

结构轻量化经验或可复制至人形机器人的 轴承、丝杠和减速器

——人形机器人系列报告

核心观点

- **特斯拉 Optimus Gen2 重量减轻 10kg，人形机器人轻量化是必然趋势。**2023 年 12 月 12 日，特斯拉发布了第二代人形机器人擎天柱 Optimus Gen2，重量减轻 10kg。轻量化发展有利于提升人形机器人的机动性、速度以及动作准确性和续航能力，是产业发展的必然趋势。
- **机器人的轻量化主要是从材料和结构这两个方面来实现。**但基于材料的方法，需采用新型材料，如镁、铝合金和碳纤维复材等，其成本高且加工难度大，同时材料轻量化也需和结构设计相互耦合。与其相比，基于结构优化的方法只需改变结构形状，其成本低且容易实现，因而**结构轻量化就成了机器人轻量化设计的主要方法。**
- **结构优化法在汽车轴承、RV 减速器、丝杠以及机器人等领域都有成功应用案例，可在性能不变或提升的情况下大幅减轻质量。**结构优化方法分为尺寸优化，形状优化和拓扑优化 3 种。根据相关文献，经过拓扑优化后的汽车 K57G0 后传动轴质量可减轻 10%；经过拓扑优化后，RV 减速器性能保持的情况下其主要部件质量有所减轻；经结构优化后，近满载航天伺服反向式行星滚柱丝杠副 IPRSM 相较于具有同等应用载荷的国外 IPRSM，体积和重量减小约 30%，同时具有更高的传动效率和传动精度，综合性能优异。此外，**结构优化法在机器人机械上臂、六轴机器人、机器人大腿等领域亦有成功应用案例。**BaiYunfei 等人对机器人 SR-165 的上臂实施了拓扑优化，优化后的上臂比原始结构各项性能均有所提高，且质量轻 55.6%。吕鑫等从材料和结构两方面对六轴机器人进行轻量化设计，成功将质量减轻 26.5%。王权等使用变密度法优化了 WABIAN-2R 机器人大腿结构，在强度、刚度、固有频率不变的情况下移除了 48.5%的材料。葛海波等用衍生式设计方法完全改变机器人腿部支架形状，将机器人腿部支架减轻了超过 50%。
- **我们认为结构轻量化的成功经验或可复制到人形机器人领域，**主要是由于当前人形机器人产业处在早期阶段，对应的设计方案在不断地更新迭代，其中也包含对轴承、丝杠、减速器类产品的优化升级。以特斯拉人形机器人为例，其包含了 14 个旋转执行器和 14 个线性执行器，即 **56 个轴承类产品（14 个角接触球轴承+14 个交叉滚子轴承+14 个滚珠轴承+14 个四点接触轴承）、14 个行星滚柱丝杠和 14 个谐波减速器，假设旋转执行器和线性执行器相应的总质量减轻 10%、20%、30%、40%、50%，则人形机器人单机可减轻 3.8、7.7、11.5、15.3、19.1 千克。**

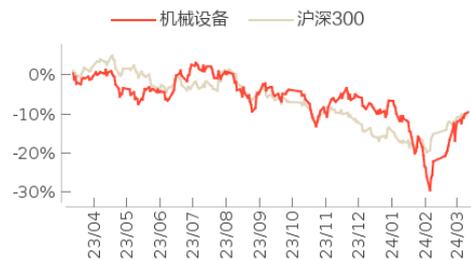
投资建议与投资标的

机器人轻量化后可大幅提高运动的机动性和工作效率，进而改善操作速度和动作准确度，同时减轻运动惯性，提高机器人的本质安全性。因此，轻量化后的人形机器人效率会更高，对控制或关节的要求可能会下降，所需的执行功能的难度也可能会降低，这有利于推动量产节点的提前和降低大规模量产的门槛。我们认为全球包括中国的优秀制造业企业积累了深厚的结构轻量化的成功经验，或将之复制到人形机器人领域，建议关注产业链相关公司：**1) 丝杠和轴承：**五洲新春(603667，买入)、北特科技(603009，未评级)、恒立液压(601100，未评级)、贝斯特(300580，未评级)、秦川机床(000837，未评级)、鼎智科技(873593，未评级)、禾川科技(688320，未评级)、新坐标(603040，未评级)、金沃股份(300984，未评级)等；**2) 减速器：**绿的谐波(688017，未评级)、夏厦精密(001306，未评级)、中大德(002896，未评级)、秦川机床(000837，未评级)、丰立智能(301368，未评级)、昊志机电(300503，未评级)、国茂股份(603915，未评级)、双环传动(002472，未评级)、豪能股份(603809，未评级)、精锻科技(300258，买入)、汉宇集团(300403，未评级)等。

风险提示：人形机器人进展不及预期；轻量化进展不及预期；国产替代进程不及预期；行业竞争加剧；假设条件变化影响测算结果。

行业评级 **看好（维持）**

国家/地区 中国
 行业 机械设备行业
 报告发布日期 2024 年 03 月 12 日



证券分析师

王天一 021-63325888*6126
 wangtianyi@orientsec.com.cn
 执业证书编号：S0860510120021

杨震 021-63325888*6090
 yangzhen@orientsec.com.cn
 执业证书编号：S0860520060002
 香港证监会牌照：BSW113

丁昊 dinghao@orientsec.com.cn
 执业证书编号：S0860522080002

联系人

刘嘉倩 liujiaqian@orientsec.com.cn

相关报告

机械装备助力新质生产力：——新质生产力系列研究 2024-03-09

上海争取人形机器人国家制造业创新中心落地，英伟达机器人最新成果值得期待：——机械行业周报 2024-02-24

灵巧手与传感器，拟人化与智能化：——人形机器人系列报告 2024-01-21

政策与产业趋势共振，人形机器人产业化有望提速：——机械行业周报 2024-01-06

精密减速器：国产替代有望提速，人形机器人旋转传动的重要纽带：——人形机器人系列报告 2023-12-20

复苏可见，海外可期，新兴可为：——机械行业 2024 年度投资策略 2023-11-22

人形机器人：国内蓝图开启，国产厂商有望突围 2023-11-03

丝杠：核心传动部件，人形机器人开启成长空间：——人形机器人系列报告 2023-10-25

目录

1. 轻量化：结构优化.....	4
1.1 拓扑优化在汽车轴承和 RV 减速器领域的应用.....	6
1.2 拓扑优化在机器人领域的应用.....	8
1.3 反向式行星滚柱丝杠的结构轻量化应用.....	9
1.4 人形机器人中线性和旋转执行器轻量化的测算分析.....	12
2. 轻量化：材料优化.....	14
2.1 镁合金、铝合金和碳纤维复材.....	14
2.2 机器人材料轻量化技术的发展方向.....	16
3. 投资建议.....	17
4. 风险提示.....	17

