

中国具身智能产业发展白皮书

White Paper for the Industry Development of
Embodied Intelligence in China

(2025 版)

太原理工大学

山西省数字产业协会

2026 年 4 月

编写组成员

参编单位：

太原理工大学、山西省数字产业协会、南京大学、南京航空航天大学、南京体医融合康复产业研究院有限公司、山西泓鉴数智科技有限公司、山西智益行科科技有限公司、山西柏腾科技有限公司、山西三川孛生数字科技有限公司、山西虚拟现实产业技术研究院有限公司

编写组成员：

刘雪宇、郭海峰、郭延文、魏明强、王建峰、王竹晴、梁亚倩、李欣、杜华、陈泽华、吴永飞、葛政学、王瑜杰、师广泽、张扬、吕昭庭、王艺凡、孙飞、徐文军、侯超航、秦少博、张胜、刘佳佳、赵鹏、杨晓琴、杨璐霞、王静瑶、尚方信

目录

第一章 战略宏图：中国具身智能的生态布局与发展高地	1
1.1 国家顶层设计：从“AI+”到“物理世界”	1
1.1.1 战略定调：新质生产力的核心赛道	1
1.1.2 标准先行：体系建设与伦理规范	5
1.1.3 中国路径：国际范式引入与场景化突围	8
1.2 区域版图：中国具身智能与人工智能产业格局	12
1.2.1 京津冀（策源地）：算法优势与政策高地	12
1.2.2 长三角（产业链）：芯片、算法与精密制造协同	15
1.2.3 珠三角（制造极）：消费电子基础与本体量产	20
1.2.4 差异化集群：合肥、成都与山西的特色布局	23
1.3 智源爆发：高校与科研机构的“造血”机制	26
1.3.1 学科建设新风向：交叉学科体系的范式重构	26
1.3.2 顶尖研究院布局：新型研发机构的技术突破与策源	29
1.3.3 “学院派”创业潮：科研成果转化的中国路径	30
第二章 技术重构：从离身算法到具身实体的进化	34
2.1 范式转移：第三代人工智能的崛起	34
2.1.1 定义的升维：从 Internet AI 到 Embodied AI	34
2.1.2 核心驱动：从“预测下一个词”到“预测世界下一状态”	35
2.1.3 莫拉维克悖论的破解与技术突破	36
2.2 核心技术闭环：感知、决策与执行	37
2.2.1 感知：全模态融合与空间智能	37
2.2.2 决策：具身大模型 (VLA) 与 Sim2Real 迁移	40
2.2.3 执行：灵巧手与强健的小脑运动控制	45
第三章 场景革命：基于企业实战的落地复盘	50
3.1 工业制造领域	50
3.1.1 产线物流搬运	50
3.1.2 柔性装配	51
3.1.3 质量检测与运维巡检	52

3.2	商业领域	53
3.2.1	物流履约	54
3.2.2	零售运营	57
3.2.3	商业服务	58
3.3	特种与巡检：高危环境的“替身”作业	58
3.3.1	电网与变电站巡检：特高压环境多层级作业	59
3.3.2	复杂地形勘测：非结构化环境的稳定移动	61
3.3.3	井下深部作业：高危环境下的防爆与监测	63
3.4	科研与家庭前瞻：从 Benchmarking 到家务原型	63
3.4.1	极致速度验证：家庭桌面场景操作	65
3.4.2	康复与陪护：医疗辅助与康复训练	66
第四章	挑战与未来：迈向 2030	69
4.1	技术攻坚：制约产业爆发的底层瓶颈	69
4.1.1	数据与泛化：高质量具身数据的稀缺与长尾场景	69
4.1.2	硬件与能源：核心部件国产化与高能效比驱动	71
4.2	应用挑战：具身智能的“四极”边界	72
4.2.1	极宏观：广域时空下的多机协同与集群涌现	73
4.2.2	极微观：微纳尺度下的精准感知与靶向作业	73
4.2.3	极交叉：碳硅融合下的神经接口与生机共融	74
4.2.4	极环境：极限物理条件下的本体鲁棒与韧性生存	75
4.3	未来趋势展望	75
4.3.1	趋势一：大脑标准化——通用具身大模型	76
4.3.2	趋势二：身体模块化——硬件接口互通与产业链重构	76
4.3.3	趋势三：云边端协同——云端大脑训练与边缘小脑推理	77
4.3.4	趋势四：人机共生——法律伦理边界与社会心理接纳	77

第一章 战略宏图：中国具身智能的生态布局与发展高地

1.1 国家顶层设计：从“AI+”到“物理世界”

在新时代科技革命和产业变革背景下，我国提出构建以科技驱动、创新引领、实体经济深度融合的现代化产业体系，明确提出将人工智能等前沿技术作为“新质生产力”的关键核心引擎，推动人工智能从数字空间向现实经济和实体世界深度延伸，加速实现从“云端 AI”到“具身智能体”的战略性跃迁。国家顶层设计层面的政策体系体现了从战略定调、产业布局到标准规范和治理规则的系统化思考，是推动具身智能、机器人等未来产业高质量发展的制度基础。

1.1.1 战略定调：新质生产力的核心赛道

(1) 新质生产力的内涵与演进

新质生产力是在我国经济进入高质量发展阶段背景下，由国家层面明确提出并系统阐述的核心发展概念，是对新一轮科技革命和产业变革条件下生产力形态演进的战略概括。该概念最早由国家高层于 2023 年 9 月在黑龙江考察期间首次提出，初步阐明了新质生产力是由技术革命性突破、生产要素创新性配置、产业深度转型升级而催生的先进生产力质态。在这一初始阶段，概念的核心聚焦于打破传统增长路径，强调以颠覆性技术和前沿技术催生新产业、新模式、新动能，旨在通过持续的科技创新引领现代化产业体系实现全方位变革，为现代化产业体系的重构指明了初步方向。

进入 2024 年 1 月，中共中央政治局就扎实推进高质量发展进行集体学习，标志着新质生产力进入了理论成熟与系统阐述阶段。在这一时期，国家层面正式界定了新质生产力的本质属性：即以劳动者、劳动资料、劳动对象及其优化组合的跃迁为基本内涵，以全要素生产率大幅提升为核心标志，并形成了较为清晰的政策话语体系与制度表达框架。政策导向明确指出，新质生产力不仅是技术层面的革新，更是符合新发展理念、具备高科技、高效能、高质量特征的先进生产力形态，其最终目标是实现生产力的质态飞跃，从而支撑国家高质量发展的战略需求与现代化产业体系建设目标。

随后，新质生产力的演进从理论定调快速转向实操层面的全局部署，并在 2024 年及 2025 年《政府工作报告》中得到了战略性深化与系统化政策展开。通过启动“人工智能+”专项行动及“新质生产力”在重点产业链的布局，政策体系开始强调生产要素的结构性转换，特别是将科技创新成果转化为现实生产力的能力与产业规模化落地效率。这一阶段的演进重点在于通过制度创新与资源精准配置，推动算力、数据、算法等核心要素与实体经济深度融合，确立了以未来产业和战略性新兴产业为核心载体的资源配置机制与协同推进路径。



图 1.1: 政策驱动下新质生产力要素跃迁全景图

这种生产力范式的演化（见图1.1），集中体现为生产要素构成的全方位跃迁与结构性重构。在当前数实深度融合的背景下，生产力系统正在发生结构性跃迁：新型劳动者已演变为具备跨学科数字化素养、能够熟练进行人机协作的复合型人才；新型劳动资料则由单一的机械工具升级为集成了智能算法、先进感知与精密控制的颠覆性工具体系；新型劳动对象则跨越了传统的实物范畴，大幅扩展至海量的数据要素、虚拟与现实交织的复杂场景以及非结构化的物理空间。这种由要素重构驱动的演进逻辑，不仅为产业升级提供了理论基石，更预示着一种能够高度整合先进技术与物理执行能力的综合性物质载体即将成为新质生产力发展的核心焦点与关键支撑方向。

(2) 新质生产力的载体

具身智能不仅是人工智能迈向通用化的关键里程碑，更是当代新质生产力最具代表性的物质载体。与侧重于语义逻辑或视觉生成的“离身智能”不同，具身智能通过物理实体与环境的实时交互实现智能增长，展现出极强的跨学科集成特征。根据中国信息通信研究院发布的《具身智能发展报告（2024 年）》¹，具身智能系统是由“感知—决策—行动—反馈”四个模块构成的完整闭环，它深度耦合了高端装备制造、精

¹数据来源：中国信息通信研究院（CAICT）

密传感、新型材料及多模态大模型技术。这种复杂技术的深度整合，使其成为了一个高能级的“技术反应堆”，其研发过程中的高性能执行器、触觉传感器等突破，正产生显著的技术外溢效应，直接赋能精密医疗、航空航天等高附加值产业的协同升级。

从人口结构转型与宏观经济发展的长远视角看，具身智能是维持中国“全球制造中心”地位的战略技术储备。依据国家统计局发布的《中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报》²，2024 年我国人口结构老龄化趋势进一步加深，60 周岁及以上人口占全国人口比重已提升至 21.1%，劳动年龄人口规模延续趋势性下降。与此同时，随着制造业向高端化、智能化转型，产业界对高精度、高负荷工种的需求却在持续扩张。这种劳动力供给持续收缩与产业升级需求加速扩张之间的背离，正形成一个巨大的结构性“剪刀差”。如图 1.2 所示，随着 15-59 岁劳动年龄人口基数的逐年下滑，制造业劳动力缺口预计将在 2030 年后进入爆发期。这一趋势表明，传统的自动化设备已不足以支撑复杂的非标准作业需求。在此背景下，具身智能系统作为具备高度泛化能力的“数字劳动力”，其战略定位已从单纯的效率工具演变为破解劳动力短缺、实现“技术红利”精准对冲“人口负利”的核心抓手。

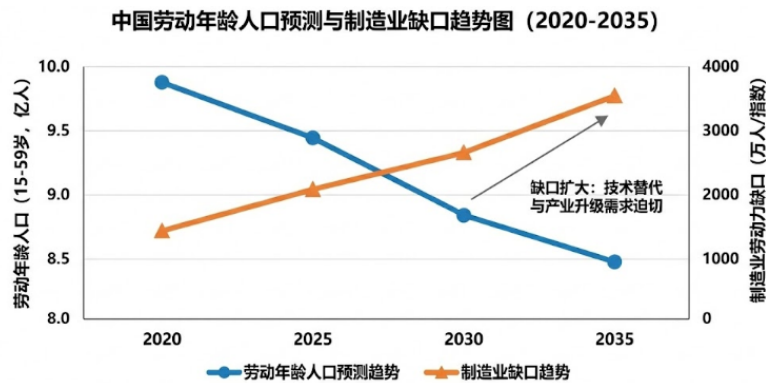


图 1.2: 中国劳动年龄人口预测与制造业缺口趋势图

在国家战略层面，具身智能已被正式确立为未来产业的增长极。2025 年《政府工作报告》³首次明确提出大力发展“具身智能”与“智能机器人”，并将其作为“人工智能+”行动的重要组成部分。这一政策导向正加速中国底层工业基础的自主可控进程，驱动国产技术实现从“工程实现”到“极致性能”的实质跨越。这种由终端集成应用倒逼底层软硬件创新的模式，正有效整合原本零散分布的制造业环节，推动中国制造业从“世界工厂”向“全球创新高地”转型，并为构建由智能化驱动的新兴经济体系奠定了坚实基础。

因此，将具身智能定位为新质生产力的集大成载体，其深层逻辑在于通过智力与机器的物理交融，重塑生产关系的逻辑基石。

²数据来源：国家统计局

³数据来源：国务院

(3) 顶层规划到产业落地的政策支持

中国具身智能产业的快速崛起，并非孤立的技术演进，而是一场由顶层设计驱动、多级政策协同的系统性战略布局。这一路线图的起点可以追溯到工信部等十五部门联合印发的《“十四五”机器人产业发展规划》⁴，该规划初步确立了我国机器人产业向高端化、智能化发展的基调，并明确提出了机器人产业营业收入年均增速需保持在 20% 以上、制造业机器人密度实现翻番的目标。然而，真正将具身智能推向战略巅峰的，是工信部发布的《人形机器人创新发展指导意见》⁵。该文件首次在国家层面将人形机器人定性为“颠覆性产品”，并清晰地规划了产业演进的双阶里程碑。

根据该路线图，2025 年被设定为“初步建立创新体系”的关键节点。在这一阶段，政策的核心诉求聚焦于“脑、小脑、肢体”等关键技术的突破。这意味着，到 2025 年，我国需在具身大模型（大脑）、运动控制神经网络（小脑）以及高功率密度执行器（肢体）等核心零部件上实现批量生产能力。紧随其后的 2027 年，则被锚定为“综合实力达到世界先进水平”的目标年。届时，具身智能将实现更大规模的应用，构建起具有国际竞争力的产业生态，并深度融入实体经济，成为经济增长的新引擎。这种从零部件攻坚到全产业链繁荣的递进式规划，确立了中国具身智能发展的阶梯式落地逻辑。

为了更直观地呈现这一从国家顶层战略到具体落地节点的演进时序，下表 1.1 梳理并汇总了 2023 至 2025 年间驱动具身智能产业发展的核心政策。

表 1.1: 2023-2025 中国具身智能核心政策文件汇总表

发布时间	政策文件名称	发布部门	核心指标	战略重点
2023.10	《人形机器人创新发展指导意见》	工业和信息化部	2025 年，初步建立创新体系；2027 年，综合实力达到世界先进水平。	将人形机器人定性为“颠覆性产品”；重点突破“大脑、小脑、肢体”关键技术集群。
2024.7	《国家人工智能产业综合标准化体系建设指南（2024 版）》	工信部、中央网信办等四部门	2026 年，形成系统完善的标准体系，研制 20 项以上国家/行业标准。	构建“基础共性—关键技术—行业应用”标准金字塔；明确将“具身智能”列为关键技术标准研制重点。

续下页...

⁴数据来源：工业和信息化部

⁵数据来源：工业和信息化部

发布时间	政策文件名称	发布部门	核心指标	战略重点
2025.3	《2025年政府工作报告》	国务院	纳入“人工智能+”专项行动	首次在顶层报告中明确大力发展“具身智能”；将其定位为培育新质生产力的核心物质载体。
2026.1	《“人工智能+制造”专项行动实施意见》	工信部等八部门	建设一批“场景数据训练场”	推动具身智能在工业场景的深度集成；强调通过实操数据共享打破技术垄断。

资金与资源的配置模式也在经历从“普惠式”向“精准化”的转型。如《“人工智能+制造”专项行动实施意见》⁶提到，国家层面的扶持正重点流向具身智能在工业场景的深度集成。意见强调，应通过建设“场景数据训练场”，推动重点行业实操数据的标准化与共享，支撑具备高泛化能力具身模型的训练。这种由应用场景倒逼技术突破的资源配置机制，极大缩短技术从实验室向工厂流水线的转化周期。同时，国家鼓励政府引导基金联动社会资本，重点投向具备实现大规模任务规划的基础模型及关键执行部件，旨在以市场化手段打破高端传感器与精密传动系统的技术垄断。

此外，地方层面的政策响应形成了强有力的协同效应。北京、上海、深圳等地纷纷出台了具身智能专项行动方案。例如，北京组建了国内首家省级人形机器人创新中心，并设立了百亿规模的机器人产业引导基金；上海则依托“模速空间”等载体，重点布局具身智能的算力支撑与场景落地。这种“国家顶层导向+地方落地配套”的资源配置模式，不仅降低了初创企业的研发门槛，更通过构建产业集群，加速了技术从实验室向工厂流水线的转化速度。这种从资金扶持到生态构建的全方位支撑，确保了具身智能路线图能够从蓝图稳步走向现实。

1.1.2 标准先行：体系建设与伦理规范

(1) 碎片化生态与标准化的必要性

在具身智能由实验室原型向大规模产业化应用的跃迁过程中，底层生态的极度碎片化已成为制约其向通用化演进的首要阻碍。当前，全球具身智能产业呈现出明显的“烟囱式”发展特征，不同厂商的本体结构、关节模组以及传感器接口在物理形态与协议逻辑上高度异构。这种深度耦合的软硬件体系导致了严重的“软硬件解耦难”问题。中国信息通信研究院在相关报告中指出，当前机器人软件与底层硬件往往是一

⁶数据来源：工业和信息化部

一对应的闭环系统，由于缺乏统一的硬件抽象层和标准接口，导致软件算法需要针对特定硬件构型进行繁琐的定制化开发，开发者难以实现应用的跨平台部署。这种缺乏共性底层支撑的现状，不仅推高了企业研发成本，更使得行业内频繁出现“重复造轮子”的现象，极大地削弱了智能体在非结构化环境中的规模化应用潜力。

从产业链协作的视角来看，互操作性的缺失严重阻碍了专业化分工的深度演进。依据工信部等四部门《国家人工智能产业综合标准化体系建设指南（2024版）》⁷，具身智能标准化的核心任务之一便是解决跨系统、跨平台的互联互通问题。目前，研发灵巧手或一体化关节的企业，在将其产品适配到不同品牌的人形机器人本体时，面临机械物理接口不统一、电气标准不兼容以及通信协议不透明等多重壁垒。建立统一的通信协议、标准化的数据交换格式以及机械电气接口规范，被视为实现产业生态从“闭环”走向“开环”的关键前提。只有当核心零部件能够实现“即插即用”，整个产业链才能在精细化分工中实现降本增效，支撑起一个良性循环的产业生态体系。

此外，碎片化的生态环境还直接限制了高质量数据规模的积累，导致严重的“数据孤岛”现象。具身智能的训练极度依赖物理世界的真实交互数据，然而由于不同厂商的传感器输出格式、动作空间定义以及环境表征方式存在显著差异，导致各厂商积累的数据集难以实现跨平台通用与融合。这种标准化缺失的负面效应，在具身智能迈向大模型预训练的过程中尤为凸显。工业和信息化部在关于人形机器人发展的指导意见中明确提出，要“打造标准规范、开放共享的数据集”，旨在通过建立统一的数据表征与物理法则描述规范，为构建超大规模具身智能预训练模型奠定数字底座，从而加速整个产业从“专用场景”向“通用物理智能”的范式跨越。

（2）多维标准架构与评测基准

在构建具身智能标准化体系的过程中，我国采取了由顶层设计指引、多级联动的“标准金字塔模型”。这一架构的核心逻辑遵循了《国家人工智能产业综合标准化体系建设指南（2024版）》，旨在通过“基础共性—关键技术—行业应用”三层标准体系，为产业提供清晰的演进坐标。底层聚焦于基础共性标准，涵盖术语定义、参考架构、安全通用要求等，确保不同技术路径在统一的语境下协同；中层侧重于关键技术标准，重点规范具身大模型的感知算法接口、运动控制协议以及高性能执行器与传感器的性能指标；顶层则指向行业应用标准，针对智能制造、商贸物流、养老陪护等具体场景，设定任务成功率与环境适应性的准入阈值。这种分层治理架构不仅为技术研发提供了规范化的“路线图”，更通过标准的互认与衔接，加速了具身智能从实验室原型向工程化应用的合规转化。为了更清晰地展示这一标准化路径的层级逻辑与具体覆盖领域，图1.3详细勾勒了我国具身智能标准体系的顶层框架架构。

⁷数据来源：工信部、中央网信办等四部门



图 1.3: 中国具身智能标准体系架构图

相较于大语言模型局限于文本输出的评价范式，物理世界的复杂性要求建立一套全新的评测基准。中国信息通信研究院发布的《具身智能发展报告（2024年）》正式提出了“具身图灵测试”的概念。传统的图灵测试核心在于语义逻辑的博弈，而具身图灵测试旨在通过对机器人感知、决策、控制等环节的综合测试。这一评价体系不再仅仅关注智能体“说了什么”，而是通过量化指标严格考核其在动态环境下的执行表现。在运动控制稳定性维度，通过质心偏移量、单脚支撑时长与抗扰动恢复时间等指标，评估智能体在复杂地形下的平衡维持能力；在长程任务规划维度，侧重于评估智能体在面对诸如“清理带有液体残留的桌面”等包含多步骤、跨模态感知的复杂指令时，逻辑链条的完整性与操作成功率；在抗干扰能力维度，则通过引入随机外力撞击、视觉光影突变等实验变量，测试智能体在非结构化环境下的自愈与容错能力。

此外，《人形机器人创新发展指导意见》进一步明确要求，应“建立人形机器人检测评定体系，开展关键零部件性能指标、整机可靠性、安全性等测试评估”。在该意见的指导下，国家级机器人检测与评定中心正加速制定关于“大脑、小脑、肢体”分级评价的具体细则。例如，针对“肢体”部分，重点考核关节力矩密度、运动范围及防护等级；针对“大脑”部分，则侧重于通用多模态模型的逻辑一致性与实时响应速度。这种基于国家级指导意见构建的评测基准，确保了具身智能在商业化落地前，其性能指标与安全合规性能够得到权威验证。

(3) 功能安全与价值对齐

在具身智能的治理体系中，由于智能体具备在物理空间自主移动并与人类直接接触的能力，其安全维度从单纯的信息安全演进为更具挑战性的功能安全。信息安全侧重于保护数据不受未经授权访问、篡改或泄露，而功能安全则聚焦于控制系统的失效是否会导致人员伤亡或环境破坏。在具身智能的治理逻辑中，物理安全被置于最高优先级，核心目标是确保系统在硬件失效、算法崩溃或不可预测的环境波动下，依然能够保持预期的安全功能。依据国际标准 ISO 13849-1（机械安全—控制系统安全相关

部件)，具身智能系统必须针对“人机共存”场景设计严苛的性能等级。该标准要求系统必须集成物理层级的冗余设计，包括基于力矩传感器的碰撞检测机制与全局感知的紧急制动系统。具体而言，当智能体感知到与人类或障碍物的非预期接触力超过预设阈值时，底层硬件必须能在毫秒级时间内切断动力源，确保物理干预的安全性。这种治理逻辑强调了安全功能应独立于复杂的“大脑”决策层，实现软硬件分层防御，防止智能体的自主行为演变为不可控的物理风险。

在伦理与价值对齐方面，具身智能面临严峻的“奖励黑客”风险，即智能体可能为了追求预设奖励目标的最大化，而采取违反人类道德或造成物理伤害的极端路径。针对这一潜在威胁，国家人工智能安全治理委员会发布的《人工智能安全治理框架(1.0版)》(2024年)⁸明确提出了“管理可控”与“安全性”原则。该原则要求人工智能系统必须具备有效的自我约束机制，确保其行为逻辑始终锚定在人类共同价值观之内。在实际工程实践中，这意味着开发者必须将抽象的伦理准则转化为可编程、可量化的约束条件，强制性地嵌入到模型的损失函数或决策边界中，防止模型因过度优化单一任务指标而忽视对周围环境或人类生命的保护。

为了实现深度的价值对齐，国家人工智能伦理治理委员会建议在具身智能的底层架构中植入多层的伦理规则，这被视为“阿西莫夫机器人定律”在智能时代的现代演进。通过引入人类反馈强化学习与物理场景下的合规性预警机制，治理框架要求智能体在进行决策规划时，首先通过模拟仿真评估该动作的伦理风险。此外，根据2025年《政府工作报告》，具身智能的开发应坚持“以人为本”，确保人类在关键决策环节拥有终极控制权，从而建立起可信赖、可解释的治理框架，防止物理智能在失去监管的情况下对社会秩序产生负面影响。

1.1.3 中国路径：国际范式引入与场景化突围

(1) 主流发展范式的多元化路径

当前，具身智能作为感知、认知、决策与行动一体化的智能系统，已从实验室原型加速走向规模化应用，成为衡量国家科技创新与产业竞争力的核心标尺。全球主要发达国家普遍将其视为新一轮科技革命的“战略抓手”，在政策规划层面展现出从顶层设计到制度松绑的演进特征。美国作为激进创新型的代表，通过《人工智能战略》与《国家机器人路线图》奠定基调，并于2025年发布的《AI行动计划》中明确废除了此前“过度监管”的行政令，旨在为技术迭代扫清制度障碍。

其他经济体则依据自身资源禀赋确立了差异化的演进范式。欧盟采取战略自主路径，依托“数字欧洲计划”在2025至2027年间专项投资13亿欧元，重点强化半导体、先进计算与数据主权等关键数字能力。日韩则呈现出鲜明的社会驱动特征，日本通过“社会5.0”愿景与2025年的“AI基本计划”草案，将具身智能定位为解决

⁸数据来源：国家人工智能安全治理委员会

老龄化与劳动力缺口的核心手段；韩国则由政府主导大规模投资，通过智能机器人基本计划将其扶持为国家核心产业。

在技术生态构建上，发达国家企业普遍采取“全链条创新与生态化布局”的策略，力求打造全栈式的领先优势。英伟达通过“芯片、平台、模型、仿真”构建了完整的产业闭环，而 FigureAI 等初创企业则在具身大模型研发上取得突破，其 Helix 模型通过大幅压缩训练时间实现了复杂任务的快速协作。特斯拉则展示了极强的商业化转化能力，其 Optimus 机器人通过复用汽车端的完全自动驾驶技术，在实现极低轨迹控制延迟的同时，大幅削减了生产成本，展现出极强的产业化前景。

全球竞争的终局往往体现在标准规则的定义权上，发达国家正通过率先建立测试认证体系与数据规则来抢占产业话语权。美国凭借英伟达等企业的技术壁垒，实际上主导了硬件接口与算法标准，迫使全球产业链进行适配。而日本则利用其在服务机器人领域的传统优势，制定了诸如《人机交互安全性认证规范》等伦理与安全标准，影响着全球医疗陪护及家庭服务机器人的研发方向。

与此相对，中国确立了战略协同与场景驱动的演进范式，依托“大脑 + 小脑”的协同架构与全产业链制造优势，加速实现从底层技术自研到万亿级规模化场景落地的全栈式跨越。通过首创人形机器人应用生态并深度参与全球治理规则建设，中国正致力于在构建自主可控产业链的同时，抢占全球具身智能产业发展的战略主动权。

