

灵巧手行业深度报告

灵巧手赛道百花齐放，关注工艺收敛进程中的产业链机遇

首席证券分析师：周尔双

执业证书编号：S0600515110002

zhouersh@dwzq.com.cn

证券分析师：钱尧天

执业证书编号：S0600524120015

qianyt@dwzq.com.cn

2025年4月23日

- ◆ **灵巧手vs夹爪：场景落地不同，稳定性与泛化性的博弈。** 场景应用决定硬件需求，不同的场景匹配不同的硬件，无论是灵巧手还是夹爪，都有其适合的应用场景。**夹爪：泛化能力有限但稳定性高，更适合工业应用场景。** 夹爪的泛化性弱于灵巧手，但低成本与高稳定性的特性使其更适配工业场景。一方面工业场景不会为多余的功能买单，夹爪可以以最高的性价比满足工业端需求；另一方面夹爪泛化性差但操作简单，现有的控制算法已可以赋予其较高的稳定性，这对于工业场景对高良率和高稳定性的要求比较友好。**灵巧手：终局泛化能力强，适配更复杂的应用场景。** 灵巧手相比夹爪能实现更多复杂的操作，例如需要抓握、手指联动的场景中，灵巧手是必然选择。长期来看，人形机器人的最终目标就是融入人类的环境，因此灵巧手会是终局解决方案，能够适用于更多的应用场景。
- ◆ **驱动模块/减速模块/传动模块是灵巧手的三大组成部分。** ①**驱动模块：**电机驱动是目前灵巧手主流的驱动方案，空心杯电机、无刷直流电机、无框力矩电机均有应用，目前空心杯电机为主流方案。②**减速模块：**降低电机的转速从而输出更大的扭矩，主要包括行星减速器和谐波减速器，目前行星减速器为目前主流方案。③**传动模块：**若电机直驱动则仅需齿轮传动，非直驱方案传动方案包括微型丝杠或蜗轮蜗杆（将旋转运动转为直线）搭配腱绳或连杆（将直线运动传递至关节），目前**微型滚珠丝杠+腱绳为主流方案。**
- ◆ **各企业灵巧手布局百花齐放。** 目前灵巧手赛道玩家众多，行业内既有仅研发灵巧手的企业，也有众多人形机器人本体企业在灵巧手赛道布局相关产品。目前行业内技术路径百花齐放，驱动、传动技术路线尚未完全收敛。我们统计了众多人形机器人本体企业与灵巧手企业的产品布局，发现电机驱动搭配腱绳传动的方案应用较多。其中特斯拉的灵巧手受市场关注度最高，一代灵巧手采用空心杯电机+行星减速箱+蜗轮蜗杆+腱绳驱动方案，二代灵巧手采用直流无刷电机+微型滚珠丝杠+腱绳驱动方案。
- ◆ **投资建议：**推荐【兆威机电】【雷赛智能】【伟创电气】【鸣志电器】，建议关注【捷昌驱动】【南山智尚】【大业股份】【云中马】。
- ◆ **风险提示：**人形机器人量产不及预期，灵巧手技术进展不及预期，宏观经济风险。

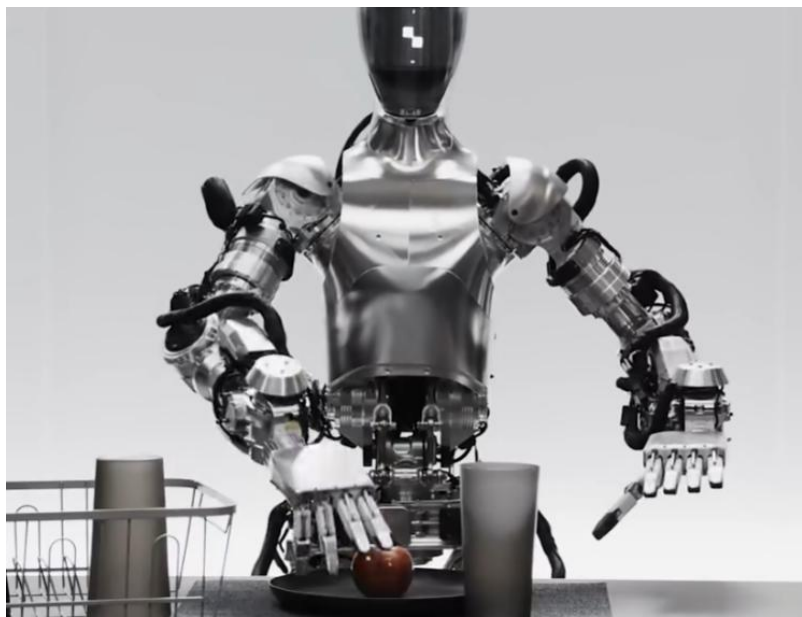


- 一、灵巧手vs夹爪：场景落地不同，稳定性与泛化性的博弈
- 二、驱动模块&减速模块：高功率密度电机为优选方案
- 三、传动模块：腱绳、连杆等多种方案各有优劣
- 四、商业落地：传感器、抓取模型打通商业落地最后一环
- 五、各企业灵巧手设计方案拆解
- 六、投资建议
- 七、风险提示

1.1 灵巧手：人形机器人与外界交互的重要渠道

- ◆ **灵巧手是人形机器人末端执行的最优选择。**手是人类经过长期进化演进的结果，是人与外界交互的重要渠道，是与现实世界交互的直接渠道。人形机器人作为仿人的产品，终极目标是做到替人与仿人，因此灵巧手理应是人形机器人末端执行的最优选择。人形机器人通过灵巧手能够使用人类设计的工具，以人的形态感知世界，更好地融入应用场景。

图：人形机器人抓取不规则物品



图：人形机器人分拣快递包裹



1.2 性价比要求高+稳定性要求高的方案：夹爪

- ◆ 场景应用决定硬件需求，不同的场景匹配不同的硬件，灵巧手和夹爪都有其适合的应用场景。
- ◆ 夹爪作为目前机器人末端执行的解决方案之一，是工业夹治具的通用版本，主要形式为两指或三指（多指）夹持器，用于抓持并操控物体。最早的夹爪为两指夹持器，动作形式单一稳定，工作可靠，且具备较低的成本，但不能对复杂目标进行抓持。因此，后续又出现了三指或四指抓持手，在两指夹持器的基础上对目标物体实施多触点抓持，提高了抓持的成功率和可靠性。
- ◆ 夹爪在工业端已实现批量出货与应用。目前工业端机械臂末端抓取执行器普遍使用夹爪，已实现批量化应用。以钧舵机器人为例，公司的电动夹爪产品已在医疗（试剂检测）和3C领域批量出货。

图：目前常用的夹爪形式



1.3 实现复杂操作+泛化能力强的终极解决方案：灵巧手

- ◆ 灵巧手和人手一样具有较好的负载、运动、控制和感知能力。灵巧手本就以人手的结构和功能为模仿对象，研究的最终目标也是期望能够像人手那样对生产、生活中的各类物体进行稳定且灵活的抓持和操作。在灵巧手数十年的发展之中，多指灵巧手的自由度、传感器数量持续提升，但高度系统集成的灵巧手具有灵活性和功能性的同时，却也导致了高额的制造成本且降低了系统的可靠性和易维护性。

图：特斯拉Gen1 灵巧手架构



图：因时机器人RH56DFX系列灵巧手



1.4 灵巧手vs夹爪：短期内各有其适合的使用场景，长期亦会共存

- ◆ **夹爪：泛化能力有限但稳定性高，更适合工业应用场景。** 夹爪的泛化性弱于灵巧手，但低成本与高稳定性的特性使其更适配工业场景。一方面工业场景不会为多余的功能买单，夹爪可以以最高的性价比满足工业端需求；另一方面夹爪泛化性差但操作简单，现有的控制算法已可以赋予其较高的稳定性，这对于工业场景对高良率和高稳定性的要求比较友好。
- ◆ **灵巧手：终局泛化能力强，适配更复杂的应用场景。** 灵巧手相比夹爪能实现更多复杂的操作，例如需要抓握、手指联动的场景中，灵巧手是必然选择。长期来看，人形机器人的最终目标就是融入人类的环境，因此灵巧手会是终局解决方案，能够适用于更多的应用场景。
- ◆ **自由度是灵巧手与夹爪的核心差异。** 更高的自由度代表能够进行更复杂的抓取和操作，也更加灵活，但更高的自由度对操作端的算法模型泛化能力提出更高要求，在当前时间节点暂无产业化。

图：G1智元专业数采机器人选用夹爪方案



图：特斯拉Optimus选用灵巧手方案



1.4 灵巧手vs夹爪：短期内各有其适合的使用场景，长期亦会共存

◆ 出于成本以及具体应用场景考量，夹爪和灵巧手虽然外表区别较大，内部结构均可以分为以下三部分：**①驱动模块**：电机驱动是目前灵巧手主流的驱动方案，空心杯电机、无刷直流电机、无框力矩电机均有应用，目前空心杯电机为主流方案。**②减速模块**：降低电机的转速从而输出更大的扭矩，主要包括行星减速器和谐波减速器，目前行星减速器为主流方案。**③传动模块**：若电机直驱动则仅需减速器，非直驱方案传动方案包括微型丝杠或蜗轮蜗杆（将旋转运动转为直线）搭配腱绳或连杆（将直线运动传递至关节），目前微型滚珠丝杠+腱绳为主流方案

图：目前常用的驱动、减速、传动方案





- 一、灵巧手vs夹爪：场景落地不同，稳定性与泛化性的博弈
- 二、驱动模块&减速模块：高功率密度电机为优选方案
- 三、传动模块：腱绳、连杆等多种方案各有优劣
- 四、商业落地：传感器、抓取模型打通商业落地最后一环
- 五、各企业灵巧手设计方案拆解
- 六、投资建议
- 七、风险提示

2.1 电机选择——空心杯电机 vs 直流无刷电机 vs 无框力矩电机

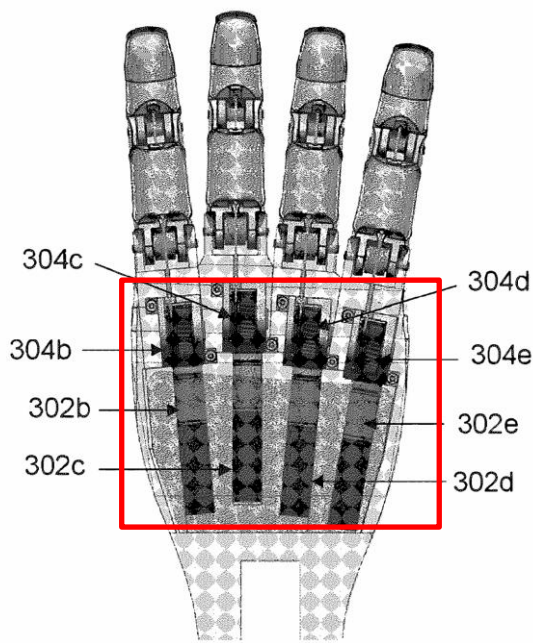
- ◆ **三种电机各有优势。** 空心杯电机采用无铁芯结构，具有高效能和低噪音优点，适用于高精度控制；直流无刷电机通过电子换向器控制磁场，具有高转速和高效能特点；无框力矩电机设计特殊，能够实现高精度力矩输出，适用于要求快速响应和降低转动惯量的场合。

项目	空心杯电机	直流无刷电机	无框力矩电机
结构	采用无铁芯转子，也叫空心杯型转子，属于直流永磁的伺服、控制电机。	由电动机主体和驱动器组成，电动机的定子绕组多做成三相对称星形接法，转子上粘有已充磁的永磁体。	由转子、定子和力矩控制组件等构成，无外框结构，转子和定子设计特殊，利于实现高精度力矩输出，减少机械限制和转动惯量。
原理	采用无铁芯转子，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消耗。	无刷直流电机由电动机主体和驱动器组成，是一种典型的机电一体化产品，通过电子换向器控制电机的磁场，实现无接触的换向。	基于电磁感应，精确控制定子绕组电流产生的磁场与转子永磁体磁场相互作用，无框结构优化磁场分布和力矩传递效率。
效率	最大效率一般在80%以上，部分产品达到90%以上	可达90%以上，部分高性能的直流无刷电机效率能达到95%左右	一般在80%-90%左右，受多种因素影响，优化设计可使部分电机达到90%以上。
转速	转速非常高，可以达到数万转每分钟	可以实现较高的转速，但通常在10000转/分钟以下	通常在每分钟数千转以下，侧重稳定力矩输出，高转速时受散热和机械强度影响。
转动惯量	转动惯量最低	相对较高	转动惯量较低，能快速响应力矩变化，实现高精度动态控制。
响应速度	起动、制动迅速，响应极快，机械时间常数小于28毫秒，部分产品可以达到10毫秒以内。	响应速度相对无刷空心杯电机较慢。	响应速度极快，能在毫秒级甚至微秒级对控制信号进行精确力矩调整。
噪音	噪音水平极低。	噪声也较低，没有电刷摩擦和换向电流的噪声。	噪音小，运行平稳，无明显机械振动和电磁噪声。
运行稳定性	转速波动很小，作为微型电动机其转速波动能够容易地控制在2%以内。	稳定性好	运行稳定，能长时间保持稳定力矩输出，受干扰小，可通过闭环控制提高稳定性。

