



中国人工智能学会
Chinese Association for Artificial Intelligence

中国人工智能系列白皮书 复合多态机器人

中国人工智能学会
二〇二四年十一月



中国人工智能系列白皮书

——复合多态机器人

中国人工智能学会
二〇二四年十一月

《中国人工智能系列白皮书》编委会

主任：戴琼海

执行主任：王国胤

副主任：陈杰 何友 刘成林 刘宏 孙富春 王恩东

王文博 赵春江 周志华

委员：班晓娟 曹鹏 陈纯 陈松灿 邓伟文 董振江

杜军平 付宜利 古天龙 桂卫华 何清 胡国平

黄河燕 季向阳 贾英民 焦李成 李斌 刘民

刘庆峰 刘增良 鲁华祥 马华东 苗夺谦 潘纲

朴松昊 钱锋 乔俊飞 孙长银 孙茂松 陶建华

王卫宁 王熙照 王轩 王蕴红 吾守尔·斯拉木

吴晓蓓 杨放春 于剑 岳东 张小川 张学工

张毅 章毅 周国栋 周鸿祎 周建设 周杰

祝烈煌 庄越挺

《中国人工智能系列白皮书——复合多态机器人》编写组

组长：支涛

副组长：张立华 付宜利 马楠 张松源

于乃功 李全印 刘学君 陈雯柏 应甫臣 赵博学 龚汉越

(按姓氏笔画数排序)

目录

前言	1
第一章：服务机器人发展综述	2
1.1 服务机器人的归类	2
1.2 服务机器人的应用场景	2
1.3 国家政策助力服务机器人驶入快车道	3
第二章：AI 发展驱动服务机器人具身化时代到来	5
2.1 从单模态大模型到多模态与具身智能融合发展 呈现加速迭代趋势	5
2.1.1 人机交互更加，沉浸自然	5
2.1.2 多模感知更加精准	5
2.1.3 认知决策更加敏捷	5
2.1.4 运动控制更加自如	6
2.1.5 整体成本更加可控	6
2.2 大模型+具身智能赋能服务行业锚定行业需求强化技术供给	6
2.2.1 标准化服务：保持服务的一致性和质量，同时提高效率和降低成本	6
2.2.2 流程化服务：优化工作流程，减少瓶颈和延迟	6
2.2.3 定制化服务：满足客户的个性化需求	6
2.2.4 敏捷化服务：在快速变化的环境中快速响应用户需求	7

2.2.5 可信化服务：提供可信化服务，确保对客户服务的安全性和隐私保护	7
2.3 服务器机器人从单一功能向复合功能加速走来	7
2.3.1 初级阶段专用单一	7
2.3.2 高级阶段复合多态	7
2.3.3 结论	8
第三章：复合多态机器人与传统机器人的对比	9
3.1 多模态机器人的概念	9
3.1.1 多模态感知能力	9
3.1.2 多模态交互	10
3.1.3 自主决策与学习	10
3.1.4 运动能力	10
3.1.5 硬件平台	10
3.1.6 软件架构	10
3.1.7 物理世界的交互数据	10
3.1.8 鲁棒性和泛化能力	10
3.2 复合多态机器人的概念	10
3.2.1 形态上的多样性	11
3.2.2 模态上的多样性	11
3.2.3 功能上的复合性	12
3.2.4 协作上的群智性	12
3.3 复合多态机器人与模块化机器人异同	12

3.3.1 模块化机器人.....	12
3.3.2 复合多态机器人.....	12
3.4 复合多态机器人与人形机器人的异同	13
3.4.1 共性部分	13
3.4.2 不同部分	13
第四章：复合多态机器人的突出特征和特点.....	15
4.1 复合多态机器人的突出特征	15
4.1.1 自主性方面	15
4.1.2 交互性方面	15
4.1.3 适应性方面	15
4.1.4 实时性方面	16
4.1.5 安全性方面	16
4.2 复合多态机器人的技术特点	16
4.2.1 多态与重构	16
4.2.2 功能解耦	17
4.2.3 跨模态学习与场景自适应	18
第五章：复合多态机器人成为具身智能的现实途径.....	20
5.1 复合多态机器人的性能优势	20
5.1.1 无死角感知与综合态势感知	20
5.1.2 高性能算力与智能人机交互	20
5.1.3 可靠低延时组网与通信	20
5.1.4 7X24 小时接力续航服务	21