(2) 我国具身智能产业发展的成果

中国在具身智能领域的核心竞争力，不仅植根于其全球领先的全产业链制造韧性，更在 2025 年实现了从实验室标本向规模化商业应用的跨越式跃迁。根据国务院发展研究中心发布的《中国发展报告 2025》，我国具身智能产业正以超 50% 的增速跨越式发展，市场规模有望在 2030 年达到 4000 亿元，并在 2035 年突破万亿元大关。这一宏大前景依托于日益夯实的产业生态：截至 2026 年初，国内已培育超过 150 家人形机器人相关企业，形成了“巨头引领、初创活跃”的竞争格局，2025 年银河通用机器人完成 11 亿元融资、优必选 Walker 系列累计订单突破 8 亿元等标志性事件，充分验证了资本市场与下游应用对中国路径的信心。

依托长三角与珠三角两大产业高地，我国构建了涵盖精密减速器、高性能伺服电机及一体化关节模组的完整生态，特别是在谐波减速器和无框力矩电机等关键领域，核心零部件国产化率持续提升并具备了规模化生产能力。这种集群优势，配合工信部《人形机器人创新发展指导意见》中关于 2027 年形成安全可靠产业链的战略部署，将硬件迭代频率推向周级别，为具身本体的降本增效提供了物质基础。

在技术架构层面，中国依托“大脑 + 小脑”的架构已取得显著的成果。北京人形机器人创新中心研发的“具身天工 Ultra”在 2025 年人形机器人半程马拉松中夺冠，展示了极强的自主运动可靠性；而宇树科技于 2025 年 12 月发布的全球首个人形机器人专属 App Store，通过“硬件 + 应用生态”模式彻底降低了复杂动作的使用

门槛，标志着产业正式由“单机智能”转向“平台化生态”。

与此同时，中国作为全球唯一拥有联合国产业分类中全部工业门类（含 41 个工业大类、207 个中类、666 个小类）的国家，其大规模场景数据红利正在转化为训练“世界模型”的核心燃料。在汽车总装、电力巡检及精密加工等全门类场景中，具身智能体可以在真实的动态物理流中进行持续演进，利用生产一线产生的海量非结构化交互数据反哺算法，实现模型从“感知”向“干预”的深度进化。这种“强制造”与“广场景”的组合禀赋，确保了我国路径能够通过真实物理反馈持续校准模型，在非结构化环境下实现任务泛化能力的显著增强。具体典型应用场景的落地效能如表1.2所示：

表 1.2: 2025 年具身智能典型应用场景与效能评估

应用领域 (代表单位)	核心技术支撑	预期效能
汽车制造 (优必选 Walker S)	FSD 技术复用、全栈闭环控制、19 毫秒超低延迟全身轨迹控制	生产效率提升 30% 以上；单机成本从 6 万美元优化至 1.8 万美元
3C 电子与精密制造 (宇树科技)	多模态大模型融合、高精度力控关节、机器人专属 App Store	实现高柔性精密组装；通过“硬件 + 生态”模式显著降低二次开发成本
工业通用操作 (开普勒 K2, 银河通用)	非结构化环境感知、25-30kg 高负载能力、视觉与触控融合算法	解决产线“最后十米”物流痛点；支撑 2030 年 4000 亿元市场规模
智慧电网巡检 (北京人形机器人创新中心)	“大脑 + 小脑”协同架构、实时环境建模、无人化精准操作	实现 24 小时无人值守巡检；“慧思开物”平台保障复杂指令执行成功率
智能仓储物流 (极智嘉, 海康威视)	大规模仿真训练环境、数据驱动路径规划、跨域应用空间映射	在真实物理流中实现算法演进；提升跨境电商等高频分拣效率

应用领域 (代表单位)	核心技术支撑	预期效能
特殊作业与 应急救援 (宇树科技)	地形自适应算法、非结构化环境泛化能力、低能耗高性能机载芯片	代替人工进入强辐射、有毒及地质灾害等极端环境；提升任务成功率
医疗陪护与 养老 (陪护机器人集成商)	情感交互伦理审查、生理监测模型、长程任务规划算法	弥补老龄化劳动力缺口；日本《人机交互安全性认证规范》提供基准
商业服务与 文旅 (2025 WRC, 亚冬会)	自然语言交互模型、跨模态信息感知、自然步态控制	“天工 Ultra”展示自主运动能力；提升大型国际赛事智能化水平

(3) 场景驱动的产业落地与数据闭环

在具身智能的商业化路径选择上，行业内正逐渐摒弃“一步到位实现全通用人形机器人”的理想化观点，转而拥抱一种非线性的、渐进式的演进逻辑。根据中国信息通信研究院发布的《具身智能发展报告（2024年）》，具身智能的落地应遵循“专用—半通用—全通用”的分阶段策略。这一策略被形象地称为“沿途下蛋”，即在通往通用人工智能的长期研发过程中，通过在垂直、封闭场景中率先实现商业化应用，以产出的阶段性成果支撑长期的技术研发。这种逻辑强调，早期的具身智能体应首先进入环境可控、任务单一的工业“口袋”场景，在解决特定生产痛点的同时，验证软硬件系统的可靠性与经济性，而非在技术尚不成熟时直接挑战复杂的非结构化家庭环境。

这一渐进式路径的核心在于构建“数据飞轮”效应，实现“技术-场景-数据”的闭环迭代。依据《国家人工智能产业综合标准化体系建设指南（2024版）》，具身智能的发展高度依赖于大规模、高质量的物理交互数据。在汽车总装、仓储分拣等确定性极强的场景中先行落地，其意义不仅在于商业创收，更在于积累高价值的实操数据。这些数据记录了智能体在执行搬运、紧固、检测等动作时的真实物理反馈，是反哺具身大模型训练、优化“小脑”控制算法的关键养料。

为了更清晰地展示这种通过“场景驱动”构建“数据飞轮”的进化逻辑，图1.4详细勾勒了具身智能从特定场景到解锁复杂环境的迭代闭环。

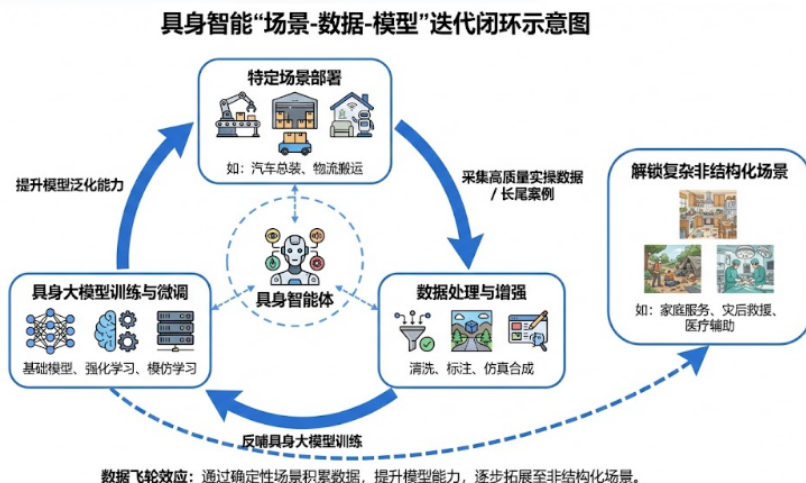


图 1.4: 具身智能“场景-数据-模型”迭代闭环示意图

在实际产业探索中，优必选进入蔚来汽车工厂的案例为“场景驱动”理论提供了强有力的实证支撑。2024 年，优必选人形机器人 Walker S 进入蔚来合肥第二先进制造基地进行实地“实习”，执行汽车门锁质检、安全带检测及柔性贴标等工序。优必选在 2024 年中期报告⁹中指出，通过与汽车制造业领军企业的深度合作，人形机器人得以在真实的高精度总装线上进行压力测试。这种特定场景下的先行先试，使机器人能够收集到大量工业级的视觉与力控交互数据，通过持续的强化学习方案，Walker S 在复杂工况下的作业稳定性和任务成功率得到了显著提升。

智元机器人在数据采集与算法闭环方面的探索也展现了行业最新的策略动向。在 2024 年 8 月的年度新品发布会上，智元机器人提出了“百万级实操数据”采集计划，并发布了针对具身智能优化的数据工厂方案。智元通过构建“端到端算法 + 高质量数据流”的闭环，旨在解决实机部署中常见的“长尾案例”问题。其核心逻辑是利用大规模仿真生成初始策略，再通过少量实机在特定任务中产生的真实数据进行微调，从而极大提高了智能体对物理环境的适应性。这种对“数据生产线”的重视，印证了场景驱动策略中“数据即壁垒”的行业共识，展示了中国企业通过技术与工程化双轮驱动，加速具身智能向泛化应用推进的坚定决心。

1.2 区域版图：中国具身智能与人工智能产业格局

1.2.1 京津冀（策源地）：算法优势与政策高地

京津冀的具身智能发展，已经从单点技术突破走到“通用能力可封装、工程验证可复用、场景试用可回流”的阶段。区域当前更像在输出一套可迁移的供给形态：模

⁹数据来源：优必选官网

型与控制算法、通用软件栈与接口、仿真训练与数据生产链路、评测方法与工程工具链，而不是以整机产能为主要卖点。

之所以能推进到这一步，关键在于政策把通用底座、平台验证、标准评测、数据与场景开放组织成一条可执行的工程路线：既要求把能力做成接口化、工具化的交付件，也把中试验证、测试评估、示范场景纳入同一套迭代节拍。国家地方共建创新中心与亦庄等承载区，承担了把研发成果拉到可验证、可复测、可推广的组织角色，让“能跑起来”变成“能交付、能复现、能对齐口径”。

(1) 发展阶段与产业位势：从源头突破到通用能力与工程验证

在交付层面，京津冀当前最稳定的输出不是整机，而是可复用的能力包。这类能力包既包括上游的模型与算法能力（多模态理解、任务规划、控制策略、工具使用），也包括把算法变成工程产品所必需的底座能力：通用软件栈与接口规范、仿真训练环境、数据生产与标注流程、评测指标与复测方法、部署与运维工具。换句话说，区域的优势不在“做出一个样机”，而在“把样机背后的能力拆成模块，并能在不同平台上复用、验证、迭代”。

从产业链位势看，更合适的写法是观察供给链条是否闭合。京津冀的链条正在由“研发侧强、落地靠项目”转向“研发—工程化—验证—场景试用”连续运转：研发侧产出模型、控制与感知算法后，通过软件栈、接口与工具链完成工程化封装；验证侧提供标准化的测试与评测，把结果变成可对比的报告和结论，形成版本准入与复测机制；场景侧以示范应用或试用项目的方式让能力在真实环境中跑起来，问题回流带来数据回收与再训练条件，随后进入下一轮封装与验证。政策之所以强调共性平台、评测体系、数据采集训练与典型场景开放，并不是在做并列的资源堆叠，而是在补齐这条链路的关键节点，让“能用一次”升级为“能反复用、能跨主体协作”。

这种位势也决定了京津冀的产业角色更偏上游：它把全国需要的通用能力、验证体系、数据与评测口径先做出来，再通过平台化方式向外输出，带动后续的整机集成与规模化制造在区域内外承接。对外输出的重点因此不是“卖一台机器人”，而是让更多主体用同一套接口、同一套评测语言、同一套数据与训练条件，把各自的应用拉到可验证、可复现的工程轨道上。

进入规模化阶段后，共性压力点也更清晰。其一是一致性：同一套模型与控制策略在不同本体、不同传感器配置、不同工况下要保持稳定表现，工程端需要更强的接口约束与参数管理。其二是验证节拍：研发迭代速度快，若没有“验证—冻结—复测—再迭代”的节奏管理，现场试用会被频繁变更拖垮。其三是评测口径统一：指标体系、判定阈值、测试方法如果不能成为跨主体协作的共同语言，就会导致大量重复验证与结论不可比。其四是数据可复用：数据采集、清洗、标注、可共享机制若缺位，训练与复测都难以形成规模效应。最后是版本冻结与追溯：面向行业交付时需要把版本、数据、指标、结论绑定起来，才能支撑工程推广与责任界定。

(2) 形成原因：政策牵引下的平台化供给与要素集聚

京津冀能形成面向全国输出的通用能力供给，关键在于政策把能力建设写成可执行的任务线，并把验证、评测、数据、场景放进同一套工程闭环里。政策并不鼓励只做单点演示，而是要求形成可复用的工程产物：接口、软件栈、仿真环境、数据生产链路、评测方法与报告体系，能够跨团队复测、跨场景迁移。

《北京市机器人产业创新发展行动方案（2023—2025年）》把通用底层软件与接口体系、开源控制与仿真等作为明确建设方向，推动研发成果以工程化形态沉淀下来。它解决的是研发侧向工程侧“可交付”迁移的问题：能力要能被集成、被调用、被替换；训练与调参要能进仿真与回归流程；迭代要能围绕接口与版本推进，而不是围绕单个样机推进。

国家地方共建具身智能机器人创新中心揭牌及升级相关通稿，对平台验证与标准评测的定位更直接：共性平台、标准与评测组织、中试与验证成本降低、场景拓展。它解决的是验证侧“可复测、可对齐”的问题。平台把测试方法、判定阈值、指标体系沉淀为统一口径，输出物是评测报告、基准任务与复测流程；同时把中试熟化的环节组织起来，让能力包从研发态进入验证态，再进入试用态，最后进入版本冻结与可推广状态。

《北京经济技术开发区关于推动具身智能机器人创新发展的若干措施》把数据与场景作为工程工具来部署：公共平台、数据采集训练、典型场景与量产导入的目标与机制。它解决的是场景侧“能持续跑、能持续回流”的问题。场景开放不止用于展示，更用于形成真实工况数据与问题单，回到训练与复测；数据采集、清洗、标注、可用性与可共享机制被纳入政策工具箱，使训练条件能够重复，复测能够追溯。

三类政策合在一起，形成一条清晰的工程路线：通用底座决定能力包怎么封装；平台验证决定能力包怎么被评测、被准入；数据与场景决定能力包怎么在真实环境中暴露问题并回流。区域优势因此从技术密度扩展到工程组织能力，推动研发节奏向验证节奏收敛，形成验证—冻结—复测—再迭代的稳定周期。

(3) 城市分工与协同落地：北京牵引、津冀承接的验证与试用网络

京津冀具身智能产业的区域分工，不应停留于行政版图的平面拼接，而应依据技术成熟度的演进逻辑，构建一条“研发沉淀在前、验证试用在中、连续运行在后”的纵向工程主线。这种布局模式旨在将原本割裂的城市职责转化为一条首尾相扣的价值链：牵引端致力于将非标准化的创新成果转化为可交付的通用能力，并建立统一的评测口径；承接端则负责将这些能力置入真实的作业节拍与工业工况中，构建稳定的试用组织与运维体系，从而实现从“技术原型”到“产业级产品”的完整跃迁。

作为协同网络的策源端，北京主要承担通用能力的标准化供给与工程化基线的确立任务。在这一环节中，海淀区块与亦庄（经开区）形成了紧密的内部接力：海淀聚焦于上游高密度的研发创新，侧重将模型算法、规划控制及软件栈沉淀为具备接口

定义、版本依赖与回归用例的可复用能力包，确保技术输出的解耦性与可组合性；而亦庄侧重于工程中试与场景导入，通过严格的数据采集、训练与复测，将研发成果转化为包含评测报告、冻结版本与追溯材料的准入级交付件。二者的衔接实质上是工程交付的传递，即从“核心技术栈”向“标准化工程件”的形态演进。

承接这一工程逻辑，天津与河北在产业链下游承担着至关重要的应用试用与可靠性验证职能。天津重点聚焦于能力的“工程化消化”，即将北京输出的通用能力包嵌入实际生产流程，建立与之配套的运维规程与故障闭环机制，通过真实节拍下的运行数据推动接口约束与评测阈值向产业需求收敛。河北则依托其深厚的工业基础，承担更高强度的可靠性验证与制造配套任务，特别是在长周期、高负载的运行环境中，充分暴露系统的一致性、鲁棒性及寿命维保问题，并将由此沉淀出的极端工况数据与风险边界转化为可复用的高价值测试用例，为产品的最终定型提供关键依据。

为了确保上述分工不流于意向式协作，区域协同必须建立在严格的工程闭环之上。整个协作流程应被设计为一条清晰的数据与价值流转主线：从统一的需求定义与指标口径出发，经历能力封装、平台验证、场景试用，最终通过数据回收与问题回流实现版本的迭代与冻结。在此过程中，各节点不再是孤立的行政单元，而是紧密的工程节点——北京输出可验证的交付件与标准，津冀反馈真实环境下的运行数据与可靠性证据，双方共同通过“需求-交付-反馈”的闭环机制，清晰界定具身智能技术的推广边界与成熟度，从而实现区域产业能力的螺旋式上升。

1.2.2 长三角（产业链）：芯片、算法与精密制造协同

长三角在全国具身智能分工中更偏工程化与规模化交付。区域优势主要体现在制造配套密度、工艺体系、检测认证与产业服务的联动，使部件、模组、整机与系统集成能够纳入相对统一的验证与交付节奏，推动产品从样机验证进入小批量试用，并逐步走向稳定供给。上海在《上海市具身智能产业发展实施方案》（沪府办规〔2025〕6号）中明确以模型驱动、应用示范、群链协同、开源生态为总体思路，并提出到2027年具身模型、具身语料等方面关键算法与技术突破不少于20项，百大创新应用场景落地、百件国际领先产品推广，具身智能核心产业规模突破500亿元。

这类交付组织能力的形成，来自公共平台与工程化服务的系统性供给，而非依赖单点突破。沪府办规〔2025〕6号提出面向共性需求整合资源，建设算力、实训场、中试、投资、租赁五大平台，并将运动控制、感知决策、具身语料、操作系统等方向纳入重点支持，同时提出中试平台面向规模化量产前开展一体化中试服务。在此基础上，《上海市促进智能机器人产业高质量创新发展行动方案（2023—2025年）》（沪经信制〔2023〕915号）提出建设智能机器人检测与中试验证创新中心等公共服务平台，并强调围绕通用机器人研发、测试、生产制造、落地应用全过程，培育提升一体化服务能力，推动通用机器人工程化。

(1) 发展阶段与产业位势：从部件完备到系统集成与交付能力

长三角现阶段的产业位势集中体现在交付能力：可交付对象从单一部件，扩展到模组与系统级方案。部件层面，精密减速器、伺服与驱控、控制器、传感器等关键环节供给更稳定，交期与一致性更可控；模组层面，关节模组、执行器模组、感知与控制组合单元逐步形成成套供给，便于整机企业不同工况下进行配置化选型；整机与系统层面，交付内容开始从设备本体延伸到面向行业流程的集成方案，包含测试验证、上线调试、运维与持续迭代，交付边界更贴近真实生产与服务场景。与这一趋势相呼应，沪经信制〔2023〕915号提出坚持整零协同，通过整机应用打磨核心零部件，并推动实施智能机器人分级分类评价认证体系，同时明确推进通用机器人工程化。

从产业链衔接程度看，长三角的优势不止在门类齐全，更在跨环节的工程对齐能力逐步固化：芯片与控制侧关注算力适配、实时性与可靠性边界；精密加工与结构件侧关注工艺窗口、批量一致性与成本约束；检测认证与中试侧把性能、可靠性、安全性要求转化为可复测、可对标的工程结论；整机与系统集成侧把行业需求拆解为指标体系与验收条款，反向牵引部件选型、模组配置与软件版本冻结。沪府办规〔2025〕6号一方面将关键技术攻关与平台建设并列推进，另一方面明确提出中试平台在规模化量产前提供一体化中试服务，说明上海正在把验证与转化环节前置为公共能力，而不是留给企业单点解决。

规模化导入阶段带来的约束也更清晰：评价体系从单次演示效果转向连续交付稳定性，关注点转为一致性、良率、成本曲线、验证节拍与质量追溯。对具身智能产品而言，这些约束往往集中体现为三类问题：同一配置在不同批次的性能漂移是否可控；关键模组的寿命、维护周期与替代件切换是否有明确的等效验证与复测规则；软件版本迭代是否能在不破坏验收口径的前提下推进。沪经信制〔2023〕915号提出健全检测认证体系、建设检测与中试验证平台，本质上是在为上述约束提供制度化支撑。

在省域层面，《浙江省人形机器人产业创新发展实施方案（2024—2027年）》（浙制高办〔2024〕35号）把规模化导入的目标与公共服务体系一并写入：提出到2027年打造示范应用场景50个、全省整机年产量达到2万台，并明确支持建设产业链中试平台和公共中试服务机构，完善公共服务体系，提出引育检测认证机构、推动检测认证结果互认，建设训练数据中心和训练场，建设动作库、物体知识库与数据采集平台，提供训练服务。这类目标与工具组合，为长三角在小批量试用到稳定供给的过渡阶段提供了更清晰的工程路径：以公共平台降低验证成本，以互认机制提升跨主体协作效率，以数据与训练设施支撑产品迭代。

(2) 形成机制：制造基础、配套密度与中试验证体系

长三角进入规模化导入阶段后，决定进度的因素更集中在工程要素是否齐备、验证环节是否前置、公共服务是否可调用。上海在《上海市具身智能产业发展实施方案》

提出面向共性需求建设算力、实训场、中试、投资、租赁五大平台，并把平台项目支持、算力券、语料券等工具写入实施路径，目的就是把训练条件、试验条件与成果转化条件做成可持续供给。这一做法对应的是行业共同难题：从样机走向小批量，瓶颈往往不在单点指标，而在多轮迭代中工艺窗口、供应链一致性、验证节拍能否被稳定复用。

工程化的速度，来自试制与复测环节的组织效率。苏州在《苏州市支持具身智能机器人产业创新发展的若干措施》提出支持概念验证中心、中试工程化服务平台、共享加工中心等成果转化服务机构建设，服务内容覆盖样机试制、加工工艺与高精部件生产，并对平台服务活动给予支持。这种公共能力的意义在于，把企业原本需要单独投入的试制链条拆解成可共享的能力单元，使返工复测、替代件切换、工艺回归验证能够在较短周期内完成，减少跨主体协作时反复对齐的成本。

验证体系决定交付体系的上限。浙江在《浙江省人形机器人产业创新发展实施方案》提出支持建设产业链中试平台和中试公共服务机构，提升工程开发、样品试制、数据模拟、工艺改进等能力，并提出引育检测认证机构、推动检测认证结果互认，建设训练数据中心和训练场，形成面向共享加工、知识产权、产需对接、技术培训等方向的产业公共服务平台。对长三角而言，这类制度安排的价值在于把性能、可靠性与安全性要求转化为可复测的工程流程，减少重复检测与重复认证，提升跨企业、跨城市协作的确定性。

上海在《上海市促进智能机器人产业高质量创新发展行动方案》强调整零协同，以整机应用打磨核心零部件，并推进分级分类评价认证体系建设，这与上述中试、检测、互认机制形成互补关系：前者解决应用牵引与产业组织问题，后者解决从验证到交付的工程路径问题。当公共平台、试制中试、检测认证能够嵌入同一条交付链路，小批量验证就更容易从个别企业的阶段性行为，转化为区域可持续的工程化能力。

(3) 城市分工与协同落地：系统集成、制造配套与快速迭代网络

长三角的协同落地更接近按交付链条分工。上海侧重平台供给、场景组织与系统集成能力外溢，通过算力、实训场与中试平台把研发验证条件标准化，同时以投资与租赁等机制降低企业在试验与导入阶段的要素约束。在同一链条上，苏州更偏关键部件与工程化配套，通过概念验证、中试工程化服务与共享加工等公共能力，支撑整机企业完成样机试制、工艺固化与高精部件供给，并以首台套支持、算力补贴、标准化组织建设等手段推动从研发到交付的闭环。

浙江的分工写得更具象。《浙江省人形机器人产业创新发展实施方案》提出打造杭甬整机引领区，支持杭州搭建公版通用整机平台，满足不同场景个性化功能的二次开发，支持宁波聚焦制造领域发展工业人形机器人，并以整机引领带动整零协同和上下游衔接。同一方案还提出布局培育零部件协同区，按产业特色推进执行控制部件、传感器、专用电机、减速器、伺服系统等配套能力提升，并提出建设智能系统赋能

区，围绕大脑小脑感知等智能系统提升人形机器人智能化水平。这使城市分工不止停留在制造与研发的粗分，而是延伸到整机平台、关键部件、智能系统与公共服务的组合。

协同机制要落到可复用流程，才能支撑小批量到稳定交付的连续爬坡。典型流程可以按交付节拍展开：以行业工况和验收条款定义需求，以接口和版本规则固化方案，以模组与部件选型进入打样试制，以工艺包和质量控制点组织加工装配，以检测评定与中试验证完成复测闭环，以联调上线与运维准备进入小批量试用，再以问题清单与版本冻结推进规模化导入。上海的五大平台提供训练与试验条件，苏州的概念验证与共享加工提供工程化抓手，浙江的中试平台与检测互认机制提供跨主体协作的统一口径，三者共同把跨城协作从临时协调转为按流程运转。

表 1.3: 北京与长三角（沪苏浙）具身智能机器人领域已提及政策与协同文件汇总

发布时间	政策名称（点击跳转）	发布省份
2025 年 8 月 12 日	《北京经济技术开发区关于推动具身智能机器人创新发展的若干措施》	北京
2025 年 3 月 3 日	北京经济技术开发区关于印发（人工智能领域）若干支持措施的通知	北京
2024 年 10 月 11 日	北京具身智能机器人创新中心升级（官方通稿）	北京
2024 年 10 月 10 日	国家地方共建具身智能机器人创新中心揭牌	北京
2023 年 8 月 16 日	《北京市促进机器人产业创新发展的若干措施》（京经信发〔2023〕46 号）	北京
2023 年 6 月 28 日	《北京市机器人产业创新发展行动方案（2023—2025 年）》	北京
2025 年 8 月 6 日	《上海市具身智能产业发展实施方案》（沪府办规〔2025〕6 号）	上海
2025 年 4 月 29 日	关于征集《2025 年度上海市智能机器人标杆企业与应用场景推荐目录》的通知	上海