2.1 电机选择——高功率密度为灵巧手电机优选

- ◆ 灵巧手由于设计空间有限，因此需要高功率密度的电机。机器人灵巧手结构紧凑，需要在有限的空间中集成多个电机，从而实现多个指关节的灵活度，而扭矩的大小又决定了手指关节的抓握力度，因此高功率密度（有限体积内提高输出功率）的电机应为灵巧手驱动单元的优选。
- ◆ 功率密度与扭矩密度的关系为： $P(\text{功率})/V(\text{体积})=2\pi * T(\text{扭矩}) * n(\text{每分钟转数})/60V(\text{体积})$ 。空心杯电机相比于无刷直流电机，其无铁芯的结构大幅提高了转速（可达10万rpm以上），进而提高了功率密度。灵巧手作为精细操作的执行器，有较高的动态响应需求，因此需要更高的功率密度，空心杯电机是比较合适的方案。

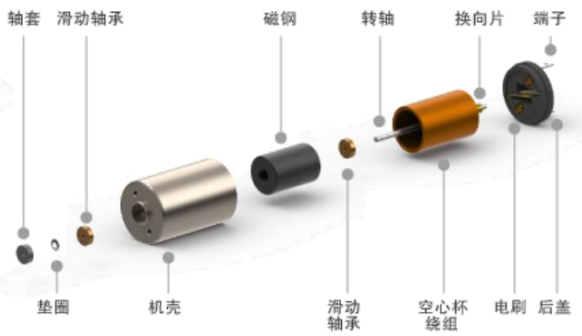
图：单只灵巧手需要集成多个电机，小空间内需要高功率密度



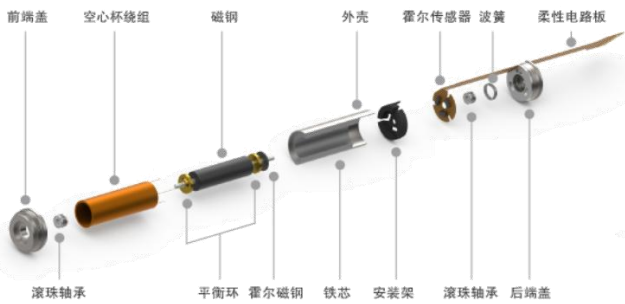
2.1.1 空心杯电机：高效精密，灵巧手理想选择

- ◆ 空心杯电机作为人形机器人灵巧手末端执行器的核心零部件，是目前性能最优的电机方案之一。
- ◆ 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。
- ◆ 空心杯电机生产的关键是线圈的生产，其核心壁垒主要在于线圈设计、绕线工艺以及绕线设备。

图：有刷空心杯电机结构图



图：无刷空心杯电机结构图



数据来源：鸣志电器官网，东吴证券研究所

表：空心杯电机适配灵巧手的优点

优点	空心杯电机相关原理
高功率密度，小巧大能量。	无铁芯转子结构使其重量大幅减轻，转动惯量减小，从而在相同的体积和重量下，能够比传统电机输出更高的功率。
快速响应，精准捕捉瞬间。	由于其转子的转动惯量小，电流对电压的波动响应快，转矩和电流的响应转速相当，使得电机能够快速启动、停止和改变转速。
高精度控制，复刻人类手部的细腻。	通过先进控制技术，如高精度的编码器和精密的控制算法，能够实现对电机的精准控制，确保电机能够按照预定的轨迹和速度运行。 空心杯电机的低噪音和低振动特性，能够减少对周围环境的干扰，提高操作的稳定性和准确性，使得灵巧手在进行精细操作时更加可靠。

数据来源：人形机器人产业通公众号，东吴证券研究所

2.1.1 空心杯电机：绕线机能力是决定空心杯产业化的关键一环

- ◆ **绕线机是空心杯电机生产的核心设备。**空心杯电机的核心创新在于其无铁芯转子结构，而绕组是实现电磁能量转换的核心部件。绕线机的作用是将漆包线按照特定方式绕制成空心杯形线圈，并确保线圈的均匀性、对称性和绝缘性，从而满足电机的高效运行需求。
- ◆ **绕线机自动化有望助力空心杯电机量产降本。**空心杯电机过往无法实现自动绕线，人工绕线是其量产成本居高不下的原因。目前日特机械已生产出空心杯自动绕线机，节拍可达到10秒完成一次绕线。展望未来自动绕线机成熟与空心杯电机生产自动化水平提高，空心杯电机有望不断实现降本，更好落地于灵巧手商业化。
- ◆ **目前空心杯电机价格仍然较高。**兆威机电空心杯电机单价约2000元，maxon空心杯电机单价约为4000元（兆威机电两倍）。根据我们草根调研，大规模量产后空心杯电机价格有望降至千元以内。

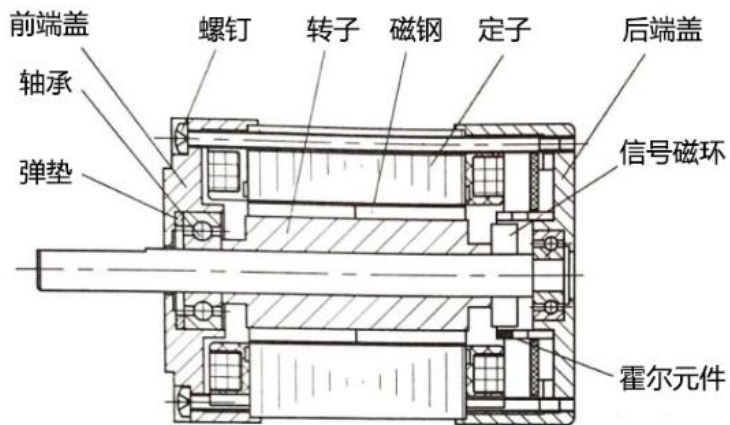
图：空心杯电机的三种绕线结构



2.1.2 直流无刷电机：低成本与高集成化的折中方案

- ◆ 直流无刷电机（BLDC）由电动机主体和驱动器组成，没有电刷和换向器，通过电子换向器来实现电机的连续运转，具有高输出功率、低电噪声、高可靠性、高动态响应、电磁干扰少、更好的转速-转矩等优点，而被广泛使用于电动汽车、工业自动化、医疗器械等领域。
- ◆ 直流无刷电机成本较低，可实现灵巧手降本需求。在性能方面，直流无刷电机的效率较高，能提供稳定的动力输出，但在精度控制和响应速度上可能略逊于空心杯电机，不过通过优化控制算法和机械结构可以在一定程度上弥补这些不足。

图：直流无刷电机的结构图



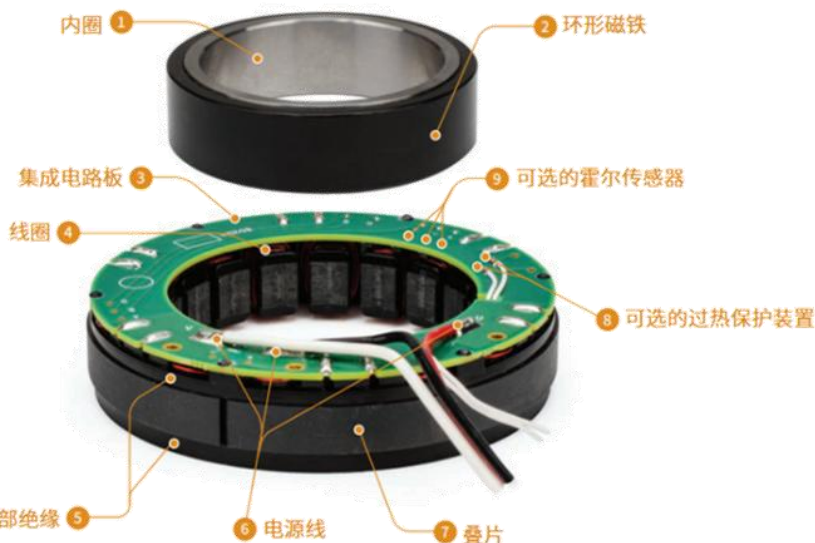
表：直流无刷电机的优缺点

优点	阐述
无电刷、低干扰	无刷电机去除了电刷，可以极大减少电火花对遥控无线电设备的干扰。
噪音低，运转顺畅	运转时摩擦力大大减小，运行顺畅，噪音会低许多，利于模型稳定运行。
寿命长，低维护成本	没有电刷，无刷电机的磨损主要是在轴承上，从机械角度看，几乎免维护。
缺点	阐述
转动惯量大，动态响应慢	直流无刷电机的转子通常包含铁芯或永磁体，转动惯量较大，响应速度相对较慢。
存在齿槽效应和转矩波动	直流无刷电机因定子铁芯的齿槽结构，会产生齿槽效应（转矩波动），导致运行振动。
体积大功率密度低	直流无刷电机因铁芯和磁路设计的限制，体积和重量通常更大，功率密度相对较低。

2.1.3 无框力矩电机：轻量紧凑，高效灵活

- ◆ 无框力矩电机通常由定子和转子两部分组成，具有**低转速大扭矩**的特点，能直接耦合（无背隙），可以直接驱动负载，不需要皮带、齿轮等传动装置。
- ◆ 无框力矩电机的性能在很大程度上取决于其电机结构和编码器。电机制造壁垒相对不高，国内厂商有望追赶；编码器影响电机运动控制功能，高端产品主依赖进口重要元件芯片、码盘的制作工艺难度较大，是国产化的主要壁垒。
- ◆ 无框力矩电机全球市场由国际厂商主导，国内市场正在快速发展。海外厂商如美国科尔摩根等凭借先发优势，在磁路仿真、材料选型和制造精度上积累深厚；国内厂商如步科股份、禾川科技等正在逐步提升技术水平，市场呈头部集中趋势，但与国际厂商相比仍有差距。

图：科尔摩根无框力矩电机产品图



表：无框电机主要优势

优点	阐述
快速响应	无框电机从获得指令信号到完成指令所要求的工作状态的时间较短，适用于需要频繁启停、灵敏响应的人形机器人领域。
高功率密度	无框电机消除了传统电机的铁芯，结构紧凑小巧，可实现更高的功率密度。适用于需要高功率输出的人形机器人关节部件。
高效率	无框电机采用了新型的电磁铁和轴承结构，具有低能耗和低摩擦的特点。适用于工作强度大，承载需求高的人形机器人应用场景。
高灵活性	无框电机体积小、质量小、轴向尺寸短、设计灵活性高，适合机器人关节这种空间受限并且高度定制化的应用。
缺点	阐述
价格高	高端进口无框力矩电机单价在5000元以上，国产价格约2000元。
调速范围小	无框力矩电机调速范围小于空心杯与直流无刷电机

2.1.3 无框力矩电机：赋予灵巧手更强的负载能力

- ◆ 目前采用无框力矩电机作为灵巧手驱动方案的产品比较少见。Dexhand和Spacehand灵巧手都采用Robodrive ILM 25无框力矩电机，该电机与传动比为100:1的谐波减速器HFUC 8结合，组成圆柱体（长约17.5mm，重约46g），提供2.4Nm的连续扭矩，峰值可达9Nm。

图：Dexhand采用无框力矩电机作为驱动方案



2.1.4 电机价格对比:

◆ 三种电机价格对比: 无框力矩电机价格 > 空心杯电机价格 > 直流无刷电机价格

(1) 直流无刷电机价格最低: 鸣志电器R16和R22直流无刷电机单价在300-400元, 根据我们草根调研, 预计大规模量产后直流无刷电机单价能够降低至200元以下。

(2) 空心杯电机价格较高: 鸣志电器10mm规格的空心杯电机单价在1000-2000元之间, 8mm规格空心杯电机单价在2000元以上。进口MAXON单价约为鸣志电器2-3倍。根据我们草根调研, 预计大规模量产后空心杯电机单价能够降低至1000元以下。

(3) 无框力矩电机: 目前主要依靠进口, 进口产品价格在5000元左右, 长期看不会成为灵巧手主流电驱方案。

表: 鸣志电器空心杯电机与直流无刷电机价格对比

电机类型	型号	规格	目前单价	大规模量产单价预测
空心杯电机	DCU08017	8mm	1433-2530元	1000元以下
	DCU10017	10mm	1060-1767元	
	DCU10025	10mm	1007-1794元	
直流无刷电机	R16	16mm	418元	200元以下
	R22	22mm	307元	

2.1.4 电机方案对比:

◆ 三种电机方案各有优劣:

(1) **空心杯电机**: 整体来看空心杯电机从性能角度出发, 是手部最优解, 主要系其体积小且转速高, 但空心杯电机目前在绕线自动化仍存在瓶颈, 导致价格较高。

(2) **直流无刷电机**: 优点在于价格便宜, 但其综合性能较空心杯电机略差。

(3) **无框力矩电机**: 主要应用于直驱方案, 但直驱方案目前在灵巧手中应用较少。

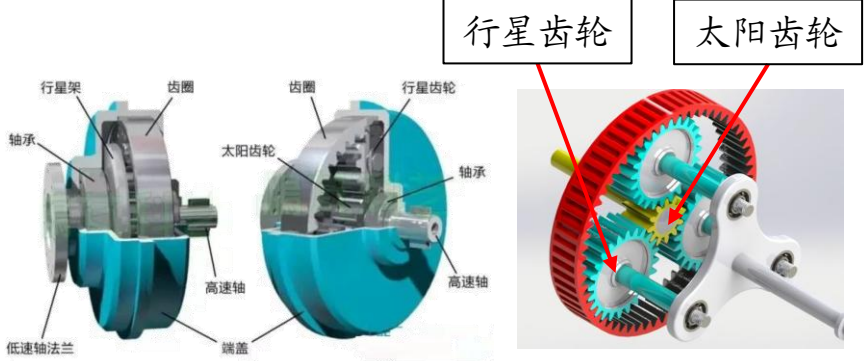
图: 目前灵巧手常用电机方案对比

驱动方案	优点	缺点	代表厂商
空心杯电机	1、物理体积较小 2、峰值转速高	1、价格较高 2、空心杯电机目前仍无法实现绕线自动化	特斯拉一代灵巧手 星动纪元
直流无刷电机	价格便宜	1、体积相比空心杯电机较大 2、转速低于空心杯电机	特斯拉二代灵巧手
无框力矩电机	峰值扭矩较大	直驱方案目前应用场景较少, 全直驱方案灵巧手价格极高	灵巧智能 新剑机电

