

行业研究

人形机器人加速发展，钕铁硼、镁合金显著受益

——人形机器人金属材料深度报告

要点

人形机器人市场空间可期，预计到 2030 年全球销量将突破 100 万台。马斯克认为 Tesla 的 Optimus 人形机器人最终产量将达到数百万台，并计划以“可能不到 2 万美元”的价格出售这款机器人。根据 Precedence Research 的预测，2032 年全球人形机器人市场规模将达到 286.6 亿美元，折合人民币超越 2000 亿元，2022-2032 年全球人形机器人市场规模复合增长率约为 33.3%；格物致胜预计 2030 年全球人形机器人销量将达到 150 万台，2035 年达到 800 万台的水平。

人形机器人的主要上游产业包括钕铁硼磁材、工装刀具（铜镀层丝、硬质合金）、钢材、轻量化材料（镁合金、铝合金、PEEK）等。Tesla 人形机器人 Optimus 主要包含 14 个旋转执行器以及 14 个线性执行器（主要原材料为钕铁硼磁材、工装刀具、电工钢等）；2 只灵巧手（主要原材料为不锈钢或高分子纤维）；主控制芯片、摄像头、电池包（我们假设其为 Tesla 设计的 4680 圆柱电池）以及整体骨骼框架（轻量化材料）。

每一百万台人形机器人出货对上游原材料的需求拉动顺序为：PEEK>镁合金>钕铁硼>铝合金>钢材。由于 Tesla 目前并未公布其使用轻量化材料的具体种类，我们分别计算了 Optimus 使用三种不同轻量化材料情形下的 100 万台人形机器人出货对上游原材料的拉动顺序，具体计算结果为 PEEK（64.5%）>镁合金（1.81%）>钕铁硼（1.20%）>铝合金（0.07%）>钢材。

人形机器人单机磁组件价值量为钕铁硼价值量的 3.52 倍，磁材公司将更加受益。考虑到人形机器人用磁材具备扭矩大（增加承重）、磁偏角小（减少动作误差）、电机体积小，单位磁性能要求高等特点，人形机器人企业对磁材的需求可能也将从简单的磁性材料升级至磁组件产品。根据我们的计算，人形机器人单机磁组件价值量为钕铁硼价值量的 3.52 倍。

Optimus Gen2 单机镀层丝消耗量约为 9.52kg，单机价值量大约为 809 元。工装刀具的使用与制作谐波减速器主要刚柔轮的制造工艺有关，目前国内的主流工艺路线为慢走丝工艺，使用材料为铜镀层丝。根据我们的计算，Optimus Gen2 单机镀层丝消耗量约为 $0.68\text{ kg} \times 14 = 9.52\text{ kg}$ ，单个 Optimus Gen2 镀层丝的价值量大约为 809 元。

我们认为镁合金有可能成为 Tesla 人形机器人轻量化材料的解决方案。根据我们的测算，Optimus Gen2 所使用的轻量化材料密度大约为 2.76 g/cm^3 ；按照 Tesla 后续优化方案再减重 10% 作为假设计算，轻量化材料密度约为 1.72 g/cm^3 。 2.76 g/cm^3 及 1.72 g/cm^3 分别接近铝合金、镁合金的密度。考虑到 PEEK 材料相比镁合金与铝合金更加昂贵（当前 PEEK 材料的价格大约为镁合金/铝合金价格的十倍以上），镁合金有可能成为 Tesla 轻量化材料的最终选择。

投资建议：人形机器人的主要原材料包括钕铁硼、镀层丝、硬质合金、镁合金、铝合金、钢材等，随着人形机器人产业化的临近，这些材料相关的上市公司有望受益，建议关注金力永磁（磁材）、宁波韵升（磁材）、正海磁材（磁材）、中科三环（磁材）、大地熊（磁材）、英洛华（磁材）、博威合金（镀层丝）、宝武镁业（镁合金）、星源卓镁（镁合金）。

风险分析：上游原材料价格波动风险，公司扩产计划不及预期风险，人形机器人技术路线变化风险，理论假设与现实不符风险等。

有色金属
增持（维持）

作者

分析师：王招华

执业证书编号：S0930515050001

021-52523811

wangzh@ebcn.com

分析师：马俊

执业证书编号：S0930523070008

021-52523809

majun@ebcn.com

分析师：方驭涛

执业证书编号：S0930521070003

021-52523823

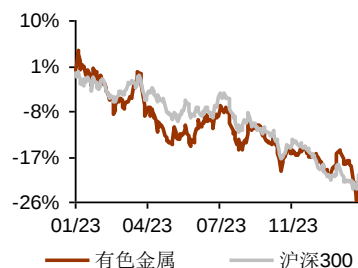
fangyutao@ebcn.com

联系人：张寅帅

021-52523682

zhangyinsuai@ebcn.com

行业与沪深 300 指数对比图



资料来源：

相关研报

机器人助力稀土磁材增长新引擎——稀土磁材板块股价异动点评（2023-07-02）

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

投资聚焦

Tesla Optimus 人形机器人掀起行业巨浪，诸多科技公司纷纷入局，当前人形机器人行业迅速迭代，产业处于“0-1”的突破阶段。未来随着人形机器人的逐步放量，上游重要原材料钕铁硼、镁合金等有望深度受益。

我们区别于市场的观点

(1) 市场对人形机器人的研究一般从 Tesla 人形机器人产品 Optimus Gen2 入手，对其参数进行披露；我们在此基础上继续进行深度拆解与分析，估算出了其质量分布情况，并进一步地计算出了几种重要原材料的单机使用量及价值量。

(2) 市场上对人形机器人用钕铁硼的研究普遍停留在磁材本身的需求量层面，我们参考新能源车用稀土永磁电机，测算出了 Optimus 单机磁组件价值量。

(3) 市场上目前还没有对 Optimus 单机用镀层丝的消耗量及价值量的测算，我们通过计算单个谐波减速器所需加工时间、单卷镀层丝、单卷镀层丝可应用于慢走丝加工时长等数据对这个问题进行了回答。

(4) 市场上目前对 Tesla Optimus 人形机器人所使用轻量化材料的预期大多为 PEEK 材料，我们在进行轻量化材料的密度计算与对比后认为铝合金和镁合金同样有可能成为 Tesla Optimus 人形机器人的轻量化材料选择。

股价上涨的催化因素

- (1) 国内相关原材料上市企业确定进入 Tesla 供应链。
- (2) 人形机器人产业化持续推进，重要产品成功推向市场。
- (3) 软硬件技术重大突破以及国家政策支持，利好人形机器人产业化加速。

投资观点

人形机器人的主要原材料包括钕铁硼、镀层丝、硬质合金、镁合金、铝合金、钢材等，随着人形机器人产业化的临近，这些材料相关的上市公司有望受益，建议关注金力永磁（磁材）、宁波韵升（磁材）、正海磁材（磁材）、中科三环（磁材）、大地熊（磁材）、英洛华（磁材）、博威合金（镀层丝）、宝武镁业（镁合金）、星源卓镁（镁合金）。

目 录

1、人形机器人产业化渐近，上游原材料有望受益	6
1.1、人形机器人发展历程复盘，AI 的出现或将成为重要助推	6
1.2、人形机器人：十年内有望达千亿 RMB 产值.....	8
1.3、人形机器人上游零部件及原材料梳理.....	9
2、人形机器人质量拆分及重要原材料分析.....	17
2.1、Optimus Gen2 质量拆分	17
2.2、稀土磁材：无框力矩电机及空心杯电机核心材料	21
2.3、工装刀具：铜镀层丝与硬质合金刀具.....	27
2.4、镁合金：人形机器人关键轻量化材料.....	28
2.5、其他材料：钢材及球墨铸铁	30
3、弹性测算.....	31
4、投资建议.....	31
4.1、金力永磁：Tesla 重要供应商，新能源、机器人均有布局	32
4.2、宁波韵升：老牌磁材生产企业，持续开拓新能源领域	32
4.3、正海磁材：稀土磁材与新能源电机驱动双轮驱动	33
4.4、中科三环：拥有雄厚理论与优秀技术的稀土磁材企业	33
4.5、大地熊：客户广泛的优质磁材供应商.....	33
4.6、英洛华：电机业务打开全新增长空间.....	34
4.7、博威合金：新材料与光伏业务双轮驱动	34
4.8、宝武镁业：背靠宝钢，镁业龙头	35
4.9、星源卓镁：突破镁合金压铸领域	35
5、风险提示.....	36

图目录

图 1：2017-2026E 全球工业机器人安装量	6
图 2：2022 年世界排名前 15 的国家和地区工业机器人安装量（万台）	6
图 3：Eureka 训练机器人熟练转笔.....	8
图 4：Eureka 通过上下文进化搜索逐渐生成更好的奖励	8
图 5：2022~2032E 全球人形机器人市场规模预测（亿美元）	8
图 6：2025-2030 年全球人形机器人销量预测（万台）	9
图 7：Optimus 旋转执行器及线性执行器图示	10
图 8：无框力矩电机上游主要原材料/零部件	10
图 9：谐波减速器组成部件示意图	11
图 10：各类型电极丝切割速度与精度对比	12
图 11：行星滚柱丝杠内部结构示意图.....	13
图 12：磨削工艺的不同种类	14
图 13：Optimus 灵巧手设计方案	15
图 14：人形机器人产业链概览	16
图 15：人形机器人价值量分布（系统拆分）	17
图 16：人形机器人价值量分布（零部件拆分）	17
图 17：Optimus 共搭载 28 个执行器组件	18
图 18：Tesla 公布其执行器性能参数	18
图 19：因时机器人 RH56DFX 系列灵巧手简要介绍	19
图 20：Optimus 搭载 2.3kwh 52v 电池包	19
图 21：Tesla 开发的 4680 圆柱电池.....	19
图 22：Optimus Gen2 质量占比	20
图 23：2023 年钕铁硼下游需求分布	21
图 24：2017~2022 年我国稀土氧化物开采指标与我国钕铁硼产量.....	23
图 25：2018~2022 年我国稀土氧化物开采指标增速与我国钕铁硼产量增速	23
图 26：2022~2025 年全球钕铁硼供需缺口预测图（万吨）	25
图 27：同步磁阻电机的转子总成示意图	26
图 28：汽车驱动电机主要部件价值量占比	26
图 29：2018 年至今镁锭、铝锭价格与镁铝比走势情况	29
图 30：人体平均肌肉体积.....	29
图 31：人形机器人采用镁合金案例	30

表目录

表 1：人形机器人发展历程	7
表 2：绿的谐波原材料采购以钢材、工装刀具、铝材为主	11
表 3：慢走丝工艺阶段变化及使用原材料	12
表 4：合金柄式滚刀案例对比	13
表 5：Ewellix 行星滚柱丝杠不锈钢选择	14
表 6：Ewellix 行星滚柱丝杠标准钢选择	14
表 7：磨削工艺所使用砂轮材料	15
表 8：Optimus Gen2 执行器质量拆分	18
表 9：因时机器人 RH56DFX 系列灵巧手主要参数	19
表 10：Optimus Gen2 质量拆分	20
表 11：2022~2025 年主要钹铁硼生产企业扩产规划（单位：吨）	22
表 12：2023-2024 年我国稀土开采及冶炼指标	22
表 13：2022~2025 年全球钹铁硼供给预测（单位：万吨）	23
表 14：工业机器人+Tesla 人形机器人占钹铁硼需求比例测算	24
表 15：2022~2025 年全球钹铁硼供需缺口测算（万吨）	24
表 16：部分磁材企业对磁组件布局情况	25
表 17：博德高科镀层电极丝相比于传统黄铜丝经济效益提升	27
表 18：三种轻量化材料参数对比	28
表 19：人形机器人主要原材料用量汇总	31
表 20：相关上市公司弹性测算表	31

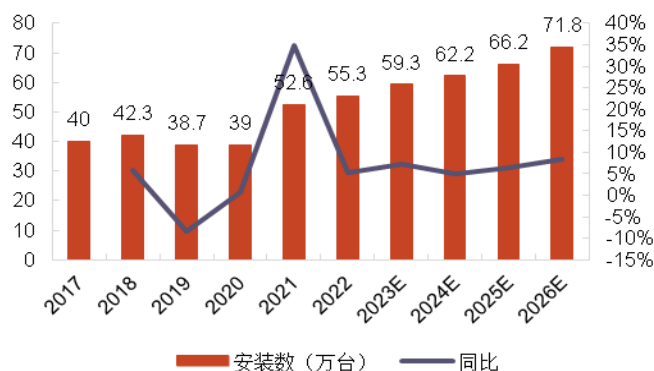
1、人形机器人产业化渐近，上游原材料有望受益

全球机器人产业保持增长态势，中国已是世界最大的工业机器人市场。根据国际机器人联合会（IFR）发布的《2023 年全球机器人报告》，2022 年全球工厂新安装 55.30 万台机器人，同比增长 5.1%，预计 2026 年全球工业机器人新安装数量将达到 71.8 万台。

按地区划分，2022 年，新安装的工业机器人中有 73% 安装在亚洲，15% 在欧洲，10% 在美洲。

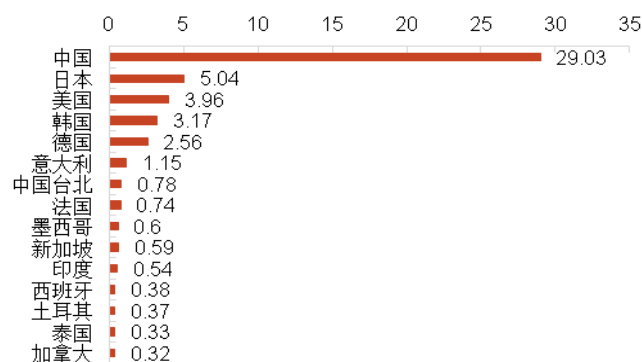
2022 年，中国是世界上最大的工业机器人市场，安装量为 29.03 万台（同比 2021 年安装量增速为 5%，2021 年安装量较 2020 年增长 57%），占全球工业机器人安装量的 52.50%。工业机器人市场份额随中国之后的是日本，其 2022 年安装量增长了 9%，达到 50,413 台，超过了 2019 年疫情前的 49,908 台。同时，日本也是世界上主要的机器人制造国，占全球机器人产量的 46%。

图 1：2017-2026E 全球工业机器人安装量



资料来源：国际机器人联合会（IFR）预测，光大证券研究所

图 2：2022 年世界排名前 15 的国家和地区工业机器人安装量 (万台)



资料来源：国际机器人联合会（IFR），光大证券研究所

工业机器人与人形机器人具备以下区别：

(1) “**大脑思维**”层面：人形机器人在 AI 感知技术和 AI 语言大模型的支持下，可以自主学习、决策以及推理；而工业机器人的“大脑思维”通常是被事先编码设定的，能够重复做编码设定好的事情而不知疲倦。

(2) “**身体体型**”层面：人形机器人的身高体型更接近人类的普遍身高体型，十分类似人体，其行为也“类人”。

基于以上两个特点，工业机器人的发展与成熟对于人形机器人奠定了重要基础以及“解锁前置科技点”的作用。

1.1、人形机器人发展历程复盘, AI 的出现或将成为重要助推

人形机器人拥有会使用人类工具、所需空间少、非连续接触运动等特点，使其更易于人机交互，适应人类工作场景，未来有望对人类的工作起到一定程度的替代作用。

人形机器人技术起步于 1960 年代后期，以日本的研究成果最为显著。根据产品运动和交互功能成熟度，其发展历程可大致分为四个阶段：

早期发展阶段（2000 年以前）：1973 年，早稻田大学研发出世界第一款人形机器人 WABOT-1 的 WL-5 号两足步行机。1986 年，日本本田开始进行人形机器人 ASIMO 的研究，并于 2000 年成功发布第一代机型。

