

新质生产力系列 | 机器人零部件：国产化 进程加速，PEEK 轻量化材料需求爆发

2024 年 11 月 11 日
专题报告

主要内容：

中证鹏元资信评估股份有限公司
研究发展部
翁欣
wengx@cspengyuan.com



机器人被誉为“制造业皇冠顶端的明珠”，机器人技术是新质生产力的体现之一，是 AI 落地的重要载体之一。人形机器人的发展历程经历了四个阶段，目前正处于商业化落地的初级阶段。人形机器人尚未实现大规模商业化主要原因是硬件成本高昂、部分技术瓶颈尚未突破，特别是软件层面智能化程度偏低是人形机器人打开 C 端远期大场景的核心掣肘。目前，多模态大模型赋予机器人泛化能力，智能化曙光初现。“具身智能”的机器人已不再是仅仅机械式地完成单一任务的工具，而是能够基于感知到的任务和环境进行自主规划、决策、行动和执行的新个体。

人形机器人有望在汽车领域率先落地。人形机器人商业化行之将至，将率先从 to B 端落地，逐步向面向消费者 to C 端拓展。人形机器人有望在汽车领域率先落地。首先，汽车行业是自动化程度最高的行业之一，也是最早采用流水线作业的产业，其次，车端供应链与机器人构架高度重合，量产降本经验丰富。

人形机器人分为软件和硬件两大部分。AI 大模型作为机器人的“大脑”，软件层面国内通用大模型的与海外仍存在一定差距。华为切入机器人领域多年，凭借大模型、算法和应用云平台优势，已初步建立生态链，有望成为国产机器人产业的核心力量。

从硬件来看，无框力矩电机（23%）、空心变电机（9%）、谐波减速器（11%）、行星滚珠丝杠（15%）是智能机器人产业中成本占比较大，增量空间也较大，国内在机电一体化方面具备一定优势，国产替代空间较大。整体来看，电机、传感器环节国产化率中等，丝杠、减速器、空心杯电机目前国产化率偏低，国内厂商处于技术加速追赶阶段。

原材料方面，原材料以钢材、磁材、铜材等金属原材料为主，具体包括钕铁硼磁材、工装刀具（铜镀层丝、硬质合金）、钢材、轻量化材料（镁合金、铝合金、PEEK、碳纤维）等。原材料方面市场关注钕铁硼磁材、轻量化材料 PEEK 和碳纤维，对于提升人形机器人的性能和降低成本具有重要意义，也是重要

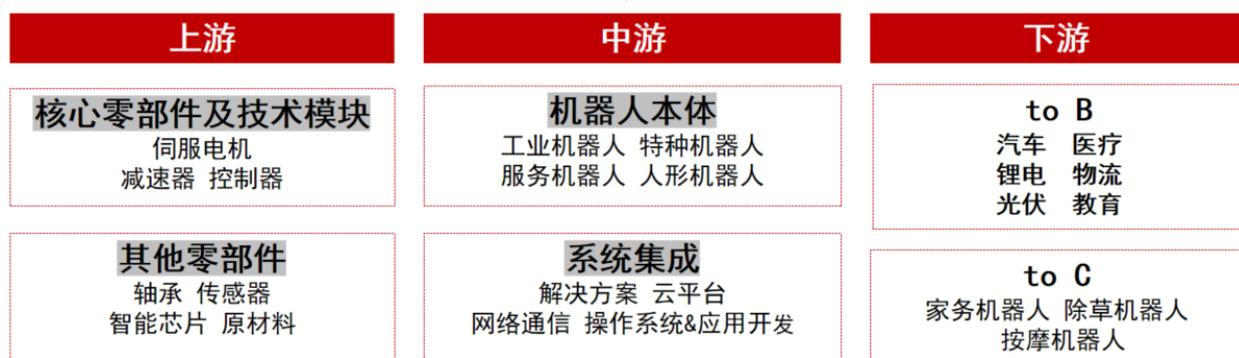
的增量空间。PEEK、碳纤维等轻量化材料国内需求有望迎来爆发。

一、人形机器人是 AI 落地的最重要载体之一，大模型智能化曙光初现，商业化行之将至

机器人被誉为“制造业皇冠顶端的明珠”，机器人技术是新质生产力的体现之一，也是 AI 落地的重要载体之一。人形机器人的发展历程经历了四个阶段，目前正处于商业化落地的初级阶段。人形机器人尚未实现大规模商业化主要原因是硬件成本高昂、部分技术瓶颈尚未突破，特别是软件层面智能化程度偏低是人形机器人打开 C 端远期大场景的核心掣肘。目前，多模态大模型赋予机器人泛化能力，智能化曙光初现，商业化行之将至

新质生产力是当今社会经济发展的重要驱动力，机器人技术是新质生产力的体现之一。机器人被誉为“制造业皇冠顶端的明珠”，其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志。从应用场景来看，机器人可划分为工业机器人、服务机器人、特种机器人及人形机器人四大类别。人形机器人集成了先进的人工智能、传感器技术和机械自动化设计，能够执行复杂的人类动作和任务，是解决全球劳动力短缺的重要工具。从机器人产业链的构成来看，该产业主要分为零部件与机器人本体及系统两大组成部分，分别对应于产业链的上游与中游。上游零部件环节可进一步细分为核心零部件（包括减速器、伺服系统、控制器）及其他零部件（如传感器、轴承、芯片、电机等），其中核心零部件的成本占比合计约70%。中游机器人本体及系统环节则可细分为工业机器人、服务机器人、特种机器人、人形机器人及系统集成（涵盖解决方案、云平台、网络通信、操作系统及应用开发等领域）。

图 1 机器人各产业链



资料来源：中证鹏元整理

人形机器人正处于商业化落地的初级阶段，人形机器人尚未实现大规模商业化主要原因是硬件成本高昂、部分技术瓶颈尚未突破，特别是软件层面智能化程度偏低是人形机器人打开C端远期大场景的核心掣肘

人形机器人的发展历程经历了四个阶段，包括早期发展阶段（1960—1999年）、高度集成发展阶段（2000—2015年）、高动态发展阶段（2016—2020年）及商业化落地初级阶段（2021年至今）。目前，人形

机器人正处于商业化落地的初级阶段。人形机器人历经数十年发展，尽管在特斯拉Optimus引发广泛关注之前，日本本田与美国波士顿已推出人形机器人，但均未实现商业化量产。这主要归因于：**（1）成本高昂：**波士顿动力的Atlas与本田的Asimo成本均超过百万美元。人形机器人当前面临“价格高一落地难一能力差”的负面循环，类似电动车阶段，打破循环仍取决于主机厂的能力边界，量产落地或是打破循环的第一步。

