

产业研究深度 | 高端装备制造

灵巧手：结构向 高承载发展，四缸 数量或倍增



为企业客户提供全方位的“产业+金融”研究服务！

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

核心要点

灵巧手是一种模拟人类手部功能的高自由度机器人末端执行器，其核心价值在于突破传统机械夹爪的局限性，赋予机器人接近人手般的灵活性与适应性。它通过多关节、多模态感知和智能控制技术，实现复杂物体的抓取、操作与交互。灵巧手是人形机器人拟人化的核心标志，也是其成本占比最高的零部件之一，约占整机成本的 20%-30%。未来人形机器人迭代提供的价值，将很大程度上通过灵巧手展现的柔性和协同能力来体现。

企业成功切入灵巧手领域需深度融合高自由度仿生结构设计（自由度数量增加）、微型高功率密度驱动（空心杯电机和无刷有齿槽电机）、精密传动（行星滚柱丝杠）以及多模态感知（触觉传感器），形成系统性解决方案。

灵巧手是机器人的核心部件。根据特斯拉公开资料，特斯拉第三代灵巧手相比于第二代的变化为：（1）手部自由度从 11 个提升到 22 个，对应的电机数量将可能提升到 22 个。（2）驱动器装载部位由手部改为手腕。驱动方面，电机驱动是当前主流方案。随着第三代灵巧手自由度增加，电机需求相应上升，这将为空心杯电机和无刷有齿槽电机供应商带来市场机会。

（3）传动系统上，腱绳+蜗轮蜗杆是特斯拉第一代方案。随着丝杠技术在灵巧手中日渐成熟，加上特斯拉有提升手部承载力的需求，未来采用行星滚柱丝杠进行传动可能是一种发展方向。若每只手配置 22 根丝杠，则单个人形机器人需要 44 根丝杠，预计将带动丝杠产业链相关企业的发展。（4）感应部分，第一代采用了霍尔传感器，第二代新增触觉传感器，第三代进一步提升传感器部分。由于触觉传感器价值量较高，其应用扩展也将使相关传感器公司受益。

风险提示

机器人落地进展不及预期风险，现有主业下游发展不及预期风险，竞争加剧的风险，价格超预期下降风险。

分析师及联系人

苏晨

SAC: S1130522010001
suchen@gjzq.com.cn

陈传红

SAC: S1130522030001
chenchuanhong@gjzq.com.cn

内容目录

一、灵巧手关键技术与具体方案对比	6
灵巧手技术路线分析：电驱+复合传动+带力和触觉传感为主导方向	6
特斯拉 Gen1 专利拆解：驱动器、齿轮箱是核心零部件	20
灵巧手空心杯电机和丝杠是未来降本核心	28
竞争格局：美国领先，国产灵巧手快速崛起	30
二、驱动装置：国产竞争力优势明显	32
价格：进口价格为国产品牌的两倍	32
竞争格局：玩家持续增多，有望快速实现国产替代	33
三、传动方式：谐波减速器尚有差距，丝杠国产优势明显	34
减速器：降速增扭，已有多家完成手部谐波减速器开发	34
丝杠：具备较高的承载力和精度，在精细化工作场景中具备必要性	37
四、传感器：精度存在差异，国产产品满足一般场景	40
电阻式和电容式触觉传感器有望成为主流	40
灵巧手需要大面积低精度皮肤+高敏感指腹	41
竞争格局：外资占据大部分份额	42
五、灵巧手及其相关产业链	44
灵巧手价值量和壁垒高	44
风险提示	46

图表目录

图表 1: 人手共有 24 个自由度.....	6
图表 2: 除手腕和手掌外, 人手共 21 个自由度.....	6
图表 3: 若要完全实现人手功能, 需要采用全驱动方案.....	7
图表 4: 灵巧手自由度最高已达 24 个.....	7
图表 5: 电机驱动综合性价比较高.....	10
图表 6: 空心杯电机采用无齿槽结构.....	11
图表 7: 线圈绕组方式包含斜绕、叠绕、直绕、马鞍绕和同心绕等.....	12
图表 8: 空心杯电机属于无齿槽电机.....	12
图表 9: 电机未来的趋势是缩小体积和提升功率密度.....	13
图表 10: 手指可以采用腱绳传动.....	14
图表 11: 手指可以采用连杆传动.....	14
图表 12: 手指可采用齿轮传动和蜗轮蜗杆传动.....	15
图表 13: 灵巧手采用滚珠丝杠作为传动件 (整体视图)	16
图表 14: 灵巧手采用滚珠丝杠作为传动件 (单自由度视图)	16
图表 15: 灵巧手传动方式各有千秋, 常复合使用.....	17
图表 16: 近年灵巧手方案采用多种传感器且采用电驱和腱绳传动为主.....	19
图表 17: DLR/HIT Hand 使用的传感器数量和种类属于较多水平.....	19
图表 18: 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.....	20
图表 19: 特斯拉灵巧手单手具有 5 个指节.....	22
图表 20: 特斯拉第一代灵巧手有 6 个执行器和 6 个齿轮箱.....	23

图表 21: 特斯拉灵巧手单指有 2 个枢轴结构与 2 个扭簧.....	24
图表 22: 特斯拉灵巧手单指有 2 个电缆与 2 个通道结构.....	25
图表 23: 特斯拉灵巧手手指顶部有自动张紧器.....	26
图表 24: 特斯拉灵巧手单指节有 1 个霍尔效应传感器.....	27
图表 25: 特斯拉灵巧手单指节有 1 套霍尔效应传感器.....	27
图表 26: 特斯拉灵巧手自由度有提升趋势.....	28
图表 27: 采用国产无刷有齿槽电机和行星滚柱丝杠单手预估价格 2.9 万元 (单位: 元/只)	28
图表 28: 灵巧手当前市场价为 2-80 万元/只.....	29
图表 29: 国产新灵巧手产品快速追赶海外实力.....	30
图表 30: Maxon 手指空心杯价格几乎为国内的两倍.....	32
图表 31: 国内外空心杯电机主要生产企业.....	33
图表 32: 谐波减速器传动效率最高.....	35
图表 33: 绿的谐波的谐波减速器人工成本逐步下滑.....	36
图表 34: 哈默纳科已经完成手指微型谐波减速器研发.....	36
图表 35: 东京大学灵巧手搭载了哈默纳科谐波减速器.....	36
图表 36: 手部减速器目前已有至少三家开发完成.....	37
图表 37: KGG 微型丝杠直径达到 1.8mm 超小轴径.....	38
图表 38: KGG 行星滚柱丝杠达到 4mm 轴径.....	38
图表 39: KGG 线性执行器(行星)总行径为 20-65mm.....	38
图表 40: KGG 已经做出丝杠传动的灵巧手方案.....	38
图表 41: 新剑传动、KGG 和五洲新春已经研发出灵巧手部丝杠.....	39

图表 42: 各路线触觉传感器的对比.....	40
图表 43: 压阻柔性触觉传感器结构及实物图.....	41
图表 44: 国内外触觉传感器性能差异体现在精度上.....	42
图表 45: 机器人触觉传感器主要生产企业.....	43
图表 46: 触觉传感器源于美国, 中国长期被日美卡脖子.....	44
图表 47: 灵巧手价值量最高的零部件为空心杯电机、丝杠、减速器、触觉传感器.....	45

一、灵巧手关键技术与具体方案对比

随着工业自动化和人工智能技术的不断进步，机器人正逐渐从单一的重复性任务执行者转变为能够执行复杂、多变任务的智能体。在这一转变过程中，灵巧手作为机器人与外界交互的重要工具，其重要性日益凸显。灵巧手的设计灵感来源于人类手部的复杂结构和功能，它使得机器人能够执行诸如抓取、操纵、甚至感知等多样化任务，极大地扩展了机器人的应用范围和操作能力。

灵巧手的组成是实现其多功能性的基础。一个典型的灵巧手系统通常由以下四个关键部分组成：

- (1) 驱动系统：负责提供动力，使手指能够进行各种运动。驱动系统包括电机、气动和液压等类型。
- (2) 传动系统：将驱动系统产生的动力转换为手指关节的运动。传动系统包括丝杠、齿轮、连杆、绳索和腱绳等。
- (3) 传感器系统：包括触觉、力觉和位置传感器等，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。
- (4) 控制系统：通过算法和软件对驱动系统和传动系统进行精确控制，以实现预定的手部运动和任务执行。

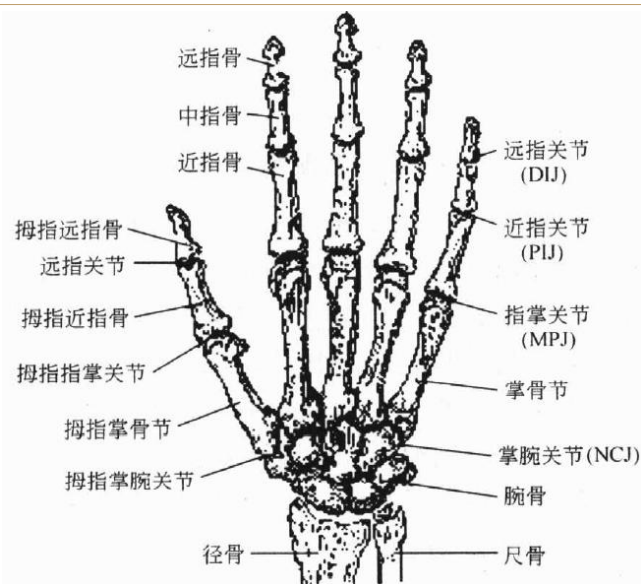
本文将结合特斯拉的灵巧手专利，拆分灵巧手驱动、传动、传感器等零部件的技术方案、未来发展方向、竞争格局和价值量。

灵巧手技术路线分析：电驱+复合传动+带力和触觉传感为主导方向

自由度数量：有自由度提升趋势

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	TIJ	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
手掌			弧度	arch	1

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

若机器人的灵巧手驱动源数量等于自由度，为全驱动；若驱动源数量小于自由度，为欠驱动。全驱动方案每个指关节都有驱动器，功能接近人手，可实现更高的精度；而欠驱动虽然集成度更高，但功能性不足，对于精度要求比较高的手指精巧控制无法胜任。

图表 3: 若要完全实现人手功能, 需要采用全驱动方案

	全驱动	欠驱动
定义	自由度=驱动源数量	自由度>驱动源数量
缺点	手掌体积大、安装困难、操作复杂	功能不足, 精度低
优点	功能接近人类, 精度高	体积小、质量轻、系统简洁
图片		

来源: 《机器人灵巧手研究综述_刘伟》, 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 4: 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
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
KNTH	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

驱动方式：电驱为主流技术方向

灵巧手主要的驱动方式分为四种：电机驱动、液压驱动、气压驱动和形状记忆合金驱动。

- 1) 电机驱动兼备精度和经济性。电机驱动方式中，电机经减速器控制转矩和转速后通过其他传动装置将旋转运动转化为手指的弯曲运动。驱动系统主要由电机、减速器组成。优势在于体积小、响应快、调控方便、稳定性好、精度高、输出力矩稳定等。后文将对主流手部电机空心杯电机和无刷有齿槽电机进行详细拆解。
- 2) 液压驱动适用于大力抓取，但体积过于庞大。液压驱动方式中，不可压缩的液体将被压入封闭系统，进而推动活塞移动，使手指产生力量和运动。驱动系统一般由液动机、伺服阀、油泵和油箱组成，常被用于工业机械手中，适合大型抓取作业。人手的重量较低，但可以实现单手吊环等大力输出动作，液压实现大力抓取的可能性最大，但系统庞大，小型化和便捷性技术有待突破。
- 3) 气压和形状记忆合金驱动重复定位精度较低。气压驱动方式中，将对空气进行压缩，空气的压力会推动活塞或膜片移动，进而转换成机器人手的运动。气压因为难以实现精确的位置控制，常用在简单的抓持手，不能实现多关节的灵活运动。
- 4) 形状记忆合金驱动经过变形后加热到一定温度，可以恢复到之前的形状而产生力驱动灵巧手的运动，但无法长时间工作，并且疲劳强度较低。

