

灵巧手：人形机器人硬件迭代核心模块

——人形机器人系列深度PPT（五）

行业评级：看好

2024年03月04日

分析师	邱世梁	分析师	王华君	研究助理	姬新悦
邮箱	qiushiliang@stocke.com.cn	邮箱	wanghuajun@stocke.com.cn	邮箱	jixinyue@stocke.com.cn
证书编号	S1230520050001	证书编号	S1230520080005		

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

1、灵巧手：人形机器人末端执行与感知的工具，是人形机器人未来硬件迭代空间最大的功能模块之一。灵巧手模仿人手的结构和功能，实现对物体的灵活抓取，满足多种工作需求。根据我们测算，目前单只人形机器人灵巧手成本约2.8万元，我们预计产业化成熟后，单只价值量有望降低到1.5万元，在人形机器人整机成本中占比约14%。**我们预计2030年人形机器人灵巧手全球市场空间约568亿元，2023-2030年市场空间复合增速约35%。**

2、传动、驱动、传感系统多元集成解决方案，赋能灵巧手精准化、智能化发展方向

- (1) **传动系统**：包括连杆传动、齿轮传动、带传动、线绳驱动等，多种传动方式可结合应用，实现优势互补；
- (2) **驱动系统**：电机驱动为主流路线，驱动力大、控制精度高、响应快，适配于灵巧手的通用性、移动性，易于实现商业化；
- (3) **传感系统**：内在传感器反馈机器人动态信息，外部传感器感知外部环境，相互搭配实现灵巧机械手的运动和控制。

3、空心杯电机：灵巧手电机最佳选择之一，海外厂商占据市场龙头，国内企业起步较晚，有望借助人形机器人实现弯道超车

(1) 使用绕线杯式电机绕组，减小了电机运行时的磁阻力矩和齿槽引起的转矩脉动，降低了电机运行过程中的能量损失，**具有节能、效率高、灵敏度高、运行稳定等特点，适配灵巧手对体积、性能、成本的优化需求。**

(2) **人形机器人帮助打开空心杯电机未来市场**，根据华经产业研究院，2022年全球空心杯电机市场规模约为51亿人民币，预计2028年市场规模将达到83亿人民币，期间复合年均增长率约8.5%。我们预测，人形机器人2030年需求实现177.2万台，带动空心杯市场空间达到132亿元。

(3) 中国与欧洲为空心杯电机的主要市场，根据QYResearch数据，2021年中国和欧洲的空心杯市场分别占全球34.8%、25.9%。**全球竞争格局高度集中，中高端市场仍由欧洲企业主导**，CR4占据市场份额的65%以上。国内鸣志电器等暂居第二梯队，国内厂商在生产效率、产品寿命、精度方面，较海外厂商仍存在一定的技术差距，随人形机器人需求空间打开，国产替代进程提速。

4、绕线机：空心杯制造核心环节，以斜绕形和马鞍形为主，海外厂商自动化程度相对较高，国产厂商自动化率快速提升

空心杯电机常用的线圈绕法有直绕形、马鞍形、斜绕形三种形式，斜绕形和马鞍形在绕制工艺上相对简单，国内外绕线机多采用这两种方式。Metetor、田中精机等厂商自动化发展居于领先地位，国内厂商研发技术存在优化空间。

5、投资建议：关注人形机器人灵巧手的重点部件及设备国产供应龙头。重点推荐鸣志电器、汇川技术、禾川科技、柯力传感，重点关注拓邦股份、伟创电气、江苏雷利、鼎智科技、雷赛智能、丰立智能、东华测试、汉威科技、田中精机等。

6、风险提示：中美贸易冲突超预期

目录

CONTENTS

- 01 灵巧手：模仿人手的结构和功能，机器人末端执行的工具
- 02 传动体系：多种传动方式并存，可结合应用实现优势互补
- 03 驱动系统：空心杯电机应用广泛，国产替代进行时
- 04 传感系统：灵巧手的感知系统，实现精准调控
- 05 投资建议及风险提示

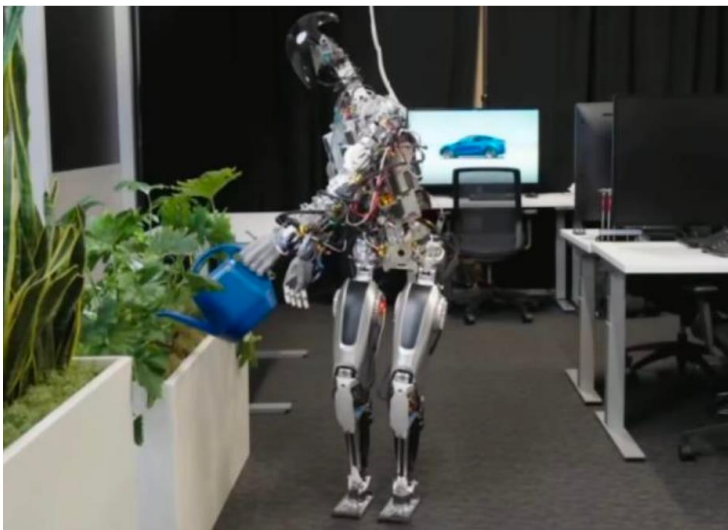
01

灵巧手：
模仿人手的结构和功能，
是机器人末端执行的工具

1.1 灵巧手：模仿人手的结构和功能，是机器人末端执行的工具

- 灵巧手是机器人操作和动作执行的末端工具，在机器人学领域属于末端执行器的范畴。
- 末端执行器是机器人执行部件的统称，一般安装于机器人腕部的末端，是直接执行任务的装置。末端执行器作为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，其性能的优劣在很大程度上决定了整个机器人的工作性能
- 灵巧手模仿人手的结构和功能，在机器人与环境的交互中起着关键作用。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。如特斯拉机器人“灵巧手”使用较为经典的六电机驱动方式，和人手一样同样使用5个手指，拥有11个自由度，拇指采用双电机驱动弯曲和侧摆，其它四指各用一个电机带动，可完成搬运、浇花、实现装配任务、抓取电动工具等动作。

图： 特斯拉 Optimus 灵巧手实现浇花动作



图： 特斯拉机器人完成自助分类物品



1.2 灵巧手发展历程:

图：灵巧手发展历程

第一阶段

20 世纪 70 年代

20 世纪 90 年代



Okada 灵巧手

制造方：日本“电子技术实验室”

自由度：3+4*2

传动方式：腱绳传动

驱动方式：电机驱动



Stanford/JPL 灵巧手

制造方：美国斯坦福大学

自由度：3*3

传动方式：腱绳传动

驱动方式：电机驱动



Utah/MIT 灵巧手

制造方：美国麻省理工学院和犹他大学

自由度：4*4

传动方式：腱绳传动

驱动方式：气动驱动

第二阶段

20 世纪 90 年代

2010 年



Robonaut hand 灵巧手

制造方：美国国家航空宇航局

自由度：14

传动方式：腱绳传动

驱动方式：电机驱动



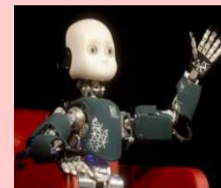
DLR- I 和 DLR- II 灵巧手

制造方：德国宇航中心

自由度：I：3*4，II：4+3*3

传动方式：腱绳传动

驱动方式：电机驱动



iCub 灵巧手

制造方：意大利IIT

自由度：眼睛：3，头：3，胸：3，胳膊：7*2，手：9，腿：6*2

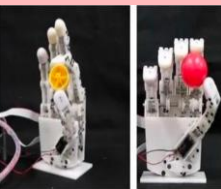
传动方式：肌腱传动

驱动方式：电机驱动

第三阶段

2010 年

2020 年



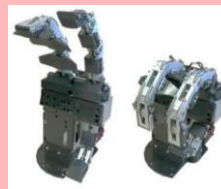
Ritsumeikan Hand 灵巧手

制造方：立命馆大学

自由度：4个（拇指1个+食指1个+其余手指1个）

传动方式：腱绳传动

驱动方式：欠驱动，电机驱动



HERI Hand 灵巧手

制造方：立命馆大学

自由度：24

传动方式：腱绳传动

驱动方式：欠驱动，电机驱动



SPRING hand 灵巧手

制造方：立命馆大学

自由度：8

传动方式：带传动

驱动方式：欠驱动，电机驱动

第四阶段

2020 年

至今



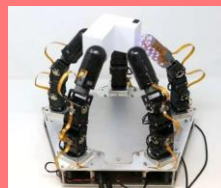
Optimus 灵巧手

制造方：特斯拉

自由度：单手11个自由度

传动方式：蜗轮蜗杆等

驱动方式：电机驱动



Highly Dexterous Robot Hand

制造方：哥伦比亚大学

自由度：15

传动方式：蜗轮蜗杆、丝杠传动

驱动方式：电机驱动，欠驱动



RBO Hand3 灵巧手

制造方：柏林工业大学

自由度：16

传动方式：-

驱动方式：气动驱动

- 目前大多多的多指灵巧手外观多为仿生设计，手指关节等内部结构主要有机械式传动（如齿轮传动等）、腱绳传动方式、软指手、刚柔结合结构、特殊构型、仿生生物关节等。

仿生结构设计类别	优点	缺点	案例
机械式铰链设计	传动效率高，响应快，关节刚度高，输出力稳定且可控。	结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高。	
腱绳拮抗驱动设计	轻量化，柔顺适用性，与传统结构相适应。	关节刚度受腱绳形变影响，腱绳与手指结构摩擦干扰大，传动效率低，寿命较低，维修成本高。	
软指手	结构柔性高，交互安全，成本低廉，抗干扰。	输出力小，结构刚度低，建模困难，控制精度低。	
刚柔混合结构	柔顺，可靠。	刚柔材料和结构的融合设计困难，刚性与柔性的跨量级建模困难。	
特殊构型	多功能，成本低。	通用性差，结构与普通灵巧手差异大，使用学习成本高。	
仿生生物关节	高度仿人化，柔顺，抗冲击，可控。	成本高，系统复杂，对驱动器要求高。	

特斯拉Optimus灵巧手、因时机器人的仿人五指灵巧手RH56BFX、RH56DFX系列，是人形机器人灵巧手的典型代表。根据因时机器人官网，仿人五指灵巧手单价约5万元/只。