（2）技术瓶颈尚未突破：例如，软件层面智能化程度偏低是人形机器人打开C端远期大场景的核心掣肘，软件层面难以适应复杂应用场景、交互能力不足、运动控制与平衡能力有待提升；硬件层面则存在续航能力不足、执行器的精度与功率密度/力矩密度需进一步优化等问题。

图2 人形机器人发展历程

1960-1999	2000-2015	2016-2020	2021-至今
早期发展阶段 以早稻田大学WABOT 为代表	高度集成发展阶段 以本田仿人机器人为代表	高动态发展阶段 以波士顿动力Atlas为代表	商业化落地的初级阶段 以特斯拉Optimus 等为代表
<p>1963年 NASA 造出了一个名为“机动多关节假人”的机器人“试穿”宇航服，能模拟35种基本人类动作</p> <p>1973年 日本早稻田大学加藤一郎团队推出世界首个全尺寸人形智能机器人WABOT-1；</p> <p>1984年 加藤一郎教授和多个研发实验室合作，开发出更智能化的WABOT-2</p> <p>1985年 中国哈尔滨工业大学开始涉足二足步行机器人相关研究</p> <p>1986-1992年 本田开发了双足机器人E0、E1、E2、E3、E4、E5、E6；</p> <p>1993-1997年 本田开启了为原型机加装上半身的研发，推出人形机器人P1、P2、P3；</p> <p>1998年 本田公司联合川田工业公司和国家先进工业科学技术研究所(AIST) 共同发布了全新的机器人系列HRP；</p> <p>1999年 上海交通大学研制仿人机器人SFHR，共24个自由度；</p>	<p>2000年 本田推出身高一米二，可用双脚流畅直立行走的Asimo(P4)</p> <p>2002年 北京理工大学研制出仿人机器人BRH-1；</p> <p>2003年 日本工业技术研究院(AIST)推出HRP-1S和HRP-2原型机；</p> <p>2004年 丰田第一代仿人类机器人进化为有腿版；</p> <p>2004年 意大利理工学院发布iCub 机器人原型；</p> <p>2005年 本田对Asimo进行升级改造，实现人形机器人奔跑，速度达6km/h；</p> <p>PAL Robotics 推出可以行走、具有语言和视觉功能的机器人平台REEM；</p> <p>2009年 Atlas 前身美军双足机器人Petman亮相；丰田发布第二代跑步机器人，跑速7km/h；</p> <p>2010年 美国宇航局与通用公司计制造的机器人宇航员Robonaut2进入国际空间站；</p> <p>2011年 本田推出All-New ASIMO；</p> <p>2013年 波士顿动力初代人形机器人Atlas亮相；丰田推出小型人形机器人Ki-robo；</p> <p>2014年 日本软银和法国AR 联合推出会表达情绪的人形机器人Pepper；</p>	<p>2016年 改进后的Atlas正式亮相，并拥有了更强的运动平衡能力，540台优必选Alpha机器人亮相央视2016年春晚；</p> <p>2017年 本田发布第三代人形机器人T-HR3；</p> <p>2019年 优必选发布第二代人形机器人Walker；</p>	<p>2021年7月； 优必选发布人形机器人Walker X</p> <p>2021年8月 特斯拉在AI Day 上首次发布人形机器人Optimus概念；</p> <p>2022年8月 小米公布首款人形机器人CyberOne；</p> <p>2022年10月 特斯拉Optimus6原型机首次亮相，计划3-5年内实现量产，售价控制在2万美元；</p> <p>2023年5月 特斯拉展示Optimus最新机型，实现多个机器人同时行走与抓取物品</p> <p>2023年7月 傅利叶推出最新研发的GR-1机器人，具有良好的运动控制能力和感知计算能力；</p> <p>2023年8月 宇树发布第一款人形机器人Unitree H1； 智元发布人形机器人远征A1； 达闼首次展示人形机器人“七仙女”小紫； 追觅科技展示人形机器人；</p> <p>2023年11月 乐聚机器人发布首款基于开源鸿蒙的人形机器人，涵盖工业、服务等多场景应用 开普勒发布通用人形机器人先行者K1、S1 D1三个型号；</p>

资料来源：leaderobot，各公司官网，中证鹏元整理

人形机器人是AI落地的最重要载体之一，多模态大模型赋予机器人泛化能力，AI技术突破带动智能化曙光初现

人形机器人的运动灵活程度主要取决于其硬件配置，而这些零部件多源自其他行业的应用迁移。通用大模型为具身智能领域带来了革命性的潜力，也是2023年以来机器人周期开启的核心逻辑。针对成本痛点，可通过产业链的规模生产来加以解决。然而，软件算法则扮演着机器人“大脑”的角色，决定着机器人的应用上限，成为机器人商业化拓展的主要瓶颈所在。以往，机器人主要依赖固有的程序设定来执行任务，由于缺乏在各类场景中通用的算法，机器人的落地应用受到了较大的限制。

近年来，随着LLM、VLM、VNM等通用大模型的发展，机器人本体获得了强大的泛化能力，从而能够适用于更多复杂场景。非专业人员无需编程即可实现对机器人的操作，机器人智能有望向更高层级的人机交互、多元感知和自主决策发展，向真正的“具身智能”迈进，这无疑加速了人形机器人的商业化进程。“具身智能”的机器人已不再是仅仅机械式地完成单一任务的工具，而是能够基于感知到的任务和环境进行自主规划、决策、行动和执行的新个体。再叠加运控算法和硬件配置的优化协调，真正的通用型人形智能机器人有望在未来走进现实。

