

通信

灵巧手：人形机器人中必不可少，有望带动空心杯电机及传感器市场持续增长

灵巧手：拟人化末端执行机构，人形机器人中必不可少，未来市场空间广阔。作为结合了仿生学新型末端执行器的灵巧手，拥有灵巧性高、适应性强、可完成多种不同类型的复杂操作等优点。随着工业自动化的发展以及 AI 技术的普及，机器人在各行各业的渗透率也在逐步提升。特斯拉 Optimus 量产在即，预计 3-5 年实现量产，且达到百万级。根据头豹研究院数据，保守估计 2030 年人形机器人的销量达到 100 万台，乐观情况下，2027 年达到 100 万台，2030 年达到 270 万台。

人形机器人产业的快速发展将为灵巧手市场带来增量需求，根据头豹研究院预测，预计保守情况下，2030 年全球人形机器人灵巧手市场规模为 320.6 亿元，年复合增长率为 81.2%，乐观情况下达 879.7 亿元，年复合增长率为 109.3%。

灵巧手拆解：空心杯电机及传感器有望受益于灵巧手带动成为新增量：

1) 空心杯电机：灵巧手将带动空心杯电机市场空间不断拓展。

我们认为，空心杯电机未来国产替代以及广阔的市场空间有三大支撑点：

①目前空心杯电机技术壁垒较高，一方面在于空心杯电机绕组的设计及工艺，另一方面在于绕线设备，国产替代需在此发力。

②空心杯市场由欧洲主导，未来市场空间广阔。根据头豹研究院数据，预计 2022-2027E 空心杯电机市场规模 CAGR 为 7.1%。全球空心杯电机市场主要集中在欧洲，市场份额分别为 34.8%和 25.9%。但目前高端空心杯电机市场仍为欧洲主导，中国市场主要为中低端产品。

③随着国内技术的不断进步，与海外企业相比，我国企业近些年来逐步具备价格低廉、交付周期短、响应迅速等优势。

我们认为，空心杯电机目前市场壁垒较高，但随着我国相关企业的技术进一步升级逐步打破技术壁垒，同时叠加我国空心杯电机成本优势，我国空心杯电机产品有望逐步走向中高端市场，进一步抢占全球市场份额。

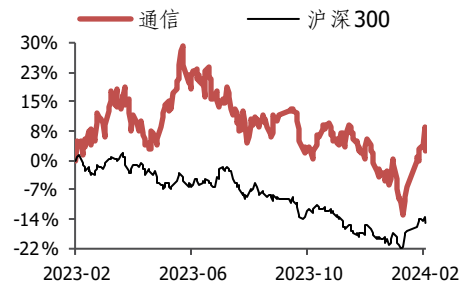
2) 传感器：灵巧手核心部件，赋能灵巧手感知能力全面提升。2023 年 12 月 13 日，马斯克发布 Optimus Gen2 介绍视频，其感知能力进一步提升，有望带动传感器产业进一步发展。

①**力传感器：**在机器人应用领域，六维力/力矩传感器可实现力控制、力觉反馈、质量检测、动态控制等，具体而言，六维力传感器主要应用于高精度抛光打磨、铣制、焊接及高精装配等场景的多关节机器人以及对传感性能要求更高的协作机器人。

②**MEMS 传感器：**MEMS 压力传感器以及 MEMS 惯性传感器为机器人应用的

强于大市（维持评级）

行业走势



作者

分析师 侯宾

执业证书编号：S1070522080001

邮箱：houbin@cgws.com

分析师 姚久花

执业证书编号：S1070523100001

邮箱：yaojiuhua@cgws.com

相关研究

- 《本周专题：海外科技巨头 AIGC 能力加速突破，华为小米最新发布手机卫星通讯功能》2024-02-26
- 《国务院带头加速建设智算中心，持续看好算力产业链投资机会》2024-02-23
- 《OpenAI 推出文生视频模型 Sora，AI 模型发展迎来里程碑—Sora 点评》2024-02-20

核心两个部件。近些年来，MEMS 技术理论研究持续进步、工艺水平不断提高，不仅大幅降低了 MEMS 惯性传感器的制造成本，而且显著提升了其测试精度和环境适应性等性能指标，使得 MEMS 惯性传感器在下游得到广泛应用。根据芯谋研究数据，预计中国惯性传感器市场将以 10.2% 的增速快速增长，至 2027 年达 125.7 亿元。

③ 柔性触觉传感器：触觉传感器是机器人进化的核心需要解决的问题。据 QY Research 数据显示，预计 2029 年全球机器人触觉传感系统市场规模将达到 4.3 亿美元，未来几年年复合增长率 CAGR 为 10.2%。未来，电子皮肤有望成为柔性触觉传感器新形势，助力人形机器人进一步成长。

相关标的：鸣志电器，拓邦股份，鼎智科技，兆威机电，禾川科技，江苏雷利，雷赛智能，柯力传感，敏芯股份，福莱新材，华谊科技，芯动联科，华测导航，八方股份，汉威科技，东华测试，瀚川智能，伟峰电子，珠城科技，瑞可达，中航光电，中大力德，双环传动，绿的谐波，贝斯特，国茂股份，华中数控。

风险提示：人形机器人发展不及预期；下游需求不及预期；国产替代化不及预期；原材料及宏观环境波动风险。

内容目录

1、灵巧手：拟人化末端执行机构，人形机器人中必不可少，未来市场空间广阔	6
1.1 末端执行器为机器人中重要部件，灵巧手具备灵活度、适应度高等特点	6
1.2 从夹持器到多指灵巧手，复杂性与功能性提高	6
1.3 人形机器人蓬勃发展，灵巧手未来市场空间广阔	8
2、灵巧手研究发展历程：从三指到五指	8
2.1 海外灵巧手研究发展历程	8
2.2 国内灵巧手研究发展历程	9
2.3 典型灵巧手商业应用案例	11
2.3.1 国外案例	11
2.3.2 国内案例	12
3、灵巧手拆解及分类：空心杯电机及传感器为新增量	15
3.1 灵巧手分类	15
3.1.1 自由度数量	15
3.1.2 结构形式	16
3.1.3 驱动方式	16
3.1.4 传动方式	17
3.1.5 感知方式	18
3.2 空心杯电机：灵巧手有望带动空心杯电机市场持续拓展	18
3.3 传感器：灵巧手核心部件，赋能灵巧手感知能力全面提升	22
3.3.1 力传感器	22
3.3.2 MEMS 压力传感器	25
3.3.3 柔性触觉传感器	27
4、相关标的	29
4.1 空心杯电机相关标的	29
4.1.1 鸣志电器	29
4.1.2 拓邦股份	30
4.1.3 鼎智科技	30
4.1.4 雷赛智能	31
4.2 传感器相关标的	32
4.2.1 汉威科技	32
4.2.2 柯力传感	32
4.2.3 敏芯股份	33
4.2.4 芯动联科	33
5、风险提示	34

图表目录

图表 1：灵巧手结构拆解	6
图表 2：典型两指夹持器	6
图表 3：联动型三指夹持器	7
图表 4：代表性多指灵巧手产品	7
图表 5：全球机器人灵巧手 2023-2030 年市场规模预测	8
图表 6：Okada 灵巧手	8

图表 7:	Stanford 灵巧手.....	8
图表 8:	Robonaut hand 灵巧手.....	9
图表 9:	DLR-I、DLR-II 灵巧手.....	9
图表 10:	HIT/DLR 灵巧手.....	9
图表 11:	BH3 及 BH985 灵巧手.....	9
图表 12:	软手指拟人手.....	9
图表 13:	北京 Inspire 灵巧手.....	10
图表 14:	灵巧手研发发展历程.....	10
图表 15:	DLR-HIT Hand II 灵巧手.....	11
图表 16:	SVH 灵巧手.....	12
图表 17:	Shadow Hand 灵巧手.....	12
图表 18:	因时机器人灵巧手 RH56BFX/RH56DFX 系列.....	13
图表 19:	腾讯 TRX-Hand 灵巧手.....	13
图表 20:	智元机器人 SkillHand 灵巧手.....	14
图表 21:	思灵机器人 SkillHand 灵巧手.....	14
图表 22:	机器人灵巧手分类.....	15
图表 23:	全驱动手典型案例.....	15
图表 24:	欠驱动手典型案例.....	15
图表 25:	驱动器外置式 Stanford/JPL 灵巧手.....	16
图表 26:	驱动器外置式 HIT/DLR 多指灵巧手.....	16
图表 27:	Festo-BionicSoftHand 气动灵巧手.....	16
图表 28:	中国计量大学基于 SMA 驱动的四指灵巧手.....	16
图表 29:	电机驱动、气压驱动、形态记忆合金驱动优缺点对比.....	17
图表 30:	连杆/齿轮/带驱动灵巧手.....	17
图表 31:	线绳驱动式灵巧手.....	17
图表 32:	各传动方式优缺点对比.....	17
图表 33:	机器人灵巧手传感器分类.....	18
图表 34:	传统有刷直流电机的结构.....	18
图表 35:	空心杯电机的结构.....	18
图表 36:	无刷空心杯电机结构图.....	19
图表 37:	有刷空心杯电机结构图.....	19
图表 38:	有刷与无刷空心杯电机比较.....	19
图表 39:	空心杯电机全球市场规模.....	19
图表 40:	空心杯电机三种绕线方式.....	20
图表 41:	不同绕组方式对比.....	20
图表 42:	Meteor 绕线机.....	21
图表 43:	特斯拉人形机器人灵巧手成本占比(截止 2023 年 9 月).....	21
图表 44:	国内外典型空心杯电机产品对比(相关参数截止 2023 年 9 月).....	21
图表 45:	特斯拉手部传感器.....	22
图表 46:	特斯拉脚部传感器.....	22
图表 47:	一维、三维、六维力传感器示意图.....	22
图表 48:	不同类型六维力/力矩传感器原理、特点、优劣势及代表企业.....	23
图表 49:	六维力传感器在机器人领域主要应用.....	24
图表 50:	全球六维力/力矩传感器主流厂商.....	24
图表 51:	2022 年中国六维力/力矩传感器市场竞争格局(按销量划分).....	24
图表 52:	2017-2027 年中国六维力/力矩传感器市场销量及预测(单位:套, %).	24
图表 53:	2017-2027 年中国六维力/力矩传感器市场规模及预测(单位:百万元, %).	24

图表 54:	MEM 工艺流程	25
图表 55:	MEMS 传感器工作流程	25
图表 56:	集成柔性压力传感器阵列的机械手	25
图表 57:	2017-2021 年我国 MEMS 压力传感器市场（按营收）	26
图表 58:	2017-2028 年我国惯性传感器市场规模（亿元）	26
图表 59:	机器人触觉传感系统的层次功能和结构图	27
图表 60:	压阻柔性触觉传感器结构及实物图	28
图表 61:	电容传感器结构图	28
图表 62:	压电式触觉传感器	28
图表 63:	阵列式光学式触觉传感器	28
图表 64:	不同分类触觉传感器优缺点对比	28
图表 65:	2017-2022 年我国柔性传感器行业市场规模及地域分布	29
图表 66:	2019-2023Q3 鸣志电器营业收入及增速	29
图表 67:	2019-2023H1 鸣志电器分业务毛利率（%）	29
图表 68:	2019-2023Q3 拓邦股份营业收入及增速	30
图表 69:	2019-2023Q3 拓邦股份归母净利润及增速	30
图表 70:	2019-2023Q3 鼎智科技营业收入及增速	31
图表 71:	2019-2023Q3 鼎智科技归母净利润及增速	31
图表 72:	雷赛智能空心杯电机及微型伺服系统	31
图表 73:	2019-2023Q3 汉威科技营业收入及增速	32
图表 74:	2019-2023Q3 汉威科技归母净利润及增速	32
图表 75:	2019-2023Q3 柯力传感营业收入及增速	32
图表 76:	2019-2023Q3 柯力传感归母净利润及增速	32
图表 77:	2019-2023Q3 敏芯股份营业收入及增速	33
图表 78:	2020-2022 敏芯股份分业务毛利率（%）	33
图表 79:	2019-2023Q3 芯动联科营业收入及增速	34
图表 80:	2019-2022 芯动联科分业务毛利率（%）	34

1、灵巧手：拟人化末端执行机构，人形机器人中必不可少，未来市场空间广阔

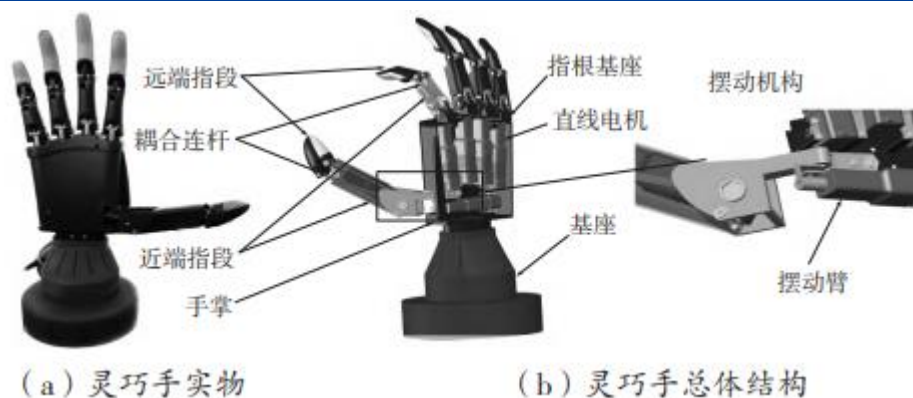
1.1 末端执行器为机器人中重要部件，灵巧手具备灵活度、适应度高等特点

末端执行器主要安装于机器人腕部末端，用于直接执行任务，末端执行器作为机器人执行任务与环境相互作用的最终执行部件，其性能将直接影响机器人整体的工作性能，按照其功能可分为两大类：工具类和抓手类。