高度集成发展阶段（2000-2015 年）：2003 年日本丰田发布“音乐伙伴机器人”，其可以实现吹喇叭、拉小提琴等乐器演奏功能；2011 年，日本本田推出第三代 ASIMO，其具有利用传感器避开障碍物等自动判断并行动的能力，还能用五根手指做手语，或将水壶里的水倒入纸杯。

高动态运动发展阶段（2015 年至今）：2016 年，美国波士顿动力公司发布双足机器人 Atlas，具有极强的平衡性和越障能力，能够承担危险环境搜救任务；2020 年，美国敏捷机器人公司推出双足机器人 Digit，能够在无人干涉的环境下自行选定搬动箱子，适用于物流、仓储、工业等多种应用场景。

在 Tesla 发布其人形机器人产品 Optimus 之后，人形机器人产业化进程加速：Optimus 能够完成多种复杂任务，引起了市场的广泛关注。

2023 年 11 月，工信部印发《人形机器人创新发展指导意见》，提出到 2025 年，人形机器人创新体系初步建立，“大脑、小脑、肢体”等一批关键技术取得突破，整机产品达到国际先进水平，并实现批量生产。到 2027 年，人形机器人技术创新能力显著提升，构建具有国际竞争力的产业生态，综合实力达到世界先进水平。

表 1：人形机器人发展历程

发展阶段	代表产品	主要功能
早期发展阶段（2000 年以前）	早稻田大学仿人机器人	两足步行
高度集成发展阶段（2000-2015 年）	丰田第一代仿人类机器人	可以实现吹喇叭、拉小提琴等乐器演奏功能
高动态运动发展阶段（2015 年至今）	波士顿动力双足机器人 Atlas	极强的平衡性和越障能力，能够承担危险环境搜救任务
产业化进程加速阶段（预计 2025 年实现量产）	Tesla 人形机器人 Optimus	记忆周边环境、完成复杂任务、控制鸡蛋不被打破、通过 AI 算法复制人类动作等

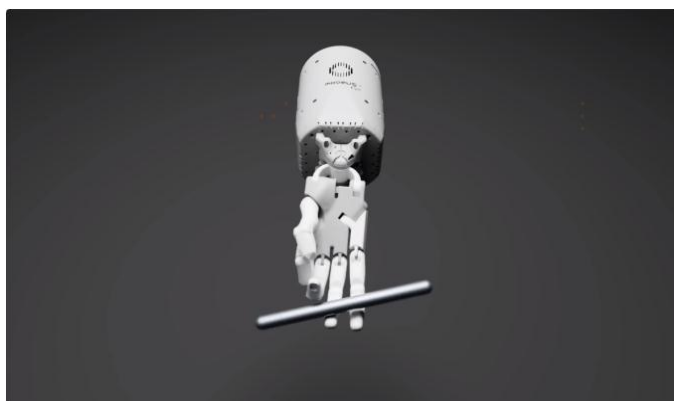
资料来源：中国机器人网，工信部，微信公众号《机器人大讲堂》，光大证券研究所整理

AI 技术的飞速发展，为机器人产业带来了前所未有的机遇。AI 不仅赋予了机器人更高级别的感知能力，还让它们具备了自主决策和学习能力。现阶段的 AI 模型可大致分为决策式/分析式 AI 和生成式 AI 两类。从决策式 AI 到生成式 AI，机器人的“大脑”变得更加智能，应用也更加广泛，并可以依靠文字、图像、多模态的输入信息学习进步。

具身智能是能理解、推理并与物理世界互动的智能系统。假如将具身智能与机器人结合，则机器人可以实现像人类一样与环境交互、感知、行动。与其他类型的机器人相比，人形机器人更符合人类工程学、更快适应人类的生活及工作环境，而其类似人类的外观可使其在日常生活及工作环境中更容易与人接近。

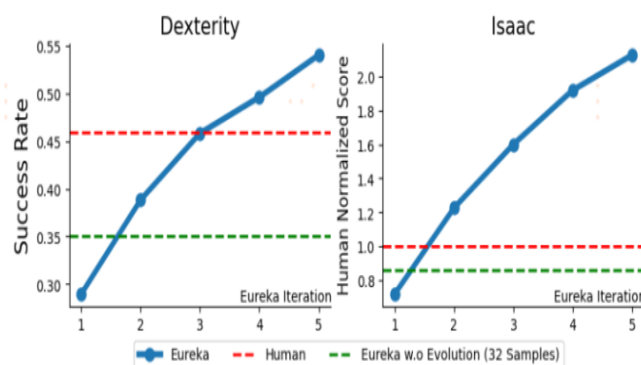
英伟达于 2023 年 10 月推出的用于训练机器人的 AI Agent——Eureka 使用 GPT-4 生成奖励函数，成功教会机器人完成了三十多个复杂任务，其中包括打开抽屉和柜子、抛球和接球，甚至是快速转笔这样难度较高的动作。Eureka 在超过 80% 的任务中超越人类专家，并可以让机器人平均处理任务效率提升 50% 以上。

图 3: Eureka 训练机器人熟练转笔



资料来源: 微信公众号《量子位》, 光大证券研究所

图 4: Eureka 通过上下文进化搜索逐渐生成更好的奖励



资料来源: 微信公众号《量子位》, 光大证券研究所

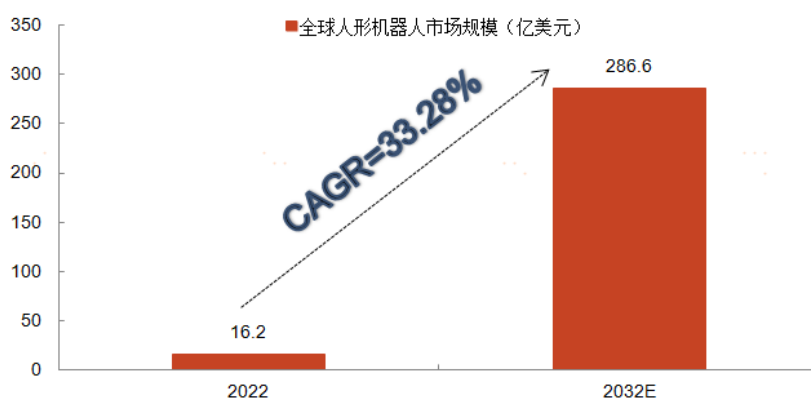
1.2、人形机器人：十年内有望达千亿 RMB 产值

从全球范围来看, 人形机器人已有商业应用场景落地预期, 例如巡逻、物流仓储; 商业化进程领先的人形机器人产品则有 EVE 和 Digit。具体而言, 美国 1X technologies 公司与 ADT commercial 公司共同研发的人形机器人 EVE 目前已成功应用于巡逻安保场景; Digit 的应用场景主要是在物流仓储环节, 进行的任务主要包括卸载货车、搬运箱子、管理货架等, 预计将在 2025 年全面上市。

在政策、资本以及技术多维度赋能下, 人形机器人的市场潜力有望加速释放。未来的商业应用场景有望扩展到服务业、制造业等领域。马斯克曾表示其设计 Tesla 机器人的远景目标是让其服务于千家万户, 比如做饭、修剪草坪、照顾老人等。目前较有潜力的人形机器人发展方向主要为制造业、航天探索、生活服务业、高校科研等, 预计 2025 年人形机器人将有望实现制造业场景应用的突破, 小批量应用于电子、汽车等生产制造环境。

根据 Precedence Research 的预测, 2022 年全球人形机器人市场规模约为 16.2 亿美元, 预计到 2032 年将达到 286.6 亿美元, 折合人民币超越 2000 亿元, 2022-2032 年全球人形机器人市场规模复合增长率约为 33.3%。

图 5: 2022~2032E 全球人形机器人市场规模预测 (亿美元)

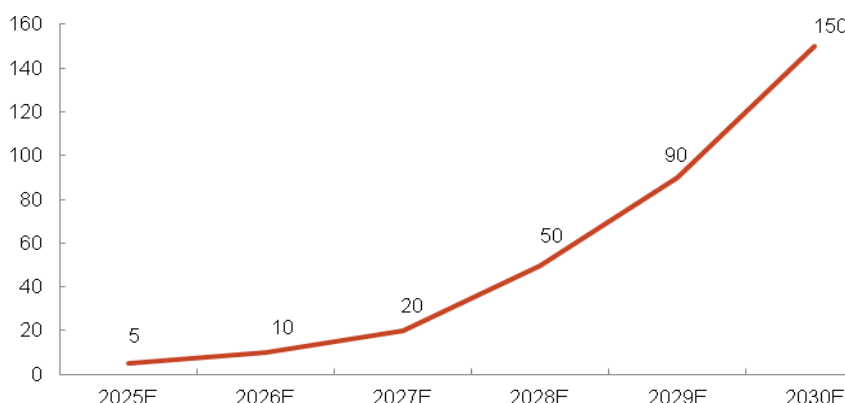


资料来源: 证券时报, Precedence Research 预测, 光大证券研究所

作为人形机器人行业的先行者，Tesla 创始人兼首席执行官马斯克对该行业的成长性以及市场空间很有信心，早在 2022 年，他便表示 Tesla 的 Optimus 人形机器人将以较低的成本实现量产，最终产量将达到数百万台，计划以“可能不到 2 万美元”的价格出售这款机器人；而 2024 年年初，Midjourney 研究实验室的创始人 大卫·霍尔茨 预测：“我们有理由期待，在 21 世纪 40 年代，地球上将有 10 亿个人形机器人。而到了 21 世纪 60 年代，整个太阳系将有 1000 亿个机器人（主要是外星机器人）。”马斯克对此言论表示赞同。

根据格物致胜在乐观情形下的预测，2029 年全球人形机器人的销量将达到 90 万台，到 2030 年这一数字则会突破 100 万台，达到 150 万台的水平，而到了 2035 年随着人形机器人产业化的逐渐成熟，全球人形机器人销量将会进一步放量达到 800 万台的水平。

图 6：2025-2030 年全球人形机器人销量预测（万台）



资料来源：格物致胜 Wintelligence 预测，光大证券研究所

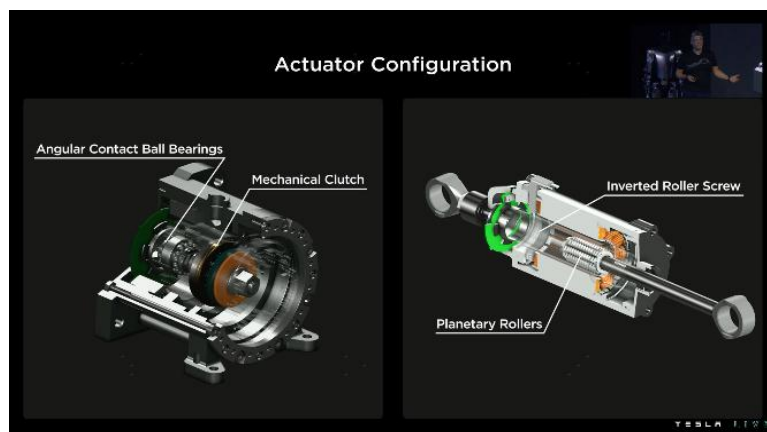
1.3、人形机器人上游零部件及原材料梳理

人形机器人的产业链主要由上游的原材料、中游的核心零部件以及下游的人形机器人整机构成。上游以钢材、磁材、铜材等金属原材料为主，中游以无框力矩电机、谐波减速器、行星滚珠丝杠等核心零部件为主。

根据 Tesla 在 Tesla AI Day 2022 上的介绍，其人形机器人 Optimus 主要包含 14 个旋转执行器（对应旋转关节）以及 14 个线性执行器（对应线性关节）。其中，旋转执行器由无框力矩电机、传感器、谐波减速器、交叉滚子轴承组成；线性执行器则由无框力矩电机、传感器、行星滚柱丝杠、单列向心球轴承组成。同时，Optimus 还包含两只灵巧手，由空心杯电机、传感器、行星减速器以及绳驱组成。

上述零部件，再加上功能相当于人类大脑的主控制芯片、功能相当于人类眼睛的摄像头、负责整机动力源的电池包以及人形机器人的整体骨骼框架，共同构建了 Optimus 人形机器人。

图 7: Optimus 旋转执行器及线性执行器图示



资料来源: Tesla AI Day 2022, 光大证券研究所

我们进一步对其核心零部件进行拆解与分析。**无框力矩电机**是人形机器人旋转执行器与线性执行器都不可或缺的动力来源部件，根据科尔摩根所披露信息，其关键原材料/零部件包括钕铁硼磁材、SS400 系列钢材（对应国内牌号 Q235 系列）、电工钢、铜材、树脂、集成电路板等。

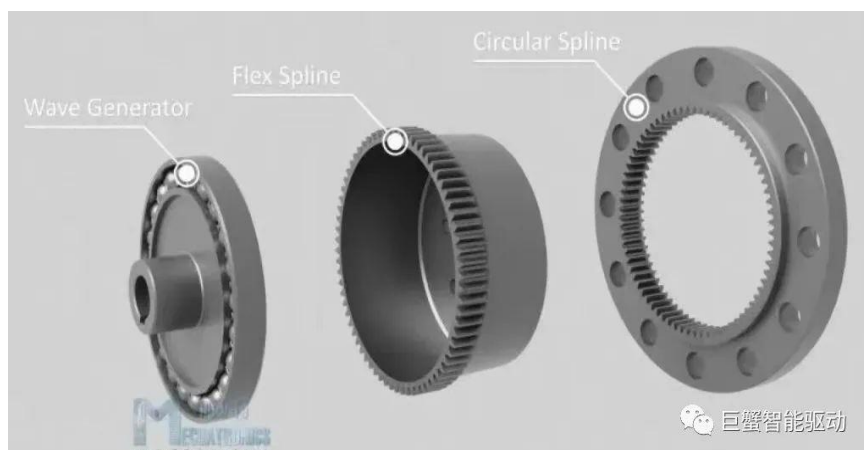
图 8: 无框力矩电机上游主要原材料/零部件



资料来源: 科尔摩根官网, 光大证券研究所

谐波减速器为人形机器人旋转执行器中的主要机械传动装置，其内部结构以柔轮、刚轮、波形发生器构成，通常采用波发生器主动、刚轮固定、柔轮输出形式。当波发生器进入柔轮内圆时，迫使柔轮产生弹性变形而呈椭圆状，使其长轴处柔轮齿插入刚轮的轮齿槽内，成为完全啮合状态；而其短轴处两轮轮齿完全不接触，处于脱开状态。由啮合到脱开的过程之间则处于啮出或啮入状态。当波发生器连续转动时，迫使柔轮不断产生变形，使两轮轮齿在进行啮入、啮合、啮出、脱开的过程中不断改变各自的工作状态，产生了所谓的错齿运动，从而实现了主动波发生器与柔轮的运动传递。

图 9：谐波减速器组成部件示意图



资料来源：微信公众号《巨蟹智能驱动》，光大证券研究所

参考绿的谐波招股说明书，其 2017~2019 年采购的原材料中，以钢材、工装刀具、铝材为主。目前，国内外的谐波减速器柔轮材料基本为 40Cr 合金钢（机械制造业使用最广泛的钢材之一），包括 40CrMoNiA，40CrA，30CrMoNiA，38Cr2Mo2VA，其中 40CrMoNiA 与 40CrA 最为常用；在刚轮方面，各企业使用的材料则有所差异，其中日本哈默纳克几十年来使用的材料均为球墨铸铁，其产品寿命已获得长时间的验证，现在国内一些减速器厂商也开始使用球墨铸铁作为刚轮的制作材料。