图 3 AI 技术突破带动机器人发展新周期



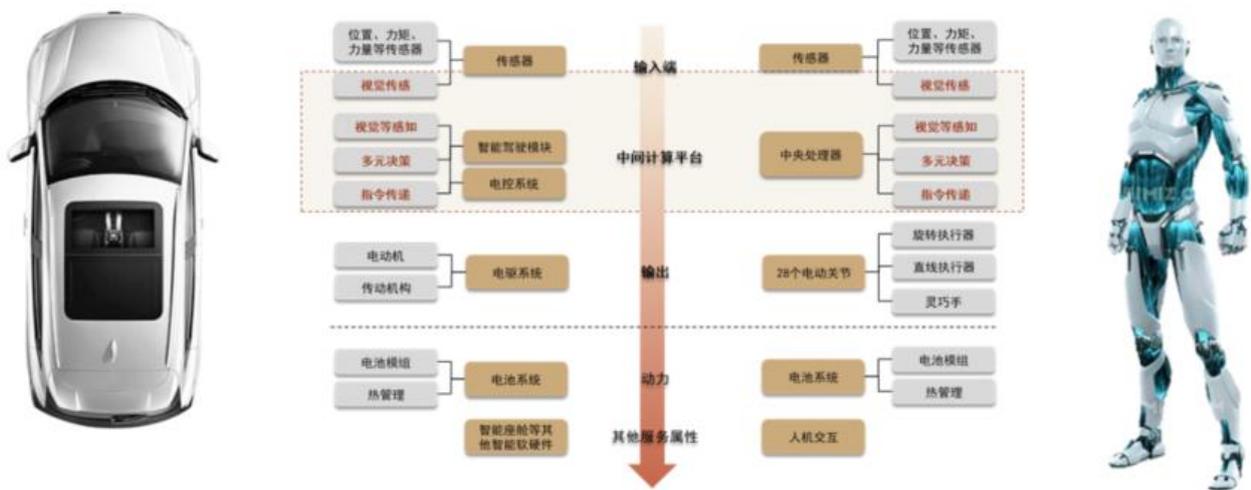
资料来源：各公司官网，中证鹏元整理

量产方面，人形机器人将率先从to B端落地，逐步向面向消费者to C端拓展，汽车领域有望成为人形机器人率先落地的领域，人形机器人市场在经历了2022—2023年的高速发展后，已有多家厂商入局该领域，预计2024年下半年人形机器人实现小批量量产，2025年真正实现商业化，2030全球累计需求有望超200万台

为什么汽车领域有望成为人形机器人率先落地的领域？任务型交付是人形机器人实现商业化落地的关键，汽车领域有望成为人形机器人率先落地的领域。根据主流机器人厂商的战略规划，人形机器人将首先在工业制造领域得到应用，并在技术成熟后逐步拓展至商用服务和家庭陪伴等场景。首先，汽车行业是自动化程度最高的行业之一，也是最早采用流水线作业的产业。在汽车制造的四大工艺——冲压、焊接、涂装和总装中，前三项工艺已经通过机床和工业机器人实现了较高的自动化水平。机械臂和AGV（自动引导车）的应用也在这些领域达到了较高的自动化程度。然而，在零部件众多、需要灵活决策的环节，尤其是汽车总装环节，对人工的需求仍然较高。这些环节适合人形机器人的应用，因为它们需要在结构化的环境中执行非结构化的操作。其次，车端供应链与机器人构架高度重合，量产降本经验丰富。(1) 车端成熟供应链复用。人形机器人零部件涉及感知、决策、执行三大系统，在电动关节、内部传感器等零部件上与车端重合度大，

车端供应链具有可迁移性。我们认为，国产特斯拉供应链厂商有望在复用车端经验的基础上针对人形机器人需求与特点进行品类拓展与产品升级，具有配套经验与技术储备的双重优势。在关节执行器、减速器、力矩电机等零部件上，国产供应商已与特斯拉达成送样、联合开发等形式的接触。**（2）制造产业优势突出，量产降本经验丰富。**伴随特斯拉Optimus订单量的释放，核心零部件国产供应商有望迎来规模效应，引领生产降本，进一步促进机器人产品放量，形成量产—降本—量产的加速飞轮。

图 4 汽车和人形机器人的构架高度重合



资料来源：特斯拉 AI DAY，中证鹏元整理

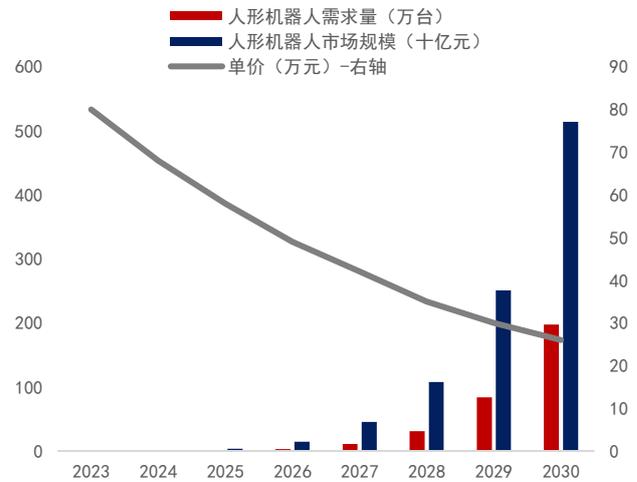
随着特斯拉Optimus的落地，大模型不断迭代升级及硬件等技术水平突破，随着特斯拉执行器定点发放，2025年人形机器人将开始进入量产阶段，未来成本有望降至20万。初期人形机器人的供应将主要由特斯拉等领先企业承担，并随后逐渐在制造业中得到广泛应用。特斯拉人形机器人预计于2025年实现交付，以汽车产业类比机器人产业，在汽车行业某车型量产前1~2年，主机厂将提前向供应商发放定点，因此2024年特斯拉人形机器人向Tier1发放执行器定点。随着执行定点发放，机器人进入量产阶段。预测2030年，全球人形机器人累计需求量有望达到200万台。从成本来看，人形机器人可以类比汽车，汽车可以看作四轮的机器人且零部件更多，因此人形机器人可以做到更低的材料成本。但人形机器人自由度更高，智能化水平更高，通用大模型难度更高，**人形机器人最终成本有望和汽车相当**。中国在硬件端具备优势，生产成本低、生产效率高，供应链及硬件端具有优势，因此人形机器人价格未来有望降至20万以内。

