

## 机器人系列报告（五）

## 人形机器人的“前世今生”

人形机器人已经进入到以具备感知能力和认知能力为主要特征的高动态运动发展阶段。2022年，特斯拉宣布将推出的人形机器人 Optimus，引起资本市场和产业界的广泛关注。人形机器人的核心零部件包括减速机构、滚柱丝杠、无框力矩电机、空心杯电机、各类传感器等，相关环节有望随人形机器人产业的发展受益。

□ 人形机器人的发展经历四个阶段，目前已经进入到以具备感知能力和认知能力为主要特征的高动态运动发展阶段。（1）萌生阶段：人形机器人仅实现简单的结构驱动。（2）早期发展阶段：人形机器人实现了关节驱动，有一定的智力水平但较为低下。（3）系统高度集成发展阶段：人形机器人已经能够完成跑步、转弯、识别特定人群面孔、检测化学防护服等简单任务。（4）高动态运动发展阶段：人形机器人的“自主”功能被逐步开发，包括自主理解、自主推断、自主决策、自主行动等。波士顿动力的 Atlas、汉森机器人的 Sophia、优必选的 Walker、敏捷机器人的 Digit、Engineered Arts 的 Ameca，以及 2022 年发布的小米 Cyberone 和特斯拉 Optimus 是第四阶段最具代表性的几个机器人。其中，2022 年 9 月特斯拉 AI Day 上 Optimus 原型机的推出，尤其受到资本市场和产业界的关注。同时，AI 大模型的应用有望进一步提升人形机器人的自主决策、与人交互能力。

□ 在特斯拉人形机器人 BOM 成本中，关节部件价值量占比超过一半，核心零部件包括减速机构、滚柱丝杠、无框力矩电机、空心杯电机以及各类传感器等。Optimus 原型机身高 172cm，体重 73kg，静坐能耗 100W，慢走能耗 500W。全身共 28 个执行器（分为旋转执行器和直线执行器两大类），2 个灵巧手，200+个自由度（其中，手部自由度 27 个）。按照 Optimus 目前的方案，谐波减速器、滚柱丝杠、无框力矩电机、空心杯电机以及各类传感器将会是运动关节的核心零部件，有望受益于人形机器人的快速发展。

□ 人形机器人将带动相关核心零部件市场空间成倍增长。在人形机器人量产，每年产量规模 50 万台的中性假设下，谐波减速器、滚柱丝杠、无框力矩电机、空心杯电机、力矩传感器的新增市场规模将分别达到 80/60/112/42/64 亿元，相比于原本的市场空间都有了成倍增长。

□ 投资建议：2022 年 9 月 30 日，特斯拉发布其第一代人形机器人 Optimus，受到资本界和产业界的广泛关注。本报告详细回顾了人形机器人的发展历史，以期投资者展现人形机器人“前世今生”的全貌。展望未来，我们认为，人形机器人的快速发展，要建立在成本快速下降的基础上，从这个角度看，中国有丰富、全面、低成本的制造业供应体系，必然会广泛、深度地参与到人形机器人的发展过程当中。建议关注在执行器总成环节绑定大客户，具备较高壁垒的三花智控（汽车组）；国产谐波减速器龙头绿的谐波；在滚柱丝杠具备优势的江苏雷利/鼎智科技（电新组）；空心杯电机核心供应商鸣志电器（电新组）。建议关注泛产业链的机会，重点公司包括中大力德、双环传动、贝斯特、恒立液压、步科股份、五洲新春等。

□ 风险提示：特斯拉人形机器人商业化进展不及预期、商业化应用场景与市场需求不及预期、产业链降本不及预期、测算假设与实际不符。

## 推荐（维持）

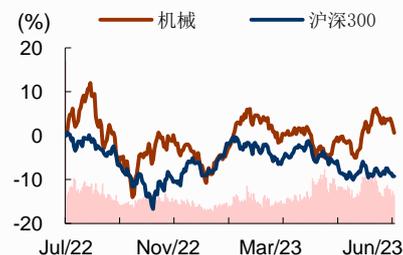
中游制造/机械

## 行业规模

		占比%
股票家数（只）	457	9.1
总市值（十亿元）	3813.8	4.7
流通市值（十亿元）	3083.9	4.4

## 行业指数

%	1m	6m	12m
绝对表现	-2.4	2.6	0.3
相对表现	-1.3	11.2	10.1



资料来源：公司数据、招商证券

## 相关报告

- 1、《机器人行业系列报告（四）—巨头纷纷布局，AI+机器人未来可期》2023-05-04
- 2、《机器人行业系列报告（三）—3月制造业 PMI 为 51.9%，机器人 Q2 表现或更佳》2023-04-01
- 3、《机器人行业系列报告（二）—特斯拉宏图 3 再提人形机器人，初步具备实用化效果》2023-03-02

胡小禹 S1090522050002  
 huxiaoyu1@cmschina.com.cn  
 梁程加 S1090522060001  
 liangchengjia@cmschina.com.cn  
 董瑞斌 S1090516030002  
 dongruibin@cmschina.com.cn  
 鄢凡 S1090511060002  
 yanfan@cmschina.com.cn  
 刘玉萍 S1090518120002  
 liuyuping@cmschina.com.cn  
 刘巍 S1090522070003  
 liuwei24@cmschina.com.cn  
 汪刘胜 S1090511040037  
 wangls@cmschina.com.cn

## 正文目录

一、 人形机器人的“前世今生”.....	5
1、 人形机器人的“L0~L5”.....	5
2、 人形机器人历史上的四大发展阶段.....	5
(1) 萌生阶段 (L0): 简单结构驱动, 智力为零.....	6
(2) 早期发展阶段 (L1~L2): 有了最初级的智力水平.....	8
(3) 系统高度集成发展阶段 (L2~L3): 应用场景简单, 以娱乐和展览为主 ..	9
(4) 高动态运动发展阶段 (L3~L4): “自主”功能逐步完善.....	10
二、 人形机器人成本详拆, 哪些环节值得关注? .....	16
1、 基于 Optimus 的成本拆分.....	16
(1) 体型与躯干: 共 28 个执行器, 200+自由度.....	17
(2) 旋转执行器: 核心部件为谐波减速器.....	19
(3) 直线执行器: 核心部件为滚柱丝杠.....	20
(4) 灵巧手: 核心部件为空心杯电机.....	20
(5) 软件: 高度复用特斯拉自动驾驶技术.....	21
2、 核心关节零部件.....	21
(1) 减速机构: 谐波减速器最为受益, 精密行星减速器或有替代机会.....	21
(2) 滚柱丝杠: 人形机器人量产将带来 29-96 亿元增量市场.....	25
三、 投资建议.....	30
四、 风险提示.....	31

## 图表目录

图 1: 目前人形机器人正从 L3 向 L4 过渡.....	5
图 2: 人形机器人的四大发展阶段.....	6
图 3: 达芬奇的“机器武士”.....	6
图 4: 土耳其机器人.....	7
图 5: 瑞士钟表匠制造的三个机器人.....	7
图 6: 国外机器人发展历程.....	8
图 7: 水牛流马的现代复原模型.....	8
图 8: 早稻田大学加藤实验室研发的两款人形机器人 WABOT-1&WABOT-2....	9

图 9: ASIMO、NAO、PETMAN 机器人 (从左到右)	10
图 10: 1986-2010 年期间推出的主要机器人	10
图 11: 2010 至今推出的主要机器人	11
图 12: 经过三代改造, Atlas 可以完成跑酷、后空翻等高难度动作	11
图 13: Sophia 是目前为止仿真程度最高的人形机器人	12
图 14: Walker 定位为服务机器人, 经历了三次迭代	12
图 15: Digit 机器人主要应用于仓储物流	13
图 16: Ameca 是现存面部表情最丰富、仿真的人形机器人	13
图 17: 2022 年 8 月, 小米 Cyberone“铁大”亮相	14
图 18: Optimus 推出后, 人形机器人有望成为继电动车之后的新增长极	15
图 19: Optimus 体型参数	18
图 20: Optimus 躯干参数	18
图 21: Optimus 全身 28 个执行器	19
图 22: 6 种执行器组合	19
图 23: 旋转执行器零部件	20
图 24: 直线执行器零部件	20
图 25: Optimus 灵巧手设计	21
图 26: Optimus 灵巧手参数	21
图 27: Optimus 三目摄像头画面	21
图 28: 谐波减速器结构示意图	22
图 29: 谐波减速器运行示意图	22
图 30: 2017-2019 年绿的谐波谐波减速器应用领域占比 (%)	23
图 31: 2022 年哈默纳科下游销售占比 (%)	23
图 32: 2021 年全球谐波减速器市场格局	24
图 33: 2020-2021 年国内谐波减速器市场竞争格局	24
图 34: 全球机器人下游谐波减速器市场规模 (亿元)	24
图 35: 精密行星减速器	25
图 36: 行星滚柱丝杠	25
图 37: 反向滚柱丝杠	25
图 38: 全球滚柱丝杠市场规模 (亿美元)	26
图 39: 科尔摩根 TBM2G 无框力矩电机	26
图 40: 全球力矩电机市场规模 (亿美元)	27

图 41: 有刷空心杯电机结构图 .....	28
图 42: 无刷空心杯电机结构图 .....	28
图 43: 我国微特电机行业市场规模 (亿元) .....	28
图 44: 力/力矩传感器.....	29
图 45: ATI 力/力矩传感器内部结构 .....	29
图 46: ASIMO 有 8 个麦克风阵列 .....	30
图 47: 能斯达电子皮肤.....	30
图 48: 机械行业历史 PE Band .....	32
图 49: 机械行业历史 PB Band .....	32
表 1: ASIMO、NAO、PETMAN 技术指标、应用场景对比 .....	10
表 2: 几款主要机器人技术指标、应用场景对比.....	15
表 3: 国内主要人形机器人厂家 .....	16
表 4: Optimus BOM 成本估算 (单位均为美元) .....	17
表 5: Optimus 执行器分布.....	19
表 6: RV 减速器和谐波减速器对比 .....	22
表 7: 各种机器人谐波减速器单位用量 .....	23
表 8: 人形机器人带动谐波减速器市场空间测算.....	24
表 9: 人形机器人带动滚柱丝杠市场空间测算 .....	26
表 10: 人形机器人带动无框力矩电机市场空间测算 .....	27
表 11: 人形机器人带来的空心杯电机市场空间测算.....	28
表 12: 人形机器人带动力矩传感器市场空间测算.....	29
表 13: 人形机器人潜在标的梳理 .....	31

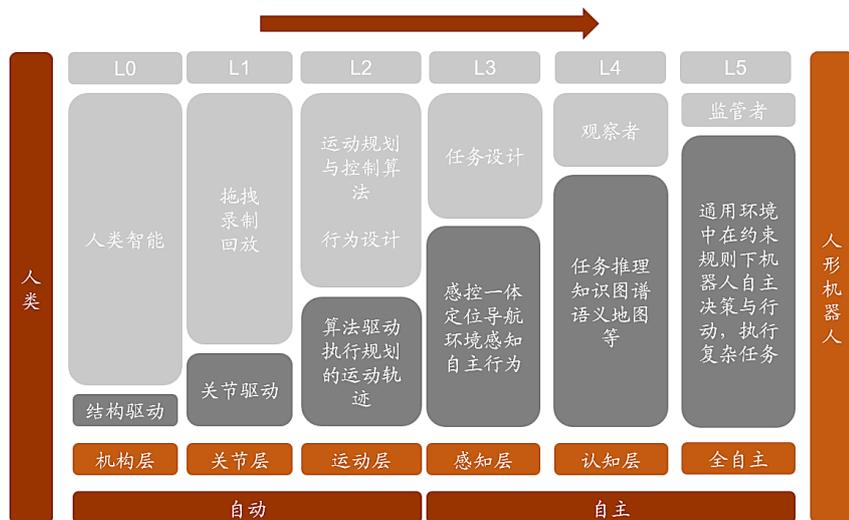
## 一、人形机器人的“前世今生”

### 1、人形机器人的“L0~L5”

人形机器人是外观和人类相似的智能机器人。据我国机器人公司优必选官网资料，按照智能化程度，人形机器人有 L0~L5 六个层级。目前，人形机器人正从 L3 向 L4 过渡。

- **L0:** 机器人只能依靠人类指令实现结构驱动，没有任何的智能化设计；
- **L1:** 机器人可以驱动关节实现拖拽、录制、回放等功能；
- **L2:** 在算法的驱动下规划运动轨迹和路径，完成特定动作；
- **L3:** 具备感知能力，利用传感器获取环境信息，能够自主识别、理解和反馈预设动作；
- **L4:** 具备一定认知，能够通过观察、测量、预设等方式自主推理，完成任务，不需要人的频繁干预；
- **L5:** 完全具备人类的思维和创造力，能够自主判断，做出决策并执行复杂的任务。

