

灵巧手硬件的五大方向

报告要点

为什么关注灵巧手？ 1) 人形机器人的核心能力是泛化性，而灵巧手是体现这种泛化性的核心。2) 灵巧手是人形机器人成本占比最高的零部件。3) 当前阶段，灵巧手存在较大的升级优化空间，是产业链瓶颈环节。4) 从 AI 数据闭环角度，灵巧手是人形机器人和外界交互的桥梁，是从物理世界采集数据的窗口。

按传动方式分类，灵巧手包括齿轮、连杆、绳驱三类。 齿轮式一般将电机布置在手指位置，优点是传动效率高、容易布置，缺点是性能高度依赖电机，当前技术下该方案的手指粗大，手指惯性高、控制复杂；连杆式的优势是坚固易维护，但由于连杆较厚且坚硬，难实现高灵巧性；绳驱式可以实现高灵巧度，但腱绳寿命有限，装配复杂性高。从当前市面灵巧手方案来看，国内企业侧重连杆，而海外企业更侧重腱绳。

我们看好微型电机、驱控芯片、微型丝杠、腱绳、传感器五大方向。

(1) 随着手部自由度的提升，电机需求大幅度提升。由于灵巧手要求驱动单元具备大扭矩、小空间的特点，一般采用空心杯电机。随着灵巧手设计方案的改进，也出现了使用直流无刷电机的方案。微型电机价值量高，BOM 成本占比高，价值量显著。

(2) 随着自由度的提升，人形机器人对电机驱控芯片的需求大幅增长。人形机器人要求电机驱控芯片具备高性能、高可靠、低功耗、高集成、小尺寸的特点。驱控芯片当前国产化率低，国产替代空间广阔。同时头部企业有望依托产业链卡位，向产业链上下游进行延伸。

(3) 随着灵巧手自由度的提升，微型丝杠的需求弹性显著。微型丝杠工作环境相对精密，对材料的要求特别高，技术壁垒进一步提升。

(4) 腱绳是目前绳驱方案的短板所在。金属腱绳的摩擦小，但强度低、不能承受小回转半径、难以固定；超分子量聚乙烯纤维比强度大，但耐高温、抗蠕变性能较差。目前金属方案和超分子量聚乙烯纤维方案都在推进。

(5) 触觉传感器是机器人与外部互动实现灵巧操作不可或缺的关键零部件，从工艺上分为 MEMS 和柔性传感器，从材料可以分为压阻式、电容式、压阻式、光电式等。当前触觉传感器主要集中在指尖，未来有望覆盖手掌、甚至整手，使用量将会大幅提升。当前 MEMS 工艺较为成熟，电子皮肤在灵敏度、分辨率等指标性能已有大幅提升，但大面积阵列化部署还面临高成本、拼接问题、电路连通性等难题。

投资建议：

建议关注：1) 深耕精密传动系统，具备灵巧手整体设计能力和一体化供应能力的兆威机电；2) 具备热处理、精密机加工能力，布局行星滚柱丝杠和微型丝杠的五洲新春；3) 电机控制芯片环节的峰岹科技。

风险提示： 1、产业量产进度不及预期；2、技术路线变化的风险；3、产品价格大幅下降的风险。

机械设备

评级： 看好

日期： 2025.03.25

分析师 祁岩

登记编码：S0950523090001

☎：010-56307033

✉：qiyen1@wkzq.com.cn

联系人 周越

☎：13167229763

✉：zhouyue@wkzq.com.cn

行业表现

2025/3/24



资料来源： ，聚源

相关研究

- 《高端制造产业跟踪（2月）：AI 应用贯穿全年，传统行业+AI 的价值或被低估》(2025/3/7)
- 《Figure Helix 模型如何影响投资逻辑？》(2025/2/25)
- 《寻找人形机器人的确定性：旋转关节投资机遇拆解》(2025/2/13)
- 《高端制造产业跟踪（1月）：DeepSeek 爆火预示着投资方向的何种变化？》(2025/2/7)
- 《高端制造产业跟踪（12月）：OpenAI 重启机器人，产业化再加速》(2025/1/3)
- 《高端制造产业跟踪（11月）：Optimus 人形机器人手部有新突破，华为入局人形机器人加速其落地》(2024/12/16)
- 《碳化硅陶瓷渣浆泵：开启行业弯道超车新引擎》(2024/11/22)
- 《高端制造产业跟踪（10月）：三大机遇驱动高端制造板块迎来利好》(2024/11/11)
- 《迈向高质量发展——竞争维度提升带来工程机械竞争格局优化》(2024/11/7)
- 《政策逐步加码，重视市场拐点》(2024/10/14)

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

内容目录

灵巧手是机器人夹爪的升级，是人形机器人的核心价值之一	4
为什么关注灵巧手	4
灵巧手三大传动方案详解	4
灵巧手方案对比：国内侧重连杆，海外侧重腱绳	9
特斯拉：腱绳传动的代表	9
因时：基于微型伺服丝杠的 11 自由度方案	10
灵心巧手：连杆传动的高自由度方案	11
兆威机电：连杆+直驱组合方案	12
灵巧手硬件五大方向	13
微型电机：BOM 占比高，价值量显著	13
驱控芯片：国产替代空间广阔	16
微型丝杠：用量有望大幅提升	18
腱绳：绳驱方案的短板所在	20
触觉传感器：稀缺的价值增量环节	23
投资建议	26
风险提示	27

图表目录

图表 1：夹爪 VS 灵巧手	4
图表 2：灵巧手分类	5
图表 3：灵巧手三大传动方式对比	5
图表 4：DLR-HIT-Hand 第一代（左）和第二代（右）	6
图表 5：DLR-HIT-Hand II 的手指结构	6
图表 6：KITECH-hand 使用的伺服电机	6
图表 7：KITECH-hand 手部结构	6
图表 8：ILDA 灵巧手的连杆设计	7
图表 9：ILDA 灵巧手手指的零部件	7
图表 10：Robonaut2 灵巧手	7
图表 11：R2 手指的驱动器结构	7
图表 12：R2 手的电机布置	8
图表 13：R2 安装了传感器测量腱绳在管道中的张力	8
图表 14：DLR Hand Arm System 前臂集成了大量的电机	8
图表 15：DLR Hand Arm System	8
图表 16：拮抗驱动设计方案	9
图表 17：DLR Hand Arm System 手的掌指关节	9
图表 18：特斯拉第一代灵巧手手指零部件	10
图表 19：特斯拉第一代灵巧手采用蜗轮蜗杆	10
图表 20：特斯拉 WE ROBOT 活动展示的新一代灵巧手	10
图表 21：因时灵巧手内部结构	11
图表 22：Linker Hand Ultra	12

图表 23: Linker Hand O7.....	12
图表 24: 灵心巧手产品展示.....	12
图表 25: 兆威灵巧手伺服系统.....	13
图表 26: 兆威机电灵巧手.....	13
图表 27: 市场灵巧手方案对比.....	13
图表 28: 无空心杯电机 VS 有空心杯电机	14
图表 29: 无空心杯电机结构.....	14
图表 30: 有空心杯电机结构.....	14
图表 31: 空心杯电机绕线方式.....	15
图表 32: 直流无刷电机价格显著低于空心杯电机.....	15
图表 33: 有刷直流电机 VS 无刷直流电机	15
图表 34: 电机驱动控制示意图.....	16
图表 35: 电机控制板.....	16
图表 36: 峰岬科技的方案可以降低成本、减少元器件面积.....	16
图表 37: 峰岬科技的芯片集成角度传感器.....	17
图表 38: 峰岬科技的关节方案.....	17
图表 39: 2023 年中国市场前十大 BLDC 电机主控及驱动芯片公司.....	17
图表 40: 因时的微型伺服电缸.....	18
图表 41: 行星滚柱丝杠的指标优势.....	18
图表 42: 全球代表性行星滚柱丝杠企业区域分布.....	19
图表 43: 中国行星滚柱丝杠市场竞争格局.....	19
图表 44: 灵巧手用的微型行星滚柱丝杠.....	20
图表 45: 灵巧手微行星滚柱丝杠.....	20
图表 46: 机器人用钢丝绳.....	20
图表 47: 聚乙烯的分类.....	21
图表 48: 高性能纤维对比.....	21
图表 49: UHMWPE 纤维的应用领域	22
图表 50: UHMWPE 产能（万吨））	22
图表 51: 中国超高分子量聚乙烯十年发展对比.....	22
图表 52: 触觉传感器的分类.....	23
图表 53: 帕西尼的 mems 传感器.....	24
图表 54: 某压阻式传感器制作工艺流程图.....	24
图表 55: 智元机器人的视触觉传感器.....	24
图表 56: digit 360 视触觉传感器	24
图表 57: 不同原理柔性触觉传感器对比.....	24
图表 58: 四种典型柔性触觉传感器示意图.....	25
图表 59: 部分触觉传感器企业.....	25
图表 60: 华威科的电子皮肤.....	26
图表 61: 墨现科技的灵巧手指尖传感器.....	26
图表 62: 福莱新材的柔性传感器.....	26
图表 63: 他山科技触觉传感器芯片.....	26

灵巧手是机器人夹爪的升级，是人形机器人的核心价值之一

为什么关注灵巧手

人形机器人的核心能力是泛化性，而灵巧手是体现这种泛化性的核心。工业机器人一般使用专用的夹爪进行操作。夹爪是针对特定任务设计的执行器，具有成本低、效率高的优势，但通用性差。而人形机器人的操作对象具有不确定性，需要执行器具备高度的灵活性，也就是需要灵巧手。我们认为人形机器人所提供的价值，将主要通过灵巧手的方式展现。

灵巧手是人形机器人成本占比最高的零部件。不同人形机器人的方案不同，灵巧手的成本占比也有波动。目前灵巧手价格占人形机器人整机成本约 20%-30%，是占比最高的零部件

当前阶段，灵巧手存在较大的升级优化空间，是产业链瓶颈环节。当前灵巧手还只能完成人手的部分功能，软硬件均有较大提升空间，是当前阶段人形机器人硬件上的最大瓶颈。马斯克也曾坦言，灵巧手的研发难度和工程量可能占到整机开发的一半。

从 AI 数据闭环角度，灵巧手是人形机器人和外界交互的桥梁，是从物理世界采集数据的窗口。因此，灵巧手是人形机器人传感器最丰富的零部件，在 AI 的数据闭环中有独特意义。

图表 1：夹爪 VS 灵巧手

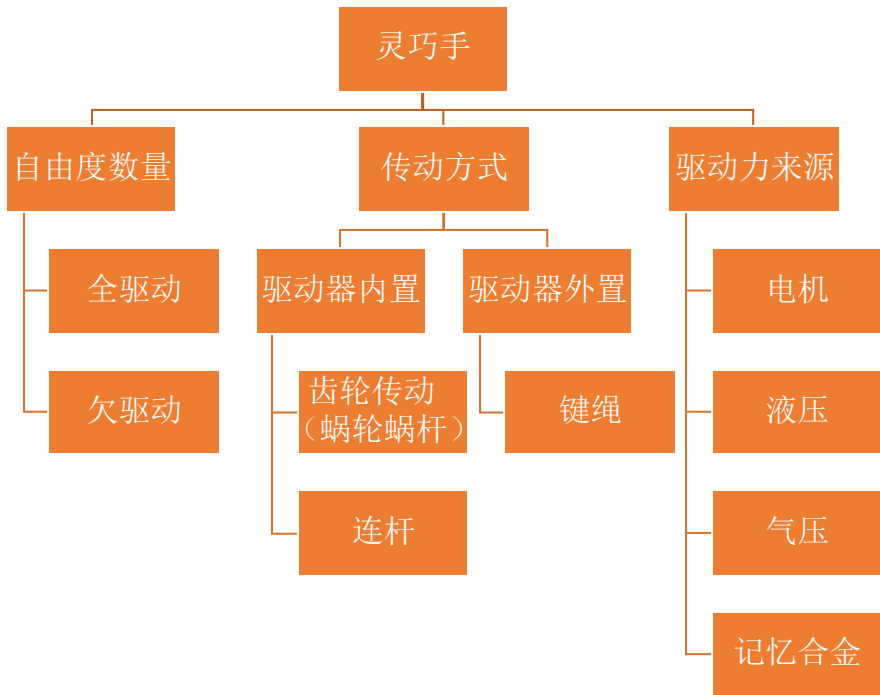


资料来源：钧舵机器人 Jodell Robotics，因时，五矿证券研究所

灵巧手三大传动方案详解

当前阶段，灵巧手方案尚未定型，技术路线多样。可以从自由度数量、驱动方式、驱动力来源等多个角度进行分类。其中，传动方式是最重要的分类依据。依据传动方式的不同，灵巧手的方案可以分为三大类：齿轮传动（包括蜗轮蜗杆）、连杆传统、腱绳传动。其中齿轮传动、连杆传动的驱动器位于灵巧手内，而腱绳传动的驱动器一般位于手臂，位于灵巧手外。

