



机器人行业研究

买入（维持评级）

行业深度研究

证券研究报告

具身智能组

分析师：冉婷（执业 S1130524100001）
ranting@gjzq.com.cn

分析师：陈传红（执业 S1130522030001）
chenchuanhong@gjzq.com.cn

灵巧手研究系列（二）

丝杠配套量有望持续提升，机器人带来海量增长空间

投资逻辑

手部边际变化未来变化的主要集中点，单台人形机器人所需微型丝杠数量有望达到 34-44 个。根据特斯拉公开信息，GEN3 灵巧手相比于 GEN2 的主要变化在于：(1) 手部增加了自由度，从 11 提升到 22 个；(2) 驱动器装载在了手腕部位。若远指关节和近指关节耦合，则需要 17 个主动自由度，若不耦合则最多需要 22 个主动自由度；每个主动自由度对应所需微型丝杠为 1 个。

手部承载力有待提升，丝杠是高承载力方案。当前灵巧手握力和承载力普遍低于 5KG，但据《2020 年中国成人健康调查》，人手握力为 25KG 以上，支撑力可以达到自身体重的 60%-70%。机器人手若想全面实现通用性，则传动部件的承载力亟待提升。其中承载力、传动效率和精度按排序看，丝杠综合能力高于腱绳和连杆，且滚柱丝杠>滚珠丝杠>梯形丝杠，因此微型滚柱丝杠的具备较高的需求度，随着供应链的成熟提升性价比后，微型滚柱丝杠渗透率有望大幅提升。

当前成熟微型滚柱丝杠供应商较小，竞争格局较好。公开资料显示，目前上市公司中已经披露布局了手部微型丝杠业务的包含浙江荣泰和五洲新春。其中浙江荣泰预备收购狄兹精密传动公司 (KGG)，该公司技术来源于全球微型丝杠龙头日本 KSS，同时具备大关节丝杠、微型滚珠丝杠（直径 1.8mm 起）和微型滚柱丝杠（直径 4mm 起）的能力，具备多年微型丝杠能力积累，具备较强先发优势。五洲新春 1H24 财务报告披露公司已经开始布局手部微型丝杠。

底层技术相通，后期具备大关节丝杠能力料将持续布局微型丝杠。微型丝杠当前主流技术方案为车铣磨工艺，当批量量产时为实现规模降本，有望通过轧制（冷锻）、以车代磨、粉末冶金等方案进行批量降本。其中车铣磨擅长精度但速度较慢，进口高精度内外螺纹磨床采购设备成本达上千万元/台，因此亟待提升性价比。根据《行星滚柱丝杠滚柱冷滚压成形机理与实验研究》，轧制丝杠优点在于加工效率是车铣磨效率的近 10 倍，且螺纹的表面光洁度较高，噪声较小。以车代磨和粉末冶金在精度要求较低的情况下性价比极高。

最终工艺选择主要取决于性价比和机器人所需微型丝杠精度。当前机器人灵巧手尚在优化过程中，若算法能力持续迭代升级，有望降低对于丝杠等硬件精度的依赖，若采用 C5 级以下精度满足机器人手部需求，则轧制、以车代磨和粉末冶金精度都满足，有望带来设备、材料和制造端行业的需求提升。

投资建议与估值

生态形成良性循环，机器人升级迭代具备持续性。从上游资本开支提升、硬件降本，中游技术力提升到下游的实用性提升，机器人行业的生态逐步形成良性循环，当前人形机器人正处于 0-1 变化的 iPhone 时代，有望持续带来新的市场催化，具备较强的持续性，而机器人灵巧手价值量占比有望超 30%，建议持续关注灵巧手边际变化。

机器人灵巧手丝杠边际变化最大，具备长期投资价值。机器人单手所需丝杠数量有望由 0 提升至 22 个，在百万台机器人时代对应 4400 万个丝杠需求。后期随机器人销量往亿台过渡的过程中，有望进一步扩展市场空间。当前已经布局微型滚柱丝杠能力的上市公司包含浙江荣泰和五洲新春，且各自具备较强的技术实力和量产能力，长期具备较强降本能力，建议持续跟踪。

风险提示

人形机器人技术量产不及预期，技术路线发展不及预期，微型滚柱丝杠渗透率不及预期，产业链主业业绩不及预期。



内容目录

一、数量：0 到 22 个，机器人单手丝杠数量跃升.....	5
1.1 特斯拉最新方案单手丝杠约 17-22 个.....	5
1.2 微型丝杠可能采用行星滚珠或者行星滚柱丝杠两类.....	8
二、手部丝杠渗透率提升是大势所趋，丝杠+腱绳复合方案呈现加乘效应.....	8
2.1 传统传动：腱绳+连杆传动为行业主流，连杆传动具有精度、负载力、成本优势.....	8
2.1.1 传动装置是灵巧手性能的重要决定因素，腱绳已应用于 Okada、DLR 等灵巧手中.....	8
2.1.2 腱绳传动：具有可远距离传动、自适应性抓取的优点，广泛应用于空间环境.....	9
2.1.3 连杆传动：具有精度高、承载力强、成本低的优点，未来发展空间广阔.....	10
2.2 新型传动：微型丝杠唤醒传动新生，微型丝杠+腱绳复合传动有望成为灵巧手主流.....	12
2.2.1 微型丝杠+腱绳复合传动有已应用于 Optimus 灵巧手中，有望成为未来主流方案.....	12
2.2.2 滚珠丝杠：利用滚珠减小摩擦力，精度、平稳度、使用寿命大幅提高.....	13
2.2.3 行星滚柱丝杠：以滚柱代替滚珠进行传动，实现滚动丝杠承载力等各方面性能的跃升.....	15
2.3 价格探析：行星滚柱丝杠单价价格约 2000 元，国产化和市场扩容有望打破价格壁垒.....	17
三、微型丝杠上下游产业链投资机会广阔，金属路线性价比高.....	18
3.1 金属路线：目前市面主流技术路线，KGG、新剑传动均采用金属材料.....	18
3.1.1 金属材料：国产轴承钢技术已实现一定突破，但与国外轴承钢仍有差距.....	18
3.1.2 加工工艺：目前丝杠加工工艺路线以车铣磨或冷锻+磨削为主.....	19
3.1.3 生产设备：丝杠生产设备仍以进口为主，国产丝杠加工设备存在“卡脖子”难题.....	20
3.1.4 粉末冶金也是丝杠加工中的一种重要技术.....	21
3.2 塑料路线：灵巧手轻量化重要实现路径，具有抗腐蚀性、高温稳定性等优势.....	23
3.2.1 PEEK 材料：性能优异的工程塑料，助力轻量化突破.....	23
3.2.2 加工工艺：包括注塑成型、热压成型、模压成型等成型方法，注塑成型效率最高.....	23
3.2.3 生产设备：注塑机为关键加工设备，海天国际、伊之密为主要供应商.....	23
3.3 陶瓷路线：轻量化+高强度+耐磨损新型材料，可实现灵巧手使用寿命的延长.....	24
3.3.1 陶瓷材料：灵巧手微型丝杠的理想材料，已在汽车、机械等领域通过实践检验.....	24
3.3.2 加工工艺：分为压制法、注射法及流延法三种类型，压制成型具有成型速度快、精度高等优势...	24
3.3.3 生产设备：高温、气氛烧结炉为关键生产设备，首钢股份、山东钢铁等公司可提供优质产品....	25
四、相关标的.....	26
4.1 微型丝杠加工与维护难度比普通丝杠更大.....	26
4.2 微型丝杠竞争格局：国外少数大型公司主导，国内追赶速度较快.....	27
4.2.1 舍弗勒通过收购优质行星滚柱丝杠厂商垄断了全球供应.....	29
4.2.2 浙江荣泰：拟收购精密丝杠生产商狄兹精密 51% 股权，布局人形机器人等领域.....	29
4.2.3 诺仕机器人成功研发目前全行业最小滚柱丝杠.....	31



4.2.4 五洲新春：主业轴承与丝杠底层原理相通，已布局微型滚柱丝杠.....	31
五、投资建议.....	32
六、风险提示.....	32

图表目录

图表 1：人手共有 24 个自由度.....	5
图表 2：除手腕和手掌外，人手共 21 个自由度.....	5
图表 3：灵巧手自由度最高已达 24 个.....	5
图表 4：特斯拉灵巧手自由度有提升趋势.....	7
图表 5：单个主动自由度=1 个微型电机+1 个滚柱丝杠+1 个腱绳.....	7
图表 6：电机驱动+腱绳（复合丝杠等）传动+触觉（复合其他传感器）是主流发展方向.....	7
图表 7：微型滚柱丝杠因更大的承载力，适合放置于灵巧手大拇指.....	8
图表 8：灵巧手已逐步形成了腱绳、连杆、齿轮三种主要传动模式.....	8
图表 9：灵巧手通过模仿人手肌腱进行传动.....	9
图表 10：腱绳可远距离传动、传动效率高、可自适应抓取.....	9
图表 11：主流的腱绳传动方案包括 N 型、N+1 型、2N 型三种.....	10
图表 12：腱绳传动是目前灵巧手中应用最广泛的传动方式.....	10
图表 13：Robonaut Hand 等空间环境灵巧手采用腱绳驱动.....	10
图表 14：连杆传动多采用平面四杆机构传动.....	11
图表 15：连杆传动负载力强、精度高、生产成本低.....	11
图表 16：连杆传动目前应用相对较少，但优势明显.....	11
图表 17：因时机器人采用直线驱动+空间连杆传动方式.....	11
图表 18：尺寸小型化、感知灵敏化和动作拟人化是灵巧手未来发展趋势.....	12
图表 19：微型丝杠+腱绳传动有望成为灵巧手主流方案.....	12
图表 20：复合传动的方案已应用于 Optimus 灵巧手中.....	12
图表 21：微型丝杠与腱绳的复合传动呈现加乘效应.....	13
图表 22：丝杠可分为梯形丝杠、滚珠丝杠和行星滚柱丝杠三种类型.....	13
图表 23：滚珠丝杠副由丝杠、螺母、滚珠组成.....	14
图表 24：滚珠丝杠通过螺纹将旋转运动转化为平移运动.....	14
图表 25：滚珠丝杠副的结构主要分为内循环结构、外循环结构、端盖结构和盖板结构.....	14
图表 26：标准式行星滚柱丝杠副由滚柱、丝杠、螺母、内齿圈和保持架构成.....	15
图表 27：行星滚柱丝杠在承载力、尺寸、噪音、寿命等方面明显优于滚珠丝杠.....	15
图表 28：滚柱丝杠可分为标准式、反向式、循环式、差动式和轴承环式五种类型.....	16
图表 29：2020 年滚珠丝杠 185 元，低于行星滚柱丝杠.....	17
图表 30：2022 年行星滚柱丝杠国产化率不足 10%.....	17



图表 31: 行星滚柱丝杠原材料成本占比大概为 60%.....	18
图表 32: 预计 2030 年行星滚柱丝杠市场可达 124.9 亿元.....	18
图表 33: KGG、新剑传动均采用金属路线.....	18
图表 34: 微型手部丝杠产业链构成.....	18
图表 35: 丝杠主要使用原材料化学成分含量 (%)	18
图表 36: 国产丝杠存在的带状偏析组织是造成其使用性能不佳的重要原因.....	19
图表 37: 国内轴承钢主要供应商	19
图表 38: 车铣磨加工流程图	20
图表 39: 磨削工艺精度最高，是市场上的主流技术方案.....	20
图表 40: 国内设备主要供应商	21
图表 41: 粉末冶金工艺流程	22
图表 42: 2023 年中国粉末冶金市场占有率统计.....	22
图表 43: PEEK 材料的主要供应商.....	23
图表 44: PEEK 五种加工工艺.....	23
图表 45: 海天国际是国内注塑机主要供应商	24
图表 46: 陶瓷材料主要应用领域及代表企业	24
图表 47: 干压成型原理	25
图表 48: 流延成型包括球磨、流延、烧结等步骤	25
图表 49: 注射成型包括混料、注射、脱脂、烧结等环节	25
图表 50: 烧结设备主要生产厂商	26
图表 51: 加压过程中粉末颗粒会发生重排、破裂、塑性流动	26
图表 52: 流延成型工艺需要流延机进行生产	26
图表 53: 微型丝杠与普通丝杆生产难度等对比	27
图表 54: 研磨法与轧制法区别与代表厂商	27
图表 55: 部分已知微型丝杆产品参数	27
图表 56: 新剑传动、KGG 和五洲新春已经研发出灵巧手部丝杠	28
图表 57: KGG 微型丝杠直径达到 1.8mm 超小轴径	30
图表 58: KGG 行星滚柱丝杠达到 4mm 轴径	30
图表 59: KGG 线性执行器（行星）总行径为 20-65mm	30
图表 60: KGG 已经做出丝杠传动的灵巧手方案	30
图表 61: 诺仕丝杠直径仅 2.5mm，螺母直径 6.5mm	31
图表 62: 诺仕丝杠精度可达 C5 级	31
图表 63: 五洲新春的主业产品轴承与丝杠底层技术相通	32
图表 64: 金属路线是目前丝杠产业链的主流方案	32

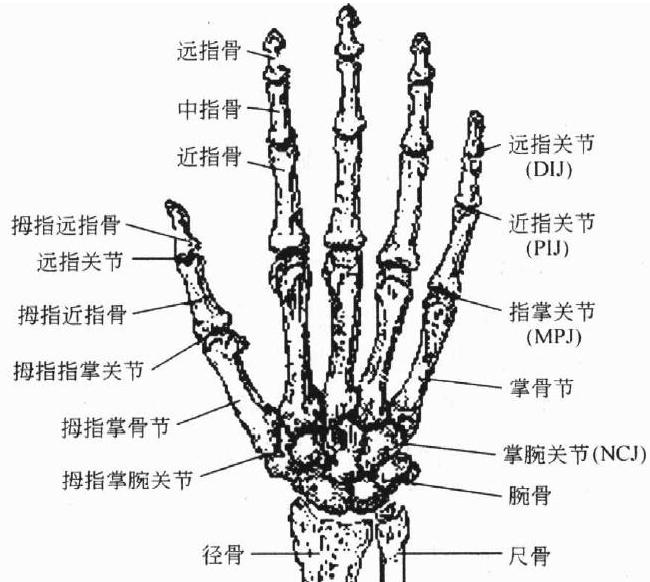


一、数量：0到22个，机器人单手丝杠数量跃升

1.1 特斯拉最新方案单手丝杠约17-22个

人手共有24个自由度。据《机器人灵巧手——建模、规划与仿真》，人手24个自由度包含拇指5个自由度，其余4指各4个自由度，另外还有腕的外展、腕的弯曲和手掌的弧度3个自由度。