图 1：目前人形机器人正从 L3 向 L4 过渡



资料来源：优必选官网、招商证券

### 2、人形机器人历史上的四大发展阶段

早在公元前四世纪，亚里士多德就提出了机器人的概念。在接下来的几百年里，机器人开始拟人化、具象化。近几十年来，人形机器人的智能化程度加速提升，技术发展速度不断超出预期。我们回顾人形机器人的发展史后，将其分为四个阶段：

- **萌生阶段（1495-1972）:** 东西方历史均记载了对人形机器人的探索，这个阶段研制出的机器人能够实现简单的结构驱动；
- **早期发展阶段（1972-1986）:** 以早稻田大学研发的人形机器人为主；
- **系统高度集成发展阶段（1986-2010）:** 以本田、软银为代表的日本公司开

始研发、推出人形机器人，它们旗下的机器人应用场景较为简单，主要用作展览和娱乐；

- **高动态运动发展阶段（2010 至今）**：美国公司主导人形机器人赛道，制造出了科技含量更高、可完成搜救、配送等复杂任务的机器人。

图 2：人形机器人的四大发展阶段



资料来源：上游新闻、招商证券

**（1）萌生阶段（L0）：简单结构驱动，智力为零**

这个阶段的机器人没有任何智能化设计，仅能实现简单的结构驱动，属于最基础的 L0 层级。公元前三世纪，古希腊神话中的代达罗斯用青铜塑造了一个机械巨人“塔罗斯”。公元前三世纪，古希腊人发明了一个以空气和蒸汽压力作为动力的机器人。第一台有实物作证的机器人是 1495 年由达芬奇绘制的“机器武士”。在这之后，西方国家及日本开始了长达几百年的机器人探索史。其中，较为知名的几款机器人有：

- **“机器武士”**：由达芬奇绘制，后被一群意大利工程师耗时 15 年制造完成，能够完成坐、站立、挥舞胳膊等动作。

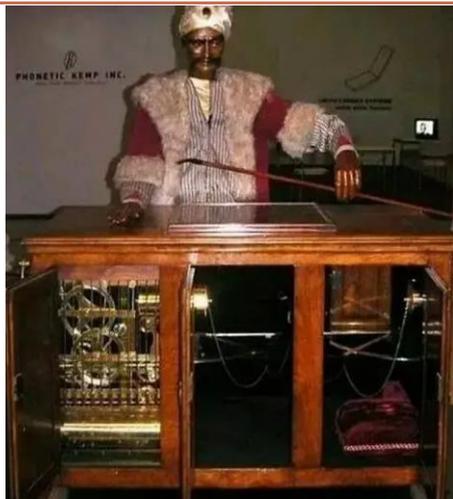
图 3：达芬奇的“机器武士”



资料来源：北京第二十六维信息技术有限公司、招商证券

- **“土耳其机器人”**：由匈牙利男爵建造，能够通过复杂的齿轮和杠杆系统移动棋子，与人下国际象棋。

图 4: 土耳其机器人



资料来源:《通信世界》、招商证券

- “写字机器人”、“绘图机器人”和“演绎机器人”: 由瑞士钟表匠及其儿子制造,目前正在瑞士一家博物馆展出。三款机器人分别能写字、画画和弹琴。替换写字机器人的 40 个齿轮后,该机器人能写出不同的句子。因此,写字机器人也被一些科学家认为是现代计算机的鼻祖。

图 5: 瑞士钟表匠制造的两个机器人



资料来源:《通信世界》、招商证券

图 6: 国外机器人发展历程

- 1495年: 达芬奇绘制“机器武士”，以风能、水力为驱动力，机器人实现坐、站立、挥舞胳膊等功能。
- 1770年: 匈牙利男爵建造“土耳其机器人”，通过复杂的齿轮和杠杆系统来移动棋子，与人下国际象棋。
- 1768-1774年: 瑞士钟表匠皮埃尔·雅奎特·德罗兹和他的两个儿子制出“写字机器人”“绘图机器人”和“演绎机器人”。
- 1893年: 加拿大人乔治摩尔设计了能行走的机器人。
- 1927年: 美国西屋电器工程师制造了“Televox”机器人。
- 1928年: 日本第一台人形机器人Gakutensoku诞生。
- 1933年: 美国西屋电气的工程师温斯利带领团队发明了一款名为Elektro的机器人。
- 1939年: 瑞典发明家奥古斯特·哈蒙发明电波机器人，可以接受无线电波传送的指令，从而实现“行走”的目的。
- 1963年: NASA造出了一个机器人，能模拟出35种基本的人类动作。

资料来源:《通信世界》、北京第二十六维信息技术有限公司、招商证券

我国的机器人大多记载于文献中或流传于民间,有的仅是后人根据传闻复刻的模型。其中,较为知名的机器人有:

- 水牛流马(三国): 传闻中三国时期的诸葛亮发明的步行机器人。

图 7: 水牛流马的现代复原模型



资料来源: 南阳铭上维网络科技有限公司、招商证券

- 倒酒机器人(唐代): 唐代是我国历史上科技发展较迅速的朝代。据资料记载,洛州的县令殷文亮刻制了一个木机器人作为女招待给客人倒酒。
- 捉鱼机器人(唐代): 传闻柳州刺史王据研制了一个类似水獭的机器人,能够下水捉鱼。

## (2) 早期发展阶段(L1~L2): 有了最初级的智力水平

这个阶段的人形机器人属于 L1~L2 层级,实现了关节驱动,能够根据指令完成特定工作,有一定智力水平但较为低下。1967年,在“仿人机器人之父”加藤一郎的带领下,早稻田大学启动了人形机器人项目,并于1972年研发出世界上第一款全尺寸人形智能机器人 WABOT-1。WABOT-1 搭载机械手脚、人工视觉、听觉装置,能够执行搬运物体等任务,智力水平和一岁半婴儿相当。1984年,加藤实验室又推出了第二代产品 WABOT-2。WABOT2 是专用的音乐人形机器人,实现了识乐谱、灵活弹奏电子琴等功能,但自主识别、理解和反馈能力尚未达到

L3 级别。

图 8：早稻田大学加藤实验室研发的两款人形机器人 WABOT-1&WABOT-2



1972

1984

**智力水平和一岁半婴儿相当的机器人：**

- ◆ 搭载机械手脚、人工视觉、听觉装置；
- ◆ 进行简单日语对话；
- ◆ 搬运物体。

**专用音乐人形机器人：**

- ◆ 进行自然对话；
- ◆ 识乐谱；
- ◆ 灵活弹奏电子琴。

资料来源：搜狐、重庆智源机器人研究院、招商证券

**(3) 系统高度集成发展阶段 (L2~L3)：应用场景简单，以娱乐和展览为主**

系统高度集成发展阶段中的人形机器人达到 L2~L3 级水平，已经能够完成跑步、转弯、识别特定人群面孔、检测化学防护服等简单任务。本田推出的 ASIMO、Aldebaran Robotics 公司（被软银收购）推出的 NAO、波士顿动力推出的 PETMAN 是三款具有代表性的机器人。

**ASIMO (2000 年推出)：**

- 可以进行奔跑跳跃等多种运动，通过视觉、听觉感应器规划路线，避免与人类发生碰撞，还能与多人对话甚至展示手语；
- 一诞生就开始在世界各地进行表演，2002 年成为了纽约证交所的第一位非人类敲钟者；
- 由于其成本过高且商业化程度低，已于 2008 年停产。

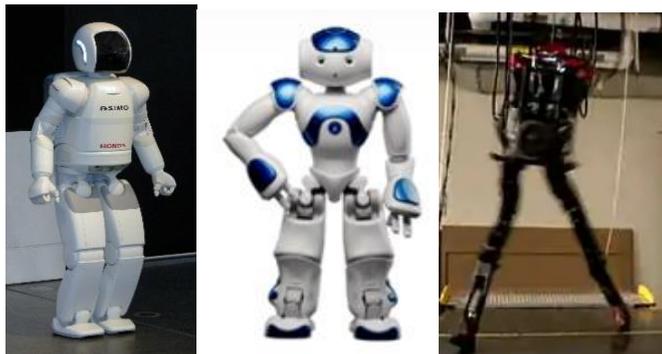
**NAO (2006 年推出)：**

- 软银于 2012 年以 1 亿美元收购了一家法国公司 Aldebaran Robotics，该公司于 2006 年推出 NAO 机器人。NAO 如今仍在售，售价 1 万。
- 是一款智能教学双足人形机器人：可以通过现成的指令块进行可视化编程，也能听、说、看，和人进行互动；被广泛应用于学术领域；

**PETMAN (2009 年推出)：**

- 随后爆火的 Atlas 机器人的前身，能像真人一样四处活动；
- 能够检验防护服和军事设备的性能。

图 9: ASIMO、NAO、PETMAN 机器人 (从左到右)



资料来源: 本田、软银、波士顿动力、招商证券

图 10: 1986-2010 年期间推出的主要机器人



资料来源: 本田、软银、波士顿动力、招商证券

表 1: ASIMO、NAO、PETMAN 技术指标、应用场景对比

	ASIMO	NAO	PETMAN
公司	本田	软银	波士顿动力
身高	120/130cm	58cm	—
体重	48-54kg	5.5kg	—
自由度	57	25	—
速度	1.6-2.7km/h	1.8km/h	5.1km/h
功能	奔跑、跳跃、与多人对话	可视化编程、听、说、看	检验防护服和军事设备的性能
应用场景	表演、展出	教学	军事

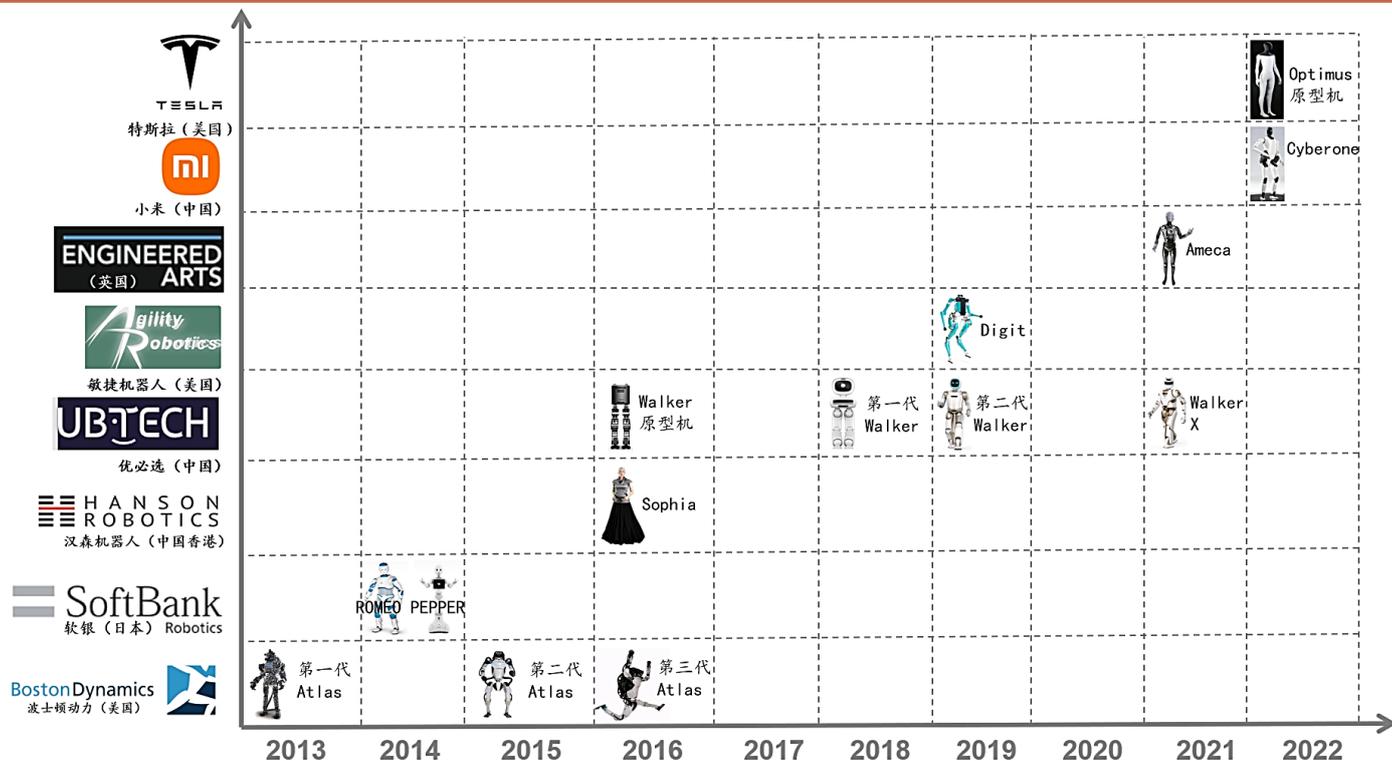
资料来源: 各公司官网、招商证券

(4) 高动态运动发展阶段 (L3~L4): “自主”功能逐步完善

进入高动态运动发展阶段后, 机器人的“自主”功能被逐步开发, 包括自主理解、自主推断、自主决策、自主行动等。这个阶段的机器人属于 L3~L4 级别。波士

顿动力的 Atlas、汉森机器人的 Sophia、优必选的 Walker、敏捷机器人的 Digit、Engineered Arts 的 Ameca，以及 2022 年发布的小米 Cyberone 和特斯拉 Optimus 是最具代表性的几个机器人。其中，2022 年 9 月特斯拉 AI Day 上 Optimus 原型机的推出对于人形机器人赛道意义重大：人形机器人有望成为继电动车之后的新增长极。