图表 2：灵巧手分类



资料来源：五矿证券研究所

图表 3：灵巧手三大传动方式对比

	优点	缺点
腱绳传动	由腱绳加上滑轮、软管实现传动。腱绳一般具有很高的抗拉强度和很轻的重量，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	腱绳本身刚度有限，影响位置精度；控制时需要一定预紧力，容易产生摩擦；腱绳布局容易产生力矩和运动的耦合，增加了控制难度和复杂性
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、易获得高精度，结构指尖的接触依靠几何封闭实现，能够较好实现多种运动规律和运动轨迹的要求	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高
齿轮/蜗轮蜗杆	通过齿轮或蜗轮蜗杆将旋转运动变为直线运动，拉动驱动器和手指指尖的弹簧驱动手指产生动作。驱动更加灵活的，但是手指闭合时间较长	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高、手指结构复杂易出现故障

资料来源：灵心数据智能平台，五矿证券研究所

齿轮传动（驱动器内置）：该方案的电机位于灵巧手手指，通过齿轮或定时皮带驱动关节的结构。这种结构可能具有较高的关节驱动效率，手部的结构也容易布置。这种方案的缺点主要在于：1) 手的大小和性能高度依赖于电机，尤其是手指部分。在当前的电机技术下，很难将手的体积做到正常人类大小；2) 由于电机的重量，手指部分的惯性较高，因此需要复杂的控制机制；3) 受限于空间，力传感器的布置困难。

电机直接驱动方案的代表包括 DLR-HIT-Hand II 和 KITECH-hand。

DLR-HIT-Hand II 是哈尔滨工业大学和德国航空航天中心联合设计的一款灵巧手，该手具有 15 个自由度，五指相同，每个手指有 3 个自由度和 4 个关节，后两个关节机械耦合。该手

采用超扁平 BLDC 电机和微型谐波驱动器。受限于硬件，该手的尺寸、重量都偏大。比如该手使用的谐波减速器直径为 20mm，单指长度可达 169.1mm，整手重量 1.5kg。DLR-HIT-Hand II 手部还配备了多个传感器，如每个关节的应变片式关节扭矩传感器、特定的关节角度传感器、指尖的六维传感器等。

图表 4: DLR-HIT-Hand 第一代（左）和第二代（右）



资料来源：Multisensory Five-Finger Dexterous Hand The DLRHIT Hand II, 五矿证券研究所

图表 5: DLR-HIT-Hand II 的手指结构

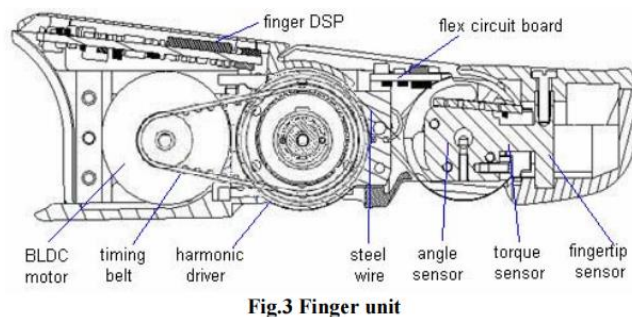
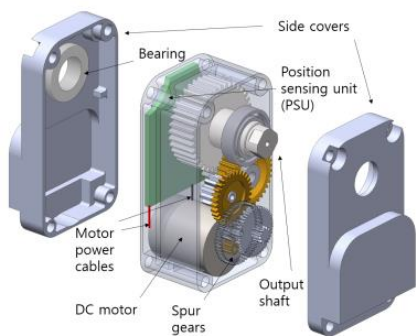


Fig.3 Finger unit

资料来源：Multisensory Five-Finger Dexterous Hand The DLRHIT Hand II, 五矿证券研究所

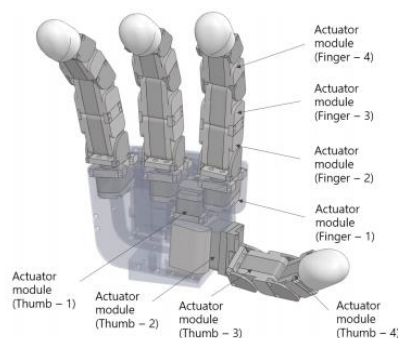
KITECH-hand 的是一款采用商业紧凑型伺服电机的灵巧手，执行器尺寸为 35.8 mm*19.5 mm*25 mm。执行器模组位于手指部位，经齿轮减速后输出扭矩，具有可逆驱动性，位置传感单元可高精度测量关节位置。

图表 6: KITECH-hand 使用的伺服电机



资料来源：KITECH-Hand A Highly Dexterous and Modularized Robotic, 五矿证券研究所

图表 7: KITECH-hand 手部结构



资料来源：KITECH-Hand A Highly Dexterous and Modularized Robotic, 五矿证券研究所

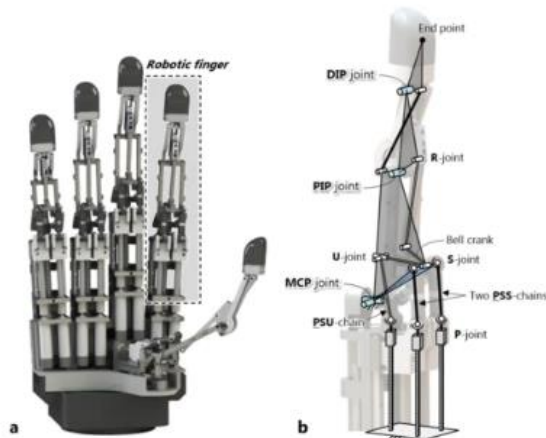
连杆传动（驱动器外置）：

连杆传动方案的电机一般位于手掌部位，通过连杆将电机运动传递到手指。连杆传动具有双向控制关节、坚固性和易于制造和维护等优点。连杆相对较厚且坚硬，较难实现像腱绳方案一样的高灵巧性。

但连杆方案的灵巧度近年来也有明显提升。一个高自由度的连杆方案灵巧手案例是 ILDA 灵巧手。ILDA 手基于连杆驱动机制，具备 15 自由度（20 个关节）、指尖力 34N、紧凑尺寸（最大长度：218 mm）、重量 1.1 kg。ILDA 灵巧手可以在掌指关节（MCP）实现 2-DOF 运动，在近端指间关节（PIP）实现 1-DOF 运动。

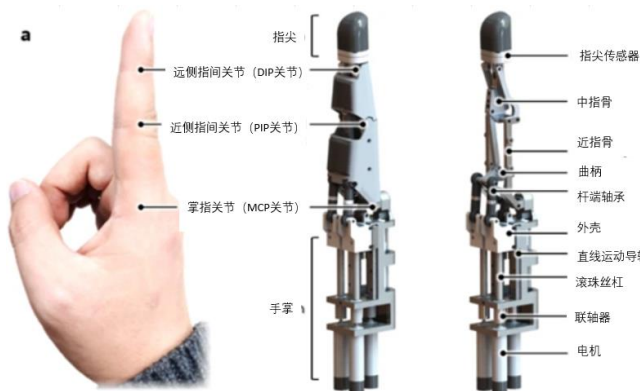
ILDA 所有手指都采用相同的结构——每根手指需要三个电机、三个联轴器、三个滚珠丝杠以产生线性运动、三个 LM 导轨和一个手指框架。ILDA 使用直径为 8 毫米的直流电机（DCX 8 M, Maxon）和一个减速比为 16:1 的齿轮箱（GPX8, Maxon）。ILDA 在每个指尖都配置了六轴力/扭矩（F/T）传感器，确保了手的力感知能力。

图表 8: ILDA 灵巧手的连杆设计



资料来源: Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand, 五矿证券研究所

图表 9: ILDA 灵巧手指的零部件



资料来源: Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand, 五矿证券研究所

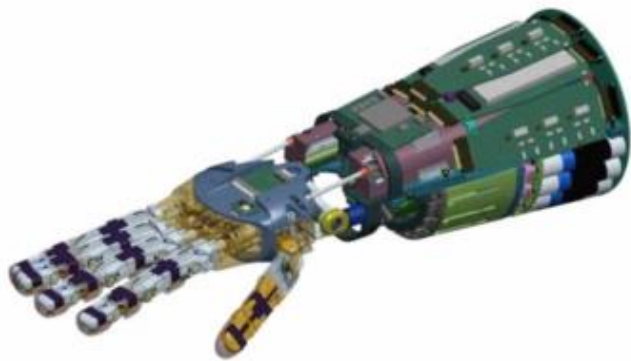
腱绳传动（驱动器外置）

采用腱绳方案的灵巧手驱动器一般布置于前臂，并通过腱绳连接到关节以传递驱动力。腱绳方案的手从结构上来说是最接近人类驱动机制的。腱绳传动方案最大的优势就是灵活——腱绳方案可以轻松实现 20 个以上的自由度。但腱绳方案的缺点也明显：1) 肌腱需要穿过关节旋转轴的结构或特殊的肌腱连接结构，装配维护的复杂性较高。2) 腱绳在长时间工作中容易产生断裂和蠕变。3) 由于摩擦增加而降低驱动效率，也增加了控制的难度。NASA 开发的 Robonaut 手、DLR 开发的 DLR Hand Arm System 以及 Shadow Robot Company 开发的 Shadow 机敏手可以被视为具有此类机制的代表性手。

Robonaut2（简称 R2 手）是 NASA 和通用汽车于 2012 年研发的灵巧手。R2 手的前臂是一个完全独立的单元，所有电机都被安装在前臂，通过 6 根导线进行通电和通信。手和前臂最大直径 127mm，从基部到手掌中心长 304mm，有效载荷超 9kg，整个手臂有 14 个自由度（手部 12 个自由度+腕部 2 个自由度）。R2 手的大小和人类手部大小相当，手指完全伸展时指尖力可达 2.25kg。

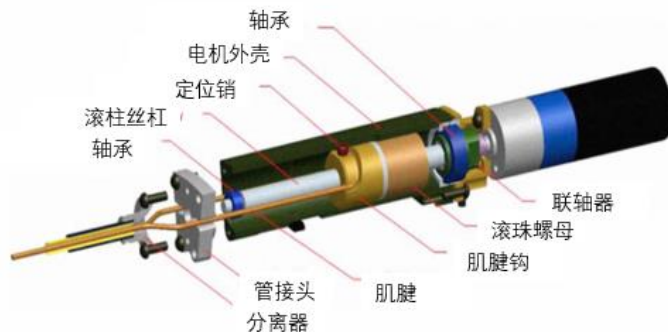
R2 手的驱动器采用了滚珠丝杠将旋转运动变为直线运动，进而对腱绳进行拉伸。R2 手的腱绳材料由 Teflon™ 和 Vectran™ 混合编织，腱绳直径 1.2mm，断裂强度 181kg。为了提升耐磨性，在编织层中增加了 PTFE。R2 手还安装了腱绳的张力传感器 (tendon tension sensors)，用来感知腱绳的张力。

图表 10: Robonaut2 灵巧手



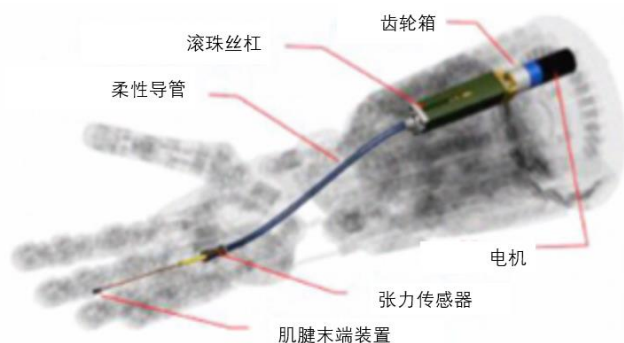
资料来源: The Robonaut 2 Hand - Designed To Do Work With Tools, 五矿证券研究所

