



运动控制行业研究

买入（首次评级）

行业专题研究报告

证券研究报告

机械组

分析师：满在朋（执业 S1130522030002） 分析师：李嘉伦（执业 S1130522060003）

manzaipeng@gjzq.com.cn

lijialun@gjzq.com.cn

人形机器人“小脑”有望成为主赛道

投资逻辑

人形机器人“小脑”有望成为主赛道：

什么是人形机器人“小脑”：人形机器人的“小脑”主要为了实现轨迹规划和运动控制（肢体驱动、姿态平衡等），主要由控制器+伺服驱动器+电机+传感器构成。控制原理与工业机器人、工业母机等高端装备类似，但需要处理多维度的输入信号和更高自由度的运动控制，同时控制策略更难，需要基于强化学习的控制技术、基于动力学的模型预测控制技术等技术支撑和融合创新，我们认为在人形机器人产业化成熟的历程中会涌现较多投资机会，有望成为重要的主赛道。

人形机器人“大脑”快速迭代，“小脑”重要性日渐提升：Figure 的 VLA 模型是人形机器人“大脑”的一个重大技术突破，通过部署两个模型解决了 VLM 模型基础架构通用性强但响应速度较慢的问题，“大脑”的成熟有迹可循，且在新技术、新架构的推动下正在快速迭代。而“小脑”由于主要是负责运动控制的落地，由于其技术路线上的高壁垒和复杂性，很难通过弯道超车实现突破，或成为人形机器人产业化的“卡脖子”环节，后续的重要性有望日渐提升。

“小脑”的潜在商业模式有哪些：1) 第三方模式：通过提供标准化运动控制解决方案，实现规模效应，支撑研发投入。类似数控系统领域的龙头企业发那科，在数控机床行业成功实现了高壁垒和通用性强的商业模式，下游主机厂很难通过自研实现替代；2) 一体化模式：企业从创立之初就专注于运控技术开发，后续逐步发展为软硬一体的布局，凭借其在运控技术上的稀缺性积累形成竞争优势；3) 深度合作二次开发：制造业龙头企业可能采取这种模式，与“小脑”第三方供应商进行合作，在供应商的运动控制系统平台上进行深度二次开发，快速实现产业化落地，并掌握一定运控技术的核心壁垒，从而加速切入人形机器人领域，实现后发制人。

谁能在本轮“小脑”成长机会中脱颖而出：

具备高端装备高速、高精多轴联动控制能力：这类企业原先的下游应用集中在半导体设备、工业母机等高端装备领域，市场参与者以海外企业（如 ACS、科尔摩根、发那科、西门子等）为主。这类企业经过长时间的技术积累，在插补算法、误差补偿、高速高精伺服控制、复杂系统轨迹规划和多轴联动等领域具备先发优势，能够快速进入新的下游行业，尤其在中高端人形机器人应用领域具有较好的发展前景。

具备工业机器人运动控制能力：这类企业通常有基于通用多轴运动控制平台进行自主研发的能力，提供自研的运动控制系统。目前，国内头部工业机器人企业已开始配套提供自己的运动控制器，并在此基础上开发新品（如智能双臂机器人、智能焊接机器人等）。这些产品在控制架构上更接近人工智能级控制，应用了视觉和大模型等新技术，使工业机器人具备更强的环境感知、自主决策和动态优化能力。下一步，具备工业机器人运动控制能力的企业也有望向人形机器人领域延伸，提供“机器人本体+运动控制”的完整解决方案。

投资建议

考虑人形机器人成长空间较大，“小脑”有望成为重要的主赛道，具有相关技术储备的企业有较好成长前景，建议关注华中数控、科德数控。

风险提示

国产替代进展不及预期、人形机器人产业化进展不及预期。



内容目录

1. 人形机器人“小脑”有望成为主赛道.....	5
1.1 从工业机器人起步，详解什么是人形机器人的“小脑”.....	5
1.2 人形机器人“大脑”快速迭代，“小脑”重要性日渐提升.....	13
1.3 以史为鉴，“小脑”商业模式思考.....	15
1.4 AI 技术对“小脑”也有显著加持，但主要是解决数学计算环节，不改变运行逻辑.....	18
2. 谁能在本轮“小脑”成长机会中脱颖而出？.....	21
2.1 具备高端装备高速、高精多轴联动控制能力：固高科技、华中数控、科德数控.....	21
2.2 具备工业机器人运动控制能力：拓斯达、埃夫特、埃斯顿.....	26
3. 投资建议.....	31
4. 风险提示.....	31

图表目录

图表 1： 机器人基本组成.....	5
图表 3： 工业机器人常见控制方式.....	6
图表 4： 仿人机器人运动控制器芯片架构.....	6
图表 5： 工业机器人控制软件的基本功能架构.....	7
图表 6： 通用运动控制器主要分类.....	7
图表 7： 工业机器人的单关节控制原理.....	8
图表 8： 将其他关节的影响作为前馈项引入控制器构成多关节控制系统.....	8
图表 9： 工业机器人运动控制系统原理.....	8
图表 10： 人形机器人“小脑”输入端更复杂.....	9
图表 11： 人形机器人是一个人工智能级运动控制系统落地场景.....	9
图表 12： 控制轴数越多运动控制系统越复杂.....	10
图表 13： 工业机器人一般控制轴数最大到 7 轴.....	10
图表 14： 人形机器人仅下肢就有 14 个自由度，控制难度大幅增加.....	11
图表 15： 四自由度双臂人形机器人构成.....	11
图表 16： 工业机器人控制时涉及正向运动学计算、逆向运动学求解.....	12
图表 17： 人形机器人的运动学模型比工业机器人复杂的多.....	12
图表 18： 倒立摆模型为最基础的机器人平衡控制运动学模型.....	13
图表 19： Figure VLAs 模型是人形机器人“大脑”的一个重大升级.....	13
图表 20： Helix 通过部署两个模型解决了 VLMS 响应速度慢的问题.....	14
图表 21： Figure 提出了全新的人形机器人规模化曲线.....	14
图表 22： 随着预训练大模型快速发展，对“小脑”的要求也会越来越高.....	15



图表 23: 人形机器人的技术进步是一个基础模型、运动控制、传感等技术互相加强的过程.....	15
图表 24: 西门子、发那科、三菱均以标准产品为主, 配套各类机床厂商.....	16
图表 25: 哈斯自研数控系统与机床.....	16
图表 26: 宇树科技作为早期入局者后续或采用自研“小脑”的一体化布局.....	17
图表 27: 机床行业的开放式数控系统会有大量二次开发的接口.....	17
图表 28: 具有自适应、自感知、自学习、自交互、自执行能力的数控系统为未来发展趋势.....	18
图表 29: 直线插补、圆弧插补为数控系统最常见的插补功能.....	18
图表 30: 基于神经网络的曲线插补加工流程.....	19
图表 31: 采用神经网络插补可降低误差.....	19
图表 32: 分段式丝杠热误差补偿技术路线.....	19
图表 33: 神经网络热误差建模流程图.....	20
图表 34: 发那科采用机器学习的 AI 伺服调整功能.....	20
图表 35: 发那科采用机器学习的 AI 热误差补偿功能.....	20
图表 36: 华中数控数控基于华中 9 型数控系统打造的智能体系架构.....	21
图表 37: 固高科技面向高端装备领域拥有大量技术积累.....	21
图表 38: 机床数控系统控制原理.....	22
图表 39: 数控系统软件构成较为复杂.....	22
图表 40: 数控系统壁垒极高, 海外龙头技术实力领先.....	22
图表 41: 步进扫描光刻机系统结构图.....	23
图表 42: 欧姆龙赋能贴片机性能提升且兼容性更强.....	23
图表 43: ACS 运动控制系统在半导体设备领域具有丰富应用经验.....	24
图表 44: 固高科技主要产品.....	24
图表 45: 固高科技下游行业不断突破.....	25
图表 46: 华中数控自研数控系统实现与海外龙头全面对标.....	25
图表 47: 华中数控工业机器人控制、伺服驱动均采用自研技术.....	26
图表 48: 科德数控自研五轴机床数控系统在运控领域有深厚技术积累.....	26
图表 49: 拓斯达、埃斯顿、埃夫特工业机器人均配套有自己的控制器.....	27
图表 50: 拓斯达单台控制器可直接控制双臂机器人.....	27
图表 51: 智能焊接机器人在架构上也更接近人工智能级控制.....	28
图表 52: 拓斯达新一代 X5 机器人控制器平台.....	28
图表 53: 拓斯达 X5 机器人控制平台端侧工业控制方案实施能力展示.....	29
图表 54: 埃斯顿提供包含运动控制的完整解决方案.....	29
图表 55: 埃斯顿“机器人+智能化”布局.....	30
图表 56: 埃夫特规划了“云-边-端三脑协同”架构.....	30
图表 57: 埃夫特通过构建智能机器人通用技术底座加速机器人产业化落地.....	30



图表 58: 建议关注标的..... 31

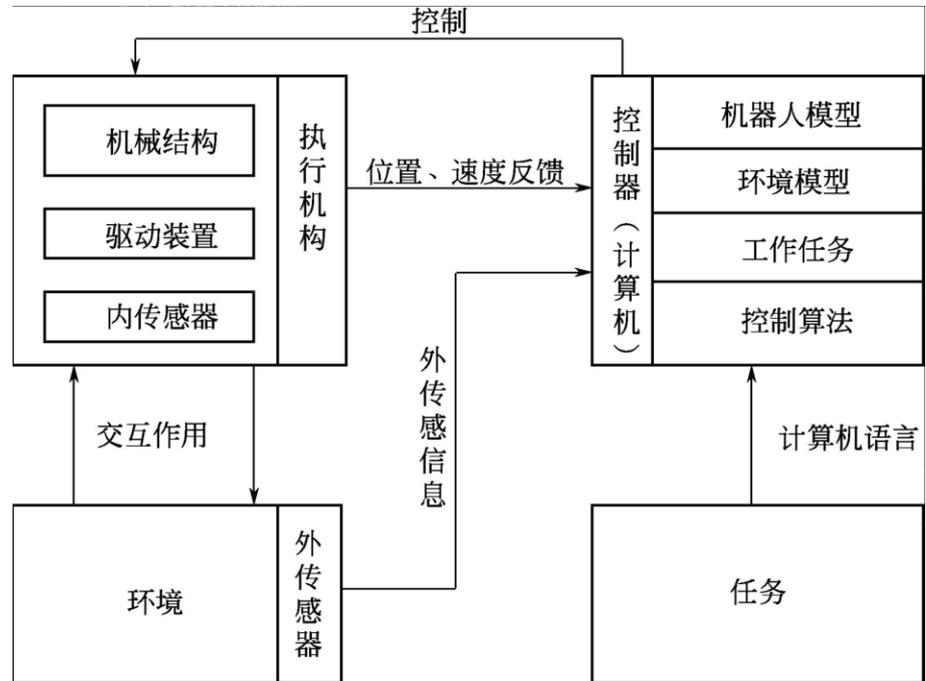


1.人形机器人“小脑”有望成为主赛道

1.1 从工业机器人起步，详解什么是人形机器人的“小脑”

各类机器人其基本组成较为相似，以执行机构、驱动装置、检测装置、控制系统和复杂机械等为主，背后运动控制的逻辑也较为相似。

图表1：机器人基本组成

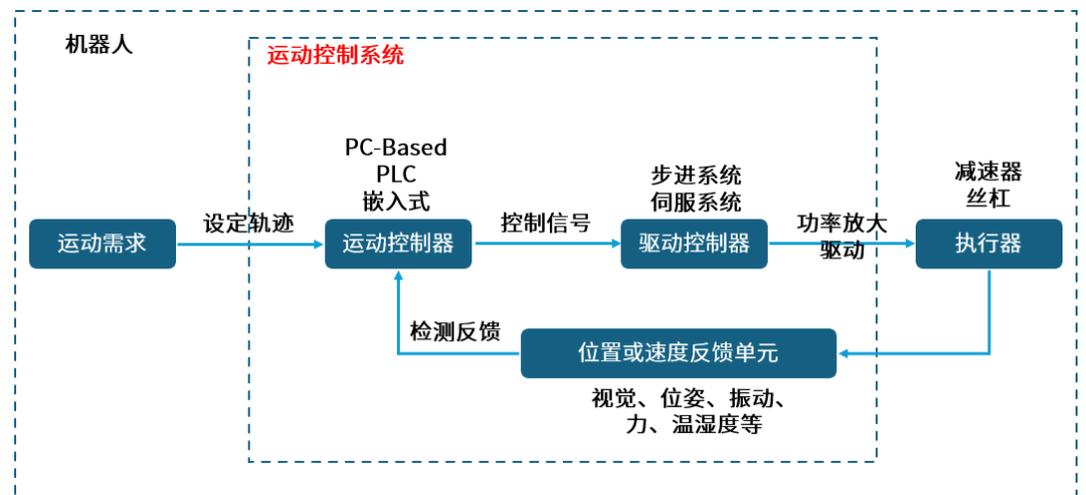


来源：《机器人驱动与控制及应用实例》，国金证券研究所

运动控制 (Motion Control) 通常是指在复杂条件下将预定的控制方案、规划指令转变成期望的机械运动，实现机械运动精确的位置控制、速度控制和转矩控制。

整体来看，机器人的运动控制系统也就是“小脑”，主要是依照具体的运动轨迹要求，根据负载情况，通过驱动器、驱动执行电机完成相应运动轨迹要求的系统。通常包括运动控制器、伺服驱动器、执行器、运动反馈单元等。

