

人形机器人上要用多少有色金属材料？

研究院 新能源&有色组

研究员

陈思捷

☎ 021-60827968

✉ chensijie@htfc.com

从业资格号: F3080232

投资咨询号: Z0016047

师橙

☎ 021-60828513

✉ shicheng@htfc.com

从业资格号: F3046665

投资咨询号: Z0014806

封帆

☎ 021-60827969

✉ fengfan@htfc.com

从业资格号: F03036024

投资咨询号: Z0014660

联系人

王育武

☎ 021-60827969

✉ wangyuwu@htfc.com

从业资格号: F03114162

投资咨询业务资格:

证监许可【2011】1289号

报告摘要

背景:

当前,全球人形机器人产业正迎来前所未有的发展机遇,技术突破与应用场景的不断拓展,使其成为推动经济增长和产业变革的重要力量。随着人工智能、材料科学等领域的飞速进步,人形机器人的功能日益强大,从最初的实验室概念逐步走向商业化应用,市场规模呈现爆发式增长。据中国信息通信研究院《人形机器人产业发展研究报告 2024 年》预测,到 2045 年,人形机器人整机市场规模可达约 10 万亿元级别,其广泛应用将深刻改变社会生产生活方式。

发现与结论:

目前人形机器人发展尚处在初级阶段,但根据中国方面公布的《"机器人+"应用行动实施方案》明确,2025 年中国机器人使用密度达 500 台/万人,较 2020 年增长 100%,全球难有如此高密度。美国、日本 2024 年人形机器人专利申请数远不及中国。

在产量预估上,2024 年中国服务型机器人产量 1052 万台,同比增长 34%;工业机器人产量 55.6 万台,同比增长 29.3%。受政策推动,预计 2027 年增速达峰值后边际递减。据 IFR 报告,2023 年中国工业机器人安装量占全球 51%,产量预估占比 70%。

人形机器人方面,GGI 预测 2024 年全球市场规模 10.17 亿美元,2030 年有望达 150 亿美元,CAGR 为 56%。按宇数科技 H1 售价 63 万元算,2025 年实际出货量仅 1.8 万台,但考虑特斯拉计划及产量大于销量预期,保守估计 2025 年产量可达 3 万台。随后指数级增长,到 2035 年产量达 1000 万台,年复合增长率 78.7%,渗透率 5.2%。

而由此拉动的对于有色板块的需求具体为,至 2035 年,单就人形机器人而言,所需用铜大约在 15 万吨/年、铝 113 万吨/年,碳酸锂 9 万吨/年。

但需要注意的是,最终结果很大程度上取决于对未来人形机器人总规模的预估,倘若届时这一领域的发展大大超乎市场当下预计,则对于相关有色品种的需求拉动将会更为显著。

目录

报告摘要	1
背景	4
机器人规模预计	5
人形机器人对铜需求的影响.....	6
人形机器人崛起对铜产业的拉动作用分析:	6
人形机器人产业带给铜材料行业的技术跃迁与产业重构.....	8
人形机器人耗铜量估算.....	8
电机系统	9
电池及控制系统	10
控制系统	11
灵巧手与触觉传感器	11
传感器系统	12
控制器与伺服系统	13
单个特斯拉人形机器人用铜量估算	13
人形机器人对铝需求的影响.....	14
轻型材料选择丰富	14
工业机器人用铝量分析	15
服务型机器人用铝量分析	16
人形机器人用铝量分析	17
人形机器人对锂需求的影响.....	19
人形机器人对有色材料需求汇总	20

图表

图 1: 工业机器人产量 单位: 万台、%	16
图 2: 服务机器人产量 单位: 万吨、%	16
图 3: 机器人分类	16
图 4: 服务机器人分类 单位: %	16
图 5: 六轴工业机器人	17
图 6: 服务机器人	17
图 7: 机器人分类	18
图 8: 服务机器人分类 单位: %	18
表 1: 人形机器人发展重要时间点与时间概述	5
表 2: 铜在人形机器人各部件中的作用	8
表 3: 特斯拉人形机器人电机系统耗铜量估算	10
表 4: 特斯拉人形机器人电芯材料层面用铜估算	10
表 5: 特斯拉人形机器人系统集成层面用铜估算	10

表 6: 特斯拉人形机器人控制系统用铜量估算.....	11
表 7: 特斯拉人形机器人灵巧手与触觉传感器用铜量估算.....	12
表 8: 特斯拉人形机器人传感器系统用铜量估算.....	12
表 9: 特斯拉人形机器人控制器与伺服系统用铜量估算.....	13
表 10: 单个特斯拉人形机器人用铜量估算	13
表 11: 特斯拉人形机器人总用铜量估算 (按 15KG/台计算)	14
表 12: 主要材料价格	15
表 13: 小型六轴机器人型号	15
表 14: 特斯拉人形机器人计划产能产量	17
表 15: 机器人用铝量	18
表 16: 机器人用铝量	19
表 17: 机器人用碳酸锂量	19
表 18: 人形机器人耗材量汇总	20

背景

春晚舞台上的“赛博秧歌”让宇数科技的机器人走入人们视野，机器人制裁也走上了风口浪尖。据国家统计局统计，2024年中国工业机器人产量55.6万台，同比增长14.2%，服务机器人产量1052万台，同比增长15.6%。刚刚结束的两会，3月5日十四届全国人大三次会议上，国务院总理李强作的政府工作报告中提到，建立未来产业投入增长机制，培育生物制造、量子科技、具身智能、6G等未来产业，同时要大力发展智能网联新能源汽车、人工智能手机和电脑、智能机器人等新一代智能终端以及智能制造装备。

当前，全球人形机器人产业正迎来前所未有的发展机遇，技术突破与应用场景的不断拓展，使其成为推动经济增长和产业变革的重要力量。随着人工智能、材料科学等领域的飞速进步，人形机器人的功能日益强大，从最初的实验室概念逐步走向商业化应用，市场规模呈现爆发式增长。据中国信息通信研究院《人形机器人产业发展研究报告2024年》预测，到2045年，人形机器人整机市场规模可达约10万亿元级别，其广泛应用将深刻改变社会生产生活方式。