5.2 复合多态机器人的应用优势	21
5.2.1 功能复合一机多能	21
5.2.2 服务效率高	21
5.2.3 服务质量高	21
5.2.4 稳定运行安全可靠	22
5.2.5 多维度降低成本	22
5.3 复合多态机器人是具身智能落地的客观选择	22
第六章：复合多态机器人技术体系与生态	24
6.1 复合多态机器人技术产业链	24
6.1.1 芯片(计算、控制等).....	24
6.1.2 传感器(视觉、力矩等).....	25
6.1.3 电机、丝杠等	26
6.1.4 机器人操作系统.....	28
6.2 复合多态机器人产业生态	29
6.2.1 基础技术研究	29
6.2.2 核心部件制造	30
6.2.3 机器人操作系统	30
6.2.4 服务和维护	30
6.2.5 政策监管机构行业协会组织第三方检测机构	31
6.3 复合多态机器人产业规模预测	31
第七章:服务场景的复合多态机器人及其近期发展	33
7.1 解构服务场景内的复合多态机器人	33

7.1.1 功能舱.....	33
7.1.2 服务机器人操作系统.....	34
7.1.3 机器人的感知单元、智能单元.....	34
7.1.4 场景感知 IoT.....	34
7.2 复合多态机器人发展过程.....	35
7.3 复合多态机器人行业的近期发展重点.....	36
7.3.1 功能复合的复合多态机器人.....	37
7.3.2 服务高效的复合多态机器人.....	37
7.3.3 稳定可靠的复合多态机器人.....	37
第八章:[云-端] 协同的复合多态机器人服务技术架构.....	38
8.1 复合多态机器人的[云-端]构成.....	38
8.1.1[云-端]的技术构成.....	38
8.1.2[云-端]的系统构成.....	39
8.2 云：持续进化的服务智能——优化提升服务体验.....	39
8.3 端：[云-端]具身智能的物理载体.....	40
8.3.1 环境适应性.....	40
8.3.2 任务执行能力.....	40
8.3.3 人机交互.....	40
第九章:复合多态机器人服务场景的应用与迁移.....	41
9.1 复合多态机器人服务场景的扩展.....	41
9.1.1 智能化酒店.....	41
9.1.2 智能化医院.....	41

9.1.3 智能化楼宇	42
9.1.4 智能化社区	42
9.1.5 智能化商超	43
9.2 复合多态机器人非服务场景的扩展	43
9.2.1 制造业工厂	43
9.2.2 芯片业工厂	43
第十章:复合多态机器人的商业路径	45
10.1 复合多态机器人是抢先具身智能机遇的商业路径	45
10.2 复合多态机器人的[云—端]一体化核心价值	45
10.3 复合多态机器人的收益模式	46
10.3.1 复合多态机器人的 ToB 购买租赁收益	46
10.3.2 复合多态机器人的 ToC 租售服务收益	46
10.3.3 复合多态机器人的开放系统的价值	46
第十一章:复合多态机器人价值潜力	47
11.1 服务农业和工业生产的巨大潜力	47
11.1.1 农业生产的变革	47
11.1.2 工业制造的创新	47
11.2 生活模式变化和老龄化催生服务机器人需求	47
11.2.1 日常生活的便利化	47
11.3 促进文化观念更新和社会治理创新	48
11.3.1 文化观念的更新	48
11.4 人才发展与机器人人口红利的转变	48

