

证券研究报告
产业研究
2024年03月20日

新材料产业深度报告： 人形机器人带来新材料机遇 ——新材料产业框架之三

➤ 人形机器人空间巨大

根据KBV Research数据，2022年全球人形机器人市场规模为14亿美元，而到2030年该市场规模预计达到396亿美元，CAGR高达51.86%。人形机器人作为具身智能的载体，近年来快速迭代进化，特斯拉创始人马斯克预计，远期人形机器人需求或达到100亿台。

➤ 执行器、灵巧手为关键零部件

人形机器人的关键部件包括各执行器关节、灵巧手等，零部件可分为减速器（谐波减速器、行星减速器）、伺服电机（无框电机、空心杯电机）、丝杠（行星滚柱丝杠、滚珠丝杠）、传感器（六维力矩传感器、柔性触觉传感器）、肢体骨骼等。

➤ 特钢、永磁材料、聚醚醚酮PEEK是用量较大的原材料

构成人形机器人的材料种类丰富，据我们测算，其中特钢、永磁材料、PEEK在一台人形机器人上的用量分别为16.8kg、3.4kg、10.5kg，有望随着人形机器人市场的拓展迎来发展新机遇。

➤ 钕铁硼永磁材料是伺服电机的关键材料

高性能钕铁硼永磁材料作为驱动电机的核心材料，在同步电机体积小型化的过程中依然能够保持高磁性、磁一致性等性质。以特斯拉Optimus为例，一台人形机器人需要使用28个无框电机、12个空心杯电机，其中高性能钕铁硼用量可达到3.4kg，人形机器人的发展能有效拉动未来高性能钕铁硼的增长需求。我们预计，人形机器人1000万台的需求将拉动3.4万吨高性能钕铁硼材料增量，拓展170亿元的市场空间。

➤ 实现人形机器人轻量化目标，聚醚醚酮PEEK是优选材料

聚醚醚酮PEEK比强度大、密度低，是综合性能和产品附加值较高的特种工程塑料，可以应用于人形机器人肢体骨骼及各关节结构件，能显著降低机器人的自重。我们预计，在人形机器人1000万台的需求下，使用PEEK实现轻量化将拉动10.5万吨的PEEK增量，带来525亿元的PEEK市场规模。

➤ 特种钢材是人形机器人零部件的重要原材料

相比于普钢，特殊钢具有优异的物理化学性能，多应用于下游高端制造、汽车、机器人等领域。我们测算，一台人形机器人上50CrMo4合金钢、40Cr合金钢和GCr15轴承钢的用量分别为7.7kg、1.4kg、7.7kg，在远期1000万台的销量下，将拉动7.7万吨、1.4万吨、7.7万吨的市场空间，对应带来的市场规模分别为11.55亿元、0.728亿元、3.927亿元。

➤ 风险提示

人形机器人产量和需求增长不及预期、新材料技术开发和国产替代不及预期、原材料价格大幅波动、行业竞争加剧、重点关注公司项目推进及业绩不及预期

图表：人形机器人零部件市场空间敏感性分析

零部件	数量	价格 (元)	总价 (元)	价值量占比	不同人形机器人销量假设下的空间测算 (亿元)		
					100万台	500万台	1000万台
FSD芯片及套件	1	84000	84000	27.68%	840	4200	8400
六维力矩传感器	30	2000	60000	19.77%	600	3000	6000
行星滚柱丝杠	14	3100	43400	14.30%	434	2170	4340
谐波减速器	14	2500	35000	11.53%	350	1750	3500
无框电机	28	1000	28000	9.23%	280	1400	2800
肢体骨骼	1	12000	12000	3.95%	120	600	1200
柔性触觉传感器	10	1 136.8	1 1368	3.75%	1 13.68	568.4	1 136.8
空心杯电机	12	460	5520	1.82%	55.2	276	552
轴承	28	150	4200	1.38%	42	210	420
其他	1	20000	20000	6.59%	200	1000	2000
总计			303488	100%	3034.88	15174.4	30348.8

资料来源：特斯拉官网，百度爱采购，我的钢铁，国海证券研究所；时间截止至2024年1月30日

图表：人形机器人产业重要原材料市场空间敏感性分析

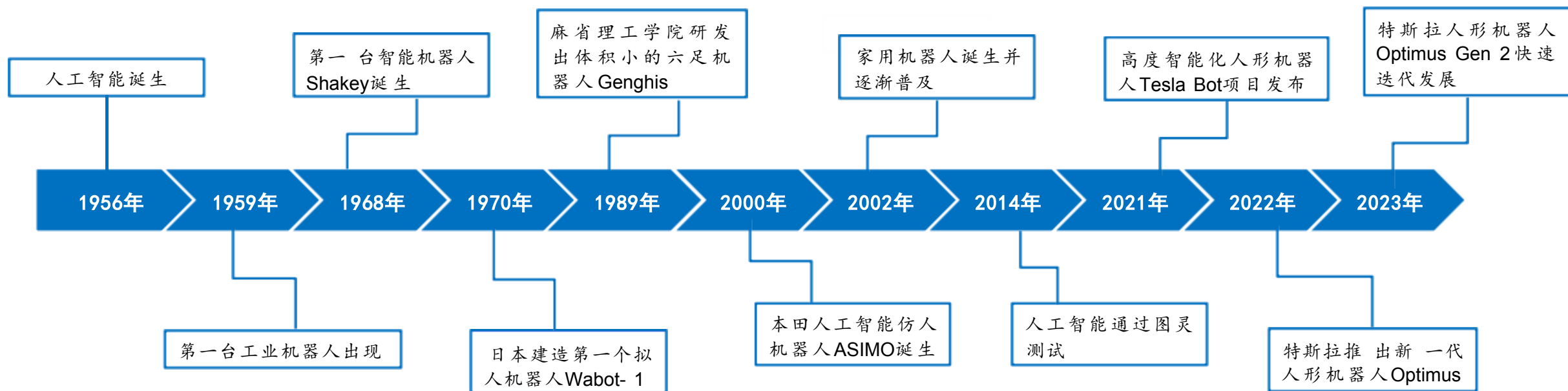
原材料	应用于何种零部件	单机用量 (kg)	不同人形机器人销量假设下的原材料市场增量空间测算 (吨)			单价 (万元/吨)	不同人形机器人销量假设下的空间测算 (亿元)		
			100万台	500万台	1000万台		100万台	500万台	1000万台
聚醚醚酮 PEEK	肢体骨骼-结构件	10.5	10500	52500	105000	50	52.5	262.5	525
钕铁硼 永磁材料	无框电机-转子 空心杯电机-转子	3.4	3400	17000	34000	50	17	85	170
铝合金	肢体骨骼-结构件	10.5	10500	52500	105000	1.95	2.05	10.24	20.48
50CrMo4 合金钢	行星滚柱丝杠-主丝杠 谐波减速器-刚轮	7.7	7700	38500	77000	1.5	1.155	5.775	11.55
GCr15 轴承钢	轴承 谐波减速器-波发生器 行星滚柱丝杠-螺母 行星滚柱丝杠-滚柱	7.7	7700	38500	77000	0.51	0.393	1.964	3.927
40Cr 合金钢	谐波减速器-柔轮	1.4	1400	7000	14000	0.52	0.073	0.364	0.728

资料来源：特斯拉官网，百度爱采购，我的钢铁，国海证券研究所；时间截止至2024年1月30日

- ◆人形机器人飞速迭代进化
- ◆Optimus结构及原材料拆解
- ◆高性能钕铁硼供不应求
- ◆PEEK是优选轻量化材料
- ◆特种钢材应用部位较多

- **智能机器人**，即具有主动性的第一人称智能，本质上是可以与环境交互感知，能自主规划、决策、行动，具有执行能力的机器人。智能机器人的核心目标是能够听到人类语言，然后分解任务，规划子任务，在移动中识别物体，与环境交互，最终完成相应任务。自1968年美国斯坦福研究所公布第一代智能机器人Shakey以来，智能机器人发展日益蓬勃、方兴未艾。

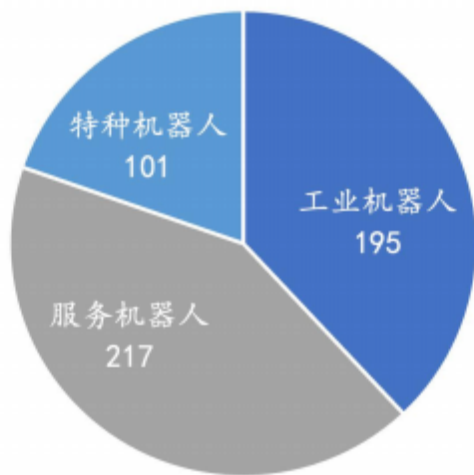
图表：智能机器人发展历程



资料来源：阜阳市机器人协会公众号，国家互联网信息办公室，爱范儿，坎德拉CANDELA，钛媒体APP，国海证券研究所

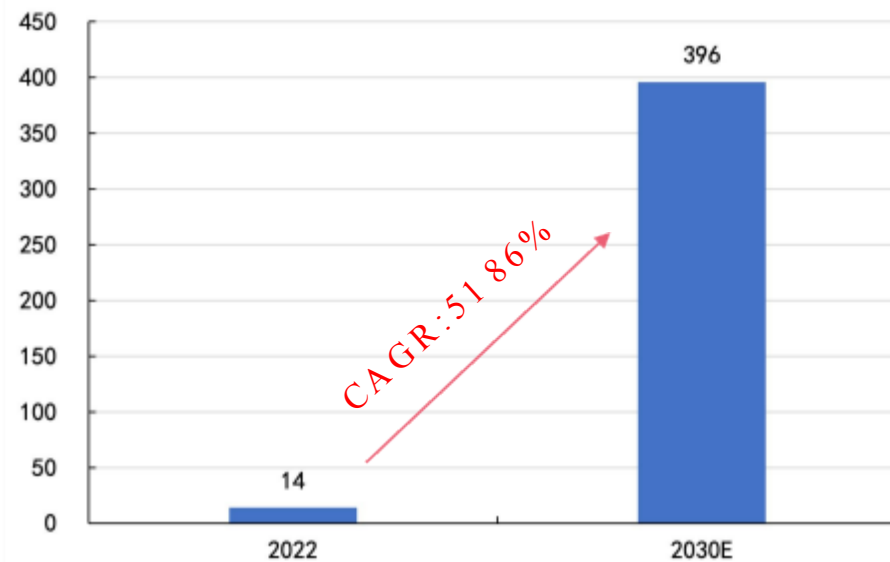
- **机器人市场规模庞大**。根据中国电子学会《中国机器人产业发展报告（2022年）》指引，预计2022年全球机器人市场规模将达到513亿美元，其中工业机器人市场规模将达到195亿美元，服务机器人达到217亿美元，特种机器人达到101亿美元。
- **全球人形机器人未来市场空间巨大**。根据KBV Research数据，2022年全球人形机器人市场规模为14亿美元，到2030年该市场规模预计达到396亿美元，CAGR高达51.86%。