2.2.1 减速装置选择：行星齿轮箱，平衡性价比与可靠性

- ◆ 行星齿轮箱即行星减速机，是多个行星齿轮围绕一个太阳轮转动的机构，其传动比可以通过调整太阳轮、行星齿轮和内齿圈的齿数来实现，结构简单，易于设计和制造。而且，由于行星齿轮在传动过程中能够均匀地分担载荷，使得齿轮箱具有较高的传动效率和可靠性。
- ◆ 行星齿轮箱的难点主要在于微型化和长寿命。目前行星齿轮箱的低寿命是限制灵巧手寿命的核心因素。兆威机电自主研发核心工艺技术，在特定测试条件下齿轮箱寿命可达5万小时。

图：行星齿轮箱结构图



数据来源：鹏芃科艺网站，东吴证券研究所

图：兆威机电6mm行星减速齿轮箱产品



数据来源：兆威机电官网，东吴证券研究所

图：微型电机和齿轮箱构成的微型传动系统



数据来源：兆威机电招股说明书，东吴证券研究所

2.2.3 减速方案对比:

◆ 行星减速器与谐波减速器方案各有优劣:

(1) **行星减速器**: 目前灵巧手减速器的主流方案仍为行星减速器方案, 行星减速器方案结构简单价格成本低, 但短寿命的问题是目前最大的缺陷。

(2) **谐波减速器**: 谐波减速器方案现阶段应用较少, 谐波减速器方案优点在于控制能力精准, 减速比更高, 结构紧凑, 但缺点为成本过高。

表: 目前灵巧手减速方案对比

减速方案	优点	缺点	代表方案厂商
行星减速器	1、结构简单 2、价格便宜	寿命较短, 灵巧手维护成本较高	特斯拉灵巧手
谐波减速器	1、谐波传动精准 2、减速比高 3、结构紧凑	成本过高, 抗冲击性低	哈默纳科全谐波方案 灵巧智能DexHand



- 一、灵巧手vs夹爪：场景落地不同，稳定性与泛化性的博弈
- 二、驱动模块&减速模块：高功率密度电机为优选方案
- 三、传动模块：腱绳、连杆等多种方案各有优劣
- 四、商业落地：传感器、抓取模型打通商业落地最后一环
- 五、各企业灵巧手设计方案拆解
- 六、投资建议
- 七、风险提示

3. 传动模块：间接驱动下实现灵巧操作的核心

- ◆ **灵巧手直接驱动VS间接驱动：**①直接驱动指灵巧手的每个自由度直接由电机搭配减速系统控制关节弯曲，无需传动部件；②间接驱动指灵巧手自由度对应的电机统一集成于手掌或手腕内，电机与减速系统输出的转矩经丝杠/蜗轮蜗杆转换为直线运动，再经腱绳/连杆驱动关节活动。
- ◆ **灵巧手全驱动VS欠驱动：**①全驱动指灵巧手每个关节自由度都是主动自由度，有对应电机单独驱动独立运行；②欠驱动指灵巧手存在主动自由度和被动自由度之分，电机驱动的自由度为主动自由度，另外通过腱绳、连杆等传动模块可由主动自由度传动被动自由度，被动自由度运动与主动自由度耦合。

表：直驱与间接驱动对比

	直接驱动	间接驱动
精度	极高（误差 $\leq 0.1\text{mm}$ ）	中等（需算法补偿）
响应速度	快（无传动延迟）	较慢（传动链惯性）
成本	高（精密电机成本占比大）	低（材料与结构简化）
适用场景	高精度操作（医疗、精密制造）	通用抓取（工业、服务机器人）
维护复杂度	高（集成化设计）	中（需定期更换易损件）
尺寸	大	小
代表企业	星动纪元	特斯拉、帕西尼、因时等

表：全驱动与欠驱动对比

	全驱动	欠驱动
灵活性	极高（独立控制关节）	有限（耦合运动）
成本	高（驱动元件多）	低（结构简化）
适用场景	高精度、复杂任务（医疗、精密制造）	通用抓取、工业搬运
技术挑战	微型化、降本	算法优化、提升精度
尺寸	大	小
代表企业	兆威机电	特斯拉、帕西尼、因时等

3.1.1 旋转-直线传动：微型滚珠丝杠，高效转化直线运动

- ◆ 滚珠丝杠是将旋转运动转换成线性运动的理想传动装置，主要由丝杠轴、螺母、滚珠以及循环部件组成。丝杠轴、螺母和端盖上都制有圆弧形螺旋槽，将它们套装在一起时，这些槽对合起来就形成了螺旋通道，滚珠能够在通道内循环滚动。当丝杠相对于螺母旋转时，滚珠在滚道内自转，同时又在封闭的滚道内循环运动，使丝杠和螺母相对产生轴向运动。
- ◆ 灵巧手中滚珠丝杠的驱动原理：电机通过齿轮箱驱动滚珠丝杠，通过滚珠丝杠上的螺母把旋转运动转换为直线运动，腱绳形成一个腱环套在螺母上，螺母拉动连接在灵巧手指指骨上的腱绳，实现手指绕关节轴的转动运动。

图：特斯拉第二代灵巧手使用微型滚珠丝杠替代蜗轮蜗杆



微型滚珠丝杠替代蜗轮蜗杆驱动腱绳

3.1.2 旋转-直线传动： 齿轮/蜗轮蜗杆传动， 驱动灵活但体积较大

◆ **齿轮/蜗轮蜗杆传动中**，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，驱动更加灵活，但是手指的闭合时间较长。但该传动方式结构冗杂，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。

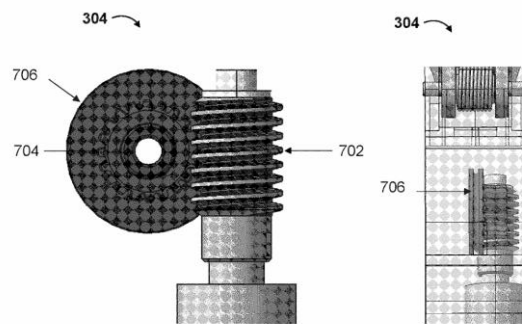
图：灵巧手齿轮/蜗轮蜗杆传动方案介绍

传动方式	特点介绍
齿轮/蜗轮蜗杆传动	<p>优点：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，驱动更加灵活，但是手指的闭合时间较长。</p> <p>缺点：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>
	典型案例
	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Vincent Hand</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>i-limb ultra Hand</p> </div> </div>

图：灵巧手齿轮传动原理



图：灵巧手蜗轮蜗杆传动原理



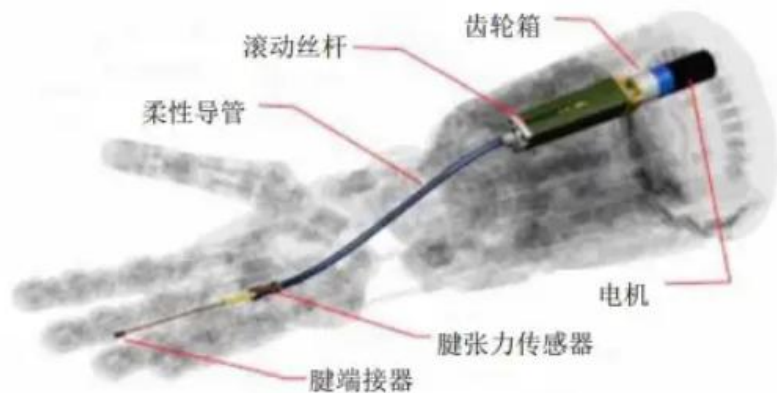
3.2.1 腱绳传动：多自由度+远距离动力传输，是一种柔性传动方式

- ◆ 腱绳传动使用腱绳传递动力。一般电机通过齿轮箱驱动滚珠丝杠，通过滚珠丝杠上的螺母把旋转运动转换为直线运动，腱绳形成一个腱环套在螺母上，螺母拉动连接在灵巧手手指指骨上的腱绳，实现手指绕关节轴的转动运动。其中为了引导腱绳的走线，避免腱绳之间的干扰，采用腱绳外包裹导管的形式。
- ◆ 目前特斯拉、海外知名灵巧手厂商SCHUNK、Shadow Robot均有使用过腱绳方案。

图：灵巧手的腱绳传动方案介绍

传动方式	特点介绍
腱绳传动	<p>优点：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>缺点：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>
	典型案例
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Shadow Hand</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>PISA/IIT SoftHand</p> </div> </div>

图：腱绳传动方案原理图



3.2.1 腱绳传动：材料的不稳定性是腱绳路线的最大阻碍

- ◆ 腱绳材料整体分为不锈钢、高分子纤维两类，其中高分子纤维使用更为广泛。UHMWPE（超高分子量聚乙烯纤维）是目前使用较为广泛的腱绳材料。在线性密度相同的情况下，该材料抵抗拉伸的强度是钢丝绳的15倍，同时具有低密度、抗切割、耐化学腐蚀、耐磨损、耐冲击等优良性能。缺点在于熔点低、抗蠕变性能形变性能低。
- ◆ 腱绳材料的研发思路：腱绳材料的研发思路为正向迭代试错，需要通过不断试错寻找最优解，正向研发过程中投入较高，但研发成功后的复刻成本较低。

图：绳驱灵巧手的腱绳材料统计

绳驱灵巧手	发布时间	腱绳牌号	腱绳材料	设计初衷	指尖力
Utah-MIT	1982	Dacron and Kevlar	聚酯纤维(涤纶)+芳纶纤维(凯夫拉)	科研	
DLR	1998	Spectra	高强度聚乙烯纤维	航空(太空操作)	30N(DLR HAND II)
Robonaut 2 Hand	2010	Teflon with Vectran	特氟龙+芳纶纤维	航空(太空操作)	
SDM hand	2010	尼龙涂层不锈钢缆	不锈钢丝	工业	
David's Hand I	2010	钢丝	钢丝	航空(太空操作)	20N指尖力
Metamorphic hand	2011	Carl Stahl 不锈钢丝	不锈钢丝(直径0.5mm)	科研	
Dexhand	2012	Dyneema	超高分子量聚乙烯纤维	航空(太空操作)	25N
PISA/IIT	2012	Dyneema	超高分子量聚乙烯纤维	工业	Z轴抓力20N,换电机后最高可达28N
Yale	2013	Spectra	高强度聚乙烯纤维	科研	10N
David's Hand II	2014	Dyneema	超高分子量聚乙烯纤维	航空(太空操作)	40N指尖力
Washington Hand	2016	Spectra	高强度聚乙烯纤维	科研	
Spacehand	2019	ZYLON纤维	聚对苯撑苯并二噁唑	航空(长期太空操作)	

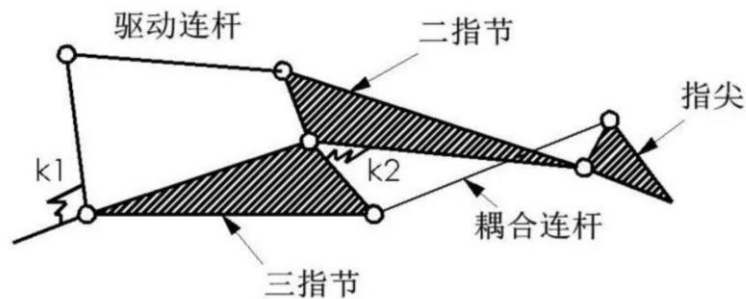
3.2.2 连杆传动：刚度好、负载能力强，能够较好实现运动轨迹

- ◆ 连杆传动系统通过一系列连杆和铰链连接来传递和转换力，并以此实现手指的运动。驱动器通过连杆系统直接作用于手指的关节。连杆传动中的指尖、二指节、三指节均为不同形状的三角形连杆，驱动连杆以及耦合连杆为直线形式，K1、K2为复位弹簧，当K1处的驱动连杆顺/逆时针转动时，手指便相应做屈曲/前伸运动。
- ◆ 目前BeBionic Hand、因时机器人-RH56DFX等使用连杆传动灵巧手方案。

图：目前夹爪or灵巧手常用方案

传动方式	特点介绍
连杆传动	<p>优点：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轨迹的要求。</p> <p>缺点：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>
	典型案例
	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>BeBionic Hand</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>因时机器人-RH56DFX</p> </div> </div>

图：腱传动结构示意图



3.3 传动方案对比:

◆ 传动方案各有优劣:

(1) **微型丝杠**: 现阶段旋转-直线传动的主流方案, 缺点是成本较高。

(2) **蜗轮蜗杆**: 优点在于可靠性高, 承载力较大, 但问题在于结构复杂, 容易使得灵巧手指节粗大十分笨重。

(3) **腱绳传动**: 优点在于能够适用于高自由度灵巧手, 且腱绳成本较低; 但缺点在于寿命较低, 且容易产生蠕变问题。

(4) **连杆传动**: 优点在于兼顾承载力和可靠性, 但问题在于效率低, 且不适合高速运动。

图: 目前灵巧手常用传动方案对比

传动方案	优点	缺点	成本	量产难度	代表产品
微型丝杠	传动精密	成本较高	高	高	特斯拉二代灵巧手、新剑等
蜗轮蜗杆	1、可靠性高 2、承载力较大	成本较高, 结构复杂, 体积较大导致灵巧手手指笨重粗大	低	低	灵巧智能等
腱绳传动	1、自由度高 2、成本相对较低	寿命较低, 容易产生蠕变和退化问题	低	低	特斯拉二代灵巧手、灵巧智能等
连杆传动	兼具承载力和可靠性	效率低, 只能单向传动; 传动路线长; 惯性力难以消除, 不适合高速运动。	低	低	帕西尼、新剑、因时等



