

机器人产业

# 机器人产业

## ROBOT INDUSTRY

2 期

总第 61 期

2025 年 3 月 25 日出版

邮发代号：82-933

智能才是机器之道



雷克智能

「智能论坛」

解码深圳人形机器人产业链「突围秘钥」

2025 年第 2 期

总第 61 期

## 解码深圳人形机器人产业链 “突围秘钥” P34



### 机器人全产业链链接会 FAIR plus 2025

发挥超大规模市场优势推动人形机器人跨越式发展 P1

从追赶到引领：我国机器人产业十年蝶变 P65

与北大携手，这家人形机器人公司迈入量产元年 P70

谢广明：用机器鱼读懂海洋脉搏 P75



赛迪传媒官方店  
微订阅 更方便  
扫码关注即可轻松订阅赛迪出版传媒公司  
旗下报刊、杂志、年鉴，还有更多优惠、  
更多服务等您体验

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



# 智能才是机器之道

探索产业升级之路  
寻求效率提升之径



## 《 机器人产业 》

### 赛迪工业和信息化研究院

地址：北京市海淀区紫竹院路66号赛迪大厦17层 邮政编码：100048

编辑部电话：+86(10) 88558766 邮箱：jqrcy@ccidmedia.com

广告部电话：+86(10) 88559742 邮箱：wanglili@ccidmedia.com

订 阅 热 线：+86(10) 88558777 邮箱：wangwu@ccidmedia.com



雷克智能  
官方微信





2025 年第 2 期

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

总编辑：王沛霖  
副社长：王莉莉  
主编：刘京运

编辑部电话：+86(10)88558766  
编辑部邮箱：jqrcy@ccidmedia.com

广告部电话：+86(10)88559742  
广告部邮箱：wanglili@ccidmedia.com

发行部：王武  
订阅热线：+86(10)88558777  
读者服务邮箱：wangwu@ccidmedia.com

品牌市场部：迟春然

法律顾问：北京市华泰律师事务所律师 王郁生  
本刊地址：北京市海淀区紫竹院路 66 号赛迪大厦 17 层  
邮编：100048  
英文刊名：Robot Industry  
汉语拼音：Jiqiren Chanye  
国内统一连续出版物号：CN 10-1324/TP  
国际标准连续出版物号：ISSN 2096-0182  
邮发代号：82-933  
广告发布登记：京海工商广登字 20170178 号  
创刊年份：2015 年  
发行单位：北京市报刊发行局

印刷：廊坊市祥丰印刷有限公司  
出版日期：2025 年 3 月 25 日  
定价：60 元

本刊刊登的所有文章仅代表作者个人观点。凡投稿本刊并授权本刊刊登的作品，均视为已授权上载于本刊网站、博客、微信、微博、微信等所有媒体使用，并已将文章部分或全部的汇编权、翻译权、印刷权和电子版的复制权、网络传播权和发行权转让给本刊编辑部。未经编辑部书面许可，任何人、任何单位不得以任何形式转载、摘编本刊所刊载的作品。

# 目次 CONTENTS

2025 年第 2 期 总第 61 期



## P34 智能论坛 解码深圳人形机器人产业链“突围秘钥”

### 1 视野 Horizon

- 发挥超大规模市场优势 推动人形机器人跨越式发展 1
- 我国产业链供应链生态体系构建路径研究 6
- 国家安全视域下的生成式人工智能新型泄密风险 与法律规制 18

### 28 前沿 Frontier

- 机器人在口腔数字化技术中的专利申请现状分析 28

### 36 智能论坛 Robot Industry Forum

- 毕亚雷：FAIR plus 2025 为创新之城构筑 机器人产业“强支撑” 36
- 途见科技：电子皮肤塑造机器人智能体 41



|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 谐波减速器破局：透过同川科技看深圳硬科技的“核心革命”       | 47 |
| 小丝杠大产业，掀开机器人核心零部件的“深圳名片”          | 52 |
| 提升工业机器人精度的关键路径——基于激光跟踪仪的机器人结构标定技术 | 57 |

## 65 案例分析 Case Study

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 从追赶到引领：我国机器人产业十年蝶变     | 65  |
| 与北大携手，这家人形机器人公司迈入量产元年  | 70  |
| 谢广明：用机器鱼读懂海洋脉搏         | 75  |
| 十年医工突围：康复外骨骼重塑他们的人生    | 80  |
| 刘今越：建筑机器人的研发应由企业主导     | 85  |
| 探索海洋：八大创新应用场景拓展深海探索新实践 | 89  |
| 匡绍龙：手术机器人发展呈现四大趋势      | 93  |
| 十年磨一剑，服务机器人重塑生活        | 97  |
| 机器人“喷涂”国产制造业蓝图         | 101 |

## 106 专题研究 Monographic Topics

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 移动机器人导航技术的研究进展       | 106 |
| 基于深度学习与机器视觉的水果分拣系统设计 | 112 |



## 广告目录

| 广告主       | 广告内容                     | 版位     |
|-----------|--------------------------|--------|
| 《机器人产业》   | 形象                       | 封二     |
| 征订        | 《机器人产业》和《人工智能》           | P40-A  |
| 公益广告      | 中国梦唱响绿色主旋律（小号篇）          | P40-B  |
| 中科慧灵      | 灵宝 - 多场景落地的通用类脑智能机器人     | P119-A |
| 机器人全产业链接会 | 机器人全产业链接会 FAIR plus 2025 | 封三     |



# 发挥超大规模市场优势 推动人形机器人跨越式发展

■文 / 王硕、曾建平、张镇、孙健

## 摘要

人形机器人作为新质生产力的代表，具有广阔的发展前景。尽管我国已形成人形机器人的完整产业链，并在传感器、伺服电机等环节具备竞争力，但在核心技术上仍与美日等国家和地区存在差距，需通过规模化场景应用加速技术迭代与产业升级。对此，文章提出三大对策：一是通过“整零协同”推动技术攻关与本地化发展；二是构建“一场景、一平台、一联盟、一标准”的协作机制；三是借鉴新能源汽车等产业经验，通过补贴、租赁等方式降低用户成本，形成技术与应用的正向循环。最终，通过政策引导与市场驱动结合，将人形机器人培育成为经济增长新引擎，提升社会福祉。





形机器人是新一轮科技革命和产业变革中的战略性技术，是重要的新质生产力，具有广阔发展前景。当前，全球人形机器人市场处于早期发展阶段，我国与美日等国家和地区具有一定的技术差距。我国高度重视人形机器人的发展，已经形成了完整的人形机器人产业链体系，在部分领域具有较强竞争实力。下一步，要发挥我国超大规模市场优势，以规模化场景应用推动人形机器人产业的跨越式发展，培育经济发展的新引擎，提升人民的幸福感。

## 我国人形机器人产业发展迅速，但与美日等相比还有相当差距

### 我国人形机器人市场前景广阔呈现出蓬勃活力

我国高度重视人形机器人的发展，出台了《人形机器人创新发展指导意见》等政策文件，设立了人形机器人创新中心、具身智能制造创新中心，开展人形机器人“揭榜挂帅”工作，打造良好的发展环境。《人形机器人产业研究报告》数据显示，2024 年我国人形机器人市场规模预计达 27.6 亿元，2029 年将激增至 750 亿元，2035 年有望达到 3000 亿元，增长势头极为迅猛。在市场和政策利好牵引下，产业化热潮和社会资本快速跟进。宇树科技、云深处科技、优必选等领军企业加大研发投入，优必选的 Walker S1 人形机器人已经进入极氪汽车工厂开展应用验证。据 IT 桔子数据，2023 年以来，国内共成

立了 29 家人形机器人创业公司，包括银河通用、加速进化、智元等，中国人形机器人行业的投资事件达 139 件，投资金额达 844.62 亿元。

### 我国人形机器人产业具有产业链齐全和供应链丰富的优势

经过多方努力，我国已初步形成了覆盖上游核心零部件和软件系统开发，中游人形机器人本体和下游终端应用的全产业链，专利申请数量和有效专利数量都居全球第一，涌现出一批优势企业和具有自主知识产权的产品。同时，我国发挥产业门类丰富、产业配套齐全和基础制造能力强等优势，在传感器、伺服电机、控制系统及减速器等供应链领域具备一定实力。国内许多工业机器人、汽车零部件供应商，例如三花智控、绿的谐波、拓普集团等，积极进入人形机器人领域，并计划针对人形机器人的运行特点开展相关研发工作。这有助于打出“快速扩产、打下价格、获得新市场”的组合拳，大幅提高我国人形机器人的产业竞争力。

### 我国与美日等在人形机器人核心环节存在技术差距

当前，国外人形机器人企业，例如特斯拉、波士顿动力等，拥有较为完善的研发体系和技术积累，在人工智能、感知技术、机体设计等领域具有较高水平。我国与世界先进水平国家相比还存在着差距。人工智能方面，我国在多模态感知与认知能力上仍然存在局限，更多专注于特定任

务，通用性不足，难以适应多变的环境和任务需求，无法完成需要多个步骤和逻辑推理的任务。感知技术方面，在传感器精度和耐久性上有一定差距，例如六维力矩传感器的结构设计精度不高、算法解耦方面研究和积累不足等。此外，随着传感器数量的增加，如何提升传感器数据的实时性和准确性，如何有效整合和处理数据也是新的技术难点。机体设计方面，在运动控制与动态平衡、感知与环境交互、力量与柔韧性等技术上仍有差距。例如，“灵巧手”仍存在灵敏度、承压能力及关节能力匹配等方面的技术瓶颈。

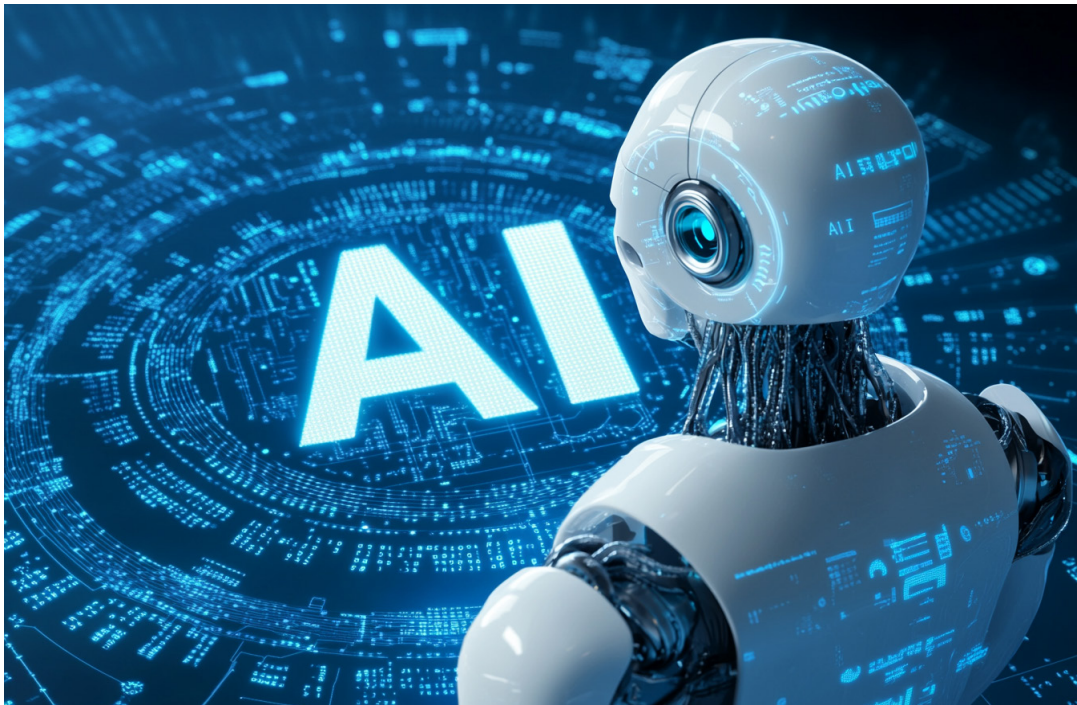
## 以规模化场景应用为牵引，实现我国人形机器人产业跨越式发展

### 工业和应急等应用场景是人形机器人的首要发展方向

人形机器人快速发展需要依托合适的应用场景和大规模消费群体，以良性供需循环推动产业向更高层次发展。人形机器人具有自感知、自分析、自决策等独特优势，因此非结构化的复杂场景成为业界聚焦的应用方向。例如，智能检测、自动装配、自动搬运等工业应用场景，智能巡检、治安巡逻等应急应用场景，康复照护、残障辅助、智慧家务等养老应用场景，以及







多媒体识别与理解、自动诊疗、辅助医疗、康养照护等服务应用场景。这些生产和生活应用场景各有差异性，而工业和应急应用场景的外部环境较为单纯，成为首要的发展方向。

### **规模化场景应用亟需加强新型要素资源的组合和建设**

人形机器人在具体场景中实现规模化应用，既需要对具体场景中的人员、机器、原料、方法、环境等资源要素进行组合、优化，还需要根据自身特点加强对新型资源要素的建设和开发。从人形机器人场景的基础层看，包括高性能智算中心、场景数据库、标准规范等基础设施。从场景的应用层看，包括云边端分层计算架构、智

能体框架、应用开发平台、智能算法和工具链等工具软件。当前，人形机器人基础设施建设还处于起步阶段，难以起到资源要素聚集发展和推动规模化应用的作用，而工具软件的路线差异化和接口不统一，更是阻碍了资源要素在各类参与主体间的流通和利用。

### **以政府为主导，加快场景应用发展和资源要素建设**

人形机器人技术的快速发展，与当前场景应用挖掘和要素资源建设不足的现状不匹配，单纯以市场化方式自发推进不仅速度慢、见效难，还易造成重复投入和供需错配。同时，解决方案个性化突出，缺乏标准化、易推广的设计，还会造成规模

效应难以释放和应用成本难以降低，难以满足日益变化、飞速发展的产业变革的需求。这就要求发挥市场和政府的共同作用，以政府为主导，统筹场景应用中各参与方的需求，科学指引资源要素建设，鼓励和引导优势行业 and 重点区域打造一批可复制、可推广的解决方案。

### 对策建议

#### “整零协同” “沿途下蛋”

##### 加快人形机器人技术和产品创新

鼓励龙头企业牵头组建创新联合体，组织凝练产业关键技术攻关清单，引领带动产业链上下游主体协同攻关。依托优势企业和研发平台，面向用户需求和重点应用场景，开发中高端人形机器人产品，加速实现关键零部件国产化。鼓励人形机器人相关技术在智能装备、工业机器人等领域孵化，采用“沿途下蛋”方式获得商业利润，推动技术持续性研发。鼓励高校和科研机构加强人工智能、机器人技术、计算机科学等领域的交叉学科基础研究，培养具备跨学科知识和技能的复合型人才。

##### 打造“一场景、一平台、一联盟、一标准”推动机制

开展常态化供需对接活动，深挖潜在的人形机器人应用需求。围绕具体应用场景，建设用户单位、机器人企业、系统集成企业、高校、科研院所等主体的协作平台，开展资源共享、协作配套、信息互通等工作。建立场景应用关键技术专利和数

据共享联盟，共同打造关键技术专利池、场景数据集等，探索分级分阶段开源共享模式。面向场景应用设立标准研制工作组，为加快共性技术、产品通用规范、接口互连接等标准研究制定，增强软硬协同适配能力。

##### 借鉴新能源汽车、光伏产业的成功发展模式，加快应用推广

借鉴新能源汽车、光伏产业的早期发展经验，按照市场成熟度分阶段制定场景应用试点，由中央财政安排专项资金，对用户购买人形机器人、共享场景数据集等事项进行补贴，形成以场景应用推动技术创新和数据积累的正循环。借鉴新能源汽车租赁、共享汽车等商业模式，探索人形机器人租赁、共享的推广模式，减少用户使用成本，以及产品升级、维保等负担。借鉴光伏代建、代运营等商业模式，发展人形机器人代运营等模式，打造人形机器人应用的利益共同体，减少用户顾虑。

#### 作者信息：

- 王 硕** 中国科学院自动化研究所研究员  
**曾建平** 国家制造强国战略建设专家咨询委秘书处  
副秘书长  
**张 镇** 国家制造强国战略建设专家咨询委秘书处  
办公室主任  
**孙 健** 国家制造强国战略建设专家咨询委秘书处  
办公室干部、《中国信息化周报》记者



在线阅读(节选)





# 我国产业链供应链生态体系 构建路径研究

■文 / 王舒磊、么鹏飞、张义鑫、郝苑婷

## 摘要

当前，面对大国博弈、新一轮全球产业链格局加速重构和国内产业高质量发展的要求，亟待破解“卡脖子”“掉链子”、增强产业根植性、推动区域协同高效发展等难题。破解这些难题的关键在于如何统筹创新链、资金链、人才链与产业链的有机融合，让产业链得到有效支撑发展的同时，其他链条也能得到进一步的增强与发展，最终以多链协同、多要素融合的方式，打破当前产业发展面临的困境。构建产业链供应链生态体系正是综合考虑各项要素环节，以增强产业链供应链的稳定性，提高产业的创新能力、盈利能力和竞争能力。

产业链供应链生态体系是增强产业链供应链稳定性，提高产业创新能力、盈利能力和竞争能力的重要“法宝”。本文基于对产业链供应链生态体系的认识，分析了当前产业链供应链生态体系建设现状及存在的问题，提出了推动产业链供应链生态体系建设的

对产业链供应链生态体系的认识和理解

产业链供应链生态体系的内涵

产业生态体系是围绕特定产业，由互动需求的多边、异质参与者之间所建立的

地域产业多维网络体系。从产业链角度构建生态体系，其内涵更加丰富，以产业链供应链为核心，产业链各主体在经济、政策、技术等外部环境因素影响下进行物质交换、能量流动和信息共享，形成多种生态学关系，实现整体系统的可持续发展。产业链生态系统的内在逻辑是系统内各参与主体间竞争合作关系的动态体现，外在表现则是企业链、创新链、服务链、人才链、政策链的深度整合，体现了一种新的产业发展模式和产业布局形式。主要包括以下内容。

企业链是构建产业链供应链生态体系的重要基础。在一定区域内聚集一批相互依存、相互协作的企业，主要包括具有核

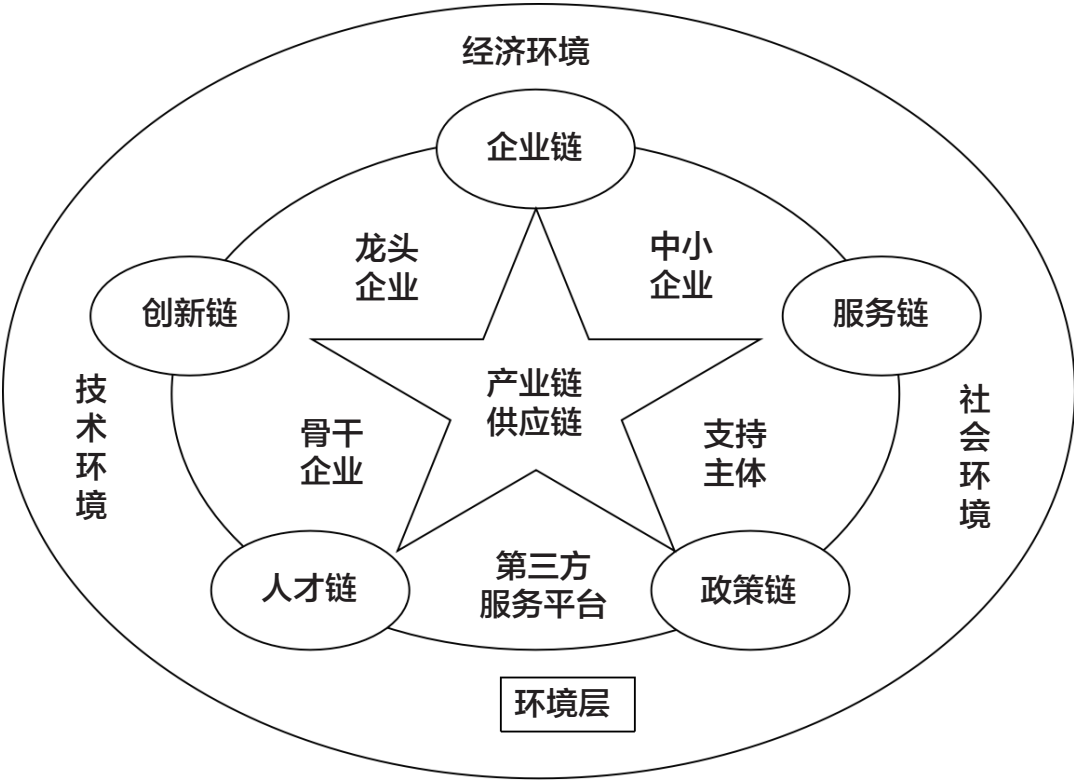


图 1 产业链供应链生态体系



心竞争力和引领作用的“链主”企业，提供配套、协作的中小企业，政府、金融机构、高校、科研机构等支持主体，形成产业同类企业的横向关联、产业供应链上下游纵向配套关联、通过中介作用使不同产业不同领域更大范围跨界关联。

创新链是产业链供应链生态体系的动力源泉。产业链与创新链深度融合，行业龙头企业联合产业链上的重点企业形成产业创新联盟，建立起政产学研用合作的良性运行机制，通过创新让产业链各环节实现价值增值，依托创新链促进产业链升级。

服务链是构建产业链供应链生态体系的重要支撑。在一定区域范围内，拥有各种各样的专业服务型机构，能够为产业提供方便快捷的市场和信息服务、金融服务、运销服务等，构建起专业化运营的服务链，协同支撑产业链发展。

人才链是构建产业链供应链生态体系的核心要素。在一定区域范围内既有适宜主导产业和各相关配套产业的熟练劳动大军，还拥有一批包括领军人才、高技能人才、高管人才的高端人才库，以“人才链”赋能“产业链”，形成人才集聚高地。

政策链是构建产业链供应链生态体系的必要保障。为推动地域内产业发展，各级政府提供优质公共服务和完善的配套政策，不断优化营商环境，为产业发展创造良好的环境和秩序。

## 产业链供应链生态体系建设的重要意义

从微观层面看，加快建设产业链供应链生态体系是企业有效应对抗风险和

提升国际竞争力的重要举措。企业是产业链的实施主体，企业强产业链才强。近年来，面对大国博弈、地缘政治冲突、新冠疫情冲击等因素，单个企业风险抵御能力差的弊端尤为凸显，尤其对于中小企业来说更是如此，在顺境中或许还能够跟随大环境顺畅发展，但逆境中却很容易将企业带入死胡同，陷入生存危机。只有与外部资源进行链接，拓宽企业能力边界，通过联动、合作打造产业链供应链生态体系，才能有效提升企业在逆境中抗风险的能力，也能让企业更高效地利用资源，优势互补，与生态圈内的伙伴共同发展，起到  $1+1 > 2$  的效果。竞争优势与生态优势为企业提供了良性循环生态系统，有利于企业更好地向上发展，提高了企业在国际上竞争力。

从中观层面看，推动产业链供应链生态体系建设是推动产业组织创新、提高产业链供应链现代化水平的必然要求。在新一轮科技革命的大趋势下，产业数字化与数字产业化相互促进，各种新兴技术不断涌现并加快推广应用，已经深刻改变了产业发展的模式。在这样的背景下，单独依靠产业链发展已经无法有效满足市场需求，需要推动创新链、人才链、资金链等多链条的有机融合，构建产业链供应链生态。在高质量发展的新阶段，通过构建产业链供应链生态，有利于增强产业链供应链的自主可控能力，带来规模经济、集群效应和价值聚合，可以有效降低摩擦成本，提高产业效率，促进体系内部业态融合升级、创新发展。

从宏观层面看，推动产业链供应链生态体系建设是构建双循环新发展格局的重要支撑。在全球经济格局调整的大背景下，加快构建以国内循环为主、国际循环为辅的双循环畅通高效的新发展格局，这是应对百年未有之大变局的战略安排。产业链供应链生态体系是构成国内大循环的产业基础，是融入国际大循环的基础平台。一方面，当前国内大循环的内生动力和可靠性亟需增强，完善的产业链生态体系聚集了“链主”企业和大量关键配套企业，具有较强的区域带动能力和行业影响力。另一方面，中国可凭借完善的产业链供应链生态体系优势，提高在全球分工体系当中的“被依赖性”，占据全球供应链体系中不可或缺的重要一环，维护国际和区域产业链供应链的安全与稳定。

### 产业链供应链生态体系的显著特征

一是与创新链人才链资金链等高度衔接的网络性。产业链供应链生态体系是一个复杂的系统网络，产业链供应链的日益复杂使得链条越来越长，同一层级的参与者越来越多，层级也从原来的三层结构扩展到现在的多层结构，也就是从“供应商－制造商－经销商”到“供应商的供应商、客户的客户”等。与此同时，产业链供应链的参与主体也愈加多样化，除了上下游企业，还包括提供支撑服务的参与者，涉及创新链、人才链、资金链、政策链等各个方面，如物流企业、仓储企业、第三方平台，以及政府、金融机构、科研机构等。良好的产业链供应链生态体系，要求

将各类主体参与的业务活动整合到一个统一的、无缝化程度较高的功能网络链条。

二是面对复杂多变的国内外环境能够及时反应的敏捷性。在不确定性、持续变化的环境下，产业供应链生态系统是一个具有竞争力的动态战略联盟，能够根据市场变化及时进行供需关系的重构，对市场需求、国际形势异动、供应链波动甚至政府决策作出快速响应。比如在逆全球化和全球疫情危机叠加冲击下，“卡脖子”风险和断供风险不断涌现，在此背景下拥有完善的产业链供应链生态体系，能够在面临风险冲击时快速调整，保持产业链的正常运转。

三是“链主”企业主导下的价值共创性。实现价值升级是产业链供应链生态系统的最终目标。产业供应链生态系统内各异质性主体，基于各自需求、面向共同价值主张，进行价值共创。“链主”企业因其具有显著的生态主导优势，通过发挥其生态主导力，带动生态系统内各环节、各要素充分融合、高效协作，进而实现价值升级的整体目标。

四是各地产业优化布局的区域协同性。经济发展水平不同的地区或产业发展阶段不同的地区根据各自基础和优势，有侧重地选择发展特色产业，加快形成产业协同发展、错位发展的格局。良好的产业链供应链生态体系是建立在区域协同发展、各地产业优化布局的基础上的。通过区域统筹协作，充分发挥各自区位、劳动力素质、产业配套能力、科技研发等优势，加深产业间协作，促进形成因地制宜、区

域联动、优势互补、互利共赢的错位发展新格局。

## 发达国家产业链供应链生态体系建设的模式

### 美国：龙头企业引领下强大的创新策源地模式

美国长期执资本主义世界之牛耳，其各项产业实力均在全球保持前列。美国依托其深厚的市场经济传统，形成了以发达的金融市场为基础、龙头企业为引领、依靠创新创业注入活力的产业链供应链生态建设体系模式，牢牢把握着核心技术和供应链网络的引领与主导地位。

一是建立以区域科技联盟为平台的协作机制。区域科技联盟作为一个重要的载体，通过从私人 and 公共部门筹集资金、向企业针对性地提供包括信息服务、经济援助服务、管理和业务发展援助、社区服务延伸和产业集群支持的多种科技公共服务，支持技术开发、应用和商业化，以实现促进产业集群创新能力和竞争力提升的目标。

二是政产学研用多向交流互动。美国产业链供应链生态体系庞大而复杂，不仅限于物资、资金和人员的流动，其政产学研的互动密切多元而灵活，在多个层次上呈现互利互促的格局。例如，硅谷产学研合作囊括知识和专利技术转移、共同研究、外部咨询、教学与人才培养、行业交流等多种形式。在科技行业和大学之间，可以经常看到行业从业者在大学进修或任

教、大学教师在学术休假期间任职于企业实验室等灵活的人员往来。在长效机制层面，以斯坦福大学技术许可办公室为代表的大学技术转移办公室成为连接美国大学与行业的重要纽带，他们与来自高校实验室的发明者一起评估某项发明潜在的应用价值，并制定许可策略和寻找合作目标，推动技术转化和效益形成。

三是大中小企业共生的商业系统。大企业往往是中小企业的主要服务对象，中小企业通过将自己的产品和服务销售给大企业，从而获得企业生存发展的资金；大企业通过中小企业的服务配套将自身产业链韧性不断增强，二者之间相互配合，共同提升产业生态的稳定性和安全性。作为这一商业系统的支撑，以硅谷为代表的产业链生态系统提供了具有高度竞争力的风险投资、商业基础设施和人力资源池，以及完善的生产性服务业体系，包括律师事务所、会计师事务所、科技服务公司等。

从美国经验来看，以行业内龙头企业为核心，借助市场的力量，构建起具有高效协同、充分合作的产业联盟，将产业链上下游、供需侧各环节各要素充分耦合，最终形成一个强劲稳定的产业链生态。

### 德国：以数字化智能化重构产业生态链的工业 4.0 模式

德国在第二次工业革命中取得长足发展，经济实力长期位居世界前列，是欧陆模式资本主义的典型代表。目前，德国具有强劲的制造业实力，且高度重视制造业，将工业安全作为国家竞争实力的重要组成



部分加以维护，在发达国家制造业空心化的背景下独树一帜。信息技术革命浪潮下，德国积极发掘新技术带来的新机遇，为工业提效赋能，提出了“工业 4.0”发展战略。

一是加强顶层设计，学术界产业界密切协同，明确智能化发展方向。2013 年，德国工程院、弗劳恩霍夫协会、西门子公司等学术界和产业界组成的“工业 4.0 平台”向德国政府提交了一份建议报告，强调工业 4.0 作为智能化、网络化世界的一部分，可通过发展数字化和智能化能力，建设智能工厂，将智能转型贯穿整个价值链，以满足用户多样化和即时性的需求，提升资源和能源的利用效率，且适应城市生产和人口结构变化。该报告从监管框架、标准化建设、人员培训、资源需求等多个方面阐述了建议采取的行动，并将中小企业和大型企业组成的产业生态有机整合在智能生产的框架下。此后，德国陆续出台了一系列指导性规划框架，如 2014 年的《数字化行动议程（2014—2017 年）》，2016 年的“数字战略 2025”，2018 年的“高技术战略 2025”等，都清晰展示了德国政府以智能化为抓手重塑自身产业链竞争优势的宏大愿景。

二是以智能化联通上下游，推动制造业服务化转型。在工业 4.0 模式框架下，德国以西门子、博世等德国龙头企业为引领，形成了一批智能工厂标杆示范项目。如德国安贝格西门子智能工厂，占地 10 万平方米，但这个体量的工厂只拥有 1000 名员工；互联网在工厂内广泛应用，链接成百上千个制造单元，与此同时，无人

化的智能设备在工厂内顺利运行；工厂高度智慧化，产品次品率极低，每百万件产品中，次品仅约 15 件，追溯性更是达到 100%。再如巴斯夫位于凯泽斯劳滕的试点智能工厂，其自动化水平极高；由客户直接下单到工厂后，其生产流水线会自动地进行通信调度，决定生产产品的形态，每一件产品都有可能与传送带上的下一件全然不同，大幅提升了生产灵活性。德国以数字化智能化为抓手提出的工业 4.0 愿景，从实现制造服务化、高附加价值化的高度重构了自身产业发展策略，为构建产业链供应链生态体系提供了借鉴。

三是发挥地方产业特色，培育专业集群网络。德国新兴产业发展特色明显，其产业集群内产业分布均衡，产学研协调发展，不同区域结合自身优势，形成了独具特色的产业集群。例如生物医药产业集群，生物医药集群较为复杂，需要大量科研型上游企业助力集群发展。在这种特征下，上中游企业形成长期稳定的合作关系，同时政府对集群进行针对性扶持。德国国内生物医药集群分布众多、专业性强、研发能力强大。产学研用高度协同的局面提高了产业集群的专业性。

### **荷兰：由政府、科研机构 and 私营企业组成的稳固“三角”生态模式**

荷兰同样是发达国家中产业链供应链生态体系建设的标杆，其竞争力指数和创新指数都位于世界前列。在荷兰模式中，以高校为代表的社会科研机构占据重要地位，充分发挥着提供创新动力的关键作用。

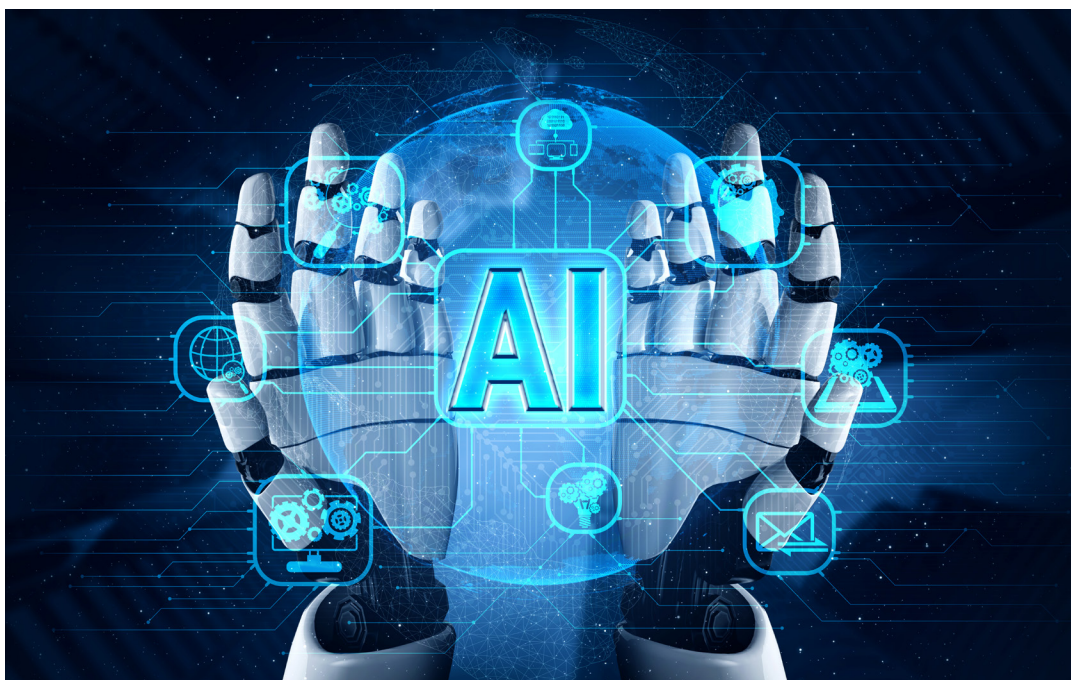
荷兰政府确立的“建设世界一流的科研力量，将科研与社会和业界紧密结合，并吸引全球顶尖科研人才”等三大目标，清晰展示了荷兰强调科研机构同私营企业紧密配合的政策导向。

一是构建科学创新组织体系，完善流程明确权责。在组织模式方面，荷兰组织体系较为完备，政府部门、科研院所、企业等高度结合，建立了一套高效的科研转化的渠道。这些联盟覆盖各种国家鼓励的支柱产业，作为公私合作的法人平台，从政府获得拨款。

二是财税等公共政策精准合理，对社会主体形成有效激励。荷兰政府为公私合作提供财政激励和税收优惠，其设计的税收抵免和“创新盒”政策，将知识产权获得的利润税率大幅下调，且申报不设上限，

极大地推动了企业的科技研发创新。高校和企业向知识创新联盟申请拨款，并由其审核项目决定是否发放资助。同时，合作也强调企业在其中的持续投入，企业必须投入至少 40% 资金作为前提，且合作协议必须是长期的，确保了政府和企业能够各司其职。

三是推动校企合作双向互促，促进成果转化协同创新。在具体实施方面，荷兰的校企合作在科技和商业方面都各具特色。一方面是形式多样的科技创新合作，有科研实验室与企业研发部门的合作，也有多部门参与的战略协作，还有设立或入驻专门园区的专项协作，涉及企业也涵盖大、中、小、微型企业。另一方面是商业模式和成果转化的创新合作，如伊拉斯姆斯创业中心等创新企业孵化器，可以聚合



伊拉斯姆斯大学的学术资源为企业提供培训，同时与其他企业建立互助关系网。孵化器还会定期发布各种统计数据和调研报告，有效推动知识成果向商业创新转化，并在推动人才双向流动、培养产业界和学术界的交叉创新等方面发挥重要作用。

四是以丰富高等教育资源为抓手，培养吸纳国际化人才。荷兰将优质的高等教育资源作为吸引人才的主要阵地，研究型大学和应用科技型大学与国外机构合作频繁，并大量参与欧盟的区域合作项目，培养了大量国际化的精英人才，能够满足企业国际业务和创新业务的发展需求。荷兰民众大多英语熟练，再加上外籍员工数量呈百万级，极大方便了荷兰与国际社会的产业合作与交流，提升了荷兰产业的国际竞争力。

产业链供应链生态建设现状及存在的问题

典型地方产业链供应链生态体系建设的实践经验

成都的“产业生态圈”模式。成都以构建产业生态圈为引领，系统整合产业配套链、要素供应链、产品价值链、技术创新链，引导优质资源集聚，推进产业功能区建设，取得显著效果。一是构建“市领导+生态圈牵头部门+重点功能区管委会”协同推进机制，将各单位责任落实明确，组建14个产业生态圈联盟，每月至少开展一次行业性活动。二是制定专业化产业政策体系，按照“一个产业一个政策、一

个企业一套办法”，根据产业具体情况制定符合产业特征的政策，将最好的资源分配给最优秀的企业。三是探索专业化土地供给方式，根据企业投资能力、建设时序等综合运用点状供地、标准厂房等差别化供地方式，出台土地供应实施方案。四是提升产业功能区专业化能力，构建“功能区管委会+专业运营公司”管理体系，管委会和专业运营公司各司其职。

