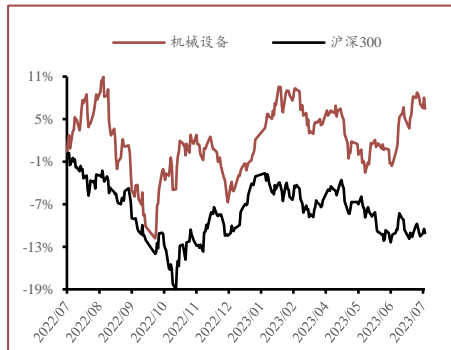


**投资评级:中性(下调)**

最近 12 月市场表现


**分析师** 余炜超

SAC 证书编号: S0160522080002

shewc@ctsec.com

**分析师** 刘俊奇

SAC 证书编号: S0160523060002

liujq@ctsec.com

**联系人** 孟欣

mengxin@ctsec.com

**相关报告**

1. 《光伏铜电镀产业化进程渐行渐近, 值得期待》 2023-06-02
2. 《流程工业研究报告》 2023-05-27
3. 《数控系统深度研究报告》 2023-04-15

# 人形机器人大时代来临, 关注各环节产业机遇

## 核心观点

- ❖ **人形机器人产业化加速, 或将成为下一个万亿市场:** 人形机器人发展历程可以追溯到 20 世纪初, 1969 年日本早稻田大学加藤一郎实验室率先解决了机器人双足行走问题, 研发出第一台以双脚走路的仿人机器人。近年来, 波士顿动力、敏捷机器人、特斯拉等陆续推出人形机器人产品, 人形机器人或将从实验室走出, 进入新的发展时期。长期来看, 人形机器人销量预计不低于现有汽车行业水平, 甚至能到达与人口 1:1 的水准, 根据世界汽车工业协会 (OICA) 最新数据显示, 2022 年全球汽车销量约为 8163 万辆, 按照人形机器人单价 2 万美元计算, 市场规模约 11.42 万亿元 (汇率按照 7 计算), 潜在市场空间巨大。
- ❖ **从特斯拉 Optimus 看人形机器人核心部件:** 人形机器人在传统机器人基础上有较大的技术跨越, 目前主要聚焦于运动控制能力的提升。从特斯拉公布的方案来看, 其结构执行器有 28 个, 主要分为旋转执行器和线性执行器两大类。旋转执行器采用谐波减速器+电机的方案, 线性执行器采用丝杠+电机的方案, 特斯拉研制了反转式行星滚柱丝杠执行器, 能够承受半吨重的压力。对于手掌关节, 其采用了空心杯电机+蜗轮蜗杆的结构, 单手具备 11 个自由度。目前来看, 无框力矩电机、谐波减速器、滑动丝杠、反转式行星滚柱丝杠、空心杯电机、力矩传感器、IMU 等是特斯拉机器人实现高自由度的核心部件。
- ❖ **重视确定性环节机会, 关注产业链扩散机遇:** 人形机器人目前还处于行业比较早期的阶段, 核心部件以及产品最终形态并未完全确定, 因此很多环节还有较大的不确定性。目前执行器方案成本较高, 降本压力巨大, 行星减速器、滑动丝杠等低成本方案并非一无是处, 我们认为可以关注产业链扩散的机会。不过部分环节有较高的确定性, 包括执行机构总成、谐波减速器、空心杯电机等, 即使量价上未来会有一些变动, 但相关行业的公司未来仍然有望在人形机器人在国内逐步量产的过程中直接受益。
- ❖ **投资建议:** 人形机器人在经历长达 50 年以上的发展之后, 有望进入量产化的大时代, 我们认为这是未来极具想象力和成长性的行业。建议关注确定性较强、行业壁垒较高或者价值体量较大的环节, 包括关节总成、丝杠、传感器、灵巧手等, 重点公司包括三花智控、拓普集团、恒立液压、贝斯特、鸣志电器等。同时也建议关注硬件泛化环境的机会, 重点公司包括双环传动、苏州固锟、步科股份、五洲新春、伟创电气、恒尔达、力星股份、杭齿前进等。
- ❖ **风险提示:** 特斯拉人形机器人量产进展不及预期; 产业链降本不及预期; 行业关键技术突破不及预期。

表 1：重点公司投资评级：

代码	公司	总市值 (亿元)	收盘价 (07.12)	EPS (元)			PE			投资评级
				2022A	2023E	2024E	2022A	2023E	2024E	
002050	三花智控	998.33	27.79	0.72	0.91	1.11	29.47	30.54	25.04	增持
601689	拓普集团	818.27	74.25	1.54	2.14	2.83	38.04	34.70	26.24	买入
002472	双环传动	274.00	32.22	0.73	0.94	1.24	34.86	34.1	26.0	未覆盖
601100	恒立液压	873.01	65.11	1.79	2.02	2.41	35.28	32.23	27.02	增持
300580	贝斯特	73.39	22.85	1.14	1.33	1.73	16.27	17.18	13.21	增持
603728	鸣志电器	279.34	66.50	0.59	0.95	1.45	56.19	69.7	45.9	未覆盖
300660	江苏雷利	101.13	31.90	0.99	1.11	1.46	23.57	28.8	21.8	未覆盖
002079	苏州固锟	108.90	13.48	0.46	0.38	0.46	29.10	35.5	29.3	未覆盖
603662	柯力传感	89.05	31.44	0.92	1.28	1.57	17.86	24.6	20.1	未覆盖
688160	步科股份	59.57	70.92	1.08	1.35	1.69	26.87	52.7	42.0	未覆盖

数据来源：wind 数据，财通证券研究所（未覆盖公司预测数据来自 wind 一致预期）

## 内容目录

1	人形机器人产业化加速，或将成为下一个万亿市场.....	6
1.1	人形机器人是 AI 重要载体，下一个万亿市场即将来临 .....	6
1.2	人形机器人发展历史超过 50 年，产业化速度开始加快.....	8
2	从特斯拉 Optimus 看人形机器人核心部件.....	9
2.1	运动执行机构是目前行业发展的核心.....	9
2.2	特斯拉擎天柱 (Optimus) 执行机构分析 .....	10
2.2.1	特斯拉目前采用谐波减速器方案，行星齿轮减速器等方案也具备潜力 .....	11
2.2.2	滑动丝杠和行星滚柱丝杠为线性执行器的核心部件.....	17
2.2.3	无框力矩电机与空心杯电机为主流方案.....	22
2.2.4	力矩传感器是运动控制实现闭环的重要部件.....	26
3	重视确定性环节机会，关注产业链扩散机遇.....	28
3.1	执行机构成本过高，产业链有望扩散.....	28
3.2	重点环节公司梳理.....	29
4	投资建议.....	34
5	风险提示.....	34

## 图表目录

图 1. 2017-2024 年各类机器人市场规模情况（单位：亿美元） .....	6
图 2. 2022 年全球机器人市场规模分布情况.....	6
图 3. 特斯拉 Optimus 人形机器人.....	7
图 4. 波士顿动力 ATLAS 人形机器人.....	7
图 5. 人型机器人行业发展历程.....	8
图 6. 人形机器人产业链图示.....	10
图 7. 特斯拉擎天柱 (Optimus) 结构图 .....	10
图 8. 特斯拉机器人的执行器结构.....	10
图 9. 特斯拉的六种执行器参数.....	11
图 10. 特斯拉线性执行器可承受半吨的钢琴重量.....	11
图 11. 特斯拉机器人的手部关节原理图 .....	11
图 12. 特斯拉机器人的手部关节示意图.....	11

图 13. 减速机与原动机、工作机的关系 .....	12
图 14. 减速机各主要部件示意图 .....	12
图 15. 精密减速器分类 .....	13
图 16. 中国精密减速器下游应用占比 .....	13
图 17. 工业机器人成本占比(左轴)及毛利率(右轴)情况 .....	13
图 18. 国内工业机器人核心零部件技术情况 .....	13
图 19. 谐波减速器结构示意图 .....	14
图 20. 谐波减速器运行示意图 .....	14
图 21. RV 减速器结构图 .....	15
图 22. RV 减速器工作原理 .....	15
图 23. 行星减速机的内部结构 .....	16
图 24. 摆线针轮减速机原理图 .....	17
图 25. 摆线针轮减速机实物图 .....	17
图 26. 丝杠产品分类 .....	18
图 27. 滚珠丝杠构成 .....	19
图 28. 滚柱丝杠结构和示意图 .....	19
图 29. 滚珠循环模式示意图 .....	19
图 30. 滚柱丝杠结构及实物示意图 .....	20
图 31. 电动机分类（按照电源类型） .....	22
图 32. 电动机分类（按照用途和结构） .....	22
图 33. 伺服电机的结构 .....	22
图 34. 伺服电机工作流程 .....	22
图 35. 无框电机实物图 .....	23
图 36. 全球无框电机市场规模预测（单位：亿美元） .....	24
图 37. 有刷空心杯电机结构图 .....	25
图 38. 无刷空心杯电机结构图 .....	25
图 39. 全球空心杯电机市场规模预测（单位：亿美元） .....	25
图 40. 力矩传感器实物图 .....	26
图 41. 力矩传感器分类 .....	26
图 42. 测量体扭曲示意图 .....	27
图 43. 轴式扭矩传感器示意图 .....	27
图 44. 六轴扭矩传感器 .....	28
图 45. 行星齿轮减速器原理 .....	29

图 46. 滑动丝杠（梯型丝杠） .....	29
表 1. 机器人的分类情况.....	6
表 2. 全球人形机器人市场规模弹性测算.....	7
表 3. 国内外主要人形机器人对比.....	9
表 4. 减速器的典型作用.....	12
表 5. 减速器分类.....	12
表 6. RV 减速器和谐波减速器的对比 .....	15
表 7. 滚柱丝杠主要零部件特点与功能.....	20
表 8. 滚珠丝杠与滚柱丝杠对比.....	21
表 9. 无框力矩电机与伺服电机对比.....	23
表 10. 国内外核心无框电机制造商.....	24
表 11. 国内外核心空心杯电机制造商 .....	26

## 1 人形机器人产业化加速,或将成为下一个万亿市场

### 1.1 人形机器人是 AI 重要载体,下一个万亿市场即将到来

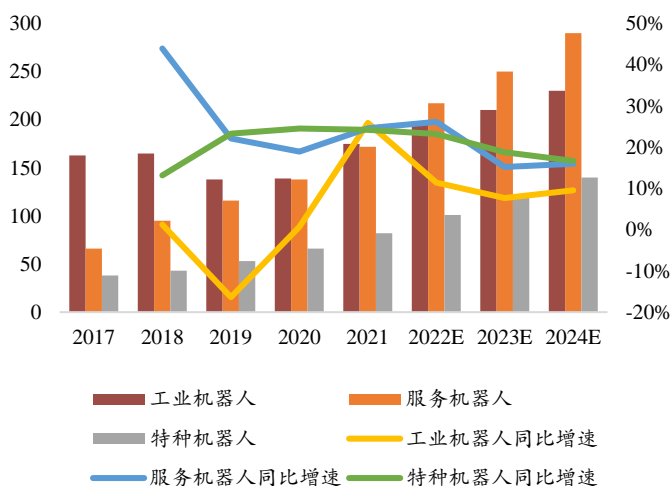
在千行百业数字化转型的巨大需求牵引之下,全球机器人行业蓬勃发展。根据国家标准委于 2020 年 11 月发布的 GB/T 39405-2020,机器人按照应用领域可分为工业机器人、个人/家用服务机器人、公共服务机器人、特种机器人和其他应用领域机器人。根据中国电子学会《中国机器人产业发展报告(2022 年)》指引,预计 2022 年全球机器人市场规模将达到 513 亿美元,其中工业机器人市场规模将达到 195 亿美元,服务机器人达到 217 亿美元,特种机器人超过 100 亿美元。另外根据报告指引,预计 2024 年全球机器人市场规模将有望突破 650 亿美元。