11.4.1 人才发展	48
11.4.2 机器人口红利	49
11.5 复合多态机器人推动生产服务范式的转型	49
参考文献	51

前言

随着新一轮科技革命和产业变革的加速演进，智能机器人^[1]技术作为科技创新的重要前沿，正迅速融入社会生产和生活的各个方面，成为推动经济高质量发展的关键力量。本白皮书旨在深入分析智能机器人^{[2][3]}的分支-服务机器人的技术演进、产业趋势、市场动态以及面临的挑战与机遇，为行业参与者、政策制定者和广大关注者提供参考。

在介绍服务机器人技术演进的基础上，白皮书引出了多模态机器人的概念，回顾了其发展历程，在此基础上重点探讨了新的复合多态机器人——集云端智能、多模态交互、自适应控制技术于一体的先进机器人，其形态在服务领域的应用前景和巨大潜力。通过对复合多态机器人的研究，重点阐述复合多态机器人在服务场景的优势、特点和技术架构，由场景需求牵引出复合多态机器人的产业生态、技术趋势等方面。报告的结构安排如下：第一部分服务机器人发展综述，包括服务机器人的归类、应用场景以及国家政策对产业发展的推动作用；第二部分深入讨论AI如何驱动服务机器人具身化的到来，以及这一过程中的关键技术和行业应用；第三部分详细对比复合多态机器人与传统机器人的异同，以及与人形机器人的异同；第四部分论述复合多态机器人作为具身智能机器人的重要分支突出特征、技术特点；第五部分探讨复合多态机器人成为具身智能实现载体的现实途径；第六部分构建复合多态机器人技术体系与产业生态的框架；第七部分重点分析服务场景市场情况与近期发展；第八部分提出适应人工智能的[云—端]协同的复合多态机器人服务技术架构；第九部分讨论复合多态机器人服务场景的应用与迁移；第十部分探索复合多态机器人的商业路径和收益模式；最后，第十一部分评估复合多态机器人的价值潜力，并对其在社会经济发展中的作用进行前瞻性思考。

我们期望白皮书能够为复合多态机器人领域的可持续发展提供策略建议，促进技术创新，推动产业升级，并为构建智能社会贡献智慧和力量。

第一章：服务机器人发展综述

1.1 服务机器人的归类

根据国际机器人联盟（IFR）划分标准，可将机器人分为工业机器人和服务机器人^[14]。其中，工业机器人是指应用于生产过程与环境的机器人；服务机器人是指除工业机器人以外，用于非制造业并服务于人类的各种机器人，分为个人/家用服务机器人及专业服务机器人。

我国实施的国家标准《机器人分类》（GB/T 39405-2020）^[8]，分为以下几类：
工业机器人：自动控制的、可重复编程、多用途的操作机，可对三个或者三个以上轴进行编程，它可以是固定式或移动式。在工业自动化中使用。按其使用用途可分为：搬运作业/上下料机器人、焊接机器人、喷涂机器人、加工机器人、装配机器人、洁净机器人、其他工业机器人。个人/家用服务机器人：在家居环境或类似环境下使用的，以满足使用者生活需求为目的的服务机器人。按其使用用途可分为：家务机器人、教育机器人、娱乐机器人、养老助残机器人、家用 安监机器人、个人运输机器人、其他个人/家用服务机器人。公共服务机器人：应用于住宿、餐饮、金融等公共场所，如商场、医院、学校等，为人类提供一般服务，如导览、咨询、安保等服务。

按其使用用途可分为：餐饮机器人、讲解导引机器人、多媒体机器人、公共游乐机器人、公共代步机器人、其他公共服务机器人。特种机器人：应用于专业领域，一般由经过专门培训的人员操作或使用的，辅助和/或替代人执行任务。这类机器人可以在极端环境下（如高温、高压、辐射等）替代人类完成任务，保障人员安全和提高工作效率。按其使用用途可分为：检查维修机器人、专业检测机器人、搜救机器人、专业巡检机器人、侦察机器人、排爆机器人、专业安装机器人、采掘机器人、专业运输机器人、手术机器人、康复机器人、其他特种机器人。其他应用领域机器人：除以上四类应用领域之外的机器人。