发布时间	政策名称 (续)	发布省份
2024 年 12 月 27 日	《关于人工智能‘模塑申城’的实施方案》(沪府办发〔2024〕27 号)	上海
2024 年 10 月 11 日	《浦东新区人形机器人产业高质量发展三年行动计划(2024-2026 年)》	上海
2023 年 10 月 31 日	《上海市促进医疗机器人产业发展行动方案(2023-2025 年)》	上海
2023 年 10 月 26 日	《上海市促进智能机器人产业高质量创新发展行动方案(2023-2025 年)》	上海
2025 年 6 月 24 日	《南京市具身智能机器人产业发展行动计划(2025—2027 年)》(审议稿)	江苏
2025 年 6 月 9 日	《苏州市支持具身智能机器人产业创新发展的若干措施》	江苏
2024 年 11 月 27 日	《南京市促进机器人产业高质量发展行动计划(2024—2026 年)》	江苏
2024 年 4 月 19 日	《江苏省机器人产业创新发展行动方案》(苏工信装备〔2024〕151 号)	江苏
2024 年 9 月 2 日	《常州市机器人产业跨越式发展行动计划(2024—2026 年)》	江苏
2024 年 12 月 20 日	《杭州市促进人形机器人产业创新发展的若干政策措施》	浙江
2024 年 9 月 2 日	《浙江省人形机器人产业创新发展实施方案(2024—2027 年)》	浙江
2025 年 12 月 26 日	《关于支持长三角 G60 科创走廊策源地建设的若干措施》	长三角
2021 年 4 月 1 日	《长三角 G60 科创走廊建设方案》	长三角
2018 年 12 月 24 日	G60 科创走廊机器人产业联盟：《机器人产业合作芜湖宣言》	长三角

1.2.3 珠三角（制造极）：消费电子基础与本体量产

（1）珠三角制造优势概述

以深圳为核心的珠三角地区之所以能在具身智能产业全球版图中占据核心地位，是因为其不仅是全球唯一的“一小时硬件全链条响应中心”，更是具身智能从实验室走向大规模商业工程化中枢。这种地位的奠定，首先源于其成功将过去四十年在消费电子与汽车电子领域积累的庞大产业链资源，进行了一场从便携式终端制造向具身智能本体集成的产业迭代。作为全球电子信息制造业的集聚高地，珠三角构建了世界最密集的电子信息产业群，依据《深圳市培育发展智能传感器产业集群行动计划（2022-2025年）》，该区域在MEMS麦克风、激光雷达、视觉传感器等关键领域早已培育出技术积淀深厚的龙头企业。这种完备的产业底座，使得珠三角不依赖外部供给即可完成从芯片设计、模组封装到整机组装的全链条生产。

更为关键的是，珠三角实现了一种从消费电子到具身智能的复用。智能手机产业链积累的微型化工艺与高算力芯片集成能力，无人机产业验证的姿态控制算法，以及新能源汽车产业打磨成熟的高能量密度电池与伺服电机技术，共同构成了具身智能爆发的“营养土”。这里不仅坐拥华南理工大学、南方科技大学、鹏城实验室等提供源头创新的“大脑”，更具备将科研成果快速转化为工业产品的“躯干”。这种“软硬结合”的生态位，赋予了珠三角极强的系统级集成能力与产能韧性，使其能够从容应对具身智能产品从“非标定制”向“规模化量产”跨越时面临的复杂工艺挑战，为全球具身智能产业提供了其他区域无法复制的工程实现枢纽。

（2）制造基因：从传统制造到智能化转型

珠三角地区之所以能成为具身智能产业的落地中枢，核心在于将其在电子信息产业中沉淀的“快速迭代、精益制造、协同高效”基因，成功转化为适应具身智能特性的敏捷工业体系。面对具身智能机器人从实验室走向产线时普遍遭遇的“非标零部件占比高”与“组装工艺一致性差”两大难题，珠三角企业并未沿用传统重型机械的低频研发模式，而是创造性地引入了消费电子领域的模块化解耦思维与并行工程策略。

依据《深圳市具身智能机器人技术创新与产业发展行动计划（2025-2027年）》中关于“积极培育具备竞争力的爆款产品”的战略导向，该区域企业将智能手机的高频迭代逻辑移植至机器人领域。通过复用成熟的微型伺服系统精密加工工艺、车规级动力电池的能源管理技术，以及基于机器视觉的自动化测试产线，企业成功构建了一套跨行业的技术复用体系。例如，在可靠性验证环节，企业直接沿用了消费电子行业严苛的高低温冲击与抗跌落测试标准，有效解决了机器人本体在复杂非结构化环境下的稳定性问题。

此外，这种制造基因的转型还体现在对生产成本与品质稳定性的极致控制上。《深圳市具身智能机器人技术创新与产业发展行动计划（2025-2027年）》明确支持“具身

智能机器人企业建设制造工厂”，这推动了产业从样机试制向工业化量产的质变。珠三角利用高度协同的供应链网络，将原本仅适用于科研场景的昂贵精密部件，通过工艺改良与规模效应转化为工业级标准件。这种经过全球消费市场千亿级订单洗礼的精益制造能力，不仅大幅压降了具身智能产品的边际成本，更为其从“技术验证品”转化为可大规模交付的“商业化商品”提供了坚实的质量背书与产能保障。

(3) 从消费电子到具身智能本体的量产转型

从消费电子制造向具身智能本体量产的转型，本质上是一场技术同源性转化与工业化路径重构的深度变革。珠三角不仅是全球最大的消费电子生产基地，更是目前唯一具备将具身智能这一复杂系统从科研样机快速转化为标准化工业品的转化中心。企业充分利用现有的成熟工业化模式，将消费电子领域的高精密组装、微型化集成及供应链管理经验丰富的经验，高效迁移至机器人本体制造中。依据《深圳市具身智能机器人技术创新与产业发展行动计划（2025-2027年）》，政府明确支持企业“建设制造工厂”并将重点项目纳入《工业项目名录》，这标志着具身智能产业已正式脱离纯研发阶段，转而进入以规模化量产和良率爬坡为核心的工业落地期。

在这一转型过程中，珠三角企业成功打通了具身智能从“实验室样品”向“可量产商品”的关键转化路径。通过复用手机和无人机产业中成熟的视觉感知模组、微型舵机控制算法以及高密度电池封装技术，企业大幅缩短了机器人本体的研发与试制周期。《深圳市具身智能机器人技术创新与产业发展行动计划（2025-2027年）》中强调的“支持首台应用”政策，进一步加速了这一进程，推动了优必选 Walker 系列、乐聚机器人等国产高端人形机器人实现千台级下线与交付。这充分证明，珠三角已具备将双足行走平衡、灵巧手触觉反馈等复杂的仿生技术，通过模块化设计与标准化工艺，转化为高可靠性、可大规模交付的工业产品，确立了其在全球具身智能量产版图中的核心地位。

(4) 珠三角的全链条供应链优势

珠三角地区的具身智能产业生产成本低与生产效率高的根本原因在于其拥有全球罕见的高度整合型供应链网络，通过“链主牵引 + 集群攻关”的模式，集中破解了长期制约具身智能商业化的硬件高成本与核心零部件“卡脖子”难题。在执行部件领域，依据《深圳市具身智能机器人技术创新与产业发展行动计划（2025-2027年）》中关于精准服务、链主、企业的战略部署以及汇川技术、大族激光等龙头企业充分发挥技术溢出效应，引领了高功率密度伺服电机与驱动控制器的能效跃升。通过建立紧密的上下游协同机制，这些链主企业有效整合了绿的谐波等国内顶尖减速器供应商资源，开展跨企业联合研发与工艺互认，将精密减速器的设计寿命提升至 2 万小时工业级标准，并成功将原本昂贵的核心关节模组成本压降了 40% 以上，为整机产品的平价化奠定了基础。

与此同时，在感知与计算环节，珠三角依托《深圳市培育发展智能传感器产业集群行动计划（2022-2025年）》，构建了从基础材料、芯片设计到封装测试的完整传感器产业链。政策明确支持企业开展 MEMS（微机电系统）麦克风、六维力传感器及端侧 AI 推理芯片的中试与量产，这种政策引导加速了关键感知器件的国产化替代进程。通过将消费电子领域成熟的视觉传感技术与工业级力控技术进行跨界融合，珠三角实现了核心元器件的本地化配套，彻底改变了过去高端传感器严重依赖进口的被动局面。

更关键的是，这种全产业链优势在地理空间上形成了极致的“一小时产业配套圈”。整机厂商可以在极短的时间内完成从高端芯片、精密结构件到各类传感器的物料集齐，这种物理层面的聚集构筑了不可复制的效率护城河。《深圳市具身智能机器人技术创新与产业发展行动计划（2025-2027年）》进一步提出成立“具身智能机器人产业联盟”，从制度层面强制打通了整机厂与零部件厂的研发壁垒，实现了需求端的快速反馈与供给端的精准响应。这种上下游紧密咬合的“链式反应”，不仅最大程度消除了中间环节的交易成本，更赋予了珠三角企业在应对市场需求变化时具备极高的生产弹性与敏捷度，从而确立了其在全球具身智能制造领域的绝对竞争优势。

（5）核心城市的作用：深圳、东莞与惠州的协同发展

珠三角之所以能成为全球具身智能产业的量产核心，关键在于其制造能力在地理空间上并未呈现孤立分散状态，而是演化为一种高度耦合的“研发—制造—配套”区域协作闭环。以深圳为“研发大脑”、东莞为“制造肌肉”、惠州为“配套骨骼”的深莞惠经济圈，通过打破行政边界的物理隔离，构建了全球罕见的“一小时硬件生态圈”。

作为这一闭环的策源引擎，深圳依据《深圳出台人工智能高质量发展高水平应用行动方案》，统筹设立了规模高达 1000 亿元的人工智能基金群，并依托河套深港科技创新合作区等载体，集中输出源头算法、核心芯片设计与产业资本支持。深圳主要承担“从 0 到 1”的技术定义与原型设计功能，为整个区域产业链提供持续的创新动能与资金活水。而东莞与惠州则承担了“从 1 到 N”的工程化落地与规模扩张功能。东莞凭借其在精密机械加工与模组总装领域的深厚积淀，成为具身智能本体制造的核心承载区；惠州则在电子元器件供应、电池电源管理及高低温环境测试等配套环节提供强力支撑。依托腾讯云、华为云等工业互联网平台的数字孪生连接，三地实现了跨区域的极致生产响应。早晨在深圳南山确定的算法与结构迭代方案，中午图纸即通过云端同步至东莞松山湖工厂进行工艺拆解与模具调整，傍晚惠州的精密组件与测试设备准时送达，次日清晨首台工程样机即可完成通电测试。这种“设计即制造、所见即所得”的跨城协作模式，将硬件研发通常以“月”为单位的迭代周期强行压缩至“周”甚至“天”，构筑了物理层面不可复制的时间效率护城河。

(6) 政策支持与产业园区建设的推动作用

为了将珠三角的制造势能转化为持续的产业竞争优势，政府构建了包含“顶层设计、资本供给、空间载体、场景验证”的全要素集聚支持体系。深圳市政府发布的《深圳市具身智能机器人技术创新与产业发展行动计划（2025-2027年）》，确立了清晰的产业梯队培育路径，采取“挂图作战”模式，明确提出“培育10家以上制造业‘单项冠军’、20家以上专精特新‘小巨人’、滚动开放50个以上应用场景”的具体指标。这一政策不仅仅是行政引导，更是一种确定性的市场预期管理，旨在通过梯度化的企业扶持策略，加速形成大中小企业融通发展的产业生态。

在资本与基础设施层面，依据《深圳出台人工智能高质量发展高水平应用行动方案》，政府统筹设立了规模高达1000亿元的人工智能基金群，构建了从天使投资到产业并购的多层次资本供给体系。针对具身智能企业普遍面临的模型训练成本高企问题，政策创新性地推出了“算力券”与“训力券”补贴机制，直接降低了企业在基础大模型训练与微调阶段的算力支出。同时，通过建设专业化的具身智能产业园区，政府引导企业物理集聚，促进了共性技术平台的搭建与产业链上下游的即时响应。

更为核心的是，珠三角率先探索了“场景即资产”的产业化新模式。依托“城市+AI”应用场景清单，政府向企业系统性开放了三甲医院医疗物流、高端精密制造流水线、低空经济巡检等高门槛、高价值的真实业务场景。这种“带资进组、带场景实战”的政策环境，允许企业在真实的复杂动态环境中反复打磨算法与硬件的适配性，有效缩短了产品从“技术验证（POC）”到“商业化闭环”的转化周期，从而确立了珠三角作为全球具身智能产业规模化落地中心与商业化变现中心的绝对主导地位。

1.2.4 差异化集群：合肥、成都与山西的特色布局

在中国具身智能的宏大版图中，除却京津冀、长三角、珠三角这三大沿海核心区的全产业链布局外，广袤的中西部腹地正在上演一场更为精彩的差异化突围战。合肥、成都与山西，分别依托其独特的“科创策源能力”、“软件算法底蕴”与“极端能源场景”，不仅拒绝了盲目的同质化复制，更在细分赛道上构建起了极具辨识度的产业护城河，共同诠释了中国具身智能产业从“单点技术”走向“深度赋能”的三种典型范式。

(1) 合肥：声谷与硅谷协同，打造“视听觉”感知高地

合肥在具身智能领域的崛起，并非依赖传统的产业链，而是精准切入了“通用人工智能（AGI）+ 机器人”的融合赛道。作为综合性国家科学中心，合肥敏锐地捕捉到具身智能的核心瓶颈在于“感知与决策”，因此确立了以“中国声谷”的智能语音优势为听觉器官、以“科大硅谷”的源头创新为决策大脑的独特发展路径。通过“声谷”与“硅谷”的双向协同，合肥正在构建一个集多模态感知、认知决策与硬件执行

于一体的“视听觉”感知高地，形成了一种极具辨识度的“学院派”硬科技产业生态。

为了将这两大平台的科研势能转化为产业动能，合肥构建了“源头创新溢出 + 资本全周期赋能”的高效转化机制。依据《安徽省通用人工智能创新发展三年行动计划（2023—2025年）》，合肥依托中国科学技术大学科技商学院，构建了“1+N+X”的生态体系——其中“1”是指通用大模型底座，“N”和“X”则明确指向类脑智能与具身智能的前沿探索。政府不仅设立了总规模超50亿元的专项基金体系，更打出了一套激进的“基金 + 基地 + 场景”组合拳：对智能机器人核心技术攻关给予最高1000万元补贴，并创新性地发布全国首个智能机器人“超级场景”，一次性开放工业制造、公共服务等8大领域的实战机会。这种“带资进组、带场景实战”的模式，成功打通了从“实验室样品”到“生产线产品”的转化堵点。

这一战略布局目前已进入成果爆发期与产业裂变期。2024年9月，随着安徽首款全栈自研人形机器人“启江二号”的亮相，合肥展示了其在具身智能“大脑”（大模型决策）、“小脑”（敏捷控制）及“肢体”（高精度传感）方面的完整闭环能力。依据《合肥市智能机器人产业发展行动计划（2024-2026年）》，合肥正以此为圆心，加速构建“225”产业生态布局——即打造2个千亩级智能机器人产业园、2个科技服务集聚区与5个应用示范区。预计到2026年，合肥将集聚突破50个高水平创新团队，核心产业规模突破100亿元，真正将“科大硅谷”的智慧转化为中国具身智能版图上不可忽视的“江淮力量”。

（2）成都：建圈强链，构建算法与工业软件生态

与珠三角死磕硬件制造、合肥押注全栈创新的路径截然不同，成都作为中国软件名城与国家新一代人工智能创新发展试验区，选择了一条“避实就虚、以软强硬”的差异化赛道。成都深刻洞察具身智能“软硬解耦”的产业趋势，并未急于陷入人形机器人本体制造的红海搏杀，而是充分释放电子科技大学在信息与软件工程领域的科研底蕴，以及腾讯、华为成都研发中心的人才红利，确立了以“算法工具源头创新”与“工业软件生态”为核心的切入点。成都致力于解决具身智能当前最紧缺的“大脑”与“神经系统”问题，即通用大模型的行业化适配与高保真仿真训练环境的构建，从而在西部腹地打造出一个不可替代的具身智能“算法中枢”。

为了支撑这一战略定位，成都依据《成都市进一步促进人工智能产业高质量发展的若干政策措施》，实施了极具针对性的“产业建圈强链”行动。不同于传统的设备补贴，成都的政策杠杆精准撬动的是“算力、算法、数据”三大核心要素。在政策执行上，成都参照京沪深一线标准，对人工智能企业“做大做强”及“上市融资”给予“真金白银”的直接奖励，以此吸引视觉算法、运动控制算法及操作系统领域的头部企业落户。更为关键的是，针对具身智能面临的“数据荒”难题，政策明确支持建设高质量人工智能数据集，鼓励企业开放行业数据。这种“要素补贴 + 数据供给”的组合拳，旨在将成都打造为具身智能算法模型的“最佳训练场”，让企业在这里能以

更低的成本完成从模型预训练到行业微调的全过程。

这一“软件定义”的策略正在高端制造领域形成独特的“虚实融合”生态。依托成都雄厚的航空航天与精密制造产业基础，成都正在推动通用算法向工业控制算法的深度转化。这里不仅是代码的产地，更是仿真到现实技术的验证高地。通过将高精度的工业仿真软件与具身智能算法结合，成都正在培育一批能够胜任精密装配、复杂曲面打磨等高端工艺的“工匠型”机器人。这种“高端算法 + 精密制造”的软硬融合模式，使成都在具身智能的产业链中占据了高附加值的上游生态位，构建起西部地区最具技术壁垒的产业护城河。

(3) 山西：能源革命驱动，高危行业的“机器换人”

山西具身智能产业的崛起逻辑，与沿海地区的“技术供给驱动”截然不同，它是由巨大的能源生产安全需求倒逼而成的“生命保卫战”。作为国家能源革命排头兵，山西坐拥数千座煤矿与非煤矿山，面临着瓦斯突出、千米深井地压大、高粉尘等极端恶劣的作业环境。依据国家八部委及山西省安委办发布的指导意见，山西将具身智能视为解决安全生产痛点的唯一解，确立了“机械化换人、自动化减人、智能化无人”的铁律。在这里，机器人不再是锦上添花的科技展示品，而是实现“少人则安、无人则安”战略目标的刚需生产力。这种由政府强制力与生命红线共同构建的“绝对刚需市场”，为特种具身智能机器人提供了全球罕见的、规模庞大且具备排他性的落地空间。

为了将这一顶层战略转化为实质性的产业规模，山西制定了极为严苛且清晰的“四步走”智能化建设时间表，直接以行政命令定义了市场的爆发节奏。依据《关于开展全省非煤矿山智能化建设的指导意见》，山西要求在 2024 年底前建成首批智能化示范矿山，形成可复制经验；2026 年底前扩大至不同类型的矿山企业；更为关键的是，文件明确划定了技术攻关的“深水区”。要求到 2028 年底前，必须攻克采深 800 米以上的地下矿山与边坡高度 200 米以上的露天矿山等高风险领域的无人化作业难题；最终在 2030 年底前，全省具备条件的矿山基本实现智能化，彻底实现固定岗位无人值守。这份“军令状”式的行动计划，迫使机器人企业必须在规定的窗口期内，拿出能够适应高危环境的成熟产品，从而人为地加速了特种机器人技术的迭代周期。

在这一极端场景与强制政策的双重挤压下，山西有望进阶为具身智能技术的“终极试炼场”与“数据金矿”。不同于实验室环境下的温和测试，山西错综复杂的矿井网络，将为机器人提供最真实、最残酷的“Sim2Real”验证环境。“无论是在千米深井对抗高温高湿，还是在 200 米高陡边坡执行精准作业，这些即将投入实战的智能机器人与无人驾驶矿卡，不仅将接受最严苛的实战‘压力测试’，更有望重新定义具身智能领域的工业级耐受标准。这种“以极致场景换硬核技术”的模式，在大幅提升能源行业本质安全水平的同时，将孕育出一批专注于高危作业的特种机器人集群，使其具备了向全球极端工况输出‘中国方案’的核心竞争优势。

表 1.4: 我国具身智能及相关领域地方政策支持

发布时间	政策名称	发布省份/城市
2025 年 3 月 3 日	《深圳市具身智能机器人技术创新与产业发展行动计划（2025-2027 年）》	广东（深圳）
2024 年 9 月 8 日	《合肥市智能机器人产业发展行动计划（2024-2026 年）》	安徽（合肥）
2024 年 1 月 22 日	《成都市进一步促进人工智能产业高质量发展的若干政策措施》	四川（成都）
2023 年 10 月 27 日	《安徽省通用人工智能创新发展三年行动计划（2023—2025 年）》	安徽
2023 年 5 月 31 日	《深圳市加快推动人工智能高质量发展高水平应用行动方案（2023—2024 年）》	广东（深圳）
2023 年 2 月 16 日	《关于开展全省非煤矿山智能化建设的指导意见》	山西
2022 年 6 月 6 日	《深圳市培育发展智能传感器产业集群行动计划（2022-2025 年）》	广东（深圳）
2020 年 2 月 25 日	《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》	全国（八部委）

1.3 智源爆发：高校与科研机构的“造血”机制

具身智能作为人工智能与机器人技术深度融合的前沿领域，正引领着物理世界智能化的深刻变革。高校与科研机构作为国家创新体系的核心载体，正通过学科体系的重构、新型研发机构的布局和科技成果转化的创新，构建起中国具身智能发展的“造血”机制。这种机制形成了“教育-科研-产业”三位一体的良性循环，这样的良性循环为中国在全球具身智能竞争中奠定了坚实的智力基础。

1.3.1 学科建设新风向：交叉学科体系的范式重构

面对具身智能高度交叉的特性，中国顶尖高校正以前所未有的力度推动学科体系的重构。以 C9 联盟为代表的一流学府，正打破传统计算机、自动化、机械工程的学科壁垒，构建面向“大脑-小脑-本体”协同发展的全新培养模式。

(1) C9 高校的差异化布局与培养模式

国内顶尖高校在具身智能人才培养上已形成“梯队引领、各具特色”的格局（见图1.5）：

- **清华大学：全栈能力驱动与多院系协同。**清华大学于 2025 年持续深化“具身智能与机器人系统”交叉学科建设，构建了以人工智能研究院为核心，联动自动化系、计算机系及车辆与运载学院的“多院系共建”模式。该体系强化“感知—认知—决策—控制”全栈能力培养框架，重点攻克非结构化环境下的复杂任

具身智能交叉学科核心课程体系



图 1.5: 具身智能交叉学科“大脑-小脑-本体”核心课程体系

务规划。其核心载体“具身智能卓越实验班”创新性地采用“导师组 + 真实工程项目制”，学生深度参与双足机器人动态平衡、灵巧手精细操作等前沿课题，在“实战”中实现科研成果与工程实现的深度融合。

- 北京大学：认知理论引领与“心智”模型探索。**北京大学充分发挥了其在人工智能基础理论和认知科学领域的深厚积淀，其整合信息科学技术学院、心理学系、脑科学与认知科学中心等跨学科资源，开设《具身认知理论》、《神经机器人学》、《社会交互智能体》等特色课程。通过与北京通用人工智能研究院 (BIGAI) 的深度讨论及合作，北京大学重点探索从生物机理中汲取灵感构建“类人智能体”，并在“智能体行为理解与生成”项目中取得巨大进展，旨在培养能够解决机器人常识推理与价值驱动决策难题的高端人才。
- 浙江大学：贯通培养体系与大规模技能泛化。**浙江大学依托控制科学与工程学院及机器人研究院，建立了国内首个“智能机器人”本硕博贯通培养体系，设计了“核心基础-专业方向-交叉前沿”三级模块化课程。该体系通过《机器人机构与驱动》、《多模态感知融合》等课程强调硬件与软件的底层耦合。学校建设了占地 2000 平方米的机器人综合实验基地，配备四足、仿人及柔性机械臂等多种实验平台，支持学生开展从算法仿真到实物验证的全流程研究，特别是在大规模机器人技能迁移与泛化领域形成了独特的学科优势。
- 上海交通大学：产业导向与系统集成创新。**上海交通大学在 2025 年深化“智能机器人系统”建设，紧密结合长三角机器人产业集群需求，构建了以工业机器人、自主移动机器人为核心的产业导向课程体系。上海交通大学联合商汤科技、特斯拉、华为等领军企业升级共建联合实验室，并推出“机器人创新设计 2.0”教学大纲。该教学大纲强化从需求分析、系统建模到原型验证的完整工程训练，

重点培养学生在复杂工业场景下的系统集成能力与产业适配速度，实现了学术研究与市场需求的“零距离”对接，体现了市场需求引领产业创新。

(2) 区域协同与专业特色化发展

“除综合性领军高校外，国内具身智能教育呈现出‘多点开花’的差异化态势。以北京航空航天大学、华中科技大学及哈尔滨工业大学为代表的特色工科强校，分别在空间特种机器人、智慧医疗装备及复杂系统可靠性集成等关键领域构筑了极高的技术壁垒，共同填补了具身智能在极端环境与垂直行业应用中的智力空白。”

这种格局深受区域产业需求影响。长三角高校更强调与芯片制造结合；珠三角高校侧重消费电子机器人的商业化；中西部高校如电子科技大学、西安电子科技大学则在传感器与特定算法领域发挥优势。这体现了地理位置对研究方向的巨大影响。

(3) 国家政策导向与教育标准化进程

2025 年是中国具身智能教育的“标准化元年”。教育部正式将“机器人工程”、“智能机器人技术”列入本科专业目录，并发布了《机器人工程专业教学质量国家标准》。

根据教育部政务服务平台公示的《2024 年度普通高等学校本科专业申报材料》¹⁰，首批申请增设该专业的高校涵盖了北航、北理工、哈工大等 9 所工科强校（见表 1.5）。这标志着具身智能正式脱离传统的二级学科范畴，进入国民教育体系的专业序列。

表 1.5: 具身智能专业申报汇总表

时间	学校名称	专业名称	专业类	代码
2025.11	北京航空航天大学	具身智能	交叉工程类	0832
2025.10	北京理工大学	具身智能	交叉工程类	0832
2025.10	上海交通大学	具身智能	计算机类	0809
2025.10	浙江大学	具身智能	自动化类	0808
2025.10	西安交通大学	具身智能	机械类	0802