特斯拉Optimus灵巧手

- 关节数：11
- 主动自由度：6
- 传感器：可能含力传感器、触觉传感器
 - 价格：未知

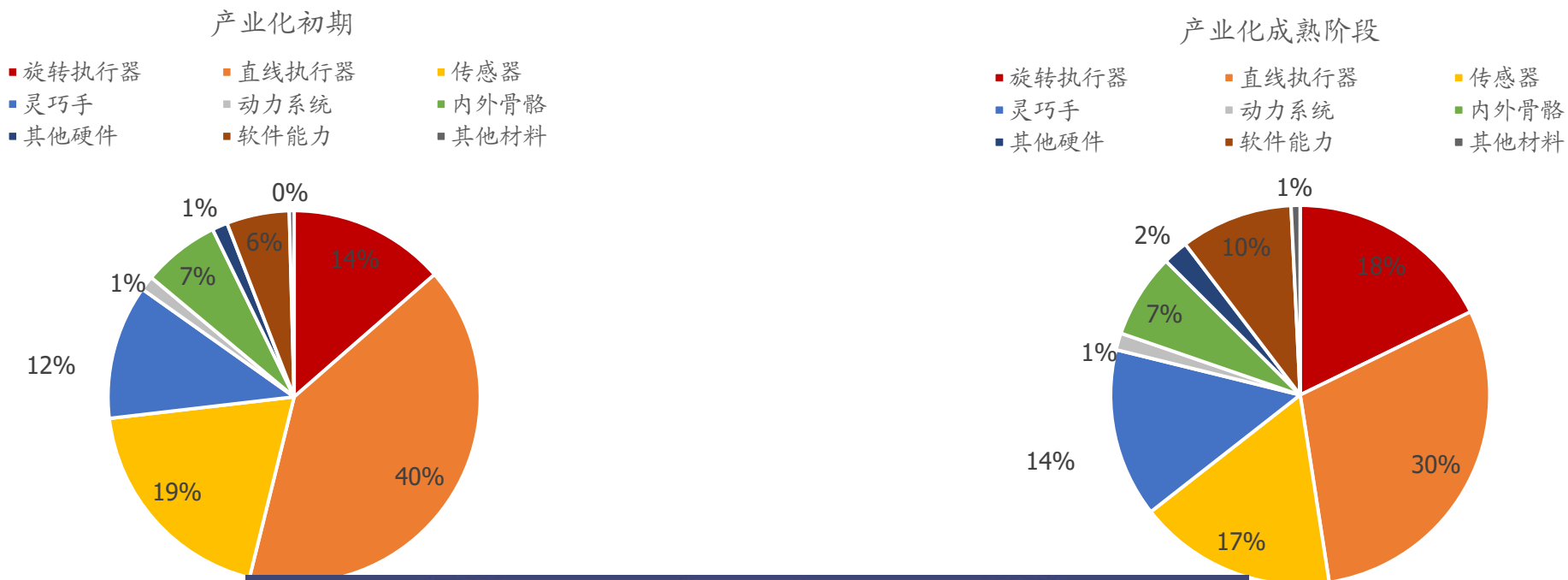


因时机器人RH56DFX系列灵巧手

- 关节数：12
- 主动自由度：6
- 传感器：集成功力传感器
- 价格：约5万元/只

部件	细分零部件	产业化初期				产业化成熟阶段				
		单机用量（个）	单价（元）	单机价值量（元）	价值占比	单机用量（个）	单价（元）	单机价值量（元）	价值占比	降本空间
灵巧手	空心杯电机	12	1200	14400	6.0%	12	600	7200	6.9%	-50%
	齿轮组	2	300	600	0.3%	2	150	300	0.3%	-50%
	触觉传感器 （假设为MEMS压力反馈单元）	12	600	7200	3.0%	12	300	3600	3.5%	-50%
	柔性材料	-	2000	2000	0.8%	-	1500	1500	1.4%	-25%
	编码器	12	300	3600	1.5%	12	200	2400	2.3%	-33%

图：产业化初期及产业化成熟阶段，灵巧手在人形机器人BOM成本中占比分别为12%、14%



		2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年
TO C端	世界总人口（亿人）	80	81	82	83	83	84	85	85
	YOY	1.0%	1.0%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.8%
	0-14岁人口占比	25%	25%	25%	25%	25%	25%	24%	24%
	65岁以上人口占比	10%	10%	10%	11%	11%	11%	11%	12%
	15-64岁人口占比	65%	65%	65%	64%	64%	64%	64%	64%
	目标收入群体：前百分比	1.3%	1.7%	2.3%	3.1%	4.1%	5.0%	5.9%	6.8%
	目标市场渗透率	0.2%	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%	0.6%	0.8%	0.9%
	TO C端人形机器人需求量（万台）	2.8	5.3	9.5	15.7	25.8	34.1	43.9	54.8
TO B端	全球工业就业人数（亿人）	7.7	7.7	7.8	7.9	7.9	8.0	8.1	8.2
	全球服务业就业人数（亿人）	17.0	17.3	17.7	18.0	18.3	18.7	19.0	19.4
	人形机器人替代比例	0.004%	0.01%	0.01%	0.02%	0.04%	0.06%	0.09%	0.13%
	TO B端人形机器人需求量（万台）	4.3	6.7	14.3	22.5	40.3	60.2	89.3	122.4
合计	人形机器人需求量（万台）	7.1	12.0	23.7	38.2	66.0	94.4	133.1	177.2
灵巧手									
单机用量		2	2	2	2	2	2	2	2
均价（元）		50000	42500	36125	30706	26100	22185	18857	16029
市场空间（亿元）		71	102	172	235	345	419	502	568
YOY		70%	44%	68%	37%	47%	21%	20%	13%

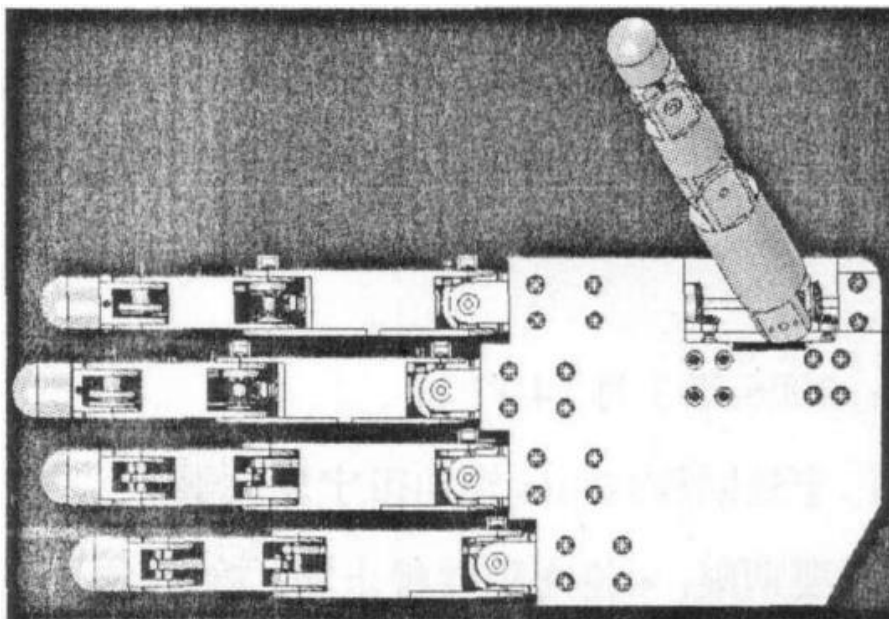
02

**传动体系：
多种传动方式并存，
可结合应用实现优势互补**

	类型	传动系统特点	特征	
			优点	缺点
传动形式	连杆传动	多使用多连杆串并联混合的形式	可抓取大型物体且结构设计紧凑，可进行包络抓取	远距离控制难度高，易弹射，可抓取空间有限
	齿轮传动	与传统的机械式铰链转动关节适配度高	稳定，高效率，可靠性强	齿轮重量大，加大整体质量和惯性，提升操作难度
	带传动	挠性传动	结构简单且传动平稳、可进行缓冲；可在大的轴间距和多轴间传递动力；价格低、便于维护	轴压力大，寿命较短
	线绳驱动	模拟人手的肌腱结构，使大型驱动器可远离执行机构	末端的负载和惯量低，抓取速度快；排布灵活，适合空间狭小且需要驱动自由度数目较多的传动场合	负载能力弱，预紧力变化大，效率随负载增加而降低；容易磨损、断裂，需要经常检修和更换

- 北航BH-985灵巧手布局完全仿人，5个手指安装在手掌上，每个手指有三个指节，整手共有11个自由度。每个手指的指节都设计成空心，便于指端力传感器和角位移传感器在手指内部走线。
- 拇指、食指和中指：每个手指有3个自由度，此三个手指能够满足对物体实现灵活操作的功能；
- 环指、小指：设计成起到辅助抓持作用的手指，只有一个自由度，共用一个电机驱动，三个指节的运动采用连杆传动，耦合在一起。这两个手指不仅起到提高抓握稳定性的作用，而且使整个手在外观上完全仿人，增加了手的美观性。