工具类末端执行器：根据具体工作要求专门设计并预留标准化接口的机器人专用工具，可以直接实现具体的加工工种、生产工艺或日常动作。

抓手类机器人末端执行器：可进行各类动作、抓持和操作任务。早期的抓手类末端执行器以气动、液压或电动夹手为主，为适应更复杂的工艺以及进行更精细化操作，三指、多自由度的手部形式末端执行器应运而生^{1 2}。灵巧手作为手部形式末端执行器，结合仿生学在于环境交互过程中具备灵活度高、可操作性强、适应性强等优点。

图表1: 灵巧手结构拆解



资料来源：《一种仿人形五指灵巧手的运动学封闭解与仿真研究》（2023年），长城证券产业金融研究院

1.2 从夹持器到多指灵巧手，复杂性与功能性提高³

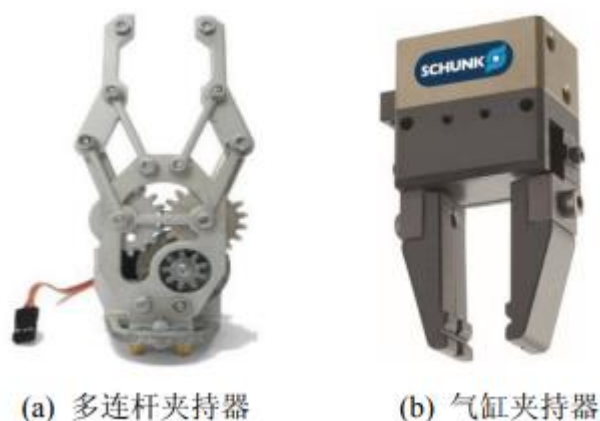
两指夹持器：夹持器可进行对物体的抓持并操控，可类比于手指的夹持操作，应用于机器人的夹持器一般采用电机或气缸驱动，目前主要产品包括德国 SCHUNK 公司的气动平行爪夹持器、FESTO 公司的气动夹持器等。

图表2: 典型两指夹持器

¹ 《一种仿人形五指灵巧手的运动学封闭解与仿真研究》（2023年）

² 《腱绳驱动仿人灵巧手运动分析》（2023年）

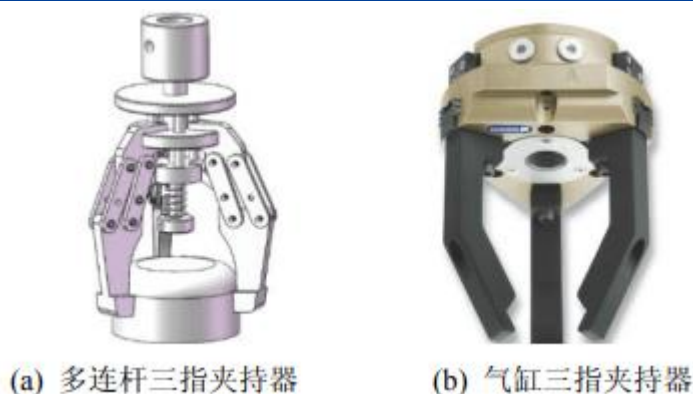
³ 本节主要参考资料：《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》（2021年）



资料来源:《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》(2021年), 长城证券产业金融研究院

多指抓持手: 对于结构复杂或缺少定位基准的目标物体, 两指夹持器经常会出现拾取失败、甚至无法夹取的现象。因此出现了三指或者四指抓持手, 主要包括联动型抓持手、多关节手指抓持手、软体多指抓持手等。

图表3: 联动型三指夹持器



资料来源:《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》(2021年), 长城证券产业金融研究院

多指灵巧手: 多指灵巧手可模仿人手, 实现人手相对应的操作, 相对于两指夹持器以及多指抓持手, 多指灵巧手可以实现更加稳定和灵活的抓持等操作, 多指灵巧手的机构形式为多指关节, 最普遍的手指数目为 3-5 个, 关节数为每个手指 3 个。

图表4: 代表性多指灵巧手产品



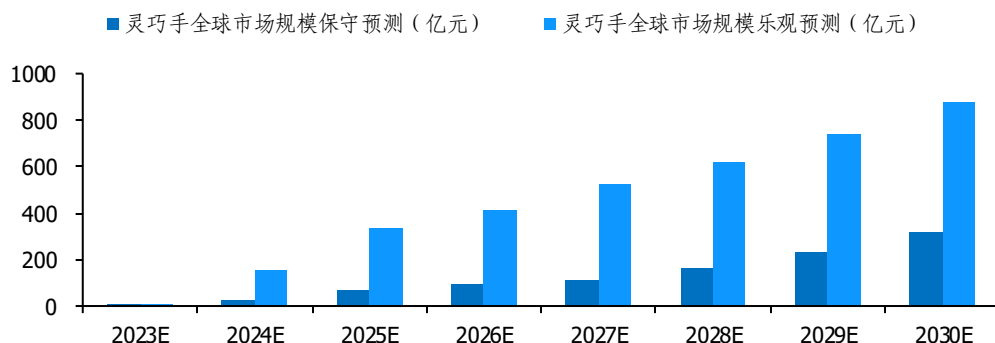
资料来源:《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》(2021年), 长城证券产业金融研究院

1.3 人形机器人蓬勃发展，灵巧手未来市场空间广阔

根据头豹研究院预测，保守估计 2030 年全球人形机器人的销量达到 100 万台，乐观情况下，2027 年达到 100 万台，2030 年达到 270 万台。

人形机器人产业的快速发展将为灵巧手市场带来增量需求，根据头豹研究院预测，预计保守情况下，2030 年全球人形机器人灵巧手市场规模为 320.6 亿元，2023 年-2030 年间年复合增长率为 81.2%，乐观情况下达 879.7 亿元，2023 年-2030 年间年复合增长率为 109.3%。

图表5: 全球机器人灵巧手 2023-2030 年市场规模预测



资料来源: 头豹研究院, 长城证券产业金融研究院

2、灵巧手研究发展历程：从三指到五指⁴

2.1 海外灵巧手研究发展历程

1974 年, 日本电工实验室研发出第一款灵巧手 Okada 灵巧手。Okada 由 3 个手指组成, 共 11 个自由度; 拇指为 3 自由度, 其余手指为 4 自由度。Okada 手质量约 240g, 能够拿起大约 500g 的物体。

20 世纪 80 年代, 斯坦福大学研发出 Stanford Hand。Stanford Hand 具有 3 个手指 9 个自由度, 单只手指采用 4 个电机驱动, 并利用 N+1 腱结构传动, 独立控制 N 个自由度。

图表6: Okada 灵巧手



资料来源: 《机器人灵巧手研究综述》(2023 年), 长城证券产业金融研究院

图表7: Stanford 灵巧手



资料来源: 《机器人灵巧手研究综述》(2023 年), 长城证券产业金融研究院

⁴ 本章主要参考资料: 《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》(2021 年)、《机器人灵巧手研究综述》(2023 年)

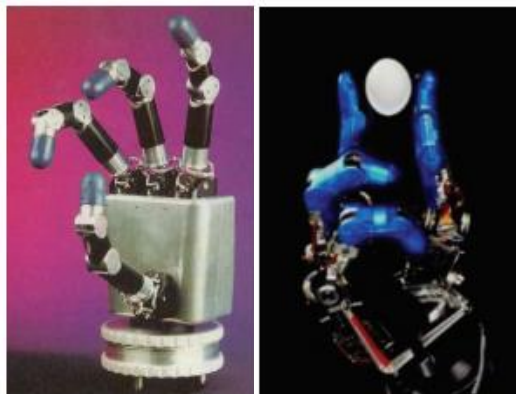
20 世纪末，随着嵌入式硬件的发展，多指灵巧手的研究向着高系统集成度和丰富的感知能力提升的方向发展，进入了快速发展阶段。

美国国家航空宇航局研制了用于国际空间站舱外作业的宇航员灵巧手 Robonaut hand。由 1 个手腕和 5 个手指组成，共 14 个自由度，并引入腱绳张力传感器控制更加准确。德国宇航中心先后研制成功了 DLR-I 和 DLR-II 灵巧手，共集成了 25 个传感器，使得该灵巧手产品大大提升了灵活性和感知度。

图表 8: Robonaut hand 灵巧手



图表 9: DLR-I、DLR-II 灵巧手



资料来源:《机器人灵巧手研究综述》(2023 年), 长城证券产业金融研究院

资料来源:《机器人灵巧手研究综述》(2023 年), 长城证券产业金融研究院

2.2 国内灵巧手研究发展历程

2001 年，哈工大（HIT）联手德国宇航中心（DLR）共同研发了一种利用齿轮以及连杆传动的 HIT/DLR 灵巧手 DLR 有 4 根手指，每根手指有 3 个自由度。指尖部分采用多连杆耦合机构，基础关节的 2 个自由度通过差动机构耦合来完成。

北京航空航天大学机器人研究所仿照 Stanford/JPL 手研制出 BH-3 灵巧手，具备 3 根手指 9 个自由度。BH-985 灵巧手具有 5 个手指，质量小于 1.5kg，采用内置 Maxon 直流伺服电机驱动，采取齿轮、连杆和钢丝传动。

图表 10: HIT/DLR 灵巧手



图表 11: BH3 及 BH985 灵巧手



资料来源:《机器人灵巧手研究综述》(2023 年), 长城证券产业金融研究院

资料来源:《机器人灵巧手研究综述》(2023 年), 长城证券产业金融研究院

2020 年，上海交通大学研制了一款气动、多材料 3D 打印、模块化高度集成软指驱动器组装的灵巧手，具备 5 根手指 11 个自由度。该灵巧手整体尺寸与女性的手掌大小相当，采取轻便化和模块化设计，手的质量仅为 138g。

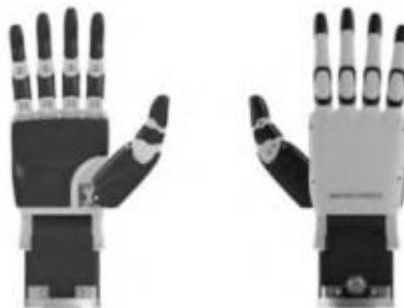
图表 12: 软手指拟人手



资料来源:《机器人灵巧手研究综述》(2023年), 长城证券产业金融研究院

2022年, 因时机器人推出灵巧手产品, 具备5个手指、6个自由度, 整体尺寸接近人手。拇指手指有2个自由度, 其他手指有1个自由度。采用6个带有肌腱的微型线性致动器驱动, 可以用于假肢、服务机器人和教学等领域。

图表13: 北京 Inspire 灵巧手



资料来源:《机器人灵巧手研究综述》(2023年), 长城证券产业金融研究院

图表14: 灵巧手研发发展历程

灵巧手	主要研究单位	研究年份	手指个数	关节数目	自由度	传动方式
Okada Hand	日本电工实验室	1974	3	11	11	腱-滑轮
SALISBURY Hand	斯坦福大学	1983	3	9	9	腱-滑轮
Belgrade/USC Hand	贝尔格莱德大学	1988	5	15	15	连杆
UB Hand	博洛尼亚大学	1992	3	13	11	腱-滑轮
NTU Hand	台湾大学	1996	5	17	17	齿轮
DIST Hand	热那亚大学	1998	4	16	16	腱-滑轮
Robonaut Hand	NASsA	1999	5	22	14	腱-滑轮
LMS Hand	普瓦提埃大学	1998	4	16	16	腱-滑轮
GIFU Hand	日本岐阜大学	2001	5	20	16	齿轮连杆
DLR Hand	德国宇航中心	2001	4	17	13	腱-滑轮
High Speed Hand	东京大学	2003	3	8	9	齿轮
Keio Hand	庆应义塾大学	2003	5	20	20	腱-滑轮
Yokoi Hand	东京大学	2004	5	15	11	腱
Robotic Hand MA-1	加泰罗尼亚理工大学	2004	4	16	16	齿轮
BH985 Hand	北京航空航天大学	2005	5	20	11	齿轮连杆
MAC-HAND	意大利热那亚大学	2005	4	12	12	腱
NAIST-HAND	日本奈良先端科学技术大学	2005	4	16	12	齿轮连杆
SKKU Hand II	韩国成均馆大学	2006	4	13	10	齿轮
HEU Hand II	哈尔滨工程大学	2006	3	9	9	齿轮

灵巧手	主要研究单位	研究年份	手指个数	关节数目	自由度	传动方式
SAH	Schunk 公司	2007	4	16	13	齿轮连杆
LARM Hand	Cassino 大学	2010	3	9	12	连杆
KNTH	K. N. Toos 科技大学	2011	3	6	9	全柔性
Metamorphic Hand	天津大学	2013	4	12	16	连杆
Barret Hand	巴雷特技术公司	2013	3	9	9	连杆齿轮
Ritsumeikan Hand	日本立命馆大学	2013	5	16	20	连杆
Pisa/IIT Soft Hand	意大利	2014	5	19	21	韧带
ISR-Soft Hand	美国	2014	5	15	21	腱
Washington Hand	华盛顿大学	2016	5	15	21	线绳
SSSA-My Hand	ScuolaSuperiore Sant' Anna	2016	5	10	21	齿轮连杆
HERI Hand	意大利	2017	3	12	15	连杆
Shadow Hand	Shadow 公司	2019	5	24	20	腱-滑轮
欠驱动灵巧手	河北工业大学	2020	5	15	15	单腱
软体仿人手	上海交通大学	2020	5	15	11	软体
Anthropomorphic Robot Hand	韩国	2021	5	15	20	线绳
ILDA Hand	韩国	2021	5	20	15	连杆

资料来源:《机器人灵巧手研究综述》(2023年), 长城证券产业金融研究院

2.3 典型灵巧手商业应用案例

2.3.1 国外案例

(1) DLR-HIT Hand II 灵巧手 (德国宇航局&哈尔滨工业大学)

该灵巧手高度仿生设计, 手指模块化设计集成电机、减速箱、传动结构等, 可以实现独立的手指和手掌运动, 同时采用角度、力矩、指尖及阵列触觉等传感器提升灵巧手感知及反馈能力。

