



华安证券

HUAAN SECURITIES

证券研究报告

人形机器人行业深度报告(二): 灵巧手带来空心杯电机增量市场

分析师：尹沿技 (SAC执业证书S0010520020001)

2023年10月25日



报告要点

- **国内灵巧手生产商具有降本量产优势：**德国Bebionic仿生灵巧手价格至少32万元/只，而因时灵巧手价格为5万元/只，我们认为可以满足人形机器人对灵巧手的基本要求，有望凭借价格优势实现一定的市场占有率。
- **2028年人形机器人将为灵巧手带来276亿元的市场：**Markets and Markets报告预测人形机器人市场规模将从2023年的18亿美元增长到2028年的138亿美元，参考特斯拉Optimus量产目标售价2万美元，预测2028年人形机器人的销售量为69万个，灵巧手销售量为138万只。我们推测Optimus目前的成本约为31.6万元，参考Optimus整体价格降幅53.8%，假设到2028年灵巧手的价格降幅为60%，即从5万元/只降为2万元/只，那么2028年人形机器人产业将为灵巧手带来276亿元的市场。
- **特斯拉灵巧手技术路线：**特斯拉灵巧手为电机驱动+腱绳传动的内置式灵巧手，采用欠驱动方案以降低成本。参考其他典型灵巧手的电机方案，我们推测特斯拉灵巧手用的是无刷空心杯电机，直径约为13mm。
- **空心杯电机国产替代加速：**空心杯电机技术壁垒一是空心杯线圈绕组的设计和加工，二是绕线设备。鸣志电器产品达到了国际先进水平，且具有明显的价格优势，有望国产替代，且人形机器人会促使国内生产商加大研发投入，加快替代速度。目前空心杯电机主要被国外生产商所占据，国内生产商总体所占份额约为15%，预计到2028年将提升到40%。
- **关注空心杯电机投资机会：**鸣志电器的空心杯电机原价为1162元，我们推测未来可以降至465元。按照6电机驱动的方案，2028年人形机器人会带来 $465 \times 6 \times 138 \text{万} = 38.5 \text{亿元}$ 的市场规模增量，约占灵巧手市场规模增量的14%。根据QYResearch报告，2022年全球空心杯电机市场规模为54.6亿元，假设在空心杯电机行业的下游应用领域中人形机器人占比为5%，即应用于人形机器人领域的空心杯电机销售额为2.7亿元，我们预测2028年应用于人形机器人领域的空心杯电机销售额为41.2亿元，将为国内生产商带来 $41.2 \times 40\% = 16.5 \text{亿元}$ 的营收。
- **相关标的：**鸣志电器、江苏雷利、兆威机电、鑫宏业。
- **风险提示：**特斯拉机器人量产不及时的风险、灵巧手的相关技术不能有所突破的风险、国内宏观经济下行的风险。



目录

1

人形机器人为灵巧手带来增量需求

2

灵巧手如何模仿人手结构？

3

特斯拉灵巧手技术路线分析

4

灵巧手的空心杯电机

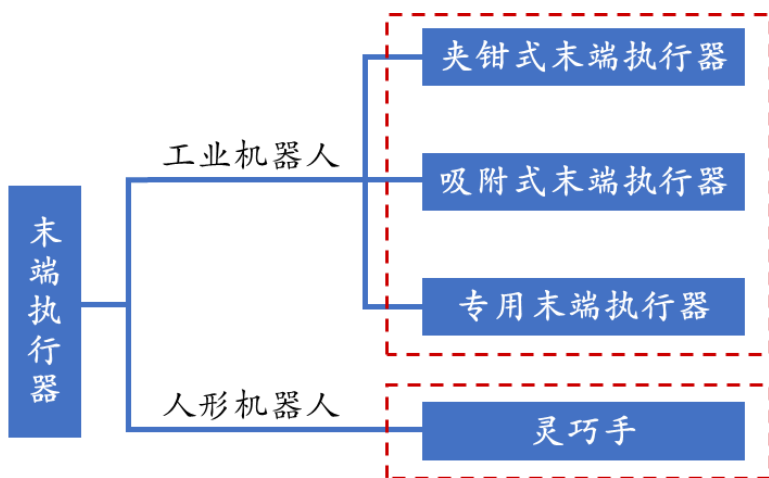
5

相关标的

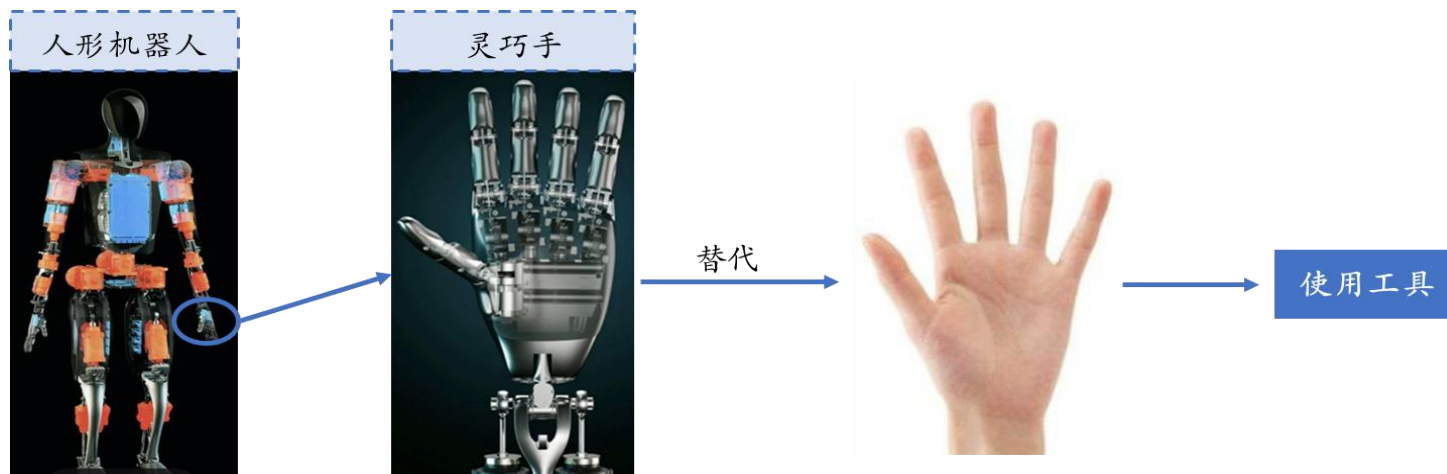
人形机器人使用工具，灵巧手不可或缺

- ▶ **人手是发挥功能的重要器官：**人类正常的工作与生活离不开双手的活动。在人与环境交互的需求中，手占据极其重要的地位。在我国永久性功能障碍分级标准中，人的上肢功能占全身功能的60%，手指功能占上肢功能的90%。
- ▶ **灵巧手通用性强：**人形机器人的灵巧手是一种基于人手运动学设计的特殊末端执行器，不同于工业机器人的末端执行器的通用性较差，只能完成焊接、喷漆等特定任务，灵巧手具备通用抓取能力。基本特征为至少具有3个手指，每指至少具有3个轴线不完全平行的自由度，通常还集成功觉、接近觉等多种传感器。
- ▶ **灵巧手将人手的功能映射给人形机器人：**人形机器人可以更加方便地使用为人设计的各种工具和仪器，一个主要原因就是灵巧手与人手有着相似的形态、结构和功能，能够完成灵活精细的抓取操作。**如果没有灵巧手，那么人形机器人几乎没有用，因为它没有执行主要功能的设备以达到特定目的。**

图表：末端执行器分类







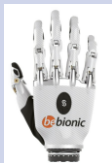
图表：灵巧手的作用



国产灵巧手有较大的价格优势

- ▶ **国外灵巧手的价格及应用领域：**灵巧手技术壁垒较高，目前国外一些灵巧手技术先进，但是设计难度大，零部件多，所以价格很高，一般用于科研领域，如Shadow灵巧手报价约220万元/只。用于假肢领域的仿生灵巧手灵活程度稍差一些，但价格也相对较低，如德国的Bebionic仿生灵巧手价格至少32万元/只。
- ▶ **国内灵巧手的价格优势：**灵巧手的国内生产商有因时机器人、浙江强脑科技、思灵机器人、蓝胖子机器智能等。其中浙江强脑科技的BrainRobotics仿生灵巧手应用领域是假肢行业，标准版价格是10.8万元/只。因时机器人是国内商业级五指灵巧手的龙头企业，因时灵巧手与特斯拉灵巧手有着类似的关节数和相同的电机数目，现在价格为5万元/只。我们认为，国内灵巧手生产商有望凭借降本优势进入特斯拉这样的人形机器人本体生产商的供应链。

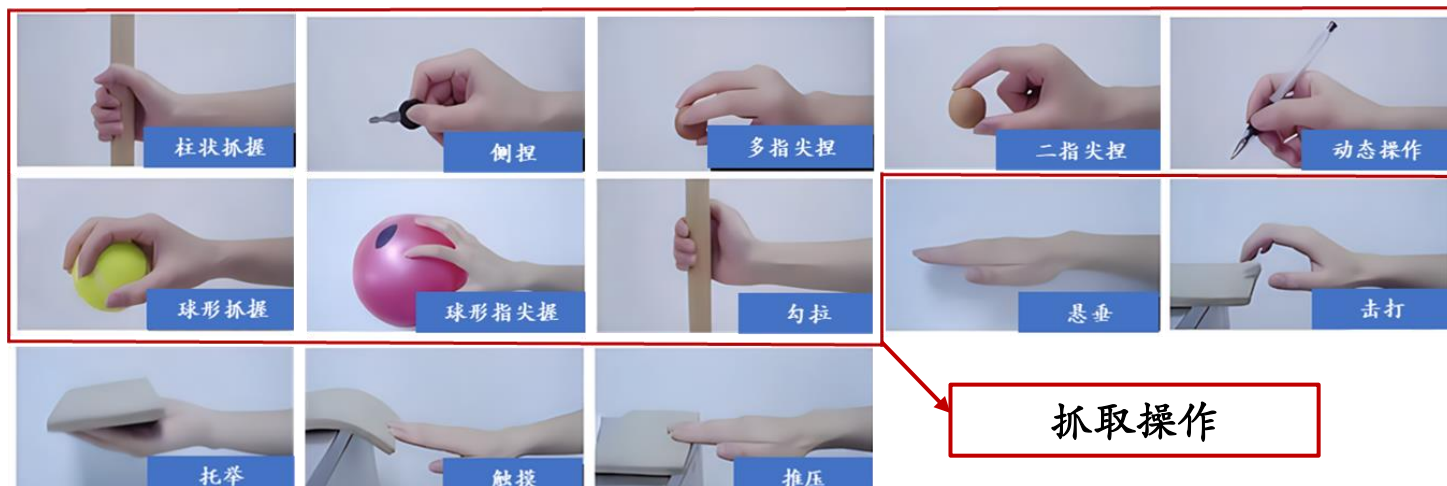
图表：典型国内外灵巧手对比

	特斯拉灵巧手	因时灵巧手	Shadow灵巧手	BrainRobotics仿生灵巧手	Bebionic仿生灵巧手
外观					
厂家	特斯拉（国外）	因时机器人（国内）	Shadow Robot（国外）	强脑科技（国内）	Ottobock（国外）
关节数目	11	12	24	10	10-12（估算）
电机数目	6	6	20	6	5
主要应用领域	人形机器人	人形机器人	科研	假肢	假肢
价格	未知	5万元/只	约220万元/只	10.8万元/只	至少32万元/只