图表1：人手共有24个自由度



图表2：除手腕和手掌外，人手共21个自由度

手指	指 节		关 节		
	名 称	符 号	名 称	符 号	自由度数
拇指	远指节	TDP	指端关节	TUJ	1
	近指节	TPP	指掌关节	TMPJ	2
	掌骨节	TM	掌腕关节	TMJ	2
食指	远指节	DP	指端关节	DIJ	1
	中指节	MP	指间关节	PIJ	1
	近指节	PP	指掌关节	MPJ	2
中指	远指节	DP	指端关节	DIJ	1
	中指节	MP	指间关节	PIJ	1
	近指节	PP	指掌关节	MPJ	2
环指	远指节	DP	指端关节	DIJ	1
	中指节	MP	指间关节	PIJ	1
	近指节	PP	指掌关节	MPJ	2
小指	远指节	DP	指端关节	DIJ	1
	中指节	MP	指间关节	PIJ	1
	近指节	PP	指掌关节	MPJ	2
手腕			外展	yaw	1
			曲度	pitch	1
			弧度	arch	1
手掌					

来源：《机器人灵巧手——建模、规划与仿真》，国金证券研究所

来源：《机器人灵巧手——建模、规划与仿真》，国金证券研究所

自由度越多，设计难度越大，难题之一是如何安置众多驱动器，让灵巧手的尺寸接近人手。目前已知自由度最多的是Shadow Hand，自由度达到24个。特斯拉人形机器人第一代单手拥有6个自由度，第二代11个自由度，整体向自由度更高发展。2014年起，已有至少4款灵巧手做到了21个自由度，传动方式上，韧带、腱绳和齿轮连杆均有采用。

图表3：灵巧手自由度最高已达24个

灵巧手	主要研究单位	研究年份	手指个数	自由度	传动方式
Okada Hand	日本电工实验室	1974	3	11	腱-滑轮
SALISBURY Hand	斯坦福大学	1983	3	9	腱-滑轮
Belgrade/USC Hand	贝尔格莱德大学	1988	5	15	连杆
UB Hand	博洛尼亚大学	1992	3	11	腱-滑轮
NTU Hand	台湾大学	1996	5	17	齿轮
DIST Hand	意大利热那亚大学	1998	4	16	腱-滑轮
Robonaut Hand	NASA	1999	5	14	腱-滑轮
LMS Hand	普瓦提埃大学	1998	4	16	腱-滑轮
GIFU Hand	日本岐阜大学	2001	5	16	齿轮连杆
DLR Hand	德国宇航中心	2001	4	13	腱-滑轮
High Speed Hand	东京大学	2003	3	9	齿轮
Keio Hand	庆应义塾大学	2003	5	20	腱-滑轮
Yokoi Hand	东京大学	2004	5	11	腱绳
Robotic Hand MA-1	加泰罗尼亚理工大学	2004	4	16	齿轮



灵巧手	主要研究单位	研究年份	手指个数	自由度	传动方式
BH985 Hand	北京航空航天大学	2005	5	11	齿轮连杆
MAC-HAND	意大利热那亚大学	2005	4	12	腱绳
NAIST-HAND	日本奈良先端科学技术大学	2005	4	12	齿轮连杆
SKKU Hand II	韩国成均馆大学	2006	4	10	齿轮
HEU Hand II	哈尔滨工程大学	2006	3	9	齿轮
SAH	Schunk 公司	2007	4	13	齿轮连杆
LARM Hand	意大利卡西诺大学	2010	3	12	连杆
KNTK	K. N. Toos 科技大学	2011	3	9	全柔性
Metamorphic Hand	天津大学	2013	4	16	连杆
Barret Hand	巴雷特技术公司	2013	3	9	连杆齿轮
Ritsumeikan Hand	日本立命馆大学	2013	5	20	连杆
Pisa/IIT Soft Hand	意大利	2014	5	21	韧带
ISR-Soft Hand	美国	2014	5	21	腱绳
Washington Hand	华盛顿大学	2016	5	21	腱绳
SSSA-My Hand	ScuolaSuperiore Sant' Anna	2016	5	21	齿轮连杆
HERI Hand	意大利	2017	3	15	连杆
Shadow Hand	Shadow 公司	2019	5	24	腱-滑轮
欠驱动灵巧手	河北工业大学	2020	5	15	单腱
软体仿人手	上海交通大学	2020	5	11	软体
Anthropomorphic Robot Hand	韩国	2021	5	20	腱绳
ILDA Hand	韩国	2021	5	15	连杆

来源：《机器人灵巧手研究综述_刘伟》，国金证券研究所

为兼顾自由度、承载力等指标，特斯拉将电机装载在手臂位置。根据特斯拉公开信息，GEN3 灵巧手相比于 GEN2 的主要变化在于：(1) 手部增加了自由度，从 11 提升到 22 个；(2) 驱动器装载在了手腕部位。若远指关节和近指关节耦合，则需要 17 个主动自由度，若不耦合则最多需要 22 个主动自由度。



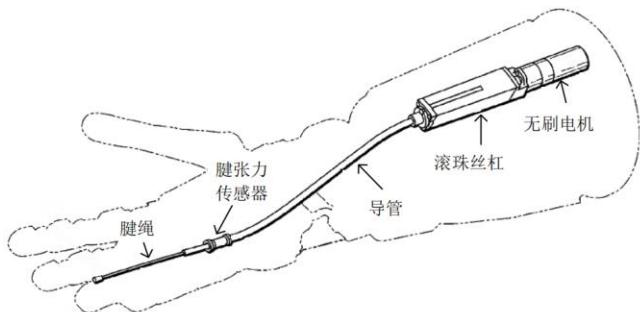
图表4：特斯拉灵巧手自由度有提升趋势



来源：特斯拉发布会，马斯克采访，国金证券研究所

在如上自由度假设下，特斯拉单手需要 17-22 个丝杠。特斯拉单个主动自由度配备了 1 个微型电机+1 个滚柱丝杠+1 个腱绳+1 个传感器。根据我们 2024 年 9 月发布的研究报告《灵巧手：结构向高承载发展，丝杠数量或将倍增》，受经济成本和技术制约影响，目前看最适合灵巧手采用的方案是：驱动采用电机，传动采用腱绳或丝杠（可搭配其他传动件），传感器采用内部加外部传感器（力、触觉传感器是高频使用的）。

图表5：单个主动自由度=1个微型电机+1个滚柱丝杠+1个腱绳



来源：《空间五指灵巧手控制系统设计_韩运峰》，国金证券研究所

图表6：电机驱动+腱绳（复合丝杠等）传动+触觉（复合其他传感器）是主流发展方向

灵巧手=手指（驱动+传动+传感器）*自由度+外壳			
自由度与电机数量	驱动形式	传动形式	传感形式
相等：全驱动	电机驱动 (空心杯/无刷有齿槽电机)	腱绳	触觉传感器
不相等：欠驱动	液压驱动	丝杠	视觉传感器
	气压驱动	齿轮	温度传感器
	形状记忆合金驱动	连杆	力传感器
			位移传感器
			角位移传感器
			力矩传感器

来源：《机器人灵巧手研究综述》，《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》，国金证券研究所

注：加粗字体表示主流方案



1.2 微型丝杠可能采用行星滚珠或者行星滚柱丝杠两类

微型滚柱相比滚珠的承载力更高，适用于大拇指。(1) 在握力方面，大拇指在灵巧手中起到关键作用，与其他手指相对，能够提供主要的对向力；在抓取物体时，大拇指可以从一侧施加力，与其他手指形成合力，实现对物体的稳定抓握。例如在抓取小型工具或者物品时，大拇指与食指、中指的配合可以产生有效的握力，确保物体不滑落。(2) 在承载力方面，大拇指由于其独特的结构和位置，在承受垂直于手掌方向的力时能发挥重要作用，有助于稳定地支撑物体，防止物体在重力作用下掉落。综合考量承载力和握力，大拇指对丝杠的承载力要求指标最高，因此适合采用行星滚柱丝杠。根据中国工控网资料显示，由 Hertz pressure(赫兹压力)定律，行星滚柱丝杠能承受的静载为滚珠丝杠的 3 倍，寿命是滚珠丝杠的 15 倍。

图表7：微型滚柱丝杠因更大的承载力，适合放置于灵巧手大拇指

类型	接触方式	直径	厂商
滚珠丝杠	点接触	常见有 6mm、8mm 等	知名品牌如日本的 NSK、THK，中国台湾的 HIWIN、PMI 等
梯形丝杠	滑动摩擦接触	常见有 6mm、8mm 等	国产的一些普通机械传动部件生产厂家均可生产，已基本实现国产替代
滚柱丝杠	线接触，承载力最高，可达到滚珠丝杠的 3 倍。	理论上可做到 8mm 以内，如 6mm 等	国外如德国舍弗勒、美国 Exlar、瑞士 Rollvis、瑞典 SKF、日本 NTN 等；国内处于小批量生产阶段

来源：中国工控网，现代制造公众号，金属加工公众号，深圳机器人协会公众号，各公司官网，国金证券研究所

二、手部丝杠渗透率提升是大势所趋，丝杠+腱绳复合方案呈现加乘效应

2.1 传统传动：腱绳+连杆传动为行业主流，连杆传动具有精度、负载力、成本优势

2.1.1 传动装置是灵巧手性能的重要决定因素，腱绳已应用于 Okada、DLR 等灵巧手中

多指灵巧手作为机器人末端执行器，是机器人与环境相互作用的最后环节与执行部件，对提高机器人的柔性和易用性有着极为重要的作用。而机器人灵巧手的体积、重量、灵活性和可操作性等各项性能指标的优劣，很大程度上取决于灵巧手采用的驱动和传动方式。在十几年的发展历程中，灵巧手已逐步形成了腱绳、连杆、齿轮三种主要传动模式。例如，Okama 和 DLR-I Hand 是腱绳传动在灵巧手中应用的典型案例，其通过腱绳传递动力，能够实现手指的灵活运动，同时减轻末端负载和惯量，适合空间狭小且需要高自由度的场合，而 Ultralight Hand、GIFU-II Hand 则采用齿轮传动的方式，能够实现精确的抓取动作和多种抓取构形。TWENDY-ONE Hand 采用齿轮+连杆的方式传动，具有稳定的动力传递和较强的抓取能力。

图表8：灵巧手已逐步形成了腱绳、连杆、齿轮三种主要传动模式

时间	灵巧手	手指数	自由度数	传动形式	驱动方式	驱动位置
1974	Okada Hand	3	11	腱绳	腱驱动	外置
1983	Utah/MIT Hand	4	16	腱绳	腱驱动	外置
1984	Stanford/JPL Hand	3	9	腱绳	腱驱动	外置
1988	Barret Hand	3	4	齿轮	直接驱动	内置
1992	UB-II Hand	3	11	腱绳	腱驱动	外置
1998	DLR-I Hand	4	12	腱绳	腱驱动	外置
1998	DIST Hand	4	16	腱绳	腱驱动	外置
1998	BH-3 Hand	3	9	腱绳	腱驱动	内置
1999	Tokyo Hand	5	12	腱绳	腱驱动	外置
2000	DLR-II Hand	4	13	齿形带	腱驱动	内置
2000	Ultralight Hand	5	13	齿轮	直接驱动	内置
2001	GIFU-II Hand	5	16	齿轮	直接驱动	内置



2001	BH-4 Hand	4	16	腱绳	腱驱动	内置
2004	UBH3 Hand	5	24	腱绳	腱驱动	外置
2004	HIT/DLR-I Hand	4	13	齿轮	直接驱动	内置
2004	Shadow Hand	5	21	腱绳	腱驱动	外置
2009	HIT/DLR-II Hand	5	15	腱绳	腱驱动	内置
2009	TWENDY-ONE Hand	4	13	齿轮+连杆	直接驱动	内置
2010	DLR HASy Hand	5	19	腱绳	腱驱动	外置
2014	RoboRay Hand	5	12	腱绳	腱驱动	外置
2014	The CEA dexterous Hand	5	20	腱绳	腱驱动	内置
2016	Washington Hand	5	21	腱绳	腱驱动	外置
2016	SSSA-My Hand	5	21	齿轮+连杆	腱驱动	外置
2017	HERI Hand	3	15	连杆	腱驱动	外置
2019	Shadow Hand	5	20	腱+滑轮	腱驱动	外置
2020	软体仿人手	5	11	软体	腱驱动（气动驱动）	外置
2021	Anthropomorphic Robot Hand	5	20	腱绳	腱驱动	外置
2021	Allegro Hand	4	16	腱绳	腱驱动	外置
2022	Tesla Optimus-I	5	11	腱绳+蜗轮蜗杆	腱驱动	内置
2024	Tesla Optimus-III	5	22	齿轮+腱绳+丝杠	腱驱动	外置

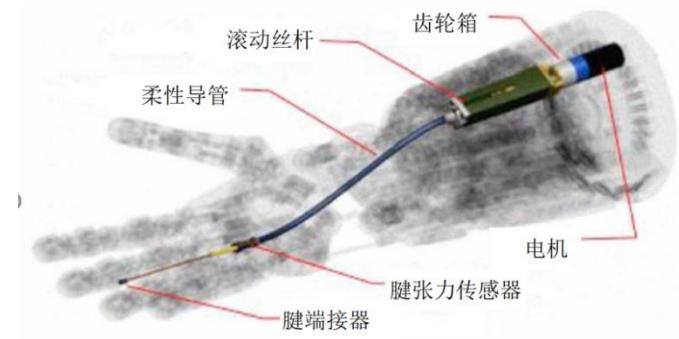
来源：《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》、《机器人灵巧手研究综述》、欣佰特科技公众号、乐晴智库精选公众号，国金证券研究所

2.1.2 腱绳传动：具有可远距离传动、自适应性抓取的优点，广泛应用于空间环境

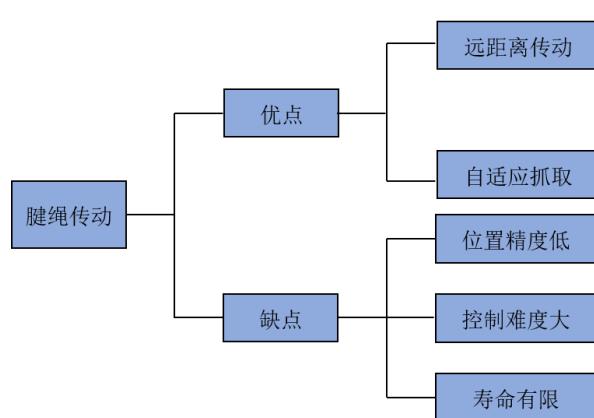
腱绳通过模仿人的肌腱进行传动，是目前灵巧手研究中应用最广泛的传动方式，具有远距离传动、传动效率高、可自适应抓取等优势，但同时存在精度有限、生产难度大、寿命较短等弊端。

