

## 机器人行业深度报告

# 特斯拉 Optimus 亮点及未来进步点并存，建议关注核心零部件环节

增持（维持）

2022年10月09日

证券分析师 周尔双

执业证书：S0600515110002  
021-60199784

zhouersh@dwzq.com.cn

证券分析师 朱贝贝

执业证书：S0600520090001  
zhubb@dwzq.com.cn

### ■ 特斯拉 Optimus 首次亮相，预计 3-5 年内实现量产

2022年9月30日，特斯拉举行第二届“人工智能日”，并发布最新版本的 Optimus 人形机器人，全身包含 28 个执行器、双手、大脑和电池组等部件，驱动方式采用减速器+电机模式，可实现直立行走、搬运、洒水等复杂动作。

相较于原型机，Optimus 在体重、行走速度和载重等方面存在优化空间，但也在自由度和执行器数量减少方面取得进步。尽管目前特斯拉与波士顿动力等老牌人形机器人厂商相比，技术还稍显落后，但考虑综合实力和速度，我们仍十分看好 Optimus 未来在工厂、物流和智慧康养等领域的应用。

### ■ Optimus 亮点及未来进步点并存，看好人形机器人长期成长性

(1) **Optimus 亮点：**电动车和人形机器人在底层技术方面有共通之处。特斯拉作为汽车龙头，将诸多汽车技术完美融合到人形机器人上，例如自动驾驶技术转化为视觉识别+自主导航技术，车辆安全模拟技术转化为硬件安保技术。

(2) **Optimus 未来进步点：**  
①**降低成本：**新版 Optimus 仍使用减速器+电机的驱动模式，尽管执行器数量有所减少（较概念机减少 12 个），但硬件成本依旧较为昂贵。根据我们的测算，在乐观/中性/悲观情况下，人形机器人执行器的硬件成本就达到 3.6/6.9/10.1 万元；  
②**运控能力有待提升：**据会场技术人员披露，Optimus 平衡性问题仍需解决，可能需要 18-36 个月，主要系机器人在实际情况下不可避免会受到外力干扰。面对特殊情况机器人需要在数据库中调用已有的指令。目前特斯拉已建立机器人数据库，还需要时间来扩充数据样本。

③**应用场景需拓展：**此次 Optimus 推出的同时，有明确给出的应用场景为工厂内的基础性工作，然而就目前来看人形机器人在工业领域“性价比”不足，期待后续特斯拉在落地应用方面的进一步拓展。

综合而言，尽管 Optimus 距离真正实现产业化仍有诸多困难需要克服，我们仍十分看好，若其能在未来明确市场需求，并且在成本控制和技术水平之间形成有效平衡，就能够实现规模化量产。根据全球市场研究机构 Marketsandmarkets 的预测，全球人形机器人市场规模（仅考虑单机）将从 2022 年 15 亿美元提升至 2027 年的 173 亿美元，CAGR=63.5%，千亿蓝海市场未来可期。

### ■ 产业链视角：核心零部件重要性凸显

机器人产业链主要包括上游核心软硬件（硬件包括伺服电机、减速器、控制器、传感器等；软件包括机器视觉、人机交互、机器学习、系统控制等）；中游本体制造商和下游应用（包括迎宾接待、高校科研等）。其中核心零部件重要性十分突出，一方面高性能的零部件是实现机器人感知与运动的基础；另一方面核心零部件成本占比较高。以传统工业机器人为例，核心零部件占据了工业机器人整机 70% 以上的成本。

①**减速器：**主要包括谐波减速器和 RV 减速器，目前仍主要被日本企业所垄断，近年来在绿的谐波和双环传动等国产龙头的带领下国产化率逐步提升。考虑到人形机器人将为减速器市场需求带来较大增量，根据测算 2025 年全球谐波减速器市场空间有望达 147.5 亿元，2022-2025 年 CAGR=59.5%。

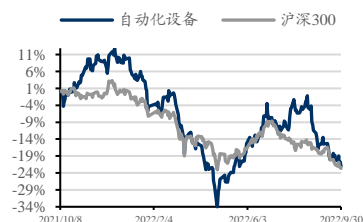
②**控制器：**主要控制机器人在工作空间中的运动位置、姿态和轨迹，近年来机器人控制器市场需求稳步增长。竞争格局方面由于机器人控制器多为本体厂商自制，竞争格局与本体类似，国外企业占据主导地位，国内外差距主要体现在软件算法，近年汇川、埃斯顿等国产机器人龙头正逐步追赶。

③**伺服系统：**主要包括驱动器和伺服电机。相较于通用伺服、机器人用伺服对响应速度、负载能力、体积质量等要求更高，因此国内外差距也更大。近年来汇川、埃斯顿等国产品牌迅速发展，在中低端伺服领域已实现大规模量产，并不断投入研发向高端伺服系统迈进。

■ **投资建议：**重点推荐绿的谐波、埃斯顿、汇川技术（东吴电新组覆盖）；建议关注双环传动。

■ **风险提示：**人形机器人产业化不及预期，核心零部件国产化不及预期，人形机器人或存在舆论阻力。

### 行业走势



### 相关研究

## 内容目录

<b>1. 特斯拉 Optimus 首次亮相，预计 3-5 年内实现量产</b> .....	<b>5</b>
1.1. Optimus 部分指标值得优化，但进步速度值得肯定 .....	5
1.2. Optimus 细节详解：执行器&双手&大脑&躯干 .....	6
<b>2. Optimus 亮点及未来进步点并存，看好人形机器人长期成长性</b> .....	<b>12</b>
2.1. Optimus 亮点：特斯拉汽车技术完美融合至人形机器人 .....	12
2.2. Optimus 进步点：成本&技术&应用场景问题仍待解决 .....	13
2.3. 千亿蓝海市场，人形机器人未来可期 .....	15
<b>3. 产业链视角：核心零部件重要性凸显</b> .....	<b>16</b>
3.1. 精密减速器：机器人生产中壁垒最高的零部件 .....	18
3.1.1. 精密减速器包含谐波与 RV 减速器，其原理与使用场景各有不同 .....	19
3.1.2. 全球精密减速器被日本垄断，近年国产化率逐步提升 .....	20
3.1.3. 考虑到人形机器人需求，2025 年全球谐波减速器市场空间有望达 147.5 亿元 .....	22
3.2. 控制器&伺服系统：机器人实现运动功能的核心部件 .....	23
3.2.1. 控制器：机器人运动控制的“大脑” .....	24
3.2.2. 伺服系统：机器人运动控制的“神经系统” .....	26
<b>4. 投资建议</b> .....	<b>27</b>
<b>5. 风险提示</b> .....	<b>28</b>

## 图表目录

图 1: 特斯拉 Optimus 示意图 (左图概念机, 中间原型机, 右图最新版本)	5
图 2: 特斯拉 Optimus 仅花费 6 个月时间学会行走	6
图 3: 相较于概念机, 新版 Optimus 存在优化空间	6
图 4: 特斯拉 Optimus 的主要构成部分	6
图 5: 特斯拉 Optimus 所使用的减速器和电机	7
图 6: 特斯拉 Optimus 上半身包含 10 个执行器	8
图 7: 特斯拉 Optimus 下半身包含 6 个执行器	8
图 8: 特斯拉通过数据分析模型寻找合适的执行器	9
图 9: 特斯拉通过仿生技术来优化执行器结构	9
图 10: 特斯拉 Optimus 手部特征	9
图 11: 人形机器人手部构造图	10
图 12: 模块化电缸示意图	10
图 13: 特斯拉将 FSD 系统应用于人形机器人, 并做出适应性修改	11
图 14: 特斯拉在 FSD 系统中嫁接 Dojo D1 超级计算芯片	11
图 15: 特斯拉通过车祸安全模拟技术的迁移, 来保证机器人碰撞损坏在可控范围内	13
图 16: 在乐观/中性/悲观情况下, Optimus 执行器的硬件价格就达到 3.6/6.9/10.1 万元	14
图 17: 通过捕捉人类运动进行关键帧分析, 为机器人设计更优化的运动轨迹	14
图 18: 优必选人形机器人 To B 端的应用场景, 但缺乏刚性需求推动其规模化	15
图 19: 根据研究机构 Marketsandmarkets 预测, 2022-2017 年人形机器人市场规模 CAGR=63.5%	16
图 20: 按照乐观/中性/悲观假设, 至 2030 年全球人形机器人市场空间分别达 750/500/250 亿美元	16
图 21: 机器人产业链情况	17
图 22: 人形机器人主要部件构成	18
图 23: 工业机器人核心零部件示意图	18
图 24: 机器人产业链各环节成本占比	18
图 25: 伺服电机输出与本体需求不匹配, 需要减速器进行减速增距	19
图 26: 精密减速器包括谐波减速器与 RV 减速器, 但其工作原理和应用场景存在区别	20
图 27: 2020 年谐波减速器国内市场销量占比情况	21
图 28: 2021 年谐波减速器国内市场销量占比情况	21
图 29: 2020 年 RV 减速器国内市场销量占比情况	21
图 30: 2021 年 RV 减速器国内市场销量占比情况	21
图 31: 国内外各品牌同型号谐波减速器关键参数对比	22
图 32: 国内外各品牌同型号 RV 减速器关键参数对比	22
图 33: 考虑人形机器人需求, 2025 年全球谐波减速器市场空间有望达 147.5 亿元	23
图 34: 运动控制系统应用原理	24
图 35: 控制器分类及特点介绍	24
图 36: 2022 年国内工业机器人控制器市场规模有望达 16 亿元	25
图 37: 控制器多为机器人厂商自制, 国内机器人控制器市场四大家族合计市场份额占有率超过 50% (2020 年)	25
图 38: 国内企业加速布局工业机器人控制器	25
图 39: 2019 年伺服系统下游应用领域占比	26

图 40: 国内伺服系统市场规模及增速.....	26
图 41: 2015 年国内伺服系统主要供应商市场份额.....	27
图 42: 2019 年国内伺服系统主要供应商市场份额.....	27
表 1: 气动、电动、液压驱动优劣比较.....	7
表 2: 相关公司估值情况 (截至 2022.9.30 收盘价) .....	28

## 1. 特斯拉 Optimus 首次亮相，预计 3-5 年内实现量产

### 1.1. Optimus 部分指标值得优化，但进步速度值得肯定

特斯拉 Optimus 首次亮相，预计 3-5 年内实现量产上市。2021 年 8 月，特斯拉 CEO 马斯克于首届“人工智能日”公开展示特斯拉人形机器人概念机 Tesla Bot。2022 年 2 月，特斯拉在提出概念后短短 6 个月内成功推出人形机器人原型机，并作为开发平台进行深度研发。2022 年 9 月 30 日，特斯拉举行第二届“人工智能日”，并发布最新版本的 Optimus 人形机器人，其可实现直立行走、搬运、洒水等复杂动作。据马斯克预计，Optimus 将于 3-5 年内实现量产上市，其最终数量将会达到百万级，而成本将降至 2 万美元左右。

