

证券研究报告

2025年06月23日

行业报告：行业专题研究

机械设备

灵巧手深度梳理——指尖跃动无垠星河，巧手编织璀璨经纬

作者：

分析师 朱晔 SAC执业证书编号：S1110522080001



行业评级：强于大市（维持评级）
上次评级：强于大市

请务必阅读正文之后的信息披露和免责申明

摘要

□ 为什么当下我们关注灵巧手？

- ①**行业趋势**——灵巧手能够灵活操作对象，关乎机器人通用泛化能力。人形机器人目前已经基本解决动力学问题，MPC控制方法使机器人腿足能力稳定、进入商业化初期，有望进入通用泛化任务阶段，关注灵巧手的感知、执行能力。行业头部企业特斯拉引领、各大厂商重点跟进灵巧手研发，为行业的重要边际变化。
- ②**价值量**——当前灵巧手在整机价值占比较大，约占特斯拉Optimus二代成本的17%，市场空间广大。**需求端**，灵巧手客户愿意付费的关键在于解决实际问题的能力，具备功能通胀的溢价空间。**成本端**，技术难+零件多+未量产导致成本高，我们测算17驱动+5传感连杆灵巧手BOM成本约5.18万元，驱动+传动占比64%、传感占比35%。
- ③**市场参与**——本体\灵巧手\零部件等环节均有广泛参与，有望推动技术快速发展+零部件快速降本。

□ 当前阶段灵巧手方案百花齐放

- **静态来看**，驱动+传动+传感构成灵巧手硬件方案，尚未完全形成共识，建议关注不变的基础关键零部件+关注新方案/趋势的增量。动态来看，灵巧手模块可参照汽车智驾模块，沿堆料竞赛→成本重构路径发展，当前为硬件堆料阶段，追求底层硬件能力提升，**中短期看堆料推动环节通胀，长期看降本带来灵巧平权**。
- 梳理市场上部分灵巧手产品，我们认为现阶段：①**自由度**，随驱动传动机构小型化、集成化，主动自由度增加、欠驱动走向全驱动；②**驱动方案**，电机选型主要为空心杯电机；③**传动方案**，刚性和柔性方案有分歧，国内偏好连杆/齿轮刚性传动，国外偏好腱绳柔性方案，小部分采用刚性+柔性混合方案。④**传感方案**，我们认为在堆料竞赛背景下感知通胀仍有望持续，目前来看触觉传感方案配置普及度较高，且为产品迭代增配的主要传感类型。

□ 堆料竞赛+路线分歧，建议关注灵巧手上游零部件环节

- **灵巧手整机环节**，建议关注：雷赛智能（机械组、电新组联合覆盖）、永创智能、祥鑫科技（机械组、电新组覆盖）、江苏雷利；
 - **驱动**——空心杯电机为主要选型，绕线为核心技术。建议关注：空心杯电机环节的鸣志电器、兆威机电；绕线设备环节的田中精机。
 - **传动**——技术路线存在分歧，关注高通用+大需求的基础传动件减速器、丝杠，以及高壁垒+高价值量的腱绳方案。
 - 1) **减速器**：行星齿轮减速器效率高、免维护、成本低，灵巧手小模数齿轮模数可达0.4~0.5mm，生产难度较大。建议关注：减速器环节的豪能股份（电新组覆盖）、中大力德，小模数齿轮环节的丰立智能（电新组覆盖）、夏厦精密，PEEK减速器环节的科达利（科盟创新，电新组覆盖）；
 - 2) **丝杠**：微型行星滚柱丝杠承载大、寿命长、响应快，加工重点在于螺纹，目前以磨床磨削为主，硬车床车削、旋风铣、冷轧亦有潜力。建议关注：微型丝杠环节的浙江荣泰（拟收购KGG，电新组覆盖）、雷迪克（拟收购TBG誉展精密）、鼎智科技、恒立液压、北特科技、贝斯特（汽车组覆盖），加工设备环节的华辰装备、浙海德曼、日发精机、秦川机床（汉江机床）、双林股份（科之鑫），PCBN加工刀具环节的沃尔德、华锐精密；
 - 3) **腱绳**：绳驱方案能提升控制精细度、空间利用率，应用案例中腱绳用量大、对材料要求高，主要有高分子的UHMWPE、钢帘线材料，链传动为新方案。建议关注：UHMWPE方案的南山智尚（轻纺组覆盖）、恒辉安防（轻纺组覆盖）、同益中，钢帘线方案的大业股份，链传动方案的征和工业。
 - **传感**——触觉传感方案配置度较高，路线出现一定程度收敛。建议关注：六维力传感器环节的柯力传感、安培龙（电新组覆盖），触觉/电子皮肤环节的福莱新材、汉威科技（机械组、通信组联合覆盖）。
- **风险提示**：人形机器人行业进展不及预期风险、机器人市场竞争加剧风险、灵巧手技术路线不确定性风险、贸易冲突超预期风险

1

为什么当下我们关注机器人灵巧手？

1.1. 为什么当下我们关注灵巧手? ——灵巧手&通用泛化能力

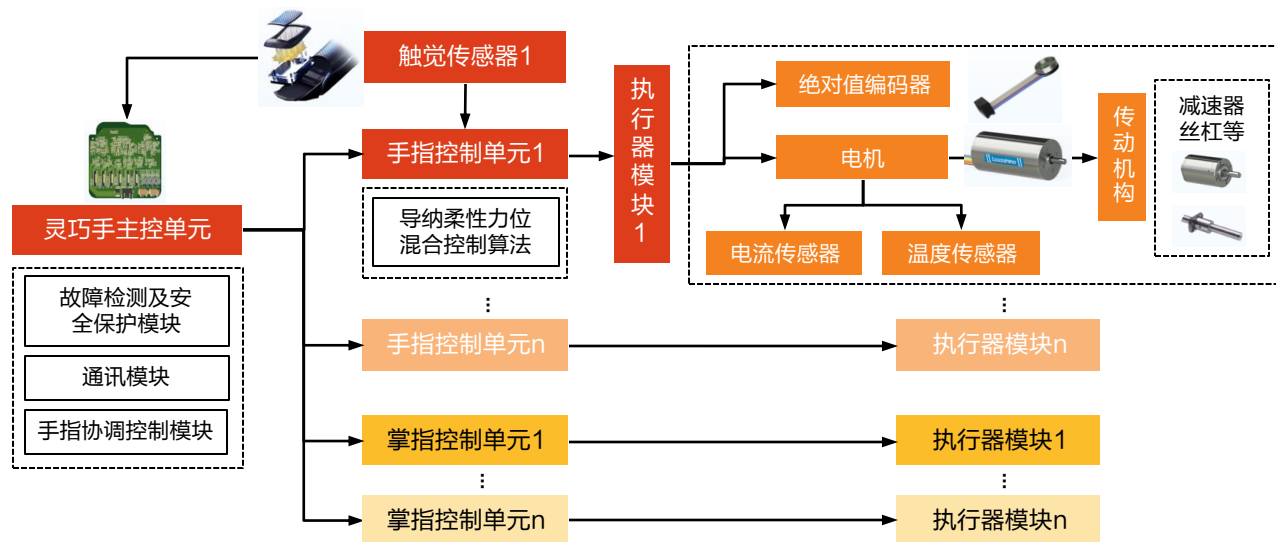
□ 灵巧手 = 驱动 + 传动 + 传感 + 控制

- **新型末端执行器，人机交互关键部分。**灵巧手是为多任务而研究开发的一种智能型通用机械手，灵巧的抓取是任务操作的先决条件。机器人灵巧手从结构和功能上参考人手，能够灵活操作对象，实现对物体的灵活抓取，满足多种工作需求。
- **一个典型的灵巧手系统的关键部分包括驱动、传动、传感和控制系统。**驱动系统负责提供动力，传动系统将这些动力转换为手指关节运动，然后触觉系统用于感知手部与外界物体的接触状态和力度，控制系统是通过算法和软件对驱动系统和传动系统进行控制。
 - **驱动系统：**赋予灵巧手运动能力并输出动力，驱动系统包括液压驱动、电机驱动、气压驱动、形状记忆合金驱动等类型。
 - **传动系统：**将驱动系统产生的动力转换为手指关节的运动，主要传动方式有连杆传动、齿轮传动以及腱绳传动等。
 - **传感系统：**包括触觉、力觉传感器等，用于感知手部与外界物体的接触状态和力度，以及手部自身的位置和运动状态。
 - **控制系统：**包括主控单元、掌指控制单元、手指控制单元等，主控单元获取外部指令信号、向手指控制系统发送驱动信号、手指控制单元控制手指运动。

图：灵巧手示意图



图：灵巧手核心部件及控制系统



1.1. 为什么当下我们关注灵巧手？——灵巧手&通用泛化能力

□ 灵巧手关乎机器人通用泛化能力，为机器人关键基础

- 灵巧手对于机器人执行泛化任务、使用人类工具能力有重要意义。通过使用仿人手的灵巧手，机器人能够使用各种专为人类设计的工具。人类手具备24自由度，灵巧手在17以上自由度时才能接近真实人手的功能，模拟人类手指的复杂运动。
 - 星动纪元发布的端到端原生机器人大模型ERA-42可实现五指灵巧手像人手一样灵活自如地使用多种多样、形态各异的工具完成上百种复杂操作任务，模型不需要任何预编程技能，完全基于强大的泛化和自适应力。
 - 据罗平团队论文《通用灵巧操作前沿探索》，在面对非固定化、非结构化的真实世界时，若需实现如同人类一般的通用操作，具身智能通用灵巧操作应当具备三大核心要素：低成本可拓展数据采集方案、强大的灵巧手操作平台、类人级具身智能操作模型。
 - 灵巧手/末端机构是机器人关键基础，国家发改委在2016年发布的《机器人产业发展规划（2016-2020）》和2024年发布的《“十四五”机器人产业发展规划》中均将多指灵巧手/智能灵巧末端执行器列为机器人关键零部件之一，与减速器、伺服系统、传感器、控制器并列。

表：国家机器人产业发展规划中灵巧手为关键零部件/基础

机器人产业发展规划 (2016-2020)	“十四五”机器人产业 发展规划
1、高精密减速器	1、高性能减速器
2、高性能伺服驱动系统	2、高性能伺服驱动系统
3、高速高性能控制器	3、智能控制器
—	4、智能一体化关节
4、传感器	5、新型传感器
5、末端执行器 重点开发抓取与操作功能的 多指灵巧手 ……	6、智能化末端执行器 研制能够实现智能抓取、柔性装配、快速更换等功能的 智能灵巧作业末端执行器 ……

图：人手骨骼模型及运动学简图

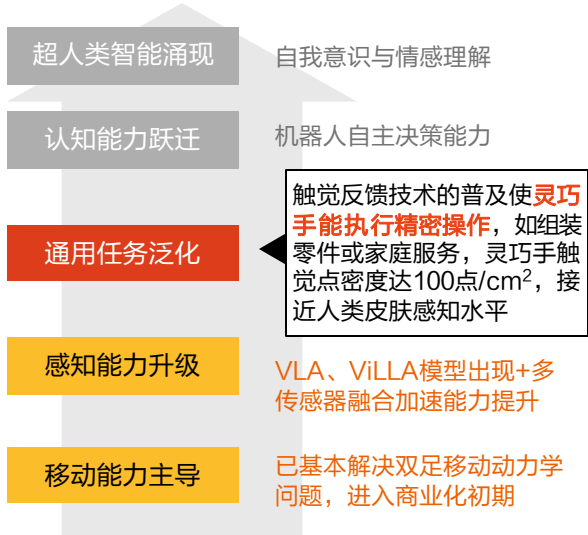


1.2. 为什么当下我们关注灵巧手? ——产业趋势&头部带动

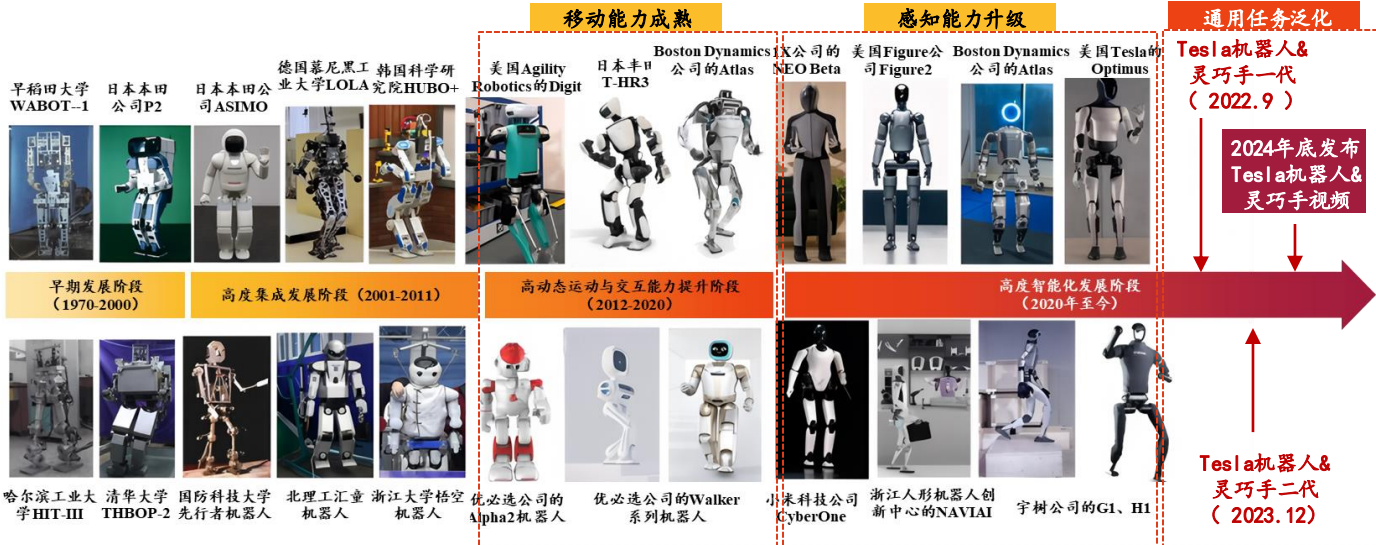
产业趋势过渡至手部, 重视头部企业引领作用

- 足部&感知取得进步, 逐渐侧重手部能力。过去30年机器人研究问题主要包括移动、操作、图像理解, 近十多年机器人在硬件、动力学控制、图像处理上取得进步, 目前已经基本解决人形机器人动力学问题, MPC (模型预测控制) 控制方法使机器人腿足能力稳定, 已进入商业化初期; 近三年机器人实现“具身智能”的突破, 可通过大数据、深度学习、LLM等理解指令、实现互动, VLA、ViLLA模型与多传感器融合技术加速感知能力进步。在移动能力成熟、感知能力升级后, 产业发展下一阶段或为实现通用泛化任务, 重点关注灵巧手的感知、执行能力。
- 重视特斯拉在灵巧手环节带动作用。特斯拉初代机器人Optimus及初代灵巧手于2022年9月发布, 仅具备基础挥手动作; 二代手于2023年12月发布, 具备11自由度、触觉, 能够完成叠衬衫、分拣物品、抓取鸡蛋等任务; 2024年底, 特斯拉发布第三代灵巧手视频, 具备22自由度, 可以完成接网球、弹奏乐器等高难度精细任务。我们认为, 行业领头羊特斯拉有望在灵巧手领域复刻在人体领域指引产业方向的作用, 灵巧手有望成为各大厂商后续重点研发定型模块, 是行业的重要边际变化。

图：机器人技术成熟度的五个阶段



图：机器人在行业趋势+头部带动下重点转向手部



1.3. 为什么当下我们关注灵巧手？——价值量&市场参与

□ 灵巧手高价值量且功能通胀，市场参与者众多

- 价值量：整机价值占比高，市场空间广阔。灵巧手模块在机器人整机中价值量占比较高，以特斯拉Optimus第二代为例，其灵巧手约6-7.3万元，相对整机35-43万元成本占比达17.3%。假设机器人整机量产单价约20万元、灵巧手配置数量不变、价值量占比保持17%，在特斯拉机器人整机50万出货量下，其灵巧手价值量将达到170亿元。
- 需求端：为实际能力付费，具备溢价空间。机器人和灵巧手当前主要为ToB产品，用于制造业工厂、仓库、餐饮等领域，**客户愿意付费的关键在于机器人/灵巧手解决实际问题的能力**。灵巧手在自由度、传感器等硬件方面的“堆料”能够提升功能性，推动环节通胀。以灵巧手为例，其10自由度标准版产品和20自由度Pro版产品价格分别为1.99、4.99万元，表观上看自由度翻倍推动价格上涨1.5倍；英国Shadow灵巧手具备24自由度、超百个传感器，售价达100-220万元。根据GRASP体系，人类手部能够实现约33种抓握类型，灵巧智能公司6.8万元19自由度产品已能够实现全部33种姿势；根据雷赛智能产品规划，其11、20、24自由度产品将分别能够实现20、26、33种手部动作姿势。

表：部分灵巧手自由度与能实现动作

公司	产品型号	自由度	主动DOF	最大荷载	动作	整机重量
帕西尼	DexH13 GEN2	13	-	5KG	抓/握/旋转/拿捏等	-
宇树科技	Dex3-1	7	-	20KG	抓取/放置	-
灵宝 CASBOT	Casbot 01	12	-	15KG	抓/握/挑/捻/搓/钩	-
魔法原子	MagicHand S01	11	-	20KG	抓/握	-
众擎机器人	SE01	6	-	-	抓取	-
灵巧智能	021量产版	19	12	5KG	33种	1KG
雷赛智能（含规划产品）	DH116	11	6	40KG	20种	490g
	DH2015	20	15	15KG	26种	650g
	DH2012	20	12	15KG	26种	550g
	DH2420	24	20	15KG	33种	450g

图：灵巧智能19自由度产品可实现33种抓握



1.3. 为什么当下我们关注灵巧手? ——价值量&市场参与

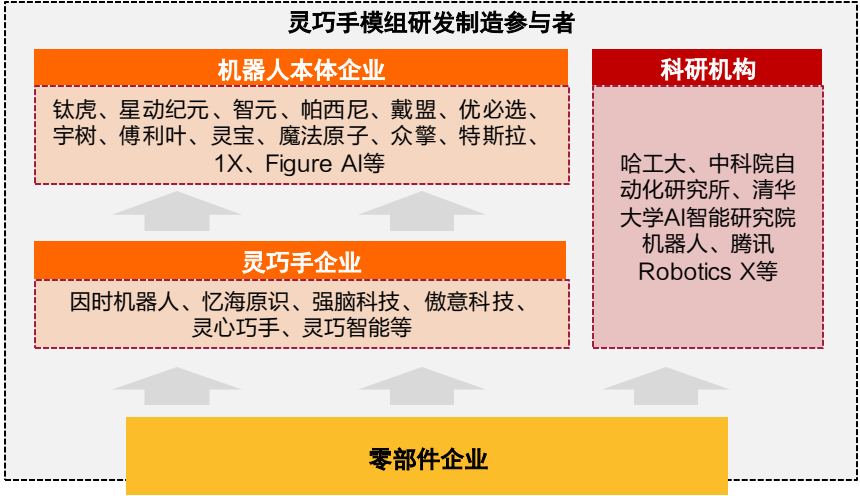
□ 灵巧手高价值量且功能通胀，市场参与者众多

- 灵巧手为高价值量环节，市场参与广泛。市场参与者包括本体企业、灵巧手企业、科研机构，也有部分零部件企业前向一体化，从灵巧手关键零部件切入模组环节，如兆威机电。梳理国内主要灵巧手市场参与者，我们认为各参与者或存在不同侧重点：
 - 科研机构：重点主要在于灵巧手自由度、负载能力等偏基础性能的方向；
 - 灵巧手企业：我们认为，由于其商业模式较局限于向下游提供产品、服务，部分企业一方面通过堆料打造高端demo用于展示技术实力和开发下游场景，如灵心巧手42DoF科研版、灵巧智能33手势产品，一方面推出综合考虑“成本-可靠性-量产-性能”的版本从而希望实现商业闭环，如灵心巧手0.99万元SE版；
 - 本体企业：主要用于配合本体研发，自由度配置上限相对于灵巧手企业较低，主流是6和12自由度；
 - 零部件企业：以兆威机电为例，其PR材料主要宣传驱动模组技术、传动模组寿命、感知、控制精度速度。

图：雷赛智能灵巧手解决方案产品族谱



图：灵巧手市场参与者众多



1.3. 为什么当下我们关注灵巧手？——价值量&市场参与

表：国内灵巧手市场公司与产品基本情况梳理

类型	公司	产品	代数	主要参数	技术特点	应用场景	价格
本体企业	星动纪元	星动XHAND1	第一代	12主动DoF，单指2 DoF，重1.1kg，最大80N握力，25kg负载，可感知温度、压力	全自驱、高自由度、高智能	工业制造、商业服务、家政康养	
	智元机器人	升级版SkillHand	第二代	19 DoF（12主动），负载5kg-30kg	视觉感知、高自由度	适用工业制造、家庭	
	帕西尼	DexH13 GEN2四指灵巧手	第二代	13 DoF，4指，5kg负载，0.01N力控，15N指尖力	多维触觉传感器 + AI 视觉系统	多场景灵巧操作	
	戴盟机器人	多维触觉感知五指灵巧手	第一代	6 个DoF，12 个关节	视触觉传感器	精准抓取，适用工业制造	
	优必选	Walker S1 灵巧手	第三代	6 DoF，6阵列式触觉压力传感器	具备全栈灵巧操作策略库	适用工业制造、家庭服务	
	宇树科技	Dex5-1五指灵巧手	第一代	20DoF，16DOA，负载4.5kg，12阵列触觉传感元	灵敏精准	抓取、放置，适用家庭、工业	
	傅利叶	GR-2灵巧手	第二代	DoF由初代的6个增加至12个		模拟人手自然运动，适用医疗、工业、服务、教育科研、家庭	
	灵宝 CASBOT	Casbot01灵巧手	第一代	12 DoF，重量800g，负载5-15kg	轻量与力量的统一	抓、握、挑、捻、搓、钩，适用工业、家庭、特种环境	
	魔法原子	MagicHand S01	第一代	11 DoF，力分辨率0.1N，负载5-20kg	高负载	工业、商业、家庭	
	众擎机器人	SE01灵巧手	第一代	单手6 DoF		抓取，适用科研教育、工业	
模组 / 零部件企业	钛虎机器人	灵巧手		6 DoF、5活动关节			1.98万
	因时机器人	RH56BFX、RH56DFX与FTP 系列工业版新品	2024/8	6主动DoF，12运动关节，重540g-790g，五指尖输出力1.5-3kg	精准触觉、超长寿命（百万次以上）、强劲抓力	家庭、助老助残、特种应用等	4.8-10 万元
	灵心巧手	Linker Hand 钛金版T10、T20	2025/2 第四版	工业版25-30DoF，科研版最高42DoF，负载5kg	超高自由度、高性价比、灵活性高、响应速度快、抓握力度大、精准抓取	工业、科研、教育、医疗等，支持二次开发	SE0.99万、标准版1.99万、Pro版4.99万
	灵巧智能	Dexhand021量产版	2025/2	19 DoF，负载5kg	高自由度、多模态、通用	高灵巧性和适应性，33 种抓握类型	首批 6.8 万
	傲意科技	ROHand	-	11关节，6主动DoF，单手指负载10kg，整手负载30kg	运动控制能力强、高准确度、快速响应	抓取、使用工具，适用家庭、医疗康养	
	大寰机器人	DH-5	2024/8	6主动DoF，11关节，重700g，单手指10N，整手负载5kg	多模态感知、小体积大负载、高自由度、服务、医疗、科研、危险环境	高精力控作业	
	兆威机电	ZW Hand	2024/11	17 DoF，15关节，单指DoF>3	首创指关节独立驱动技术		
	速腾聚创	Papert 2.0	2025/1	20 DoF，负载5kg，指尖指腹手掌上共14力传感器		操作螺丝刀、拿起鸡蛋，适用工业制造	
	强脑科技	Brainrobotics标准版		6主动DoF，10活动关节			10.8万
	哈工大			五指灵巧手重量1.2kg，具感知能力			
研究机构	中科院自动化研究所	Casia Hand		25 DoF			
	清华大学AI智能研究院智能机器人			12 DoF			
	腾讯Robotics X	TRX HAND		8关节			

资料来源：智东西公众号、亿欧网公众号等，天风证券研究所

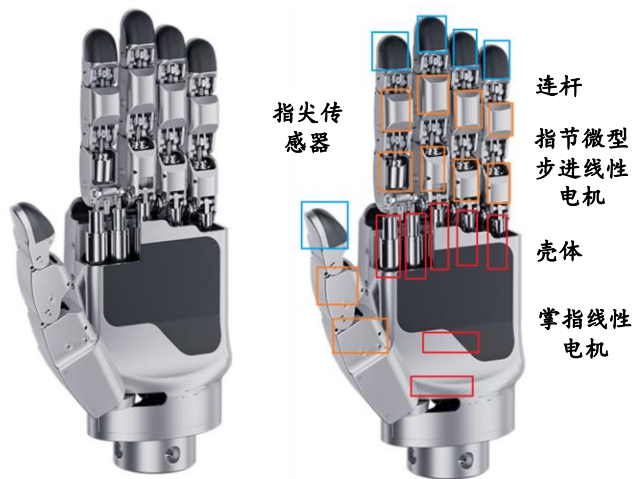
注：根据公开资料梳理，可能存在一定滞后性，仅供参考

1.3. 为什么当下我们关注灵巧手？——价值量&市场参与

□ 高价值量亦体现在成本端，关键零部件占比较高

- **成本端：技术难+零件多+未量产导致成本高。**从技术本质来看，银河通用创始人王鹤认为灵巧手在人形机器人硬件中技术难度最大，“自由度—负载—价格”形成了不可能三角；从零部件来看，灵巧手采用的电机、传动组件等众多复杂零部件，核心零部件价格较高，如单个灵巧手内使用的电机成本就能达到2.6~6.5万元，因时机器人BOM成本中的70~80%为微型伺服电缸，手掌骨架、连杆、壳体等结构件开模量产后成本较低；从运控来看，当前大规模真机灵巧操作数据采集成本高、质量不稳定。
- **灵巧手BOM成本拆解：**根据我们测算，以一款17主动驱动且搭载5个指尖传感器的连杆灵巧手为例，其BOM成本约为5.2万元，其中驱动、传动部分达到约3.3万元，占比64%，为最大的成本组成部分；其次为指尖触觉传感单元，单价最高，总价值1.8万元，占比35%。以仅减配第一、二指关节的12驱5传感方案为例，其物料成本约4.5万元，驱动、传动约为2.6万元，占比58%，传感价值量不变，占比40%。

图： 17驱5传感刚性灵巧手结构拆解



图： 17驱5传感刚性灵巧手BOM成本拆解

零部件	选型	用量							单价 (元)	总价 (元)	占比
		拇指	指1	指2	指3	指4	整手	总数			
驱动+传动	某品牌灵巧手高集成度传动模组	2	2	2	2	2	-	10	1400	14,000	27%
	某品牌微型伺服电缸（集成空心杯电机+减速器+丝杠）	2	2	1	1	1	-	7	2700	18,900	36%
	小计	4	4	3	3	3	-	17	-	32,900	64%
感知	某品牌ITPU指尖触觉传感单元	1	1	1	1	1	-	5	3600	18,000	35%
控制器	某品牌STM32 12路微型直线伺服驱动控制器	-	-	-	-	-	1	1	400	400	1%
其他	壳体/连接件/紧固件/电线等，当前总BOM较高，假设为总BOM的1%	-	-	-	-	-	1	1	-	500	1%
灵巧手BOM成本										51,800	100%

注：用于测算的灵巧手方案与零部件选型均为市场公开出售的产品的组合，产品图片、选型规格仅供参考，不代表某一具体品牌产品，价格、型号为测算时数据，不代表最新数据。测算仅供参考。

2

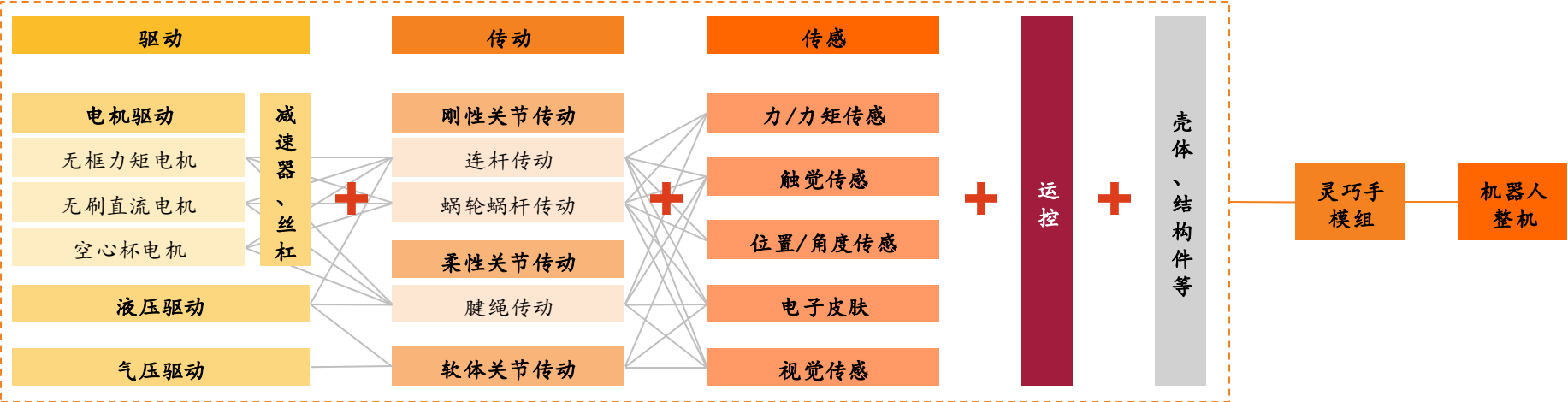
灵巧手的分析框架与各公司方案分析

2.1. 静态框架：灵巧手方案硬件构成为驱动+传动+传感

□ 灵巧手方案主要关注驱动+传动+传感配置

- 灵巧手的方案主要由驱动、传动、传感三个硬件环节和控制环节构成：
 - 驱动为灵巧手的动力来源，有电机驱动、液压驱动、气压驱动等方式，当前灵巧手主要以电机驱动为主，电机选型包括空心杯电机、无刷有齿槽电机、无框力矩电机等。由于体积紧张，灵巧手微型电机可能会集成减速器、丝杠、力传感器、驱动器于一体。
 - 传动为传递动力的方式，有腱绳传动、连杆传动、蜗轮蜗杆传动等方案，不同传动在负载、精度、寿命方面差异较大。
 - 传感主要用于感知手指状态、反馈至控制系统进行规划决策，有力传感、触觉传感、电子皮肤等类型，主要基于电阻应变、电容、压电等检测技术。
- 指数+自由度+驱动+传动可描述基本的灵巧手硬件方案，传感器相对独立，可根据不同需求进行配置，如因时机器人灵巧手为5指+12自由度+6驱动+连杆灵巧手，可配力传感器和触觉传感器，帕西尼DexH5灵巧手为4指+12自由度+5驱动+连杆灵巧手，配置多维触觉传感器。
- 当前硬件技术路线尚未完全形成共识，我们建议在投资方向上关注“不变”的基础关键零部件，如空心杯电机、减速器、丝杠、传感器，同时关注市场新方案与产业趋势的带来的新零部件增量，如腱绳、链传动。

