

人形机器人

电子产业链 市场洞察及方案介绍

2025年 7月



人工智能产业链联盟

星主： AI产业链盟主

知识星球

微信扫描预览星球详情



前言

人形机器人（Humanoid Robot）通常是指那些在外观形态、运动方式（比如双足行走）、感知交互能力上模仿人类，并具备一定自主决策和执行能力的复杂智能系统。他们能与人类一起工作以提高生产力，也能够学习和执行各种任务，例如抓取物体、移动货柜、装卸箱子等等。

近年来，人形机器人成为了科技圈和资本市场最炙手可热的明星之一。从科技巨头争相布局到初创企业的融资热潮，从媒体的密集报道到公众的广泛热议，人形机器人承载着我们对未来生产力变革、社会服务升级，乃至人类生活方式演进的无限遐想。

人形机器人的发展已经经历了萌芽探索阶段（20世纪60年代末至90年代）、集成发展阶段（本世纪初至2010年）、高动态发展阶段（2010年至2022年）。目前正处于智能化发展阶段（2022年至今），在人工智能技术的赋能下，人形机器人具有了更加智能化的感知、交互和决策能力，同时，电驱动成为“肢体”主流技术路线，实现了更加精准的行走和操作，提高了研发迭代速度。比如特斯拉的人形机器人Optimus就是基于人工智能技术和FSD（Full Self-Driving，全自动驾驶）芯片，通过端到端的神经网络模型实现任务级和动作级的决策，以及复杂环境中物体、人脸和手势等的识别，再加上其全身压力计算和实时反馈机制，使机器人的四肢运动更加灵活，能够实现流畅和自然的动作。

然而，我们也必须清醒地认识到，人形机器人产业整体仍然处于发展的初级阶段。目前，真正实现大规模商业化量产的产品屈指可数，市面上更多的是令人惊艳的技术原型和概念展示，距离走进千家万户、服务千行百业还有一段路要走。但这“星星之火”，正预示着未来“燎原之势”的巨大潜力。行业普遍认为，人形机器人有望成为继计算机、智能手机之后的又一个颠覆性智能终端。

目录

第一章 人形机器人市场全景

- 1.1 人形机器人的市场规模：爆发前夜，潜力无限 02
- 1.2 参与企业：群雄并起，各显神通 03
 - 1.2.1 国际企业：技术先行与商业化探索 04
 - 1.2.2 中国企业：加速追赶，特色发展 05
- 1.3 人形机器人相关政策：国家引领，地方积极布局 07

第二章 人形机器人相关电子产业链

- 2.1 人形机器人的“大脑”——主控制系统深度解析 12
- 2.2 人形机器人的“小脑”——运动控制系统深度解析 16
 - 2.2.1 微控制器（MCU）/DSP等微处理器 17
 - 2.2.2 功率器件 20
 - 2.2.3 隔离器芯片 22
 - 2.2.4 编码器 23
- 2.3 人形机器人传感器市场洞察 25
 - 2.3.1 内部传感器 25
 - 2.3.2 外部感知传感器 27
- 2.4 电源系统解析 28
- 2.5 通信模块 33
- 2.6 其他芯片需求 35
 - 2.6.1 存储器 35
 - 2.6.2 语音模块 35

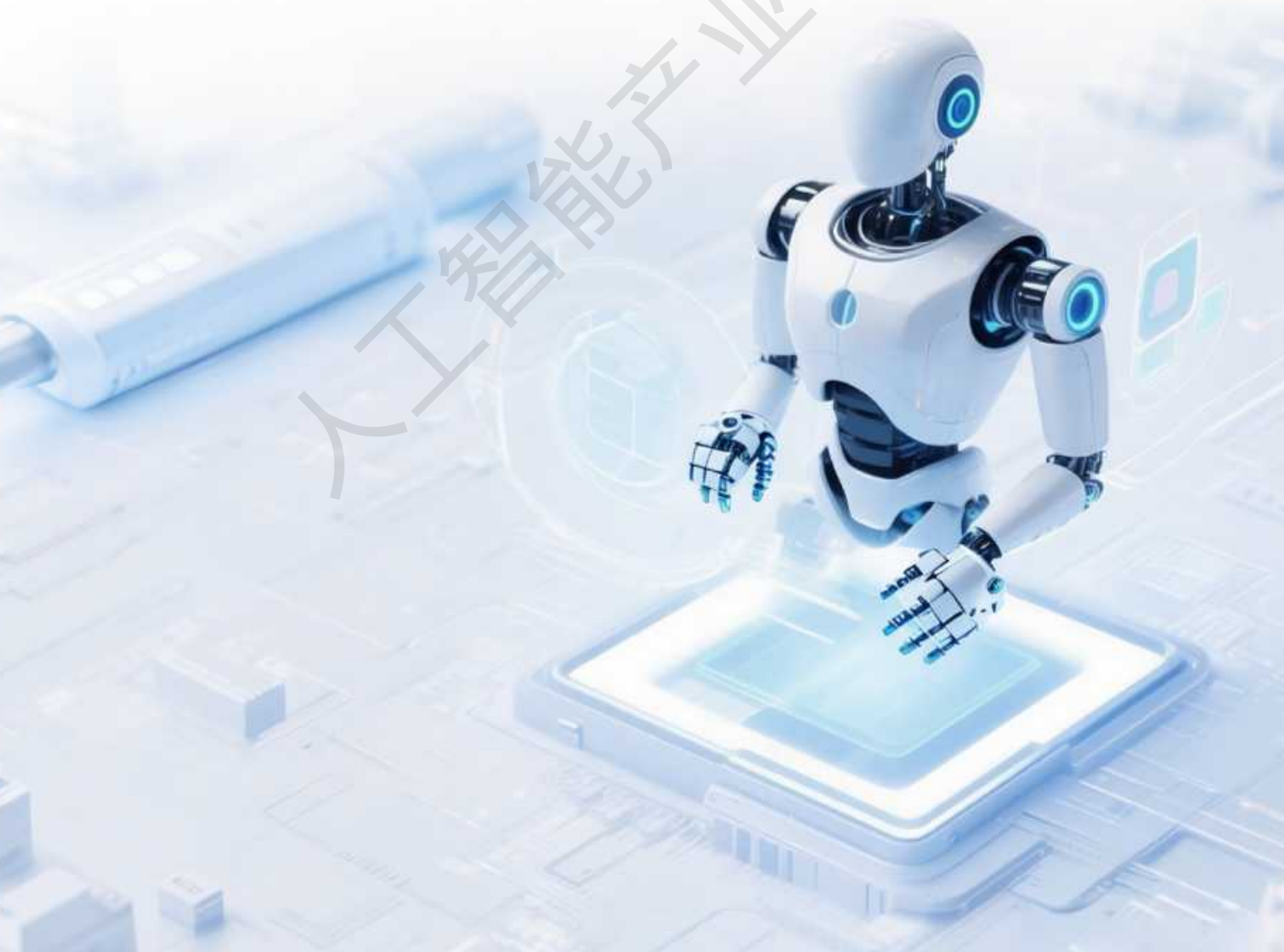
第三章 关键技术趋势

第四章 未来展望与建议

*中电港是**文中标星号企业***的授权分销商，可提供这些企业的人形机器人相关产品、方案和技术支持。

第一章

人形机器人 市场全景



人形机器人作为融合了尖端的人工智能、精密制造、先进传感与控制技术的高度集成化产物，虽然它现在处于产业化的黎明时分，但由于其广阔的应用前景和巨大的市场潜力，仍然吸引了全球科技界、产业界和资本市场的高度关注。

1.1 人形机器人的市场规模：爆发前夜，潜力无限

全球人形机器人市场目前仍然处于爆发的前夜，整体规模相对较小，但其增长曲线陡峭，预示着有望成为一个千亿级，甚至万亿级别的市场。高工机器人产业研究所（GGII）在《2025年人形机器人产业发展蓝皮书》中预测，2025年全球人形机器人市场规模63.39亿元；2030年市场规模将超过640亿元；到2035年，将超过4000亿元。

中国人形机器人市场空间测算							
年份	2024	2025E	2026F	2027F	2028F	2029F	2030F
中国人形机器人市场规模预测（亿元）	12.54	23.98	42.26	66.89	109.62	157.33	254.14
中国人形机器人销量预测（台）	2,400	7,300	16,000	34,500	57,500	98,000	162,500

表1：人形机器人市场规模预测（数据来源：高工产业研究院，芯查查）

高盛等机构更是预测，在理想情况下（技术突破、成本下降与应用普及），到2035年，人形机器人市场规模有望达到1,540亿美元。更乐观的特斯拉CEO埃隆·马斯克则认为未来人形机器人的需求量可能达到100亿至200亿台，将远超汽车产业的体量。

出货量方面，当前人形机器人的年出货量尚处于数千台至万台级别的水平，主要集中在科研机构、头部企业的研发部门，已经少量特定场景的试点应用。高工机器人产业研究所预计，到2025年，全球人形机器人的市场销量有望达到1.24万台，2030年将接近34万台；2035年将超过500万台。其中，2024年中国人形机器人出货量超过2,400台，市场规模超过12.54亿元。而且2025年多家企业已经反馈，第一季度的订单量已经超过了2024年全年。

近两年来，人形机器人初创企业发展迅速。据公开资料显示，截止2024年，国内外通用人形机器人整机商业公司数量约150家，其中国内企业数量超过80家，2024年人形机器人行业的融资事件超过60起。

值得注意的是，业界普遍认为2025年将是人形机器人的量产元年。目前，已经有多家人形机器人公司发布了量产计划，数量从几百台到几千台不等。

特斯拉：计划在2025年生产“数千台”人形机器人Optimus，2026年生产5万至10万台，2027年达到50万台

Figure：其人形机器人生产线BotQ初代设计产能1.2万台/年，并计划在4年内扩产到10万台/年规模

优必选：预计2025年将生产1,000至2,000台

智元：预计2025年生产3,000至5,000台

宇树科技：预计2025年生产3,000至5,000台

奇瑞：2025年人形机器人的量产目标是2,000台

银河通用（Galbot）：计划5年内生产1万台

随着技术的成熟和成本的优化，预计未来3到5年内，人形机器人市场将迎来一波增长小高潮，出货量有望提升至数10万级别。驱动因素包括工业自动化升级、劳动力短缺与成本上升，以及AI大模型的赋能。

特别是大模型技术的发展，给人形机器人注入了强劲的发展动力。作为AI落地物理世界的优质载体，人形机器人在AI加持下将拥有感知、思考、决策等能力，变得更加智能。

1.2 参与企业：群雄并起，各显神通

近两年来，全球人形机器人领域迎来了新品发布的“井喷期”。2024年全年，全球人形机器人新品发布数量已经超过了106款，远超过去20年的总和。目前，开放原子开源青龙收录的人形机器人产品有144个，参与的企业和机构有91家。

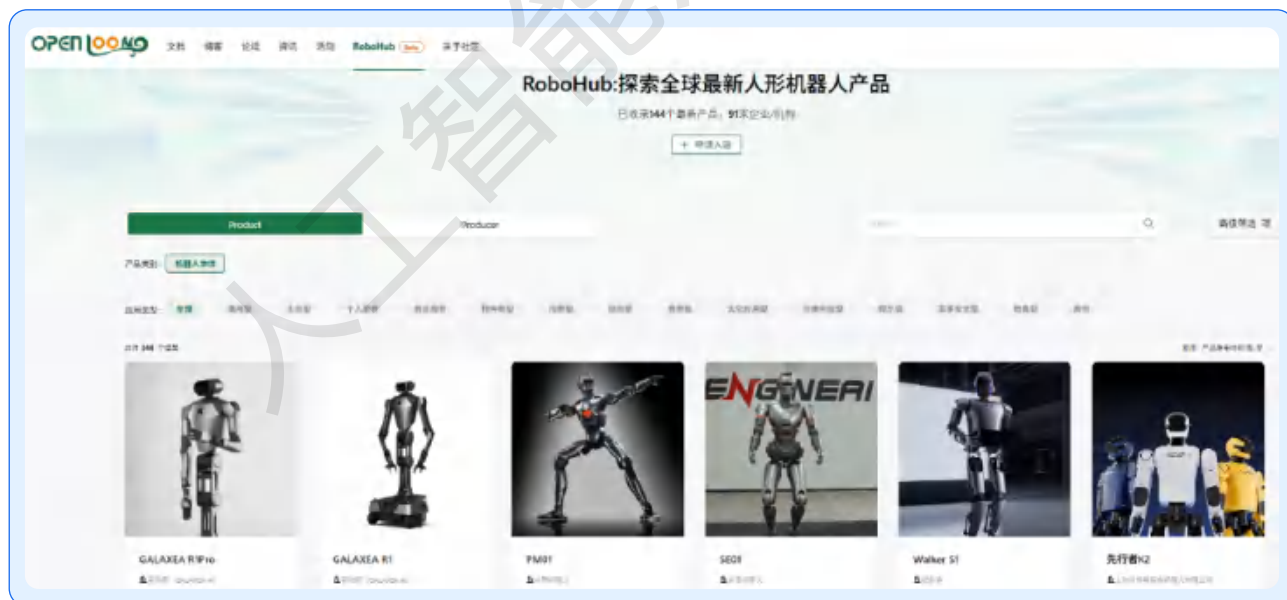


图1：开源青龙收录的人形机器人企业及其产品（来源：开源青龙）

当前人形机器人赛道呈现出科技巨头、老牌机器人公司，以及新兴初创企业同台竞技的局面，产品形态和技术路线也各具特色。

1.2.1 国际企业：技术先行与商业化探索

波士顿动力 (Boston Dynamics)： 作为人形机器人技术的先驱，由马克·雷伯特创立于1992年，脱胎于麻省理工学院实验室。先后被谷歌、软银收购，现隶属于韩国现代汽车公司。其最新的Atlas机器人是2024年4月发布的，该人形机器人更多是作为技术验证平台，展示了人形机器人运动能力的上限。其商业化路径仍在积极探索，例如将其技术应用于工业巡检、物流等。最新一代Atlas已转向全电动设计，并强调商业化和可制造性。

特斯拉： 成立于2003年，凭借其在电动汽车领域积累的AI、视觉感知、控制系统、电池技术和大规模制造经验，高调入局人形机器人领域，推出Optimus（擎天柱），2024年8月发布了Optimus Gen2，预计今年会推出第三代Optimus。马斯克的目标是打造一款成本低于2万美元、能够大规模量产的通用型人形机器人，以解决劳动力问题。Optimus强调“有用性”和“可负担性”，其迭代速度极快，已展示了分拣物品、简单工厂作业等能力。

Agility Robotics： 成立于2015年，由美国俄勒冈州立大学分拆而来。其目标市场聚焦在生产供应链和仓库自动化领域。凭借其双足人形机器人Digit，专注于物流搬运场景，特别是“最后一公里”的配送和仓库内的货物搬运。Digit已获得亚马逊等公司的订单，并实现了小批量的商业化部署，是目前商业化进展较快的公司之一。该公司还开设了世界上第一座人形机器人制造工厂，推动量产和商业化进程。

Figure AI： 成立于2022年，由AI和机器人领域资深人士创立，其人形机器人Figure 01强调通用性和与人类环境的无缝协作。该公司获得了包括微软、OpenAI、NVIDIA、亚马逊创始人贝索斯等科技巨头和知名投资人的巨额投资，目标是开发能够执行广泛任务的人形机器人，并已展示与OpenAI大模型结合后的对话与自主任务执行能力。其创始人认为人形机器人可以解决现在越来越严重的劳动力短缺问题。

Sanctuary AI： 成立于2018年，总部位于加拿大温哥华。其Phoenix人形机器人拥有类似人类的灵巧手和独特的AI控制系统Carbon，并强调通过通用人工智能(AGI)的赋能，致力于让机器人能完成数百种不同的人类任务。

Apptронik： 从德克萨斯大学奥斯汀分校的人类中心机器人实验室剥离出来，其人形机器人Apollo设计用于在物流、制造、零售乃至最终的家庭环境中与人类协同工作。

1X： 成立于2014年，总部位于挪威，拥有一支由工程师、设计师和AI专家组成的团队，专注于开发和生产能模仿人类行为的机器人，以增加全球的人类劳动力。产品包括EVE和NEO两款人形机器人，其中EVE是一款配备滑轮的机器人，可以在物流、安全、医疗等领域投入使用；NEO是一款双足人形机器人，主要面向家庭辅助场景应用。该公司获得了OpenAI、三星等企业的投资。

本田 (Honda) ASIMO（已停止开发但影响深远）： 尽管ASIMO项目已停止，但其在双足行走、人机交互方面的早期探索为后续研究奠定了重要基础。

1.2.2 中国企业：加速追赶，特色发展

中国企业在政策支持、市场需求和资本助推下，正加速追赶国际先进水平，并展现出独特的应用创新活力。

优必选 (UBTECH)： 作为中国人形机器人领域的先行者和“人形机器人第一股”，其Walker系列人形机器人已迭代多个版本，在服务导览、教育科研、工业应用等领域均有落地。Walker X等型号展示了在家庭服务、老人陪护等方面的潜力。今年4月底，优必选与东风柳汽签订了小批量人形机器人采购合同，涉及工业人形机器人Walker S1和商用版人形机器人Walker C。