图1：特斯拉 Optimus 示意图（左图概念机，中间原型机，右图最新版本）



数据来源：特斯拉官网，东吴证券研究所

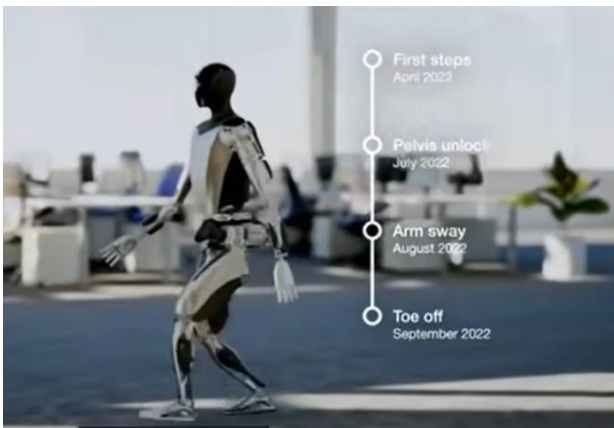
相较于概念机，最新版本 Optimus 部分指标存在优化空间，但也有进步之处。根据公开信息，对比最新版本 Optimus 和 2021 年发布的概念机：

- (1) **身高方面**：新版 Optimus 身高 173cm，与概念机相仿（比概念机高 1cm）；
- (2) **体重方面**：新版 Optimus 体重为 73kg，而概念机体重为 56.7kg，体重增大后会加大能耗，并影响机器人运动能力；
- (3) **行走速度方面**：概念机设计行走时速为 8km/h，新版 Optimus 虽未公布详细的行走速度数据，但从人工智能日现场和视频中的表现来看，行走速度较为缓慢；
- (4) **载重方面**：新版 Optimus 可搬运约 20 磅（10kg）重的中小型货物，预计要实现概念设计的 20kg 负载还需一定时间；
- (5) **自由度方面**：新版 Optimus 全身自由度为 50 个（其中躯干 28 个，双手各 11

个), 多于概念机的 40 个自由度。在增加自由度的同时全身执行器数量却由 40 个减少至 28 个。执行器由减速机、电机、丝杆等零部件组成。

尽管新一代 Optimus 的部分指标仍存在优化空间, 但也不乏进步之处。同时考虑到特斯拉在依托自身汽车制造底层技术的基础上, 仅用 6 个月时间实现概念→初代原型机, 随后 8 个月实现最新 Optimus 的推出, 进展非常迅速。尽管目前特斯拉与波士顿动力、敏捷机器人等老牌人形机器人厂商相比, 技术还稍显落后, 但考虑综合实力和速度, 我们仍十分看好特斯拉人形机器人未来在工厂、物流和智慧康养等领域的应用。

图2: 特斯拉 Optimus 仅花费 6 个月时间学会行走



数据来源: 特斯拉 AI Day, 东吴证券研究所

图3: 相较于概念机, 新版 Optimus 存在优化空间

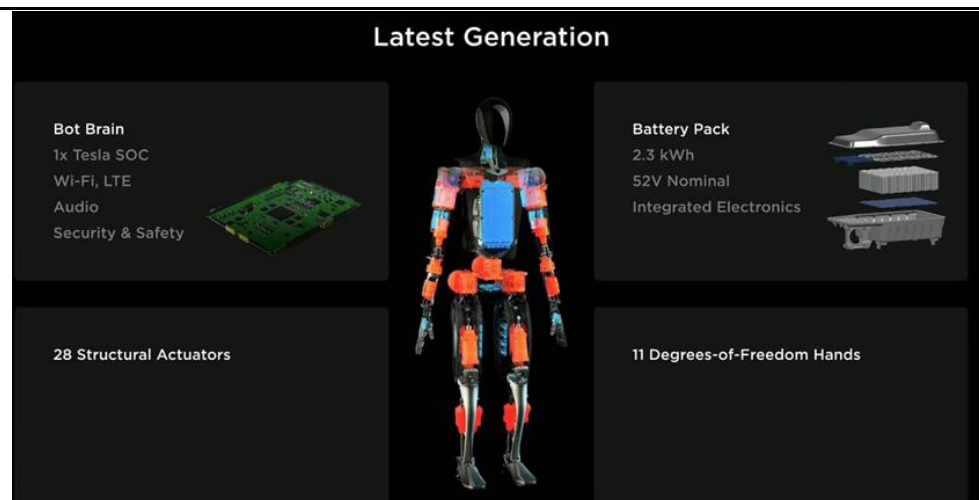
指标	概念机	最新 Optimus
身高 (cm)	172	173
体重 (kg)	56.7	73
时速 (km/h)	8	行走缓慢
载重 (kg)	20	10
自由度	40	50
执行器 (个)	40	28

数据来源: 特斯拉官网, 东吴证券研究所 (注: 标蓝色为值得优化指标, 标红色为有进步指标)

## 1.2. Optimus 细节详解: 执行器&双手&大脑&躯干

特斯拉 Optimus 主要由机械部分 (下图红色部分) 和电子部分 (蓝色部分) 组成, 机械部分包含 28 个执行器和双手; 电子部分包含大脑和躯干 (冷却系统、电池包)。

图4: 特斯拉 Optimus 的主要构成部分



数据来源: 特斯拉 AI Day, 东吴证券研究所

(1) 执行器：采用减速机+电机的传动方式

执行器是一种驱动机制，控制系统通过它来执行或操作任务，可以简单类比为人体的肌肉和四肢，大脑会通过控制肌肉和四肢来实现运动。人形机器人为实现足式运动，一般采用关节形式进行驱动，而驱动方式主要包括气动、电动和液压三种方式。1) 气体驱动：气动的优点是具备压缩性，能够使机器人更柔顺地进行运动，但是其功率体积比最低，负载能力很差；2) 电机驱动：电动即最常见的电机驱动（需搭配减速器），具有简单、驱动控制成熟的优点，是最常见的驱动方式，但由于电机负载能力的限制，使得电机驱动的机器人负载能力也较弱；3) 液压驱动：液压驱动虽然成本略高，但具有很大的功率体积比，从而使四足机器人可以具备高动态行走能力且负载能力强。目前在全球头部人形机器人厂商中，仅有波士顿动力将液压作为执行器的驱动方式，其余例如优必选、本田等均选用电机+减速器的驱动方式。

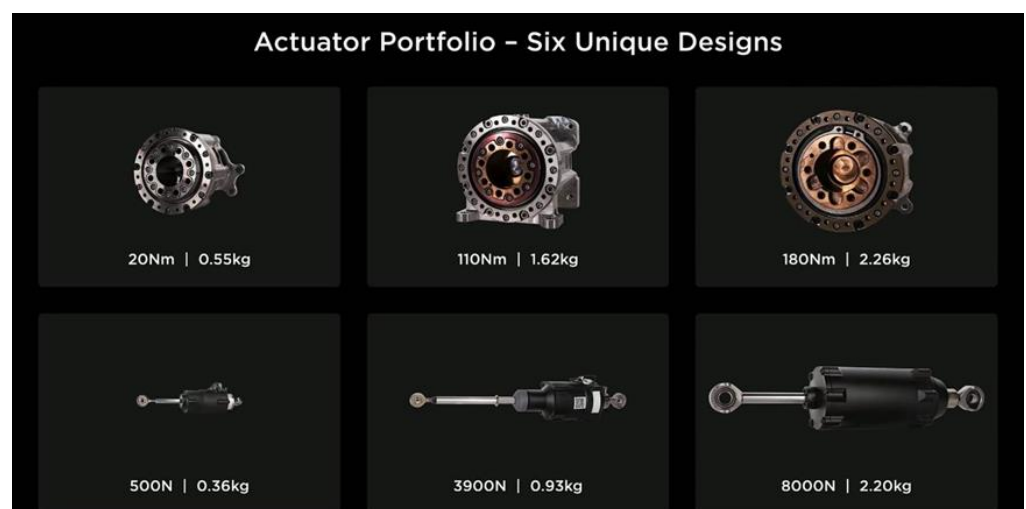
表1: 气动、电动、液压驱动优劣比较

	优点	缺点
气体驱动	具备压缩性，运动控制柔顺	负载能力最差
电机驱动	简单、驱动控制成熟	负载力较差
液压驱动	高动态行走能力，负载能力强	成本略高

数据来源：液压四足机器人驱动控制与稳定行走研究，东吴证券研究所

特斯拉 Optimus 也采用了传统减速机+电机的传动模式，在发布会中特斯拉展示了扭矩从 20Nm 到 180Nm 的减速机，力矩从 500N 到 8000N 的电机，均在减速机和电机头部企业的产品参数范围内。以哈默纳科 HPG 系列和绿的谐波 LCD 系列谐波减速器产品为例，其扭矩范围分别为 3.9-2200Nm 和 3.2-2100Nm。数量方面，最新版 Optimus 全身共有 28 个执行器，较概念机减少 12 个。

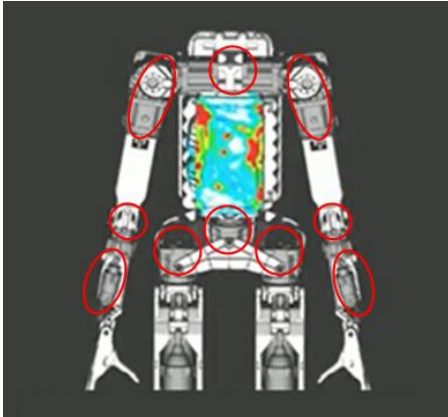
图5: 特斯拉 Optimus 所使用的减速器和电机



数据来源：特斯拉 AI Day，东吴证券研究所

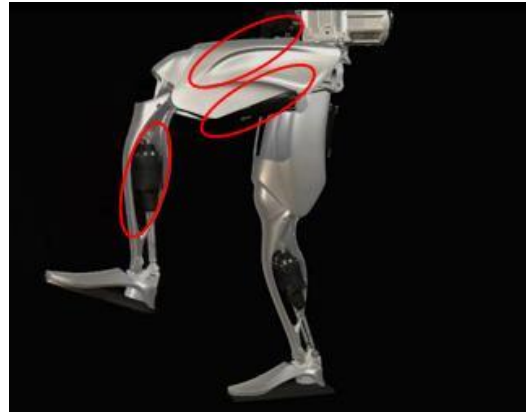
分部位来看,根据现场图片及我们判断,其上半身包含 8 个伺服电机+减速器关节, 2 个线性推杆电机+减速器关节(小臂); 下半身包含 6 个线性推杆电机+减速器关节; 双手包含 12 个执行器(每个手掌 6 个)。