图表：2022E全球机器人市场规模 (单位：亿美元)



资料来源：中国电子学会，国海证券研究所

图表：全球人形机器人市场规模 (单位：亿美元)



资料来源：KBV Research，国海证券研究所

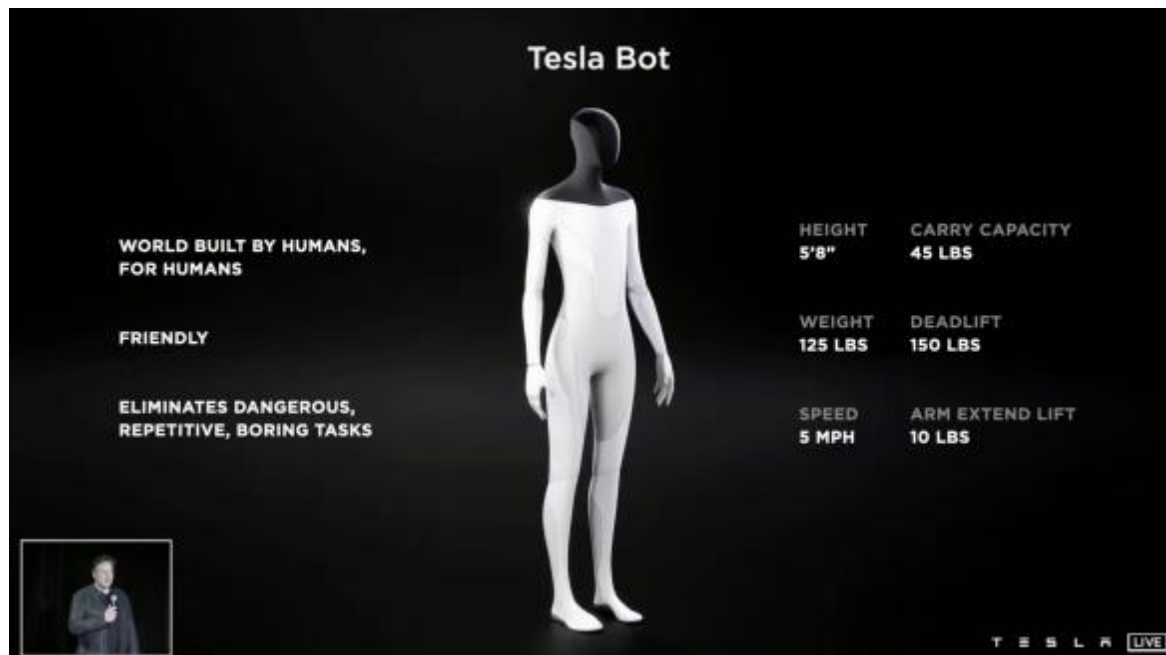
- **具身智能被视作人工智能的最终形态**。具身智能是指一种基于物理身体进行感知和行动的智能系统，其通过智能体与环境的交互获取信息、理解问题、做出决策并实现行动，从而产生智能行为和适应性。
- **相比一般机器人，人形机器人具有更加复杂的结构、传感、驱动和控制系统**。人形机器人是指外观和功能与人相似的智能机器人，比一般机器人具有更加复杂的结构、传感、驱动和控制系统。
- **人形机器人是具身通用人工智能最理想的身体形式**。未来的机器人需要真正做到和人一样，通过实现规划决策（大脑）、运动控制（小脑）、主控系统、主干结构及零部件的组合（类似于人的一系列关节和肌肉）达成基于感知到的任务和环境进行自主规划 - 决策 - 行动 - 执行等一系列行为的目标。

图表：构成具身智能的三大基础模块



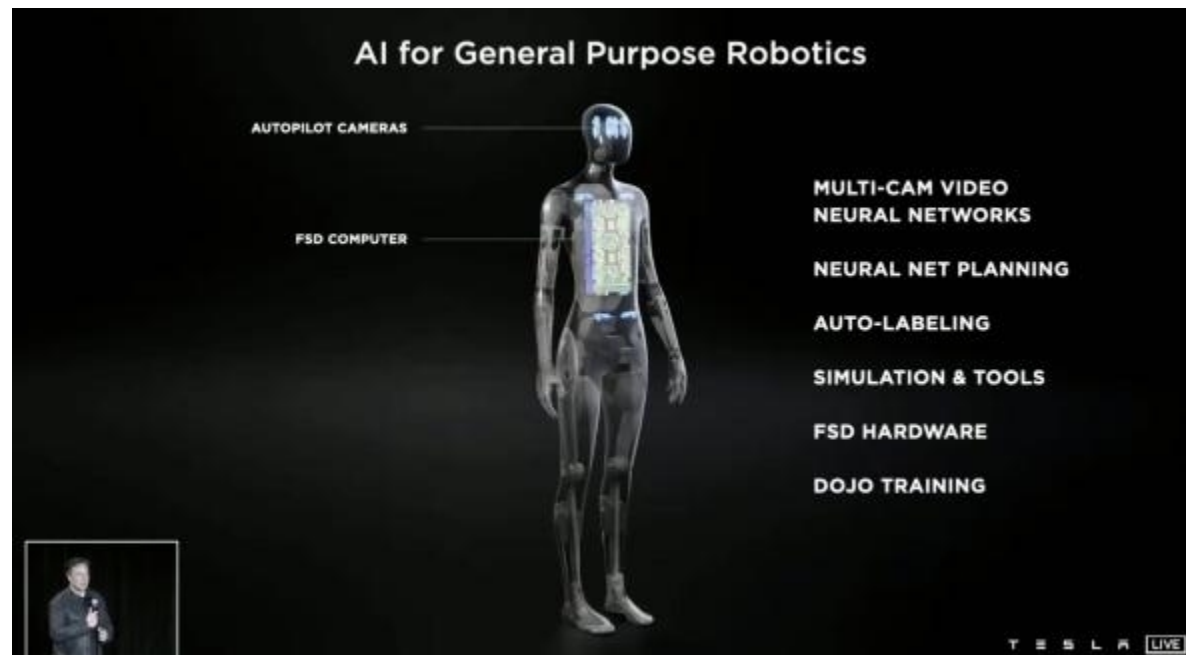
- **Te sl a B ot 横空出世 ， 人形机器人快速更新**。2021年8月19日，在特斯拉首届A I D a y活动中，马斯克亲自发布了概念机 Te sl a B ot。按照马斯克的设想，Te sl a B ot 将由分布在机器人手臂、颈部、躯干、手掌、腿部的合计40个电机驱动，使用轻质材料构成主体，并拥有如人类一般灵活的双手。马斯克认为，Te sl a B ot 将会从处理无聊、重复和危险的事情开始，逐步去实现其他更复杂任务。

图表：Tesla Bot整体数据展示



资料来源：湃客：机器之心

图表：Tesla Bot具备高度具身智能特性



资料来源：湃客：机器之心

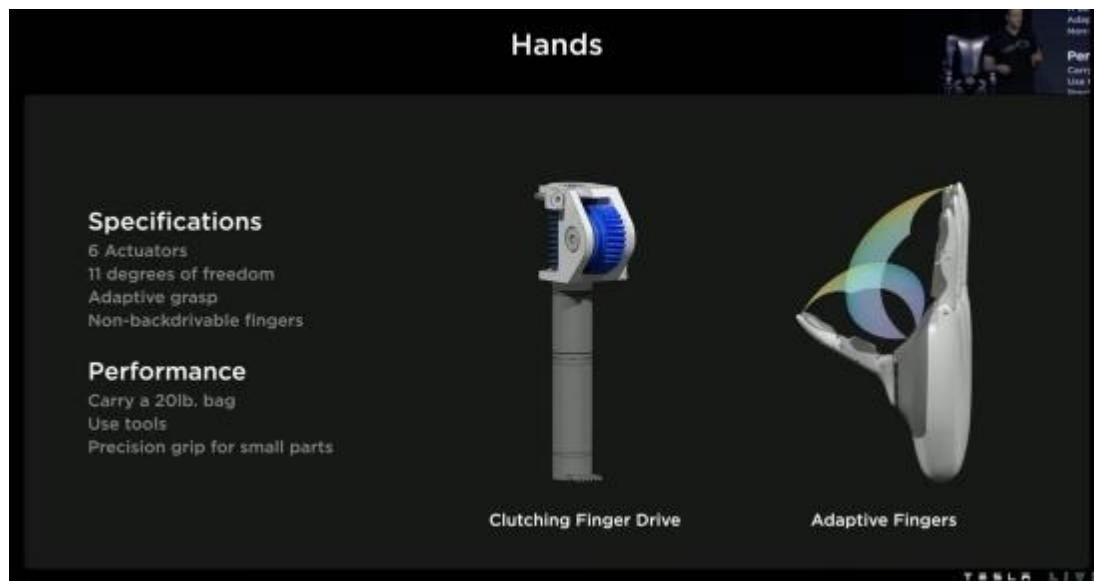
- **Optimus迭代进化，有望量产且大幅降低成本。** 2022年9月30日，特斯拉在Tesla AI Day展示了人形机器人Optimus（擎天柱）的原型机版本，并在展示文档中分享了大量技术细节。马斯克认为Optimus有望在3-5年内实现量产，最终降本至2万美金一台，从而普通家庭亦可购买。
- **Optimus具有极高自由度。** Optimus全身共有40个关节，其中Optimus的四肢以及躯干部分合计有28个执行器关节，包括14个旋转执行器关节以及14个线性执行器关节。而Optimus的一双灵巧手则有12个执行器关节，每只手具备11个自由度，可以进行自适应抓取，且具备反向锁止功能。