宇树科技 (Unitree Robotics)： 以高性能四足机器人闻名，近年来也推出了其通用人形机器人H1。H1凭借其出色的运动性能、模块化设计和相对更具竞争力的价格，获得了市场的广泛关注，展现了中国企业在机器人核心运动部件和控制算法上的进步。

智元机器人 (AgiBot)： 由备受瞩目的前华为“天才少年”项目成员彭志辉（稚晖君）创立，其人形机器人“远征A1”强调AI驱动的通用智能和灵巧操作。远征A1集成了智元自研的“AI大脑”El Brian和灵巧手，目标是首先应用于工业制造、新能源等场景，未来拓展至更多领域。公司凭借创始人的影响力及强大的技术团队，获得了市场的广泛关注和知名机构的投资。

众擎机器人 (EngineAI Robotics)： 是一家于2023年10月在深圳成立，专注于通用智能机器人及行业场景方案的机器人公司。其主要业务包括人形机器人和其他相关产品的研发生产。其产品主要面向科研教育、工业制造、商业服务、家庭等多种场景。目前已经推出SE01、PM01、SA01三个系列的人形机器人产品，以及即将推出S2原创IP服务机器人系列产品。其中，SE01人形机器人是众擎机器人旗舰级产品，售价约2至3万美元，以高校和科研院所为主要目标客户，已经销售了上百台。今年2月份，其开源人形机器人PM01开始辅助深圳警方街头巡逻。

小米 (Xiaomi)： 凭借其在消费电子领域的品牌影响力和生态链整合能力，推出了全尺寸人形仿生机器人CyberOne（铁大）及其迭代版本。小米更侧重于探索人形机器人在其智能家居生态中的角色以及情感交互能力。

傅利叶智能 (Fourier)： 从康复机器人领域切入，推出了通用人形机器人GR-1。GR-1强调运动能力和负载能力，已开始小批量生产，并积极探索在工业、康复、科研等领域的应用。今年4月发布了开源人形机器人Fourier N1。

星动纪元 (ROBOTERA)： 是一家于2023年8月，由清华大学交叉信息研究院孵化的人形机器人企业，也是唯一一家清华大学占股的人形机器人企业。其创始人陈建宇是清华大学博士生导师、助理教授。其首款通用人形机器人产品星动STAR1共有55个自由度，最高关节扭矩达400Nm，最高转速达25rad/s。其灵巧手产品星动XHAND1，是一款具有高自由度、高性能和高智能性的五指机器人灵巧手。星动纪元最新推出的超拟人服务机器人星动Q5已经在北京世纪金源购物中心实训，为购物中心消费者提供实地线下商业化服务。

乐聚机器人 (LEJU ROBOT)：作为国内较早进入人形机器人领域的企业之一，乐聚机器人最初以教育和服

务机器人切入市场，其“夸父”(KUAVO)系列人形机器人是其向更通用化、智能化方向发展的代表。公司在人形机器人步态控制、人机交互等方面有一定积累，并在教育科研、商业展示、特定服务领域持续探索和推广。

普渡机器人 (PUDU)：专注于服务机器人的研发、设计、生产和销售，并率先在业内实现了专用、类人型和

人形机器人产品的完整布局。在2024年12月推出了其首款全尺寸双足人形机器人PUDU D9，搭载了其自研的灵巧手PUDU DH11，且PUDU D9秉持“生而为人”的核心设计理念，在能力上无限接近于人，目标是为人类完成各类泛化任务。

埃斯顿自动化 (ESTUN AUTOMATION)：国内工业机器人头部企业，2022年7月成立埃斯顿酷卓团队着手

研发具备“手脚眼脑感控协同”能力的具身智能机器人产品。2024年9月推出人形机器人Codroid 01，2025年6月推出第二代产品Codroid 02，可实现全身所有关节的运动能力，相比一代产品，在复杂场景下的灵活性与适应性均有了显著提升。

此外，还有小鹏鹏行、达闼机器人、开普勒、越疆、均普智能、奇瑞旗下的墨甲智创等，这些企业或依托

母公司的技术积累，或由顶尖AI、机器人专家创立，正从不同技术路径和应用场景切入人形机器人赛道。

当前及未来人形机器人产品形态和技术特点正朝着更智能、更通用、更实用和更经济方向演进。

在智能方面，未来人形机器人将会深度融合AI大模型，具备更强的自然语言理解、多模态感知、自主学

习、复杂任务规划与执行能力。也就是说，未来人形机器人不仅仅是一个执行预设程序的机器，而是能理解意

图，适应环境的AI智能体。

通用性方面，未来人形机器人将集成视觉（高清摄像头、深度相机）、听觉（麦克风阵列）、触觉（力/

力矩传感器、电子皮肤）、激光雷达、IMU等多种传感器，能够实现对复杂环境的全面感知和精准理解。从而

能够在非结构化、动态变化的环境中稳定工作，比如工厂、家庭、户外等等。

实用性方面，未来人形机器人将追求更稳定流畅的双足行走、更强的动态平衡、更灵活的全身运动，以及

更精巧的灵巧手操作，比如精细抓取、工具使用等等。

经济性方面，将会采用模块化设计降低开发和维护成本，通过新材料和优化结构实现轻量化，提升续航和

运动效率。此外，还可以通过核心零部件的国产化、规模化生产、技术优化等手段，不断降低制造成本，使其

更具市场竞争力。

1.3 人形机器人相关政策：国家引领，地方积极布局

各国政府，特别是中美等科技大国，已经将人形机器人提升到了国家战略层面，通过政策引导、资金支持、标准制定等多种方式推动产业的发展。

在中国，2023年11月，工业和信息化部印发的《人形机器人创新发展指导意见》是中国人形机器人产业发展的纲领性文件。该《意见》提出了明确的发展目标：

到2025年：初步建立人形机器人创新体系，“大脑（智能控制系统）、小脑（运动控制系统）、肢体（高动态性能的执行部件）”等关键技术取得突破，确保核心部件安全有效供给，整机产品达到国际先进水平，并实现批量生产，在特种、制造、民生等领域实现示范应用。

到2027年：人形机器人技术创新能力显著提升，形成安全可靠的产业链供应链体系，构建具有国际竞争力的产业生态，综合实力达到世界先进水平。此外，《“十四五”机器人产业发展规划》、《新一代人工智能发展规划》等国家级规划也为人形机器人发展提供了宏观指导和支持。

另外，在2023年，我国还推出了《新产业标准化领航工程实施方案（2023-2035年）》，以及《关注组织开展2023年未来产业创新任务揭榜挂帅工作的通知》，提出面向元宇宙、人形机器人、脑机接口、通用人工智能等4个重点方向，突破关键技术。2024年则推出了《关于推动未来产业创新发展的实施意见》，提出做强未来高端装备，打造包括人形机器人在内的多项标志性产品。

在标准方面，全国机器人标准化技术委员会成立了人形机器人标准工作组，制定标准体系，规范产业发展，并前瞻性布局未来的标准化方向。而且，2025年4月，我国人形机器人技术要求系列国家标准正式获批立项，在全国机器人标准化技术委员会（TC591）秘书处承担单位北京机械工业自动化研究所有限公司的统筹下，优必选联合北京人形机器人创新中心有限公司、上海人工智能实验室等单位共同发起了该系列国标，并主导牵头制定作业操作技术要求，主要针对灵巧操作、腿部移动作业、双臂操作、长序列执行、多机协同、操作避障、续航等作业操作技术要求进行规范。

随后，北京、上海、深圳、杭州、南京、武汉、宁波等城市，以及浙江、广东省等省份纷纷出台了专项政策或行动计划，积极打造人形机器人产业高地。北京市发布《北京市促进机器人产业创新发展的若干措施》，设立百亿级机器人产业基金，支持人形机器人关键技术研发和产业化。上海市提出打造具有全球影响力的机器人产业创新高地，支持人形机器人在高端制造、医疗康复等领域的应用示范。深圳市也出台了支持机器人产业发展的政策，鼓励技术创新和产业链建设。这些地方政策通常包括研发补贴、人才引进奖励、应用场景开放、产业园区建设、投融资支持等具体措施，为本地人形机器人企业发展创造了良好环境。

此外，美国、欧盟、日本、韩国、加拿大和新加坡等国家和地区也纷纷通过国家级AI战略、机器人计划等方式，通过政策和资金扶持产业链各环节的技术研发和生产应用。

在美国，2011年通过美国国家科学基金会（NSF）推出国家机器人计划（NRI）对智能机器人和自主系统的基础研究，该项目在运行12年后，投资了超过2.5亿美元，支持了300多个研究项目，并在2022年结束。另外，还通过NASA的“空间机器人”，以及国防部的“军事机器人和自动驾驶车辆”项目支持机器人的发展。2023年5月，白宫科技政策办公室发布新版《国家人工智能研发战略计划》，进一步确立九大战略重点，包括强化基础研究、推进所谓“负责任人工智能”、提升教育培训、加强跨学科融合、完善基础设施建设等。美国政府通过财政补助、科研资助与公共采购等多元手段，积极引导人工智能技术从基础研究走向产业应用。2025年2月，美国国务院特别竞争研究项目（SCSP）向联邦政府提交备忘录，呼吁设立国家机器人发展战略，推动工业、军事和物流领域的机器人规模化部署。这些布局显示，美国正积极构建以“人工智能+机器人”为核心的战略生态，提升其在全球智能系统竞争中的地位。

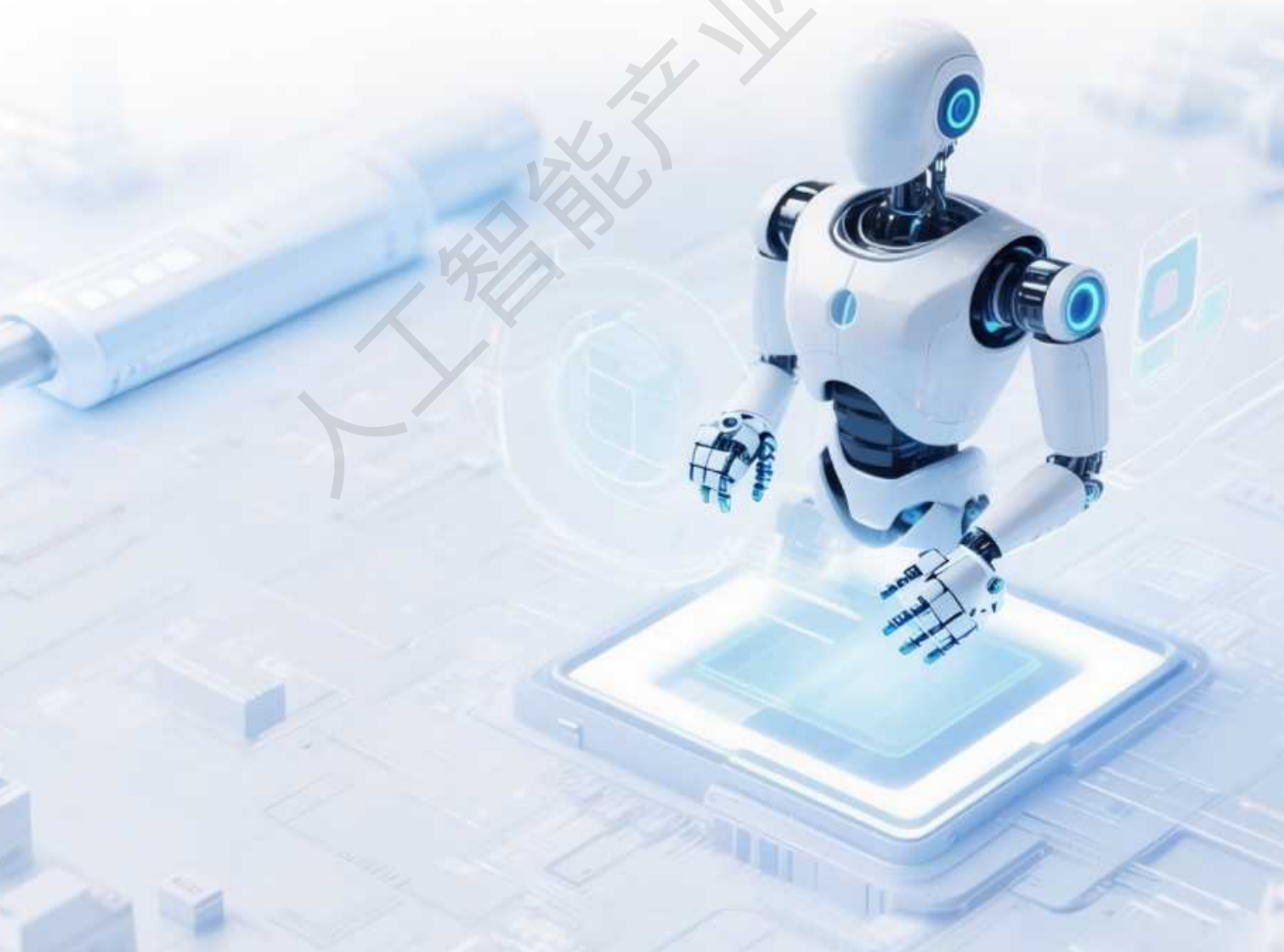
在欧盟，2021年推出了“地平线欧洲”计划，该计划2021至2027年预算达955亿欧元。其首要目标是加强欧盟的科技基础，提高欧洲的创新能力和竞争力。其中，德国在2018年推出了“高科技战略2025（HTS）”，该战略将持续到2026年，总预算3.5亿欧元（约3.7亿美元）。

在日本，2015年推出了“机器人战略”，2020年启动的“Moonshot研发计划”将持续到2050年，预算为250亿日元（约4.4亿美元）。在社会、环境和经济领域设定了10个Moonshot目标，以实现“人类福祉”。其中包括未来社会面临的问题，例如人口老龄化和全球变暖。该计划促进了AI机器人的实现，这些机器人可以自主学习、适应环境、智能进化并与人类一起行动。

在韩国，2024年1月宣布推出“第四个智能机器人基本计划”，该计划将持续到2028年，投资1800亿韩元（约1.28亿美元）。

第二章

人形机器人 相关电子产业链



传统的机器人是为单一目的而设计的，比如工厂的AGV，机械臂等，但未来的人形机器人作为通用机器人的理想形态，能够无缝适应人类设计的工作空间，具备理解自然语言能力、自主规划复杂的动作，完成高强度的任务。

近年来，随着人工智能的快速崛起，人形机器人产业也发生了很大的变革，其“智力能力”正在超过“物理能力”。由于人形机器人变得指数级的“更智能”，一系列潜在的硬件瓶颈问题将需要解决。目前，特斯拉的Optimus是人形机器人领域的典型代表，其硬件方案也是很多人形机器人厂商的重要参考之一。如今，制造人形机器人的成本可能在1万美元至30万美元之间，具体价格取决于配置和下游应用。摩根士丹利在其一份报告中分析了Optimus 2的硬件成本，他们预计每台成本在5万至6万美元（不包含软件）。不过，通过规模化生产，引入AI算法缩短研发周期，以及国产供应链的支持，成本还有很大的降低空间。马斯克对Optimus设定的成本目标是2万美元。

