

工业技术创新

Industrial Technology Innovation

CCID 赛迪出版物

2023年 第10卷 第5期 10月25日出版 总第58期 邮发代号：80-867

面向旋转工件磨损检测的三线圈差动式电涡流位移传感技术

制造企业供应链数字化能力评价体系研究

蜂窝结构吸能特性研究进展及其增材制造应用

基于物联网的可穿戴设备及生命体征监测系统

ISSN 2095-8412



9 772095 841233



10



原国家新闻出版广电总局第一批认定学术期刊

《中国学术期刊评价研究报告》（第6版）认定“RCCSE中文学术期刊”

本刊已被以下期刊数据库收录：

国家哲学社会科学学术期刊数据库

国家科技期刊开放平台

中国知识资源总库（CNKI）

国家哲学社会科学文献中心

中国科学引文索引（CSCI）

中国核心期刊（遴选）数据库

《工业技术创新》期刊 编审委员会成员

- | | |
|-----|-----------------------------------|
| 何积丰 | 同济大学 院长 / 院士 |
| 卢秉恒 | 西安交通大学机械工程学院 院长 / 院士 |
| 刘韵洁 | 中国联通科技委 主任 / 院士 |
| 倪光南 | 中国电子学会云计算专家委员会 副主任 / 院士 |
| 沈昌祥 | 北京工业大学计算机学院 院士 |
| 王华明 | 北京航空航天大学材料科学与工程学院 院士 |
| 姚建铨 | 天津大学光学院 院士 |
| 程 凯 | 中国电子科技集团公司第五十五研究所 主任 / 研究员 |
| 顾 昌 | 武汉大学动力与机械学院实验中心 主任 / 教授 |
| 官建成 | 中国科学院大学管理学院 博导 |
| 黄海明 | 北京交通大学土木建筑工程学院 博导 |
| 黄卫东 | 西北工业大学材料学院 博导 |
| 何 桢 | 天津大学管理与经济学院工业工程系 主任 / 博导 |
| 蒋林华 | 河海大学力学与材料学院 副院长 / 博导 |
| 康 锐 | 北京航空航天大学可靠性与系统工程学院 博导 |
| 陆介平 | 国家知识产权局国家专利导航试点工程（江苏）研究基地 主任 / 教授 |
| 李旭东 | 兰州理工大学材料科学与工程学院 副院长 / 博导 |
| 李 云 | 西安交通大学化学工程与技术学院 博导 |
| 李拥军 | 中国钢铁协会 首席分析师 / 博士 |
| 刘武朝 | 天津师范大学法学院 教授 |
| 孙体昌 | 北京科技大学矿物加工工程系 博导 |
| 宋 伟 | 中国科学技术大学公共事务学院 院长 / 博导 |
| 汤书昆 | 中国科学技术大学人文学院 院长 / 博导 |
| 王长峰 | 北京邮电大学国家重大科技（项目）专项研究院 博导 |
| 王家强 | 云南大学材料与能源学院 博导 |
| 王 香 | 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院 博导 |
| 邢 敏 | 中国内燃机工业协会 秘书长 / 高级工程师 |
| 徐 征 | 北京交通大学理学院太阳能研究所 博导 |
| 吴贵生 | 清华大学技术创新研究中心 主任 / 博导 |
| 张明福 | 哈尔滨工业大学复合材料研究所 教授 |

特约专题：数字仿真

面向旋转工件磨损检测的三线圈差动式电涡流位移传感技术..... 卢祎迪, 赵金库, 赵玉峰, 王鹏 (001)

爆破冲击下隧道初期支护动态响应仿真分析 王泰恒, 蒋新闻, 陈猛, 薄澎涛, 王国超 (012)

动态激光封割气态放射性同位素光源的多物理场耦合仿真研究 马俊平, 李思杰, 李雪, 平杰红, 李鑫 (019)

基于机器视觉的PCB裸板焊盘识别与提取方法

..... 张定恒, 王守印, 叶世林, 洪惠群, 郑文斌, 朱寒, 林丽 (026)

一种基于时频特征检测的雷达信号门限检测方法及其FPGA工程实现

..... 张宇祥, 黄明, 姜超, 周元翰, 郭宇航 (035)

工业工程改善

精益管理拉式系统在安全生产双重预防机制中的应用 许国磊, 孙秀娟 (042)

城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制与管理平台研究

..... 刘宇然, 李超, 张含笑, 李鉴, 刘媛, 唐金金 (050)

制造企业供应链数字化能力评价体系研究 李媛智, 郭枝权 (060)

汽车安全气囊气体发生器生产线设备综合效率(OEE)改善 张俊, 尚云平 (068)

数据中心和5G基站参与新型电力系统需求响应：发展潜能与对策建议 谭力, 于娟 (078)

新材料

蜂窝结构吸能特性研究进展及其增材制造应用 李春杰, 周琦, 常心如 (084)

染料JGB的镀铜机制及其对电解铜箔微观形貌和力学性能的影响

..... 陈杨, 杜荣斌, 朱旭, 汪宏亮, 杨林, 桑凤姣 (093)

工业科学

基于STM32单片机的双向DC/DC变换器 赵徐森, 汤昊臻, 李萌, 董勇, 郭锦东, 马知远 (099)

基于物联网的可穿戴设备及生命体征监测系统 冯玉竹, 魏剑南, 马玉鑫, 刘霞 (106)

一种数字化正交解调的信号分离装置 周元翰, 黄明, 杨杰, 姜超, 蓝浩宇, 郭宇航 (116)

◉ 期刊更名公告 ◉

经国家新闻出版署批准,《工业技术创新》从下一期起正式更名为《新型工业化理论与实践》,国内统一连续出版物号由CN 10-1231/F变更为CN 10-1933/F。

特此公告。

广告索引

版位	厂商名称	广告内容	咨询电话
122	北京赛迪出版传媒有限公司	赛迪传媒官方店	010-88558777
封三	《工业技术创新》编辑部	公益广告	010-88558900

2023年《工业技术创新》订阅方式:

- 属地邮政局: 属地邮政管理局对外业务服务网点 (邮发代号: 80-867)
- 期刊发行部: 《工业技术创新》客户服务中心 (电话: 010-88558777)

版权声明:

- 凡投稿本刊,或允许本刊登载的作品,均视为将作品的发表权、信息网络传播权、在本刊合作数据库上的转载权等一并授予本刊。
- 向本刊投稿,不得违反国家法律法规,不得泄露国家机密,不得违反学术规范。作品刊出后,仅代表作者本人观点,文责自负。
- 本刊所有文字和图片作品,未经著作权人许可,不得转载、摘编。

作者投稿给本刊即意味着同意上述约定。若有异议,请事先与本刊签订书面协议。

面向旋转工件磨损检测的 三线圈差动式电涡流位移传感技术

卢祎迪¹, 赵金库², 赵玉峰², 王鹏¹

(1. 清华大学精密仪器系, 北京 100084;
2. 黑龙江北方工具有限公司, 黑龙江牡丹江 157000)

摘要: 工业场景中广泛存在对旋转工件磨损情况进行在线检测的需求, 电涡流是其中一种重要的非接触式磨损检测方法。为克服传统单线圈结构电涡流位移传感器在量程一直径比和复杂工况下抗电磁环境干扰能力上的局限性, 提出面向旋转工件磨损检测的三线圈差动式电涡流位移传感技术。通过优化三线圈同轴等距排列的电涡流位移传感器结构, 设计基于数字电路的传感系统信号控制和信号处理模块, 扩大了电涡流位移传感器的量程比, 提高了传感信号的信噪比。在1:1还原的实验装置上进行测试, 表明该技术可以实现24 mm的量程和0.01 mm的分辨率, 可以满足对盾构机滚刀进行在线磨损检测的需求。

关键词: 旋转工件; 磨损检测; 电涡流位移传感器; 量程; 抗干扰

中图分类号: TP216 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-001-11

工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.001

0 引言

工业作为第二产业, 是各个国家综合国力发展和人民生活水平提高的重要基础。对于传统的机械行业, 与信息技术相结合是提升设备质量、生产效率、市场竞争力的必要途径^[1]。在工业生产设备中广泛存在旋转工件, 在生产过程中, 这些工件会发生不同程度的磨损, 对这些磨损进行监控, 可以帮助生产人员掌握其工作状态, 及时对磨损较重的旋转工件进行更换, 避免生产事故的发生。

自20世纪电涡流现象被发现、电涡流传感器问世以来, 电涡流传感器的设计制造技术迅速发展, 逐渐形成了较为稳定的结构^[2-3]。从原理上, 电涡流位移传感器利用电磁场作为媒介对目标金属进行非接触式的测量, 具有频率响应范围宽、分辨率高、灵敏度高、结构简单、成本低, 以及

不易受油污、灰尘、水分等中间介质影响等多种优点^[4-5]。这些优点使其被广泛应用于各种场景下的测量任务, 例如振动测量、位移测量、金属厚度测量、转轴转速测量等, 在现代社会中发挥着重要的作用^[6-9]。

但是, 传统的单线圈结构电涡流位移传感器也具有量程一直径比较低、容易受到电磁环境干扰的缺点。更具体而言, 传统单线圈结构电涡流位移传感器的有效量程一般在直径的二分之一左右, 这使其不适用于某些对传感器直径和量程具有特殊需求的场景。以盾构工程中盾构机滚刀磨损检测任务为例, 盾构滚刀是一种旋转工件, 刀刃宽度有限, 用于测量的传感器直径需要与刀刃宽度相近或比刀刃宽度更小, 以保证传感器测量的主要对象是发生磨损的刀刃部分; 同时, 盾构滚刀在掘进过程中会发生较为严重的磨损, 对传感器的量程有较高要求。这些由具体任务决定的

特殊要求，使得传统的单线圈结构电涡流位移传感器并不适用于诸如盾构滚刀磨损在线监测的应用场景^[10]。

针对上述问题，本文基于三线圈差动式电涡流位移传感原理，对传感器探头结构和整体结构进行设计和优化，基于数字信号处理技术和嵌入式系统设计技术，设计传感器的信号发生、控制和处理模块，完成传感器激励源信号的生成，以及敏感元件信号的采集、计算和分析，并实现将最终结果输出给计算机的功能。最终设计完成的传感器具有更高的量程一直径比，且在复杂环境下具有更强大的抗电磁环境干扰能力。此外，本文设计一套模拟盾构机工作过程中盾构滚刀磨损的实验装置，并将设计制作的三线圈差动式电涡流位移传感器在实验装置中进行测试，验证传感器在工件磨损在线监测任务应用中的有效性。

1 三线圈差动式电涡流位移传感原理

在传统的单线圈结构电涡流位移传感器中，单个线圈既是产生涡流的激励源，也是传感器的敏感元件。工作时，传感器在线圈中通入高频交流电流，以激励线圈周围产生同频的高频交变电磁场，进而在附近的导体中感应出闭合的感应电流，即电涡流。根据楞次定律，电涡流产生的磁场会抵消激励磁场，减少敏感线圈中的磁通量，进而减小敏感线圈的等效电感。同时，电涡流在金属中的发热会使得来自敏感线圈的能量发生损耗，进而增大敏感线圈的等效电阻^[11-12]。

电涡流对敏感线圈电感和电阻影响的强度与二者之间的距离相关：一般地，敏感线圈两端的等效阻抗受到线圈到金属导体表面的距离 x 、导体的电导率 σ 、导体的磁导率 μ 、导体的厚度 h 以及激励信号频率 ω 的影响，可以写成以上述参数为变量的多元函数，即

$$Z_{coil} = Z(\rho, \mu, x, h, \omega) \quad (1)$$

将电涡流影响敏感线圈等效阻抗的效应用于位移测量，需要控制上述变量中除位移 x 以外的参数不变，此时，线圈等效阻抗为关于位移 x 的单值函数，可以通过测量敏感线圈等效阻抗得到对应的位移 x 。

三线圈差动式电涡流位移传感技术的原理与

传统单线圈结构电涡流位移传感技术类似，其结构图如图1所示^[13]。其中，位于中间的线圈P是一次线圈，传感器通过向其施加激励信号产生交变电磁场，进而在被测金属中感应出电涡流；位于上下两侧的线圈是二次线圈，用于接收来自于一次线圈和电涡流的感应电压，并反馈给传感器进行计算。

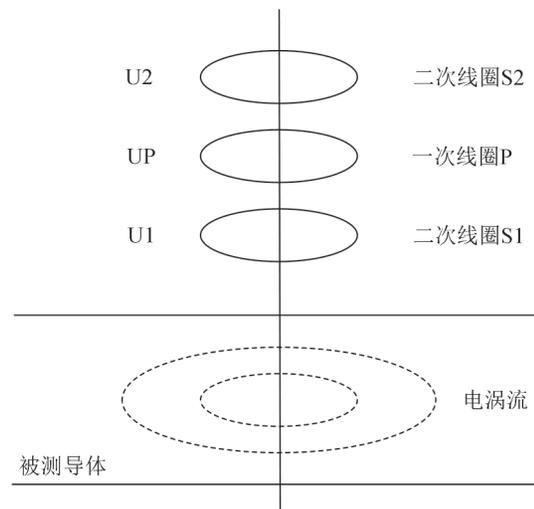


图1 三线圈差动式电涡流位移传感器原理图

在上述结构中，两个二次线圈关于一次线圈对称分布。这种对称性使得一次线圈直接在两个二次线圈中产生的感应电压相同。因此，对两个二次线圈产生的感应电压进行差动运算，可以消除感应电压中直接由一次线圈产生的部分。另一方面，对于金属中涡流在二次线圈中产生的感应电压，由于两个二次线圈与电涡流的距离不同，二者在幅值和相位上都有差异，而这一差异可以反映在差动运算的结果上。更具体而言，使用变压器模型对三个线圈和电涡流之间的电磁感应进行描述，可以得到如下模型^[13]。

记驱动一次线圈产生交变磁场的信号幅值为 U_p ，前后两个二次线圈中产生的感应电压分别为 U_1 和 U_2 ，电涡流的电流为 I_e ，则有

$$\begin{cases} Z_p I_p - j\omega M_{pe} I_e = U_p \\ -j\omega M_{1p} I_p - j\omega M_{1e} I_e = U_1 \\ -j\omega M_{2p} I_p - j\omega M_{2e} I_e = U_2 \\ Z_e I_e - j\omega M_{pe} I_e = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： M_{ij} 表示 i 、 j 两个单位之间的互感； Z_i 表示单位 i 在工作频率 ω 下的阻抗。由于三线圈差动式

电涡流位移传感器线圈之间具有对称结构, 故有 $M_{1p}=M_{2p}$; 由于金属中的电涡流到两个二次线圈之间的距离不同, 故有 $M_{1e}>M_{2e}$ 。

联立上述公式可以得到差动电压的表达式

$$U_1 - U_2 = -j\omega I_c (M_{1e} - M_{2e}) = \frac{\omega^2 M_{pe}}{Z_e Z_p} (M_{1e} - M_{2e}) U_p \quad (3)$$

随着金属与传感器探头之间距离增加, M_{1e} 和 M_{2e} 均随之减小, 通过实验和仿真计算可以得到二者之差随位移增加逐渐减小, 因此差动电压随敏感线圈与被测导体之间的距离增加也会逐渐单调减小, 这一关系可以用于位移测量。

2 三线圈差动式电涡流位移传感器设计

本章的主要内容是基于第1章介绍的三线圈差

动式电涡流位移测量原理, 设计并制作三线圈差动式电涡流位移传感器。

从结构和组成上, 三线圈差动式电涡流位移传感器可以分为探头、模拟电路和数字电路三个部分。其中, 探头部分是传感器的敏感元件, 其核心部位为三个同轴等间距排列的线圈; 模拟电路部分负责驱动一次线圈产生激励信号和接收二次线圈的感应电压并进行差动运算; 数字电路部分实现生成正弦信号、读取感应电压并计算差动信号幅值、测量结果线性化和通过串口输出的功能。传感器整体组成和结构如图2所示。

2.1 传感器探头设计和制作

探头是三线圈差动式电涡流位移传感器的敏感元件, 其精度和可靠性直接影响传感器的最终性能。探头部分总体设计如图3所示。

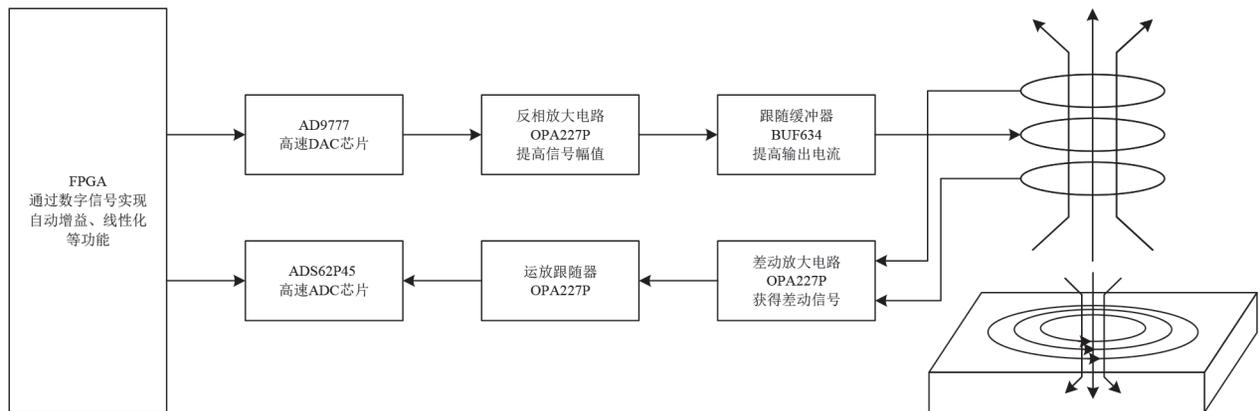


图2 三线圈电涡流位移传感器组成和结构示意图

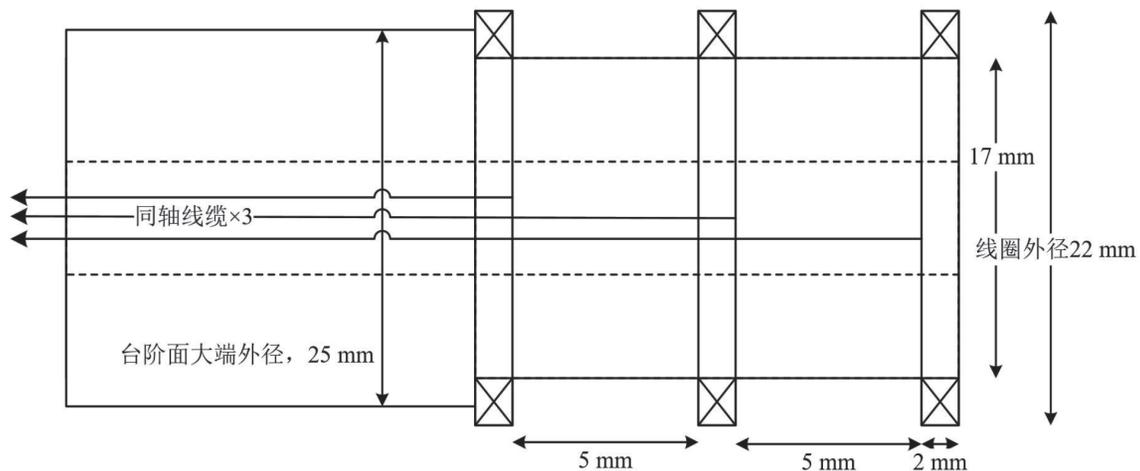


图3 传感器探头部分设计图

在图3右侧并排的三个线圈中，位于中间的线圈为一次线圈，用于产生作为激励的交变磁场；位于两侧的是二次线圈，用于接收来自电涡流的感应电压。两个二次线圈在空间上的对称性和在电学参数上的一致性决定了探头性能。为保证探头具有更好的一致性和对称性，本节进行了组成探头的线圈挑选和装配时的线圈相对位置调整。

组成探头的线圈为由直径为0.2 mm的铜质漆包线绕成的多层螺线管。线圈因具有导线电阻、线圈结构的电感和漆包线间的寄生电容，整体是一个复杂的RLC网络，具有自谐振特性。这种特性可以用谐振频率 f_r 、谐振点阻抗 Z_r 和100 kHz频率点阻抗 Z_{100k} 三个相关参数进行描述。

使用如图4所示的阻抗分析仪对线圈的阻抗—频率特性曲线进行测量，测量结果如图5所示。

由图5可以得到线圈的谐振频率 $f_r=2.390$ MHz、谐振点阻抗 $|Z_r|=7.71$ k Ω ，100 kHz频率点阻抗 $|Z_{100k}|=222$ Ω 。设计阶段中共对10个线圈进行了如上测试，各自的 f_r 、 Z_r 和 Z_{100k} 如表1所示。

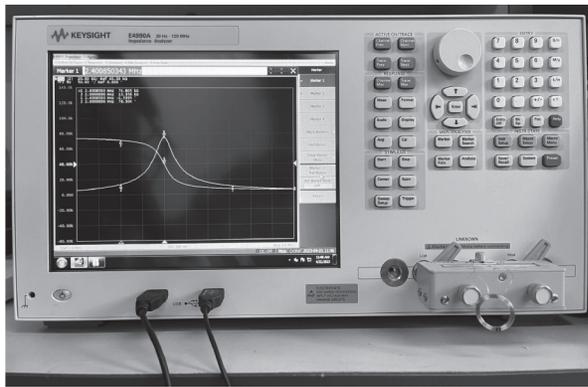


图4 用于分析线圈的阻抗分析仪

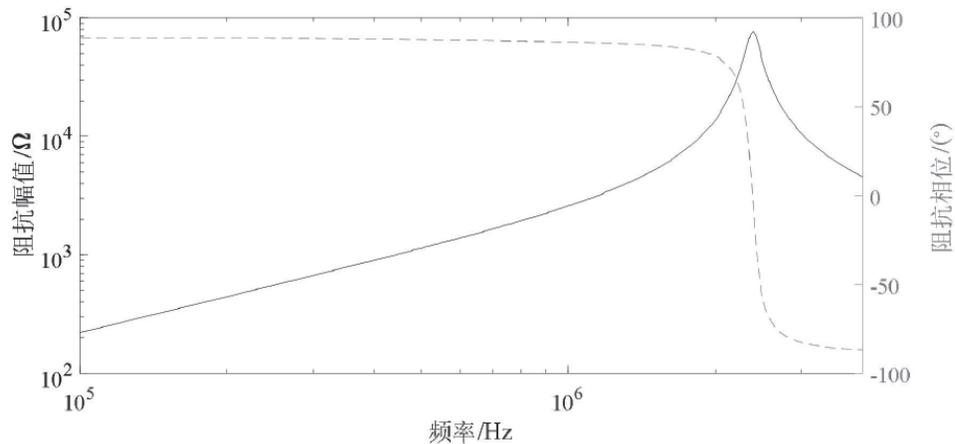


图5 线圈阻抗—频率曲线

表1 传感器线圈电学参数

线圈编号	谐振频率 f_r /MHz	谐振点阻抗 $ Z_r $ /k Ω	100 kHz阻抗 $ Z_{100k} $ / Ω
1	2.405	7.83	222
2	2.390	7.71	222
3	2.410	7.87	221
4	2.550	8.53	222
5	2.420	7.65	221
6	2.440	7.76	221
7	2.410	7.71	221
8	2.470	7.90	220
9	2.400	7.90	221
10	2.420	7.80	222

以上述三个电学参数的相似性为标准评价两个线圈的相似性，最终选取了电学参数较为相似的线圈2和线圈9作为二次线圈用于制作探头。

为了将线圈固定、保证三线圈之间对称的空间关系，本节还使用3D打印技术制作了一个线圈支架，用于固定三个线圈的相对位置，并且将连接线圈的同轴电缆引出。在3D设计软件Solidworks中设计了如图6所示的线圈支架。其中，支架前段为 $\Phi 17$ 圆柱，其直径和线圈内径相等，可以将线圈套上，用于固定线圈的同轴关系。中间为 $\Phi 17$ 到 $\Phi 25$ 的台阶面，用于定位靠后的二次线圈。线圈两端的导线从圆柱侧面上开的 $\Phi 1$ 孔连接到中心通孔，在通孔中连接同轴电缆，再从探头后方引出。

将三个线圈套在支架上后，位于前方的二次线圈通过圆柱的端面完成定位，位于后方的二次线圈通过台阶面完成定位，位于中间的一次线圈通过实际测试调整位置。调整的具体原则是，当探头周围没有其他金属时，两个二次线圈中感应电压的差动信号应具有尽可能小的幅值。

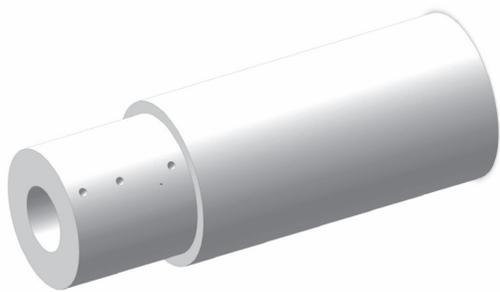


图6 线圈支架的Solidworks设计图

2.2 传感器模拟电路部分设计

模拟电路从功能和结构上可以分为发射电路和接收电路两个部分。其中, 发射电路用于将数字电路产生的正弦激励信号放大并输出给一次线圈作为激励; 接收电路用于接收电涡流在两个二次线圈中产生的感应电压, 完成差动运算并将差动信号输出给数字电路。模拟电路整体原理图如图7所示。

接收电路中差动放大电路的主要功能是对两个二次线圈的感应电压进行差动运算, 运放芯片使用了OPA227高精度单运放芯片。该芯片提供了两个用于调整失调电压的Trim引脚, 可以使用电位器连接两个Trim引脚用于调整失调电压。除此以外, 接地的平衡电阻使用了可调电阻器, 可以通过调整阻值提高运放差动放大电路的对称性。

接收电路的另一部分是运放跟随器, 目的是将差动信号耦合输出给ADC芯片。通过查询电路设计图可以得到ADC芯片电路的输入电阻为 $50\ \Omega$, 相对较小, 为了将差动信号完整传递给ADC芯片, 使用一个运放跟随器进行耦合。

2.3 传感器数字电路部分设计

传感器数字信号处理部分使用FPGA开发板实现, 在传感器系统中承担的功能主要有以下四点: 产生幅值可调的正弦激励信号、接收差动信号并计算其幅值、根据差动信号幅值计算位移并自动增益、将测量结果通过串口输出给PC。

FPGA开发板使用了Xilinx公司的XC7K325T-FFG900芯片, 其周围配置了包括高速ADDA接口、RS232串口、JTAG调试接口在内的多个模块和接口。实验中的硬件设计代码主要在

Xilinx公司的Vivado平台上进行编写和调试, 使用的硬件设计语言为Verilog。本文中用到的模块及电路结构图如图8所示。

从功能上, 数字信号处理部分主要可以分为正弦信号生成模块、差动信号幅值计算模块、线性化模块和串口通信模块四个部分。

正弦信号生成模块使用经典的直接数字频率合成(Direct Digital Synthesis, DDS)方法实现, 使用了Vivado IP catalog中自带的dfs, sin_lut, fixed三个ip核。其中, dfs核用于生成给定频率的线性变化的相位信号, 将相位信号传递给sin_lut模块, sin_lut模块通过查找表的方式将线性变化的相位信号转换为正弦信号。最后, 将sin_lut模块生成的标准正弦信号和幅值参数使用定点数乘法器模块fixed相乘, 得到可以调节幅值和频率参数的正弦信号输出。

对于差动信号幅值计算模块, 通过FPGA开发板上的ADC芯片读取两个二次线圈的感应电压。用于描述信号幅值的参数一般有信号峰峰值、周期RMS以及FFT。由于本文设计的三线圈差动式电涡流位移传感器接收到的信号是较为标准的正弦信号, 其中的高频噪声或毛刺较少, 因此使用运算较简单的信号峰峰值作为差动信号幅值的描述量。为获得更为平滑的信号, 设计并使用FIR数字滤波器, 对ADC采集得到的信号和差动信号幅值计算模块输出的信号进行滤波处理。

线性化模块使用反比例函数拟合的方式, 通过一个除法器实现。在使用过程中首先通过标定环节确定反比例函数拟合的具体参数, 再在该参数下进行测量工作。在FPGA中完成差动信号幅值的计算和线性化后, 还需要向外界输出测量结果。本节使用FPGA开发板上的RS232串行通信接口将测量结果输出给PC, PC上的串口通信程序可以将格式化的输出以图表的形式向用户展示。FPGA的ADC芯片可以实现14位的量化, 以无符号整数的形式进行输出, 对应范围是0~16 383。其中, 线性化之后的数据使用二进制定点数的方式进行解读, 将16位无符号整数映射为两位定点小数, 因此传感器输出结果的最小变化量为 $0.01\ \text{mm}$ 。接收数据使用串口调试程序对RS232串口发来的信息进行接收和可视化。最终输出效果如图9所示。

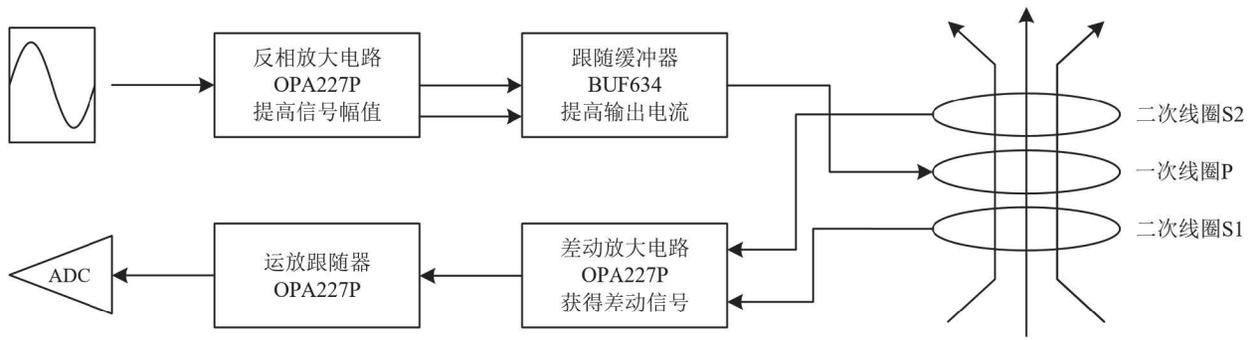


图7 模拟电路部分原理图

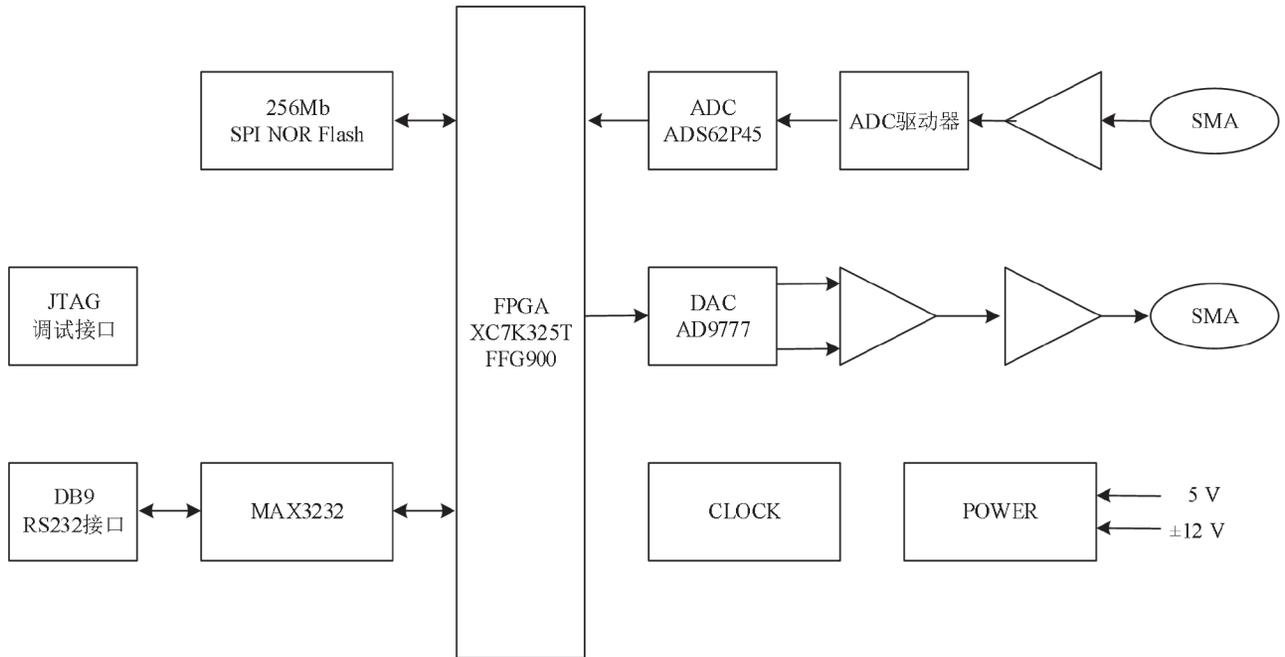


图8 数字电路部分使用的模块及电路结构

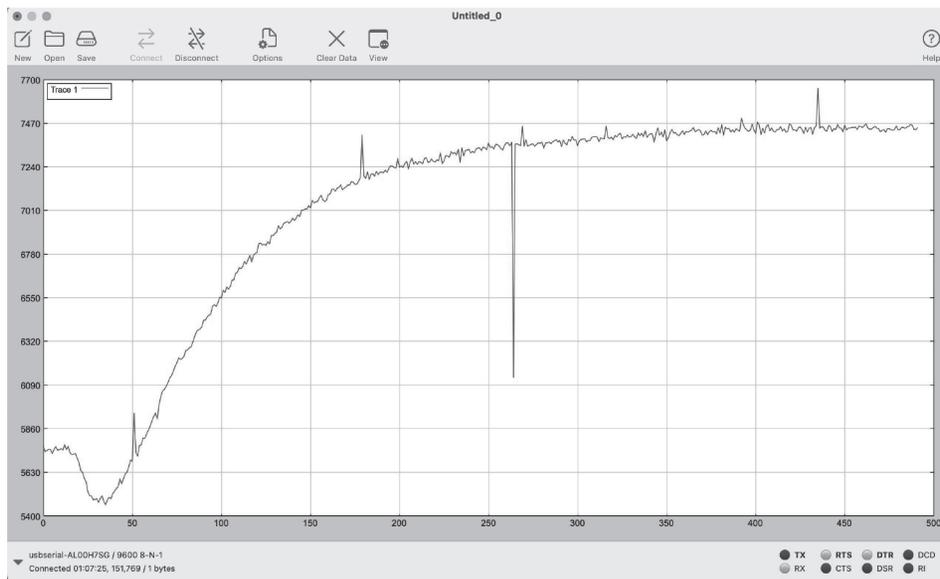


图9 串口通信程序输出效果图

3 实验装置测试

本章使用实验室中带金属板的位移台对传感器量程内的传感器输出一位移曲线进行测试，并对测试结果进行分析。此外，为了验证传感器在实际测量任务中的有效性，本章根据盾构滚刀工作状态和不同磨损情况，1:1还原设计制作了一套实验装置，并且将第2章设计制作的传感器固定在实验装置上进行测试。

3.1 传感器在位移台上的测试

为了测试第2章设计制作的传感器输出随位移

的变化，使用固定有金属板的位移台对传感器进行测试。测试从金属板贴紧传感器探头即位移0 mm开始，每间隔0.5 mm进行一次测试。受限于位移台的活动范围，共收集到了从0 mm到24 mm，共49个测量点的数据。测量结果如图10所示。

使用反比例函数对5~24 mm区间的数据进行拟合，得到结果如图11所示。

使用拟合得到的函数进行线性化，得到结果如图12所示。由图12可以得到，在线性区间内，传感器的量程为5~24 mm；在线性化阶段，数据使用两位小数的定点数储存，对应传感器输出的分辨率为0.01 mm。在线性区间内，传感器输出的最大误差为0.8 mm，计算可以得到线性度为4.2%。

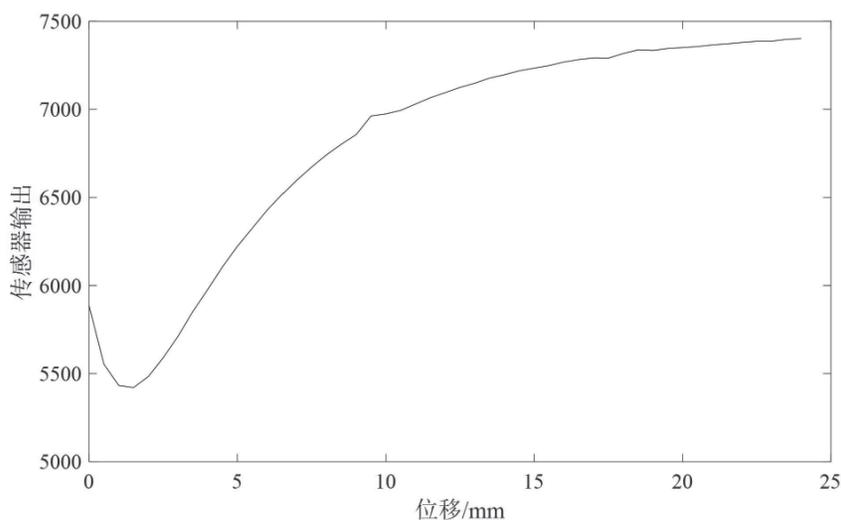


图10 传感器原始输出一位移曲线

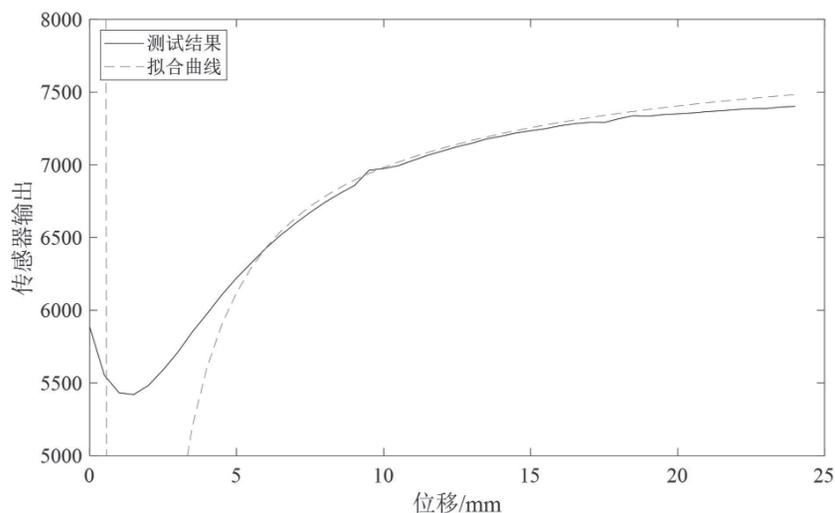


图11 使用反比例函数拟合传感器原始输出

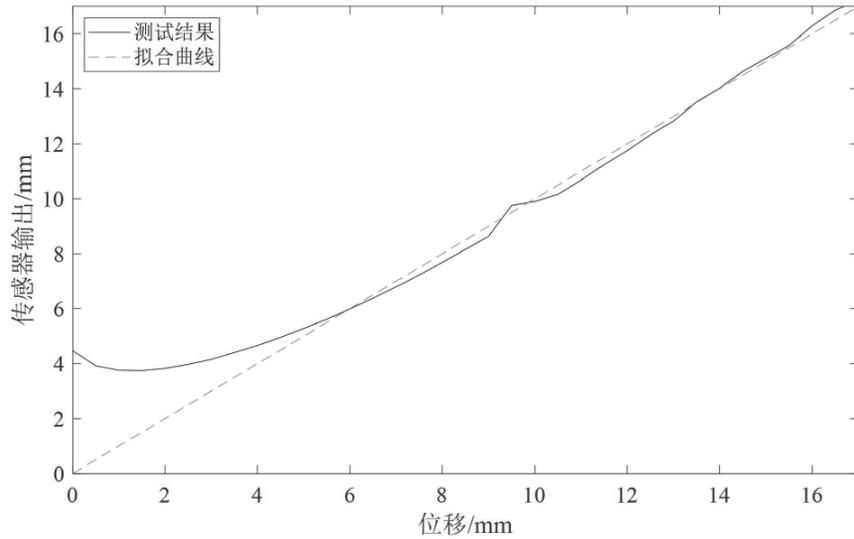


图12 线性化后的传感器输出

3.2 传感器在实验系统上的测试

本节根据盾构滚刀的工作状态和不同磨损情况设计制作了一套实验系统，用于验证三线圈差动式电涡流位移传感技术的有效性。为使实验系统尽量接近真实情况，委托盾构机再生产厂家对实验装置进行加工。

在盾构机于硬质岩层中掘进的过程中，盾构滚刀在刀盘的驱动下发生旋转，并通过滚刀刀刃与岩石之间的挤压和剪切实现破碎岩石的效果，盾构滚刀具体结构如图13所示^[14-15]。

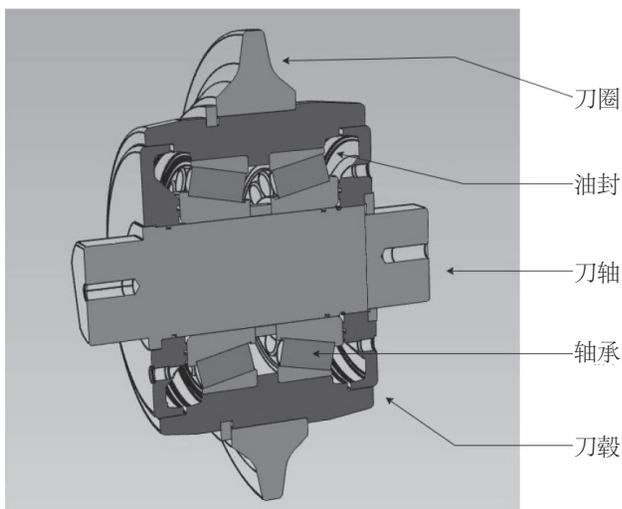


图13 盾构滚刀具体结构

在这一过程中，盾构滚刀刀刃极易发生磨损，具体表现为从刀刃表面到轴心的半径减小。在实验

系统中，以标准17英寸滚刀刀圈的材料和形状作为基准，制作了刀圈圆周不同位置上具有不同磨损量的滚刀模型，如图14所示。考虑到实际工程需求，滚刀刀圈磨损量的极限值约为15 mm，因此为滚刀设计了0~16 mm的不同磨损量。

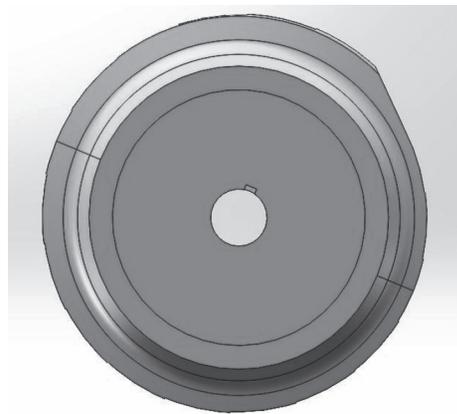


图14 在圆周具有不同磨损量的滚刀模型

三线圈差动式电涡流位移传感器在实验系统中进行测试的过程主要包括以下几个步骤：

调试实验系统，包括固定传感器和刀圈的相对位置、连接好直流电源和模拟电路、检查FPGA和PC等实验相关设备的状态，测试传感器信号是否能正常输出。

启动滚刀驱动模块，通过变速箱上的调速旋钮将滚刀转速调整至与盾构滚刀实际工作过程中接近的速度。

通过电脑上的串口通信程序接收多个滚刀旋

转周期内传感器测量结果随时间变化的情况, 并进行可视化的展示和记录。

实验装置实物图如图15所示。

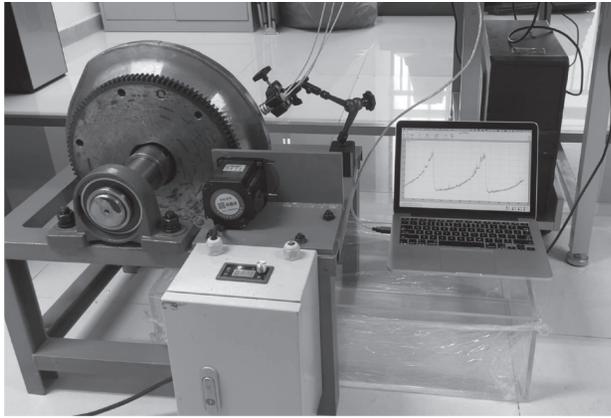


图15 实验装置实物图

由于对盾构滚刀的磨损量进行了预处理, 因此在滚刀旋转一周的过程中传感器探头会依次扫过刀圈上设计的18个扇形区。在实验过程中, 电机驱动滚刀顺时针旋转, 使得传感器按照磨损量从大到小的顺序依次扫过17个具有不同均匀磨损量的扇形, 可以认为传感器测量的真值是依次下降的17个台阶面。

传感器测量结果随盾构滚刀旋转一周的变化情况, 即传感器输出一时间曲线如图16所示。可以观察到, 当传感器正对台阶面中间部位时, 输出相对比较稳定。当传感器扫过台阶面边缘时, 由于探头具有宽度, 因此输出的测量值表现出来的不是阶跃

式的突变, 而是有一个缓慢变化的过程。

为了对传感器在各个磨损量下的表现进行测试, 将传感器通过不同台阶面时测量值的平均值作为该点磨损量下的测量值。由此可以得到传感器输出随磨损量真值变化曲线, 如图17所示。

为了对在每个测试点上传感器输出的重复性精度进行描述, 选取了在10个测量周期中, 传感器正对台阶面中心部分时对应的数据, 并通过箱线图的方式进行可视化, 结果如图18所示。可以观察到箱线图中箱子的高度随磨损量增大而增大, 最大高度约为2 mm。这是因为在线性化过程中使用的反比例函数对于磨损量较大的区域放大效果更强, 噪声影响也更明显, 这一现象和输出一时间图像的特征也是吻合的。

从本文制作的三线圈差动式电涡流位移传感器在实验系统上的测试结果中可以发现, 传感器在滚刀从全新到磨损到极限量的过程中, 在16 mm的实际工作量程中可以对具体磨损情况进行较为准确的测量。

4 结束语

本文针对传统单线圈结构电涡流位移传感器量程一直径比受限和复杂工况下抗电磁环境干扰能力较弱的情况, 设计制作了三线圈差动式电涡流位移传感器结构, 优化了传感器探头和电路结构, 并采用数字信号处理技术设计制作了一套传感系统信号控制和信号处理系统, 实现了传感器

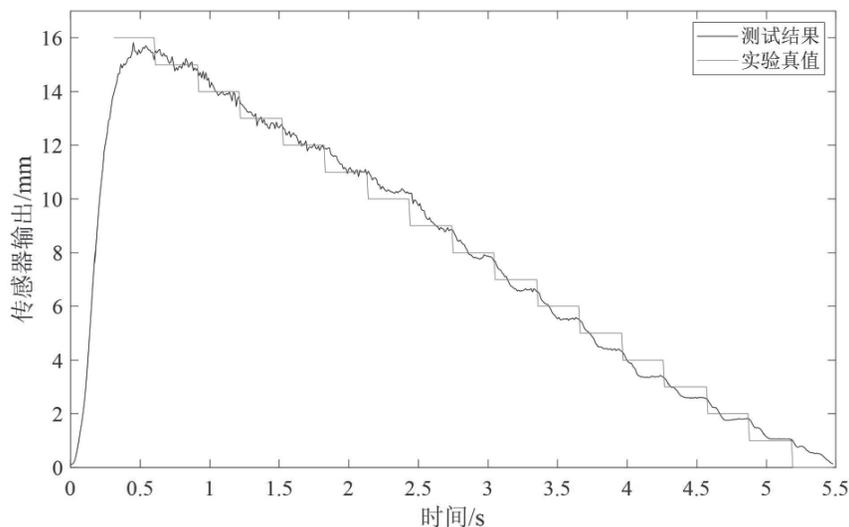


图16 传感器输出一时间曲线

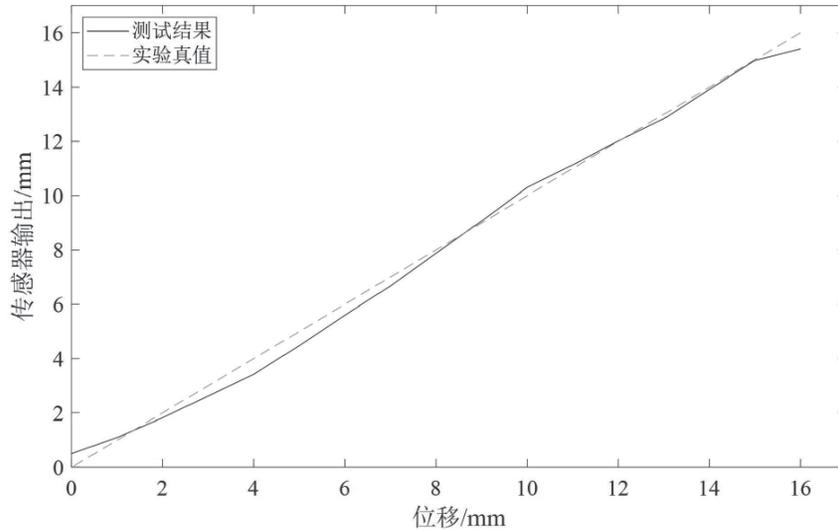


图17 传感器输出随磨损量真值变化曲线

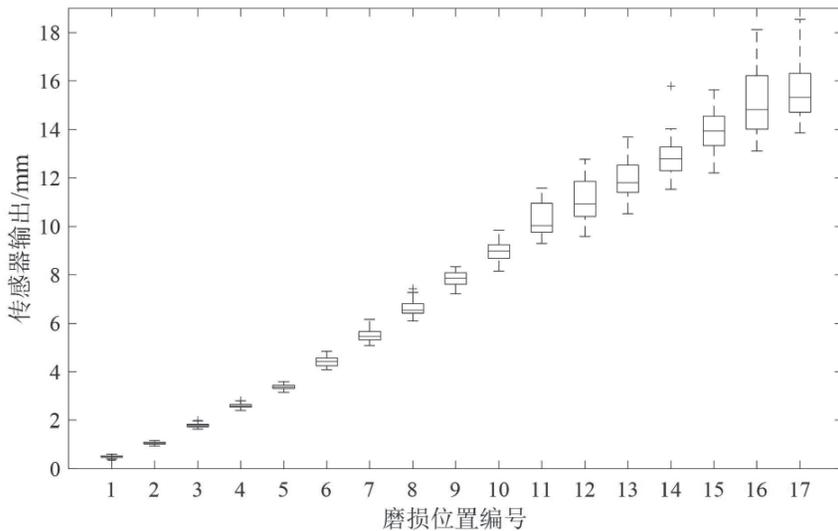


图18 传感器输出—磨损量箱线图

激励源的输出，以及敏感元件信号的采集、计算和分析，最终通过串口向计算机输出测量结果。

在此基础上，本文使用带有金属板的位移台对三线圈差动式电涡流位移传感器的性能进行了测试，并且针对盾构磨损滚刀监测的应用场景搭建了一套用于模拟实际情况的实验装置，将制作的传感器在实验装置上进行了测试。实验结果证明，文中设计的三线圈差动式电涡流位移传感器可以在实验装置模拟的测试环境中正常工作，传感器具有24 mm的量程、0.01 mm的分辨率，量程内传感器线性度为4.2%，针对盾构滚刀模型上模拟的不同磨损量可以得到具有明显区分度的结果，可以满足盾构滚刀磨损在线监测需求。

参考文献

- [1] 黄前柏, 涂成. 让数据驱动产业升级[J]. 新理财(政府理财), 2017(Z1): 74.
- [2] 杨露露. 电涡流位移传感技术的研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2020.
- [3] GAO K. Study on Eddy-current Nondestructive Testing Method of the Double-layers Conductive Coating Thickness[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14): 114.
- [4] 郑敏. 大量程电涡流位移传感器设计与实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [5] 王志春, 张楼成, 袁小健. 多频电涡流法测量连铸坯壳厚度的方法[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(7): 596-602.

- [6] 舒化. 基于多频涡流的金属箔厚度检测方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [7] 李伟. 高精度高稳定性电涡流传感器的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [8] 王三成, 王三胜, 李园园, 等. 脉冲涡流无损检测技术及其在飞机多层金属结构腐蚀检测的研究和进展[J]. 工业技术创新, 2016, 3(4): 609-612.
- [9] 陈剑, 伍明文, 章志平, 等. 基于超声波与涡流设备探测地铁道岔尖轨伤损的研究[J]. 工业技术创新, 2021, 8(2): 49-53.
- [10] WANG F, MEN C, KONG X, et al. Optimum Design and Application Research of Eddy Current Sensor for Measurement of TBM Disc Cutter Wear[J]. Sensors, 2019, 19(19): 4230.
- [11] 黄小秋, 丁天怀, 付志斌. 简化目标函数的电涡流传感器线圈参数优化设计法[J]. 仪表技术与传感器, 2000(11): 3-5.
- [12] 王海森. 双频电涡流位移传感技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2021.
- [13] 李剑, 丁天怀, 徐玉铮, 等. 差动结构电涡流式液位传感器性能改进与应用[J]. 仪表技术与传感器, 2003(2): 12-14.
- [14] 朱英伟, 郑立波, 张洪涛. 新型盾构机刀具磨损检测技术研究[J]. 施工技术, 2014, 43(1): 121-123.
- [15] 吴俊. 盾构刀具与岩土体力学相互作用及磨损研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.

作者简介:

卢祎迪 (2000—), 男, 博士研究生。主要研究方向: 智能传感器。

赵金库 (1969—), 男, 硕士, 正高级工程师。主要研究方向: 特种产品装配与检测。

赵玉峰 (1987—), 男, 学士, 工程师。主要研究方向: 特种产品装配与检测。

王鹏 (1977—), 通信作者, 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 智能传感器。

E-mail: peng@mail.tsinghua.edu.cn

(收稿日期: 2023-09-14)

Three-Coil Differential Eddy-Current Displacement Sensing Technology for Rotating Workpiece Wear Detection

LU Yidi¹, ZHAO Jinku², ZHAO Yufeng², WANG Peng¹

(1. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Heilongjiang North Tool Co., Ltd., Mudanjiang 157000, China)

Abstract: There is a widespread demand for the online wear detection of rotating workpiece in the industrial scenes, in which eddy-current is one of the important non-contact wear detection methods. In order to overcome the limitations of range-diameter ratio in traditional eddy-current displacement sensor with single-coil structure and anti-electromagnetic interference ability under complex working conditions, a three-coil differential eddy-current displacement sensing technology was proposed for the rotating workpiece wear detection. By optimizing the structure of the eddy-current displacement sensor with three coils arranged coaxially and equidistantly, the signal control and processing module of the sensing system based on the digital circuit was designed, which expanded the range ratio of the eddy-current displacement sensor and improved the signal-to-noise ratio of the sensing signal. The test on the 1:1 recovery experimental device shows that the technology can achieve a measuring range of 24 mm and a resolution of 0.01 mm, which can meet the demands of online wear detection of the hob of a shield machine.