表 2：绿的谐波原材料采购以钢材、工装刀具、铝材为主

原材料类型	2019 年度		2018 年度		2017 年度	
	采购金额 (万元)	占比	采购金额 (万元)	占比	采购金额 (万元)	占比
钢材	1744.94	35.16%	4146.58	55.84%	2030.03	38.66%
工装刀具	828.04	16.68%	1033.65	13.92%	783.37	14.92%
铝材	532.88	10.74%	397.08	5.35%	968.03	18.43%

资料来源：绿的谐波招股说明书，光大证券研究所

工装刀具的使用与制作谐波减速器主要刚柔轮的制造工艺有关，目前国内的主流工艺路线为慢走丝工艺（利用连续移动的细金属丝作电极，对工件进行脉冲火花放电，产生 6000 度以上高温，蚀除金属、切割成工件）或滚齿、插齿工艺（滚齿运用展成法原理，使用滚刀来加工齿轮，相当于一对交错螺旋轮啮合；插齿则是用插齿刀按展成法或成形法加工内、外齿轮或齿条等的齿面）。

从谐波减速器加工工艺的实际效果来看，慢走丝加工精度较高，为目前国内谐波减速器的主要加工工艺，但其多次切割技术的特点，导致生产效率低。此外，慢走丝工艺由于其工作原理只能切割钢材，针对导电性能差的球墨铸铁则无法使用慢走丝加工。

而刚轮的插齿工艺可以应对任何材料，包括钢材和球墨铸铁。滚齿与插齿相较于慢走丝，在效率上提高了近 10 倍，但插齿与滚齿工艺的精度逊色于慢走丝加工工艺，因此，人们希望在插齿工艺上添加相应的附加装置，以此达到与慢走丝工艺一样的精度。综合来看，谐波减速器的柔轮滚齿、刚轮插齿工艺或许在未来会成为更好的加工工艺。

慢走丝所使用的原材料以铜锌合金为主，最早的慢走丝可以追溯到 20 世纪 60 年代的紫铜电极丝。

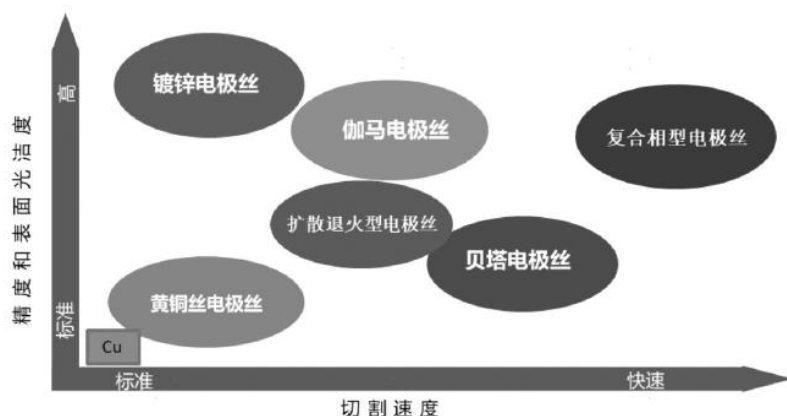
表 3：慢走丝工艺阶段变化及使用原材料

慢走丝工艺阶段	使用原材料	切割速度	切割精度
紫铜电极丝	纯铜	20mm ² /min	0.05mm
黄铜电极丝	铜锌二元合金	50mm ² /min	相较于紫铜电极丝显著提高
镀锌电极丝	芯材黄铜包覆一层锌	比其他系列切割线有所降低	所有切割线产品中最高
极细电极丝	早前以钨钼为主，现在以钢丝为主	/	适用于电子、光学、钟表的超精密加工
扩散退火型电极丝	普通黄铜包覆锌后经过特殊的扩散退火处理加工成铜锌合金	比普通镀锌电极丝快 15%	比普通镀锌电极丝低
β型电极丝	无氧铜或黄铜合金并通过特殊的退火工艺在外层包裹铜锌合金，铜锌比例接近 1:1	/	略低于普通镀锌电极丝
γ型电极丝	无氧铜或黄铜合金并通过特殊的退火工艺在外层包裹铜锌合金，锌含量在 60%左右	切割速度受到一定限制	比β型切割精度更高
复合相型电极丝	无氧铜或黄铜合金并通过特殊的退火工艺在外层包裹铜锌合金，电极丝表面同时含有β相和γ相组织	适合对精度和速度均有要求的加工	适合对精度和速度均有要求的加工

资料来源：孟宪旗等《浅析慢走丝用电极丝技术的发展及应用》，光大证券研究所整理

目前运用的慢走丝工艺中，紫铜电极丝已经基本被淘汰；黄铜电极丝是通用化的一种电极丝，适用于一般工况条件下的普通加工；镀锌电极丝是切割精度和表面光洁度最优的一款电极丝；复合相型电极丝是速度最快的一种电极丝，适合于超高速的加工，如最近几年在市面上出现的一种国产 F 型电极丝，在慢走丝切割领域已经积累了良好的口碑；其它类型的电极丝如伽马型、扩散退火型等类型的电极丝，要根据实际的工况条件和需要来进行选择。

图 10：各类型电极丝切割速度与精度对比



资料来源：孟宪旗等《浅析慢走丝用电极丝技术的发展及应用》，光大证券研究所

滚齿和插齿工艺所使用的刀具原材料以高速钢为主，而目前硬质合金在滚刀与插齿刀上的使用越来越广泛。硬质合金是一种粉末冶金合成物，包含了一种或一种以上的硬质材料（如碳化钨）以及粘结材料（如钴）。这是一种硬度非常高的材料，其特性通常体现在很高的耐磨耗性以及热稳定性上面。

硬质合金滚刀材料成本较高，且要完全发挥合金滚刀的性能，需要配备性能足够的滚齿机，所以很长一段时间，硬质合金滚刀只在微小模数齿轮领域、汽车转向器小齿轮领域应用。

随着国内大部分变速器齿轮加工厂设备的更新，高速滚齿机越来越普及，干切技术得到大批量应用，粉末冶金材料滚刀制约了大批设备的性能，硬质合金滚刀得到了用武之地。且部分刀厂已经克服合金滚刀的制造瓶颈，能在保证交期的情况下批量供应高精度大外径滚刀。

现在的齿轮加工机床条件可以使切削速度再提升 30%~100%或更高，传统的粉末冶金高速钢不能满足要求。基于硬质合金材料加工的滚刀，能做到更少的加工时间、更高的加工效率，机床的潜能将能得到充分发挥，且硬质合金可以在不增加投入的情况下提高效率、降低刀具成本。

插齿刀方面，硬质合金插齿刀在高速、高刚性、智能型的数控插齿机上高速插销齿轮，大大提高了齿轮的加工精度、表面质量和生产效率。合适的涂层提高刀具的耐用度，延长了插齿时间，减少了换刀次数，降低了齿轮加工成本。

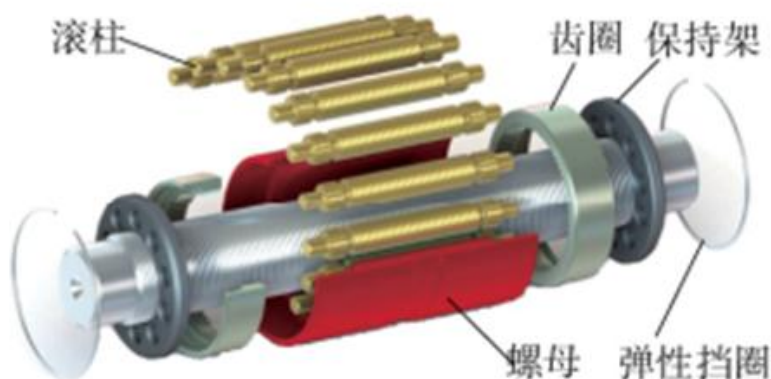
表 4：合金柄式滚刀案例对比

对比项目	高速钢滚刀	硬质合金滚刀
对比滚刀材质	G90、Speedforce	硬质合金 HM
滚刀大小	80+305 柄式整体刀	70+305 柄式整体刀
速度	270m/min 2 刀切 加工时间 1 分 29 秒	375m/min 一刀切 加工时间 44 秒
单次加工寿命	1100 件	3500 件
维修次数	约 15 次	约 19 次
单件成本	2.2443 元	0.943 元

资料来源：微信公众号《渝阳机电》，光大证券研究所

行星滚柱丝杠是人形机器人线性执行器中的主要机械传动装置，其可以将旋转运动转化为直线运动，传动单元为丝杠及螺母之间的滚柱，其由行星架、内齿圈、螺母、滚柱、丝杠等组成。

图 11：行星滚柱丝杠内部结构示意图



资料来源：GGII，光大证券研究所

Rollvis 及 Ewellix 为全球领先的行星滚柱丝杠生产商，研究他们在丝杠中所选用的原材料能够更好地判断现在乃至未来的丝杠原材料选择及趋势。

根据 Rollvis 的设计方案，行星滚柱丝杠中丝杠选用的材料为合金结构钢 42CrMo，合金结构钢 42CrMo 强度和淬透性比 35CrMo 有所增高，调质后有较高的疲劳极限和抗多次冲击能力，低温冲击韧性良好，且对合金结构钢 42CrMo 需做预处理，表淬硬度不低于 54---60HRC。螺母和滚柱选用的材料为高碳铬轴承钢 GCr15，高碳铬轴承钢 GCr15 综合性能良好，淬火和回火后具有高而均匀的硬度，良好的耐磨性和高的接触疲劳寿命，热加工变形性能和切削加工性能均好。对高碳铬轴承钢 GCr15 需进行淬火处理，其表面接触硬度为 56-60HRC。

Ewellix 的设计方案中，标准丝杠轴主要由经过预处理的 50CrMo4（或者以 42CrMo4）制成，预处理的方式为表面硬化处理。螺母和滚柱使用全硬化 100Cr6

轴承钢。而在高达 180℃ 的高温工况下运行的丝杠轴，或应用中存在磨损问题，也可以选择 100Cr6。

表 5: Ewellix 行星滚柱丝杠不锈钢选择

钢材牌号	描述	硬度 (HRC)	耐腐蚀性对比
X105CrMo17	马氏体不锈钢	58-60	**
X30Cr13	马氏体不锈钢	50-55	***
X12CrNiMoV12-3	渗透不锈钢	58-60	***
X40CrMoVN16-2	氮不锈钢	58-60	****
X5CrNiCuNb16-4	沉淀硬化不锈钢	38-45	*****
X17CrNi16-2	马氏体不锈钢	40-45	*****

资料来源: Ewellix 官网, 光大证券研究所

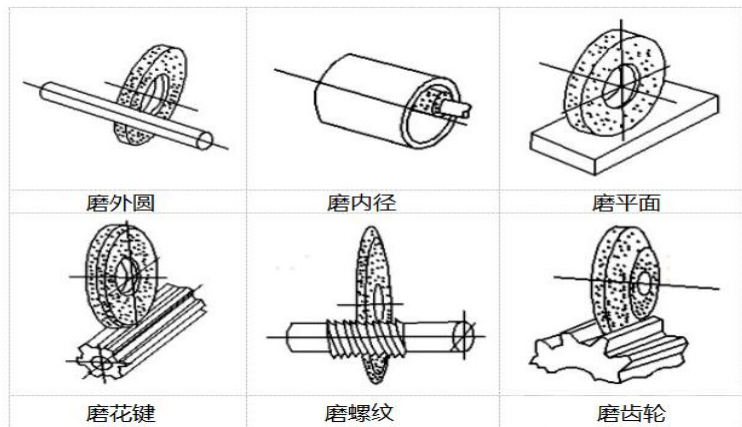
表 6: Ewellix 行星滚柱丝杠标准钢选择

零部件	钢材	处理工艺	热处理	最高工况温度 (°C)	标准温度下的表面硬度 (HRC)	客户受益点
标准轴	50CrMo4 或 42CrMo4	预处理拉伸强度 880 至 1030MPa; 屈服强度 >650MPa	感应淬火	110	58 to 60	良好的耐磨性
根据要求提供的标准轴	50CrMo4	预处理拉伸强度 880 至 1030MPa; 屈服强度 >650MPa	感应淬火; 更高的回火温度	150	58 to 60	良好的耐磨性及中等的温度适应性
特殊轴	100Cr6	预处理拉伸强度 840 至 970MPa; 屈服强度 >500MPa	感应淬火	180	59 to 63	更高的耐磨性, 对高温的适应性, 但更脆弱
螺母和滚轮	100Cr6	退火处理	穿透硬化	180	58 to 62	良好的耐磨性及良好的温度适应性

资料来源: Ewellix 官网, 光大证券研究所

目前的行星滚柱丝杠主要制造工艺包括磨削及车削工艺。磨削工艺属于精加工, 加工量少、精度高, 在机械制造行业中应用比较广泛。由于磨粒的硬度很高, 磨具具有自锐性, 磨削可以用于加工各种材料, 包括淬硬钢、高强度合金钢、硬质合金、玻璃、陶瓷和大理石等高硬度金属和非金属材料。

图 12: 磨削工艺的不同种类



资料来源: 微信公众号《机加工程师》, 光大证券研究所

磨削的工艺速度很高, 每秒可达 30m~50m; 磨削的工况温度较高, 可达 1000℃~1500℃; 磨削过程历时很短, 只有万分之一秒左右; 通过磨削加工可以获得较高的加工精度和很小的表面粗糙度值; 另外, 磨削不但可以加工软材料, 如未淬硬钢、铸铁等, 而且还可以加工淬硬钢及其他刀具不能加工的硬质材料, 如陶瓷和硬质合金等。

关于磨削所使用砂轮的具体材料，可分为普通磨料砂轮（刚玉和碳化硅等）和超硬磨料砂轮（金刚石和立方氮化硼等）。对于行星滚柱丝杠这类以钢材为主的核心零部件，以传统的刚玉砂轮及 CBN 砂轮的材料形式更为适合。

表 7：磨削工艺所使用砂轮材料

砂轮种类	成分	特点	适用磨削材料
棕刚玉砂轮	Al ₂ O ₃	硬度高、韧性大	适宜磨削抗拉强度较高的金属，如碳钢、合金钢、可锻铸铁、硬青铜
白刚玉砂轮	Al ₂ O ₃	硬度略高于棕刚玉砂轮，韧性则比棕刚玉低，在磨削时，磨粒容易碎裂，因此，磨削热量小	适宜制造精磨淬火钢、高碳钢、高速钢以及磨削薄壁零件用的砂轮
黑碳化硅砂轮	碳化硅	性脆而锋利，硬度比白刚玉高	适于磨削机械强度较低的材料，如铸铁、黄铜和耐火材料等
绿碳化硅砂轮	碳化硅	硬度相对于黑碳化硅砂轮高，磨粒锋利，导热性好	适合于磨削硬质合金、光学玻璃、陶瓷等硬脆材料
金刚石砂轮	用金属或合成树脂将天然或人造金刚石微粉结合在一起而成	/	可用于包括硬质合金刀具、陶瓷、纯铁、玻璃之类的硬质材料的磨削和石材、混凝土的切断等
CBN 砂轮	立方氮化硼	硬度高，热化学稳定好，由磨削产生的热量少，不易诱发磨削烧伤，还会减少加工变质层，耐磨性高，磨粒锋锐性好	比单晶刚玉、微晶刚玉、白刚玉等更适用于不锈钢磨削工艺