- 一、灵巧手vs夹爪：场景落地不同，稳定性与泛化性的博弈
- 二、驱动模块&减速模块：高功率密度电机为优选方案
- 三、传动模块：腱绳、连杆等多种方案各有优劣
- 四、商业落地：传感器、抓取模型打通商业落地最后一环
- 五、各企业灵巧手设计方案拆解
- 六、投资建议
- 七、风险提示

4.1 传感器：触觉是实现灵巧操作的关键一环

- **触觉传感器对灵巧手实现商业化落地至关重要：**精准的力控是灵巧手商业化落地的基础，触觉传感器可实时检测接触力、压力分布和剪切力，帮助灵巧手调整抓握力度，提高抓取的成功率和稳定性。
- **触觉传感器技术路线多样，但原理相同：**传感器主要可分为三部分敏感元件（感知）+转换元件（转化为电信号）+信号处理电路（处理电信号）。根据敏感元件的不同可分为电容式、电磁式、压力式、压电式、光电式、摄像头等。

表：传感器技术路线对比

传感器类型	原理	优势	劣势
电容式	基于电容变化（极板间距或介电常数变化），检测位移、压力或物质特性。	灵敏度高（可达皮法级）；非接触测量；抗电磁干扰强；结构简单。	易受湿度/温度影响；需要高频电路；标定复杂；易受寄生电容干扰。
电磁式	利用电磁感应原理（如线圈阻抗变化、涡流效应或霍尔效应），检测磁场、电流或位移。	耐高温/高压；响应快；可远距离检测（如接近开关）；抗污染性强。	需外部磁场环境；对金属敏感；低频噪声大；体积较大（含线圈）。
压力式	通过应变片（压阻效应）或弹性元件形变，将压力转换为电信号。	量程范围广（kPa~GPa）；精度高（±0.1% FS）；可测静态压力；稳定性好。	温度漂移明显；过载能力有限；安装需应力匹配；动态响应较慢（机械形变延迟）。
压电式	利用压电材料（石英、陶瓷等）受压力产生电荷的特性，检测动态力/振动。	高频响应（kHz~MHz）；自发电无需电源；耐高温/冲击；体积小。	无法测静态力；输出阻抗高需电荷放大器；灵敏度受温度影响；需定期校准。
光电式	通过光敏元件（光敏电阻、光电二极管等）将光强变化转换为电信号，检测位置、颜色或透明度。	非接触测量；响应快（纳秒级）；抗电磁干扰；可远距离探测（光纤传感器）。	受环境光干扰；对透明/反光物体敏感；光学元件易污染；高温/粉尘环境性能下降。
摄像头视触觉	通过摄像头捕捉弹性材料表面形变（如硅胶层上的标记点位移），结合图像处理算法反推触觉信息。	高空间分辨率（亚毫米级）；可同时获取视觉+触觉数据；非接触式弹性层设计灵活。	依赖光照条件；图像处理延迟大；需高算力支持；弹性材料易老化；校准复杂度高。

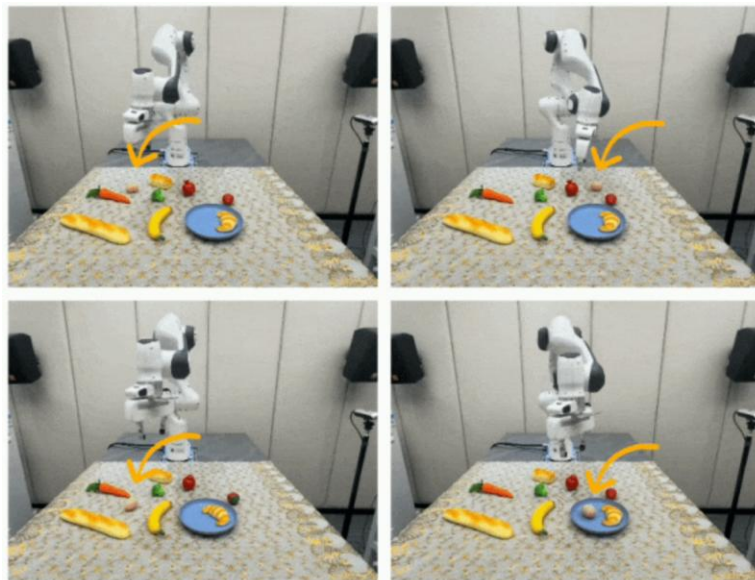
4.2 抓握大模型：赋予抓握末端更强的任务执行泛化能力

- ◆ 夹爪自由度更低，是训练抓取大模型的入门选择：相比五指灵巧手的10-20个主动/被动并存的自由度，夹爪自由度较低且都为主动自由度，避免了运动耦合的问题，在训练抓握模型时更加简单高效，泛化后的稳定性也更突出。
- ◆ 银河通用以二指夹爪训练出抓握大模型GraspVLA：2025年1月，银河通用在合成数据的基础上训练出了全面泛化的端到端具身抓取大模型GraspVLA，可实现光照、背景、平面位置、空间高度、动作策略、动态干扰、物体类别七大泛化，该模型是依靠二指夹爪训练而成。
- ◆ 我们认为依靠夹爪末端执行器避免自由度耦合干扰，可以更聚焦抓取识别能力本身的泛化，提高模型的训练效率。在模型识别能力泛化的基础上再引入动作更复杂的五指灵巧手是更好的选择。

图：银河通用采用二指夹爪训练GraspVLA模型



图：GraspVLA模型已实现七大泛化



4.3 商业模式演进：本体厂自制灵巧手成为趋势

- **灵巧手是人形机器人面向应用场景执行任务的最核心部件：**人形机器人要实现商业化需要具有执行任务的能力，而手作为与现实世界交互最频繁的部分，重要性不言而喻。因此灵巧手是人形机器人执行任务和与现实世界交互的重要末端执行器。
- **本体厂商自制灵巧手正成为人形机器人行业大趋势：**灵巧手作为人形机器人最核心的末端执行器，本体厂商自制灵巧手正成为行业大趋势。目前行业内人形机器人本体厂商宇树科技、星动纪元、智元机器人等均有自主的灵巧手产品。
- **本体厂商自制灵巧手的重要性：**①灵巧手是最核心的末端执行部件，决定人形机器人是否能够商业化落地，本体企业需要自主掌握核心技术；②自制灵巧手可以实现与本体更好的匹配，灵巧手可伴随本体同步迭代进步；③抓握大模型是灵巧手的“大脑”，而不同的灵巧手构型需要匹配不同的抓握大模型，本体厂自主研发灵巧手可以同步带动模型端能力演进。

图：宇树科技推出20自由度灵巧手



图：星动纪元12自由度全直驱灵巧手





- 一、灵巧手vs夹爪：场景落地不同，稳定性与泛化性的博弈
- 二、驱动模块&减速模块：高功率密度电机为优选方案
- 三、传动模块：腱绳、连杆等多种方案各有优劣
- 四、商业落地：传感器、抓取模型打通商业落地最后一环
- 五、各企业灵巧手设计方案拆解
- 六、投资建议
- 七、风险提示

5.1 各企业灵巧手布局情况

● 技术路线尚未完全收敛:

目前灵巧手赛道玩家众多，既有仅研发灵巧手的企业，也有众多人形机器人本体企业在灵巧手赛道布局相关产品。目前行业内技术路径百花齐放，驱动、传动技术路线尚未完全收敛。

● 我们判断高自由度&低成本为未来灵巧手进步方向:

如果是简单的工业场景，我们认为夹具的适用性会更高；但如果需要在复杂的场景使用，高自由度灵巧手是必备的，至少在食指和拇指需要具备侧摆功能。如果需要高自由度，则考虑全直驱、腱绳or连杆+微型丝杠的方案，但全直驱目前价格过高，经济性过低，综合判断，我们认为腱绳or连杆+微型丝杠的方案会具有更高的综合性价比。

表：灵巧手单品企业布局

企业	技术路线	自由度	企业	技术路线	自由度
强脑科技	仿生设计，单手主动握力为6kg，单手承载能力为30kg，单指捏力为30N。采用非侵入式脑机接口技术。集成了多模态触觉感知能力，具备高精度和快速响应能力。	有10个活动关节、6个驱动自由度，可实现5根手指的独立运动和协同操作	因时机器人	同等功率下，电缸体积仅为传统产品的1/2至1/3。集成电机、减速器、驱动控制、丝杠及传感器，推拉力最高达400N。采用力闭环控制，力控制精度可达多档，支持柔性抓取物品	6自由度、12关节
傲意科技	ROHand内置PID电机控制算法，能够实现±1mm的定位精度。采用铝合金、锌合金等材质，降低整体重量。应用于工业场景，还拓展到智能仿生义肢、教育科研装备等领域。	ROH-A001型号：具备6个主动自由度和5个被动自由度，总共11个自由度	Shadow Robot	配备129个传感器，运行频率高达1KHz，能提供精确数据。部分指尖标配触觉传感器，且可升级。完全集成ROS，便于用于研发和AI、机器学习测试。搭配Shadow Glove和遥控操作系统，能在远程或危险环境中实现精准控制	五指：24个自由度，由20个电机通过腱驱动
兆威机电	高转矩直流电机和无刷空心杯电机均已形成系列产品，成功用于人形机器人等领域。整手的关键组件全部采用自主研制，包括电机、减速器、控制器等，其中高效高功率密度传动模组的设计寿命高达10年	整机拥有17个主动执行单元，单只手指自由度大于等于3个	Clone Robotics	采用整体肌腱肌肉设计，液压驱动（允许使用电力和化学动力）、无金属元素，肌肉组织完全柔韧	27自由度

5.1 各企业灵巧手布局情况（续）

企业	机器人型号	技术特点	DOF	驱动方式	应用领域	合作客户/生态
星动纪元	STAR1	每个手指配备高分辨率（>100点）触觉阵列传感器，精度高达0.1N，单手最高握力能达到80N。采用高集成度的全自研一体化关节模组，集成高功率密度空心杯电机、高功率密度驱动器和低阻尼小间隙减速器，结合高精度编码器，实现精细运动控制	12个主动自由度。支持食指侧摆，拇指具有大范围活动能力，可实现多手指间灵活协同动作。	采用纯电驱方式，避免液压和气动驱动的小型化和应用局限性。每个自由度都有对应驱动源，实现全自主五指关节驱动。	工业精密装配、医疗手术辅助、家庭服务	自研为主，目前已与5家头部制造业公司进行POC
特斯拉	Optimus Gen-3	传感器：多模态融合（视觉+触觉），高精度力矩传感器和位置传感器。材料：低成本压铸工艺，轻量化金属框架。控制算法：基于深度学习的环境实时分析，结合生成式AI生成拟人动作	22个自由度+关节解耦	线驱传动（柔顺拟人），电机+丝杠方案，执行器外置于前臂	物流搬运、医疗护理、家庭服务（清洁、烹饪）	T链：三花智控，哈默纳科，鸣志电器，双环传动，贝斯特等
智元机器人	远征A2	传感器：集成基于MEMS（微机电系统）原理的触觉传感器。控制算法：EI-Brain智脑系统，分层决策算法适配复杂任务	19个自由度（12个主动自由度）	采用自研PowerFlow关节电机，结合腱绳传动与线性执行器，实现高扭矩输出与柔性传动	工业场景：汽车装配、精密零件组装、物流搬运。服务场景：家庭服务。特种作业：危险环境操作	与均普智能（智能制造场景）、科大讯飞（AI大模型集成）、软通动力（操作系统研发）等达成战略合作
宇树科技	H1	自研灵巧手还未完成，选配采用三指灵巧手方案，正在尝试增加触觉传感器	11个自由度（三指）	电驱关节，齿轮+连杆传动	工业装配、服务机器人	宝通科技（工业场景落地合作）
魔法原子	MagicHand S01	基于电流与触觉融合的力位混合控制技术，可实现抓、握、双指操作等灵巧、复杂的动作	11个自由度	电机驱动、力位混合控制技术、微型电动推杆	双臂搬运负重最高可达20公斤，适配装配、检测等多种作业场景	—
1X	NEO	基于OpenAI大模型的运动规划算法，触觉传感器（压力反馈）+视觉定位	20个自由度	腱绳驱动+模块化电机	仓储物流、家庭服务机器人	中坚科技（国内唯一注资+协助降本增效）。受OpenAI战略投资
Figure	F.02	负载能力达25公斤，黑色点阵式皮肤或集成触觉传感器，增强抓握灵敏度和环境适应性。	16个自由度	—	工业制造，物流、仓储、零售	Figure链：绿的谐波，领益智造，兆威机电
优必选	Walker S1	6个阵列式触觉压力传感器，能够精确地监测抓握力度	—	—	室内外物流场景的无人化和规模化商业应用	—
达闼科技	XR4	集成高精度六维力传感器和触觉传感器。基于云端AI模型和自适应运动控制算法，支持多场景泛化能力	12个主动自由度+5个被动自由度	内置模块化电机驱动+谐波减速器	精密装配、高危环境作业	—

5.2 特斯拉Optimus第一代灵巧手拆分（空心杯方案）

● 第一代灵巧手方案拆解：

主要由单手6个无刷空心杯电机模组，11个自由度（6个主动自由度+5个被动自由度），空心杯电机模组由空心杯电机+行星减速箱+编码器构成。特斯拉采用金属腱绳+蜗轮蜗杆传动方案。

