

# 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

# 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

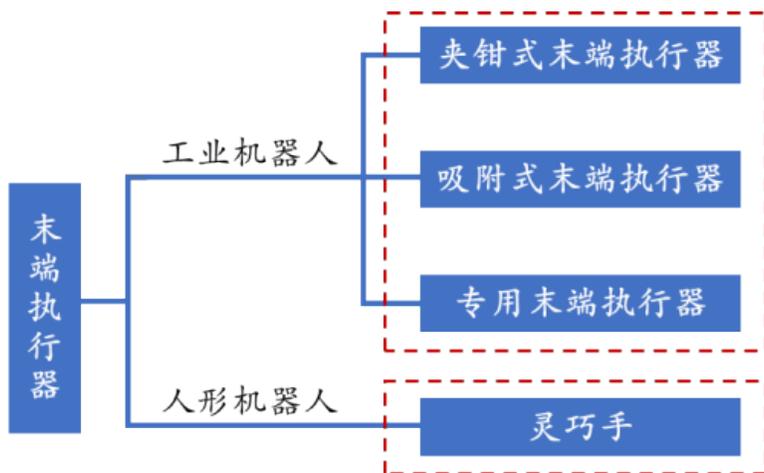
4 灵巧手的空心杯电机

5 相关标的

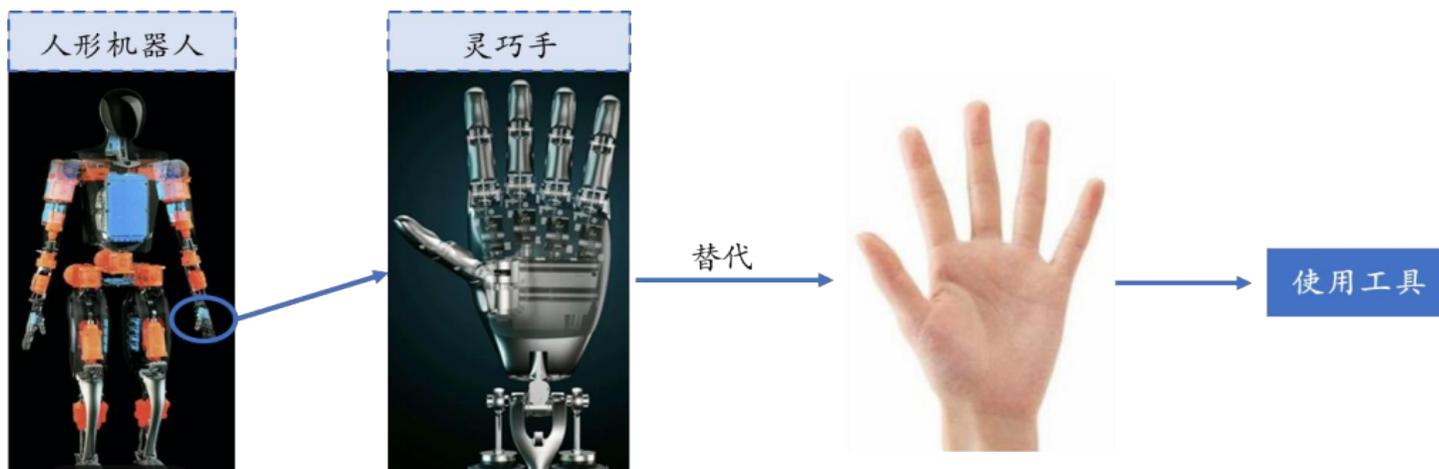
# 人形机器人使用工具，灵巧手不可或缺

- **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

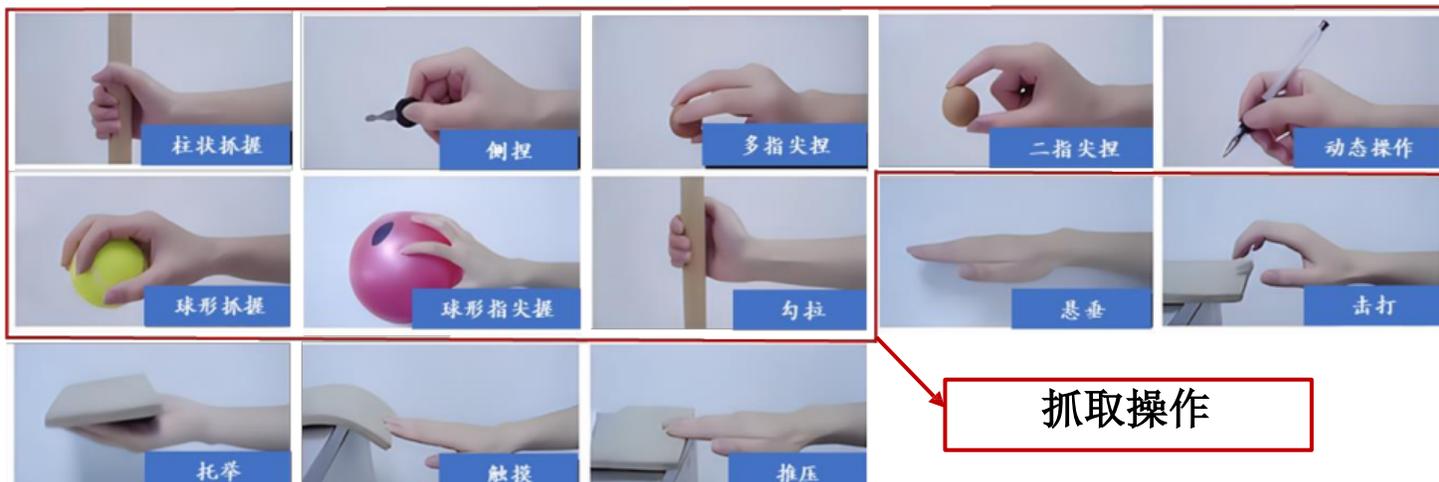
	特斯拉灵巧手	因时灵巧手	Shadow灵巧手	BrainRobotics仿生灵巧手	Bebionic仿生灵巧手
外观					
厂家	特斯拉（国外）	因时机器人（国内）	Shadow Robot（国外）	强脑科技（国内）	Ottobock（国外）
关节数目	11	12	24	10	10-12（估算）
电机数目	6	6	20	6	5
主要应用领域	人形机器人	人形机器人	科研	假肢	假肢
价格	未知	5万元/只	约220万元/只	10.8万元/只	至少32万元/只

资料来源：淘宝网，小米技术，因时机器人，特斯拉AI DAY 2022，硅步机器人，Bionics For Everyone，脑机Hub公众号，搜狐网，中国工控网，华安证券研究所