图表 15: DLR-HIT Hand II 灵巧手



资料来源: 小米技术, 长城证券产业金融研究院

(2) SVH 灵巧手

SVH 灵巧手由德国公司 Schunk 设计研发, 具备 9 个驱动器, 能够以高灵敏度执行各种

抓取操作。弹性抓握表面保证了对物体的可靠抓握。电子装置完全集成在腕关节上。

其具备三大优势，1）低能耗，适用于移动应用领域；2）设计较为紧凑，控制、调节器和电力电子元件集成在腕关节处；3）轻松连接市场标准的工业和轻型机器人。

图表16: SVH灵巧手



资料来源: Schunk 官网, 长城证券产业金融研究院

(3) Shadow Hand 灵巧手

英国 Shadow Robot 公司推出 Shadow Hand 灵巧手, 由 5 根手指和 1 个手掌组成, 具备 24 个关节, 20 个自由度, 由单独的驱动器驱动控制, 具备人手的大部分抓取能力, 同时集成位置传感器、温度传感器、力反馈传感器等提升感知及灵活性。

图表17: Shadow Hand 灵巧手



资料来源: 上海硅步机器人, 长城证券产业金融研究院

2.3.2 国内案例

(1) 因时机器人灵巧手

因时机器人推出两款灵巧手产品 RH56BFX/RH56DFX, 仿人五指灵巧手采用创新型直线驱动设计, 根据因时机器人官网显示, 该灵巧手具有 6 个自由度和 12 个运动关节, 结合力位混合控制算法, 可以模拟人手进行诸如弹琴、猜拳等复杂动作。RH56BFX 系列灵

巧手又称钢琴手，速度快、抓握力稍小，集成力传感器，适用于弹钢琴及手势交互等场景。RH56DFX 系列灵巧手抓握力大，速度适中，适用于机器人或假肢的抓取操作。根据因时机器人官网，两款灵巧手均支持 ROS，可提供 ROS 插件。

图表 18: 因时机器人灵巧手 RH56BFX/RH56DFX 系列



资料来源：因时机器人官网，长城证券产业金融研究院

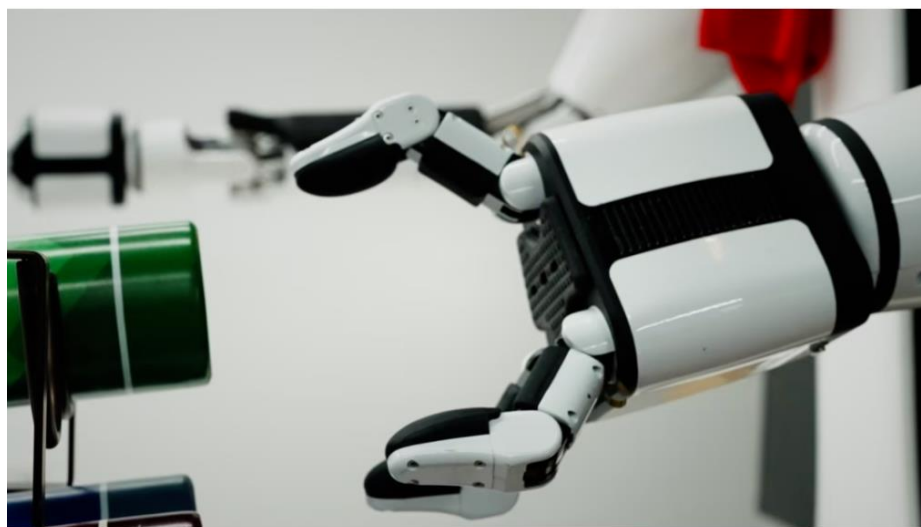
（2）TRX-Hand（腾讯）

2023 年 4 月 25 日，腾讯 RoboticsX 实验室公布最新机器人研究进展，首次展示在灵巧操作领域的成果，推出自研机器人灵巧手 TRX-Hand。

在运动能力上，TRX-Hand 采用创新的刚柔混合驱动专利技术和自研高功率密度驱动器，具备 8 个可独立控制关节，重量 1.16 千克，最大持续指尖力可达 15N，最大关节速度不低于 600 度每秒，可轻松应对不同形状尺寸物体的抓取和操作，柔性驱动的指尖设计有效提升了手指的抗冲击能力。

在感知能力上，灵巧手在指尖、指腹和掌面均覆盖了自研的高灵敏度柔性触觉传感器阵列，掌心处安装微型激光雷达和接近传感器，同时每个关节均集成了角度传感器，保证灵巧手在抓取和操作过程中能准确地感知自身与物体状态信息。

图表 19: 腾讯 TRX-Hand 灵巧手



资料来源：腾讯 RoboticsX 实验室，长城证券产业金融研究院

（3）智元机器人灵巧手

2023 年 8 月 18 日，智元机器人召开远征 A1 智元具身智能机器人发布会，会上智元机

器人也推出其自研的灵巧手。智元机器人灵巧手拥有12个主动自由度,5个被动自由度,所有驱动均为内置,指尖传感器可以分辨物体颜色、形状、材质,通过指尖传感器视觉闭环设计,降低了对整体电机的精度需求。

图表20: 智元机器人 SkillHand 灵巧手



资料来源: 新智元, 长城证券产业金融研究院

(4) Dexterity Hand (思灵机器人)

思灵机器人五指灵巧手是世界领先的高度集成化和模块化的多指力控机器人灵巧手,由4个模块化的多关节手指和1个具有主动对掌功能的拇指组成,整手外观上略小于正常成年男性手,具有拟人的外观和功能。五个手指均具有仿人型的运动轨迹,得益于拇指的对掌性,五指灵巧手可以复现多种人手的抓取类型。5个手指均集成有力传感器和位置传感器等,可实现多传感器融合的抓取算法,以保证机器人手与环境交互的柔顺性。

图表21: 思灵机器人 SkillHand 灵巧手

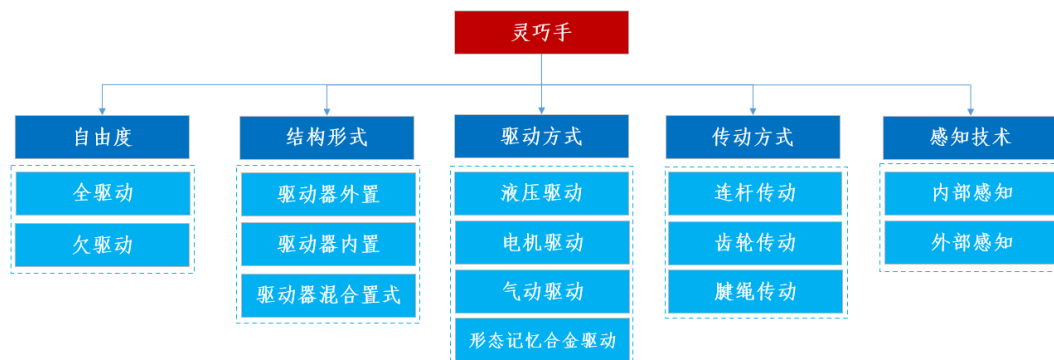


资料来源: 思灵机器人官网, 长城证券产业金融研究院

3、灵巧手拆解及分类：空心杯电机及传感器为新增量

3.1 灵巧手分类⁵

图表22：机器人灵巧手分类



资料来源：众星智能，《机器人灵巧手研究综述》（2023年），长城证券产业金融研究院

3.1.1 自由度数量

根据自由度与驱动源数量，可将灵巧手分为全驱动和欠驱动两大类。

全驱动灵巧手：驱动源数量与被控制灵巧手的自由度数量相等，缺点在于需要更多的驱动器，操作较为复杂同时成本更高；欠驱动灵巧手：被控制的自由度多于驱动源的数目，缺少驱动源的部分进行耦合传动，整体更加简洁，鲁棒性较高，但缺点在于高精度复杂度高的操作比较难以执行。

图表23：全驱动手典型案例



图表24：欠驱动手典型案例



资料来源：《机器人灵巧手研究综述》（2023年），长城证券产业金融研究院

资料来源：《机器人灵巧手研究综述》（2023年），长城证券产业金融研究院

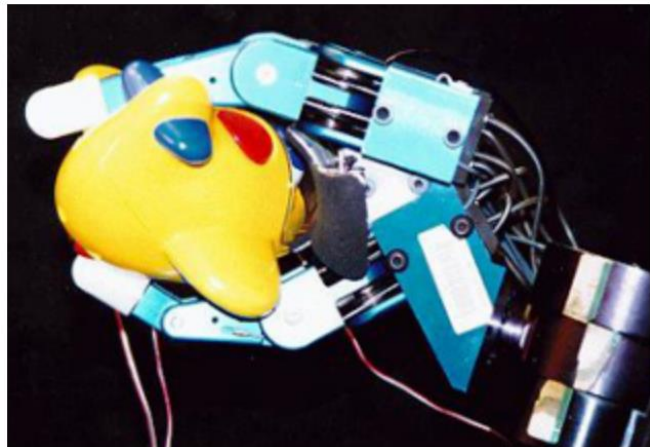
⁵ 本节主要参考资料为：众星智能、《机器人灵巧手研究综述》（2023年）

3.1.2 结构形式

根据灵巧手结构形式，可将其分为驱动器外置式、驱动器内置式以及驱动器混合置式三大类。

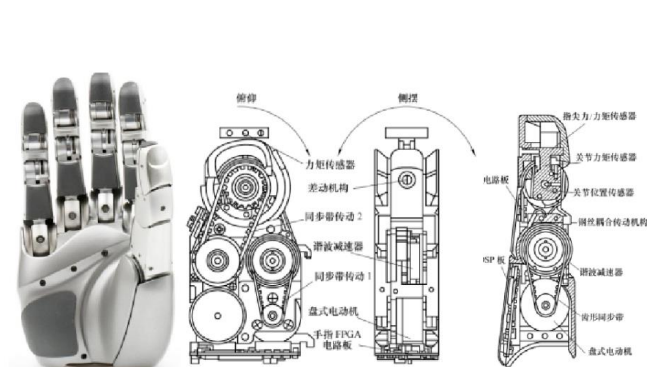
早期灵巧手一般选择驱动器外置式，主要原因在于早期驱动器整体结构较大，难以嵌入灵巧手手指关节之中，随着材料、工艺技术的不断发展，使得驱动器内置成为可能。但由于驱动器外置存在控制难度大、传感器不能反应关节信息等优点，而驱动器内置存在关节灵活度下降、整手尺寸较大等缺点，驱动器混合置式应运而生，内外置相结合的方式提高了手指输出力矩，同时也保证了整手体积得到控制。

图表25: 驱动器外置式 Stanford/JPL 灵巧手



资料来源：众星智能，长城证券产业金融研究院

图表26: 驱动器外置式 HIT/DLR 多指灵巧手



资料来源：众星智能，长城证券产业金融研究院

3.1.3 驱动方式

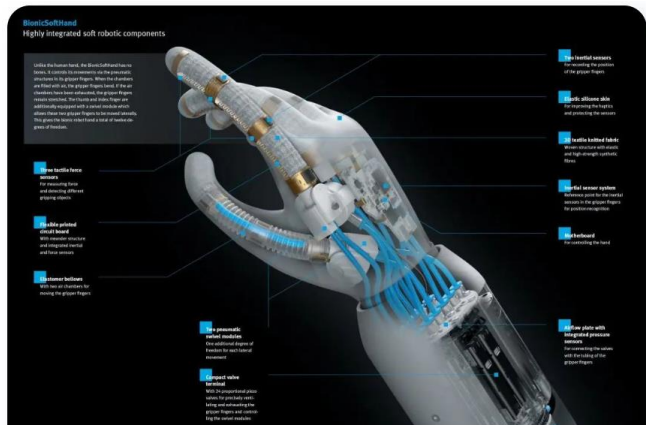
根据灵巧手驱动方式，可将其分为液压驱动式、电机驱动、气压驱动、形状记忆合金驱动四大类。

液压驱动式：常被用于工业机械手中，适合大型抓取作业。

电机驱动式：电机驱动是目前灵巧手主要驱动方式，优点在于体积小、控制能力强、输出力矩稳定等特点，缺点在于受限于体积会使得整手体积大较为难以控制。

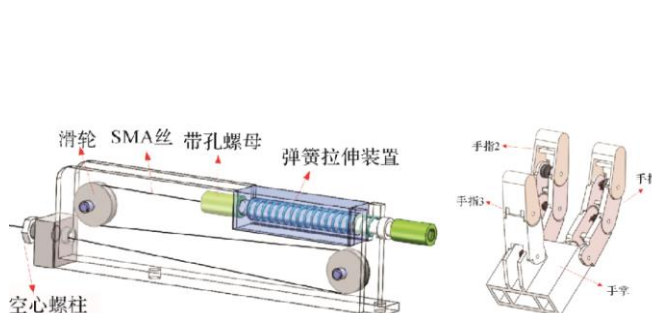
气压驱动式：气压驱动最接近人体肌肉驱动方式，易于控制、能量存储方便，但刚度较低、动态性能较差。

图表27: Festo-BionicSoftHand 气动灵巧手



资料来源：众星智能，长城证券产业金融研究院

图表28: 中国计量大学基于 SMA 驱动的四指灵巧手



资料来源：众星智能，长城证券产业金融研究院

形态记忆合金驱动式：形状记忆合金的性能较为优良，广泛应用于多个领域，形态记忆合金驱动的灵巧手适合小型、高精度机器人装配作业。

图表29：电机驱动、气压驱动、形态记忆合金驱动优缺点对比

	优点	缺点
电机驱动式	体积小、响应快，调控方便、稳定性好、精度高、输出力矩稳定	
气压驱动式	操作方便、质量轻巧、动作迅速、价格适中、维护简便	可操作性不强，轨迹精度不够
形态记忆合金驱动式	可进行负载驱动快速反应，且位移大，变位迅速	无法长时间工作，并且疲劳强度较低