2010年后，人工智能与机器人技术深度融合。2013年，波士顿动力Atlas展示复杂环境操作能力；2015年，本田ASIMO面向商业场景演示导览、服务功能；软银Pepper机器人聚焦情感交互，进入零售、医疗等领域。尽管未实现大规模商用，但这些探索验证了人形机器人在服务、工业等场景的应用可能性，推动产业从实验室研究向市场应用过渡。

2021年，特斯拉发布Optimus人形机器人，凭借AI大模型与量产规划，引发全球行业热潮。2023年，小米CyberOne、优必选Walker X等消费级产品亮相，技术向智能化、轻量化演进。2024年，中国《“机器人+”应用行动实施方案》落地，明确人形机器人在工业、医疗等场景的应用方向，全球企业加速研发投入。当前，人形机器人正处于产业化关键阶段，技术融合与政策支持共同驱动其迈向大规模商用。

人形机器人的研发存在着周期性的特征，分别为技术驱动的创新周期和市场需求的成长周期。技术驱动的创新周期又可以分为基础技术突破周期和产品迭代周期。基础技术突破周期为10到15年，周期以关键技术的飞跃结束。例如，20世纪70年代伺服技术突破、2010年代AI技术融入，均推动机器人性能跃升，形成技术创新周期。产品迭代周期是指从原型机到商用产品的时间，通常需要5-8年。以特斯拉Optimus为例，2021年发布原型机，2025年规划量产，体现技术转化为商业产品的典型周期。与技术驱动的创新周期不同的是，市场需求的长周期所需要的时间要更久。2020年以前是导入期，以技术验证为主，市场认知度比较低，市场的需求局限于科研和特定场景，应用范围比较窄。2021年到2030年为成长期，随着技术的逐渐成熟，应用市场一

步一步拓展，市场需求快速增加，预计到 2030 年，全球人形机器人市场的规模将达到千亿美元。2030 年之后将是人形机器人的爆发期，人形机器人将实现规模化商用，渗透工业，医疗，家庭等领域，形成十万亿级生态产业。

表 1：人形机器人发展重要时间点与时间概述

重要时间节点	事件
2000	本田发布 ASIMO 机器人，首次实现稳定双足行走及复杂动作执行，标志人形机器人运动控制技术的重大突破
2013	波士顿动力 Atlas 机器人完成后空翻等极限动作演示，展现其在动态平衡与复杂运动控制领域的领先技术
2015	软银 Pepper 机器人进入商业场景，探索服务机器人商业模式
2021	特斯拉 Optimus 搭载 FSD 芯片与 AI 大模型，实现智能交互与自主决策能力的跃升，推动人形机器人向“智能化”迈进
2024	中国《“机器人+”应用行动实施方案》发布，明确人形机器人产业地位，推动场景落地。
2025	全球多家企业启动量产计划，标志产业从研发投入向商业化运营转型。

资料来源：华泰期货研究院

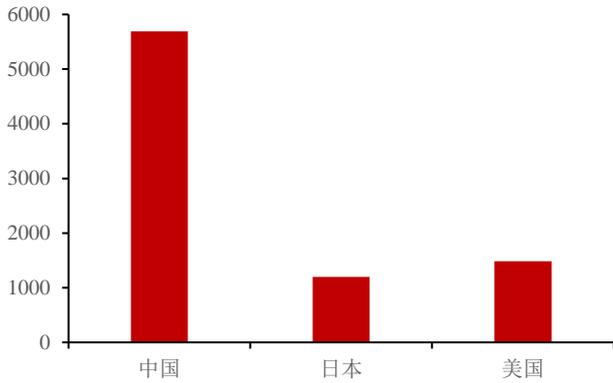
机器人规模预计

根据中国《“机器人+”应用行动实施方案》明确，到 2025 年中国机器人使用密度达 500 台/万人，较 2020 年增长 100%。而就全球范围内而言，显然不会有如此高的密度。即便是美国日本这样的国家，在 2024 年对于人形机器人的专利申请数与中国相比也相去甚远。

在全球机器人产量预估方面，2024 年中国服务型机器人产量 1052 万台，累计同比增长 34%，工业机器人产量 55.6 万台，累计同比增长 29.3%，在未来产量预估方面，在政策推动下，预计增速在 2027 年达到峰值，随后按照增速边际递减的预期，以及据国际机器人联合会（IFR）发布的《2024 世界机器人报告》，2023 年中国工业机器人安装量占全球安装量的 51%，产量预估占比全球 70%计算。

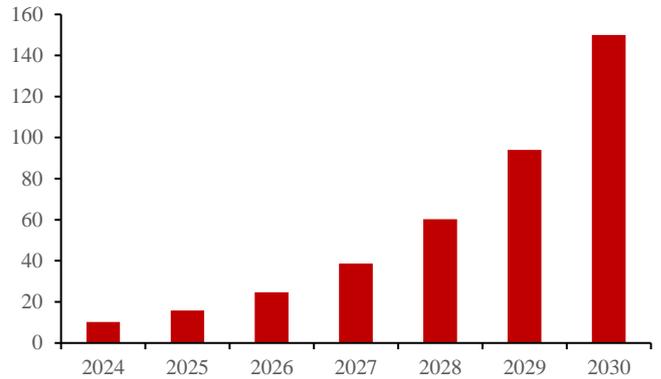
人形机器人方面，据高工机器人产业研究所（GGI）预测，2024 年全球人形机器人市场规模 10.17 亿美元，2030 年有望达到 150 亿美元，CAGR 56%，按照当下宇数科技 H1 售价 63 万元计算，即 2025 年实际机器人出货量仅有 1.8 万吨。但考虑特斯拉预估 2025 年计划生产 1 万台，保守估计 5000 台计算，上述计算的 1.8 万吨也属于保守数据，且考虑产量会大于销售量的预期。因此我们预估 2025 年人形机器人产量可达到 3 万台，随后指数级增长，到 2035 年人形机器人产量 1000 万台，年复合增长率 78.7%，人形机器人渗透率 5.2%。