- **优势：**与其他传动形式相比，腱绳可在驱动器外置的腱驱动灵巧手指内，利用有限的空间进行远距离传动，这是腱绳传动最突出的优势。另外，腱绳传动中多采用滑动轴承，故传动系统摩擦较小、传递效率高。同时，在一些特殊的设计中，可以通过调节腱绳刚度实现灵巧手自适应抓取。
- **不足：**由于腱本身具有刚度有限、弹性较大的特点，绳子长度的变化会导致位置控制和力量失稳，影响其传动的位置精度。另外，腱绳需要添加预紧装置，并在控制算法上予以补偿，控制难度比较大，预紧力产生的摩擦也会影响使用寿命。这些因素增加了腱绳传动的难度和复杂性。

图表9：灵巧手通过模仿人手肌腱进行传动



图表10：腱绳可远距离传动、传动效率高、可自适应抓取



来源：《腱驱动空间多指灵巧手感知与控制关键技术研究》，国金证券研究所

来源：《拟人灵巧手的设计与控制研究》、《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》、小米技术公众号，国金证券研究所

腱绳通常与滑轮搭配使用，根据腱绳与滑轮在灵巧操作手的位置不同，主流的腱绳传动方案包括N型、N+1型、2N型三种，每种方案都有其独特的优势和适用场景。其中“N型”传动方案驱动器数目最少，这种设计能够有效降低驱动



系统的整体尺寸，降低电气系统与控制系统的复杂程度，提高了系统的可靠性，但N型传动方案需要预紧装置来确保腱绳的张力；“N+1型”传动方案所需的腱绳数目最少。然而，这种方案的一个显著缺点是单个腱绳与单个驱动单元的负载较大，导致驱动单元尺寸较大，牺牲了系统的紧凑性和灵活性；“2N型”传动方案的承载能力较强，动态特性较好，但所需驱动单元数目较多，机构尺寸偏大，可能会影响灵巧手的整体灵活性和操作空间。

图表11：主流的腱绳传动方案包括N型、N+1型、2N型三种

传动方案	原理简图	驱动器数目	腱绳数目	特点
N型		N	2N	驱动器数目少；需要预紧机构
N+1型		N+1	N+1	腱绳数目少；单根腱绳负载大
2N型		2N	2N	承载能力强、动态性能较好；驱动器数目多

来源：《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》，国金证券研究所

由于其灵活性高、成本较低等特点，腱绳传动是目前灵巧手中应用最广泛的传动方式，典型案例有Shadow Hand、PISA/IIT SoftHand等。Shadow Hand是一款高度拟人化的灵巧手，采用腱绳传动实现了与人类手相似的运动灵活性和操作能力；而PISA/IIT SoftHand则通过腱绳传动和欠驱动设计，简化了控制复杂度，同时保持了较高的操作性能。特别的，由于腱绳驱动可适用于远距离传动，便于实现驱动器外置的驱动方案，并减轻空间环境下摩擦问题以及剧烈温差环境下零件热胀冷缩导致配合变化的问题，腱绳传动广泛应用于空间传动中，例如美国宇航中心的Robonaut Hand、Robonaut 2 Hand 和德国宇航中心(DLR)的Dexhand均采用腱绳驱动的方式。

图表12：腱绳传动是目前灵巧手中应用最广泛的传动方式

图表13：Robonaut Hand 等空间环境灵巧手采用腱绳驱动



来源：《机器人灵巧手研究综述》，国金证券研究所

来源：《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》，国金证券研究所

2.1.3 连杆传动：具有精度高、承载力强、成本低的优点，未来发展空间广阔

连杆传动多采用平面四杆机构传动，铰链将各构件相互连接，通过各个连杆实现运动变换和动力传递，具有负载力强、精度高、生产成本低等优点，但也具有结构冗杂、灵活度低、抗冲击性差等不足。

➤ **优势：**连杆传动机构能解决腱绳驱动不稳定的问题，满足精确控制抓取位置和抓取力的需求。连杆传动利用连杆



实现动作的传递，连杆刚度强、出力大，有很好的负载能力，能够抓取大型物体。同时连杆加工成本低廉，生产难度较小。

- 不足：相比于其他传动，连杆传动结构较为冗杂，尺寸和质量较大。同时连杆传动缺乏自适应性，无法实现对物体的完全包络，动作灵活性有限。另外由于连杆柔性不足，导致抗冲击能力较差。以上因素导致连杆传动目前在灵巧手中应用相对较少。

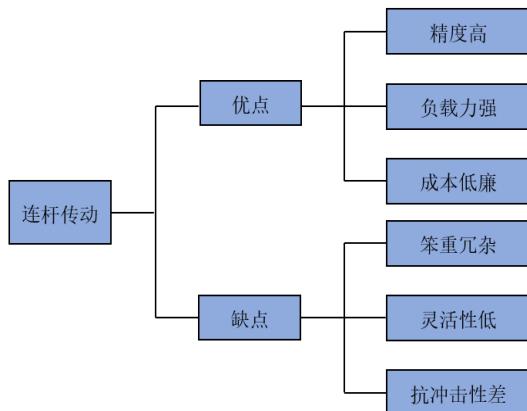
图表14：连杆传动多采用平面四杆机构传动



(a) 手指模型

(b) 扭簧位置

图表15：连杆传动负载力强、精度高、生产成本低



来源：《一种新型灵巧操作手的设计与分析》，国金证券研究所

来源：《拟人灵巧手的设计与控制研究》、小米技术公众号，国金证券研究所

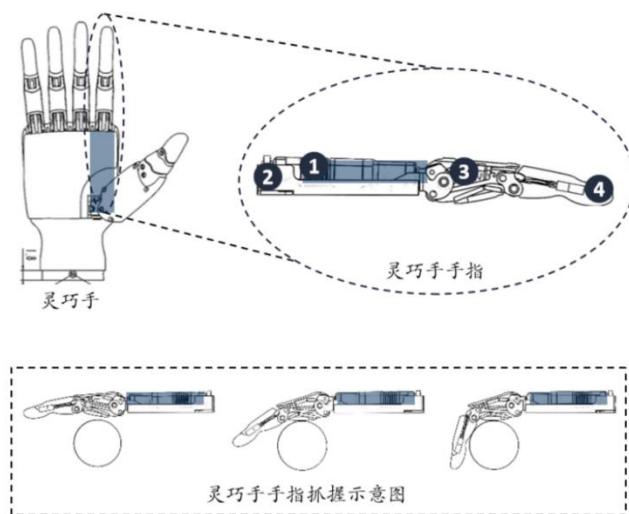
相比于腱绳传动，连杆传动目前应用相对较少，但优势却十分明显。腱绳方案虽然有较高的柔韧性，但精度易受疲劳度、张力影响，对材料要求较高；齿轮传动的齿隙和啮合误差会影响传动精度，且加工精度要求高，而连杆传动能够规避腱绳和齿轮传动的不足。因时机器人通过研究发现，直线驱动+空间连杆的传动方案是灵巧手技术方案的最优解。这种创新型设计结合了直线驱动的高精度和连杆传动的稳定性，实现整手12个关节的灵活运动，不仅使灵巧手具有亚毫米级定位精度，还赋予其数千克的负载能力。同时，直线驱动+空间连杆的设计简化了系统的复杂性，降低了控制难度，使得灵巧手在实际应用中更加高效和可靠。

图表16：连杆传动目前应用相对较少，但优势明显

图表17：因时机器人采用直线驱动+空间连杆传动方式



来源：《机器人灵巧手研究综述》，国金证券研究所



来源：机器人大讲堂公众号，国金证券研究所

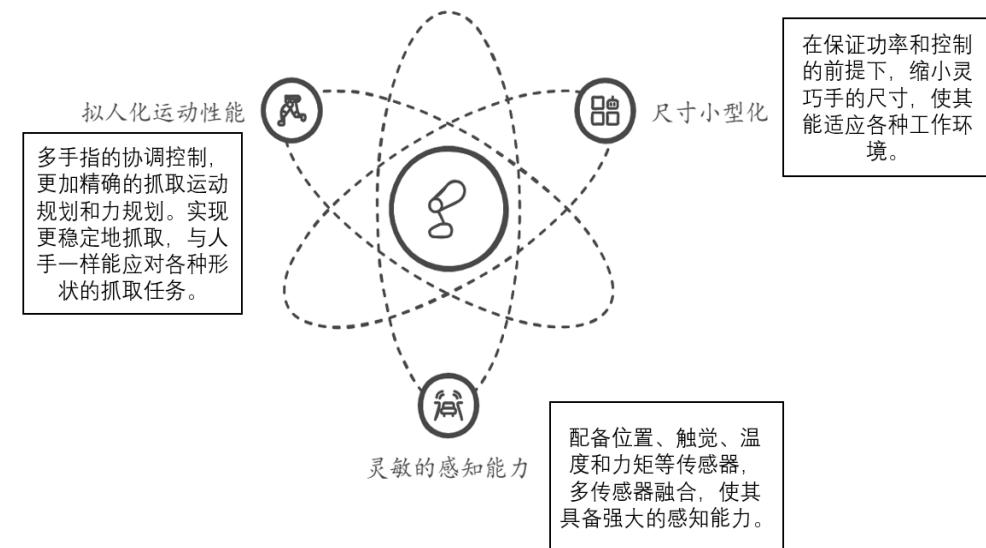


2.2 新型传动：微型丝杠唤醒传动新生，微型丝杠+腱绳复合传动有望成为灵巧手主流

2.2.1 微型丝杠+腱绳复合传动有已应用于 Optimus 灵巧手中，有望成为未来主流方案

随着机器人技术的不断发展，多变的工作环境，复杂的工作任务都对多指灵巧的性能提出了更高的要求。无论是在工业制造中的精密装配、医疗手术中的精细操作，还是服务机器人中的拟人化交互，灵巧手都需要具备更高的灵活性、精度和适应性。因此，未来灵巧手的发展方向将主要集中在尺寸小型化、感知灵敏化和动作拟人化三个方面。尺寸小型化可以使灵巧手在狭小空间内灵活操作，感知灵敏化能够提升其对环境和工作对象的感知能力，而动作拟人化则使其更接近人类手的自然运动方式，从而更好地完成复杂任务。这就要求传动设备减小尺寸、提高精度和稳定性，传统传动方式中，腱绳传动精度有限，稳定性较弱，而连杆传动尺寸过大，灵巧性不足。传统传动方式已很难满足灵巧手未来发展趋势，灵巧手传动方式亟待转变创新。

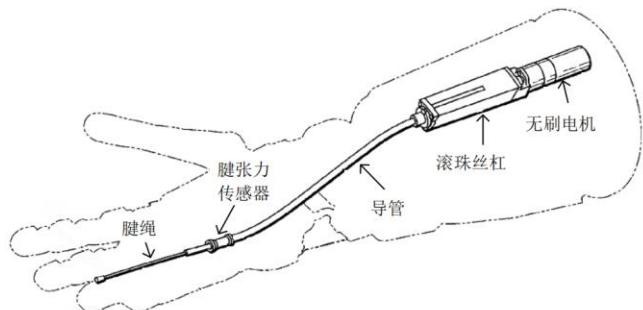
图表18：尺寸小型化、感知灵敏化和动作拟人化是灵巧手未来发展趋势



来源：《拟人灵巧手的设计与控制研究》，国金证券研究所

为顺应灵巧手高精度、高稳定性的趋势，微型丝杠被逐步引入灵巧手传动中，微型丝杠+腱绳复合传动有望成为未来灵巧手传动主流方案。在该复合传动方案中，置于灵巧手前臂中的电机通过齿轮箱驱动滚珠丝杠，并通过滚珠丝杠上的螺母将转动转化为平动。螺母旋转带动套在其上的腱环旋转，拉动连接在灵巧手手指指骨上的腱绳，实现手指绕关节轴的转动运动。目前微型丝杠+腱绳复合传动的方案已应用于特斯拉 Optimus 灵巧手中。Optimus 灵巧手采取驱动器外置的三级传动方案，该方案在一级传动中采取行星齿轮箱，二级传动中采取传动精度更高的丝杠作为线性运动的零部件，由于手臂模组到手指的距离较远，三级传动依然选择了腱绳的方案。

图表19：微型丝杠+腱绳传动有望成为灵巧手主流方案



图表20：复合传动的方案已应用于 Optimus 灵巧手中



来源：《腱驱动空间多指灵巧手感知与控制关键技术研究》，国金证券研究所

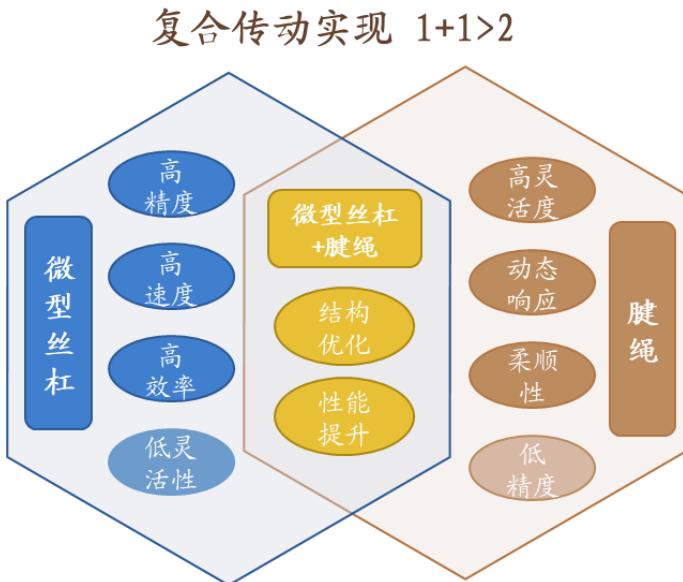
来源：机器人大讲堂公众号，国金证券研究所

在灵巧手的传动系统中，微型丝杠与腱绳的复合传动呈现加乘效应：丝杠凭借高精度、低摩擦特性实现刚性关节的精



准定位，腱绳则通过柔顺性适应多自由度运动和复杂场景。两者功能互补——腱绳弥补丝杠灵活性不足，丝杠解决腱绳的精度衰减与张力控制难题，协同突破单一传动在动态响应、负载能力等方面局限。通过结构优化，丝杠承担高精度线性驱动，腱绳负责空间运动传递与缓冲，显著提升整体性能。但需注意若设计存在重量分配或控制冲突，可能因摩擦叠加产生短板效应。因此，通过轻量化设计和协同控制优化，方能有效释放该复合传动的加乘优势。

图表21：微型丝杠与腱绳的复合传动呈现加乘效应



来源：工业高科公众号、高性能树脂及应用公众号，国金证券研究所

根据工作原理，丝杠可分为滑动（梯形）丝杠、滚珠丝杠、行星滚柱丝杠三类。梯形丝杠因其牙型截面为梯形而得名。梯形丝杠通过滑动摩擦进行传动，工作时温升较大且磨损严重，使用寿命和传动速度较低。滚珠丝杠相较于梯形丝杠具有更小的摩擦系数，效率和精度更高，能够提供高速供给，被广泛应用于汽车、数控机床、机械等行业。行星滚柱丝杠以滚柱代替滚珠，在传动效率、精度等方面较滚珠丝杠实现性能进一步提升，是灵巧手传动的首选丝杠类型。