图表 11: R2 手指的驱动器结构



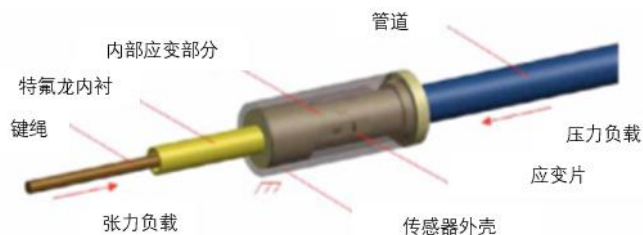
资料来源: The Robonaut 2 Hand - Designed To Do Work With Tools, 五矿证券研究所

图表 12: R2 手的电机布置



资料来源: The Robonant 2 Hand - Designed To Do Work With Tools, 五矿证券研究所

图表 13: R2 安装了传感器测量腱绳在管道中的张力

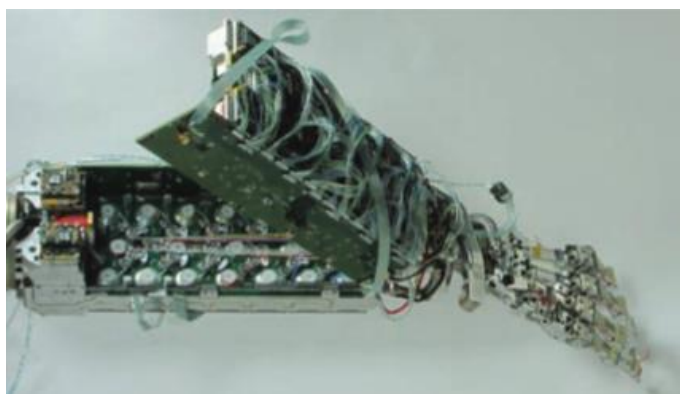


资料来源: The Robonant 2 Hand - Designed To Do Work With Tools, 五矿证券研究所

DLR Hand Arm System 是德国宇航中心 DLR 于 2010 年设计的绳驱灵巧手。DLR Hand Arm System 在手部设计 19 个自由度（另外还有 2 个被动自由度），在腕部设计 2 个自由度，共设计 21 个自由度（考虑被动自由度共计 23-Dof）。DLR Hand Arm System 采用“拮抗驱动”（antagonistic actuation）方案，每个自由度都通过 2 个电机和 2 个弹性元件来“拮抗”的驱动。所以 DLR Hand Arm System 的前臂一共有 42 个电机和弹性元件。

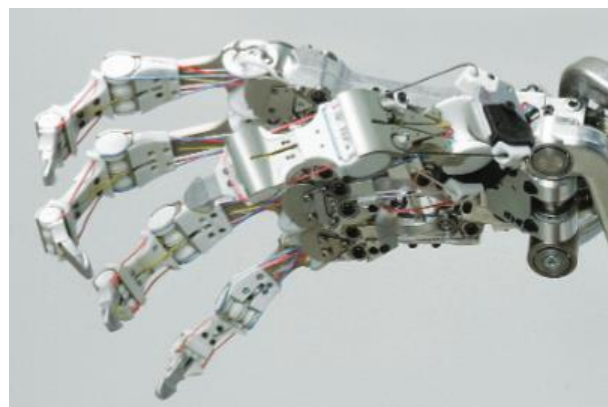
对 DLR Hand Arm System，蠕变不是最大的限制因素，键绳的耐磨性、如何固定肌腱、抗弯折性、颜色（便于组装维护）更值得关注。DLR Hand Arm System 一开始使用了钢丝绳，但钢丝绳存在安装不便、频繁弯折寿命不长的问题。作者综合考虑了 Kevlar（杜邦公司旗下的芳纶纤维）和 Dyneema。由于 Kevlar 纤维打结后强度会显著下降，因此最终选择了 Dyneema。DLR 在 2015 年推出的 space hand 上，出于对蠕变性的考虑，使用了 zylon(PBO)纤维编织成的绳子替代 Dyneema 腱绳。

图表 14: DLR Hand Arm System 前臂集成了大量的电机



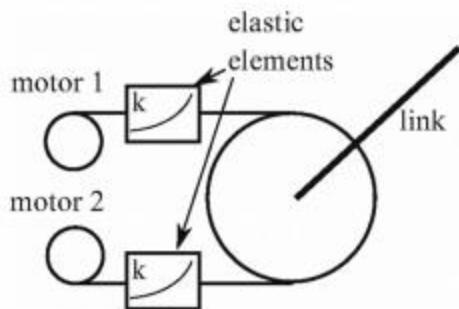
资料来源: The hand of the DLR Hand Arm System: Designed for interaction, 五矿证券研究所

图表 15: DLR Hand Arm System



资料来源: Antagonistically Driven Finger Design for the Anthropomorphic DLR Hand Arm System, 五矿证券研究所

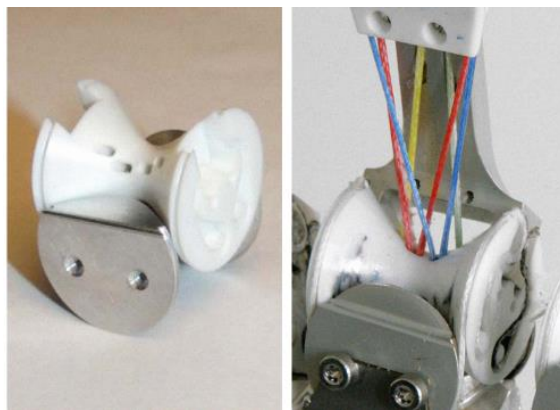
图表 16：拮抗驱动设计方案



资料来源：Antagonistically Driven Finger Design for the Anthropomorphic

DLR Hand Arm System, 五矿证券研究所

图表 17：DLR Hand Arm System 手的掌指关节



资料来源：Antagonistically Driven Finger Design for the Anthropomorphic

DLR Hand Arm System

灵巧手方案对比：国内侧重连杆，海外侧重腱绳

人手具有 27 个自由度。一般认为当灵巧手具备 17 个自由度及以上可以实现接近人手的灵活性。17 个自由度是我们判断一款灵巧手性能的重要参考。

国内灵巧手企业以连杆传动方案为主，如兆威机电、因时、灵心巧手（L10\L20）均使用连杆传动方案。目前使用连杆传动方案也可以做到 17 个自由度以上，在耐用性、灵活性上取得一个较好的平衡。

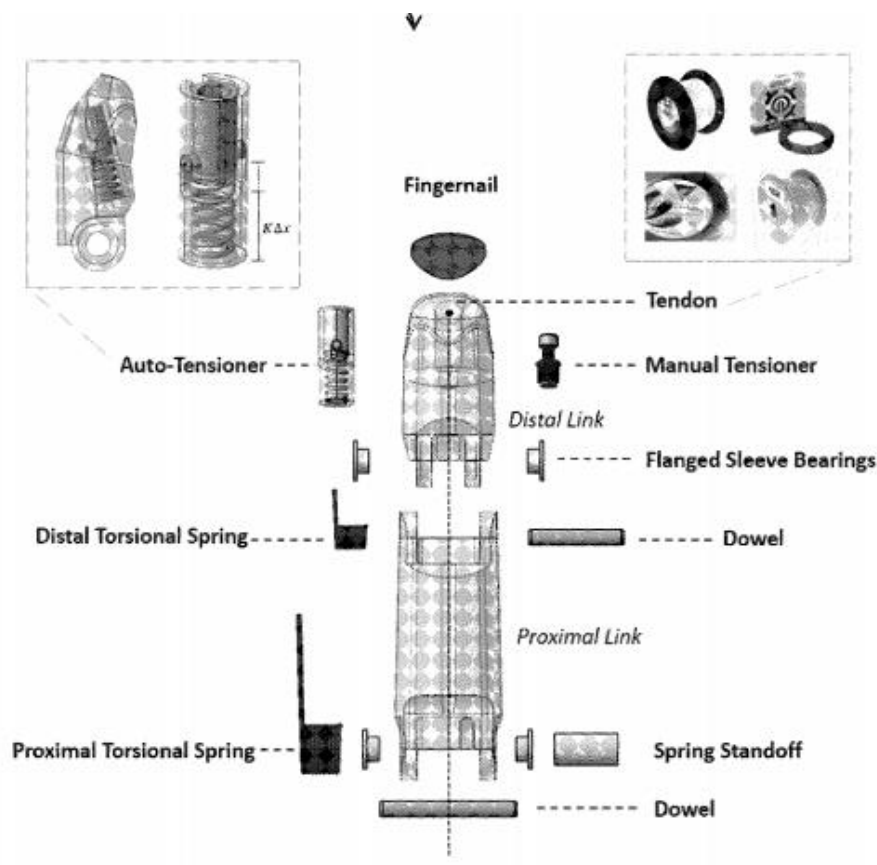
海外企业更青睐腱绳方案，追求高灵活性。比如特斯拉新一代灵巧手采用腱绳方案可以做到 22 个自由度，高度灵活拟人。

特斯拉：腱绳传动的代表

特斯拉的灵巧手经过数次迭代升级，其中 11 自由度版本的灵巧手公开了专利，尽管不是最新方案，但对我们了解特斯拉的思路亦有帮助。特斯拉 11 自由度版本灵巧手有如下特点：

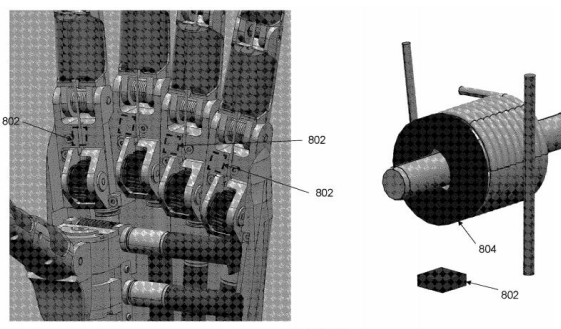
- 11 个自由度，其中主动自由度 6 个，也就是说这是一款欠驱动的灵巧手。特斯拉认为腱绳方案+欠驱动，随着接触位置的变化，结构件的位置也会移动，接触点也随之变化。这样的手指具备更多的适应性。
- 腱绳方案中的摩擦是一大缺点。特斯拉使腱绳保持浮动（floating），保持了一定的灵活性。
- 腱绳在一根细管中移动，末端可以连接张紧器（tensioner）。自动张紧器常用于汽车发动机或工业机械，作用是使皮带或链条始终保持恒定张力并自动调节张力。
- 11 自由度版本使用了蜗轮蜗杆进行传动。我们推测主要是蜗轮蜗杆可以做到大减速比，可以提高手部的负载能力。

图表 18：特斯拉第一代灵巧手指零部件



资料来源：特斯拉 五矿证券研究所

图表 19：特斯拉第一代灵巧手采用蜗轮蜗杆



资料来源：特斯拉，五矿证券研究所

图表 20：特斯拉 WEROBOT 活动展示的新一代灵巧手



资料来源：机器人大讲堂，五矿证券研究所

特斯拉在 2024 年 WE ROBOT 活动中展示了新一代灵巧手，依然保留了绳驱方案，自由度提升至 22-Dof，高度灵活拟人。从图片可以看出，手腕部有大量的腱绳，电机被放置于前臂部位。

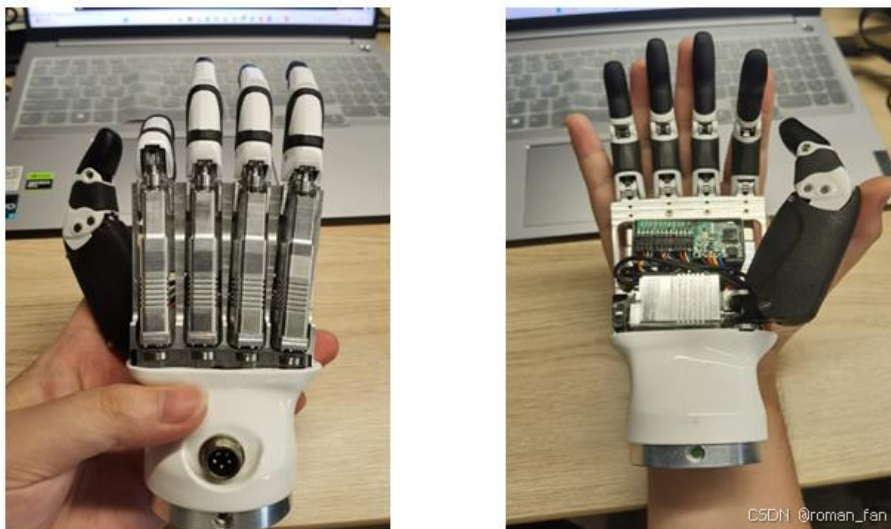
因时：基于微型伺服丝杠的 11 自由度方案

因时机器人创立于 2016 年，是一家专注于微型精密运动部件研发制造的专精特新企业，主营产品包括微型伺服电缸和仿人五指灵巧手，并在微型、高精度和力控技术等方面具有领先优势。因时机器人研制的仿人五指灵巧手 2019 年上市，是国内首款商业化可量产的五指