国内灵巧手可实现灵活抓取

- **人手的抓取操作：**人手的运动涉及相当高的灵活性水平，能做出各种各样的动作，适用于执行各种需要抓握力的任务。人手有十三种基本功能，其中抓取操作有勾拉、侧捏、动态操作、球形抓握、球形指尖握、柱状抓握、二指尖捏和多指尖捏八种。
- **因时灵巧手可实现灵活抓取：**虽然国外灵巧手在性能上高于国内灵巧手，例如Shadow灵巧手比因时灵巧手关节更多，自由度更多，传感器更多。但是国内的因时灵巧手在功能上也可以实现灵活抓取，可以复现人手的主要抓取操作。我们认为以因时灵巧手为代表的国内灵巧手可以满足人形机器人对灵巧手的基本要求，有望凭借价格优势实现一定的市场占有率。

图表：人手的基本功能



图表：因时灵巧手抓取操作



特斯拉Optimus的BOM成本估算：灵巧手占比达31.64%

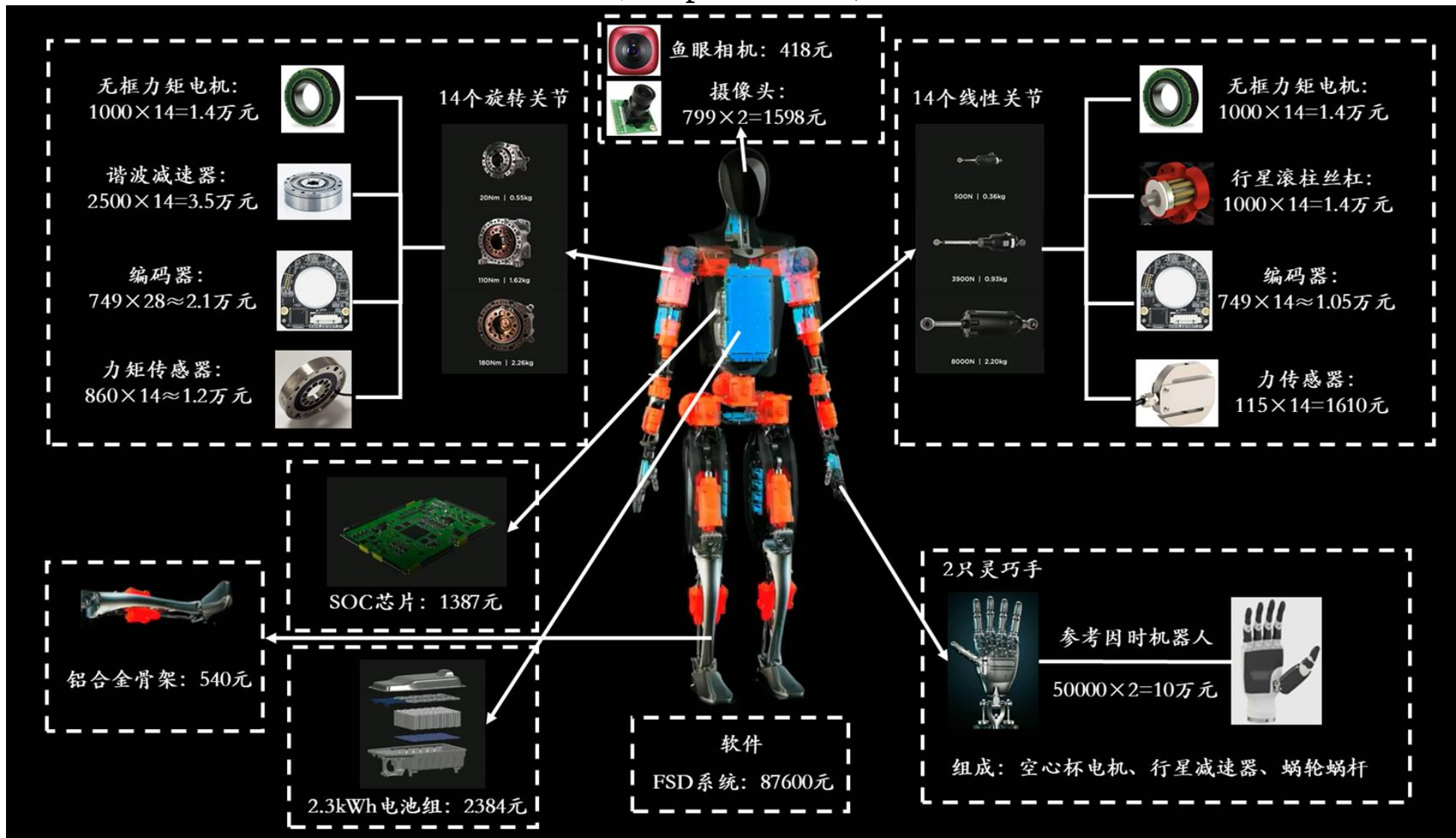
图表：特斯拉Optimus的BOM成本估算

分类	零件	数量	单价 (元)	总价 (元)	成本占比	价格来源		
灵巧手	灵巧手	2	50000	100000	31.64%	参考淘宝网的因时机器人灵巧手（和特斯拉灵巧手的电机数目一样均为6个）售价，假设为50000元/只		
关节	旋转关节	无框力矩电机	14	1000	14000	4.43%	共38.64%	参考爱采购的科尔摩根TBM 2G的价格，假设均价为1000元
		谐波减速器	14	2500	35000	11.07%		参考爱采购绿的谐波人形机器人专用谐波减速器，假设均价为2500元
		编码器	2×14	749	20972	6.64%		参考爱采购的零差云控品牌绝对值编码器价格，假设均价为749元
		力矩传感器	14	860	12040	3.81%		参考淘宝网的合肥力智100Nm力矩传感器的价格，假设均价为860元
	线性关节	无框力矩电机	14	1000	14000	4.43%		参考爱采购的科尔摩根TBM 2G的价格，假设均价为1000元
		行星滚柱丝杠（反向）	14	1000	14000	4.43%		特斯拉机器人的行星滚柱丝杠厂家为瑞士GSA，根据中国供应商网报价，单价为1000元
		编码器	14	749	10486	3.32%		参考爱采购的零差云控品牌绝对值编码器价格，假设均价为749元
		力传感器	14	115	1610	0.51%		特斯拉线性关节最大载荷为8000N，参考淘宝网的0-1吨德森特力传感器的价格，假设均价为115元
光学传感器	鱼眼相机	1	418	418	0.13%	参考淘宝网的华为鱼眼镜头报价418元		
	摄像头	2	799	1598	0.51%	推测摄像头和特斯拉汽车的一样都用了品牌Aptina，京东报价为799元		
控制器	SOC芯片	1	1387	1387	0.44%	SOC芯片为特斯拉自研，根据雷锋网消息，HW 3.0的芯片成本可估算为190美元，按照1:7.3汇率换算为1387元		
电池	电池包（2.3kWh）	1	2384	2384	0.75%	特斯拉从松下、LG和宁德时代这三家供应商处购买电池的平均价格为142美元/kWh，推测2.3kWh电池包价格为326.6美元，按照1:7.3汇率换算为2384元		
软件系统	FSD系统	1	87600	87600	27.72%	根据中关村在线消息，特斯拉FSD系统的最近价格下调至1.2万美元，按照1:7.3汇率换算为87600元		
骨架	材质为铝合金	27	20	540	0.17%	Optimus总重73kg，经过分析计算关节总重为38.28kg，电池包（2.3kWh）按照三元锂电池300Wh/kg的能量密度算得重量为7.7kg，估计骨架重量约为27kg，根据长江有色金属网可得铝合金单价约为20元/kg		
总计				316035	100.00%			

资料来源：淘宝网，爱采购，中国供应商网，京东，雷锋网，网易科技，中关村在线，特斯拉AI DAY 2022，长江有色金属网，华安证券研究所

特斯拉Optimus的各部位价值量

图表：特斯拉Optimus的各部位价值量



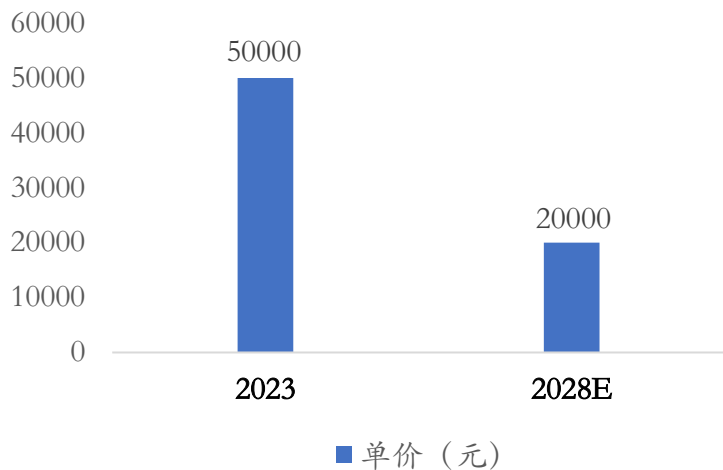
资料来源：淘宝网，爱采购，中国供应商网，京东，雷锋网，网易科技，中关村在线，特斯拉AI DAY 2022，长江有色金属网，华安证券研究所



放量推动降价，人形机器人将为灵巧手带来广阔市场

- ▶ **灵巧手销售量预估：**Markets and Markets报告预测人形机器人市场规模将从2023年的18亿美元增长到2028年的138亿美元，参考特斯拉Optimus量产目标售价2万美元，我们预测2028年人形机器人的销售量为69万个，灵巧手销售量为138万只。
- ▶ **灵巧手价格预估：**特斯拉灵巧手为自研，假设现在特斯拉灵巧手价格为5万元/只（参考电机数目一样的因时灵巧手的售价）。我们推测特斯拉Optimus目前的成本约为31.6万元，而特斯拉Optimus量产时目标售价为2万美元，按照1:7.3的汇率换算为14.6万元，整体价格降幅为53.8%。参考特斯拉Optimus的整体价格降幅，考虑到现在灵巧手市场规模小，技术壁垒高，我们预测到2028年灵巧手价格降幅约为60%，即降为2万元/只。

