



# 正文目录

1. 灵巧手：机器人环境交互及功能执行终端.....	5
2. 灵巧手结构设计三要素：驱动、传动、感知.....	8
2.1. 驱动系统.....	8
2.1.1. 电机：空心杯电机适配手指关节，直流无刷电机推动降本.....	8
2.1.2. 减速器：降转速提扭矩，行星&谐波减速器均有应用.....	15
2.2. 传动系统.....	19
2.2.1. 腱绳传动：目前主流传动形式，具有排布灵活、柔性传动等优点.....	20
2.2.2. 丝杠传动：新型传动方案，与腱绳优势互补.....	21
2.3. 感知系统.....	22
2.3.1. 力/力矩传感器：帮助灵巧手实现精准力控，应变式性能更优.....	23
2.3.2. 触觉传感器：赋予灵巧手触觉感知能力，逐步向仿生电子皮肤演进.....	25
3. Optimus 灵巧手迭代复盘与展望.....	27
4. 投资建议.....	31
5. 风险提示.....	32

## 1. 灵巧手：机器人环境交互及功能执行终端

灵巧手作为人形机器人末端执行器，在机器人与环境的交互中起到关键作用。灵巧手作为机器人末端执行器，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。随着机器人向工业深度应用和服务、健康、军事、航空航天等领域的不断拓展，机器人与目标对象和环境的交互需求和能力越来越高，如特斯拉 Optimus 已可以完成浇花、分拣电池、叠衣服等复杂动作。

图表 1: 特斯拉 Optimus 分拣电池



资料来源: 特来讯, X平台Tesla Optimus账号, 东方财富证券研究所

图表 2: 特斯拉 Optimus 叠衣服



资料来源: 汽车之家, X平台Tesla Optimus账号, 东方财富证券研究所

图表 3: 人手自由度分析

Flexion & Extension



Abduction & Adduction



图表 4: 各研究机构灵巧手自由度情况

灵巧手	主要研究单位	研究年份	手指个数	关节数目	自由度	传动方式
Okada Hand	日本电工实验室	1974	3	11	11	腱-滑轮
SALISBURY Hand	斯坦福大学	1983	3	9	9	腱-滑轮
Belgrade/USC Hand	贝尔格莱德大学	1988	5	15	15	连杆
UB Hand	博洛尼亚大学	1992	3	13	11	腱-滑轮
NTU Hand	台湾大学	1996	5	17	17	齿轮
DIST Hand	热那亚大学	1998	4	16	16	腱-滑轮
Robonaut Hand	NASA	1999	5	22	14	腱-滑轮
LMS Hand	普瓦提埃大学	1998	4	16	16	腱-滑轮
GIFU Hand	日本岐阜大学	2001	5	20	16	齿轮连杆
DLR Hand	德国宇航中心	2001	4	17	13	腱-滑轮
High Speed Hand	东京大学	2003	3	8	9	齿轮
Keio Hand	庆应义整大学	2003	5	20	20	腱-滑轮
Yokoi Hand	东京大学	2004	5	15	11	腱
Robotic Hand MA-1	加泰罗尼亚理工大学	2004	4	16	16	齿轮
BH985 Hand	北京航空航天大学	2005	5	20	11	齿轮连杆
MAC-HAND4	意大利热那亚大学	2005	4	12	12	腱
NAIST-HAND	日本东良先端科学技术大学	2005	4	16	12	齿轮连杆
SKKU Hand II	韩国成均馆大学	2006	4	13	10	齿轮
HEU Hand II	哈尔滨工程大学	2006	3	9	9	齿轮
SAH	Schunk 公司	2007	4	16	13	齿轮连杆
LARM Hand	Cassino 大学	2010	3	9	12	连杆
KNTH	K. N. Toos 科技大学	2011	3	6	9	全柔性
Metamorphic Hand	天津大学	2013	4	12	16	连杆
Barret Hand	巴雷特技术公司	2013	3	9	9	连杆齿轮
Ritsumeikan Hand	日本立命馆大学	2013	5	16	20	连杆
Pisa/IIT Soft Hand	意大利	2014	5	19	21	韧带
ISR-Soft Hand	美国	2014	5	15	21	腱
Washington Hand	华盛顿大学	2016	5	15	21	线绳
SSSA-My Hand	ScuolaSuperiore Sant'Anna	2016	5	10	21	齿轮连杆
HERI Hand	意大利	2017	3	12	15	连杆

根据自由度和驱动源数量关系，可将灵巧手分为全驱动和欠驱动两大类。

全驱动灵巧手驱动源的数量与被控制灵巧手的自由度数量相等。每个手指关节都有驱动器，使其能够实现主动控制，在某种程度上能够像人手一样完成全部的动作指令甚至要求更高的灵巧动作。但是，全驱动也意味着需要更多的驱动器，会使手掌体积变大、安装困难、操作复杂。欠驱动灵巧手被控制的自由度多于驱动源的数目，缺少驱动源的部分则进行耦合随动。欠驱动手硬件集成度高，整体系统简洁高效，体积小、质量轻，便于进行动力学分析。但是，欠驱动机械手的高集成性一定程度上也是牺牲高自由度性能的结果，存在功能性不足，尤其是对于精度要求比较高的手指精巧控制无法胜任。

图表 5: 全驱动灵巧手



资料来源:《机器人灵巧手研究综述》(刘伟等, 2023,《机械传动》), 东方财富证券研究所

图表 6: 欠驱动灵巧手



资料来源:《机器人灵巧手研究综述》(刘伟等, 2023,《机械传动》), 东方财富证券研究所



图表 7: 灵巧手结构设计

仿生结构设计类型	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。	

## 2. 灵巧手结构设计三要素：驱动、传动、感知

典型灵巧手由驱动系统、传动系统、感知系统和控制系统构成。

1) **驱动系统**：驱动系统主要负责提供动力，使灵巧手完成这种动作；

2) **传动系统**：主要作用是将驱动系统产生的动力转换为各手指关节的运动；

3) **感知系统**：包括内部感知和外部感知，内部感知主要是判断灵巧手运动参数如位置、速度、加速度等，外部感知用于判断与外部物体的交互状态，包括触觉、力觉等；

4) **控制系统**：根据感知系统反馈信息，通过软件和算法对驱动和传动系统进行精确控制，实现手部运动。

### 2.1. 驱动系统

2.1.1. 电机：空心杯电机适配手指关节，直流无刷电机推动降本

灵巧手主要的驱动方式包括液压驱动、电机驱动、气压驱动和形状记忆合金驱动，其中电机驱动是主流方案。

1) **液压驱动**：一般由液动机、伺服阀、油泵和油箱等组成，常用于工业

机械手中，适合大型抓取作业；

**2) 电机驱动：**具备体积小、响应快、调控方便、稳定性好、精度高、输出力矩稳定等特点，更加适合灵巧手使用；

**3) 气压驱动：**具备操作方便、质量轻巧、动作迅速、价格适中、维护简便等优点，但可操作性不强，轨迹精度不够；

**4) 形状记忆合金驱动：**适合小型、高精度机器人装配作业，它可以进行负载驱动，且反应快速，且位移大，变位迅速，但其无法长时间工作，并且疲劳强度较低。

图表 8：不同驱动类型对比

类型	介绍	优点	缺点
电机驱动型	通过电机来驱动机器人的关节旋转或实现其他运动。	控制精度高、响应速度快、可靠性高，能够实现复杂的动作和运动。	功耗较高、需要较大的空间和重量限制，以及需要采取措施防止过热和过载等问题。
液压驱动型	通过液体压缩泵产生高压液体，高压液体对输出机构做功产生力。	输出力矩大、动作速度快、稳定性高，能够实现高负载和复杂动作。	需要配套液压系统和油路等设施，相对比较复杂，维护和保养也较为困难。
气压驱动型	利用气动执行元件将压缩空气的压力能转换为机械能，驱动关节和肢体运动。	清洁、无污染，操作简单，低成本，易于维护和保养。	输出力和稳定性相对较低，无法实现高负载和复杂动作。
形状记忆合金驱动型	具有形状记忆效应和伪弹性特性，可以在加热后发生形状变化，从而产生驱动力。目前，人形机器人领域对形状记忆合金驱动的研究主要集中在灵巧手部位。	不需要复杂的控制系统和电源，具备结构简单、功重比大、轻量化、小型化等特点。	形状记忆合金成本较高，对于人形机器人大规模生产和商业化应用会增加成本压力。
混合驱动型	结合不同的驱动方式和技术，以实现更灵活、智能、自适应的运动和互动。目前以电机驱动和液压驱动结合为主。	结合不同驱动方式的优点，以电机驱动和液压驱动结合为例，具有输出力矩大、稳定性高、控制精度高、可实现复杂运动和动作。	维护和保养成本高，需要关注不同驱动部分，且考虑到协同作业，控制系统的设计和实现更为复杂。

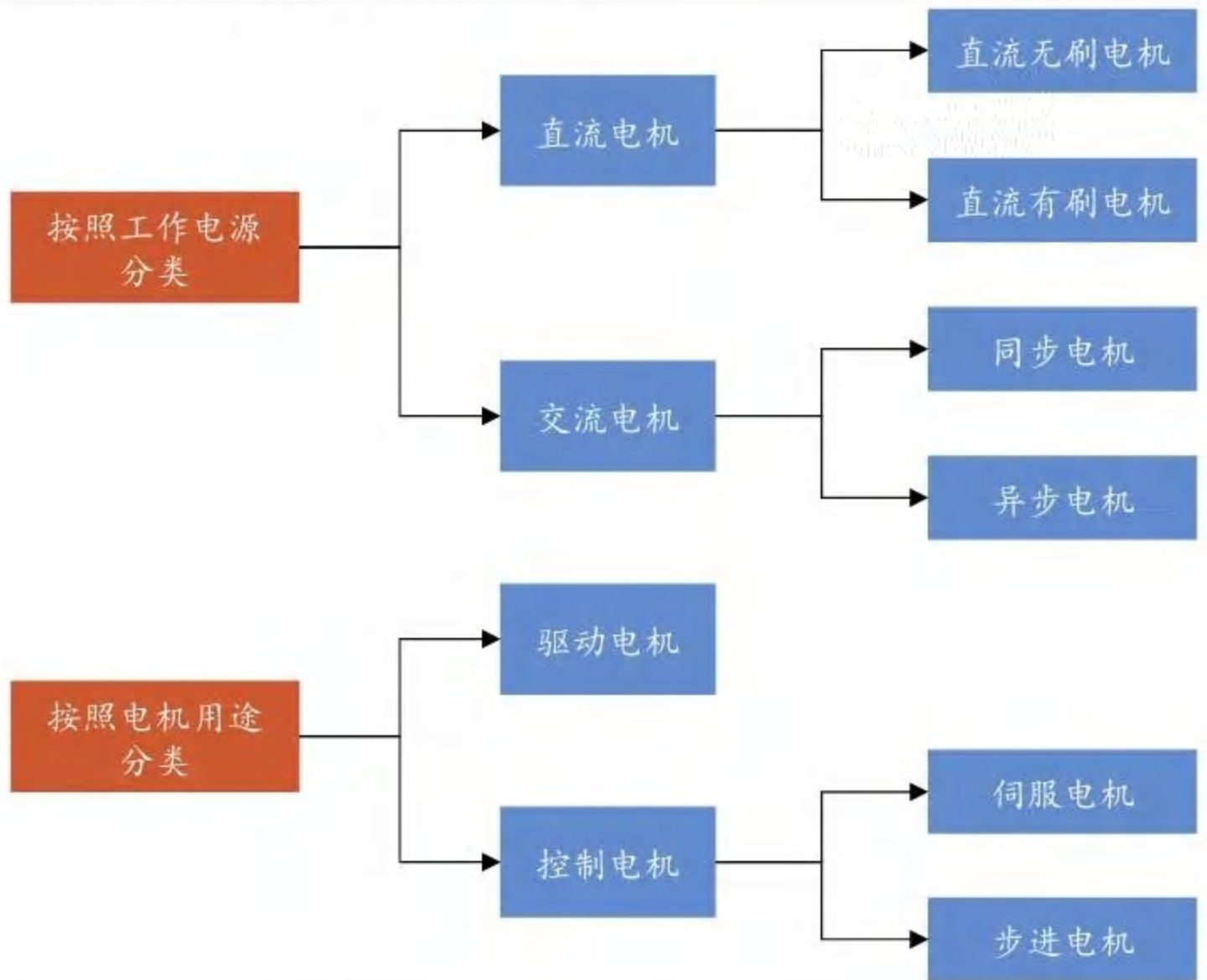
资料来源：《中国人形机器人产业发展蓝皮书》（高工机器人研究院），东方财富证券研究所