灵巧手，产品突破多项技术瓶颈，目前成本大幅降低，并获得国家重点研发计划“智能机器人”重点专项支持。

因时仿人五指灵巧手单手具有 11 个自由度，其中 6 个主动自由度。采用直线推杆的方式进行驱动器的设计，电机位于手掌位置，内置连杆和弹簧进行传动。因时的微型伺服电缸的内部集成了空心杯电机、精密减速器、丝杠传动机构、力传感器、位置传感器，是最核心的零部件。

图表 21：因时灵巧手内部结构



资料来源：CSDN，五矿证券研究所

灵心巧手：连杆传动的高自由度方案

灵心巧手成立于 2023 年 7 月 6 日，专注于开发以灵巧手和云端智脑为核心的具身智能平台。灵心巧手在 2024 年第五届中国机器人行业年会荣获 LeadeRobot2024 年度具身智能产业赋能奖、LeadeRobot2024 年度机器人末端执行器最佳适配奖。在 2024 年中关村仿生机器人大赛荣获灵巧手领域第一名。灵心巧手月销量已突破 100 只。

灵心巧手的 Linker Hand 采用单指模块化设计，可以减轻负载，提高速度和灵活性，降低维护成本；配备先进的多传感器系统，能够实现对环境的精确感知交互，在接触到物体时，精确捕捉到其接触物体的三维力，感知所接触物体表面的纹理和温度差异。

2025 年，灵心巧手发布 Linker Hand 灵巧手钛金版 T10、T20，售价分别为 19999 元和 49999 元。2025 年工博会，灵心巧手进一步发布了售价 88.88 万元终结者版本 Linker Hand Ultra（25+自由度，绳驱传动）和 0.88 万的入门级产品 Linker Hand O7（7 自由度，连杆传动）。

图表 22: Linker Hand Ultra



资料来源: 灵心巧手, 五矿证券研究所

图表 23: Linker Hand O7



资料来源: 灵心巧手, 五矿证券研究所

图表 24: 灵心巧手产品展示

	linker hand L10	Linker hand L20	Linker hand L30	Linker hand J42
自由度	10 主动+10 被动	20 主动+5 被动	26 主动	最大 42 主动
驱动方式	连杆驱动	连杆驱动	腱绳驱动	腱绳驱动
最大抓握力握力	12N	拇指 15N 四指 10N	拇指 9~20N 四指 10~20N	5N
产品展示	Linker Hand L10 标准版 	Linker Hand L20 pro版 	Linker Hand L30 线驱版 	Linker Hand J42 工业版

资料来源: 灵心巧手, 五矿证券研究所

兆威机电: 连杆+直驱组合方案

2024 年 11 月兆威机电正式发布手指集成驱动的高可靠灵巧手。兆威机电本次发布的仿生灵巧手具备以下特点:

高灵巧性。该灵巧手配备 17 个主动执行单元, 其中单指节拥有 3 个及以上主动执行单元, 准确模拟人手部的抓握等精细动作, 赋予机械手更好的灵活性与精确度。指节电机独立驱动, 指尖集成传感器, 手长 238.5mm, 手宽 88mm, 手厚 40.7mm, 负载 3kg, 重量<1kg。

高可靠性:单手 10 年设计寿命, 关键组件全部自研。

高精度:微驱控制器主频 600M 且采用一拖六结合磁编方案, 电机控制精度高。每个指节采用电机搭配微型减速器和丝杆驱动, 结合高密度、高集成与布局优化的 PCB 设计, 实现精确的动力输出和快速响应

我们可以进一步从兆威机电的灵巧手专利中观察其技术方案: 兆威机电的灵巧手专利技术中, 掌指控制单元采用无刷直流电机, 手指控制单元采用步进电机, 结合直线执行器应用, 通过电机旋转搭配微型减速器和丝杆实现精确的动力输出和快速响应。

图表 25：兆威灵巧手伺服系统



资料来源：兆威机电，五矿证券研究所

图表 26：兆威机电灵巧手



资料来源：兆威机电，五矿证券研究所

图表 27：市场灵巧手方案对比

	兆威机电	灵心巧手L20	因时RH56	特斯拉
展示图				
自由度（主动）	17	18	6	17
自由度（被动）	0	5	5	5
全驱动/欠驱动	全驱动	欠驱动	欠驱动	欠驱动
传动方式	连杆/直驱	连杆	连杆	腱绳
重量	<1kg	1kg	540g	-
单指握力		10/15N	4N/6N	-
最大长度mm	238.5	263.5	217.8	-
宽	88	99.8	80.7	-
厚	40.7	45.5	31.2	-

资料来源：兆威机电、灵心巧手、因时、机器人大讲堂，五矿证券研究所

灵巧手硬件五大方向

从需求弹性和产业链稀缺性角度，我们推荐投资者关注五大方向：微型电机、驱控芯片、微型丝杠、腱绳、传感器。

微型电机：BOM 占比高，价值量显著

灵巧手对空间要求苛刻，一般使用微型电机。目前主流方案包括空心杯电机和无刷直流电机。

空心杯电机属于直流永磁电机，与普通有刷、无刷直流电机的主要区别是采用无铁芯转子，也叫空心杯型转子。由于转子结构变化，空心杯电机体积小，重量和转动惯量大幅降低，具备了铁芯电机所无法达到的控制和拖动特性。此外转子结构彻底消除了因为铁芯形成涡流而造成的电能损耗，具有突出的节能特点。

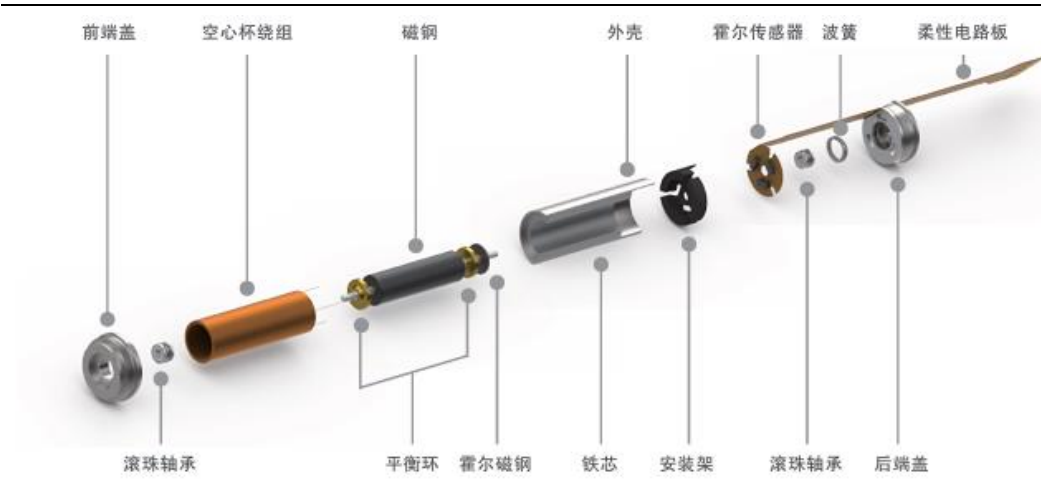
空心杯电机也可以细分为无刷空心杯电机和有刷空心杯电机。两者在转向方式、转子构成、寿命、转速、抗干扰等方面性能存在差异。

图表 28：无刷空心杯电机 VS 有刷空心杯电机

	无刷空心杯电机	有刷空心杯电机
转向方式	线圈导线直接连接到控制器，通过处 理连接板上的霍尔反馈的位置信号完 成换向	利用碳刷（或者金属电刷）和换向器的配 合来完成换向
转子	线圈是固定的，永磁铁作为转子在中 间旋转	线圈、换向器和连接板在外壳和永磁铁中 间旋转，他们共同组成转子
寿命	长寿命（20000h）	寿命首先（2000h）
转速	高转速	转速受限
干扰性	电磁干扰可忽略	有火花
控制算法	需要驱动控制	控制简单

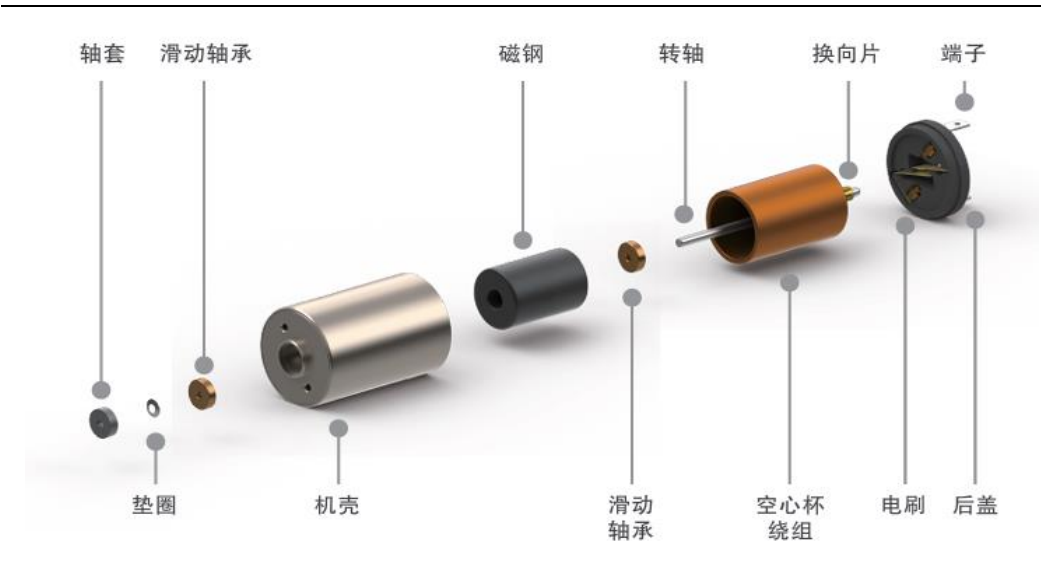
资料来源：机械电气电机杂谈， 五矿证券研究所

图表 29：无刷空心杯电机结构



资料来源：鸣志电器， 五矿证券研究所

图表 30：有刷空心杯电机结构



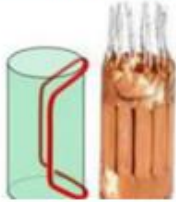
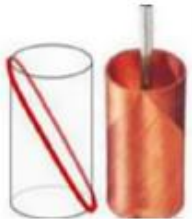
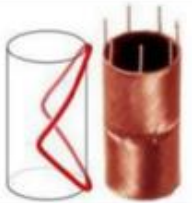
资料来源：鸣志电器， 五矿证券研究所

空心杯电机的核心技术壁垒在于自支撑绕组技术上。首先，由于空心杯电机所有漆包线都是

悬空绕线，内部没有任何支撑，对加工精度的要求非常高。其次，目前我国生产空心杯电机多采用卷绕式生产技术，生产效率较低，废品率高。

空心杯电机线圈的卷绕方式包括直绕组、斜绕组、同心式绕组、叠绕组等。

图表 31：空心杯电机绕线方式

绕线方式	优缺点	图示
直绕型	有效导体部分与电枢轴线平行，属于集中绕组 槽满率较高； 绕线杯中中部壁薄，漆包线排布不整齐、有堆叠，整个空心杯线圈排布较乱； 端部留有走线余量所以端部尺寸较高。	
斜绕型	元件有效边和电枢轴线成一定倾斜角度 端部尺寸较小； 自动化设备一次性绕制成型，合格率高； 绕组杯的平整度、一致性好； 漆包线相互交叠，槽满率较低。	
同心式绕组 (菱形绕组)	先绕制成多个单一菱形线圈再排线的方法，线圈一般采用自粘性方导线便于绕制和固定； 便于控制整形后的空心杯尺寸； 提高槽满率同时生产效率高，适合批量生产； 功率密度较大； Maxon电机就采用了该方法	

资料来源：drylin，五矿证券研究所

如果采用腱绳方案，可以将电机安置在前臂，使用直流无刷电机。将电机安置在前臂后，获得了较大的空间，可以使用直流无刷电机降低成本。相比有刷直流电机，无刷直流电机省去了碳刷，采用电气控制系统对线圈进行控制，增加了成本及电机的复杂性，但效率更高、寿命更长、转速更大。