图 1: 2024 年人形机器人申请专利数 | 单位: 个



数据来源: 新快网 华泰期货研究院

图 2: 人形机器人市场规模 | 单位: 亿美元



数据来源: GGI 华泰期货研究院

人形机器人对铜需求的影响

人形机器人崛起对铜产业的拉动作用分析:

铜在人形机器人中的核心应用场景在于三个方向, 分别是动力传输系统, 信号传输系统和结构部件。铜具有优良的导电性, 铜的导电性仅次于银, 但是铜的成本有远低于银, 低电阻的特性可以减少电流传输过程中的能量损耗, 提高电机效率。例如人形机器人中用到的无框力矩电机中每千瓦功率需要 0.5-1kg 的铜。而铜又具有良好的延展性和加工性, 易于拉制成极细的导线, 例如机器人中用到的空心杯电机的转自绕组就会采用高纯度的铜线, 并能弯曲成复杂形状。与此同时, 铜还具有耐腐蚀性和高导热性, 铜在常温下不容易氧化, 且能耐受一定程度的潮湿和化学腐蚀, 确保电机在长期运行过程中保持稳定的性能。铜的导热系数也很高, 可以快速散发电机运行中产生的热量, 避免过热损坏绕组或者其他的部件。

1. 动力传输系统: 铜基绕组构建仿生运动的 "神经网络"

在人形机器人的腕、膝等大关节驱动系统中, 无框力矩电机通过直接驱动技术实现类人步态的动态平衡。这类电机采用高纯度铜线编织的绕组网络, 每千瓦功率需求对应 0.5-1kg 铜材消耗, 单台电机形成 15-25kg 的铜材用量。这些铜绕组如同机器人下肢的 "神经网络", 在 50kHz 的高频电磁转换中, 将电能以 98% 以上的效率转化为机械动能。铜材料的低电阻率 ($1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) 和高载流密度特性, 使其在 100°C 温升环境下仍能保持稳定的导电性能, 支撑机器人完成每小时 6 公里的持续行走。

在手指关节等精密驱动单元, 空心杯电机的微型化设计将铜材应用推向新维度。其转子绕组采用直径 5-10 微米的高纯度铜线, 通过激光焊接技术形成密度达 3000 匝 /

立方厘米的绕组结构。电刷系统采用铜 - 石墨复合材料，在每分钟 5 万转的高速摩擦中，实现接触电阻 $< 10\text{m}\Omega$ 的稳定电流传导。这种材料组合使机器人手指能完成 0.05 牛米¹的精细抓握力控制，同时耐受 500 万次循环运动的机械疲劳。

2. 信号传输系统：铜基导体编织智能感知的 "神经网络"

立方厘米的绕组结构。电刷系统采用铜 - 石墨复合材料，在每分钟 5 万转的高速摩擦中，实现接触电阻 $< 10\text{m}\Omega$ 的稳定电流传导。这种材料组合使机器人手指能完成 0.05 牛米的精细抓握。

人形机器人的感知系统依赖铜材料构建精密的信号传输网络。视觉传感器的同轴电缆采用 99.99% 纯度的无氧铜线，在 20Gbps 的高速数据传输中保持 $< 0.1\text{dB/m}$ 的信号衰减。力传感器的应变片使用康铜合金 (Cu55Ni45)，其 $110\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 的电阻率与 0.49 的应变系数，能精准捕捉 0.01N 的微小力变化。单台机器人传感器系统消耗的 100-150g 铜材，如同分布全身的 "神经元"，将环境感知信号以光速传递至控制中枢。

在控制系统层面，多层电路板采用铜箔厚度 35-70 μm 的 FR4 基材，通过盲埋孔技术实现 0.1mm 的线宽精度。连接器线束使用镀锡铜线，在 10 万次插拔测试中保持 $< 5\text{m}\Omega$ 的接触电阻。这些铜基导体构建的 "神经网络"，确保控制指令在 100ns 级延迟内传递至执行机构，支撑机器人完成复杂的路径规划与实时避障。

3. 结构部件：铜合金打造刚柔并济的 "骨骼肌肉"

传动系统中的行星减速器采用铝青铜 (CuAl10Fe3) 蜗轮，其 HB160-200 的布氏硬度与 0.15% 的延伸率，在 100N·m 的扭矩负载下保持 0.05mm 的齿形精度。轴承衬套用铜基合金 (CuSn10P1)，其 120MPa 的抗压强度与 0.002 的摩擦系数，使关节旋转寿命超过 2000 小时。这些耐磨铜合金如同机器人的 "肌腱"，在动态负载中保持传动精度。

连接部件则采用黄铜 (CuZn37) 铆钉，其抗拉强度 $\geq 380\text{MPa}$ 的特性确保 10 年以上的结构稳定性。导电滑环使用铜合金电刷，在 360° 连续旋转中实现 10A 电流的稳定传导。这些铜基连接件既保证了机械结构的刚性，又为分布式控制系统提供了可靠的电气连接。

在人形机器人产业的爆发式增长中，铜材料的需求正呈现指数级上升趋势。据行业预测，到 2030 年，若全球人形机器人销量突破 100 万台，单台平均 250kg 的铜消耗

¹ 牛米是物理定义，扭矩的单位是力的单位和距离的单位的乘积，即牛顿·米，简称牛米。

量将形成 25 万吨的总需求，相当于 2022 年全球精炼铜消费量的 0.3%。这一增量虽在当前市场占比有限，但标志着铜材料在新兴领域的突破。随着人形机器人向服务、医疗等场景渗透，2040 年市场渗透率有望提升至 500 万台，带动铜需求飙升至 125 万吨，较 2030 年增长 5 倍。这一规模相当于再造一个小型铜消费市场，将使机器人领域成为继建筑、电力后的重要需求增长点。这种需求扩张不仅重塑铜行业的应用格局，更推动铜加工技术向高精度、轻量化方向升级，为行业创造新的价值空间。

人形机器人产业带给铜材料行业的技术跃迁与产业重构

在智能制造的浪潮中，人形机器人正从科幻想象加速走向现实。这一技术演进不仅重塑着工业生产与社会服务的图景，更对基础材料产业产生深远影响。作为兼具导电性与机械性能的战略金属，铜在人形机器人的动力传输、信号处理与结构支撑中展现出不可替代的技术价值，其应用创新正在推动铜产业进入结构性升级的新纪元。