电机是指依据电磁感应定律实现电能转换或传递的一种电磁装置，主要作用是产生驱动转矩，作为用电器或各种机械的动力源。以常见的直流电机为例，直流电机核心部件包括定子、转子以及换向器和电刷。其中 1) 定子：由永磁体或电磁铁绕组构成，产生固定磁场；2) 转子：由导电线圈（电枢绕组）和铁心组成，线圈中通入直流电后产生磁场；3) 换向器及电刷：换向器及电刷主要起到改变线圈电流方向的作用，使转子在旋转过程中始终受到一个方向的力矩。电机在工作过程中，当电流通过转子线圈时，线圈产生与定子固定磁场互斥的磁场推动转子转动，随着转子旋转换向器不断改变线圈电流方向使得线圈磁场始终与定子固定磁场互斥，从而使转子持续旋转。

图表 9：直流有刷电机结构图



图表 10: 按工作电源/用途的电机分类



图表 11: 人形机器人主要应用电机类型对比

性能	步进电机	无框力矩电机	永磁同步电机	空心杯电机
控制精度	取决于相数和拍数,两相混合式步进电机的步距角一般为 1.8°、0.9°。	取决于电机结构和编码器,高精度的无框力矩电机控制精度可以达到 0.1° 甚至更高精度。	取决于编码器,高性能的永磁同步电机能达到 0.1° 甚至更高精度。	高性能的空心杯电机能达到 0.1° 甚至更高精度。
低频特性	低速时易出现低频振动现象	扭矩产生相对平滑,无显著的扭矩脉动。	具有良好的低频特性	具有良好的低频特性
矩频特性	输出力矩随转速升高而下降,低速时转矩较高,高速时转矩会急剧下降。	具有高扭矩输出,且随着频率增加,扭矩性能逐渐减小。	具有较高的转矩密度,使其在高速运行时仍然能够输出较大的扭矩。	具有较高的功率密度,温升低,效率高。
过载能力	一般不具有过载能力	具有较强的过载能力	具有较强的过载能力	具有较强的过载能力
运行性能	开环控制,启动频率过高或负载过大易出现失步或堵转的现象,停止时转速过高易出现过冲现象。	闭环控制,一般不会出现失步或过冲现象。	闭环控制,一般不会出现失步或过冲现象。	闭环控制,一般不会出现失步或过冲现象。
速度响应性能 (从静止到工作转速)	200~400 毫秒	几毫秒到十几毫秒	20~50 毫秒	<28 毫秒
悬停能力	停转时转矩达到峰值,保持力矩较大,可以在不使用刹车的情况下保持在停止位置。	在无外部扭矩作用下能够保持稳定的转速。	悬停状态下能够保持稳定的输出,为悬停运动提供强大的支持。	悬停状态下能够保持稳定的输出,为悬停运动提供强大的支持。
经济性	结构简单,成本较低	结构相对简单,成本高	结构相对简单,成本高	结构相对简单,成本高
人形机器人领域应用空间	小	大	大	大

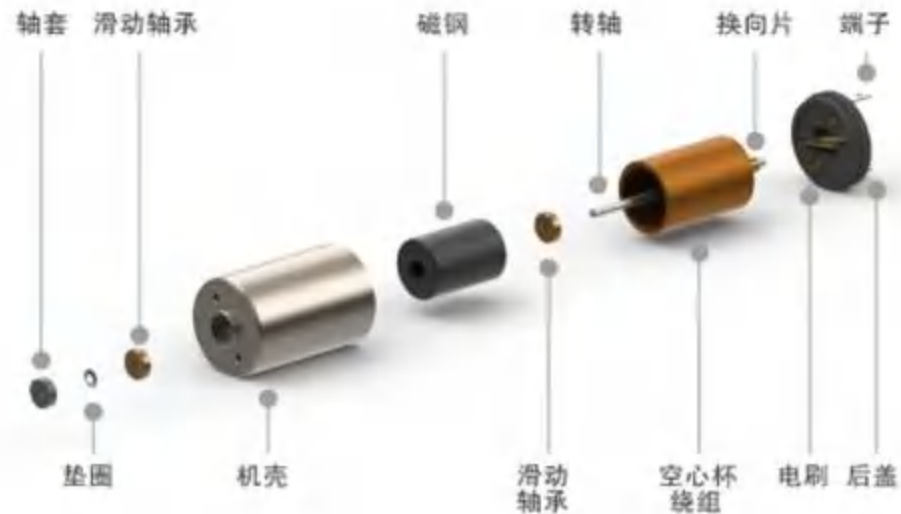
资料来源:《中国人形机器人产业发展蓝皮书》(高工机器人研究院),东方财富证券研究所



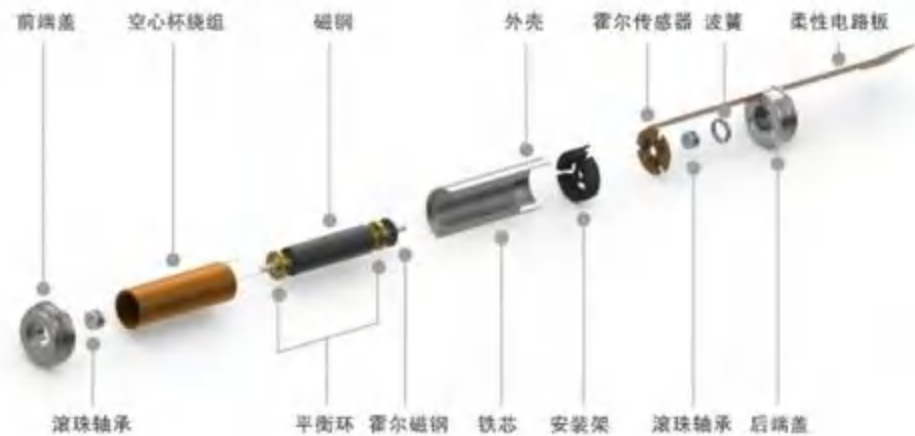
## A) 空心杯电机

空心杯电机具备效率高、控制精度高、结构紧凑、稳定性高等优点，与人形机器人手指关节匹配度较高。空心杯电机是一种微型伺服电机，与传统电机不同之处在于其电机转子（定子）无铁芯，具备：**1) 效率高**：无铁芯电枢基本无贴铁损，能量转化效率最高可达 90% 以上，传统电机一般在 70% 以内；**2) 控制精度高**：机械时间常数小，响应时间极快，空心杯电机机械时间常数一般在 28ms 以内，部分产品甚至小于 10ms，而一般铁芯电机在 100ms 以上；**3) 稳定性高**：空心杯电机具备较高的输出转矩和较小的转矩脉冲，操作运行更加平稳可靠；**4) 结构紧凑**：与同功率铁芯电机相比，空心杯电机体积更小，质量更轻；**5) 寿命长**：无铁芯电枢设计降低电机的机械损耗，便于延长电机寿命。

图表 12: 有刷空心杯电机结构图



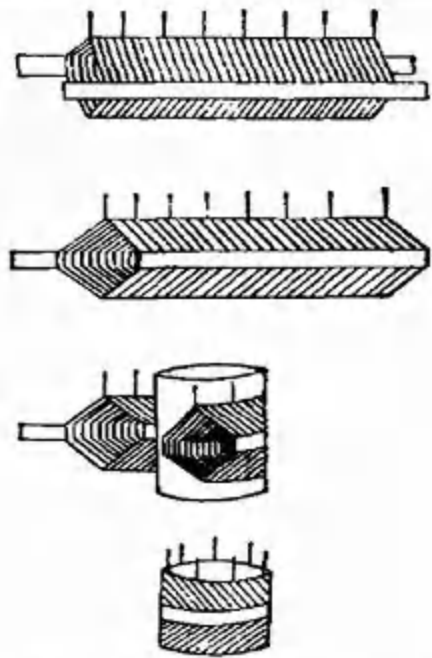
图表 13: 无刷空心杯电机结构图



空心杯电机技术壁垒在于电机绕组，绕组质量直接决定电机性能。电机绕组是电机的重要组成部分，绕组的质量决定了空心杯电机的质量，直接影响到电机可靠性和运行性能。线圈绕组生产工艺包括：**1) 卷绕生产技术**：首先将铜线绕制成一定几何形状的空心线圈，进而将线圈挤扁制成扁平的铜线板，左后再将线板绕成圆柱状线圈；**2) 一次成型生产技术**：利用空心杯线圈绕制设备一次绕制成型。

现行通用的绕制方法分为直绕型、马鞍形和斜绕形，直绕形在绕制过程中形成的端部圆环厚度增大了电机的尺寸，故不适合应用于一些空间受限的场景，斜绕形和马鞍形是目前国外先进空心杯电机厂商较为常用的绕制形式。

图表 14: 卷绕线圈制造流程



资料来源:《马鞍形空心杯电机线圈绕制设备研究》(谢春祥, 2017, 哈尔滨工程大学), 东方财富证券研究所

图表 15: 一次成型后的线圈



资料来源:《马鞍形空心杯电机线圈绕制设备研究》(谢春祥, 2017, 哈尔滨工程大学), 东方财富证券研究所

图表 16: 空心杯电机线圈绕制形式



(a) 直绕形

(b) 马鞍形

(c) 斜绕形

海外先发技术领先，国内厂商加速布局。空心杯电机市场方面，国外头部企业占据主要市场份额，其采用一次性绕制成型的生产技术，掌握壁垒线圈绕组设计和加工、壁垒绕线设备技术等核心技术，而国内主要用绕卷式生产，工艺比较繁琐，自动化程度低，性能与国外先进水平仍有差距。海外主要空心杯电机厂商包括德国 Faulhaber、瑞士 Maxon、Portescap 和美国 Allied Motion Technologies，根据 QY Research 数据，2021 年空心杯电机市场 CR4 超过 65%，国内如鸣志电器、鼎智科技、伟创电气等厂商逐步完成空心杯电机技术突破，并加快布局相关产品，未来有望逐步实现国产化替代。