图：灵巧手静态研究框架

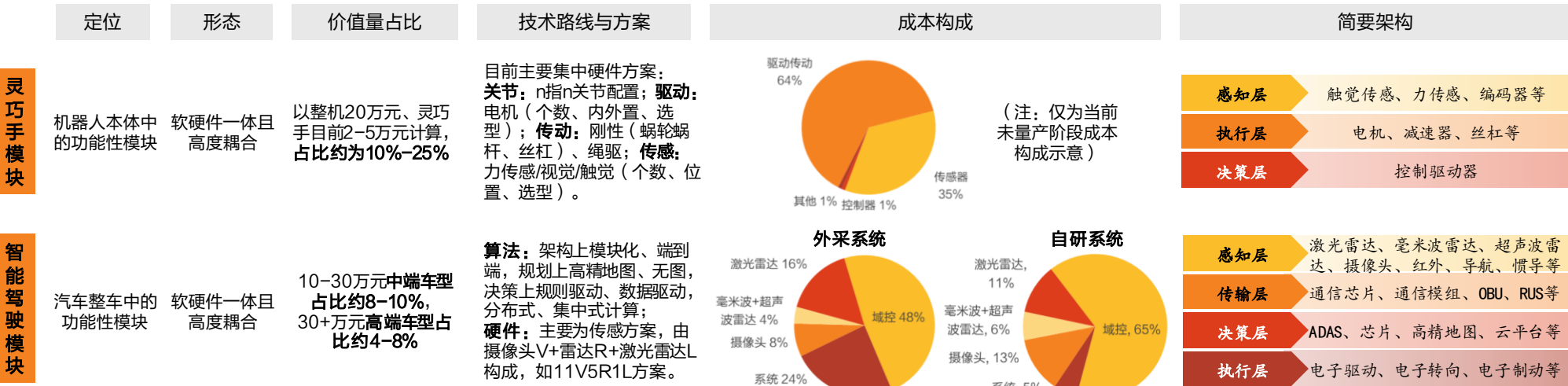


2.2. 动态框架：参照自动驾驶，灵巧手当前是什么阶段？

□ 中短期看堆料推动环节通胀，长期看降本带来灵巧平权

- 我们认为，人形机器人灵巧手模块可与汽车智能驾驶模块类比，从价值量来看，当前智驾模块约占高端车型的4-8%、中端车型的8-10%，而灵巧手尚未量产降本，约占整机10-25%；成本构成来看，外采ADAS系统的智驾模块约24%成本为系统、28%为感知、48%为域控，自研ADAS的智驾约65%成本为域控、30%为感知、5%为系统，当前灵巧手执行层关键硬件的驱动传动占比约64%、感知占35%；技术路线与方案来看，智驾在硬件和算法上均有不同路线，如算法端的架构、决策、规划、计算分布，硬件端主要为不同数量摄像-雷达-激光雷达构成的多样化传感方案，灵巧手目前主要为硬件方案，驱动方案主要由不同数量手指-关节-驱动组合构成，传动主要为刚性（连杆、蜗轮蜗杆）vs柔性（腱绳）方案，传感方案较为独立。
- 异同对比来看，二者在形态上均为软硬件一体且高度耦合的产品，感知与规划决策高度耦合，同时主机厂对成本控制有要求；当前阶段灵巧手硬件比重较大（大于外采系统智驾，接近自研系统智驾），主要集中于硬件方案，在算法上目前进展相对较慢。

图：灵巧手与自动驾驶系统特点对比

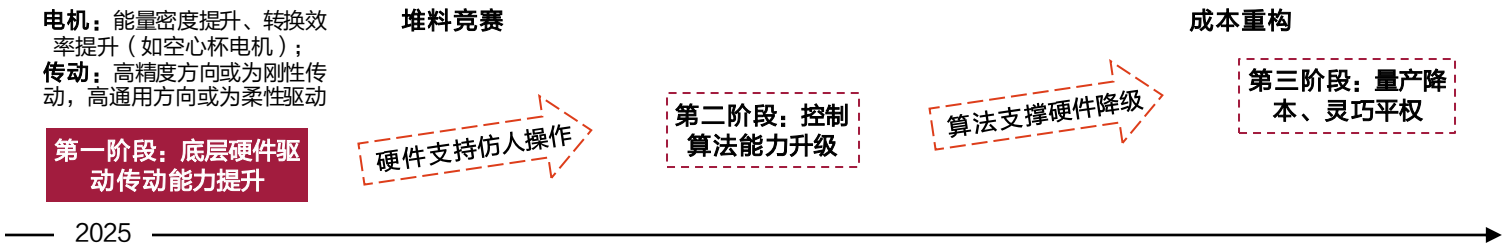


2.2. 动态框架：参照自动驾驶，灵巧手当前是什么阶段？

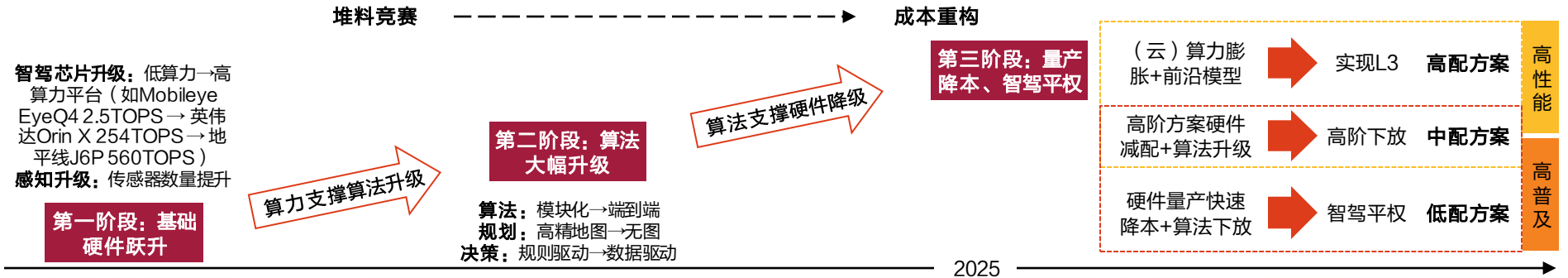
□ 中短期看堆料推动环节通胀，长期看降本带来灵巧平权

- 智驾模块主要经历了基础硬件能力跃升（高算力平台+感知升级）→算力支撑下算法大幅升级（端到端+无图+数据驱动）→算法支撑下量产硬件降级/降本（智驾技术平权）三个阶段，可总结为堆料竞赛→成本重构。堆料竞赛阶段主张将全球最优硬件堆叠到位，再比拼软件系统，核心不在于软硬件降本；成本重构为行业当前阶段，激光雷达+高算力平台的高配方案主张量产降本+智算中心提升模型训练能力尽早实现L3，中配方案主张高配算法下放+取消高配方案激光雷达降本，低配方案主张采用量产降本入门硬件+算法下放实现智驾平权。
- 我们认为灵巧手可能参照智驾发展路径沿堆料竞赛→成本重构发展，当前为硬件堆料阶段，目的仍是追求底层硬件能力提升，在硬件技术路线收敛、相对成熟后控制算法升级有望成为核心竞争领域。

图：灵巧手发展进程推演



图：智驾系统发展进程梳理



2.3. 方案分析：欠驱动+电机为主流路线，刚性vs柔性仍有分歧

□ 欠驱动走向全驱动，电驱为主流路线，传动方案仍有分歧

- 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（驱动与可动关节数量对比）：
 - **全驱动灵巧手**：驱动源的数量与被控制灵巧手的自由度数量相等。每个手指关节都有驱动器，使其能够实现主动控制，能够像人手一样完成全部的动作指令甚至要求更高的灵巧动作。但全驱动体积较大、安装困难、操作复杂。
 - **欠驱动灵巧手**：被控制的自由度多于驱动源的数目，缺少驱动源的部分则进行耦合随动。欠驱动手硬件集成度高，整体系统简洁高效、体积小、质量轻，便于进行动力学分析，但存在功能性不足的问题，尤其是对于精度要求比较高的手指精巧控制无法胜任。
- 根据驱动的不同，可将灵巧手分为电机、液压、气压、形状记忆合金等路径，现阶段大多商用/研发产品均采用电机驱动方案。
- 根据传动的不同，灵巧手的主要有连杆传动、齿轮/蜗轮蜗杆传动、腱绳传动等路径，连杆与齿轮/蜗轮蜗杆精度相对较高，负载较大，但柔性不足，腱绳驱动为柔顺传动方式，容易实现高自由度，但精度有限，且控制难度较高。

表：灵巧手不同驱动方式特点

驱动方式	优点	缺点
电机驱动	体积小、响应快，调控方便、稳定性好、精度高、输出力矩稳定	结构相对复杂、成本相对较高
液压驱动	驱动力大，能够快速完成响应控制，适合应用于大负载的控制领域	需要高精度零件，设备成本高，容易受到外部异物污染
气压驱动	气动驱动系统结构简单、维修方便、价格低廉，且速度快、动作灵活迅速	气压系统压力低，输出力较小，可操作性不强，轨迹精度不够

表：灵巧手不同传动方式特点

驱动方式	优点	缺点
连杆传动	刚度好、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，较好实现多种运动规律和运动轨迹	结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对空间配置要求较高
齿轮/蜗轮蜗杆传动	齿轮或蜗轮蜗杆将旋转变成直线运动，手指动作相互独立，具有多种的抓取构形，驱动更加灵活	运动时间较长，结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击较弱，对空间配置要求较高，结构复杂容易故障
腱传动	由腱绳加上滑轮或者软管实现传动，腱一般具有很高的抗拉强度，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	腱本征刚度有限，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，控制难度和复杂性较高

2.3. 方案分析：欠驱动+电机为主流路线，刚性vs柔性仍有分歧

□ 欠驱动走向全驱动，电驱为主流路线，传动方案仍有分歧

- 根据我们梳理的9家灵巧手/机器人企业灵巧手产品，我们认为现阶段灵巧手发展具备以下几个特点：
- **自由度上，主动自由度增加，欠驱动走向全驱动**，随着驱动传动机构小型化、集成化，如因时、兆威、优必选等选择将电机+减速器+丝杠一体集成，灵巧手可放置更多主动自由度，近段时间发布的帕西尼二代H13、兆威为全驱灵巧手，智元、宇树等在迭代中增加自由度。
 - **驱动方案上，电驱为主流**，在电机选型上（明确标注电机选型）主要为空心杯电机，无刷、有刷型均有采用。
 - **传动方案上，刚性和柔性方案仍有分歧**，因时、兆威、帕西尼、星动纪元、宇树等国内企业/产品均青睐刚性传动路线，主要分为连杆和齿轮两个阵营；特斯拉、Shadow、DLR等国外企业产品较为青睐腱绳柔性方案。优必选初代版本为腱绳方案，第二代以来改为全刚性传动方案；智元初代版本为刚性传动方案，新一代中添加腱绳结构作为手指指节弯曲传动方案，采用刚性+柔性混合传动方案。
 - **传感方案上**，可分为关节（力/力矩）、电机（力/位置）、表面（压力/触觉）、视觉（摄像头）几种传感类型，触觉传感配置度较高，因时、帕西尼、优必选在版本迭代中增配表面压力/触觉传感单元，帕西尼、智元等增配手部摄像头，我们认为，在堆料竞赛背景下感知通胀有望持续。

表：各厂商灵巧手方案总结

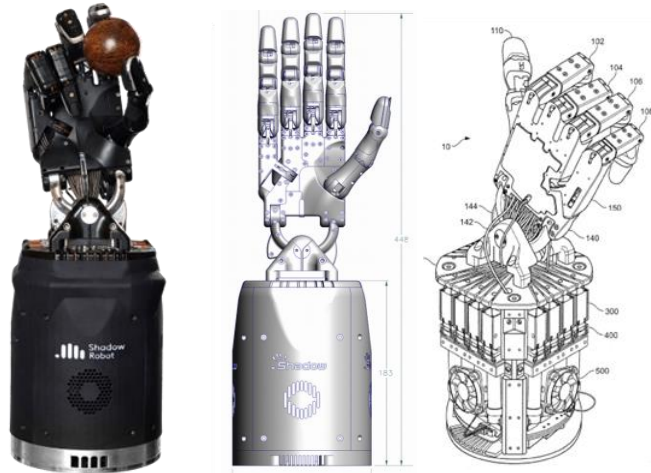
项目	shadow	DLR		因时		帕西尼		兆威机电	优必选				星动纪元	宇树	智元
		Dexhand	Hand II	RH56B/DFX	RH56DFTP	Dex H13	Dex H5	ZWHand	四代灵巧手	三代	二代	一代	XHAND1	Dex 5-1 / 1P	智元灵巧手
驱动方案	Maxon电机	无刷直流电机	无刷直流电机	微型电缸（空心杯电机）		直线电机	直线电机	直线电机（无刷空心杯）	直线电机	直线舵机（电机）		舵机（电机）	空心杯有刷电机	空心杯电机	电机
传动方案	腱绳	谐波+锥齿轮/绕线盘+高分子腱绳	谐波+差速+同步带/绕线盘+钢丝腱绳	行星减速箱+行星滚柱丝杠+连杆+弹簧		连杆	连杆	行星减速器+行星滚柱丝杠	簧圈+连接臂组件/轴+连杆	丝杠+推杆+转动销轴/球窝球头	丝杠+推杆+连杆+推杆球副	减速器+丝杠+扭簧+腱绳	行星减速箱+齿轮—锥齿轮	齿轮减速器	丝杠+连杆，蜗轮蜗杆+腱绳，侧摆连杆
传感方案	指尖触觉+腱张力+位置+力+温度	关节力矩+关节位置+温度	指尖力+关节力矩+关节位置+腱张力+触觉+温度	位置+力传感器	位置+力传感器+触觉	触觉传感器+手部摄像头	触觉传感器	力传感器+触觉传感器	—	电机磁传感器+压力传感器	电机磁传感器	电机集成滑动变阻器	指尖触觉+角度传感	关节力矩/温度/电压电流+IMU+传感器压力/温度	MEMS触觉+视觉+手背摄像头
主动自由度	20	12	15	6		13	5	17	6	6		4	12	16	12
自由度	24	16	15	12		13	12	17	11	11		10	12	20	19

2.3.1. Shadow：24自由度20驱动五指灵巧手，高自由度拟人精细操控

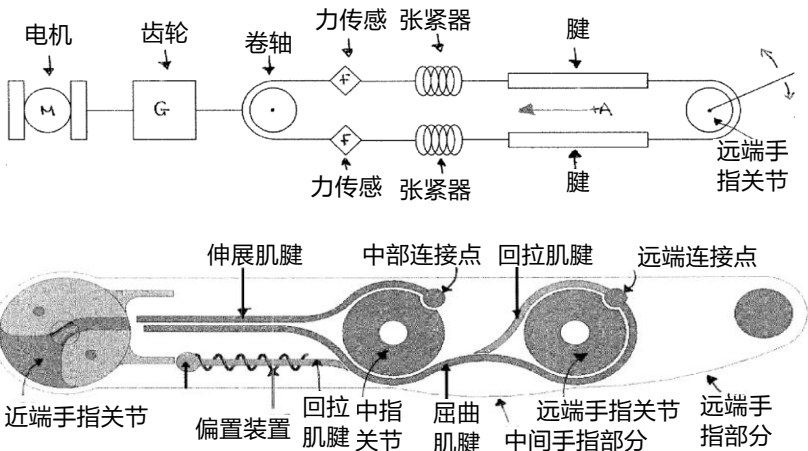
□ Shadow：采用5指+24自由度+20驱动+腱绳方案，高自由度拟人精细操控

- 自由度：五指灵巧手，欠驱动24自由度、20主动自由度（包括手腕2自由度），所有手指具备3个关节（均具备侧摆自由度）、小拇指手掌部具备一个额外自由度，远端指节耦合。
- 驱动：采用Maxon空心杯电机，20个驱动均外置于手臂。
- 传动：采用腱绳传动方案，驱动系统结构为电机-齿轮-卷轴-张紧器-腱绳。腱绳绕卷轴，关节上设置连接点，腱绳一侧连接近端关节-中间关节，一侧连接近端关节-远端关节，腱绳上放置偏置装置、张紧器、力传感器。
- 传感：全手搭载100多个传感器，包括指尖触觉传感器、位置传感器、力传感器、腱张力传感器、IMU、温度传感器、电流/电压传感器，其中位置和触觉传感器采样频率为1kHz，力传感器频率为500Hz。

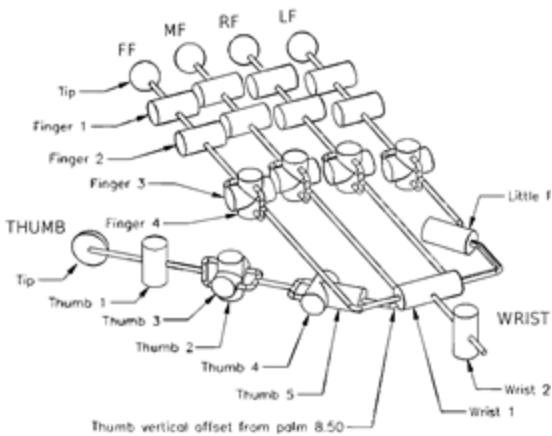
图：Shadow灵巧手



图：Shadow灵巧手驱动传动示意图



图：Shadow灵巧手关节自由度配置



表：Shadow灵巧手

项目	Shadow Dexhand
驱动方案	Maxon空心杯电机
传动方案	腱绳
传感方案	指尖触觉+腱张力+位置+力+温度
重量	4.3KG
指数	5
主动自由度	20
自由度	24
关节	手16+腕2
拇指活动度	120°

2.3.2. DLR：腱+带双传动方式，高集成度精密传动

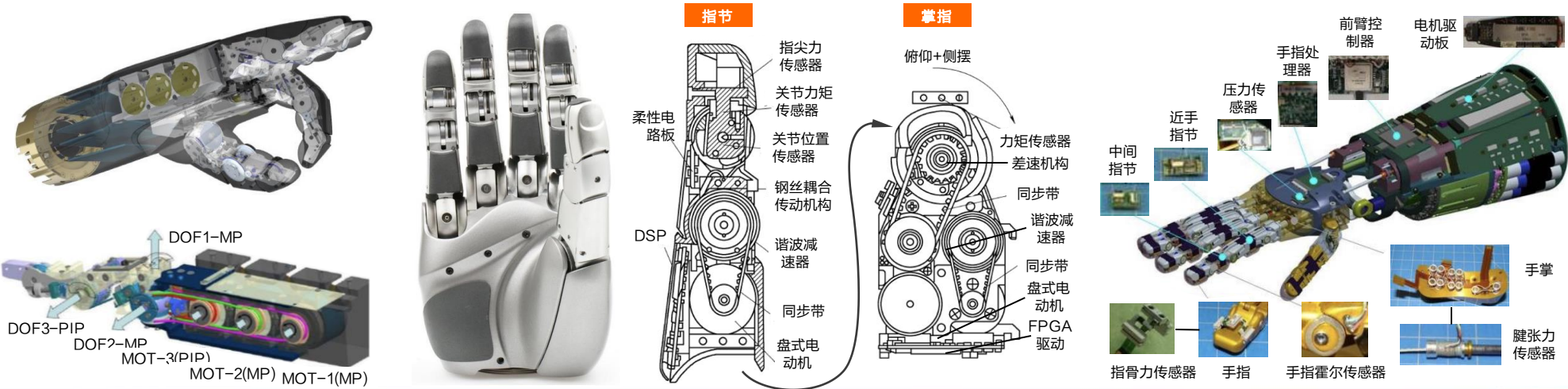
□ DLR：II代采用5指+15自由度+12驱动+腱/带方案，高集成度精密传动

- DLR-HIT Hand II：①自由度：整手15自由度，手指为模块化设计，5个手指完全相同，每个手指有3个自由度（包括侧摆）、4个关节，末端两个关节通过钢丝机构耦合运动。②驱动：无刷直流电机集成谐波减速器。③传动：手指关节为谐波+绕线盘+钢丝，基关节为谐波+锥齿轮差速机构+同步带。绕线盘具有较高的传动效率，容易配置多个驱动实现高自由度，但无法直接实现自锁、对电机输出力矩要求较大。④传感：指尖力+关节力矩+关节位置+腱张力+触觉+温度。
- DLR Dexhand：①自由度：4个相同的模块化手指，每个手指4关节和3个独立自由度。②驱动：驱动为无刷直流电机集成谐波减速器，电机都内置于手掌中。③传动：手指关节采用Dyneema 腱绳+滑轮传动，基关节采用锥齿轮实现侧摆和俯仰运动。④传感：配置关节力矩传感器、霍尔位置传感器、温度传感器等。

表：DLR灵巧手参数介绍

项目	DLR Hand II	DLR Dexhand
驱动方案	无刷直流电机	无刷直流电机
传动方案	谐波+差速+同步带/绕线盘+钢丝腱绳	谐波+锥齿轮/绕线盘+高分子腱绳
传感方案	指尖力+关节力矩+关节位置+腱张力+触觉+温度	关节力矩+关节位置+温度
重量	1.5KG	—
指数	5	4
主动自由度	15	12
自由度	15	16
关节	20	16
指尖力矩	10N	25N
负载	30N	—

图：DLR Dexhand灵巧手与手指构造 图：DLR Hand II灵巧手与手指构造



2.3.3. 因时机器人：12自由度6驱动连杆灵巧手，驱动+传动+传感迭代升级

因时机器人：采用5指+12自由度+6驱动+连杆方案，自研微型电缸模组

- 已发布三个型号：RH56BFX抓力小，RH56DFX负载高，FTP提高电机+丝杠选型、增加传感器、延长使用寿命。
- 自由度：**5指+12自由度+6驱动方案。
- 驱动：**自研微型伺服电缸集成电机、减速箱、丝杠、力传感器、位置传感器、编码器，FTP系列升级无刷空心杯电机+行星滚柱丝杠。
- 传动：**采用连杆方案。直线电机驱动伸缩杆伸长带动近指节弯曲，通过连杆机构驱动远端指节弯曲，同时拉长弹簧，电机缩回时远近指节伸直。
- 传感：**电缸集成位置传感器、力传感器，配置绝对位置传感器，断电后不会丢失信息。FTP在内置力传感器电缸基础上在手表面集成了12个触觉传感模块。

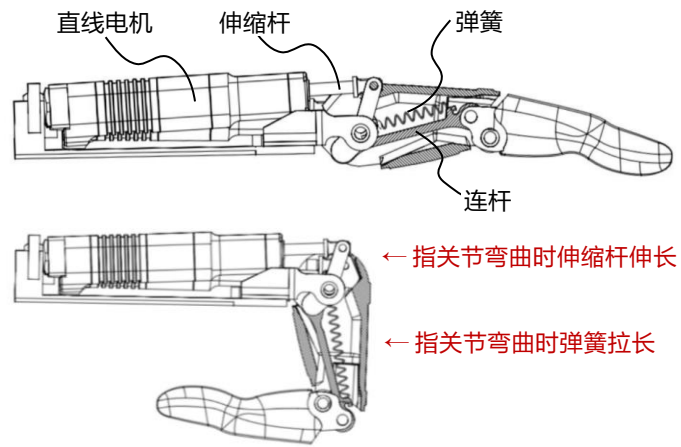
表：因时机器人灵巧手参数介绍

项目	RH56BFX	RH56DFX	RH56DFTP
驱动方案	微型电缸（空心杯电机）		
传动方案	行星减速箱+行星滚柱丝杠+连杆+弹簧		
传感方案	位置+力传感器		位置+力传感+触觉
重量	单手540g		790g
指数	5		
主动自由度	6		
自由度	12		
握力	拇指6N/四指4N	拇指15N/四指10N	指尖30N
握力分辨率	0.5N		-
拇指活动度	横向>65°		横向>85°
运动速度	拇指弯曲150° /s、四指弯曲570° /s		拇指弯曲>130° /s 四指弯曲>200° /s
重复定位精度	±0.2mm		

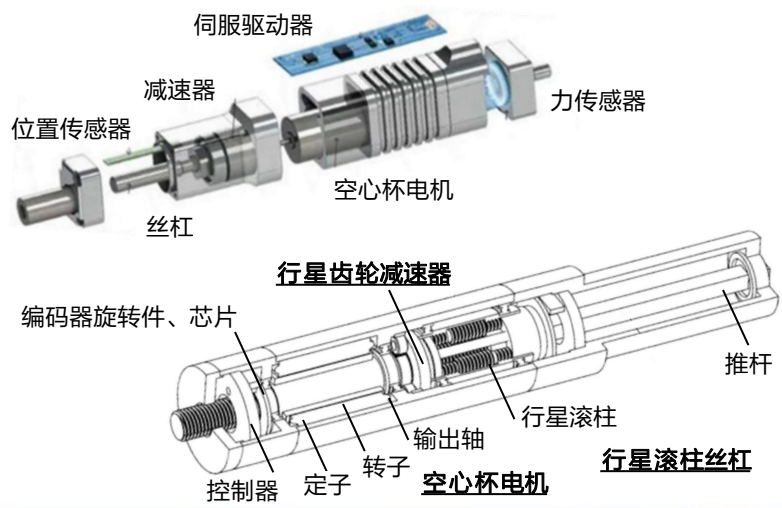
图：因时机器人FTP灵巧手



图：因时灵巧手指结构图



图：因时灵巧手微型伺服电缸结构

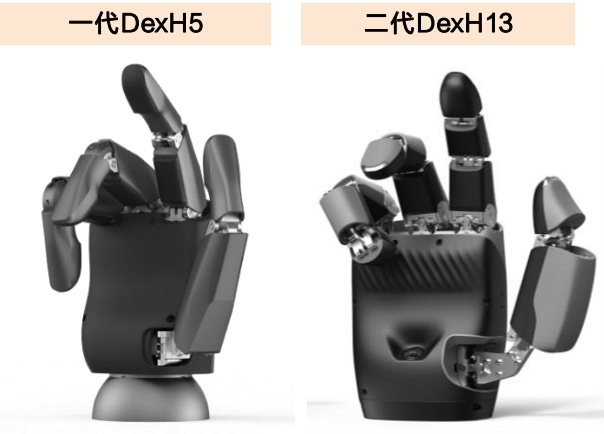


2.3.4. 帕西尼传感：直线电机+连杆灵巧手，多维触觉+视觉双模态

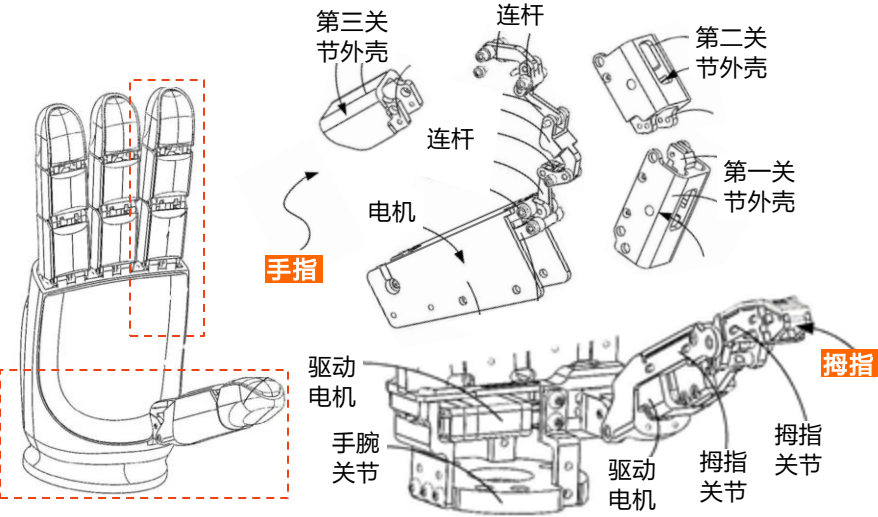
□ 帕西尼传感：采用4指+13自由度+13驱动+连杆方案，传感+操控为核心技术

- 目前已发布DexH5、DexH13两代产品，主要在驱动、传感上做了升级。
- **自由度**：四指灵巧手，一代手为12关节自由度，二代手为13个关节自由度。
- **驱动**：采用**直线电机**作为驱动源，一代手仅有5主动自由度，二代为全驱动13自由度。
- **传动**：采用**连杆传动**方案。
- **传感**：搭载自研ITPU多维触觉传感单元，一代手单手集成180颗ITPU，能够精准感知物体温度、滑动、振动等多重信息，可实现0.01N精准力控，进行更多精细操作；二代手搭载1140颗第二代ITPU触觉传感单元和800万像素摄像头，能够感知六维力+量化的9种人类触觉参数，具备1mm空间分辨率，能够实现多维触觉+AI视觉双模态。

图：帕西尼灵巧手产品图



图：帕西尼灵巧手结构



表：帕西尼灵巧手参数介绍

项目	二代DexH13	一代DexH5
驱动方案	直线电机	直线电机
传动方案	连杆	连杆
传感方案	触觉传感器+手部摄像头	触觉传感器
重量	1.4KG	1.4KG
指数	4	4
主动自由度	13	5
自由度	13	12
握力	指尖15N	夹持30N
力传感精度	0.01N	0.01N
负载	5KG	5KG
拇指活动度	—	125°
重复定位精度	—	±0.2mm

表：帕西尼ITPU传感器参数

项目	第二代ITPU
触点类型	多点面阵式
结构类型	柔性表面
技术路线	电磁式
感知维度	六维力+9种人类触觉参数
精度	≤1%FS
采样频率	1000Hz
空间分辨率	1mm
分辨率	0.01N

2.3.5. 兆威机电：17驱高主动自由度灵巧手，微型关节电机实现全直驱

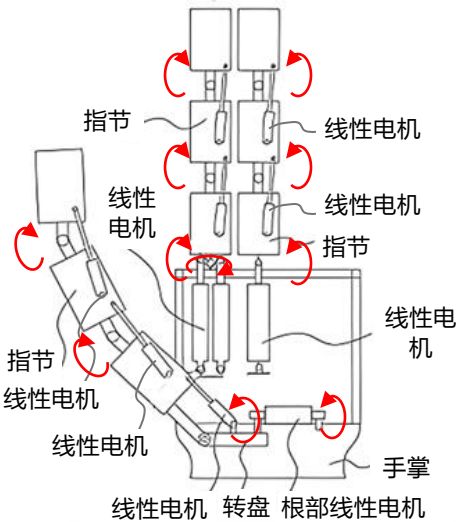
□ 兆威机电：采用5指+15关节+17驱动+丝杠方案，核心电机技术塑造高精传动

- **自由度**：ZW Hand为5指15关节灵巧手，其中大拇指有3个关节、配置4个主动自由度/电机，食指配置3个弯曲+1个侧摆自由度，其余三指均为三个弯曲自由度，整手共17主动自由度（可定制17-20自由度版本，我们认为可能为其余三指的侧摆自由度）。
- **驱动**：采用**线性步进电机**作为驱动源，全手配置17个电机。兆威机电自研灵巧手微型传动电机，集成**无刷空心杯+行星减速器+行星滚柱丝杠**。直线步进马达具有自锁性能，传动效率达到50%~85%，直径仅8~16mm。
- **传动**：采用电机集成的**行星减速+行星滚柱丝杠+万向铰接**的传动方案，具备自锁性能，承载能力、传动效率、使用寿命均有所提升。
- **传感**：配置指尖集成传感器。