广州的“双链结合”模式。为全力保障产业链供应链安全稳定，构建韧性强劲的产业链生态体系，广州建立由政府作为“链长”，企业作为“链主”的“链长+链主”的工作推进体系。一是充分发挥“链长”统筹产业要素资源优势、“链主”企业头雁引领和生态主导优势，推动资源优化分配，共同补链、稳链、强链。二是联合协同作战，建立市区联动、各司其职、责任到人的工作机制。“指挥部”即“总链长”，进行总体规划；“作战部”即“链长和链主”，完成战术计划制定工作；“主力军”即“牵头部门和链主工作专班”，将各项工作执行下去，协同打好产业基础高级化、产业链现代化攻坚战。三是强化“链长”统筹协调和督促检查，牵头部门落实主体责任，完善服务保障工作机制，支持和引导广大企业深度参与，形成“链长+链主”齐抓产业共促发展的强大合力。

合肥的“以点带面”模式。合肥深入实施“以点带面”连线成片发展战略，通过落地一个龙头企业带动一个主导产业，再由一个主导产业培育一个产业生态，逐步打造出远近闻名的“芯屏汽合，集终生智”





的产业布局。以“汽”（新能源汽车）为例，首先，聚焦行业头部企业。合肥抓住新能源汽车发展趋势，瞄准处于危机边缘的造车新势力头部企业蔚来汽车，通过“风险对赌”的高风险投资招引蔚来汽车总部落户经开区。其次，通过头部企业带动效应吸引其他企业进驻。在蔚来落户合肥之后，江淮大众新能源汽车、江淮蔚来新能源汽车、长安汽车二期等 50 多个新能源汽车项目相继在合肥集聚。最后，打造新能源汽车完整产业链生态。目前，合肥新能源汽车产业链生态完备，上中下游企业集聚，新能源汽车产业集群发展势头良好。

长沙的“阶梯管理”模式。为破除产业链供应链难点堵点，构建良性产业链供应链生态体系，长沙探索出由长沙市委书记和长沙市长担任“总链长”，其他市领导担任“链长”，形成从上到下有序高效的“四级调度”工作机制。第一级，长沙市委书记在

每季度末召集各位“链长”调度产业链建设工作情况；第二级，长沙市长在每季度初召集各产业链办公室主任调度产业链办公室工作推进情况；第三级，长沙分管副市长不定期召集相关园区产业链工作负责人，实际解决产业链供应链面临的问题和难题；第四级，长沙市产业链办公室通过座谈、调研等方式，实时掌握产业链动态。在这种机制的高位推动、高位协调、高位督办下，产业链办公室的产业链全景图，涵盖了 22 个产业链的垂直供应链、横向协作链，为动态分析产业链的现状、存在问题，及时有效做出响应提供了重要支撑。

### 当前产业链供应链生态建设存在的问题

一是创新链人才链资金链匹配度不高，难以适应产业转型升级的迫切需求。产业链供应链生态体系建设离不开创新链的布局、人才链的完善和资金链的支持。

当前，我国正处在构建现代化产业体系、推动经济由高速增长向高质量发展的关键时期，产业链供应链转型升级的需求越发紧迫。然而，当前支撑和保障产业链供应链顺利转型升级的条件还不稳固，创新链、人才链和资金链并未形成有效配套。具体看，在产业链供应链的关键节点，科技创新条件还不完备，关键技术及产品对外依存仍然十分严重，无法及时有效突破产业升级的瓶颈，很容易陷入被美西方国家“卡脖子”的困境；在技术创新的关键节点，资金支持力度有待加强，资金滚动支持政策还不完善，难以持续支撑新技术的突破与应用并实现良好的资金循环；在产业链供应链上下游各环节，尤其是容易引发断点堵点的关键环节，专业技术人才、国际化管理人才、“高精尖”领军人才储备不足，无法有效供给产业转型升级的发展所需；围绕技术创新、人才供给和资金支持等方面对产业链供应链转型升级支撑和保障的体制机制还不够完善。

二是“链主”企业生态主导力没有充分发挥，上下游高效协同价值共创还未实现。“链主”企业往往在行业内处于龙头地位，对产业链上下游具有引领带动作用，是构建产业链供应链生态体系的主力军。比如，英特尔、三星、波音、空客等“链主”企业，基本形成了从产品设计、制造到销售的全闭环生态链。反观我国企业，“链主”企业生态主导力效应并未充分彰显。一方面，“链主”企业数量储备不足。虽然历经多年发展，涌现出一大批诸如国家电网、中国石油、中国石化、华为等全

球知名的产业链“链主”企业，但更多还是以代工为主，缺乏核心竞争力的企业。这些企业由于没有自己的核心技术，无法树立起具有较强竞争力的品牌，缺乏市场高度认可的产品和长期稳定的客户，与行业内国际领先企业具有很大差距，技术创新与市场应用衔接不畅，没有形成闭合的产业链供应链。另一方面，在产业配套方面，国内以“链主”企业为主搭建的产业链供应链上下游高端产业公共服务平台仍然十分缺乏。

三是地方产业发展统筹引导不足，科学性不强、长效性不足、协同性不高等现象突出。在政绩考核指挥棒下，各级地方政府都在不遗余力地发展产业，但由于缺乏长远规划、利益共享机制，一些地方产业发展事倍功半。一方面，由于一些地方政府在引导产业差异化发展方面的积极性和主动性不足，缺乏着眼于长远的规划和全国的产业布局。与此同时，中央和地方之间的上下对接，难以形成全国“一盘棋”，难以做到“劲往一处使”。另一方面，地方重复低效投资现象突出，既无法有效推动产业高速发展，更加剧了产业恶性竞争而非协同合作。由于缺乏成熟的利益共享机制，导致地方之间为争抢产业落地，强制要求配套产业投资、采购本地产品等，破坏了营商环境，导致了恶性竞争、低效发展。比如光伏产业，2022年8月，工信部等三部门发布的《关于促进光伏产业链供应链协同发展的通知》中就指出，根据产业链各环节发展特点合理引导上

下游建设扩张节奏,优化产业区域布局,避免产业趋同、恶性竞争和市场垄断。

四是国内外不稳定性不确定性因素显著增多，产业链供应链“断链”“脱钩”风险持续攀升。地缘贸易摩擦正呈现出常态化、扩大化和剧烈化的趋势，而制造业已然成为地缘贸易摩擦的焦点。目前，美欧日韩等提出了构建或完善自己的产业链供应链计划，逐步建立起对我国“围堵打压”的反华联盟。比如，2021年9月，美日印澳四国举行首脑会谈，强化在半导体供应链领域合作，推进建立安全通信网，试图进一步阻碍半导体材料和制造装置对我国供应。在全球产业链供应链重塑过程中不断加强的政治化趋势，无疑将给跨国企业带来巨大的“选边站队”压力。同时，一些以出口为主的国内外向型企业也在逐步向以越南为代表的东南亚国家或印度转移，一定程度上提升了维持产业链供应链稳定安全的难度。

## 推动产业链供应链生态体系建设的 路径选择

建设以链主企业为中心的产业链生态圈。发挥链主企业强大的资源整合能力，在产业链协调中进行并购延链、淘汰落后环节等，凭借其主导地位实现自身利益最大化，引领产业链发展。发挥链主企业资本和技术优势，通过在生产、技术、培训等方面给上下游配套企业提供专业化指导，带动产业链中小企业朝着规模化、专业化、高端化发展，加大“专精特新”中小企业培育力度。鼓励中小企业加强对链主企业知识、技术溢出的吸收能力，加快自身提档升级，发展壮大，形成大中小企业信息联通、产能对接、品牌共建、知识产权和销售渠道共享等深度产业协作配套模式。

促进产业链供需调配和精准对接。推进传统产业链整合优化,以互联网为手段,





打通供销渠道，去除冗余环节，通过信息联通，打破信息闭塞痛点，帮助企业把握市场行情、简化中间环节，真正实现降本增效。统筹数字平台、物流等基础设施建设，将产业链生产计划进行共享，协同产业链信息，实现物流运输一体化。强化特殊场景下基础设施联通能力保障，推动平时、急时等多状态下基础设施依然互联互通、协调联动。以中心城市、城市群为枢纽节点，以交通链、资金链、人才链、信息链为纽带，强化全国各省市间的产业链合作，促进供需精准对接，顺畅城市之间信息、人员、要素流动。

根据各地特色优势布局产业链不同环节。及时研判产业链发展趋势，分行业分类做好供应链的战略设计和精准施策，对处于产业链关键环节的重点企业所遇到的困难和问题进行及时跟踪，实施快速响应、程序简单、规则透明的针对性支持，引导企业将产业链关键环节留在国内，确保对产业链的绝对控制力，维护产业链的安全和稳定。以中心城市和城市群为重点，基于各自比较优势，打造若干产业链节点城市，发挥节点城市的制造业规模效应、创新外溢效应与市场竞争优势，以适度分散为目标，关联一批二级、三级节点城市。优化区域分工协作格局，强化中西部和东北地区承接产业转移的能力建设。

加强创新链、资金链、人才链等与产业链的高效适配。围绕产业链部署创新链，将科技创新和产业优化升级统筹联动，以链式融合创新提升产品竞争力和创新话语

权。围绕创新链、产业链、价值链和技术链梳理可以促进产业链科技含量提升的主要任务，集中各方力量开展联合攻关。创新实践“链长制”，链长负责制定产业规划和支持政策，做好产业链的顶层设计和组织协调工作；链主负责组织上下游企业和产学研用各方，联合开展技术攻关和生态营造。

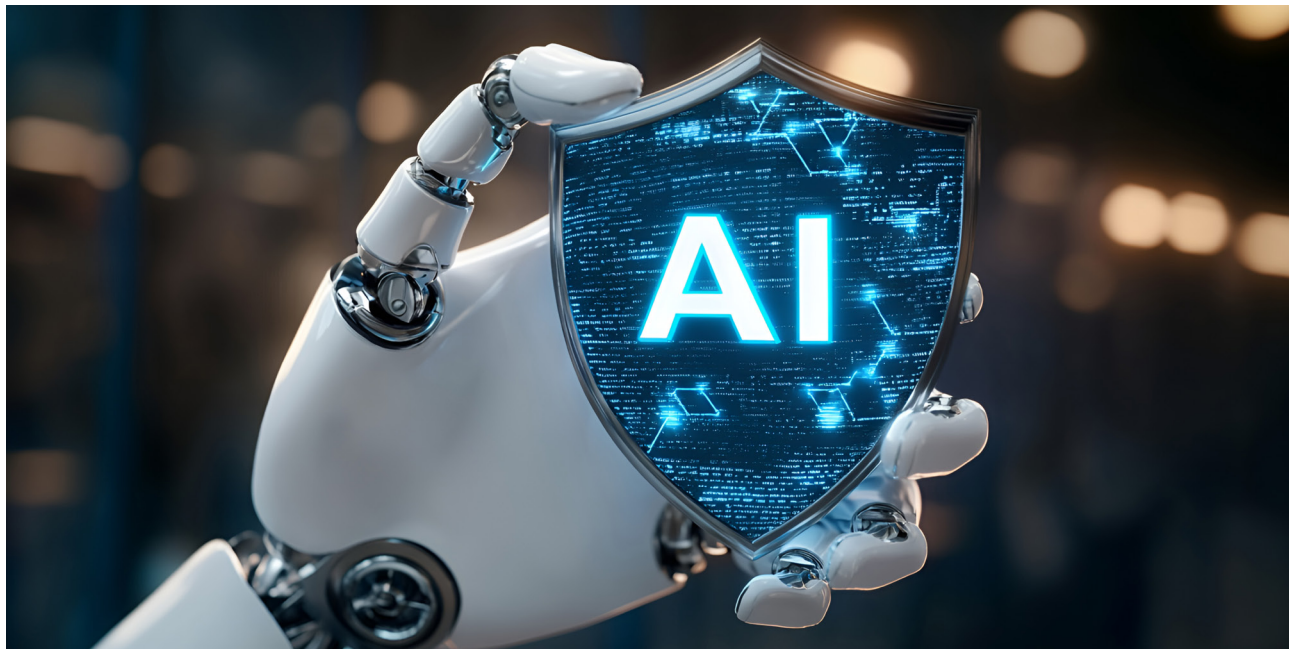
加快自主产品应用生态系统建设。聚焦重点领域关键瓶颈，分行业做好供应链战略设计和精准施策，强化重点产业链关键基础技术和产品的产业化攻关。重点将基础领域创新技术和产品纳入首台套、首批次、首版次等保险补偿支持范围。以重点领域、重点区域应用场景建设为突破点，组织形成一批量级大、带动性强的应用场景项目，推动新技术新产品的示范应用，形成可复制可推广的商业模式，打造具有黏性的产业生态系统。强化顶层设计，探索研究“首发应用场景”“示范应用场景”等支持措施，实现政策有效衔接和精准支持。加强应用前沿整机带动，对取得突破的国产化产品，引导和支持供需对接，为自主创新产品应用创造公平的市场环境。

#### 作者信息：

**王舒磊** 赛迪智库规划所新兴产业研究室主任  
**么鹏飞** 赛迪智库规划所新兴产业研究室研究人员  
**张义鑫** 赛迪智库规划所新兴产业研究室研究人员  
**郝苑婷** 赛迪智库规划所新兴产业研究室研究人员



在线阅读(节选)



# 国家安全视域下的生成式人工智能新型泄密风险与法律规制

■文 / 饶宇锋

## 摘要

生成式人工智能技术的快速发展催生了传统安全框架难以覆盖的新型泄密风险，对国家安全构成严峻挑战。数据层面表现为：大模型训练数据的“记忆性生成”可能导致敏感信息复现；合成数据亦存在重新识别风险；跨境数据流动监管漏洞引发中间衍生数据失控隐患。应用层面风险集中于：开源大模型被恶意改造为泄密工具、下游应用接口传导漏洞，以及合法接口滥用诱导模型输出涉密信息。当前治理体系面临技术迭代与法律规制的“科林格里奇困境”、责任分配模糊和治理碎片化等结构性矛盾。对此，需构建动态分级分类监管框架，依据模型参数量、应用场景和数据敏感性划分风险等级，实施差异化治理；扩展国家秘密法律内涵，将算法关联性信息纳入保护范围，明确“逆向工程”“诱导提问”等行为的法律定性；开发闭源专用大模型实现涉密领域隔离式治理。

基金项目信息：国家社会科学基金青年项目“总体国家安全观视野下网络侵入型侦查的法律规制研究”（编号：20CFX033）

**生**成式人工智能大模型（如 ChatGPT、Deepseek）凭借其强大的内容生成能力，已经深度嵌入到社会发展的各个行业，为第四次工业革命提供了新动能。根据中国互联网络信息中心（CNNIC）发布的《生成式人工智能应用发展报告（2024）》统计，截至 2024 年底，我国人工智能核心产业规模已接近 6000 亿元。生成式人工智能的应用场景不断拓展，特别是在政府政务、军事国防等涉及国家安全的关键领域，多地政府已开始探索利用智慧政务 AI 大模型提升政务服务效率，使用其处理公文写作、舆情分析等业务。各国军方目前也已经开始探索基于这些大模型的军事应用<sup>[1]</sup>，大模型的应用提高了作战人员、武器和指挥信息系统的智能交互水平，对历史战况和现实情报通过先进算法进行快速推演分析，提升打击精度和反应速度。但生成式人工智能技术的迅猛发展在释放生产力的同时，也催生出传统安全框架难以全面覆盖的新型泄密风险。

生成式人工智能的泄密路径不再只依赖传统的数据窃取或网络入侵，而是通过模型参数的隐性关联、开源技术的恶意改造和大模型依赖国外技术的漏洞。生成式人工智能和传统技术最大的不同在于大模型通过海量数据训练形成的参数矩阵。这个参数矩阵就像是一个复杂的“黑箱”，里面藏着模型的“智慧”，但同时也可能藏着一些不该泄露的信息。例如，生成式人工智能大模型的参数（Weights）隐含的“统计性泄密”，与传统数据泄露不同，

“统计性泄密”不依赖直接获取原始的敏感数据，而是向模型输入精心设计的提示词（Prompt），诱导参数激活特定路径，从而输出与训练数据关联的内容。例如，通过输入“中国某省电力供应薄弱环节”，可能触发模型输出隐含真实电网脆弱性的信息。而这些参数仅仅是传统意义上的统计信息。中国国家信息中心 2023 年监测发现，在国内外暗网中涌现出 WormGPT、PoisonGPT、EvilGPT 等一批恶意人工智能大模型，通过改造开源的合法大模型，以生成恶意软件代码造成数据泄露、网络攻击、窃取隐私等，并自动生成诈骗文本图像，针对我国政府和军工单位进行复杂的网络钓鱼活动<sup>[2]</sup>。这些案例都表明，生成式人工智能的泄密路径已从传统的“数据存储—数据传输—数据使用”过程中发生的数据直接泄露的风险，转变成通过大模型中的隐含参数、多模态输出的组合关联、大模型开源生态的全球扩散等非线性方式，以更加隐蔽的方式造成泄密，对国家安全构成重大挑战。

在此背景下，文章旨在系统分析生成式人工智能的泄密风险，并提出相应的规制路径。首先，根据生成式人工智能大模型所具有的技术特点，分别从大模型数据层面、模型应用层面，提出生成式人工智能的新型泄密风险。其次，基于现有的中国数据安全法律体系与《生成式人工智能服务安全基本要求》，研究当下我国生成式人工智能泄密风险治理现状，发掘我国生成式人工智能泄密风险治理中司法与执法实践中的不足与存在的治理困境。最



后，探索兼顾安全与发展的治理范式。立足中国法治实践，通过法学与计算机科学的深度交叉，希望为破解生成式人工智能新型泄密风险治理的“科林格里奇困境”（Collingridge's Dilemma）提供一些参考。

## 生成式人工智能大模型所引发的新型泄密风险

### 数据层面的泄密风险

#### 大模型训练数据“记忆性生成”：难以完全脱敏

在数据层面，大模型对海量训练数据的依赖使得涉及国家安全的敏感信息的“被动泄露”成为可能。训练过程中未被充分脱敏的政务文件、国企内部资料，甚至国家安全信息都有可能被模型记忆并复现。有研究人员通过对抗性提示技术，已从开源大模型中成功提取出训练数据中的个人隐私、商业合同片段，乃至政策草案内容。这一现象被称为“概率推断复现”（probabilistic inference reproduction），即模型在生成文本时，可能会根据训练数据中的统计模式，复现特定的文本片段<sup>[3]</sup>。此外，攻击者可能通过构造带有启发性的输入问句进行攻击，诱导大模型输出记忆数据，进而获取模型训练数据集，从而导致更大规模的数据泄露风险<sup>[4]</sup>。假设攻击者以特定组合提问（如“某省稀土出口配额调整依据”）时，模型可能基于训练数据的隐性关联，输出与真实政策高度吻合的推论。在此类泄密行为中，攻击者无需直接窃取原始数据，仅通过与大模型的交

互即可获取大量涉及国家安全的敏感信息。

#### 合成数据陷阱：去标识化的虚假安全

为规避泄露敏感信息与法律合规风险，部分大模型的开发机构转向使用合成数据训练模型。很多学者认为，合成数据通过生成与原始数据统计特性相似的数据，避免了直接使用敏感信息，从而有效保护了数据安全。并且，由于合成数据既能保持原始数据的统计属性，又不由任何数据主体直接产生，不属于任何特定主体，因此被视为一种隐私增强技术，能够在发挥数据效用的同时有效保护敏感信息。然而，在保护数据安全的初衷下，合成数据的界限并不清晰，生成过程也隐藏着数据泄露的风险。

当前，合成数据的生成主要采取应用生成模型，尤其是生成对抗网络，它们不是完全从零开始创建合成数据，而是仍需要借助原始的真实数据来训练<sup>[5]</sup>。合成数据的质量取决于用于生成数据的原始数据集。错误的原始数据会产生错误的合成数据，从而导致模型的输出不准确。合成数据与真实世界的构成越贴近，模型训练效果就越好。因此，尽管生成过程复杂，敏感数据仍存在被攻击者“重新识别风险”。尤其是合成数据与原始数据过度拟合，其生成逻辑中仍可能隐含原始数据分布特征。

现在的监管部门目前也难以审查数据处理中的混淆行为。由于大模型技术企业可以将合成数据设计得与真实数据极其相似，并将合成数据与真实数据混用，这使得部分未经允许使用的真实数据被滥用，从而引发数据泄露的风险。现在的技术无

法区分真实数据与合成数据，也难以对合成数据背后的混淆行为作出有效的审查。相比之下，大模型技术企业则可以利用真实数据与合成数据难以验证的特性，混用两种数据，以规避监管审查。同时，监管部门也难以确认是否已彻底删除泄露的敏感数据。

## 大模型跨境数据流动：数据泄密的灰色通道

生成式人工智能大模型的算力依赖与数据全球化协作特性，使其不可避免地需要进行跨境数据流动。一方面，囿于基础模型研发和训练所需投入的高昂成本和技术壁垒，国内许多企业构建生成式人工智能大模型时，通常依赖境外开源大模型或境外算力资源，再结合自有或外部行业数据进行模型训练和优化。另一方面，国内生成式人工智能企业在技术积累、市场规模、成本控制和商业化应用等方面具有优势，国产生成式人工智能大模型也逐渐走出国门，随之而来的是更大的泄密风险。

尽管依据《中华人民共和国数据安全法》第三十六条要求数据本地化存储，但大模型训练过程中产生的大量中间数据（如梯度更新值）仍可能通过境外服务器传输。攻击者利用此类数据流的可追溯性，通过逆向工程反推原始数据特征。《中华人民共和国个人信息保护法》与《中华人民共和国数据安全法》虽强调原始数据本地化，但未覆盖训练过程中产生的衍生数据，形成监管漏洞。即便生成式人工智能大模型不直接接触重要数据，但生成式

人工智能强大的数据汇聚和分析能力，也可能导致其生成的衍生数据中包含重要数据，进而引发数据跨境的重大风险。

2024年3月22日颁布的《促进和规范数据跨境流动规定》增强了数据跨境流动的监管力度，但对生成式人工智能研发应用场景下的数据跨境流动问题尚未给出明确的指导原则或细化规则，这可能导致生成式人工智能开发者和服务提供者在实践中陷入合规困境<sup>①</sup>，阻碍其进行国际数据流动和合作。此外，各地数据跨境流动管理规定的碎片化监管态势，可能加剧地区间法规执行不一致的状况，影响政策的统一性和有效性。这种合规落实不到位的现象，不仅增加了数据主体合法权益遭受侵害的风险，也对国家安全构成潜在威胁。

## 应用层面的泄密风险

### 开源大模型被恶意利用，成为新型泄密工具

生成式人工智能开源大模型的开放特点在推动技术普惠的同时，也因其易获取性和使用低门槛的特点成为国家安全的新威胁。开源模型的透明性与易获取性，使得攻击者能够轻易获取模型架构、参数权重和训练逻辑，进而通过微调、数据投毒或功能定向改造，将其转化为泄密工具或攻击武器<sup>[6]</sup>。以暗网著名的恶意人工智能大模型 WomGPT 为例，它基于开源 GPT-JLLM 构建，具有实际自定义 LLM。使用新的 API，不依赖于 OpenAI 内容政策限制。使用包括合法网站、暗网论坛、恶

<sup>①</sup>不同国家对跨境数据流动的监管标准不同，科技企业需要同时遵循数据来源国和数据存储目标国的监管法规。不同国家的数据保护法规复杂且相互重叠，这可能导致企业在遵守一个国家的法规时违反另一个国家的法规。例如，欧盟的《通用数据保护条例》（GDPR）和中国的《中华人民共和国个人信息保护法》在数据保护和隐私权方面就有不同的要求。

意软件样本、网络钓鱼模板等大量数据进行训练。有较高的响应率和运行速度，无字符输入限制。这一模型可以自动化大量生成恶意软件代码造成数据泄露、网络攻击、窃取隐私等，并生成诈骗文本图像进行复杂的网络钓鱼活动和商业电子邮件入侵（BEC）。对开源模型的改造不仅成本低廉，且技术门槛极低——只需少量样本数据和基础编程能力即可完成。

同时，我国部分科技企业由于技术积累和算力资源的不足，在开发大模型的过程中，需要使用到全球开源社区内的境外开源大模型参数。当国产 AI 项目依赖境外开源框架（如 TensorFlow、PyTorch）时，其模型参数可能被植入隐蔽后门。如果使用这个带有后门的大模型，并在敏感数据上进行微调，这个新模型的权重将直接编码其中一部分的数据。假设某些国产汽车自动驾驶模型集成了境外开源视觉模块，其参数空间被植入地理围栏后门，其模型在特定地理坐标（如某军事管理区周边）自动提高环境感知精度，并将元数据上传至境外服务器。这些开源大模型无异于成为窃取国家安全敏感信息的特洛伊木马。

### 下游应用 API 接口传导漏洞，造成泄密

在政务、金融、能源等关键领域，大模型通过 API 接口的深度嵌入，使得技术缺陷可能引发系统性泄密。假设在关键电网系统中接入大模型生成的电力调度代码时，因模型训练数据过度拟合历史故障案例，生成的代码中存在“负荷峰值超过阈值时自动跳过安全检查”的致命逻辑漏洞。境外攻击者通过分析公开的电网运

行数据，构造特定负载条件触发漏洞，导致区域性断电事故，并趁机窃取电网拓扑结构信息。此类案件中，尽管直接攻击行为可适用《中华人民共和国刑法》第二百八十五条“破坏计算机信息系统罪”，但模型开发者常以“技术中立”抗辩，主张漏洞源于训练数据的客观缺陷而非主观过错。司法机关因缺乏对算法黑箱的技术解释能力，往往难以认定开发者责任，最终导致追责链条断裂。

### 合法应用与非法窃密的边界模糊

通过多次向大模型的应用端提问，从而获得敏感数据，究竟是用户的合法应用行为还是非法使用，意图窃密。在法律上目前还没有明确界定。大模型的应用用户通过精心设计的渐进式提问，利用大模型的上下文关联与推理能力，逐步诱导出未公开的敏感信息。例如，某政策咨询系统中，攻击者以“某领域年度预算总额”→“分项支出比例”→“重点项目的资金拨付流程”为提问链条，通过多轮对话引导模型输出涉密财政细节。此类行为的技术本质是利用模型对训练数据隐性关联的“记忆”能力，但《中华人民共和国刑法》第二百八十二条“非法获取国家秘密罪”的要求是“窃取、刺探、收买”手段，而诱导性提问并未突破系统权限或使用技术攻击手段。

## 我国生成式人工智能泄密风险治理现状与存在问题

### 我国生成式人工智能治理法律政策概述

随着生成式 AI 技术的进步，我国推出



表 1 我国生成式人工智能服务管理规定

| 名称                                    | 发布机构           | 发布时间             |
|---------------------------------------|----------------|------------------|
| 《关于加强互联网信息服务算法综合治理的指导意见》              | 国家互联网信息办公室等九部门 | 2021 年 9 月 17 日  |
| 《互联网信息服务算法推荐管理规定》                     | 国家互联网信息办公室等四部门 | 2021 年 12 月 31 日 |
| 《互联网信息服务深度合成管理规定》                     | 国家互联网信息办公室等三部门 | 2022 年 11 月 25 日 |
| 《国务院办公厅关于深入推进跨部门综合监管的指导意见》            | 国务院办公厅         | 2023 年 1 月 13 日  |
| 《生成式人工智能服务管理暂行办法》                     | 国家互联网信息办公室等七部门 | 2023 年 7 月 10 日  |
| 《网络安全标准实践指南——生成式人工智能服务内容标识方法》         | 全国信息安全标准化技术委员会 | 2023 年 8 月 25 日  |
| 《生成式人工智能服务安全基本要求》                     | 全国网络安全标准化技术委员会 | 2024 年 3 月 1 日   |
| 《信息安全技术 生成式人工智能数据标注安全规范》（征求意见稿）       | 全国信息安全标准化技术委员会 | 2024 年 4 月 3 日   |
| 《信息安全技术 生成式人工智能预训练和优化训练数据安全规范》（征求意见稿） | 全国信息安全标准化技术委员会 | 2024 年 4 月 3 日   |

了一系列规范（见表 1），包括《互联网信息服务算法推荐管理规定》和《互联网信息服务深度合成管理规定》。特别是 2023 年发布的《生成式人工智能服务管理暂行办法》（以下简称《暂行办法》），在全球范围内率先对生成式 AI 进行立法。2024 年 3 月 1 日，全国网络安全标准化技术委员会发布了《生成式人工智能服务安全基本要求》，这是我国首个关于 AIGC 服务安全的技术指导文件，它详细阐述了《暂行办法》中关于生成式 AI 的安全要求，覆盖了网络安全、数据安全、信息保护，以及泄密安全风险等多个方面。

自 2017 年《中华人民共和国网络安全法》、2021 年《中华人民共和国个人信息保护法》和《中华人民共和国数据安全法》实施后，我国建立了以“数据三法二条例”为核心的数据监管体系，包括对生成式人工智能泄密的法规。这些法律从国家层面构建了我国生成式人工智能的创新和监管体系，并初步形成了多层次的治理规范架构。

**治理场景分散，政府内部治理主体众多，外部治理主体参与不足**

但我国目前针对生成式人工智能的治理主要是基于以往传统数字技术常采用的以风险预防和归性为主导的分散治理<sup>[7]</sup>。而生成式人工智能技术的泄密风险呈现出与传统治理范式相异的复合性特征。其风险形态已突破传统单维度的场景化治理边界，其风险生成机理不再局限于网络攻击或数据泄露等离散要素，而是呈现出数据层、算法层与应用层之间的系统性耦合关系。具体而言，训练数据集的数据敏感性、算法黑箱的不可解释性，以及生成内容的不可控性构成了三位一体的风险源，且各要素间存在显著的跨维度传导效应。这种技术特点使得生成式人工智能在具有跨领域通用性的同时，也打破了传统技术工具与特定应用场景的对应关系。现行以算法备案、数据分类保护、内容审查为要件的分散化治理模式，因缺乏风险要素间的联动规制机制，难以有效应对生成式人工智

能引发的系统性泄密风险。从这些法律规范的出台单位来看，也可以发现目前针对生成式人工智能治理的主体也过于分散。一部相关法律法规的出台往往需要多个部门联合制定。

与此同时，生成式人工智能技术正以前所未有的速度迭代发展。在此过程中，关键核心技术主要被相关研发企业所掌控。对于政府而言，若要对大模型泄密风险的有效治理，仅依赖内部相关部门及技术手段已远远不足，必须将这些企业纳入治理范畴。政府在理解生成式人工智能背后的技术逻辑和运行机制方面存在偏差，在技术监督上也存在短板，难以对治理对象实施持续高效的监督。此外，科层制的内部运作机制通常较为迟缓，导致政府难以及时应对生成式人工智能所引发的泄密风险。

### **既有规范治理效果有限：过度依赖“安全评估”“算法备案”等事前预防手段**

既有的传统人工智能治理规范，其核心主要强调在风险出现之前进行预防和治理。然而，这种以事前预防为主导的治理规范主要适用于风险相对可预测的传统人工智能时代。面对生成式人工智能的黑箱模型和涌现等问题，这种基于风险预防的事前治理规范设置显示出其局限性。

《生成式人工智能服务安全基本要求》要求大模型上线前备案和进行模型安全评估、审计，并且对于敏感数据做出了特别规定，要求采用先进的加密技术，如AES 256 位加密，确保数据的安全性。建

立严格的数据访问控制机制，例如，对于包含敏感个人信息的数据，可以存储在加密的数据库中，仅对授权人员开放。这些措施都属于泄密风险发生之前，做出的事前预防措施。对于传统人工智能产生的相关风险，例如算法导致的大数据杀熟等现象相对可控且其背后法律主体较为明确的技术。基于事前预防理念的算法备案、算法评估等制度可以起到较好的事前风险防控作用。但生成式人工智能由于其自身通用性、产品内容涌现性和运行产出的复杂性，使得其发展方向和风险业态都还没有明确，相关风险难以被及时有效地预测，监管难度也不断增大。传统事前监管制度难以发挥作用。例如，《中华人民共和国数据安全法》要求对重要数据实施分类分级管理，但生成式大模型训练数据和输出数据随时会发生动态变化。例如，某新能源汽车企业的电池参数在单独存储时，只是属于该企业的商业秘密，经模型训练后与其他数据关联可能升级为产业安全信息。监管部门因缺乏动态风险评估工具，仍沿用静态分类标准，将此项数据只视作普通统计信息，而非涉密数据。

### **对于生成式人工智能泄密风险的责任分配不清**

在生成式 AI 治理框架中，责任分配不明确可能导致泄密风险治理难度提升。现行规范未明确“大模型开发者”角色，导致责任划分模糊。在“小模型”时代，定制化生产方式使得研发、部署和运行主体界限清晰。但大模型的“无需定制”“协

同部署”和“轻量通用”方式，使得服务提供者难以对模型定义、设计和部署产生最终影响。因此，明确区分大模型的开发者与服务提供者，并为其设定不同的数据安全保障义务，是降低泄密风险的重要措施。然而，我国颁布的《暂行办法》第二十二條仅规定了生成式人工智能技术、生成式人工智能服务提供者和生成式人工智能服务使用者的概念，未单独规定作为大模型技术支持方的开发者。这种缺乏明确规定的情况，导致两者在模型数据安全保障义务的责任边界模糊，进而不利于监管部门对这两类主体的监督与追责。针对生成式人工智能的治理，亟需建立更为清晰的责任分配机制，以便有效应对潜在的泄密风险，并确保各方在数据安全保障方面的义务得到合理履行<sup>②</sup>。

国家安全视域下生成式人工智能的泄密风险规制路径

在建设科技强国和贯彻总体国家安全观的双重目标下，我们要实现对生成式人工智能泄密风险防范与促进科技创新二者之间的动态平衡，建立健全与生成式人工智能时代相适应的法律规制模式，提升针对泄密风险防控措施的针对性、适应性和有效性。

治理规范创新：从静态管控到动态响应

当前，以欧美为代表的人工智能走在前列的国家虽然都还在强调事前预防、先

行治理来应对人工智能可能产生的风险和负面效应。但上述制度无法应对生成式人工智能围绕大语言模型和深度学习海量数据最终演绎归纳出的内容和产生的复杂泄密风险。因此，本研究认为不宜将政府作为单一主体来参与生成式人工智能泄密风险的治理，而是将其作为分散权力系统当中的一部分，吸纳进企业和社会的力量作为重要一环来参与合作治理。在这一过程中，要建立彼此的权力利益分享机制、情报决策机制、风险预警机制，有效地团结科技企业来增强国家治理生成式人工智能泄密风险的水平和能力<sup>[8]</sup>。

树立实时应对（敏捷）式监管理念，建立动态分级监管制度

无论是事前预防型还是关于现实问题展开的回应式治理，其本质都是针对某一特定领域、特定场景的治理，而不是对技术发展的整个过程进行掌控。而保持实时动态监管则是不断更新监管方式，要根据不同类型的泄密风险等级调整评价手段和方式，从单一的预防型或事后监管型转变为“事前预防、事中干预、事后惩治”过程式治理。《暂行办法》第三条明确提出了对生成式人工智能服务实行分类分级监管，第十六条具体指出，分类分级监管指根据生成式人工智能应用的服务场景，对应用中可能出现的风险及影响从高到低进行排序，再根据不同风险等级划定不同的监管方式。但我国目前并未提出进一步的分类分级依据和操作方法。具体到泄密风险的治理，可以针对依据模型参数量、应

②需要注意的是，在《生成式人工智能服务管理暂行办法》实施前，《互联网信息服务深度合成管理规定》曾将适用主体划分为“技术支持者-服务提供者-服务使用者”，而《生成式人工智能服务管理暂行办法》《生成式人工智能服务安全基本要求》均未对“技术支持者”和“服务提供者”进行区分。



用场景、数据敏感性实施三级分类管理。

高风险类（如政务、国防、能源领域）：强制使用国产自主框架，训练数据需全生命周期境内存储，禁止接入境外 API 服务。

中风险类（如医疗、金融领域）：实施算法备案与黑箱可解释性审查，要求输出内容嵌入不可篡改的数字水印，便于对数据的使用行为进行事后追溯。

低风险类（如教育、娱乐领域）：允许使用境外开源模型，但需定期提交安全自评报告。

## 明确大模型运行全过程的各方责任机制

责任机制是法律开展制度设计所关注的核心内容。如前文所述，我国现阶段的大模型监管文件仅提及模型服务提供者的安全责任，却忽视了大模型的技术开发者、用户在其安全保障中的作用。鉴于此，结合生成式人工智能的动态特征，建议在现有的监管体制基础上，对模型的服务提供者、技术研发者和用户作区分处理，完善基于大模型运行全过程的泄密风险安全责任机制。建立“开发者—服务提供者—用户”分级责任机制。

开发者：承担基础模型的安全审计义务，需对参数隐含风险进行第三方评估（如红队测试），高风险模型强制部署参数水印与动态混淆技术。对开源模型开发者课以“合理注意义务”，要求其针对可预见的滥用场景部署技术防护措施。

服务提供者：实施实时内容过滤与溯源机制，对 API 调用日志保存不少于三年，对高频敏感查询（如“稀土出口配额”“军事设施坐标”）自动触发风险预警。

用户：禁止通过组合提问、多轮对话等“技术性合法滥用”行为诱导输出涉密信息，违者适用《中华人民共和国反间谍法》第三十六条“非法获取国家秘密”条款<sup>③</sup>。

## 扩展国家秘密的法律内涵

现行规范体系对生成式人工智能泄密风险的规制困境，源于生成式人工智能新的技术特点与法律客体理论的错位。《中华人民共和国保守国家秘密法》以“经法定程序确定的实体化信息”为保护对象，而生成式人工智能通过其模型参数矩阵，训练输出的关联性信息、合成数据的动态衍生信息，使得国家秘密的载体逐渐变得分散<sup>[9]</sup>。可以修订《中华人民共和国保守国家秘密法》，增设“算法关联性信息”类别，将参数隐含的统计性关联、合成数据的实质性危害纳入保护范围；可以明确“通过技术手段可识别且关系国家安全的信息关联”视同国家秘密，无论其是否经过传统定密程序。出台配套司法解释，对“参数逆向工程”“诱导性提问”等大模型新型泄密行为进行类型化界定。例如，将“利用模型参数推断未公开战略部署”的行为纳入《中华人民共和国刑法》第一百一十一条<sup>④</sup>“为境外非法提供国家秘

<sup>③</sup>《中华人民共和国反间谍法》第三十六条 国家安全机关发现涉及间谍行为的网络信息内容或者网络攻击等风险，应当依照《中华人民共和国网络安全法》规定的职责分工，及时通报有关部门，由其依法处置或者责令电信业务经营者、互联网信息服务提供者及时采取修复漏洞、加固网络防护、停止传输、消除程序和内容、暂停相关服务、下架相关应用、关闭相关网站等措施，保存相关记录。情况紧急，不立即采取措施将对国家安全造成严重危害的，由国家安全机关责令有关单位修复漏洞、停止相关传输、暂停相关服务，并通报有关部门。

<sup>④</sup>《中华人民共和国刑法》第一百一十一条 【为境外窃取、刺探、收买、非法提供国家秘密、情报罪】为境外的机构、组织、人员窃取、刺探、收买、非法提供国家秘密或者情报的，处五年以上十年以下有期徒刑；情节特别严重的，处十年以上有期徒刑或者无期徒刑；情节较轻的，处五年以下有期徒刑、拘役、管制或者剥夺政治权利。

密罪”的规制范畴。在《中华人民共和国出口管制法》中增列“生成式 AI 模型参数”“多模态生成算法”为管制物项，限制或者禁止其向高风险国家或组织出口。

**技术赋能：建立涉敏涉密的闭源专用大模型**

为了既能满足国家关键行业与领域对生成式人工智能技术的需求，又要避免开源大模型被恶意利用导致涉及国家安全与国家秘密的敏感信息与重要数据泄露的风险，需要开发封闭性的应用于国防、外交、司法等涉密特殊领域的闭源“领域模型（Domain-specific Models）”。即依托生成式人工智能基础模型，依托专业知识和专门性的使用需求，通过对基础模型的精调、蒸馏、编辑等处理形成的人工智能模型，或者依托专门性知识库直接开发的特殊用途模型。涉敏涉密的闭源专用大模型法律治理需求不容忽视。第一，这些模型可能通过专门训练数据、知识推理组件、基于模型的知识编辑等方式吸纳不开放乃至保密的知识和信息，不仅泄密风险较公用模型突出，各种评估、认证、测评、审计等第三方治理机制的开展亦备受限制。第二，这些模型往往有某些性能指标的刚性约束，与公用模型的训练目标不尽相同。例如，人民法院应用的司法大模型对回答准确率有严格的要求，而不一定需要追求与通用模型同等的有效回应率<sup>[10]</sup>。对此，这些模型需要隔离式治理机制，在贯彻实施国家安全保密法律制度之余，精心界定第三方专业机构介入的边界。隔离式治理

的关键在于数据接触机会和治理能力的相对移位：测评、评估、检测、算法审计等机构不能获得敏感或秘密的真实数据，而只能基于模拟数据训练的“影子模型”进行测评，同时严格遵守保密协议，必要时进场操作，不带走影子模型和分析报告；用户需要一定程度上获得包括但不限于具备自行脱网测试、检验、解释、定位（被投毒或污染的参数、有缺陷模块等）等功能的治理工具、测评基准和风险防御能力。

**参考文献：**

[1] 季鹏飞, 华松逸, 张煜晨, 等. 军事大模型发展现状与算力基础设施需求分析 [J]. 军民两用技术与产品. 2024, (6): 36-44.