图表目录

图 1: 特斯拉 Optimus Gen2 重量减轻 10kg.....	4
图 2: 尺寸优化、形状优化和拓扑优化示意图	5
图 3: 汽车 K57G0 后传动轴几何模型图	6
图 4: RV 减速器中的行星架（左）和针齿壳（右）的拓扑优化	7
图 5: 拓扑优化后的行星架（左）和针齿壳（右）	8
图 6: 经拓扑优化等方法后，机器人 SR-165 的上臂质量减轻 55.6%.....	8
图 7: 经拓扑优化等方法后，机器人 IPR-1 减重 50.15%.....	9
图 8: 反向式行星滚柱丝杠副 IPRSM 结构示意图	10
图 9: 重大装备高集成度机电作动器 IEMA 结构示意图	10
图 10: 最终设计的航天伺服反向式行星滚柱丝杠副 IPRSM 示意图	11
图 11: 特斯拉人形机器人共 52 个自由度	12
图 12: 特斯拉人形机器人采用的旋转和线性执行器示意图	13
表 1: 工信部印发《人形机器人创新发展指导意见》指出要攻克的关键技术.....	4
表 2: 几类主要的拓扑优化方法比较.....	6
表 3: 汽车 K57G0 后传动轴拓扑优化前后的质量情况	7
表 4: 常规反向式行星滚柱丝杠副 IPRSM 初始设定的结构参数	10
表 5: 经近满载设计优化后，航天伺服反向式行星滚柱丝杠副 IPRSM 的结构参数	11
表 6: 短时高承载 IPRSM 和 RVI 27×5 IPRSM 性能指标对比	12
表 7: 特斯拉人形机器人包含 56 个轴承类产品、14 个丝杠类产品和 14 个减速器类产品	13
表 8: 不同情况下，第一代特斯拉人形机器人旋转和线性执行器减轻的质量/kg	13

1.轻量化：结构优化

2023年12月12日，特斯拉发布了第二代人形机器人擎天柱 Optimus Gen2。官方介绍文字中显示，新增的技术特点包括：Tesla 设计的全新执行器和传感器；2 自由度驱动的全新颈部；执行器集成电子元件和线束；步行速度提高 30%；脚力/扭矩感应，更类似人类；**重量减轻 10kg**；11 自由度驱动的全新手部。2022 年 10 月，特斯拉 CEO 马斯克启动 2022 年 AI 日活动，人形机器人擎天柱 Optimus 原型机正式亮相。在当时，Optimus 身高约为 5 尺 8 寸，重量约为 125 磅，行走速度为每小时 5 英里，最多可提 45 磅的物品，并且头部配有屏幕。

图 1：特斯拉 Optimus Gen2 重量减轻 10kg



数据来源：Tesla AI Day，东方证券研究所

骨架结构拓扑优化、高强度轻量化新材料是我国人形机器人亟需攻克机器人关键技术群之一。2023 年 11 月 2 日，工信部印发《人形机器人创新发展指导意见》，明确指出：人形机器人集成人工智能、高端制造、新材料等先进技术，有望成为继计算机、智能手机、新能源汽车后的颠覆性产品，将深刻变革人类生产生活方式，重塑全球产业发展格局。关键技术攻克：《指导意见》提出以大模型等人工智能技术突破为引领，在机器人已有成熟技术基础上，重点在人形机器人“大脑”和“小脑”、“肢体”关键技术、技术创新体系等领域取得突破。

- 一是开发基于人工智能大模型的人形机器人“大脑”，增强环境感知、行为控制、人机交互能力，开发控制人形机器人运动的“小脑”，搭建运动控制算法库，建立网络控制系统架构。
- 二是系统部署“机器肢”关键技术群，打造仿人机械臂、灵巧手和腿足，攻关“机器体”关键技术群，突破轻量化骨骼、高强度本体结构、高精度传感等技术。
- 三是构建完善人形机器人制造业技术创新体系，支持龙头企业牵头联合产学研用组成创新联合体，加快人形机器人与元宇宙、脑机接口等前沿技术融合，探索跨学科、跨领域的创新模式。

表 1：工信部印发《人形机器人创新发展指导意见》指出要攻克的关键技术

关键技术攻克	
机器人“大脑”关键技术群	围绕动态开放环境下人形机器人感知与控制，突破感知-决策-控制一体化的端到端通用大模型、大规模数据集管理、云边端一体计算架构、多模态感知与环境建模等技术，提高人形机器人的人-机-环境共融交互能力，支撑全场景落地应用。
机器人“小脑”关键技术群	面向人形机器人复杂地形通过、全身协同精细作业等任务需求，开展高保真系统建模与仿真、多体动力学建模与在线行为控制、典型仿生运动行为表征、全身协同运

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

	动自主学习等关键技术研究，提升人形机器人非结构化环境下全身协调鲁棒移动、灵巧操作及人机交互能力。
机器肢关键技术群	面向人形机器人高动态、高爆发和高精度等运动性能需求，研究人体力学特征及运动机理、人形机器人动力学模型及控制等基础理论，突破刚柔耦合仿生传动机构、高紧凑机器人四肢结构与灵巧手设计等关键技术，为人形机器人灵活运动夯实硬件基础。
机器体关键技术群	面向人形机器人本体高强度和高紧凑结构需求，研究人工智能驱动的骨架结构拓扑优化、高强度轻量化新材料、复杂身体结构增材制造、能源-结构-感知一体化设计以及恶劣环境防护等关键技术，打造具有高安全、高可靠、高环境适应性的人形机器人本体结构。

数据来源：工信部，东方证券研究所

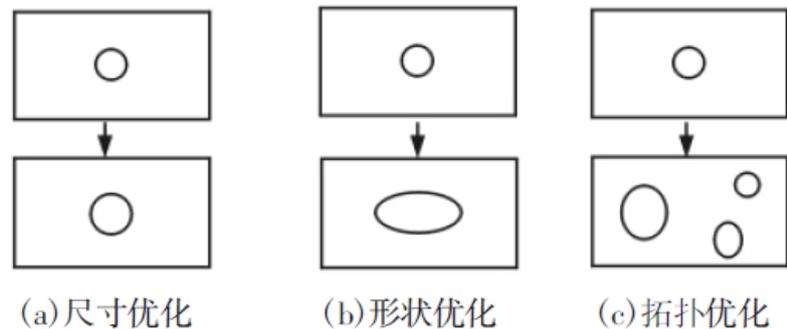
目前，机器人的轻量化主要是从材料和结构这两个方面来实现。基于材料的轻量化，即使用新型小密度材料来搭建机器人，如德国宇航局的 DLR LWR 系列机器人采用碳纤维材料来搭建主体。而基于结构轻量化的方法则是在原有结构材料的基础上，通过改变结构形状来实现轻量化，如 Albert 等对机器人胸部结构采用结构拓扑来实现轻量化。

两种方法均可达到轻量化的目标，但基于材料的方法，需采用新型材料，其成本高且加工难度大。与其相比基于结构优化的方法只需改变结构形状，其成本低且容易实现，因而基于结构的轻量化就成了机器人轻量化设计的主要方法。

结构优化方法分为尺寸优化，形状优化和拓扑优化这 3 种。

1. 尺寸优化就是通过改变结构尺寸大小，实现结构优化目的；
2. 形状优化就是以结构节点坐标为优化变量，达到优化结构形状和尺寸的目的；
3. 拓扑优化是通过优化结构的开孔数量和位置等拓扑信息达到优化结构的目的。

图 2：尺寸优化、形状优化和拓扑优化示意图



数据来源：魏春梅等《重载汽车传动轴的拓扑优化与轻量化设计》，东方证券研究所

在这三种方法中，拓扑优化不仅能够完成相应结构的形状和与尺寸优化，并且能够改变结构材料的分布状态，在节省材料的同时能够使结构形状与尺寸达到最优，其在建筑、机械、桥梁、航空等领域都有应用。由于拓扑优化方法具有自动收敛到最优材料分布的优点，有学者将该方法引入