图表2：机器人“小脑”包括运动控制器、驱动、执行器、运动反馈单元等



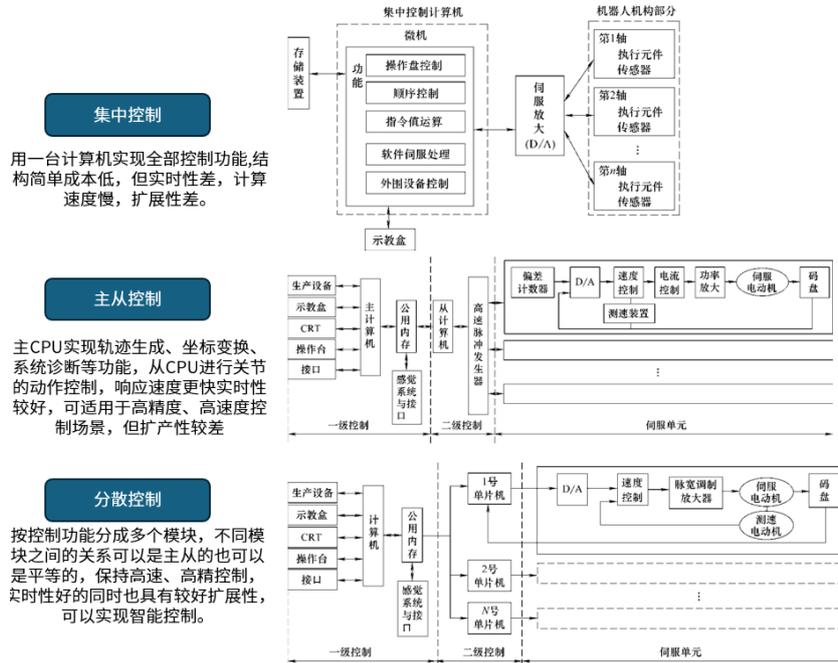
来源：固高科技招股说明书，国金证券研究所

具体到工业机器人的运动控制系统，其目标是对工业机器人的各个关节进行联动控制，从而实现轨迹跟踪运动，比单纯控制一个关节完成点到点的运动更加复杂。一般可以通过一



台计算机进行集中控制、多个 CPU 进行主从分级控制、进一步模块化进行分散控制。

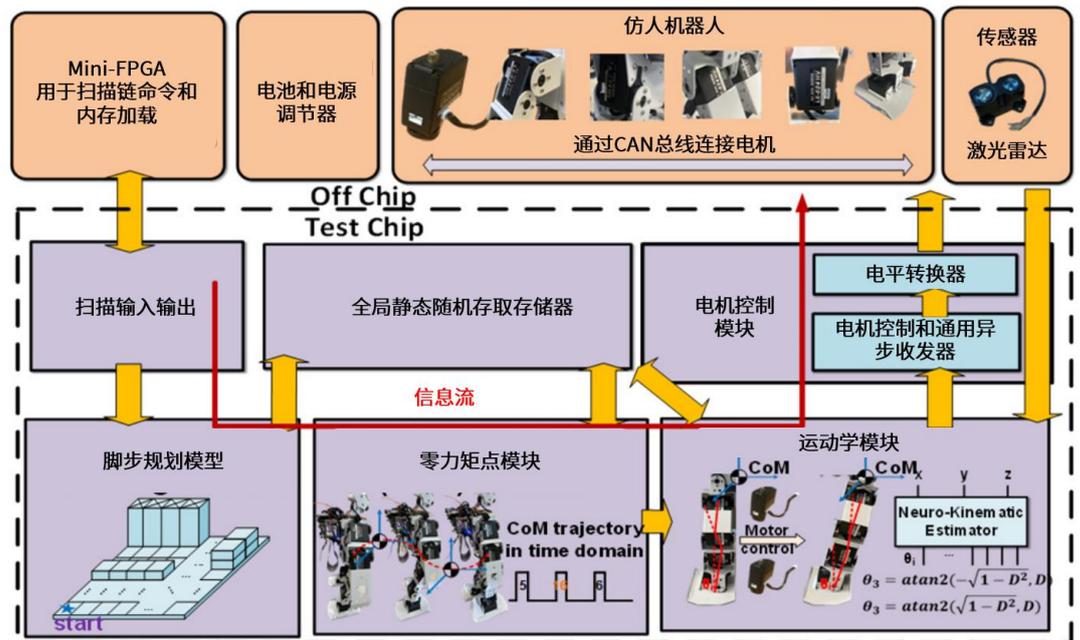
图表3: 工业机器人常见控制方式



来源:《工业机器人技术基础》, 国金证券研究所

其中运动控制器是工业机器人运动控制系统的核心,控制器从上位机获取数据,并控制伺服驱动器完成控制的执行,再基于传感器反馈的信息确保控制按照规划完成了执行。运动控制器通常包括轨迹生成器、插补器、控制回路、步序发生器等模块。

图表4: 仿人机器人运动控制器芯片架构

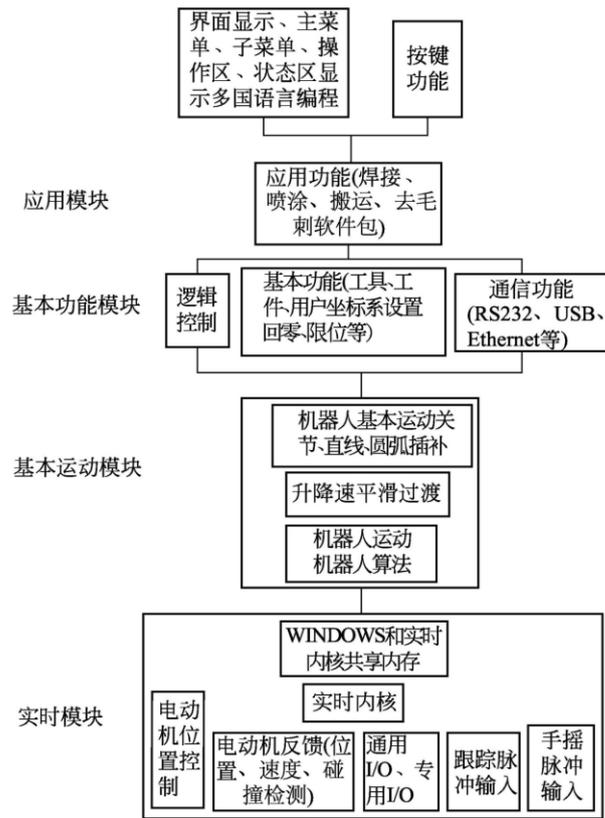


来源:《Humanoid Robot Control: A Mixed-Signal Footstep Planning SoC with ZMP Gait Scheduler and Neural Inverse Kinematics》, 国金证券研究所

运动控制器可采用各类运动控制方法和策略来提升机器人的性能,故具有较强的“软件”属性。



图表5: 工业机器人控制软件的基本功能架构



来源:《机器人驱动与控制及应用实例》, 国金证券研究所

根据平台不同, 通用运动控制器可以分为 PLC 控制器、嵌入式控制器和 PC-Based 控制卡三大类。

图表6: 通用运动控制器主要分类

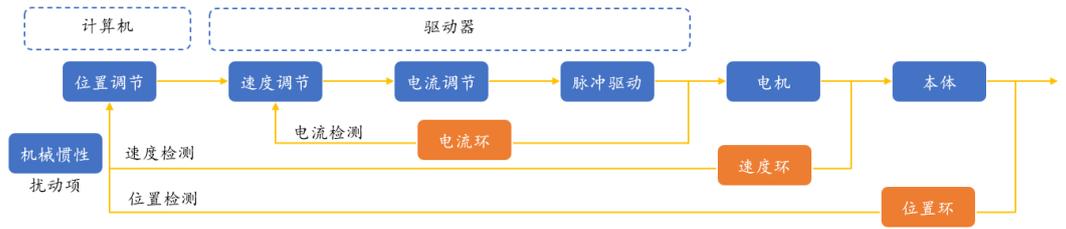
分类	特点	应用领域
PLC 控制器	系统简单, 体积小, 可靠性高, 但不支持复杂算法, 可以通过在 PLC 平台上, 添加驱动步进电机或伺服电机的位置控制模块, 在为各种机械设备提供逻辑控制的同时, 提供运动控制功能	可以用于圆周运动或直线运动的控制, 广泛应用于各种机械、机床、机器人和电梯等行业
嵌入式控制器	涵盖从简单到复杂的各种运用, 具有应用灵活、稳定性高、定制性强、价格便宜、操作和维护方便的特点	在针织机械、激光、切割、点胶机等设备制造行业有广泛的应用
PC-Based 控制卡	系统通用性强、可拓展性强, 能够满足复杂运动的算法要求、抗干扰能力强, 可供用户根据不同的需求, 在 DOS 或 Windows 等平台上自行开发应用软件, 组成各种控制系统	主要应用于电子、半导体、工业机器人、包装等领域

来源: 雷赛智能招股说明书, 国金证券研究所

具体到工业机器人控制的执行, 如果是单个关节的控制, 不需要考虑其他关节影响, 机器人的机械惯性被当做扰动项来进行处理, 通常通过电机实现驱动, 由电流检测、速度检测、位置检测构成闭环控制。



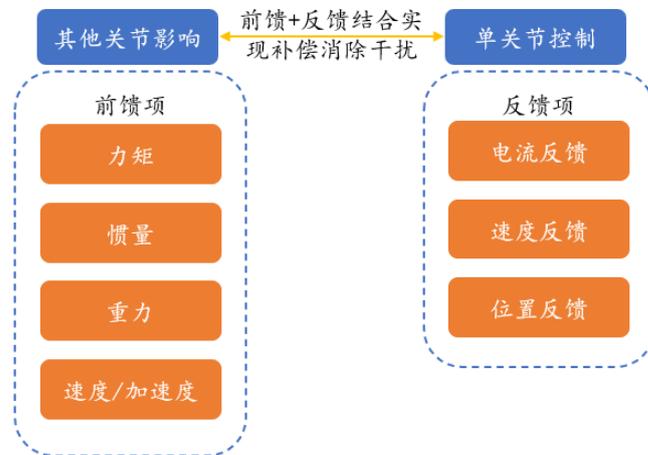
图表7: 工业机器人的单关节控制原理



来源:《工业机器人设计与控制》, 国金证券研究所

多关节的联动控制需要在单关节的基础上考虑关节之间的影响,需要更多的传感器数据反馈来将其他关节对当前关节的扰动作为前馈项引入位置控制器,从而构成多关节控制系统。

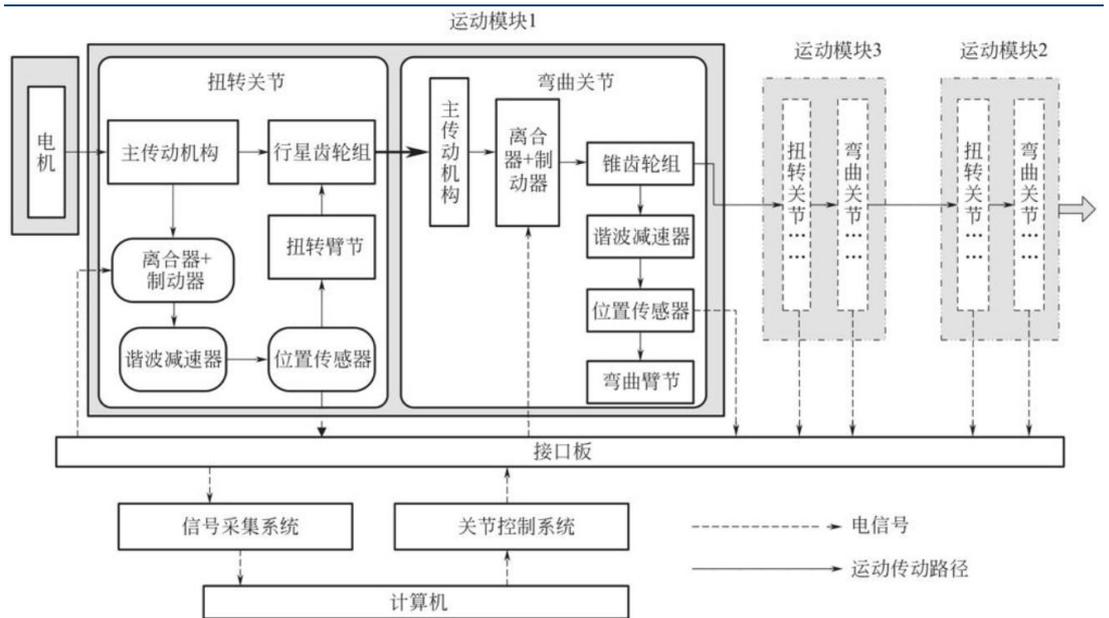
图表8: 将其他关节的影响作为前馈项引入控制器构成多关节控制系统



来源:《工业机器人设计与控制》, 国金证券研究所

最终工业机器人通过对关节速度、位置、力进行调节,完成多自由度旋转运动。

图表9: 工业机器人运动控制系统原理



来源:《工业机器人设计及控制》, 国金证券研究所

伴随着大语言模型等 AI 技术的快速进步,运动控制系统在机器人领域的应用有望逐步拓宽到人形机器人领域,人形机器人运动控制和工业机器人相比我们认为变化主要体现在输入端更复杂、控制难度更高、环境变量增加等方面,对运动控制系统企业来说是个全新的

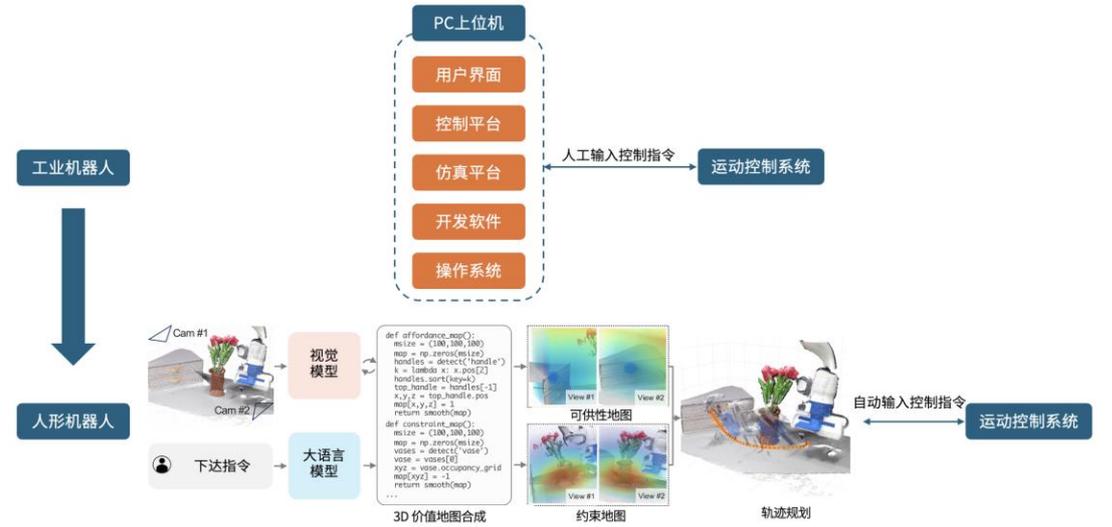


挑战和发展机会：

1) 输入端更复杂：原来的上位机变成了有大模型的“大脑”，但不改变运动控制系统作为“小脑”的作用

工业机器人一般通过 PC 作为上位机，由工程师人机交互完成指令输入后运动控制系统进行重复执行。到了人形机器人领域，上位机变成了依托大语言模型的“大脑”，可以直接将自然语言转化成控制指令输入到运动控制系统中，但不改变运动控制系统作为“小脑”的作用。