表1.机器人的分类情况

分类	定义
工业机器人	自动控制的、可重复编程、多用途的操作机,可对三个或三个以上轴进行编程,它可以是固定式或移动式。在工业自动化中使用。
个人/家用服务机器人	在家居环境或类似环境下使用的,以满足使用者生活需求为目的的服务机器人。
公共服务机器人	住宿、餐饮、金融、清洁、物流、教育、文化和娱乐等领域的公共场合为人类提供一般服务的商用机器人。
特种机器人	应用于专业领域,一般由经过专门培训的人员操作或使用的,辅助和/或替代人执行任务的机器人。

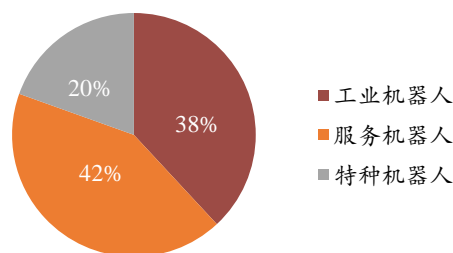
数据来源:国家标准 GB/T 39405-2020《机器人分类》,财通证券研究所

图1.2017-2024 年各类机器人市场规模情况(单位:亿美元)



数据来源:中国电子学会《中国机器人产业发展报告(2022 年)》,财通证券研究所

图2.2022 年全球机器人市场规模分布情况



数据来源:中国电子学会《中国机器人产业发展报告(2022 年)》,财通证券研究所

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,有的具有类人的感知、决策、行为和交互能力,被誉为人工智能的最终形态,其设计制造目的是为了与人工工具和环境进行交互,从而辅助甚至替代人类的生产生活。



人形机器人需要更高的感知能力、运动控制能力、交互能力。

- (1) **感知能力**：人形机器人往往处于非结构化环境，面临的场景更多样，环境不确定性更高，需要具备极强的环境感知能力和非结构化场景作业能力；
- (2) **运动控制能力**：体型上更类人，体积重量有所受限，同时需要实现步态行走，对运动控制也提出了更高的要求；
- (3) **交互能力**：人形机器人面临解决情感陪伴的服务需求，与人打交道次数更多，需具备较强的人机交互能力。

图3.特斯拉 Optimus 人形机器人



数据来源：2023 Tesla Shareholder Meeting，财通证券研究所

图4.波士顿动力 ATLAS 人形机器人



数据来源：Boston Dynamics 官网，财通证券研究所

人形机器人是 AI 领域的重要载体，或将造就一个新的万亿级市场。人形机器人离不开机器视觉与神经网络，前者通过目标追踪、图像描述、场景理解等生成数据，后者模仿人脑对生成的数据进行算法处理，从而令人形机器人完成各自任务，而无论是机器视觉或神经网络都与 AI 息息相关。英伟达创始人黄仁勋在 ITF World 2023 半导体大会上表示，具身智能（Embodied AI）是能理解、推理、并与物理世界互动的智能系统，是人工智能的下一个浪潮，AI 与机器人的融合可以实现机器人的最终体，具有很好的想象空间。长期来看，我们认为人形机器人销量预计不低于现有汽车行业水平，甚至能到达与人口 1:1 的水准，根据世界汽车工业协会（OICA）最新数据显示，2022 年全球汽车销量约为 8163 万辆，假设人形机器人与汽车销量一致，按照人形机器人单价 2 万美元（马斯克在 AI Day 提出的价格）计算，人形机器人市场规模约 11.43 万亿元（汇率按照 7 计算），潜在市场空间巨大。

表2.全球人形机器人市场规模弹性测算

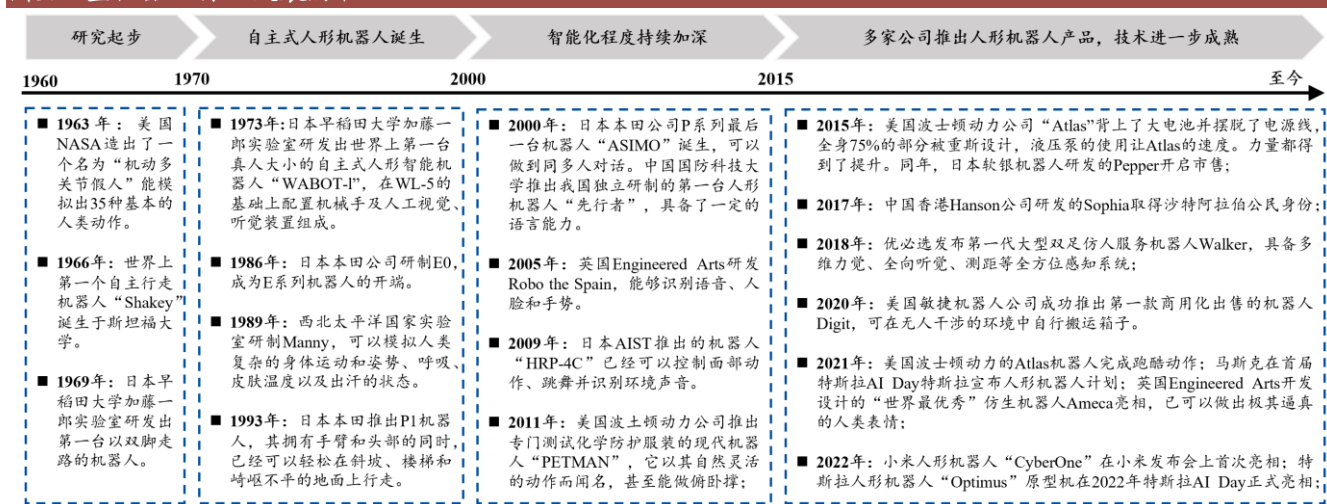
人形机器人数量（个）	100 万	1000 万	5000 万	1 亿	5 亿	10 亿	100 亿
人形机器人假设单价（万美元）	2.0	2.0	2.0	2.0	1.6	1.3	1.0
人形机器人市场规模（亿美元）	200	2000	10000	20000	80000	130000	1000000
人形机器人市场规模（亿元人民币）	1400	14000	70000	140000	560000	910000	7000000

数据来源：和讯网，前瞻网，财通证券研究所

## 1.2 人形机器人发展历史超过 50 年，产业化速度开始加快

人形机器人研究起步于双足行走的模仿，推动迈向自主式机器人。人形机器人的发展历程可以追溯到 20 世纪初，经历了从简单的机械装置到现代复杂智能系统的演变。早期的人形机器人主要是木偶和机械式自动装置，受制于技术水平的限制。随着科技的进步，人形机器人逐渐具备了更高级的功能，如自主运动、环境感知和人机交互等。1969 年，日本早稻田大学加藤一郎实验室率先解决了机器人双足行走问题，研发出第一台以双脚走路的仿人机器人，揭开了人形机器人研究的序幕。1973 年，日本早稻田大学加藤一郎实验室研发出世界上第一台真人大小的自主式人形智能机器人“WABOT-I”，在 WL-5 的基础上配置机械手及人工视觉、听觉装置组成。

图5.人型机器人行业发展历程



数据来源：通信世界全媒体，搜狐新闻，网易新闻，人民网日本频道，新华网，TechWeb，中国机器人网，澎湃新闻，每日经济新闻，财通证券研究所

人形机器人在控制方法和人工智能技术不断更迭的基础上取得了迅速发展，商业化条件日益成熟。21 世纪以来，机器人的行走能力、智能化和功能越来越强大，2000 年本田公司推出的 ASIMO 机器人可以做到同多人对话，是行业的典范。2015 年，日本软银研制的 Pepper 机器人开启市售是人形机器人走入大众市场的重大尝试，2021 年波士顿动力旗下 Atlas 的跑酷视频一经发出便收获百万点赞，同年英国 Engineered Arts 开发设计的“世界最优秀”仿生机器人 Ameca 亮相，已可以做出极其逼真的人类表情。另外，电动车巨头特斯拉在 2021 年宣布将开展人形机器人计划，其研发的“Optimus”机器人原型机在 2022 年特斯拉 AI Day 正式亮相。





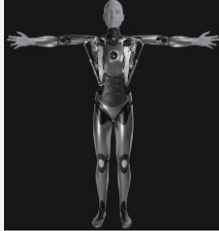


近年来，波士顿动力、敏捷机器人、特斯拉等陆续推出人形机器人产品，功能与应用场景各有不同。波士顿动力推出的 Atlas 机器人专注于强化“运动智能”的能力，2018 年可实现左右脚交替三连跳 40cm 台阶，2021 年完成高难度跑酷动作；



敏捷机器人推出的 Digit 机器人致力于制造行走机器人，是世界上第一款销售的两足机器人；Engineered Arts 推出的 Ameca 机器人关注于制造人形娱乐机器人，具有 12 个全新的面部致动器，经过面部表情升级后，能对着镜子眨眼、抿嘴、皱眉、微笑，号称是“全球最先进的人形机器人”；Optimus (特斯拉) 根据 2022 AI Day 介绍，将首先应用于特斯拉汽车的驾驶辅助系统，也就是用于车载，承载能力为 20 公斤，该机器人的建议任务是“危险、重复、繁琐”的任务，例如提供制造协助。

国产人形机器人发展迅速，优必选、小米陆续推出相关产品。优必选的 Walker 机器人系列是中国机器人厂商在世界范围该领域的代表性产品，经过数次迭代升级，2020 年全新 Walker X 机器人在步态规划与控制、柔顺力控、全身运动规划等核心技术方面进行了重点升级；小米推出的 CyberOne 机器人可感知人类情绪，视觉敏锐、可对真实世界三维虚拟重建，可实现双足运动姿态平衡，四肢强健、动力峰值扭矩 300NM 等领先技术能力。

表3.国内外主要人形机器人对比

	WABOT-1	ASIMO	Atlas	Walker	Ameca	CyberOne	Optimus
发布时间	1972 年	2000 年	2013 年	2016 年	2021 年	2022 年	2022 年
厂商	早稻田大学	本田	波士顿动力	优必选	Engineered Arts	小米	特斯拉
国家	日本	日本	美国	中国	英国	中国	美国
产品特点	高约 2 米，重 160 公斤，全身共有 26 个关节，手部还装有触觉传感器。	高 130cm，重 48kg，最大速度是 9km/h，全身 57 个关节。造价高达 300-400 万美元，于 2022 年 3 月退役。	高 188cm，重 150kg，其设计目的是为了搜索和救援任务。	高 130cm，重 63kg，具备 36 个高性能伺服关节和全方位感知系统。	高 187cm，重 49kg，身体共有 52 个模块，支持 51 种关节运动。该公司称 Ameca 为“机器人的未来面孔”。	高 177cm，重 52kg，可协调运动 21 个关节，可感知 45 种人类清晰，分辨 85 种环境语义。	高 172cm，重 56.6kg，可拿取约 20 千克重物，行走速度为 5 英里/h。
产品外观							

数据来源：智源机器人产业研究院公众号，日本早稻田大学官网，日本丰田官网，波士顿动力官网，优必选官网，Engineered Arts 官网，小米官网，特斯拉官网，财通证券研究所