重载机器人结构优化设计领域，表明其非常适合于机器人的结构优化设计。因此，运用拓扑优化方法，进行机器人的结构优化设计，是解决当前轻量化机器人的一个重要手段。

结构拓扑优化主要分为两类：一类是离散结构的拓扑优化，用来确定并设计离散化的分析对象中各个独立要素之间的连接形式、连接关系以及判断要素的存在与否；第二类是连续体结构的拓扑优化，大多数用来确定并设计均质连续体的空间构型，包括连接形式以及孔洞的形状与位置等等。对于连续体拓扑优化的描述方法，比较常用的几种方法有：变密度法，均匀化方法，水平集方法以及渐进结构优化法等。

表 2：几类主要的拓扑优化方法比较

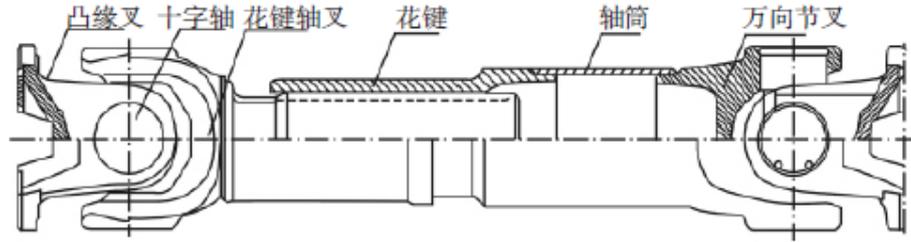
类型	发展	优点	缺点
均匀化法	最初的用于三维实体拓扑优化数学算法，总体上以单元的空间几何形态作为设计变量，现几乎被变密度法替代。	理论清晰简单，易于实现。	灵敏度计算复杂，并且优化后的结构含有多孔质材料，不易制造。
变密度法	由均匀化法发展而来，后来以 SIMP 以及 RAMP 作为典型数学模型，现成为被广大拓扑软件采用的计算方法。	由于该数学模型简单，可程序化程度高，适用于大多数三维实体结构，是目前最为常用的拓扑优化计算的模型。	灰度空间以及孔洞问题依赖过滤函数以及高次单元，收敛难度依赖人为惩罚因子的干预，拓扑边界不明显。
渐进结构法	较为新型的算法之一，以删除与保留单元作为特点，先慢慢融入其他算法的后续可操作处理中。	具有删除材料或者添加的双向性，可以在没有材料的设计空间内创建新的材料拓扑结构。	依赖于网格的密集度以及划分质量，拓扑边界不清晰，对复杂结构难以收敛。
水平集法	由处理图像分割问题发展而来的一种算法，将结构的拓扑形态转换为求高维函数的某个特殊水平面曲线的方法，正在发展中。	理论发展程度高，相较其他法，可以得到最清晰的拓扑结构边界信息。	计算规模大分质量，复杂结构难以收敛。

数据来源：姚屏等《结构拓扑优化方法及其机器人轻量化应用现状及发展》，东方证券研究所

1.1 拓扑优化在汽车轴承和 RV 减速器领域的应用

拓扑优化法在汽车等领域有所应用。根据魏春梅等的《重载汽车传动轴的拓扑优化与轻量化设计》，K57G0 传动轴是一款用于重型汽车的传动部件，主要由前传动轴和后传动轴两部分组成。经过研究发现，此款传动轴的后传动轴存在较大优化空间，因此，主要针对后传动轴进行轻量化设计。首先对后传动轴的三维模型进行简化，目的是提高有限元分析效率和可行性，简化原则是在符合实际应用的前提下去掉一些质量不大或结构复杂的小零件，例如滚针、螺纹、垫片等。

图 3：汽车 K57G0 后传动轴几何模型图



数据来源：魏春梅等《重载汽车传动轴的拓扑优化与轻量化设计》，东方证券研究所

后传动轴主要由万向节叉、凸缘叉、十字轴、花键、花键轴叉以及轴筒等六部分组成。经过研究后发现，此款传动轴的凸缘叉、花键轴叉及万向节叉偏重。因此，后传动轴的轻量化设计主要针对凸缘叉、花键轴叉及万向节叉进行。根据拓扑优化分析结果及前期大量实验数据可知：凸缘叉的两侧壁及中心应力较小，材料相对较多，存在较大的优化空间；花键轴叉最大应力集中在轴颈处，齿部应力较小，可适当减少齿数和中空化轴身来减轻重量；万向节叉最大应力集中在耳孔壁底部截面突变处，由于最大应力较小，可采取削减耳孔壁的材料及加大内孔中空化使其轻量化，可优化部位。

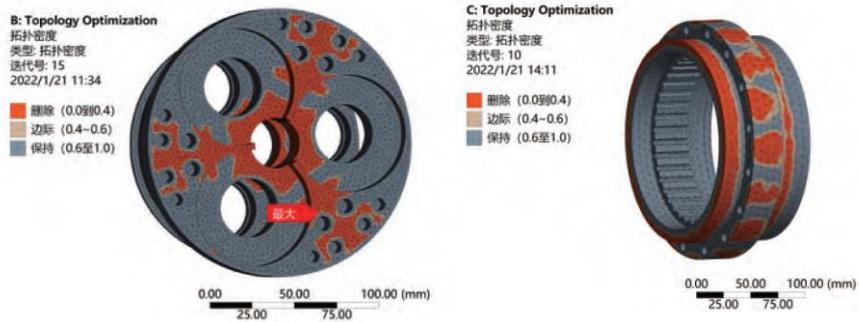
表 3：汽车 K57G0 后传动轴拓扑优化前后的质量情况

	优化前质量 kg	优化后质量 kg	质量减轻 kg	质量减轻比重%
凸缘叉	9.23	6.874	2.356	25.5%
花键轴叉	19.16	16.43	2.73	14.2%
万向节叉	10.304	9.512	0.792	7.7%
后传动轴总体	-	-	8.235	10%

数据来源：魏春梅等《重载汽车传动轴的拓扑优化与轻量化设计》东方证券研究所

根据王明楠等《基于拓扑优化的 RV 减速器轻量化优化设计》，行星架中心位置原始应力应变小的地方出现大量消融的区域，使得行星架的设计区域产生大量的掏空空间，大大降低材料的使用率。优化后的行星架保留部分为灰色部分，褐色部分为过渡区域，红色为去除部分。同理，对于针齿壳，褐色为过渡区域，灰色为保留区域，针齿壳的材料去除即红色部分的位置与针齿壳静力学分析应力云图位置应力较小的地方一致。

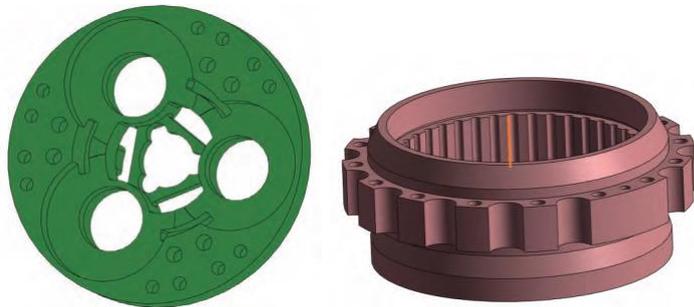
图 4：RV 减速器中的行星架（左）和针齿壳（右）的拓扑优化



数据来源：王明楠等《基于拓扑优化的RV减速器轻量化优化设计》，东方证券研究所

根据王明楠等《基于拓扑优化的RV减速器轻量化优化设计》，通过静力学分析得出优化后行星架与针齿壳最大应力值分别为 101.79 MPa、2.3913 MPa，相比于优化前应力有微小降低，使用拓扑优化在保证RV减速器性能基础上使主要部件质量得到了减轻。