1.2 服务机器人的应用场景

本白皮书主要分析和研究的对象是：一、《机器人分类》（GB/T 39405-2020）个人/家用服务机器人、部分特种机器人；二、国际机器人联盟（IFR）中的和服务机器人，特别是针对智能化服务机器人。服务机器人逐步从单一走向了智能化，服务机器人应用场景复杂多样、具体细分种类繁多，包括但不限于：

- 家庭服务：如清洁机器人、陪伴机器人、教育机器人。
- 医疗健康：如辅助手术机器人、护理机器人、康复机器人。
- 餐饮服务：如点餐机器人、送餐机器人。
- 酒店服务：如前台接待机器人、客房服务机器人。
- 零售服务：如导购机器人、库存管理机器人。
- 公共服务：如导览机器人、信息咨询机器人。

1.3 国家政策助力服务机器人驶入快车道

各主要工业国以美国、欧盟、日本、中国为代表，美国重点发展智能技术和与国防等关键领域相关的机器人产业；欧盟重点关注技术创新和机器人产业中的中小初创企业发展；日本着力发展工业领域的应用发展和机器人对劳动力短缺的补充。我国政策对服务机器人全球产业的发展也起到了重要的推动作用^[15]。

《“十四五”机器人产业发展规划》^[4]是由工业和信息化部、国家发展和改革委员会、科学技术部等15个部门联合发布的规划文件。该规划对“十四五”期间国家推进机器人产业发展作了具体部署，提出了到2025年机器人产业发展的主要目标，并部署了提高产业创新能力、夯实产业发展基础、增加高端产品供给、拓展应用深度广度、优化产业组织结构等主要任务。2023年1月出台的《“机器人+”应用行动方案》^[5]和同年11月出台的《人形机器人创新发展指导意见》^[6]则共同强调了聚焦重点应用领域和人形机器人，突破机器人应用技术及解决方案，推广典型应用场景。《“机器人+”应用行动实施方案》由工信部等十七部门联合印发，旨在推动机器人技术在各个领域的应用，提出到2025年，制造业机器人密度较2020年实现翻番，服务机器人、特种机器人行业应用深度和广度显著提升。科技部等六部门关于印发《关于加快场景创新以人工智能高水平应用促进经济高质量发展的指导意见》^[7]的通知，场景创新是以新技术的创造性应用为导向，以供需联动为路径，实现新技术迭代升级和产业快速增长的过程。推动人工智能场景创新对于促进人工智能更高水平应用，更好支撑高质量发展具有重要意义。以更智能的城市、更贴心的社会为导向，在城市管理、交通治理、生态环保、医疗健康、教育、养老等领域持续挖掘人工智能应用场景机会，开展智能社会场景应用示范。国家标准项目《服务机器人云平台分类及参考体系结构》由全国机器人标准化技术委员会归口实施。该项目的目的在于通过云计算与机器人技术的结合，解决服务机器人本地计算资源受限的问题，

促进服务机器人与云计算、边缘计算等新一代信息技术的深度融合。上述相关政策和规划文件体现了国家对服务机器人产业发展的重视，旨在通过技术创新、产业升级、标准制定等多方面措施，推动服务机器人产业快速健康发展。中国正以高速发展机器人产业为契机提升全球综合竞争力。

第二章：AI 发展驱动服务机器人具身化时代到来

机器人从上个世纪中期发展至今经历了电气时代、数字时代，如今迈入了智能时代。服务机器人从“摆设”到应用、从专用单一功能机器人到复合功能机器人高速走过了10余年的进化之路。随着大模型落地应用场景越来越广泛，服务机器人被以大模型为代表的新一代人工智能赋能，正加速具身化。