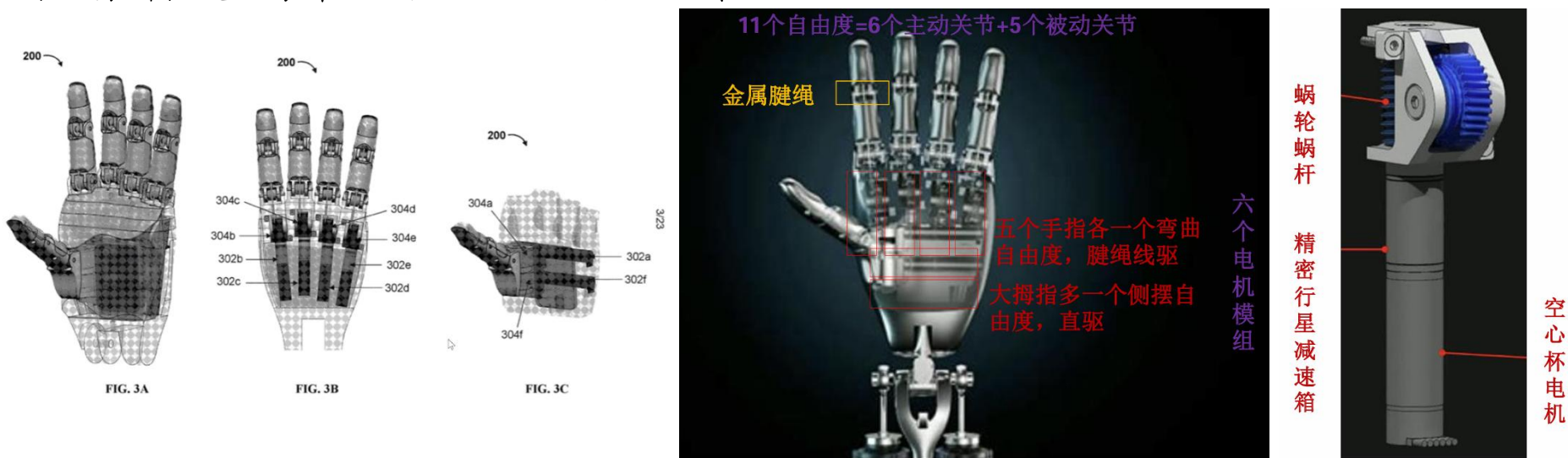
● 供应商选择：

25Q1末第一批量产的灵巧手还是空心杯电机方案，第一批量产大概率以外资供应商为主，后续量产可能导入国产供应商。

● 第一代灵巧手方案优劣势：

第一代灵巧手的优点在于采用蜗轮蜗杆模式，具备自锁能力，拥有较大的抓取力，而缺点在于缺少侧摆自由度，没有办法实现精密抓取。因此初步判断第一代灵巧手大概率应用于工厂环境。

图：特斯拉灵巧手第一代“空心杯电机”方案



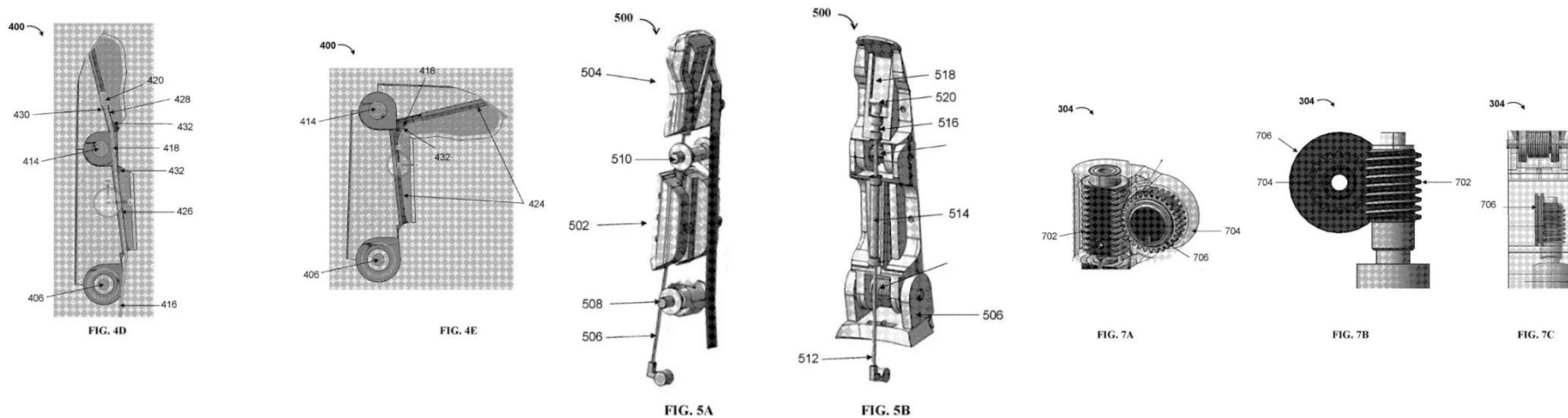
5.2 蜗轮蜗杆搭配腱绳实现手指的弯曲

● 原理拆解：

蜗轮蜗杆用于将电机的高速旋转转换为低速、高扭矩的运动中。在这种设计中，电机的输出轴连接到蜗杆，蜗杆与蜗轮啮合。蜗轮的旋转速度比蜗杆慢，但输出扭矩更大，从而为手指的运动提供足够的力量。腱绳将蜗轮蜗杆产生的扭矩传递到手指的各个关节。腱绳的一端连接到蜗轮的滑轮（如滑轮706），另一端延伸到手指的远端部件。特斯拉的设计中，腱绳不绕在关节的枢轴上，而是沿着手指的近端部件和远端部件延伸。当电机旋转时，蜗杆带动蜗轮旋转，蜗轮上的滑轮随之转动。滑轮的转动使腱绳被拉动或释放。

一句话总结： 齿轮/蜗轮蜗杆传动，通过齿轮或者蜗轮蜗杆将驱动器的旋转运动转换成直线运动，拉动驱动器和手指间的弹簧来驱动手指产生动作。

图：蜗轮蜗杆搭配腱绳原理



5.2 特斯拉Optimus第二代灵巧手拆分（腱绳方案）

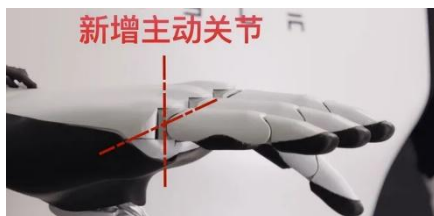
● 第二代灵巧手方案拆解：

单手22个自由度，20个电机，单指三级传动。其中灵巧手的食指、中指、无名指分别具有4个自由度，拇指以及小指分别具有5个自由度。具体来看，每根手指有三个关节，分别是远端关节（DIP），中间关节（PIP），近端关节（MCP），其中DIP&PIP具有一个自由度，可以弯曲和伸展，MCP具有两个自由度，可以进行弯曲伸展，以及内收和外展。第二代灵巧手行星齿轮箱传动，保持关节第一级运动；手臂绳驱+丝杠集成进电机，电机采用直流无刷电机

● 第二代灵巧手优缺点：

优点在于自由度高，但负载和传动精度有限，此外由于空间有限，第二代灵巧手还未贴载传感器。

图：特斯拉第二代灵巧手示意图

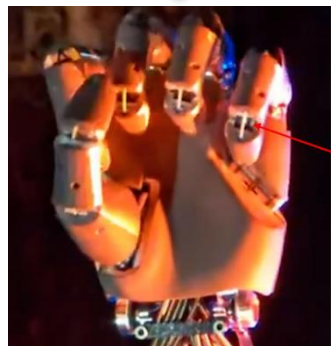
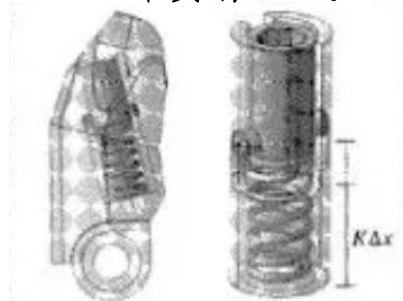


5.2 特斯拉Optimus两代灵巧手对比

第二代灵巧手三大变化均指向丝杠用量的提升：

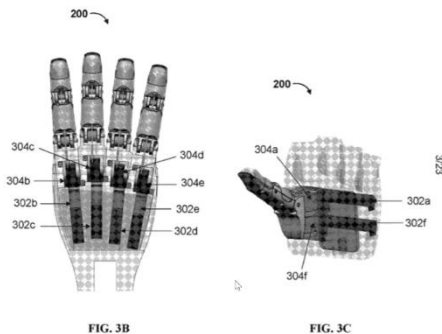
- 驱动器外置带来自由度提升：驱动器后置集成在手臂上可以放入更多的驱动器，直接增加灵巧手的自由度。
- 采用丝杠替代蜗杆：采用丝杠能有效提升灵巧手的精度和载荷能力，提高传动效率。
- 采用腱绳替代扭力弹簧：采用一根单独的腱绳完成手指的伸展，进一步提高灵活性。

图：扭力弹簧替换成腱绳



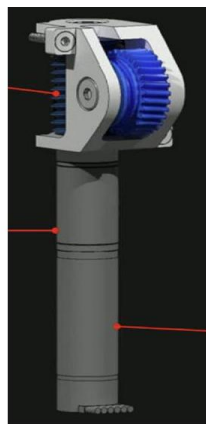
回弹腱绳

图：驱动器从内置到外置，蜗杆换成丝杠



蜗
轮
蜗
杆

精
密
行
星
减
速
箱



空
心
杯
电
机



手
腕
通
道

第
二
层
驱
动
器
腱
绳
组

第
一
层
驱
动
器

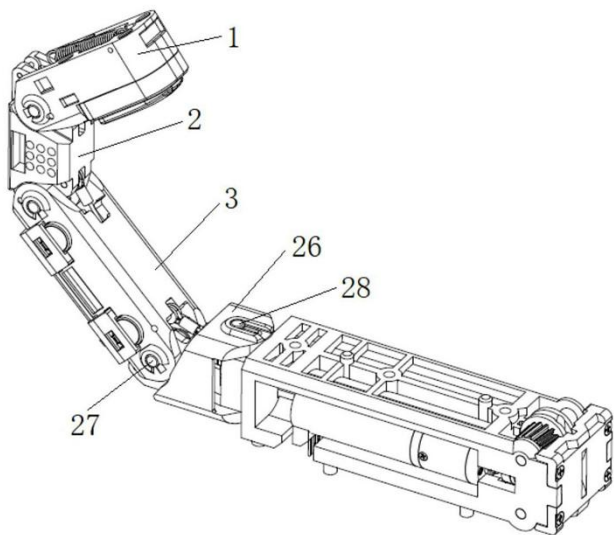
第
二
层
驱
动
器

5.3 灵巧智能灵巧手技术路线

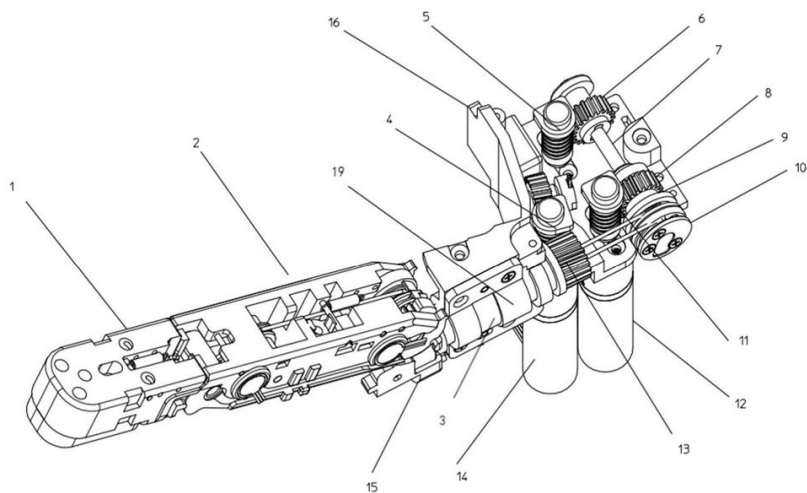
灵巧智能专利披露了其灵巧手产品手指的驱动方式：

- **驱动方案：**灵巧智能的灵巧手采用电机驱动方案。
- **传动方案：**第一指节与第二指节分别由一套电机+涡轮蜗杆+驱动绞盘+钢丝绳驱动，另外手指根部由一个单独电机+涡轮蜗杆驱动。
- **自由度：**单根手指具有三个自由度。第一、第二、第三指节均可自主运动，其中第一、第二由钢丝绳间接驱动，第三直接由电机直接驱动。