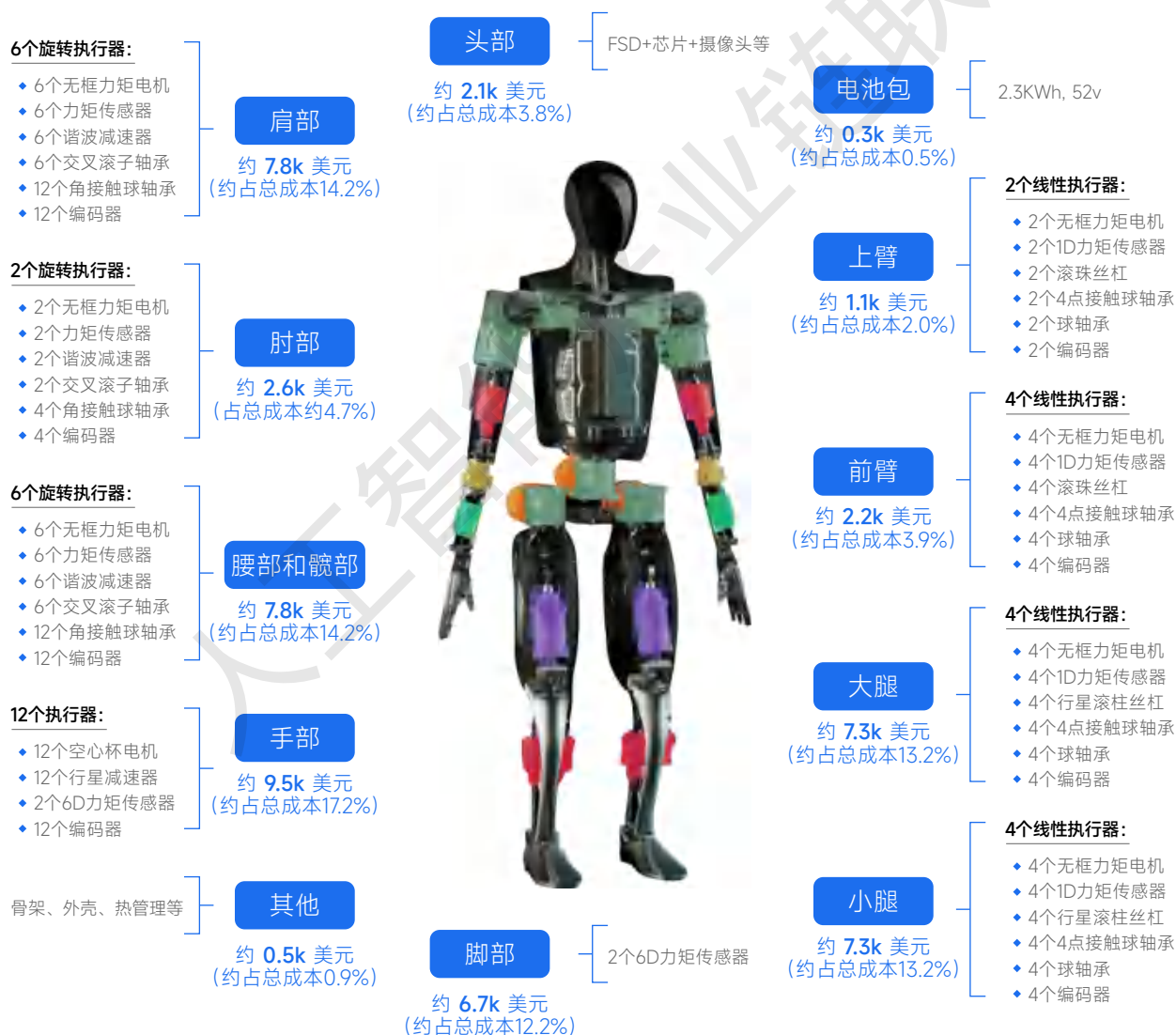


图2：特斯拉Optimus 2的BOM成本分析（来源：特斯拉、摩根士丹利、芯查查）

从技术架构层面来看，构建此类人形机器人一般需要四层技术架构。

首先最底层是硬件抽象层，它是人形机器人的核心神经末梢，统一管理物理硬件设备和标准化传感器的驱动，包括IMU、音频与麦克风、体感/触摸传感器、摄像头、位置传感器，以及标准化的执行器接口，兼容各种类型的电机、关节等执行设备。

在硬件抽象层上面是实时控制框架层，它通过将其上一层发来的突发指令转化为具体的硬件控制信号，运行频率为100Hz至1kHz。开发者可以通过模型预测控制，或者AI控制策略来实现一系列的控制需求，实时控制包括速度控制器、位置控制器、阻抗控制器和力矩控制器等。



图3：人形机器人四层技术架构（来源：NVIDIA，芯查查）

第三层是感知和规划层，这是机器人的“小脑”，运行频率是30Hz，完成的任务包括场景识别与自身定位、物体识别与定位、抓取动作规划、整体移动能力等。

最上面的第四层是高层推理层，也就是机器人的“大脑”，负责抽象具体的任务，或者制定长期的目标规划，运行的频率为1至5Hz。完成的任务包括自然语言交互、场景理解、符号化的规划任务目标，以及全局调度等。

为了满足这四层技术架构需求，人形机器人需要满足一定性能的硬件来做支撑。一般来说，人形机器人的硬件架构包括机械结构、控制系统、驱动系统、传感器和电源系统等。人形机器人的各项高级功能，比如自主导航、精确操作、人机交互等，都高度依赖其内部复杂的电子系统。其核心的电子子系统通常包括：

主控制系统：负责实时决策和协调各部件工作。它相当于人形机器人的“大脑”，对人形机器人的自主性和感知能力至关重要，主要包括CPU、GPU、AI专用芯片、DSP、FPGA芯片等硬件，AI大模型、通信网络（比如CAN总线、EtherCAT等）以及各类软件系统（比如操作系统、仿真软件、感知与认知算法等）。

电机驱动控制系统：负责精确控制执行器中电机的转速、转矩和位置，实现机器人的灵活运动。它相当于人形机器人的“小脑”。这部分会用到MCU、DSP、FPGA、功率器件、隔离器、电流传感器或编码器等元器件。

传感器：主要是环境感知及人形机器人本身的状态获取，包括惯性传感单元（IMU）、陀螺仪、相机、激光雷达、超声波雷达、力矩传感器、触觉传感器等。

电源管理系统：负责电池能量的稳定、高效分配与管理，为所有电子部件供电。

通信模块：负责人形机器人内部各模块间，以及人形机器人与外部设备的数据交换。

人形机器人对运动控制能力和感知计算能力均有极高的要求。执行部分的精密运动依赖于高性能的电机驱动和控制系统，而感知控制部分的强大功能则源于先进的传感技术和强大的数据处理芯片。这些电子系统的高效协同，是实现人形机器人感知、决策和执行闭环控制的基础。

也就是说，未来的人形机器人将需要更多先进的芯片，例如在执行推理和工作规划任务的控制系统，需要性能更强的应用处理器（比如CPU、GPU、DSP、FPGA、AI专用芯片等）来执行大语言模型；运动控制系统需要实时性更高，性能更好的MCU、MPU等芯片来实现关节的运动控制；感知系统需要采用CMOS图像传感器（CIS）、MEMS传感器、激光雷达、6D力矩传感器、触觉传感器等实现环境感知和自身运动状态的感知；电源系统需要更多电源管理芯片、电池及电池管理系统（BMS）、充电模组、电源网络的支持等等。

2.1 人形机器人的“大脑”——主控制系统深度解析

人形机器人最上层的推理控制系统，也就是机器人的“大脑”，它会负责协调多个执行器的运动、处理复杂的运动学和动力学算法，融合多传感器信息，以及运行AI大模型，来实现自主决策和智能交互。

生成式AI的快速发展可以说是近年来人形机器人性能不断提高的重要因素，直接催化了自2022年以来大量新的人形机器人创业项目的启动。AI的增长大大提升了人形机器人处理人类工作场所中经常遇到的复杂和细微场景的潜力，增强了机器人利用更复杂的传感器、视觉、以及执行器进行协同工作的能力，推动了商用化落地的进程。

目前，绝大多数领先的人形机器人初创企业都与一个或多个AI参与者，比如NVIDIA、OpenAI、谷歌、百度、华为、腾讯、阿里巴巴等建立了合作伙伴关系。作为AI在物理世界的最佳载体，AI将赋予机器人“大脑”功能，让它可以跟人类一样思考和行动。

因此，AI与主控制系统，运动控制系统将是人形机器人最具价值的组成部分。因为它体现了人形机器人的智能水平，这包括多模态感知、逻辑思维以及运动控制等能力。主控系统中的AI芯片可以通过输入的多传感器信号感知环境信息，进行逻辑思考后生成指令，并将指令发送给运动控制系统，控制各执行器高精度和稳定地运行，同时接收来自运动控制系统的实时反馈信息，并做出调整。

AI算法可以通过高扩展性、精确性和稳定性来增强人形机器人的通用性和泛化能力。不过，目前人形机器人的AI算法仍处于发展初期，需要大量的现场验证、算法迭代和硬件磨合来达到完善。

根据NVIDIA推出的人形机器人基础模型GROOT N1将人形机器人分解成双系统架构，即系统1（System 1）和系统2（System 2）。

其中，系统1作为底层控制模块，通过扩散模型（Diffusion Transformer Module）（DiT）实现120Hz高频关节控制，直接生成关节位置/速度指令，解决实时平衡控制问题；系统2采用Eagle-2视觉语言模型（Vision-Language Module，VLM）处理自然语言指令，通过跨模态注意力对齐视觉输入与动作空间。

系统2以10Hz频率提取包含多视角图像和语言指令的环境信息，系统1以120Hz高频生成精细的运动控制信号，这种快慢双系统就像人的大脑和小脑，大脑负责高维认知、推理和行为规划，是经过深思熟虑的，有意识的主动选择。小脑负责具体低维运动，从传感器到电机的闭环控制，无意识，近似于本能。

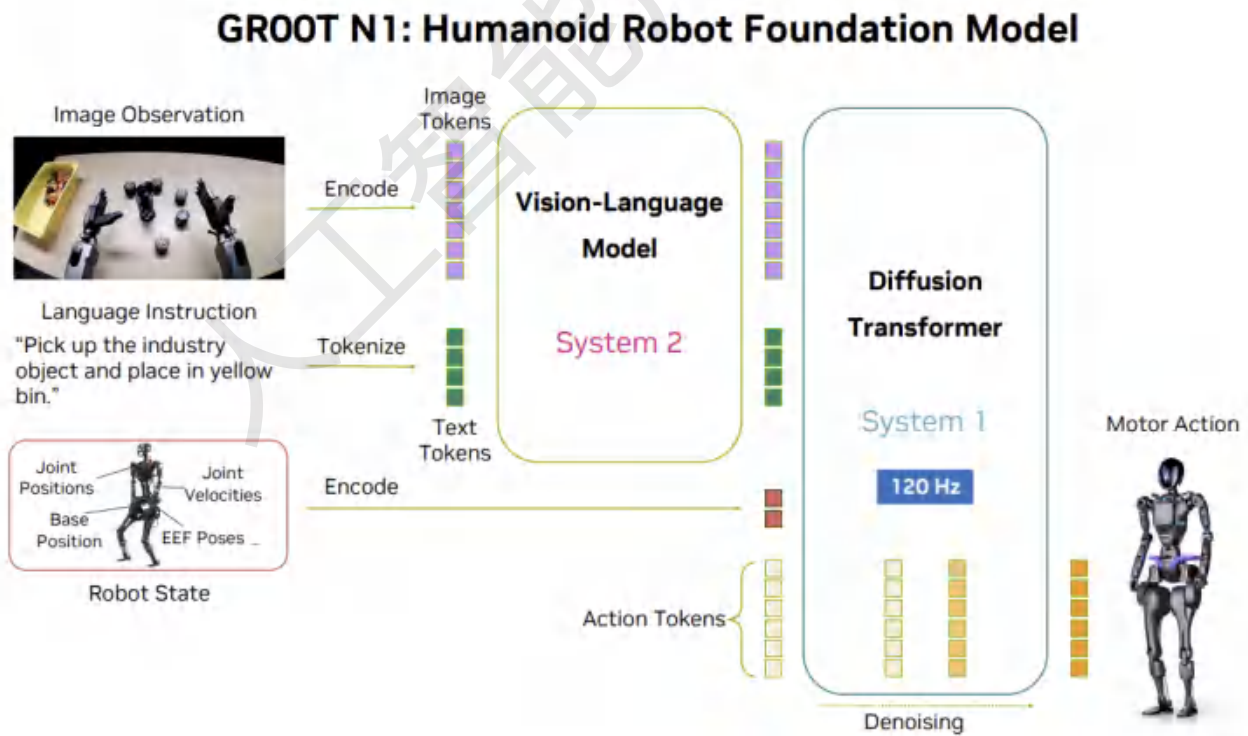


图4：NVIDIA推出的人形机器人基础模型GROOT N1（来源：NVIDIA）

在硬件方面，NVIDIA*特别推出了针对人形机器人的主控芯片Jetson AGX Thor，该芯片采用了异构计算架构，具有14核Poseidon-AE CPU处理实时控制逻辑（如100Hz力矩控制），Blackwell GPU加速视觉推理（如6D物体姿态估计），支持同时运行GR00T N1模型（20亿参数）和实时传感器融合算法。Thor单芯片集成了1000TOPS AI算力及100TFLOPS图形算力，支持同时处理视觉识别与物理仿真，使得机器人能够在边缘端实现复杂任务处理，减少对云端的依赖，提升了系统的响应速度和自主性。

在安全方面，Thor集成了硬件安全岛，支持功能安全等级ASIL-D，满足医疗机器人、工业协作机器人等对安全性要求极高的应用场景。

不过，该芯片今年下半年才会量产。目前大部分人形机器人企业采用的是NVIDIA*的Jetson系列，比如Xavier NX、AGX Orin、Orin Nano。

当然，除了此类AI专用芯片之外，也可以采用高性能SoC、GPU、FPGA、CPU、DSP、MPU等处理器芯片来作为主控。

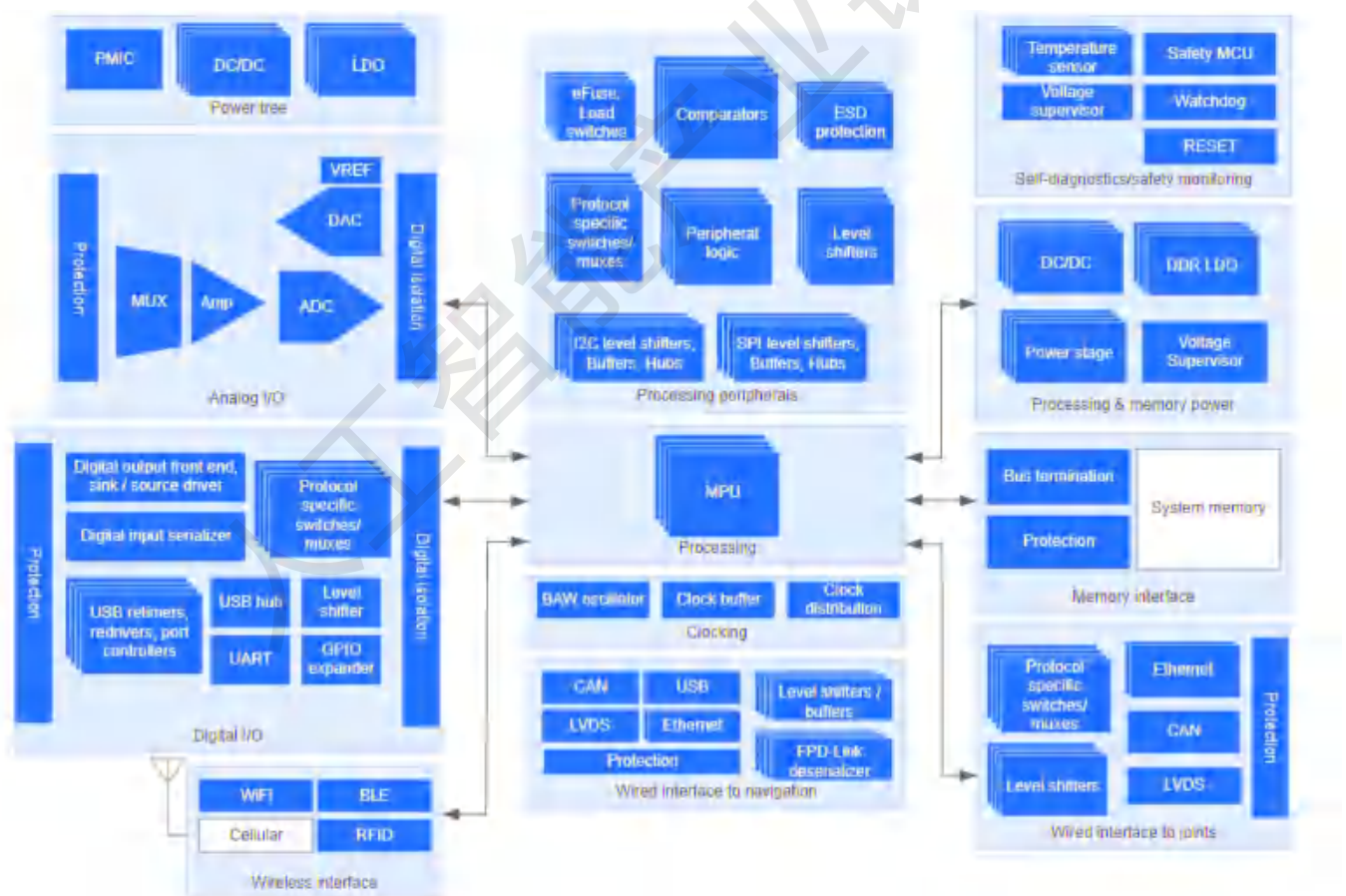


图5：人形机器人控制系统框图（来源：TI，芯查查）

SoC: 通常集成强大的CPU核心（如Arm Cortex-A系列、Intel Core系列）、GPU（用于并行计算和图形处理）、NPU（神经处理单元，专用于AI加速）以及丰富的外设接口。它们能够运行复杂的操作系统（如Linux、ROS）和高级算法库，为机器人提供强大的计算能力和AI处理能力。例如，NVIDIA的Jetson系列和Intel的Movidius VPU就是常用于机器人AI应用的SoC芯片。特斯拉的Optimus机器人则采用了其自研的FSD芯片，该芯片具备强大的AI算力，用于处理感知和控制任务。