## 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%

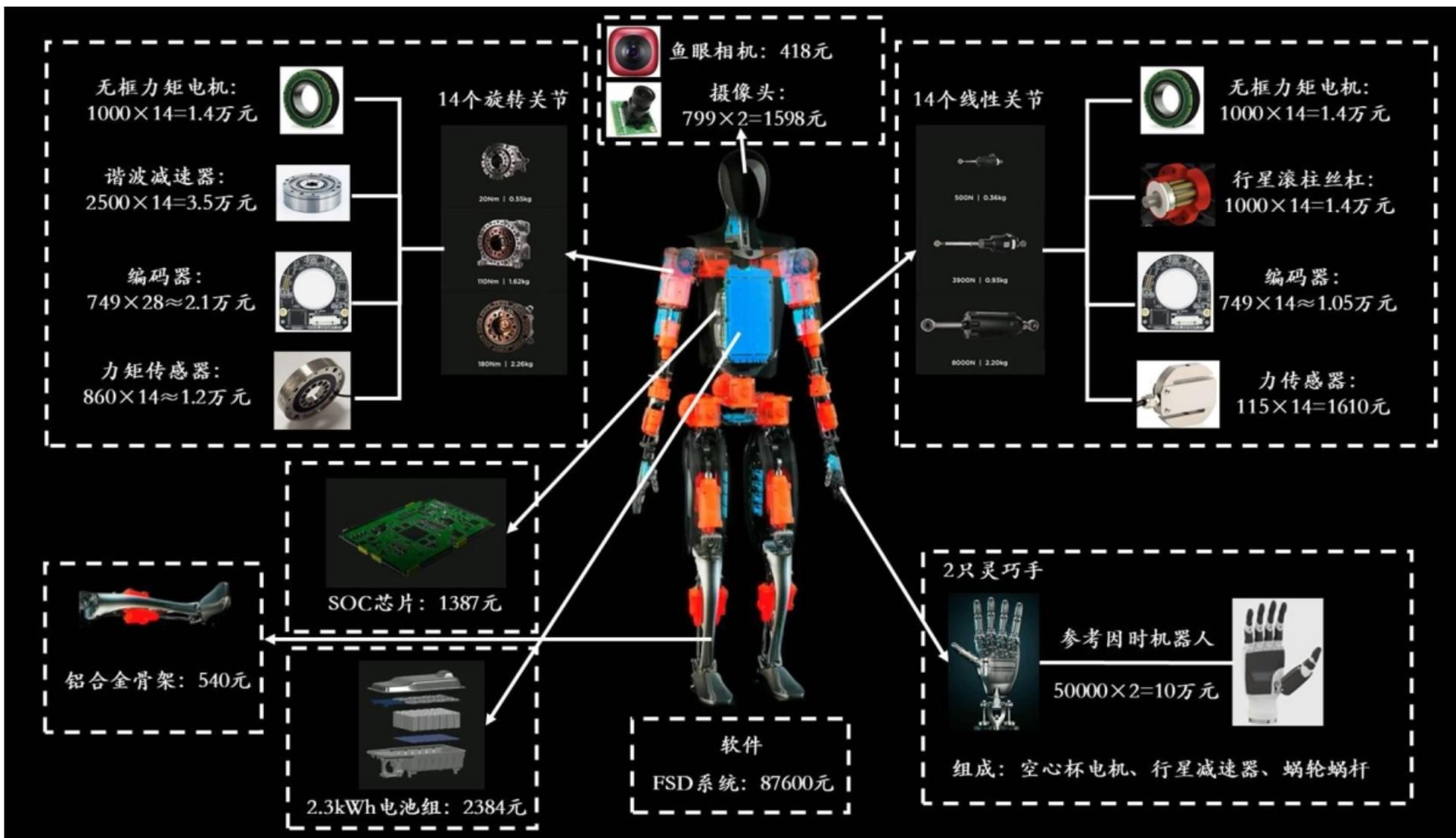
图表：特斯拉Optimus的BOM成本估算

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 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 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 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 参考爱采购的科尔摩根TBM 2G的价格，假设均价为1000元 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 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 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
		谐波减速器	14	2500	35000	11.07%	
		编码器	2×14	749	20972	6.64%	
		力矩传感器	14	860	12040	3.81%	
	线性关节	无框力矩电机	14	1000	14000	4.43%	
		行星滚柱丝杠（反向）	14	1000	14000	4.43%	
		编码器	14	749	10486	3.32%	
		力传感器	14	115	1610	0.51%	
光学传感器	鱼眼相机	1	418	418	0.13%	参考淘宝网的华为鱼镜头报价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

