

人形机器人“好用”的关键

特斯拉Optimus22自由度灵巧手方案解析

投资评级：推荐（维持）

报告日期：2025 年 01 月 03 日

分析师：林子健

SAC编号：S1050523090001

研创价值

灵巧手的需求来源于柔性制造

人体结构是最适应现代文明的进化形态，同理，“人造人”是最贴近人类日常生产生活需求的机器人形态。将自动化生产线转变为柔性制造车间，需要寻求智能的解决方案，而这种解决方案可以由灵巧手和人形机器人来缔造，并且有机器学习和类脑智能技术的加持，数字化的日常生活都能成为人形机器人的学习资料，智能性将持续深化。可以让机器人像人一样使用工具的灵巧手，是提升机器人柔性操作能力的关键部件，是柔性制造避不开的一环。

特斯拉OptimusGen3 灵巧手有三大变化，三大变化均指向丝杠用量提升

我们推测，特斯拉下一代灵巧手方案是N自由度、N 腱绳、N 执行器方案。根据10月10日特斯拉在发布会上的演示视频，特斯拉新一代灵巧手采用腱绳驱动的传动方式，肌腱的一端固定在指尖(骨骼)中，另一端连接到执行器(肌肉)。目前Opimus灵巧手自由度为22个，已与人手处于相当水平。我们推测，特斯拉手部执行器数量在17/22个。

驱动器外置带来自由度提升：驱动器后置集成在手臂上可以放入更多的驱动器，直接增加灵巧手的自由度；

采用丝杠替代蜗杆：二者作用均是将旋转运动转变为直线运动，采用丝杠能有效提升灵巧手的精度和载荷能力，提高传动效率；

采用腱绳替代扭力弹簧：上一代机器人手指伸展主要依靠扭力弹簧复原，但现在采用一根单独的腱绳完成伸展，灵活性进一步提高。

Optimus灵巧手后续进展演绎

灵巧手工程量占据Optimus 工程量的50%。灵巧手作为机器人上最重要的末端执行器，我们认为其设计和构造必然会随着机器人的应用场景改变而改变。现阶段仍然没有办法打造出同时具备低成本、长寿命、高精细化的灵巧手。这一代22自由度的Optimus灵巧手已经在自由度上接近人手，但腱绳结构还是存在一定程度上的不足。在实际应用中出于实用性和成本考虑，灵巧手必然、会迭代出多个版本，使得不同场景中的机器人可以灵活搭配上不同灵巧手来完成相对确定场景中的工作。应用场景特性不同，采购不同版本的灵巧手的成本会低于采购不同版本的机器人，灵巧手是机器人走向“好用”的关键。

灵巧手关键零部件解析

灵巧手价值量最高的三个部件即丝杠、电机、减速器，推荐标的包括：

- 1) 丝杠：双林股份、贝斯特、北特科技、五洲新春；
- 2) 空心杯电机和减速器：鸣志电器、兆威机电、雷赛智能；
- 3) 总成：捷昌驱动、兆威机电。

重点关注公司及盈利预测

公司代码	名称	2025-01-03 股价	EPS			PE			投资评级
			2023	2024E	2025E	2023	2024E	2025E	
002050. SZ	三花智控	22.84	0.81	0.88	1.03	28.20	26.08	22.14	未评级
002979. SZ	雷赛智能	30.11	0.45	0.70	0.89	66.91	43.00	33.66	未评级
003021. SZ	兆威机电	74.98	1.05	0.90	1.14	71.41	83.44	66.00	未评级
300100. SZ	双林股份	28.38	0.20	0.99	1.03	141.90	28.67	27.55	买入
601689. SH	拓普集团	47.69	1.95	1.75	2.25	24.46	27.22	21.23	未评级
603009. SH	北特科技	39.51	0.14	0.20	0.36	282.21	197.55	109.75	买入
603667. SH	五洲新春	25.02	0.40	0.44	0.57	62.55	56.97	43.98	未评级
603728. SH	鸣志电器	52.11	0.34	0.33	0.50	154.58	159.80	104.85	未评级

资料来源：wind，华鑫证券研究(未评级公司盈利预测取自wind一致预期)

机器人下游应用不及预期

地缘政治风险

研发进度不及预期

目 录

CONTENTS

1. 灵巧手是机器人最重要的末端执行器
2. 特斯拉下一代灵巧手三大核心变化均指向手部丝杠价值量上升
3. 灵巧手关键零部件解析
4. 风险提示

01

灵巧手是机器人最重要的末端执行器

研：创价值

1、灵巧手是机器人最重要的末端执行器

1.1、灵巧手是机器人一种复杂的末端执行器，其需求来源于柔性制造

末端执行器决定机器人的工作性能。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。机器人的末端执行器主要分为工业机械手和仿人多指灵巧手。传统的工业机械手大多是针对特定的工作任务、特定被夹持零件而设计的，可以有效地执行简单的重复性任务。工业机械手自由度少，结构简单，易于控制，但是灵活性低，没有配置传感器，无法进行精确的位置控制和力控制，通用性差。

机器人多指灵巧手是一种高度灵活、复杂的末端执行器。相比于工业机械手，灵巧手具有以下优点：1) 仿人多指灵巧手通常具有多根手指，每根手指都具有多个关节和多个自由度，具有很高的灵活性；2) 仿人多指灵巧手配置了必要的传感器，可以精确控制灵巧手的操作；3) 灵巧手的每根手指都可以看作是一个微小的连杆机器人，这种微小的外形尺寸使得灵巧手具有很高的操作精度；4) 仿人多指灵巧手通常都通用性强，可以对目标物体实施多种仿人操作，对类人工作环境的适用性强，可以实现在未知和非结构环境中对不同形状的物体进行抓取。

末端执行器灵活度逐渐趋于人类手部



典型两指夹持器

联动型三指夹持器

多关节手指抓持手

多指灵巧手

资料来源：机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战_蔡世波，华鑫证券研究

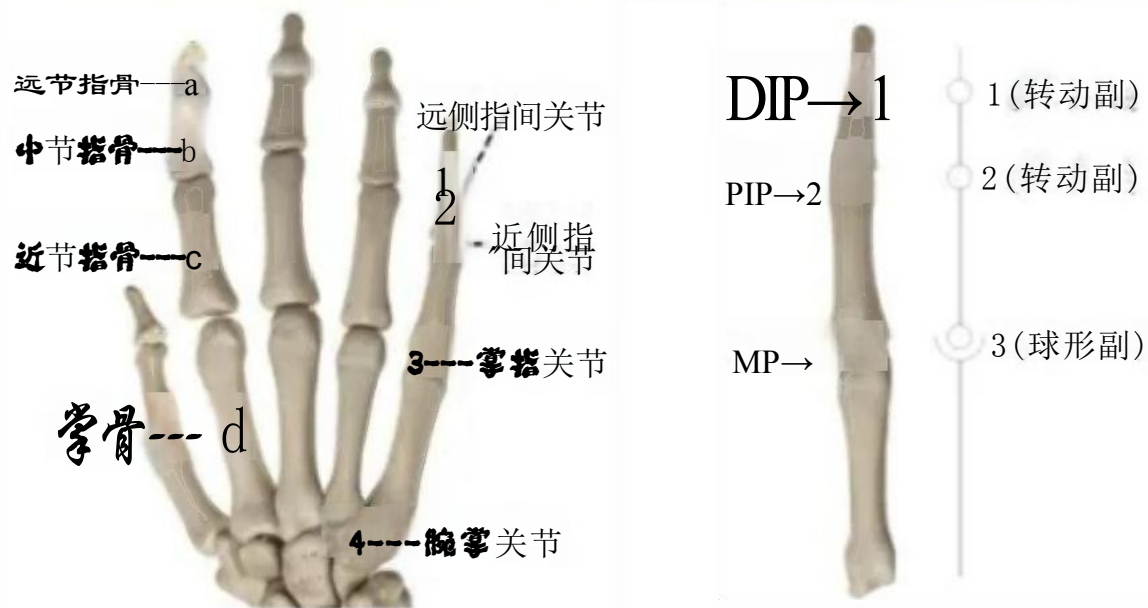
1、灵巧手是机器人最重要的末端执行器

1.1、灵巧手是机器人一种复杂的末端执行器，其需求来源于柔性制造

灵巧手的需求来源于柔性制造。为批量解决高强度、高重复的工作自动化流水线应运而生，但单条生产线只能生产一种或几种固定规格的同类产品。与“刚性”相对，“柔性”体现在适应外部环境变化的能力，即小批量生产、同一条生产线多类型生产等；也体现在适应内部变化的能力，即在内部设备故障等干扰条件下迅速调整生产节奏不影响生产效率。人体结构是最适应现代文明的进化形态，同理，“人造人”是最贴近人类日常生活需求的机器人形态。将自动化生产线转变为柔性制造车间，需要寻求智能的解决方案，而这种解决方案可以由灵巧手和人形机器人来缔造，并且有机器学习和类脑智能技术的加持，数字化的日常生活都能成为人形机器人的学习资料，智能性将持续深化。**可以让机器人像人一样使用工具的灵巧手，是提升机器人柔性操作能力的关键部件，是柔性制造避不开的一环。**

人手一共有24个自由度。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、腕的曲度、掌的弧度3个自由度。从结构上，远侧指间关节和近侧指间关节形成了转动副，掌指关节形成了球形副。转动副可以实现弯曲/伸展运动，在空间有1个自由度；球形副不仅可以实现弯曲/伸展运动，还能实现侧摆运动，球形副在空间中有2个自由度。

人手医学结构图



人手各指节、关节名称和自由度分布

手指	指 节		关 节				传感器测量位置	
	名称	符号	名称	符号	自由度数			
拇指	远指节	TDP	指端关节	TU	1	10	外展	14
	近指节	TPP	指掌关节	TMPJ	2	9		
	掌骨节	TM	掌胞关节	TW	2	15		
食指	远指节	DP	指端关置	DU	1	X	与中指间外展	13
	中指节	MP	指间关节	PJ	1	8		
	近指节	PP	指掌关节	MPJ	2	7		
中指	远指节	DP	指端关节	DU	1	X	与环指间外展	12
	中指节	MP	指间关节	PUJ	1	6		
	近指节	PP	指掌关节	MP	2	5		
环指	远指节	DP	指端关节	DUJ	1	x	与小指间外展	11
	中指节	MP	指间关节	PUJ	1	4		
	近指节	PP	指掌关节	MPJ	2	3		
小指	远指节	DP	指端关节	DU	1	*		
	中指节	MP	指间关节	PJ	1	2		
	近指节	PP	指掌关节	MPJ	2	1		
手腕			外展		1	16		
			曲度	pich	1	17		
手掌			饭度	akch	1	18		

资料来源：全驱动五指灵巧手结构设计及控制系统的研究_马凝，机器人灵巧手：建模、规划与仿真，华鑫证券研究

1、灵巧手是机器人最重要的末端执行器

1.2、灵巧手可按照自由度数量、传动方式、驱动方式进行分类 根据自由度与驱动源数量，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。

全驱动灵巧手每个关节都能独立控制



>优势：具有完全可重复的运动轨迹，适合某些功能性和精细操作较高的场合。在工业场合，例如组装、测量等情况下有更好的表现，而且多一个执行器，也使得全驱动方案对比欠驱动方案在握持物体时具有更大的扭矩。