2.1 从单模态大模型到多模态与具身智能融合发展 呈现加速迭代趋势

从单模态大模型到多模态与具身智能融合发展，是AI发展的大趋势。机器人“大脑”的进化速度将主要取决于大模型技术的发展速度，而大模型技术的发展速度又由算力和数据量的增长速度以及算法的进化速度所决定，目前都呈现出加速迭代的趋势。在大模型加持下，自学习、自适应、自组织的具身智能正在走向现实，机器人产业有望迎来繁荣发展期。服务机器人的智能化、协同化、个性化水平将大幅提升，主要体现在自然人机交互、多模态智能感知、自主认知决策、精准运动控制以及研发训练成本降低等诸多方面^{[9][10]}。

2.1.1 人机交互更加，沉浸自然

大模型语言生成能力强，为机器人的语音交互难题提供了解决方案。人工智能公司Levatas与波士顿动力合作，将ChatGPT和谷歌语音合成技术接入Spot机器狗，实现与人类的自然交互^[11]。

2.1.2 多模感知更加精准

大模型促进视觉、听觉、文本等多种信息模态的融合处理，服务机器人在处理复杂任务时能整合多源信息，做出更为全面和准确的决策^[12]。OpenAI最新发布的GPT-4o，支持文本、音频和图像的多模态输入输出，实现真正的多模态统一。

2.1.3 认知决策更加敏捷

借助大模型，可基于情境分析做出更加合理的判断和规划行动路径，包括评估多种可能的行动方案，预测行动后果，并选取最优解。面对突发情况时，可快速适应并调整策略，体现出更强的自主性和灵活性。

2.1.4 运动控制更加自如

通过集成强化学习算法，大模型帮助机器人在不断试错中学习最有效的运动策略。例如，DQN（DeepQ-Network）和其他强化学习模型可以与大模型协作，基于当前状态决定下一动作，从而优化路径规划、避障策略和物体操作技巧。

2.1.5 整体成本更加可控

具身智能应用到机器人载体的时间和成本都在降低，一是在研发阶段，训练成本在降低，大模型用于辅助设计、功能开发等工作大幅减少人员、计算资源；二是自动化的虚拟测试也大幅降低测试成本，提升数据收集，加快产品迭代速度。整体上会降低研发成本和周期。

2.2 大模型+具身智能赋能服务行业锚定行业需求强化技术供给

在服务行业迈向智能化的浪潮中，大模型认知智能和具身智能赋能的服务机器人正成为引领行业升级的关键抓手。通过精准锚定行业需求，大模型认知智能和具身智能不仅能够强化技术供给，还将重塑服务交付的方式，从而提升效率、优化体验，推动服务行业发生革命性的变革。

2.2.1 标准化服务：保持服务的一致性和质量，同时提高效率和降低成本

- (1) 自动化执行系统，使机器人能够按照既定流程执行标准化任务。
- (2) 质量控制算法，确保服务输出符合预设标准。
- (3) 远程监控与调整，允许人工监督者远程监控服务流程并进行实时调整。

2.2.2 流程化服务：优化工作流程，减少瓶颈和延迟

- (1) 流程优化算法，分析和优化服务流程，减少等待时间。
- (2) 任务调度系统，智能调度机器人执行任务，以提高效率。
- (3) 物联网(IoT)集成，以实现设备和服务流程的智能互联。

2.2.3 定制化服务：满足客户的个性化需求

- (1) 客户数据分析，深入分析客户数据以理解个性化需求。
- (2) 人工智能决策支持，帮助机器人根据客户需求做出定制化决策。

(3) 模块化机器人设计，允许快速调整机器人功能以适应不同服务需求。

2.2.4 敏捷化服务：在快速变化的环境中快速响应用户需求

- (1) 机器学习能力，使机器人能够从经验中学习并快速适应新任务。
- (2) 灵活的软硬件架构，便于快速更新和升级机器人系统。
- (3) 实时反馈机制，允许机器人根据客户反馈快速调整服务。