图6: 特斯拉 Optimus 上半身包含 10 个执行器



数据来源: 特斯拉 AI Day, 东吴证券研究所

图7: 特斯拉 Optimus 下半身包含 6 个执行器



数据来源: 特斯拉 AI Day, 东吴证券研究所

**执行器是人形机器人非常重要且有挑战的环节。其重要性体现在, 类比于人体执行器就是我们进行生产活动的肌肉, 是必不可少的部位。而其挑战性就在于:**

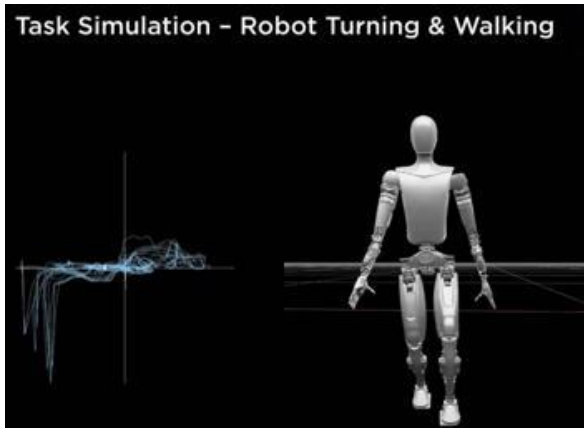
1) **如何设计出高能量密度高稳定的执行器:** 人的肌肉是拉伸运动, 因此可以在重量不大的情况下, 产生上百公斤的力; 目前常用的执行器电机做的是回转运动, 其转速很快, 但如果要产生力, 则需要多级的减速传动, 但多级传导后其稳定性就会有所降低。而机器人如果需要进行高精密复杂运动, 就必须在承受巨大力量的同时保障稳定性, 如何设计出高能量密度、高稳定的执行器非常关键。

2) **如何设计出满足运用于多关节的执行器:** 人形机器人关节数量众多, 为满足不同运动形态需求, 势必会运用到不同类型的执行器。但为了实现降本, 必须要找到满足运用于多关节的执行器。

特斯拉非常重视执行器的设计, 主要通过运用数据模型分析来寻找合适的执行器。首先需要考虑机器人需要进行的动作, 例如步行、转弯、爬楼梯, 得到其关节所需要承受的压力。其次把这些数据输入到自主搭建的优化模型中, 从而得到执行器需要的参数, 例如承受力, 扭矩, 需要的能耗等等, 最后综合考虑生产成本后选择合适的执行器。此外, 特斯拉还会通过仿生技术来优化执行器结构。例如 Optimus 的膝关节部位, 和人类膝关节韧带的结构极为相似。

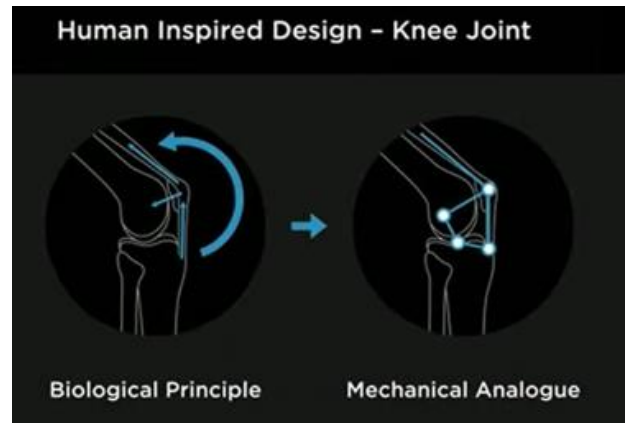


图8: 特斯拉通过数据分析模型寻找合适的执行器



数据来源: 特斯拉 AI Day, 东吴证券研究所

图9: 特斯拉通过仿生技术来优化执行器结构



数据来源: 特斯拉 AI Day, 东吴证券研究所

(2) 双手: 搭载大量传感器, 可实现细微操作

人形机器人的双手设计方面, 特斯拉通过仿生技术全面看齐人手: ①灵活性: 特斯拉 Optimus 单个手掌搭载 6 个执行器, 共有 11 个自由度, 可以实现自由灵活运动。②拥有感知: 人手包含数以万计的“触觉传感器”, 特斯拉希望机械手也能够和人手一样拥有感觉, 因此搭载大量的传感器, 例如力敏传感器和触觉传感器等。③实现工作: 根据现场发布会的描述, Optimus 双手可载重约 10kg, 能够使用工具并拿起细小的东西。此外通过添加特殊的驱动器, 特斯拉 Optimus 能够在不打开手掌的情况下, 进行相应的活动。

图10: 特斯拉 Optimus 手部特征



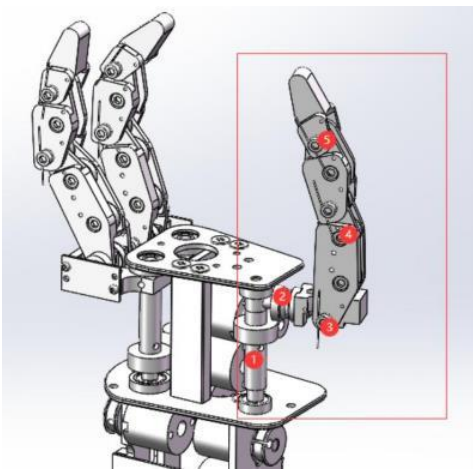
数据来源: 特斯拉 AI Day, 东吴证券研究所

结构方面, 考虑到人形机器人进行的是完全拟人化的动作, 因此要求手部灵活且有较高的抓取力, 从而需要搭配体积小灵活度高, 但能量密度大的执行器, 我们判断空心

杯电机+精密减速器+丝杠组成的模块化电缸是人形机器人较好的选择。空心杯电机具有重量轻，体积小，能量密度大等特点，与同等功率的铁芯电动机相比，其重量、体积减轻超过三分之一。

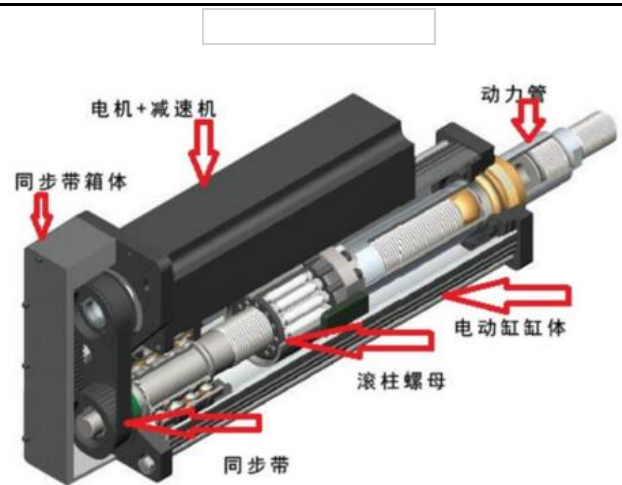
目前特斯拉对人形机器人双手的开发还处于初级阶段，还有许多希望能够实现的功能：①可以同时拿起重物和实现微小动作：特斯拉希望通过仿生技术设计出机械肌腱，能够在抓取重物的同时，也能够实现微小操作，例如拿起很薄很小的纸张。②让双手实现自我学习：人类在面对从来没有拿起过的东西时，也可以轻松拿起，特斯拉希望机器人也能够通过自我学习做到这一点。

图11：人形机器人手部构造图



数据来源：CSDN，东吴证券研究所

图12：模块化电缸示意图



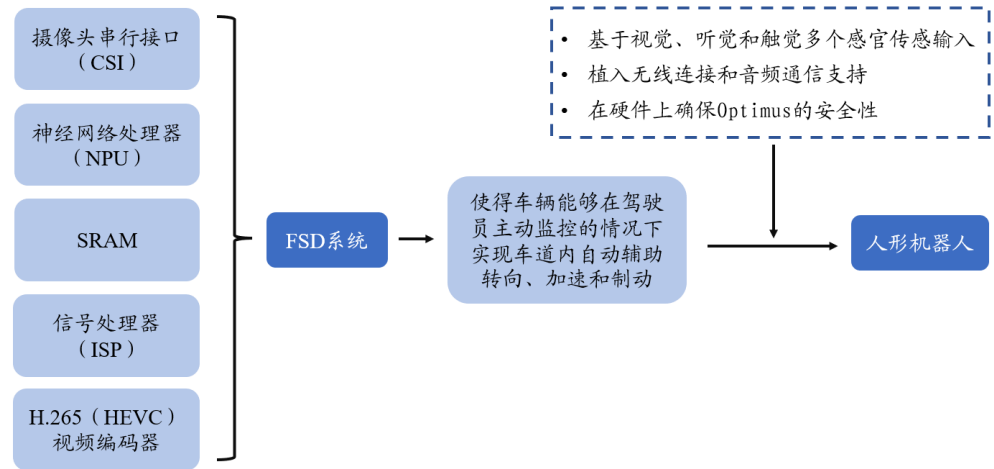
数据来源：神威气动官网，东吴证券研究所

## （2）大脑：搭载 FSD 全自动驾驶系统和 D1 超级芯片

在大脑部分，最新版 Optimus 人形机器人采用了与特斯拉电动车相同的全自动驾驶系统 FSD 和感知计算单元，包括自主研发的算力极强的 Dojo D1 超级计算机芯片以及三颗 Autopilot 级别自动辅助摄像头。

FSD 系统即为全自动驾驶系统，其使得车辆能够在驾驶员主动监控的情况下实现车道内自动辅助转向、加速和制动，减少枯燥的驾驶操作，提升驾驶乐趣。由于人形机器人的需求和形式与电动车存在一定的差异，特斯拉对植入人形机器人的 FSD 系统做了三方面的改变：1) 信息基于多感官输入：为使 Optimus 的“大脑”更接近人脑，信息将基于多个感官传感输入（视觉、听觉和触觉），让机器人能够处理数据并做出决策；2) 植入无线连接和音频通信支持：为了方便机器人与人的沟通交流，特斯拉在 FSD 系统中植入无线连接和音频通讯支持功能；3) 增加硬件保护机制：为稳定机器人的四肢控制，保护机器人本身和机器人周围的人，将在硬件上确保 Optimus 的安全性。

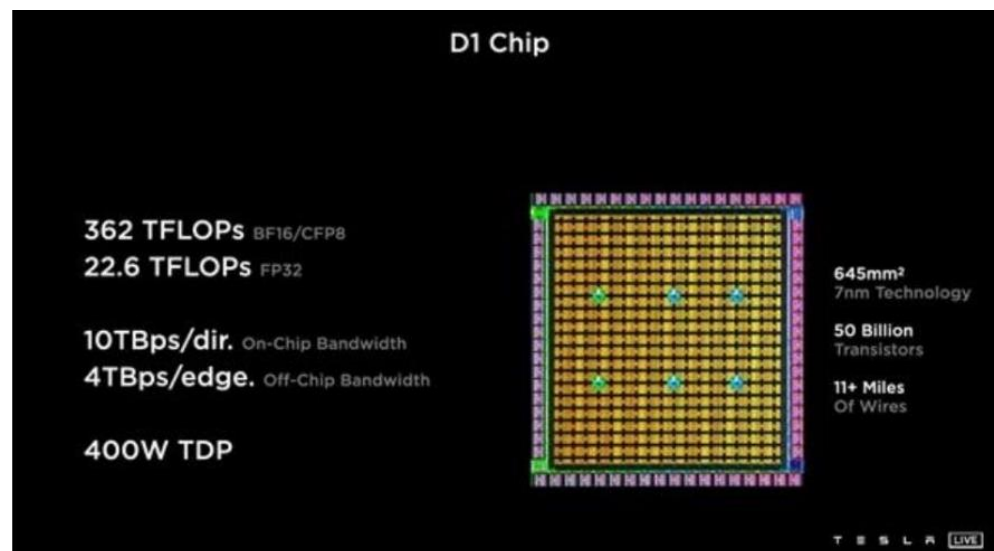
图13: 特斯拉将 FSD 系统应用于人形机器人, 并做出适应性修改



数据来源: 特斯拉 AI Day, 东吴证券研究所

特斯拉在 FSD 系统中嫁接了计算机视觉神经网络训练芯片——自研的 Dojo D1 超级计算芯片。每个 D1 单元之间无缝连接, 相邻芯片之间的延迟低, 训练模块实现了更大程度的带宽保留, 实现了高达 9 千万亿次的算力。理论上讲, Dojo 超级计算机的性能无上限, 实际应用中, 与业内其他产品相比同成本下性能提高 4 倍, 同功耗下性能提高 1.3 倍, 占用空间降低 5 倍。