表 2：铜在人形机器人各部件中的作用

技术领域	应用描述	技术突破点	性能提升适用处
电机绕组	使用 99.99% 超高纯度铜，配合纳米晶退火工艺	电阻率降至 $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，导电效率提升 2%，绕组温升降低 12°C	特斯拉 Optimus
信号传输系统	使用镀银铜线	高频信号衰减率从 0.5dB/m 降至 0.2dB/m，确保 20Gbps 数据在 10 米传输中不失真	特斯拉 Optimus
中央处理器与电路板	使用 35 μm 铜箔构建高密度互联网络	实现 0.1mm 线宽，在 100mm ² 面积内集成 10 万+个信号通道，控制指令传递延迟在 10ns 级	一般适用于高级人形机器人
运动控制系统	无框力矩电机的铜绕组，铜基复合材料电刷	在 300°C 热冲击下保持 98% 导电率，实现 10 ⁶ 次换向无磨损	波士顿动力 Atlas 机器人
液压关节	铜合金衬套	确保 200N·m 扭矩下 0.05° 的运动精度	波士顿动力 Atlas 机器人
手指关节	空心杯电机使用直径 3 μm 的单晶铜线	绕组密度达 5000 匝/cm ³ ，配合铜-碳纳米管复合电刷，实现 0.01 牛米的精细力控	一般适用于高级人形机器人
柔性关节	铜基形状记忆合金丝	在 50°C 温差下产生 20% 应变，使机器人手臂能安全接触人类	达闼科技服务机器人

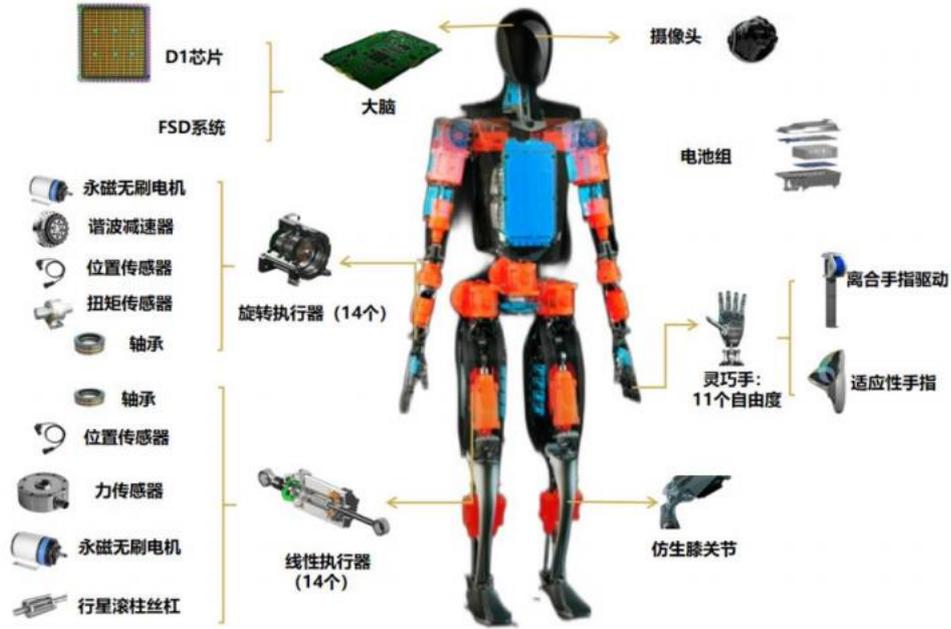
资料来源：华泰期货研究院

人形机器人耗铜量估算

以目前相对流行的特斯拉人形机器人 Optimus 的铜用量为例，其铜用途主要分布在电

机、传动系统、传感器、电池及控制系统等部分。以下是详细估算：

5: 特斯拉人形机器人部件展示



数据来源：特斯拉官网 华泰期货研究院

电机系统

· 无框力矩电机

Optimus 全身共配备 28 个无框力矩电机，分布于旋转关节和线性关节，承担核心驱动功能。单个电机的质量约为 750 克，铜含量占总质量的 10%-15%。因此，总铜用量范围为 2.1 千克至 3.15 千克。特斯拉采用高纯度铜线（纯度 $\geq 99.95\%$ ）和优化的绕组结构，减少了层数和导线直径，同时无铁芯设计相比传统铁芯电机可减少约 30%-50%的铜材消耗。

· 空心杯电机

Optimus 每只灵巧手使用 6 个空心杯电机，双手共计 12 个空心杯电机。假设单个空心杯电机的重量为 100-200 克，铜含量占总重量的 10%-15%。则 12 个空心杯电机的总铜用量约为 120-360 克。

表 3：特斯拉人形机器人电机系统耗铜量估算

组件	数量	单件质量（克）	含铜比例	总耗铜量（千克）
无框力矩电机	28	750	10%-15%	2.1-3.15
空心杯电机	12	100-200	10%-15%	0.12-0.36

资料来源：特斯拉官网 华泰期货研究院

电池及控制系统

Optimus 的电池系统铜用量主要集中在电芯内部结构和能量管理系统。

1. 电芯材料层面

采用的电池组容量为 2.3kWh，推测其电芯型号为 21700 或 4680。每只电芯的铜箔用量约为 8-12 克，以 63 个电芯成组计算，总铜箔用量约为 0.5-0.8kg。采用全极耳²技术后，实际铜箔用量可能进一步控制在 0.4-0.6kg。

表 4：特斯拉人形机器人电芯材料层面用铜估算

组件	数量	单件质量（克）	含铜比例	总耗铜量（千克）
电芯材料层面	63	8-12		0.5-0.8

资料来源：特斯拉官网 华泰期货研究院

2. 系统集成层面

电池 Pack 的铜消耗还包括汇流排、高压线束、热管理铜管和 BMS 模块连接件等。

表 5：特斯拉人形机器人系统集成层面用铜估算

组件	铜用量（千克）
汇流排	0.2-0.3
高压线束	0.15-0.20
热管理铜管	0.10-0.15
BMS 模块连接件	0.05

资料来源：特斯拉官网 华泰期货研究院

需要注意的是，48V 低压架构、叠片工艺和一体化压铸技术的应用，使得铜用量相比传统设计有所减少。综合以上因素，Optimus 电池系统的铜用量约为 1.0-1.8kg/台，占