图表 5：电机驱动综合性价比比较高

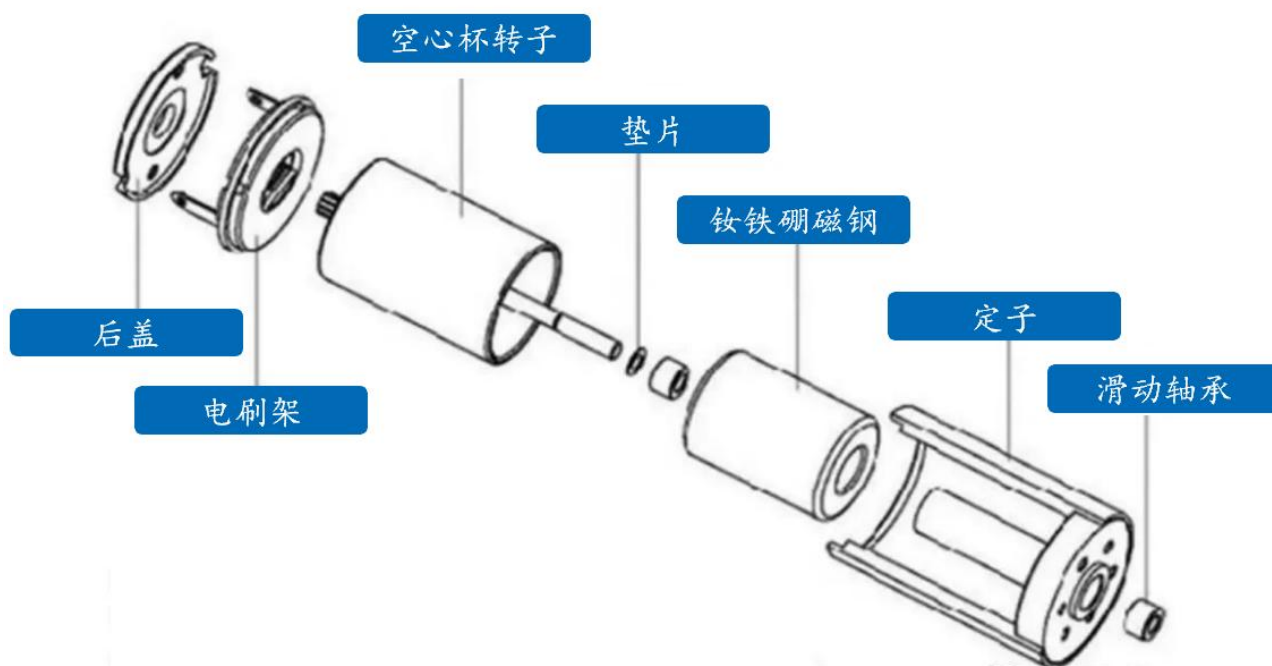
驱动方式	驱动方式	优点	缺点
电机驱动		①驱动力大，控制精度高；②响应快，模块化设计；③易于更换维护	①结构可能较为复杂；②可能需要额外的减速机构来增加扭矩
液压驱动		①能够驱动较大的负载；②可实现较大的力矩输出	①系统可能存在泄漏问题；②效率不高，体积大，成本高，易污染
气压驱动		①控制简单，能量存储方便；②柔性好，适合敏感操作	①刚度低，动态性能差；②装配难度大，运动控制不精确
形状记忆合金驱动		①位移大，功率重量比高；②变位迅速，方向灵活	造价高，易疲劳，寿命较低

来源：《机器人灵巧手研究综述_刘伟》，国金证券研究所

综合对比可知，电机驱动是最适合灵巧手批量生产使用的方式。主要因为随着电机设计、加工技术以及电子技术等的进步，能够为灵巧手提供体积小、出力大的微型电机，其次因为电能的获取、存储容易，为电机提供了应用的基础。可能采用的电机包括空心杯电机、无刷有齿槽电机等。

空心杯电机方案能效高，适合电池供电且长时间运行的灵巧手。空心杯电动机采用无铁芯转子，消除了由于铁芯形成涡流而造成的电能损耗，因此效率更高，转动惯量小，易于控制。根据《空心杯微型电机及线圈的研究进展》，空心杯电机主要具备以下特点：（1）节能特性：能量转换效率很高，其最大效率一般在 65% 以上，部分产品可达到 90% 以上（铁芯电动机一般不超过 75%）。（2）控制特性：起动、制动迅速，响应极快，根据《空心杯微型电机及线圈的研究进展》，机械时间常数小于 28 毫秒，部分产品可以达到 10 毫秒以内（铁芯电动机一般在 100 毫秒以上）。（3）波动特性：运行稳定性十分可靠，转速的波动很小。作为微型电动机，空心杯电机的转速波动能够容易的控制 2% 以内。因此空心杯电机特别适合电池供电同时又要求长时间运行的应用场合，例如仿生手、人形机器人和手持电动工具等。

图表 6：空心杯电机采用无齿槽结构



来源：万泰电机官方微信公众号，国金证券研究所

空心杯电机主要难点在于绕组设计、动平衡设计及资金投入。因此新进入者的技术积累较浅，难以达到机器人领域的高效率等要求。

(1) 绕组设计：绕组需要保证线圈的高密度以及排列的一致性，从而使得产品具备高功率和扭矩密度。绕组的形态具备多样性，不同形态的绕组会直接影响生产的良率，但多数技术都被外资企业申请专利，进一步加大国内企业突破的难度。

(2) 动平衡的设计：转子动平衡是电机生产制造过程中极其重要的一个工序，直接关系到电机的噪声、振动指标性能是否达标。转子动平衡差异的原因是不同企业使用了不同的磁性材料，导致转子的质量分布不均一。

(3) 资金投入：电机的自动化生产线中设备价格较高，绕组设备单台价格百万以上，且需要设备厂商定制化开发，对空心杯电机厂商的资金要求较高。

图表 7：线圈绕组方式包含斜绕、叠绕、直绕、马鞍绕和同心绕等

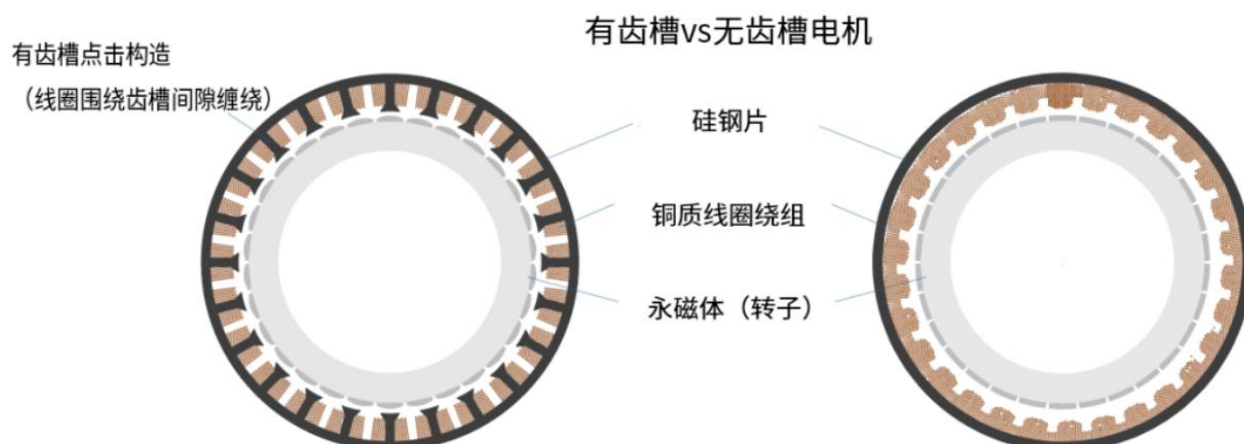


来源：电机设计工艺工程，国金证券研究所

无刷有齿槽电机方案是降本的一种可行方式。手指部位可使用的电机可按有无齿槽区分为无刷有齿槽电机和无刷无齿槽电机：

- 1) 有齿槽：无刷直流电机大多采用有齿槽设计，即线圈绕制在定子上的齿槽中；
- 2) 无齿槽：空心杯属于无齿槽电机；在无齿槽电机中，定子上没有齿槽结构，线圈单独绕制成型，直接固定在定子表面或内部。

图表 8：空心杯电机属于无齿槽电机



来源：科尔摩根官方公众号，国金证券研究所

由于空心杯电机具备小直径、扭矩波动小等特点，机器人当前仍以空心杯电机为主导。无刷有齿槽电机功率较空心杯电机更大，同时大直径导致其短期仅能安装在大拇指（空间容忍度更高）。相比于空心杯电机，无刷有齿槽电机有齿槽力矩，导致速度和扭矩都有更大的波动，有铁芯之后无法做高速运转；空心杯电机可以做到高速、小直径，主要通过手掌结构来起承载重量，从这个角度看，无刷直流电机的功率更大，可以放在大拇指上，但是短期不会放在其他手指上，因为手指要更小更轻巧。

电机未来发展方向是围绕降本增效，主要通过缩小体积、减轻重量的方式实现，如谐波磁场电机、一体化技术电机。1）谐波磁场电机：通过改变电机内部设计结构，实现缩小体积、增大功率密度；2）一体化技术电机：通过集成减速器等产品，实现缩小体积、增大功率密度。

图表 9：电机未来的趋势是缩小体积和提升功率密度

	谐波磁场电机	一体化技术电机
优势	体积小、重量轻、功率密度高、工艺简化、可大幅降低电机轴电流	体积小、NVH 表现效果好，传动效率高
劣势	精度要求高、对基础磁性材料有要求	价格略贵、不适合长时间运作、维修麻烦
进展	国内已有成品	国内外众多车企均有不同程度布局
难点	磁性材料问题难以解决	汽车电机热管理难度较大
应用	物流系统滚筒电机	汽车电机、小型伺服/步进电机等

来源：华域麦格纳、红旗、奔驰公告，国金证券研究所

传动方式：布局丝杠正式成为手部传动的发展趋势

传动方式主要包含腱绳、丝杠、齿轮、连杆等。早期灵巧手曾经采用齿轮、连杆等传动机构，然而因为尺寸和质量大、运动不灵活等问题逐渐被淘汰。模仿动物肌腱传动方式的腱绳传动目前广泛被灵巧手采用，根据各公司 2024 年中报，上