Keywords: Rotating Workpiece; Wear Detection; Eddy-Current Displacement Sensor; Range; Anti-Interference

爆破冲击下隧道初期支护动态响应仿真分析

王泰恒¹, 蒋新闻², 陈猛¹, 薄澎涛¹, 王国超¹

(1. 西南林业大学, 云南昆明 650051;

2. 云南交投公路建设第六工程有限公司, 云南昆明 650043)

摘要: 考察隧道围岩等级、爆破载荷、支护厚度等因素对爆破冲击下隧道初期支护动态响应的影 响, 为隧道初期支护施工设计提供理论依据。以瑞丽至孟连高速公路勐省隧道工程为项目背景, 以隧道衬砌振动速度和位移响应为主要评判标准, 选取关键监测点, 采用数值模拟方法分析各因素对隧道初期支护的变化规律。研究发现: 在相同爆破载荷(装药量)下, 随着隧道围岩等级的提高, 隧道支护动态响应变得更加剧烈; 在爆破施工中, 装药量与隧道初期支护动态响应呈线性正相关, 支护厚度与隧道初期支护动态响应呈负相关。据此, 提出了保障隧道施工安全的建议, 为隧道初期支护相关工程设计提供了理论范式。

关键词: 隧道初期支护; 隧道围岩等级; 支护厚度; 装药量; 动态响应; 数值模拟

中图分类号: TH202; TP115 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-012-07

工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.002

0 引言

隧道初期支护动态响应及其稳定性对保证隧道施工安全性具有重要意义。在爆破冲击下, 炸药与隧道壁之间的空气间隙受到高温高压, 发生强烈压缩, 因空气密度小而产生爆破载荷^[1]。从工程角度来看, 影响隧道初期支护动态响应稳定性的因素主要包括隧道初期支护参数本身、隧道围岩等级、爆破所产生的爆破载荷大小、混凝土型号等。

目前, 针对隧道初期支护动态响应的研究已经在各工程领域中取得一定进展。任永强等^[2]采用Ls-Dyna软件, 对有限差分边坡模拟模型进行了分析, 分析了爆破载荷下边坡应力、振动速度、位移等参数的响应特点。桑运龙等^[3]采用离散有限元方法, 对不同隧道围岩等级下的松动圈进行

了分析, 发现了松动圈面积比值与隧道围岩等级成正比的规律。周文锋等^[4]将现场实验数据采集与数值模拟相结合, 验证了萨道夫斯基经验公式在爆破振动衰减规律预测中的可行性, 同时使用Ls-Dyna软件对不同爆破参数下的振动响应进行了分析, 得到了规律性认识。郑爽英等^[5]采用Ls-Dyna软件模拟了输气管道和周围土体相互作用的规律, 考察了埋深、管壁厚度、管道直径等因素对管道振动的影响规律, 归纳了不同爆破参数对土体及管道的影响。Zhang等^[6]利用Ls-Dyna软件进行了三维有限元仿真, 通过现场监测数据验证了仿真结果的可靠性, 并确定了人防隧道应力、振动速度达到最大值的位置, 建立了粒子峰值速度与有效应力的关系模型, 进而根据最大抗拉强度准则, 利用关系模型, 制定了人防隧道爆破振动安全准则。朱大鹏等^[7]采用数值模拟方法研究了岩堆隧道在不同装药量和爆距的爆破载荷下速度和加速度的响应规律, 对岩堆隧道安全施工具有重要意义。郭东明等^[8]对不同间距邻近爆

基金项目:

云南省先进装备智能制造技术重点实验室开放基金课题(项目编号: KLYAEIMTY2022002)

破载荷下的隧道破坏规律及动态响应规律进行了研究, 得到了动态响应衰减规律以及爆破安全距离阈值, 为邻近爆破施工提供了理论支持。

综上所述, 相关文献对爆破载荷对邻近隧道、既有隧道等的影响开展了研究, 取得了一定的进展, 但大多数研究是针对距掌子面一定距离的隧道初期支护结构进行的研究, 缺少对紧邻掌子面部分的隧道初期支护的研究。紧邻掌子面的隧道初期支护动态响应作为振动最强的部分, 对隧道初期支护安全和稳定性具有重要影响。而且, 众多研究成果以定性分析为主, 缺乏定量计算, 存在重经验、轻理论的倾向。

勐省隧道是瑞丽至孟连高速公路上的一座隧道, 左幅起讫桩号ZK392+340~ZL395+905, 长3 565 m, 右幅起讫桩号ZK392+337~ZK395+955, 长3 618 m。该项目位于云南、贵州西南边缘, 横断山脉南部, 褶皱大多被断层所破坏, 施工采用全断面爆破方法。鉴于NASTRAN是由NASA为应对大型结构问题而研发的有限元软件, 是权威的结构计算软件, 相较而言具有更多理论分析优势, 故本文采用NASTRAN软件对勐省隧道模型进行数值模拟, 考察不同隧道围岩等级、爆破载荷、支护厚度对隧道初期支护动态响应的影响, 为隧道初期支护设计提供理论范式。

1 数值模拟

1.1 模型建立

利用NASTRAN软件建立隧道模型。隧道断面为三心圆, 上半部隧道半径为6.4 m, 下半部隧道半径为9.3 m, 拱底半径为18.68 m。模型的整体尺寸为80 m×60 m×30 m。由于该模型结构具有明显的对称特征, 因此只取一半模型进行分析, 以提升计算效率^[9]。有限元计算模型如图1所示。

1.2 载荷施加及边界条件设置

围岩和隧道衬砌采用弹塑性模型, 边界条件设置为在模型侧面施加纵向固定约束, 同时在隧道剖面施加对称约束, 其余面设置为自由面^[10]。

目前, 针对隧道爆破载荷施加问题, 一般有三种方法^[11]。第一种为建立炸药结构模型和被爆

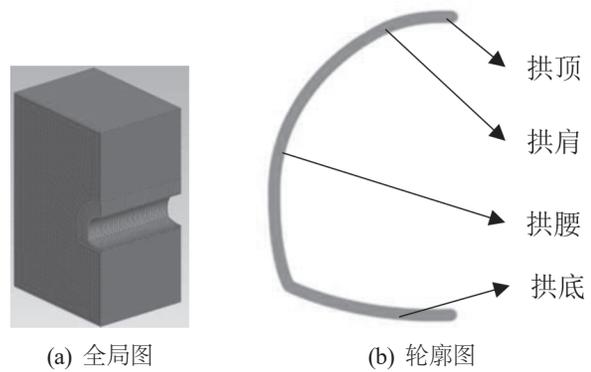


图1 有限元计算模型

破结构模型, 在被爆破结构和炸药结构之间建立共节点, 利用软件自带的炸药材料进行模拟, 这种方法精确度最高, 但是网格划分复杂、计算量大, 容易造成计算无法正常进行。第二种为建立炮孔壁, 在炮孔壁上施加等效压力, 相比第一种方法计算量大为降低, 但计算量仍然较大, 对设备要求较高。第三种为利用经验公式计算出作用于隧道轮廓面的等效压力, 不需要对炮孔以及炸药进行建模, 加载方式有了很大的简化, 计算量也大有降低。经过检验, 第三种方法在对计算精度要求不高的情况下, 具有最好的成本效益。

目前最常用的爆破载荷施加方法是将其简化为三角波。爆破载荷峰值 p_m 的经验公式^[12]为

$$p_m = \frac{139.91}{z} + \frac{844.81}{z^2} + \frac{2154}{z^3} - 0.8034 \quad (1)$$

式(1)中: z 为常数, 满足

$$z = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \quad (2)$$

式(2)中: R 为爆点到载荷作用面的等效距离; Q 为掏槽孔最大装药量。

爆破载荷加载时间一般由现场采集或由理论公式计算。本文采用理论计算^[13]的方式, 爆破载荷加载的上升段时间 t_R 和总时间 t_S 分别为

$$t_R = \frac{12 \times \sqrt{R^{2-\mu}} \times Q^{0.05}}{K} \quad (3)$$

$$t_S = \frac{84 \times \sqrt[3]{R^{2-\mu}} \times Q^{0.2}}{K} \quad (4)$$

式(3)~(4)中:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (5)$$

式(5)中: K 为体积压缩模量; E 为弹性模量; μ 为泊松比。

2 结果与讨论

2.1 不同隧道围岩等级下的动态响应

在隧道初期支护厚度、混凝土材料以及载荷都不变的情况下，改变隧道围岩等级，对不同围岩等级下的动态响应进行仿真。隧道围岩等级一般分为Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级，力学参数如表1所示。

表1 不同隧道围岩等级的力学参数

隧道围岩等级	密度 / (kg/m^3)	泊松比	弹性模量 /GPa	摩擦角 / $(^\circ)$
Ⅲ级围岩	2 723	0.3	43.07	45
Ⅳ级围岩	2 100	0.272	15	34
Ⅴ级围岩	1 500	0.2	5.4	31.7

2.1.1 振动速度响应规律

在实际隧道施工中，掏槽孔最大装药量 Q 为34 kg，掏槽孔到衬砌轮廓面的距离 R 约为4 m，将其代入式(2)中，计算出常数 z 的值为1.234 62，从而根据经验公式，即式(1)计算出作用于衬砌轮廓面的载荷大小约为1.81 MPa。将表1中的力学参数代入式(3)~(4)，可以得出不同围岩等级下载荷的作用峰值和作用时间，结果如表2所示。

表2 载荷作用峰值和作用时间

隧道围岩等级	作用峰值 /MPa	加载时长 /ms	总时长 /ms	压缩模量 /MPa
Ⅲ级围岩	1.81	16.6	130	300.49
Ⅳ级围岩	1.81	4.5	34	1 096.4
Ⅴ级围岩	1.81	1.2	10.3	3 589.1

目前，国内外通常采用振动速度作为隧道衬砌动态响应的主要评判标准^[14]。观察三种不同隧道围岩等级下隧道掌子面的振动速度分布状况，并选取隧道初期支护的拱顶、拱肩、拱底振动速度进行监测。提取这三个支护位置对应的振动速度最大值，可得到振动速度随围岩等级的变化曲线，如图2所示。三个支护位置在不同隧道围岩等级下随时间变化的趋势如图3所示。

综合图2和图3进行讨论。在Ⅴ级围岩等级下，爆破后6 ms达到振动速度最大值，其中拱顶

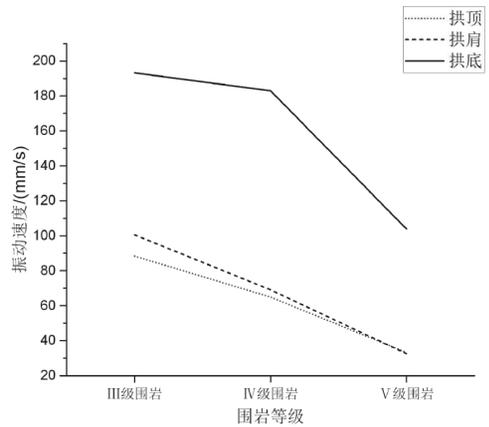
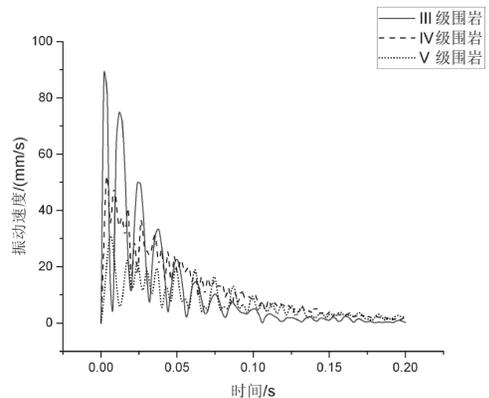
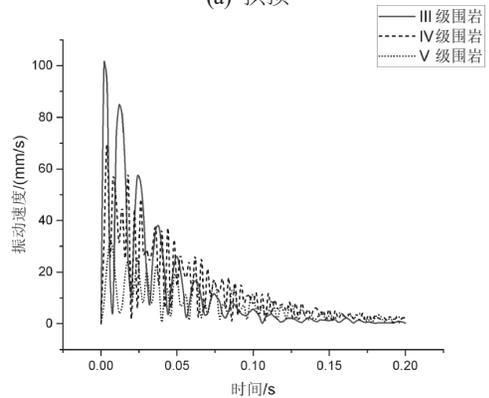


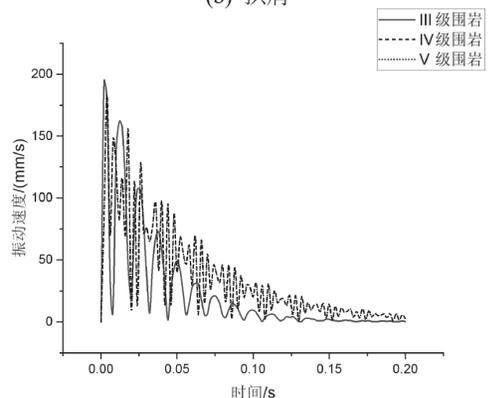
图2 不同围岩等级振动速度



(a) 拱顶



(b) 拱肩



(c) 拱底

图3 不同围岩等级振动速度曲线

最大振动速度为33.23 mm/s, 拱肩最大振动速度为32.6 mm/s, 拱底最大振动速度为103.9 mm/s; 在IV级围岩等级下, 爆破后4 ms达到振动速度最大值, 其中拱顶最大振动速度为64.96 mm/s, 拱肩最大振动速度为69.09 mm/s, 拱底最大振动速度为182.97 mm/s; 在III级围岩等级下, 爆破后2 ms达到振动速度最大值, 其中拱顶最大振动速度为88.38 mm/s, 拱肩最大振动速度为100.52 mm/s, 拱底最大振动速度为193.2 mm/s。

从表1可以看出, 当装药量一定时, 载荷作用峰值大小不变, 载荷作用时间随围岩等级变化而变化。在III级围岩等级下, 围岩力学性能最好, 载荷作用时间最短。随着围岩等级的升高, 作用时间不断增加。同时, 当爆破载荷大小一定时, 载荷作用时间越短, 可理解为爆破载荷越剧烈。从图2和图3可以看出, 当保持装药量一定时, 围岩等级越高, 隧道初期支护振动速度达到峰值所需要的时间越长, 但是振动速度峰值越小。

2.1.2 位移响应规律

位移响应反映爆破冲击下不同围岩等级对应的隧道初期支护变形量^[15]。为了更好地监测位移响应规律, 在隧道初期支护的拱顶、拱肩、拱底位置分别设置监测点, 提取各个监测点在不同围岩等级下的位移变化最大值, 研究隧道初期支护的位移响应剧烈程度。不同隧道围岩等级下位移响应随时间变化曲线如图4所示。可以看出, 围岩等级对隧道初期支护有较为明显的影响。在V级围岩等级下, 隧道初期支护最大位移发生在爆破后20 ms, 此时隧道拱顶最大位移量为0.339 mm, 拱肩最大位移量为0.34 mm, 拱底最大位移量为1.063 mm; 在IV级围岩等级下, 隧道初期支护最大位移发生在爆破后6 ms, 其中拱顶最大位移量为0.225 mm, 拱肩最大位移量为0.241 mm, 拱底最大位移量为0.635 mm; 在III级围岩等级下, 隧道初期支护最大位移发生在爆破后4 ms, 其中拱顶最大位移量为0.127 mm, 拱肩最大位移量为0.135 mm, 拱底最大位移量为0.278 mm。比较不同围岩等级下位移响应随时间变化的三条曲线, 可以发现V级围岩位移响应达到最大值的时间最长, 且回到初始稳定状态的时间相比IV级围岩和III级围岩的时间更长。

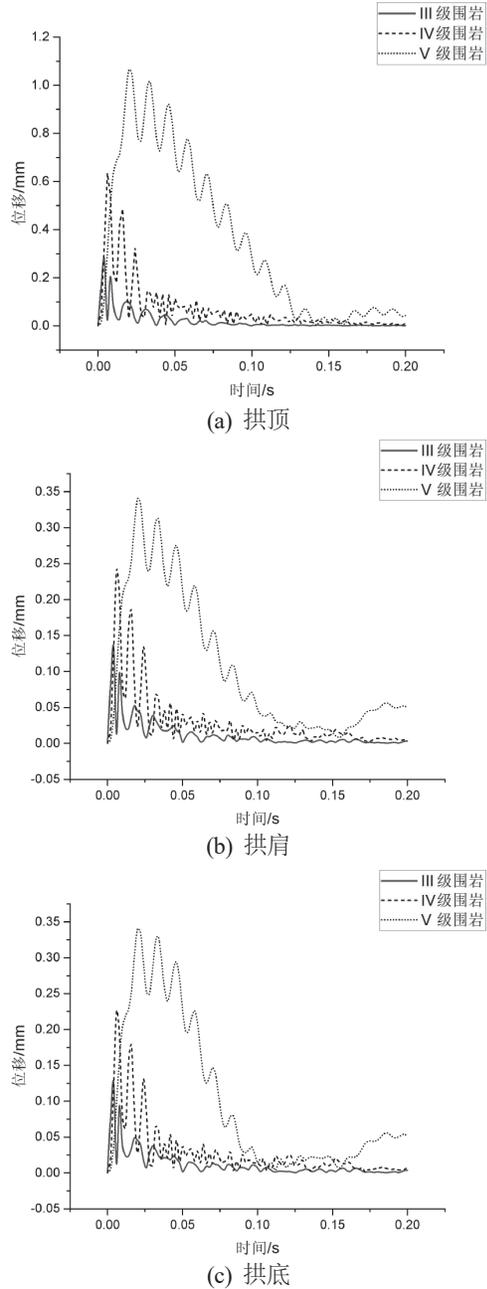


图4 不同隧道围岩等级下位移响应随时间变化曲线

同时选取爆破后隧道的拱顶、拱肩、拱底位移响应最大值进行对比, 如图5所示。

2.2 不同爆破载荷下的动态响应

通过设置不同的掏槽孔装药量来设置隧道初期支护所承受的载荷。设置掏槽孔装药量为32~38 kg, 通过式(1)~(2)得出作用于隧道衬砌轮廓面的等效载荷。不同装药量对应的等效载荷和作用时间如表3所示。

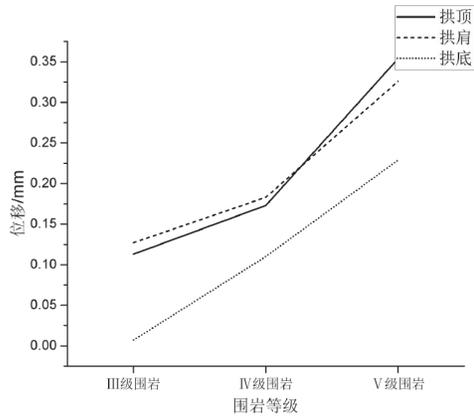


图5 不同围岩等级位移响应最大值

表2 载荷作用峰值和作用时间

装药量/kg	32	33	34	35	36	37	38
等效载荷/MPa	1.72	1.77	1.81	1.84	1.90	1.95	1.99
加载时长/ms	0.017	0.017	0.017	0.016	0.016	0.017	0.017
总时长/ms	0.128	0.129	0.130	0.131	0.132	0.132	0.133

由先前研究可以了解到，隧道初期支护动态响应主要集中在紧邻隧道掌子面的方向上，即初期支护的Y平面，达到振动速度最大值的时间约为载荷加载后6 ms。从模态分析可以得知，隧道初期支护的位移主要发生在拱肩和拱顶，其中拱肩变化最明显。因此，为了更好地分析振动响应，在拱肩处设置监测点，观察监测点在X方向和Z方向的振动速度（合速度）、位移等参数随装药量的变化趋势。

2.2.1 振动速度随装药量的影响

拱肩位置不同装药量产生的振动速度如图6所示。当装药量为32 kg时，拱肩位置最大振动速度为45.93 mm/s；当装药量为38 kg时，最大振动速度为52.98 mm/s。对图6的变化曲线进行分析，发现变化趋势近似呈现线性关系，可以得到拟合的关系式为

$$y = 1.7143x + 8.38143 \quad (6)$$

式中：y为隧道初期支护的振动速度；x为隧道施工装药量。

2.2.2 位移响应随装药量的影响

位移响应同样是隧道初期支护的重要指标之一。根据剪切失效准则，当剪切滑移量超过梁截

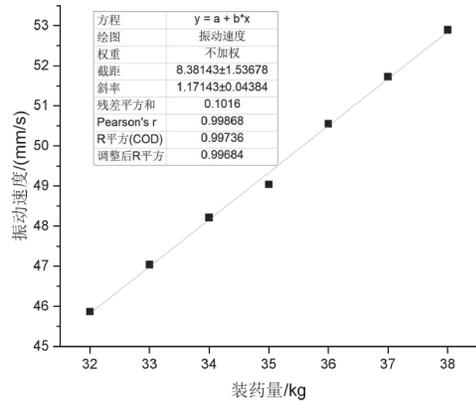


图6 不同装药量下最大振动速度

面厚度的1/3时，整个截面就会发生剪切破坏。因此，对爆破冲击下隧道初期支护的位移响应进行分析具有重要意义。

在隧道初期支护衬砌模型上设置监测点，观察在表1中不同装药量下载荷的位移响应，如图7所示，当装药量为32 kg时，隧道初期支护在掌子面上的位移最小，其值在隧道施工后20 ms时达到最大值，大小约为0.785 mm；随着装药量的增大，位移响应数值也逐渐增大，当装药量在38 kg时，位移响应的数值约为0.913 mm，说明位移响应大小与装药量呈正相关，进一步统计分析可以得出初期支护的位移响应与装药量的关系为

$$y = 0.02132x + 0.10304 \quad (7)$$

式中：y为隧道初期支护的位移响应大小；x为隧道施工装药量。由式(9)可以看出装药量与隧道初期支护的位移响应呈现线性正相关。

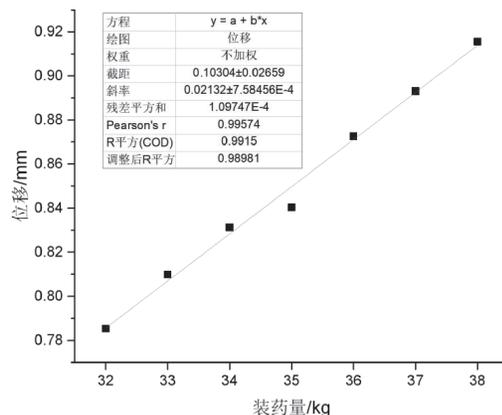


图7 不同装药量下的位移响应

2.3 不同支护厚度下的动态响应

影响隧道初期支护动态响应程度的参数除了

隧道围岩等级、爆破载荷外, 还有支护厚度。本文选取320~380 mm厚度的混凝土进行模拟。

模型边界条件与前述情况一致。根据实际施工状况, 取装药量为34 kg, 其爆破载荷可以等效为1.81 MPa。在隧道拱顶位置设置监测点, 观测隧道初期支护与掌子面相近部分的振动速度和位移响应。

2.3.1 不同支护厚度下的振动速度

针对不同支护厚度下的振动速度进行模拟, 得到的振动速度随支护厚度变化的曲线, 如图8所示。研究发现, 改变支护厚度只会改变隧道初期支护振动速度的峰值, 而对振动响应随时间变化规律的影响不大。拱顶位置的振动速度在支护厚度为320 mm时的数值最大, 发生在爆破后6 ms, 约为57.47 mm/s。随后, 振动速度随支护厚度的增大而逐渐降低, 当支护厚度为380 mm时, 振动速度峰值为34.84 mm/s。总体而言, 振动速度的下降幅度随支护厚度的增大而逐渐降低, 即随着支护厚度的增大, 支护厚度对支护结构动态响应的影响逐步减小。

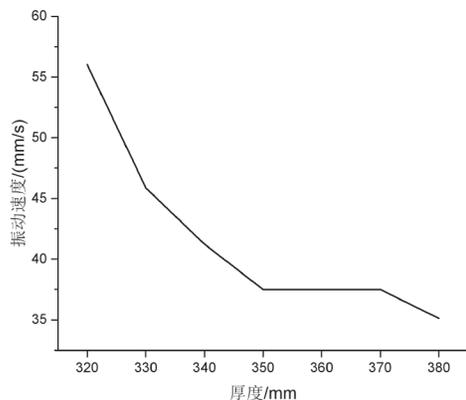


图8 振动速度随支护厚度变化曲线

2.3.2 不同支护厚度下的位移响应

隧道初期支护的位移响应也是影响隧道初期支护能力的重要参数。为研究不同支护厚度在相同载荷下的动态响应, 选取拱顶位置作为监测点。由数值模拟结果可以发现, 位移响应最大值发生在爆破后12 ms左右。不同支护厚度下的位移响应如图9所示。随着支护厚度的增大, 拱顶位置位移响应最大值总体呈现降低趋势, 在支护厚度为320 mm时, 位移最大, 约为0.88 mm, 随后逐

渐下降。当初期支护厚度为380 mm时, 支护结构的位移响应最大值为0.62 mm, 此时位移响应最小。由此可以看出, 支护厚度越大, 支护动态响应程度越小, 当混凝土厚度到达一定值时, 其对支护结构的影响逐渐减小。

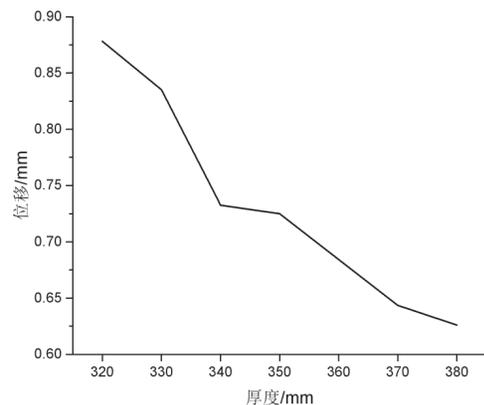


图9 位移响应随支护厚度变化曲线

3 结论与讨论

本文通过数值模拟, 考察了围岩等级、装药量(即爆破载荷)、支护厚度三个因素对爆破冲击下隧道初期支护动态响应的影响, 得到以下主要结论

① 隧道围岩等级越高, 力学性能越差, 支护响应越剧烈。在恶劣围岩条件下施工时, 可以采取加大支护厚度的方式保证隧道围岩的稳定性。

② 隧道施工中的装药量与隧道初期支护的振动速度及位移响应呈线性正相关。装药量越大, 隧道初期支护动态响应越明显, 但振动速度和位移出现峰值的时间未发生变化。

③ 支护厚度与隧道初期支护动态响应呈负相关。初期支护厚度越大, 稳定性越高, 振动速度和位移的最大值越小。

因此, 在进行隧道施工的过程中, 当围岩状况较差时, 可以在保证成本的前提下采用加厚隧道支护厚度, 短进尺、小装药量、多次爆破, 加设锚杆等方式进行施工, 以保证隧道施工安全。

参考文献

- [1] CHEN M, YE Z, LU W, et al. An improved method for calculating the peak explosion pressure on the borehole wall in decoupling charge blasting[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 146(12): 103695.
- [2] 任永强, 张家铭, 李晔, 等. 基于数值模拟技术的爆破动力

荷载对边坡的稳定性影响研究[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5):262-268.

[3] 桑运龙,何国华,孙州,等. 爆破振动对隧道不同级别围岩松动范围影响分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2): 291-298.

[4] 周文锋,廖少明,秦青阳,等. 山岭隧道爆破施工振动响应分析及控制研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 620-628.

[5] 郑爽英,杨立中. 下穿隧道爆破地震作用下埋地输气管道的动力响应规律研究[J]. 爆破, 2015, 32(4): 69-76, 109.

[6] ZHANG Z, ZHOU C, REMENNIKOV A, et al. Dynamic response and safety control of civil air defense tunnel under excavation blasting of subway tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 112(6): 103879.

[7] 朱大鹏,阿布拉铁,许红波. 爆破振动下大前石岭隧道岩堆围岩动力响应预测[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 645-649.

[8] 郭东明,刘康,张伟,等. 不同间距邻近爆破荷载下隧道破坏规律及动态响应研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(10): 1000-1005.

[9] 骆正坤,李新平,孙吉主,等. 深埋跨断层隧道爆破开挖动力响应规律研究[J]. 爆破, 2020, 37(3): 56-62.

[10] 石海天. 爆破荷载下隧道围岩稳定性研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2021.

[11] 蒲磊. 不同加载方式下隧道爆破振动特征分析[J]. 爆破, 2018, 35(1): 42-48.

[12] 张程红. 邻近隧道爆破施工引起的既有隧道衬砌振动速度阈值分析[D]. 兰州:兰州交通大学, 2009.

[13] 王晓闪. 爆破对公路隧道衬砌结构的影响研究[D]. 西安:西安科技大学, 2016.

[14] 冯锡勇. 浅埋隧道施工爆破荷载对围岩及支护结构的动力响应研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2016.

[15] 王光勇,张运强,余锐,等. 爆破作用下山岭隧道锚固壁动态响应及衬砌的影响研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(4): 769-775, 931.

作者简介:

王泰恒(1996—),男,山东济南人,硕士。主要研究方向:机械设计及结构动特性仿真。

蒋新闻(1974—),男,湖北黄梅人,高级工程师。研究方向:桥梁隧道施工工艺及钢结构设计。

陈猛(1972—),通信作者,男,四川武胜人,博士,教授。主要研究方向:计算机辅助工程及机械动力学仿真。
E-mail: chenmengcm2008@126.com

薄澎涛(1996—),男,山西临汾人,硕士在读。研究方向:机械设计及结构动特性仿真。

王国超(1998—),男,江西上饶人,硕士在读。研究方向:机械设计及结构动特性仿真。

(收稿日期:2023-04-19)

Simulation Analysis on Dynamic Response of Tunnel Primary Support Under Blasting Impact

WANG Taiheng¹, JIANG Xinwen², CHEN Meng¹, BO Pengtao¹, WANG Guochao¹

(1. Southwest Forestry University, Kunming 650044, China;

2. Yunnan Jiaotou Highway Construction Sixth Engineering Co., Ltd., Kunming 650044, China)

Abstract: The influences of factors such as surrounding rock grade of tunnel, blasting load, support thickness on the dynamic response of tunnel primary support under blasting impact were investigated to provide a theoretical basis for the construction design of tunnel primary support. Taking the Mengsheng Tunnel Project of Ruili-Menglian Expressway as the project background, taking the vibration velocity and displacement response of the tunnel lining as the main evaluation criteria, the key monitoring points were selected, and the numerical simulation method was used to analyze the change law of various factors on the tunnel primary support. Findings: under the same blasting load (charge), the dynamic response of tunnel support becomes more severe with the increase of the surrounding rock grade of tunnel; in the blasting construction, the charge is linearly positively correlated with the dynamic response of tunnel primary support; the support thickness is negatively correlated with the dynamic response of tunnel primary support. Accordingly, suggestions were put forward to ensure the safety of tunnel construction, which provides a theoretical paradigm for the engineering design of tunnel primary support.

Keywords: Tunnel Primary Support; Surrounding Rock Grade of Tunnel; Support Thickness; Charge; Dynamic Response; Numerical Simulation

动态激光封割气态放射性同位素光源的 多物理场耦合仿真研究

马俊平, 李思杰, 李雪, 平杰红, 李鑫

(中国原子能科学研究院核技术综合研究所, 北京 102413)

摘要: 动态激光封割气态放射性同位素光源涉及传热、熔化、流动、汽化、固化、旋转等复杂动态物理过程, 物理过程之间相互影响, 且受到较多工艺参数的影响, 必须采用多物理场耦合仿真方法进行研究。采用COMSOL Multiphysics, 建立数学模型, 开展动态激光封割工艺过程仿真, 考察高硼硅玻璃管壳转速、激光功率对温度分布、熔池形貌的影响。研究发现: 玻璃管壳转速越快, 熔池区域越小, 封割所需时间越长; 气态放射性同位素光源玻璃管壳被辐照区域最高温度约为1 600 °C; 当激光功率为15 W、玻璃管壳转速为400 r/min时, 封割时间约为0.65 s。将模拟结果与热成像设备试验结果相对比, 结果基本符合实际情况, 且被辐照区域的温度分布近似呈高斯分布, 与工艺过程仿真采用的激光热源分布假设相一致。

关键词: 放射性同位素光源; 动态激光封割; 多物理场耦合; 高硼硅; 激光热源

中图分类号: O562.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-019-07

工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.003

0 引言

气态放射性同位素光源的制备方法是首先在玻璃管壳内壁涂敷诸如ZnS:Cu、ZnS:Ag、ZnO、聚集诱导发光(AIE)材料等荧光材料, 然后在玻璃管壳中充入氙气等气态放射性同位素, 最后对充气玻璃管壳进行封割。气态放射性同位素光源具有发光稳定、使用寿命长、无电池和免维护等特点^[1-4]。气态放射性同位素光源的工作原理是, 气态放射性同位素衰变释放出 β 射线, 激发荧光材料中的原子, 使原子处于激发态, 激发态的原子在回到基态的过程中辐射出可见光光子^[4]。在气态放射性同位素光源的制备中, 最重要的工艺包括玻璃管壳内壁荧光材料涂敷工艺、气态放射性同位素充入玻璃管壳工艺、充气玻璃管壳封割工艺^[5]。其中, 对充入气态放射性同位素的玻璃管壳进行封割涉及密封和切割两个动作, 是关

乎气态放射性同位素光源制备成败的关键环节, 将直接决定气态放射性同位素光源的成品率和成品质量。在该环节中, 既要实现对气态放射性同位素的密封, 也要使得光源密封表面光滑平整以减小应力集中。为实现这一目标, 密封和切割是同步进行的, 即一个过程要同时实现密封和切割两个动作。历史上, 气态放射性同位素光源玻璃管壳的封割采用火焰进行, 而随着激光技术的发展, 激光加工方法逐步被采用。与火焰加工方法相比较, 激光加工方法具有能量密度大、热影响区域小、封割速度快、重复性好、可控性强等优点^[6]。

目前, 激光加工方法主要被用于金属和非金属材料的切割、打孔、焊接、表面处理和微加工^[7]等领域, 其中在采用激光对玻璃进行焊接和切割方面已有大量的研究报道。例如, Richter等^[8]采用飞秒激光实现了熔融石英玻璃的焊接; 焦俊科等^[9]采用有限元方法模拟了运动的石英玻璃板在CO₂

激光作用下的热效应。鉴于气态放射性同位素光源玻璃管壳封割涉及焊接（可用于密封）和切割两个动作，并且在工艺过程中不能出现内外贯穿的情况，实现起来较难，因此鲜有报道。笔者所在课题组于2019年采用有限元方法模拟了封割过程中的温度和应力变化^[10]，而对于传统激光焊接方式中常涉及的熔化、固化以及熔池演化等过程未给予考虑。玻璃是一种透明易碎的脆性材料，传统激光光源不易被其吸收，并且玻璃吸热时会受到热膨胀的作用，焊接时容易碎裂，故传统激光焊接方式往往并不适用。

对充入气态放射性同位素的玻璃管壳进行封割，一般采用激光波长为10.6 μm的CO₂激光器，其波长较易于被玻璃材料吸收，适合用于玻璃材料加工^[7, 11]。动态激光封割气态放射性同位素光源玻璃管壳，是使玻璃管壳处于旋转状态，利用激光径向集中辐照旋转玻璃管壳相应位置，使玻璃管壳的被辐照区域吸收激光能量，温度急剧上升，进而使玻璃管壳发生软化、熔化、塌缩等；当激光辐照停止后，玻璃管壳的

被辐照区域温度迅速降低，使玻璃管壳发生固化。至此，封割完成。在这一过程中，涉及了传热、熔化、流动、汽化、固化、旋转等复杂动态物理过程。鉴于物理过程之间相互影响，且受到较多工艺参数的影响，为了减少试验次数、降低研发成本，本文采用多物理场耦合有限元软件COMSOL Multiphysics^[12]进行动态激光封割工艺过程仿真，考察高硼硅玻璃管壳转速、激光功率对温度分布、熔池形貌的影响，从而确定相关工艺参数，为现场研发试验提供指导。

1 动态激光封割模型

1.1 几何模型

对气态放射性同位素光源玻璃管壳进行动态激光封割，是将一定功率的激光从径向辐照到玻璃管壳的某一特定区域。因此，建立一个包含气态放射性同位素的玻璃管壳几何模型，如图1所示。玻璃管壳外径为2 mm、内径为1.5 mm，激光采用0~250 W的CO₂脉冲激光。

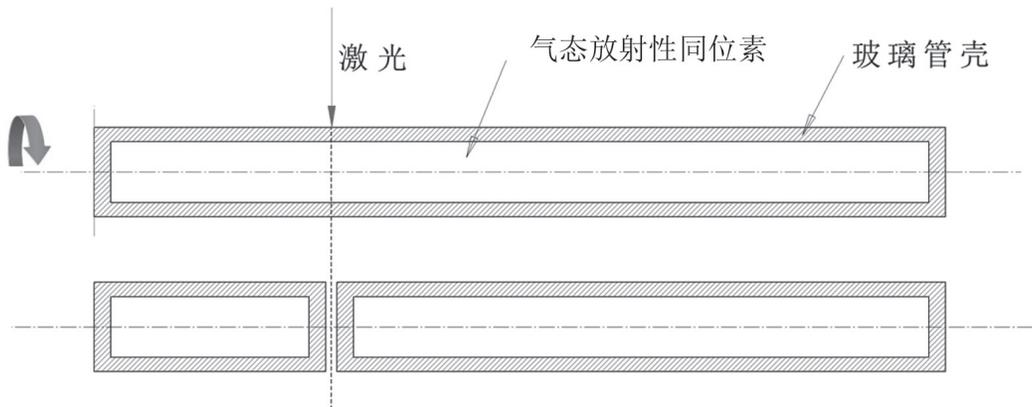


图1 动态激光封割气态放射性同位素光源的几何模型

1.2 仿真计算假设

仿真计算采用有限元软件COMSOL Multiphysics，将热传递和流体流动的瞬态物理过程相耦合。为了在可接受的计算时间和计算精度下求解多物理场耦合方程，对封割工艺过程进行以下简化和条件假设：

- ① 材料均匀且各向同性；
- ② 流体流动属于层流且为不可压缩牛顿流体；

- ③ 激光热源能量满足高斯分布；
- ④ Boussinesq近似考虑熔池中温度引起的密度差异；
- ⑤ 表观热容法用于熔化潜热。

1.3 数学物理模型

气态放射性同位素光源玻璃管壳的动态激光封割涉及复杂热传递、相变和流体流动物理过程，在这些

过程中, 相关物理参量随时间、空间不断演化的过程是通过控制方程表示的, 求解这些方程, 就可以得到相关物理参量在不同时间、空间下的详细情况。

1.3.1 传热模型

玻璃管壳上吸收激光的热功率空间分布^[13]为

$$Q = \frac{P_{\text{laser}} \alpha(T)}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (1)$$

式中: P_{laser} 为激光功率; $\alpha(T)$ 为材料与温度相关的吸收系数; r_0 为激光束半径。

激光与玻璃相互作用遵循Beer-Lambert定律^[14], 即

$$\frac{\partial I}{\partial z} = \alpha(T)I = Q \quad (2)$$

式中: I 为激光强度。

计算区域的温度随时间的变化可以通过热传递^[15]方程求解, 即

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (3)$$

式中: ρ 为密度; C_p 为比热容; T 为温度; \vec{u} 为流体速度矢量; k 为导热率。

考虑玻璃管壳材料的熔化—固化相变焓, 比热容被修改为

$$C_p = C_p(T) + \frac{1}{(T_1 - T_s) \sqrt{\pi}} \times L_f \times \exp\left[-\left(\frac{T - T_{\text{melt}}}{T_1 - T}\right)^2\right] \quad (4)$$

式中: T_{melt} 为熔点; L_f 为熔化潜热; T_1 为流体温度; T_s 为固体温度。

在辐照区域, 由汽化导致的热损失 q_{evap} ^[16]表示为

$$q_{\text{evap}} = L_v (1 - \beta_R) \sqrt{\frac{M}{2\pi k_b}} p_0 \exp\left[\frac{L_v M}{k_b T_{\text{vap}}} \left(1 - \frac{T_{\text{vap}}}{T}\right)\right] \quad (5)$$

式中: L_v 为汽化潜热; T_{vap} 为沸点; p_0 为沸点处的蒸汽压; k_b 为玻尔兹曼常数; β_R 为逆扩散系数; M 为摩尔质量。

考虑到周围环境的自然对流和辐射到环境中的损失, 熔池自由面上的热通量为

$$-\vec{n} \cdot (-k \nabla T) = Q - q_{\text{evap}} - h(T - T_0) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (6)$$

式中: h 为对流系数; T_0 为参考温度; σ 为斯特芬—玻尔兹曼常数; ε 为发射率。

1.3.2 流体模型

在动态激光封割气态放射性同位素光源的过

程中, 随着激光辐照时间的增加, 玻璃管壳被辐照区域的温度不断升高, 玻璃材料开始软化、熔化、汽化, 而停止辐照、温度降低后, 玻璃材料开始固化。在此过程中, 玻璃流体和蒸汽产生较小速度的流场。

根据流体为不可压缩牛顿流体的假设, 质量和动量输运过程通过瞬态层流纳维—斯托克斯方程^[17-18]进行求解, 其中质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (7)$$

采用Boussinesq近似(弱可压缩流体流), 动量守恒方程可写为

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot (\nabla \cdot \vec{u}) = \nabla \cdot \left[-pI + \mu \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \cdot \vec{u})^T \right) \right] + \\ \rho \vec{g} - \rho_l \beta_l (T - T_{\text{melt}}) \vec{g} \Phi + \\ K \vec{u} + (\gamma \vec{n} k - \sigma_t) \delta(\Phi) + p_{\text{recoil}} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: p 为压力场; μ 为动力粘度; \vec{g} 为重力场; β_l 为液体膨胀系数; ρ_l 为液体密度; Φ 为水平集函数; $\delta(\cdot)$ 为delta函数; k 为曲率; γ 为表面张力系数; I 为单位矩阵; $K \vec{u}$ 表示狄拉克条件, 其中 K 满足

$$K = -C \left[\frac{(1 - f_1)^2}{f_1^3 + b} \right] \quad (9)$$

式中: C 为常数; b 为一个避免分母为零的参数。

此外: $\rho_l \beta_l (T - T_{\text{melt}}) \vec{g} \Phi$ 表示浮力效应; $\gamma \vec{n} k$ 表示表面张力; $\sigma_t = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla T \cdot \vec{t}$ (\vec{t} 为切线单位矢量)

表示马兰戈尼效应; p_{recoil} 为反冲压。

在不同温度下的流体分数 f_1 表示为

$$f_1 = \begin{cases} 0, T < T_s \\ \frac{T - T_1}{T - T_s}, T_s < T < T_1 \\ 1, T > T_1 \end{cases} \quad (10)$$

而液体—气体界面上存在汽化, 故引入连续性方程

$$\nabla \vec{u} = \dot{m} \delta(\Phi) \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho^2} \right) \quad (11)$$

式中: ρ_v 为气体密度; Φ 由水平集输运方程确定, 即

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \Phi = \gamma_{\text{ls}} \nabla \cdot \left[\varepsilon_{\text{ls}} \nabla \Phi - \Phi \left(1 - \Phi \frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|} \right) \right] \quad (12)$$

式中: γ_{ls} 重新初始化参数; ε_{ls} 为液—气界面厚度参数。

液体—气体界面上汽化率 \dot{m} 满足

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{M}{2\pi k_b}} \frac{p_{recoil}(T)}{\sqrt{T}} (1 - \beta_R) \quad (13)$$

式中： β_R 为逆扩散系数。

在液体—气体界面上，反冲压 p_{recoil} 是熔池的主要影响因素，垂直表面张力（拉普拉斯力）与反冲压平衡，近辐射表面的马兰戈尼效应将使熔池增大。反冲压是表面温度的函数，非平衡过程采用逆扩散系数的Clausius-Clapeyron定律^[19]，即

$$p_{recoil} = \frac{1 + \beta_R}{2} p_0 \exp\left(\frac{L_v M}{T_{vap}} \left(1 - \frac{T_{vap}}{T}\right)\right) \quad (14)$$

在非界面上，不可压缩流体没有质量损耗，因此

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (15)$$

为了防止计算过程中移动网格畸形导致计算精度差的问题，采用任意拉格朗日—欧拉（ALE）方法，在每个计算时间步，采用传播移动边界位移至整个计算域的方式解稳态超弹性问题，以控制计算区域的网格变形。为了避免出现过多的扭曲单元，接近界面的单元设置为虚拟超

弹性材料。在有限元软件COMSOL Multiphysics中指定边界条件，以控制网格位移。

2 结果及讨论

2.1 参数对温度分布的影响

图2所示为玻璃管壳转速分别为400 r/min和600 r/min，激光功率为15 W时，气态放射性同位素光源玻璃管壳在不同时刻下的温度分布图。从图2中可以看出，在400 r/min转速下，在0.15 s时刻，加热区域从边缘开始形成熔池，经过进一步加热；在0.32 s时刻，玻璃管壳被辐照区域进一步熔融，温度变化也更加剧烈，随着热量的逐渐输入，温度快速升高，最终达到1 600 °C；直至0.52 s时刻，玻璃管壳开始熔透；最后在0.65 s时刻，玻璃管壳完全熔透并且分为两个部分，经冷却后形成两段各自封闭的玻璃管。在600 r/min转速下，初始出现熔池的时刻为0.25 s，直至0.95 s时刻，玻璃管壳完全熔透，分为两个部分。

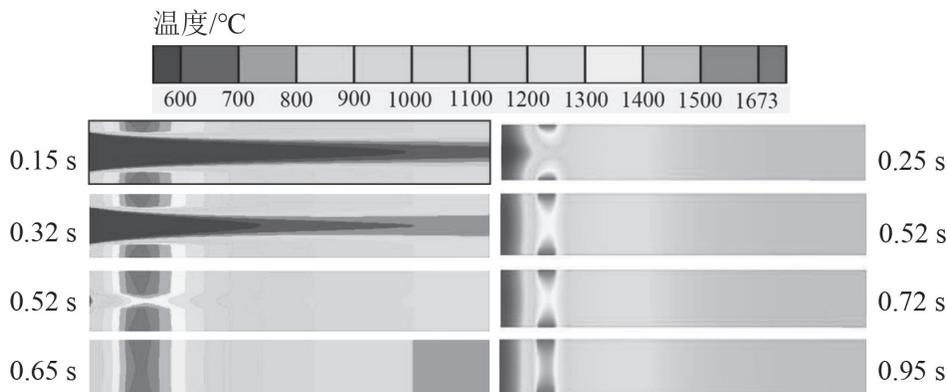


图2 不同转速及辐照时间下的温度分布

在400 r/min转速下，在激光辐照初期，随着时间的增加，玻璃管壳温度逐渐升高，由于玻璃管转动速度较慢，随着受辐照时间的增加，辐照作用范围也逐渐增大。在600 r/min转速下，由于玻璃管壳高速旋转，热源能量更加集中于辐照区域，但是较高的转速又使得完全熔透玻璃管的时间会有所增加。当激光加热区域温度达到1 600 °C时，发生熔池演变，直至将整个区域分为两段，从而完成封割工艺过程。比较两个转速下的结果可知，转速越大，热影响区域越小，熔

池越小，但是熔透所需时间越大。这是因为转速越大，激光在玻璃管壳某一位置作用的时间越短，沉积在玻璃管中的能量越少，因此升温速度较慢，达到相同温度所需时间越多；另外，由于转速增大，激光作用时间更短，横向传热更少，熔池区域更小。

2.2 参数对熔池形貌的影响

为了进一步分析激光辐照高硼硅玻璃管壳区

域的熔池形貌及流动情况, 对熔池的变化过程进行了详细的动力学模拟及分析。图3所示为激光功率为15 W时, 激光辐照转速为400 r/min的气态放射性同位素光源玻璃管壳时, 玻璃管壳截面在不同时刻下的形貌及流动状态。由于随着时间的增加, 激光辐照能量的沉积会有所增多, 因此玻璃管壳逐渐软化, 进入熔化状态。在0.15 s时刻, 玻璃管壳进入熔化状态且温度扩散, 随着辐照和转动的进行, 玻璃管壳封割区域形成相对较深的凹陷; 随着流场的持续流动, 高温的流体态玻璃向两侧流动。在0.32 s时刻, 随着内部熔化的玻璃管发生流动, 流体态玻璃缓缓向两侧流动, 逐渐形成两个较小的环流。在0.52 s时刻, 两侧环流继续向两侧流动, 玻璃管壳凹陷逐渐扩大, 随着转动的持续, 两侧玻璃管壳割裂状态已经非常明显, 玻璃管壳两侧均已形成更深凹陷的环流; 在0.65 s时刻, 玻璃在表面张力及重力的驱动下向下铺展, 激光辐照区域会慢慢融合、固化, 随着玻璃管壳的转动, 玻璃管壳两侧分别逐渐冷却, 完成封割。

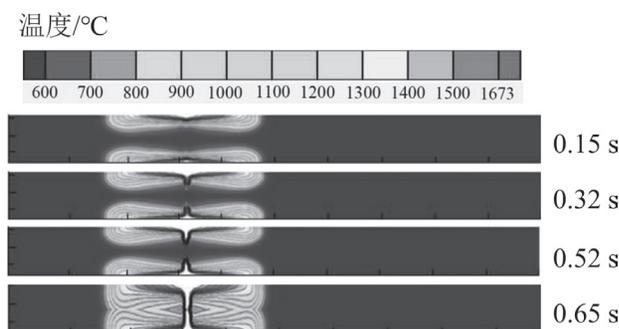
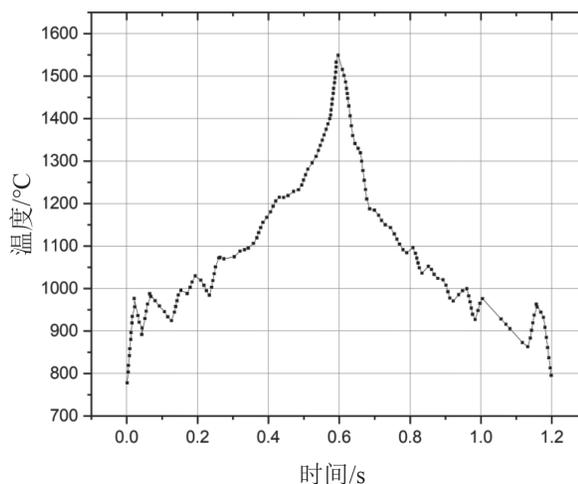
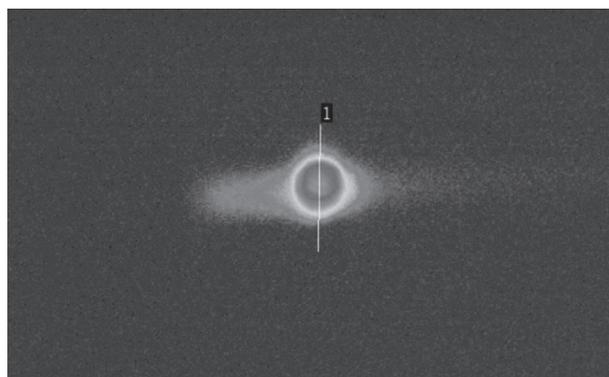


图3 不同辐照时间下的熔池形貌和流动状态

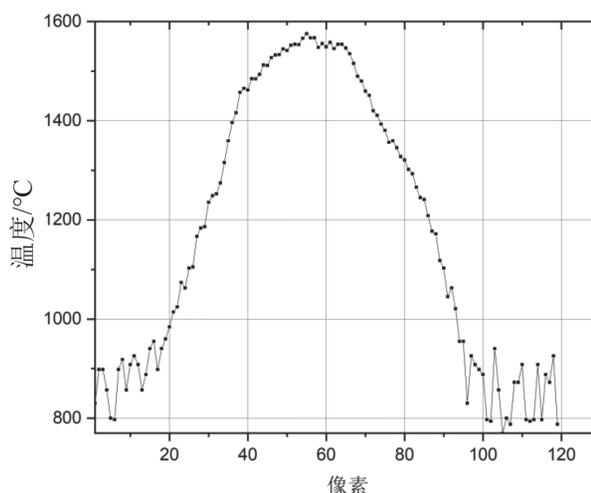
另外, 采用热成像设备对同等条件计算模型的动态激光封割气态放射性同位素光源过程的温度变化和熔池形貌进行了测量, 结果如图4所示。从图4a可见, 激光辐照旋转的高硼硅玻璃管壳时, 玻璃管壳的温度随着时间的推移而逐渐升高, 直至近1 600 °C, 所用时间及温度峰值与模拟结果基本一致; 对图4b所示的熔池形貌进行分析得到图4c, 表明被辐照区域的温度分布近似呈高斯分布, 与工艺过程仿真采用的激光热源分布假设是一致的。



(a) 玻璃管壳温度随着时间推移的变化



(b) 熔池形貌



(c) 图4b线条1上的温度分布情况

图4 热成像动态激光封割过程中温度变化及分布

3 结束语

本文利用多物理场耦合有限元软件 COMSOL Multiphysics, 基于数学模型, 对动态激光封割放射性同位素光源工艺进行了工艺过程模拟, 并与热成像设备试验测试结果进行了比较。在工艺过程模拟中, 考虑了熔池重力、浮力、表面张力、马兰戈尼效应之间的相互作用, 建立了数值模型, 模拟计算了玻璃管壳转速、激光辐照时间对温度分布、熔池形貌的影响。模拟结果表明:

(1) 玻璃管壳转速越大, 熔池区域越小, 封割所用时间越长;

(2) 气态放射性同位素光源的玻璃管壳在封割过程中模拟计算的峰值温度在1 600 °C左右, 与试验结果相符合;

(3) 当激光功率为15 W、玻璃管壳转速为400 r/min时, 模拟计算的封割时间约为0.65 s, 与试验结果基本一致。

参考文献

- [1] 缪增星, 吕廷海, 张淑卿. 氚光源的研制[J]. 同位素, 1990, 3(1): 66-67.
- [2] BOWER K E, BARBANEL Y A, SHRETER Y G, et al. Polymers, Phosphors, and Voltaics for Radioisotope Microbatteries[M]. New York: CRC Press LLC, 2002.
- [3] KIM K, KIM K S, SON S H, et al. Manufacturing Process of self-luminous glass tube utilizing tritium gas: experimental results for DB construction[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2005, 22(6): 899-904.
- [4] BLASSE G, GRABMAIER B C. 发光材料[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [5] KORIN A, GIVON M, WOLF D. Parameters affecting the intensity of light sources powered by tritium[J]. Nuclear Instruments and Methods. 175, 130(1): 231-237.
- [6] NAM G J, SEO M H, RYU K H, et al. Laser cutting and sealing methods of capillary glass tube[C]//Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 2004: 154-159.
- [7] 李亚江, 李嘉宁. 激光焊接/切割/熔覆技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [8] RICHTER S, ZIMMERMANN F, EBERHARDT R, et al. Toward laser welding of glasses without optical contacting[J]. Applied Physics A, 2015, 121(1): 1-9.
- [9] 焦俊科, 王新兵. CO₂激光作用下运动石英玻璃的温度分布[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(1): 1-4.
- [10] 李思杰, 马俊平, 平杰红, 等. 基于Abaqus的放射性光源激光封割技术仿真研究[J]. 同位素, 2019, 32(5): 355-359.
- [11] 杨慧杰, 田芳, 郭卫. 玻璃的激光切割[J]. 玻璃, 2018, 45(8): 25-27.
- [12] COMSOL Multiphysics® v. 5.5. [OL]. <http://cn.comsol.com/>.
- [13] Mickael C, Muriel C, Philippe L M, et al. A complete model of keyhole and melt pool dynamics to analyze instabilities and collapse during laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 2014, 26(4): A3-42001.9.
- [14] FREI W. 借助Beer-Lambert定律模拟激光与材料的相互作用[OL]. <https://cn.comsol.com/blogs/modeling-laser-material-interactions-with-the-beer-lambert-law>.
- [15] PANWISAWAS C, PERUMAL B, WARD R M, et al. Keyhole formation and thermal fluid flow-induced porosity during laser fusion welding in titanium alloys: Experimental and modelling[J]. Acta Materialia, 2017, 126(3): 251-263.
- [16] TOMASHCHUK I, BENDAOU I, SALLAMAND P, et al. Multiphysical Modelling of Keyhole Formation during Dissimilar Laser Welding[C]// Excerpt from the Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Munich.
- [17] EBRAHIMI A, SATTARI M, BREMER S J L, et al. The influence of laser characteristics on internal flow behaviour in laser melting of metallic substrates[J]. Materials & Design, 2022, 214(2): 110385.
- [18] MUJUMDAR S S, DAVIDE C, KAPOOR S G. Modeling of Melt-Pool Formation and Material Removal in Micro Electro-Discharge Machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, 137(3): 031007.
- [19] BRUYERE V, TOUVREY C, NAMY P, et al. Comparison between Phase Field and ALE Methods to model the Keyhole Digging during Spot Laser Welding[C]// The Proceedings of the 2013 COMSOL Conference in Rotterdam.

作者简介:

马俊平 (1982—), 通信作者, 男, 汉族, 四川内江人, 硕士, 高级工程师。研究方向: 放射性同位素技术。
E-mail: mars2k@163.com

李思杰 (1986—), 男, 汉族, 广东湛江人, 研究生, 高级工程师。研究方向: 放射性同位素技术。

李雪 (1990—), 女, 汉族, 河北衡水人, 博士研究生,

工程师。研究方向: 放射性同位素技术。

平杰红 (1975—) 男, 汉族, 北京人, 本科, 高级工程师。研究方向: 放射性同位素技术。

李鑫 (1976—), 男, 汉族, 甘肃兰州人, 本科, 正高级工程师。研究方向: 放射性同位素技术。

(收稿日期: 2023-05-10)

Simulation Study on Multiphysical Field Coupling of Sealing and Cutting Gaseous Radioisotope Light Sources Using Dynamic Laser

MA Junping, LI Sijie, LI Xue, PING Jiehong, LI Xin
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Sealing and cutting gaseous radioisotope light sources using dynamic laser involves complex dynamic physical processes such as heat transfer, melting, flow, vaporization, solidification and rotation. These physical processes are influenced by each other and they are also influenced by many process parameters, so it is necessary to adopt multiphysical field coupling simulation method to carry out the study. By using COMSOL Multiphysics, the mathematical model was established, and the sealing and cutting process using dynamic laser was simulated. The effects of the rotating speed of high borosilicate glass shell and the laser power on the temperature distribution and the morphology of molten pool were investigated. Findings: The faster the rotation speed of glass shell, the smaller the molten pool area and the longer the sealing time. The highest temperature in the irradiated area of the glass shell of gaseous radioisotope light source is about 1 600 °C. When the laser power is 15 W and the rotating speed of glass shell is 400 r/min, the sealing and cutting time is about 0.65 s. Compared with the experimental results of thermal imaging equipment, the simulation results are basically in line with the actual situation, and the temperature distribution in the irradiated area is approximately Gaussian, which is consistent with the assumption of laser heat source distribution adopted in the process simulation.

Keywords: Radioisotope Light Source; Sealing and Cutting Using Dynamic Laser; Multiphysical Field Coupling; High Borosilicate; Laser Heat Source

基于机器视觉的PCB裸板焊盘识别与提取方法

张定恒¹, 王守印¹, 叶世林¹, 洪惠群², 郑文斌¹, 朱寒³, 林丽^{1,2}

(1. 福建工程学院电子电气与物理学院, 福建福州 350118;

2. 福建省空间信息感知与智能处理重点实验室(阳光学院), 福建福州 350015;

3. 徐州三新供电服务有限公司睢宁分公司, 江苏徐州 221200)

摘要: 印刷电路板(PCB)裸板焊盘缺陷检测是PCB生产工艺中不可或缺的一环, 技术已相对成熟, 但准确性和实时性有待进一步提升。提出一种基于机器视觉的PCB裸板焊盘识别与提取方法。将图像单通道提取、图像去噪、图像增强、图像定位及焊盘提取等关键技术相融合, 提取RGB图像的R通道进行双边滤波以及增强, 完成预处理, 再利用大津法实现焊盘定位, 最后结合采用最小外接矩形实现焊盘提取与标记。搭建了基于机器视觉的检测系统平台, 开展了软硬件设计, 对不同环境下采集的三个PCB裸板进行处理时间对比, 表明该方法在保证准确性的前提下具有较好的实时性, 平均处理时间仅为0.052 4 s。

关键词: 机器视觉; 印刷电路板; 焊盘识别; 焊盘提取; 大津法; 最小外接矩形

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-026-09

工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.004

0 引言

随着我国制造业迈向高端化智能化绿色化发展阶段, 工业产品检测技术的应用范围不断扩大, 为确保工业产品质量提供了坚实保障。印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)焊盘缺陷检测是PCB生产工艺中不可或缺的一环, 而PCB焊盘识别与提取又是正式开展缺陷检测的必要前置环节, 其实时性和准确性直接影响缺陷检测全流程效率和效果。

PCB焊盘识别与提取的传统手段包括Hough变换方法、中心定位算法、最小外接矩形方法等。杜培明等^[1]提出了一种基于Hough变换方法的PCB焊盘识别方法。虞继敏等^[2]针对PCB焊盘圆孔的不规则性问题, 焊盘圆孔内部的黑斑、暗影

以及焊盘连接线没有完全嵌在金属内部的问题, 提出了一种基于PCB飞针测试的焊盘圆孔中心定位算法, 有效提高了检测精度。柳露艳等^[3]提出了一种基于最小外接矩形方法的人眼快速定位方法。林德育等^[4]提出了一种基于最小外接矩形方法的SOP贴片元件定位识别方法。

近年来, 随着图像处理技术与深度学习技术的快速发展, 众多学者将这些先进技术与工业图像识别、提取、检测等环节相结合, 进一步增强了检测效果。贾玉兰等^[5]提出了一种对不规则珠宝图像进行主成分分析的自动定位和检测方法。张展等^[6]提出了一种基于图像分割的工件定位与识别方法。郭联金等^[7]设计了神经网络分类器, 提取PCB上导线及焊盘的特征作为输入, 通过神经网络训练构建了用于缺陷检测的MLP神经网络模型。陈东强等^[8]提出了一种以PCB打孔点为基准, 利用图像处理技术实现PCB图像定位的方法。韩金岳^[9]提出了一种基于灰度投影积分法的铁路扣件定位方法。刘莉等^[10]

基金项目:

福建工程学院本科教学改革研究项目(JG2021020); 福建省空间信息感知与智能处理重点实验室(阳光学院)开发基金(FKLSIPIP1005)

将贝叶斯模型与阈值分割相结合, 通过求得最佳分割阈值, 提高了PCB焊盘图像分割精度。

虽然以上研究工作卓有成效, 但实时性和准确性仍有很大改进空间。本文将先进的机器视觉技术与检测算法相结合, 提出一种融合了图像单通道提取、图像去噪、图像增强、图像定位及焊盘提取等关键技术的PCB裸板焊盘识别与提取方法, 并搭建机器视觉检测系统平台, 对本文方法的检测效率和效果与传统方法进行对比, 凸显本文方法的实时性和准确性。

1 PCB裸板焊盘识别与提取方法中的关键技术

本文提出的PCB裸板焊盘识别与提取方法的实现过程如图1所示。该方法包括图像预处理、图像分割及焊盘提取三个步骤。

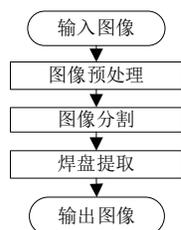


图1 PCB裸板焊盘识别与提取方法流程图

1.1 图像预处理

本文采用的图像预处理流程如图2所示。

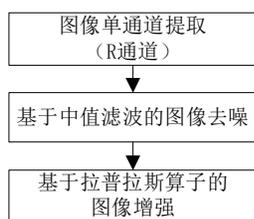
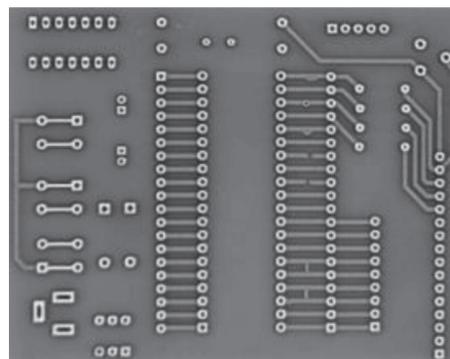


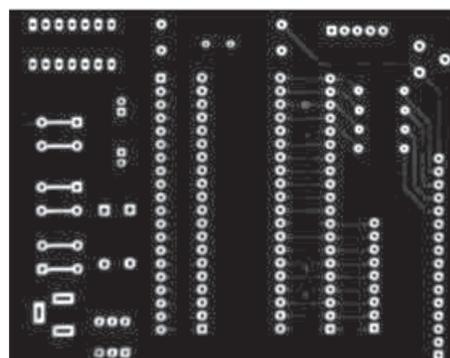
图2 图像预处理流程

原始输入图像为RGB图像(如图3a所示)。考虑到图像的不同通道具有不同的细节信息, 而R通道图像得到的细节相对更为清晰, 因此在预处理中, 直接用R通道图像替代常见的灰度化操作(如图3b所示)。针对单通道图像, 利用中值滤波算子实现图像去噪(如图3c所示), 并引入拉普拉斯算子实现图像增强(如图3d所示)。

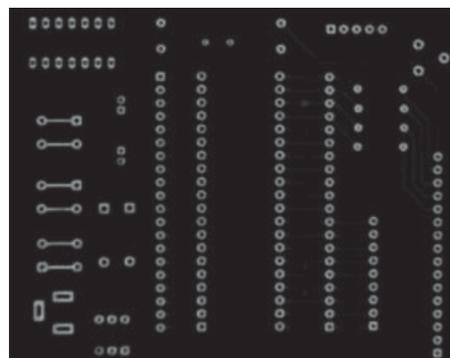
计算过程具体如下所示。



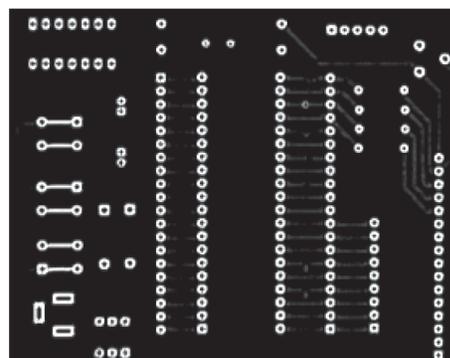
(a) 原始输入图像



(b) 单通道提取图像 (R通道)



(c) 去噪后图像



(d) 增强后图像

图3 图像预处理过程

将二维函数图像 $f(x,y)$ 的二阶微分(拉普拉斯算子)定义为

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (1)$$

针对离散的二维函数图像 $f(x,y)$ ，可作如下近似计算：

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= (f(i+1,j) - f(i,j)) - \\ &\quad (f(i,j) - f(i-1,j)) \quad (2) \\ &= f(i+1,j) + f(i-1,j) - 2f(i,j) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} &= (f(i,j+1) - f(i,j)) - \\ &\quad (f(i,j) - f(i,j-1)) \quad (3) \\ &= f(i,j+1) + f(i,j-1) - 2f(i,j) \end{aligned}$$

将式(2)与式(3)相加，拉普拉斯算子转化为

$$\begin{aligned} \nabla^2 f(x,y) &= f(i+1,j) + f(i-1,j) + \\ &\quad f(i,j+1) + f(i,j-1) - \\ &\quad 4f(i,j) \quad (4) \end{aligned}$$

根据式(4)可得卷积核模板为

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

本文采用45°旋转各向同性的滤波器对式(5)进行处理，以增强边缘，得

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ 或 } \mathbf{w} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.2 基于大津法的焊盘识别

大津法由Otsu于1979年所提出^[11]，因此又称Otsu算法。该算法基于整幅图像的统计特性实现阈值自动选取，是一种最大类间方差法。该算法的核心是假设图像的阈值为 T ，将图像的灰度值划分为两个小组，计算每一个小组的方差，当两个小组的之间的方差达到最大时，对应的阈值即为最佳阈值^[12]。此时，根据求取的最佳阈值对图像进行分割即可。

具体而言，设获取的一幅图像有 M 个灰度值，故灰度范围是 $0 \sim M-1$ 。在灰度值范围内选择一个阈值 T ，将图像的灰度值划分为两个小组 G_0 、 G_1 。 G_0 对应的灰度值范围是 $0 \sim T$ ， G_1 对应的灰度

值范围是 $T+1 \sim M-1$ 。设 N 为图像中的像素总量， n_i 为灰度值为 i 的像素数量，则灰度值为 i 的概率为 $p_i = n_i/N$ 。假设两组图像对应的像素数目占总体像素数目的概率分别为 w_0 、 w_1 ，对应平均灰度值分别为 u_0 、 u_1 ，则有

$$\begin{cases} w_0 = \sum_{i=0}^T p_i \\ w_1 = \sum_{i=T+1}^{M-1} p_i = 1 - w_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_0 = \sum_{i=0}^T ip_i \\ u_1 = \sum_{i=T+1}^{M-1} ip_i \end{cases} \quad (8)$$