图：灵巧智能手指采用腱绳驱动



图：灵巧智能大拇指具有三个弯曲自由度

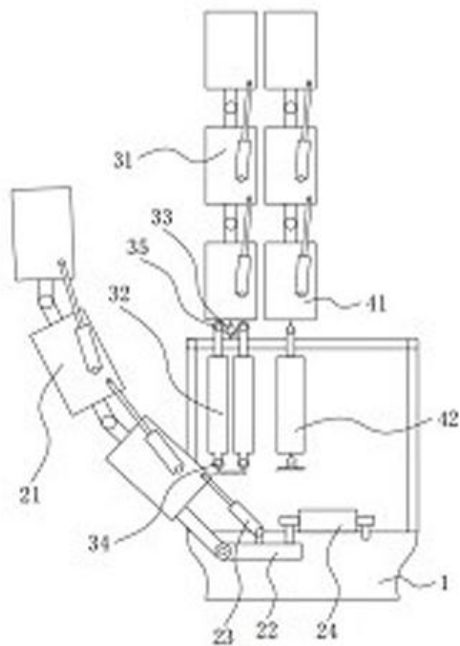


5.5 兆威机电灵巧手技术路线

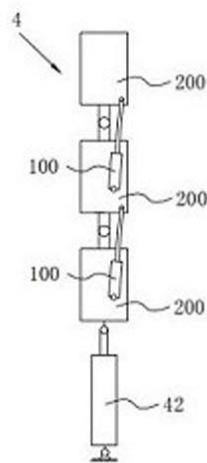
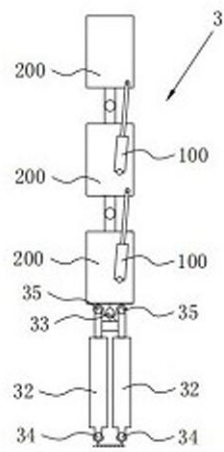
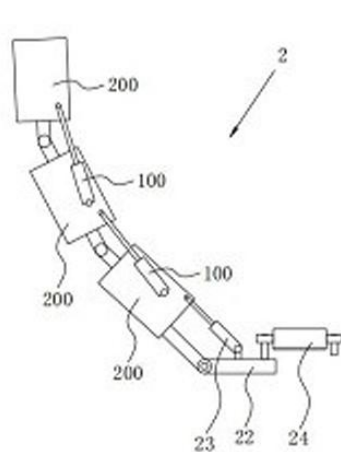
兆威机电专利披露了其灵巧手产品手指的驱动方式：

- **驱动方案：**兆威机电的灵巧手采用线性电机与步进线性电机相结合的驱动方案。
- **传动方案：**动力来源为线性电机，因此无需转变运动的轨迹。直线电机的伸缩可以直接控制每个指关节的弯曲。
- **自由度：**三类手指的自由度状态不同：①大拇指具有三个弯曲的自由度以及一个侧摆旋转的自由度；②食指具有三个弯曲自由度，以及一个侧摆自由度；③中指、无名指、小拇指具有三个弯曲自由度。

图：兆威机电的灵巧手设计



图：兆威机电灵巧手分三类手指





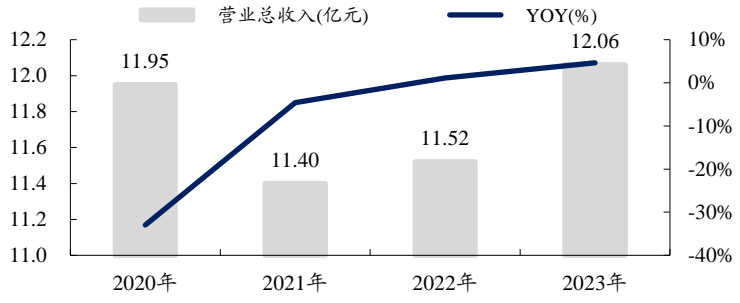
- 一、灵巧手vs夹爪：场景落地不同，稳定性与泛化性的博弈
- 二、驱动模块&减速模块：高功率密度电机为优选方案
- 三、传动模块：腱绳、连杆等多种方案各有优劣
- 四、商业落地：传感器、抓取模型打通商业落地最后一环
- 五、各企业灵巧手设计方案拆解
- 六、投资建议
- 七、风险提示

6.1 【兆威机电】专注微型传动领域超20年，灵巧手产品加速落地

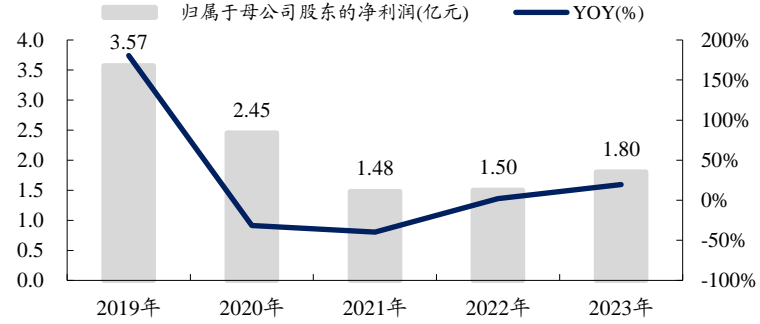


- ◆ 业绩稳步增长，毛利率较高。2021-2023年公司营业收入从11.40亿元增长至12.06亿元，增长稳健，归母净利润从1.48亿元增长至1.80亿元。利润率方面，公司毛利率与归母净利率分别维持在30%和14%上下。
- ◆ 微型电机研发突破，人形机器人灵巧手产品加速落地。公司在微型传动与驱动领域持续创新，完成高转矩直流电机、无刷空心杯电机等产品研发，产品以高精度、小体积、低噪音为核心优势并形成系列化应用，覆盖汽车、医疗及人形机器人等领域。基于微型传动技术积累，公司积极开发仿生机器人灵巧手，并推进与行业头部客户的合作。随着人形机器人产业化加速，相关产品有望成为新增长点。

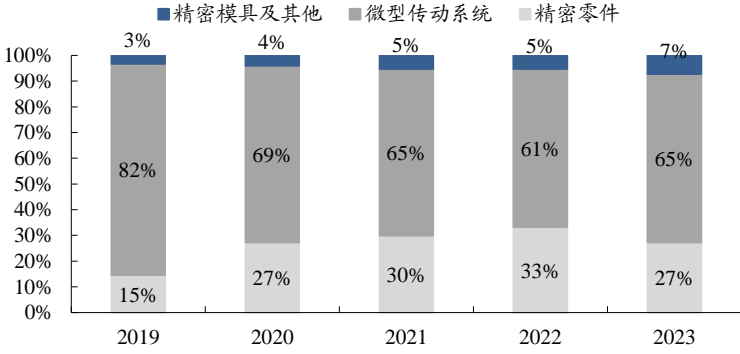
图：2020-2023年公司营业收入（亿元）



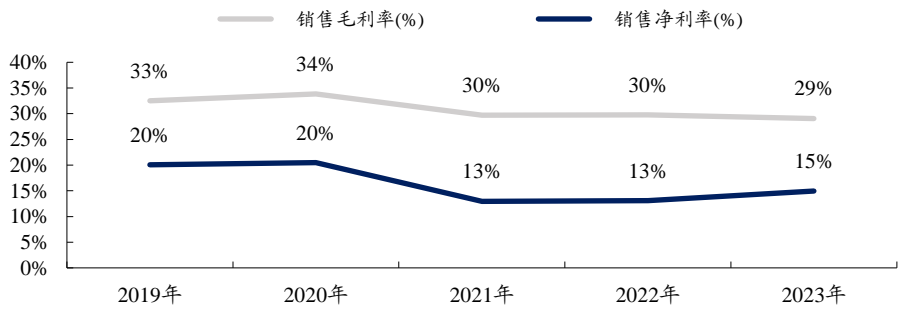
图：2019-2023年公司归母净利润（亿元）



图：分业务收入占比（%）



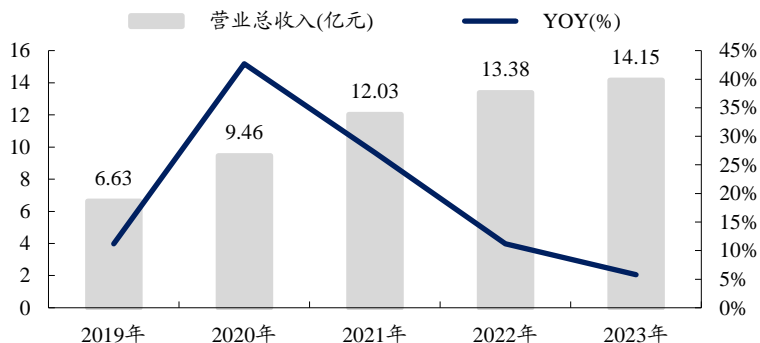
图：2019-2023年公司毛利率位于30%上下波动



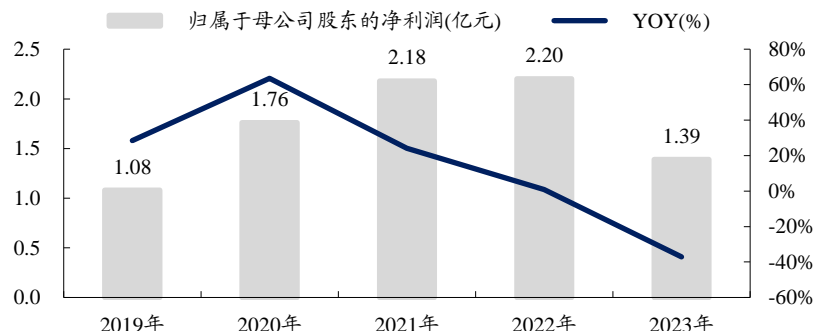
6.2 【雷赛智能】加强伺服系统服务，积极布局人形机器人领域

- ◆ 营收稳健增长，盈利质量总体稳定。2019-2023年公司营收CAGR=20.87%，归母净利润CAGR=6.51%，公司业绩稳健增长。2019-2023年综合毛利率从42%降至38%，主要系原材料价格上涨及产品降价压力。
- ◆ 加强伺服系统服务，积极布局人形机器人领域。雷赛智能推出了涵盖30W至22kW功率范围的全系列伺服系统，其成立的上海雷赛机器人科技有限公司，专注于高密度无框力矩电机、空心杯电机及配套的微型伺服系统等机器人零部件及模组的研发、生产和销售，并已实现了FM系列高密度无框力矩电机的成功量产，2023年机器人业务营收占比超25%。

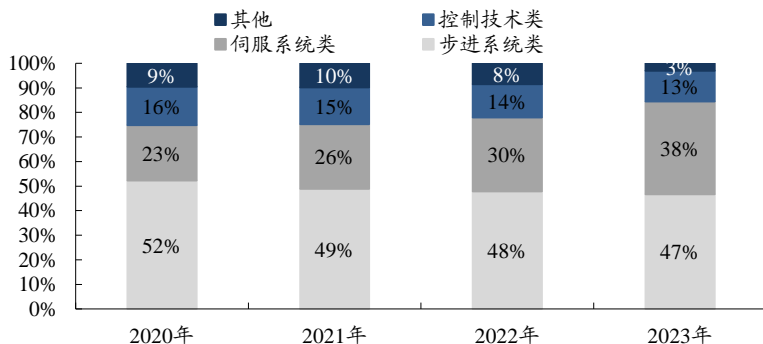
图：2019-2023年营收CAGR=20.87%



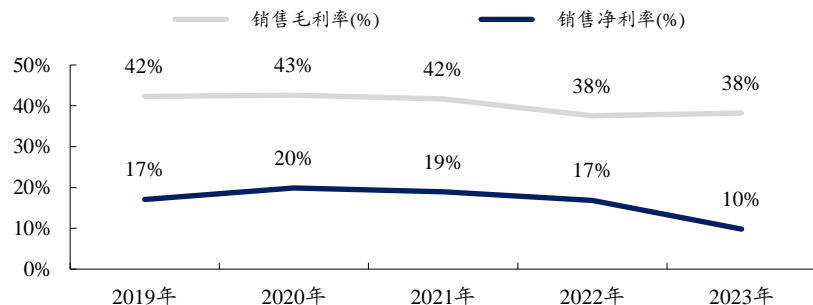
图：2019-2023年归母净利润CAGR=6.51%



图：分业务收入占比情况 (%)



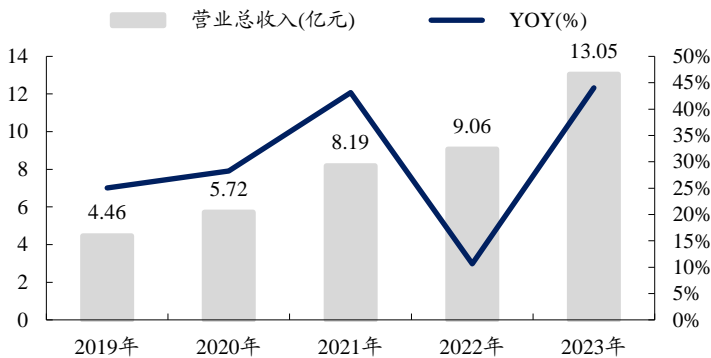
图：2019-2023年综合毛利率从42%降至38%



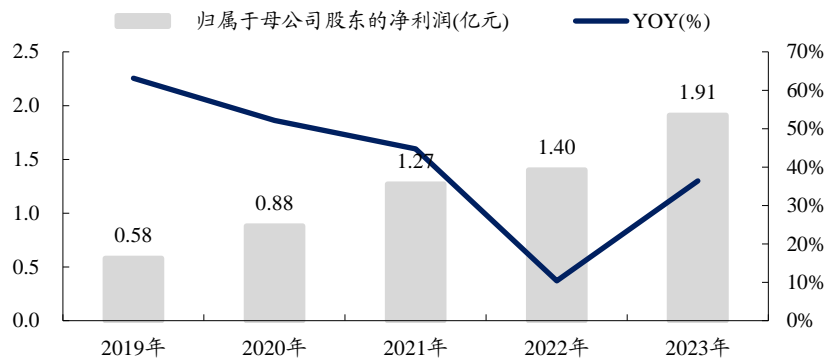
6.3 【伟创电气】持续深耕机器人领域，赋能机器人产业高速发展

- ◆ 经营业绩稳步增长，盈利能力不断增强。2019-2023年公司营业收入从4.46亿元增长至13.05亿元，CAGR=30.79%，归母净利润CAGR=34.71%。经营业绩稳步增长，盈利能力不断增强。
- ◆ 持续深耕机器人领域，为机器人产业高速发展蓄势赋能。公司持续深耕机器人领域，加大该行业的综合投入，为机器人产业高速发展蓄势赋能；针对人形机器人需求，公司开发8-16mm直流无刷空心杯电机系统，集成编码器、驱动器、减速机，具备高功率密度和紧凑设计，适配灵巧手及关节模组；通过合资公司伟达利，研发旋转关节模组（谐波/行星减速机）和直线关节模组，布局机器人关节、控制器等核心部件。