>缺点：对控制策略的要求较高，当没有合理的运动学分析控制时，整体的灵活性其实并不如欠驱动的方案。

欠驱动灵巧手与人手更类似



>优势：对比全驱动方案，少一个甚至两个执行器，对节省手臂、手腕的空间和重量，都是非常大的提升，而且具有更好的顺应性。

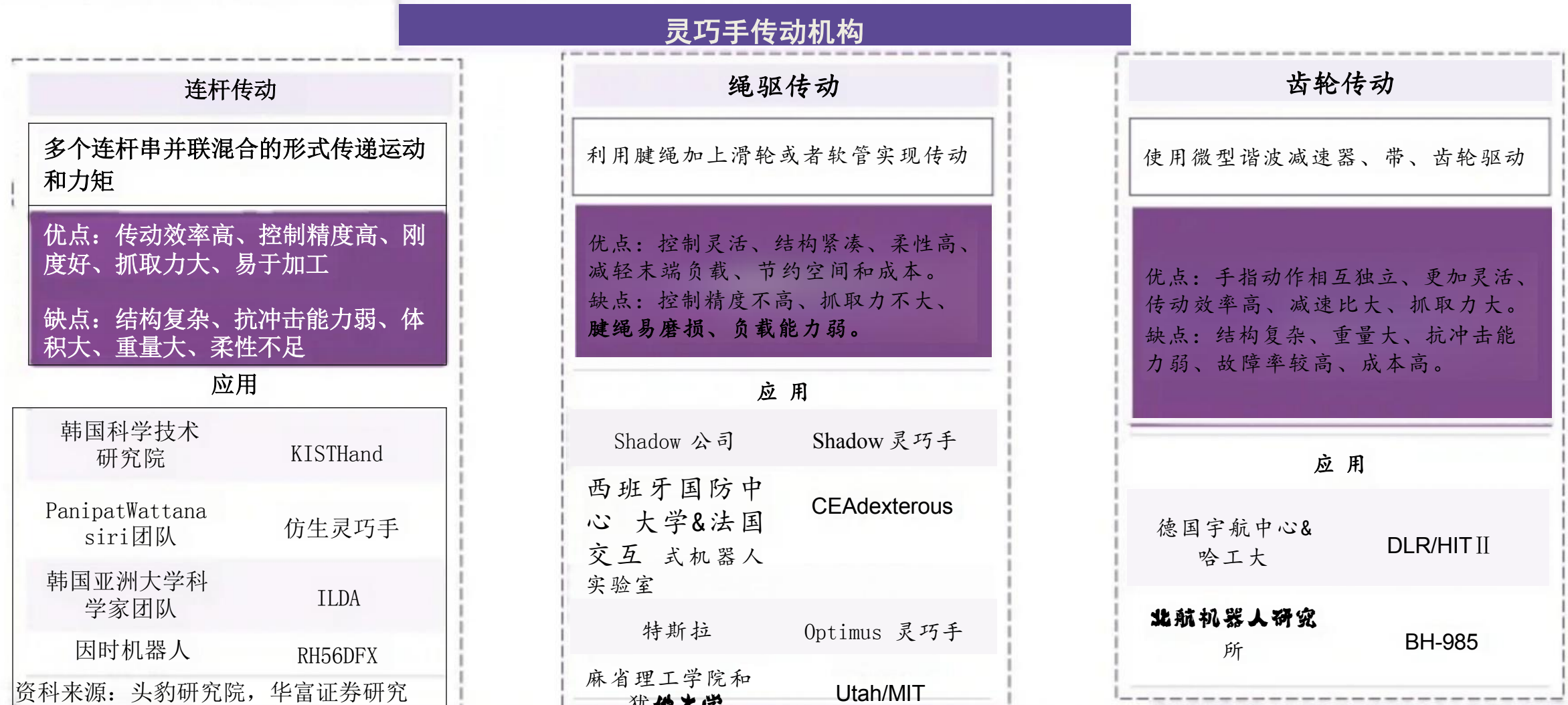
>缺点：不具备完全重复的运动轨迹，在需要精密操作的情景下，表现可能不如全驱动方案，甚至不如耦合方案。

资料来源：机器人灵巧手研究综述_刘伟，华鑫证券研究

1、灵巧手是机器人最重要的末端执行器

1.2、灵巧手可按照自由度数量、传动方式、驱动方式进行分类

灵巧手的传动系统对操作的稳定性和灵活性有重要影响，传动方式有连杆传动、绳驱传动和齿轮传动三种。连杆传动广泛用于工业、假肢领域，刚度大，易于强力抓取物体，但重量体积较大，柔性不足。绳驱传动主要用于科研领域和人形机器人领域，灵活度高、结构简单，但控制精度不足，寿命短，已有Shadow 等灵巧手落地，也是特斯拉机器人配备的灵巧手类型；齿轮传动主要应用于工业机器人，每根手指可独立操纵，灵活性强，但结构复杂、易发生故障，成本较高。



1、灵巧手是机器人最重要的末端执行器

1.2、灵巧手可按照自由度数量、传动方式、驱动方式进行分类

灵巧手逐渐按照是否在线绳、钢丝、皮带等柔性传动部件分为腱驱动和直接驱动两种形式。

- 腱驱动：**可以节省手指体积，手指的拟人程度更高，腱绳能够提供较大的关节力矩，但由于腱绳传力的柔性限制，传力有一定的延迟，影响位置控制的精度，而且预紧程度会直接影响控制效果，对控制系统的设计要求较为严格。
- 直接驱动：**将电机和驱动电路内置在手指内，手指体积较大，且不能提供较大的关节力矩，但其控制精度较高且模块化手指之间可以相互替代，可维修程度很高。

相较而言，腱驱动的设计方式便于实现远距离传动，采用腱驱动的形式将部分驱动系统放置于灵巧手外部，能有效减小灵巧手的整体尺寸。

腱驱动和电机内置驱动的的优缺点对比

驱动方式	腱驱动	电机内置驱动
电机和驱动器位置	前臂	手指内
手指体积	小	大
关节力矩	大	小
传动柔性	有	无
模块可替代性	差	强

代表性灵巧手的主要参数

时间	灵巧手	手指数	自由度数	传动形式	驱动方式	驱动位置
1974	OkadaHand	3	11	腱绳	腱驱动	外置
1983	Utah/MITHand	4	16	腱绳	腱驱动	外置
1984	Stanford/JPLHand	3	9	腱绳	腱驱动	外置
1988	BarretHand	3	4	齿轮	直接驱动	内置
1992	UB-I1Hand	3	11	腱绳	腱驱动	外置
1998	DLR-I Hand	4	12	腱绳	腱驱动	外置
1998	DISTHand	4	16	腱绳	腱驱动	外置
1998	BH-3Hand	3	9	腱绳	腱驱动	内置
1999	TokyoHand	5	12	腱绳	腱驱动	外置
2000	DLR-II Hand	4	13	齿形带	腱驱动	内置
2000	UltralightHand	5	13	齿轮	直接驱动	内置
2001	GIFU-IIHand	5	16	齿轮	直接驱动	内置
2001	BH-4Hand	4	16	腱绳	腱驱动	内置
2004	UBH3Hand	5	24	腱绳	腱驱动	外置
2004	HIT/DLR-I Hand	4	13	齿轮	直接驱动	内置
2004	ShadowHand	5	21	腱绳	腱驱动	外置
2009	HIT/DLR-IIHand	5	15	腱绳	腱驱动	内置
2009	TWEBDY-ONEHand	4	13	齿轮+连杆	直接驱动	内置
2010	DLRHASyHand	5	19	腱绳	腱驱动	外置
2014	RoboRayHand	5	12	腱绳	腱驱动	外置
2014	TheCEAdexterousHand	5	20	腱绳	腱驱动	内置

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，空间五指灵巧手控制系统设计_韩运峥，华鑫证券研究

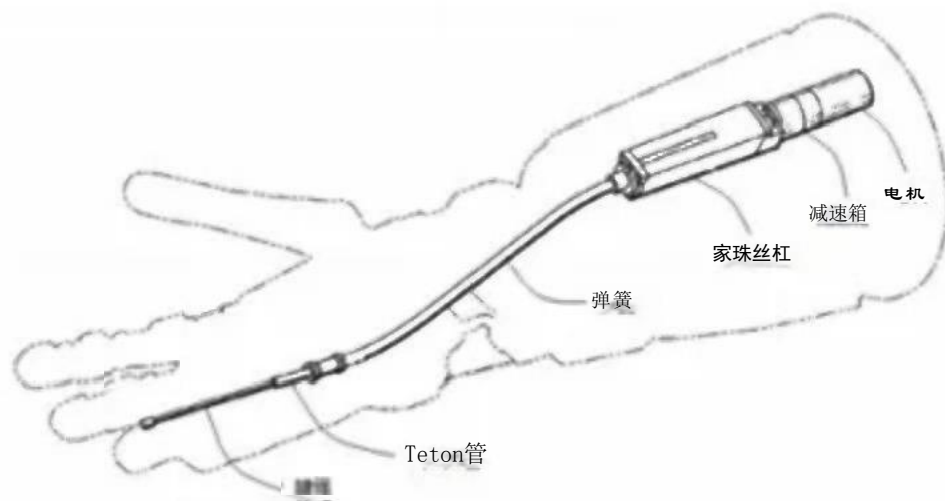
1、灵巧手是机器人最重要的末端执行器

1.3、驱动器外置腱驱动灵巧手兼具灵活性、小体积与可靠性

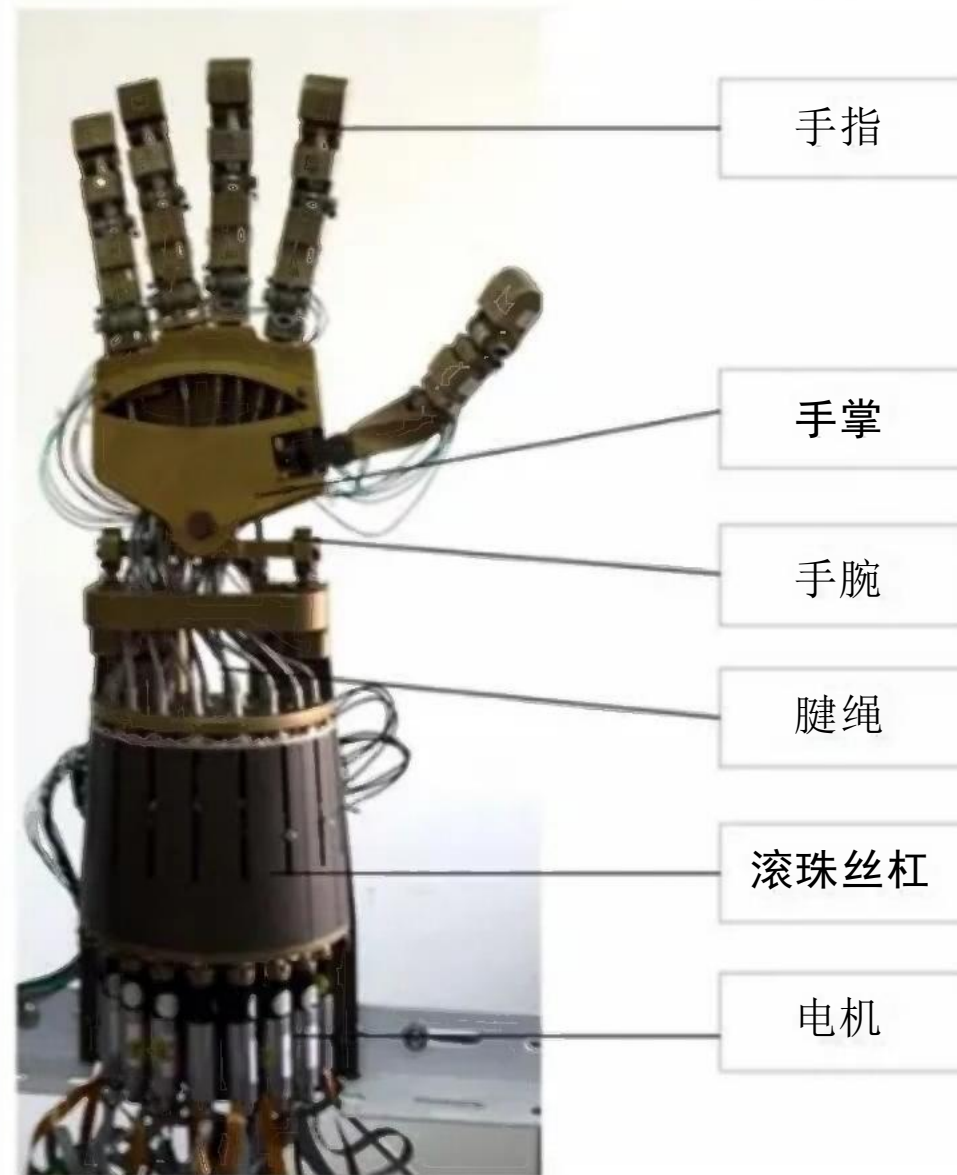
驱动器外置腱驱动灵巧手主要运作原理如下：

电机和滚珠/滚柱丝杠外置于手臂中，电机通过减速箱带动滚珠丝杠，电机轴的转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，拉动手指绕关节轴旋转。由于手腕的俯仰和侧摆运动会扭动腱绳的位置和形状，为了消除手腕运动对腱绳的影响，在腱绳外面套上硬质弹簧，类似自行车刹车线的原理。当手腕运动时，硬质弹簧能保证腱绳中的张力不受影响。但弹簧的引入又增大了腱绳受到的摩擦力，为了减小腱绳与弹簧之间的摩擦力，在腱绳和弹簧之间套入Teflon管，既能提高传动效率，又解决了腱绳与弹簧之间的长时间摩擦带来的磨损问题。