图：北航BH-985灵巧手图示



齿轮传动机构



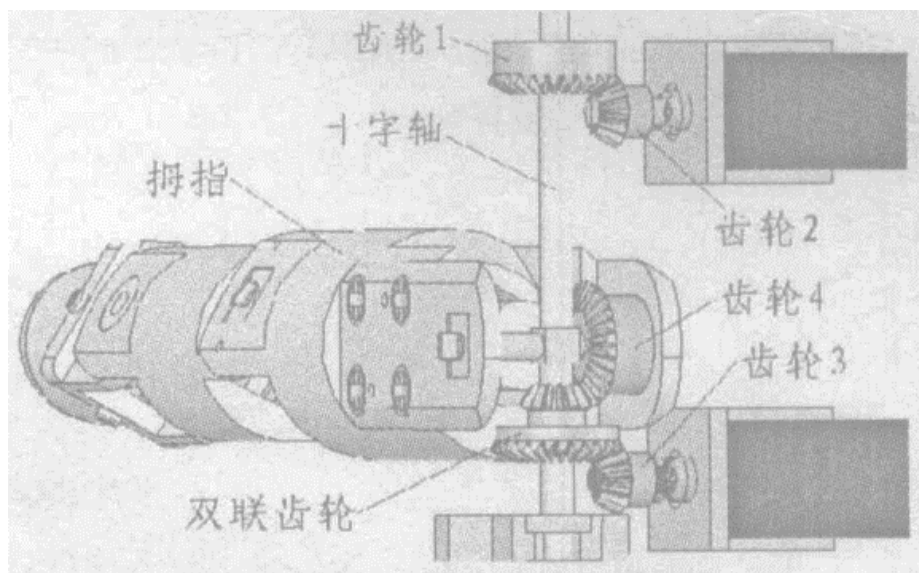
钢丝绳传动



连杆传动机构

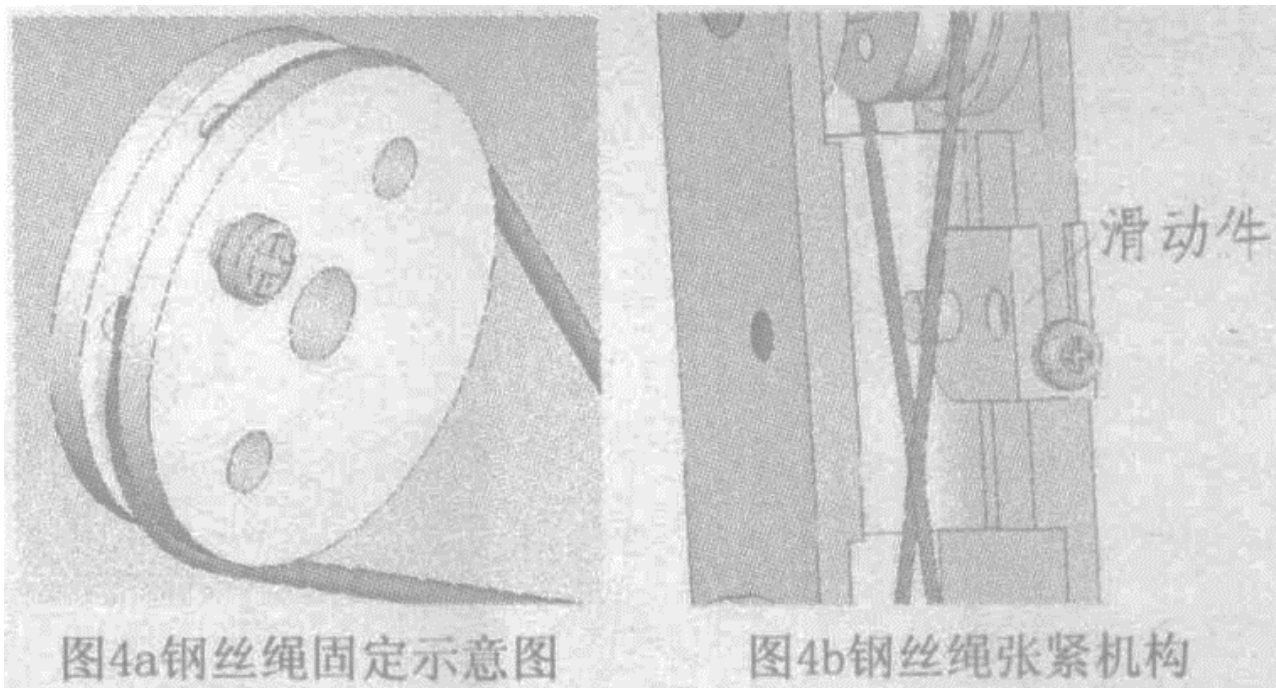
- 由于齿轮传动具有效率高、传动比恒定、结构紧凑、工作可靠、寿命长等优点，因此**各个手指的近关节和拇指、食指、中指的中关节等11个位置都采用齿轮传动**。
- 该设计满足结构紧凑的要求，并且有助于实现精确的位置控制，且为了考虑齿轮通用性、减少加工困难，将这11处圆锥齿轮传动设计成完全相同的形式——齿轮1通过销联接的方式与十字轴的长轴固联，电机通过齿轮2带动齿轮1转动，使拇指实现侧摆运动。双联齿轮活套在十字轴的长轴上，齿轮3通过双联齿轮及齿轮4，带动拇指实现屈曲运动，其中齿轮4活套在十字轴的短轴上并通过销联接与拇指近指节相固联。食指和中指的中关节十字轴传动与拇指类似。

图：拇指十字轴传动机构原理图



- 北航BH-985灵巧手在拇指、食指和中指的中、远指节采用了柔性好、伸缩性小的进口钢丝传动。
- 钢丝绳传动利用钢丝绳的拉力实现力和运动的传递，具有柔顺性好的优点，适合用于灵巧操作。但由于零件的尺寸小，钢丝绳与绳轮的固定式需要解决的问题；另外，钢丝绳式弹性元件，刚度较低，长时间使用后容易出现塑性变形，产生松弛现象，因此使用后需要进行张紧。

图：钢丝绳固定与张紧机构

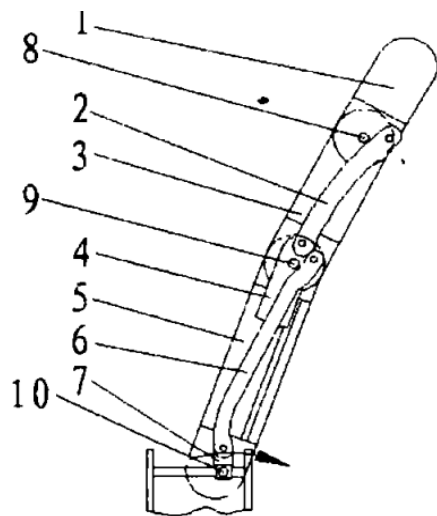


- ❑ 北航BH-985灵巧手的环指和小指分别只有一个自由度，该手指的电机安放在手掌上，电机驱动近指节运动，**中指节和远指节由近指节通过连杆机构带动，实现耦合运动。**
- ❑ 连杆机构刚度好，有利于在力度抓持时提供较大的抓持力，连杆传动能够实现中心距较大的传动；但由于中指节和远指节的运动与近指节存在耦合关系，因此其转角由近指节转角所决定，难以实现精确的位置控制。

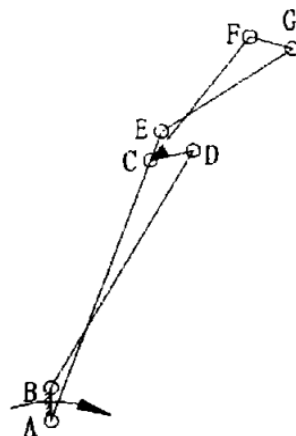
图：环指连杆传动原理图

1.远指节 2.上连杆 3.中指节 4.中关节机架 5.近指节 6.下连杆

7.近关节机架 8.远关节轴 9.中关节轴 10.近关节十字轴



环指连杆传动
结构示意图



环指连杆传动
工作原理图

03

**驱动系统：
空心杯电机应用广泛，
国产替代进行时**

3.1 灵巧手具有多种驱动方式，电机驱动为主流方式

- **动力源/驱动方式：**根据驱动系统可分为液压驱动、电机驱动、气压驱动、形状记忆合金驱动四类。
- **电机驱动是目前多指灵巧手的主要驱动方式。电机驱动具有驱动力大，控制精度高、响应快、模块化设计、易于更换维护等优点。特斯拉optimus、优必选人形机器人灵巧手等都选择了电机驱动方式。**

	类型	特征	
		优点	缺点
动力源/ 驱动方式	液压驱动	工业机械手常用，可进行大型抓取工作	系统庞大，便携性差
	电机驱动	标准化、响应快，调控方便、精度高、输出力矩稳定	成本较高，工艺要求度高
	气压驱动	操作简单、质量轻、动作迅速、价格适中、维护方便	轨迹精度不高、可操作性弱
	形状记忆合金驱动	适宜小型、高精度机器人装配作业；负载驱动反应迅速，且位移幅度大，变位快速	可工作时间短，易疲劳

特斯拉灵巧手采用空心杯电机驱动技术路线



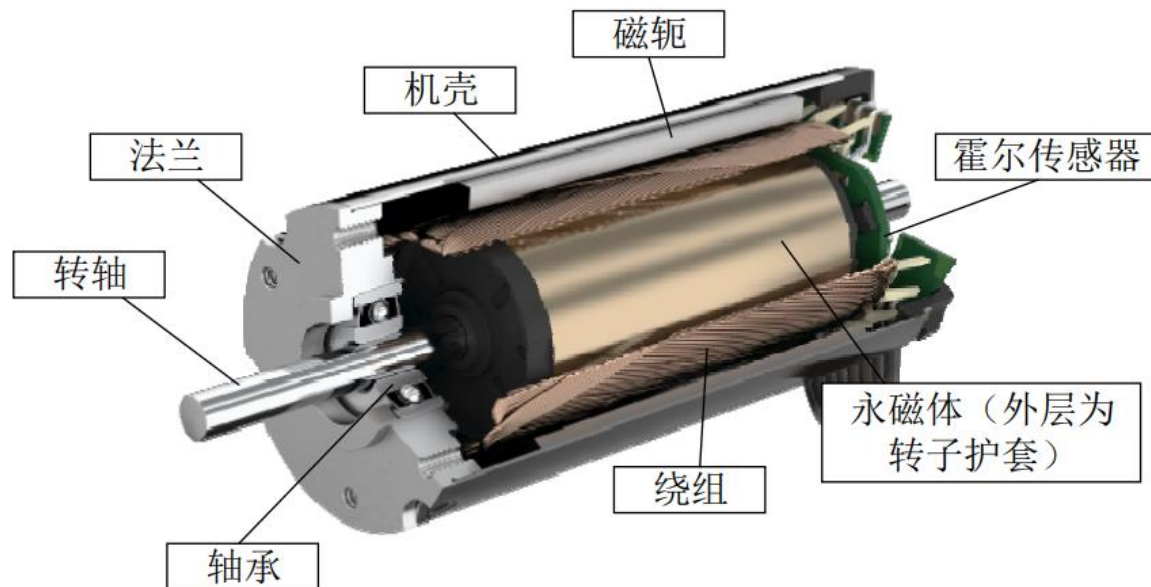
优必选灵巧手采用电机驱动技术路线



3.2 空心杯电机：实现高效率与稳定运行，是灵巧手的最佳选择之一

- 空心杯电机的主要组成部分包括空心杯绕组、转子组件、传感器组件、法兰、轴承、磁轭等，永磁体作为转子，绕组作为定子，三相定子绕组采用绕线杯结构，电枢绕组以自支撑的形式分布在气隙中，绕线杯式绕组式实现消除齿槽转矩的关键部件，定子组件是由三相对称分布的绕组、磁轭、引出线焊接板等组成，转子组件主要是由轴承、永磁体和转子护套组成。

图：空心杯无刷电机结构图



3.2 空心杯电机：实现高效率与稳定运行，是灵巧手的最佳选择之一

- 空心杯电机与其他电机的主要区别是使用了绕线杯式电机绕组，这种新型结构由于没有冲齿槽结构，减小了电机运行时的磁阻力矩和齿槽引起的转矩脉动，降低了电机运行过程中的能量损失，使电机性能得到了极大的提高，**具有节能、效率高、灵敏度高、运行稳定等特点**。因此，空心杯适用于高续航（如智能手表、健康监测器）以及结构紧凑的机器设备（如机器人、无人机）等领域，满足其对高效、节能、小型化的电机的需求。