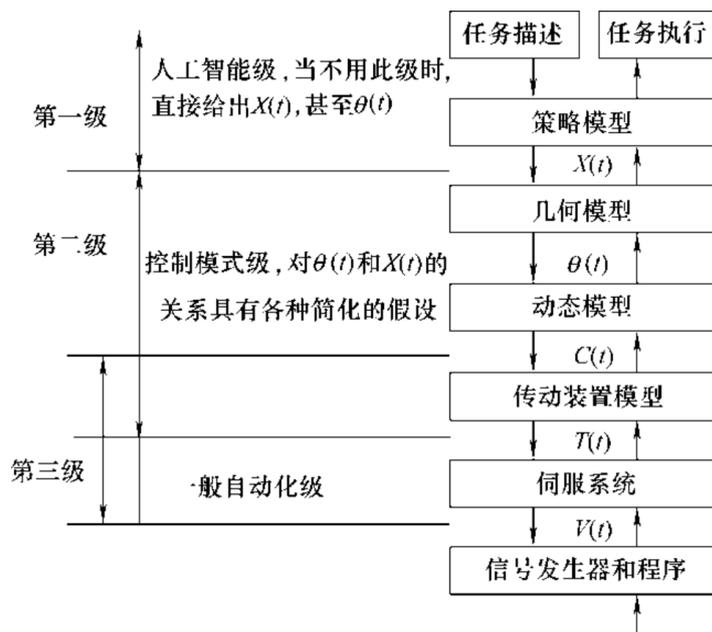
图 10：人形机器人“小脑”输入端更复杂



来源：《工业机器人完全应用手册》，《VoxPoser：Composable 3D Value Maps for Robotic Manipulation with Language Models》，国金证券研究所

换一个角度看，也可以理解为是原来的运动控制系统控制层级的提升，达到了理想的人工智能级，具备自然语言理解和自主执行能力。

图 11：人形机器人是一个人工智能级运动控制系统落地场景



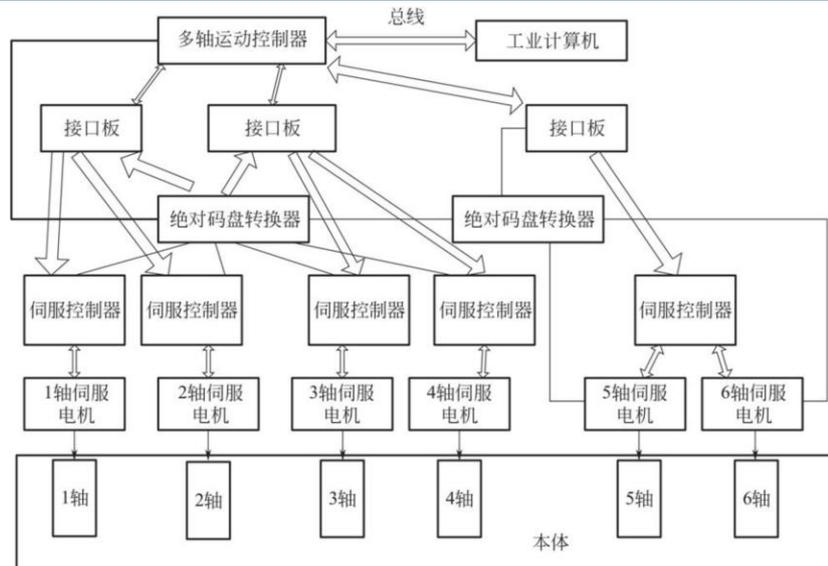
来源：《工业机器人技术基础》，国金证券研究所

2) 控制难度更高：联动控制轴数大幅增加

工业机器人控制轴数决定了其自由度，轴的数量选择通常取决于具体的应用，控制轴越多运动控制系统越复杂，使用时的编程量也更大。



图表12：控制轴数越多运动控制系统越复杂



来源：《工业机器人设计及控制》，国金证券研究所

工业机器人根据不同的结构形态、用途、作业要求等不同有较多分类，但控制上以多轴实时运动控制为主，基于关节控制、位置控制、力控制完成作业任务，一般控制轴数不会超过7轴。

图表13：工业机器人一般控制轴数最大到7轴

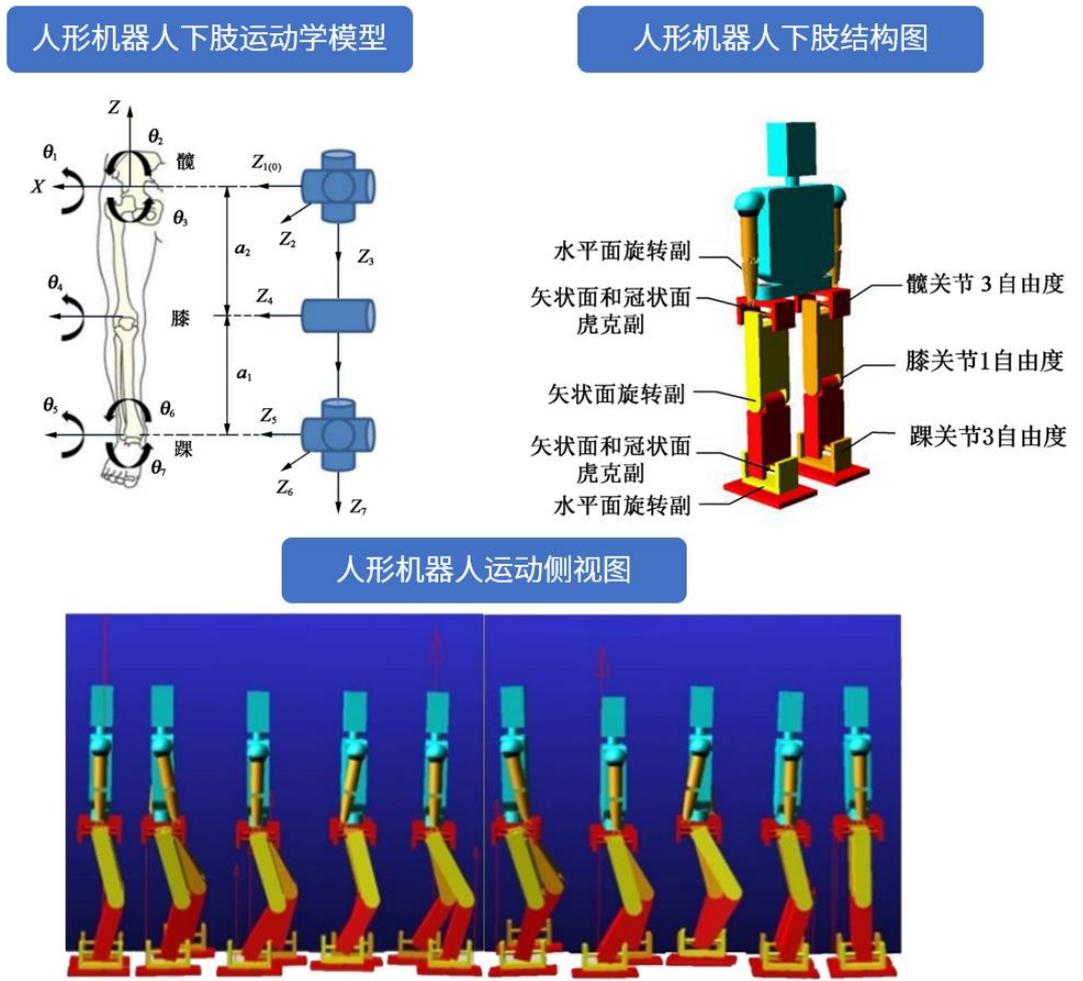
类别	常见形态	控制轴数	承载能力(kg)	重复定位精度(mm)	
加工类	弧焊、切割	垂直串联	6~7	3~20	0.05~0.1
	点焊	垂直串联	6~7	50~350	0.2~0.3
	通用装配	垂直串联	4~6	2~20	0.05~0.1
装配类	电子装配	SCARA	4~5	1~5	0.05~0.1
	涂装	垂直串联	6~7	5~30	0.2~0.5
搬运类	装卸	垂直串联	4~6	5~200	0.1~0.3
	输送	AGV	-	5~6500	0.2~0.5
包装类	分拣、包装	垂直串联、并联	4~6	2~20	0.05~0.1
	码垛	垂直串联	4~6	50~1500	0.5~1

来源：《工业机器人完全应用手册》，国金证券研究所

到了人形机器人领域，需要控制的轴数会大幅增加，根据《基于动作捕捉技术对仿人机器人运动学分析与仿真》信息，人形机器人下肢可简化为14自由度系统，其中，髋关节为3个自由度，分别为横滚、俯仰和偏转，通过1个虎克副和1个旋转副来连接；同样的传动方式也作用于踝关节的3个自由度，每个膝关节1个前向自由度，通过1个旋转副连接。



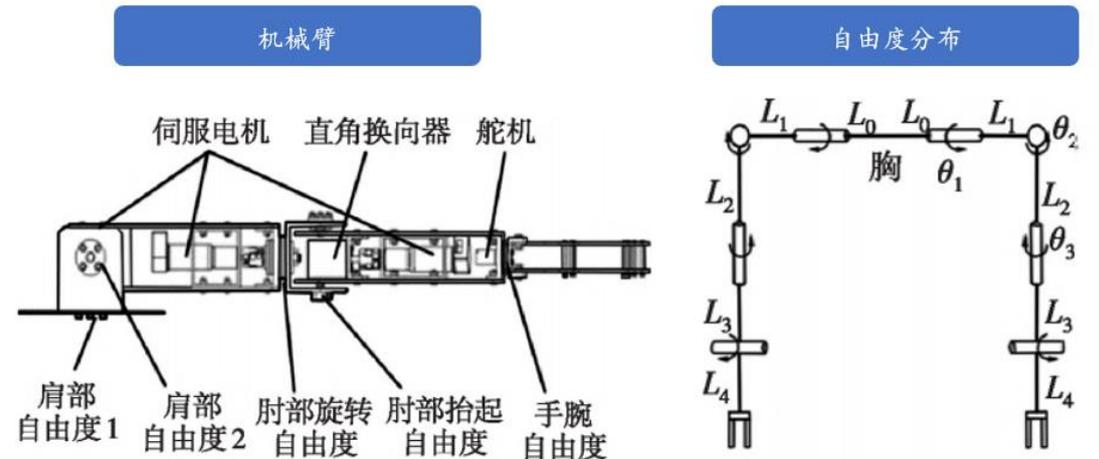
图表14: 人形机器人仅下肢就有14个自由度, 控制难度大幅增加



来源: 《基于动作捕捉技术对仿人机器人运动学分析与仿真》, 国金证券研究所

如果再考虑上肢和下肢协同控制, 控制难度会再进一步大幅增加。

图表15: 四自由度双臂人形机器人构成



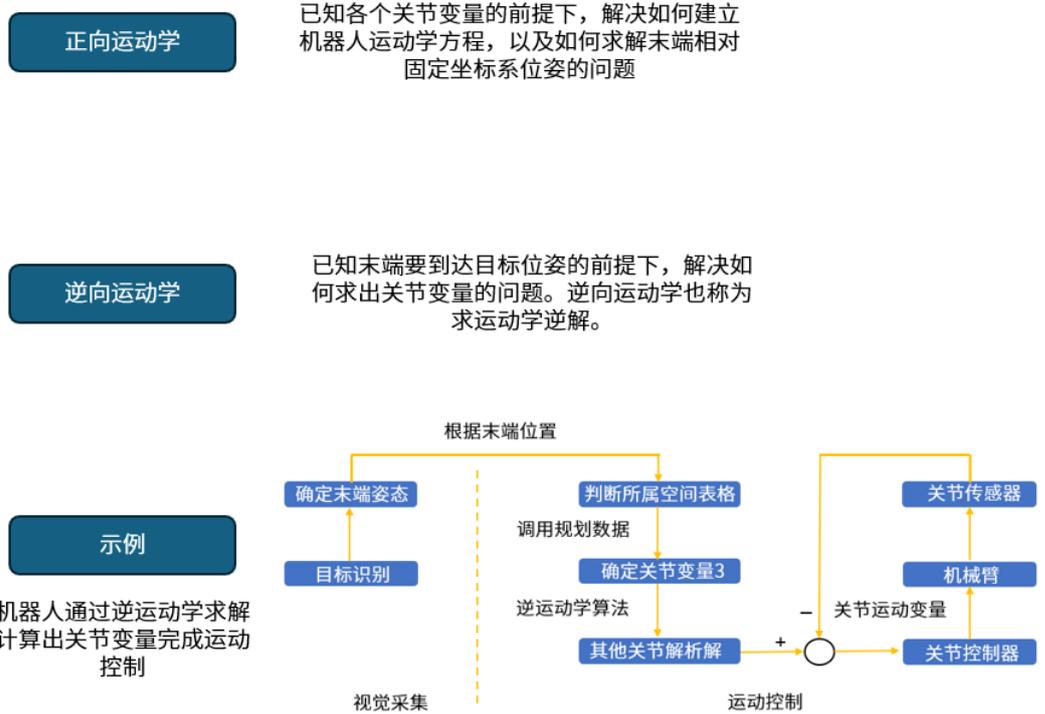
来源: 《仿人机器人手臂动作模仿系统的研究与实现》, 国金证券研究所

3) 运动学模型进一步复杂化

工业机器人在控制时对应于驱动末端位姿运动的各关节参数是需要实时计算的, 一般包括正向运动学计算、逆向运动学等求解。工业机器人由于场景较为固定同时关节数量少, 甚至可以在离线状态下精准进行计算和优化