图表 32：直流无刷电机价格显著低于空心杯电机

电机类型	产品型号	重量 /g	机座尺寸 /mm	长度 /mm	额定转矩 /Nm	价格 /元
空心杯电机	DCU08017P06-S002&PG08C-0016	7.7	8	28.1	6.5	1433
直流无刷电机	BLR16024H10-S002	19	16	26.8	0.002	418

资料来源：鸣志电器，五矿证券研究所

图表 33：有刷直流电机 VS 无刷直流电机

	有刷直流电机 BDC	无刷直流电机 BLDC
购买成本	较低	较高
使用寿命	短，一般 2-3 年	长，一般 7-10 年
维护及运行成本	需要定期维护更换碳刷及附件	无需更换损耗件
机械与控制特性	效能低，转速及控制弱于无刷电机	效能高、速度高、控制精准
能耗与散热	能耗高、散热差	能耗低、散热好
震动和噪声	震动和噪声大	震动和噪声小
潜在风险	有碳粉掉落及电火花风险	无

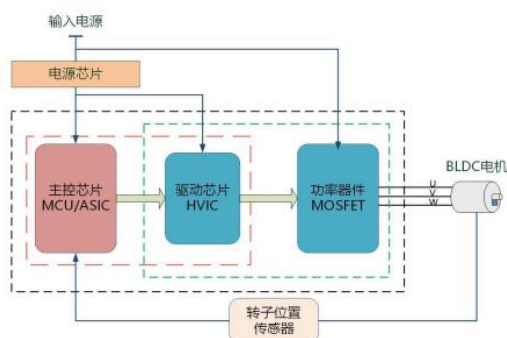
资料来源：倍捷科技，五矿证券研究所

微型电机 BOM 成本占比高，价值量显著。假设单手 17 个主动自由度，对应 17 个电机。如果采用空心杯电机，按单价 1433 元/个计算，单手价值量高达 2.43 万元。即使采用直流无刷电机，按单价 418 元/个估算，单手价值量也高达 7106 元。

驱控芯片：国产替代空间广阔

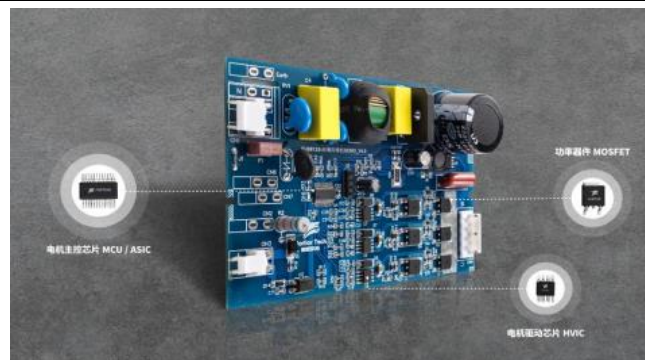
电机的驱控芯片包括主控芯片 MCU、驱动芯片、功率器件、传感器等。驱控芯片通过集成控制算法、功率驱动和保护功能，实现电机的高效、安全与智能化运行。其性能直接影响设备的精度、可靠性和能效。

图表 34：电机驱动控制示意图



资料来源：峰昭科技，五矿证券研究所

图表 35：电机控制板

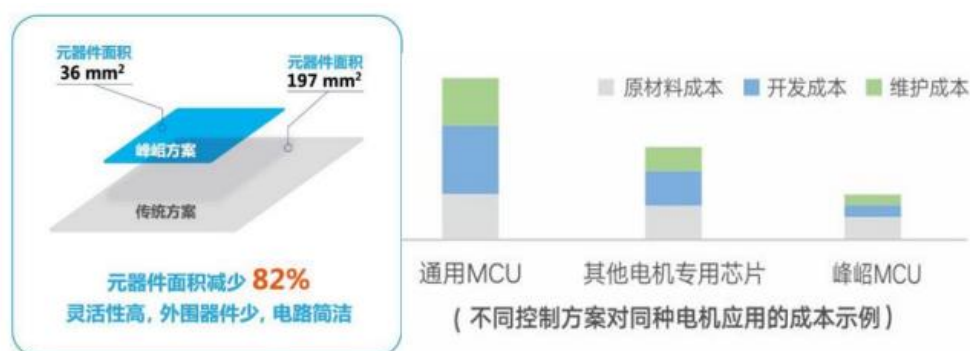


资料来源：峰昭科技，五矿证券研究所

人形机器人要做到动作协调，对电机的驱控芯片也提出了新的要求。

- 高性能、高稳定。人形机器人要求灵巧操作，对完成转矩的控制的时间提出了较高要求。
- 低功耗。人形机器人非常重视电机效率，这不光涉及到电机本身，也涉及到电机的控制架构。
- 高集成、小尺寸。灵巧手对尺寸要求高，需要严格控制驱控芯片的尺寸。在单一晶圆上集成了电源、驱动或功率器件，可有效降低整体方案成本，减少元器件面积。

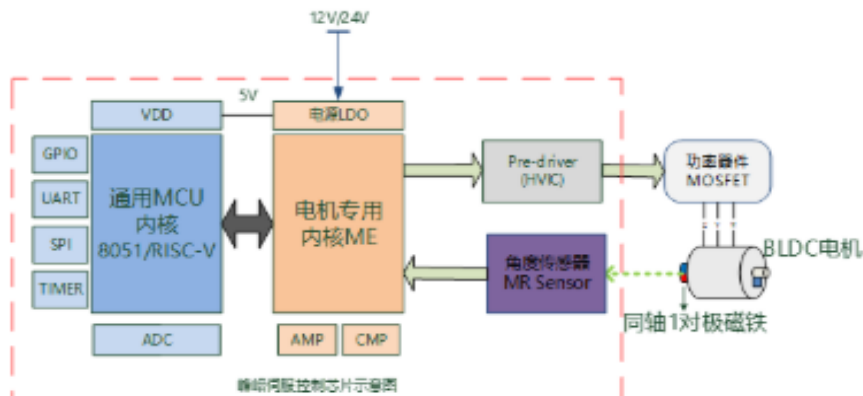
图表 36：峰昭科技的方案可以降低成本、减少元器件面积



资料来源：峰昭科技，五矿证券研究所

电机驱控芯片行业逐步走向单芯高集成，价值量有提升可能。传统的方案采用分立器件实现，新一代方案已经可以把传感器、通用内核和专用内核以及 pre-driver 都放在了一起，进一步提升集成度，降低成本。

图表 37：峰岷科技的芯片集成角度传感器



资料来源：峰岷科技, 电子工程专辑, 五矿证券研究所

图表 38：峰岷科技的关节方案

机器人/机器狗大关节方案



机器人/机器狗小关节方案



资料来源：峰岷科技, 哔哩哔哩, 五矿证券研究所

电机驱控行业国产化率偏低，国产替代空间广阔。以 BLDC 电机驱控芯片为例，全球前十大厂商仅峰岷科技一家中国企业，市占率仅 4.8%，国产替代空间广阔。

图表 39：2023 年中国市场前十大 BLDC 电机主控及驱动芯片公司

排名	公司	国家	市占率
1	A	德国	18.50%
2	B	美国	11.80%
3	C	瑞士	10.80%
4	D	荷兰	7.10%
5	E	日本	5.90%
6	峰岷科技	中国	4.80%
7	F	比利时	4.50%
8	G	美国	4.30%
9	H	德国	3.70%
10	I	日本	3.20%

资料来源：峰岷科技, 五矿证券研究所

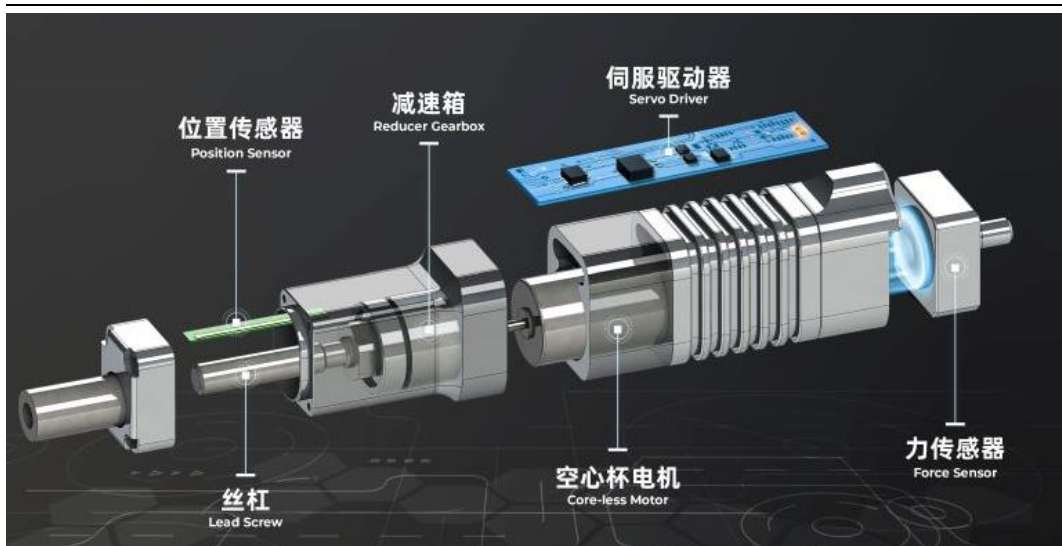
依托产业链环节的关键卡位，优势企业向产业链上下游延伸。2025 年 1 月，峰岷科技与三花控股期签署了《合作框架协议》，双方同意出资设立合资公司（三花控股持股 50%，峰岷科

技持股 36%)。合资公司专注于空心杯电机（无槽永磁交流电机）本体及相关产品的研发、设计、制造和销售。

微型丝杠：用量有望大幅提升

我们看好微型丝杠在灵巧手的用量大幅提升。微型丝杠常与高精度减速器、高性能空心杯电机、传感器以及伺服控制系统集成为微型伺服电缸。这种集成设计可以在保证更小体积的基础上实现驱控一体化，具有体积小、精度高、负载大等技术特点。

图表 40：因时的微型伺服电缸



资料来源：因时，五矿证券研究所

部分方案微型丝杠的单手用量可达 15 个以上。参考 ILDA 手的连杆结构，每个手指对应 3 个微型丝杠，单手需要 15 个微型丝杠。参考 R2 手的绳驱结构，每个自由度需要一个微型丝杠。假设某款手具备 17 个主动自由度，意味着至少需要 17 个微型丝杠。

高精度微型丝杠是微型伺服电缸的核心。丝杠的作用是把旋转运动变为直线运动。蜗轮蜗杆也可以将旋转运动变为直线运动，比如特斯拉第一代灵巧手就使用了蜗轮蜗杆。但丝杠的精度高、传动效率高、稳定性好、噪音低，适用于高精度传动设备。而蜗轮蜗杆承载能力强、通用性强，更适用于大负载场合，比如减速机、升降机、工业机械等。

微型丝杠或主要以滚珠丝杠为主。参考 ILDA、R2 手的结构，均采用了滚珠丝杠。我们认为滚珠丝杠的传动效率高（一般为 85%~95%），同时加工成本较低，将会成为微型丝杠的主流选择。

微型行星滚柱丝杠性能更好，部分方案也会采用。行星滚柱丝杠的传力接触面积大大增加，具有更大的承载力和更高的机械刚性。在相同丝杠直径下，行星滚柱丝杠比滚珠丝杠承载能力提高 6~15 倍；相同负载下比滚珠丝杠节省 1/3 空间。由于滚珠丝杠的滚珠在运行时会发生碰撞，而行星滚柱丝杠避免了这个问题，因此行星滚柱丝杠还可以输出更高的直线速度。行星滚柱丝杠转速可达 6000r/min，直线速度可 2m/s 以上，加速度可达 1000rad/s² 以上。传动效率方面，虽然行星滚柱丝杠是滚动摩擦，但由于加工误差及表面粗糙度等原因，传动效率低于滚珠丝杠，一般低于 90%，在润滑良好的情况下可以达到 90%。

图表 41：行星滚柱丝杠的指标优势

指标	优势
承载力强	相同丝杠直径下，比滚珠丝杠承载力提高 6-15 倍

节省空间	相同负载下，比滚珠丝杠节省 1/3 空间
传动效率好	润滑良好情况可达到 90%，噪声小
速度和加速度好	转速可达 6000r/min，直线速度 2m/s，加速度 1000rad/s ²
定位精度	定位精度优于 1μm
寿命	比同类滚珠丝杠提高 10 倍以上
工作环境温度范围	比同类滚珠丝杠提高 2 倍以上