图：兆威机器人灵巧手ZW Hand



图：兆威灵巧手整手结构示意图



图：兆威机电灵巧手驱动与传动部件



表：兆威机器人灵巧手ZW Hand参数介绍

项目	ZWHand
驱动方案	直线电机（无刷空心杯）
传动方案	行星减速器+行星滚柱丝杠
传感方案	力传感器+触觉传感器
重量	<1KG
指数	5
主动自由度	17
自由度	17
关节	15
负载	3KG

2.3.6. 优必选：方案多次更迭，刚性+高自由度+高集成度+传感为演进方向

□ 优必选：灵巧手迭代四个版本，刚性+高自由度+传感+集成度为演进方向

➢ 优必选较为集中在24年11月、23年9月、22年12月、20年11月、18年11-12月期间发布灵巧手相关专利，我们认为除23年9月低自由度版外可视为为优必选迭代的四个灵巧手版本。我们认为柔性→刚性、低自由度→高自由度、少传感单元→多传感单元、低集成度→高集成度（参考第四代，驱动电机数量增加但体积缩小且能置于手指中）为主要迭代方向。

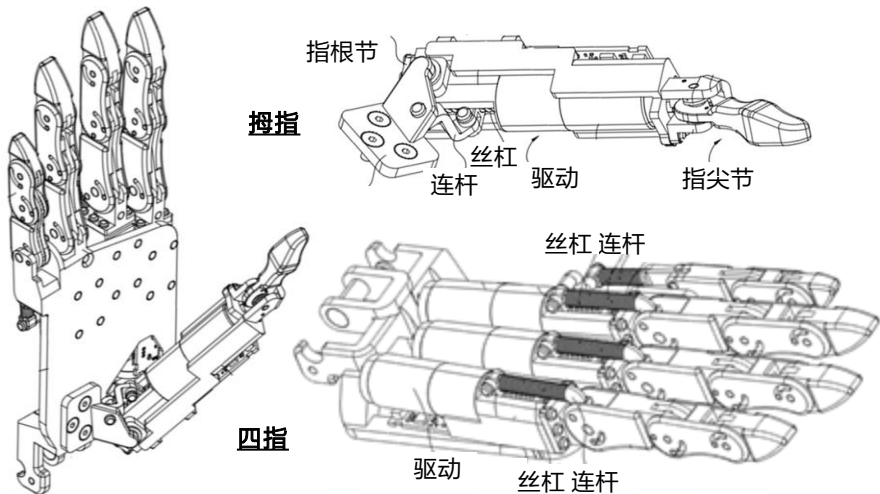
■ **第四代（2024专利）：**①**自由度：**四指各1驱动、2关节，拇指2驱动、2关节，具备弯曲+侧摆功能，全手10个关节、11自由度；②**驱动：**采用**直线电机**作为驱动源，末端为输出轴，拇指电机分别为横置于手掌+内置于手指，摆放方式较二/三代有所改进；③**传动：**四指为**连接臂组件（连接臂+连接轴）+簧圈**，拇指为**连杆结构**。

■ **低自由度版（2023专利）：**五指四驱，电机+丝杠+连杆驱动。

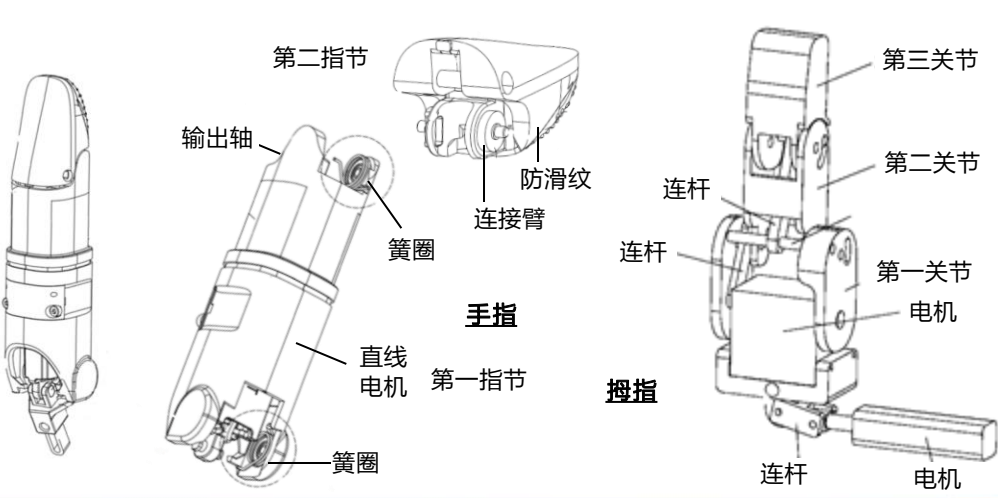
表：优必选灵巧手参数介绍

项目	低自由度版	四代灵巧手	三代灵巧手	二代灵巧手	一代灵巧手
驱动方案	电机	直线电机	直线舵机（电机+丝杠+推杆）		舵机（电机+减速器+丝杠）
传动方案	丝杠+连杆	簧圈+连接臂/轴+连杆	丝杠+推杆+转动销轴/球窝球头	丝杠+推杆+连杆+推杆球副	减速器+丝杠+腱绳+扭簧
传感方案	-	-	电机磁传感器+压力传感器	电机磁传感器	滑动变阻器（电阻传感器）
指数	5	5	5		5
主动自由度	4	6	6		4
自由度	10	11	11		10
负载	-	-	双手15KG	-	-

图：优必选低自由度版本灵巧手



图：优必选第四代（2024版）灵巧手指结构



资料来源：《CN 117207226 A 一种仿生手及机器人》，《CN 119407823 A 一种仿生手指、仿生手及机器人》，《CN 119347827 A 仿生拇指机构及灵巧手》，国家知识产权局，天风证券研究所

2.3.6. 优必选：方案多次更迭，刚性+高自由度+高集成度+传感为演进方向

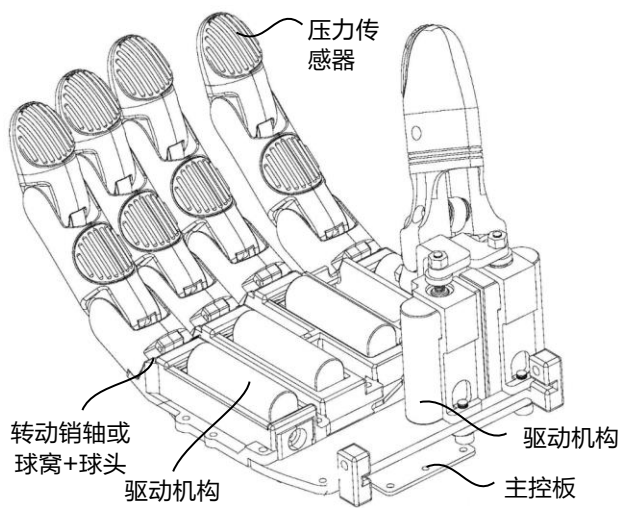
□ 优必选：灵巧手迭代四个版本，刚性+高自由度+传感为演进方向

- 第三代（2022专利）与第二代（2020专利）外形较为相似，改进的部分为关节方案（二代为连杆结构，三代为转动销轴/球窝球头结构）、大拇指双驱动摆放方案（二代为垂直布置于手掌平面，三代为并列垂直于手掌平面）、传感器（第三代配置6个阵列式压力传感器）。
- 自由度：四指各2关节、各1驱动，拇指2关节、2驱动，具备侧摆自由度，整手11自由度；
- 驱动：第二代灵巧手专利中包含手指舵机结构，由电机+丝杠+舵机推杆组成，集成磁传感器；
- 传动：三代手关节通过转动销轴转动连接，或通过球窝+球头的球铰结构连接；二代手关节直线舵机推杆球副连接连杆，另一端铰接壳体，其余关节均为连杆连接；
- 传感：三代手配置6个阵列式压力传感器。

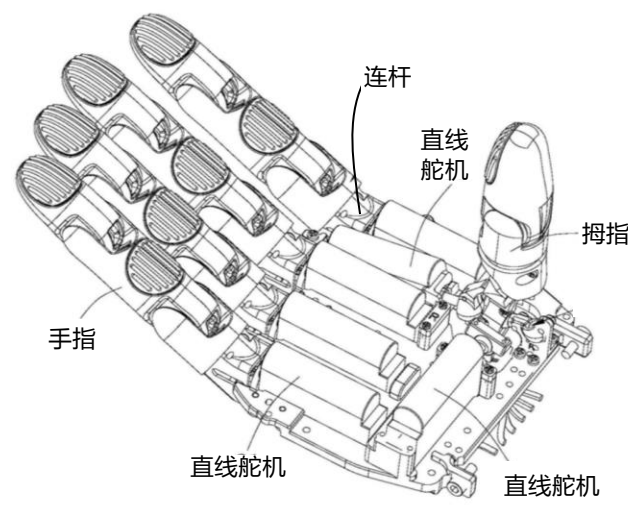
表：优必选灵巧手参数介绍

项目	三代灵巧手	二代灵巧手
驱动方案	直线舵机（电机+丝杠+推杆）	
传动方案	丝杠+推杆+转动销轴/球窝球头	丝杠+推杆+连杆+推杆球副
传感方案	电机磁传感器+压力传感器	电机磁传感器
指数	5	
主动自由度	6	
自由度	11	
负载	双手15KG	-

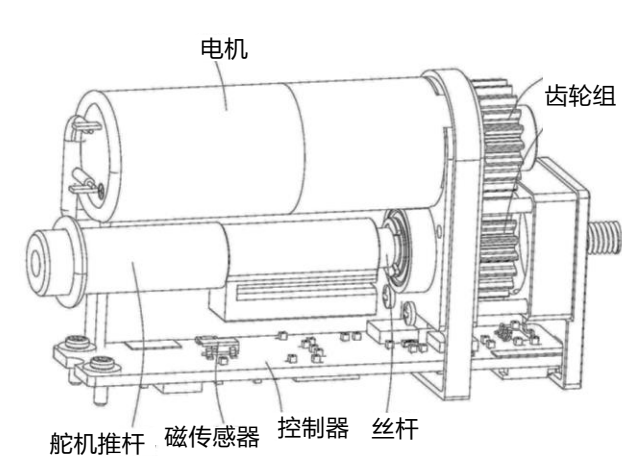
图：优必选第三代（2022版）灵巧手整手结构



图：优必选第二代（2020版）灵巧手整手结构



图：优必选第二代（2020版）灵巧手指舵机



2.3.6. 优必选：方案多次更迭，刚性+高自由度+高集成度+传感为演进方向

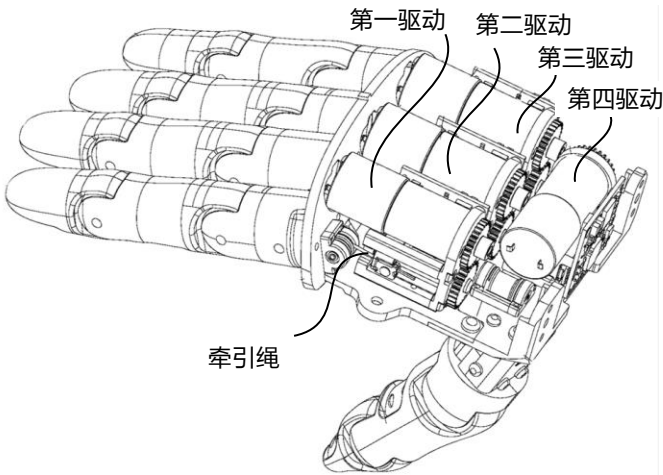
□ 优必选：灵巧手迭代四个版本，刚性+高自由度+传感为演进方向

- 第一代灵巧手为绳驱灵巧手，驱动采用典型的电机+减速器+丝杠结构。
- 自由度：四指、拇指均为2关节、2自由度，无名指和小拇指共用一个电机，整手10自由度；
- 驱动：一代手指舵机（2018专利）提出一种手指舵机，主要由电机+减速器+丝杠组成，丝杠具备自锁功能，可以放置手指端反向推动舵机，保护舵机内部结构；
- 传动：主要为腱绳传动方案，根据顺序为减速器+丝杠+腱绳，两个指关节配置与弯曲方向相反的扭簧。一条牵引绳连接驱动-第一指节-第二指节端部，一二指节扭簧恢复力方向与第二指节弯曲方向相反另一条牵引绳连接第一指节-第三指节，二三指节扭簧恢复力方向与第三指节弯曲方向相反；
- 传感：电机控制板通过滑动变阻器判断丝杠螺母位置和弯曲状态（电阻传感器）。

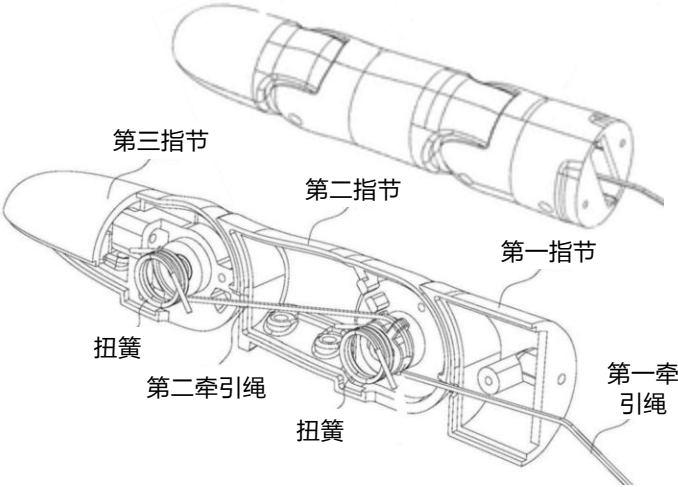
表：优必选灵巧手参数介绍

项目	一代灵巧手
驱动方案	舵机（电机+减速器+丝杠）
传动方案	减速器+丝杠+腱绳+扭簧
传感方案	滑动变阻器（电阻传感器）
指数	5
主动自由度	4
自由度	10
负载	-

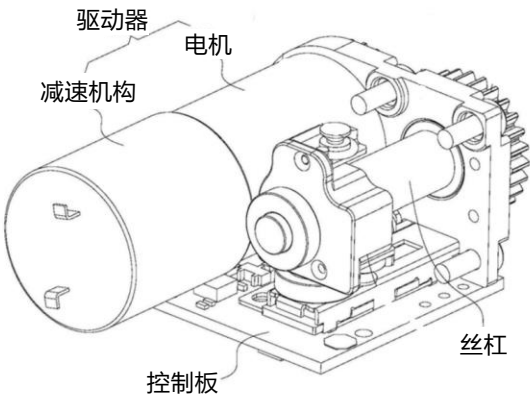
图：优必选第一代（2018版）灵巧手整手结构



图：优必选第一代（2018版）灵巧手指结构



图：优必选第一代（2018版）灵巧手手指舵机

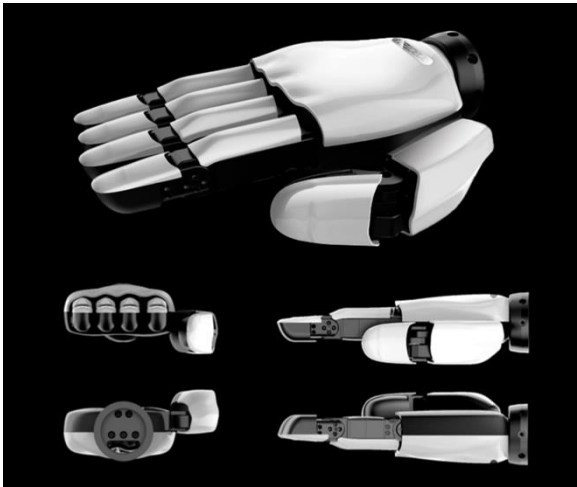


2.3.7. 星动纪元：全驱12自由度齿轮灵巧手，自研关节模组兼具精度负载

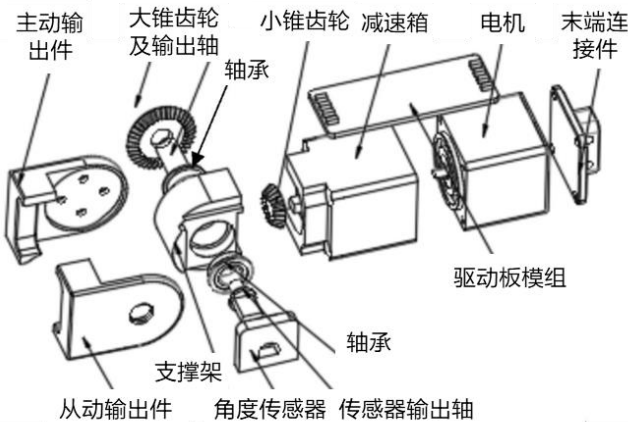
□ 采用5指+10关节+12驱+齿轮方案，自研关节模组兼顾精度与负载

- **自由度**：XHAND1为五指灵巧手，拥有12个全主动、全驱动的自由度，大拇指和食指各3自由度（食指增加侧摆自由度，达到 $\pm 15^\circ$ ）、其余手指各2个，可实现拇指与小拇指对握、旋拧等动作。
- **驱动**：全自研一体化灵巧手关节模组采用**空心杯+减速箱+锥齿轮**方案，采用空心杯电机，集成减速器、驱动器、传感器。主动关节均在本位且全部解耦，每个关节均可实现反驱。各个部位进行紧凑化设计，深耕底层电机磁路拓扑与结构设计，提升关节爆发力。单指最大负载5KG、四指20KG，整手可以举起25KG以上哑铃。
- **传动**：采用**纯齿轮准直驱传动**，采用锥齿轮传动。
- **传感**：每个手指配备高分辨率**触觉阵列传感器**，每个指尖采集120-300个三维力触觉信息，分辨率达到0.05N，具备更多感知能力，如接触觉、滑动感知，可通过面阵力解算得到表面纹理和材质信息；每个触觉传感器具备20个温度阵列，可采集温度信息。

图：星动纪元XHAND1



图：星动纪元灵巧手关节模组



表：星动纪元XHAND1参数介绍

项目	XHAND1
驱动方案	空心杯有刷电机
传动方案	行星减速箱+齿轮—锥齿轮
传感方案	指尖触觉+角度传感
重量	1.1KG
指数	5
主动自由度	12
自由度	12
握力	指尖15N，整手80N
负载	指尖5KG，整手25KG
食指侧摆	$\pm 15^\circ$
拇指活动度	$< 110^\circ$
最小抓握直径	15mm
重复定位精度	1mm

2.3.8. 宇树科技：发布五指灵巧手，高自由度+高集成度+传感为演进方向

宇树科技：发布5指+15关节+16驱+齿轮方案，自由度+集成度+传感为演进方向

- 宇树科技于25年4月发布Dex5一代灵巧手，相较前代Dex3升级幅度较大。
- Dex5-1/1P：①自由度：四指为3关节3主动自由度（2主动弯曲+主动侧摆+1末端耦合被动弯曲），拇指为3关节4主动自由度（3弯曲+侧摆），整手15关节、16主动自由度，其中12个直驱、4个传动；②驱动：自研微型力控复合传动关节，电机选型为高功率密度空心杯电机；③传动：微型力控齿轮传动关节，采用低阻尼小间隙减速器；④传感：标准版为关节力矩+温度+电压电流+IMU，P版本配置94单元压力传感器；
- Dex3-1：采用3指6主动自由度，微型无刷电机+齿轮方案，配置33压力传感单元。
- 根据宇树科技24年1月披露的专利，公司自研电机+双联行星齿轮减速器+两级圆柱齿轮的关节动力单元，可应用于灵巧手，具备结构紧凑、传动阻力小等优势。

表：宇树灵巧手参数介绍

项目	Dex 5-1 / 1P	Dex 3-1
驱动方案	空心杯电机	无刷电机
传动方案	齿轮减速器	齿轮组
传感方案	关节力矩/温度/电压电流+IMU+（1P）传感器压力/温度	关节力矩/温度/电压电流+IMU+传感器压力/温度
重量	1KG	710g
指数	5	3
主动自由度	16	7
自由度	20	7
握力	指尖10N	-
最大负载	4.5KG	500g
四指侧摆	±22°	-
最小抓握直径	10mm	-
重复定位精度	± 1mm	± 2mm
传感器阵列	（1P）12阵列94单元	9阵列33单元
压力感知范围	（1P）10-2500g	10-2500g

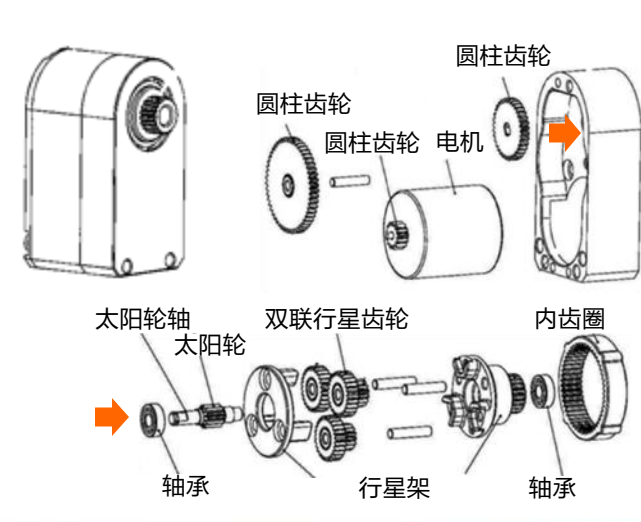
图：宇树Dex 5-1灵巧手结构示意图



图：宇树Dex 3-1灵巧手结构示意图



图：一种多级减速结构、动力单元与灵巧手



2.3.9. 智元机器人：12驱混合传动方案实现高集成度+高自由度+多传感

□ 智元机器人：12驱混合传动方案实现高集成度+高自由度+高传感

- 智元于24年8月发布19DOF五指灵巧手，由4个模块化手指和1个具备主动对掌功能的拇指构成，整手可抓握5KG、自锁提拉30KG，能够应对工业级的大负载场景。目前智元已形成全系列灵巧手产品，还包括12自由度五指灵巧手、6自由度五指灵巧手、二指夹爪、OmniPicker等产品。梳理公司专利文件，我们认为该19DOF手结构较符合公司24/6集中申请的灵巧手相关专利，23/7-8集中申请了另一个版本的灵巧手相关专利。据我们总结，24版较23版保留了单驱动连杆侧摆结构，升级的地方在于**混合柔性驱动**（全刚性→刚柔混合），**提高自由度**（24版19自由度）、**提高集成度**（24版12驱动提升一倍，且全内置于手掌中）、**提升传感组件**（24版搭载触觉、视触觉、摄像头）。
- 我们认为，智元在灵巧手领域具备较强工程和研发能力，19DOF灵巧手具备众多亮点：**①集成度上**，12电机高度集成于手掌，呈三排排列，高度利用手掌基板空间；**②传动方式上**，智元灵巧手采用混合传动方式，仅手指就采用了连杆和腱绳的混合传动方式，传动效率高且尺寸小，整手包括连杆侧摆、蜗轮蜗杆+腱绳弯曲、丝杠+连杆弯曲等方案；**③解耦能力上**，通过3电机+腱绳、4连杆方案分别实现拇指和四指的弯曲与侧摆运动解耦；**④侧摆能力上**，通过连杆仅需要1个电机驱动四个手指侧摆，降低复杂度；**⑤自锁能力上**，通过蜗轮蜗杆结构使腱绳传动具备自锁性。

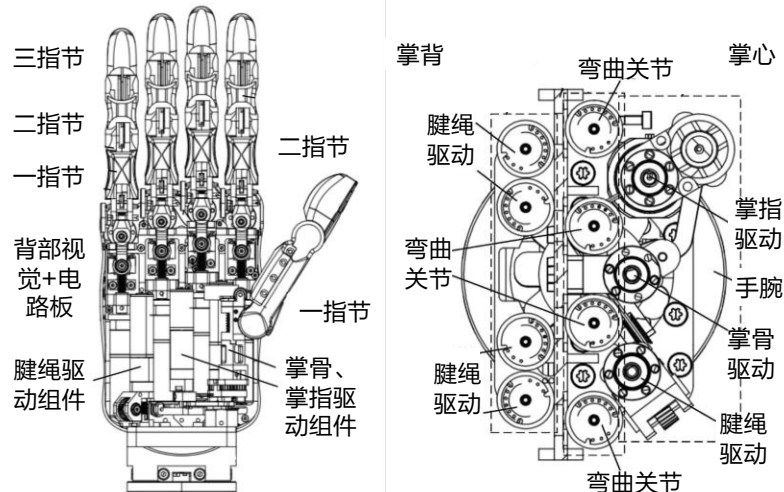
图：智元19DOF灵巧手（24版）结构介绍

项目	智元灵巧手
驱动方案	电机
传动方案	四指：掌指丝杠+连杆直驱弯曲关节，指节蜗轮蜗杆+腱绳传动弯曲关节，连杆侧摆耦合传动关节 拇指：蜗轮蜗杆+腱绳
传感方案	MEMS触觉+视触觉+手背摄像头
指数	5
关节	14（手指3*4+拇指2）
主动自由度	12（手指2*4+拇指3+侧摆1）
自由度	19（手指3*4+拇指3+侧摆4）
负载	整手5KG，自锁提拉30KG

表：智元19DOF灵巧手（24版）



图：智元19DOF灵巧手（24版）整体结构



2.3.9. 智元机器人：12驱混合传动方案实现高集成度+高自由度+多传感

□ 智元机器人：12驱混合传动方案实现高集成度+高自由度+高传感

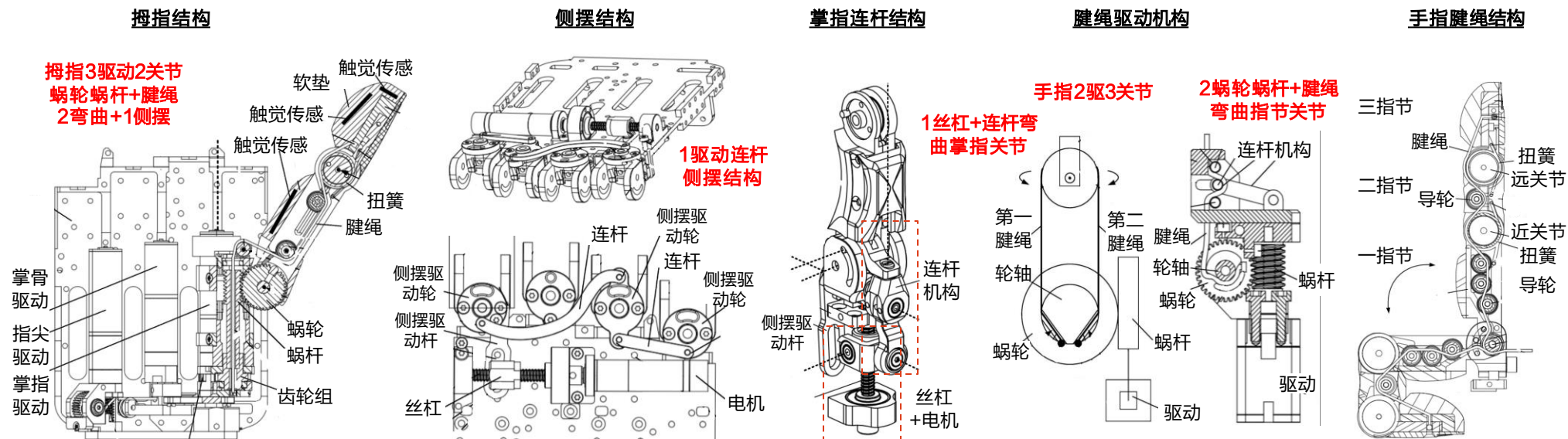
➤ 根据智元于2024年6月集中发布的专利文件，我们总结其19DOF灵巧手具备如下特点：

■ **自由度：**全手19自由度，四指包括3弯曲+1侧摆，拇指包括2弯曲+1对掌；全手12主动自由度，四指各1腱绳+1弯曲，拇指2弯曲+1对掌。

■ **驱动+传动：拇指**——包括掌骨驱动组件、掌指驱动组件、指间驱动组件，掌指为电机+蜗轮蜗杆，指间为电机+腱绳。**手指**——掌指关节通过电机+丝杠+连杆实现弯曲，指节关节通过电机+腱绳实现弯曲。腱绳驱动机构包括基座、驱动组件、轮轴、蜗轮蜗杆和腱绳，电机驱动蜗杆旋转带动蜗轮旋转，两根腱绳分别连接于蜗轮和指节的两侧，通过蜗轮蜗杆传动的自锁性实现腱绳机构自锁。**侧摆**——电机+丝杠+连杆，电机通过丝杠驱动侧摆驱动杆、驱动轮运动，实现第一指转动侧摆，通过连杆带动第二、第三指侧摆，通过另一个连杆实现第四指侧摆。

■ **传感：**指尖配置触觉传感器，手背搭载视觉模块。

图：智元19DOF灵巧手（24版）结构介绍



资料来源：《CN 118769277 A 灵巧手拇指、灵巧手和机器人》，《CN 118650649 A 灵巧手手指、灵巧手和机器人》，《CN 118650648 A 灵巧手指、灵巧手和机器人》，《CN 118636177 A 侧摆机构、灵巧手和机器人》，《CN 118636176 A 腱绳驱动机构》，国家知识产权局，天风证券研究所