图14: 特斯拉在 FSD 系统中嫁接 Dojo D1 超级计算芯片



数据来源: 特斯拉官网, 东吴证券研究所

#### (4) 躯干：高度集成传感器、电池组和冷却系统

考虑到运动学和量产降本的需求，特斯拉尽量减少机器人四肢所需机电执行器、传感器的数量，并将传感器、电池管理和冷却系统都集成到了躯干部位。

最新版本 Optimus 的躯干处搭载有容量为 2.3 kWh、52V 的电池组，能够维持机器人一整天的工作。电池组借鉴了特斯拉电子产品和汽车产品中高度集成的设计，搭载至特斯拉 SoC 系统运行。SoC 系统指的是将一套完整的信息处理系统集成到一块芯片上，电池组中的单块芯片可支持所有传感融合、电池通讯以及充放电管理功能。

## 2. Optimus 亮点及未来进步点并存，看好人形机器人长期成长性

### 2.1. Optimus 亮点：特斯拉汽车技术完美融合至人形机器人

简化来看，汽车即为带有轮子的机器人，因此汽车和人形机器人在底层技术方面有诸多共通之处。特斯拉最为全球汽车龙头，将诸多汽车技术完美融合到人形机器人上，才能够使得在 6-8 个月内成功开发出能够行走承重的人形机器人。

#### (1) 自动驾驶技术的迁移（视觉识别+自主导航）：

人形机器人自主导航定位是真正实现“拟人”应用的基础，特斯拉通过汽车自动驾驶技术的迁移快速掌握人形机器人自主导航定位功能。

智能机器人的自主导航定位算法包含了机器视觉、定位、导航和避障等核心技术。机器视觉是机器人对外界环境进行描述的过程，表征了机器人对外界环境的理解能力。定位是机器人依托于建图结果，或与建图过程同时对自身方位进行准确辨识。导航和避障是机器人自主决策、规划和控制，从而将自身安全准确地引导至目的地的过程。这与汽车自动驾驶有很多相似之处。

**在视觉识别方面**，特斯拉有非常强的计算机视觉算法和相应的网络，能够直接把计算机视觉迁移到机器人上。特斯拉也在努力架构更多的神经网络，训练神经元进行高频率的特征识别，提高机器人的视觉识别功能。**在导航和避障方面**，通过对机器人进行特定的训练，让其记住之前走过的路径，并结合自动驾驶导航技术，使机器人可以与环境更好地互动，例如在低电量的时候能够自主去充电。

#### (2) 车祸安全模拟技术的迁移（安全保障）：

人形机器人在工作中碰撞或者摔倒无法避免，特斯拉通过车祸安全模拟技术的迁移，来保证机器人碰撞损坏在可控范围内。

特斯拉的车祸安全模拟模型具有强大的物理生产能力和模拟能力，可以实现 3500 万的自由度，所以在 Optimus 的设计中，特斯拉将其应用于机器人损坏控制之上，来保

障机器人硬件的安全性。即使 Optimus 摔倒也最多只会造成表面损伤，而不会影响到核心部件，比如价格昂贵、制作困难的大脑和控制系统等。

图15：特斯拉通过车祸安全模拟技术的迁移，来保证机器人碰撞损坏在可控范围内



数据来源：特斯拉 AI Day，东吴证券研究所

## 2.2. Optimus 进步点：成本&技术&应用场景问题仍待解决

### (1) 尽管执行器数量有所下降，但硬件成本依旧高昂：

在之前发布的报告中我们曾提及，成本问题是阻碍人形机器人量产的重要因素之一，而原因即在于人形机器人自由度极高，相较于传统的六轴机器人，其对减速器、电机等核心零部件的需求量成倍增加。因此为实现降本市场会着重关注以下三点：①是否能够有更有性价比的新型驱动方式来代替传统的减速器+电机驱动模式；②若仍然使用传统的机械传动，能否减少执行器的数量；③能否降低减速器和电机的成本。

此次新发布的 Optimus 仍然使用减速器+电机的传统机械驱动模式，并未在传动方式上做出创新，而减速器和电机的成本在小规模生产的情况下也没有太大的下降空间。尽管新版 Optimus 在执行器的数量上有所减少（28 个执行器），较概念机的 40 个执行器共减少 12 个。但相对而言，其对核心零部件的需求量仍然是六轴机器人的 4-5 倍，硬件成本依旧较为昂贵。

根据上文我们对最新版本 Optimus 的图解，其上半身包含 8 个伺服电机+减速器关节，2 个线性推杆电机+减速器关节；下半身包含 6 个线性推杆电机+减速器关节；双手包含 12 个空心杯电机+减速器关节。按照各零部件的市场均价进行测算，则可得在乐观/中性/悲观情况下，仅仅是执行器的硬件价格就达到 3.6/6.9/10.1 万元，人形机器人综合成本难以降低。

图16: 在乐观/中性/悲观情况下, Optimus 执行器的硬件价格就达到 3.6/6.9/10.1 万元

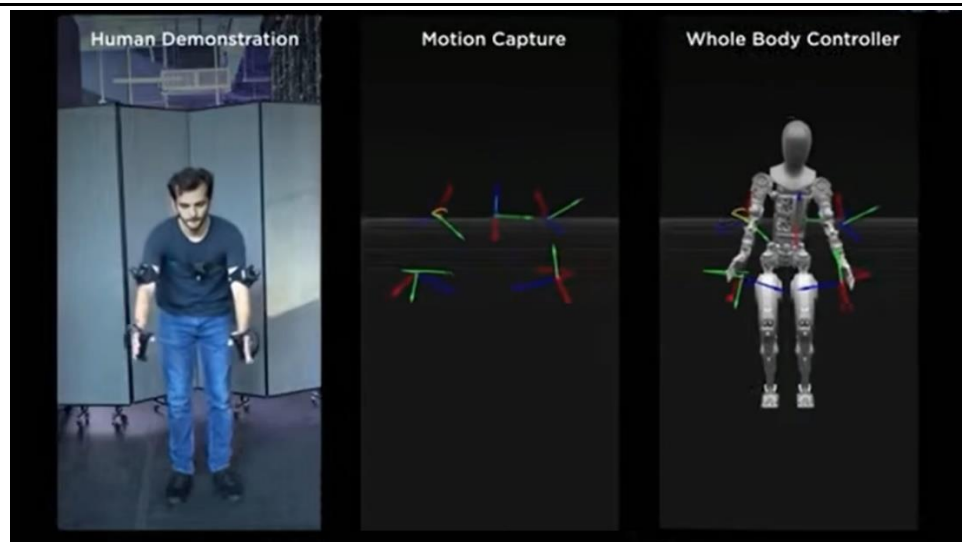
	品类	数量	乐观	中性	悲观
			单价 (元/件)		
上半身	伺服电机	8	300	500	700
	线性推杆电机	2	150	200	250
	精密减速器	10	1000	2000	3000
	上半身价格 (万元)		1.3	2.4	3.6
下半身	线性推杆电机	6	150	200	250
	精密减速器	6	1000	2000	3000
	下半身价格 (万元)		0.7	1.3	2.0
手部	空心杯电机	12	400	600	800
	精密减速器	12	1000	2000	3000
	手部价格 (万元)		1.7	3.1	4.6
人形机器人零部件总价格 (万元)			3.6	6.9	10.1

数据来源: 特斯拉 AI Day 发布会, 东吴证券研究所预测

(2) 人形机器人运动控制能力有待提升:

良好的运动控制是人形机器人真正落地实现应用的重要因素。运动控制范畴中, 能够直立行走仅仅是第一步, 在行走中保持平衡, 抓取物体时保持稳定性是更大更难的问题。特斯拉在实现机器人运动控制方面进行了很多尝试。例如特斯拉利用软件对人类运动进行捕捉后进行可视化处理, 形成关键帧。然后逐一对躯干, 手和腿的位置进行关键帧分析, 再通过运动学原理映射回人形机器人, 从而形成更好的轨迹优化。

图17: 通过捕捉人类运动进行关键帧分析, 为机器人设计更优化的运动轨迹



数据来源: 特斯拉 AI Day 发布会, 东吴证券研究所

目前人形机器人在现实工作中保持平衡仍有很多挑战, 涉及到多领域的结合。例如需要有足够好的零部件去支撑机器人的实现动作, 需要足够优化的算法指令来形成轨迹, 需要有足够好的机器视觉和传感器对周围世界进行评估。根据会场技术人员披露,

Optimus 平衡性问题仍需解决，可能需要 18-36 个月时间的开发，主要系人形机器人在实际运行中，不可避免会受到外力干扰，例如被碰撞，地面湿滑等等。但人形机器人很难像人类一样通过自我学习来应对这些特殊情况，而是需要在数据库中调用已有的指令，通过算法和硬件的配合来应对。目前特斯拉已经建立起机器人运动数据库，但面对纷繁复杂的现实世界，还需要更长的时间来扩充数据样本。

### (3) 特斯拉 Optimus 未实现应用场景的拓展：

目前已实现量产的机器人都有着明确的应用场景，而且这些应用场景无论是 To B 还是 To C 都有大量的刚性需求，例如工业机器人在工业领域实现的搬运、焊接、点胶等工艺，扫地机器人的家用功能，电力巡检机器人在电网的应用等等。现有的人形机器人的主要应用包括商业领域的导览接待、特殊环境下的搜救搬运等工作，尚无能够大规模应用的刚需场景。目前头部人形机器人正在积极寻找有刚需的应用场景，例如优必选正在积极探索智能物流、智慧康养等领域人形机器人的应用。

图18：优必选人形机器人 To B 端的应用场景，但缺乏刚性需求推动其规模化



数据来源：优必选官网，东吴证券研究所

特斯拉此次发布会中，有明确给出的人形机器人大规模应用场景为特斯拉工厂内的搬运和上下料等工作，即工业应用中的“基础性工作”。然而就目前来看，人形机器人在工业领域“性价比”不足。以在工业领域实现应用的美国 Digit 双足机器人为例，其主要用途为在工厂或仓库内装载和卸载货运箱，但其售价高达 25 万美元，性价比远低于工业机器人甚至是纯人类。综合而言，此次特斯拉 Optimus 推出的同时，并未展示出有刚需，且人形机器人有性价比的应用场景，期待后续特斯拉在落地应用方面的进一步拓展。