空心杯电机优点

更大的功率体积比

空心杯电机不需要将绕组缠绕在铁芯上，电枢绕组有足够的空间分布在定子内腔表面，可以提高电枢绕组的匝数，因此电机可以承受更高的电压等级。此外，电枢绕组的结构也提高了铜线截面积，可以提高电机的电流等级，实现了比传统开槽电机更大的功率体积比。

更好的散热性能和更高的过载能力

空心杯电机的定子不开槽，电枢绕组被粘贴在定子的内腔表面，使气隙和磁阻比传统电机大，从而保证了永磁体在电流过载倍数很大的情况下，也不容易退磁，因此过载性能和稳定性强。空心杯电机可以有效排出电机内部产生的热量，具有更好的散热性能，保证电机长时间运行不会出现过热。

噪声更低、运行更平稳

空心杯无刷电机定子无齿槽，没有齿槽转矩，消除了齿槽产生的电磁噪音。

控制性能优良

空心杯电机电感很低，电气时间常数小，响应速度极快，空心杯电机的机械时间常数值可达10ms以内，另外无齿槽设计使得空心杯电机转矩与转速波动小，运动平滑，伺服特性优良。

3.3

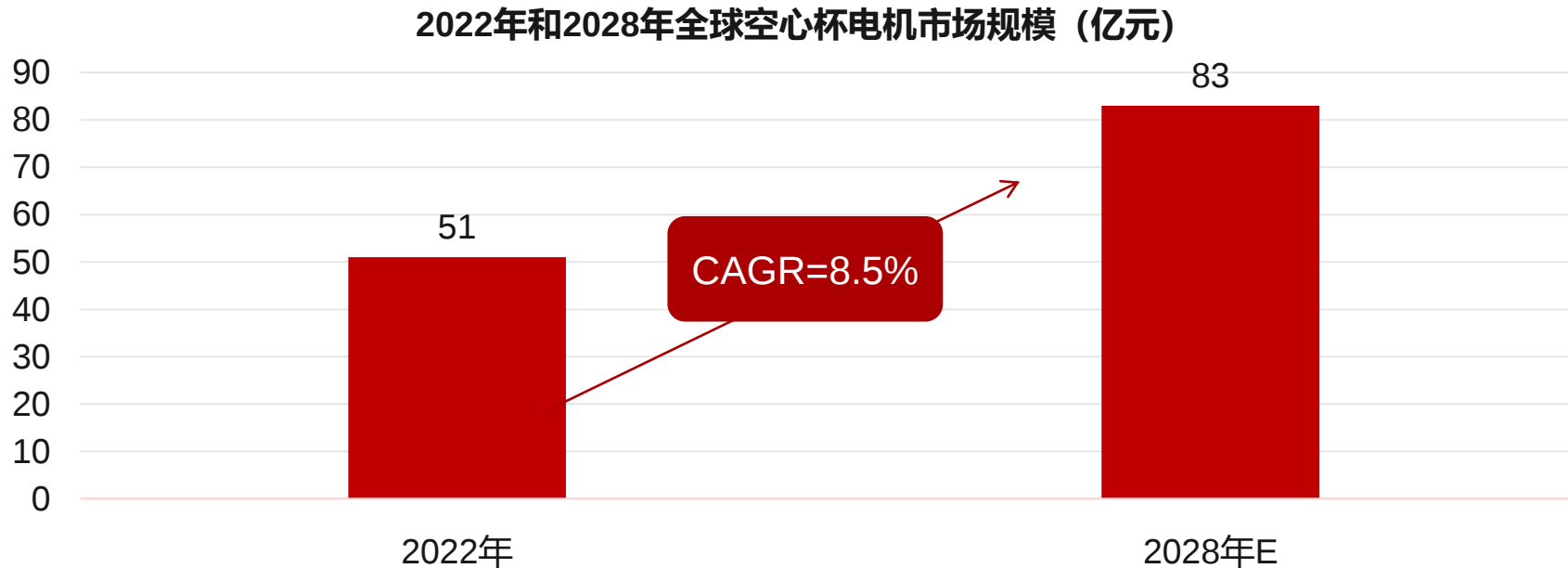
空心杯电机：应用于航天航空，医疗，机器人等多个领域

应用领域		具体应用产品
航天航空	航空领域	飞机控制系统:用于小型舵面、各种类型的空气和液体阀门、电传飞行航空领域控制系统、阀门、空调系统等的执行器;机上通讯和机舱设施:各种用于天线装置、窗户遮光板控制、电动座椅调节、卫生间、行李架关闭辅助装置的执行器。
	航天领域	用于火箭发动机阀门、光伏阵列驱动装器以及伸展机构的驱动装置。用于对接分离系统执行器；应用于科研航天器和机器人探测任务执行机构，尤其是在月球和火星的探测任务重
	无人机领域	基础设施:用于对接、维护、发射和降落系统的执行器,用于执行维护作业的机器人系统:有效载荷机构:舵面执行器、电子光学元器件、云台和负载驱动装置、绞盘和负载锁定装置;由电机、控制器和螺旋桨组成的优化驱动系统，可用于多轴飞行器、固定翼飞行器和无人垂直起降飞行器。
医疗设备	有源植入物	传感器或有源元件可以帮助有源植入物监控或支持人体功能，例如在心脏支持系统、主动阀、定位系统、泵系统等。
	外壳系统	手术机器人，用于支持外科医生;外科手持工具，用于去除组织和软骨、钻孔和固定螺栓。
	泵机和药剂配量系统	胰岛素泵，在必要时自动注射必要的胰岛素量，以使糖尿病患者的血糖水平保持在正确的水平;全新泵机和药剂配量系统的开发，并专门处理客户的需求。
	复健和假肢	各种的假体，例如仿生手、仿生脚、外骨骼等。
工业自动化和机器人	实验室自动化	液体处理(移液机器人)、即时检测诊断(POC)、DNA测序、PCR分析。
	工业自动化	传送带、电动夹具、泵、半导体、纺织品、焊接设备。

3.4 预计2028年全球空心杯规模达到83亿元，CAGR达8.5%

- 空心杯电动机在结构上突破了传统电机的转子结构形式，采用的是无铁芯转子，也叫空心杯型转子。这种转子结构彻底消除了由于铁芯形成涡流而造成的电能损耗，同时其重量和转动惯量大幅降低，从而减少了转子自身的机械能损耗。空心杯电机能量转换效率很高，其最大效率一般在70%以上，部分产品可达到90%以上（普通铁芯电动机一般在15-50%）。空心杯电机作为高效率的能量转换装置，在很多领域代表了电动机的发展方向。
- 根据华经产业研究院，2022年全球空心杯电机市场规模约为51.0亿人民币，预计2028年市场规模将达到83.0亿人民币，期间复合年均增长率约8.5%。

全球空心杯电机市场空间有望从2022年的51亿元增长到2028年的83亿元，CAGR=8.5%



3.5人形机器人：打开空心杯市场需求，2030年市场有望达到132亿元

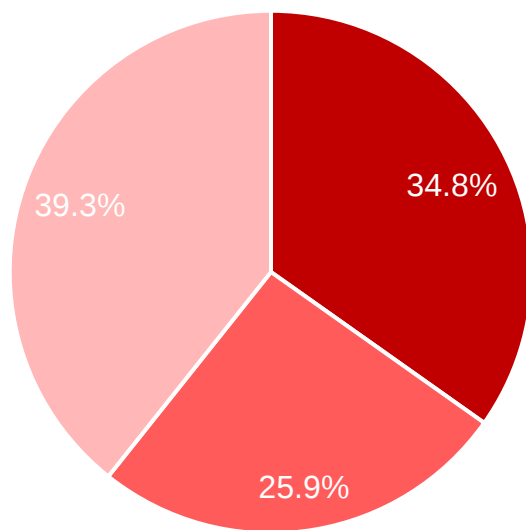
 浙商证券股份有限公司
ZHESHANG SECURITIES CO.LTD

		2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年
TO C端	世界总人口（亿人）	80	80	81	82	83	83	84	85	85
	YOY	1.0%	1.0%	1.0%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.8%
	0-14岁人口占比	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	24%	24%
	65岁以上人口占比	10%	10%	10%	10%	11%	11%	11%	11%	12%
	15-64岁人口占比	65%	65%	65%	65%	64%	64%	64%	64%	64%
	目标收入群体：前百分比	1.1%	1.3%	1.7%	2.3%	3.1%	4.1%	5.0%	5.9%	6.8%
	目标市场渗透率	0.1%	0.2%	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%	0.6%	0.8%	0.9%
	TO C端人形机器人需求量（万台）	1.7	2.8	5.3	9.5	15.7	25.8	34.1	43.9	54.8
TO B端	全球工业就业人数（亿人）	7.6	7.7	7.7	7.8	7.9	7.9	8.0	8.1	8.2
	全球服务业就业人数（亿人）	16.7	17.0	17.3	17.7	18.0	18.3	18.7	19.0	19.4
	人形机器人替代比例	0.002%	0.004%	0.01%	0.01%	0.02%	0.04%	0.06%	0.09%	0.13%
	TO B端人形机器人需求量（万台）	2.5	4.3	6.7	14.3	22.5	40.3	60.2	89.3	122.4
合计	人形机器人需求量（万台）	4.2	7.1	12.0	23.7	38.2	66.0	94.4	133.1	177.2
空心杯电机										
单机用量		12	12	12	12	12	12	12	12	12
均价（元）		1440	1296	1166	1050	945	850	765	689	620
市场空间（亿元）		7	11	17	30	43	67	87	110	132
YOY			53%	52%	78%	45%	56%	29%	27%	20%