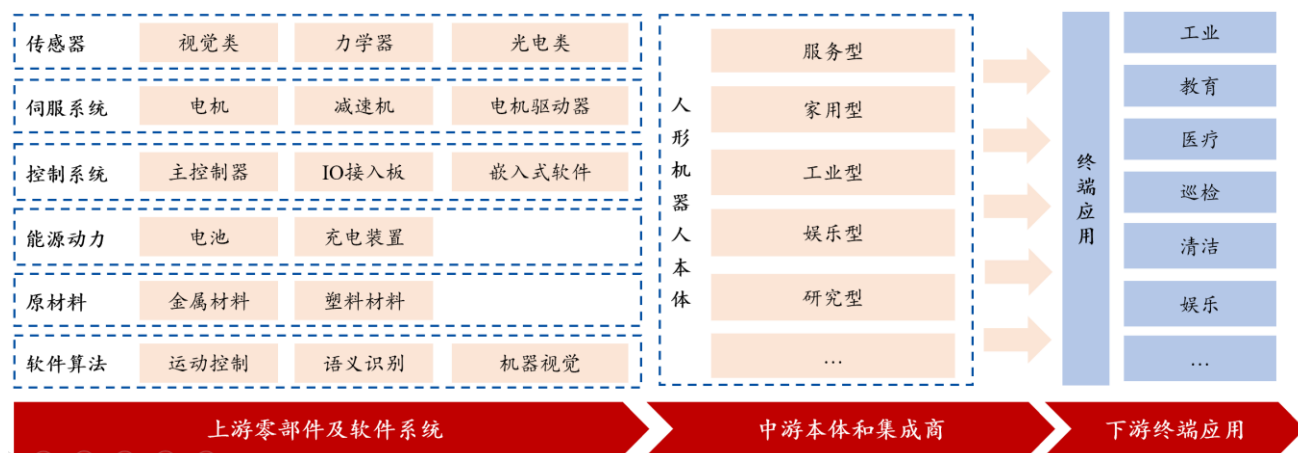
## 2 从特斯拉 Optimous 看人形机器人核心部件

### 2.1 运动执行机构是目前行业发展的核心

人形机器人在传统机器人基础上有较大的技术跨越，目前主要聚焦于运动控制能力的提升。长期来看，人形机器人有更强的柔性化水平，更好的环境感知能力和判断能力，在运动控制能力、环境感知能力和人机交互能力上均需要有较大的突

破。目前人形机器人首要需要解决的问题是如何实现像人一样去运动，并且能够兼顾可靠性、成本的因素，人机交互、环境感知等环节也会在未来长期发展之中逐步完善。

图6.人形机器人产业链图示



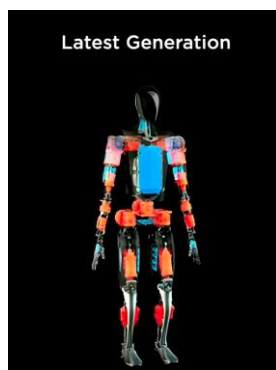
数据来源：高工机器人《2023 年人形机器人行业研究报告》，财通证券研究所

人形机器人产业链与工业机器人产业链有一定相似性，上游是核心零部件以及 AI 配套基础设施与技术，中游为机器人生产和集成商，下游为各种应用领域。核心零部件包括减速机、传感器、电机、运动控制器等。

## 2.2 特斯拉擎天柱 (Optimus) 执行机构分析

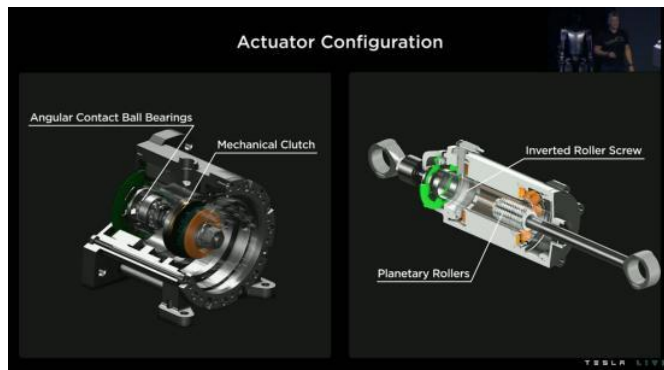
从特斯拉公布的方案来看，其结构执行器有 28 个，主要分为旋转执行器和线性执行器两大类。擎天柱 (Optimus) 旋转执行器主要分布于肩髋等需要大角度旋转的关节，线性执行器分布于膝肘等摆动角度不大的单自由度关节和腕踝两个双自由度但是体积紧凑的关节。

图7.特斯拉擎天柱 (Optimus) 结构图



数据来源：Tesla AI Day 2022，财通证券研究所

图8.特斯拉机器人的执行器结构



数据来源：Tesla AI Day 2022，财通证券研究所

根据参数和结构的不同，特斯拉公布了 6 种规格的执行器，其中旋转执行器包括 20NM、110NM 和 180NM 三种，线性执行器包括 500N、3900N、8000N 三种。旋转执行器采用谐波减速器+电机的方案，线性执行器采用丝杠+电机的方案，特斯拉研制了反转式行星滚柱丝杠执行器，能够承受半吨重的压力。对于手掌关节，其采用了空心杯电机+蜗轮蜗杆的结构，单手具备 11 个自由度。

图9.特斯拉的六种执行器参数



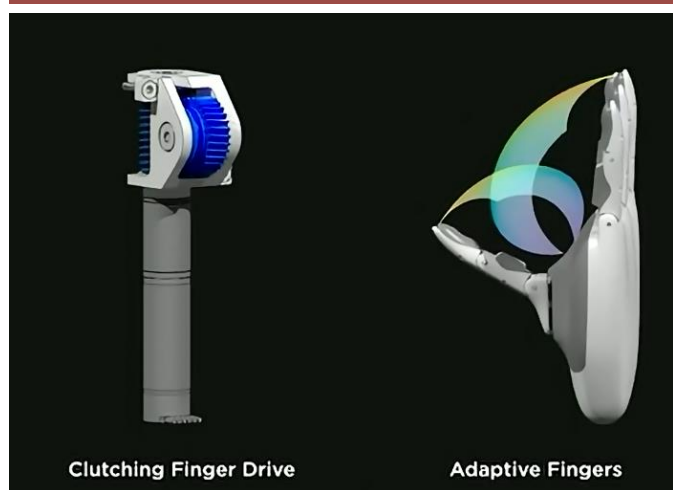
数据来源：Tesla AI Day 2022，财通证券研究所

图10.特斯拉线性执行器可承受半吨的钢琴重量



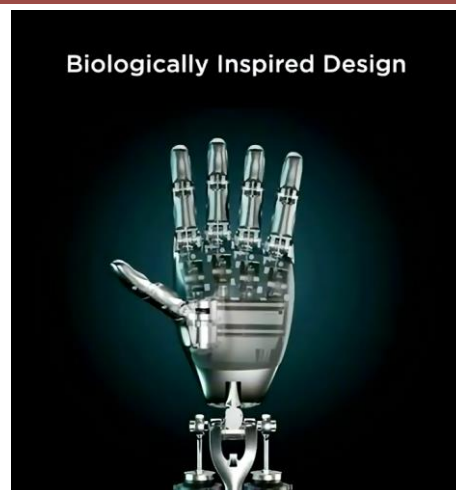
数据来源：Tesla AI Day 2022，海天精工官网，财通证券研究所

图11.特斯拉机器人的手部关节原理图



数据来源：Tesla AI Day 2022，财通证券研究所

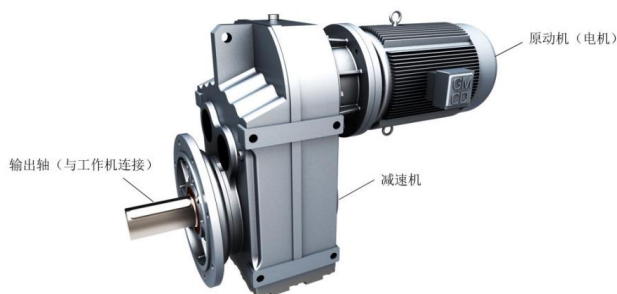
图12.特斯拉机器人的手部关节示意图



数据来源：Tesla AI Day 2022，财通证券研究所

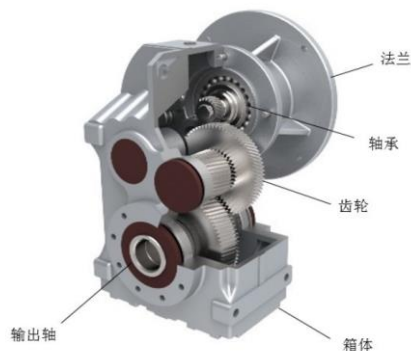
**2.2.1 特斯拉目前采用谐波减速器方案，行星齿轮减速器等方案也具备潜力**  
减速机是机器人的核心精密零部件之一，技术壁垒高。减速器又称减速机，是一种动力传达机构。减速机的工作原理是把原动机的动力通过减速机的输入轴上齿数少的齿轮啮合输出轴上的大齿轮来达到减速的目的，是影响机器人性能的核心因素。减速机由齿轮、箱体、轴承、法兰、输出轴等几个主要部件组成。根据绿的谐波招股说明书介绍，精密减速器制造对材料、设备、工艺等多个环节都有严格要求，具有明显的投资门槛高、技术难度大等特点，行业壁垒极高。

图13.减速机与原动机、工作机的关系



数据来源：国茂股份招股说明书，财通证券研究所

图14.减速机各主要部件示意图



数据来源：国茂股份招股说明书，财通证券研究所

表4.减速器的典型作用

减速器的作用	介绍
减小转速	在电机的很多使用场合中，很难完全去使用电机的额定转速，因为这牵涉很多其它的功能需求和匹配的原则，所以需要对电机的转速进行减速。
增大扭矩	减速机在降速的同时提高输出扭矩，扭矩输出比例按电机输出乘减速比
减小运动机构的惯量	减速同时降低了负载的惯量，惯量的减少为减速比的平方
提高精度	高速电机+减速器在减速的过程中传动误差也会被对应缩小，可以提高精度
锁止机构	涡轮蜗杆减速机有一个非常重要的功能，那就是锁止机构，当它的减速比达到一定的比值后，它几乎可以完全屏蔽掉运动机构对电机的反向冲击，甚至是完全锁止整个机构的运动。

数据来源：锐迪赛尔减速机百家号，财通证券研究所

减速机可根据传动精度、传动类型、传动级数、齿轮形状和传动布置形式等方式分类。根据传动类型的不同，通用减速机可以分为齿轮减速机、蜗杆减速机、行星齿轮减速机、摆线针轮减速器等，根据传动级数的不同可以分为单级减速器和多级减速机。根据精度不同可以分为一般传动减速器和精密减速机，精密减速机具有回程间隙小、精度较高、使用寿命长、稳定性高等特点，通常在数控机床、机器人、航空航天等领域有应用，精密减速机包括谐波减速机、RV 减速机、摆线针轮行星减速机、精密行星减速器等。

表5.减速机分类

分类	分类依据	具体类别
工业通用减速机	按传动类型	齿轮减速机、蜗杆减速机和行星齿轮减速机
	按传动级数	单级和多级减速机
	按齿轮形状	圆柱齿轮减速机、圆锥齿轮减速机和圆锥-圆柱齿轮减速机
工业专用减速机	按传动布置形式	展开式、分流式和同轴式减速机
	按应用领域	船用齿轮箱、冶金齿轮箱、风力发电齿轮箱、航天航空齿轮箱、机器人专用减速机等