图表 16: 工业机器人控制时涉及正向运动学计算、逆向运动学求解



来源：《工业机器人技术基础》，《仿人机器人轻型高刚性手臂设计及运动学分析》，国金证券研究所

人形机器人由于自由度更多、运动模式更复杂、环境变量更多，对应的运动学模型会比工业机器人复杂的多。

图表 17: 人形机器人的运动学模型比工业机器人复杂的多

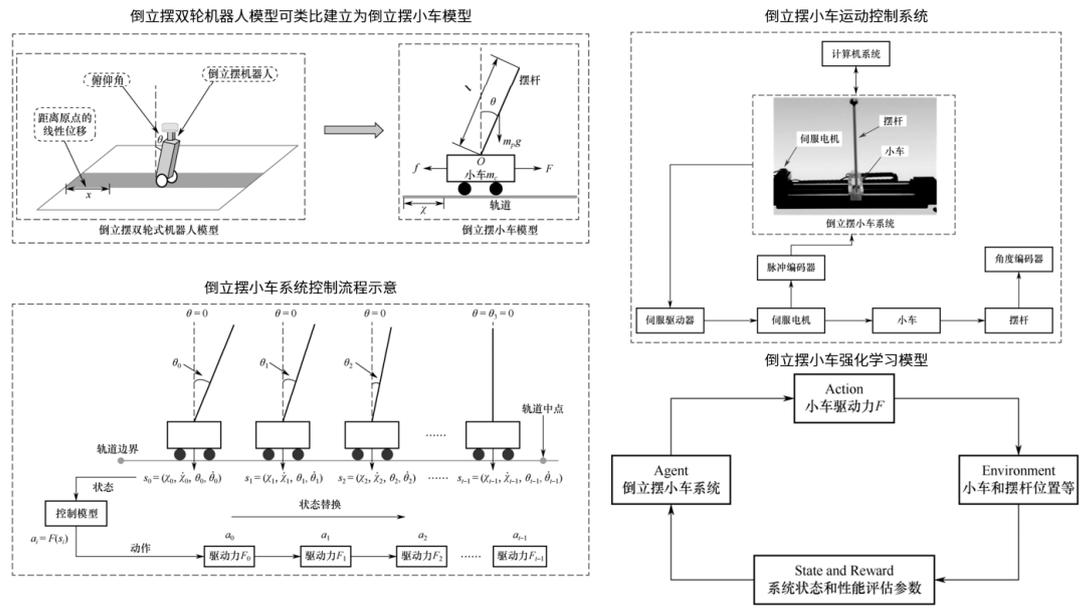
<p>自由度更高</p>	<p>自由度增加，根据关节参数计算出末端位姿的运动学模型更加复杂计算量显著加大</p>
<p>运动模式更复杂</p>	<p>运动的重复性和可预测性较差，需要考虑大量不同的复杂运动模式</p>
<p>多体动力学耦合</p>	<p>要考虑各关节之间的互相影响，建立更复杂的动力学模型和算法</p>
<p>环境变量多</p>	<p>对运动学模型的计算速度要求较高，需要实现实时计算</p>

来源：《人形机器人》，《机器人学基础》，国金证券研究所

例如人形机器人需要针对姿态平衡控制、持物平衡控制、抓取控制等场景进行建模分析，并开发针对性的控制策略。



图表 18: 倒立摆模型为最基础的机器人平衡控制运动学模型



来源:《深度强化学习理论及其在机器人运动控制中的应用实践》, 国金证券研究所

1.2 人形机器人“大脑”快速迭代,“小脑”重要性日渐提升

Figure 机器人发布的 Helix 视觉-语言-动作 (VLAs) 模型展示了一套让“大脑”加速成长的路径,是目前首个能够实现人形机器人全部上肢控制的高速连续控制输出模型。

图表 19: Figure VLAs 模型是人形机器人“大脑”的一个重大升级

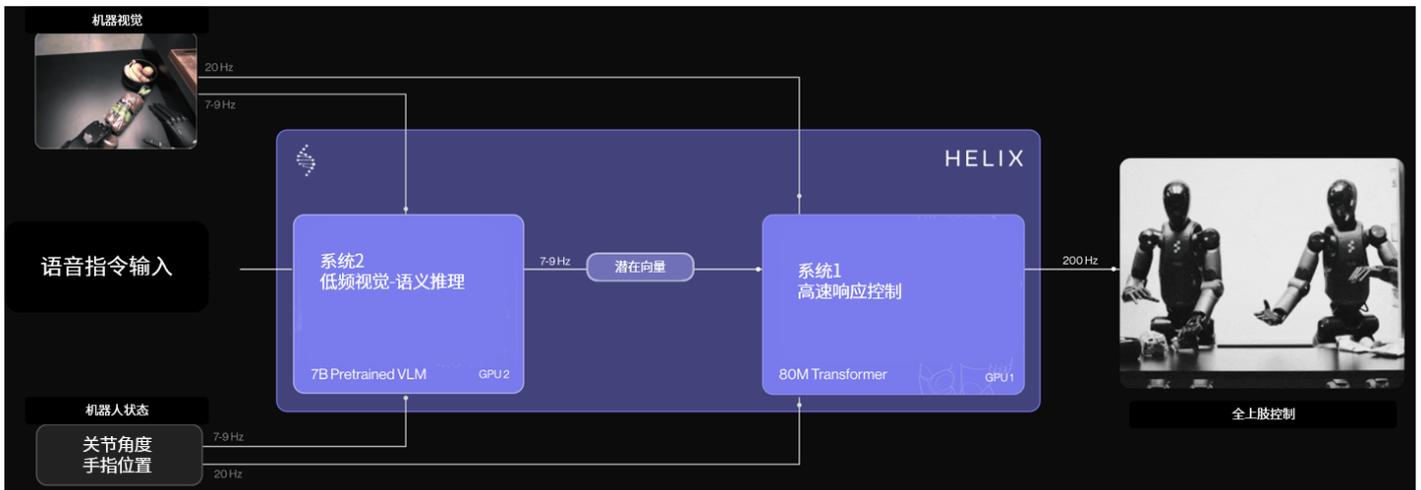
全部上肢控制	Helix 是首个能对类机器人的整个上身,包括手腕、躯干、头部和单个手指,进行高速连续控制输出的 VLA 模型。
多机器人协作	首个能同时在两台机器人上运行的 VLA 模型,使机器人能共同解决之前从未见过物品的长时间操作任务。
拾取任意物品	配备 Helix 的 Figure 机器人几乎能拾取任何小型家用物品,包括数千种它们之前未遇到过的物品,只需遵循自然语言指令。
单一神经网络	与之前的方法不同,Helix 使用单一的神经网络权重集来学习所有行为,如拾取和放置物品、使用抽屉和冰箱以及机器人间交互,且无需特定任务的微调。
商用部署就绪	Helix 是首个完全在嵌入式低功耗 GPU 上运行的 VLA 模型,可立即用于商业部署。

来源: Figure 官网, 国金证券研究所

Helix 通过部署两个模型解决了 VLAs 模型基础架构通用性强但响应速度较慢的问题,通过再加入一个视觉运动策略速度快但通用性差的模型进行互补,这种解耦架构可以让系统在最佳时间尺度上运行,系统 2 可以“慢思考”高层次目标,而系统 1 可以“快思考”以实时执行和调整动作。



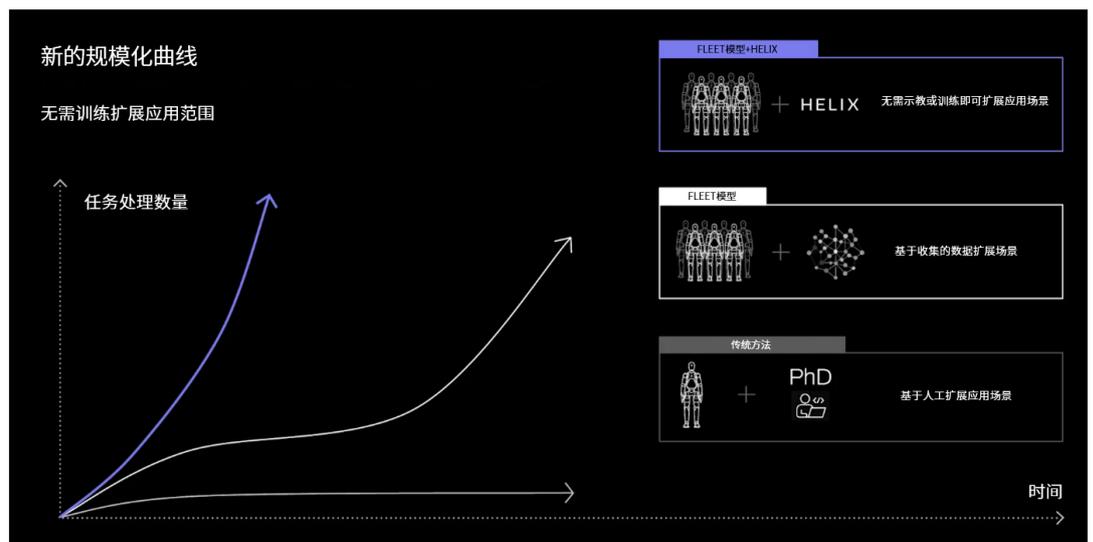
图表20: Helix 通过部署两个模型解决了 VLMs 响应速度慢的问题



来源: Figure 官网, 国金证券研究所

Figure 提出了全新的人形机器人规模化曲线, 人形机器人未来面向不同场景的泛化任务处理能力将持续增强。

图表21: Figure 提出了全新的人形机器人规模化曲线

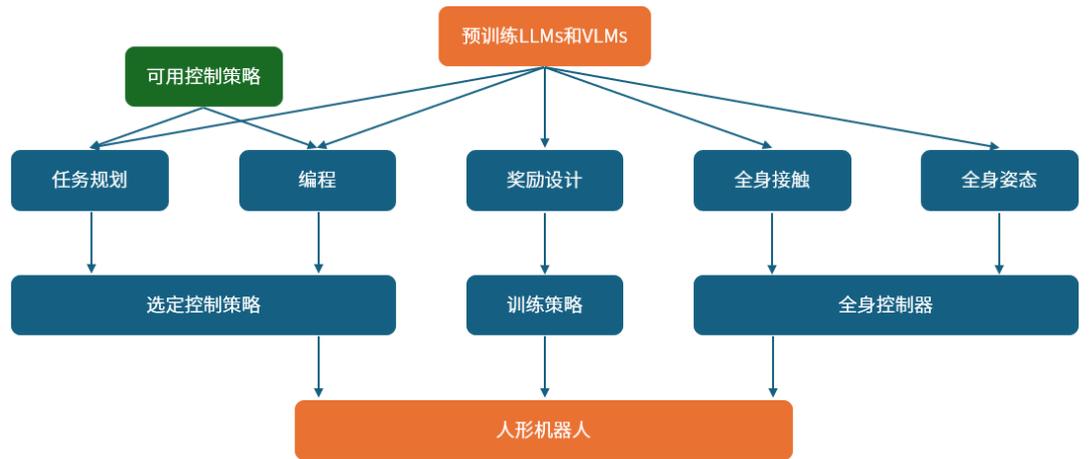


来源: Figure 官网, 国金证券研究所

随着预训练大语言模型 (LLMs)、视觉语言模型 (VLMs)、视觉语言动作 (VLAs) 模型等技术快速迭代, 人形机器人“大脑”加速成熟, 对“小脑”的要求也会越来越高。



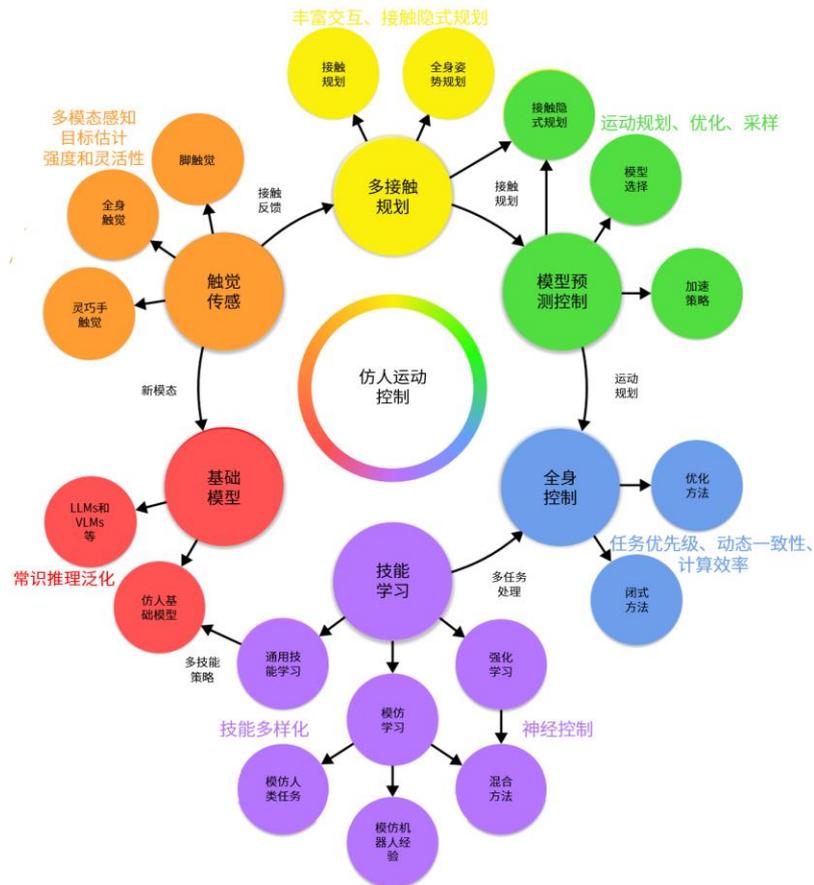
图表22：随着预训练大模型快速发展，对“小脑”的要求也会越来越高



来源：《Humanoid Locomotion and Manipulation: Current Progress and Challenges in Control, Planning, and Learning》，国金证券研究所

人形机器人的技术进步是一个基础模型、运动控制、传感等技术互相加强的过程。

图表23：人形机器人的技术进步是一个基础模型、运动控制、传感等技术互相加强的过程



来源：《Humanoid Locomotion and Manipulation: Current Progress and Challenges in Control, Planning, and Learning》，国金证券研究所