图表22：丝杠可分为梯形丝杠、滚珠丝杠和行星滚柱丝杠三种类型

类型	优点	缺点	应用领域
梯形丝杠	结构简单、有自锁性、承载力大、制造方便、价格低	效率低下、精度低、速度低	常被用于普通机床、新能源汽车刹车、驻车系统及机器人线性关节等。
滚珠丝杠	效率高、精度高、高速供给	对原材料、生产环节、设计与制造各个方面都提出了更高的要求	多应用于汽车、数控机床、机械等场合
行星滚柱丝杠	相较于滚珠丝杠，行星滚柱丝杠摩擦力更小，传动效率更高，精度更高	相较于滚珠丝杠，行星滚柱丝杠其制造工艺更复杂	精密机床、机器人、军工装备等需要高负载、高精度场合

来源：头豹研究院、创业邦、万捷传动官网，国金证券研究所

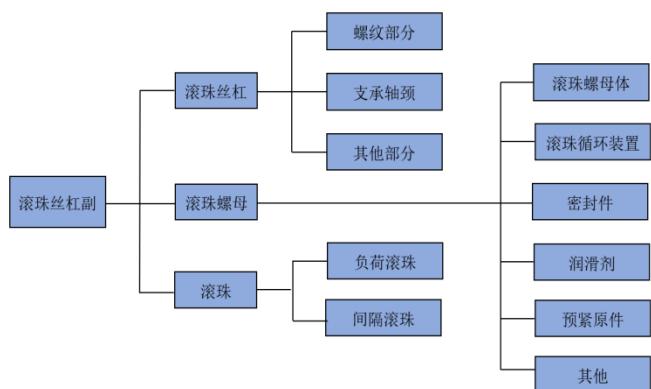
2.2.2 滚珠丝杠：利用滚珠减小摩擦力，精度、平稳度、使用寿命大幅提高

滚珠丝杠一般由螺杆、螺母、钢球、预压片、反向器、防尘器六个部分组成。通常情况下，电机作为动力源，通过联轴器将旋转力矩传递给丝杠，当丝杠受到旋转力的作用时，螺母与丝杠之间螺纹配合，螺母在丝杠上沿轴向移动，实现将旋转运动转化为平移运动。

滚动摩擦代替滑动摩擦，赋予滚珠丝杠高精度、高寿命、高效率的优点。相较于滑动导轨，滚珠导轨属于滚动摩擦，摩擦阻力较小，使得运动平稳性提高。同时滚动摩擦能大幅减少磨损，从而延长使用寿命。另外，数量多、直径小的滚珠能够承受更大的载荷，提高轨道的刚性和自动控制的精确性，提高工作效率。



图表23：滚珠丝杠副由丝杠、螺母、滚珠组成



图表24：滚珠丝杠通过螺纹将旋转运动转化为平移运动



来源：金属加工公众号，国金证券研究所

来源：金属加工公众号，国金证券研究所

滚珠丝杠副的结构传统分为内循环结构和外循环结构两种。其中滚珠始终与丝杠保持接触的是内循环，内循环结构的优点在于滚珠循环回路较短，运动流畅性好，传动效率高，同时由于滚珠在螺母内部循环，螺母的径向尺寸可以设计得较小，从而使得整个传动装置更加紧凑。然而，内循环结构的反向器加工难度较大，需要高精度的制造工艺，且装配和调整较为复杂，这在一定程度上增加了制造成本和维护难度。外循环结构的滚珠循环回路较长，传动效率相对较低，且挡珠器的刚性较差，容易磨损，从而影响传动精度和使用寿命。然而，外循环结构的制造工艺相对简单，易于大规模生产，且装配和调整较为方便，因此在一些对精度要求不高的场合中仍然具有广泛的应用。目前，端盖结构、盖板结构的应用也逐步增加。

图表25：滚珠丝杠副的结构主要分为内循环结构、外循环结构、端盖结构和盖板结构

种类	特点	循环圈数		螺母尺寸	示意图
		圈数	列数		
内循环结构	通过反向器组成滚珠循环回路，每一个反向器组成1圈滚珠链。因此承载小。适应于微型滚珠丝杠副与普通滚珠丝杠副。	1	2以上	小	
外循环结构	通过插管组成滚珠循环回路，每一个插管至少1.5圈滚珠链，因此，承载大。适应于小导程、一般导程、大导程与重型滚珠丝杠副。	1.5以上	1以上	大	
端盖结构	通过螺母两端的端盖组成滚珠循环回路，每个回路至少1圈滚珠链，承载大。适应于多头大导程、超大导程滚珠丝杠副。	1以上	2以上	小	
盖板结构	通过盖板组成滚珠循环回路，每个螺母一个盖板，每个盖板组成至少1.5圈滚珠链。适应于微型滚珠丝杠副。	1.5以上	1	中	

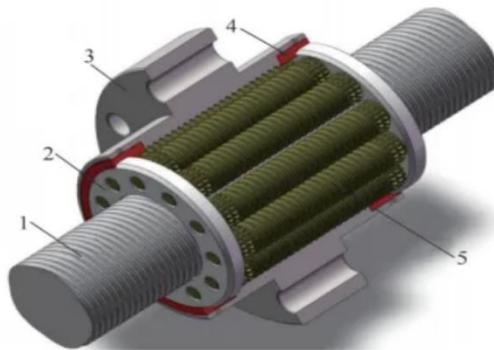
来源：《滚珠丝杠副的发展趋势》，国金证券研究所



2.2.3 行星滚柱丝杠：以滚柱代替滚珠进行传动，实现滚动丝杠承载力等各方面性能的跃升

行星滚柱丝杠是一种高精度、高效率的传动装置，主要由滚柱、丝杠、螺母、内齿圈和保持架构成。其工作原理基于滚动摩擦，通过滚柱在丝杠和螺母之间的行星运动实现运动和力的传递。具体而言，滚柱在丝杠和螺母的螺纹牙之间滚动，同时与两者的螺纹牙啮合，从而将旋转运动转化为直线运动，使螺母沿丝杠的轴向做平移运动，同时保持架和内齿圈分别承担着定位支撑和动力传输的作用。这种设计不仅显著降低了摩擦损耗，还提高了传动效率和精度。

图表26：标准式行星滚柱丝杠副由滚柱、丝杠、螺母、内齿圈和保持架构成

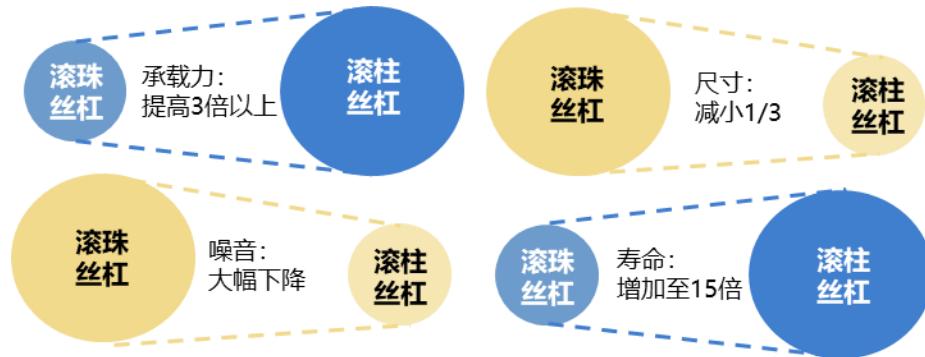


1—丝杠 2—保持架 3—螺母 4—内齿圈 5—滚柱

来源：金属加工公众号，国金证券研究所

与滚珠丝杠相比，行星滚柱丝杠在尺寸、承载力、寿命和噪音等方面的优势明显。从尺寸上看，由于导程与行星滚柱丝杠的节距成函数关系，行星滚柱丝杠导程可低于0.5mm，在相同载荷的情况下，行星滚柱丝杠体积比滚珠丝杠小1/3的空间。从承载能力上看，行星滚柱丝杠能够将承载力平均分散在更大的表面，其承载力比同规格滚珠丝杠副高出3倍以上（最高超过10倍）。从寿命上看，行星滚柱丝杠承载力分散，可减小摩擦力，根据 Hertz pressure（赫兹压力）定律，行星滚柱丝杠能承受的静载为滚珠丝杠的3倍，寿命是滚珠丝杠的15倍。从噪音上看，滚珠丝杠内的珠子在轨道内需要在某一点上做方向切换，而滚柱则与主丝杠同步做圆周运动，因此行星滚柱丝杠振动和噪音更小。由此可见，行星滚柱丝杠在尺寸、承载能力、寿命、噪音等多个方面优于滚珠丝杠，更适用于人形机器人的灵巧手。

图表27：行星滚柱丝杠在承载力、尺寸、噪音、寿命等方面明显优于滚珠丝杠



来源：天誉科技官网、国金证券研究所

根据结构不同，行星滚柱丝杠可分为标准式行星滚柱丝杠、反向式行星滚柱丝杠、循环式行星滚柱丝杠、差动式行星滚柱丝杠和轴承环式行星滚柱丝杠五种类型。其中标准式行星滚柱丝杠是目前应用最广泛的类型，其他4种类型均是为了适应于不同的应用环境而在其基础上演变而来的。反向式行星滚柱丝杠适用于环境恶劣、高负载、高速等场合，反向式行星滚柱丝杠用于中小负载、小行程和高速的应用场景，循环式行星滚柱丝杠在高刚度、高承载、高精度的场合下得到广泛应用，差动式行星滚柱丝杠可应用于传动比较大，承载能力较高的情境下，轴承环式行星滚柱丝杠则多应用于高承载、高效率等场合。



图表28：滚柱丝杠可分为标准式、反向式、循环式、差动式和轴承环式五种类型

类型	结构	特点	应用场景	示意图
标准式行星滚柱丝杠	丝杠、螺母为三角形多头螺纹，滚柱为具有一定螺旋升角的球形单头螺纹，并在其两端加工有直齿，内齿圈固定在螺母两端并与滚柱两端的直齿轮啮合。	一般情况下，丝杠为主动件，螺母为输出构件。能够实现较大行程。	适用于环境恶劣、高负载、高速等场合，主要应用于精密机床、机器人、军工装备等领域，是目前应用最广泛的类型。	
反向式行星滚柱丝杠	结构形式与标准式类似，不同在于其没有内齿圈，丝杠两端加工有直齿与滚柱两端的齿轮啮合，且螺母作为主动件，其长度比标准式的大得多。	一般情况下，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。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。其主要缺点为行程受到螺母内螺纹长度的限制。	主要用于中小负载、小行程和高速的应用场景。可替代传统液压、气压伺服作动系统用于航空、航天、船舶、电力等领域。	
循环式行星滚柱丝杠	相比于标准式，其去掉了内齿圈，增加了凸轮环结构，其功能类似于滚珠丝杠的返回器，目的是为了让滚柱在螺母内旋转一周后回到初始位置，另外其滚柱上无螺纹、齿轮结构，为环槽状，环槽间距与丝杠、螺母的螺纹匹配，其安装在具有凹槽结构的保持架上	循环式行星滚柱丝杠的结构特点增加了参与啮合的螺纹数量，因此具有较高的刚度和较大的承载能力。其缺点在于其凸轮环结构会产生振动冲击，存在噪音问题。	主要应用于要求高刚度、高承载、高精度的场合，如医疗器械、光学精密仪器等领域。	
差动式行星滚柱丝杠	与标准式相比，其去掉了内齿圈，滚柱上也没有齿轮段。其滚柱、螺母均为环槽结构，且滚柱的环槽分为多段，其中小中径段与螺母啮合，大中径段与丝杠啮合	差动式行星滚柱丝杠的结构特点使其可以获得更小的导程。但在其运动过程中，螺纹会产生滑动现象，在重载情况下，容易产生磨损，导致精度丧失，可靠性降低等问题。	适用于传动比较大，承载能力较高的应用场合	
轴承环式行星滚柱丝杠	其滚柱与循环式相同，为环槽结构，相比于标准式，其螺母上去掉了内齿圈，增加了壳体、端盖及推力圆柱滚子轴承等部件	轴承环式行星滚柱丝杠上的推力圆柱滚子轴承大大提高了其承载能力，同时也减小了各构件间的磨损，增大了传动效率。但存在着结构复杂，径向尺寸大，制造成本高等缺点	主要适用于高承载、高效率等场合，如石油化工、重型机械等领域	



来源：《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计》，国金证券研究所

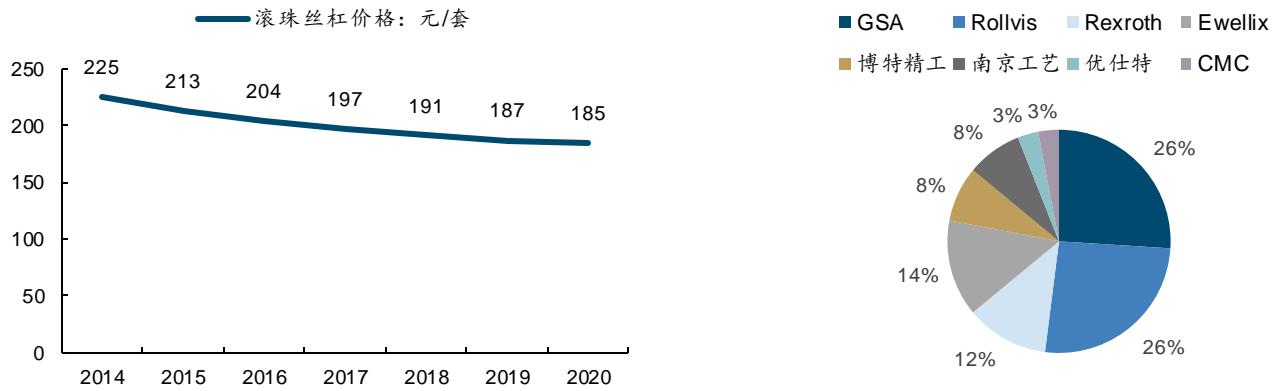
2.3 价格探析：行星滚柱丝杠单价约 2000 元，国产化和市场扩容有望打破价格壁垒

根据两种微型丝杠的性能比较，可以看出行星滚柱丝杠在承载力、使用寿命、效率等方面均优于滚珠丝杠，但价格仍是阻碍行星滚柱丝杠生产应用的最大壁垒。以全球最大的行星滚柱丝杠公司之一 Rollvis 为例，Rollvis 单个行星滚柱丝杠价格约 2000 元/个，且国内尚不具备批量生产能力。而滚珠丝杠国产化进程已初步完成，国内产品价格已从 2014 年的 225 元/个下降至 2020 年的 185 元/个，远低于行星滚柱丝杠。目前行星滚柱丝杠价格昂贵有以下原因：