资料来源：《机器人灵巧手研究综述》（2023年），长城证券产业金融研究院

3.1.4 传动方式

灵巧手的主要传动方式有连杆传动、齿轮传动、带传动以及线绳传动。

图表30：连杆/齿轮/带驱动灵巧手

图表31：线绳驱动式灵巧手



资料来源：《机器人灵巧手研究综述》（2023年），长城证券产业金融研究院

资料来源：《机器人灵巧手研究综述》（2023年），长城证券产业金融研究院

连杆传动多用于工业商业，结构设计较为紧凑但远距离操作较为困难；齿轮传动主要应用于工业机器人，传动比相对稳定，传动效率高，但齿轮会导致灵巧手整体质量加大；带传动结构简单传动平稳，但维护相对较难；线绳驱动是目前灵巧手目前应用最为广泛的传动方式，最类似于人手的肌腱结构，适合空间狭小且需要驱动自由度数量较多的场合。

图表32：各传动方式优缺点对比

传动方式	实现方式	优点	缺点
腱传动	由腱（钢丝绳、迪力马绳等）加上滑轮或者软管实现传动。	容易实现多自由度和远距离动力传输，节省空间和成本，是一种柔顺传动方式	腱本身的刚度有限，影响位置精度；控制时需要一定的预紧力，容易产生摩擦；腱的布局容易产生力矩和运动的耦合。这些因素都增加了手爪抓取控制的难度和复杂性。
连杆传动	采用平面连杆机构传动	刚度好、出力大、负载能力强、加工制造容易、易获得较高的精度，构件之间的接触可以依靠几何封闭来实现，能够较好实现多种运动规律和运动的轨迹的要求。	结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高。
齿轮/蜗轮	驱动器通过齿轮或蜗轮蜗杆	和别的多指灵巧手相比，驱动更加灵活，	结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性

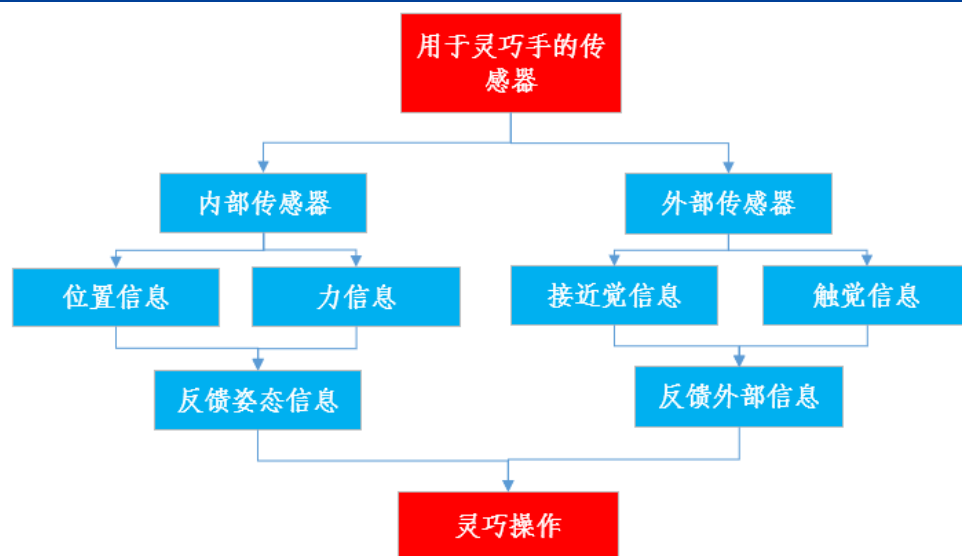
传动方式	实现方式	优点	缺点
蜗杆传动	杆将旋转变成直线运动，拉动驱动器和手指之间的弹簧来驱动手指产生动作	但是手指的闭合时间较长。	能较弱，对手内空间配置要求较高，手指的结构比较复杂，容易出现故障。
人工肌肉 (液压/气动)	液压驱动和气动的驱动方式是近年来兴起的一种重要的驱动方式，是模拟人肌肉的一种驱动方式。	-	由于材料和技术的限制，这些“人工肌肉”技术还远远不能满足机器人手爪实现可靠、快速和精确地抓取功能。

资料来源：小米技术，长城证券产业金融研究院

3.1.5 感知方式

机器人灵巧手的感知技术可以分为内部感知和外部感知。

图表33：机器人灵巧手传感器分类



资料来源：《A review on sensory perception for dexterous robotic manipulation》（2022年），长城证券产业金融研究院

内部传感器：用于反馈机械手自身的位置或力等状态信息。这两种信息是机械手不可缺少的部分。内部传感器可以使得灵巧手更好地了解自己的状态。内部传感器包括位置传感器、弯曲传感器和张力传感器。

外部传感器：机器人获取周围环境信息的必要部件。当面对未知的环境和物体时，外部传感器具有足够的安全性和可操作性。在操作前阶段，使用近端传感器来检测物体与机械手之间的距离。当机械手接触到物体时，触觉传感器用于提供物体的物理信息和接触力。外部传感器包括近端传感器、触觉传感器和多模态传感器⁶。

3.2 空心杯电机：灵巧手有望带动空心杯电机市场持续拓展

空心杯电机是一种采用无铁芯转子的直流永磁伺服控制电动机，其尺寸较小，直径不超过40mm，空心杯电机主要由轴、轴承、电刷、换向器、杯形绕组（转子）、转轴、线圈、滑动轴承、外壳、磁铁（定子）等组成。

图表34：传统有刷直流电机的结构

图表35：空心杯电机的结构

⁶ 《A review on sensory perception for dexterous robotic manipulation》（2022年）



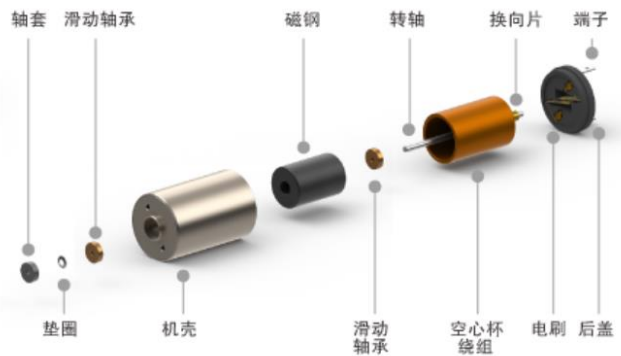
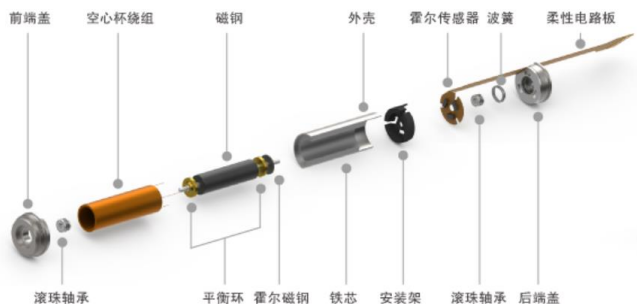
资料来源:《空心杯电机定制化管理的应用研究》(2018年),长城证券产业金融研究院

资料来源:《空心杯电机定制化管理的应用研究》(2018年),长城证券产业金融研究院

根据换向方式的不同,空心杯电机可分为有刷空心杯电机和无刷空心杯电机,有刷电机转子无铁芯,无刷电机(又称无刷无齿槽电机)定子无铁芯。无刷空心杯电机适用于需要长时间连续运行和具有较高控制要求或可靠性要求的应用场景,有刷空心杯电机适用于对产品灵敏性和可靠性要求较高的行业。

图表36: 无刷空心杯电机结构图

图表37: 有刷空心杯电机结构图



资料来源:鸣志电器官网,长城证券产业金融研究院

资料来源:鸣志电器官网,长城证券产业金融研究院

从优缺点来看,无刷空心杯电机具备较长的寿命,转速也较高,可以大幅提升电机效率和功率密度。有刷空心杯电机控制较为简单,但由于碳刷的摩擦会导致能量损耗,电机寿命受限;此外,碳刷与线圈接线头之间的断续接触会产生电火花,并干扰电子设备。

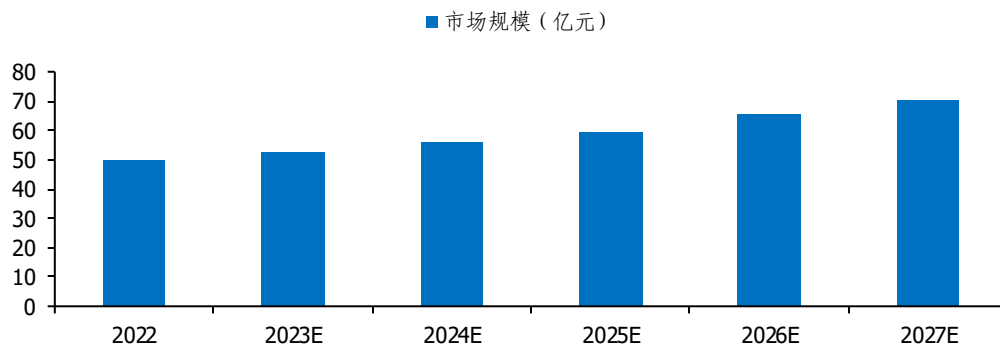
图表38: 有刷与无刷空心杯电机比较

无刷空心杯电机	有刷空心杯电机
长寿命 (20000h)	电机寿命受限 (2000h)
高转速	电机转速有限
电磁干扰可忽略	有火花
有铁损	无铁损
需要驱动控制	控制简单

资料来源:头豹研究院,长城证券产业金融研究院

空心杯市场由欧洲主导,未来市场空间广阔。根据头豹研究院预测,预计 2022-2027E 全球空心杯电机市场规模 CAGR 为 7.1%。全球空心杯电机市场主要集中在中国和欧洲,市场份额分别为 34.8%和 25.9%。目前高端空心杯电机市场仍为欧洲主导,中国市场主要为中低端产品;欧洲及北美厂商对空心杯电机研发较早,生产设备和工艺都较为成熟先进,技术壁垒相对较高,国内企业仍需发力追赶。

图表39: 空心杯电机全球市场规模



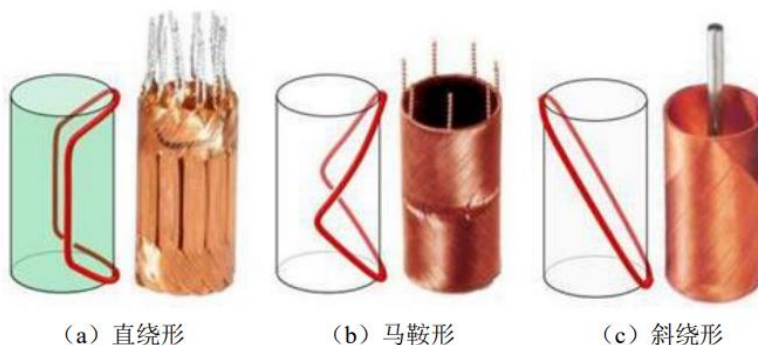
资料来源：头豹研究院，长城证券产业金融研究院

目前空心杯电机存在两大核心技术壁垒：一方面在于空心杯电机绕组的设计及工艺，另一方面在于绕线设备，国产替代需在此发力。

1) 空心杯电机常用的线圈绕法有直绕形、马鞍形、斜绕形三种形式。其中，直绕形绕制方法工艺较为复杂，斜绕形和马鞍形在绕制工艺上相对简单，国内外厂商大多采取斜绕形和马鞍形两种方式⁷。

空心杯电机设计要点在于追求小型化的同时提供效率更高、更大的输出，因此线圈绕组设计是核心影响因素，包括绕线方式和绕组参数，掌握相关工艺的厂商具有核心竞争力。

图表40：空心杯电机三种绕线方式



资料来源：《马鞍形空心杯电机线圈绕制设备研究》（2017年），长城证券产业金融研究院

图表41：不同绕组方式对比

	直线形	马蹄形	斜绕形
工艺难易度	最难	中等	最易
特点&特性	工艺较为复杂，多用于较长绕组结构，许多次绕制而成，上下两端部的绕组不产生力矩，但增加电枢的整体重量	可减小线圈厚度，在高功率密度电机上有效减少磁路气隙，增加切割磁场的长度，更好的利用定子磁性	发展较早，相对来说绕制简单，排线紧密，可大批量生产。无端部绕组，导线利用率高，重量优化
应用场景	常用于线圈匝数要求较少的场景	制造厂商主流线性之一，Maxon主要采用此方式	制造厂商主流线性之一，适合大批量生产场景

资料来源：头豹研究院，长城证券产业金融研究院

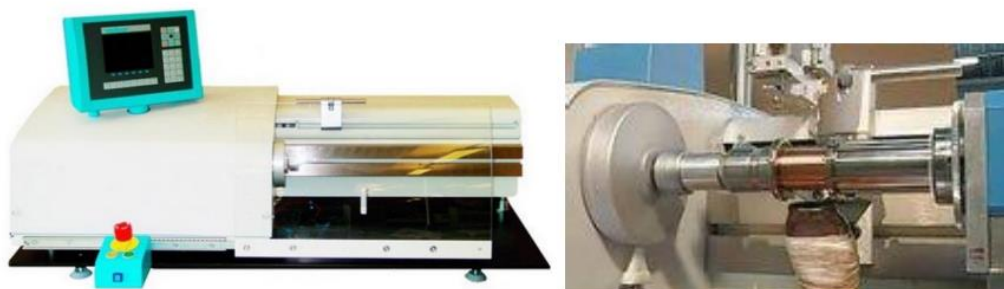
2) 空心杯电机线圈的生产技术主要分为人工绕线、绕卷式生产技术和一次成型生产技术。目前，我国大多数厂商采用绕卷式生产技术，海外厂商主要采取一次成型生产技术，手

⁷ 《马鞍形空心杯电机线圈绕制设备研究》（2017年）

工绕制以及半自动式的绕卷式生产技术自动化程度低，在需要大量劳力的同时，其所产出的线圈排线精度较差，进而影响线圈质量。因此，如果想实现线圈高精度高效率生产，以及最终电机质量提升，必须采用自动化生产以及先进的绕线设备。