根据以上结果，可以计算出图像总体的平均灰度值为

$$u = w_0 \times u_0 + w_1 \times u_1 \quad (9)$$

类间方差为

$$g(t) = w_0(u_0 - u)^2 + w_1(u_1 - u)^2 = w_0 w_1 (u_0 - u_1)^2 \quad (10)$$

最佳阈值为

$$T = \operatorname{argmax}(g(t)) \quad (11)$$

式(11)中： T 值即为使得式(10)最大的值。

1.3 基于最小外接矩形的焊盘提取

文献[13]提出了两种基于二值化图像拓扑分析的边界跟踪算法。一是确定二值化图像边界之间的邻域关系，根据外部边界和像素1、圆孔和像素0分别具有的一一对应关系，产生二值图像，且不需要重建图像即可从该图像中提取某种特征；二是对第一种算法进行改进，只对未被孔包围的外部边界进行跟踪。

本文实现焊盘提取的步骤为：首先提取焊盘轮廓，其次计算最小外接矩形。根据文献[13]中的轮廓检测原理，提取通过大津法处理后的输出图像轮廓。针对输出图像轮廓，引入旋转目标法^[3]计算最小外接矩形。使用旋转目标法可以在图像中检测出物体的外接矩形，其基本思想是将检测目标在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内进行等间隔旋转，统计每次的轮廓在坐标系方向上的外接矩形参数，通过计算外接矩形面积以提取具有最小面积的矩形^[14]。

2 实验验证

2.1 机器视觉检测系统平台搭建

在分析现有检测系统通用结构基础上, 搭建出一套基于机器视觉的、具有自动对焦功能的焊盘缺陷检测系统。本系统实物图如图4所示。

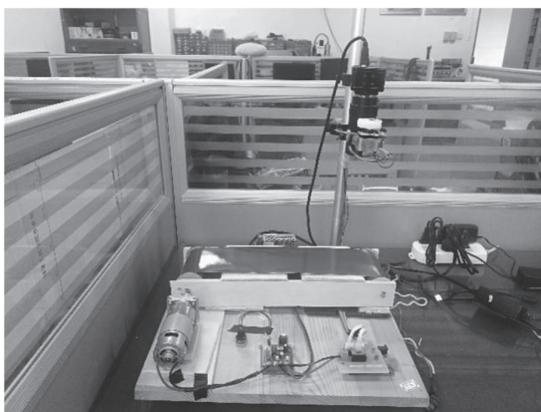


图4 机器视觉检测系统平台

2.1.1 系统硬件部分

本系统硬件部分参照应用于工业现场的常见机器视觉系统来设计, 主要包括视觉检测系统与载物台(如产品流水线等)两个部分。在部分模块中还包括反馈控制部分(如对机械手的控制等)。

机器视觉检测系统框图如图5所示。系统由工业相机、镜头和PC组成的视频采集、显示与处理模块, 由步进电机、驱动器、光电开关和Arduino单片机组成的自动对焦控制模块, 以及由Arduino单片机和LED灯组成的反馈控制仿真模块组成。

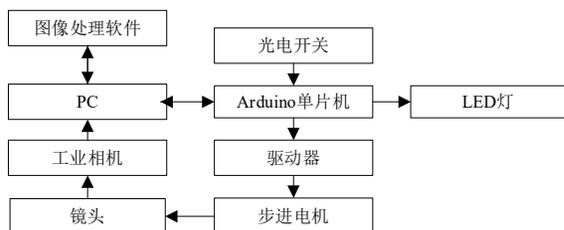


图5 机器视觉检测系统框图

载物台即传送模块, 为独立控制部分, 主要是由PVC皮带和木板组成的简易传送带。主动轴和被动轴使用管状物体加上圆形木片和螺杆制成, 动力使用24 V直流减速电机。皮带负责待测物体的传送过程。

2.1.2 系统软件部分

系统软件部分包括上位机与下位机。上位机(PC)部分实现视频图像采集、显示与处理, 并与下位机(单片机)实现信号的传输, 此部分程序使用C++语言编写, 采用Visual C++平台的MFC类库和OpenCV图像库。下位机除了实现与上位机通信外, 还接收来自限位传感器的信号及发送LED灯控制信号, 此部分程序采用C语言实现。上位机和下位机之间的通信通过串口完成, 上位机软件程序中引入串口通信控件mscomm^[15]。

系统信号传输流程如图6所示。在所有信号传输中, 仅PC与单片机之间是双向传输。

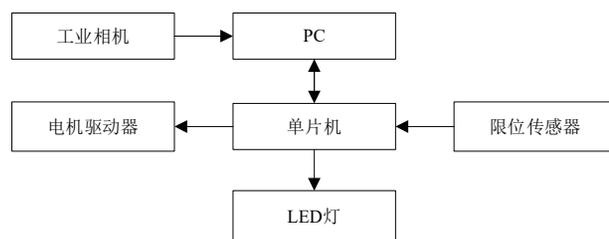


图6 系统信号传输流程

上位机程序主流程图如图7所示, 涵盖了图像采集与显示、自动对焦及视觉检测全过程。

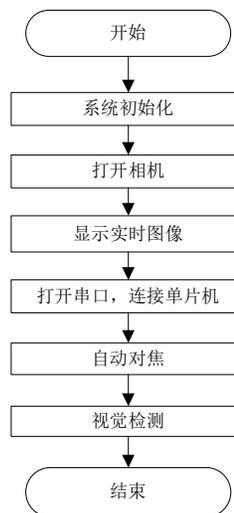


图7 上位机程序主流程图

2.2 算法实现以及对比

在搭建的机器视觉检测系统平台基础上, 采用安装了Windows 10 64位操作系统的PC, 基于

x64的、主频为2.20 GHz的处理器，8 GB内存，840 MB显存。运用Visual Studio 2017实验平台，结合OpenCV 3.4.0函数库，验证本文提出的PCB裸板焊盘识别与提取方法的性能，并与Hough变换法^[1]、AdaBoost级联分类器检测法^[16]进行对比。实验所用的三块PCB裸板图像均由机器视觉检测系统采集得到。图8所示为利用基于大津法的焊盘识别方法对PCB裸板焊盘进行识别的结果。

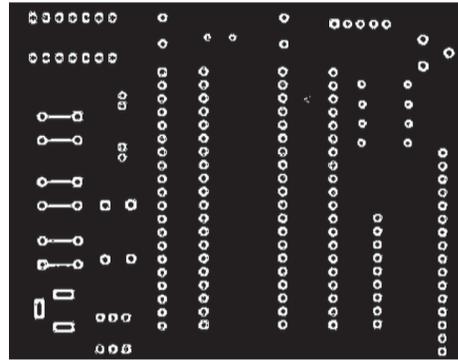


图8 基于大津法的焊盘识别

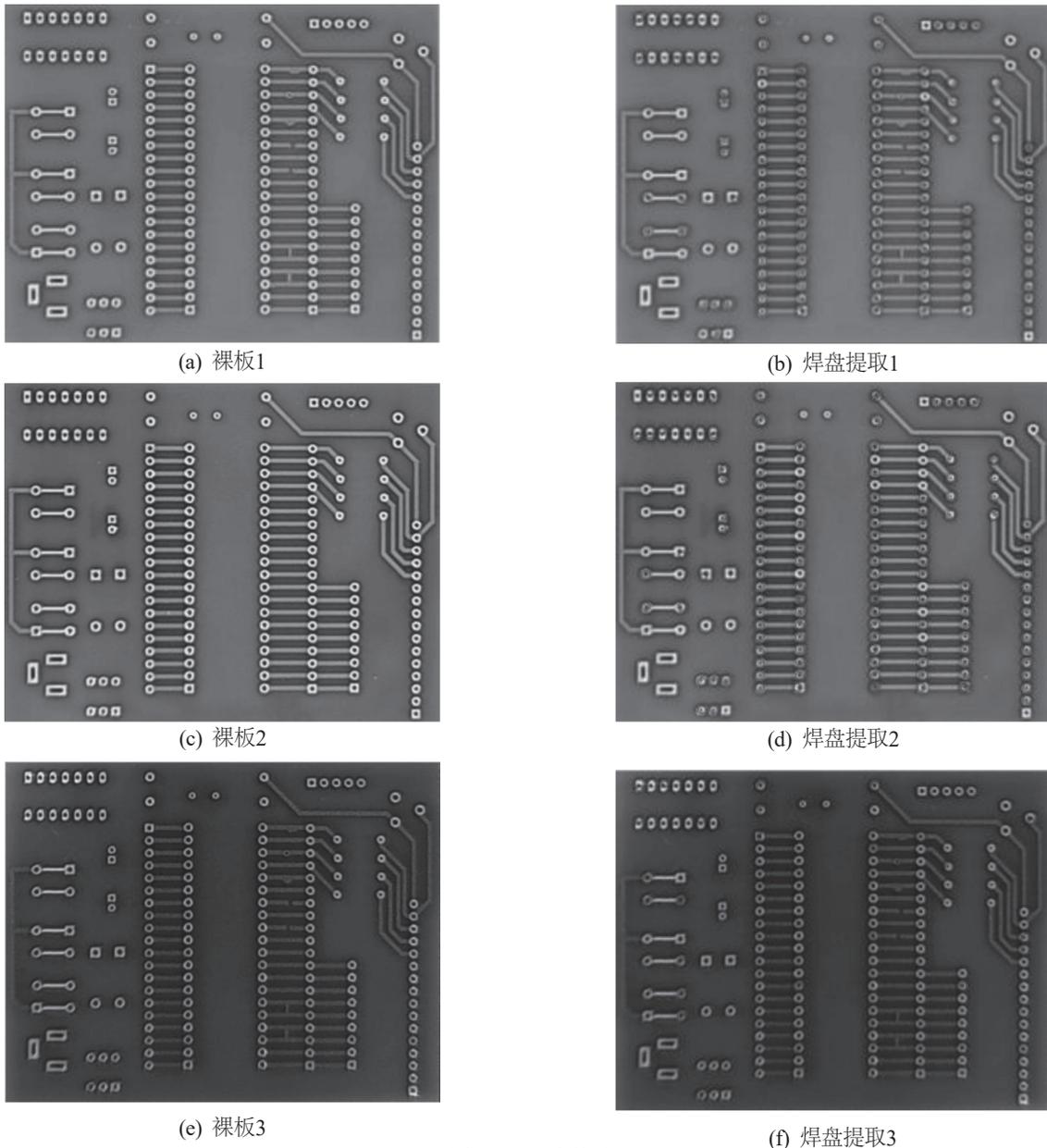
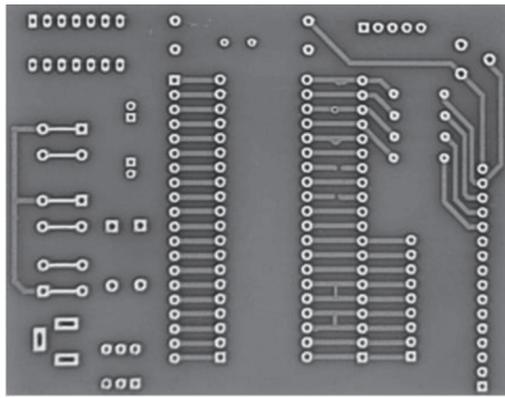
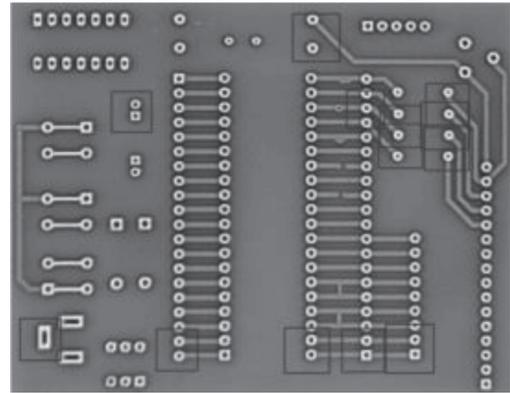


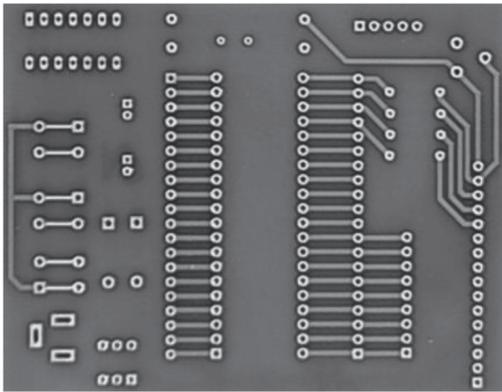
图9 Hough变换法



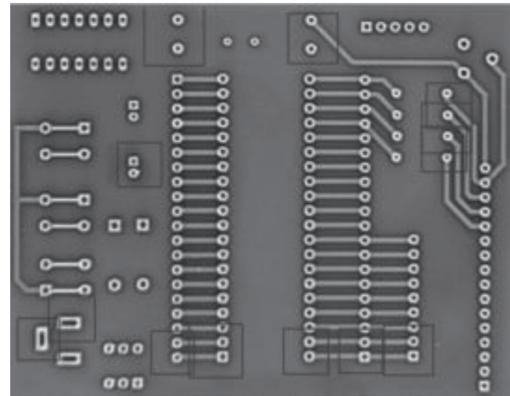
(a) 裸板1



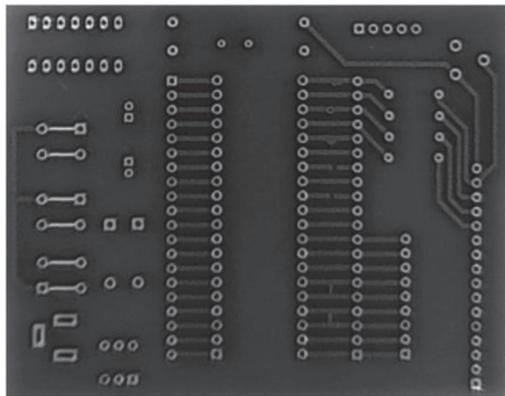
(b) 焊盘提取1



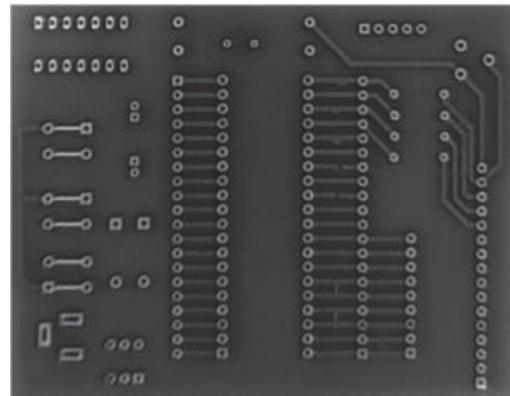
(c) 裸板2



(d) 焊盘提取2

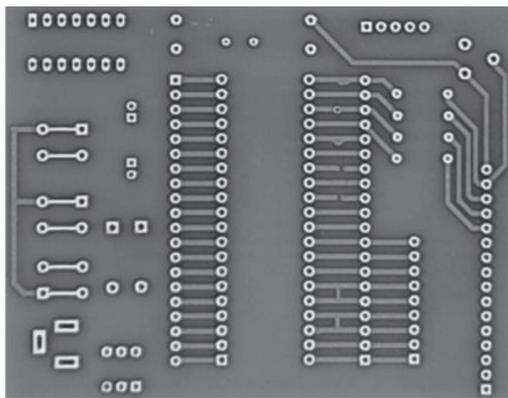


(e) 裸板3

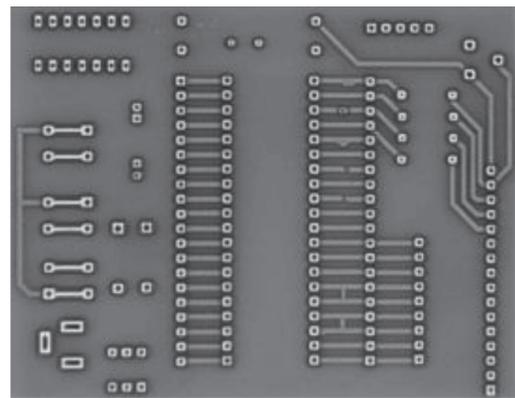


(f) 焊盘提取3

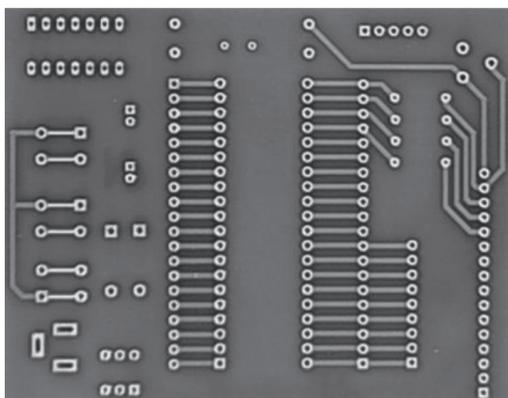
图10 AdaBoost级联分类器检测法



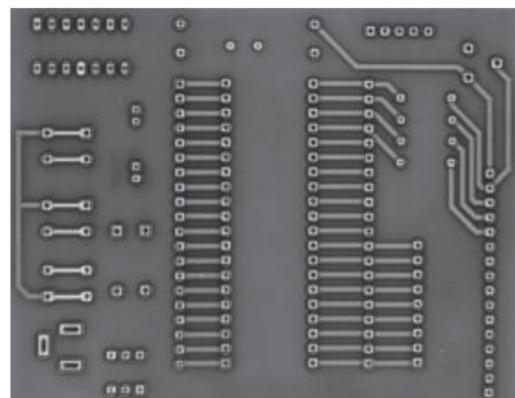
(a) 裸板1



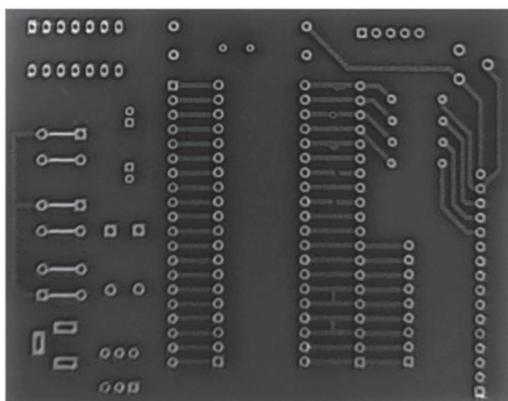
(b) 焊盘提取1



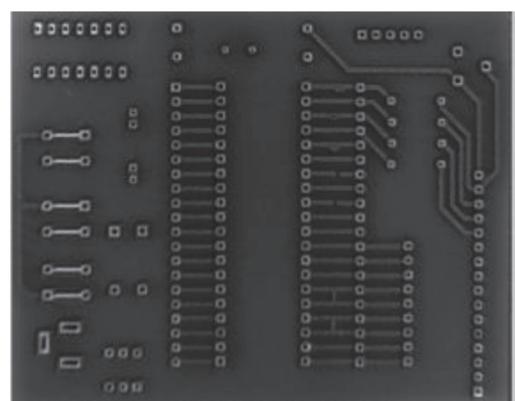
(c) 裸板2



(d) 焊盘提取2



(e) 裸板3



(f) 焊盘提取3

图11 本文方法

图9~11为三种方法的结果对比, 需要说明的是, 为了使对比效果更直观, 三种方法均在得到最终结果后, 将结果显示于原RGB图中。

通过实验结果对比可以发现, 利用本文方法进行PCB裸板焊盘识别与提取的结果优于其他两种方法。

表1所示为不同环境下采集的三个PCB裸板在三种方法下所用的时间对比。可以看出, 本文提出的方法具有卓越的实时性, 平均处理时间仅为0.052 4 s, 约是Hough变换法的四分之一、AdaBoost级联分类器检测法的十分之一。需要说明的是, 针对三组不同的图像和处理方法, 实验过程中分别取五次运行时间, 计算平均值作为该方法的最终执行时间, 以增强实验的公允性。

表1 不同方法处理时间对比

裸板	方法	Hough变换法	AdBoost法	本文方法
	裸板 1	时间/s	0.224 8	0.565 0
裸板 2	方法	Hough变换法	AdBoost法	本文方法
	时间/s	0.230 3	0.644 5	0.054 5
裸板 3	方法	Hough变换法	AdBoost法	本文方法
	时间/s	0.221 5	0.629 4	0.051 3

3 结束语

为提升PCB裸板焊盘识别与提取方法的准确性和实时性, 本文提出了一种基于机器视觉的PCB裸板焊盘识别与提取方法。针对PCB裸板焊盘图像特点, 在预处理中直接用R通道图像来替换常见的灰度化操作; 为增强边缘, 采用45°旋转各向同性的滤波器增强图像; 利用大津法结合轮廓检测, 引入旋转目标法计算最小外接矩形实现焊盘定位。为验证算法的性能, 本文搭建了一个机器视觉检测系统。实验结果表明, 本文所提出的算法具有较好的准确性及实时性, 平均处理时间仅为0.052 4 s。

参考文献

- [1] 杜培明, 赵玉贵, 陈亮. 随机Hough变换识别PCB圆形焊盘[J]. 中国仪器仪表, 2009(2): 73-75.
- [2] 虞继敏, 谭礼健, 周尚波. PCB测试飞针运动控制的焊盘圆孔中心定位[C]//第28届中国过程控制会议(CPCC 2017)

暨纪念中国过程控制会议30周年. 2017.

- [3] 柳露艳, 王直杰. 一种快速人眼精确定位算法[J]. 电子设计工程, 2014, 22(6): 40-42.
- [4] 林德育, 肖曙红, 麦智伟. 基于最小外接矩形的SOP贴片元件的定位识别[J]. 现代制造工程, 2017(9): 133-138.
- [5] 贾玉兰, 霍占强, 侯占伟, 等. 基于主成分分析的珠宝自动定位及检测方法[J]. 计算机应用, 2016, 36(10): 2922-2926.
- [6] 张展, 杨东升. 运用图像分割的工件定位与识别方法的研究[J]. 小型微型计算机系统, 2016, 37(9): 2070-2073.
- [7] 郭联金, 谢跃信, 罗炳军. 基于亚像素的PCB表面质量检测[J]. 电子质量, 2018(6): 8-13.
- [8] 陈东强, 彭亚涛, 金戈. 基于图像处理的印刷板打孔定位与实现[J]. 福建轻纺, 2018(8): 29-36.
- [9] 韩金岳. 图像处理中的铁路扣件定位方法[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(3): 182-184.
- [10] 刘莉, 陈玉, 程军, 等. 基于贝叶斯模型的印刷电路板ECT图像分割与识别方法[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(9): 1-8.
- [11] OTSU N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 2007, 9(1): 62-66.
- [12] 李刚, 韩建国. PCB图像检测中阈值化分割的研究[J]. 北京化工大学学报, 2002, 29(4): 72-74.
- [13] SUZUKI S, ABE K. Topological structural analysis of digitized binary images by border following[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 30(1): 32-46.
- [14] 张法全, 王国富, 曾庆宁, 等. 利用重心原理的图像目标最小外接矩形快速算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1382-1387.
- [15] 章辉, 叶建芳, 叶建威. 基于MSComm控件串口通信的实现[J]. 电子测量技术, 2011, 34(8): 126-129.
- [16] 降爱莲, 杨兴彤. 基于AdaBoost-SVM级联分类器的行人检测[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(7): 2547-2550, 2565.

作者简介:

张定恒 (2001—), 男, 贵州普安人, 本科生在读。研究方向: 机器视觉。

E-mail: zhangdh1517@163.com

王守印 (1996—), 男, 山西大同人, 硕士研究生在读。

研究方向: 机器视觉、深度学习。

叶世林 (1996—), 男, 福建南平人, 硕士研究生在读。

研究方向: 图像质量控制、深度学习。

洪惠群 (1984—), 女, 福建泉州人, 硕士, 讲师。研究方向: 图像处理、计算机视觉、表情识别。

郑文斌 (1980—), 女, 福建三明人, 硕士, 副教授。研究方向: 信息隐藏, 机器视觉、无线通信等。

林丽 (1983—), 通信作者, 女, 福建福州人, 硕士, 讲师。研究方向: 机器视觉、图像质量评价。

E-mail: lily6568@qq.com

(收稿日期: 2023-04-24)

The Pad Recognition and Extraction Method of PCB Bare Board Based on Machine Vision

ZHANG Dingheng¹, WANG Shouyin¹, YE Shilin¹, HONG Huiqun², ZHENG Wenbin¹, ZHU Han³, LIN Li^{1,2}

(1. School of Electronic, Electrical and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Key Laboratory of Spatial Information Perception and Intelligent Processing (Yango University), Fuzhou 350015, China

3. Suining Branch of Xuzhou Sanxin Power Supply Service Co., Ltd., Xuzhou 221200, China)

Abstract: The pad defect detection of printed circuit board (PCB) bare board is an indispensable part of the PCB production process. Its technology is relatively mature, but the accuracy and real-time feature need to be further improved. A pad recognition and extraction method of PCB bare board based on the machine vision was proposed. By integrating the key technologies such as image single channel extraction, image denoising, image enhancement, image positioning and pad extraction, the R channel of the RGB image was extracted for the bilateral filtering and enhancement to complete the pre-processing; the pad location was realized by the Otsu's method. Finally, the pad was extracted and marked in conjunction with the minimum enclosing rectangle. A detection system platform based on the machine vision was built, the software and hardware design were performed and the processing time of three PCB bare boards collected in different environments were compared, showing that such a method has good real-time performance on the premise of ensuring accuracy, and the average processing time is only 0.052 4 s.

Keywords: Machine Vision; Printed Circuit Board; Pad Recognition; Pad Extraction; Otsu's Method; Minimum Enclosing Rectangle

一种基于时频检测的雷达信号能量门限检测方法 及其FPGA工程实现

张宇祥, 黄明, 姜超, 周元翰, 郭宇航
(北方工业大学电子信息学院, 北京 100144)

摘要: 单一的雷达信号能量检测方法和时频检测方法存在受制于初始经验参数精度、时间复杂度和空间复杂度较大等局限, 已经无法适应低信噪比、快速变化电磁环境下的雷达信号检测。为解决上述问题, 推动新体制雷达技术发展, 提出一种通过检测信号时频谱来实现信号能量门限检测的方法。新方法利用了雷达信号绝大部分能量集中在整个信号带宽中较窄频带范围内这一特性, 通过检测时频变化趋势来捕获有效脉冲, 给工程节省了大量的计算时间和逻辑资源。为考虑FPGA工程实现需求, 规避了FPGA内的除法运算。经验证, 新方法适用于PFM、LFM、SFM、TLFM、NP等常见类别的雷达信号检测, 可以广泛适应0 dB、10 dB、20 dB等信噪比环境, 并且在0 dB低信噪比环境压力测试下依然可以实现有效识别, 工程应用潜力较强。

关键词: 雷达信号; 门限检测; 时频检测; FPGA工程实现; 低信噪比

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-035-07
工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.005

0 引言

新体制雷达技术不断发展, 雷达所处电磁环境变得复杂多变。常规的雷达信号检测方法是首先计算信号的模, 然后将信号的模与某个固定的检波值(即门限)进行对比。如果门限设置过低, 则会造成虚警概率大大增加; 而门限过高, 则会导致信号漏检。在现实应用中, 自动增益控制(AGC)可用于自动跟踪信号, 得到动态的门限, 但是门限收敛速度较慢, 在面对复杂的电磁环境时无法快速响应, 极大影响了信号特征的识别和分选。

针对以上问题, 国内外很多专家学者开展了相应研究。在信号检测方面, 有学者从能量、时频等多个维度开展了研究。阎啸等^[1]利用CORDIC算法, 在频域上实施实时的数字检波, 以识别雷达信号。崔翠梅等^[2]通过实验估计噪声功率, 根

据噪声实际波动情况灵活调整检测门限, 与传统的能量检测算法相比, 该算法在低信噪比环境下感知性能更优。黄河等^[3]针对一般的高斯白噪声环境, 基于双门限能量检测, 计算出动态自适应门限, 并利用其提高检测概率。李雷等^[4]利用FPGA+AD9361硬件平台改良了雷达接收机, 利用多级对数放大和双门限方法检测雷达信号。以上算法从各自的技术路径出发, 在信号捕获方面取得了卓有成效的进展, 但也存在各自的局限性: 能量检测受制于初始经验参数的精度, 在复杂电磁环境中缺少自适应调节手段; 相比能量检测, 时频检测效果有显著改善, 但由于算法时间复杂度和逻辑资源限制, 难以在实际工程中得到有效推广应用。

为有效解决上述问题, 本文提出一种基于时频检测的雷达信号能量门限检测方法, 并在FPGA中进行工程实现。该方法的提出主要基于如下考

虑：一是雷达信号是一种脉冲信号，绝大部分能量集中在整个信号带宽中较窄的频带范围；二是噪声信号通常符合随机高斯分布，频谱变化幅度很大，便于识别。利用以上频率分布及变化趋势，将对较恶劣的电磁环境具有更强的适应性，从而使得该方法在复杂多变的电磁环境下仍然能够准确捕获有效的雷达信号。

1 时频检测算法

信号时频检测算法通常具有较高的空间复杂度或者时间复杂度，难以实现快速计算。例如，快速傅里叶变换、小波变换等时频检测算法通过多次迭代，以牺牲时间和硬件资源为代价准确获取信号的频率特征参数。但是，在门限检测中往往并不需要非常高的精度。为了给工程节省尽可能多的计算时间和逻辑资源，设计一种稳定的、具有较低复杂度的实时算法显得十分必要。

复信号的瞬时相位计算公式、频率—相位转换公式分别如式(1)、式(2)所示：

$$\varphi(m) = \arctan \left[\frac{Q(m)}{I(m)} \right] \quad (1)$$

$$f(m) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\varphi(m)}{dm} \quad (2)$$

式(1)~(2)中： $I(m)$ 、 $Q(m)$ 、 $\varphi(m)$ 、 $f(m)$ 分别为信号的实部、虚部、相位、频率。

将式(1)代入式(2)并整理，得到

$$f(m) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{Q'(m) \times I(m) - Q(m) \times I'(m)}{I^2(m) + Q^2(m)} \quad (3)$$

由于在FPGA中，信号是离散的，最小的时间单位是主时钟的一个时钟周期，因此式(3)中的导数可以转化为如式(4)所示的形式，展开并化简后可进一步得到式(5)。

$$f(m) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\frac{Q(m) - Q(m-1)}{m - (m-1)} \times I(m) - \frac{I(m) - I(m-1)}{m - (m-1)} \times Q(m)}{I^2(m) + Q^2(m)} \quad (4)$$

$$f(m) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{Q(m) \times I(m-1) - Q(m-1) \times I(m)}{I^2(m) + Q^2(m)} \quad (5)$$

在FPGA工程实现中，使用式(5)的缺点很明显：除法不易处理。对于这种情况，通常有两种手段：一是查找表，二是采用CORDIC算法。第一种方法所需要的硬件资源（逻辑单元）会随着

除法位数的上升而呈指数型上升；第二种方法的资源占用虽然在处理高位数除法时有较好的改善，但是无法在一个时钟周期内实时完成，算法的时间复杂度偏高。

据此，本文通过计算信号的相位差来反映信号频率。信号瞬时频率 $f_o(m)$ 的计算公式为

$$f_o(m) = \Delta\varphi(m) \times \frac{f_s}{2\pi} \quad (6)$$

式(6)中： f_s 是主频， $\frac{f_s}{2\pi}$ 是常数，所以相位差 $\Delta\varphi(m)$

就能够反映频率。信号的相位差如式(7)所示，以不同形式展开，可以分别得到式(8)和式(9)。

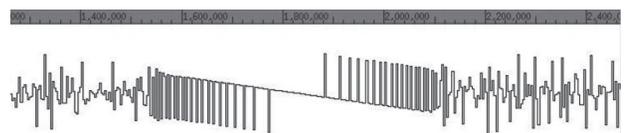
$$\Delta\varphi(m) = \varphi(m-1) - \varphi(m) \quad (7)$$

$$\Delta\varphi(m) = \arctan \left[\frac{Q(m-1)}{I(m-1)} \right] - \arctan \left[\frac{Q(m)}{I(m)} \right] \quad (8)$$

$$\Delta\varphi(m) = \arctan \left[\frac{Q(m) \times I(m-1) - Q(m-1) \times I(m)}{Q(m) \times Q(m-1) + I(m-1) \times I(m)} \right] \quad (9)$$

通过式(8)和式(9)两种表现形式在FPGA上计算出的结果分别如图1a、1b所示。调用Xilinx公司CORDIC IP核的结果范围是 $[-\pi, \pi]$ ，由图1a可以看出，两个相位直接相减有可能会超过 $[-\pi, \pi]$ 范围，造成较大的误差；而由图1b可以看出，使用式(9)可以避免上述问题。深入剖析式(9)可以得知，其优势是既避免了将除法运算留在FPGA内，节约了硬件资源，也使得信号频率特征变化可以得到实时反映。

由图1b还可以看出，具有高斯分布的噪声信号的频率变化是随机的，但是脉冲信号则只集中在较窄的频带范围内，相对变化率远小于噪声。作为一种新的脉冲门限分选手段，只需检测时频信号的变化趋势即可有效捕获脉冲。



(a) 利用式(8)计算出的结果



(b) 利用式(9)计算出的结果

图1 相位差计算结果比较

2 不同电磁环境下的雷达信号建模与仿真

本文的实现平台基于UltraScale+RFSoc芯片, 具有8个通道4.8 GHz采样率的ADC, 经过下变频处理可以得到2 GHz的带宽, 而常规的雷达信号带宽远小于2 GHz, 相比于高斯分布在2 GHz上的噪声信号, 在频谱上具有十分明显的区别, 有益于作为信号识别手段。同时, 检测结果受信噪比影响较小, 可以适应多种不同的信噪比环境。

鉴于本方法是基于相位进行计算的, 因此需要检验该方法能否在复杂电磁环境下避免白噪声影响。

雷达中常见的调频信号包括抛物线型调频信号(PFM)、线性调频信号(LFM)、正弦调频信号(SFM)、V型调频信号(TLFM)、单频信号(NP)^[5]。对应信号的时频谱图如图2所示。

鉴于CORDIC算法对噪声比较敏感, 而工程应用中噪声不可避免, 且对连续信号进行离散化处理也会引入一定噪声, 因此为检验新方法的抗噪性, 在不同的信噪比条件下进行激励信号仿真也是很有必要的。

通过数学建模生成的信号均为2.4 GHz采样率的复信号, 载频为1 300 MHz, 带宽为300 MHz, 信号脉冲宽度为3 μs , 总脉冲宽度为6 μs , 有效信号带宽占总信号的40%~90%。在添加0 dB、10 dB、20 dB信噪比的高斯白噪声的情况下, 方法的处理结果分别如图3a、3b、3c所示(调频信号从上到下依次是PFM、LFM、SFM、TLFM、NP)。可以看出, 利用新方法处理得到的信号时频变化趋势比较明显, 即使是在0 dB信噪比环境下, 也具有一定的可辨识度。同时, 无论信噪比如何, 信号和高斯白噪声的差别均十分明显, 可以作为后续门限验证的重要依据。

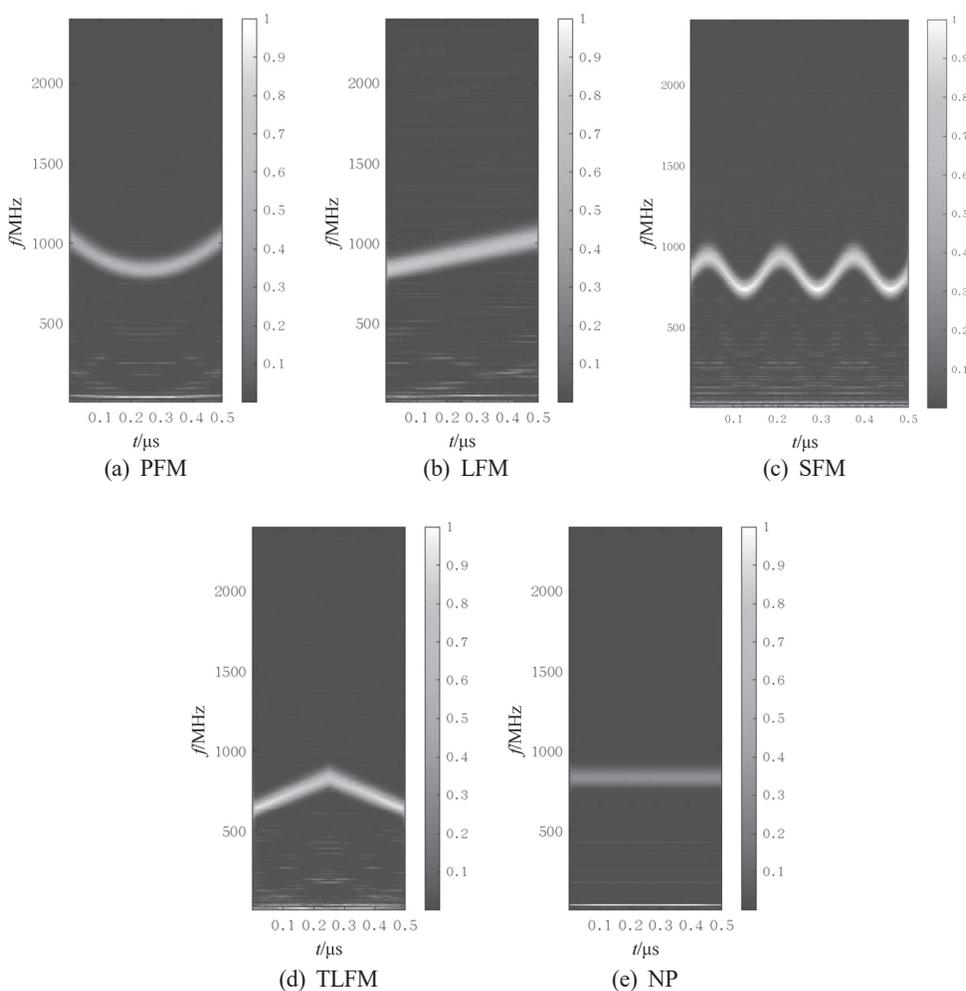


图2 5种常见调频信号的时频谱图

3 工程设计

3.1 工程架构设计

硬件采用Xilinx公司的UltraScale+RFSoc芯片，硬件描述语言为SystemVerilog语言，

软件综合设计和仿真平台为Vivado2021.2。对雷达接收的模拟信号，采用4.8 GHz采样率的ADC，采样精度为14位，经过下变频之后，串行转并行变为8路复信号。系统处理主时钟为300 MHz，理论上可以达到最高的有效带宽2.4 GHz。

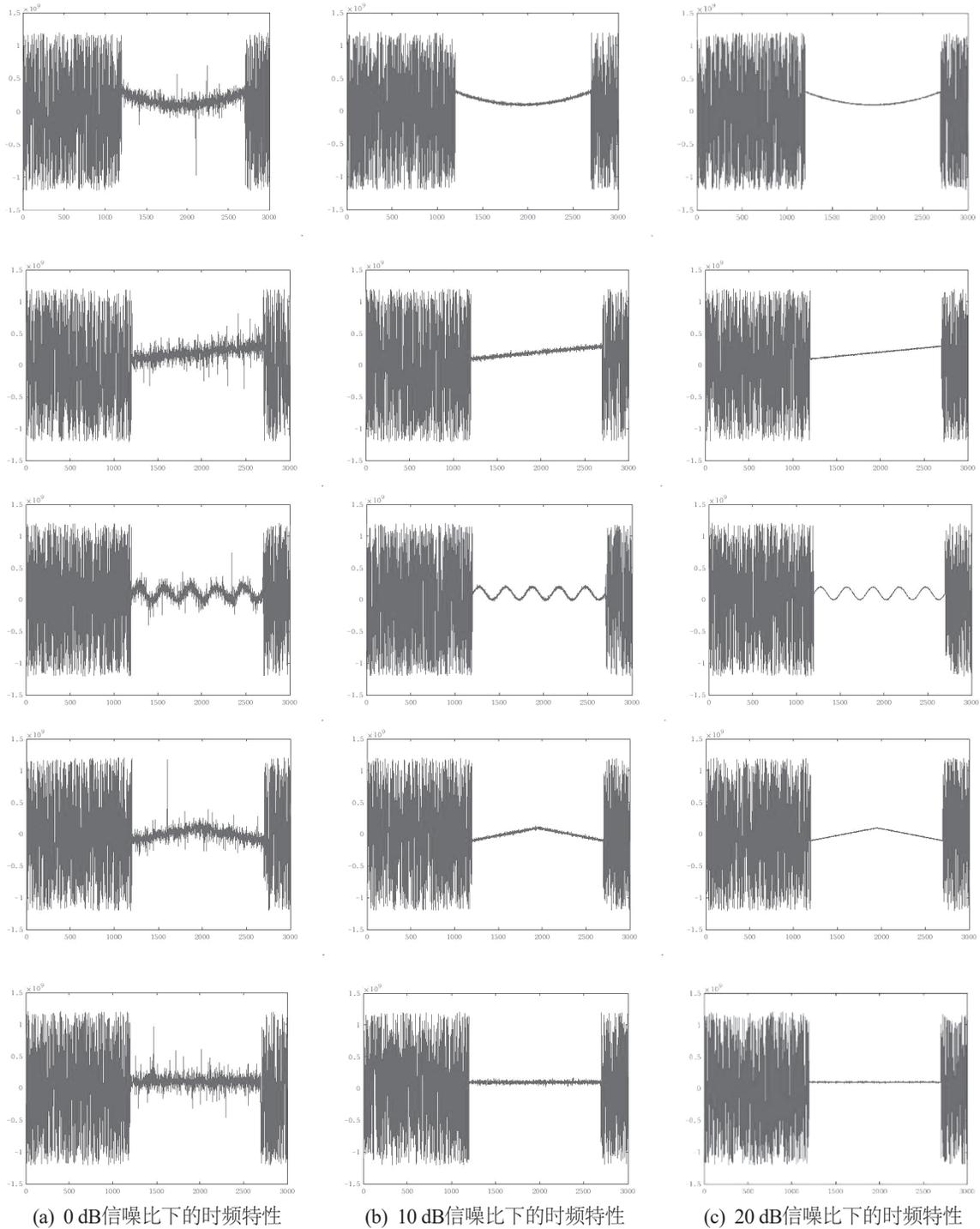


图3 不同信噪比下的时频特性

在架构设计中, FPGA采用了并行流水结构, 可以实时提取出脉冲信号的时频调制特征, 为之后的分选处理提供最迅速的数据支撑。

FPGA工程架构设计如图4所示。2.4 GHz的信

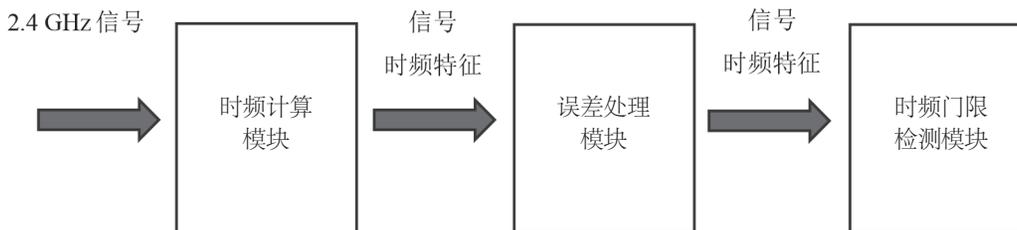


图4 FPGA工程架构设计

3.2 误差处理

如图5a所示, 受到接收机技术条件的限制, 接收信号的相位容易丢失, 这就会导致时频谱信号的误差。在实际验证时可以看出, 在总共7 200个离散点值中, 4个点出现异常情况。故添加一个有效信号判别模块, 只有当电平翻转持续4个时钟周期后, 才认为是真实翻转, 否则认为是毛刺, 予以忽略, 这就造成上升沿和下降沿的检测延迟4个时钟周期。如图5b所示, 经过误差处理模块的处理, 能够有效消除由相位丢失造成的误差。

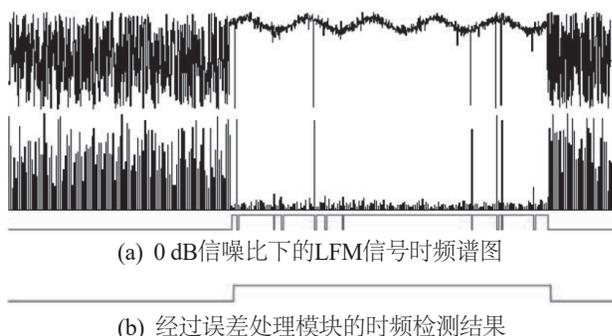


图5 误差处理示例

号进入时频计算模块, 根据式(9)得到信号的时频特征, 再进入误差处理模块, 消除由环境带来的误差, 最后根据处理后的结果作为信号门限的检波条件。

4 工程验证

4.1 针对不同电磁环境的验证

如表1所示, 检测了电磁环境变化的情况下(即信噪比为0、10、20 dB时)的检测结果对比。每个检测结果上半部分是检测值, 下半部分是根据检测值得到的判断结果。在传统检测方法中(表1改进前), 由于检波值是固定常数, 所以并不适应多种不同电磁环境, 而且在0 dB信噪比环境下, 噪声和信号门限过于接近, 使得误判情形非常多。而本文提出的新方法(表1改进后)受信噪比影响很低, 所以可以适应多种不同的电磁环境。

检测结果表明, 本文方法提取的时频特征比传统的能量检测更臻准确。

4.2 低信噪比条件下的压力测试

以PFM、LFM、SFM、TLFM、NP这5种调

表1 针对不同电磁环境的验证

结果类型	信噪比		
	0 dB	10 dB	20 dB
改进前	检测结果: [Noisy signal at 0 dB SNR] 判断结果: [Irregular detection results at 0 dB SNR]	检测结果: [Noisy signal at 10 dB SNR] 判断结果: [Irregular detection results at 10 dB SNR]	检测结果: [Noisy signal at 20 dB SNR] 判断结果: [Irregular detection results at 20 dB SNR]
改进后	检测结果: [Cleaner signal at 0 dB SNR] 判断结果: [Accurate detection results at 0 dB SNR]	检测结果: [Cleaner signal at 10 dB SNR] 判断结果: [Accurate detection results at 10 dB SNR]	检测结果: [Cleaner signal at 20 dB SNR] 判断结果: [Accurate detection results at 20 dB SNR]

频信号为序，生成0 dB信噪比信号送入工程架构，如图6a、6b、6c、6d、6e所示。每个子图第一行是信号的时频谱，第二行是根据时频谱计算处理来的信号频率变化趋势；第三行是根据频率变化判断得到的有效信号。可以看出，部分信号中有较多虚警信号，但本文提出的时频检测手段使得雷达信号在窄带频谱上非常集中，所以噪声信号十分明显，较好适应了多种不同的调频信号，也较好适应了非常恶劣的电磁环境，通过了压力测试。此外，该方法不需要提前设置检波值，对操作人员的经验要求低，也是一个不可忽视的应用优势。

5 结束语

为了在低信噪比、快速变化电磁环境下实现高质量的雷达信号检测，本文提出了一种通过雷达信号时频特征检测雷达信号能量门限的新方法。该方法无需设置初始检波值，规避了FPGA内的除法运算，几乎不受信号信噪比的影响，且给工程节省了大量的计算时间和逻辑资源。本文仿真了0 dB、10 dB、20 dB信噪比下的PFM、LFM、SFM、TLFM、NP这5种常见的雷达信号，结果表明本文提出的新方法能够适应多种电磁环境，且在低信噪比环境下进行压力测试也表现出卓越的性能，具有较强的工程应用价值。

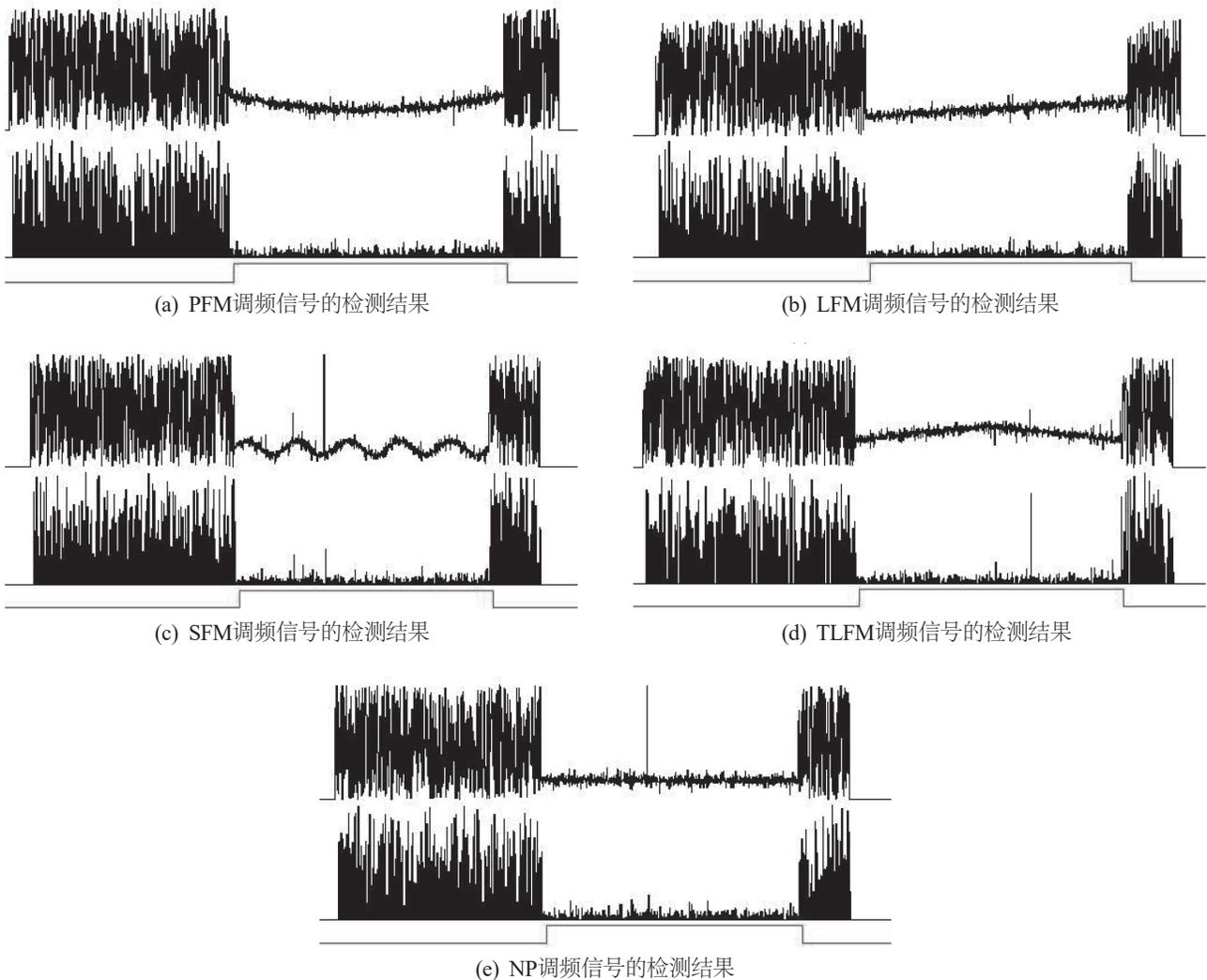


图6 5种调频信号在0 dB信噪比电磁环境下的压力测试

致谢

本课题受到北方工业大学大学生科学研究与创业行动计划、北方工业大学校内教改项目支持。

参考文献

- [1] 阎啸, 秦开宇, 高援开, 等. 基于CORDIC算法的频谱分析技术研究[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(3): 335-338.
- [2] 崔翠梅, 秦贵秋, 吴秋怡. 基于USRP2920与差分能量检测的双门限频谱感知算法实现[J]. 通信技术, 2022, 55(1): 14-20.
- [3] 黄河, 袁超伟. 基于动态自适应双门限能量检测的序贯协作频谱感知算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(5): 1037-1043.
- [4] 李雷, 严玉国, 杨宾峰. 二次雷达双门限检测接收机的研究及FPGA实现[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(8): 141-145.
- [5] 贲广利. 线性调频信号参数估计方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.

作者简介:

张宇祥 (1999—), 男, 电子信息工程专业在读研究生。
主要研究方向: 雷达信号侦察与分选。
E-mail: 13552983080@163.com

黄明 (1977—), 通信作者, 男, 高级实验师。主要研究方向: 弱信号采集与数字信号处理。
E-mail: huangmingncut@126.com

姜超 (2003—), 男, 电子信息工程专业在读本科生。主要研究方向: 数字信号处理。
E-mail: 3427264790@qq.com

周元翰 (2001—), 男, 电子信息工程专业在读本科生。主要研究方向: 数字信号处理。
E-mail: 2860303832@qq.com

郭宇航 (2002—), 男, 电子信息工程专业在读本科生。主要研究方向: 弱信号采集和数字信号处理。
E-mail: 2676568613@qq.com

(收稿日期: 2023-09-17)

A Radar Signal Energy Threshold Detection Method Based on Time-Frequency Detection and Its FPGA Engineering Implementation

ZHANG Yuxiang, HUANG Ming, JIANG Chao, ZHOU Yuanhan, GUO Yuhang
(North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Radar signal energy detection method or time-frequency detection method itself is limited by the accuracy of initial empirical parameters, time complexity and space complexity, which cannot adapt to the radar signal detection in low SNR and rapidly changing electromagnetic environments. In order to solve the above problems and promote the development of new hierarchy radar technology, a signal energy threshold detection method using the time-frequency spectrum detection was proposed. The new method takes advantage of the fact that most of the energy of radar signal is concentrated in the narrow frequency band of the whole signal bandwidth, and thus captures the effective pulse by detecting the time-frequency variation trend, which saves a lot of calculation time and logical resources for engineering. In order to consider the requirements of FPGA engineering implementation, the division operation in the FPGA was avoided. It is verified that the new method is suitable for detecting the common radar signals such as PFM, LFM, SFM, TLFM, NP, etc., and can be widely adapted to SNR environments such as 0 dB, 10 dB, 20 dB, etc. Especially, it can still realize effective recognition in the pressure test of low SNR environment of 0 dB, which holds strong engineering application potential.

