

并提供面向嵌入式编程语言的自动代码生成及通用集成接口,确保模型语义确定、可执行追溯<sup>[4]</sup>。

(2) 集成开发域应采用分层插件化 IDE 框架,具备基础编辑环境、代码格式化、代码导航、断点设置与管理、调试控制与展示、项目资源与版本控制、增量编译、集成适配与插件扩展等能力,支持跨平台与多形态部署,适配嵌入式软件工程的协同开发与配置受控需求。

(3) 测试验证域应覆盖静态合规检查、用例自动生成、覆盖率统计分析、目标机适配测试、差异化回归测试与运行时错误检查,通过标准接口与版本管理、持续集成、缺陷跟踪等系统对接,实现测试验证的自动化结果执行与闭环处理<sup>[5]</sup>。

### 3.2.3 合规管控与追溯层

本层以内嵌式合规管控为目的,构建满足可追溯、可审计、可复现要求的过程与证据链体系,建立从需求开发、测试用例到缺陷变更记录的双向追溯链条;实现关键测试验证活动的流程合规自查与版本留痕,并将配置日志、结果报告等自动归集为存证记录集,对接审查过程受控与证据链完整性的核心要求。

## 4 标准体系落地路径与实施保障

### 4.1 标准体系分阶段实施路径

#### 4.1.1 标准编制阶段

以成套体系化标准为核心,统筹开展标准内容完善、行业意见公开征集、技术专家评审等工作。对标 DO-178C、ISO 26262 等国内外通用行业规范和标准,统一标准体系中的数据格式、通用外部接口、部署模式等共性技术要求,保证标准之间的逻辑自洽、技术指标协调<sup>[6]</sup>。

#### 4.1.2 试点应用阶段

优先选取相关行业领域内的主要使用需求单位、系统研制企业和工具研发厂商等不同类型主体开展小范围的试点工作。试用基于标准要求的建模、集成开发、测试验证工具链,验证标准内容的架构适配性、工具间接口互通性以及数据流转的完整准确性等,同步收集试点过程中遇到的问题和优化建议,对标准条目、技术要求等进行完善。

#### 4.1.3 全面推广阶段

在试点验证成熟的基础上,面向全行业开展标准宣贯培训与技术推广。分层解读标准体系架构与执行要求,引导行业单位逐步按照标准规定开展工具选型,研发适配、改造等规范化管理,逐步替代更新企业的内部规范与非标准工具组合。

#### 4.1.4 动态迭代阶段

结合航空、轨交、汽车行业软件技术的迭代演进、研制等发展情况,定期收集行业反馈意见内容,对标准的技术内容,功能要求及接口规范进行修订完善,保持标准体系的生命力,实现标准、工具、技术要求的同步演进。

## 4.2 多维度配套保障体系

### 4.2.1 组织保障

组件由标准化机构、行业装备研制单位、工具研发企业、高校科研院所、合规审查机构共同构成的联合工作组。统筹标准实施、问题协调、技术交流等工作,打通“标准制定—工程应用—审查反馈”的沟通渠道,形成“产学研用审”协同联动格局。

### 4.2.2 技术保障

依托行业现有技术力量,搭建技术支撑平台。针对标准应用、工具适配、架构部署等常见问题提供技术答疑与现场指导;同步开展技术培训、案例分享,提升行业人员对标准与协同架构的理解和应用能力。

### 4.2.3 产业保障

引导嵌入式工具自研企业对标具体标准开展产品升级与迭代,推动系统建模、集成开发、测试验证工具全面符合规范要求。鼓励工具企业与嵌入式软件研制单位开展深度合作,结合工程场景打磨产品,逐步构建高可靠、强实时的国产工具链生态。

### 4.2.4 合规审查保障

推动标准要求与航空、轨道交通、汽车等各行业合规审查与规则衔接。将标准体系建设成果作为工具鉴定选型、软件过程验证的通用参考依据,明确标准条款在合规取证中的采信规则,降低企业取证成本,提升工具与研制流程的认可度。

## 5 结论与展望

本文针对航空、轨道交通、汽车等高可靠实时嵌入式软件行业痛点,依托成套标准体系搭建覆盖建模、开发、验证全流程一体化协同架构,明确通用规制逻辑与完整落地实施体系。通过统一数据、接口、追溯约束,打通各环节信息壁垒,建立行业统一工程基线,降低跨项目工具切换成本,提升软件研制标准化与合规审查水平,整套框架具备广泛工程复用价值。

### 参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会,工业和信息化部.装备制造业标准化和质量提升规划(国质检标联〔2016〕396号)[Z].2016.
- [2] Leanna Rierison, 安全关键软件开发与审定——DO-178C标准实践指南[M].北京:电子工业出版社.2020.
- [3] GB/T 30961-2014: 嵌入式软件质量度量[S].国家标准化管理委员会,2014.
- [4] 刘芮霖,邓杨,龚彬.基于AADL和SCADE的模型驱动软件设计[J].太赫兹科学与电子信息学报,2020,18(06).
- [5] 曲明成,崔乃刚,吴翔虎,陶永超.嵌入式软件虚拟化测试技术标准框架研究[J].哈尔滨工业大学学报.2017,49(05).
- [6] ISO 26262: Road, Vehicles-Functional Safety[S].International Organization for Standardization, 2018.