资料来源：精密行星滚柱丝杠的传动特性（李凯等），前瞻产业研究院，五矿证券研究所

行星滚柱丝杠对加工精度要求高、制造难度大。丝杠加工工艺有冷轧、旋风铣、硬车、砂轮磨削等。其中冷轧精度最低，一般不能满足精度要求。砂轮磨削精度最高，但生产效率低。硬车、旋风铣工艺虽然牺牲了一定精度，但相比磨削方式的生产效率显著提升。丝杠在加工过程中，需多次加工、时效处理、修磨中心孔等以提高精度。行星滚柱丝杠因空间形状复杂加工难度更高。

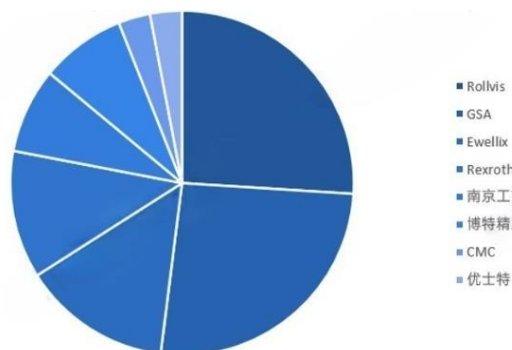
行星滚柱丝杠此前多进口，价格高昂且定制化。由于行星滚柱丝杠的制造工艺和技术要求相对较高，涉及高低温时效处理、淬火等多个复杂环节，造价成本也相对较高，过去以 Rollvis、GSA、Ewellix（均为舍弗勒旗下公司）等公司在国内占据主要市场，国产替代空间广阔。

图表 42：全球代表性行星滚柱丝杠企业区域分布



资料来源：前瞻产业研究院，五矿证券研究所

图表 43：中国行星滚柱丝杠市场竞争格局



资料来源：前瞻产业研究院，五矿证券研究所

灵巧手使用的微型丝杠要求更高。微型丝杠的螺纹非常细密，能够提供非常平稳的运动和精准的控制。微型丝杠由于尺寸小，工作环境相对精密，对材料的要求特别高。微型丝杠通常采用高硬度的合金钢或者不锈钢，能够在长期使用中保持高精度和耐磨性。其精密结构导致安装和维护需更高精度对准和细致保养，稍有偏差即影响性能。国内微型丝杠的生产厂商包括诺仕机器人、因时机器人、新剑传动、KGG 等。

- 诺仕机器人已研发出全球最微型的行星滚柱丝杠，其丝杠直径仅为 2mm，螺母直径 6mm，可以极大增加线性执行器空间利用率，为灵巧手等狭小空间精确控制提供线性执行器方案。
- 因时机器人已经能够实现螺母直径 10mm 以内的微型行星滚柱丝杠量产，并将这项技术应用到了灵巧手的驱动设计中，既保证了微型伺服电缸更小的体积，同时实现了更大的推拉力。
- KGG 可以生产轴径 4mm 的行星滚柱丝杠，负载可达 1000N；滚珠丝杠轴径仅 1.8mm，C3/C5/C7 精度均可定制。

图表 44：灵巧手用的微型行星滚柱丝杠



资料来源：诺仕机器人，五矿证券研究所

图表 45：灵巧手微分行星滚柱丝杠



资料来源：新剑传动，五矿证券研究所

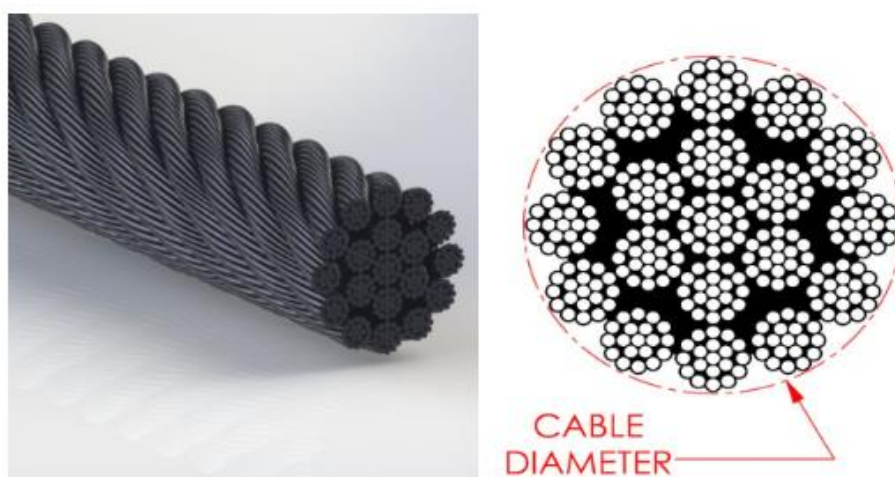
腱绳：绳驱方案的短板所在

腱绳是目前绳驱方案的瓶颈之一。灵巧手腱绳需要高强度与耐久性、抗蠕变、较小的折弯半径、抗腐蚀、良好的柔韧性等。目前腱绳的主流方案包括钢丝绳和超高分子量聚乙烯纤维（UHMWPE）两类。两种方案各有优劣，最终选择尚无定论。目前来看，钢丝绳在大负载领域表现出较好的适应性；UHMWPE 方案则适用于高自由度、低负载的灵巧手。

钢丝绳常见的材料有碳素钢丝绳、不锈钢钢丝绳、镀锌钢丝绳、合金钢丝绳等，钢丝绳通常用多股绞合形成线缆，以达到更优的性能。在手术机器人领域通常采用钨钢丝绳，具有优异的断裂强度和超长的循环寿命。

钢丝绳的优点在于摩擦小，不仅没有内摩擦，而且滑动表面的摩擦系数较小。但钢丝绳的缺点也很明显：1) 钢丝绳末端难以固定；2) 钢丝绳不能承受较小的回转半径；3) 钢丝绳强度较低，相同直径的情况下所能承受的最大载荷远低于高分子纤维绳；4) 钢丝绳寿命较短。

图表 46：机器人用钢丝绳



资料来源：江苏贝泽精密，五矿证券研究所

超高分子量聚乙烯纤维（UHMWPE）是由超高分子量聚乙烯（分子量 100 万以上）通过凝胶纺丝法制得的纤维。20 世纪 30 年代 Staudinger 教授指出高强高模纤维的理想结构应该是大分子链无限长且以伸直链结晶存在。从分子结构看，UHMWPE 纤维是接近理论极限强度的最理想的高聚物。

图表 47：聚乙烯的分类

通用名称	低密度聚乙烯	直链低密度聚乙烯	高密度聚乙烯	超高分子量聚乙烯
	LDPE	LLDPE	HDPE	UHMW-PE
密度 [kg/m ³]	910-930	910-930	940	940
熔点 [°C]	105-110	110-125	125-137	135-140
透明性	高 ← → 低			
弯曲模量 [MPa]	约10 ²	10 ² -10 ³	≥10 ³	
分子结构	 有许多长支链的 支化结构	 有许多支链的 直链结构	 支链短且少的 直链结构	 无支链的 长直链结构
用途例	·包装材料 ·农用薄膜 ·电线护套	·薄膜 ·层压板	·集装箱 ·洗涤剂容器 ·工业薄膜	·锂离子电池分隔膜 ·齿轮、阀门 ·高强度纤维

资料来源：mitsui chemicals, 五矿证券研究所

超高分子量聚乙烯纤维（UHMWPE）是人类目前能合成的高强度的物质，与碳纤维、芳纶纤维一起被誉为世界三大特种纤维。UHMWPE 具备优异的性能。以荷兰帝斯曼集团集团的 UHMWPE 产品 Dyneema 为例：

- 在相同重量的基础上，Dyneema 的强度是钢丝的 15 倍。
- 用 Dyneema 制成的绳索比钢丝绳轻 8 倍，可以漂浮在水中
- Dyneema 是疏水性的，不吸水。
- Dyneema 是化学惰性的，在干燥、潮湿、含盐和潮湿的条件下性质稳定。
- Dyneema 暴露在紫外线下时仍能保持性能。

UHMWPE 具备高强高模特点。纤维的强度可以用自由断裂长度表示。自由断裂长度是指纤维、绳索自由吊挂时，因自身质量而断裂的理论长度。自由断裂长度对应材料的强度，与粗细无关。UHMWPE 的自由断裂长度理论值达到 400km，是芳纶纤维的 1.4 倍。UHMWPE 纤维还具备良好的弯曲性能，能在不开裂或断裂的情况下进行任何形式的织造，而玻璃纤维、碳纤维和芳纶纤维的弯曲性能较差。

图表 48：高性能纤维对比

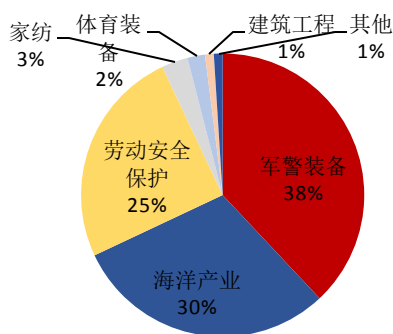
纤维类型	密度 (g/cm ³)	抗张强度 (GPa)	初始模量 (GPa)	比抗张强度	比抗张模量	断裂伸长率 (%)
UHMWPE纤维	0.97	4	165	4.12	170	≤5.0
普通PE纤维	0.94	0.77	8.64	0.47	9.2	≤20
高强聚酯	1.38	0.86	19.59	0.62	14.2	≤12
高强聚酰胺	1.14	0.85	8.05	0.75	6.6	≤20
聚丙烯腈	0.9	0.73	5.2	0.88	4.7	≤20
高强PVA	1.32	2	40	1.52	30.3	≤4.9
PPTA	1.44	3.6	132	2.5	91.7	≤3.5
PBO	1.59	5.8	270	3.65	170	≤3.0
聚芳酰胺	1.5	3	120	2	80	≤3.5
碳纤维	1.75	2.5	210	1.43	120	≤1.4
钢丝	7.86	1.7	210	0.22	26.7	≤1.1

资料来源：《高性能纤维》（朱美芳、周哲），五矿证券研究所

UHMWPE 优势在于强度高，但在耐高温、抗蠕变性能上还有所欠缺。由于 UHMWPE 分子结构简单、分子间无氢键作用，并且分子间的范德华力只有色散力，导致分子间作用力小，容易滑移造成蠕变。长时间使用后灵巧手精度会有所下降。

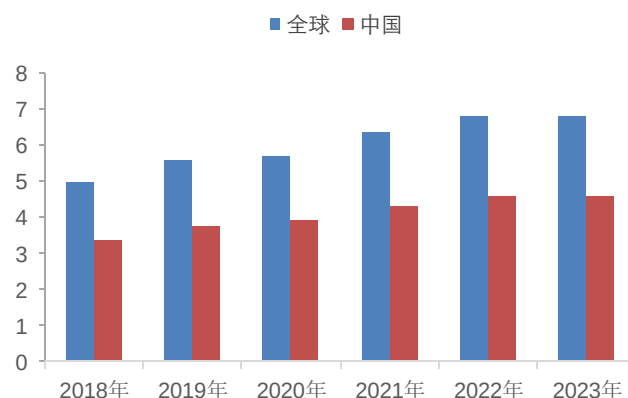
UHMWPE 被广泛运用于绳索、网、鱼线、防护装备、加固材料等领域。2023 年中国 UHMWPE 纤维需求量达 3.38 万吨，占全球需求的 61% 以上，2018~2023 年 CAGR 约 14.6%。国内 UHMWPE 主要应用领域中，军警装备、海洋产业和劳动安全防护三者占比分别为 38%、30% 和 25%。此外，UHMWPE 纤维在家纺、体育装备和建筑工程等行业也有少量应用。

图表 49：UHMWPE 纤维的应用领域



资料来源：超高分子量聚乙烯纤维产业现状及未来趋势（闫海燕），五矿证券研究所

图表 50：UHMWPE 产能（万吨）



资料来源：超高分子量聚乙烯纤维产业现状及未来趋势（闫海燕），五矿证券研究所

UHMWPE 已经基本实现国产化，性能达到国际领先水平。截至 2023 年，中国 UHMWPE 产能占全球比例超过 60%。目前国内 UHMWPE 纤维已实现产业化的产品主要集中在强度为 35cN/dtex 左右的产品，强度大于 40cN/dtex 以上的超高强、耐热抗蠕变、高耐切割等功能性纤维产品仍缺乏。海外龙头凭借深厚的技术积淀，仍具有较强的实力。中国企业将在高端领域内继续突破。南山智尚自主研发的“抗蠕变超高分子量聚乙烯纤维用纺丝液及其制备方法”专利，有效解决了传统 UHMWPE 纤维长期使用中的松弛问题，显著提升了产品稳定性和耐用性。其纤维拉伸强度达 42cN/dtex，处于国内第一梯队，接近国际龙头水平。