欧洲及北美厂商对于空心杯线圈绕制设备发展较早，技术较为先进，绕制线圈的质量和效率具备较大的优势，国内厂商需要持续提升针对绕制设备的研发才能够使线圈及空心杯电机质量提升，持续向上拓展中高端的空心杯电机市场。

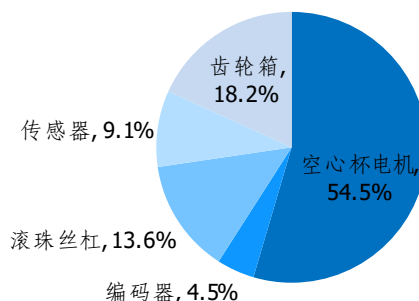
图表42: Meteor 绕线机



资料来源:《马鞍形空心杯电机线圈绕制设备研究》(2017年), 长城证券产业金融研究院

空心杯电机下游应用市场丰富，国产替代空间较大。空心杯电机因其特性被广泛使用，下游应用领域广阔，针对人形机器人领域，空心杯电机同样是核心零部件，尤其是在灵巧手中的运用，以特斯拉 Optimus 灵巧手为例，根据头豹研究院预估，空心杯电机在手部执行器零部件成本占比 54.5%，单台人形机器人需要 12 个空心杯电机。

图表43: 特斯拉人形机器人灵巧手成本占比(截止 2023 年 9 月)



资料来源: 头豹研究院, 长城证券产业金融研究院

国产空心杯电机具备成本优势，未来量产有望持续收益。目前人形机器人量产所面临的一大问题就在于成本过高，未来随着降本需求的进一步提高，各零部件环节均须进行技术革新以及成本上的降低，与海外企业相比，我国企业具备价格低廉、交付周期短、响应迅速等优势，未来随着我国逐步打破空心杯电机技术壁垒，有望在人形机器人量产的过程中持续收益。

图表44: 国内外典型空心杯电机产品对比(相关参数截止 2023 年 9 月)

	Maxon	Faulhaber	Portescap	鸣志电器
产品	ECX SPEED13L	Series 1218 B	12ECP48 8B 21	ECU13026H06
尺寸 (mm)	13	12	12	13
额定电压 (V)	18	6	9	6
额定电流/最大连续电流 (A)	1.42	/	3.3	1.34
额定转矩/最大连续转矩 (mNm)	5.16	/	8.1	2.77

	Maxon	Faulhaber	Portescap	鸣志电器
空载转速 (rpm)	41900	30500	36000	24600
电机效率	79%	62%	/	69%
重量 (g)	34	8.3	30	19
外壳-环境热阻 (°C/W)	19.5	48.3	24.2	32
绕组-外壳热阻 (°C/W)	2	10.6	2.5	3.69
最大绕组温度 (°C)	155	125	125	155
机械时间 (ms)	3.25	7.7	1.1	5.67
零售价格 (元)	2198	/	2321	996

资料来源：头豹研究院，长城证券产业金融研究院

3.3 传感器：灵巧手核心部件，赋能灵巧手感知能力全面提升

Optimus Gen2 传感器再升级，有望带动传感器产业进一步发展。2023 年 12 月 13 日，马斯克发布 Optimus Gen2 介绍视频。Optimus Gen2 可以轻松准确地抓取、拿起、放下鸡蛋，中间不会掉下来，左手转右手的整个过程也极为连贯，显示出 Optimus Gen2 的精准物体操控能力。

此次 Optimus Gen2 更加强大的一大重点在于感知方面的升级，Optimus Gen2 融合最先进的手部传感器，拥有 11 个自由度的全新灵巧手甚至具备了触觉感知功能，能够轻松地处理鸡蛋等精致物体，通过搭载触觉传感器的灵巧手，在拾起物体时能够呈现可视化的压力分布图像，从拾起物品的动作来看，几乎和人类没有差别。此外，Optimus Gen2 在足部亦搭载传感器，帮助其更平稳的行走以及完成其他复杂动作。

图表 45：特斯拉手部传感器



资料来源：机器之心，长城证券产业金融研究院

图表 46：特斯拉脚部传感器

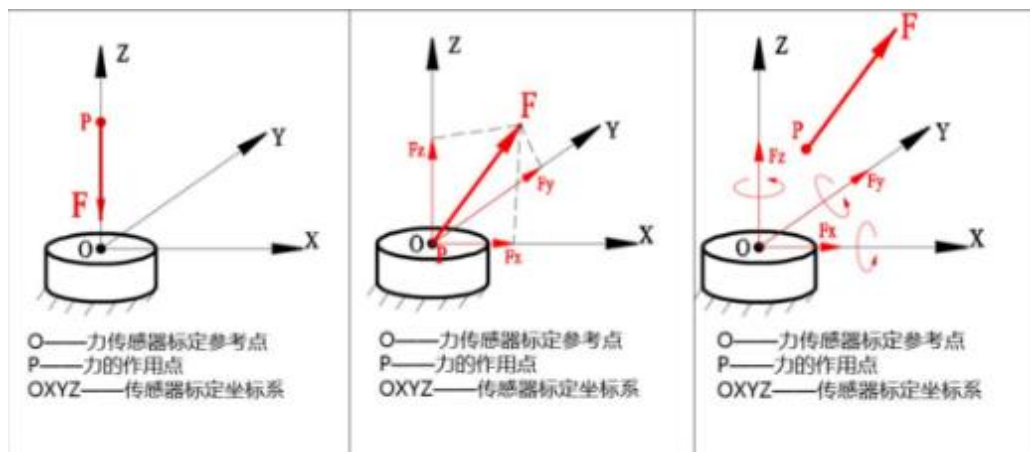


资料来源：机器之心，长城证券产业金融研究院

3.3.1 力传感器

力传感器可以将力的大小转换成相关电信号，可以检测张力、压力、重量、扭矩和内应力等机械量。根据测量维度可以分为一维至六维传感器，六维传感器是维度最高的力传感器可以给出最为全面的信息，其技术难度较大，但是六维力传感器也是最适合于灵巧手的传感器。

图表 47：一维、三维、六维力传感器示意图



资料来源：高工业机器人，长城证券产业金融研究院

六维传感器又称为六维力/力矩传感器、F/T 传感器，用于精确测量 X、Y、Z 三个方向的力信息，和 M_x 、 M_y 、 M_z 三个维度的力矩信息。主要用于检测、预防、控制等场景，通常安装在机器人的底摩或者末端，可以提供应用过程中的力交互信息。

近年来，国家出台多项政策，支持传感器产业以及六维力传感器发展，其中：

《“十四五”机器人产业发展规划》中指出，研制三维视觉传感器、六维力传感器和关节力矩传感器等力觉传感器、大视场单线和多线激光雷达、智能听觉传感器以及高精度编码器等产品，满足机器人智能化发展需求。

《人形机器人揭榜挂帅任务榜单》针对力传感器做出**揭榜任务**：面向人形机器人准确获取驱动关节和肢体末端触感力学信号的需求，突破稳定可靠的力传感器结构与制造、智能化信号处理与分析、多信息智能识别与模型分析等关键技术；研制系列化、高性能、低成本、智能化的新型力传感器；发展低成本、规模化的传感器生产制造方法，推动新型力传感器在人形机器人上的产业化应用。**预期目标**：到 2025 年，完成人形机器人系列化力传感器的设计与制造，满足驱动关节、手指、足底等肢体末端力测量需要，并在人形机器人上开展实际应用。传感器采用低成本、高性能的设计，精度达到 0.5%FS，响应时间优于 0.03s，具有智能信息采集与处理能力，提升力传感器的智能化水平。

根据测量原理的不同，可将力传感器分为应变片式、光学式以及压电/电容式传感器，其中应变片式传感器是最为常用的力传感器类型，具有精度高、技术成熟、测量范围广的特性。

图表 48：不同类型六维力/力矩传感器原理、特点、优劣势及代表企业

传感元件类型	原理及特点	优点	缺点	代表企业
应变片式	通常采用的是硅应变片或金属箔，本质是材料本身发生形变进而转化为阻值变化	精度高、技术成熟、测量范围广、成本低、频响特性好	生产工艺复杂、金属箔式应变计输出微弱	ATI、宇立仪器、坤维科技、鑫精诚、蓝点触控、海伯森、神源生智能、Sintokogio、Bota Svsystems AG、SCHUNK、埃力智能、ME-MeBsysteme GmbH 等
光学式	通过光纤、光栅反映形变，再转化成力	可靠性高、测量范围广、抗电磁干扰能力强	对测试环境要求高、刚性偏弱	OnRobot、松果体、华力创等
压电/电容式	电容是通过极距的变化导致电压变化，压电则是通过形变改变电荷	高灵敏度和高分辨率、频率范围宽、结构简单、环境适用性强	调理电路复杂、信号漂移难以抑制	Robotiq、Robotous、WACOH-TECH、Kistler 等

资料来源：高工业机器人，长城证券产业金融研究院

六维传感器在下游应用领域非常广泛，可应用于机器人、汽车、医疗、航空航天等等。在机器人应用领域，六维及传感器主要应用于多关节机器人以及对传感性能要求更高的场景。

图表 49: 六维力传感器在机器人领域主要应用



资料来源: 高工机器人, 长城证券产业金融研究院

根据高工机器人数据显示, 根据 2022 年国内市场销量口径看 ATI、宇立仪器、坤维科技、鑫精诚位于第一梯队。其中在协作机器人领域, 2022 年按销量划分位于前五位的分别为坤维科技、ATI、蓝点触控、余立仪器以及鑫精诚。

图表 50: 全球六维力/力矩传感器主流厂商

图表 51: 2022 年中国六维力/力矩传感器市场竞争格局(按销量划分)



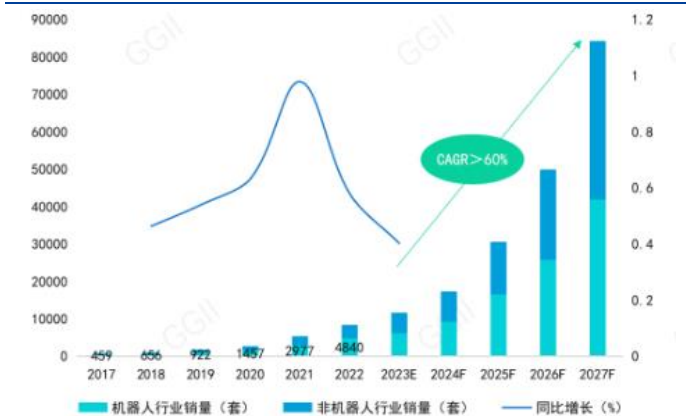
资料来源: 高工机器人, 长城证券产业金融研究院

资料来源: 高工机器人, 长城证券产业金融研究院

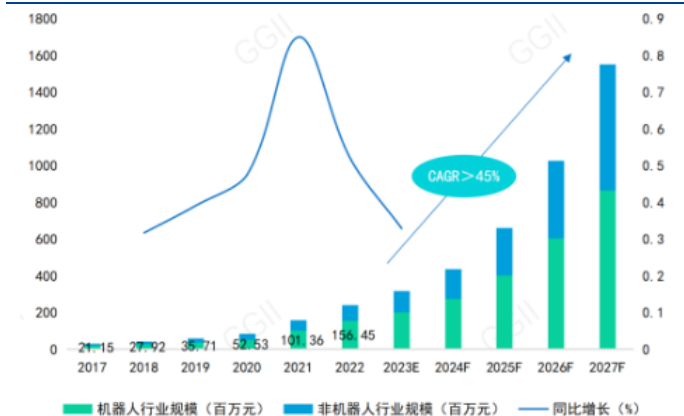
六维力/力矩传感器未来市场空间广阔。根据 GGII 数据显示, 2022 年我国六维力/力矩传感器销量 8360 套, 同比增长 57.97%, 其中机器人行业销量 4840 套, 同比增长 62.58%, 到 2027 年中国市场六维力/力矩传感器销量有望突破 84000 套, 其中机器人行业销量有望突破 42000 套; 2022 年我国六维力/力矩传感器市场规模 1.56 亿元, 同比增长 54.35%, 2027 年中国六维力/力矩传感器市场规模将超过 15 亿元。

图表 52: 2017-2027 年中国六维力/力矩传感器市场销量及预测(单位:套, %)

图表 53: 2017-2027 年中国六维力/力矩传感器市场规模及预测(单位:百万元, %)



资料来源：高工机器人，长城证券产业金融研究院

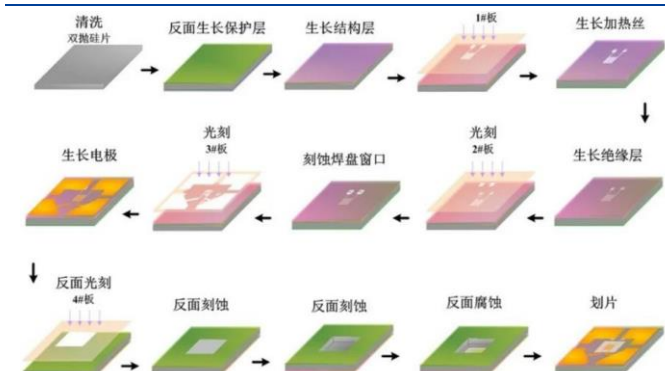


资料来源：高工机器人，长城证券产业金融研究院

3.3.2 MEMS 压力传感器

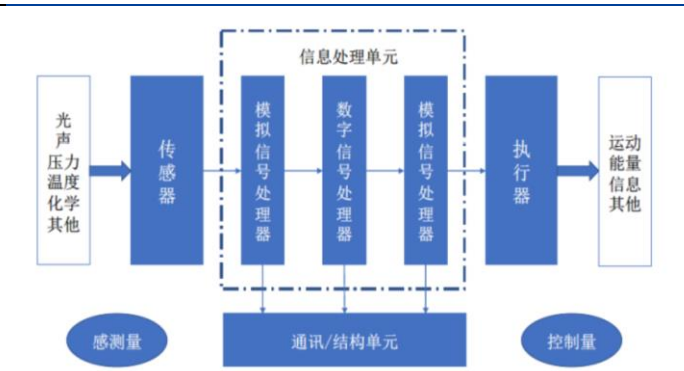
MEMS 的全称是微型电子机械系统(Micro Electromechanical System)，利用半导体制造工艺和材料，将传感器、执行器、机械机构、信号处理和控制电路等集成于一体的微型器件或系统。MEMS 传感器可以将输入的信号转换成可检测的输出信号，与传统传感器相比，MEMS 传感器体积小、重量轻、成本相对较低适合批量化生产。