[2] 王晓冬, 李木子. 生成式人工智能滥用恶用的安全威胁及对策建议研究 [J]. 中国信息化. 2023, (11): 25-27.

[3] 冯瑞佳, 苟洋, 张考, 等. 基于人工智能的网络安全技术与应用 [J]. 网络安全技术与应用. 2024, (3): 118-121.

[4] 刘超超, 陈雪, 肖冰. 基于生成式人工智能的网络认知域安全技术 [J]. 信息安全与通信保密. 2024, (8): 41-48.

[5] 向家伟. 机械故障数值模拟驱动的生成式对抗网络及智能诊断原理 [J]. 中国科学: 技术科学. 2021, (3): 341-355.

[6] 张郅, 李欣, 叶乃夫, 等. 基于暗知识保护的模型窃取防御技术 DKP [J]. 计算机应用. 2024, (7): 2080-2086.

[7] 徐伟, 何野. 生成式人工智能数据安全风险的治理体系及优化路径——基于 38 份政策文本的扎根分析 [J]. 电子政务. 2024, (10): 42-58.

[8] 张旭芳. 生成式人工智能的算法安全风险及治理路径 [J]. 江西社会科学. 2024, (8): 90-100.

[9] 张勇, 张春雨. 数字安全视角下国家秘密的刑法保护 [J]. 河北法学. 2023, (6): 70-89.

[10] 苏宇. 人工智能的多层分支式治理框架 [J]. 探索与争鸣. 2024, (10): 18-21, 177.

**作者信息：**

**饶宇锋** 西安交通大学法学院人工智能与信息安全法律研究中心硕士研究生



在线阅读(节选)



# 机器人在口腔数字化技术中的 专利申请现状分析

■文 / 姚宇博

## 摘要

本文针对口腔机器人领域的发明专利申请数据进行了检索、分析和梳理，从专利申请发展趋势、专利申请来源地域、专利申请人及关键技术构成四个方面对专利申请现状进行了统计分析。结果显示，中国和美国为主要技术产出国，我国口腔机器人领域的申请主要集中在南方，特别是长三角地区。口腔机器人技术领域的主要申请人都为企业，口腔修复种植领域是新兴热点技术领域，为企业的专利布局和研究提供了参考。



**随**着数字化技术的不断发展，数

字化医疗已经成为医疗健康产业

发展的重要趋势，数字化技术逐渐从科研阶段转向应用阶段，医疗领域成为数字化应用集中的场景之一<sup>[1]</sup>。数字化技术也在口腔医学的不同领域日益普及，口腔数字化设备不断更新换代。机器人是一种能够半自主或者自主进行智能工作的机器，医疗是其重要的使用领域，医疗机器人通过编辑程序降低对人工的依赖，通过自动控制机器人执行任务，保证微创手术的精准操作，适用于复杂手术<sup>[2]</sup>。

口腔数字化中的机器人涉及计算机、力学、材料、医学等多个学科，能够帮助医生在进行微创手术操作时扩展视野，进行精准的导航，规划详细的手术方案，具有广阔的现代化应用前景、安全性好、使用效率高、操作稳定精准等优点，在口腔种植、颌面外科等领域应用广泛。口腔种植领域包括被动式种植牙机器人和主动式种植牙机器人，外科包括硬组织和软组织的切割<sup>[3]</sup>。口腔种植机器人通过灵活地进行精准导航和对导板进行静态的约束，实现了通过计算机精准地植入种植体，对患者口腔中的种植区域进行准确的定位<sup>[4]</sup>。目前，口腔机器人已经被广泛应用于口腔修复、正畸、牙体牙髓治疗等口腔外科技技术领域<sup>[5]</sup>。

本文以专利数据为数据样本，通过专利申请发展趋势、专利申请来源地域、专利申请人和关键技术构成等多方面，对机器人在口腔数字化技术中的专利申请现状进行了研究和分析，为相关口腔机器人企

业的专利申请布局和学术研究提供参考，从而提升口腔机器人企业的核心竞争力。

## 专利数据来源及检索

本文以 IncoPat 专利数据库作为基础数据，以牙科、口腔或牙齿卫生装置的 IPC 分类号 A61C，结合中英文关键词：口腔、牙科、机器人、stomatology、dentistry、robot 进行检索，具体限定公开截止日期为 2025 年 1 月 1 日。经过简单同族合并后，用于本文进行专利分析的专利数据共 401 项。

## 口腔机器人领域发明专利申请分析

### 发明专利申请趋势分析

如图 1 所示，全球第一件口腔机器人应用相关的发明专利申请出现在 1959 年，是一件德国专利申请，申请人为西门子公司，涉及一种牙科机器人，头部内置有每分钟 20 万转的压缩空气涡轮，驱动空气通过前滚珠轴承向下穿过钻头，并且还提供了用于钻头和治疗点的水冷却。我国第一件口腔机器人领域的相关发明专利申请出现较晚，申请于 2009 年，申请人为神农咨询股份有限公司，涉及一种手术模板制造系统，包括牙模巡航装置、机械手臂、译码器、多个刹车件、控制模块等。通过移动机械手臂测量设于牙模上的影像定位器定位牙套的对应位置，以配合软件程序处理来取得牙模与多个电脑断层影像间的

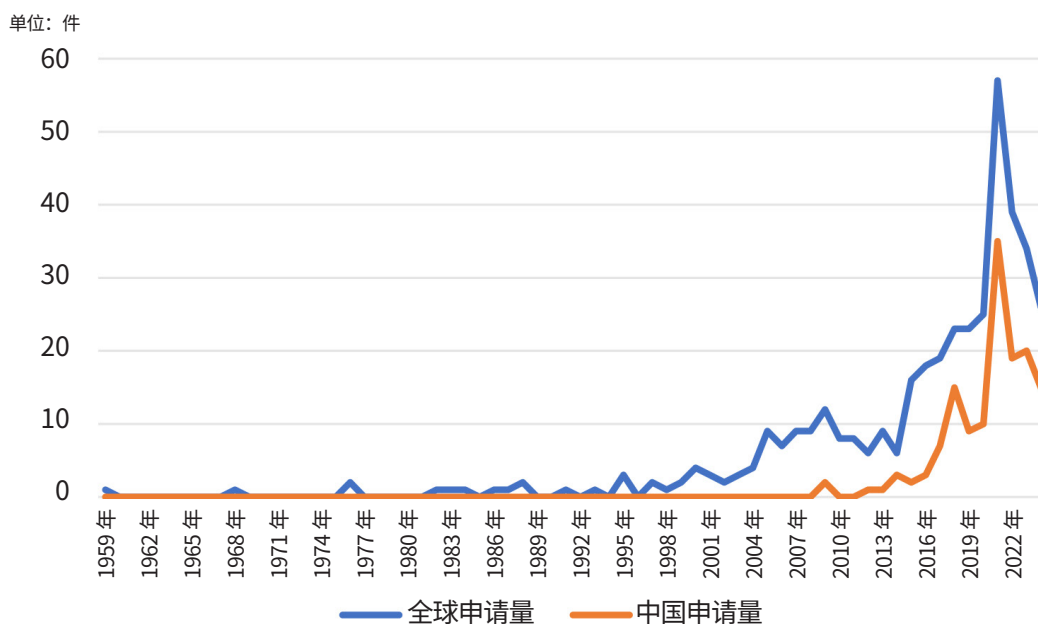


图 1 专利申请量随年份变化趋势图

定位关系，操作该机械手臂至植牙方位时，启动刹车件固定机械手臂，便于制造手术模板。这表明国外在口腔领域应用机器人等技术较早，而在我国近十几年才开始注重该领域的研究和专利申请。

全球申请量在 2009 年之前每年低于 10 件，专利申请数量较少，该领域处于缓慢发展模式，处于产业的初步发展期。2014 年后，申请量翻倍到每年两位数，专利年申请量进入迅速增长的态势，在 2021 年达到全球专利申请的顶峰，年申请量达到 57 件。2022 年以后，专利年申请量有所回落，但仍然维持在 30 件左右。而我国口腔机器人领域的专利申请起步较晚，在 2009—2017 年间专利申请量均处于个位数，在全球占比低于一半甚至三分之一。2017 年后，我国该领域技术开始进入迅猛发展态势，在 2018 年和 2021 年达到两个

小高峰，占比超过全球申请量的一半甚至更多，在 2021 年达到最高峰 35 件。我国在近 4~5 年，申请量跃居全球第一，表明我国开始重视知识产权保护，并且在该领域的科研水平发展迅速。

### 专利申请来源地域分析

虽然全球第一件口腔机器人应用相关的发明专利申请出现在德国，但是中国和美国仍然占据该领域全球专利申请量的前两位，中国和美国的应用量差别不大，中国比美国稍多一些，申请量位居全球第一，达到 142 件。中美加起来占据口腔机器人领域全球 66.5% 的专利申请量，这也与中美两国在全球相关领域的科研水平相关。从图 2 右边国内地域的分布来看，发明专利申请量最大的是北京，占比 6%，达到 25 件，排名第二和第三的是浙江和江苏。

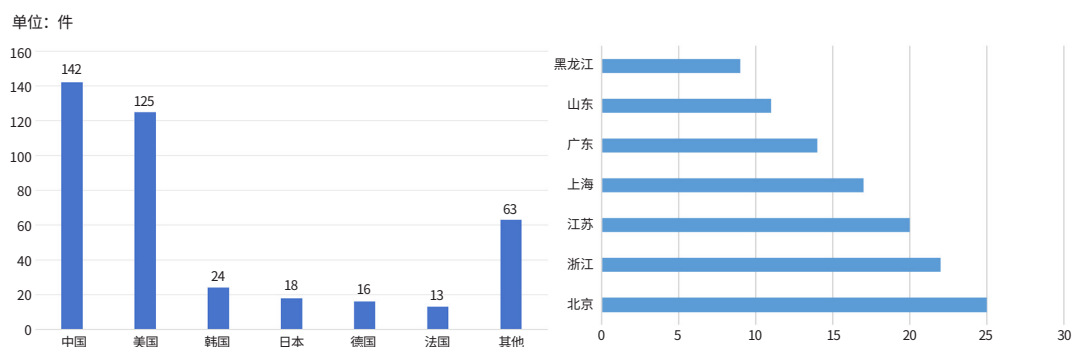


图2 专利全球及中国地域分布情况

国内各省市的申请量分布较为均衡，前四名除了北京外，浙江、江苏和上海都属于长三角地区，可见在全国口腔机器人领域的申请主要集中在长三角地区，这也说明了北京和长三角地区等经济发达省市的研发实力更强，更重视知识产权的保护和专利布局。

### 申请人申请量分析

图3显示了对口腔机器人领域申请人的分析结果，专利申请量排名前十的申请人都来自中国和美国，这也和图2专利全球地域分布情况相符，中国和美国占据该领域的绝对领先地位。其中，雅客智慧（北京）科技有限公司和美国巴奥米特（BIOMET）集团公司申请量并列全球第一，都申请了12件；浙江工业大学和美国NEOCIS公司申

请量并列全球第三，都申请了9件发明专利。口腔机器人技术领域的主要申请人都为企业，前十名的申请人中有八家企业和两所高校，高校为浙江工业大学和华南理工大学，八家企业中国内企业有五家、美国企业有三家，这说明机器人在口腔领域中的产业化程度比较高，有很多企业投入研发资金进行研发并且申请专利。

对口腔机器人技术领域排名前列的申请主体进行研究发现，排名全球第一的雅

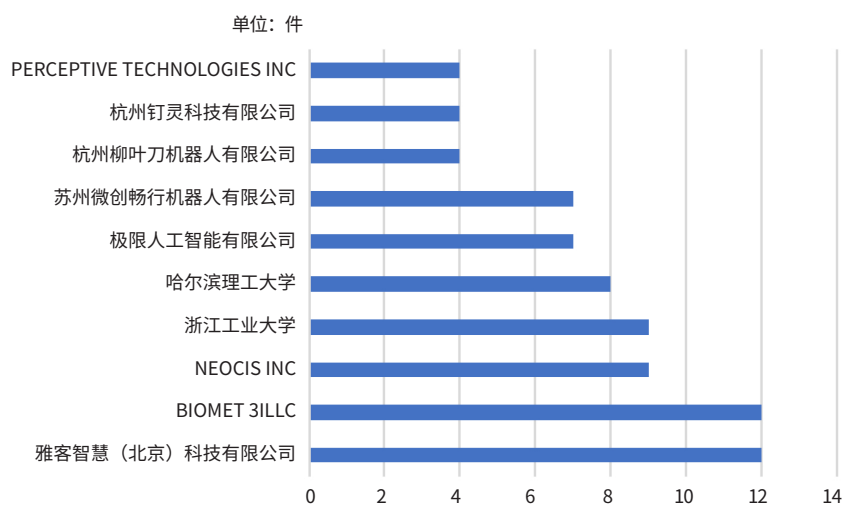


图3 口腔机器人领域前十名申请人及其申请量排序



客智慧（北京）科技有限公司是一家专注于口腔数字医疗的前沿科技企业，专门从事医疗机器人产品研发、生产、销售和售后服务，涉及计算机软件、机械设计与制造、机器人智能控制、口腔临床医学等众多相关领域。雅客智慧的第一件口腔机器人领域申请出现在 2018 年，涉及一种基于力反馈信息的辅助种牙系统和方法，口腔种植机在机械臂的带动下进行牙齿钻孔操作，力传感器实时采集口腔种植机的钻孔力，根据力传感器的反馈信息自动控制机械臂的进给速度，可以实现安全可靠的自动钻孔，进而可以提高手术的可靠性。该公司申请的 12 件口腔机器人的发明专利，其中有 8 件都已获得授权，2 件还在审查过程中，授权率很高，而且 100% 都维持有效，表明雅客智慧公司的专利维护很好且申请质量很高。该公司的专利布局主要集中在牙科种植机器人方面，包括种牙钻孔控制系统、钻孔路径纠正方法和系统、种植体窝洞制备系统，以及植入精度测试装置和方法等方面。

申请量全球第三的美国 NEOCIS 公司是一家总部位于美国迈阿密的牙科手术机器人公司，成立于 2009 年。NEOCIS 是全球第一家牙科机器人公司，其主要产品是 Yomi，这是牙科领域第一个，也是唯一一个获得美国食品药品监督管理局（FDA）批准的机器人手术系统，该系统通过软件进行术前规划，并在术中提供手术器械的导航引导。该公司第一件口腔机器人领域申请出现在 2015 年，涉及用夹板装置，形成基准标记用于外科机器人导

航系统和相关方法，于 2022 年获得授权。NEOCIS 公司的专利布局与雅客智慧公司有所不同，NEOCIS 公司主要布局在外科机器人、外科手术导航系统、牙科钻孔或切割技术等方面。

### 关键技术构成分析

国内外的口腔机器人专利申请中的核心技术，涉及口腔修复种植、计算机辅助外科学和外科手术导航系统、牙科辅助用具、牙科钻孔或切割机械、牙科假体及其制造等方面。

其中，口腔修复种植领域是在口腔机器人相关专利技术中近年来新兴且专利申请量占比最大的技术领域之一。申请量位居全球第一的美国巴奥米特（BIOMET）集团公司于 2015 年就开始在该领域进行专利布局，其专利（US20160157964A1）涉及一种用于牙科手术过程中的机器人装置，在全球被引用 34 次，涉及 6 个 IPC 小组，应用领域广泛，曾有过专利诉讼和转让行为，在 8 个国家和地区申请专利布局，专利价值度高。该发明的机器人系统具有接地臂，接地臂的第一端耦接至基座，接地臂的第二端被构造成联接到患者口中的固定结构，接地臂的第二端相对于基座具有至少六个自由度；工作臂的第一端从基座延伸，工作臂的第二端被构造成与一个或多个在牙科手术过程中使用的工具联接，所述工作臂的一部分相对于所述基座具有至少六个自由度，并且可移动，以在患者口中的骨中形成开口，以及将牙植入物安装在所述开口中；还包括一个或多个传感器，

用于监视接地臂和工作臂的位置，传感器生成用于创建患者嘴的至少一部分的术后虚拟三维植入物水平模型的位置数据。

国内口腔修复种植领域价值度最高的一件发明专利由中国人民解放军第四军医大学于 2017 年申请，2022 年转让给了雅客智慧（北京）科技有限公司，2024 年获得授权。该专利（CN107582193A）涉及用于口腔种植手术的机器人系统，实现对种植器械路径和方位的精确控制；通过力反馈系统和骨质分析专家诊断系统，可以很大程度上提高种植体种植的成功率，提高了准确性和稳定性，同时加入了安全策略，使得机器人系统的安全性大大提高，为机器人种植体顺利植入创造了良好的条件。

计算机辅助外科及手术导航领域的专利申请量仅次于口腔种植领域，例如专利 US20160213433A1，该申请在全球被引用 52 次，涉及 5 个 IPC 小组，在 5 个国家和地区申请专利布局，涉及一种用于提供第一对象和第二对象的引导相对移动的方法，包括获得所述第一对象和所述第二对象的 3D 模型，并从所述 3D 模型导出所述第一对象和第二对象之间的第一优选相对布置，使用 3D 扫描仪扫描所述第二对象的至少一个区域，并根据 3D 扫描的结果确定第一对象和第二对象的当前相对排列；计算用于实时校正相对运动与优选路径的偏差的信息；提供所述第一对象和第二对象朝向所述第一优选相对布置的相对运动，其中所计算的信息用于引导来自当前相对布置的相对运动。

综上所述，从上文对机器人在口腔数

字化技术中的专利申请发展趋势、专利申请来源地域、专利申请人及关键技术构成等多方面进行分析来看，中国和美国占据口腔机器人领域的领先地位，在全国口腔机器人领域的申请主要集中在南方，特别是长三角地区。口腔机器人技术领域的主要申请人都为企业，该技术领域的关键技术涉及口腔修复种植、计算机辅助外科学和外科手术导航系统、牙科辅助用具、牙科钻孔或切割机械、牙科假体及其制造等方面。针对上述分析，对口腔领域的机器人数字化提出如下建议：1）加强口腔医学与 AI 技术、大数据、力学等多领域学科的融合，促进智慧医疗、精准医疗的全面发展；2）提高高校及科研院所在该方向的研发能力及创新水平，加强校企合作和企业之间的多领域国际化合作，提高专利成果的转化及产业化水平。

### 参考文献：

- [1] 郭英胜等，数字化和人工智能技术在口腔医学中的应用进展 [J]，中国现代医生，2024（31），121-125.
- [2] 王梓佳等，口腔数字化诊疗技术的应用现状与趋势 [J]，中华老年口腔医学杂志，2024（5），301-305.
- [3] 李明瑶等，口腔外科医用机器人的研究与应用现状 [J]，医疗卫生装备，2024（7），86-93.
- [4] 罗之琳等，口腔种植机器人的精度及应用现状 [J]，口腔医学研究，2024（11），950-955.
- [5] 赵梦雨等，口腔种植机器人的应用现状与研究进展 [J]，机器人外科学杂志，2024（4），727-733.

### 作者信息：

姚宇博 国家知识产权局专利局专利审查协作  
北京中心助理研究员



在线阅读（节选）

# 解码深圳人形机器人产业链 “突围秘钥”

随着人工智能、传感器等软硬件技术的突破迭代，我国人形机器人迎来“爆发式”增长。摩根士丹利（Morgan Stanley）发布的《人形机器人 100：绘制人形机器人价值链图谱》梳理了全球人形机器人产业链中的百强上市公司，中国共有 35 家企业上榜，其中仅深圳市就贡献 7 家。

近年来，作为“科技第一城”的深圳，在推进技术融合创新、加快应用场景落地等方面持续发力，积极构建具身智能机器人产业创新生态。数据显示，深圳市机器人厂商供应链的本地化率已超六成，仅南山区就集聚了超过 200 家人形机器人产业链上下游企业及机构，产业链集聚效应优势凸显。在此背景下，机器人全产业链链接会（FAIR plus）的举办，将为推动我国机器人产业开发配套与智能制造能力走向世界，贡献新的更大力量。

本期智能论坛前瞻探索 FAIR plus 的精彩内容，深度解析其中涌现出的新技术、新产品、新模式，揭示深圳在人形机器人浪潮中把握机遇、引领变革的“突围秘钥”。





P36 毕亚雷：FAIR plus 2025 为创新之城构筑机器人产业“强支撑”

P41 途见科技：电子皮肤塑造机器人智能体

P47 谐波减速器破局：透过同川科技看深圳硬科技的“核心革命”

P52 小丝杠大产业，掀开机器人核心零部件的“深圳名片”

P57 提升工业机器人精度的关键路径——基于激光跟踪仪的机器人结构标定技术





# 毕亚雷：FAIR plus 2025 为创新之城构筑机器人产业“强支撑”

■文 / 王莉莉

## 引言

“智造”正在开辟全球经济动能的增量空间。深圳坚持制造业立市之本，扶植机器人产业茁壮成长、领跑全国，产业产值已突破千亿规模，近三年的年复合增长率超过战略性新兴产业的平均增速。FAIR plus 2025 落地深圳，将进一步优化当地创新创业生态环境，接续释放机器人产业园区“磁场效应”，为深圳科技产业全域增彩。



**深**圳由“三来一补”起步，逐步成长为全球知名的科技创新中心，构建了涵盖电子信息、先进制造等领域的完整产业体系。当前，深圳品类全、响应快、韧性强的产业链为机器人产业的发展培厚创新沃土，不计其数的优质中小企业扎根深圳，在控制器、伺服系统等关键领域研制出竞争力强的技术产品，一批“瞪羚”“独角兽”“小巨人”企业争相崛起于深圳。

中国科学院深圳先进技术研究院校企合作与创新发展处处长、深圳市机器人协会副理事长兼秘书长毕亚雷剖析道，深圳机器人产业一路向上的背后是强大的产业链、制造链能力，也是机器人应用场景不断拓展、韧性生长的鲜活印证。2025 年 4

月 24 日开幕的“机器人全产业链峰会”（FAIR plus 2025）有望成为机器人全产业链最大规模召集的盛会之一，精准帮扶中小企业优势互补、技术互通、模式互鉴、场景互融。

## 科学施策、与时俱进的深圳信号

战略性新兴产业是我国培育发展新动能、打造发展新优势的关键领域。深圳主动服务国家战略，着眼于产业成长性，合理规划“20+8”产业集群布局，提出到 2025 年，战略性新兴产业增加值超 1.6 亿元，同时打造形成 4 个万亿级、4 个五千亿级、一批千亿级产业集群的整体目标。



图 1 中国科学院深圳先进技术研究院校企合作与创新发展处处长、深圳市机器人协会副理事长兼秘书长毕亚雷



“20+8”产业集群 2.0 版本在 1.0 版本的基础上动态调整集群门类，将“机器人产业集群”列为基础支撑类战略性新兴产业集群，将“智能机器人”列为 5~10 年内产业规模实现倍数级增长的未来产业。此外，高性能材料、智能传感器、半导体与集成电路、智能网联汽车，以及人工智能等机器人相关上下游产业都被重点关注。

常年服务深圳机器人产业，关注鼓励每一家优质中小企业，深圳市机器人协会为市级政策落地提供了深入透彻的建议参考。毕亚雷介绍，深圳市机器人协会常年承担机器人集群的战略咨询，针对各行政区机器人集群培育，依据产业基础及优势，导入资源，促进区域错位与协同发展。

## 协同创新、跨域创新的深圳打法

深圳市机器人协会充分吸收各技术领域优质企业作为会员，引导各类创新主体

持续加大研发投入，为企业打造最好的科技创新生态，推动技术创新和产品迭代升级。

为引导产业链协同创新，深圳市机器人协会从市场拓展业务入手，策划“智能机器人进百业”等多场产业对接活动，组织多家企业与终端用户方进行技术交流和方案推介，在逐渐积累大量终端用户资源的同时，帮助会员企业拓展市场。

沿用产业对接模式，2025 年 4 月 24 日至 26 日，深圳市机器人协会将在深圳会展中心（福田）7-8 号馆举办“机器人全产业链对接会”（FAIR plus 2025）。在活动现场，协会策划组织二十余场闭门对接会议，邀请有合作能力的上游厂家、整机厂家与终端用户做场景研讨和技术互通会议，以共同投入的心态，促成产业链协同创新，提升深圳机器人产业整体竞争力。

深圳全方位打造技术创新策源地和新质生产力孵化器，得益于完备的机器人产业链和响应速度快的优势，深圳企业得以在跨技术领域的舞台上施展拳脚。例如，



深圳嘉立创科技股份有限公司是电子和机械产业链的一站式服务供应商，通过产业互联网整合资源，嘉立创实现了低成本、快速的打样生产，将打样周期缩短至最快12小时。2023年，嘉立创营收约70亿元，其打样服务广泛服务于华南地区人形机器人企业。

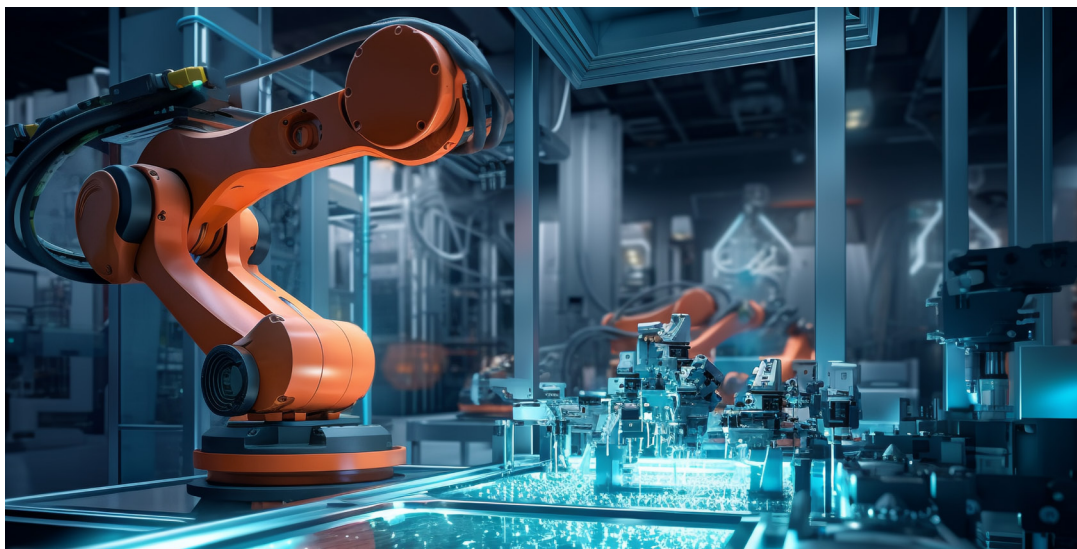
作为“外贸第一城”，深圳制造业体系外贸成分含量高，深圳机器人企业能够在短时间内签下并交付大规模直接订单，赢得海外客户的信任和青睐。面对日益复杂的外部环境挑战，众多深圳机器人企业纷纷将目光投向亚太、欧美、北美等市场，而泳池清洁机器人、割草机器人、铲雪机器人等产品的研发先驱也早已在深圳崭露头角。过往几年，深圳本土诞生了富士康和比亚迪这样的国际龙头企业，与之配套的机器人系统集成等自动化行业也得到了充分带动。毕亚雷介绍道，深圳的出海政策相对宽松优越，吸引了全国相当数

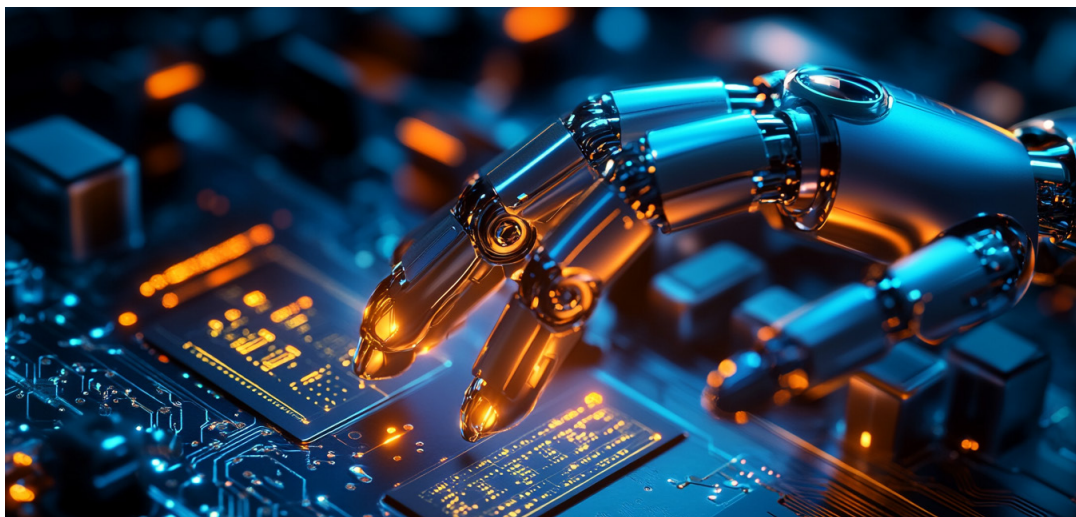
量的机器人头部厂家将其出海板块设立在深圳。深圳市机器人协会召集超400家的大规模海外买家团前来参加FAIR plus 2025，现场还将有超100家机器人全产业链企业参与，为机器人企业提供与海外买家面对面交流的机会，助力国内企业开拓海外市场。

## 辐射全国、走向海外的深圳

### 自信

当前，我国机器人产业虽然已经发展超过10年，但工业机器人的渗透率仍不足10%，其他应用领域渗透率更低。毕亚雷解释道，这源于机器人的产品成熟度不够，很多产品导入沦为工程项目，例如人形机器人虽然应用需求广泛，但在技术实现、成本控制和能力积累等方面还存在诸多问题。FAIR plus 展会正是针对这些问题，致力于为机器人开发阶段的技术交流





与创新提供平台。

基于对机器人产业发展趋势的深刻洞察，深圳市机器人协会为 FAIR plus 展会规划出“全产业链链接”的定义。这一概念的用意在于充分发挥深圳在机器人产业链上的优势，打造一个全方位、深层次的产业交流与合作平台。毕亚雷介绍道，“plus”的含义深远，旨在展示机器人成熟产业链，并引导更多成熟产业链进入机器人领域。同时，FAIR plus 展会致力于拉通和探讨人工智能与机器人融合中存在的技术瓶颈和产业环节，进一步拓展和论证机器人应用的更多可能性和更优方案。与上海工博会、世界机器人大会等同类展会相比，FAIR plus 2025 突出了对机器人产业链上游技术和零部件的重视，有利于促进产业链上下游企业之间的深度交流与合作。毕亚雷介绍，FAIR plus 2025 精心策划，定向邀请了超过 150 家企业进行实物展示，其中四分之三为上游零部件模组厂商，涵

盖机电、控制、AI 模型等关键领域，以及周边配套服务与代工厂；剩余四分之一则展示了整机及人形机器人等高端开发平台。此次盛会还将带来一系列创新机器人产品的首次亮相，助力参展企业提升品牌影响力，抢占市场先机。

此次盛会也是向全世界展示机器人全品类的硬件选购会，更是深圳在全球标杆城市建设背景下，充分展现其机器人硬件制造优势的重要平台。深圳市机器人协会邀请终端场景方、整机厂家连同技术提供方共赴盛会，借 FAIR plus 2025 的契机，搅动深圳新质生产力互通、创新、跃升的一池活水，推动机器人产业以“智”赋能、提质增效，构建更开放、更协同的机器人技术社区，向全球输出中国机器人产品的整体制造能力。

#### 作者信息：

王莉莉 本刊副社长



在线阅读(节选)

# 征订



## 《机器人产业》

《机器人产业》是聚焦于机器人、智能制造、人工智能等领域的产经评论杂志。杂志由工业和信息化部相关部门主管，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)有限公司主办，2015年3月正式出版，双月刊，单月出版。

《机器人产业》杂志以“智能才是机器之道”为理念，践行“探索产业升级之路，寻求效率提升之径”的宗旨，服务于机器人产业的决策者，努力为机器人产业内的政府机构、企事业单位、大专院校、科研院所、产业开发区架设沟通的桥梁。



## 《人工智能》

《人工智能》杂志由工业和信息化部相关部门主管，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)有限公司主办。

围绕人工智能领域，关注产业政策，报道研究前沿，传播技术趋势，刊载应用案例，推动成果转化，服务我国制造业转型升级发展。

### 期刊定价

单期定价60元，全年6期，共360元。  
接受全年期刊预订。

### 《机器人产业》 扫码订阅



### 《人工智能》 扫码订阅



咨询邮箱: wangwu@ccidmedia.com

咨询电话: 010-88558777



公益广告



中国梦  
唱响绿色主旋律

中宣部宣教局 中国文明网

40-B 机器人产业 | ROBOT INDUSTRY



# 途见科技： 电子皮肤塑造机器人智能体

■文 / 李轲昕

## 引言

随着蛇年春晚上人形机器人大热，机器人技术被舆论和资本的狂潮掀举到前所未有的高度，相关配套技术与产业也相继闯入人们的视野。如同人的神经末梢，电子皮肤是机器人向类人化进步的重要武装，决定着机器人是否能够胜任人类生活中众多精细操作型的任务。



可以感知病人体表温度和湿度的医疗护理机器人在医院普及，能够精细修型、打磨的机器人成为修文物节目的常驻嘉宾……这些或许都是未来机器人走入生活的缩影。当下，人机交互技术行至半途，复杂环境深度感知能力成为机器人迈向未来的关键卡点。