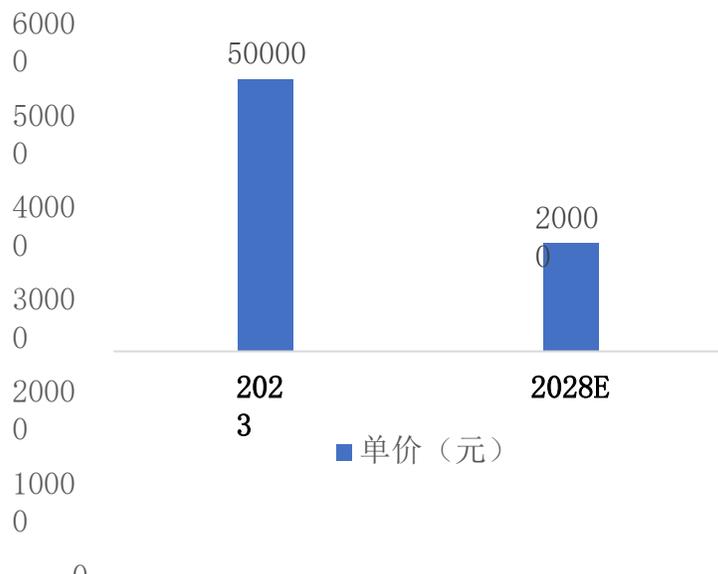
图表：特斯拉Optimus的各部位价值量



## 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

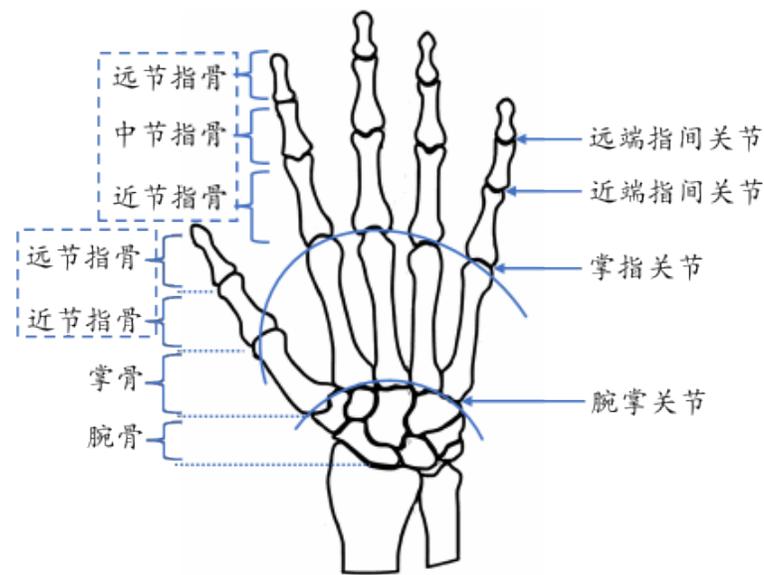
5 相关标的

# 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。

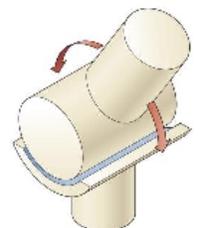
大拇指结构特殊，只有近节指骨和远节指骨两节指骨，其余四指都有三节指骨。大拇指的腕掌关节为双凹的鞍状结构状结构，所以大拇指虽然只有两节指骨，但却是手指中最灵活的。