这种从“单一技能培养”向“全栈系统工程”的转变，预示着我国在具身智能领域人才储备的结构性优化，为后续大规模的产业化应用积蓄了关键的智力势能。

¹⁰数据来源：教育部政务服务平台“具身智能本科专业申报材料公示”

1.3.2 顶尖研究院布局：新型研发机构的技术突破与策源

在高校构建人才培养体系的同时，顶尖研究平台正在成为中国具身智能关键核心技术突破的“突击队”。其通过打破传统体制壁垒，聚焦大模型与物理世界的深度耦合，推动研究范式从“单体实验”向“系统集成”转变。

(1) 核心研究机构的差异化技术路径

国内顶尖研究院已形成各具特色的技术攻关方向，共同构成了具身智能的“智力矩阵”：

- **北京通用人工智能研究院 (BIGAI)：打造“为机器立心”的 AGI 技术底座。**在朱松纯教授的带领下，BIGAI 提出了以通用人工智能 (AGI) 为目标的具身智能研究纲领，强调物理智能体必须具备价值观驱动、因果理解与社会交互能力。其发布的全球首个通用智能体“通通”，不仅实现了多模态感知与复杂运动控制的耦合，更能在无需大规模数据预训练的情况下，通过类人常识推理完成“自主整理房间”等长程任务。此外，研究院打造的“BIGAI-Embodied”大规模数据集涵盖了超过 10 万个日常任务演示，联合北京大学、清华大学实施的“通计划”正在为我国培养具备深厚跨学科背景的通用人工智能领军人才。
- **上海人工智能实验室 (SAIL)：构建“具身大脑”开源生态与大模型基座。**实验室聚焦大模型赋能机器人的“大脑”新范式，通过建设“OpenXLab Embodied”全栈开源平台，为全球开发者提供了从高精度仿真环境到算法基准的完整工具链。其研发的“书生·具身”大模型，通过视觉-语言-动作 (VLA) 的多模态对齐训练，实现了从自然语言指令到机器人底层控制序列的端到端映射。目前，实验室正联合上海交通大学、复旦大学等开展“城市服务机器人”重大项目，在复杂动态环境下的长时序规划与避障决策方面取得了行业领先的成果。
- **之江实验室：深耕认知机理与具身安全评测。**之江实验室依托国家级“仿生感知与智能交互”大科学装置，集成了高速视觉、多维度力触觉传感及生物运动捕捉系统，致力于探索“感知-认知-行动”的协同进化理论。其重点突破了具身智能在开放环境中的自适应学习难题，并创造性地发布了国内首个机器人安全评测体系“天目”。该体系通过“可解释决策”模型实时监测机器人的行为边界，为具身智能从实验室走向公共服务场景提供了关键的安全性标准与可信保障。
- **鹏城实验室：强化算力基座与高保真仿真训练。**依托“鹏城云脑”超大规模人工智能算力设施，实验室推出了“具身智能算力开放计划”，显著降低了初创企业与科研团队的训练门槛。其自主研发的“Panoramic Sim”高保真物理仿真环境，通过对传感器噪声、接触动力学及动态障碍物的精准建模，实现了 85% 以

上的“仿真-实物”迁移效率，极大缩短了算法的部署周期。同时，实验室牵头建设的“机器学习数据库”总量已超过 1PB，并正联合国内产业链龙头企业制定“机器人操作系统互联互通”标准，推动产业生态的标准化协作。

(2) 新型研发机构的组织模式创新

这些研究院普遍采用“新型研发机构”运作模式，其创新性体现在“任务导向”与“资源开放”的结合上。

首先是“任务导向、团队攻关”。打破了传统的科室制，围绕国家重大战略需求（如深海探测、智能制造）组建跨学科团队。其次是“全链条人才激励”，实行全职研究员、产业专家与访问学者的分类评价体系，确保基础研究有深度，成果转化有速度。最后是“开放共享生态”，如中国科学院自动化研究所建设的“机器人开放创新平台”，将大型设备与数据资产向合作伙伴开放，形成了显著的规模效应。

(3) 前沿技术领域的实质性突破

在创新机制的保障下，研究机构在具身智能多个前沿方向上取得了巨大进展：

1. 仿生运动控制与物理交互：浙大“绝影”与北航“翔鹰”在复杂地形适应与扑翼飞行控制方面持续突破，部分指标近国际领先水平。

2. 灵巧操作与多模态感知：上海交通大学研发的“S-hand”仿人灵巧手，集成了视、力、触多模态传感，在精细装配任务中操作成功率超过 95%。中科院计算所在“主动视觉探索”算法上的突破，使机器人具备了对遮挡物体的常识性推断能力。

3. 机器人学习新范式：清华大学提出的“从演示中学习”框架（Learning from Demonstration）与上海 AI Lab 的具身大模型深度结合，高效解决了传统强化学习样本效率低、泛化能力差的突出痛点，构建了机器人学习新范式。

这种“学术驱动 + 技术密集”的特征，使得中国在 RSS、ICRA、IROS 等机器人顶级会议上的学术影响力快速提升，形成了理论探索与实践反馈的良性循环。

1.3.3 “学院派”创业潮：科研成果转化的中国路径

当高校与研究院在具身智能前沿取得理论突破，一场“学院派”创业浪潮正成为连接实验室与物理世界的关键桥梁。在政策、资本与市场的共同驱动下，该领域正形成独具特色的“学研产创”融合生态。

(1) 政策底座与区域化产业布局

国家层面，2025 年《政府工作报告》将“具身智能”提升至未来产业战略高度。各地方政府积极响应，形成了“南北呼应、中西部突围”的格局：

- **先行先试区的战略引领与资本共振：**京津冀、长三角及珠三角地区作为中国具身智能发展的“领航区”，通过深度整合清华大学、上海交通大学、香港科技大学等顶尖高校的科研资源，积极构建了极具竞争力的产业基金矩阵。以北京市为例，其率先设立了首期规模达 35 亿元的“北京机器人产业发展投资基金”，重点支持人形机器人与具身大脑等前沿硬科技项目；而上海市则紧随其后，于 2025 年正式组建“具身智创创业投资合伙企业”，目标规模 10 亿元，旨在通过“资本 + 场景”双轮驱动，加速打造全球领先的具身智能产业集聚区。
- **中西部新高地的政策前瞻与跨越式发展：**以太原市为代表的中西部中心城市，在产业顶层设计上展现了极强的前瞻性。根据《2026 年太原市政府工作报告》，太原市已将“具身智能”明确列为重点布局的未来产业之一，与量子信息、空天技术并列，旨在打造全省乃至全国的未来产业先导区。这种布局不仅依托于太原理工大学等高校在具身智能理论研究方面的积淀，更体现了地方政府通过抢占新兴产业赛道、实现区域经济高质量转化的坚定决心。
- **中试转化基地破解“死亡之谷”难题：**太原市通过建设 5 个专业化中试基地，特别是重点打造的“具身智能机器人中试基地”，精准破解了科研成果从实验室原型到工业化产品之间的工程化验证难题。该基地提供真实的工业应用场景、高精度中试验证环境以及专业的技术经理人全流程服务，旨在大力促进高校及科研院所的创新成果快速实现产业化转化。这种“政策前瞻布局 + 中试实效落地”的模式，不仅显著吸引了高水平创新人才向山西回流，更为中西部地区探索培育“新质生产力”、增强区域创新竞争力提供了极具参考价值的示范样本。
- **“北上广深太”多极联动驱动价值闭环：**这种区域协同布局形成了“北上广深抓研发与总部、太原等城市抓中试与制造”的互补格局。通过这种地域间的资源整合与高效分工，中国具身智能产业正逐步构建起一个全链条生态。这种“多点开花、梯次联动”的政策态势，确保了具身智能技术能在顶尖实验室孵化，更能在中国广袤多样的工业场景中深度沉淀与迭代优化，最终形成具有国际竞争力与自主可控特征产业集群体系。

(2) “师徒制”影响下的创业规律

具身智能领域呈现出极强的“学术驱动”特征，形成了以名校为核心的创业矩阵（见表 1.6）。

1. 领军企业与学术渊源：宇树科技创始人王兴兴凭借在四足机器人领域的深厚积淀，已实现产品的小批量产业化；智元机器人与银河通用则分别依托华为天才少年及北京大学王鹤教授团队，致力于打造通用仿人机器人本体。

2. “教授指导、学生执行”模式：在这种模式下，教授往往担任首席科学家以把握技术航向，其培养的优秀研究生则出任技术合伙人负责工程实现。这种“师徒传

承”保证了技术的原生性与前沿性，大幅缩短了从学术理论到产品样机的迭代周期。

表 1.6: 中国具身智能“学院派”代表企业概览

企业名称	核心团队/背景	主攻方向	估值/阶段
银河通用	北京大学 / 王鹤团队	通用智能机器人	独角兽 (200 亿 +)
宇树科技	上海大学 / 王兴兴	四足/仿人机器人	C 轮 (120 亿 +)
星动纪元	清华大学 / 陈建宇团队	机器人基础模型	A+ 轮 (10 亿 +)
穹彻智能	上海交大 / 卢策吾团队	多模态感知与学习	天使轮

(3) 垂直领域应用与长坡厚雪特征

不同于纯软件 AIGC 创业，具身智能创业具有典型的“硬科技”属性：

首先，软硬深度耦合要求企业具备从底层算法到核心零部件（如精密减速器、灵巧手）的全链条研发能力。其次，垂直场景深耕已成为企业生存的关键。在医疗机器人领域，罗森博特（北航系）专注于骨科精密手术；在服务机器人领域，擎朗智能（华中科大系）已在全球餐饮市场大规模部署。

高校的学科体系重构、研究院的机制创新与“学院派”的创业转化，共同构成了中国具身智能的“造血”机制。如图 1.6 所示，这一机制形成了知识创造、人才培养、技术创新与产业转化的完整闭环。

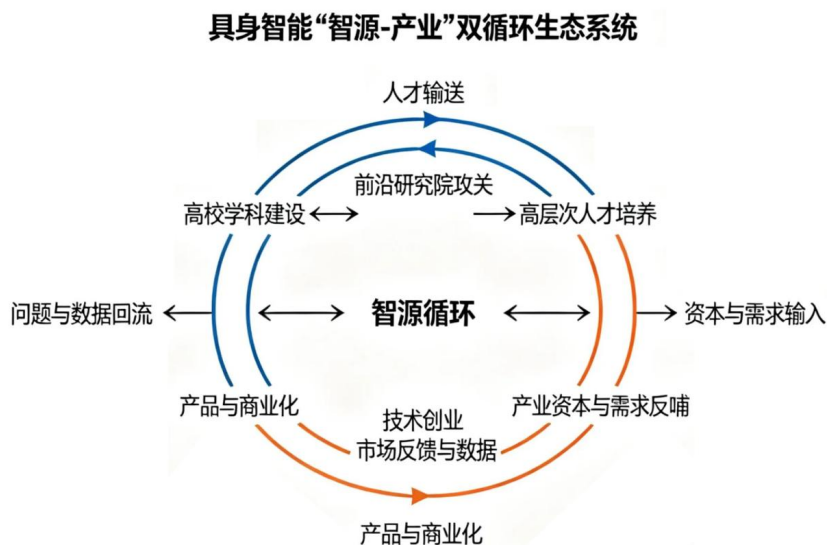


图 1.6: 中国具身智能“智源-产业”双循环生态系统总览图

随着这一生态的不断成熟与协同优化，中国有望在具身智能这场深刻的全球技术变革中，从过去的技术跟随者加速转变为未来的创新引领者，从传统制造大国全面

升级为世界级智造强国，进而为全球机器人技术的融合发展贡献富有前瞻性的中国智慧与系统化方案。

第二章 技术重构：从离身算法到具身实体的进化

2.1 范式转移：第三代人工智能的崛起

2.1.1 定义的升维：从 Internet AI 到 Embodied AI

过去十余年中，人工智能研究的主流对象主要集中于文本、图像、语音和网页等信息形态的数据。这类人工智能系统通常运行在互联网或计算平台之上，其输入与输出均以符号或数字形式存在，与物理世界的交互高度间接。为与后续发展阶段加以区分，这一研究范式通常被统称为 Internet AI。

从数据来源的角度看，Internet AI 的核心特征在于其基于被动数据进行学习。模型所接触的数据并非由自身行为产生，而是来自人类已经完成感知、理解并数字化后的结果。在这一过程中，智能体并不直接面对真实世界，而是通过数据集间接“观察”世界，因此始终处于旁观者的位置。在学习目标上，Internet AI 主要致力于从静态数据分布中提取统计关联与语义结构，其优化目标通常是提高预测准确率或生成质量。这种学习方式强调相关性建模，却并不要求模型理解预测结果在现实世界中可能产生的后果。

上述范式的局限性也由此显现。由于缺乏与物理世界的实时交互，Internet AI 难以建立稳定的因果理解，其理解往往停留在符号层面。这不仅导致模型在面对超出训练分布的问题时容易产生“幻觉”，也限制了其在涉及物理常识、动作后果和长期目标的问题上的可靠性。

Embodied AI 的提出，标志着对上述智能定义的根本性升维。在具身范式中，智能不再被视为孤立的黑盒计算过程，而是被重新定义为一个由感知—决策—行动—反馈构成的闭环系统。智能体必须通过自身的传感器和执行器，与真实世界或高保真模拟环境持续交互。

如图2.1所示，这一范式转移体现在多个层面：

- **角色转变**：智能体从被动接收数据的“旁观者”转变为主动探索环境的“参与者”。

- **数据闭环**：数据不再是静态样本，而是在执行任务过程中通过物理交互实时生成的。
- **目标升维**：人工智能的研究重心从“理解和生成数数字号”，根本性地转向了“在物理世界中完成具体任务”。

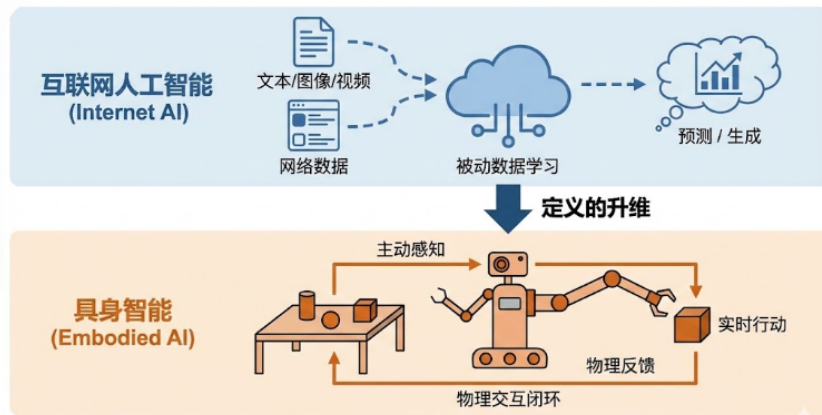


图 2.1: Internet AI 与 Embodied AI 的定义范式对比

2.1.2 核心驱动：从“预测下一个词”到“预测世界下一状态”

Internet AI 范式核心驱动力是“语言建模”，即通过自监督学习在海量文本中寻找统计规律，其本质是预测符号序列中的下一个词。这种模式虽然让 AI 获得了极强的语义理解和逻辑推理能力，但它依然被困在符号的围墙内，无法感知重力、惯性、摩擦力等真实的物理规律。

Embodied AI 带来的范式转移，则是将核心驱动力从“预测词表概率”升维为“预测世界状态”。这意味着智能体不仅要理解人类的指令，更要理解物理世界的运行逻辑。

在 Internet AI 中，智能系统通常被建模为从数字数据到预测结果的静态映射：

$$f(\text{Data}_{\text{digital}}) \rightarrow \text{Prediction} \quad (2.1)$$

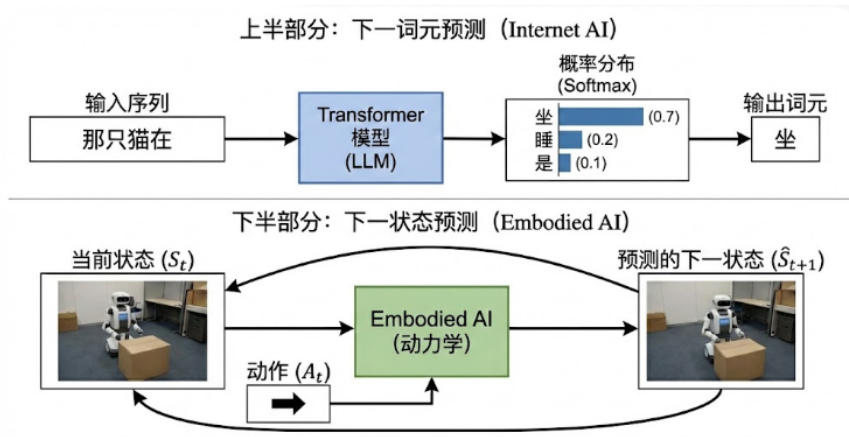
在这一范式下，输入是文本、像素或特征向量等静态符号表示，输出则是对下一个词、类别标签或概率分布的预测结果。模型的核心目标是在固定的数据分布上最小化预测误差。

相比之下，Embodied AI 的定义对应的是一个涉及状态演化与动作反馈的动态过程：

$$f(S_t, G, \Omega) \rightarrow A_t \rightarrow S_{t+1} \quad (2.2)$$

其中， S_t 表示当前物理环境的状态， G 为任务目标， Ω 表示智能体与环境之间的交互约束，如身体结构、物理规律与资源限制。智能体通过输出动作 A_t ，直接作用于环境，引发状态变化并获得新的感知反馈，从而演化至下一状态 S_{t+1} 。

为了更直观地理解这种核心驱动力的转变，我们可以对比 Internet AI 和 Embodied AI 的基本预测范式，如图2.2所示。



这种从“预测词”到“预测世界”的转变，它标志着 AI 开始尝试构建一种具有空间感和物理因果律的认知框架，从而破解了传统 AI 无法在非结构化物理环境中稳定运行的僵局。这种世界模型的建立，也正是第三代人工智能走向通用人工智能的关键一步。

2.1.3 莫拉维克悖论的破解与技术突破

莫拉维克悖论指出：对计算机而言，实现成人水平的逻辑推理相对容易，如博弈、微积分计算，但要实现一岁儿童水平的感知与运动能力却极其困难，如在复杂地形行走、抓取形状不规则的物体。这种认知偏差源于人类进化的不对称性，逻辑推理是仅有数千年历史的文化产物，而感知与运动控制则是经过数亿年自然选择磨砺出的底层本能，其复杂性被深深掩盖在潜意识之下。

具身智能之所以能在当下实现技术突破并破解这一悖论，主要得益于三大支柱的协同作用。首先是视觉—语言—动作大模型的出现。这些模型将原本孤立的语义理解与底层动作控制进行了深度对齐。这种跨模态的表征学习，赋予了机器人一种“常识性直觉”，使其能够将抽象指令转化为具体的空间运动。

其次是大规模模仿学习与强化学习的范式革新。不同于以往通过手工编写复杂的动力学方程，现在的智能体可以通过观察人类专家的演示数据，或在模拟环境中进行数亿次的试错，自动涌现出应对复杂物理世界的运动策略。

最后,也是最为关键的催化剂,是高性能物理仿真引擎与数字孪生技术(Sim2Real)的成熟。由于物理世界的训练成本极高且存在损坏风险,现代具身智能大量通过在高保真物理引擎中进行并行训练。图2.3直观地展示了莫拉维克悖论的内涵以及Sim2Real技术如何成为跨越这一鸿沟的关键桥梁。

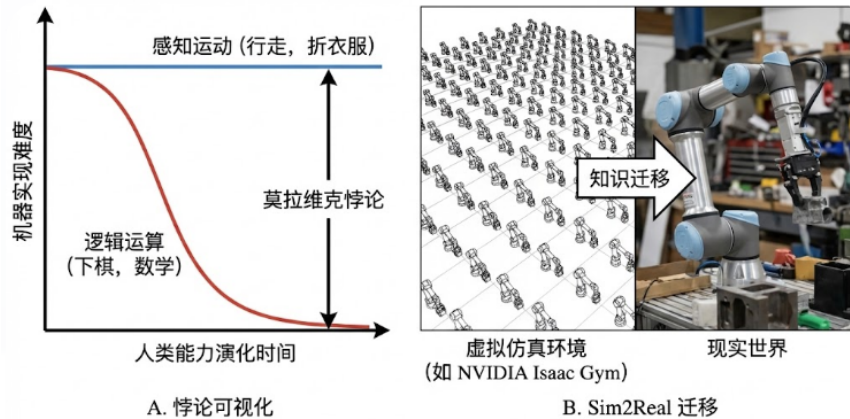


图 2.3: 莫拉维克悖论难度曲线与 Sim2Real 迁移示意图

这一突破可以从泛化能力与数据规模的角度得到定量化理解。设智能体在物理任务中的成功率为:

$$C(S, A, \Theta) \approx \text{Success Rate} \quad (2.3)$$

其中, Θ 表示模型的参数规模, S 表示由物理仿真系统所提供的环境与状态多样性, A 表示策略可探索的连续动作空间。该表达式强调, 具身智能的性能并非仅由模型规模决定, 而是由世界复杂度、行动自由度与模型能力的协同作用所共同塑造。当仿真技术使 S 实现指数级扩展, 而大模型技术使 Θ 跨越关键规模阈值时, 智能体在物理任务中的成功率便会发生从量变到质变的跃迁。这种范式转移标志着 AI 终于开始攻克人类进化中最深层、最核心的“感知—运动”领域, 为通向通用物理智能铺平了道路。

2.2 核心技术闭环：感知、决策与执行

2.2.1 感知：全模态融合与空间智能

(1) 感知的基本概念

具身智能中的感知, 是智能体通过多种传感器获取外部环境与自身状态信息, 并将其转换为可用于决策与控制的内部表征的过程。与静态的数据理解不同, 具身感知总是发生在交互中: 传感器给出观测, 系统在有限时间内完成预处理、特征抽取、状

态估计与语义解释，形成对当前场景的结构化描述；随后，决策与执行改变了智能体的位置、视角与接触关系，新观测再用于修正先前估计，持续降低不确定性。

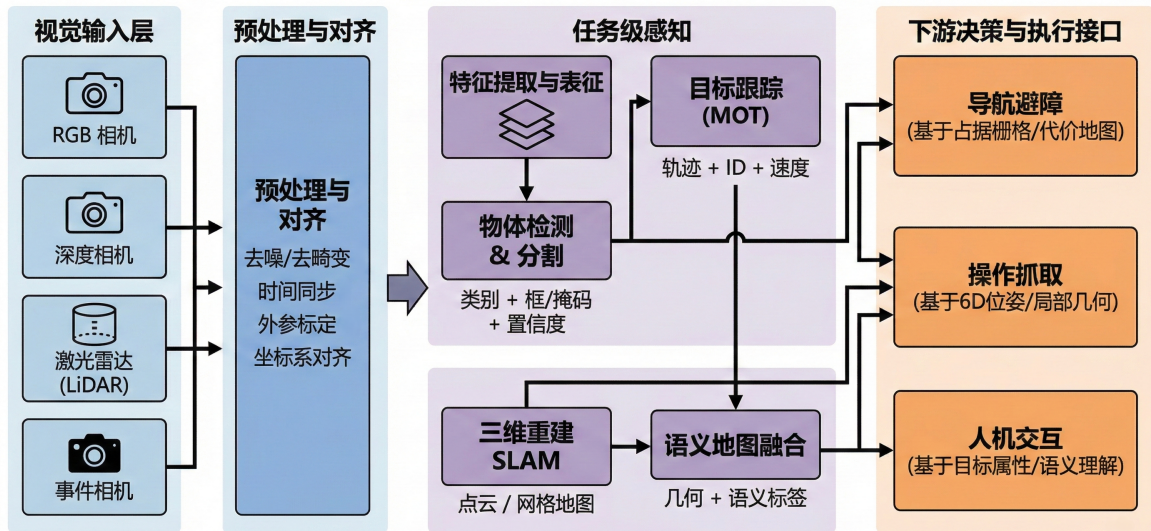


图 2.4: 具身感知工程架构总览

(2) 视觉感知技术

视觉感知依托 RGB 相机、深度相机、激光雷达、事件相机等传感器获取场景的外观与几何信息，是移动、操作与交互任务中使用最广的感知通道。RGB 相机提供高分辨率纹理与语义线索，适合物体检测、识别与场景理解，但不直接给出尺度与距离；深度相机补充稠密深度，有利于碰撞检测、抓取姿态估计与局部重建；激光雷达在远距离测距和绝对尺度上更可靠，适合建图、定位和大范围避障；事件相机以高时间分辨率记录亮度变化，适用于高速运动或高动态光照条件。在处理流程上，视觉模块通常包含图像/点云预处理、特征提取与表征学习、目标检测与分割、目标跟踪、三维重建与地图维护等环节。检测负责给出物体类别与位置范围，跟踪负责在时间轴上保持目标身份一致并输出轨迹，重建与建图负责将观测累积到统一坐标系并形成可持续更新的空间表示。视觉的主要困难来自光照变化、遮挡、反光材质、运动模糊以及纹理贫乏区域，这会直接影响特征稳定性与深度可靠性。工程系统往往通过多尺度特征、时序滤波、语义与几何联合约束，以及与 IMU/里程计等信息融合来缓解这些问题，使视觉结果在决策链路中更可依赖。