3.6 竞争格局：海外厂商占据市场龙头，国产替代进行时

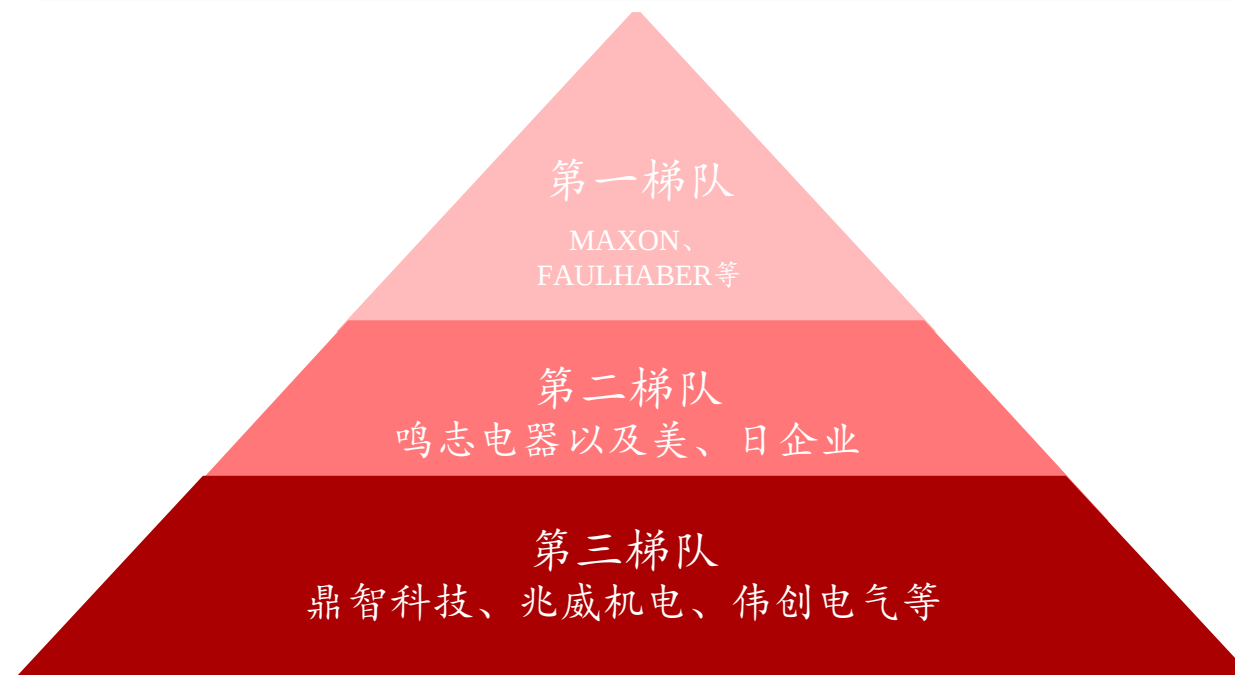
- **中国与欧洲为空心杯电机的主要市场，但高端市场仍被欧洲企业主导。**根据QYResearch数据，2021年中国和欧洲的空心杯市场份额分别占全球总市场的34.8%、25.9%。
- **空心杯全球竞争格局高度集中，目前海外厂商为主。**全球空心杯电机市场的主要制造商包括瑞士MAXON、德国FAULHABER、瑞士PORTESCAP、美国Allied Motion Technologies公司，这四家顶级制造商占据了市场份额的65%以上。由于瑞士、德国等欧洲以及北美厂商对空心杯电机研发较早，具有性能优异的生产设备和稳定成熟的工艺，行业地位较高，因此产品竞争优势明显，形成一定程度垄断。而国内大多数厂商主要受制于核心技术的突破。

2021年空心杯市场份额



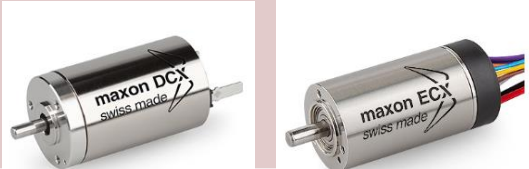
■ 中国 ■ 欧洲 ■ 其他

空心杯电机品牌梯队



3.6 竞争格局：海外厂商占据市场龙头，国产替代进行时

□ 国内外空心杯电机制造商在软实力和硬实力均有一定差距。硬实力的差距主要集中在电机材料选用、本体设计和机电控制方案配置，国外企业具有先进的加工镀膜工艺与更扎实的电机材料理论研究、小尺寸电机设计能力强和上千种方案进行驱动配置；软实力的差距主要集中于市场影响力、客户资源、品牌声誉与市场认可度等。

主要生产厂商	成立年份	主营业务	产品图例
瑞士MAXON	1961	公司是全球领先的高精度驱动系统供应商，分布于全球40个国家。主要产品有无刷和有刷DC电机、行星齿轮箱、正齿轮箱、特殊齿轮箱、传感器、编码器、伺服放大器、位置控制器等。	
德国FAULHABER	1947	公司是精细机械和机电技术方面领域的杰出代表，在全球30多个国家与地区设有销售代表和分公司。主要产品有直流电机、内置驱动器电机、直线电机、减速箱、线性致动器、编码器、电子控制、配件等。	
鸣志电器	1994	公司专注于运动控制领域核心技术及系统级解决方案的研发和经营，核心业务围绕自动化和智能化领域有序外延扩张。分公司遍及北美、欧洲、日本和东南亚全球员工总数已达3,000多人。主要产品包括旋转步进电机、无刷无槽电机、直线步进电机、直流无刷电机、伺服电机、智能驱动、智能照明系统等。	
鼎智科技	2008	公司专注于直线丝杆步进电机，深耕精密直线运动系统领域，在中国和美国设有生产基地，在中国深圳、美国加州和韩国设有销售分部。主要产品线性执行器、混合式旋转步进电机、直流有刷电机、直流无刷电机、空心杯电机、简易模组、微型夹爪、音圈电机、运动控制器等。	

主要生产厂商	成立年份	主营业务	产品图例
伟创电气	2013	公司自设立以来一直专注于电气传动和工业控制领域，主营业务为变频器、伺服及控制系统等产品的研发、生产及销售，产品广泛应用于数控机床、纺织机械、矿用设备、起重、高效能源、轨道交通、智能装备、电液伺服、印刷包装、石油化工等行业。	
雷赛智能	1997	公司是国家级专精特新“小巨人”企业，专业从事智能装备运动控制核心部件的研发、生产、销售与服务，主要产品为伺服系统、步进系统、控制技术类产品等，产品广泛应用于新能源、半导体、工业机器人等行业，为全球智能装备行业客户提供稳定可靠、高附加值的运动控制核心部件及系统级解决方案。	
禾川科技	2011	公司是一家技术驱动的工业自动化控制核心部件及整体解决方案提供商，主要从事工业自动化产品的研发、生产、销售及应用集成。为客户提供由核心部件、机器自动化到数字化工厂的整体解决方案，产品矩阵已经实现工业自动化领域“控制+驱动+执行传感+机电一体化”的覆盖，并在近年沿产业链上下游不断延伸，涉足上游的工控芯片、传感器和下游的高端精密数控机床等领域。	
拓邦股份	1996	公司主营业务为智能控制系统解决方案的研发、生产和销售，即以电控、电机、电池、电源、物联网平台的“四电一网”技术为核心，面向家电、工具、新能源、工业和智能解决方案等行业提供各种定制化解决方案。	

国内厂商在生产效率、产品寿命、精度方面，较海外厂商仍存在一定的技术差距。在产品设计层面上，国内厂商与国外先进厂商相比尺寸精密度有差距，国外企业小尺寸电机设计能力强，直径最小尺寸可至6mm，MAXON和FAULHABER的无刷空心杯电机尺寸可达4mm和3mm，而国内企业少有12mm以下尺寸的空心杯电机产品。在相同的8mm直径、6V额定电压的有刷空心杯参数对比下，国内电器在功率、最大效率的表现较国外厂商有一定差距。

表：空心杯电机主要厂商产品尺寸范围

厂商	有刷空心杯直径（mm）	无刷空心杯直径（mm）
瑞士MAXON	6-90	4-90
德国FAULHABER	6-38	3-44
瑞士PORTESCAP	8-35	8-35
鸣志电器	8-24	13-30

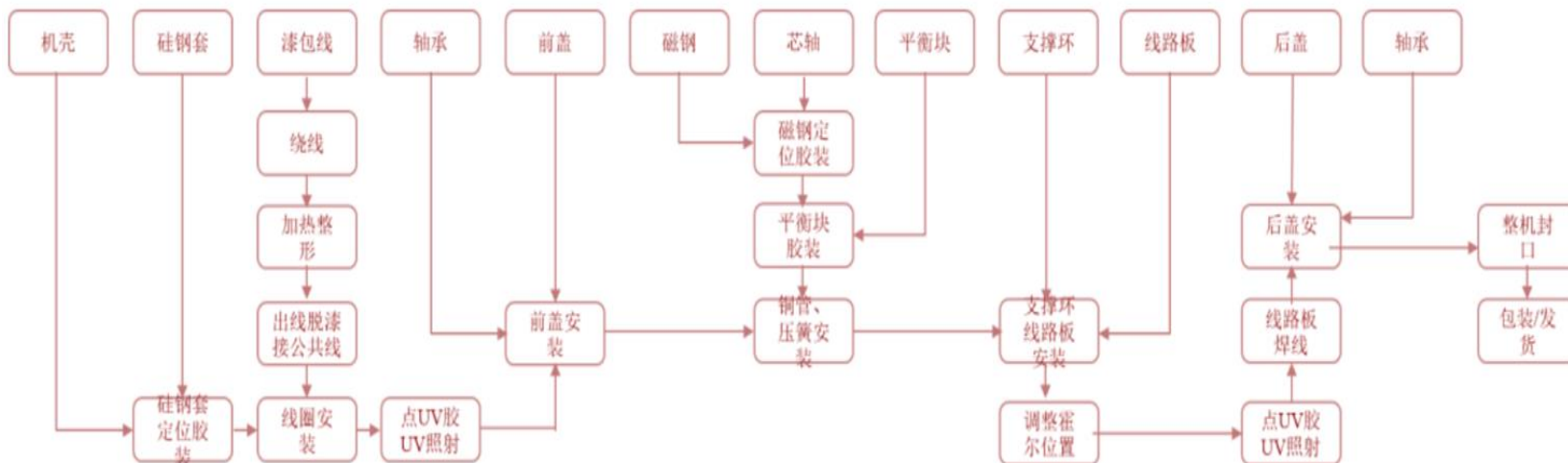
表：空心杯电机产品对比

厂商代表产品	直径（mm）	功率（W）	机械时间常数（ms）	电压（V）	空载转速（rpm）	额定转矩（mNm）	最大效率（%）
MAXON： DCX 8 M Ø8 mm	8	0.5	4.18	6	11000	0.637	71
FAULHABER： 0816K006SR	8	1.2	6.5	6	13500	0.69	69
PORTESCAP： 08GS61	8	0.5	5.3	6	11000	0.64	72
鸣志电器： DCU08017P06	8	0.3	6.6	6	13500	0.85	55