FPGA: 凭借其可编程逻辑单元和并行处理能力，FPGA在需要确定性低延迟和硬件级加速的特定任务中具有优势，例如高速传感器数据预处理、复杂的实时控制逻辑、自定义接口协议转换等。在某些设计中，FPGA可以作为MPU的协处理器，分担特定的计算密集型或时间敏感型任务。

目前，在人形机器人主控系统方面没有特定的方案，各家采取的技术路线都不尽相同，目前主流的方案有CPU+GPU、CPU+FPGA、GPU+ASIC等方案。

CPU+GPU的方案最为成熟，特斯拉的FSD芯片就是采用该路线，其中CPU做控制、GPU做图像处理、NPU为神经处理单元，并集成了大量的计算单元和专门的神经网络加速器，能够高效地进行复杂的计算和推理任务；

CPU+FPGA方案，由于FPGA的开发流程简单，具有较短的研究周期，但FPGA的价格比较高，同时FPGA的功耗也相对较高，不适合功耗敏感的应用；

CPU+ASIC的方案，通过数字“类存算一体”方式实现MAC操作，在电路级实现“存算一体”，该路线运行稳定性较高，但并行性和能效比较低。

具体产品方面，英特尔的i系列或者Ultra系列CPU、NVIDIA*的Jetson系列（比如Xavier NX、AGX Orin、Orin Nano、Thor等）、高通（Qualcomm）*的机器人平台（RB系列）、Intel的酷睿系列及Movidius VPU是主流选择。

FPGA/ASIC: 用于实现特定算法的硬件加速，或作为协处理器。供应商主要有AMD*、Altera、Microchip*，以及国内的复旦微电子、紫光国芯等。比如AMD的Zynq UltraScale+ MPSoC系列，因其可重构性和并行处理能力，被用于机器人系统中需要硬件加速和实时处理的特定模块。

当然，也有一部分机器人企业也在探索基于RISC-V或Arm架构的自研芯片。

根据目前公开的信息，优必选的初代Walker搭载的是英特尔的i7 7500U（2.7GHz）和i5 6200U（2.3GHz）、升级版的Walker X主要采用i7 8665U（双路、1.9GHz）再加上NVIDIA GT1030显卡；宇树科技的H1系列人形机器人标配的是英特尔的i5/i7芯片，可以选配i7加NVIDIA Jetson Orin NX（单块或多块，最多3块）；傅立叶智能的GR-1采用的是英特尔的i7 13700H处理器；众擎机器人的PM01人形机器人采用的是英特尔的N97配合NVIDIA的Jetson Orin芯片；智元机器人采用的是Jetson Orin芯片；北京人形机器人创新中心发布的天工通用机器人Pro版采用的是英特尔的CPU与NVIDIA的Jetson Orin芯片等。

2.2 人形机器人的“小脑”——运动控制系统深度解析

人形机器人的运动控制系统通常是指在复杂条件下将预定的控制方案、规划指令等转变为期望的机械运动，实现机械运动精确的位置控制、速度控制和转矩控制。前文提及，人形机器人的运动控制系统就相当于其“小脑”，可以按照具体的运动轨迹要求，根据负载的情况，通过驱动器、驱动执行电机完成相应运动。

以第二代特斯拉人形机器人为例，它一共用了14个旋转关节、14个线性关节和12个手部关节（其第三代灵巧手已经升级到22个关节）。旋转关节是电机加减速器的组合，让机器人做旋转动作，线性关节是电机加丝杠的组合，让机器人做直线运动。

具体来看，每一个关节就是一个复杂的机电一体化系统，通常由电机、减速器、编码器以及驱动和控制这些部件的电子电路构成。电机一般包括无刷直流伺服电机、空心杯电机、无框电机等。

伺服电机，就是在电机的基础上，增加一个控制系统，从而更加精准地控制电机的开关、转速、扭矩和位置等。

空心杯电机，是一种直流永磁无刷电机，只是它的转子不是铁芯和缠绕线圈，而是一个永磁体，因此电机看起来像是一个空心的杯子，其最大的优势是与同等功率的铁芯电机相比，它的重量和体积缩减了一半，而且转动惯量小、效率高、噪声低，适合人形机器人的手部狭小空间。

无框电机，其实就是没有传统机械外壳的电机，它的定子和转子是环状的，主要通过镶嵌在传动轴上，带动轴的转动。无框电机可以保证高功率密度的同时，让电机尺寸更加紧凑，而且还减少了不必要的外部结构，提供了更大的灵活性。

上面提到的这些电机都需要驱动控制系统，以实现对电机输出的精确调控。其核心组件包括接收控制指令并执行控制算法的微控制器（MCU），或更高级的处理器等芯片、驱动电机电流的功率器件（比如MOSFET或GaN FET）及其栅极驱动器，用于反馈电机位置和速度的编码器接口电路以及与其他系统模块通信的总线接口（具体可以参见下图6）。

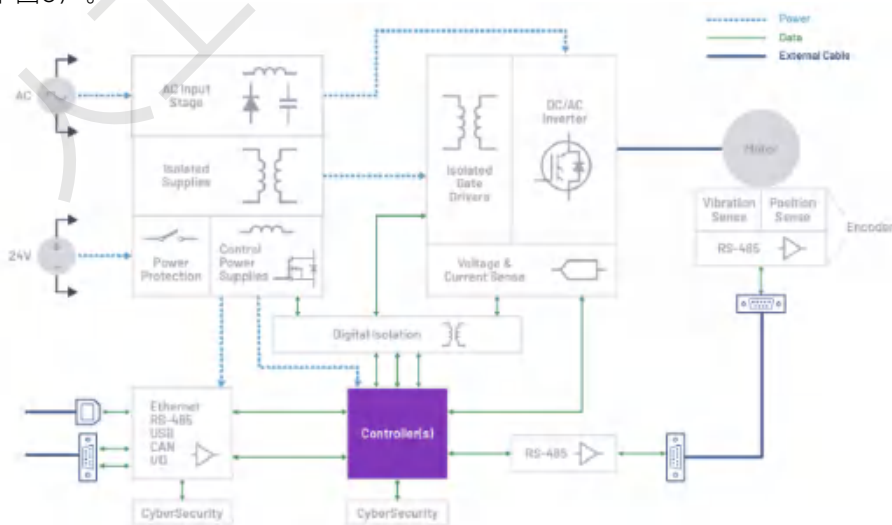


图6：典型人形机器人电机控制系统框图（来源：ADI，芯查查）

这些电子部件通常被设计为分布式，即尽可能靠近电机安装，甚至集成在关键模块内部。这种布局有助于减少信号传输延迟，提高控制回路的响应速度和抗干扰能力，并简化机器人内部复杂的布线。然而，这也对电子部件的小型化、散热设计以及通信的可靠性提出了更高的要求。

人形机器人通常拥有几十个自由度（DOF），这就意味着需要控制同等数量的电机。因此，电机驱动控制系统的设计必须兼顾高性能、高效率、高集成度和高可靠性。人形机器人的电机驱动控制系统往往需要在集中式高级运动规划与分布式底层关节控制之间取得平衡。一些先进的人形机器人采用混合控制架构，即中央处理器负责整体运动规划、步态生成和平衡控制等复杂计算，而各个关节内的控制器则专注于执行来自中央处理器的指令，并进行实时的闭环伺服控制。这种分层控制策略对各级处理单元的性能和它们之间的通信效率都提出了更高的要求。

2.2.1 微控制器（MCU）/DSP等微处理器

在人形机器人运动控制系统中，控制器扮演着至关重要的角色，它们是实现精确、实时电机控制的“神经末梢”。每个或者每组关节电机通常都配有专门的微控制器来执行底层的伺服控制任务，这个微控制器主要是MCU，也有采用DSP、FPGA或者性能更高的MPU等。

拿人形机器人中应用较多的MCU来说，执行器中MCU的核心功能是接收来自上层主控芯片的运动指令，比如目标位置、速度或力矩，结合来自编码器、电流传感器等反馈信号，通过精确的脉冲宽度调制（PWM）信号控制功率器件的开关，从而驱动电机达到预定状态。其主要构成和功能包括：

CPU核心：通常采用Arm Cortex-M系列（如M0+，M3，M4，M7）或专用的DSP核心（如TI C2000系列）。Cortex-M4/M7内核因其较高的处理性能、浮点运算单元（FPU）和DSP指令集，常用于需要复杂控制算法（如磁场定向控制FOC）的应用。

存储器：包括用于存储控制程序的Flash存储器和用于运行时数据的SRAM。

PWM发生器：能够产生高分辨率、高频率的PWM信号，用于精确控制电机相电流，从而实现平滑的转矩输出和高效的能量转换。

ADC（模数转换器）：高精度、高速的ADC用于采集电机相电流、母线电压、温度等模拟反馈信号，为闭环控制提供数据基础。

编码器接口：支持多种编码器类型（如增量式、绝对式、BiSS、EnDat、Resolver等）的接口电路，用于获取电机转子的精确位置和速度信息。

通信接口：如CAN-FD、SPI、I2C、UART等，用于与主控制器、其他传感器或MCU进行数据交换部分高性能MCU开始集成EtherCAT从站控制器。

协处理器/硬件加速器：一些高级电机控制MCU集成专用硬件单元，如TI C2000系列中的控制律加速器（CLA）、三角函数数学单元（TMU）、Viterbi、Complex Math、CRC单元（VCU）等，用于加速复杂的数学运算，减轻主CPU的负担，提高控制回路的实时性。

功能安全特性：随着人形机器人应用场景的扩展，对功能安全的要求日益提高。一些MCU开始集成硬件级的安全特性，或其设计遵循相关安全标准（如IEC 61508, ISO 26262），以支持系统级的安全认证。

人形机器人对运动的平顺性、精确性和安全性要求极高。这直接推动了执行器MCU向更高性能、更高集成度和更专业化方向发展。例如，高分辨率PWM可以实现更精细的电机控制，减少转矩脉动，提升运动平稳性。快速准确的ADC则为电流环和速度环的快速响应提供了保障。专用数学协处理器的引入，使得复杂的控制算法（如FOC、模型预测控制MPC等）能够在MCU上高效运行。

一个值得关注的趋势是MCU内部开始集成轻量级的AI加速能力。这使得执行器层面可以实现一些边缘智能功能，例如基于AI的预测性维护（监测电机运行状态，预测潜在故障）或自适应控制（根据负载变化或环境扰动实时调整控制参数），从而提升执行器的智能化水平和鲁棒性。此外，多核MCU也开始应用于复杂的电机控制场景，允许将控制任务、通信任务和安全监控任务分配到不同的核心上并行处理，以提高整体性能和响应速度。

在供应商方面，电机控制MCU市场供应商众多，目前并没有专门针对人形机器人的MCU产品，大都是采用通用型MCU产品，只是人形机器人使用的MCU产品，对实时性、可靠性和多接口能力的要求更高。

德州仪器（Texas Instruments, TI）：其C2000实时控制MCU系列是电机控制领域的标杆产品，以强大的32位TMS320C28x DSP内核、高性能外设（如高分辨率PWM、快速ADC、CLA协处理器、TMU、VCU）和丰富的电机控制软件库著称。具体型号如TMS320F28P65x，以及基于新型C29x内核的F29H85x系列，后者提供更高的实时性能和增强的安全支持。TI也提供基于Arm内核的MCU（比如AM261x等），用于人形机器人的电机控制应用。

意法半导体（STMicroelectronics）：STM32系列MCU产品线极为丰富，基于Arm Cortex-M0/M3/M4/M7/M33等多种内核，提供了从低成本到高性能的广泛选择。其中，STM32G4、STM32F3（集成运放、比较器、高分辨率定时器）和STM32H7（高性能M7内核）等系列特别适用于电机控制应用，并有完善的电机控制生态系统（如X-CUBE-MCSDK），当然也可以用于人形机器人产品中。

恩智浦 (NXP Semiconductors) *: 其i.MX RT系列跨界MCU (结合了Arm Cortex-M内核的实时性与应用处理器的性能) 及MCX系列MCU芯片适用于机器人和运动控制。

瑞萨电子 (Renesas Electronics) *: RA系列 (基于Arm Cortex-M) 和RX系列 (瑞萨自有RX内核) MCU, 以及专门的电机控制MCU, 比如R5F572MDDDBG#20、R7S910007CBG#AC0、R7S910035CBG#AC0、R9A07G044L23GBG#BC0+、RAA215300A2GNP#HA0、RA4T1与RA8T2等也非常适合人形机器人中的电机控制。值得一提的是, 瑞萨电子的RZ-V2H处理器具有Cortex-R8和Cortex-A55多核处理器, 支持实时运动控制和传感器融合, 而且支持CAN-FD、以太网、SPI和RS485等协议, 能与关节和灵巧手等其他模块无缝集成, 很适合人形机器人应用。

Microchip*: 其dsPIC系列数字信号控制器 (DSC), 比如dsPIC33CK128MPx, 以及SAM系列MCU (基于Arm Cortex-M) 也常用于电机控制应用。

ADI*: 其TMC9660具有栅极驱动单元、运动控制单元、测量单元、电源单元和保护诊断单元, 可帮助客户最大限度地减少BOM和电路板空间, 集成了FOC控制算法, 无需代码编程即可实现对电机的控制。非常适合驱动低电感电机, 比如空心杯电机。

兆易创新 (GigaDevice) *: GD32H7系列MCU, 基于Arm Cortex-M7内核, 主频高达600MHz, 集成了EtherCAT控制器和CAN-FD接口, 适用于高端伺服驱动和机器人控制。此外, GD32F3, GD32F4, GD32G5、以及GDSCN832系列EtherCAT从站控制器也适合人形机器人应用。

小华半导体 (XHSC) *: HC32F系列MCU, 比如其HC32M1、HCM3043、HC32F334等产品就已经被一些人形机器人厂商所采用。

先楫半导体 (HPMicro): HPM6E8Y系列MCU, 采用双RISC-V内核, 主频高达600MHz, 集成了千兆以太网交换机 (支持TSN)、EtherCAT从站控制器 (ESC)、32路高分辨率PWM (100ps) 以及多种编码器接口, 专为机器人运动和控制设计。此外, 还有HPM6E00/HPM5E00等系列也适合人形机器人应用。

此外, 还有英飞凌的XMC4800系列、**纳芯微***的NSUC1610、雅特力的AT32M412/416、峰岬科技的FU68系列、**新唐***的M0518LD2AE、**海思***的Hi3061/65x、国民技术的N32H76xEC、N32H78xEC, 以及N32H473系列、极海半导体的G32R501、APM32M3514系列等产品均可用于人形机器人应用。

至于最终如何选择, 通常取决于人形机器人厂商对性能、外设集成度、开发生态、成本以及特定功能 (比如集成EtherCAT) 的需求。TI、ST、NXP是该领域的传统供应商, 而像先楫半导体这样新兴的企业则是通过高度集成的解决方案, 比如原生支持EtherCAT等来寻求差异化竞争。

2.2.2 功率器件

功率器件是电机驱动功率级的核心，负责根据MCU产生的PWM信号，对供给电机的高电流进行高速开关控制，从而驱动电机绕组产生旋转磁场。传统上，硅基MOSFET或IGBT是主流选择，但近年来，以氮化镓（GaN）FET为代表的宽禁带半导体器件因其卓越性能，在人形机器人等功率密度和效率要求极高的领域崭露头角。栅极驱动器作为功率器件的配套芯片，负责将MCU的逻辑电平PWM信号转换为可以快速、可靠地开关功率器件的驱动信号。

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) :

作为一种电压控制器件，MOSFET在电机驱动中用作功率开关。通过门极电压控制其导通和关断，从而控制电流流向电机绕组。在人形机器人中，通常需要低导通电阻（ $R_{DS(on)}$ ）以减少导通损耗，以及较好的开关特性以降低开关损耗。

GaN FET (Gallium Nitride Field-Effect Transistor) :

GaN FET是一种基于氮化镓材料的新型功率晶体管。相比硅MOSFET，GaN FET具有更低的导通电阻、更小的栅极电荷（ Q_g ）和输出电容（ C_{oss} ），以及几乎为零的反向恢复电荷（ Q_{rr} ），这使其能够以更高的开关频率（可达数百kHz甚至MHz级别）工作，同时保持极低的开关损耗。这些特性对于人形机器人执行器至关重要：

高效率：更低的导通损耗和开关损耗意味着更高的能量转换效率，有助于延长电池续航和减少发热。

高功率密度：更高的开关频率允许使用更小尺寸的无源元件（如电感、电容），结合GaN器件本身较小的芯片尺寸（相同 $R_{DS(on)}$ 下），使得整个功率级可以做得更加紧凑，非常适合空间受限的机器人关节。