传统触觉传感器是离散、块状的刚性结构，往往是非连续地覆盖在机器人凹凸不平的本体表面，存在感触盲区，而且很难实现多种参量的融合感知。在弯曲和拉伸的情况下，容易出现一致性降低的状况，甚至是电路故障和信号中断。此外，机器人和接触面“硬碰硬”时，容易损坏触觉传感器，从而造成经济损失。如果精密的

传感设备像人的皮肤一样覆盖在体表，机器人感知周围环境的综合能力和经济效益都将大幅提升。

2025年1月，备受全球电子科技产业瞩目的国际消费类电子产品展览会（CES 2025）在美国拉斯维加斯开幕，来自全球各地的参展者在现场触摸了途见科技有限公司（以下简称“途见科技”）自主开发的可拉伸多模态柔性电子皮肤，为它的柔软和真实所惊讶。展台上，途见科技与合作伙伴深圳兆威机电股份有限公司共同开发的高自由度触觉感知灵巧手，向机器人行业内外人士展示了电子皮肤落地应用的生动实践。

这两家企业都在我国创新之城——深



图1 搭载电子皮肤的五指灵巧手





图 2 电子皮肤助力人机触觉交互

圳落地扎根。在电子皮肤等机器人产业前沿技术大规模应用的前夜，深圳设立百亿 AI 和机器人产业基金，鼓励优质中小企业焕发创新驱动力，持续加强国产机器人关键组件的扶持力度，结合 FAIR plus 2025 等国际展会的平台优势，多家具身智能及配套技术企业崭露头角，科技创新和智能制造越来越成为深圳提振经济的新质引擎。

## 电子皮肤填补具身智能产业最后一块拼图

电子皮肤是一种可模拟人类皮肤感知能力且具备柔性延展性的薄膜系统，可用

于智能机器人手指、手臂等部位，赋予机器人复杂的触觉感知能力和精准的抓握控制，实现智能人机交互和机器与环境交互。

依赖敏感材料的创新、传感器集成技术的发展、柔性电子技术的研发和智能算法的应用，电子皮肤技术融合了材料科学、微电子和生物学三大学科，能实现或超越人类皮肤的传感功能。

工业检测领域，清华大学团队开发的仿生三维电子皮肤，其压力分辨率达 0.1mm，可精准识别产品表面微裂纹或装配压力偏差，已应用于半导体晶圆检测场景，较传统人工抽检效率提升 90%；特种装备领域，清源创新实验室研发的 TENG-gel 电子贴片，集成温度 / 应力双

重监测功能，可嵌入消防服实时感知火场热辐射强度与装备结构形变，当温度超过阈值时通过电信号预警，已在模拟火灾测试中实现 96% 的报警准确率；智慧医疗领域，南科大团队开发的柔性触觉系统可实时监测创面愈合情况，为医生提供精准数据，助力伤口管理，还可用于假肢感知增强，使残疾人能更真实地感受到外界刺激，提高生活质量。随着技术不断进步，电子皮肤正为人们的生活带来更多便利和福祉。

然而，电子皮肤仍是工业界的新事物，大多停留在实验室研发阶段，市面上相关产品难得一见。途见科技为国内首批掌握电子皮肤核心技术，并将电子皮肤投入工业应用落地的公司，推出一系列已转化或

待转化的科技成果，填补我国柔性传感领域的技术空白和产业空白。

### 电子皮肤将迎来“iPhone 时刻”

据统计，2024 年，中国机器人灵巧手市场销量约为 0.57 万只，而到 2030 年，这一数字有望突破 34 万只，全球机器人灵巧手市场规模预计将达到 30.35 亿美元。这无疑为电子皮肤提供了广大的应用空间。

为提高电子皮肤与灵巧手产品的适配程度，途见科技创始人赖建诚告诉记者，公司研制的柔性电子皮肤追求极致的灵敏度与精度，检测最小触觉信号可达 1 mN

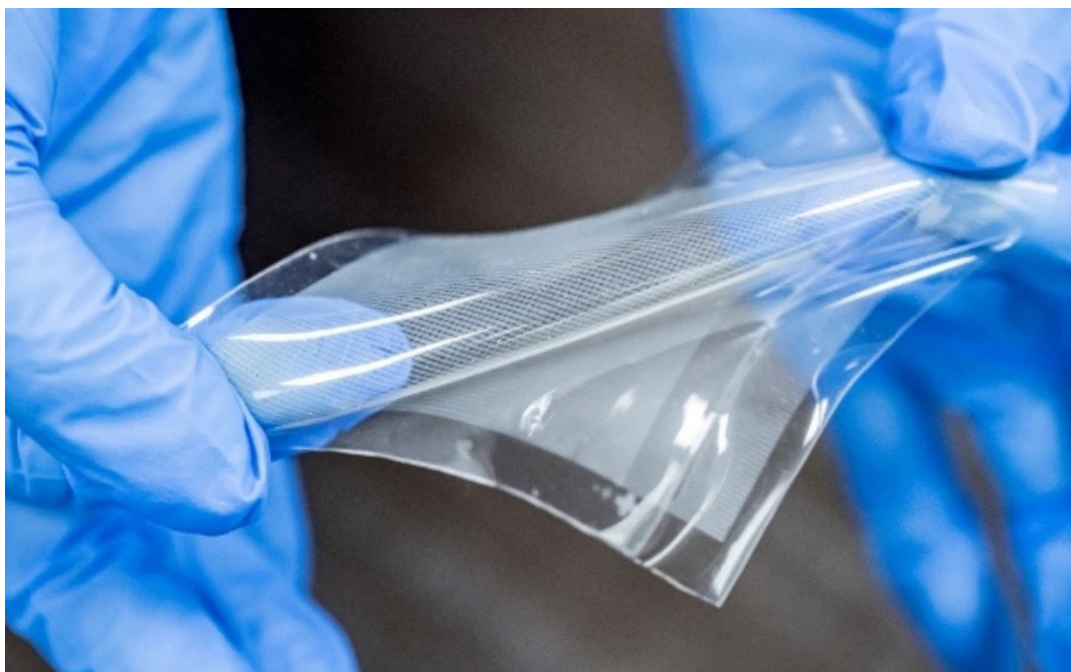


图 3 柔性可拉伸电子皮肤

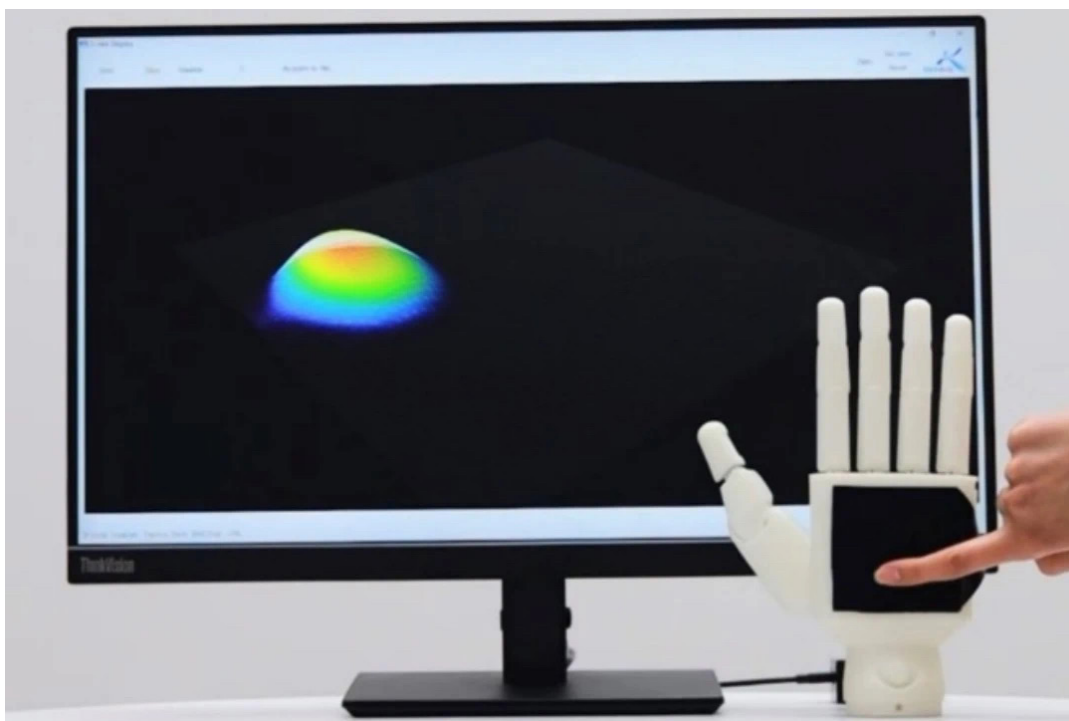


图 4 灵敏丝滑的电子皮肤触感体验

级，触觉感知的空间分辨率可达亚毫米级（ $<0.5\text{ mm}$ ），相比传统硅基传感器可更精准地识别更精细的触觉信息。同时，途见科技研制的电子皮肤具有相当高的可靠性和稳定性，采用高耐久性柔性导电材料，可适应百万次弯折、拉伸和变形；利用高信噪比信号处理算法，可有效抑制温度漂移和材料老化，保持长期可靠的触觉感知能力。由于柔性电子皮肤能够适应不规则表面，实现大面积、可定制化贴附，相比传统单点或局部触觉传感器，能更全面地覆盖机器人或智能设备表面。

应用市场的风向往往能启发技术的演变。得益于人形具身智能机器人产业的快速发展，赖建诚预计电子皮肤技术将向多

模态信息融合、高精度触觉反馈，以及高适配性和耐用性等方位升级。鉴于此，途见科技将不断进行技术迭代，拓展感知维度，开发震动、温度、质地感知等功能。结合 AI 信号处理技术，实现人机交互反馈的细致入微。更新低功耗、无线化设计，甚至构建自我修复功能，提高电子皮肤在母设备中的适用性和可持续性。

随着具身智能产业形态跃升，不仅服务机器人和协作机器人，人形机器人、新能源智能座舱、可穿戴外骨骼机器人等产业也将成为柔性传感技术的重要应用阵地，辅助产品衍生出新型竞争力，将智能惠及到生活的方方面面。赖建诚表示，团队将柔性传感技术应用辐射至多个应用领



域，已构建成熟的电子皮肤触觉感知系统、灵巧手及机器人整机触觉感知系统、智能交互手套触觉感知系统、智能座舱空间人机交互感知系统等产品体系，为迎接电子皮肤“iPhone 时刻”做好准备。

## 驻扎于智能制造产业链高地

作为中国电子皮肤产业的重要聚集地，深圳已形成涵盖上游材料、中游制造及下游应用的完整产业链。例如，深圳瑞华泰薄膜科技股份有限公司是全球高性能聚酰亚胺（PI）薄膜专业制造商，生产的耐原子氧 PI 薄膜具有极佳耐候性、介电性和柔韧性，广泛用作机器人柔性传感的基底材料。受益于深圳传感器产业集群的壮大发展，中游封装厂和下游需求商星罗棋布，既满足高集成度电子皮肤的制造需求，又为终端市场提供了更快的产品落地路径，充分展现了深圳从材料研发到终端落地的协同优势。

深圳具备供应链高度集成的优势，可大幅缩短技术产品化周期。在深圳，代工厂可在 2 周内完成柔性电子元件的原型试制，相比其他城市可节约 30%~50% 的时间成本，柔性传感器封装测试厂同样效率颇高，能在 1 个月内完成小批量生产，方便公司展开市场验证。大批量产阶段，深圳的自动化生产线可实现柔性电子皮肤的快速大规模制造，使成本降低 30% 以上。同时，深圳聚集大量高科技人才，为企业持续吸引有理想的团队成员。开放的市场环境和靠近港澳的地理优势，也让企业对

接国际市场更加便利。

## 向国际平台释放合作信号

深圳是开放之城、创新之城、活力之城，科技大厂和优秀科技中小企业荟萃一堂，机器人厂商供应链的本地化率已超六成，仅南山区就集聚了超过 200 家人形机器人产业链上下游企业及机构。2025 年 4 月 24 日至 26 日，深圳市机器人协会联合国内外学界领袖、业内精英、行业组织等共同创办的“机器人全产业链峰会”（FAIR plus 2025）盛大开幕。该展会陈列机器人全产业链前沿技术与开发资源，为前来参展者打造专业的交流合作平台。

在深圳双链协同优势的引领作用下，FAIR plus 2025 倡导机器人可以从“工具”角色向“智能体”转变，带动机器人产业生态向智能化纵深发展，奏响人工智能和机器人两大前沿学科融合发展、走向世界的咏叹调。途见科技受邀参展，计划首次公开展示适用于具身智能机器人领域的可拉伸柔性电子皮肤，真诚寻求志同道合的技术合作方和行业应用落地伙伴。

赖建诚希望，FAIR plus 2025 能够招徕大量跨领域合作伙伴，在创新之城呈现机器人、人工智能、柔性电子、智慧医疗等产业联动创新、强链补链的良好局面。

### 作者信息：

李轲昕 本刊编辑



在线阅读(节选)

# 谐波减速器破局：透过同川科技看深圳硬科技的“核心革命”

■文 / 刘政鑫

## 引言

以全球领先的制造业为支点，深圳正加速锻造具有全球标杆意义的机器人产业创新策源地。聚焦机器人产业的发展关键，深圳市机器人协会携手产业链上下游企业，打造“机器人全产业链链接会”（FAIR plus 2025），推动中国机器人产业开发配套与智能制造能力走向世界。



**被**誉为“中国硅谷”的深圳，因其全球顶尖的电子制造与机器人产业链集群，成为孕育创新种子的沃土。政策红利持续释放，创新活力不断加持。作为中国机器人产业的核心集聚区之一，深圳的上下游企业密集，形成需求牵引与技术联动的双重优势。依托这一优势，深圳市机器人协会举办 FAIR plus 2025，旨在整合资源，推动核心零部件攻关，构建具身智能基座。

福田实验室聚焦具身智能感知与决策，光明实验室提供昇腾算力应用，深圳已经构建起“基础研究+技术攻关+成果转化”的全链条创新体系。滚动开放的超50个机器人应用场景，支持企业快速验证产品性能。从核心技术到配套产业，深圳正加速布局机器人赛道，呈现一场属于未来产业的科技盛宴。

## 产业沃土辐射千亿版图

深圳这座城市不仅为企业提供澎湃的

科创动能，更以全方位的政策扶持体系为企业赋能，从研发补贴到税收优惠，从固定资产补助到人才引进奖励，为企业构筑坚实的成长阶梯，辐射整个珠三角的千亿级机器人市场版图。

这片机器人产业沃土为深圳的企业带来了全方位的支持。创新磁场持续释放虹吸效应，深圳这座中国科技创新的前沿灯塔，孕育出优必选、越疆科技等在全球技术版图开疆拓土的旗舰企业。顶尖人才群星汇聚，智慧火花在鹏城绽放，推动企业构筑跨学科研发的立体矩阵，带动技术发展、创新。产学研深度融合的生态蓬勃生长，深圳大学城、中国科学院深圳先进院、南方科技大学、鹏城实验室等高校、科研院所，在精密传动、智能材料等尖端领域提供全方位支持。

市区两级政府打造机器人产业政策矩阵，借力研发专项补贴与税收递延优惠等制度创新，为科技企业开辟全生命周期发展的绿色通道。依托粤港澳大湾区战略支点的地缘优势，企业既能经香港枢纽对接





国际认证体系，又可整合粤港澳大湾区要素资源。从跨境资本活水到智造应用场景，锻造出攻守兼备的多维竞争优势，深圳在全球的资源配置枢纽地位日益凸显。

深圳市机器人协会等组织推动产业链协同，驱动产业链从单兵突进到军团作战的战略转型，携手核心零部件、算法、整机、系统集成、机器人生产设备等各环节企业，形成紧密协作的 FAIR plus 2025 这一机器人全产业链技术和开发资源平台，实现产业链上下游高效联动。作为全国机器人产业高地，深圳依托密集的上下游企业网络，形成需求牵引与技术创新的双重飞轮效应。

## 从“工业”到“人形”的“深圳方案”

从工业机器人的批量落地、应用，再到人形机器人大火，IP 深圳的机器人新闻持续不断。在机器人技术不断进步的今天，深圳俨然已成为机器人技术的创新高地。聚焦机器人产业发展，核心零部件如减速

器、伺服电机等国产化率的提升和技术创新是关键所在。早在 2011 年，深圳便以前瞻视野发布全国首个机器人产业五年规划，剑指精密减速器、伺服系统等“卡脖子”技术的突破。深圳市科技创新局发布的《深圳市具身智能机器人技术创新与产业发展行动计划（2025—2027 年）》支持谐波减速器等核心零部件的技术攻关。“揭榜挂帅”“项目经理人制”等模式推动技术研发，提供研发补贴、首台套应用支持及场景开放，资金与资源倾斜，助力企业快速实现技术转化。

如今，深圳机器人产业链条已基本建设完备，基础技术实力充足，培育出一批细分领域、细分赛道的优秀机器人企业，成立于 2012 年的深圳市同川科技有限公司（以下简称“同川科技”）就是其中的代表。同川科技市场总监史源介绍，谐波减速器作为机器人产业链的核心部件，在轻负载、高精度、小体积场景中具有不可替代性，尤其在人形机器人、协作机器人等领域占据核心地位，传动关节和执行器则是工业机器人的核心部件。



图 1 同川科技高性能工业旋转执行器 HRA、SRA 系列



图 2 同川科技江门工厂

作为全球电子信息和先进制造高地的深圳，贯通上下游的智能制造产业集群，规模化的高精度数控机床与模具制造企业集群，为谐波减速器核心部件提供高精度加工保障。本地供应链网络覆盖高强度合金钢基材、热处理设备、检测仪器等关键生产要素，降低企业采购成本，缩短交付周期；丰富的工业自动化企业提供自动化产线设计与集成服务，助力谐波减速器企业提升生产效率和产品一致性。

史源表示，对谐波减速器、机器人关节、执行器的生产制造而言，深圳不仅原材料供应稳定，更具备需求迭代速度领跑行业的敏捷响应机制。区域内形成的立体化物流通道，从样品空运的“‘T+2’极速达”到集装箱海运的“周内达”，这种端到端的产业配套能力，正持续赋能国内硬科技企业构筑全球竞争优势。

## 自鹏城起飞，开全球视野

同川科技自 2012 年创立之初，便以工业自动化领域为起点，深耕非标自动化及冲压机械手领域——彼时正值深圳及珠三角制造业自动化需求呈现井喷态势，同川科技凭借敏锐的行业嗅觉，乘势而上在时代浪潮中崭露头角。史源介绍，基于深圳的产业积淀，同川科技在 2015 年开启战略转型，将研发重心转向机器人核心部件领域，与城市创新脉搏同频共振。

在传统谐波减速器的生产制造方面，同川科技已取得自主知识产权的 3D 共轭双圆弧齿形，能够提供较高传动精度和一万小时以上的精度保持寿命，振动和声音表现都较传统齿形更小，具有代差级的优势。所有自制零件采用先热处理后硬加工的工艺，零件尺寸变化小，一致性高，



图3 同川科技低压执行器 TCM 系列

自主热处理，批次差异可控。制齿环节采用先进的车齿工艺，平均单件加工时长 1.5 分钟，形成成本优势。

同川科技自研的协作机器人关节模块，只需要简单的拼装即可组装成一台标准协作机器人。史源介绍，在人形机器人应用方面，同川科技正在研发中的新型谐波减速器，通过结构设计将做到重量更轻、体积更小、输出扭矩密度更高，满足人形机器人对于关节轻量化、小型化的需求。TCM 系列低压模组从 11 型到 32 型可以覆盖绝大部分人形旋转关节需求。

作为谐波减速器核心应用领域，工业机器人、协作机器人厂商的生产基地主要集中于中日两国，这使得同川科技的传统

市场开发天然具备国际化基因。同时，面对人形机器人这片蓝海市场，同川科技正着力构建全球产业版图，不仅与英国头部家电企业建立联合研发机制，完成样机交付，更打入北美人形机器人供应链体系，稳定占据核心传动部件席位。史源表示，

“通过本次 FAIR plus 2025，同川科技与许多业内同仁进行技术上的交流探讨，初步达成合作意向。通过现场产品展示，增产品牌曝光，也让更多机器人企业认识同川、了解同川。”

#### 作者信息：

刘政鑫 本刊编辑



在线阅读(节选)



# 小丝杠大产业，掀开机器人核心零部件的“深圳名片”

■文 / 宣叶卉

## 引言

深圳作为我国智能机器人的核心聚集地，既拥有乐聚、众擎、优必选等机器人整机企业，也拥有威远精密、同川科技等核心零部件企业。硬核科技生态群擎动湾区产业升级，深圳的创新势能正在其中奔涌如潮。今年4月，FAIR plus 2025 将发出全球场景下属于核心零部件领域的“深圳强音”。



**深**圳作为全球科技创新与智能制造的标杆城市，以国际化合作网络、全球级物流枢纽和全链条产业生态构筑的核心优势，为企业的全球化战略注入强劲动力。

依托前海深港现代服务业合作区、自贸试验区等战略平台，以及世界级港口群与宝安国际机场编织的立体物流体系，企业可无缝对接海外客户需求与供应链资源，推动智能机器人产品辐射全球市场。ITES 深圳工业展、CITE 深圳电博会，以及即将启幕的“机器人全产业链峰会”FAIR plus 2025 等行业盛会，为深圳搭建了技术展示、商贸对接的全球化舞台。

## 机器人产业迎来“深圳范式”

高标准市场体系是一流营商环境的重要体现，深圳以创新要素集聚地、营商环境示范城的独特禀赋，为企业成长注入澎湃

新动能，并作为深圳改革前沿阵地首创了“四位一体”营商生态系统，以市场化配置资源、法治化保驾护航、国际化接轨标准、便利化提升效能，打造极简审批模式，构建知识产权全链条保护网，为企业锻造成本洼地与创新极地，持续释放产业跃升势能。

在“深圳范式”赋能下，机器人产业正以高效协同的创新链条加速成果转化，研发补贴、税收优惠、人才引进等多重政策红利，产学研协同创新机制，形成强大合力，推动机器人产业核心技术突破。集聚产业链技术与开发资源，FAIR plus 在深圳应运而生。聚焦机器人核心零部件领域，从控制系统、伺服系统、传感器到一体化关节，都将呈现在本次 4 月 24—26 日的 FAIR plus 2025 这场产业盛事中。共襄盛举，推动产业链上下游深度对话；聚焦成果，海外专业买家团与行业用户响应召集，核心零部件领域企业得以发现新







图 1 威远精密深圳宝龙总部基地

机遇。

硬核科技生态群擎动湾区产业升级，深圳的创新势能正在其中奔涌如潮。精密智造的生态矩阵、全要素耦合的智造体系，助力行业企业构筑从核心部件智造到系统集成创新的全链条闭环，让本土机器人军团冲刺全球高端装备价值标杆。

在这片创新热土上，百万市场主体正在激荡无限可能。既有专精特新“小巨人”崭露锋芒，又有全球化企业布局未来。政策红利的持续释放叠加“深圳智造”的国际口碑，让本土机器人企业既能深耕粤港澳大湾区腹地，更可借力数字丝绸之路，将智能解决方案输往全球，实现技术跃迁与市场拓疆的双重突破。

## 人形机器人带动核心零部件发展

发展机器人产业既需要全产业链协

同推进，更要在核心零部件领域实现突破性进展。自 2022 年特斯拉人形机器人 Optimus 首次在关节模组中引入行星滚柱丝杠以来，滚动功能部件的热度也因此高涨。

滚动功能部件凭借高精度、高刚性、低摩擦、长寿命等优势，发挥着至关重要的作用。其中，滚珠丝杠副可实现高精度运动控制，传动效率达 90% 以上，适应高速高加速度工况，结构紧凑且可定制，广泛应用于智能制造、医疗、3C 电子等领域。随着机器人行业快速发展，核心零部件国产化成为产业升级的重要方向。同时，人形机器人大火使国内厂家对滚动功能部件需求日益迫切。

深圳凭借完整的人形机器人产业链、高效创新环境、强大的智能制造能力、完善的供应链、国际化优势和政策支持，成为滚动功能部件企业发展的理想基地。

深圳的智能制造供应链体系具备超精



密加工、表面处理、智能检测等能力，能够快速响应市场需求，实现定制化生产和规模化制造。依托自由贸易区、全球展会平台和国际物流枢纽，深圳为企业提供便捷的出海通道，助力国产走向全球。深圳不断推动机器人产业升级，促进企业技术迭代和市场拓展，涌现了一批优秀的核心零部件企业，成立于1995年的深圳市威远精密技术有限公司（以下简称“威远精密”）就是其中之一。

## 立足深圳，“小巨人”推动自主可控

威远精密总经理李敬宇博士介绍，深圳对威远精密的发展意义重大。自创立以来，威远精密顺应时代发展，跟随深圳改革发展前行的脉搏，在深圳这片沃土，耕耘创新，不断发展。

现在，威远精密积极响应深圳政府“工厂上楼”的召唤，在深圳宝龙“专精特新”产业园购置近万平方米厂房强化总部功能。还在安徽滁州设有两个生产基地，形成华东、华南双布局。华东滁州基地专注

规模化生产，华南深圳基地聚焦定制化服务、高附加值产品及技术研发。依托深圳的创新生态和高端制造资源，加速高精度滚动功能部件的升级迭代。深圳作为企业发源地和技术高地，持续助推威远精密在全球市场保持领先，推动行业高质量发展。

当前，我国滚动功能部件制造水平已显示出中国力量。国内企业在高精度滚珠丝杠副、逆向自循环滚珠丝杠副等核心技术上取得突破，部分产品达到国际先进水平，并应用于航天器、舰船、无人机、机床、工业自动化、新能源、医疗器械等行业。

然而，与海外工业强国相比，在超精密加工、材料工艺、表面处理、长寿命测试等方面仍有差距。尤其在微型丝杠副、精密执行机构、超长寿命产品等领域需进一步攻关。李敬宇博士强调，部分高端材料、核心零部件如高精度轴承钢、精密加工设备等仍依赖进口。虽然人形机器人需求推动滚动功能部件发展，但市场规模效应尚未形成，克服浮躁心态，倾心致力攻克微型化、高精度制造、本土化发展、标准化等难题。



图2 威远精密研发生产的滚珠丝杠副



图3 威远精密研发生产的行星滚柱丝杠副



图 4 威远精密安徽生产基地

作为国家级专精特新“小巨人”企业，威远精密依托深圳宝龙（高端研发）和安徽滁州（规模制造）双基地布局，提升了国产高端滚珠丝杠技术水平，推动国内机器人核心零部件自主可控进程。以滚动功能部件为核心产品，面对人形机器人、协作机器人、新能源车、医疗设备等领域对高精度滚珠丝杠副产品的持续需求，威远精密研制出逆向自循环滚珠丝杠和具身机器人用直线驱动器。

逆向自循环滚珠丝杠副的主要特点是滚珠在螺母体内循环，摩擦系数小、结构紧凑、重量轻、传动效率高达 85%、能耗低、续航能力强，显著提高了执行精度和长期稳定性，是目前国内最小规格能够量产的滚珠丝杠副产品，是人形机器人的灵巧手最佳替代品。

李敬宇博士表示，本次在深圳召开的 FAIR plus 2025，对威远精密而言，不仅是展示技术和产品，获得订单，通过会中的技术沙龙、社区培育、供需对接，可以发掘自身与场景方深度融合的潜力，还可以借助活动平台拓展海外业务，增强竞争力，为未来的发展奠定基础。

过往十年，我国机器人产业蓬勃发展。作为迄今为止全球最大的机器人市场之一，我国出品的核心部件亦得到了产业规模化的验证。像威远精密这样的深圳企业正在机器人产业中扮演关键角色，推动我国自主化产品在全球市场屹立。

## 作者信息：

宣叶卉 本刊特约撰稿人



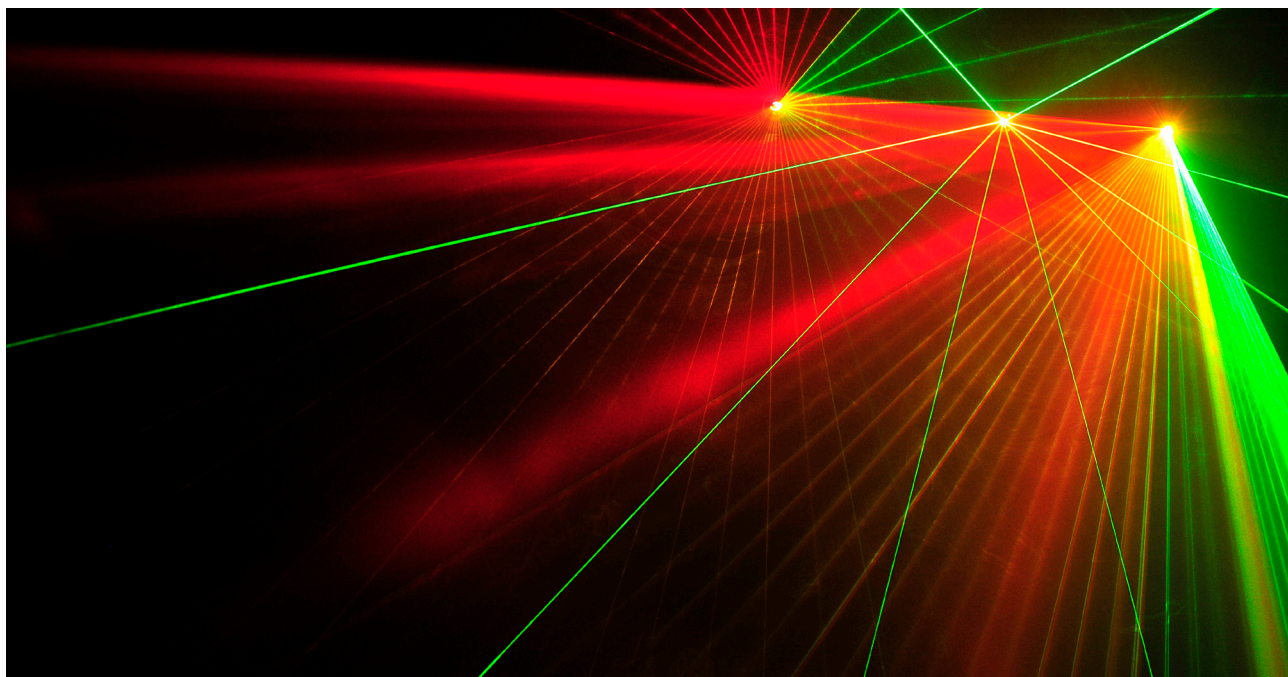
在线阅读(节选)

# 提升工业机器人精度的关键路径 ——基于激光跟踪仪的机器人 结构标定技术

■文 / 苗立晓

## 引言

在制造业智能化升级的浪潮中，工业机器人正面临精密加工、半导体封装等高精尖领域对毫米级定位精度的严苛挑战。针对传统机器人标定技术存在模型灵敏度不足、参数辨识效率低等行业痛点，深圳市华成工业控制股份有限公司创新推出“基于激光跟踪仪的机器人结构标定技术”，该技术在华为光总线项目、腾讯数字孪生等项目中成功应用。





**控**制系统是机器人的“大脑”，决定了机器人的智能化水平和执行任务的精度。为此，深圳市华成工业控制股份有限公司（以下简称“华成工控”）提出一种“基于激光跟踪仪的机器人结构标定技术”，可以有效提升机器人的运动控制精度，更好地应对工业自动化带来的挑战。

华成工控是国内具有代表性和权威性的控制系统开发商，向市场持续输出创新技术和先进产品，“基于激光跟踪仪的机器人结构标定技术”就是其中之一。2025年4月24—26日，华成工控将亮相“机器人全产业链峰会”（FAIR plus 2025），与产业链上下游汇聚一堂，开启合作共赢的新篇章。

## 引言

在制造业高端化、智能化、绿色化转型的浪潮中，工业机器人作为核心生产装备，其定位精度成为影响产品质量与生产效率的关键因素。华成工控聚焦这一痛点，开展“基于激光跟踪仪的机器人结构标定方法”项目研究，致力于突破机器人精度提升的技术瓶颈，为产业升级注入强劲动力。本文将深入剖析该项目的技术原理、创新成果、应用实践及行业影响，探寻其在工业机器人精度提升领域的关键价值与发展潜力。

## 工业机器人精度需求与现状剖析

### 高精度定位的重要性

在电子信息、新能源、高性能医疗器

械等前沿制造领域，产品制造工艺对精度的要求近乎严苛。以高精度工件打磨为例，微小的定位偏差可能导致工件表面粗糙度不达标，影响产品外观与性能；精密点胶环节中，点胶位置的误差会使电子产品的电气连接不稳定，降低良品率。工业机器人高精度定位是确保产品质量一致性、提高生产效率、降低生产成本的核心要素，直接关乎企业在高端制造市场的竞争力。

### 现有精度水平的局限

当前，在高精度作业场景下，人工与半自动化生产方式仍占据主导。人工操作受限于人体疲劳、技能差异等因素，难以保证稳定的高精度作业；半自动化设备虽部分提高了生产效率，但在定位精度上仍存在较大提升空间。工业机器人因装配、制造过程引入的运动学误差，致使绝对定位精度难以满足高端制造需求，成为制约产业发展的关键短板。

## 华成工控项目核心技术解析

### 运动学辨识模型创新

基于串联多连杆运动学理论，华成工控研究团队构建基础 DH 模型，通过齐次变换矩阵描述基坐标系到末端的位姿关系。深入剖析发现 DH 模型存在参数奇异性和易变形问题，微小偏差可能引发参数突变，影响模型准确性。为解决这一难题，团队创新提出 MDH 模型，优化模型参数，确保运动学参数的完备性，降低模型对微小偏差的敏感性，为后续精确标定奠定坚

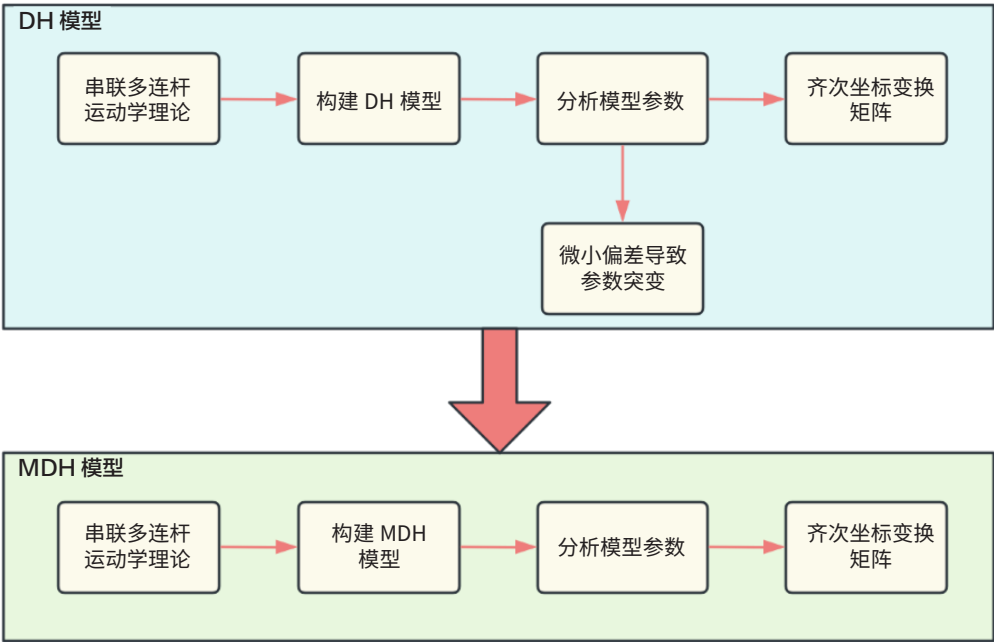


图1 建立机器人完备运动学参数

实基础。

同时，团队聚焦“机器人完备运动学参数”关键技术，建立最小参数集模型。通过合理筛选和精简运动学参数，在不损失关键信息的前提下，大幅降低运动学辨

识的复杂度，提高参数辨识效率与准确性，使机器人运动学模型更加简洁高效。

### 误差模型深度研究

结合运动学模型与微分变换法，华成

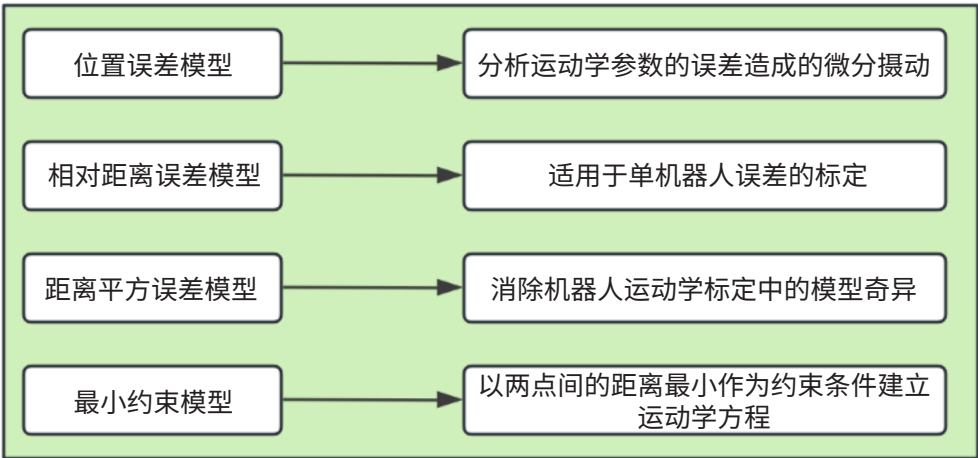


图2 分析误差模型的适应性

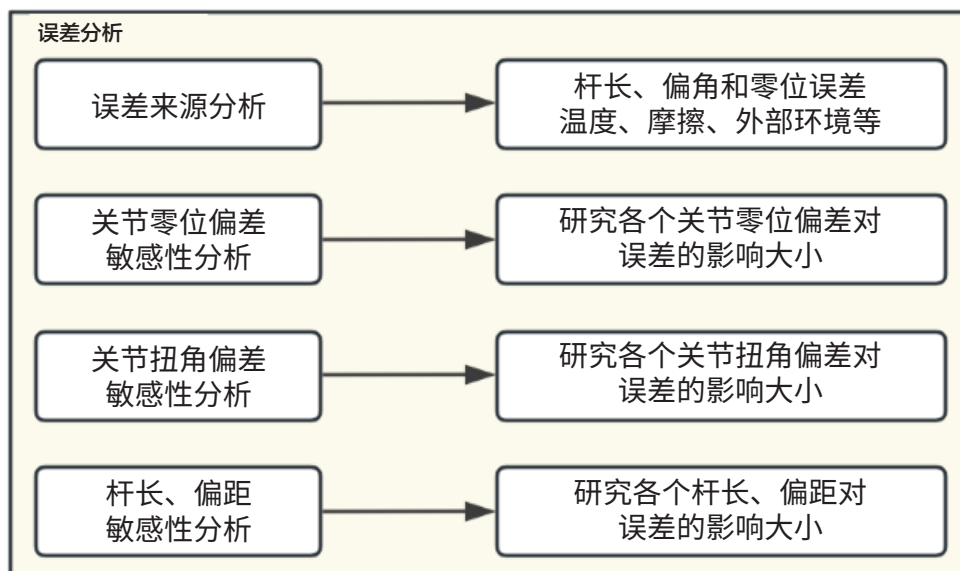


图3 研究运动学参数误差主要来源

工控推导出雅可比矩阵，并据此建立多种适用于机器人标定的误差模型。位置误差模型用于分析运动学参数误差导致的微分扰动，直观反映参数变化对机器人末端位置的影响；相对距离误差模型针对单机器人误差标定场景，能够精准测量机器人各关节间相对距离的误差；距离平方误差模型则有效消除机器人运动学标定中的模型奇异问题，确保标定过程的稳定性和可靠性；基于牛顿迭代识别的距离和距离平方差最小约束模型，以两点间距离最小为约束条件构建运动学方程，进一步优化标定精度。