图 5：拓扑优化后的行星架（左）和针齿壳（右）



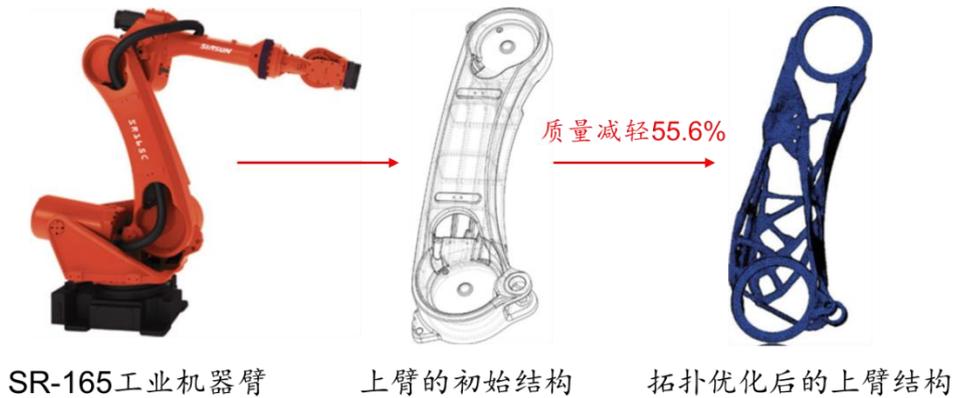
数据来源：王明楠等《基于拓扑优化的RV减速器轻量化优化设计》，东方证券研究所

1.2 拓扑优化在机器人领域的应用

除此之外，拓扑优化法也逐步应用于机器人领域。根据李锦忠等的《有限元和拓扑联合优化方法及其在机器人结构轻量化设计中的应用》，拓扑优化应用于机械体的结构分析都是先根据优化前零部件的受力约束等情况，将单个零部件脱离出整体对其施加约束和载荷再进行独立拓扑分析的过程，这种方法在机器人结构优化中也很常见。如 Albert Albers 等分别对人形机器人 ARMARIII 胸部和手腕等结构进行了多种载荷作用下的情况分析并对其独立施加相应载荷情况后采用结构拓扑来实现轻量化，使得整体重量大为减轻；BaiYunfei 等人在机器人 SR-165 上，先对机器人上臂进行了单独受力分析，然后在对上臂施加等效约束载荷后用 SIMP 法进行了上臂拓扑优化，优化后的上臂比原始结构各项性能均有所提高，且质量轻 55.6%。

图 6：经拓扑优化等方法后，机器人 SR-165 的上臂质量减轻 55.6%

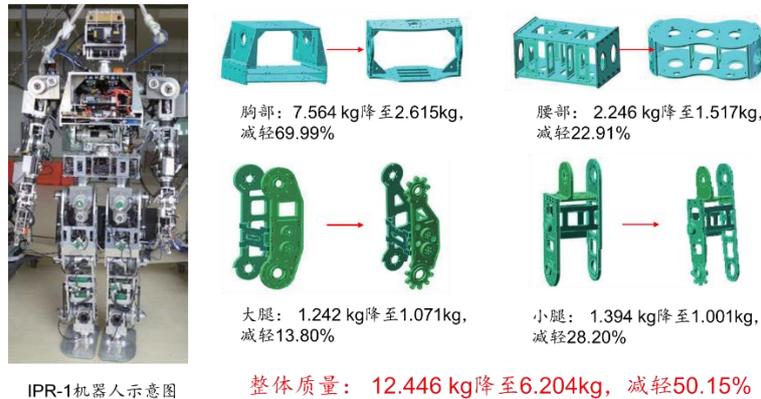
有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。



数据来源: BaiYunfei 等《Structural Topology Optimization for a Robot Upper Arm Based on SIMP Method》, 东方证券研究所

根据李锦忠等的《有限元和拓扑联合优化方法及其在机器人结构轻量化设计中的应用》, Dongsen Ye 采用有限元分析的方法找出每个部件材料最大应力远小于许用应力的位置, 再对其独立施加等效约束载荷, 采用结构进化拓扑的方法对其进行结构轻量化优化, 优化后的结构刚度和振动特性与之前相比均有所提高, 质量却减小了, 实现了机器人的轻量化。

图 7: 经拓扑优化等方法后, 机器人 IPR-1 减重 50.15%



数据来源: Dongsen Ye 等《The Lightweight Design of the Humanoid Robot Frameworks Based on Evolutionary Structural Optimization》, 东方证券研究所

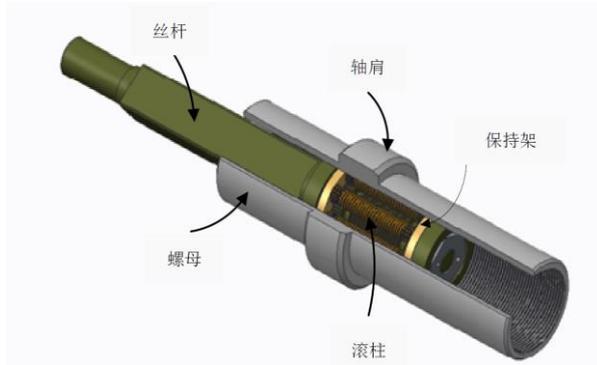
根据詹穗鑫《基于点阵结构的仿人机器人下肢轻量化研究》, 吕鑫等从材料和结构两方面对六轴机器人进行轻量化设计, 成功将质量减轻 26.5%。王权等使用变密度法优化了 WABIAN-2R 机器人的大腿结构, 在强度、刚度、固有频率不变的情况下移除了 48.5%的材料。段军涛等采用序列二次规划法对机器人腿部结构重要尺寸进行优化, 完成了仿人机器人腿部结构设计。葛海波等用衍生式设计方法完全改变机器人腿部支架形状, 将机器人腿部支架减轻了超过 50%。

1.3 反向式行星滚柱丝杠的结构轻量化应用

有关分析师的申明, 见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分, 或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

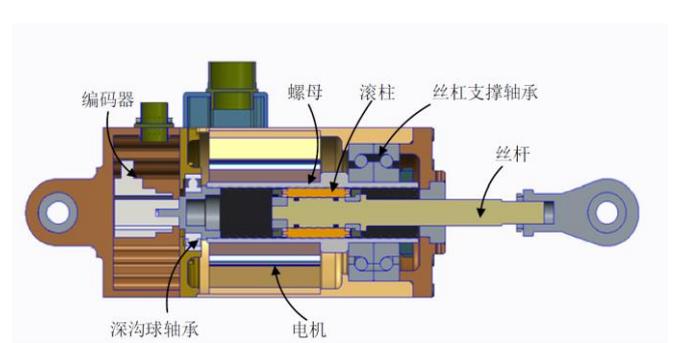
根据吴贵成《短时高承载反向式行星滚柱丝杠副关键技术研究》，新一代高性能航天重大武器装备的发展，促进了第三代新型反向式行星滚柱丝杠副（Inverted Planetary Roller Screw Mechanism, IPRSM）传动技术的发展，使其已逐步替代第二代滚珠丝杠副成为航天航空领域重大装备高集成度机电作动器（Integrative Electro-Mechanical Actuator, IEMA）的理想传动部件。但目前 IPRSM 仍按常规方法设计，存在体积重量大的问题，限制了其在对体积和重量敏感的航天小型武器装备上的应用。