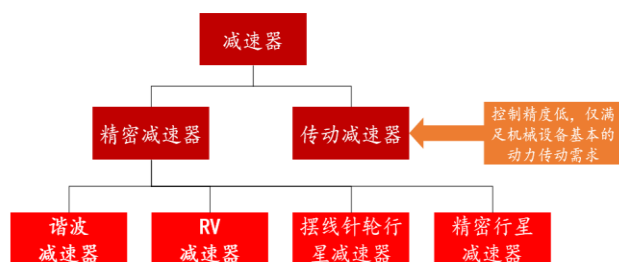
数据来源：前瞻产业研究院，财通证券研究所

机器人为精密减速机最主要下游，机器人用减速机主要有谐波减速机、RV 减速机、行星齿轮减速器等。根据观研天下数据，我国精密减速机下游应用中，工业



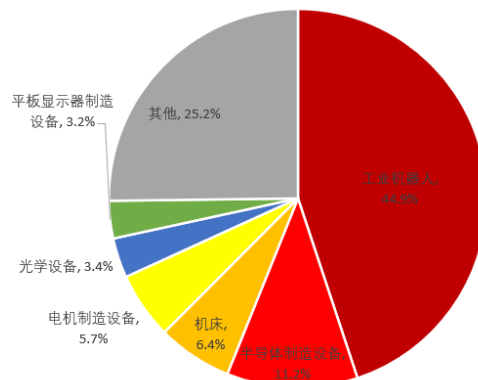
机器人占比 44.9%，是最大的下游应用。一般来说，机器人的每个关节都需要配置一台减速器，减速器的选型需要综合考虑体积、减速比、扭矩和价格等方面因素，不同的机器人有不同数量的关节，而且负载不同，所用的减速器也不同。一般而言，重载的关节多使用 RV 减速器，轻载关节一般用谐波减速器。

图15.精密减速器分类



数据来源：亿欧智库《2022 中国工业机器人市场研究报告》，财通证券研究所

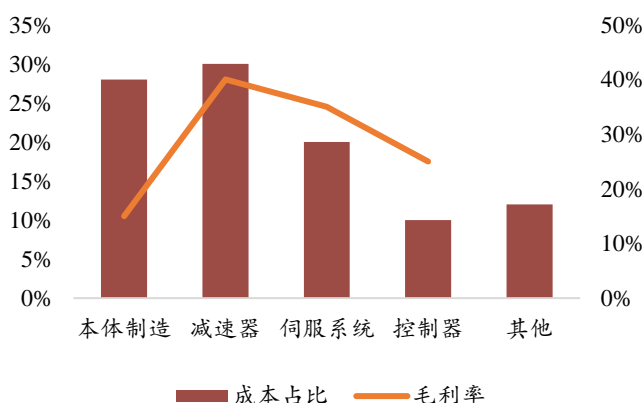
图16.中国精密减速器下游应用占比



数据来源：观研天下《中国精密减速器行业现状深度调研与投资战略研究报告（2022-2029 年）》，财通证券研究所

以工业机器人为例，精密减速器属于其核心部件，成本占比 30%。机器人上游核心部件主要包括是减速器、伺服系统和控制器，其中减速器占机器人成本的 30%，伺服系统占成本的 20%，控制器占成本的 10%，减速器是价值量最大的核心部件。控制器、伺服系统和谐波减速器国内厂商已经实现突破，目前 RV 减速器仍然大量依靠进口。目前减速器的毛利率约 40%，高于伺服系统/控制器和本体制造，且目前减速器仍然具有较高的技术壁垒。

图17.工业机器人成本占比(左轴)及毛利率(右轴)情况



数据来源：亿欧智库《2022 中国工业机器人市场研究报告》，财通证券研究所

图18.国内工业机器人核心零部件技术情况

控制器	已解决有无问题；因底层软件架构和核心控制算法不足，在稳定性、相应速度和易用性方面与国际产品有差距。
减速器	谐波减速器已实现技术突破，可实现进口替代；RV减速器因传动精度、扭转刚度、稳定性等性能问题，仍依赖进口
伺服系统	需要高力矩、高精度、高稳定、强抗干扰的伺服电机和伺服驱动；虽与国际产品有差距，但可以满足需求。

数据来源：亿欧智库《2022 中国工业机器人市场研究报告》，财通证券研究所



精密减速器包括谐波减速器、RV 减速器、精密行星减速器、摆线针轮行星减速器等。

### (1) 谐波减速器：

谐波减速器由波发生器、柔轮和刚轮三大基本零件组成。谐波减速器是一种靠波发生器使柔轮产生可控的弹性变形波，通过柔轮与刚轮的相互作用实现运动和动力传递的传动装置。谐波减速器在机器人应用中常用于小臂、腕部和手部等小关节部位。

图19.谐波减速器结构示意图

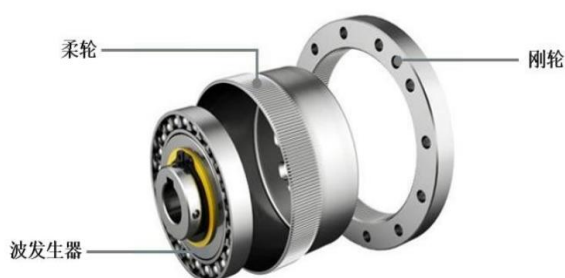
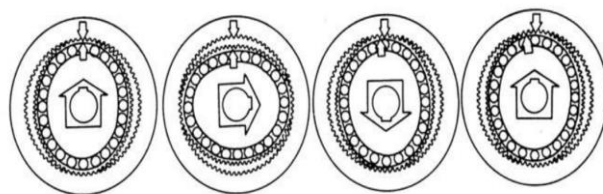


图20.谐波减速器运行示意图



数据来源：绿的谐波招股说明书，财通证券研究所

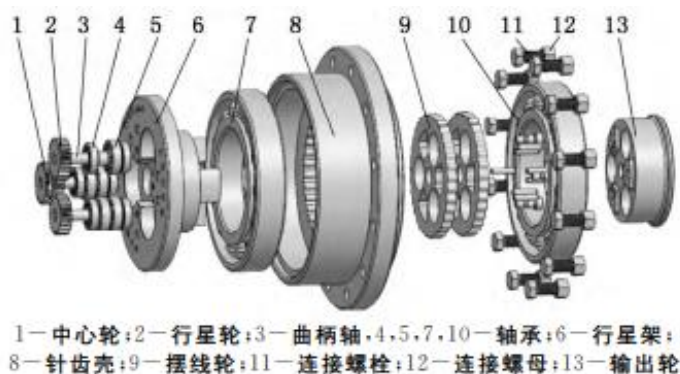
数据来源：绿的谐波招股说明书，财通证券研究所

谐波减速器凭借其多项优点在轻负载精密减速器领域中占据主导地位，且应用广泛。除了机器人领域外，其在医疗器械、数控机床、光伏设备和半导体设备等领域均有应用前景。谐波减速器的主要优点有：（1）**传动精度高**：多齿在两个 180 度对称位置同时啮合，使得齿轮齿距误差和累计齿距误差对旋转精度的影响较为平均，可得到极高的位置精度和旋转精度。（2）**传动比大**：单级谐波齿轮传动的传动比可达 30-500,且结构简单,三个在同轴上的基本零部件就可实现高减速比。（3）**承载能力强**：在谐波传动中，齿与齿的啮合是面接触，加上同时啮合齿数比较多，因而单位面积载荷小，承载能力较其他传动形式高。（4）**体积小、重量轻**：相比普通的齿轮装置，该齿轮结构体积和重量可以大幅降低，实现小型化、轻量化。在输出力矩相同的前提下，相较一般减速器，其体积可减少 2/3，重量可减轻 1/2。

### (2) RV 减速器：

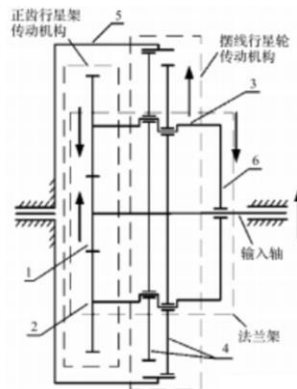
RV 减速器结构复杂，主要三大零部件为中心轮和行星轮、摆线轮和曲柄轴。RV 减速器，全称旋转矢量(Rotary Vector)减速器，与摆线针轮减速器同源，由一个行星齿轮减速机的前级和一个摆线针轮减速机的后级组成，因此内部结构会比谐波减速器更加复杂。RV 减速器在机器人应用中常用于转矩大的腿部、腰部和肘部等关节部位。

图21.RV 减速器结构图



数据来源:《RV 减速器结构分析与三维造型设计》(王万新), 财通证券研究所

图22.RV 减速器工作原理



数据来源: 齿轮传动公众号, 财通证券研究所

RV 减速器作为工业机器人关节的高精密减速传动装置具有多项优点且应用广泛。除了机器人领域外, 其在医疗检测设备、机床和卫星接收系统等领域均有应用广泛应用。RV 减速器的主要优点有: (1) **传动效率高**: 摆线针轮行星减速装置中的传动零件刚度高、接触应力小, 零件加工和安装精度易于实现高精度。(2) **体积小、质量轻**: 行星传动结构与紧凑的 W 输出结构组合, 使得整个摆线针轮减速装置结构十分紧凑。(3) **传动比大**: 采用一齿差或少齿差传动, 摆线针轮传动的传动比大小摆线针轮的齿数, 齿数越多, 传动比越大。(4) **承载能力强**: 摆线针轮传动同时啮合的齿数要比渐开线外齿传动同时啮合的齿数多。(5) **寿命长**: 摆线轮和针轮的轮齿均淬硬、精磨, 比渐开线少齿差传动中内齿轮的加工性能更好、齿面硬度更高。

表6.RV 减速器和谐波减速器的对比

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

数据来源: 绿的谐波招股说明书, 财通证券研究所

### (3) 行星减速器：

行星减速器也称为行星齿轮减速器，是齿轮减速器的一种，行星减速器使用行星齿轮来达到减速效果，其原理和齿轮减速机相同。行星减速机中均匀分布在四周的圆柱齿轮在内齿轮和外齿轮之间围绕一个同心圆做运动，圆柱齿轮的循环运动类似于太阳系中的行星运行轨迹。因此，行星齿轮减速机也叫行星减速机。行星减速机主要用于传递必要的力矩，齿轮数量越多，其齿轮的负载面越大，承载能力越强。行星减速机以其体积小、传动效率高、减速范围广、精度高等诸多优点，而被广泛应用于伺服、步进、直流等传动系统中。行星减速器减速比通常在 3~10 之间，减速机级数一般不超过 3，但有部分大减速比定制减速机有 4 级减速。行星减速器精度可以做到 1 分以内，单级传动效率在 97%~98%。

图23.行星减速机的内部结构



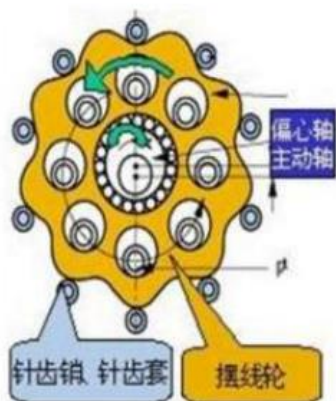
数据来源：neugart 官网，财通证券研究所

### (4) 摆线针轮减速器：

摆线针轮减速机是一种应用行星式传动原理，采用摆线针齿啮合的新颖传动装置，其全部传动装置可以分为三部分，包括输入部分、减速部分、输出部分。输出轴装有一个错位 180° 的双偏心套，偏心套上装有两个滚柱轴承，形成 H 机构，两个摆线轮的中心孔即为偏心套上转臂轴承的滚道，并由摆线轮与针齿轮上一组环形排列的针齿轮相啮合，以组成少齿差内啮合减速机构。摆线针轮减速机工作时，摆线轮的运动具有公转也有自传，在输入轴正转一周时，偏心套亦转动一周，摆线轮于相反方向上转过一个齿差从而得到减速。

摆线针轮减速机具有结构紧凑、单机传动比大、运转平稳、可靠性高、拆装方便等优点,在许多情况下可以替代普通圆柱齿轮减速机及蜗轮蜗杆减速机。摆线针轮减速机的单级转动比能达到 87,两级减速时转动比为 121-5133,其效率在 90%以上。其原理与行星减速器类似,结构比较紧凑。不过摆线针轮减速机也有成本较高,传递功率较小,寿命相对较短的缺点。摆线针轮减速机可广泛用于石油、环保、化工、水泥、输送、纺织、制药、食品、印刷、起重、矿山、冶金、建筑、发电等行业。