图 11：2010 至今推出的主要机器人



资料来源：波士顿动力、汉森机器人、敏捷机器人等公司、招商证券

Atlas (2013 年推出):

- 现存最灵巧的人形机器人之一：可以完成跑酷、后空翻、侧滚翻、前滚翻、180 度空中转体、空中劈叉、360 度空中转体等高难度动作。
- 已经经过了三代的改造：第一代有四个液压驱动的四肢；第二代身后有电池大背包，已经脱离了电缆的束缚；第三代 Atlas 机器人可以在室内和室外进行实际操作。

图 12：经过三代改造，Atlas 可以完成跑酷、后空翻等高难度动作



资料来源：波士顿动力、招商证券

**Sophia (2016 年推出):**

- **目前为止，在形态上仿真程度最高的人形机器人:** Sophia 有极其逼真的人类表情和高度仿生的皮肤，搭配了人工智能系统，可以处理自然语言会话，识别人脸和情绪，产生自己的情绪。在最新的视频中，Sophia 甚至开出了“Nacho cheese” (not your cheeses) 的谐音梗玩笑。
- **首个获得公民身份的机器人:** 2017 年，沙特阿拉伯正式赋予 Sophia 公民身份。它还是联合国开发计划署第一位机器人创新大使，在世界各地数百个会议上发表过演讲。

图 13: Sophia 是目前为止仿真程度最高的人形机器人

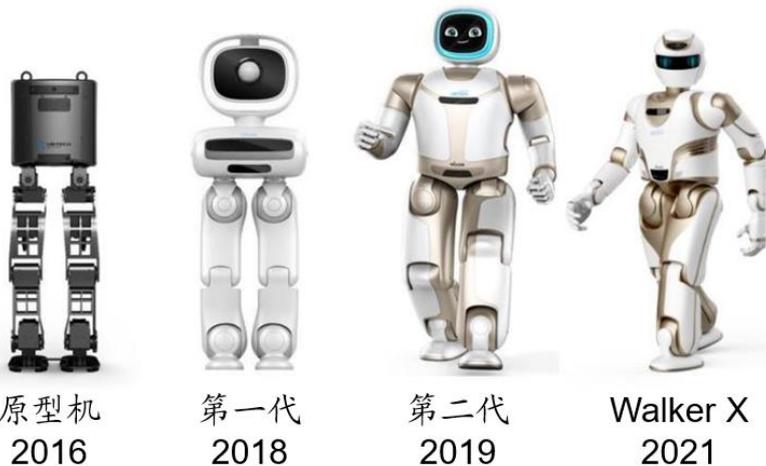


资料来源: 汉森机器人、招商证券

**Walker (2016 年推出):**

- **主打环境适应和人机交互能力:** 运动控制算法上可以适应各种地面和一定程度的不平整地形。柔性机械臂可以跟外界进行安全交互。结合机器视觉能力，还可以实现精准的手眼协调抓取。
- **定位为服务机器人，服务功能丰富:** 具备物体识别分拣与操作能力，可以自主操控冰箱等各类家电; 末端柔顺控制技术，可以完成按摩、拧瓶盖等家居任务; 内置的原生 28+ 机器人情绪体系，可以进行主动式交互。

图 14: Walker 定位为服务机器人，经历了三次迭代



资料来源: 优必选、招商证券

**Digit (2019 年推出):**

- **定位是仓储物流机器人:** 借助自带传感器进行半自动导航，搬动 18 公斤的

物体，进行移动包裹、卸货等工作，主要将被投入到物流、仓库等使用场景。同时也会被出售给执法和军事部门，但只提供非武器化功能。

- **首款出售给企业的双足机器人，但价格昂贵，商业化规模小：**2020年，美国汽车制造公司福特引进了第一批 Digit 机器人，旨在研究快递“最后一公里”的配送问题。但是，Digit 的售价达到了 25 万美元，每小时操作成本为 25 美元。2021 年产量为 40-60 台，综合考虑其高成本和低产量，Digit 的商业化规模较小。

图 15: Digit 机器人主要应用于仓储物流

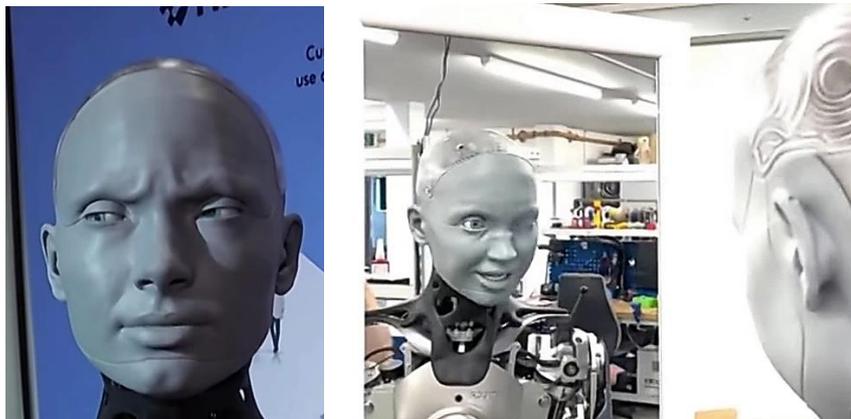


资料来源：Agility Robotics、招商证券

**Ameca (2021 年推出):**

- **面部表情最丰富、仿真的人形机器人：**利用 Mesmer 技术为 Ameca 提供大量的真人表情数据，从人体不同角度扫描，构建 3D 模型，在立体光刻 3D 打印机上制作的精确模具，使皮肤质感看起来和真人一样。
- **能够对外界变化做出相应反应：**Tritium 操作系统连接了软件、硬件和云端，可以驱动硬件的每一个组成部分，使其硬件部分能像人类骨骼一样活动。在最新的视频中，Ameca 对镜子邪魅一笑的表情比以往更加逼真。

图 16: Ameca 是现存面部表情最丰富、仿真的人形机器人



资料来源：Engineered Arts、招商证券

**Cyberone “铁大” (2022 年推出):**

- **真正做到了不仅看得到也看得懂：**据小米介绍，“铁大”采用了以高性能、小型化电机为主的干系统作为运动能力支撑，搭载自研 Mi-Sense 深度视觉模组，结合 AI 交互算法，使其不仅拥有完整的三维空间感知能力，更能够

实现人物身份识别、手势识别、表情识别。

- **更面向于服务人本身：**行动速度、抓握力、交互能力和 AI 算法对环境语义的识别判断能力突出。

图 17：2022 年 8 月，小米 Cyberone “铁大”亮相



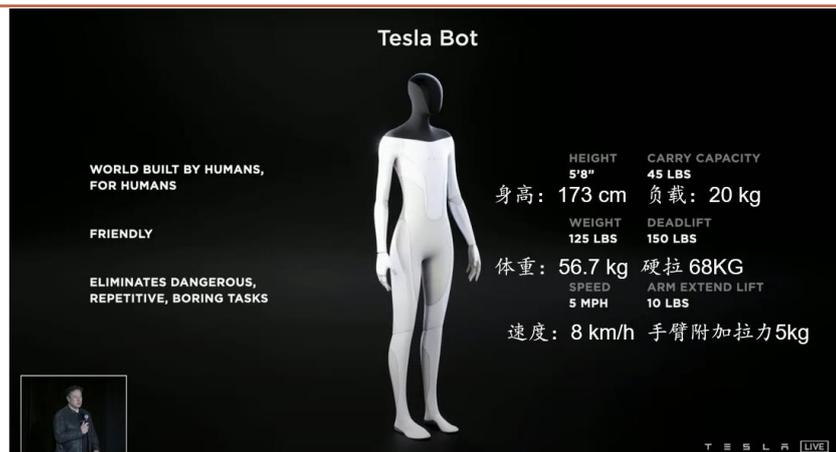
资料来源：小米、招商证券

**Optimus (2022 年推出):**

2022 年 9 月，特斯拉 Optimus 机器人原型机首次亮相，引起业内外广泛关注。

- **颠覆性功能定位，家庭、工业双场景应用：**功能定位为可实现家庭、工业双场景应用，完成危险、重复、枯燥工作的人形机器人。现有的机器人产品都只能完成某一特定场景的某一具体任务。
- **将逐步实现运动控制、环境探索、端到端操作等能力的提升：**在特斯拉 5 月 17 日发布的视频中，Optimus 又实现了以下进展：
  - ✓ 运动控制精度与感知能力提升: 具体表现之一为机械臂可以敲打鸡蛋但不打碎鸡蛋;
  - ✓ 环境探索与记忆能力有较大提升: Optimus 可以对场地环境进行感知与记忆，形成计算机视觉模型;
  - ✓ 端到端的操作能力有明显提升: 通过设定目标能够完成对桌子上的物品分类摆放的任务，复杂程度有所提升。

图 18: Optimus 推出后，人形机器人有望成为继电动车之后的新增长极



资料来源：特斯拉、招商证券

表 2: 几款主要机器人技术指标、应用场景对比

	Atlas	Sophia	Walker	Digit	Ameca	Cyberone	Optimus
公司	波士顿动力	汉森机器人	优必选	敏捷机器人	Engineered Arts	小米	特斯拉
身高	150cm	167cm	130cm	155cm	187cm	177cm	172cm
体重	89kg	20kg	63kg	42.2kg	49kg	52kg	56.6kg
自由度	28 个关节	—	41	—	21	21	28
负载	11kg	—	10kg	15kg	—	20kg	20kg
速度	2.5m/s	—	3km/h	1.5m/s	—	3.6km/h	8km/h (设计)
技术特点	28 个液压驱动关节和立体视觉系统;	①层次化毛孔、纳米级巨型分子毛孔等技术; ②电池操控的面部表情材料 Frubber	①内置的原生 28+机器人情绪体系; ②柔性机械臂	①激光雷达和立体相机; ②集成感应、计算和两个 4 自由度臂; ③全面的软件 API	①Mesmer 技术; ②Tritium 操作系统	①全身控制算法; ②视觉控制系统; ③音频算法; ④情绪感知	①四肢有 40 个机电执行器; ②仿人类设计, 由“轻质材料”制成; ③FSD、Dojo 强强联合构成机器人“大脑”
功能	跑酷、后空翻、侧滚翻、前滚翻、180 度空中转体、空中劈叉、360 度空中转体	自然对话、表情识别、回答问题	物体识别分拣与操作; 自主操控冰箱等各类家电; 按摩、拧瓶盖;	搬动 18 公斤的物体, 进行移动包裹、卸货	逼真的面部表情、快问快打	人物身份识别、手势识别、表情识别	自由行走、自我组装、感知环境、自主导航、远程操作和监控
应用场景	救灾、空间探索、娱乐活动、家庭服务	展演、与人交流	服务	仓储物流、执法和军事	餐饮、酒店、零售等领域	服务	工业&家庭

资料来源：各公司官网、百度百科、招商证券

**AI 大模型加速人形机器人自主化、智能化进程。**2022 年 11 月底，由 OpenAI 团队开发的 ChatGPT 正式推出，引发广泛关注。随后，谷歌 Bard、百度文心一言等大模型加入竞争。长期看来，ChatGPT 的关键技术可以帮助人形机器人实现下列突破：