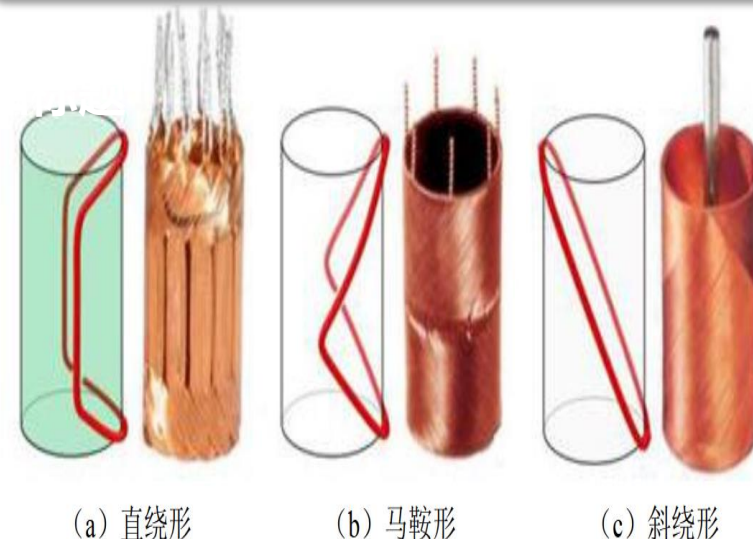
3.7 绕线工艺：空心杯制造重要环节，以斜绕形和马鞍形为主

- 空心杯电机的生产工艺主要分为四个步骤：铁芯制造、线圈绕制、转子制造和电子调速器的组装。其中，铁芯制造是生产过程中的关键环节，需要精确的加工和组装工艺。线圈绕制则是将铁芯和线圈进行组合，制造定子。转子制造是将磁钢和轴承进行组装，制造转子。最后再将电子调速器和传感器进行组装。
- 空心杯电机常用的线圈绕法有直绕形、马鞍形、斜绕形三种形式。其中，直绕形绕制方法工艺较为复杂，多用于较长绕组结构，常为多次绕制而成。斜绕形和马鞍形在绕制工艺上相对简单，国内外绕线机多采用这两种方式。

空心杯电机生产流程



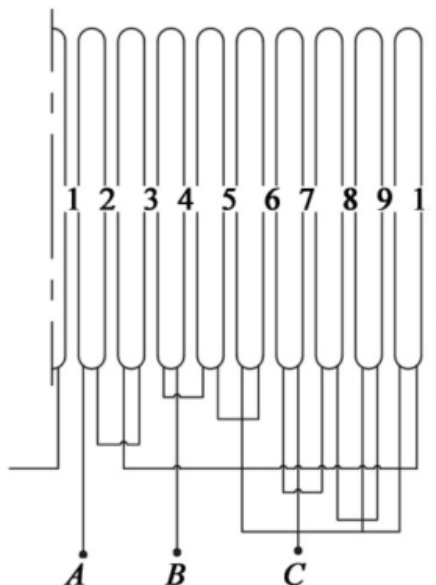
空心杯电机线圈绕制形式



3.8 直绕式：集中绕组的优化与挑战，提升槽满率与端部尺寸

- 直绕式是指元件有效导体部分与电枢轴线平行的绕组，属于集中绕组。绕制时先按匝数要求在绕线模上绕制成普通环形的漆包线元件，在排线芯轴上按绕组展开图连成绕组，两端部涂以适当的粘结剂并固化成型。
- **优点：**槽满率较高，绕线杯中部壁薄。
- **缺点：**由于绕制线圈时漆包线排布不整齐有堆叠，故整个电枢杯线圈排布较乱，且排线时端部须留有走线余量，从而导致端部尺寸较高。

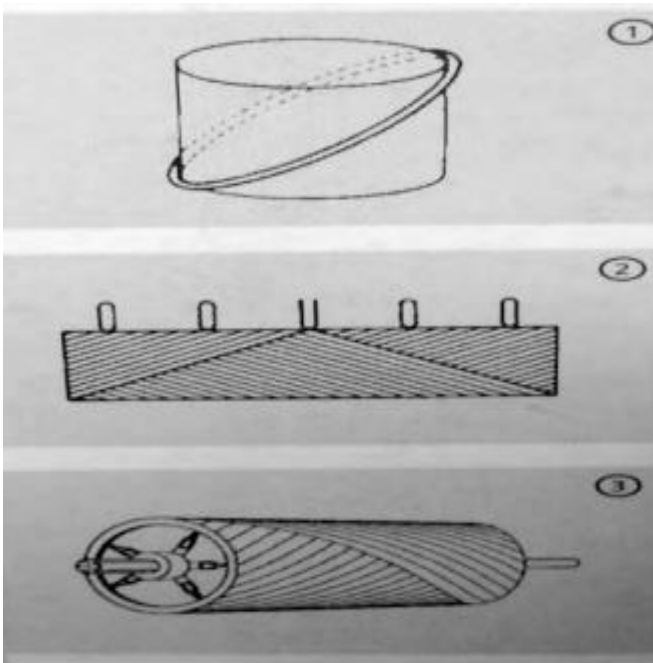
直绕式绕线杯平面连接图



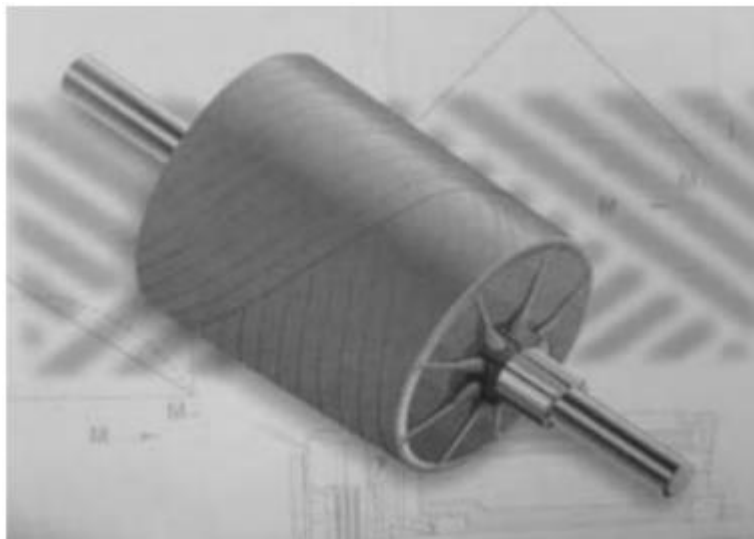
3.9 斜绕式：融合简易操作与高效生产，槽满率存在挑战

- 斜绕式也称蜂房式绕组，采用蜂房式绕发制成，中间留抽头，为了能连续绕制，必须使元件有效边和电枢轴线成一定倾斜角度。
- **优点：**端部尺寸较小。斜绕组以其绕线工艺简单易操作被广泛应用，国外两大知名空心杯电机生产公司德国某公司和瑞士某公司均采用斜绕组电枢杯，采用先进的绕线工艺技术，采用自动化设备一次性绕制成型，合格率 100%，绕组杯平整度、一致性很好。
- **缺点：**由于斜绕式连续绕制需要一定的排线角，使得漆包线交叠，槽满率较低。

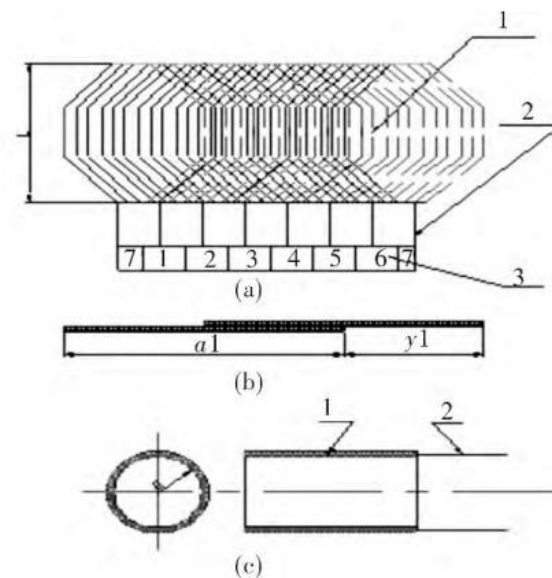
德国某公司斜绕组电枢杯绕制过程



德国某公司斜绕组电枢杯成品



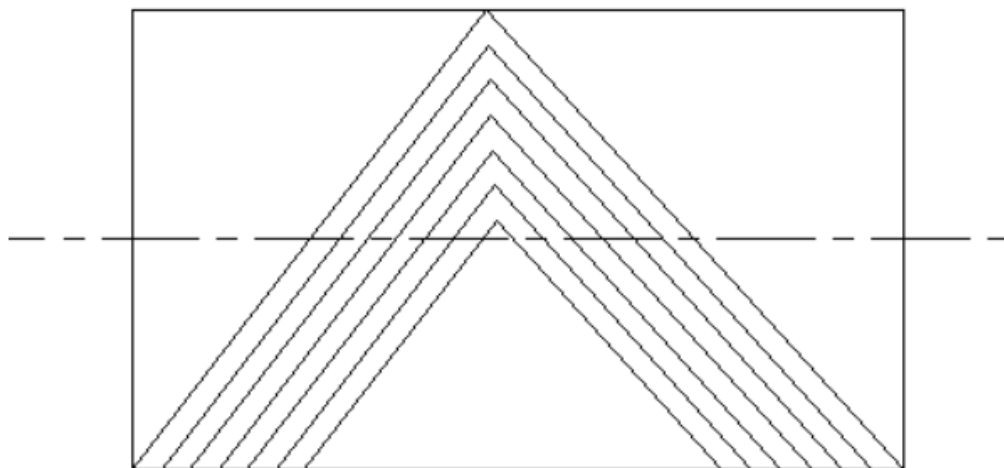
瑞士某公司斜绕组电枢杯绕制过程



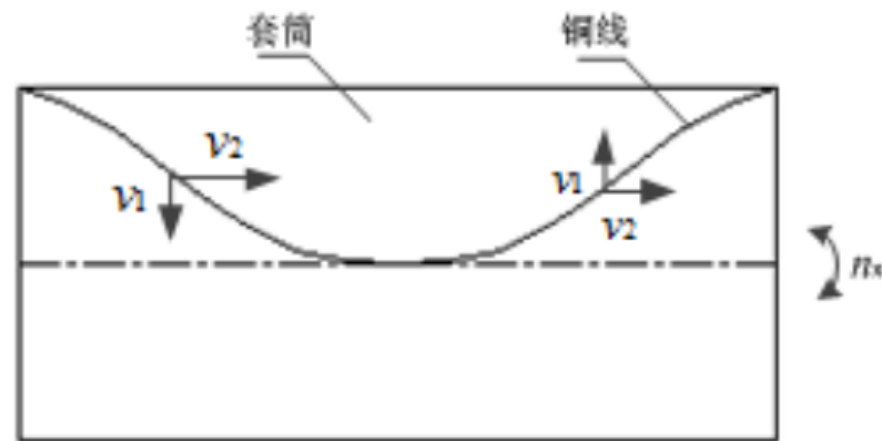
3.10 马鞍形：提升磁体效率与降低材料消耗，绕制质量与效率较低

- 线圈排列形状上，马鞍形线圈的每匝线圈呈现马鞍的形状一层层紧密排列。
- **优点：**线圈排列纹路清晰，铜线之间不发生干涉，线圈两端重叠率较低；线圈材料耗费小，导线总长减小，线圈内阻小；相同的磁体，利用效率更高。
- **缺点：**国内马鞍形线圈多是卷绕法的成型方式，多采用手工或半自动化设备，自动化程度低，绕制线圈质量和效率较低。