图 8：反向式行星滚柱丝杠副 IPRSM 结构示意图



数据来源：吴贵成《短时高承载反向式行星滚柱丝杠副关键技术研究》，东方证券研究所

图 9：重大装备高集成度机电作动器 IEMA 结构示意图



数据来源：吴贵成《短时高承载反向式行星滚柱丝杠副关键技术研究》，东方证券研究所

因此，面向航天小型武器装备对伺服传动机构高承载轻量化的迫切需求，围绕典型航天伺服机构短时高应力使用工况，以新型高性能 IPRSM 为对象，针对常规设计的 IPRSM 应用在航天小型武器装备上存在的“冗余”问题，研究材料近屈服极限使用疲劳弹性失效行为与承载能力之间的关系，并以其为核心提出短时高应力 IPRSM 近满载轻量化设计准则，建立短时高承载 IPRSM 近满载轻量化设计制造及评估与验证方法，为实现航天伺服短时高应力传动机构的高承载轻量化设计提供理论基础和技术支撑。

材料与结构设计相结合，最大限度发挥材料的性能。首先作者吴贵成是从负载材料方面研究了典型航天伺服机构短时高应力工况下材料低周疲劳特性，建立了材料近限使用疲劳弹性失效寿命分散带预测模型，给出材料近屈服极限使用低周疲劳弹性失效应力循环次数与应力之间的关系。而后作者吴贵成提出基于材料近限使用的短时高应力 IPRSM 近满载设计方法，从结构设计制造方面，研究 IPRSM 啮合关系和螺纹牙载荷分布规律，建立短时高应力 IPRSM 近满载强度设计准则和参数精确设计准则，给出近满载设计流程；通过数值解算和干涉分析，完成设计算例，验证短时高应力 IPRSM 近满载设计方法的正确性和有效性。

作者吴贵成以材料近限使用许用应力作为 IPRSM 零件最大工作应力进行设计的方法定义为近满载设计，材料近限使用许用应力取值近屈服极限区间应力。近满载设计核心是为了实现材料的近限使用，提高机构的承载能力，而机构的承载能力又耦合零件结构参数精确设计及高精度制造等因素，因此，将近满载设计分为近满载强度设计和结构参数精确设计。

表 4：常规反向式行星滚柱丝杠副 IPRSM 初始设定的结构参数

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

	数量	螺距 P/mm	螺纹头数 mm	螺纹长度 mm	啮合点数	螺纹中径 d/mm	牙型半角 β /°
滚柱	8	1.5	1	39	25	10	45
丝杆	1	1.5	3	39	25	30	45
螺母	1	1.5	3	220	25	50	45

数据来源：吴贵成《短时高承载反向式行星滚柱丝杠副关键技术研究》，东方证券研究所

根据短时高应力 IPRSM 近满载设计方法得到的 IPRSM 滚柱、丝杆、螺母中径分别为 7.5mm、22.5mm、37.5mm，而原有按照常规设计得到的 IPRSM 滚柱、丝杆、螺母中径分别为 10mm、30mm、50mm。通过计算可知，根据短时高应力 IPRSM 近满载设计方法得到的 IPRSM 相较于根据常规机械设计方法得到的 IPRSM 中径减小 25%，体积减小约 43.8%。表明短时高应力 IPRSM 近满载设计方法能够有效减小航天工况下 IPRSM 体积。

表 5：经近满载设计优化后，航天伺服反向式行星滚柱丝杠副 IPRSM 的结构参数

	数量	螺距 P/mm	螺纹头数 mm	螺纹长度 mm	啮合点数	螺纹中径 d/mm	牙型半角 β /°
滚柱	8	1.5	1	35	25	7.5	45
丝杆	1	1.5	3	36	25	22.5	45
螺母	1	1.5	3	220	25	37.5	45

数据来源：吴贵成《短时高承载反向式行星滚柱丝杠副关键技术研究》，东方证券研究所

图 10：最终设计的航天伺服反向式行星滚柱丝杠副 IPRSM 示意图



数据来源：吴贵成《短时高承载反向式行星滚柱丝杠副关键技术研究》，东方证券研究所

最后，作者吴贵成将近满载 IPRSM 与 RVI 27×5 IPRSM 在尺寸、承载性能和传动性能方面进行对比。其中 RVI 27×5 IPRSM 为技术水平国际先进的 ROLLVIS 公司生产的新型产品，其最大静载荷与本文近满载设计的 IPRSM 水平相当。与具有同等许用载荷的 RVI 27×5 型号 IPRSM 相比，近满载 IPRSM 丝杆中径为 22.5mm，小于 RVI 27×5 丝杆中径 36mm；螺距为 1.5mm，小于 RVI 27×5 螺距 4mm；正传动效率 91%、逆传动效率 89%，大于 RVI 27×5 正传动效率 82%，逆传动效率 77%；传动精度均为 G5 级。上述结果表明，在航天伺服短时高应力工况下，近满载

IPRSM 相较于具有同等应用载荷的国外 IPRSM 具有体积和重量减小约 30%，同时，具有更高的传动效率和传动精度，综合性能优异。

表 6：短时高承载 IPRSM 和 RVI 27x5 IPRSM 性能指标对比

	短时高承载 IPRSM	RVI 27×5	性能比较
丝杆中径 mm	22.5	27	小 16.7%
滚柱中径 mm	7.5	9	小 16.7%
螺母中径 mm	37.5	54	小 16.7%
导程 mm	4.5	5	相当
螺纹头数	3	3	相当
许用载荷 kN	101	100	相当
正传动效率	0.91	0.82	高 9%
逆传动效率	0.89	0.77	高 12%
传动精度	G5	G5	相当

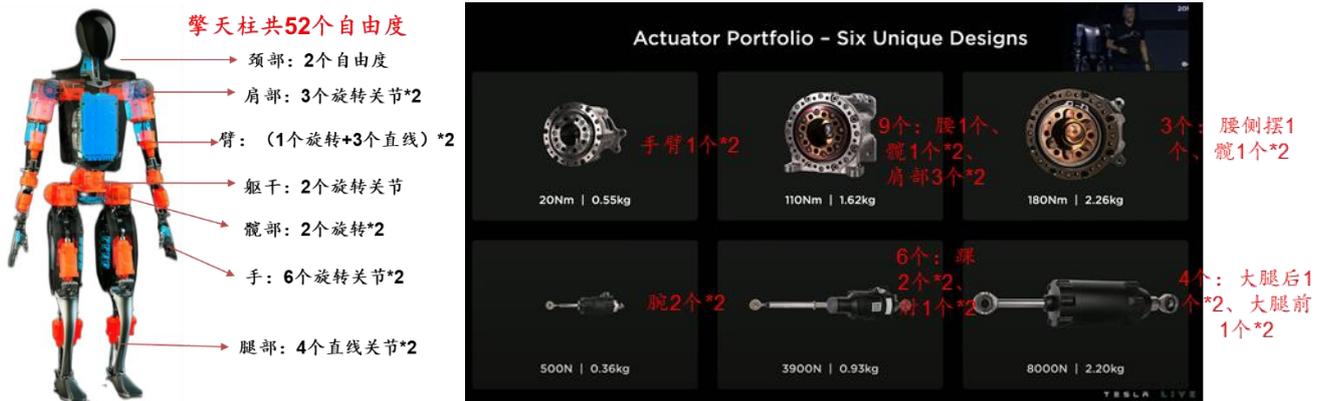
数据来源：吴贵成《短时高承载反向式行星滚柱丝杠副关键技术研究》，东方证券研究所

1.4 人形机器人中线性性和旋转执行器轻量化的测算分析

特斯拉人形机器人自由度：共 52 个，手以外有 28 个关节（躯干 2 个、肩臂 14 个、髌腿 12 个）、灵巧手 6 个主动关节（两只 22 个）、脖颈 2 个自由度。身体 28 个运动关节方案：分为旋转和线性 2 大类执行器，每类包括 3 种旋转执行器和 3 种线性执行器。