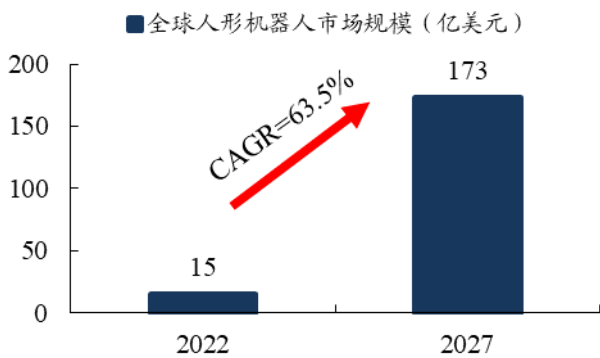
## 2.3. 千亿蓝海市场，人形机器人未来可期

综合而言，尽管人形机器人距离真正实现产业化仍有诸多困难需要克服，我们仍十分看好特斯拉新一代 Optimus 人形机器人，若其能在未来明确市场需求，并且在成本控制和技术水平之间形成有效平衡，就能够实现商业化的落地和规模化的量产。根据全球市场研究机构 Marketsandmarkets 的预测，全球人形机器人市场规模（仅考虑单机）将从 2022 年 15 亿美元提升至 2027 年的 173 亿美元（按人民币兑美元 7: 1 计算为 1211 亿元），CAGR=63.5%。

而根据特斯拉 CEO 马斯克的预计，未来全球人形机器人数量可达百万级，最终单台成本可能会低于两万美元。我们按照乐观/中性/悲观假设，测算可得至 2030 年全球人形机器人市场空间分别达 750/500/250 亿美元，未来可期。具体测算假设如下：

- 1) **乐观情况：**人形机器人降本超市场预期，且在各个工业和家居场景均得到广泛应用，至 2030 年人形机器人保有量达到 500 万台，单台成本下降至 1.5 万美元。
- 2) **中性情况：**人形机器人降本顺利，在工业场景得到规模应用，并进入部分家居场景，至 2030 年人形机器人保有量达到 250 万台，单台成本为 2 万美元。
- 3) **悲观情况：**人形机器人降本不及市场预期，仅在少部分工业和家居场景得到应用，至 2030 年人形机器人保有量达到 100 万台，单台成本为 2.5 万美元。

图19: 根据研究机构 Marketsandmarkets 预测, 2022-2027 年人形机器人市场规模 CAGR=63.5%



数据来源: Marketsandmarkets, 东吴证券研究所

图20: 按照乐观/中性/悲观假设, 至 2030 年全球人形机器人市场空间分别达 750/500/250 亿美元

假设	乐观	中观	悲观
全球人形机器人销量 (万台)	500	250	100
人形机器人单价 (万美元/台)	1.5	2	2.5
全球人形机器人市场空间 (亿美元)	750	500	250

数据来源: 东吴证券研究所预测

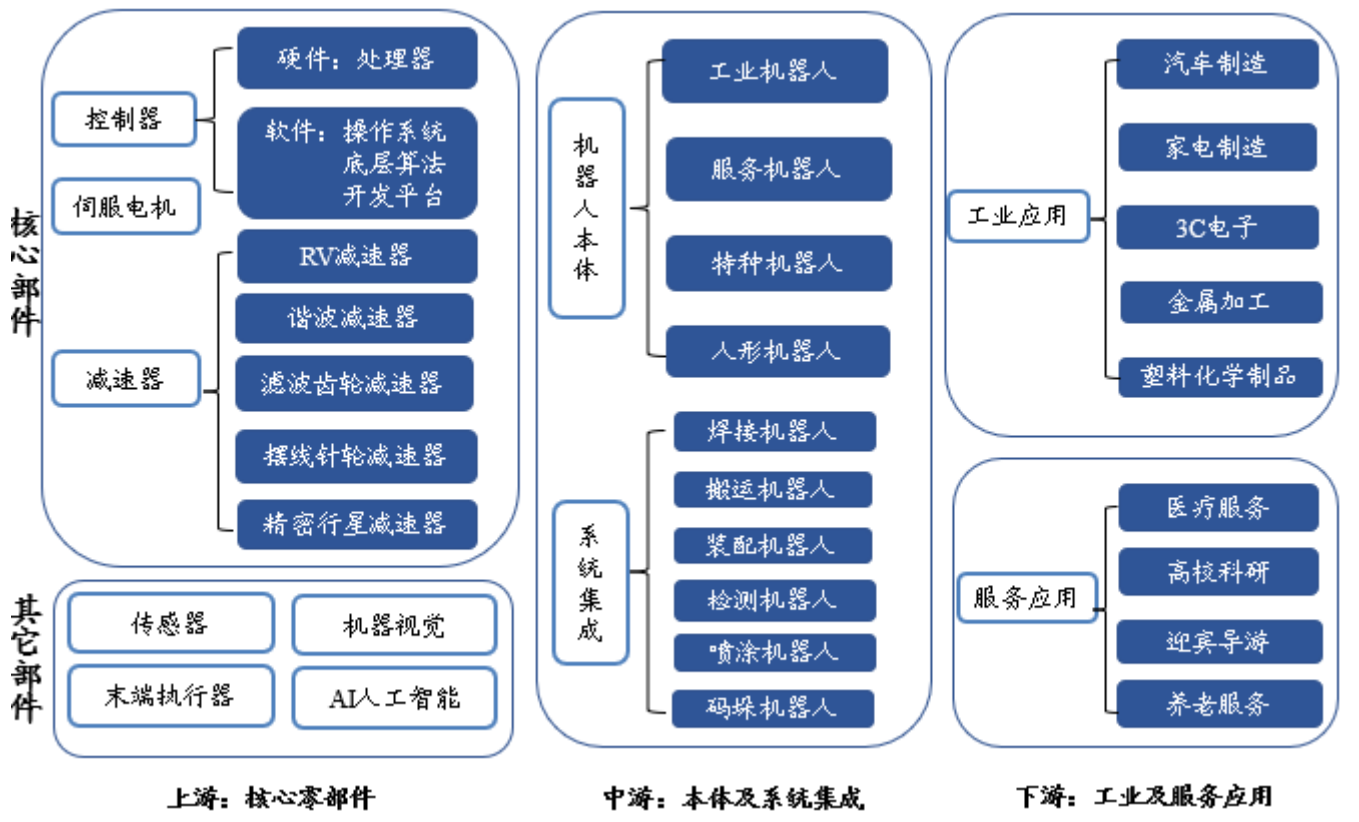
### 3. 产业链视角：核心零部件重要性凸显

人形机器人产业链主要分为上中下游三部分。具体来看，上游为核心软硬件，硬件主要包括伺服电机、减速器、控制器、传感器等；软件包括机器视觉、人机交互、机器学习、系统控制等；中游则是人形机器人本体制造商，国内包括优必选、北京钢铁科技、国外包括波士顿动力、美国敏捷机器人、日本丰田、本田、特斯拉等。下游目前还未有



成熟的商业应用，可能的应用场景包括迎宾接待、展厅引导、高校科研等。

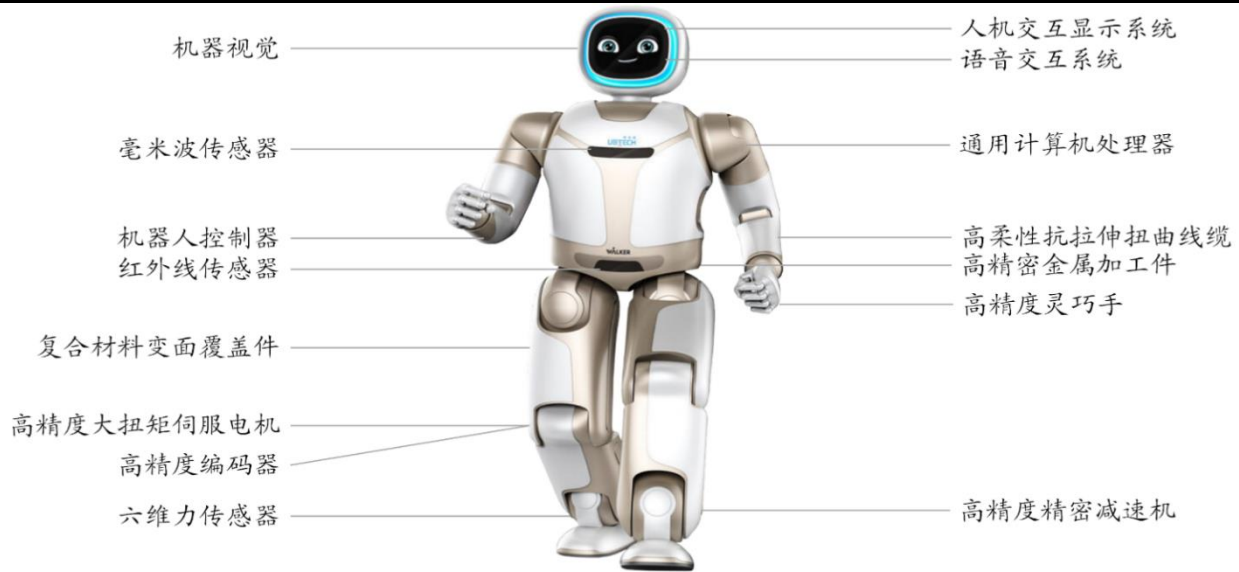
图21：机器人产业链情况



数据来源：中商产业研究院，东吴证券研究所整理

在此前发布的人形机器人行业深度报告中，我们已经强调过核心零部件的重要性。此次特斯拉 Optimus 的发布进一步验证我们的观点，主要可以体现在两大方面：1) 核心零部件成为阻碍量产的关键因素：上文提及特斯拉此次发布会，超预期的点主要集中在软件和算法，而阻碍量产的关键因素是缺乏高效高性价比的执行器，即以目前电机+减速机+丝杠的运动控制结构，无法兼顾高效率 and 低成本。2) 人形机器人中核心零部件成本占比将会高于传统工业机器人：以传统工业机器人为例，核心零部件占据了工业机器人整机 70% 以上的成本，其中减速机占整机成本约 36%，伺服占整机成本约 24%，控制器占整机约 12%。考虑到人形机器人自由度更高，所需零部件更多，且未来 3-5 年特斯拉都会作为人形机器人主流量产玩家，而特斯拉软件和电池基本都有成熟的供应链或能够自制，但核心零部件需要外采，因此核心零部件成本占比可能会高于工业机器人。