² 全极耳技术是一种通过优化电极结构设计来提升电池性能的技术。其核心特点是在电极边缘预留箔均匀分布多个极耳，取代传统电池的单一或少量极耳设计，从而降低内阻、提升倍率。

机器人总铜耗量（10-20kg）的 10%-18%。随着技术进步，这一数值有望进一步降低至 0.8-1.2kg/台。

控制系统

特斯拉人形机器人 Optimus 的控制系统主要包括主控制芯片、传感器、电子器件以及相关的电路连接等。虽然目前没有明确的公开数据直接说明 Optimus 控制系统中铜的具体用量，但可以结合其技术特点和类似应用进行合理推测。

· 主控制芯片与电子器件

Optimus 的“大脑”采用特斯拉自研的 FSD 芯片，其算力高达 1 PFLOPS。芯片本身主要由半导体材料构成，但其封装和散热模块可能涉及铜材料，用于提高导热性能和稳定性。芯片与外部电路的连接也依赖于铜制的引脚和导线。控制系统中的其他电子器件（如 BMS 模块、IMU 惯性测量单元等）也包含铜制的电路板和连接线

· 传感器与数据传输

Optimus 配备了多种高精度传感器，如摄像头、LIDAR、红外传感器和力传感器。这些传感器的信号传输和电源连接需要铜制的线缆，尤其是在高精度和高带宽的数据传输中，铜的导电性能至关重要。数据传输模块（如 Wi-Fi 和 LTE 连接）也需要铜制的天线和电路。

· 电路连接与布线

控制系统的电路连接主要依赖于铜制的 PCB（印刷电路板）、汇流排和高压线束。虽然 Optimus 采用的 52V 低压系统相比传统 12V 系统减少了铜用量，但考虑到其复杂的功能和高精度要求，铜在电路中的应用仍然是必不可少的。

表 6：特斯拉人形机器人控制系统用铜量估算

组件	描述	用铜量估算（千克）
芯片与电子器件	主控制芯片及相关电子器件	0.1-0.2
传感器与数据传输	各类传感器和数据传输模块	0.1-0.2
电路连接与布线	铜制线缆和 PCB，考虑到复杂电路设计和高精度要求	0.2-0.4

资料来源：特斯拉官网 华泰期货研究院

灵巧手与触觉传感器

Optimus 每只手配置 5 个 MEMS 触觉传感器（双手共 10 个），采用柔性基底材料与碳纳米管/石墨烯等导电复合材料，铜元素主要用于电极引出和信号传输线路。单个触觉

传感器的铜用量约为 0.5-1.5 克，总铜用量约为 5-15 克。

但考虑到触觉传感器在人形机器人总铜耗量中占比不足 0.1%，其实际影响可忽略不计。未来随着全碳基柔性传感器技术的突破，铜用量有望进一步降至 3 克以内。

表 7：特斯拉人形机器人灵巧手与触觉传感器用铜量估算

组件	描述	用铜量估算（克）
灵巧手触觉传感器	MEMS 触觉传感器，柔性基底材料与碳纳米管/石墨烯复合材料	5-15

资料来源：特斯拉官网 华泰期货研究院

传感器系统

· 视觉传感器

Optimus 的视觉传感器采用纯视觉方案，包含 1 个鱼目摄像头和 2 个普通摄像头。每个摄像头的铜用量可能在 5-10 克左右，三个摄像头总用量约为 15-30 克。

· 力传感器

Optimus 中使用的力传感器包括一维力传感器和六维力/扭矩传感器。一维力传感器的铜用量较少，而六维力/扭矩传感器的铜用量较高，假设每个传感器的铜用量约为 50-100 克，总计约为 480-960 克。

· IMU 模块

IMU 模块的核心功能是通过加速度计和陀螺仪实时感知物体的运动状态，为机器人提供高精度的运动数据。尽管 IMU 模块的主要材料包括半导体、陶瓷和金属外壳等，但铜的使用主要集中在电路板和电子元件、连接线和接口部分。假设每个 IMU 模块的铜用量约为 10-20 克（具体取决于模块的尺寸和复杂度），则：4 个主控 IMU：约 40-80 克铜。40 个消费级 IMU：约 400-800 克铜。综合来看，Optimus 中 IMU 模块的铜用量可能在 440-880 克左右。

表 8：特斯拉人形机器人传感器系统用铜量估算

组件	描述	用铜量估算（克）
视觉传感器	鱼目摄像头、普通摄像头	每个摄像头：5-10 克；总共：15-30 克
力传感器	一维力传感器、六维力/扭矩传感器	总计：480-960 克
IMU 模块	电路板和电子元件、连接线和接口	总计：440-880 克

资料来源：特斯拉官网 华泰期货研究院

控制器与伺服系统

控制器系统

控制器系统作为核心电路组件，其铜用量主要集中在电路板与连接器、散热结构以及线缆与线束部分。根据行业估算，单台人形机器人的连接器总用量约 100-200 套，每套连接器含铜量约 1-2 克，总铜用量约 0.1-0.4 千克。控制器运行时需通过铜制散热片或热管散热，这部分铜用量约 0.2-0.5 千克。线缆与线束中，铜丝成本占原材料的 86.6%，假设线束总重量约 1-2 千克，铜用量约 0.8-1.7 千克。综合估算，控制器系统的铜总用量约为 1.1-2.6 千克。

伺服系统

伺服系统作为核心动力单元，其铜用量主要集中在伺服电机绕组、编码器与驱动器以及连接线束部分。单台机器人需 40 个以上伺服电机，每个电机的铜绕组用量约为 100-200 克，总用量约 4-8 千克。编码器和驱动器内部的电路板、连接器及散热结构含铜量约为 0.5-1 千克。伺服系统与控制器、传感器间的线束铜用量约为 1-2 千克。综合估算，伺服系统的铜总用量约为 5.5-11 千克。