图 5 工业场景是量产突破口,硬件端核心为量产降本



资料来源：中证鹏元整理

图 6 2030 年全球人形机器人需求及市场规模预测



资料来源：中证鹏元整理

二、人形机器人产业链各环节快速突破，国产替代正在进行时

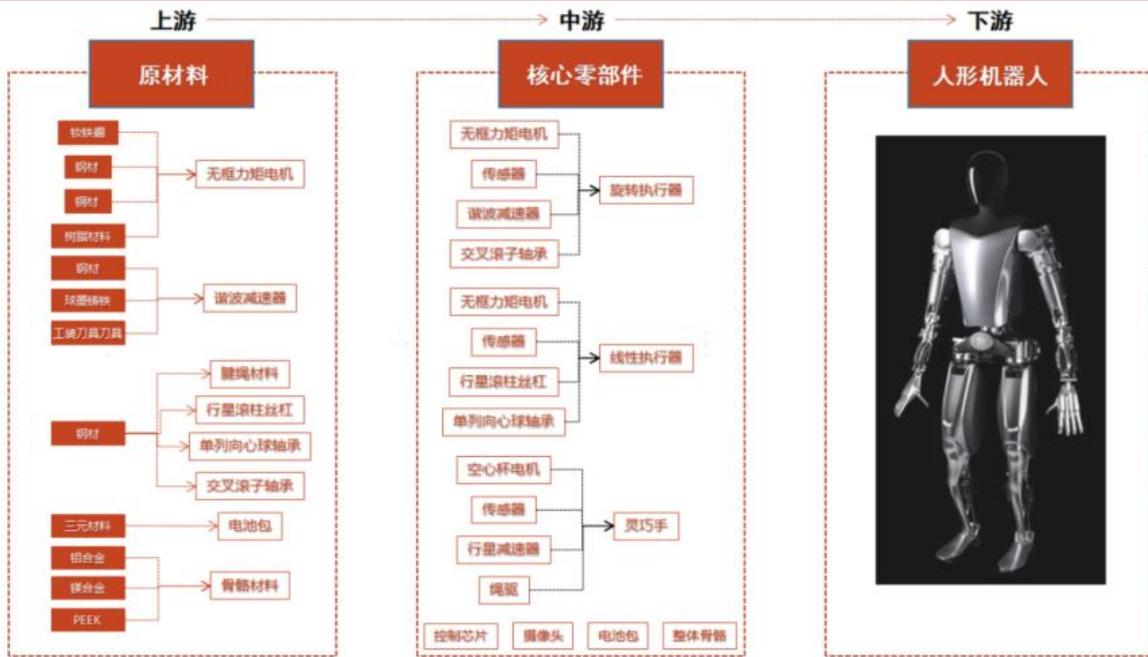
无框力矩电机、空心变电机、谐波减速器、行星滚珠丝杠是智能机器人产业中增量空间较大的核心零部件，国内在机电一体化方面具备一定优势，国产替代空间较大；原材料方面市场关注钕铁硼磁材和轻量化材料 PEEK 及碳纤维，对于提升人形机器人的性能和降低成本具有重要意义，也是重要的增量空间

人形机器人分为软件和硬件两大部分。AI 大模型作为机器人的“大脑”，软件层面国内通用大模型与海外仍存在一定差距。华为切入机器人领域多年，凭借大模型、算法和应用云平台优势，已初步建立生态链，有望成为国产机器人产业的核心力量。

硬件部分主要由原材料、核心零部件以及整机构成。核心零部件方面，核心零部件以无框力矩电机、谐波减速器、行星滚珠丝杠等核心零部件为主。由于人形机器人供应链与汽车供应链高度重合，在电动关节、内部传感器等零部件上与车端重合度大，车端供应链具有可迁移性。**在众多零部件中，无框力矩电机(23%)、空心变电机(9%)、谐波减速器(11%)、行星滚珠丝杠(15%)是智能机器人产业中成本占比较大，增量空间也较大。**国内在机电一体化方面具备一定优势，零部件国产替代空间较大。

原材料方面，原材料以钢材、磁材、铜材等金属原材料为主，具体包括钕铁硼磁材、工装刀具（铜镀层丝、硬质合金）、钢材、轻量化材料（镁合金、铝合金、PEEK）等。**原材料方面市场关注钕铁硼磁材和轻量化材料 PEEK 及碳纤维，对于提升人形机器人的性能和降低成本具有重要意义，也是重要的增量空间。**

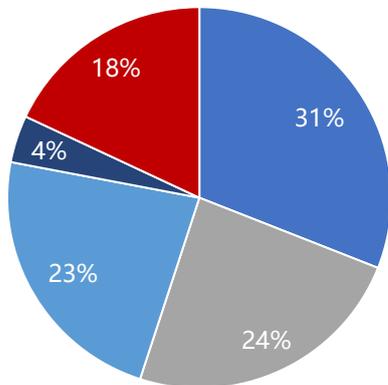
图7 人形机器人零部件及材料概览



资料来源：特斯拉 AI DAY，中证鹏元整理

图8 机器人旋转关节模组拆解

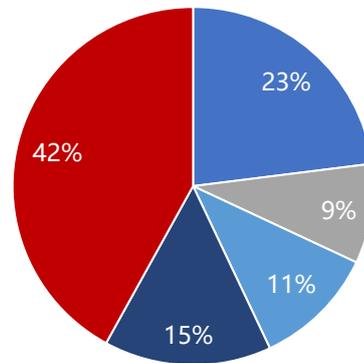
■ 直线关节 ■ 旋转关节 ■ 手部关节 ■ 智能硬件 ■ 其他



资料来源：特斯拉 AI DAY，中证鹏元整理

图9 机器人核心零部件成本占比

■ 无框力矩电机 ■ 空心杯电机 ■ 谐波减速器
■ 行星滚珠丝杠 ■ 其他



资料来源：特斯拉 AI DAY，中证鹏元整理

2023年12月，特斯拉展示 Optimus 人形机器人全身具备 50 个自由度，这些自由度均匀分布在各个身体部位。Optimus 由 14 个旋转执行器、14 个线性执行器以及灵巧手上的多个空心杯关节构成，共同赋予了其 50 个自由度。这使得 Optimus 的不同身体部位能够进行前摆（Pitch）、扭转（Yaw）、侧摆（Roll）等运动。此外，每只灵巧手具备的 11 个自由度，使其能够执行更为复杂的操作。**2024年10月，特斯拉推出新一代 Optimus 机器人，Optimus 新一代灵巧手具备 22 个自由度，主要集中于前臂和手指部分，远超大多数**

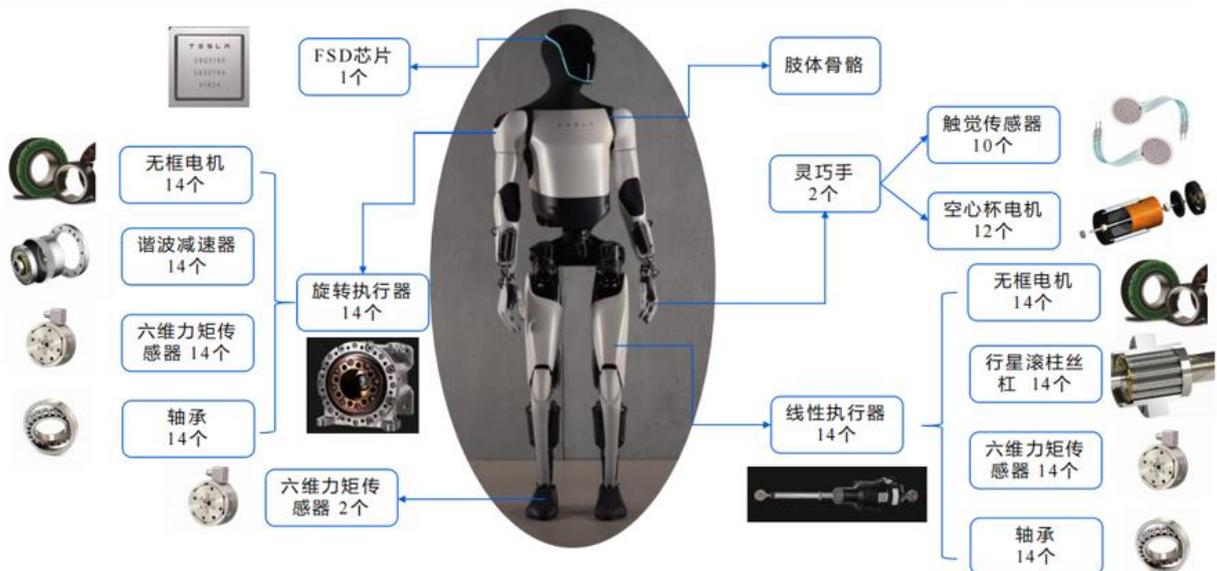
同类灵巧手的设计。与上一代 Gen2 灵巧手的 11 个自由度相比，新一代灵巧手的灵活性和多样化操作能力得到了显著提升。