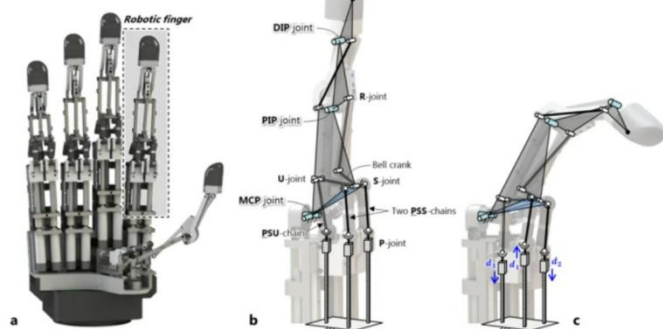
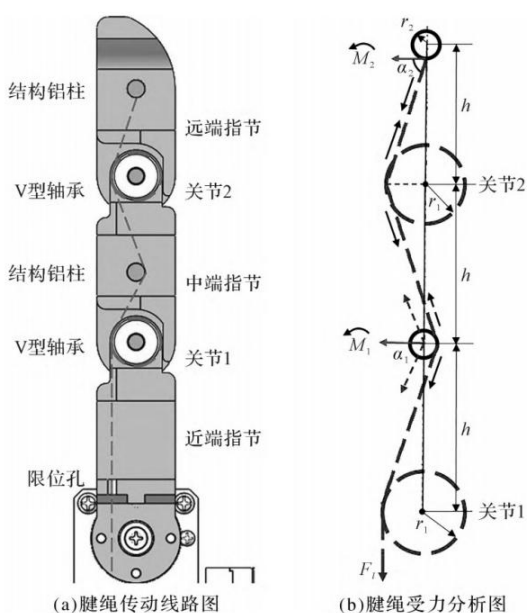
市公司正集中研发手部丝杠，布局丝杠正成为传动的发展趋势。

腱绳传动使用线绳模拟人手的肌腱结构，可以使得大型的驱动器远离执行机构，减轻末端的负载和惯量，提升了抓取的速度，排布灵活，因此适合空间狭小且需要驱动自由度数目较多的传动场合。

连杆传动使用多个连杆串并联混合的形式传递运动和力矩。手指的运动和动力由刚性连杆传递，能够抓取大型的物体且结构设计紧凑，可以完成包络抓取。缺点是难以远距离控制，容易发生弹射，且抓取空间较小。

图表 10：手指可以采用腱绳传动

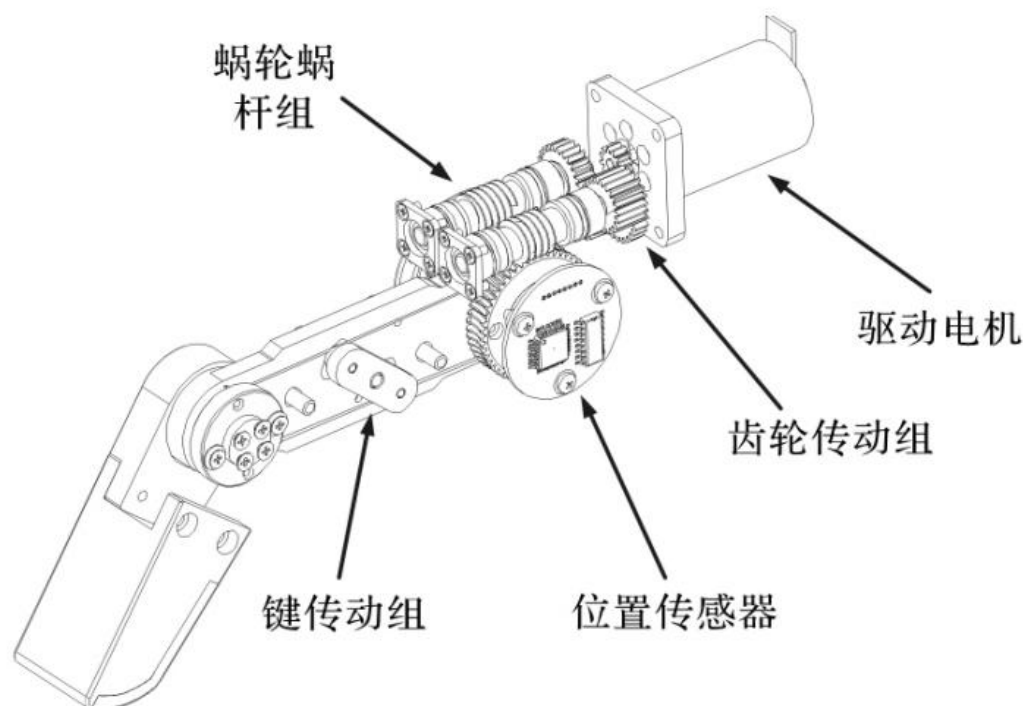
图表 11：手指可以采用连杆传动



来源：《腱绳驱动机械手的设计及其柔性抓取控制_徐光宇》，国金证券研究所
来源：《并行连杆传动的机械手指结构设计及运动学分析_罗萍》，国金证券研究所

齿轮/蜗轮蜗杆传动通过齿轮或者蜗轮蜗杆将驱动器的旋转运动转换成直线运动，拉动驱动器和手指间的弹簧来驱动手指产生动作。

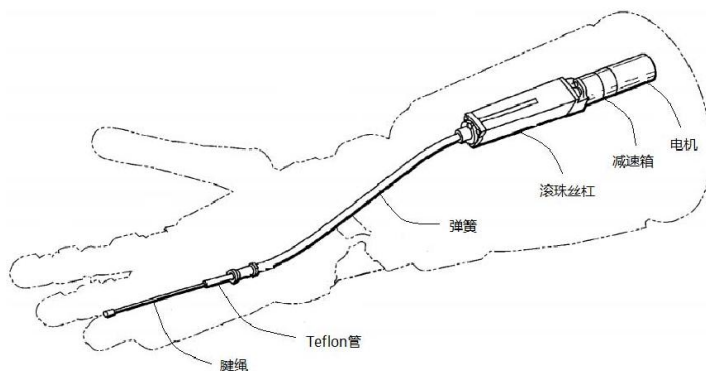
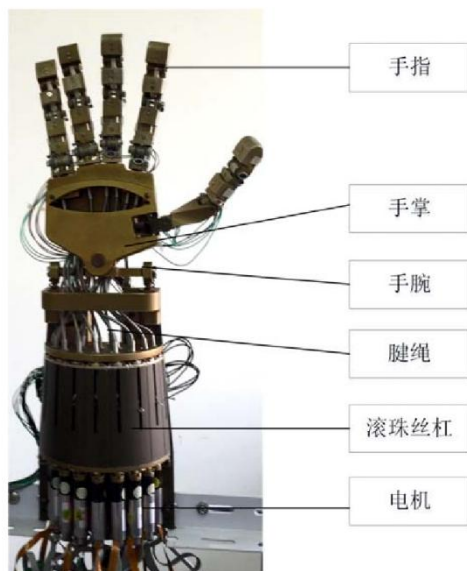
图表 12：手指可采用齿轮传动和蜗轮蜗杆传动



来源：《基于欠驱动原理的多指灵巧手结构设计及实验研究_宋振东》，国金证券研究所

滚珠丝杠传动，根据《空间五指灵巧手控制系统设计_韩运崢》，电机和滚珠丝杠外置于手臂中，电机通过减速器带动滚珠丝杠，电机轴的旋转运动被转化为丝杠螺母的平移运动，丝杠螺母拉动腱绳，腱绳另一端连接到手指指骨上，拉动手指关节绕关节轴旋转，形成手指弯曲运动。据特斯拉公开资料，特斯拉后续将驱动装置安装在手臂而非手指里面。

图表 13: 灵巧手采用滚珠丝杠作 图表 14: 灵巧手采用滚珠丝杠作为传动件
为传动件 (整体视图) (单自由度视图)



来源:《空间五指灵巧手控制系统设计_ 来源:《空间五指灵巧手控制系统设计_韩运峥》, 国
韩运峥》, 国金证券研究所 金证券研究所

灵巧手的传动装置一般可以分为三级: (1) 第一级: 位于电机侧, 主要为减速器, 起到的作用是精度调节; (2) 第二级: 最重要, 负责动作执行; (3) 第三级: 连接驱动器和关节末端, 主要是腱绳和连杆。从市场案例看, 一级传动以皮带为主, 二级传动主要采用丝杠或者锥齿轮, 三级传动基本都会采用腱绳和连杆。综合对比看, 各种方案各有所长, 但由于工厂中的劳动场景需要有较强的承载力, 而丝杠是承载力最高的传动方案, 因此有可能在工厂场景中成为主流。

图表 15：巧手传动方式各有千秋，常复合使用

传动方式	简介	优点	缺点
腱绳传动	使用线绳模拟人手的肌腱结构，可以使得大型的驱动器远离执行机构	①重量轻，结构简单 ②驱动单元少、控制简单、制造成本低 ③符合仿生学要求，具有被动柔顺特性	①负载能力较弱 ②可靠性较差，需一定的预紧力来保障精度 ③寿命较短，恶劣工况和疲劳测试中绳驱容易断裂
连杆传动	使用多个连杆串并联混合的形式传递运动和力矩	①刚度大 ②迟滞性较低	①传动设计结构复杂，加工精度要求高 ②抓握不规则物体时的包络性和自适应性较差 ③较难实现拟人化
齿轮传动	通过齿轮或者蜗轮蜗杆将驱动器的旋转运动转换成直线运动，拉动驱动器和手指间的弹簧来驱动手指产生动作	①具备较高精度和高重复性 ②具有较高的刚性	①存在背隙可能降低传动精度 ②需要搭配其他传动方式，比如滚珠丝杠、带传动或连杆，设计难度较高
丝杠传动	电机和滚珠丝杠外置于手臂中，电机通过减速器带动滚珠丝杠，电机轴的旋转运动被转化为丝杠螺母的平移运动	①精度较高 ②传动效率高，节省能源 ③承载力高，寿命长	①成本较高；②自重增大；③结构相对复杂

来源：《机器人灵巧手研究综述_刘伟》，国金证券研究所

传感器：特斯拉手部传感器数量有增加态势

总体手部上可使用的传感器包含力、位移、触觉、角位移、视觉、压力、力矩、位置、霍尔和温度传感器等。其中，触觉、视觉和温度传感器属于外部感知，力、位移、角位移和力矩属于内部感知。

图表 16：近年灵巧手方案采用多种传感器且采用电驱和腱绳传动为主

名称（或研究单位）	突出特点	指数	自由度数	驱动形式	传动形式	传感技术	名称（或研究单位）
TJU/KCL 中国/英国	变胞手掌	3、4、5	13、15、18	电机	—	—	TJU/KCL 中国/英国
ZJUThand 中国	无中间传动装置	5	20	FPA	—	手指，力、位移传感器	ZJUThand 中国
哈佛大学、	全驱动	4	20	电机	腱绳	触觉、角位	哈佛大学、斯

斯坦福大学						移传感器	坦福大学
SSSA-MyHand	通过 3 电机实现 6 电机功能	5	21	电机	齿轮、腱绳	力、位移传感器	SSSA-MyHand
东京大学	可变刚度	4	13	气动	腱绳	指尖，指尖力	东京大学
MELTANT- α 日本	多操作形式： 1. VR 体感手柄遥控 2. 生物信号控制 3. 视觉识别手势跟踪	5	21	电机	腱绳	计算机视觉	MELTANT- α 日本
SchunkSVH 德国	高仿生化、高集成度	5	21	电机	齿轮	手指，力、位移传感器，机器视觉	SchunkSVH 德国
SHU II 中国	轻量化程度高	5	16	电机	腱绳	—	SHU II 中国
F-hand 日本	简化设计，控制极其简单	5	18	电机	腱绳	—	F-hand 日本
TactileTele robot 日本	控制器可穿戴、反馈真实触感	5	21	电机	腱绳	力、位移传感器	TactileTele robot 日本
河北工业大学	具有关节锁紧机构	5	15	电机	腱绳	压力传感器	河北工业大学
FESTO 德国	完全采用柔性硅胶材料	5	12	气动	气动波纹管	计算机视觉，深度传感器	FESTO 德国
康奈尔大学机械手	可自适应拾取对象	5	12	传导光线	气动波纹管	手指，波导装置	康奈尔大学机械手
ELEKITCYBORGHAND 日本	可穿戴	5	20	液压	液压缸	—	ELEKITCYBORGHAND 日本