- **计算机视觉：**大模型算法应用到人形机器人上，可以提升其识别环境中物体的能力；
- **自然语言处理：**通过将自然语言处理集成到机器人中来让其更好地理解 and 回应人类地语言，提升交互性；

- **机器学习:** 算法能够让人形机器人从大数据和经验中学习规律, 更好地进行推理和决策;
- **预测和分析:** 提升推理能力, 帮助机器人预测和响应环境变化, 轻松自如地处于更复杂的开放环境中。

事实上, 人形机器人接入 GPT3/4 后, 已经展现出了突破性的交互能力和情感表达能力。以机器人 Ameca 为例, 在接入 GPT3/4 后, 她展现出了惊人的语言沟通和自主思考能力。在被冒犯到时, Ameca 甚至做出了“愤怒”的表情。

**作为总结:**

- (1) 人形机器人的发展大致可分为四个阶段, 目前已经进入到以具备感知、认知能力为主要特征的第四阶段。
- (2) 国内主要人形机器人公司包括优必选、小米、幻尔科技、北京钢铁侠科技、追觅科技、大连蒂艾斯 (EX 机器人)、达闼机器人等。
- (3) 随着大模型算法的不断成熟, 人形机器人的自主决策能力、与人交互能力有望实现质的飞跃。

**表 3: 国内主要人形机器人厂家**

公司名称	公司介绍	主要产品
小米	主业为智能硬件和电子产品研发, 2022 年推出明星产品 Cyberone	Cyberone (铁大)
优必选 (UBTECH)	全球领先的人形机器人高新企业, 自研人工智能算法成为机器人“大脑”, 实现了机器人伺服驱动器的大规模量产	Walker 系列 (Walker、Walker X、Walker H2、熊猫机器人悠悠)
大连蒂艾斯 (EX 机器人)	专业从事智能仿生人形机器人研发、生产、销售及服务的国家高新技术企业。创造了中国第一台仿生人形机器人, 亚洲首家实现量产能力的仿生人形机器人企业	EXrobots
北京钢铁侠科技	国内第一家专门从事双足机器人研发和推广的科技公司	五代双足大仿人机器人 ART
纯米科技	互联网高科技技术企业, 2023 年 1 月公布全尺寸人形仿生机器人“大强”的荧幕首秀视频	全尺寸人形仿生机器人“大强”
幻尔科技	国内领先的高校教育机器人解决方案提供商	仿生教育机器人
追觅科技	专注智能生活家电的全球化科技公司	用于生活家电的通用型人形机器人
伟景机器人	专注于智能人形机器人和立体智能视觉系统研发和应用的国家级高新技术企业	智能人形服务机器人
乐森机器人	集智能机器人的研发、平台软件开发运用及产品销售为一体的高科技企业	泰坦机器人、K1

资料来源: 小米、优必选、大连蒂艾斯等公司官网、招商证券

## 二、人形机器人成本详拆, 哪些环节值得关注?

### 1、基于 Optimus 的成本拆分

特斯拉 Optimus 是目前市场上关注度最高的人形机器人。2021 年特斯拉 AI Day 上, 马斯克首次宣布开发概念性人形机器人。2022 年的 AI Day 上, 特斯拉展示了人形机器人 Optimus 的原型机, 其中一个原型机能够在舞台上行走, 另一个版本可以移动手臂。2023 年特斯拉股东大会上, Optimus 展示了其迭代的速度, 最新的型号在运动控制能力等方面得到大幅提升。

在特斯拉人形机器人 BOM (Bill of Material, 物料清单) 成本中, 关节部件价值量占比超过一半, 无框力矩电机、谐波减速器、传感器等价值量占比较高。根据我们的估算, 目前已知的特斯拉人形机器人 BOM 成本大约为 41381 美元 (不含未披露零件)。其中, 关节的 BOM 成本大约为 23563 美元, 占总成本的 56.9%。

在整机的 BOM 成本中，价值量占比最高的分别为 FSD 系统、无框力矩电机和谐波减速器。在关节的 BOM 成本中，价值量占比最高的分别为无框力矩电机、谐波减速器和位置传感器。这里，大脑硬件和软件系统参考了特斯拉目前车载软硬件的价格；运动关节的零部件参考了目前市场可循的零售价格以及厂商官网披露的价格，相比于大规模量产的价格会偏高。因此，我们的测算会比人形机器人实际量产后要高，测算仅作参考。

表 4: Optimus BOM 成本估算 (单位均为美元)

部位	零件	单价	数量	总价	占比	价格依据
躯干	电池包	460	1	460	1.1%	根据维科网，方形三元动力电池价格大约 1400 元/kWh，总价大约 3220 元，按照 1:7 汇率，对应 460 美元
大脑硬件	计算盒子	1500	1	1500	3.6%	据佐思汽车研究，特斯拉 HW4.0BOM 成本 1500 美元，包含摄像头模组、毫米波雷达和计算盒子
	摄像头模组					
	毫米波雷达					
旋转执行器	谐波减速器	233	16	3728	9.0%	据绿的谐波招股说明书，2019 年公司销售谐波减速器平均单价为 1631.95 元人民币，按照 1:7 汇率测算为 233 美元
	机械离合器	180	16	2880	7.0%	据 EMPI 网站，大众汽车车用 180 毫米机械离合器单价 180 美元
	滚珠轴承	7.2	32	230	0.6%	据米思米官网，外径 260 毫米滚珠轴承单价 50.6 元人民币，按照 1:7 汇率，对应 7.2 美元
直线执行器	滚柱丝杠 (反向、行星)	85.7	24	2057	5.0%	Rollvis 送样产品单价大约 2000 元人民币，国产单价 600 元人民币，按照 1:7 汇率，对应 88.6 美元
电机	无框力矩电机	142.9	28	4001	9.7%	据步科股份官方信息，目前无框力矩电机的产品单价是几百元至几千元不等，假设单价 1000 元人民币，按照 1:7 汇率，对应 142.9 美元
	空心杯电机	128.6	12	1543	3.7%	据鸣志电器官网，有刷空心杯电机价格区间为 400-1400 元，取中位数 900 元，按照 1:7 汇率，对应 128.6 美元
传感器	力学传感器	71.4	12	856.8	2.1%	据 1688 网站，格鲁斯机器人用传感器价格大约为 500 元，按照 1:7 汇率，对应 71.4 美元
	力矩传感器	142.9	16	2286.4	5.5%	据 1688 网站，OnRobot 协作机器人用六轴力矩传感器价格大约为 1000 元，按照 1:7 汇率，对应 142.9 美元
	位置传感器	71	44	3124	7.5%	AutoZone 博世曲轴车用位置传感器 0261210199 价格为 71 美元
编码器	编码器	71.4	40	2856	6.9%	据爱采购网站，机器人编码器价格大约为 500 元，按照 1:7 汇率，对应 71.4 美元
软件系统	FSD	15000	1	15000	36.2%	参考特斯拉官网 FSD 最新价格
外壳架构件	合金、碳纤维	26	33	858	2.1%	总重 73kg 中减去零部件重量大约 40kg，估计结构件重量 33kg，碳纤维价格 180 元/公斤，按照 1:7 汇率测算为 26 美元/公斤
合计				41381	100.0%	

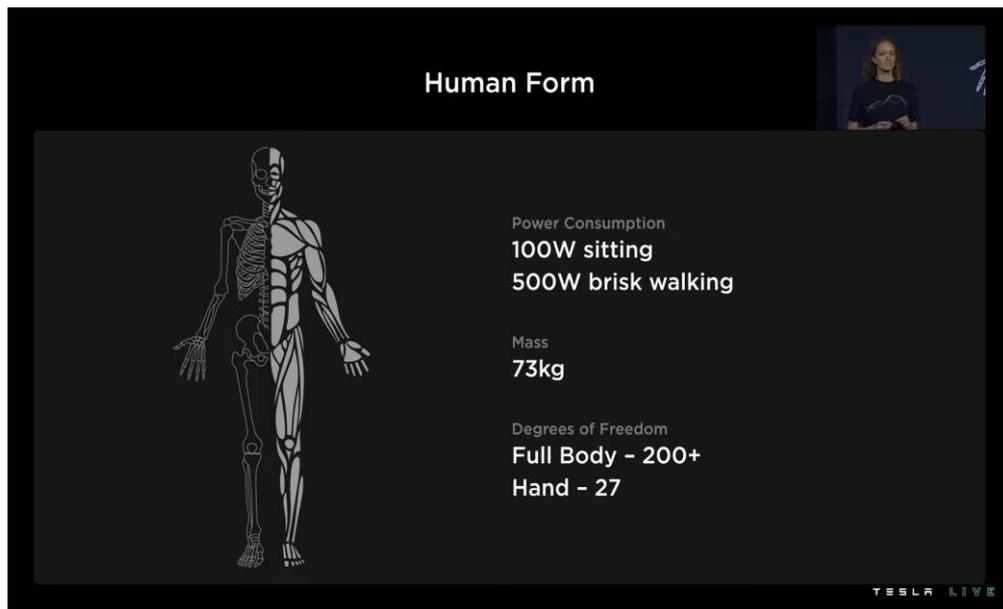
资料来源：维科网、佐思汽车研究、绿的谐波、EMPI、米思米、步科股份、鸣志电器、1688、AutoZone、爱采购、特斯拉、招商证券估算

注：本表所涉及传感器为特斯拉 AI Day 中，执行器上所展示的传感器，实际中，根据专家访谈，人形机器人大约含超过 200 个传感器，其他未披露传感器未计入。本表仅包含特斯拉公布的零部件成本，仍有大量未公布的零部件（比如齿轮、螺丝螺母、编码器、伺服等）具备较大价值量。由于未披露，暂不计入成本拆分当中

### (1) 体型与躯干：共 28 个执行器，200+自由度

根据特斯拉 2022 年 AI Day 资料，Optimus 原型机身高 172cm，体重 73kg，静坐能耗 100W，慢走能耗 500W。全身自由度 200+，手部自由度 27 个。

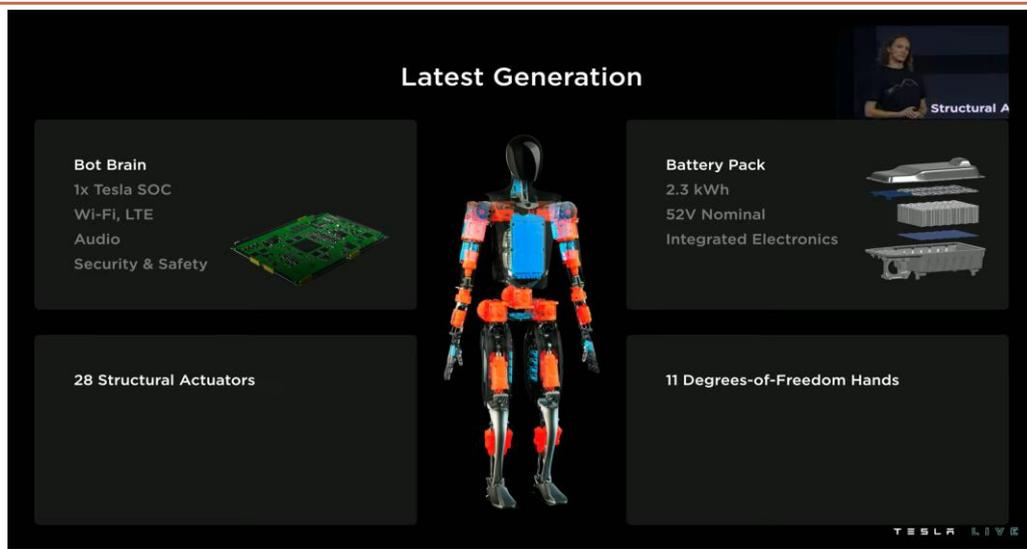
图 19: Optimus 体型参数



资料来源：特斯拉、招商证券

下图显示的机器人身体中，橙色部分为执行器，蓝色部分为电子系统。躯干中间是电池包（2.3kWh 容量，52V 电压）将汽车和能源产品中的电池技术集成到电池包中，基于特斯拉现有的产业链就可以制造。机器人的“大脑”也在躯干当中，利用 Autopilot 的软硬件技术进行集成，根据外观和性能需求改进，用于处理视觉数据、决策、通信，包含了 1 个特斯拉 Soc 芯片、WiFi 与 LTE 通讯芯片、音频处理芯片和安全芯片。