《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%。



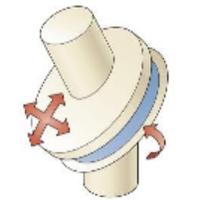
# 人手自由度分析：可以屈伸和外张内收

- **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。



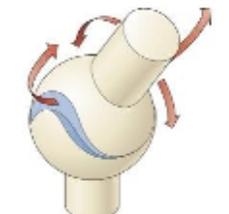
铰链关节

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。



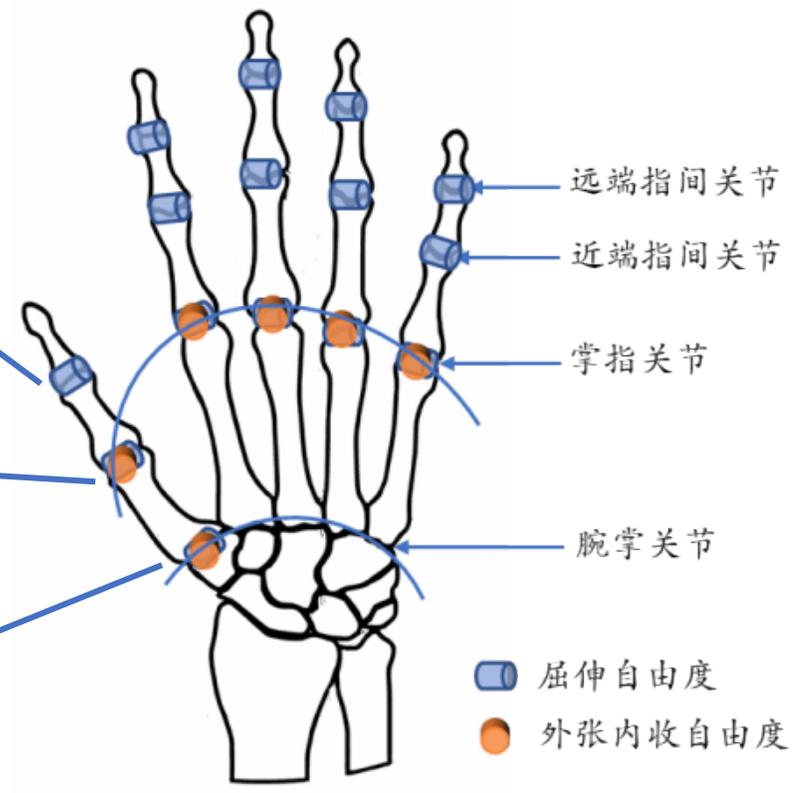
椭圆关节

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。

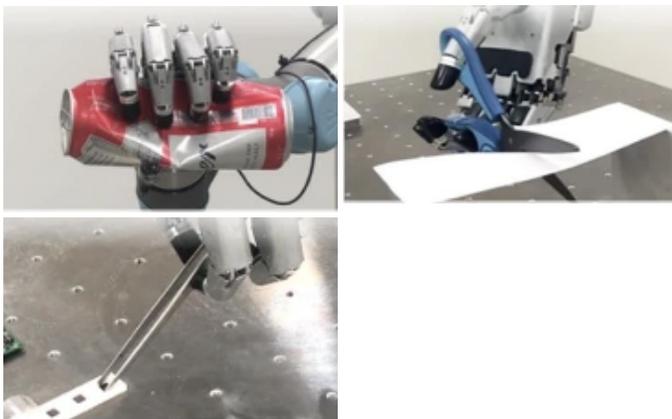


● 屈伸自由度  
● 外张内收自由度

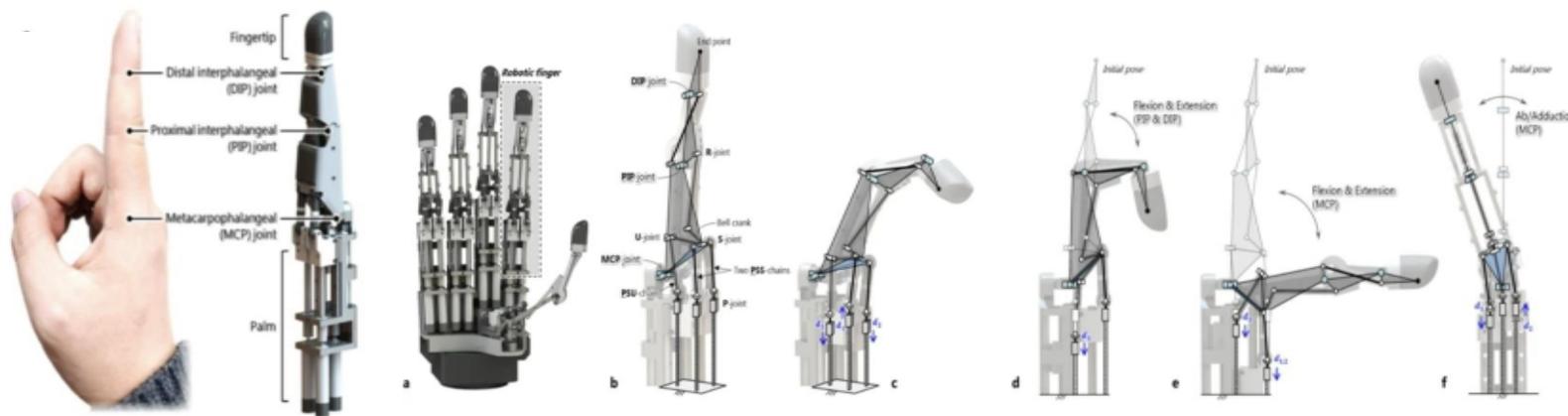
## 灵巧手模仿人手结构，有望替代人手功能

- **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

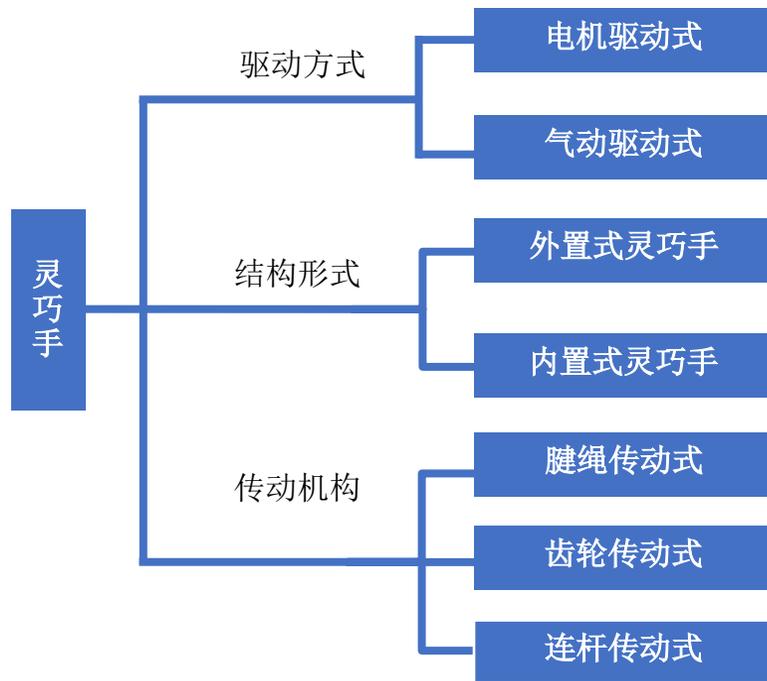
4 灵巧手的空心杯电机

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	 Shadow灵巧手	 特斯拉灵巧手、优必选灵巧手
优点	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 外置使得灵巧手本体的设计空间更大</li> <li>2. 可以增大手指的输出力</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 传感器直接测量，误差小</li> <li>2. 模块化设计使互换性和可维护性大大增强</li> </ol>
缺点	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 传感器难以反映手指关节情况</li> <li>2. 绳索机构预紧和标定都非常困难</li> <li>3. 手指的非模块化设计使其可维护性较差</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 驱动器的内置使通信和控制难度加大</li> <li>2. 手指尺寸及灵巧手整手尺寸较大，关节灵活度下降</li> </ol>

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：  
<https://d.book118.com/467043030123006105>