- 14 个旋转执行器：由电机+谐波减速器+力矩传感器+位置传感器+交叉滚子轴承+向心止推滚珠轴承构成。
- 14 个线性执行器：由电机+行星滚柱/梯形/滚珠丝杠+力矩传感器+位置传感器构成。

图 11：特斯拉人形机器人共 52 个自由度



数据来源：Tesla AI Day、东方证券研究所

旋转执行器主要分布于肩腕等需要大角度旋转的关节，线性执行器分布于膝肘等摆动角度不大的单自由度关节和腕踝两个双自由度但是体积紧凑的关节。擎天柱腿部的线性执行器主要分布负责支撑和承力的髌关节、膝关节及踝关节，具有前后摆动自由度，采用线性执行器驱动器关节的第一个优势是空间利用率高，第二个优势是线性执行器的螺杆传动机构通过合理设计可以具备自锁

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

能力；上肢的肘关节屈伸采用线性执行器的理由和腿部原理一致，低耗能高推力，让擎天柱拥有强壮的二头肌；前臂的两个线性执行器构成并联关节主要目的是降低腕关节的尺寸。

图 12：特斯拉人形机器人采用的旋转和线性执行器示意图



数据来源：Tesla AI Day、东方证券研究所

结合前文对于丝杠、轴承、减速器的轻量化案例分析，我们认为通过优化结构去除冗余质量是具备可能性的。当前处在人形机器人产业早期阶段，对应的设计方案在不断地更新迭代，其中也可能包含对丝杠、轴承、减速器等产品的结构和质量的优化升级。以特斯拉人形机器人为例，其包含了 14 个旋转执行器和 14 个线性执行器，即 56 个轴承类产品（14 个角接触球轴承+14 个交叉滚子轴承+14 个滚珠轴承+14 个四点接触轴承）、14 个行星滚柱丝杠和 14 个谐波减速器，假设旋转执行器和线性执行器相应的总质量减轻 10%、20%、30%、40%、50%，则人形机器人单机可减轻 3.8、7.7、11.5、15.3、19.1 千克。2023 年 12 月 12 日，特斯拉发布了第二代人形机器人擎天柱 Optimus Gen2，重量减轻 10kg。由此比较可知，结构轻量化也可能是未来人形机器人轻量化的重要方向之一。

表 7：特斯拉人形机器人包含 56 个轴承类产品、14 个丝杠类产品和 14 个减速器类产品

	所属执行器种类	产品	数量/个
轴承	旋转执行器	角接触球轴承	14
轴承	旋转执行器	交叉滚子轴承	14
轴承	线性执行器	滚珠轴承	14
轴承	线性执行器	四点接触轴承	14
轴承类合计			56
丝杠	线性执行器	行星滚柱丝杠	14
减速器	旋转执行器	谐波减速器	14

数据来源：Tesla AI Day、东方证券研究所

表 8：不同情况下，第一代特斯拉人形机器人旋转和线性执行器减轻的质量/kg

	总质量	质量减轻 10%	质量减轻 20%	质量减轻 30%	质量减轻 40%	质量减轻 50%
旋转执行器	22.46	2.25	4.49	6.74	8.98	11.23

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并阅读本证券研究报告最后一页的免责声明。

线性执行器	15.82	1.58	3.16	4.75	6.33	7.91
合计	38.28	3.8	7.7	11.5	15.3	19.1

数据来源：Tesla AI Day、东方证券研究所测算

2.轻量化：材料优化

机器人轻量化材料的选择需要满足机器人的服役条件。在机器人本体自重中所占比例最大的是机器人本体结构材料，这些结构材料需要满足以下要求：

- 强度高：**在工业生产中机器人结构材料必须保证一定的强度，否则将会增加安全事故的产生并影响机器人的使用寿命。
- 较大的弹性模量和弹性极限：**机器人需要在服役过程中承受外力，因此需要具有抵抗弹性变形的能力，同时要尽可能的避免服役过程中的塑性变形，这是机器人精确控制的基础。
- 较大的震动阻尼：**因为机器人部件启动，制动的过程中会由于自身惯性，造成局部受力，并产生局部的震动，为了精确定位，稳定传动，需要材料本体吸收这部分的震动阻尼。
- 轻量化：**机器人材料的轻量化可以减少使用能耗，降低运动惯性从而降低部件受力，同时减少传动部件的负担。在特殊服役环境下，如航天领域，轻量化的结构能够尽可能的为其他部件设计提供自重余量。

传统的工业机器人制造中，使用的最常见材料是各种合金钢等，这些材料有着较高的强度以及较低廉的成本，在传统的机械设备中所占比重极高。铸铁、合金钢常见于包装、焊接、搬运等功用的机器人，在对于卫生有着较高要求的食品包装、医药卫生等领域应用的机器人中，不锈钢也有着较为广泛的应用，如德国库卡机器人有限公司（KUKA）的 KR15SL 型机器人等。铁基材料的密度普遍较大，约为 7.845t/m³，碳钢的密度更高，而不锈钢的密度略低。因而大量使用不锈钢材料，势必会导致机器人本体质量增加。机器人本体材料的轻量化必须尽可能的用其他材料取代钢铁材料。

总体来看，当前机器人常用的轻量化材料包括镁合金、铝合金、碳纤维复合材料、工程塑料等，这些类型材料具有不同的属性特点，在不同的领域中有着不同的适用性。

2.1 镁合金、铝合金和碳纤维复材

镁合金

镁合金作为目前最轻的金属结构材料，其密度不到钢铁的 1/4，比强度远高于钢铁材料。镁合金作为轻质材料在航空航天等领域已经发挥了不可取代的作用，同样应用于机器人领域，在提升机器人机动性、降低能耗等方面有着显著优势。

镁合金已经应用在了许多先进的机器人上，如：

- 日本本田株式会社（Honda）通过采用镁合金材质制作机器人外壳的方法，极大降低了机器人的自重，并提高了机器人阿斯莫（ASIMO）的机动性，使得其步行速度提高了 50%；
- 瑞典阿西亚布朗勃法瑞公司（简称“ABB”）的 YuMi 机器人采用镁合金双臂，通过精确的抓取控制，真正意义上实现了人机协作。

虽然镁合金在机器人上得到了初步应用，但是镁合金自身也有着不可忽视的缺点。由于现有牌号镁合金的强度和韧性无法与钢铁材料相比，实现轻量化的同时也制约了机器人的能力，如镁合金手臂难以实现大抓取量，难以在工业，尤其是重工业、大型设备制造领域得到广泛的应用。

因此，在关键部件上，目前镁合金还不能完全取代钢铁、铝合金等材料。通过不断优化镁合金的

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并阅读本证券研究报告最后一页的免责声明。

生产工艺，同时调配镁合金中合金元素比例进行合金成分优化，提高镁合金的整体性能，对于机器人行业的应用和发展都有着重要的意义。同时，通过结构优化，实现镁合金在已有机器人系统中非受力部件的替代也是实现机器人轻量化的重要途径之一。