1.3 以史为鉴，“小脑”商业模式思考

以发展更加成熟的机床数控系统行业作为参考，最终形成了三种稳定的商业模式：

- 1) 西门子模式（产品标准化通用化）：数控系统厂专业生产各种规格的数控系统，提供



各种标准型的功能模块，为全世界的主机厂批量配套。

图表24：西门子、发那科、三菱均以标准产品为主，配套各类机床厂商



来源：《中国战略性新兴产业研究与发展·数控系统》，国金证券研究所

2) 哈斯模式(主机厂一体化)：主机厂独立开发数控系统，并与其自产的数控机床配套销售，通常这些企业创立之初以数控系统研发起步，后来形成数控系统+机床的布局，哈斯通过一体化的模式实现了机床销量走向全球前列。国内科德数控也采用这种模式，从数控系统起步逐步实现了五轴机床的一体化布局。

图表25：哈斯自研数控系统与机床



来源：《中国战略性新兴产业研究与发展·数控系统》，国金证券研究所

3) 马扎克模式(主机厂与数控系统厂商深度合作)：主机厂在数控系统厂提供的开发平台上，研发自主品牌的数控系统，并与其所生产的数控机床配套销售。以如马扎克、森精机等公司为例，在三菱、发那科提供的数控系统平台上，共同研发形成马扎克、森精机的数控系统品牌。

人形机器人“小脑”后续的商业模式预计也是三种模式并存：

1) 打造“小脑”第三方供应商：通过标准化产品取得规模化优势，进一步支撑研发投入

我们认为，已经在工业母机、半导体设备和工业机器人等领域积累丰富经验的运动控制系统供应商，更有潜力转型成为人形机器人领域的第三方“小脑”供应商。这类企业凭借在运动控制核心算法、多轴联动控制、伺服驱动器、工业现场网络以及传感器等关键技术领域所具备的强大技术积累，能够以更高的技术起点切入人形机器人领域，并在未来的市场中占据优势地位。

2) 自研“小脑”一体化布局：先发企业更多采用该商业模式，强化企业技术壁垒

宇树科技展示了大量人形机器人“小脑”训练成果，通过模仿&强化学习目前有能力完成跑步、跳舞等多关节协同复杂动作（根据公司官网信息可达到23-43个关节电机），作为



人形机器人行业的早期入局企业，后续或成为类似机床数控系统哈斯模式的一体化布局。

图26: 宇树科技作为早期入局者后续或采用自研“小脑”的一体化布局

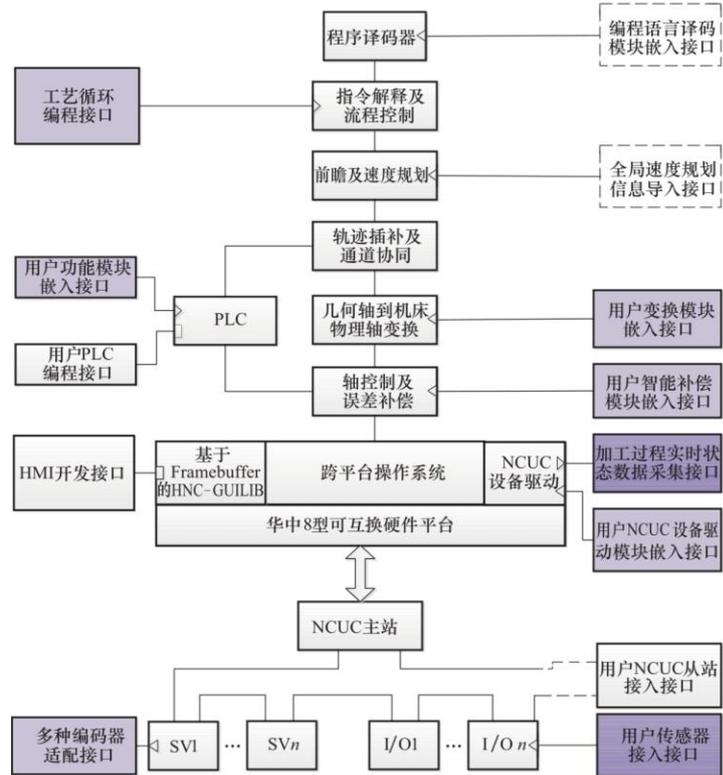


来源: 宇树科技官网, 国金证券研究所

3) 主机厂与第三方“小脑”供应商深度合作: 给行业后进入者后发制人机会

鉴于目前还有较多汽车、消费电子等行业的大型企业尚未在人形机器人领域展开布局, 预计未来这些企业在进入该领域时, 将倾向于与成熟的第三方“小脑”供应商建立深度合作关系。这种合作模式不仅能够加速产品的量产, 还能通过针对性的场景开发快速实现规模应用, 并利用规模化生产降低成本。这为行业后来者提供了后发制人的机会, 使他们无需从零开始进行“小脑”的研发, 而是在现有的通用运动控制平台基础上进行二次开发, 从而更快进入市场。

图27: 机床行业的开放式数控系统会有大量二次开发的接口



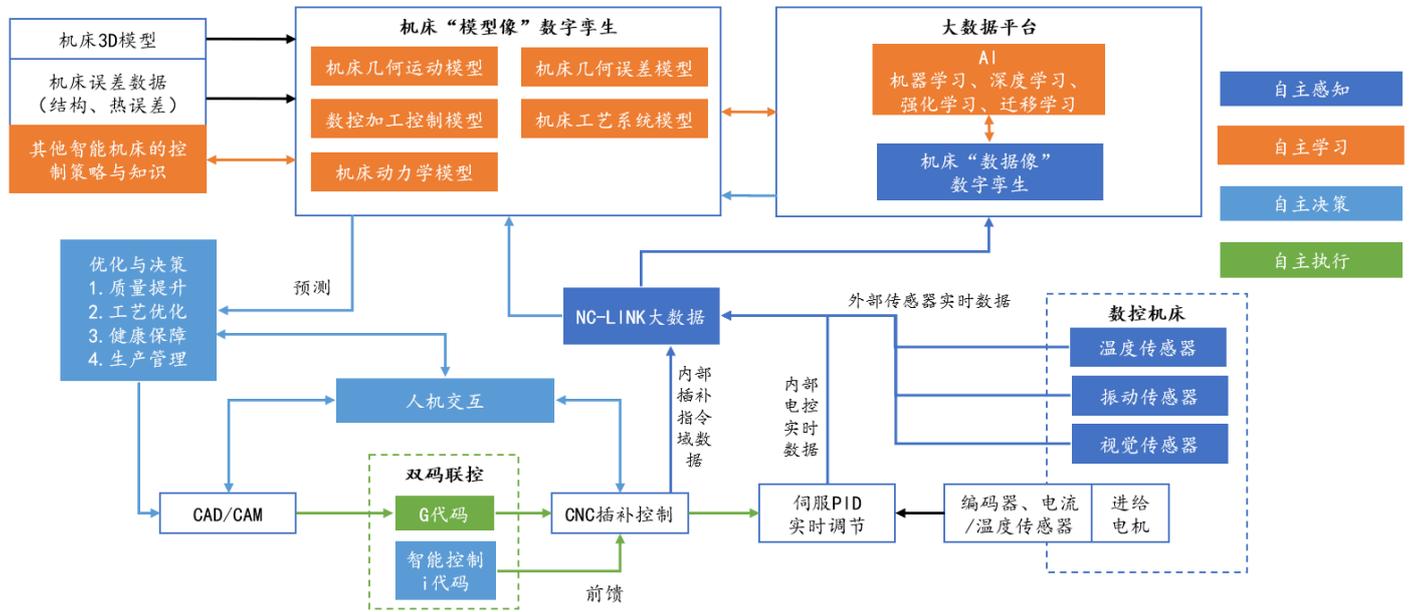
来源: 《中国战略性新兴产业研究与发展·数控系统》, 国金证券研究所



1.4 AI 技术对“小脑”也有显著加持，但主要是解决数学问题，不改变运行逻辑

在运动控制系统领域，我们看到即使是以稳定性为高优先级的机床数控系统领域，未来的发展趋势也是打造一个具有自适应、自感知、自学习、自交互、自执行能力的数控系统。

图表28：具有自适应、自感知、自学习、自交互、自执行能力的数控系统为未来发展趋势



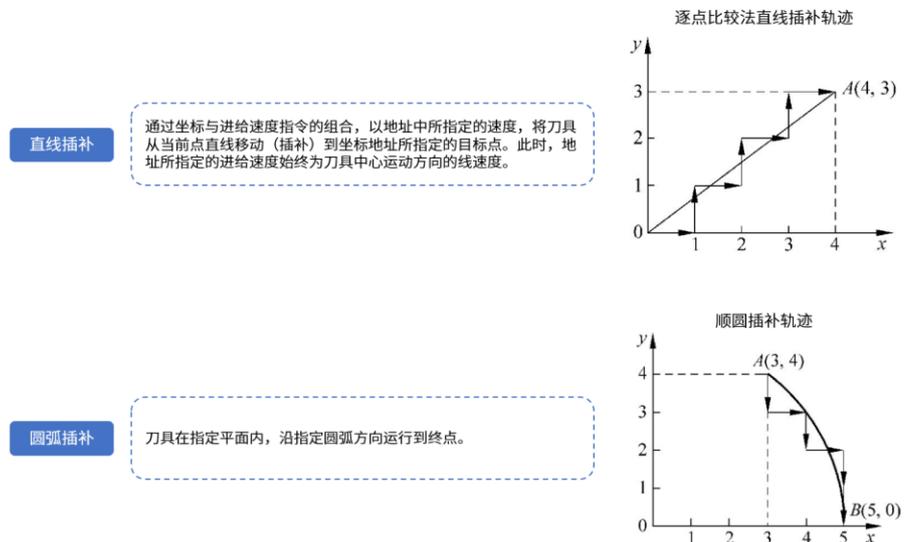
来源：中国工程院，国金证券研究所

具体例如通过采用遗传算法和BP神经网络算法，对数控机床加工效率、加工精度影响较大的插补、热误差补偿等功能将得到显著强化：

1) 插补：减少运算时间，提高插补速度，解决复杂型面加工难题

数控机床刀具的移动是一步步进行的，为了实现最优加工效果刀具轨迹应该和工件轮廓一致。对于复杂曲线，直接生成一条完全一致的轨迹算法会变得很复杂，实际应用中主要通过直线/圆弧逼近需要加工的曲线，插补就是指在这个过程中根据输入的基本数据（如直线终点坐标值、圆弧起点、圆心、终点坐标值等），按照一定的方法产生直线、圆弧等基本线型，并以此为基础完成所需要轮廓轨迹的拟合工作。

图表29：直线插补、圆弧插补为数控系统最常见的插补功能

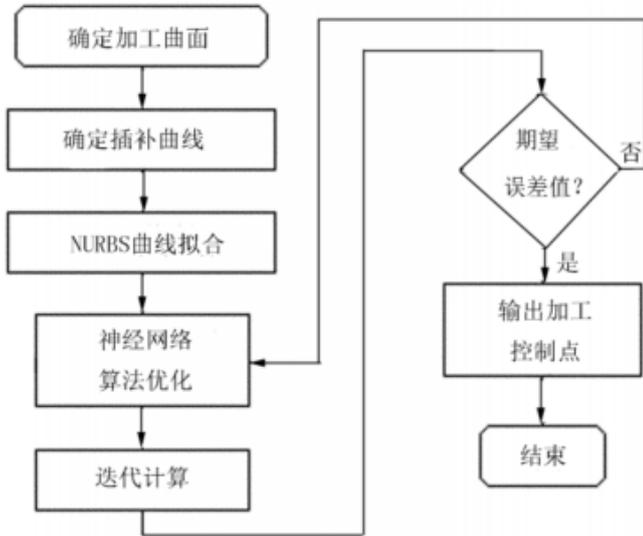




来源：《机床数控技术基础》，《华中 8 型数控系统编程说明书（V2.4）》，国金证券研究所

通过采用遗传-神经网络对插补进行优化，可以简化计算过程提高插补效率，并且改善刀具路径精度和表面光顺性。

图表30：基于神经网络的曲线插补加工流程



图表31：采用神经网络插补可降低误差

误差采集表面编号	采用神经网络曲线插补误差/%	不采用神经网络曲线插补误差/%
1	0.25	0.45
2	0.13	0.18
3	0.26	0.37
4	0.18	0.29
5	0.35	0.46
6	0.21	0.35

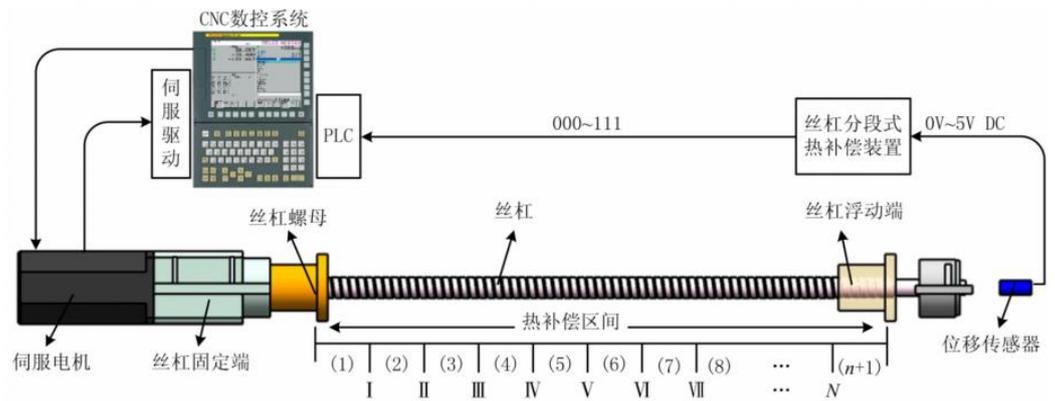
来源：《五轴加工中心农机零件加工仿真研究-基于曲线插补技术》，国金证券研究所

来源：《五轴加工中心农机零件加工仿真研究-基于曲线插补技术》，国金证券研究所

2) 热误差补偿：通过建模提高预测精度

根据《数控机床丝杠传动系统热误差实时补偿技术》数据，高精度数控机床的误差主要是热误差，可占总误差的 50%-75%。以丝杠热误差补偿为例，目前的主要补偿方式是通过位移传感器测量丝杠总热形变量，或通过温度传感器检测温度变化量，通过软件生成一个认为误差来抵消热误差影响。