图表54: MEM 工艺流程



资料来源：汉威科技官网，长城证券产业金融研究院

图表55: MEMS 传感器工作流程

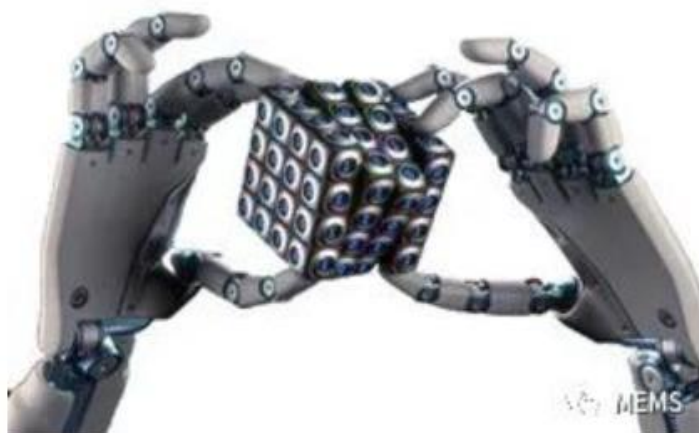


资料来源：思瀚产业研究院，长城证券产业金融研究院

具体而言，机器人主要所需应用的是 MEMS 压力传感器以及 MEMS 惯性传感器两部分。

其中，压力传感器可以实现对于外力和环境条件的检测，MEMS 压力传感器可以直接应用于机器人关节，为机器人提供本体感觉反馈，使得机器人可以连续检测感受目前的运动以及负载状况，此外，压力传感器可运用于机器人外部表皮进行接触时里的反馈，如灵巧手中的之间可集成压力传感器进行灵巧手触觉反馈。

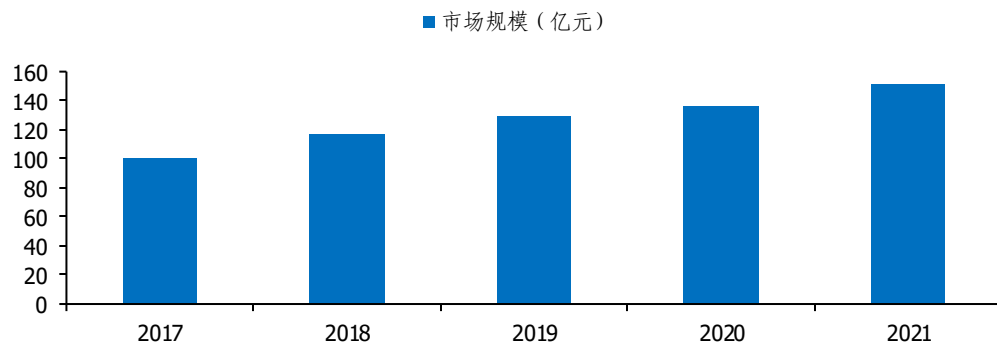
图表56: 集成柔性压力传感器阵列的机械手



资料来源：麦姆斯咨询，长城证券产业金融研究院

根据头豹研究院数据，2021 年中国 MEMS 压力传感器市场规模为 151 亿元，2017-2021 年间复合增长率为 10.9%。目前 MEMS 压力传感器生产商仍以美国大型半导体企业为主，国产替代空间较大。

图表 57: 2017-2021 年我国 MEMS 压力传感器市场（按营收）



资料来源：头豹研究院，长城证券产业金融研究院

MEMS 惯性传感器相对于压力传感器、声学传感器等其他类型的传感器应用领域较广，在高可靠领域及其他工业、消费领域均具备丰富的应用场景。

MEMS 惯性传感器可分为 MEMS 加速度计、MEMS 陀螺仪、MEMS 惯性测量单元 (IMU) 三大类。

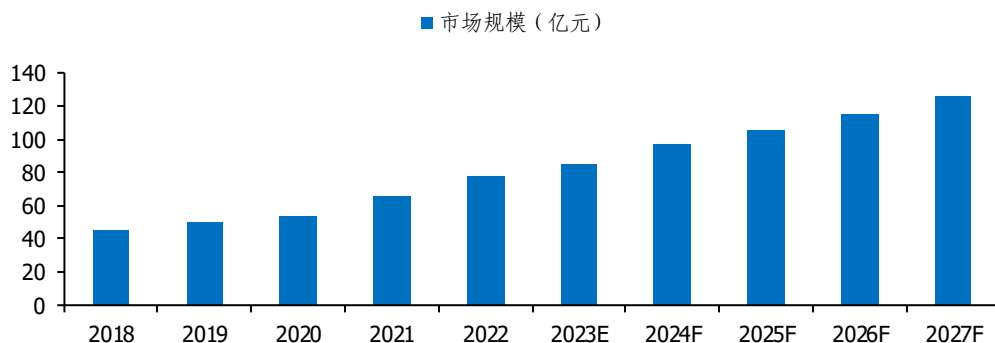
MEMS 加速度计：研究最早，最为成熟，可以分为电容式、压电式、压阻式等，其中电容式最为成熟应用最广泛，可以用于消费电子、工业自动化等下游领域。

MEMS 陀螺仪：目前振动型陀螺仪应用最广泛，可以分为线振动型陀螺和谐振环型陀螺，陀螺仪的主要优点在于结构小、制造工艺优化、整体性能更好

IMU：IMU 按实现途径分为组装式和单片式两类。主要的厂家包括博世、TDK 等。

根据芯谋研究数据，预计中国惯性传感器市场将以 10.2% 的增速快速增长，至 2027 年达 125.7 亿元。

图表 58: 2017-2028 年我国惯性传感器市场规模（亿元）



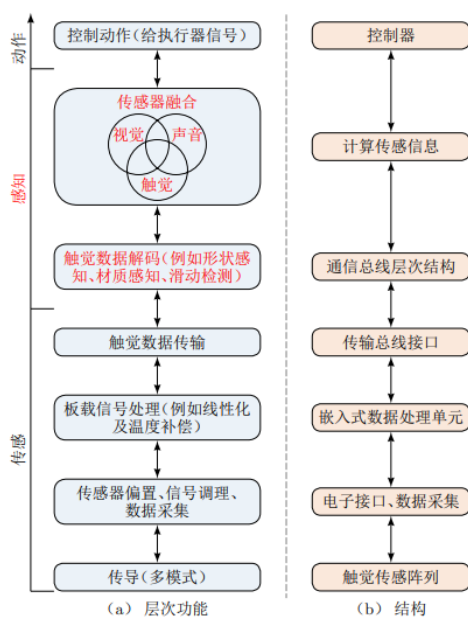
资料来源：芯谋研究，长城证券产业金融研究院

《人形机器人揭榜挂帅任务榜单》同样针对 MEMS 传感器做出**揭榜任务**：面向人形机器人姿态控制对高性能、小型化姿态传感器的需求，突破传感器小型化结构设计、陀螺仪高精度加工工艺、智能响应姿态解算等关键技术；研制基于 MEMS 惯性器件的高性能姿态传感器；研究减小传感系统体积重量，降低功耗，提升传感器抗振动、抖动能力以及传输性能的方法；发展低成本、规模化传感器生产制造方法，推动新型 MEMS 姿态传感器在人形机器人上的产业化应用。**预期目标**：到 2025 年，完成高性能、低成本的 MEMS 姿态传感器研制，具有较强的抗振动和抖动性能，俯仰角和横滚角静态精度为 0.1° ，零偏稳定性（ 1σ ，10s 平滑）不低于 $0.3^\circ/\text{h}$ ，MEMS 姿态传感器具有强的鲁棒性和智能稳定算法。

3.3.3 柔性触觉传感器

触觉传感器是灵巧手中模仿人类触觉的关键部件，其基本原理是通过向触觉阵列施加压力，产生电流并向最高层的算法实现软硬件协同，从而实现模拟人类触觉反馈的效果，即输入触觉并产生相对应的输出。

图表 59：机器人触觉传感系统的层次功能和结构图



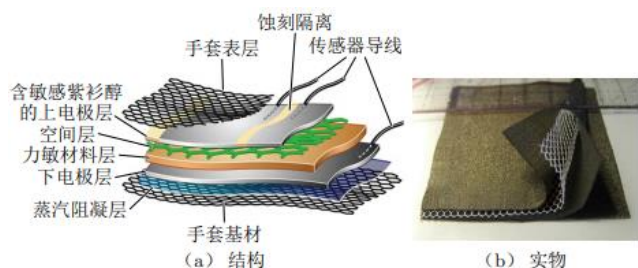
资料来源：《触觉传感器与电子皮肤研究进展》（2022 年），长城证券产业金融研究院

触觉传感器从原理上可分为压阻式、电容式、压电式、电感式和光学式：

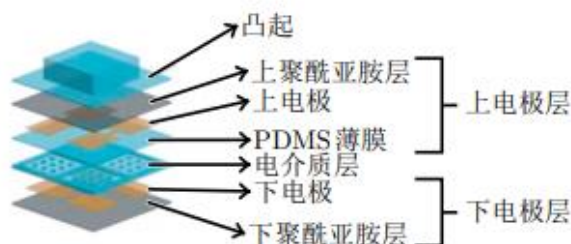
压阻式触觉传感器：压阻材料受到压力后，内部电阻率发生变化，进而产生电信号，随后通过测量电信号的变化可以实现受力大小的测量。

电容式触觉传感器：电容式传感器在感受到法向力和切向力会产生不同电容值的变化，进而可以实现对于三维力大小的测量。

图表60：压阻柔性触觉传感器结构及实物图



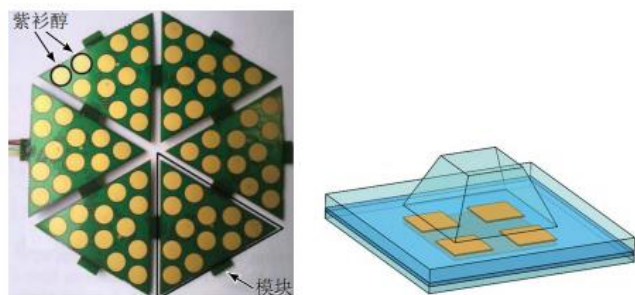
图表61：电容传感器结构图



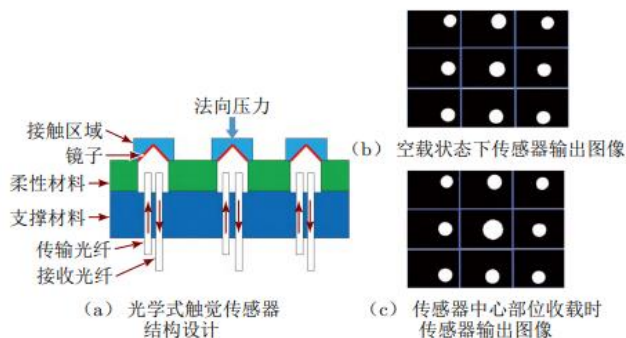
资料来源：《触觉传感器与电子皮肤研究进展》（2022年），长城证券产业金融研究院

资料来源：《触觉传感器与电子皮肤研究进展》（2022年），长城证券产业金融研究院

图表62：压电式触觉传感器



图表63：阵列式光学式触觉传感器



资料来源：《触觉传感器与电子皮肤研究进展》（2022年），长城证券产业金融研究院

资料来源：《触觉传感器与电子皮肤研究进展》（2022年），长城证券产业金融研究院

压电式触觉传感器：当晶体收到法向力时，产生电极化现象，不施加力后恢复到不带电状态。从而接受所受外力转化出的电信号，从而实现触觉监测。

光学式触觉传感器：将传感器所受压力映射为光信号强度、波长等性质的变化，通过检测光学信号来检测传感器所受压力。

图表64：不同分类触觉传感器优缺点对比

传感器类别	优点	缺点
压阻式触觉传感器	负载能力强、鲁棒性好、电信号测量便捷	迟滞性较大，不利于快速响应，温漂大，线性度较差
电容式触觉传感器	灵敏度与空间分辨率高，响应幅度宽	测量电路复杂，传感器易受电气干扰的影响
压电式触觉传感器	更便于携带，且其材料刚度高，线性度好，响应灵敏	易受噪声干扰，其介电性会受温度影响
光学式触觉传感器	无电气干扰的问题	易受到温度影响，且光纤的微弯曲会导致光损失，分析触觉信息的计算方法复杂

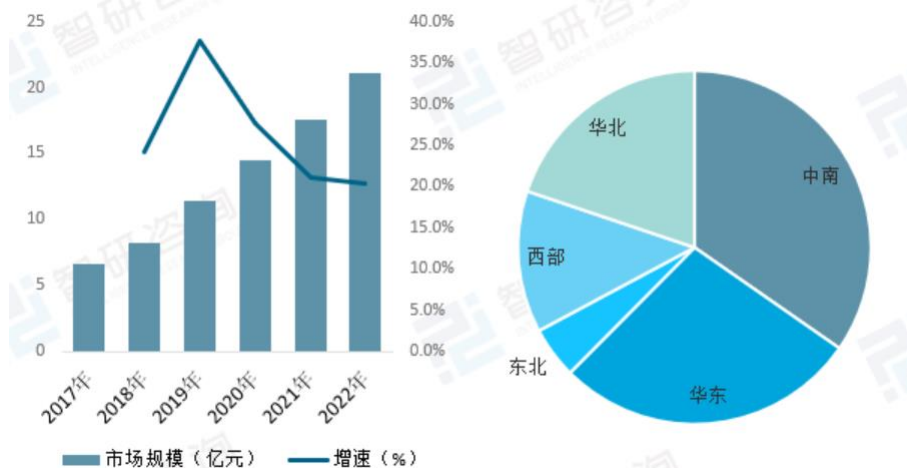
资料来源：《触觉传感器与电子皮肤研究进展》（2022年），长城证券产业金融研究院

