

具身智能机器人用电机技术发展动态

智慧信息中心 黄碧霞

1 引言

具身智能机器人，作为融合了感知、认知和行动能力的智能实体，正以其独特的物理存在和交互能力，重新定义着人机协作的边界。与传统的纯软件智能不同，具身智能强调智能体通过物理身体与环境进行实时交互，在真实世界中感知、学习和执行任务。从工业生产线上精准作业的机械臂，到家庭环境中提供服务的陪伴机器人，再到极端环境下执行搜救任务的特种机器人，具身智能机器人正以前所未有的速度融入人类生活的各个领域。而这一切能力的实现，都离不开一个关键硬件组件——电机。

作为机器人的“关节”与“肌肉”，电机的重要性不言而喻。它不仅是机器人运动的动力源，更是实现精准控制、力反馈和自适应交互的核心执行器。电机性能的优劣，直接决定了机器人的灵活性、精确度、响应速度乃至整体智能水平的表现。随着人工智能技术的飞速发展，具身智能机器人的“大脑”日益强大，而作为“肢体”执行关键的电机制造技术，则成为制约机器人整体性能突破的关键瓶颈。正因如此，全球机器人产业巨头和创新企业都在积极布局电机技术研发，推动着具身智能机器人核心零部件领域的快速演进。

2 发展现状

2.1 市场概况与规模

具身智能驱动电机市场正迎来爆发式增长。根据 QYResearch 调研统计，2030 年全球具身智能驱动电机市场销售额预计将达到 131.7 亿元，2024-2030 年复合增长率高达 52.0%。中国市场在过去几年变化较快，2023 年市场规模约占全球一定比例，预计 2030 年将进一步扩大全球占比^[1]。这种快速增长背后是人形机器人商业化进程的加速，以及核心零部件国产化率提升的双重驱动。

全球机器人用电动机市场竞争格局明显，主要厂商包括德国 Lenze、SEW、SIEMENS、日本 Yaskawa、Mitsubishi、ABB 等。从区域市场看，欧洲是最大的市场，占有约 40% 的份额，其次是日本和北美地区。然而，中国势力正在快速崛起，据分析，中国拥有超过全球 50% 的人形机器人公司，这些企业得到政府政策的

大力支持。

2.2 主流驱动电机类型及技术特点

当前具身智能机器人领域主要采用多种电机技术路线，每种技术都有其独特的优势和应用场景，表 1 介绍了三种主流电机的核心技术特点及应用情况。

表 1 具身智能机器人主流驱动电机技术特点和市场情况

电机类型	技术特点	主要应用场景	市场情况
无框力矩电机	无外壳和轴承，结构紧凑，功率密度高，低转速输出大扭矩	机器人大关节（如髌、膝、肩）	应用广泛；代表厂商有科尔摩根、步科、TO Robodrive
空心杯电机	线圈无铁芯，转矩均匀，运行平稳，节能，控制灵敏，转动惯量小，响应极快	机器人灵巧手手指关节等需要精密控制的部位。	市场增长迅速，预计 2026 年全球市场规模达 120 亿元；代表厂商有鸣志电器、德国 Faulhaber、瑞士 Maxon
轴向磁通电机	“三明治”盘式结构，轴向尺寸短，功率密度极高	对厚度有限制的关节（如腕、踝），电动飞行器、电动汽车。	新兴技术，国内厂商如盘毂动力、东睦股份、卧龙电驱

2.2.1 无框力矩电机

无框力矩电机本质上是一对独立的转子和定子，没有外壳和轴承，允许将其直接嵌入机器人的关节结构内部，实现“结构即电机”的高度集成化设计，如图 1 所示。这种结构使得电机具备体积小、功率密度高、低转速输出大扭矩等特性，非常适合在紧凑空间内需要输出巨大力量的场景，例如支撑机器人身体重量和完成蹲起、行走等动作的髌、膝关节。另一方面，高性能的钕铁硼或钕钴等永磁材料是保证其强大性能的关键，这类材料的价值能占到电机总成本的三成以上。

2025 年 7 月，步科机器人正式发布第四代 FMK 系列无框力矩电机及 RD 系列中空驱动器，专为具身智能机器人关节模组设计。新品通过大裂比中空结构、轻量化工艺（外径 25-115mm 全覆盖）及高功率密度特性，解决机器人关节的布线空间限制与重量矛盾。该产品实现了 70mm 中空直径支持线束/传感器穿轴布线、<55dB 噪音及振动抑制提升动作协调性、模块化设计降低客户 TCO 成本 18% 的三大核心突破^[2]。