图表：Optimus具有六种不同设计的执行器



资料来源：量子位公众号

图表：Optimus灵巧手执行关节示意



资料来源：国际船舶海工网

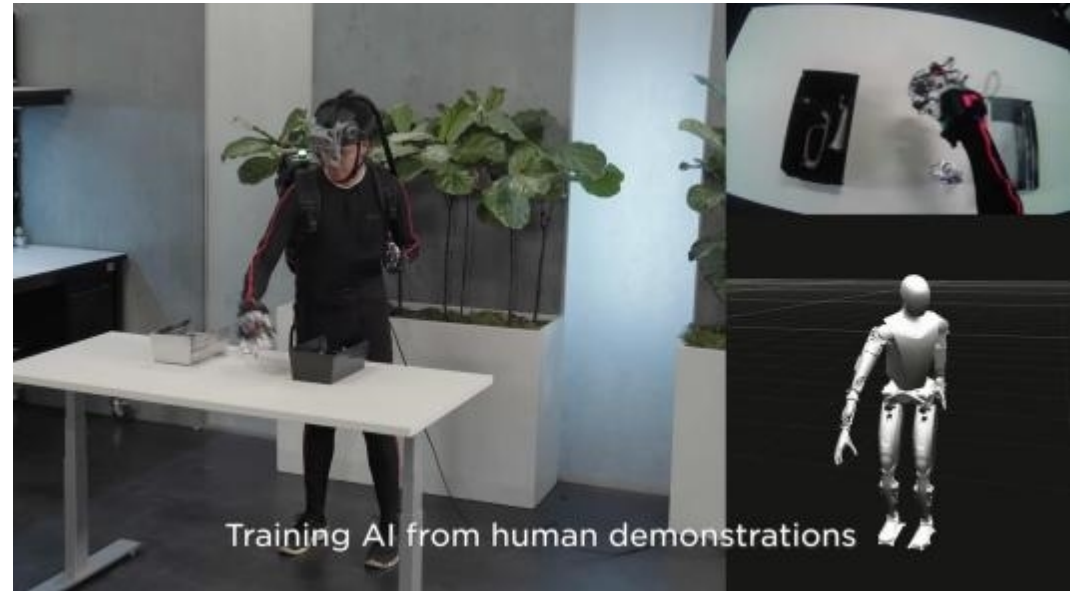
- **Optimus 力度控制能力，感知能力显著提升。**2023年5月，特斯拉在其股东大会上发布了擎天柱Optimus 的演示视频，机器人的力度控制更加精准，可以接触但不击碎鸡蛋。机器人的感知能力亦显著提升，可以识别并记忆不同的路况。此外，Optimus 可以由人类输入动作范例，进行端到端的学习。
- 马斯克预计，Optimus 的远期需求或达到100亿台。

图表：Optimus精准力度控制



资料来源：快科技

图表：Optimus学习人类动作范例



资料来源：快科技

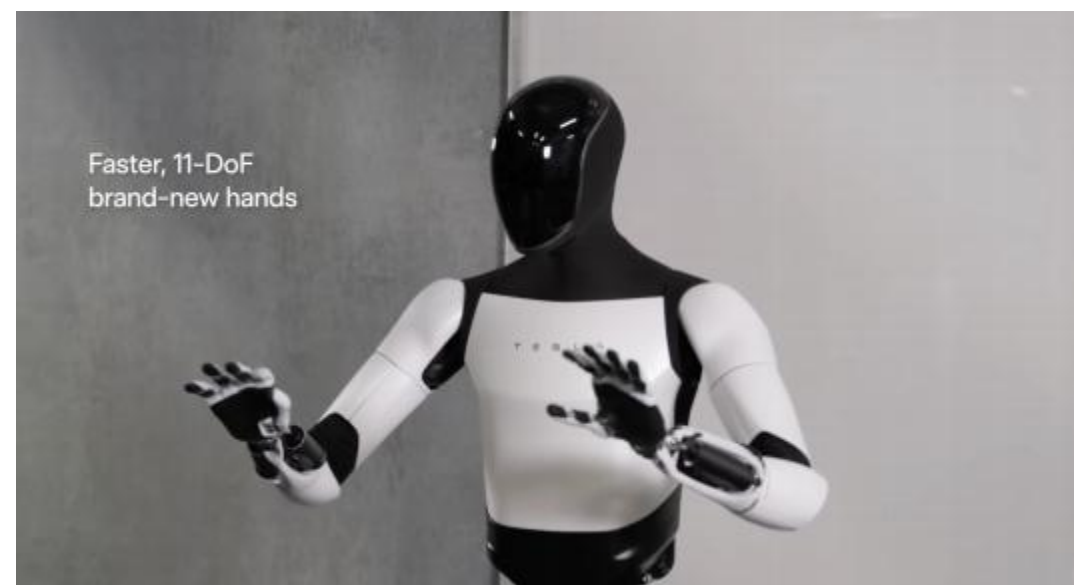
- **Optimus Gen2智能机器人来袭，手部关节全新升级，力度控制进一步增强。**2023年12月，特斯拉发布Optimus Gen2的最新视频。视频显示，Optimus Gen2拥有AI大模型的加持，体重比一代减少10kg，步行速度加快30%，身体控制能力增强；手部关节全新升级，活动更加自然。手指部分均搭载触觉传感器，能更精准地抓握细小易碎物品。同时，Optimus Gen2还可以做多个深蹲动作，显示出其平衡能力有所增强。