图表：灵巧手价格变化趋势预测



- ▶ **灵巧手的增量需求：**目前灵巧手的用户主要是一些科研机构，市场规模较小，人形机器人产业爆发必将带来灵巧手的增量需求。预测2028年人形机器人灵巧手的销售量将增长为138万只。按照之前对灵巧手价格降幅的预估，灵巧手价格降为2万元/只，那么2028年人形机器人产业将为灵巧手带来276亿元的市场。



目录

1 人形机器人为灵巧手带来增量需求

2 灵巧手如何模仿人手结构？

3 特斯拉灵巧手技术路线分析

4 灵巧手的空心杯电机

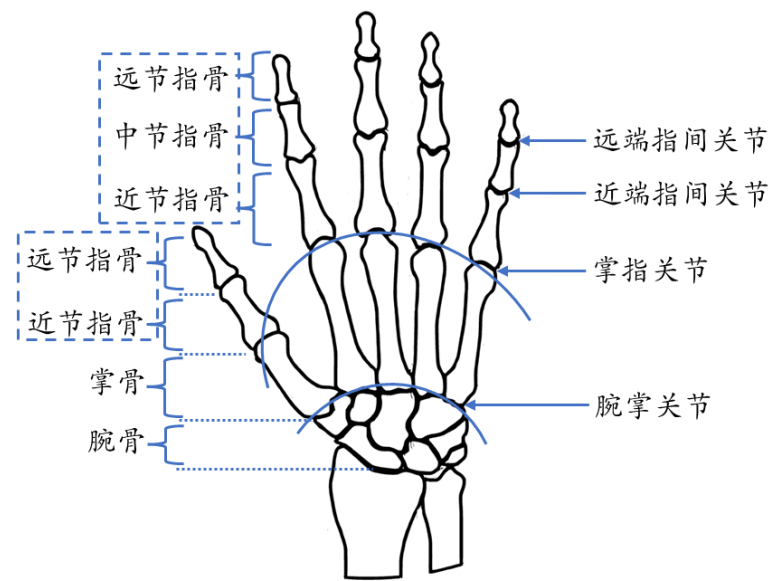
5 相关标的

人手的结构决定功能

- **灵巧手模仿人手结构：**人形机器人的灵巧手以人手的结构和功能为模仿对象，其研究的最终目标也是期望能够像人手那样对形态各异的物体进行稳定灵活的抓取操作。
- **手部的骨骼和关节结构，为手功能的实现提供了结构基础：**手部有27块骨头和19个关节，由34块肌肉牵引完成动作，被48条神经控制。手部骨头分为5块掌骨、14块指骨以及8块腕骨，指骨可分为近节指骨、中节指骨和远节指骨。手部关节主要包括腕掌关节、掌指关节和指间关节等。
- **人手具有独特的结构和功能：**与其他手指相比，大拇指有着独特的解剖结构，拇指功能的完善让人类能够更好地使用工具。人手可以通过弯曲手指并向手掌中心旋转，让拇指与其他四指指尖相碰，这是其他灵长类动物难以做到的。

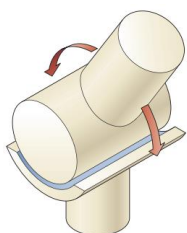
大拇指结构特殊，只有近节指骨和远节指骨两节指骨，其余四指都有三节指骨。大拇指的腕掌关节为双凹的鞍状结构状结构，所以大拇指虽然只有两节指骨，但却是手指中最灵活的。

《手功能评判标准》中规定，如果在手部结构完整的情况下，手功能为100%，其中大拇指占整个功能的40%，而其他手指中占比最高的也只占20%。



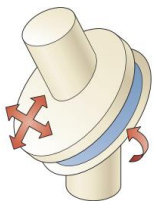
人手自由度分析：可以屈伸和外张内收

- **人手自由度：**可以根据解剖学假定人手自由度是21个（不计算手腕）。大拇指有5个自由度，其余四指各有4个自由度。
- **大拇指自由度：**指间关节有1个自由度；掌指关节有2个自由度，可以屈伸，也可以外张内收；腕掌关节是鞍状关节，有2个自由度，可以屈伸，也可以外张内收。
- **其余四指自由度：**2个指间关节各有1个自由度；掌指关节有2个自由度，可以屈伸，也可以外张内收。



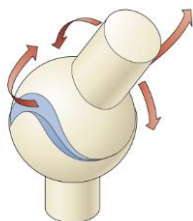
铰链关节

指间关节为铰链关节，可绕中心轴转动，只有1个转动自由度。



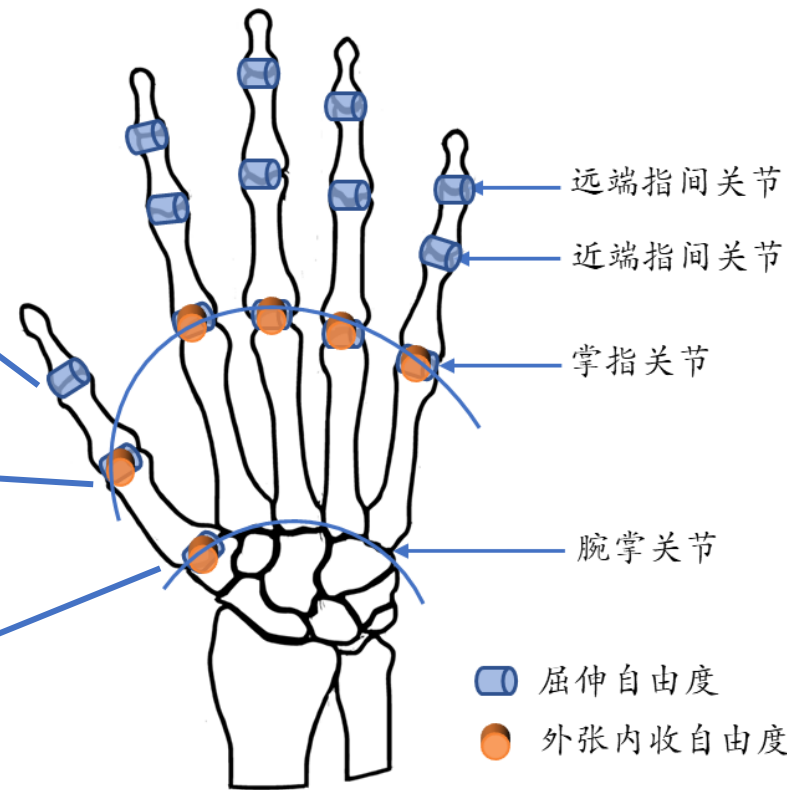
椭圆关节

掌指关节是椭圆关节，一个关节面是椭圆形的突起，另一个关节面是椭圆形的凹陷，运动发生在两个正交的轴上，有2个自由度。



鞍状关节

第一腕掌关节尤为特殊，属于双凹的鞍状关节，灵活性更高，构成拇指对掌和对指活动。



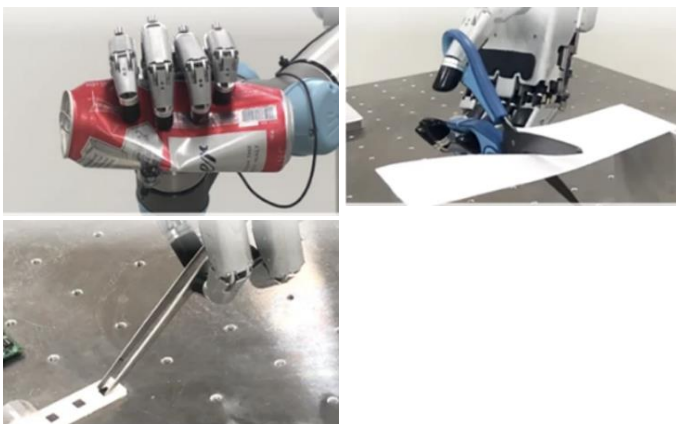
● 屈伸自由度

● 外张内收自由度

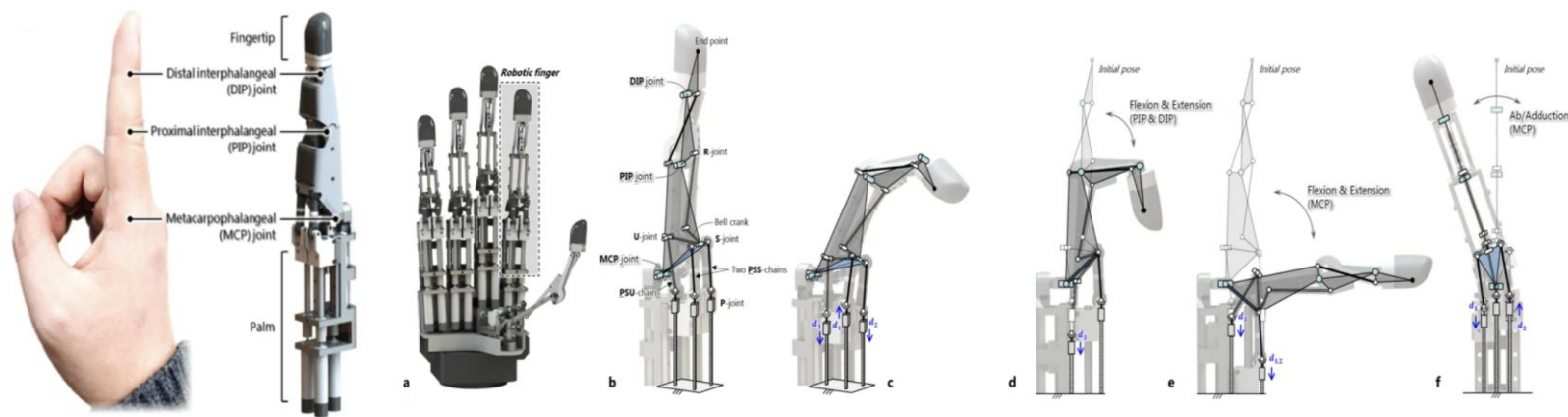
灵巧手模仿人手结构，有望替代人手功能

- ▶ **灵巧手模仿人手结构：**以ILDA灵巧手为例，ILDA灵巧手有5根手指和20个关节，与人手结构高度相似，电机都集成在手掌中，且手指都带有指尖传感器。
- ▶ **自由度分析：**ILDA灵巧手有15个自由度，实现了掌指关节中的2自由度运动和近端指间关节中的1自由度运动，掌指关节可以屈伸，也可以外张内收，近端指间关节可以屈伸，远端指间关节无自由度。
- ▶ **能够复刻人手部分功能：**ILDA灵巧手能够进行抓握、剪纸、用镊子精细夹取等动作，复刻了人手部分功能。随着技术的进一步突破，灵巧手有望替代人手功能，可以使用为人设计的各种工具和仪器。