通过对比分析不同误差模型的特点与适用场景，团队精准提取出最适合机器人标定的误差模型，为实现高精度标定提供了有力的理论支撑。在实际应用中，根据机器人的作业环境、精度要求等因素，灵

活选择合适的误差模型，能够显著提升标定效果。

### 运动学参数误差分析

全面剖析运动学参数误差来源，涵盖温度、摩擦、外部环境等外部因素，以及杆长、偏角、零位误差等内部因素。针对各关节零位偏差、扭角偏差、杆长和偏距等参数，开展敏感性分析，绘制误差分布曲线。研究发现，部分关节零位偏差对机器人末端位置误差影响较大，在标定过程中需重点关注和修正；杆长和偏距的微小变化也会累积导致显著的定位误差。通过精准确定对运动学误差产生主要影响的参数，为优化标定策略、提高机器人结构精度提供了关键依据。

在实际操作中，根据误差分布曲线，对关键参数进行重点监测和调整，能够有



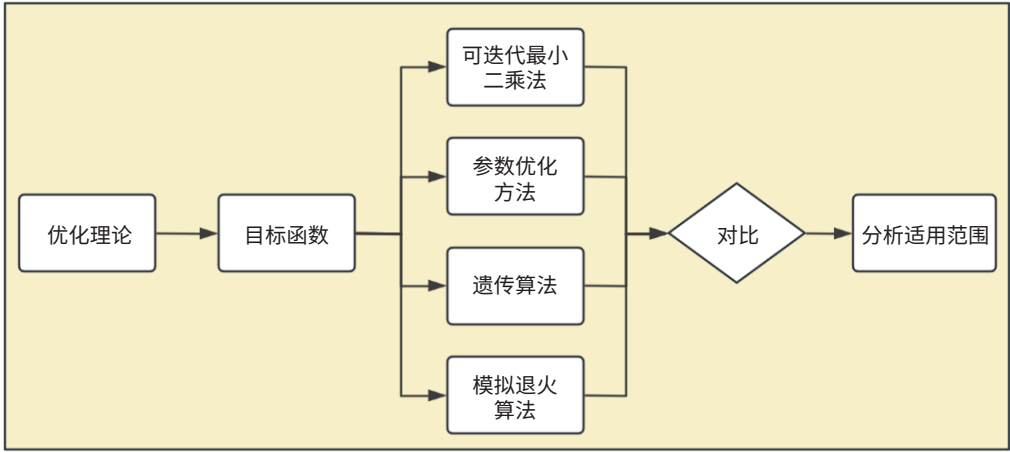


图 4 研究不同辨识算法的补偿效果

效降低误差积累，提升机器人整体精度。

人在复杂工况下仍能保持高精度运行。

### 参数辨识方法优化

对多种参数辨识方法进行深入研究，对比可迭代最小二乘法、遗传算法、模拟退火算法等的优劣，分析其对辨识结果的影响。最终选择可迭代最小二乘法，并结合项目需求进行优化。该方法通过对采集数据的多次迭代计算，逐步逼近真实参数值，有效提高了参数辨识的准确度。同时，团队创新性地提出基于自适应遗传算法的测量点位生成方法，根据机器人运动学特点和标定精度要求，智能生成最优测量点位，大幅减少测量时间和工作量，提高标定效率；构建基于卡尔曼滤波的位置估算方法，对激光跟踪仪采集的位置数据进行滤波处理，有效消除机械振动、环境噪声等干扰因素导致的位置偏差，确保数据的准确性和稳定性；提出基于冗余参数剔除的运动学参数辨识方法，在降低扰动误差的同时，提高参数辨识的准确性和鲁棒性，使机器

### 华成工控研发实力与项目支撑

#### 综合实力强劲

华成工控是运动控制技术、工业机器人系统和驱控一体领域的领军企业。自成立以来，华成工控专注于技术研发与产品创新，于 2021 年成功挂牌新三板，展现出强大的资本实力与发展潜力。华成工控拥有 10,000 平方米的现代化办公场地，为研发、生产和运营提供了充足的空间。华成工控员工近 200 人，其中研发人员占比近半数。高素质的研发团队为项目提供了坚实的智力支持，确保技术创新持续推进。

#### 技术积累深厚

华成工控在工业控制领域深耕多年，积累了丰富的技术成果。在高精度伺服电批控制、高能量密度伺服驱动器设计、基

于力触的人机协作、基于激光仪的机器人参数标定、基于机器视觉的快速识别定位、多轴驱控一体控制器设计、基于机器学习的机械臂未知环境自适应轨迹规划，以及基于力反馈的多关节机器人高速高精度运动控制等核心技术领域取得突破，并获得多项 CE 认证，涵盖 EC 通用系列、机器人一体柜、伺服电批、低压伺服产品等。截至目前，华成工控拥有知识产权近 1000 项。这些技术成果为“基于激光跟踪仪的机器人结构标定方法”项目提供了坚实的技术储备，促进了项目的快速推进和技术创新。

## 广泛的应用案例与合作

华成工控的产品广泛应用于多个行业，机器人锁附工作站、格力冲压联机生产场景、浙江朗成科技车床自动化等项目都取得显著成效。此外，华成工控与华为、比亚迪、格力、腾讯等知名企业开展深度合作，参与华为光总线项目、腾讯云数字孪生项目等。通过与行业巨头的合作，华成工控不仅能够及时了解市场需求和行业发展趋势，还能借助各方优势资源，加速项目成果的转化和应用，提升项目的市场价值和行业影响力。

在腾讯云数字孪生项目中，华成工控利用其先进的机器人标定技术，为数字孪生模型提供高精度的机器人运动数据，实现了虚拟与现实场景的高度匹配，提升了生产过程的可视化和智能化水平。

## 先进的研发仪器与测试平台

为确保项目研究的科学性和准确性，

华成工控配备了先进的研发仪器和测试平台。FARO Vantage-E 激光跟踪仪作为核心测量设备，具备高精度、高速度的测量能力，能够实时获取机器人末端的位置信息；视觉锁附测试台、码垛测试台、打磨测试台、点胶测试台等专业测试平台，模拟不同的工业应用场景，对机器人在实际作业中的性能进行全面测试；EFT 测试台、温湿度测试箱、静电测试台等辅助设备，用于测试机器人在不同环境条件下的稳定性和可靠性。这些先进的仪器设备和测试平台为项目研究提供了有力的技术支持，保障了研究成果的质量和可靠性。

在标定测试过程中，利用 FARO Vantage-E 激光跟踪仪对机器人末端位置进行高精度测量，结合测试平台收集的数据，能够准确分析机器人的运动学误差，为标定算法的优化提供精准数据支持。

## 项目预期成果与社会效益

### 显著的技术指标提升

项目致力于实现机器人标定技术的重大突破，预期标定后绝对定位精度提高 70%，大幅提升机器人在高精度作业场景中的应用能力；标定时间控制在 20 分钟以内，显著提高生产效率，减少设备停机时间；实现标定流程自动化，降低人工操作成本和误差，提高标定结果的准确性和一致性。标定完成后生成详细的结果报告，为机器人后续维护和优化提供重要依据。

在实际应用场景中，以某电子制造企业的精密点胶工序为例，采用华成工控

的标定技术后，点胶位置精度从原来的  $\pm 0.1\text{mm}$  提升至  $\pm 0.03\text{mm}$ ，产品良品率从 85% 提高到 95% 以上，生产效率提高了 30%，有效降低了生产成本。

### 丰富的学术成果产出

项目预期在知识产权方面取得丰硕成果，计划申请知识产权不少于 10 项，其中发明专利不少于 2 项、实用新型专利不少于 3 项、软件著作权不少于 5 项。这些知识产权成果不仅是项目技术创新的重要体现，还将为公司在机器人标定领域构筑坚实的技术壁垒，提升公司的核心竞争力。同时，项目研究过程中形成的技术论文和研究报告，将为行业技术发展提供理论参考和实践经验，推动机器人标定技术的学术研究和产业应用不断向前发展。

### 积极的社会效益贡献

作为机器人控制系统的关键配套软件，项目成果在一定程度上填补了机器人标定软件的空白，为下游本体厂商制造更精密的机器人提供有力技术支撑，促进机器人产业整体升级。项目实施过程中，预计新增就业人员不少于 10 人，其中培养工程师 3 名、技术人员 5 名、研究生 2 名。通过人才培养，为机器人产业发展注入新鲜血液，提升行业整体技术水平和创新能力，推动产业可持续发展。

## 行业应用前景与展望

### 拓展高端制造应用边界

随着制造业向高端化迈进，对工业机

器人精度要求持续攀升。华成工控的机器人结构标定技术为高端制造领域带来了新的解决方案。在航空航天零部件加工中，高精度的机器人标定能够确保复杂曲面零件的加工精度，提高零部件的装配精度和可靠性；在半导体制造领域，满足芯片制造过程中对光刻、封装等环节的超高精度定位需求，推动半导体产业技术升级。机器人标定技术还可应用于精密模具制造、医疗器械制造等行业，助力企业突破精度瓶颈，提升产品质量和市场竞争力，拓展工业机器人在高端制造领域的应用边界。

### 助力产业智能化升级

在工业 4.0 和智能制造的大背景下，机器人作为智能化生产的核心设备，其精度的提升对于实现生产过程的智能化、自动化至关重要。华成工控的标定技术与人工智能、大数据等技术深度融合，能够实现机器人的自主感知、自主决策和自主调整。通过实时监测机器人的运动状态和误差数据，利用人工智能算法进行分析和预测，提前调整机器人参数，确保机器人始终保持高精度运行。这将极大地提高生产系统的智能化水平，减少人工干预，降低生产成本，提高生产效率和产品质量，推动整个制造业向智能化、柔性化方向升级。

### 推动行业技术革新

华成工控的项目成果为机器人标定技术领域树立了新的标杆，其创新的技术方法和理念将激发行业内其他企业和研究机构的创新热情。通过技术交流与合作，推



动机器人运动学模型优化、误差补偿算法改进、测量设备升级等相关技术的不断发展。行业内将形成良性竞争和创新氛围，促使更多企业加大研发投入，共同攻克机器人精度提升的技术难题，推动整个机器人产业技术水平的不断革新和进步。

## 结论

华成工控“基于激光跟踪仪的机器人结构标定方法”项目，凭借其在技术研发、项目实施、成果转化等方面的卓越表现，为工业机器人精度提升提供了创新解决方案。项目成果不仅满足了高端制造领域对机器人高精度定位的迫切需求，还将推动机器人产业智能化升级和技术革新，创造

显著的经济效益和社会效益。随着技术的不断完善和应用领域的拓展，该项目有望在机器人产业发展中发挥更为重要的作用，成为推动制造业高质量发展的关键力量，引领工业机器人精度提升技术迈向新的高度。

FAIR plus 2025 是一场展示机器人开发技术的盛会，针对产业环节定向邀约做实物展示的企业超 150 家。与华成工控相似，以控制系统为代表的核心零部件企业将汇聚一堂，交流切磋，为全球制造业的智能化转型贡献中国智慧和方案。

## 作者信息：

**苗立晓** 深圳市华成工业控制股份有限公司项目负责人



在线阅读(节选)



# 从追赶到引领： 我国机器人产业十年蝶变

■文 / 刘京运



## 引言

从实验室的技术突破到工厂车间的智能升级，再到万家灯火的智慧服务，我国机器人产业用十年光阴书写了一部催人奋进的创新史诗。这十年，我们见证了核心技术从受制于人到并跑领跑的历史性跨越，目睹了行业应用从点状落地向多元场景的全面绽放，亲历了产业生态从单一布局到系统融合的华丽转身。这场以技术变革为引擎、应用场景为舞台、生态重构为根基的产业革命，不仅改写了全球机器人的创新版图，更在智能时代的浪潮中刻下了鲜明的中国坐标。

2025年春节刚过，各地相继召开“新春第一会”，加紧向改革创新施策发力，机器人屡屡成为关注焦点。楚才系列人形机器人展示会在湖北武汉“高调”举办，“劳动者”“神农”“天问”等10款人形机器人集中亮相，湖北省委书记王忠林、省长李殿勋亲临现场，与人形机器人现场互动；广东省委书记黄坤明主持召开人工智能与机器人产业发展座谈会，强调推动广东人工智能与机器人产业发展加力提速、成群成势，加快构筑高技术、高成长、大体量的产业新支柱。似乎在一夜之间，机器人迅速成为各地抢抓机遇、重点布局的关键。

“九层之台，起于累土”机器人现象级“破圈”非一日之功。回望十年前，我国刚坐稳全球第一大工业机器人市场的宝座，彼时协作机器人方兴未艾，以清洁机器人为代表的服务机器人快速兴起，家庭娱乐用途的无人机受到广泛欢迎，骨科机器人、胶囊机器人等医疗智能装备在部分重点医院投入临床，国内机器人企业多点开花，但“小、散、弱”等问题突出，技术创新力和产业竞争力仍较为薄弱。

昔日荒滩起大厦，今朝云端筑星河。中国科学院院士乔红表示，我国机器人技术已经得到飞跃式发展，和国际先进水平的距离显著减少。从2024世界人工智能大会上的“十八金刚”人形机器人阵列，到2025年北京举办全球首场人形机器人半程马拉松，我国以人形机器人为代表的高精尖技术成果，已经具备比肩世界一流的能力和水平。

从追赶到引领，我国机器人产业过去十年实现了跨越式发展，高端化、智能化迈出坚实步伐。一批概念样机突破实验室藩篱，走向商业化市场；一批成熟产品融合创新技术，迈向多元化场景。机器人产业成果丰硕、亮点突出、特色鲜明。

### 创新突围：从进口依赖到自主可控的逆袭

我国高度重视机器人产业发展。2014年，习近平总书记在中国科学院第十七次院士大会、中国工程院第十二次院士大会上强调，我们不仅要把我国机器人水平提高上去，而且要尽可能多地占领市场。十年砥砺前行，我国机器人产业实现了由小变大、从优到强的历史性飞跃。减速器、控制器、伺服电机等“三大件”的国产化取得瞩目成绩；多模态感知、自然语言交互、自主决策等整机关键能力得到显著提升。机器人已成为我国培育新质生产力、推进新型工业化的重要抓手。

在工业机器人领域，减速器是附加值最高的关键零部件之一，日本企业长期占据市场主导地位。近年来，以绿的谐波为代表的国内减速器研发制造企业，在原材料研究、零部件粗加工、精密加工和整机装配等主要制成过程实现了自主可控，有效打破国外垄断，产品性能稳步提升。以精密谐波减速器为例，国内产品的性能已经比肩国际先进水平，促使国外产品平均单价腰斩，对加快国内机器人整机研制企业降本增效起到积极的推动作用。



控制器被誉为工业机器人的大脑，是实现智能制造的核心要素。长期以来，以发那科为代表的日本厂商在控制器领域占据主导地位，国内厂商研发起步晚、技术水平低，综合竞争实力处于弱势。近年来，新松机器人、广州数控、华中数控等国内控制器领军企业快速崛起，逐步实现自主研发，核心零部件受制于人的局面得到缓解。目前，北京、深圳、芜湖、宁波等地形成了较为完善的机器人产业生态，在控制器等关键零部件领域培育了一批优势企业。

人形机器人的“破圈”，让伺服电机再度成为机器人产业关注的焦点。以仿生灵巧手为例，在抓取鸡蛋等易碎物品时，动作要既精准又稳定，因此对伺服电机的性能要求，较工业场景提高了数倍。早期，伺服电机市场一直是外资品牌主导。近年

来，以鸣志电器、拓普集团、汇川技术等企业为代表的国产厂商，推出了一系列性能出色的电机产品，逐渐走出国门，呈现百家争鸣之势。

应用变革：从单点开花到全面追赶的演进

当前，我国已成为全球最大的机器人应用市场，广阔的市场孕育了一批优秀的本土企业。数据显示，截至2024年12月底，我国共有45.17万家智能机器人产业企业，注册资本共计64,445.57亿元，企业数量较2020年底增长206.73%，较2023年底增长19.39%，呈稳健增长态势。新兴企业不断催化机器人产业变革，加速迭代机器人的形态功能，推动机器人的社会角色持续演变。曾经受限于钢铁网笼之中的机器人，



如今已发展成为柔性可交互的人类助手。

工业机器人的发展和应用历史长，大多数人对机器人的初始印象都源于此。早期，工业机器人主要是在防护网或警戒线内，按照既定程序执行动作，不需要理解和交互，单调执行重复任务。随着传感器和人工智能的发展，工业机器人结合多模态融合技术，逐渐具备环境感知、路径规划和自主决策能力，以协作机器人为代表的产业“新秀”异军突起。协作机器人实现了与人类的近距交互，显著降低了机器人的部署成本，提高了企业的柔性生产能力和水平。此后，协作机器人进一步拓展应用场景，在商超、餐饮等服务领域同样实现了创新应用。

扫地机器人曾是服务机器人的代名词，其商业化的繁荣成为国产服务机器人快速崛起的生动写照。从激光导航到多传感器融合导航，从人工清洁到自清洁，从扫拖一体到机械臂加持，国产扫地机器人紧跟技术革命浪潮，力争把简单的家务做到尽善尽美。同时，在高精尖的医疗手术领域，国产服务机器人厂商也逐渐从舞台边缘走向中心。达芬奇手术机器人曾在医疗领域占据垄断地位，高昂的整机售价和耗材费用，常常令医生和患者望洋兴叹。如今，威高集团、天智航、精锋医疗等一批本土企业在医疗领域站稳脚跟，推动我国精准医疗阔步向前，有力促进医疗服务均衡化、同质化，彰显原始创新成果在医疗领域的卓越成效。

近年来，在全球关注的人形机器人领域，我国更是取得了一系列亮眼成绩。在

2025年蛇年春晚火速“破圈”的宇树科技，旗下人形机器人 Unitree H1 和 Unitree G1 已经实现公开发售；智元机器人推出的人形机器人灵犀 X2，不仅实现了走、跑、跳等功能，还可以完成负重深蹲、玩平衡车、骑自行车等高难度任务。此外，优必选、小米、银河通用、松延动力等一批老牌企业和创业新星同样实力不凡，成为全球人形机器人领域不可小觑的“中国力量”。

### 产业生态：从纵向垂直到跨界融合的繁荣

新一轮科技革命与产业变革深入发展，机器人与人工智能、物联网、大数据等技术融合交织，产业链辐射范围持续扩大，产业生态涵盖主体日益增加。因此，决定机器人产业发展的关键因素已经不仅仅是过去的传统“三大件”，而是更看重产业链生态体系的综合能力。工业和信息化部印发的《人形机器人创新发展指导意见》就明确提出，构建产业协同生态，推动机器人、人工智能、新材料等企业跨领域合作，开展技术应用联合攻关，增强软硬协同适配能力，提升产业链供应链韧性。

现阶段，跨界已经成为我国机器人产业的常态。2025年初，蚂蚁集团拓展具身智能和机器人业务的主要载体，上海蚂蚁灵波科技有限公司，开放招聘具身智能人形机器人系统和应用等岗位，在具身智能领域展开布局和投入。相比互联网企业跨界“造人”，车企更是声势浩荡。据不完全统计，截至2025年2月，全球已有



18家车企切入人形机器人赛道，小米、小鹏、蔚来等国内造车新势力都位列其中。此外，汽车供应链企业也在加速融入机器人领域。中鼎控股发布的公告披露，中鼎股份或其子公司分别与五洲新春、众擎机器人、埃夫特签署战略合作协议，围绕机器人开展合作。机器人作为时下关注度最高的产业领域之一，吸引相关各方竞相入局，促使我国机器人产业生态的“朋友圈”越来越大，产业综合竞争力稳步提升。

从区域分布看，北京、长三角地区、珠三角地区的机器人企业高度聚集，产业生态优势突出。北京拥有超2万家机器人企业，基于在人工智能领域的深耕积累，智能算法和控制系统已成为北京机器人产业的靓丽名片。在长三角地区，以上海、杭州、苏州等地为代表，机器人产业增长势头强劲。其中，仅上海的机器人产值就占据全国的五分之一；宇树科技、云深处

科技作为“杭州六小龙”的成员备受业界关注，展现出杭州机器人产业的强劲增长动能；绿地谐波作为苏州的老牌名企，已成为当地机器人核心零部件领域的一杆旗帜。在珠三角地区，以广州、深圳、东莞等地为代表，基于机器人在制造业领域的深厚积淀，支撑起了庞大的工业产值，并在AI芯片、运动控制等机器人核心技术领域走在前列。

筚路蓝缕启山林，栉风沐雨砥砺前行。过去十年，我国机器人产业以“咬定青山不放松”的坚韧，完成了从全面追赶到部分引领的惊鸿一跃。如今，万亿产业链破茧成蝶，以逆风翻盘的姿态在世界科技版图书写下醒目的东方坐标，恰似鲲鹏振翅，云程发轫，万里可期。

#### 作者信息：

刘京运 本刊主编

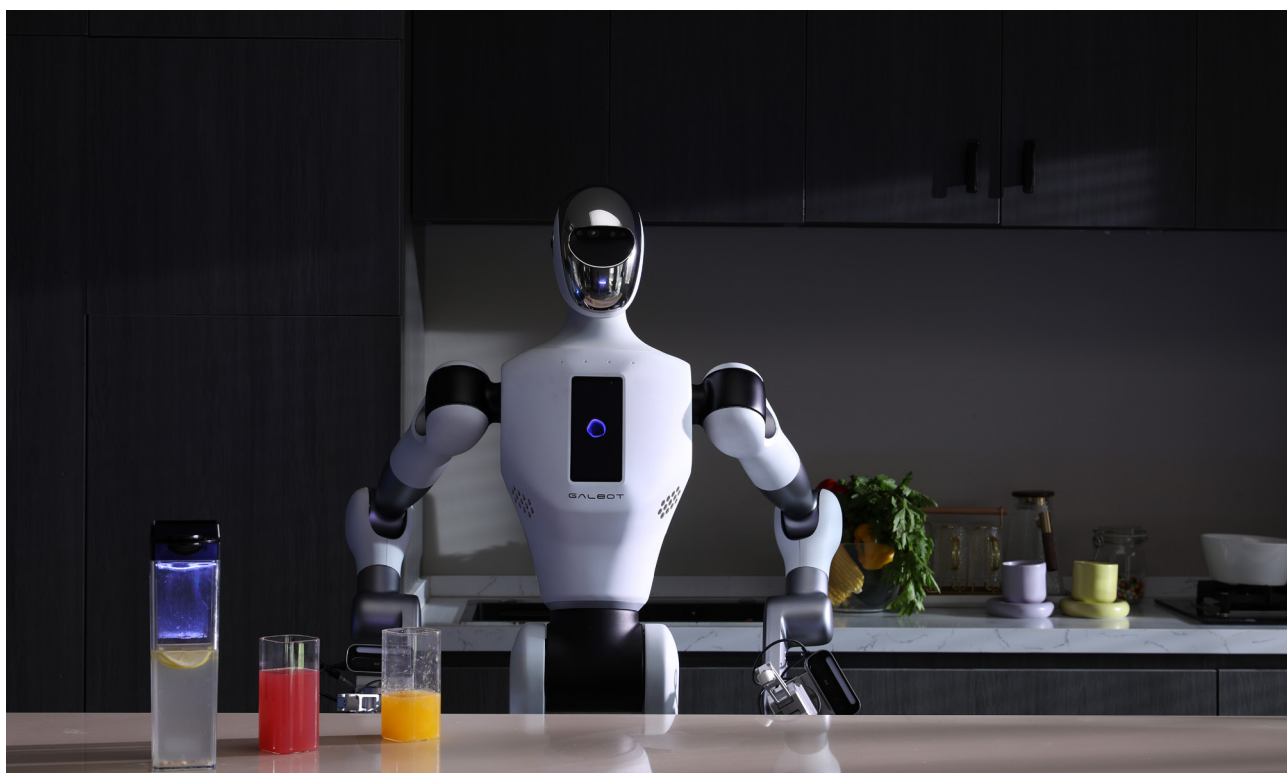


在线阅读(节选)



# 与北大携手，这家人形机器人公司 迈入量产元年

■文 / 李轲昕



## 引言

2025年初，“科技春晚”美国消费电子展 CES 2025 如约开幕。芯片巨头英伟达创始人黄仁勋发布了多个新产品，其中包括首个生成式世界基础模型 Cosmos。在演讲现场，他公开展示了 14 款全球领先的人形机器人产品。作为其中唯一一台以轮式底座为移动方式的人形机器人，来自北京银河通用机器人有限公司的 Galbot G1 赫然登场，举起英伟达新一代 RTX5090 显卡。那么，黄仁勋为何青睐这家成立不到两年的公司？

“通用”是市面上大多数人形机器人研发商为之努力的方向，也是北京银河通用机器人有限公司（以下简称“银河通用”）的研发愿景。其原因，一是人形机器人有快速部署的特点，能快速融入工作场景而无需增加特殊配置；二是使用门槛低，通过语音和文字指令布置任务，抛弃了传统的轨迹重放等作业方式。不过，当前技术水平仍不支持“通用”人形机器人规模落地，仍需从细微场景入手，以小见大，补足通用场景提出的能力清单。

在银河通用创始人、CTO 王鹤博士的带领下，银河通用研发团队以端到端具身多模态大模型补足人形机器人“脑力”空白，在国际范围内首次实现了成功率在95%以上抓取随机堆放、从未见过的透明、高光等物体，甚至已进一步掌握类似开柜子、开抽屉、晾衣服等泛化操作技能。银河通用与北大和北京智源人工智能研究院（BAAI）分别成立了具身智能联合实验室和研究中心，与合作伙伴深度探索零售场

景技能闭环，并开发未来机器人在工业、物流、康养等方向的技能，共同赋能机器人又稳又好地迈入实际场景应用。

## 模拟数据填平“通用”与现实之间的鸿沟

具身智能指用具象化的身体与真实物理世界交互。高水平训练数据的缺乏，直接限制了人形机器人的泛化性和通用性，大部分只能在局限的环境下，面对特定对象，以固有的操作方式完成专用任务，严重不适配真实物理世界随机性的特征。因此，在高质量训练数据和训练方法面世之前，人形机器人实现规模商业化有很大难度。

银河通用产品总监朱辉以三个案例来概括国内外数据收集现状。一是特斯拉数据中心招募工人重复做出放置电池的动作，通过头戴 VR 眼镜为 Optimus 收集数据，该方法只适用于固定的操作动作，当抓取对象发生改变时，抓取成功率骤降；二是斯坦福大学使用主从臂采集数据，训



图1 Galbot 在银河通用前台迎宾



图 2 Galbot 抓起随机打碎的玻璃杯

练 ALOHA 做滑蛋虾仁，但只适用于类似格局的厨房，当房间条件如灶台高度发生改变，操作成功率骤降；三是字节跳动团队 GR-2 使用学术公开数据集中的 3800 万个互联网视频片段进行生成式训练，取得不俗的表现，但和真实世界相比，公开数据集中的动作数据的规模和多样性仍然有限，并不足以使得机器人学到多种技能。可以看出，基于现实环境和直接使用数据集的训练方式都有欠缺之处。这三个案例都是通过收集现实数据来训练模型，从而使模型运行出来的结果符合真实物理世界，并使得模型具有预测动作轨迹的能力。

近年来，仿真技术普遍地应用到学术研究中，银河通用团队在计算机中模拟出了仿真物理环境，用计算机模拟运行，在仿真环境中一秒钟可以生成超万条级别的仿真数据，大大降低数据成本，提高模型训练效率。2025 年初，银河通用联合北京智源人工智能研究院及北京大学和香港大学得研究人员，发布全球首个全面泛化的端到端具身抓取基础大模型 GraspVLA，

为解决具身大模型训练过程中的数据困难和泛化困难提供了可行的解题思路。同时，团队提出 VLA（Vision Language Action，视觉 - 语言 - 动作模型）达到基础模型需满足的七大泛化金标准：光照泛化、背景泛化、平面位置泛化、空间高度泛化、闭环能力、动态干扰泛化，以及物体类别泛化。此外，GraspVLA 还可以使用一人天的数据体量，快速训练 GraspVLA 理解新需求、新名词。

在复刻环境数据时，先把真实世界映射到摄影画面中，再渲染为机器人能理解的 3D 环境。深度相机可以测量物体到相机的距离，用于三维重建、目标定位、识别等应用领域，受环境光变化影响，机器人看到的物体颜色和形态可能会发生改变，尤其是透明高光物体，影响机器人的识别和判断。银河通用在咖啡厅、便利店、生产车间、KTV、关灯的房间等真实工作环境中测试，机器人抓取成功率居高不下。

银河通用产品总监朱辉表示，目前公司团队约有百余人，分工明确，一直保持着较高的创新活性，公司机器人性能上的迭代以周为单位。机器人在部分真实场景走向深度应用，产生出大量有参考价值的数据，又进一步推动了模型训练和技术迭代。

### Galbot 的展会实践

大模型有先验知识，能够理解环境，实现环境图像的智能分割。早在 2024 北京智源大会上，机器人就可以通过认真观



察货架的信息，构建出货架在虚拟世界中的映射，再渲染货品包装等细节。朱辉介绍，“完全不需要对接数据库人为地输送数据，展会前一天让机器人花费少量时间自主学习场地环境，展会当天开机就能用上，移动底座的设计也使机器人的续航能力延长至 6~8 小时，机器人可以长时间维持演示状态，吸引了大量观众驻足。”2024 世界机器人大会（WRC）上，银河通用机器人 Galbot 被围观群众“出难题”，拿了很多不带标签的透明矿泉水瓶摆在桌面上，机器人都能够一一抓取。不少观众在现场见到机器人缓慢的思考和执行速度时，纷纷质疑其实现应用的可能性。朱辉表示，出于安全防护的考虑，大会上所展示的机器人速度被刻意放缓，而实际的抓取速度已经达到展示速度的 3~4 倍。

朱辉介绍到，公司成立之初因研发精力有限，Galbot 只能使用购买来的国产灵巧手，此后，公司自主研发了一款兼顾轻量化设计和复杂功能的灵巧手，将在今年展会公开亮相时展示。“在日复一日大数据加持的交互学习中，具身大模型机器人训练出决策的‘大脑’和执行的‘小脑’，指挥日渐灵巧的‘手’，机器人能够独立完成越来越多的工作。”朱辉谈道。

在 2024 云栖大会上，Galbot 每天工作 8 小时，在连续 3~4 天的真机工作展示中，它共服务了 900 多位观众，取送了超千件商品，取送的商品数几乎可以补满 8 个云栖大会现场摆放商品的货架。无独有偶，银河通用在 2024 年 9 月闪耀亮相服贸会，与其合作伙伴搭建药房场景，机器人在其中不间断地完成着补货、点货、取货任务。



图 3 Galbot 正在叠衣物



图 4 Galbot 在药房零售场景应用

### Galbot 的落地方向和落地进度

王鹤博士表示，当前人形机器人技术已达到产业化的边界，当前主要任务是将端到端大模型能力迁移到人形机器人上。未来五年，人形机器人有望在商业和工厂等场景中实现规模达万台的应用，十年后有望进入家庭生活场景。

银河通用已与合作伙伴签署战略合作协议，双方将在线下零售、智慧货仓、智慧物流等多个领域围绕机器人赋能服务展开全面、深入的合作，以科技创新服务社会，帮助实体药房等提质升级，以数字化解决方案实现“把世界送到消费者手中”。近两年，银河通用主要训练 Galbot 在零售场景的“通用”能力，打造药房零售场景下的无人值守闭环。朱辉谈道，Galbot 将

首先在北京的某些药房中实现应用，如今人们在手机上买到的商品，就有可能是由人形机器人分拣、配送的。

据圆周智行不完全统计，2024 年，我国人形机器人行业共发生 71 起融资事件，融资总额将近 70 亿元，单笔融资达亿级的有 26 起。其中，银河通用一举聚齐了北京、上海、深圳、香港四地政府背景基金，承接这四地发展人形机器人产业的迫切心情。

2025 年是银河通用人形机器人量产元年，朱辉表示，人形机器人产量达到千台后，将迎来成本的进一步下滑，并加速进入餐饮、物流、康养、医院、写字楼等应用场景发光发热。

#### 作者信息：

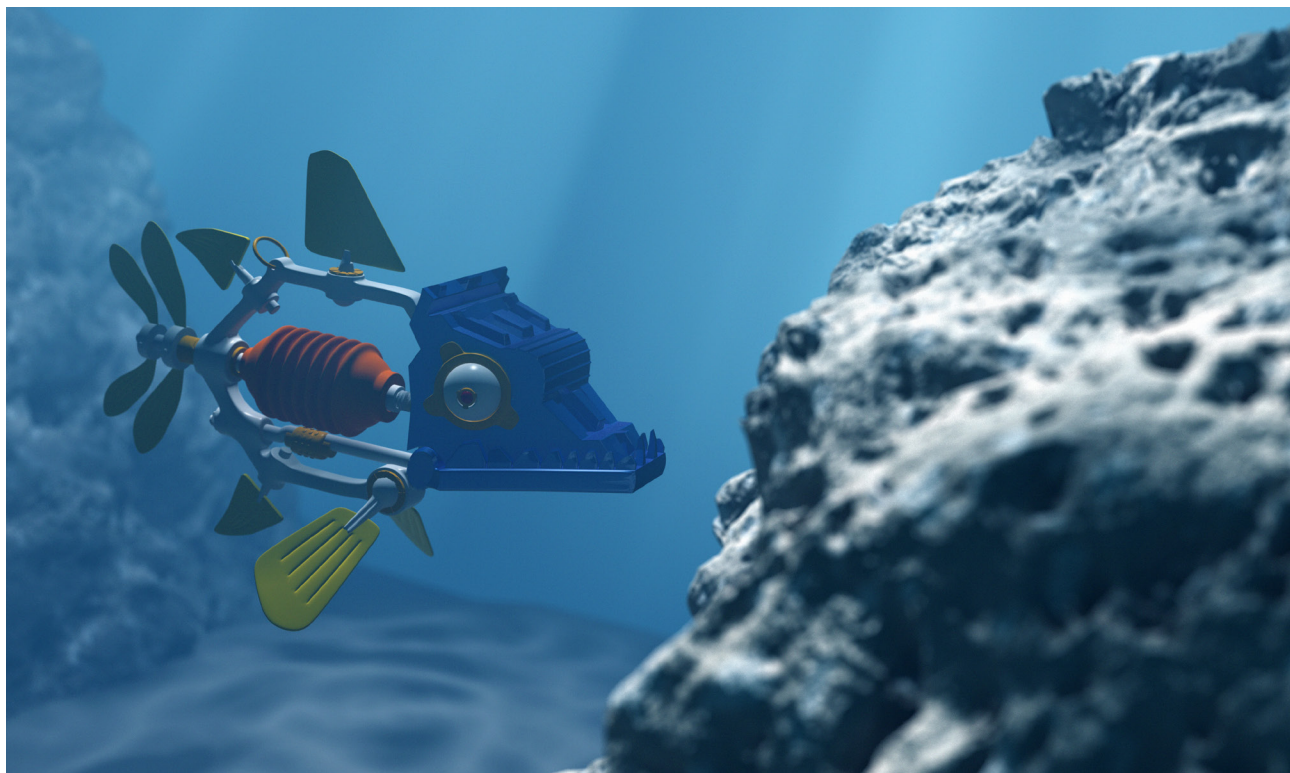
李轲昕 本刊编辑



在线阅读(节选)