- 国产化率低：目前世界范围内生产行星滚柱丝杠并参与市场竞争的厂家主要有：Ewellix、Rollvis、GSA、Rexroth、CMC、南京工艺、济宁博特、优仕特等，以外资为主，2022 年国产化率不足 10%。
- 市场需求有限：IHS Market 根据 2019 年数据进行预测，2022 年全球行星滚柱丝杠销售数量预计为 86000 个，其中中国预计销售 10000 个。市场需求不足导致无法形成量产摊薄制造成本。
- 生产工艺复杂：行星滚柱丝杠从生产工艺角度区分为轧制滚柱丝杠和研磨滚柱丝杠，其中研磨法生产的滚柱丝杠性能高但成本也相对较高，目前人形机器人中的行星滚柱丝杠多采用此种方法进行制造，导致成本较高。

图表29：2020年滚珠丝杠 185 元/个，低于行星滚柱丝杠

图表30：2022年行星滚柱丝杠国产化率不足 10%



来源：智研咨询，国金证券研究所

来源：《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究》，国金证券研究所

然而，在市场需求扩大、国产化率提高的趋势下，滚柱丝杠价格仍有较大下降空间。

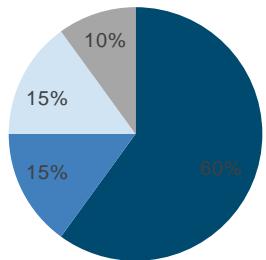
- 成本构成中可变成本占比较高。根据王有雪《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究》，以目前国内市场上销售量最多的行星滚柱丝杠产品为例，其原材料成本占比大概为 60%，工时成本和生产所需成本占比 15%，工厂内的固定成本分摊为 15%，集团向法国工厂征收的管理成本占比 10%，可见行星滚柱丝杠中变动成本占比较大，价格仍有较大下降空间。
- 行星滚柱丝杠国产化进程显著加快，贝斯特、汉江机床等公司纷纷进军行星滚柱丝杠领域。贝斯特行星滚柱丝杠工艺不断优化，已为 2025 年批量供货做好了技术和设备储备。秦川机床子公司汉江机床已拥有滚柱丝杠的研发、制造基础，现已逐步开始小批量生产。长盛轴承应用于机器人领域的丝杠产品尚处于送样及研发阶段。
- 随着人形机器人发展，行星滚柱丝杠需求量逐年提升。根据 DATAINTELLO 数据，2022 年全球行星滚柱丝杠市场规模约为 87.8 亿元，2018-2022 年间市场规模复合增速为 4.5%，预计 2030 年全球行星滚柱丝杠市场规模可达 124.9 亿元。

国产化进程加快、市场需求上升推动者行星滚柱丝杠可变成本逐年下降，行星滚柱丝杠有望打破价格壁垒，实现大规模供给。

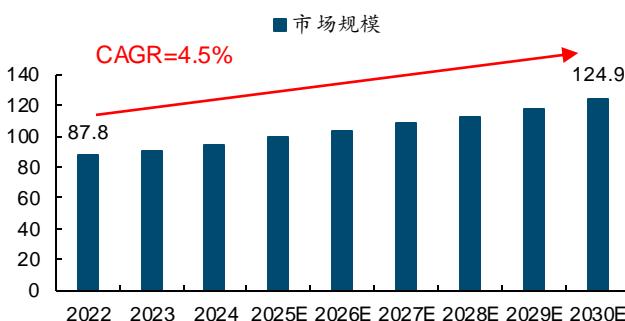


图表31：行星滚柱丝杠原材料成本占比大概为60%

■原材料 ■工时成本 ■工厂固定成本分摊 ■管理成本



图表32：预计2030年行星滚柱丝杠市场可达124.9亿元



来源：《E公司滚柱丝杠产品营销策略研究》，国金证券研究所

来源：DATAINTEL、融中研究，国金证券研究所

三、微型丝杠上下游产业链投资机会广阔，金属路线性价比高

3.1 金属路线：目前市面主流技术路线，KGG、新剑传动均采用金属材料

在当前市场环境下，生产微型手部丝杠的厂商大多采用基于金属材料的制造路线。金属路线下微型手部丝杠产业链由上游原材料与零部件供应、中游行星滚柱丝杠制造、下游多应用领域构成。

图表33：KGG、新剑传动均采用金属路线



来源：KGG 官方公众号，新剑传动官方公众号，国金证券研究所

图表34：微型手部丝杠产业链构成



来源：前瞻产业研究院，国金证券研究所

3.1.1 金属材料：国产轴承钢技术已实现一定突破，但与国外轴承钢仍有差距

行星滚柱丝杠的丝杠一般采用经过预处理的 50CrMo4 或 42CrMo4 作为原材料。行星滚柱丝杠在工作时需要承受较大的轴向力和扭矩，合金结构钢如 42CrMo 具有较高的屈服强度和抗拉强度，能够保证丝杠在承受高负荷时不发生变形或断裂，确保传动的准确性和稳定性。同时，其出众的韧性可有效抵抗冲击载荷，减少因突发外力冲击而导致的损坏风险，进而保障丝杠在长时间、高强度的工作过程中，始终维持稳定的传动性能。

行星滚柱丝杠的螺母和滚柱则采用高碳铬轴承钢 GCr15 作为原材料。该钢材具备高硬度、良好的耐磨性以及高接触疲劳强度等特性，能够有效应对螺母和滚柱在运转过程中面临的磨损及高接触应力等情况，从而确保行星滚柱丝杠整体的稳定运行与长使用寿命。

国内行星滚柱丝杠在材料选择上，主要聚焦于马氏体不锈钢与奥氏体不锈钢。马氏体不锈钢淬性良好，借助热处理强化手段，能够达到高硬度、高强度以及出色的耐磨性，然而在韧性与耐蚀性方面存在短板。奥氏体不锈钢具备优良的塑性、卓越的耐腐蚀性、良好的抗氧化性以及出色的焊接性能，但强度相对来说较为薄弱。

图表35：丝杠主要使用原材料化学成分含量 (%)

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
GCr15 高渗碳轴承钢	最小值	0.95	0.15	0.25	-	-	1.40
	最大值	1.05	0.35	0.45	0.02	0.025	1.65 0.10

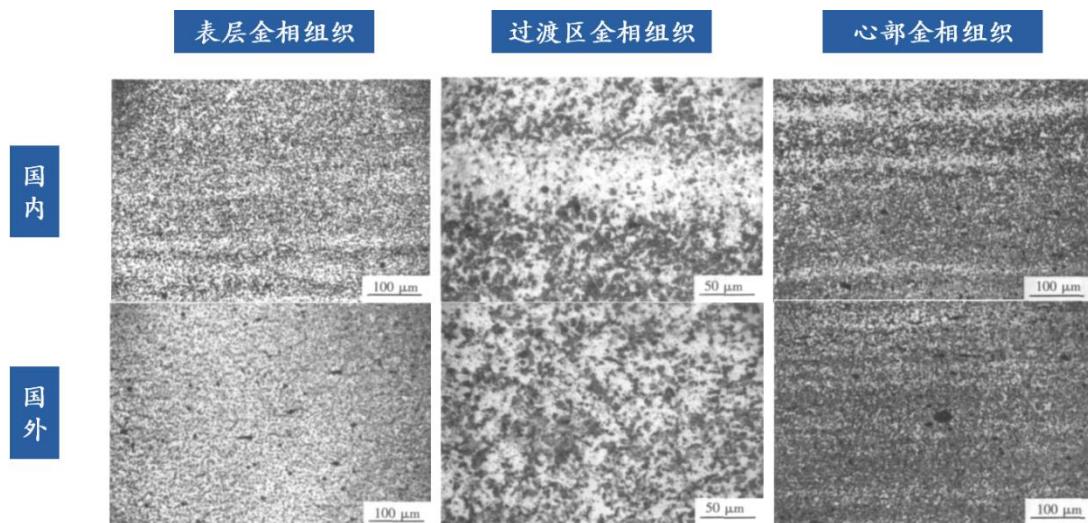


50CrMo4 超高强度合金结构钢	最小值	0.46	-	0.50	-	-	0.90	0.15
	最大值	0.54	0.4	0.80	0.035	0.025	1.20	0.30

来源：《由 GCr15 钢的化学成分设计看轴承钢的研发准则》，中国特钢企业协会公众号、国金证券研究所

国产行星滚柱丝杠与国外丝杠存在差距的原因在于原材料质量欠佳和后续热加工工艺不当。根据《国产 Cr/Mo 钢滚珠丝杠与国外同类产品的质量分析》，国产丝杠存在的带状偏析组织是造成其使用性能不佳的重要原因。带状组织具有显著的方向性是脆弱的部位，容易造成在变形过程中的应力集中，甚至出现裂纹；带状组织还会降低钢的力学性能、切削性能和淬透性，使零件淬火变形倾向增大，强韧性降低。

图表36：国产丝杠存在的带状偏析组织是造成其使用性能不佳的重要原因



来源：《国产 Cr/Mo 钢滚珠丝杠与国外同类产品的质量分析》，国金证券研究所

国产制造商和原材料供应商在基础材料端的研发、应用已经实现突破。在材料研发方面，第三代轴承钢已经具备较强的耐高温、耐腐蚀性，第四代轴承钢将聚焦于其耐极端高温和轻量化的特性，目前尚处于科研与开发阶段。一些新钢种的成功研发填补了国内高端轴承钢领域的空白。但国内轴承钢也仍存在质量不稳定、高端轴承钢供给不足等问题。目前我国行星滚柱丝杠原材料供应厂商包括太钢不锈、酒钢宏兴、久立特材、永兴材料等。

图表37：国内轴承钢主要供应商

公司简称	要点
太钢不锈	不锈钢及其它钢材、钢坯，钢锭、黑色金属、铁合金金属制品的生产、销售；钢铁生产所需原辅材料的国内贸易和进出口等业务
酒钢宏兴	集采矿、选矿、烧结、焦化、炼铁炼钢、热轧、冷轧以及不锈钢生产为一体，具备年产 1000 万吨以上钢材生产能力
久立特材	工业用不锈钢管及特种合金的管材，管件、法兰、棒材及管道预制件的研发、生产、销售。
永兴材料	不锈钢及特殊合金材料等特种金属材料棒线材的研发、生产和销售
武进不锈	工业用不锈钢管及管件的研发、生产与销售
宝钢股份	铜铁冶炼、加工，电力、煤炭
华菱钢铁	钢材产品的生产和销售

来源：前瞻产业研究院、国金证券研究所

3.1.2 加工工艺：目前丝杠加工工艺路线以车铣磨或冷锻+磨削为主

目前精密丝杠加工主要分为车铣磨、冷锻+磨削两类工艺路线。车铣磨工艺路线中，在粗加工阶段借助车削利用主轴回转与刀具移动切除多余材料，铣削凭借旋转多刃刀具高效切割，共同对丝杠、滚柱和螺母毛坯进行初步成型；随后通过淬火、回火等热处理提升零件性能；最后运用外圆磨床、内圆磨床等设备进行磨削精加工，确保高精度。

冷锻+磨削工艺路线，则先以冷轧技术对坯件冷态施压使其塑性变形，高效加工成接近成品的形状，提升材料利用率与零件表面性能，之后依据需求进行热处理消除内应力，最后磨削余量以达高精度要求。而硬车和砂轮磨工艺路线主要用于反向式行星滚柱丝杠螺母加工，硬车可在硬态材料上直接车削，效率高、成本低，能加工出螺母内螺纹等；砂



轮磨则精度更高，用于进一步提升螺母加工精度与表面质量，不过长螺母内螺纹磨削时，因砂轮单边支撑存在精度控制难题。

图表38：车铣磨加工流程图

序号	工艺内容	备注
1	下料	GCr15
2	球化退火热处理并检验校直	降低硬度
3	加工端面，钻中心孔	
4	粗车	
5	高温时效并检验	去应力
6	加工端面，修研中心孔	
7	半精车	
8	铣	
9	粗磨	两顶尖
10	工作表面（滚道）与加工基准（中心孔）淬、回火—检验	
11	研磨中心孔	
12	粗磨 90° V 形槽	两顶尖
13	磁力探伤	
14	时效处理并检验	去应力
15	研磨中心孔	
16	半精磨滚道	两顶尖
17	低温时效处理并检验	
18	铣键槽	
19	磨端部螺纹	
20	研磨中心孔	
21	精磨滚道，全检	两顶尖
22	装配—跑合—检验—防锈包装—检验—入库	

来源：《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究》，国金证券研究所

目前磨削工艺为市场上精密丝杠加工的主流技术方案，精度可达 P0-P1 级，为超精密丝杠主流工艺，但工序复杂、效率偏低。较低精度领域则采用半精加工方案如硬态车削和旋风铣削。硬车 (P2-P3 级, Ra<1.6 μm) 效率优于磨削，但存在刀具损耗问题；旋风铣削 (P3 级, Ra≈0.4 μm) 兼顾效率与表面质量，但高精度领域仍依赖磨削，且需关注铣刀寿命。冷轧通过模具塑性变形高效成形，但精度较低 (P5-P10 级)，表面粗糙度 Ra 值 0.8-1.6 μm，需要通过磨削进一步精加工以提升产品精度。

图表39：磨削工艺精度最高，是市场上的主流技术方案

工艺	加工精度	表面质量	特征
冷轧	P7	0.8 μm<Ra<1.6 μm	效率高、精度低
磨削	P1	受砂轮粒度号和磨削速度影响	精度高、工序复杂、效率低
硬车	P2-P3	Ra<1.6 μm	效率高、刀具易磨损
旋风铣	P3	Ra=0.4 μm	兼顾效率与质量、精度欠缺

来源：金属加工、焉知人形机器、东佑、青轩小研、园区产业招商、磨床与磨削等公众号，《滚珠丝杠螺纹制造技术向高效、低耗、绿色方向发展》、《滚珠丝杠滚道硬车加工技术研究》，国金证券研究所

3.1.3 生产设备：丝杠加工设备仍以进口为主，国产丝杠加工设备存在“卡脖子”难题

机器人丝杠生产过程中要经过热处理、车、铣、磨或冷锻等工艺，这其中需使用到的设备包括车床、铣床（旋风铣床）、磨床（外圆磨床、螺纹磨床、内圆磨床等）、圆锯机、热处理设备、检测仪等。

目前丝杠国产加工设备存在“卡脖子”的技术壁垒，主要集中在热处理设备及车、铣、磨床的核心功能部件。



1) 热处理设备：热处理设备难点在于炉温自适应控制。国外先进设备通过优化加热元件布局和智能控温算法，可使炉膛内温度均匀性控制在±5°C以内。国产设备在加热元件的设计和制造工艺上相对落后，控温系统的算法也不够先进，导致炉膛内温度均匀性较差，进而影响丝杠质量。解决这一问题需要反复验证积累数据库，而我国设备引入晚，在发展进程中积累的数据量有限。同时专业人才储备不足，导致自主研发与创新能力受限，在实际应用中，这类设备目前仍以进口为主。