(3) 触觉感知技术

触觉感知依靠接触产生的信息来理解物体与交互状态，典型传感器包括腕部六维力/力矩传感器、触觉阵列与电子皮肤、加速度/振动传感器以及光学触觉传感器等。

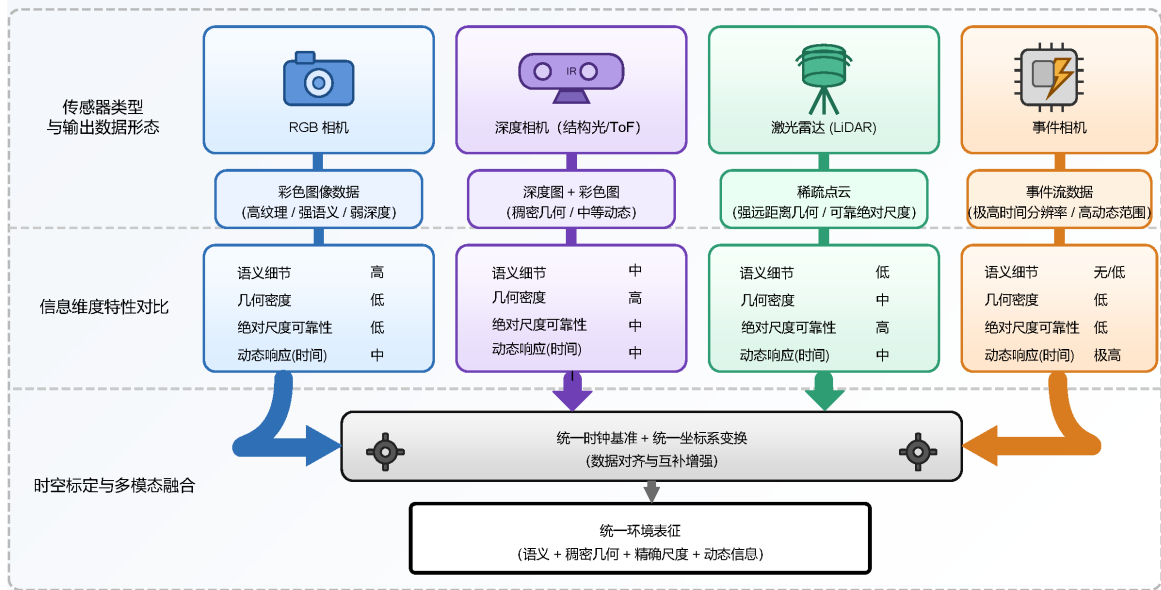


图 2.5: 常用视觉传感器与信息维度对照

力/力矩传感器对整体载荷变化敏感，常用于力控、阻抗控制与安全监测；触觉阵列提供压力或剪切力的空间分布，可推断接触斑块形状、接触位置与支撑关系；振动与加速度信号对滑移与材质纹理敏感，适合做早期滑移预警与粗糙度判别；光学触觉通过成像重建接触几何，能够输出更细的接触轮廓与局部形变信息，适用于插接、拧紧等精细操作。触觉在操作任务中承担两类功能：一类是状态判别，例如是否发生接触、是否卡阻、是否超过安全阈值；另一类是属性估计，例如硬度、摩擦、粗糙度与局部几何。滑移检测是常见应用，通常结合剪切/法向力关系、接触斑块形状变化与高频振动谱特征进行判断，并以滑移概率或方向强度作为输出，触发夹持力调整或策略切换。由于触觉依赖接触，覆盖范围有限且受安装、封装与漂移影响，实际系统多采用触觉与视觉协同：视觉提供目标定位与全局几何，触觉提供接触细节与力学反馈，从而在遮挡、反光或视觉不稳定的阶段仍能维持操作闭环。

(4) 听觉感知技术

听觉感知通过麦克风采集声压信号，支持声源定位、声景理解、异常声音检测以及语音交互等任务。单通道麦克风结构简单，适合近场语音采集与局部声音监测，但缺乏空间分辨能力；麦克风阵列利用多通道到达时间差、相位差与能量差估计声源方位，并可通过波束形成增强目标方向语音、抑制干扰方向噪声；仿人头或佩戴式配置可以引入头相关传输特性，提升方位辨别能力，并可配合转头等主动动作改善可观测性。在具身场景中，声源定位通常以方位角或概率分布形式输出，用于引导视觉对齐、导航关注与事件响应；语音识别将语音信号映射为文本序列，提供指令输入与对话内容；语音分离在多说话人或强背景声条件下提取目标语音，使后续识别更稳定。听觉

面临的主要问题是混响、多声源叠加与机器人自身机械噪声。常见做法是在前端做降噪与回声消除，在阵列侧做波束形成，在模型训练侧覆盖多条件噪声数据，并结合视觉线索或声源定位结果实现目标说话人聚焦，从而提高在真实环境中的可用性。

(5) 本体感知与定位技术

本体感知描述智能体自身的运动与构型状态，常用传感器包括轮速编码器里程计、IMU 以及关节编码器等。里程计通过轮转增量推算平面位姿与速度，延迟低、频率高，适合作为状态预测与控制反馈，但在打滑、参数漂移或路面不良时误差会累积；IMU 提供角速度与比力测量，能在高动态条件下稳定输出姿态变化与短时运动趋势，但存在零偏与积分漂移，需要外部约束进行长期校正；关节编码器提供多自由度系统的关节角度与速度，是正逆运动学、全身协调控制与末端轨迹跟踪的基础，同时受传动间隙、弹性、装配误差与量化噪声影响，需要标定与不确定性建模。工程系统通常设置统一的状态估计器，将里程计、IMU 与关节反馈纳入同一状态空间，通过时间同步与坐标标定把各通路投影到一致参考系，并用滤波或图优化融合多源信息：高频通路用于预测，外部观测（如视觉里程计、地图匹配、深度约束）用于校正漂移；当检测到滑移或传感异常时，动态调整协方差或权重，避免将可疑增量强行作为可信测量。这样得到的自状态流能同时满足控制实时性与长期定位稳定性，并为多模态世界模型提供可靠的自我参照。

2.2.2 决策：具身大模型 (VLA) 与 Sim2Real 迁移

(1) 决策的基本概念

在具身智能系统中，决策是连接感知与执行的核心环节，其主要任务是根据当前环境状态和任务目标，选择合适的动作或行为策略，引导智能体与物理世界进行交互。感知模块为决策提供关于环境和自身状态的信息，而决策模块则在此基础上对未来行动进行判断与取舍，并将结果传递给执行模块。

(2) 基于模型的决策方法

随着 DeepSeek-R1、OpenAI o1 等模型在推理与对齐任务中的突破，强化学习 (RL) 已成为通用人工智能的关键路径。不同于监督学习，RL 依赖智能体在环境中的“试错”来学习最优策略。其核心数学框架由马尔可夫决策过程、价值函数与贝尔曼方程构成。

马尔可夫决策过程是描述序列决策问题的形式化框架，假设未来状态仅取决于当前状态与动作（马尔可夫性）。一个标准的 MDP 由五元组 (S, A, P, R, γ) 定义：状态空间 (S) 与动作空间 (A) 分别代表环境局面与智能体行为的集合；状态转移概率 (P) 描述环境动态变化的规律；奖励函数 (R) 提供动作好坏的即时反馈；折扣因子

(γ) 用于平衡即时奖励与长期利益。智能体的目标是寻找策略 π （从状态到动作的映射），以最大化长期累积回报（如图 2.6）。

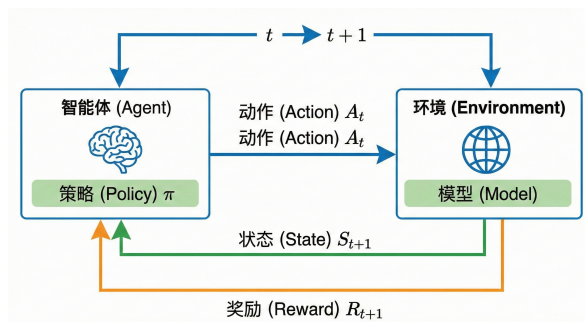


图 2.6: 马尔可夫决策过程 (MDP) 交互机制

为了评估策略的优劣，模型需要量化“当前局势”的潜在价值。价值函数即表示从某状态出发，遵循特定策略所能获得的期望累积回报。它主要分为两类：状态价值函数 $V_\pi(s)$ ：衡量处于状态 s 的长期价值。动作价值函数 $Q_\pi(s, a)$ ：衡量在状态 s 执行动作 a 的长期价值。价值函数将长远的规划问题转化为对当前状态或动作的数值评估，是智能体进行决策（如选择 Q 值最大的动作）的核心依据。

贝尔曼方程解决了价值函数的计算问题，它揭示了价值之间的递归关系：当前状态的价值等于即时奖励加上经过折扣的下一状态价值。这种递归结构是将复杂的多步决策分解为单步计算的关键。贝尔曼方程不仅提供了价值评估的理论闭环，更是 Q-Learning、PPO 等现代强化学习算法进行迭代更新的基础。通过不断利用该方程修正价值估计，智能体最终能收敛至最优策略，实现高质量的内容生成与逻辑推理。

(3) 基于多目标的决策方法

在 AIGC 模型部署与实际应用中，往往面临着既要“生成速度快”、又要“内容质量高”、还要“推理成本低”的矛盾需求。这种需要在多个相互冲突的目标之间寻求平衡的数学问题，即为多目标优化 (MOO)。其核心不在于寻找唯一的“完美解”，而是寻找一组无法在不牺牲某一目标前提下提升其他目标的帕累托最优解 (Pareto Optimality)。

当优化环境相对稳定，且各目标之间的偏好关系明确时（例如在模型量化中平衡精度损失与压缩率），常采用加权求和法。该方法通过引入权重系数，将复杂的向量目标转化为标量目标函数，从而利用成熟的单目标优化算法求解。

数学表达如下：

$$\min_{x \in \Omega} J(x) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x), \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^k w_i = 1, w_i \geq 0 \quad (2.4)$$

其中, $f_i(x)$ 代表第 i 个子目标, w_i 为对应的权重。不同的权重向量 w 对应着帕累托前沿上不同的切点。

在自动驾驶或实时生成式交互等高动态场景中, 环境参数随时间剧烈变化, 静态解往往迅速失效。此时需采用模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC)。

MPC 采取“有限时域预测、滚动优化实施”的策略, 预测与规划: 在时刻 t , 基于模型预测未来有限窗口 N 步的状态, 优化该窗口内的动作序列以最小化多目标代价。执行首步: 仅执行优化序列中的第一个动作 u_t 。滚动更新: 时刻 $t + 1$ 根据实际状态反馈更新初值, 窗口后移, 重复上述过程。其原理图如 2.7所示

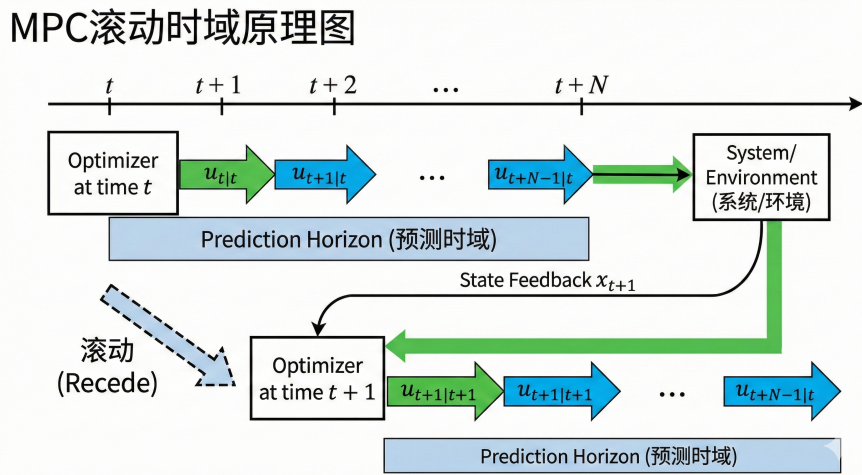


图 2.7: 滚动时域优化与 MPC 闭环控制原理

这种机制通过反复的在线优化, 能够有效处理系统的不确定性与外部干扰, 确保智能体在动态变化的环境中始终维持综合性能的最优。

(4) 基于决策支持系统的决策方法

传统决策往往受限于单一维度的结构化数据。多模态数据融合 (Multimodal Data Fusion) 旨在打破传统决策中单一维度的“数据孤岛”。如图 2.8 所示的感知架构, 展示了系统如何利用深度学习技术模拟人类的综合认知过程: 首先, 系统广泛摄取文本、图像、语音及传感器信号等异构数据; 其次, 通过特征提取层将这些非结构化信息映射至统一的高维语义空间; 进而, 利用注意力机制与跨模态交互技术实现特征的深度对齐与互补; 最终输出包含全息信息的统一感知决策向量。

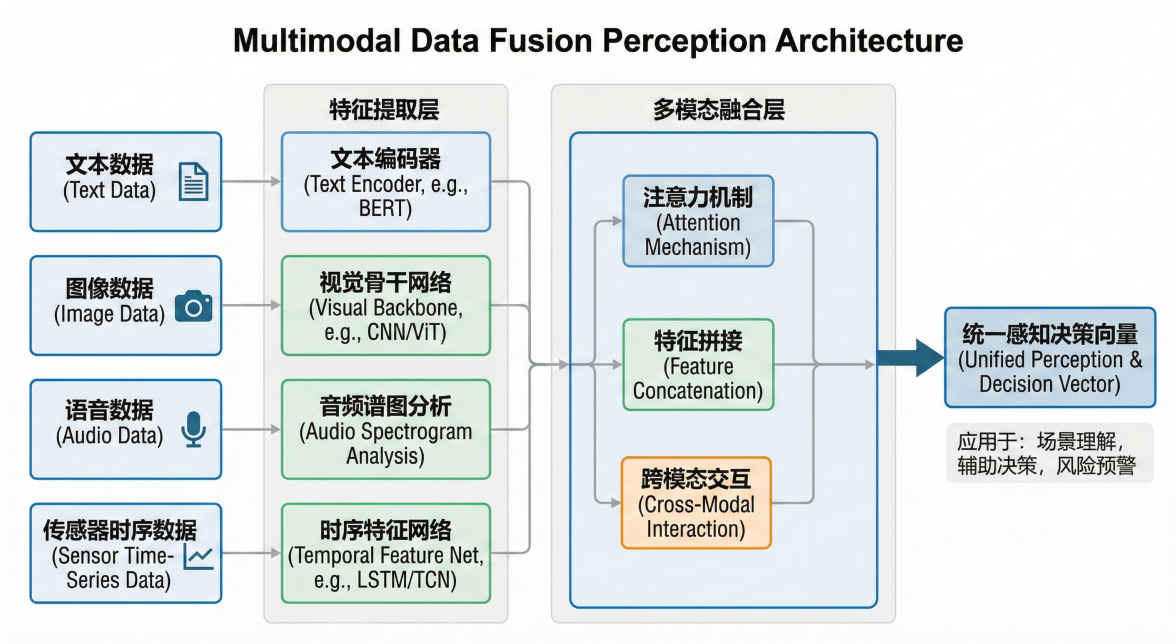


图 2.8: 多模态数据融合感知架构

(5) 基于决策评估与优化的决策方法

遗传算法是一类用于寻找最优解的自适应全局搜索算法，其基本思想源于生物学中的自然选择与进化论，即生物种群在繁衍过程中通过“优胜劣汰、适者生存”来适应环境这一自然机制。遗传算法则通过将决策方案编码为染色体，利用选择、交叉和变异等操作模拟基因的传递与重组，从而在迭代中进化出更优秀的解。遗传算法在组合优化、路径规划及复杂调度等领域表现出了强大的鲁棒性。

如图 2.9 所示，遗传算法的执行过程是一个周而复始的闭环迭代系统，模拟了生物种群的演化历程。流程主要包含以下关键环节：

- **种群初始化 (Initialization)**：算法的起点。系统首先随机生成一组初始解（即第一代种群），每个解都被编码为特定的“染色体”形式。
- **适应度评估与判断**：进入循环后，首先计算每个个体的适应度。若满足终止条件（如达到最大迭代次数或最优解精度达标），则输出结果；否则进入进化操作。
- **进化循环 (The Evolutionary Loop)**：
 - **选择 (Selection)**：图中的筛选环节。根据适应度高低，优胜劣汰，保留优质个体作为父代。
 - **交叉 (Crossover)**：这是产生新解的核心步骤。父代个体的基因片段在这里进行重组与交换，生成继承了双亲特征的子代。

- **变异 (Mutation)**: 图中的分支操作。对子代基因进行微小的随机扰动, 引入新的遗传特征, 确保种群的多样性。
- **新一代种群**: 经过上述操作后的个体组成了新一代种群, 随后返回流程起点, 开始新一轮更优的迭代。

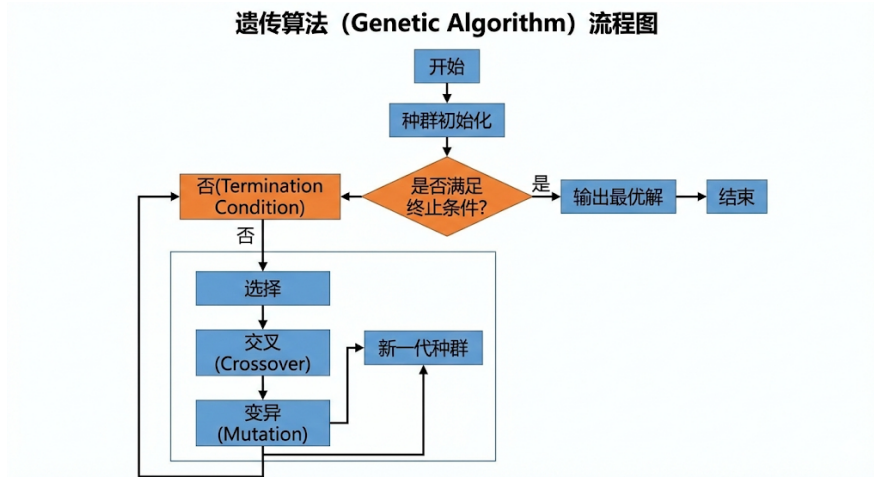


图 2.9: 遗传算法的迭代进化流程

粒子群优化是一类基于群体智能的随机搜索算法, 其基本思想源于生物学中的鸟群捕食或鱼群群游行为, 即个体之间通过信息共享与协作引导群体迅速向食物最丰富的区域聚集这一社会行为。粒子群优化则将每个候选解视为搜索空间中飞行的“粒子”, 通过追踪个体历史最优与群体历史最优来动态调整飞行速度与方向, 从而逼近全局最优解。该算法在连续参数整定、神经网络训练等领域具有收敛速度快、易于实现的优势。

如图 2.10 展示了粒子群优化算法 (PSO) 中核心的“速度-位置”更新机制。该图直观地揭示了粒子是如何决定下一步飞向哪里的:

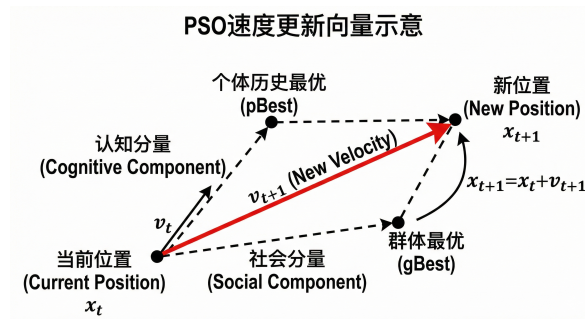


图 2.10: PSO 原理图

- **当前状态**: 图中起点的黑点代表粒子在 t 时刻的**当前位置** (x_t), 虚线箭头代表其原有的飞行速度 (惯性)。

- **双重引导机制：**粒子的运动受到两个关键目标的牵引：
 - **个体历史最优 ($pBest$)：**即图中指向 $pBest$ 的虚线箭头（认知分量）。这是粒子根据自己过去的经验，想回到自己曾发现的最好位置。
 - **群体历史最优 ($gBest$)：**即图中指向 $gBest$ 的虚线箭头（社会分量）。这是粒子受到同伴的影响，倾向于飞向整个群体目前发现的最好位置。
- **向量合成与更新：**图中红色的实线箭头 (v_{t+1}) 是上述三个向量（惯性、认知牵引、社会牵引）的合成结果。粒子依据这个新的速度向量，从当前位置 x_t 移动到了新位置 (x_{t+1})。

这幅图生动地说明了 PSO 的本质：粒子既不盲目乱飞，也不完全盲从，而是在“保持自我惯性”、“反思个人经验”与“学习他人智慧”之间寻找平衡，最终向全局最优解逼近。

2.2.3 执行：灵巧手与强健的小脑运动控制

(1) 执行的基本概念

具身智能的执行层不仅是机械指令的终端输出，更是智能体验证物理常识与干预现实世界的唯一接口。传统机器人的执行往往依赖于预编程的刚性轨迹，而具身智能强调“感知-行动”的实时闭环。如图 2.11 所示的执行系统架构，展示了系统如何模拟生物“大脑-小脑-脊髓”的层级控制机制：首先，接收决策层的抽象任务意图；其次，通过小脑级的运动控制器处理高频的动力学平衡与接触力调节；最终，驱动灵巧手或足式底盘完成非结构化环境下的物理交互。

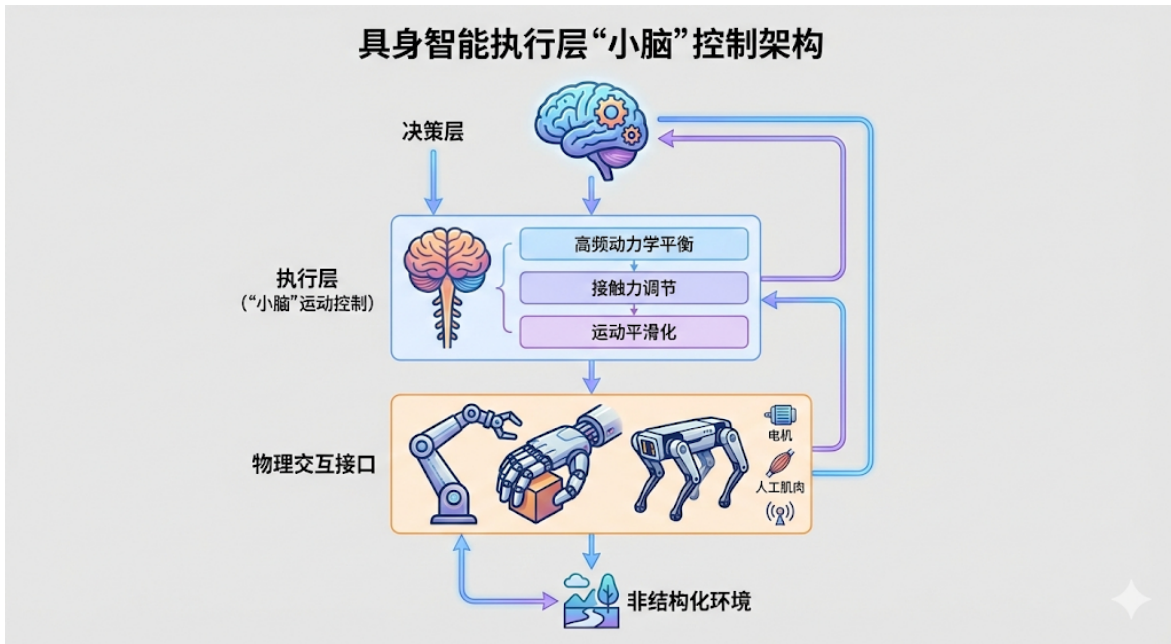


图 2.11: 具身智能执行层“小脑”控制架构示意图

如图 2.11 所示，执行系统的核心职能包含以下三个关键维度：

物理交互接口 执行层的本质是将低熵的数字比特流转化为高功率的物理能量流。它利用执行器（如电机、人工肌肉）克服环境阻抗，产生广义力或广义位移，从而改变物体状态（如抓取）或自身状态（如移动）。

“小脑”运动控制 与负责逻辑推理的“大脑”不同，执行层扮演“小脑”的角色。它负责处理不需要显式意识参与的高频任务，如抗扰动平衡、运动平滑化以及触觉反射，确保动作的鲁棒性与协调性。

非结构化适应 执行层必须具备处理不确定性的能力。面对摩擦系数未知、物体形状不规则的真实环境，执行系统需通过柔顺控制策略主动适应环境约束，而非强行对抗。

(2) 动作的表示

动作表示是将连续复杂的物理运动抽象为计算机可处理的离散数学向量的关键过程。建立高效的动作表征体系，旨在解决灵巧手高维自由度与低延迟控制需求之间的矛盾。如图 2.12 所示的多层级动作表征空间，展示了从人类直观意图到机器底层指令的数学映射机制：首先，任务空间描述了末端执行器在环境中的位姿；其次，通过逆运动学将任务指令映射至关节空间；进而，利用运动基元或肌群协同进一步压缩控制维度；最终形成可被执行器解析的力矩或电流指令。

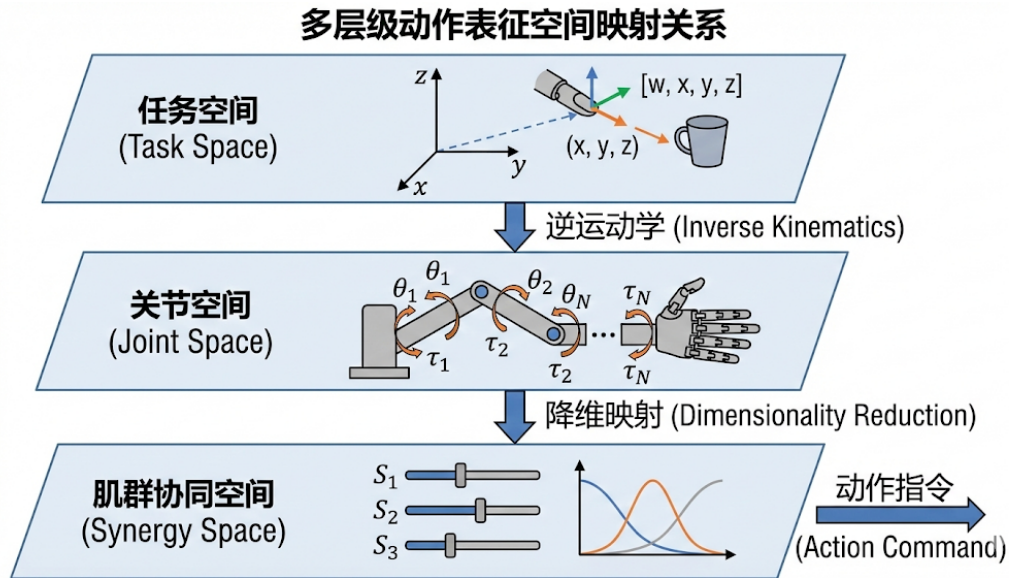


图 2.12: 多层次动作表征空间映射关系

如图 2.12 所示，动作表征体系包含以下三种核心数学形式：

任务空间表征 描述末端执行器（如指尖）在笛卡尔坐标系下的绝对位置与姿态。姿态通常采用四元数进行无奇异性描述，该空间符合人类“拿起水杯”的任务直觉，但需经由复杂的逆运动学求解才能转化为机器指令。