表 1 特斯拉 Optimus 最新机器人自由度分布

身体部位	自由度	旋转执行器	线性执行器	空心杯关节
肩部	3(x2)	前摆+侧摆+扭转		
肘部	1(x2)		前摆	
腕部	3(x2)	扭转	前摆+扭转	
腰部	2	侧摆+扭转		
髌宽部	3(x2)	侧摆+扭转	前摆	
膝盖	1(x2)		前摆	
脚踝	2(x2)		前摆+侧摆	
灵巧手（新增）	22(x2)			自由运动
颈部（新增）	2	2		
总计	74	16	14	44

资料来源：科创板日报，中证鹏元整理

图 10 Optimus 结构拆解



资料来源：chipsetc，传感器专家网，智电芯片，国海证券研究所，中证鹏元整理

机器人核心零部件

(1) 无框力矩电机

无框力矩电机用于线性关节和旋转关节，具有高效率、紧凑结构和易于维护的优势，无框力矩电机市场规模尚小，而国外技术相对成熟，国内供应商已展现出一定的竞争力，国产化率中等。不同于传统的伺服电机，无框力矩电机没有机壳，只有定子和转子2个部件。这一设计使得无框力矩电机不再受限于电机的外壳结构件来建立运动控制轴，而是将电机内置于机器本身的结构中，空间更加紧凑，且整体系统的惯量降低，运动控制更加平稳。无框力矩电机市场规模尚小，而国外技术相对成熟，国内供应商已展现出一定的竞争力，国产化率中等。国外主要的供应商包括科尔摩根、TQ Robodrive、Nidec、Parker等。国内厂商主要有步科股份（龙头，产品已达到国际先进水平）、伟创电气、禾川科技等。

图 11 机器人旋转关节模组拆解



资料来源：科尔摩根，中证鹏元整理

图 12 无框力矩电机示意图



资料来源：科尔摩根，中证鹏元整理

(2) 减速器

减速器是机器人的“关节”，包含RV减速器、谐波减速器及行星减速器，是由多个齿轮构成的传动组件，人形机器人旋转关节应用谐波减速器，手部及部分身体关键应用行星减速器，预计人形机器人中期将为谐波减速器带来约400亿元的市场增量空间，国产化程度较高。其中，谐波减速器具备单级传动比大、体积小、重量轻、运动精度高以及能在密闭空间和介质辐射环境下正常工作的优点。与一般减速器相比，在输出力矩相同的情况下，谐波减速器的体积可减少三分之二，重量可减轻一半，被应用于人形机器人旋转关节。根据宇博智业产业研究数据，2023年我国谐波减速器市场规模约为30亿元。假设到2030年人形机器人累计需求达到200万台，谐波减速器的增量市场规模有望超过400亿元。人形机器人的发展将促进谐波减速器的国产替代进程。国内减速器制造商的技术进步显著，部分产品的关键技术指标已超越国际同行，在机器

人核心零部件国产化程度较高。绿的谐波是谐波减速器领军企业，来福谐波、福德机器人、同川精密、国茂股份等企业也在积极扩大谐波产能，未来国产替代的加速发展可期。

行星减速器精度略低于谐波减速器，被用于手部关节或对精度要求不高的部分身体关节。RV减速器由于体积较大，在人形机器人领域的应用受到一定限制。行星减速器整体技术难度较低与谐波减速器，国内企业具备竞争优势。国外主要的供应商包括日本新宝、纽卡特、威滕斯坦等。国内厂商主要有科峰智能、纽氏达特等，合计国内占比超过20%。

表 2 特斯拉 Optimus 机器人自由度分布

	谐波减速器	行星减速器	RV 减速器
图示			
产品性能	小体积、重量轻、传统比大、高精度、低负载能力、耐冲击	小体积、轻重量、高承载能力、高精度、长寿命、精度高	大体积、高负载能力、高刚度
减速比	大	小	大
应用场景	工业机器人、人形机器人旋转关节	机器人手部关节、部分身体关节	汽车、运输、港口码头等
价格区间	1,000-5,000 元/台	300-2500 元/台	5,000-8,000 元/台

资料来源：Wind，中证鹏元整理

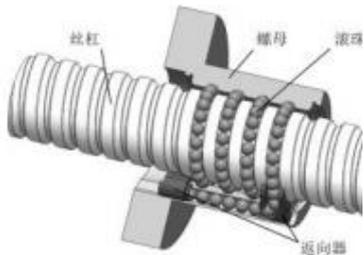
(3) 丝杠

丝杠通过螺母、滚柱、丝杆等零部件将旋转运动转换为直线运动，分为梯形丝杠、滚珠丝杠和行星滚柱丝杠三种。行星滚珠丝杠与滚柱丝杠较梯形丝杠相比具备传动效率、精度高的优势，被广泛应用于人形机器人。人形机器人对滚柱丝杠需求有望持续保持高速增长态势。丝杠的制造技术门槛较高，供应商数量有限，高端市场国产化率较低。特斯拉公司研发的人形机器人内置了共计14个线性执行器，由“驱动器+无框力矩电机+丝杠+力矩传感器+编码器+轴承”等关键部件构成。丝杠是线性执行器不可或缺的组成部分，特斯拉Optimus线性关节使用4个梯形丝杠和10个滚柱丝杠，在特斯拉人形机器人总成本中约占10%~25%之间。丝杠通过螺母、滚柱、丝杆等零部件将旋转运动转换为直线运动。丝杠主要分为梯形丝杠、滚珠丝杠和行星滚柱丝杠三种。滚珠丝杠传动效率、精度明显高于梯形丝杠，故多应用在数控机床等领域，行星滚柱丝杠较滚珠丝杠优势在于抗冲击力、承载力更强，应用于航母等领域。行星滚柱丝杠核心壁垒在于螺母内螺纹加工。滚柱丝杠零部件中加工难度较大的零件是丝杠、滚柱、螺母及内齿圈，其中螺母壁薄容易损坏，再加