Keywords: Radar Signal; Threshold Detection; Time-Frequency Detection; FPGA Engineering Implementation; Low SNR

精益管理拉式系统在安全生产双重预防机制中的应用

许国磊¹, 孙秀娟²

(1. 北京赛迪时代信息产业股份有限公司, 北京 100089;

2. 北京工业职业技术学院, 北京 100042)

摘要: 安全管理是企业健康、稳定发展的重要保障。构建安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制是有效防范遏制生产事故的关键路径;精益管理拉式系统从市场需求的最终产品出发,准确组织企业各环节生产,拉动企业产品品种、数量、进度和质量提升。提出将精益管理拉式系统运用于安全生产双重预防机制的理论框架,按照安全目标环节、安全计划环节、安全执行环节、安全检查环节和安全改进环节进行分解,将事故发生作为双重预防机制的最终产品。将每个环节分解成不同元素,通过寻找权重最高环节中的元素,即恶要素,分析出对当前环节影响最大的元素并加以管理。通过贝叶斯算法在TPDCA中动态寻找、更新恶要素,使得恶要素影响权重不断降低,以预防生产事故发生。精益管理拉式系统在安全生产双重预防机制中的有效应用,能够帮助不同行业及单位的安全管理从“大水漫灌”粗放式管理向“滴灌式”精细化管理的转变,从而提高安全管理效率。

关键词: 双重预防机制;安全风险分级管控;隐患排查治理;恶要素;精益管理拉式系统;贝叶斯算法

中图分类号: X45 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-042-09

工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.006

0 引言

“十三五”时期,各地区、各有关部门和单位扎实推进安全生产,法规标准体系和监管体制进一步健全,专项整治进一步深化,重点领域安全风险管控进一步强化,安全生产形势进一步好转。2020年,全国化工事故起数、死亡人数较2016年分别下降36%、24%,化工较大以上事故起数下降17%;烟花爆竹生产经营事故起数、死亡人数连续五年“双下降”,2020年较2016年分别下降76%、85%,烟花爆竹重特大事故得到有效遏制。“十四五”时期,安全生产仍有诸多问题需要解决,如安全发展理念有待进一步贯彻

到位、本质安全水平还需提高、安全管理能力仍要加强、全链条安全管理亟待平衡等。其中,全链条安全管理不平衡问题尤为突出,一些环节重特大事故比较集中,可能累积形成系统性安全风险,从而引发生产事故。

《“十四五”国家安全生产规划》^[1]提出,引导高危行业领域企业开展基于信息化的安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制建设。双重预防机制建设是工业化生产行业,如煤矿、金属非金属矿山、化工、金属冶炼、建筑施工、道路运输、爆破和烟花爆竹等行业的必然要求,是防范生产事故的两道防火墙。安全风险管控到位,就不会形成事故隐患;隐患一经发现及时治理,就不可能酿成事故。因此,双重预防机制能切实把每一类风险都控制在可接受范围内,把每一个隐患都遏制在形成之初,把每一起事故都消

基金项目:

2023年北京工业职业技术学院职业教育教学改革项目
(JGXM-202306)

灭在萌芽状态。

由此, 基于双重预防机制的精益体系应运而生。其中, 传统精益体系无论是在自动化工厂、数据化驱动、数字化制造、智能化物流、灵活化交付等运营方面, 还是在人工智能、机器学习等技术层面, 都可以给制造企业带来显著的改进和提升作用。通过持续改进、循环迭代, 逐步将精益体系思想导入工作各环节, 可帮助企业实现精益生产^[2]。但是, 目前在应急安全行业, 基于双重预防机制建立精益体系的研究相对较少。当前, 生产事故的预防更多是采用计划驱动的方式来甄别危险源和隐患, 对于事故可能引起的影响, 缺乏结果导向的系统模型和绩效取向的量化分析作为支撑。

开滦煤矿始建于1878年, 是我国历史比较悠久的采煤企业, 在安全管理方面颇具代表性。本文首先通过统计数据反映开滦煤矿自始建以来的安全管理历程, 印证安全管理对于减少生产事故发生的重要意义, 并以此为契机, 对传统的PDCA模型进行拓展, 加入对目标(Target)的管理, 将目标的深化作为管理改进的基础, 形成基于精益生产理念中拉式系统的TPDCA(Target Plan Do Check Action)管理模型, 以缓解全链条安全管理不平衡的问题。将模型中的各环节逐步分解为元素, 评估影响, 量化为权重, 从而引导管理人员重视精益管理在安全生产中的作用, 重新思考企业流程逻辑, 减少浪费、降低成本、提高效率、创造价值。然后, 本文采用贝叶斯算法在TPDCA中动态寻找、更新恶要素, 使得恶要素影响权重不断降低, 预防生产事故的发生。本文这一理念的提出, 能够帮助企业把有限的人力、物力投入最有价值的工作中, 使企业由粗放式管理向精细化、颗粒化管理转变, 提高安全管理效率。

1 TPDCA管理模型

1.1 安全管理的重要性分析

开滦煤矿1949—2006年生产百万吨死亡率^[3]统计于图1。可以看出事故在较长时期呈下降趋势, 但并非直线下降, 而是会有小幅度的反复。

这符合安全管理的规律, 安全管理应是一个随着事故的发生不断总结、不断改善的过程。

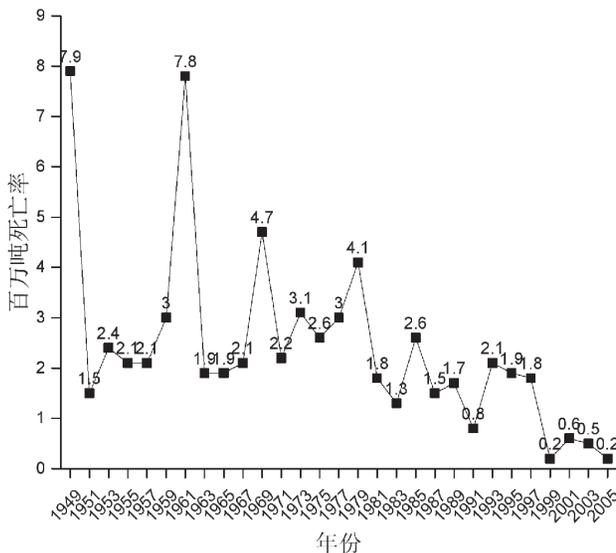


图1 开滦煤矿1949—2006年生产百万吨死亡率

1.2 TPDCA安全管理体系

PDCA是全面质量管理应遵循的科学程序。全面质量管理活动的全部过程, 就是质量计划的制订和组织实现的过程, 这个过程要按照PDCA循环, 不停顿地、周而复始地运转。P (Plan) 为计划, 包括方针和目标的确定, 以及活动规划的制定。D (Do) 为执行, 根据已知的信息, 设计和布局具体的方法、方案, 再根据设计和布局进行具体运作, 实现计划中的内容。C (Check) 为检查, 总结执行计划的结果, 分清哪些对了, 哪些错了, 明确效果, 找出问题。A (Action) 为处理改进, 对成功的经验加以肯定, 并予以标准化; 对失败的教训也要总结, 引起重视。对于没有解决的问题, 应提交给下一个PDCA循环中去解决。以上四个过程不是运行一次就结束, 而是阶梯式上升、螺旋式前进。

PDCA循环虽然能够指导企业完善其质量管理, 但对于安全管理而言并不是完全适用, 需要进行合理的裁剪。在安全行业中, 安全目标通常指国家各部门宏观的指导文件、意见和标准, 其中标准具有针对性, 可以直接指导企业的安全生产工作, 而指导文件、意见通常难以对单位具体化的工作进行直接指导。此外, P (计划) 是基于部门文件制定的, 而不是单位独立形成的计划, 如果不能有

效分解，将存在对文件认识不到位的风险。就拿双重预防机制来说，《国务院安委会办公室关于实施遏制重特大事故工作指南构建双重预防机制的意见》^[4]提到，企业要组织专家和全体员工，采取安全绩效奖惩等有效措施，全方位、全过程辨识生产工艺、设备设施、作业环境、人员行为和管理体系等方面存在的安全风险，做到系统、全面、无遗漏，并持续更新完善，但并没有对特定行业、特定企业进行具有可操作性的说明。因此，政策理解的深度、宽度就显得尤为重要。TPDCA安全管理体系在PDCA的基础上加入前置的T (Target)，即目标管理，通过对文件进行分解，以减轻、规避文件认识风险。T (目标) 环节旨在对国家政策、指导意见、安全法规、标准规范等 (以下统称规范) 要求进行分解，分解过程称为SBS (Safety Breakdown Structure, 安全分解结构)，分解形成的结果称为目标元素。TPDCA安全管理体系的形成也不是一蹴而就的，与PDCA一样，均需前后衔接、循环进行，逐步解决双重预防机制中遇到的问题。

在TPDCA安全管理体系中，P (计划) 是以目标管理中形成的规范作为输入，按照时间、干系人、责任、利益相关制度进行计划和管理，以与规范一一对应。D (执行) 是以计划和管理的内容为依据采取的行动。C (检查) 的作用是检查执行的内容是否符合计划。A (处理改进) 的含义有三个，一个是改进实施的工作，使其更加符合规范，另一个是根据外部影响，比如法律变更，及时调整TPDCA中的T和SBS。第三个是发现可能导致隐患事故的恶要素，动态改变执行措施、计划内容甚至SBS。PDCA通常基于计划驱动，虽然能够做到层层递进、有的放矢，但难以保证计划和结果的一致性、因果的强关联性。TPDCA为了解决此问题，融合了“事故发生”导向的精益管理拉式系统，既做到计划驱动，目标落实不缺少，也做到结果 (指隐患或事故) 驱动，使得工作不冗余，是一个典型的价值流程系统。

2 精益管理拉式系统改进与构建

2.1 传统精益拉式系统局限性分析

传统工厂采用的精益拉式系统，作用是按照

需求提供产品或者服务，减少浪费。这里的浪费通常包括流程衔接间隔时间的浪费和并行流程等待时间的浪费。以下重点讨论间隔时间对生产的浪费。

典型的暖通空调制造流程如图2所示，包括三条主流程：附件生产、钣金生产和采购件加工。附件为标准件，在同一类规格产品中通用；钣金按照订单特定设计生产；采购件按照客户订单采购，采购到货后进一步加工。三条主流程汇合至总装形成产品成品^[5]。

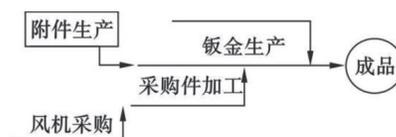


图2 暖通空调制造流程

不同规格产品的采购需求如表1所示，不同规格产品的加工、采购时间如表2所示。

表1 不同规格产品的采购需求

产品类别	平均需求/ (台·月 ⁻¹)	订货频率/ (台·d ⁻¹)	发货频率/ (次·d ⁻¹)
小规格	20	1	1
大规格	4	0.2	3

从图2所示的暖通空调制造流程中还可以看出，附件生产、采购件加工和钣金生产三个环节均完成后，才能把整个产品交付。在这里不考虑产品大小、规格、数量对整体订单的影响，通过表2可以看出，大规格钣金生产环节的下一步间隔为173 min，在所有下一步间隔中最长，那么应该优先减少浪费的工作就是钣金生产。同理，在钣金生产中，喷涂工作的下一步间隔为40 min，时间最长，应优先减少浪费。

假设钣金喷涂工艺采取措施减少浪费后，将下一步间隔减少到34 min，那么下一次应该被采取措施的就是下一步间隔为35 min的冲压工艺。以此类推。

2.2 精益管理拉式系统建立

传统的价值流是指从原材料转变为成品，并对其赋予价值的全部活动^[6]。精益管理拉式系统应用于安全生产双重预防机制需要对传统精益拉式系统价值流进行裁剪。

传统精益拉式系统以市场订单作为最终产品，需要考虑产品配件、加工工艺、数量等对产品形成的限制。

精益管理拉式系统以风险管控失效和隐患发生作为最终产品。本单位事故发生的教训、同行业事故发生的教训和相关部门列举的重点防范事故是形成最终产品的核心要素。产品形成过程按照安全目标环节、安全计划环节、安全执行环节、安全检查环节、安全改进环节进行划分，形成安全管理价值流，如图3所示。

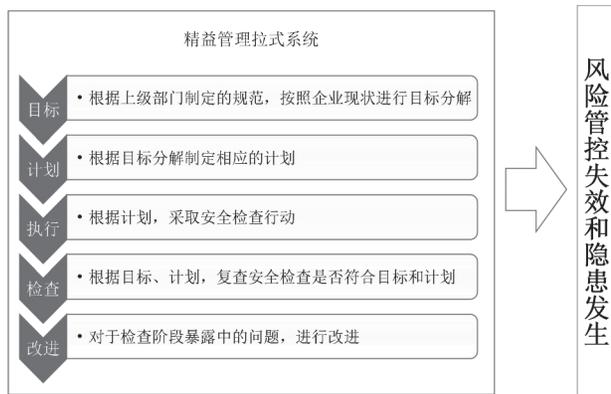


图3 精益管理拉式系统的安全生产管理价值流

表2 不同规格产品的加工、采购时间

关键件	工位	批量	加工、采购时间/min			
			小规格	下一步间隔	大规格	下一步间隔
钣金	剪切	5	245.5	10	320.4	13
	冲压	5	256.7	30	301.3	35
	折弯	5	237.8	20	312.3	29
	喷涂	5	224.5	20	224.5	40
	做板	5	235.7	20	304.5	20
	发泡	5	267.9	20	324.5	21
	配料	1	240.3	15	290.4	15
	合计		1 708.4	135	2 077.9	173
采购件	剪切	5	87.3	15	103.4	10
	冲压	5	98.2	12	103.5	11
	卷绕	5	65.4	12	74.5	12
	喷漆	5	224.5	12	224.5	14
	风机装备	5	280.4	11	301.3	18
	配料	1	139.4	16	159.4	19
	合计		895.2	78	966.6	84
附件	剪切	5	130.4	13	145.6	12
	冲压	5	123.4	24	135.9	30
	修边	5	187.4	12	200.1	14
	焊接	5	256.7	24	287.3	40
	组装	5	233.5	10	268.7	19
	配料	1	78.3	10	80.4	15
	合计		1 009.7	93	1 118	130
	总装	1			200.2	60
	终检	1			20.3	30
	成品				15(d)	

例如，某市制定的《2022年××市交通运输安全应急管理工作要点》中要求加强城市公交、出租车、网约车平台等企业运营安全管理，落实安全生产责任制、责任人。将此作为目标进行安全分解，形成的SBS如图4所示。

2.2.1 初始化精益管理拉式系统目标、计划、执行(TPD)

在初期运用精益管理拉式系统，首选按照计划驱动，对规范进行分解，形成SBS。一阶段的权重赋予5分，二阶段赋予3分，三阶段赋予2分，

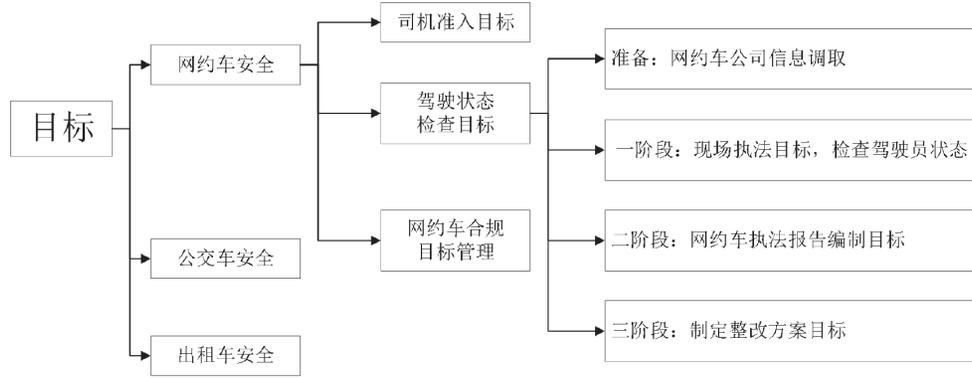


图4 安全分解结构 (SBS) 示例

总计10分。对于一阶段初始化计划，根据驾驶员状态目标进行计划分解，如图5所示。

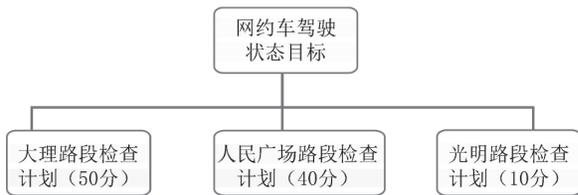


图5 根据驾驶员状态目标进行计划分解

大理路段车流量大，因此权重相对较高。大理路段执法检查计划对应的执行工作分解如图6所示。

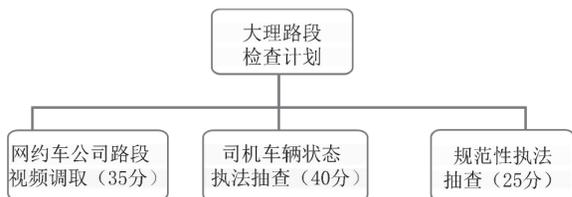


图6 根据执法检查计划执行工作分解

可以看出，目标、计划和执行权重最高的要素分别是：目标，一阶段；计划，大理路段检查计划；执行，司机车辆状态执法抽查。这三部分是影响最大的因素，也就是恶要素。

2.2.2 动态更新检查、改进 (CA) 和TPDCA逆向改进

进行复查时重点关注执法检查，包括样本是否遗漏、时间区间有效性、安全隐患清单排序的合理性、安全隐患应对手段的有效性等内容。若样本量权重是20分，时间区间有效性是20分，安全隐患清单排序的合理性是40分，安全隐患应对手段的有效性是20分，那么恶要素就是安全隐患清单排序的合

理性，也就应该对隐患清单中的内容采取手段进行改进，比如执法宣传、现场罚款等。改进手段需要分解成TPDCA，如果执行完毕后安全检查的恶要素发生了变化，比如样本量权重是20分，检查时间区间有效性是20分，安全隐患清单排序的合理性是20分，安全隐患应对手段的有效性是40分，那么恶要素就变为安全隐患应对手段的有效性。

在动态更新恶要素的过程中，往往仅从现有目标出发，而对真正造成隐患或事故的结果考虑相对较少，因此在对TPDCA进行初始化后，采用拉式系统更新TPDCA模型，从事故隐患出发，逆推复查、执行、计划、目标，实施逆向改进，如图7所示。

把通过安全执行环节发生的事故（含隐患）作为逆推采取的相关措施。对于发生的事故，若是由安全检查和复查1、安全检查和复查2共同产生的，且经过分析，安全检查和复查1权重为60分，安全检查和复查2为40分，那么安全检查和复查1即为改进过程中的恶要素，同理，执行、计划和目标环节的恶要素如图7中加深的字体。

虽然在前期初始化时采用的是目标导向，改进时引入了结果导向的拉式系统，但恶要素的确认更多依赖于专家判断，存在专家经验不足的风险^[7]。针对非常规突发灾害事故演变路径不清晰、演变过程及发展态势复杂，应急决策主体在应急救援过程中很难作出正确决策的现状^[8]，简单的统计分析不能找到影响安全生产的主要影响因素。因此，有必要对引发企业生产事故的原因信息进行深度挖掘，找出引发事故的关键因素^[9]。鉴于在安全管理中，多因素耦合影响程度研究较少，事故发生因素众多且各因素间耦合关系复杂，难以确定事故发生关联度较强的原因，故通过利用贝叶斯

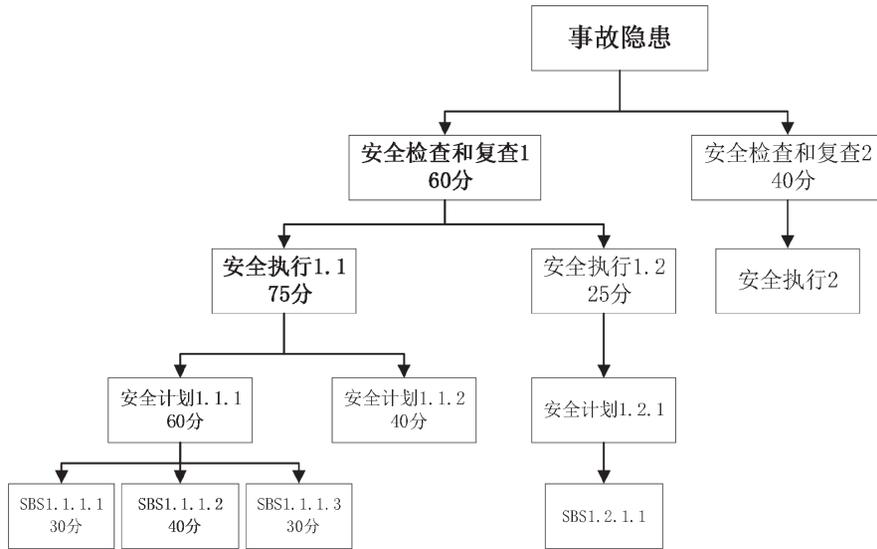


图7 TPDCA逆向改进举例

算法动态确定恶要素, 来降低此类风险。

3 利用贝叶斯算法动态确定恶要素

贝叶斯算法是一种基于概率推理的数学模型, 对具有不确定性和关联性问题的解决具有优势并且应用广泛。为了提高事故率计算准确性, 采用贝叶斯算法计算恶要素。算法使用原则是在对事故故障数据进行有效存储和分析的基础上, 充分挖掘蕴藏在数据训练集中的价值^[10]。

3.1 制定训练集, 计算风险源对事故影响的概率

根据国家、行业、企业统计数据, 把风险源和事故相关数据作为训练集, 以驾驶状态风险管控和隐患排查为例, 训练集如表3所示。

将是否发生事故事件记录为 x , 由驾驶员睡眠

时间、车辆保养频率、消防配备、驾驶员考核效果和天气共计5个事件共同促成, 事件相对独立。

对于特征值“驾驶员睡眠时间”采用高斯分布, 假设

$$P(x_i | c) \sim N(\mu_{c,i}, \sigma_{c,i}^2) \quad (1)$$

式中: $\mu_{c,i}$ 和 $\sigma_{c,i}^2$ 分别是第 c 类样本在第 i 个属性上取值的均值和方差, 则有

$$P(x_i | c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{c,i}} \exp\left[-\frac{(x_i - \mu_{c,i})^2}{2\sigma_{c,i}^2}\right] \quad (2)$$

事故发生记为 x_1 , 事故未发生记为 x_2 , 则 $P(x_1) = 0.67$, $P(x_2) = 0.33$ 。

3.2 获取即时检查数据

检查某位驾驶员状态数据, 如表4所示。其中, 车辆保养频率、消防配备、驾驶员考核结果和天气样本集没有变化, 变化的只是驾驶员睡眠时间。

表3 驾驶状态风险管控和隐患排查

序号	驾驶员睡眠时间/h	车辆保养频率	消防配备	驾驶员考核结果	天气	是否发生事故
1	1	高	完备	优	晴朗	是
2	2.3	中	不完备	良	下雨	否
3	3	低	完备	差	晴朗	是
4	4	高	不完备	差	晴朗	是
5	1.7	高	不完备	差	下雨	否
6	2	高	不完备	良	晴朗	是

表4 驾驶员检查状态数据

序号	驾驶员 睡眠时间/h	车辆保 养频率	消防 配备高	驾驶员 考核结果	天气
1	1.8	高	完备	优	晴朗

3.2.1 计算发生事故的概

驾驶员睡眠时间在发生事故中的平均值、方差和标准差分别为2.5、1.67和1.12。

$$P(\text{驾驶员睡眠时间}=1.8 \text{ h} | \text{发生事故}) = \frac{1}{1.12\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(1.8-2.5)^2}{2 \times 1.67^2}\right] \approx 0.122 \quad (3)$$

根据驾驶员睡眠时间在未发生事故中的平均值，计算方差，有

$$s^2 = \frac{1}{2}[(2.3-2)^2 + (1.7-2)^2] = 0.09 \quad (4)$$

故标准差是0.3。

$$P(\text{驾驶员睡眠时间}=1.8 \text{ h} | \text{未发生事故}) = \frac{1}{0.3\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(1.8-2)^2}{2 \times 0.09}\right] \approx 3.64 \quad (5)$$

那么：

$$P(\text{发生事故}=是) = 0.122P(\text{消防设施完备} | \text{未发生事故}) \times P(\text{驾驶员考核结果为优} | \text{发生事故}) \times P(\text{天气晴朗} | \text{发生事故}) \approx 0.0085 \quad (6)$$

3.2.2 计算未发生事故的概

根据章节3.2.1，同理有

$$P(\text{发生事故}=否) = 3.64P(\text{车辆保养频率高} | \text{未发生事故}) \times P(\text{消防设施完备} | \text{未发生事故}) \times P(\text{驾驶员考核结果为优} | \text{未发生事故}) \times P(\text{天气晴朗} | \text{未发生事故}) = 3.64 \quad (7)$$

注：因为车辆保养频率高且未发生事故、消防设施完备且未发生事故、驾驶员考核结果为优且未发生事故、天气晴朗且未发生事故在样本中不存在，因此取值均为1。

3.3 根据恶要素风险，确定恶要素并采取针对性措施

$P(\text{发生事故}=否) > P(\text{发生事故}=是)$ ，由表4数据也可以看出，睡眠1.8 h未发生事故概

比发生事故概率高。

求二者之差，即 $3.64 - 0.0085 = 3.6315$ ，记作恶要素风险。

然后，就可以依次确定多个样本的事故概率，找出恶要素风险值最小的数，记为恶要素。优先解决执行阶段的恶要素，加强管控。

按照此方法逐步确定安全检查和复查、安全执行、安全计划(SBS)、安全目标中的恶要素，集中资源处理恶要素，做到有的放矢。安全体系建设往往不是一蹴而就，需要循环往复，不断迭代^[11-12]，不断提高管理水平。

4 结束语和展望

本文首先论证了通过有效的安全管理减少生产事故发生的可行性和必要性，然后阐述了如何在安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制下裁剪建立TPDCA模型，并通过持续改进，兼以运用计划驱动和结果驱动双重控制，动态寻找恶要素。最后，本文利用贝叶斯算法，动态确定恶要素，实现了有效的安全管理。

本文贝叶斯算法中训练集的建立采用了行业公共数据，对于特定单位有可能出现偏差，如何有针对性地建立单位自身的训练集，可以作为延续性的课题进行讨论。希望本文能够为各企业开拓安全管理思路，不断地改进管理，减少生产事故的发生。

参考文献

- [1] 国务院安全生产委员会. “十四五”国家安全生产规划[R]. 2022.
- [2] 陈占勇. H泵业(天津)有限公司精益管理应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [3] 邹向炜. 基于流程化的煤矿安全生产风险控制系统[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- [4] 国务院安委会办公室. 关于实施遏制重特大事故工作指南构建双重预防机制的意见[R]. 2016.
- [5] 周健, 肖浩锋, 王小虎. 基于价值流图析的客户定制产品拉动系统设计[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(10): 1501-1505.
- [6] 李琴, 彭丽霞, 刘海东, 等. 价值流技术在产品生产系统优化中的应用[J]. 现代制造工程, 2015(2): 24-29.

- [7] 夏登友, 钱新明, 段在鹏. 基于动态贝叶斯网络的非常规突发灾害事故情景推演[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 898-902.
- [8] 甄双成, 张靖. 石油石化企业生产典型事故应急案例介绍分析[C]//中国石油石化安全生产与应急管理技术交流会, 2014: 271-274.
- [9] 张芮博. 危险化学品道路运输事故率计算方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [10] 杨连报. 铁路事故故障文本大数据分析关键技术研究及应用[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.
- [11] 程永增. 精益化管理模式在整车企业重点应用分析中的应用分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [12] 杨日岚. 信息安全建设方案决策中的贝叶斯风险分析应用[C]//第三届全国信息安全等级保护技术大会, 2014: 101-104.

作者简介:

许国磊(1984—), 通信作者, 男, 满族, 河北廊坊人, 本科, 高级工程师。研究方向: 工程项目管理、电子信息工程管理、工程咨询。

E-mail: 18633310733@163.com

孙秀娟(1972—), 女, 汉族, 山西人, 工程硕士, 副教授。研究方向: 网络管理、数据挖掘。

E-mail: sxj@bgy.edu.cn

(收稿日期: 2023-06-13)

Application of Lean Management Pull System in Dual Prevention Mechanism of Safety Production

XU Guolei¹, SUN Xiujuan²

(1. Beijing CCID Info Tech. Inc, Beijing 100048, China;

2. Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China)

Abstract: Safety management is an important guarantee for the healthy and stable development of enterprises. The key path to effectively prevent and contain the production accidents is to construct a dual prevention mechanism of classified management and control of safety risks as well as investigation and management of hidden dangers. The lean management pull system accurately organizes all aspects of enterprise production by starting from the final product of market demand, to promote the variety, quantity, progress and quality of enterprise products. A theoretical framework of applying lean management pull system into the dual prevention mechanism of safety production was proposed. According to safety target link, safety planning link, safety execution link, safety inspection link and safety improvement link, the framework was decomposed, and the accident occurrence was taken as the final product of the dual prevention mechanism. Each link was decomposed into different elements. By looking for the element with the highest weight, i.e. the evil element, the element with the greatest influence on the current link was analyzed and managed. The Bayesian algorithm was used to dynamically find and update the evil factors in the TPDCa, so that the influence weight of the evil factors was continuously reduced to prevent production accidents. The effective application of lean management pull system in the dual prevention mechanism of safety production can help the safety management of different industries and units to change from the extensive management of “flood irrigation” to the refined management of “drip irrigation”, thus improving the efficiency of safety management.

Keywords: Dual Prevention Mechanism; Risk Control; Hidden Danger Investigation; Evil Elements; Lean Pull System; Bayesian Algorithm

城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制 与管理平台研究

刘宇然¹, 李超², 张含笑¹, 李鉴¹, 刘媛¹, 唐金金²

(1. 北京市地铁运营有限公司, 北京 100080; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 从实时性、动态性、多样性、智能性、安全性等系统设计需求考虑, 提出一套城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制与管理平台建设方案。系统包含基础数据管理子系统、网络化运输方案智能编制子系统、列车运行图智能编制子系统、列车运行图仿真子系统、列车运行图智能评估子系统、列车运行图智能优化子系统以及列车运行图统一管理子系统, 内部集成网络化列车运行方案编制模型、网络化列车运行图编制模型、线网列车运行图仿真模型、线网列车运行图衔接优化模型, 并针对线网列车运行图设计了评价指标体系。开发了原型系统, 由算法服务器、数据库服务器和接口服务器等构成C/S与B/S模式相结合的3层体系结构。在北京地铁的试运行表明, 搭建的基于人机交互的城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制与管理平台技术可行、效果良好; 平台的建成将列车运行计划的编制时长由5个工作日缩短至1小时以内, 列车运行计划编制周期缩短80%。

关键词: 城市轨道交通; 网络化; 列车运行计划; 智能编制; C/S; B/S

中图分类号: U293.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-050-10

工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.007

0 引言

列车运行计划是城市轨道交通运营组织、运输生产的依据。列车运行计划编制是在既有设施设备资源的约束下, 规定各列车经过线路区间的次序及在各车站的到发时刻, 以解决城市轨道交通运营安全性和运输高效性的科学问题。列车运行计划编制质量和编制周期既关乎城市轨道交通运输生产计划的执行, 也会对线网运营组织的安全性和经济性产生直接影响^[1-2]。

为提高城市轨道交通列车运行计划的编制效率, 专业的编制工具已被开发出来并得以投入使用。但是, 现有的编图软件以单线决策为基础, 且仅能作为绘制工具, 无法依据运营情况提供及时、有效的辅助决策。随着城市轨道交通线网规

模不断扩张, 客运需求日益增长, 运输压力不断加大, 列车运行计划编制工作难度与强度均在持续提升, 基于单线的、以手动制图为主的传统列车运行计划编制工具越来越无法满足现阶段运营组织、运输生产的需要。同时, 随着各地城市轨道交通线网指挥中心的建设加快, 以历史或预测客流数据为依据的列车运行计划编制正持续朝着智能化、网络化的方向发展。

经文献调查研究, 既有的与列车运行计划编制相关的工作存在诸多不足。一是列车运行计划一体化程度不足。一种常用的编制方法是分阶段确定列车开行交路计划^[3-4]、列车时刻表^[5-6]、列车接续计划^[7-8]的分层式编制方法, 虽然能够有效降低列车运行计划的求解难度, 但各阶段结果相互独立, 优化目标难以统一, 最终结果无法达到

系统最优。二是网络运输计划缺少智能化编制手段^[9-12]。由于单线网络运输计划编制系统无法满足智能化服务需求, 因此运输方案与线网客流耦合度较低, 难以灵活应对城市客流在时空上的波动。三是缺乏线网列车运行图智能化管理系统。列车运行图的管理和调整涉及多部门的沟通协作, 如果难以打通不同部门间的信息流通, 就需要耗费大量人力, 这就降低了编图效率, 拖延了列车运行图编制周期。四是缺少列车运行图智能化评估系统^[13-16]。列车运行图的可行性和优劣性无法客观评价, 就难以指导后续的列车运行图优化工作。

综上, 城市轨道交通列车运行计划编制系统应顺应智能化、网络化的发展趋势, 提升区域运输能力和服务质量, 精准匹配运力运量, 实现降本增效。依托城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制与管理平台, 构建考虑全方位、统筹全部门、覆盖全时段的综合决策辅助系统, 已经成为城市轨道交通运营组织、运输生产的迫切需要。

本文主要内容及结构组织如下: 第1章, 分析城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制与管理平台的系统设计需求, 并提出系统体系结构构建方案; 第2章, 从组件层面对系统所用功能组件及结构进行剖析; 第3章, 针对各子系统的功能需求建立具体模型及指标体系, 并提出求解方法; 第4章, 展示原型系统开发及实际应用情况; 第5章, 对本文所做工作进行总结。

1 系统设计需求分析及体系结构构建

1.1 系统设计需求分析

随着城市轨道交通线网规模不断扩张, 信号设备制式愈发多样, 乘客出行要求不断提高, 以贯通运营和跨制式运营为主体的运营模式加快演进, 导致列车运行计划面临运输方案制定智能化与精细化程度低, 以及列车运行图编制智能化水平低、适应性差、评估方法缺乏、优化难、衔接弱等问题。为了进一步缩短列车运行计划编制周期, 加强城市轨道交通运营服务创新, 实现流程化、自动化、网络化的列车运行计划编制与评估优化, 要求城市轨道交通网络化列车运行计划智

能编制与管理平台具有以下特点。

(1) 实时性。通过接口服务器获取列车自动监控系统(ATS)实时消息数据, 对线网运力运量进行实时评估, 与客流进行匹配, 实现实时运力运量监察。

(2) 动态性。通过分析北京地铁客流特征, 研究交路方案、列车停站方案、首末班车方案、列车开行频率优化方案, 提出线网级编图模式, 及时根据动态变化的客流更新列车运行计划。

(3) 多样性。通过列车运行方案优化技术、列车时刻表与接续计划一体化生成技术、稳定与非稳定客流阶段列车运行图优化技术、列车运行线优化生成技术、平/高峰时段线网级列车运行图衔接优化技术、基于能耗约束的线网级列车运行图优化技术, 对包含复杂交路计划、列车时刻表、车底周转计划在内的多主体实现协同优化。

(4) 智能性。依据客流分析结果, 实现运营策略的自动推荐, 分析并展示推荐结果的合理性与可行性。

(5) 安全性。针对不同的对象和不同的用户定义不同的访问权限, 在保证共享资源的同时也确保数据的安全性和一致性。

1.2 系统体系结构和功能

城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制与管理平台包括基础数据管理子系统、网络化运输方案智能编制子系统、列车运行图智能编制子系统、列车运行图仿真子系统、列车运行图智能评估子系统、列车运行图智能优化子系统以及列车运行图统一管理子系统。平台整体功能结构如图1所示。

网络化运输方案智能编制子系统主要功能是运用有限的网络配线(联络线、库线、折返线、越行线)资源和车辆基地, 根据网络客流时空分布特征, 综合分时交路方案、分时开行对数方案、大站快车方案、运行与停站方案、首末班车方案等不同组合模式, 形成列车多交路运行、双向不平衡运行、低速高密度折返、大站快车运行、越行快车运行、库线出车运行、压缩站停时间等方式, 实现网络资源精准高效配置。核心功能包括根据客流特征确定重点车站和线路、利用

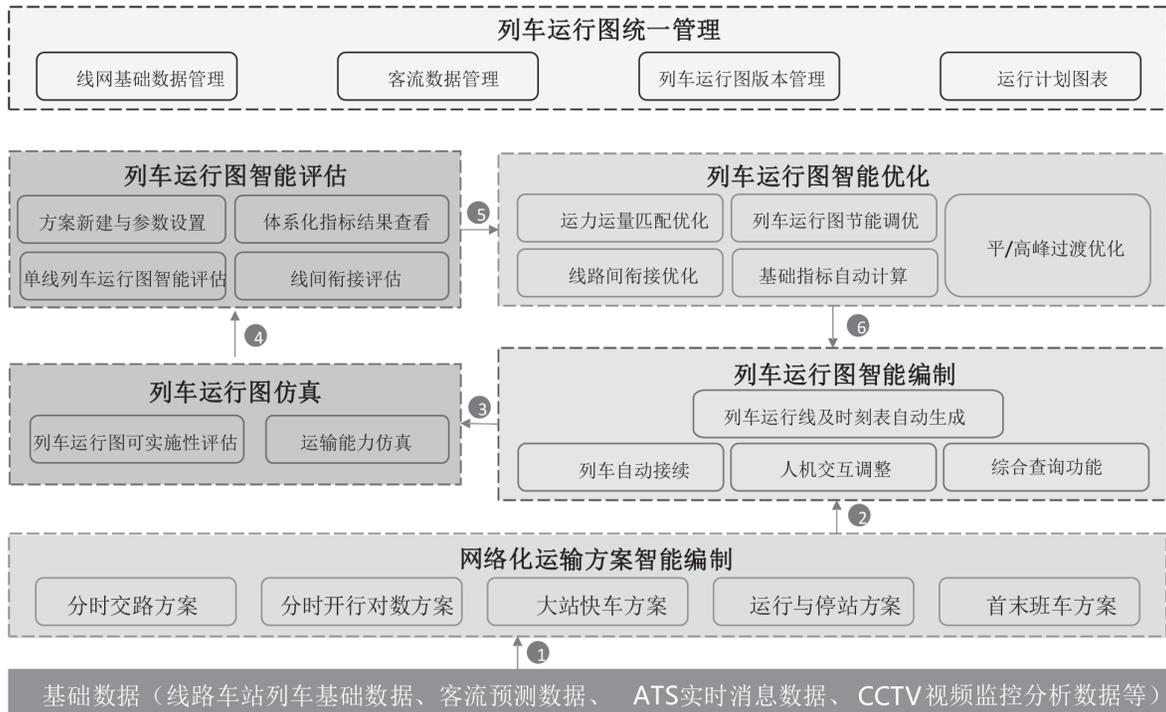


图1 平台整体功能结构

时段内车站上下车客流数据计算各个车站分时停站时间、确定各运营时段的分时交路方案、确定运行与停站方案、制定首末班车方案、制定分时开行对数制定与整合输出运力配置方案。

列车运行图智能编制子系统根据网络化运输方案智能编制结果，考虑首末班车时间、线间到发站时间协同、高峰进退峰时间、车辆段及库线就近发/存车，完成自动化编图。系统按功能可分为列车运行线及时刻表自动生成模块、列车自动接续模块、人机交互调整模块、综合查询功能模块。其中，列车运行线及时刻表自动生成模块以运输方案为输入，考虑高峰与平峰运力需求，基于固定设施位置及运行图编制约约束铺画运行线，完成全天基础列车运行线的铺画；列车自动接续模块则通过对客流与运行线进行精准匹配，实现自适应调整，按照时间顺序进行列车交路的计算机自动勾画，将自动生成的列车车次与运行线一一对应，完成列车运行图的绘制；人机交互调整模块支持用户根据实际需要，对列车运行图中到发时刻、接续关系等进行手动调整；综合查询功能模块包括指标查询与冲突检测两个子模块，作为评估列车运行图编制水平和可行性的参考。

列车运行图仿真子系统通过调整不同场景下的列车运行影响因素，复现实际城市轨道交通中难以施行的实验仿真，提前论证列车运行图的可行性，同时针对列车运行图冲突检测结果，定位冲突车次、冲突地点，给出告警类型与列车运行图调整建议。列车运行图仿真子系统功能模块主要包括列车运行图可实施性评估模块和运输能力仿真模块两部分。运输能力仿真模块又包括仿真场景模型搭建模块、能耗与鲁棒性仿真计算模块，其中前者将线路结构信息、列车主体信息、客流信息等作为输入，用于构建仿真场景。列车运行图可实施性评估以计划列车运行图作为参照，以列车牵引制动性能、线路平纵断面、线路站场布局等为约束，对列车运行过程进行仿真。

列车运行图智能评估子系统综合城市轨道交通绩效考核指标与国内外对列车运行图评价指标体系的研究，选取符合运营现状的评价指标，构建较为客观、全面的城市轨道交通列车运行图评价指标体系，从多角度对列车运行图编制质量进行评价。子系统主要包括方案新建与参数设置模块、体系化指标结果查看模块、单线列车运行图智能评估模块、线间衔接评估模块。其中，方案

新建与参数设置模块根据评估实际需求, 设置高峰时段、拥挤度阈值、运行图信息与客流数据信息; 体系化指标结果查看模块基于城市轨道交通效能评价指标体系中的分值加权计算方法, 对列车运行图总体得分进行计算; 单线列车运行图智能评估模块包含基础指标分析、区间运力运量匹配度分析、运行图能力评估, 对交路、运力紧张区段及时段、折返线与出入段线使用能力进行分析与展示; 线间衔接评估模块用于对换乘站进行分方向换乘衔接评估, 可视化展示各列车衔接情况、平均换乘等待时间等信息。

列车运行图智能优化子系统旨在按运营时段实现面向高峰时段的列车运行图优化、时效和能效耦合驱动的平峰期列车运行图优化, 以及以末班车衔接优化为主导的列车运行图优化, 最终实现全天运营时段运力运量的最优匹配、降本增效, 具体而言包括运力运量匹配优化、列车运行图节能调优、线路间衔接优化、基础指标自动计算、平/高峰过渡优化等功能。列车运行图智能优化子系统的主要功能模块包括基础列车运行图管理模块、列车运行图优化模块以及优化结果输出展示模块。其中, 基础列车运行图管理模块用于加载现有的列车运行图数据, 实现列车运行图数据的增删改查; 列车运行图优化模块基于输入的约束条件, 自动选取适当的优化模型, 对列车运行图进行多目标协同优化, 包括首末车衔接优化、平/高峰过渡优化等; 优化结果输出展示模块将优化前后衔接效率、乘客等待时间等信息对比展示, 并以固定格式进行报表输出。

列车运行图统一管理子系统用于对新编制的、以前不同时期编制的各类列车运行图及其关联的编图参数、说明文档等格式化及非格式化运行图文件, 进行数字化标准化存储和统一管理, 以方便回溯查询, 具体包括线网基础数据管理、客流数据管理、列车运行图版本管理、运行计划图表等功能。列车运行图统一管理子系统功能模块主要包括用户统一管理模块、基础数据统一管理模块、列车运行图发布统一管理模块、客流分析结果统一管理模块以及计划列车运行图统一管理模块。其中, 用户统一管理模块基于不同身份用户, 实现不同权限的管理, 并筛选出可查看、可编辑的内容; 基础数据统一管理模块用于实现

对线网数据、线路数据、车站信息数据、设施设备数据、客流数据进行统一的管理; 列车运行图发布统一管理模块用于将系统已经编制完成的运行图送至决策层, 便于决策层审批反馈或确认发布; 客流分析结果统一管理模块用于对线网、线路、车站、断面四个维度的客流指标(进出站、断面、换乘)进行管理查询; 计划列车运行图统一管理模块则是对运行控制中心(OCC)传输上来的计划列车运行图进行统一管理, 方便后续计划列车运行图与实际列车运行图的比对。

2 功能组件设计

引入基于组件的软件开发技术, 可以增强代码的复用性, 提高软件的开发效率和质量, 能够随时进行系统的升级。更重要的是, 封装组件实现了系统开发的模块化和接口标准化, 可以在多个子系统中重复利用, 降低软件开发周期, 降低系统后期维护成本。客户端系统可以实现用户自定义功能, 具有不同权限的用户可以通过计算机网络下载功能组件。

根据功能组件被重复利用的广度和深度, 功能组件可以分为以下3类不同粒度。

(1) 小粒度重用组件, 即程序代码重用, 涉及数据库操作组件、统计组件、Web浏览组件、查询组件等。

(2) 中粒度重用组件, 即软件设计模块重用, 涉及基础数据管理模块中的线路基本参数、区间基础参数、车站基础参数、换乘时间、列车交路等。

(3) 大粒度重用组件, 即应用子系统重用。独立开发的应用程序或者子系统既可以单独使用, 又可以是组合成新系统的子系统。在应用子系统重用过程中, 不作内部源代码的修改, 而是通过预定义的标准接口与其他子系统, 如网络化运输方案智能编制子系统、列车运行图智能编制子系统、列车运行图智能优化子系统、列车运行图仿真子系统、列车运行图智能评估子系统、列车运行图统一管理子系统等协调工作。

小粒度重用组件数量最多, 实现的功能比较具体, 代码规模也比较小, 一旦封装完成, 则基本不作源代码的修改, 故可作为构建系统功能的

单元，被其他模块多次调用。中粒度重用组件由若干小粒度重用组件组合而成，可以完成一些具体的业务功能。在确定不同编图人员的操作权限时，可以以中粒度重用组件功能为单位进行划分，进而确定协同网络图。大粒度重用组件是网络化列车运行计划智能编制与管理平台的若干个子系统，可以单独使用，将相应的数据通过标准数据接口与数据库交换或实时通信，也可以通过网络协同工作。

网络化列车运行计划智能编制与管理平台组件结构图如图2所示。

3 网络化列车运行计划编制模型

3.1 网络化列车运行方案编制模型

城市轨道交通线网由线路组成，线网列车运行计划要以线路为基础，同时考虑不同线路间的衔接优化，以在列车运行计划编制中实现城市轨道交通互联互通。一条线路包含多个车站，根据线路折返站布置，生成备选交路集合并构建服务网络，在考虑乘客在单线交路出行以及多线换乘行为的基础上，对服务网络进行客流分配，通过系统聚类方法，根据客流的变化速率，把全天运营时段自动划分为早晚高峰时段和午平峰时段，同时引入换乘惩罚系数来量化多交路方案对乘客换乘造成的影响，提高客流与车流匹配程度。在自动推荐各个时段下线路的交路方案时，考虑线路运营组织及能力限制等约束，以企业运营成本与乘客等待时间成本最小为目标，建立混合整数非线性规划模型，在备选集中挑选交路，并确定运行方案中各运营时段的交路方案、开行对数等要素。针对问题特点，提出变量裁剪方法，缩减模型规模，设计局部搜索的启发式算法，提高求解速度。

3.2 网络化列车运行图编制模型

列车运行图是行车组织工作的基础，是在列车运行计划的基础上构建的列车运行时间与空间关系图解，表示各次列车在各区间运行及在各车站停车或通过状态的二维线条图。网络化列车运

行图编制模型以网络化列车运行方案编制的输出作为输入，生成以客流为导向的列车运行图，其核心是设计将时刻表与车底运用方案一体化的优化编制模型，并综合考虑场段布设位置与客流时空分布对列车出入段路径选择的影响，构建描述列车运行的时空状态网络。设计算法，将列车运行图与车底运用方案一体化自动编制问题转化为车辆径路寻优问题，构建基于拉格朗日松弛的迭代求解算法，通过松弛问题中的难约束，构造拉格朗日对偶问题，并借助时空状态网络求解模型，将主问题分解为若干子问题，通过并行计算，大幅提高求解效率，实现极为快速的一键成图。

3.3 线网列车运行图仿真模型

完成网络化列车运行图编制后，对列车运行图的可实施性进行验证，这是编制计划投入实际使用前不可或缺的环节。列车运行图的可实施性验证包括列车运行冲突检测以及运力运量匹配分析。在列车运行冲突检测中，检测列车在同一时间是否访问同一资源，是否造成轨道区段占用冲突、折返冲突、进路冲突等冲突。在运力运量匹配分析中，分析列车在某个断面是否存在运力不能满足要求或者运力浪费严重的情况。如果检测出列车运行图存在冲突或者运力运量严重不匹配的情况，则表明列车运行图需要进行优化与调整。

建立的列车运行图仿真模型从轨道交通线网中“线”这一维度出发，首先以线路、信号、车辆、列车运行时间等信息为基础，对列车运行图中的列车在不同时刻的运行状态以及相应的信号与设备的状态进行仿真，这些状态包括列车的速度、里程、占用的轨道、进路的开放情况、信号机状态、道岔的位置等。根据列车在每个车站进出站的时间是否存在运行偏离，对冲突进行检测。结合清分模型统计OD个体出行路径信息，搭建线路车流与客流联动的仿真平台，通过仿真计算得到车流与客流的耦合情况，为运力运量匹配分析提供支撑。

3.4 线网列车运行图评价指标体系

为实现城市轨道交通高效运营，需要一套网

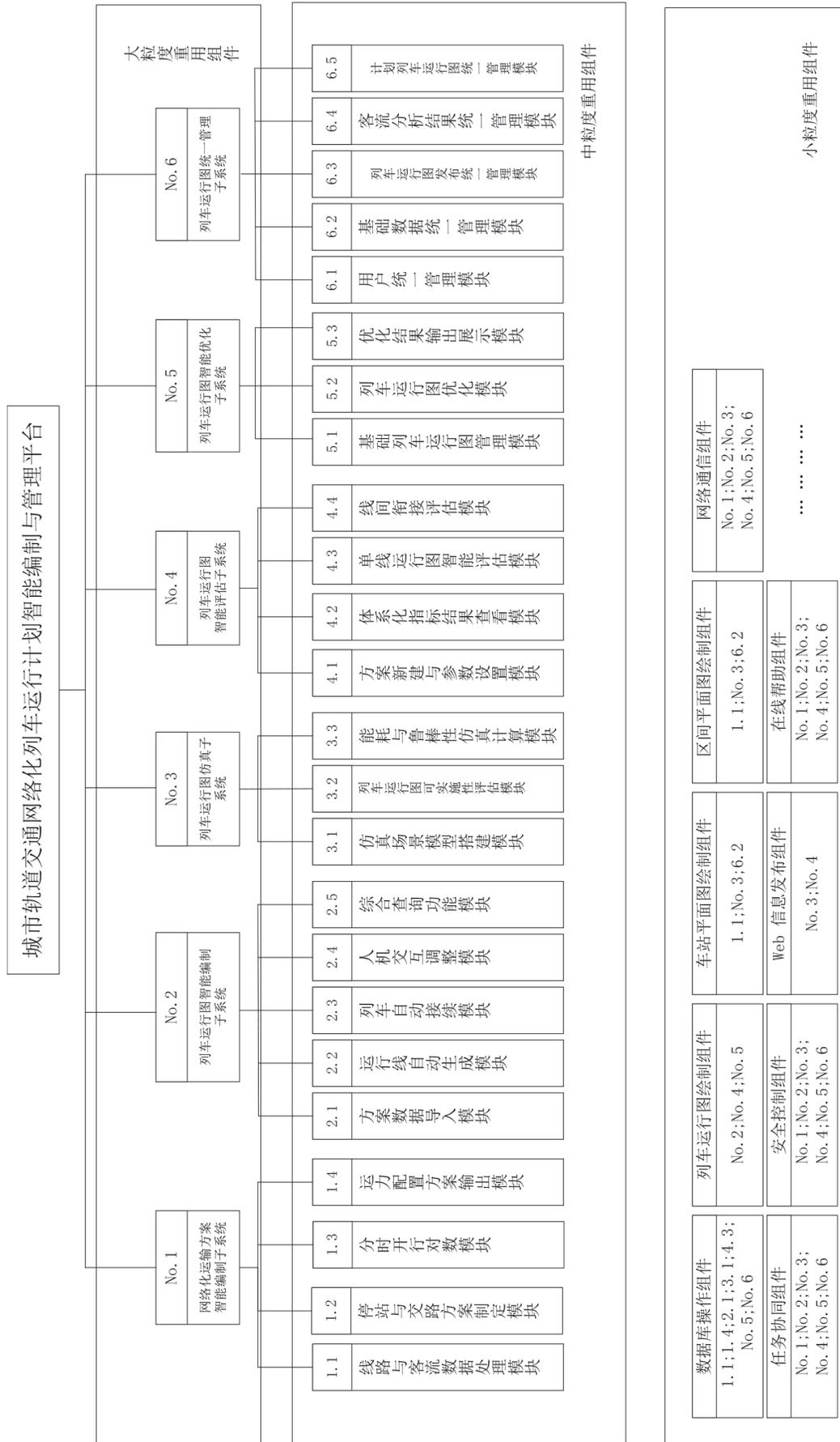


图2 网络化列车运行计划智能编制与管理平台组件结构图

络化列车运行图评价指标方案，从多视角、多层次面对列车运行图编制质量进行评估，以分析现有列车运行图运力资源配置是否合理以及能否适应客流时空分布情况，进而对列车运行图编制优化提供参考。

依据列车运行图评价指标体系构建原则，针对列车运行图评估基本需求，选取效能指标、技术性能指标、服务质量指标、线间协调性指标与安全指标5大类26项。系统以列车运行图编制系统输出的运行图数据及分时断面客流数据作为系统输入，整合评价指标管理、评估方案设定、评价指标计算与存储、评估结果展示功能，形成一套面向列车运行图编制与调整、运营管理等岗位工作人员的列车运行图评估系统。

3.5 列车运行图衔接优化模型

合理的线网列车运行图衔接技术是发挥城市轨道交通网络效益的关键。为了适应网络化运营协同要求，在线路上实施的列车运行图应该充分考虑线网换乘站的换乘衔接效果，为乘客提供更优的服务。首先，详细分析列车运行图的特征、要素，以及编制需要的数据、遵循的原则和运输组织等相关基础理论。其次，针对乘客出行

过程中的换乘环节，描述城市轨道交通客流的分布规律，提出换乘衔接的基本概念并分析对接效果产生影响的多种因素。再次，以最小化线网乘客出行换乘等待时间为目标，考虑彻底的数量约束、列车运行间隔约束、乘客乘车约束，通过分析换乘节点的车一流关系建立基于线间协调的列车运行图衔接优化模型。针对问题特点设计基于模拟退火的粒子群优化算法（PSO-SA），用于求解优化后列车运行图，能够有效提高换乘衔接效果。

4 原型系统开发

为了验证城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制与管理平台技术路线的可行性，做好一定程度的原始技术积累，设计和开发了1个原型试验系统，并已经在北京地铁投入试运行。该系统在Microsoft Visual Studio 2019 环境下运行，以WPF技术为基础，采用B/S与C/S模式相结合的体系结构，通过C#程序语言编制完成。原型系统架构如图3所示，系统主要界面如图4所示。

根据北京地铁的实际情况，将列车运行计划编制工作划分为7个任务区，每个任务区由多名运营策划人员负责。各个任务区之间既可以独立完

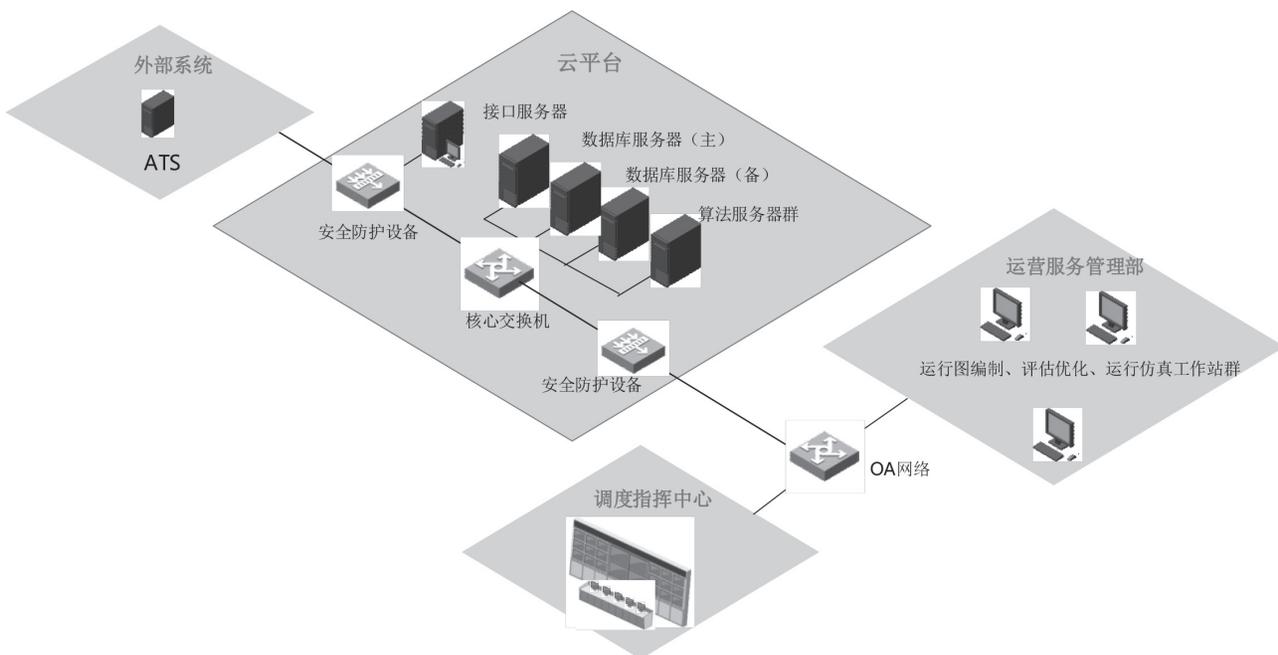
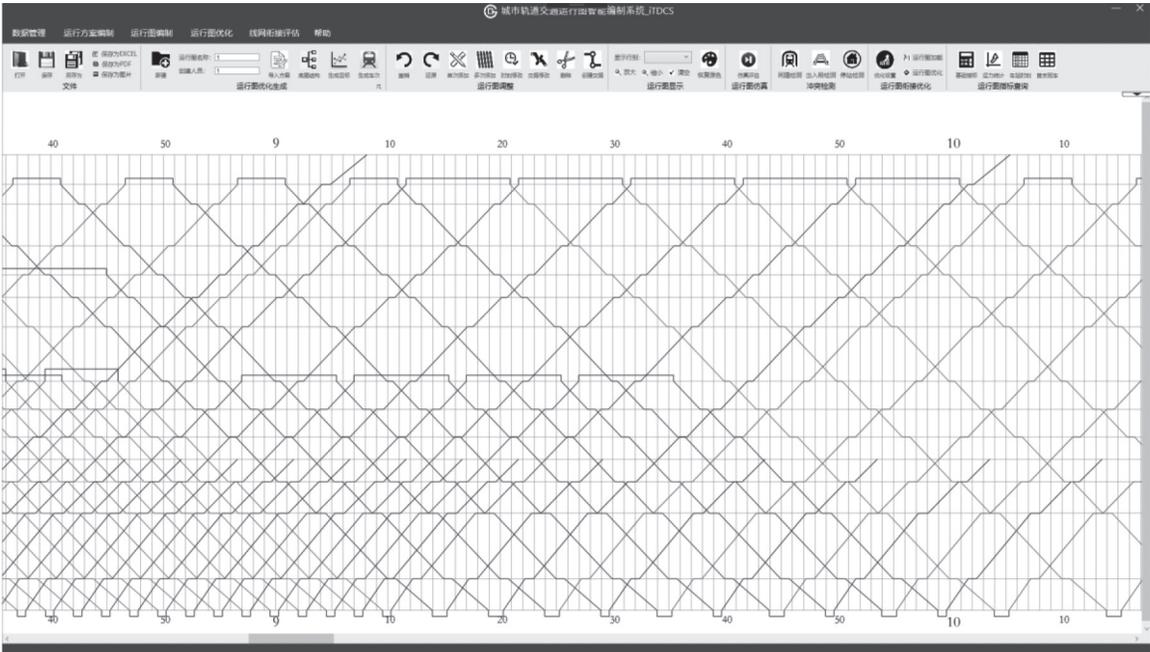


图3 原型系统架构示意图



(a) 示例1



(b) 示例2

图4 原型系统界面示意图

成对应工作内容，又可以相互连接串通完成列车运行计划的全流程编制。一般情况下，运营策划人员通过安装有专业组件的工作站，以C/S模式进行工作，保证运营策划的专业性与安全性。针对运营评估这类用户量大、功能更新频繁、共享性强的功能，用户则需通过B/S模式进行访问。在B/S模式下工作的运营策划人员能够在异地协

同工作，在Web浏览器上进行线网以及线路列车运行图评价指标的整理与输出。试运行期间，城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制与管理平台达到了设计目标要求，将运行图编制周期由5个工作日缩短至1小时以内，缩短80%，并大幅提高了编制过程的自动化率，得到了运营部门的认可。

5 结论与讨论

本文以分析城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制与管理平台为研究目标,提出了系统设计需求和系统体系结构构建方案,从组件层面对系统所用功能组件及结构进行了剖析,针对各子系统的功能需求建立了具体模型及指标体系,提出了求解方法,并展示了原型系统开发及实际应用情况,得到以下认识:

(1) 城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制与管理平台的设计路线正确,在技术上是可行的。它打破了时间和空间的障碍,解决了列车运行计划编制周期长、运力运量匹配程度低、列车运行图适应性差、列车运行图评估方法缺乏、列车运行图优化难、线网列车运行图衔接弱等问题。

(2) 本文在研究城市轨道交通网络化列车运行方案智能编制技术、网络化列车运行图智能编制技术、列车运行图仿真技术、线网列车运行图执行效果评估体系及优化方法的基础上构建了网络化列车运行计划智能编制平台,采用B/S与C/S相结合的体系结构,可以很好地满足城市轨道交通企业运营策划的需要,有效降低了运行图编制周期,提升了城市轨道交通网络化列车运行计划编制全流程智能化水平。

(3) 本文通过对列车运行图编制工作进行模式再造,简化了原有列车运行计划编制工作中多部门编制与审核流程,大幅降低了工作强度与编制周期,实现了网络化运营条件下线网列车运行计划与列车运行图智能编制全流程的集成。

下一步,为了实现城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制与管理平台的实用化与产品化,还需要对列车运行计划的实时调整技术进行更加深入的研究和完善。除此之外,研究建立与城市轨道交通网络化列车运行计划智能编制相配套的技术规范和管理制度也尤为重要。

参考文献

- [1] 杜懿佳,陈钉均,吕红霞,等.城市轨道交通线网列车运行图协同编制系统功能研究[J].铁道运输与经济,2022,44(10): 99-104, 119.
- [2] SCHÖBEL A. An eigenmodel for iterative line planning, timetabling and vehicle scheduling in public transportation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 74(1): 348-365.
- [3] 李正洋,赵军,彭其渊.考虑多交路多编组的城市轨道交通列车交路计划优化[J].铁道学报,2020,42(6): 1-11.
- [4] KASPI M, RAVIV T. Service-oriented line planning and timetabling for passenger trains[J]. Transportation Science, 2013, 47(3): 295-311.
- [5] 许得杰,巩亮,曾俊伟.考虑客流时变需求的大小交路列车时刻表优化模型[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(2): 122-129.
- [6] 冉昕晨,陈绍宽,陈磊,等.考虑客流空间分布的地铁列车节能时刻表优化方法[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(3): 103-110.
- [7] 王典,赵军,钟庆伟,等.城轨线路车底空驶出场路径与时刻表综合优化[J].铁道学报,2019,41(8): 19-31.
- [8] 姚宇,朱晓宁,康柳江,等.城市轨道交通列车时刻表与车底运用整合优化模型[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(1): 200-206.
- [9] 庄巍,陈永生.上海地铁列车运行图自动编制系统[J].计算机工程,2003,29(21): 165-167.
- [10] 魏润斌,贾顺平,毛保华,等.考虑满载率均衡的城市轨道交通直通运营开行方案优化[J].哈尔滨工业大学学报,2023,55(3): 68-77.
- [11] 杨安安,汪波,陈艳艳,等.基于能力影响的城市轨道交通跨线列车开行方案研究[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(6): 221-227.
- [12] 杨安安,汪波,陈绍宽,等.基于客流直达的城市轨道交通跨站停开行方案优化研究[J].都市轨道交通,2022,35(2): 91-98.
- [13] WANG Y, TANG T, NING B, et al. Passenger-demands-oriented train scheduling for an urban rail transit network[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 60(11): 1-23.
- [14] GOVERDE R M P, BESINOVIC N, BINDER A, et al. A three-level framework for performance-based railway timetabling[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 67(6): 62-83.
- [15] 石钰.地铁运行图质量指标评价研究[J].交通标准化,2013(11): 88-91.
- [16] 杨永泰.城市轨道交通网络列车运行图评估方法研究[D].深圳:深圳大学,2019.

作者简介:

刘宇然 (1986—), 男, 北京人, 本科。研究方向: 城市轨道交通行车组织优化。

E-mail: 496832272@qq.com

李超 (1996—), 男, 山西大同人, 博士研究生。研究方向: 复杂系统建模与仿真。

E-mail: 19114039@bjtu.edu.cn

张含笑 (1990—), 女, 北京人, 硕士。研究方向: 城市轨道交通行车组织优化。

E-mail: 15120045177@139.com

李鉴 (1982—), 男, 北京人, 本科。研究方向: 城市轨道交通行车组织优化。

E-mail: 110955048@qq.com

刘媛 (1982—), 女, 北京人, 本科。研究方向: 轨道交通运输组织优化。

E-mail: 787962498@qq.com

唐金金 (1982—), 男, 广西桂林人, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 交通运输组织信息化与智能化。

E-mail: jjtang@bjtu.edu.cn

(收稿日期: 2023-05-26)

Intelligent Compilation and Management Platform for Networked Train Operation Plan of Urban Rail Transit

LIU Yuran¹, LI Chao², ZHANG Hanxiao¹, LI Jian¹, LIU Yuan¹, TANG Jinjin²

(1. Beijing Subway Operation Co., Ltd., Beijing 100080, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Considering the system design requirements of real-time, dynamic, diversity, intelligence and safety, a set of construction scheme of intelligent compilation and management platform for networked train operation plan of urban rail transit was put forward. The system includes basic data management subsystem, networked transportation scheme intelligent compilation subsystem, train diagram intelligent compilation subsystem, train diagram simulation subsystem, train diagram intelligent evaluation subsystem, train diagram intelligent optimization subsystem and unified train diagram management subsystem, which integrates networked train operation scheme compilation model, networked train diagram compilation model, networked train diagram simulation model and networked train diagram connection optimization model, and a designed evaluation index system for networked train diagram. A prototype system consisting of algorithm server, database server and interface server, etc. was developed and a three-layered architecture combining C/S and B/S mode was formed. The trial operation in Beijing subway shows that the intelligent compilation and management platform for networked train operation plan of urban rail transit based on human-computer interaction is feasible and effective. With the completion of the platform, the preparation time of train operation plan is shortened from 5 working days to less than 1 hour, and the preparation period of the train operation plan is shortened by 80%.