图 20: Optimus 躯干参数

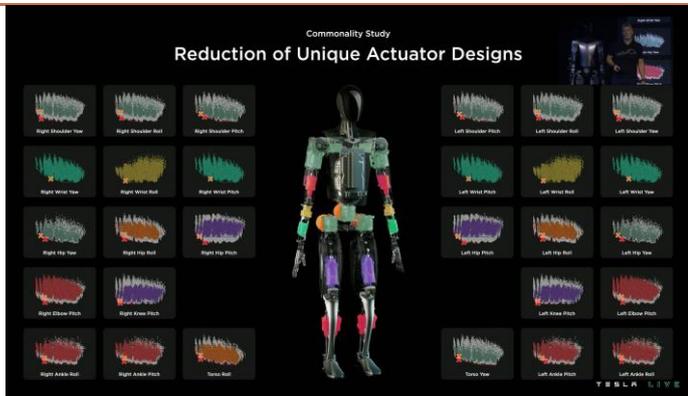


资料来源：特斯拉、招商证券

Optimus 全身共 28 个执行器，其中旋转执行器 16 个，直线执行器 12 个。执行器通过各自位置模拟出的运动速度与力矩寻找各自关节在成本上的最优解，再通过寻找每个部位的共性，减少执行器的差异性来达到降本的目的。28 个执行器中，旋转执行器负责欧拉角中的偏航角（Yaw）和横滚角（Roll），直线执行器负责俯仰角（Pitch），因此共有 16 个旋转执行器和 12 个直线执行器。最终形成的执行器设计有六种。其中，旋转执行器和直线执行器各三种。旋转执行器中，小

型号扭矩 20Nm，重量 0.55kg；中型号扭矩 11Nm，重量 1.62kg；大型号扭矩 180Nm，重量 2.26kg。直线执行器中，小型号负载 500N，重量 0.36kg；中型号负载 3900N，重量 0.93kg；大型号负载 8000N，重量 2.20kg。

图 21: Optimus 全身 28 个执行器



资料来源：特斯拉、招商证券

图 22: 6 种执行器组合



资料来源：特斯拉、招商证券

表 5: Optimus 执行器分布

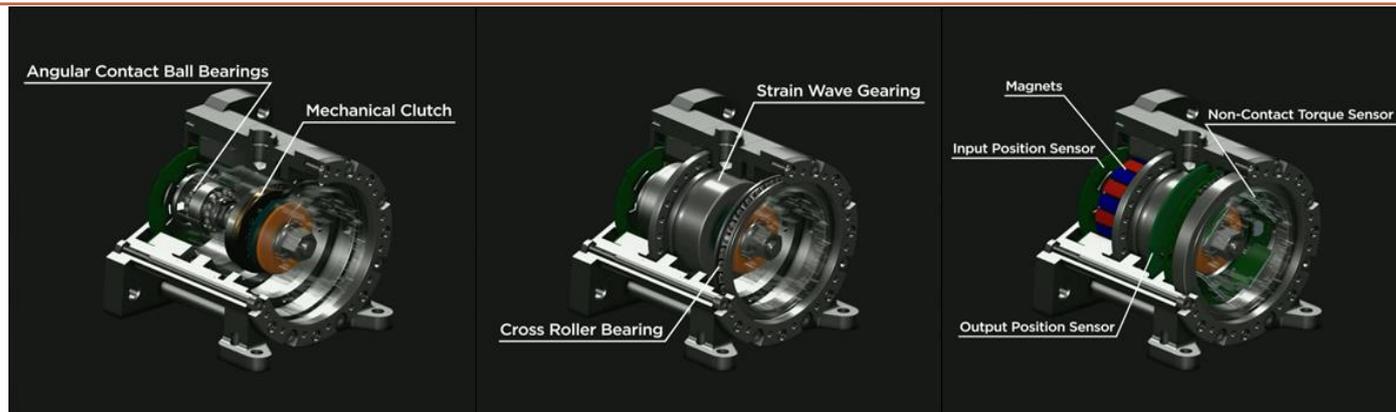
部位/欧拉角	旋转执行器		直线执行器
	偏航角 (Yaw)	横滚角 (Roll)	俯仰角 (Pitch)
肩部	2	2	2
腕关节	2	2	2
髁关节	2	2	2
膝部			2
肘部			2
躯干	1	1	
踝关节		2	2
合计	7	9	12

资料来源：特斯拉、招商证券

## (2) 旋转执行器：核心部件为谐波减速器

Optimus 共有 16 个旋转执行器 (7 个偏航角, 9 个横滚角), 用于机器人肩膀、手臂、肘部、髁关节、踝关节和躯干的旋转关节。旋转执行器主要由伺服电机、减速机构 (谐波减速器) 和编码器组成, 其中谐波减速器是核心部件。根据特斯拉 2022 年 AI Day 资料, 旋转执行器的高速端包含角度接触滚珠轴承 (Angular Contact Ball Bearing) 和机械离合器 (Mechanical Clutch), 低速端包含谐波减速器 (Strain Wave Gearing) 和交叉滚子轴承 (Cross Roller Bearing)。另外, 旋转执行器中还集成了永磁体 (电机, Magnets)、输入和输出位置传感器 (Input & Output Position Sensor) 以及非接触力矩传感器 (Non-Contact Torque Sensor)。我们认为, 谐波减速器是旋转执行器中最为核心的部件, 其价值量高, 制造难度大。

图 23: 旋转执行器零部件

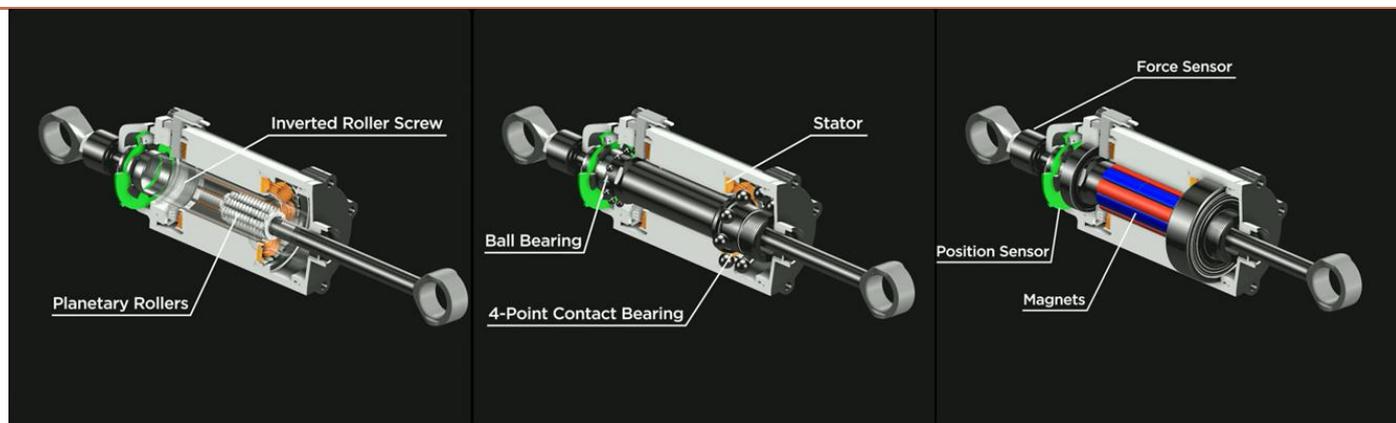


资料来源: 特斯拉、招商证券

### (3) 直线执行器: 核心部件为滚柱丝杠

Optimus 共有 12 个直线执行器 (12 个俯仰角), 用于肩膀、手臂、大腿和小腿的直线关节。直线执行器主要由伺服电机、减速机构 (滚柱丝杠) 和编码器组成, 其中滚柱丝杠是核心部件。旋转执行器的高速端包含反向滚柱丝杠 (Inverted Roller Screw) 和行星滚柱丝杠 (Planetary Rollers), 低速端包含定子 (Stator)、滚珠轴承 (Ball Bearing) 和四点接触轴承 (4-Point Contact Bearing)。另外, 直线执行器还集成了永磁体 (Magnets)、位置传感器 (Position Sensor) 和力传感器 (Force Sensor)。我们认为, 滚柱丝杠 (含反向和行星) 是直线执行器中最为核心的部件, 其价值量高、制造难度大。

图 24: 直线执行器零部件



资料来源: 特斯拉、招商证券

### (4) 灵巧手: 核心部件为空心杯电机

灵巧手是机器人操作和动作执行的末端工具, 在机器人领域被称为末端执行器 (End-Effector), Optimus 一只灵巧手包含 6 个执行器, 执行器包含空心杯电机、螺杆和传动齿轮等部件。灵巧手作为机器人与环境相互作用的最后环节与执行部件, 对提高机器人的柔性和易用性有着极为重要的作用, 其性能的优劣在很大程度上决定了整个机器人的工作性能。机器人灵巧手的本体、传动、建模、感知、规划与控制的复杂性, 源于人类社会对它拟人化灵活操作能力的预期。人们在使用自己的双手执行生活和生产中的各种操作任务时, 常常是潜意识中即完成了目标任务的理解、分解和手指协同工作的过程规划与控制。这些看似习以为常、

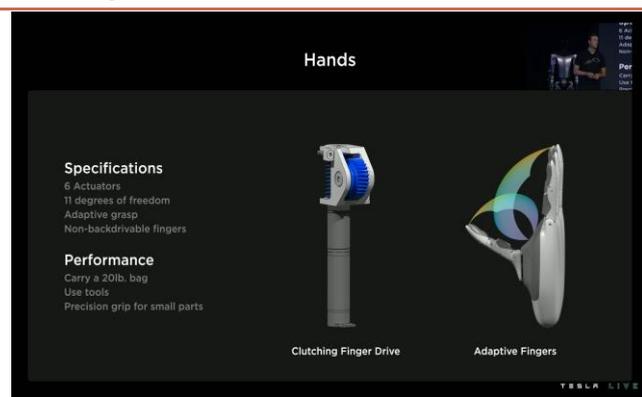
简单至极的工作能力是人类经历数百万年进化才具有的，因此，要研制、复现人手功能，机器人多指灵巧手必然也将经历艰难、复杂、曲折的过程。特斯拉灵巧手采用与人手相似的五指多关节设计，执行器为空心杯电机带动螺杆旋转带动齿轮旋转从而使手关节进行旋转。一只手有 6 个执行器、11 个自由度。自适应抓取、不可反向驱动的手指可以搬运 20 磅的背包、使用工具、用作小型精密零件夹具。我们认为，空心杯电机为灵巧手最为核心的部件，具备尺寸小、重量轻、精度高等特点，在制造工艺上壁垒较高。

图 25: Optimus 灵巧手设计



资料来源：特斯拉、招商证券

图 26: Optimus 灵巧手参数

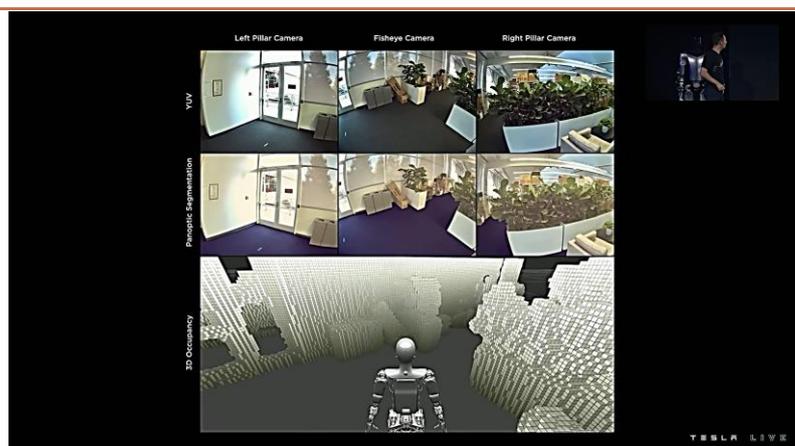


资料来源：特斯拉、招商证券

### (5) 软件：高度复用特斯拉自动驾驶技术

软件方面，Optimus 大量复用了特斯拉在汽车自动驾驶方面的技术，包括与软件相匹配的硬件（如摄像头、芯片等）。Optimus 采用特斯拉自动驾驶中使用的三目摄像头（左柱+鱼眼+右柱），通过 Autopilot 算法和占用网络训练机器人，构建 3D 环境并规划行动轨迹。与 2022 年 AI Day 相比，2023 年特斯拉股东大会上的 Optimus 进步神速，已经具备户外行走的能力。