更精确的控制：高PWM频率可以产生更平滑的电机电流波形，减少转矩脉动，提高电机运行效率，降低电机噪音，并实现更快的动态响应。

改善的散热：虽然功率密度提高，但由于效率提升，整体发热可能得到更好控制，或者在相同散热条件下输出更大功率。

栅极驱动器 (Gate Driver) :

负责放大MCU输出的PWM信号，并提供足够的电流和电压来快速驱动功率器件（MOSFET或GaN FET）的栅极，确保其在最佳状态下开关。对于GaN FET，由于其开关速度极快且对驱动条件敏感，通常需要专门设计的GaN栅极驱动器，有些GaN方案甚至将驱动器与GaN FET集成在同一封装内（如TI的GaN智能功率模块，EPC的ePower Stage IC），以减少寄生电感，优化开关性能。

人形机器人执行器对功率器件的要求通常包括：适应48V左右的母线电压（电池电压通常在39V至54V之间浮动），功率等级从几十瓦到数千瓦不等（大部分驱动器在10W到1.5kW之间）。GaN FET的采用被认为是人形机器人执行器电子领域的一大变革性趋势。它不仅能显著提升功率密度和控制精度，还能使关节更小、更轻、更灵活，直接影响机器人的整体运动性能和拟人化程度。

这一转变也对执行器系统中的其他组件提出了协同优化的要求，例如需要MCU能够产生更高频率的PWM信号，以及专门为GaN特性设计的栅极驱动电路。同时，更高的功率密度也对封装和散热技术提出了新的挑战。

市场规模方面，根据Omdia预测，2023年全球功率半导体市场规模达到503亿美元，预计2024年市场规模为522亿美元，2027年市场规模将达到596亿美元，其中功率IC市场占54.8%，功率分立器件占30.1%，功率模块占15.1%。另据Yole的数据，2023年全球IGBT市场规模为71亿美元，预计到2026年达到84亿美元。在IGBT方面，中国IGBT产量持续提升，带动自给率不断增加。基于中国核心元器件国产化的要求，国产替代成为国内IGBT的发展趋势，未来在人形机器人的增量需求下，中国IGBT需求将有望得到进一步释放。对于GaN市场，根据Yole的数据，2023年全球GaN市场规模约2.6亿美元，预计2029年将提升至20.1亿美元，年复合增长率为40.6%，其中工业领域GaN市场规模增长率甚至可达50%以上。

在供应商方面，硅基MOSFET和IGBT的供应商非常多，这里重点介绍一下GaN器件的供应商情况。

TI：提供低压GaN FET和集成了驱动器的GaN智能功率模块（如DRV7308，LMG2100R026半桥GaN功率级，以及MOSFET门极驱动器（如DRV8350三相智能门极驱动器）。TI强调其GaN解决方案能将功率级尺寸减小50%以上，并支持数百kHz的PWM控制。

宜普电源转换公司（Efficient Power Conversion, EPC）：是增强型氮化镓（eGaN）功率器件的领导者，提供eGaN FET和ePower Stage IC（集成功率级）。其EPC23104 ePower Stage IC（100V，11mΩ RDS(on) typ, 15A）及其参考设计EPC91104（适用于14V-80V输入，最高14A连续电流）专为人形机器人等精密运动控制应用优化，强调紧凑设计和高效率。针对更大功率需求（如肘部和膝部电机），EPC提供EPC9176。

英飞凌（Infineon Technologies）：拥有广泛的MOSFET产品组合（如OptiMOS系列）和CoolSiC MOSFET。在GaN领域，英飞凌也推出了CoolGaN系列产品，包括分立GaN HEMT和集成了驱动的GaN EiceDRIVER IC，适用于高效率、高功率密度应用。

ST：提供各类MOSFET（如STPOWER MDmesh，STripFET系列）和GaN解决方案，包括分立GaN晶体管和MASTERGAN系列（集成半桥驱动器和GaN HEMT的系统级封装产品），以及STDRIVE GaN驱动器。

安世半导体（Nexperia）*：提供N沟道和P沟道功率MOSFET，以及GaN FET产品组合，覆盖从低压到中高压的应用。

安森美（onsemi）*：是功率半导体的重要供应商，提供MOSFET和GaN器件。

此外，还有ADI*、瑞萨*、纳微、英诺赛科等厂商有GaN FET产品供应。虽然硅基MOSFET仍在广泛使用，但GaN FET凭借其在效率、频率和尺寸方面的显著优势，正迅速成为人形机器人等高性能执行器应用的首选。EPC和TI在为机器人应用提供专用GaN解决方案方面表现突出。

2.2.3 隔离器芯片

在电机驱动等涉及高低压电路交互的系统中，隔离器芯片是保障系统安全和信号完整性的关键组件。它们在人形机器人的执行器电子系统中，主要用于隔离高压功率级与低压控制电路（如MCU），防止高压冲击损坏敏感元件，断开接地回路，并提高系统在强电磁干扰环境下的噪声抗扰度。

数字隔离器通过在信号路径中引入电流隔离栅（Galvanic Isolation Barrier）来实现信号的隔离传输。常见的隔离技术包括：

电容耦合隔离：利用高压电容器作为隔离栅传输交流信号。TI的数字隔离器多采用基于二氧化硅（SiO₂）的电容隔离技术。ST的STISO62x系列采用厚氧化层电流隔离技术。

磁耦合隔离（变压器耦合）：利用微型变压器通过磁场耦合传输信号。ADI*的iCoupler技术和Infineon的ISOFACE系列（无磁芯变压器技术）是此类技术的代表。

光耦合隔离：传统的光耦也是一种隔离方式，但数字隔离器在速度、功耗、集成度和寿命方面通常更具优势，因此在现代机器人设计中更受青睐。

选择隔离器芯片时，需要关注以下关键参数：

隔离电压：衡量隔离栅能够承受的最大电压，通常以kVrms或Vpeak表示。根据应用的安全等级，可能需要基本绝缘或增强绝缘（Reinforced Isolation）。

数据速率：隔离器支持的最大信号传输速率，单位为Mbps。需要匹配通信总线或信号接口的速率要求。

共模瞬态抗扰度（CMTI）：衡量隔离器抵抗快速共模电压变化（高dV/dt）而不发生数据错误的能力，单位为kV/μs。在电机驱动等高噪声环境中，尤其是在使用GaN等快速开关器件时，高CMTI至关重要。

传播延迟：信号通过隔离器所需的时间。低传播延迟对于高速通信和实时控制非常重要。

通道数和方向：隔离器可以提供单向或双向多个隔离通道，以适应不同的接口需求。

功耗：尤其对于电池供电的人形机器人，低功耗隔离器有助于延长续航。

封装和尺寸：需要适应机器人关节内部的紧凑空间。

功能安全认证：如符合IEC 60747-17（VDE 0884-17），UL 1577等元器件级隔离标准，以及支持系统级功能安全标准（如IEC 61508）的能力。

随着人形机器人中GaN等高速功率器件的广泛应用，以及对功能安全要求的日益提高，数字隔离器的发展趋势是提供更高的CMTI、更高的数据速率、更强的隔离等级（增强隔离成为安全关键应用标配）、更低的功耗，并集成更多功能安全特性。至于隔离技术的选择（电容式、磁耦式）会影响器件的传播延迟、功耗和对外部磁场的敏感性等特性，因此，人形机器人厂商在设计时需根据具体应用需求来权衡。

供应商方面，TI、ADI*、瑞萨*、英飞凌、ST、恩智浦*、Silicon Labs等海外厂商，以及国内的纳芯微*都有相关产品可供选择。

TI：提供基于其专有二氧化硅（SiO₂）隔离技术的多系列数字隔离器，如ISO77xx系列（例如ISO776x, ISO7741，支持高达5kVrms隔离，100Mbps速率，高CMTI），ISO67xx系列（通用型），ISO65xx系列（功能隔离）。其产品覆盖从基本隔离到增强隔离，并有汽车级产品可供选择。

ADI*：以其iCoupler磁隔离技术闻名，提供ADuM系列数字隔离器（如ADuM12xx/13xx/14xx系列用于通用隔离，ADuM3xxx/4xxx系列具有更高性能或集成电源）。以及MAX14xxx/MAX22xxx系列也包含数字隔离器，如MAX14483用于隔离SPI接口。

英飞凌：ISOFACE系列数字隔离器采用无磁芯变压器（CT）技术，提供高鲁棒性和精确时序性能，适用于隔离门极驱动信号、CAN、SPI、UART等通信接口。

ST：STISO62x系列（如STISO620，STISO621）采用厚氧化层电流隔离技术，提供高达6kV的电流隔离，适用于电机驱动、电池监控等应用。

恩智浦*：虽然其强项在于接口芯片，但也提供隔离型CAN收发器如TJA1052IT。

瑞萨电子*：提供适用于恶劣环境的耐辐射数字隔离器（如ISL71610M, ISL71710M），用于隔离串行通信。

纳芯微 (NOVOSENSE)*：NSI82xx系列数字隔离器，强调高CMTI（可达±250kV/μs）和高可靠性。

数字隔离器市场竞争激烈，以TI的SiO₂电容隔离和ADI、Infineon的变压器磁隔离为主要技术路线。选型标准通常包括隔离等级、数据速率、CMTI、通道配置、功耗和封装尺寸等。

2.2.4 编码器

在人形机器人当中，编码器主要用来精确控制机器人各个关节和运动部件。为了实现高精度的运动控制，编码器需要满足一些特定的技术要求和性能指标，比如高分辨率、低延迟和实时反馈、小型化和轻量化、耐高负载和高转速、高抗干扰性和耐用性、高可靠性、低功耗，以及可兼容性和支持特定的通信接口等。

经常使用的编码器类型有磁性编码器、光学编码器和电容式编码器。

磁性编码器：

适用于需要较高分辨率且对环境变化（如温度、湿度）有较强适应能力的应用。磁性编码器不易受灰尘和污染影响，耐用性较好，常用于人形机器人的关节部分。

光学编码器：

可提供极高的分辨率，但对环境要求较高，容易受到灰尘和振动的影响，适用于对精度要求极高的部分，如机器人的手指或面部表情控制。

电容式编码器：

具有较高的抗干扰性，适用于多种环境，可以在一定程度上避免机械磨损，在某些高精度控制中应用较多。

一般来说，每个旋转关节包含两个编码器，比如特斯拉的第二代Optimus采用了14个旋转关节，就需要28个编码器；每个线性关节和灵巧手指也需要一个编码器。目前比较主流的编码器供应商有：

海德汉（Heidenhain）：德国品牌，专注于光学编码器，广泛应用于精密控制领域，尤其是机器人技术。

雷尼绍（Renishaw）：英国品牌，提供高精度的光学和磁性编码器，适用于高端机器人系统。

堡盟（Baumer）：瑞士品牌，提供多种类型的编码器，适用于工业自动化和机器人系统。

欧姆龙（Omron）*：日本品牌，提供低成本的增量型编码器，适合教育和娱乐型机器人。

Maxon Motor：瑞士品牌，提供高精度电机和编码器，广泛应用于高精度机器人控制系统。

尼得科（Nidec）：日本品牌，提供多种类型的编码器，适用于需要高性价比的机器人系统。

多摩川（TAMAGAWA）：日本品牌，主要提供高精度的运动控制和位置测量解决方案。多摩川的产品广泛应用于工业自动化、机器人、数控机床、汽车制造、航空航天以及其他高精度需求的领域。

值得一提的是，**ADI***的磁编码器产品ADMT4000磁转数传感器，可以用于人形机器人的灵巧手和关节；支持多圈计数、掉电记忆功能，上电能够自动读取当前绝对位置；**ams OSRAM***的AS5047P磁编码器的抗干扰能力比较突出；迈来芯也可提供其专有的编码器产品。另据Yole的数据，2021年全球磁传感器主要供应商包括Allegro、英飞凌、AKM等；国内供应商包括**纳芯微***、宁波时代电气、比亚迪半导体等。

市场规模方面，根据华经产业研究院的数据，2022年全球编码器市场销售额为42亿美元，预计到2028年将达到67亿美元，2022至2028年复合增长率为8.1%。我国编码器市场中，多摩川、海德汉、西克和堡盟占据了50%以上的市场份额，行业集中度较高。

2.3 人形机器人传感器市场洞察

传感器是一种检测装置，能够将物理世界中的参数变化，按照一定的规律转换成电信号等其他形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它通常由敏感元件、转换元件及基本转换电路组成。敏感元件用来灵敏地感受被测量，并按照确定关系做出响应；转换元件将敏感元件感受的被测量转换成电路参数，比如电阻、电感、电容、电压或电流等；基本转换电路是将转换元件的输出转换成便于传输和处理信号的电路。

为了能够掌握人形机器人的运动信息，将这些信息解构出来，根据测量对象的不同，人形机器人所用传感器可以分为内部传感器和外部传感器。其中，内部传感器是指感知人形机器人自身运动状态的传感器，分为力控和位控两大方面，分别对应力传感器和加速度、内部零部件运行状态等传感器。外部传感器是指感知外部环境的传感器，包括视觉、触觉、听觉、嗅觉、味觉和距离等传感器。

在这些传感器当中，价值量比较高，国产化空间比较大的是力矩传感器和IMU等。

2.3.1 内部传感器

人形机器人内部传感器常用来监测机器人自身的状态、运动、环境参数等信息。通过这些传感器提供的数据，机器人可以进行决策、控制和适应不同的工作环境和任务要求。

力传感器主要用来测量作用在物体上的力的大小，力矩传感器则是用来测量物体所受到的扭矩或力矩的大小。一般力传感器用来测量直线方向的力，力矩传感器用来测量旋转方向的力。

两者的工作原理也略有不同：

力传感器：

其工作原理基于物体弹性变形和材料的电学或电子特性。通常使用应变片等敏感元件，当力施加到这些元件上时，会引起电阻值的变化，进而通过电桥电路转换成电压输出。

力矩传感器：

同样使用应变片来检测弹性变形，但主要关注的是扭矩引起的变形。应变片在受到扭矩作用时发生变形，通过电桥电路测量这种变形，并将之转化为与扭矩成正比的电压输出。

人形机器人中使用的力/力矩传感器需求主要来自本体、关节、手腕和灵巧手等。根据测量的方向维度不同，力/力矩传感器可以分为一至六维力/力矩传感器。

直线关节的一维力传感器：

该传感器主要用来测量沿着一条直线运动的力，比如测量人形机器人臂的垂直压力和拉力、测试弹簧的压缩力等。

旋转关节的力矩传感器：

这种传感器设计用于测量旋转运动中的力矩或扭矩。它们通常用于测量机械系统中轴的扭矩，例如发动机、电机或其他旋转部件的扭矩。这类传感器可以检测和记录在旋转过程中作用在物体上的扭矩大小，以及它们相对于旋转轴的方向。

六维力矩传感器：

六维传感器是一种多功能传感器，可以测量物体在三个空间维度上的位移（X、Y、Z轴）以及围绕这些轴的旋转（Roll、Pitch、Yaw）。它能够同时检测物体的三维位移和三个旋转方向的运动状态，因此称为“六维”。这种传感器通常用于测量物体的姿态、运动 and 方向。

一般来说，人形机器人会在手部和足部搭载六维力矩传感器，因为手部需要高度的灵活性和精确度，在多个方向上进行旋转、倾斜和移动，而足底是与地面接触的重要部位，需要在多个方向上进行平衡和稳定。六维力矩传感器可以检测足底的倾斜、姿态和位置。

在工艺难度方面，六维力矩传感器要比一维力传感器大很多。目前六维力矩传感器主要是海外品牌为主，供应商包括欧美厂商ATI、AMTI、奇石乐（Kistler），日本企业新东工业（SINTOKOGIO）、WACOH-TECH，以及机器人末端工具生产商雄克（SCHUNK）、OnRobot、Robotiq等。国内厂商主要有宇立仪器、坤维科技、海伯森等。

在价值量方面，根据e-motion supply 和爱采购网站数据，ATI 旗下机器人常用的 mini45、axia80 m8、nano43型号产品进口价格全都超过3万元人民币，大型传感器omega191进口价格在10.5万元。国产厂商海伯森产品标价为4.5万元，FUTEK实验用大型六维力传感器价格在10万-20万之间。

触觉传感器也是人形机器人中比较常用的一种传感器，按照原理可以分为压阻式、电容式、压电式、光学式等。大多排列成矩阵组成阵列触觉传感器，空间分辨率可达毫米级，接近人类皮肤，因此也被称为“电子皮肤”。

触觉传感器可以覆盖在人形机器人三维载体表面，感知与环境接触的力、温度、湿度、震动、材质、软硬等特性，是实现类人触觉的关键。主要应用于灵巧手，未来可能扩展到肩膀、手肘、前后背部等部位，以实现与人的接触和互动。