Keywords: Urban Rail Transit; Networked; Train Operation Plan; Intelligent Compilation; C/S; B/S

制造企业供应链数字化能力评价体系研究

李媛智, 郭枝权

(中国软件评测中心, 北京 100048)

摘要: 随着全球供应链体系不断受到冲击, 供应链数字化能力建设成为加快推进新型工业化、使制造企业实现更高质量发展的必然选择。提出一套客观、量化评价制造企业供应链数字化能力水平的评价体系, 可以更好地帮助制造企业推动供应链数字化转型进程。基于层次分析法(AHP)和德尔菲法(Delphi Method), 从供应链物资流、数字化进程和企业结构三个维度出发, 抽象出制造企业供应链和业务所需要具备的7大能力单元及下属的17个能力模块, 确定权重系数, 考虑专家组调整因素, 形成了制造企业供应链数字化能力评价体系。实践应用表明, 该评价体系的评价结果能够帮助制造企业掌握供应链运作状况和数字化水平, 为制造企业的供应链数字化转型和数字化供应链建设规划提供了重要的参考依据。

关键词: 制造企业; 供应链; 数字化转型; 能力评价; 新型工业化

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-060-08

工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.008

0 引言

供应链活动分为研究与计划、寻源采购、生产制造、物流交付(仓储与运输)、售后与支持^[1]。国务院办公厅印发的《关于积极推进供应链创新与应用的指导意见》(国办发〔2017〕84号)^[2]明确提出“供应链是以客户需求为导向, 以提高质量和效率为目标, 以整合资源为手段, 实现产品设计、采购、生产、销售、服务等全过程高效协同的组织形态”。新冠肺炎疫情爆发后, 全球供应链体系遭受重创, 物流的中断充分暴露了供应链体系的脆弱性。制定供应链战略, 优化供应链策略, 提出科学有效的供应链运营机制, 提升产业链供应链韧性和安全水平, 成为新形势下链上企业应对市场挑战的必然选择。

在国家大力推进智能制造的背景下, 供应链数字化转型也受到了广泛重视。供应链数字化转型是塑造供应链柔性、提高制造企业应对市场风险能力的有效手段, 在制造业转型升级中被赋予

重要战略意义。2021年11月, 工业和信息化部印发《“十四五”信息化和工业化深度融合发展规划》(工信部规〔2021〕182号)^[3], 将“产业链供应链数字化升级行动”作为五大重点工程之一。2021年12月, 工业和信息化部等八部门联合印发的《“十四五”智能制造发展规划》(工信部联规〔2021〕207号)^[4]中也明确提出了“打造智慧供应链”的要求。在制造企业中, 相较于研发、销售等管理过程, 供应链数字化转型因涉及价值链上下游各职能领域而面临更加严峻的挑战。波士顿咨询公司与麻省理工学院的合作调研、国家工业信息安全发展研究中心联合阿里研究院的调研等均显示, 目前企业数字化成效主要来自产品研发和市场拓展方面, 数字化技术对供应链的改善效果相对较小^[5]。尽管相较于研发、销售, 供应链数字化转型涉及环节更为复杂、项目实施难度更大、对企业整体能力要求更高, 但其依然是制造企业实现高质量发展的重要一环, 尤其是在目前日益复杂的市场竞争环境下, 供应

链数字化转型能显著提升企业的风险管理能力, 有助于维护供应链安全稳定^[6], 为我国加快推进新型工业化, 构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局提供基本保障。

对于如何评价、提高供应链管理能力, 前人做了大量研究。有学者从不同角度构建了对管理制度、管理层次以及管理对象进行综合评价的管理评价体系^[7], 其中供应链管理成熟度是衡量供应链能力和水平的重要指标之一, 受到广泛关注。早期, 研究者主要从环境、资源、管理、客户满意度等维度出发, 提出供应链成熟度模型, 诊断开展供应链业务流程的能力, 以满足供应链战略的要求^[8]。而近年来, 随着我国对供应链数字化转型关注度的日益加深, 围绕供应链数字化转型进行现状、趋势、实施路径研究的文献数量持续增长^[9], 并逐步向实践推进, 为深入认识制造企业供应链数字化转型需求和目标提供了参考。随着企业供应链数字化转型的深入开展, 评估环节越来越受到重视^[10], 如王瑞等^[11]从战略、运营技术、文化组织能力、生态圈四个维度建立了制造企业数字化成熟度评价模型, 基于层次分析法 (AHP) 和决策试验与评价实验室方法对某商用车企业数字化成熟度进行了评估。本文在前人已有研究的基础上, 结合笔者所在机构和笔者本人多年制造企业服务经验, 建立基于层次分析法和德尔菲法 (Delphi Method) 的制造企业供应链数字化能力评价体系, 以期为制造企业构建数字化供应链提供理论和实践层面的指导。

1 供应链数字化能力评价模型

供应链数字化转型是运用新一代信息技术, 将供应链各环节作业数据进行量化和数字化, 充分验证、收集、优化, 结合大数据技术与人工智能 (AI) 技术, 对数据进行切片可视化、分析、优化、KPI化、预测, 乃至利用机器人流程自动化 (RPA) 技术进行智能调度, 代替人工作业的一种工业运行新范式^[12]。以新一代信息技术为依托的供应链数字化转型, 使企业供应链逐步具备更高的灵活性、更低的运营成本、更强的柔韧性, 帮助企业更快速地响应客户需求、更敏锐地捕捉外界

环境变化, 为市场提供更高品质的产品和服务^[13]。

数字化能力评价, 是指对组织或个人在数字化领域的的能力进行评估和分析, 它能够帮助企业更好地了解其数字化水平和发展方向。制造企业供应链数字化能力评价, 是指对企业利用数字化技术赋能企业内部供应链、实现跨价值链管理的能力进行评估和分析, 评价结果可以帮助企业了解自身供应链的竞争力和优势, 从而使得企业制定更加有效的供应链数字化建设战略和计划。

1.1 模型架构

制造企业供应链数字化能力, 主要体现在数字化技术对企业不同结构层级、不同业务环节的活动赋能。沿着企业生产活动中物资流动的方向, 我们从三个维度, 即供应链物流流、数字化进程、企业结构, 进行了解构, 构建了企业供应链数字化能力评价模型架构, 如图1所示。

供应链物流流, 由计划、采购、生产/委外、运输、服务五个业务环节构成, 涉及企业的产品设计、采购、生产、销售、服务等业务活动及其协同, 基本覆盖了物资在企业中的流通过程。

数字化进程, 即企业应用数字化技术的范围和程度, 可以从基础技术、数据管理、分析应用、安全流通四个层级进行评价。

企业结构, 即企业的组织层级, 对于大部分制造企业, 大体可划分为企业、部门/车间、厂房/产线、设备四个层级, 体现从机器到工厂、从工厂到企业的垂直整合作用。

制造企业始终追求生产效率更高、产品品质更好、资源消耗更少、市场响应更快、环境影响更小、生产成本更低, 以最优化的方式向最需要的用户提供最合适的产品, 为用户、为企业自身及员工、为社会创造最大的价值。本文在模型架构构建的过程中也贯彻了这一理念, 充分考量了供应链各环节和各层级中数字化技术对企业改善质量、成本、准时、环保四项指标的赋能情况, 并综合考虑人员、设备、物料、环境四项因素的影响, 以及数字化技术的应用对质量、成本、准时、环保管理的赋能效果, 如图1左下角所示。

1.2 评价体系

1.2.1 能力单元和能力模块的确定

为了实现对制造企业供应链数字化能力的科学、全面评价，本文研究团队在模型架构的基础上，从数字化技术赋能的角度，归纳、总结出制造企业供应链和业务所需要具备的能力，抽象为7个能力单元，并结合制造企业供应链实际业务场景，提炼出代表供应链核心业务能力的考察点，整理为17个能力模块，最终形成制造企业供应链数字化能力评价体系，如图2所示。

1.2.2 计划能力

供应链计划的目的是实现供应链整体价值最

大化，即用最低的成本满足客户需求。供应链计划包括对供应链主要结构的说明，以及关于设施、库存、运输、信息、采购、定价的供应链设计决策。本能力单元将对需求计划制定能力、生产计划制定能力、物流计划制定能力和库存部署能力进行评价。

1.2.3 采购能力

采购能力是指制造企业在原材料、商品等的采购方面所具备的能力，一般包括商务和技术两个方面。采购能力对企业的成本、质量等品质指标和生产制造等业务活动均具有较深远的影响，是企业供应链的核心环节之一。本能力单元将从采购计划、过程管理、供应商管理三个环节进行能力评价。

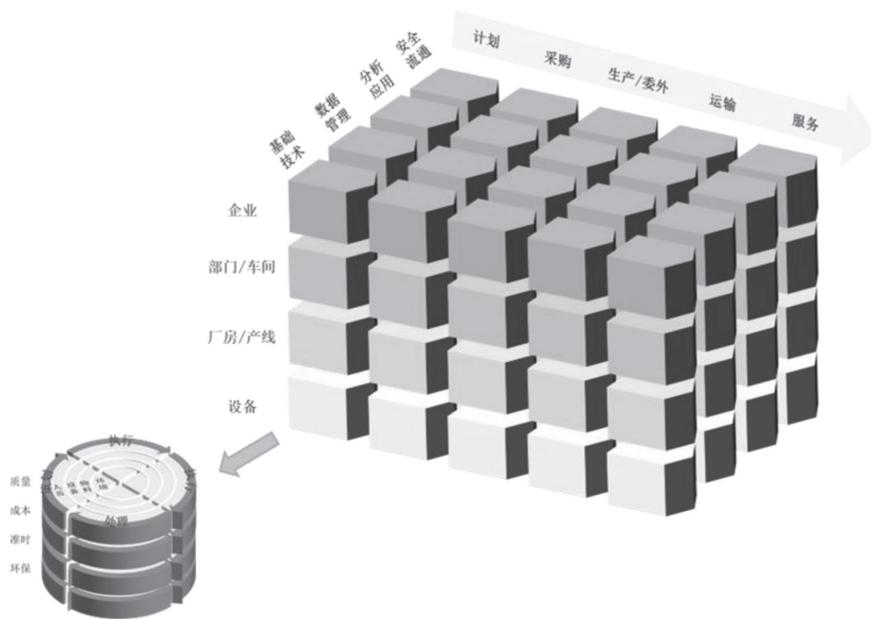


图1 制造企业供应链数字化能力评价模型架构

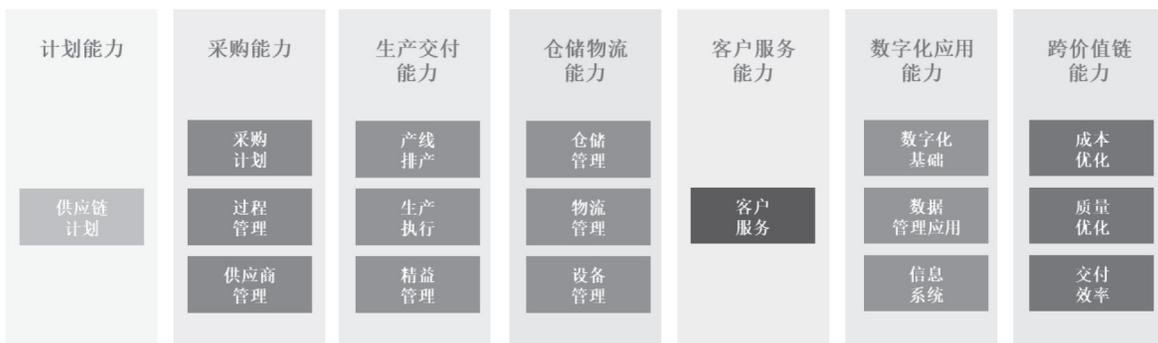


图2 制造企业供应链数字化能力评价体系

1.2.4 生产交付能力

生产交付能力是指制造企业在承接订单后, 能够按照客户需求, 按时、按质地交付订单产品的能力。生产交付能力是企业效率的体现, 直接影响交货期, 是除质量外对客户满意度影响最大的因素。本能力单元将从产线排产、生产执行、精益管理三个环节进行能力评价。

1.2.5 仓储物流能力

仓储物流能力包括具有智能化和自动化功能的设备和设施、仓储管理软件、信息化系统、现场技术支持、设备管理和物流管理等多个方面。仓储物流能力是保障制造企业生产交付能力的重要环节之一。本能力单元将从仓储管理、物流管理、(仓储)设备管理三个环节进行能力评价。

1.2.6 客户服务能力

服务是制造企业直接面对客户的部分, 是除产品之外企业品牌最重要的“形象大使”。当代的市场营销观点强调, 企业应该更多地了解每个客户的需求, 并将其视为市场营销的核心。只有深入了解不同客户的需求, 才能正确选择合适的客户关系管理策略。客户关系管理技术在这一过程中的运用日益频繁, 为企业及其客户提供为维持长期高效合作关系所需的各种信息。供应链服务是供应链在市场竞争中服务资源与能力的体现, 也是占据市场份额、获取额外利润的体现。供应链服务实现的是一种按需的和主动的智能服务, 即通过捕捉用户的原始信息, 利用后台积累的数据, 构建需求结构模型, 进行数据挖掘和商业智能分析, 除了可以分析用户的习惯、喜好等显性需求外, 还可以进一步挖掘与时空、身份、工作生活状态关联的隐性需求, 主动给用户提提供精准、高效的服务。本能力单元将对渠道管理能力、服务质量管理能力、退换货管理能力、问题与事故管理能力进行评价。

1.2.7 数字化应用能力

狭义的数字化是指利用信息系统、传感器、

机器视觉等信息通信技术, 将物理世界中复杂多变的数据、信息和知识转换为一系列二进制代码, 引入计算机内部, 形成可识别、可存储、可计算的数字和数据, 然后用这些数字和数据建立相关的数据模型, 进行统一的处理、分析和应用, 这同时也是数字化的基本过程。本能力单元将从数字化基础、数据管理应用、信息系统三个方面进行能力评价。

1.2.8 跨价值链能力

本文的跨价值链能力主要指制造企业内部与供应链能力相关的跨部门、跨组织协作能力, 主要体现在全局的成本管理、质量管理和交付管理。因此, 本能力单元将从成本优化、质量优化、交付效率三个方面进行能力评价。

2 供应链数字化能力评价方法

2.1 评价方法的选择

层次分析法(AHP)是指将总是与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次, 并在此基础之上进行定性和定量分析的决策方法。作为一种综合性评价方法, 层次分析法适用于几乎所有领域^[14]。德尔菲法(Delphi Method)又称专家调查法, 是主要利用专家的知识、经验或偏好进行评级、评分或赋权的方法。该方法是一种利用函询形式进行集体匿名思想交流的方法, 被广泛地应用于工业、商业、教育、卫生保健等领域。

在实际评价过程中, 首先采用层次分析法, 确定各个能力单元和能力模块的权重关系; 然后采用专家调查法, 根据各评价指标要求, 深入制造企业收集指标数据, 并根据专家的知识 and 经验积累进行评价。这种组合评价的方式, 在一定程度上避免了单一评价方法的片面性, 增强了评价结果的客观性和可信度^[15]。

2.2 指标权重的确定

制造企业供应链数字化能力评价体系给出的评价指标分为三级, 包括能力单元(一级指标)7

项、能力模块（二级指标）17项，以及能力组件（三级指标）50项。

利用图2的层次关系，根据层次分析法进行计算，即可得到各能力单元和能力模块的权重。层次分析法创始人Thomas L. Saaty通过实验比较了不同打分标度下判断结果的正确性，实验表明1~9分的评分标度是最合适的。获得基础性数据后，为了比较同一层次指标对其对应的上一层指标的影响程度，需要构造判断矩阵。如设定制造企业供应链数字化能力评价体系的目标层为T，则

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \cdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \ddots & \cdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中：当 a_{ij} 按照上一级指标重要程度与下一级指标重要程度的比值进行表征时，两个指标相同，同等满意程度记为1。

考虑到供应链在流程制造业和离散制造业中发挥的作用和影响力不同，在实际应用前，笔者所在团队邀请了7位来自装备制造、医药、食品、电子信息等不同行业的专家，组成专家组，根据流程制造和离散制造的不同特点，讨论确定了两组不同的判断矩阵，最终形成了分别适用于流程制造业和离散制造业的指标权重，作为开展评估工作的基础。

在制造企业供应链数字化能力评价体系的实际应用中，被评企业可以根据所属行业选择使用对应的指标权重，并结合企业自身规模、供应链特性等提出对指标权重的调整建议和理由，由专家组讨论后确定是否对指标权重进行调整以及调整的尺度。一般来讲，对具体指标的权重调整比例不应超过10%。

2.3 评价结果的计算

评价对象总分由各级指标得分加权计算得出，每一级指标的得分可以依据在下一级的得分情况加权计算得出。

各能力组件得分D为该能力组件每项评价指标的算术平均值，计算公式为

$$D = \frac{1}{i} \sum_{m=1}^i X_m \quad (2)$$

式中： X_m ，评价指标得分； i ，能力组件内包含的评价指标数量。

各能力模块得分C为该能力模块内各能力组件的加权平均值，计算公式为

$$C = \frac{1}{j} \sum_{m=1}^j (\beta_m \times D_m) \quad (3)$$

式中： D_m ，能力组件得分； β_m ，能力组件权重； j ，能力模块内包含的能力组件数量。

能力单元得分B为该能力单元内各能力模块的加权平均值，计算公式为

$$B = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k (\gamma_m \times C_m) \quad (4)$$

式中： C_m ，能力模块得分； γ_m ，能力模块权重； k ，能力单元内包含的能力模块数量。

2.4 评价等级划分

制造企业供应链数字化能力评价等级定义了该企业供应链发展的阶段水平，描述了该企业中的组织逐步向供应链数字化转型迈进路径，代表了该企业当前实施供应链数字化转型的程度，同时也体现了供应链数字化转型的评价结果。制造企业供应链数字化能力分为以下5个等级，如图3所示。制造企业在实施供应链数字化转型时，首先要定位自身当前的等级现状，并充分结合企业战略、发展规划以及现有的资源水平，制定适合企业发展的目标，据此引入各项先进技术，循序渐进，完成自我转型路径的定义。

2.4.1 初始级

在这个级别下，制造企业还没有开始规划数字化供应链，但已经具备供应链基本组织职能，有了供应链管理的意识。企业已有对应的供应链标准流程，能够提高部门之间的协同效率，具备了进行供应链数字化转型的基础条件。

2.4.2 基础级

在这个级别下，制造企业已经开始有供应链

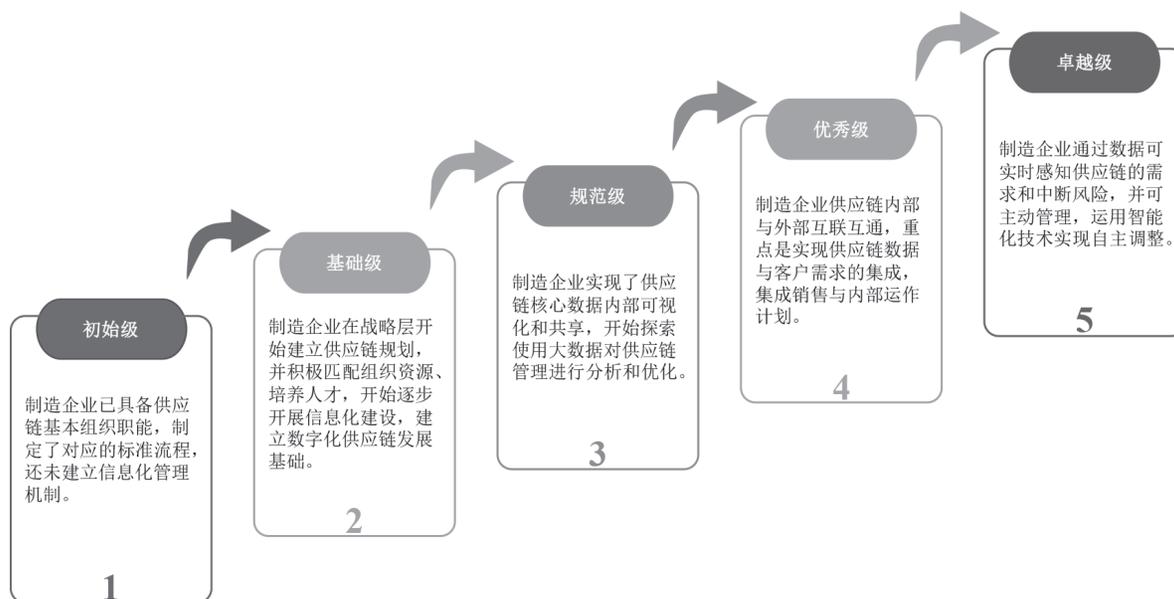


图3 制造企业供应链数字化能力等级

数字化转型愿景，供应链数字化战略已经成为企业供应链数字化转型的重要组成部分，企业在各业务流程领域开始规划供应链数字化转型措施。战略规划实现了从组织资源到技术赋能的转变，开始培养供应链专有人才，开始规划建立对应的信息化体系，且核心环节已部分实现业务流程信息化，数据趋向结构化，但还未实现数字化协同作业。

2.4.3 规范级

在这个级别下，制造企业已经建立了供应链数字化管理的基础。企业供应链实现了核心数据可视化，供应链流程参与者都可以共享数据。企业开始探索使用大数据对供应链管理进行分析和优化，在核心流程探索协同作业，并开始培养数据人才、建立数据平台，从组织层面推动供应链数字化转型持续进行。

2.4.4 优秀级

在这个级别下，制造企业在基于内部供应链协同作业的基础上，寻求与外部数据的融合，包含与供应商及客户数据的集成，这可将客户需求完全、实时集成到供应链中，而客户数据成为企业供应链管理的驱动力和决策依据。组织内的数

据治理逐步完善，数据价值挖掘成为组织内普遍具有的能力基础。

2.4.5 卓越级

在这个级别下，制造企业基于全产业链端端的供应链协同，形成了协同价值网络，已具备强大的数据处理能力，包括商业智能、预测分析、机器学习和网络智能等，可通过分析实时数据，监控与预测供应链的需求或中断，运用各项智能化技术实现供应链自主调整，让企业在决策、生产、客户服务的价值链中反应更加敏捷高效。

3 制造企业供应链数字化能力评价体系应用

本章以装备制造企业——A企业为例开展实证研究。在每个能力组件内，依据企业能力由低到高设定了“无、有、用、熟、优”五个等级，为了更直观地表现评价结果，使用数值0~20、20~40、40~60、60~80、80~100依次对应上述评价等级。

在采用德尔菲法的过程中，邀请了装备制造行业专家、信息化专家、精益生产专家、数字化专家共5人组成专家团队，并邀请A企业IT、采购、生产制造、销售、仓储等各供应链相关部门技术骨干人员11人组成内部评估团队，共计16人参与了评价工作。

3.1 指标权重的调整和确认

在开展正式评估前，专家团队与A企业内部评估团队共同召开了评估准备会。会上，A企业技术骨干人员向专家组介绍了企业的组织架构、主要产品、主要生产流程、供应链构成等基础情况，并在原有的离散制造行业指标权重基础上提出了调整建议的理由。专家团队经过质询和内部讨论，部分接纳了A企业的调整建议。调整后的指标权重经专家团队和A企业内部评估团队确认后，作为在A企业开展评估工作的依据。

3.2 正式评估

正式评估期间，专家团队首先在A企业技术骨干人员的陪同下，走访了A企业生产车间、原料库、备件库、成品库区等区域，然后对内部评估团队成员逐一进行了访谈，详细了解了A企业各部门的工作模式、信息系统建设和应用、数字化装备应用、跨部门协同等情况。

访谈结束后，专家团队根据对A企业供应链数字化能力现状的认识，对应供应链数字化能力评价中的各项评价指标，逐一讨论确定专家评分结果。同时，A企业内部评估团队根据自身对企业能力的认知进行评分。双方评分完成后，再遵循专家优选原则计算得到A企业的最终评估得分。专家优选原则，即以专家评分作为基准分数，通过加权平均算法计算最终得分。企业自评分数与专家测评分数的差异越大，则专家评分所占的比重越大。

计算过程中，依据已确定的各项指标权重，加权计算出A企业各能力组件最终得分，并逐级计算得到各能力模块、能力单元的得分。A企业供应链数字化能力评价结果如表1所示。

3.3 对评价结果的讨论

A企业供应链数字化能力评价最终得分为29.63分，总体处于基础级水平。整体来看，A企业的生产交付能力较其他能力单元的评估得分高，但在数字化应用、客户服务以及计划能力

表1 A企业供应链数字化能力评价结果

序号	能力单元	得分	权重
1	计划能力	22.73	13.2%
2	采购能力	37.50	13.2%
3	生产交付能力	50.00	11.8%
4	仓储物流能力	27.50	17.1%
5	客户服务能力	20.22	13.1%
6	数字化应用能力	21.36	18.4%
7	跨价值链能力	34.09	13.2%

方面表现较弱。从A企业的实际情况来看，在生产制造环节，A企业数字化设备占比已达到80%左右，覆盖了全部核心业务环节，并通过ERP、MES、WMS等信息系统的集成，实现了生产数据的自动化采集和应用，但在客户服务方面，暂未建立客户服务平台，对客户服务的知识积累、客户服务人员的管理等还采用较传统的方式。此外，在计划制定方面，由于A企业缺乏系统集成的支持，采购计划无法自动生成。

总体看来，以上评价结果客观反映了A企业现阶段的能力短板问题，对A企业具有参考价值。在后续的供应链数字化转型中，建议企业首先从上述三项能力的提升入手，其中需要特别重点关注数字化应用能力的提升。

4 结束语

在供应链数字化转型的未来主导模式下，国内制造企业越来越重视供应链管理能力的提升。本文以广泛的企业调研和丰富的专家服务经验为基础，构建了制造企业供应链数字化能力评价体系，内容涵盖了制造企业在供应链数字化转型中涉及到的诸多方面，并在服务企业过程中对评价体系的适用性进行了验证。研究表明，此评价体系有助于制造企业掌握供应链运作状况和数字化水平，为制造企业的供应链数字化转型和数字化供应链建设规划提供了重要的参考依据。期望该评价体系的应用可以引导制造企业合理投入资源，有效降低转型风险，为制造企业实施供应链数字化转型提供全面、坚实的服务支撑。

参考文献

- [1] 梁学栋, 刘大成, 李智. 供应链管理[M]. 北京: 经济管理出版社, 2020.
- [2] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于积极推进供应链创新与应用的指导意见: 国办发〔2017〕84号[Z].
- [3] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发“十四五”信息化和工业化深度融合发展规划的通知: 工信部规〔2021〕182号[Z].
- [4] 工业和信息化部, 国家发展和改革委员会, 教育部, 等. 八部门关于印发《“十四五”智能制造发展规划》的通知: 工信部联规〔2021〕207号[Z].
- [5] 赵新阳, 邱伏生. 企业供应链数字化的挑战与应对[J]. 物流技术与应用, 2023, 28(2): 130-134.
- [6] 张树山, 胡化广, 孙磊, 等. 供应链数字化与供应链安全稳定: 一项准自然实验[J]. 中国软科学, 2021(12): 21-30, 40.
- [7] 汪莹, 邓雪凤. 供应链管理成熟度的评价体系与方法[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1340-1344.
- [8] DOS SANTOS I M, DE MIRANDA MOTA C M, ALENCAR L H. The strategic alignment between supply chain process management maturity model and competitive strategy[J]. Business Process Management Journal, 2021, 27(3): 742-778.
- [9] 庄玉良, 王雨晴. 我国数字化供应链研究的现状与趋势: 基于CiteSpace的文献计量分析[J]. 物流技术, 2023, 42(2): 103-109.
- [10] 胡冬青, 杨厚满. 企业数字化转型评估方法[J]. 质量与认证, 2022(1): 57-58.
- [11] 王瑞, 董明, 侯文皓. 制造型企业数字化成熟度评价模型及方法研究[J]. 科技管理研究, 2019, 39(19): 57-64.
- [12] 郭恒涛, 龚俊, 臧梦璐. 数字化供应链: 用智慧创造价值[J]. 华北电业, 2022(5): 78-80.
- [13] KHAN S A, NAIM I, KUSI-SARPONG S, et al. A knowledge-based experts' system for evaluation of digital supply chain readiness[J]. Knowledge-Based Systems, 2021, 228(9): 107262.
- [14] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.
- [15] 何慧霞, 魏桂英, 武森, 等. 智能制造评价理论研究现状及未来展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 56-63.

作者简介:

李媛智 (1979—), 通信作者, 女, 北京人, 硕士, 工程师。研究方向: 工业企业智能制造、数字化转型研究, 智能制造能力成熟度评估。
E-mail: liyuanzhi@cstc.org.cn

郭枝权 (1987—), 男, 黑龙江宝清人, 工程师。研究方向: 智能制造、数字化转型。

(收稿日期: 2023-04-19)

Research on Evaluation System of Supply Chain Digitalization Ability of Manufacturing Enterprises

LI Yuanzhi, GUO Zhiquan

(China Software Testing Center, Beijing 100048, China)

Abstract: With the continuous impact on the global supply chain system, the construction of digitalization ability of supply chain has become an inevitable choice to advance the new industrialization and enable the manufacturing enterprises to achieve higher quality development. A set of objective and quantitative evaluation system was put forward for evaluating the level of supply chain digitalization ability of manufacturing enterprises, as to better help manufacturing enterprises to promote the transformation process of supply chain digitalization. Based on the analytic hierarchy process (AHP) and Delphi Method, starting from the three dimensions, i.e. supply chain material flow, digitalization process and enterprise structure, 7 capacity units and 17 subordinate capacity modules required by the supply chain and business of manufacturing enterprises were abstracted, their weight coefficients were determined, and the adjustment factors of expert group were considered, thus forming the evaluation system of supply chain digitalization capacity of manufacturing enterprises. The practical application shows that the evaluation results of such an evaluation system can help the manufacturing enterprises master the operation status and digitalization level of the supply chain, and provide an important reference for the digital transformation and construction planning of supply chain for manufacturing enterprises.

Keywords: Manufacturing Enterprise; Supply Chain; Digital Transformation; Ability Evaluation; New Industrialization

汽车安全气囊气体发生器生产线设备综合效率 (OEE) 改善

张俊, 尚云平

(湖北航鹏化学动力科技有限责任公司, 湖北襄阳 441000)

摘要: 设备综合效率 (OEE) 可以用于评价制造企业设备有效利用率, 进而衡量制造企业生产效率, 助力加快推进新型工业化。从某公司汽车安全气囊气体发生器生产线现状出发, 收集节拍、产能、停机等数据, 针对其设备利用率低且产能严重不足的问题, 识别出影响因素, 建立相应的改善对策。改善后, 生产节拍从25.30 s缩短至15.70 s, 控制在理论设计节拍16 s以内, 日产能从3 200发提升至4 500发。对改善前后的OEE三因素进行对比, 时间稼动率从83.42%提升至94.89%, 质量合格率从96.81%提升至99.53%, OEE从60.30%提升至87.18%, 提升了26.88个百分点。较好实现了OEE与精益管理思想的结合, 达到了提高设备利用率和产能的目的, 为制造企业创造了利润, 提升了制造企业的竞争力。

关键词: 设备综合效率 (OEE); 制造企业; 新型工业化; 生产节拍; 精益管理

中图分类号: T-9 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-068-10

工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.009

0 引言

随着经济社会的发展以及人们生活水平的提高, 汽车走进千家万户^[1], 人们对汽车安全性的要求也越来越高。安全气囊作为消除汽车安全隐患的便捷技术, 愈发受到汽车研发和制造企业的重视^[2]。气体发生器是安全气囊系统的核心部件, 好比安全气囊的“心脏”, 市场需求较大, 产业竞争激烈, 短周期、高质量、低成本的气体发生器生产模式已成为很多汽车研发和制造企业追求的目标^[3]。

设备是制造企业的重要生产工具, 设备发生故障或效率低下不仅会降低生产效率、延长生产周期, 还可能导致产品不良, 因此, 设备管理在企业生产管理中必须受到重视^[4]。然而, 大多数企业的生产线看似运作良好, 实际上并没有以最好的状态进行工作, 设备利用率不高, 无形中增加了企业的生产成本, 造成了巨大浪费^[5]。为了解决这一问题, 设备综合效率

(Overall Equipment Effectiveness, OEE) 这一概念被提出^[6]。OEE不仅可以用于评价单台设备的效率, 也可对整条生产线的效能进行评估^[7]。目前, OEE已成为评价设备有效利用率, 进而衡量企业生产效率的重要标准, 可以较全面地反映设备管理对设备效率的影响^[8]。有很多研究人员对OEE的提升开展了有益的探索工作。巫少龙等^[8]围绕生产“六大损失”, 查找出造成生产损失的原因并制定了具体改善对策, 将IGA生产线的OEE从60.4%提升至74.5%。万俊^[9]提出了通过改进模具结构, 优化模具上机安装方式, 减少刀片损耗来实现快速换模的方法, 将自动开线压接机的OEE从77.7%提升至81.2%。徐伟^[10]建立了电子信息系统以自动记录设备运行、停机等数据, 并制定了预防性维护保养计划, 使AI设备的OEE达到目标水平。黄鹏鹏等^[11]将OEE与工业工程相结合, 通过对时间稼动率、性能稼动率、合格率进行改善, 使生产线的OEE从71.5%提升至83.1%。

本文以某公司汽车安全气囊气体发生器生产

线为研究对象, 引入OEE理论, 识别出生产线各工序的设备效率损失, 确定易发生故障的瓶颈工位, 从而开展有针对性的改善活动, 起到降低设备故障率和产品不良率、释放出损失或隐藏的产能等作用^[12]。在此过程中, 充分结合了精益管理思想, 降低了瓶颈工位节拍, 提高了设备利用率, 达到了进一步提高产能和缩短生产周期等目的^[7]。

1 OEE理论概述

OEE是用来表达实际生产能力相对于理论产能的比率, 是企业监测设备运转损失、研究生产效率改善对策的一种方法。OEE不是被动的工具, 而是企业生产过程改善的驱动力^[13], 它的使命是帮助企业实现精益生产^[14]。OEE改善可以降低生产过程中的浪费, 保障生产线的稳定运行^[11]。具体而言, OEE改善可以帮助企业识别和消除生产过程中可能发生的各类损失, 包括故障停机损失、短暂小停机损失、速度降低损失、产品换型损失、不良品及返工损失等^[15]。影响OEE指标的三个因素分别是时间稼动率、性能稼动率、质量合格率, 具体计算公式为

$$\text{OEE}=\text{时间稼动率}\times\text{性能稼动率}\times\text{质量合格率} \quad (1)$$

1.1 时间稼动率

时间稼动率由设备的稼动时间除以负荷时间得到, 是设备故障停机损失的评价指标。设备故障停机损失主要包括计划停机和计划外停机, 计划停机包括用餐休息、换料、开班点检、6S清扫等, 非计划停机包括设备故障、物料短缺、质量缺陷停机等, 具体计算公式有

$$\text{时间稼动率}=\text{稼动时间}\div\text{负荷时间} \quad (2)$$

$$\text{负荷时间}=\text{工作时间}-\text{计划停机时间} \quad (3)$$

$$\text{稼动时间}=\text{负荷时间}-\text{非计划停机时间} \quad (4)$$

1.2 性能稼动率

性能稼动率由实际产出时间除以实际运转时间(即稼动时间)得到, 是用来评价设备在生产过程中是否以最大速度运行的指标, 即设备生产速度的损失程度。设备生产速度损失包括设备缺

乏保养引起的节拍变慢以及设备短暂小停机等损失, 具体计算公式有

$$\text{性能稼动率}=\text{实际产出时间}\div\text{稼动时间} \quad (5)$$

$$\text{实际产出时间}=\text{理论节拍}\times\text{生产总量} \quad (6)$$

1.3 质量合格率

质量合格率是指初期合格率, 并非不良品返工后的最终合格率, 它是质量损失的评价指标, 用来反映报废产品、需要返工产品等初期没有满足质量要求的情况, 具体计算公式为

$$\text{质量合格率}=(\text{生产总量}-\text{不良品数})\div\text{生产总量} \quad (7)$$

2 现状分析

某公司汽车安全气囊气体发生器生产线是一条自动化生产线, 主要包括金属件装配、药剂装填、激光焊接、检测等工序, 全线呈U型工位布局(如图1所示), 共10个工位, 2名作业员, 1名配料员, 生产线理论设计节拍16 s。

生产线每天工作时间1 440 min, 其中计划停机包括中午用餐休息30 min、换料停机20 min、班次间交接班20 min, 非计划停机包括故障停机177 min、小停机50.2 min, 日生产总量3 200件, 其中不合格数量102件。那么

$$\text{计划停机时间}=30+20+20=70 \text{ min} \quad (8)$$

$$\text{非计划停机时间}=177+50.2=227.2 \text{ min} \quad (9)$$

$$\text{负荷时间}=1\ 440-70=1\ 370 \text{ min} \quad (10)$$

$$\text{稼动时间}=1\ 370-227.2=1\ 142.8 \text{ min} \quad (11)$$

$$\text{时间稼动率}=1\ 142.8\div1\ 370=83.42\% \quad (12)$$

$$\text{质量合格率}=(3\ 200-102)\div3\ 200=96.81\% \quad (13)$$

$$\text{性能稼动率}=3\ 200\times16\div(1\ 142.8\times60)=74.67\% \quad (14)$$

$$\text{OEE}=83.42\%\times74.67\%\times96.81\%=60.30\% \quad (15)$$

3 OEE改善方案

3.1 时间稼动率改善

影响生产线时间稼动率的主要因素是设备故障停机损失。该生产线引进了制造执行系统

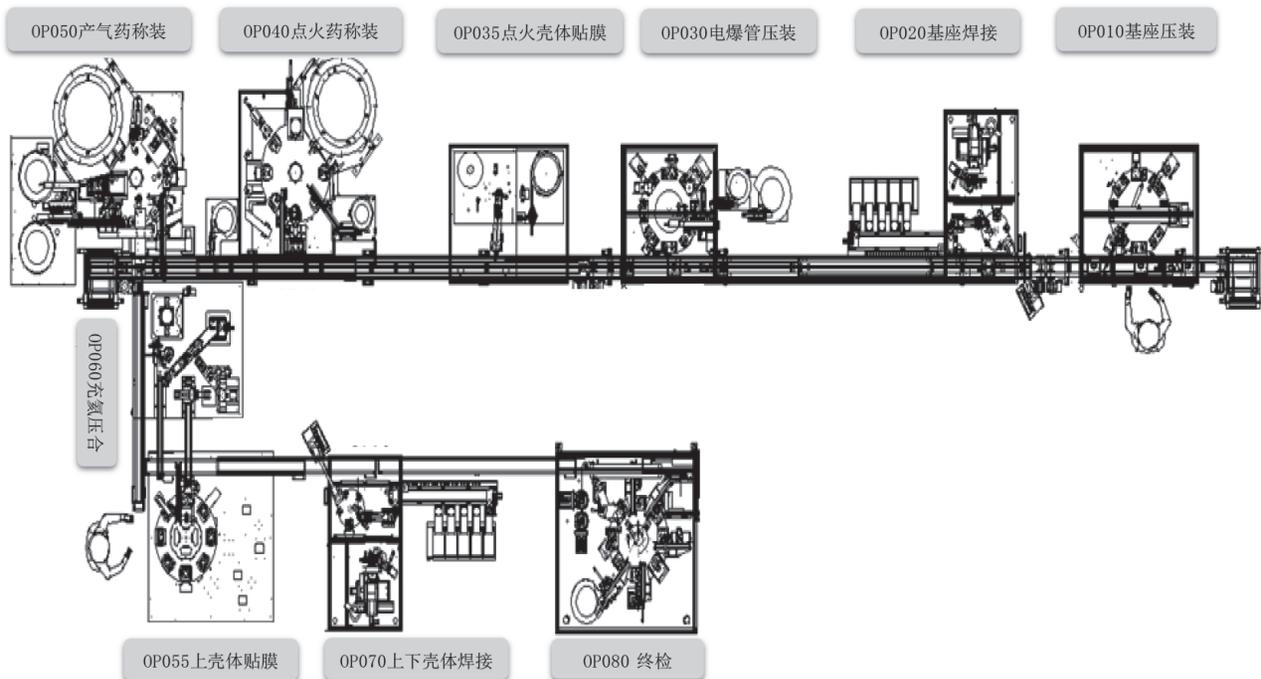


图1 某公司汽车安全气囊气体发生器生产线工位布局图

(MES)，实现了设备运行时间、停机时间、产能、产品不良等数据的自动统计功能。从系统中调取某一天生产线的设备运行情况，作出各工位故障停机时间分布图，如图2所示。由图2可知，OP050

产气药称装和OP060充氮压合两个工位故障停机时间较长，分别是55 min、62 min，其他8个工位合计故障时间60 min。为了在考虑成本效益的情况下尽最大可能减少设备故障停机，提出以下改善措施。

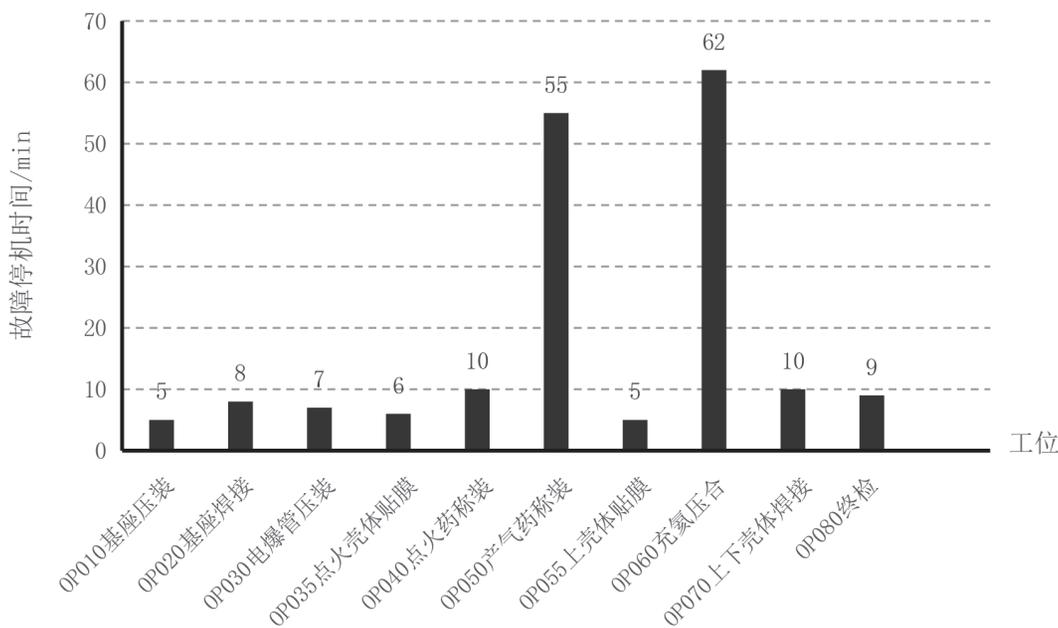


图2 改善前生产线各工位故障停机时间分布图

3.1.1 缩短OP050设备故障损失时间

OP050产气药称装工位是产气药装入产品

后，在产品开口端压装燃烧室盖进行封口，防止药剂洒落。燃烧室盖是通过压装气缸自动取料后再进行压装作业，压装气缸的故障较为频

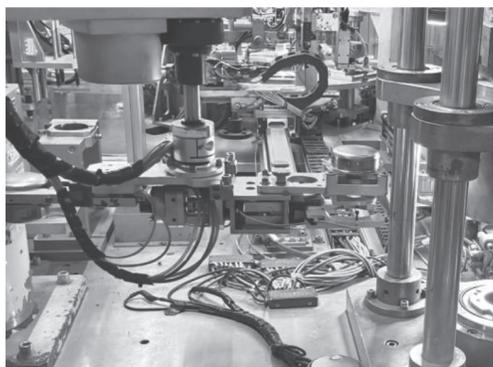
繁, 单日故障时间高达62 min。经分析, 原因是与产品接触的药斗口未抛光处理, 导致药粒残留; 清药时, 药粒卡在料斗口顶住气缸, 且PLC未给出气缸到位信号, 气缸强制撑住, 压不下去, 致使气缸故障。通过增大料斗震动频率以及在料斗口加装防药粒卡住装置, 该故障得到了彻底解决。

3.1.2 缩短OP060设备故障损失时间

OP060充氮压合工位是机器人的左右两个夹臂

分别各夹取一个上工序组件, 再将其依次放入压合腔体内。机器人的两个夹臂呈“一”字形, 需要左右夹臂进行旋转换向才可完成。该工位的主要故障是控制机器人夹臂旋转换向的磁开气缸异常, 单日故障时间长达55 min。经分析, 原因是每个周期机器人执行动作多, 且需要360°旋转, 信号线跟着一起旋转、拉扯, 长期使用就会造成信号线松动、接触不良。

针对以上问题, 通过在机器人上方加装信号转接盒, 在信号线活动部位加装信号线防护套, 该问题得到了彻底解决, 改善前后对比图如图3所示。



(a) 改善前



(b) 改善后

图3 改善前后机器人对比图

3.2 性能稼动率改善

设备在使用过程中不可能总是以理论生产速度进行工作, 往往会因各种因素出现短暂小停机, 也会因缺乏维护保养等导致设备节拍变慢。设备短暂小停机和设备生产速度损失是性能稼动率的主要影响因素。其中, 短暂小停机是一种由于某种异常经常发生的特殊设备故障类型, 生产线员工只需简单操作就能暂时恢复生产, 不需要进行专业维修处理^[7]。为了提高性能稼动率, 需要从减小设备短暂小停机损失、降低瓶颈工位节拍两方面进行改善。

3.2.1 减小设备短暂小停机损失

设备在运转过程中经常会出现2 min内的短暂小停机。大多数小停机都需要人工干预, 但生产线工位基本是无人作业状态, 当出现小停机异常

时, 需要附近工位操作员或者班长步行至异常工位进行处理。

统计生产线一天的设备短暂小停机后, 通过剖析小停机问题的发生原因, 制定相应对策, 如增加缓冲垫Ⅱ振动盘启动延时、优化过滤网安装结构增加防带起装置、定期清理真空吸装置吸头、优化视觉检测算法、机械夹爪增加防滑保护套等措施, 使小停机问题得到根本解决, 改善前后小停机明细对比如表1所示。改善前, 小停机人工干预可达到211次, 累计小停机时长3 011 s, 约50.2 min。改善后, 人工干预降低至38次, 累计小停机时长598 s, 约10 min, 小停机损失缩短了40.2 min。

3.2.2 降低瓶颈工位节拍

该生产线的理论设计节拍为16 s, 生产线

设备在使用一定时间后速度相比初始理论速度会有所降低，生产节拍会变长。为了提高性能稼动率，需采取适当措施对生产节拍进行优化提升。测定生产线各工位节拍，作出节拍分布图，如图4所示。由图4可知，OP060充氮压合工位节拍25.30 s最长，是该生产线的瓶颈工

位，即生产节拍为25.30 s。OP040点火药称装、OP060充氮压合、OP070上下壳体焊接三个工位节拍大于理论设计节拍16 s，严重制约生产线速度，是需要重点改善的工位。为了减小设备的速度损失，使其达到理论速度，制定了以下改善措施。

表1 改善前后生产线小停机对比

序号	设备短暂小停机项目	改善前			改善后		
		干预次数	单次小停机时间/s	累计停机时间/s	干预次数	单次小停机时间/s	累计停机时间/s
1	缓冲垫Ⅱ卡料，真空吸取失败	20	13	260	2	13	26
2	过滤网被带起	13	20	260	2	20	40
3	真空吸取缓冲垫掉落，视觉检测不好	15	15	225	3	15	45
4	燃烧室盖孔位置错误	12	30	360	3	30	90
5	顶升工件方向偏离，与工装干涉卡死	15	20	300	7	20	140
6	产品堆积时机器人抓料失败	6	15	90	3	15	45
7	机械手取氮检腔体取出卡住的产品	55	10	550	6	10	60
8	短路插座卡料	30	12	360	5	12	60
9	标签贴歪	41	14	574	6	14	84
10	自动下线产品夹取失败	4	8	32	1	8	8
总计		211		3 011	38		598

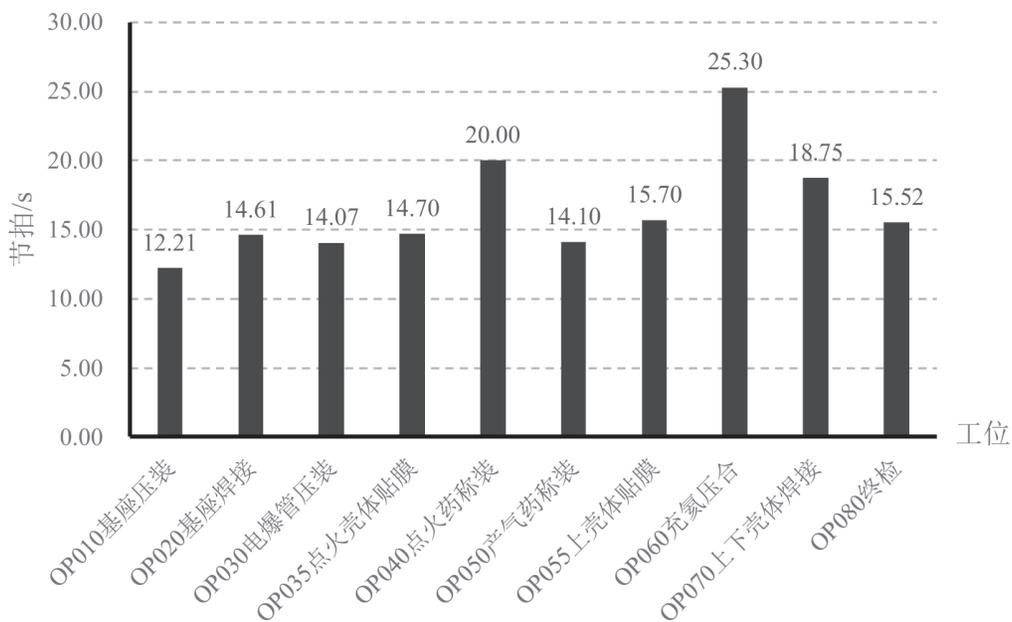


图4 改善前生产线各工位节拍分布图

① 点火药称装工位上线找正优化。工件下线时需进行方向找正, 即夹爪夹住工件气缸, 带动工件气缸进行旋转, 直至工件的两个定位内凹豁口完全嵌入工装上凸出的两个定位耳中(如图5所示), 而气缸旋转角度受供气压力波动的影响, 且不能夹持工件 360° 连续旋转, 每次只能旋转一个小角度, 因此找正时经常出现旋转10次左右的情况, 节拍高达20 s。将气缸改为电缸结构, 电缸不受供气压力影响, 能更精确控制旋转角度, 有效提高了找正效率, 改善后节拍为14 s, 缩短了6 s。

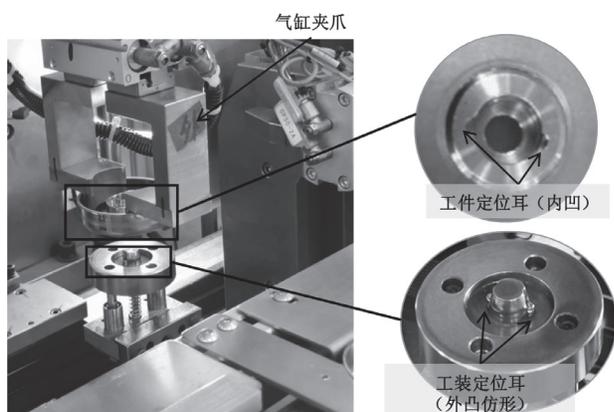


图5 改善前OP040点火药称装工位下线方向找正结构

② 充氮压合工位抽真空改善。充氮压合工位抽真空时间较长, 分析后发现是管道中的异物杂质影响了抽真空速度, 而且压合腔体中的活塞杆因长时间使用造成磨损, 导致腔体密封性不好, 使得整体节拍高达25.30 s。针对以上问题, 对管道进行清理, 并更换新的活塞杆, 抽真空时间缩短, 整体节拍为15 s, 缩短了8.30 s。

③ 上下壳体焊接工位焊接旋转角度优化。把焊接工序工件放置在卡盘上, 卡盘夹紧工件带动其旋转, 焊接后视觉相机检测工件在整个圆周的焊缝质量(图6a), 然而因设备内部空间和安装限制, 焊接起始点A与视觉相机正下方的视觉检测起点B不在同一点, 存在 60° 角度差, 如图6b、6c所示。当焊接方向顺时针旋转, 工件在旋转 300° 后, 视觉相机才开始检测到A点处的焊缝。因此, 检测完工件圆周上的完整焊缝需旋转总角度为 660° , 使得节拍长达18.75 s。



(a) 工位图

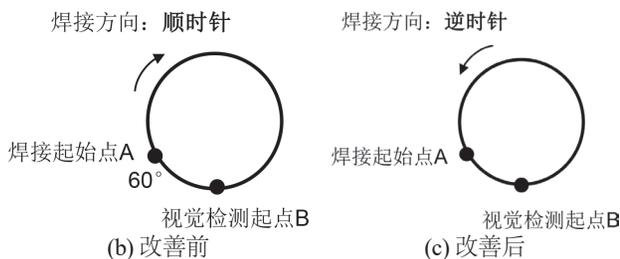


图6 焊接工位旋转角度图

将焊接方向改为逆时针旋转, 工件只需旋转 60° 后, 视觉相机即可检测到A点处的焊缝。因此, 检测完工件圆周上的完整焊缝需旋转总角度为 480° , 减少了 180° 重复旋转角度, 节拍变为14.15 s, 缩短4.60s。

综上, 对16 s以上的3个工位进行以上改善后, 再次测定各工位节拍, 并作出改善后各工位节拍分布图, 如图7所示。由图7可知, 改善后生产线各工位节拍都在16 s以下, OP055上壳体贴膜工位节拍15.70 s变为该生产线的瓶颈工位, 即生产节拍为15.70 s。

3.3 质量合格率改善

该生产线当天总产量为3 200发, 其中不良品102发, 质量合格率96.81%。统计当天不良品类型, 并作出质量类型缺陷分布图, 如图8所示。由图8可知, 质量类型缺陷前三名是自动点火药(AI)误判32发、焊接飞溅28发、产气药称药超时25发, 对此提出以下改善措施。

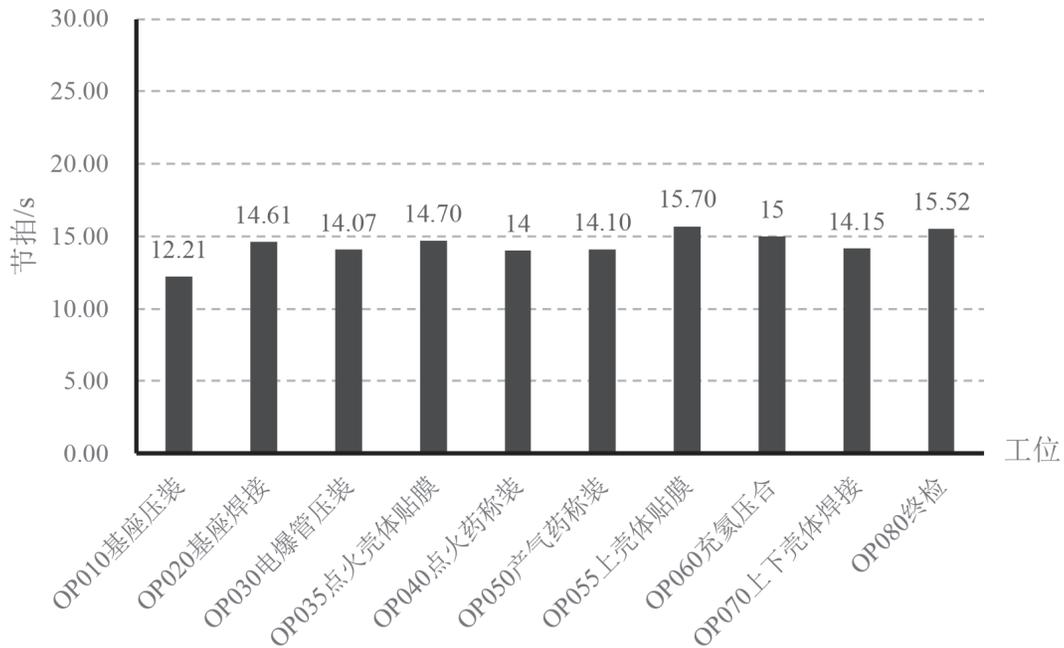


图7 改善后生产线各工位节拍分布图

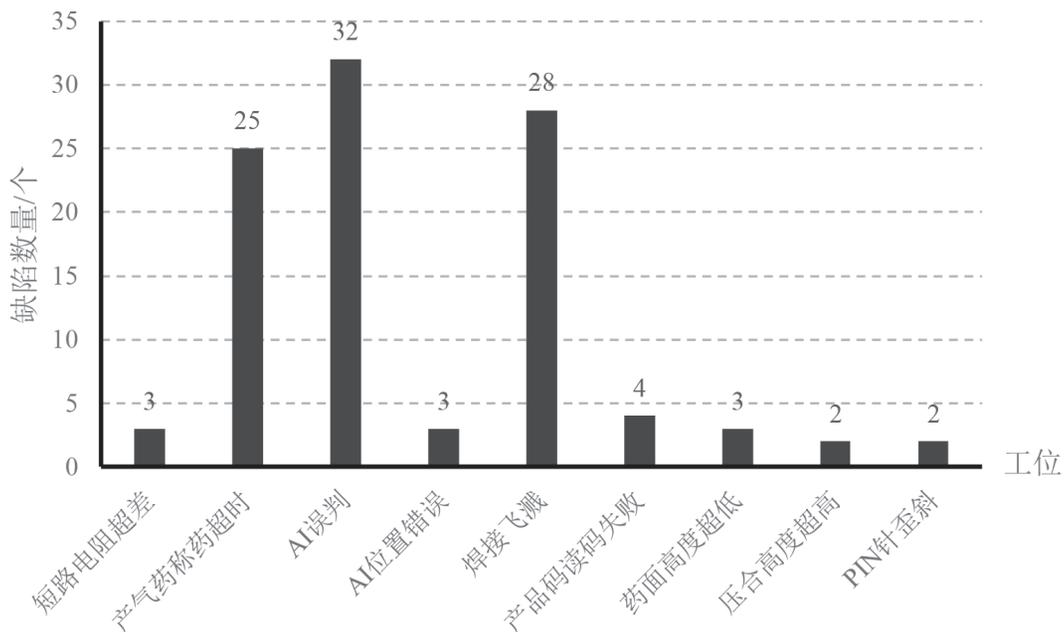
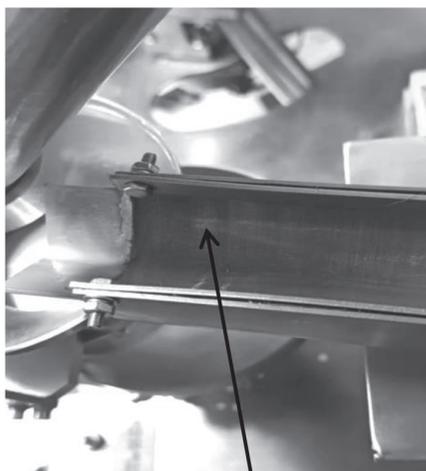


图8 改善前生产线质量类型缺陷分布图

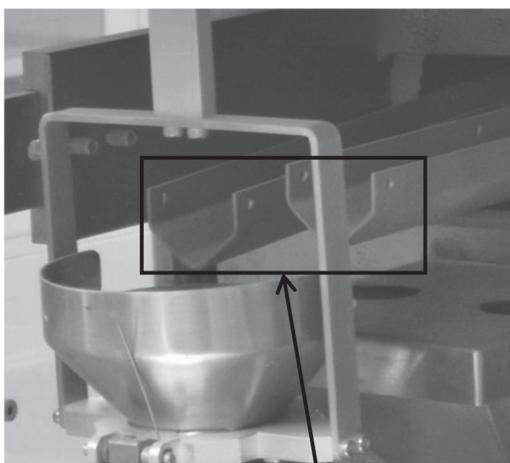
3.3.1 降低产气药称药超时不良率

产气药称量工位使产气药经称药料道(图9)震动后落入出口端的电子秤中,当电子秤重量在规定时间内达到预期范围时,反馈信号给PLC,料道停止震动。但是,因料道上

安装有过滤网,当产气药从料道经过时,阻力大、流畅性差,称药时间超过要求值,造成不良。故而,重新设计一款无过滤网结构的直线料道,保证料道光滑,使产气药下料时流畅性好,提高了产气药在料道的通过速度,有效降低了称药超时的不良率。



带过滤网料道
(a) 改善前



无过滤网料道
(b) 改善后
图9 改善前后称药料道

3.3.2 降低自动点火药误判率

在充氮压合工位，需在产品中安装一片自动点火药，且保证药片完整、无破损。生产线运用视觉相机对其进行拍照，系统根据图片自动比对合格与否。因药片自身成灰色，导致视觉拍照后药片有较多灰色斑点（图10），系统较易误判为药片破损。故而，对药片生产配方进行优化改善，在不改变药片各项性能的前提下，增加一种辅料，使药片成色由灰色变为白色，改善后视觉误判率明显降低。

3.3.3 降低焊接飞溅率

产品对密封性要求较高，而上下壳体激光焊



(a) 改善前



(b) 改善后

图10 改善前后自动点火药视觉图

接飞溅产生的气孔会直接影响产品密封性。针对焊接飞溅问题，经分析发现，在上工序充氮压合时，氮气充入过多，导致焊接时热量升高，气体逸出，产生飞溅气孔。因此，对上工序充氮压合工艺进行改善，通过在氮气出口增加流量计精确控制氮气流量及减少产品内氮气充入量等方式，显著减少焊接飞溅问题的发生。

综上，通过降低称药超时不良率、自动点火药误判率和焊接飞溅率，生产线的质量合格率高至99.53%，提高2.72个百分点。

4 改善效果评价

通过对时间稼动率、性能稼动率、质量合格率进行改善后，降低了设备故障停机损失、设备短暂小停机损失，提高了设备利用率和产品合格率，OEE也得到了大幅度提升。对改善前后数据进行综合对比，如表2所示。改善后时间稼动率由83.42%提升至94.89%，性能稼动率由74.67%提升至92.31%，质量合格率由96.81%提升至99.53%。OEE指标由原来的60.30%提升至87.18%，提升了26.88个百分点。

表2 改善前后数据对比

	工作时 间/min	计划停机 时间/min	非计划停机 时间/min	负荷 时间/min	稼动 时间/min	不良数	产出数	理论节拍/s	时间稼动 率/%	性能稼动 率/%	质量合格 率/%	OEE/%
改善前	1 440	70	227.20	1 370	1 142.8	102	3 200	16	83.42	74.67	96.81	60.30
改善后	1 440	70	70	1 370	1 300	21	4 500	16	94.89	92.31	99.53	87.18

5 结束语与讨论

本文通过收集汽车安全气囊气体发生器生产线的节拍、产能、停机等相关数据，计算了生产线OEE现状，针对影响OEE的各类损失因素进行了分析，定位了瓶颈工序，并围绕设备故障停机损失、设备短暂小停机损失、设备生产速度损失、不良品损失等方面制定对策进行OEE改善，最终将生产节拍从25.30 s缩短至15.70 s，日产能从3 200发提升至4 500发，OEE从60.30%提升至87.18%，提高了生产线的设备利用率，降低了生产成本，为公司占领短周期、低成本的气体发生器市场打下了坚实的基础，实现了利润与竞争力的双赢。

本文为气体发生器生产线OEE低的问题提出的解决方案对其他制造企业也有重要的启示价值。虽然不同企业OEE的实际影响因素可能不完全相同，但是问题解决的思路基本是一致的，都需要以收集生产相关数据为依据，围绕OEE的三因素去分析、寻求改善方案，减少各类损失，以期达到降本增效的目的。因此，该OEE改善方法是加快推进新型工业化的重要思路，可帮助制造企业充分挖掘生产潜能，凸显在同行业中的生产优势，增强企业的核心竞争力，推动企业高质量发展。

参考文献

[1] 王珏. 汽车主动安全技术及其发展方向[J]. 时代汽车, 2017(6): 32, 34.