腱驱动原理



驱动器外置灵巧手整机机构



资料来源：空间五指灵巧手控制系统设计_韩运峥，华鑫证券研究

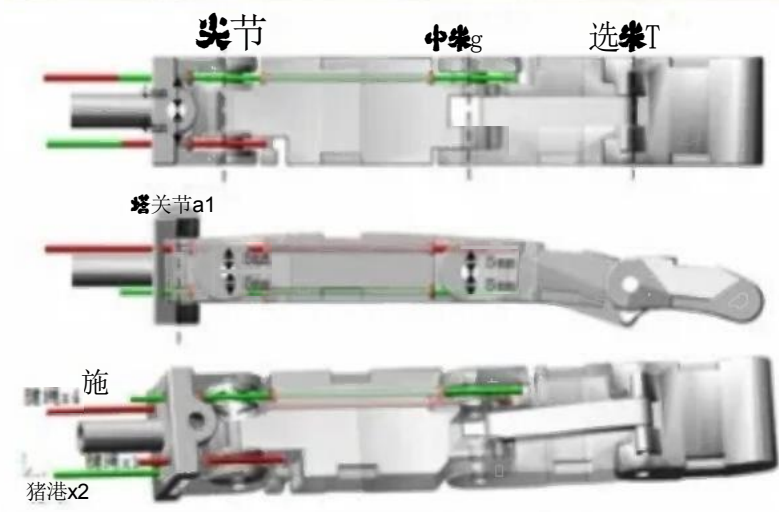
1、灵巧手是机器人最重要的末端执行器

1.3、驱动器外置腱驱动灵巧手兼具灵活性、小体积与可靠性

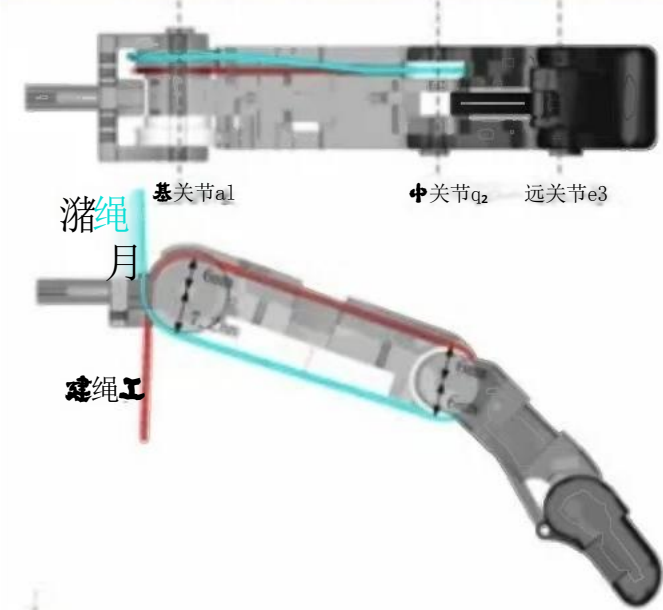
远程驱动能有效减小手指的体积和重量，由于腱绳只能传递拉力，腱绳的数目大于手指自由度时才能对手指的每一个自由关节进行完全确定的控制。经过证明，当腱绳数目比自由关节数目多1时，就可以使用腱绳来独立控制所有的自由关节。以3自由度的食指为例，4根腱绳即可完全控制3个自由关节。N+1 型腱驱动方案能有效的减少腱绳数目，但会引入腱绳运动和手指关节运动之间的耦合性，即驱动一个关节需要多根腱绳的参与，一根腱绳的运动牵引多个关节，对控制算法更高要求。

N型驱动方案驱动器数目最少，有利于减小驱动系统的整体尺寸。同时，可以有效降低电气系统与控制系统的复杂程度，提高可靠性。在“N型”的传动方案中，两根腱绳构成了一条闭环回路。为了调整回路中腱绳长度误差，并使腱绳工作在张紧状态，腱驱动手指中需要引入预紧机构对腱绳张力进行调整。如果采用欠驱动，驱动器数量进一步降低。

3自由度4腱绳的N+1型驱动方案



2自由度2腱绳的N型驱动方案



三种传动方案对比

传动方案	原理简图	驱动器数目	腱绳数目	特点
N型		N	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，空间五指灵巧手控制系统设计_韩运峰，华富证券研究

02

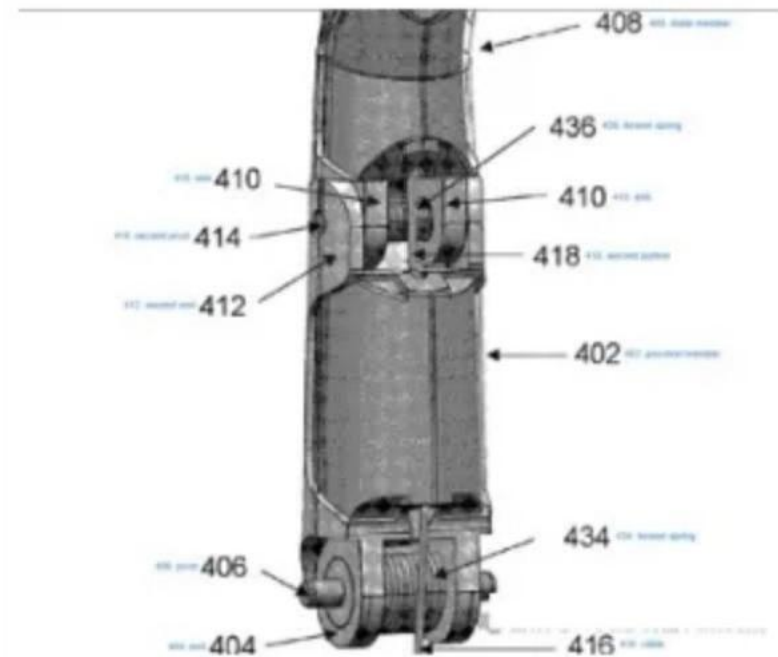
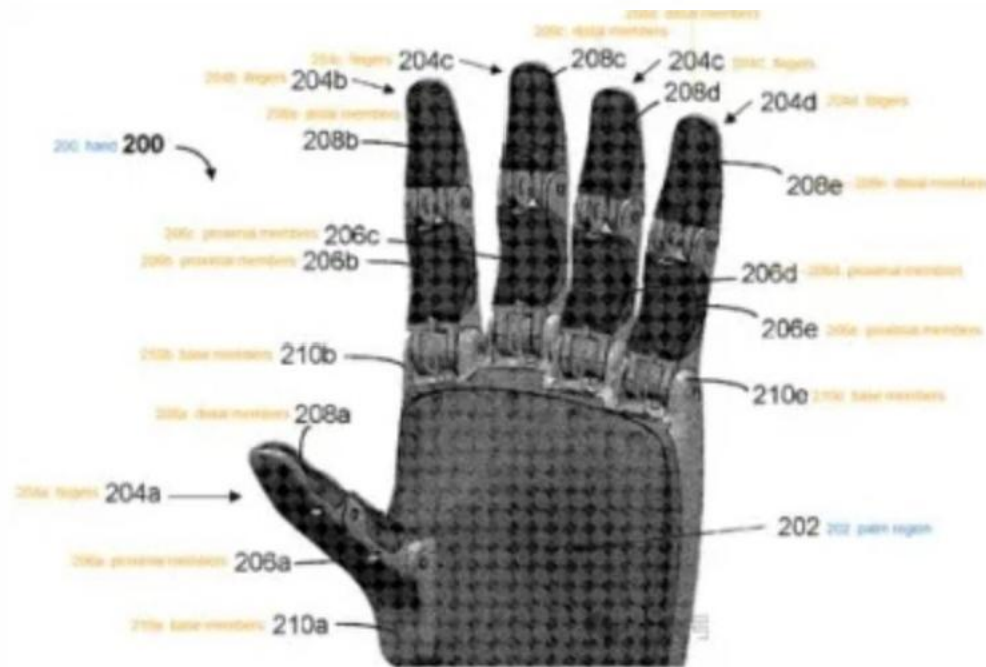
特斯拉下一代灵巧手三大核心变化均指向丝杠
价值量上升

研：创价值

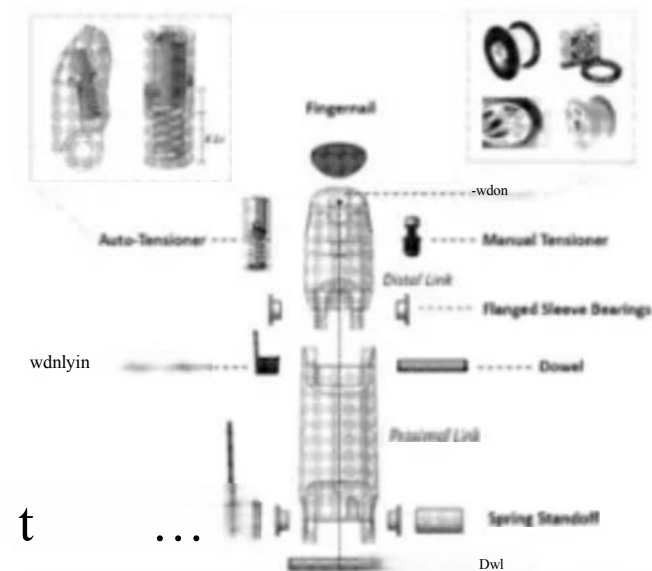
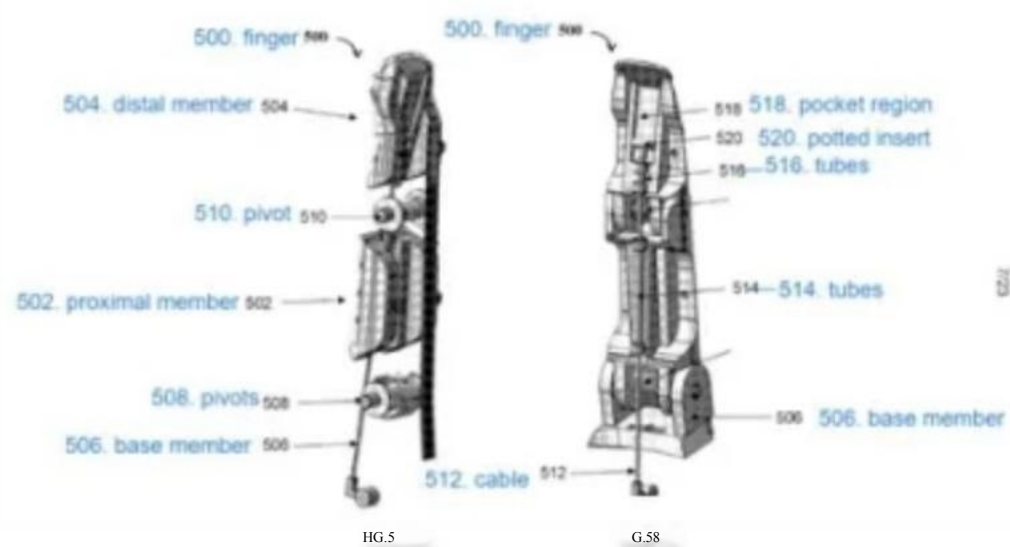
2、特斯拉下一代灵巧手三大核心变化均指向丝杠价值量上升

2.1、特斯拉Optimus一代灵巧手专利解析

手和手指布局： 灵巧手设计模仿人手，包括手掌区域和五个手指，每个手指具有近侧构件和远侧构件，能够围绕相应关节枢轴旋转。



腱绳布线： 使用腱绳而非传统齿轮或连杆系统来驱动手指运动，腱绳的布线设计允许更自由的手指运动和更高效的力传递。

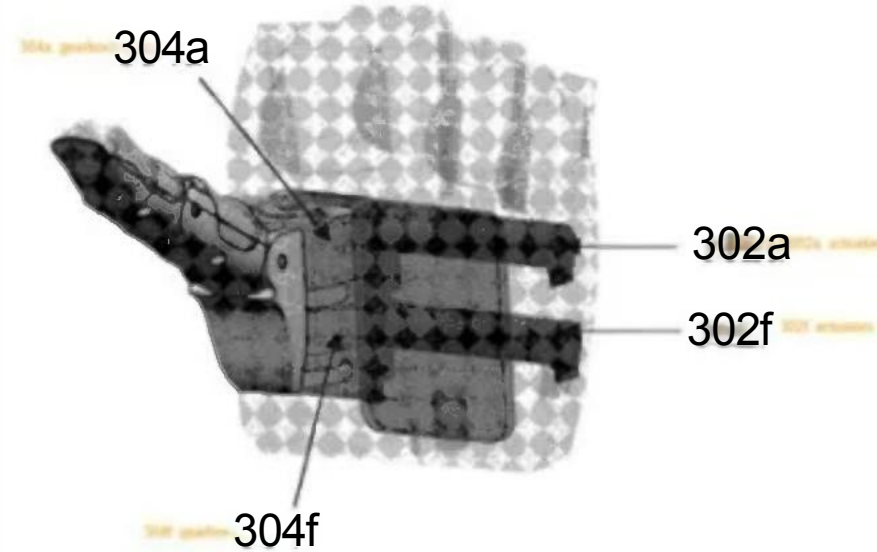


资料来源：人形机器人研究院，TESLA，华富证券研究

2、特斯拉下一代灵巧手三大核心变化均指向丝杠价值量上升

2.1、特斯拉Optimus一代灵巧手专利解析

- 大拇指：**具有两个空心杯电机模组执行器302a和302f，分别控制弯曲/伸展和外展/内收运动。



运行方式：当电缆416被驱动器302拉动时，末端420可以与远端部件408或其结构啮合，以使近端部件402或远端部件408中的至少一个移动。例如，当电缆416被驱动器302拉动时，末端420可以与远端部件408或其结构啮合，从而导致近端部件402围绕第一枢轴406旋转和/或远端部件408围绕第二枢轴414旋转。