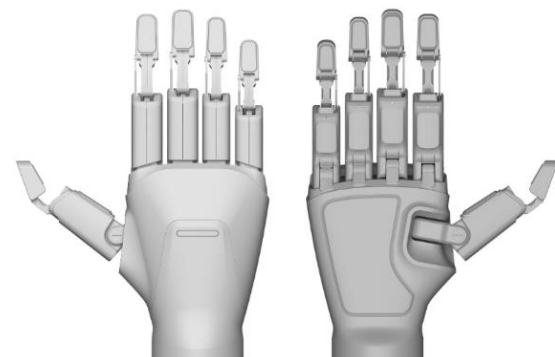
2.3.9. 智元机器人：12驱混合传动方案实现高集成度+高自由度+多传感

□ 智元机器人：12驱混合传动方案实现高集成度+高自由度+高传感

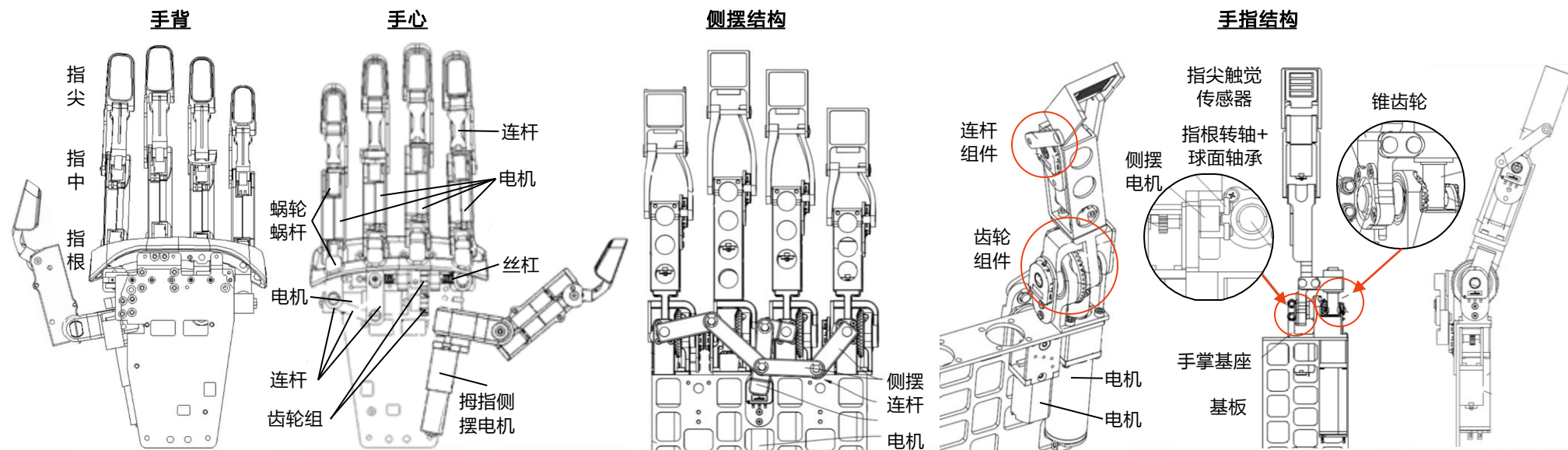
➢ 根据智元于2023年7-8月集中发布的专利文件，我们总结该阶段智元灵巧手具备如下特点：

- **自由度**：整手12自由度，四指+拇指均为2弯曲自由度，除中指外其余四指还具备1个侧摆自由度（耦合），拇指具备1侧摆自由度，整手7主动自由度，四指侧摆1+弯曲4，拇指侧摆1+弯曲1。
- **驱动-传动**：手指设计上，一个方案为第二指节配置电机用于实现弯曲自由度，一二指关节配置连杆+蜗轮蜗杆传动机构，掌指关节配置蜗轮蜗杆机构，侧摆通过连杆耦合机构实现；一个方案为手掌配置电机，一二指节配置连杆传动机构，掌指关节配置锥齿轮传动机构，侧摆通过侧摆电机+转轴+球面轴承实现。
- **传感**：指尖配置触觉传感器。

图：智元23版灵巧手外观示意



图：智元23版灵巧手结构介绍



3

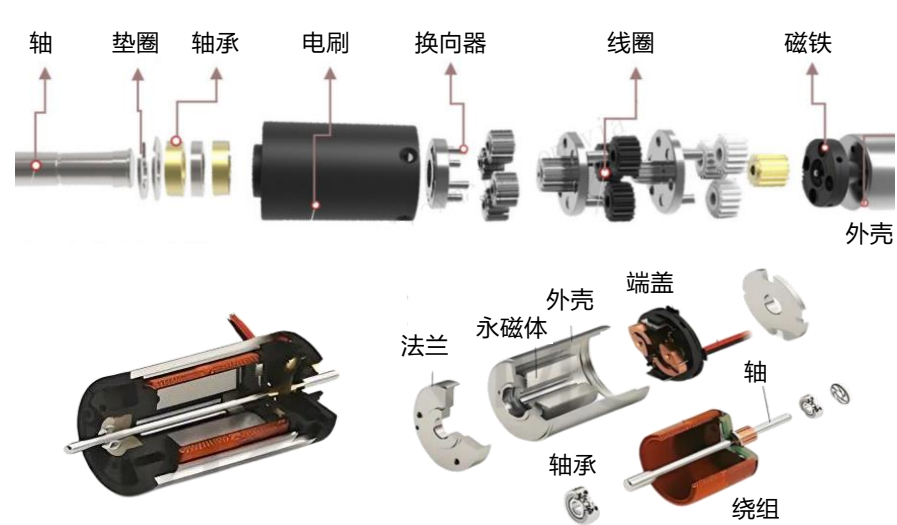
堆料竞赛+路线分歧，建议关注灵巧
手上游零部件环节

3.1. 驱动：空心杯电机为灵巧手电机首选，绕线为核心技术壁垒

□ 空心杯电机适用于尺寸小、精度高的灵巧手

- 空心杯电机是一种采用无铁芯的直流永磁伺服电机。结构上，空心杯电机转子是空心的杯子形状，突破了传统电机的实心铁芯转子形式，从而彻底消除了铁芯形成涡流造成的功率损耗。空心杯电机具备以下优势：①**无齿槽效应**，低速运行平稳、低震动、低噪音，转子可控制在任意位置；②**能效高**，转化效率超过70%，部分产品达到90%以上；③**结构紧凑**，功率密度高，较相同功率铁芯电机重量、体积可减少30~50%；④**控制特性好**，响应速度较快，具有良好的启动和停止特性，高速运行时转速调节灵敏；⑤**使用寿命上**，空心杯电机免维护，寿命长，普通电机电刷易磨损需定期更换。**空心杯电机适合应用于尺寸小、精度高、灵活性强的灵巧手。**
- 根据换向方式不同可分为有刷空心杯和无刷空心杯。无刷空心杯电机采用电子换向，线圈固定，磁极旋转，利用电子设备、霍尔元件感知永磁体磁极位置，根据检测结果使用电子线路切换电流方向，使其产生正确方向的磁力来驱动电机，无需在转子上额外增加启动绕组，采用无齿槽结构线圈，可提升效率和功率密度，适用于长时间连续运行和具备较高控制要求、可靠性要求的场景；有刷空心杯采用机械换向，磁极固定，线圈旋转，换向器和碳刷交替接触使电流方向随电机转动变化，会存在碳刷磨损、产生电火花，适用于对产品灵敏性和可靠性要求较高的行业。

图：空心杯电机结构示意图



表：有刷空心杯与无刷空心杯对比

项目	有刷空心杯电机	无刷空心杯电机
结构爆炸图	外壳 磁体 绕组	绕组 平衡簧 磁钢 外壳 霍尔 波簧
剖面图	电刷 空心杯电枢 输出轴 换向器 定子 永磁体	磁环 空心杯电枢 输出轴 霍尔元件 定子 永磁体
寿命	寿命有限（2000h）	长寿命（20000h）
转速	高转速	转速有限
运行干扰	有火花	可忽略
控制方式	控制简单	需要驱动控制

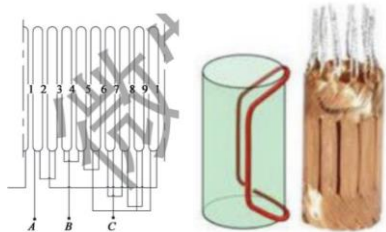
3.1. 驱动：空心杯电机为灵巧手电机首选，绕线为核心技术壁垒

□ 空心杯电机难点在于绕线技术——绕线设计、绕线工艺及绕线设备

- **绕线是空心杯核心技术壁垒。**空心杯无铁芯自支撑绕组由漆包线制成，在制造过程中通过施加压力和温度将相邻电线的漆融化在一起，形成坚固的绕组结构。线圈设计——体现了厂商对于电机设计的理解，导线粗细、绕组匝数影响电阻、电流、速度常数；线圈加工——空心杯绕组漆包线均为悬空绕线，无齿槽、无支撑，绕制过程直接影响电机的体积、转速、功率密度、良率、精度影响磁场稳定性。
- **按线圈绕法分为直绕式、斜绕式、马鞍/同心式。**马鞍和斜绕较简单、重量轻、转动惯量小、时间常数小、输出力矩大，为国外先进空心杯方案：
 - **直绕式：**元件有效导体部分与电机轴线平行，工艺主要为，手工按绕组跨距挂线——整形——灌封增加强度和绝缘性。直线部分壁薄、端部线圈重叠较多，需要留出放置端部的空间，绕组、空间利用率较低，模具复杂，灌封工艺繁琐，生产效率低。
 - **斜绕式：**元件有效导体部分与电机轴线成一定倾斜角度，可为六边形、三角形，工艺主要为，导线在绕线模绕成型——整形固化——浸漆增加强度和绝缘性。工装较为简单，工艺过程简便，适合体积小、线径细、槽满率低的杯型绕组，不适用电流较大需多根线并绕的场景。
 - **同心/马鞍式：**数个相互独立的线圈通过拼接、整形固化制成，端部无重叠、厚度小、磁路气隙小、利用率高，**相同绕组参数下性能表现较好。**同心式绕组根据设计要求可单根绕制、多根并绕，线径选择灵活、槽满率高，但由于由独立线圈拼接，一致性、均匀性不易保证。

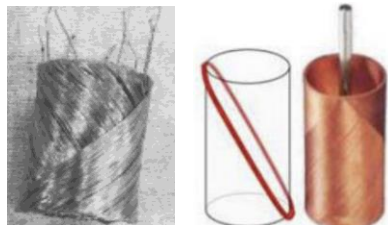
图：空心杯电机线圈绕制方法

直绕式



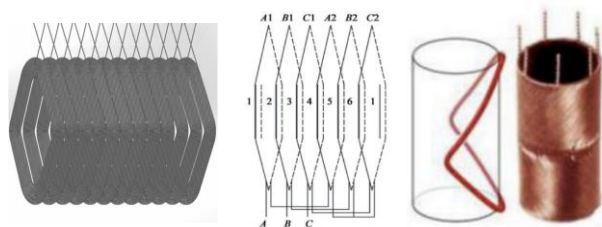
需留出端部线圈空间，利用率较低，模具复杂，灌封工艺繁琐，生产效率低

斜绕式



工装、工艺过程简便，适合体积小、线径细、槽满率低的杯型绕组，不适用电流较大、需多根线并绕的场景

马鞍/同心式



端部无重叠、厚度小、磁路气隙小、利用率高，相同绕组参数下性能表现较好，线径选择灵活、槽满率高，但由于由独立线圈拼接，一致性、均匀性不易保证

3.1. 驱动：空心杯电机为灵巧手电机首选，绕线为核心技术壁垒

□ 空心杯电机难点在于绕线技术——绕线设计、绕线工艺及绕线设备

➢ 按成型方式分为人工、卷绕、一次成型工艺。一次成型工艺简单、绕制效率高、良率高、线圈直径小，我国空心杯电机多采用卷绕工艺：

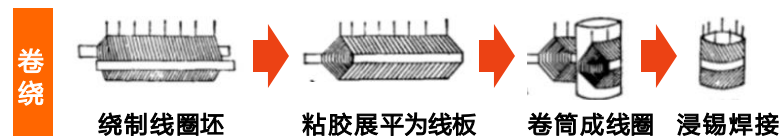
■ 人工绕线：通过插针、手动卷线、手动排线等步骤进行生产。

■ 卷绕工艺，通过铜线绕成空心线圈——线圈挤扁制成线板——线板绕成圆柱状线圈——浸锡焊接，为半自动化工艺，不适用<12mm的电机。

■ 一次成型工艺，通过绕线机将铜线按一定规则缠绕在主轴上从而直接成型，为全自动化工艺。

➢ 空心杯电机绕线设备为绕线技术壁垒之一。**绕线机难点在于超细导线的张力控制和不同线型的绕制**，0.02-0.25mm超细导线绕制过程中张力过大会使电阻增加，张力过小会导致排线疏松，对于设备PLC、伺服及传动器件要求较高。海外厂商设备较先进，绕线设备基本实现自动化，生产效率高，头部厂商如瑞士Meteor、日本田中精机、日本日特机械。我国绕线机研发起步较晚，自动化程度相对较低，线圈以卷绕式为主，部一次成型设备在大功率电机的粗线径线圈中可靠性和精度与国外设备有一定差距，国内公司如中特科技研发的全自动双轴绕线机采用卷绕工艺，勤联科技采用一次成型工艺，但只能绕制尺寸小、线径细、形状单一的线圈，无法满足大功率空心杯电机的要求。

图：空心杯线圈不同绕线成型工艺



图：相关企业绕线设备及产品规格

中特科技

全自动双轴空心杯电机卷绕机+生产线

适用尺寸：外径 $\phi 18-35\text{mm}$ ，线径 $\phi 0.025-0.3\text{mm}$
主轴数：1轴
主轴转速：Max 6000 转/分

田中精机

空心线圈绕线机系列

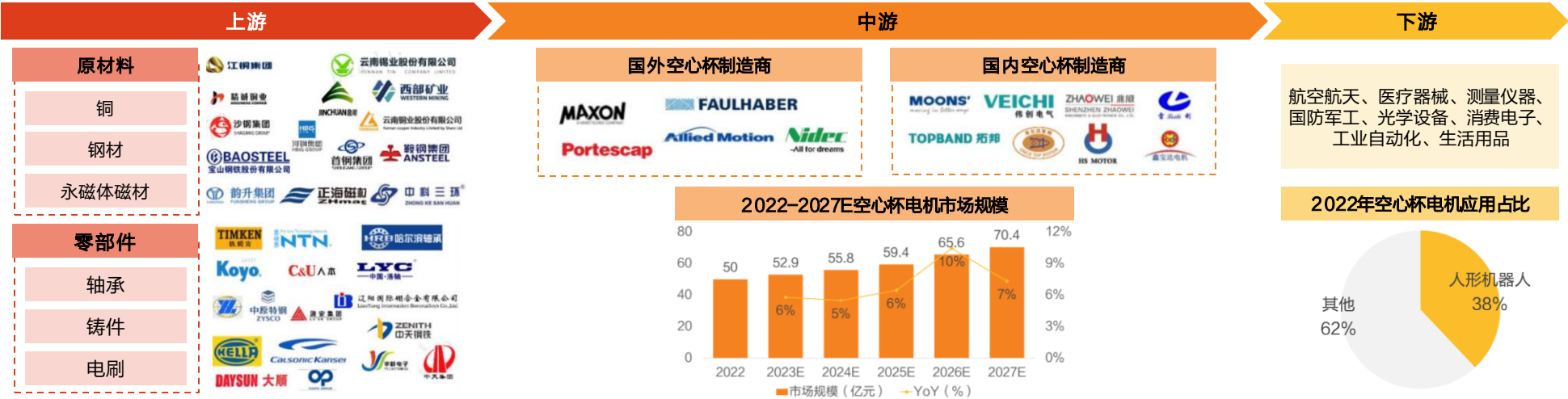
适用范围：无骨架电子线圈，采用两边夹具同步旋转工艺，可以绕制超小型线圈，线径 $\phi 0.02-0.3\text{mm}$
转速：MAX 5000 转/分

3.1. 驱动：空心杯电机为灵巧手电机首选，绕线为核心技术壁垒

□ 空心杯电机市场规模望达10亿美元级别

- 据头豹研究院预测，2025年空心杯电机市场规模约为59亿元，至2027年有望达到70.4亿元，2025~27年CAGR为8.9%。
- 空心杯电机上游主要包括铜、钢材、磁材等原材料环节，轴承、铸件、电刷等零部件环节，钕铁硼永磁体、贵金属电刷、套筒轴承较适用；中游为空心杯制造商，技术壁垒在于设计、设备、工艺；下游广泛应用于航空航天、医疗器械、消费电子、工业自动化等领域。
- **永磁材料：**永磁材料是电机性能优劣关键之一，轻量化、体积小要求下空心杯电机一般使用高性能烧结钕铁硼永磁体。永磁材料主要利用稀土元素与过渡金属组成合金，主要有金属永磁、铁氧体永磁、稀土永磁。钕铁硼Nd₂Fe₁₄B为第三代稀土永磁材料，具有高剩磁、高矫顽力、高磁能积、低质量/体积等特点，应用范围较广、性价比较高，生产工艺有烧结（>85%）、粘结、热压。高性能钕铁硼尺寸精度高、磁性均匀、一致性好，加工容易，适用于高功率、高磁场领域和小型化、轻量化场景，专利壁垒、生产技术门槛较高，占总产量30%以下。钕铁硼磁材除空心杯电机外还可应用于新能源汽车、家电、风力发电等领域。

图：空心杯电机产业链梳理

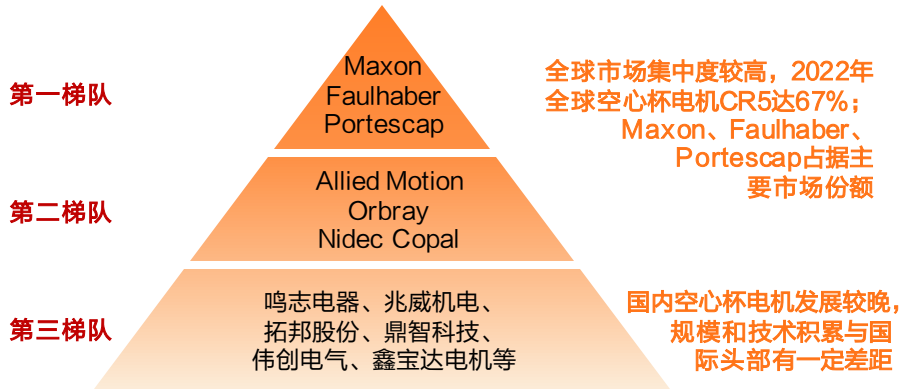


3.1. 驱动：空心杯电机为灵巧手电机首选，绕线为核心技术壁垒

□ 国际头部占据主要市场，国产替代性价比较高

- 全球空心杯电机市场集中度较高，2022年CR5达67%，Maxon、Faulhaber、Portescap等国际头部企业占据主要份额。国内制造商主要有鸣志、兆威、鼎智等，性能仍有一定差距，但具备一定性价比优势。
- 经过梳理，我们选取国内外5款具备一定可比性（13mm）的产品：
 - **空载转速**：Maxon（4.2万转）等海外厂商远高于国内厂商（1.2/2.9万转）；
 - **效率**：Maxon/兆威/鸣志达到79%/74%/73%，参数相差较小；
 - **重量**：Faulhaber、鸣志重量相对Maxon等减少约60%的重量；
 - **最大绕组温度**：Maxon可达到155℃，其余可达125℃，鸣志仅达到100℃；
 - **机械时间**：Portescap低至1.1ms，鸣志仅为9.19ms，兆威较接近Maxon；
 - **价格**：以鸣志为例，其空心杯电机价格约600~2500元，主要是因为部分集成减速器、编码器；横向对比，Maxon等海外空心杯电机约为2000元，类似型号鸣志量产价格最低仅600元/个、兆威较海外低约400-500元。

图：全球空心杯电机竞争格局



表：国内外部分空心杯电机厂商产品参数对比

品牌	Maxon	Faulhaber	Portescap	兆威机电	
型号	ECXSPEED13L	Series1218B	12ECP488B21	MC0623	MC1226
尺寸/mm	13	12	12	6mm	12mm
额定电压/V	18	6	9	12	12
额定电流/A	1.42	—	3.3	0.256	0.69
额定转矩/mNm	5.16	—	8.1	0.4	2.38
空载转速/rpm	41900	30500	36000	63400	28600
电机效率/%	79%	62%	—	70%	74%
重量/g	34	8.3	30	—	—
外壳环境热阻/℃/W	19.5	48.3	24.2	67.9	38.6
绕组外壳热阻/℃/W	2	10.6	2.5	15.2	7.5
最大绕组温度/℃	155	125	125	125	125
机械时间/ms	3.25	7.7	1.1	2.84	4.5
零售价格/元	2198	—	2321	1860	1799
品牌	鸣志电器（有刷DCU系列）				
型号	DCU08017P06	DCU08017P12	DCU13020P06	DCU13020P06	
尺寸/mm	8	8	13	13	
长度/mm	36.8	47	19.7	42.8	
额定电压/V	6	12	6	6	
最大连续电流/mA	0.165	0.054	0.409	0.407	
最大连续转矩/mNm	1.8	100	1.74	80	
空载转速/rpm	3379	16	12100	186	
电机效率/%	90%	42%	73%	73%	
重量/g	9.6	12.3	13.6	30	
外壳环境热阻/℃/W	52.8	52.8	50.6	50.6	
绕组外壳热阻/℃/W	26.4	26.4	16.8	16.8	
最大绕组温度/℃	100	100	100	100	
机械时间/ms	6.6	6.82	9.19	7.77	
电刷类型	稀有金属	稀有金属	稀有金属	稀有金属	
集成部件	含减速器+编码器	含减速器+编码器	仅电机	含减速器	
减速级数-减速比	1-4	5-1024	—	3-66	
未税价格/元	2228	2530	583	1007	

注：根据公开资料梳理，可能存在一定滞后性；标黄列选取进行对比的型号，标红表明具备优势、标蓝表明存在劣势；不同产品间可能不具备可比性，仅做示例、仅供参考。

3.2. 传动：技术路线存在分歧，关注适用广的减速器、丝杠和高壁垒的腱绳

□ 传动技术仍存分歧，关注减速器、丝杠、腱绳

➢ 根据我们对不同灵巧手传动方案的梳理，相较于灵巧手电机选型较集中于空心杯电机，**灵巧手传动技术路线存在一定分歧，我们认为可重点关注不同方案中通用性较强、需求量较大的基础传动件减速器、丝杠，以及具备高壁垒、高价值量的腱绳。**

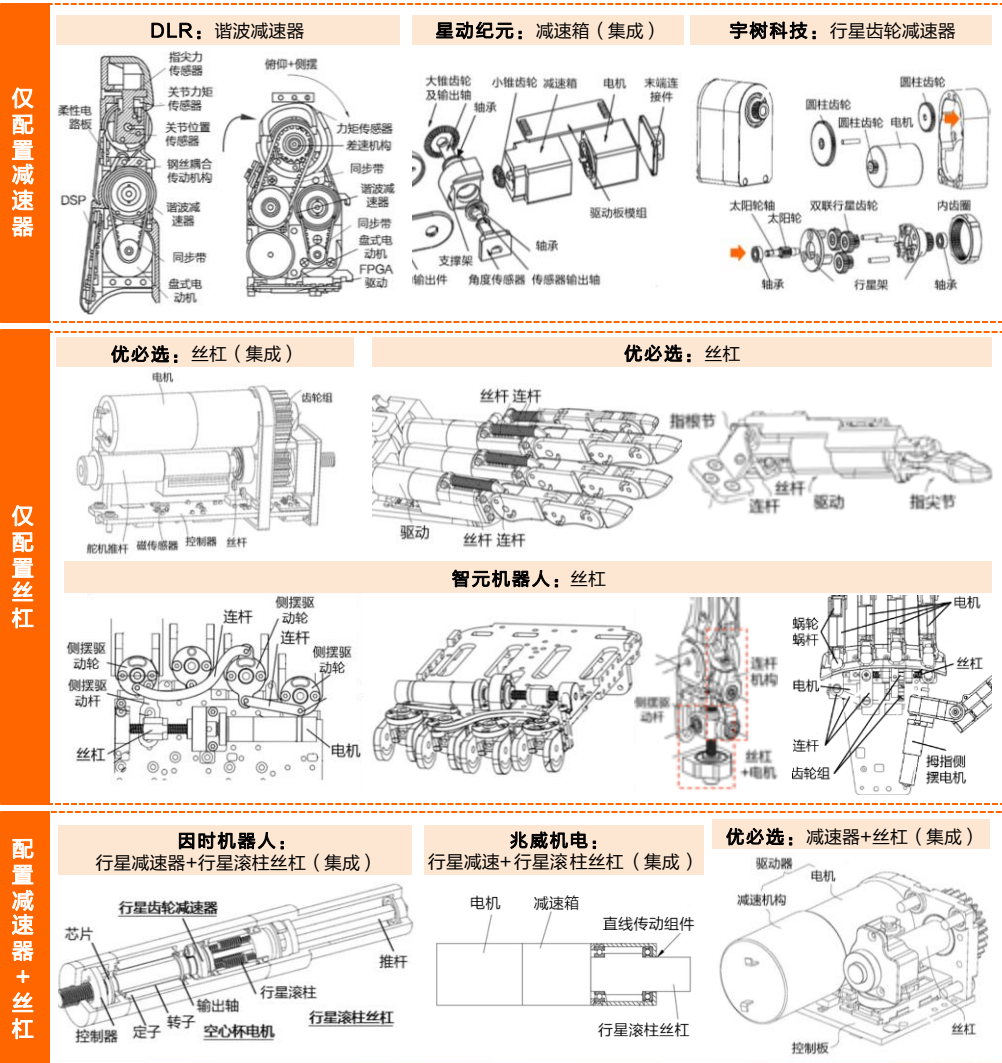
➢ **基础传动件：**我们梳理发现基础传动件减速器和丝杠在灵巧手中直接使用或集成于微型电机的用量仍较大，且刚性/柔性传动都有应用，部分案例减速器和丝杠可同时配置。在电机集成化、微型化设计 + 灵巧手自由度/电机数量持续增加的产业趋势背景下，减速器和丝杠用量有望增加，同时手部且相较于躯干、四肢关节空间非常有限，微型减速器、微型丝杠对生产精度要求较高，制造难度较高：

■ **减速器：**主要用于降低电机转速、提高扭矩。据我们梳理，**灵巧手减速器较多集成于电机，选型多为行星齿轮减速器**（因时、帕西尼），也有采用谐波减速器的方案（DLR）。

■ **丝杠：**主要用于将电机旋转运动转化为直线运动。据我们梳理，**丝杠在灵巧手中应用十分广泛，刚/柔性方案中均可应用，选型多为行星滚柱丝杠**（兆威、因时）。

➢ **腱绳传动：**腱绳在应用中单手用量大，性能上需要有较强的断裂强度、抗蠕变性、耐磨损性、寿命，受材料影响较大。目前主要由高强度材料制成，分为钢丝绳（如钨钢、不锈钢）和高分子绳（主要为超高分子量聚乙烯纤维UHMWPE）。

图：不同灵巧手方案中减速器与丝杠应用梳理



3.2.1. 传动：减速器——行星减速器适用于灵巧手，小模数齿轮制造难度高

行星减速器传动效率高，较适合应用于灵巧手

- 行星齿轮减速器传动效率较高、免维护。机器人、数控机床、航空航天等领域主要采用精密行星减速器、谐波减速器和RV减速器。行星齿轮减速器载荷均匀分布、传动效率较高、终身免维护、成本较谐波低，常用于移动机器人轮部或集成于伺服电机、步进电机中。行星齿轮主要由太阳轮、行星轮、行星架、内外齿等机构组成，单级减速一般不超过10，一般会多级使用以提高减速比。
- 微型行星减速器适用于机器人灵巧手。微型行星减速器受益微型齿轮加工技术发展，在灵巧手中逐步替代微型谐波，虽然精度有一定降低，但可增加负载、降低成本。尺寸上，兆威有6/8/10mm直径微型塑胶行星减速机、3.4/4/6/8/10mm金属行星减速机；鸣志电器8mm DCU0817系列有刷空心杯电机搭载5级减速器后，相较1级减速器，扭矩由1.8mNm提升至100mNm，长度/重量增加10.2mm/2.7g。价格上，鸣志空心杯电机若配置1-2级减速机增加的价值量较小，3-4级需增加约100-200元，5级需增加约300元；兆威微型行星减速机单价约100-300元。

图：兆威机电微型行星减速器



表：主流减速器技术指标与应用场景对比

项目	行星齿轮减速器	谐波减速器	蜗轮蜗杆减速器	RV减速器
主要构成	太阳轮、行星轮、内齿圈	柔性内轮、刚性外轮、波发生器	蜗轮、蜗杆	行星轮前级、摆线针轮后级
减速比	单级2.8-12.5	单级50-500	单级8-80	单级11-87
输出扭矩	一般	一般	低	高
传动效率	80%-95%	70%-90%	70%-90%	90%-94%
使用寿命	>2万小时，免保养	>8000h	-	>6000h
重量体积	径向长度大	小	大	中
制造要求	高	高	高	较高
成本(元/个)	200-2000	1000-5000	5000-8000	
适用场景	移动机器人，集成于步进/伺服电机	机器人腕部、手部、小臂	-	机器人基座、大臂、肩膀
生产企业	住友、SEW、尼得科、中大力德、科峰智能、丰立智能等	哈默纳科、绿的、中技克美、大族、来福、中大力德、双环、昊志、丰立等	-	纳博特斯克、威腾斯坦、双环传动、中大力德、昊志机电等

表：鸣志电器空心杯电机不同减速器配置

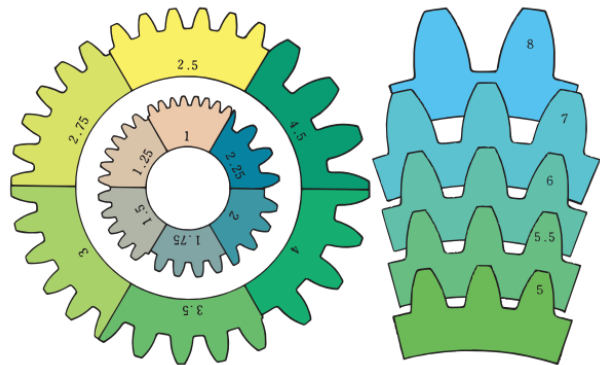
品牌	鸣志电器DCU08017P06有刷空心杯				
减速器级数	1	2	3	4	5
减速比	4	16	64	256	1024
空载转速/rpm	3379	845	211	53	13
名义转速/rpm	824	206	52	13	8
最大扭矩/mNm	1.8	6.5	21.1	74	100
效率	90%	81%	66%	58%	42%
长度/mm	25.6	28.1	30.7	33.2	35.8
重量/g	7.1	7.7	8.5	9	9.8
未税价格/元	1433	1433	1447	1571	1736
较1级增加长度	—	2.5	5.1	7.6	10.2
较1级增加重量	—	0.6	1.4	1.9	2.7
较1级增加价格	—	0	14	138	303

3.2.1. 传动：减速器——行星减速器适用于灵巧手，小模数齿轮制造难度高

□ 微型行星采用小模数齿轮，设计-制造全链技术难度高

- 微型行星齿轮传动使用小模数齿轮。模数是齿距与圆周率的比值，用于表示齿轮齿形大小。国标定义小模数齿轮模数为<1mm，中国机械通用零部件工业协会将≤2.5mm的齿轮定义为小模数齿轮，微型行星齿轮传动中齿轮模数均小于1mm，甚至可达0.4~0.5mm。小模数齿轮广泛应用于电动工具、农林机械、医疗器械、智能家居、特高压电网、缝纫机领域。
- 小模数齿轮可使用金属和塑料作为原材料，加工方式有切削、锻造、粉末冶金，塑料齿轮可采用注塑工艺。金属切削齿轮硬度高、负载大、精度高，适用于高负载场景，粉末冶金齿轮一致性好、重量轻、成本低，适用于低负载场景，塑料齿轮质量轻、耐磨损、抗冲击、自润滑、噪音低，适用于汽车、电器、轻量化场景。塑料齿轮注塑成型后为9级精度，滚齿后可达8~9级，精切后可达7级及以下。丰立智能、夏厦精密主要为金属切削工艺，海昌新材主要为粉末冶金工艺。