根据《人形机器人揭榜挂帅任务榜单》指出，针对触觉传感器，**揭榜任务为：**围绕人形机器人灵巧手使用工具、操作设备、分拣物品、高精度装配等能力，在灵巧手掌内配置触觉传感器，以感知操作目标的位姿、硬度、肌理等特征，提高灵巧手的智能化操作能

力。研发小体积、高可靠性、高稳定性的人形机器人手部触觉传感器，满足人形机器人灵巧手感知、操作、交互等需求，提升新型触觉传感器自主设计与研发水平，推动触觉传感器的产业化应用。**预期目标：**到 2025 年，完成小体积高可靠性高稳定性手部触觉传感器研制，实现指尖、指腹和掌面部位传感器阵列密度 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ （厚度 $\leq 0.3\text{mm}$ ）；力检测范围 $0.1\text{N}/\text{cm}^2\sim 240\text{N}/\text{cm}^2$ （ $10\text{g}/\text{cm}^2\sim 24\text{kg}/\text{cm}^2$ ） $\pm 5\%$ ；最小检测力 10g。

根据智研咨询数据显示，2022 年全球柔性传感器市场规模为 19.31 亿美元，需求量为 2.43 万个，均价为 7.95 美元/个。2022 年中国柔性传感器行业市场规模为 21.12 亿元，其中，市场主要分布在华北、中南、华东地区，占比分别为 19.84%、34.66%、27.79%。据 QY Research 数据显示，预计 2029 年全球机器人触觉传感系统市场规模将达到 4.3 亿美元，2023-2029 年间年复合增长率 CAGR 为 10.2%。

图表 65: 2017-2022 年我国柔性传感器行业市场规模及地域分布



资料来源：智研咨询，长城证券产业金融研究院

4、相关标的

4.1 空心杯电机相关标的

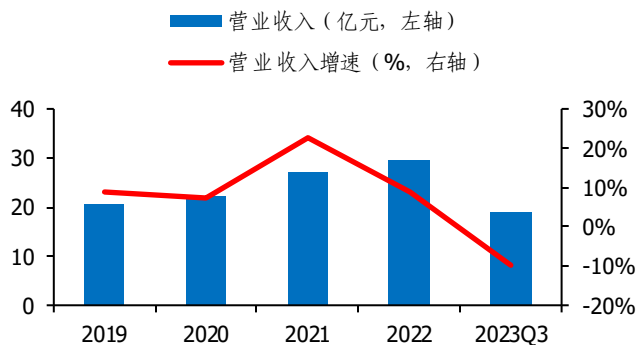
4.1.1 鸣志电器

公司从事运动控制领域产品的研发、生产和经营已有二十余年，在运动控制领域掌握了核心的控制电机研发技术、驱动控制技术和尖端制造技术，并具备在多种电机驱动控制系统中植入现场总线技术和自产产品系统集成技术的能力。公司的步进电机、直流无刷电机、空心杯电机、电机+丝杠模组、电机+减速机模组等产品被国内、外客户广泛使用，在技术、品牌、规模化生产、行业定制化开发、高性价比等方面具有明显优势。

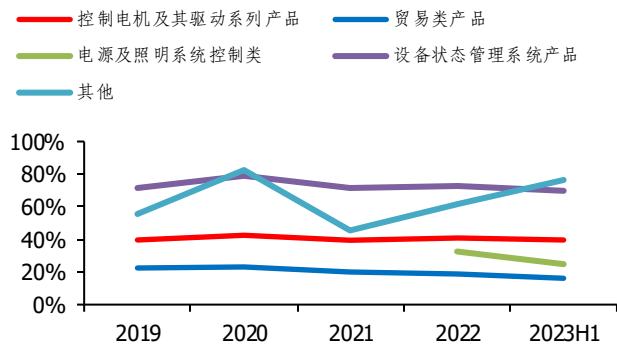
根据公司 2023 年半年报，公司的混合式步进电机产品在全球市场一直享有较高的市场地位，占据全球市场份额 10% 以上，同时也是最近十年之内唯一改变混合式步进电机全球竞争格局的国内企业，打破了日本企业对该行业的垄断。公司的直流无刷电机、交流伺服电机、空心杯电机技术亦在全球居于前列水平。

图表 66: 2019-2023Q3 鸣志电器营业收入及增速

图表 67: 2019-2023H1 鸣志电器分业务毛利率 (%)



资料来源: FinD, 鸣志电器 2019-2022 年年报, 鸣志电器 2023 年三季报, 长城证券产业金融研究院



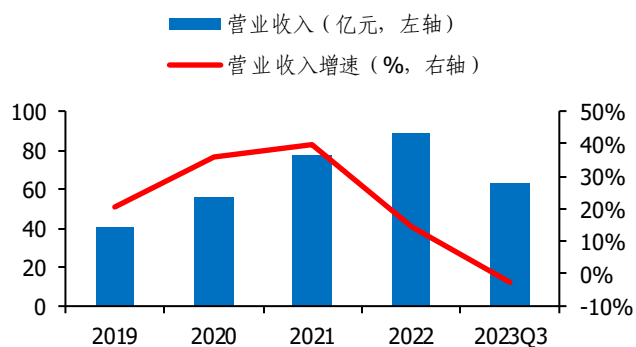
资料来源: FinD, 鸣志电器 2019-2022 年年报, 鸣志电器 2023 年半年报, 长城证券产业金融研究院

4.1.2 拓邦股份

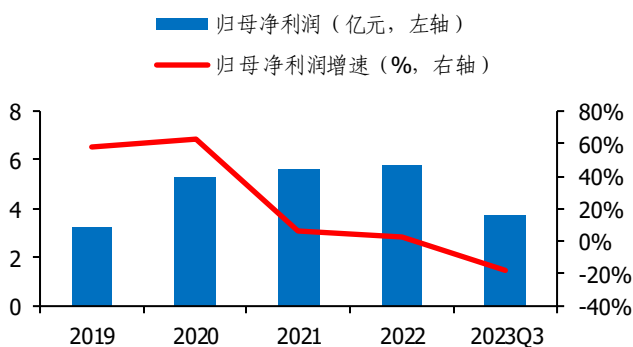
公司围绕空心杯电机、直流无刷电机 (BLDC)、步进电机、伺服电机等各类型电机形成数十个先进的电机技术平台。其中公司在工具电机和运动控制领域处于国内领先水平。公司空心杯电机产品在工业机器人的电动夹爪等中高端应用场景, 兼具高精度和高性价比的特点, 具备过载能力强、能量转换效率高, 轻量化等产品优势, 公司在工业机器人行业中已实现伺服驱动系统及空心杯电机的批量应用, 在移动机器人等领域有较大拓展空间, 受益于国产替代、工厂智能化升级、低碳发展, 未来将迎来新一轮景气周期。

图表 68: 2019-2023Q3 拓邦股份营业收入及增速

图表 69: 2019-2023Q3 拓邦股份归母净利润及增速



资料来源: FinD, 拓邦股份 2019-2022 年年报, 拓邦股份 2023 年三季报, 长城证券产业金融研究院



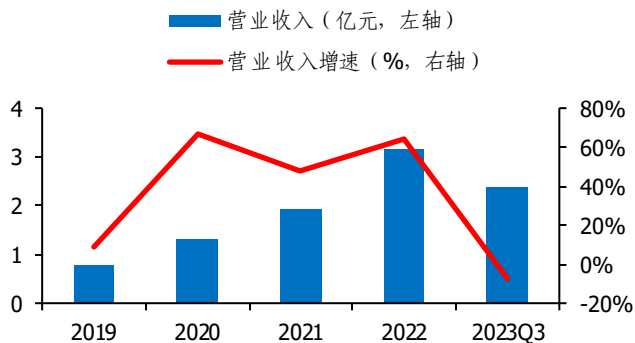
资料来源: FinD, 拓邦股份 2019-2022 年年报, 拓邦股份 2023 年三季报, 长城证券产业金融研究院

4.1.3 鼎智科技

公司是以微特电机为主要构成的定制化精密运动控制解决方案提供商, 主要从事线性执行器、混合式步进电机、直流电机、音圈电机及其组件等产品的设计、研发、生产和销售, 公司以客户需求为导向, 将成熟技术方案向客户进行推广应用, 并针对特定需求开展定制化产品开发。

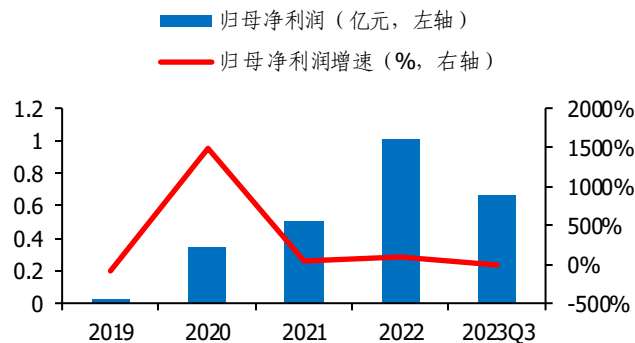
公司积极布局空心杯电机相关产品, 空心杯电机是公司重点发展的核心产品, 最小直径 8mm, 最大转速 8 万转/分钟。根据公司《关于接待机构投资者调研情况的公告 (2023 年 9 月 18 日)》, 公司空心杯电机已基本成熟, 处于中小批量供货阶段。公司自研空心杯电机绕线设备, 可实现空心杯电机全自动批量生产。由于核心工艺及设备自研, 公司的空心杯电机产能建设周期较短, 可以快速满足批量订单。空心杯电机技术壁垒核心在于高转速下的平稳性、寿命、噪音以及配套的行星减速箱。公司掌握减速箱核心技术, 自研产品处于样机和测试阶段, 公司空心杯电机+减速箱配套产品国内领先。

图表70: 2019-2023Q3 鼎智科技营业收入及增速



资料来源: FinD, 鼎智科技 2019-2022 年年报, 鼎智科技 2023 年三季度报, 长城证券产业金融研究院

图表71: 2019-2023Q3 鼎智科技归母净利润及增速



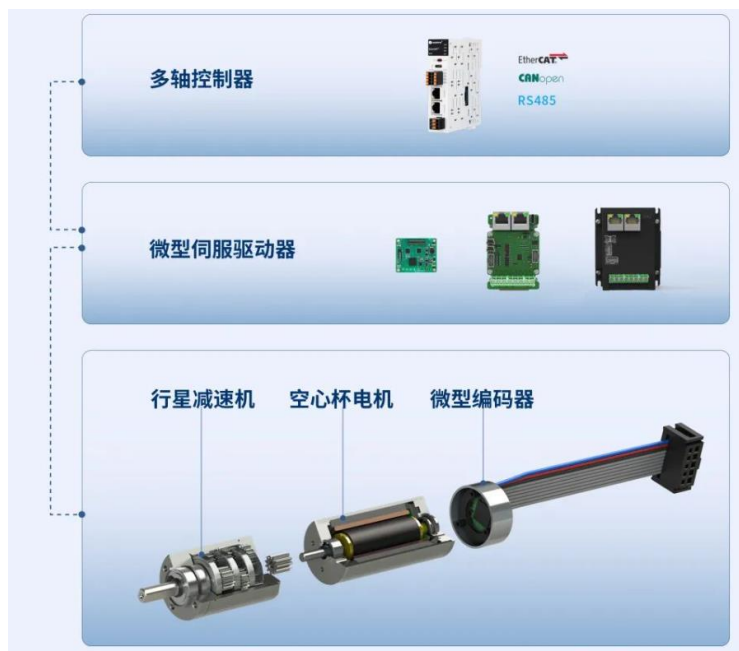
资料来源: FinD, 鼎智科技 2019-2022 年年报, 鼎智科技 2023 年三季度报, 长城证券产业金融研究院

4.1.4 雷赛智能

雷赛智能从 2018 年开始持续耕耘机器人行业, 包括 AGV/AMR 以及协作机器人等领域。前期发布的 FM 无框电机和 LD3M 系列驱动器主要针对人行机器人和协作机器人的关节部分, 根据雷赛智能官微显示, 2023 年 12 月 27 日, 雷赛智能基于二十年伺服行业成功经验, 历经一年多努力, 研发成功无刷空心杯电机与配套的微型伺服系统, 推动人形机器人等先进产业的发展, 帮助广大客户进行进口替代和升级降本, 此次发布的空心杯电机和 LD2mini 系列驱动器, 针对人形机器人灵巧手、医疗仪器、工业自动化、电动工具等新兴市场。

雷赛无刷空心杯电机采用马鞍型全自动绕线技术、一次成型, 拥有八大亮点和四大核心优势、总体上达到世界一流技术水平。雷赛无刷空心杯电机对标全球最优空心杯电机技术水平, 具有转矩特性好、功率密度高、转速范围大、使用寿命长、产品规格全等众多优点。

图表72: 雷赛智能空心杯电机及微型伺服系统



资料来源: 雷赛智能官微, 长城证券产业金融研究院

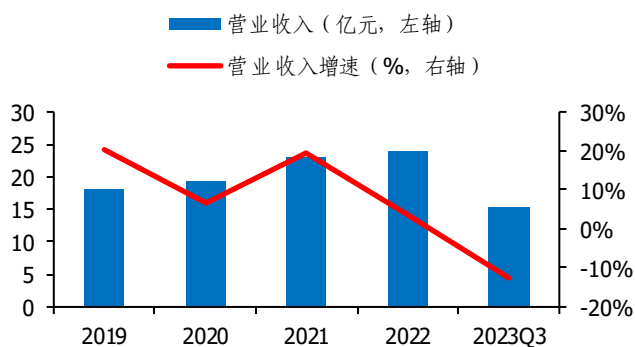
4.2 传感器相关标的

4.2.1 汉威科技

公司是国内领先、国际知名的气体传感器制造商，传感器业务集研发、生产、销售为一体，掌握厚膜、薄膜、MEMS、陶瓷等核心工艺，产品覆盖气体、压力、流量、温度、湿度、光电、加速度等门类，是最具成长性和价值的核心业务板块之一。该板块业务主要由公司旗下子公司炜盛科技、山西腾星、深圳汉威、苏州能斯达等开展。