图表 17: 国内外空心杯电机主要供应商

地区	公司	相关产品/布局进展	应用场景
海外	MAXON	机电驱动系统、紧凑型驱动装置、有刷 DC 电机、无刷 DC 电机、齿轮箱、传感器、控制器等	医疗、工业自动化、航空航天、机器人、汽车等
	Faulhaber	直流无刷电机、步进电机、减速箱、线性致动器、电子控制等	航空航天、工业和自动化、医疗、机器人等
	Portescap	无刷直流电机、有刷直流电机、步进电机、齿轮箱、编码器、控制器等	手术电动工具、医疗设备、工业电动工具、航空航天、机器人、自动化等
	Allied Motion	无刷电机、驱动器、编码器、伺服电机、精密小电机、力矩电机等	自动化、医疗设备、半导体设备、车辆、太空国防等
国内	鸣志电器	步进电机、无刷无齿槽电机、有刷空心杯电机、伺服电机、驱动器、控制器等	半导体、锂电储能、新能源汽车智能化、机器人等
	鼎智科技	线性执行器、空心杯电机、无框力矩电机、直流无刷/有刷电机等	半导体、移动设备、工厂自动化、机器人、生物医学&健康护理等
	拓邦股份	高效电机、智能控制器、工控产品、锂电池	家电、工具、新能源、工业等
	兆威机电	已完成了高转速直流电机、无刷直流电机以及微型空心杯电机和永磁步进电机的开发,并积极布局攻关更具挑战的电机产品。	-
	禾川科技	伺服系统、PLC 等,已有空心杯电机产品	光伏、锂电池、机器人、激光、3C 电

## B) 无刷有槽电机

灵巧手使用的电机按照有无齿槽可分为有齿槽电机和无齿槽电机，大部分直流无刷电机都是有齿槽设计，空心杯电机属于无齿槽电机。

1) 有齿槽:大部分无刷直流电机均采用齿槽设计，定子铁芯上有齿槽，线圈绕制在这些齿槽中;

2) 无齿槽:定子铁芯无齿槽，线圈绕制在空心杯或其他无齿槽结构中。



图表 18: 有齿槽电机及无齿槽电机结构图

有齿槽点击构造

(线圈围绕齿槽间隙缠绕)

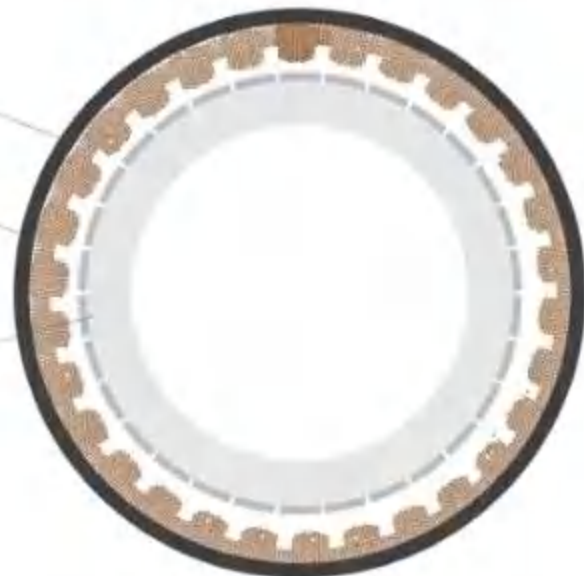


有齿槽vs无齿槽电机

硅钢片

铜质线圈绕组






永磁体 (转子)



图表 19: 有齿槽电机和无齿槽电机特点对比

	无齿槽电机	有齿槽电机
特点一	使用更大的磁铁来尽可能减小气隙, 以提供最大的转矩	高极数类型效率较低, 高转速时转矩也更低
特点二	高转速下磁芯损耗较低, 适用于轻质、低转矩和稳定的应用需求	通过协同设计和标准设计, 能够最大限度地减少齿槽转矩
特点三	尽管消除了齿槽转矩, 但是仍会产生转矩波动, 有一定应用限制	高电流时电枢反应小, 转矩波动更少, 低速时连续转矩更高
特点四	绕组封装在定子叠片中, 运行更加平稳, 产生的转矩可预测且高	更高的单位体积转矩输出、电机常数、效率、加速度、可制作性以及更小的惯性

图表 20: maxon 直流无刷电机与空心杯电机对比

电机	EC 20 flat	EC 45 flat	RE-max 21	RE 10	EC 10	EC-max 16
电机类型	直流无刷电机	直流无刷电机	有刷空心杯电机 (石墨电刷)	有刷空心杯电机 (稀有金属电刷)	无刷空心杯电机	无刷空心杯电机
价格 (元/个)	713-1013	672-920	937-1125	537-722	2144-3119	1416-2463
额定功率 (W)	3	30	6	0.75	8	8
额定转矩 (mNm)	3.56	56.9	1.91	0.76	1.74	7.66
示例图						

## 2.1.2. 减速器：降转速提扭矩，行星&谐波减速器均有应用

减速器是连接动力源和执行机构的中间机构，具有匹配转速和传递转矩的作用，将电机端高转速低扭矩转变为执行端低转速高扭矩。减速器是一种由封闭在刚性壳体内部的齿轮传动、蜗杆传动、齿轮-蜗杆传动所组成的独立部件，常用作原动机与工作机之间的减速传动装置。通常而言，电机的转速可达数千转每分钟且输出扭矩较小，无法满足大部分负载端低转速、大负载的工作需求，在电机输出功率恒定的情况下，降低电机输出转速可以提高其输出扭矩。

图表 21：减速器工作原理



资料来源：科峰智能招股书，东方财富证券研究所

根据原理不同，精密减速器主要分为精密行星减速器、谐波减速器、RV

图表 22: 主要精密减速器类型及特点

类别	结构特点	优点	缺点	应用领域
精密行星减速器	体积比较小, 主要包括行星轮、太阳轮和内齿圈。精密行星减速器单级传动比都在 10 以内, 且减速级数一般不会超过 3 级。	扭矩大、精度可高达 1' 以内、单级传动效率高达 97%、质量轻、寿命可长达 2 万小时、免保养	单级传动比范围小	移动机器人、新能源设备、高端机床、智能交通等行业的精密传动装置
谐波减速器	主要包括波发生器、柔轮与刚轮。减速器工作时, 波发生器会发生可控变形, 同时依靠柔轮、刚轮的啮合传递动力。	传动精度高, 重量和体积小, 运转平稳、传动比大	传递扭矩相对较小, 传动效率低、使用寿命有限	机器人中负载较小的小臂、腕部和手部等关节、航空航天、精密加工设备和医疗设备领域
RV 减速器	主要包括两级传动装置, 分别为渐开线行星齿轮传动和摆线针轮行星传动。	传动比范围广至 31-171, 传动效率高达 85%-92%, 传动平稳性高, 承载能力强, 刚性和耐过载冲击性能好, 传动精度高。	结构复杂、制造难度大、成本高	机器人中负载较重的机座、大臂、肩部等大关节

资料来源: 科峰智能招股书, 东方财富证券研究所

图表 23: 主要精密减速器性能指标

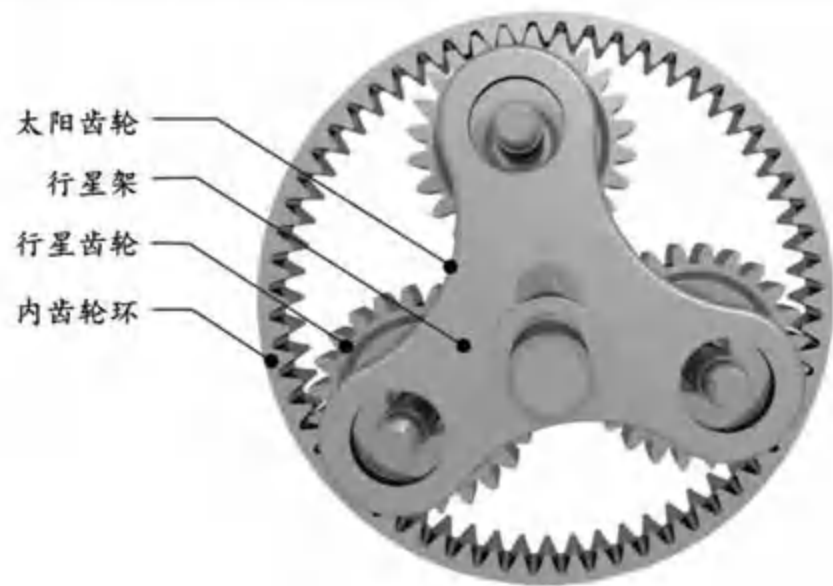
主要指标	精密行星减速器	谐波减速器	RV 减速器
传动效率	>95%	>70%	>80%
传动精度 (")	≤180	≤60	≤60
传动比	3-512	30-160	30-192.4
设计寿命 (h)	>20,000	>8,000	>6,000
扭转刚度 (N·m/arcmin)	10-370	1.34-54.09	20-1,176
额定输出转矩 (N·m)	40-1,200	6.6-921	101-6,135
噪音 (db)	≤65	≤60	≤70
温升 (°C)	≤30	≤40	≤45

资料来源: 科峰智能招股书, 东方财富证券研究所 注: 招股书披露日期为 2023 年 6 月 30 日

行星减速器的核心部件主要包括太阳轮、行星轮、行星架和内齿圈。其工作原理可以概括为以下步骤：

- 1) 太阳轮驱动：太阳轮通常与输入轴连接，由电机等动力源驱动旋转；
- 2) 行星轮运动：太阳轮旋转时，通过与行星轮的啮合，带动行星轮绕太阳轮旋转，同时，行星轮也在内齿圈内滚动，形成一个复合运动；
- 3) 行星架固定：行星架通常与输出轴连接，行星轮在绕太阳轮旋转的同时，也绕行星架的中心旋转，行星架的固定或旋转决定了减速器的输出方式；
- 4) 内齿圈固定：内齿圈通常固定在减速器外壳上，是行星轮的滚动轨道。

图表 24: 行星减速器基本内部结构



资料来源: IQS Directory, 东方财富证券研究所

图表 25: 行星减速器多级驱动结构



资料来源: 兆威机电官网, 东方财富证券研究所

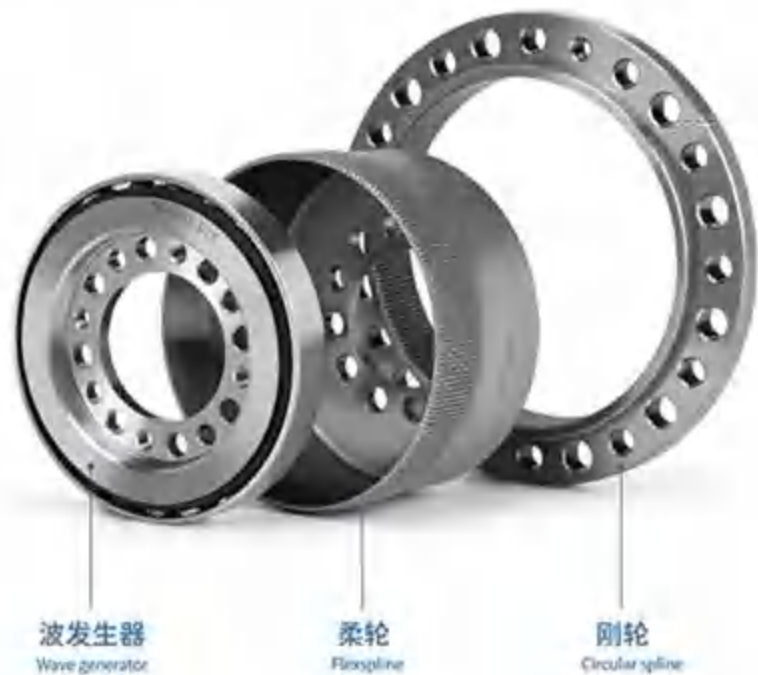
谐波减速器主要由柔轮、刚轮、波发生器组成，通过柔轮的弹性变形传递运动。谐波齿轮减速器主要由带有内齿圈的刚性齿轮（刚轮）、带有外齿圈的柔性齿轮（柔轮）、波发生器三个基本构件组成。谐波传动技术使用柔性构件来实现机械传动，其工作原理通常采用波发生器主动、刚轮固定、柔轮输出的形式：