图 27: Optimus 三目摄像头画面



资料来源：特斯拉、招商证券

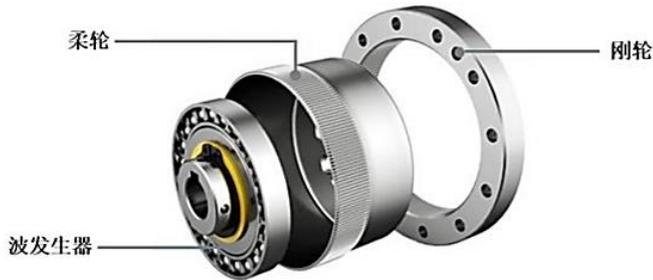
## 2、核心关节零部件

### (1) 减速机构：谐波减速器最为受益，精密行星减速器或有替代机会

从表 6 的成本拆分中我们可以看出，在特斯拉机器人运动关节中，旋转执行器占

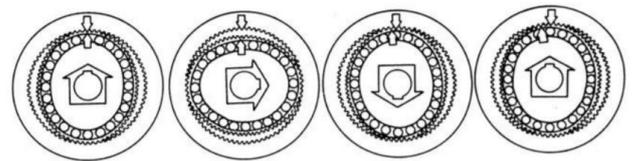
据最大的价值量,而旋转执行器中最核心的部件是减速机构。相比于RV减速器,谐波减速器更适合作为人形机器人旋转执行器的减速机构。谐波减速器主要由波发生器、柔性齿轮、柔性轴承、刚性齿轮四个基本构件组成。其运动的传递是靠波发生器装配上柔性轴承使柔性齿轮产生可控弹性变形,并与刚性齿轮相啮合来实现。谐波减速器体积小、重量轻、传动比大的特点使其能够广泛应用于协作机器人、服务机器人等轻负载领域。与RV减速器相比,谐波减速器(1)成本更低;(2)精度更高;(3)满足人形机器人负载,不需要更高的负载能力;(4)体积小,重量轻,能够满足人形机器人轻量化需求。

图 28: 谐波减速器结构示意图



资料来源: 绿的谐波招股说明书、招商证券

图 29: 谐波减速器运行示意图



资料来源: 绿的谐波招股说明书、招商证券

表 6: RV 减速器和谐波减速器对比

项目	RV 减速器	谐波减速器
技术特点	通过多级减速实现传动,一般由行星齿轮减速器的前级和摆线针轮减速器的后级组成,组成的零部件较多。	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。与RV及其他精密减速器相比,谐波减速器使用的材料、体积及重量大幅度下降。
产品性能	大体积、高负载能力和高刚度	体积小、传动比高、精密度高
应用场景	一般应用于多关节机器人中机座、大臂、肩部等重负载的位置。	主要应用于机器人小臂、腕部或手部。
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	5000-8000 元/台	1000-5000 元/台
<b>主流技术指标:</b>		
背向间隙	≤60 arc sec	≤20 arc sec
传动效率	>80%	>75%
温升	≤45℃	≤40℃
噪声	≤70db	≤60db
减速比	30-192.4	30-160
额定转矩下使用寿命	>6000h	>8000h
额定输出转矩	101-6135 N·m	6.6-921 N·m
扭转刚性	20-1176 N·m/arc min	1.34-54.09 N·m/arc min

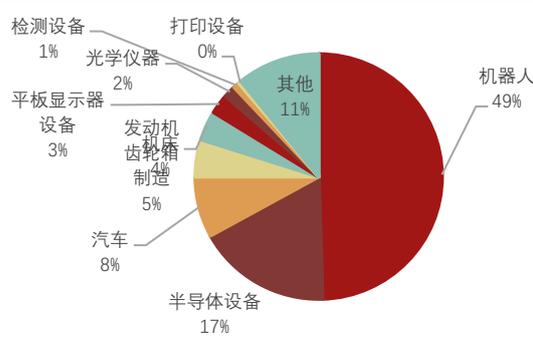
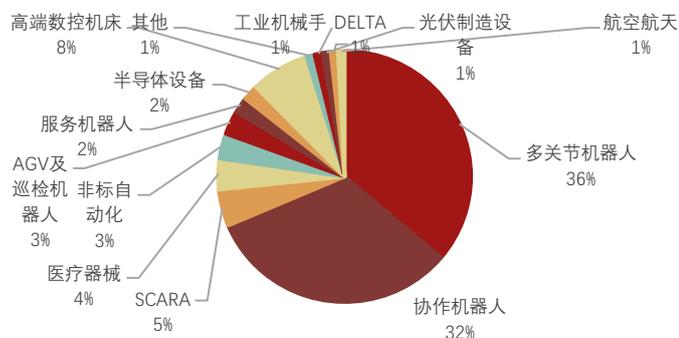
资料来源: 绿的谐波招股说明书、招商证券

谐波减速器下游主要应用于机器人行业,人形机器人将打开谐波减速器行业空间。谐波减速器主要应用于工业机器人、服务机器人、数控机床、光伏设备、医疗器械等多个行业和领域。根据绿的谐波招股说明书,2017-2019年绿的谐波销售的

谐波减速器应用下游中，多关节机器人占比 36.22%，协作机器人占比 32.41%，SCARA 机器人占比 4.72%。根据哈默纳科《投资者指南 2022》，2022 年哈默纳科下游销售占比中，机器人占 49.5%，接近一半。传统的小六轴机器人的谐波减速器单位用量大约为 3-6 台，协作机器人单位用量为 6-7 台，而人形机器人用量将达到 16 台左右。人形机器人的崛起将大大提升谐波减速器的行业空间。

图 30：2017-2019 年绿的谐波谐波减速器应用领域占比 (%)

图 31：2022 年哈默纳科下游销售占比 (%)



资料来源：绿的谐波招股说明书、招商证券

资料来源：哈默纳科《投资者指南 2022》、招商证券

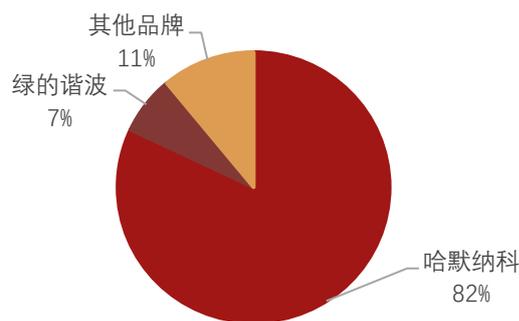
表 7：各种机器人谐波减速器单位用量

机器人类型	谐波减速器单位用量
小六轴机器人	3-6 台
大六轴机器人	0-3 台
SCARA	2-3 台
Delta	3 台
协作机器人	6-7 台
人形机器人 (Optimus)	16 台

资料来源：绿的谐波招股说明书、招商证券

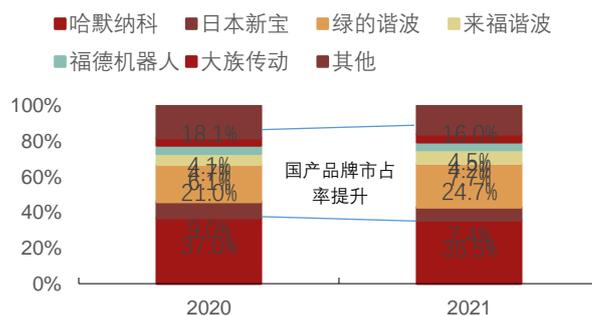
日本哈默纳科是谐波减速器全球龙头，以绿的谐波为代表的国产谐波减速器厂商稳步推进国产替代。根据华经产业研究院《中国谐波减速器市场竞争格局及未来投资前景预测报告》，2021 年，在全球谐波减速器市场格局中，哈默纳科全球市场占有率 82%，绿的谐波占比 7%，其他厂商占比约 11%。2020-2021 年，我国市场最大的两个外资品牌哈默纳科和日本新宝在中国市场的占有率由 46%降低至 42.9%。国内做谐波减速器的企业总共有 30 多家，实力较强的有绿的谐波、来福谐波、福德机器人、大族传动等企业，2020-2021 年，这四家企业在中国市场上的占有率之和由 35.9%提升至 41.1%。其中，绿的谐波作为国内谐波减速器龙头，加速追赶国际先进厂商。在国产协作机器人领域，绿的谐波已成为厂家首选品牌。

图 32：2021 年全球谐波减速器市场格局



资料来源：华经产业研究院、招商证券

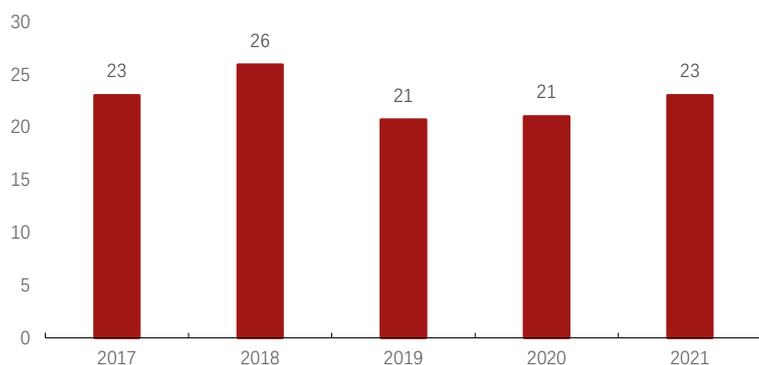
图 33：2020-2021 年国内谐波减速器市场竞争格局



资料来源：华经产业研究院、招商证券

2021 年全球机器人下游谐波减速器市场大约 23 亿元，人形机器人量产将为谐波减速器提供 42-128 亿的增量市场。根据华经产业研究院统计，2021 年全球机器人下游谐波减速器市场规模为 23 亿元。当前 Optimus 旋转执行器采用谐波减速器为减速机构，单机用量为 16 台，目前谐波减速器的平均售价大约为 1600 元/台。假如人形机器人远期进入量产阶段，在悲观/中性/乐观假设下，年产人形机器人为 20/50/100 万台，保持单机用量为 16 台，谐波减速器单价随着量产规模的不同分别为 1300/1000/800 元/台，对应的市场空间为 42/80/128 亿元。

图 34：全球机器人下游谐波减速器市场规模（亿元）



资料来源：华经产业研究院、招商证券

表 8：人形机器人带动谐波减速器市场空间测算

	悲观假设	中性假设	乐观假设
人形机器人产量 (万台)	20	50	100
单台机器人谐波减速器用量 (台)	16	16	16
谐波减速器平均单价 (元/台)	1300	1000	800
<b>市场空间 (亿元)</b>	<b>42</b>	<b>80</b>	<b>128</b>

资料来源：招商证券

精密行星减速器价格低、制造难度小、耐久度高，是人形机器人减速机构的潜在方案。精密行星减速器是传动结构主要由行星轮、太阳轮、内齿圈三部分组成的精密减速器，其结构简单且传动效率高，多安装在伺服电机上，用来降低转速，提升扭矩，精确定位。相对于谐波减速器，精密行星减速器优点在于价格低（400-500 元/台）、制造难度较小、耐久度高，可以做到终身免维护；缺点则是精度较低、传动效率更低、回差更大。在精度和效率要求较低的关节执行器当中，精密行星减速器是减速机构的潜在方案。在 Taoyuanmin Zhu 2023 年发表的论文《Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot》中，执行器减速机构采用了

行星减速器，作者导师为 UCLA 著名的人形机器人专家 Dennis W. Hong，是 UCLA 机器人实验室 RoMeLa 的创办者。

图 35: 精密行星减速器

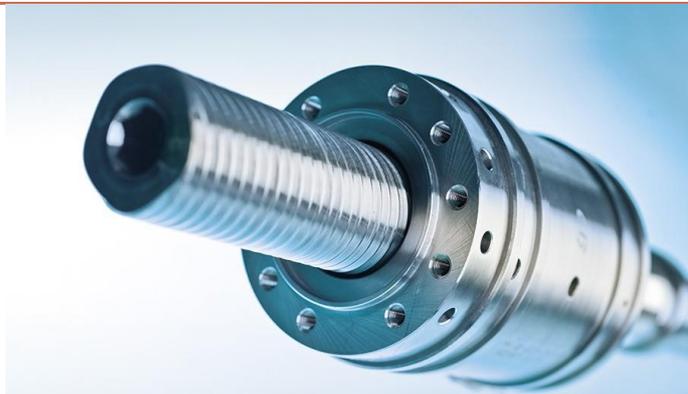


资料来源:《Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot》、招商证券

## (2) 滚柱丝杠: 人形机器人量产将带来 29-96 亿元增量市场

Optimus 采用的滚柱丝杠 (Roller Screw) 主要为行星滚柱丝杠和反向滚柱丝杠。行星滚柱丝杠是一种将旋转运动转化为直线运动的传动部件，具有运行速度高、承载能力强、环境适应性好以及使用寿命长等优点。反向滚柱丝杠的工作原理与行星滚柱丝杠相同，拥有与行星滚柱丝杠相似的高速性能，但是载荷是直接作用于转换推管上。滚柱丝杠主要应用于机床、半导体设备、航空航天精密件、机器人等精密自动化机械。