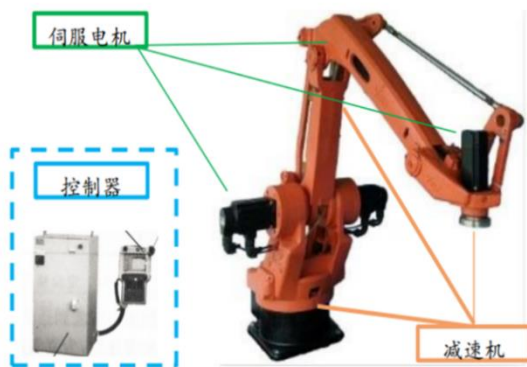
图22: 人形机器人主要部件构成



数据来源: 优必选官网, 东吴证券研究所

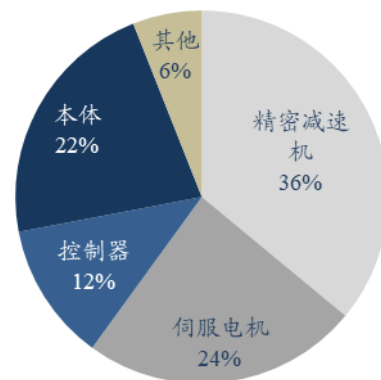
机器人核心零部件主要包括精密减速机、交流伺服电机、控制器。精密减速器是连接动力源和执行机构的中间机构, 具有匹配转速和传递转矩的作用。伺服电机在自动控制系统中, 用作执行元件, 把所收到的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。机器人每个关节运动均需靠伺服电机驱动, 以实现多自由度的运动。控制器是工业机器人的大脑, 对机器人的性能起着决定性的影响。工业机器人控制器主要控制机器人在工作空间中的运动位置、姿态和轨迹, 操作顺序及动作的时间等。

图23: 工业机器人核心零部件示意图



数据来源: Ofweek, 东吴证券研究所

图24: 机器人产业链各环节成本占比



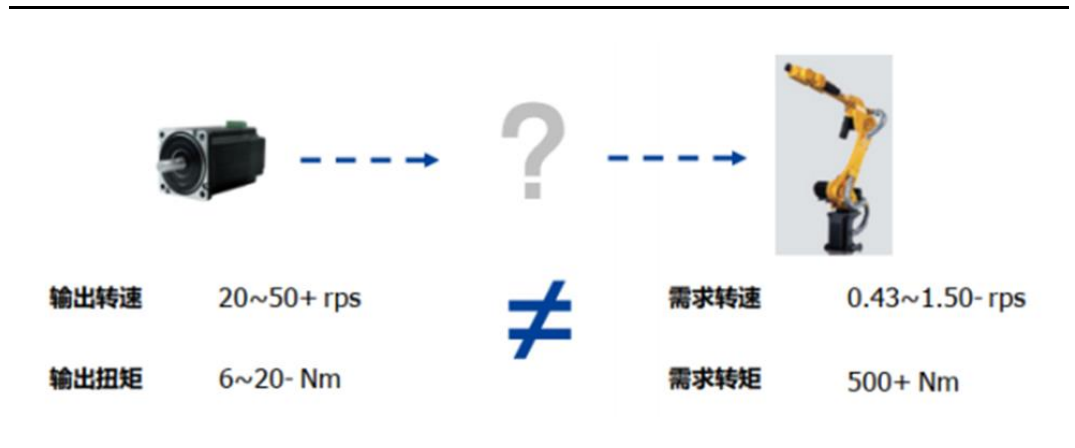
数据来源: Ofweek, 东吴证券研究所

### 3.1. 精密减速器: 机器人生产中壁垒最高的零部件

### 3.1.1. 精密减速器包含谐波与 RV 减速器，其原理与使用场景各有不同

**精密减速器是机器人生产过程中技术壁垒最高的零部件。**机器人每个关节运动均需靠伺服电机驱动，伺服电机具有输出转速大、输出扭矩小的特点；而关节结构实际上的需求是输出转速小、转动扭矩大，所以现有伺服电机的输出不能满足终端机械本体的运动需求，就需要减速器这一结构进行减速增距。

图25：伺服电机输出与本体需求不匹配，需要减速器进行减速增距



数据来源：埃斯顿官网，东吴证券研究所

**精密减速器主要包括谐波减速器与 RV 减速器，但其工作原理和应用场景存在较大区别：**

**1) 谐波减速器：**由波发生器、柔轮和刚轮组成。当波发生器被放入柔轮内圆时，柔轮产生弹性变形弯曲成椭圆状，且由于柔轮外侧的刚轮比其多 2 个齿，导致柔轮长轴部分正好可以与刚轮的齿轮啮合，而短轴部分与刚轮的齿轮呈脱离状态。由于刚轮固定，因此在波发生器逆时针转动时，柔轮作顺时针转动。当波发生器持续转动时，柔轮不断发生变形，两轮轮齿在啮入、啮出的过程中进行错齿运动，波发生器转动 180°，柔轮正好转动一个齿数，其转动角度之比即为减速比。谐波减速器具有以下特点：①体积小和重量轻：由于谐波齿轮传动主要构件只有三个，相较 RV 减速器，零部件至少减少 50%，体积和重量均减少 1/3 以上；②精度高：由于谐波齿轮为多齿同时啮合，并且有两个 180 度对称的齿轮啮合，因此齿距误差较小，使位置精度和旋转精度达到极高的水准；③单级传动比大：波发生器每正时针旋转 180°，柔轮逆时针旋转 1 个齿数，这也造就了其高传动比，其单级传动比可达 50-500 之间。④低负载：由于谐波减速器需要借助柔轮变形进行运动传递，如果负载过大将导致柔轮变形不均匀，且反复的高速变形使得其比较脆弱，因此其承载力有限。

**2) RV 减速器：**由两个减速部构成，在第一减速部中，输入轴的旋转从输入齿轮传递到直齿轮，按齿数比进行减速；在第二减速部中，有一个曲柄轴与直齿轮相连接，在

曲柄轴的偏心部分,通过滚动轴承安装 RV 齿轮,曲柄轴会带动 RV 减速机做偏心运动,当曲柄轴转动一周, RV 齿轮就会沿与曲柄轴相反的方向转动一个齿,从而达到减速效果。RV 减速器与谐波减速器一样,具有精度高、单机传动比大等特点;但相较于谐波减速器, RV 减速器组成更加复杂,导致体积和重量较大,且由于不存在变形运动因此具有更高的刚性和扭矩承载能力,主导重负载精密减速器领域。

图26: 精密减速器包括谐波减速器与 RV 减速器,但其工作原理和应用场景存在区别

项目	RV减速器	谐波减速器
技术特点	内燃机或其它高速运转的动力通过减速机输入轴上齿数少的齿轮啮合输出轴上齿数大的齿轮来达到减速的目的。	通过柔轮的弹性变形传递运动,主要由柔轮、刚轮、波发生器三个核心零部件组成。当波发生器持续转动时,迫使柔轮不断发生变形,长轴部分钢轮和齿轮啮合,短轴部分钢轮与齿轮呈脱离状态,因此两轮轮齿会在进行啮入、啮出的过程中产生错齿运动,达到减速目的。
产品性能	大体积、高负载能力、高刚度	小体积、低负载能力、高精密度
应用场景	一般应用于工业机器人中机座、大臂、肩部等重负载的位置。	主要应用于小负载工业机器人小臂、腕部或手部;协作和SCARA机器人大部分动力关节
平均每台机器人使用量	多关节型3台, SCARA型1台	多关节型3.5台、SCARA型3台,坐标及其它型1台,协作型7台
终端领域	汽车、运输、港口码头等行业中通常使用配有RV减速器的重负载机器人。	3C、半导体、食品、注塑、模具、医疗等行业中通常使用由谐波减速器组成的30kg负载以下的机器人。
价格区间	5,000-8,000元/台	1,000-5,000元/台
图例		

数据来源: 绿的谐波招股书, 东吴证券研究所整理

基于以上分析,由于谐波减速器承载力有限,但重量、体积较小;RV 减速器具有更高的承载力,但重量、体积较大,因此两种减速器短期内呈现互补、而非替代关系。一般来讲,负载 10kg 以下工业机器人主要使用谐波减速器;10-20kg 高负载的工业机器人小臂、手腕关节可以采用谐波减速器;负载 30kg 以上的,在其轻负荷的末端关节上也能够使用谐波减速器;而如基座、大臂、肩部等重负载部位多使用 RV 减速器。而在人形机器人的特殊应用场景下,我们判断应该会同时或单一使用到谐波减速器和 RV 减速器,甚至是行星减速器,但数量和具体使用部位会与每家公司的设计息息相关。

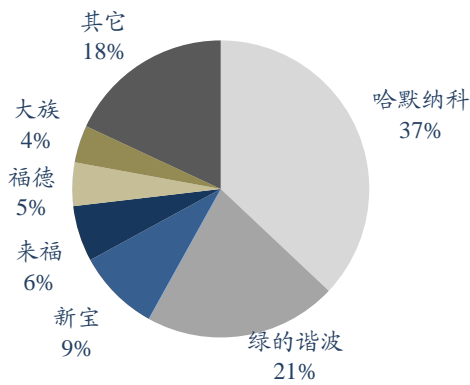
### 3.1.2. 全球精密减速器被日本垄断,近年国产化率逐步提升

从竞争格局来看,全球机器人减速器市场呈现高度集中状态,几乎被哈默纳科和纳

**博特斯克垄断。**《工业机器人减速器市场分析与产业供需格局研究报告(2018年)》显示，日本纳博特斯克是生产RV减速器的世界巨头，约占60%的全球减速器市场份额；哈默纳科则是谐波减速器领域的龙头，约占15%的全球减速器市场份额。除此之外，日本住友RV减速器和新宝谐波减速器合计占全球10%市场份额，全球减速器市场呈现出日本企业高度集中的局面。

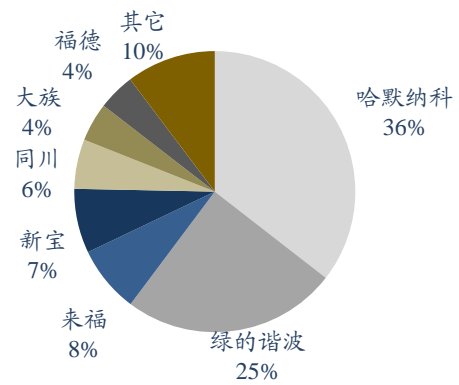
**国内减速器市场得益于绿的、双环等龙头的带动，近年来国产化率持续提升。**根据高工机器人研究统计，谐波减速器方面，2021年日本哈默纳科和新宝在中国的销量市占率分别同比下滑1.5pct和1.6pct，绿的谐波销量市占率同比提升3.7pct；RV减速器方面，2021年纳博特斯克在中国的销量市占率同比下滑3.0pct，双环传动销量市占率同比提升5.75pct。从产品类型来看，技术难度相对较低的谐波减速器国产化进程相对迅速。