1) 当波发生器装入柔轮内圆时，迫使柔轮产生弹性变形而呈椭圆状，使其长轴处柔轮齿轮插入刚轮的轮齿槽内，成为完全啮合状态，短轴处两轮轮齿完全不接触，处于脱开状态；

2) 当波发生器连续转动时，迫使柔轮不断产生变形并产生错齿运动，从而实现波发生器与柔轮的运动传递。

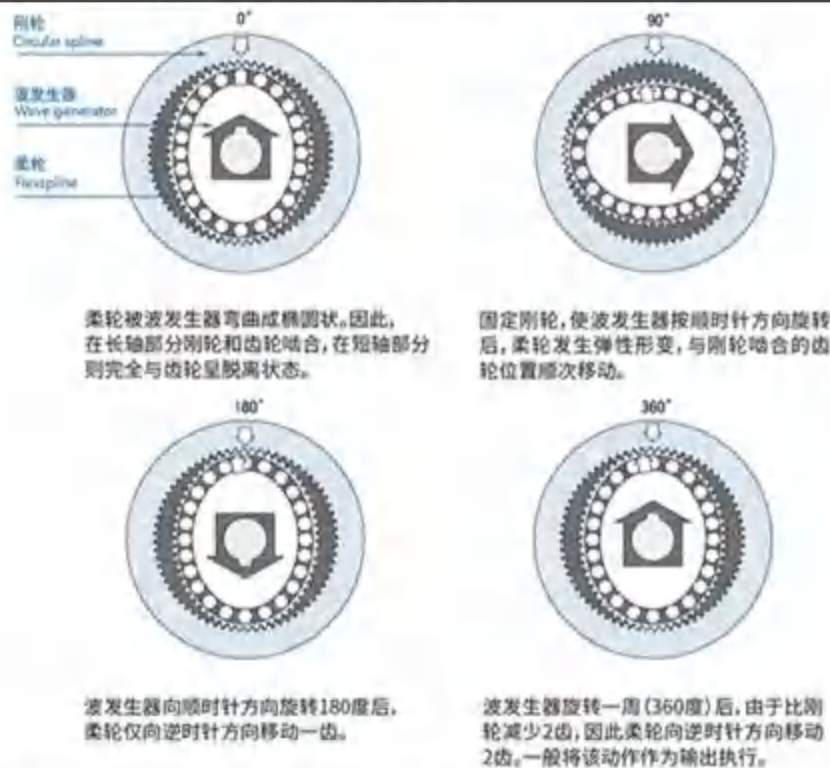


图表 26: 谐波减速器传动装置构成



资料来源: 来福谐波官网, 东方财富证券研究所

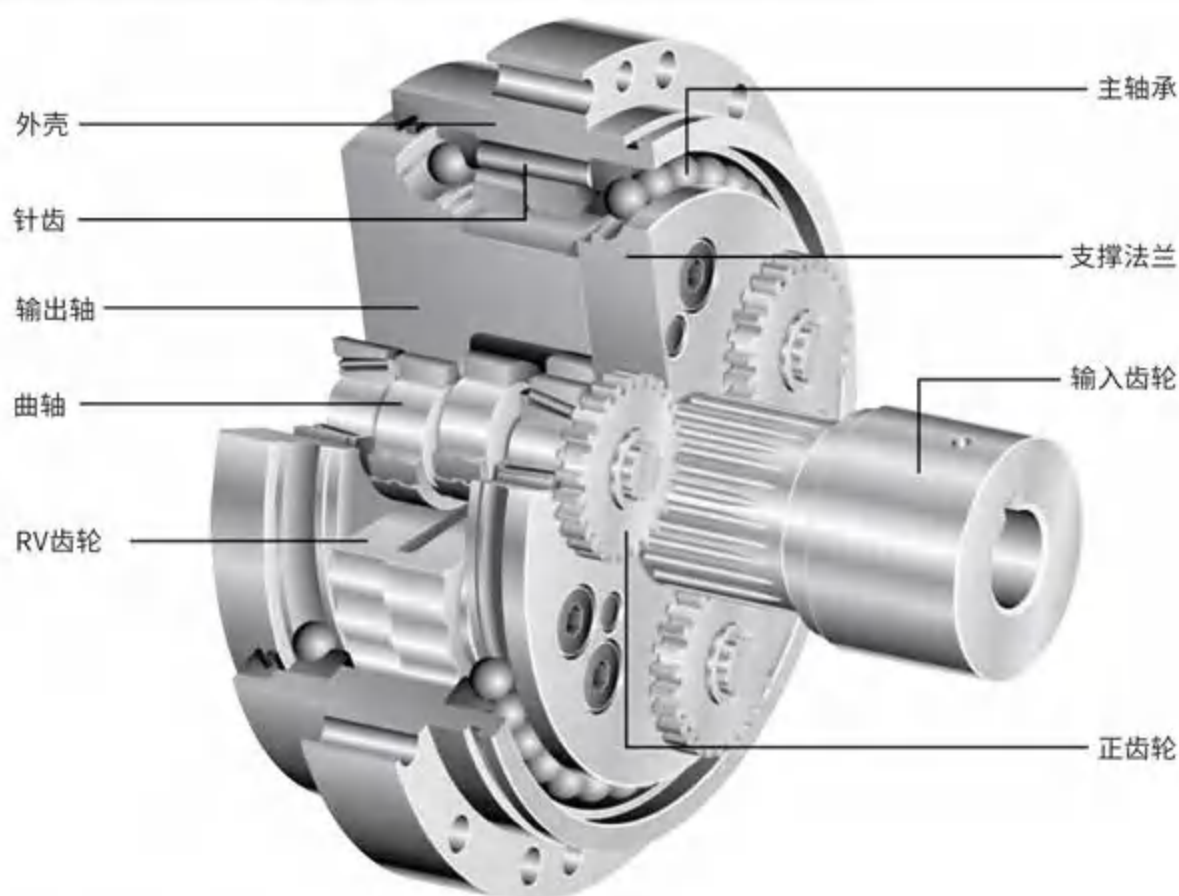
图表 27: 谐波减速器工作原理



资料来源: 来福谐波官网, 东方财富证券研究所

为一封闭差动轮系。

图表 28: RV 减速器内部结构



资料来源：纳博特斯克官网，东方财富证券研究所

特斯拉 Optimus Gen1 灵巧手有 6 个空心杯关节驱动系统，采用空心杯电机+多级行星减速器+蜗轮蜗杆方案。

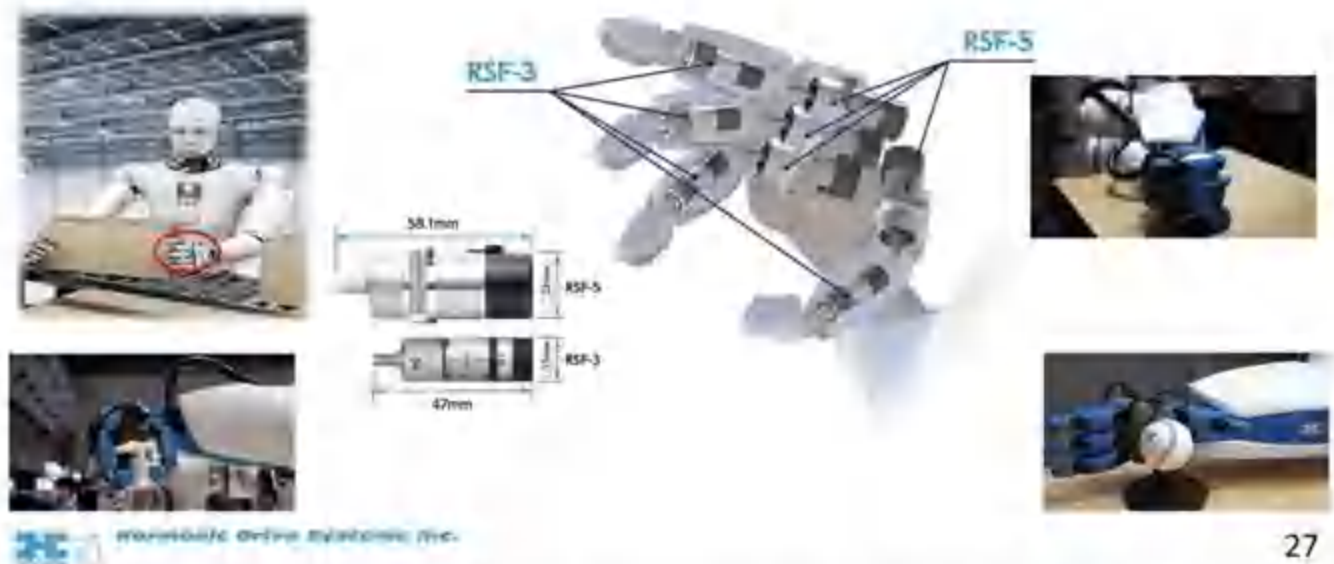
图表 29: 特斯拉 Optimus Gen1 灵巧手



资料来源：特斯拉 2022 AI DAY，汽车电子与软件，东方财富证券研究所

哈默纳科推出搭载 RSF-3、RSF-5 微型谐波减速器的灵巧手方案。

图表 30：哈默纳科搭载谐波减速器灵巧手方案



27

资料来源：哈默纳科官网，哈默纳科 Financial Results for the Fiscal Year Ending March 31, 2024，东方财富证券研究所

## 2.2. 传动系统

传动系统决定灵巧手机械难易复杂程度和成本，同时影响灵巧手传动效率和可靠性。传动系统负责将驱动系统产生的运动合力以一定方式传递到手指关节，从而使得关节做相应运动，灵巧手抓取稳定性和灵活性等重要指标取决于传动系统。

灵巧手主要传动方式包括腱传动、连杆传动、齿轮/蜗轮蜗杆传动、人工肌肉（液压/气动）等。早期多指灵巧手的手指内曾采用齿轮、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是目前灵巧手应用最为广泛的传动方式。

图表 31: 不同传动方式对比

传动方式	特点	缺点
腱传动	<p>由腱（钢丝绳、迪力马绳等）加上滑轮或者软管实现传动。腱一般具有很高的抗拉强度和很轻的重量，容易实现多自由度和远距离动力传输，节省空间和成本，是一种柔顺传动方式。</p>	<p>腱本身的刚度有限，影响位置精度；控制时需要一定的预紧力，容易产生摩擦；腱的布局容易产生力矩和运动的耦合。这些因素都增加了手爪抓取控制的难度和复杂性。</p>
连杆传动	<p>采用平面连杆机构传动，刚度好、出力大、负载能力强、加工制造容易、易获得较高的精度，构件之间的接触可以依靠几何封闭来实现，能够较好实现多种运动规律和运动的轨迹的要求。</p>	<p>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。</p>
齿轮/蜗轮蜗杆传动	<p>驱动器通过齿轮或蜗轮蜗杆将旋转变成直线运动，拉动驱动器和手指之间的弹簧来驱动手指产生动作，手指部分采用金属连接，各个手指动作相互独立，具有多种的抓取构形，和别的多指灵巧手相比，驱</p>	<p>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，手指的结构比较复杂，容易出现故障</p>