图表 51：中国超高分子量聚乙烯十年发展对比

型号	2010	2020
产业规模	7800 吨/年	34700 吨/年
产能利用率	51%	62%
市场份额	86%	98%
技术水平	☆☆	☆☆☆☆
装备国产化率	<50%	>95%
与国际领先水平差距	10-15 年	<3 年

资料来源：我国超高分子量聚乙烯纤维的发展现状与建议（吕佳滨等），五矿证券研究所

人形机器人灵巧手腱绳用量显著。灵巧手腱绳用量和自由度、传动方案有关。如果采用类似 Robonaut2 方案，1 个主动自由度只需要 1 根腱绳。如果采用 DLR Hand Arm System 的方案，每个主动自由度需要 2 根腱绳来控制。我们认为，DLR Hand Arm System 的方案成本偏高。对于量产方案，1 个主动自由度搭配 1 根腱绳的方案更具经济性。以单手 17 个主动自由度计算，1 个人形机器人需要 34 根腱绳。单台机器人的腱绳价值量在 2000 元-4000 元的区间。假设人形机器人年产量 100 万台/年，其中 60% 采用绳驱方案，对应市场规模 12~24 亿元/年。

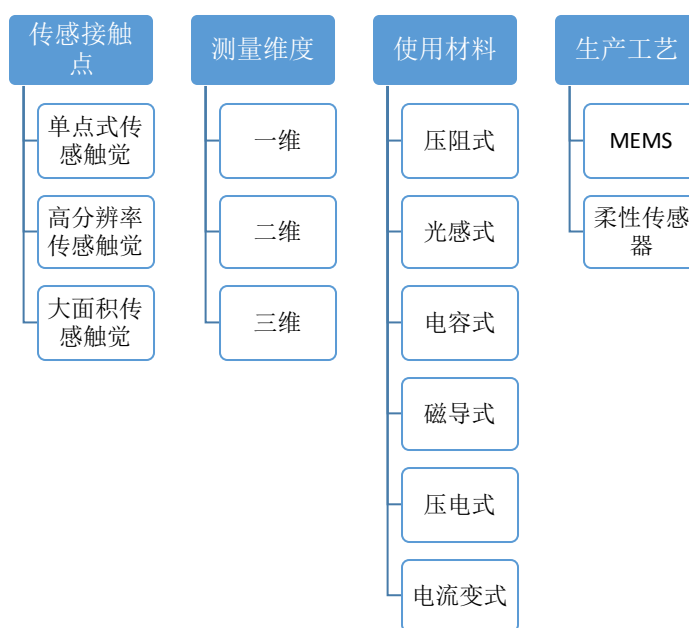
触觉传感器：稀缺的价值增量环节

严格来说，灵巧手的传感器包括内部传感器和外部传感器。内部传感器主要是感应灵巧手内部的信号，监测灵巧手的工作状态，比如位置传感器、力/力矩传感器、温度传感器。外部传感器主要采集外部的信号，监测和目标物体的交互状态，当前主要为触觉传感器、接近觉传感器。本章节说的传感器主要是触觉传感器。

人类手部有 17000 多个感官单元，可以提供力度、纹理、温度、被抓物体的硬度等信息。通过这些外部信息，人手可以建立信息闭环，甚至可以实现“盲操作”。人手的灵巧操作非常依赖于这一套感知系统，因此丰富的传感器是实现灵巧操作不可或缺的要素。

从广义的方面来说，触觉技术主要包括了接触感知、压力感知、滑感知、刚度感知、冷热感知。当前阶段，机器人的触觉传感器主要为压力感知和接近觉感知。

图表 52：触觉传感器的分类



资料来源：机械手触觉技术研究发展综述（王宏民等），五矿证券研究所

当前主流传感器以 MEMS 工艺为主。MEMS（Micro-Electro-Mechanical System）是一种微型而精密的机械系统，它将微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路等集成于一块或多块芯片上。MEMS 传感器具有体积小、重量轻、成本低、功耗低、可靠性高、适于批量化生产、易于集成和实现智能化的特点。

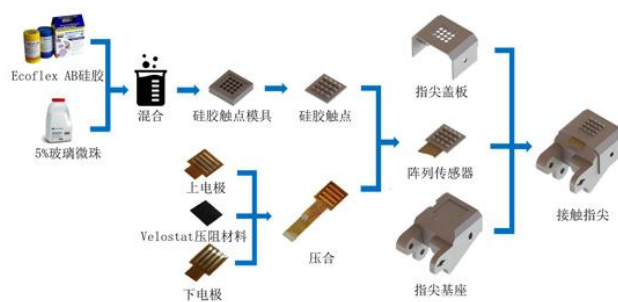
MEMS 传感器包括压阻式、电容式、压电式、光电式（视触觉）等。当前压阻式传感器为行业主流，其优点包括灵敏度高、分辨率高、技术成熟、成本较低。视触觉传感器（Vision-Based Tactile Sensor, VBTS）也逐步受到关注。

图表 53：帕西尼的 mems 传感器



资料来源：帕西尼， 五矿证券研究所

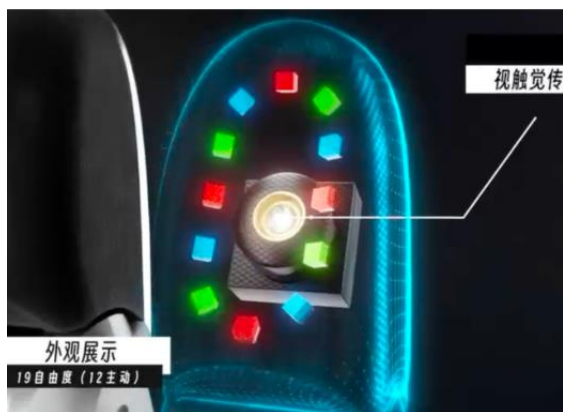
图表 54：某压阻式传感器制作工艺流程图



资料来源：基于阵列式压力传感器的触觉感知方法研究（李颖鸿）， 五矿证券研究所

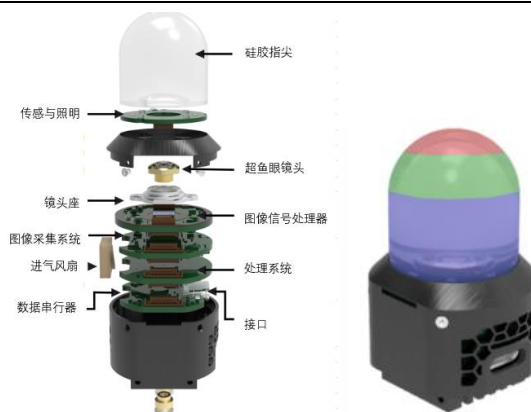
视觉传感器原理主要是利用相机接收表面的形变信息来实现对外界环境的感知，能够实时反馈与接触物体的压力、形状、纹理等信息。视觉传感器的代表是 GelSight 与 Meta AI 推出的 Digit 360。Digit 360 是一款指尖形状的全向视觉传感器，配备了超过 18 种传感功能，是真正的多模态触觉传感器（可以检测空间细节的微小变化，感应力小至 1 mN，几何形状低至 7 μ m，振动高达 9Khz，热量，甚至气味）。

图表 55：智元机器人的视觉传感器



资料来源：智元机器人， 五矿证券研究所

图表 56：digit 360 视觉传感器



资料来源：欣百特科技， 五矿证券研究所

除 MEMS 传感器外，柔性触觉传感器是近年兴起的另一方向。柔性触觉传感器又称电子皮肤，是利用柔性材料的物理特性，将外部的力学量转换为电信息，从而实现对触觉感知的传感器产品。柔性电子皮肤以聚二甲硅氧烷 PDMS、聚乙烯醇 PVA 等柔性材料为基底，以碳纳米管、石墨烯、导电聚合物等为敏感材料，采用微纳加工技术制备而成，能贴合人体皮肤或机器人复杂曲面。而传统 MEMS 传感器采用半导体工艺生产和封装，是刚性结构。

与 MEMS 传感器类似，柔性触觉传感器可以分为压阻式、电容式、压电式、摩擦电式等。其中电阻式和电容式技术成熟、成本低，成为当前主流方案。

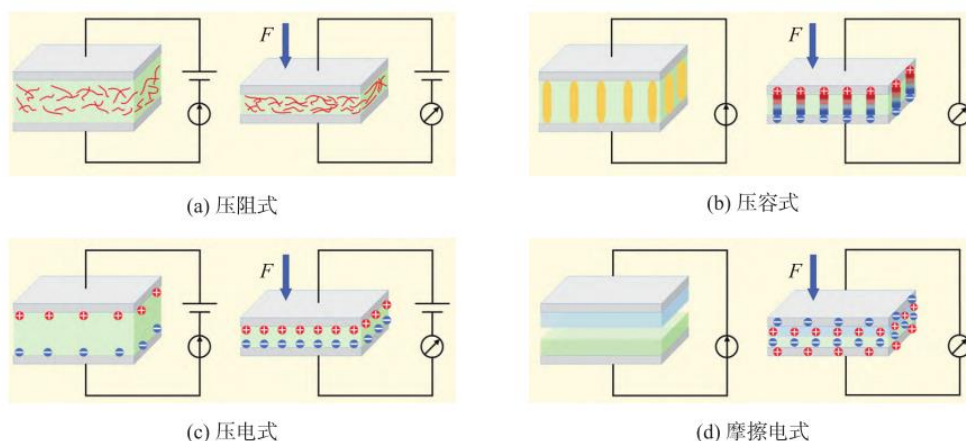
图表 57：不同原理柔性触觉传感器对比

	原理	优点	缺点
压阻式	使用压敏电阻作为压阻材料，在受到应力作用时，应力改变载流子数量，载流子数量变化改变电阻率，电阻率随外界压力刺激发生变化	较高的灵敏度、过载承受力强、噪音干扰小、结构简单、成本低	体积大、可重复性差、温度敏感、滞后
压容式	外力作用时，电容触觉传感器极板间相对位置发生变化，从而导致其电容量发生变化	线性度好、成本低、实时性高、灵敏度高、功耗低	稳定性差、测量电路复杂

压电式	施加外力时，压电材料结构会变形，负离子和阳离子的电荷中心被分离，形成电偶极子，导致压电势的形成	灵敏度高、动态特性好、响应时间看、结构简单	空间分辨率差、仅适用动态力检测
摩擦电	指两种不同电负性材料在接触带电的过程中会在两种材料上形成相反的静电荷，因此物理表面接触和两种材料通过接触带电作用产生电荷转移。	制作成本低、结构简单、输出电压高、高灵敏度、监测范围宽、响应速度快	只能监测动态；对放大电路性能有较高要求

资料来源：柔性触觉传感器智能感知技术与应用研究进展（尹宝凡等），五矿证券研究所

图表 58：四种典型柔性触觉传感器示意图



资料来源：柔性触觉传感器智能感知技术与应用研究进展（尹宝凡等），五矿证券研究所

我们看好触觉传感器/电子皮肤方向的机会。

首先，触觉是实现灵巧操作不可或缺的要素，触觉传感器重要性凸显。

其次，当前触觉传感器主要在指尖，未来有望覆盖手掌、整手，使用量将大幅提升。预计未来电子皮肤单机价值量有望达到 3000~4000 元/台。按人形机器人出货量 100 万台/年估算，对应市场规模 30~40 亿元/年。

再次，触觉传感器/电子皮肤技术壁垒高，厂商跨界切入难度较大。当前灵巧手行业主要厂商包括他山科技、帕西尼、能斯达、墨现科技等。各厂商具备自己的技术特点，在细分领域形成优势，进行差异化竞争。比如他山科技采用多对的电容传感器，再加以力的识别结构，可以很好地做三维力的学习，2024 年出货触觉传感器 1 万颗以上。帕西尼 PX-6AX gen2 触觉传感器，采用电磁式技术路线，可捕捉 15 种多维触觉感知信息，可以测量法相及切向力，空间分辨率 1mm，精度 1%FS，实现 0.01N 的精密识别。墨现科技的柔性传感器结构简单，厚度最小可以做到 0.2mm，一个指尖可以覆盖 100 个感应点甚至更多。