图表：Optimus Gen2形态展示



资料来源：科创板日报

图表：Optimus Gen2高灵活度的双手

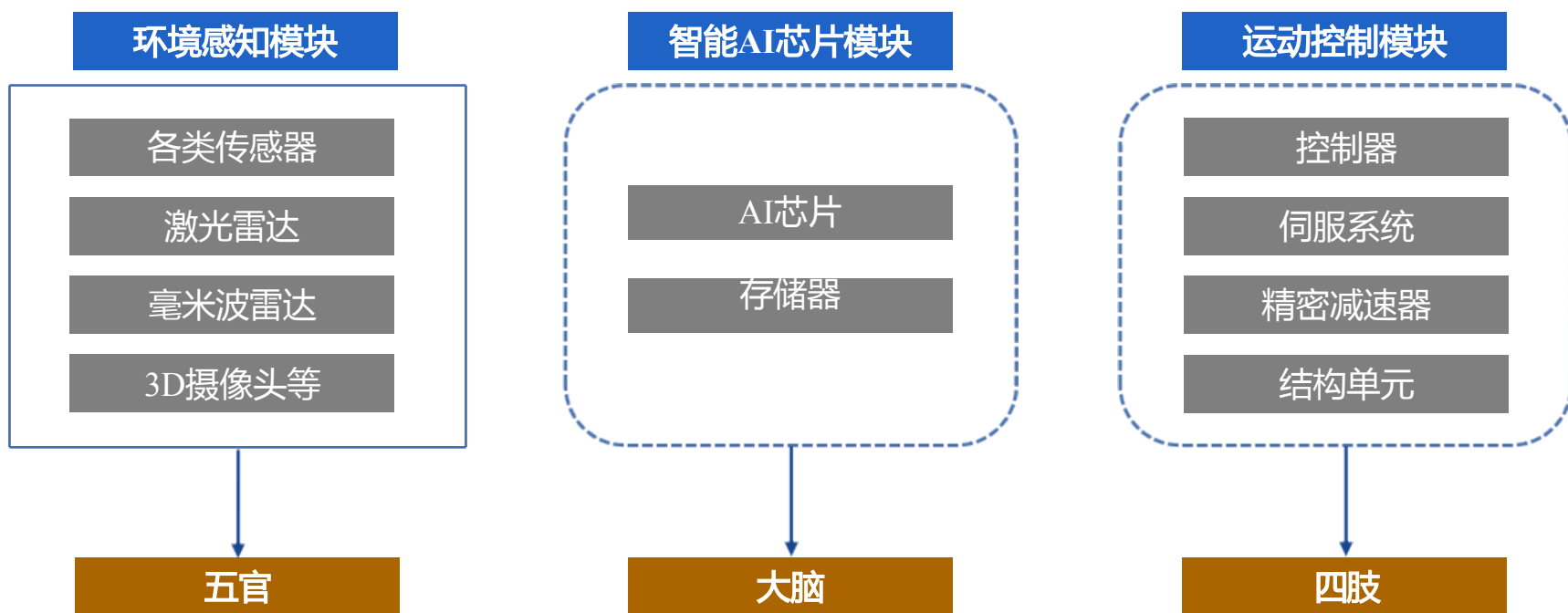


资料来源：华尔街见闻

- ◆人形机器人飞速迭代进化
- ◆Optimus结构及原材料拆解
- ◆高性能钕铁硼供不应求
- ◆PEEK是优选轻量化材料
- ◆特种钢材应用部位较多

- 人形机器人主要包含四大核心技术模块：环境感知模块、智能AI芯片模块、运动控制模块、操作系统模块，其中前三大技术模块与硬件有关。

图表：人形机器人三大硬件核心模块



资料来源：中国科学院自动化研究所，国海证券研究所

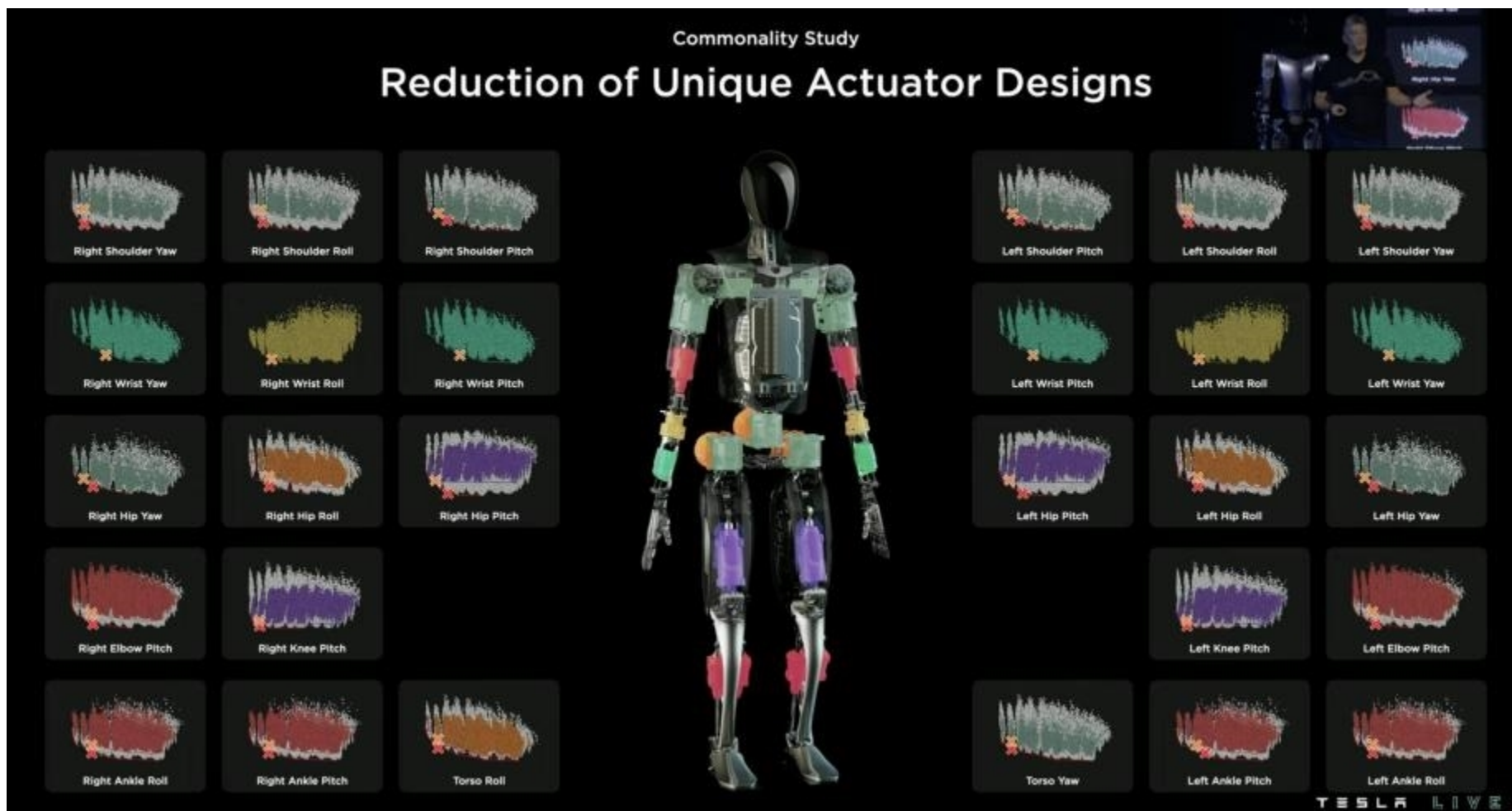
- Optimus全身有50个自由度，分布在各个身体部位。人形机器人的自由度需要执行结构达成，组成Optimus的14个旋转执行器、14个线性执行器、灵巧手的多个空心杯关节为其带来了50个自由度，使其不同身体部位能够前摆(Pitch)、扭转(Yaw)、侧摆(Roll)运动，同时每只灵巧手的11个自由度让其能够执行更复杂的操作。

图表：Optimus自由度分布及对应执行结构的运动方式

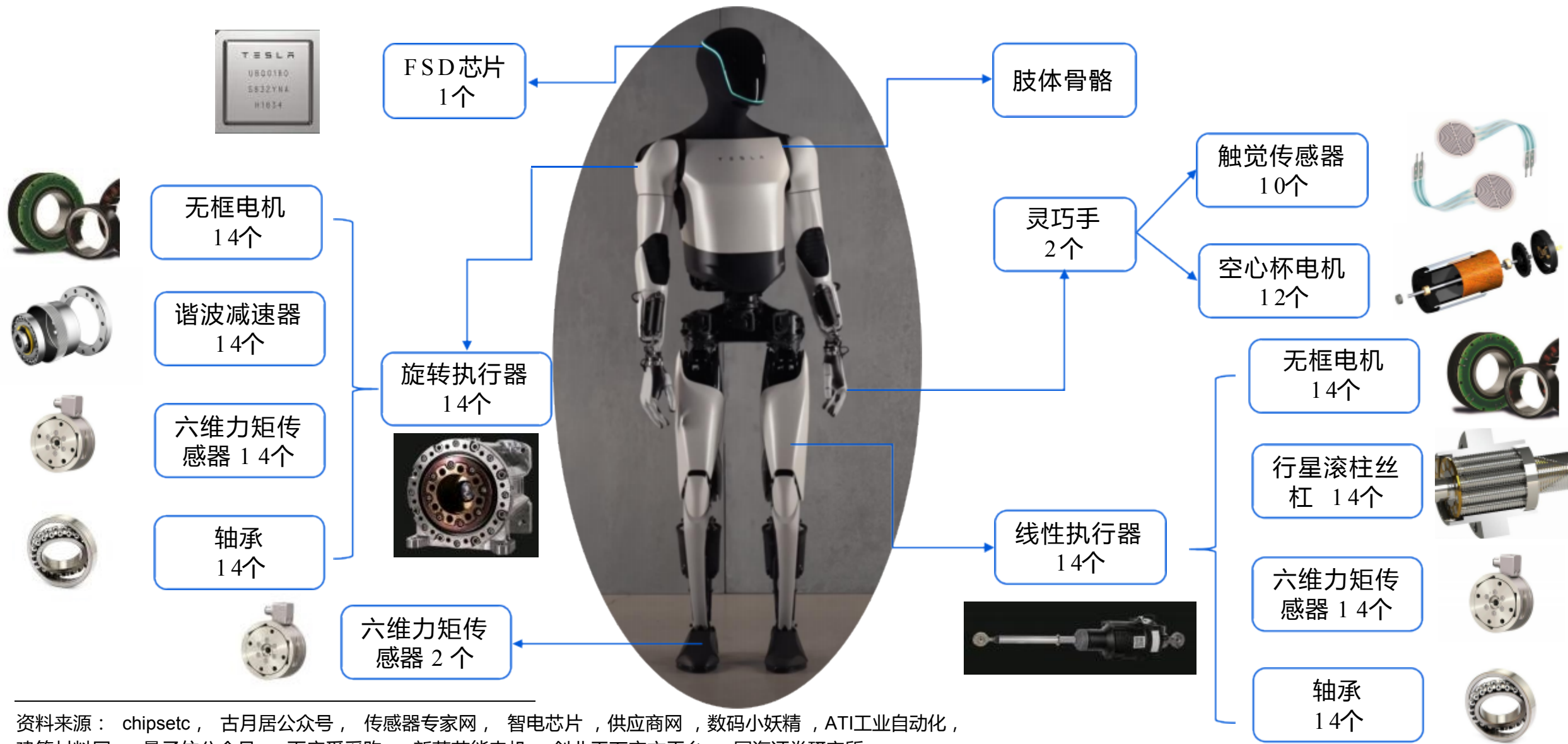
身体部位	自由度	旋转执行器	线性执行器	空心杯关节
肩部	3 (x2)	前摆+ 侧摆+ 扭转		
肘部	1 (x2)		前摆	
腕部	3 (x2)	扭转	前摆+ 扭转	
腰部	2	侧摆+ 扭转		
髋部	3 (x2)	侧摆+ 扭转	前摆	
膝盖	1 (x2)		前摆	
脚踝	2 (x2)		前摆+ 侧摆	
灵巧手	11 (x2)			自由运动
总计	50	14	14	22

资料来源：科创板日报，古月居公众号，国海证券研究所

图表：Optimus躯干上28个独特的执行器作用设计与位置分布



资料来源：智东西官方账号



资料来源：chipsetc，古月居公众号，传感器专家网，智电芯片，供应商网，数码小妖精，ATI工业自动化，建筑材料网，量子位公众号，百度爱采购，新菱节能电机，创业天下官方平台，国海证券研究所

- 在 Optimus 整机的 BOM 中，FSD 芯片及套件、六维力矩传感器、行星滚柱丝杠、谐波减速器、无框电机价值量位列前五，分别占整机价值的比重为 27.68%、19.77%、14.30%、11.53%、9.23%。

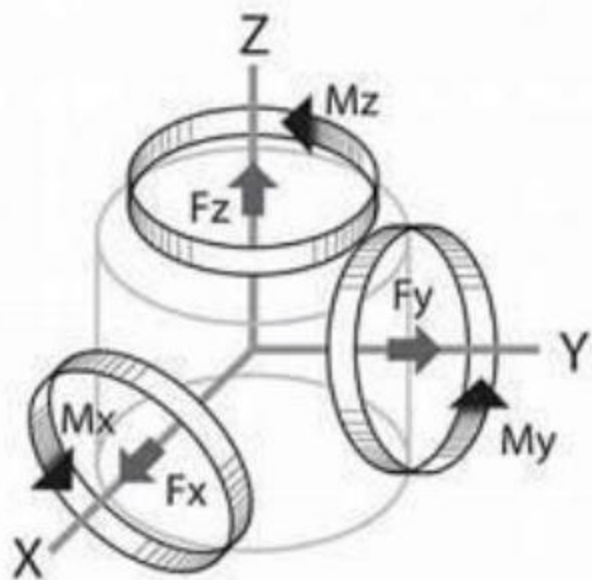
图表：Optimus 成本拆分 (单位：元)

零部件	数量	价格	总价	价值量占比
FSD 芯片及套件	1	84000	84000	27.68%
六维力矩传感器	30	2000	60000	19.77%
行星滚柱丝杠	14	3100	43400	14.30%
谐波减速器	14	2500	35000	11.53%
无框电机	28	1000	28000	9.23%
肢体骨骼	1	12000	12000	3.95%
柔性触觉传感器	10	1 136.8	1 1368	3.75%
空心杯电机	12	460	5520	1.82%
轴承	28	150	4200	1.38%
其他	1	20000	20000	6.59%
总计			303488	100%

资料来源：特斯拉官网，百度爱采购，阿里巴巴批发网，《A low-cost, human-like, high-resolution, tactile sensor based on optical fibers and an image sensor》，国海证券研究所；时间截止至 2024 年 1 月 30 日

- **六维力矩传感器**是性能最优、力觉信息最全面的力矩传感器，能够同时测量三个轴向力和三个轴向力矩，将力矩的物理变化转换成精确的电信号，满足任何方向上力的检测。
- 六维力矩传感器技术壁垒较高，需解决维间扰动、矢量解耦算法、动静态标定、对所测力分量敏感的单调性和统一性等问题。
- 六维力矩传感器应用于每个线性执行器和旋转执行器上，使Optimus结构更为简洁，对力的感知和控制效果更好。