# Research on Key Technologies, Application Prospects and Implementation Paths of Humanoid Robots in Intelligent Manufacturing Scenarios

Lunhuang Xu Weijia Huang\* Yafan He

Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou, Guangdong, 510540, China

## Abstract

Humanoid robots serve as critical carriers connecting digital systems and physical workshops to deliver full-process flexible manufacturing. Drawing on over two decades of practical experience in smart factory planning, this paper sorts out the practical gaps between lab-level humanoid robot technologies (including dexterous end-effector control, multi-sensor environmental perception and joint drive hardware) and industrial mass production requirements. By sorting out prototype test cases of leading domestic and overseas manufacturers and comparing applicable conditions across manufacturing tracks, this paper defines segmented stations and value boundaries suitable for humanoid robots. The research concludes that large-scale popularization of humanoid robots in China relies not merely on technical breakthroughs, but on a systematic project covering core component output, cost-benefit balance, industrial chain coordination and cross-disciplinary technical talents. Judging from the current iteration cycle, full-process verification for customized workstation pilots in leading manufacturers will be completed within 5–8 years, while cross-industry mass adoption requires at least 15 years of continuous technical iteration and ecological construction.

## Keywords

humanoid robots; intelligent manufacturing; dexterous hand control; motion control; technology implementation

# 人形机器人在智能制造场景中的关键技术、应用前景与落地路径研究

许纶煌 黄维佳\* 何亚凡

广州科技职业技术大学, 中国·广东 广州 510540

## 摘 要

人形机器人被视作打通数字孪生体系与实体生产车间、实现全流程柔性制造的核心载体。笔者拥有二十余年智能工厂整体规划实操经验,结合一线项目落地数据,梳理人形机器人灵巧末端控制、多源环境感知、关节驱动硬件三大核心技术现存短板与工业化落地的现实差距。本文整理国内外头部厂商最新样机实测案例,横向对比不同制造赛道适配条件,明确人形机器人可落地的细分工位与价值边界。综合研判得出:国内人形机器人规模化普及并非单一技术攻关问题,而是核心零部件产能、投入产出平衡、上下游产业链配套、复合型工艺人才储备共同构成的系统性工程。结合当前迭代节奏判断,头部制造企业专属工位试点可在5至8年完成全流程验证,若要实现全行业大范围铺开,至少需要15年持续技术迭代与应用生态搭建。

## 关键词

人形机器人; 智能制造; 灵巧手控制; 运动控制; 技术落地

## 1 引言

全球制造业面临着劳动力结构变化、产品个性化需求

激增以及生产效率提升瓶颈等多重挑战。传统的“刚性自动化”系统在应对这些挑战时愈发吃力。人形机器人,凭借其与人类似的形态,被寄予厚望——它能够直接使用为人类设计的工具、工作站和工厂环境,从而以最低的改造成本赋能高度柔性化的生产模式,即“即插即用”式的自动化。然而,理想与现实之间存在巨大的“工程鸿沟”。本研究将摒弃泛泛而谈,从工程实践视角出发,聚焦三个核心问题:

(1) 关键技术量化评估: 人形机器人的灵巧手操作精度、双足运动稳定性等关键指标目前处于什么水平? 与工业

【作者简介】许纶煌(1970–),男,中国江西赣州人,本科,高级工程师,从事智能制造、无刷电机、嵌入式系统及相关方向的研究。

【通讯作者】黄维佳(1981–),男,中国广东南海人,硕士,从事智能制造、嵌入式系统研究。

级要求差距多大？

(2) 应用场景价值锚点：在哪些具体的制造工序中，人形机器人能创造出不可替代的经济价值，从而证明其高昂的初期投资是合理的？

(3) 中国路径的现实推演：结合中国的产业链优势和短板，实现规模化推广的可信时间表和依赖条件是什么？

## 2 人形机器人关键技术进展与分析：从演示惊艳到工业可靠

### 2.1 环境感知与 AI 决策（“大脑”）：多传感器融合与场景理解瓶颈

当前，头部厂商普遍采用多目视觉、激光雷达和IMU（惯性测量单元）的融合方案来实现环境感知。例如，特斯拉的 Optimus 机器人利用其纯视觉方案，已能完成对常见物体（如螺栓、电池模块）的识别与分类。在决策层面，基于大模型的自然语言指令理解成为新趋势，使得机器人能够理解“把那个零件拿给我”这样的高级指令。然而，工业应用的瓶颈在于“场景理解的深度”和“决策的确定性”。实验室演示多在干净、光照恒定的环境中进行，而真实工厂环境存在光照变化、遮挡、噪音、油污、多变的温湿度，以及大量其他未知干扰。AI 模型对于长尾问题的处理能力依然不足，例如，识别从未见过的、有缺陷的工件。此外，当前基于学习的决策系统缺乏形式化验证，其行为在安全至上的工业环境中仍被视为“不可预测的黑箱”。