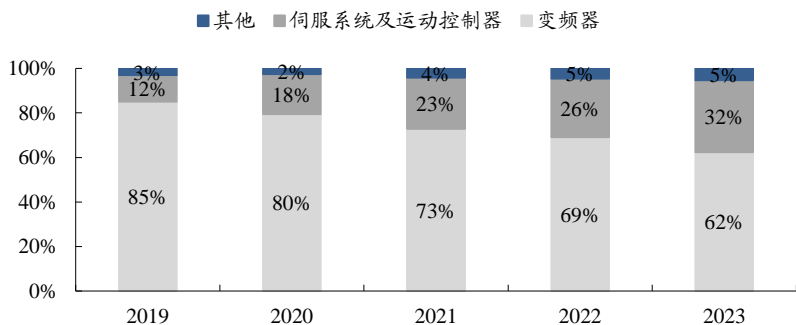
图：2019-2023年营收CAGR=30.79%



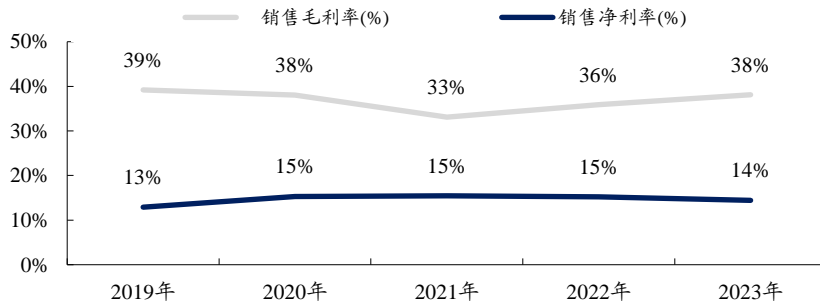
图：2019-2023年归母净利润CAGR=34.71%



图：分业务收入占比情况(%)



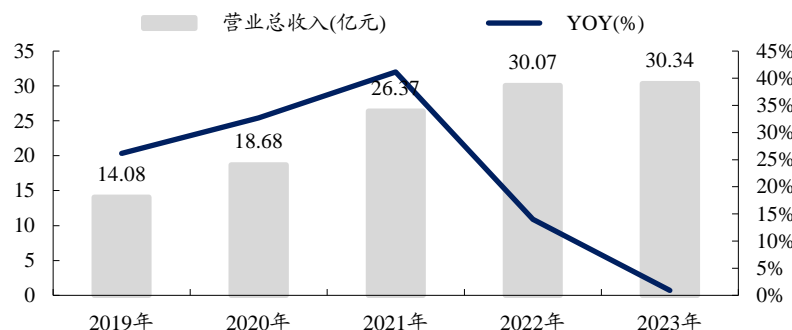
图：2019-2023年公司毛利率较为稳定



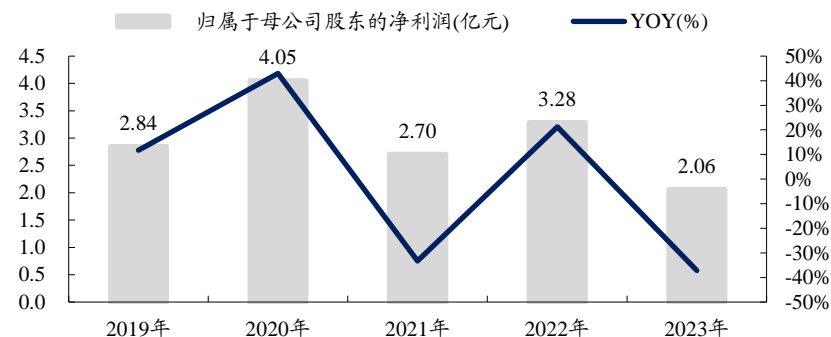
6.4 【捷昌驱动】战略合作推动核心技术研发，技术储备具备潜力

- ◆ 业绩稳步增长，盈利有所下滑。2019-2023年公司营业收入CAGR=21.16%，归母净利润CAGR=-7.71%。拆分公司主营业务看，线性驱动产品几乎贡献公司100%的营收。
- ◆ 战略合作推动核心技术研发，技术储备具备潜力。2023年12月，捷昌驱动与浙江灵巧智能科技有限公司共同成立浙江灵捷机器人零部件有限公司，专注于机器人灵巧手、关节模组、空心杯电机及驱动器等核心零部件的研发与生产。核心产品包括Dexhand系列灵巧手、高精度关节模组、空心杯电机等，其中灵巧手已进入销售阶段，主要面向工业自动化和医疗领域。

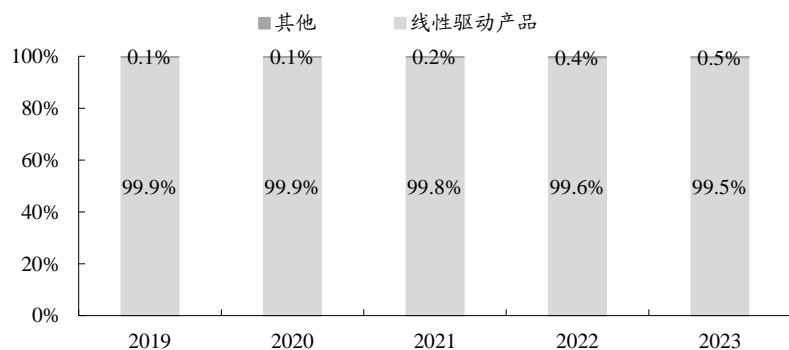
图：2019-2023年营收CAGR=21.16%



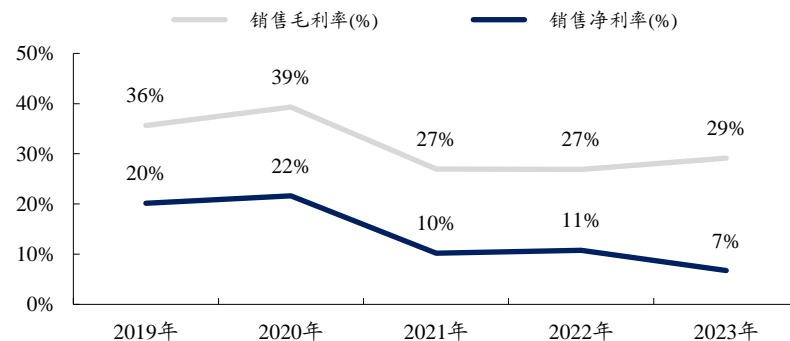
图：2019-2023年归母净利润CAGR=-7.71%



图：分业务占比情况(%)



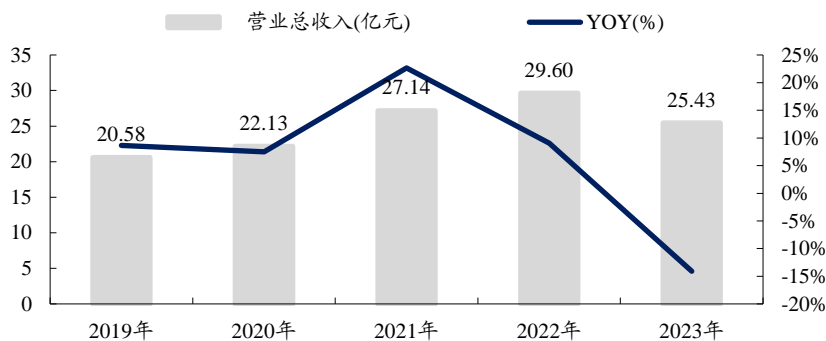
图：近年来公司毛利率较为稳定



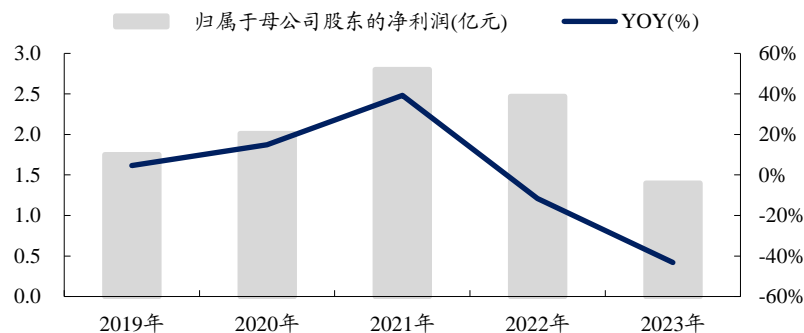
6.5 【鸣志电器】聚焦灵巧手电机，高附加值产品创造新增长空间

- ◆ 聚焦电机研发生产，近年来盈利能力有所下滑。2019-2023年营收CAGR=5.43%，但盈利能力有所下降，归母净利润CAGR=-5.43%。公司聚焦电机及驱动系统业务，2023年电机及驱动系统业务收入占比81%。
- ◆ 聚焦灵巧手电机，高附加值产品创造新增长空间。公司重点布局灵巧手核心部件，包括无齿槽空心杯关节电机模组、伺服电机减速机模组等。空心杯电机模组采用无齿槽设计，具备高功率密度和紧凑结构，适配人形机器人灵巧手的多自由度操作需求，伺服驱动与控制系统集成高精度传感器和AI算法，支持自适应环境变化，提升任务执行效率满足人形机器人对高精度、高响应速度的要求。

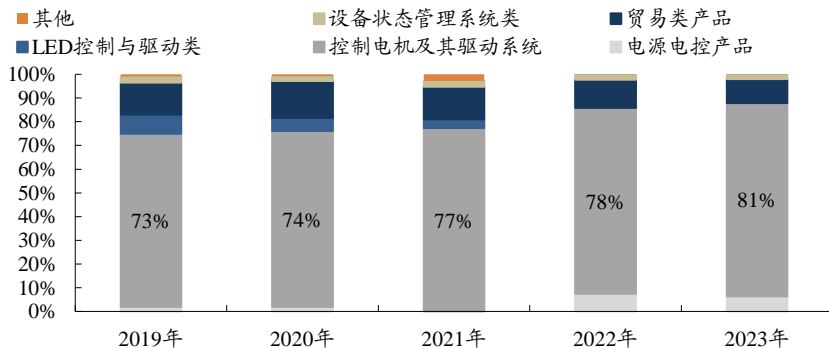
图：2019-2023年营收CAGR=5.43%



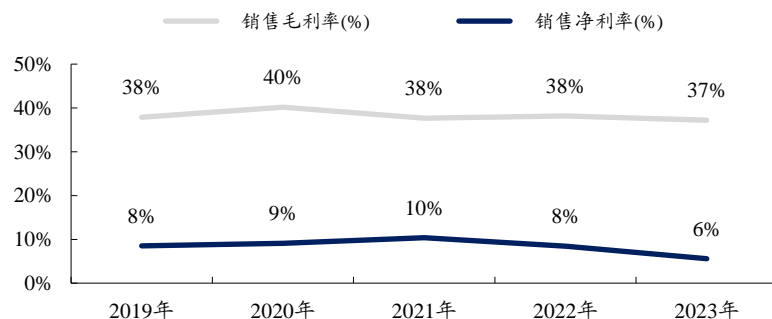
图：2019-2023年归母净利润CAGR=-5.43%



图：公司分业务收入(%)



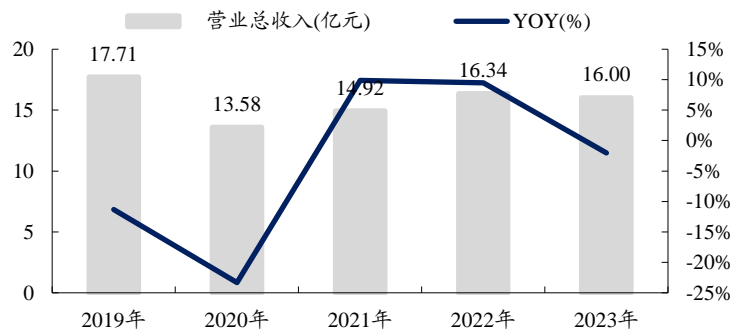
图：2023年净利率下降，盈利质量弱化



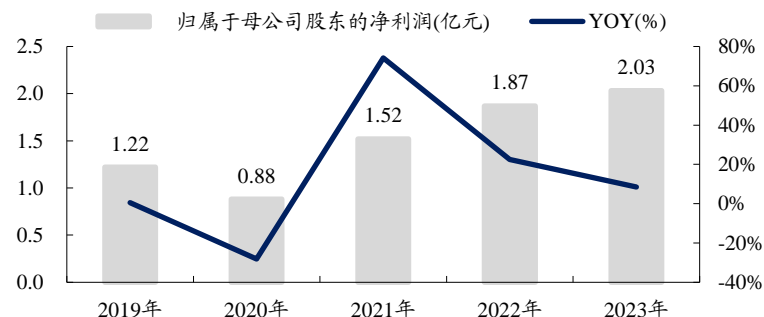
6.6 【南山智尚】腱绳技术储备充足，未来有望兑现业绩

- ◆ 整体业绩规模收缩，盈利质量优化。2019-2023年营业收入呈波动趋势，CAGR=-2.51%，整体规模收缩。归母净利润CAGR=13.58%，盈利质量优化。2019-2023年公司毛利率稳定提升，从30%提升至35%。
- ◆ 腱绳技术储备充足，但尚未形成实际订单。产品矩阵包括防弹系列（800D及以上）、海洋绳网系列（1000D-1600D）、防切割手套系列（400D）及家用纺织品系列（300-350D）。超高分子量聚乙烯纤维（UHMWPE）具备高强度、低蠕变性、耐磨损等特性，能够满足灵巧手动力传动对轻量化与耐用性的需求。机器人市场尚处于初级培育阶段，相关的供应链还没有成熟，公司前瞻布局未来有望兑现业绩。