来源：《灵巧式机械手研究现状综述》，国金证券研究所

据《机器人灵巧手：建模、规划与仿真》，用于灵巧手的传感器主要有位置和触觉传感器，测量关节位置是实现手指运动控制所必需的基本要求，实际中经常用霍尔元件、电位计和光学传感器来测量位置。而触觉传感器主要用于反馈接触信

息，一般包含力传感器和接触传感器两种。其他的传感器可以针对特殊任务需要而增加，如接近觉、视觉、加速度和振动等。

图表 17: DLR/HIT Hand 使用的传感器数量和种类属于较多水平

传感器类型	传感方式	作用	传感器数量
关节力矩传感器	基于应变测量原理	关节位置信息	3
关节绝对位置传感器	集成式双轴霍尔传感器	放在关节处，可直接获得关节位置空间信息	3
电机霍尔传感器	模拟霍尔传感器	集成在盘式电机内，可以提供电机空间的相对位置	3
指尖力/力矩传感器	基于应变原理	指尖反馈外界触觉交互信息	1
温度传感器	集成式温度传感器	感受机械手和外界温度	3

来源：DLR/HITHand 官网，《仿人多指灵巧手机器操作控制》，国金证券研究所

具体使用案例上，根据特斯拉 Gen2 发布会，特斯拉机器人上确定搭载了触觉传感器。对于其他的方案，总体还有多种传感器可以选择，如 DLR/HITHand 官网显示，其使用了关节力矩传感器、关节绝对位置传感器、电机霍尔传感器、触觉传感器和温度传感器。

方案选择：性能与成本的综合博弈

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 18：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	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

特斯拉 Gen1 专利拆解：驱动器、齿轮箱是核心零部件

根据特斯拉手部专利，手部共采用了约 14 种核心零部件。按价值量排序，执行器、齿轮箱、霍尔效应传感器较高：

- 1) 执行器：空心杯电机（我们预计量产后国产 1000 元/个， $13 \times 1000 = 13000$ 元）或者无刷有齿槽电机（预计量产后国产 160 元/个， $160 \times 13 = 2080$ 元）
- 2) 行星齿轮箱：304a-304f（齿轮箱=1 齿轮+1 蜗轮），我们预估量产后单自由度价值量约 100 元，13 个自由度合计 ASP1300 元。
- 3) 指节部件：近端 402、远端 408、420，为壳体，我们预计价值量较小
- 4) 指节的两端：410、412，为壳体，我们预计价值量较小
- 5) 枢轴（包含销钉、销轴等）：406、414，我们预计价值量较小
- 6) 电缆：416、418、512，我们预计价值量较小
- 7) 通道结构：424、426，我们预计价值量较小

- 8) 扭簧：远端 436、近端 434，我们预计价值量较小
- 9) 弹簧支架、销钉，我们预计价值量较小
- 10) 其他：指甲、肌腱、自动张紧器、手动张紧器、法兰套轴承，我们预计价值量较小
- 11) 管道：514、516，我们预计价值量较小
- 12) 蜗轮：704（包含滑轮 706），在齿轮箱中已经计算
- 13) 齿轮：702，在齿轮箱中已经计算
- 14) 霍尔效应传感器：由感应器 802 和磁场源 804 组成（处理器 114 通过霍尔效应传感器测量的磁场确定指节部件的位置或者旋转角度），产业链成熟，价值量较小

根据特斯拉 Gen1 灵巧手专利，手指的基本工作机制通过电缆驱动系统和执行器的协同作用来实现。当执行器被激活时，拉动电缆，电缆通过手指的通道结构引导，带动手指的关节围绕枢轴旋转。电缆通过齿轮箱保持适当的张力，确保关节运动平稳。此外，扭簧提供了额外的回弹力，使手指在操作完成后能够自然恢复到初始状态。这种电缆驱动的设计不仅减少了复杂的机械部件，还提高了手指的灵活性和耐用性。通过霍尔效应传感器的精确定位，手指能够实时调整运动，从而实现高度精细的操作任务。

特斯拉灵巧手专利拆解步骤如下：

- ❖ 第一步，根据特斯拉灵巧手专利显示，其单手有 5 个手指，每个手指包含两个指节（近指节 206+远指节 208），每根手指靠紧固件固定在手掌上。这步

新增了指节部件。

图表 19：特斯拉灵巧手单手具有 5 个指节

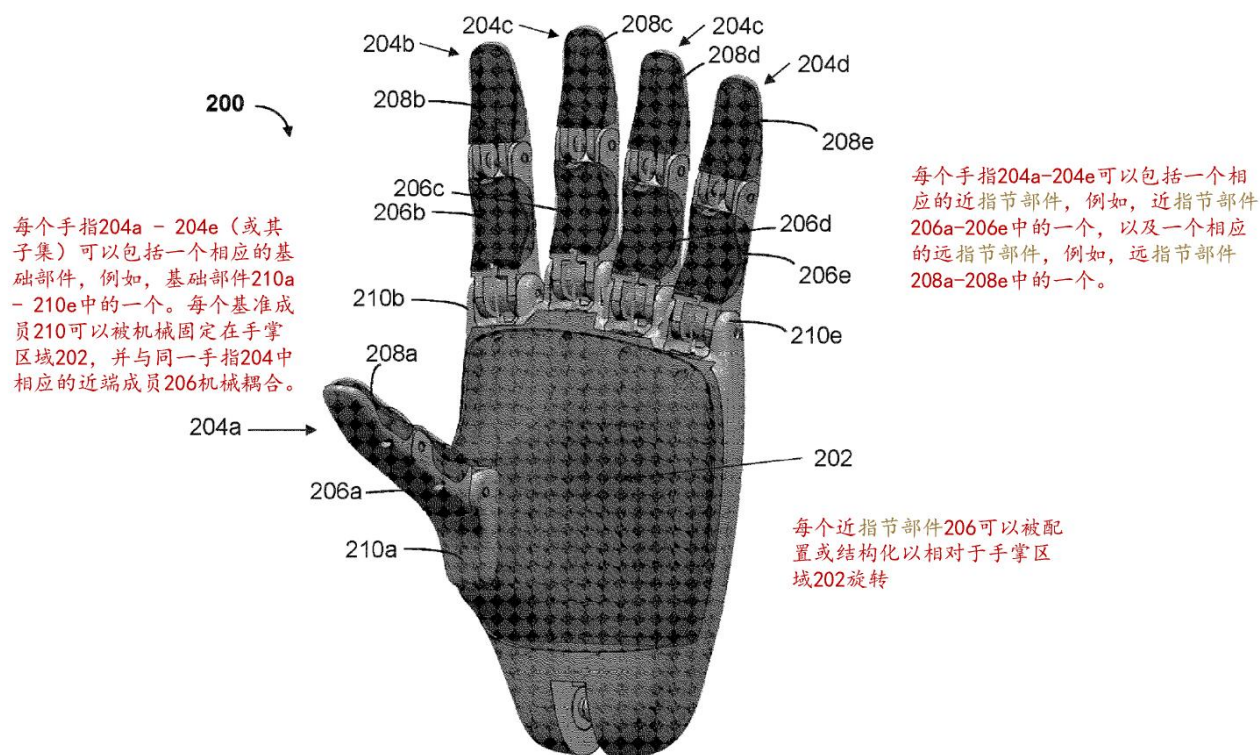
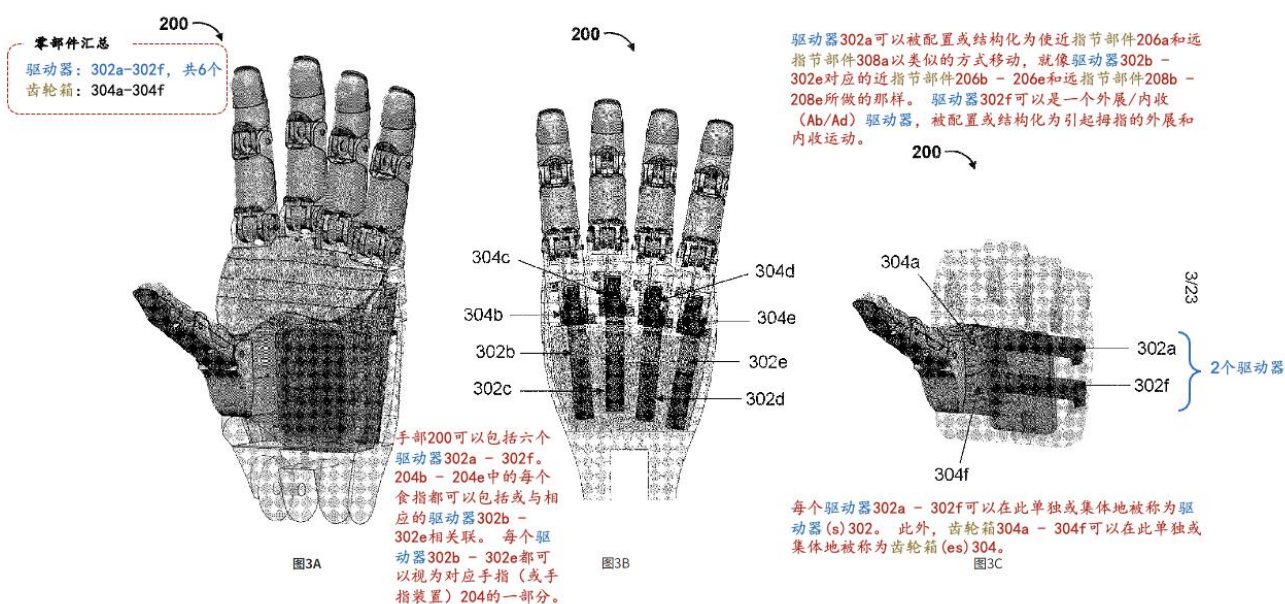


图2

来源：特斯拉灵巧手专利，国金证券研究所

❖ 第二步，根据特斯拉灵巧手专利，其单手有 6 个自由度，因此包含 6 个执行器和齿轮箱。其中执行器主要放在手掌（第三代由于自由度增加，手掌容量难以包容，因此将执行器装载到容量更大的手臂）。这步新增了执行器和齿轮箱，单手分别有 6 个。