其他4指：由于特斯拉一代灵巧手采用的是2指关节，与我们常规的人手相比少了一组关节，因此每个手指有一个空心杯电机模组执行器搭配对应的扭簧，具有1个主动自由度和1个由腱绳牵引的被动自由度指关节，能够实现复杂的抓握。

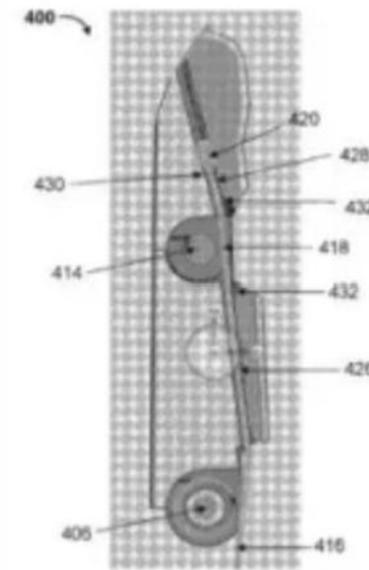
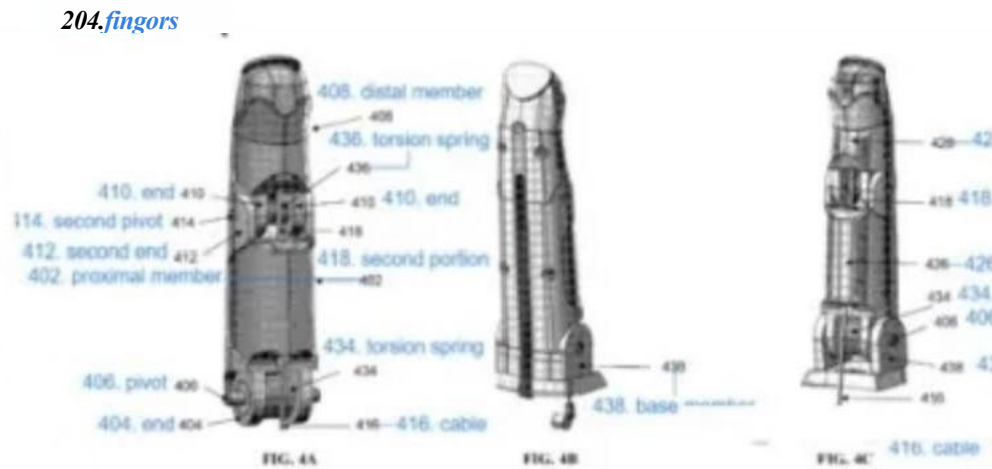


FIG.4D

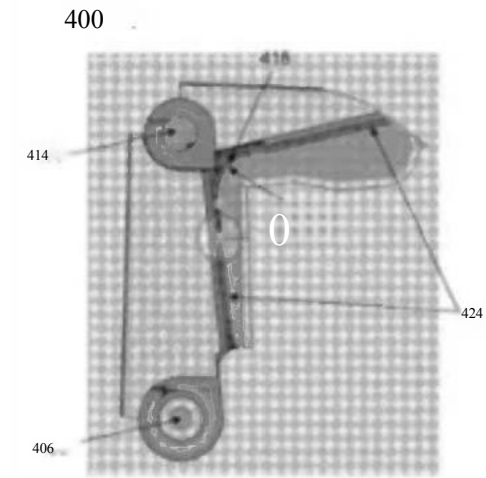


FIG.4E

资料来源：人形机器人研究院，华鑫证券研究

2、特斯拉下一代灵巧手三大核心变化均指向丝杠价值量上升

2.1、特斯拉Optimus一代灵巧手专利解析

驱动装置：本专利灵巧手采用空心杯电机作为驱动装置，这种电机以其体积小、重量轻、响应速度快的特点，非常适合用于需要精密控制的场合。

➢ **传动装置：**传动装置采用绳驱结合蜗轮蜗杆的方式，既保证了传动的平顺性，也确保了足够的力量传递及自锁性能。

200.hand 200

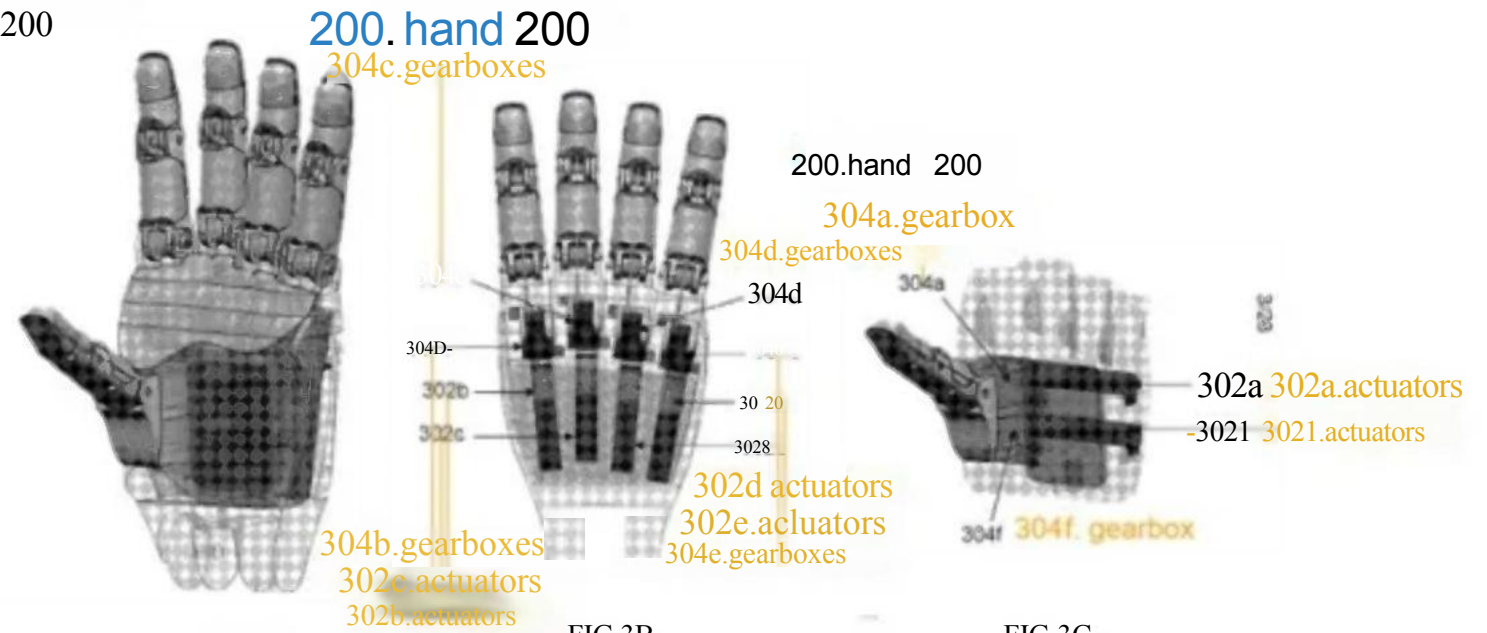


FIG.3B

FIG.3C

304.gearbox 304

304.gearbox 304

304.gearbox 304

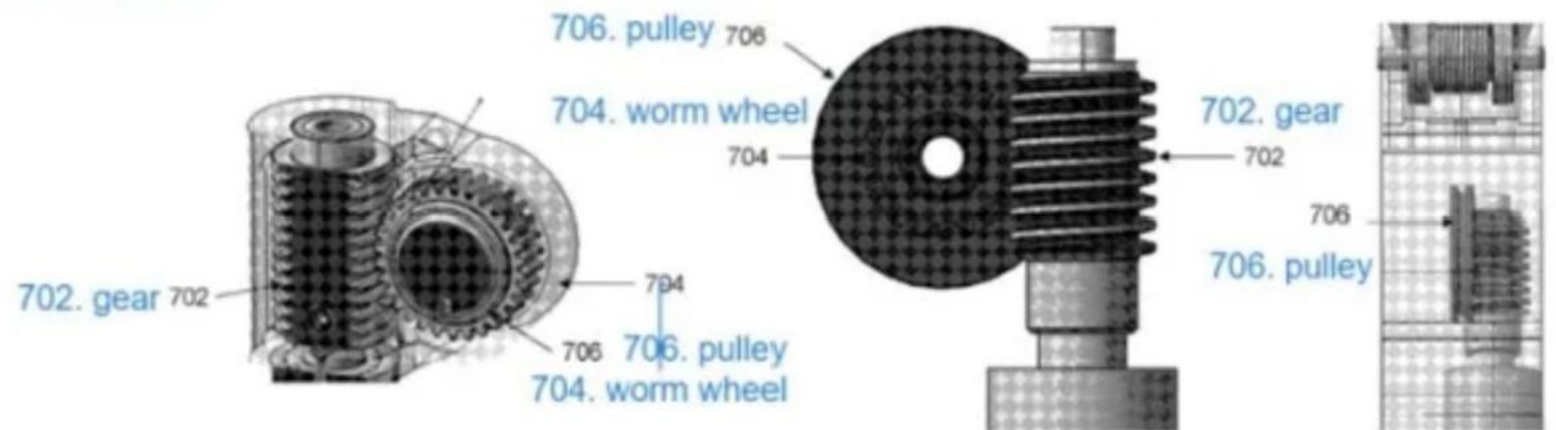


FIG.7A

FIG.7B

FIG.7C

资料来源：人形机器人研究院，华鑫证券研究

2、特斯拉下一代灵巧手三大核心变化均指向丝杠价值量上升

2.2、特斯拉下一代灵巧手迎来重大更新

我们推测，特斯拉下一代灵巧手方案是N自由度、N腱绳、N执行器方案。根据10月10日特斯拉在发布会上的演示视频，特斯拉新一代灵巧手采用腱绳驱动的传动方式，肌腱的一端固定在指尖(骨骼)中，另一端连接到执行器(肌肉)。目前Opimus灵巧手自由度为22个，已与人手处于相当水平。我们推测，特斯拉手部执行器数量在17/22个。