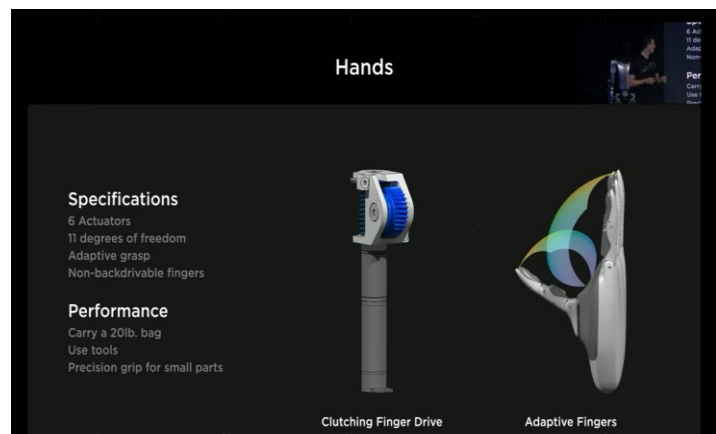
资料来源：微信公众号《机加工程师》，光大证券研究所

行星滚柱丝杠的制造工艺在未来有望更多使用**车削工艺**。硬态车削指使用超硬刀具对硬度高于 50HRC 的材料进行精密切削，从而回避或减少使用磨削加工技术。车削的金属去除率是磨削的 3-4 倍，而且节省了砂轮修正时间，效率是磨削加工的 3 倍。

在车削工艺中所使用的车刀制造材料包括高速钢、硬质合金、超硬材料三类。**高速钢刀具**：采用高速钢制造，可以不断修磨，是粗加工半精加工的通用刀具。**硬质合金刀具**：刀片采用硬质合金制造，用于切削铸铁、有色金属、塑料、化纤、石墨、玻璃、石材和普通钢材，也可以用来切削耐热钢、不锈钢、高锰钢、工具钢等难加工的材料。**超硬刀具**主要是以金刚石和立方氮化硼为材料制作的刀具，其中人造金刚石复合片（PCD）刀具及立方氮化硼复合片（PCBN）刀具占主导地位。

灵巧手是人形机器人中具备高度灵活和精细控制能力的末端执行器，Tesla Optimus 人形机器人的灵巧手可以使用工具，并最多可以承载 20 磅的重量，其主要结构为空心杯电机、行星减速器搭配传动装置。空心杯电机的主要原材料如同前文所述的无框力矩电机，即钕铁硼磁材；行星减速器原材料可以类比谐波减速器；而传动装置原材料则需要结合具体的传动方案判断。

图 13：Optimus 灵巧手设计方案



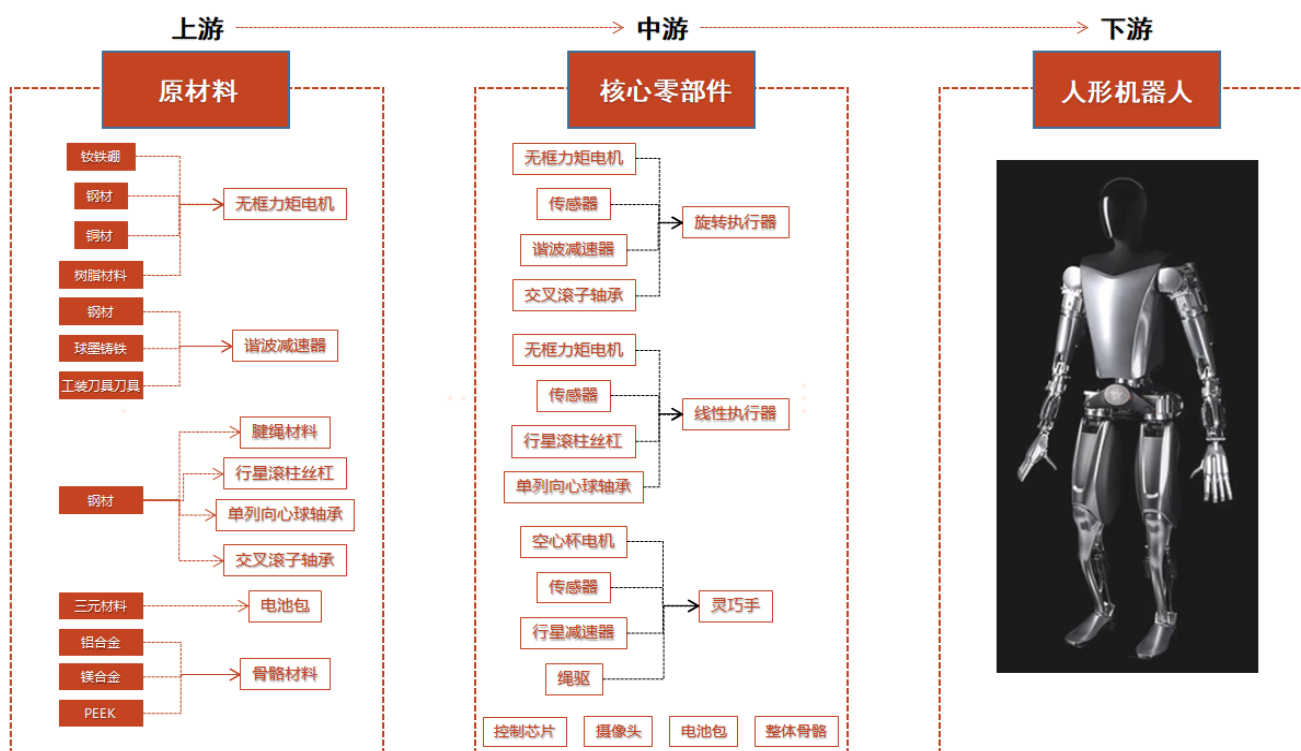
资料来源：Tesla AI Day 2022，光大证券研究所

在现有的灵巧手传动方案中，腱绳传动是目前应用最为广泛的一种。腱绳传动是指通过腱绳和缠绕腱绳的辅助装置把驱动源的力矩传送到手指各个关节上的传动方式，由于传动腱绳具有较高的柔性以及较小的尺寸，使得腱绳传动对驱动器和减速器的结构尺寸要求较低，并且传动路线灵活多样。然而腱绳传动也有其应用难点，主要包括精确控制难于实施等。

在腱绳材料的选择方面，一般使用不锈钢或高分子纤维两大类，其中不锈钢钢丝绳材料制成灵巧手可以应用于工业、航空（太空操作）以及科研领域。

除了旋转执行器、线性执行器及灵巧手三个核心零部件之外，Optimus 还包含了控制芯片、摄像头、电池包（以 4680 电池为核心）、整体人形骨骼（以轻量化材料为核心）等其他部件，并最终组装成人形机器人产品。

图 14：人形机器人产业链概览



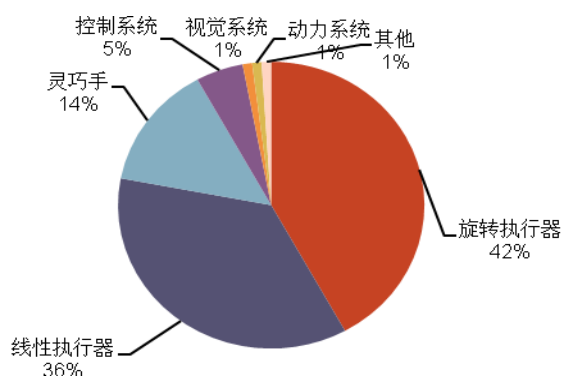
资料来源：Tesla AI Day 2022，光大证券研究所

2、人形机器人质量拆分及重要原材料分析

根据光大证券研究所电力设备新能源团队于 2024 年 1 月 15 日发布的报告《人形机器人：加速发展 全面进击——人形机器人行业系列报告(一)》中的测算，旋转执行器价值量占比最高（42%），线性执行器第二（36%），灵巧手排名第三（14%），其余系统分别为控制系统（5%）、视觉系统（1%）、动力系统（1%）、其他结构件（1%）。

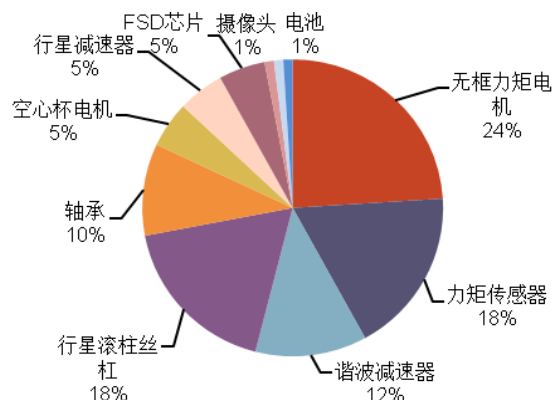
若进一步拆分至核心零部件，则包括无框力矩电机（24%）、力矩传感器（18%）、谐波减速器（12%）、行星滚柱丝杠（18%）、轴承（10%）、空心杯电机（5%）、行星减速器（5%）、FSD 芯片（5%）、摄像头（1%）、电池（1%）、其他（1%）。

图 15：人形机器人价值量分布（系统拆分）



资料来源：Tesla 官网，根据光大证券研究所电力设备新能源团队于 2024 年 1 月 15 日发布的报告《人形机器人：加速发展 全面进击——人形机器人行业系列报告(一)》中的相关测算绘制

图 16：人形机器人价值量分布（零部件拆分）



资料来源：Tesla 官网，根据光大证券研究所电力设备新能源团队于 2024 年 1 月 15 日发布的报告《人形机器人：加速发展 全面进击——人形机器人行业系列报告(一)》中的相关测算绘制

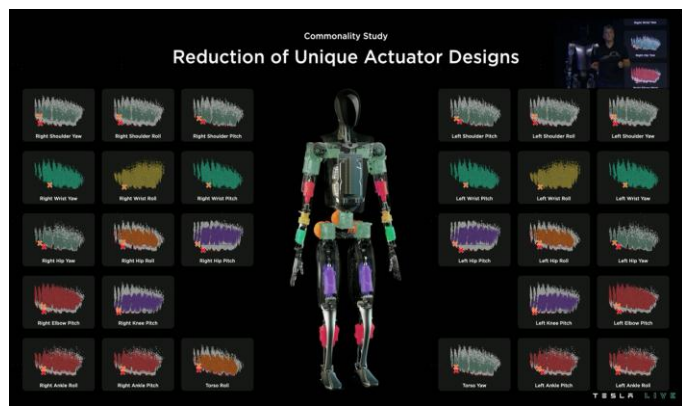
2.1、Optimus Gen2 质量拆分

根据 Tesla AI Day 2021 披露的信息，当时该 Tesla Bot 为 Tesla 人形机器人的概念机，其身高约为 5 尺 8 寸（折合约 1.72 米），重量约为 125 磅（折合约 56.70kg），其中手臂搭载 12 个、腿部 12 个、手腕 12 个、躯干 2 个、脖子 2 个，总计 40 个电机驱动。

而到了 Tesla AI Day 2022，Tesla 正式推出了其人形机器人产品，命名为 Optimus，其整体重量为 73kg，并公布了更加具体的电机执行器设计方案，包含肩部 6 个、手腕 6 个、髌部 6 个、膝盖 2 个、肘部 2 个、脚踝 4 个、躯干 2 个，共计 28 个无框力矩电机驱动，再叠加灵巧手部位一只 6 个，共 12 个空心杯电机，电机数量仍然保持 40 个不变。

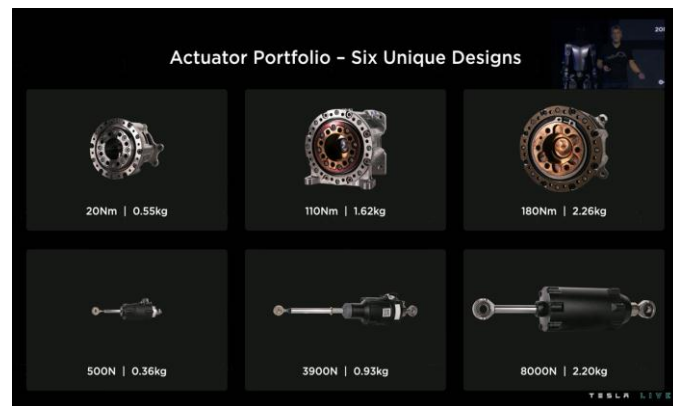
同时，Tesla 也公布了其具体的电机执行器的重量参数以及负重参数：小型旋转执行器力矩为 20Nm，质量为 0.55kg；中型旋转执行器力矩为 110Nm，质量为 1.62kg；大型旋转执行器力矩为 180Nm，质量为 2.26kg。小型线性执行器最大受力为 500N，质量为 0.36kg；中型线性执行器最大受力为 3900N，质量为 0.93kg；大型线性执行器最大受力为 8000N，质量为 2.20kg。

图 17: Optimus 共搭载 28 个执行器组件



资料来源: Tesla AI Day 2022, 光大证券研究所

图 18: Tesla 公布其执行器性能参数



资料来源: Tesla AI Day 2022, 光大证券研究所

2023 年 12 月, Tesla 进一步公布其最新人形机器人 Optimus Gen2 及相应的一些性能参数变化。Optimus Gen2 采用了 Tesla 设计的执行器和传感器、执行器集成电子元件和线束, 并包含 2 个自由度驱动的全新颈部和 11 个自由度驱动的全新手部。同时步行速度提高 30%, 平衡性能更好, 重量减轻 10kg。

结合执行器所在部位、功能, Tesla 公布其执行器的尺寸及性能参数, 我们对 Optimus Gen2 所包含的身体部位共 30 (28+2, 新增 2 个颈部自由度) 个执行器进行具体的拆分, 如下:

表 8: Optimus Gen2 执行器质量拆分

关节部位	旋转执行器	线性执行器	备注	质量 (kg)
肩部	6	/	6 个小型旋转	3.3
肘部	/	2	2 个中型线性	1.86
腕部	2	4	2 个小型旋转, 4 个小型线性	2.54
髋部	4	2	2 个中型旋转, 2 个大型旋转, 2 个中型线性	9.62
膝部	/	2	2 个中型线性	1.86
踝部	/	4	4 个大型线性	8.8
躯干	2	/	2 个大型旋转	4.52
颈部	2	/	2 个小型旋转	1.1
总计	16	14	30	33.6

资料来源: Tesla AI Day 2022, 光大证券研究所测算

灵巧手方面, Tesla 官方并未公布其灵巧手的相关质量参数, 仅表示其单个灵巧手由 6 个驱动器驱动, 并具备 11 个自由度, 最高可以提起 20 磅 (9.1kg) 的物体。我们选择了具有详细产品参数, 且与 Tesla 灵巧手具有一定相似度的因时机器人所生产的 RH56DFX 系列灵巧手作为比较对象。在此, 我们假设 Optimus Gen2 所用灵巧手重量与 RH56DFX 系列灵巧手重量相近, 即单只灵巧手质量为 540g, 左右两只灵巧手总质量为 1.08kg。

图 19：因时机器人 RH56DFX 系列灵巧手简要介绍



资料来源：因时机器人官网，光大证券研究所

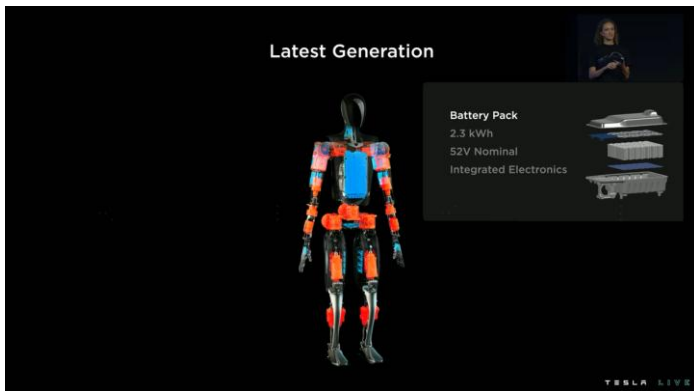
表 9：因时机器人 RH56DFX 系列灵巧手主要参数

型号	左右手	自由度	关节数	重量	工作电压	静态电流	最大电流	重复定位精度	拇指最大抓握力	四指最大抓握力	抓握力分辨率	拇指横向旋转范围	拇指侧摆速度	拇指弯曲速度	四指弯曲速度
RH56DFX-2L	左手	6	12	540g	DC24V±10%	0.2A	2A	±0.20mm	15N	10N	0.50N	>65°	107°/s	70°/s	260°/s
RH56DFX-2R	右手	6	12	540g	DC24V±10%	0.2A	2A	±0.20mm	15N	10N	0.50N	>65°	107°/s	70°/s	260°/s