图27: 2020年谐波减速器国内市场销量占比情况



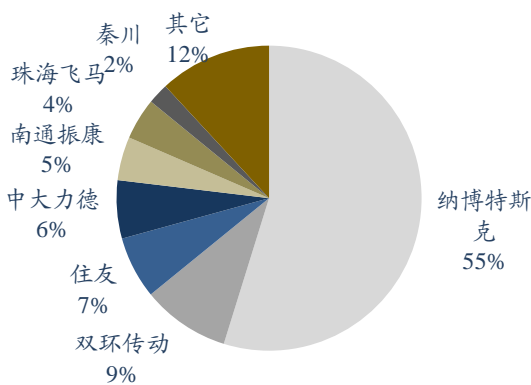
数据来源：高工机器人研究所，东吴证券研究所

图28: 2021年谐波减速器国内市场销量占比情况



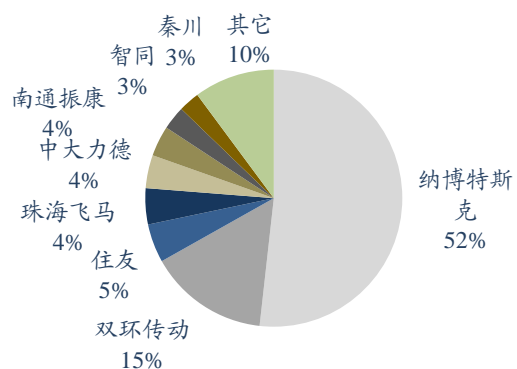
数据来源：高工机器人研究所，东吴证券研究所

图29: 2020年RV减速器国内市场销量占比情况



数据来源：高工机器人研究所，东吴证券研究所

图30: 2021年RV减速器国内市场销量占比情况



数据来源：高工机器人研究所，东吴证券研究所

关键参数指标相近，实际使用性能仍有较大差距。在比较国内外各品牌同类产品的

指标时，可以发现传动精度、减速比、扭矩刚度等关键指标参数已十分接近，但真实差距体现在指标之外，在真实使用过程中，寿命、精度、故障率等方面仍有较大差距。根据我们的产业链调研，以哈默纳科和国内品牌为例，实际使用差距主要体现在两方面：1) 哈默纳科谐波减速器在其全生命周期中可保持零故障，而国内品牌仍有故障率；2) 在相同环境下，哈默纳科谐波减速器的寿命是国内减速器的 1-2 倍，在越恶劣的工况下寿命差距越大。

图31: 国内外各品牌同型号谐波减速器关键参数对比

性能指标	绿的 (LHS-32)	来福 (LHT-32)	钧兴 (KSHG-32)	HD (HPG-32)
齿隙精度	≤ 1arcmin	≤ 1arcmin	≤ 1arcmin	≤ 1arcmin
传动精度	≤ 1arcmin	≤ 1arcmin	≤ 1arcmin	≤ 1arcmin
效率	≥ 80%	≥ 80%	≥ 80%	≥ 85%
温升	< 40℃	< 40℃	< 40℃	< 40℃
噪声	< 75dB(A)	< 75dB(A)	< 75dB(A)	< 75dB(A)
允许最高输入转速 (rads/min)	4500	4000	4800	5000
额定扭矩	51-130	99-178	95-170	54-137
最大冲击扭矩	190-652	497-892	450-868	200-686
减速比	30-160	50-160	50-160	30-160
回差	≤ 10'	≤ 10'	5' ≤ X ≤ 10'	5' ≤ X ≤ 10'
重量	2.5	3.15	3.15	3.2

数据来源：高工机器人整理，东吴证券研究所

图32: 国内外各品牌同型号 RV 减速器关键参数对比

性能指标	南通振康 RV-40E	秦川机床 RV-40E	环动科技 SHPR-40E	纳博特斯克 Nab 40E
齿隙精度	≤ 1arcmin	≤ 1arcmin	≤ 1arcmin	≤ 1arcmin
传动精度	≤ 1arcmin	≤ 1arcmin	≤ 1arcmin	≤ 1.5arcmin
效率	≥ 80%	≥ 80%	85% ≤ X ≤ 95%	85% ≤ X ≤ 95%
温升	< 47℃	< 45℃	< 45℃	< 45℃
噪声	< 75dB(A)	< 70dB(A)	< 75dB(A)	< 70dB(A)
过载	≤ 250%	200% ≤ X ≤ 250%	≤ 250%	≤ 250%
减速比	57-153	57-153	56-153	30-191
允许最高输入转速	70	70	70	70
额定扭矩	412	412	412	353
扭转刚度	108	108	108	108
回差	≤ 10'	≤ 10'	≤ 10'	≤ 10'

数据来源：高工机器人整理，东吴证券研究所

### 3.1.3. 考虑到人形机器人需求，2025 年全球谐波减速器市场空间有望达 147.5 亿元

工业机器人、协作机器人为谐波减速器提供基础市场，人形机器人提供增量市场。

①工业机器人：根据 IFR 预测，2020-2025 年全球工业机器人销量 CAGR=8%；②协作

机器人：人机交互需求提升+资本涌入，市场规模加速膨胀，根据 IFR 预测 2020-2025 年全球协作机器人销量 CAGR=21%；③人形机器人：根据我们对目前产业形式的判断，保守预计至 2025 年人形机器人销量为 50 万台，与工业机器人相当。

按照一台工业机器人搭载 3.5 台，一台协作机器人搭载 7 台谐波减速器来计算，一台人形机器人搭载 10 台谐波减速器计算。人形机器人搭载谐波减速器数量假设如下：

以特斯拉 Optimus 为例，全身搭载 28 台减速器，其中我们判断下肢及腰部 8 个减速器大概率使用负载能力较强的 RV 减速器。而上身+手部的 20 台减速器大概率会使用谐波减速器，部分关节还可能会使用行星减速器。谐波和行星减速器均有体积小特点，但谐波减速器精度较高，不耐冲击；而行星减速器精度较低，耐冲击，机器人制造商可能会视情况选择部分行星减速器。再考虑到为实现降本，机器人制造商会不断努力减少执行器数量，因此我们保守估计一台人形机器人将搭载 10 台谐波减速器。

综合测算下可得 2022-2025 年全球机器人用谐波减速器需求量将分别达 182/299/467/738 万台，CAGR=59.5%。再按照谐波减速器单价约 2000 元/台测算，则可得 2022-2025 年全球机器人用谐波减速器市场规模将分别达 36.3/59.8/93.4/147.5 亿元。

图33：考虑人形机器人需求，2025 年全球谐波减速器市场空间有望达 147.5 亿元

	2020	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E
<b>工业机器人</b>						
全球工业机器人销量（万台）	38.4	43.5	45.3	48.6	51.8	54.9
每台工业机器人平均所需谐波减速器（台）	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
工业机器人用谐波减速器需求（万台）	134	152	159	170	181	192
<b>协作机器人</b>						
全球协作机器人销量（万台）	2.5	2.9	3.3	4.1	5.1	6.5
每台协作机器人平均所需谐波减速器（台）	7	7	7	7	7	7
协作机器人用谐波减速器需求（万台）	17.5	20.3	23.1	28.7	35.7	45.5
<b>人形机器人</b>						
全球人形机器人销量（万台）				10.0	25.0	50.0
每台人形机器人平均所需谐波减速器（台）				10	10	10
人形机器人用谐波减速器需求（万台）				100	250	500
<b>全球机器人用谐波减速器总需求（万台）</b>	<b>152</b>	<b>173</b>	<b>182</b>	<b>299</b>	<b>467</b>	<b>738</b>
谐波减速器平均售价（元）	2000	2000	2000	2000	2000	2000
<b>谐波减速器市场规模（亿元）</b>	<b>30.4</b>	<b>34.5</b>	<b>36.3</b>	<b>59.8</b>	<b>93.4</b>	<b>147.5</b>
YOY	2.4%	13.6%	5.3%	64.5%	56.3%	58.0%

数据来源：IFR，东吴证券研究所测算

### 3.2. 控制器&伺服系统：机器人实现运动功能的核心部件

机器人的运动控制主要通过控制器和伺服系统共同完成，而伺服系统主要包括伺服驱动器和伺服电机。运动控制上游包括各类电子元器件，如 PCB 面板、IC 芯片、晶体管、电阻电容等，中游核心部件包含运动控制器、伺服驱动器、伺服电机，下游运用于

工业机器人、半导体、机床等各行各业。

图34: 运动控制系统应用原理



数据来源：雷赛智能招股书，东吴证券研究所

### 3.2.1. 控制器：机器人运动控制的“大脑”

运动控制器是根据指令和传感信息控制机器人完成任务的装置，由控制板卡和算法控制软件组成，技术路线包括 PLC、PC-based 和嵌入式控制器三种。其中 PC-Based 能够实现更为复杂的运动控制，目前已成为发展最快的运动控制器，随着下游工业机器人、半导体等行业对运动控制要求的提高，PC-Based 控制将迎来更为广阔的发展。

图35: 控制器分类及特点介绍

分类	特点	应用领域
PLC控制器	系统简单，体积小，可靠性高，但不支持复杂算法，可以通过在 PLC 平台上，添加驱动步进电机或伺服电机的位置控制模块，在为各种机械设备提供逻辑控制的同时，提供运动控制功能	可以用于圆周运动或直线运动的控制，广泛应用于各种机械、机床、机器人和电梯等行业
嵌入式控制器	涵盖从简单到复杂的各种运用，具有应用灵活、稳定性高、定制性强、价格便宜、操作和维护方便的特点	在针织机械、激光、切割、点胶机等设备制造行业有广泛的应用
PC-Based 控制卡	系统通用性强、可拓展性强，能够满足复杂运动的算法要求、抗干扰能力强，可供用户根据不同的需求，在 DOS 或 Windows 等平台上自行开发应用软件，组成各种控制	主要应用于电子、半导体、工业机器人、包装等领域

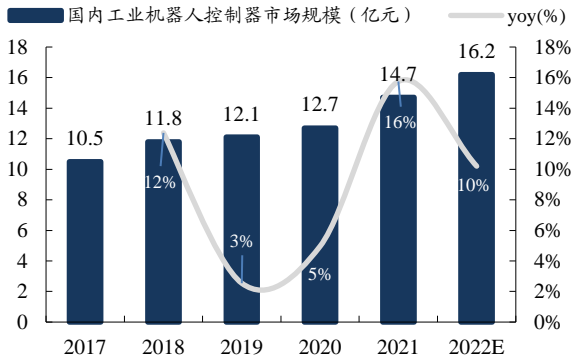
数据来源：雷赛智能招股书，东吴证券研究所

控制器作为机器人的大脑，对机器人的运动性能起着决定性的影响。工业机器人控制器主要控制机器人在工作空间中的运动位置、姿态和轨迹，操作顺序及动作的时间等。而对于不同类型的机器人，其控制器类型与设计方案也有所不同。例如直角坐标机器人售价低，运动控制相对简单，多采用工控机+运动控制卡的方案；而在多关节机器人和 SCARA 的场景下，由于机器人结构紧凑，运动控制较为复杂，多采用示教器+嵌入式控制器的方案。近年来随着工业机器人的市场扩张，机器人控制器市场需求也稳步增长。



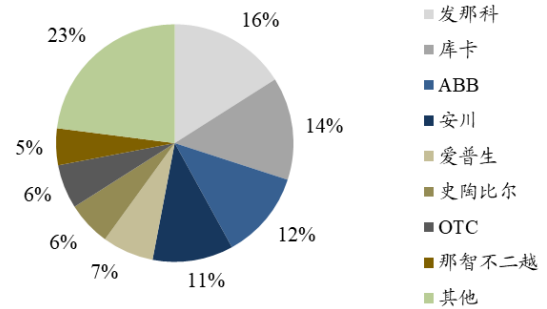
根据中商产业研究院统计，2022 年国内工业机器人控制器市场规模有望达 16.2 亿元，2017-2022 年复合增长率为 9.1%。

图36: 2022 年国内工业机器人控制器市场规模有望达 16 亿元



数据来源: 中商产业研究院, 东吴证券研究所

图37: 控制器多为机器人厂商自制, 国内机器人控制器市场四大家族合计市场份额占有率超过 50% (2020 年)