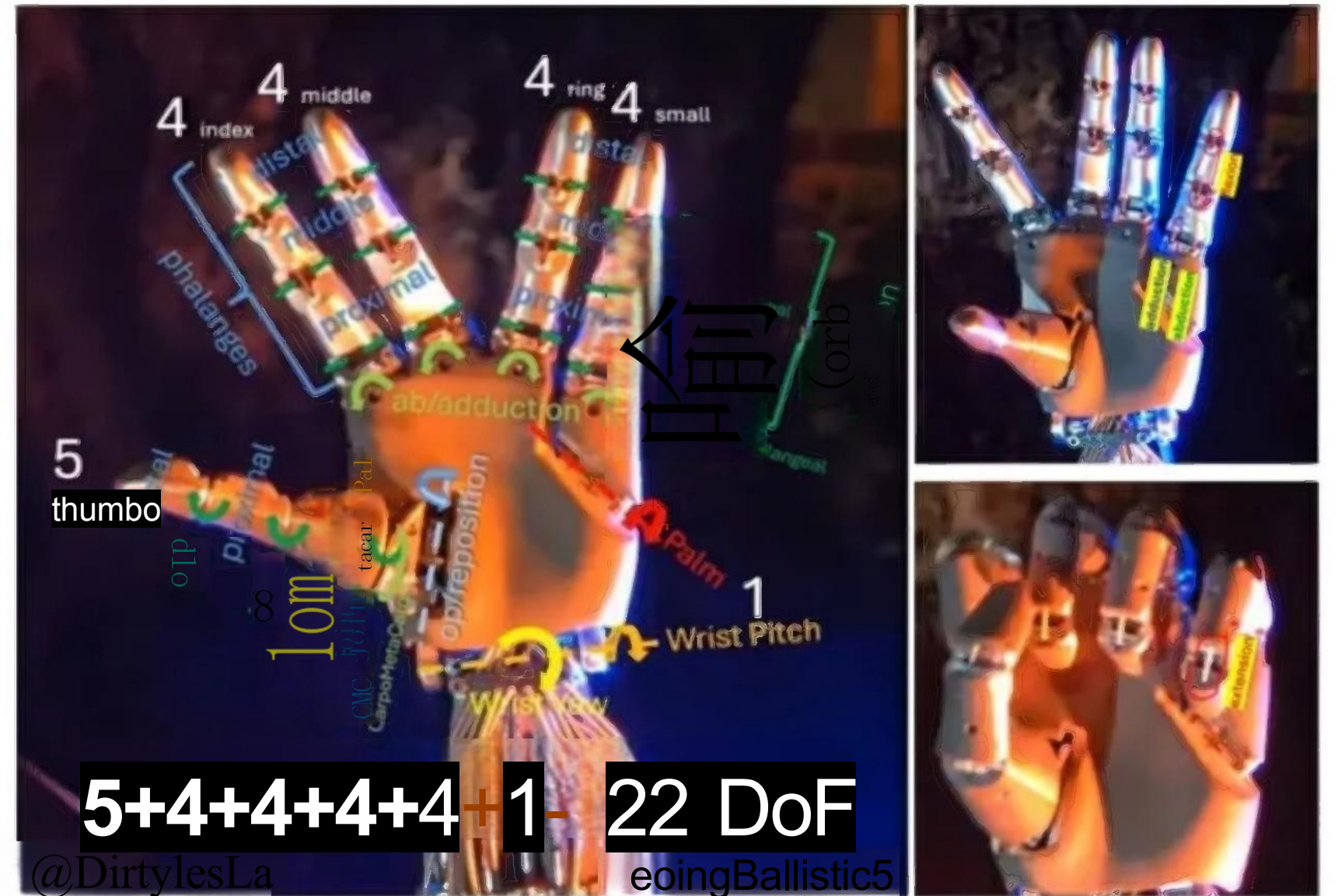
人手自由度拆分

Flexion & Extension

Abduction & Adduction



OptimusGen3 灵巧手自由度拆分



资料来源：TESLA, Dirty Tesla, 小米技术公众号，华鑫证券研究

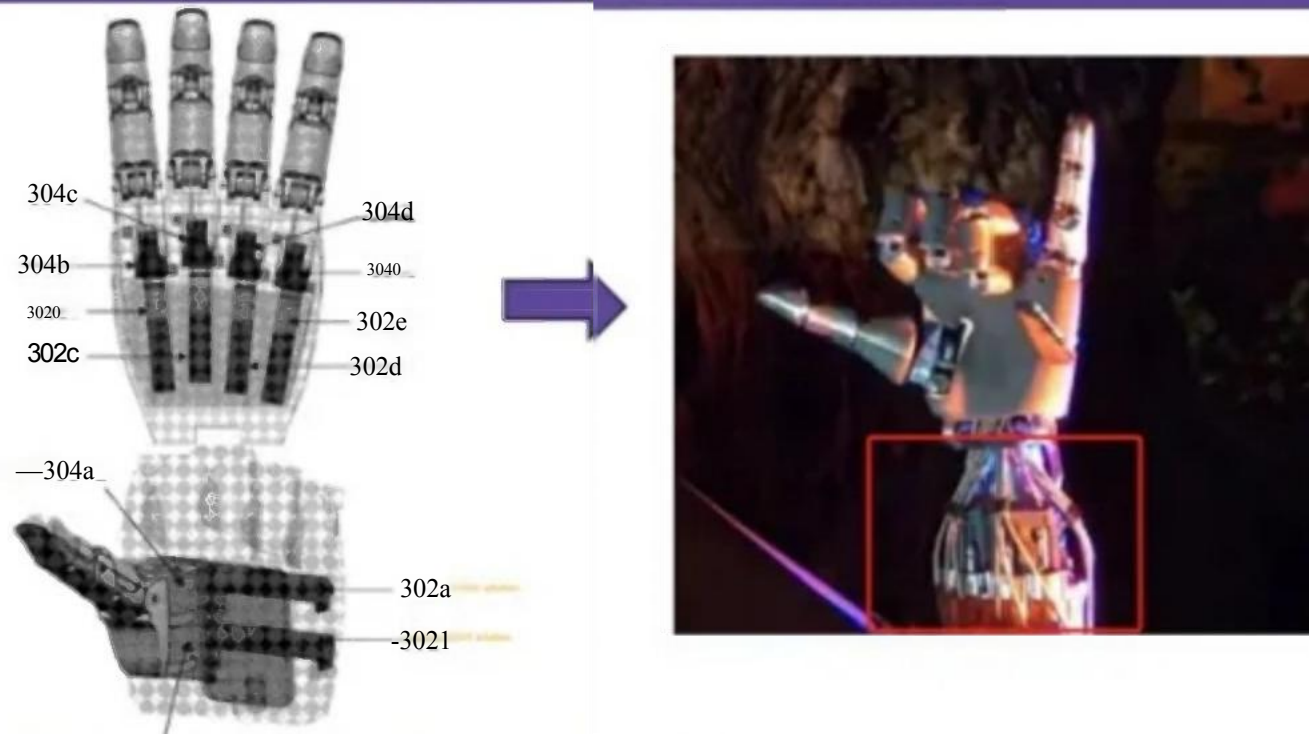
2、特斯拉下一代灵巧手三大核心变化均指向丝杠价值量上升

2.2、特斯拉下一代灵巧手迎来重大更新

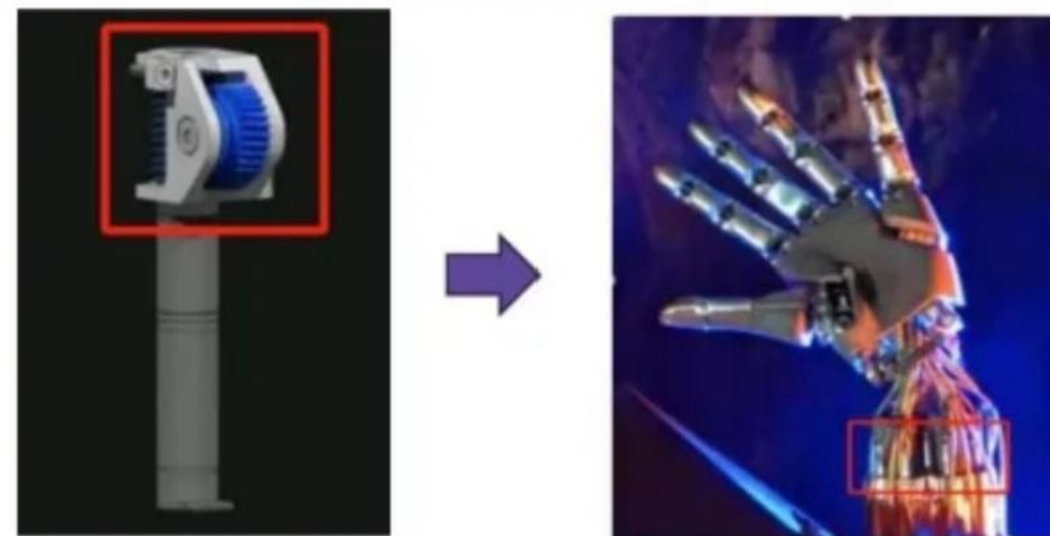
特斯拉Optimus Gen3灵巧手有三大变化，三大变化均指向丝杠用量提升：

- **驱动器外置带来自由度提升：**驱动器后置集成在手臂上可以放入更多的驱动器，直接增加灵巧手的自由度；
- **采用丝杠替代蜗杆：**二者均能改变运动方向，采用丝杠能有效提升灵巧手的精度和载荷能力，提高传动效率；
- **采用腱绳替代扭力弹簧：**上一代机器人手指伸展主要依靠扭力弹簧复原，但现在采用一根单独的腱绳完成伸展，灵活性进一步提高。

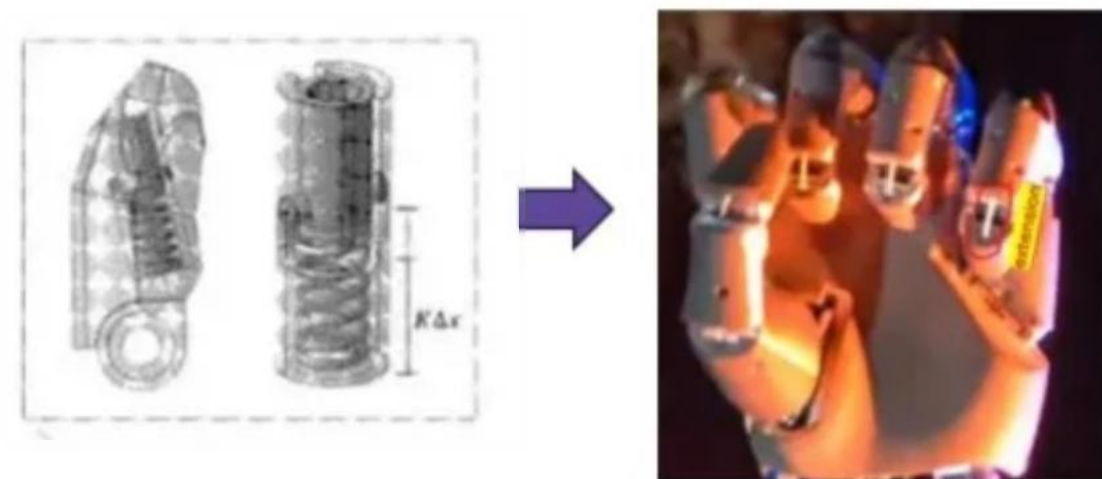
手掌内置驱动器变为手臂外置驱动器



蜗杆替换为丝杠



扭力弹簧替换为腱绳



资料来源：TESLA, 电动星球, 人形机器人研究院, 华鑫证券研究

2、特斯拉下一代灵巧手三大核心变化均指向丝杠价值量上升

2.3、特斯拉下一代灵巧手已装机

11月28日，特斯拉Optimus发布视频，22个自由度灵巧手已装机，并用最新的灵巧手接住网球。

整体硬件动作协调流畅十分类人。接网球手部孤立动作，抓握同时，Optimus整个上肢乃至头部随之摆动保持平衡，整体动作丝滑流畅。我们认为，机器人替人主要分两步走，首先要求是硬件性能能支撑机器人做出类似人类的动作，其次是机器人依靠自己的“大脑”去独立做出行为举止。现在看来，特斯拉第一步已经初步满足，第二步我们看好特斯拉在ai方面包括端到端模型深厚积累。

手部体积于前代大致相同。驱动器后置带来的结果是，整体手部体积于二代相近。所有驱动器连同前臂线性执行器一起封装在内部，结构紧凑外形和谐。

此前Optimus手部动作受自由度限制



Optimus 用22自由度灵巧手接网球



资料来源：TESLA,华鑫证券研究

03

灵巧手关键零部件解析

研：创价值

3 灵巧手关键零部件解析

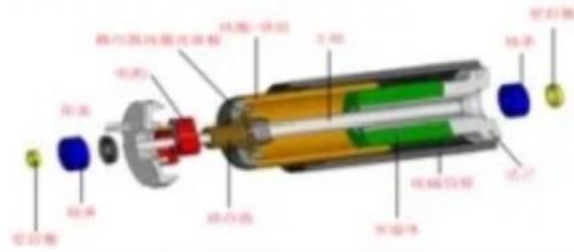
3.1 空心杯电机具有突出的节能特性、灵敏方便的控制特性和稳定的运行特性

微型电机是由定子、转子(由铁芯转子和绕组构成)、电枢绕组、电刷、换向器等部件组成。空心杯电机的转子是直接采用导线绕制而成，线圈通过连接板与换向器、主轴连接在一起；从结构上看，其是由外框架、沿外围分布的驱动线圈、中间的空心转子以及附加的传感器组成。

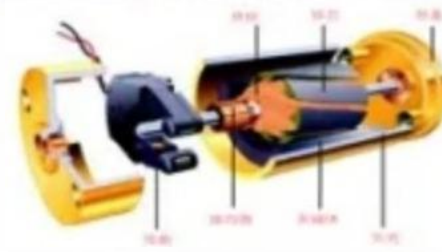
空心杯电机属于直流永磁的伺服控制电机，也可以将其归类为微特电机。空心杯电机在结构上突破传统电机的转子结构形式，采用了无铁芯转子，这种新颖的转子结构彻底消除了因铁芯形成涡流而造成的电能损耗；同时，空心杯电机重量和转动惯量大幅降低，从而减少转子自身的机械能损耗。由于转子结构变化而使电机的运转特性得到极大改善，不但具有突出的节能特点，更为重要的是具备了铁芯电机所无法达到的控制和拖动特性。作为高效率的能量转换装置，在很多领域代表了电动机的发展方向