图 36: 行星滚柱丝杠



资料来源: 穆格中国官网、招商证券

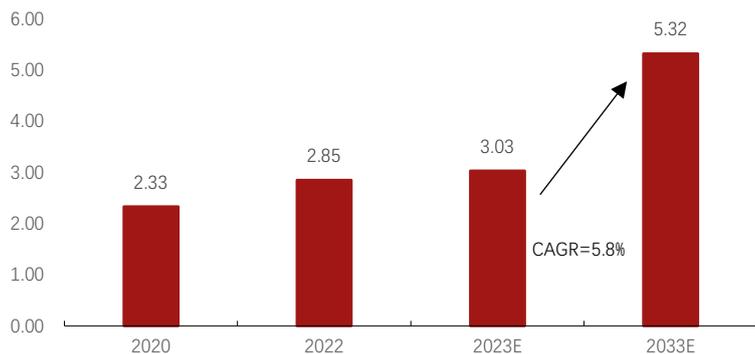
图 37: 反向滚柱丝杠



资料来源: 穆格中国官网、招商证券

2022 年全球滚柱丝杠市场规模 2.85 亿美元，人形机器人量产将带来 29-96 亿元增量市场。根据 Persistence Market Research 的数据，2022 年全球滚柱丝杠市场规模为 2.85 亿美元，预计 2023 年市场规模约 3.03 亿美元，2023-2033 年预计 CAGR 约 5.8%，到 2033 年市场规模达 5.32 亿美元。目前，全球滚柱丝杠主要厂商为瑞士 GSA 旗下的 Rollvis、德国舍弗勒、美国 MOOG、瑞典 SKF。国内厂商有江苏雷利子公司鼎智科技。根据中国供应商网报价，Rollvis 用于人形机器人的行星滚柱丝杠报价大约为 2000 元人民币，国产价格目前在 600-800 元。假如人形机器人远期进入量产阶段，在悲观/中性/乐观假设下，年产人形机器人为 20/50/100 万台，保持单机用量为 24 个 (12 个行星+12 个反向)，滚柱丝杠单价随着量产规模的不同分别为 600/500/400 元/个，则对应的市场空间为 29/60/96 亿元。

图 38: 全球滚柱丝杠市场规模 (亿美元)



资料来源: Persistence Market Research、招商证券

表 9: 人形机器人带动滚柱丝杠市场空间测算

	悲观假设	中性假设	乐观假设
人形机器人产量 (万台)	20	50	100
单台机器人滚柱丝杠用量 (个)	24	24	24
滚柱丝杠平均单价 (元/个)	600	500	400
市场空间 (亿元)	29	60	96

资料来源: 招商证券测算

### (3) 无框力矩电机: 人形机器人关节电机主流的解决方案

无框力矩电机是人形机器人关节电机主流的解决方案。力矩电动机是一种极数较多的特种电机,可以在电动机低速甚至堵转(即转子无法转动)时仍持续运转,不会造成电动机的损坏。在这种工作模式下,电动机可以提供稳定的力矩给负载,故名为力矩电动机。在 Optimus 的执行器中,电机去掉了外壳、轴承等框架部件,只包含定子和转子,可以节省空间,便于安装和走线,符合机器人轻量化需求。因此,采用的电机叫做无框力矩电机。无框力矩电机需要一体化设计并集成到机器内部,这样需要根据具体的机械设计尺寸来确定无框力矩电机的外形尺寸和扭矩/转速性能,所以需要定制。无框力矩电机的优点:极高的刚度、高效率、静音、稳定性高、低维护性。目前外海主要厂商有美国科尔摩根、美国 MOOG、瑞士 Maxon 等,国内厂商有步科股份、昊志机电等。

图 39: 科尔摩根 TBM2G 无框力矩电机

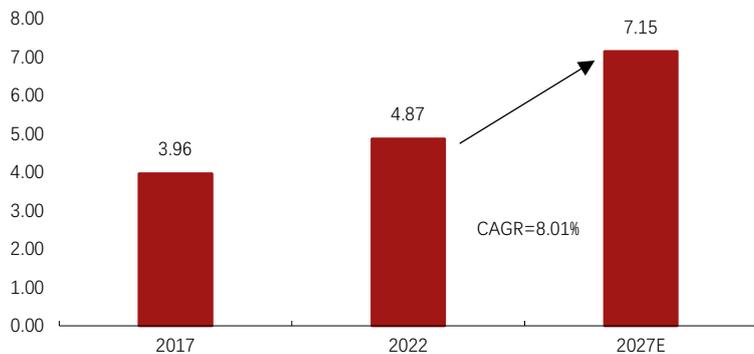


资料来源: 科尔摩根、招商证券

全球无框力矩电机市场规模大约 38 亿元,人形机器人量产将带来 56-168 亿元增量市场。根据咨询机构 Technvivo 数据,2022 年全球力矩电机市场规模大约 4.87

亿美元，预测到 2027 年市场规模大约 7.15 亿美元，CAGR=8.01%。根据步科股份官方信息，目前无框力矩电机的产品单价是几百元至几千元不等，针对不同的功率段和尺寸，价格会有所不同。假如人形机器人远期进入量产阶段，在悲观/中性/乐观假设下，年产人形机器人为 20/50/100 万台，保持单机用量为 28 个，无框力矩电机单价随着量产规模的不同分别为 1000/800/600 元/个，对应市场空间为 56/112/168 亿元。

图 40: 全球力矩电机市场规模 (亿美元)



资料来源: Persistence Market Research、招商证券

表 10: 人形机器人带动无框力矩电机市场空间测算

	悲观假设	中性假设	乐观假设
人形机器人产量 (万台)	20	50	100
单台机器人无框力矩电机用量 (台)	28	28	28
无框力矩电机平均单价 (元/台)	1000	800	600
市场空间 (亿元)	56	112	168

资料来源: 招商证券测算

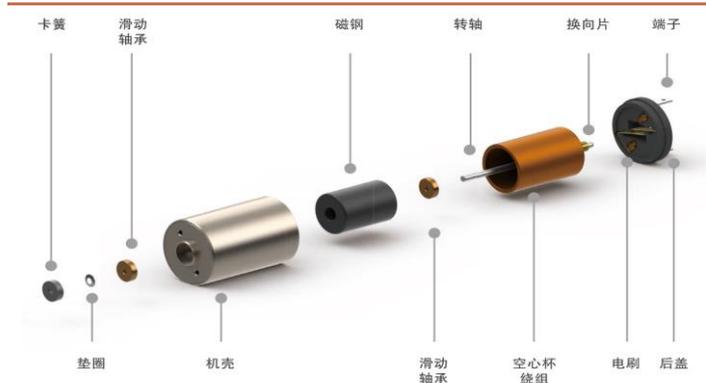
#### (4) 空心杯电机: 灵巧手最核心零部件

空心杯电机为 Optimus 的灵巧手提供动力，具备节能、控制和拖动的特性。空心杯电动机属于直流永磁的伺服、控制电机，也可以将其归类为微特电机。空心杯电机在结构上突破了传统电机的转子结构形式，采用的是无铁芯转子，也叫空心杯型转子。这种转子结构彻底消除了由于铁芯形成涡流而造成的电能损耗。同时，其重量和转动惯量大幅降低，减少了转子自身的机械能损耗。由于转子的结构变化，电动机的运转特性得到了极大改善。空心杯电动机具有突出的节能特点，更为重要的是，它具备了铁芯电动机无法达到的控制和拖动特性。

空心杯电动机具有以下特性:

- (1) **节能特性:** 能量转换效率很高，最大效率一般在 70% 以上，部分产品可达到 90% 以上 (铁芯电动机一般在 70%)。
- (2) **控制特性:** 起动、制动迅速，响应极快，机械时间常数小于 28 毫秒，部分产品可以达到 10 毫秒以内 (铁芯电动机一般在 100 毫秒以上); 在推荐运行区域内的高速运转状态下，可以方便地对转速进行灵敏的调节。
- (3) **拖动特性:** 运行稳定性十分可靠，转速的波动很小，作为微型电动机其转速波动能够容易的控制 在 2% 以内。

图 41: 有刷空心杯电机结构图



资料来源: 鸣志电器官网、招商证券

图 42: 无刷空心杯电机结构图



资料来源: 鸣志电器官网、招商证券

空心杯电机下游主要为军工、航空航天、工业控制、机器人等行业。(1) 在航空航天领域, 空心杯电机可用于减轻飞行器的重量; (2) 在军工领域, 空心杯电机能够快速调节导弹飞行方向; (3) 在工业控制领域, 空心杯电机可用于制造工业机器人。国外主要厂商有瑞士 Maxon、德国福尔哈贝等, 国内厂商有鸣志电器、江苏雷利子公司鼎智科技等。根据新思界产业研究中心发布的《2023-2028 年空心杯电机行业市场深度调研及投资前景预测分析报告》, 伴随下游行业快速发展, 全球空心杯电机市场规模不断扩大, 2022 年已达到 7.9 亿美元。根据步科股份招股说明书, 我国微特电机 2021 年规模达到 1344 亿元, 空心杯电机占比仍然较小。

图 43: 我国微特电机行业市场规模 (亿元)



资料来源: 步科股份招股说明书、招商证券

人形机器人带来的空心杯电机增量市场规模大约为 22-60 亿元。根据鸣志电器官网, 有刷空心杯电机价格范围约为 400-1000 元, 无刷空心杯电机价格范围约为 900-1400 元, 取中位数估算单个空心杯电机价格约 900 元。假如人形机器人远期进入量产阶段, 在悲观/中性/乐观假设下, 年产人形机器人为 20/50/100 万台, 保持单机用量为 12 个 (一只灵巧手 6 个执行器), 无框力矩电机单价随着量产规模的不同分别为 900/700/500 元/个, 则对应的市场空间为 22/42/60 亿元。

表 11: 人形机器人带来的空心杯电机市场空间测算

	悲观假设	中性假设	乐观假设
人形机器人产量 (万台)	20	50	100
单台机器人空心杯电机用量 (台)	12	12	12
空心杯电机平均单价 (元/台)	900	700	500
市场空间 (亿元)	22	42	60

资料来源: 招商证券

(5) 传感器：人形机器人将集成大量不同种类的传感器

力/力矩传感器将会在人形机器人执行器中大量使用。力/力矩 (Force/Torque) 传感器测量并输出在笛卡尔直角坐标系中各个坐标 (X, Y 和 Z) 上的力和力矩。按照测量维度上分, 力矩传感器可分为一轴至六轴传感器, 其中六轴传感器可测量 X、Y、Z 三轴力和力矩。一个六轴力/力矩传感器也经常被称为多轴力/力矩传感器系、多轴加载单元、F/T 传感器或者六轴加载单元。力/力矩传感器被广泛的应用与各个工业领域, 如, 产品测试, 机器人装配, 打磨和抛光等。在研究领域力/力矩传感器被用于外科手术机器人、仿生机器人、康复机器人, 及神经学等其他不同的应用中。在特斯拉 Optimus 方案中, 力/力矩传感器被应用在执行器当中。其中, 1 个旋转执行器中含有 1 个力矩传感器, 1 个直线执行器中含有 1 个力传感器。

图 44: 力/力矩传感器



图 45: ATI 力/力矩传感器内部结构



资料来源: ATI 官网、招商证券

资料来源: ATI 官网、招商证券

多轴力矩传感器壁垒高、价格贵, 人形机器人带来增量市场大约 32-96 亿元。根据 Mordor Intelligence 数据, 2020 年力矩传感器市场价值 67.3 亿美元, 预计到 2026 年将达到 116.3 亿美元, 2021-2026 年期间的复合年增长率为 9.68%。力/力矩传感器的国外厂商主要有美国 ATI 等公司, 国内柯力传感具备应变式力矩传感器产品, 昊志机电和宇立仪器 (未上市) 已经开发出六维力矩传感器。力/力矩传感器随着测量轴数的增加价格也会响应增加。目前海外厂商六轴力/力矩传感器价格甚至上万。根据 1688 网站价格, OnRobot 协作机器人用六轴力矩传感器价格大约为 1000 元, 格鲁斯机器人用传感器价格约为 500 元。在悲观/中性/乐观假设下, 年产人形机器人为 20/50/100 万台, 保持单机力矩传感器用量为 16 个, 力传感器用量为 12 个, 力矩传感器单价随着量产规模的不同分别为 1000/800/600 元/个, 对应的市场空间为 32/64/96 亿元; 力传感器单价随着量产规模的不同分别为 500/400/300 元/个, 对应市场空间为 12/24/36 亿元。