触觉传感器目前还处于发展早期，供应商主要以海外企业为主，包括Canatu、Sensel、Flexpoint、Novasentis、Tekscan、JDL等；当然国内也有不少企业开始了这方面的产品开发，比如汉威科技的子公司能斯达、奥迪威、帕西尼（多维触觉传感器PX-6AX）、力感科技、他山科技、墨现科技等。

值得一提的是村田*新推出的产品Picoleaf传感器，它是村田特有的压电技术实现的一款高灵敏度传感器，通过这有机压电薄膜上印刷电极，实现传感功能。它非常薄，可以弯曲使用，使用场景非常灵活，适合人形机器人的灵巧手应用。

除了力矩传感器，还有惯性传感器（IMU）也是人形机器人中常用的内部传感器之一。IMU是由一系列的MEMS传感器组合而成，通常会包括加速度计、陀螺仪、磁力计等，可用来测量物体的加速度、角速度和磁场强度等参数，从而输出速度、位置和姿态。

IMU对于人形机器人保持平衡、姿态控制，以及导航定位等至关重要。目前，IMU市场主要被海外品牌占据，比如博世、ST、TDK、霍尼韦尔、ADI*、村田*、NXP*、EPSON*等。前五大厂商占了超过80%的市场。国内的IMU供应商有导远、华依、芯动联科等。目前，中低端的IMU已经实现了国产替代。但是高端的产品还是依赖进口。根据对性能和精确程度的要求不同，IMU的价格也有所差别，一般工业级的价格在几百元到几千元不等。

此外，有的人形机器人还配备了接近传感器、距离传感器、位置传感器、速度传感器、平衡传感器、嗅觉传感器、甚至是味觉传感器等。

2.3.2 外部感知传感器

人形机器人外部感知传感器主要包括视觉传感器、语音传感器、测温传感器、激光雷达、超声波雷达等传感器。拿机器视觉来说，目前人形机器人采用的机器视觉方案有很多，包括2D视觉、3D视觉等。

2D视觉基于物体平面轮廓驱动，解决部分二维层面的读条识别、边缘检测等问题，无法获得曲度、空间坐标等三维参数，完全可以满足外观检测、识别等应用，但检验精度低。

3D视觉技术在2014年前后开始兴起，利用立体摄像、激光雷达等技术准确地完成物体三维信息的采集，对于光照条件、物体对比度等客观因素适应能力更强，可以实现2D视觉无法实现或者不好实现的功能，例如检测产品的高度、平面度、体积等和三维建模等。

3D视觉常用四种技术：激光三角测量、结构光、飞行时间（ToF）、多目视觉。基于采集方式的不同，视觉方案可以分为毫米波雷达、激光雷达和摄像头等。

人形机器人上，目前主流的方案是特斯拉的多目视觉方案，在图像采集方面搭载了8颗摄像头，实现了360度环绕的影像识别；在算法端则是移植了特斯拉车上的全自动驾驶系统算法，搭载的硬件是其自研的FSD芯片。得益于特斯拉在自动驾驶算法上的深厚积累，特斯拉的人形机器人视觉方案实现了快速落地。

但其他人形机器人厂商的视觉方案，一般是激光雷达和多目视觉相机，或者ToF相机的结合，比如：

- 波士顿动力机器人采用：激光雷达 + ToF相机；
- 智元机器人采用：激光雷达 + ToF相机；
- 小米的铁大采用：iToF + RGB深度视觉模组；
- 优必选机器人采用：1个多目视觉相机 + 2个RGB相机 + 4个超声波传感器。

目前，各家的视觉方案有所不同，具体采用的视觉模组的个数没有详细披露，技术路线也还在探索之中。

在供应商方面，目前视觉传感器的主要供应商是基恩士（KEYENCE），国内的奥普特和奥比中光也有相应的产品。

2.4 电源系统解析

人形机器人的电源系统是其持续稳定运行的能量中枢，负责从电池获取电能，并将其高效、稳定地转换为机器人内部各个电子子系统所需的多种电压。考虑到人形机器人是高度动态的移动平台，其电源系统设计面临着能量效率、功率密度、动态响应、多电压轨输出以及严苛的安全性等多重挑战。

人形机器人的电源系统通常以大容量锂离子电池为储能核心，典型的母线电压为48V。整个电源系统围绕电池展开，主要包括以下关键电子组件：

电源管理芯片 (PMIC):

负责从主电池电压高效转换生成机器人内部各种低压器件（如MCU、传感器、通信芯片等）所需的多个稳定电压轨。

模拟前端 (Analog Front-Ends, AFE):

在电池管理系统（BMS）中，AFE专用于精确测量电池包内每个单体电芯的电压、温度等关键参数，为BMS提供基础数据。

电池管理系统 (Battery Management System, BMS) 相关芯片:

包括BMS控制器（通常是MCU）、保护电路、电量计（Fuel Gauge）以及均衡电路等，共同负责电池包的全面监控、保护、均衡和状态估计（如荷电状态SoC、健康状态SoH）。

这些组件协同工作，确保为机器人提供持续、可靠且安全的动力来源。电源系统的设计不仅要满足各个子系统在不同工作状态下的功率需求，还要最大限度地提高能量利用效率以延长机器人续航时间，同时必须具备完善的保护机制以应对电池可能出现的过充、过放、过流、过温等异常情况。人形机器人内部执行器等部件的负载变化剧烈且频繁，这对电源系统的动态响应能力和稳定性提出了很高要求。因此，先进的PMIC、高精度的AFE以及智能化的BMS芯片是构建高性能人形机器人电源系统的基石。

PMIC市场由多家大型半导体公司主导，它们提供广泛的产品组合，其中许多适用于对集成度、效率和可靠性要求较高的机器人或工业应用。

TI: 拥有非常全面的PMIC产品线，包括针对特定处理器/FPGA的配套PMIC和通用型多通道PMIC。其TPS系列（如TPS65224-Q1, TPS6594-Q1, TPS6521815, TPS6503xx-Q1）和LP系列（如LP8764-Q1, LP8732/-Q1）是其代表性产品，提供多路降压转换器和LDO输出，支持可编程性和功能安全特性。

ADI*: 通过收购Linear Technology和Maxim Integrated，ADI拥有了强大的PMIC产品组合。例如，LTC系列中的一些数字电源系统管理（PSM）控制器（如LTC7880，虽然本身是控制器，但体现了多轨管理和数字控制的趋势）以及Maxim的多通道PMIC，适用于复杂的电源系统。

瑞萨电子*: 也提供面向消费电子、工业和汽车等领域的PMIC产品。例如，P9165是一款可编程多通道PMIC，集成了5路DC/DC和11路LDO，适用于多核SoC、ASIC、FPGA等应用。

英飞凌: 其OPTIREG PMIC系列（如TLF35585）主要面向汽车应用，提供高效、功能安全的集成多轨电源解决方案，这些特性对要求高可靠性的机器人系统也具有借鉴意义。

ST: STPMIC系列是其主要的PMIC产品线，如STPMIC1专为STM32MP1 MPU设计，而STPMIC25则针对新一代应用处理器（如STM32MP2系列），集成了多路Buck转换器和LDO，采用紧凑封装。

恩智浦*: 提供一系列PMIC产品，如PF系列（例如PF09，专为i.MX95应用处理器设计，具有5路Buck和4路LDO，支持ASIL D安全等级；PF81/PF82适用于汽车应用）和MC系列（如MC34VR500多输出DC/DC稳压器），广泛应用于汽车、工业和消费电子领域。

Qorvo*: 提供ACT88xxx系列PMIC，例如ACT88325是一款高度灵活、可配置的PMIC，具有3路Buck、2路LDO和负载旁路开关。

国内厂商中，**思瑞浦***、**圣邦微***、**艾为电子***等都有相关的电源管理芯片产品可供选择。

人形机器人应用的PMIC选型通常借鉴汽车和工业领域成熟的解决方案，因为它们在工作温度范围、可靠性、功能安全等方面有相似的要求。关键的差异化特性包括输出通道的数量和类型、各通道的电流输出能力、输入电压范围、转换效率、热性能、封装尺寸以及可编程性和控制接口（通常是I2C或SPI）。

在人形机器人的电池管理系统（BMS）中，模拟前端（AFE）是连接电池包与BMS微控制器的关键桥梁，负责对电池包内各个单体电芯（cell）的物理状态进行精确、实时的测量。AFE的测量精度和分辨率对BMS的整体性能至关重要。高精度的测量数据能够帮助BMS更准确地估算SoC和SoH，从而优化电池的能量利用率，

延长电池的使用寿命。同时，精确的监测也是及时发现电芯失衡、过充、过放等早期故障迹象，保障电池包安全运行的前提。例如，在2023年，TI推出了BQ79718-Q1，可以监测9到18节串联电芯，精度可以达到 $\pm 1\text{mV}$ ，电池电压和电池组电流测量时间精度可以达到64微秒；2024年，英飞凌推出的TLE9018DQK AFE方案也可以同时监测18节电芯，其最突出的特点是集成了压力和温度补偿功能，最高耐压可达120V；ADI*的LTC6813-1 AFE宣称其总测量误差小于2.2mV，并采用16位ADC。

AFE的主要供应商包括：

ADI*：凭借其收购的Linear Technology，ADI在BMS AFE领域拥有强大的技术实力和市场地位。其LTC68xx系列（如LTC6813-1, LTC6811, LTC6812）是业界知名的高精度多节电池监控器AFE，支持多达18个串联电芯的测量，具有极低的电压测量误差，并采用独特的isoSPI菊花链通信接口，增强了长距离通信的抗干扰能力和可靠性。MAXKGO公司的智能BMS系统就采用了ADI的LTC6813。此外，ADI的ADBMS系列多节电池监控器也集成了AFE功能。

TI：TI的BMS解决方案通常将AFE功能（如高精度ADC用于电芯电压和电流测量）集成在其电池监控和保护芯片中，如BQ769x2系列（例如BQ76942, BQ76952）和BQ79xxx系列。这些芯片不仅提供测量功能，还集成了保护、均衡控制和通信接口。

恩智浦*：在汽车BMS领域有重要布局，其BMS芯片通常也包含高精度的AFE模块。

瑞萨电子*：同样为汽车和工业应用提供BMS解决方案，其芯片产品中也集成了AFE功能。

新唐科技*：该公司的BMS AFE产品已经演进到了第四代，其最新的AFE产品为KA49702（高边）/KA49701（低边），可以支持17节串联电芯，内置了多种保护机制来保障BMS系统的稳定运行。

ADI*和TI是BMS AFE技术领域的主要供应商，ADI以其独立的高精度AFE IC闻名，而TI则倾向于将AFE功能更紧密地集成到功能更全面的BMS监控保护芯片中。选择AFE或集成AFE的BMS芯片时，关键考虑因素包括支持的电芯串数、电压和温度的测量精度、通信接口的类型和鲁棒性（尤其是在高噪声环境下）、是否集成均衡功能以及均衡电流能力等。

电池管理系统（BMS）是人形机器人电源系统的“守护神”和“智能管家”，负责确保高能量密度锂离子电池包在各种工况下的安全、高效和长寿命运行。BMS的核心由一系列相关芯片构成，这些芯片协同工作，实现对电池的全面管理。

一个完整的BMS通常由以下关键芯片或功能模块组成：

BMS微控制器（BMS MCU）：作为BMS的“大脑”，通常是一款专用的MCU，负责运行BMS的核心算法，处理来自AFE的测量数据，做出决策（如充放电控制、均衡控制、故障诊断与保护），并与机器人主控制器或其他系统进行通信。

模拟前端（AFE）：前面所述，负责精确测量电芯电压、温度等参数。

电量计/荷电状态估算（Fuel Gauge / SoC Estimation）：通过复杂的算法（如库仑积分法结合开路电压法、卡尔曼滤波等）估算电池的剩余电量（SoC）和健康状态（SoH），为机器人提供续航里程预测和电池老化评估。

保护电路：监测电池的电压、电流、温度等参数，一旦超出预设的安全阈值（如过压、欠压、过流、短路、过温、欠温），立即触发保护机制，如断开充放电回路，以防止电池损坏或发生热失控等危险。这些保护功能通常由BMS监控芯片配合外部功率开关（如MOSFET）实现。

均衡电路：由于制造差异和使用过程中的不一致性，电池包内各单体电芯的容量和内阻可能存在差异，导致充放电过程中电压不一致。均衡电路（被动均衡或主动均衡）通过对电压较高的电芯进行能量转移或消耗，使所有电芯的电压趋于一致，从而最大限度地利用电池包的总容量，延长电池寿命。

通信接口：BMS需要通过CAN总线、SPI、I2C等接口与车辆控制器（VCU）或机器人主控单元进行信息交互，上报电池状态，接收控制指令。

BMS芯片正朝着高度集成化、智能化和网络化的方向发展。一个显著的趋势是无线BMS（wBMS）的兴起。传统BMS中，连接各个电池模组和传感器的线束非常复杂，增加了系统的重量、成本、装配难度和潜在故障点。wBMS采用无线通信技术（如专用射频协议）替代这些线束，在每个电池模组或电芯附近部署小型无线传感和通信单元，将数据无线传输到BMS主控制器。这种架构能够显著减轻系统重量，简化电池包设计和装配，提高系统的模块化程度和可扩展性，并可能通过减少连接器相关的故障来提升可靠性。对于结构紧凑、对重量敏感且可能采用分布式电池布局的人形机器人而言，wBMS具有极大的吸引力。

另一个重要趋势是BMS算法的智能化。通过引入机器学习（ML）和人工智能（AI）算法，BMS能够更精确地估算SoC、SoH，甚至预测电池的剩余使用寿命（RUL）和潜在故障，实现预测性维护和更优化的充放电管理。此外，支持更高电芯串数（如20-32串）的单颗BMS IC也在不断涌现，以适应更大容量电池包的需求。同时，随着对数据安全的重视，BMS的网络安全也成为一个新的关注点。

BMS相关芯片（监控器、保护器、电量计）的供应商主要集中在汽车电子和工业控制领域，其产品和技术也适用于机器人。

ADI*：ADI在BMS领域同样拥有强大的产品组合。其ADBMSxxxx系列（如ADBMS6830B，ADBMS6833M，ADES1830）是高精度多节电池监控IC，支持菊花链通信，适用于高压电池系统。LTC68xx系列（如前述AFE部分）也常作为BMS的核心测量部件。Maxim的MAX178xx系列是其汽车级BMS产品。ADI也推出了wBMS解决方案。

恩智浦*：作为汽车半导体主要供应商之一，NXP提供MC3377x系列（如MC33771, MC33772）等BMS IC，以及FSxx系列功能安全系统基础芯片，广泛应用于电动汽车电池管理。

瑞萨电子*：提供ISL942xx系列电池前端控制器和RAJ240xxx系列BMS解决方案，面向汽车和工业储能应用。

英飞凌：其AURIX系列微控制器常被用作BMS主控MCU，同时提供TLE9012DQU、TLE9015DQU等多通道电池监控和均衡IC，满足汽车功能安全要求。

选择BMS芯片时，需要综合考虑电池的化学体系（如锂离子、磷酸铁锂）、电芯串并联数量、系统电压等级、所需的测量精度、保护功能等级、均衡方式和电流、通信接口需求、是否需要功能安全认证（如汽车应用的ASIL等级）以及是否采用wBMS架构等因素。TI和ADI在提供的资料中展现了其全面的BMS解决方案，这些方案在电动汽车和工业储能领域已有广泛应用，其技术和产品也完全可以移植到人形机器人平台。

部件类型	主要功能/特性	主要供应商	代表产品系列/型号	机器人应用说明
电源管理芯片 (PMIC)	多路电压轨输出 (Buck, LDO)、电源定序、效率优化、集成保护、可编程控制	TI、ADI Renesas Infineon、ST NXP、Qorvo	TI: TPS65xxx, LP87xx ADI: LTCxxxx, Maxim PMICs Renesas: P9165 Infineon: OPTIREG™ PMIC (如 TLF35585) ST: STPMIC25, STPMIC1 NXP: PF09, PF8xxx, MC34VR500 Qorvo: ACT88xxx	为机器人内部处理器、传感器、MCU等提供稳定、高效的多路供电
模拟前端 (AFE) (BMS)	高精度电芯电压/温度测量、信号调理、均衡驱动接口、与BMS MCU通信	ADI、TI	ADI: LTC68xx (如 LTC6813-1), ADBMSxxxx TI: (集成于BQ769x2, BQ79xxx系列BMS芯片中)	为BMS提供精确的原始电池数据，是电池状态估计和保护的基础
BMS相关芯片 (监控器、保护器、电量计)	电芯监控、充放电保护、电量估算 (SoC/SoH)、主动/被动均衡、通信接口、(可选)无线通信	TI、ADI NXP、Renesas ST、Infineon	TI: BQ769x2 (如 BQ76952), BQ797x8 (如 BQ79758-Q1) ADI: ADBMSxxxx, LTC68xx (作为核心测量), MAX178xx NXP: MC3377x Renesas: ISL942xx ST: L9963, STC31xx Infineon: TLE9012/TLE9015	实现对机器人电池包的全面管理和保护，确保安全和寿命