空心杯电机和普通电机的区别

空心杯电机



普通(有刷直流)电机



结构图

结构

转子为空心杯形状
(由一个薄壁金属杯构成，内部为空心，外部为环形磁极)

转子通常为实心或有槽的圆柱形，内部装有导线和磁极

工作原理 利用空心杯转子中的磁场与定子产生的磁场相互作用而产生转矩

利用转子中的导线在磁场中受到的洛伦兹力来产生转矩

性能特点

外形尺寸小、轻巧：转矩密度较高；集成度高；
高精度、高效率(最高效率>80%)；
转速高(受限于换向系统，最高转速≥10000rpm)；
响应速度较快(机械时间常数通常只有十几个ms)；
寿命长(预期大约在1000-3000h)；
制造成本较高(9或11或13片换向片)

体积和重量较大：
铁损较大(存在涡流损耗，最高效率约为50%)；
无法运行在高转速下(一般最高转速<5000rpm)；
响应较慢(机械时间常数一般>100ms)；
寿命较短(一般几百个h)；
制造成本较低(3-5片换向片)

应用场景 应用于对性能要求较高的领域，如航空航天、机器人等

应用于对性能要求较低的领域，如家用电器、工业设备等

资料来源：天孚电机官网，上海茂硕机械设备有限公司官网，鸣志电器官网，《空心杯电机定制化应用研究》，华鑫证券研究

空心杯电机优势

特点	优势
	低速运行平稳
无齿槽效应	低振动，低噪音
	转子可控制在任意位置
	磁路设计更优
结构紧凑	功率密度更高
	温升低，效率高
低电感	高动态响应
	高加速度

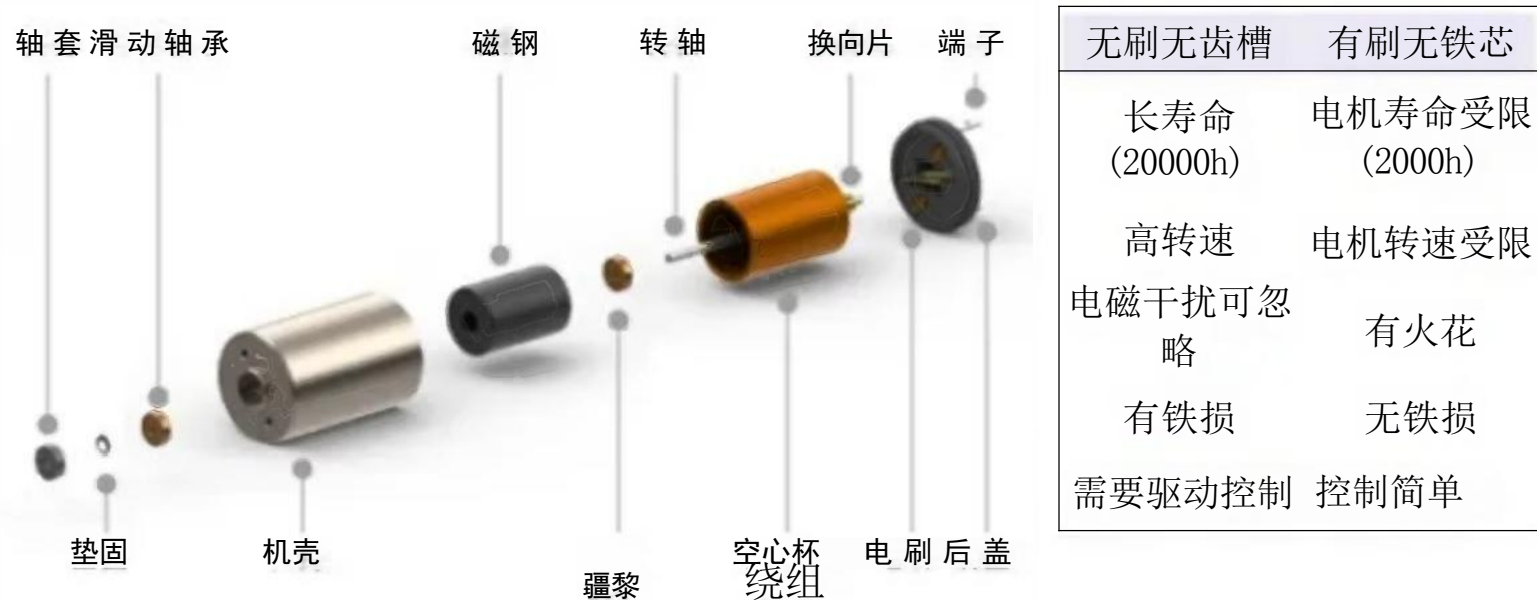
3 灵巧手关键零部件解析

3.1、根据换向方式可划分为有刷空心杯电机和无刷空心杯电机

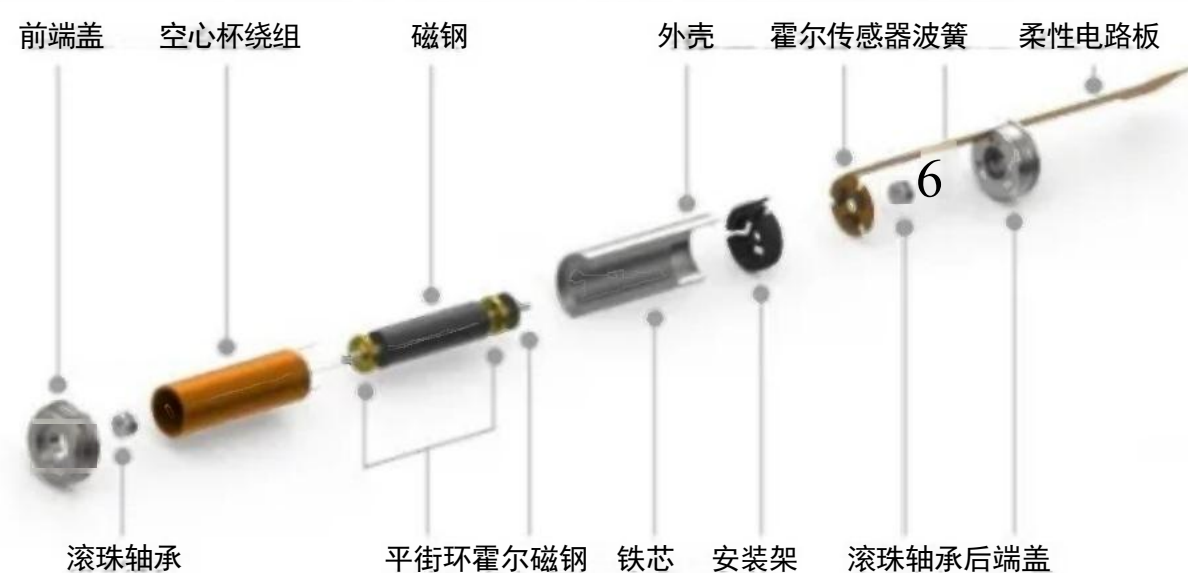
空心杯电机可分为有刷和无刷电机：**有刷电机的转子无铁芯，无刷电机(又称无刷无齿槽电机)的定子无铁芯。**主要的区别有：(1)有刷空心杯电机利用碳刷(或者金属电刷)和换向器的配合来完成换向，而无刷空心杯电机的线圈导线直接连接到控制器，通过处理连接板上的霍尔反馈的位置信号完成换向；(2)有刷空心杯电机的线圈、换向器和连接板在外壳和永磁体中间旋转，共同组成转子；而无刷空心杯电机的线圈是固定的，永磁铁作为转子在中间旋转。

相比于有刷空心杯电机，**无刷空心杯电机的性能更优**，其具备转速上限更高、重量更小、功率体积比更大的优点，但是价格偏高。

鸣志电器的有刷空心杯电机结构图



鸣志电器的无刷空心杯电机结构图



资料来源：鸣志电器官网，华鑫证券研究

3 灵巧手关键零部件解析

3.1 、空心杯电机杯型绕组成型工艺是空心杯电机制造中的关键，直接影响电机的性能

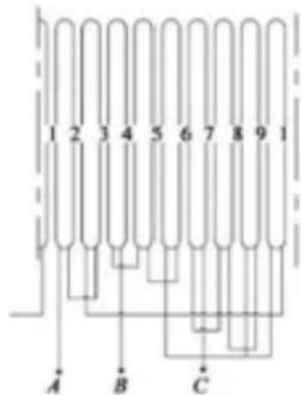
空心杯电机杯型绕组成型工艺复杂，要求严格，生产合格率低，制造成本高，是空心杯电机面临的难题，也使得空心杯电机的应用受到一定限制。空心杯电机杯型绕组的类型众多，包括直绕组、斜绕组、同心式绕组、叠绕组等。

杯型绕组分类

直绕式杯型绕组

元件有效导体部分与电机轴线平行

- 生产效率低
- 灌封工艺繁琐
- 挂线工装及整形模具复杂

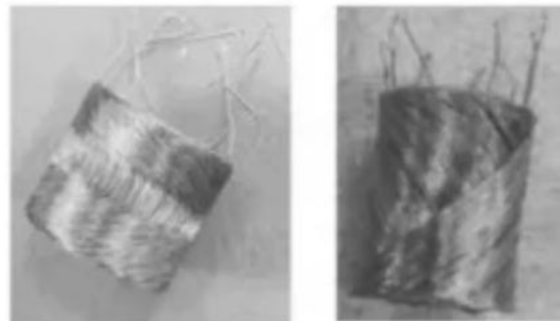


直绕式绕线杯平面连接图

斜绕式杯型绕组

元件有效导体部分与电机轴线成一定倾斜角度

- 绕组利用率高
- 生产效率高
- 工装模具结构简单，工艺过程较为简便
- 适合体积小、线径细、槽满率低的杯型绕组，对于电流较大的电机需多根线并绕采用斜绕组杯子则难以实现

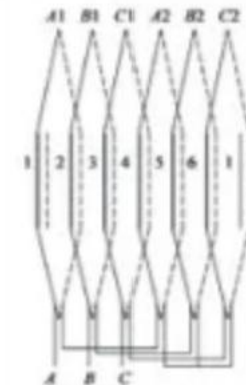


两种不同形式的斜绕式杯型绕组

同心式杯型绕组(菱形绕组)

由数个相互独立的线图采用拼接、整形固化的方法制成杯型绕组

- 线径选择灵活，槽满率高
- 生产效率高，适合批量生产
- 相同绕组参数下同心式较斜绕式性能更优，在国内外空心杯电机上广泛使用
- 线图分布一致性是难点



菱形绕组杯平面图

资料来源：《空心杯电机非对称同心式绕组成型工艺技术研究》，《空心绕线杯无刷电机绕组设计技术》，华鑫证券研究

3、灵巧手关键零部件解析

3.1 、空心杯电机市场的主要厂商

全球空心杯电机市场集中度较高，较为知名的企业包括Faulhaber、Portescap、Alied Motion Technologies、Maxon Motor及Nidec CopalCorporation 等，这些企业在空心杯电机的设计、制造以及技术创新方面处于领先地位。

目前，空心杯电机市场主要由海外企业占据主导地位，但国内也有一些电机厂商已经能够提供或正在布局高性能空心杯电机以应对未来需求巨大的蓝海市场，如鸣志电器、伟创电气、江苏雷利、拓邦股份等。

国内空心杯电机的部分厂商

公司	空心杯电机产品的覆盖情况
鸣志电器	国内的第一梯队； 直流有刷电机提供08mm-024mm多种外径及机身长度规格型号； 直流无刷无槽电机提供010mm、013mm, 016mm, 022mm, 026mm等多种外径及机身长度规格
伟创电气	已自主研发出直径仅10mm直流无刷空心杯电机系统
江苏雷利	空心杯无刷电机提供016mm、022mm、028mm、030mm、036mm、042mm外径的规格型号
禾川科技	产品布局 ϕ 8mm ϕ 10mm ϕ 12mm ϕ 13mm等多种规格的无刷空心杯电机
鼎智科技	提供直径10mm、16mm、22mm、28mm、30mm、36mm、42mm空心杯电机(无槽无刷)