## 2.2.1. 腱绳传动：目前主流传动形式，具有排布灵活、柔性传动等优点

腱绳传动具备排布灵活、柔性传动等优点，但负载能力较弱。腱绳在一定程度上模拟了人手的肌腱结构，可使大型驱动系统远离执行机构，通过将电机、减速箱、丝杠置于手臂中，减轻末端的负载和惯量，提升抓取速度，适合空间狭小且需要驱动自由度数目较多的灵巧手场景，但腱绳传动的负载能力弱，预紧力变化大。

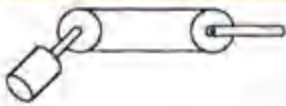
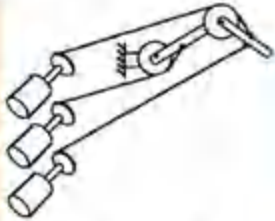
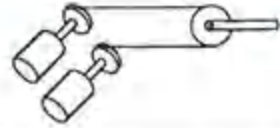
图表 32：腱绳传动灵巧手整体机构



资料来源：《空间五指灵巧手控系统设计》（韩运崧，2016，南京航空航天大学），东方财富证券研究所

目前，主流的腱绳传动方案有三种： $N$ 型、 $N+1$ 型、 $2N$ 型。其中， $N$ 、 $N+1$ 、 $2N$ 分别代表驱动 $N$ 个独立自由度所需的驱动单元数目， $N$ 型方案对电机数目少，但需要预紧机构， $N+1$ 型方案腱绳数目少，但对单根腱绳负载能力要求高， $2N$ 型方案负载能力强，动态性能佳，但电机数量较多。

图表 33: 三种腱绳传动方案对比

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

资料来源:《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》(孙成远, 2015, 哈尔滨工业大学), 东方财富证券研究所

主流腱绳材料包括钢丝绳和高分子纤维两大类。钢丝绳无内摩擦、与滑动表面摩擦系数小、强度高、承载力大, 常见材质有碳素钢丝绳(用于重载领域)、不锈钢钢丝绳(食品加工、海洋开发等)、镀锌钢丝绳(航空、冶金等)、合金钢丝绳(建筑、桥梁等), 通常多股绞合形成线缆。高分子纤维中, 超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)较为常见, 具备高强度、低蠕变性、耐磨损等优点。

### 2.2.2. 丝杠传动: 新型传动方案, 与腱绳优势互补

微型丝杠新型传动方案具备高承载、高效率、高精度、高可靠性等优点。丝杠是将旋转运动转化为直线运动或将直线运动转化为旋转运动的传动元件, 按照摩擦特性可分为滑动丝杠、滚动丝杠及静压丝杠, 滑动丝杠结构简单、成本低但传动效率较低, 静压丝杠定位精度极高, 但需增加一套供油/气系统, 成本高应用少。滚动丝杠包括滚珠丝杠和行星滚柱丝杠, 在机器人领域应用广泛。

1) 滚珠丝杠: 主要结构包括滚珠丝杠、滚珠螺母、滚珠三部分, 适合高精度、高效率、高可靠性传动场景;

2) 行星滚柱丝杠: 主要结构包括丝杠、行星滚柱、保持架、内齿轮和螺母, 相比滚珠丝杠优势主要包括承载能力及寿命更强、导程和节距灵活体积小、速度和加速度更高等。

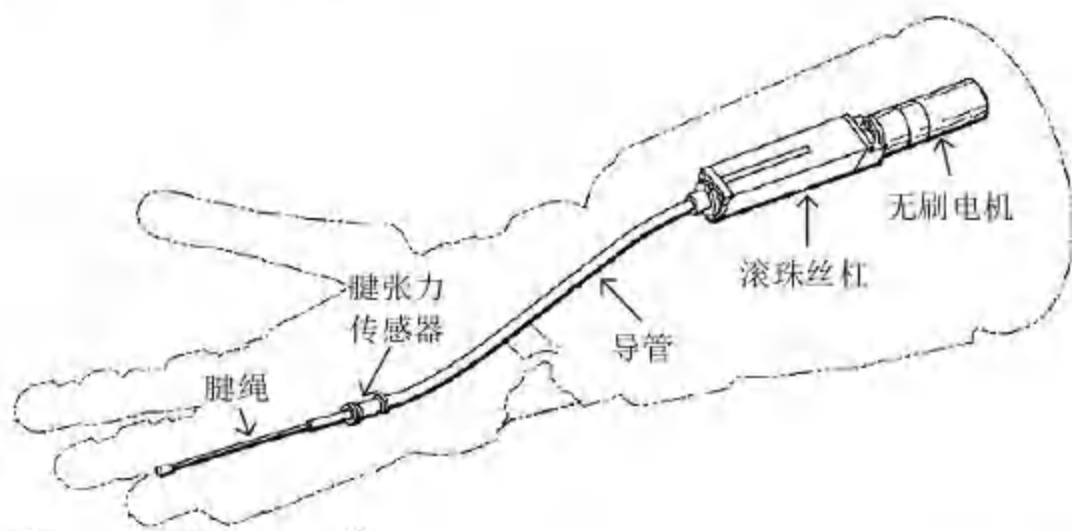
图表 34: 滑动丝杠、滚动丝杠及静压丝杠



资料来源: 传动网, 南京工艺, 东方财富证券研究所

微型丝杠+腱绳复合传动或成未来主流方案。2024年11月28日，Tesla Optimus在X平台官方账号发布旗下Optimus机器人接球视频展示其新一代手臂和灵巧手，掌内所有驱动系统已移至前臂，通过腱绳驱动手指。参考《多指灵巧手动力学与操作控制技术研究》（徐彤彤，2019，南京航空航天大学），电机和丝杠外置于手臂中，电机通过减速箱带动微型丝杠，电机轴转动被转化为丝杠螺母的直线运动，丝杠螺母拉动腱绳，腱绳另一端连接到手指指骨上，拉动手指绕关节轴运动。

图表 35：腱绳+丝杠复合传动

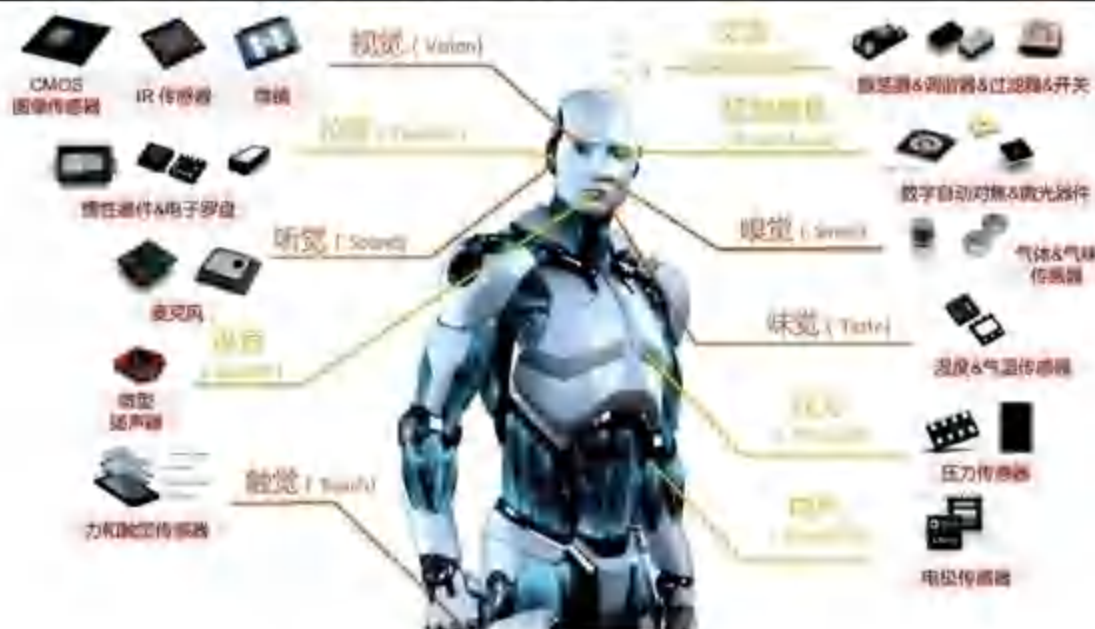


资料来源：《多指灵巧手动力学与操作控制技术研究》（徐统统，2019，南京航空航天大学），东方财富证券研究所

### 2.3. 感知系统

感知是控制和执行的前提，人形机器人可通过传感器实现对外界光、力、声、电等信息的感知，为控制和执行提供实时反馈。传感器是软件控制和硬件零部件的桥梁，根据检测对象不同，可分为内部传感器和外部传感器，内部传感器用于检测机器人/灵巧手的运动参数如位置、速度、加速度等，外部传感器主要针对周围环境信息的感知，常见的外部传感器包括力传感器、视觉传感器、触觉传感器以及温湿度传感器等，用于灵巧手的传感器主要是力/力矩传感器和触觉传感器。

图表 36：人形机器人传感器应用位置示意图



资料来源：高工机器人微信公众号，Yole，高工机器人产业研究所GGII，东方财富证券研究所

## 2.3.1. 力/力矩传感器：帮助灵巧手实现精准力控，应变式性能更优

力/力矩传感器可以将力/力矩的量值转换为相关电信号。根据测量维度，力觉传感器可以分为一至六维传感器。一维、三维和六维力传感器最常见。六维传感器是维度最高的力觉传感器，能给出最为全面的力觉信息。

**一维力传感器：**测定一个方向的力，要求待测力的方向能完全与标定坐标轴重合，常见的压力传感器、称重传感器都属于一维力传感器。

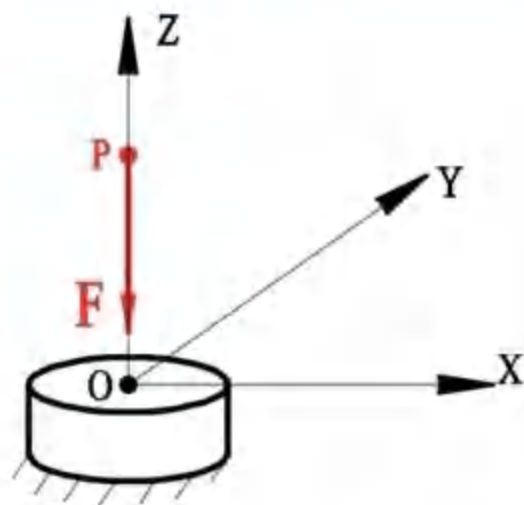
**三维力传感器：**测定三个正交方向的力。如果待测力的方向变化，但力的作用点保持不变，与传感器的标定参考点重合，那么用三维力传感器就能完成测量任务，但如果待测力的作用点不在标定参考点，由于三维力传感器无法测量力矩，则会产生测量偏差。

**六维力传感器：**测量三个正交方向的力和三个正交方向的力矩。即使待测力的方向任意变化，作用点不在标定参考点，六维力传感器也能完成测量任务。六维力传感器通过内部算法解耦各个方向的力和力矩的干扰，使得力觉信息反馈更全面，是多维力传感器中功能最为全面、应用最为广泛的产品类型。