图：齿轮模数与大小对比



表：小模数齿轮不同材质与加工方式对比

类型	金属小模数齿轮		塑料小模数齿轮
	金属切削	粉末冶金	
材料	以钢为主，其次为铸铁、合金		聚甲醛POM、尼龙PA、聚酯PBT、聚醚醚酮PEEK等
生产工艺	齿轮钢切削加工而成，主要有锻造、铣齿、滚齿、车齿、磨齿、抛丸、热处理等工序	金属粉末压制成型或金属注射成型，主要有压制、烧结、研磨、热处理等工序	高精度塑料齿轮为注塑+滚齿+精切切削，低精度注塑+滚齿或一次性注塑成型
优势	抗冲击性较高、硬度高、寿命长、扭矩负载大、齿形精度高、传动噪音小	产品一致性好、材料利用率高、生产效率高、比钢齿轮重量轻、成本低	PEEK质量轻、惯性小、耐腐蚀、耐磨损、低噪声、自润滑、机械强度高、耐冲击
劣势	材料利用率低、生产效率低、重量较大、成本较高、	易磨损、硬度相对较低、扭矩负载较小、精度较低、传动噪音较大	热膨胀大，弹性模量和弯曲强度较小，温升和机械负荷下容易磨损断裂
应用领域	桥梁道路施工等高负载场景	低负载场景	汽车、电器、轻量化场景
代表企业	丰立智能、夏厦精密	海昌新材、丰立智能	科盟创新（科达利）

表：不同精度齿轮应用领域及加工工艺

精度	精度等级	应用	加工工艺	
0	最高精度			
1	超精密等级	用于齿轮标准量仪校对和精度传递实体基准		
2				
3	高精度等级	精密机床、仪器、船舶、军工、航空航天、中高端乘用车、新能源车、减速器等	范成法，磨齿、滚齿、研磨/剃齿	7级及以下塑料齿轮可注塑+滚齿+一二次精切
4			范成法，磨齿/剃齿	
5			范成法，切齿/精加工	
6	中等精度等级	汽车、手动变速器、商用车、农机、工程机械、工业机床、航空发动机、减速器等	范成法或仿型法，一般不磨齿	8级及以上塑料齿轮可一次性注塑成型
7			任意方法，不需要精加工	
8				
9	低精度等级	农业机械、工程机械、拖拉机、一般用途减速器等		
10				
11				
12				

3.2.1. 传动：减速器——行星减速器适用于灵巧手，小模数齿轮制造难度高

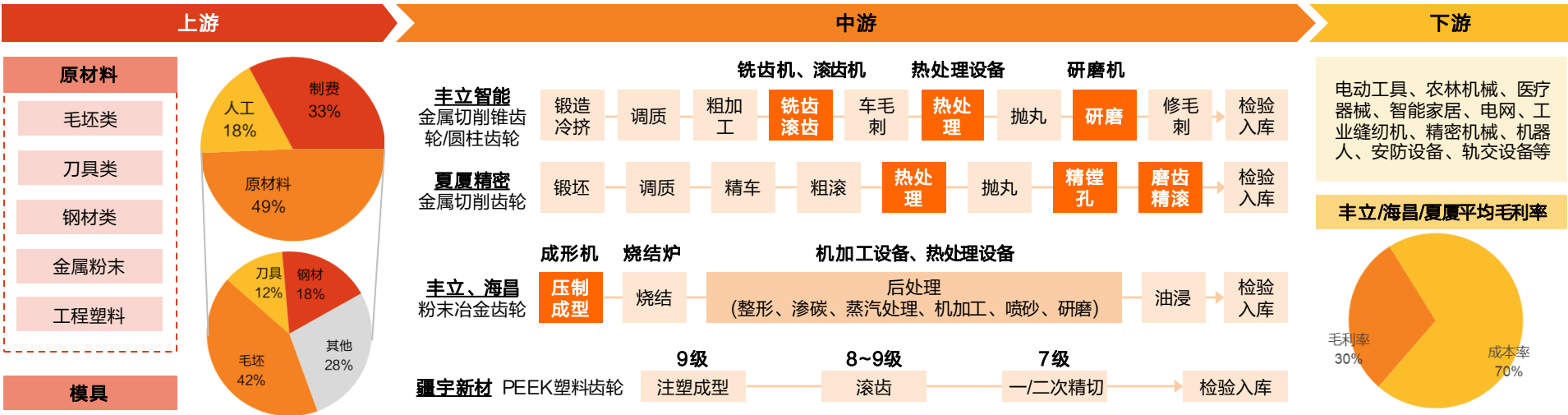
□ 微型行星采用小模数齿轮，设计-制造全链技术难度高

- 小模数齿轮生产依赖knowhow，需要掌握全链技术。小模数齿轮对径向精度、齿侧隙精度要求高，加工中的切削力、夹紧力、支撑力容易引起齿轮变形和断裂，外界振动、冲击力对精度影响较大。小模数齿轮技术壁垒来自于全链knowhow的掌握，丰立智能和夏厦精密在设计-设备-刀具-生产-检验环节均有相关自研技术。据中国机械通用零部件工业协会统计，2020年全国齿轮规上企业约800家，生产小模数齿轮仅约56家。
- 产业链：参考丰立智能、夏厦精密、海昌新材公告，小模数齿轮上游原材料平均约占生产成本50%，主要包括毛坯、钢材、刀具；中游为生产制造，铣齿、滚齿、磨齿、热处理、压制成型为核心工艺，相关生产设备单价高/合计价值占比高，人工、制费平均占生产成本18%、33%；下游应用于电动工具等行业，2024~2025年平均毛利率约为30%。

表：丰立智能各环节核心技术

环节	核心技术
设计	圆柱齿轮强度设计与校核技术
	螺旋锥齿轮与准双曲线齿轮设计与机床调整计算技术
设备	全自动六轴CNC小模数锥齿轮铣齿刀磨刀机及软件控制技术
刀具	刀条式硬质合金铣齿刀制造技术
热处理	齿面硬化热处理技术
铣齿	小模数螺旋锥齿轮球高控制技术
	小模数螺旋锥齿轮铣齿技术
	螺旋锥齿轮半滚切法设计与机床程序
	可替换的小模数弧齿锥齿轮或小模数双曲线齿轮的加工工艺
	一种高精度快速定位铣齿自动装卸装置的制造技术
检验	振动频谱运用检测技术
	螺旋锥齿轮寿命试验设计程序
	齿轮测量中心P26绝对测量程序

图：小模数齿轮产业链梳理



资料来源：Wind，丰立智能公告，夏厦精密公告，海昌新材公告，疆宇新材公众号，天风证券研究所

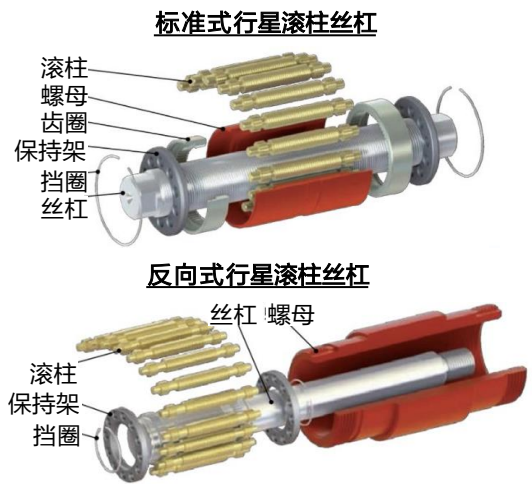
注：数据参考丰立智能、夏厦精密、海昌新材公告，报告期不完全相同，不代表最新财务数据，仅供参考

3.2.2. 传动：丝杠——滚柱丝杠加工难度大，关注加工工艺&设备国产化

□ 行星滚柱丝杠效率高体积小，较适合应用于灵巧手

- 行星滚柱丝杠效率高、体积小。丝杠从设计结构角度可分为梯形丝杠、滚珠丝杠、滚柱丝杠。梯形丝杠中无滚动体，通过滑动摩擦传动，传动效率较低；滚珠和滚柱丝杠具有钢球或螺杆型的滚动体，通过滚动摩擦传递推力，传动效率较高。相比滚珠丝杠，滚柱丝杠有更多的接触点，具有大承载、长寿命、响应速度快等优势。如KGG微型行星滚柱/滚珠丝杠可达到4mm、1.5mm，可以应用于灵巧手场景。
- 行星滚柱丝杠在主螺纹丝杠的周围行星布置了6-12个螺纹滚柱丝杠，滚柱螺母内使用的是小螺纹滚柱与主丝杠相互啮合，这时螺母的结构类似于行星齿轮箱。按照结构和运动特点分类行星滚柱丝杠可分为标准式、反向式、循环式、差动式和轴承环式。反向式行星滚柱丝杠的螺母为主动件，丝杠为输出构件，滚柱、丝杠之间无相对轴向位移，其主要用于中小负载、小行程和高速的应用场景，其最大的优势在于可将其螺母作为电机转子实现电机和丝杠一体化设计，形成结构紧凑的一体式机电作动器。

图：标准式与反向式行星滚柱丝杠



表：直线传动机构性能参数对比

项目	行星滚柱丝杠	滚珠丝杠	齿轮齿条系统	直线电机系统
承载能力	很高	高	高	低
寿命	很长	较长	较长	较长
速度	很快	中等	较快	较快
抗冲击性	很高	很高	高	高
机械刚度	较高	中等	高	中等
相对体积	小	中等	大	小
摩擦	小	小	小	小
效率	较高	很高	很高	-
安装	简单	简单	简单	简单

表：丝杠不同精度应用范围

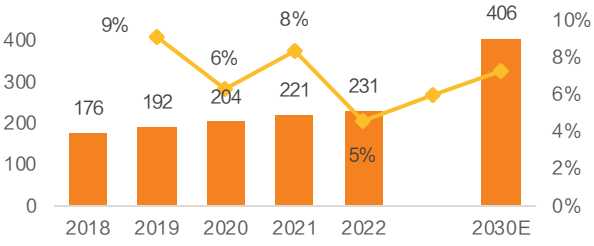
精度等级	机床							半导体/PCB					机器人			电动注塑机	三维测量仪				
	车床	铣镗床	加工中心	钻床	坐标镗床	磨床	冲床	激光设备	曝光设备	化学处理设备	引线焊接机	探测器	插件机	P C B 开孔机	正交坐标型			垂直多关节型	圆筒坐标型		
	P1																				
	P2																				
	P3																				
	P4																				
	P5																				
	T7																				
	T10																				

3.2.2. 传动：丝杠——滚柱丝杠加工难度大，关注加工工艺&设备国产化

□ 欧日企业垄断国内市场，国产厂商加速研发

- **滚珠丝杠**：据观研报告网，2022年全球滚珠丝杠市场规模约为231亿美元，预计2030年达406亿美元，2022-30年CAGR为7.3%，中国市场约占全球市场的20%。全球市场CR5达约46%，欧洲、日本企业占据全球约70%市场份额，国内高端滚珠丝杠市场德日企业份额占比90%，剩余10%为中国大陆和中国台湾企业。国外滚珠丝杠厂商主要有日本NSK、THK，德国博世力士乐、舍弗勒等，国内厂商主要有HIWIN、银泰、南京工艺、鼎智科技等，许多正在研发的企业处于未上市阶段，且多数仅具备单件生产能力，和海外大规模量产企业仍有较大差距。
- **滚柱丝杠**：行星滚柱丝杠有望逐步替代传统丝杠，但制造难度高、生产设备有限，市场规模较小，据Persistence Market Research，2023年全球滚柱丝杠市场规模约为3亿美元，同比增长6%。主要以海外企业为主，预计2022年我国滚柱丝杠市场份额Top4厂家为瑞士Rollvis、瑞士GSA、德国Rexroth、瑞典Ewellix，合计占比78%，国内厂商南京工艺占比8%，国内企业还有新剑传动、恒立液压、诺仕机器人等。

图：全球滚珠丝杠市场规模（亿美元）



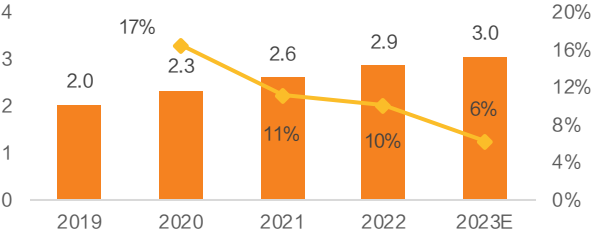
图：2022E国内高端滚珠丝杠竞争格局



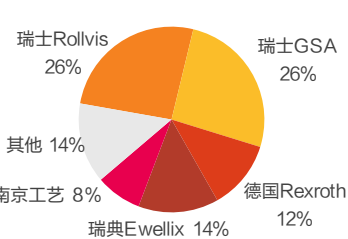
表：丝杠领域公司梳理

公司	国家	产品	精度水平
NSK	日本	滚珠丝杠：小型FA系列、高速静音BSS系列	C1-C7
THK	日本	滚珠丝杠：标准型、球保持器型；磨制型、轧制型	-
恒立液压	中国	滚珠丝杠：内循环、端塞循环、弯管循环、球保持器型；行星滚柱丝杠	-
鼎智科技	中国	滚珠丝杠	C3/C5/C7
Rollvis	瑞士	滚柱丝杠：标准式、循环式、反转式、微分式	G1-G5
GSA	瑞士	滚柱丝杠：非循环式、循环式	KL5-KL10
Rexroth	德国	行星式滚柱丝杠	T5/T7/T9
Ewellix	瑞典	滚珠丝杠：行星式、紧凑型反向、循环式	-
南京工艺	中国	滚柱丝杠：行星式、循环式	P1/P2/P3/P5
新剑传动	中国	滚柱丝杠：标准式、反向式、循环式、差动式	G1/G3/G5, T3/T5/T7

图：全球滚柱丝杠市场规模（亿美元）



图：2022E国内滚柱丝杠竞争格局



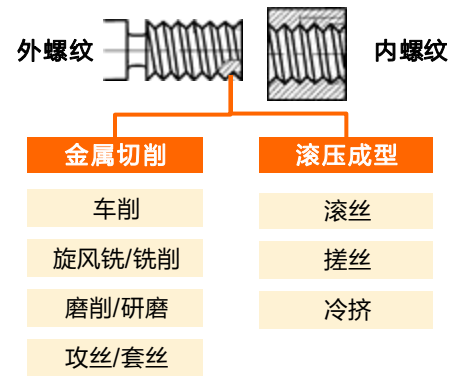
注：2021年数据缺失，采用2020年与2022年均值代替。

3.2.2. 传动：丝杠——滚柱丝杠加工难度大，关注加工工艺&设备国产化

□ 滚柱丝杠加工重点在于螺纹，加工工艺路线众多

- 机械加工工艺主要有车、磨、铣、镗、钻、刨等方式。车削特点为工件旋转，主要用于加工轴、套等产品；磨削特点为精度较高，主要用于各类高精度要求工件表面加工；铣削通过铣刀旋转对工件表面进行加工，可在平面、沟槽、曲面等应用；镗床、钻床主要用于加工孔，刨床主要用于工件表面直线加工。
- 滚柱丝杠加工重点主要为高精度螺纹加工。丝杠和滚柱外螺纹、行星螺母内螺纹为滚柱丝杠关键传动特征，对加工精度、一致性要求非常高。螺纹加工工艺可分为金属切削和滚压成型，切削包括车削、铣削、磨削、攻丝套丝，滚压包含滚丝、搓丝、冷挤。不同加工工艺可实现的最高精度不同，整体来看，磨>镗>车>铣>刨=钻=滚压=挤压，其中研磨可达到最高精度等级IT01~5。

图：螺纹加工工艺



表：不同种类切削加工机床与工艺

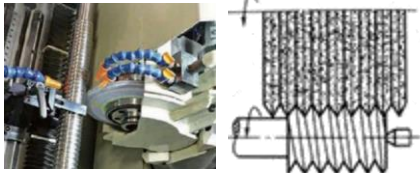
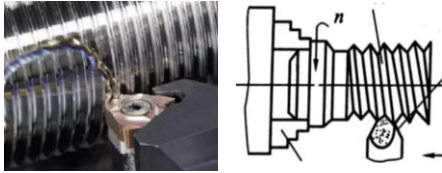
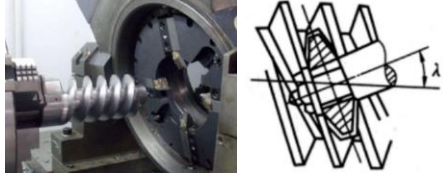
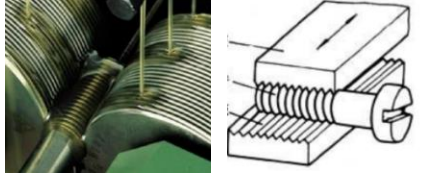
类型	车床	磨床	铣床	镗床	钻床	刨床
设备图示						
加工方式	车刀对旋转工件进行车削	磨具旋转对工件表面进行磨削	铣刀旋转在工件表面铣加工	镗刀在工件上镗孔	钻头在工件上加工孔	刨刀直线运动加工工件表面
运动特点	工件旋转	磨具旋转	铣刀旋转	镗刀旋转，镗刀/工件进给运动	钻头旋转、轴向移动	刀具与工件做相对直线运动
分类	普通车床、转塔和回转车床、仿形车床、立式车床、铲齿车床、马鞍车床等	外圆磨床、内圆磨床、平面磨床、砂带磨床、珩磨机、端面磨床、超精密磨床、抛光机等	升降台铣床、龙门铣床、单柱铣床、单臂铣床等	卧式镗床、坐标镗床、金刚镗床、深孔钻镗床、落地镗床等	立式台式、摇臂式、深孔钻床、中心孔、铣钻床、卧式钻床等	牛头刨床、龙门刨床、插床等
加工质量	IT等级7~11	研磨IT01~5，珩磨IT4~7，圆磨/平磨IT5~8，金刚石磨IT5~7	IT8~11	金刚石镗IT5~7，镗IT7~11	铰孔IT6~10，钻孔IT10~13	刨插IT10~11
应用	轴、盘、套等回转表面工件，是使用最广的一类机床	高精度、高硬度机械零件	加工平面、沟槽、曲面、齿轮	大型箱体零件加工的主要设备	精度较低，可钻通孔、盲孔，特殊刀具可扩孔、铰孔、铰孔、攻丝，机加工中非常常用	平面与沟槽加工、直线成形面加工

3.2.2. 传动：丝杠——滚柱丝杠加工难度大，关注加工工艺&设备国产化

▣ 滚柱丝杠加工重点在于螺纹，加工工艺路线众多

- 磨削——高精度丝杠螺纹的主要加工方法：磨削工艺加工精度高达G1级、P1级，为高精度丝杠主流工艺。但①磨削热变形误差占丝杠误差的40%~70%，是影响丝杠加工精度的主要误差，②磨削工序繁琐、加工较慢，③高精度数控螺纹磨床国产化率低，基本完全依赖进口。
- 硬车——以车代磨有扩大应用潜力较大：硬车削虽然精度略低，仅能达到G3级别，但加工过程中能够避免磨削过程温升，表面残余应力均匀，增加螺纹寿命，加工效率是磨削的2~3倍，对设备要求相对较小，材料浪费少，具备一定替代磨削工艺的潜力。
- 旋风铣——加工效率高但工件尺寸受限：旋风铣加工精度可达到P3级，加工效率可达到磨削的3~5倍，且产生热量低、表面质量高、能够提升刀具70%使用寿命。但旋风铣无法加工过小工件，如汉江内螺纹磨床SK7605、MITSUSEIKI内螺纹磨床GSN180iS最小可加工8mm直径内螺纹，而莱斯特瑞兹LWN 120 IW内旋风铣只能加工12mm以上内螺纹，我们认为，在灵巧手微型滚柱丝杠加工中可能会受到一定限制。
- 冷轧滚压——加工精度低，为方案次选：冷轧滚压加工效率较高，但精度仅能达到P7、G9级，我们认为可能为精密滚柱丝杠加工工艺的次选。

表：行星滚柱丝杠加工工艺对比

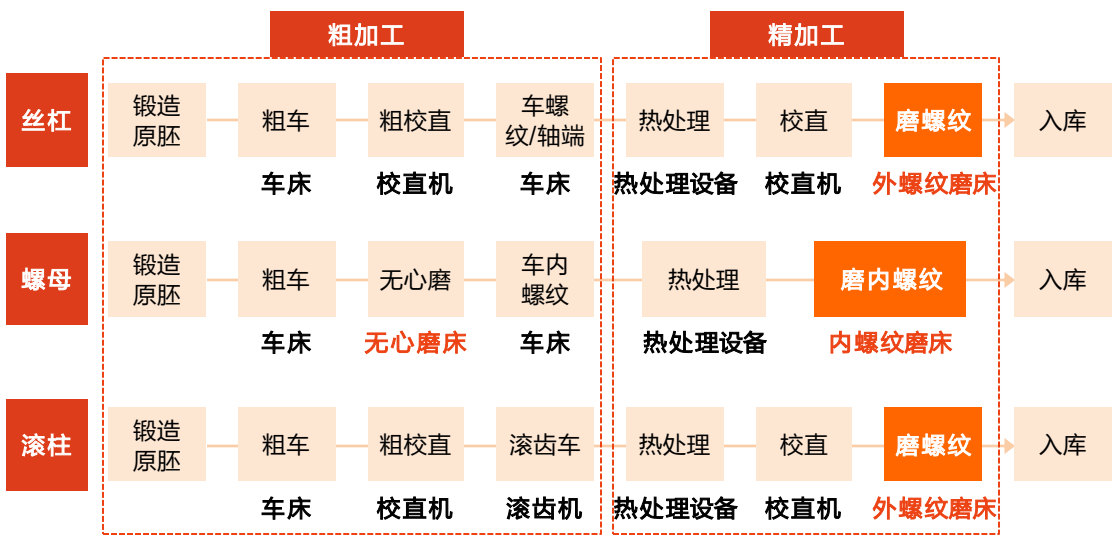
类型	磨削	硬车削	旋风铣	冷轧/滚压
示意图				
工艺说明	以两端中心孔为加工工艺基准，通过热处理、车削、磨削等几十道工序逐步完成，主要用于加工淬硬工件精密螺纹	“以车代磨”，采用螺纹滚道硬车削技术。成型车刀结构简单，用于小批量加工；螺纹梳刀较复杂，适用于中大批量细牙短螺纹加工	通过工件与刀具的旋转组合来执行加工，可将螺纹滚道一次成型铣削，工序短，且不需要反复进行刀具调整和校直	采用冷加工工艺模具制造，通过轧制、滚压进行精加工。动板直线往复运动，静板固定，工件置于之间受压并滚动，螺纹压入工件表面
加工精度	很高，可达到G1级、P1级，单线磨削可实现5级精度，适合精密丝杠加工	略低，可达到G3级，能够避免磨削过程温升导致丝杠硬度降低而导致低可靠性，表面残余应力分布均匀，增加螺纹部件疲劳寿命	略低，可达到P3级，切削产生的热量低，切削深度小，表面质量高	低，仅能达到P7级、G9级，齿形精度差，但外观较为光滑
加工效率	很低，工序较长、加工慢、周期长	较高，效率是磨削的2~3倍	很高，为磨削的3~5倍	高
制造成本	制造成本高，工序复杂、磨具要求高、能耗大	设备要求较小，刀具磨损快，材料浪费少	刀具使用寿命提高70%	设备投入较大，无屑加工

3.2.2. 传动：丝杠——滚柱丝杠加工难度大，关注加工工艺&设备国产化

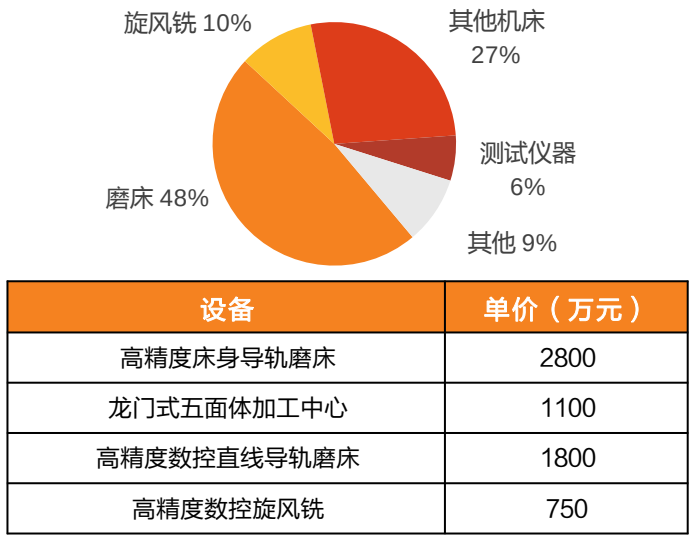
磨削——高精度丝杠螺纹主要加工方法，螺纹磨床为核心设备

- 磨削在滚柱丝杠加工中占比高。磨削是指使用螺纹磨床高速旋转的成型砂轮对加工工件表面进行高速切削，主要用于加工淬硬精密工件，精度高，但加工时间较长。行星滚柱丝杠生产工艺流程分为粗加工和精加工两大阶段，粗加工阶段主要负责毛坯制造和螺纹初步加工，精加工阶段需要对内外螺纹进行精细磨削，螺纹磨床是精加工环节的核心技术。根据《面向精密螺纹丝杠的智能制造单元系统研究》的加工案例数据，磨削工序约占丝杠加工总时间38%。反向式行星滚柱丝杠因驱动方式的改变，螺母变长，内螺纹磨制工艺难度大幅增加。
- 磨床在生产设备中占比大、单价高。以秦川机床滚动功能部件扩产项目规划为例，5 亿丝杠产值对应设备投资额1.56亿元，共采购设备 46 台，其中磨床价值量占比约为 48%。秦川机床项目中高端磨床采用了进口机床，单价高昂，如高精度床身导轨磨床单价高达2800万元，数控直线导轨磨床单价达1800万元。

图：行星滚柱丝杠加工工艺流程



图：秦川机床滚动功能部件扩产设备投资情况



注：价格数据为2022年秦川机床定增说明书披露内容。

3.2.2. 传动：丝杠——滚柱丝杠加工难度大，关注加工工艺&设备国产化

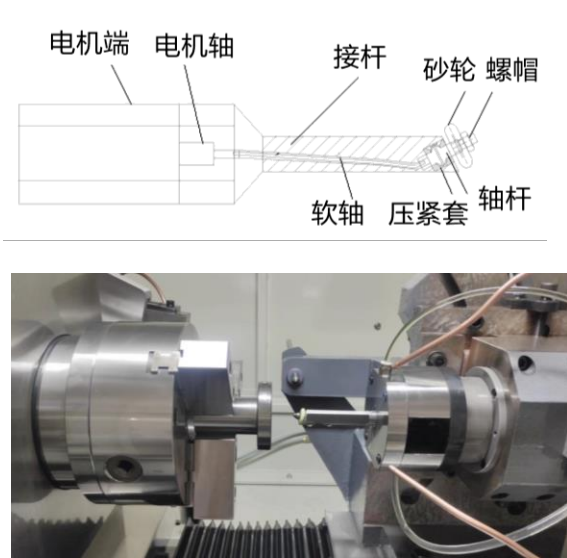
▣ 磨削——高精度丝杠螺纹主要加工方法，螺纹磨床为核心设备

- 国外螺纹磨床主要厂商包括日本三井、德国克林贝格、瑞士斯图特、英国麦屈克斯和霍罗德、美国德拉克等；国内主厂商主要有汉江机床、日发精机、华辰装备、科之鑫（双林股份子公司）。
- 科之鑫——自研弯头磨杆技术，数控螺纹磨床精度达国际领先水平，加工的丝杠产品精度最高可达PO级，2级、3级精度，能够实现反推式行星滚柱丝杠的量产。大导程螺母的螺旋升角大，普通直接杆磨削内螺纹螺母与接杆会产生干涉，此前国内相关磨削方式仿制三井磨床结构、弯头磨杆，但砂轮转轴微型轴承磨损严重，单次仅能加工几十个螺母（三井弯头磨可加工200~300个），因此国内主要使用干涉磨方法，效率低、精度低。科之鑫提出一种用于磨削高精度大导程螺母的弯头磨杆结构，通过磁悬浮、气浮方式使轴杆与压紧套无接触、无摩擦，避免了频繁更换轴承，极大提高加工精度和加工效率。

图：磨床领域公司梳理

公司名	介绍
上海机床厂	SK7420型数控丝杠磨床可磨削P1级及以上精度滚珠丝杠。
汉江机床 (秦川机床)	在螺纹磨床领域取得了众多成果与创新，产品系列丰富且精度高，不断突破关键技术，整体技术国内领先。SGK7432高精度数控丝杠磨床技术性能国内领先，制造成熟度达7级；2024年研制HJ 109高效数控内螺纹磨床可高精高效磨削行星滚珠丝杠螺母。
日发精机	2023年研发的数控螺纹磨床已用于多行业丝杆与螺母加工，截至 2024 年9月，用于丝杆、螺母的内、外螺纹磨床及磨削中心已向部分客户交付使用，用于螺母的端面外圆专用磨床也已向部分客户交付使用。
华辰装备	公司精密螺纹磨床对标世界一流产品，各项精度指标达到世界一流产品同等水平，标准丝杠试件加工精度等级最高可达PO级，广泛应用于工业母机、机器人制造、汽车零部件制造、精密仪器制造、航空航天等多个重点领域。
科之鑫 (双林股份)	主要研究内外圈磨削技术、内螺纹磨削技术、外螺纹磨削技术，数控螺纹磨床精度达到国际领先水平，加工的丝杠产品精度最高可达PO级，2级、3级精度，能够实现反推式行星滚柱丝杠的量产。依托自主研发弯头磨杆技术，内螺纹磨床可用于长径比1:10反向式行星滚柱丝杠高精度磨削，磨削效率与良品率大幅提升。

图：科之鑫螺纹磨床弯头磨杆结构



3.2.2. 传动：丝杠——滚柱丝杠加工难度大，关注加工工艺&设备国产化

□ 硬车——超精密车床“以车代磨”有扩大应用潜力

- 硬车削工艺简单高效，但工件受限、精度相对较低。硬车主要优势在于①加工效率高，以一个150mm拉伸模具0.2mm切削深度加工为例，硬车削加工需30分钟、磨削需8小时；②加工成本低，硬车削简单灵活，可在各种标准车床上完成，易于编程、方便更换刀具；③避免磨削温升导致丝杠低硬度、低可靠性，表面残余应力分布均匀，增加螺纹部件疲劳寿命。但**传统上认为硬车削加工精度较低且无法加工高硬度工件，仅用于粗加工**，主要是由于硬质材料的切削力大、对导轨的反推力大，传统车床减震特性有限、难以承受，因此加工精度不够、表面粗糙度差、刀具磨损大。硬质合金材料硬度可达80HRC、耐磨性强，通常认为需要金刚石砂轮磨削加工，淬火钢硬度一般为58~65HRC。
- 汉布雷格——多个关键机床技术解决硬质材料高精度加工需求。荷兰汉布雷格Hembrug为西班牙诺巴特机床集团成员，专门制造高精度硬车床。汉布雷格MIKROTURN超精密硬车床采用**花岗岩底座+静压导轨+PCD金刚石刀具**，花岗岩底座硬度、热稳定性、减震能力优于铸铁，静压导轨实现无摩擦、减小刀尖振动、长久保持精度，PCD金刚石刀具耐磨、表面粗糙度更优，加工形状精度可达0.5~1 μm，表面粗糙度0.1~0.4 μmRa，材料硬度范围55~70HRC，能够实现丝杠螺母、滚柱轴承等精密部件的加工。