图表：ILDA灵巧手的功能




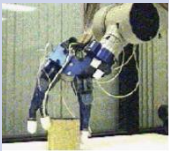
图表：ILDA灵巧手的仿人手运动学结构



灵巧手发展历程：从三指到五指，传感功能升级

- **灵巧手起始阶段：**1962年的Belgrade手被认为是世界上最早的灵巧手。1974年日本的Okada灵巧手是早期灵巧手的典型代表，它有3根手指，拇指有3个自由度，另外两根手指各有4个自由度，采用电机驱动和肌腱传动方式。
- **20世纪80年代：**20世纪80年代是灵巧手发展的一个里程碑，取得了许多成果，产生了具备了位置、力/力矩等基本传感功能的现代灵巧手。1983年美国的Stanford/JPL灵巧手有3个手指，每指有3个自由度，采用12个直流伺服电机作为关节驱动器，采用N+1型腱驱动系统传递运动和动力。Utah/MIT灵巧手有4个手指，每个手指有4个自由度，共16个自由度，采用2N型腱驱动系统传递运动和动力。

图表：几款典型灵巧手（1970-1990年）

时间	灵巧手	外观	手指数	自由度数	驱动	传动	传感	结构
1974年	Okada灵巧手		3	11	电机	腱	电机/关节位置， 电机电流	外置
1983年	UTAH/MIT灵巧手		4	16	气动	腱	电机/关节位置， 张力，触觉	外置
1983年	Stanford/JPL灵巧手		3	9	电机	腱	电机位置，张力， 指尖力，指尖触觉	外置

灵巧手发展历程：从三指到五指，传感功能升级

- 20世纪90年代：随着嵌入式硬件的发展，多指灵巧手的研究向着高系统集成度和丰富的感知能力提升的方向发展。20世纪90年代研制的典型灵巧手有DLR I灵巧手和NASA多指灵巧手，这些灵巧手在构型方面有所提高，能够根据抓取操作的需要进行灵巧手构型，感知能力也更加丰富。
- 21世纪初：21世纪初研制的典型灵巧手有Shadow灵巧手和HIT/DLR II灵巧手，系统的集成度、机电一体化程度有很大的提高，能够更加准确地完成一些人手的基本功能。

图表：几款典型灵巧手（1990-2010年）

时间	灵巧手	外观	手指数	自由度数	驱动	传动	传感	结构
1998年	DLR I灵巧手		4	12	直线电机	腱	电机/关节位置，指尖力	外置
1999年	NASA多指灵巧手		5	14	电机	腱	电机/关节位置，张力，触觉	外置
2004年	Shadow灵巧手		5	20	电机/气动	腱	关节位置，指尖触觉，肌腱力，温度	外置
2008年	HIT/DLR II灵巧手		5	15	电机	齿形皮带	电机/关节位置，关节力矩，6维指尖力，触觉	内置

资料来源：《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》，《机器人灵巧手的研究与发展》，华安证券研究所



目录

1 人形机器人为灵巧手带来增量需求

2 灵巧手如何模仿人手结构？

3 特斯拉灵巧手技术路线分析

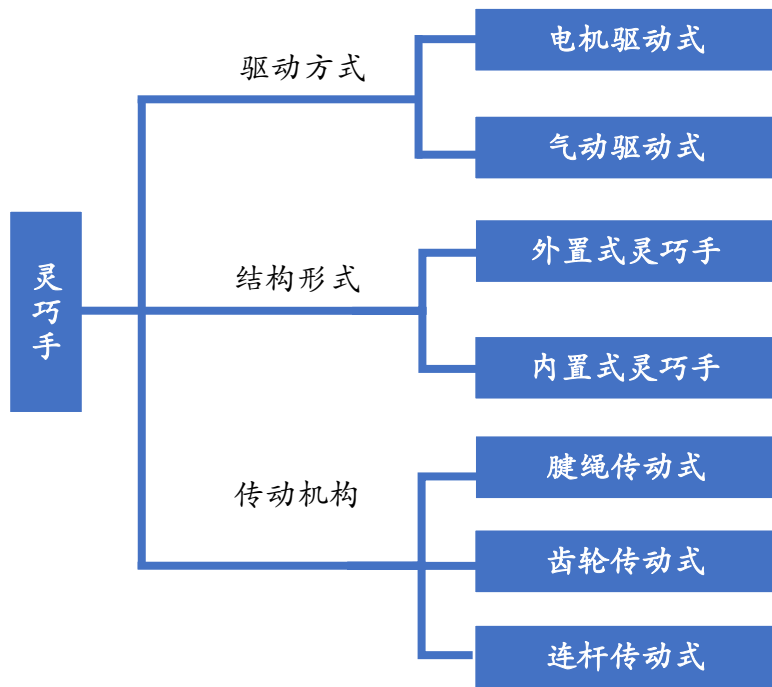
4 灵巧手的空心杯电机

5 相关标的

灵巧手驱动分析：特斯拉灵巧手为电机驱动

- ▶ **灵巧手按驱动分类：**灵巧手的类型多种多样，可根据驱动方式、结构形式以及传动机构的不同来进行划分。灵巧手按驱动方式主要分为电机驱动式、气动驱动式。
- ▶ **电机驱动为主流，特斯拉灵巧手采用空心杯电机：**驱动源（如电机）为灵巧手的活动提供动力，是影响灵巧手体积重量的重要因素。电机驱动是目前多指灵巧手的主流驱动方式，其关键问题是如何减小电机的尺寸。特斯拉Optimus和优必选Walker的灵巧手都是电机驱动，特斯拉灵巧手为减小电机尺寸而使用空心杯电机。

图表：灵巧手分类方式





图表：灵巧手驱动分类

	电机驱动式	气动驱动式
驱动方式	控制电机的转速和转向来实现机器人关节的运动	通过气体的压力和流动驱动气缸实现关节的运动
应用	 主流驱动方式，如特斯拉灵巧手	 上海交大联合MIT开发的气动灵巧手
优点	驱动力大、控制精度高、响应快、模块化设计、易于更换维护	易于控制、能量储存方便、柔性高
缺点	电机的体积较大，会占用较大的空间	刚度低、动态性能差、负载能力差

灵巧手结构分析：特斯拉灵巧手为内置式灵巧手

- ▶ 灵巧手按结构分类：外置式灵巧手的电机放置在手掌外，内置式灵巧手的电机放置在手掌内。
- ▶ 变化趋势是从外置式到内置式：早期的灵巧手一般将驱动源（如电机）外置，主要是因为电机较大，随着电机的尺寸减小，灵巧手逐渐走向内置式。如特斯拉Optimus的灵巧手是内置式，控制电机和接收传感器反馈信号的控制单元位于手内。我国的优必选Walker机器人的灵巧手也是内置式，实现了灵巧手的模块化。
- ▶ 人形机器人灵巧手的未来趋势是内置式：内置式灵巧手可以模块化，这使灵巧手的互换性和可维护性大大增强，从而减小人形机器人的维护成本。但内置式灵巧手的设计空间更加有限，因此对电机的尺寸要求更高，我们认为这会
给以体积小为优点的空心杯电机带来应用需求。

图表：灵巧手结构分类

	外置式灵巧手	内置式灵巧手
结构	将电机外置在手臂，采用拉线方式从远端控制灵巧手的关节	将驱动、传感、控制等驱动执行零部件都集成在手掌内
应用	 <p>Shadow灵巧手</p>	 <p>特斯拉灵巧手、优必选灵巧手</p>
优点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 外置使得灵巧手本体的设计空间更大 2. 可以增大手指的输出力 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 传感器直接测量，误差小 2. 模块化设计使互换性和可维护性大大增强
缺点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 传感器难以反映手指关节情况 2. 绳索机构预紧和标定都非常困难 3. 手指的非模块化设计使其可维护性较差 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 驱动器的内置使通信和控制难度加大 2. 手指尺寸及灵巧手整手尺寸较大，关节灵活度下降

灵巧手传动分析：特斯拉灵巧手为腱绳传动式

- ▶ **灵巧手按传动分类：**传动机构将驱动源（如电机）产生的运动和力以一定的方式传递到手指关节，从而使手指关节能够活动，灵巧手按传动机构的不同可分为腱绳传动式、齿轮传动式和连杆传动式。
- ▶ **特斯拉灵巧手为腱绳传动：**模仿人手肌腱传动方式的腱绳传动式是最常用的传动机构，具有控制灵活，结构简单，柔性高等优点。特斯拉灵巧手为腱绳传动，由配备了涡轮蜗杆的空心杯电机拉动金属腱绳，从而带动手指关节运动。

图表：灵巧手传动分类

	腱绳传动式	齿轮传动式	连杆传动式
传动机构	由腱（如钢丝绳）加上滑轮或者软管实现传动，通过电机带动腱拉动手指	通过齿轮或蜗轮蜗杆将旋转变成直线运动，拉动弹簧来驱动手指产生动作	采用平面连杆机构传动，构件之间的接触可以依靠几何封闭来实现
应用	 特斯拉灵巧手	 HIT/DLR II 灵巧手	 因时灵巧手
优点	控制灵活，结构简单，柔性高，节省空间和成本	各个手指动作相互独立，可实现精确的传动比，传动精度高，传动扭矩大	刚度好，负载能力强，加工制造容易，易获得较高的精度
缺点	腱本身的刚度有限从而影响位置精度，腱的布局容易产生力矩和运动的耦合	结构复杂，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高	柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高

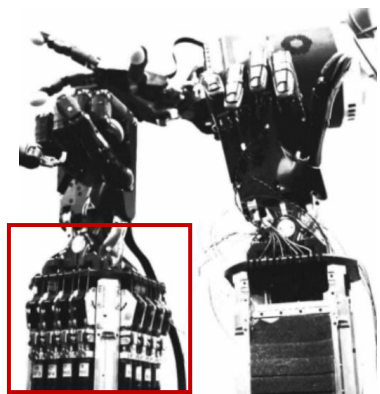
图表：特斯拉灵巧手的腱绳



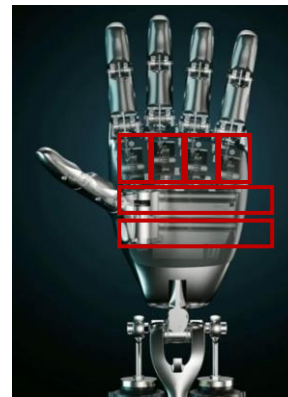
欠驱动or全驱动：特斯拉灵巧手为欠驱动

- ▶ 欠驱动灵巧手和全驱动灵巧手：欠驱动灵巧手是指电机的数目小于自由度数目的灵巧手，一个电机控制几个关节。全驱动灵巧手是指电机的数目等于自由度数目的灵巧手，一个电机只控制一个关节。
- ▶ 特斯拉灵巧手为欠驱动：虽然全驱动灵巧手的每个手指关节都能主动控制，可以更好地模仿人手运动，但是目前的绝大多数灵巧手都是欠驱动灵巧手。特斯拉灵巧手也是欠驱动，使用6个电机来实现11个自由度。
- ▶ 为什么我们认为人形机器人会用欠驱动灵巧手？
 1. 全驱动灵巧手成本太高，如全驱动的Shadow灵巧手报价约220万元。欠驱动灵巧手减少了电机的数目，虽然失去了一部分功能性，但是极大地降低了成本，提高了鲁棒性（鲁棒性是指在异常情况下还能正常工作的能力）。
 2. 之前我们分析过，为了减小维护成本，人形机器人的灵巧手应该是模块化的内置式灵巧手。全驱动灵巧手的电机数量多，目前难以集成在灵巧手有限的空间中，只能做成外置式的，不利于维修和更换。