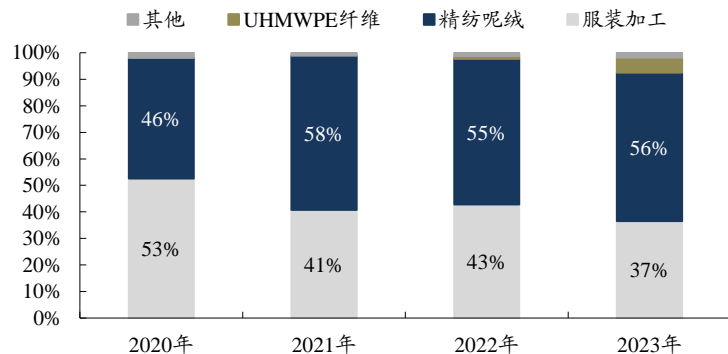
图：2019-2023年营收CAGR=-2.51%



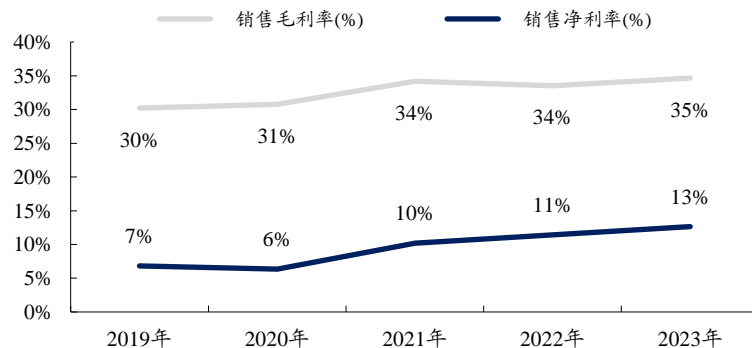
图：2019-2023年归母净利润CAGR=13.58%



图：分业务收入占比情况 (%)



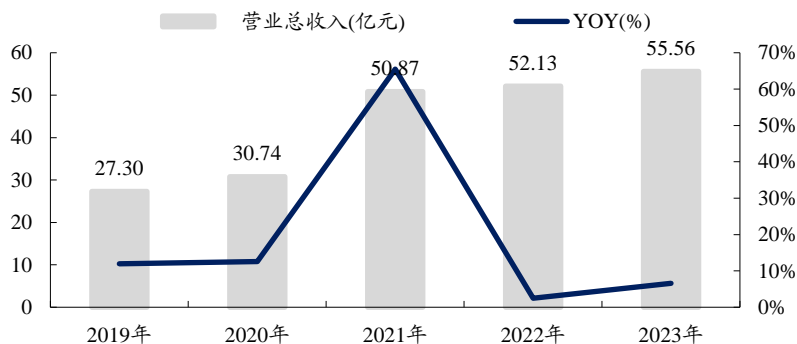
图：2019-2023年毛利率不断提高 (%)



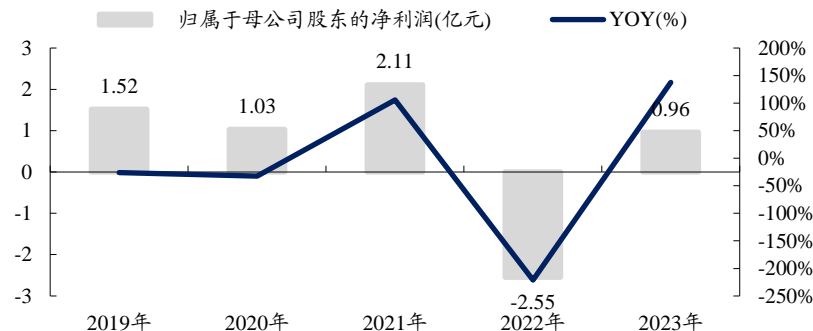
6.7 【大业股份】聚焦主营业务，初步切入灵巧手腱绳赛道

- ◆ 业绩整体稳健增长，净利润剧烈波动。2019-2023年公司营收由27.30亿元增长至55.56亿元，CAGR=19.44%，业绩整体稳健增长。2019-2022年公司毛利率有所下降，2022年公司毛利率降低至2%，2023年回升至8%。
- ◆ 聚焦主营业务，初步切入灵巧手腱绳赛道。公司专注于金属骨架材料的研发与生产，核心产品包括胎圈钢丝、钢帘线、胶管钢丝，广泛应用于轮胎制造及汽车工业，覆盖乘用车、载重车、工程机械等领域。其钢丝绳组件因高强度特性被探索应用于机器人灵巧手的腱绳传动系统。根据公司2024年半年报，腱绳相关业务营收为2200万元，占比不足1%，显示该业务尚处研发与市场验证阶段。

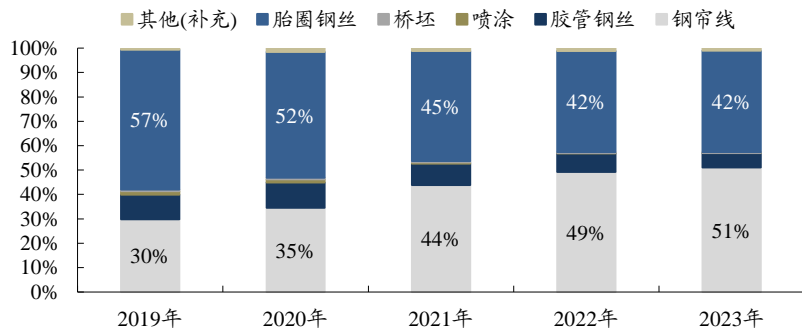
图：2019-2023年营收CAGR=19.44%



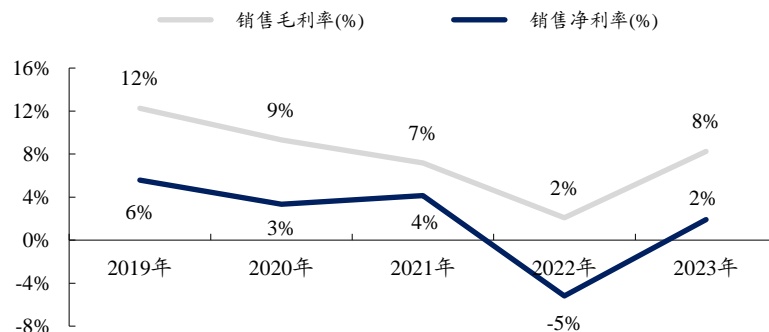
图：2019-2023年归母净利润CAGR=-10.85%



图：公司分业务收入情况 (%)



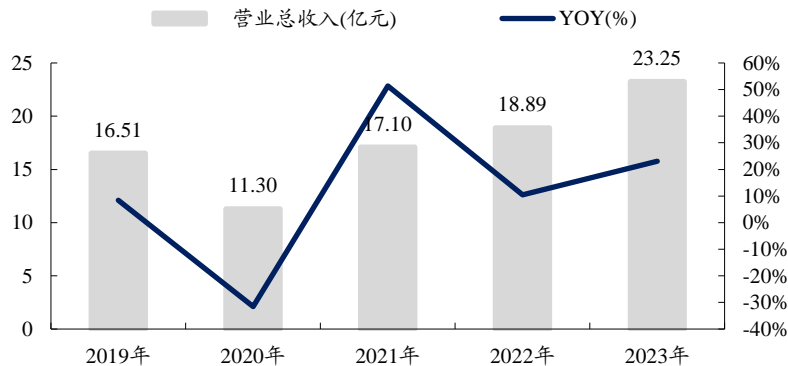
图：2023年公司毛利率有所回升 (%)



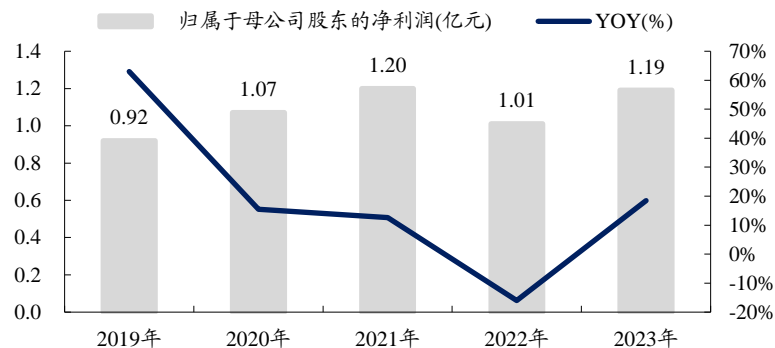
6.8 【云中马】以革基布生产为核心业务，间接切入灵巧手赛道

- ◆ 业绩整体呈增长趋势，销售毛利率降低。2019-2023年营收CAGR=8.94%，呈增长趋势，2019-2023年归母净利润CAGR=6.64%。毛利率方面，公司近年来销售毛利率有所下滑，从2019年的16%降低至2023年的11%。
- ◆ 以革基布生产为核心业务，间接切入灵巧手赛道。公司于2023年投资中玺新材料（安徽）有限公司（持股8.15%），该公司掌握连续化淤浆法生产超高分子量聚乙烯（UHMWPE）工艺，打破国外技术垄断，产品分子量覆盖100万-1050万，具备高强度、耐磨性、轻量化等特性，适用于人形机器人腱绳材料需求。云中马通过投资中玺新材料，初步完成机器人腱绳材料的技术储备，但业务贡献仍处萌芽期。

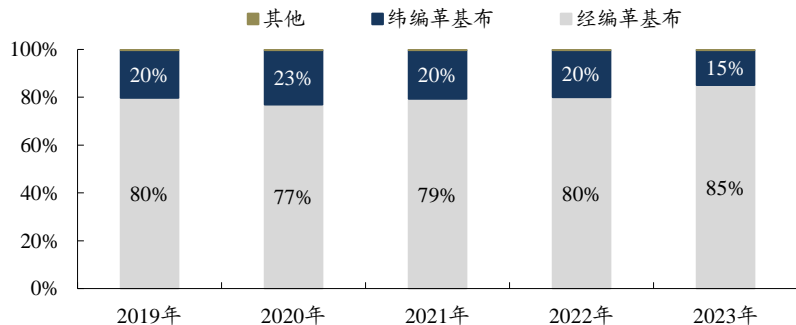
图：2019-2023年营收CAGR=8.94%



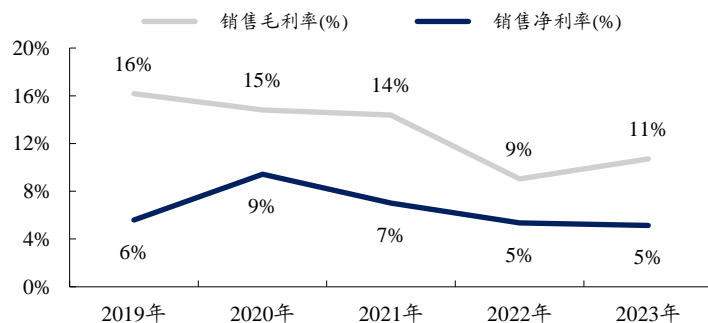
图：2019-2023年归母净利润CAGR=6.64%



图：公司分业务收入情况（%）



图：近年来公司毛利率有所下滑（%）





- 一、灵巧手vs夹爪：场景落地不同，稳定性与泛化性的博弈
- 二、驱动模块&减速模块：高功率密度电机为优选方案
- 三、传动模块：腱绳、连杆等多种方案各有优劣
- 四、商业落地：传感器、抓取模型打通商业落地最后一环
- 五、各企业灵巧手设计方案拆解
- 六、投资建议
- 七、风险提示

(1) 人形机器人量产不及预期。灵巧手作末端执行器，需要搭载在人形机器人本体上，整体需求空间与人形机器人本体需求空间保持一致。若人形机器人量产不及预期，则灵巧手需求可能不及预期。

(2) 灵巧手技术进展不及预期。目前灵巧手行业仍处在多技术路线并行的时期，技术路径尚未收敛，若灵巧手技术进步不及预期，则可能影响产业链公司发展。

(3) 宏观经济风险。人形机器人尚处于产业化进程初期，若宏观经济形势出现波动，则可能对人形机器人产业化进程产生不利影响。

东吴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。

本研究报告仅供东吴证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议，本公司及作者不对任何人因使用本报告中的内容所导致的任何后果负任何责任。任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

在法律许可的情况下，东吴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。

市场有风险，投资需谨慎。本报告是基于本公司分析师认为可靠且已公开的信息，本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，也不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。

本报告的版权归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。经授权刊载、转发本报告或者摘要的，应当注明出处为东吴证券研究所，并注明本报告发布人和发布日期，提示使用本报告的风险，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。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。

东吴证券投资评级标准

投资评级基于分析师对报告发布日后6至12个月内行业或公司回报潜力相对基准表现的预期（A股市场基准为沪深300指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普500指数，新三板基准指数为三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的），北交所基准指数为北证50指数），具体如下：

公司投资评级：

买入：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准在15%以上；

增持：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于5%与15%之间；

中性：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于-5%与5%之间；

减持：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于-15%与-5%之间；

卖出：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准在-15%以下。

行业投资评级：

增持：预期未来6个月内，行业指数相对强于基准5%以上；

中性：预期未来6个月内，行业指数相对基准-5%与5%；

减持：预期未来6个月内，行业指数相对弱于基准5%以上。

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应当充分考虑自身特定状况，如具体投资目的、财务状况以及特定需求等，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。

东吴证券研究所

苏州工业园区星阳街5号

邮政编码：215021

传真：（0512）62938527

公司网址：<http://www.dwzq.com.cn>

东吴证券 财富家园