# 谢广明：用机器鱼读懂海洋脉搏

■文 / 李轲昕



## 引言

从事仿生水下机器人这一“冷门”研究学科，要有一颗炙热的心。北京大学工学院教授、智能仿生设计实验室主任谢广明悉心研究仿生机器鱼二十余年，致力于将传统的“师法自然”研究推向更深层次，不仅从自然界中汲取灵感，更以科技回馈自然，为鱼类生态保护贡献智慧与力量。



“ 机甲鲸鲨”在海洋馆游动、摆尾，“机器箱鲀”成为潜水爱好者的摄影伴侣，仿生水下机器人正以各式各样的形态走入人类的生活。我国仿生水下机器人研究基本功扎实，创新氛围浓厚，应用前景光明。其中，北京大学智能仿生设计实验室是国内最早进入该领域的科研力量之一。

适合在人类生活空间工作的，是模仿人类外观和行为的人形机器人。同样地，真正适合在水下作业的，是各种各样像鱼一样的生物。北京大学工学院教授、智能仿生设计实验室主任谢广明曾在格致论道讲坛阐述道，机器人的重点是机器，不是长得像人一样才叫做机器人，机器鱼也是一类机器人。鱼类经过亿万年进化，它们

的游动效率远高于人类生产的螺旋桨，同时具备较高的机动性、隐蔽性。研究机器鱼，对人类探海能力的提升具有重大意义。

### 不仅“形似”，更要“神似”

回顾我国仿生水下机器人学科的“前世今生”不难发现，从前仿生水下机器人的研究方向主要集中在运动仿生的角度，旨在简单复现水下生物的运动模式。随着研究的不断深入，如今仿生水下机器人的研究焦点已跃升至涵盖感知仿生、通信仿生、抓取仿生及集群行为仿生等多个维度的广泛探索。谢广明总结道，学者观察水下生物的视角，已经从单纯的运动模仿，提升至对水下生物生存智慧及适应复杂多



图 1 北京大学工学院教授、智能仿生设计实验室主任谢广明

变水下环境机制的深刻洞察。这一系列转变标志着人类对鱼类仿生学研究的理解和实践迈入了更为全面且深入的阶段。

提升游动效率的两大技术路径

如何显著提升仿生水下机器人的游动效率，一直是谢广明潜心攻克的难题，他将研究方向划分为两个部分。一方面，要研究如何对肌肉运动模式进行精准捕捉与再现。例如，以黄鳍金枪鱼的肌肉运动模式为设计灵感，吉林大学团队研制液压柔性驱动器，可以使机器鱼展现出优秀的游动速度和能效比。另一方面，要从鱼类减少阻力的有效策略入手，思考如何巧妙地利用水流的力量。例如，伦敦大学研究团队发现鱼鳞阵列会在鱼类表面产生条纹状基流，可以降低皮肤摩擦阻力，为机器鱼的研发提供重要线索。

仿侧线系统提升机器鱼感知能力

生物学家研究指出，侧线系统对于鱼类的水下生存至关重要，它不仅能让鱼类感知到身体周遭的水流动态变化，还能根据水流的变化而敏锐地感知到障碍物、猎物、天敌和同伴的存在。谢广明课题组是国内较早展开仿鱼类侧线感知研究的团队，早在 2020 年，团队就提出了一种基于人工侧线系统的机器鱼自主轨迹评估方法，研究结果发布于机器人研究领域的顶级期刊。

以原始设计抵达续航极点

电池性能的提升将直接延长机器人的作业时长。在现有能源供给技术的框架

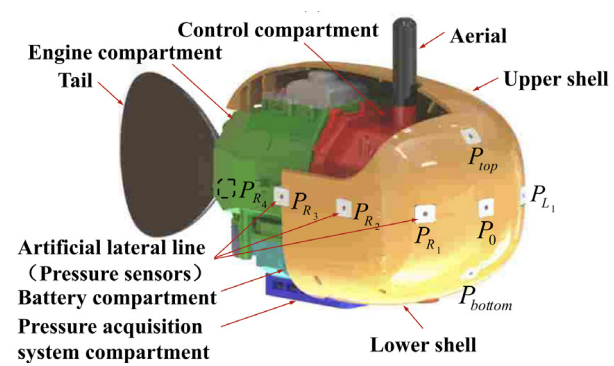


图 2 集成人工侧线系统的箱鲀机器鱼

内，通过优化设计能挖掘提升续航潜力的空间。

其一，探索仿生驱动新机制，旨在超越传统的连杆机构与绳驱机构等设计模式，开辟能量转换效率更为卓越的技术新路径。其二，深化水下减阻技术的研发，涉及对机器人外观形态的精心设计以及表面材质的优选，以期实现水流阻力的最小化。其三，深入研究并模拟自然界生物的续航策略，例如鱼类的间歇性游动模式。谢广明团队正致力于将此机制融入机器鱼的设计中，实现能源的有效节约，进而延长机器鱼在水下的自主游动时间。

集群行为研究取得扎实进展

十年间，学者在模仿鱼群行为的仿生水下机器人集群方向取得了不少突出的研究成果。谢广明分享道，哈佛大学科研团队通过精密实验成功演示了仿生机器鱼在三维空间内的集群游动行为，这项研究进展令人印象深刻。这些机器鱼设计巧妙，背部与腹部都装备了 LED 光源，并内置模拟鱼眼的双目视觉系统，能够赋予机器鱼全方位 360° 的视野能力。研究团队凭

借先进的 3D 视觉识别技术，精确追踪机器鱼身上的光源，以此为基础高效获取各机器鱼的姿态与位置信息。随后，通过局部区域内机器鱼间的精密协同机制，成功再现了自然界中经典的鱼群行为模式。谢广明分析，尽管该研究成果在集群协作理论层面并未实现根本性的创新突破，但其独到之处在于巧妙地运用了主动光源技术与机器视觉技术，为机器鱼提供了一种新颖且有效的途径，以获取同伴的位置与姿态信息，从而促进了集群行为的精准模拟。这一成果为后续仿生水下机器人集群研究提供了重要的参考和借鉴。

### 多学科知识于此汇聚

仿生水下机器人汇聚了来自材料科学、电子工程、自动控制、人工智能等多个领域的先进技术。谢广明表示，任何前沿理论的涌现或技术的革新，都能成为推动机器鱼性能跃升的关键力量。

功能材料在提升机器性能、优化结构设计等方面发挥着举足轻重的作用。例如，使用介电高弹体膜包裹水凝胶，可以使仿生深海狮子鱼在万米深海承受极高的静水压，像扑翼一样扇动向前推进；用包括石墨烯在内的化学混合物制成纳米片，并逐层组装成类似珍珠贝母的结构，可以使机器人有效吸附水中的微塑料。

流体力学则帮助研究人员优化机器鱼的外形设计和运动方式，通过减少水流阻力，延长续航时间。结合流体力学模型，开发能够实时调整游动姿态和速度的自适应

控制系统，能够使机器鱼灵活应对湍流、层流等各种复杂环境。

人工智能技术的融入，则极大地增强了系统的自主决策与学习能力，使得这些设备能够更智能地适应环境变化，实现更高效的任务执行。

### 学科热度有待攀升

从事研发、教学工作多年，谢广明深知，仿生水下机器人是最难研究和开发的机器人技术之一。

首先，进入门槛高。这一领域不仅要求研究者具备扎实的理论基础和实践经验，还需要昂贵的实验设备和测试环境等，这些都对研究机构的资金实力和科研设施提出了极高要求。此外，由于水下环境的复杂性和不可预测性，即便是微小的设计或技术调整也可能带来巨大的实验风险和成本，进一步提高了研究门槛。

其次，成果产出慢。由于学科的专业性和复杂性，从概念设计到原型测试，再到实际应用，每一个环节都需要经过反复验证和优化，这一过程往往耗时较长。加之水下环境的特殊性，许多在陆地上行之有效的理论和技术在水下应用中面临重重挑战，进一步延缓了研究进度和成果产出。然而，正是这样的挑战，激发了科研人员不断探索和创新的动力，推动了仿生水下机器人技术不断向前发展。

最后，从业人员少。国内仿生水下机器人的研究一直保持着相对较小的人员规模，尽管近些年有些明显扩充。谢广明希



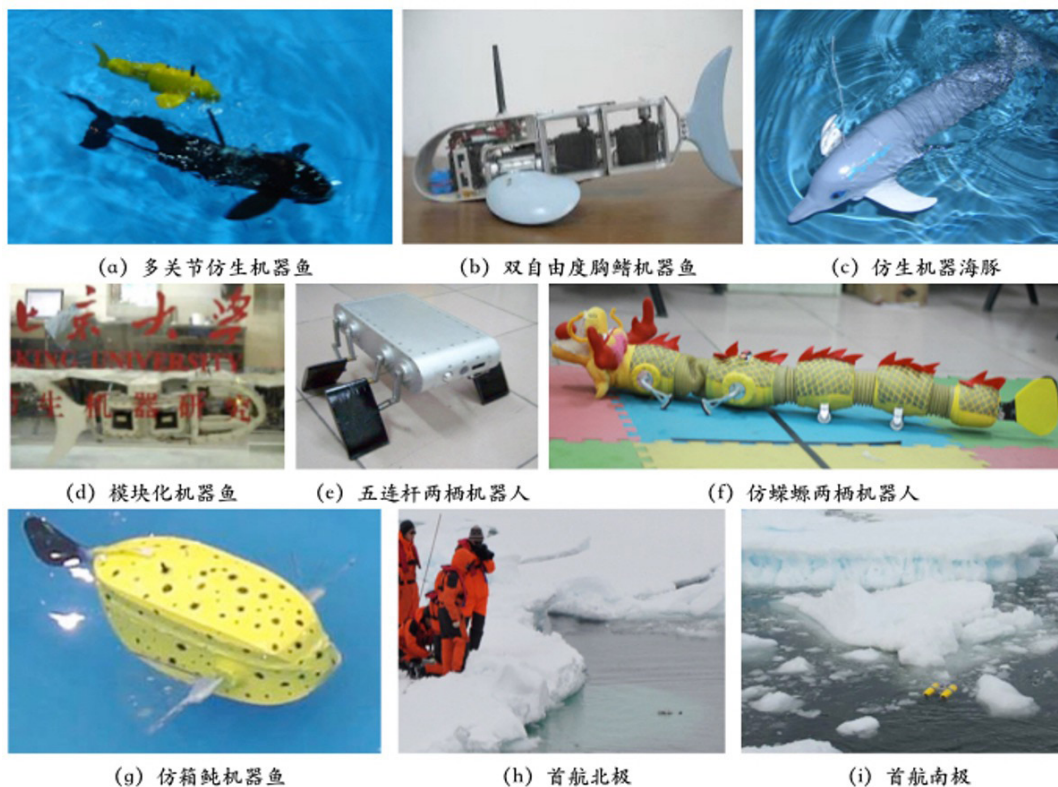


图3 北京大学智能仿生设计实验室发明的机器鱼样机合集

望有更多的研究团队进入这一领域，加强相互交流与协作，共同促进仿生水下机器人技术的进步。

近年来，谢广明团队持续深化与德国马克斯·普朗克研究所生物学家的合作与交流，生物学家对生物世界的深刻洞察为机器鱼的研究工作提供灵感，团队研制的机器鱼又能帮助生物学家进一步探索生物学奥秘，这不仅跨越了生物学与工程学的界限，还促进了双方知识的互鉴与融合。谢广明分享了双方合作的标志性成就——利用机器鱼作为研究载体，揭示鱼类集群游动时节能的奥秘。为探索鱼类在水下集群游动的节能机理，生物学家需要实时掌

控鱼的能量消耗，而这基本不具备可行性。可控、可编程、可测量的机器鱼解决了这一难题，帮助生物学家以前所未有的精度探究鱼类集群游动的节能机制。

谢广明用“水下集大成者”来表达自己的对仿生水下机器人的期待与憧憬。谢广明认为，仿生鱼是展现人类智慧与创新精神的杰作，未来仿生水下机器人将在海洋探测、水下救援、水下考古等领域发挥更加重要的作用，为人类探索海洋奥秘、保护海洋环境作出更大的贡献。

#### 作者信息：

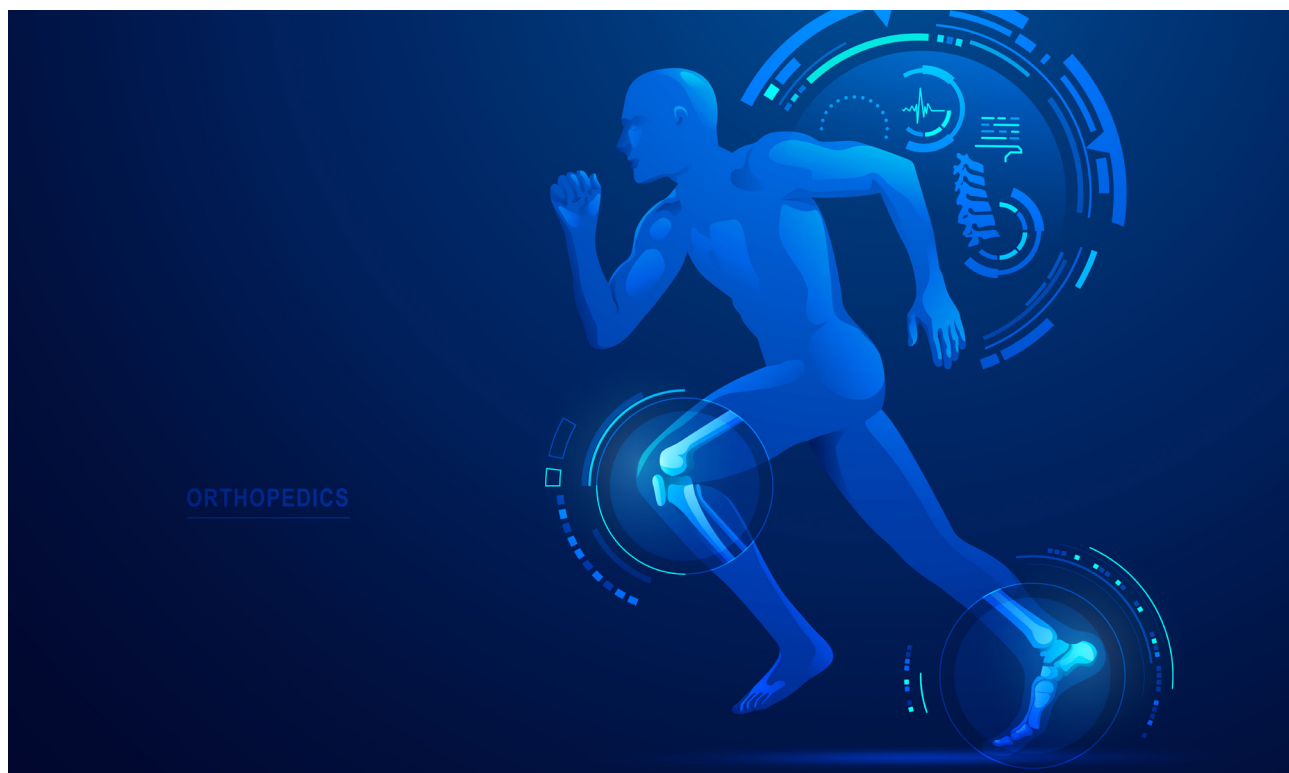
李轲昕 本刊编辑



在线阅读(节选)

# 十年医工突围： 康复外骨骼重塑他们的人生

■文 / 刘京运



## 引言

仅需百元租赁费，泰山游客就可以穿戴上“机器腿”，攀登泰山健步如飞。其实，这类“登山神器”属于增强型外骨骼机器人，而外骨骼机器人并非第一次闯入大众视野。与其同源的康复型外骨骼机器人常被用于帮助截瘫、偏瘫、脑瘫患者恢复部分运动能力，实现“康复一人，幸福全家”的愿景。

“与人平视时，讲话的感觉是不一样的。”已经使用外骨骼机器人十年之久的林寒这样

说道。林寒在 2013 年意外摔伤，下肢丧失行动能力，两年后，他到四川省八一康复中心作为首批穿戴试验员，协助程洪教授带领的电子科技大学机器人研究中心组，参与到外骨骼机器人产品的实验和开发项目中。如今，他已经坚持每天使用外骨骼机器人训练行走长达十年，正在逐渐恢复下肢知觉和力量，已经能够自主驾驶车辆上下班，有了自己的家庭和生活。

在这十年间，林寒见证了电子科技大学团队外骨骼机器人产品的七代变迁和数不清次数的性能提升改造。2023 年，电子科技大学外骨骼机器人团队正式成立布法罗机器人科技（成都）有限公司（以下简称“布法罗”）。布法罗创始人兼首席技术专家程洪教授曾解释过公司名称的由来：“布法罗，BUFFALO，直译是‘水牛’，做机器人，‘仿生’就是最高级别的境界，另一方面，水牛的意象与四川的农耕文化息息相关，我们的名字、我们的愿景与这片土地紧密相连。”

布法罗营销中心华北区负责人祝霞回忆道，团队选择康复型外骨骼机器人作为研究方向，是因为“5·12”汶川大地震后出现大批需要接受康复训练的残障人士。当时国外已经出现了用于康复治疗的“外骨骼机器人”，但动辄几十万美元的价格让患者望而却步。2009 年底，从海外深造归来，刚刚加入电子科技大学的程洪注意到了这一需求，下决心带领团队从零开始，



图 1 林寒穿戴外骨骼行走

研发一款能够帮助截瘫患者重拾行动能力的国产外骨骼机器人。

## 学科体系日趋完善

外骨骼康复机器人的迭代不仅依赖康复医学的演进，还难在多个交叉学科的同时掌握。志愿者每指出一处产品缺陷或提出新的需求点，就可能意味着一门新的学科被牵扯到康复型外骨骼机器人的迭代方案中。

在机械工程方面，巧妙的机械结构设计可以确保外骨骼的强度、稳定性，使用轻质、高强度、耐用的材料能够提升患者穿戴的舒适感；在电子工程领域，力传感





图2 布法罗团队研制的康复型外骨骼机器人产品

器、加速度计、陀螺仪等多种传感器的集成，可实时监测患者的运动状态和外部环境，而可靠的驱动技术则能提供充足动力和精确的运动控制；在计算机科学与人工智能范畴，先进的控制算法使机器人可以依据患者运动意图和实时数据动态调整姿态，个性化辅助康复，同时借助人工智能和机器学习技术分析康复数据以优化训练方案；在生物力学与人体工程学方面，对人体下肢运动机制和步态周期的研究，可用于设计符合生理结构的外骨骼，实现自然舒适辅助。此外，还需根据患者的康复规律，设计有效的训练模式，并通过与医疗机构合作，开展临床试验，评估其有效性和安全性。

交叉学科研究日益透彻，康复型外骨骼机器人的适用人群从截瘫患者逐渐扩展到脑损伤患者，例如偏瘫、脑瘫、脑外伤等，应用病症已经拓展到骨科术后康复、意识障碍患者的康复，甚至心衰引起的下肢功能障碍。祝霞介绍道，目前各种原因导致的下肢功能障碍几乎都需要使用外骨骼康复机器人，尤其对于偏瘫患者，机器人可以帮助他们有效增加肌肉力量，改善偏瘫步态。

### 向有效、安全、易用迭代

十年前，许多人认为外骨骼机器人没有长期利用价值，因为脱离了机器人的辅助，身体情况得不到任何改善。其实不然，神经具有可塑性，通过外部器械带动穿戴者进行科学、高效、准确的步行康复训练，能够刺激神经系统重塑，提升下肢自主行走能力，加速康复进程。

以前，康复型外骨骼机器人的功能，局限于带动患者做被动的康复训练，现在的机器人设计了评估功能，训练模式扩展到主动模式、主被动模式，增加了单关节训练的等速、等张、等长模式，也增加了包括单抬在内的腿训练模式，可以帮助穿戴者做关节固定角度的牵伸训练，完成多模态下的运动降张。基于“神经可塑性”原理，机器人每增添一项细分功能，都能帮助患者在不同的康复周期制定更优的训练内容，让患者投入的时间和精力获得更大收益。

穿戴的安全性是康复型外骨骼机器人设计的第一要义。近十年，我国的传感器

产业表现出强劲的发展势头。高精度、体积小的传感器可以自动识别患者的用力情况，自动切换助力等级，减少被动模式对关节活动受限的患者的误伤。机器人上也设置了急停按钮、倾斜报警装置等安全保护措施。

当前，康复型外骨骼机器人已经走出实验室，作为一项成熟技术产品，被普遍应用于各地的康复中心。祝霞介绍，研发团队很早就考虑到了设备的易用性问题，通过采用电动方式调节设备的腰宽、大小腿的长度，增加髋关节外展 45°、扶手外展 90° 等功能，方便患者上下机。同时，机器人以患者为中心进行纵向管理，可以收集录入每名患者的康复信息，实时显示患者对设备的力矩，以及设备对患者的力矩。未来机器人还将向智能化方向迭代出更多功能。

市场接受度攀升

布法罗最新升级的 Aider3S 型号下肢步行外骨骼产品正处在临床验证阶段，磨合解决了很多上一代产品的设计问题，获得了志愿者的普遍认可。

布法罗研发生产的外骨骼产品也受到了各地康复中心治疗师的一致好评。传统康复中心会对步态训练设立门槛，一般情况下，患者达到站立平衡一级才具备开始训练的基础身体条件，训练时一般需要 2~3 名治疗师，以及 1~2 名家属协同。引入康复型外骨骼机器人后，患者病情稳定后即可接受标准化、规范化的步行步态训



图 3 布法罗 Aider3S 型号下肢步行外骨骼产品

练，且在训练中对人工辅助的需求更低。随着产品应用的普及，了解康复型外骨骼机器人的人群，逐渐从患者群体扩展到普罗大众。祝霞透露，四川、河南、北京、上海等地对康复机器人的接受程度和使用情况更好，此外，越来越多的地方将康复型外骨骼机器人相关治疗服务纳入医保，为患者解决了后顾之忧。

人工智能和康复医学碰撞新火花

智能康复不仅是数字化康复设备的简单集合，还是把先进的康复理念、临床技术、智能设备、管理模式应用于整个康复



图 4 患者正在使用脑机 + 外骨骼产品

过程的一种新型的现代化医疗方式。基于在康复领域积累的丰富经验，布法罗推出了“智能康复一体化解决方案”，从产品端升级到了智能康复生态的营造。“2020年以来，我们持续发展智能康复的生态，建设智能康复中心，完善智能康复的整体解决方案。”祝霞总结道。

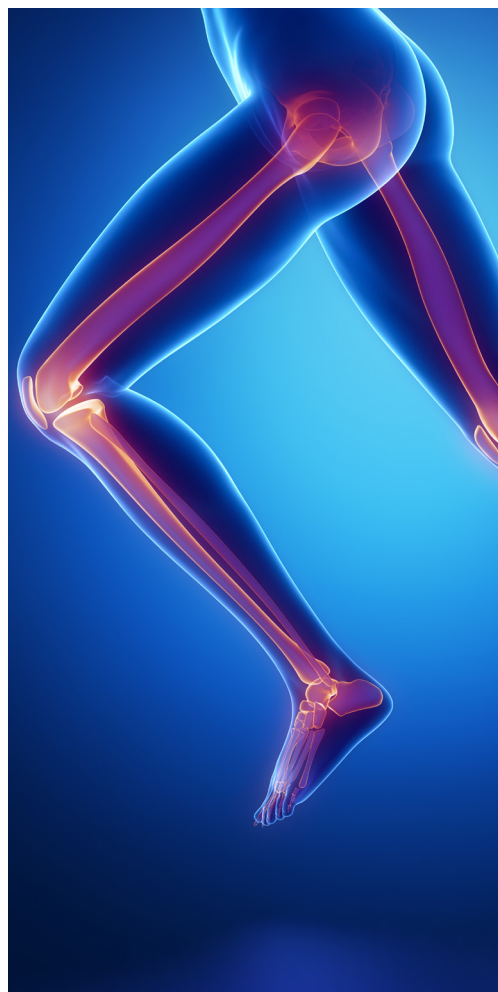
在过去十年，我国的半导体产业得到显著发展，脑机接口所使用的芯片大部分实现国产化。以外骨骼机器人为媒介，康复脑机接口技术正在实践中实现验证，帮助康复运动与大脑神经形成闭环，大幅提高神经损伤康复训练的效果。此外，新型传感器和 AI 算法将与康复机器人实现有机结合，外骨骼机器人有望提供更加个性化的训练，在提高康复效率的同时，通过

数据追踪和反馈，帮助医生和康复师更好地评估患者的康复进度，随时调整治疗方案。

未来，康复型外骨骼机器人会向更加轻便的可穿戴方向发展，新材料和轻量化电机也是其迭代的关键。据悉，电子科技大学正在研究将 DeepSeek 接入外骨骼机器人，更好识别患者意图。

### 作者信息：

刘京运 本刊主编



在线阅读(节选)



# 刘今越：建筑机器人的研发 应由企业主导

■文 / 刘政鑫



## 引言

在过去十年，我国建筑机器人产业经历了从技术突破到生态重塑的深刻变革。市场结构逐渐优化，创新链与产业链的深度融合推动建筑机器人行业的高速发展。河北工业大学刘今越教授表示，建筑机器人的研发应由企业主导，深度适配场景，唯有如此才能满足建筑行业的高标准与快节奏发展需求。

**面** 对人口老龄化加剧与劳动力结构性短缺的双重挑战，建筑机器人产业化发展成为破解建筑业人力瓶颈的关键。建筑机器人集群不仅能够实现施工效率的指数级跃升与工程品质的毫米级管控，更展现出了降低全周期运营成本、优化资源集约利用、构建绿色建造体系等多维价值。

过去十年，建筑机器人技术从实验室概念到工程化落地，实现跨越式发展。新型城镇化与乡村振兴战略的协同推进，为我国建筑机器人领域注入强劲发展动能。国家出台《“十四五”建筑业发展规划》、2023 年远景目标纲要，广东省率先将机器人施工时长纳入工程验收指标，深圳试点“BIM+ 机器人”全流程协同系统……我国建筑机器人驶入发展快车道。

### 非标化场景是发展瓶颈

建筑机器人按全生命周期发展过程进行分类，主要涵盖设计、建造、运维、拆解四大核心环节。在建筑数字化设计阶段，对施工图纸进行二维与三维模型的智能转换，融合 AI 技术进行方案优化。施工建造领域则聚焦实体机器人应用，包括砌筑、整平、焊接、喷涂等环节，典型案例包括“天蝉”建筑机器人、博智林系列机器人等。运维阶段主要部署检测、维护类机器人，如幕墙清洁机器人、物料运输机器人等。建筑生命终结阶段，应用拆解机器人执行精准拆除、物料分拣及资源回收等任务。

当前，建筑机器人发展速度受限的核

心原因，在于施工场景的动态性、非标化，以及复杂建模的高难度。建筑施工领域虽已建立起相对成熟的规范体系，但聚焦建筑机器人领域，国标、行标、团标等标准体系仍存在显著缺位。《建筑机器人通用技术条件》《建筑机器人安全标准》等现有标准呈现碎片化特征，难以形成全面有效约束。

建筑行业对个性化设计的高度追求与机器人技术所需的标准化基因形成结构性矛盾。现阶段的建筑多为异形结构，这与机器人的标准化操作流程难以匹配，导致其在复杂场景下的适应性不足。非标化场景的多样性与机器人操作的刚性要求形成矛盾，成为制约其广泛应用的关键瓶颈。

### 破解建模难题

与扫地机器人仅需平面地图导航不同，建筑机器人需处理多维空间信息，工况实时更新，因此机器人建模也需要实时更新，场景建模成为建筑机器人应用部署阶段需要解决的核心难题。

河北工业大学刘今越教授表示，建筑机器人进行施工，需要由不同工种的建筑机器人按照工序轮替协同作业，这种动态协作模式与工业场景存在本质差异，工业机器人仅需固定于工位对移动的物料进行加工，而建筑机器人则需要环绕静态建筑物移动作业，这种空间位移特性产生多重技术难题，移动定位精度波动、多机协同定位偏差、施工误差链式传导等。

当前，建筑机器人正在突破的技术路

径，是构建基于 BIM 系统的智能导航解决方案。其核心逻辑在于，建筑工程必定存在数字化图纸，直接解析这些建筑信息，就可以为机器人生成全局最优路径。如同人类驾驶员应用导航 APP，施工机器人调用 BIM 模型实现精准定位，省却现场测绘环节，通过融合环境感知系统与局部避障算法，实现效率提升。这种“图纸导航 + 实时感知”的复合模式，使机器人得以即时投入施工作业，相较传统建图方式提升 80% 以上的作业时效。目前，基于 BIM 数字模型驱动技术的智能化施工装备体系已涵盖焊接打磨等工艺环节，正在进行该技术的体系化推广，以应用于更多作用场景。

## 扎根作业场景

建筑机器人必然扎根于施工一线现场，刘今越强调，建筑机器人的研发应由企业主导，虽然高校具备相关技术储备，但施工工艺往往根植于作业现场，且处

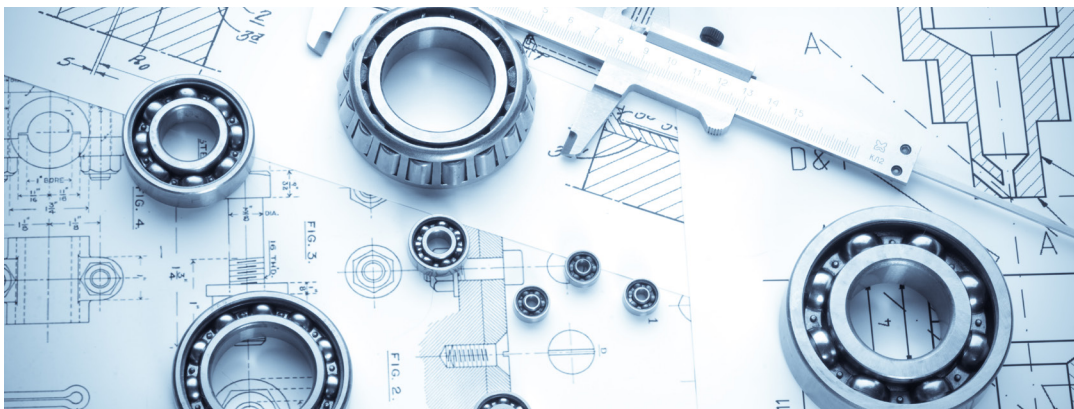
于持续升级迭代进程中，需要深度适配能力——唯有如此才能匹配建筑行业的高标准与快节奏发展需求。

从技术研发层面看，机器人核心算法、理论架构的创新突破需要深厚的技术积累，这正是高校科研团队的优势所在。同时，建筑场景的特殊性对机器人系统提出了严苛要求，自感知、自适应、自学习、自决策的全链条智能能力必须达到工程级标准。因此，当技术进入工程转化阶段，持续的场景测试、可靠性验证、稳定性优化等系统性工程实践，则是具备完整产业链资源的企业更具竞争力之处。这种产学研的分工协同，本质上源于工程应用需要构建包含场地资源、技术团队等在内的生态系统，让建筑机器人从实验室走向施工现场。

国家级重点研发计划等代表性科研项目，已明确要求由企业担任牵头单位，主导技术研发、成果转化及产业化应用全流程。虽有少数掌握核心技术的教授通过创







业推进产业化，但其聚焦领域多为特定细分领域，主要针对高附加值环节，而真正面向施工场景、满足现场作业刚性需求的工程化机器人解决方案仍属稀缺资源。

未来，建筑机器人要实现突破性发展，校企深度融合无疑是理想的发展路径，高校科研团队应聚焦核心算法研发，企业则发挥工程化优势，在技术落地、环节优化上精准发力，才能培育出兼具技术创新性与市场引爆力的标杆产品。谈到业内热议的人形机器人能否应用到建筑行业时，刘今越表示，与其他场景不同，建筑场景存在作业面不平整、技术指标复杂等问题，因此短时间内很难应用。

### 从技术储备到百亿市场

刘今越指出，现阶段技术成熟度制约着标准体系建设，但建筑机器人正处于全球建筑业智能化转型的风口期，市场规模有望在 2030 年突破百亿美元量级。随着应用场景的持续深化，通过规范施工现场管理、突破关键技术瓶颈、构建动态标准

体系的三维驱动，必将推动行业步入规范化、规模化发展新阶段。

作为建筑机器人产业发展的见证者和参与者，刘今越表示，2015 年至 2025 年是行业的黄金十年，建筑机器人领域不仅获得产学研机构的支撑，科研院所与企业研发团队的投入热忱亦持续攀升，社会各界的关注度指数级增长。在 2025 年至 2035 年这一新的十年，随着国家政策引导、人口红利消减带来的刚性需求，叠加智能建造平台日臻完善与新技术迭代赋能，建筑机器人将完成从技术储备到工地普及的跨越。

我国建筑智能化产业集群已实现局部领跑，部分头部企业以建筑机器人应用方案开拓海外市场，这场由机器人技术驱动的产业革命，推动我国从“基建狂魔”向“智能建造创新策源地”转型，为全球建筑业可持续发展提供新范式。

#### 作者信息：

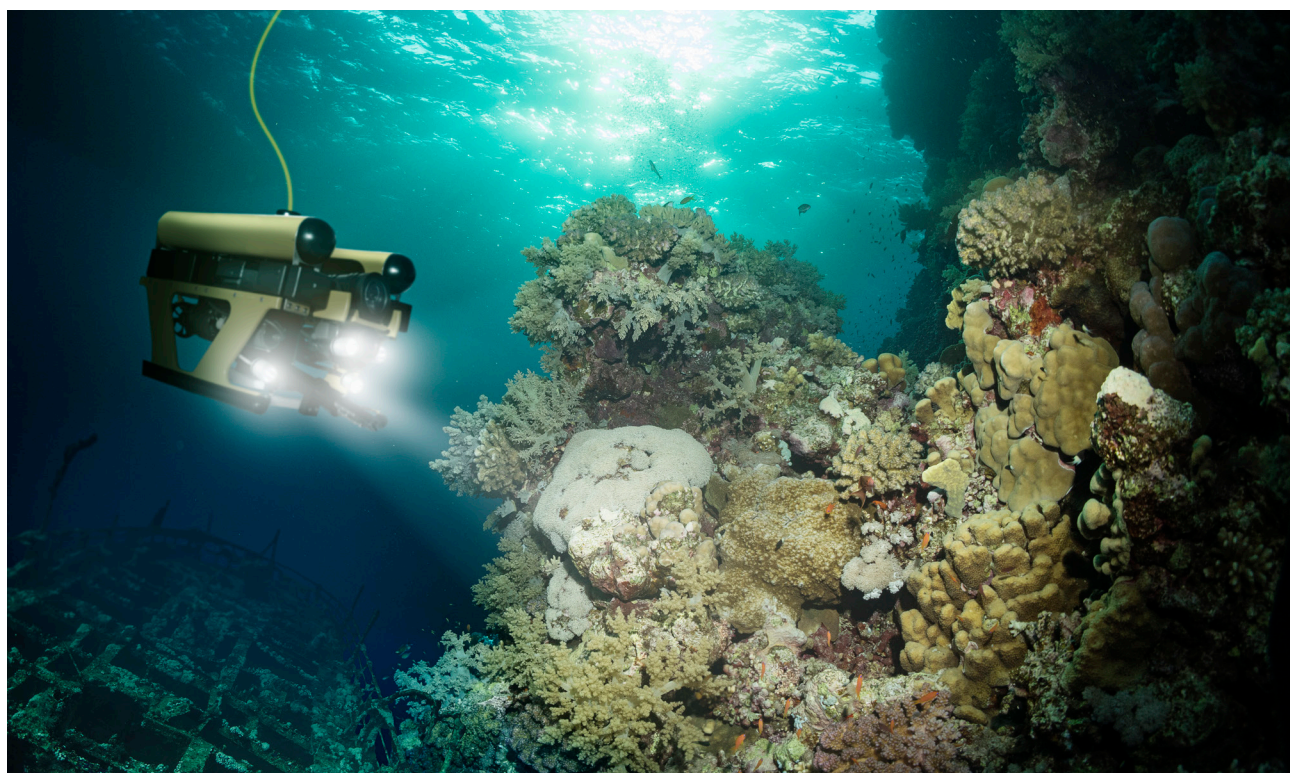
刘政鑫 本刊编辑



在线阅读(节选)

# 探索海洋：八大创新应用场景 拓展深海探索新实践

■文 / 王莉莉



## 引言

作为深海探测领域的尖端技术装备，水下机器人在深海勘探、海洋牧场等应用中发挥战略支撑作用。随着海洋强国战略的推进，我国水下机器人产业迎来爆发式发展，以“探索海洋”为代表的我国自主化水下机器人企业正聚焦应用场景，拓宽探索边界，破浪而出。



2025年政府工作报告首次将“深海科技”纳入其中，成为举国之力发展的重要新兴产业。作为深海科技中的关键领域，深海探测技术的发展亦十分重要。作为应用于深海探测的战略装备，水下机器人、水下无人机等高精尖技术与产品对深海运载与作业至关重要。深度开发海洋资源，发展海洋经济，将是新时代下促进我国经济高质量发展的重要机遇。

大连探索海洋科技有限公司（以下简称“探索海洋”）成立于2019年，从事国内外智能海洋装备与研发，目前已经开发了多个系列的水下机器人、水下推进器、声呐、水下机械臂等，并为意大利、越南、新加坡等多个国家和地区的客户提供服务。