铝合金

铝合金也是机器人制造中常用的轻量化材料之一，铝合金比镁合金的质量略重，但比起钢铁材料仍然有着巨大的轻量化优势。铝合金的密度约为铁合金的 1/3，比强度也远高于铁合金，因此同样在低强度的服役环境下。

铝合金在机器人领域已经有了非常广泛的应用。如：

- 由德国 KUKA 开发的 LBRiiWA 人机协作机器人轻量化是通过采用铝制材料的结构设计实现的；
- 我国华南理工大学研制的一种具有梯度网状结构的铝合金压铸机械臂及其制造方法，在保证机械臂所需强度的前提下，减轻了机械臂本体的质量，提高了机械臂的机动性能，同时多孔结构的设计也避免了凝固过程中产生的铸造缺陷，提高了机器人手臂的成品率。通过不同牌号铝合金的复合，能够同时利用不同牌号铝合金性能上的优势，达到整体的材料最优化。
- 南京工程学院设计的人体感应机械臂、机械手套件，采用了铝合金与钛合金做了机械手套用于感知人体手部动作，在制造、医疗、救灾等领域有着广泛的应用前景。

除了在工业应用领域，铝合金由于其低廉的价格，在教育类（如 Arduino）及服务类机器人方面都有着广泛的应用。

铝合金在机器人应用上的缺陷与镁合金类似，**同样要在其轻量化和强度之间取舍。铝合金和镁合金的比强度低于钢材，这意味着达到一定强度所需要的铝/镁合金所需的体积要大于钢材。因此采用铝/镁合金需要对于机器人的结构和机械部件进行重新设计。**

碳纤维复材

碳纤维是一种含碳量在 95%以上的高强度、高模量的新型纤维材料。碳纤维材料的强度远高于钢铁，比强度甚至高达钢铁材料的 43 倍，其密度由于成分不同，只有钢铁材料的 1/6 ~ 1/4 之间。

由于碳纤维复材所具有的这些优异的性质，其在机器人工业领域方面是近几年的研究热点。如：

- 英国谢菲尔德大学先进制造研究中心的加工、复合材料和集成制造专家联合制造出可重构碳纤维复合材料机器人机床，这种模块化的碳纤维机器人机床可以由 2 个人轻松操作搬运和组装，极大提高了生产效率；
- 为了兼顾轻量化和安全性，2012 年美国仿生控股有限公司（EksoBionic）推出的康健型的下肢外骨骼系统 Ekso 的关键部位采用了大量的铝合金、钛合金和碳纤维的复合材料；
- 日本松下电器产业株式会社(Panasonic)在 2015 年 9 月推出的质量仅为 6kg 的可穿戴式机器人“AssistSuite”，其零部件主要采用了碳纤维复合材料，机器人用于辅助重物装卸作业。
- 北京邮电大学研制的一款新型机器人碳纤维臂杆，采用碳纤维降低了机器人手臂的自重，从而减少了震动、运动惯性、降低了能耗，同时实现了机器人手臂更加平稳的移动。
- 由无锡威盛新材料科技有限公司(简称“RSN”)提供的相关产品数据证明，使用碳纤维复合材料制作的机械臂，能够有着比起传统钢铁材料和铝合金更加均匀的载荷分布，整体质量比铝合金材质减轻了 30%，比钢铁材质轻了 70%，臂架重心因此而降低了 10%，振动减少了 40%，精准度由 0.03mm 提升到 0.01mm，安全稳定性和工作效率都得到了有效提升。

目前我国碳纤维在机器人领域方面的应用处于一个高速增长的阶段，随着碳纤维国产化，碳纤维的价格下降更加推动了碳纤维机器人的发展。近些年，碳纤维机器人方面专利申请的数量快速增长，反映出我国在碳纤维机器人领域飞速的进步。

然而，**碳纤维复合材料自身的物理和化学性质使得其难以在一些极端环境下服役**。如：虽然碳纤维材料的蠕变较少，但是其本身具有易燃的特性，这就使得其在高温环境如消防等领域的应用受到限制。**另外碳纤维复合材料虽然强度较高，但是其材料的各向异性以及容易撕裂的特性使得其在制作部件的过程中需要进行复杂的应力计算和设计。**

2.2 机器人材料轻量化技术的发展方向

材料自身性能提升

不同的轻量化材料有着不同的物理化学性质，在不同环境下服役的机器人也有着不同应用，如：

- 镁合金机器人能够广泛适用于医疗、服务、精密制造、人机交互等生活及轻工业领域，但是由于其强度限制，难以胜任铸造、焊接、大质量搬运等重工业环境下的服役。另外，镁合金的塑性影响到了其加工性能。由于机器人普遍结构复杂，镁合金较差的韧性提高了其作为机器人材料的成本。
- 铝合金同样轻质，由于其低廉的价格，使其在生活生产领域有着更广泛的应用。在模型、教育类机器人上，铝合金是最佳选择。但是铝合金同样具有塑性问题，同时铝合金热稳定性很差，在极端温度的服役条件下容易发生蠕变，不适用在铸造和消防等领域的应用。
- 碳纤维作为一种全新的高强度材料，其强度远高于钢铁，而且作为一种柔性材料，具有很强的加工性，容易成型。碳纤维与其他材料的复合能够使得其性能得到更加完善的发挥。碳纤维与高强度树脂的复合能够极大地增强树脂材料的强度。碳纤维复合材料虽然其轴向抗拉强度极大，但是纵向容易撕裂，因此在设计部件的时候需要进行复杂的应力计算，同时碳纤维增强树脂材料易燃，因此同样不适用于高温作业。

虽然上述轻量化材料在机器人领域有着极大的应用前景，但是这些材料自身的性能限制了其在机器人领域的应用。因此，材料自身性能的提升对于机器人材料轻量化有着极其重要的意义。

- 添加合金元素提升镁合金材料的塑性，能够降低其加工成本，通过施加镀层和涂层的方式对镁合金进行阻燃，也能够扩展其在各个领域上的应用。
- 铝合金材料也能够通过不断的成分优化，达到其强度、韧性、耐腐蚀性等性能的最佳组合，甚至获得接近钢铁材料的力学性能。
- 碳纤维材料可以通过寻找不同的复合体形成不同类型的复合材料，发挥其高强度的优势。

可以说，**目前材料仍然是制约机器人服役性能的重要因素，材料性能的不断提升，是机器人性能获得突破的关键。**

材料轻量化和结构设计相互耦合

机器人轻量化技术的关键是材料轻量化和设计轻量化，两者相辅相成，才能够共同发挥轻量化机器人的优势。进行结构优化，在低承载部位采用蜂窝或者中空结构减少材料的使用，或针对机器人的功能进行全新设计，去除冗余部件，均能够有效降低机器人的自重。如：

- 美国波士顿动力公司（Boston Dynamics）为美国军方研制的类人型机器人 Atlas，利用 3D 打印技术，实现了在机械腿部部件上铝钛合金的中空结构，极大减轻了自重。

不失强度的结构优化设计不仅能够节省材料，降低自重，更能够利用材料的尺寸效应（即材料缺

陷的总体数量按照其尺寸的减小而降低)，降低材料缺陷数量，将轻量化材料的强度优势尽可能发挥。

多种轻量化材料一体化应用

与新型轻量化材料开发同步，多种材料的复合，多材料的一体化应用也是机器人轻量化技术发展的大趋势。由于机器人结构复杂，所采用的部件有许多，不同的位置所需的材料也有着不同的要求。