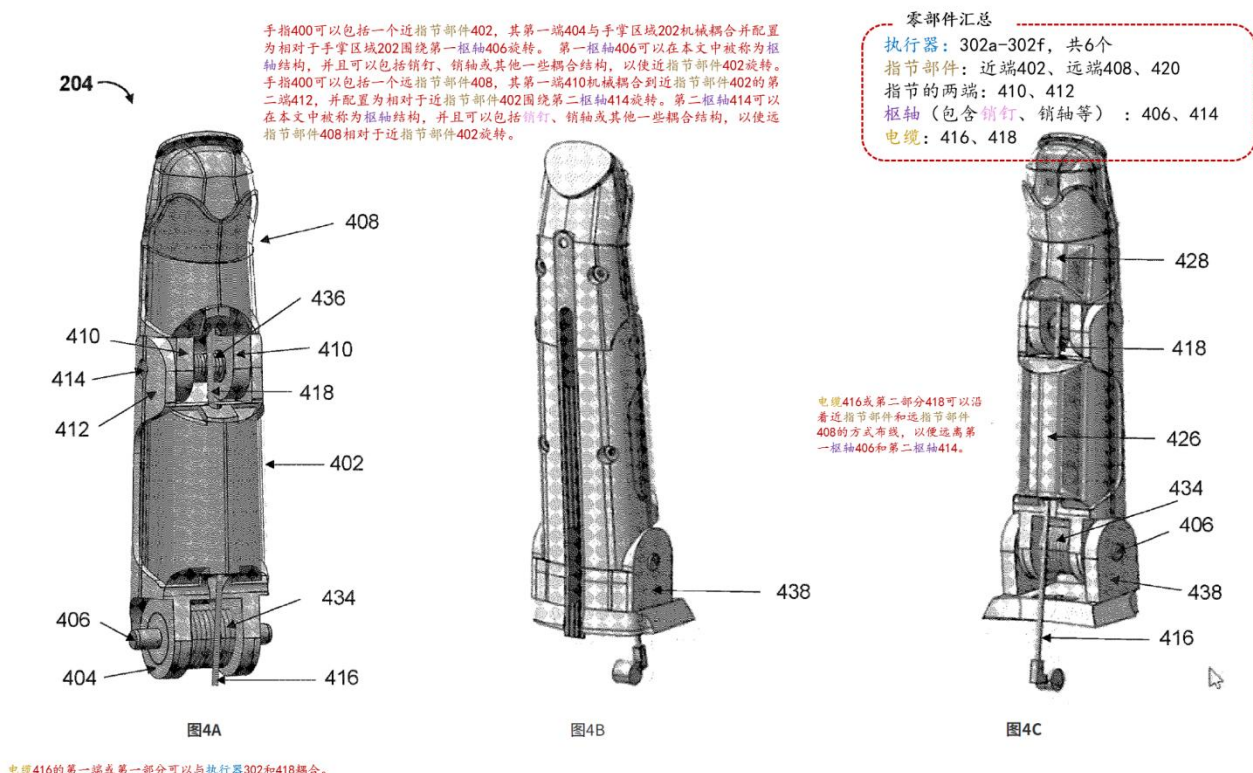
图表 20：特斯拉第一代灵巧手有 6 个执行器和 6 个齿轮箱



来源：特斯拉灵巧手专利，国金证券研究所

- ❖ 第三步，根据特斯拉灵巧手专利，其单指有 2 个枢轴结构与 2 个扭簧。两个枢轴分别位于手指的近端（406）和远端（414），通常由销钉或轴承构成，允许手指在特定的角度范围内自由旋转。远端扭簧（436）和近端扭簧（434）分别位于手指的远端和近端关节，不仅提供了额外的稳定性，还能帮助手指在恢复初始状态时提供反馈力量。这步新增了枢轴结构与扭簧。

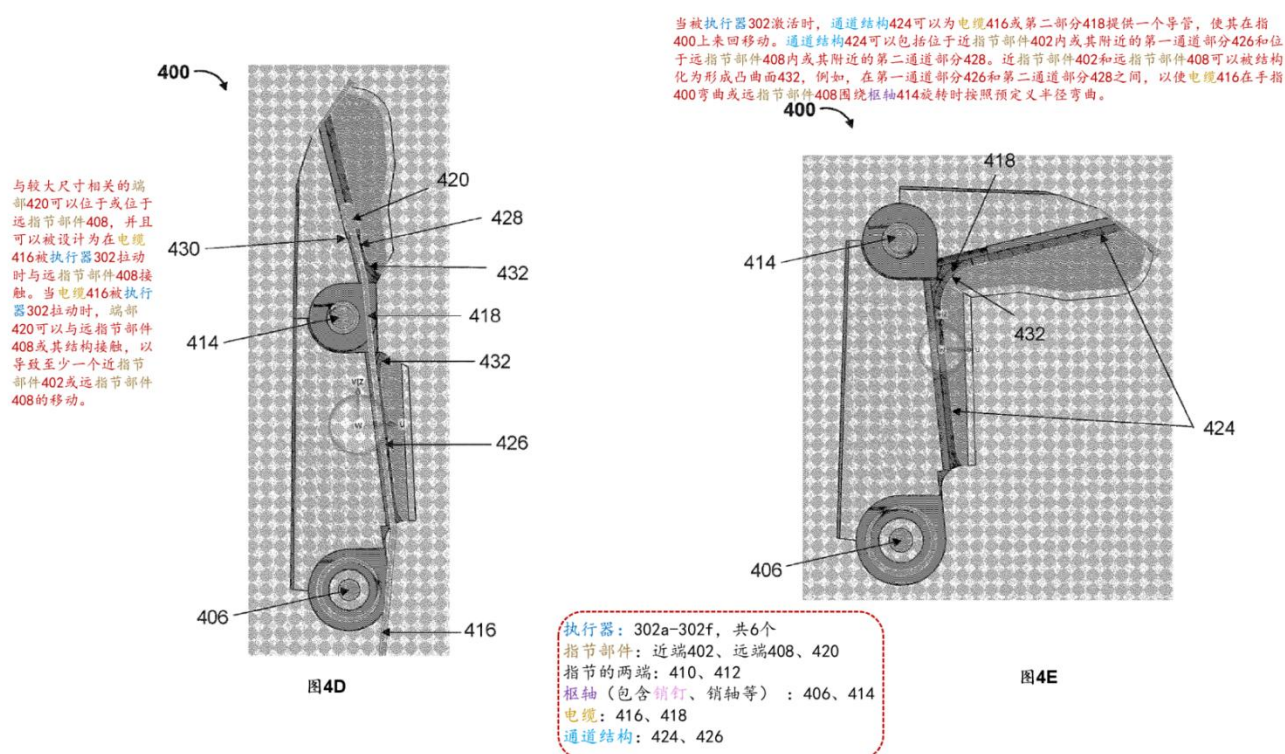
图表 21：特斯拉灵巧手单指有 2 个枢轴结构与 2 个扭簧



来源：特斯拉灵巧手专利，国金证券研究所

❖ 第四步，根据特斯拉灵巧手专利，其单指有 2 个电缆与 2 个通道结构，电缆一端与执行器相连，另一端通过复杂的通道结构（424、426）沿手指内部布线。当执行器运动时，电缆可以带动灵巧手进行弯曲。通道结构为电缆的移动提供了引导路径，确保电缆在手指弯曲时能够自由移动而不会打结。这步新增了电缆与通道结构。

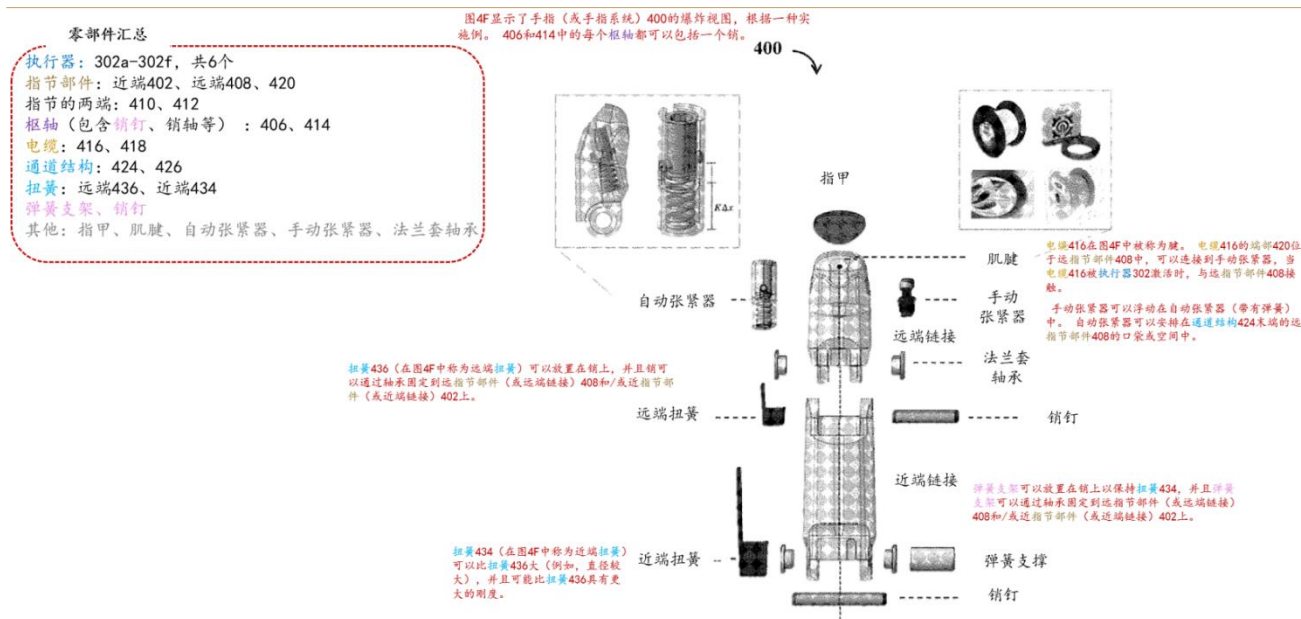
图表 22：特斯拉灵巧手单指有 2 个电缆与 2 个通道结构



来源：特斯拉灵巧手专利，国金证券研究所

❖ 第五步，根据特斯拉灵巧手专利，灵巧手有 6 个齿轮箱，每个执行器通过一个齿轮箱控制电缆的移动。齿轮箱通常由蜗轮和蜗杆组成，齿轮箱中的滑轮与电缆相连，确保电缆的张力始终保持在一个稳定范围内。这步新增了齿轮箱（包含齿轮、蜗轮、蜗杆和滑轮等）。

图表 23：特斯拉灵巧手手指顶部有自动张紧器



来源：特斯拉灵巧手专利，国金证券研究所

❖ 第六步，根据特斯拉灵巧手专利，灵巧手每个手指还配备了1个霍尔效应传感器用于监测手指各个关节的旋转角度和位置。霍尔效应传感器与处理器相连，当手指旋转时，通过测量磁场的变化来确定手指的确切位置，提供实时反馈。这步新增了霍尔效应传感器。

图表 24：特斯拉灵巧手单指节有 1 个霍尔效应传感器

图 8A 和 8B 描绘了霍尔效应传感器 802 的使用，用于监测手指和相应零部件的位置

霍尔效应传感器 802 可以与处理器 114 进行通信耦合。处理器 114 可以根据测量的磁场确定近指节部件的位置或旋转角度

零部件汇总

执行器：302a-302f，共 6 个
齿轮箱：304a-304f（齿轮箱=1 齿轮+1 蜗轮）
指节部件：近端 402、远端 408、420
指节的两端：410、412
枢轴（包含销钉、销轴等）：406、414
电缆：416、418、512
通道结构：424、426
扭簧：远端 436、近端 434
弹簧支架、销钉
其他：指甲、肌腱、自动张紧器、手动张紧器、法兰套轴承
管道：514、516
蜗轮：704（包含蜗轮 706）
齿轮：702
霍尔效应传感器：802、804（处理器 114 通过霍尔效应传感器测量的磁场确定指节部件的位置或者旋转角度）