图表 37：一维/三维/六维传感器的测力对比

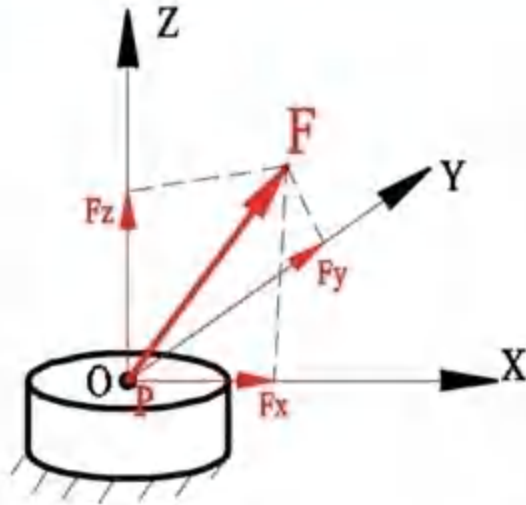
一维



O——力传感器标定参考点  
P——力的作用点  
OXYZ——传感器标定坐标系

一维力传感器的标定坐标轴为 OZ 轴，如果被测量力 F 的方向能完全与 OZ 轴重合，那么此时用一维力传感器就能完成测量任务。

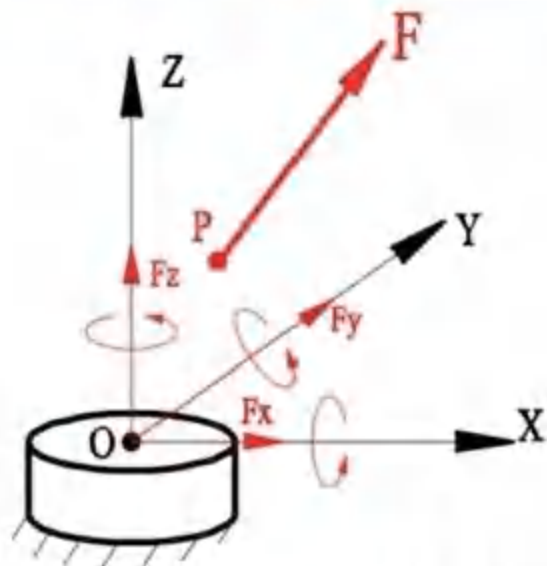
三维



O——力传感器标定参考点  
P——力的作用点  
OXYZ——传感器标定坐标系

力 F 的作用点 P 始终与传感器的标定参考点 O 保持重合，力 F 的方向在三维空间中随机变化，这种情况下用三维力传感器就能完成测量任务，它可以同时测量  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  这三个 F 的分力。

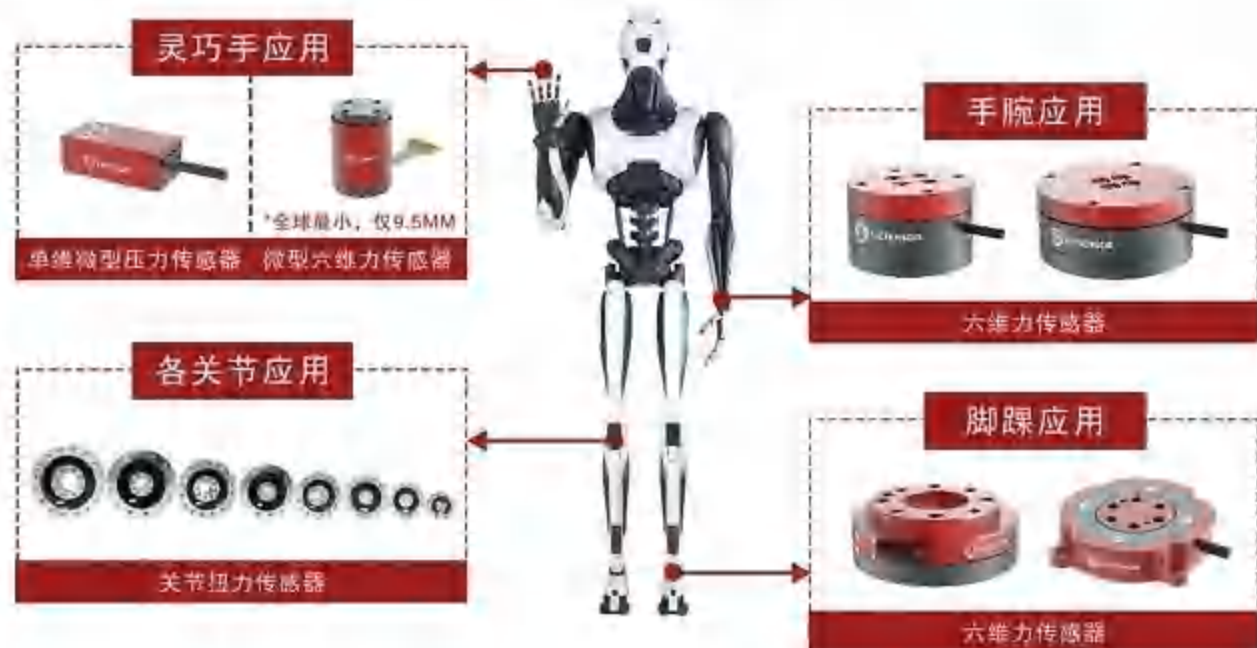
六维



O——力传感器标定参考点  
P——力的作用点  
OXYZ——传感器标定坐标系

空间中任意方向的力 F，其作用点 P 不与传感器标定参考点重合且随机变化，这种情况下就需要选用六维力传感器来完成测量任务，同时测量  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  六个分量。

图表 38：人形机器人领域力传感器应用位置示意图



资料来源：鑫精诚微信公众号，东方财富证券研究所

根据感力原理不同，力/力矩传感器主要分为应变片式、光学式及压电/电容式。应变片式力/力矩传感器在稳定性、信噪比以及动态特性等方面具有明显优势，目前市场应用的力/力矩传感器大部分式给予应变式的测量，基于压电、电容和光学等原理测量的力/力矩传感器下游尚未得到广泛应用。

**应变式力传感器：**采用的是硅应变片或金属箔，压电式传感器可分为电容和压电两种。其原理都是转换元件应变片随力敏元件同时发生形变，导致自身电阻值、电压差、光栅变化，通过电信号反应力和力矩的改变。硅应变片能够保持高刚度、稳定性和信噪比，缺点是成本较高、制作工艺复杂；

**光学式力传感器：**测量范围较广、抗电磁干扰能力强，但缺点是刚性偏弱，并且对环境的要求较高；

**压电/电容式力传感器：**拥有高灵敏度和高分辨率，并且环境适用性较强，但缺点是电路复杂，信号漂移难以抑制。

图表 39: 不同类型力/力矩传感器对比

传感元件类型	原理及特点	优点	缺点	代表企业
应变片式	通常采用的是硅应变片或金属箔,本质是材料本身发生形变进而转化为阻值变化	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 精度高、技术成熟、</li> <li>• 测量范围广、成本</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 生产工艺复杂</li> <li>• 金属箔式应变计输出微弱</li> </ul>	ATI、宇立仪器、坤维科技、鑫精诚、 蓝点触控、海伯森、神源生智能、 Sintokogio、Bota Systems AG、SCHUNK、 埃力智能、ME-Me $\beta$ systeme GmbH 等
光学式	通过光纤、光栅反应形变,再转化成力	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可靠性高</li> <li>• 测量范围广</li> <li>• 抗电磁干扰能力强</li> <li>• 高灵敏度和高分辨</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 对测试环境要求高</li> <li>• 刚性偏弱</li> </ul>	OnRobot、松果体、华力创等
压电/电容式	电容是通过极距的变化导致电压变化;压电式他用过形变改变电荷	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 频率范围款,结构简单</li> <li>• 环境适用性强</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 调理电路复杂</li> <li>• 信号漂移难以抑制</li> </ul>	Robotiq、Robptous、WACOH-TECH、 Kistler 等

资料来源:高工机器人微信公众号 GGII, 东方财富证券研究所

## 2.3.2. 触觉传感器：赋予灵巧手触觉感知能力，逐步向仿生电子皮肤演进

触觉传感器赋予灵巧手触觉感知能力，通过接触测量物体的物理特征，从而实现对周围环境的感知。机器人触觉感知有许多应用场景，如机器人在抓取物体时通过触觉感知来控制抓取力度的大小，不会因为抓力过小而使物体滑落，也不会因为抓力过大导致物体损坏，同时机器人还能根据触觉信息来识别接触物体的材质及种类等。

图表 40：特斯拉 Optimus Gen2 灵巧手搭载触觉传感器轻松拿取鸡蛋



资料来源：X 平台 Tesla Optimus 官方账号，东方财富证券研究所

根据原理不同，触觉传感器分为压阻式、电容式、压电式和光学式等，最常见的是压阻式、电容式和压电式触觉传感器。

1) **压阻式**：是利用弹性体材料的电阻率随压力大小的变化而变化的性质制成，并把接触面上的压力信号变为电信号；

2) **电容式**：在外力作用下使两极板间的相对位置发生变化，从而导致电容变化，通过检测电容变化量来获取受力信息；

3) **压电式**：基于压电效应的传感器。压电效应指当晶体受到法向力时，内部产生电极化现象，撤掉外力时，晶体又恢复到不带电状态。将压电式触觉传感器连接到电荷放大器和测量电路上，采集其与所受外力相关的电信号，从而实现触觉检测；