图24.摆线针轮减速机原理图



数据来源:电机技术及应用公众号,财通证券研究所

图25.摆线针轮减速机实物图



数据来源:塞弗勒减速机有限公司官网,财通证券研究所

谐波减速器具有结构紧凑,传动比大的特点,也是特斯拉机器人主要采用的减速器产品,但成本方案也有望在后续量产中得到应用。谐波减速器在工业机器人上有广泛使用,而人形机器人对于减速器体积、传动比、重量等有较高要求,考虑到人形机器人的集成度要求和负载要求,谐波减速器基本可以满足人形机器人的要求,也是特斯拉目前采用的主要方案。介于目前人形机器人成本较高,不排除未来适用其他低成本方案的可能性,行星齿轮减速器等产品也有一定概率进入人形机器人市场。

### 2.2.2 滑动丝杠和行星滚柱丝杠为线性执行器的核心部件

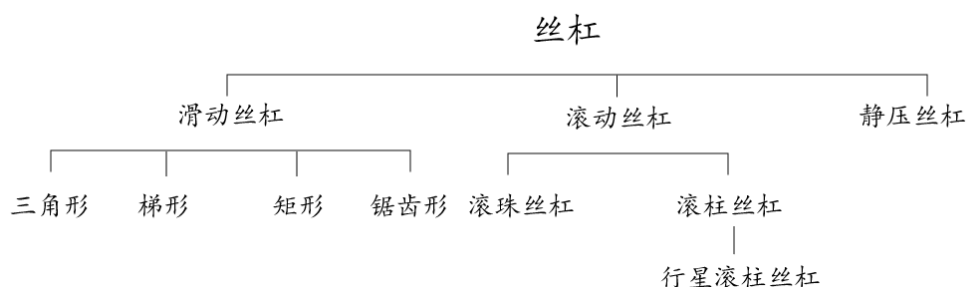
丝杠是一种将旋转运动转变为直线运动的机械装置。由于丝杠具有传动、调节、定位、支撑等多种用途,其在机械设备和仪器仪表领域有着非常广泛的应用,比较典型的应用场景有机床、光学仪器和测量仪器等。其中,高端机床设备、航空航天、机器人制造、自动化生产线等领域的不断发展,对高精度的丝杠产品有了更广泛和迫切的需求。

丝杠有多种类型,其中梯形丝杠、滚珠丝杠运用范围广泛,滚柱丝杠未来前景广阔。按照丝杠的摩擦特性可以分为滑动丝杠、滚动丝杠和静压丝杠。1) 滑动丝杠



按牙型可分为三角形、梯形、锯齿形和矩形丝杠，市面上最常见的为三角形，主要用于联接，与三角形丝杠相比，梯形、锯齿形和矩形丝杠具有更高的效率和更好的传动性能，主要用于传动。2) 滚动丝杠主要分为滚珠丝杠和滚柱丝杠两大类，滚动丝杠的制作难度普遍高于滑动丝杠，滚珠丝杠具有摩擦力小，传动效率高和精度高的优点，因此得到了较为广泛的应用；与滚珠丝杠相比，滚柱丝杠具有更高的承载能力、效率、可靠性和更强的刚度、耐用性，与此同时，由于其要求制作工艺更复杂，制作成本更高，应用范围受到一定限制，滚柱丝杠中行星滚柱丝杠近年来尤其受到关注。3) 静压丝杠摩擦小使用寿命长、减震性好，常用于精密机床和数控机床的给进机构中。

图26.丝杠产品分类



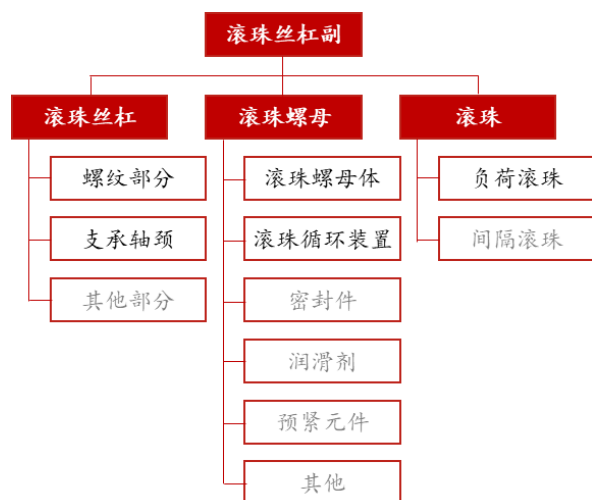
数据来源：山东博特官网，财通证券研究所

**滚珠丝杠**，又名滚珠丝杠副，是工业精密机械中常用的传动元件。其主要结构包括滚珠丝杠、滚珠螺母、滚珠三部分。丝杠轴为螺母运动的导向轴，其表面具有螺纹，滚珠在螺纹内运动。螺母由预压片、反向器、防尘器等组成，是直线运动的移动体，带动滚珠循环机制；其端部密封件用于封装润滑零件、防止异物进入。滚珠是利用低摩擦系数维持整个零部件运转的媒介。

根据螺母中的滚珠循环方式，滚珠丝杠可分为外循环、内循环、端盖式。a) 外循环是指滚珠在循环过程结束后与丝杠脱离接触，通过螺母外表面的螺旋槽或插管返回丝杠螺母。该方式制造工艺简单，使用广泛，但由于滚道接缝处很难做得平滑，因此滚道平稳性略差。b) 内循环是指滚珠始终与丝杠保持接触，通过反向器实现循环。反向器分圆柱凸键反向器、扁圆镶块反向器两种，其中后者尺寸较小，可以减小螺母径向尺寸并缩短轴向尺寸，但其对反向器外轮廓和螺母上切槽尺寸的精度要求较高。c) 端盖式为早期结构，其缺点较多，目前已被淘汰。

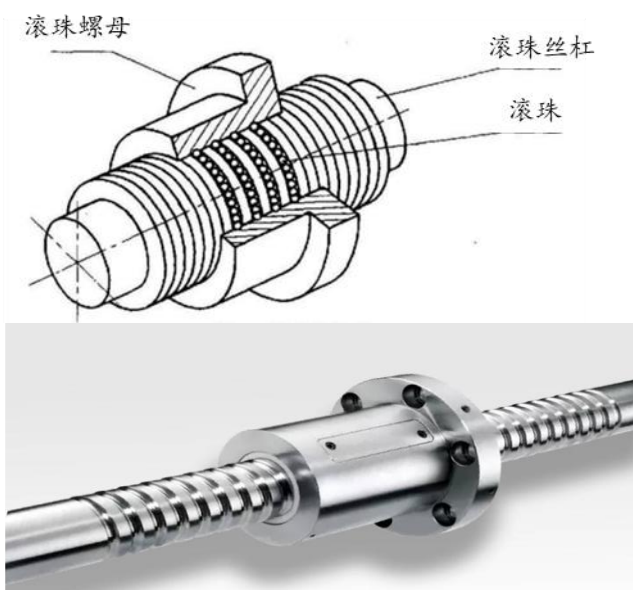


图27.滚珠丝杠构成



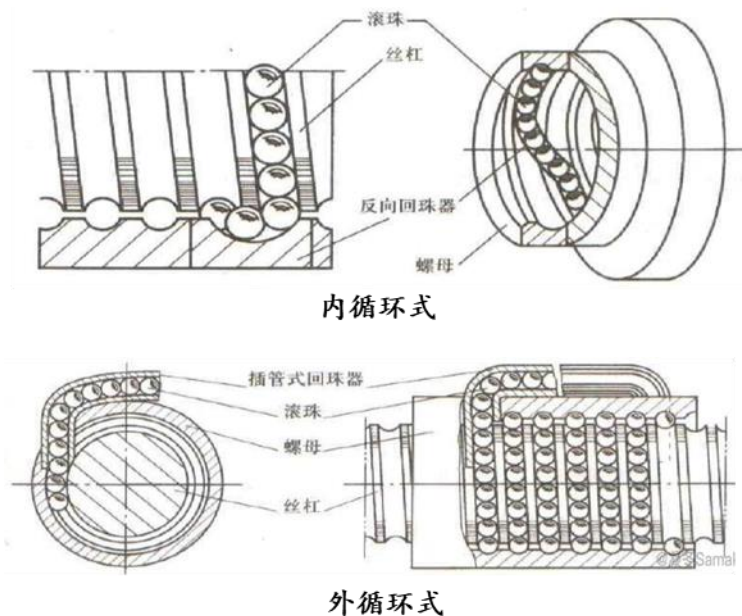
数据来源：华经产业研究院，财通证券研究所

图28.滚柱丝杠结构和示意图



数据来源：TPTNANO 官网，南京工艺官网，财通证券研究所

图29.滚珠循环模式示意图



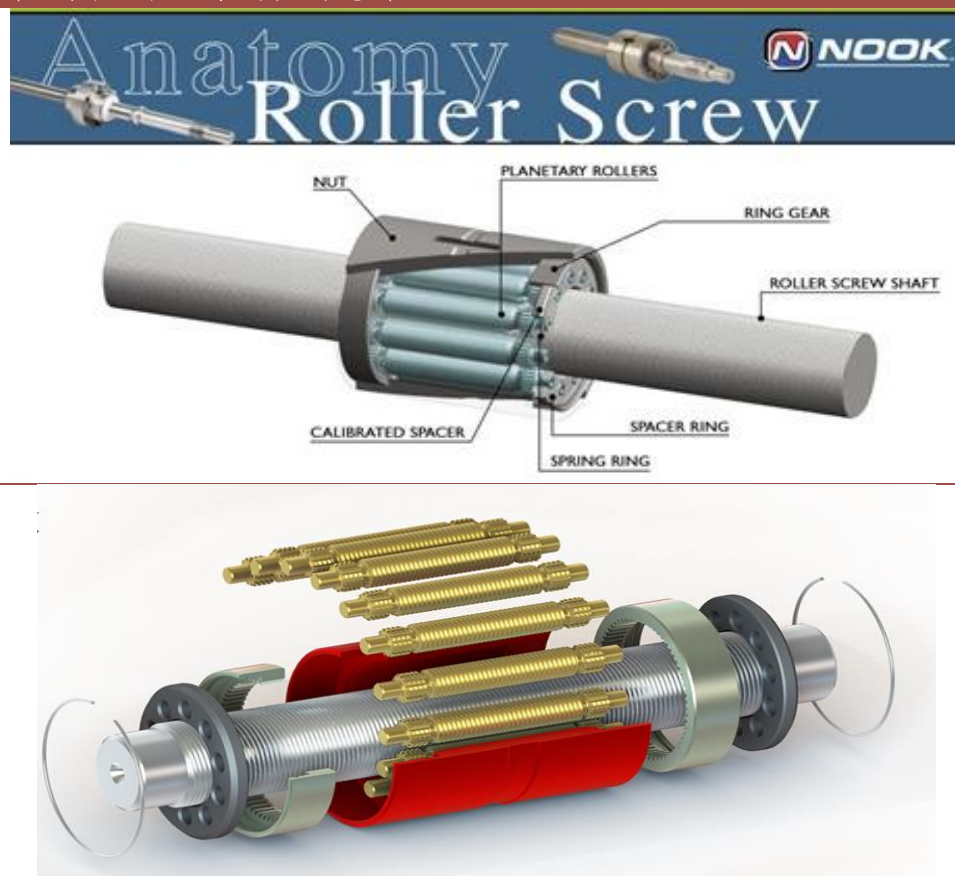
数据来源：深圳汉工官网，财通证券研究所

滚珠丝杠的主要功能是将旋转运动转化为直线运动，化滑动摩擦为滚动摩擦。滚珠丝杠的螺母和螺杆表面加工成凹弧，形成螺纹滚道，滚珠置于滚道之间，形成滚珠螺杆组件。当丝杠相对螺母旋转时，丝杠的旋转面通过滚珠推动螺母轴向移动。