2.2.5 可信化服务：提供可信化服务，确保对客户服务的安全性和隐私保护

- (1) 安全协议和加密技术，以保护数据传输和存储的安全。
- (2) 故障检测和自我修复系统，以确保机器人的稳定运行和快速恢复。
- (3) 伦理和合规性设计，以确保机器人的行为符合伦理标准和法律法规。

2.3 服务器机器人从单一功能向复合功能加速走来

服务机器人是自动化向智能化转变过程中的重要里程碑和显著成果，而服务机器人从单一功能向复合功能转变是技术驱动、需求牵引的综合结果。服务机器人由专用单一的初级阶段正迈向功能复合、形态异构的智能机器人的高级阶段，两个阶段都体现了技术进步和应用深化的自然演化。

2.3.1 初级阶段专用单一

这个阶段集中开发能够模仿特定、单一功能人类动作和行为的机器人，以及AGV（自动引导车）用于物料搬运和运输任务。这些机器人和AGV通常设计为执行特定的、单一的任务。该阶段的落地实践主要有：①AGV，被广泛用于仓库和工厂环境，进行货物的自动化搬运和分拣。这一阶段主要面临的挑战有：系统集成度较低、各个系统和机器人之间的交互有限、缺乏灵活性、难以适应多变的任务和环境；②AMR（自主移动机器人），AMR与其前身AGV不同，后者依赖于轨道或预定义路径，并且通常需要操作员监督。AMR使用一组复杂的传感器、人工智能、机器学习和计算来进行路径规划，以导航其环境，不受有线电源的束缚；③仿生机器人，模仿自然界中的动物形态或功能，如模仿狗的四足机器人，在实际应用中主要被用于简单的服务任务，如迎宾、基础咨询或简单的物品搬运等。

2.3.2 高级阶段复合多态

进入这一阶段开始转向复合多态机器人，解耦的特征更为明显，机器人的各个组件（硬件和软件）可以独立运行、分级升级和部分替代，机器人将能够执行多种任务，具有更高的灵活性和适应性。该阶段的落地实践主要有：①模块化设计，机

机器人采用模块化设计，可以根据不同的任务需求实现分体分时使用和快速模块更换。②多功能集成，机器人能够统筹兼顾，执行清洁、搬运、客户服务等多种任务。③自主性提升，机器人的自主导航和决策能力将得到进一步增强。④智能决策，机器人要能够处理场景更复杂、更多变的任务，在没有人工干预的情况下做出自主决策。⑤人机协作，机器人与人类员工要能够更紧密地协作，共同完成任务。这一阶段可能面临的挑战有：需要更高复杂度的智能算法和更大规模的数据即时处理能力；需要确保机器人的决策过程完全透明、可解释，并符合伦理标准。在这一阶段，机器人不再仅仅是执行预设任务的机器，而是成为能够根据环境和需求定义和优化自己行为的智能体。当前服务机器人正处于高级阶段的发展初期。

2.3.3 结论

复合多态机器人作为当今服务机器人领域的先进代表，不仅具备高度的应用价值，更是行业新质生产力的典型产品。复合多态机器人将是服务机器人的重要发展方向，预示着服务行业的未来发展趋势。随着技术的不断进步和市场的逐渐成熟，复合多态机器人有望在未来发挥更加重要的作用，为服务行业带来深远的影响。

第三章：复合多态机器人与传统机器人的对比

具身智能（Embodied AI）：具身智能最早可追溯到1940年，由一个神经科学家和一个数学家提出。图灵在《Computing Machinery and Intelligence》提出了learning machine这个概念^[16]，文章提出了具身测试和离身测试，探讨了智能可能的表现形式，学术界很多人认为图灵是真正解释具身智能概念雏形的人。具身智能强调智能系统与物理世界的交互和感知能力，认为智能是与身体和环境交互作用的结果。具身智能的研究涉及到如何让智能系统通过与环境的交互来学习、理解和适应环境，从而实现更加复杂和高级的任务。这个概念在当时并没有得到广泛的关注和发展，随着时间的推移，尤其是在深度学习和其他人工智能技术的快速发展下，具身智能开始得到更多的关注，并逐渐成为人工智能领域的一个重要研究方向。复合多态机器人具备具身智能特征，其诞生是技术发展的必然趋势。