表 9：特斯拉人形机器人控制器与伺服系统用铜量估算

组件	部分描述	用铜量估算（千克）
控制器系统	电路板与连接器、散热结构、线缆与线束	总计：1.1-2.6 千克
伺服系统	伺服电机绕组、编码器与驱动器、连接线束	总计：5.5-11 千克

资料来源：特斯拉官网 华泰期货研究院

单个特斯拉人形机器人用铜量估算

根据各部分铜用量的详细估算，特斯拉人形机器人 Optimus 的总铜消耗量可综合如下：

表 10：单个特斯拉人形机器人用铜量估算

组件	描述	用铜量估算（克）
电机系统	无框力矩电机、空心杯电机	2.22-3.51
电池及控制系统	电芯铜箔、汇流排、线束等	1.0-1.8
控制系统	芯片、传感器、电路连接	0.4-0.8
传感器系统	视觉传感器、力传感器、IMU 模块	0.94-1.87
控制器与伺服系统	控制器系统、伺服系统（含电机绕组、编码器、线束）	6.6-13.6

其他部分

触觉传感器

0.005-0.015

资料来源：特斯拉官网 华泰期货研究院

将各部分最小和最大值分别累加： • 最小值： $2.22 + 1.0 + 0.4 + 0.935 + 6.6 + 0.005 \approx 11.16 \text{ kg}$ • 最大值： $3.51 + 1.8 + 0.8 + 1.87 + 13.6 + 0.015 \approx 21.595 \text{ kg}$

考虑到用户提到的总铜耗量范围（10-20 kg）及技术路径的合理性，最终估算为： 单台特斯拉人形机器人铜用量约为 10-20 千克，平均按 15 千克计算。

表 11：特斯拉人形机器人总用铜量估算（按 15KG/台计算）

年份	全球机器人总数量 (万台)	全球人形机器人占比 (%)	人形机器人(万台)	用铜量 (吨)
2025	2050	0.15	3	450
2026	2780	0.36	10	1500
2027	3880	0.77	30	4500
2028	5090	1.57	80	12000
2029	6520	2.45	160	24000
2030	8280	3.02	250	37500
2031	10267	3.60	370	55500
2032	12526	3.99	500	75000
2033	14781	4.53	670	100500
2034	16998	4.88	830	124500
2035	19207	5.21	1000	150000

资料来源： 华泰期货研究院

人形机器人对铝需求的影响

轻型材料选择丰富

目前市面上主要的轻型材料选择主要有镁合金、铝合金和碳纤维，特斯拉的 Optimus Gen2 让 PEEK 进入大众视野。从过往汽车轻量化的进程来看，主流模式是铝代钢，因铝合金加工工艺相对简单，且前期价格远低于镁合金，但目前镁合金对铝合金的替代也在进行中。Optimus Gen2 通过增加 PEEK 的使用量，使得重量下降 10KG，行走速度提高 30%，使得其成为当下的宠儿，但其当前因绝对价格过高，成为量产阶段的一大障碍，不过随着国产 PEEK 的发展，预计未来在机器人制造方面使用前景依旧可观。

表 12: 主要材料价格

材料	密度 (g/cm ³)	比强度 (MPa/cm ³)	单位 (万元/吨)
钢材	7.85	200	0.4
镁合金	1.83	250-300	1.7
铝合金	2.63-2.85	80-120	2.1
PEEK	1.29-1.45	800	30-100
碳纤维	1.78-2.0	1400 以上	8.3

资料来源: 百川盈孚 华泰期货研究院

工业机器人用铝量分析

工业机器人方面, 小型六轴机器人强度需求低, 速度要求需求快, 主要使用铝合金; SCARA 考虑结构和成本, 主要使用铝型材; Delta 类型机器人追求轻量化和高速运动则会使用碳纤维; 而应用于医药清洁环境机器人, 则需要使用不锈钢材质; ABB 和 FANUC 的几款小型机器人有使用到镁合金, 不过镁合金加工难度大。

六轴工业机器人根据负载臂展等因素, 用铝量同样也有所不同, 负载 5 公斤主要应用于电子、食品等行业的小型零部件装配、分拣等工作, 为了实现快速运动和高精度操作, 会在机械臂、关节等部位使用铝合金。负载在 5-20 公斤之间常用于汽车零部件加工、焊接、物料搬运等场景。这类机器人为了保证一定的强度和刚度, 其机械臂、腕部以及部分支撑结构采用铝合金, 以上机器人以 6 系铝合金居多。负载超过 20 公斤用于大型机械零部件搬运、铸造等重负载任务, 为了承受大负载会使用较多的钢材, 铝材会使用高强度铝合金如 7 系。

普通工业机器人除去线缆和电子元件外, 通体包括手臂、关节、腕部及支撑结构大多使用铝合金制造, 像大型的码垛机器人, 其手臂和部分框架结构会大量使用高强度铝合金如 7075 铝合金, 用铝量可能在 80 公斤左右, 均值预估工业机器人单台耗铝量 25-35kg。2024 年中国工业机器人产量环比增加 12.6 万台, 贡献铝用增量仅有 3000-5000 吨。

表 13: 小型六轴机器人型号

组件	TA6-R3	TA6-R5	TA6-R10	TA6-R20
有效载荷	3KG	5KG	10KG	20KG
材料	铝、钢	铝、钢	铝、钢	铝、钢
电缆长度	6m	6m	6m	6m
重量	16.2KG	22.6KG	36KG	52KG