图 1 无框力矩电机

2.2.2 空心杯电机

空心杯电机实际上是一种中空、无铁芯的杯状绕组，如图 2 所示，这种设计大幅降低了转子的转动惯量，带来了极快的响应速度和运行效率，而且转矩均匀分布，在低速运转下保持平稳运行，同时在高速运转下振动和噪音也较小。这些特性使其成为机器人灵巧手的关键，通过多个空心杯电机以实现类似人类的精细抓取操作。但该类电机的核心难点在于定子/转子的自支撑绕组技术。

2025 年人形机器人产业数据显示，灵巧手技术正经历革命性突破，人形机器人灵巧手自由度已从 2024 年平均 8 个提升至 15 个，抓取精度达到 $\pm 0.1\text{mm}$ 。这一突破性进展主要得益于空心杯电机技术的成熟——其功率密度较传统电机提升 3 倍，重量减轻 60%，使得单手指驱动模块重量可控制在 50g 以内。国内厂商鸣志电器通过收购瑞士 Technosoft Motion AG 获得绕线工艺核心技术，实现直径 6mm、转速 30000rpm 的超微型电机量产。中大力德则推出行星减速器+空心杯电机的一体化模组，将传动效率提升至 92%。



图 2 空心杯电机

2.2.3 轴向磁通电机

轴向磁通电机与传统电机的径向磁场不同，轴向磁通电机的磁场方向与轴平行，呈扁平的“三明治”结构，如图 3 所示。这使其在同等扭矩下，轴向长度可以大幅缩减。作为新兴技术方向，其盘式结构带来明显的空间优势，代表着电机技术由传统结构向高效轻量化的演进趋势。尽管在制造工艺（如 SMC 软磁材料应用）、散热和成本方面仍面临挑战，但其卓越的功率密度特性，让它被认为是未来机器人关节，尤其是空间受限部位的理想解决方案。这种电机可为电动飞行器、电动汽车及机器人关节等提供理想动力。

国内领先厂商盘毂动力已率先实现轴向磁通电机的规模化量产与应用，在细分领域专利储备方面处于行业领先地位。其量产电机产品功率覆盖 63W 至 900kW，功率密度可达 21kW/kg，体积和重量比同功率径向磁通电机大大缩减，甚至达到 50%，且拥有更加宽泛的高效工作区间，可满足从轻型装备到大型动力系统的多场景应用需求，标志着国产轴向磁通电机产业化的关键突破。



图 3 轴向磁通电机

2.3 标准体系和测试评价基准

目前，具身智能系统的发展仍处于起步阶段，尚缺乏全面的标准框架予以规范。随着产业逐步成熟，具身智能机器人驱动电机领域的标准化建设也在快速推进。中国信通院牵头推动的国际标准《具身智能系统框架及能力要求》在 ITU-T 第 21 专业组 2025 年第二次全体会议期间正式冻结，为全球具身智能领域的技术创新和研发实践提供了统一的技术框架。与此同时，两份新立项标准 EAI-bench

《具身智能系统基准测试和评价框架》和《面向真实场景的具身智能遥操作数据采集系统技术要求》进一步丰富了标准体系^[3]。

在国内，机器人电机相关标准也在不断完善，例如，

- GB/T 43200-2023《机器人一体化关节性能及试验方法》：规定了机器人一体化关节的性能并描述了试验方法，适用于协作机器人及腿足式机器人关节。

- GB/T 43726-2024《无刷直流力矩电动机通用技术条件》：规定了无刷直流力矩电动机的分类与型号、技术要求、检验方法、检验规则和交付准备。

- JB/T 14682-2024《多关节机器人用伺服电动机技术规范》：规定了多关节机器人用伺服电动机的总体要求和性能要求，描述了相应的试验方法。

……

等标准共同构成了机器人电机技术评价的基准，为产品质量提升和国际技术互操作提供了支撑。

3 发展难点与挑战

3.1 技术瓶颈与挑战

尽管具身机器人电机技术取得了显著进步，但在迈向规模化商业应用的进程中仍面临诸多技术瓶颈。这些挑战主要集中在功率密度、散热管理、精度一致性和成本控制等方面，如表 2 所示。

表 2 具身机器人电机技术难点分析

电机类型	核心技术难点	性能影响	解决方向
无框力矩电机	高功率密度散热、与关节结构集成设计、手工制造导致一致性差	温升高影响连续运行，温升高引起性能下降影响控制精度	优化散热设计、自动化生产工艺
空心杯电机	无铁芯转子制造工艺、高精度转矩控制、成本控制	转矩控制精度影响运行可靠性与任务完成精确度，精度提升将引起制造成本高	精密绕线工艺创新、规模化生产降本
轴向磁通电机	盘式结构制造复杂性、散热压力大、轴向磁吸力平衡、结构强度、材料性能要求高	微小气隙偏差会导致磁通分布不均、轴向磁吸力增大，引发振动噪音；温升高转子磁钢过热存在退磁风险问题；高速离心力，对电	SMC 一体压铸、液冷散热技术