图表：六维力矩传感器能满足任何方向上力的检测



资料来源：远瞻智库

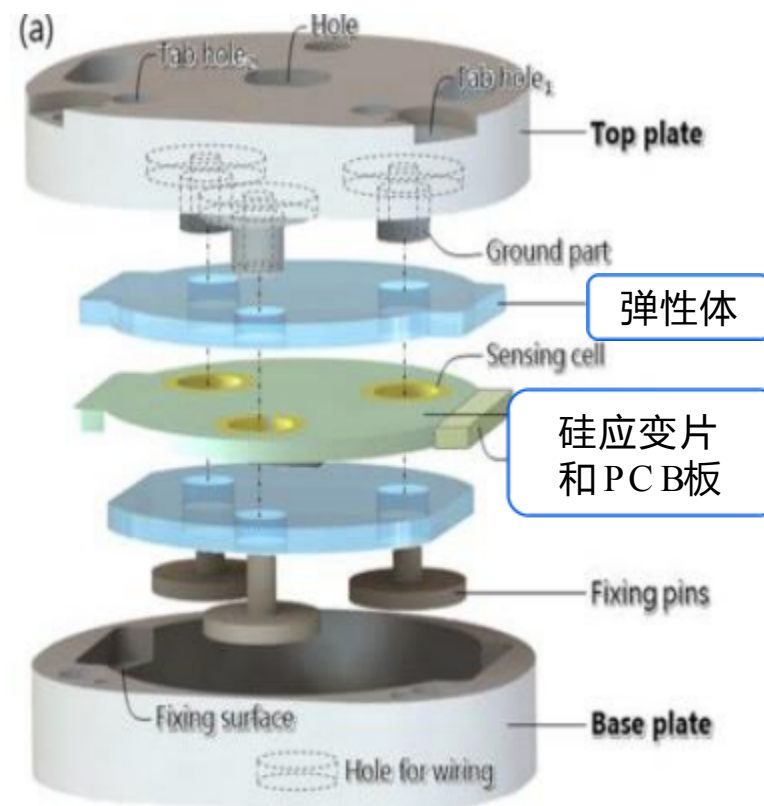
图表：六维力矩传感器应用于Optimus



资料来源：华尔街见闻，国海证券研究所

- 六维力矩传感器属于应变片式传感器，其主要组成部分包括弹性体(Elastomer)、硅应变片、PCB板等。弹性体材料包括铝合金、不锈钢等；PCB板的核心是覆铜板，是将电子玻纤布或其它增强材料浸以树脂，一面或双面覆以铜箔并经热压而制成的一种板状材料；这些部分价值较为便宜。
- 硅应变片是传感器的核心，也是其价值的主要组成部分。硅应变片是将单晶硅切片、研磨、腐蚀压焊引线，最后粘贴在聚酰亚胺的衬底上制成的，其关键是通过测量硅的体积变化带来电阻的变化，采集并计算以后得到力的大小。
- 硅应变片材料成本较低，但导致其价格高昂的原因是对应变精准测量采集的技术和加工工艺。截止2024年2月27日，硅应变片龙头KYOYA的KFWB型号应变片的价格为445.2元/片，而标准130 μ m的N型单晶硅片仅需2.55元/片。

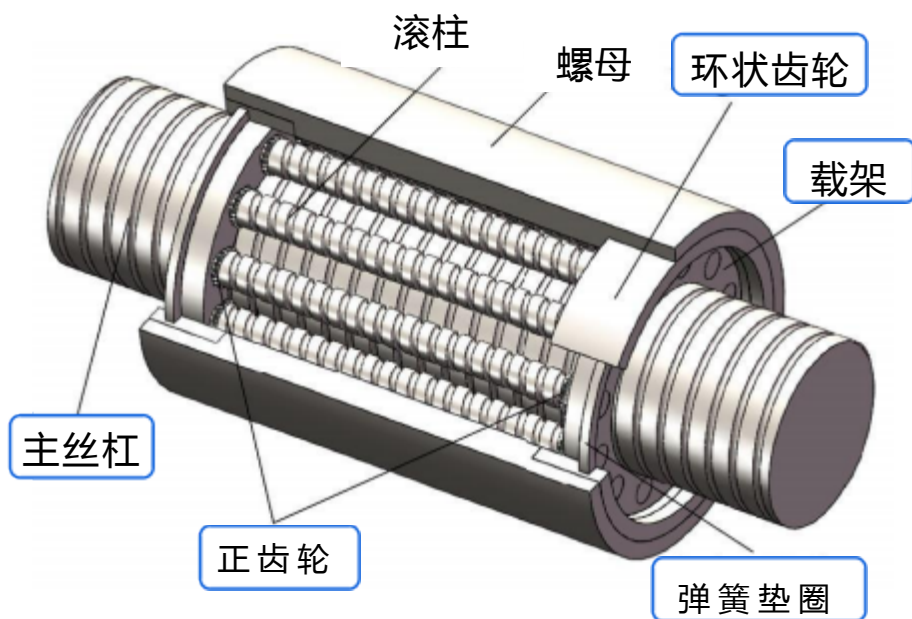
图表：一种六维力矩传感器的结构组成



资料来源：《Six-Axis Force/Torque Fingertip Sensor for an Anthropomorphic Robot Hand》，国海证券研究所

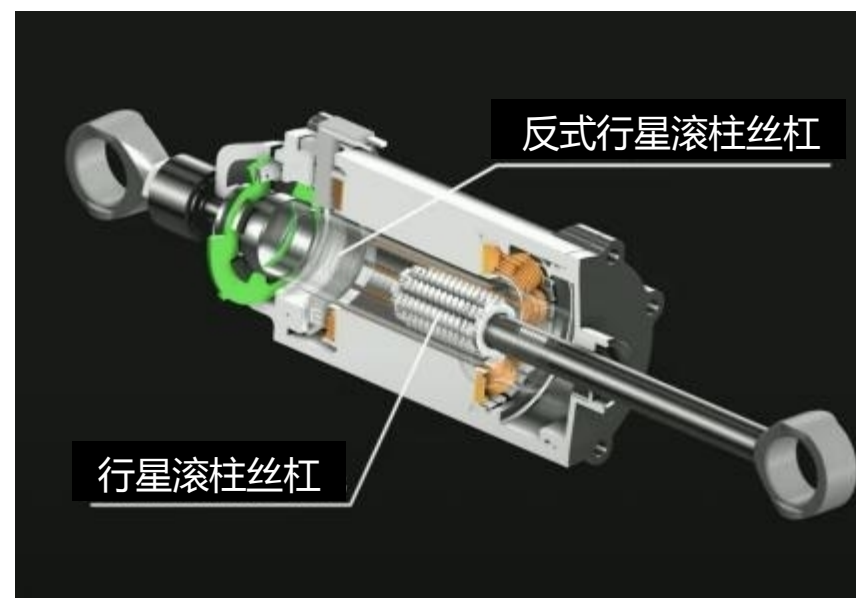
- 行星滚柱丝杠将电机的旋转运动转换为丝杠或螺母的直线运动。行星滚柱丝杠的核心部件包括主丝杠， 螺纹滚柱丝杠和螺母。 主丝杠的周围， 行星环绕般布置了6 - 12个螺纹滚柱丝杠， 使行星滚柱丝杠具有运行速度高、 承载能力强、 使用寿命长等特性， 作为液压系统的替代品更加适用于人形机器人。
- 行星滚柱丝杠具有高技术壁垒， 售价高昂。行星滚柱丝杠加工精度要求高， 制作工艺繁琐复杂， 可以为客户定制产品， 选用高材质的钢材能为行星滚柱丝杠的加工精度提供保证， 减小摩擦阻力， 因此行星滚柱丝杠售价较为昂贵。

图表：行星滚柱丝杠结构拆解



资料来源：《Multi-objective optimization of planetary roller screw mechanism based on improved boundary condition》， 国海证券研究所

图表： Optimus线性执行器中的行星滚柱丝杠



资料来源：砍柴网， 国海证券研究所

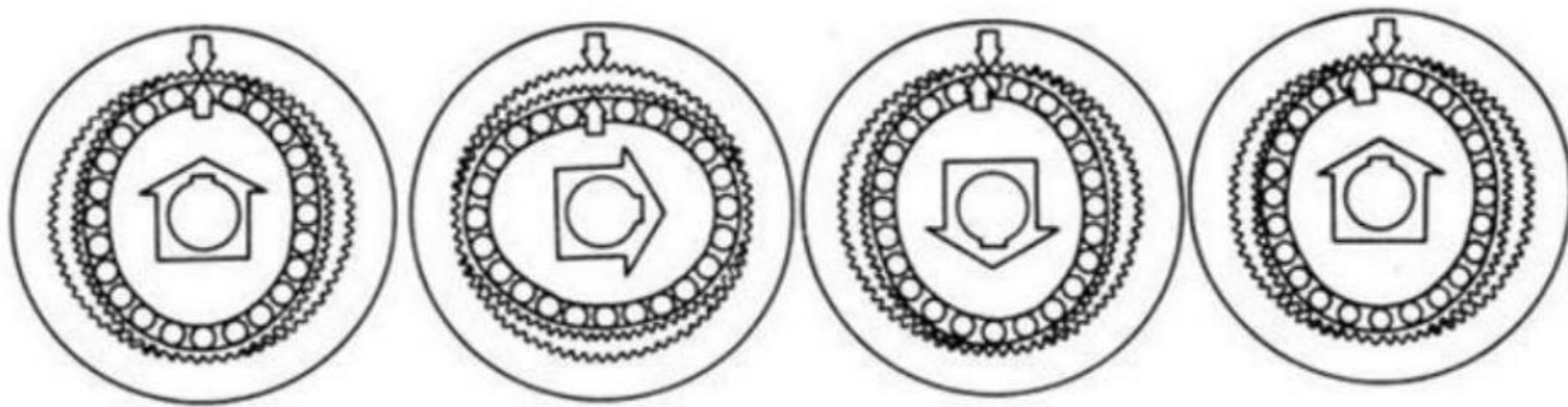
- 行星滚柱丝杠的材料中，主丝杠选用的材料为50CrMo4或42CrMo4合金钢，螺母和滚柱选用的材料为GCr15轴承钢。50CrMo4合金钢具有高强度、高硬度和良好的抗疲劳性能，适用于制造需要承受高载荷的零部件；GCr15轴承钢耐磨性、抗接触疲劳强度高，热加工性好，适用于制造高耐磨性、高弹性极限和高接触疲劳强度的机械零件。