资料来源: 智能制造 华泰期货研究院

图 1：工业机器人产量 | 单位：万台、%



数据来源：Wind 华泰期货研究院

图 2：服务机器人产量 | 单位：万吨、%

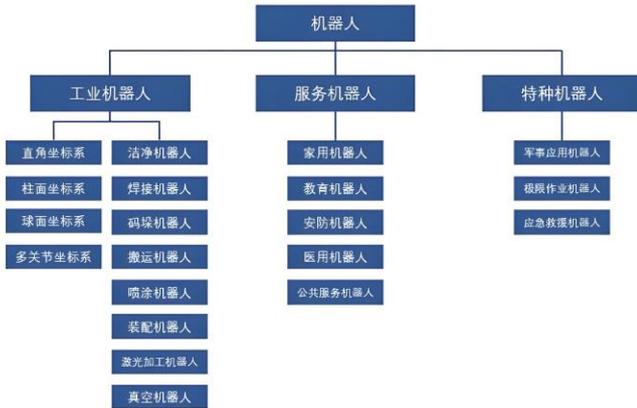


数据来源：Wind 华泰期货研究院

服务型机器人用铝量分析

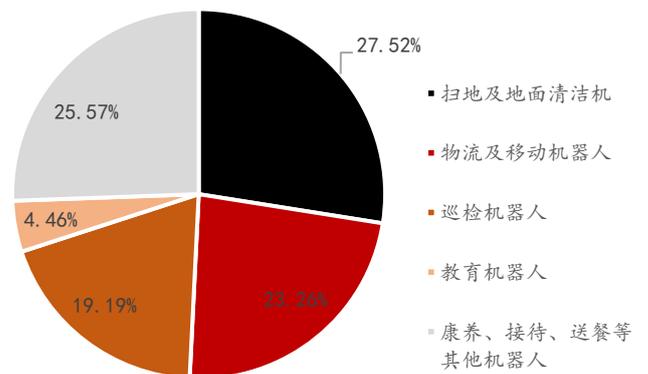
普通服务型机器人对强度、速度耐腐蚀等因素要求较低，因此用铝量相对较少，小型室内服务机器人譬如扫地机器人仅关键结构件使用铝，用铝量可忽略不计。中型服务机器人如餐厅酒店服务机器人，一般有 5-20 公斤的载重需求，但其自身壳体大多使用塑料材质 (ABS)。大型服务机器人如物流搬运机器人，其框架结构、机械臂和支撑部位会使用到铝合金，单台使用量可超过 10kg。

图 3：机器人分类



数据来源：华泰期货研究院

图 4：服务机器人分类 | 单位：%



数据来源：中商产业研究 华泰期货研究院

根据中商产业研究院发布的报告显示，2023 年中国服务机器人市场中，扫地及地面清洁机器人市场份额占比最大达 27.52%。对用铝量分析中，我们预估具备搬用功能机器人中单机用铝量 10kg，占服务型机器人比例 30%-40%，即 2024 年中国服务型机器人平均用铝量 3-4kg。

图 5：六轴工业机器人



图 6：服务机器人



数据来源：华泰期货研究院

数据来源：华泰期货研究院

人形机器人用铝量分析

特斯拉召开 2024Q4 业绩会更新 Optimus 最新进展，2026 年下半年对外交付 Optimus Version2。2025 年内部计划生产 1 万台 Optimus，年底前至少可以生产数千台。目前正在设计的产线产能 1 千台/月，下一条 1 万台/月，再下一条 10 万台/月，量产后单台机器人成本将低于 2 万美元。

表 14：特斯拉人形机器人计划产能产量

	2025 年	2026 年	2027 年
产能	1.2 万台/年	12 万台/年	120 万台/年
产量	5000 台	5 万台	50 万台

资料来源：特斯拉官网 华泰期货研究院

最初擎天柱的预期重量为 57 公斤，但第一代实际上达到了 73 公斤左右，而第二代通过 PEEK 材料的使用成功减少了 10 公斤，将整体重量调整到了 63 公斤左右。人形机器人铝耗材主要体现在壳体方面，包含其内部零件的封装材料以及机器人骨架。

特斯拉机器人铝用量分析

特斯拉机器人有 30 个关节，分别由 16 个旋转执行器和 14 个线性执行器组成，手部共有 22 个自由度。

执行器：由减速器、滑动丝杆、滚动丝杆、轴承、传感器、电机、电控组成，根据特斯拉公布 Optimus Gen2 使用 3 中类型线性执行器（质量分别为 0.36kg、0.93kg 和 2.2kg）和 3 种类型旋转执行器（质量分别为 0.55kg、1.62kg 和 2.26kg），按平均计算即一台机器人执行器总重量分别为 16.3kg 和 23.6kg。

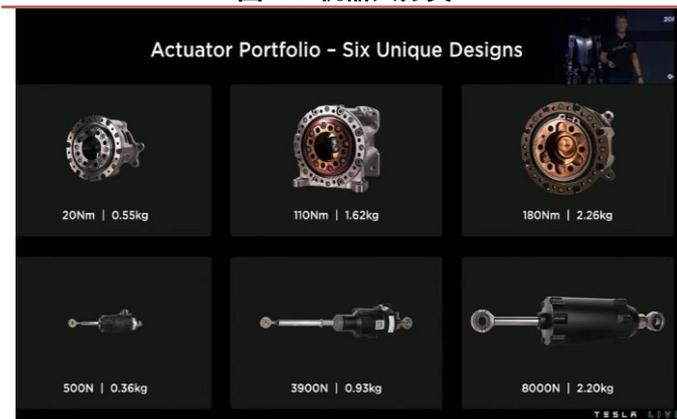
其中滑动丝杆和滚动丝杆主要采用高强度轴承钢。传感器方面包含视觉传感器、力传感，铝主要用于外壳，单台机器人搭载 5-8 个视觉传感器，15-20 个力传感器，铝用量预计 0.7kg。电机方面，铝用于点击外壳及散热方面，根据工业电机铝壳重量通常占电机总重的 10%-15%，但机器人方面考虑轻量化因素考虑，预计铝用量相较工业化将有所增加，预计铝壳重量约 5-10kg。减速器方面，根据目前市场已有工业机器人减速器如哈默纳科 CSF 系列，用铝量 2kg。

即执行器用铝量预估范围在 8-13kg，取中间值为 10kg，占比 25%。

外壳和骨骼：根据市面上主流人形机器人人高体重统计，平均身高 175cm，对应平均体重 63kg，平均数据与特斯拉 Optimus Gen2 极为相似。特斯拉电池组使用密度约为 244Wh/kg，容量为 2.3kWh，推测电池组重量 9.5kg；执行器总重量 39.9kg；灵巧手推测重量 1kg，则剩余外壳躯体重量大约 12kg。本文骨骼和外壳均按照使用铝合金推算，但随着镁合金性价比的提高，不排除后期镁合金的替代作用。