### 需求井喷开拓万亿蓝海

作为海洋强国战略的核心支撑领域，水下机器人技术展现空前的战略价值。从智能巡航，到应急探摸；从水下破拆，到深海建模——水下机器人凭借其全天候、全海深作业优势，不仅将传统潜水作业效率提升，运营成本降低，更能将人员直接暴露于高压、低温、低可见度环境的风险大幅降低。无论是深海油气田开发、海上风电建设，还是深远海养殖网箱维护和深海采矿作业，若缺乏具备自主感知、自主决策、自主作业能力的智能水下机器人装备体系，相关产业的规模化发展将被制约。

在国民经济持续向好的宏观背景下，海洋经济作为新质生产力的重要载体，迎来爆发式增长窗口。水下机器人技术不仅关乎海洋资源开发效率，更在海底地质勘探精度提升、海洋生态环境长效监测等方面，为我国海洋科研和深海作业带来了革命性的进步，推动海洋经济转型升级与海洋文明建设。海底管线巡检、海洋牧场监测等新需求井喷式涌现，为水下机器人产业开辟出万亿级市场蓝海。当前，水下机器人技术已深度渗透到海洋科考中的热液喷口采样、智慧渔业中的鱼群生物量评估等二十余个细分领域，将海底资源勘探误差从米级压缩至厘米级，使海洋环境监测频率由季度级提升至实时级。

水下机器人领域的跨越式发展，深







度融合了光纤陀螺传感器技术、深度强化学习算法与海洋环境大数据分析等尖端科技。为应对复杂多变的水下作业环境，水下机器人技术仍有许多技术难题需要突破，包括提升水下机器人自主导航精度、强化复杂海洋环境适应性、突破数据传输效率，并增强其抗干扰能力。依托国内完整的产业链配套与持续强化的研发投入，水下机器人关键技术的工程化转化正加速推进。

### 核心技术构建护城河

全球水下机器人市场蕴藏着万亿级产业潜力，但受限于市场培育周期及技术推广壁垒，当前实际发展规模与理论预期尚存显著差距。这一蓝海领域的技术转化与商业应用，仍需突破多重产业瓶颈。在海洋强国战略驱动下，以我国探索海洋为代表的科技企业持续加码研发投入。

目前，探索海洋公司已成功研制ROV（缆控水下机器人）、AUV（自主式水下航行器）等系列化产品矩阵，开发水上无人艇等复合型作业平台。在核心部件领域，突破水下多自由度机械臂、矢量推进系统、多波束声呐阵列等关键技术的工程化应用。

标准化产品是探索海洋的一大优势特征。ROV具备卓越的外部扩展性能，可灵活搭载多模态传感系统、高精度检测设备及多功能机械手作业模块。在ROV的基础上，通过搭载传感器、高清摄像头、LED灯等配件，进一步提升了ROV的操作灵活性和数据收集能力。此外，探索海洋设计了Alpha系列和Bravo系列两款水下机械臂，搭配丰富的末端执行器，为操作员提供了在不同任务之间迅速切换的可能性。利用这些末端执行器，水下机械臂进行水下打捞、取样、切割等多种任务，满足应用需求。

为适应场景的实际需求，探索海洋根据不同的作业任务，设计实现了包括海参捕捞机器人、海洋牧场机器人在内的海洋经济养殖专用机器人，包括桥梁检测机器人、水质检测机器人、水下三维建模机器人在内的基础设施维护专用机器人，以及打捞机器人、水下清理机器人、水下搜救机器人等在内的应急救援专用机器人。

作为行业先锋，探索海洋持续深化海洋探索实践，通过整合智能感知系统与仿生驱动技术，在水下机器人领域开拓出深海资源勘探、海底管线巡检、生态监测预警等八大创新应用场景。

依托自主知识产权的核心算法库，构建可复制的标准化整机体系，基于模块化设计理念开发出兼容多任务载荷的通用型平台。打造覆盖需求分析、方案设计、运维服务的全生命周期系统化解解决方案；搭建云端协同研发管理平台，建立参数化模型数据库，研发智能仿真测试系统，加速油田巡检、珊瑚礁保护等场景应用的规模化部署。

### 政策东风助力“智造”远航

近年来，我国已成为全球水下机器人产业高地。在“海洋强国”战略引领下，水下机器人产业正迎来黄金发展期，已形成覆盖资源勘探、应急救援、生态监测等30余个细分领域的完整产业体系。

“十四五”国家重点研发计划“深海和极地关键技术与装备”重点专项提出，着力突破深海科学考察、探测作业、深海资源开发的系列关键技术与装备，支撑促进深海装备产业发展专项的实施。2025年政府工作报告首次将“深海科技”列为新兴产业重点领域，明确提出支持推动深海探测、资源开发、装备制造全产业链协同发展。

《山东省“十四五”海洋经济发展规划》聚焦海底资源勘查、深海空间探测等关键技术攻关；上海印发《关于推动上海海洋经济高质量发展加快建设现代海洋城市的实施意见》，明确提出发展深海科技，支持万米级载人潜水装备、自主水下机器人等核心技术的研发。地方专项政策的发

布，“智慧海洋”“透明海洋”等国家级工程落地实施，不断吸引高端人才和企业集聚，推动产业发展。

自主化技术产品接连突破，仿生机器人攻克柔性结构技术难关，深海作业型机器人完成4500米级海试验证，构建“蛟龙”载人潜水器、“海斗”无人潜航器、“潜龙”自主水下机器人的立体化技术体系，北京航空航天大学等研发团队研发能在万米深海实现多模态运动的小型深海可变形机器人。核心技术日趋成熟，水下机器人应用场景不断拓展，市场规模持续增长。

从近海试验到万米深潜，这场蓝色技术革命正在重塑海洋开发格局。以探索海洋为代表的行业领军企业既推动着产业链价值提升，更肩负着国家海洋战略使命。乘着全球“深海科技”浪潮，我国水下机器人将在蔚蓝深处闪耀“中国智造”的科技之光。

#### 作者信息：

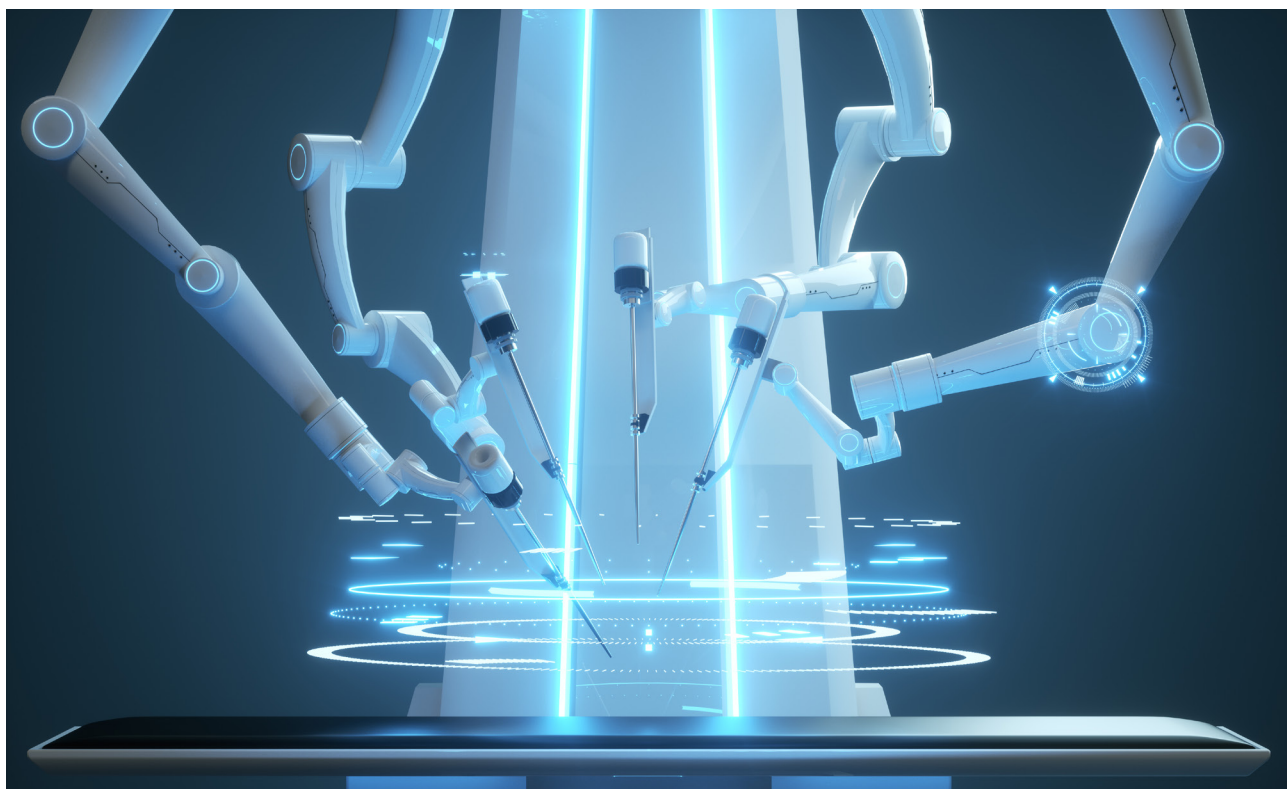
王莉莉 本刊副社长



在线阅读(节选)

# 匡绍龙：手术机器人发展 呈现四大趋势

■文 / 刘政鑫



## 引言

手术机器人的发展为医疗领域带来革命性变革和深远影响。相较于传统手术，机器人辅助手术展现出的显著优势已成为推动医疗手术发展的重要动力。深圳技术大学教授匡绍龙认为，未来手术机器人将向四个方向发展，即精准化和智能化、专科化和工具化、多适应症、微小化。



**我**国手术机器人经历了从技术引进到自主创新、从实验室研究到临床应用的转型关键十年，手术机器人作为高端医疗设备的典范，正成为推动精准医疗和智慧医院建设的关键力量。

腹腔镜手术、骨科手术等传统手术对医生的技能和体能要求极高，相比之下，机器人辅助手术展现出显著优势，已成为推动医疗手术行业发展的重要动力。借助机器人提供的增强型可视化、操作灵活性和精确控制，临床效果得到了显著提升。术后并发症的减少以及住院时间的缩短，进一步巩固了市场对这项技术的青睐。

### 技术突破是关键

手术机器人是多学科交叉融合的产物，集医学、计算机科学、控制工程等多

个领域的技术于一体。随着 AI、5G 等前沿技术的融入，手术机器人的性能实现了质的飞跃。

更微创的手术有利于减少大创口给病人带来的痛苦、加快术后恢复速度，这是促使手术机器人出现的重要原因。同时，机器人能在需要精细操作的手术场景中发挥重要作用，已在普外科、神经外科、泌尿外科、骨科、妇科等多个领域得到应用。目前，手术机器人主要包括，神外手术机器人、骨科手术机器人、腔镜手术机器人、经自然腔道手术机器人、血管介入手术机器人和经皮穿刺手术机器人。

深圳技术大学教授匡绍龙表示，手术机器人、AI、大模型、5G 等技术的发展对医疗行业产生了变革性的影响，“对于医生而言，传统开放手术不仅对他们的技能和体能要求都非常高，对他们的身体也有一定的损伤，在胃镜手术中，医生需要





长时间站立操作；骨科、穿刺等手术中，医生则有暴露在术中 CT 中的风险”，匡绍龙表示，应用手术机器人，不仅解决了医生的体能消耗，降低医生的术中风险，微创的手术方式还减少了对病人的创伤，加快了出院速度；特别是远程手术，显著提升了基层医院的手术技术水平。

国产手术机器人作为我国自主研发的技术代表之一，已经实现了多项技术突破，包括高精度影像引导技术、多自由度机械臂控制技术，以及结合人工智能的实时手术数据分析。特别是在远程手术领域，通过 5G 网络支持，手术机器人大幅提升了医疗资源的可及性，实现了跨越数千公里的精密操作，为偏远地区和资源匮乏地区的患者提供了优质的医疗资源。

### 理解需求是核心

匡绍龙介绍，我国手术机器人发展的早期，成果主要集中在高校，很多市场化

的产品都源自成果转化，骨科领域成果主要集中在北航，转化了包括天智航、铸正、罗森博特等，腔镜类则分布较广，包括哈工大转化的思哲睿、天大转化的威高、上海交大的术锐等。

随着技术的发展与普及，逐步出现了以手术机器人为核心进行的如校企联动、手术机器人产业集群模式等发展机制，“像中关村智友研究院、苏州协同创新医用机器人研究院、北京市医疗机器人产业创新中心这样由地方共建的手术机器人平台，也为产业的发展贡献了力量。”匡绍龙介绍。

当前，手术机器人已经广泛应用于各个科室。匡绍龙表示，手术机器人在研发过程中遇到的第一大挑战就是医工结合。匡绍龙指出，影响手术机器人研发迭代的主要原因有 N 个，首先每个医生都有自己的手术特色，所以对手术机器人就提出了很多个性化的要求，这就造成了设计上的瓶颈。匡绍龙以骨科手术机器人为例介绍，以工科视角来看，把骨头当作刚体进行处

理，但在临床中，这样的手术机器人是不能达到医生预期的。手术机器人不是一个单一的机械臂，而是一套继承性的医疗系统，需要包含配套的影像处理、术中导航等，因此成本也很高。“操作手术机器人对医生而言，也是一种挑战，需要一定的培养周期。”

匡绍龙表示，未来手术机器人将向四个方向发展，即精准化和智能化、专科化和工具化、多适应症、微小化。“精准化和智能化意味着因机器人造成的病人创口将更小、病痛将更轻，专科化和工具化则解决了现有手术机器人系统大占地面积的问题，减少手术室内的安全隐患；多适应症则是将单台手术机器人的经济价值最大化，仅需更换作业模式和对应的末端执行器就能适用于更多科室，而微小化则应用于体内诊疗包括肿瘤、血管内、呼吸道内等。”

### 我国手术机器人进入快速发展期

随着国家政策的支持以及医疗装备研发的不断突破，我国手术机器人产业链的国产化进程加速推进。《机器人产业发展规划（2016—2020年）》鼓励腹腔镜和神经外科手术机器人等创新设备的产业化。《“十四五”医疗装备产业发展规划》《“机器人+”应用行动实施方案》《“十四五”医疗装备产业发展规划》等政策为手术机器人的研发提供了良好的环境和支撑。

匡绍龙表示，北京、上海、深圳等地

深度布局手术机器人，《上海市高端装备产业发展“十四五”规划》《北京市机器人产业创新发展行动方案（2023—2025年）》等政策接连出台。多样化产业政策推动了区域手术机器人产业链的快速发展，他介绍道，“北京的微眸医疗、深圳的精锋医疗、上海的微创医疗等，都是近年来手术机器人赛道涌现出的杰出榜样。像我所在的深圳对手术机器人产业发展给出了诸多便利，包括我个人提出的智慧手术室项目，深圳给予了从资金到样本的全方位支持，对技术的转化、成果的落地起到了巨大且关键的作用”。

过去十年，我国手术机器人行业已经从技术追赶阶段迈向了局部领先阶段，但要实现全面产业化，还需克服诸多障碍，弥补不足。在2025年全国两会上，中国科学院院士、同济大学附属东方医院院长陈义汉委员就建议，要优化管理流程，促进国产手术机器人规范化应用；强化医疗质量监管，确保国产手术机器人安全有效应用；加强政策扶持，推动国产手术机器人的技术升级和产业规模化。

随着“机器人+医疗”生态的不断完善，我国有望在2030年前后成为全球手术机器人产业领先梯队中的一员。中国手术机器人将为全球精准医疗领域贡献“中国智慧”和“中国方案”，开启全球医疗健康事业新篇章。

#### 作者信息：

刘政鑫 本刊编辑



在线阅读(节选)



# 十年磨一剑， 服务机器人重塑生活

■文 / 刘政鑫



## 引言

当第一缕晨光穿透智能窗帘，咖啡机器人已经根据你的口味偏好调制好了一杯个性化的饮品，而送餐无人机正在穿越城市天际线，将美味的早餐准时送达你的门前。过去十年，在技术创新的驱动下，服务机器人产业实现了质的突破，这些场景不再是科幻小说中的想象，而是我们当下生活的真实写照。

十年前，服务机器人的概念尚未被广大消费者和商家所接受，市场渗透率极低。当时，机器人的智能化程度有限，更多依赖于机械执行而非智能决策。随着技术的不断进步和消费者需求的日益增长，家庭与商用服务机器人开始迎来了前所未有的发展机遇。

如今，深度学习技术得到广泛运用，机器人实现了自我优化和功能提升，能够高效完成一系列复杂多样的任务，成为人们生活中不可或缺的伙伴和助手。人机共生的理念深入人心，机器人产业正在经历质的飞跃，朝着高质量发展的新阶段迈进。

### 从机械执行跨越到智能感知

十年前，服务机器人产业尚处于技术积累阶段。家庭清洁设备普遍采用随机碰

撞算法，路径规划误差较大。在商用领域，机器人面临的挑战更为严峻。例如，餐饮配送机器人仅能识别固定轨道，语音交互系统响应速度缓慢等，难以适应复杂环境的需求。

转折点出现在 2017 年，环境感知技术取得突破，搭载 SLAM 技术的全局规划系统在清洁设备中的应用，清洁实现效率大幅提升，标志着自主导航技术进入实用化阶段。

人工智能技术的发展进一步推动服务机器人变革。多模态传感器集成技术从期刊论文中的理论，逐步转为行业应用的实践。毫米波雷达与 3D 视觉系统的融合应用，使地面微尘的识别精度达到了毫米级，能耗降低了超过一半。群体智能调度技术的突破，使配送机器人集群能够实现每秒数十台设备的协同运作，在密集场景下单





日配送量突破十万级。在人机交互领域，情感识别算法实现了微表情分析，方言实时互译系统支持更多种地方语言，进一步拓展了服务机器人的适用边界。

随着硬件技术的不断迭代更新，加速产业升级的进程。分布式算力架构的广泛应用，显著提升计算效率，使单台设备现在能够并行处理多达数十项任务，不仅大幅降低了响应延迟，而且算力密度实现了成倍的增长。此外，能源系统的革新也成了人们关注的焦点，固态电池模块的应用显著延长了商用设备的续航时间，并且充电效率相较于传统方案有了显著提升，有效缓解了能源焦虑问题，为用户带来了更加便捷和高效的使用体验。

### 从政策扶持转型为生态共建

服务机器人的发展离不开政策的支持

与引导，产业的不断发展也促使多方形成合力。在产业链上下游的共同努力下，正在不断形成以技术创新为核心、市场应用为导向的良性生态圈。

政策引导提供产业发展动力。在 2016 年，《机器人产业发展规划 2016—2020 年》首次将服务机器人纳入国家战略性新兴产业的范畴，并设立了专项基金以支持核心部件的研发工作。2023 年，《“机器人+”应用行动实施方案》的发布，明确了十大应用领域，其中包括养老服务和商业社区服务两项服务机器人应用领域。到了 2024 年，《关于打造消费新场景培育消费新增长点的措施》的颁布，明确提出了在家庭清洁、商业服务等领域拓展机器人应用的深度，并推动长三角、珠三角地区形成六大机器人产业集群。国产谐波减速器的市场占有率取得了显著突破，伺服电机成本大幅降低。



市场机制促进技术应用转化。从 2015 年至 2025 年，家庭服务领域内针对老年人的适老化产品的市场份额增长了近三分之一，其中集成了健康监测和跌倒预警等功能的设备，已经成为银发人群的必需品。在商业应用领域，创新展现出多样化的发展态势，餐饮服务的全自动化流程系统有效减少了厨房的人力需求，并显著提高了菜品制作的一致性，进而改变了传统的服务模式。资本市场对于技术创新的响应尤为敏捷，同时，服务机器人研发领域的投资已占到行业总收入的近五分之一。

产学研协同模式激发创新活力。通过建立“技术研发-场景测试-商业转化”的快速通道，产学研协同模式得以实现。AI 烹饪算法通过深度学习技术复现了八大菜系的精髓，实现了极高的火候控制精度，推动了家庭料理设备技术的迭代更新。在物流领域，实现了“空中分拣-自动装卸-末端配送”的全链路自动化，单日处理更是突破了千万件级，仓储效率相较于传统模式实现了跨越式增长。这种跨领域的协作催生了智能体验馆、无人服务街区等新兴业态，使得技术创新与市场需求形成了有效的闭环。

### 从工具替代到重塑生活方式

家庭服务机器人正在重塑我们的生活方式。多功能管家设备广泛普及，其模块化设计能够灵活切换清洁、烹饪、安防等功能，通过多核处理器控制智能终端，实现全屋设备的联动。而商用服务机器人的

批量落地，正在催生新的经济形态。零售行业引入了智能导购机器人，通过 3D 扫描技术为顾客推荐服饰；酒店服务机器人实现了全流程无人化运营，集成了人脸识别、行李搬运、客房服务等功能模块，提升了客户满意度；物流领域的革新尤为显著，分拣机器人在高货物识别准确率的支持下，能够实现日均处理数百万件包裹，效率是传统人工仓库的十倍以上。

随着机器人技术在日常生活中的深度融入和广泛应用，社会正在经历一场深刻的文明跃迁。这些技术突破不仅塑造着当下的生活方式，更预示着未来社会的无限潜力和广阔前景。在这场已经持续了十年之久的科技变革中，服务机器人已经从最初简单的原始机械装置，进化成为具备复杂情感认知能力的智慧体，不仅是效率革命的积极推动者，还扮演着人文关怀传递者的角色，通过与人类的互动，带去情感上的慰藉和支持。

这场始于技术突破、兴于产业变革、融于文明演进的发展浪潮，深刻改变了人们的生活方式，正在书写人类与机器人融合共生的新篇章。

#### 作者信息：

刘政鑫 本刊编辑



在线阅读(节选)

# 机器人“喷涂”国产制造业蓝图

■文 / 李轲昕



## 引言

历经十余年深耕，北京炎凌嘉业智能科技股份有限公司在机器人喷涂领域屡破技术壁垒，逐渐成长为国家级专精特新“小巨人”企业。炎凌嘉业依托防爆机器人、重载机器人等核心产品，在攻克汽车行业涂装的行业难题之余，加速布局轨道交通、军工、航空航天、风电行业的喷涂、智能装配等应用。从工艺突破到全链创新，炎凌嘉业正以先进的机器人技术，加快我国装备制造业的智能蓝图。

**新**能源汽车的快速发展为汽车涂装行业带来新需求。重庆赛力斯汽车超级工厂喷涂车间内，日本发那科机器人在为问界汽车喷涂，以“国产新能源汽车”著称的比亚迪也选择布设来自德国杜尔的“未来涂装车间”。一直以来，国产喷涂机器人在汽车行业的生存空间很小。

国内唯一一家提供汽车整车喷涂解决方案的本土企业——北京炎凌嘉业智能科技有限公司（以下简称“炎凌嘉业”），成立至今已有十一二年的时间。在这不算短暂的发展历程中，炎凌嘉业一步一脚印，夯实汽车喷涂领域的技术根基，将应用领域逐步拓展至乘用车、商用车、工程机械、轨道交通等领域，目前服务的主要客户包括中国中车、长安汽车、潍柴动力、一汽重汽等。

### 两类核心产品满足喷涂多样化需求

以飞机喷涂为例，炎凌嘉业研发负责

人介绍道，空客、波音及国内各大飞机制造商的飞机表面涂装作业环节，仍在依赖人工完成绝大部分工作。这种作业模式存在着喷涂环境差、喷涂工艺不可控（漆膜厚度不均匀）、劳动强度大等难题，既影响项目进度又危害作业人员健康。炎凌嘉业应用自主研发的防爆机器人、复合防爆机器人结合空间定位导航技术、机器人安全技术及喷涂工艺技术构建综合系统，解决飞机等大型目标体的表面涂装作业的难题。3月14日，由炎凌嘉业、高校、企业团队联合提请的“国产大飞机整机智能涂装技术及装备”项目，经中国机电一体化技术应用协会鉴定为国际先进水平。飞机喷涂技术已得到中国商飞的成功验证，未来该技术有望为我国航空航天大型装备制造提供喷涂作业整体解决方案。

### 保障安全、应用广泛的防爆机器人

炎凌嘉业的防爆机器人系列产品是其核心产品之一。“防爆机器人并非不怕爆炸，而是通过特殊的技术手段，确保在易燃易爆环境中不会引发爆炸。”公司研发



图1 炎凌嘉业机器人产品





图 2 炎凌嘉业参加 2024 世界机器人大会

负责人耐心地讲解道。炎凌嘉业在防爆机器人中运用了多种防爆技术，如正压防爆、隔爆、本安防爆等，形成了丰富多样的产品，目前形成了从核心零部件到喷涂用的防爆机器人、重载防爆机器人、移动防爆机器人三个产品系列。

除了喷涂环境需要做防爆处理，炎凌嘉业还研制了防爆 AGV 底盘，用于在防爆环境下进行物料的转运工作。复合防爆机器人是由防爆 AGV 底盘加上机械手臂组成，具备移动喷涂功能，还可用于金属打磨、易燃易爆原材料搬运等领域。在弹药生产等行业，由于过去一些设备防爆等级不高，曾发生多起爆炸事故，造成人员伤亡。炎凌嘉业的防爆机器人能够有效解决这些安

全隐患，保障生产过程的安全与稳定。

### 高效搬运、转运的重载机器人

重载机器人也是炎凌嘉业的重点产品之一。炎凌嘉业的重载机器人包括重载 6 轴工业机器人以及重载 AGV。重载 6 轴工业机器人负载达到 1 吨以上，主要用于搬运重型物品，而重载 AGV 则侧重于重型物品的转运。这些产品主要应用于大型工业领域，解决大型工业交通中的搬运和转运难题。

在 2024 世界机器人大会上，炎凌嘉业展出了会场中最大的机器人——自重超 7 吨、最大抓取负载重量 1.2 吨的重载工业机器人。刘大宇表示，炎凌嘉业正向

着更高的研发生产目标——最大负载可达2.3吨的新一代重载工业机器人前进。

### 占领汽车喷涂技术高地

炎凌嘉业以汽车喷涂起家，是国内唯一一家能够做汽车整车喷涂的本土企业。初创的喷涂机器人公司一般从零件喷涂起步，家电卫浴、器械零部件等小金属件的喷涂工艺相对简单，而炎凌嘉业一直精研汽车整车喷涂技术。

汽车喷涂不仅要保证外观颜色、光泽色泽一致，更要确保不同位置的漆膜厚度均匀，这就需要精确控制一系列工艺参数，包括流量、转速、高压成型空气等。由于汽车不同位置的参数需动态变化，且一个汽车可能存在上千种变化组合，这使得汽车喷涂工艺的技术难度极大，也是外资品牌长期垄断该领域的原因之一。

为了应对汽车喷涂工艺的挑战，炎凌嘉业自主研发喷涂软件系统，内部积累了十几年来在汽车喷涂方面的实操数据，能够根据车型、油漆属性等因素进行微调，确保喷涂效果的一致性和稳定性，从而快速调试新型喷涂产线。一般情况下，使用该系统调试汽车喷涂产线，快则一个月，长则2~3个月即可完成。

### 国内外市场双轮驱动

#### 国内市场遍地开花

炎凌嘉业在国内市场的布局广泛，其产品和服务覆盖了多个行业。介绍，炎凌

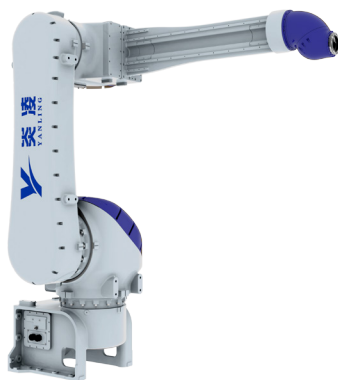


图3 炎凌嘉业防爆工业机器人

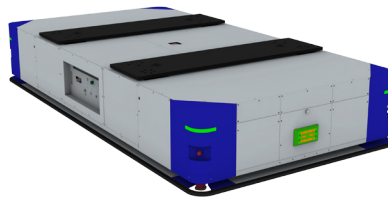


图4 炎凌嘉业防爆AGV

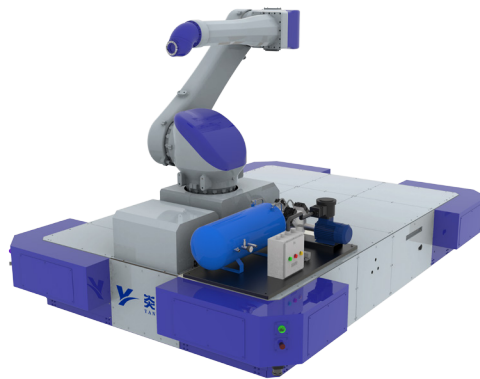


图5 炎凌嘉业复合防爆AGV



图6 炎凌嘉业重载工业机器人



图 7 炎凌嘉业入选博士后科研工作站

嘉业为重庆长安打造了亚洲最大的汽车喷涂产线，该产线启用一百多台机器人，可喷涂多种轿车车型；还为中国中车提供高铁外表面的喷涂服务。在风电行业，公司参与风电轮毂装配以及风电叶片的移动喷涂工作。公司制定行业细分的市场策略，针对不同行业成立专门的团队，能够更好地满足不同客户的需求，提高客户满意度，从而在国内市场占据一席之地。

### 国际市场势如破竹

随着国内市场竞争日益激烈，炎凌嘉业积极拓展国际市场，向海外市场提供重载解决方案以及销售机器人产品。据悉，炎凌嘉业已与白俄罗斯合作，在当地成立办事处和分公司，共同开拓海外市场。通过与白俄罗斯的合作，炎凌嘉业不仅能够将自身的技术和产品推广到国际市场，还能借助当地的资源 and 市场优势，进一步提升公司的国际竞争力。

### 创新引领企业持续发展

一方面，炎凌嘉业计划进一步扩充防

爆机器人产品线，利用大模型等新兴技术，推出 VLA 架构的具身智能机器人产品，提升防爆机器人的整体智能化水平。另一方面，在重载机器人领域，炎凌嘉业将推出负载更大的产品，以适应不断发展的工业生产需求。为将前沿技术转化为产业动能，炎凌嘉业长期与北京科技大学、北京理工大学等多所高校开展产学研合作，合作领域涵盖喷涂技术、移动机型技术等多个方面。炎凌嘉业于 2024 年入选博士后科研工作站，打造高层次人才创新平台，吸引青年科技人才前来开展研究工作，共同推进科研成果落地和创新发展。

2025 年 1 月，北京城市副中心产业高质量发展大会在北京市通州区举办，炎凌嘉业在现场签约重大项目，将瞄准机器人中试、测试领域的空白，在通州区建设能辐射京津冀区域的机器人中试中心。炎凌嘉业作为国家级专精特新“小巨人”企业，每年都投入千万元用于技术研发，未来将继续秉持创新发展的理念，不断提升自身实力，为推动防爆及重载机器人在各行业应用和发展作出更大贡献。

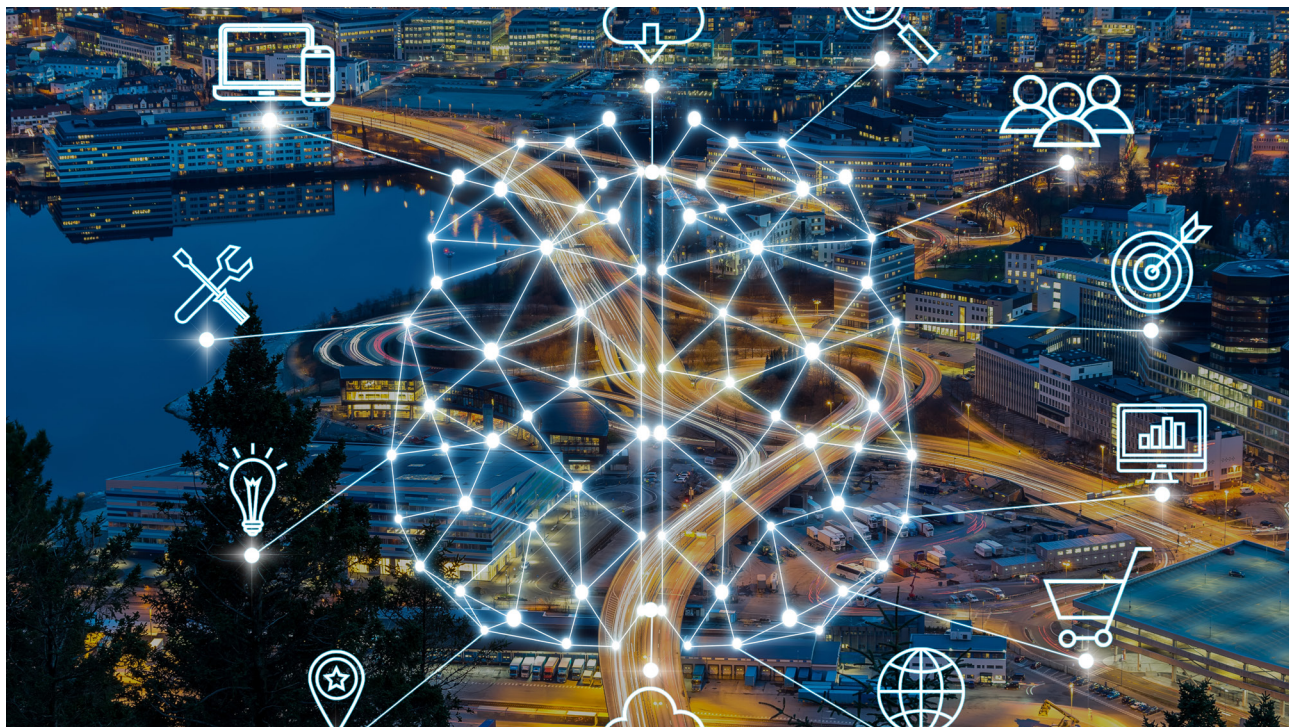
### 作者信息：

李轲昕 本刊编辑



在线阅读(节选)





# 移动机器人导航技术的研究进展

■文 / 杨雪

## 摘要

本文从移动机器人导航的主要目标出发，分析了导航任务的核心目标和实现路径，详细阐述了多传感器融合定位技术、智能路径规划算法、SLAM 技术的改进与优化，以及智能导航系统的集成与应用的研究现状。同时，针对当前技术存在的瓶颈，提出了未来研究方向，包括深度学习与强化学习在导航中的应用、多机器人协同导航与任务规划，以及边缘计算与云端协同的导航架构设计。本文旨在总结现阶段研究成果，为推动移动机器人导航技术的进一步发展提供参考和思路。

**随**着机器人技术的飞速发展，移动机器人在工业、服务业、物流等领域的应用需求日益增长。作为移动机器人自主运行的关键技术，导航技术在提升机器人环境适应性、定位精度和路径规划能力等方面发挥着核心作用。移动机器人导航的核心目标是从起始位置到目标位置的路径规划与控制，要求实现高效的引导（guiding）与安全的航行（moving）。然而，复杂环境和动态变化对导航技术提出了更高的要求，包括实时环境感知、多目标协同、自主决策等能力。近年来，研究人员在多传感器融合、智能算法、SLAM 技术，以及智能系统集成等方面取得了重要进展，但仍面临着动态环境适应性不足、路径规划效率低、实时性欠佳等挑战。为此，本文总结了移动机器人导航技术的最新研究进展，探讨了深度学习、多机器人协同、边缘计算等新兴技术在导航领域的应用潜力，以期对未来研究提供参考和指导。

## 移动机器人导航的主要目标

机器人导航任务的核心目标是实现从起始位置  $x_s$  到目标位置  $x_g$  的路径规划与控制。为了达到这一目标，导航任务通常要求两大主要功能：引导（guiding）与航行（moving）。引导的目标是通过合适的导航策略减少路径规划中的代价函数，以实现目标的高效达成；航行的目标是确保机器人在移动过程中避开障碍物，保持安全性，避免与环境中的任何危险因素发生碰撞<sup>[1]</sup>。

在数学上，导航任务可以通过一个优化问题来描述，通常涉及到最小化一个代价函数  $c(u_0, u_1, \dots, u_T)$ ，该代价函数衡量了机器人运动过程中各项控制信号的综合效果，并确保机器人能够从起点  $x_s$  到达目标点  $x_g$  的过程中始终满足安全约束条件。导航的优化问题可以写为：

$$\begin{aligned} u_0, u_1, \dots, u_T = \arg \min & c(u_0, u_1, \dots, u_T) \\ \text{s.t.} & f(x_k, u_{k-1}, \omega_k) = \\ & x_k, x_k \in Q_{free}, \forall k = 0, 1, \dots, T \end{aligned}$$

其中， $x_k$  表示机器人在时刻  $k$  的状态， $u_k$  为机器人控制信号， $\omega_k$  为过程噪声， $Q_{free}$  是机器人能够安全移动的空间区域，且路径必须避免进入障碍物区域  $Q_{obs}$ 。在此框架下，机器人不仅要在尽可能短的路径上完成从  $x_s$  到  $x_g$  的转移，还要确保路径中的每一时刻都不会穿越已知的障碍物区域，从而保证机器人在执行任务时不会发生碰撞或损坏。

引导（guiding）和航行（moving）是导航系统中相互补充的目标。引导注重对路径的优化，寻求最小化代价函数并提高导航效率，而航行则注重路径的安全性，确保机器人在动态环境下仍然能够规避障碍物，顺利完成目标任务。两者相辅相成，最终确保机器人在不同环境和场景中的可靠性与实用性。