图表：Shadow灵巧手的电机排布



图表：特斯拉灵巧手的电机排布





目录

1 人形机器人为灵巧手带来增量需求

2 灵巧手如何模仿人手结构？

3 特斯拉灵巧手技术路线分析

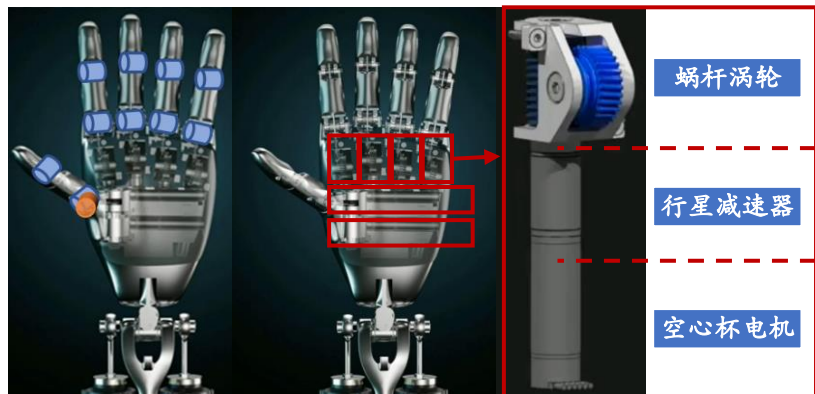
4 灵巧手的空心杯电机

5 相关标的

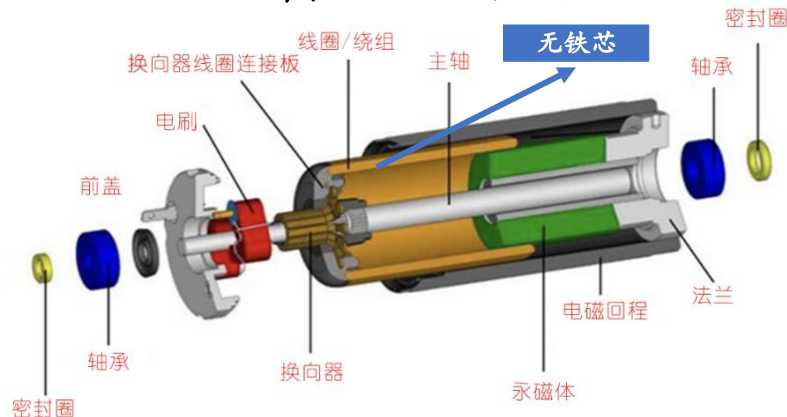
空心杯电机适用于灵巧手：无铁芯、体积小

- **空心杯电机是特斯拉灵巧手的核心部件：**特斯拉灵巧手是电机驱动+腱传动的内置式灵巧手，使用6个电机来实现11个自由度，其中拇指采用双电机驱动，其它四指各采用一个电机驱动。特斯拉Optimus灵巧手用的电机是空心杯电机，这是一种特殊的直流永磁伺服电机。空心杯电机不同于传统电机采用铁芯转子，采用的是无铁芯的空心杯型转子。
- **空心杯电机适用于灵巧手：**灵巧手的空间狭小，所以要求配备的电机体积要尽可能小，体积小、重量小的空心杯电机凸显优势，与灵巧手的需求非常契合。其主要优点如下：
 - 1.空心杯电机没有铁芯，所以与同等功率的铁芯电机相比，其重量、体积减轻1/3-1/2，且转动惯量小。
 - 2.空心杯电机的无铁芯结构彻底消除了铁芯的涡流造成的电能损耗，效率一般都高于70%，部分产品可以高达90%，而铁芯电机效率一般在70%以内。
 - 3.无齿槽效应，运行平稳，噪音小。

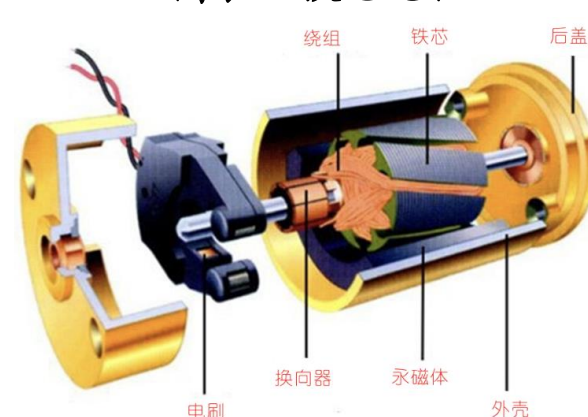
图表：特斯拉Optimus灵巧手结构



图表：空心杯电机



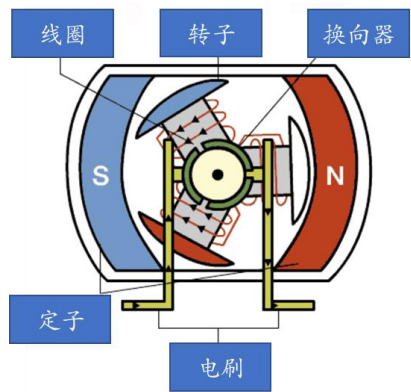
图表：铁芯电机



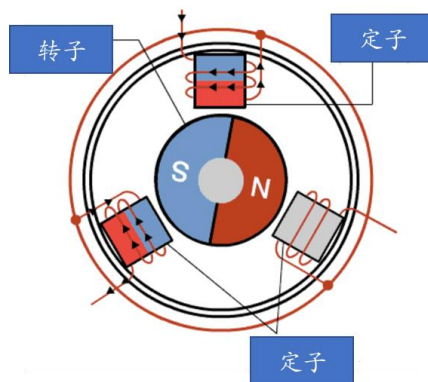
空心杯电机分类：有刷和无刷

- ▶ **有刷空心杯电机和无刷空心杯电机：**空心杯电机可分为有刷空心杯电机和无刷空心杯电机。有刷主要结构为定子+转子+电刷，永磁体为定子，电刷与换向器不断接触摩擦，在转动中起到导电和换相作用，容易产生火花。无刷主要结构为定子+转子，永磁体为转子，没有电刷，换向通过霍尔效应传感器、编码器或旋转变压器完成。

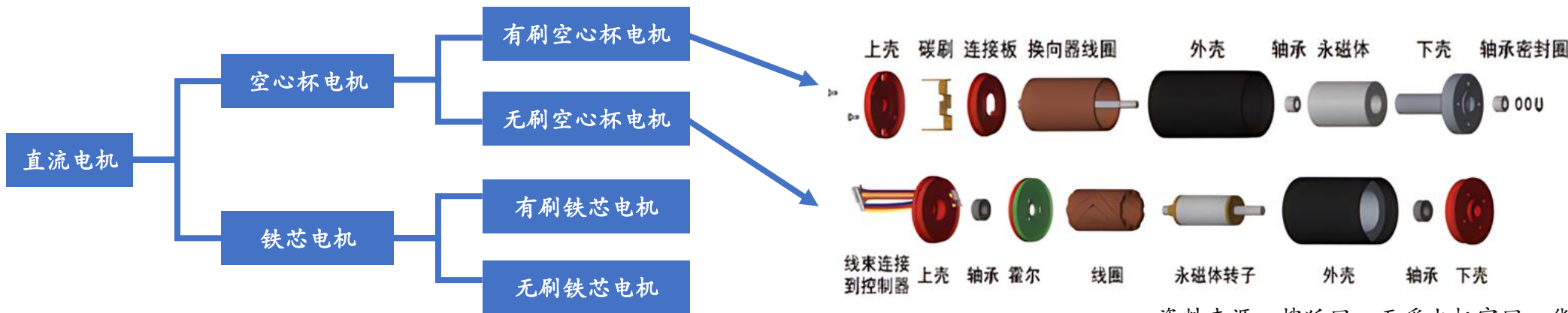
图表：有刷电机原理图



图表：无刷电机原理图



图表：空心杯电机分类与结构



典型灵巧手使用的电机对比：种类、型号、参数、单价

- ▶ 因时灵巧手使用无刷空心杯电机：因时灵巧手使用6个集成了无刷空心杯电机的微型伺服电缸作为驱动源。
- ▶ HIT/DLR II灵巧手使用扁平无刷空心杯电机：HIT/DLR II灵巧手的盘式电机直径为20mm，高度为13.6mm，重量为15g。我们比对相关参数后确定了电机型号是盘式电机Maxon 241916（扁平的无刷空心杯电机）。
- ▶ Shadow灵巧手使用有刷空心杯电机：Shadow灵巧手使用了20个电机，其中16个为有刷空心杯电机Maxon 118608。

图表：典型灵巧手使用的电机对比

	特斯拉灵巧手	因时灵巧手	HIT/DLR II灵巧手	Shadow灵巧手
外观				
电机种类	空心杯电机	无刷空心杯电机	扁平无刷空心杯电机	有刷空心杯电机
电机型号	自研	LA10系列微型伺服电缸	Maxon 241916	Maxon 118608
电机外观				
直径	未知	13.2mm（电缸直径）	20mm	13mm
高度	未知	66.5mm（电缸高度）	13.6mm	38.9mm
重量	未知	21g（电缸重量）	15g	27g
单价	未知	1290元	632元	1153元