资料来源：中商产业研究院，电子发烧友，各公司官网，华鑫证券研究

3.1 、无刷有齿槽电机和空心杯电机对比

驱动器后置减小电机体积压力，无刷有齿槽电机适用于和空心杯电机不同的场景。无刷有齿槽电机的定子结构通常由多个铁芯齿槽组成，每个齿槽中嵌有绕组线圈。这些铁芯齿槽用于引导和增强电机内的磁场，以提高效率和提供较高的转矩密度。绕组排列在齿槽中，并与永磁转子相配合形成旋转磁场。这种结构设计较为紧凑，适合需要高功率密度和稳健性能的应用。齿槽的存在有助于集中磁场，提高转矩密度，但会产生齿槽效应，有轻微的转矩波动，对平稳性产生影响。

无刷有齿槽电机主要性能特点

	无刷有齿槽电机	空心杯电机
定子结构	有齿槽，铁芯绕组	固定永磁体
转子结构	带永磁体的转子	空心绕组，转子无铁芯
转矩密度	高	较低
惯量	较高	极低
运行平稳性	存在齿槽效应，低速平稳性一般	平稳，无振动
动态响应	中等动态性能	动态响应极快
成本	较低	高
适用场景	合高功率密度、需要承受较高负载的应用	超高速、小型化应用

资料来源：立鼎产业研究网，深圳踢踢电子，控制工程网，华鑫证券研究

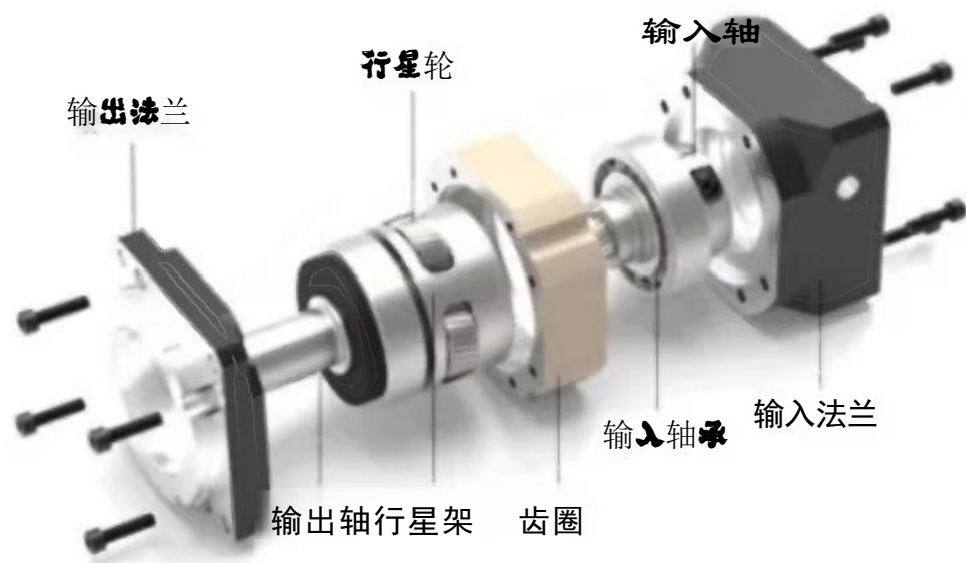
3 灵巧手关键零部件解析

3.2、行星减速器介绍

行星减速器的结构主要包括中心太阳轮、行星齿轮、内齿圈。工作时中心太阳轮驱动内部受力旋转，带动行星齿轮在内齿圈轨道内进行旋转，依赖齿轮之间的啮合来实现转速的减小，行星架作为输出轴，将减速后的运动传递给负载。实现输入进来的高转速通过齿轮件传动后将速度降低再输出的效果，主要作用就是将电机的高速低扭转换为低速高扭。

行星减速器可以实现更高的减速比和扭矩输出。通过多个行星齿轮级的串联，每一级都能降低转速并增加扭矩。减速比的大小由几级减速比的乘积决定。

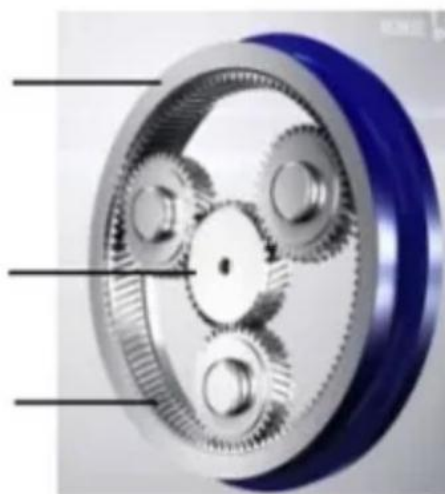
精密行星减速器结构示意图



内齿圈与外部箱体

中心太阳轮

行星齿轮



输入端

中心太阳轮驱动
内部受力旋转

输出端

行星齿轮外接其
他结构进行输出



内部相互啮合
带动内部行星齿
轮转动

3 灵巧手关键零部件解析

3.2、行星减速器和其他减速器对比

目前市面上用于人形机器人关节的减速器主要有以下三种：RV 减速器、谐波减速器和行星减速器。RV 减速器高刚性、高负载，但体积和重量较大；谐波减速器精度最高，但抗冲击力和寿命有限；行星减速体积小、质量轻、稳定性好，但单级传动比较低。

精密减速器类别	RV减速器	谐波减速器	行星减速器
图片示例			
结构组成	包括两级传动装置，第一级为单级行星齿轮减速器，第二级为差动齿轮减速器	包括波发生器，传动的输入单无；柔轮，是一个柔性部件，工作中在不断变形，通过外齿轮进行大扭矩的输出；刚轮，为带有内齿的刚性结构	包括行星轮、太阳轮和内齿圈。太阳轮连接输入轴，行星轮连接输出轴
工作方式	通过行星减速器初步减速，再由针齿盘与摆线齿轮实现精确啮合减速	波发生器会发生可控变形，带动柔轮转动，柔轮外齿轮通过弹性变形与刚性齿轮啮合，向刚轮传递动力	中心太阳轮驱动内部受力旋转，带动行星齿轮在内齿圈轨道内进行旋转，依赖齿轮之间的啮合来实现动力传递和转速减小
优点	高负载，高刚性，寿命长	高精度、高减速比	体积小，质量轻，稳定性好
缺点	体积大，重量大	抗冲击能力和寿命有限	单级的传动比较低
使用场景	结构支撑，大扭矩输出	精密动作	精密动作

资料来源：《工业机器人用精密减速器研究现状》林江海. 黄鹏程. 王燕霜等，华鑫证券研究

3 灵巧手关键零部件解析

3.2、头部厂商介绍

各公司专注于减速器及相关传动系统领域，凭借技术优势和产品创新，广泛应用于工业机器人、人形机器人、新能源、医疗等行业。

公司名称	日本新宝	纽卡特	纽氏达特	科峰智能
简要情况	日本公司，在国际市场和国内市场均占有最大份额	德国公司，2004年在沈阳成立分公司，有1400万种可能的减速机配置	秉承欧洲技术，拥有大量进口加工中心、车削中心、全自动数控滚齿机、插齿机、磨齿机和真空离子氮化技术及先进的装配线	已在高端机床、顶管机、半导体、医药装备、包装机械等领域实现进口替代
产品类型	无级变速器、减速器	减速器	精密行星减速器	45-235全系列斜齿行星减速器产品、16-1720全系列直齿行星减速器、微型行星减速器、智能减速器等产品系列，非标定制化产品数千种
公司名称	中大力德	兆威机电	秦川机床	丰立智能
简要情况	公司小型和微型减速电机在国内市场拥有较强的市场地位，精密减速器实现了技术突破，已在与国外先进企业的市场竞争中占有一席之地，不断实现对进口产品的替代	专业从事微型传动系统、精密注塑件和精密模具的研发、生产与销售的高新技术企业，主要为客户提供定制化微型传动系统和精密注塑件	国内规格最全、系列最多、满足5—1000KG负载匹配全系列工业机器人关节减速器产品的供应商，尤其是大负载产品	一家专业从事小模数齿轮、精密减速器及零部件等产品研发、生产与销售的高新技术企业，拥有50项专利技术，其中发明专利12项。
产品类型	“精密行星减速器+伺服电机+微型传动系统、精密注塑件和驱动”模组化产品	精密注塑件和精密模具	在齿轮加工机床、螺纹磨床、加工中心、车削中心、外圆磨床等领域处于国内第一梯队	齿轮、精密减速器及零部件、新能源传动以及气动工具

资料来源：科峰智能招股说明书，纽氏达特官网，中大力德2023年度报告，兆威机电招股书，秦川机床2023年年度报告，丰立智能2023年度报告，华鑫证券研究

3、灵巧手关键零部件解析

3.2、各家行星减速器产品性能比较

各家行星减速器的可选尺寸范围较大，从性能角度来看，国内厂商与海外厂商产品并无显著差距。

头部厂商行星减速器产品对比					
公司名称 系列名称	纽卡特 HLAE	日本新宝 VRS		科峰智能 SPLS	中大力德 ZPN
产品图片					
径向尺寸范围 (单位: mm)	70-90-110	60-75-100-140-180-210-240		70-90-120-160-205	22-32-42-52-62-72-82-105-120
1级传动比	3~10	3~10		3~10	3.7~6.75
2级传动比	9~100	15~100		10~64	14~46
最小尺寸的减速器重量(羊级) (单位: kg)	2.1	1.6		1.4	/
最小尺寸的运行噪音(单位: dB)	58	/		<58	<60
最小尺寸的额定输出扭矩(羊级) (单位: Nm)	15~33	18~27		32~44	1~4
最小尺寸的最大输出扭矩(单 级)(单位: Nm)	24~53	35~50		54~88	2~8
特点	符合较高的安全和卫生要求	高精度, 高适配、在寿命期内 无需更换润滑剂、安装便捷		耐腐蚀, 卫生设计	斜齿轮, 齿与齿之间更紧凑 终生润滑, 任意安装

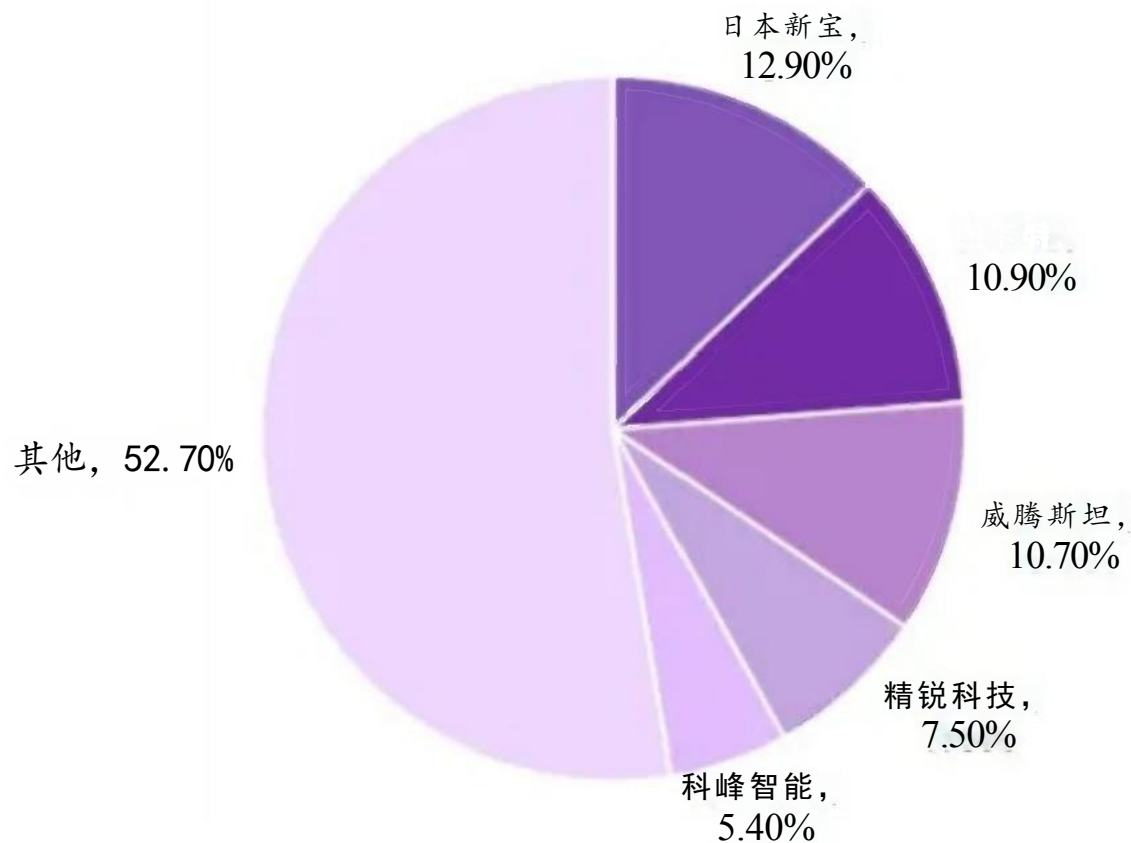
资料来源: Neugart 产品手册, Shimpo 产品手册, Wittenatein 产品手册, 科峰智能产品手册, 中大力德产品手册, 华富证券研究