图：汉布雷格超精密硬车床花岗岩底座



图：汉布雷格MIKROTURN系列超精密硬车床

汉布雷格 超精密硬车床 MIKROTURN系列



立式超精密车床
650V/800V/1000V/
1000V4/1500V4

卧式超精密车床
Baseline/100/
500XL/Twin

亚微米级卧式超精密车磨复合机床
Grind100

图：汉布雷格MIKROTURN 100超精密硬车床参数

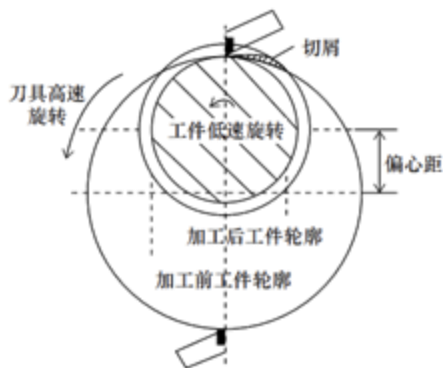
型号	汉布雷格 MIKROTURN 100
最大车削尺寸	Ø380mm、长度350mm
最大工件重量	50Kg
工件硬度范围	55~70HRC，如轴承钢100Cr6、高速钢、模具钢、表面硬化钢、硬质合金
可加工工件类型	丝杠螺母、轴承环、滚柱轴承、液压件、驱动轴、齿轮、各种注塑&模具组件
最大主轴转速	4000
主轴扭矩	50Nm
主轴跳动	0.1 μm
行程	Z轴350mm、X轴240mm
最大进给速度	12m/min
工进速度	0~12m/min
数控系统分辨率	0.1 μm
定位精度	1 μm
重复定位精度	0.2 μm
机床重量	7T

3.2.2. 传动：丝杠——滚柱丝杠加工难度大，关注加工工艺&设备国产化

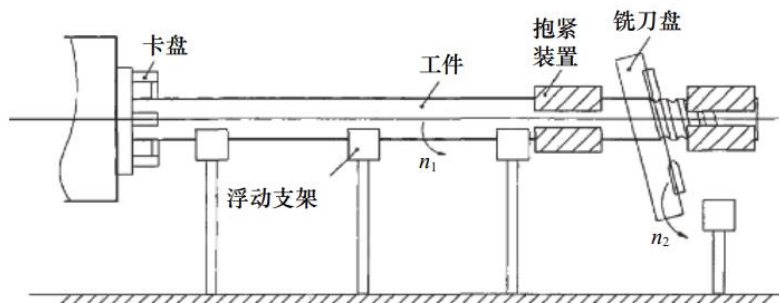
□ 旋风铣——先进螺纹加工方法，加工效率更高

- 旋风铣是指用装在高速旋转刀盘上的硬质合金成型刀从工件上铣削出螺纹的螺纹加工方法。加工过程中工件1~10 r/min 低速旋转，刀盘大于600 r/min 转速高速旋转，同向旋转完成顺铣，工件每旋转一周，刀盘沿着工件轴线移动一个螺纹导程的距离，实现螺纹滚道加工。**旋风铣特点是速度高、加工效率高、加工产生热量较小，但精度较为有限、高切削速度会导致小径工件弯曲变形。**
- 旋风铣工艺可通过三种方式实现：
 - **旋风铣专机**：即使用专门用于旋风铣的机床，精度高、加工范围广，但投资巨大、柔性差，不能完成后续车铣钻孔等一系列其他加工工序。
 - **瑞士型走心机+旋风铣刀座**：即在走心机上加装旋风铣刀座，精度高、数控化自动加工、加工范围较广，不需要购买专用机床，投资少，是接骨螺钉、小蜗杆、微型丝杠等零件领域先进的加工解决方案。走心机还可以完成车铣钻等后续加工工序，实现自动化高效加工。
 - **普通车床+旋风铣刀座**：该方式为国内采用的改造方式，投资小但比较低端，精度较低，不能加工微型零件。

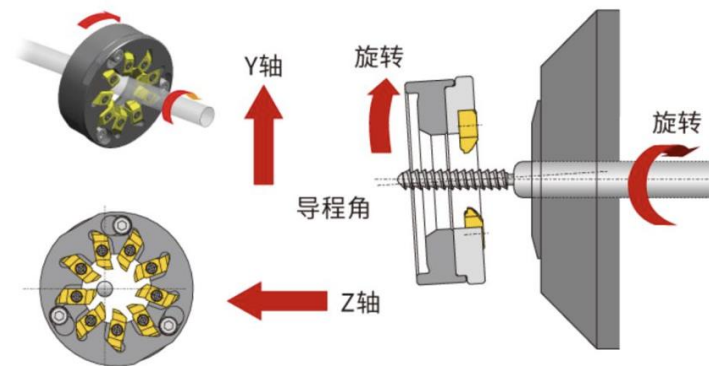
图：旋风硬铣削加工原理



图：旋风铣机床结构



图：旋风铣加工工艺示意图



3.2.2. 传动：丝杠——滚柱丝杠加工难度大，关注加工工艺&设备国产化

□ 旋风铣——先进螺纹加工方法，加工效率更高

- 旋风铣刀（刀具）：旋风铣头需完成高速精密切削加工，直接影响机床加工精度和效率，超硬刀具材料聚晶立方氮化硼PCBN适用于螺纹旋风硬铣削，可对硬度大于50HRC的淬硬钢直接切削。国内厂商沃尔德、欧科亿均有PCBN旋风铣刀片产品，可应用于人形机器人丝杠旋风铣加工。
- 旋风铣床（机床）：德国莱斯特瑞兹、中国汉江机床均有专门用于旋铣的机床。莱斯特瑞兹LWN系列旋铣床型号较多，可覆盖众多工件尺寸、行业，外旋铣可加工直径3mm的微型部件，内旋铣最小可加工工件直径为12mm。汉江机床SK6010数控丝杠铣床主要用于滚珠丝杠螺纹滚道硬旋铣成型加工，采用可转位CBN刀片进行成型高速铣削，加工效率比传统方式提高30%，可加工最小5mm的螺距。

图：莱斯特瑞兹LWN 160外旋铣床



图：汉江机床SK6010数控丝杠铣床



图：PCBN刀片与旋风铣刀



表：部分旋铣床加工参数与应用领域梳理

型号	莱斯特瑞兹 LWN系列旋铣机						汉江机床
	LWN 65	LWN 90	LWN 100	LWN 120	LWN 120 IW	LWN 160	SK6010数控丝杠铣床
加工方式	外旋铣	外旋铣	外旋铣	外旋铣	内旋铣	外旋铣	—
工件直径	3~10mm	10~50mm	14~30mm	15~50mm	12~150mm	10~100mm	最大80mm
工件长度	最大250mm	10~350mm	最大220mm	最大950mm	最大800mm	最大6000mm	最大1800mm
应用	汽车、医疗	驱动、汽车、航空	汽车	驱动、汽车，可加工硬质材料	驱动、汽车，可加工内牙型	驱动、塑料、航空、能源	丝杠螺纹滚道

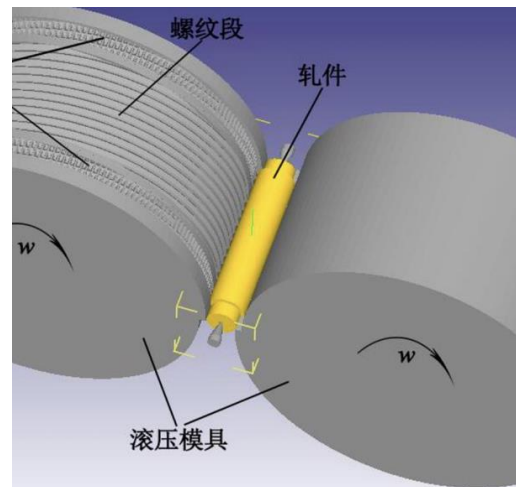
3.2.2. 传动：丝杠——滚柱丝杠加工难度大，关注加工工艺&设备国产化

□ 冷轧滚压——金属成型加工方法，具备微型化加工潜力

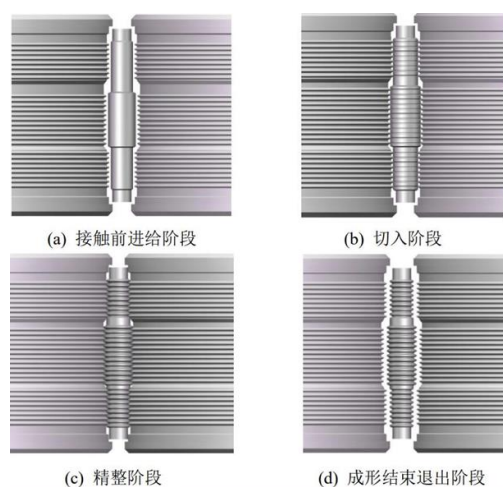
➢ 滚柱成形过程中工件放置在滚压轮之间，两滚压轮同向旋转并径向进给运动，逐步压入形成最终齿形。相对于切削加工，滚压优点为①表面质量较好，②能提高工件表层金属硬度、强度；③效率比切削螺纹提高工效几倍至几十倍，易于实现自动化；④不产生切屑，节省材料；⑤可加工切削无法加工的细长工件。冷压工艺主要集中于花键，齿轮、螺纹与蜗杆等产品，主要用于汽车、内燃机、发电机等领域。国内冷压工艺应用较久，如杭州新剑、北京齿轮总厂、南京工艺装备厂等。但由于对成形设备的认识、成形精度的控制以及成形机理的理解等方面的不足，实际生产的零件质量还有待提高。

■ 诺仕机器人——精密轧制工艺实现微型丝杠精度、尺寸突破。诺仕机器人主要采用精密轧制工艺生产行星滚柱丝杠，目前已经能够加工丝杠直径1.5mm、螺母直径5.5mm的全球最小C5级行星滚柱丝杠。公司螺母直径6mm、丝杠直径1.6mm的C5级微型滚柱丝杠额定负载10KG，寿命达到300万次以上，10万套时价格低至20美元。

图：螺纹滚柱轧制成形示意图



图：冷轧压成形过程



图：诺仕机器人C5级高精度微型丝杠

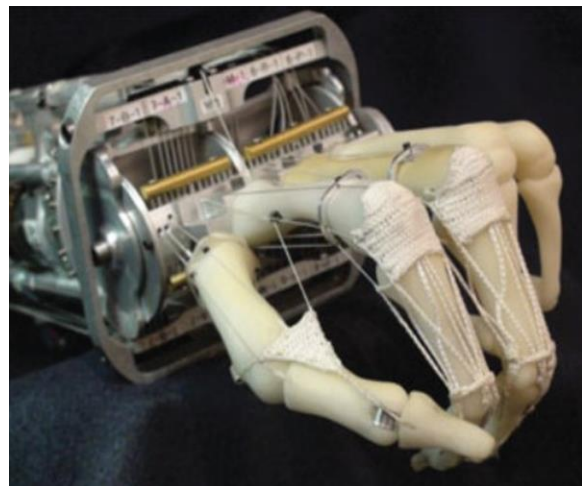


3.2.3. 传动：腱绳——传动中壁垒较大环节，有望贡献边际增量

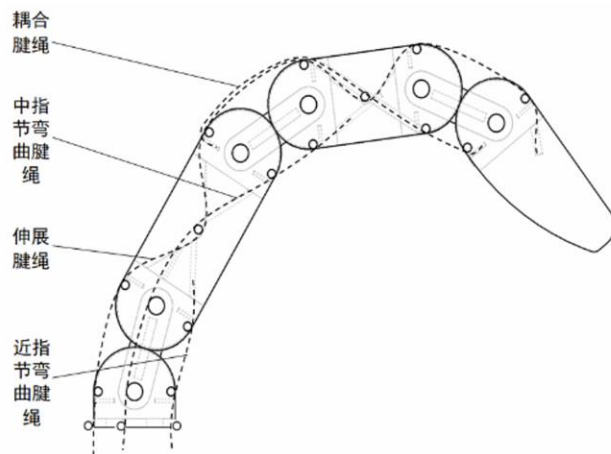
□ 腱绳赋予灵巧手精细控制和轻量化，具较大发展潜力

- 腱绳能够提升灵巧手的精细控制能力，是灵巧手轻量化的重要材料。腱绳传动系统使用类似人类手指的腱和绳索结构，通过拉动或放松绳索来驱动手指的关节运动。通常采用电机驱动滚珠丝杠转换为直线运动，腱绳形成一个腱环套在丝杠螺母上，螺母拉动连接在灵巧手指指骨上的腱绳实现手指绕关节轴的转动运动。腱绳+外置电机近似于人类手部运动原理，能够选择更大功率的型号，易于为单个关节配置多个驱动实现变刚度设计；同时易于实现指骨的小型化、轻量化，减少运动能耗，为后期传感器拓展升级提供充足的布局空间；但该方案也会增加系统不稳定性和复杂度，需要考虑关节运动耦合对绳长的影响、腱绳路径上产生的摩擦力。
- 腱绳方案电机配置上较为灵活，单个关节可采用单驱动、对立驱动，还可增加系统冗余配置。单驱动模式中腱绳一侧使用弹性元件，运动中会对关节拉力产生一定损耗；对立驱动模式对关节运动有更全面的控制能力；还可以基于系统自由度数量进行综合驱动网络布局，可采用自由度 $n < \text{驱动数} < 2n$ 个驱动。增加驱动单元数量会增加控制的复杂度，且对电机的同步控制有更高要求。

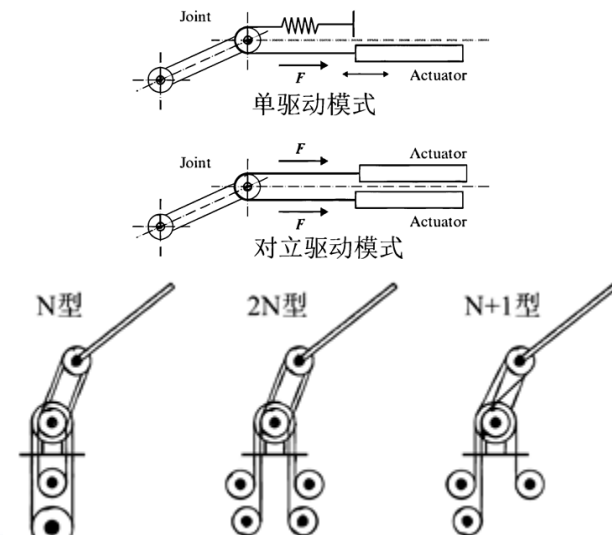
图：人手解剖学测试平台灵巧手



图：腱绳路径布置示意图



图：腱绳驱动单元配置模式

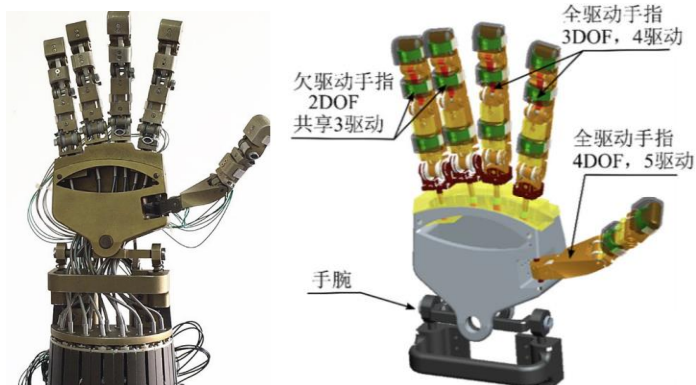


3.2.3. 传动：腱绳——传动中壁垒较大环节，有望贡献边际增量

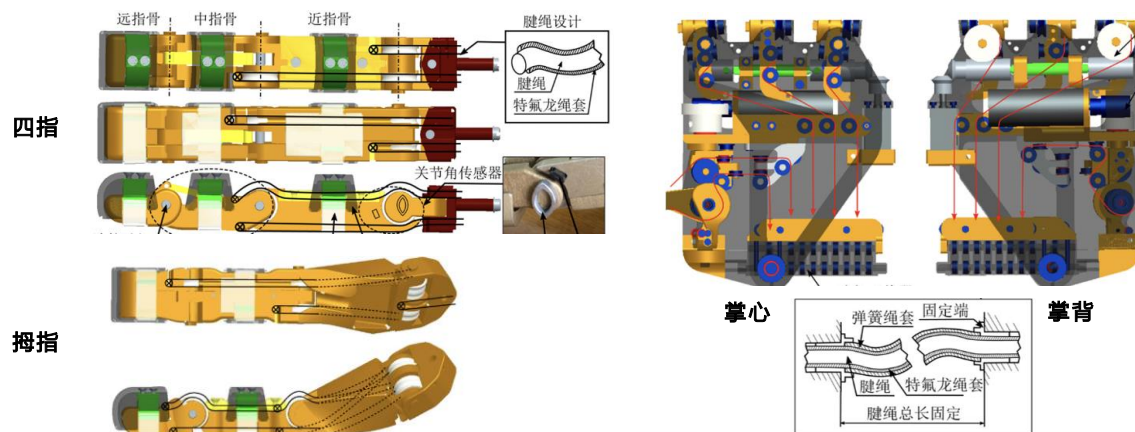
□ 绳驱灵巧手方案在应用中腱绳用量大、关注腱绳材料——以南航五指灵巧手项目为例

- 整手：该灵巧手具有16驱动单元、14DOF，拇指5驱、4DOF，食指和中指4驱动、3DOF，无名指和小指共享3驱动、各2DOF。
 - 手指：四指——腱绳沿指腹指背对立式布局实现侧摆、弯曲、伸缩，同组对立式腱绳差动控制单关节弯曲、伸缩，两组腱绳之间差动实现基关节侧摆运动。腱绳外包裹特氟龙绳套以减少摩擦力。拇指——布置五根腱绳实现侧摆、弯曲、伸展，远关节和中关节两组腱绳差动控制基关节侧摆，同步收缩则产生近关节弯曲，并在近指骨指背单独布置一根腱绳以实现近关节伸展。加工技术受限导致走线孔为直线孔，极易使入口处腱绳摩擦力陡增产生突变性弯曲。由于基关节侧摆角很大，无导向腱绳将随着关节运动，产生不确定性的绳长变化以及小半径弯折。
 - 手掌手腕：手掌腱绳除特氟龙绳套外还包裹一层拉簧，拉簧由连接于手掌和前臂的固定端进行限位保证总长不变。无导向腱绳路径设计在运动中摩擦力较大、绳长变化不可预测，案例采用全导向腱绳路径设计（红色箭头线为腱绳引导路径），手指腱绳依次经过导向轴承—腕部理线器—前臂，经过轴承导向后相互平行，经过理线器后腱绳方向不受腕部运动影响。
- 总结该案例，我们认为在实际设计、应用中，①**腱绳用量大**，腱绳需覆盖指腹/指背—手掌/手背—前臂的长度，而如连杆方案仅需覆盖关节长度；②**关注腱绳摩擦、绳长变化，对材料要求高**，腱绳需包裹绳套以减少与骨架产生摩擦，绳长产生的不确定性变化可能导致控制难度上升；③**控制复杂，关注运动干扰**，各类动作需同组/不同组腱绳的同步/差动控制实现，耦合性较强，需通过全导向设计减少受关节运动影响导致方向变化。

图：绳驱灵巧手整手设计布局



图：绳驱灵巧手各部分设计布局



3.2.3. 传动：腱绳——传动中壁垒较大环节，有望贡献边际增量

□ UHMWPE为主流腱绳材料，钢丝绳亦有应用潜力

- 腱绳材料对传动性能至关重要，需要具备高模量、高强度、低摩擦。基于材质分类，腱绳材料主要有钢丝和高分子纤维材料：
- **钢丝绳**：包括钨钢丝绳、不锈钢钢丝绳等，其优势在于没有内摩擦、滑动摩擦系数小、强度高、承载力较大、韧性高，劣势在于反复运动容易破坏手结构、钢丝绳末端难以固定、不能承受较小回转半径、寿命较短。DLR Hasy Hand采用钢丝绳腱绳。
 - **高分子纤维**：早期使用的腱绳材料有特氟龙、芳纶、涤纶等，**目前超高分子量聚乙烯是主流腱绳材料**。超高分子量聚乙烯纤维UHMWPE分子量通常在100万~500万之间，是世界上比强度和比模量最高的纤维，具有超高强度、超高模量、低密度、耐磨损、柔韧性好等性能。海外以Dyneema和Spectra为主，分别为帝斯曼和霍尼韦尔生产的UHMWPE材料。美国R2灵巧手腱绳以Vectran为主体，外表采用Vectran和Teflon混纺的方案以减小摩擦；德国Dexhand灵巧手采用迪尼马Dyneema纤维绳，后续迭代升级为PBO纤维。

表：灵巧手性能参数/描述梳理

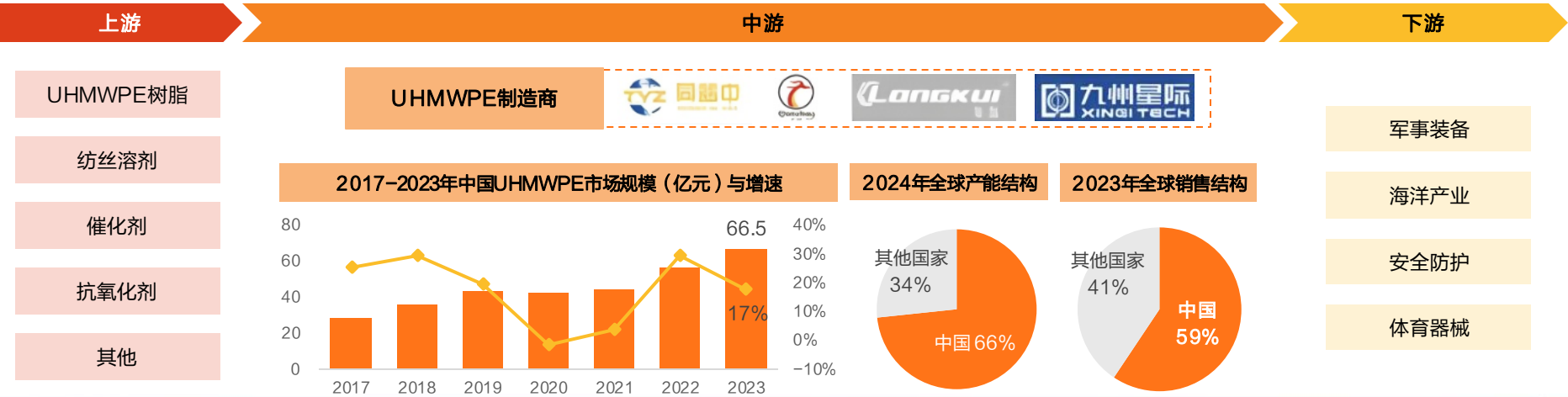
材料分类	材料类型		性能参数/性能描述
钢丝材料	钢丝绳		没有内摩擦、滑动摩擦系数小、强度高、承载力较大、韧性高
高分子纤维材料	超高分子量聚乙烯 UHMWPE	超高强型	断裂强度 $\geq 36\text{cN/dtex}$ ，初始模量1,300~1,800cN/dtex，断裂伸长率2~3%
		耐热型	瞬间耐热温度 $\geq 180^\circ\text{C}$ ，强度 $\geq 30\text{cN/dtex}$ ，初始模量 $\geq 1,100\text{cN/dtex}$ ，断裂伸长率 $\leq 3\%$ ，CV值 $\leq 3\%$
		抗蠕变型	70°C 、300MPa下蠕变断裂时间 ≥ 900 小时，蠕变伸长率 $\leq 8\%$ ，强度 $\geq 30\text{cN/dtex}$ ，初始模量 $\geq 1,100\text{cN/dtex}$ ，断裂伸长率 $\leq 3\%$ ，CV 值 $\leq 3\%$
	尼龙6		拉伸强度0.66~0.97 Mpa，初始拉伸模量280~510 Mpa，延伸率16%~25%
	涤纶		拉伸强度0.78~1.12 Mpa，初始拉伸模量1120~1990 Mpa，延伸率7%~17%
	丙纶		拉伸强度0.24~0.66 Mpa，初始拉伸模量150~330 Mpa，延伸率20%~80%

3.2.3. 传动：腱绳——传动中壁垒较大环节，有望贡献边际增量

□ UHMWPE——主流高性能腱绳材料，我国产能快速扩充

- 市场规模：据百谏方略研究统计，2023年全球超高分子量聚乙烯市场销售额达到112亿元，预计2030年达到190亿元，2023-2030年CAGR为7.84%。根据智研咨询的数据，2023年我国UHMWPE纤维市场规模为66.48亿元，产量为3.98万吨，需求量为7.24万吨。中国为全球UHMWPE纤维第一大生产国，产品性能不断接近国际领先水平。2024年海外UHMWPE纤维产能约3.4万吨/年，占比34%，中国UHMWPE纤维为6.6万吨/年，占比66%，为第一大生产国。产品性能上，UHMWPE纤维产品的性能优劣主要在于其断裂强度、初始模量以及断裂伸长率，中国九州星际、千禧龙纤、湖南中泰UHMWPE纤维性能较好，断裂强度可达≥43cN/dtex的产品，接近国际领先水平。
- 产业链：UHMWPE纤维由乙烯单体聚合而成，聚合完成后对聚合物进行纺丝，纺丝后进行拉伸。上游原料包括UHMWPE树脂、纺丝溶剂、催化剂等，UHMWPE材料供应商数量有限，国际上存在一定程度垄断；中游为UHMWPE制造商，UHMWPE纤维生产工艺复杂、技术壁垒高，加工过程包括溶胶纺丝、凝固浴、拉伸、热处理等，还需要优化催化剂配方、改进生产流程和后处理技术以提升纤维强度、模量和耐热性；下游应用领域主要有军事装备、海洋产业、安全防护、体育器械等。

图：UHMWPE产业链梳理

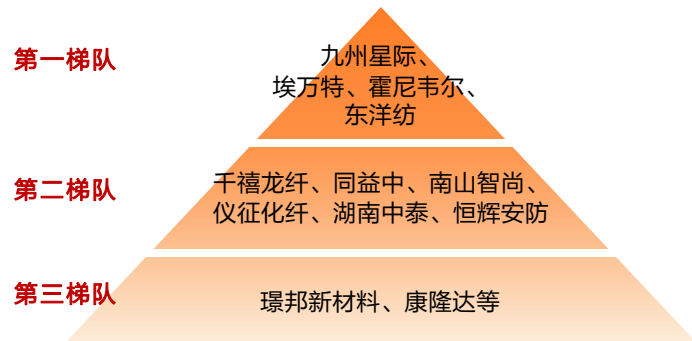


3.2.3. 传动：腱绳——传动中壁垒较大环节，有望贡献边际增量

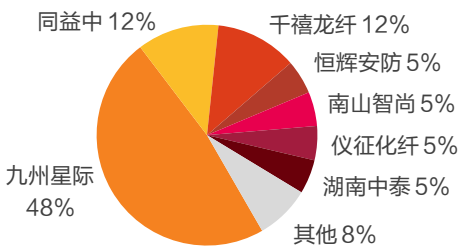
□ UHMWPE——主流高性能腱绳材料，我国产能快速扩充

- UHMWPE纤维市场集中度较高。全球UHMWPE市场第一梯队企业有九州星际、美国埃万特、美国霍尼韦尔、日本东洋纺等；第二梯队企业有千禧龙纤、同益中、南山智尚、仪征化纤、湖南中泰、恒辉安防等；第三梯队有璟邦新材料、康隆达等。国际巨头企业进入市场较早，如日本东洋纺1984年进入UHMWPE纤维行业，美国埃万特收购荷兰DSM的UHMWPE纤维业务，DSM公司的Dyneema和霍尼韦尔的Spectra是UHMWPE纤维主流产品。国内企业产品在一致性、稳定性、抗蠕变性等方面持续追赶海外龙头，积极拓展机器人业务。
- 国内产能结构：中国UHMWPE纤维市场集中度较高，2024年CR5占比超80%，九州星际产能3.2万吨/年，占比48%，同益中、千禧龙纤占比12%，恒辉安防、南山智尚、仪征化纤、湖南中泰占比约5%。

图：灵巧手竞争格局



图：2024年中国UHMWPE产能结构



表：全球UHMWPE主要生产企业梳理

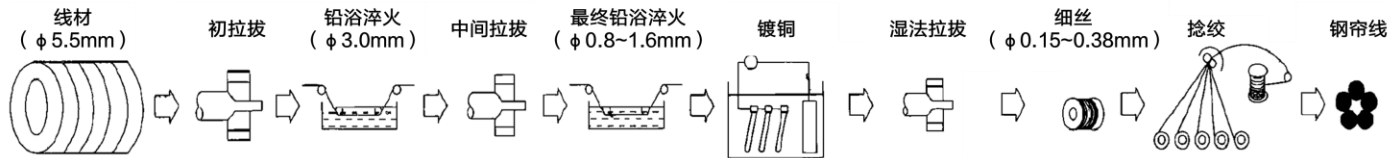
公司	介绍
荷兰DSM	全球技术领先企业，1975年开始进入市场，拥有成熟的冻胶纺丝-超拉伸法工业化生产技术，产品机械性能好，具有超过钢铁15倍的强度和更小的尺寸，同时保持高柔顺性和生物相容性
日本东洋纺	全球知名UHMWPE纤维制造商之一，与荷兰DSM公司合作生产供应Dyneema纤维，供应日本市场，自研熔法高强聚乙烯纤维Tsunooaga，耐切割性好，生产成本低
美国霍尼韦尔	1985年通过引进荷兰DSM专利技术开始生产Spectra-HT、Spectra900、Spectra1000等系列产品，开发新型医用纤维Spectra MG，超轻、超高强度、高度耐受疲劳和磨损、摩擦系数低、运动平顺
九州星际	24年UHMWPE产能达3万吨/年，位居全球第一，产品涵盖中强-超高强等多个系列
千禧龙纤	现有8,000吨年产能，有色丝品类、产品一致性等方面具有较强竞争力
同益中	国内首批掌握全套生产技术和较早实现产业化企业，拥有全产业链布局，目前正在对接机器人腱绳需求
南山智尚	现有3,600吨年产能，产品具备高强度、耐磨损特性，目前正积极开拓机器人相关应用领域
恒辉安防	现有3,000吨年产能，主要产品为安全防护手套、UHMWPE纤维及复合纤维，已送样人形机器人企业
湖南中泰	现有3,000吨UHMWPE纤维产能，产品达国内领先水平、国际先进水平
仪征化纤	现有3,300吨年产能，中国石化中高端聚脂生产基地、特种纤维生产基地，中国第一条干法纺丝UHMWPE纤维工业化生产线建成企业