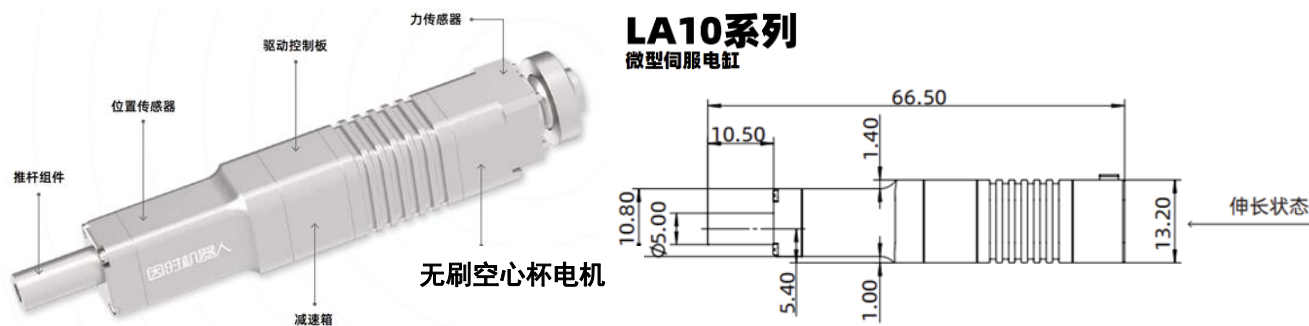
推测特斯拉灵巧手的空心杯电机为无刷，直径约为13mm

- 无刷是未来趋势，推测特斯拉灵巧手用的是无刷空心杯电机：特斯拉灵巧手的空心杯电机没有直接说明是有刷还是无刷，但是有刷空心杯电机寿命短且会产生火花，所以现在灵巧手用的空心杯电机一般都是无刷，例如因时灵巧手和HIT/DLR II灵巧手使用的都是无刷空心杯电机。虽然Shadow灵巧手使用了有刷空心杯电机，但是它在2004年就问世，使用有刷很可能是因为限于当时的技术。为了提高灵巧手的寿命和可靠性，无刷为未来趋势，所以我们推测特斯拉灵巧手用的是无刷空心杯电机。
- 推测特斯拉灵巧手所用电机直径约为13mm：特斯拉灵巧手没有说明电机的尺寸，我们参考因时灵巧手和Shadow灵巧手来估算。因时灵巧手的电缸直径为13.2mm，那么里面的电机直径应该略小于13mm，Shadow灵巧手机电机直径也为13mm，因此我们推测特斯拉灵巧手的无刷空心杯电机直径约为13mm。而根据鸣志电器官网，无刷铁芯电机最小的直径也达到了16mm，这也是灵巧手都使用空心杯电机而不使用铁芯电机的原因。

图表：空心杯电机对比（无刷vs有刷）

无刷空心杯电机	有刷空心杯电机
寿命长（20000h）	寿命短（2000h）
转速高（可超过20000rpm）	转速低（低于13000rpm）
无火花	产生火花

图表：因时机器人LA10系列微型伺服电缸组成及尺寸



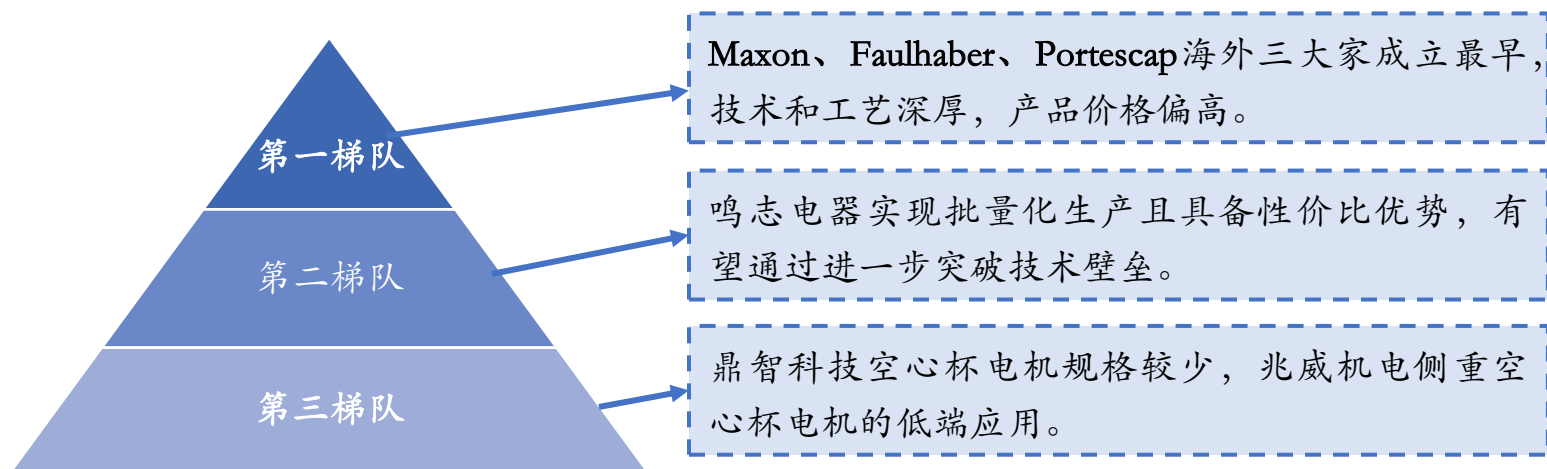
空心杯电机竞争格局

► **空心杯电机竞争格局：**空心杯电机市场竞争格局高度集中，主要国际生产商是Maxon、Faulhaber、Portescap等公司，CR3全球市场占有率达70%-80%。主要国内生产商有鸣志电器、鼎智科技（江苏雷利子公司）和兆威机电，推测国内生产商总体市场占有率约为15%。空心杯电机市场之所以高度集中，我们认为主要有2个原因：

1、Maxon、Faulhaber和Portescap三大生产商起步早，有着丰富的技术储备，产品受到广泛认可，也跟客户建立了稳定的供应关系，如Maxon的产品在NASA的火星探测活动中被多次使用，Bebionic仿生灵巧手在研发过程中找到Faulhaber合作，研发出了专用的空心杯电机。

2、空心杯电机技术壁垒高，国内生产商更注重成本控制，缺乏对高端技术的投入，导致技术水平相对滞后，难以抢占高端市场。

图表：空心杯电机品牌梯队



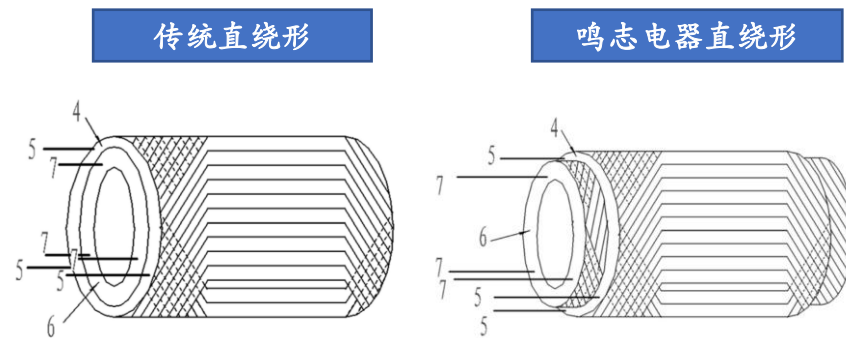
空心杯电机技术壁垒

- **空心杯电机的技术壁垒：**空心杯电机的工艺难度比较大，技术壁垒主要有2个，一是空心杯线圈绕组的设计和加工，二是绕线设备。
- **空心杯线圈绕组的设计和加工：**空心杯线圈绕线方式主要有直绕形、马鞍形和斜绕形3种。为增大空心杯电机力矩，需要提高永磁体利用率，这一点可以通过减小线圈厚度从而减小磁场气隙来达成。直绕形端部的线圈厚度较大，而马鞍形和斜绕形能够有效减小线圈厚度。Maxon主要采用马鞍形绕组方式、Faulhaber主要采用斜绕形绕组方式，而它们绕线的具体工艺处于保密状态，目前鸣志电器采用直绕形工艺，但是它拥有一种新型的绕组结构专利，可以减小直绕形端部的线圈厚度，从而在很大程度上弥补了直绕形工艺的不足。
- **空心杯线圈绕线设备：**产品的一致性、长寿命和批量化生产需要自动化产线。Maxon、Faulhaber的自动化生产设备是自研自制，不对外销售。国内生产商主要采用半自动/手工生产，其中鸣志电器的绕线机采购自日本小田原&田中精机，主要采用半自动生产，返工率高(国内万分之三十，国外万分之五)。

图表：空心杯线圈绕组方式



图表：鸣志电器绕组结构专利



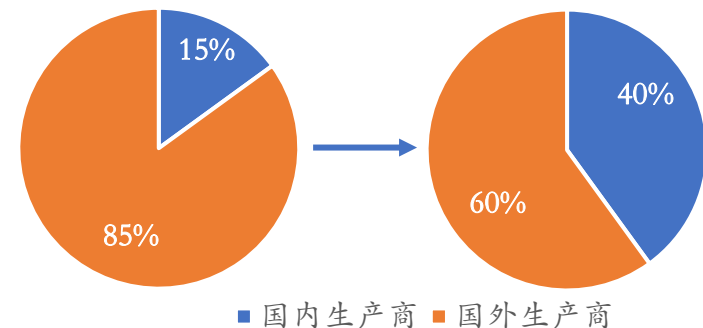
空心杯电机有望国产替代

- 空心杯电机有望凭借技术进步和价格优势实现国产替代：国产的空心杯电机价格显著低于国外生产的空心杯电机价格。选择国内生产商鸣志电器和国外生产Faulhaber、Maxon的相似规格的无刷空心杯电机进行对比，发现鸣志电器产品在性能上接近甚至超过了Faulhaber产品，相比国际龙头Maxon产品，转速还有较大的差距，但是价格也便宜许多。我们认为鸣志电器有望率先在人形机器人细分赛道实现国产替代，原因如下：第一，鸣志电器产品达到了国际先进水平，能够满足特斯拉的需求；第二，鸣志电器产品在技术过关的前提下具有明显的价格优势，且毛利率为36.7%，仍有继续降价的空间；第三，鸣志电器是特斯拉的供应商，容易打入人形机器人供应链。
- 人形机器人的发展将加快空心杯电机国产替代速度：目前空心杯电机主要应用领域是医疗行业和航空航天行业，随着人形机器人的发展，预计未来人形机器人将会成为空心杯电机的主要应用场景，我们认为这会促使国内生产商加大研发投入，改进绕线设计加工工艺，加快空心杯电机国产替代速度。我们预测到2028年，国内生产商市占率将从15%提升到40%。

图表：空心杯电机性能对比

	型号	直径	空载转速	额定转矩	单价
鸣志电器	ECU13038H18-S001	13mm	23400rpm	3.5mNm	1162元
Faulhaber	1226S012B	12mm	27400rpm	1.97mNm	——
Maxon	ECX SPEED 13 M	13mm	45700rpm	4.21mNm	2079元