## 移动机器人导航技术的应用研究

### 多传感器融合定位技术

近年来，多传感器融合技术在移动机



器人定位中得到了广泛应用。金凯乐<sup>[2]</sup>等提出了一种基于激光 SLAM 的移动机器人自主导航优化方法，利用图优化理论获取全部位姿拓展节点对应的子节点，通过闭环检测计算误差最小的位姿，并根据 SPA 算法更新位姿，实现了准确的机器人位姿估计。翁嘉鑫<sup>[3]</sup>等将传统的基于 ROS 平台的 Navigation 功能框架与 AprilTag 标签算法相结合，设计了一种新型导航系统。该系统采用 Gmapping 算法和 AMCL 算法分别完成环境建图与机器人定位，通过 Navigation 功能框架获取环境地图与机器人位姿信息进行路径规划，并结合 AprilTag 标签算法进行导航，提高了系统在多场景下的适应性。江航<sup>[4]</sup>等在 ROS2 的基础上设计了自主移动机器人 AMR 的硬件和软件系统架构，提出了基于多传感器数据融合的地图构建技术。相关学者采用深度相机和激光雷达进行融合建图，并利用陀螺仪辅助进行机器人姿态调整，提高了机器人的自定位准确度和导航精度。这些研究表明，多传感器融合技术可以有

效提高移动机器人的定位精度和环境感知能力，为实现可靠的自主导航奠定了基础。

### 智能路径规划算法

智能路径规划是移动机器人导航的核心技术之一，近期研究主要集中在改进传统算法和设计新型算法两个方面。蒋泽艳<sup>[5]</sup>等提出了基于异构串行蚁群算法的路径规划方法，通过改进栅格模型的投影、膨化和编码过程，引入信息素非均匀初始化方法和角度启发因子，并采用异构蚂蚁串行策略，有效减少了机器人工作路径长度和拐点数量。黄莲花<sup>[6]</sup>等提出了一种新的全局路径规划器，采用 Voronoi 图提取环境中最安全的区域，并将快速行进法应用于该区域，从而获得最短的路径。此外，他们还提出了通用机器人导航架构，将机器人导航和环境快速全局规划器相结合，并采用样条规划曲线对全局路径进行细化插补。王凯<sup>[7]</sup>等提出了一种改进的 A 算法实现 AMR 的路径规划，提高了路径规划的效率 and 准确性。有学者对传统 A 算法进行





了改进，提出了一种 3-n 贝塞尔曲线优化方式，并利用构建的优质地图进行验证，提高了路径的平滑性。这些研究表明，智能路径规划算法在提高路径质量、减少计算复杂度和增强环境适应性等方面取得了显著进展。

### SLAM 技术的改进与优化

SLAM 技术作为移动机器人自主导航的关键技术，近年来得到了广泛研究和改进。岳康<sup>[8]</sup>针对传统 SLAM 方法在实际应用中存在数据计算量大、先验信息获取时间成本高等问题，研究了基于建筑信息模型 BIM 的室内移动机器人导航技术，应用 BIM 信息实现移动机器人室内地图构建、定位及路径规划。岳康提出了一种融合视觉信息的自适应蒙特卡罗定位算法，引入扫描匹配优化点云对齐，有效提高了定位精度。张宇轩<sup>[9]</sup>对粒子滤波算法进行了研究，提出改进的蝴蝶优化算法，优化传统粒子滤波算法的建议分布，有效降低后验位姿估计误差。结合蝴蝶算法，张宇轩提出了改进的 RBPF-SLAM 算法，通过仿真实验验证了算法的有效性。刘睿<sup>[10]</sup>提出了一种融合点线特征的视觉惯性 SLAM 系统，以应对快速运动或弱纹理场景下的导航定位需求。刘睿改进了 EDLines 算法，引入了线段长度抑制和分组合并策略，提高了线特征提取的质量，并提出了一种基于 KLT 光流跟踪的线特征匹配方法，显著提升了系统的实时性。这些研究表明，SLAM 技术在提高定位精度、增强环境适应性和提升实时性方面取得了重要进展。

### 智能导航系统集成与应用

随着移动机器人技术的不断发展，智能导航系统的集成与应用成为研究热点。王伟<sup>[11]</sup>等设计并搭建了集环境感知和导航于一体的小度机器人移动平台，实现了主流激光 SLAM 算法，并采用轮式里程计和 IMU 数据相融合的方法提高了移动平台定位的准确性。王伟等还提出了一种基于视觉的目标距离监测方法，提高了移动平台在实际工作中的智能化和可靠性。邢军<sup>[12]</sup>等以送餐等配送类智能服务机器人为研究对象，研究了该类移动服务机器人的典型运动学模型、自主定位与导航技术，并开发了服务机器人性能测试系统，实现对服务机器人自主定位和导航能力性能的测试。陶树林<sup>[13]</sup>等设计了一种基于激光雷达 SLAM 的物流移动机器人，采用树莓派 4B 主控板、STM32 单片机、激光雷达、相机等硬件设备搭建移动机器人，通过引入 Cartographer 和 Gmapping 构建地图，并融合相机增加机器人的安全性及功能性。这些研究表明，智能导航系统的集成与应用正朝着多功能、高可靠性和实用化的方向发展，为移动机器人在各领域的应用提供了有力支持。

## 移动机器人导航技术的未来研究方向

### 深度学习与强化学习在导航中的应用

随着人工智能技术的快速发展，深度学习和强化学习在移动机器人导航领域展现出巨大潜力。未来研究可以围绕以下几个方面展开。首先，利用深度学习技术提



### 边缘计算与云端协同的导航架构

随着物联网和5G技术的发展,边缘计算与云端协同的导航架构将成为未来移动机器人导航系统的重要发展方向。首先,需要研究基于边缘计算的实时导航算法,将部分计算任务从云端迁移到边缘设备,减少通信延迟,提高系统的实时性和可靠性。其次,探索云边协同的大规模环境建模和地图更新技术,利用云端强大的计算能力和存储能力,实现多机器人、多场景的地图信息融合和共享。再次,研究基于边缘智能的自适应导航策略,根据本地环境和任务需求动态调整导航参数和算法,提高系统的灵活性和适应性。此外,还需要关注边缘设备与云端之间的高效通信机制,设计适应性强的数据压缩和传输策略,平衡通信效率与信息完整性。同时,探索基于联邦学习的分布式导航模型训练方法,在保护数据隐私的前提下,利用多个边缘节点的数据提高模型性能。最后,研究云边协同的安全导航机制,包括数据加密、身份认证和入侵检测等技术,确保整个系统的安全性和可靠性。这些研究方向将有助于构建更智能、更高效和更安全的移动机器人导航系统,为未来智能化、网络化的机器人应用奠定基础。

### 结语

移动机器人导航技术的发展为机器人在复杂环境中的高效运行奠定了基础。本文分析了当前研究热点及其应用,包括多传感器融合定位技术、智能路径规划算法、

SLAM技术的优化和智能导航系统的集成。同时,提出了未来研究方向,聚焦深度学习与强化学习、多机器人协同导航,以及边缘计算与云端协同导航架构的发展潜力。未来,随着人工智能和物联网技术的进一步发展,移动机器人导航系统将在环境感知、自主决策和系统安全性等方面得到显著提升。通过多学科交叉融合与技术创新,移动机器人将在工业生产、服务业和智慧城市等领域发挥更加重要的作用。

### 参考文献:

- [1] 杨姝慧,郝子鑫,李彬.机器人路径规划算法研究分析与综述[J].齐鲁工业大学学报,2024,38(05):37-46.
- [2] 金凯乐,李发元,杨婷.激光SLAM技术下移动机器人自主导航优化研究[J].激光杂志,2024,45(5):20-24.
- [3] 翁嘉鑫,何坚强,陆群.基于ROS平台的移动机器人自主导航技术研究[J].自动化技术与应用,2023,42(4):5-8.
- [4] 江航,邱胜海,孙小肖,等.ROS2环境下移动机器人导航及路径规划研究[J].物联网技术,2023,13(12):125-127.
- [5] 蒋泽艳,郭林煊,廖军,等.移动机器人导航路径的异构串行蚁群算法规划[J].机械设计与制造,2024(1):342-346.
- [6] 黄莲花,李光明.基于Voronoi图和快速行进的移动机器人导航路径规划[J].机械设计与制造,2023(11):87-92.
- [7] 王凯,张研,王成.基于融合建图的全方位自主导航机器人研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2024(002):000.
- [8] 岳康.基于BIM的室内移动机器人导航技术研究[D].石家庄铁道大学,2023.
- [9] 张宇轩.基于ROS的移动机器人SLAM和导航技术研究[D].常州大学,2023.
- [10] 刘睿.基于点线特征的移动机器人视觉惯性SLAM与导航研究[D].重庆理工大学,2024.
- [11] 王伟,王勇,张晔,等.智能消毒机器人移动平台导航系统研究[J].机械设计与制造,2024(5).
- [12] 邢军,李岳洪,吴旻,等.室内智能服务机器人自主定位与导航性能测试技术研究[J].日用电器,2023(3):11-19.
- [13] 陶树林,刘祚时,唐雨.基于SLAM物流移动机器人导航技术研究[J].机电工程技术,2024,53(6):100-104.

### 作者信息:

杨雪 国家知识产权局专利局专利审查协作天津中心知识产权师



在线阅读(节选)





# 基于深度学习与机器视觉的 水果分拣系统设计

■文 / 韦沛成、张申奥、林鹏威、彭泽骁、余华

## 摘要

随着抖音、快手等短视频带货平台的兴起，为传统农产品销售拓宽了销售渠道，显著带动了地方农产品销售。针对家庭或微小型农场用人成本高、人工分拣效率低和主观性强等问题，本文设计了基于深度学习与机器视觉的水果分拣系统，主要包括水果深度学习模型构建和机器视觉识别系统设计。该系统基于YOLOV8模型，不断优化调整模型参数和训练过程，将训练高效、精准的水果模型部署至嵌入式系统。然后，结合机器视觉系统和分拣执行机构，实现自动化的水果分拣操作，能够有效地提高农场的分拣效率，减少人工干预，并确保水果品质。

资助项目：大学生创新创业训练项目“‘智慧助农’——果园分拣系统设计”，项目编号：202410595089

随着抖音、快手等短视频平台兴起，特色农产品借电商“出山”，有效地促进农产品产销对接、推动农业转型升级、拓宽农民就业增收渠道等方面成效显著<sup>[1-2]</sup>。然而，在乡村农业现代化发展实践中，农户因资金投入规模较小，无法像大型企业采用现代全自动化的生产经营方式，生产效益较低。特别是水果类农产品的生产经营，不仅采收时间短、品质和新鲜度要求高，还需要雇佣大量的劳动力，导致短时间内的当地人工成本不断攀升，影响小微企业、家庭农场等可持续发展。针对这一问题，课程组深入研究乡村农场水果分拣需求，设计果园智能分拣系统。该系统集成了YOLO模型、图像识别技术、深度学习和传感器技术，在作业区内可实时检测水果，并给出其位置、类别、大小、成熟度等特征，高效地

完成对目标的分拣，提升小微型农场较复杂水果分拣场景中的自动化管理水平。

整体设计方案

总体方案设计

该水果分拣系统基于 RK3588 作为主控芯片，结合 YOLOv8n-seg 深度学习模型、OpenCV 图像处理技术和 OpenCL 并行计算优化，旨在实现水果的快速识别、品质分级与高效分拣。系统核心采用 RK3588，通过 USB、Wi-Fi、RS485、HDMI、I2C 和 PWM 等通信接口与摄像头、步进电机、显示屏等外围硬件交互，协调各模块工作。摄像头部分采用 V4L2 驱动框架，支持实时调整采集速率、曝光度和对焦距离，以适应复杂光照条件。

在图像处理部分，利用 YOLOv8n-

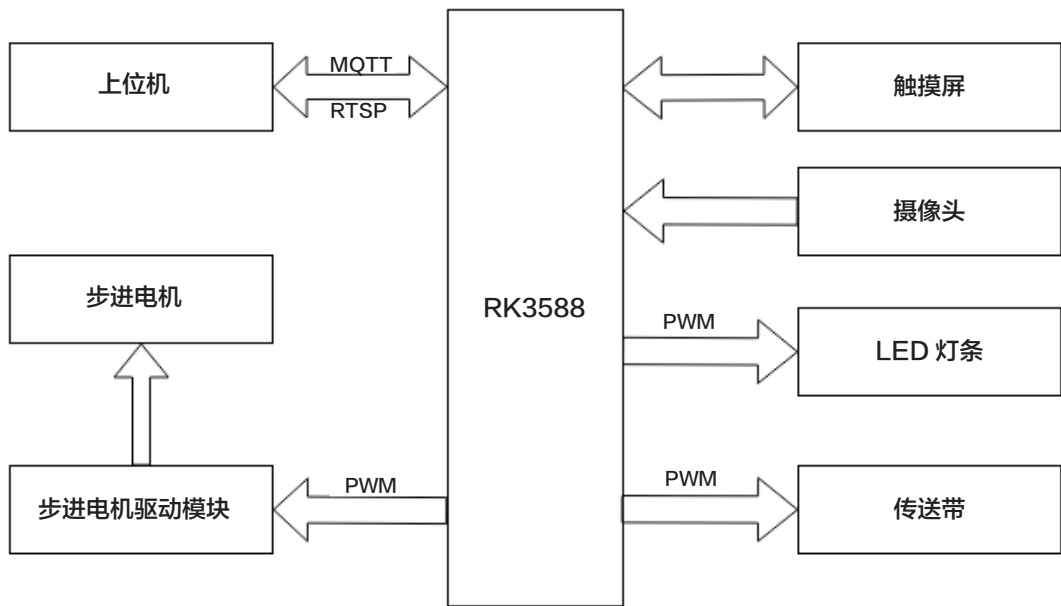


图 1 系统流程图

seg 模型对水果的种类和表面缺陷（如裂纹、斑点、损伤等）进行精准识别，通过 OpenCL 技术对 YOLOv8 推理过程进行加速，充分发挥 RK3588 的硬件并行计算能力，大幅提高识别速度。同时，结合 OpenCV 进一步分析水果的颜色、形状和纹理特征，评估其新鲜度和品质等级。识别结果由主控芯片分类处理，通过步进电机精准控制传送带，将水果按照三个等级（如优质、中等、次等）分拣至不同出口，确保分拣的快速性与准确性。

系统配备 Qt 触摸屏界面，实时显示水果种类、缺陷信息、新鲜度评估结果和分拣统计数据，并支持用户对分拣策略进行自定义配置和远程监控。此外，系统通过 OpenCL 的计算加速功能实现了 YOLOv8 与 OpenCV 任务的高效并行处理，进一步提升了实时性能，满足高吞吐量需求。整体设计充分利用 RK3588 的计算能力、YOLOv8 的识别精度、OpenCV 的分析功能和 OpenCL 的加速优势，实现从数据采集到智能分拣的全流程高效自动化，为水果分拣提供了一种高性能、智能化的解决方案，系统流程图如图 1 所示。

## 硬件设计

### 电源设计

通过 QC2.0 协议<sup>[3]</sup>将电压诱骗升压至 12 V，以满足开发板的供电需求。该电路通过 Type-C 接口采用 QC（Quick Charge）协议诱骗技术，将充电器的输出电压从默认的 5 V 调节至 12 V。传统 USB

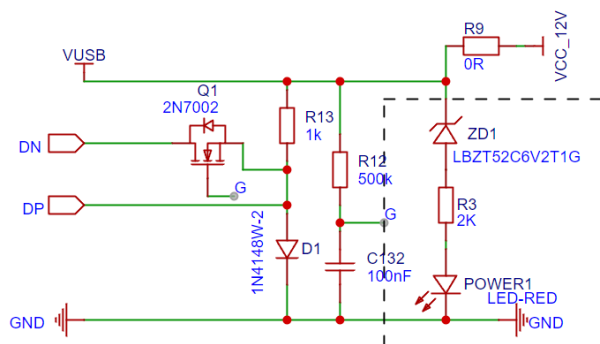


图 2 QC2.0 诱骗原理图

充电电压不超过 5 V，电流小于 2 A，实际充电功率不足 7.5 W。而 QC2.0 支持多档电压（如 5 V、9 V 和 12 V）和更大的电流，最高充电功率可达 36 W。在诱骗过程中，DP 和 DN 引脚分别输出 0.6 V 电压，此电压由 1N4148 二极管的结电压提供。通过由两个 470kΩ 电阻和一个 10 μF 电容组成的 RC 延时电路，控制 N 沟道效应管 2N7002 延迟导通，从而实现将 0.6 V 电压延迟传输至 DN 引脚，确保信号发送的时序正确。当诱骗信号被适配器成功识别后，适配器输出 12 V 电压。如图 2 所示。

驱动 28 步进电机工作电压为 24 V，需将 12 V 输入电压稳定升压至 24 V 输出。该电路采用 Boost 电路，以高效升压芯片 XL6019E1 为核心，其 24 V 升压电路原理图如图 3 所示。

### 装置主体与传输的设计

分拣装置根据计算机指令精准控制机械组件，将水果按照优质、中等、次等和损坏等标准分拣至不同出口。通过传输带，水果被输送至分拣区域，经过摄像头实时



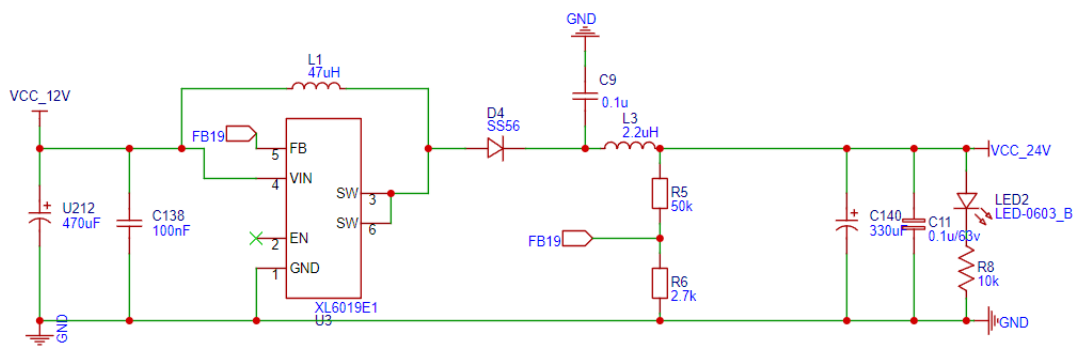


图 3 24 V 升压电路原理图

检测和识别后，计算机依据识别结果判定水果的分拣等级，并且分拣装置激活相应机械组件，迅速完成分类，并将水果引导至对应出口。

与传统的伸缩杆推动方式相比，该设计采用简化的操作机制，减少了复杂的机械运动，显著降低设备的磨损和故障概率，提高系统的稳定性与可靠性。同时，分拣装置提升了分拣效率，可在较短时间内完成多种等级水果的精确分类。分拣过程能够保持平稳流畅，确保水果在分拣过程中保持完整，避免因机械冲击造成的损坏。如图 4 所示。

### 机器视觉结构设计

该机器视觉检测系统由 RK3588 Linux 开发板和 IMX415 高清摄像头组成。摄像头固定安装在装置主体的顶端，通过 V4L2 驱动框架与开发板连接，确保能够精准捕捉水果的高分辨率图像。RK3588 开发板具备强大的计算能力，可高效处理来自 4K 超高清摄像头的实时图像数据。

IMX415 高清摄像头凭借出色的成像能力，支持多种先进功能，包括缩放、自动对焦和曝光度调节，使其能够在复杂光照条件下捕捉清晰、稳定的图像。通过 V4L2 接口，系统能够精确控制摄像头，

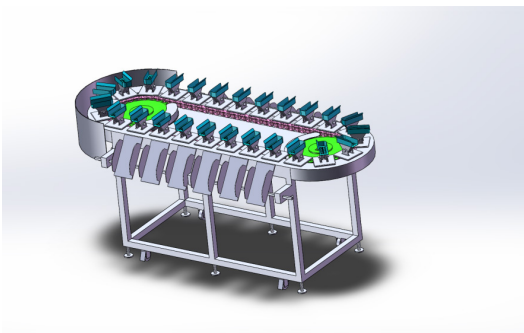


图 4 测模型转换流程图

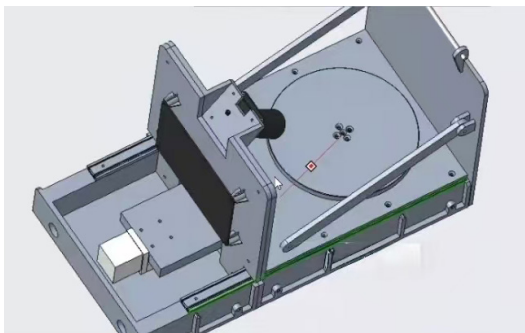


图 5 测模型转换流程图

实现初始化、参数配置和实时图像数据获取，并动态调整曝光、对焦和分辨率等核心参数。V4L2 充分发挥 IMX415 的硬件性能，保障了获取图像的高质量与精确性，为水果品质检测提供了可靠的视觉数据基础。如图 5 所示。

### 软件设计

#### 水果模型训练及识别

##### 数据采集及数据标注

为训练 RKNN 模型，需要准备合适的水果数据集，需要进行高质量的数据采集。数据采集需要使用高清分辨率摄像头，以确保图像的清晰度和细节完整性。本设计采用 IMX415 高清摄像头进行数据采集，该摄像头具有高分辨率和良好的成像效果，能够精准地捕捉水果的外观特征，如颜色、形状、大小和表面缺陷。

在数据标注中，为提高数据的多样性和全面性，需要在不同光照条件下对多种水果进行多视角标注，确保每个水果的各个面都能被充分捕获，保证标注数据的多样性和完整性。标注范围应覆盖水果的不同外观特征，并尽量减少错误标注和漏标的情况，水果数据标注如图 6 所示。

##### 模型训练

通过 Ultralytics YOLOv8 提供的工具库，使用 YOLOv8n-seg 模型进行训练，该模型不仅具备目标检测功能，还能实现水果的像素级精确分割，适用于种类识别、成熟度评估和表面缺陷检测。训练前，利用 VOTT 生成包含分割掩膜的标注文件，



图 6 水果数据标注

并转换为 YOLOv8n-seg 支持的格式。训练过程中，通过调整学习率、批量大小和训练轮数等参数，优化模型收敛效果，并实时监控分类损失、边界框回归损失和分割损失等指标，确保模型的稳定性和性能提升。

##### 模型转换

通过 Ultralytics YOLOv8 提供的工具库，配置训练参数，采用 YOLOv8n-seg 模型进行训练。该模型不仅具备目标检测功能，还能实现像素级的水果精确分割，适用于种类识别、成熟度评估，以及表面缺陷检测等多项任务。训练前，利用 VOTT 将标注好的数据集生成包含分割掩膜的标注文件，将其转换为 YOLOv8n-seg 支持的格式，以确保模型能够正确读取数据。在训练过程中，通过设置学习率、批量大小、训练轮数来优化模型的收敛效果，同时实时监控分类损失、边界框回归损失和分割损失等指标，确保模型在训练过程中保持稳定性并提升性能。

水果识别

RKNN 推理依赖于 RKNN-Toolkit 实现推理过程<sup>[4]</sup>，专为 Rockchip 硬件平台设计，可充分利用 NPU 实现高性能的实时 AI 任务处理。RKNN 推理的核心原理和一般神经网络的推理相似，通过前向传播计算以得到最终的输出；通过初始化加载预训练的 RKNN 模型文件，并创建运行上下文；查询模型的输入和输出张量信息，确保输入数据符合模型的格式和维度要求。在数据准备阶段，需对输入图像进行预处理尺寸调整，将处理好的数据传递给模型，随后执行推理，RKNN 引擎在硬件加速的支持下完成神经网络的前向传播计算，并生成推理结果。最后，获取推理的输出数据，并对结果进行后处理。在推理完成后，释放输出内存资源，清理加载模型时占用的内存。

水果成熟度识别

颜色是水果外观品质评价的重要指标之一。例如，柑橘的颜色较深通常表明其成熟度较高；苹果中红色分布越广且均匀，通常代表口感更佳；芒果的黄色是开始成熟的标志，红色则代表成熟并且口感更加

丰富；鲜枣的红色区域越大，通常意味着口感更甜、品质更好。

通过高清摄像机的拍照，对水果成熟度进行色泽检测<sup>[5]</sup>，通过 OpenCV 读取 RGB 颜色模型，本文以苹果为例，如图 7（a）所示。通过计算苹果图像中的红色强度占比（Ra），可以对苹果的成熟度进行分级。读取摄像头采集到的苹果图像，并将其转换为 HSV 色彩空间，如图 7（b）所示，以便提取红色区域。通过定义红色的色调范围，提取图像中对应颜色的区域，并将其转换为二值掩膜图后提取图像中的红色区域，并将其转换为二值掩膜图，如图 7（c）所示。接着，利用中值滤波和空洞填充等处理方法对掩膜图像进行去噪和填充，如图 7（d）所示，得到更加完整的红色区域，如图 7（e）所示。然后，代码计算红色区域的红色（R）、绿色（G）和蓝色（B）通道的像素值，并根据这些值计算红色强度占比（Ra），即红色通道的平均值与红绿蓝三通道总和的比值，公式为  $Ra = Rm / (Rm + Gm + Bm)$ 。根据 Ra 值，苹果的成熟度被分为四个等级：若 Ra 小于 0.45，则判断为不成熟；若 Ra 介于 0.45 和 0.5 之间，则为三级成熟；若

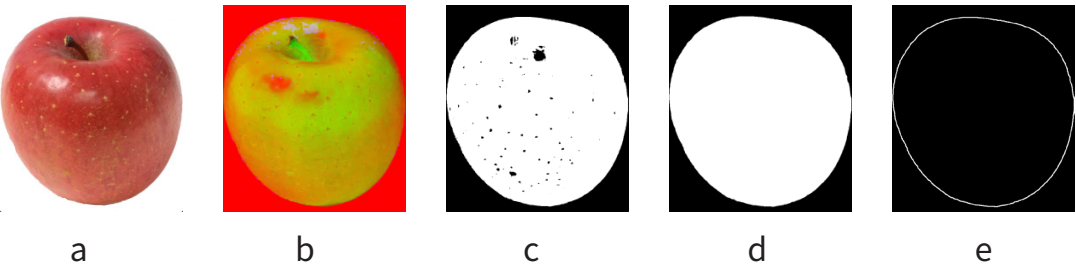


图 7 图像处理过程图



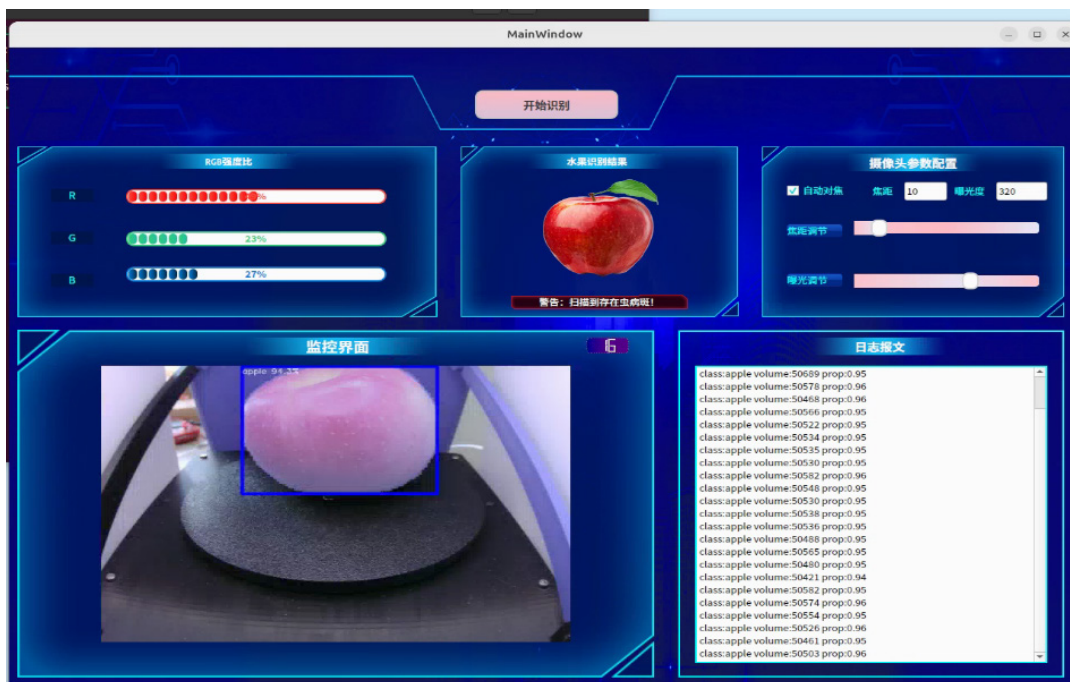


图 8 水果分拣 UI 设计

Ra 介于 0.5 和 0.55 之间，则为二级成熟；若 Ra 介于 0.55 和 0.6 之间，则为一级成熟；而 Ra 值大于 0.6 时，表示苹果已经完全成熟。

## 水果分拣系统 UI 设计

基于深度学习分类与机器视觉的水果分拣机，结合 QT-creator 软件设计了个性化的监控平台界面，如图 8 所示，提供了直观、高效的操作体验。在分拣机运行过程中，系统通过 RTSP 协议进行实时视频流推送，用户可以通过平台界面实时监控分拣机的工作状态。为了提升信息的管理与可视化，平台通过 MQTT 协议将采集到的各类数据（如水果分类信息、成熟度、分拣状态等）融入可视化界面，实时

显示在监控平台上，并将所有重要信息写入日志文件，便于后续的数据分析与追踪。同时，系统支持对摄像头的曝光度、对焦等参数进行调节，用户可以通过界面进行统一管理和实时调整，确保图像采集的质量和准确性。这种设计不仅让操作界面更加简洁、易用，还提高了系统的灵活性和可操作性，使得用户能够更加便捷地进行监控、管理和优化工作过程，提升使用体验和工作效率。

## 结语

基于深度学习分类与机器视觉的成熟度检测水果分拣机在实际生产中具有广泛的应用前景。通过将深度学习模型与机器视觉技术相结合，该系统能够精准地对水

果的外观进行检测和分类，实现对水果成熟度、外形和质量的全面评估。结合物联网技术，系统可将检测软件嵌入到微型计算机中，进行生产线上的实时监控。同时，系统还可搭载于果园巡检机器人或果园监控设备中，扩大监测范围，实现无人化、全天候、实时的持续检测。未来，应积极探索产学研融合的发展战略，扩大试点果园的建设，并将现有技术尽快应用到实际生产中，实现从水果成长到分选过程的全链条检测。通过不断优化与升级技术，检验现有技术的不足，积累数据与经验，不仅能够提升水果生产过程中的自动化水平，还能推动智能化分拣技术的广泛应用，进一步提高生产的效率、质量和精度，推动行业的持续创新与发展。

### 参考文献:

[1] Zerssa G, Feyssa D, Kim D G, et al. Challenges of

smallholder farming in Ethiopia and opportunities by adopting climate-smart agriculture[J]. Agriculture, 2021, 11(3): 192.

[2] Zhang T, Li Q, Zhang C, et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems[J]. Frontiers of information technology & electronic engineering, 2017, 18: 68-85.

[3] Li X, Wang Z. Analysis and Optimization of Quick Charge 2.0 Protocol for Mobile Devices[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2019, 65(2): 167-174.

[4] Wang, Y., Li, X., & Zhang, J. (2021). Optimizing Deep Learning Inference on Embedded Devices with RKNN-Toolkit. Journal of Embedded Systems and Applications, 12(3), 45-56.

[5] 王丽娟, 陈浩然, 季石军, 等. 机器视觉成熟度检测的苹果色选分拣机设计 [J]. 农业与技术, 2022, 42(12): 36-40.

### 作者信息:

**韦沛成** 桂林电子科技大学本科在读

**张申奥** 桂林电子科技大学本科在读

**林鹏威** 桂林电子科技大学本科在读

**彭恽骁** 桂林电子科技大学本科在读

**余 华** 桂林电子科技大学讲师



在线阅读(节选)

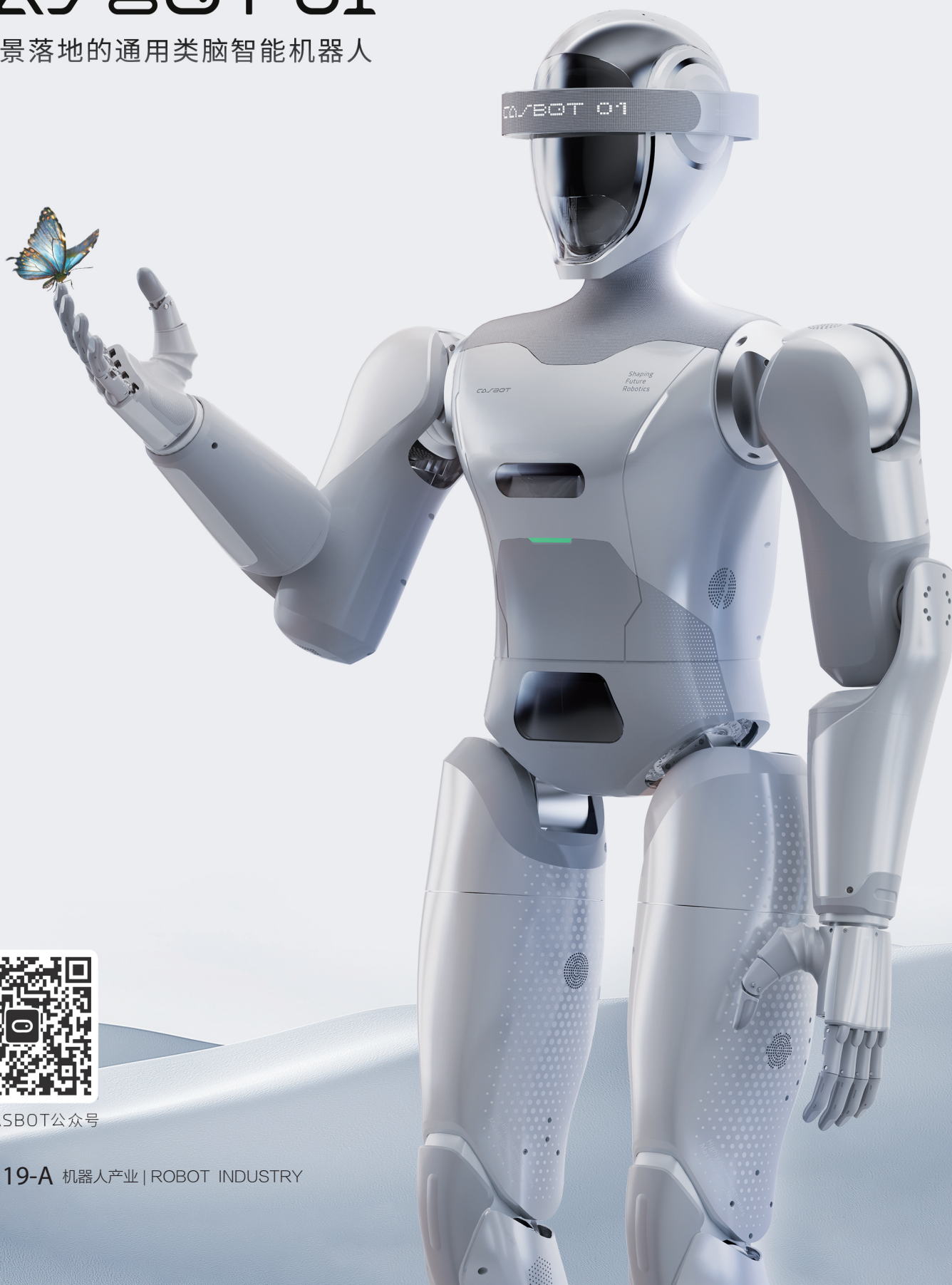


广告

# 灵宝

## CASBOT 01

多场景落地的通用类脑智能机器人



灵宝CASBOT公众号

119-A 机器人产业 | ROBOT INDUSTRY





**FAIR plus**  
机器人全产业链接会

广告

# 机器人全产业链接会 FAIR plus 2025

## 智启未来 链动全球

**4** 场

标准工作组会议

**50+**

具身智能机器人产业环节

**4** 场

具身智能产业论坛

**150+**

产业上游及整机实物展示

**5** 场

技术社区共建会

**400+**

人次海外专业买家团

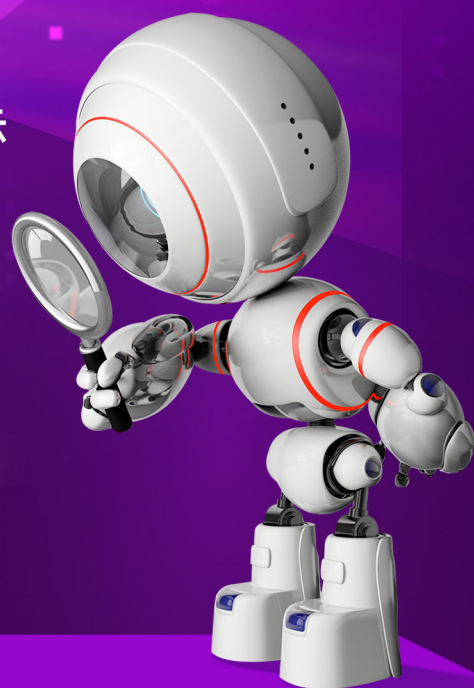
**20+**

具身场景协同开发对接会

**20000+**

人次行业专业观众

数据来源：深圳市机器人协会



参展咨询：

李女士 13058180240（微信同号）

观展咨询：

王女士 13066938014（微信同号）

时间/地点：

**2025.4.24-26**

**深圳市会展中心（福田）7-8号馆**