- **机器人关节部位**普遍在高载荷、高磨损、大应力的环境下服役。这些部位的材料多采用力学性能较好的钢铁材料，如能够开发出具有相似性能的轻量化材料满足该环境下的服役性能，就能够有效减少钢铁材料的应用，从而有效降低机器人的自重。
- 另外，**机器人的非承载部件**，如一些人形机器人的颈部，就可以采用强度低一些的轻量化材料。因此在机器人制造之前进行精细的计算，根据各个部件的不同力学性能需求，尽可能在满足服役环境的条件下进行轻量化的选材。

3.投资建议

机器人轻量化后可大幅提高运动的机动性和工作效率，进而改善操作速度和动作准确度，同时减轻运动惯性，提高机器人的本质安全性。因此，轻量化后的人形机器人效率会更高，对控制或关节的要求可能会下降，所需的执行功能的难度也可能会降低，这有利于推动量产节点的提前和降低大规模量产的门槛。我们认为全球包括中国的优秀制造业企业积累了深厚的结构轻量化的成功经验，或将之复制到人形机器人领域，建议关注产业链相关公司：

1) **丝杠和轴承**：五洲新春(603667, 买入)、北特科技(603009, 未评级)、恒立液压(601100, 未评级)、贝斯特(300580, 未评级)、秦川机床(000837, 未评级)、鼎智科技(873593, 未评级)、禾川科技(688320, 未评级)、新坐标(603040, 未评级)、金沃股份(300984, 未评级)等；

2) **减速器**：绿的谐波(688017, 未评级)、夏厦精密(001306, 未评级)、中大力德(002896, 未评级)、秦川机床(000837, 未评级)、丰立智能(301368, 未评级)、昊志机电(300503, 未评级)、国茂股份(603915, 未评级)、双环传动(002472, 未评级)、豪能股份(603809, 未评级)、精锻科技(300258, 买入)、汉宇集团(300403, 未评级)等。

4.风险提示

人形机器人进展不及预期：人形机器人目前还处于初期阶段，技术路线等尚未完全确定，发展进程可能不及市场预期；

轻量化进展不及预期：人形机器人是软硬件结合的产品，在不断迭代升级中，轻量化的优化进展可能不及市场预期；

国产替代进程不及预期：目前国内相关厂商的技术与国外头部厂商相比仍有较大差距，若技术突破进展不及预期，将影响到国产替代进程；

行业竞争加剧：伴随人形机器人放量以及行业降本趋势下，新参与者可能会增加，产品价格可能会有所下降，行业竞争可能会有所加剧。

假设条件变化影响测算结果：文中测算基于设定的前提假设基础之上，若相关假设的数量、减轻

比例、重量等发生改变，存在假设条件发生变化导致结果产生偏差的风险。

分析师申明

每位负责撰写本研究报告全部或部分内容的研究分析师在此作以下声明：

分析师在本报告中对所提及的证券或发行人发表的任何建议和观点均准确地反映了其个人对该证券或发行人的看法和判断；分析师薪酬的任何组成部分无论是在过去、现在及将来，均与其在本研究报告中所表述的具体建议或观点无任何直接或间接的关系。

投资评级和相关定义

报告发布日后的 12 个月内行业或公司的涨跌幅相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅为基准（A 股市场基准为沪深 300 指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普 500 指数）；

公司投资评级的量化标准

- 买入：相对强于市场基准指数收益率 15%以上；
- 增持：相对强于市场基准指数收益率 5% ~ 15%；
- 中性：相对于市场基准指数收益率在-5% ~ +5%之间波动；
- 减持：相对弱于市场基准指数收益率在-5%以下。

未评级 —— 由于在报告发出之时该股票不在本公司研究覆盖范围内，分析师基于当时对该股票的研究状况，未给予投资评级相关信息。

暂停评级 —— 根据监管制度及本公司相关规定，研究报告发布之时该投资对象可能与本公司存在潜在的利益冲突情形；亦或是研究报告发布当时该股票的价值和价格分析存在重大不确定性，缺乏足够的研究依据支持分析师给出明确投资评级；分析师在上述情况下暂停对该股票给予投资评级等信息，投资者需要注意在此报告发布之前曾给予该股票的投资评级、盈利预测及目标价格等信息不再有效。

行业投资评级的量化标准：

- 看好：相对强于市场基准指数收益率 5%以上；
- 中性：相对于市场基准指数收益率在-5% ~ +5%之间波动；
- 看淡：相对于市场基准指数收益率在-5%以下。

未评级：由于在报告发出之时该行业不在本公司研究覆盖范围内，分析师基于当时对该行业的研究状况，未给予投资评级等相关信息。

暂停评级：由于研究报告发布当时该行业的投资价值分析存在重大不确定性，缺乏足够的研究依据支持分析师给出明确行业投资评级；分析师在上述情况下暂停对该行业给予投资评级信息，投资者需要注意在此报告发布之前曾给予该行业的投资评级信息不再有效。

免责声明

本证券研究报告（以下简称“本报告”）由东方证券股份有限公司（以下简称“本公司”）制作及发布。

本报告仅供本公司的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。本报告的全体接收人应当采取必要措施防止本报告被转发给他人。

本报告是基于本公司认为可靠的且目前已公开的信息撰写，本公司力求但不保证该信息的准确性和完整性，客户也不应该认为该信息是准确和完整的。同时，本公司不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的证券研究报告。本公司会适时更新我们的研究，但可能会因某些规定而无法做到。除了一些定期出版的证券研究报告之外，绝大多数证券研究报告是在分析师认为适当的时候不定期地发布。

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，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需求。客户应考虑本报告中的任何意见或建议是否符合其特定状况，若有必要应寻求专家意见。本报告所载的资料、工具、意见及推测只提供给客户作参考之用，并非作为或被视为出售或购买证券或其他投资标的的邀请或向人作出邀请。

本报告中提及的投资价格和价值以及这些投资带来的收入可能会波动。过去的表现并不代表未来的表现，未来的回报也无法保证，投资者可能会损失本金。外汇汇率波动有可能对某些投资的价值或价格或来自这一投资的收入产生不良影响。那些涉及期货、期权及其它衍生工具的交易，因其包括重大的市场风险，因此并不适合所有投资者。

在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任，投资者自主作出投资决策并自行承担投资风险，任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

本报告主要以电子版形式分发，间或也会辅以印刷品形式分发，所有报告版权均归本公司所有。未经本公司事先书面协议授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容。不得将报告内容作为诉讼、仲裁、传媒所引用之证明或依据，不得用于营利或用于未经允许的其它用途。

经本公司事先书面协议授权刊载或转发的，被授权机构承担相关刊载或者转发责任。不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

提示客户及公众投资者慎重使用未经授权刊载或者转发的本公司证券研究报告，慎重使用公众媒体刊载的证券研究报告。

东方证券研究所

地址：上海市中山南路 318 号东方国际金融广场 26 楼

电话：021-63325888

传真：021-63326786

网址：www.dfzq.com.cn

东方证券股份有限公司经相关主管机关核准具备证券投资咨询业务资格，据此开展发布证券研究报告业务。

东方证券股份有限公司及其关联机构在法律许可的范围内正在或将要与本研究报告所分析的企业发展业务关系。因此，投资者应当考虑到本公司可能存在对报告的客观性产生影响的利益冲突，不应视本证券研究报告为作出投资决策的唯一因素。