3.2.3. 传动：腱绳——传动中壁垒较大环节，有望贡献边际增量

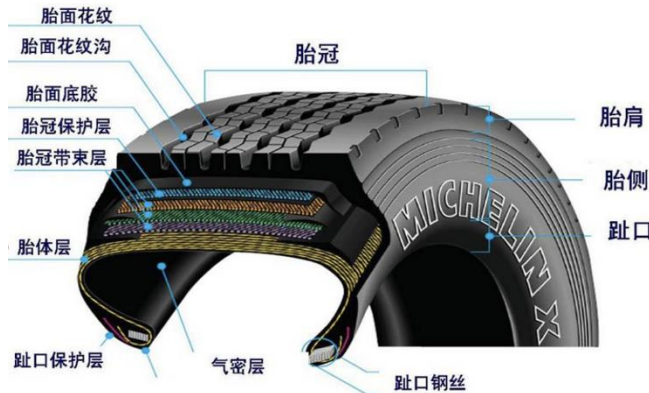
□ 钢帘线——超细高强度金属丝，具备灵巧手应用潜力

- 钢帘线是用优质高碳钢制成的表面镀有黄铜的细规格钢丝股或绳，是子午线轮胎的主要骨架材料，主要用于轮胎胎体与带束层。钢丝帘线的耐热性好、蠕变为零、抗冲击性强、拉伸模量高、压缩模量高。
- 市场规模：根据智研咨询的数据，2023年我国钢帘线市场规模为208.2亿元，产量为304.5万吨，需求量为218.6万吨。
- 产业链：上游原材料包括二甲苯、硫酸铜、硫酸亚锡、润滑剂、拉丝粉、硼砂、高碳钢热轧盘条等，其中高碳钢热轧盘条是钢丝绳的核心原材料，国内钢可满足大部分钢帘线盘条市场需求，但高疲劳寿命、高强度、规格极细、扭转要求等的特殊高端材料仍需要进口；中游为制造环节，采用冷拔高碳钢盘条工艺，主要有淬火、拉拔、镀铜、捻制等工艺流程，生产中需要将盘条拉拔成直径0.15~0.38mm的极细细丝，线材长度增加1000~1400倍，截面面积缩小至最初的万分之八。钢帘线下游用途较为单一，基本仅用于子午线轮胎。

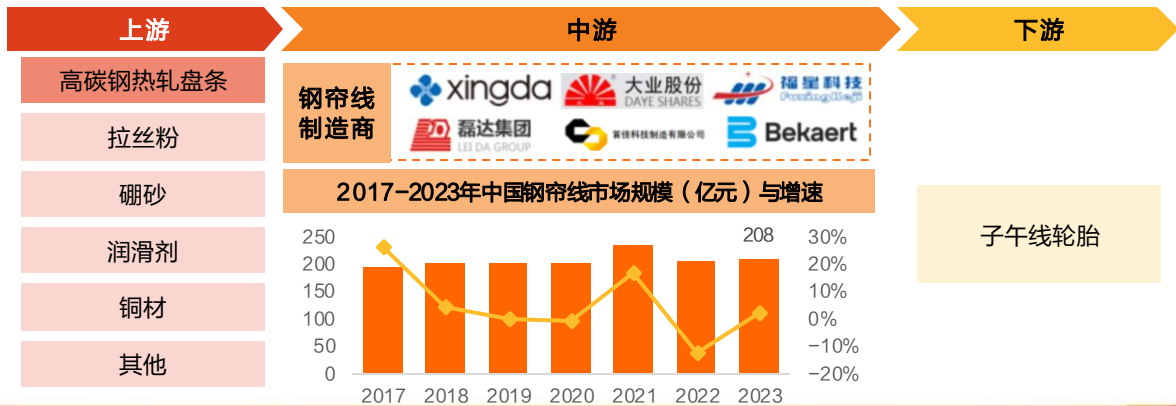
图：钢帘线主要生产工艺



图：轮胎与钢帘线结构示意图



图：钢帘线产业链梳理



3.2.3. 传动：腱绳——传动中壁垒较大环节，有望贡献边际增量

□ 钢帘线——超细高强度金属丝，具备灵巧手应用潜力

- 国际钢帘线生产商主要有比利时贝卡尔特、韩国高丽制钢等，国内主要有兴达国际、大业股份、福星科技、首佳科技、恒星科技、骏马集团、磊达股份、胜通钢帘线等。
- **大业股份——积极挖掘钢帘线应用于灵巧手腱绳的历史级机遇。**成立于2003年，主营胎钢丝、钢帘线、胶管钢丝等产品。全资子公司大业机器人与北京邮电大学签订开发服务协议，共同组建联合研发团队，开展人形机器人腱绳材料的研发与感知功能创新探索工作。研发目标是提升腱绳材料的强度、柔韧性和耐久性，使其能够进一步适配人形机器人灵巧手以及其他关节复杂多样的动作需求。在感知功能领域，双方将共同探索新型感知技术在人形机器人关键零部件上的应用。

表：全球钢帘线主要生产企业梳理

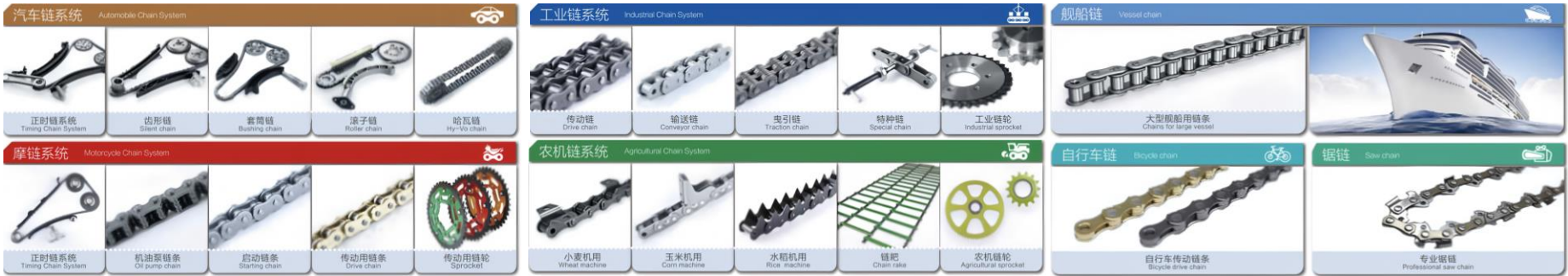
公司	介绍
比利时贝卡尔特	创立于1880年，总部位于比利时，主导超高强度钢帘线研发，钢丝变形技术和镀膜技术全球引领者，高端市场占有率超30%
韩国高丽制钢	创立于1945年，韩国知名钢帘线生产企业，引领韩国特殊线材产业发展
江苏兴达国际	1992年进入钢帘线行业，已经在苏中戴南建成了大规模的钢帘线生产基地，全球钢帘线产能第一，市占率超25%，新能源专用钢帘线出货量占比达45%
大业股份	成立于2003年，主营胎钢丝、钢帘线、胶管钢丝等， 目前正在探索钢帘线应用于人形机器人腱绳领域
胜通钢帘线	成立于2003年，现为大业股份旗下品牌，主要生产子午线轮胎用钢帘线、胎圈钢丝、胶管钢丝、切割钢丝、金刚线母线等高端金属制品
江苏骏马集团	骏马集团成立于1990年，是全球具备规模的轮胎骨架材料生产基地之一；骏马钢帘线成立于2003年，是轮胎骨架材料为主业，主导产品有锦纶6浸胶帘子布、高模低缩涤纶帘子布、子午轮胎钢帘线、高档无纺布等，成功实现超高强度钢帘线(4000MPa级)国产化突破
东方钢帘线	主要从事子午线轮胎用钢帘线、制造切割钢丝、胶管钢丝业务，为中国香港上市公司首佳科技（首钢子公司）子公司
福星科技	成立40余年，主要生产轮胎钢丝、钢丝绳、钢帘线、预应力PC钢绞线、晶硅片切割钢丝等产品，专攻特种钢帘线，应用于航空胎、军用胎、光伏领域

3.2.4. 传动：链条——传统传动方式之一，灵巧手传动新方案

□ 链条传动可精简传动结构设计，为灵巧手传动新方案

- 链传动是三大传动系统之一，广泛地应用于摩托车、汽车、船舶、农业机械、工程机械、物流仓储、石油化工等领域。
- 征和工业是国内链传动领军企业，从事各类链传动系统的研发生产，产品应用于汽车、摩托、工业传动、农机、船舶等领域。征和工业自2024年以来，提出用于灵巧手的微型链传动/带传动方案，相对传统方案主要优势在于①链传动可以简化传动系统，降低成本、节省空间，②链条啮合传动稳定可靠，具备连续性、平顺性、不出现打滑，③增强灵活性，能够对不规则物体进行柔性包络抓取。

图：征和工业主要产品



表：征和工业链传动灵巧手方案专利梳理

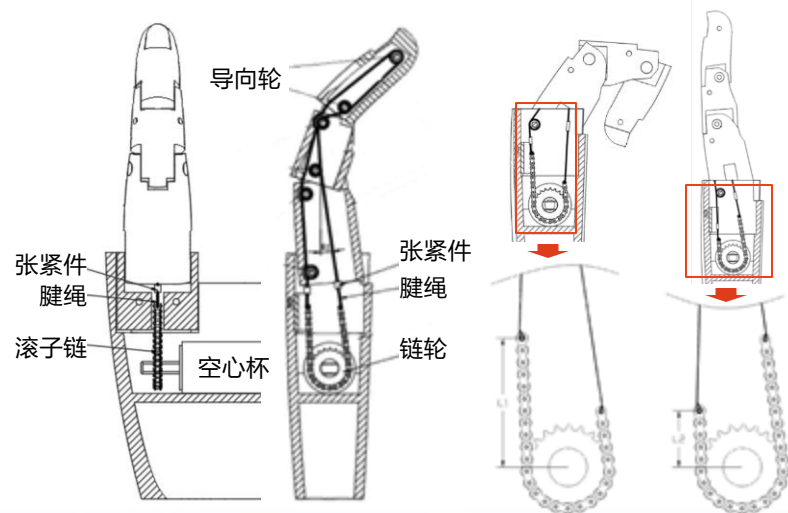
专利号/名	申请日	专利试图解决的问题	专利所提出的方法
CN 119407822 A 一种人形机器人手指传动系统	2024/11/11	现有传动系统① 结构复杂、零件多、制造难度高、成本高；② 机械手内空间小，限制传感器等安装；③ 传动弹簧、绳驱等方案精度差、控制不稳定，连杆方案占用空间大	简化传动系统零件，使用微型双扣推送链装置作为每根手指部分的驱动机构，该方案成本低、节省空间、精度高、稳定性高、传动平顺
CN 118832617 A 一种带传动多自由度机械手指及机械手	2024/8/2	① 传统铰链轴结构限制机械手的动态范围、精度，对非标准形状或不规则工件时处理不佳；② 绳驱机械手活动过程中会发生抖动、线缠绕的现象	采用带传动技术，避免线传动的抖动和线缠绕问题；铰链结构实现偏移和曲线动作，根部设置锥形滑轮调节传动带张力，增强灵活性和传动精度，实现对不规则工件柔性包络抓取
CN 118721251 A 一种人形机器人手指	2024/7/17	滚珠丝杠、连杆、齿轮、腱绳传统传动方案在制造成本、刚度、传输力、设计复杂度、运动自适应性、平稳性、效率、传动比、传动距离、运行灵活性等方面均存在一个或多个缺陷	微型链+腱绳，单个电机可实现手指弯曲、伸直，换向过程依靠链传动啮合、稳定可靠、不打滑、轨迹可控，灵活性强

3.2.4. 传动：链条——传统传动方式之一，灵巧手传动新方案

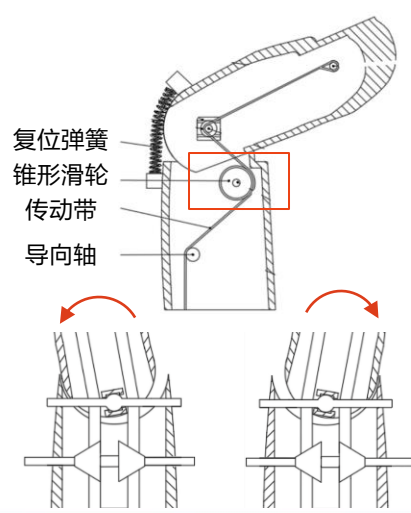
□ 链条传动可精简传动结构设计，为灵巧手传动新方案

- **微型链+腱绳传动 (CN118721251A)**：指节相互铰接，手掌内设空心杯电机，指节侧面有导向轮；腱绳两端与微型滚子链的两端连接，串联张紧件、绕过导向轮。空心杯电机输出轴连接链轮，微型滚子链与链轮啮合，电机正反转实现手指的伸直和弯曲。微型滚子链的节距 $P < 1.905\text{mm}$ ，采用马氏体不锈钢，可实现免维护。**单电机实现手指运动，链传动啮合稳定、轨迹可控、灵活性强、成本低。**
- **锥形齿轮+带传动方案 (CN118832617A)**：指节间通过多自由度铰接轴铰接、根部指节内设张力调节机构，固定轴、铰接轴、张力调节机构通过传动带连接。末梢指节左右摆动时，传动带在锥形滑轮上滑动，可因锥形滑轮外径的变大或变小调节传动带的张力，**能实现对不规则物体形状的自适应柔性包络抓取**，增强机械手灵活性、传动精度、夹持力。
- **微型双扣推送链方案 (CN119407822A)**：每个手指仅设置微型双扣推送链装置 + 电机，可实现手指部分3个自由度的运动，其中两个自由度用于欠驱动屈曲，而另外一个自由度用于耦合外展或内收。相比丝杠、弹簧、绳驱方案，**可以较低的成本得到精确且稳定的传动**，且传动过程中更加连续、平滑、高效。

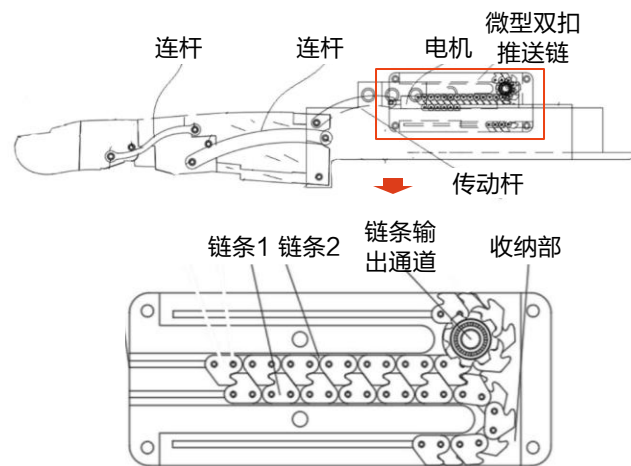
图：征和工业微型链+腱绳灵巧手传动系统



图：征和工业带传动灵巧手传动系统



图：征和工业微型双扣推送链灵巧手传动系统

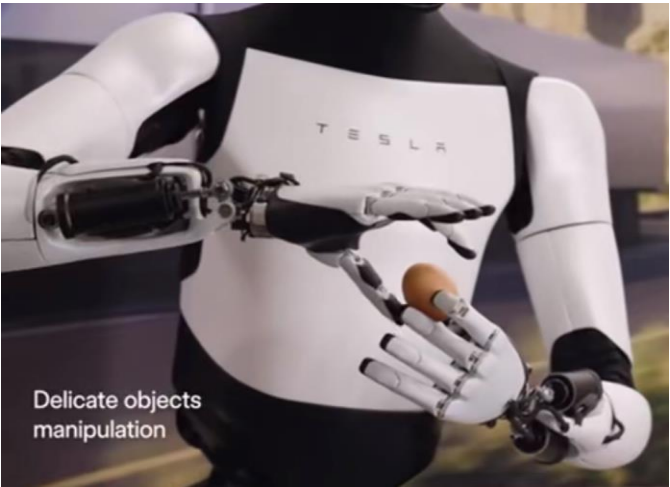


3.3. 传感：通向灵巧柔顺控制之路，堆料竞赛重点布局环节

□ 传感器——机器人灵敏运动之基，第二代Optimus最大边际变化

- 传感器赋予机器人视、力、触、嗅、味等多种感知能力，还能用于检测机器人自身的内部工作状态，通过对各关节的位置、速度、温度、载荷、电压等信息进行探测和了解，能够有效保证和提升机器人自身动作准确性和灵敏度。机器人高精传感主要有三种方案：
- **电流环**：基于电流反馈和辨识动力学模型算力，无需加装传感器，但精度较低，仅有10N；
 - **末端力传感器**：主要通过机械臂末端加装如六维力等传感器实现，精度高，可达到0.01N，但价格昂贵，如六维力传感器达上万元；
 - **关节力矩传感器**：安装在关节之中，精度、价格在电流环方案与末端力传感器方案之间；
 - **电子皮肤/柔性传感**：通过在表面添加传感器实现对力的感应，在传统消费电子产品中有一定应用，但整体仍处于研发之中。
- **传感器为特斯拉第二代Optimus主要增量环节**：第二代Optimus搭载由特斯拉设计的执行器与传感器、2自由度驱动颈部、响应更快的11自由度灵巧手、触觉传感器（十指）、执行器集成电子和线束、足部力/扭矩传感器、铰接式脚趾等，更聚焦运动与控制。传感器系Optimus最大边际变化，手部采用全新11自由度灵巧手方案，增加手指触觉传感器，可以实现两指捏起鸡蛋的精细操作。

图：第二代Optimus灵巧手



表：力觉感应不同技术路线对比

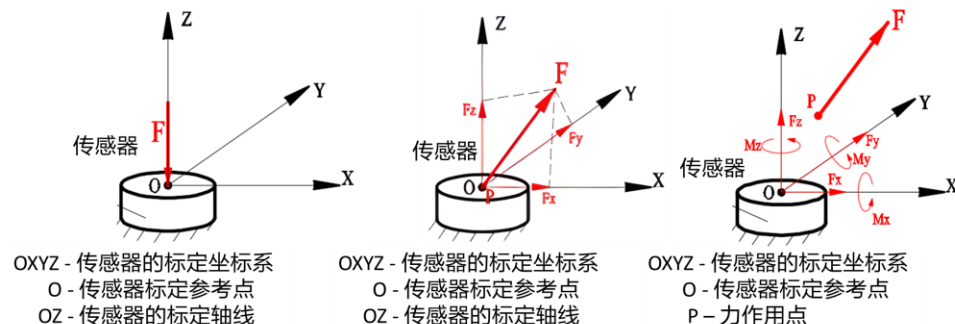
力觉感应方式	应用方式	优点	缺点
电流环	通过电流反馈和辨识动力学模型估计力	无需加装传感器	精度低，只有10N
末端力传感器	机械臂末端加装力传感器	精度高，一维可达0.1N，六维可达0.01N	价格高，一维价格上千，六维为2万以上
关节力矩传感器	机械臂关节处加装力矩传感器	精度可达0.5~0.1N，价格在电流环与末端力传感器之间	
电子皮肤/柔性传感	肢体外层添加电子皮肤/柔性传感器	可实现灵巧和敏锐触觉，消费电子有初步应用，但整体仍处于研发中	

3.3.1. 传感：六维力传感器——应变片路线为主，感应精准性能优秀

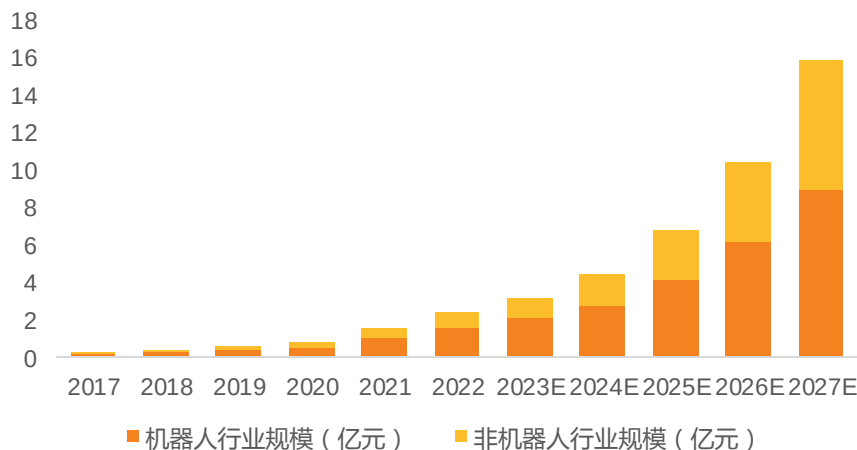
□ 六维力传感器性能优秀，应变片式为主要路线

- **按照测量维度分类**，力传感器可分为一维和多维。一维力传感器仅检测一个方向的作用力，价格多为数百元，广泛应用于工业场景；多维力传感器能够测量多个维度的力，常见的是三维和六维。**六维力传感器适用于参考点距离较远、变化随机性强、精度要求高的场景**，能够同时测量XYZ轴向力和环绕轴的力矩，并通过内部算法解耦各个方向的力和力矩的干扰，给出最全面的力觉信息，技术壁垒高、应用难度大。
- **市场规模**：根据GGII数据，2022年中国市场六维力传感器市场规模约2.39亿元、同比增长54.35%，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%；预计到2027年，中国市场六维力传感器市场规模将超过15亿元，复合增长率超过45%，销量有望突破84,000套，复合增长率超过60%，其中机器人行业销量有望突破42,000套。
- **价格昂贵**：根据爱采购、京东等在线平台产品及MIR睿工业公众号的数据，进口的ATI六维力传感器价格在8万元左右，外资产品单个均价约为4万元；国产六维力传感器价格在6000-40000元之间，均价在2万元以上。国外品牌HBM应变片价格在800-3000元左右。按ATI六维力传感器使用12个应变片计算，应变片成本将达到0.96-3.6万元。据MIR睿工业调研数据，国产六维力传感器成本仅有数千元，利润率较高，两年内单个产品价格有望降至5000元左右。

图：一维/三维/六维力度传感器示意图



图：2017-2027年中国六维力/力矩传感器市场规模及预测

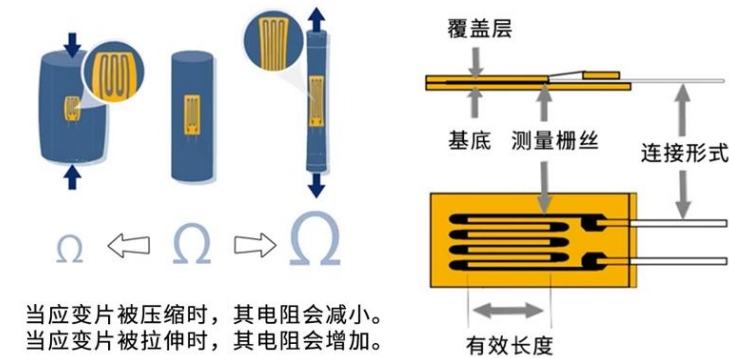


3.3.1. 传感：六维力传感器——应变片路线为主，感应精准性能优秀

六维力传感器性能优秀，应变片式为主要路线

- 按照测量原理/信号采集原理分类，应用较久的是电阻应变式、电容式、压电式，随着检测传感技术的发展，光电式、电感式、气压式、电磁式等检测方法也有应用，不同技术各有优缺点。**大部分六维力传感器基于应变片结构**，硅应变片式性能表现好于金属应变片，但成本较高，近年来硅应变片工艺有所改进，成本有望降低；压电式动态特性较好，但更多用于少于六维力传感器上，六维力传感器上的应用有望增加。
- 多维力传感器主要由力敏元器件、信号采集电路、信号调理电路、多维信号解耦系统（硬件/软件）、上位机或嵌入式系统信息处理软件等构成。力敏元件的性能直接决定多维力传感器的灵敏度、量程、分辨率、刚性等性能指标。以ATI应变式六维力传感器为例，其内部拥有三根梁，每个梁上有四个硅应变片，成对工作构成半桥电路。

图：应变片工作原理



表：不同六维力传感器技术路线性能对比

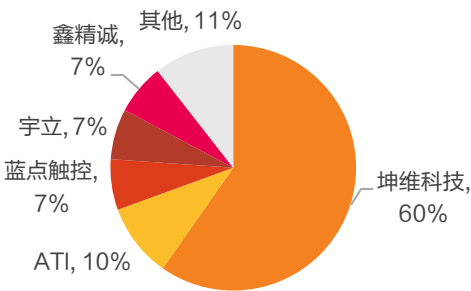
技术类型		方法描述	稳定性	刚度	动态特性	信噪比	成本	应用特点
应变式	硅应变片式	力作用 → 电阻变化量	很高	很高	中	很高	中	精度高、技术成熟、范围广、频响特性好，但存在非线性误差、信号输出微弱
	金属箔式		中	很高	中低	中低	中低	
电容式		力作用 → 电容变化量	中低	低	中低	低	中低	灵敏度高、分辨率高、频率范围宽、结构简单、适用性强，但静态力测量困难、分辨率不高
光学式		光电效应，力作用 → 光学量变化	中低	低	中	低	中	可靠性高、测量范围广、动态响应好，但价格昂贵、测试环境要求高
压电式		压电效应，力作用 → 电荷量变化	中	很高	很高	中	很高	动态响应好、精准性好、分辨率高、结构紧凑、尺寸小、刚度强，但调理电路复杂、寄生电容影响大

3.3.1. 传感：六维力传感器——应变片路线为主，感应精准性能优秀

六维力传感器性能优秀，应变片式为主要路线

中国六维力矩传感器供应商逐年增加，但受制于高技术壁垒，真正具备批量化产品供应能力的厂商依旧较少。根据2022年销量口径划分，ATI、宇立科技、坤维科技、鑫精诚位于第一梯队，但各家厂商下游应用侧重点各有特色：ATI作为全球龙头，积累丰富，应用面相对较广；宇立在工业机器人磨抛行业和汽车碰撞测试行业应用更多；坤维科技在协作机器人、医疗手术机器人和康复机器人领域具备明显优势，同时其产品在航空航天领域具备行业核心竞争力，鑫精诚凭借苹果供应商的身份已将其产品推入到3C行业，同时在机器人行业和医疗行业也有布局。

图：2022年中国协作机器人六维力传感器竞争格局（销量口径）



表：六维力传感器市场主要参与者

企业	地区	公司简介
坤维科技	中国	成立于2018年，是一家致力于提供高精度力觉传感器（六轴力传感器）及力控解决方案的企业。
鑫精诚	中国	成立于2009年，专注于微型压力、称重、多轴力、扭力等多样化的智能传感器及控制仪表的工业级产品研发和创新。
宇立仪器	中国	由原美国FTSS总工黄约博士于2007年创立，在多轴力传感器设计领域积累了20余年经验，在汽车和工业机器人领域具有较强的竞争优势。
蓝点触控	中国	成立于2019年，专业从事高精度、高性能力传感器以及力控产品，已形成了六维力传感器、关节扭矩传感器、力控应用软件包等多个产品系列。
海伯森	中国	成立于2015年，主营产品包括3D闪测传感器、3D线光谱共焦传感器、点光谱共焦位移传感器、超高速工业相机和六维力传感器等。
柯力传感	中国	成立于1994年，目前已有的微型、扭矩、二维/三维/六维力等高端力学传感器，公司积极推动多维力、机器人传感器项目。
华培动力	中国	公司拥有压力传感器全流程自主知识产权，在惠斯通电桥、金属应变片、金属弹性体等领域有独到见解和工艺诀窍，目前有车规级MEMS压力芯片和硅应变计的自主设计及封装测试的能力，向六维力矩传感器延展。机器人是公司非常重视的发展方向，机器人子公司的成立正在筹备中。
安培龙	中国	公司重视人形机器人用力传感器的研发及投入，用于机器人场景的单向力传感器及力矩传感器开发完成，目前已接到小批量订单
ATI	美国	世界领先的多维力传感器制造商，致力于开发最先进的产品和解决方案，主营业务包括机器人快速转换装置及力传感器。
SCHUNK	德国	创建于1945年，主营产品包括精密夹具和自动化抓取系统、传感器等，主要应用于机械和自动化领域。
Robotiq	加拿大	成立于2008年，主营产品包括机器人末端夹具、力矩传感器、机器人相机套件等。
OnRobot	丹麦	由丹麦OnRobot、匈牙利OptoForce和美国Perception Robotics合并而成，主营产品包括机器人末端夹具、力矩传感器、机器人相机套件等。
WACOH-TECH	日本	成立于2007年，主营业务包括力传感器和MEMS传感器产品的开发、生产、销售。

3.3.2. 传感：触觉传感器——阵列压力传感器快速落地，或为路线收敛方向

□ 多维触觉是机器人重要感知方式，有望成为传感路线收敛方向

- 多维触觉是机器人重要的知觉形式，压力检测是触觉感知的重要方面：1) 多维触觉使机器人能够感知物体的硬度、粗糙度、形状等多维信息，使得机器人能够更加准确地感知和理解环境中的物体特征，是机器人实现精准操作物体和执行复杂任务的基础。2) 确保机器人在复杂环境中依然能够发挥作用，增强机器人可靠性。3) 使机器人能够控制施加在物体上的力量，从而实现更加精细和智能的力控操作。触觉感知是机器人获取外界环境信息的重要途径，其中压力检测是触觉感知的重要方面。所谓“柔性”是指触觉传感器具有类似人类皮肤的物理特性，即具备一定的柔度可覆盖在载体表面测量受力信息，从而感知目标对象的特征信息。
- 触觉传感已经成为众多灵巧手产品标配/增配方案。据我们的梳理，如帕西尼、兆威机电、优必选、星动纪元、智元均在灵巧手标配触觉传感器，因时触觉传感器版本为一种增配版本，我们认为，**触觉在传感器选型中的地位类似于空心杯在电机选型中的地位，已经出现一定程度的收敛。**