2) 车、铣、磨床的核心功能部件：高精度的车、铣、磨床核心部件是生产出高精度的丝杠的关键因素。目前数控系统和主轴的制作是主要的技术难点。同时目前国产磨床存在效率低从而导致丝杠生产速度慢的问题。

我国目前已有多家公司开始布局丝杠加工设备，包括秦川机床、华辰装备等，国产设备替代指日可待。

图表40：国内设备主要供应商

类型	代表公司	机型名称
车床	浙海德曼	Hi 系列/T85 系列-精密数控车床/T75 系列
	秦川机床（汉江机床）	CH75 系列
	通用技术大连机床	CLS20
	津上精密机床	CNC 精密自动车床
铣床-旋风铣	海天精工	TC II 系列
	华辰装备	亚μ磨削系列
	通用技术大连机床	XD 系列立式数控铣床
	秦川机床（汉江机床）	MTK20 车铣中心
磨床	日发精机	RF 系列
	秦川机床（汉江机床）	SK7432×15GX 高精高效数控丝杠磨床
	华辰装备	MK8480
滚压	思进智能	DCM 系列压铸设备
热处理设备	爱协林热处理系统（北京）	密封箱式多用炉
	世创 STRONG	智能化网带炉热处理生产线

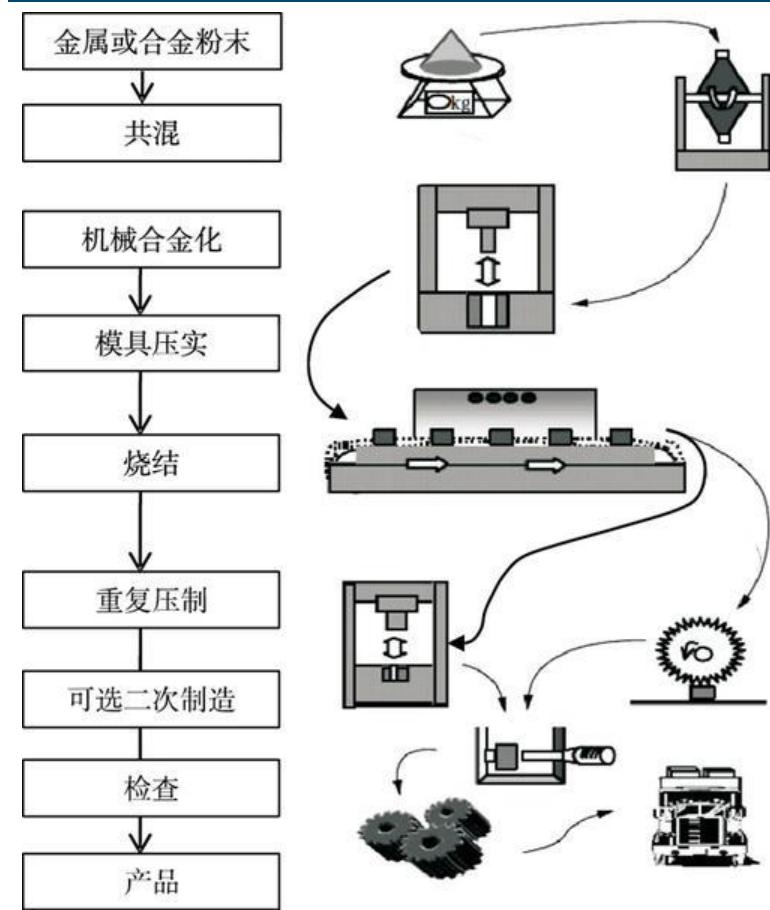
来源：各公司官网，国金证券研究所

3.1.4 粉末冶金也是丝杠加工中的一种重要技术

粉末冶金是一种极具特色的材料加工技术，它以金属粉末或金属与非金属粉末混合物为原料来制造金属材料、复合材料及各类零件。其工艺过程涵盖多个关键环节：粉末制备，接着进行混合与制粒，将不同成分粉末按比例混合，并在必要时制成团聚体以改善成型性能；随后采用模压成型、等静压成型、注射成型等方式，在压力作用下使粉末在模具中形成所需形状的坯体；之后在保护气氛或真空中将坯体加热至低于金属熔点的温度进行烧结；最后，根据需求对烧结后的零件开展机加工、热处理、表面处理等后续处理，以进一步优化性能。该技术优势显著，材料利用率高达90%以上，能极大降低材料成本，且可实现近净成型，制造出形状复杂、尺寸精度高的零件。



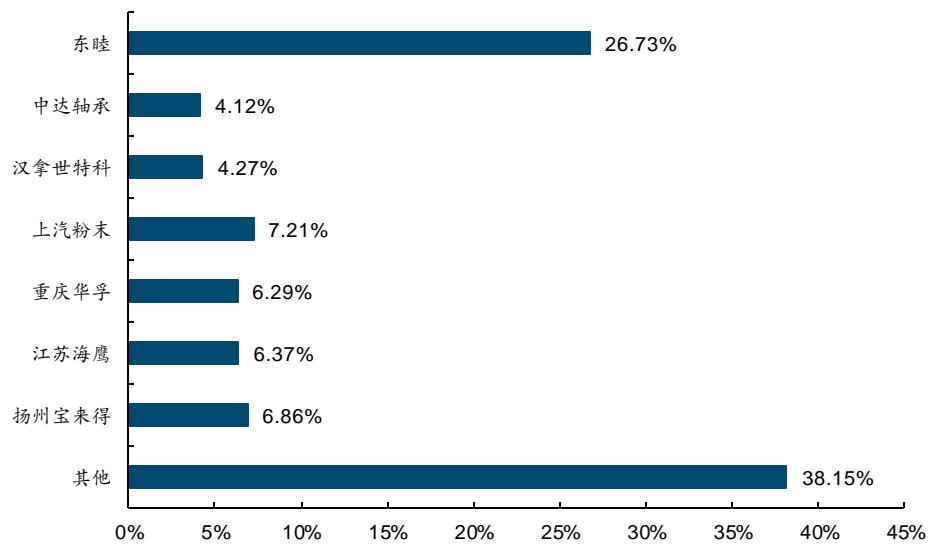
图表41：粉末冶金工艺流程



来源：《新型成膜技术机械成膜法的研发及其应用》，国金证券研究所

粉末冶金市场因产品具备优异物理性能、高度可定制化以及成本效益等优势，吸引了众多用户与企业，预计其年均复合增长率将维持在较高水平。从各家企业粉末冶金制品的出货量与销售额来看，东睦股份为该领域的的主要厂商。

图表42：2023年中国粉末冶金市场占有率统计



来源：粉体网，国金证券研究所



3.2 塑料路线：灵巧手轻量化重要实现路径，具有抗腐蚀性、高温稳定性等优势

3.2.1 PEEK 材料：性能优异的工程塑料，助力轻量化突破

PEEK（聚醚醚酮）是一种性能优异的工程塑料。具有出色的机械性能、抗腐蚀性和高温稳定性。PEEK 还具有自润滑性好、易加工、绝缘性稳定、耐水解等优异性能。在机器人领域，PEEK 材料凭借其显著的轻量化特性，成为了备受瞩目的关键材料。机器人在执行任务时，需要具备灵活的运动能力和高效的能源利用效率，过重的机身会严重影响其灵活性与续航能力。PEEK 材料密度低，质量轻，将其应用于机器人制造，能够有效减轻机器人的整体重量，使机器人在运动过程中更加敏捷，能耗更低。

目前国内 PEEK 材料的主要供应商有中研股份、新瀚新材、沃特股份。中研股份是继英国威格斯公司、比利时索尔维公司和德国赢创公司之后全球第 4 家 PEEK 产能超过千吨级的企业，是目前除英国威格斯公司外全球第 2 家能够使用 5000L 反应釜进行 PEEK 聚合生产的企业，是目前 PEEK 产量最大的中国企业。

近年来，国内企业在 PEEK 材料领域取得了显著进步，多个国产 PEEK 产品的性能指标已达到国际先进水平。同时，得益于较低的原料和人工成本，国产 PEEK 材料在性价比上展现出明显优势，国产替代的步伐正在加快。

图表43：PEEK 材料的主要供应商

企业名称	企业标签
中研股份	专精特新小巨人企业\规模以上工业\企业技术中心\高新技术企业
金发科技	制造业单项冠军企业\技术创新示范企业\绿色制造\国家级重点实验室
沃特股份	专精特新中小企业\国家标准制定企业
吉大赢创	规模以上工业
吉大特塑	专精特新企业\国家标准制定企业\规模以上工业
山东君昊	科技型中小企业\规模以上服务业

来源：企查猫，国金证券研究所

3.2.2 加工工艺：包括注塑成型、热压成型、模压成型等成型方法，注塑成型效率最高

PEEK 复合材料常见加工成型方法，主要有注塑成型、热压成型、模压成型、缠绕成型及等离子体喷涂、热喷涂等。注塑成型可制备复杂结构产品，成型效率高，但制品强度偏低，力学性能增强效果不理想。热压成型工艺相对简单，便于批量生产，可先制成平面制品，再二次加工出所需形状。模压成型效率高，工艺简单，常用于结构简单、尺寸较大的平面制品，但工艺参数选择不当会产生裂纹。缠绕成型可个据制品受力情况确定缠绕方式，制品质量稳定，便于自动化生产。

图表44：PEEK 五种加工工艺

加工方式	加工流程
注塑成型	混合粉末→注塑机熔化→注入模具→烧结固化
热压成型	原料→预处理后的模具→施压升温固化成型
模压成型	预浸料/预混料→放入模具→加压、升温→固化成型
缠绕成型	预浸带预热→缠绕于芯模→加热接触点→预浸料逐层黏合成型
等离子体喷涂	粉末喷涂→加速沉积→预处理工件表面→形成涂层
热喷涂	注入氧-乙炔火焰中→有孔隙的涂层→激光后处理→致密微观涂层结构

来源：《PEEK 复合材料及其在风电滑动轴承中的应用》，国金证券研究所

3.2.3 生产设备：注塑机为关键加工设备，海天国际、伊之密为主要供应商

PEEK 材料的主要加工设备为注塑机。注塑机的工作原理与打针用的注射器相似，它是借助螺杆（或柱塞）的推力，将已塑化好的熔融状态（即粘流态）的塑料注射入闭合好的模腔内，经固化定型后取得制品的工艺过程。国内注塑机厂家众多，可以关注海天国际、伊之密。



图表45：海天国际是国内注塑机主要供应商



来源：海天国际官网，国金证券研究所

3.3 陶瓷路线：轻量化+高强度+耐磨损新型材料，可实现灵巧手使用寿命的延长

3.3.1 陶瓷材料：灵巧手微型丝杠的理想材料，已在汽车、机械等领域通过实践检验

陶瓷材料是一种新型材料，具有重量轻、强度高，不易变形、抗电性好等优良性能，是微型丝杠的理想材料。

- 重量轻，契合灵巧手轻量化发展趋势：陶瓷材料的密度通常较低，这使得其在相同体积下，陶瓷比金属等传统材料更轻。微型丝杠采取陶瓷路径，能够满足灵巧手轻量化需求，有助于提升机器人整体的运动灵活性与能源利用效率。
- 强度高，可提高微型丝杠传动速度：陶瓷材料具有晶体结构，存在紧密排列的离子键或共价键的键合结构，这使得陶瓷材料具有高强度的特点。高强度陶瓷材料应用于微型丝杠，可在不影响精度的情况下实现更高的速度。
- 耐磨损，能够实现微型丝杆寿命的延长：陶瓷材料具有优异的耐磨性、抗腐蚀性以及低摩擦特性，使用陶瓷材料的微型丝杠能够大大提升耐用性，减少维护和更换频率，为灵巧手的长时间稳定运行提供保障。

陶瓷材料凭借其卓越性能，在机械、汽车零部件领域已得到广泛应用。机器人丝杠作为机器人的核心传动部件，对材料的精度保持性、耐磨性和轻量化要求极高。鉴于陶瓷材料在汽车领域的出色表现，将其应用于机器人丝杠制造具有极大的潜力。

图表46：陶瓷材料主要应用领域及代表企业

应用领域	产品类型	主要材料举例	代表企业
机械	密封环	SiC, Al ₂ O ₃	美国 Carborundum
	轴承、轴套	Si ₃ N ₄ , ZrO ₂	日本东芝陶瓷，日本光洋精工
	泵的内衬、叶片、柱塞、阀门	ZrO ₂ , Al ₂ O ₃	日本京瓷公司
	拔丝模、喷丝嘴、喷砂嘴、热挤模	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , Si ₃ N ₄	日本特殊陶业，英国 Morgan
	切削刀具	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , Si ₃ N ₄	德国 CeramTec, 瑞典 Sandvik
汽车零部件	火花塞、电热塞	Al ₂ O ₃ , Si ₃ N ₄	日本特殊陶业
	挺柱、摇臂银块	Si ₃ N ₄	日本特殊陶业
	涡轮增压器转子、气门	Si ₃ N ₄	日本京瓷公司
	蜂窝陶瓷催化剂载体	堇青石瓷	美国康宁公司

来源：粉体网，国金证券研究所

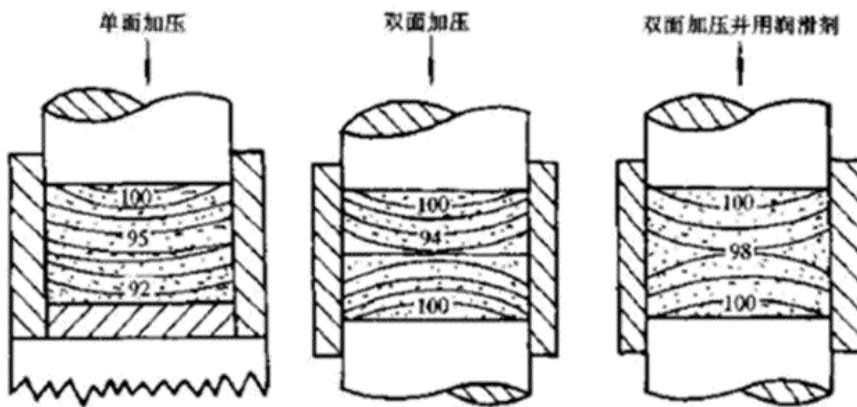
3.3.2 加工工艺：分为压制法、注射法及流延法三种类型，压制成型具有成型速度快、精度高等优势

陶瓷路线的主要加工工艺有压制成型、注射成型及流延成型三种类型，其中压制成型成型速度快，具有较高精度，优势明显。

- 压制成型：压制成型是指将陶瓷粉料与有机或无机添加剂混合，然后将混合物放入特制的模具中，在一定的温度和压力条件下进行成型。压制成型具有成型速度快、精度高等优势。干压成型过程中，通过模具和压力设备的配合，可以快速地将粉料压制成型。相比一些其他成型方法，如注浆成型等，不需要等待泥浆缓慢地脱水成型，能够在较短时间内完成单个坯体的成型，适合大规模工业化生产，可有效提高生产效率，满足市场对产品数量需求。