图表：行星滚柱丝杠标准钢材选择

零部件	钢	在标准回火温度下的表面硬度	热处理	最大允许运行温度	性能
标准轴	50CrMo4 或 42CrMo4	58-60	感应淬火	110°C	良好的耐磨性 韧性
标准轴（按需求）	50CrMo4	58-60	感应淬火 高温回火	150°C	良好的耐磨性 中等温度下运行的韧性
特殊轴	GCr15	59-63	感应淬火	180°C	高耐磨性 适应于高的运行温度 更脆
螺母&滚柱	GCr15	58-62	淬透	180°C	良好的耐磨性 高温运行能力

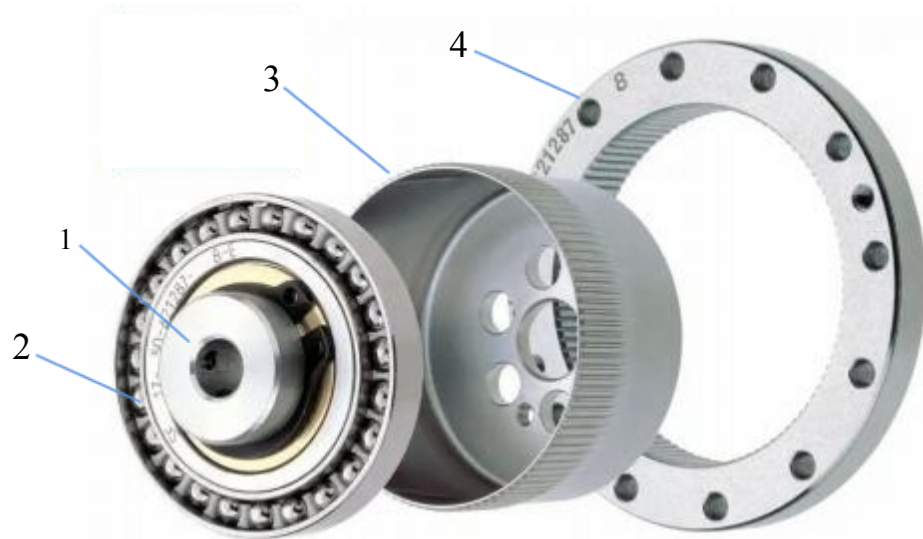
- **谐波减速器是旋转执行器的核心部件**。谐波减速器由波发生器、柔轮、刚轮组成，其工作原理是利用波发生器使柔轮产生可控弹性变形，并与刚轮相啮合来传递运动和动力的齿轮传动。
- 谐波减速器具有单极传动比大、体积小、质量小、运动精度高并能在密闭空间和介质辐射的工况下正常工作的优点，使其在机器人小臂、腕部、手部等部位具有较大优势，代表性厂商为日本哈默纳科、国内绿的谐波。

图表：谐波减速器工作原理示意图



- **谐波减速器的核心技术在于谐波齿形的设计、柔轮的设计和成型工艺、波发生器的加工工艺。这些设计工艺技术难度大，均属于企业的核心机密，而实现柔轮、刚轮、波发生器的优异性能还离不开对材料和材质的高要求，通过选择合适的材料能有效提高各零部件的抗疲劳性能，延长其使用寿命。**
- **谐波减速器主要由钢材制成。柔轮材料基本为40Cr合金钢，国外提纯技术较高。刚轮材料国内厂家一般使用工具钢或铸钢，而日本哈默纳科则采用球墨铸铁。波发生器由柔性轴承和凸轮组成，其材质采用工具钢或碳钢。**

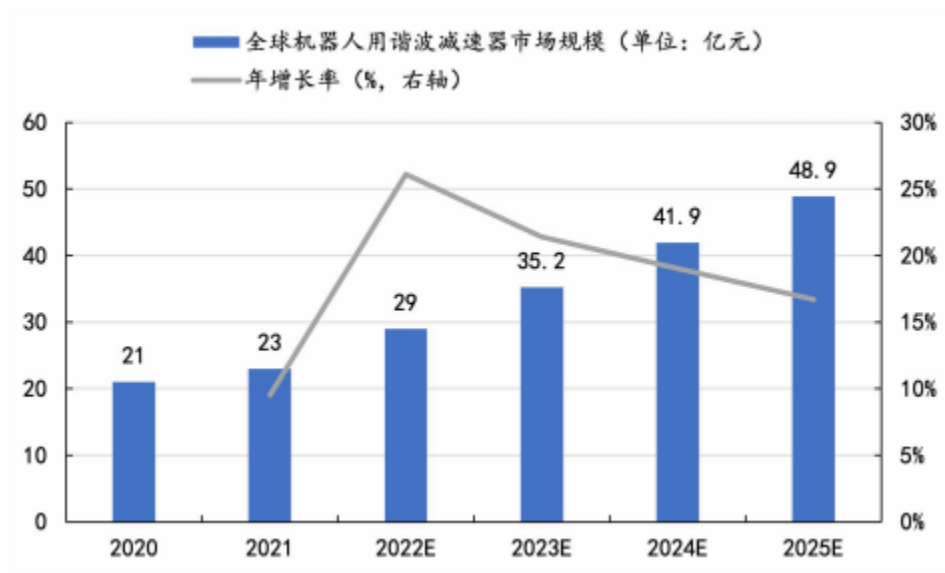
图表：谐波减速器主要结构示意图



- 1- 凸轮，材料：工具钢或碳钢
- 2- 柔性轴承，材料：工具钢或碳钢
- 3- 柔轮，材料：40Cr合金钢
- 4- 刚轮，材料：工具钢或铸钢

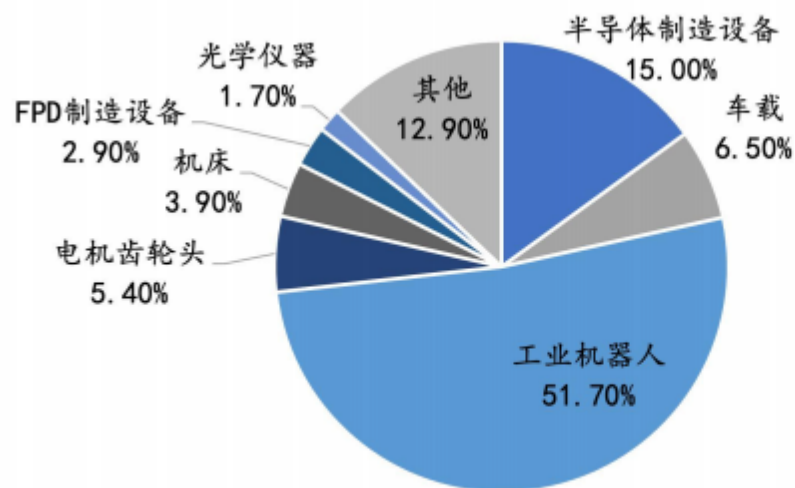
- 谐波减速器体积小，传动比高，精密度高，适用于负载较轻的精密减速器领域，是人形机器人减速器的优选方案。资料显示，Optimus旋转执行器均采用谐波减速器，应用于肩关节、腕部、腰部、髋部等部位。
- 2025年全球机器人用谐波减速器市场预计达到48.9亿元。近年来，全球机器人产业发展迅速，其产量持续增加；除工业机器人外，人形机器人也逐步进入谐波减速器的下游应用行业。据华经情报网数据，2020年全球机器人用谐波减速器市场规模21亿元，预计2025年市场扩容翻倍，达到48.9亿元。

图表：全球机器人用谐波减速器市场规模



资料来源：华经情报网，国海证券研究所

图表：2021年哈默纳科谐波减速器下游市场应用分布



资料来源：华经情报网，国海证券研究所

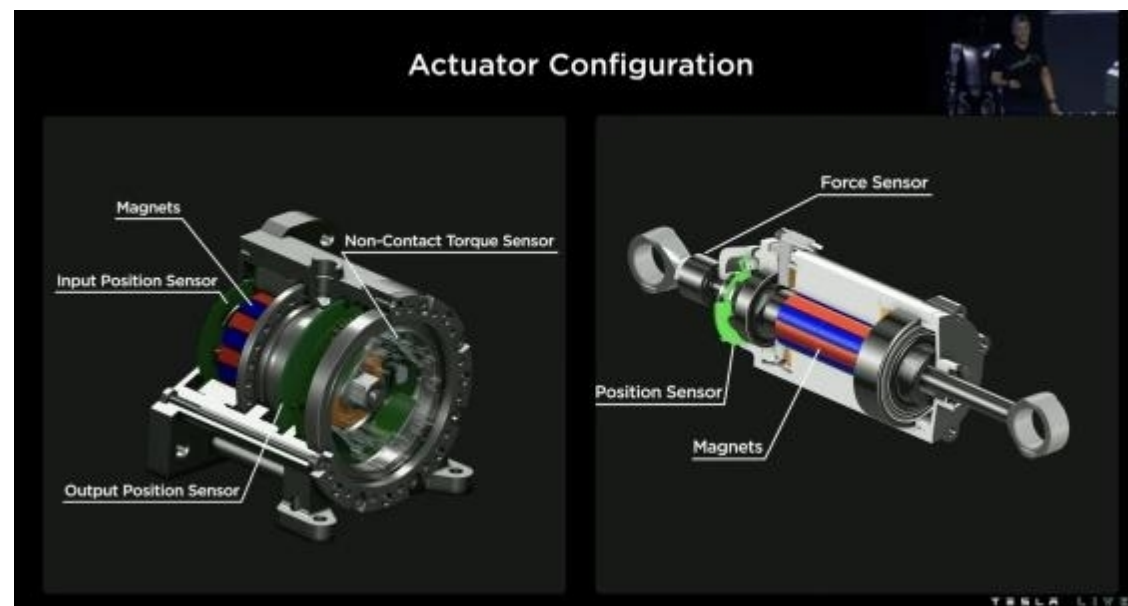
- 伺服电机可以控制速度，位置精度非常准确，可以将电压信号转化为转矩和转速以驱动控制对象。伺服电机接收到 1 个脉冲，就会旋转对应的角度，从而实现位移，能够很精确的控制电机的转动，实现精确的定位。
- 无框电机属于伺服电机的一种，是驱动人形机器人执行器工作的动力来源。无框电机消除了传统电机的铁芯，结构紧凑小巧，可实现更高的功率密度，具有低能耗和低摩擦的特点。