图表：空心杯电机市占率预测



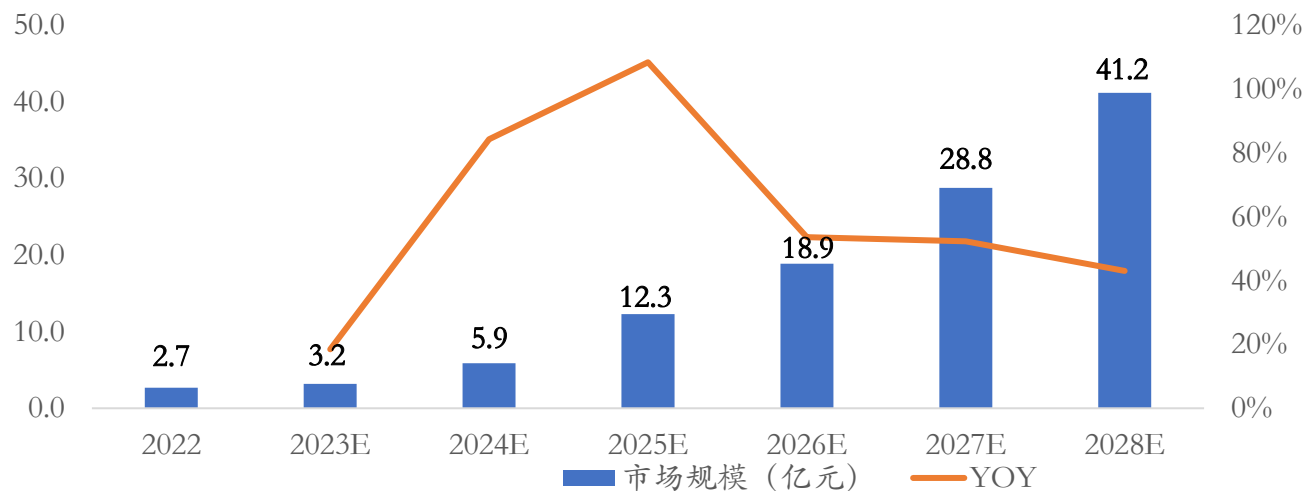
空心杯电机单价变化分析与增量市场预估

- **空心杯电机单价随销售量增加而降低：**以Maxon的直径13mm无刷空心杯电机为例，当购买数量达到20-49个的时候，单价降到了原价的63.6%。鸣志电器的直径13mm无刷空心杯电机价格更低，议价空间也应该更小，我们可以假设现在大量拿货时价格由1162元降为930元，即原价的80%。我们之前对特斯拉Optimus放量后整体价格降幅为53.8%的判断，可以假设空心杯电机销售放量后价格降幅为50%，在现有的拿货价（930元）的基础上降低到465元。
- **空心杯电机市场规模预测：**之前我们推测2028年灵巧手的销售量为138万只，按照6电机驱动的方案，2028年会给空心杯电机行业带来 $465 \times 6 \times 138 \text{万} = 38.5 \text{亿元}$ 的市场规模增量，约占灵巧手市场规模增量的14%。根据QYResearch报告，2022年全球空心杯电机市场规模为54.6亿元（按照1:7.3汇率），而目前人形机器人还未商业化，假设在空心杯电机行业的下游应用领域中人形机器人占比为5%，即应用于人形机器人领域的空心杯电机销售额为2.7亿元，我们预测2028年应用于人形机器人领域的空心杯电机销售额为41.2亿元，将为国内生产商带来 $41.2 \times 40\% = 16.5 \text{亿元}$ 的营收。

图表：Maxon电机单价变化

	购买数量	单价
Maxon ECX SPEED 13 M	1-4	2079元
	5-19	1624元
	20-49	1323元
	50及以上	询价

图表：空心杯电机市场规模预测（仅人形机器人领域）



资料来源：Maxon，鸣志电器，QYResearch，华安证券研究所



目录

1 人形机器人为灵巧手带来增量需求

2 灵巧手如何模仿人手结构？

3 特斯拉灵巧手技术路线分析

4 灵巧手的空心杯电机

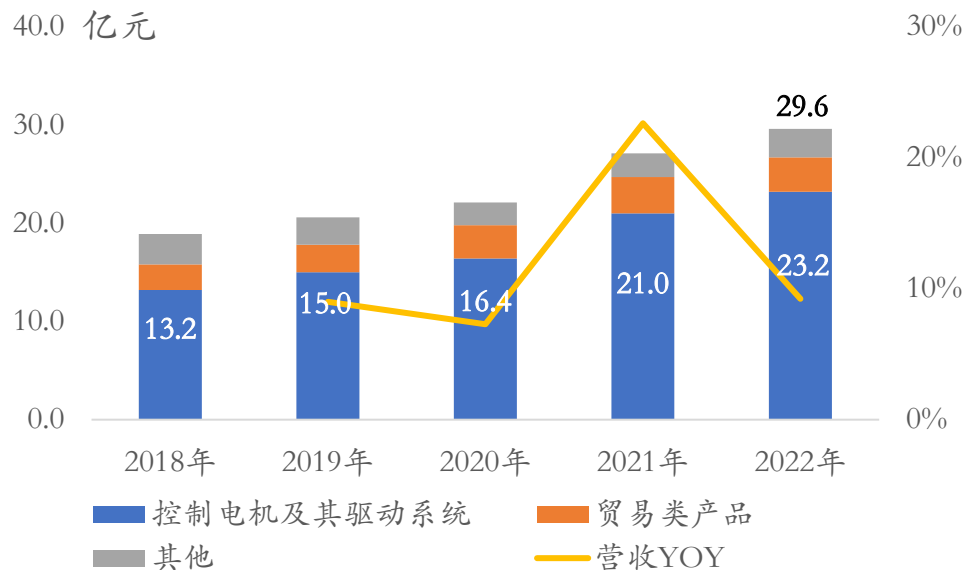
5 相关标的



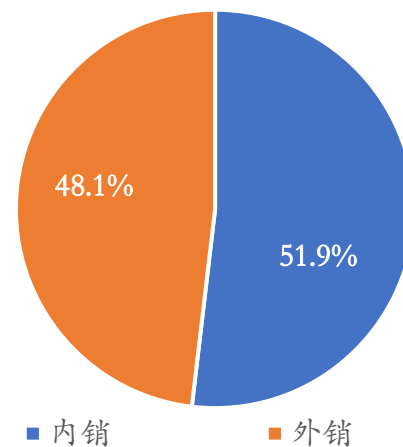
鸣志电器

- ▶ **空心杯电机有技术优势：**公司主营业务是控制电机及其驱动系统，产品线齐全，包括步进电机、空心杯电机、伺服驱动器与电机等。最有技术优势的人形机器人相关产品是空心杯电机，包括有刷空心杯电机和无刷空心杯电机，可提供多种额定电压版本的一系列空心杯电机。
- ▶ **全球销售网络：**公司在控制电机业界知名，分公司遍及北美、欧洲、日本和东南亚，已形成全球销售网络，产品受到国内和国外市场认可，在2022年营业收入中，外销占比48.1%。
- ▶ **电机业务营收占比大，空心杯电机或将拉升营收：**2022年公司营业收入为29.6亿元，其中电机业务营业收入为23.2亿元，占比约78%。随着人形机器人的发展，对空心杯电机的需求量也将提升，或将拉升营收。

图表：2018年-2022年公司营业收入



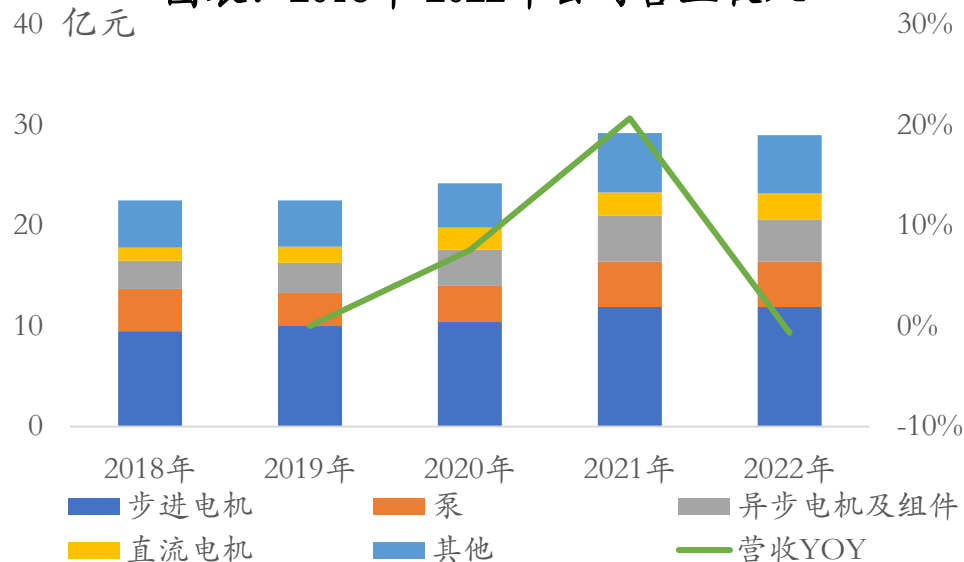
图表：2022年营业收入地区分布



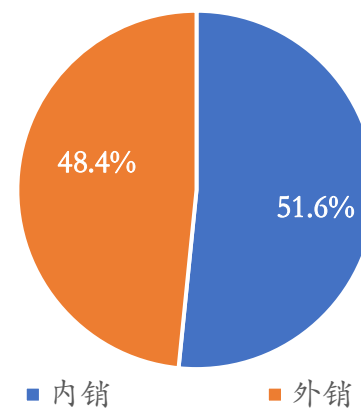
江苏雷利

- ▶ **能够生产无刷空心杯电机：**公司是一家具有广泛影响力的微电机产品研发设计、生产制造型上市企业，拥有常州（钱家、新北、武进）、安徽、浙江、越南、中山等多个制造基地，年电机出货量超2亿台。其子公司智鼎科技拥有直径16mm-42mm的一系列无刷空心杯电机产品。
- ▶ **市场认可度高，产品远销欧美：**公司产品受到国际市场的广泛认可，在2022年营业收入中，外销占比近半，其中欧美地区占比约为25%，亚太地区占比约为25%。
- ▶ **主营业务为电机，空心杯电机将拉高直流电机所占营收比例：**主营业务是各种电机的制造，2022年公司营业收入为29亿元，其中步进电机、异步电机及组件、直流电机等电机业务占据一大半的营收。空心杯电机属于直流电机的一种，人形机器人的发展带来了空心杯电机的增量市场，预计2023年直流电机业务在公司营业收入构成中所占比例将会拉升。