当然，在BMS管理芯片以及AFE芯片方面，这几年国产半导体厂商推出的产品也越来越多，而且应用领域也逐渐从消费类应用向工业类应用渗透，未来在人形机器人领域应该也会有一定应用。

2.5 通信模块

人形机器人内部集成了大量的传感器、执行器和控制器，它们之间需要高效、可靠的数据交换和协同工作。总线通信芯片是实现这种内部“神经网络”的关键，负责将控制指令从主控制器传递到各个执行器MCU，并将执行器的状态信息、传感器的反馈数据回传。根据应用需求的不同，人形机器人中可能采用多种总线技术。

CAN-FD (Controller Area Network with Flexible Data-Rate):

CAN总线因其鲁棒性和可靠性在汽车和工业领域得到广泛应用。CAN-FD作为其增强版本，在保留CAN总线主要特性的同时，大幅提升了数据段的传输速率（最高可达5Mbps甚至更高，而经典CAN通常为1Mbps），并支持更大的数据负载（每帧最多64字节）。这使其非常适合人形机器人中对带宽和实时性有一定要求的分布式控制网络，如连接多个关节控制器。TI等公司提供支持CAN-FD协议的物理层收发器（PHY）和嵌入式处理器。

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology):

是一种基于以太网的高性能、实时性工业总线。其核心优势在于极高的通信速度（处理1000个分布式I/O仅需30μs）、精确的同步能力（纳秒级抖动，通过分布式时钟DC实现）、灵活的拓扑结构（线型、树型、星型或混合，无需交换机）以及“动态处理”机制（数据在经过从站时被读取和写入，延迟极小）。这些特性使其成为要求严苛的多轴伺服控制应用的理想选择，非常适合人形机器人全身运动的同步协调控制。

通信总线的选择是人形机器人系统架构设计的关键之一，它直接影响到系统的实时性能、布线复杂度、成本和可扩展性。EtherCAT因其卓越的同步性能和高带宽，在高要求的同步多轴控制场景中备受青睐。CAN-FD则为实时性要求较高但无需EtherCAT极致性能的分布式控制提供了一个平衡的选项。人形机器人的整体控制架构（集中式、分布式或混合式）也会影响总线的选择和布局。随着机器人对实时性和带宽需求的不断提升，EtherCAT等高速确定性总线的应用日益广泛，这也推动了MCU集成EtherCAT从站控制器（如先楫半导体HPM6E8Y，瑞萨电子* RZ/T系列，TI AMIC110）或FPGA/ASIC实现该协议的趋势，以降低BOM成本和设计复杂度。

在供应商及其产品方面：

CAN-FD 收发器 (Transceivers):

TI: 提供CAN和CAN-FD物理层收发器及集成CAN控制器的MCU/处理器。例如，ISO1042-Q1是一款隔离型CAN收发器，支持CAN-FD。

恩智浦*: 拥有广泛的CAN/CAN-FD收发器产品组合，包括标准型、带部分网络功能型、隔离型（如TJA1052iT53）和支持信号改善能力（SIC）的型号，满足汽车和工业需求。

Microchip*: ATA656x系列（如ATA6560, ATA6561, ATA6562）是其CAN/CAN-FD收发器产品线的代表，支持高达8Mbps的数据速率，并符合ISO 11898-1:2016等标准。

英飞凌：提供CAN和CAN-FD收发器，如TLE935x系列。

ST：作为主要的半导体供应商，也提供CAN收发器产品。

瑞萨电子*：同样提供CAN收发器解决方案。

EtherCAT 从站控制器 (Slave Controllers, ESC):

倍福(Beckhoff)：作为EtherCAT技术的发明者，提供ET1100和ET1200等专用ASIC作为EtherCAT从站控制器，具有8KB DPRAM，支持分布式时钟，可配置多达4个MII端口。

先楫半导体：其HPM6E8Y、HPM6E00、HPM5E00系列MCU集成了EtherCAT从站控制器。

Microchip*：提供LAN9252（双PHY EtherCAT从站控制器）和LAN9255（集成了Arm Cortex-M4F MCU的EtherCAT从站控制器）。其FPGA产品线通过与Trinamic合作，在SmartFusion2 SoC FPGA上提供EtherCAT解决方案。

瑞萨电子*：拥有多款支持EtherCAT的处理器和MCU，如EC-1（专用ESC）、R-IN32M3-EC（工业网络引擎）、RX72M MCU、RZ/N1、RZ/T1、RZ/N2L、RZ/T2L、RZ/T2M系列SoC。

TI：其Sitara系列处理器（如AM437x, AM5728, AMIC110 SoC）和TMS320F2838x 32位实时MCU系列支持EtherCAT从站功能。

英飞凌：XMC4300和XMC4800系列微控制器集成了EtherCAT从站控制器。

亚信电子 (ASIX Electronics)：提供AX58100, AX58200, AX58400系列EtherCAT从站控制器。

Altera：通过在其Cyclone和MAX 10系列FPGA上实现EtherCAT IP核来提供从站解决方案。

ADI*：提供fido5200实时以太网多协议交换芯片，支持EtherCAT从站。其收购的Trinamic公司也推出了TMC8460 EtherCAT从站控制器IC，集成了PWM和Step/Dir等外设。

莱迪思半导体 (Lattice Semiconductor)*：提供基于FPGA的安全连接运动控制平台，可支持EtherCAT。

其中，倍福是EtherCAT技术的领导者，在专用ASIC领域仍占重要地位，但众多半导体厂商已通过专用IC、MCU/SoC集成或FPGA IP核等方式提供EtherCAT解决方案。CAN-FD收发器市场则由TI、**NXP***、**ADI***、**瑞萨电子***等传统接口IC供应商主导。

另外**ADI***的GMSL也是一种高性价比、简单且可扩展的SerDes技术。GMSL兼具稳健的PHY和超低BER，支持高分辨率和低延迟的摄像头及显示屏连接要求，以及通过视频分路、菊花链连接和传感器数据聚合实现灵活的拓扑，是一种高度可扩展的灵活解决方案。GMSL同时也是一种经济实惠的解决方案，视频、音频、控制、数据和电源可以在单个通道上传输，简化了连接，支持3G/6G/12G带宽以及长达15米的距离。

当然，通信模块中，还包括WiFi、蓝牙、UWB以及蜂窝网络等多种无线通信模块。此类供应商众多，就不一一介绍了。

2.6 其他芯片需求

2.6.1 存储器

随着人形机器人采用的传感器数量越来越多，AI性能越来越高，对存储芯片的需求也随之增长。一般来说，主控系统会采用16GB（DDR或LPDDR）+256GB（SSD）的存储配置，未来应该会跟随着系统升级，存储容量将会提升。

除了DARM和NAND Flash产品，其实人形机器人还会用到NOR Flash产品以用来存储人形机器人的快速启动代码及数据记录。

据了解，目前人形机器人采用的DRAM产品主要是DDR4/LPDDR4X以前的产品，也就是说，除了SSD用到的NAND Flash存储器产品，其他类型的存储器产品主要是利基型存储器芯片产品。

供应商方面，三星、美光*、SK海力士都有相关的DRAM产品，国内的兆易创新*可以提供部分DRAM的产品；江波龙*的FLXC2002G-W6/LPDDR4X已经用在四足机器人上，当然也可以用在人形机器人中；佰维存储的LPDDR4X已经用在宇树科技的Go2智能机器狗上；还有北京君正旗下的ISSI*也有LPDDR2、DDR3、LPDDR4/LPDDR4X等DRAM产品。

NAND Flash产品方面除了三星、美光*和SK海力士提供的产品，江波龙*的固态硬盘产品FSB0C001T-B7C7200已经用在了人形机器人当中，eMMC存储器产品FEMDNN032G-C9A55用在了教育机器人上；佰维存储的eMMC存储器也有用在宇树科技的产品当中。此外，东芯股份的NAND Flash产品也可以用于人形机器人当中。

NOR Flash产品方面，兆易创新*可提供高速的SPI NOR Flash GD25LX系列，数据吞吐量达400MB/s，能够满足快速的代码读取和程序启动需求。

随着AI大模型在人形机器人上的部署，存储芯片也会变得更加重要，且容量会与智能手机和汽车一样，变得越来越大。

2.6.2 语音模块

人形机器人的语音模块是其“感知器官”的重要组成部分，主要作用在于实现与人类的语音交互和对周围声音信息的感知。语音模块主要通过麦克风收集声音信息，使机器人能够听到周围的声音，进而通过语音识别技术理解人类的语言指令，从而实现与人类无障碍地互动和富有逻辑的对话交流。

语音识别也是人形机器人“大脑”感知模块的重要功能，与环境感知等共同构成了其具身智能的基础。工信部在《人形机器人创新发展指导意见》中也明确提出要突破宽频响、高灵敏度的仿生听觉传感器等关键技术，以实现人形机器人的智能化和类人化。

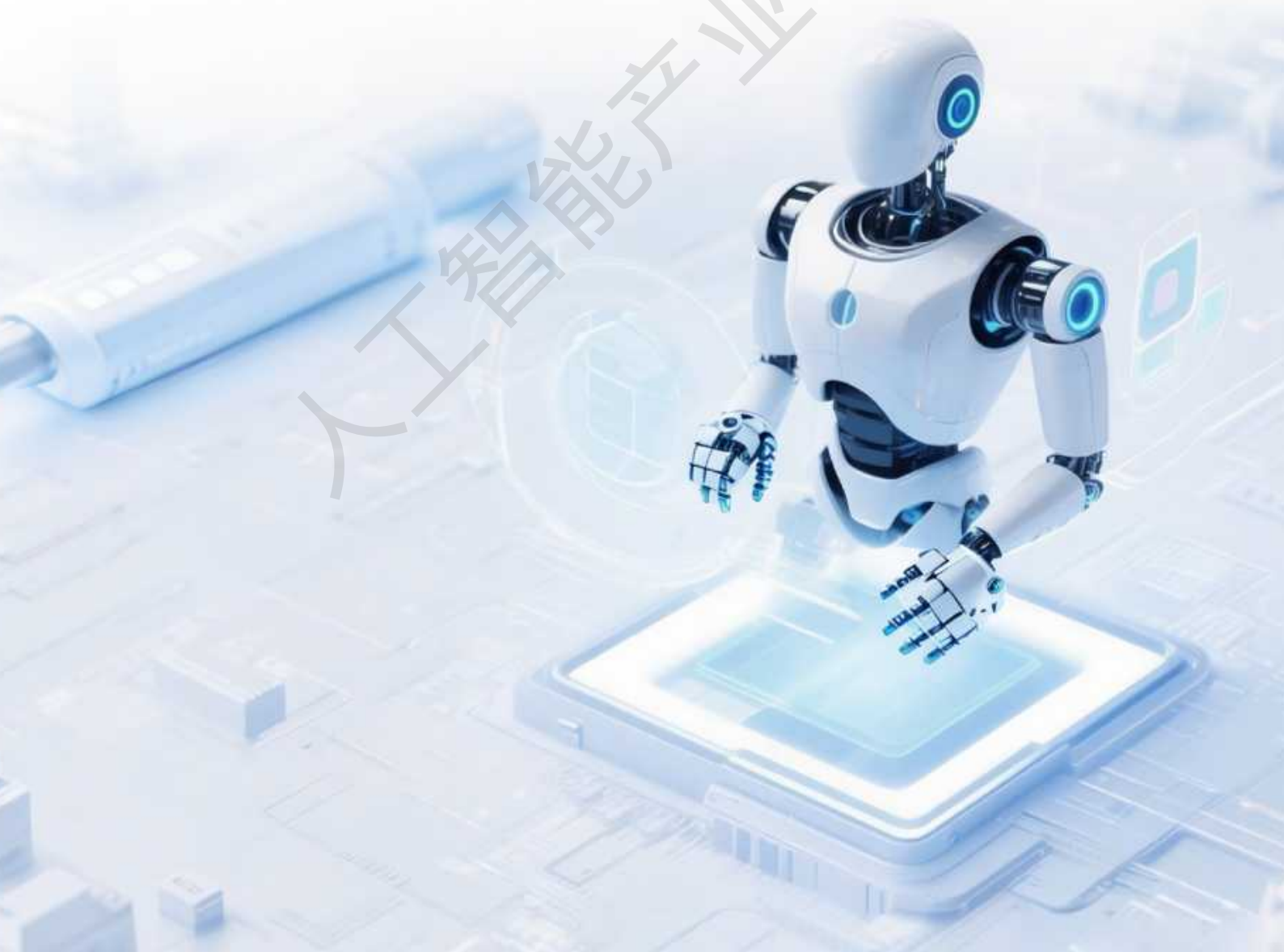
一般来说，人形机器人的语音模块主要包括声音接收器（麦克风）、信号处理器和音频处理软件等部分。其中，音频处理软件包括大语言模型，目前大语言模型的供应商包括OpenAI（ChatGPT）、Google（Robotics Transformer 2/RT-2，支持视觉-语言-动作VLA模型）、微软、百度、华为、腾讯、小米、阿里巴巴、科大讯飞等。这些大模型的发展使得人形机器人能够进行多模态交互，理解语言和视觉信息，处理触觉、声音等多种感官数据。

供应商方面，麦克风供应商主要有英飞凌、ST、楼氏电子、歌尔微电子、瑞声科技、敏芯微等；音频处理器芯片供应商包括恩智浦*、ADI*、X MOS、高通*、瑞芯微、全志、聆思科技等，以及一些AI芯片提供商，比如NVIDIA*等。

据悉天工人形机器人配备了RK3588 AIUI多模态开发套件，具备强大的算力和全链路交互能力，适用于公共场景下的复杂高噪人机交互。聆思科技的语音模块集成了科大讯飞的神经网络算法，内置了科大讯飞的语音合成XTTS算法，可支持优质的女声和男声发音，适合于人形机器人应用。

第三章

关键技术趋势



人形机器人对电子部件提出了小型化、轻量化、高功率密度、高可靠性、高集成度和智能化等一系列严苛的要求。这些需求正驱动着相关芯片技术的持续创新。

（一）主处理器：大模型推动高算力芯片需求

大模型在推动人形机器人技术的革新，而运行训练或推理大模型需要更强算力支持。因此，未来人形机器人的主控芯片对先进制程和封装技术的需求将会激增。例如，NVIDIA即将推出的Thor芯片，单颗算力可达2000TOPS，推动主控芯片向更高性能和智能化方向演进。

（二）MCU：向更高性能和多功能集成方向演进

人形机器人所需要的MCU正朝着更高主频、更多处理器核心、更大内存，以及更丰富的外设（如高分辨率PWM、高速ADC、协处理器）方向发展，以应对日益复杂的电机控制算法（比如FOC、MPC）和实时多任务处理需求。同时，为了增强连接性，MCU开始集成更高级的通信接口，比如CAN-FD和EtherCAT从站控制器等。此外，功能安全和边缘AI能力也是MCU在人形机器人应用领域必须考虑增加的功能之一。

（三）功率器件革新：GaN成为未来趋势

功率器件方面，GaN因其高效率和功率密度特性，成为人形机器人执行器的重要选择。GaN产品性能的提升、集成化，以及先进封装与散热是未来产品的研发方向。英飞凌预测，机器人行业将在2025年及以后广泛使用GaN，因为GaN能够提供实现紧凑、高性能设计所需要的效率，比如，将逆变器集成在电机机箱内，既可以避免使用逆变器散热片，同时又能减少每个关节/轴的线缆，并简化EMC设计。

也就是说，人形机器人在硬件方面，对电子部件的极致追求，正驱动着相关芯片向更高性能、更高集成度、更高能效、更高可靠性和更强智能化（包括功能安全和AI赋能）的方向全面进化，同时必须兼顾小型化和成本效益。这些技术趋势的背后，是人形机器人从实验室走向商业化应用，满足实际场景需求的必然要求。

（四）软件核心技术：大模型训练模式之争

人形机器人软件发展的关键在于大模型训练。目前主要有两种方式训练人形机器人所需的大模型，一种是通过VLA大模型，另一种是端到端大模型。

VLA大模型指的是视觉-语言-动作大模型，它能够让机器人通过理解环境和语言指令，执行模块输出为动作。一般会分为三个步骤：首先接收并理解语音和图像输入；其次根据接收的信息做推理决策；最后根据决策生成动作指令，并控制机器人运动。