电机类型	核心技术难点	性能影响	解决方向
		机械强度有较大影响。软磁复合材料 (SMC)、永磁体等材料制造工艺复杂，成本高，影响量产。	

3.1.1 功率密度与散热挑战

人形机器人的关节驱动器追求高功率质量密度比，要求伺服驱动器自身很轻，但是可以输出的功率和转矩却非常大。同样是输出 5000 瓦的能力，常规机器人驱动器尺寸的大小像一只成年男子的手掌，但是人形机器人的驱动器尺寸只有半个火柴盒大小，这几乎是机械物理的极限，也是人形机器人伺服系统的难点之一。散热压力是另一个重要挑战。轴向磁通电机由于夹层结构和高功率密度导致热容量低，转子磁钢易过热引起退磁风险增加。对于无框力矩电机，同样有类似问题，其高度集成的特性，直接嵌入关节机械结构内部，这对结构设计和散热提出了极高要求。有数据显示，部分国产电机在过载 150% 时，温升比进口件高 15°C，这将直接影响机器人的连续工作运行能力。

3.1.2 产品质量一致性与制造工艺

在电机产业升级过程中，产品质量一致性问题面临严峻挑战。机器人是软硬件高度耦合的产业，如果软件训练好了，但硬件的一致性差，应用表现就会出问题。可见硬件一致性对于机器人性能的重要性。

供给人形机器人的无框力矩电机，至今仍要靠工匠手工贴片，这一现象发生在多家顶尖机器人公司的高端制造车间里。那个银色小磁环外部的金属贴片全靠手工精细粘贴。手工贴片工艺虽然在小批量生产中具有灵活性优势，但在质量一致性方面存在天然缺陷。同一批次电机可能出现的性能偏差大，而自动化生产线可较好的保证一致性，但是建立自动化产线的成本很高。

精密制造工艺仍是行业瓶颈，特别是对于空心杯电机而言，其核心难点在于定子/转子的自支撑绕组技术，这需要高度精密的制造设备和工艺控制。

3.1.3 标准化缺失与检测技术薄弱

目前在人形机器人领域，在各个方面尚缺乏全面的标准体系予以规范，安全、性能、兼容性等标准亟待完善补充。特别是人形机器人关节部件、驱动产品没有明确的指标和标准，产品优劣很难判别。

具身智能系统与智能电动汽车在复杂性和安全要求方面有许多相似之处，两种系统都依赖于复杂的传感器、执行器和控制算法，在动态环境中执行复杂任务。因此，具身智能系统的标准框架可以借鉴智能电动车的标准，构建自身的零部件和整机标准体系。与智能电动车不同的是，具身智能系统的可用性更为关键，因此需要发展相应的标准以满足用户交互的需求。此外，由于具身智能系统可以应用于多种场景，如人形机器人在智能制造和家庭服务中的不同应用，因此需要定义并评估其在各应用场景中的性能。

检测技术本身也面临诸多挑战，传统测试方法存在多种局限性：测试覆盖率有限，难以覆盖所有可能的测试场景，尤其是复杂业务逻辑和边界条件；驱动电机转矩控制、位置控制精度高，动态响应快，现有的测试设备多依赖人工，很难满足高精度、动态响应的要求等。

3.2 成本与商业化瓶颈

成本是制约人形机器人普及的关键因素之一。轴向磁通电机等新技术面临成本较高的问题，主要源于材料特殊、制造复杂，量产成本高。例如，高性能的钕铁硼或钕钴等永磁材料是保证电机强大性能的关键，这类材料的价值能占到电机总成本的三成以上。据预测，人形机器人平均售价将从 2025 年的 7.5 万美元下降到 2035 年的 2.5 万美元。

续航能力不足也是人形机器人从工业场景走向千家万户的“拦路虎”，人形机器人当前的电池和电能转化效率都亟待提升，目前人形机器人行走很慢、不会跑跳，或者负重之后的运动能力表现不佳。

4 发展趋势

4.1 技术创新方向

具身智能机器人电机技术正朝着更高功率密度、更深层次集成和更智能化的方向发展，主要体现在材料创新、结构优化和智能集成等方面。

新材料应用：SMC（软磁复合材料）一体压铸具有各向同性磁性，可支持复杂三维磁通设计，适配 3D 打印，实现大规模稳定制造。在轻量化材料领域，根据最新测试数据，采用镁合金关节壳体的人形机器人减重达 25%，续航提升 30%。碳纤维领域，天工 Ultra 2.0 的 3D 编织 T800 级碳纤维手臂结构，在 10kg 负载下自重仅 1.2kg。