上螺纹位于内部导致砂轮磨削时需要保持一定倾角，对稳定性要求较高，因此内螺纹加工是整个工艺流程中壁垒最高的环节。

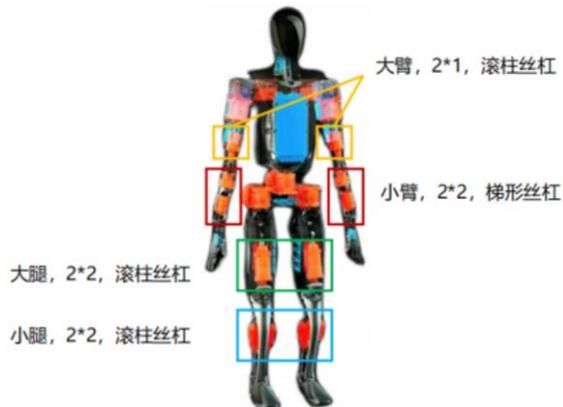
市场空间来看，人形机器人对滚柱丝杠需求有望持续保持高速增长态势，有望扩容滚柱丝杠市场空间30亿-100亿元。从下游需求来看，目前全球滚珠丝杠市场空间在100亿-150亿元，其中国内占比约20%，滚柱丝杠市场空间在20亿元左右。人形机器人对滚柱丝杠需求有望持续保持高速增长态势，有望扩容滚柱丝杠市场空间30亿-100亿元。特斯拉人形机器人Optimus的线性执行器核心零部件有滚柱丝杠，假设14个线性执行器10个采用滚柱丝杠，并假设人形机器人单价1000-3000元/个，对应市场空间为30亿-100亿元。竞争格局来看，滚柱、高端珠丝杠的制造技术门槛较高，供应商数量有限，高端市场国产化率较低。目前，全球主要滚珠丝杠供应商包括NSK、THK等，头部企业主要为欧洲和日本，高端市场国产化率低。全球主要的滚柱丝杠供应商包括Ewellix、Rollvis、GSA、Rexroth、CMC以及国内的南京工艺济宁波特和优仕特（中国台湾）等，2022年Rollvis、GSA、Ewellix、Rexroth四家公司在我国的市场份额合计约为78%，高端市场国产化率偏低，且国内供应商在供货质量方面与欧美企业相比仍存在显著差距。

表3 滚柱丝杠与滚珠丝杠对比

分类	行星滚柱丝杠	滚珠丝杠	滑动丝杆（梯形丝杠）
示意图			
滚动体	滚柱	滚珠	截面
滚动体循环运动方式	滚柱围绕丝杠轴心做行星运动	借助反向机构实现循环滚动	丝杠与螺母之间产生滑动摩擦，推动丝杠/螺母完成直线运动
滚动体受力状态	滚动体受载面积大，任何时候都同时受载，无循环交变力	滚珠受载面积小，且轮流受载，产生循环交变应力	受载面积大
滚动体的离心力	行星机构阻止离心力	高速运转时会产生较大离心力	
传动效率	高，约80%	高，约90%	较低，约30%~40%
主要应用	航空航天、机器人	数控机床、航空航天、机器人	大负载但工作转动和工作制要求较低的应用场景

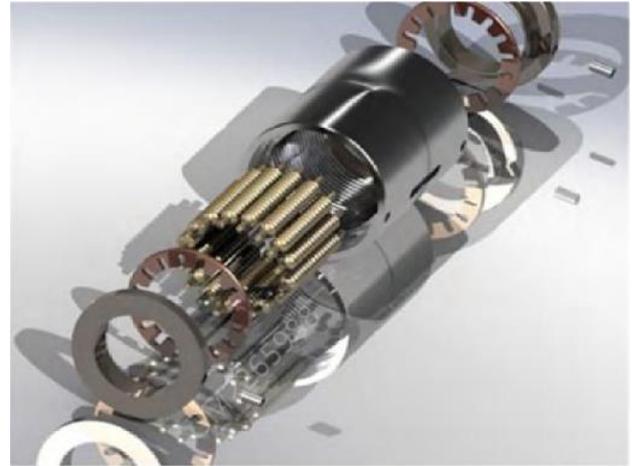
资料来源：新剑传动，中证鹏元整理

图 13 特斯拉 Optimus 线性关节使用 4 个梯形丝杠和 10 个滚柱丝杠



资料来源：特斯拉 AI DAY，中证鹏元整理

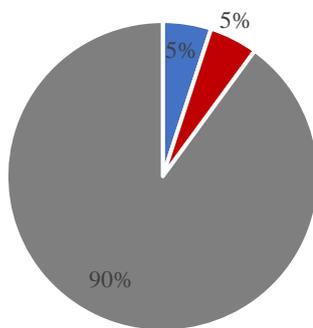
图 14 行星滚柱丝杠示意图



资料来源：新剑传动，中证鹏元整理

图 15 2022 年中国高端滚珠丝杠市场竞争格局

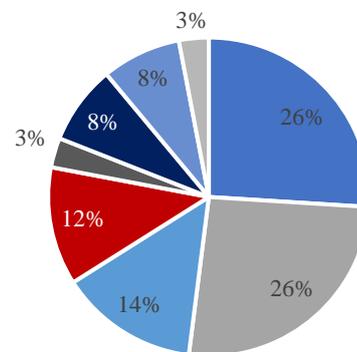
- 中国大陆：汉江、南京工艺
- 中国台湾：上银、银泰
- 德国：力士乐；日本：THK、NSK



资料来源：各公司财报，中证鹏元整理

图 16 2022 年中国滚柱丝杠市场竞争格局

- Rollvis (瑞士)
- Ewellix (瑞典)
- CMC (美国)
- 南京工艺
- GSA (瑞士)
- Rexroth (德国)
- 济宁博特
- 优仕特 (中国台湾)