资料来源：因时机器人官网，光大证券研究所

在电池包方面，Optimus Gen2 并未进行进一步的更新，在此我们假设 Optimus Gen2 所使用的电池包与 Optimus 中披露的电池方案保持一致，即在躯干处搭载高度集成的 2.3kwh 52v 电池包，我们进一步假设 Optimus Gen2 所使用的电池包为 4680 圆柱电池。而 TroyTeslike（特斯拉生产与销售数据追踪服务商）根据 EPA 发布的关于 Tesla Model Y 续航测试结果进行了计算，发现当前美国小部分标准续航 Model Y 车型中使用的 4680 电池的能量密度为 229Wh/kg，据此我们可以计算出 Optimus Gen2 所需电池包的电芯重量至少为 10.04kg，考虑到电池包对应的包裹材料及其他材料，我们假设其电池包整体重量大约为 11kg。

图 20：Optimus 搭载 2.3kwh 52v 电池包



资料来源：Tesla AI Day 2022，光大证券研究所

图 21：Tesla 开发的 4680 圆柱电池



资料来源：Tesla 官网，光大证券研究所

在 Optimus Gen2 所使用的摄像头与芯片方面，其采用了纯视觉方案，使用了 3 个不同种类的 2D 摄像头，包括 2 个高清 2D 摄像机和一个广角鱼眼摄像机，以及 FSD 芯片，这些整体的重量不会太大。

奥比中光是行业领先的机器人视觉及 AI 视觉科技公司，致力于构建机器人与 AI 视觉产业中台、打造机器人的“眼睛”，且优选人形机器人 Walker S 的上游供应链中包含奥比中光，我们假设 Tesla Optimus Gen2 所用摄像头与奥比中光所供应摄像头类似。根据奥比中光官网所披露其 Astra 系列摄像头的重量数据，平均重量约为 218g，我们假设 Optimus Gen2 摄像头与芯片合计质量约为 0.7kg。

结合 Optimus Gen2 最新披露其质量将较 Optimus 下降 10kg，即总质量为 63kg，我们可以对其质量分布做一个大致拆分测算：

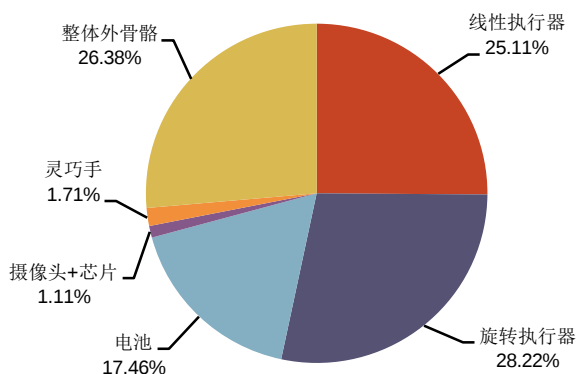
表 10：Optimus Gen2 质量拆分

部件拆分	质量 (kg)	占比	备注
线性执行器	15.82	25.11%	无框力矩电机+行星滚柱丝杠+传感器+轴承
旋转执行器	17.78	28.22%	无框力矩电机+谐波减速器+传感器+轴承
执行器总计	33.6	53.33%	/
电池包	11	17.46%	4680 圆柱电池
摄像头+芯片	0.7	1.11%	3 个摄像头+FSD 芯片
灵巧手	1.08	1.71%	2 个灵巧手
整体外骨骼	16.62	26.38%	轻量化材料为核心

资料来源：Tesla AI Day 2022，光大证券研究所测算；注：详细测算过程见上文，整体外骨骼质量根据 Optimus Gen2 总质量 63kg 推算。

根据我们的测算，质量占比最大的部分为旋转执行器（28.22%），其由 16 个无框力矩电机、16 个谐波减速器及其他配套零部件组成；第二部分为整体外骨骼（26.38%），其以轻量化材料为核心；第三大部分为线性执行器（25.11%），其由 14 个无框力矩电机、14 个行星滚柱丝杠及其他配套零部件组成；第四大部分为电池包，质量占比为 17.46%。

图 22：Optimus Gen2 质量占比



资料来源：Tesla AI Day 2022，光大证券研究所测算

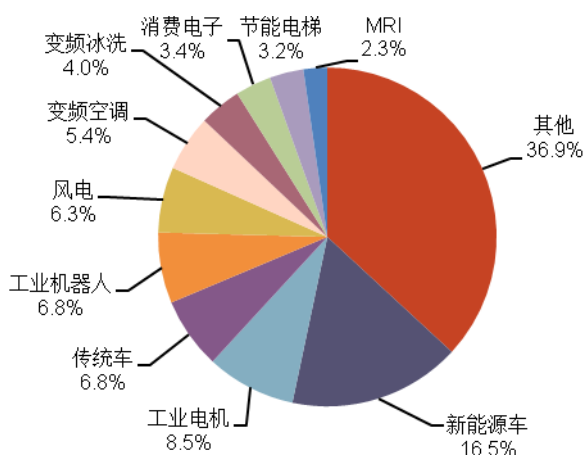
2.2、 稀土磁材：无框力矩电机及空心杯电机核心材料

如前所述，第三代稀土永磁材料钕铁硼，为人形机器人中重要核心零部件无框力矩电机、空心杯电机的核心材料，其作用主要为电产生磁场，从而与线圈相互作用，实现电能到机械能的转换。

除人形机器人电机应用以外，钕铁硼广泛应用于变频空调的压缩电机、风电直驱电机、新能源车、汽车 EPS 转向系统、汽车微电机、3C 端的 VCM 和听筒、工业机器人等诸多领域。根据我们的测算，2023 年钕铁硼下游应用需求仍较为分散：新能源汽车、工业电机和传统车的需求量占比较高，分别达到 16.5%、8.5%和 6.8%；工业机器人、风电和变频空调的占比分别为 6.8%、6.3%和 5.4%。

（详见光大证券 2022-02-07 外发研报《低成本高弹性的全球稀土龙头——北方稀土（600111.SH）投资价值分析报告》及 2023-11-15 外发研报《能源金属否极泰来，钠钒电池静待花开——能源金属 2024 年度投资策略》）

图 23：2023 年钕铁硼下游需求分布



资料来源：USGS、光大证券研究所测算；按钕铁硼需求量口径测算

钕铁硼的供给方面，目前主要上市企业的总产能达到了 13 万吨（2022 年），并有相当数量的企业都有扩产规划。不仅以稀土磁材为主业的各大企业如金力永磁、宁波韵升、正海磁材、中科三环等在快速扩张，部分上游的稀土企业或其他企业也在进入稀土磁材板块。大量的产能增长意味着行业竞争加剧，磁材厂商可凭借客户优势、技术优势以及早期积累的市场占有率维持自身的领先地位。

表 11：2022~2025 年主要钕铁硼生产企业扩产规划（单位：吨）

企业	2022	2023E	2024E	2025E	远期
金力永磁	23000	26000	40000	40000	43000
宁波韵升	21000	21000	36000	36000	36000
正海磁材	16500	24000	24000	36000	36000
中科三环	26500	31500	36500	36500	36500
大地熊	8000	10000	13000	18000	18000
英洛华	13000	15000	15000	15000	15000
中科磁业	1700	1700	1700	3700	7700
银河磁体	4000	4000	4000	4000	4000
中钢天源	2000	2000	2000	10000	10000
安泰科技	7000	7500	10500	10500	10500
金田铜业	3500	8000	8000	8000	8000
广晟有色	3000	3000	3000	8000	8000
厦门钨业	4000	4000	9000	9000	9000
总计	133200	157700	202700	234700	241700

资料来源：各公司公告，光大证券研究所整理、测算

展望未来，我们认为钕铁硼磁材的重要上游氧化镨钕的供应相对有限，国内矿山的供应量主要受开采指标控制，未来仍将有序释放。国外矿山进口量主要来自于三处：缅甸矿、澳大利亚莱纳斯公司和美国 Mountain Pass 矿山。

根据我国 2024 年第一批稀土开采、冶炼分离总量控制指标，矿产品生产总量为 135,000 吨，相较 2023 年第一批指标同比增加 12.5%，增速同比下降 6.5pcts；冶炼分离指标为 12.7 万吨，同比增长 10.4%，增速同比下降 7.9pcts，指标增速呈现放缓趋势。

表 12：2023-2024 年我国稀土开采及冶炼指标

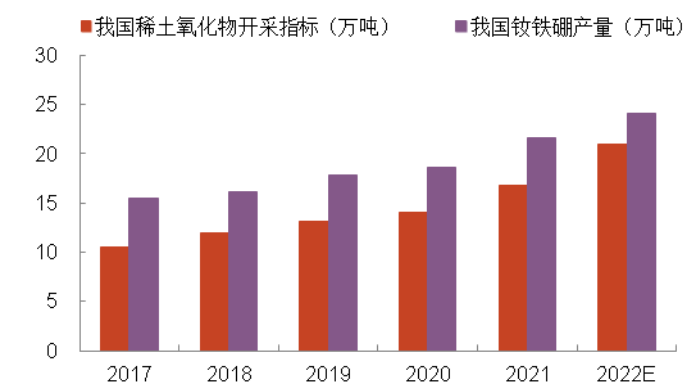
序号	稀土集团	2023 年第一批			2023 年第二批			2024 年第一批（折稀土氧化物，吨）		
		离子型稀土（以中重为主）	岩矿型稀土（轻，单位：吨）	离子型稀土（以中重为主）	岩矿型稀土（轻，单位：吨）	离子型稀土（以中重为主）	冶炼分离产品（折稀土氧化物，吨）	岩矿型稀土（轻）	离子型稀土（以中重为主）	冶炼分离产品（折稀土氧化物，吨）
1	中国稀土集团有限公司	28114	7434	33304	26086	5576	29895	30280	10140	38990
2	中国北方稀土（集团）高科技股份有限公司	80943	/	73403	85707	/	78831	94580	/	88010
3	厦门钨业股份有限公司	/	1966	2256	/	1474	1707	/	/	/
4	广东省稀土产业集团有限公司	/	1543	6037	/	1157	4567	/	/	/
	其中：中国有色金属建设股份有限公司	/	/	2055	/	/	1555	/	/	/
合计		109057	10943	115000	111793	8207	115000	124860	10140	127000
总计		120000		115000	120000		115000	135000		127000

资料来源：工信部，光大证券研究所

纵观近年来我国稀土开采指标的变化情况与钕铁硼磁材的产量情况，整体表现出较强的正相关性；观察两者的增速情况，则能发现 2 个特点：1) 钕铁硼的产量增速不会超过稀土氧化物开采指标的增速；2) 近年来钕铁硼产量增速与稀土氧化物开采指标增速出现分化：2022 年我国稀土氧化物开采指标增长达 25%，较 2021 年上升 5 个 pcts，而 2022 年我国钕铁硼产量增速仅为 11.32%，较 2021

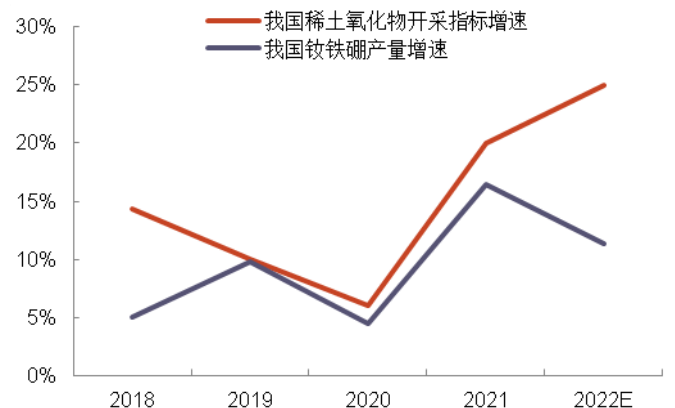
年下滑 5.12 个 pct，这可能是由于磁材厂对稀土价格的波动避险、维持企业安全生产而累积一定量的稀土库存所导致。

图 24：2017~2022 年我国稀土氧化物开采指标与我国钕铁硼产量



资料来源：工信部，光大证券研究所测算

图 25：2018~2022 年我国稀土氧化物开采指标增速与我国钕铁硼产量增速



资料来源：工信部，光大证券研究所测算

具体看，据中国稀土行业协会数据，2022 年上半年全国烧结钕铁硼毛坯产量为 11.6 万吨，同比增长 15%；粘结钕铁硼产量 4490 吨，同比增长 2%。假设 2022 年下半年钕铁硼产量与上半年一致，则 2022 年全国钕铁硼的整体产量为 24.10 万吨，结合前文我们对于主要钕铁硼生产企业的产能梳理，则可以计算出 2022 年全国其他小型磁材企业的钕铁硼整体产能约为 10.78 万吨，我们进一步假设 2023~2025 年全国其他小型磁材企业的钕铁硼产量增速为 2018~2022 年全国钕铁硼产量增速的平均值，那么 2023~2025 年全国其他小型磁材企业的钕铁硼产量分别为 11.79/12.90/14.12 万吨。

国外钕铁硼厂商主要包括日本日立金属、信越化学、TDK 以及德国 VAC 等。目前全球钕铁硼的产能主要集中于国内，国外产能我们参考弗若斯特沙利文的预测数据，即 2022/2023/2024/2025 年海外企业钕铁硼的产量分别为 2.2/2.3/2.4/2.6 万吨。

结合上述国内企业与海外企业的总产量，我们测算 2022/2023/2024/2025 年全球钕铁硼总供给分别为 26.30/29.86/35.57/40.19 万吨。

表 13：2022~2025 年全球钕铁硼供给预测（单位：万吨）

年份	2022	2023E	2024E	2025E
国内主要企业	13.32	15.77	20.27	23.47
国内其他小型企业	10.78	11.79	12.90	14.12
国内总计	24.10	27.56	33.17	37.59
海外产量	2.2	2.3	2.4	2.6
总供给	26.30	29.86	35.57	40.19

资料来源：弗若斯特沙利文，工信部，光大证券研究所预测；注：海外产量来自于弗若斯特沙利文预测数据

需求端，机器人成为稀土磁材增长新引擎。2023 年 6 月 28 日，北京市人民政府办公厅印发《北京市机器人产业创新发展行动方案（2023-2025 年）》，明确到 2025 年，北京市机器人核心产业收入达到 300 亿元以上，打造国内领先、国际先进的机器人产业集群。2023 年 1 月 19 日，工业和信息化部等十七部门联合发布《关于印发“机器人+”应用行动实施方案的通知》，目标到 2025 年，制造业机器人密度较 2020 年实现翻番。

根据我们于 2022 年 2 月 7 日发布的《低成本高弹性的全球稀土龙头——北方稀土（600111.SH）投资价值分析报告》中的测算，全球工业机器人产量将从 2020 年的 49 万台上升至 2025 年的 113 万台，按照每台消耗 25kg 的钕铁硼计算，我们预计 2025 年全球工业机器人消耗的钕铁硼可达到 2.84 万吨，2020 年-2025 年 CAGR 为 18.1%。

除了工业机器人以外，人形机器人对钕铁硼的需求更具想象空间。我们在此前的叙述中已经简单介绍了钕铁硼在人形机器人中的使用环节，即 30 个（28+2）个无框力矩电机以及 12 个空心杯电机。根据文硕咨询所披露的数据，单个 Optimus Gen2 人形机器人所需的高性能钕铁硼将达到 3.5kg/台（仅为估计数据，实际设计中不同厂家的设计方案对钕铁硼的需求量也不同）。根据张英建等人发表的《中国钕铁硼市场发展现状及未来发展趋势分析》一文，电动汽车单电机钕铁硼用量仅为 2kg，人形机器人钕铁硼单机用量已超过电动汽车单机用量。