### 2.2 运动规划与全身控制（“小脑”）：从动态平衡到能耗危机

在 2026 春晚中所见宇树人形机器人的翻墙动作，以及波士顿动力 Atlas 的跑酷视频，充分展示了其在全身动力学控制和瞬时运动规划上的顶尖水平。其核心技术在于能够实时计算并控制全身多个关节的力矩协调输出，以维持动态平衡。但工业应用关注的是可靠性、效率和成本。由于人形机器人在实现双足行走时，关节电机不断接受大电流冲击式驱动，其能耗远高于轮式或履带式移动。人形机器人高强度运动时，其电池可能仅能支撑不到半小时，这对于需要 8 小时甚至 24 小时连续作业的生产节拍是无法接受的。此外，双足机器人在湿滑、充满线缆或油渍的地面上行走的稳定性，至今仍未得到完美解决。因此，在初期，固定底座或移动平台上的上半身人形机器人，可能是更具工程可行性的折中方案。

### 2.3 灵巧手精细操作（“手”）：自由度、触觉与控制的三角难题

灵巧手是决定人形机器人能否胜任精密装配任务的核心。

(1) 硬件自由度（DOF）：英国 Shadow Robot 公司的 Dexterous Hand 拥有 20 个自由度（DOF），能够高度模拟人手的 24 个自由度，实现精准的抓取构型。特斯拉

Optimus 的手则采用更工程化的设计，在 11 个自由度的基础上实现了五指独立驱动与自适应抓取，在成本与性能间寻求平衡。

(2) 触觉传感：触觉是实现精细力控和操作反馈的前提。目前先进的灵巧手指尖已能集成高达百个感知单元的触觉传感器阵列，分辨率接近人类指尖皮肤。例如，有研究团队开发出的光学触觉传感器，其空间分辨率可达 <1mm，能清晰感知物体的滑动和纹理。

(3) 控制算法——核心瓶颈：控制一个 20+ 自由度的灵巧手，其复杂度呈指数级增长。传统的基于模型的控制方法难以应对抓取过程中复杂的接触动力学。当前主流研究方向是模仿学习与强化学习。例如，OpenAI 曾通过在仿真环境中进行数千年的等效训练，让机械手学会了单手解魔方。然而，这种“暴力”学习法的代价是巨大的算力和时间成本，且学习到的策略泛化能力差。在工厂里，更换一个工件就可能需要重新进行大量的训练或调试。目前，灵巧手在实验室环境下对一个特定任务（如插拔连接器）的成功率可能达到 95% 以上，但其操作速度通常仅为熟练工人的 1/5 到 1/10，且对未在训练集中出现的干扰（如工件位置的微小偏移）极为敏感。

## 3 人形机器人在智能制造中的落地应用可能性分析

人形机器人要在制造业场景中应用落地，投资回报率是关键，即人形机器人的综合成本必须低于人工成本，或其创造的价值远超替代成本。

### 3.1 高潜力行业与价值场景研判（未来 3-8 年）

人形机器人在制造业最具价值的场景主要是替代人力高重复性、易疲劳性出错、劳动强度大、精确度要求高等场景。

#### 3.1.1 汽车制造业总装线——最具潜力的突破口

(1) 场景：车内线束：此工序需要将数十个线索的插件精准对位并插入相应的接口，目前均为人工操作，工人重复弯腰极易疲劳。仪表盘总成安装：需要人工双手托举并对准多个卡扣，精度要求高，劳动强度大。还有车门合装、座椅安装等。

(2) 可行性分析：汽车产线是十分成熟的自动化生产线，工位固定、流程标准，环境相对标准化和结构化。但线束的柔韧性、卡扣的力度反馈即使人类操作，也有一定难度，对灵巧手更是巨大的考验，不过在技术还是乐观的。

(3) 数据支撑：人形机器人在诸多物流企业的物件搬运和货架物件的放置，以及在一些模具制造业场景中的上下料作业，均有开始实验并得到较好的效果，取得了大量数据支撑，标志着从实验室走向真实工厂的第一步。

(4) 时间预测：5 年内，在领先车企的个别高负荷、高重复性工位实现试点应用。