资料来源：各公司财报，中证鹏元整理

(4) 灵巧手

灵巧手因其高价值量，成为人形机器人实现应用的关键。其结构复杂且精密，真实人手具备21个自由度，而机器人灵巧手则根据特定应用场景简化功能，以平衡成本与自由度。特斯拉最新机器人单手自由度已达到21个，与人手相匹配。灵巧手的性能和成本受其三大核心组件——驱动、传动和传感装置的共同影响。在全球空心杯电机市场中，外资品牌在高端市场占据明显优势，国内企业正迅速追赶。灵巧手机电机主要采用空心杯电机或无刷有齿槽电机。空心杯电机以其体积小、功率密度大、噪音低等特点，更符合人形机器人灵巧手对空间紧凑性和负载能力的要求，成为当前灵巧手的主流解决方案。空心杯电机的三大核心技术

串扰、抗过载能力及维间耦合误差等方面占据领先地位。我国早期的研发团队主要来自国防军工和科研院所。随着工业机器人及协作机器人等民用需求的增长，国内本土供应商如**宇立仪器、坤维科技、鑫精诚、海伯森、蓝点触控、神源生智能瑞尔特测控**等纷纷涌现，属于大力攻克技术难点阶段，并已有相关产品实现落地并进入产业化应用。此外，**昊志机电、柯力传感**等企业已经具备六维力/力矩传感器的生产能力，部分产品型号已开始进入下游用户的验证测试阶段，有望加速实现国产替代。

图 19 机器人传感器示意图

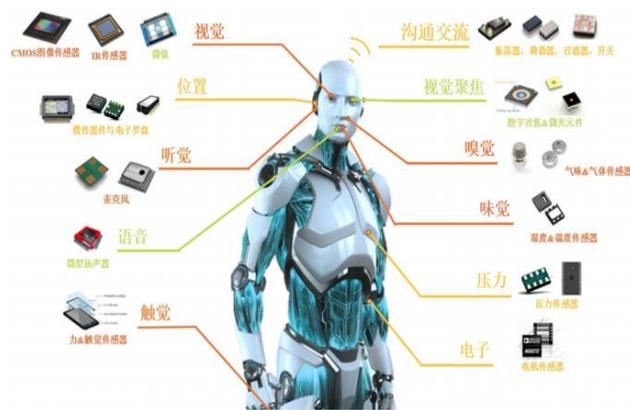
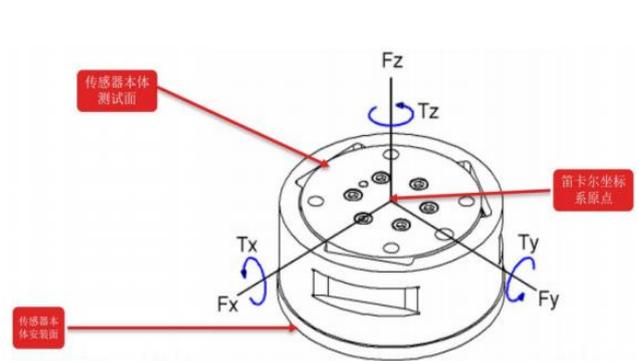


图 20 六维力矩传感器示意图



资料来源：Yole，中证鹏元整理

资料来源：ATI，中证鹏元整理

整体来看，在机器人核心零部件环节，电机、传感器环节国产化率中等，丝杠、减速器、空心杯电机目前国产化率偏低，国内厂商处于技术追赶阶段。随着人形机器人技术的不断进步，国内企业也正在加速发展，国产程度不断提高。

表 4 机器人核心零部件国产替代空间对比

核心零部件	单机价值量占比	国产化率	部分代表企业
无框力矩电机	23%	中等	步科股份、禾川科技、昊志机电、禾川科技、雷赛智能、伟创电气等
减速器	11%	较高	绿的谐波、双环传动、昊志机电、国茂股份、秦川机床、丰立智能、中大力德、科峰智能、夏厦精密、豪能股份、精锻科技等
力传感器	16%	中等	柯力传感、昊志机电、东华测试、安培龙、华依科技、索辰科技、凌云股份、康斯特、华培动力、高华科技等
丝杠	15%	低	五洲新春、新剑传动、贝斯特、北特科技、斯菱股份、恒立液压、秦川机床、鼎智科技、禾川科技、长盛轴承、南京工艺等
空心杯电机	9%	低	鸣志电器、鼎智科技（江苏雷利）、拓邦股份、雷赛智能、伟创电气等

资料来源：特斯拉 AIDAY、各公司官网、前瞻产业研究所，中证鹏元整理

机器人原材料

原材料方面市场关注钕铁硼磁材、轻量化材料 PEEK 和碳纤维材料，对于提升人形机器人的性能和降低成本具有重要意义，也是重要的增量空间，PEEK、碳纤维等轻量化材料国内需求有望迎来爆发

人形机器人原材料以钢材、磁材、铜材等金属原材料为主，具体包括钕铁硼磁材、工装刀具（铜镀层丝、硬质合金）、钢材、轻量化材料（镁合金、铝合金、PEEK、碳纤维）等。Tesla 人形机器人 Optimus 主要包含 14 个旋转执行器以及 14 个线性执行器（主要原材料为钕铁硼磁材、工装刀具、电工钢等）；2 只灵巧手（主要原材料为不锈钢或高分子纤维）；主控制芯片、摄像头、电池包（假设为 Tesla 设计的 4680 圆柱电池）以及整体骨骼框架（轻量化材料）。假设 2030 全球人形机器人累计需求超 200 万台，这里测算了 200 万台人形机器人出货对上游原材料需求，具体计算结果为 PEEK(120%)>镁合金(3.6%)>钕铁硼(2.40%)>铝合金(0.4%)>钢材。

PEEK、碳纤维等轻量化材料国内需求有望迎来爆发。PEEK 材料属于特种工程塑料，具备耐热、阻燃、耐磨、耐腐蚀等优势。PEEK 材料具备耐热、阻燃、耐磨、耐腐蚀等优势。与工程塑料相比，PEEK 材料兼具刚性和韧性；与金属材料相比，PEEK 材料比强度大的同时，自身重量较轻，符合下游汽车领域轻量化趋势，有望实现以塑代钢。**碳纤维**应用场景包括机械手、部分关节部位、感知鞋等，考虑到目前已发布机器人的应用场景主要为机械臂，测算单位碳纤维用量时仅考虑机械臂。假设单机械臂碳纤维用量约 3.5-4kg，单个人形机器人碳纤维用量约 7-8kg，预计 2027 年全球人形机器人行业拉动碳纤维增量超过 5000 万吨。

机器人主要原材料上市公司包括金力永磁（钕铁硼）、宁波韵升（钕铁硼）、正海磁材（钕铁硼）、中科三环（钕铁硼）、博威合金（镀层丝）、宝武镁业（镁合金）、中研股份（PEEK）等。