图表：无框电机应用于机器人关节



资料来源：科尔摩根官网，国海证券研究所

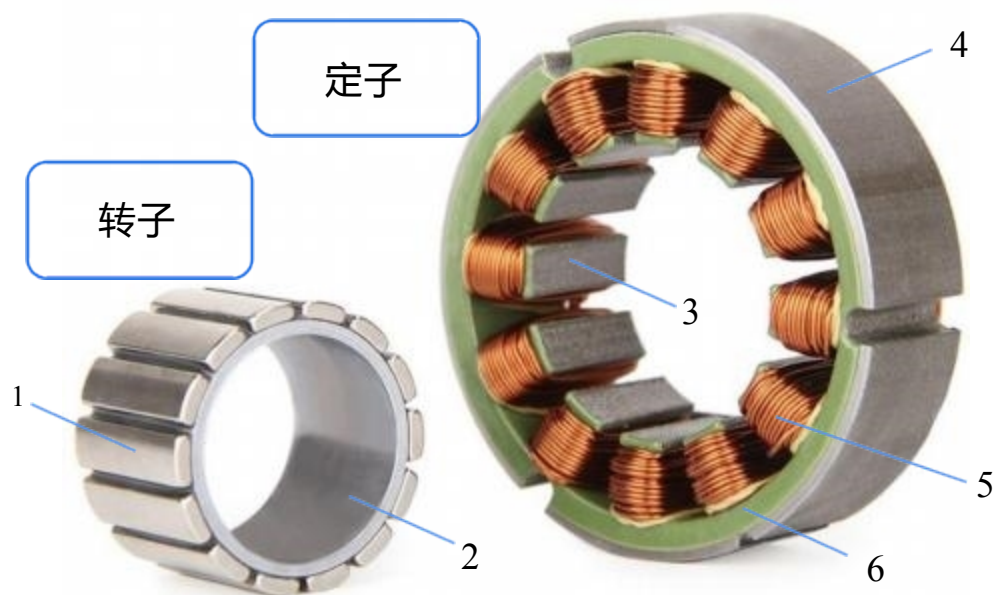
图表：Optimus执行器中电机结构拆解



资料来源：澎湃新闻新闻客户端，国海证券研究所

- 无框电机仅由一组定子和转子组成。转子由带永磁体的旋转钢圆环组件构成，直接安装在机器轴上；定子包含有高磁导率磁芯，外面包裹着能产生电磁力的铜绕组，紧凑地安装在机器外壳的主体内。据观研报告网，在上述材料中永磁材料价值量最高，占整体的35%。
- 根据尼得科为机器人关节设计的无框电机产品参数，其转子重量在0.027kg - 0.336kg之间，我们估计中等型号的转子中使用钕铁硼永磁材料的量为0.1kg。

图表：无框力矩电机结构拆解



- 1- 环形永磁铁，材料：钕铁硼/钕钴
- 2- 轮毂，材料：SS400系列冷轧钢
- 3- 高磁导率磁芯，材料：钴铁合金/镍铁合金/硅钢片
- 4- 外壳，材料：铝合金
- 5- 线圈，材料：铜、清漆涂层
- 6- 绝缘涂层，材料：聚氨酯/聚合树脂

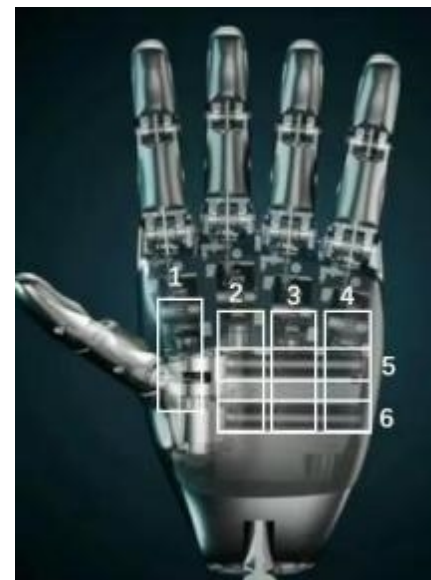
- 空心杯电机属于直流永磁的伺服电机，是一种微特电机（尺寸不超过40mm）。空心杯电动机体积小、高效、低噪音，具有突出的节能特性、灵敏方便的控制特性和稳定的运行特性，技术先进性十分明显。
- 无刷空心杯电机通过驱动器实现电子换向，相比于有刷空心杯电机，因其转速更高、寿命更长适合应用在人形机器人手部。Optimus每只灵巧手上均有6个空心杯电机驱动的空心杯关节，给予灵巧手11个自由度，从而实现更加灵活、精密的操作。

图表：空心杯电机的特性对比

有刷空心杯电机	无刷空心杯电机
工作寿命2000h	工作寿命长 (20000h)
转速低	高转速
有火花	电磁干扰几乎为零
无铁损	有铁损

资料来源：观研报告网，国海证券研究所

图表：Optimus灵巧手的六处空心杯电机



资料来源：环球Tech，国海证券研究所

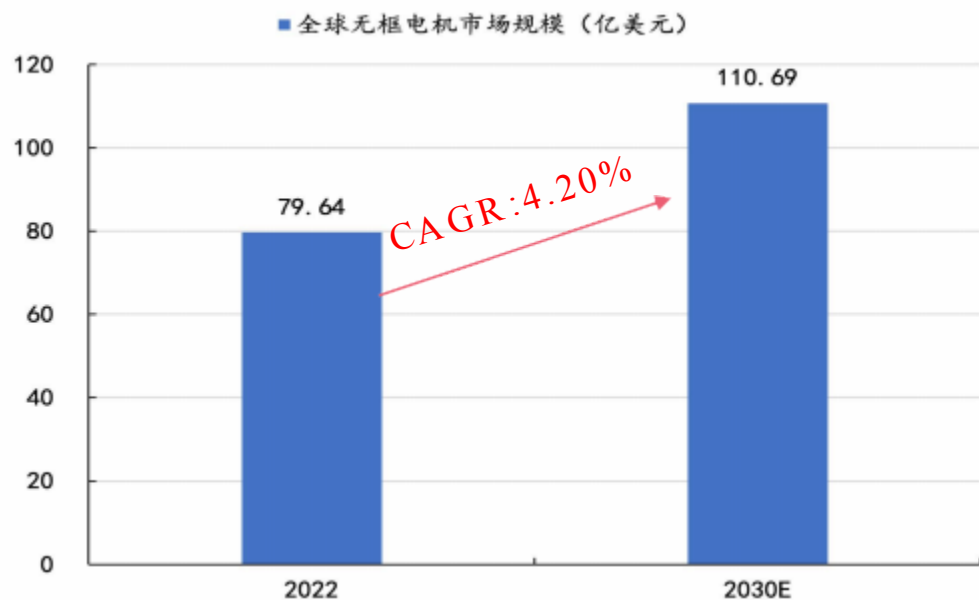
- 空心杯电机的核心技术壁垒在于定子/转子的自支撑绕组技术上。实现自支撑绕组技术的关键点，在于绕组形式和绕组设备。目前空心杯电机的绕组类型包括直线型、斜绕型、同心式绕型等，德国Faulhaber、瑞士Maxon等海外厂商在绕组工艺和技术沉淀方面具有优势，使得其空心杯电机产品性能优异。
- 组成无刷空心杯电机的主要结构包括线圈、转子、外壳、霍尔传感器等。线圈由漆包线绕制而成，而漆包线由铜和绝缘材料构成。转子由永磁材料和铁芯组成，其中永磁材料价值量最大。

图表：无刷空心杯电机结构拆解



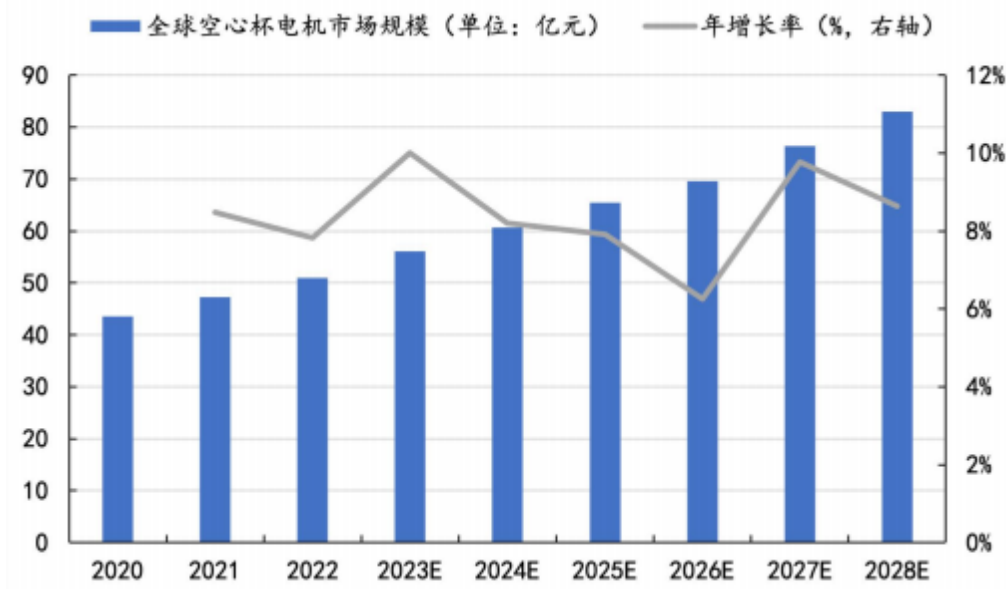
- 机器人关节要求电机体积小、扭矩大、响应快。无框力矩电机轻量化、功率高，低转速情况下能够输出更大扭矩，非常符合人形机器人的需求。空心杯电机体积小、性能优异，非常适用于灵巧手。
- 全球无框电机以及空心杯电机市场规模庞大。据 Global Growth Insights，2022年全球无框电机销售规模为79.64亿美元。根据观研报告网的统计，2022年空心杯电机市场规模为51亿元，预计2028年市场规模将达到83亿元，2022-2028年CAGR为8.5%。
- 无框电机在Optimus上应用数量达到28个，空心杯电机的应用数量为12个，未来市场空间巨大。