动，滚珠的滚动使得丝杠和螺母之间的滑动摩擦转变为滚珠与丝杠、螺母之间的滚动摩擦。同时，滚珠通过反向器或螺旋槽进行循环，构成闭合回路。

行星滚柱丝杠是柱形滚动体环绕丝杠轴做行星运动的机械装置，主要组成元件包括丝杠轴、螺纹滚柱、内齿轮、行星架、挡圈和防尘圈等。标准式行星滚柱丝杠的配套电机由连轴器连接丝杠轴，驱动主轴旋转啮合螺纹滚柱，螺母内滚柱做行星运动时发生轴向位移，将电机提供给丝杠轴的旋转运动转化成螺母的直线往复运动。

图30.滚柱丝杠结构及实物示意图



数据来源：NOOK 官网，ROLLVIS 官网，财通证券研究所

表7.滚柱丝杠主要零部件特点与功能

主要部件	特点
滚柱	相同牙形角的单头单道旋转槽螺纹，角度与螺母匹配，防止旋转时与螺母之间的轴向运动
丝杠	90° 牙形角多头螺纹
螺母	内螺纹与丝杠的牙形角和头数相同
螺母组件	功能
齿轮	通过啮合滚柱末端轮齿控制滚柱的旋转与轨道
间隔环	齿轮内旋转，等距孔充当滚柱光滑轴端的旋转轴承
挡圈轴	轴向固定间隔环

数据来源：李凯等《精密行星滚柱丝杠的传动特性》(2016)，财通证券研究所

**滚柱丝杠主要应用于军工及高精尖的民用领域。**滚柱丝杠属于螺纹丝杠的高精尖分支，国内研究应用及规模化量产尚处于初级阶段，而在海外，除军用领域外，滚柱丝杠已应用于塑料成形、汽车与飞机产业拉削、机电压力机、铆接焊接、石油天然气、铁路、钢铁、模拟器等多种民用领域的高精尖方向。为适应不同应用环境，滚柱丝杠在标准式行星滚柱丝杠的基础上衍生出多种派系：如应对小行程工作场景紧凑空间需求的反转式丝杠，应对医疗器械和精密光学领域的刚度能力需求的循环式丝杠，应对重型机械重载需求的轴承环式丝杠和应用于传动较大场合的差动式丝杠。

**滚柱丝杠相比滚珠丝杠具有高承载和长寿命的性能优势，更加可靠。**滚珠丝杠传递载荷元件是滚珠，通过钢球的点接触受力，而滚柱丝杠以滚柱替代滚珠，通过螺纹之间的线接触承载压力，相同体积空间内，滚柱丝杠的受力承载面积约为滚珠丝杠的 15 倍，因此滚柱丝杠承载能力更强、使用寿命更长。同尺寸条件下，滚柱丝杠的额定动载荷可为滚珠丝杠的 3-4 倍，寿命约为滚珠丝杠的 15 倍；滚柱丝杠额定静载荷高，抗冲击能力强，轴向承载力为滚珠丝杠的 3-6 倍，而滚柱丝杠在受到震动时钢球容易冲击形成塑性变形。

表8.滚珠丝杠与滚柱丝杠对比

项目	滚珠丝杠	滚柱丝杠
滚动体	滚珠，钢球易购得	滚柱，磨纹加工难度更大，有技术 know-how
传动效率	高	较低，摩擦力较小时可达 90%以上
传动速度	额定转速在 3000-5000RPM 间	转速可达 6000RPM，加速度可达 7000rad/s <sup>2</sup>
承载力	较小	大，是同尺寸滚珠丝杠的 3-6 倍
抗冲击能力	较弱，滚珠易冲出刻痕点	较强
精度	较低，最低为 G9	较高，最低为 G5
使用寿命	较短	较长，约为滚珠丝杠的 15 倍
维护费用	较高	较低

数据来源：东莞市领航机电设备有限公司官网，高技传动科技公众号，邓琦《行星滚柱丝杠电动缸应用现状》(2017)，财通证券研究所

**滚柱丝杠导程范围大、噪音低、维护方便，具有更强的可用性。**滚柱丝杠相较于受限于钢珠直径的滚珠丝杠，可通过调整螺纹头数使导程达到更小的微米级，导程范围更大。大多滚柱丝杠无需循环返回装置，具有高速和低噪音的优势。滚珠丝杠拆卸时副滚珠易散落，而滚柱丝杠更便于维护，仅需将丝杠旋回螺母。

**特斯拉人形机器人目前使用了多套反转式行星滚柱丝杠和滑动丝杠，其中反转式行星滚柱丝杠主要用于下肢等承载力较大的部位，也是目前执行机构中成本最大的零部件之一。**

### 2.2.3 无框力矩电机与空心杯电机为主流方案

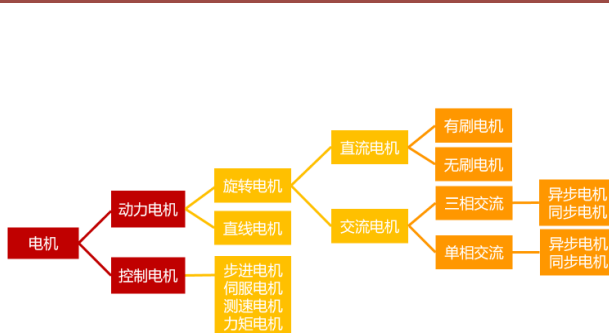
电动机是一种常见的动力输出装置，产品分类较多。电机是指依据电磁感应定律实现电能转换或传递的一种电磁装置，分为电动机和发电机，电动机可作为动力输出装置。电机分类较多，按照工作电源分类可分为直流电机和交流电机，直流电机可分为无刷直流电动机和有刷直流电动机，交流电机可分为同步电动机和异步电动机。从用途上看，电动机可以分为驱动类电机和控制类电机，驱动类电机是将电能转换成机械能，主要应用在电钻、小车轮子、电风扇、洗衣机等设备上，典型电机包括直流电机等。控制类电机是将脉冲信号转换成一个转动角度的电机，在非超载的情况下，电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数，主要应用在自动化仪表、机器人、自动生产流水线、空调扇叶转动等设备，典型电机包括伺服电机、步进电机等。

图31.电动机分类（按照电源类型）



数据来源：亚洲国际动力传动与控制技术展览会官网，财通证券研究所

图32.电动机分类（按照用途和结构）



数据来源：电子工程世界网，财通证券研究所

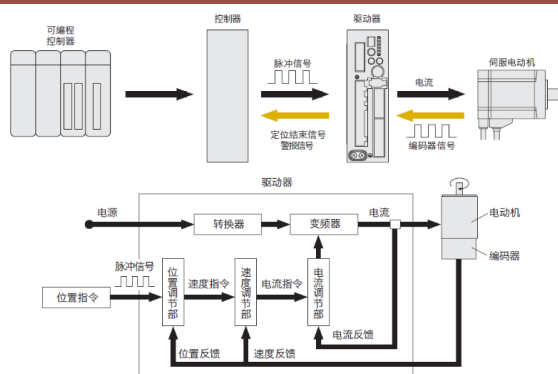
伺服电机由定子、转子、轴承、编码器等核心部件构成，编码器是检测电动机转速和位置的传感器。编码器还可分为绝对式编码器和增量式编码器，绝对式编码器可检测电动机旋转一圈内的绝对位置，并输出旋转角度的绝对位置。

图33.伺服电机的结构



数据来源：中国传动网，财通证券研究所

图34.伺服电机工作流程



数据来源：中国传动网，财通证券研究所



特斯拉人形机器人主要采用无框力矩电机。无框力矩电机是力矩电机的一种类型，力矩电机是伺服电机的一种，因此无框力矩电机也是一种特殊的伺服电机。力矩电机是一种特殊类型的无刷永磁同步电机，是一种具有软机械特性和宽调速范围的伺服电机。而无框电机是一种新型力矩电机，由独立的转子和定子部件组成，这些部件分别安装到机械设备中，以将扭矩传递给负载。无框电机精简了设备的结构、减小了整体的空间。无框电机取消外壳和轴承，通过精心的结构设计，定子和转子分别直接固定至机械设备上，与人形机器人执行器结构比较契合，因此在人形机器人上有望大量使用。由于无框力矩电机的负载直接连接转子，无需传动件，无框力矩电机也属于直驱电机。

图35.无框电机实物图



数据来源：科尔摩根官网，财通证券研究所

表9.无框力矩电机与伺服电机对比

电机	控制方式	性能	原理
伺服电机	以扭矩、位置、速度等三种模式为控制方向的电机，采用闭环控制方式	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	伺服电机转子转速由输入信号控制，并能快速反应，在自动控制系统中，作为执行元件，可将所收到的电信号直接转换为电动机轴的角位移或角速度输出
无框力矩电机	以扭矩为控制方向的电机，采用的是开环控制的方式	是极对数很多的特种电机，在电动机低速甚至堵转时仍能持续运转，不会造成电动机的损坏。	无框力矩电机是一种特殊类型的无刷永磁同步电机。由于负载直接连接转子，无需传动件，无框力矩电机属于直驱电机。

数据来源：云熙机电官网，财通证券研究所

根据 insightSLICE 预测，2022 年无框无刷直流电机的市场规模估计为 8.55 亿美元，预计 2032 年将会达到 16.67 亿美元，复合增长率为 6.9%。从全球市场来看，国外制造商包括科尔摩根、尼得科、Allied Motion、Parker Hannifin、Akribis Systems、Pranshu、Moog Inc.等，国内制造无框电机的企业主要有步科股份、绿的谐波、昊志机电等。



图36.全球无框电机市场规模预测（单位：亿美元）



数据来源：insightSLICE，财通证券研究所

表10.国内外核心无框电机制造商

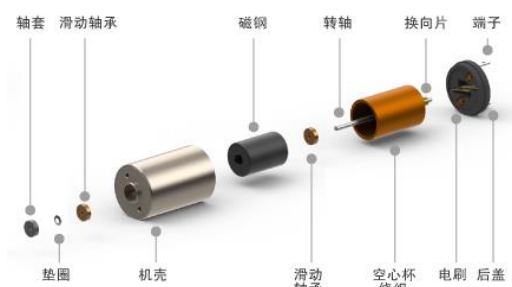
公司	优势	产品范围
国内	步科股份 无框电机配置灵活，安装方便，着眼于目前驱动系统的高度集成化趋势；成本优势明显，助力国产协作机器人成本控制。	公司的自动化设备控制核心部件主要包括工业人机界面、伺服系统、步进系统、可编程逻辑控制器、变频器等产品涵盖电主轴、数控转台、直线电机、谐波减速器、数控系统、伺服电机等数十个系列上百种产品
	昊志机电 公司应用于机器人领域的产品已形成链条，包括控制器、无框力矩电机和谐波减速器等。	
国外	科尔摩根 可在极其紧凑的电磁组件中提供高转矩，同时还可集成先进的材料、绕组和灵活性能，适用于各种应用。具有高可靠性，可绑定磁铁线，形成紧凑的，自支撑的线圈；采用缓蚀材料建造；在电机中使用钕磁铁，有助于为电机创造高扭矩。	电机、驱动器、直线执行器、AGV 控制解决方案和自动化平台
	尼得科	产品包括电机、电机控制器、减速器、传感器和生产设备等

数据来源：各公司官网，财通证券研究所

特斯拉人形机器人在手掌部位还使用了空心杯电机，空心杯电动机属于直流永磁的伺服、控制电动机，也属于微特电机。空心杯电动机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，目前空心杯电机是人形机器人手掌部位的主流方案。作为高效率的能量转换装置，在很多领域代表了电动机的发展方向。