马鞍形空心杯线圈形状



马鞍形空心杯线圈成型过程



3.11 空心杯绕线：海外自动化程度相对较高，国内待弯道超车

	主营业务	绕线机代表产品
瑞士Meteor	公司是世界上有着较高占有率的绕线机供应商，在行业内具有较为先进的技术和强大的研发实力，研制出诸多类型的线圈绕制设备，攻克了较多技术上的难题，在多个方面有着独特的解决方案。	 M21 型绕线机  M22 半自动绕线机
日本田中精机株式会社	公司是世界绕线机生产的鼻祖，第一个将计算机控制用于全自动绕线机上，发明了磁铁无摩擦张力器，研发出 CNC 可翻转的多轴绕线设备的公司。	 BAS-01-30  BAS-01-40
中国中特科技工业	公司是我国从事电机设备研究与制造较早的企业，为电机制造企业提供了个性化系统解决方案。特别是在无刷电机生产设备领域，该公司生产的多款自动以及半自动绕线设备是国内该行业专用设备中的佼佼者，成为国内较受欢迎的绕线设备生产厂商。	 全自动双轴空心杯绕线机
东莞市台立电子机械有限公司	公司生产的绕线设备能够应用汽摩磁电机、汽车雨刷电机等汽车上的电机线圈绕制，另外可绕制航模电机等定子或转子线圈。	 TL-S702A 自动双轴飞叉绕线机

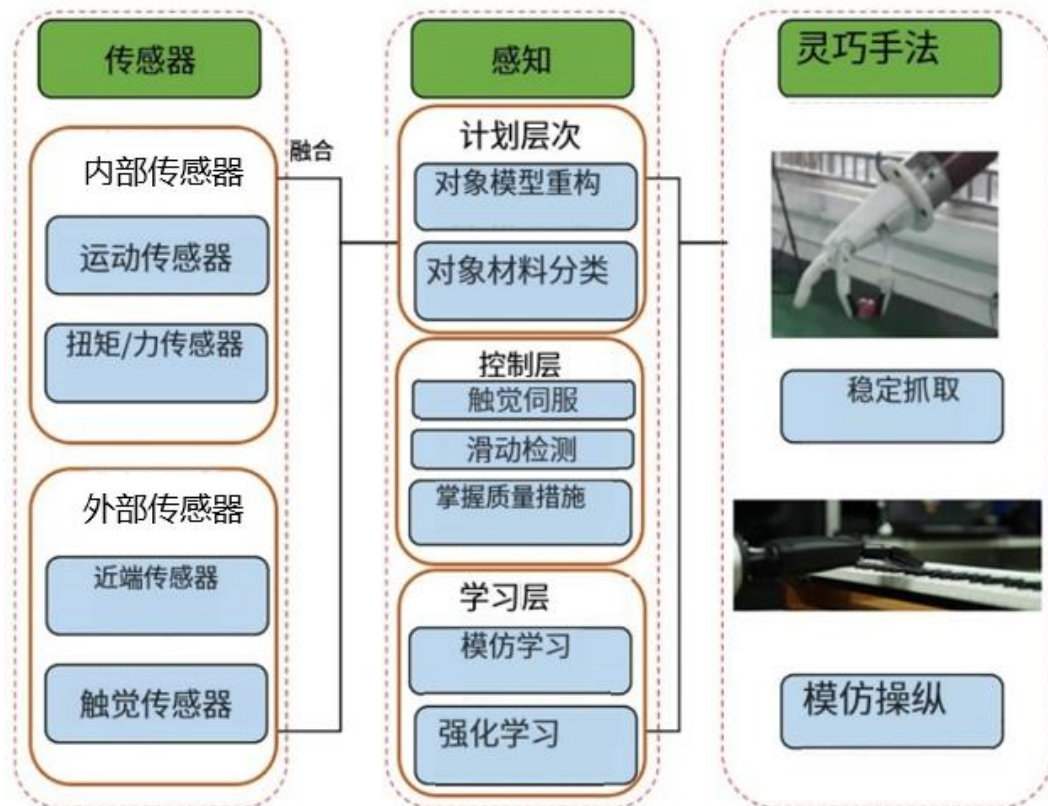
04

传感系统： 灵巧手的感知系统， 实现精准调控

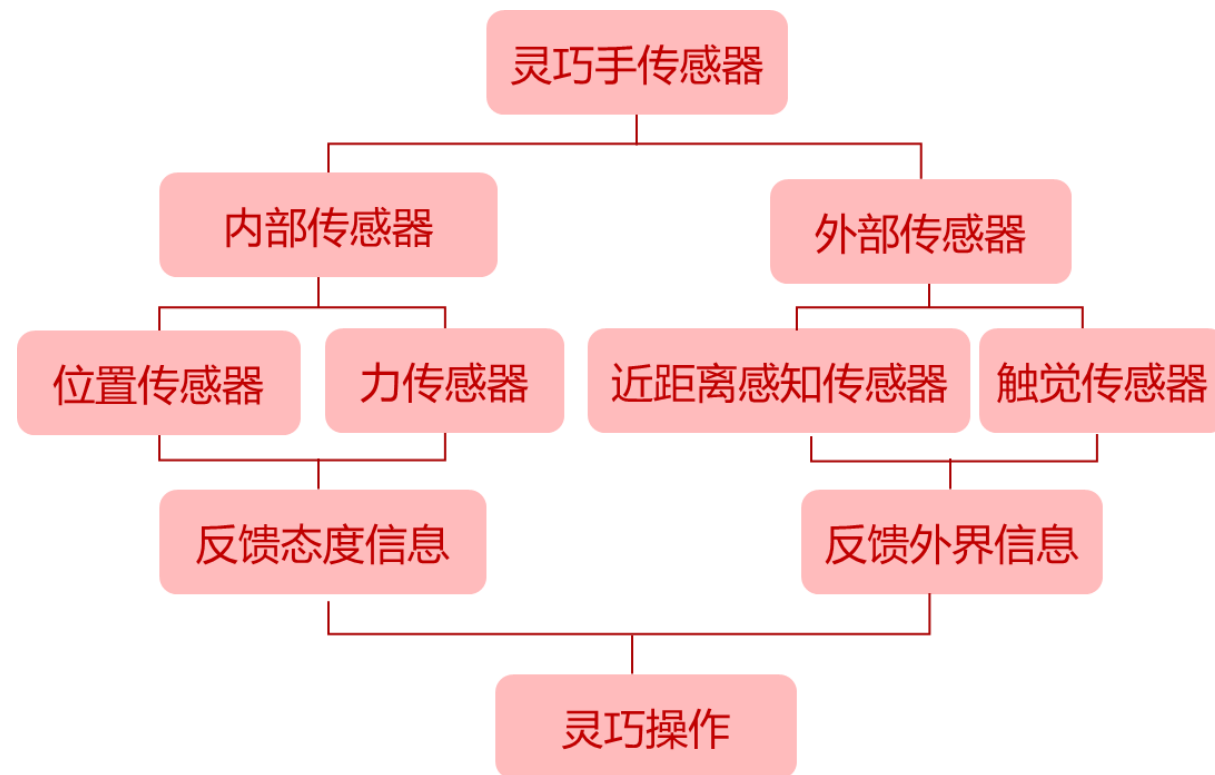
4.1 传感器：内外融合与协作，感知动态信息与外界环境

- 根据传感器在灵巧手中的布局和功能，分为内在传感器和外在传感器两类。内在传感器反馈机器人身体的动态信息，例如手关节角度、关节扭矩和肌腱拉力，而外部传感器则感知外部环境，例如压力、力、温度和光滑度。应用不同的算力规划、控制和学习来实现灵巧机械手的运动和控制。

传感器用于灵巧手的感知方法及其操作



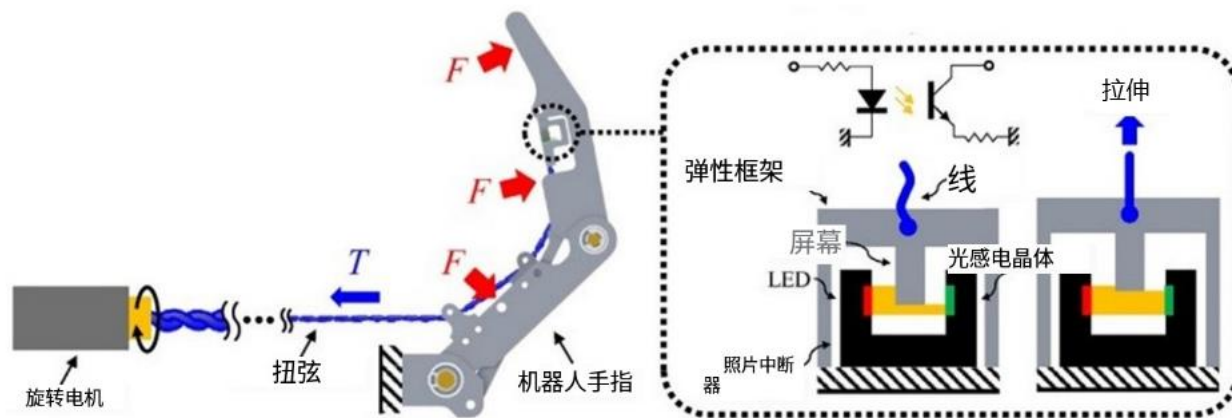
灵巧手传感器分类



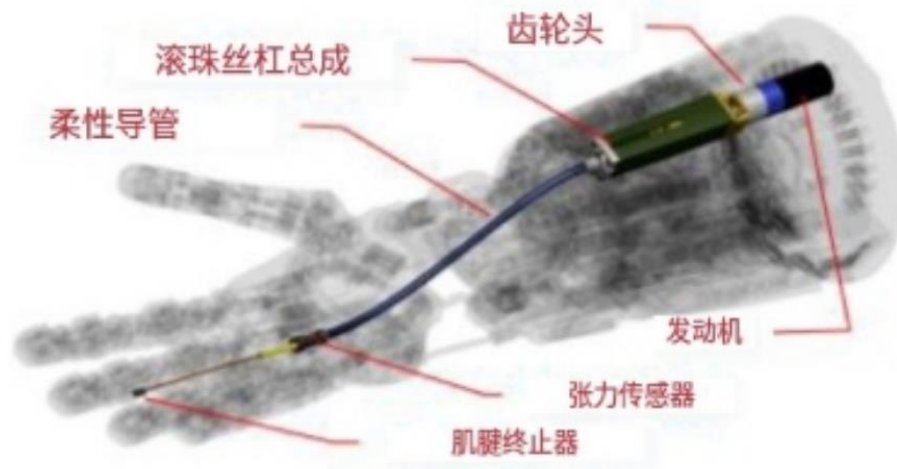
4.2 力传感器：灵巧手关节处感知并度量力的核心

- 力传感器是感知并度量力的关键部件。力矩传感器又称为扭矩传感器，可对各种旋转或非旋转机械部件上的扭转力矩进行感知检测，能够将扭力的物理变化转换成电信号，具有精度高、频响快、可靠性好、寿命长等优点。力/扭矩传感器提供机械手的动态信息，是机械手进行稳定、灵巧的抓取和操纵的必要条件。如Robonaut 2就使用了一种高集成度的力传感器来准确测量张力信息。