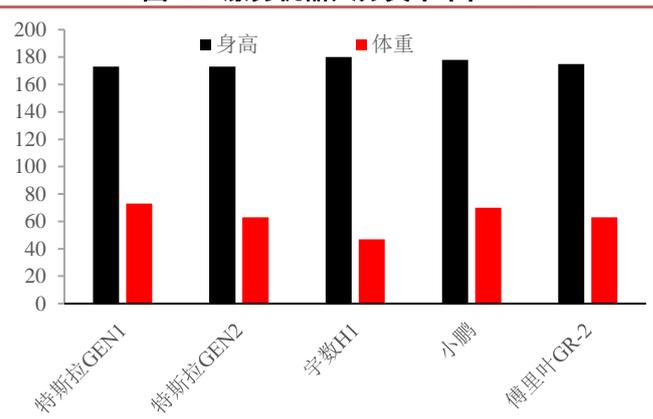
总计：一台人形机器人用铝量为执行器 10kg+骨骼 12kg=22kg，占机器人总量 35%。

图 7：机器人分类



数据来源：特斯拉官网 华泰期货研究院

图 8：服务机器人分类 | 单位：%



数据来源：华泰期货研究院

表 15：机器人用铝量

人形机器人用铝量	服务型机器人用铝量	工业机器人用铝量
22kg/台	4kg/台	30kg/台

资料来源：华泰期货研究院

综合考虑工业机器人、服务型机器人和人形机器人计算，到 2030 年机器人方面铝消费量达到 45 万吨左右，年负荷增长率 35%；到 2035 年铝消费量达到 113 万吨，2030-2035 年负荷增长率 20%。

表 16: 机器人用铝量

年份	全球机器人总数 (万台)	全球人形机器人占比 (%)	人形机器人 (万吨)	服务机器人 (万吨)	工业机器人 (万吨)	用铝量 (万吨)
2025	1800	0.17	3	1710	90	9.6
2026	2430	0.41	10	2310	120	13.1
2027	3400	0.88	30	3230	170	18.7
2028	4460	1.79	80	4230	230	25.6
2029	5700	2.81	160	5420	280	33.6
2030	7250	3.45	250	6880	370	44.1
2031	8990	4.12	370	8530	460	56.1
2032	10970	4.56	500	10400	570	69.7
2033	12950	5.17	670	12300	650	83.4
2034	14900	5.57	830	14150	750	97.4
2035	16900	5.92	1000	16000	900	113.0

资料来源：华泰期货研究院

人形机器人对锂需求的影响

人型机器人动力主要使用锂电池，目前人型机器人仍在发展初始阶段，体积大小不同，带电量也存在较大差异，部分体积较小的牺牲续航导致带电量较少，特斯拉 Optimus Gen-2 优化后重量仍达 63kg，容纳 2.3kWh 电芯，宇树科技 Unitree 系列 H1 机型：仅配备 0.815kWh 锂电池，续航不足 1 小时。后续随着电池技术发展及人型机器人用途增加，带电量有望逐步提升。根据公开资料，目前机器人主要使用高镍三元电芯，随着固态电池技术成熟，后续有望逐步使用固态电池。根据单个机器人带电量，单 GW 电池消耗碳酸锂量，对后续人型机器人对碳酸锂消费量进行预测，结果如下表所示：

表 17: 机器人用碳酸锂量

年份	单个机器人带电量 (KWh)	全球人形机器人产量 (万台)	电池需求量 (GW)	单 GW 碳酸锂消耗量 (吨)	碳酸锂总消耗量 (吨)
2025	1.8	3	0.054	750	40.5
2026	2.5	10	0.25	750	187.5
2027	3.5	30	1.05	800	840
2028	4	80	3.2	850	2720

2029	4.5	160	7.2	1000	7200
2030	5	250	12.5	1200	15000
2031	5	370	18.5	1200	22200
2032	5	500	25	1400	35000
2033	5	670	33.5	1500	50250
2034	5	830	41.5	1600	66400
2035	5	1000	50	1800	90000

资料来源：华泰期货研究院

人形机器人对有色材料需求汇总

总体而言，人形机器人对于有色主要品种（铜、铝、碳酸锂）需求影响如下表所示：

表 18：人形机器人耗材量汇总

年份	全球机器人总数 (万台)	全球人形机器人占比 (%)	人形机器人 (万吨)	耗铜量 (吨)	耗铝量 (万吨)	耗碳酸锂量 (吨)
2025	1800	0.17	3	450	9.6	40.5
2026	2430	0.41	10	1500	13.1	187.5
2027	3400	0.88	30	4500	18.7	840
2028	4460	1.79	80	12000	25.6	2720
2029	5700	2.81	160	24000	33.6	7200
2030	7250	3.45	250	37500	44.1	15000
2031	8990	4.12	370	55500	56.1	22200
2032	10970	4.56	500	75000	69.7	35000
2033	12950	5.17	670	100500	83.4	50250
2034	14900	5.57	830	124500	97.4	66400
2035	16900	5.92	1000	150000	113.0	90000

资料来源：华泰期货研究院

免责声明

本报告基于本公司认为可靠的、已公开的信息编制，但本公司对该等信息的准确性及完整性不作任何保证。本报告所载的意见、结论及预测仅反映报告发布当日的观点和判断。在不同时期，本公司可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。本公司不保证本报告所含信息保持在最新状态。本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本公司力求报告内容客观、公正，但本报告所载的观点、结论和建议仅供参考，投资者并不能依靠本报告以取代行使独立判断。对投资者依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及作者均不承担任何法律责任。

本报告版权仅为本公司所有。未经本公司书面许可，任何机构或个人不得以翻版、复制、发表、引用或再次分发他人等任何形式侵犯本公司版权。如征得本公司同意进行引用、刊发的，需在允许的范围内使用，并注明出处为“华泰期货研究院”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。本公司保留追究相关责任的权利。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

华泰期货有限公司版权所有并保留一切权利。

公司总部

广州市天河区临江大道1号之一2101-2106单元 | 邮编：510000

电话：400-6280-888

网址：www.htfc.com