与传统的电机相比，空心杯电机具有许多独特的特点。首先，由于其内部结构较为简单，因此可以实现更高的转速和功率密度。其次，由于内部空心结构的设计，使得电机整体更加轻量化和紧凑，适合于各种特殊场合的应用。此外，在响应速度、低噪音、精准控制等方面也具有独特的优势。空心杯电机可分为有刷和无刷两种，有刷电机（又称直流有刷无铁芯电机）转子无铁芯，无刷电机（又称无刷无齿槽电机）定子无铁芯。

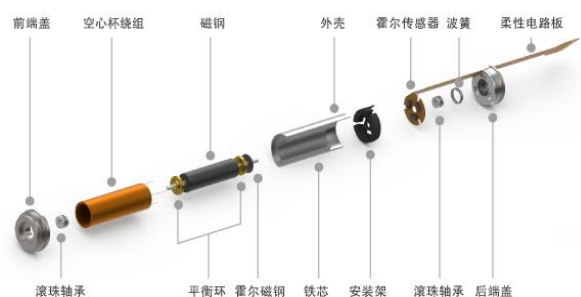
图37.有刷空心杯电机结构图



有刷空心杯电机结构图

数据来源：鸣志电器官网，财通证券研究所

图38.无刷空心杯电机结构图

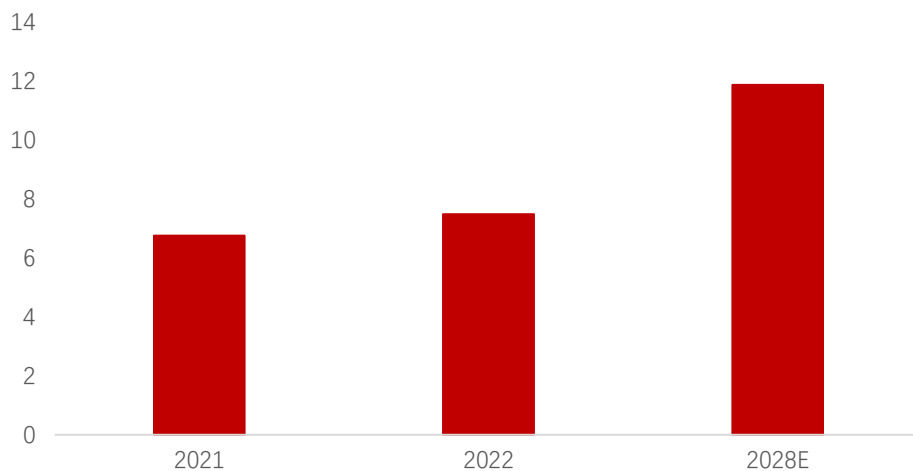


无刷空心杯电机结构图

数据来源：鸣志电器官网，财通证券研究所

根据 QY Research 预测，2022 年全球空心杯电机市场规模为 7.48 亿美元，预计 2028 年将达到 11.86 美元，复合增长率为 8%。目前空心杯市场被德国 FAULHABER、瑞士 Maxon 主导，鸣志电器、鼎智科技等为我国空心杯电机主要生产厂商，同时伟创电气等企业也在加速布局相关产品。

图39.全球空心杯电机市场规模预测（单位：亿美元）



数据来源：QY Research，财通证券研究所

表11.国内外核心空心杯电机制造商

公司		优势	产品范围
国内	鸣志电器	该系列电机采用了具有自主专利技术的空心杯绕组，能为公司带来高转矩、高扭矩、低噪音的优势；由于没有齿槽效应以及其结构紧凑，公司能得到更平稳的高低速运行、更精准的控制以及更高的效率和功率密度。	产品涵盖步进电机、无齿槽&空心杯电机、步进驱动器与电机、步进伺服驱动器与电机（闭环步进）、伺服驱动器与电机、集成式电机、全能型智能电机驱动器等
	鼎智科技	可避免由于齿槽存在磁阻不均匀而引起气隙磁感应的脉振；可消除电枢铁心中产生脉振损耗和主极极靴表面上产生表面损耗；具有高耐用性、低电气噪声和高效率等特点。	产品涵盖线性执行器、步进电机、直流无刷电机、空心杯电机等
国外	德国 FAULHABER	公司是独特的创新性微型电机技术空心杯电机的起源地，对驱动技术的发展产生了重要的影响。	从具有 200mNm 连续转矩的强大直流电机，到外径只有 1.9mm 的纤巧的微电机，FAULHABER 的标准产品能够通过 2500 多万种组合方式为特殊应用提供最优的驱动系统
	瑞士 Maxon	maxon DC 电机是质量优异的直流空心杯电机，采用高性能永磁体。电机的“心脏”是享有全球专利的空芯杯转子。这项最先进的技术带给驱动器的优势是紧凑的结构、高性能和低惯性	产品包括机电驱动系统、有刷 DC 电机、无刷 DC 电机、齿轮箱等

数据来源：各公司官网，财通证券研究所

## 2.2.4 力矩传感器是运动控制实现闭环的重要部件

**力矩传感器（Torque sensor）**是一种用于测量或检测物体扭矩或力矩的装置。力矩是指施加在物体上的力和物体的转动半径之间的乘积。机器人力矩传感器可以将机器人的动力学特性转换为实时测量的数字信号，使得机器人可以通过控制算法实现各种精准的运动和控制。特斯拉人形机器人在全身也使用了多个力矩传感器以保障去运动控制精度，从而实现特定的运动操作。

图40.力矩传感器实物图



数据来源：HBK 官网，财通证券研究所

图41.力矩传感器分类



数据来源：传感器专家网，财通证券研究所

根据原理的不同，力矩传感器可以分为应变计式力矩传感器、磁敏式力矩传感器、电容式力矩传感器、振动式力矩传感器、光学式力矩传感器。力矩传感器在测量的时候不会受到拉向载荷，而是受到杠杆力矩或扭矩的影响，产生扭转。因此，扭矩传感器需要采用特殊的应变计来测量这种类型的载荷，即扭矩。根据力矩传感器结构的不同，可以分为轴式力矩传感器和法兰力矩传感器。

图42.测量体扭曲示意图



数据来源：HBK 官网，财通证券研究所

图43.轴式扭矩传感器示意图



数据来源：HBK 官网，财通证券研究所

六维力传感器或六轴力矩传感器具有在多个方向上测量力和力矩的能力，包括三个线性力（X、Y、Z 轴）和三个力矩（扭矩）（绕 X、Y、Z 轴）。对此对应的是单轴扭矩传感器（Single-axis Torque Sensor），轴扭矩传感器是一种用于测量沿单一轴向的扭矩的传感器，它专门设计用于测量沿单个方向的扭矩，而不考虑其他方向的扭矩。这些传感器通常用于需要测量特定轴向扭矩的应用场景。六轴技术在轴式扭矩传感器中的应用可以带来更广泛的功能和更高的技术含量。具有以下优点：

- （1）多维度测量：六轴力矩传感器能够同时测量多个方向上的力和力矩，提供更全面的力矩信息。
- （2）空间力矩测量：六轴力矩传感器可以提供绕 X、Y、Z 轴的力矩测量，可用于测量物体在三维空间中的力矩和转动情况。
- （3）多轴力矩控制：六轴力矩传感器的输出可以用于实时控制和调整多个轴上的力矩，广泛应用于机器人技术、装配工艺控制等领域。
- （4）精确性和灵敏度：六轴力矩传感器通常具有高精度和高灵敏度，能够提供准确和可靠的力矩测量结果。

图44.六轴扭矩传感器



数据来源：hypersen 官网，财通证券研究所

市场规模将超百亿美元，外资企业占据领导地位。2020 年全球扭矩传感器市场价值 67.3 亿美元，根据 Mordor Intelligence 预测，2026 年全球扭矩传感器市场价值将达到 116.3 亿美元，2021-2026 年期间的复合增长率为 9.68%。全球主要的力矩传感器制造商包括 ATI Industrial Automation、Robotiq、Nordbo Robotics、OnRobot、HMB、WACOH 等。

### 3 重视确定性环节机会，关注产业链扩散机遇

#### 3.1 执行机构成本过高，产业链有望扩散

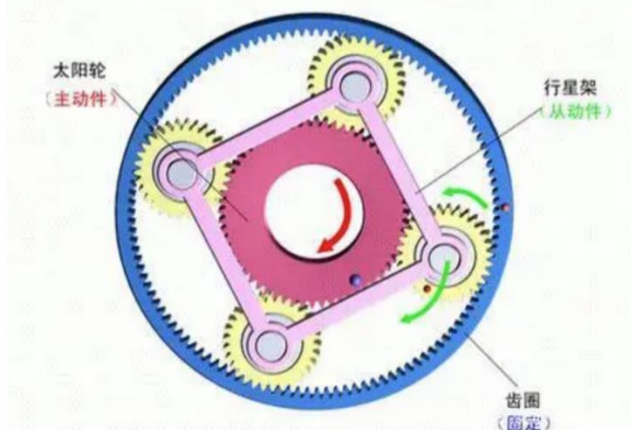
人形机器人目前还处于行业比较早期的阶段，核心部件以及产品最终形态并未完全确定，因此很多环节还有较大的不确定性。不过部分环节有较高的确定性，在目前特斯拉方案中已经得到应用，并且有比较明确的供应商或者测试产品，包括执行机构总成、谐波减速器、空心杯电机等，相关行业的公司未来有望在人形机器人在国内逐步量产的过程中直接受益。丝杠、行星齿轮减速器、无框力矩电机、力矩传感器、编码器等板块目前产品形态，核心供应商等还未明确形成，我们认为可以保持比较开放的态度观察行业发展的动向。

目前执行器方案成本较高，降本压力巨大。以旋转执行器为例，按照无框力矩电机、谐波减速器、驱动器及其他部件的成本分别为 1000 元、1500 元、1000 元计算，关节总成成本约 2500 元。对于线性执行器，按照无框力矩电机、反转式行星滚柱丝杠、驱动器及其他部件的成本分别为 1000 元、10000 元、1000 元计算，关节总成成本约为 12000 元。考虑到还有滑动丝杠的使用，28 个执行器关节成本约 16 万元，距离马斯克提到量产后销售价格 2 万美元的目标，仍有较大差距。我们认为，执行器目前成本较高，执行器仍然是未来人形机器人降本的关键部分。



行星减速器、滑动丝杠等低成本方案或迎来成长机遇。行星齿轮减速器由于精度较差，在传统的工业机器人领域使用场景很少，但是其成本较低，以中大力德产品为例，其行星齿轮减速器销售单价仅为数百元。在降本的压力下，行业内或许也会在部分产品上使用行星齿轮减速器产品。与此相似的还有丝杠类产品，反向式行星滚柱丝杠成本较高，未来滑动丝杠、滚珠丝杠等其他丝杠类产品也具备一定的成长潜力。

图45.行星齿轮减速器原理



数据来源：深圳市维动自动化设备有限公司百家号，财通证券研究所

图46.滑动丝杠（梯型丝杠）



数据来源：博特精工官网，财通证券研究所

## 3.2 重点环节公司梳理

### 1、执行器总成

目前国内具备较强执行器总成制造能力的企业包括三花智控和拓普集团。

#### （1）三花智控

三花智控是全球领先的生产和研发制冷空调控件元件和零部件的厂商，有着 30 多年的历史经验。在汽车、电器和空调行业中，通过与全球著名企业的合作紧密，三花已成为世界领先的 OEM 供应商，提供高品质且最具竞争力的商品。三花目前成为膨胀阀、电磁阀和换向阀最大的生产厂商之一，年销售量超过 1 亿件。基于三花智控较强的制造能力和集成能力，公司有望在机器人领域执行器领域占据重要的市场地位。

#### （2）拓普集团

拓普集团自 1983 年创立，总部位于中国宁波，在汽车行业中专注笃行 40 年。集团设有动力底盘系统、饰件系统两大事业群，以及一个面向智能驾驶的独立品牌业务单元-域想智行。集团主要生产汽车 NVH 减震系统、内外饰系统、车身轻量