[2] 夏雨. 安全气囊的发展与应用[J]. 科技展望, 2016, 26(36): 124.

[3] 刘从虎, 张映峰, 王伟. 汽车零部件企业生产管理信息系统研究[J]. 安徽工程科技学院学报(自然科学版), 2010, 25(4): 75-79.

[4] 王霆宇, 汪惠芬, 刘庭煜. 基于设备综合效率的设备损失分析[J]. 机械制造, 2016, 45(5): 61-64.

[5] 燕喜春. 设备综合效率OEE 的分析与改善[J]. 设备管理与维修, 2015(6): 10-11.

[6] 李金热, 杨新春. 设备综合效率OEE计算及扩展[J]. 中国农机化, 2008(3): 94-97.

[7] 姚倩, 李荣荣, 龚建钊. 基于设备综合效率的板式家具封边机生产效率分析与评价[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(3): 26-32.

[8] 巫少龙, 吴国献, 张元祥. 基于OEE的企业设备效率分析与改善[J]. 机械制造, 2010, 48(3): 75-77.

[9] 万俊. 提高自动开线压接机设备综合效率的方法[J]. 机械制造, 2016, 54(5): 97-100.

[10] 徐伟. AI设备综合效率分析与提升[J]. 工业工程, 2014, 17(5): 23-28.

[11] 黄鹏鹏, 罗佳, 蔡芷榕, 等. 企业设备综合效率分析与提升研究[J]. 制造技术与机床, 2018(2): 165-170.

[12] 钟晶, 李跃宇. 企业生产管理的利器: OEE研究[J]. 现代商贸工业, 2009, 21(1): 382-383.

[13] 任广杰, 刘大成, 丁迎耕, 等. 基于约束理论的设备综合效率方法研究[J]. 制造技术与机床, 2004(4): 20-23.

[14] 林琳, 马涛. 单机设备OEE数据分析模型的建立[J]. 工业工程, 2008(3): 119-122.

[15] 陈霄, 乔铤, 李国波. 全自动分拣系统的OEE分析[J]. 物流技术与应用, 2023, 28(2): 164-169.

作者简介:

张俊 (1990—), 男, 湖北襄阳人, 本科, 工程师。研究方向: 汽车制造技术开发与配方研制。
E-mail: zhangjun@caschp.com

尚云平 (1991—), 通信作者, 女, 湖北襄阳人, 本科, 工程师。研究方向: 精益生产与汽车制造工艺。
E-mail: sypcherish@163.com

(收稿日期: 2023-06-19)

Overall Equipment Effectiveness (OEE) Improvement on Gas Generator Production Line of Automobile Airbag

ZHANG Jun, SHANG Yunping

(Hubei Hangpeng Chemical Power Technology Co., Ltd., Xiangyang 441000, China)

Abstract: The overall equipment effectiveness (OEE) can be used to evaluate the effective utilization rate of equipment in manufacturing enterprises, and then to measure the production efficiency of manufacturing enterprises and help to advance the new industrialization. Based on the present situation of gas generator production line of automobile airbag in an enterprise, the data of beat, capacity and shutdown were collected. Aiming at the problems of low equipment utilization rate and serious capacity shortage, the influencing factors were identified and the corresponding improvement countermeasures were established. After the improvement, the production beat was shortened from 25.30 s to 15.70 s, controlled within the theoretical design beat 16 s, and the daily production capacity was increased from 3 200 to 4 500. Comparing the three factors of OEE before and after improvement, the time productivity increased from 83.42% to 94.89%, the qualified rate of quality increased from 96.81% to 99.53%, and the OEE increased from 60.30% to 87.18%, i.e. an increase of 26.88 percentage points. The combination of OEE and lean management thought is well realized, and the purpose of improving equipment utilization rate and productivity is achieved, which creates profits for manufacturing enterprises and enhances their competitiveness.

Keywords: Overall Equipment Effectiveness (OEE); Manufacturing Enterprise; New Industrialization; Production Beat; Lean Management

数据中心和5G基站参与新型电力系统需求响应： 发展潜能与对策建议

谭力，于娟

(中国电子信息产业发展研究院，北京 100846)

摘要：对数据中心和5G基站参与新型电力系统需求响应的发展前景进行深入剖析，以期为数据中心和5G基站参与电力系统需求响应的实际应用提供参考，促进电力系统和通信系统融合发展。对数据中心和5G基站参与需求响应的潜力进行分析，发现新型电力系统调峰需求缺口大，亟需调动智能化程度更高、更具经济性、响应速度更快、更环保低碳的需求侧灵活性资源来应对挑战，而数字基础设施或可通过参与需求响应降低用电成本。梳理了数据中心和5G基站参与电力系统需求响应的重要意义、现实基础、潜在场景和盈利模式等课题，剖析了数据中心和5G基站规模化参与电力系统需求响应面临的问题主要来自关键技术和项目试点两个层面。据此，提出三点对策建议：开展关键技术研究攻关，深挖数字基础设施的储荷资源需求响应潜力；共商合作机制，建立符合数据中心和5G基站用电特性的市场机制与盈利模式；加快数字基础设施数字化绿色化改造，为参与电网互动打好基础。

关键词：数据中心；5G基站；需求响应；新型电力系统；灵活性资源

中图分类号：TK02 **文献标识码：**A **文章编号：**2095-8412 (2023) 10-078-06

工业技术创新 URL：<http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI：**10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.010

0 引言

新型电力系统是“双碳”战略的重点建设任务之一。随着可再生能源等新能源在电力系统的渗透率不断提高，电力系统的稳定性、安全性面临极大挑战。深入挖掘电力资源潜在需求，通过需求响应合理、有效地利用电力资源，成为缓解新能源入网带来的电力系统可靠性降低问题的重要手段。数据中心和5G基站具备参与电力系统需求响应的良好基础，是典型的分布式灵活性资源。通过充分挖掘数据中心和5G基站的灵活性潜能，运营商可有效降低数据中心和5G基站的用电价格，或获取参与电力系统需求响应的相应补贴，从而有效缓解数据中心和5G基站用电成本过高的问题。

国内外已有少数国家和地区的部分机构率先开展了数字基础设施与电力系统互动的验证项目。在国外，日本通信运营商NTT DOCOMO公司开展了“绿色基站”验证项目^[1]；南非MTN公司采用PowerStar解决方案实现了基站能量的动态管理^[2]。在国内，江苏省发展和改革委员会于2022年发布了《江苏省电力需求响应实施细则》（修订征求意见稿），明确数据中心和5G基站运营商可以独立户号参与需求响应，对通过需求响应临时性减少的负荷按照其响应调控时间和响应速度执行可中断负荷电价，补偿电价最高可达45元/千瓦^[3]；2019年，广州供电局和中国铁塔股份有限公司广州市分公司探索合作建设了“通信基站闲散储能示范项目”，然而目前各项目规模较小且以技术验证为主，尚未开展大规模商业应用。

目前, 已有一些数据中心参与电力系统需求响应及优化调度研究。Beloglazov等^[4]提出了一种用于虚拟云数据中心的有效资源管理策略, 通过虚拟机的动态重分配来调节工作负荷的分布情况, 进而降低数据中心的能源消耗。祁兵等^[5]建立了一种考虑托管式数据中心负荷调节不确定性的区间优化模型, 通过在紧急需求响应时段关停部分服务器来削减负荷。Bahrami等^[6]通过考虑数据中心负载调度的灵活性, 研究了放松管制下的电力市场中需求响应计划。现有的数据中心和5G基站参与电力系统需求响应策略方面的研究主要集中在优化利用负荷本身的可转移特性等方面, 但鲜有文献将传统电力系统需求响应的价格与激励机制应用于数据中心和5G基站及相应的用户侧, 无法间接影响数据中心和5G基站的可调度潜力。

鉴于此, 有必要深入分析数据中心和5G基站参与新型电力系统需求响应的发展前景。本文首先立足于电力系统的调峰需求分析, 评估数据中心和5G基站对负荷侧资源的调节潜力, 研判数字基础设施在电力系统需求响应中的参与程度; 其次, 梳理数据中心和5G基站参与电力系统需求响应的重要意义、现实基础、潜在场景和盈利模式等课题; 然后, 剖析实现数据中心和5G基站规模化参与电力系统需求响应面临的问题; 最后, 对下一步工作提出对策建议。

1 数据中心和5G基站参与需求响应的潜力分析

在“双碳”目标驱动下, 高比例新能源接入将成为新型电力系统的基本特征及发展形态^[7]。传统电力系统采用出力可控的火电机组发电, 而新型电力系统采用出力具有随机性、波动性和间歇性的新能源机组发电^[8]。据全球能源互联网发展合作组织预测, 到2060年, 中国风电和光伏发电装机容量占比之和达到约80%, 发电量占比之和达到约70%^[9], 将对电力系统的稳定性产生极大威胁。提升电力系统灵活性以应对具有复杂性的新能源发电, 是充分实现新能源消纳的关键^[10]。提升电力系统灵活调节能力, 首要方式是增加系统可灵活调节的资源, 解决电力电量平衡问题。

1.1 新型电力系统调峰需求缺口大

在“双碳”目标下, 可再生能源装机比例将保持高速增长。2022年, 风电和光伏发电量突破1万亿千瓦时, 占全社会用电量的13.8%。为实现2030年风电和光伏发电量占比25%的目标, 2030年风电和光伏总装机容量将增长至12亿千瓦^[11]。然而, 可再生能源具有较强的随机性和波动性, 出力与用电负荷不匹配, 影响电网安全稳定运行。增强需求侧响应能力的传统方法主要是靠增加火电机组的出力或建设大量的储能电站, 但碳排放量大, 响应速度慢, 成本高^[12]。在“双碳”目标下, 亟需调动智能化程度更高、更具经济性、响应速度更快、更环保低碳的需求侧灵活性资源来应对挑战。

1.2 负荷侧资源调节潜力巨大

负荷侧存在大量具备调节潜力的灵活性资源, 包括电动汽车、分布式储能、智能楼宇空调、工业园区等各类负荷, 具有点多量大、容量较小、电压等级低、主体多样等特征。令负荷聚合商聚合用户侧的储能、分布式电源、不间断电源等, 多元化调节负荷资源参与需求响应, 成为新型电力系统的研究热点。我国学者在电动汽车及虚拟电厂等负荷参与电力系统需求响应做了大量的策略研究和技术储备, 但未能从实践层面开展大规模、大范围的业务, 负荷侧柔性资源未得到充分挖掘。

1.3 数字基础设施或可通过参与需求响应降低用电成本

在数字经济浪潮下, 数据中心和5G基站规模化建设加速, 规模快速扩张导致用电成本激增。随着数字中国和网络强国的深入推进, 数据中心和5G基站的建设增量将数倍于存量, 能耗水平或将呈指数级上升。数据中心和5G基站的高能耗特性严重侵蚀了企业利润。面对巨额电力成本, 运营商从多方面探寻降本增效方式。当前主要采取的节能手段有高效冷却、智能关闭部分设备与功

能、动态调整设备功耗等^[13]。虽然上述手段已取得一定效果，但电费仍让运营商“不堪重负”。高昂的用电成本已成为制约数据中心和5G基站高质量发展的主要因素，参与需求响应或将成为降低用电成本的有效途径^[14]。

2 数据中心和5G基站参与需求响应的重要意义、现实基础和潜在场景

2.1 数据中心和5G基站参与需求响应的重要意义

面对愈发严峻的新型电力系统调峰调频考验，一些电网公司不断扩建发电厂、储能电站，带来了沉重的负担，重复投资也会造成浪费。将数据中心和5G基站纳入常态化电力系统调度运行中，既能提高系统运行效率，又能实现轻资产运营。对于通信系统而言，数据中心和5G基站参与电力系统需求响应也是降低用电成本的潜在途径。充分挖掘数据中心和5G基站的需求响应潜力，降低其用电价格或获取相应的需求响应补贴，可有效缓解5G基站用电成本过高的问题，有利于数据中心和5G基站从高耗能基础设施向供能基础设施的身份转变。

2.2 数据中心和5G基站参与需求响应的现实基础

对于新型电力系统而言，总数量庞大的数据中心和5G基站属于典型的分布式灵活性资源。据国家互联网信息办公室《数字中国发展报告（2022年）》显示，我国数据中心机架总规模超过650万标准机架，近5年年均增速超过30%，在用数据中心算力总规模位居世界第二^[15]。截至2023年5月，我国已累计开通5G基站273.3万座。据中国电子信息产业发展研究院《5G产业发展白皮书》估算，到2030年，我国建成5G基站数量将会突破千万座^[16]。一是数据中心和5G基站用电设备普遍具有智能功耗管理功能，可提供一定的功耗调节空间。二是数据中心和5G基站在建设时普遍装设储能电池作为备用电源，在不同工况（忙时/闲时）下，可以动态

地将储能电池分为两部分：一部分用于备电，另一部分作为灵活调度资源。当服务器忙时，所需备用的电源容量大，余下可调度部分相对减少，反之则增加。因此，数据中心和5G基站的储能电池可作为一种容量时变的储能参与电力系统需求响应。

2.3 数据中心和5G基站参与需求响应的潜在场景

在我国当前的电价机制下，数据中心和5G基站参与电力系统需求响应的潜在应用场景较多。一是参与电力调峰。未来我国算力网络和5G网络基本建成后，数据中心集群和5G基站群的能耗在电力负荷中的比例会大幅提高，具有很大的调峰空间。在不影响用户通信质量的情况下，可实现在用电低谷时段充电，在用电高峰时段放电，通过峰谷价差实现套利，以降低数据中心和5G基站用电成本。例如，中国铁塔股份有限公司与国家电网有限公司合作，组织299座5G基站参与迎峰度冬电力保供准实时需求响应演练，在演练时间段内通过智能控制设备实施基站自备电池供电，最大压降功率1 079 kW，最小压降功率857 kW，响应效果较好^[17]。二是参与电力调频。数据中心和5G基站采用退役锂离子动力电池，具有很好的动态特性，在接收到系统的调频信号后，能够灵活进行充放电，响应系统的调频需求，获取调频收入。三是参与电力综合应用。目前已有关于储能电池同时参与调峰和调频的协同方法的研究。数据中心和5G基站同样具有参与多种需求响应应用场景的潜力，能够在电网需求侧扮演多种角色。

3 数据中心和5G基站规模化参与需求响应的盈利模式

数据中心和5G基站参与电力系统需求响应盈利模式的核心议题有：参与需求响应如何产生收益，如何测算付出的成本，产生的收益如何分配，以及参与各方是否获得足够回报。本章从三个运维主体的角度出发，分析数据中心和5G基站规模化参与电力系统需求响应的盈利模式。

3.1 运营商运维模式

在运营商运维模式下, 运营商拥有数据中心和5G基站灵活性资源的所有权和运维控制权, 作为独立主体参与电力系统互动。电网公司在电力系统实时运行时向运营商提出需求, 运营商控制灵活性资源参与需求响应, 如图1所示。运营商参与需求响应可以降低度电成本, 获取额外收益。在满足可靠性的前提下, 在电价低时为储能电池充电, 并在电价高时用储能电池给数据中心和5G基站用电设备供电, 以达到降低度电成本的目的。进一步地, 运营商可以与供电公司合作, 通过采用电网友好型的用电方式, 从供电公司处获得更低的用电价格。

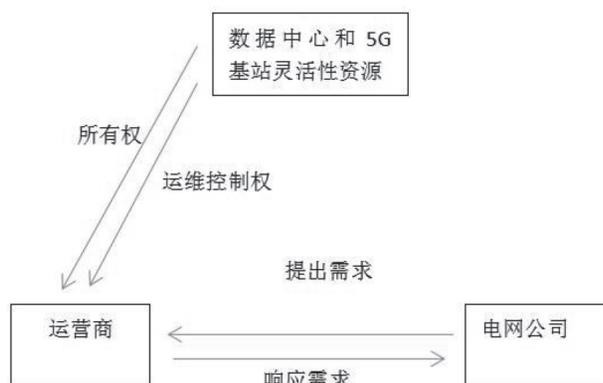


图1 运营商运维模式示意图

3.2 电网公司运维模式

在电网公司运维模式下, 电网公司向运营商支付灵活性资源使用费, 以获取数据中心和5G基站灵活性资源的运维控制权, 如图2所示。为满足电力系统的经济性和可靠性需求, 电网公司可以在日常运行时对数据中心和5G基站内的灵活性资源进行调度。在此模式中, 运营商不用在日常运维中进行决策, 而仅作为资源提供方。电网公司在保证数据中心和基站用电可靠性的前提下使用灵活性资源。双方通过合作实现互利共赢。

3.3 第三方运维模式

在第三方公司参与数据中心和5G基站需求响应模式中, 运营商、电网公司和第三方公司三方

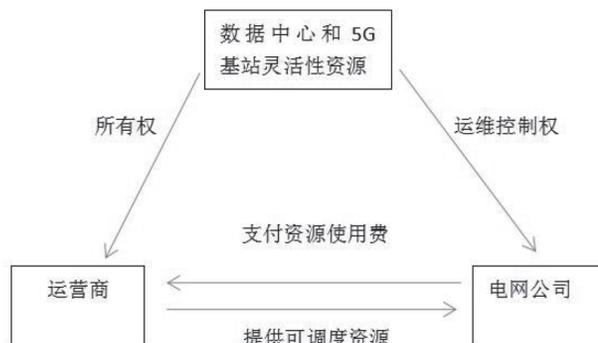


图2 电网公司运维模式示意图

互动合作。运营商不直接接入非自身主营业务的需求响应, 而是由第三方公司充当运营商代理, 作为运营商和电网公司之间的桥梁。作为数据中心和5G基站灵活性资源的运维控制权归第三方公司所有, 电网公司发出需求信号对第三方公司提出调度灵活性资源参与需求响应的要求, 如图3所示。在需求响应过程中, 第三方公司可以通过分时或实时电价套利、参与辅助服务市场等方式获取收益。

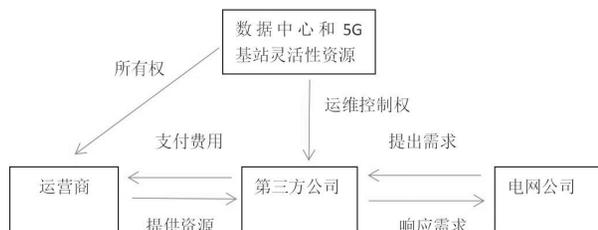


图3 第三方运维模式示意图

4 数据中心和5G基站规模化参与需求响应面临的问题

4.1 关键技术面临的问题

数据中心和5G基站参与电力系统需求响应需要开展的技术研究主要包括智能设备功耗管理、储能电池能量管理、储能电池可调度容量刻画与预测、数据中心和5G基站聚合与协同调度等。智能设备功耗管理是数据中心和5G基站参与电力系统需求响应的前提之一, 需进一步研究如何根据实时负载, 结合不同时间尺度和空间尺度的功耗管理技术, 实现数据中心和5G基站功耗的最优管理。数据中心和5G基站参与电力系统需求响应需要通过储能电池能量管理频繁调度电池进行充放

电。在信息通信行业大量使用二次利用的退役动力电池作为备用电源的情况下，电池不一致性问题必须得以解决^[18]。储能电池可调度容量刻画与预测用于评估在保障设备供电可靠性的前提下，储能电池的调度可行域。聚合与协同调度技术用于实现海量数据中心和5G 基地的协同。

4.2 项目试点的局限性

现阶段，数据中心和5G基站参与电力系统需求响应的项目试点规模较小，且主要以技术验证为主，缺乏对参与需求响应收益分配以及参与各方能否获得足够回报的分析。例如，运营商开展需求响应需要进行技术改造、新增设备，频繁调度储能电池将加速电池老化，这些额外成本未能计入试点项目的经济性测算。再如，数据中心和5G基站大规模并网放电给电网带来的安全风险和如何实施防御策略等问题尚无定论。如何建立既能为电力系统提供稳定支撑，又能兼顾运营商和电网公司利益的商业模式，仍需进一步探索研究。

5 对策建议

5.1 开展关键技术研究攻关，深挖数字基础设施的储荷资源需求响应潜力

一是进一步研究实时控制策略。由于数字基础设施的负荷具有时变特点，因此需研究如何动态结合不同时间尺度的功耗管理技术，实现数字基础设施功耗的最优管理。二是开展数据中心和5G基站负载的精准预测，并在此基础上计算储能电池可调度容量。三是设计数据中心和5G基站聚合框架、协同机制、调度算法。基于数字基础设施运行模式和电力系统运行模式，综合考虑运营商、电网公司和负荷聚合商三方利益，建立信息通信基站网络与电力网络联合运行模型。

5.2 共商合作机制，建立符合数据中心和5G基站用电特性的市场机制与盈利模式

一是总结试点项目成就、局限性。以提高运

营商满意度和参与度为目标，核算各方成本与效益，帮助市场了解需求响应的运行机制，明确各利益相关方参与市场互动时扮演的角色，探索适用于电力系统调度的数据中心和5G基站需求响应实施模式。二是推动出台数字基础设施储能资源聚合参与电网调峰调频、辅助服务的市场交易政策，进一步细化聚合商的责任、参与形式、参与门槛和补偿标准。

5.3 加快数字基础设施数字化绿色化改造，为参与电网互动打好基础

一是加速推进磷酸铁锂电池在数字基础设施的全面应用。鼓励将退役动力电池梯次利用于数据中心和5G基站备电领域。充分考虑与电网互动场景下的可靠性要求、机房类型和环境条件等因素，引导通信运营商对储能电池科学合理选型。二是加强数字基础设施智能装置改造和动态节能等新技术的推广应用，发展智能化能源管理系统，以数字化赋能数字基础设施进一步降低能耗。

参考文献

- [1] KOMIYA K, SEKI S, TAKENO K. Environmentally friendly, disaster-resistant green base station test systems[J]. NTT DOCOMO Technical Journal, 2013, 15(1): 35-41.
- [2] GSMA. Case study: PowerStar and MTN South Africa[EB/OL]. (2019-04-17). <https://www.mendeley.com/catalogue/072f8bb2-4434-3d11-a297-734ae9817eb8/>.
- [3] 江苏省发展与改革委员会. 江苏省电力需求响应实施细则: 征求意见稿[R]. 江苏: 江苏省发展改革委员会, 2022.
- [4] BELOGLAZOV A, BUYYA R. Energy efficient allocation of virtual machines in cloud data centers[C]// 2010 10th IEEE/ACM International Conference on Cluster, Cloud and Grid Computing. IEEE, 2010: 577-578.
- [5] 祁兵, 曹望璋, 李彬, 等. 考虑托管式数据中心负荷调节不确定性的区间优化模型[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 39-49.
- [6] BAHRAMI S, WONG V W S, HUANG J. Data center demand response in deregulated electricity markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2820-2832.
- [7] 鲁宗相, 黄瀚, 单葆国, 等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 12-18.
- [8] 丁明, 林玉娟, 潘浩. 考虑负荷与新能源时序特性的随机生产

- 模拟[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6305-6314.
- [9] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2060年前碳中和研究报告[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2020.
- [10] 施涛, 朱凌志, 于若英. 电力系统灵活性评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 146-154.
- [11] 国务院. 2030年前碳达峰行动方案[R].
- [12] 于娜, 刘甲利, 孙莉, 等. 电动汽车作为主动负荷参与需求响应的研究[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(4): 20-26.
- [13] 中国移动研究院. 5G基站节能技术白皮书[R].
- [14] 雍培, 张宁, 慈松, 等. 5G通信基站参与需求响应: 关键技术与前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5540-5551.
- [15] 国家互联网信息办公室. 数字中国发展报告: 2022年[R].
- [16] 中国电子信息产业发展研究院. 5G产业发展白皮书: 2020[R].
- [17] 许广林, 罗双祥, 丁宁, 等. 深挖铁塔基站负荷潜力 服务迎峰度冬电力保供[N/OL]. 搜狐网: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1755327982439465704&wfr=spider&for=pc>. (2023-01-18).
- [18] 陆运章, 马一山, 郭进, 等. 磷酸铁锂电池在离网光伏通信基站供电系统的应用研究[J]. 太阳能, 2022(7): 74-80.

作者简介:

谭力 (1989—), 女, 广西柳州人, 硕士研究生。研究方向: 绿色能源、绿色制造。

E-mail: 15011253808@163.com

于娟 (1988—), 通信作者, 女, 山东海阳人, 博士研究生, 副研究员。研究方向: 产业研究、绿色设计。

E-mail: yujuan2214@163.com

(收稿日期: 2023-06-29)

Data Centers and 5G Base Stations Participating in Demand Response of New Electric Power System: Development Potential and Countermeasures

TAN Li, YU Juan

(China Center for Information Industry Development, Beijing 100846, China)

Abstract: The development prospects of data centers and 5G base stations participating in the demand response of new electric power system were deeply analyzed, so as to provide references for the practical application of data centers and 5G base stations participating in the demand response of new electric power system and further to promote the integrated development of power system and communication system. By analyzing the potential of data centers and 5G base stations to participate in the demand response, it is found that the demand gap of new electric power system is large, and it is urgent to mobilize the demand-side flexible resources with higher intelligence, more economy, faster response, more environmental protection and lower carbon to meet the challenges, and digital infrastructure may reduce the power consumption cost by participating in the demand response. The significance, realistic basis, potential scenarios and profit model of data centers and 5G base stations participating in the demand response of new electric power system were sorted out, and the problems faced by data centers and 5G base stations participating in the demand response of new electric power system on a large scale were analyzed from aspects of two levels: key technology and project pilot. Based on this, 3 countermeasures are put forward: (1) carry out the key technology research and the key problem tackling, dig deep into the response potential of storage resource demand of digital infrastructure; (2) discuss the cooperation mechanism and establish a market mechanism and profit model that conforms to the electricity consumption characteristics of data centers and 5G base stations; (3) accelerate the digital green transformation of digital infrastructure and lay a good foundation for participating in the power grid interaction.

Keywords: Data Centers; 5G Base Stations; Demand Response; New Electric Power System; Flexible Resource

蜂窝结构吸能特性研究进展及其增材制造应用

李春杰, 周琦, 常心如

(南京理工大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210094)

摘要: 蜂窝的独特结构使其在抗压抗冲击等方面具有卓越优势, 越来越多研究人员受到仿生学的启发, 将蜂窝结构应用于各工程技术领域。增材制造 (AM) 技术的产生与发展为复杂蜂窝结构设计提供了更多可能。简要论述了吸能结构的研究意义; 以结构力学为基础, 考察了相对密度、冲击响应等蜂窝结构力学性能参数, 并列举了总吸能、比吸能等蜂窝结构吸能效果的评价指标; 展示了负泊松比蜂窝结构、新型仿生蜂窝结构相比传统蜂窝结构的吸能特性改善, 并对蜂窝结构的增材制造应用进行了评述。最后, 对蜂窝结构的增材制造研究进行了前瞻性的展望。

关键词: 增材制造; 仿生学; 吸能特性; 蜂窝结构; 负泊松比

中图分类号: TG495; TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-084-09

工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.011

0 引言

自然界的生物体经过几百万年的进化, 结构、功能和形态等特性得到优化^[1]。仿生学 (bionics) 最早被提出于20世纪50年代, 是一种对生物体进行模仿的系统学科, 生物体的特殊结构可以对新材料、新结构和新设备的设计提供启发^[2]。中国自古以来也有“道法自然”的哲学思想。这些学科和思想已经成为人们在产品适用性设计、先进技术开发等生产活动中获得灵感的源泉。例如, 多孔结构在自然界普遍存在, 这种结构在维持生物体功能等方面发挥了至关重要的作用。蜂窝结构就是一个典型的例子, 对蜂窝结构的研究可以追溯到几千年以前, 然而直到19世纪, 蜂窝结构才大规模进入生产生活中。鉴于蜂窝结构的吸能特性十分优异^[3], 目前, 研究人员已将其借鉴到各种吸能部件的研发中^[4]。

蜂窝结构通常是复杂结构, 因而传统加工方法已经越来越不能满足人们对蜂窝结构进行优化设计的需求^[5]。增材制造 (AM) 技术的出现摆脱了传统加工方法的弊端, 成为复杂蜂窝结构制造

的最佳选择。增材制造技术基于离散堆积原理, 通过数字系统控制热源 (激光^[6]、电子束^[7]、电弧^[8]等) 加热熔化填充材料 (粉末^[9]、丝材^[10]等), 由点到线、由线到面, 层层堆叠, 从而实现3D实体零件的直接成型, 因此增材制造技术也被称为3D打印技术。目前, 在工业生产中受到广泛应用的增材制造技术主要有数字光处理 (DLP)、熔融沉积成型 (FDM)、选择性激光熔化 (SLM)、光固化成型 (SLA)、电子束熔化 (EBSM) 以及电弧增材制造 (WAAM) 等^[11]。

本文主体内容如下: 第1章, 简要论述吸能结构 (Energy-Absorbing Structure) 的研究意义; 第2章, 以结构力学为基础, 列举几种蜂窝结构吸能效果的评价指标; 第3章, 展示几种常见蜂窝结构的吸能特性; 第4章, 对蜂窝结构的增材制造应用进行评述。

1 吸能结构简述

随着科学技术的进步, 产品设计越来越追求轻质、低能耗、高安全性等, 力求获得优异的产

品综合性能。汽车、航空航天等工程领域对具有高能量吸收能力的轻型结构的需求不断增长^[12, 13]。以仿生学为启发设计出这类轻型结构, 已经成为研究人员的重要科学手段^[14]。与一些高比强度材料截然不同, 吸能结构在受到外部载荷冲击时, 会触发塑性变形、胞壁之间摩擦或者粘弹性等机制, 将冲击过程中输入的动能转化为应变能^[15], 把大部分能量吸收或者分散, 从而减少冲击带来的影响。

在利用增材制造技术制备蜂窝结构之前, 需要提供结构的三维CAD模型, 目前Solidworks、Meshmixer、AutoCAD等建模软件基本可以满足建模需求^[16]。模型通常采用STL格式, 对模型进行切片处理后, 即可传送到增材制造设备进行打印^[17]。目前, 对蜂窝结构的研究主要集中于对其宏观结构的优化, 在实际打印时, 三维模型的划分与切片的层次数往往也对成型件的质量有着重要影响, 但有关该方面的研究还较少。

蜂窝结构的孔洞在空间上呈现周期性拓扑排列, 多孔结构使其有较低的相对密度, 在车辆、航天等领域发挥了不可磨灭的作用。例如在车辆领域, 用蜂窝夹层结构代替车辆实芯底板, 使得车身的重量大大减少, 增加了机动性。在航天领域, 经过优化的蜂窝夹层结构具有良好的电磁性能, 装备在机翼上, 可提高飞行器的隐蔽性。图1所示为金属蜂窝结构的吸能器。

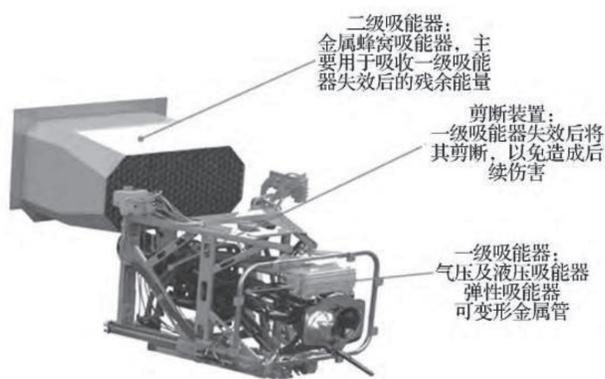


图1 金属蜂窝结构的吸能器^[18]

2 蜂窝结构力学性能

2.1 相对密度

Gibson等^[19]基于微观力学模型, 详细介绍

了蜂窝结构力学性能参数的推导过程, 为蜂窝结构的发展提供了理论依据。在这些力学性能参数中, 相对密度对蜂窝结构的性能影响较大。蜂窝相对密度可定义为在单个胞元结构中, 蜂窝结构密度与蜂窝基材密度之比。假设蜂窝相对密度为 ρ_r , 蜂窝结构密度为 ρ , 蜂窝基材密度为 ρ_s , 蜂窝重量为 M , 蜂窝结构体积为 V , 蜂窝基材体积为 V_s , 那么

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2)$$

$$M = \rho_s \cdot V_s \quad (3)$$

$$\rho_r = \frac{V_s}{V} \quad (4)$$

由式(4)可知, 蜂窝相对密度与蜂窝基材体积和蜂窝结构体积有关, 而这两个体积又与蜂窝胞元参数有关。

2.2 冲击响应

研究人员通过冲击实验对蜂窝结构吸能特性进行了研究。根据冲击速度不同, 可将冲击分为低速冲击和高速冲击。在低速冲击下, 蜂窝的变形模式可定义为准静态模式, 如三点弯曲、准静态冲击等; 在高速冲击下, 蜂窝的变形模式可定义为动态模式, 主要由落锤实验、霍普金森杆实验等完成。在不同的冲击模式下, 蜂窝结构的应力—应变曲线会有不同的响应, 如图2所示。

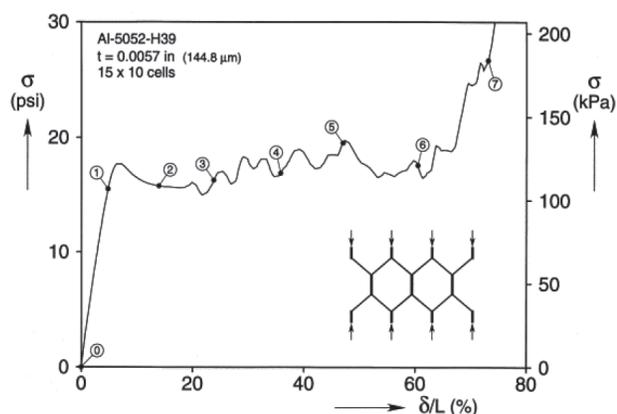


图2 蜂窝结构的应力—应变曲线^[20]

Papka等^[20]发现蜂窝结构在准静态响应过程

中，等效应力—应变基本上呈现三个阶段—弹性阶段、平台应力阶段、密实化阶段。在弹性区，蜂窝结构胞壁发生弹性变形；在平台区，应力在一定范围内波动，结构变形逐渐增大，结构发生屈服、塑形坍塌以及压溃变形，从而吸收大量能量；在平台区末期，胞壁之间相互接触，直至完全贴合在一起，蜂窝结构呈现密实化，此时蜂窝结构力学性能与基材相近，曲线斜率陡增，应力急剧上升。因此，平台应力阶段是吸能的重要阶段，研究人员对蜂窝结构进行优化也是为了寻求更优的平台区，其中以负泊松比蜂窝结构的研究最为突出^[21]。

有关动态冲击响应的研究发现，应变速率对吸能特性的影响也尤为重要。蜂窝结构在不同的冲击速度下会表现出不同的变形模式，因而其吸收能量的能力也不同^[22]。Hönig等^[23]推导出临界

冲击速度 $v_{cr} = \int_0^{\epsilon_{cr}} \sqrt{\frac{\sigma'(\epsilon)}{\rho_r}} d\epsilon$ 。其中： ϵ_{cr} 为应力—应变曲线在初始峰值时的应变； $\sigma'(\epsilon)$ 为蜂窝结构在弹性阶段的杨氏模量。当冲击速度 $v \leq v_{cr}$ 时，为冲击加速阶段，冲击变形可定义为准静态压缩变形，而当 $v > v_{cr}$ 时，蜂窝结构受到动态冲击，随着载

荷的施加，蜂窝结构会被压溃直至密实化。Tan等^[24]对临界冲击速度进行了简化，得到 $V_{cr} = \sqrt{\frac{2\sigma_0}{\rho_r}}$ 。其中： σ_0 为在准静态压缩下的蜂窝结构屈服强度。Ozdemir等^[25]分析发现，在动态冲击初始阶段，蜂窝结构应力会首先急剧上升，随后下降，使得蜂窝结构出现局部应力增强的典型特征。随着冲击速度的增大，蜂窝结构从准静态模式过渡到逐层压溃的密实化动态冲击模式。与此同时，王士龙^[26]研究发现，蜂窝结构的应力强化效应会随着相对密度的增大而显著强化，这是由于蜂窝结构的胞元厚度增加，使得抗变形能力增强。

随着载荷的施加，蜂窝结构会被压溃直至密实化。Tan等^[24]对临界冲击速度进行了简化，得到 $V_{cr} = \sqrt{\frac{2\sigma_0}{\rho_r}}$ 。其中： σ_0 为在准静态压缩下的蜂窝结构屈服强度。Ozdemir等^[25]分析发现，在动态冲击初始阶段，蜂窝结构应力会首先急剧上升，随后下降，使得蜂窝结构出现局部应力增强的典型特征。随着冲击速度的增大，蜂窝结构从准静态模式过渡到逐层压溃的密实化动态冲击模式。与此同时，王士龙^[26]研究发现，蜂窝结构的应力强化效应会随着相对密度的增大而显著强化，这是由于蜂窝结构的胞元厚度增加，使得抗变形能力增强。

2.3 吸能指标

吸能指标是衡量蜂窝结构力学性能的重要指标，也是评价蜂窝结构吸能特性的重要方式。图3所示为蜂窝结构在冲击载荷作用下的力—位移曲线。通常以EA、SEA、MCF、PCF、CFE、EAE等参数评估蜂窝结构吸能特性，部分参数的

计算公式如表1所示。其中： X 为进入密实化阶段的位移；EA为总吸能，即蜂窝结构通过塑形变形而消耗的能量；SEA为比吸能，即单位质量或单位体积所吸收的能量；MCF为平均冲击力，即蜂窝结构在压缩过程中应力的平均值；PCF为蜂窝结构在早期被压溃时的峰值力；CFE为冲击效率，即MCF与PCF的比值；EAE为能量吸收率。SEA和EA两个参数已被用作衡量蜂窝结构吸能特性的非常关键的指标，其中SEA常用来比较不同结构、不同材料的吸能特性。

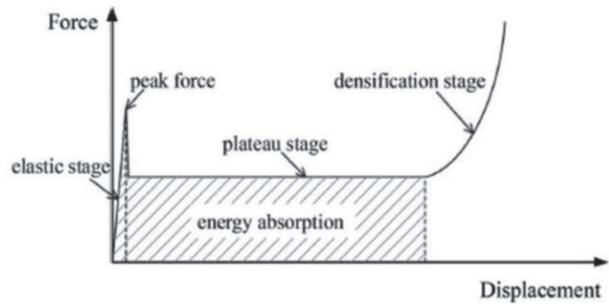


图3 冲击载荷作用下的力—位移曲线^[15]

表1 吸能评价标准

参数	公式
总吸能 (Energy Absorption Capacity, EA)	$EA = \int_0^X F(x) dx$
比吸能 (Specific Energy Absorption, SEA)	$SEA = \frac{EA}{M}$
平均冲击力 (Mean Crushing Force, MCF)	$MCF = \frac{EA}{X}$
冲击效率 (Crush Force Efficiency, CFE)	$CFE = \frac{MCF}{PCF}$

3 蜂窝结构吸能特性

3.1 传统蜂窝结构

如引言所述，蜂窝结构自发现以来已有几千年历史。随着蜂窝结构的使用环境发生巨大变化，人们对其性能的要求也有显著提高，因此研究人员对蜂窝结构进行了大量的优化设计。对于传统蜂窝结构，如方形、六边形、圆形等，可以通过对其几何形状进行参数化，确定其单元尺寸^[27]。邓磊等^[28]通过有限元模拟发现，方形蜂窝结构的

胞壁厚度、高度、宽度等结构参数对吸能特性有不同程度的影响, 通过合理设计, 可以使得蜂窝结构的吸能效果最优。朱易^[29]对正六边形蜂窝结构进行实验和仿真分析得出, 当边长为5 mm、胞壁厚为0.75 mm时, 在爆炸冲击下, 夹层结构变形最小, 比吸能最高。Hu等^[30]研究了圆孔蜂窝结构壁厚对蜂窝结构变形模式和力学特性的影响, 通过有限元模拟发现, 蜂窝结构的平台应力随着壁厚的增加而增大。

3.2 负泊松比结构

传统蜂窝结构宏观上表现出正泊松比效应。随着负泊松比概念的提出, 负泊松比蜂窝结构受到研究人员的广泛关注。在单轴压缩下, 负泊松比蜂窝结构横收缩, 而在受拉伸时, 负泊松比蜂窝结构反而在弹性范围内出现膨胀现象。如今, 负泊松比蜂窝结构迅速发展^[31]。负泊松比蜂窝结构由正六边形蜂窝优化而来^[32]。随后, Choi等^[33]对凸多面体和凹多面体形状的泡沫材料进行了研究, 发现泡沫材料的胞元形状直接影响负泊松比蜂窝结构的力学性能。由此, 研究人员从不同角度对负泊松比蜂窝结构开展了大量优化研究。Grima等^[34]在手型蜂窝结构的基础上, 提出了具有多个旋转中心的新型手型蜂窝结构, 大大提升了蜂窝结构的吸能特性。Dong等^[35]研究发现, 胞壁厚度对凹六边形蜂窝结构的变形模式有显著影响, 并研究了蜂窝单元数对蜂窝结构吸能特性的影响。Shao等^[36]研究了不同壁厚梯度的正泊松比蜂窝和负泊松比蜂窝在不同压缩速度下的变形模态、压缩应力和能量耗散能力。迄今为止, 研究人员相继提出了许多更为新型的负泊松比蜂窝结构: 内凹一反手型蜂窝结构^[37]、内凹状环形蜂窝结构^[38]、正弦曲边内凹蜂窝结构^[39]等。负泊松比效应示意图如图4所示, 典型的负泊松比蜂窝结构如图5所示。

蜂窝结构虽然在吸能方面有着很好的应用潜力, 但受到孔隙结构的影响, 其刚度难免会有所下降。为了获得综合力学性能更佳的蜂窝结构, 研究人员也相继设计了一些方法来弥补孔隙带来的刚度性能损失^[41], 如制备蜂窝夹层结构、在蜂窝结构内加肋板、填充蜂窝孔洞等。Xue等^[42]研

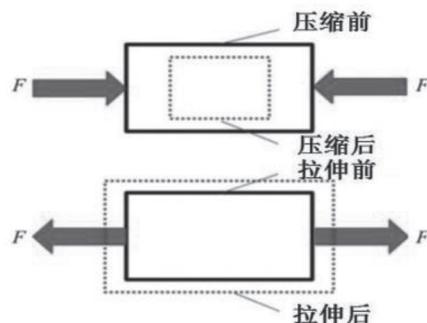


图4 负泊松比效应示意图^[40]

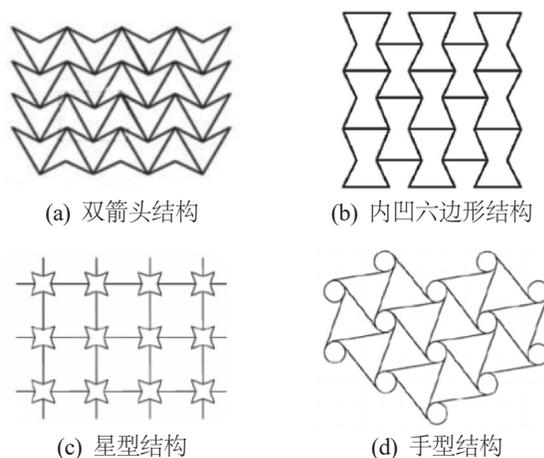
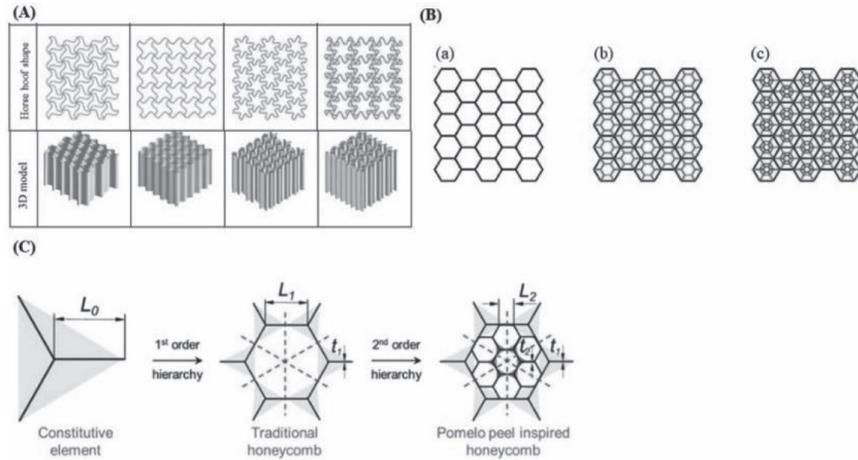


图5 典型的负泊松比蜂窝结构^[41]

究了不同结构的蜂窝夹层与由相同材料和相同重量制成的实心板的变形模式与吸能机理。李翔城^[43]对多种铝蜂窝夹层结构的异面压缩力学响应和缓冲吸能特性进行了研究。Lu等^[44]通过在蜂窝单元内加入肋板, 显著提高了蜂窝结构的弹性模量, 并且可以实现正泊松比与负泊松比的转换。Fu等^[45]把菱形结构加入蜂窝结构中, 在保证蜂窝结构具有负泊松比效应的同时, 实现了蜂窝结构屈服强度的提高。周昊等^[46]在碳纤维增强方形蜂窝孔洞内填充了泡沫材料, 结合有限元分析发现, 夹芯结构的抗压缩性能和比吸能均呈现出增大的趋势。罗伟铭等^[47]在铝蜂窝内填充型砂, 研究了铝蜂窝填砂复合结构在低速冲击下的吸能效果, 为铝蜂窝填砂复合结构在吸能防护结构中的应用奠定了基础。

3.3 新型仿生蜂窝结构

近些年, 研究人员将传统蜂窝结构与其他仿生结构结合, 制备了吸能效果更优的新型仿生蜂窝结构, 如图6所示。



(A) 不同截面的马蹄形蜂窝; (B) 蜘蛛网蜂窝; (C) 仿柚子皮状蜂窝
图6 新型仿生蜂窝结构^[48]

Yang等^[49]在三角形蜂窝、方形蜂窝、六边形蜂窝的基础上,提出了一系列由马蹄形结构组成的新型仿生铝蜂窝,通过添加马蹄形结构,在应力-应变曲线上获得了更长的平台区,从而获得了更高的比吸能。He等^[50]受蜘蛛网启发,通过在蜂窝结构中创建蜘蛛网结构,构建了一阶和二阶蜘蛛网-蜂窝分级结构,通过适当调整层次结构因素,可以有效地调节能量吸收能力。Zhang等^[51]发现柚子皮在柚子落地时可以吸收大量动能,耗散能量,分析原因得知柚子皮具有多孔的分级蜂窝结构,是内部果肉和种子的保护屏障,故利用柚子皮结构构建了一种新型的分级蜂窝,并研究了其吸能效果。

4 蜂窝结构的增材制造应用

传统的制造工艺很难实现复杂仿生结构的加工。尽管数字化电弧焊、数控机床等新兴技术已经能够实现部分复杂结构的加工,但这些技术属于减材制造,且裁剪剩余材料无法再利用,浪费严重^[52]。增材制造技术使用逐层累加的方法连接材料并构建整体结构,能够有效解决复杂构件成型问题,且减少浪费^[53]。

4.1 熔融沉积成型 (FDM)

熔融沉积成型技术^[54]通过喷嘴电加热方式使

热塑性填充材料加热至略高于熔点状态。喷嘴在计算机的控制下,在x-y平面上运动,同时喷嘴挤压融化状态的丝材,进而凝固成型。当x-y平面一层成型后,平台下移一定距离,进行下一层的成型,如此往复,最终打印出实体零件。FDM污染少、制作成本低,在PLA、ABS、PA、橡胶等熔点较低的材料打印方面有较多应用。程志伟等^[55]在内凹六边形蜂窝胞元内部加入斜撑结构,以PLA作为丝材,采用FDM制备了强化型内凹六边形蜂窝,通过冲击实验发现,加入斜撑结构不会改变蜂窝结构的负泊比效应,反而能够提升蜂窝结构的抗冲击性能,即斜撑结构的加入提高了整体蜂窝结构的能量吸收能力。Li等^[56]通过FDM制备了四种不同结构(普通蜂窝、手型蜂窝、内凹六边形蜂窝、桁架增强蜂窝)的橡胶蜂窝结构,研究发现普通蜂窝、手型蜂窝、桁架增强蜂窝的变形能力优于内凹六边形蜂窝结构,但当变形大于30%时,内凹六边形蜂窝的应变吸收能是其余三种结构的3倍,这表明内凹六边形蜂窝结构有更好的吸能特性,同时使用玻璃状聚合物填充蜂窝结构时,蜂窝结构的整体刚度提升。Ingrole等^[57]提出了一种新型膨胀支柱结构设计及其性能改进,采用FDM制备了六边形蜂窝、内凹蜂窝、局部增强支柱结构,并通过平面内的单轴压缩加载进行比较研究,采用有限元模拟对结果进行了验证,研究发现辅助支柱设计在平面内的单轴荷载作用下表现出优异的吸能效果。

4.2 选择性激光熔化 (SLM)

选择性激光熔化技术^[58]使金属粉末在激光束的热作用下完全熔化, 按照三维CAD切片模型规划好的扫描路径在粉末床层进行逐层扫描, 扫描后的金属粉末经冷却后凝固成型。SLM的原理和FDM类似, 只是在热源及粉末原材料方面有所不同。激光扫描不能完全熔化粉末, 并且由于局部温度升高, 颗粒表面的高局部温度导致粉末在分子水平上熔化。然而, 粒子在激光扫描后完全熔化并融合在一起, 从而产生比传统方法更好的机械特性。郎晓明等^[59]对六边形蜂窝结构的直边进行了优化, 提出了S形曲边蜂窝结构, 并基于SLM技术, 以GP1不锈钢为基材, 制备了两种蜂窝结构, 通过准静态压缩性能, 结合有限元模拟技术, 对比分析了两种蜂窝结构的变形模式以及吸能效果。Hassanin等^[60]利用SLM技术, 制备了Ni-Ti凹角六边形蜂窝结构, 通过有限元模拟抗弹性能测试, 分析发现优化后的结构在不同撞击位置的相对密度不同, Ni-Ti蜂窝结构的比吸能比Ni-Ti板高约2倍, 比传统钢板高5倍。

4.3 光固化成型 (SLA)

光固化成型技术^[61]主要采用液态光敏树脂作为原材料, 在紫外光束的照射下进行点到线、线到面的扫描。经过扫描的液态树脂被固化, 一层扫描结束后, 升降台下降一个层片距离, 进行新一层的扫描, 直至成型整个零件。Riva等^[62]利用SLA制备了手型蜂窝结构与内凹六边形蜂窝结构, 通过拉伸实验发现, 由SLA制备的蜂窝结构具有负泊松比效应, 在失效时具有更高的变形, 从而获得更大的韧性。

4.4 电子束选区熔化 (EBSM)

电子束选区熔化 (EBSM) 技术^[63]以电子束为热源, 作用于预置粉末材料, 通过逐层沉积获得所需零件, 其原理同FDM类似。由于EBSM具有效率高、热应力较小等优势, 故适应于钛合金、钛铝合金等高性能金属材料的制备, 目前已经在航天等领域发挥重要作用。Tang等^[64]利用

EBSM制备了油气分离转子Ti-6Al-4V蜂窝结构, 该结构展现出110 MPa的高压缩强度, 为航空发动机润滑系统中更有效的油气分离提供了一种很有前途的解决方案。

4.5 讨论

近些年, 增材制造技术的诸多优点使其在各个领域发展迅速。蜂窝结构的吸能特性很大程度上取决于自身的结构, 因此增材制造出的物品的结构优劣也至关重要。本章列举了蜂窝结构上的增材制造工艺研究, 虽然取得了较多成果, 但是也存在一些缺点。例如, 在运用FDM技术时, 由于设备喷嘴耐热性较好, 故在树脂基材料中应用较为广泛, 而在打印金属材料时, 只能用于低熔点金属^[65]。再如, 在运用SLM技术进行制备的过程中, 由于加热冷却速度较高, 导致蜂窝结构内部产生较大的热应力, 开裂倾向较大^[66]。又如, SLA技术的打印过程中耗时相对较多, 且加工费用高, 并且可供打印的材料种类也较为有限^[67]。EBSM虽然应用范围较为广泛, 在一些难熔的材料制备中有着独特的优势, 但其工作时涉及高压的输入, 会产生X射线, 需要配备成本较高的真空环境系统 (当然, 真空环境同时也使得粉末不会受到外来杂质的影响, 纯度可以得到保证)^[68]。此外, 增材制造无法制造从纳米到宏观尺度的结构, 在小于1 μm 尺度的设计中无法胜任。因此, 为了进一步提高蜂窝结构的吸能效果, 必须在增材制造技术研发方面取得更为实质性的进展。

5 结束语与展望

受自然界启发的蜂窝结构材料拥有优异的吸能效果, 在工程设计领域具有极大的应用潜力。增材制造技术的复杂结构加工优势为其在蜂窝结构制备中提供了更多的可能性。本文对蜂窝结构吸能特性进行了简要介绍, 并以结构力学为基础, 综述了蜂窝吸能效果的评价指标以及对蜂窝结构进行的优化, 最后分析了增材制造技术在蜂窝结构中的应用和存在的一些问题。未来, 针对蜂窝结构的增材制造研究中还可在以下方面进行探索:

(1) 利用塑料、橡胶、树脂等基材的FDM技

术在蜂窝结构中研究较多,而针对增材制造金属基蜂窝结构的研究则较少,仅在SLM和SEBM中有部分研究进展,有待深入。

(2) 蜂窝结构建模和仿真资源数据有限,适用于蜂窝结构建模和仿真的参数有待分享,分析方法有待进一步开发。

(3) 目前的研究主要集中于对蜂窝结构宏观结构的优化,如优化尺寸形状等。下一步,可以考虑从材料微观结构对蜂窝结构组织性能进行优化,如通过对构件进行热处理等方式改善微观组织。

参考文献

- [1] 陈志华,张倩. 仿生结构研究综述[C]/全国索结构技术交流会. 2012.
- [2] VINCENT J F V, BOGATYREVA O A, BOGATYREV N R, et al. Biomimetics: its practice and theory[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2006, 3(9): 471-482.
- [3] EVANS A G, HUTCHINSON J W, ASHBY M F. Multifunctionality of cellular metal systems[J]. *Progress in Materials Science*, 1998, 43(3): 171-221.
- [4] THANG P T, KIM C, JANG H, et al. Buckling behavior analysis of hybrid-honeycomb sandwich cylindrical shells[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 276(5): 114214.
- [5] ZHANG K, DUAN H, KARIHALOO B L, et al. Hierarchical, multilayered cell walls reinforced by recycled silk cocoons enhance the structural integrity of honeybee combs[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(21): 9502-9506.
- [6] CHEN Y, ZHU H, ZHANG P, et al. An exceptionally strong, ductile and impurity-tolerant austenitic stainless steel prepared by laser additive manufacturing[J]. *Acta Materialia*, 2023, 250(5): 118868.
- [7] OVALLE D G, ROCK C, WINKLER C, et al. Microstructure development and properties of microalloyed copper, Cu-0.3Zr-0.15Ag, produced by electron beam additive manufacturing[J]. *Materials Characterization*, 2023, 197(5): 112675.
- [8] CHATURVEDI M, SCUTELNICU E, RUSU C C, et al. Wire Arc Additive Manufacturing: Review on Recent Findings and Challenges in Industrial Applications and Materials Characterization[J]. *Metals*, 2021, 11(6): 939.
- [9] 张康, 杨博文, 秦立东, 等. 金属增材制造用粉末制备技术研究进展[J]. *金属加工: 热加工*, 2023(3): 24-31.
- [10] 王涵, 周伟民, 闵国全, 等. 送丝激光增材制造的研究进展[J]. *中国金属通报*, 2018(12): 248-251.
- [11] SAVOLAINEN J, COLLAN M. How Additive Manufacturing Technology Changes Business Models: Review of Literature [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32(3): 101070.
- [12] YIN S, YANG R, HUANG Y, et al. Toughening mechanism of coelacanth-fish-inspired double-helicoidal composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 205(3): 108650.
- [13] PENG Y, LI T, BAO C, et al. Performance analysis and multi-objective optimization of bionic dendritic furcal energy-absorbing structures for trains[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 246(5): 108145.
- [14] CUI C Y, CHEN L, FENG S, et al. Novel cuttlebone-inspired hierarchical bionic structure enabled high energy absorption [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 186(3): 110693.
- [15] MOHAMMADI H, AHMAD Z, PETR M, et al. An insight from nature: honeycomb pattern in advanced structural design for impact energy absorption[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 22(1/2): 2862-2887.
- [16] 张馨丹. 3D打印技术研究现状和关键技术研究[J]. *现代工业经济和信息化*, 2022, 12(11): 139-141.
- [17] OGUNSANYA M, ISICHEI J, PARUPELLI S K, et al. In-situ Droplet Monitoring of Inkjet 3D Printing Process using Image Analysis and Machine Learning Models[J]. *Procedia Manufacturing*, 2021, 53: 427-434.
- [18] 王力, 范乐天, 高军, 等. 螺旋缠绕式圆筒型蜂窝吸能特性研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(23): 51-55.
- [19] Gibson L J, Ashby M F, Schajer G S, et al. The Mechanics of Two-Dimensional Cellular Materials[J]. *Proceedings of The Royal Society A*, 1982, 382(1782): 25-42.
- [20] PAPKA S D, KYRIAKIDES S. Experiments and full-scale numerical simulations of in-plane crushing of a honeycomb[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(8): 2765-2776.
- [21] MONTGOMERY-LILJEROTH E, SCHIEVANO S, BURRIESCI G. Elastic properties of 2D auxetic honeycomb structures: a review[J]. *Applied Materials Today*, 2023, 30(2): 101722.
- [22] SUN Y, LI Q M. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 112(2): 74-115.
- [23] HÖNIG A, STRONGE W J. In-plane dynamic crushing of honeycomb. Part I: crush band initiation and wave trapping[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, 44(8): 1665-1696.
- [24] TAN P J, REID S R, HARRIGAN J J, et al. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part II: 'shock' theory and comparison with experimental data and numerical models[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(10): 2206-2230.
- [25] OZDEMIR Z, TYAS A, GOODALL R, et al. Energy

- absorption in lattice structures in dynamics: Nonlinear FE simulations[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 102(4): 1-15.
- [26] 王士龙. 多胞材料动态力学性能的多尺度分析和表征[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [27] SUN G, HUO X, WANG H, et al. On the structural parameters of honeycomb-core sandwich panels against low-velocity impact[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 216(7): 108881.
- [28] 邓磊, 王安稳, 毛柳伟, 等. 方孔蜂窝夹层板在爆炸载荷下的吸能特性[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(17): 186-189.
- [29] 朱易. 橡胶填充蜂窝夹层复合结构抗爆性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [30] HU L L, CAI D Y, WU G P, et al. Influence of internal pressure on the out-of-plane dynamic behavior of circular-celled honeycombs[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 104(6): 64-74.
- [31] XUE X, LIN C, WU F, et al. Lattice structures with negative Poisson's ratio: A review[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 34(3): 105132.
- [32] WOLCOTT M P. Cellular solids: Structure and properties[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1990, 123(2): 282-283.
- [33] CHOI J B, LAKES R S. Analysis of elastic modulus of conventional foams and of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1995, 37(1): 51-59.
- [34] GRIMA J N, GATT R, FARRUGIA P-S. On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures[J]. *Physica Status Solidi*, 2008, 245(3): 511-520.
- [35] DONG Z, LI Y, ZHAO T, et al. Experimental and numerical studies on the compressive mechanical properties of the metallic auxetic reentrant honeycomb [J]. *Materials & Design*, 2019, 182(11): 108036.
- [36] SHAO Y, MENG J, MA G, et al. Insight into the negative Poisson's ratio effect of the gradient auxetic reentrant honeycombs[J]. *Composite Structures*, 2021, 274(10): 114366.
- [37] 魏路路, 余强, 赵轩, 等. 内凹一反手性蜂窝结构的面内动态压溃性能研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(4): 261-269.
- [38] 沈振峰, 张新春, 白江畔, 等. 负泊松比内凹环形蜂窝结构的冲击响应特性研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(18): 89-95, 117.
- [39] 虞科炯, 徐峰祥, 华林. 正弦曲边负泊松比蜂窝结构面内冲击性能研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(13): 51-59.
- [40] 陶晓晓. 车辆底部负泊松比结构防护组件抗爆炸冲击技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [41] 杨智春, 邓庆田. 负泊松比材料与结构的力学性能研究及应用[J]. *力学进展*, 2011, 41(3): 335-350.
- [42] XUE Z, HUTCHINSON J W. A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(10): 1283-1305.
- [43] 李翔城. 组合式铝蜂窝异面压缩响应及缓冲吸能特性研究[J]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [44] LU Z X, LI X, YANG Z Y, et al. Novel structure with negative Poisson's ratio and enhanced Young's modulus [J]. *Composite Structures*, 2016, 138(15): 243-252.
- [45] FU M H, CHEN Y, HU L L. Bilinear elastic characteristic of enhanced auxetic honeycombs[J]. *Composite Structures*, 2017, 175(9): 101-110.
- [46] 周昊, 郭锐, 姜炜. 泡沫填充碳纤维增强复合材料方蜂窝夹芯准静态压缩特性[J/OL]. *工程力学*: 1-9 [2023-07-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20221024.1633.354.html>.
- [47] 罗伟铭, 石少卿, 孙建虎, 等. 铝蜂窝填砂复合夹芯结构的低速冲击响应试验研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(10): 50-56.
- [48] SIDDIQUE S H, HAZELL P J, WANG H, et al. Lessons from nature: 3D printed bio-inspired porous structures for impact energy absorption: A review[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 58(10): 103051.
- [49] YANG X, SUN Y, YANG J, et al. Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructure[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 125(4): 1-11.
- [50] HE Q, FENG J, CHEN Y, et al. Mechanical properties of spider-web hierarchical honeycombs subjected to out-of-plane impact loading[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2018, 22(3): 771-796.
- [51] ZHANG W, YIN S, YU T X, et al. Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125(3): 163-172.
- [52] THOMPSON M K, MORONI G, VANEKER T, et al. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints[J]. *CIRP Annals*, 2016, 65(2): 737-760.
- [53] VELASCO-HOGAN A, XU J, MEYERS M A. Additive Manufacturing as a Method to Design and Optimize Bioinspired Structures[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(52): 1800940.
- [54] PERVAIZ S, QURESHI T A, KASHWANI G, et al. 3D Printing of Fiber-Reinforced Plastic Composites Using Fused Deposition Modeling: A Status Review[J]. *Materials*, 2021, 14(16): 4520.
- [55] 程志伟, 侯秀慧. 强化型内凹蜂窝的力学特性研究[J/OL]. *应用力学学报*: 1-9 [2023-07-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.O3.20230228.1147.007.html>
- [56] LI T, CHEN Y, HU X, et al. Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties[J]. *Materials & Design*, 2018, 142(3): 247-258.
- [57] INGROLE A, HAO A, LIANG R. Design and modeling of

- auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement[J]. *Materials & Design*, 2017, 117(3): 72-83.
- [58] SPEARS T G, GOLD S A. In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing [J]. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 2016, 5(1): 16-40.
- [59] 郎晓明, 陈斐洋, 阮班超, 等. 增材制造曲边蜂窝结构的力学行为和吸能特性[J]. *宁波大学学报(理工版)*: 1-7 [2023-07-06]. DOI:10.20098/j.cnki.1001-5132.2022.1107.
- [60] HASSANIN H, ABENA A, ELSAYED M A, et al. 4D Printing of NiTi Auxetic Structure with Improved Ballistic Performance[J]. *Micromachines*, 2020, 11(8): 745.
- [61] 李东方, 陈继民, 袁艳萍, 等. 光固化快速成型技术的进展及应用[J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(12): 1769-1774.
- [62] RIVA L, GINESTRA P S, PANDINI S, et al. Production and characterization of the Poisson's ratio of cellular structured metamaterials by additive manufacturing[J]. *Procedia CIRP*, 2022, 110: 378-382.
- [63] 郭超, 张平平, 林峰. 电子束选区熔化增材制造技术研究进展[J]. *工业技术创新*, 2017, 4(4): 6-14.
- [64] TANG H P, WANG Q B, YANG G Y, et al. A Honeycomb-Structured Ti-6Al-4V Oil-Gas Separation Rotor Additively Manufactured by Selective Electron Beam Melting for Aero-engine Applications[J]. *Jom: the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2016, 68(3): 799-805.
- [65] 王春香, 张辉. FDM型3D打印机喷头结构的进展[J]. *塑料*, 2021, 50(3): 93-98.
- [66] SINGLA A K, BANERJEE M, SHARMA A, et al. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64(4): 161-187.
- [67] BALC N, YANKOV E, NIKOLOVA M P. Comparison of the Accuracy of 3D Printed Prototypes Using the Stereolithography (SLA) Method with the Digital CAD Models[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2017, 137: 02014.
- [68] 张新, 林小辉, 高选乔, 等. 增材制造难熔金属材料及其应用研究进展[J]. *粉末冶金工业*, 2022, 32(3): 18-22.