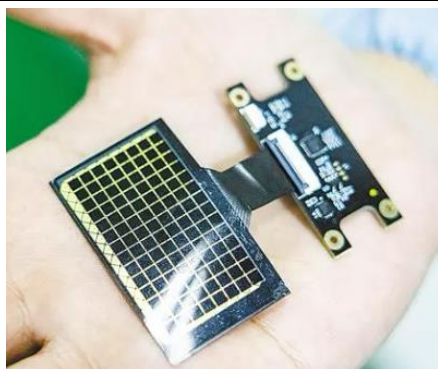
图表 59：部分触觉传感器企业

公司名称	成立时间	公司简介	技术方案
他山科技	2017	拥有全球领先的 AI 触感知专用芯片及触觉感知算法。采用多对的电容传感器，2024 年出货触觉传感器 1 万颗以上。	电容式
帕西尼	2021	PX-6AX gen2 触觉传感器，采用电磁式技术路线，可捕捉 15 种多维触觉感知信息，可以测量法相及切向力，空间分辨率 1mm	磁电式
能斯达	2013	专注于柔性电子技术的研发与创新，确立了柔性压力传感器、柔性压阻、压电、温	

		柔性压电传感器、柔性织物、柔性应变传感器、柔性温湿度传感器、柔性热敏传感器、柔性电容传感器七大产品系列	湿度、电容
墨现科技	2021	传感器厚度最小可以做到 0.2mm，一个指尖可以覆盖 100 个感应点甚至更多，最小触发力度仅 5g。	解耦的渗透式柔性传感器
华威科	2011	湖北省专精特新中小企业。公司由中国科学院能有伦院士发起成立	柔性传感器
福莱新材	2009	福莱新材发布了柔性传感器新技术和产品。从海外引进了国家级、省级人才共 3 名，主要围绕柔性传感器设计、工艺、硬件、软件进行研究开发。	压阻式柔性传感器

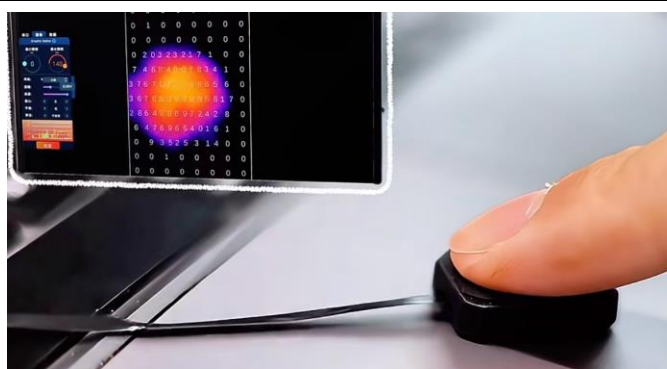
资料来源：他山科技、帕西尼、能斯达、新华社、墨现科技、华威科、福莱新材，五矿证券研究所

图表 60：华威科的电子皮肤



资料来源：中国光谷公众号，五矿证券研究所

图表 61：墨现科技的灵巧手指尖传感器



资料来源：墨现科技，五矿证券研究所

图表 62：福莱新材的柔性传感器



资料来源：福莱新材，上海证券报，五矿证券研究所

图表 63：他山科技触觉传感器芯片



资料来源：他山科技，五矿证券研究所

电子皮肤目前正处于从实验室走向产业化的初期阶段。从性能角度，电子皮肤的灵敏度、分辨率等性能已有较大提升，但大面积阵列化部署时，面临着高成本、拼接问题、电路连通性差等难题。

投资建议

- 1、灵巧手是人形机器人区别于工业机器人的核心价值所在，重要性凸显。同时高度灵活拟人的灵巧手也是产业链当前瓶颈。优质灵巧手公司具备高壁垒和稀缺性，可以给予适当的估值溢价。
- 2、建议关注：1) 深耕精密传动系统，具备灵巧手整体设计能力和一体化供应能力的兆威机

电；2) 具备热处理、精密机加工能力，布局行星滚柱丝杠和微型丝杠的五洲新春；3) 电机控制芯片环节的峰岷科技。

风险提示

- 1、产业量产进度不及预期；
- 2、技术路线变化的风险；
- 3、产品价格大幅下降的风险。

分析师声明

作者在中国证券业协会登记为证券投资咨询(分析师)，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。作者保证：(i) 本报告所采用的数据均来自合规渠道；(ii) 本报告分析逻辑基于作者的职业理解，并清晰准确地反映了作者的研究观点；(iii) 本报告结论不受任何第三方的授意或影响；(iv) 不存在任何利益冲突；(v) 英文版翻译若与中文版有所歧义，以中文版报告为准；特此声明。

投资评级说明

投资建议的评级标准		评级	说明
报告中投资建议所涉及的评级分为股票评级和行业评级（另有说明的除外）。评级标准为报告发布日后 6 到 12 个月内的相对市场表现，也即以报告发布日后的 6 到 12 个月内的公司股价(或行业指数)相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准。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；美国市场以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	股票评级	买入	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报在 20%及以上；
		增持	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报介于 5%~20%之间；
		持有	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报介于-10%~5%之间；
		卖出	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报在-10%及以下；
		无评级	预期对于个股未来 6 个月市场表现与基准指数相比无明确观点。
	行业评级	看好	预期行业整体回报高于基准指数整体水平 10%以上；
		中性	预期行业整体回报介于基准指数整体水平-10%~10%之间；
		看淡	预期行业整体回报低于基准指数整体水平-10%以下。

一般声明

五矿证券有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会批复的证券投资咨询业务资格。本公司不会因接收人收到本报告即视其为客户，本报告仅在相关法律许可的情况下发放，并仅为提供信息而发放，概不构成任何广告。本报告的版权仅为本公司所有，未经本公司书面许可，任何机构和个人不得以任何形式对本研究报告的任何部分以任何方式制作任何形式的翻版、复制或再次分发给任何其他人。如引用须联络五矿证券研究所获得许可后，再注明出处为五矿证券研究所，且不得对本报告进行有悖原意的删节和修改。在刊载或者转发本证券研究报告或者摘要的同时，也应注明本报告的发布人和发布日期及提示使用证券研究报告的风险。若未经授权刊载或者转发本报告的，本公司将保留向其追究法律责任的权利。若本公司以外的其他机构（以下简称“该机构”）发送本报告，则由该机构独自为此发送行为负责。

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的价格、价值及投资收入或将产生波动；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；本公司不保证本报告所含信息保持在最新状态。同时，本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本报告的作者是基于独立、客观、公正和审慎的原则制作本研究报告。本报告的信息均来源于公开资料，本公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证，也不保证所包含信息和建议不发生任何变更。本公司已力求报告内容的客观、公正，但文中的观点、结论和建议仅供参考，不包含作者对证券价格涨跌或市场走势的确定性判断。在任何情况下，报告中的信息或意见不构成对任何人的投资建议，投资者据此做出的任何投资决策与本公司和作者无关。在任何情况下，本公司、本公司员工或者关联机构不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也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。本公司及作者在自身所知情范围内，与本报告中所评价或推荐的证券不存在法律法规要求披露或采取限制、静默措施的利益冲突。

五矿证券版权所有。保留一切权利。

特别声明

在法律许可的情况下，五矿证券可能会持有本报告中提及公司所发行的证券并进行交易，也可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问和金融产品等各种金融服务。因此，投资者应当考虑到五矿证券及/或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突，投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一参考依据。

联系我们

上海	深圳	北京
地址：上海市浦东新区陆家嘴街道富城路 99 号震旦国际大厦 30 楼 邮编：200120	地址：深圳市南山区滨海大道 3165 号五矿金融大厦 23 层 邮编：518035	地址：北京市东城区朝阳门北大街 3 号五矿广场 C 座 3F 邮编：100010

Analyst Certification

The research analyst is primarily responsible for the content of this report, in whole or in part. The analyst has the Securities Investment Advisory Certification granted by the Securities Association of China. Besides, the analyst independently and objectively issues this report holding a diligent attitude. We hereby declare that (1) all the data used herein is gathered from legitimate sources; (2) the research is based on analyst's professional understanding, and accurately reflects his/her views; (3) the analyst has not been placed under any undue influence or intervention from a third party in compiling this report; (4) there is no conflict of interest; (5) in case of ambiguity due to the translation of the report, the original version in Chinese shall prevail.

Investment Rating Definitions

The rating criteria of investment recommendations The ratings contained herein are classified into company ratings and sector ratings (unless otherwise stated). The rating criteria is the relative market performance between 6 and 12 months after the report's date of issue, i.e. based on the range of rise and fall of the company's stock price (or industry index) compared to the benchmark index. Specifically, the CSI 300 Index is the benchmark index of the A-share market. The Hang Seng Index is the benchmark index of the HK market. The NASDAQ Composite Index or the S&P 500 Index is the benchmark index of the U.S. market.	Ratings		Definitions
	Company Ratings	BUY	Stock return is expected to outperform the benchmark index by more than 20%;
		ACCUMULATE	Stock relative performance is expected to range between 5% and 20%;
		HOLD	Stock relative performance is expected to range between -10% and 5%;
		SELL	Stock return is expected to underperform the benchmark index by more than 10%;
		NOT RATED	No clear view of the stock relative performance over the next 6 months.
	Sector Ratings	POSITIVE	Overall sector return is expected to outperform the benchmark index by more than 10%;
		NEUTRAL	Overall sector expected relative performance ranges between -10% and 10%;
		CAUTIOUS	Overall sector return is expected to underperform the benchmark index by more than 10%.

General Disclaimer

Minmetals Securities Co., Ltd. (or "the company") is licensed to carry on securities investment advisory business by the China Securities Regulatory Commission. The Company will not deem any person as its client notwithstanding his/her receipt of this report. The report is issued only under permit of relevant laws and regulations, solely for the purpose of providing information. The report should not be used or considered as an offer or the solicitation of an offer to sell, buy or subscribe for securities or other financial instruments. The information presented in the report is under the copyright of the company. Without the written permission of the company, none of the institutions or individuals shall duplicate, copy, or redistribute any part of this report, in any form, to any other institutions or individuals. The party who quotes the report should contact the company directly to request permission, specify the source as Equity Research Department of Minmetals Securities, and should not make any change to the information in a manner contrary to the original intention. The party who re-publishes or forwards the research report or part of the report shall indicate the issuer, the date of issue, and the risk of using the report. Otherwise, the company will reserve its right to taking legal action. If any other institution (or "this institution") redistributes this report, this institution will be solely responsible for its redistribution. The information, opinions, and inferences herein only reflect the judgment of the company on the date of issue. Prices, values as well as the returns of securities or the underlying assets herein may fluctuate. At different periods, the company may issue reports with inconsistent information, opinions, and inferences, and does not guarantee the information contained herein is kept up to date. Meanwhile, the information contained herein is subject to change without any prior notice. Investors should pay attention to the updates or modifications. The analyst wrote the report based on principles of independence, objectivity, fairness, and prudence. Information contained herein was obtained from publicly available sources. However, the company makes no warranty of accuracy or completeness of information, and does not guarantee the information and recommendations contained do not change. The company strives to be objective and fair in the report's content. However, opinions, conclusions, and recommendations herein are only for reference, and do not contain any certain judgments about the changes in the stock price or the market. Under no circumstance shall the information contained or opinions expressed herein form investment recommendations to anyone. The company or analysts have no responsibility for any investment decision based on this report. Neither the company, nor its employees, or affiliates shall guarantee any certain return, share any profits with investors, and be liable to any investors for any losses caused by use of the content herein. The company and its analysts, to the extent of their awareness, have no conflict of interest which is required to be disclosed, or taken restrictive or silent measures by the laws with the stock evaluated or recommended in this report.

Minmetals Securities Co. Ltd. 2019. All rights reserved.

Special Disclaimer

Permitted by laws, Minmetals Securities Co., Ltd. may hold and trade the securities of companies mentioned herein, and may provide or seek to provide investment banking, financial consulting, financial products, and other financial services for these companies. Therefore, investors should be aware that Minmetals Securities Co., Ltd. or other related parties may have potential conflicts of interest which may affect the objectivity of the report. Investors should not make investment decisions solely based on this report.

Contact us

Shanghai

Address: 30/F, Zhendan International Building, No.99 Fucheng Road, Lujiazui Street, Pudong New District, Shanghai
Postcode: 200120

Shenzhen

Address: 23F, Minmetals Financial Center, 3165 Binhai Avenue, Nanshan District, Shenzhen
Postcode: 518035

Beijing

Address: 3/F, Tower C, Minmetals Plaza, No.3 Chaoyangmen North Street, Dongcheng District, Beijing
Postcode: 100010