图表：2018年-2022年公司营业收入



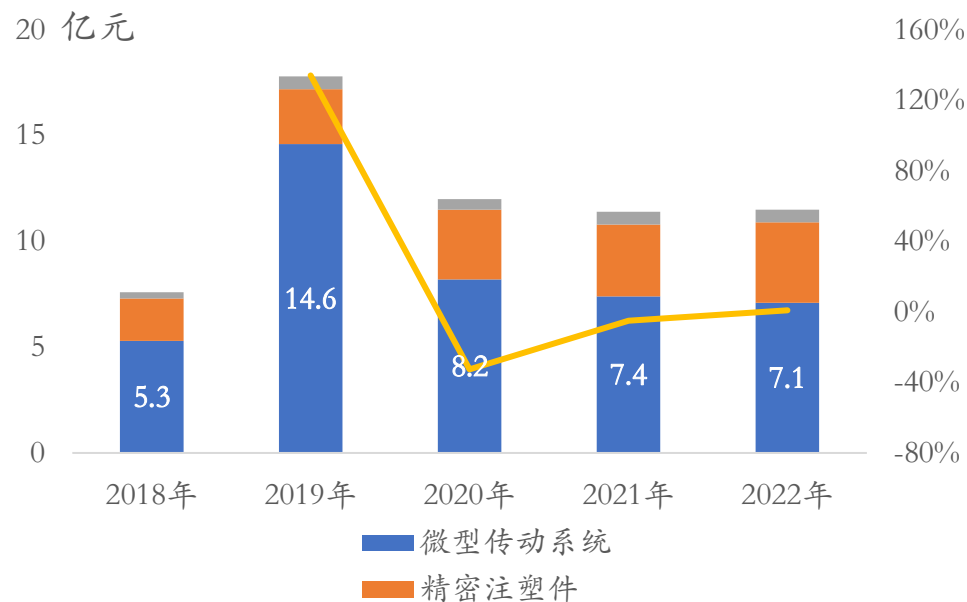
图表：2022年营业收入地区分布



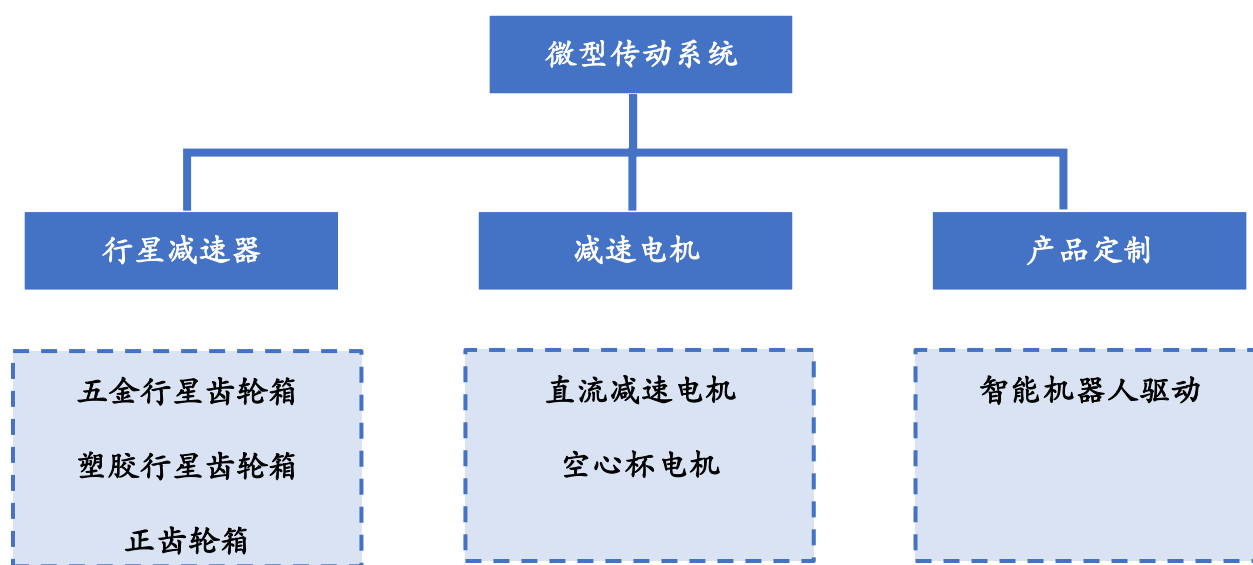
兆威机电

- **相关产品是行星减速器、空心杯电机：**公司主营业务是微型传动系统的研发、生产和销售。微型传动系统与人形机器人领域联系紧密，公司相关产品为行星减速器、空心杯电机等。
- **技术优势：**可提供尺寸范围大（外径3.4mm-38mm）的一系列行星减速器，行星齿轮组级数在1-5级，有望在空心杯电机中得到应用，并可直接提供外径6mm的空心杯减速电机。
- **营收分析：**公司近三年的营收比较稳定，行星减速器、空心杯电机所在的微型传动系统业务在公司营收中占大部分，考虑到人形机器人的影响，公司营收有望再创新高。

图表：2018年-2022年公司营业收入



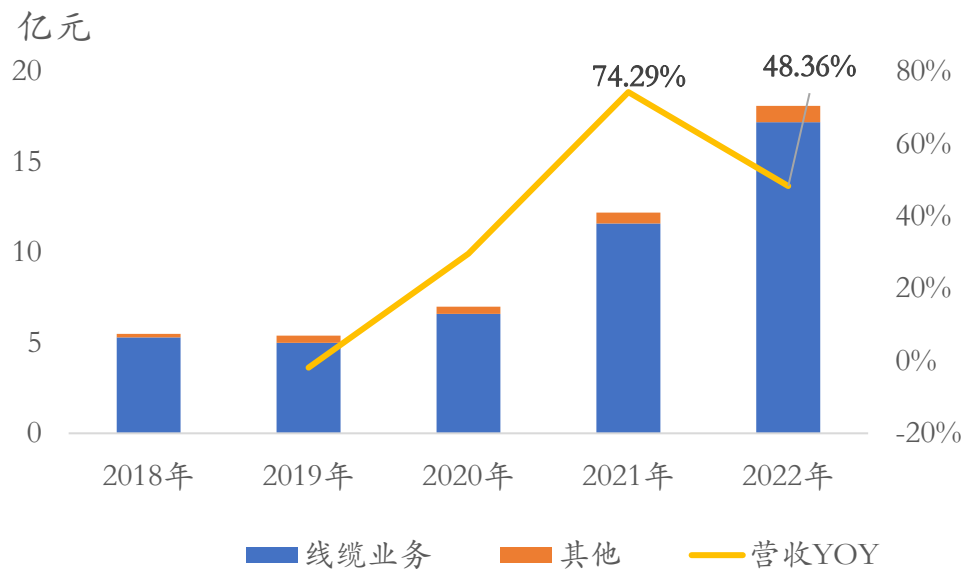
图表：人形机器人领域相关产品



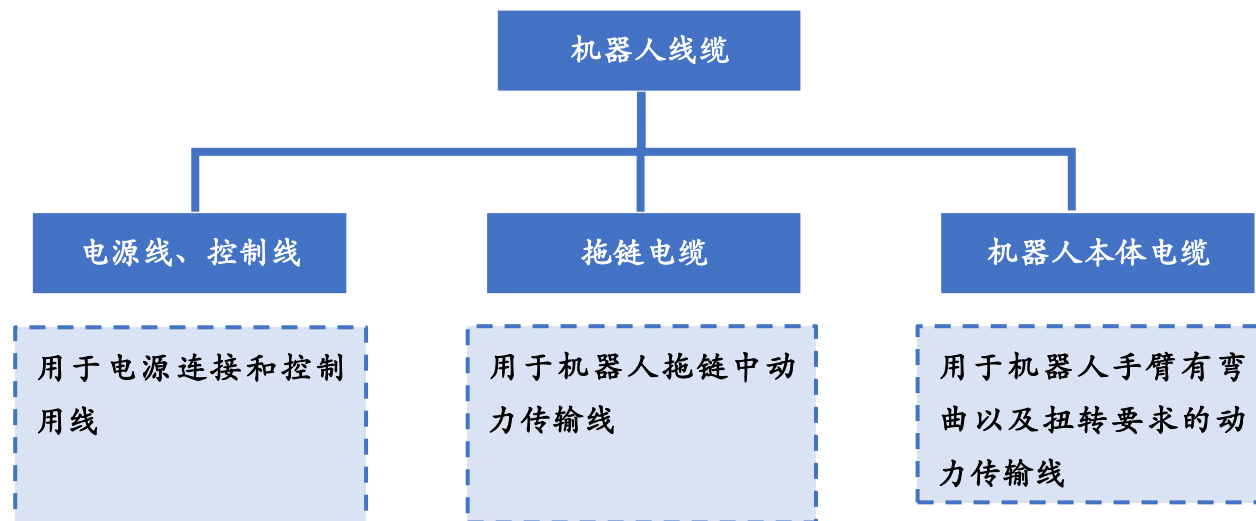
鑫宏业

- **相关产品是机器人线缆，可用于腱绳传动式灵巧手：**主营业务为各种特种线缆的研发、生产及销售，其中的机器人线缆包括电源线、控制线、拖链电缆、机器人本体电缆等。很多灵巧手采用的传动方式是腱传动，需要用到线缆作为腱绳。
- **生产能力：**公司拥有现代化生产线14条，设备56台，新增设备双层共挤1台，实现月生产力72800KM，同时拥有全套的检验与试验设备，能够满足机器人扩产时线缆生产的需要。
- **营收分析：**公司主营业务为线缆业务，2022年公司营收为18.1亿，其中线缆业务营收为17.2亿，占比约95%。近两年营收增长迅猛，2021年同比增长率为74.29%，2022年同比增长率为48.36%。

图表：2018年-2022年公司营业收入



图表：人形机器人领域相关产品





风险提示

▶ 特斯拉机器人量产不及时的风险

特斯拉机器人量产不及时，可能导致灵巧手产业的发展不如预期的风险。

▶ 灵巧手的相关技术不能有所突破的风险

灵巧手所需的技术很多，如驱动技术、机械传动技术、传感技术等，如果这些技术迟迟没有突破，将会影响灵巧手的发展速度。

▶ 国内宏观经济下行的风险

如果因为不可预知的因素导致国内宏观经济下行，可能对灵巧手产业的发展造成负面影响。



重要声明

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，以勤勉的执业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，本报告所采用的数据和信息均来自市场公开信息，本人对这些信息的准确性或完整性不做任何保证，也不保证所包含的信息和建议不会发生任何变更。报告中的信息和意见仅供参考。本人过去不曾与、现在不与、未来也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接收任何形式的补偿，分析结论不受任何第三方的授意或影响，特此声明。

免责声明

华安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。本报告中的信息均来源于合规渠道，华安证券研究所力求准确、可靠，但对这些信息的准确性及完整性均不做任何保证。在任何情况下，本报告中的信息或表述的意见均不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司、本公司员工或者关联机构不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。投资者务必注意，其据此做出的任何投资决策与本公司、本公司员工或者关联机构无关。华安证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

本报告仅向特定客户传送，未经华安证券研究所书面授权，本研究报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。如欲引用或转载本文内容，务必联络华安证券研究所并获得许可，并需注明出处为华安证券研究所，且不得对本文进行有悖原意的引用和删改。如未经本公司授权，私自转载或者转发本报告，所引起的一切后果及法律责任由私自转载或转发者承担。本公司并保留追究其法律责任的权利。

投资评级说明

以本报告发布之日起6个月内，证券（或行业指数）相对于同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准，A股以沪深300指数为基准；新三板市场以三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以纳斯达克指数或标普500指数为基准。定义如下：

行业评级体系

- 增持—未来6个月的投资收益率领先市场基准指数5%以上；
- 中性—未来6个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至5%；
- 减持—未来6个月的投资收益率落后市场基准指数5%以上；

公司评级体系

- 买入—未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数15%以上；
- 增持—未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数5%至15%；
- 中性—未来6-12个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至5%；
- 减持—未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数5%至；
- 卖出—未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数15%以上；
- 无评级—因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。