表 12: 人形机器人带动力矩传感器市场空间测算

	悲观假设	中性假设	乐观假设
人形机器人产量 (万台)	20	50	100
单台机器人力矩传感器用量 (台)	16	16	16
力矩传感器平均单价 (元/台)	1000	800	600
市场空间 (亿元)	32	64	96

资料来源: 招商证券测算

人形机器人中还将集成大量不同的传感器, 如, 位置传感器、视觉传感器、听觉传感器、柔性传感器等。Optimus 执行器方案除了包含力/力矩传感器以外, 还

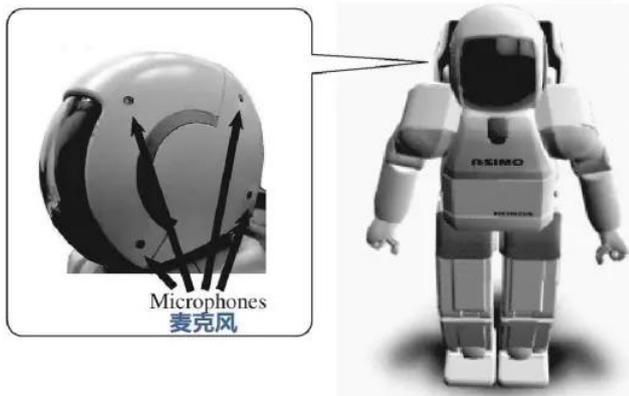
包含了位置传感器。位置传感器是可量测位置的传感器。它可分为绝对位置传感器和相对位置传感器。根据测量变量的性质来分类，位置传感器可分为线性的、角度的和多轴的。位置传感器主要应用于直流无刷电机、汽车等下游行业。

视觉传感器是整个机器视觉系统信息的直接来源，主要由一个或者两个图形传感器组成，有时还要配以光投射器及其他辅助设备，主要功能是获取足够的机器视觉系统要处理的最原始图像。Optimus 主要采用特斯拉自动驾驶的视觉方案（三目摄像头）。采用多个图像感应器，可以通过计算位置偏差获得物体的三维信息，形成 3D 视觉。

听觉传感器的主要功能是接收声波，将声音信号转换为电信号，一般使用麦克风等振动检测器作为检测元件。机器人为了实现更加精准的声音定位，需要 2 个或以上配置在空间不同位置的麦克风阵列。例如，本田 ASIMO 左右两侧分别有 4 个麦克风阵列。当多个处于不同位置的人说话时，讲话的信号作为声源，会被 8 个麦克风接收，可以通过对 8 个轨道组成的信号处理、分离来定位说话者。

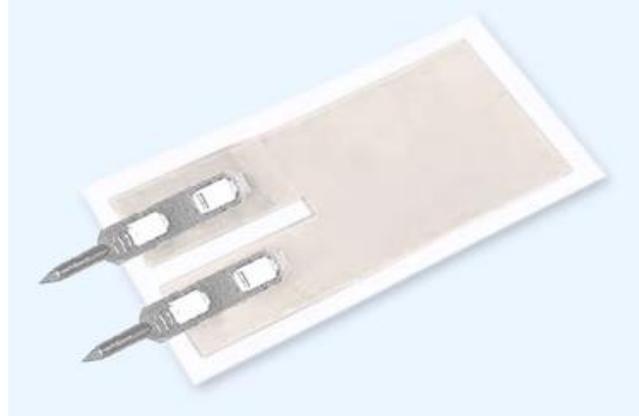
柔性传感器采用柔性材料作为基底制成的传感器，具有良好的柔韧性、延展性，可自由弯曲和折叠，能够更加方便的对复杂的被测量标的进行检测，又被称为电子皮肤。在现有的人形机器人方案中，优必选正在电子皮肤上进行研发试验，但目前技术相对还不成熟，没有实现大批量的量产，只在一些实验室中应用。电子皮肤方案当前的缺点是增加了布线和设计的难度，维护成本也较高。

图 46: ASIMO 有 8 个麦克风阵列



资料来源: ASIMO、招商证券

图 47: 能斯达电子皮肤



资料来源: 能斯达、招商证券

### 作为对本章的总结:

- (1) 特斯拉机器人的成本大致分为硬件和软件两部分;
- (2) 软件中的 FSD 价值量占比最高, 约占全部 BOM 成本的 36%;
- (3) 人形机器人关键核心硬件零部件包括减速机构(谐波减速器、行星减速器)、滚柱丝杠、无框力矩电机、空心杯电机以及各类传感器。
- (4) 关节部件包括无框力矩电机、谐波减速器、传感器等, 价值量总和, 占 BOM 成本的比例超过一半;

## 三、投资建议

2022 年 9 月 30 日, 特斯拉发布其第一代人形机器人 Optimus, 受到资本界和产业界的广泛关注。本报告详细回顾了人形机器人的发展历史, 以期投资者展现人形机器人“前世今生”的全貌。展望未来, 我们认为, 人形机器人的快速发

展，要建立在成本快速下降的基础上，从这个角度看，中国有丰富、全面、低成本的制造业供应体系，必然会广泛、深度的参与到人形机器人的发展过程当中。建议关注在\*\*执行器总成环节绑定大客户，具备较高壁垒的三花智控（汽车组）；国产谐波减速器龙头绿的谐波；在滚柱丝杠具备优势的江苏雷利/鼎智科技（电新组）；空心杯电机核心供应商鸣志电器（电新组）。建议关注泛产业链的机会，重点公司包括中大力德、双环传动、贝斯特、恒立液压、步科股份、五洲新春等。

表 13: 人形机器人潜在标的梳理

环节	零部件	公司名称	市值 (截至 2023-07-21, 单位: 亿元)	备注
旋转执行器	总成	三花智控	985	旋转执行器总成送样，与绿的墨西哥合资设厂，同时切入直线执行器，准备自制行星滚柱丝杠
		绿的谐波	218	谐波减速器送样，与三花墨西哥合资设厂，年产能 60 万/台
	谐波减速器（当前主流）	丰立智能	59	谐波产能明年投产，博世供应商
		汉宇集团	50	子公司同川生产谐波减速器
		国茂股份	123	子公司国茂精密生产谐波减速器
	行星减速器（潜在替代）	中大力德	52	生产行星减速器、RV 减速器、谐波减速器，行星有可能成为旋转执行器中谐波的替代方案
通力科技		58	行星减速机，运用于环保、冶金等下游	
直线执行器	行星滚柱丝杠	鼎智科技	48	江苏雷利子公司，行星滚柱丝杠国产替代瑞士舍弗勒进行送样
灵巧手	空心杯电机	江苏雷利	102	鼎智科技母公司
		鼎智科技	48	空心杯电机送样，国产微特电机龙头
		江苏雷利	102	鼎智科技母公司
		鸣志电器	268	空心杯电机送样，国产微特电机龙头
电机、伺服、编码器	无框力矩电机	步科股份	54	伺服+电机+编码器一体化供应商，下游机器人、医疗、机器物联网
		汇川技术	1761	国产工控龙头
	伺服电机	禾川科技	60	国产工控厂商
		伟创电气	60	国产工控厂商
		昊志机电	50	子公司 Infranor 为瑞士知名伺服电机制造商
	编码器	奥普光电	85	国产编码器龙头
传感器	机器视觉	奥普特	166	国产机器视觉龙头，下游 3C 为主
		凌云光	124	国产机器视觉龙头，下游 3C 为主
	3D 视觉传感器	奥比中光	140	3D 视觉传感器龙头，20%收入来自机器人
	力矩传感器	柯力传感	84	小批量传感器应用于机器人
其他零部件	RV 减速器	汉威科技	55	子公司能斯达生产电子皮肤，小米为能斯达战略投资
		秦川机床	135	国产 RV 减速器厂商，机床丝杠、磨齿机
	bldc 电机芯片	双环传动	256	国产 RV 减速器龙头
		峰岷科技	110	产品交付三花送样人形机器人

资料来源: Wind、招商证券

注: 加粗为核心标的

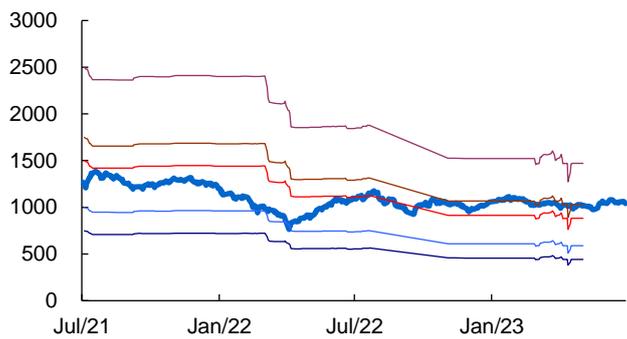
## 四、风险提示

- （1）特斯拉人形机器人量产进展不及预期:** 我们所有的市场空间测算均基于特斯拉 Optimus 能够成功量产并实现商业化应用的前提。若 Optimus 量产不及预期，减速器等核心零部件的市场空间将无法打开。
- （2）商业化应用场景与市场需求不及预期:** 应用场景客观存在、市场需求旺盛是决定人形机器人商业价值的两大重要条件。在工业场景中，人形机

机器人要具备比工业机器人更高的性价比才能让厂家考虑置换现有的机器人。在家庭场景中，人形机器人的便捷性、可用性、经济性是一个家庭考虑购买的重要因素。

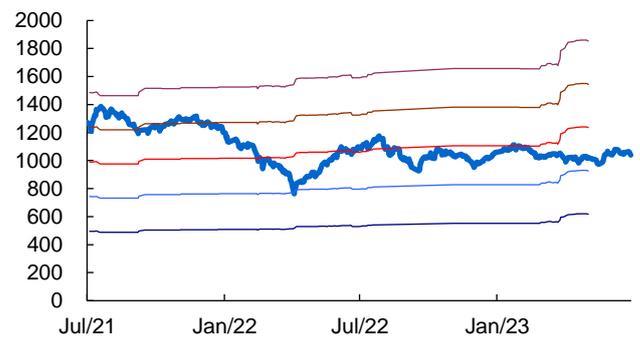
- (3) **产业链降本不及预期：**谐波减速器、无框力矩电机、空心杯电机等核心零部件的价格很大程度上决定了 Optimus 能否被成功推向市场。成本问题也是 Optimus 目前面临的主要难题之一。
- (4) **行业新增容量测算假设不成立：**我们对 Optimus 带来的市场增量空间测算中使用了大量的假设（主要包括对零部件价格、数量、类型的假设），可能和 Optimus 正式量产后的实际情况不符。

图 48: 机械行业历史 PE Band



资料来源：公司数据、招商证券

图 49: 机械行业历史 PB Band



资料来源：公司数据、招商证券

## 分析师承诺

负责本研究报告的每一位证券分析师，在此申明，本报告清晰、准确地反映了分析师本人的研究观点。本人薪酬的任何部分过去不曾与、现在不与、未来也将不会与本报告中的具体推荐或观点直接或间接相关。

## 评级说明

报告中所涉及的投资评级采用相对评级体系，基于报告发布日后 6-12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期当地市场基准指数的市场表现预期。其中，A 股市场以沪深 300 指数为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以标普 500 指数为基准。具体标准如下：

### 股票评级

强烈推荐：预期公司股价涨幅超越基准指数 20%以上

增持：预期公司股价涨幅超越基准指数 5-20%之间

中性：预期公司股价变动幅度相对基准指数介于±5%之间

减持：预期公司股价表现弱于基准指数 5%以上

### 行业评级

推荐：行业基本面向好，预期行业指数超越基准指数

中性：行业基本面稳定，预期行业指数跟随基准指数

回避：行业基本面转弱，预期行业指数弱于基准指数

## 重要声明

本报告由招商证券股份有限公司（以下简称“本公司”）编制。本公司具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。本报告基于合法取得的信息，但本公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。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。报告中的内容和意见仅供参考，并不构成对所述证券买卖的出价，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。除法律或规则规定必须承担的责任外，本公司及其雇员不对使用本报告及其内容所引发的任何直接或间接损失负任何责任。本公司或关联机构可能会持有报告中所提到的公司所发行的证券头寸并进行交易，还可能为这些公司提供或争取提供投资银行业务服务。客户应当考虑到本公司可能存在可能影响本报告客观性的利益冲突。

本报告版权归本公司所有。本公司保留所有权利。未经本公司事先书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、引用或转载，否则，本公司将保留随时追究其法律责任的权利。