灵巧手手指的基于光电断路器的力传感器



Robonaut 2使用高集成度的力传感器



4.3 触觉传感器：目前主要有MEMS、电子皮肤两种技术实现路径

□ **MEMS压力阵列触觉传感器：**通过测量介质的压力来实现对物理量的检测。其基本原理是利用微机电系统技术制造出微小结构，通过这些结构对介质产生的压力进行敏感检测，并将检测到的信号转换为可读取的电信号。特斯拉Optimus-Gen2灵巧手指尖部位就使用了列阵式触觉传感器，可以实现捏住鸡蛋的抓取易碎物品的能力。

图：五类不同原理的触觉传感器的对比分析

原理	优点	缺点
压阻式	较高的灵敏度;过载承受能力强	压敏电阻漏电流稳定性差;体积大，不易实现微型化;功耗高;易受噪声影响;接触表面易碎
光电式	较高的空间分辨率;电磁干扰影响较小	多力共同作用时，线性度较低;数据实时性差;标定困难
电容式	测量量程大;线性度好;制造成本低;实时性高	物理尺寸大，不易集成化;易受噪声影响，稳定性差
电感式	制造成本低;测量量程范围大	磁场分布难以控制，分辨率低;不同接触点的一致性差
压电式	动态范围宽;有较好的耐用性	易受热响应效应影响

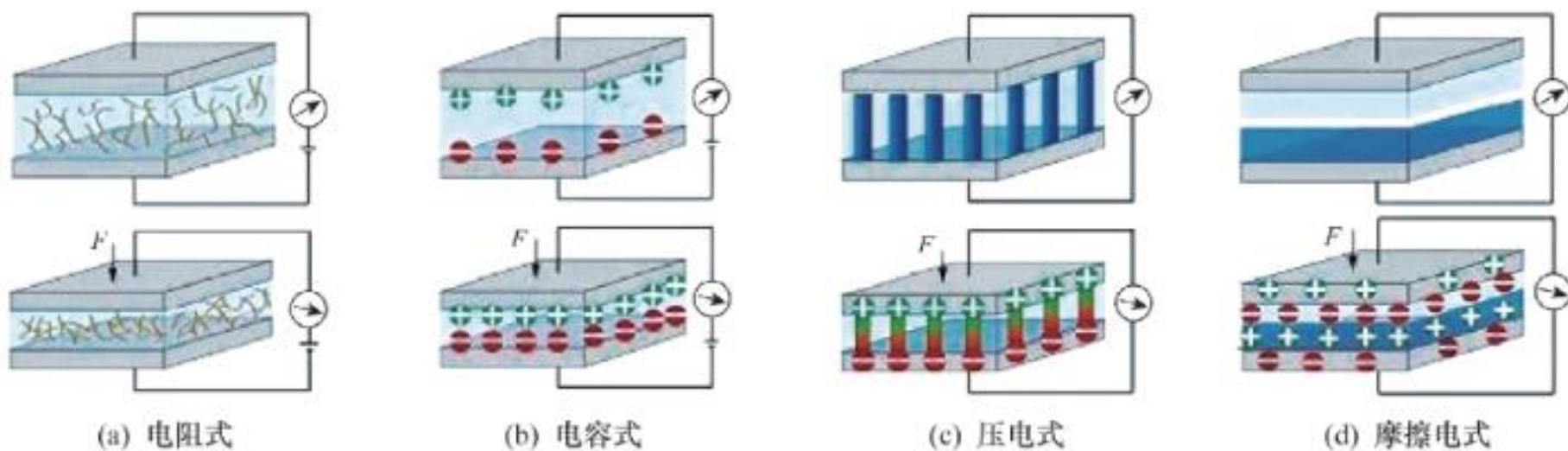
图：Optimus-Gen2 灵巧手使用触觉传感器



4.4 触觉传感器：目前主要有MEMS、电子皮肤两种技术实现路径

□ **柔性传感器（电子皮肤）**：是利用柔性材料的物理特性，将外部的力学量转换为电学量，从而实现对触觉感知的传感器产品，具有高灵敏度、高柔韧性、响应速度快、延展性高甚至可以自由弯曲折叠等特点。目前主流的自供电方式为压电、摩擦电和热电三种。其中，压电领域的研究开展最早，在材料、性能和器件等方面取得诸多研究成果；摩擦电作为新兴的能源供给研究领域，近年来引起国内外广泛关注，其相关研究和应用得到迅速发展；热电领域的研究在热能转换方面备受关注，且能实现温度监控，未来集成式可实现多信号检测的自供电传感器将成为研究重点。

图：电子皮肤的四种转换机制



05

投资建议及 风险提示

5.1

核心标的：聚焦人形机器人灵巧手核心部件及设备供应龙头

日期:	2024/3/1				EPS (元)				PE				PB (2022)	ROE (2022)
	代码	公司名称	股价 (元)	总市值 (亿元)	2022A	2023E	2024E	2025E	2022A	2023E	2024E	2025E		
空心杯电机	603728	鸣志电器	59.9	251.6	0.6	0.4	0.7	1.1	101	139	82	55	5.3	9.6
	300124	汇川技术	63.9	1,709.1	1.6	1.8	2.3	2.9	39	35	28	22	10.1	24.2
	688320	禾川科技	33.5	50.6	0.7	0.9	1.2	-	52	36	27	-	4.6	8.3
	002139	拓邦股份	8.9	113.1	0.5	0.6	0.8	-	19	15	12	-	2.4	10.8
	688698	伟创电气	31.7	66.7	0.8	1.4	1.8	-	41	23	17	-	3.9	15.1
	300660	江苏雷利	27.0	85.6	1.0	1.1	1.4	1.7	27	24	19	16	2.1	9.1
	873593	鼎智科技	36.3	34.9	3.1	1.2	1.6	-	12	30	22	-	27.5	53.1
	002979	雷赛智能	17.7	54.8	0.7	0.4	0.7	0.9	25	41	27	20	6.2	19.4
	301368	丰立智能	44.8	53.7	0.5	-	-	-	90	-	-	-	6.5	7.0
	300461	田中精机	17.2	26.8	-0.5	-	-	-	-34	-	-	-	10.0	-14.0
传感器	603662	柯力传感	30.4	85.9	0.9	1.1	1.4	1.7	33	28	22	18	2.1	11.9
	300007	汉威科技	16.5	53.9	0.9	1.1	1.0	1.3	19	15	16	12	2.1	10.7
	300354	东华测试	45.6	63.0	0.9	1.3	1.8	2.5	52	36	25	18	9.9	22.3
	688322	奥比中光-UW	32.0	127.9	-0.8	-0.2	0.2	-	-42	-170	213	-	2.6	-10.5
	688582	芯动联科	32.6	130.4	0.3	0.6	0.8	-	96	56	41	-	0.0	20.6
	002456	欧菲光	8.7	281.8	-1.6	0.0	0.3	0.6	-5	-	-	-	3.0	-88.9

- 1) **中美贸易冲突超预期**：若美国对人形机器人中国配套供应链厂商加强限制，将对国产厂商发展造成不利影响；
- 2) **技术迭代不及预期**：灵巧手涉及到的技术很多，例如驱动技术、传感技术等，若技术迭代速度较慢，将对灵巧手的发展速度造成一定影响；
- 3) **产业化进展不及预期**：目前灵巧手尚处于产业化初级阶段，市面上能够量产灵巧手的厂商较少，若产业化不及预期，可能会对产业链上的供应商造成一定影响。

行业的投资评级

以报告日后的6个月内，行业指数相对于沪深300指数的涨跌幅为标准，定义如下：

- 1、看好：行业指数相对于沪深300指数表现 + 10%以上；
- 2、中性：行业指数相对于沪深300指数表现 - 10% ~ + 10%以上；
- 3、看淡：行业指数相对于沪深300指数表现 - 10%以下。

我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重。

建议：投资者买入或者卖出证券的决定取决于个人的实际情况，比如当前的持仓结构以及其他需要考虑的因素。投资者不应仅仅依靠投资评级来推断结论

法律声明及风险提示

本报告由浙商证券股份有限公司（已具备中国证监会批复的证券投资咨询业务资格，经营许可证编号为：Z39833000）制作。本报告中的信息均来源于我们认为可靠的已公开资料，但浙商证券股份有限公司及其关联机构（以下统称“本公司”）对这些信息的真实性、准确性及完整性不作任何保证，也不保证所包含的信息和建议不发生任何变更。本公司没有将变更的信息和建议向报告所有接收者进行更新的义务。

本公司的客户作参考之用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。

本报告仅反映报告作者的出具日的观点和判断，在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议，投资者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。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及/或其关联人员均不承担任何法律责任。

本公司的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。本公司没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。本公司的资产管理公司、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。

本报告版权均归本公司所有，未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、发布、传播本报告的全部或部分内容。经授权刊载、转发本报告或者摘要的，应当注明本报告发布人和发布日期，并提示使用本报告的风险。未经授权或未按要求刊载、转发本报告的，应当承担相应的法律责任。本公司将保留向其追究法律责任的权利。

浙商证券研究所

上海总部地址：杨高南路729号陆家嘴世纪金融广场1号楼29层

北京地址：北京市广安门大街1号深圳大厦4楼

深圳地址：深圳市福田区深南大道2008号凤凰大厦2栋21E02

邮政编码：200127

电话：(8621)80108518

传真：(8621)80106010

浙商证券研究所：<http://research.stocke.com.cn>