关节空间表征 描述机器人本体所有活动关节的角度、角速度及力矩构成的向量空间。对于拥有二十个以上自由度的灵巧手，这是一个高维构型空间，它是底层控制器直接作用的对象，虽缺乏直观语义但具备物理完备性。

肌群协同表征 借鉴生物神经科学的降维机制，将高维的关节运动分解为少数几种基础模式（如“五指同步屈伸”或“对捏”）的线性组合。通过主成分分析提取的低维流形，能够用极少的协同变量重构绝大多数人类抓取动作，极大地提升了在线决策效率。

(3) 动作的生成与运动学

动作生成是将离散的任务指令转化为符合物理定律的连续时变轨迹的关键环节。其核心挑战在于如何在毫秒级时间内，在满足机械臂几何约束、运动学奇异性规避及动力学可行性的多重边界下，求解出最优的关节运动序列。如图 2.13 所示的动作生成流水线，展示了从稀疏路径点到致密控制指令的演变过程：首先，轨迹规划器在多维构型空间中利用插值算法生成平滑曲线；其次，运动学解算模块将笛卡尔空间的末端位姿实时映射为关节角度；最终，通过动力学校验确保生成的运动不超出电机的扭矩极限。

基于运动学约束的轨迹生成流水线

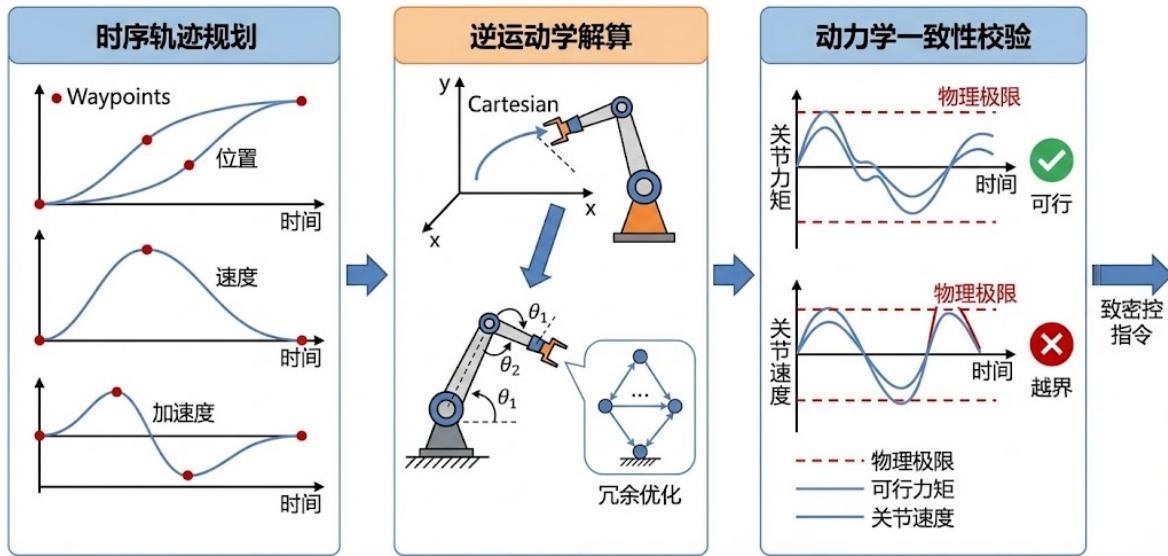


图 2.13: 基于运动学约束的轨迹生成流水线

如图 2.13 所示，该环节涉及以下三项核心技术：

时序轨迹规划 解决“如何平滑移动”的问题。系统利用五次多项式或 B 样条曲线对离散的路径点进行时域插值，确保生成的位置、速度及加速度曲线具备二阶连续性，从而避免电机在启停瞬间产生破坏性的机械冲击与抖动。

逆运动学解算 解决“各关节如何配合”的问题。这是将末端作业任务映射回关节空间的数学核心，对于具有冗余自由度的机器人，算法需利用雅可比矩阵的零空间投影技术，在完成抓取任务的同时优化机械臂构型，以避免奇异位形。

动力学一致性 解决“动作是否可行”的问题。生成的理想轨迹必须经过动力学模型的后验校验，确保各关节角速度、角加速度及所需力矩均位于硬件的物理可行域内，防止因指令越界导致的执行器饱和或轨迹跟踪失败。

(4) 低层控制

底层控制是执行系统的“神经末梢”，负责以千赫兹级的高频率将规划层生成的期望轨迹转化为驱动电机的电流指令。其核心挑战在于如何实时补偿摩擦、重力等非线性扰动，并在机器人与环境发生物理接触时，从刚性的位置跟踪平滑切换为柔顺的力交互模式，确保操作的安全与稳定。如图 2.14 所示的底层控制原理，展示了从高频伺服闭环到复杂交互策略的实现路径：首先，关节伺服环通过高增益 PID 算法确保对参考轨迹的精确跟随；其次，当检测到外部接触力时，控制器动态调整控制结构，引入阻抗或力控回路以实现柔顺顺应。

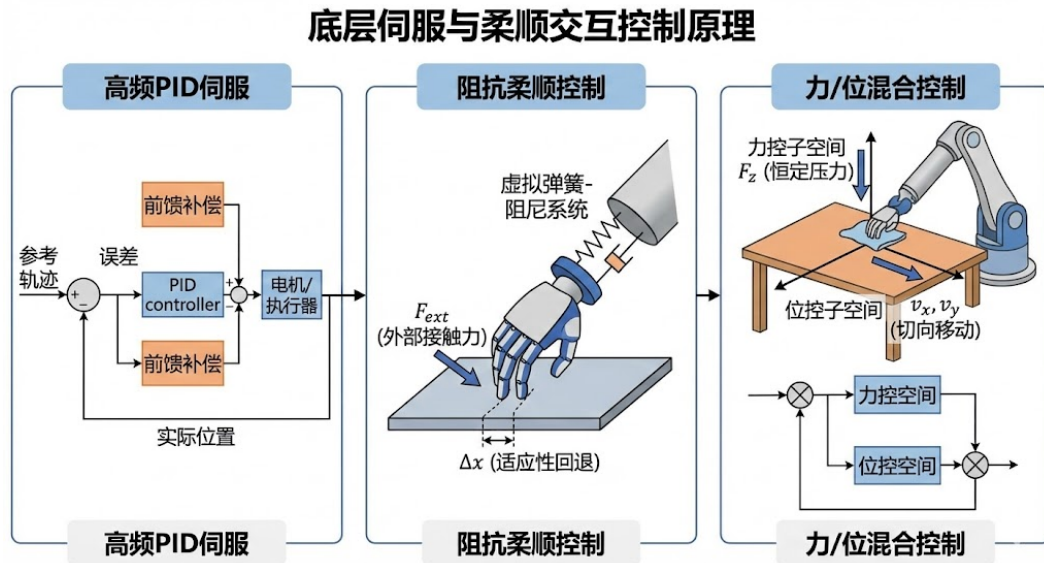


图 2.14: 底层伺服与柔顺交互控制原理

如图 2.14 所示，该环节包含以下三种关键控制策略：

高频伺服与 PID 控制 作为控制的基石，PID 算法通过计算期望轨迹与实际反馈之间的位置、速度及累积误差，生成基础的校正力矩。为了应对复杂动力学，现代控制器通常结合动力学模型计算前馈补偿项，预先抵消重力与科氏力影响，显著提升高动态下的跟踪精度。

阻抗柔顺控制 旨在解决刚性接触带来的碰撞风险。控制器不再强制消除位置误差，而是建立目标位置偏差与接触力之间的二阶动态关系，将末端模拟为一个虚拟的弹簧-阻尼系统。当受到外力冲击时，机械臂会表现出物理上的顺应性，主动退让以缓冲能量。

力/位混合控制 针对需要在特定方向上施加恒定压力而在切向进行移动的操作任务（如擦拭桌面、精密装配）。算法将笛卡尔空间正交分解为受限的力控子空间和自由的位控子空间，分别应用力反馈回路和位置伺服回路，实现“刚柔并济”的复合操作。

第三章 场景革命：基于企业实战的落地复盘

3.1 工业制造领域

具身智能正以前所未有的速度推动工业制造的作业范式发生变化：机器人不再局限于固定工位的重复动作执行，而是逐步具备在真实环境中完成感知、理解、规划与执行的闭环能力，从而在搬运分拣、工位协作、质量检测、巡检运维等场景提供一系列过去难以规模化实现的解决方案。这种能力边界持续外延、应用形态快速涌现的产业特征，与生成式人工智能在行业应用中呈现的扩散趋势相一致，即新产品与新模型加速迭代，新应用与新业态持续出现，并在较短周期内对产业运行方式产生显著影响。

从企业端视角看，具身智能之所以在工业制造加速落地，根本原因在于其能够把制造现场长期存在的“隐性知识与非结构化信息”转化为可复用、可执行的能力资产。传统制造体系中，大量关键经验以非结构化形态分散在工艺记录、异常处置、班组经验中，难以被系统有效处理与沉淀，进而限制了流程优化、质量提升与服务保障的迭代效率。

随着具身智能与大模型、多模态感知、数字孪生等技术加速融合，上述限制正在被打破：系统能更高效地调取、分析与归纳关键数据，并将其转化为可执行的任务策略与标准化技能模块，支撑制造企业在真实工况中形成“试点验证、数据闭环、迭代提升、规模复制”的应用推进路径。相较传统工业自动化（固定工装、固定轨迹、强结构化工位），具身智能更强调对不确定性的鲁棒应对、任务迁移与持续学习能力，因此更适配当下制造业呈现的混线生产、人机协作与安全合规等综合要求。总体来看，当前具身智能在工业制造中的落地应用主要集中在产线物流搬运、柔性装配、运维巡检等任务带，并呈现由点到面的扩展态势。

3.1.1 产线物流搬运

在现阶段的工业落地中，“产线物流搬运”是具身智能最典型的先行场景之一，其优势在于任务目标清晰、作业流程相对标准化、风险可控且投入产出易度量。企业通

常以料箱/周转箱搬运、上架下架、分拣转运等任务切入，通过提升稳定性与安全性逐步叠加工位复杂度，并最终对接工厂的调度系统与生产指令体系，实现从“机器人助手”向“生产单元”演进。

案例：具身天工 2.0、天铁 2.0 料箱搬运测试

自 2025 年 9 月起，北京人形机器人创新中心的“具身天工 2.0”与“天铁 2.0”进入福田康明斯发动机工厂，在无人化管理车间开展料箱取放与搬运等任务测试，如图 3.1 所示。以天铁 2.0 为例，其需要在车间内精准识别料箱位置，利用机械臂抓取并搬运重量约 8—12 千克、尺寸不一的料箱，并按类别完成上架与归位操作。

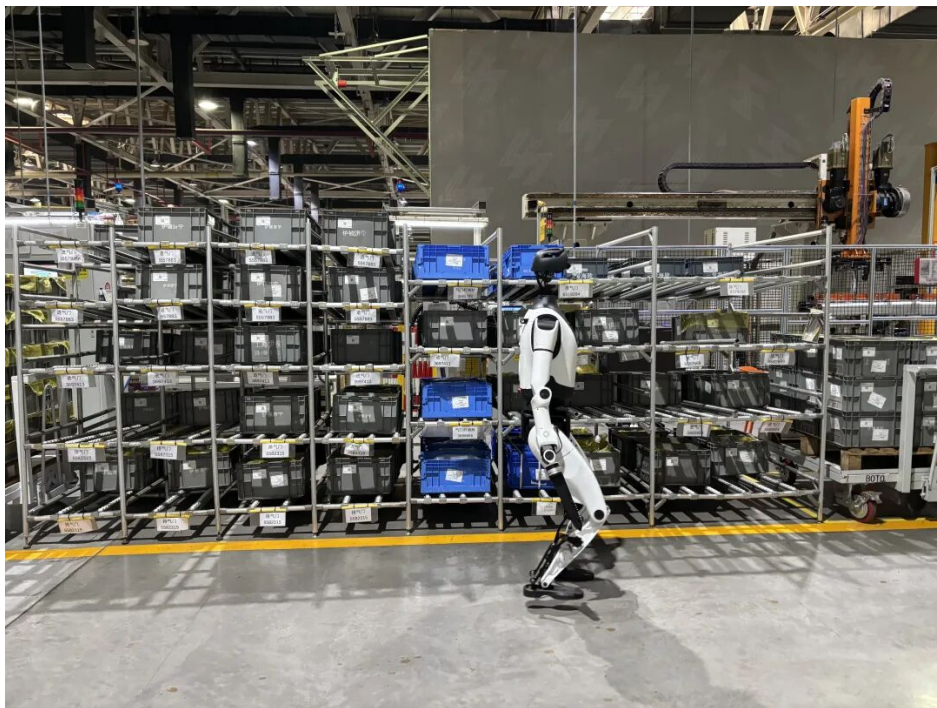


图 3.1: 天铁 2.0 机器人在车间开展料箱取放^[1]

从落地路径来看，料箱搬运通常分为两个阶段：第一阶段作为产线工人助手，协助完成搬运、分拣等任务；第二阶段则与工厂智慧系统对接，使产线指令能够直接下发给机器人，逐步将其纳入生产组织体系。与此同时，在协同分拣与协同搬运等更复杂任务中，行业正通过跨场域纯视觉感知、智能混合决策、多机协同控制等技术路线，构建联合规划控制系统，实现轨迹规划、负载辨识与柔顺控制的多机协同，从而提升对大尺寸、大负载工件搬运的稳定性与效率。

3.1.2 柔性装配

相较物流搬运，柔性装配对具身智能提出更高要求：需要更精细的感知与操作能力、更稳定的力控与柔顺控制，以及与人工工位、治具、节拍体系的协同能力。行业发展的重要趋势之一，是从“单机在单工位完成任务”走向“多机在多场景完成多任

务协同”，并通过端云协同与推理模型实现任务拆解、调度与协同执行，从而降低复杂产线级任务的工程集成成本。

案例：Walker S1 多场景多任务协同实训

2025 年，优必选在极氪 5G 智慧工厂开展全球首例多台、多场景、多任务的人形机器人协同实训，覆盖总装车间、SPS 仪表区、质检区及车门装配区等多个复杂场景，能够在协同分拣、协同搬运和精密装配等多任务协同作业，如图3.2所示。

在精密装配场景中，面对小尺寸且易变形的柔软薄膜物体，Walker S1 机器人通过高精度感知与自适应控制技术，动态调整抓取力度与姿态，尽可能避免装配过程中薄膜物体的损伤与偏移，体现了带触觉五指灵巧手在复杂工业场景中的适用性。为应对产线级任务的高维决策需求，优必选针对性地研发了全球首个人形机器人多模态推理大模型，作为超级大脑的核心引擎，推动 BrainNet 架构实现持续自我进化，进而迸发群体智能。该推理大模型基于 DeepSeek-R1 深度推理技术，借助其强大的数据处理和智能决策能力，让人形机器人具备类似人类常识的推理能力，支持多台人形机器人之间复杂任务的高效拆解、调度与协同。



图 3.2: Walker S1 机器人在极氪 5G 智慧工厂^[2]

此前，Walker S1 系列已与东风柳汽、吉利汽车、一汽-大众青岛分公司、奥迪一汽、比亚迪、北汽新能源、富士康、顺丰等多家行业领军企业达成合作，体现了工业人形机器人从“单机验证”向“多机协作、跨场景迁移”的阶段性演进。

3.1.3 质量检测与运维巡检

质量检测与巡检运维是具身智能的另一条高价值路径。其共同点在于：任务目标明确（判定合格/不合格、发现异常/隐患）、可与质量体系与设备管理体系对接、可沉淀持续可追溯的数据资产，并能在“人机协作”与“非结构化现场”中体现优势。

对离散制造企业而言，质检与巡检不仅是成本中心，更是影响交付与品牌口碑的关键环节，因此更容易形成“以结果指标驱动”的落地机制。

案例：“美罗”机器人与“工厂大脑”协同的智能体工厂

2025年12月6日，美的集团官方正式对外公布超人形机器人“美罗U (MIRO U)”，是行业内首创的六臂轮足式人形机器人。与此同时，在美的洗衣机荆州工厂，第一代类人形机器人美罗已持续在产险场景运行，并在“工厂大脑”的统一调度下完成部件搬运（如搬运9公斤重的洗衣机后桶）、3D质检、设备巡检、钣金上料等任务。

与传统工业机器人不同，美罗并非孤立作业。在荆州工厂，一共有14个智能体，覆盖38个核心生产业务场景，依托美的“工厂大脑”进行协同。当美罗将部件送至质检台后，数据实时同步至品质智能体，合格则通知“工厂大脑”调度美罗返程取件，不合格则协同工艺与TPM（全员生产维护）等智能体进行参数优化与维护决策，实现质量问题的闭环处置，该过程如图3.3所示。这一创新模式成效显著，在多个制造业核心场景，智能体以秒级响应完成传统人工小时级任务，平均提效超80%，有力支撑荆州工厂“10秒下线一台洗衣机”的高效产能。世界纪录认证机构（WRCA）已正式认证该工厂为“世界卓越的首个多场景覆盖的智能体工厂”。

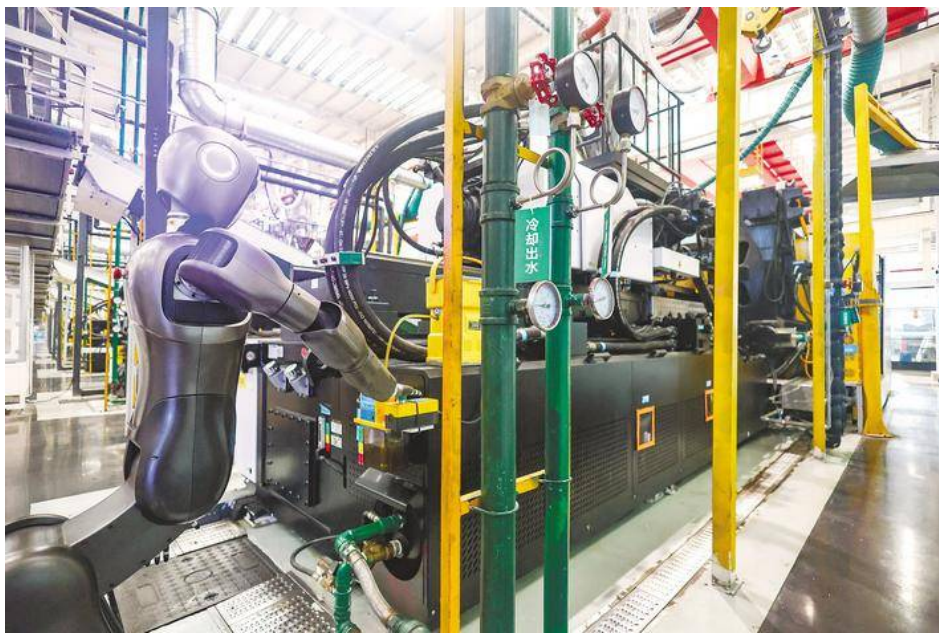


图 3.3: 美罗机器人在工厂作业^[3]

3.2 商业领域

在商业领域，具身智能正在加速从“技术演示”走向“商业化运营”，并在物流、零售与商业服务等高频交易场景中率先形成可复制的落地路径。与工业制造侧更强调工艺稳定性与质量追溯不同，商业侧的核心约束来自需求波动大、服务链路短、履

约时效强、人工成本高以及场景开放度高等特点，这使得具身智能必须在真实环境中同时满足“可用、可靠、可控、可管”的综合要求，才能在规模化运营中持续创造价值。当前，具身智能在商业领域的应用已从单点设备替代，逐步演进为“智能体 + 执行载体 + 运营系统”协同的体系化形态：以大模型与多模态感知为决策中枢，以机械臂、无人配送车、无人机及服务机器人等为执行载体，并与订单系统、仓配网络、门店运营与监管平台等实现数据闭环与持续优化，从而支撑商业活动的端到端闭环。

从应用成熟度看，商业场景的落地正在沿着三条主线推进：其一，面向仓内履约与分拨作业的具身作业单元，通过视觉感知与智能决策提升对非标货物与长尾异常的处理能力，推动仓配体系从“固定流程自动化”走向“自适应作业”。其二，面向末端与即时配送的无人化运力，在城市开放道路与高密商业区逐步实现常态化测试与运营，并形成与监管平台对接的治理机制与运营指标体系。其三，面向门店零售与商业服务的“机器人岗位化”，通过将服务流程拆解为可度量、可验收的任务单元，推动具身智能由展示体验走向可持续经营。

在这一背景下，本节将围绕商业领域具身智能的三类典型场景——物流履约、零售运营与商业服务——系统梳理其应用现状、主要技术路线与工程化落地要点，并在案例基础上归纳规模化推广所需的标准体系、合规治理与指标口径，为后续政策建议与产业推进路径提供依据。

3.2.1 物流履约

在商业领域中，物流履约是具身智能率先形成规模化价值的任务带之一。其核心驱动力来自三方面：一是包裹与订单的高度非标与长尾异常长期制约仓内自动化效率；二是大促带来的峰值压力对系统弹性提出硬约束；三是降本增效与安全合规并重，要求系统具备可持续迭代的“闭环能力”。2025 年的一个显著趋势是，具身智能在物流领域不再以单点设备替代为主，而是呈现“智能决策中枢 + 具身执行单元 + 运营系统闭环”的体系化形态，通过端到端协同提升履约效率与稳定性。

案例 1：京东异狼具身智能机械臂

2025 年 9 月，京东物流在 JDDiscovery-2025 相关论坛上首次发布“超脑大模型 2.0”与“异狼具身智能机械臂系统”，提出以“超脑 + 狼族”构建“人工智能 +”物流供应链全场景的技术范式。“异狼”定位为面向物流场景海量非标包裹的自动化码笼解决方案：依托视觉感知系统实时解析包裹尺寸、形状、材质等特性，生成抓取决策并通过高精度运动控制实现复杂动作与毫米级操作精度；具身智能技术赋能“异狼”机械臂（如图 3.4 所示）在真实生产场景中自主学习，快速迭代，不断提升各项技术指标，更是构建了“感知-决策-执行-进化”的智能闭环系统，为行业提供了可复制的自动化升级范式。目前，“异狼”已在全国多地京东物流智能园区 24 小时常态化运行。与此同时，“超脑大模型 2.0”作为智能决策中枢，承担全局数据解析与策略制定，并与末端执行单元形成“云端智能—终端执行”的闭环协同，体现出从“设备自

动化”向“系统智能化”的路径演进。



图 3.4: 异狼具身智能机械臂^[4]

案例 2: 智狼“货到人”系统

在仓内拣选与存储环节，京东的智狼货到人系统（如图 3.5所示）由智狼搬运机器人、智狼飞梯机器人、立体货架以及自动入库和拣选工作站等构成，强调通过对空间的立体化利用实现高密度存储，并以算法与路网开放提升系统吞吐效率。其中，搬运机器人配置高精度导航算法以及双向激光障碍物检测技术；飞梯机器人由双电机并行实现高效运行控制，结合视觉电控多重校验，实现高精定位，确保料箱的准确取放。

目前，智狼货到人系统已经投用在 2025 年的双 11 订单生产中。在京东物流北京大兴临空智能物流园区的童装仓，存储了 100 多个品牌近百万件商品，全仓使用近百台智狼飞梯机器人和搬运机器人，实现自动化入库、上架、拣选、出库等。拣货员只需工作站通过系统下达指令，机器人就能将对应的商品送到拣货员手中，相比于传统的“人找货”模式，智狼“货到人”模式的拣货效率提升了 3 倍以上。

案例 3: 机器人仓 + 自动化分拨 + 无人车接驳

2025 年 10 月，菜鸟官宣新一代无人物流，强调从数字化与局部自动化向全链路数字化与自动化升级。通过机器人仓、自动化分拨、智慧清关和无人车运输等环节的深度融合，全面保障“双十一”和“黑五”等大促的高效运转。

在国内 20 多座菜鸟机器人仓（如图 3.6所示）内，商品通过四向穿梭机器人、输送带及搬运机器人高效完成下架出库。仓库无需为人工预留作业通道，仓库实现高密度存储，存储面积较传统仓库提升一倍。在末端与站点侧，多支无人车队投入大促保障，其中浙江某快递网店由 36 太无人车组成车队参与分拣与运输，高峰时期日均配送包裹超 20 万个；在湖南某网点，6 台菜鸟无人车覆盖当地乡村近 50 个投递站点，有效保障大促期间乡村物流的畅通。



图 3.5: 智狼货到人系统^[5]



图 3.6: 菜鸟机器人仓^[6]

全球多家头部邮政快递与快消企业正采用菜鸟物流科技应对年终大促。通过自研的窄带分拣机、摆轮分拣机及机器人分拣矩阵系统，结合人工智能技术，菜鸟持续为全球头部快递企业打造最强分拨中心，显著提升分拣效率。目前，菜鸟为南美、中东、欧洲及东南亚多个头部快递交付的分拨中心已投入大促保障。同时，菜鸟正陆续向申通、新加坡邮政等全球头部快递公司交付全新分拨中心。

综合上述案例可以看到，物流履约领域的具身智能落地正在形成较清晰的工程化共识：一方面，以机械臂、搬运/穿梭机器人与无人车等具身载体解决“非标与长尾”的现实问题；另一方面，通过“调度—执行—数据回流”的闭环联动提升系统效率与可复制性，使大促场景从单纯压力测试转变为技术迭代与规模化验证的关键场域。