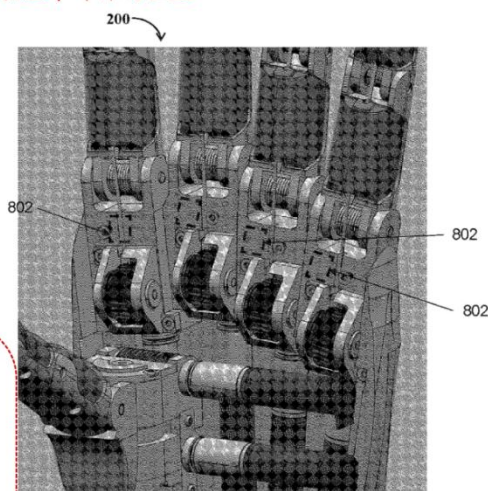
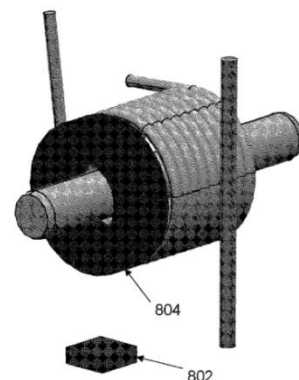


图 8A



来源：特斯拉灵巧手专利，国金证券研究所

图表 25：特斯拉灵巧手单指节有 1 个霍尔效应传感器

霍尔效应传感器 804 不随近指节部件 402 移动，可以检测随着近指节部件 402 旋转而产生的磁场变化。

零部件汇总

执行器：302a-302f，共 6 个
齿轮箱：304a-304f（齿轮箱=1 齿轮+1 蜗轮）
指节部件：近端 402、远端 408、420
指节的两端：410、412
枢轴（包含销钉、销轴等）：406、414
电缆：416、418、512
通道结构：424、426
扭簧：远端 436、近端 434
弹簧支架、销钉
其他：指甲、肌腱、自动张紧器、手动张紧器、法兰套轴承
管道：514、516
蜗轮：704（包含蜗轮 706）
齿轮：702
霍尔效应传感器：802、804（处理器 114 通过霍尔效应传感器测量的磁场确定指节部件的位置或者旋转角度）

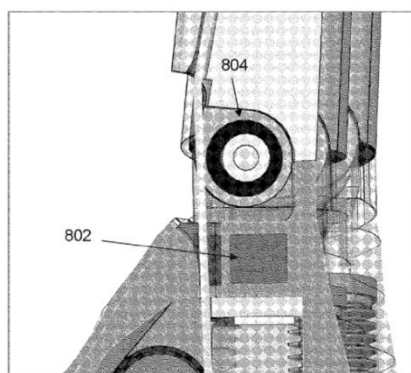
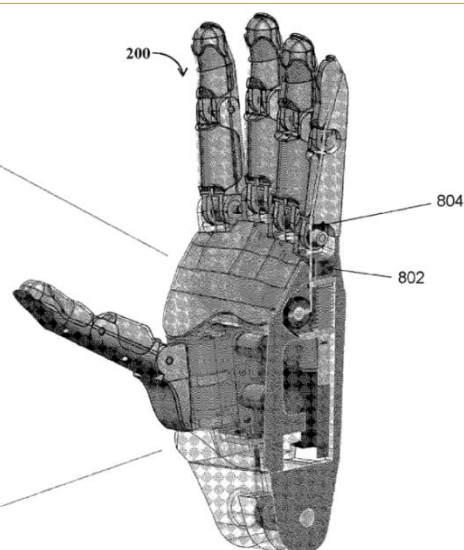


图 8B



来源：特斯拉灵巧手专利，国金证券研究所

灵巧手空心杯电机和丝杠是未来降本核心

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，我们预计对应的电机数量将从原本的 6 个提升到 13-17 个；（2）驱动器装载在了手腕部位。

图表 26：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

我们测算出当前单手的纯零部件价格总和为 6.4 万元（采用国产空心杯电机和滚柱丝杠，13 个主动自由度）~17.3 万元（采用进口空心杯电机和滚柱丝杠，22 个主动自由度），测算过程如下：

驱动电机上，我们假设单手主动自由度为 22 个，对应需要 22 个驱动电机，假设每个手指能够用到 1 个无刷有齿槽电机，单手共计 5 个，其余 17 个主动自由度全采用空心杯电机；根据 Maxon、兆威机电线上购物平台官网，预计空心杯电机（带霍尔传感器）和无刷有齿槽电机价格分别为 4500 元/个（进口）、800 元/个。

传动件上，假设分别使用 22 根行星滚柱丝杠、22 个行星减速箱和 10 根腱绳，由于精度较高，我们预计对应价格分别为 300（国产）、100、100 元/根。

传感器上，我们假设采用高精度指腹电容式传感器+大面积电子皮肤+指缝间温度传感器+指节间霍尔传感器。（1）电容式触觉传感器：预计单手搭载 5 个高精度的触觉传感器，主要搭载在指腹部位；（2）大面积电子皮肤：假设手掌+手背（包含手指）均覆盖低精度电子皮肤，根据中南大学烧伤整形外科资料，人双手掌面积约为人体表面积的 1%，而人体总面积为 1.5-2 m²，所以单手手掌+手背面积约为 1.5×1%×2=0.015 m²，因此假设灵巧手单手皮肤面积也为 0.015 m²。；（3）指缝间温度传感器：预计单手 5 个；（4）霍尔传感器：据特斯拉专利，单手有 5 个，已包含在电机中。单价上，根据力感科技、上海测控、KMU、墨感科技官网旗舰店，假设电容式触觉传感器、大面积电子皮肤、指缝间传感器价格分别为 100 元/个、2000 元/m²、40 元/个。

其他如电缆、通道结构、扭簧、齿轮、指甲等价值量较小，预计合计约 50 元/手。

图表 27：采用国产无刷有齿槽电机和行星滚柱丝杠单手预估价格 2.9 万元（单位：元/只）

单手总价值量		总价	零部件	方案：自由度数量为	22	个					
29130	驱动	17600	驱动器种类	进口空心杯电机 (带霍尔传感器)	单位	无刷有齿槽电机	单位				
			驱动数量	0	个	22	个				
			驱动单价	4500	元/个	800	元/个				
	传动	9800	传动器种类	滚柱丝杠	单位	行星减速器	单位	腱绳	单位		
			传动数量	22	根	22	个	10	根		
			传动单价	300	元/根	100	元/个	100	元/根		
	传感	730	传感器种类	触觉传感（指腹）	单位	大面积皮肤	单位	温度传感器	单位	霍尔传感器	单位
			传感器数量	5	个	0.015	m²	5	个	5	个
			传感器单价	100	元/个	2000	元/m²	40	元/个	10	元/个
	其他零部件	1000	其他零部件种类	电缆、扭簧、齿轮等	单位						
			其他零部件数量	5	套						
			其他零部件单价	200	元/套						

来源：深圳力感科技淘宝官方旗舰店，墨感科技淘宝官方旗舰店，KMU 淘宝官方旗舰店，国金证券研究所

据淘宝网、京东网的询价结果，目前大部分灵巧手的单手市场价为 2-15 万元/只，

整体价格与精度、关节数和驱动数等关键指标呈现正相关关系。DLR 配备了较高精度的零配件售价 80 万元/只，根据线上购物平台显示，DLR 单手包含 15 个自由度，高度集成了电机、齿轮、哈默纳科减速器、传感器等零部件。

图表 28：灵巧手当前市场价为 2-80 万元/只

灵巧手名称	厂商	单价	触觉传感(个)	抓握力分辨率	指尖力控精度	DOF 自由度(个)	关节数(个)	DOA 自由度(个)	重复定位精度(mm)	电机类型
		(万元)								
FTP 系列	国时机器人	4.8	≥12	\	\	\	≥12	≥6	±0.2	\
RH56BFX、RH56DFX	国时机器人	4.0	0	0.5N	\	\	12	6	\	\
RH8D	京天博特	15.3	5	\	1mN	19	\	8	\	\
RH8D	京天博特	7.8	0	\	\	19	\	\	\	\
铎乐灵巧手	铎乐	3.3	\	\	\	\	\	6	\	FOC 无刷电机
BXCG	钛虎	2.2	\	\	\	\	\	6	\	FOC 无刷电机
韩国 AllegoHand	韩国 Allego	14.0	\	\	\	16	\	\	\	\
DLR	哈工大	80.0	\	\	0.5 degrees	15	\	\	\	DC 无刷电机
Qbsofthand	QB Robotics	11.0	\	\	\	19	\	\	\	\

来源：国时机器人淘宝官方旗舰店、京天博特京东旗舰店、淘宝店铺机器人工控之家，国金证券研究所

竞争格局：美国领先，国产灵巧手快速崛起

当前美国在机器人灵巧手技术上处于领先地位，特别是在人工智能、传感器融合以及仿生技术领域有显著优势。美国的许多公司和研究机构在灵巧手的硬件设计和智能化控制系统方面积累了大量的技术经验。中国近年在机器人灵巧手领域的技术积累迅速增长，尽管与美、欧相比还有一定差距，但市场规模庞大，政府支持力度强，市场化进程快。

自由度角度看，海外特斯拉、Shadow Hand、SCHUNK 和 ILDA 已经将 DOF 自由度做

到 20 个以上，国内青龙灵巧手自由度做到 19 个，处于国内较为领先地位。抓握力角度，海外的 QBhand 和国内的星动纪元较为领先，抓握力分别达到 62N 和 80N。国内市场上，因时机器人、傲意、腾讯 RoboticsX 实验室等企业也在积极布局，且具有低成本供应链优势，未来国产灵巧手有望占据更多市场份额。

图表 29：国产新灵巧手产品快速追赶海外实力

灵巧手名称	驱动方式	传动方式	重量	最大抓握力	手指数量	DOF	DOA	传感方式	执行器数量	承载力
特斯拉灵巧手	电驱	腱绳、蜗轮、蜗杆	\	\	5	22	13-17 (预测)	霍尔传感器、触觉传感器	13-17 (预测)	\
Shadow Hand	气动人工肌肉驱动	腱绳	4300g	\	5	24	20	129 个传感器	20	4KG
SCHUNK SVH Hand	电驱	齿轮、连杆	1300g	0.85kg	5	20	9	\	9	\
Pisa/IIT SoftHand	电驱	腱绳	\	\	5	19	\	\	\	\
DLR 五指灵巧手	电驱	谐波减速器、齿轮、绳驱	1800g	10N	5	\	15	40 个模拟传感器+45 个数字传感器	15	\
Qbhand	电驱	腱绳	770g	62N	5	19	\	\	\	1.1KG
ILDA hand	电驱	连杆	1100g	34N	5	15	15	\	15	\
因时科技灵巧手	电驱	齿轮/丝杠	540g	30N	5	12	6	\	6	2-3KG
思灵灵巧手	电驱	齿轮/连杆	490g	15N	5	15	6	\	6	数千克
清华大学	电驱	\	550g	\	5	\	\	\	\	5KG
腾讯灵巧手 TRX-Hand	电驱	减速器	1160g	15N	3	\	8	角度传感器、接近传感器、微型激光雷达	8	6.5KG 以上
小鹏灵巧	电驱	\	430g	\	5	11	\	\	\	数千克

手 PX5										
智元高自由度灵巧手	电驱	\	1600g	5KG		19	12	基于视觉的指尖传感	\	\
傲意灵巧手	电驱	\	545g	\	5	6	11	\	6	10KG
星动纪元	电驱	\	1100g	80N	5	12	\	\	\	25KG
青龙灵巧手	电驱	\	600g	15N	5	19	6	指尖触觉感知	12	5KG
钛虎灵巧手	电驱	\	480g	\	5	\	6	\	6	\

来源：各公司官网，国金证券研究所

二、驱动装置：国产竞争力优势明显

价格：进口价格为国产品牌的两倍

灵巧手驱动电机主要包含空心杯电机、无刷有齿槽电机。

由于生产难度系数更高，同级别空心杯电机是普通电机价格的 10 倍。据淘宝，兆威机电 8mm 微型电机+4 级齿轮箱的价格为 160 元，虽然电流更小，但是具有转矩大和减速比高的优点，例如兆威机电的 8mm 微型电机转矩达到 750 gf.cm，大于同公司的 6mm 的空心杯电机（转矩为 600 gf.cm），减速比为 369:1，而直径 8mm 的空心杯电机减速比只有 64:1。