作者简介:

李春杰 (1999—), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生。主要研究方向: 增材制造仿生吸能结构。

周琦 (1967—), 通信作者, 男, 湖南人, 教授, 博士生导师。研究方向: 增材制造、微观异构仿生设计。

E-mail: cheezhou@126.com

常心如 (1999—), 女, 山西太原人, 硕士研究生。主要研究方向: 结构仿真。

(收稿日期: 2023-05-30)

Research Advances on Energy-Absorbing Characteristics of Honeycomb Structure and Its Additive Manufacturing Application

LI Chunjie, ZHOU Qi, CHANG Xinru

(School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The unique structure of honeycomb makes it hold excellent advantages in compression and impact resistance, and more and more researchers are inspired by bionics to apply honeycomb structure into various engineering and technological fields. The emergence and development of additive manufacturing (AM) technology provides more possibilities for the structural design of complex honeycomb. The research significance of energy-absorbing structure was briefly stated. Based on the structural mechanics, the mechanical performance parameters of honeycomb structure such as relative density and impact response were investigated, and the evaluation indexes of energy-absorbing effect of honeycomb structure such as total energy-absorption and specific energy-absorption were listed out. The improvement of energy-absorbing characteristics of honeycomb structure with negative Poisson's ratio and new bionic honeycomb structure compared with traditional honeycomb structure was demonstrated, and the application of additive manufacturing on honeycomb structure was reviewed. Finally, the research on additive manufacturing of honeycomb structure was prospected.

Keywords: Additive Manufacturing; Bionics; Energy-Absorbing Characteristics; Honeycomb Structure; Negative Poisson's Ratio

染料JGB的镀铜机制及其对电解铜箔微观形貌和力学性能的影响

陈杨, 杜荣斌, 朱旭, 汪宏亮, 杨林, 桑凤姣
(安庆师范大学化学与化工学院, 安徽安庆 246133)

摘要: 为研究染料健那绿B (JGB) 的镀铜机制, 考察其对电解铜箔微观形貌和机械力学性能等的影响, 采用线性扫描伏安法 (LSV) 和计时电流法 (CA), 探讨JGB与聚丙二醇 (PPG)、聚二硫二丙烷磺酸钠 (SPS)、Cl⁻共存情况下对铜沉积的影响, 同时利用X射线衍射仪 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 分析晶面择优取向及铜箔形貌, 并对电解铜箔进行表面粗糙度和力学性能测试。研究发现: 在复合添加剂PPG、SPS、Cl⁻中加入JGB后, 所得的铜镀层会更平整细致并保持良好的光泽度, 且添加了15 mg/L JGB与未添加JGB相比, 粗糙度下降20.79%, 高温抗拉伸强度提升11.85%。

关键词: 健那绿B; 染料; 添加剂; 聚丙二醇; 择优取向; 表面粗糙度; 高温抗拉伸强度

中图分类号: TQ153.1+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-093-06

工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.012

0 引言

电解铜箔具有良好的导电性和耐腐蚀性^[1-3], 在太阳能电池、燃料电池等新型器件和新能源等新兴领域得到了广泛应用^[4-6]。在电解铜箔生产中, 需要通过电解将铜离子还原为铜金属, 生产资料包括铜离子、电解槽、电极和电解液等^[7-9]。其中, 铜离子可以来自铜硫酸溶液、硫酸铜溶液 (注: 铜硫酸溶液主要由铜盐和硫酸组成, 通常使用氯化铜作为铜盐, 但一般情况下氯化铜的高价格限制了它们的使用, 并且不如硫酸铜稳定。硫酸铜溶液由硫酸铜和水组成, 硫酸铜是最常用的铜盐, 是最稳定的化合物之一, 而且价格相对较低。因此, 相比之下硫酸铜溶液更适合作为主溶液) 或铜硫酸盐溶液, 而电解槽是将铜离子和电解液混合在一起进行电解的场所^[10-11]。采用不含添加剂的酸性镀液很难得到高品质的铜箔, 而不同的添加剂对铜沉积的影响效果也不尽相同: 聚丙二醇 (PPG) 可以抑制铜沉积, 提升镀层的

致密性, 但无法改善镀层外观^[12-13]; 聚二硫二丙烷磺酸钠 (SPS) 可以加速铜沉积, 使镀层表面更加光滑、致密, 从而达到外观上的要求^[14-16]; Cl⁻与PPG协同作用, 可进一步增强抑制铜沉积的效果^[17]。为得到平整性好且具有良好力学性能的电镀铜箔, 国外有将染料用作整平剂的报道, 染料在覆盖能力、整平效果等方面均有优势^[18-19]。本文开展电化学测试, 以染料健那绿B (JGB)^[20]作为整平剂, 探讨其在镀铜过程中的作用机制和影响, 其中包括JGB与抑制剂PPG、光亮剂SPS、氯离子Cl⁻的竞争吸附和协同作用, 进而考察JGB对电解铜箔微观形貌、力学性能的影响。

1 实验部分

电化学测试在上海辰华仪器有限公司生产的CHI660E电化学工作站上开展。使用三电极系统, 工作电极是1 cm×1 cm铜电极, 辅助电极是与工作电极面积相同的铂板电极, 参比电极是饱和甘汞

电极 (SCE)。实验前,铜电极的处理步骤为:纯水清洗→4 000目砂纸抛光→纯水清洗→丙酮除油→纯水清洗→10% HCl浸泡8~10 s活化表面→纯水清洗^[21]。基础镀液体系为在80 g/L CuSO₄·5H₂O、40 g/L H₂SO₄的基础电解液中加入整平剂JGB,溶液温度控制在40 °C,保持静止状态。

线性扫描伏安法 (LSV) 的电位界限为0~1.00 V (vs SCE),扫描速度为0.01 V/s。计时电流法 (CA) 的阶跃电位为0.7 V (vs SCE)。用S-3400扫描电子显微镜对铜箔的微观结构进行表征。采用岛津公司生产的XRD-6000型X射线衍射仪进行铜箔的择优取向分析。铜箔的表面粗糙

度测试采用马尔PS-10型粗糙度测试仪完成,以制备的铜箔中间部分作为待测区域,每次测试距离约为50 mm,每个待测样品横向与纵向各测3次,测试结果取平均值。铜箔的力学性能测试通过西瓦卡CV-WN-1562高低温拉力试验机完成,为避免铜箔边缘沉积不均匀所带来的性能误差,选择铜箔中间部分制备测试样品,测试样品的尺寸为10 mm×150 mm,测试温度为120 °C,每个待测样品测试3次,测试结果取平均值。

Scharifker-Hills成核模型可用于确定成核机制和计算相关参数。Scharifker-Hills成核模型无因次表达式^[22]如表1所示。

表1 Scharifker-Hills成核模型无因次表达式

瞬时成核	连续成核
$\frac{I^2}{I_m^2} = \frac{1.9542}{t/t_m} \{1 - \exp[-1.2564(t/t_m)]\}^2$	$\frac{I^2}{I_m^2} = \frac{1.2254}{t/t_m} \{1 - \exp[-2.3367(t/t_m)]\}^2$
$t_m = \frac{1.2564}{N\pi kD}$	$t_m = \left(\frac{4.6733}{AN_\infty \pi k'D}\right)^{1/2}$
$I_m = 0.6382zFDc(kN)^{1/2}$	$I_m = 0.4615zFD^{3/4}c(k'AN_\infty)^{1/4}$
$I_m^2 t_m = 0.1629(zFc)^2 D$	$I_m^2 t_m = 0.2598(zFc)^2 D$

表1中:

- I*—电流密度, A/cm²;
- t*—*I*的对应时间, s;
- I_m*—CCTs曲线的最大电流密度, A/cm²;
- t_m*—*I_m*的对应时间, s;
- z*—转移电荷数;
- F*—法拉第常数, 取值为96 485 C;
- D*—离子扩散系数, cm²/s;
- c*—离子浓度, mol/cm³;
- M*、*ρ*—金属沉积相的摩尔质量 (g/mol) 及密度 (g/cm³);
- N*、*N_∞*—晶核数密度和晶核最大数密度, cm²;
- A*—成核速率常数;
- k*、*k'*—与实验体系有关的常数。

2 实验结果与讨论

2.1 染料JGB与PPG、SPS、Cl⁻协同作用时的LSV和CA实验

铜沉积阴极电极反应过程以逐步降价机制为

理论基础。首个过程为Cu²⁺ + e⁻ → Cu⁺, 为控制步骤^[23-24]。染料JGB加入后的LSV曲线如图1所示。可知,当电位扫描到-0.5~-0.4 V时,复合添加剂PPG、SPS和Cl⁻的电流密度发生显著变化,即沉积电位在此区间。加入JGB后,沉积电位显然负移至-0.6 V,说明JGB的加入具有阴极极化作用。这是由于JGB是一种含偶氮基的有机染料^[25],在电解时,主要通过分子中的含氮基团与高电流密度区的Cu²⁺发生竞争吸附抑制该处的铜沉积,但不影响低电流密度区的铜沉积。同时,JGB的加入不仅有利于SPS(加速剂)向铜箔孔内传输,还与PPG(抑制剂)发生协同作用,形成PPG—Cl⁻—JGB(抑制层),从而增强PPG对铜沉积的抑制作用。

图2a、2b所示分别为JGB加入后的CCTs图及对应的无因次化图。由图2a可知,在复合添加剂中加入染料JGB后,电流密度减小,且电流密度整体上小于无JGB的情况,这是由于在电镀过程中,JGB会优先吸附在高电流密度区,且吸附量大,导致该区域铜沉积受阻,从而降低此处电流密度。而在低电流密度区,因JGB的吸附量小,使得该区域铜沉积阻碍较小,这样不同区域的铜

沉积速度的差异减小, 使得镀层表面变得平整。对图2a进行无因次化变换得到图2b。图2b显示, 无论是否添加JGB, 都不会改变原始的成核模式, 一直为瞬时成核, 并且不会改变铜沉积的成核生长机制。铜离子的扩散系数 D 和成核密度 N 可以根据Scharifker-Hills成核模型计算, 如表2所示。

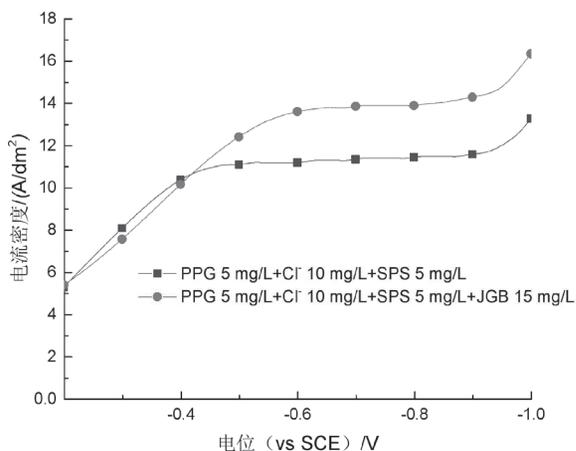
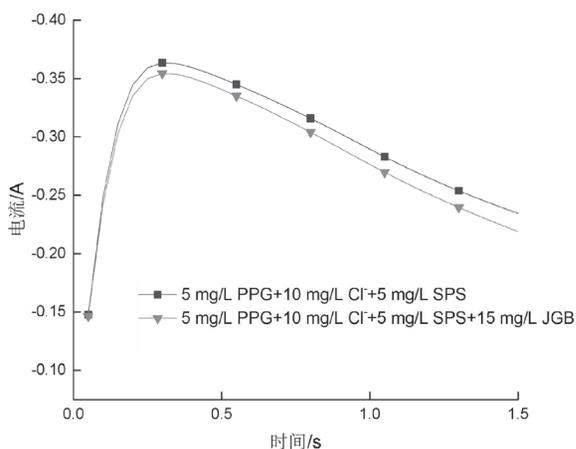
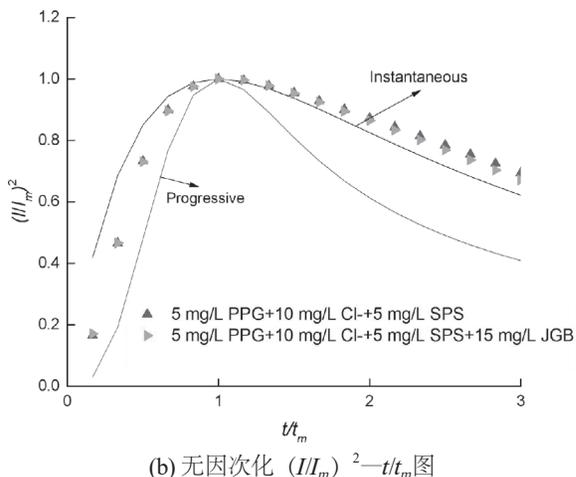


图1 JGB加入后的LSV曲线



(a) CTTs图



(b) 无因次化 $(I/I_m)^2 - t/t_m$ 图

图2 JGB加入后的CTTs图及对应的无因次化图

表2 铜离子的扩散系数 D 和成核数密度 N

添加剂	扩散系数 $D/(10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s})$	成核数密度 $N/(10^5 \text{ cm}^{-2})$
0 mg/L JGB	2.533 6	7.170 2
15 mg/L JGB	2.407 1	7.547 0

铜离子的扩散系数 D 可以作为铜离子扩散能力的参照, D 值越小, 代表抑制作用越强, 镀层越均匀。 N 是成核数密度, 它是一种特征值, 可以用作确定铜箔的致密、光滑程度, N 值越大, 则铜箔表面越细致光滑。由表2可知, JGB的加入减小了铜离子的扩散系数 D , 表明JGB确实具有抑制铜沉积的能力, 验证了上述线性扫描伏安法 (LSV) 得出的结论。同时, 成核数密度 N 明显增大, 表明JGB的加入可以使镀层细致且光滑, 又与计时电流法 (CA) 的分析相吻合。

2.2 电解铜箔XRD分析

图3所示为未加入JGB和加入JGB后所制作出的电解铜箔XRD分析图。通常来说, 衍射峰的强度越高, 结晶程度就越大, 相应晶面的生长就越均匀。铜是面心立方晶体, 镀层若呈现 (111) 晶面择优取向, 则会比较平整, 而若呈现 (220) 晶面择优取向则反之; 呈现 (200) 晶面择优取向则表示光泽度较好。在图3中, (111) 衍射峰强度最高的是图3b, (200) 衍射峰强度最高的也是图3b, 即加入JGB后的情况; (220) 衍射峰强度最高的是图3a, 即不加入JGB的情况。以上进一步说明随着JGB浓度的升高, 镀层表现得越平整, 并保持良好的光泽度。

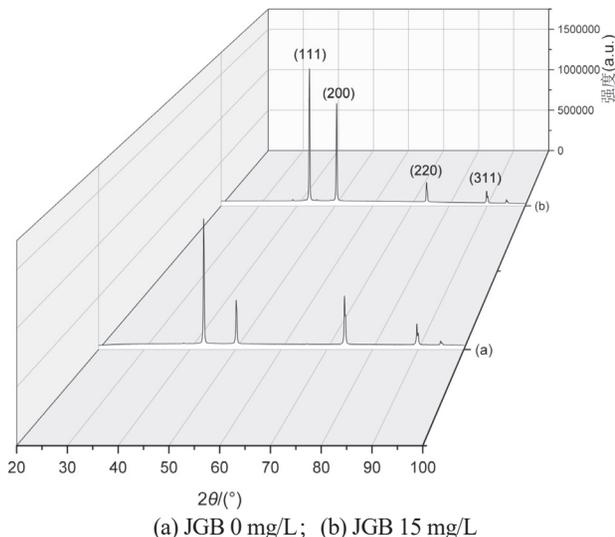


图3 未加入、加入JGB后电解铜箔的XRD分析图

铜箔镀层各晶面的织构系数（TC值）如表3所示。如果某晶面TC值大于 $1/n$ （ n 表示峰的数量），则该晶面表现出择优取向面垂直于基体，TC值越高，择优程度越大。但是，若每个晶面的TC值相同，则晶面取向表现为无序。由表3可知，在复合添加剂PPG、SPS、CI的作用下，仅晶面（311）没有择优取向；加入JGB后，晶面（220）不再表现为择优取向， $TC_{(111)}\%$ 与 $TC_{(200)}\%$ 都保持较高的数值，且都比未添加JGB时高，呈现出良好的平整性和光泽度。

表3 铜箔镀层各晶面的织构系数

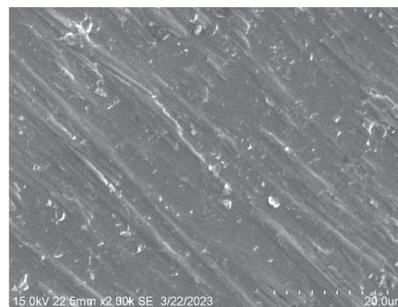
添加剂	晶面			
	(111)	(200)	(220)	(311)
0 mg/L JGB	35.35	26.23	35.31	3.11
15 mg/L JGB	53.02	37.65	6.42	2.92

2.3 微观形貌分析

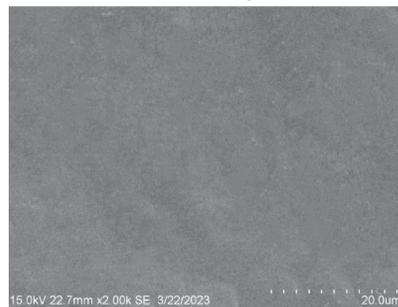
图4所示为未加入JGB和加入JGB后电解铜箔的SEM图，实验条件是温度 $40\text{ }^\circ\text{C}$ ，电流密度 50 mA/cm^2 。对比来看，在加入JGB前（图4a），铜镀层表面有很多杂乱无序的条纹和颗粒。但随着JGB的加入，镀层表面显然变得光滑平整，整平效果显著。这是由于在电沉积进程中，基底表面在微观层面上看是高低不平的，表面凹陷的厚度大于凸起的高度，因此JGB更快到达凸起处，凸出处高含量的JGB增大了电极反应的极化，抑制了晶粒沉积并增加了表面光滑度。

2.4 粗糙度与力学性能测试

JGB对电解铜箔表面粗糙度与力学性能的影响如图5所示。分析得知，JGB的加入使铜箔表面粗糙度有较明显的下降趋势，而高温抗拉伸强度有缓慢上升的趋势。添加量为 15 mg/L JGB的情况与未添加JGB相比，粗糙度下降了 20.79% ，高温抗拉伸强度提升了 11.85% 。由此可以得出，表面粗糙度与力学性能变化趋势有一定的相关性，随着镀层表面趋于平整，铜箔的抗拉伸强度会增强。

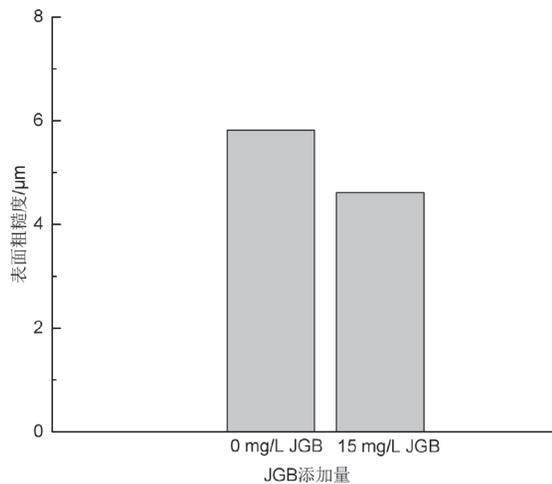


(a) JGB 0 mg/L

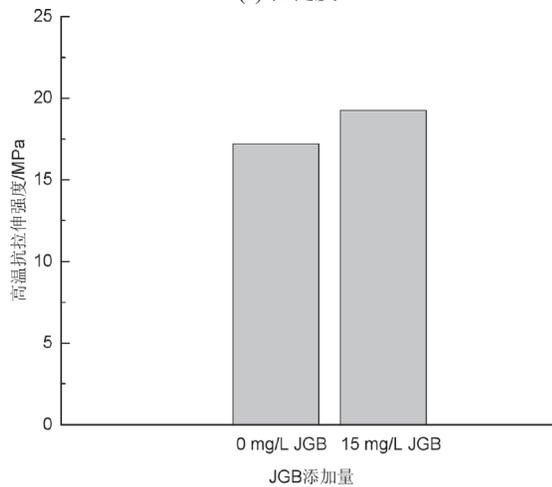


(b) JGB 15 mg/L

图4 未加入、加入JGB后电解铜箔的SEM图



(a) 粗糙度



(b) 力学性能

图5 JGB对电解铜箔表面粗糙度与力学性能的影响

3 结论与讨论

(1) 染料JGB与复合添加剂PPG、SPS、Cl⁻协同作用时, 在电化学测试中表现为阴极极化的增大和对铜沉积的抑制作用。同时, JGB的加入可以减小铜离子扩散系数 D 和增大成核数密度 N , 使镀层细致且光滑。

(2) 在复合添加剂PPG、SPS、Cl⁻作用下, 在电解铜箔晶面(111)、(200)、(220)、(311)中, 仅晶面(311)没有择优取向; 加入JGB后, 晶面(220)不再表现为择优取向, $TC_{(111)}\%$ 和 $TC_{(200)}\%$ 都保持较高的数值, 且都比未添加JGB时高, 呈现出良好的平整性和光泽度。

(3) 加入JGB后, 电解铜箔的力学性能增强, 表现为粗糙度减小, 高温抗拉伸强度增大。

参考文献

- [1] WU M, ZHANG Z, XU X, et al. Seeded growth of large single-crystal copper foils with high-index facets [J]. *Nature*, 2020, 581(7809): 406-410.
- [2] PENG J, CHEN B, WANG Z, et al. Surface coordination layer passivates oxidation of copper [J]. *Nature*, 2020, 586(7829): 390-394.
- [3] WANG L, XU X, ZHANG L, et al. Epitaxial growth of a 100-square-centimetre single-crystal hexagonal boron nitride monolayer on copper [J]. *Nature*, 2019, 570(7759): 91-95.
- [4] SUN Y, PAN J F, LIU L L, et al. Improvement of performance stability of electrolytic copper foils by bi-component additives [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2022, 52(8): 1219-1230.
- [5] VARMAZYAR J, KHODAEI M. Diffusion bonding of aluminum-magnesium using cold rolled copper interlayer [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 773(30): 838-843.
- [6] WANG S P, WEI K X, WEI W, et al. Enhancing Surface Roughness and Tensile Strength of Electrodeposited Copper Foils by Composite Additives [J]. *Physica Status Solidi. A: Applications & Materials Science*, 2022, 219(5): 1-7.
- [7] WOO T G, PARK I S. Changes in Electrical Properties of Copper-Plated Layer by Organic Additives on High Current Density [J]. *Korean Journal of Metals and Materials*, 2019, 58(1): 41-48.
- [8] WANG X, HUANG L, ZHANG Y, et al. Novel silicon nanowire film on copper foil as high performance anode for lithium-ion batteries [J]. *Ionics*, 2018, 24(16): 373-378.
- [9] HE Z, MA F, LI M, et al. Multi-functional hybrid active power converter and its industrial application for electrolytic copper-foil [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(16): 3985-3994.
- [10] IBRAHIM J S, MATHEW R T, PRASAD M, et al. Processing and Specimen Thickness to Grain Size (t/d) Ratio Effects on Tensile Behaviour and Microformability of Copper Foils [J]. *Metals and Materials International*, 2022, 28(10): 2340-2355.
- [11] QIN L, WU Y, SHEN M, et al. Straining copper foils to regulate the nucleation of lithium for stable lithium metal anode [J]. *Energy Storage Materials*, 2022, 44(1): 278-284.
- [12] LI Y, REN P, LI R, et al. A novel bright additive for copper electroplating: electrochemical and theoretical study [J]. *Ionics*, 2023, 29(1): 363-375.
- [13] LI S, ZHU Q, ZHENG B, et al. Nano-scale twinned Cu with ultrahigh strength prepared by direct current electrodeposition [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 758(5): 1-6.
- [14] ALESHINA V K, GRIGORYAN N S, ASNIS N A, et al. Additives to the electrolyte for copper plating of through-holes in multilayer printed-circuit boards [J]. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2021, 10(4): 1661-1676.
- [15] WOO T G. The effects of Bis (3-Sulfo-Propyl) di-Sulfide (SPS) additives on the surface morphology and mechanical properties of electrolytic copper foil [J]. *Korean Journal of Metals and Materials*, 2016, 54(9): 681-687.
- [16] XIAO Z, ZHOU Z, SONG L, et al. Electrochemical studies and molecular dynamics simulation of the interaction between accelerators and Cu surface during the electroplating process [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2019, 14(5): 4705-4717.
- [17] CHOE S, KIM M J, KIM H C, et al. Degradation of poly (ethylene glycol-propylene glycol) copolymer and its influences on copper electrodeposition [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2014, 714(1): 85-91.
- [18] LIAO C, ZHANG S, CHEN S, et al. The effect of tricyclazole as a novel leveler for filling electroplated copper microvias [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, 827(15): 151-159.
- [19] YU W, LIN C, LI Q, et al. A novel strategy to electrodeposit

- high-quality copper foils using composite additive and pulse superimposed on direct current [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2021, 51(23): 489-501.
- [20] SONG S J, CHOI S R, KIM J G, et al. Effect of molecular weight of polyethylene glycol on copper electrodeposition in the presence of bis-3-sulfopropyl-disulfide [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2016, 11(12): 10067-10079.
- [21] SEKAR R. Synergistic effect of additives on electrodeposition of copper from cyanide-free electrolytes and its structural and morphological characteristics [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(7): 1665-1676.
- [22] ALCANFOR A A C, DOS SANTOS L P M, DIAS D F, et al. Electrodeposition of indium on copper from deep eutectic solvents based on choline chloride and ethylene glycol [J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 235(1): 553-560.
- [23] ZHANG S, CHEN H, QIAN Y, et al. Effect of dealloying temperature on microstructure and tensile properties of self-supporting nanoporous copper foil fabricated in situ [J]. *Journal of Porous Materials*, 2023, 30(1): 267-276.
- [24] SHEN Z, ZHANG L, LI P, et al. Dynamic failure mechanism of copper foil in laser dynamic flexible forming [J]. *Materials Science-Poland*, 2021, 38(4): 684-692.
- [25] WOO T G, PARK J J, PARK I S. Initial Behavior of Additives and Mechanical Properties of Copper Foils on

High Current Density [J]. *Korean Journal of Metals and Materials*, 2021, 59(5): 304-313.

作者简介:

陈杨 (1997—), 通信作者, 男, 汉族, 江苏常熟人, 在读硕士研究生。研究方向: 高纯金属及合金的电解加工。
E-mail: 1774736240@qq.com

杜荣斌 (1974—), 男, 博士, 教授。研究方向: 高纯金属及合金的电解加工。

朱旭 (2002—), 男, 在读本科。研究方向: 高纯金属及合金的电解加工。

汪宏亮 (2004—), 男, 在读本科。研究方向: 高纯金属及合金的电解加工。

杨林 (2004—), 女, 在读本科。研究方向: 高纯金属及合金的电解加工。

桑凤姣 (2003—), 女, 在读本科。研究方向: 高纯金属及合金的电解加工。

(收稿日期: 2023-06-13)

Copper Plating Mechanism of Dye JGB and Its Effect on Microstructure and Mechanical Properties of Electrolytic Copper Foil

CHEN Yang, DU Rongbin, ZHU Xu, WANG Hongliang, YANG Lin, SANG Fengjiao
(College of Chemistry and Chemical Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246133, China)

Abstract: In order to study the copper plating mechanism of dye Janus Green B (JGB) and its effect on the microstructure and mechanical properties of electrolytic copper foil, linear sweep voltammetry (LSV) and chronoamperometry (CA) were used to explore the influence of JGB on the copper deposition in the presence of polypropylene glycol (PPG), sodium polysulfide dipropyl sulfonate (SPS) and Cl⁻. Meanwhile, X-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscope (SEM) were used to analyze the preferred orientation of crystal plane and the morphology of copper foil, and the surface roughness and mechanical properties of electrolytic copper foil were tested. Findings: after adding JGB into composite additives PPG, SPS, Cl⁻, the obtained copper plate will be smoother, finer and keep good gloss. Its roughness will decrease by 20.79% and its tensile strength at high temperature will increase by 11.85% when adding 15 mg/L of JGB.

Keywords: Janus Green B; Dye; Additive; Polypropylene Glycol; Preferred Orientation; Surface Roughness; Tensile Strength at High Temperature

基于STM32单片机的双向DC/DC变换器

赵徐森, 汤昊臻, 李萌, 董勇, 郭锦东, 马知远
(北方工业大学信息学院, 北京 100144)

摘要: 实现双向DC/DC变换器对锂电池的充放电功能和为负载供电功能, 以模拟太阳能光伏发电技术。设计一种双向集成、同步整流的Buck-Boost双向DC/DC变换器, 系统主电路可工作在电流连续模式 (CCM) 和电流断续模式 (DCM) 两种模式, 并采用STM32单片机进行实时采样, 作出数字逻辑判断, 实现光伏输入和电池储能的双向控制。实验和测试结果表明: 在同步整流模式下, Buck充电电路效率高于92%, 电池恒流充电电流控制精度高于99.6%, 负载上输出电压稳定在(30±0.5) V范围。设计的变换器优化了电路结构, 降低了成本, 具有效率高、充电电路控制精度高等特点。

关键词: 光伏发电; 电池储能; 双向DC/DC变换器; Buck-Boost; STM32单片机

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-099-07
工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.013

0 引言

太阳能是一种可再生能源。面向国家可持续发展战略要求和人民对环境保护的迫切需求, 在可以预计的将来, 能源装备性能将不断提升, 储能技术将日益进步, 电网能够越来越多地“消纳”光伏发电, 太阳能逐步取代常规能源成为可能。太阳能光伏发电技术与储能技术相结合, 符合“绿色、节能、低成本”的发展范式。

基于单片机的太阳能控制系统能够很好地把太阳能光伏发电技术与单片机智能控制技术结合起来^[1-5], 具有电路结构简单、工作稳定可靠、实用性强等优点。本文设计一种基于STM32单片机的双向DC/DC变换器, STM32单片机通过实时采样进行数字逻辑判断, 指挥双向DC/DC变换器实现光伏输入和电池储能的双向控制。本设计实质上是一种以电池的能量存储和管理为中心的系统。当直流电源提供的能量大于负载所需的能量时, 系统在充电状态下工作, 将电源提供的多余能量储存起来; 当直流电源提供的能量小于负

载所需的能量时, 系统在放电状态下工作, 储能锂电池提供部分能量, 保证负载功率保持稳定。

“双向DC/DC变换器”一词正是源于这种能量双向传输的特性。

1 变换器框架设计

系统工作框架如图1所示。由直流稳压电源(以下简称“直流电源”)模拟光伏板, 输入的直流电压在24~38 V范围变化, 负载由30 Ω电阻模拟, 电压稳定在30 V。系统主电路采用了Buck-Boost双向DC/DC变换电路, 通过STM32单片机和逻辑控制电路产生两路PWM驱动信号, 控制其灵活切换三种工作状态。

状态一: 当输入电压 U_i 超过35 V时, 由于直流电源提供的能量大于负载所需的能量, 因此系统工作在Buck充电状态, 将电源提供的多余能量传输给电池储存起来, 同时保证负载上的电压稳定在30 V。此时电路是一个双环并联的控制系統^[6-8]。

状态二：当输入电压 U_s 处于32~35 V范围时，由于直流电源提供的能量小于负载所需的能量，因此系统工作在Boost放电状态，由电池提供部分能量，保证负载上的电压稳定在30 V。

状态三：当输入电压 U_s 低于32 V时，系统也工作在Boost放电状态，但直流电源不再给负载提供能量，而是由电池提供全部能量，保证负载上的电压稳定在30 V。

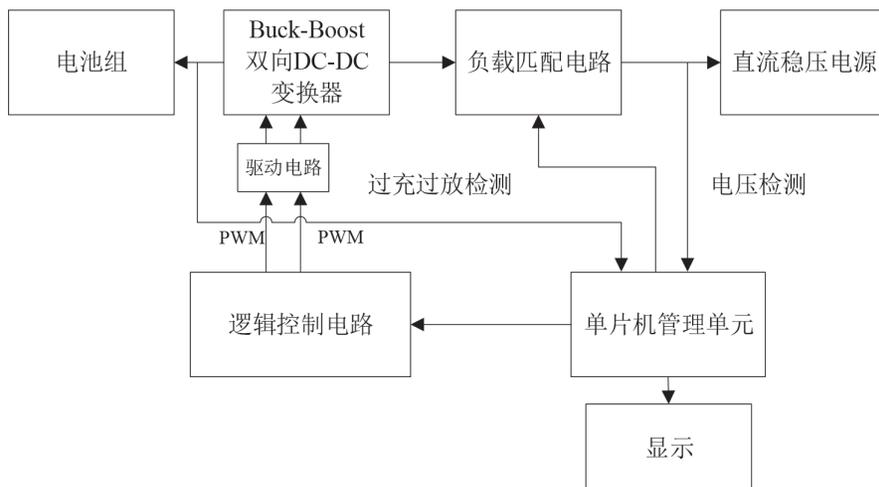


图1 系统工作框架

系统根据直流电源的电压值，自动调整充放电工作状态。系统中电池组使用18650型、容量2 000~3 000 mAh的锂离子电池，由5节电池串联而成。该电池单节标称电压一般为4 V，过充电压为4.2 V左右，过放电压为2.8 V左右。5节18650型锂电池串联后，其正常工作电压处于14~21 V范围。剩余电荷（SoC）是电池状态的一项重要指标，一般电池的SoC处于20%~100%范围。当SoC等于100%时，开路电压即为正常工作电压的最高值21 V；当SoC等于20%时，开路电压为18.85 V。

2 变换器系统设计

2.1 双向DC/DC变换电路设计

双向DC/DC变换电路需要工作于充电和放电两种模式。传统上分别采用Buck电路和Boost电路完成充电和放电工作。为减少器件数量、降低成本，本设计将两个电路集成为一级电路，形成双向Buck-Boost电路^[9-10]，作为双向DC/DC变换电路，如图2所示。

电池组接在图2电路的左侧，当直流电源对电池充电（即充电模式）时，该电路为Buck工作方式，此时Q1为主控开关管，Q2为同步续流管；

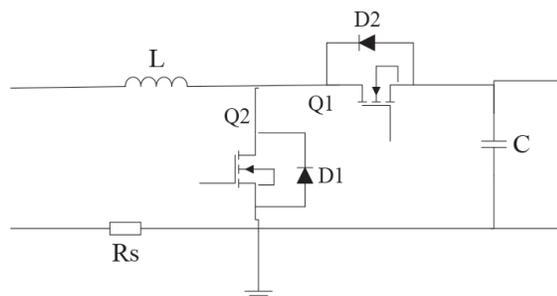


图2 双向DC/DC变换电路

当电池组向直流电源和负载放电（即放电模式）时，该电路为Boost工作方式，此时Q2为主控开关管，Q1为同步续流管。

2.1.1 MOS管的选择

① 耐压选择：由于MOS管的选择需要遵循导通电阻小的原则，因而选用低压管，以减少通态损耗；系统要求输入电压 U_s 最高为38 V，所以耐压范围选择40~50 V，以保证耐压足够。

② 电流量选择：系统电流最大为2 A，所以选择4 A以上MOS管即可。MOS管电流越大，通态电阻越小，越有利于提高通态损耗，但是结电容随着电流量增大而增大，又会增大开关损耗。权衡考虑，选择5~10 A的MOS管较合适。

③ 驱动电压选择: 驱动电压越高, MOS管的导通电阻越小, 即导通损耗越小, 但开关损耗以平方规律增加, 故应选择低压驱动MOS管, 驱动电压处于6~8 V较佳。

2.1.2 二极管的选择

由于电路工作在电流连续模式 (CCM), 主要损耗为反向恢复电流造成的损耗, 因此降低反向恢复电荷或反向恢复时间的有效手段是采用快恢复二极管。快恢复二极管分三类: ① 快恢复管, 这种二极管耐压高, 反向恢复电流较大; ② 碳化硅二极管, 它几乎没有反向恢复电流, 然而由于导通电压大于1 V, 所以只适合于高压工作模式; ③ 肖特基二极管, 其最大优点是导通电压在0.4~0.6 V。综合考虑, 选择肖特基二极管最为合适。

2.1.3 电感的选择

电感根据磁芯的不同分为三种: ① 开气隙的铁氧体, 这种磁芯效率最高, 但干扰大, 气隙也难以控制; ② 非晶磁芯, 该磁芯效率高、损耗小, 但是工作频率太低; ③ 低磁通磁芯, 效率和工作频率较适中, 最终决定采用以铁硅铝为磁芯的电感。

电感量L与纹波电压有关, 电感值通常为75~100 μH 。因为电池是一个响应速度为几十毫秒的电源, 所以电池两端可以并联一个2 000 μF 左右的电容, 以提高响应速度^[11]。

2.2 控制电路设计

该双向DC/DC变换器需要驱动信号来驱动开关管, 使电路正常工作。对于驱动芯片的选择, 有多种方案: UC3843芯片原理简单, 易于实现, 但是无软启动, 不利于电路正常工作; UC3854芯片能够实现软启动, 能得到该系统所要求的驱动信号, 但其内部结构原理较为复杂, 应用困难; SG3525芯片既可以实现软启动, 也有较简单的工作原理, 能满足电路驱动信号的要求。综上, 选用SG3525芯片作为控制芯片驱动开关管。在该系统中, 使用了两片SG3525, 为主电路中的两个开关管提供驱动信号。控制电路如图3所示。

为提高系统效率, 系统采用同步整流的方式, 使开关管导通压降低^[12], 这样就需要设计逻辑控制电路来实现对驱动信号的要求。系统逻辑电路如图4所示。通过检测SG3525的10管脚电平高低, 来实现Buck和Boost电路的转换。

本系统采用具有自举功能的IR2112为主控芯片, 驱动Buck-Boost电路的上管和下管, 驱动电路如图5所示。

3 控制程序设计

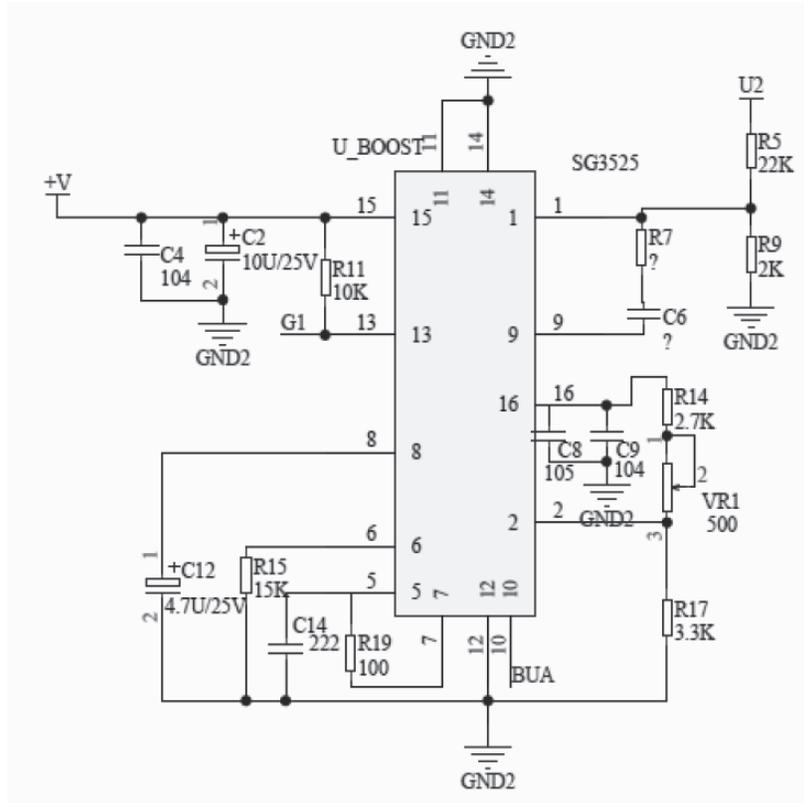
本系统设计的双向DC/DC变换器, 既可能工作在电流连续模式 (CCM), 又可能工作在电流断续模式 (DCM)。在电流连续模式中, 主电路小信号模型为一个二阶系统, 即双极点系统; 在电流断续模式中, 系统又为一个单极点系统。系统在充电状态下为恒流控制模式, 所以要采用电流环; 同时系统无论在充电状态还是放电状态下, 都要求工作在稳压状态, 所以要采用电压环。我们设计一个统一的PI补偿网络, 采用主极点校正, 以牺牲少量系统动态响应为代价, 来满足上述所有要求^[13]。

STM32单片机可以通过功能按键或者自动检测方式, 实现Buck、Boost和Buck-Boost三种电路工作状态的转换。在Buck、Boost模式中, AD电压采集运用了均值检测方法, 消除了尖峰脉冲的影响, 同时加入了过充、过放检测, 当发生过充、过放情况时, 系统强制停机, 从而起到了保护电路的作用。系统程序流程框图如图6所示。

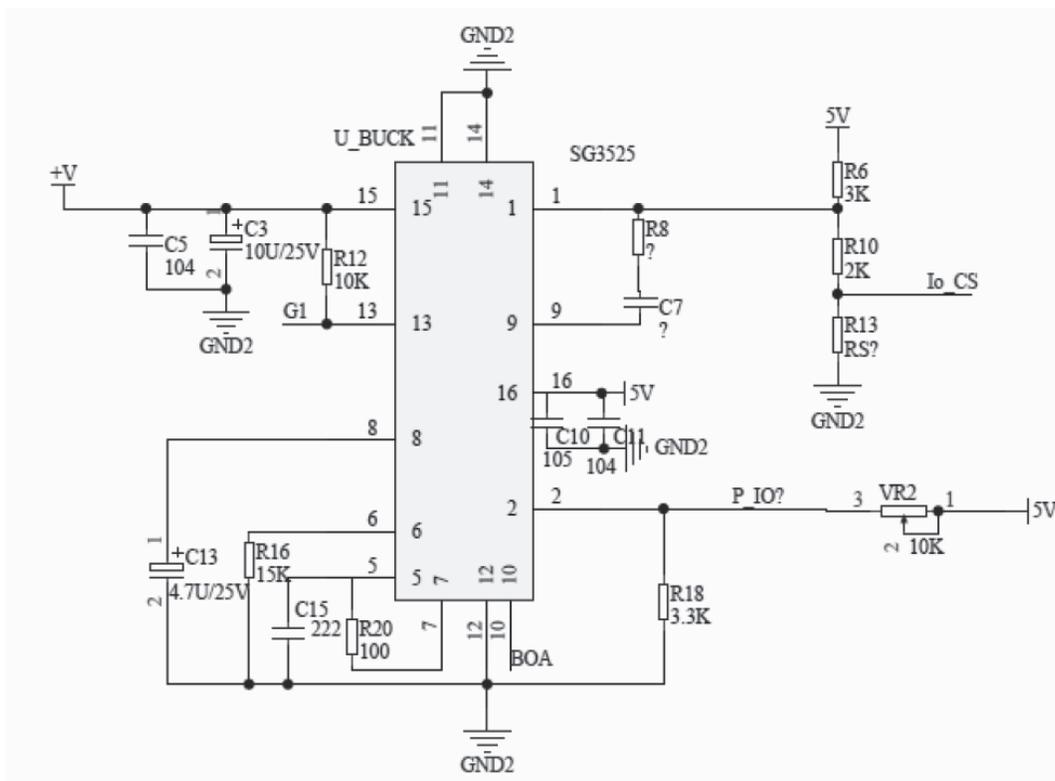
4 实验与测试

为提高系统工作效率, 兼顾轻量化的要求, 同时保障制作的硬件电路合理可靠, 双向DC-DC变换器开关频率选择较高的100 kHz。系统采用同步整流控制技术, 使导通电压由0.4 V降到0.1 V, 显著减少通态损耗。选用低驱动电压的开关管, 减少驱动损耗, 降低导通损耗。双向DC/DC变换器样机如图7所示。

在双向DC/DC变换器的软硬件调试中, 优化出最佳的设计电路和参数, 并对变换器进行了如表1~3所示的性能测试。



(a) 第一片SG3525周围的控制电路



(b) 第二片SG3525周围的控制电路

图3 控制电路

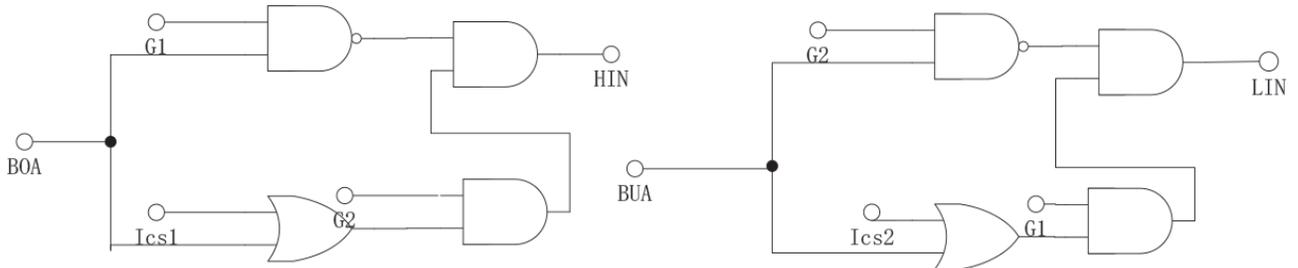


图4 系统逻辑电路

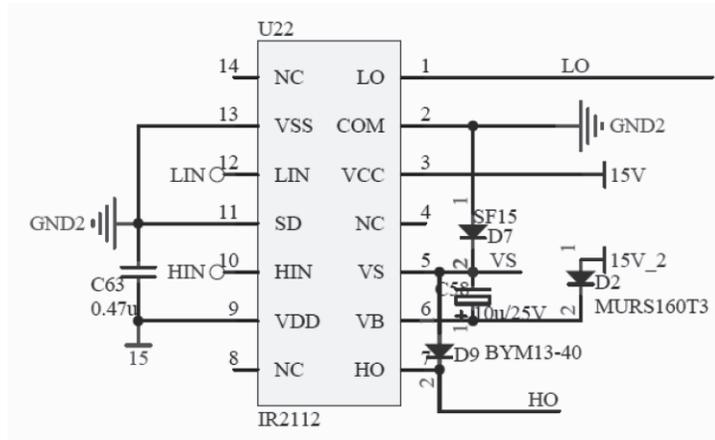


图5 驱动电路

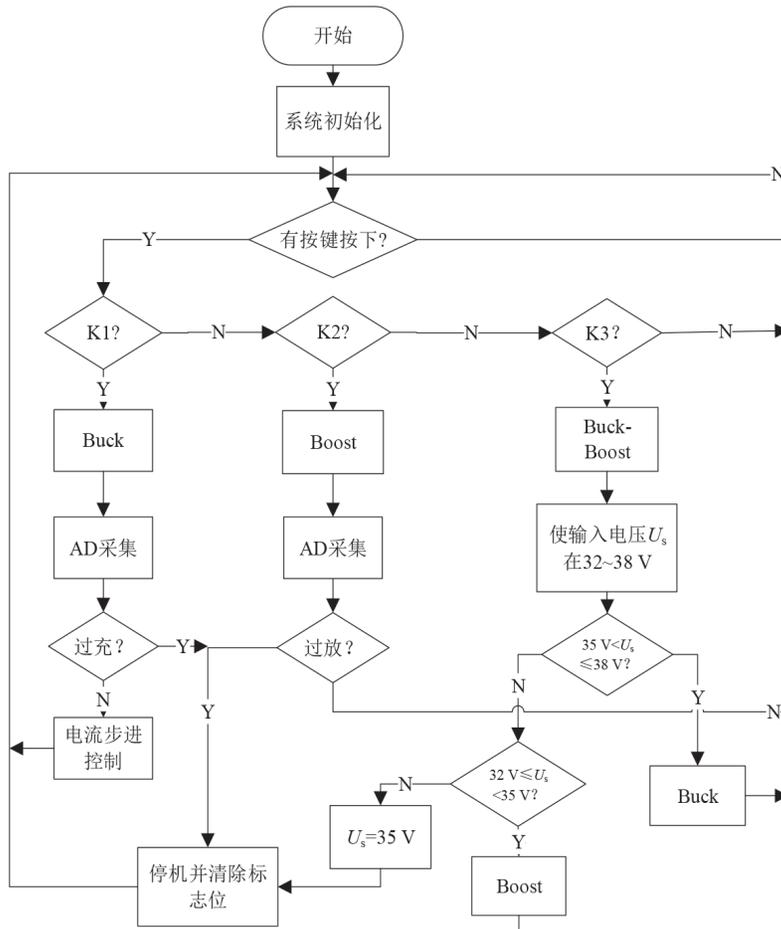


图6 系统程序流程框图

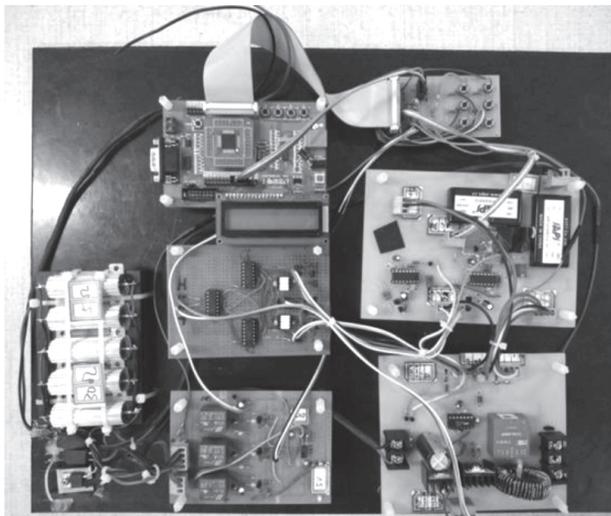


图7 双向DC/DC变换器样机

表1 同步整流效率

情形	无同步整流			有同步整流		
	I_{in}/A	I_o/A	$\eta/\%$	I_{in}/A	I_o/A	$\eta/\%$
1	0.56	0.85	91.07	0.58	0.89	92.07
2	0.98	1.51	92.44	0.93	1.45	93.55
3	1.16	1.78	92.07	1.16	1.80	93.10
4	1.33	2.05	92.48	1.34	2.08	93.83

(测试条件: Buck模式, 输入电压 $U_s=30V$, 输出电压 $U_2=18V$)

表2 电流控制精度

情形	电流设定值	电流实际值	电流控制精度 $e_{ic}/\%$
	I_{10}/A	I_1/A	$(e_{ic}=(I_1-I_{10})/I_{10} \times 100\%)$
1	1.0	0.997	0.3
2	1.3	1.196	0.33
3	1.7	1.603	0.19
4	2.0	2.007	0.35

(测试条件: 输出电压 $U_2=30V$, 电池恒流充电)

表3 负载上输出电压的稳定性

情形	U_s/V	U_2/V
1	32	29.8
2	34	29.9
3	36	29.5
4	38	29.9

对表1的实验结果进行比较可以看到, 在采用同步整流技术的情况下, 工作在Buck模式下的变换器效率比无同步整流时高出至少一个百分点。

对表2的实验结果进行分析可以看到, 在给电池恒流充电的工作模式中, 实际充电电流与设定

值的相对误差不大于0.4%, 即实现的电池恒流充电电流控制精度高于99.6%。

对表3的实验结果进行分析可以看到, 当输入电压 U_s 在32~38 V范围内变化时, 系统工作模式实现自动转换, 同时保证负载上输出电压 U_2 稳定在(30±0.5) V范围。

其他测试结果表明, 通过有效的逻辑电路与控制电路相配合, 制作完成的双向DC/DC变换器实现了对锂电池的充放电功能和为负载供电功能。

5 结论与讨论

本文设计了一种基于STM32单片机的、用于电池储能装置的双向DC/DC变换器。该系统由直流稳压电源模拟光伏板, 输入电压在24~38 V范围变化, 负载由30 Ω电阻模拟, 输出功率为30 W。系统成功实现了双向DC/DC变换器对锂电池的充放电功能和为负载供电功能。主要应用特点包括:

① 采用了双向集成同步的DC/DC变换器, 节省了部分器件, 大大降低了成本。

② 主电路既可工作在电流连续模式 (CCM), 也可工作在电流断续模式 (DCM)。

③ 采用了STM32单片机, 通过实时采样进行数字逻辑判断, 实现了智能控制。

本文设计了双向DC/DC变换器样机, 进行了实验和测试, 结果表明:

① 系统效率高, 在同步整流模式下, Buck充电电路效率高于92%;

② 电池恒流充电工作模式实现的充电电流控制精度高于99.6%;

③ 在输入电压全范围变化时, 工作模式实现自动转换, 负载上输出电压控制在(30±0.5) V范围;

④ 抗干扰性和可靠性强, 具有过充、过放、短路等保护功能。

参考文献

[1] 王楠, 贾姝娟, 岳健. 双向DC/DC变换器在微电网储能系统的应用[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(22): 91-93.
 [2] 方军涛, 罗龙刚. DC/DC直流开关电源的研究与设计[J]. 通信电源技术, 2020, 37(9): 63-66, 69.
 [3] 谢颖翔. 应用于储能系统中的双向DC-DC变换器的设计[J]. 现代工业经济和信息化, 2019, 9(10): 36-37.

- [4] 张国驹, 唐西胜, 周龙, 等. 基于互补PWM控制的Buck/Boost双向变换器在超级电容器储能中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 15-21.
- [5] 韩猛, 李昊远, 刘东立, 等. 太阳能光伏系统双向DC-DC变换器的设计[J]. 电动工具, 2019(3): 14-18.
- [6] 李宁宁, 师长立, 何俊强, 等. 超级电容器储能逆变器控制策略研究[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(4): 696-701.
- [7] 冯兴田, 万满满, 韩立博, 等. 基于储能的双向DC/DC变换器电源系统控制策略[J]. 电力电子技术, 2017, 51(7): 8-10, 19.
- [8] 张惠生, 赵兴勇, 王凯武, 等. 基于风光互补微电网的复合储能控制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 48-53, 96.
- [9] 王丙元, 姜建. 基于滑模预测控制的光伏储能双向DC/DC变换器[J]. 电气自动化, 2022, 44(4): 29-33.
- [10] 王归新, 杨斌, 陈海东. 混合式隔离双向DC-DC变换器建模与控制[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(11): 48-57.
- [11] YAZDANI F, ZOLGHADRI M R. Design of Dual Active Bridge Isolated Bi directional DC converter Based on Current Stress Optimization[C]//Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2017.
- [12] 李建杨, 王俊峰, 王凯. 单端反激式DC/DC变换器同步整流技术研究[J]. 通信电源技术, 2019, 36(1): 14-16, 24.
- [13] 张湘映. 基于改进PID控制的快速响应数字DC/DC变换器设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.

作者简介:

赵徐森 (1968—), 通信作者, 男, 江西泰和人, 本科, 高级实验师。研究方向: 功率变换技术。
E-mail: zxs@ncut.edu.cn

汤昊臻 (2002—), 男, 山东枣庄人, 电子信息工程专业2020级在读本科生。

李萌 (2002—), 男, 安徽淮北人, 电子信息工程专业2020级在读本科生。

董勇 (2002—), 男, 甘肃天水人, 电子信息工程专业2020级在读本科生。

郭锦东 (2002—), 男, 河南三门峡人, 电子信息工程专业2021级在读本科生。

马知远 (2003—), 男, 安徽黄山人, 电子信息工程专业2021级在读本科生。

(收稿日期: 2023-04-12)

Bidirectional DC/DC Converter Based on STM32 Single Chip Microcomputer

ZHAO Xusen, TANG Haozhen, LI Meng, DONG Yong, GUO Jindong, MA Zhiyuan
(Information College, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: The charge and discharge function on the lithium battery and the function to supply the power to the load were realized using the bidirectional DC/DC converter, to carry out the simulation on the solar photovoltaic power generation technology. A bidirectional integrated and synchronous rectifier Buck-Boost bidirectional DC/DC converter was designed. The main circuit of the system worked in two modes: continuous current mode (CCM) and discontinuous current mode (DCM), and the STM32 single chip microcomputer was used for the real-time sampling and the digital logic judgment, so as to realize the bidirectional control of photovoltaic input and battery energy storage. The experimental and test results show that the efficiency of Buck charging circuit is higher than 92%, the control accuracy of battery constant charging current is higher than 99.6%, and the output voltage on the load is stable in the range of (30±0.5) V. The designed converter optimizes the circuit structure, reduces the cost, and has the characteristics of high efficiency and high charging circuit control accuracy.