图表47：干压成型原理

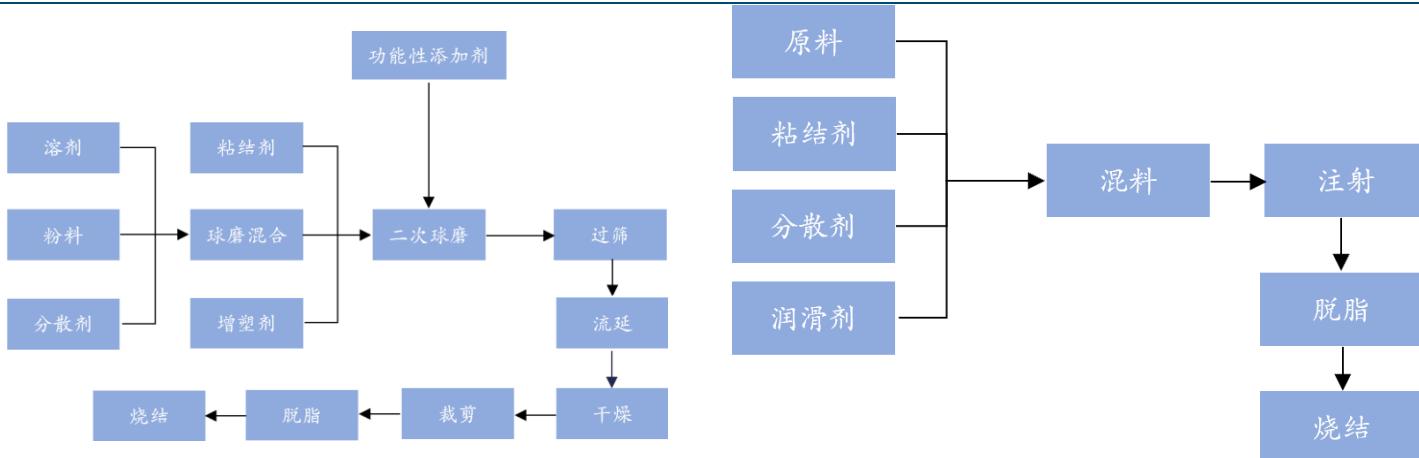


来源：先进材料应用公众号，国金证券研究所

- 流延成型是指先将陶瓷粉体与分散剂加入溶剂（水或有机溶剂），经球磨或超声振荡使粉体分散、溶剂浸润，再加入粘结剂和增塑剂二次球磨得均一浆料。接着在流延机上成型为素坯，干燥使溶剂挥发、粘结剂成网状得素坯膜，经机加工成特定形状，最后排胶、烧结得到成品的成型工艺。
- 注射成型是指把原料粉末与粘结体系按预定比例混合，在密炼机内将混合体系充分混合均匀，制成具有合适流动性的喂料，经破碎后利用注射成型机注入定制模具，进而对预制品进行脱脂、烧结，最终获取成品的一种加工方法。

图表48：流延成型包括球磨、流延、烧结等步骤

图表49：注射成型包括混料、注射、脱脂、烧结等环节



来源：GGG 官方公众号，新剑传动官方公众号，国金证券研究所

来源：前瞻产业研究院，国金证券研究所

3.3.3 生产设备：高温、气氛烧结炉为关键生产设备，首钢股份、山东钢铁等公司可提供优质产品

在陶瓷路线的微型丝杠制备过程中，三种工艺路线都需要经过研磨、烧结等步骤。在研磨环节，需要球磨机进一步细化陶瓷粉末颗粒，提高粉末的比表面积，同时使原料与添加剂更好地混合。在烧结环节，毛坯需要使用烧结设备固化成型，目前主要使用高温烧结炉和气氛烧结炉两种烧结设备。

- 高温烧结炉：用于将成型后的陶瓷坯体在高温下进行烧结，使陶瓷颗粒之间发生固相反应，形成致密的陶瓷结构，提高陶瓷的硬度、强度等性能。根据加热方式不同，有电阻炉、燃气炉、感应炉等多种类型。
- 气氛烧结炉：有些陶瓷轴承材料如氮化硅等，需要在特定的气氛（如氮气气氛）下进行烧结，以保证烧结过程中的化学反应和材料性能。气氛烧结炉能够精确控制炉内的气氛成分、压力和温度等参数，满足不同陶瓷材料的烧结要求。

烧结环节是陶瓷路线较为关键的生产环节，烧结炉的优劣直接影响所制备的陶瓷性能。目前我国国内优秀的烧结设备生产厂商包括首钢股份、山东钢铁、包钢股份和元琛科技等。



图表50：烧结设备主要生产厂商

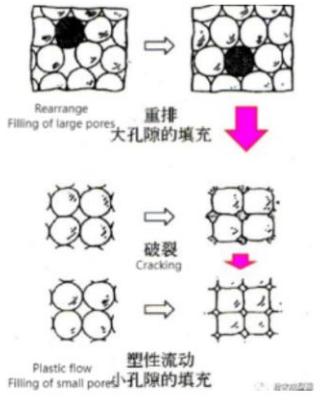
企业	业务介绍
首钢股份	世界五百强首钢集团所属的上市公司，具有焦化、炼铁、炼钢、轧钢、热处理等完整的生产工艺流程，拥有国际一流装备和工艺水平，具有品种齐全、规格配套的冷热系全覆盖板材产品序列。
山东钢铁	是山东省较大的钢铁联合企业，公司拥有从焦化、原料、烧结、球团、炼铁、炼钢到轧钢完整的生产工艺系统，其中，5100m³高炉、2100mm厚板生产系统、2050mm热连轧生产线、2030mm冷连轧生产线、大型特钢棒材生产线、H型钢生产线等工艺装备已达到中国领先水平。
包钢股份	具备 1750 万吨铁、钢、材配套能力，可生产高速钢轨、石油套管、管线管、汽车板、高级管线钢、高强结构钢等高端产品，总体装备水平达到国际一流。
元琛科技	专注于研发钢铁烧结机低温催化剂，以实现终端客户的减污降碳目标。通过采用其研发的低温催化剂，烧结烟气可以在 180°C 下进行脱硝处理，从而显著减少高炉煤气燃料的消耗。

来源：华经产业研究院，国金证券研究所

另外，在压制工艺中，还需要用到的设备有干压成型机与模具。模具用于确定产品的形状。干压成型机通过压力施加系统对模具中的陶瓷粉料施加压力。在压力作用下，陶瓷粉料颗粒之间的空气被排出，颗粒相互靠近并紧密堆积，形成具有一定形状和强度的陶瓷坯体。

在流延成型中，还需要用到的设备有陶瓷注射成型机和流延机。陶瓷注射成型机将混合好的陶瓷注射料加热成具有良好流动性的熔体，然后通过柱塞或螺杆施加压力，将熔体注入到预先设计好的模具型腔中。流延机主要由浆料储存罐、刮刀、基带、干燥系统等组成。浆料从储存罐流出，在刮刀的作用下均匀地涂覆在基带表面，形成一层薄而均匀的浆料层，然后通过干燥系统使浆料中的溶剂挥发，形成具有一定强度和柔韧性的陶瓷生坯带。

图表51：加压过程中粉末颗粒会发生重排、破裂、塑性流动 图表52：流延成型工艺需要流延机进行生产



来源：福建华清电子材料官网，国金证券研究所

来源：德龙科技官网，国金证券研究所

四、相关标的

4.1 微型丝杠加工与维护难度比普通丝杠更大

在功能上，微型丝杠的设计初衷是为了满足高精度、高灵敏度的需求；普通丝杠主要承受较大的负载，完成大范围的位移，因此相比普通丝杠，微型丝杠在应用场景、材料选型、热处理、安装和维护上有很大不同。

- 从应用场景上看：微型丝杠范围更窄。微型丝杠的设计初衷是为了满足高精度、高灵敏度的需求。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。但同时，这也限制了微型丝杠在以上需求的领域中。而普通丝杠更多地用于一些对精度要求不是特别高的领域，比如一些工业机械设备、加工设备等。这些场合中，丝杠



的作用更多的是承受较大的负载，完成大范围的位移。

- 从材料上看：微型丝杠由于工作环境相对精密，对材料的要求很高。其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。而且，由于微型丝杠的工作环境可能非常恶劣，比如高温、低温、强腐蚀环境等，因此对材料的耐用性和抗腐蚀性要求非常严格。而普通丝杠的材质相对来说选择更多，常见的有碳钢、不锈钢、铝合金等，因为普通丝杠不一定每个环境都需要很高的耐磨性和抗腐蚀性。因此，普通丝杠在材料上的选择可以更灵活。
- 从热处理上看：是微型丝杠的生产痛点。热处理工序是为了给丝杠校直，防止弯曲变形。但是校直本身会产生内应力，而内应力有逐渐消失的倾向。由于内应力的消失会引起丝杠的变形，这就影响了微型丝杠精度的保持。
- 从安装上和维护上看：微型丝杠的难度也相对较高。由于它体积小、精度高，在安装时需要非常精密的对准和校正，稍有偏差就可能影响整个系统的运行。而普通丝杠相对简单，虽然也需要精准安装，但尺寸更大，误差容忍度也更高；维护方面，微型丝杠也要求更加细致的保养。为了保持高精度，它的润滑、清洁以及工作环境的控制都非常重要。而普通丝杠只需要一些常规的润滑和清洁就能保证其正常运作。

图表53：微型丝杠与普通丝杆生产难度等对比

	微型丝杠	普通丝杠
功能设计	满足高精度、高灵敏度需求。	承受较大的负载，完成大范围的位移。
应用场景	工作环境相对精密，如医疗设备、航空航天、军工等部分。部分场景相对恶劣。	工作环境较为通用，如机床、升降设备等。
材料选型	为保持高精度、耐腐蚀性，高硬度的合金钢或者不锈钢。	更加灵活多样，碳钢、不锈钢、铝合金等。
热处理	较直时内应力消失容易使微型丝杠变形。	较直时内应力消失不易使普通丝杠变形。
安装和维护	安装时需要非常精密的对准和校正，稍有偏差就可能影响整个系统的运行；维护时，润滑、清洁以及工作环境的控制都非常重要。	安装误差容忍度更高；维护只需常规的润滑和清洁。

来源：理工精密官网，国金证券研究所

4.2 微型丝杠竞争格局：国外少数大型公司主导，国内追赶速度较快

全球竞争格局全球丝杠市场主要由少数大型公司主导，如瑞士 GSA、日本 THK 等。

从销售上看，国外大型公司凭借其技术优势、品牌影响力以及全球销售网络，占据了市场的主导地位。亚太地区凭借其制造业产业链的深厚优势和快速发展的经济态势，成为全球丝杠市场的主要驱动力。

从工艺上来看，微型丝杠加工方式分为研磨和轧制：

- 研磨法：精度高，能够做到 C0，并且产品寿命长、运行噪音较低。但是研磨法工艺繁杂，加工耗时长，导致成本很高。使用研磨法进行加工的典型是 GSA。该公司通过一系列收购，完成了对使用研磨法加工行星滚柱丝杠的厂商的垄断。
- 轧制法：精度较低，一般只能做到 C7，寿命较短，运行噪音较高，但是加工时间非常短，对成本能够进行有效控制。国内诺仕机器人采用轧制法，能够在微小型丝杠上做到 C5 精度，且打样时间可以控制在两周内。

除上述两家公司外，一部分公司同时采用研磨法和轧制法进行微型丝杠的加工，例如：日本 KSS、THK，国内 KGG、TGB 等。

图表54：研磨法与轧制法区别与代表厂商

	精度	产品寿命	加工时间	成本	运行噪音	代表厂商
研磨法	较高，能够做到 C0	较长	较长	高	较小	GSA、Rollvis、KGG、KSS、THK、TGB
轧制法	较低，一般做到 C7	较短	很短	低	较大	诺仕机器人、KGG、KSS、THK、TGB

来源：供应商网，国金证券研究所

尽管从销售和工上看，国内起步较晚。但是部分国内公司追赶速度较快，通过收并购、高激励吸引人才和高校成果转化等方式快速布局，顺利量产微型丝杠产品，并且产品在某些性能上能够对标，甚至超过国外产品。

图表55：部分已知微型丝杠产品参数

	最小主丝杠直径	精度范围	效率	导程范围	负载
KGG	1.8mm (滚珠) / 4mm (滚)	G1/G3/C3/C5/C7		0.6-36mm	>1000N



	柱)				
KSS	1.8mm (滚珠)	研磨 C0-C5/ 轧制 C7		0.5-30mm	
诺仕机器人	1.6mm (滚柱)	轧制 C5	>70%	0.22mm	额定 10kg
GSA	3.5mm (滚柱)	研磨 G1、G3	>70%	0.5-50mm	
Rollvis (被 GSA 收购)	1mm (滚柱)			0.1-50mm	
THK	4mm (滚珠)	研磨 C0-C5; 轧制 C7-C10		1-20mm	
TGB	1.8mm (滚珠)	研磨 C3-C5; 轧制 C5-C7		0.5mm	

来源：公司官网，国金证券研究所

上市公司微型滚柱丝杠布局较少，建议关注五洲新春、浙江荣泰等。据各公司公告和官网资料显示，目前已经研发手部微型滚柱丝杠的包含 KGG (拟被浙江荣泰收购)、诺仕机器人、TGB、五洲新春、新剑传动。

图表56：新剑传动、KGG 和五洲新春已经研发出灵巧手部丝杠

地区	公司名称	相关产品及进度	国家/地区
海外	舍弗勒 Schaeffler	子公司 GSA、Rollvis(收购)、Ewellix (收购) 深耕于行星滚柱丝杠领域，是行星滚柱丝杠全球大型供应商，其部分团队原隶属于 SKF，在行星滚柱丝杠领域有较强实力，瑞士 GSA 也是全球产品系列最全、规格型号最多的厂家	欧洲
	斯凯孚 SKF	全球第二大行星滚柱丝杠生产商，其针对普通领域与高精技术场合分别推出了 SR/BR/TR/PR 系列标准式行星滚柱丝杠及 SV/BV/PV 系列循环式滚柱丝杠	瑞典
	穆格 Moog	旗下核心产品包括伺服驱动器、滚珠丝杠、反向滚珠丝杠等，其有超过 30 年的行星滚柱丝杠定制历史	美国
	Exlar	致力于反向式行星滚柱丝杠电动缸的研发，并提供电机转子与行星滚柱丝杠机电一体式的智能驱动产品	美国
国内	博特精工	公司主要产品有包含行星滚柱丝杠在内的多种机械传动用轴类产品，广泛用于电解铝行业、数控机床等行业，其研制的 BT-GZXS 行星滚柱丝杠具有长时 间承受重载的能力，目前已投入市场使用	山东
	思科瑞传动	全球极少数拥有设计、制造全系列行星滚柱丝杠的企业，目前设计多种产品已投入石化、军事等领域使用	常州
	仲孚机械	具有非标直径、非标导程、行星滚柱丝杠的描绘与出产才能，并成功研制出了高精细行星滚柱丝杠	江苏
	KGG	已经研发出手指行星滚柱丝杠	上海
	恒立液压	部分设备已到，已建设相关技术团队，在研滚柱丝杠	常州
	贝斯特	公司生产的滚珠丝杠副、直线导轨副等产品已应用于国内知名机床商部分型号的机床上，得到了市场的高度认可；自主研发的行星滚柱丝杠已于 2023 年顺利出样	无锡
	五洲新春	公司将发展灵巧手、旋转执行器和线性执行器上面的滚柱丝杠产品。24H1 已经实现小批量产品销售。	浙江
	新剑传动	已经研发出关节和灵巧手微分行星滚柱丝杠	杭州
	斯菱股份	规划建设行星滚柱丝杠产品产线，投入资金 1.17 亿元	浙江
	双林股份	已完成人形机器人滚柱丝杠研发立项，样件制作和设备投资在按计划推进	宁波
	北特科技	开发行星滚柱丝杠零部件并送样，搭建了产线，但尚未获得订单	上海
	鼎智科技	已经完成行星滚柱丝杠多条生产线的搭建，已经开始试产	常州
	诺仕机器人	已经研发出灵巧手专用的微型滚柱丝杠	深圳
	TGB	已经研发出灵巧手用微型滚珠丝杠与微型电缸	中国台湾