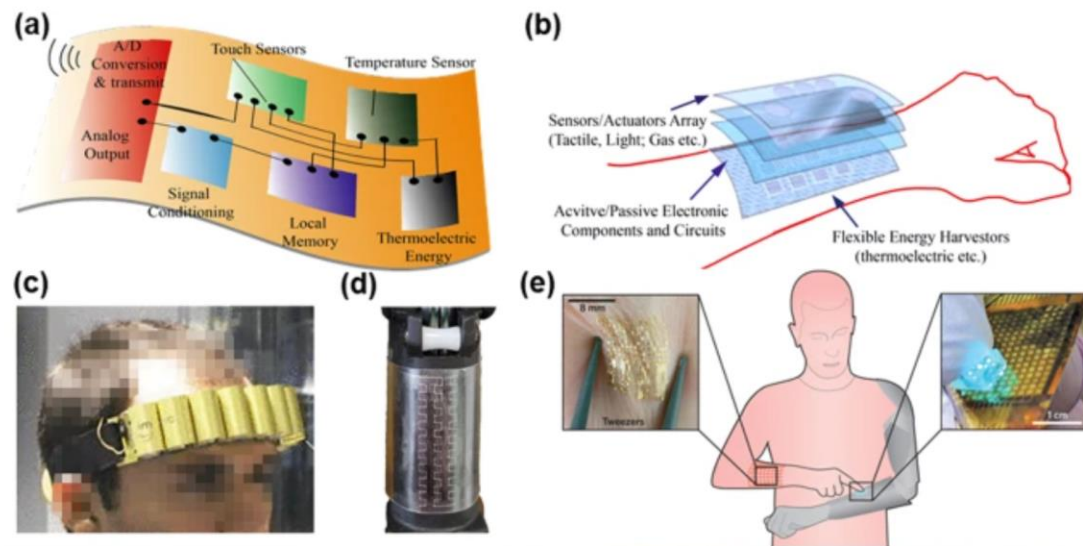
图：Freedom仿人触觉灵巧手对比



无触觉力控情况

有触觉力控情况

图：机器人多类传感器和柔性电子皮肤

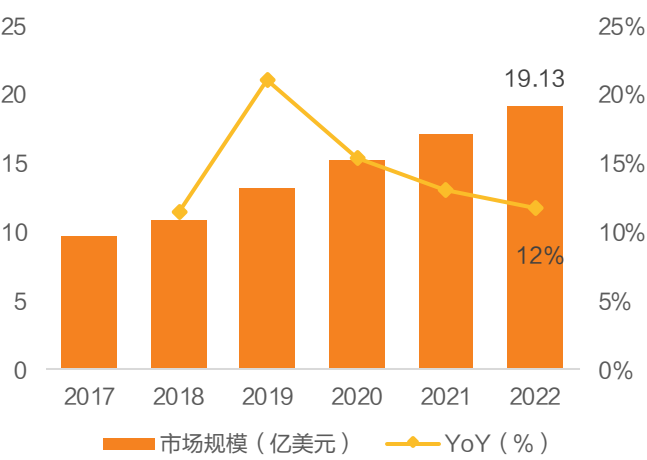


3.3.2. 传感：触觉传感器——阵列压力传感器快速落地， 或为路线收敛方向

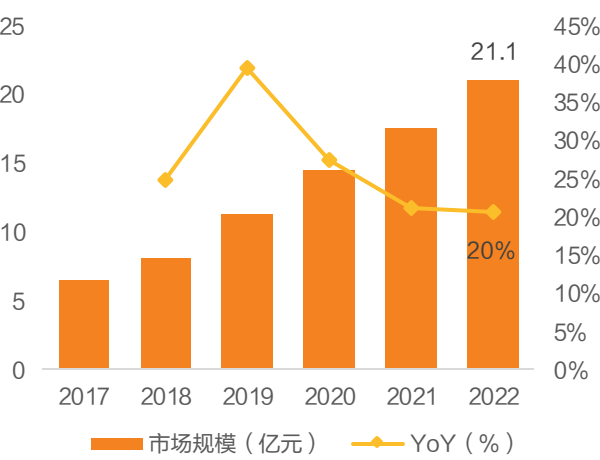
□ 多维触觉是机器人重要感知方式，有望成为传感路线收敛方向

- 触觉传感器应用广泛，可以广泛应用在机器人、消费电子、可穿戴智能设备、智能家居、智能汽车等领域，工业自动化、机器人技术的快速发展将推动柔性传感器的应用增长。根据智研咨询数据，全球柔性传感器行业市场规模呈现逐年上涨态势，2022年全球柔性传感器市场规模为19.13亿美元，同比增长12%，需求量为2.43万个，均价为7.95美元/个。中国柔性传感器行业市场规模增长速度较快，2022年中国柔性传感器行业市场规模为21.1亿元，同比增长20%。
- 国外厂商占据八成高端触觉传感器市场：触觉传感器行业技术壁垒较高，全球范围内触觉传感器产商主要是美国Tekscan公司、美国Pressure Profile Systems、美国Sensor Products Inc等，CR3占比达60%以上，美国触觉传感器行业竞争力强。触觉传感器是我国重点攻关的35项“卡脖子”技术之一，目前我国触觉传感器生产实力不足，布局企业数量较少，且多数以技术含量较低的产品研制为主。根据智研咨询数据，2022年中国柔性传感器需求量4923万个，产量仅为1634万个，柔性传感器国产化率为32.50%。

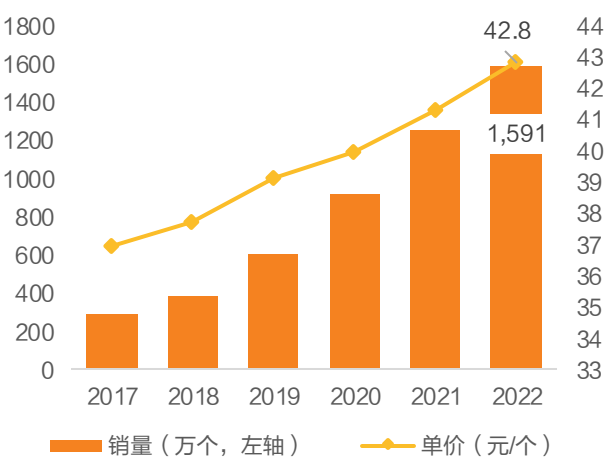
图：2017-2022年全球柔性传感器行业规模



图：2017-2022年中国柔性传感器行业规模



图：2017-2022年国产柔性传感器销量及中国市场传感器价格情况

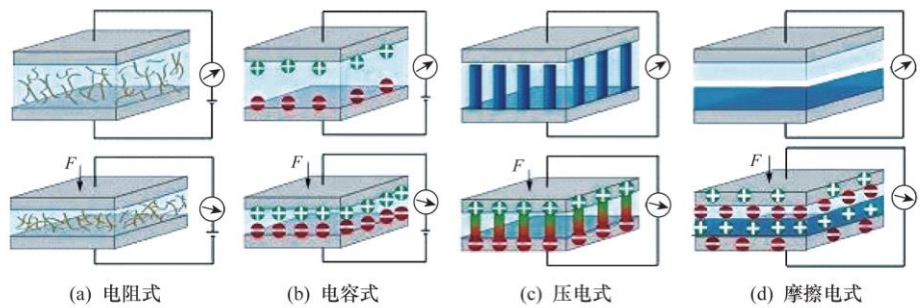


3.3.2. 传感：触觉传感器——阵列压力传感器快速落地， 或为路线收敛方向

□ 柔性压力传感器——多点阵列压力传感器为主流高精感知解决方案

- 柔性压阻式压力传感器：利用弹性材料的电阻率随压力大小的变化而变化的性质制成，将接触面上的压力信号转换为电信号。主要分为两大类：一类是基于导电橡胶、导电塑料、导电纤维等复合型高分析导电材料制成的器件；导电橡胶是将玻璃镀银、铝镀银、银等导电颗粒均匀分布在硅橡胶中，受压时导电颗粒接触，电阻率发生变化。另一类是根据半导体材料的压阻效应制成的器件，其基片可直接作为测量传感元件，扩散电阻在基片内组成惠斯通电桥。基片受到外力作用时电阻率发生变化导致各电阻值发生变化，电桥产生相应的电压信号输出。
- 柔性压阻式压力传感器被认为是下一代柔性压力传感器的理想选择：柔性压阻式压力传感器所具有的优势在于结构简单、灵敏度高、响应快、制造成本低、稳定性好，劣势是体积大，不易实现微型化；功耗高，接触表面易碎；易受噪声影响。

图：电子触觉皮肤传感器的转换机制



表：不同压阻式传感器优缺点对比

种类	柔性基底+敏感材料举例	优点	缺点
MEMS应变计	PI+金属应变计、PI+NiCr、PDMS+应变片	灵敏度高、空间分辨率高	单元易碎、成本较高、封装后尺寸大
导电聚合物	PDMS+Flemion	弯曲性好、成本低	灵敏度低
导电橡胶	PDMS+混有CNT的PDMS、PDMS+INASTROMER导电橡胶	弯曲性好、可检测静态动力	存在迟滞现象
导电溶液	柔性橡胶+导电液（Bio Tac）	集成度高、稳定性好	信号串扰、密封性要求高

3.3.2. 传感：触觉传感器——阵列压力传感器快速落地，或为路线收敛方向

□ 柔性压力传感器——多点阵列压力传感器为主流高精度感知解决方案

- 将MEMS传感器阵列化并集成在柔性可延展衬底是实现柔性电子的重要途径：许多研究采用了复杂的微结构来增强传感器的灵敏度，但实现微型结构通常要涉及复杂且昂贵的制造工序，不利于阵列化；目前部分机器人厂商和研究机构采用多点阵方案来实现人工指尖触觉感应。
- 上海硅步灵巧手——指尖末端多点阵列压力传感器，可高精度地执行多种抓取操作。Freedom仿人形五指触感灵巧手单指指尖配置指尖多点阵列触觉传感器，传感设计为“五纵五横”形式，从而将整块压敏材料自动分割为5*5矩阵形式，共具有25个压阻力单元，灵巧手手指传感器实物抓取中实时反馈，通过算法实现触感感知能力，感知精度最小为0.3N以内，响应速度0.05S。其触觉传感单元具有16个触点，采用灵敏度高弛豫时间低的柔性压敏材料、稳定性高的“柔性-非柔性”界面过渡材料、弹性好机械强度高的柔性包覆与支撑材料、节点间的柔性互连材料为主要本体材料，同时结合CMOS工艺技术，通过在CMOS 触觉传感器实现复合传感结构，构成单片的触觉传感单元（即触点）；并采用柔性技术实现传感单元间的互连与信号读出。

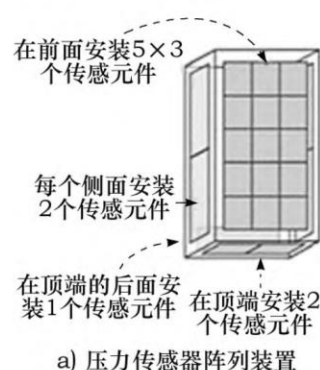
图：第二代Optimus灵巧手部指尖传感器



图：Freedom仿人形五指触感灵巧手



图：压力传感器阵列装置和PR2机器人手爪

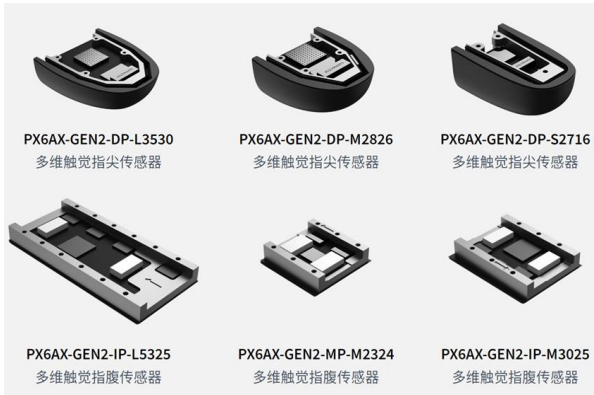


3.3.2. 传感：触觉传感器——阵列压力传感器快速落地，或为路线收敛方向

□ 帕西尼——超越机器人感官边界，定义全新触觉技术

- 帕西尼感知是一家拥有前沿核心触觉技术的人形机器人公司，创始成员来自日本早稻田大学机器人实验室。公司产品线覆盖传感器核心零部件到人形机器人整机全链，已实现商业级批量交付。
- 帕西尼自研的多维度触觉传感技术由 HAPTA 异构多核阵列软硬件架构实现 (Hetero-Array Probing Tactile Architecture)，其下集成ITPU多维触觉传感单元 (Intelligent Tactile Processing Unit) 和触觉算法，能全面支撑ITPU在复杂的泛用场景下精准感知，为机器人用户提供易用且丰富的触觉信息，进行毫秒级决策和高层级感知。
- 帕西尼专业级ITPU传感器采用电磁式传感技术，为多点面阵式触点，柔性表面具备高柔性抓握能力，能够感知六维力和9种人类触觉，精度与传统六维力相当，且测、算、传一体化全集成，成本远低于传统六维力传感器，售价仅为百元~千元级。

图：帕西尼第二代PX-6AX面阵式六维力传感器



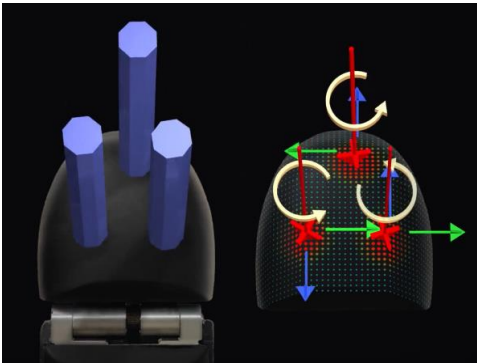
表：帕西尼传感器与传统六维力传感器比较

项目	帕西尼专业级ITPU Gen2	传统六维传感器
触点类型	多点面阵式	单点式
结构类型	柔性表面	刚性
技术路线	电磁式	多为应变式
感知维度	六维力+9种人类触觉	六维力
精度	≤1%FS	≤1%FS
采样频率	1kHz	1kHz
空间分辨率	1mm	无
分辨力	0.01N	随量程变化
内置算力	有	无
自动化标定	有	无
售价	百元/千元级	万元级

表：帕西尼传感器与不同类型触觉传感器比较

项目	帕西尼专业级ITPU Gen2	光学触觉	压阻触觉	电容触觉
灵敏度	高	高	低	高
动态范围	高	低	低	中
响应速度	高	低	高	高
迟滞	低	高	高	低
尺寸	小	大、厚	小	小
抗干扰	强	中	强	弱
柔性抓握	高	高	低	低
感知维度	六维力+9种人类触觉	有切向力表征能力但难定量	无	无
集成度	测算传一体	低，需上位机、信号处理装置		
成本	全集成成本低	需高成本采集卡等		

图：帕西尼ITPU传感器感知示意图

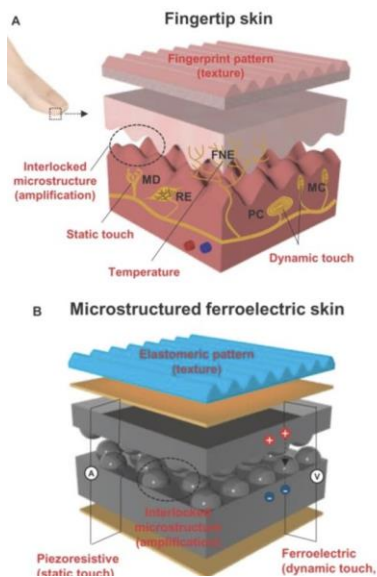


3.3.3. 传感：电子皮肤——与人体触觉传感相仿，但仍在研发阶段

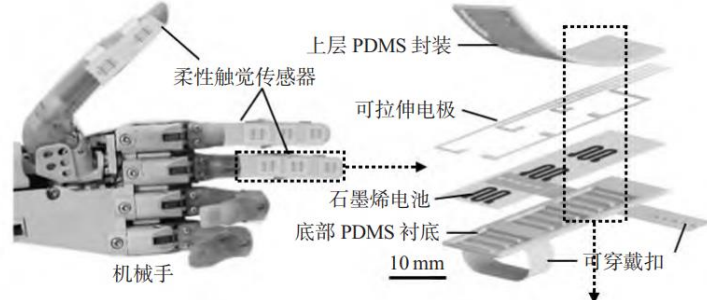
□ 电子皮肤——与人体触觉传感相仿，但仍在研发阶段

- **柔性触觉电子皮肤具有与人体触觉传感器相仿的功能：**电子皮肤（E-skin）作为机器人外表面蒙皮可为机器人提供丰富的触觉信息，促进机器人控制领域及新一代人机交互领域的发展。高柔弹性、高灵敏度的电子皮肤触觉传感器使机器人更加灵活、纤细、智能、人性化。感知皮肤可以如同衣服一样附着在更重载体表面，完成接触力的测量，不受接触面积和形状限制。
- **电子皮肤在实际应用中存在诸多挑战：**高灵敏度、高柔性的电子皮肤制造工艺复杂、成本高和难以批量生产；目前，柔性电子皮肤的发展仍然受材料与结构限制，在测量精度上无法与传统成熟的金属及半导体传感器相比；未来研究中，探索新材料和结构设计仍是制备高性能电子皮肤的关键，尤其是高灵敏度和高柔性的电子皮肤。

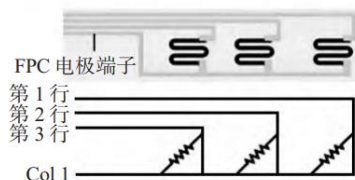
图：仿真电子皮肤结构



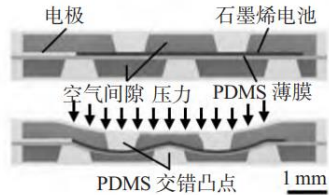
图：全柔性触觉压力传感器



(a) 机械手全柔性触觉压力传感器示意 (b) 触觉传感器的多层结构

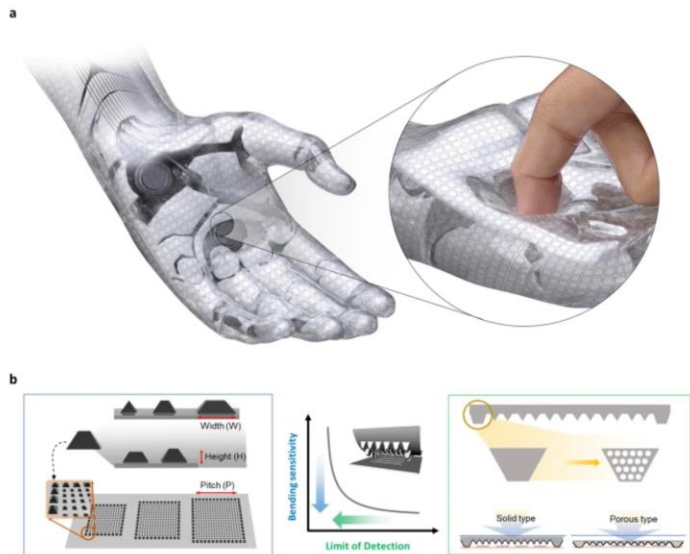


(c) 石墨烯电池的电极连接



(d) 触觉传感器的压力传感机制

图：机械解耦的压力传感器（MDPS）总体示意图



3.3.3. 传感：电子皮肤——与人体触觉传感相仿，但仍在研发阶段

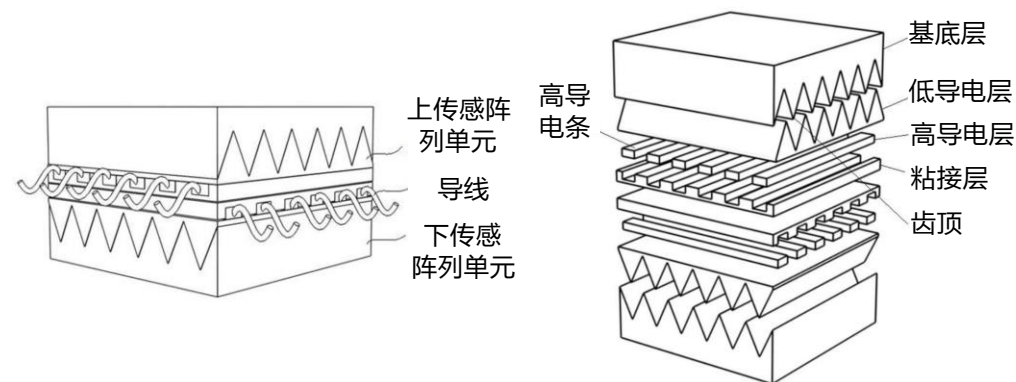
□ 电子皮肤——与人体触觉传感相仿，但仍在研发阶段

➢ 目前研发/生产电子皮肤的企业并不多，国外只有2~3家，国内上市公司中仅有两家公开宣布研发制造，其余为创企。

■ **福莱新材——电子级功能材料深厚积淀，已实现小批量订单**：福莱新材电子级功能材料主要包括胶带系列、保护膜系列和离型膜系列，主要应用于消费电子和汽车电子领域，在制造过程中起保护作用。在新兴的柔性传感器领域，福莱新材凭借在材料和涂层技术上的优势，成功开发出高性能柔性传感器材料，为人形机器人触觉与电子皮肤、工业检测等领域提供关键材料支持。公司核心竞争力主要为：**①系统性的集成设计能力**，公司拥有将硬件、传感材料、PCB等结合在一起的设计能力，**②传感材料中的基材、压敏材料、硅胶材料为公司主业**，公司对涂布工艺的理解和在高分子材料领域的积累较有优势。*目前柔性传感器已经与部分头部客户完成小批量订单任务。*

■ **汉威科技——子公司能斯达立足柔性微纳传感，产品已实现上机**：汉威传感器产业集群成员苏州能斯达攻克了柔性微纳传感器灵敏度低、稳定性差和规模化制造难等关键技术难题，建立了稳定的纳米敏感材料体系，现已掌握柔性压阻、压电、温湿度、电容、汗液五大核心技术，拥有柔性压力传感器、压电传感器、织物、应变传感器、温湿度传感器、热敏传感器、电容传感器、汗液传感器八大产品系列，并拥有一条年产千万支柔性传感器的超净印刷线和组装线，在消费电子、健康医疗、IOT等战略新兴产业均有相关应用落地，**在柔性传感器产业化方面具有国际领先水平。公司柔性传感器获得部分厂家小批量订单，部分已实现产品上机。**

图：福莱新材超灵敏抗疲劳柔性压力传感阵列结构图



图：能斯达柔性传感器产品



4. 建议关注灵巧手各环节相关标的

□ 建议关注灵巧手，我们梳理各环节相关标的如下：

■ 灵巧手整机 —— 永创智能、雷赛智能、祥鑫科技、江苏雷利；

■ 驱动：

1) 空心杯电机制造：鸣志电器、兆威机电、雷赛智能、伟创电气；

2) 绕线设备：田中精机；

■ 传动：

1) 微型行星减速器：豪能股份、中大力德；

2) 小模数齿轮：金属切削小模数齿轮丰立智能、夏厦精密，PEEK齿轮科达利（科盟创新）；

3) 微型丝杠制造：浙江荣泰（拟收购KGG狄兹精密）、雷迪克（拟收购TBG誉展精密）、鼎智科技、恒立液压、北特科技、贝斯特；

4) 丝杠加工设备：华辰装备、浙海德曼、日发精机、秦川机床（子公司汉江机床）、双林股份（子公司科之鑫）；

5) 丝杠加工刀具：PCBN刀具沃尔德、华锐精密；

6) 腱绳传动：UHMWPE材料的南山智尚、恒辉安防、同益中，钢帘线的大业股份，链传动的征和工业；

■ 传感：

1) 六维力传感器：柯力传感、华培动力、安培龙；

2) 触觉传感器/电子皮肤：福莱新材、汉威科技。

注：雷赛智能为机械组、电新组联合覆盖，祥鑫科技为机械组、电新组联合覆盖，伟创电气为机械组、电新组联合覆盖，豪能股份为电新组覆盖，丰立智能为电新组覆盖，科达利为电新组覆盖，浙江荣泰为电新组覆盖，贝斯特为汽车组覆盖，南山智尚为轻纺组覆盖，恒辉安防为轻纺组覆盖，安培龙为电新组覆盖，汉威科技为机械组、通信组联合覆盖。

4. 建议关注灵巧手各环节相关标的

涉及环节		公司	股票代码	营收/亿元	营收YoY	归母/亿元	归母YoY	毛利率	归母净利率	ROE	当前市值	PE-LYR	
整机	灵巧手整机	永创智能	603901.SH	35.7	13%	0.2	-78%	25%	0%	1%	48.4	1.4	
		雷赛智能	002979.SZ	15.8	12%	2.0	45%	38%	13%	14%	128.4	8.1	
		祥鑫科技	002965.SZ	67.4	18%	3.6	-12%	14%	5%	10%	97.7	1.4	
		江苏雷利	300660.SZ	35.2	14%	2.9	-7%	28%	8%	9%	173.6	4.9	
驱动	空心杯电机	电机生产	鸣志电器	603728.SH	24.2	-5%	0.8	-45%	38%	3%	227.2	9.4	
		兆威机电	003021.SZ	15.2	26%	2.3	25%	31%	15%	7%	235.7	15.5	
		伟创电气	688698.SH	16.4	26%	2.5	28%	39%	15%	12%	91.5	5.6	
		绕线设备	田中精机	300461.SZ	2.3	-13%	-1.5	-1655%	39%	-68%	-26%	29.5	13.0
传动	微型行星齿轮减速机	豪能股份	603809.SH	23.6	21%	3.2	77%	34%	14%	12%	110.0	4.7	
		中大力德	002896.SZ	9.8	-10%	0.7	-1%	26%	7%	6%	105.9	10.8	
		丰立智能	301368.SZ	5.0	18%	0.2	-30%	15%	3%	2%	68.2	13.5	
		夏厦精密	001306.SZ	6.7	26%	0.6	-13%	22%	9%	5%	43.7	6.6	
		科达利	002850.SZ	120.3	14%	14.7	23%	24%	12%	13%	303.1	2.5	
	丝杠加工	浙江荣泰	603119.SH	11.3	42%	2.3	34%	35%	20%	13%	141.9	12.5	
		恒立液压	601100.SH	93.9	5%	25.1	0%	43%	27%	17%	895.3	9.5	
		鼎智科技	873593.BJ	2.2	-21%	0.4	-52%	53%	17%	6%	63.7	28.5	
		北特科技	603009.SH	20.2	8%	0.7	40%	18%	4%	4%	131.0	6.5	
		贝斯特	300580.SZ	13.6	1%	2.9	10%	35%	21%	10%	115.9	8.5	
		雷迪克	300652.SZ	7.4	14%	1.2	0%	32%	16%	9%	77.6	10.5	
	微型丝杠	华辰装备	300809.SZ	4.5	-7%	0.6	-47%	29%	14%	4%	81.1	18.2	
		浙海德曼	688577.SH	7.7	15%	0.3	-12%	25%	3%	3%	46.6	6.1	
		加工设备	日发精机	002520.SZ	18.0	-13%	-6.8	25%	17%	-37%	-76%	44.7	2.5
		秦川机床	000837.SZ	38.6	3%	0.5	3%	16%	1%	1%	116.0	3.0	
		双林股份	300100.SZ	49.1	19%	5.0	514%	18%	10%	21%	253.7	5.2	
刀具	沃尔德	688028.SH	6.8	13%	1.0	2%	46%	15%	5%	30.8	4.5		
	华锐精密	688059.SH	7.6	-4%	1.1	-32%	39%	14%	8%	38.8	5.1		
腱绳	UHMWPE	南山智尚	300918.SZ	16.2	1%	1.9	-6%	34%	12%	9%	91.1	5.6	
		恒辉安防	300952.SZ	12.7	30%	1.2	10%	22%	9%	10%	42.2	3.3	
		同益中	688722.SH	6.5	1%	1.3	-15%	38%	20%	10%	44.5	6.9	
	钢帘线	大业股份	603278.SH	51.0	-8%	-1.7	-278%	3%	-3%	-8%	30.3	0.6	
	链传动	征和工业	003033.SZ	18.4	6%	1.3	13%	21%	7%	11%	32.7	1.8	
传感	六维力	柯力传感	603662.SH	13.0	21%	2.6	-17%	43%	20%	10%	170.9	13.2	
		华培动力	603121.SH	12.4	-2%	0.7	-43%	26%	5%	5%	80.7	6.5	
		安培龙	301413.SZ	9.4	26%	0.8	3%	32%	9%	7%	67.8	7.2	
	电子皮肤	福莱新材	605488.SH	25.4	19%	1.4	98%	13%	5%	10%	86.4	3.4	
		汉威科技	300007.SZ	22.3	-3%	0.8	-41%	30%	3%	3%	114.5	5.1	

5. 风险提示

□ 人形机器人行业进展不及预期风险

- 国家发布较多政策推动智能工业机器人、人形机器人、高端数控机床等领域发展，虽然近期上述相关领域发展较为迅速，但由于实际推动效果较低、技术瓶颈较难突破、资金短缺、产业基础水平薄弱等因素，政策到最终产品落地的不确定性较大。

□ 机器人市场竞争加剧风险

- 目前国内各环节均有一定数量公司参与市场竞争，虽然生产制造机器人相关零部件的技术门槛较高，但市场竞争压力持续增加。同时，处于垄断地位的全球性行业巨头可能会采取一定针对性措施进一步激化市场竞争，从而使得相关企业利润下降。

□ 灵巧手技术路线不确定性风险

- 人形机器人行业硬件技术及软件技术（大脑及大模型、小脑及运控技术等）发展仍处于早期阶段，技术路径存在较大争议、不确定性大，放量时间节点未确定，存在前期投入成本难以收回的风险。

□ 贸易冲突超预期风险

- 机器人产业链相关公司与汽车、汽车零部件、电子等产业链公司存在一定重合，参与国际贸易的比例较大，贸易冲突可能会使相关产品成本大幅提升、终端需求下降。贸易冲突会阻碍机器人产业前沿技术、产品交流，阻碍行业发展，部分技术可能受到限制。部分环节制造设备、原材料仍需进口，贸易冲突可能会大幅提升相关产品价格或导致无法进行生产。

分析师声明

本报告署名分析师在此声明：我们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，本报告所表述的所有观点均准确地反映了我们对标的证券和发行人的个人看法。我们所得报酬的任何部分不曾与，不与，也将不会与本报告中的具体投资建议或观点有直接或间接联系。

一般声明

除非另有规定，本报告中的所有材料版权均属天风证券股份有限公司（已获中国证监会许可的证券投资咨询业务资格）及其附属机构（以下统称“天风证券”）。未经天风证券事先书面授权，不得以任何方式修改、发送或者复制本报告及其所包含的材料、内容。所有本报告中使用的商标、服务标识及标记均为天风证券的商标、服务标识及标记。

本报告是机密的，仅供我们的客户使用，天风证券不因收件人收到本报告而视其为天风证券的客户。本报告中的信息均来源于我们认为可靠的已公开资料，但天风证券对这些信息的准确性及完整性不作任何保证。本报告中的信息、意见等均仅供客户参考，不构成所述证券买卖的出价或征价邀请或要约。该等信息、意见并未考虑到获取本报告人员的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。客户应当对本报告中的信息和意见进行独立评估，并应同时考量各自的投资目的、财务状况和特定需求，必要时就法律、商业、财务、税收等方面咨询专家的意见。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，天风证券及/或其关联人员均不承担任何法律责任。

本报告所载的意见、评估及预测仅为本报告出具日的观点和判断。该等意见、评估及预测无需通知即可随时更改。过往的表现亦不应作为日后表现的预示和担保。在不同时期，天风证券可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。

天风证券的销售人员、交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论和/或交易观点。天风证券没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。天风证券的资产管理部门、自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。

特别声明

在法律许可的情况下，天风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，投资者应当考虑到天风证券及/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。

投资评级声明

类别	说明	评级	体系
股票投资评级	自报告日后的6个月内，相对同期沪深300指数的涨跌幅	买入	预期股价相对收益20%以上
		增持	预期股价相对收益10%-20%
		持有	预期股价相对收益-10%-10%
		卖出	预期股价相对收益-10%以下
行业投资评级	自报告日后的6个月内，相对同期沪深300指数的涨跌幅	强于大市	预期行业指数涨幅5%以上
		中性	预期行业指数涨幅-5%-5%
		弱于大市	预期行业指数涨幅-5%以下

THANKS