

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中国和欧洲，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。

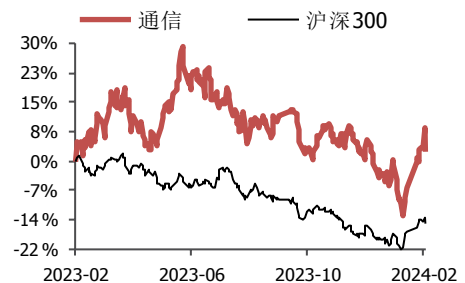
2) 传感器：灵巧手核心部件·赋能灵巧手感知能力全面提升。2023 年 12 月 13 日，马斯克发布 Optimus Gen2 介绍视频，其感知能力进一步提升，有望带动传感器产业进一步发展。

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，六维及传感器主要应用于高精度抛光打磨、铣制、煤接及高精究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
- 《央企牵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:	<i>Okada</i> 灵巧手	8
图表 7:	<i>Stanford</i> 灵巧手	8
图表 8:	<i>Robonaut hand</i> 灵巧手	9
图表 9:	<i>DLR-I</i> 、 <i>DLR-II</i> 灵巧手	9
图表 10:	<i>HIT/DLR</i> 灵巧手	9
图表 11:	<i>BH3</i> 及 <i>BH985</i> 灵巧手	9
图表 12:	软手指拟人手	9
图表 13:	北京 <i>Inspire</i> 灵巧手	10
图表 14:	灵巧手研发发展历程	10
图表 15:	<i>DLR-HIT Hand II</i> 灵巧手	11
图表 16:	<i>SVH</i> 灵巧手	12
图表 17:	<i>Shadow Hand</i> 灵巧手	12
图表 18:	因时机器人灵巧手 <i>RH56BFX/RH56DFX</i> 系列	13
图表 19:	腾讯 <i>TRX-Hand</i> 灵巧手	13
图表 20:	智元机器人 <i>SkillHand</i> 灵巧手	14
图表 21:	思灵机器人 <i>SkillHand</i> 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 <i>Stanford/JPL</i> 灵巧手	16
图表 26:	驱动器外置式 <i>HIT/DLR</i> 多指灵巧手	16
图表 27:	<i>Festo-BionicSoftHand</i> 气动灵巧手	16
图表 28:	中国计量大学基于 <i>SMA</i> 驱动的三指灵巧手	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:	<i>Meteor</i> 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

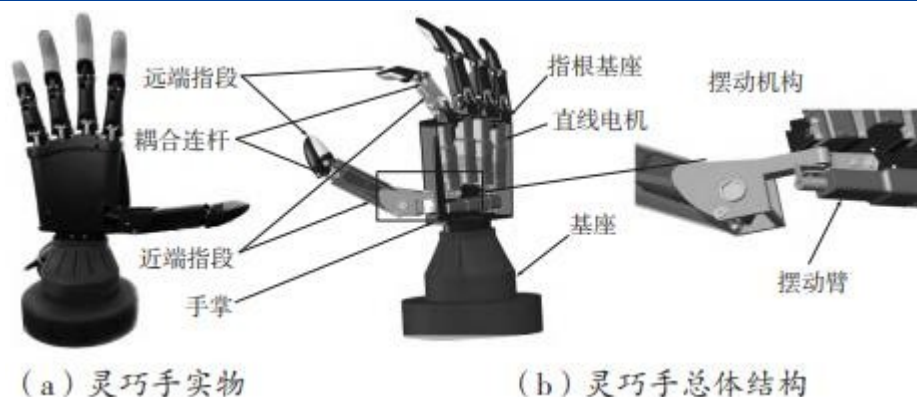
1.1 末端执行器为机器人中重要部件，灵巧手具备灵活度、适应度高等特点

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）

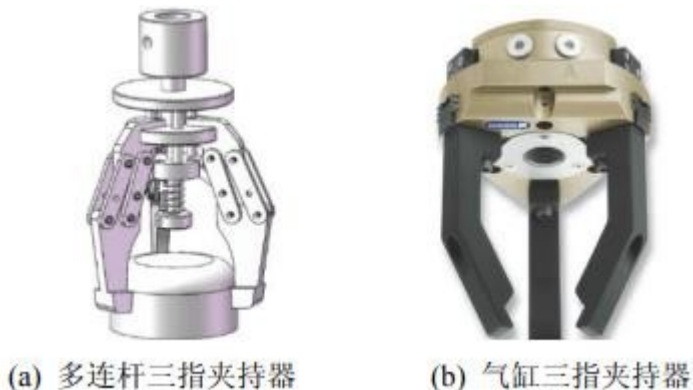
³ 本节主要参考资料：《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》（2021 年）