马斯克表示，未来该机器人产量应该可以达到数百万台，3 至 5 年间即可量产上市。假设按照 Tesla 上市 100 万台人形机器人测算，对应钕铁硼将新增需求量 0.35 万吨，以 2025 年全球钕铁硼需求量作为基数测算，工业机器人+Tesla 人形机器人钕铁硼需求量占总需求比例为 7.7%。

表 14：工业机器人+Tesla 人形机器人占钕铁硼需求比例测算

	2021 年	2022 年	2023 年 E	2024 年 E	2025 年 E
全球工业机器人产量（万台）	62	73	84	98	113
工业机器人单耗钕铁硼（Kg）	25	25	25	25	25
全球工业机器人钕铁硼需求量（万吨）	1.54	1.82	2.11	2.44	2.84
Tesla 人形机器人远期产量预测（万台）	/	/	/	/	100
Tesla 人形机器人单机耗钕铁硼（Kg）	/	/	/	/	3.5
Tesla 人形机器人钕铁硼需求量（万吨）	/	/	/	/	0.35
全球钕铁硼需求量（万吨）	25.11	27.85	31.16	34.89	41.43
工业机器人+Tesla 人形机器人钕铁硼（远期）需求量占总需求比例	6.13%	6.54%	6.77%	6.99%	7.70%

资料来源：Tesla AI Day 发布会，光大证券研究所测算；详细测算过程见光大证券研究所于 2022 年 12 月 15 日外发报告《新型储能拥抱大时代，钠钒电池迎接主升浪——能源金属 2023 年度投资策略》

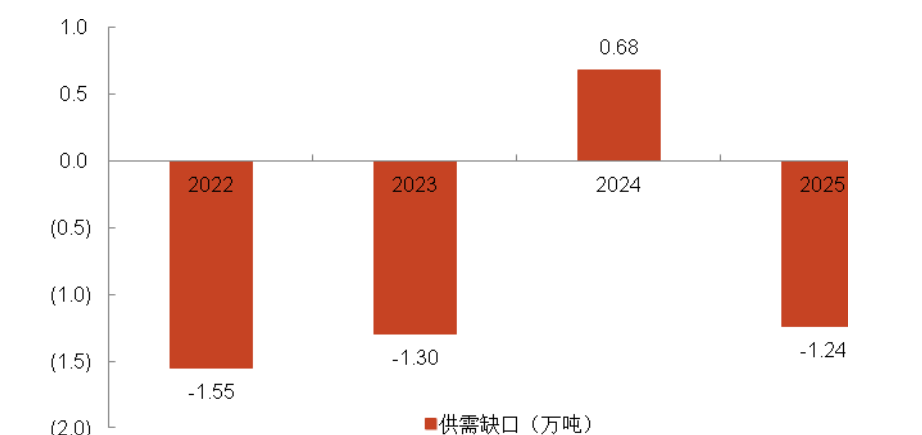
综上，我们对 2022~2025 年全球钕铁硼的供需缺口做进一步测算。从测算结果看，2022~2025 年全球钕铁硼供需紧平衡的格局将持续，其中 2024 年是各磁材厂扩产计划的预期投产时间，因此或将出现小幅过剩。我们预计 2022/2023/2024/2025 年的全球钕铁硼供需缺口（供给-需求）将分别为 -1.55/-1.30/0.68/-1.24 万吨。

表 15：2022~2025 年全球钕铁硼供需缺口测算（万吨）

	2022	2023E	2024E	2025E
总供给	26.30	29.86	35.57	40.19
总需求	27.85	31.16	34.89	41.43
供需缺口（供给-需求）	-1.55	-1.30	0.68	-1.24

资料来源：弗若斯特沙利文，工信部，Tesla AI Day 发布会，光大证券研究所测算

图 26：2022~2025 年全球钕铁硼供需缺口预测图（万吨）



资料来源：弗若斯特沙利文，工信部，TeslaAI Day 发布会，光大证券研究所测算

磁组件或将为磁材公司打开全新增长空间。磁组件是磁性材料（钕铁硼、钐钴等）与金属、非金属等材料通过粘接、注塑等工艺装配而成的组合件，如 EPS 上转子、风电磁极、电机定转子、直线电机组件、传感器等。磁组件产品是磁材公司向磁材下游产业链的延伸，可以为客户减少装配时间和制造成本。

考虑到人形机器人用磁材具备扭矩大（增加承重）、磁偏角小（减少动作误差）、电机体积小，单位磁性能要求高等特点，人形机器人企业可能会与磁材公司合作研发设计所需要的电机组件，考虑到目前数家上市磁材公司已经开始布局稀土永磁材料的磁组件产品，人形机器人企业对磁材企业的需求可能也将从简单的磁性材料升级至磁组件产品。

表 16：部分磁材企业对磁组件布局情况

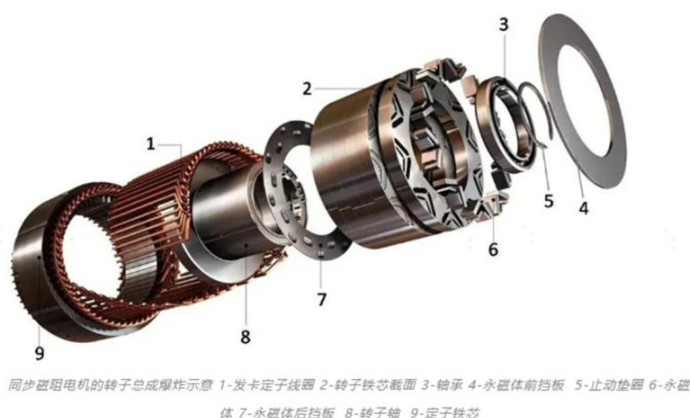
企业	磁组件布局情况
金力永磁	投资建设“墨西哥新建年产 100 万台/套磁组件生产线项目”
宁波韵升	公司致力于向下游的磁组件应用领域延伸，可以提供从小于“1”到大于“12”的不同规格的旋转电机组件
正海磁材	主要生产钕铁硼永磁材料及组件
大地熊	生产汽车转向系统 EPS 转子、汽车感应器系列产品、汽车内饰系统、磁力吸盘、风力发电机磁极盒组件、直线电机、无刷吸尘器转子组件、烧结钕铁硼绝缘胶粘剂系列产品等。

资料来源：各公司公告，各公司官网，光大证券研究所整理

磁组件的价值量相比于单纯的磁性材料往往会有较大的提升。由于目前 Optimus Gen2 的具体设计方案未知，我们参考现有汽车的永磁同步电机中磁组件与磁性材料的价值量对比情况来假设人形机器人中磁组件价值量相对于磁性材料价值量的增长幅度。

近年，包括 Tesla Model 3 在内，几乎所有 EV 和 HEV 都装有内置式永磁体同步磁阻电机（IPMSynRM）。这类电机的转子总成主要由转子轴、转子铁芯、永磁体（又称磁钢）及其前后挡板等部件构成。

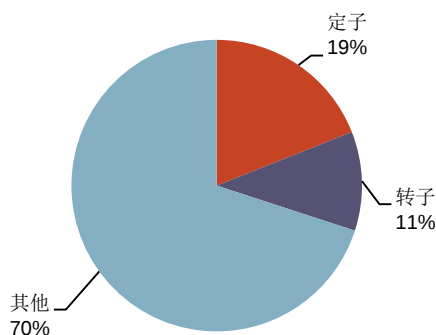
图 27：同步磁阻电机的转子总成示意图



资料来源：微信公众号《EDC 电驱未来》，光大证券研究所

永磁同步电机的制造原材料主要有钕铁硼、硅钢片、铜和铝等，其中永磁材料钕铁硼主要用于制造转子永磁体，硅钢片主要用于制作定子铁芯。定子与转子的质量与性能直接决定了驱动电机的能效及稳定性等关键指标，价值量在整个驱动电机中分别占比 19%、11%。

图 28：汽车驱动电机主要部件价值量占比



资料来源：智研咨询《2022 年中国新能源汽车驱动电机行业现状及发展趋势分析》，光大证券研究所

从汽车用驱动电机价值量拆分看，转子占比大约为 11%。根据光大证券研究所电力设备新能源团队于 2024 年 1 月 15 日发布的报告《人形机器人：加速发展 全面进击——人形机器人行业系列报告(一)》中的测算，Optimus 单机无框力矩电机与空心杯电机的价值量总和大约为 44800 元。转子永磁体（磁组件）占电机价值量占比大约为 11%，那么 Optimus 单机磁组件价值量约为 4928 元。

2024 年年初，中国国内钕铁硼（38EH）市场均价约为 400 元/kg，结合前文所述 Optimus 单机钕铁硼消耗量约为 3.5kg，则 Optimus 单机钕铁硼价值量约为 1400 元，据此测算，磁组件价值量为钕铁硼价值量的 3.52 倍。

2.3、 工装刀具：铜镀层丝与硬质合金刀具

在前文中我们已经对人形机器人所涉及的工装刀具做了简要介绍。在谐波减速器的制造工艺中，慢走丝工艺主要使用铜镀层丝，而滚插齿工艺则使用工具钢刀具或硬质合金刀具；在行星滚柱丝杠的制造工艺中，磨削工艺主要使用传统的刚玉砂轮及 CBN 砂轮材料，车削工艺中车刀使用材料包括高速钢、硬质合金、超硬材料三类。

慢走丝（铜镀层丝）单耗方面，可以结合镀层丝的单卷质量、单个谐波减速器的加工时间等数据计算得到。根据微信公众号《博德高科》相关的披露数据，单卷镀层丝的质量为 5kg，可用于慢走丝加工 20 小时。

表 17：博德高科镀层电极丝相比于传统黄铜丝经济效益提升

电极丝规格 (mm)	某品牌 0.25 黄铜丝	贝德姆 0.25 镀层丝	备注
测试地点	博德高科慢丝车间	博德高科慢丝车间	/
平均效率 (沙迪克 1#)	3243mm ² /h	4460-4726mm ² /h	加工效率提升 36%-45%
平均效率 (沙迪克 2#)	2682mm ² /h	3456-4014mm ² /h	加工效率提升 28%-49%
单卷黄铜丝 (5kg) 实际放电时间	20 小时以上		以加工效率提升 28% 计算，镀层丝能提前 5.6 小时完成同等工作量 (即能多加工 5.6 小时的工作量)
单卷镀层丝增加产值	20 小时*28%*100 元/小时=560 元		100 元/小时指慢走丝机台每小时产生的最低效益
单卷镀层丝增加的费用	5kg*17 元/kg=85 元		相比于黄铜丝，镀层丝单价贵 17 元/kg
使用每卷镀层丝收益	560 元-85 元=475 元		475 元/卷
单台机床整月耗丝量	1 卷/天*26 天=26 卷		26 卷/月

资料来源：微信公众号《博德高科》，光大证券研究所

根据绿的谐波招股说明书，2017 年下半年至 2018 年上半年，绿的谐波的每个生产班次约能生产 1.25 万件次，按照两班倒，每年 300 个工作日计算，公司机加工总产能为 750 万件次/年。按照绿的谐波的产能规划，其中 360 万件次产能用于生产谐波减速器相关零部件，而生产 1 台谐波减速器平均需要机加工 40 件次，据此计算该公司谐波减速器产能为 90,000 台/年。

此外，绿的谐波招股说明书中还披露了其 2020 年拥有设备数量，其中数控专用机床（慢走丝工艺用设备）数量为 51 台。我们再假设每个班次工作时间为 8 个小时，我们可以计算得到单个谐波减速器需要加工时间： $300*2*8/(90000/51)=2.72$ 小时。

结合前文数据，单卷镀层丝质量为 5kg，可用于慢走丝加工 20 小时，那么我们可以进一步计算得出单个谐波减速器消耗镀层丝质量为： $5\text{kg}/(20/2.72)=0.68\text{kg}$ 。Tesla Optimus Gen2 目前搭载谐波减速器共 14 个，那么 Optimus Gen2 单机镀层丝消耗量约为 $0.68*14=9.52\text{kg}$ 。参考博德高科官网采购数据，其慢走丝工艺用镀层丝的平均价格大约为 85 元/kg，据此我们可以计算出单个 Optimus Gen2 镀层丝的价值量大约为 809 元。

硬质合金刀具通常会使用在行星滚柱丝杠的车削工艺及谐波减速器的滚插齿工艺中（需要注意工艺之间的替代性）。硬质合金的刀具耐用度制约切削速度，引起换刀及磨刀次数的变化，从而影响生产率和成本。若耐用度定得过高，虽然可以减少换刀及磨刀次数，但必定会降低切削速度，影响生产率的提高；如果耐用度选得过低，虽然可以提高切削速度，但必然增加换刀和磨刀的次数，增加成本。因此提高生产率和降低成本有时往往是矛盾的。使用中只有从具体生产条件出发，选择合适的耐用度，才能使最高生产率和最低成本达到统一。

目前大多数硬质合金刀具采用最低成本耐用度，即经济耐用度。其数值一般是：在通用机床上，硬质合金车刀耐用度大致为 60~90min；硬质合金端面铣刀耐用度大致为 90~180min。根据前文所测算数据，单个谐波减速器的平均加工时间大约为 2.72 小时，对于硬质合金刀具，我们取交集，即耐用度为 90min（1.5 小时），那么每一个谐波减速器将使用 1.81 份左右的硬质合金刀具（若使用滚插齿工艺）。

硬质合金刀具的单位质量方面，由于现有的机械加工刀具一般遵循“好钢用在刀刃上”的道理，仅在刀片端使用昂贵的硬质合金原材料。根据微信公众号《金属加工》所披露的数据，硬质合金切削环重量为 275g。我们假设单个行星滚柱丝杠（车削工艺）对于硬质合金刀具的使用量与谐波减速器相同，那么单个 Optimus Gen2 对于硬质合金的消耗量约为 $1.81 \times 14 \times 275\text{g} / 1000 \approx 13.96\text{kg}$ 。

2.4、 镁合金：人形机器人关键轻量化材料

Optimus Gen2 总质量为 63kg，相比于前代 Optimus 质量减少 10kg，未来 Tesla 目标在 Optimus Gen2 的质量基础上再减重 10%。由于 Tesla 目前并未公布其轻量化材料的具体使用，市场上关于轻量化材料种类的选择以推测为主，其中 PEEK 材料被认为是具备较大应用潜力的一种材料，其重量较轻、性能较优是其脱颖而出的理由。

Tesla 以生产汽车起家，我们参考汽车目前热度较高的两种轻量化材料：铝合金和镁合金，与 PEEK 进行性能对比。

表 18：三种轻量化材料参数对比

材料	密度 (g/cm³)	抗拉强度 (Mpa)	比强度 (N*m/kg)	弹性模量 E (10⁴Mpa)	硬度 (BHN)	熔点 (°C)
镁合金	1.8	250~343	191	4.41	40~75	650
铝合金	2.7	110~270	57	7.15	75~120	660
PEEK	1.31	100~200	456	1	/	341

资料来源：微信公众号《瑞道镁业资讯》，正浩特塑 PEEK，光大证券研究所

从上表的参数对比来看，PEEK 为三者中最轻，密度仅为 1.31g/cm³，不到铝合金密度的一半；其在抗拉强度、比强度等其他方面的参数表现也不落下风。除了其质地较轻、机械强度高的特点外，PEEK 在耐化学性方面也表现优秀，其另一个优良性能是绝缘性；此外，PEEK 还显示出出色的电子性能，它具有非常稳定的介电常数和较低耗散因数，这使得该材料可用于电信技术。