图表32：分段式丝杠热误差补偿技术路线

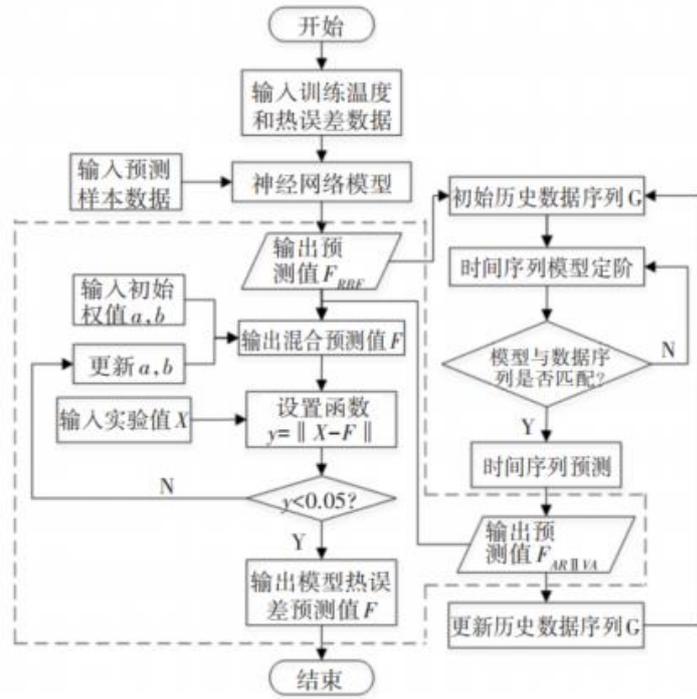


来源：《数控机床丝杠传动系统热误差实时补偿技术》，国金证券研究所

目前机器学习已经成为了热误差建模的主要方法，通过 BP 神经网络模型可以提高模型预测精度。



图表33：神经网络热误差建模流程图



来源：《混合神经网络用于滚珠丝杠热误差预测》，国金证券研究所

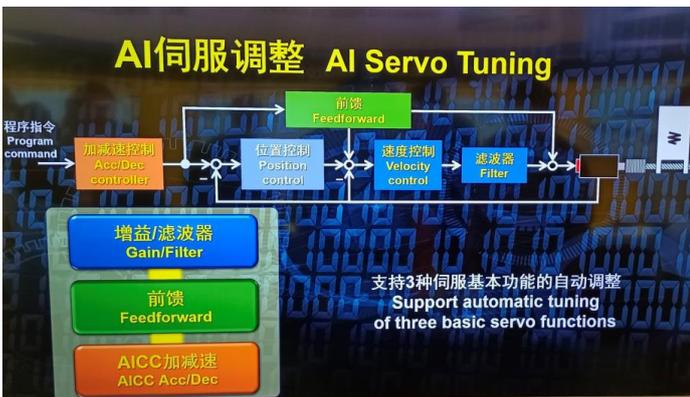
AI 相关应用技术我们在海外、国内的头部数控系统企业已经看到了实际的应用：

1) 发那科

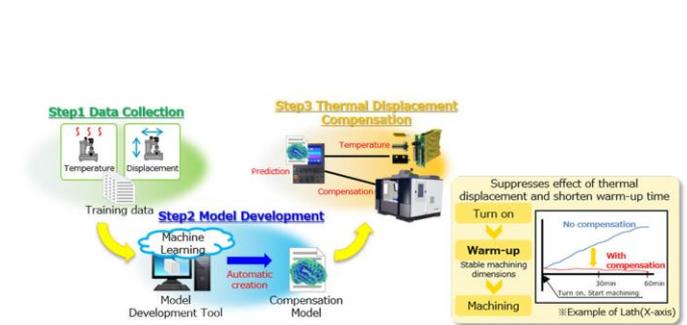
发那科已经推出了采用机器学习技术的 AI 伺服调整、AI 热误差补偿、AI 分抹等功能。

图表34：发那科采用机器学习的AI伺服调整功能

图表35：发那科采用机器学习的AI热误差补偿功能



来源：《从 CIMT2023 看数控系统智能化发展》，国金证券研究所



来源：发那科官网，国金证券研究所

2) 华中数控

国内数控系统领军企业华中数控推出了华中 9 型智能数控系统，集成了 AI 芯片，融合了 AI 算法，将人工智能、物联网等新一代智能技术与先进制造技术深度融合，遵循“自主感知-自主学习-自主决策-自主执行”新模式。



图表36：华中数控数控基于华中9型数控系统打造的智能体系架构



来源：卓尔智造，国金证券研究所

总体而言，AI 技术在运动控制领域主要解决的是数学问题，使原本需要通过人工不断优化和完善的算法实现自动化改进。例如，利用卷积神经网络（CNN）优化插补算法，可以实现更精确、高效的轨迹规划和计算。这种技术的应用并未改变运动控制系统的整体运行逻辑，而是提供了新的优化工具。

2.谁能在本轮“小脑”成长机会中脱颖而出？

2.1 具备高端装备高速、高精多轴联动控制能力：固高科技、华中数控、科德数控

这一类企业控制系统覆盖的下游行业主要是数控机床、半导体设备等，其运动控制系统的轴数不会像人形机器人那么多，但是对于高速度、高控制精度、高响应速度等方面要求极致，需要误差补偿、高速高精伺服控制、复杂系统轨迹规划、多轴联动等方面的长时间技术积累。

图表37：固高科技面向高端装备领域拥有大量技术积累

核心技术	装备制造环节	固高科技代表性核心技术
运动控制	控制、决策	高速高精轨迹控制算法、高精度机械补偿算法、高性能速度规划算法、激光控制技术、高速指令传输技术、力位控制技术
伺服驱动	感知、控制、执行	伺服高响应电流控制技术、伺服高速高精度速度及位置控制技术、伺服编码器及传感技术、智能伺服技术、伺服驱动器主动规划技术
多维感知	智能感知	相机有限元模型、3D 相机标定方法、机器人精度标定系统
工业现场网络	工业互联	网络显示控制技术、gLink-I 现场总线技术、gLink-II 现场网络总线技术（基于千兆以太网实现的分布式工业通信总线技术）
工业软件	感知、控制、决策、工业互联	CPAC-GRT 实时内核软件技术、CPAC-OtoStudio 集成开发技术、开放式数控技术、数控定制化 CAM 技术、开放式机器人技术、机器人离线编程技术、工业边缘计算系统建模技术、低代码开发平台技术

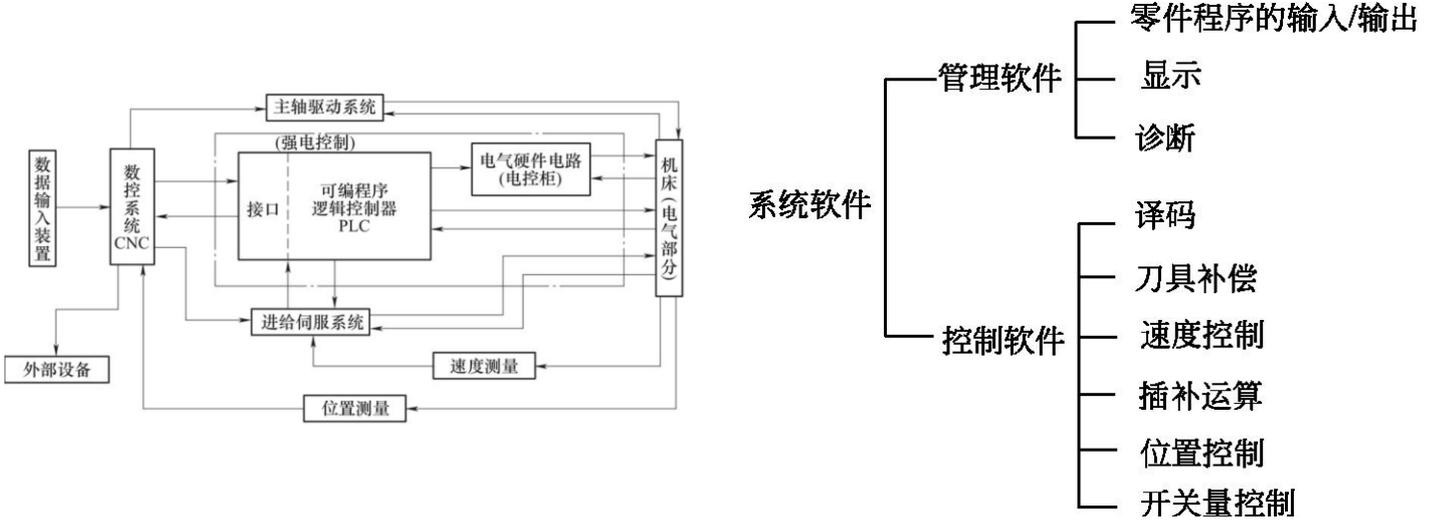


来源：固高科技招股说明书，国金证券研究所

数控机床作为通用设备，面对的工件种类繁多，数控系统必须完成管理和控制两大任务，系统的管理软件主要包括输入、I/O 处理、通信、显示和诊断等程序。系统的控制部分包括译码、刀具补偿、速度控制、插补和位置控制、开关量控制等软件。

图表 38：机床数控系统控制原理

图表 39：数控系统软件构成较为复杂



来源：《数控机床系统连接与调试》，国金证券研究所

来源：《现代数控机床及控制》，国金证券研究所

目前机床数控系统全球主要市场参与者主要是发那科、西门子、海德曼、三菱，由于技术壁垒较高市场格局较为集中，中国大陆华中数控、广州数控等企业虽然已经取得了显著的国产替代成果，但在技术成熟度上仍与海外龙头仍有一定差距。

图表 40：数控系统壁垒极高，海外龙头技术实力领先

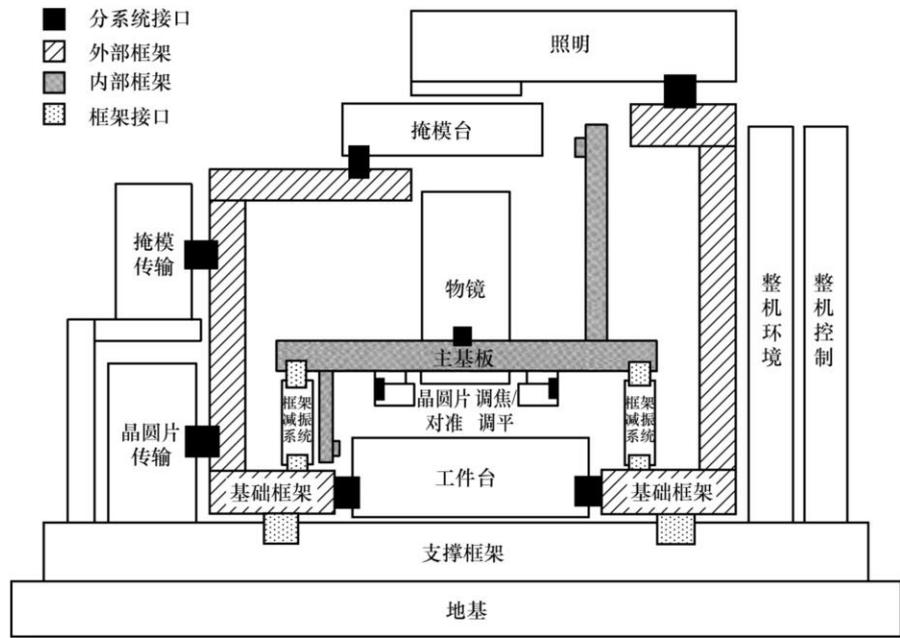
分类级别	代表品牌	功能完备性	性能及适用范围	可靠性 (MTBF)
国外顶尖	西门子、海德汉	CAD、CAM、多种样条曲线插补、RTCP、空间刀补、智能误差补偿、3D 仿真、后置处理、智能诊断、MES、ERP;1000M 工业总线通讯	三环全数字驱控一体、纳米级高速高精曲线插补、智能化自适应机床参数配置、通过参数选择可以满足几乎所有设备控制应用	30000h
国外一流	发那科、三菱、NUM	CAD、简易 CAM、多种样条曲线插补、RTCP、空间刀补、综合误差补偿、3D 仿真、后置处理、智能诊断;1000M 工业总线通讯	三环全数字驱控一体、纳米级高速高精曲线插补、通过参数数据可满足车、铣、加工中心及各类专用设备控制	15000h
中国台湾系统	新代、亿图、宝元	简易 CAM、NURBS 样条插补、RTCP、侧刃加工、动态误差补偿、2D 仿真、在线诊断;100M 工业总线通讯	位置环闭环控制、微米级高速高精插补、通过参数选择可满足车、铣、加工中心及部分专用设备控制	10000h
中国大陆高端	华中、光洋、广数、KND	NURBS 样条插补、RTCP、侧刃加工、动态误差补偿、2D 仿真、在线诊断;100M 工业总线通讯	位置环闭环控制、微米级高速高精插补、具有车、铣、加工中心及部分专用设备控制系统;加工效率一般	10000h
中国大陆普适	华兴、开通、达丰、广泰	通用插补功能、刀具直线及半径补偿功能、静态误差补偿、2D 仿真、在线诊断;100M 工业总线通讯	脉冲或总线闭环控制、小线段前瞻插补控制、具有车、铣、加工中心及个别专用设备控制系统;加工效率较低	3000h

来源：《中外高端数控系统差距分析及对策》，国金证券研究所

到了半导体设备领域，其运动控制的场景相比数控机床会更加固定，以固定行程的重复性动作为主，但需要的控制精度会再高上一个量级，以浸没式光刻机为例，其工件台扫描速度高达 800mm/s，对应的掩模台速度达到 3.2m/s，同时相对运动控制精度达到纳米量级。