表 5 人形机器主要原材料用量汇总

使用原材料	单耗	价值量（元）	200 万台人形机器人材料 总用量（万吨）	市场总供给（万 吨）	弹性
钕铁硼	3.5kg	1400	0.35	29.07	2.4%
磁组件	40 个（28+12）	4928	8000 万个		
铜镀层丝	9.5kg	809	2.0		
硬质合金刀具	14kg	/	2.8		/
镁合金	10.3kg	216.72	2.0	57.14	3.6%
铝合金	16.6kg	332.4	3.2	2472.37	0.2%
PEEK	10.3kg	3715.2	2.0	1.6	120.%
钢材	31.2kg	/	6.2	188820	极小
球墨铸铁	31.2kg	118.5	6.2	1595	0.4%

(理论上限)

电工钢	31.2kg	327.4	6.2	1500	0.4%
(理论上限)					

资料来源：特斯拉 AI DAY、各公司官网、光大证券研究所，中证鹏元整理

三、机器人零部件及材料上市公司及转债标的梳理

表6 半导体零部件上市公司及转债标的梳理

转债名称	正股名称	2024 年 Q3		2024 年 Q3		转股溢价率 (%)	评级
		营收 (亿元)	同比	净利润 (亿元)	同比		
机器人零部件企业							
拓普转债	拓普集团	193.52	37%	22.43	40%	5.79	A+
三花转债	三花智控	205.63	8%	23.20	6%	46.12	AA
贝斯转债	贝斯特	10.42	4%	2.25	6%	1.52	AA-
沪工转债	上海沪工	7.34	10%	0.46	5%	74.26	AA-
万讯转债	万讯自控	7.40	-2%	0.19	-60%	3.67	AA-
锋龙转债	锋龙股份	3.41	7%	0.01	-76%	9.97	AA
弘亚转债	弘亚数控	21.66	6%	4.59	-4%	13.80	A+
睿创转债	睿创微纳	31.50	18%	3.86	8%	6.17	AA-
艾华转债	艾华集团	29.65	15%	1.92	-40%	13.67	AA-
金田转债	金田股份	918.44	12%	2.88	-27%	-0.54	AA
再 22 转债	再升科技	10.96	-13%	1.02	-21%	3.64	AA
楚江转债	楚江新材	390.07	15%	0.54	-86%	-0.51	AA
通光转债	通光线缆	19.04	6%	0.57	-43%	2.09	A
-	步科股份	5.06	-6%	0.61	-33%	-	-
-	昊志机电	10.00	4%	-1.93	-865%	-	-
-	禾川科技	11.16	18%	0.52	-40%	-	-
-	绿的谐波	3.56	-20%	0.85	-46%	-	-
-	国茂股份	26.60	-1%	3.93	-5%	-	-
-	北特科技	18.81	10%	0.49	22%	-	-
贝斯转债 (退市) -	贝斯特	13.43	22%	2.65	15%	-	AA-
-	恒立液压	89.85	10%	25.04	7%	-	-

新春转债 (退市)	五洲新春	31.06	-3%	1.44	-9%	-	AA-
-	鼎智科技	2.82	-11%	0.81	-20%	-	-
-	鸣志电器	25.43	-14%	1.42	-43%	-	-
-	兆威机电	12.06	5%	1.80	20%	-	-
-	伟创电气	13.05	44%	1.89	37%	-	-
-	柯力传感	10.72	1%	3.35	22%	-	-
-	东华测试	3.78	3%	0.88	-28%	-	-
机器人原材料企业							
金力转债 (退市)	金力永磁	66.88	-7%	5.67	-20%	-	AA-
	宁波韵升	53.69	-16%	-2.27	-164%	-	-
正海转债	正海磁材	58.74	-7%	4.48	10%	4.70	AA-
	中科三环	83.58	-14%	3.62	-64%	-	-
博 23 转债	博威合金	177.56	32%	11.24	109%	-0.27	AA
	宝武镁业	76.52	-16%	3.57	-48%	-	-
	中研股份	2.92	18%	0.55	-2%	-	-

资料来源：Wind，转股溢价率数据截至2024年11月4日，中证鹏元整理

免责声明

本报告由中证鹏元资信评估股份有限公司（以下简称“本公司”）提供，旨在派发给本公司客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。

本报告基于我们认为可靠的公开信息和资料，但我们对这些信息的准确性和完整性均不作任何保证。需要强调的是，报告中观点仅是相关研究人员根据相关公开资料作出的分析和判断，并不代表公司观点。本公司可随时更改报告中的内容、意见和预测，且并不承诺提供任何有关变更的通知。

本报告中的内容和意见仅供参考，并不构成对所述证券的买卖出价。投资者应根据个人投资目标、财务状况和需求来判断是否使用报告所载之内容和信息，独立做出投资决策并自行承担相应风险。本公司及其雇员不对使用本报告而引致的任何直接或间接损失负任何责任。

本报告版权仅为本公司所有，未经事先书面同意，本报告不得以任何方式复印、传送或出版作任何用途。任何机构和个人如引用、刊发本报告，须同时注明出处为中证鹏元研发部，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。合法取得本报告的途径为本公司网站及本公司授权的渠道，非通过以上渠道获得的报告均为非法，本公司不承担任何法律责任。

独立性声明

本报告所采用的数据均来自合规渠道，通过合理分析得出结论，结论不受其它任何第三方的授意、影响，特此声明。

中证鹏元资信评估股份有限公司

深圳 地址：深圳市深南大道 7008 号阳光高尔夫大厦（银座国际）三楼 邮编：518040
电话：0755-82872897 传真：0755-82872090

北京 地址：北京市朝阳区建国路甲 92 号世茂大厦 C 座 23 层 邮编：100022
电话：010-66216006 传真：010-66212002

上海 地址：上海市浦东新区民生路 1299 号丁香国际商业中心西塔 9 楼 903 室 邮编：200120
总机：021-51035670 传真：021-51035670

湖南 地址：湖南省长沙市雨花区湘府东路 200 号华坤时代 2603 邮编：410000
电话：029-88626679 传真：029-88626679

江苏 地址：南京市建邺区黄山路 2 号绿溢国际广场 B 座 1410 室 邮编：210019
电话：025-87781291 传真：025-87781295

四川 地址：成都市高新区天府大道北段 869 号数字经济大厦 5 层 5006 号
电话：+852 36158343 传真：+852 35966140

山东 地址：山东自由贸易试验区济南片区经十路华润中心 SOHO 办公楼 1 单元 4315 室
总机：0531-88813809 传真：0531-88813810

陕西 地址：西安市莲湖区桃园南路 1 号丝路国际金融中心 C 栋 801 室
电话：029-88626679 传真：029-88626679

香港 地址：香港中环德辅道中 33 号 21 楼
电话：+852 36158342 传真：+852 35966140