镁合金同样具有较多优点：其密度仅为 1.8g/cm³，在所有结构用合金中最轻；比强度、比刚度高：镁合金的比强度明显高于铝合金和钢，比刚度与铝合金和钢相当，而远远高于工程塑料，为一般塑料的 10 倍；耐振动性好：在相同载荷下，减振性是铝的 100 倍、钛合金的 300~500 倍；电磁屏蔽性佳：3C 产品的外壳（手机及电脑）要能够提供优越的抗电磁保护作用，而镁合金外壳能够完全吸收频率超过 100db 的电磁干扰；散热性好：一般金属的热传导性是塑料的数百倍，镁合金的热传导性略低于铝合金及铜合金，远高于钛合金，比热则与水接近，是常用合金中最高者。

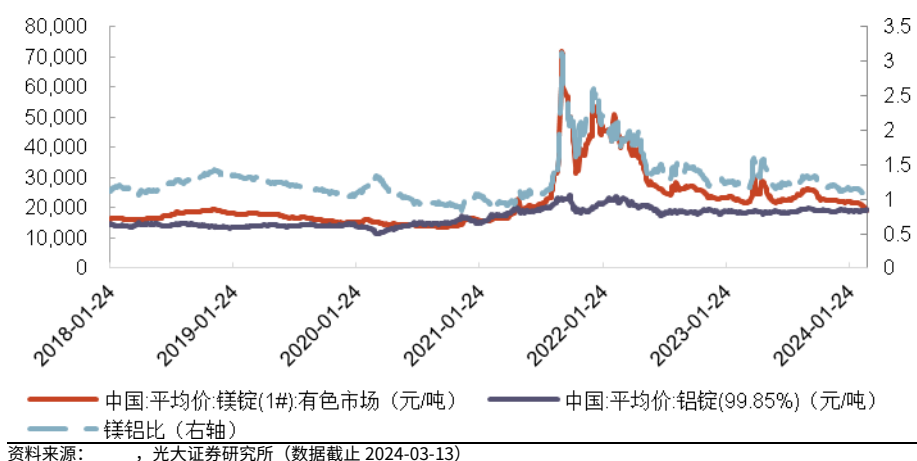
镁合金同时也有两个不可忽视的缺点：镁合金易燃烧，其化学性能很强，在空气中易氧化、易燃烧；另外，镁合金耐腐蚀性差：各种类型气体均会对镁产生程度不同的腐蚀，因此，工业生产中镁锭必须镀膜钝化，涂油及以蜡纸包覆。

从 2018 年至今（截至 2024 年 3 月 12 日）的镁铝价格比的历史走势来看，镁铝价格比基本落在 1-1.5 区间范围内，历史平均镁铝比为 1.28（2021 年下半

年能耗双控使镁供给端受限，后续 12 月份环保督察进一步加剧镁在供给端的压力，镁铝比大幅上涨）。

根据镁铝的密度关系，镁的密度比铝小 1/3，因此按照重量计价时，镁价理论上可以是铝价的 1.5 倍，实际生产过程中，由于镁相对容易出现表面腐蚀的情况，部分镁产品需要进行表面处理，产生额外的成本，因而镁铝比可能低于 1.5。截至 2024 年 3 月 13 日，镁铝比为 1.01，当前的镁铝比较低，有利于镁下游领域的广泛使用。

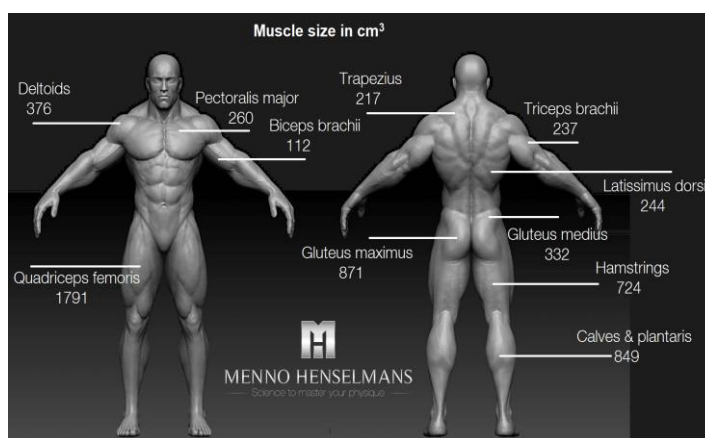
图 29：2018 年至今镁锭、铝锭价格与镁铝比走势情况



PEEK 材料相比镁合金与铝合金更加昂贵。当前，国内 PEEK 材料价格约为 30 万元/吨至 40 万元/吨（300~400 元/kg），国外则高达 80 万元/吨至 100 万元/吨（800~1000 元/kg）。而镁合金价格为 21 元/kg（2024 年 3 月第一周），铝合金价格为 18.8~20.5 元/kg（2024 年 3 月 13 日），PEEK 材料的价格为镁合金/铝合金价格的十倍以上。

在我们此前对 Optimus Gen2 的质量分布计算中，旋转执行器与线性执行器的质量总计为 33.6kg，电池包质量为 11kg，2 个灵巧手总质量为 1.08kg，摄像头+芯片总质量为 0.7kg，那么以轻量化材料为核心的整体外骨骼总质量为 16.62kg，这是以 Optimus Gen2 相比于前代 Optimus 减重 10kg（即总重量为 63kg）作为前提假设计算出来的结果。

图 30：人体平均肌肉体积



资料来源：Menno Henselmans，光大证券研究所

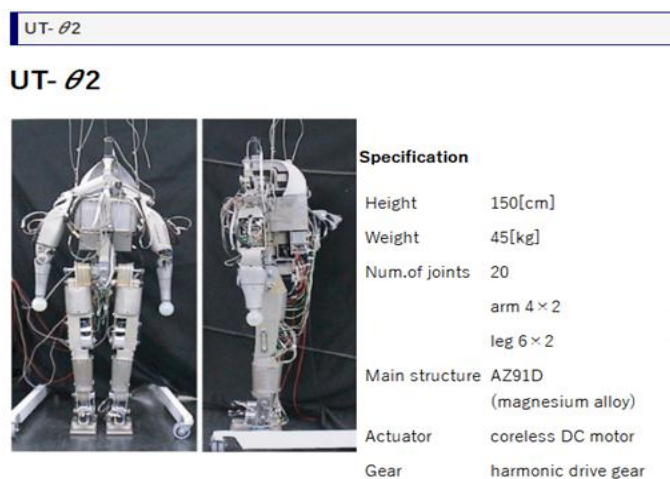
由于 Optimus Gen2 展现出了与人类高度相似的制造与结构，我们选择人类作为其使用轻量化材料的体积的参照物，考虑到若直接使用人体体积作为人形

机器人体积，会多纳入诸如脏器（电池包）、骨骼（执行器）等不应计入人形机器人轻量化材料体积的其他部分，我们选择以人体肌肉体积作为人形机器人整体体积的参照。根据 Menno Henselmans 所披露数据，人体肌肉的平均体积为 6013cm^3 ，我们计算 $16.62\text{g} \times 1000 / 6013\text{cm}^3 \approx 2.76\text{g}/\text{cm}^3$ ，即 Optimus Gen2 所使用轻量化材料的平均密度大约为 $2.76\text{g}/\text{cm}^3$ ，与铝合金密度相当。

进一步地，我们计算根据 Tesla 后续优化方案提出的继续减重 10%，即达到人形机器人概念机体重 57kg 时轻量化材料的平均密度。我们假设其他部件的设计都不会出现重大改变，即减重 10% 全部由轻量化材料的替代实现，那么以轻量化材料为核心的整体外骨骼总质量为 $16.62 - 63 \times 10\% = 10.32\text{kg}$ ，除以人体肌肉平均体积 6013cm^3 ，即 $10.32\text{g} \times 1000 / 6013\text{cm}^3 \approx 1.72\text{g}/\text{cm}^3$ ，与镁合金密度相当。

由于 Tesla 并未公布其轻量化材料的设计方案，目前只能推测其选用轻量化材料种类。综合考虑材料性能参数、材料成本差异、材料密度匹配度，我们认为镁合金同样有可能成为关键核心轻量化材料。

图 31：人形机器人采用镁合金案例



资料来源：微信公众号《人形机器人大讲堂》，光大证券研究所

2.5、其他材料：钢材及球墨铸铁

除去前文所述的几种主要原材料（稀土磁材、工装刀具、轻量化材料）以外，人形机器人的其他原材料以钢材为主，其中谐波减速器的刚轮会使用球墨铸铁，柔轮材料使用合金钢材；无框力矩电机则会使用电工钢及碳素结构钢；行星滚柱丝杠、灵巧手的腱绳材料同样以合金钢、不锈钢等为主要原材料。

在前文的测算中，我们计算出旋转执行器（无框力矩电机+谐波减速器）的总质量为 17.78kg，其中钕铁硼用量约为 1.75kg（总用量 3.5kg，其中旋转执行器使用量占 50%），那么剩余 16.03kg 为电工钢+合金钢+球墨铸铁使用量；线性执行器（无框力矩电机+行星滚柱丝杠）的总质量为 15.82kg，其中钕铁硼用量约为 1.75kg（总用量 3.5kg，其中线性执行器使用量占 50%），那么剩余 14.07kg 为合金钢使用量；灵巧手总质量为 1.08kg，我们假设其质量全部由不锈钢钢材贡献。

那么人形机器人钢材方面的使用量约为 $16.03 + 14.07 + 1.08 = 31.18\text{kg}$ 。

3、弹性测算

在前文中，我们分析了人形机器人的主要原材料和应用环节，并计算了主要原材料的单机消耗量，主要包括钕铁硼、镀层丝、硬质合金刀具、镁合金、铝合金、钢材等。

表 19：人形机器人主要原材料用量汇总

使用原材料	单耗	价值量（元）	100 万台人形机器人对应材料总用量	市场总供给（万吨）	弹性
钕铁硼	3.5kg	1400	3500 吨	29.07（2023E）	1.20%
磁组件	40 个（28+12）	4928	4000 万个	/	/
铜镀层丝	9.52kg	809	9520 吨	/	/
硬质合金刀具	13.96kg	/	13960 吨	/	/
镁合金	10.32kg	216.72	10320 吨	57.14（2023E）	1.81%
铝合金	16.62kg	332.4	16620 吨	2472.37（2023E）	0.07%
PEEK	10.32kg	3715.2	10320 吨	1.6（2022）	64.50%
钢材	31.18kg	/	31180 吨	188820（2023）	极小
球墨铸铁（理论上限）	31.18kg	118.5	31180 吨	1595（2021）	0.20%
电工钢（理论上限）	31.18kg	327.4	31180 吨	1500（2022）	0.21%

资料来源：Tesla AI Day 2022，科尔摩根官网，微信公众号：《博德高科》、《瑞道镁业资讯》、《盖世汽车社区》，光大证券研究所测算（备注：弹性=100 万台人形机器人对应材料总用量/市场总供给；硬质合金刀具以及钢材由于具体种类较为复杂，无法取合适价格数据，故此处不计算价值量；磁组件、铜镀层丝、硬质合金刀具目前暂时没有权威市场总供给数据，故此处不计算相应弹性）

我们分别计算了 Optimus 使用三种不同轻量化材料情形下的 100 万台人形机器人出货对上游原材料的需求拉动顺序，具体计算结果为 PEEK（64.5%）> 镁合金（1.81%）> 钕铁硼（1.20%）> 铝合金（0.07%）> 钢材。

我们也对相关的上市公司，就机器人相关产品的价格上涨 1% 对公司的业绩弹性进行测算。主要包括金力永磁（钕铁硼）、宁波韵升（钕铁硼）、正海磁材（钕铁硼）、中科三环（钕铁硼）、博威合金（镀层丝）、宝武镁业（镁合金）。

表 20：相关上市公司弹性测算表

公司名	代码	机器人相关产线产能（2023E）	机器人相关产线产量（2023E）	机器人相关产品及单位	产品价格（元/吨）	△1%价格上涨带来的归母净利润变化（亿元）	2023 年 Q1-3 归母净利润（亿元）	2023 年年度归母净利润（亿元）	业绩弹性
金力永磁	300748	26000	15600	钕铁硼，吨	400000	0.48	4.94	5.64	8.52%
宁波韵升	600366	21000	12600	钕铁硼，吨	400000	0.39	-2.47	-2.35	/
正海磁材	300224	24000	14400	钕铁硼，吨	400000	0.44	3.68	4.90	9.05%
中科三环	000970	31500	18900	钕铁硼，吨	400000	0.58	2.23	3.00	19.40%
博威合金	601137	4800	4800	镀层丝，吨	85000	0.03	7.91	11.55	0.27%
宝武镁业	002182	200000	200000	镁合金，吨	22000	0.34	2.07	2.77	12.25%

资料来源：各上市公司公告，光大证券研究所测算（备注：假设 2023 年 4 家磁材公司的产能利用率为 60%；博威合金及宝武镁业产能利用率为 100%；增值税、所得税税率为 13%；博威合金对子公司博德高科拥有 100% 的股权，故其镀层丝贡献利润均为归母净利润；其余公司未披露具体产线构成，因此假设各产线贡献利润均为归母净利润；正海磁材、宝武镁业 2023 年度归母净利润=2023 年前三季度归母净利润/3*4，其余公司 2023 年年度归母净利润来自各公司业绩预告/业绩快报，取披露区间平均值，宁波韵升 2023 年归母净利润为负，因此无法计算业绩弹性）

4、投资建议

人形机器人的主要原材料包括钕铁硼、镀层丝、硬质合金、镁合金、铝合金、钢材等，随着人形机器人产业化的临近，这些材料相关的上市公司有望受益，建议关注金力永磁（磁材）、宁波韵升（磁材）、正海磁材（磁材）、中科三环（磁

材)、大地熊(磁材)、英洛华(磁材)、博威合金(镀层丝)、宝武镁业(镁合金)、星源卓镁(镁合金)。

4.1、金力永磁：Tesla 重要供应商，新能源、机器人均有布局

根据金力永磁最新披露业绩快报，2023 年，金力永磁实现营业收入 66.88 亿元，同比减少 6.66%；归母净利润 5.64 亿元，同比减少 19.78%；扣非归母净利润 4.93 亿元，同比减少 27.68%。

Tesla 重要供应商：2020 年 9 月 21 日，公司与 Tesla 签署了《零部件采购协议》，为 Tesla 公司提供稀土永磁产品，正式进入了 Tesla 供应链。目前，公司为 Tesla 供应的钕铁硼产品主要用于新能源车中，随着 Tesla 逐步推进其人形机器人产品 Optimus 的产业化，金力永磁也很可能作为其重要供应商持续为 Tesla 供应人形机器人用钕铁硼产品。

新能源市场市占率 28%：2022 年，公司新能源汽车及汽车零部件领域收入达到 28.89 亿元，较上年同期增长 174.97%。2022 年，公司新能源汽车驱动电机磁钢产品销售量可装配新能源乘用车约 286 万辆，按照 CleanTechnica 公布的 2022 年全球新能源乘用车销量 1,009.12 万辆计算，公司全球市场占有率约 28%。

机器人领域紧密布局：公司规划在 2022 年具备 23,000 吨高性能稀土永磁材料产能的基础上，逐步配置资源和能力，建设好赣州、包头、宁波生产基地；规划到 2025 年建成 40,000 吨高性能稀土永磁材料产能。同时，公司计划投资 1 亿美元，投资建设“墨西哥新建年产 100 万台/套磁组件生产线项目”以提升公司在人形机器人、新能源汽车等领域的市场竞争力。

风险提示：上游稀土价格波动风险，公司扩产计划不及预期风险，人形机器人技术路线变化风险，下游客户订单变动风险等。

4.2、宁波韵升：老牌磁材生产企业，持续开拓新能源领域

2023 年前三季度，宁波韵升实现营业收入 40.24 亿元，同比减少 19.56%；归母净亏损 2.47 亿元，同比转亏；扣非归母净亏损 2.05 亿元，同比转亏。