4) **光学式**：将传感器所受压力映射为光信号强度、波长等性质的变化，通过检测光学信号来检测传感器所受压力。

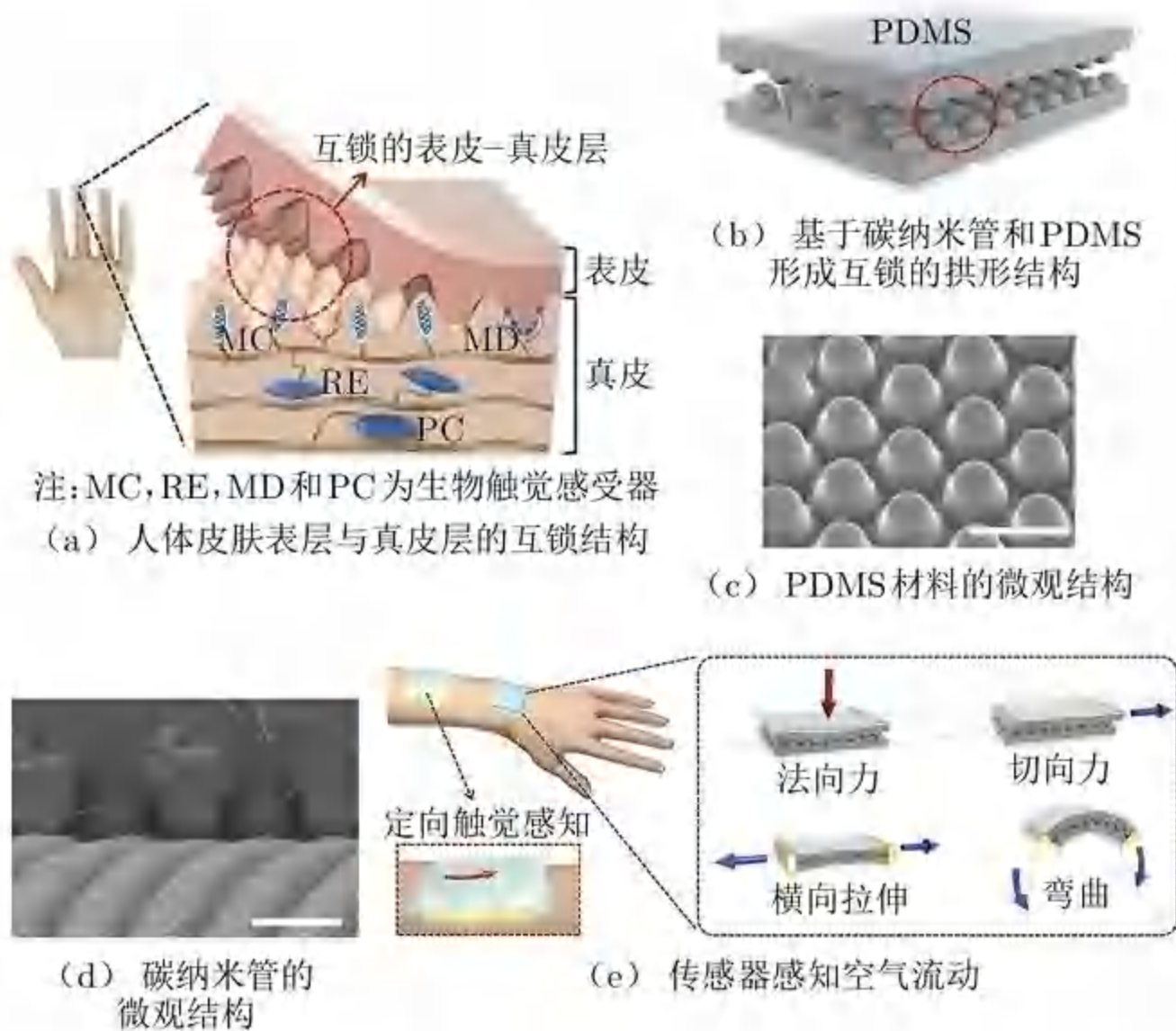
图表 41：主要触觉传感器类型优缺点对比

	优点	缺点
压电式触觉传感器	灵敏度高、信噪比高、可靠性高、材料刚度高、线性度好	易受噪声干扰，其介电性会受温度影响
压阻式触觉传感器	负载能力强、鲁棒性好、电信号测量便捷	其迟滞性较大，不利于快速响应，并且其温漂大，线性度也较差
电容式触觉传感器	灵敏度与空间分辨率高，响应幅度宽	测量电路复杂，传感器易受电气干扰的影响
光学式触觉传感器	分辨率高，无电气干扰的问题	容易受到温度影响，且光纤的微弯曲会导致光损失，分析触觉信息的计算方法复杂

资料来源：《触觉传感器与电子皮肤研究进展》（朱盛鼎等, 2022, 《电子机械工程》），《高灵敏度柔性电子皮肤的研究与应用进展》（吴帅帅等, 2023, 《传感器与微系统》），东方财富证券研究所

触觉传感器向具备阵列化、柔性化和集成化特点的电子皮肤方向发展。随着技术发展，触觉传感器不再局限于采集力信息，对模拟生物皮肤复杂属性与功能的仿生化需求提升，即触觉传感器逐步向具备阵列化、柔性化和集成化特点的电子皮肤演进。1) **阵列化**:为获取触觉必须使触觉传感器与物体接触，因此表面接触面积越大，获取信息量越多，阵列化、高密度的触觉传感器可获取不同位置、不同时间的触觉信息；2) **柔性化**:触觉传感器从物理特性上像人的皮肤一样柔顺，并可粘贴安装载体表面；3) **集成化**:触觉传感器集成功能、温度、湿度、硬度、粘度等多维感知能力。

图表 42: 触觉传感器阵列电子皮肤



### 3. Optimus 灵巧手迭代复盘与展望

Optimus 一代灵巧手采用空心杯电机+齿轮箱(齿轮+蜗杆)+金属腱绳方案:

1) Optimus 一代灵巧手 200 包括 202 手掌、204a-204e 手指, 204 手指又包含 206a-e 近指节、208a-e 远指节和 210a-e 基件:

图表 43: 特斯拉 Optimus 一代灵巧手正视图

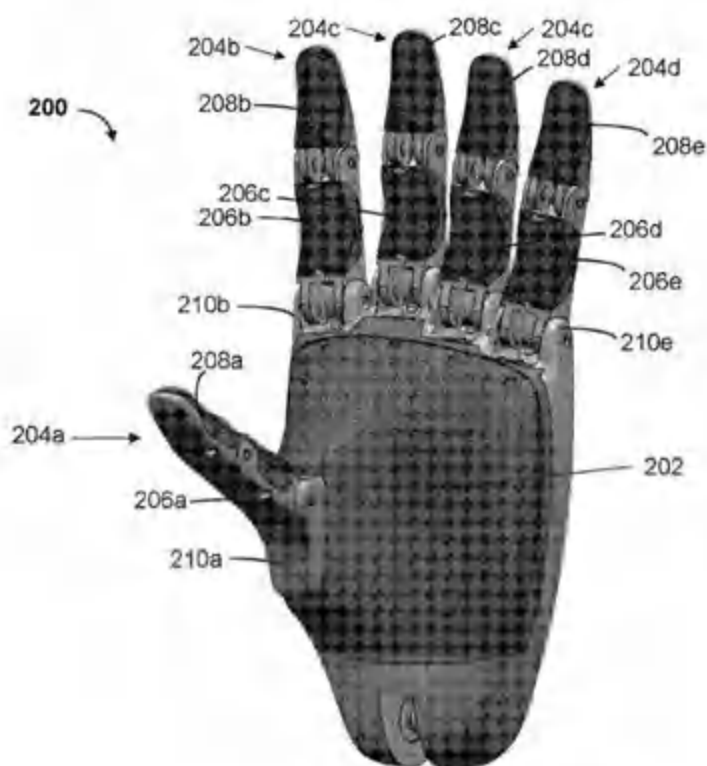
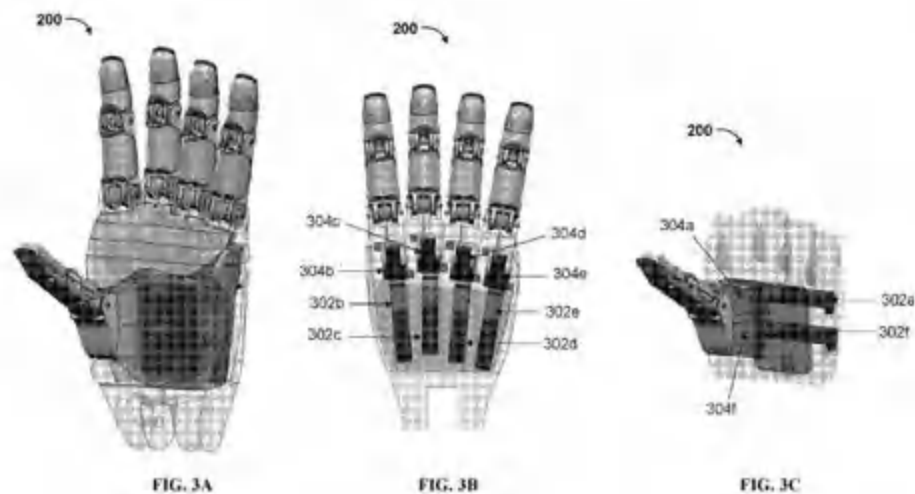


FIG. 2

资料来源: 特斯拉灵巧手专利 WO2024/073138 A1, 机器人前瞻公众号, 东方财富证券研究所

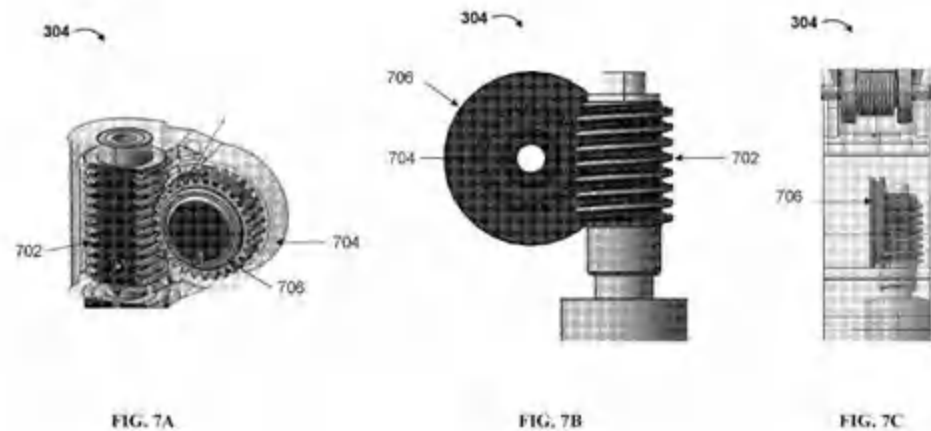
2) Optimus 一代灵巧手内部结构为 6 个电机 302a-f 和齿轮箱 304a-f, 302a-e 五个电机可驱动对应手指 204a-e 的近指节 206a-e 和远指节 208a-e 运动, 电机 302f 负责驱动拇指 204a 外展或内收, 齿轮箱 304 包括一个齿轮 702 和一个蜗杆 704, 齿轮 702 固定在电机 302 的输出轴上, 蜗杆 704 中的滑轮 706 与腱绳 416 连接, 当电机 302 工作时, 输出轴旋转通过齿轮 702、蜗杆 704、滑轮 706 的传导, 最终拉动腱绳 416;

图表 44: 特斯拉 Optimus 一代灵巧手透视图



资料来源: 特斯拉灵巧手专利W02024/073138 A1, 机器人前瞻公众号, 东方财富证券研究所

图表 45: 齿轮箱内部结构

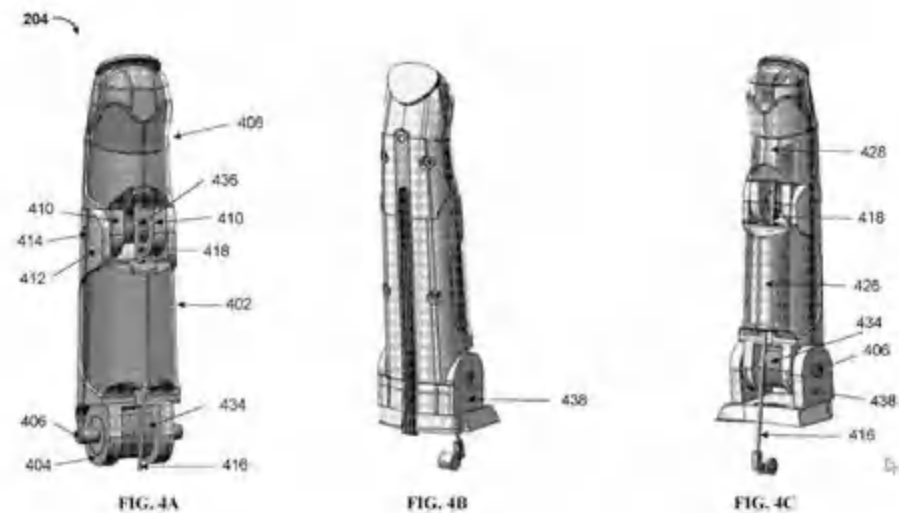


资料来源: 特斯拉灵巧手专利W02024/073138 A1, 机器人前瞻公众号, 东方财富证券研究所

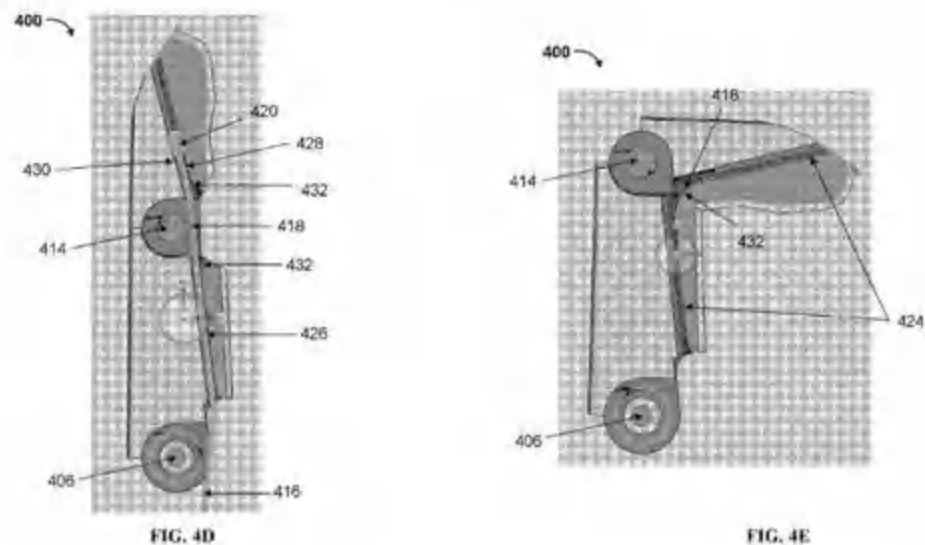


3) Optimus 一代灵巧手单指的重要部件包括近指节部件 402、远指节部件 408、枢轴 406 和 414、腱绳 416 和 418, 其中近指节部件 402 与手掌 202 耦合, 并可围绕第一枢轴 406 旋转, 远指节部件 408 与近指节部件耦合, 并可围绕第二枢轴 414 旋转, 腱绳 416 和 418 是同一根腱绳的不同部分, 腱绳 416 与电机 302 或齿轮箱 304 连接, 腱绳末端 420 与远指节部件 408 或其结构啮合。当腱绳 416 被电机 302 拉动时, 拉力通过腱绳 416 传导至远指节部件 408, 从而导致近指节部件 402 围绕第一枢轴 406 旋转或远指节部件 408 围绕第二枢轴 414 旋转。