如果三个步骤分别是调用三个不同的模型完成的，就是分层模型，而如果是在一个模型中完成的，就是端到端大模型。

端到端大模型的优点在于反应速度快，可以规模化部署，而且能够实现智能涌现；缺点则是难度很高，需要大量的训练数据，短期难以落地。

可以看到，目前国内初创人形机器人企业大多采用的是分层模型，仅有特斯拉、星动纪元等少数企业采用了端到端大模型。

（五）数据获取挑战：训练数据的采集瓶颈

人形机器人大模型之所以没有像通用大模型那样爆发，是因为能够用于机器人大模型训练的数据匮乏。比如训练人形机器人的一个抓取动作模型可能需要百万级带物理标注的轨迹数据，而这些带标注的数据在现实中难以大规模采集。

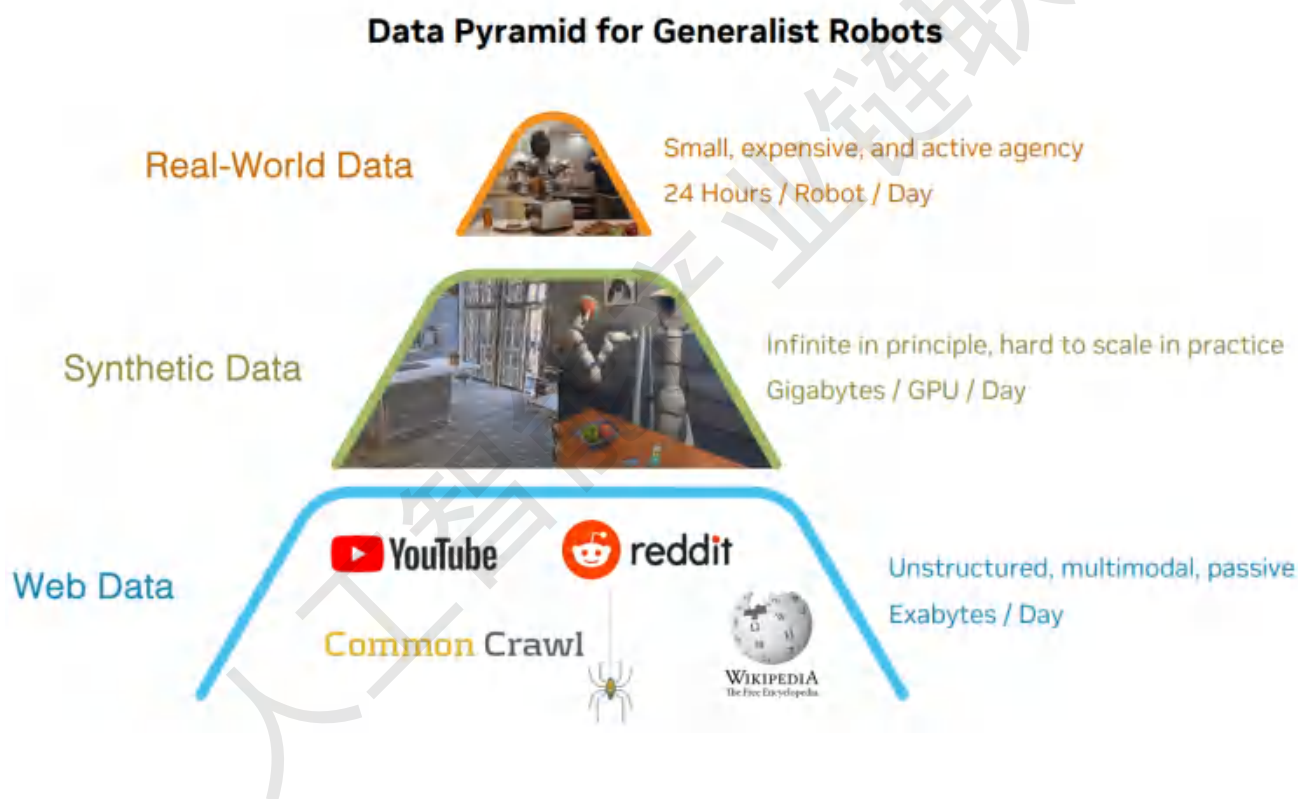


图7：通用机器人数据金字塔（来源：NVIDIA）

目前人形机器人主要有三种数据获取模式：分别是真实数据遥操采集；虚拟生成仿真数据；真人数据映射。

真实数据遥操采集：机器人的遥操作是指操作员通过遥控器、手柄等手动设备进行远程控制，对机器人进行操作。目前实现机器人遥操作的技术路径多样，包括利用VR、外骨骼以及动作捕捉设备等。通过遥操来采集数据成本极高，特别是需要动作捕捉设备来采集的数据，因为一套动作捕捉设备的价格在几十万区间。而且单个工业机器人每天能够生成的有效数据仅有数小时，采集后还需要人工标注物理参数，成本非常高。目前，智元机器人等人形机器人企业已经开始了机器人遥操数据的采集；宇树科技也来利用遥操采集的数据进行强化学习。

虚拟生成仿真数据：近年来兴起的仿真技术虽然可以生成大量数据，但由于传统的物理引擎（比如MuJoCo）在复杂场景下的精度不足，存在难以解决的“虚拟到现实”偏差（Sim2Real Gap）。也就是说，用虚拟仿真数据训练机器人的效果不好，若是简单的抓取、搬运场景，仿真数据相对可行，但涉及到柔性场景，比如叠衣服和被子等柔性物体，就容易出现问題。因为涉及到柔性物体形变仿真，在物理层面本身很难建模。据公开信息现实，大模型在虚拟环境中训练后，迁移到真实场景时，性能衰减超过40%。早期研究显示，仅依赖仿真数据训练的机器人在真实场景中的任务成功率低于30%，必须依赖大量真机调参，形成“数据闭环”的周期长达数月。这种偏差使得仿真难以替代真实测试，阻碍了机器人开发的效率提升。

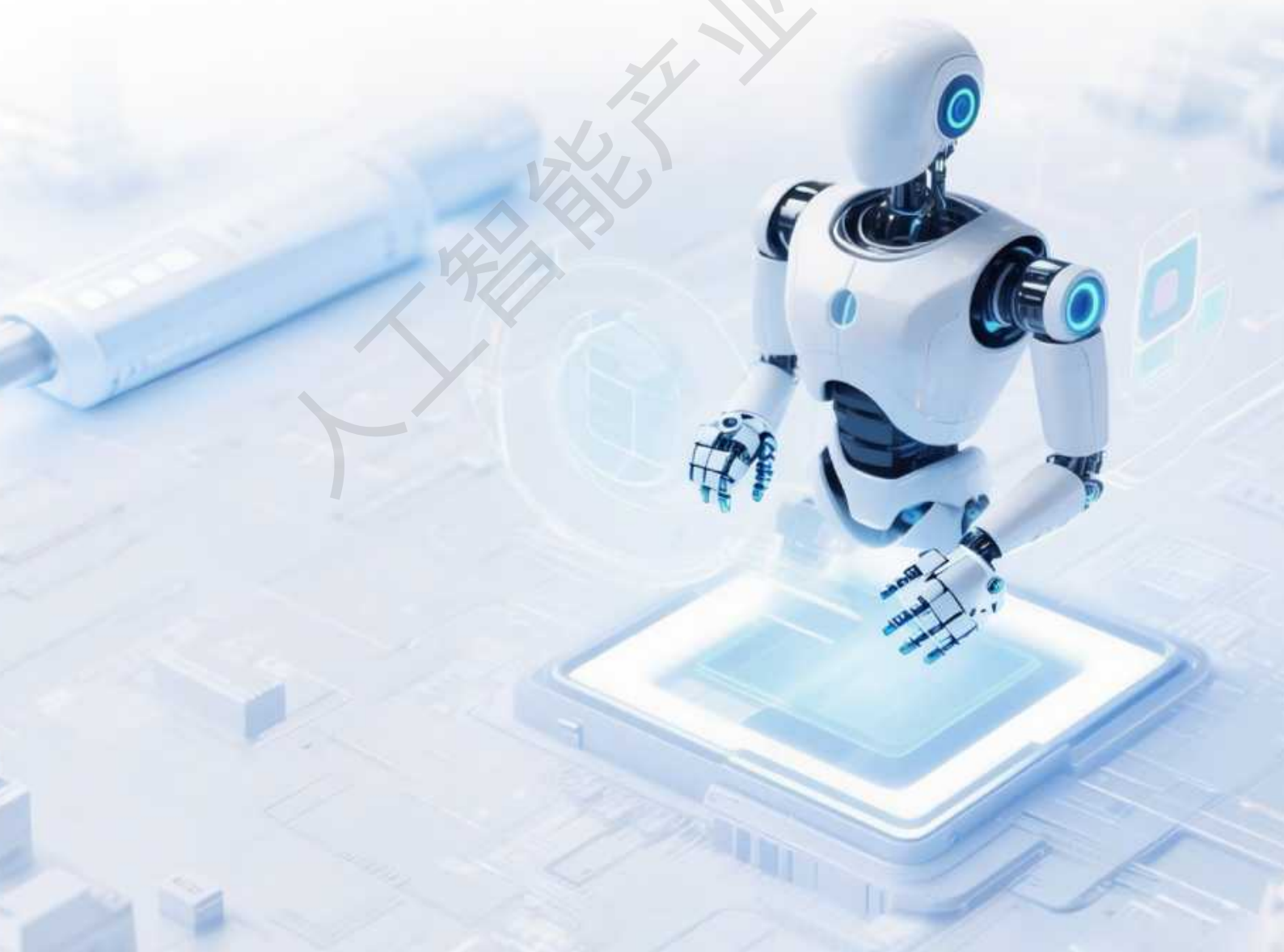
真人数据映射：目前UMI和DexCap（斯坦福机器人团队）等机构正在探索真人数据映射，就是通过采集真实人的数据，用某种映射关系，转化为机器人数据。目前，该数据获取方式还处于比较早期。

对于数据问题，目前还没有非常有效的解决方案，但都在想办法应对，比如NVIDIA不断推出新的工具来填补数据鸿沟，并开源数据库；智元机器人通过其Genie Sim仿真框架构建从轨迹生成、模型训练、基准测试到部署验证的完整评估闭环，并通过仿真工具链帮助用户快速验证算法性能并优化模型；银河通用通过其Grasp VLA工具，生成仿真数据用于机器人训练；甚至还出现了一些专门采集机器人数据的企业等等。

不过目前更多的是各人形机器人企业选择在自己的方案上努力收集数据，先在单一场景下实现一定程度的泛化，从而让更多的人形机器人投入实际运用。相信随着实际场景中部署的人形机器人越来越多，硬件方案逐步收敛，人形机器人的基础模型呈现出一定的智能涌现，就有可能实现真正的端到端大模型。

第四章

未来展望与建议



人形机器人市场正处于高速增长的前夜，各大研究机构对其未来市场规模均给出了极为乐观的预测。MarketsandMarkets预测全球人形机器人市场将从2025年的29.2亿美元增长到2030年的152.6亿美元，年复合增长率高达39.2%。高盛更是预测，在理想情况下（技术突破、成本下降与应用普及），到2035年，人形机器人市场规模有望达到1,540亿美元。作为人形机器人的核心组成部分，执行器及其电子系统、电源系统及其电子部件的市场需求也将随之水涨船高。

驱动这一市场高速增长的主要因素包括：

- **人工智能技术的飞速发展：**特别是大语言模型（LLM）、计算机视觉、强化学习等AI技术的进步，使得人形机器人具备了更强的环境感知、自主决策、自然语言交互和学习适应能力，拓展了其应用场景。
- **劳动力短缺与成本上升：**在全球范围内，许多行业面临劳动力短缺和人力成本持续上升的压力，这为能够执行重复性、危险性或高强度工作的人形机器人提供了替代人力的经济驱动力。
- **新兴应用的不断涌现：**人形机器人正从传统的工业应用场景（如制造业的某些环节）向更广泛的领域渗透。
- **物流仓储：**执行货品搬运、分拣、盘点等任务。
- **医疗健康与个人护理：**辅助医护人员、陪伴老人、为残障人士提供生活协助。
- **零售与酒店服务：**担任导购、迎宾、信息咨询、送餐等角色。
- **教育与娱乐：**作为教学辅助工具或娱乐互动平台。
- **安防巡逻与应急救援：**在危险或不适宜人类工作的环境中执行任务。
- **制造成本的逐步下降：**随着技术的成熟和生产规模的扩大，人形机器人的核心零部件（包括电子元器件）成本有望持续下降，使其在更多应用场景中具备经济可行性。
- **政府政策的推动：**多国政府将机器人产业（包括人形机器人）列为战略发展重点，并出台相关政策予以支持。比如，6月9日，我国工信部、民政部发布开展智能养老服务机器人结对攻关与场景应用十点工作的通知，其中指出，分阶段实施一批智能养老服务机器人攻关和应用试点项目，形成一批能够满足多层次、多样化养老服务需求的机器人产品。在家庭、社区和养老机构等场景中试点应用，在应用验证过程中完成产品迭代升级，应用验证周期不少于6个月。居家养老服务机器人产品需完成不少于200户家庭应用验证，部署不少于200台套；社区和机构类养老服务机器人产品需完成不少于20个社区或20家养老机构应用验证，部署不少于20台套。这将推动人形机器人在智能养老应用场景的快速落地。

这些新兴应用的拓展，对人形机器人的电子系统提出了多样化和专业化的需求。例如，在医疗护理领域，机器人需要具备极高的安全性、可靠性和精准的感知交互能力；在物流仓储领域，则更强调机器人的负载能力、续航时间和导航避障的鲁棒性。这些都将直接转化为对执行器控制精度、功率器件效率、传感器性能、电源管理智能化水平以及通信系统带宽和可靠性的具体要求，从而持续驱动相关电子元器件的技术创新和市场增长。预计未来几年，随着人形机器人在各个领域的应用逐步落地，其电子产业链将迎来爆发式的增长机遇。

当然，人形机器人是基于对人类的学习与模仿，其难点主要在于大脑、小脑和本体上，其中大脑方面的难点最大。有业界人士表示，目前人形机器人在硬件方面相对好解决，真正难的还是高智能的通用型的机器人大模型。因此，大模型是推动人形机器人迈向通用人工智能的关键因素，其出现能够让机器人“大脑”显著进化，大大提升机器人的通用性和泛化性。大模型为人形机器人发展提供了强大助力，随着国内外更多企业纷纷发力，今年有望期待更多大模型的发布，同时也会加速人形机器人的产业化进程。

因此，基于以上分析，提出以下建议：

对于技术研发者和芯片供应商，应持续关注人形机器人对小型化、高功率密度、高效率、高实时性、高可靠性和功能安全的需求，加大在GaN功率器件、高集成度电机控制MCU（尤其集成先进通信和AI能力）、高精度BMS芯片（特别是wBMS和智能算法）以及与之配套的高性能隔离器和PMIC等方向的研发投入。

对于机器人集成商，在选择电子部件时，需综合评估性能、功耗、尺寸、成本、可靠性、供应链安全以及供应商的技术支持和生态系统，应积极拥抱新兴技术（如GaN、EtherCAT、wBMS），并关注零部件的功能安全等级，以满足不同应用场景的安全要求。

对于产业链投资者，人形机器人电子产业链具有广阔的增长前景。可关注在核心芯片领域，特别是**AI芯片、高性能MCU、GaN功率器件、精密传感器接口芯片、BMS芯片**等具备技术突破能力或独特市场定位的企业。同时，支持国产供应链发展的相关标的也具备长期投资价值。

对于行业标准制定者与政策制定者，应加速完善人形机器人相关的技术标准、安全规范和测试认证体系，特别是针对核心电子部件的性能、接口和安全性要求。鼓励产业链上下游协同创新，支持关键核心技术的攻关和国产化进程，营造良好的产业发展环境。

人形机器人的时代正在加速到来，其电子产业链的成熟与发展是这一进程的关键驱动力。只有通过持续的技术创新、产业链的协同合作以及对市场需求的精准把握，最终实现人形机器人在各个领域的广泛应用。

AI人工智能产业链联盟

#每日为你摘取最重要的商业新闻#

更新 · 更快 · 更精彩



Zero

AI音乐创作人

水墨动漫联盟创始人

百脑共创联合创始人

人工智能产业链联盟创始人

中关村人才协会秘书长助理

河北北大企业家分会秘书长

墨攻星辰智能科技有限公司CEO

河北清华发展研究院智能机器人中心线上负责人

中关村人才协会数字体育与电子竞技专委会秘书长助理



主要业务:AI商业化答疑及课程应用场景探索, 各类AI产品学习手册, 答疑及课程



欢迎扫码交流

提供: 学习手册/工具/资源链接/商业化案例/行业报告/行业最新资讯及动态



人工智能产业链联盟创始人

邀请你加入星球, 一起学习

人工智能产业链联盟报告库



星主: 人工智能产业链联盟创始人

每天仅需0.5元, 即可拥有以下福利!

每周更新各类机构的最新研究成果。立志将人工智能产业链联盟打造成市面上最全的AI研究资料库, 覆盖券商、产业公司、研究院所等...

知识星球

微信扫码加入星球