图表41：步进扫描光刻机系统结构图



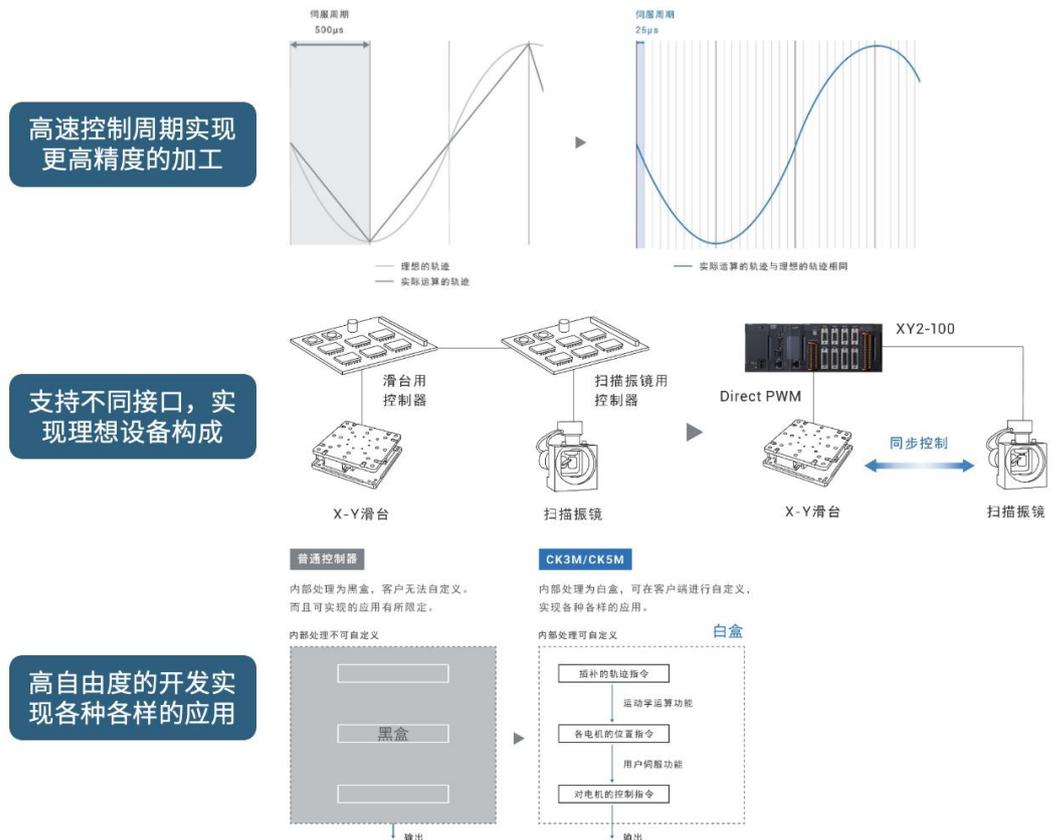
来源：《芯片制造：半导体工艺与设备》，国金证券研究所

半导体设备是目前海外运动控制龙头企业重点发力的方向：

1) 欧姆龙：为半导体设备行业开发多种提质增效解决方案。

例如针对贴片机，欧姆龙推出了通过 $25\mu s/5$ 轴的超高速伺服周期运算，使设备达到更高性能，同时兼容性更强，支持更多接口并且可高自由度的开发实现各种应用。

图表42：欧姆龙赋能贴片机性能提升且兼容性更强



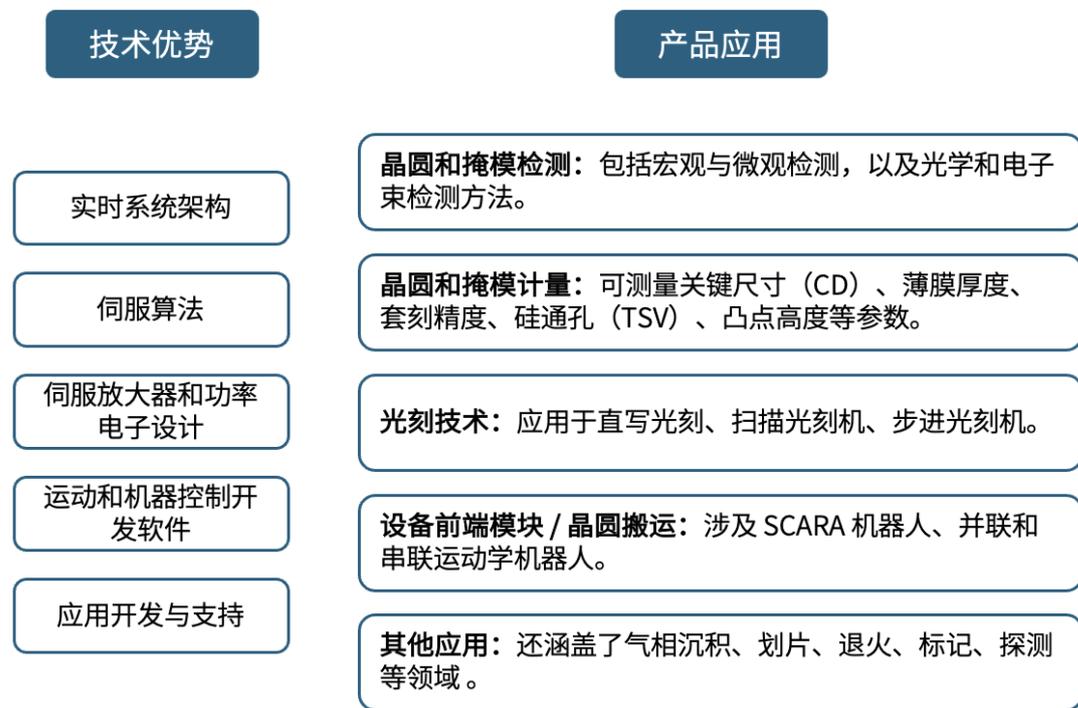
来源：欧姆龙官网，国金证券研究所



2) ACS: 运动控制系统在半导体设备领域具有丰富应用经验。

ACS 运动控制系统覆盖了检测、计量、光刻、搬运等多种半导体设备，具有丰富应用经验。

图表43: ACS 运动控制系统在半导体设备领域具有丰富应用经验



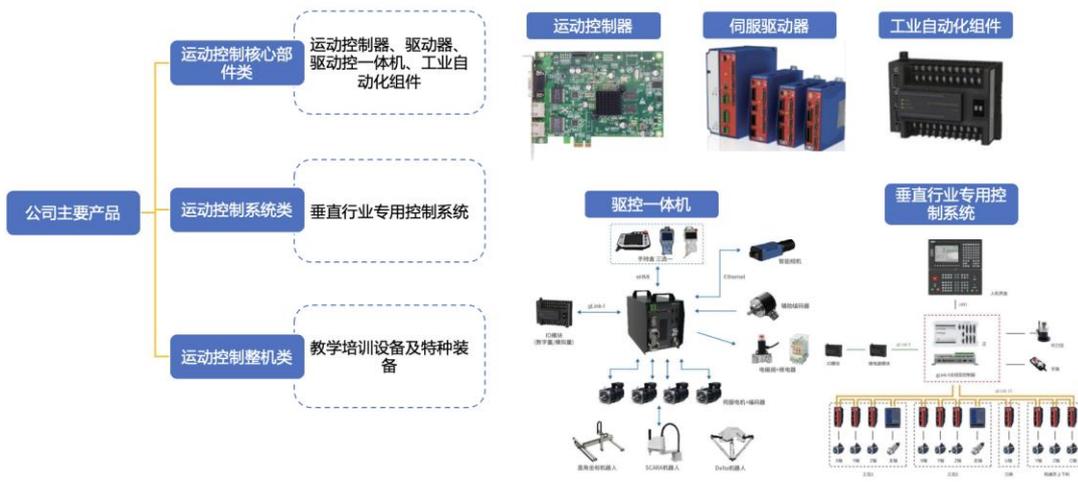
来源：ACS 官网，国金证券研究所

数控机床、半导体设备行业对运动控制系统要求较高，行业有很高进入门槛，我们认为能够实现国产替代突破的企业已在数控高阶算法、高精伺服控制、实时操作系统等方面实现了技术突破，具有较强技术壁垒，有望在人形机器人“小脑”成长机会中抢占先机，建议关注：

1) 固高科技：打造通用运动控制平台，在半导体设备、工业母机、工业机器人领域均实现突破

固高科技专注于运动控制及智能制造的核心技术研发，形成了运动控制、伺服驱动、多维感知、工业现场网络、工业软件等自主可控的技术体系，构建了“装备制造核心技术平台”，为近 60 个行业 2000 多家装备制造厂商累计部署超过 60 万套先进运动控制系统。

图表44: 固高科技主要产品



来源：固高科技官网，固高科技招股说明书，国金证券研究所

固高科技以正向研发实现了核心技术突破，性能从追赶到实现超越海外企业，能力圈不断拓展，逐步切入了半导体设备、工业母机等国产化率较低的赛道，下游覆盖行业持续突破。



图表45：固高科技下游行业不断突破

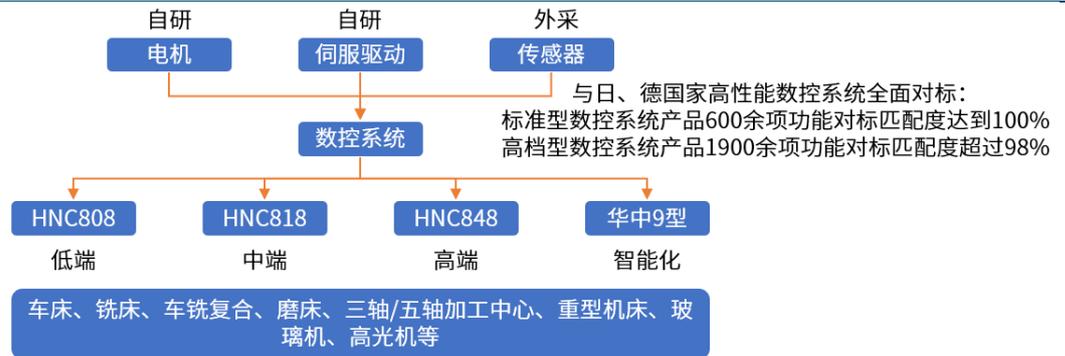


来源：固高科技招股说明书，固高科技公司公告，国金证券研究所

2) 华中数控：国产高端数控系统领军企业，开发多款工业机器人本体产品

华中数控从1993年开发出华中1型数控系统，2018年公司华中8型数控系统的“04专项”课题通过验收，标志着公司在关键技术指标、产品可靠性达到国外主流数控系统技术水平。目前在航空航天、汽车零部件制造、3C制造、机床工具、通用机械加工、木工、玻璃加工等领域得到批量应用。根据公司公告信息，2020年公司在国产高端数控系统市占率近50%，在国产品牌中排名第一。

图表46：华中数控自研数控系统实现与海外龙头全面对标



来源：华中数控官网，华中数控公司公告，国金证券研究所

同时华中数控工业机器人核心的控制、伺服驱动均采用自研技术。机器人本体包括BR双旋、垂直多关节、水平多关节、SCARA、Delta、特殊系列六大系列的40余款产品，采用自研伺服控制技术、自制高性能伺服电机，零部件自主化比例超过80%。



图表47：华中数控工业机器人控制、伺服驱动均采用自研技术

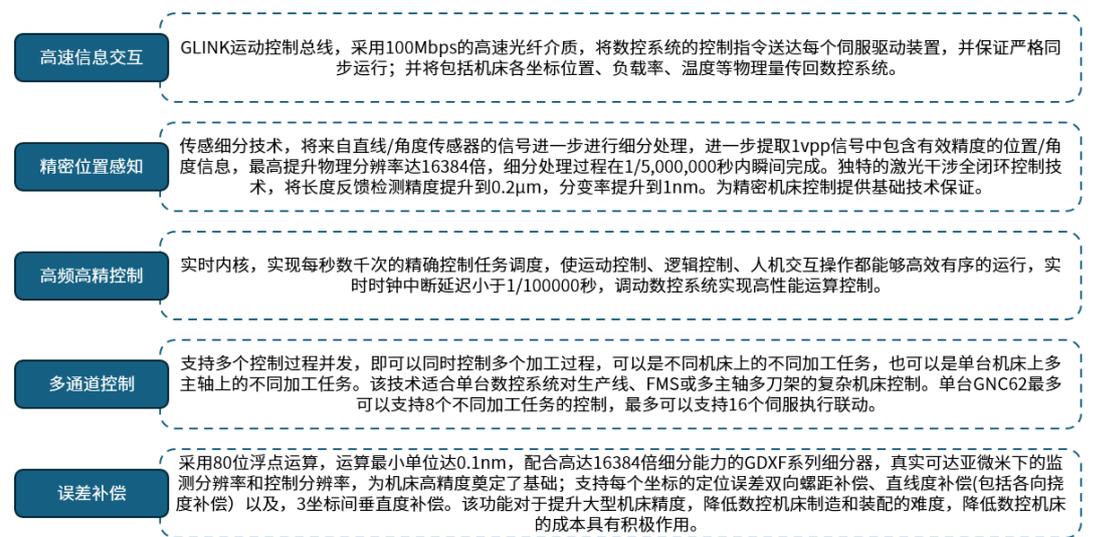


来源：华中数控官网，国金证券研究所

3) 科德数控：五轴机床数控系统一体化布局，高端数控系统积累深厚

科德数控在高端五轴机床领域持续推进国产替代，其中使用的数控系统为公司自研，对标海外西门子 840D、发那科 30i 等高端数控系统，在运动控制总线、传感器、高频高精控制、多通道控制、误差补偿等领域有深厚技术积累。

图表48：科德数控自研五轴机床数控系统在运控领域有深厚技术积累



来源：科德数控官网，国金证券研究所

2.2 具备工业机器人运动控制能力：拓斯达、埃夫特、埃斯顿

根据《中国战略性新兴产业研究与发展：工业机器人》信息，在工业机器人行业控制器生产商通常分为两大类，一类将控制器作为独立产品进行销售，例如奥地利的 KEBA、贝加莱 (B&R)、德国倍福 (Beckhoff)、美国泰道 (Delta Tau)，这类厂家主要是提供了一个基础的控制平台，没有在机器人性能和应用方面作太多开发；另一类是由工业机器人本体厂商在通用的多轴运动控制器平台基础上进行自主研发，海外的发那科、库卡、ABB、安川电机，国内的拓斯达、埃夫特、埃斯顿均有提供自己的工业机器人运动控制系统能力。