化、底盘系统、智能座舱部件、热管理系统、空气悬架系统和智能驾驶系统等产品。拓普集团与国内外多家汽车制造商建立了良好的合作关系，已成为奥迪、宝马、斯特兰蒂斯、通用、吉利、福特、奔驰、大众、高合、理想、蔚来、小鹏、RIVIAN、LUCID 等汽车制造商的全球合作伙伴。拓普集团同样拥有较强的制造能力和集成能力，也将是机器人行业上游的重要供应商。

## 2、丝杠

丝杠作为高端的传动装置，在机床等高端机械设备上有大量应用，但并未实现国产化，国内以南京工艺、秦川机床为代表的企业在业内有一定规模，但是目前人形机器人使用的行星滚柱丝杠国内还没有企业具备较好的制造能力。近年来，恒立液压、贝斯特、长盛轴承等企业开始布局丝杠导轨业务，未来有望实现在人形机器人领域的拓展。

### (1) 恒立液压

2021 年 9 月，恒立液压发布定增预案，计划投资 15.3 亿元用于线性驱动器项目，该项目达产后将形成年产 104,000 根标准滚珠丝杠电动缸、4,500 根重载滚珠丝杠电动缸、750 根行星滚柱丝杠电动缸、100,000 米标准滚珠丝杠和 100,000 米重载滚珠丝杠的生产能力。项目完成后，恒立液压将具备滚珠丝杠和行星滚柱丝杠的制造能力。

### (2) 贝斯特

贝斯特成立于 1997 年 5 月，公司主营业务为研发、生产及销售各类精密零部件及工装夹具产品。公司主要产品为涡轮增压器精密轴件、涡轮增压器叶轮、涡轮增压器中间壳（为无锡石播增压器有限公司供货）。公司近年来开始布局丝杠导轨业务，目标实现机床丝杠导轨的国产化替代。

### (3) 长盛轴承

长盛轴承 2022 年发布《向特定对象发行股票预案》，公司计划募集资金 4.46 亿元，并计划投资 2.65 亿元用于扩建年产自润滑轴承 16700 万套、滚珠丝杠 3 万套项目。

### (4) 秦川机床

秦川机床子公司汉江机床是国家第三个五年计划时期兴建的三线建设重点工程之一，机械工业大型骨干企业，国内螺纹磨床主导企业。经过 50 多年的发展历程，形成以自动化、数字化、智能成套成线产品为主的精密数控螺纹加工机床产业，以滚珠丝杠副、滚动直线导轨副、滚动导轨块、滚动花键副、螺杆转子副、齿轮

齿条副、精密工作台和精密零部件产品为主的滚动功能部件产业，是陕西省高新技术企业。

### 3、减速器

国内谐波减速器核心制造商包括绿的谐波、来福、大族、双环传动、国茂股份，行星齿轮减速器制造商包括中大力得，同时国茂股份等企业有望在行星齿轮箱领域实现布局。

#### (1) 绿的谐波

绿的谐波自 2003 年开始，公司核心团队从事机器人用精密谐波减速器理论基础的研究。公司业务聚焦谐波减速器、机电一体化产品、旋转执行器、数控分度转台、无框电机、电液伺服控制器、工业自动化服务等多类产品，也是国内谐波减速器龙头企业。

2023 年 4 月，公司与三花智控拟在三花于墨西哥的工业园内（即“三花墨西哥工业园”）共同出资设立一家合资企业，我们预计这将有助于公司在人形机器人领域的布局。

#### (2) 双环传动

双环传动创建 40+年来专注于机械传动核心部件——齿轮及其组件的研发、制造与销售，已成为中国头部的专业齿轮产品制造商和服务商之一。公司产品涵盖传统汽车、新能源汽车、轨道交通、非道路机械、工业机器人等多个领域，业务遍布全球，成为包括采埃孚、康明斯、卡特彼勒以及上汽、一汽等国内外知名企业的供应商，世界 500 强客户销售占比 60%以上。

#### (3) 国茂股份

国茂股份专注减速机行业 30 年，公司主营产品为齿轮减速机和摆线针轮减速机，年产量超 70 万台，产品广泛应用于工程机械、智能物流与仓储、工业自动化、冶金、环保、新能源、食品轻工、港口机械、资源开采等通用机械行业各领域。公司是国内通用减速器龙头企业，同时具有谐波减速器产品布局，未来有望在行星齿轮减速机等领域持续拓展。

#### (4) 中大力德

中大力德始创于 1998 年，是一家集电机驱动、微特电机、精密减速器的研发、制造、销售、服务于一体的机电自动化企业。公司一直从事减速电机、减速器等核心零部件的生产和销售，主力产品为减速电机和行星减速器，并且还推出微型

无刷直流减速电机、精密行星减速器、滚筒电机、RV 减速器、谐波减速器、伺服驱动、永磁直流减速电机等产品。

#### 4、力矩电机

##### (1) 步科股份

步科股份一直专注于工业自动化设备控制核心部件与工业物联网/互联网软硬件的研发、生产、销售以及相关技术服务，公司核心产品包括工业人机界面、伺服系统、步进系统、可编程逻辑控制器、变频器等，在物流设备、机器人、包装设备、食品设备、服装设备、医疗设备、环保设备等行业有广泛应用。公司第三代无框力矩电机产品可以对标国际领先产品，部分型号具备一定优势。

##### (2) 昊志机电

昊志机电成立于 2006 年，是一家专业从事中高端数控机床、机器人、新能源汽车核心功能部件等的研发设计、生产制造、销售与维修服务的国家高新技术企业。公司稳步向数控机床和工业机器人等高端装备的核心功能部件领域横向扩张，目前产品涵盖 PCB 钻孔机/成型机/划片机电主轴、数控金属/玻璃雕铣机电主轴、数控车床主轴/电主轴、走芯车床电主轴、直结与皮带式机械主轴、加工中心电主轴、钻攻中心电主轴、高速内/外圆磨床主轴、木工雕铣机电主轴、高光及超精加工电主轴、超声波电主轴、液静压主轴、铣削动力头、末端执行机构、刀柄夹头、数控转台、直线电机、谐波减速器、数控系统、伺服电机、驱动器、传感器、燃料电池压缩机、曝气鼓风机、直驱类高速风机等数十个系列上百种产品。

#### 5、空心杯电机

##### (1) 鸣志电器

鸣志电器司专注于运动控制领域和智能电源领域核心技术及系统级解决方案的研发和经营，公司目前业务主要包括运动控制领域业务、智能电源领域业务、工业互联网业务、贸易代理业务、其他业务等五大板块。公司运动控制领域有控制电机类产品、启动控制类产品和传感器类产品，公司的空心杯电机产品在国内具有较好的竞争力。

##### (2) 鼎智科技



鼎智科技成立于 2008 年，公司主要产品为线性执行器、各类微电机及其组件，下游客户主要为医疗设备、工业自动化控制设备等制造企业。公司在丝杠、空心杯电机市场在国内具有一定的领先性。

### （3）伟创电气

伟创电气是一家专业从事工业自动化控制产品研发、生产和销售于一体的国家级高新技术企业。公司产品涵盖变频调速器、伺服驱动系统、光伏逆变器、PLC、HMI、自动化设备等。广泛应用于石油、化工、陶瓷、起重、机床、金属制品、电线电缆、塑胶、印刷包装、纺织化纤、冶金、煤矿、市政等行业。

公司 2022 年成立了机器人行业部，目前主要是以机器人大配套为出发点，执行端主要以低压伺服、空心杯电机、特种无框力矩电机、谐波减速器等这类产品为主。公司研制的空心杯电动机具有高转速、高扭矩、低噪音振动的优势，电机运行平稳、更精确的控制；电机结构紧凑让电机提供了更高的效率和功率密度。能广泛应用于人形机器人、检测机器人、工业自动化机器人、航空、医疗设备、工业工具、仪器仪表、电子设备等领域。

## 6、力矩传感器

### （1）柯力传感

柯力传感成立于 1995 年，是目前全球称重领域物联网研发与推广应用的主要引领者之一，也是中国重要的称重元件制造及销售企业之一和工业物联网产业开拓者之一。公司主要研制和生产各类物理量传感器、称重仪表、电子称重系统、工业物联网系统成套设备。依靠公司在称重领域的制造经验与优势，公司有望在力矩传感器领域取得突破。

### （2）苏州固锴

苏州固锴成立于 1990 年，是中国电子行业半导体十大知名企业、江苏省高新技术企业、中国半导体分立器件协会副理事长企业。公司产品包括最新封装技术的无引脚集成电路产品和分立器件产品、汽车整流二极管、功率模块、整流二极管芯片、硅整流二极管、开关二极管、稳压二极管、微型桥堆、军用熔断丝、光伏旁路模块、太阳能电池用银浆以及各种电子浆料等共有 50 多个系列、1500 多个品种。

## 4 投资建议

人形机器人在经历长达 50 年以上的发展之后，有望进入量产化的大时代，我们认为这是未来极具想象力和成长性的行业。建议关注确定性较强、行业壁垒较高或者价值体量较大的环节，包括关节总成、丝杠、传感器、灵巧手等，重点公司包括三花智控、拓普集团、恒立液压、贝斯特、鸣志电器等。同时也建议关注硬件泛化环境的机会，重点公司包括双环传动、苏州固锟、步科股份、五洲新春、伟创电气、恒尔达、力星股份、杭齿前进等。

## 5 风险提示

**特斯拉人形机器人量产进展不及预期。**特斯拉在人形机器人上的进展对行业量产具有引领作用，但是特斯拉人形机器人降本仍然有一定压力，量产进展有低于预期的可能性。

**产业链降本不及预期。**目前人形机器人方案成本较高，行业内正在通过多种方式实现成本下降，并且只有成本下降才会带来大量的应用。

**行业关键技术突破不及预期。**人形机器人目前还未量产，全球范围内仍在研发过程中，行业关键技术突破有低于预期的可能性。

**信息披露****● 分析师承诺**

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，并注册为证券分析师，具备专业胜任能力，保证报告所采用的数据均来自合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解。本报告清晰地反映了作者的研究观点，力求独立、客观和公正，结论不受任何第三方的授意或影响，作者也不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

**● 资质声明**

财通证券股份有限公司具备中国证券监督管理委员会许可的证券投资咨询业务资格。

**● 公司评级**

买入：相对同期相关证券市场代表性指数涨幅大于 10%；

增持：相对同期相关证券市场代表性指数涨幅在 5%~10%之间；

中性：相对同期相关证券市场代表性指数涨幅在-5%~5%之间；

减持：相对同期相关证券市场代表性指数涨幅小于-5%；

无评级：由于我们无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使我们无法给出明确的投资评级。

**● 行业评级**

看好：相对表现优于同期相关证券市场代表性指数；

中性：相对表现与同期相关证券市场代表性指数持平；

看淡：相对表现弱于同期相关证券市场代表性指数。

**● 免责声明**

本报告仅供财通证券股份有限公司的客户使用。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。

本报告的信息来源于已公开的资料，本公司不保证该等信息的准确性、完整性。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邀请或向他人作出邀请。

本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的价格、价值及投资收入可能会波动。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。

本公司通过信息隔离墙对可能存在利益冲突的业务部门或关联机构之间的信息流动进行控制。因此，客户应注意，在法律许可的情况下，本公司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或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务。在法律许可的情况下，本公司的员工可能担任本报告所提到的公司的董事。

本报告中所指的投资及服务可能不适合个别客户，不构成客户私人咨询建议。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。

本报告仅作为客户作出投资决策和公司投资顾问为客户提供投资建议的参考。客户应当独立作出投资决策，而基于本报告作出任何投资决定或就本报告要求任何解释前应咨询所在证券机构投资顾问和服务人员的意见；

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、发表或引用，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。