图表：全球无框电机销售规模



资料来源：Global Growth Insights，国海证券研究所

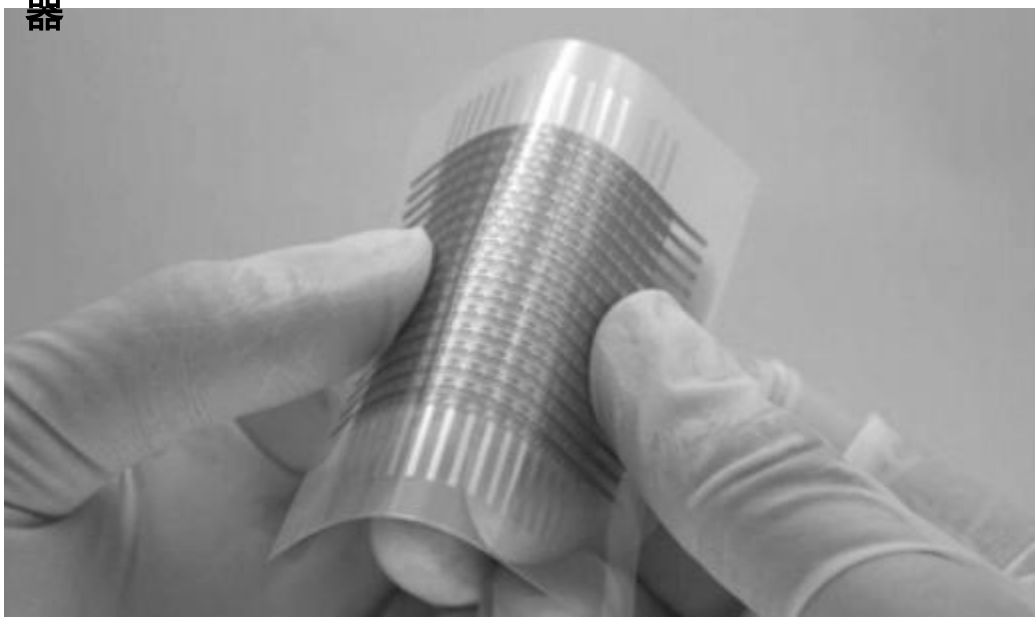
图表：2020-2028E全球空心杯电机市场规模



资料来源：观研报告网，国海证券研究所

- 触觉传感器是机器人直接感知环境作用的重要传感器，能够实现与环境接触力、温度、湿度、震动、材质、软硬等特性的检测。触觉传感器的拟真体现在是否具有柔性。
- 触觉传感器接触面积越大，获得的信息量越大。在触觉传感阵列中单位面积内传感单元数量越多，即触觉传感阵列分辨率越高，获得的物体信息越准确。

图表：一款典型的阵列式触觉传感器



资料来源：《A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications》

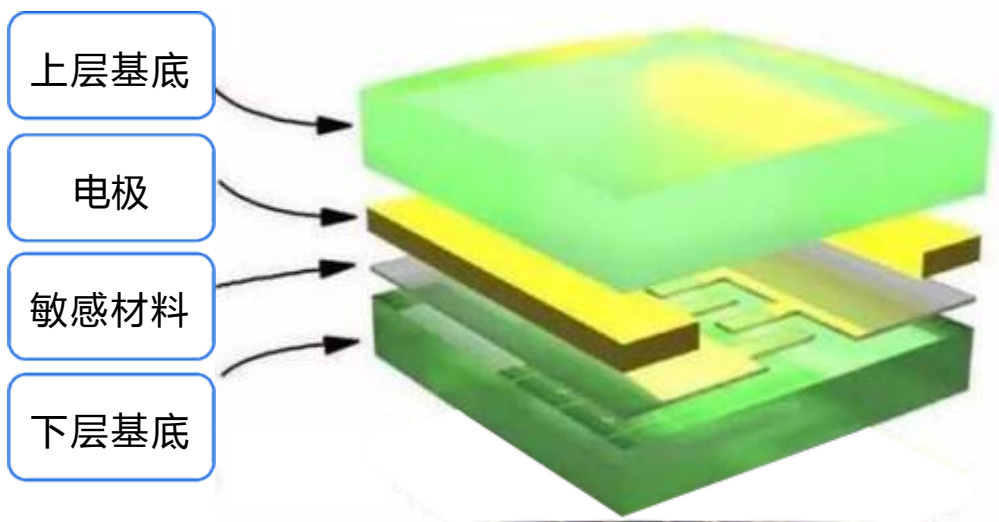
图表：Optimus的每只手指均配备柔性触觉传感



资料来源：盖世汽车资讯

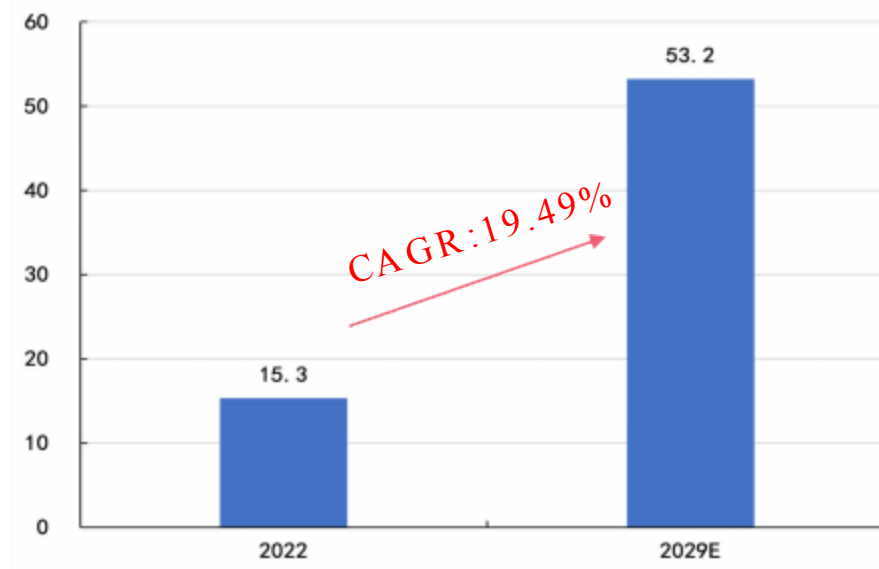
- **柔性触觉传感器材料选择包括敏感材料**(半导体、有机聚合物、碳纳米管、石墨烯等) 和柔性基底材料。柔性基底材料需要具有轻薄、透明、柔性和拉伸性好、绝缘耐腐蚀等性质，材质一般为硅橡胶、聚二甲基硅氧烷(PDMS)等。日本公司XELARobotics应用于机器人的产品uSkin采用的就是硅橡胶。
- **柔性触觉传感器的价值较高**。根据文献《A low-cost, human-like, high-resolution, tactile sensor based on optical fibers and an image sensor》，一只灵巧手的五只手指若全部配备以硅橡胶为基底的多阵列柔性触觉传感器，需要花费812美元。

图表：柔性触觉传感器结构拆解



资料来源：麦姆斯咨询，国海证券研究所

图表：全球柔性触觉传感器市场规模 (单位：亿美元)



资料来源：QY Research，国海证券研究所

- 肢体骨骼是支撑人形机器人进行各种行动的基本框架，其应用场景包括外壳材料、脊椎、大臂、小臂、大腿、小腿等结构件。目前人形机器人肢体骨骼的常用材料包括钢材、铝合金、镁合金、碳纤维等。
- 以 Optimus 为例，总重73kg中减去零部件重量30kg、电池组重量11.5kg，则结构件重量31.5kg。2022年发布的 Optimus 的肢体骨骼材料选用的是铝合金。假设肢体骨骼的2/3部分能由性能优异且更重量轻的PEEK替代，按照铝合金:PEEK密度比例2:1计算，则每台人形机器人PEEK的用量约为10.5kg。

图表：人形机器人腿部的肢体骨骼示意



图表：肢体骨骼主要为人形机器人外壳



- 结合O pt im u s上应用的六种不同执行器重量和各零部件生产企业的产品信息，我们假设谐波减速器重量平均为0.5kg、行星滚柱丝杠重量平均为0.5kg、轴承平均重量为0.1kg，得到人形机器人原材料单机用量测算。
- 经测算，人形机器人单机原材料总价为7316.8元，占总成本的比重为2.41%。

图表：人形机器人重要原材料单机用量测算

原材料	应用于何种零部件	单量/kg	数量	单机用量/kg	单价(元/kg)	单机价格/元
聚醚醚酮 PEEK	肢体骨骼-结构件	10.5	1	10.5	500	5250
钕铁硼永磁材料	无框电机-转子	0.1	28	3.4	500	1700
	空心杯电机-转子	0.05	12			
铝合金	肢体骨骼-结构件	10.5	1	10.5	19.5	204.75
50CrMo4合金钢	行星滚柱丝杠-主丝杠	0.3	14	7.7	15	115.5
	谐波减速器-刚轮	0.25	14			
GCr15轴承钢	轴承	0.1	28	7.7	5.1	39.27
	谐波减速器-波发生器	0.15	14			
	行星滚柱丝杠-螺母&滚柱	0.2	14			
40Cr合金钢	谐波减速器-柔轮	0.1	14	1.4	5.2	7.28

资料来源：有色宝，金力永磁公司公告，中研股份招股说明书，百度爱采购，我的钢铁，国海证券研究所；时间截止至2024年1月30日

- 对人性机器人产业的重要原材料进行市场空间敏感性分析，根据之前对O pt im u s原材料单机用量的测算，得到各原材料的未来市场增量空间。

图表：人形机器人产业重要原材料市场空间敏感性分析

原材料	单机用量(kg)	不同人形机器人销量假设下的原材料市场增量空间测算 (吨)			单价 (万元/吨)	不同人形机器人销量假设下的空间测算 (亿元)		
		100万台	500万台	1000万台		100万台	500万台	1000万台
聚醚醚酮 PEEK	10.5	10500	52500	105000	50	52.5	262.5	525
钕铁硼永磁材料	3.4	3400	17000	34000	50	17	85	170
铝合金	10.5	10500	52500	105000	1.95	2.05	10.24	20.48
50CrMo4合金钢	7.7	7700	38500	77000	1.5	1.155	5.775	11.550
GCr15轴承钢	7.7	7700	38500	77000	0.51	0.393	1.964	3.927
40Cr合金钢	1.4	1400	7000	14000	0.52	0.073	0.364	0.728

资料来源：有色宝，金力永磁公司公告，中研股份招股说明书，百度爱采购，我的钢铁，国海证券研究所；时间截止至2024年1月30日

- ◆人形机器人飞速迭代进化
- ◆Optimus结构及原材料拆解
- ◆高性能钕铁硼供不应求
- ◆PEEK是优选轻量化材料
- ◆特种钢材应用部位较多

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：
<https://d.book118.com/626010200045010105>