老牌磁材生产企业，行业领先技术研发能力：公司是国内最早一批进入烧结钕铁硼磁材行业的企业之一，最早可以追溯至 1991 年。公司拥有行业领先的技术研发能力，是国家级技术创新示范企业、国家知识产权示范企业。

新能源汽车业务高速增长：公司面向汽车行业不断提高核心技术和方案解决能力，管理体系稳步提升，在国内外新能源汽车市场的主流供应商地位持续夯实。2022 年公司在新能源汽车应用领域实现销售收入约 14.73 亿元，同比增长约 242%。其中国内新能源主驱配套 137.7 万套，按乘联会统计的 2022 年国内新能源乘用车销量 566.24 万辆计，国内市场占有率达 24.3%，公司产品已广泛应用于国内主要的新能源汽车品牌，确立了公司在国内新能源汽车应用市场的领先地位。近年来，公司不断加大海外新能源汽车市场的拓展力度，已进入一批知名新能源汽车驱动系统厂商供应链。

风险提示：上游稀土价格波动风险，公司扩产计划不及预期风险，人形机器人切入不及预期风险等。

4.3、 正海磁材：稀土磁材与新能源电机驱动双轮驱动

2023 年前三季度，正海磁材实现营业收入 46.27 亿元，同比增加 1.53%；归母净利润 3.68 亿元，同比增长 20.50%；扣非归母净利润 3.54 亿元，同比增长 20.25%。

稀土磁材龙头之一：公司是业内最早服务于新能源、节能化、智能化“三能”市场的头部企业，下游客户均属细分市场龙头。作为核心供应商，公司深度参与客户前期开发，经验丰富，对产品的应用场景有深刻而独到的理解。公司多个牌号产品的性能达到世界领先水平，可满足各高端应用市场的需求。

布局新能源电机驱动业务：新能源汽车电机驱动系统是电动汽车的核心零部件之一，是电动汽车车辆行驶中的主要执行结构，其驱动特性决定了汽车行驶的主要性能指标。公司新能源汽车电机驱动系统业务由子公司上海大郡负责运营，上海大郡自成立以来，专注于新能源汽车电机驱动系统的研发、生产及销售。人形机器人同样以电机进行驱动，公司的电机驱动业务或将成为宝贵经验。

风险提示：上游稀土价格波动风险，公司扩产计划不及预期风险，新能源汽车领域业务进展不达预期、风电业务领域进展不达预期等。

4.4、 中科三环：拥有雄厚理论与优秀技术的稀土磁材企业

2023 年前三季度，中科三环实现营业收入 64.17 亿元，同比减少 14.52%；归母净利润 2.23 亿元，同比减少 63.73%；扣非归母净利润 2.06 亿元，同比减少 66.21%。

雄厚理论与优秀技术：公司创始人、董事长王震西院士早年曾在法国国家磁学实验室师从诺贝尔奖获得者、世界著名科学家奈尔教授，回国后一直致力于稀土磁性材料的研究，并以扎实的基础研究为先导开创了中国的钕铁硼产业，与中科院物理所具有深厚的渊源。

产品种类覆盖广、质量高：公司一直致力于自主研发、革新工艺，不断优化产品结构、提升产品种类布局的完整性取得了显著的效果。在品质综合能力方面，公司是率先进入国际钕铁硼高端应用领域——VCM 的国内稀土永磁企业，打破了美、欧、日等企业在该领域的长期垄断。在磁性能方面，公司可以提供具有高综合性能（最大磁能积（单位 MGOe）和内禀矫顽力（单位 kOe）之和大于 75）及高温稳定性（工作温度大于 200℃）的烧结钕铁硼产品。在高性价比稀土永磁产品方面，公司自 2013 年起开始系统研发大比例添加高丰度稀土元素的烧结钕铁硼磁体，形成了完整的高丰度元素综合作用影响机制理论框架，推出了系列化高性价比产品，相关发明专利得到授权。

风险提示：上游稀土价格波动风险，公司扩产计划不及预期风险，行业竞争加剧风险，国际市场汇率变化风险等。

4.5、 大地熊：客户广泛的优质磁材供应商

根据大地熊最新披露业绩快报，2023 年，大地熊实现营业收入 14.30 亿元，同比减少 32.51%；归母净亏损 0.39 亿元，同比减少 126.08%；扣非归母净亏损 0.50 亿元，同比减少 140.52%。

客户广泛且优质：在汽车工业领域，公司通过了德国采埃孚、德国舍弗勒、巨一科技、精进电动、双林股份等国内外新能源汽车驱动电机及零部件制造厂商的认证并批量供货，应用于大众、宝马、克莱斯勒、福特、通用、本田、江淮、奇瑞、五菱、长安等国内外知名新能源汽车品牌。在工业电机领域，公司和中国中车、德国舍弗勒、德国西门子、美国百得、日本牧田、日本松下、日本 CIK、日本 SMC 等工业电机制造商保持了稳定的合作关系。

稀土原材料供应有保证：2011 年公司与北方稀土合资成立北方稀土安徽公司，保障了公司稀土原材料的稳定供应，十多年来双方遵守约定不断深化合作并实现互利共赢。2022 年，公司参与北方稀土对其所属内蒙古包钢稀土磁性材料有限责任公司、宁波包钢展昊新材料有限公司、北京三吉利新材料有限公司、北方稀土安徽公司四家磁材企业的整合重组。整合重组后，内蒙古包钢稀土磁性材料有限责任公司更名为内蒙古北方稀土磁性材料有限责任公司（简称“北方磁材”），公司持有北方磁材 5.18% 股权。公司稀土原材料的供应渠道和稳定性未发生重大变化，公司将继续参与整合重组后北方磁材的公司治理，保障公司总体战略规划和发展目标的实现。

风险提示：主营产品价格波动风险，上游稀土价格波动风险，公司扩产计划不及预期风险，行业竞争恶化风险等。

4.6、英洛华：电机业务打开全新增长空间

2023 年，英洛华实现营业收入 38.49 亿元，同比减少 18.67%；归母净利润 0.87 亿元，同比减少 66.46%；扣非归母净利润 1.26 亿元，同比减少 40.91%。

公司电机业务打开全新增长空间：公司电机系列产品品类齐全，拥有直流、交流、无刷、伺服、推杆电机，减速器以及电机驱动等 200 多个规格、5000 多个型号，已形成了包括电机、减速器和电控一体化的平台，能满足各细分行业不同客户的需求。人形机器人同样以电机进行驱动，公司的电机驱动业务或将成为宝贵经验。

公司电动轮椅业务系列产品受众面广：公司研发生产的电动轮椅车、电动代步车和助行器产品品种齐全、性能优良、舒适安全，能满足全 ODM、OEM 及私人订制，产品功能类别呈现多样化和智能化的趋势。目前公司有电动轮椅车 13 个系列、电动代步车 7 个系列，共几十个款型，材质包含铁质、铝质、碳纤维等，产品全面覆盖高、中、低档，产品受众面广。

风险提示：上游稀土价格波动风险，公司扩产计划不及预期风险，行业竞争恶化风险，国际贸易风险等。

4.7、博威合金：新材料与光伏业务双轮驱动

2023 年前三季度，博威合金实现营业收入 125.24 亿元，同比增加 28.34%；归母净利润 7.91 亿元，同比增加 87.64%；扣非归母净利润 7.95 亿元，同比增加 98.07%。

有色金属特殊合金材料的引领者：公司是具有国际竞争力的有色金属特殊合金材料的引领者，是特殊合金牌号最齐全、特殊合金产品产量最大的企业之一，公司的产品覆盖 17 个合金系列，100 多个合金牌号，为下游近 30 个行业提供专业化产品与服务，满足了客户的一站式采购需求。公司着力于为客户创造价值，对于特殊客户的特定材料要求，提供定制化的合金设计方案以满足其个性化需求。

深耕美欧光伏市场多年，具备独特的竞争优势：公司通过多年的美国、欧洲市场营销和推广积累，已经连续 6 年位列美国布隆伯格新能源（BNEF）全球光伏组件制造商银行可贷性一级供应商列表，连续 4 年位列美国光伏进化实验室（PVEL）全球光伏组件可靠性加严测试顶级性能供应商列表，通过差异化的服务，公司品牌得到美、欧光伏客户高度认可。公司深耕美国市场多年，与美国市场主要客户建立了长期、深度、稳定可靠的合作关系。

风险提示：原材料价格波动风险，合金、光伏技术路线变动风险，美国光伏政策变动风险等。

4.8、 宝武镁业：背靠宝钢，镁业龙头

2023 年前三季度，宝武镁业实现营业收入 55.63 亿元，同比减少 21.74%；归母净利润 2.07 亿元，同比减少 64.17%；扣非归母净利润 1.87 亿元，同比减少 66.28%。

背靠宝钢：公司原控股股东为梅小明，原持股比例为 18.03%，宝钢金属原持股比例为 14%。2022 年 10 月 17 日，宝钢金属与梅小明签署合作框架协议，拟以 17.91 元/股认购公司增发的 6200 万股 A 股股票，发行完成后宝钢金属持有云海金属 21.53% 的股份，梅小明持有公司 16.45% 的股份，结合宝钢金属与梅小明签署的《合作框架协议》中公司党委会建立、董事会改选、监事会改选、高级管理人员设置等公司治理及人事安排，梅小明将失去对公司的控制权，公司控股股东将变更为宝钢金属，实际控制人将变更为国务院国资委，目前此次权益变动已完成。

镁行业龙头：公司是全球镁行业龙头企业，目前已形成年产 10 万吨原镁和 20 万吨镁合金的生产能力，镁合金产销量连续多年保持全球领先。公司致力于给全球汽车客户提供优质的镁铝合金压铸汽车关键核心零部件，主要提供仪表盘支架、中控支架、座椅支架等镁合金中大型汽车零部件产品，为保时捷、宝马、沃尔沃等国际知名车厂配套。

风险提示：原材料价格波动风险，人形机器人轻量化材料替代风险。

4.9、 星源卓镁：突破镁合金压铸领域

2023 年前三季度，星源卓镁实现营业收入 2.54 亿元，同比增加 26.48%；归母净利润 0.58 亿元，同比增加 31.61%；扣非归母净利润 0.52 亿元，同比增加 22.04%。

深耕镁合金压铸业务：公司主要从事镁合金、铝合金精密压铸产品及配套压铸模具的研发、生产和销售。公司现有主要压铸产品包括汽车显示系统零部件、汽车座椅零部件、新能源汽车动力总成零部件、汽车车灯零部件、汽车中控台零部件等汽车类压铸件以及 电动自行车功能件及结构件、园林机械零配件等非汽车类压铸件。

技术研发领先：公司致力于汽车零部件、中高端电动自行车变速箱壳体、园林机械零部件领域精密压铸件的生产技术研究开发，尤其在镁合金精密压铸方面具有技术优势。公司自 2009 年起开始较早专注于镁合金压铸技术研发与市场开拓，相较于潜在竞争者，公司已完成针对镁合金压铸件模具开发、压铸成型、后处理、精密加工等全业务链条的技术积累，涵盖防开裂成型技术、局部加压成型技术、顶出防变形控制技术、镁合金静电喷涂技术、镁合金熔化保护技术、镁

灰去燃技术、镁合金粉尘收集净化控制技术、大平面、薄壁易变形铸件加工技术、复杂刀具设计和应用技术等多项核心技术。

风险提示：原材料价格波动风险，人形机器人轻量化材料替代风险。

5、风险提示

- (1) **上游原材料价格波动风险：**磁材上游稀土价格波动较大，会对各公司业绩造成影响。
- (2) **公司扩产计划不及预期风险：**大部分磁材公司均有扩产计划，需要注意扩产计划不及预期带来的风险。
- (3) **人形机器人技术路线变化风险：**人形机器人尚处于“从 0 到 1”的进程中，其中技术路线的演变与变化可能会对相关原材料的上市公司带来风险。
- (4) **理论假设与现实不符风险等：**本篇报告包含大量数据测算以及理论假设环节，需要注意理论假设与现实不符带来的风险。

行业及公司评级体系

评级	说明
买入	未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 15%以上
增持	未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 5%至 15%；
中性	未来 6-12 个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至 5%；
减持	未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 5%至 15%；
卖出	未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 15%以上；
无评级	因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。
基准指数说明：A 股市场基准为沪深 300 指数；香港市场基准为恒生指数；美国市场基准为纳斯达克综合指数或标普 500 指数。	

分析、估值方法的局限性说明

本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。负责准备以及撰写本报告的所有研究人员在此保证，本研究报告中任何关于发行商或证券所发表的观点均如实反映研究人员的个人观点。研究人员获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户反馈、竞争性因素以及光大证券股份有限公司的整体收益。所有研究人员保证他们报酬的任何一部分不曾与、不与、也将不会与本报告中的具体推荐意见或观点有直接或间接的联系。

法律主体声明

本报告由光大证券股份有限公司制作，光大证券股份有限公司具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格，负责本报告在中华人民共和国境内（仅为本报告目的，不包括港澳台）的分销。本报告署名分析师所持中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格编号已披露在报告首页。

中国光大证券国际有限公司和 Everbright Securities(UK) Company Limited 是光大证券股份有限公司的关联机构。

特别声明

光大证券股份有限公司（以下简称“本公司”）成立于 1996 年，是中国证监会批准的首批三家创新试点证券公司之一，也是世界 500 强企业——中国光大集团股份公司的核心金融服务平台之一。根据中国证监会核发的经营证券期货业务许可，本公司的经营范围包括证券投资咨询业务。

本公司经营范围：证券经纪；证券投资咨询；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问；证券承销与保荐；证券自营；为期货公司提供中间介绍业务；证券投资基金代销；融资融券业务；中国证监会批准的其他业务。此外，本公司还通过全资或控股子公司开展资产管理、直接投资、期货、基金管理以及香港证券业务。

本报告由光大证券股份有限公司研究所（以下简称“光大证券研究所”）编写，以合法获得的我们相信为可靠、准确、完整的信息为基础，但不保证我们所获得的原始信息以及报告所载信息之准确性和完整性。光大证券研究所可能将不时补充、修订或更新有关信息，但不保证及时发布该等更新。

本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次发布时光大证券研究所的判断，可能需随时进行调整且不予通知。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。客户应自主作出投资决策并自行承担投资风险。本报告中的信息或所表述的意见并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对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。

不同时期，本公司可能会撰写并发布与本报告所载信息、建议及预测不一致的报告。本公司的销售人员、交易人员和其他专业人员可能会向客户提供与本报告中所载观点不同的口头或书面评论或交易策略。本公司的资产管理子公司、自营部门以及其他投资业务板块可能会独立做出与本报告的意见或建议不相一致的投资决策。本公司提醒投资者注意并理解投资证券及投资产品存在的风险，在做出投资决策前，建议投资者务必向专业人士咨询并谨慎抉择。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。投资者应当充分考虑本公司及本公司附属机构就报告内容可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一信赖依据。

本报告根据中华人民共和国法律在中华人民共和国境内分发，仅向特定客户传送。本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、复制、转载、刊登、发表、篡改或引用。如因侵权行为给本公司造成任何直接或间接的损失，本公司保留追究一切法律责任的权利。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。

光大证券股份有限公司版权所有。保留一切权利。

光大证券研究所

上海

静安区新闻路 1508 号
静安国际广场 3 楼

北京

西城区武定侯街 2 号
泰康国际大厦 7 层

深圳

福田区深南大道 6011 号
NEO 绿景纪元大厦 A 座 17 楼

光大证券股份有限公司关联机构

香港

中国光大证券国际有限公司
香港铜锣湾希慎道 33 号利园一期 28 楼

英国

Everbright Securities(UK) Company Limited
6th Floor, 9 Appold Street, London, United Kingdom, EC2A 2AP