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



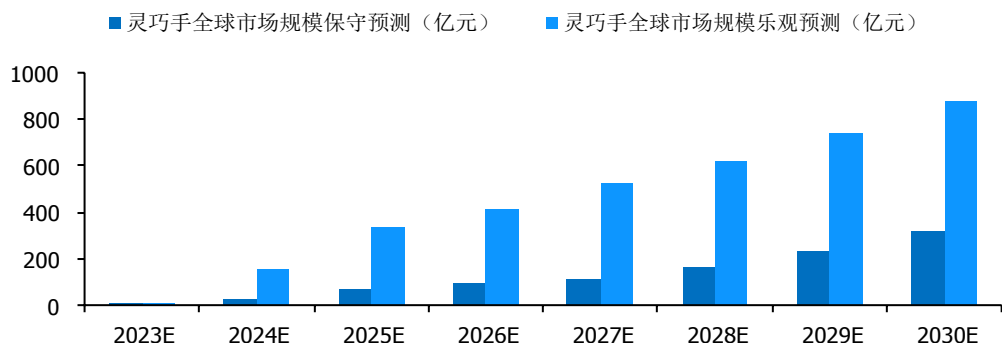
资料来源:《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》(2021年),长城证券产业金融研究院

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



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

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。

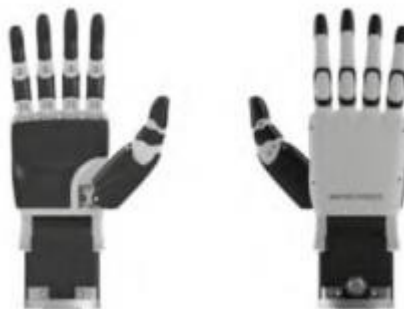
图表 12: 软手指拟人手



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

2.1 典型灵巧手商业应用案例

2.1.1 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

2.2.1 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

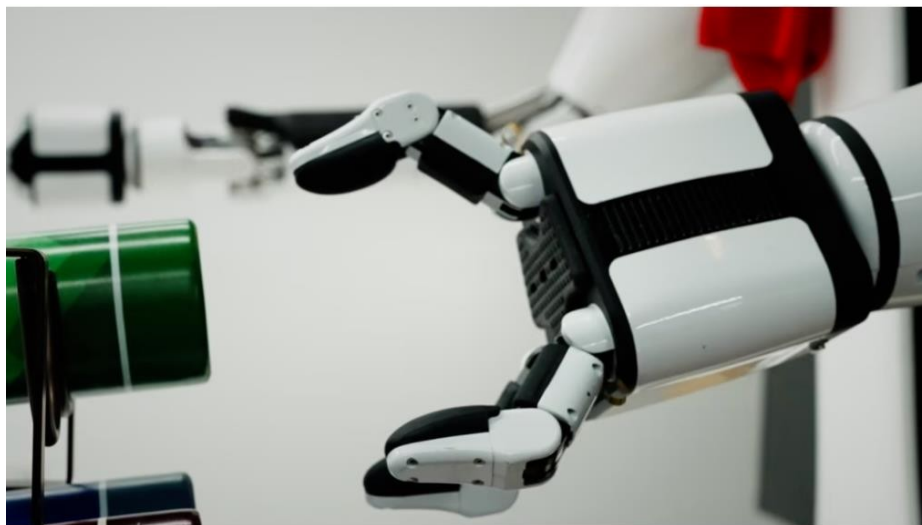
(2) TRX-Hand (腾讯)

2023 年 4 月 25 日，腾讯 Robotics X 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 Robotics X 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

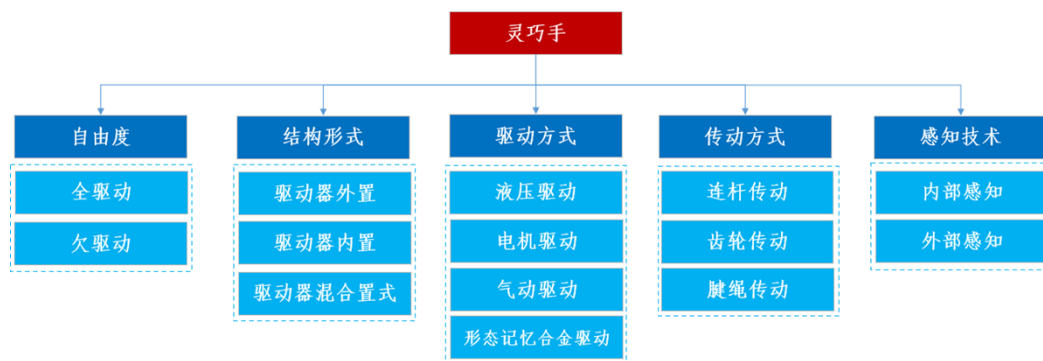


资料来源：思灵机器人官网，长城证券产业金融研究院

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）

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/188117041040006051>