3 灵巧手关键零部件解析

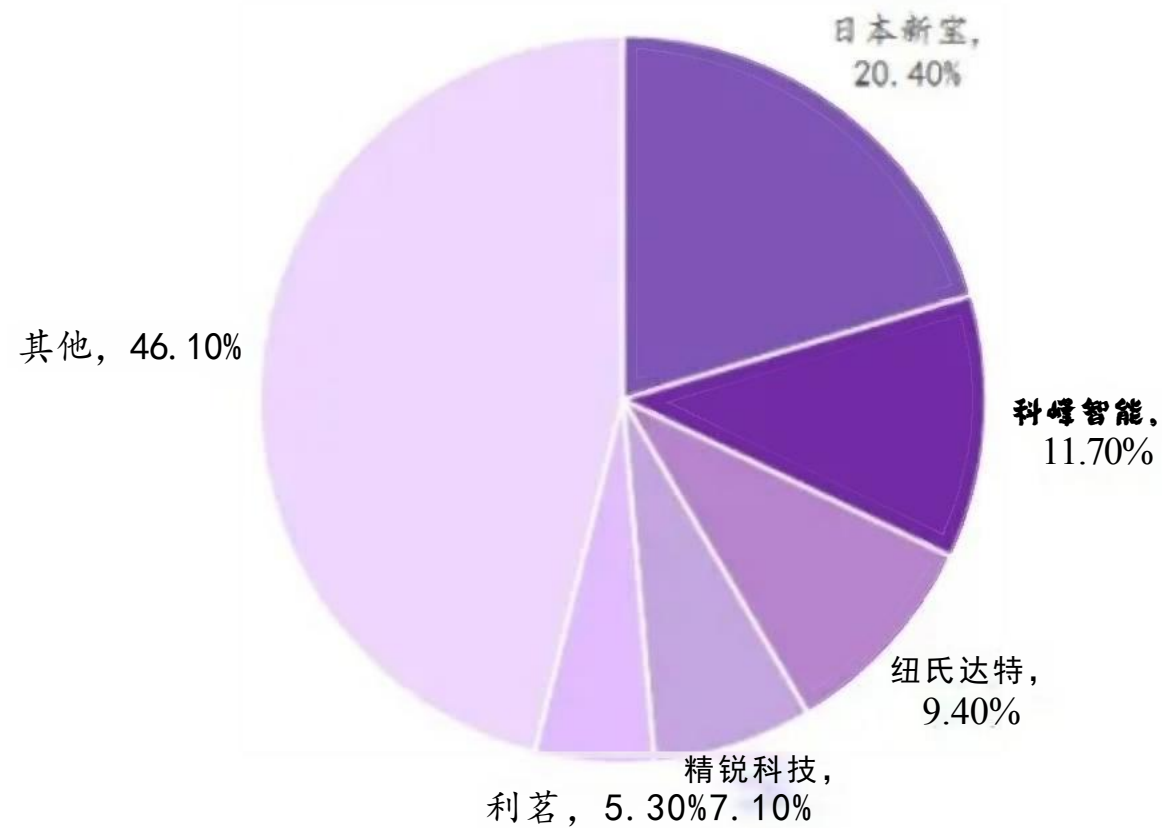
3.2、行星减速器竞争歌剧院

行星减速器市场竞争格局较为分散。因其技术门槛相对较低，市场竞争较为激烈，没有明显的市场主导企业。2022年精密行星减速器的国内和国外市场都以日本新宝为首。国内厂商如科峰智能、纽氏达特在中国市场一定程度上能实现对国外产品的替代。

2022年全球精密行星减速器市场



2022年中国精密行星减速器市场份额



资料来源：科峰智能招股说明书，华鑫证券研究

3.3、丝杠可以有效提升灵巧手的载荷和抗冲击性

蜗轮蜗杆和丝杠均能够改变运动方向，但适用于不同场景。蜗轮蜗杆适合需要高减速比和自锁性的场景，特别是在灵巧手中用于关节固定或稳定负载的位置控制。滚珠丝杠本质是线性传动装置，通常不具备高减速比功能，其机械减速能力取决于螺距(导程)。滚珠丝杠更适合需要高精度和高效率的传动任务，比如快速且精确地调整关节位置或实现复杂抓取动作。

蜗轮蜗杆与滚珠丝杠性能对比

	蜗轮蜗杆	滚珠丝杠
减速比	高，单级可达大幅减速	较低，需结合电机控制完成减速
效率	低 (30%-90%)	高 (>90%)
自锁性	有	无，需要额外机构
精度	中等，易受齿轮间隙影响	高，定位重复性好
承载能力	较好	优秀
运行平稳性	高	高
磨损与寿命	磨损快，需定期润滑	磨损慢，寿命长
成本	一般	较高
适用场景	需位置锁定，低速高扭矩应用	需高精度、高效率传动场景

资料来源：景一精工，KHK官网，华鑫证券研究

3 灵巧手关键零部件解析

3.3、滚柱丝杠和滚珠丝杠比较优势在于精度、载荷、寿命等多方面

滚珠丝杠螺母组件包含多个滚珠轴承，能够处理中等负载的滚珠轴承有最小尺寸要求。与相似尺寸和导程的滚柱丝杠相比，滚珠轴承的半径需要更粗糙的螺距，导致接触点更少。加上较小的接触半径和允许轴承互相接触的设计，限制了滚珠丝杠的DLR (Dynamic Load Rating)，导致较低的力和较短的使用寿命。相比于传统的滚珠丝杠传动，行星滚柱丝杠传动呈现多副(螺纹副和齿轮副、多体(多个零件参与啮合传递运动和动力)、多点(螺纹副多点接触)的啮合特征，故在相同丝杠直径下，行星滚柱丝杠比滚珠丝杠的承载能力提高6倍，相同负载下节省1/3空间，寿命提高14倍，工作环境温度范围提高2倍。

在实际应用中，滚柱相对于螺母无轴向运动，丝杠转速可达600r/min，螺母直线速度可达2m/s。采用行星滚柱丝杠作为传动机构的EMA与采用滚珠丝杠的EMA相比相同推力下重量减少30%，相同重量下推力提升50%。而且，行星滚柱丝杠可采用微小导程(螺距可达0.3mm)，不仅更便于控制传动精度和提升动态频响，而且由于更多接触点同时参与传力，能够实现重载条件下的超高精密传动。

行星滚柱丝杠与滚柱丝杠性能对比



性能	滚柱丝杠	滚珠丝杠
动态额定载荷	非常高	中等
寿命	很长，几倍于滚珠丝杠	一般
冲击载荷	非常高	中等
相对体积	最小	中等
加速度	高	中等
精度	高	一般

资料来源: TOLOMATIC, 华鑫证券研究

3 灵巧手关键零部件解析

3.4、主流灵巧手腕绳材料性能

主流灵巧手腕绳材料主要分为高分子材料和不锈钢两大类。其中，高分子材料为超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维，主要包括Dyneema和Spectra两类，具有高强度、轻质、耐磨损、耐化学侵蚀、耐磨和抗紫外线等特性，延长了绳索的使用寿命。相比之下，钢丝绳在传动效率方面有一定优势，但其末端固定困难、不能承受小的回转半径、强度较低、寿命短等缺点限制了其在灵巧手设计中的应用。此外，钢丝绳的断裂行为不均匀，反冲力难以预测，而高分子材料的腕绳则表现出线性、可预测的反冲力，断裂时更安全。

灵巧手的腕绳材料性能比较

性能指标	UHMWPE (Dyneema/Spectra)	钢丝绳
安全性	安全性高，以线性方式断裂	低于高分子纤维绳
强度	高，是钢丝的15倍(同重量)	相对较低，同直径下最大载荷低于高分子纤维绳
重量	轻，具有低密度特性	较重，密度高
耐磨性	优异，适用于耐磨应用	良好，但低于高分子材料
拉伸性	低拉伸性，操作平稳	-
耐化学性	高，能抵御潮湿、紫外光与化学试剂的侵蚀	中等，易受腐蚀影响
成本	可能较高，取决于应用和生产规模	相对较低，但维护成本可能较高
耐水性	防水，能浮于水面	一般，易受水分影响
耐疲劳性	优异，适合长期高负载运行	中等，易出现疲劳断裂
耐温性	熔点相对较低(约138℃)，并且在极低温度下没有脆点，无法保持性能	耐温性较好，但易受高温影响
抗蠕变性	较差，易发生形变	较好，但长期负载下可能发生蠕变



超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)绳索

资料来源：贝泽精密产品官网，Access Ropes产品官网，腕传动灵巧手指的传动分析与结构设计_李柏龄，华鑫证券研究

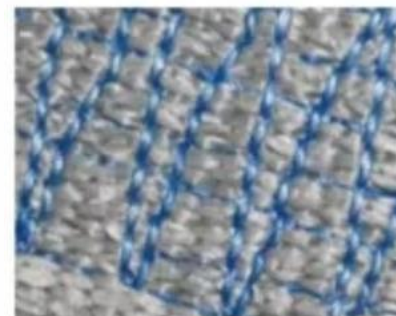
3 灵巧手关键零部件解析

3.4、主流灵巧手腕绳材料性能

荷兰DSM公司是全球领先的高性能材料供应商之一，其核心产品Dyneema广泛用于腱绳传动系统中。美国Honeywell公司生产的Spectra纤维，也广泛应用于腱绳传动系统中。日本东洋纺公司与DSM合资，不仅供应Dyneema纤维，还自主研发了Tsunooga纤维。英国Shadow Robot公司推出Shadow灵巧手，腱绳传动系统模拟了人手的肌腱结构。中国宁波大成新材料股份有限公司自1996年起研发UHMWPE纤维，是全球主要生产商之一，产品出口多国。此外，江苏贝泽精密金属科技有限公司生产机器人特细金属腱绳，钢丝绳没有内摩擦，强度高，是灵巧手腕绳材料较优选择。

国内外灵巧手材料生产公司

公司	产品	介绍
荷兰DSM	Dyneema (UHMWPE) TREVO	DSM是全球领先的高性能材料供应商之一，Dyneema是其核心产品，广泛用于腱绳传动系统中。
美国Honeywell	Spectra (UHMWPE)	Speotra纤维是一种超高分子量聚乙烯(UHMNPE)纤维，具有极高的抗拉强度和耐磨性，广泛应用于腱绳传动系统中。
日本(东洋纺Toyobo)	Dyneema (UHMWPE)	与DSM合资
日本(三井化学)	Tekmilon	-
英国(Shadow Robot)	高分子纤维	Shadow Dexterous Hand(tendon driven)
宁波大成新材料	UHMWPE纤维	-
江苏贝泽精密	钨钢丝绳	制造机器人特细金属腱绳



Dyneema纤维



Spectra纤维



特斯拉灵巧手或采用金属腱绳

资料资源：《中国化工新材料产业发展报告·2016》，Shadow Robot, 贝泽精密产品官网, TESLA, 华意证券研究

机器人下游应用不及预期

地缘政治风险

研发进度不及预期

林子健：厦门大学硕士，自动化/世界经济专业，CPA, 6 年汽车行业研究经验。曾任职于华福证券研究所，担任汽车行业分析师。2023年加入华鑫证券研究所，担任汽车行业首席分析师。兼具买方和卖方行业研究经验，立足产业，做深入且前瞻的研究，擅长自下而上挖掘个股。深度覆盖特斯拉产业链/一体化压铸等细分领域。

张智策：武汉大学本科，哥伦比亚大学硕士，2024年加入华鑫证券。2年华为汽车业务工作经验，主要负责智选车型战略规划及相关竞品分析。

程晨：上海财经大学金融硕士，2024年加入华鑫证券，研究汽车&人形机器人方向。

股票投资评级说明：

	投资建议	预测个股相对同期证券市场代表性指数涨幅
1	买入	>20%
2	增持	10%—20%
3	中性	-10%—10%
4	卖出	<-10%

行业投资评级说明：

	投资建议	行业指数相对同期证券市场代表性指数涨幅
1	推荐	>10%
2	中性	-10%—10%
3	回避	<-10%

以报告日后的12个月内，预测个股或行业指数相对于相关证券市场主要指数的涨跌幅为标准。

相关证券市场代表性指数说明：A 股市场以沪深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；美国市场以道琼斯指数为基准。