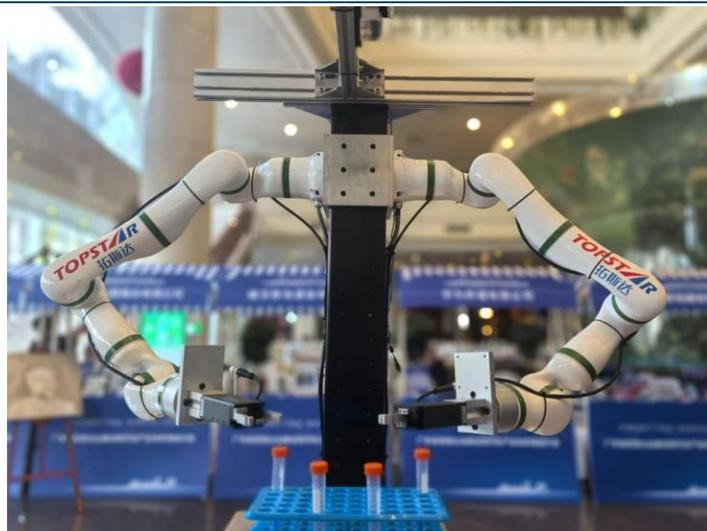
图表49: 拓斯达、埃斯顿、埃夫特工业机器人均配套有自己的控制器



来源: 拓斯达官网, 埃斯顿官网, ROBOX 官网, 国金证券研究所

工业机器人的运控目前已经看到了较强的延展性,例如拓斯达展示的基于自研运动控制平台的智能双臂机器人解决方案,聚焦医疗场景取样领域,构建“VR+AI+工业机器人”的智能协同系统,可支持单台控制器同时精准控制两台机器人。基于大模型的推理能力,机械臂可以自主完成精细操作,控制的智能化层级进一步提升。

图表50: 拓斯达单台控制器可直接控制双臂机器人

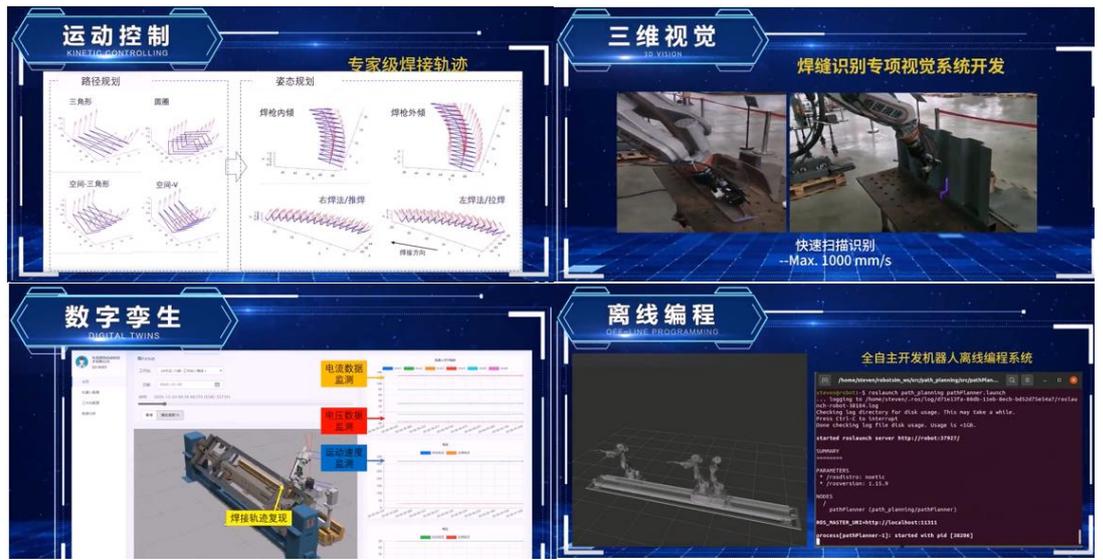


来源: 拓斯达官网, 国金证券研究所

包括焊接机器人在架构上也更接近前文提到的人工智能级控制,为了适应不同的焊接场景,焊接机器人需要使用具备环境感知、自主决策和动态优化能力的智能控制系统。



图表51：智能焊接机器人在架构上也更接近人工智能级控制



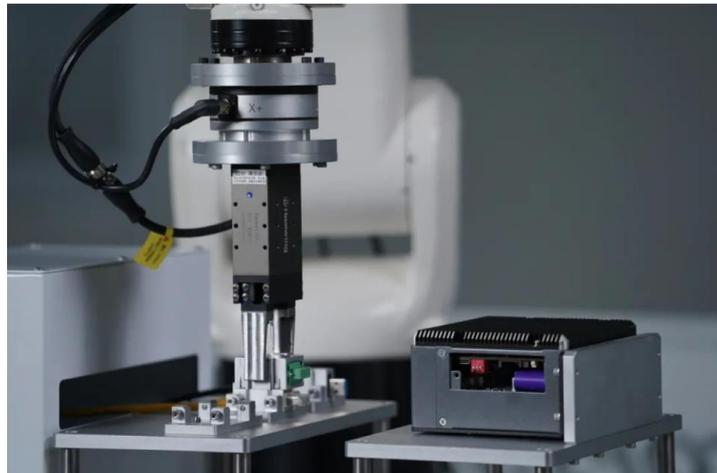
来源：固高科技微信公众号，国金证券研究所

后续具备工业机器人运动控制能力的企业也有望将进一步延伸至人形机器人领域：

1) 拓斯达：开发 X5 机器人控制平台，加码“小脑”布局

拓斯达控制平台研发中心推出的新一代 X5 机器人控制平台，是从底层硬件到上层软件实现全链条国产化自主可控的核心产品。X5 借助先进的技术和数据整合能力，可在具身智能大模型领域赋予智能体以“小脑与脊柱”的功能。

图表52：拓斯达新一代 X5 机器人控制器平台



来源：拓斯达微信公众号，国金证券研究所

根据拓斯达官网信息，拓斯达与华为(深圳)全球具身智能产业创新中心签约合作备忘录，双方将在底层控制和 AI 工业机器人、具身智能关键技术上进一步深入合作。拓斯达在华为全联接大会 2024 上受邀展示了基于 openEuler 开源操作系统在云服务器、边缘数据中心及端侧工业控制系统中的实际应用。通过展示 openEuler Embedded 嵌入式操作系统的强大生态，结合拓斯达新一代 X5 机器人控制平台（以下简称：X5）在端侧工业控制系统中的方案实施能力，进一步验证了 X5 在多样化应用场景中的高适应性与优异性能。



图表53: 拓斯达 X5 机器人控制平台端侧工业控制方案实施能力展示



来源：拓斯达微信公众号，国金证券研究所

2) 埃斯顿：提供包含运动控制的完整解决方案，积极布局“机器人+智能化”

埃斯顿坚持“All Made By Estun”的全产业链战略，业务覆盖从自动化核心部件及运动控制系统、工业机器人、机器人应用的智能制造系统全产业链，构建了从技术、质量、成本、服务和品牌的全方位竞争优势。

图表54: 埃斯顿提供包含运动控制的完整解决方案

工业自动化核心部件	工业机器人/智能系统	协作机器人	具身智能&人形机器人
<p>品牌: 埃斯顿</p> <p>规格: 2/4/8/16/32/64/128</p> <p>产品: 运动控制器/智能运动控制器</p>			
<p>品牌: 埃斯顿</p> <p>规格: 50W-200kW</p> <p>产品: DX系列驱动器/ED3L系列</p>			
<p>品牌: 埃斯顿</p> <p>规格: 50W-28kW</p> <p>产品: 伺服电机</p>	<p>3-700KG负载87款机器人</p> <p>完全自主核心部件工业机器人</p> <p>工业机器人应用+智能系统工程</p>	<p>3-35KG负载12款协作机器人</p> <p>自研实时3D仿真引擎</p> <p>关节内置高精度力矩传感器</p>	<p>具身智能软件平台(大小脑)</p> <p>具身智能核心零部件及整机平台</p> <p>“一脑多形”多场景应用</p>

来源：埃斯顿微信公众号，国金证券研究所

埃斯顿以“机器人+智能化”赋能制造业转型升级，积极探索 AI+具身智能的融合应用，埃斯顿推出语义 AI 大模型、人形机器人以及协作机器人等先进产品。



图表55: 埃斯顿“机器人+智能化”布局

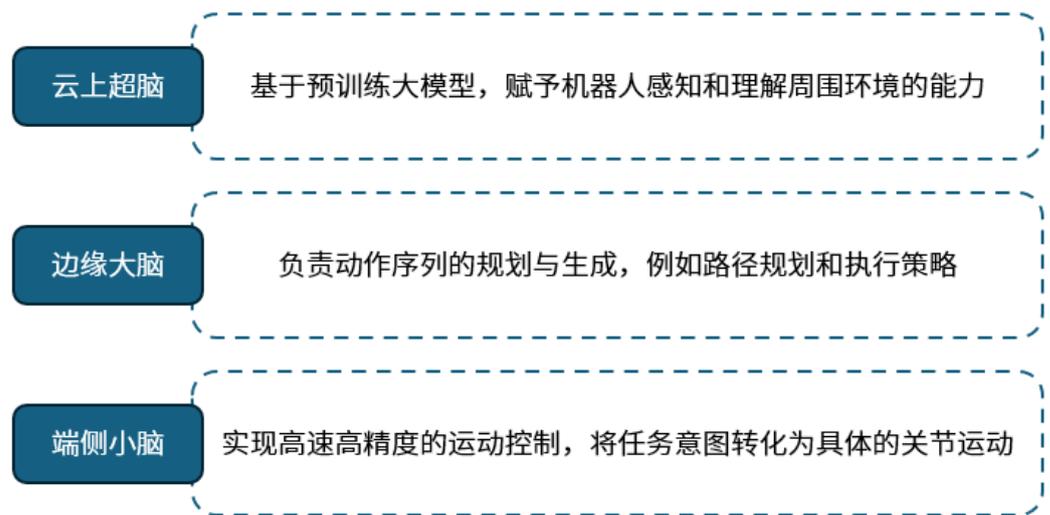


来源：埃斯顿微信公众号，国金证券研究所

3) 埃夫特：拥有运动控制子公司 Robox SPA，布局智能机器人通用技术底座

埃夫特持有 Robox SPA 49% 股权，自 1975 年以来，Robox SPA 一直致力于开发和制造运动控制器、编程语言、开发环境和库，以解决机器人和运动控制系统的所有运动控制要求。在自研和与子公司技术协同合作背景下，埃夫特实现了机器人正向设计技术、机器人运动控制技术、机器人智能化及系统集成技术三大类核心技术突破。

图表56: 埃夫特规划了“云-边-端三脑协同”架构



来源：现代制造微信公众号，国金证券研究所

埃夫特规划通过“云-边-端三脑协同”架构+大模型进化重写机器人能力上限，再通过“RaaS (Robot as a Service) 模式+数据闭环”依托智能机器人通用技术底座加速机器人产业化落地。

图表57: 埃夫特通过构建智能机器人通用技术底座加速机器人产业化落地





来源：现代制造微信公众号，国金证券研究所

3.投资建议

考虑人形机器人成长空间较大，“小脑”有望成为重要的主赛道，具有相关技术储备的企业有较好成长前景，建议关注：

具备高端装备高速、高精多轴联动控制能力：固高科技、华中数控、科德数控

具备工业机器人运动控制能力：拓斯达、埃斯顿、埃夫特

图表58：建议关注标的

类型	代码	公司	市值 (亿元)	归母净利润 (亿元)						PE				
				2022A	2023A	2024E	2025E	2026E	2022A	2023A	2024E	2025E	2026E	
高端装备运动控制	301510.SZ	固高科技	155	0.53	0.51				290	301				
	300161.SZ	华中数控	64	0.17	0.27	0.52	1.34	1.71	381	236	123	48	37	
	688305.SH	科德数控	76	0.60	1.02	1.31	1.91	2.62	126	75	58	40	29	
工业机器人运动控制	300607.SZ	拓斯达	163	1.60	0.88	-0.94	0.78	1.39	102	185		209	117	
	002747.SZ	埃斯顿	198	1.66	1.35	-0.03	1.72	3.61	119	147		115	55	
	688165.SH	埃夫特	152	-1.73	-0.47									

来源：I find，国金证券研究所；注：除华中数控、科德数控外取自 I find 2025 年 3 月 13 日一致预期

4.风险提示

国产替代进展不及预期：目前在运动控制器、伺服驱动器领域国内企业已实现突破，部分国内企业已经步入第一梯队，但如果技术研发、市场开拓力度弱于海外企业，或导致国产替代进展不及预期，影响企业业绩增长。

人形机器人产业化进展不及预期：人形机器人由于对运动控制要求较高，人形机器人的产业化将显著提升运动控制市场需求增量，弱人形机器人产业化进展不及预期，将影响企业业绩增长。



行业投资评级的说明：

- 买入：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上；
- 增持：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5%—15%；
- 中性：预期未来 3—6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5%—5%；
- 减持：预期未来 3—6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。



特别声明：

国金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。

形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告反映撰写研究人员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，国金证券不对使用本报告所包含的材料产生的任何直接或间接损失或与此有关的其他任何损失承担任何责任。且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整，亦可因使用不同假设和标准、采用不同观点和分析方法而与国金证券其它业务部门、单位或附属机构在制作类似的其他材料时所给出的意见不同或者相反。

本报告仅为参考之用，在任何地区均不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告提及的任何证券或金融工具均可能含有重大的风险，可能不易变卖以及不适合所有投资者。本报告所提及的证券或金融工具的价格、价值及收益可能会受汇率影响而波动。过往的业绩并不能代表未来的表现。

客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供多种金融服务。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布该研究报告的人员。国金证券并不因收件人收到本报告而视其为国金证券的客户。本报告对于收件人而言属高度机密，只有符合条件的收件人才能使用。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告仅供国金证券股份有限公司客户中风险评级高于C3级（含C3级）的投资者使用；本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的建议或策略。对于本报告中提及的任何证券或金融工具，本报告的收件人须保持自身的独立判断。使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

若国金证券以外的任何机构或个人发送本报告，则由该机构或个人为此发送行为承担全部责任。本报告不构成国金证券向发送本报告机构或个人的收件人提供投资建议，国金证券不为此承担任何责任。

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

上海	北京	深圳
电话：021-80234211	电话：010-85950438	电话：0755-86695353
邮箱：researchsh@gjzq.com.cn	邮箱：researchbj@gjzq.com.cn	邮箱：researchsz@gjzq.com.cn
邮编：201204	邮编：100005	邮编：518000
地址：上海浦东新区芳甸路 1088 号 紫竹国际大厦 5 楼	地址：北京市东城区建内大街 26 号 新闻大厦 8 层南侧	地址：深圳市福田区金田路 2028 号皇岗商务中心 18 楼 1806



【小程序】
国金证券研究服务



【公众号】
国金证券研究