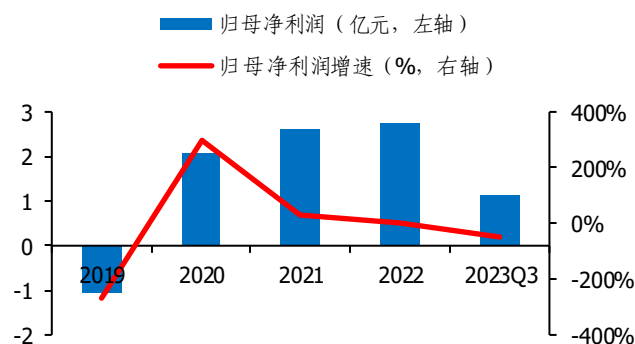
根据公司 2023 年半年报，公司柔性微纳传感器业务主要由控股子公司苏州能斯达开展，苏州能斯达积极拓展柔性微纳传感器的应用场景，不断优化“柔性感知技术+采集系统+人机交互”的解决方案，柔性微纳传感器目前已在智能机器人领域有明确的应用，并与小米科技、九号科技、深圳科易机器人等积极开展业务合作，后续发展空间广阔。

图表 73: 2019-2023Q3 汉威科技营业收入及增速



资料来源: FinD, 汉威科技 2019-2022 年年报, 汉威科技 2023 年三季度报, 长城证券产业金融研究院

图表 74: 2019-2023Q3 汉威科技归母净利润及增速



资料来源: FinD, 汉威科技 2019-2022 年年报, 汉威科技 2023 年三季度报, 长城证券产业金融研究院

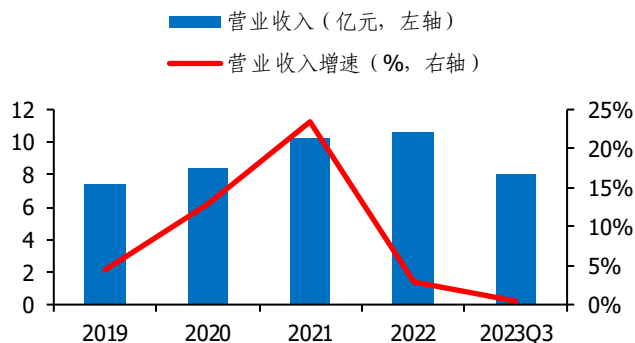
4.2.2 柯力传感

公司主营业务为研制、生产和销售应变式传感器、仪表等元器件；提供系统集成及干粉砂浆第三方系统服务、不停车检测系统、无人值守一卡通智能称重系统、制造业人工智能系统、企业数字化建设软件开发服务、移动资产管理系统、物流分拣系统等。

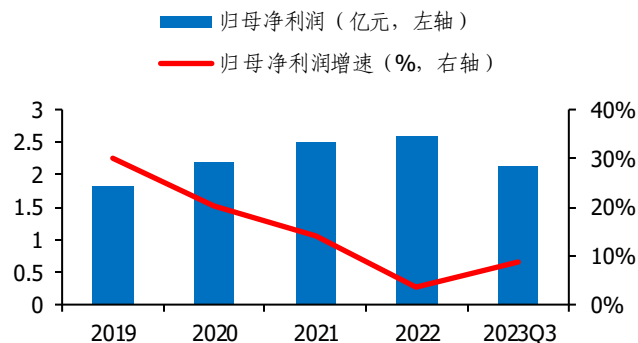
公司在目前已有的微型、扭矩、多维力等高端力学传感器品类基础上，加快自主研发，积极寻求与各大机器人厂商的商务合作。根据客户的不同需求，公司已经进行了多款扭矩传感器、多维力传感器等产品的送样和试制。与此同时，公司围绕“人形机器人”所涉及的触觉、视觉传感器积极寻求对外投资机会，根据公司 2023 年半年报，截止 2023 年 6 月底，公司已经储备了若干个技术壁垒高、市场前景广的机器人传感器种子项目，为下一阶段抢抓人形机器人传感器领域的发展机会做好全方位的准备。

图表 75: 2019-2023Q3 柯力传感营业收入及增速

图表 76: 2019-2023Q3 柯力传感归母净利润及增速



资料来源: FinD, 柯力传感 2019-2022 年年报, 柯力传感 2023 年三季度报, 长城证券产业金融研究院



资料来源: FinD, 柯力传感 2019-2022 年年报, 柯力传感 2023 年三季度报, 长城证券产业金融研究院

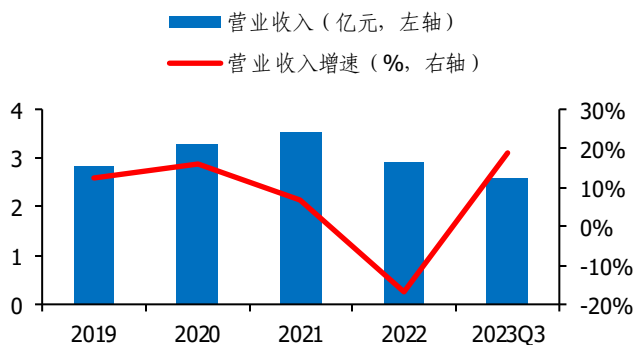
4.2.3 敏芯股份

根据公司 2023 年半年报, 公司作为国内唯一掌握多品类 MEMS 芯片设计和制造工艺能力的上市公司, 致力于成为行业领先的 MEMS 芯片平台型企业。经过多年的技术积累和研发投入, 公司在现有 MEMS 传感器芯片设计、晶圆制造、封装和测试各环节都拥有了自主研发能力和核心技术, 同时能够自主设计为 MEMS 传感器芯片提供信号转化、处理或驱动功能的 ASIC 芯片, 并实现了 MEMS 传感器全生产环节的国产化。公司目前主要产品线包括 MEMS 声学传感器、MEMS 压力传感器和 MEMS 惯性传感器。

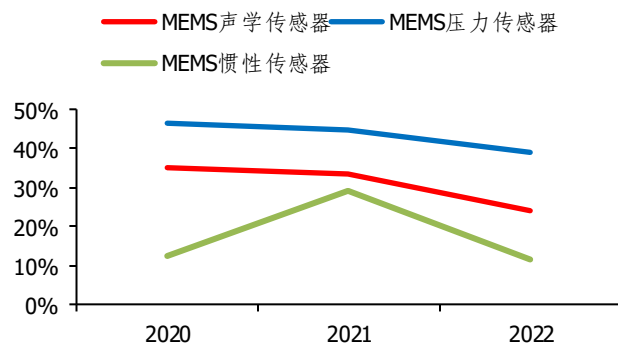
公司生产的 MEMS 声学传感器出货量位列世界前列: 根据 IHSMarkit 的数据统计, 2016 年公司 MEMS 声学传感器出货量全球排名第六, 2017 年公司 MEMS 声学传感器出货量全球排名第五, 2018 年公司 MEMS 声学传感器出货量全球排名第四。根据 Omdia 的数据统计, 2021 年 MEMS 声学传感器中 MEMS 芯片的出货量, 全球排名第三。

图表 77: 2019-2023Q3 敏芯股份营业收入及增速

图表 78: 2020-2022 敏芯股份分业务毛利率 (%)



资料来源: FinD, 敏芯股份 2019-2022 年年报, 敏芯股份 2023 年三季度报, 长城证券产业金融研究院



资料来源: iFinD, 敏芯股份 2020-2022 年年报, 长城证券产业金融研究院

4.2.4 芯动联科

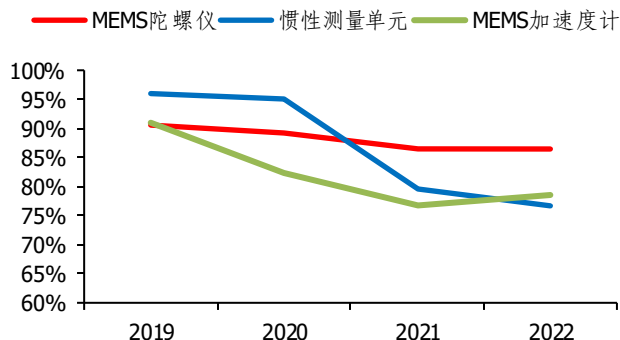
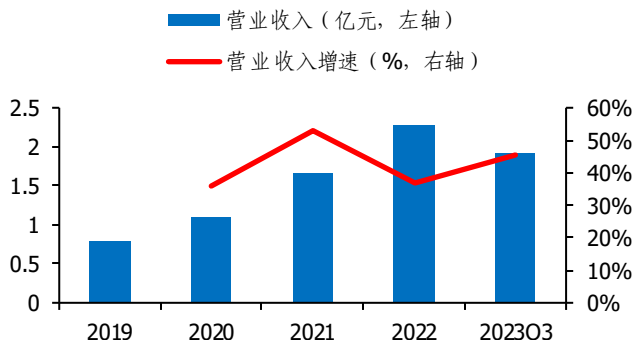
公司主要产品为高性能 MEMS 惯性传感器, 包括 MEMS 陀螺仪和 MEMS 加速度计, 均包含一颗微机械 (MEMS) 芯片和一颗专用控制电路 (ASIC) 芯片。陀螺仪和加速度计通过惯性技术实现物体运动姿态和运动轨迹的感知, 是惯性系统的基础核心器件, 其性能高低直接决定惯性系统的整体表现。硅基 MEMS 惯性传感器因小型化、高集成、低成本的优势, 成为现代惯性传感器的重要发展方向。

公司长期致力于自主研发高性能 MEMS 惯性传感器, 经过多年的探索和发展, 公司高性能 MEMS 惯性传感器的核心性能指标达到国际先进水平, 复杂环境下适应性强。根据公

司 2023 年半年报披露,公司产品已实现批量化应用并在应用的过程中不断升级和迭代。其中,高性能 MEMS 陀螺仪具有小型化、高集成、低成本的优势,有力推动了 MEMS 陀螺仪在高性能惯性领域的广泛应用。

图表 79: 2019-2023Q3 芯动联科营业收入及增速

图表 80: 2019-2022 芯动联科分业务毛利率(%)



资料来源: iFinD, 芯动联科 2019-2022 年年报, 芯动联科 2023 年三季报, 长城证券产业金融研究院

资料来源: iFinD, 芯动联科 2019-2022 年年报, 长城证券产业金融研究院

5、风险提示

人形机器人发展不及预期: 目前人形机器人尚处于初期探索阶段,未来发展进程以及量产进程可能不及预期。

下游需求不及预期: 目前灵巧手主要应用于人形机器人领域,受限于人形机器人未来前景可能不及预期,下游需求也可能出现负面影响。

国产替代不及预期: 目前空心杯电机、传感器等尚存在已经技术壁垒,国产替代进程可能受限于各类因素导致国产替代进度不及预期。

原材料及宏观环境波动风险: 若上游原材料出现较大波动或整体宏观环境出现风险,亦有可能对整个行业造成不确定性。

免责声明

长城证券股份有限公司（以下简称长城证券）具备中国证监会批准的证券投资咨询业务资格。

本报告由长城证券向专业投资者客户及风险承受能力为稳健型、积极型、激进型的普通投资者客户（以下统称客户）提供，除非另有说明，所有本报告的版权属于长城证券。未经长城证券事先书面授权许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布，亦不得作为诉讼、仲裁、传媒及任何单位或个人引用的证明或依据，不得用于未经允许的其它任何用途。如引用、刊发，需注明出处为长城证券研究院，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。

本报告是基于本公司认为可靠的已公开信息，但本公司不保证信息的准确性或完整性。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的邀请或向他人作出邀请。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。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。

长城证券在法律允许的情况下可参与、投资或持有本报告涉及的证券或进行证券交易，或向本报告涉及的公司提供或争取提供包括投资银行业务在内的服务或业务支持。长城证券可能与本报告涉及的公司之间存在业务关系，并无需事先或在获得业务关系后通知客户。

长城证券版权所有并保留一切权利。

特别声明

《证券期货投资者适当性管理办法》、《证券经营机构投资者适当性管理实施指引（试行）》已于 2017 年 7 月 1 日起正式实施。因本研究报告涉及股票相关内容，仅面向长城证券客户中的专业投资者及风险承受能力为稳健型、积极型、激进型的普通投资者。若您并非上述类型的投资者，请取消阅读，请勿收藏、接收或使用本研究报告中的任何信息。

因此受限于访问权限的设置，若给您造成不便，烦请见谅！感谢您给予的理解与配合。

分析师声明

本报告署名分析师在此声明：本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，在执业过程中恪守独立诚信、勤勉尽职、谨慎客观、公平公正的原则，独立、客观地出具本报告。本报告反映了本人的研究观点，不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接收到任何形式的报酬。

投资评级说明

公司评级		行业评级	
买入	预期未来 6 个月内股价相对行业指数涨幅 15% 以上	强于大市	预期未来 6 个月内行业整体表现战胜市场
增持	预期未来 6 个月内股价相对行业指数涨幅介于 5%~15% 之间	中性	预期未来 6 个月内行业整体表现与市场同步
持有	预期未来 6 个月内股价相对行业指数涨幅介于 -5%~5% 之间	弱于大市	预期未来 6 个月内行业整体表现弱于市场
卖出	预期未来 6 个月内股价相对行业指数跌幅 5% 以上		
	行业指中信一级行业，市场指沪深 300 指数		

长城证券产业金融研究院

深圳

地址：深圳市福田区福田街道金田路 2026 号能源大厦南塔楼 16 层
 邮编：518033

传真：86-755-83516207

上海

地址：上海市浦东新区世博馆路 200 号 A 座 8 层
 邮编：200126

传真：021-31829681

网址：<http://www.cgws.com>

北京

地址：北京市西城区西直门外大街 112 号阳光大厦 8 层
 邮编：100044

传真：86-10-88366686