来源：中国设备工程，各公司官网，Wind，国金证券研究所



4.2.1 舍弗勒通过收购优质行星滚柱丝杠厂商垄断了全球供应

德国舍弗勒集团是一家全球性的汽车和工业产品供应商，生产用于动力总成和底盘应用的高精度组件和系统，以及用于大量工业应用的滚动轴承和滑动轴承解决方案。

GSA 是舍弗勒控股子公司，在装配、加工工艺、材料及热处理工艺上有深厚的积累，从产品覆盖规格、生产规模到产品生产经验积累具有较大优势。其前身 Gewinde Zaire AG 公司自 1932 年以来一直致力于螺纹磨削，能够制造任何类型的螺纹。这一领域的不断发展以及根据最新研究结果不断扩大的机械设备，使 Gewinder Zaire AG 公司能够在螺纹研磨领域面临所有挑战。基于 Gewinder Zaire AG 数十年的螺纹研磨经验，1982 年 Gewinder Siegfried Andreas AG (GSA AG) 成立。此后，GSA AG 一直从事高精度行星滚柱丝杠 (RGT) 的生产，其设备可以为中小型工件进行包括内圆、外圆、侧面的磨削工艺。

2017 年，舍弗勒收了瑞士 ROLLVIS。ROLLVIS 是成立于 1970 年的瑞士另一家行星滚柱丝杠公司；并购之后 GSA 公司综合实力和制造能力进一步提升。2022 年 7 月，舍弗勒以 5.82 亿欧元再次收购 Ewellix，代表了舍弗勒集团在线性技术产品矩阵的重大扩展，使产品比以往更贴近客户需求，更专注于工业业务的三大核心趋势：用机电系统替代或补充液压和气动解决方案、追求最佳效率、自动化和机器人化趋势。Ewellix 的加入使舍弗勒拥有了兼顾各种性能和规格的较完备滚柱丝杠产品矩阵，产品主要应用于汽车、半导体、工业机器人及自动化、石化等。

根据 GSA 及其收购公司的官网数据，公司目前已经批量生产螺杆直径为 3.5mm 与 5mm 的微型行星滚柱丝杠，其转速最大能够达到 6000 转，精度范围保持在 G1-G3。

根据王有雪《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究》和上海欧克电子科技有限公司的数据，2022 年，GSA 公司在中国行星滚柱丝杠市场份额高达 52%，其中 Rollvis 市占率 35%。

4.2.2 浙江荣泰：拟收购精密丝杠生产商狄兹精密 51% 股权，布局人形机器人等领域

2025 年 2 月 14 日，浙江荣泰与上海狄兹精密机械有限公司（简称 KGG）签订《股权转让意向性协议的议案》，预计交易完成后浙江荣泰将持有 KGG 的 51% 股权。

KGG 成立于 2008 年，与日本 KSS、台湾 CPC 达成深度合作，成为当时率先采用日本品质标准进行轴端加工的国内厂家。2014 年，电气部门的成立，标志着上海狄兹开始转型成为整体工程解决方案提供商。2016 年成功成为 Apple 供应链中的一员，并成为日本知名品牌的单轴机械手 OEM 工厂。2018 年，公司在科创板挂牌。2020 年，公司设立深圳分公司，并在上海拥有 3 个厂区，总占地面积超过 16100 平方米。公司持续在研发和生产上投入，并接连扩大厂区，并累计生产突破超万台单轴机械手，总营收突破 2 亿。2023 年，厂区搬迁至小昆山镇，总占地面积超过 18000 平方米。上海狄兹从加工、贸易代理型企业，稳步发展为集设计研发、生产销售及工程服务于一体的科技创新生产型企业。公司的打样时间控制在一周内，批量交货则是 20-30 天。

在 2024 年北京机器人展览上，KGG 展出 4mm 直径的行星滚柱丝杠，以及直径 1.8mm 的行星滚珠丝杠；此外 KGG 还展出了集成了行星滚柱丝杠方案的灵巧手。淘宝网显示，KGG 超小丝杠轴径 3mm 售价为 950 元/个。



图表57: KGG 微型丝杠直径达到 1.8mm 超小轴径



图表58: KGG 行星滚柱丝杠达到 4mm 轴径



来源: KGG 官方微信公众号, 国金证券研究所

来源: KGG 官方微信公众号, 国金证券研究所

图表59: KGG 线性执行器(行星) 总行程为 20-65mm



图表60: KGG 已经做出丝杠传动的灵巧手方案



来源: KGG 官方微信公众号, 国金证券研究所

来源: KGG 官方微信公众号, 国金证券研究所



4.2.3 诺仕机器人成功研发目前全行业最小滚柱丝杠

诺仕机器人是一家以独特的轧制工艺制造高精度行星滚柱丝杠的中国公司。公司采用了独特的高精度金属成型工艺，可以满足行星滚柱丝杠 G5 精度稳定量产，实现低成本完成高强度、高耐久和高精度产品的生产交付，为具身机器人产业量产、汽车及智能制造产业提供可靠的解决方案。

诺仕机器人成立于 2023 年，脱胎于一家拥有 30 余年螺纹螺杆制造经验的家族企业。家族企业第一代创始人徐根林教授曾任上海大学教授，在机械制造工艺领域深耕近 50 年，拥有超过三十年的理论研究及生产经验。另一位创始人徐杨硕士毕业于同济大学机械制造专业，与联合创始人王晓斌曾就职于世界 500 强汽车零部件企业，具备世界级企业管理视角及经验。联合创始人王晓斌是一位连续成功创业者，曾从 0 开始将初创团队带入 Pre-IPO 阶段。

诺仕机器人于 2024 年 8 月份北京世界人形机器人大会上首发了全球最小的可量产行星滚柱丝杠，一些头部人形机器人公司开始采用该解决方案，最小外径可以做到 6.5mm，丝杠 2.5mm，行程能做到 50mm 以上，最大负载可达 30kg 左右，且丝杠精度达 C5 级别，是目前体型最小，该体型负载最大的行星滚柱丝杠（内有 6 个滚柱围绕主丝杠）。进一步，公司还研发出更加小型的尺寸。其丝杠直径仅为 1.6mm，螺母直径 6mm，寿命 300 万次以上，极大增加了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，解决绳驱寿命差、梯形丝杠效率低、连杆负载不够等问题。

在价格方面，诺仕机器人在微型滚柱丝杠量产 10 万套时价格可低至 138 元人民币。机器人关节用反式行星滚柱丝杠与汽车 EMB 滚柱丝杠已是诺仕机器人的成熟产品，10 万套时的报价可分别低至 483 元人民币与 345 元人民币。交付周期方面：打样时间低至 14 天，现有工厂可年产 50 万套滚柱丝杠。

目前，诺仕机器人商业化正在稳步推进中，已在多个细分领域完成落地和批量出货，覆盖人形机器人灵巧手及肢体直线执行器、锂电池涂敷设备、医疗设备、焊接机械臂、汽车制动 EMB 系统、高精密光学设备定位和工业机床等领域。公司产品获得行业头部客户的肯定。

图表 61：诺仕丝杠直径仅 2.5mm，螺母直径 6.5mm

图表 62：诺仕丝杠精度可达 C5 级



来源：诺仕机器人官方视频号，国金证券研究所

来源：诺仕机器人官方视频号，国金证券研究所

4.2.4 五洲新春：主业轴承与丝杠底层原理相通，已布局微型滚柱丝杠

公司具备高性能金属材料研发能力和精密制造工艺。在技术上，五洲新春在轴承制造领域已掌握高精度冷辗、热处理变形控制等核心工艺，匹配微型滚柱丝杠所需车铣磨工艺。在材料上，五洲新春具备高性能轴承材料研发经验，可以为丝杠产品所需的耐磨、抗疲劳材料开发提供技术支撑。

据五洲新春 24H1 财报显示，公司将发展灵巧手、旋转执行器和线性执行器上面的滚柱丝杠产品，且 24H1 已经实现小批量产品销售。



图表63：五洲新春的主业产品轴承与丝杠底层技术相通

发动机风扇支架轴承 | 空调电磁离合器轴承 | 叶片/叶片环 | 齿套 | 凸轮桃片、油泵凸轮 | 定距环

球环滚针轴承



来源：五洲新春官网，国金证券研究所

五、投资建议

生态形成良性循环，机器人升级迭代具备持续性。从上游资本开支提升、硬件降本，中游技术力提升到下游的实用性提升，机器人行业的生态逐步形成良性循环，当前人形机器人正处于0-1变化的iPhone时代，有望持续带来新的市场催化，具备较强的持续性，建议持续关注灵巧手边际变化。

机器人单手所需丝杠数量有望由0提升至22个，在百万台机器人时代对应4400万个丝杠需求。后期随机器人销量往亿台过渡的过程中，有望进一步扩展市场空间。当前已经布局微型滚柱丝杠能力的上市公司包含浙江荣泰和五洲新春，且各自具备较强的技术实力和量产能力，长期具备较强降本能力，建议持续跟踪。

图表64：金属路线是目前丝杠产业链的主流方案

材料路线	流程		(潜在) 相关标的
金属路线	轴承钢供应商		太钢不锈、酒钢宏兴、久立特材、永兴材料、武进不锈、宝钢股份、华菱钢铁
	生产设备供应商	车床	浙海德曼、秦川机床（汉江机床）、通用技术大连机床、津上精密机床
		铣床	海天精工、华辰设备、通用技术大连机床、秦川机床（汉江机床）
		磨床	日发精机、秦川机床（汉江机床）、华辰装备
		滚压	思进智能、宝飞螺、安德森库克、肯尼福、意大利ORT公司
	丝杠生产商	热处理	爱协林热处理系统（北京）、世创STRONG
		磨制	GSA、Rollvis、KGG、KSS、THK、TGB
塑料路线	PEEK 供应商		中研股份、金发科技、沃特股份、吉大赢创、吉大特塑、山东君昊
	生产设备供应商	注塑机供应商	海天国际、伊之密
陶瓷路线	生产设备供应商	烧结设备供应商	首钢股份、山东钢铁、包钢股份、元琛科技

来源：各公司官网、前瞻产业研究院、华经产业研究院、企查猫、供应商网、158机床网、欧洲机床与智能制造网、国金证券研究所

六、风险提示

机器人落地进展不及预期风险。人形机器人发展过程中将面临智能能力提升、硬件降本等多重阻碍，若放量时间低于



预期，将导致相关设备的放量时间不及预期，资本投入长期难以回收，对公司的业绩产生负向影响。

现有主业下游发展不及预期风险。产业链部分公司下游呈中低速增长，若订单交付量不及预期，将对业绩经营产生负向影响。

竞争加剧的风险。硬件端长期比拼成本，行业前景向好的背景下，各细分赛道参与者将持续增加，导致原有参与者处的的竞争格局恶化，份额和溢价能力可能被侵蚀，进而影响机器人相关业务的盈利能力。

价格超预期下降风险。报告中统计的价格主要来自当前没有量产的情况下的售价，若量产，价格随着规模效应提升容易产生较大波动，进而导致板块市场空间下行。



行业投资评级的说明:

买入：预期未来3—6个月内该行业上涨幅度超过大盘在15%以上；
增持：预期未来3—6个月内该行业上涨幅度超过大盘在5%—15%；
中性：预期未来3—6个月内该行业变动幅度相对大盘在-5%—5%；
减持：预期未来3—6个月内该行业下跌幅度超过大盘在5%以上。

**特别声明：**

国金证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

本报告版权归“国金证券股份有限公司”（以下简称“国金证券”）所有，未经事先书面授权，任何机构和个人均不得以任何方式对本报告的任何部分制作任何形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告反映撰写研究人员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，国金证券不对使用本报告所包含的材料产生的任何直接或间接损失或与此有关的其他任何损失承担任何责任。且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整，亦可因使用不同假设和标准、采用不同观点和分析方法而与国金证券其它业务部门、单位或附属机构在制作类似的其他材料时所给出的意见不同或者相反。

本报告仅为参考之用，在任何地区均不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告提及的任何证券或金融工具均可能含有重大的风险，可能不易变卖以及不适合所有投资者。本报告所提及的证券或金融工具的价格、价值及收益可能会受汇率影响而波动。过往的业绩并不能代表未来的表现。

客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供多种金融服务。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布该研究报告的人员。国金证券并不因收件人收到本报告而视其为国金证券的客户。本报告对于收件人而言属高度机密，只有符合条件的收件人才能使用。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告仅供国金证券股份有限公司客户中风险评级高于C3级（含C3级）的投资者使用；本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的建议或策略。对于本报告中提及的任何证券或金融工具，本报告的收件人须保持自身的独立判断。使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

若国金证券以外的任何机构或个人发送本报告，则由该机构或个人为此发送行为承担全部责任。本报告不构成国金证券向发送本报告机构或个人的收件人提供投资建议，国金证券不为此承担任何责任。

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

上海

电话：021-80234211

邮箱：researchsh@gjzq.com.cn

邮编：201204

地址：上海浦东新区芳甸路 1088 号

紫竹国际大厦 5 楼

北京

电话：010-85950438

邮箱：researchbj@gjzq.com.cn

邮编：100005

地址：北京市东城区建内大街 26 号

新闻大厦 8 层南侧

深圳

电话：0755-86695353

邮箱：researchsz@gjzq.com.cn

邮编：518000

地址：深圳市福田区金田路 2028 号皇岗商务中心

18 楼 1806



【小程序】
国金证券研究服务



【公众号】
国金证券研究