国产微型空心杯+减速箱的当前价格约 1-2 千元，进口不带减速器价格为其 2 倍。Maxon 的 6mm 直径无刷空心杯电机，不带减速器，售价为 4675 元，但兆威机电同直径产品仅售价 1818 元，国产价格具备较高性价比。

图表 30：Maxon 手指空心杯价格几乎为国内的两倍

品牌	型号	价格	外径	转矩	空载电流	减速比
Maxon	ECX SPEED 4 M Ø4 mm, 无刷, 带霍尔传感器	2060 元以下（购买达 50 件以上）	4mm	0.241mNm	14.4 mA	-

Maxon	ECX PRIME 6 M Ø6 mm, 无刷, 带霍尔传感器	4675 元以下 (购买达 50 件以上)	6mm	0.58mNm	83.8	-
兆威机电	6mm 空心杯电机	2007 元	6mm	50gf. cm	380mA MAX	15:1
兆威机电	8mm 空心杯电机	1818 元	8mm	600gf. cm	800 mA MAX	64:1
兆威机电	ZWMD008008-369-02	159.76 元	8mm	750gf. cm	150 mA MAX	369:1

来源：兆威机电淘宝官方旗舰店，Maxon 官网，国金证券研究所

竞争格局：玩家持续增多，有望快速实现国产替代

中高端领域中，空心杯电机市场基本被外资厂商垄断，2023 年外资企业市场份额达到 85% 以上。但国内布局工业用空心杯电机的企业较多，如鸣志电器、兆威机电、拓邦股份、鼎智科技和伟创电气等，有望快速切入机器人领域，实现国产化降本。

图表 31：国内外空心杯电机主要生产企业

空心杯电机	鸣志电器	鼎智科技	拓邦股份	禾川科技	Maxon	Portescap	FAULHABER	伟创电气	兆威机电
人形机器人相关能力圈	空心杯电机、丝杠、减速机、编码器、控制器	空心杯电机、无框力矩电机、精密减速机、行星滚柱丝杠、T 型丝杠、精密驱控器	控制器和算法、空心杯电机、伺服驱动、电池	整机，旋转关节、线性关节、手部关节，主要产品包括驱动器、无框力矩电机、空心杯电机、编码器、位置传感器等	空心杯电机、高效率关节 (HEJ) 和高精度关节 (HPJ)	空心杯电机	空心杯电机	空心杯电机、人形机器人的关节模组	空心杯电机
24 年中	-	齿轮	与国内	已推出	-	-	-	推出了	高转矩

报 进展		箱目 前已 经与 多家 人形 机器 人公 司灵 巧手 合作	人形机 器人客 户确认 需求、 完成样 机制作、 实现部分 头部送 样	人形机 器人游 龙 01				低压伺 服系 统、伺 服一体 轮、伺 服一体 机、旋 转关节 模组、 空心杯 电机系 统、无 框电机 等机器 人核心 部件及 机器人 整机解 决方案	直流电 机和无 刷空心 杯电机 均已形 成系列 产品， 成功用 于汽 车、医 疗、人 形机器 人等领 域，正 开展 4mm 直 径无刷 空心杯 电机技 术攻关
---------	--	--	---	--------------------	--	--	--	--	--

来源：鸣志电器、鼎智科技、拓邦股份、禾川科技、Maxon、Portescap、FAULHABER、伟创电气、兆威机电公司公告和公司官网，国金证券研究所

三、传动方式：谐波减速器尚有差距，丝杠国产优势明显

如前所述，传动中用到价值量比较大的零部件主要为减速器和丝杠，绳索、螺杆等价值量较低，因此我们重点展开研究减速器和丝杠。

减速器：降速增扭，已有多家完成手部谐波减速器开发

一级传动采用减速器的方式较多，其主要作用为增强扭矩与控制精度。从性能角度看，谐波减速器精度一般低于 1 弧分，行星减速器和蜗轮蜗杆高于 1 弧分。从传动效率看，行星减速器和谐波减速器的传动效率均大于 85%，远高于蜗轮蜗杆的 30-40%。从价格上看，手指上搭载的微型谐波由于工艺难度更高，单价目前在 7000 元，若长期大批量生产有望降低至 800-1500 元/个。行星减速器单价一般为小几百元。

图表 32：谐波减速器传动效率最高

类型	绿的谐波	哈默纳科	Maxon	中大力德	Damen CNC	价格	传动效率
谐波减速器	<2 arcmin	CSG-GH 系列： <1 arcmin	/	/	/	进口微型 7000 元， 国产微型 1000-2000 元 普通谐波 800-1500 元	85%以上
行星减速器	/	减速比 3 至 50: 1 <5 arcmin (单级) <7 arcmin (双级)	GP 系列： < 9 arcmin (单级)	ZD 系列： <5 arcmin(单级) <8 arcmin(双级) <12 arcmin(三级)	/	进口微型：900-1200 元 普通行星：500-100 元	94%以上
蜗轮蜗杆	/	/	/	/	<8 arcmin	200 欧元以下	75%以上

来源：绿的谐波、哈默纳科、Maxon、中大力德、Damen CNC 官网，小米官方旗舰店，京东，淘宝，国金证券研究所

其中壁垒较高的为谐波减速器。谐波减速器的壁垒在于生产数据库积累，要对各种工况各种需求都有相应的调参能力。

国内外产品差异：寿命、噪声、温升和稳定性。国产谐波减速器主要表现为使用寿命较短、精度保持性差、传动效率不高、噪声大、负载小。性能的差异主要源于原材料（海外如纳伯斯特克用的是山阳特钢）、加工精度、热处理等。

成本：规模迭代决定成本优势。从成本结构看，谐波减速器直接材料、直接人工和制造费用占比分别为 25%、31%、28%，未来规模和设备自动化提高后，成本有望显著下降。且头部规模迭代快的公司，有望获得规模优势。

图表 33: 绿的谐波的谐波减速器人工成本逐步下滑

	2020	2021	2022	2023
直接材料	334	321	268	351
直接人工	394	274	187	236
制造费用	438	249	207	259
委外加工费用	185	160	108	59
单个谐波减速器成本	1,351	1,004	770	905
单个谐波减速器价格	1,815	1,556	1,503	1,538
单个谐波减速器毛利率	26%	35%	49%	41%

来源: 绿的谐波公司公告, 国金证券研究所

哈默纳科已经完成手指微型谐波减速器研发, 哈默纳科 23 年年报显示, 公司开发了用于人形机器人手部的迷你执行器 RSF-3C 及 RSF-5B, 集成谐波减速器、无刷伺服电机及编码器于一体, 并展示这些微型减速器可以用于手指关节, 每根手指配置 2-3 台, 目前已搭载至东京大学灵巧手设计方案中。

图表 34: 哈默纳科已经完成手指微型谐波减速器研发

图表 35: 东京大学灵巧手搭载了哈默纳科谐波减速器



来源: 哈默纳科 23 年年报, 国金证券研究所

来源: 人形机器人研究院公众号, 国金证券研究所

国内绿的谐波和非上市公司宏勤自动化科技也有研发手部微型谐波减速器, 总体价格约 1000-2000 元。绿的谐波 24 年中报显示, 其超小型谐波减速器可以做到最小外径为 6mm, 适用于智能机器人手指关节。宏勤自动化科技产品目录显示, 其 2020 年已经研发出可用于机器人手指关节的迷你小型谐波减速器, 目前适用

的直径有 13/20/30mm 三种。

由于人形机器人带来行业研发灵巧手谐波减速器热潮，预计后续更多的公司将研发完成用于手部的谐波减速器。当前的减速器玩家上市公司主要包含绿的谐波、双环传动、豪能股份、同川科技和国茂股份等。

图表 36：手部减速器目前已有至少三家开发完成

减速器	能力圈	客户	手部减速器	微型谐波直径
哈默纳科	谐波减速器	digit、东京大学等已经使用其手部谐波减速器	有	5/13/22mm
绿的谐波	谐波减速器	优傲、通用电气、那智不二越、ABB、新松机器人、埃斯顿、埃夫特、新时代、华数机器人、广州数控、遨博、亿嘉和	有	6mm
东莞市宏勤自动化科技有限公司	谐波减速器	产品广泛应用于工业机器人、服务机器人、无人机、航空航天、医疗器械、半导体生产设备等高端制造领域	有，价格为 1000 元左右	13/20mm

来源：各公司官网，各公司公告，国金证券研究所

丝杠：具备较高的承载力和精度，在精细化工作场景中具备必要性

随丝杠技术成熟，灵巧手采用丝杠的概率有望大幅提升。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 1.5mm 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/根。

图表 37: KGG 微型丝杠直径达到 1.8mm 超小轴径
图表 38: 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 39: KGG 线性执行器 (行星) 总行程为 20-65mm
图表 40: 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

由于人形机器人带来行业研发灵巧手丝杠研发热潮，预计后续更多的公司将研发完成手部的滚珠丝杠和行星滚柱丝杠。当前的丝杠上市公司主要包含北特科技、贝斯特、五洲新春、鼎智科技、斯菱股份等。各公司公告显示，当前 KGG 和新剑传动已完成手部丝杠研发，五洲新春正在研发中。

图表 41：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	中国山东
	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	中国常州
	仲孚机械	具有非标直径、非标导程、行星滚柱丝杠的测绘与出产才能，并成功研制出了高精度行星滚柱丝杠	中国江苏
	KGG	已经研发出手指行星滚柱丝杠	中国上海
	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	中国常州
	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	中国无锡
	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	上海

		获得订单	
	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

来源：中国设备工程，各公司官网， ， 国金证券研究所

四、传感器：精度存在差异，国产产品满足一般场景

电阻式和电容式触觉传感器有望成为主流

特斯拉 Gen2 采用的方案预计采用了压力式触觉传感器，像素数量约为 8*12，我们预计单机价值量约数百元。其主要分为电阻式、电容式和压电式等方案。整体从成本角度看电阻式和电容式有望成为最终方案。

手部传感器中价值量最大的是触觉传感器。特斯拉第二代人形机器人 Gen2 发布，增量主要是触觉传感器，我们详细解读触觉传感器赛道技术路线、产业内公司和供应链等。

图表 42：各路线触觉传感器的对比

方案路线	优点	不足
接触式电阻（传统 FSR）	动态范围宽，耐用，灵敏度高，原材料易得，后续处理电路相对简单，具备良好的负载能力，与集成电路相容	1) 涂层剂纯度较低，填料粒径误差大；2) 国内目前油墨还未实现量产。
接触式电阻（余震型电阻材料）	可承受更高静压；量产的一致性高；耐刮擦，可靠性高	存在温漂现象
电容式方案	原理简单；精度高；像素密度高	1) 自身电容量小，容易受到场环境的电磁和噪声干扰；2) 可弯曲性不足
热辐射方案	可以进行无接触的热量传感	只能和生物进行交互，许多场景下无法使用
压电式方案	动态范围宽，经久耐用的压电和热电材料具有良好的机械特性，能同时感受力的作用和温度的变化	1) 只能测变化力；2) 器件过于敏感，容易监测到非目标物体；3) 压电材料随使用次数增多，发出的信号减弱；4) 容易受到高频信号的干扰，实现功能需要强大的芯片和算法，成本高