Keywords: Photovoltaic Power Generation; Battery Energy Storage; Bidirectional DC/DC Converter; Buck-Boost; STM32 Single Chip Microcomputer

基于物联网的可穿戴设备及生命体征监测系统

冯玉竹, 魏剑南, 马玉鑫, 刘霞
(烟台大学物理与电子信息学院, 山东烟台 264005)

摘要: 充分考虑老年人健康需求, 构建一套基于物联网的可穿戴设备及生命体征监测系统。以STC89C51单片机最小系统作为核心控制器件, 搭配DS18B20传感器和MAX30102传感器, 通过温度系数晶体采集人体手腕体温, 采用光容积法采集人体心率和血氧数据, 以MPU6050陀螺仪作为传感器采集人体偏转角度和加速度变化, 作为跌倒检测综合判定依据, 并采用液晶显示屏和按钮实现人机交互。测试结果表明: 该系统能够准确测量手腕温度, 手腕温度与额头温度的平均误差约为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与腋下温度的误差约为 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$; 在心率测量方面, 光容积法可以获得可靠的人体心率血氧信号, 系统测量值与PGG输出的心率图像吻合度较好; 在跌倒检测方面, 偏转角度和加速度变化两个参数的融合可将跌倒检测准确率提高到96.3%。系统具有体积小、精度高、功耗低、可穿戴等特点, 具有广阔的应用前景。

关键词: 可穿戴设备; 生命体征监测; 体温采集; 血氧; 心率; 跌倒检测

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-106-10
工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.014

0 引言

当前, 我国老年人口不断增长, 给经济社会发展带来了巨大挑战^[1]。在全面建设社会主义现代化国家的新征程上, 提高人民生活品质, 尤其是提高老年人生活品质, 成为重要任务。随着新型工业化战略的实施, 新兴产业、新兴技术有着更加广阔的发展空间, 其中可穿戴设备可以起到监测老年人健康状况的作用, 有效缓解老年人口带来的社会压力和家庭压力^[2], 不断实现人民对美好生活的向往。

目前市场上的智能手环(以下简称“手环”)

等可穿戴设备主要面向年轻人和健身人士, 其功能局限于对使用者的日常运动进行记录, 不仅准确性有待提高, 而且对老年人的使用需求考虑不周全, 缺乏健康监测报警等重要功能。根据调查, 手环在老年群体中的使用还不普遍: 未接触过手环和刚接触手环的老年人占比分别为51.85%和44.44%, 而熟练使用手环的老年人仅占3.70%; 81.48%的老年人表示愿意接受手环的日常佩戴, 88.89%的老年人认为拥有手环可以使生活更加便利。虽然仍有11.11%的老年人对手环的作用抱以观望的态度, 但可以看出, 未来针对老年人的可穿戴设备市场将极具潜力^[3]。

老年人的生命体征(如健康状态和健康指标特征等)与年轻人截然不同, 因此需要根据老年人的健康监测需求开展更具专业性、针对性的设计和研发。例如, 老年人更关注心率、血氧等指标的监测, 以及跌倒报警和紧急救援等功能。再如, 老年人对智能产品的操作往往较为生疏, 考虑

基金项目:

2022年山东省高等教育学会高等教育研究专项课题“新工科视域下物联网工程专业实践教学模式研究”; 2021年第二批教育部高教司产学研合作协同育人项目——以“项目+竞赛”为驱动的物联网工程创新训练实践基地建设; 山东省大学生创新训练项目(S202211066018); 山东省大学生创新训练项目(S202211066023); 烟台大学大学生创新训练项目(X202211066112)

到这一特殊情况, 操作流程需要尽可能简化^[3]。本文设计一套面向老年人的、基于物联网的可穿戴设备, 对生命体征监测系统软硬件研发, 重点关注体温、心率、血氧等健康指标的日常监测, 以及跌倒检测功能准确率的提升等方面, 从根本上保证生命体征监测系统的综合性能。

1 系统总体方案设计

采用STC89C51单片机最小系统作为核心控制

器件, 搭配DS18B20传感器和MAX30102传感器, 实现对老年人体温、心率和血氧等健康指标数据的采集。LED显示模块采用LCD液晶显示屏, 与单片机通过通信模块进行通信连接。跌倒检测功能由MPU6050陀螺仪实现, 同时使用蜂鸣器报警电路作为声音报警装置^[4-5]。无线发射模块与键盘模块配合, 单片机通过nRF24L01模块发送信息。无线接收模块接收端接入电源模块, 单片机接收来自控制端的信号, 驱动nRF24L01模块和LED显示模块^[6]。系统总体方案设计图如图1所示。

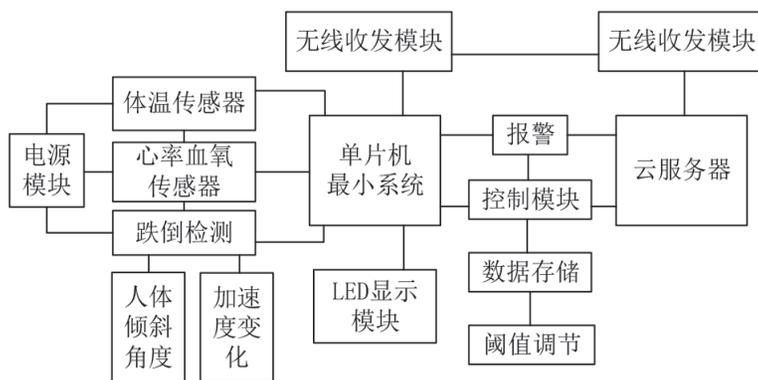


图1 系统总体方案设计图

2 硬件电路设计

2.1 主控电路设计

STC89C51单片机是新一代的51单片机, 其功能强大, 具有低电压、高性能、速度快、能兼容普通51指令系统等特点^[7]。STC89C51单片机内部除了具有与外部联系的4个并行I/O口外, 还增加了标准的P4口, 其中P0口内部不带上拉电阻。另外, 此单片机的管脚具有多重功能, P1.0~P1.7不仅能够作为普通的I/O口使用, 还可以进行数模转换。单片机最小系统原理图如图2所示。

2.2 LCD1602显示模块设计

LCD1602显示模块与单片机通过并口连接, P0~P7在本设计中与单片机连接。微机通过控制P2端口的三个引脚(P2.4、P2.5和P2.6)来控制LCD1602的RS、RW和E引脚的高低电平。其中, RS用于控制LCD屏幕接收数据或命令, RW用于控制LCD1602显示模块进行读写操作, 使E

引脚能控制总线。为了使显示器正常工作, 需要一个电阻来调整显示器与VL端口的对比度。图3 LCD1602显示电路图如图3所示。

2.3 体温采集电路设计

体温采集电路采用温度系数晶体作为计数器2的脉冲输入, 晶体振荡器的振荡速率随着温度的变化而变化。在预设阶段, 计数器1和温度寄存器设置为与55℃相对应的参考值。计数器1通过减去低温系数晶体产生的脉冲信号来计算减法。当计数器1的预设值减小到0时, 温度寄存器的值增加1, 计数器1的预设值重新加载, 使其再次开始计数低温系数晶体产生的脉冲信号。此循环一直持续到计数器2计数为0并停止累积温度寄存器值。在这种情况下, 温度寄存器中的值就是测量的温度值。

数字温度传感器是单线接口、多点网络的简单硬件, 易于在体温采集电路中使用。DS18B20传感器模块的引脚包括GND、DQ和VDD, 引脚数低于其他传感器。数据均通过DQ引脚接收和

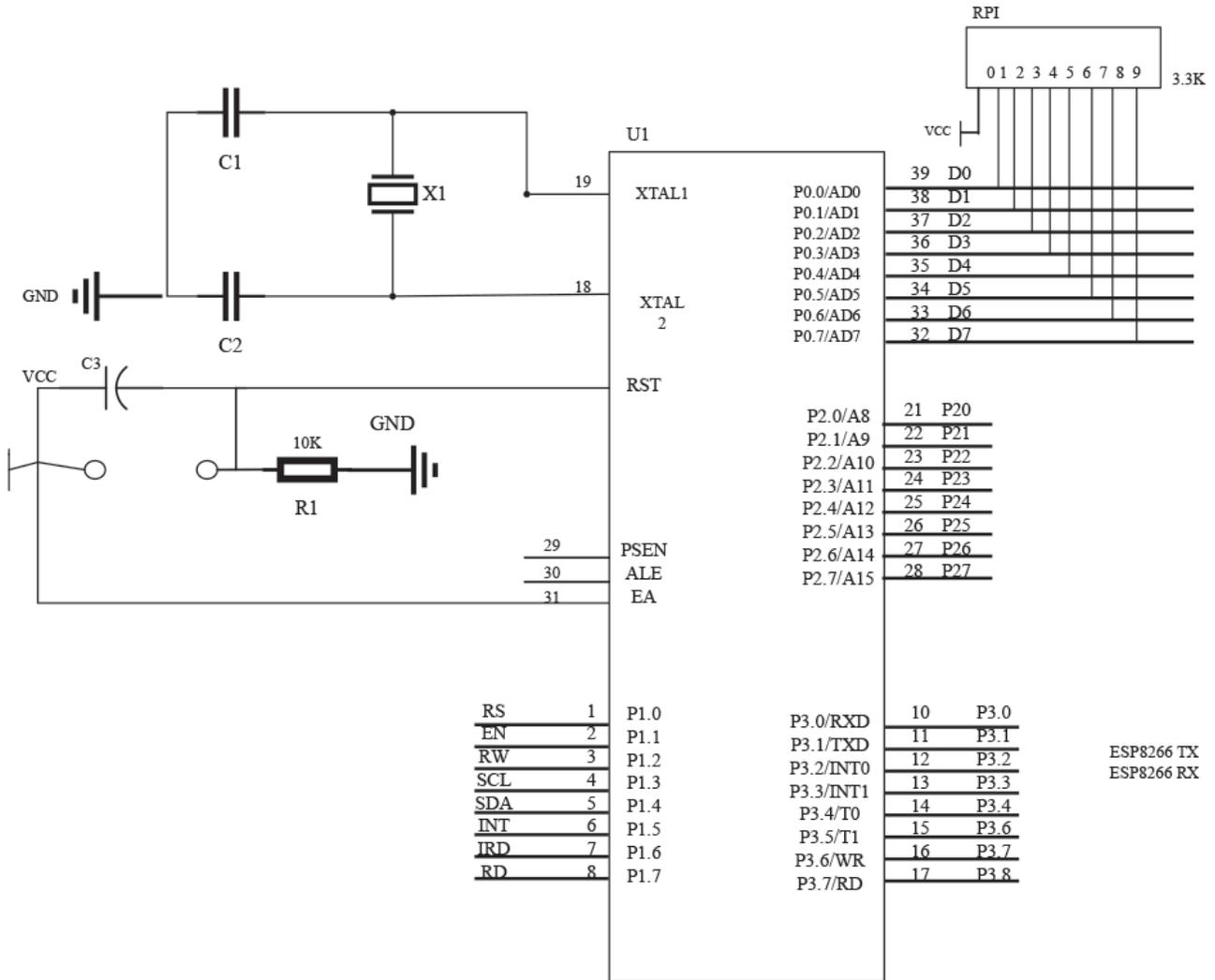


图2 单片机最小系统原理图

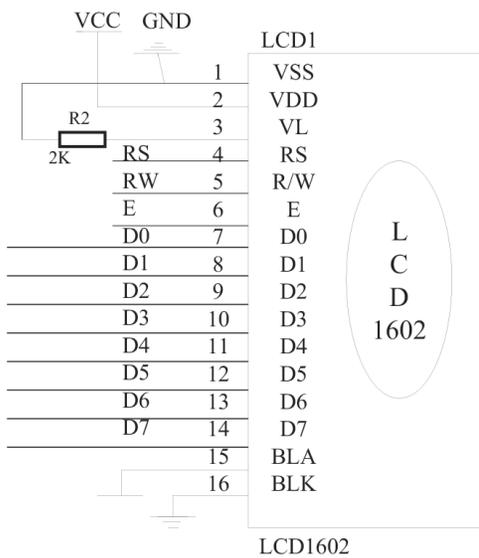


图3 LCD1602显示电路图

发送，使其更易于使用。在本设计中，DS18B20传感器的DQ引脚连接单片机的P2.3引脚以传输数据。在实际焊接中，使用DS18B20传感器探头，不仅可以提供准确稳定的测量结果，而且具有防止外界环境干扰的优点^[8-9]。体温采集电路原理图如图4所示。

2.4 心率血氧电路设计

本设计采用光容积法来测量心率和血氧。光容积法利用人体组织在血管搏动时造成的透光率差异，来进行心率和血氧饱和度的测量。本设计采用特定波长的发光二极管作为光源，这些波长对动脉血中的氧合血红蛋白（HbO₂）和脱氧血红蛋白（Hb）具有选择性。当光通过组织时，动脉

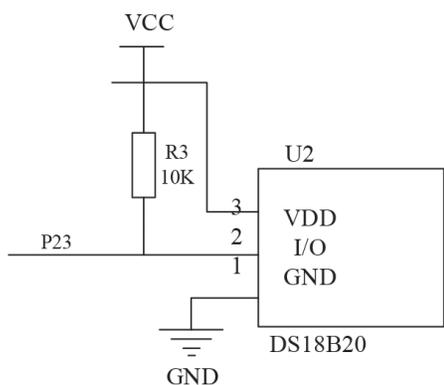


图4 体温采集电路原理图

搏动导致充血容积的变化, 进而引起光的透光率发生改变。接收器中的光电转换器接收经过人体组织反射的光, 并将透光率转化为电信号, 血氧饱和度计算公式为

$$Sa(O_2) = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $Sa(O_2)$ 为血氧饱和度; C_{HbO_2} 、 C_{Hb} 分别为 HbO_2 、 Hb 的含量。

MAX30102传感器可同时测量心率和血氧, 是一款能够有效防止光干扰的升级产品。MAX30102传感器将收集的数据传输到单片机, 以便通过兼容的通信接口进行处理, 其工作原理是采集血管动脉搏动时产生的透光率变化, 将其转换为电信号进行放大输出, 从而实现心率和血氧的测量^[10]。MAX30102传感器电路如图5所示。

SCL引脚和SDA引脚分别连接单片机的P1.3

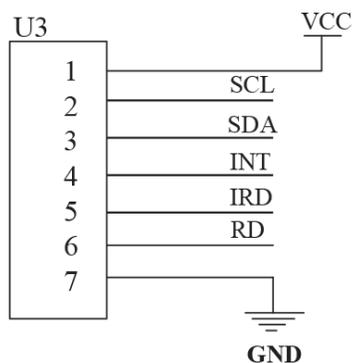


图5 MAX30102传感器电路图

和P1.4引脚, 通过软件模拟I2C端口实现通信。单片机的P1.5端口连接传感器的中断输出口, 用于在数据采集完成后通知单片机读取数据。IRD端口用于驱动传感器内部的红外发光管进行血氧测量, 而

RD端口用于驱动红色发光管进行比较测量^[11-12]。

2.5 跌倒检测

跌倒检测传感器采用2个MPU6050陀螺仪, 可以获取6个轴上的加速度和角速度, 通过接口将采集的模拟量转换成数字量输出。当老年人处于站立或走动状态时, 其竖直方向加速度为 $1g$ ($g=9.8 \text{ m/s}^2$); 当处于跌倒状态时, 将进入失重状态, 加速度值减小; 当处于静止状态时, 加速度重新回到 $1g$ 。在跌倒过程中, 人体发生倾斜, 不仅会造成加速度变化, 还造成倾角变化。因此, 本设计采取了综合利用加速度变化和人体偏转角度的方法, 当偏转角度处于异常区域 (大于阈值, 此处阈值设置为 70°) 时, 则发出预警。但是, 在实践中, 仅凭偏转角度这个变量很难准确判断老年人是否处于摔倒姿势, 容易导致误判。因此, 创建人体跌倒过程的运动模型, 提取人体姿态变化的特征参数, 是准确进行跌倒检测并发出报警信息的关键。当老年人跌倒时, 不仅偏转角度会发生异常, 各个方向的加速度矢量也会发生显著变化。假设人体站立时, 正前方向为 x 轴、水平方向为 y 轴、竖直方向为 z 轴, 加速度分别为 a_x 、 a_y 、 a_z 。当跌倒姿态发生时, 人体处于超重状态, 加速度会有明显变化, 此时传感器传出人体合加速度SVM为

$$SVM = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (2)$$

根据当前系统硬件条件, 当人体偏转角度变化超过 70° , 且SVM的值大于 $0.7g$ 时, 判定跌倒触发。

MPU6050陀螺仪的测量角度可以通过编程进行校准, 以提高测量数据的精度。I2C接口中的SCL引脚连接计数电路的引脚P3.4, SDA引脚连接计数电路的引脚P3.5。信号通过时钟线和数据线与单片机进行信号传输, 实现数据读写和控制^[13]。计数电路图如图6所示。

2.6 Wi-Fi通信电路设计

STC89C51单片机的P3.0和P3.1引脚具有UART通信功能, 可以用于与ESP8266和nRF24L01模块进行通信。TXD与nRF24L01进行无线通信, 可以通过设置实现发送信息和收取信息

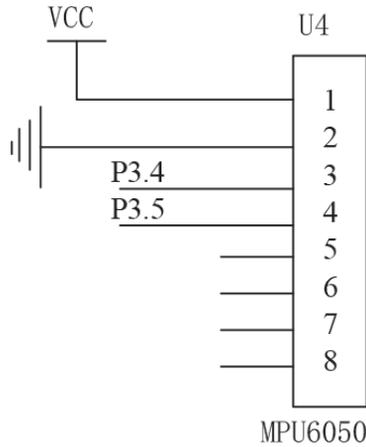


图6 计数电路图

之间的随意切换，也就是主机随意切换功能^[7]。具体的通信方式是串行数据传输。

2.7 蜂鸣器报警电路设计

生命体征监测系统可以进行报警，报警功能主要采用的是有源蜂鸣器，它具有控制简单、易于操作的特点。在蜂鸣器中加入三极管，可以进一步提高单片机引脚的驱动力^[14]。蜂鸣器的电路接线图如图7所示。将蜂鸣器电路与单片机的P3.3引脚连接起来，并将该引脚设置为低电平，使得PNP型三极管8550进入导通状态，就可以让蜂鸣器发出声音。

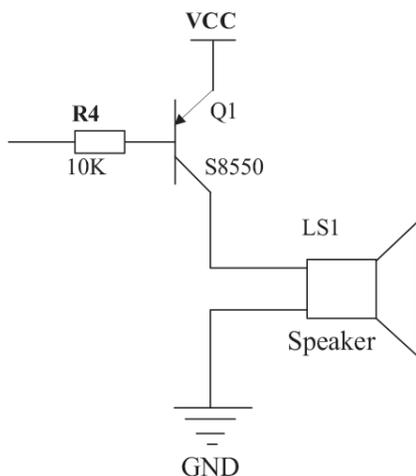


图7 蜂鸣器电路图

2.8 继电器报警开关电路设计

报警开关功能设计是通过继电器控制来实现

的，而继电器控制又是通过单片机向被控制器输出高低电平来实现的。在硬件设计上，继电器除了需要连接VCC和GND引脚以外，还需要将数据通信引脚与单片机的IO口相连接，通过单片机的IO口输出高低电平来驱动继电器，实现开关操作。这种设计可以实现对报警的远程控制功能。

2.9 电源电路设计

本设计采用USB和锂电池两种供电方式。由于电池电压可能出现波动，并且无法为单片机提供5 V电压，因此本设计采用开关电源升降压供电电路为系统提供电源，如图8所示。

当USB端口插入电源时，5 V电压通过反向截止二极管D2，从USB端口进入开关电源电路。RT6150芯片通过电压反馈数值调整占空比，以提供稳定的输出电压。如果USB断电，系统将依靠BT1锂电池通过二极管D2提供电源。RT6150芯片能够在电池电压下降到1.8 V时依旧稳定工作，并将电源电压提升至最高5.5 V输出，确保输出电压的稳定性。这种设计保证了系统在USB可用时从USB供电，在USB不可用时自动切换到电池供电，并且能够保持稳定性。

3 软件设计

3.1 主程序设计

主程序的核心功能是设置蜂鸣器和按键对应的单片机引脚，并设置体温、心率、血氧等参数的默认值。在主函数的开头，通过调用各个模块的初始化函数来保证系统正常运行。然后，编写发送和读取体温、心率、血氧、偏转角度的指令。接下来是按键进程，一旦检测到按键按下，立即进行相应的加法或减法处理，实施按键切换操作。再然后，调用LCD1602显示进程、报警进程和Wi-Fi通信进程。按键的结果在LCD显示屏上显示。如果任何参数超出预设值范围或发生跌倒事件，单片机会立即启动报警电路，把报警信息显示在连接的Wi-Fi主机上。报警会持续响起，直到生命体征恢复正常并保持正常站立姿势。重

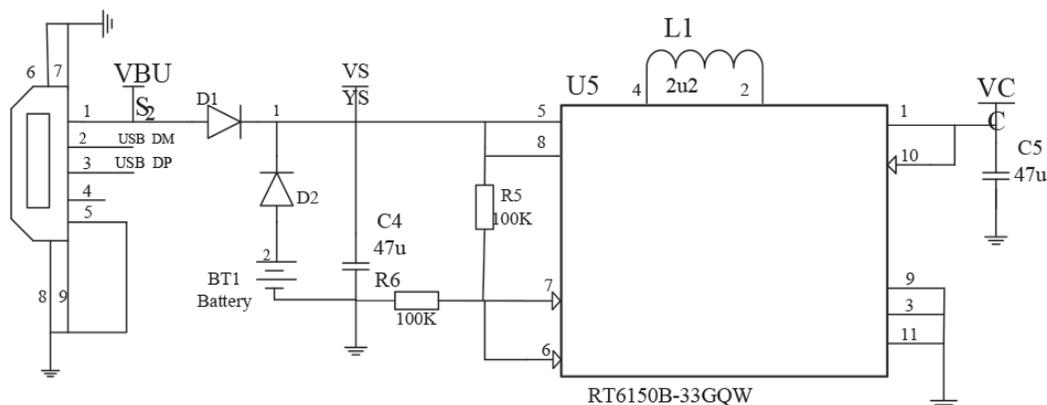


图8 开关电源升降压供电电路图

新打开监控系统开关, 相关参数才会恢复到默认状态。按下电源键时, 首先进行初始化操作, 然后连接Wi-Fi加入网络。通过按键改变预设值, 通过传感器采集显示参数, 并进行报警处理。如果与手机配对不成功, 则重复连接操作。

3.2 液晶显示模块

液晶显示模块的任务很简单。开机后, 第一行从左到右显示测得的体温、心率和血氧饱和度, 第二行显示每个参数的预设值范围。具体内容根据单片机的指令显示。在主程序中, 调用液晶显示模块的功能, 并在适当的位置调用相应的子进程。子进程包括定义RW、RS和EN引脚, 等待LCD准备好, 写入命令数据, 设置显示器的起始地址, 连续写入字符串数据以及初始化LCD1602。写入命令数据的进程在液晶显示模块中起到重要作用^[15]。本设计的液晶显示模块流程图如图9所示的串口通信子流程图。

3.3 子程序设计

在设置数据传输的波特率方面, 使用ESP8266单片机控制板的无线通信模块, 将采集到的健康指标发送到主机。

在使用DS18B20传感器时, 首先需要进行初始化操作。该传感器的信号通常由总线控制器控制。初始化包括以下步骤: 首先, 单片机发送一个低电平脉冲, 持续时间为480~960 μs , 以进行复位并释放总线, 进入接收状态; 然后, 通过电

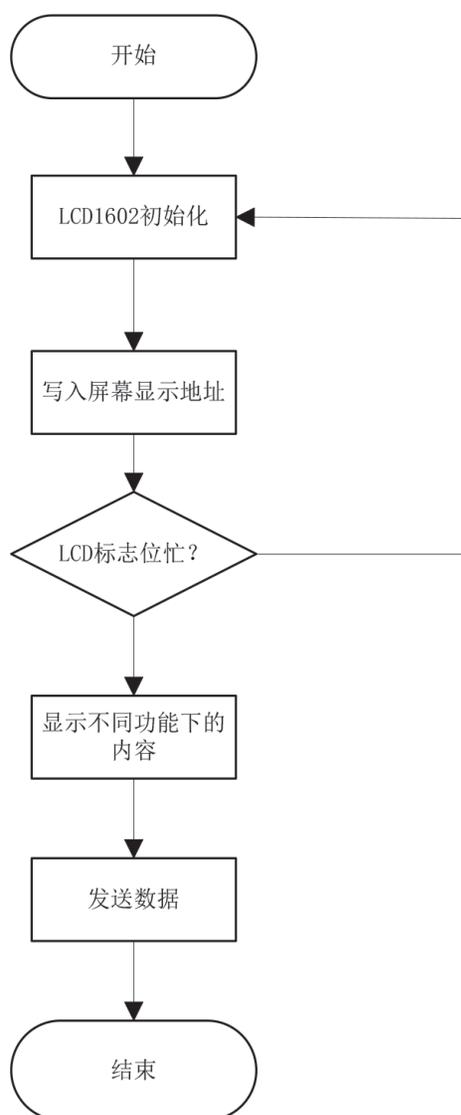


图9 串口通信子流程图

阻将总线拉至高电平状态, 当DS18B20传感器检测到上升沿时, 等待1 560 μs , 再发出一系列由

60~240 μs低电平信号组成的存在脉冲^[7-8]。

初始化过程完成后，DS18B20传感器可以正常工作，并开始提供体温数据。DS18B20传感器的操作至关重要，它包括写1时序和写0时序。DS18B20的写操作时序图如图10所示。

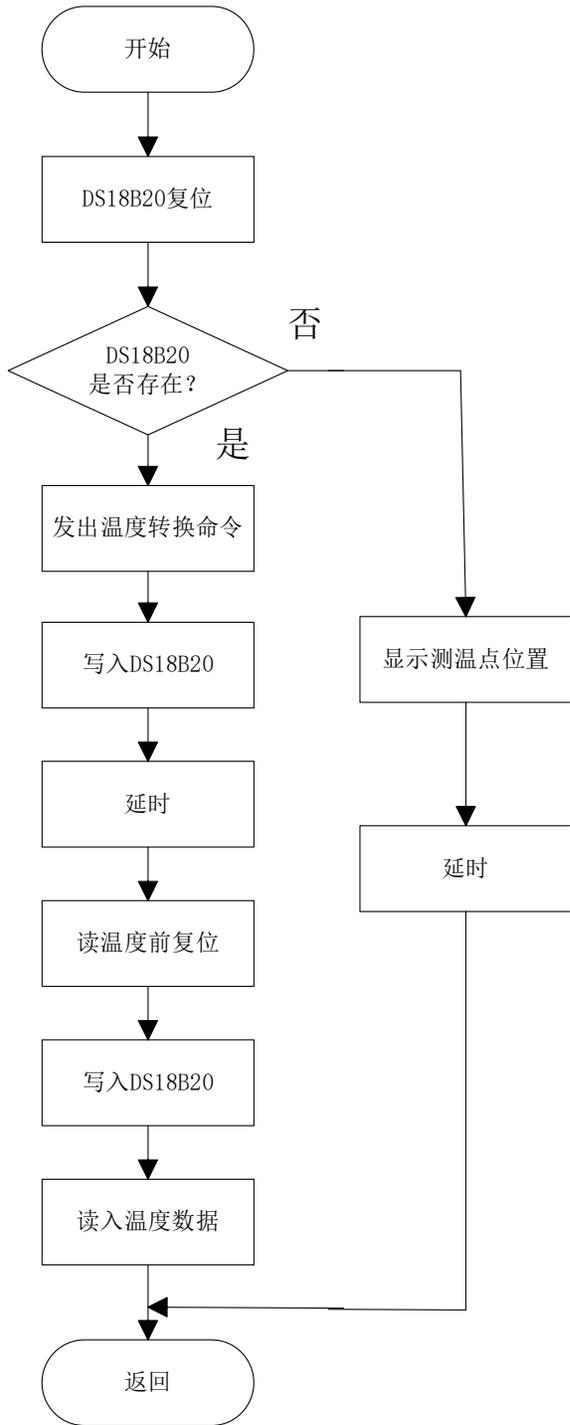


图10 DS18B20的写操作时序图

在建立起始信号时，首先将数据引脚SDA和时钟引脚SCL拉至高电平，并延时一段时间。然后，将SDA引脚拉低，形成一个跳变，表示开始传输数据。停止信号的生成是通过将SCL引脚设为高电平，同时将SDA引脚设置为低电平，然后将SDA引脚拉高。

在I2C总线中，发送器发送字节数据来传递信息，接收器会返回一个ACK信号作为确认。当ACK信号为低电平时，表示传输正常，系统可以正常工作^[16-17]。

跌倒采集执行流程图如图11所示。

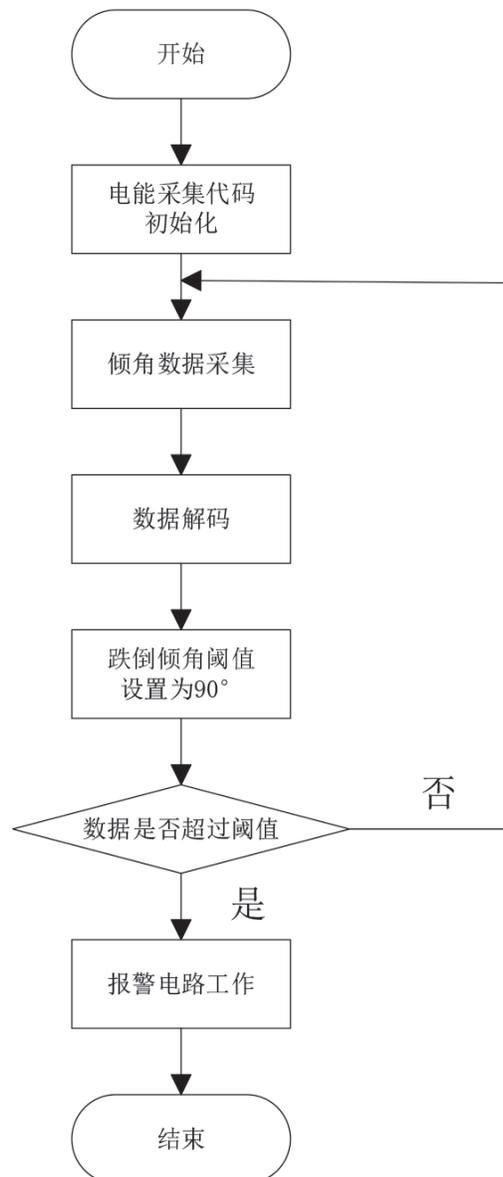


图11 跌倒采集执行流程图

4 系统测试

4.1 实物设计

系统上方是STC89C51单片机, 插入了LCD液晶显示屏、蜂鸣器、LED显示模块、独立按键、ESP8266 Wi-Fi传感器、MPU6050心率血氧传感器, 以及最底端的MAX30102传感器和DS18B20传感器。其中, 可以用三个按键进行参数的转换设置, 以及加法和减法操作。在初始状态下, 体温、心率和血氧饱和度三个基本参数都处于正常范围内, 蜂鸣器处于关闭状态, 指示灯不亮。刚上电时, 温度默认数值为25 °C, 心率和血氧值都为0。温度的上限值是37.5 °C, 正常心率的范围是60~100 bpm (bpm, 非法定计量单位, 1 bpm=1/min), 血氧饱和度的下限为80%。如果采集到的数值超过了初始参数设置, 系统将触发报警并且指示灯会闪烁。同时, 相关的信息也会被发送到主机上。实物报警示意图如图12所示。

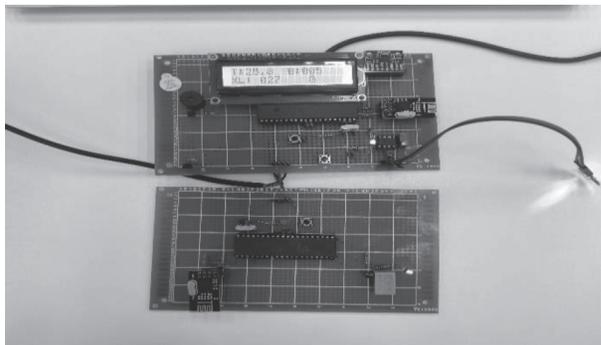


图12 实物报警

4.2 功能准确性测试

手握DS18B20传感器探头, 可以实现体温实时测量。另外, 只需轻触MAX30102传感器, 即可采集心率和血氧饱和度数据。在测量过程中, LCD1602显示屏上将显示具体数值, 并且系统会将相关信息发送到主机上。为了验证系统在静止状态下心率测量数据的准确性, 将测量数据与PPG心率仿真器的参考值进行对比, 实验结果如图13所示。可见, 本设计的心率测量值与PPG心率测量值差距较为温和, 变化规律较为相似, 测量误差均值在12 bpm以内。

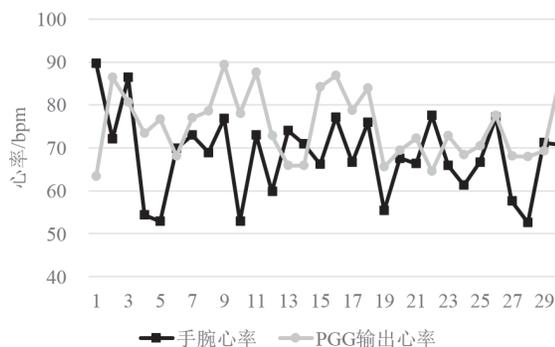


图13 心率测量对比结果

将系统测量的手腕温度同时与额前温度和腋下温度相对比, 可以看到温度测量结果介于额前温度和腋下温度之间。虽然额前温度由于测量环境的影响有较大波动, 但测量结果仍比较理想。手腕温度的测量误差均值约为0.3 °C, 与腋下温度的误差约为0.7 °C。

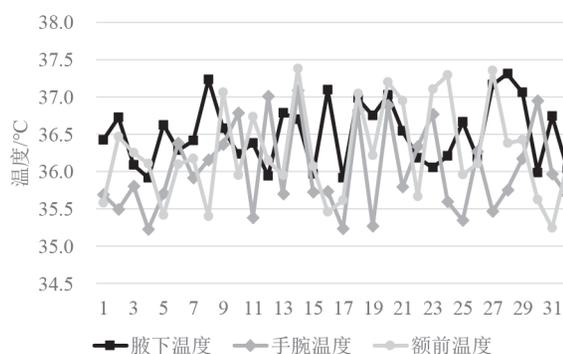


图14 体温测试对比图

考察本系统监测老年人异常状态时触发自动报警的稳定性。通过模拟人体姿态变化, 触发传感器报警, 检查设备是否能够准确判断跌倒情况并实时报警, 以确保在发生意外情况时能得到及时救助。

为了确保跌倒检测的准确性, 进行了一系列测试, 包括平躺、坐立、慢走和跌倒四种状态。在测试中, 使用了偏转角度和加速度变化两个指标来确定跌倒状态。部分测试结果如表1所示, 仅使用偏转角度测定跌倒状态的准确率约为89.371%, 仅使用加速度变化测定跌倒状态的准确率约为93.134%。为了排除平躺、步行和手腕活动对监测结果的影响, 将偏转角度和加速度变化相结合, 跌倒检测准确率可高达96.3%。

因此, 通过综合考虑偏转角度和加速度变化, 能够更准确地判断跌倒状态, 减少误报和漏

报等情况的发生。这种综合方法在跌倒检测中具有更强的可靠性，为老年人健康监测提供了更便捷的功能。

表1 跌倒检测准确性测试

人体姿态	偏转角度/(°)	加速度变化	是否报警
平躺1	91.496	0	否
平躺2	91.325	0	否
平躺3	90.982	0.021g	否
坐立1	4.532	0	否
坐立2	2.342	0.033g	否
坐立3	2.793	0	否
慢走1	0.253	0.189g	否
慢走2	1.341	0.423g	否
慢走3	2.012	0.341g	否
跌倒1	89.142	0.791g	是
跌倒2	86.981	1.298g	是
跌倒3	-91.213	2.312g	是
跌倒4	-90.839	1.659g	是
跌倒5	-88.239	1.768g	是

5 结论与讨论

本文设计了一套面向老年人的、基于物联网的可穿戴设备，对生命体征监测系统进行了软硬件研发。提出了系统总体设计方案、软硬件设计，开展了通信、实物、人机交互等测试。该系统采用了DS18B20、MAX30102和MPU6050等多种传感器模块，能够准确测量体温、血氧等健康指标，并运用无线传输功能实现跌倒检测。测试结果表明，当测量结果超过预设阈值时，系统能够及时进行报警处理，有效检测老年人意外情况，为抢救争取更多时间。总而言之，该系统展现出不断增长的应用前景。

目前，本系统心率和体温的测值与实际值较为相似，手腕温度的测量误差均值约为0.3 °C，与腋下温度的误差约为0.7 °C。在跌倒检测方面，本系统利用人体偏转角度和加速度变化量进行结合判定，准确率高达96.3%，大大降低了假性跌倒判定对使用者的影响。在心率测量方面，系统的测量值与PPG输出心率图像较为吻合，但测量值总体上略低于PPG输出值，并且存在一定的延迟性。未来的

研究工作可以把重点放在心率测量算法改进上，进一步提高系统测量的准确性和实时性。

综上，设计的人体健康监测系统具备良好的性能和潜力，能够为应对医疗资源紧张和老龄化社会的挑战提供有力支持。进一步的研究工作应集中在改善算法和优化传感器性能上，以提高系统的测量精度和实时性，为用户提供更准确和及时的健康监测数据，为相关领域的研究和实践做出有价值的贡献。

参考文献

- [1] 陆杰华, 林嘉琪. 重度老龄化社会的人口特征、风险识别与战略应对[J]. 中国特色社会主义研究, 2023(1): 59-68.
- [2] 冯园园. 人口老龄化对我国医疗卫生费用的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [3] 任琦, 王娟娟, 李晨, 等. 老年人对智能手环的需求调查及分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2022(11): 31-34.
- [4] 张琥石, 庞庆良, 黄代政, 等. 基于STM32的物联网多体征参数监护系统[J]. 现代电子技术, 2023, 46(8): 79-83.
- [5] 陈平, 吴国盛, 陈晓宇. 基于FPGA的老年人健康安全监测系统设计[J]. 医疗卫生装备, 2023, 44(1): 47-52.
- [6] 徐晓骏, 胡意. 基于物联网的智能看护老人系统[J]. 物联网技术, 2022, 12(11): 87-89, 92.
- [7] 张新荣, 张智尧, 常波, 等. 智能老人健康监测与定位系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(2): 13-17, 50.
- [8] 李兆千, 李广凯, 姜绍君, 等. 物联网可穿戴体温监测系统设计[J]. 物联网技术, 2023, 13(1): 51-52.
- [9] 王长辉, 邹思奇, 段佳明, 等. 一种新型STM32的红外测温报警枪[J]. 物联网技术, 2022, 12(12): 5-6, 9.
- [10] 何媛媛, 余迪, 何佳衡, 等. 基于物联网的可穿戴式心率、血氧监测系统[J]. 物联网技术, 2023, 13(2): 59-62, 65.
- [11] 张晟祺, 解乃军, 纪有旺, 等. 基于STM32的老人跌倒检测智能家居系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(1): 35-39.
- [12] 李光发, 胡国清, 陈佳, 等. 基于移动端的非接触心率检测系统研究与设计[J/OL]. 计算机测量与控制: 1-9[2023-05-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4762.tp.20230309.1421.008.html>.
- [13] 何翔, 卓建业. 无线运动传感器系统设计[J]. 现代电子技术, 2023, 46(4): 25-29.
- [14] 代金鑫, 于灵奇, 何亮, 等. 基于ADXL345的人体跌倒监测装置的设计[J]. 电子制作, 2022, 30(23): 11-14.

- [15] 刘雯, 郑心雨, 高宇晖, 等. 基于nRF51-DK的智能心率手环设计[J]. 物联网技术, 2019, 9(1): 75-77.
- [16] 马超. 基于MPU6050的人体跌倒检测系统设计与实现[D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- [17] 王亚宾, 张小栋, 穆小奇, 等. 用于助老伴行机器人的老年人摔倒预测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(7): 1-7.

作者简介:

冯玉竹 (2000—), 女, 湖北襄阳人, 本科生在读, 通信工程专业。

魏剑南 (2002—), 男, 山东济宁人, 本科生在读, 通信工程专业。

马玉鑫 (2002—), 男, 山东泰安人, 本科生在读, 物联网工程专业。

刘霞 (1986—), 通信作者, 女, 山东泰安人, 博士, 讲师。研究方向: 通信与信息系统。
E-mail: ytuliuxia@ytu.edu.cn

(收稿日期: 2023-06-21)

IoT-Based Wearable Device and Vital Signs Monitoring System

FENG Yuzhu¹, WEI Jiannan¹, MA Yuxin¹, LIU Xia¹

(School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: Fully considering the health demands of the elderly, a wearable device and vital signs monitoring system based on the Internet of Things was built. The minimum system of STC89C51 single chip microcomputer was used as the core control device. Pairing with DS18B20 sensor and MAX30102 sensor, the wrist temperature of human body was collected by temperature coefficient crystal, and the data of human heart rate and blood oxygen were collected by photolysis method. The MPU6050 gyroscope was used as the sensor to collect the human deflection angle and acceleration change, taken as the comprehensive judgment basis for fall detection. The LCD screen and buttons were used to realize human-computer interaction. The test results show that the system can accurately measure the wrist temperature, the average error between wrist temperature and forehead temperature is about 0.3 °C, and the error between wrist temperature and underarm temperature is about 0.7 °C. In the aspect of heart rate measurement, photolysis method can obtain reliable blood oxygen signal of human heart rate, and the measured value of the system is in good agreement with the heart rate image output by PGG. In the aspect of fall detection, the fusion of deflection angle and acceleration change can improve the accuracy of fall detection to 96.3%. The system has the characteristics of small size, high precision, low power consumption and wearability, with broad application prospects.

Keywords: Wearable Device; Vital Signs Monitoring; Temperature Collection; Blood Oxygen; Heart Rate; Fall Detection

一种数字化正交解调的信号分离装置

周元翰, 黄明, 杨杰, 姜超, 蓝浩宇, 郭宇航

(北方工业大学信息学院, 北京 100144)

摘要: 为了便于通信、多媒体、雷达等领域的数字信号处理, 解决混叠信号分离问题, 设计一种数字化正交解调的信号分离装置。通过扫频找到接收信号的主要频点, 通过生成主要频点的正交信号对原始信号进行处理, 实现对混叠信号的有效分离。搭建FPGA处理模块, 数字信号处理以XC7A35T-1FTG256I芯片为核心, 取得较广采样频率范围与较高处理效率。不失普遍性, 考察了双路正弦信号、正弦信号和三角信号、双路三角信号的分离, 通过示波器观察到分离后的信号符合预期。经计算, 频率平均精确度达到97%以上。

关键词: 正交解调; 信号分离; 数字信号处理; FPGA; 正弦信号; 三角信号

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8412 (2023) 10-116-05

工业技术创新 URL: <http://gyjs.cbpt.cnki.net> **DOI:** 10.14103/j.issn.2095-8412.2023.10.015

0 引言

随着“十四五”规划相关工作的深入开展, 近年来, 智能制造、物联网等技术得到迅猛发展。传感器、通信等技术是物联网领域的关键核心技术, 但受各种干扰的影响, 由这些技术获取的信号往往难以直接用于分析以获取有价值的信息, 这对复杂信号处理提出了更加迫切的需求。复杂信号处理的关键在于把混叠信号中的单分量信号提取出来。目前, 针对信息较少的混叠信号处理, 大多通过神经网络算法进行盲源分离。文献[1]在某种复杂情况下成功提取了所需信号, 但需要借助多个信号接收器, 不便于在只有一个接收端子的环境下应用。文献[2-3]对单通道盲源分离进行了相关研究, 但其应用需要以大量数据为支撑, 在一些较简易的环境下应用受限。

正交解调是一种常见的信号分离方法^[4], 已被广泛应用于振动信号分析^[5]、回波信号分析^[6]、光学陀螺检测^[7]等技术或领域, 且在消除信号干扰方面起到了良好效果。相较于小波解调与相干解调等方法, 正交解调所需前置知识较少, 实现方

式简捷, 便于对信号进行快捷处理^[8]。文献[4]设计了最小均方自适应滤波器, 消除了正交解调可能带来的直流偏置, 但由于步长固定, 因而在时延较低的情况下可能导致稳态误差较大。受到数字化技术在信号分析类仪器中的应用启发^[9], 本文设计一种以XC7A35T-1FTG256I芯片为核心的数字化正交解调的信号分离装置。不失普遍性, 本文研究对象为正弦信号和三角信号的分离。本文的思想方法强调了将数字化技术应用于信号处理的重要性, 对研究人员、即将从事研究领域的学生等^[10]具有理论和实践层面上的指导和教育意义。

1 理论基础与关键技术

1.1 正交解调理论基础

正交解调方法是一种在数字信号处理领域受到普遍使用的方法, 它在通信、多媒体、雷达等领域具有广泛的应用场景。它通过将信号与正交基进行内积运算, 实现信号的分离和提取。在通信系统中, 当多个信号同时传输时, 信号之间会产生干

扰，使得接收到的信号变得不清晰。利用正交解调方法将这些互相干扰的信号分离开来，可显著提高通信质量。在音频处理领域，正交解调方法可用于音频信号的降噪和分离。在图像处理领域，正交解调方法被广泛应用于图像压缩和图像分割。在雷达系统中，正交解调被应用于接收和处理多个目标的回波信号，从而实现目标的识别和跟踪^[11]。

正交解调原理框图如图1所示。

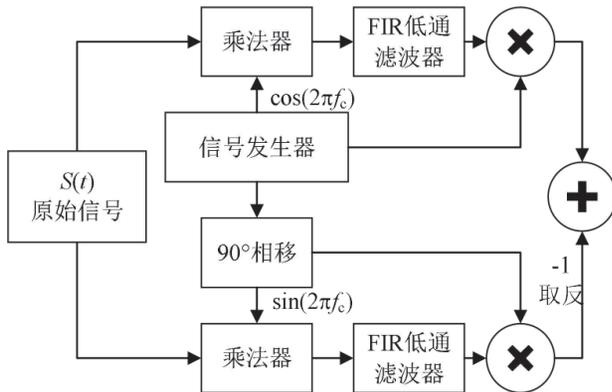


图1 正交解调原理框图

原始信号，即混叠信号 $S(t)$ 满足

$$S(t) = R_1(t) + R_2(t) \quad (1)$$

式中： $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 均表示单一信号。以正弦信号为例，其表达式为

$$R_1(t) = A(t)\cos(2\pi f_c t + \phi) \quad (2)$$

式中： A 为幅值系数； f_c 为中心频率； ϕ 为初始相位。 R_2 的频率与初始相位均与 R_1 不同。由于二者基本类似，这里只模拟 R_1 解调过程。首先将其与同频的一对正交信号分别相乘进行频谱搬移，分别得到

$$A(t)/2 \times [\cos(4\pi f_c t + \phi) + \cos \phi]$$

和

$$A(t)/2 \times [\sin(4\pi f_c t + \phi) - \sin \phi]$$

经过低通滤波器滤除高频分量，得到相位信息，再与原先的同路信号进行相乘，分别得到

$$A(t)/2 \times [\cos(2\pi f_c t + \phi) + \cos(2\pi f_c t - \phi)]$$

和

$$A(t)/2 \times [\cos(2\pi f_c t - \phi) - \cos(2\pi f_c t + \phi)]$$

二者相减再将幅度乘以2，即可恢复出原始信号。

1.2 异步FIFO

FIFO (First In First Out) 是一种先进先出的

数据缓存器，与普通存储器的区别是没有外部读写地址线，只能顺序读写，不能随机读写。异步FIFO采用双端口RAM作为中间存储器，在跨时钟时可以有效发挥作用，通常被用于数据通信、信号处理、接口等情形^[12]。

1.3 CIC滤波器

级联积分器梳状 (CIC) 滤波器，也称作Hogenuer滤波器，是数字系统中采样率变化较大时被普遍使用的多速率滤波器，通常用于具有过采样率的应用中，在无线通信领域较受欢迎^[13-15]。

2 系统方案设计

本系统首先通过加法器模拟双路信号混叠，之后通过高速AD采样将混叠信号传入FPGA处理模块，待处理完毕后通过高速DA模块将分离后的信号输出。由于对于未知混叠信号的分离，因此FPGA处理模块主要分为扫频与分离两个部分。扫频部分统计出混叠信号中的频率分量，分离部分通过正交解调分离出原始信号。数字信号处理以XC7A35T-1FTG256I芯片为核心。出于对研究问题的简化，输入信号均为20 kHz~100 kHz的五倍频信号，同时简化原始信号为正弦波或三角波的一种。系统流程图如图2所示。

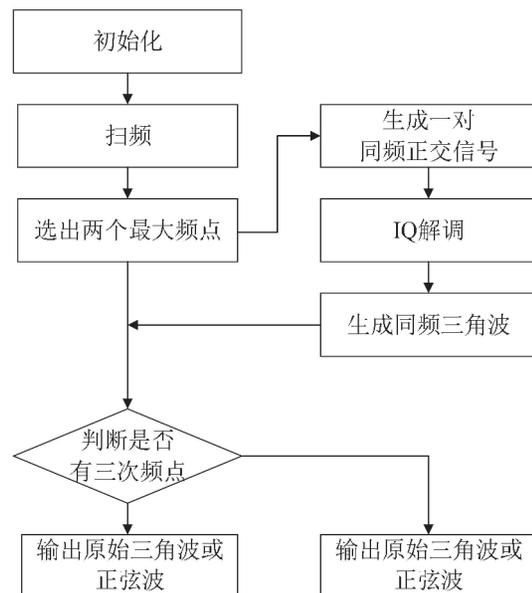


图2 系统流程图

3 工程实现

3.1 扫频部分实现

扫频部分运用正交解调原理，将混叠信号中的频率分量筛选出来。混叠信号进入FPGA后，与FPGA内部DDS生成的20 kHz~100 kHz正交信号分别进行时域相乘，再通过低通滤波器将高频分量过滤掉，平方求和得到包络信号，最后通过希尔排序筛选出两个最高频点，即双路信号主频点。这里由于FPGA主频设置为500 kHz，因此在通过低通滤波器前，需要通过异步FIFO将时钟主频提升至100 MHz，通过CIC滤波器后再将其恢复为500 kHz。为了满足筛选三角波的要求，在筛选出主频点后，以相同方式求出三倍频包络信号，同时设置门限值，判断混叠信号中是否包括三倍频点，以便于后续的分离判断。

3.2 分离部分实现

分离部分通过正交解调原理，在DDS之前筛选出两路频率信号，并分别产生正交信号。混叠信号与DDS产生的信号相乘，再与低通滤波器和DDS共同生成的通路信号相乘，最后与正交信号相减，得到原始正弦信号。由于主频设置较低导致采样率较低，因此后续采用CIC滤波器提高采样率至100 MHz，便于进入DA模块处理。若有三角波，则在得到原始正弦信号后通过反三角函数得到相频曲线（拟合为曲线后实际为点集），在1/2幅值处进行翻折，得到三角波图像。

3.3 低通滤波器相关设计实现

受研究条件限制，本装置低通滤波器设置条件相对较为宽松。本文通过MATLAB生成了截止频率为3 kHz、衰减为50 dB、总阶数为849阶的低通滤波器，如图3所示。

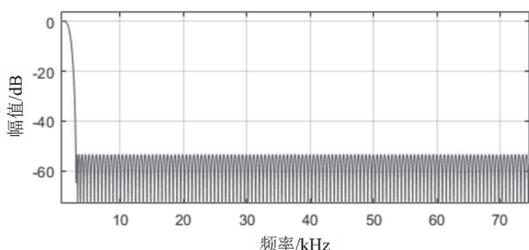


图3 低通滤波器

4 结果展现

4.1 双路正弦信号混叠后分离情况

如图4所示，输入信号为双路正弦信号，各路主频分别为95 kHz和100 kHz，通过观察输出，可看到装置成功分离出原始信号。

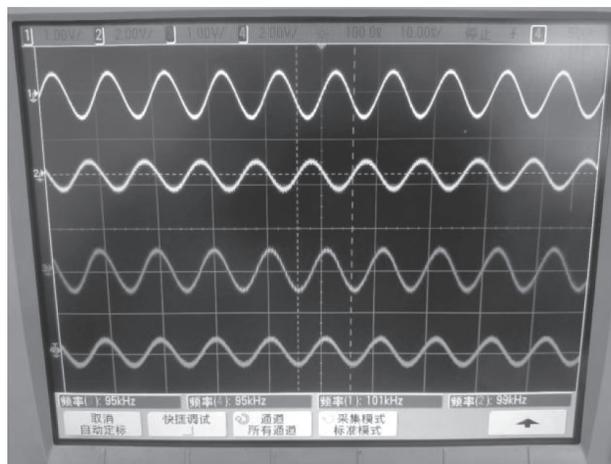


图4 双路正弦信号分离图

类似地，开展多组测量实验，具体测量数据如表1所示。频率平均精确度为97%以上，可以看出装置成功分离出两路原始正弦信号。

表1 双路正弦信号测量数据统计表

输入信号 频率/kHz	输出信号 频率/kHz	输入信号 频率/kHz	输出信号 频率/kHz
20.00	20.04	25.00	25.19
20.00	19.92	100.00	99.00
30.00	30.10	40.00	40.20
30.00	29.90	55.00	54.60
45.00	45.00	60.00	59.90
50.00	49.80	55.00	54.60
80.00	80.00	100.00	99.00

4.2 正弦信号和三角信号混叠后分离情况

如图5所示，输入信号为一路正弦信号和一路三角信号，主频分别为20 kHz和100 kHz，通过观察输出，可看到装置成功分离出原始信号。

类似地，开展了多组测量实验，具体测量数据如表2所示。频率平均精确度为99%以上，可以看出装置成功分离出正弦信号和三角信号。

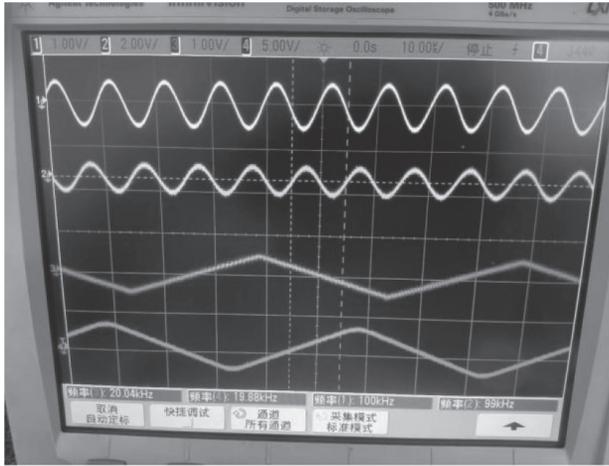


图5 正弦信号和三角信号分离图

表2 正弦信号和三角信号测量数据统计表

三角波		正弦波	
输入信号 频率/kHz	输出信号 频率/kHz	输入信号 频率/kHz	输出信号 频率/kHz
20.00	20.00	25.00	25.10
40.00	40.20	45.00	45.00
75.00	75.40	95.00	95.00

4.3 双路三角信号混叠后分离情况

如图6所示, 输入信号为双路三角信号, 各路主频分别为25 kHz和40 kHz, 通过观察输出, 可看到装置成功分离出原始信号。

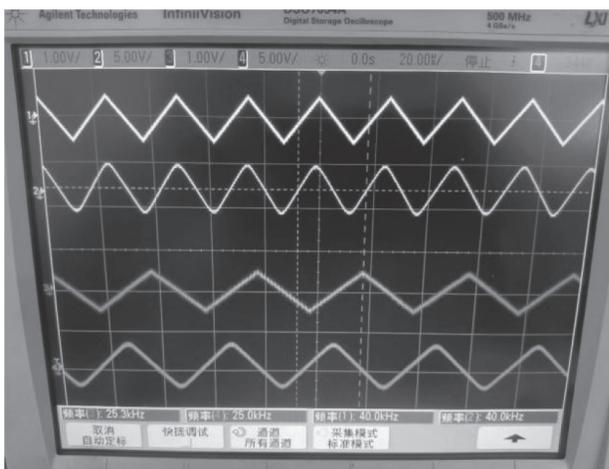


图6 双路三角信号分离图

类似地, 开展了多组测量实验, 具体测量数据如表3所示。频率平均精确度为99%以上, 可以看出装置成功分离出两路原始三角信号。

表3 双路三角信号测量数据统计表

输入信号 频率/kHz	输出信号 频率/kHz	输入信号 频率/kHz	输出信号 频率/kHz
35.00	34.70	45.00	45.00
50.00	50.00	65.00	66.00

5 结论与讨论

本文设计了一种数字化正交解调的信号分离装置, 并对几种常见的混叠信号进行了处理。该装置原理简明, 易于迁移至各应用领域, 较完美实现了对混叠信号的准确分离。经估算, 频率平均精确度达97%以上。

然而, 本文研究仍然存在一些局限性。首先, 研究范围局限在低频段, 且信号类型局限于正弦波和三角波等简易波形上, 对其他频段、其他类型信号的处理研究有待展开, 未来需予以深化。其次, 由于在现实生活中, 频点扫描往往难以实现, 故应进一步探索自适应滤波器的适用性, 未来的研究工作可以聚焦于装置性能改进。例如, 可以通过算法优化, 使得滤波器可以适应更多种实际复杂信号的处理。再如, 可以针对特定领域需求, 开展定制化设计, 如无线通信信号识别、语音信号分辨等。此外, 还可以将该装置与其他高级信号处理算法融合在一起, 产生1+1>2的技术效果。

总体而言, 本研究为信号分离问题的解决提供了一种可行的思路和方法。随着进一步的研究和改进, 该装置有望在实际应用中发挥更大的作用, 为信号处理领域带来更多的发展机遇。

参考文献

- [1] 郝青青. 复杂混叠声信号的盲分离方法及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [2] 邓文, 黄知涛, 王翔. 单通道通信信号盲分离方法的研究进展综述[J]. 通信学报, 2023, 44(8): 179-194.
- [3] ZHOU Y, FENG Y, TAROKH V, et al. Multi-Level Mean-Shift Clustering for Single-Channel Radio Frequency Signal Separation[C]//2019 IEEE 29th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP). IEEE, 2019.
- [4] WANG H, ZHOU X, ZHOU G. Application of an

Adaptive Direct Current Offset Elimination Algorithm
Based on FPGA in Orthogonal Demodulation[C]//2019

IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic
and Automation Control Conference (IAEAC). IEEE, 2019.

- [5] 李信宇. 基于正交解调的偏振不敏感 Φ -OTDR系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [6] 刘帅帅. 一种用于超声多普勒回波信号解调的单通道乘法器电路[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [7] 吴传斌. 基于正交解调的谐振式微光学陀螺[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [8] 李濛, 吴呈瑜, 占敖. 基于正交MFSK信号的解调优化算法[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(3): 541-546.
- [9] 陈向民, 张辉. 一种用于信号分析的数字正交解调电路设计[J]. 电讯技术, 2006(2): 65-69.
- [10] 黄慧春, 堵国樑, 郑磊. 大学生电子设计竞赛的创新与思考[J]. 创新创业理论研究与实践, 2022, 5(2): 156-158.
- [11] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理: 第7版[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [12] 刘李明. 基于FPGA的通用实时信号处理系统的硬件设计与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2009: 1-10.
- [13] HOGENAUER E. A class of digital filters for decimation and interpolation[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Denver, CO, USA, 1980.
- [14] 高敏, 于宗光, 万书芹, 等. 可编程CIC滤波器设计技术[J]. 信息技术与信息化, 2022(12): 154-158.
- [15] PROAKIS J G, MANOLAKIS D G. 数字信号处理: 第4版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

作者简介:

周元翰 (2001—), 男, 电子信息工程专业在读本科生。
主要研究方向: 数字信号处理。
E-mail: 2860303832@qq.com

黄明 (1977—), 通信作者, 男, 高级实验师。主要研究方向: 弱信号采集与数字信号处理。
E-mail: huangmingncut@126.com

杨杰 (2001—), 男, 电子信息工程专业在读本科生。主要研究方向: 模拟电子设计及数字信号处理。
E-mail: 1152193976@qq.com

姜超 (2003—), 男, 电子信息工程专业在读本科生。主要研究方向: 数字信号处理。
E-mail: 3427264790@qq.com

蓝浩宇 (2003—), 男, 电子信息工程专业在读本科生。主要研究方向: 数字信号处理。
E-mail: 2635680107@qq.com

郭宇航 (2002—), 男, 电子信息工程专业在读本科生。主要研究方向: 弱信号采集和数字信号处理。
E-mail: 2676568613@qq.com

(收稿日期: 2023-08-28)

A Signal Separation Device Using Digital Orthogonal Demodulation

ZHOU Yuanhan, HUANG Ming, YANG Jie, JIANG Chao, LAN Haoyu, GUO Yuhang
(College of Information, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: In order to facilitate the digital signal processing in the fields such as communication, multimedia and radar, and to solve the problem of separating the aliasing signals, a signal separation device using the digital orthogonal demodulation was designed. The main frequency points of the received signals were found by frequency sweeping, and the original signals were processed by generating orthogonal signals of the main frequency points, thus realizing the effective separation of aliasing signals. The FPGA processing module was built, and the digital signal processing took the XC7A35T-1FTG256I chip as the core, as to achieve a wide sampling frequency range and high processing efficiency. Without losing generality, the separations of two-way sinusoidal signal, sinusoidal-triangular signal and two-way triangular signal were investigated respectively, and the separated signals observed by the oscilloscope met the expectation. By calculation, the average accuracy of frequency reaches above 97 percent.

Keywords: Orthogonal Demodulation; Signal Separation; Digital Signal Processing; FPGA; Sinusoidal Signal; Triangular Signal

赛迪传媒
影响力就是生命力

报纸 / 期刊 / 资讯 / 年鉴



扫描二维码进入微信商城



扫描二维码进入手机淘宝商城

赛迪传媒官方店

秀不一样的品质之选

服务专线：010-88558777

新形象 新体验 新感觉

赛迪传媒商城：主推赛迪旗下品质报刊，扫码了解赛迪出版传媒公司旗下产品

中国电子报

通信产业报

新能源汽车报

中国信息化周报
影响力就是生命力

中国计算机报

机器人产业

软件和集成电路

中国工业和信息化

数字经济
DIGITAL ECONOMY

智能网联汽车
Intelligent Connected Vehicles

人工智能
Artificial Intelligence VIEW

工业技术创新
Industrial Technology Innovation

网络空间安全

网络安全和信息化

风能
WIND ENERGY

赛迪传媒官方淘宝店 赛迪传媒官方微店
双店齐开 总有一店适合您

公益广告

「技术创新
持续助力乡村振兴」

工业技术创新

(2014年创刊)

Industrial Technology Innovation

2023年第5期
(Gongye Jishu Chuangxin)

主管单位: 中华人民共和国工业和信息化部
主办单位: 中国电子信息产业发展研究院
赛迪工业和信息化研究院(集团)有限公司
出版单位: 北京赛迪出版传媒有限公司

主 编: 张 阔
责任编辑: 吕红秋
美术编辑: 高思帅

编辑电话: 010-88558900

发行单位: 北京市报刊发行局
订阅热线: 010-88558777

传 真: 010-88558850
主 页: gyjs.cbpt.cnki.net
邮 箱: gyjscx@ccidmedia.com

出版日期: 2023年10月25日

广告发布登记: 京海工商广登字20170178号

承印单位: 廊坊市纸颜印刷有限公司

编辑出版地址: 北京市海淀区紫竹院路66号赛迪大厦17层(100048)

承印单位地址: 廊坊市安次区后屯工业区221号

每期定价: 60.00元
国内统一连续出版物号: CN 10-1231/F
国际标准连续出版物号: ISSN 2095-8412