结构优化创新：PCB 定子采用无铁芯设计减轻重量、降低涡流损耗，提升效率与可靠性。扁平线圈技术可提高槽填充率，磁场更强，功率增加 20%–30%；线圈形状优化提升散热效率。对于轴向磁通电机，强化散热方案包括液冷通道、相变材料及碳纳米管等新型应用，显著增强热管理能力。

集成化与智能化：未来的电机不再是独立的部件，而是与减速器（如谐波减速器）、编码器、驱动器深度集成，形成智能化的"关节模组"。人形机器人伺服系统需要在高智能性方面持续精进，包括参数自整定免调试以及智能健康运维。一个特斯拉擎天柱机器人大约使用 40 个驱动器，如果工程师去逐个调节驱动器是非常费时和困难的，因此伺服驱动器需要具备智能自整定能力。

4.2 产业生态与标准化进程

具身智能机器人电机产业的健康发展离不开完善的产业生态和标准化体系。当前，行业正呈现产业链协同整合、标准体系加速构建的趋势。

产业链协同整合：随着核心部件国产化率提升，人形机器人 BOM 成本下降 40%，供应商从单一部件供应向系统级方案转型，如武汉构建从实验室到量产的闭环，实现从传感器、关节模组到整机的全链条生产，本地化配套率达 80%；深圳形成 24 小时研发闭环，将灵巧手开发周期大大缩短。

标准体系建设：政策层面，工信部等四部门联合印发的《国家人工智能产业综合标准化体系建设指南（2024 版）》正式发布，文件明确提出完善标准工作顶层设计，强化全产业链标准工作协同，统筹推进标准的研究、制定、实施和国际化，为推动技术进步、助力产业高质量发展提供技术支撑作用。

检测技术升级：行业正在从传统的人工检测向智能化检测转型，包括自动化测试台架（集成测功机、功率分析仪、热成像仪等设备，实现一键式全参数检测）、在线监测系统（在生产过程中实时采集电机性能数据，建立质量追溯体系）以及 AI 辅助诊断（利用机器学习算法分析测试数据，提前预测潜在故障）。

4.3 商业化应用前景

具身机器人电机技术的商业化应用正呈现加速态势，在多场景中展现出巨大潜力。2025 年数据显示，人形机器人已在五大场景渗透率突破临界点：工业场景中，汽车装配机器人已实现 2000 小时无故障运行；医疗康复机器人通过力觉反馈完成 95% 的复健动作引导；家庭服务机器人销量同比增长 300%，其中导购机

型占比达 45%。

随着特斯拉 Optimus、小米 CyberOne 等产品的量产，行业将聚焦于：核心部件寿命与可靠性提升；运动控制算法优化；垂直场景解决方案深化。这场由硬件创新驱动的产业革命，正在打开万亿级应用市场的大门。

5 总结与展望

总体来看，具身智能机器人电机技术正朝着更高功率密度、更深层次集成和更智能化的方向快速发展，从基础材料、结构设计到集成工艺和智能控制都在持续突破。要突破当前的瓶颈，需要产业链上下游的协同创新，包括新材料研发、结构设计优化、生产工艺改进和检测标准完善。

1. 加速技术攻关：持续投入新材料、新工艺（如复合材料、精密加工）的研发，解决散热、精度和一致性等核心问题。

2. 推动标准化建设：加快制定统一的接口和性能标准，促进模块化发展，降低系统集成难度和成本。

3. 构建检验检测与认证：依托和完善国家标准，建立权威的第三方检测评价体系，为产品性能和质量提供可靠评价。

4. 加强能力建设及技改投入：目前中心电机测试平台所覆盖最小测功机转矩量程为 0.5Nm、5Nm，仅针对安全、简单性能（如电参数、稳态转速转矩等）测试，无法满足更小范围的具身机器人用电机及系统稳态、动态性能检测，而且自动化程度还有待提高。需要加强更高精度、更快动态响应的设备投入，可扩展最小量程范围（1mNm，90000r/min），在电机集成与专项测试上也需要投入针对整个集成模组的测试系统、特殊项目的专项测试系统（如齿槽转矩测试系统、微型磁钢检测系统等），综合评估电机、驱动器、编码器和减速器协同工作时的系统效率、动态响应和热性能，以提升中心具身机器人用电机及系统的检测能力。

参考文献

[1] 2024 年全球具身智能驱动电机行业总体规模、主要企业国内外市场占有率及排名 [EB/OL].2025.01.<https://www.qyresearch.com.cn/reports/4582135/embodied-intelligent-drive-motor>.

[2] 更轻、更大、更快 | 步科发布第四代无框力矩电机及中空驱动器! [EB/OL].2025-07-

06. <https://www.kinco.cn/articledetail/gqgdgksbkfbdsdwkljdjjzkqdq60.html>.

[3] 中国信通院牵头推进具身智能国际标准工作取得重要进展[EB/OL].2025.11.17.

<http://cww.net.cn/article?id=605299>.