图表 46: 特斯拉 Optimus 一代灵巧手手指正视图、背视图及侧视图



图表 47: 腱绳拉动近指节/远指节旋转示意图



资料来源: 特斯拉灵巧手专利W02024/073138 A1, 机器人前瞻公众号, 东方财富证券研究所

资料来源: 特斯拉灵巧手专利W02024/073138 A1, 机器人前瞻公众号, 东方财富证券研究所

4) 手指零部件主要包括指甲、自动张紧器、手动张紧器、扭簧、销钉、轴承等，枢轴 406 或 414 由销钉、扭簧、轴承构成，扭簧放置在销钉上，并通过轴承固定在远指节部件或近指节部件上。

图表 48: 特斯拉 Optimus 一代灵巧手手指零部件爆炸图

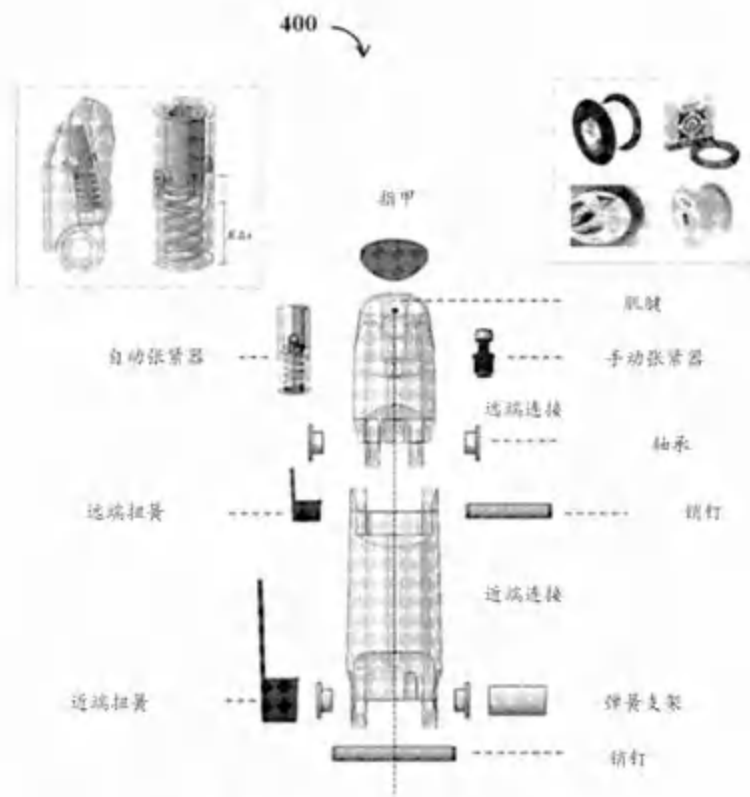
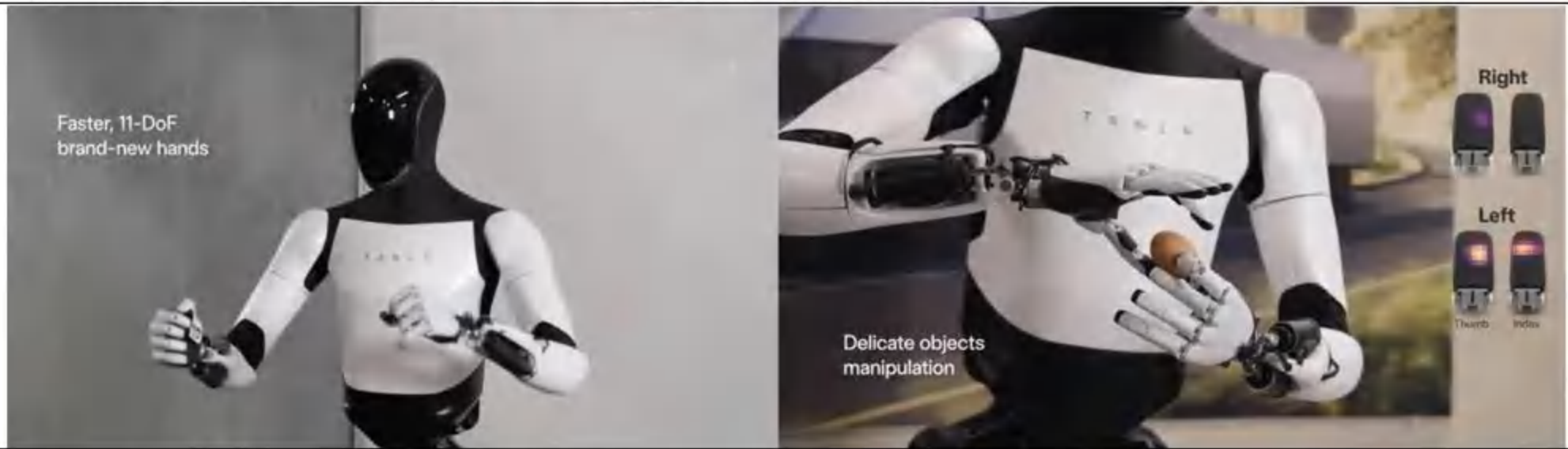


FIG. 4F

图表 49: Optimus Gen2 灵巧手维持 11 个自由度并引入触觉传感器



资料来源: X 平台 Tesla Optimus 官方账号, 东方财富证券研究所

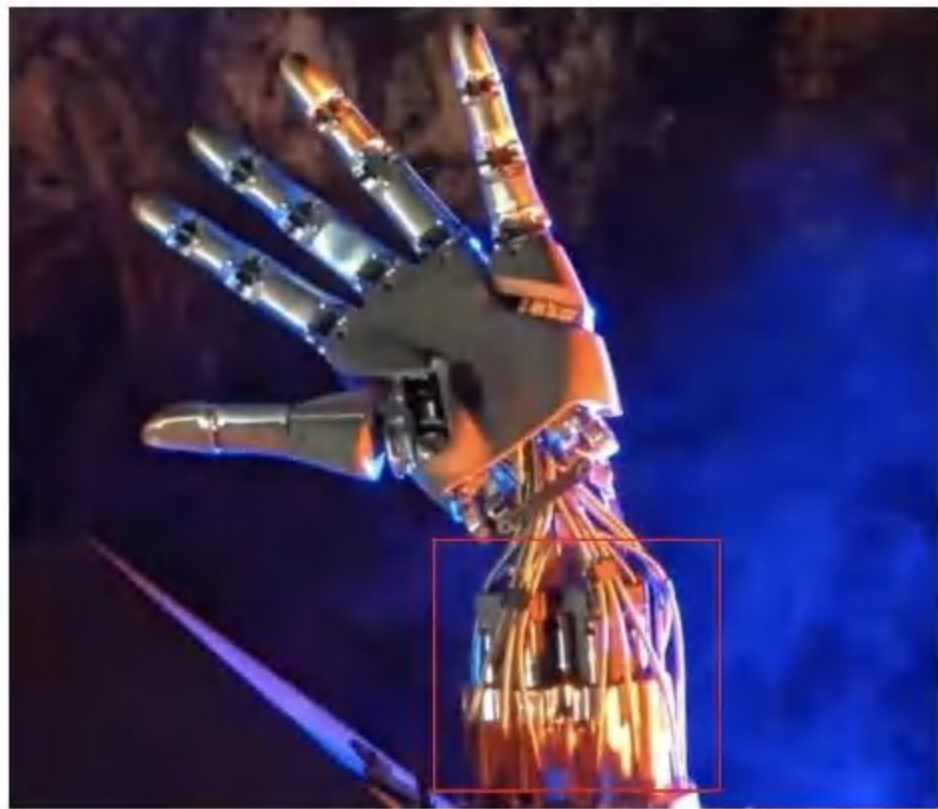
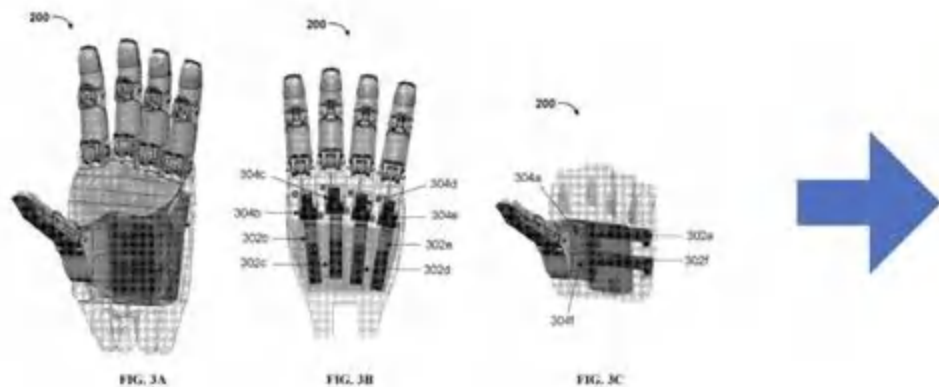
Optimus gen3 灵巧手相比前两代变化较大，根据公开信息核心变化主要包括驱动系统外置于手臂中，自由度由 11 个提升至 22 个并且采用丝杠替代蜗杆与腱绳组成复合传动系统。

1) 自由度提升：Optimus gen3 灵巧手自由度由 11 个提升至 22 个，预计电机需求由 6 个提升至 13 或 17 个；

图表 50：Optimus gen3 灵巧手自由度提升至 22 个



图表 51: Optimus Gen3 灵巧手驱动系统外置于手臂中



3) 丝杠+腱绳复合传动: Optimus Gen3 保留了末端腱绳的传动方式, 电机端将蜗杆替换为微型丝杠, 有效提高传动效率并提升灵巧手操控精度和负载能力。

图表 52: Optimus gen3 灵巧手保留末端腱绳的传动形式



资料来源: X 平台 Tesla Optimus 账号, 东方财富证券研究所

图表 53: Optimus Gen3 灵巧手电机端蜗轮蜗杆替换为微型丝杠