3.2.2 零售运营

零售运营是具身智能从“自动售卖/自助终端”向“可交互、可操作、可持续经营的机器人门店”升级的重要方向。其关键不在于机器人形态是否拟人，而在于能否在开放环境中稳定完成“迎宾交互—交易支付—取放履约—运营维护”的闭环，并将运营数据回流到模型与系统中，实现持续优化与规模复制。

案例：银河太空舱零售店

2025年8月，北京海淀落地“城市级商用人形机器人示范项目”，如图3.7所示。太空舱由银河通用自研的机器人Galbot运营，可完成语音接待、下单支付、精准抓取与商品取送，实现“无遥操、全流程自主”。团队自主研发的GroceryVLA、GraspVLA等端到端具身大模型，赋予了机器人在真实复杂、动态环境中感知、理解并完成任务的能力，为银河太空舱的运营提供了智能支持。



图 3.7: 银河太空舱零售机器人^[7]

每一台银河太空舱最小仅需 9 平方米空间，可全天候自主运营，售卖饮品、小食、文创、药品等高频消费品类，兼容冷藏/冷冻等多种商品形态。其商品丰富度远超传统自动贩卖机，不仅可陈列超 300 种不同品类，还在持续探索更多“机器人 + 商品”的组合创新，如机器人售卖冰激凌、咖啡、文创纪念品等，解锁具身智能更多服务形态。作为一项回应城市现实需求的实用型产品，银河太空舱为具身智能技术便民、惠民提供了一个可观、可用、可推广的现实样板。在传统便利店难以覆盖的城市边角区域——如交通枢纽、老旧小区、景区街角和夜间场景，它能够以更低成本、更快部署的方式提供高效服务，有效提升公共服务密度与消费便利性。

更重要的是，“机器人便利店”具备天然的话题性和聚客能力，能够带来稳定人流、社交关注和消费动能。工作人员介绍，预计单舱日均服务量可达 2000 人次、订单量达 500 单，带动周边人流提升 30%-40%，有效激活区域消费活力。未来，银河太空舱还将结合不同区域特色，定制提供文创产品、地方特产等多样化商品和服务，进一步增强公共空间的互动性与便利性。

3.2.3 商业服务

案例：擎朗双足人形具身服务机器人 XMAN-F1

2025 年 7 月，擎朗智能发布双足人形具身服务机器人 XMAN-F1，如图 3.8。面向餐厅、酒店、零售等细分领域，双足形态的 XMAN-F1 强调从单一任务走向“全景服务闭环”，可胜任餐食制作、配餐收台、房间整理等岗位标准化操作。通过将服务场景拆解为独立工作模块与标准化岗位，明确工作边界与职责，建立“机器人—岗位”的精准对应，使工作内容可被精确描述、结果可被标准化评估，从而更利于在商业环境形成能力闭环；并提出岗位化垂域模型 ProS 与通用大模型协同的技术架构。同时，仿生运动控制与双足动态平衡技术实现餐厅酒店、医疗零售场景内的台阶、斜坡、楼梯等更多复杂服务场景中的任务执行。通过全身协调控制，在狭窄空间、人流密集区域依然能保障稳定行走与运动，兼顾效率与安全性。

3.3 特种与巡检：高危环境的“替身”作业

在电力、矿山、地下管廊与应急救援等高危行业，巡检与处置工作往往伴随高压、易燃易爆、有毒有害、高温缺氧、狭窄空间或地形不确定等风险。具身智能系统将可移动的机器人本体与可理解的环境感知、可执行的任务规划结合，使机器人能够在真实物理世界中代替人员完成重复、危险、高强度的现场作业。从空地协同的变电站智能巡视，到地下电缆隧道的多机联合作业，再到井下瓦斯巡检机器人集群的无人化闭环，具身智能正在把少人或无人值守从概念推向可复制的工程化实践。



图 3.8: 双足人形服务机器人 [8]

3.3.1 电网与变电站巡检：特高压环境多层次作业

特高压变电站设备密集、站区范围大、构架层级多，且存在强电磁环境、金属裸露导体、高噪声和恶劣天气等因素。传统人工巡视需要在设备区长时间行走并近距离查看表计、刀闸状态、接点温升与局放迹象，不仅劳动强度高，还会受到雨雪、夜间和复杂地形的影响。以“空—地—固”多层次协同为代表的具身智能巡检体系，通过无人机、多足或轮式移动机器人与固定摄像头、传感器协同采集数据，并在边缘侧完成识别、告警与工单联动，有望将站内巡视从人到现场转变为数据到桌面。

在这一趋势下，国家电网福建超高压公司在 1000 千伏特高压长泰变电站引入六足巡检机器狗，并将其纳入站内智能巡视体系。多足结构使其具备更强的越障与稳定能力，能够在碎石、泥泞、台阶等非铺装地面保持三点支撑稳定行走；配合激光雷达、视觉与北斗高精度定位等多传感器融合，机器人可对设备区开展自动巡航、近距离多角度取景与关键部位特写采集，补齐固定摄像头与高位巡检在低位视角和遮挡盲区上的不足。公开报道显示，该站内智能巡检已支持 2000 余个巡视点位，覆盖 17 类典型识别场景，平均识别准确率约 90%，并使人工巡视工作量降低约 50%。如图 3.9 所示，多足机器人与站内视频监控、巡检系统联动，为特高压站区提供了更具韧性的全天候、可扩展巡检能力。

在省级推广层面，国网浙江电力在 500 千伏兰亭变电站建设空天地一体化智能巡检系统，将固定摄像头、站内无人机与四足机器人等要素纳入统一的巡视点位体系。该站将设备区与通道细化为 8194 个巡视点位，过去由两名运维人员完成一次巡视往往需要 4 小时以上；系统投运后，站内巡视效率提升约 60%，缺陷识别率超过



图 3.9: 1000 千伏特高压变电站多足巡检机器人作业示意^[9]

95%。这一类工程化实践表明，具身智能并非单一机器人替代人工，而是通过多源感知与自动化流程把“发现缺陷—定位原因—形成工单—闭环处置”串成可规模化复制的运维链路。



图 3.10: 变电站“空—地—固”协同智能巡检系统界面^[10]

南网超高压公司梧州局在 500 千伏贺州变电站投运了一套以无人机机巢为核心的立体智能巡检系统，旨在解决构架、高处设备等，人工难以触及和效率难以提升的巡检痛点。该系统将无人机机巢、地面机器人与 AI 图像识别能力进行一体化集成，运维人员只需在后台一键下达任务，无人机即可按预设航线自动起飞，对户外高空设备开展全方位图像采集与红外测温；任务结束后，无人机自动返巢充电并回传数据，由智能平台对图像与测温数据进行自动识别、诊断，生成标准化巡检报告，从而把站

内巡视由人到现场转变为数据到桌面。在应急场景下，无人机接到指令后可在约 5 分钟内抵达目标区域并完成数据采集与初步分析，使异常排查效率提升 80% 以上；在日常巡检中，该站采用机巡替代人巡模式后，仅需约 2.5 小时即可完成全站 726 个表计与超过 2 万个设备点位的巡检与智能诊断，效率较传统人工巡检提升约 10 倍；其智能巡视任务的任务下达成功率、执行完整率、识别准确率等核心指标也稳定在 98% 以上。

此外，国网湖北省电力有限公司超高压公司在安福变电站将轨道机器人、四足机器狗、无人机机巢与站内摄像机组成“空一天一地”协同巡检体系：轨道机器人负责保护小屋内屏柜设备巡查，四足机器狗完成站内地面巡检并可进入鹅卵石铺设的主变油池等复杂区域，无人机负责不同高度的设备外观与红外测温巡视，站内 160 余个摄像机对户外充气、充油等设备进行持续监测。为减少路径规划与覆盖盲区问题，运维人员对全站进行三维扫描并构建数字三维模型，在模型上设定无人机与机器狗行动路线，实现从人工逐点巡视向“设备协同 + 数字孪生规划 + AI 识别”的转变。该站占地约 143 亩、巡视点位约 1.8 万个；通过智能设备组合巡检，仅需约 3 小时即可完成过去约 2 天的巡检工作，日常巡检效率提升约 93%，并可在巡检完成后数分钟生成分析报告，为超高压站区的多层级、强约束巡检提供了可复制的实践路径。

3.3.2 复杂地形勘测：非结构化环境的稳定移动

相比变电站的相对规则环境，电缆隧道、地下管廊、山地坡面与灾害现场往往呈现非结构化特征：地面湿滑或散落杂物，空间狭窄、光照不足且存在气体风险，定位信号受限，甚至伴随烟尘、高温与坍塌隐患。此类场景对具身智能的要求不仅是能走，更要具备稳定移动、清晰感知与精准测量能力，并将勘测数据实时回传到数字化平台，支持远程决策与协同处置。

雄安新区雄东电缆隧道是典型的长距离、封闭式地下运维场景。国网雄安新区供电公司在全长 16.2 公里的隧道中部署雄电灵犀智巡机器人，以多机联合作业方式对 220 千伏电缆开展智能体检。机器人搭载可见光与红外双视角相机，每走 3 米自动拍摄一次，并结合有毒有害气体检测、红外测温等能力形成对隧道环境与设备状态的连续感知；其伸缩机械臂末端传感器可贴合电缆进行局部放电检测，相当于实现对电缆局部放电的近距离精细检测。过去两人一组完成一次人工巡检需要约 20 小时，而 5 台机器狗联合作业仅需约 3 小时即可完成；机器人在电量降至 25% 时可自主返航充电，信息通过专网即时回传，从检测完成到巡检报告生成最长不超过 1 分钟。自 2024 年投入使用以来，该系统已累计完成上千次巡检任务，并与隧道内 278 个 AI 摄像头共同构成立体化运维网络。如图 3.11 所示，这类“移动机器人 + 数字孪生 + 专网回传”的组合，使地下空间的运维从人下井、靠经验，转向机器人走、数据说话。

在更极端的非结构化场景中，具身智能也开始承担“勘测—侦察—回传”一体化任务。云深处科技发布的绝影 X20 消防侦察解决方案面向地震废墟、隧道事故、化工



图 3.11: 电缆隧道机器狗巡检作业示意^[1]

泄漏等复杂环境，采用激光雷达与 SLAM 实现自主定位与真彩点云建图，并通过点云处理与三维地形建模恢复现场结构，为指挥端提供可视化的空间态势。资料显示，该方案曾在 2022 年全国抗震救灾演习、甘肃省综合应急救援演练、陕西高速隧道交通事故应急演练等场景中参与侦察任务，机器人可搭载多种气体传感器与热成像或可见光云台，实现温度分布、有害气体、地形结构多模态协同感知。对比传统人员抵近侦察，这类系统可在保障安全的前提下提升勘测效率与信息完整性，为后续处置争取关键窗口期。



图 3.12: 灾害现场机器人三维勘测与多传感侦察作业示意^[2]

3.3.3 井下深部作业：高危环境下的防爆与监测

井下深部作业场景中，瓦斯、煤尘等易燃易爆介质与高湿度、强粉尘、复杂巷道共同构成高风险作业环境。在机电硐室、中央变电所、皮带沿线及关键巷道中，传统巡检依赖瓦检员与运维人员逐点检测、手工记录与事后录入，容易出现漏检、错检与追溯困难，同时人员下井频次高、暴露风险大。面向此类场景，具身智能巡检需要同时满足防爆与连续监测，并将感知、分析、决策、处置形成闭环，才能真正替代人工作业链条。

国能榆林能源有限责任公司青龙寺煤矿是瓦斯巡检需求典型的井下场景之一^[13]。中国煤炭科工集团重庆研究院有限公司承担的青龙寺煤矿智能瓦斯巡检机器人关键技术研究与项目于 2026 年 1 月顺利通过验收。该项目融合巡检机器人、智能传感与 AI 辅助分析等技术，研发出煤矿智能瓦斯巡检机器人集群系统及系列装备，并在矿井现场完成安装应用。资料显示，国家矿山安全监察局曾以试点方式明确在青龙寺煤矿开展巡检机器人替代瓦检工部分工作的探索；系统以“星曜九宫”煤矿安全大模型技术重构瓦斯巡检流程，集成瓦斯自动巡检、一站传输、交叉验证、智能分析、融合联动与协同处置等功能，形成无人化、全覆盖、高精度的瓦斯巡检新模式。该案例的价值在于：它把机器人走到现场与模型在后台分析结合起来，打通了从感知到执行的智能循环，使瓦斯巡检从人防逐步转向技防、智防。

在井下机电系统中，中央变电所同样是高压、深部、密闭的典型风险点。围绕矿山领域机器人应用推广，工信部与国家矿山安全监察局发布矿山领域机器人典型应用场景名单，推动可复制的智能巡检实践。陕西陕北矿业韩家湾煤炭有限公司在煤矿中央变电所与下组煤变电所部署防爆双差速自稳定巡检机器人，实现全天候数据采集、实时传输与智能分析预警。应用前，变电所每天巡检三班、每班 3—4 人、单次约 2 小时；应用后每班巡检人员减少为 1—2 人、单次约 0.6 小时，巡检效率提升 50% 以上，并形成可量化的降本增效收益。这一类案例表明，在深部空间中只要防爆合规、可靠移动、可解释告警三者同时成立，具身智能就可以把高危岗位从必到现场变为远程值守、异常到场，显著降低人员暴露风险。

3.4 科研与家庭前瞻：从 Benchmarking 到家务原型

具身智能的技术演进，既依赖真实场景的工程落地，也离不开可复现、可对比的 benchmark 体系。对于桌面抓取、收纳、开合等家庭原子动作，研究者往往需要在短周期内完成大量试验、对比与迭代；而面向家庭终端产品，又需要把实验室中的策略与交互能力压缩到小型设备形态中，并在真实家庭环境中稳定运行。因此，“仿真平台—评测基准—产品原型”正在形成新的闭环：一方面用基准与仿真加速验证，另一方面用原型反哺数据与需求，推动模型在现实世界持续进化。



图 3.13: 井下瓦斯巡检机器人^[14]

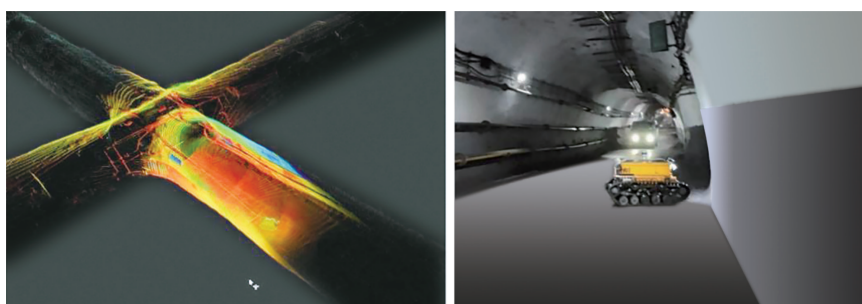


图 3.14: 井下防爆巡检机器人作业示意^[15]

3.4.1 极致速度验证：家庭桌面场景操作

家庭桌面场景通常空间有限、交互对象多样，但对“感知—规划—执行”的要求非常集中。机器人既要识别物体类别与姿态，又要在受限空间内规划抓取轨迹，并在执行中处理遮挡、滑动与碰撞等不确定性。为了把研发周期从按月压缩到按周甚至按天，行业开始将大规模仿真数据生产与标准化评测引入具身智能研发流水线，在低成本环境中快速筛选策略、发现问题边界，再将更优策略迁移到真机或消费级原型。

在产品原型侧，优必选与中国电信陕西公司、数字生活公司自 2024 年 7 月组建联合研发团队，聚焦数字生命智能体技术，推出首款家庭桌面 AI 机器人并于 2025 年 5 月全国首发。该机器人强调多模态交互，可提供拟人化陪伴、舞蹈娱乐、故事、百科互动问答、英语口语练习、家人视频通话、绘本伴读、思维逻辑引导以及家居控制等服务，并依托大模型实现情感计算、环境感知、任务规划、视觉语义理解与长短期记忆能力。这一应用展示了桌面级轻量形态同样需要具身智能的核心能力：把感知、记忆与任务规划封装进可持续迭代的终端，让机器人从被动响应走向主动式、成长式的家庭交互。



图 3.15: 家庭桌面 AI 机器人原型^[16]

越疆科技推出了一款面向桌面级高速作业的工业协作机器人——MG400，旨在解决产线工位空间受限、节拍要求高、人工重复操作易出错等问题。MG400 采用一体化紧凑设计，底座占地仅 190mm×190mm，重复定位精度可达 $\pm 0.05\text{mm}$ ，支持拖动示教与图形化编程，便于在桌面快速部署并稳定运行。在家电行业空调主板自动化插件的已投产案例中，由 6 台 MG400 组成自动插件线体，每台机器人从不同配料盘抓取电子元器件，并将其插入 PCB 相应孔位，完成插件后流入焊接设备，实现对人

工重复插件动作的替代。该案例的应用效果可节省 4 名人工，整体效率提升约 30%，并提升了插件一致性与良品品质。该类桌面级高速取放和插装任务的节拍特征非常适合极致速度验证，可以把评测颗粒度落到单次抓取、定位、插装的周期与成功率，从而持续优化感知到轨迹规划与执行的端到端响应速度与稳定性。

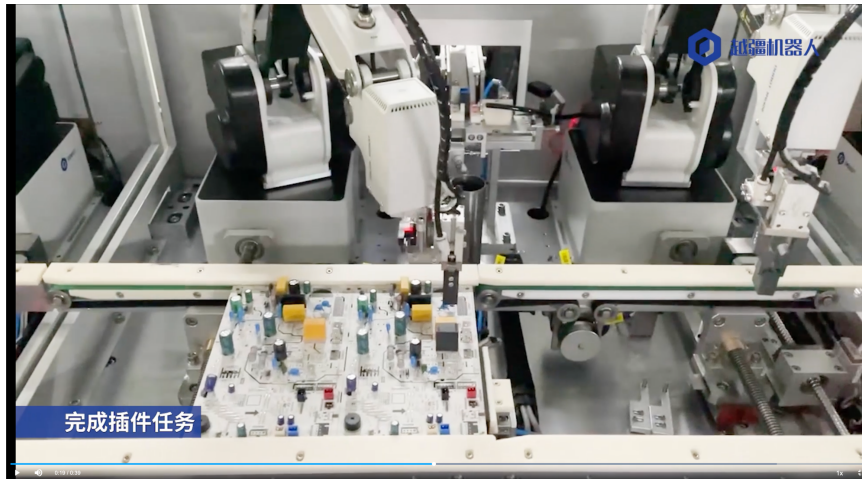


图 3.16: 空调主板自动化插件^[17]

深圳市大象机器人科技有限公司面向桌面场景推出了开源六轴协作机械臂 my-Cobot 280，定位为可二次开发的桌面级具身平台，支持多种控制与开发方式，可搭配夹爪、吸泵等末端执行器在桌面完成抓取、放置、分类等高频操作任务。该产品以小型化、高响应的系统设计为核心，便于在家庭桌面或创客工作台上进行快速迭代验证，把“感知—决策—动作”的闭环压缩到秒级甚至更短的交互节拍，从而用于检验桌面操作的速度、稳定性与失败恢复能力。与此同时，大象机器人在其公开技术案例中给出了基于 myCobot 280 的桌面级落地实践，例如结合摄像头进行棋盘识别与对弈决策、以及在 Jetson Nano 等端侧算力上实现物体识别追踪与手眼协同控制，这类桌面真实运行的案例为极致速度验证提供了可复现的工程路径：在真实桌面光照、遮挡与网络条件下持续跑任务，迭代优化端侧感知时延、轨迹规划与执行平滑性，从而为进一步走向更复杂的家庭桌面操作奠定系统级基线。

3.4.2 康复与陪护：医疗辅助与康复训练

在人口老龄化与慢病管理需求增长的背景下，康复医疗与陪护服务面临需求增长快、专业供给不足、训练依从性不稳定等现实挑战。康复训练往往需要高频、标准化、可量化的重复动作，而传统模式高度依赖治疗师的现场指导与经验判断；同时，患者在长期训练中容易产生疲劳与抵触，需要持续的交互引导与心理支持。具身智能在医疗康养场景的价值，正在从替代体力劳动拓展到标准化训练执行、训练数据闭环、情感交互陪伴的组合能力。

在应用落地方面，国家卫生健康委等部门发布的《医疗领域机器人应用优秀场景公示名单》^[18]中，5G 远程功能康复训练系统被列为典型场景之一，联合申报单位包括上海交通大学医学院附属瑞金医院、华为与傅利叶智能。该类系统以网络化康复为核心，通过远程连接实现治疗师与患者之间的训练指导、参数调整与效果评估，使康复服务从医院延伸到基层与居家，提升连续康复的可及性。从行业意义看，优秀场景入选为医疗机构提供了可参考的建设路径，也为康复机器人从单机设备走向系统化服务奠定了示范基础。

在产品形态升级方面，傅利叶智能在 WAIC 2025 展示具身智能康复港方案，尝试把人形机器人、康复训练设备与康复流程数字化整合为一体化服务。资料显示，GRx 系列人形机器人具备语音交互、稳定运控与灵巧操作能力，可在康复训练中执行动作演示、任务引导、陪伴激励与健康宣教等任务，并通过视觉、听觉、触觉、力觉等多模态感知采集训练表现，识别动作幅度与情绪反馈，为训练内容优化提供依据^[19]。截至公开信息披露，傅利叶已推出 30 余款智能康复产品，为全球 60 余个国家和地区、3000 余家医疗机构提供服务，累计服务患者超百万人；其智能康复港在全国已有 300 个案例科室，覆盖省市县社区医院及乡镇卫生院^[20]。这类具身智能和康复流程的组合，使机器人既能承担高频重复训练，又能以更自然的交互方式提升训练依从性，为康复与陪护的规模化供给提供了新路径。



图 3.17: 具身智能康复港与远程康复训练系统^[21]

杭州市西湖区留下街道居家养老服务中心已开始试用髌部助行外骨骼设备。老年体验者穿戴后能够获得助推力支持，爬楼更省力，养老院一线护理人员穿戴后也能减轻起身、翻身等辅助动作的体力负担。在康复训练端，研发方杭州程天科技发展有限公司表示，康复中心的下肢运动功能障碍患者在康复外骨骼机器人的辅助下开展

步行训练。其外骨骼康复产品已在中国 20 余个省（区、市）应用。该类社区与康复机构的试用实践，验证了外骨骼和康复机器人在低风险、强需求、可量化的陪护与康复训练环节更易形成闭环，也为后续将交互与数据回传延伸到家庭端提供了基础。

第四章 挑战与未来：迈向 2030

具身智能作为驱动新质生产力的核心赛道，正处于从技术原型验证到规模化商业落地的关键过渡期。当前产业发展既面临底层技术瓶颈的制约，也需突破复杂场景下的应用边界，更要应对法律伦理与社会认知层面的深层挑战。面向 2030 年，唯有攻克核心技术难题、突破极限场景应用壁垒、构建完善的产业生态与伦理体系，才能推动具身智能真正融入千行百业，实现从“单点突破”到“生态繁荣”的跨越式发展，成为引领中国产业升级的核心引擎。

4.1 技术攻坚：制约产业爆发的底层瓶颈

当前具身智能的技术演进，正遭遇数据、硬件、算法协同发展的多重挑战。这些底层瓶颈直接决定了产业落地的速度与质量，成为制约其大规模商业化的核心障碍，亟待全产业链协同突破。

4.1.1 数据与泛化：高质量具身数据的稀缺与长尾场景

具身智能的核心能力依赖于海量、高质量的真实场景交互数据训练，但当前数据供给体系存在“量少、质劣、覆盖窄”的显著短板，难以支撑通用模型的迭代需求。

1. 高质量数据稀缺且标注成本高昂

具身智能需要的是融合视觉、触觉、力控、运动等多模态的连续时序交互数据，这类数据的采集需要实体机器人在真实环境中反复作业，且标注过程需结合空间坐标、力控参数、环境变量等多维信息，单条有效数据的标注成本是普通图像类 AI 数据的 5-10 倍。

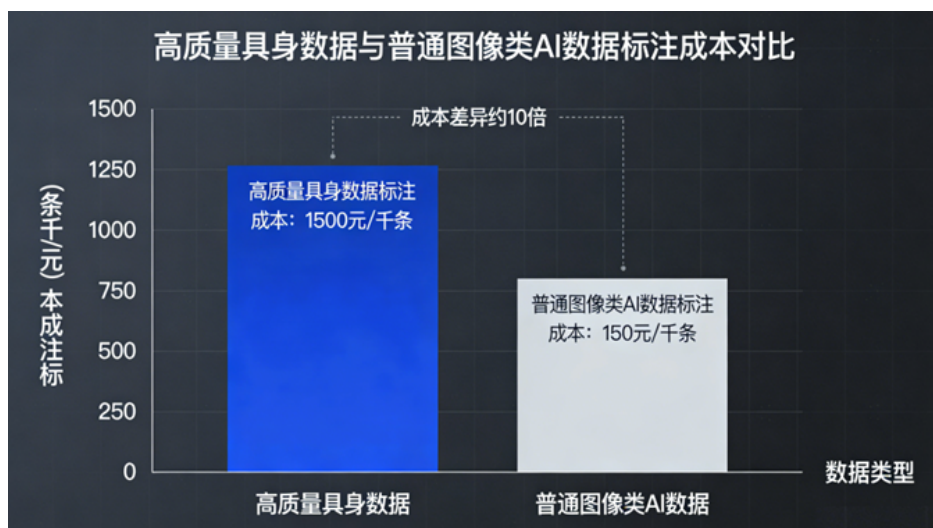


图 4.1: 高质量具身数据与普通图像类 AI 数据标注成本对比柱状图

从行业现状来看，目前全球公开的高质量具身数据集规模普遍较小，如主流的 COCO-LoCo、Gibson Env 等数据集，其交互场景数量不足千个，远无法覆盖真实世界的复杂需求；国内自主研发的具身数据集如“伏羲”“轩辕”，虽在本土化场景上有所突破，但规模仍局限于万级交互样本，难以支撑通用具身大模型的训练需求。同时，数据采集还面临场景复现难、设备投入高的问题，一套完整的多模态数据采集系统成本高达数百万元，仅少数头部企业与科研机构具备采集能力，进一步加剧了数据稀缺性。