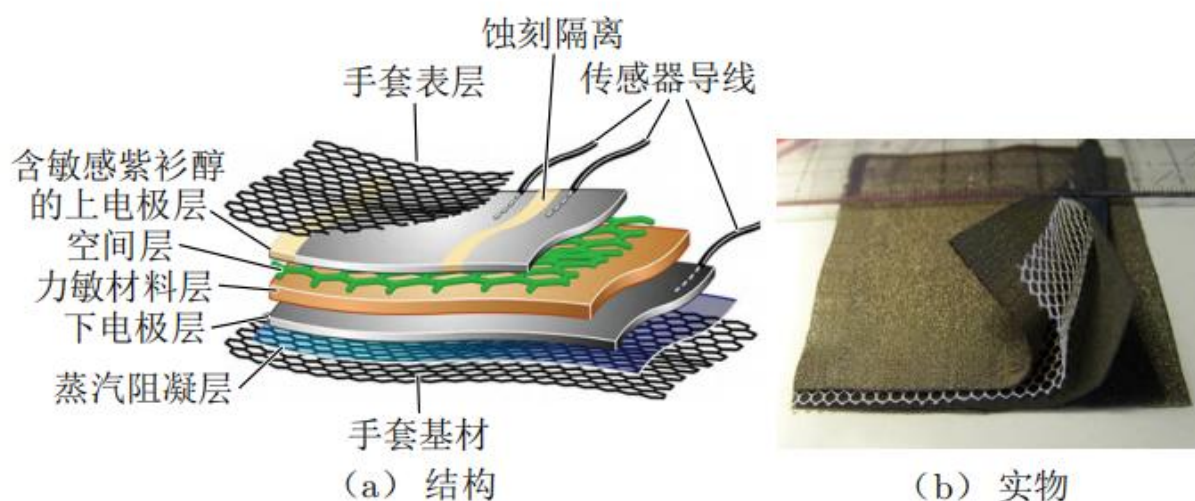
MEMS 方案	\	成本过高
---------	---	------

来源：《智能机器人用触觉传感器应用现状》，国金证券研究所

灵巧手需要大面积低精度皮肤+高敏感指腹

当前触觉传感器主流技术方案是电阻式：主要有两种具体方案：**a.** 接触电阻方案，通过改变极板之间的接触面积和接触紧密度来改变电阻。例如零感科技的泡棉方案，通过在发泡材料的内部投入导电物质，可以把其当成开口的圆环，在下压的过程中，开口逐渐缩小，材料的导电性会逐渐提升，进而反应了接受的压力。**b.** 导电颗粒方案，又称隧穿方案，通过在弹性材料内部填充导电颗粒，通过按压导致导电颗粒间间隙的缩小，进而带来电阻的变化。

图表 43：压阻柔性触觉传感器结构及实物图



来源：《A Multi-Modal Sensing Glove for Human Manual-Interaction Studies》，国金证券研究所

我们预计有三种触觉搭配使用将成为长期主流：**a.** 热感；**b.** 大面积低精度的反馈；**c.** 高精度反馈（如指腹）。预计会将三类方案结合在一起使用，分别是电阻式、电容式、热辐射式。

◆ 电阻式：大面积覆盖，可用于手臂和身体部位。优势在于组装简单，易于大

批量生产，柔性更高，寿命更长，可靠性强，成本低，耐高温和高压。我们假设手掌手背 4 个+身体部分共计 2 平方米。

- ◆ 电容式：用于指腹以辨别纹理。电容式适用于高精度场景，如新能源电池制具的检测、判断触摸物体的类型和盲文的检测等。
- ◆ 热辐射式：可布局在指缝间感知温度。通过热辐射和红外线去检测人或金属的靠近，可以实现非接触的感知，判断是否有热源靠近，用于规避危险。

图表 44：国内外触觉传感器性能差异体现在精度上

性能参数	进口传感器	国内传感器
有效尺寸	◆◆*9.7*9.7mm ²	◆◆*30*30mm ²
厚度	0.203mm	0.6mm
压力范围	4N-445N	100N-500N
准确度	<±3%	<±10%
耐久性	≥300 万次	≥100 万次

来源：Tekscan 官网，《能斯达电子-柔性薄膜压力传感器 ZNS-01》，国金证券研究所

国内外触觉传感器差距主要体现在国内成本低但精度略低。（1）成本差异：海外产品在核心原材料等与国内区别不大，国内产品价格低廉。（2）性能差异：海外产品在精度（3-5%）、技术和外观的细节方面比较领先，钛深产品精度 3-5%，力感科技产品精度 5%，普遍产品精度在 10%左右，足够满足终端用户目前的使用场景需求。

竞争格局：外资占据大部分份额

全球触觉传感器主要厂商有 Tekscan、Pressure Profile Systems、Sensor Products Inc. 等，全球前三大厂商共约占有 65%的市场份额。

国内布局了触觉传感器的公司有苏州能斯达电子（汉威科技）、墨现科技、力感科技、瑞潞科技等、埔慧科技、帕西尼感知科技、韧和科技、他山科技、柔宇科

技、宇博智能、常州福普生、上海澄科电子、常州柔希电子等。

图表 45：机器人触觉传感器主要生产企业

触觉传感器	墨现科技	帕西尼	能斯达电子	力感科技 (汉威科技)	Tekscan	Pressure Profile Systems
机器人领域进展	已研发出 Gen2 类似方案触觉传感器	自产机器人并使用触觉传感器	公司集中资源专注发展传感器及物联网应用等核心业务	薄膜压力传感器解决方案提供商	世界触觉传感器三大龙头之一	世界触觉传感器三大龙头之一
能力圈	触觉传感器	触觉传感器、扭矩传感器、机器人、关节等	触觉传感器	触觉传感器	触觉传感器	触觉传感器

来源：各公司公告，各公司官网，国金证券研究所

上市公司中主要包括汉威科技、苏试试验、弘信电子和柯力传感。1) 汉威科技，旗下子公司苏州能斯达已建立稳定纳米敏感材料体系，2024 年上半年，传感器营收 1.55 亿元；2) 苏试试验，原有产品技术同源，可直接迁移，2024 年上半年营收 9.16 亿元；3) 弘信电子，压力传感器领域有所积累，2024 年上半年营收 30.37 亿元；4) 柯力传感，触觉传感器已启动与多家企业、院校的合作，同时以自研模式进行研发，目前尚处于研发验证阶段。

图表 46：触觉传感器源于美国，中国长期被日美卡脖子



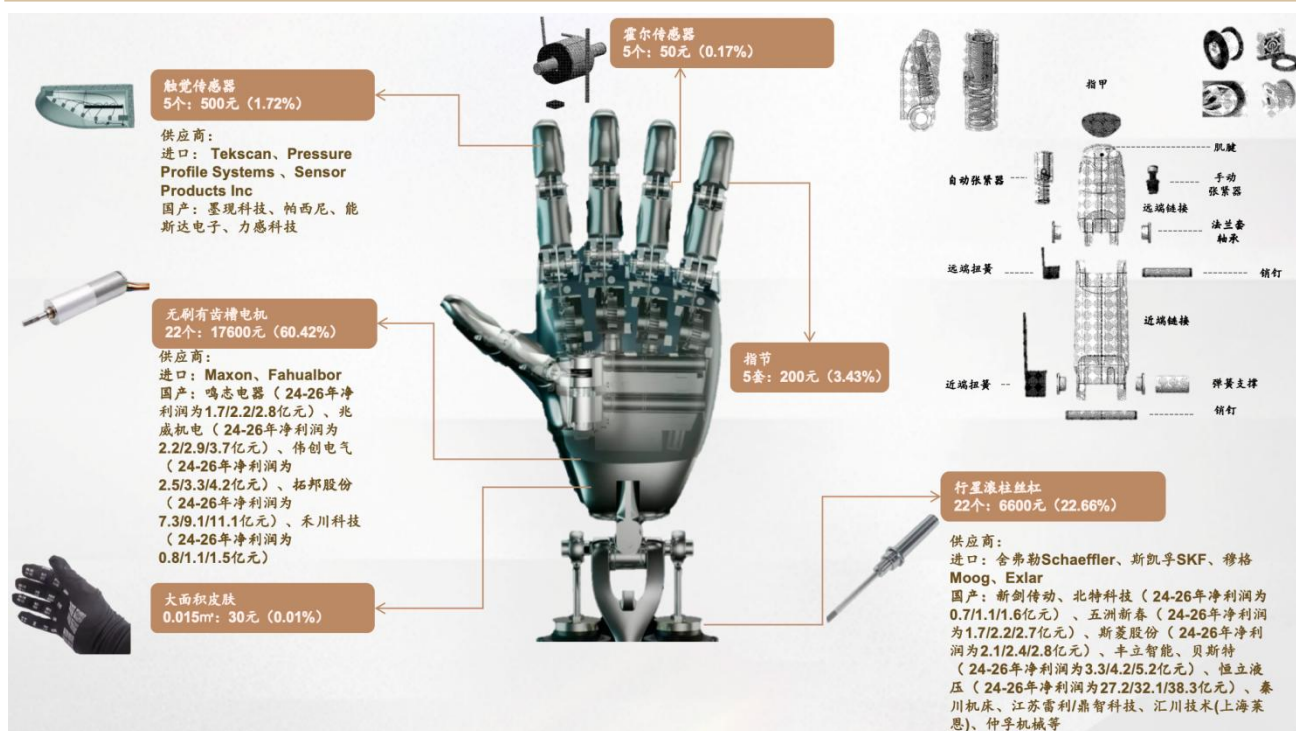
来源：Interlink 官网，Tekscan 官网，传感器专家网，国金证券研究所

五、灵巧手及其相关产业链

灵巧手价值量和壁垒高

灵巧手是机器人的核心部件，据特斯拉公开资料，特斯拉第三代灵巧手相比于第二代的变化为：（1）手部增加了自由度，从 11 提升到 22 个，从而对应的电机数量将可能提升到 22 个；（2）驱动器搭载位置从手掌改为手腕部位。

图表 47: 灵巧手价值量最高的零部件为空心杯电机、丝杠、减速器、触觉传感器



来源：各公司官网，特斯拉灵巧手专利，特斯拉 Optimus 发布会，国金证券研究所

注：价值量测算采用国产空心杯电机价值量和国产行星滚柱丝杠，假设手部采用无刷有齿槽电机、行星滚柱丝杠、行星减速器，总单手价值量为 2.9 万元。

驱动系统方面，电机驱动是当前主流的灵巧手驱动方式，由于第三代灵巧手自由度增加，所需电机数量增加至 22 个，利好空心杯电机和无刷有齿槽电机供应商，后者价值量约 60.42%，建议关注鸣志电器、兆威机电、伟创电气、拓邦股份、禾川科技等。

传动系统上，腱绳+蜗轮蜗杆是特斯拉第一代方案，随着行业手部灵巧手丝杠的日渐成熟，叠加特斯拉提升单手承载力的需求，手部采用丝杠进行传动可能是一种发展方向，若单手丝杠为 22 根，则单个人形机器人需要 44 根丝杠，价值量占比约 22.66%，利好丝杠产业链供应商，建议关注五洲新春（已布局灵巧手丝杠）、北特科技、贝斯特、恒立液压、斯菱股份等。

感应部分，第一代采用了霍尔传感器，第二代新增触觉传感器，第三代进一步提升传感器感应部分。由于触觉传感器价值量较大，利好相关公司，建议关注汉威科技、柯力传感等公司。

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、硬件降本和政策等多重阻碍，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，导致原有参与者处于的竞争格局恶化，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，若量产后，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。

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》，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。