数据来源: 埃夫特招股书, 东吴证券研究所

工业机器人控制器多为本体厂商自制, 竞争格局与本体类似。目前国外主流机器人厂商的控制器均为在通用的多轴运动控制器平台基础上进行自主研发, 以四大家族和国内主流品牌为例, 已均基本实现自主生产。因此从竞争格局来看, 工业机器人控制器市场份额与工业机器人匹配, 2020 年四大家族合计市场份额占有率达到 50% 以上。

国内外差距主要集中于软件算法, 近年来国内企业加速布局。从产品差距来看主要体现在软件和算法方面, 采用的硬件平台与国外差距不大。一方面国外品牌天然具有先发优势; 另一方面软件算法等二次开发需要大量的经验积累, 而国外品牌工业机器人占据市场主导地位, 能够在更多更高端的场景下进行开发试错, 因而能够更加迅速的成长迭代。近年来国内企业加速布局控制器市场, 例如埃斯顿收购 TRIO, 埃夫特战略投资 ROBOX, 并成立子公司瑞博思, 逐步追赶国外品牌的步伐。

图38: 国内企业加速布局工业机器人控制器

企业名称	减速器	伺服电机	控制器
库卡	外购	外购	自产
发那科	外购	自产	自产
安川电机	外购	自产	自产
ABB	外购	自产	自产
埃斯顿	外购	自产	收购TRIO, 自产
汇川技术	外购	自产	自产
埃夫特	外购	外购	收购ROBOX, 自产
新松	外购	国产化替代中	国产化替代中
新时达	外购	外购	少量自产

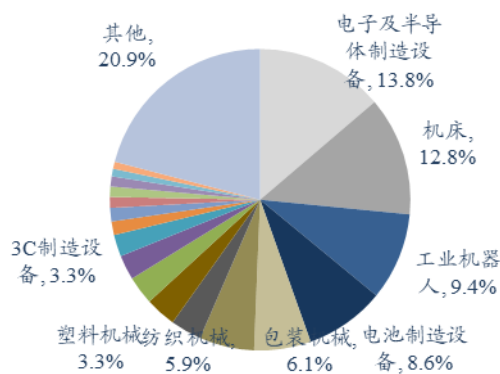
数据来源: 埃夫特招股书, 东吴证券研究所

### 3.2.2. 伺服系统：机器人运动控制的“神经系统”

伺服系统主要包括伺服驱动器和伺服电机，是工业自动化设备的“神经系统”。伺服系统是指以物体的位置、方位、状态等控制量组成的，能够跟随任意变化的输入目标或给定量的自动控制系统，主要包括驱动器和电机两部分。伺服系统可按照控制命令的要求，对功率进行放大、变换与调控等处理，通过驱动装置对电机输出力矩、速度和位置的控制量，最终形成的机械位移能准确地执行输入指令要求。伺服系统决定了自动化机械的精度、控制速度和稳定性，因此是工业自动化设备的核心。

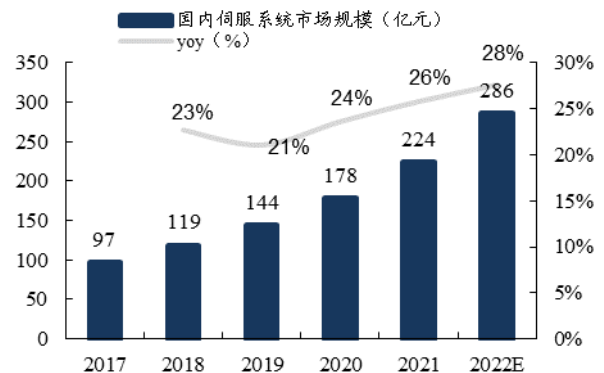
下游需求升级，市场规模逐步扩大。伺服行业下游应用行业随高精密设备需求的不断提升，实现了从纺织、包装、印刷等传统领域向电子设备制造、工业机器人等新兴领域的转移。2019年，电子半导体、机床和工业机器人是伺服应用最主要的三大市场，占比达到36%。随着伺服系统下游应用的转型升级，市场规模也在逐步扩大。根据中商产业研究院测算，2022年国内伺服系统市场规模有望达286亿元，2017-2022年复合增长率为24.1%。

图39：2019年伺服系统下游应用领域占比



数据来源：MIR，东吴证券研究所

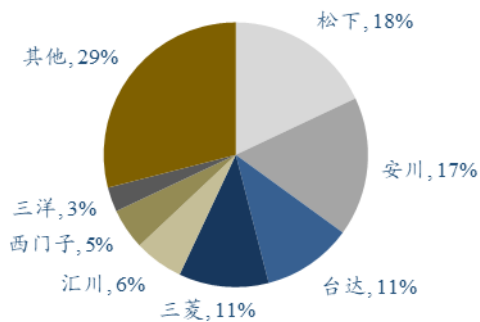
图40：国内伺服系统市场规模及增速



数据来源：中商产业研究院，东吴证券研究所

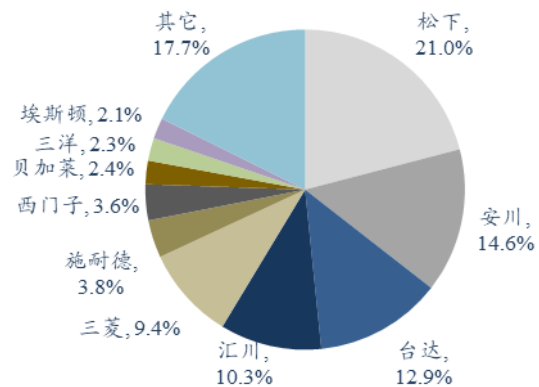
外商占据半壁江山，国产奋起直追。由于内资品牌在技术储备、产品性能、质量、品类上和国外品牌存在一定的差距，且电机编码器芯片依赖进口，国产伺服电机尚不能完全替代国外品牌，欧美和日系品牌仍然垄断着中高端伺服系统市场。2019年，松下、安川、三菱三大日系品牌就占据国内伺服系统全部市场份额的约45%，西门子、博世力士乐、贝加莱等欧美系品牌主要把握高端市场，部分欧美品牌推出中端产品。随着国内电机制造水平的大幅提升，交流伺服技术也逐渐为越来越多的国内厂家所掌握，同时交流伺服系统上游芯片和各类功率模块的不断进行技术升级，促成了国内伺服驱动器厂家在短短的不足十年时间里实现了从起步到全面扩展的发展态势。

图41：2015年国内伺服系统主要供应商市场份额



数据来源：工控网，东吴证券研究所

图42：2019年国内伺服系统主要供应商市场份额



数据来源：MIR，东吴证券研究所

相较于通用伺服，机器人用伺服系统对性能等各方面要求更高。机器人伺服系统通常指用于多轴运动控制的精密伺服系统，其对伺服系统的反应速度、体积、性能等诸多方面均提出更高的要求。（1）快速响应性：机器人工作节拍快，对伺服系统的反应灵敏性要求更高，一般以伺服电机的机电时间常数的大小来反应伺服电机快速响应的性能；（2）高负载运作：由于大型工业机器人负载量十分大，因此要求机器人的伺服电机的起动转矩大，转动惯量小，有足够的起动转矩惯量比。此外工业机器人会进行十分频繁的正反向和加减速运行，并可能在短时间内承受数倍过载；（3）体积小质量小：为配合工业机器人的体型，伺服电机必须体积小、质量小、轴向尺寸短，并且还要经受得起苛刻的，可进行十分频繁的正反向和加减速运行，并能在短时间内承受数倍过载。

正是由于机器人对伺服系统的更高要求，相较于通用伺服，国内外机器人用伺服系统的技术差距更大，这也直接影响到国内外工业机器人性能和稳定性的差距。近年来汇川技术、埃斯顿、广州数控设备等较大规模伺服电机品牌涌现，目前在中低端伺服领域已经可以实现大规模量产，市场占有率不断提升，并不断投入研发向高端伺服系统迈进。

#### 4. 投资建议

重点推荐【绿的谐波】突出重围的国产机器人龙头，【埃斯顿】玉汝于成，国产机器人集大成者，【汇川技术】变革赋能，国产电控&工控龙头（东吴电新组覆盖）；建议关注【双环传动】高精度齿轮龙头，RV减速机开启第二成长曲线。

表2: 相关公司估值情况 (截至 2022.9.30 收盘价)

股票代码	公司名称	市值 (亿元)	股价 (元)	归母净利润 (亿元)			PE			投资建议
				2022E	2023E	2024E	2022E	2023E	2024E	
688017.SH	绿的谐波	198.5	334.7	2.4	3.5	4.8	124	86	64	重点推荐
002747.SZ	埃斯顿	28.3	246.0	2.2	3.4	4.9	95	63	45	重点推荐
300124.SZ	汇川技术	66.1	1,744.6	43.0	56.1	73.0	41	31	24	重点推荐
002472.SZ	双环传动	39.6	307.8	5.4	7.7	10.3	58	41	30	建议关注
	平均						79	55	41	

数据来源: Wind, 东吴证券研究所

注: 绿的谐波、埃斯顿为东吴机械组预测, 汇川技术为东吴电新组预测, 双环传动为 Wind 一致预期。

## 5. 风险提示

**(1) 人形机器人产业化不及预期:** 人形机器人仍处于发展初期阶段, 若产业化应用场景不足, 则会导致人形机器人产业化不及预期。

**(2) 核心零部件国产化不及预期:** 人形机器人对于产业链要求较高, 若国产零部件厂商产品性能提升不及预期, 无法满足人形机器人使用需求, 则可能导致零部件国产化不及预期。

**(3) 人形机器人或存在舆论阻力:** 人形机器人自诞生以来就伴随着诸多舆论压力, 不同人群对于人形机器人的看法也有差异, 若舆论阻力巨大, 或导致人形机器人推广不及预期。

## 免责声明

东吴证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

本研究报告仅供东吴证券股份有限公司（以下简称“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客户。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，本公司不对任何人因使用本报告中的内容所导致的损失负任何责任。在法律许可的情况下，东吴证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

市场有风险，投资需谨慎。本报告是基于本公司分析师认为可靠且已公开的信息，本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，也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报告。

本报告的版权归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。如引用、刊发、转载，需征得东吴证券研究所同意，并注明出处为东吴证券研究所，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。

## 东吴证券投资评级标准：

### 公司投资评级：

买入：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对大盘在 15% 以上；

增持：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对大盘介于 5% 与 15% 之间；

中性：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对大盘介于 -5% 与 5% 之间；

减持：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对大盘介于 -15% 与 -5% 之间；

卖出：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对大盘在 -15% 以下。

### 行业投资评级：

增持：预期未来 6 个月内，行业指数相对强于大盘 5% 以上；

中性：预期未来 6 个月内，行业指数相对大盘 -5% 与 5%；

减持：预期未来 6 个月内，行业指数相对弱于大盘 5% 以上。

东吴证券研究所

苏州工业园区星阳街 5 号

邮政编码：215021

传真：（0512）62938527

公司网址：<http://www.dwzq.com.cn>