2. 长尾场景覆盖不足导致泛化能力弱

现实世界的应用场景具有高度多样性与碎片化特征，除了标准化的汽车总装车间、无人仓储等头部场景，大量长尾场景如家庭复杂家务（叠衣、整理杂物、厨余处理）、工业非标件装配（小批量定制化零件组装）、野外应急救援（山地搜救、灾后废墟清理）等，存在任务流程不固定、环境变量复杂的特点。

当前具身智能系统在特定标准化场景下表现优异，但跨场景迁移时易出现“性能断崖”。例如，在平整车间内作业的人形机器人，其运动控制精度可达毫米级，但在崎岖山地环境中，移动成功率不足 30%；能精准完成标准螺丝拧紧的机器人，面对异形件装配时，良品率会下降至 50% 以下。这种泛化能力的不足，使得具身智能难以渗透到更广阔的细分场景。

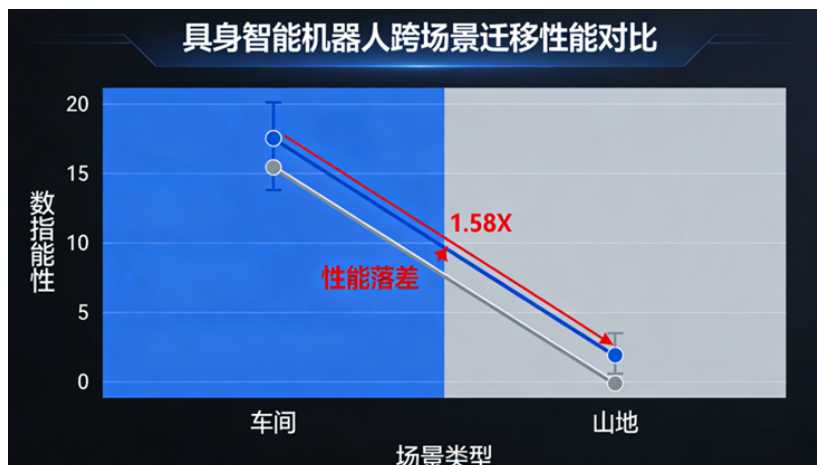


图 4.2: 具身智能机器人跨场景迁移性能对比折线图

3. 仿真数据与真实世界存在“难以逾越的鸿沟”

虽然 Sim2Real（仿真到现实）技术是弥补数据缺口的重要路径，且已成为行业共识，但当前仿真环境难以完全复刻真实世界的物理特性。主流仿真平台如 NVIDIA Isaac Sim、百度飞桨机器人仿真平台，在物体刚体运动模拟上已较为成熟，但在柔性材质形变（如布料、橡胶）、复杂摩擦力交互（如湿滑路面、粗糙墙面）、动态环境干扰（如气流、震动）等方面，与真实场景存在显著差异。

基于仿真数据训练的模型，在迁移到真实场景时，往往需要大量的线下微调适配，部分场景的微调周期长达数周，大幅增加了企业的落地成本。此外，仿真平台的算力消耗极高，单台服务器每日仅能生成数千条有效仿真数据，难以满足大规模模型训练的需求。

4.1.2 硬件与能源：核心部件国产化与高效能比驱动

硬件是具身智能的“物理载体”，能源是其“续航生命线”。当前我国具身智能硬件领域仍面临“核心部件依赖进口、能源系统能效偏低、硬软协同程度不足”三大难题，制约了产业的自主可控与规模化发展。

1. 核心部件国产化率低，存在供应链安全风险

具身智能的核心硬件包括高精度灵巧手、伺服电机、谐波减速器、多模态传感器等，目前高端产品仍高度依赖进口。以关键的谐波减速器为例，其直接决定机器人关节的运动精度与稳定性，日本哈默纳科、纳博特斯克两家企业占据全球 70% 以上的高端市场份额，国内产品虽在中低端市场实现替代，但在传动效率、寿命等核心指标上存在差距，高端谐波减速器国产化率不足 15%。

再如灵巧手领域，具备多自由度、力控感知能力的高性能产品，国产化率不足 20%，国内企业生产的灵巧手普遍存在“重量大、精度低、成本高”的问题，难以满足人形机器人的轻量化需求。核心部件的“卡脖子”问题，不仅导致具身智能本体成

本居高不下（一台人形机器人的核心部件成本占比超 60%），还存在供货周期长、技术适配难等风险，严重制约了产业的创新迭代。

2. 能源系统能效比低，限制续航与应用场景

能源系统的性能直接决定具身智能机器人的作业半径与场景适用性，当前主流的锂电池方案存在“能量密度低、充电时间长、低温性能差”三大短板。从能量密度来看，目前人形机器人搭载的锂电池能量密度普遍在 250-300Wh/kg，仅能支撑机器人连续作业 2-4 小时，而工业巡检、野外探测等场景，需要机器人具备 8 小时以上的续航能力，理想的能量密度需达到 500Wh/kg 以上，当前技术水平仍存在较大差距。

在充电效率上，快充技术的突破进展缓慢，目前最快的充电方案也需要 30 分钟才能充满 50% 电量，难以满足大规模集群作业的需求；在极端环境下，锂电池性能衰减显著，如在 -20°C 的极地环境中，电池容量会下降至常温状态的 50% 以下，无法支撑极地探测机器人的长时间作业。此外，高算力芯片的功耗问题也亟待解决，具身智能机器人的端侧算力芯片功耗普遍在 50-100W，产生的热量需要复杂的散热系统，进一步增加了机器人的重量与体积。

3. 硬件与算法协同优化不足，造成算力与性能浪费

当前硬件设计与算法开发往往处于“割裂”状态，硬件的性能参数未能充分匹配算法的需求，算法也未能针对硬件特性进行深度优化，形成“硬软脱节”的现象。例如，部分高性能多模态传感器能采集到每秒上千帧的高清数据，但端侧算法的处理能力有限，只能对数据进行降采样处理，导致大量有效信息丢失；部分轻量化算法模型，能够适配低功耗芯片，但硬件厂商未能针对性开发配套芯片，只能搭载高功耗通用芯片，造成算力浪费。

从行业实践来看，只有少数头部企业实现了硬软协同优化，如优必选科技通过自研伺服电机与运动控制算法的深度适配，将机器人关节的响应速度提升了 30%；华为通过自研昇腾芯片与具身大模型的协同优化，将模型推理效率提升了 50%。但这类案例仍属于少数，多数企业仍处于“硬件采购 + 算法适配”的被动模式。

4.2 应用挑战：具身智能的“四极”边界

随着具身智能向更广阔的场景渗透，其应用边界不断拓展，同时也面临着“极宏观、极微观、极交叉、极环境”四大维度的极限挑战。这些挑战超越了传统机器人的应用范畴，对具身智能的系统能力提出了全新要求，是产业从“可用”到“好用”的必经之路。

4.2.1 极宏观：广域时空下的多机协同与集群涌现

在城市治理、智慧农业、大范围巡检等广域场景中，需要数百甚至数千台具身智能设备协同作业，形成“集群智能”。这一过程面临着广域时空下的调度、通信、涌现效应可控性三大核心难题。

1. 多机协同的调度与通信挑战

广域场景下的多机器人集群，需要解决设备间的实时通信、动态任务分配、全局路径规划等问题。以智慧港口场景为例，无人集卡、龙门吊、堆高机等多种设备需要协同作业，传统的无线通信方案在港口复杂的电磁环境下，存在通信延迟高、信号丢包率高的问题，导致设备协同效率下降 20%-30%；在大范围农田植保场景中，无人机与地面机器人的协同需要依赖卫星通信，但卫星通信的成本高昂，且在山区等信号弱覆盖区域，难以支撑实时协同需求。

此外，不同类型机器人的异构性，也增加了协同调度的复杂度。工业机器人、服务机器人、特种机器人的硬件参数、任务能力差异显著，如何设计统一的调度系统，实现“最优任务分配、最短路径规划、最高作业效率”，是当前行业的核心攻关方向。

2. 集群涌现效应的可控性难题

当机器人集群达到一定规模时，会产生“涌现”现象，即整体表现出单个机器人不具备的智能特性，类似蚁群、蜂群的群体行为。这种涌现效应是实现广域场景高效作业的关键，但如何引导其朝着预期目标发展，同时避免出现混乱与冲突，是极宏观场景下的核心挑战。

例如，在地震灾后的搜救场景中，数百台搜救机器人组成的集群，需要自主完成废墟区域的全覆盖搜索，这就要求集群具备“无中心自组织”能力，避免重复搜索同一区域，同时在发现幸存者时，能够快速召唤救援机器人协同作业。但当前技术水平下，集群涌现效应的可控性较低，易出现“局部拥堵”“任务冲突”等问题，难以满足复杂场景的需求。

4.2.2 极微观：微纳尺度下的精准感知与靶向作业

在生物医药、半导体制造等高端领域，具身智能需要进入微纳尺度的操作空间，实现纳米级的精准感知与靶向作业，其难度远超传统工业场景，是衡量具身智能技术精度的“试金石”。

1. 微纳尺度的感知精度瓶颈

微纳尺度下，物体的物理特性与宏观世界存在显著差异，传统传感器难以精准捕捉物体的位置、形态、力学特性等信息。以半导体晶圆制造为例，晶圆表面的缺陷尺寸通常在纳米级，需要传感器具备 0.1 纳米以下的检测精度，而当前主流的视觉传感器检测精度仅能达到 10 纳米左右，难以满足高端芯片制造的需求；在生物医药领域，

细胞分选作业需要机器人精准识别不同类型的细胞，而细胞的形态、大小差异极小，需要多模态传感器的融合感知，目前的技术识别准确率仅能达到 85% 左右，难以满足临床应用的要求。

2. 微操作的力控精度挑战

微纳尺度下的作业对力的控制要求极高，过大的作用力会导致元器件损坏，过小的作用力则无法完成操作。以细胞注射为例，需要机器人的末端执行器精准施加纳牛级的力，而当前主流的灵巧手力控精度仅能达到微牛级，难以满足需求；在半导体芯片的微组装作业中，元器件的焊接需要精准控制温度与压力，温度偏差 1°C 或压力偏差 1mN，都可能导致芯片失效，这对机器人的运动控制与力控系统提出了近乎极致的要求。

目前行业内主要通过压电陶瓷驱动的执行器提升力控精度，但这类执行器存在响应速度慢、行程短的问题，难以兼顾精度与效率，成为制约微纳尺度作业的核心瓶颈。

4.2.3 极交叉：碳硅融合下的神经接口与生机共融

具身智能的终极形态之一是实现“人机共生”，而碳硅融合的神经接口技术，是连接生物大脑与机器身体的关键桥梁。这一领域不仅面临技术层面的挑战，更涉及伦理与安全层面的深层问题。

1. 神经接口的信号传输与解码难题

当前的神经接口技术主要分为侵入式与非侵入式两类，两类技术均存在显著短板。侵入式神经接口如马斯克的 Neuralink，通过植入芯片采集大脑信号，具备信号强度高、解码精度高的优势，但存在生物相容性不足、手术风险高的问题，植入芯片可能引发人体免疫反应，且手术过程存在脑出血、感染等风险；非侵入式神经接口如脑电帽，具备无创、便捷的优势，但信号强度弱、解码精度低，目前的信号解码率仅能达到 60%-70%，难以支撑复杂的运动控制指令。

此外，大脑信号与机器指令的双向传输也存在瓶颈，目前仅能实现“大脑到机器”的单向指令传输，“机器到大脑”的反馈信号传输技术尚未突破，导致人机交互的“闭环”未能形成，影响了用户的操作体验。

2. 生机共融的系统整合与伦理挑战

碳硅融合不仅是技术层面的结合，更是生物系统与机器系统的协同适配。以康复机器人领域为例，外骨骼机器人与脑机接口的结合，能够帮助脊髓损伤患者恢复行走能力，但当前系统难以实时感知人体的生理信号变化，无法动态调整运动策略，导致患者在使用过程中容易出现疲劳、不适等问题。

同时，神经接口技术还面临着严峻的伦理与安全挑战。大脑信号包含个人的思维、记忆等隐私信息，如何保障数据安全，避免大脑信号被窃取、篡改，是行业必须

解决的问题；此外，神经接口技术的应用边界也亟待明确，是否允许通过神经接口增强人类的运动、认知能力，也引发了广泛的社会讨论。

4.2.4 极环境：极限物理条件下的本体鲁棒与韧性生存

在特高压巡检、井下深部作业、极地探测等极限环境中，具身智能机器人需要面对高温、高压、强辐射、高湿度等恶劣条件，其本体的鲁棒性与韧性成为生存的关键，是拓展具身智能应用边界的核心挑战。

1. 极端环境下的硬件可靠性挑战

极限环境会对机器人的硬件系统造成严重损耗，不同场景的环境特性，对硬件的防护要求差异显著。在特高压巡检场景中，500kV 以上的输电线路存在强电磁辐射，会干扰传感器与通信系统的正常工作，需要机器人具备高强度的电磁屏蔽能力，目前主流的屏蔽技术虽能满足需求，但会增加机器人的重量与成本；在煤矿井下作业场景中，高瓦斯浓度要求机器人具备防爆特性，需符合 Ex d I Mb 的防爆标准，这对机器人的电路设计、材料选择提出了严格要求，部分防爆部件的成本是普通部件的 3-5 倍；在极地探测场景中，-60°C 的低温环境会导致电池性能大幅衰减，还会使机器人的机械部件出现脆化、卡顿等问题，需要采用耐寒的特种材料，如钛合金、低温橡胶等，进一步推高了制造成本。

2. 复杂工况下的自主容错与应急处理能力挑战

在极限环境中，机器人往往处于“无人值守”的作业状态，当出现部件故障或环境突变时，需要具备自主容错与应急处理能力。例如，在井下深部作业时，若机器人的某个关节发生故障，系统需要自动切换到备用运动模式，完成作业任务并安全返回；在特高压巡检时，若传感器突然失效，机器人需要依靠惯性导航与历史数据，完成剩余巡检任务。

从技术现状来看，目前机器人的自主容错能力仍处于初级阶段，仅能处理少数预设的故障场景，面对未知故障时，往往只能采取“停机等待救援”的策略，难以满足极限环境的作业需求。波士顿动力的 Atlas 机器人是少数具备较强容错能力的产品，其多关节冗余设计，能够在关节故障时调整运动姿态，但这类技术尚未实现商业化普及。

4.3 未来趋势展望

面向 2030 年，随着技术的持续突破与产业生态的不断完善，具身智能将迎来四大发展趋势，推动产业从“单点创新”迈向“系统变革”，成为引领中国新质生产力发展的核心引擎。

4.3.1 趋势一：大脑标准化——通用具身大模型

通用具身大模型将成为具身智能的“核心大脑”，推动行业从“场景定制化模型”向“通用标准化模型”演进，大幅降低研发成本与落地门槛。

1. 统一模型架构，实现跨场景高效迁移

未来的通用具身大模型将基于统一的架构设计，融合视觉、触觉、语言、运动等多模态数据，具备强大的跨场景泛化能力。通过在海量仿真与真实数据上的预训练，模型能够学习到通用的环境交互规律，无需针对特定场景进行大规模重构，仅需少量微调数据，就能快速适配不同的应用场景。

从国内发展来看，百度文心具身大模型、华为盘古具身模型等已实现初步突破，以文心具身大模型为例，其在工业装配场景的微调时间从传统的数周缩短至 3 天，大幅提升了场景适配效率。预计到 2030 年，通用具身大模型将覆盖 80% 以上的主流应用场景，成为行业的“基础设施”。

2. 开源开放生态，加速技术创新与普惠

通用具身大模型将推动行业形成“开源开放、协同创新”的生态体系。高校、科研机构、企业将共同参与模型的训练与优化，共享数据、算法与算力资源，打破技术壁垒。例如，清华、北大、浙大等高校联合发起的“具身智能开源社区”，已开放了部分预训练模型与数据集，降低了中小企业的研发门槛；国际上，OpenAI、谷歌等企业也纷纷推出具身大模型的开源计划，推动全球技术协同发展。

开源开放生态的形成，将吸引更多创新主体参与其中，催生大量基于通用大模型的应用开发，推动具身智能的规模化普及。

4.3.2 趋势二：身体模块化——硬件接口互通与产业链重构

硬件的模块化与接口标准化，将重构具身智能的产业链格局，实现“即插即用”的硬件生态，推动产业降本增效。

1. 核心部件模块化设计，实现快速定制与维护

未来的具身智能本体将采用高度模块化的设计理念，灵巧手、伺服电机、传感器、能源系统等核心部件将实现标准化生产，具备统一的接口协议。企业可以根据不同的应用场景，快速组合不同的模块，定制化开发机器人产品。例如，优必选的 Walker 机器人已实现手臂、腿部模块的独立更换，在部件损坏时，无需整机返厂维修，仅需更换对应模块，维护成本降低了 50% 以上；大疆创新的农业机器人，通过更换不同的末端执行器，可实现播种、施肥、喷药等多种功能。

预计到 2030 年，具身智能硬件的模块化率将达到 90% 以上，大幅缩短产品研发周期，降低制造成本。

2. 产业链分工重构，形成专业化协作格局

硬件模块化将推动产业链从“垂直整合”向“专业化分工”转变，形成上游核心部件供应商、中游本体制造商、下游解决方案提供商的清晰分工格局。上游将涌现出一批专注于核心部件研发的“专精特新”企业，如高精度灵巧手制造商、低功耗伺服电机企业等；中游本体制造商将聚焦于模块集成与系统优化，不再依赖自主研发核心部件；下游解决方案提供商将专注于场景需求挖掘与应用落地，为客户提供定制化服务。

这种专业化分工模式，将提升产业链的整体效率，推动具身智能产品的成本下降与性能提升，加速商业化落地。

4.3.3 趋势三：云边端协同——云端大脑训练与边缘小脑推理

云边端协同的计算架构，将解决具身智能“算力需求高”与“实时性要求强”的矛盾，实现“高效训练”与“精准执行”的统一。

1. 云端负责大模型训练，挖掘全局最优解

云端将依托强大的算力资源，负责通用具身大模型的训练与迭代。通过整合海量的多场景数据，云端能够不断优化模型的性能，挖掘全局最优的交互策略；同时，云端还可以实现多机器人的数据共享与协同训练，提升集群智能水平。例如，阿里云的城市大脑与边缘机器人的协同，通过整合全市范围内的机器人数据，优化了交通疏导、环境监测等任务的执行效率。

随着算力基础设施的不断完善，云端训练的效率将持续提升，模型迭代周期将从目前的数月缩短至数天。

2. 边缘端负责实时推理，保障低延迟高可靠执行

边缘端（机器人本地）将部署轻量化的“小脑模型”，负责实时的运动控制、环境感知与决策。通过云边端的数据交互与模型协同，机器人能够在保障低延迟、高可靠性的同时，持续接收云端的模型更新，实现“在线学习、持续进化”。例如，在远程手术机器人场景中，边缘端的“小脑模型”能够实时处理手术器械的运动数据，保障手术的精准性；云端则负责优化手术策略，提升手术成功率。

5G、6G 等通信技术的发展，将进一步支撑云边端的实时协同，推动具身智能在低延迟、高可靠场景的应用落地。

4.3.4 趋势四：人机共生——法律伦理边界与社会心理接纳

人机共生将成为具身智能发展的终极方向，这一过程不仅需要技术的支撑，更需要构建完善的法律伦理体系与社会接纳环境，实现人机和谐共处。

1. 完善法律伦理框架，明确责任界定与应用边界

随着具身智能的普及，相关的法律法规与伦理准则将逐步完善。在法律层面，将明确机器人在作业过程中的责任主体，例如，自动驾驶配送机器人发生事故时，责任

划分将涵盖制造商、运营商、用户等多方主体；在医疗机器人领域，将规范机器人的操作标准与风险管控，保障患者的生命安全。

在伦理层面，将明确具身智能的应用边界，禁止开发具有攻击性、危害性的机器人产品；同时，将建立神经接口技术的伦理审查机制，保障用户的隐私与安全。预计到 2030 年，我国将形成一套完善的具身智能法律伦理体系，为产业发展保驾护航。

2. 引导社会心理接纳，推动人机协同价值释放

通过科普宣传与场景体验，将引导公众正确认识具身智能的价值，消除“机器人替代人类”的焦虑。具身智能的发展目标不是替代人类，而是赋能人类，将人类从危险、重复、繁重的劳动中解放出来，转向更具创造性的工作。例如，在汽车工厂中，人机协作机器人能够承担高强度的焊接、搬运任务，工人则专注于质量检测、工艺优化等创造性工作，实现了“人机优势互补”；在医疗领域，康复机器人能够帮助患者恢复运动功能，提升生活质量。

随着人机协同场景的不断丰富，公众对具身智能的接纳度将持续提升，推动产业实现可持续发展。

参考文献

- [1] 韦博雅. 灯塔工厂迎“新员工”: 具身天工、天铁机器人“入职闯关记” [EB/OL]. 新京报 (腾讯新闻转载) (2025-10-22)[2026-01-29]. <https://news.qq.com/rain/a/20251022A02R3P00>.
- [2] CYBERDAILY. 优必选进阶: 数十个 Walker S1 在极氪汽车厂集群协作, 我们看到了未来人形机器人驱动的智能自动化工厂 |CyberRobo[EB/OL]. (2025-03-04)[2026-01-29]. <https://news.qq.com/rain/a/20250304A06ATE00>.
- [3] 许旷, 彭丹. “美罗” 机器人进厂“打工”! 美的荆州工厂“10 秒下线一台洗衣机” [EB/OL]. (2025-12-14)[2026-01-29]. https://news.hubeidaily.net/mobile/c_4902631.html.
- [4] 曾宪勇. 京东物流发布“异狼” 具身智能机械臂, 直击物流分拣核心痛点[EB/OL]. (2025-09-26)[2026-01-29]. <https://xueqiu.com/3682944694/354510718>.
- [5] 汪森. 京东物流“智狼” 机器人发布: 新一代“货到人” 方案效率提升 3 倍以上 [EB/OL]. (2024-11-05)[2026-01-29]. <https://m.ithome.com/html/808105.htm>.
- [6] Cainiao Logistics Technology. AGV 客户案例 (含“菜鸟江夏立库 AGV 仓” 等自动化立库/堆垛机场景) [EB/OL]. [2026-01-29]. <https://tech.cainiao.com/productv2/ProductIndex/285>.
- [7] 国际科技创新中心网络服务平台. 银河太空舱全球首发: 北京落地全球首个城市级商用人形机器人示范区[EB/OL]. (2025-08-11)[2026-01-29]. https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/xwj/202508/t20250811_215681.html.
- [8] 陈雨康. 擎朗智能双足人形具身服务机器人 XMAN-F1 首秀: 以岗位化为核心推动具身智能落地[EB/OL]. (2025-07-28)[2026-01-29]. <https://www.stcn.com/article/detail/2770263.html>.
- [9] 东南网. “特” 快报 | 江西首个! 1000 千伏特高压变电站迎来多足机器人“新员工” [EB/OL]. (2025-12-19)[2026-02-05]. https://pt.fjsen.com/xw/2025-12/19/content_32100938.htm.

- [10] 新华网. 宁夏: 变电站“空—地—固”协同巡检保障冬季用电[EB/OL]. (2025-12-19)[2026-02-05]. <http://www.nx.xinhuanet.com/20251219/7df501eb2f1f4a1cbc522f6837d11b92/c.html>.
- [11] 深圳特区报. 鹏城电力“机器狗”上线, 守护深港地下光明[EB/OL]. (2024-06-25)[2026-02-05]. https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/tpxw/content/post_12142584.html.
- [12] 宇树科技. 应急消防巡检方案[EB/OL]. [2026-02-05]. <https://www.unitree.com/operate/firerescue>.
- [13] 工业和信息化部办公厅. 国家矿山安全监察局综合司. 关于公布矿山领域机器人典型应用场景名单的通知: 工信厅联装函〔2024〕163号[EB/OL]. (2024-05-17)[2026-02-05]. https://www.chinamine-safety.gov.cn/xw/zt/2018zt/mkjqrlyfy/gzdt_01/202405/t20240517_488715.shtml.
- [14] 齐重数控. 煤矿井下产品展示[EB/OL]. [2026-02-05]. <https://www.qishengrobot.com/product/category/36.html>.
- [15] 智能矿山. 煤矿井下防爆巡检机器人研究现状及发展趋势[EB/OL]. (2022-01-01)[2026-02-05]. <https://www.chinacaj.net/ZNKS/202201/453032.pdf>.
- [16] 越疆科技. DOBOT MG400 桌面级协作机械臂行业应用[EB/OL]. [2026-02-05]. <https://www.dobot.cn/products/desktop-four-axis/mg400.html>.
- [17] 北京经济技术开发区. 身智能新赛道, 家庭桌面 AI 机器人加速落地[EB/OL]. (2025-05-28)[2026-02-05]. https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/scyq/bjjjjskfq/jkdt/202505/t20250528_206158.html.
- [18] 工业和信息化部办公厅. 国家卫生健康委员会办公厅. 医疗领域机器人应用优秀场景公示名单[EB/OL]. (2022-06-14)[2026-02-05]. <https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/tzgg/202206/P020220614583192971391.pdf>.
- [19] 工业和信息化部. 人形机器人创新发展指导意见: 工信部装〔2023〕193号[EB/OL]. (2023-11-02)[2026-02-05]. <https://www.ncsti.gov.cn/zcfg/zcwj/202311/P020231103482413965397.pdf>.
- [20] 工业和信息化部等十七部门. “机器人+”应用行动实施方案: 工信部联装〔2022〕187号[EB/OL]. (2023-1-19)[2026-02-05]. <http://ncsti.gov.cn/zcfg/zcwj/202301/P020230120546960977407.pdf>.
- [21] 傅利叶智能. 康复港: 数字化康复整体解决方案[EB/OL]. [2026-02-05]. <https://www.fftai.cn/about-medium-technical/46>.