3.1 多模态机器人的概念

多模态大模型和多模态机器人都有多模态，大模型的多模态指能够处理和理解多种不同类型数据输入的人工智能模型，

即多模态交互。这些数据类型通常包括但不限于文本、图像、声音、视频等。2024年5月，OpenAI 在官网正式发布新旗舰模型 GPT-4o 多模态大模型，其中o代表的是omni，即“全能”，GPT-4o 可以实时对音频、视觉和文本进行推理。

多模态机器人（Multimodal Robot）^[17]这一概念从Google学术上检索最早可以追溯到2003年，但彼时多模态机器人主要是多种形态的意思，现在的多模态机器人则更多是融合了多模态大模型处理能力的机器人概念。多模态机器人具有以下综合了行业提出的多模态机器人的一些要素特征：

3.1.1 多模态感知能力^[18]

多模态机器人需要具备视觉、听觉、触觉等多种感知能力，以理解和响应周围环境。例如，视觉SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）技术可以帮助机器人进行即时定位和地图构建，而语音交互技术则赋予机器人“能听会说”的能力。

3.1.2 多模态交互

机器人通过语音、触觉反馈、视觉显示等多种方式与人类进行交互，提高用户体验和机器人的可用性。

3.1.3 自主决策与学习

多模态机器人需要具备自主决策能力，能够根据感知到的信息做出合适的行动选择。同时，通过机器学习和强化学习等技术，机器人能够不断学习优化其行为策略。

3.1.4 运动能力

无论是轮式、腿式还是多关节臂，多模态机器人都需要有适应不同地形和任务的运动能力。

3.1.5 硬件平台

多模态机器人的硬件平台包括传感器、执行器、计算单元等，它们是实现机器人功能的基础。

3.1.6 软件架构

包括操作系统、中间件、AI算法等，它们共同构成了机器人的“大脑”，负责处理感知信息、做出决策和控制机器人的动作。

3.1.7 物理世界的交互数据

为了训练具有物理世界交互能力的机器人模型，需要收集大量的真实世界交互数据，这些数据包含了与物理环境互动的丰富信息。

3.1.8 鲁棒性和泛化能力

多模态机器人需要具备处理现实世界中长尾事件的能力，这些事件在实验室环境中很少见，但在真实世界中可能会频繁发生。

3.2 复合多态机器人的概念^{[19][20]}

复合多态机器人（Composite Polymorphic Robots）是一种面向未来生产和服务业需求，运用多模态大模型、具身智能以及新型传感器融合、自适应控制技术与执行系统，实现高度集成与模块化架构的智能机器人；是能够更好地理解和应对人类的需求，与人类员工、其他机器人以及智能系统相互配合，实现未来生产制造领

域的柔性化规模化以及服务行业的智能化便捷化的智能机器人，在形态、技术、功能及协作上具备场景适应性。

经过系统研讨分析，编写组认为，复合多态机器人应该是在结构上具备多种机器人形态，同时融合了多模态认知智能和具身智能，具备高效人-机交互和机-机协同，能够自主感知复杂环境、自主决策完成多种任务的新一代智能机器人，是前面提到的多模态机器人未来发展的新阶段。其主要特征如下：



图 3-1 资料来源：云迹科技

3.2.1 形态上的多样性

复合多态机器人在设计上突破了传统机器人的固定形态，可以根据任务需求变换形态，这种形态变化与传统机器人的伸缩机械臂、旋转关节等不同，如可以改变移动模式，由轮式变成轮履复合、轮足复合运动模式，以适应不同的工作环境和任务需求。韩国 Naver Labs、ETH Zurich 的机器人实验室在可变形和可重构机器人领域进行了许多开创性的研究^[21]。

3.2.2 模态上的多样性

这些机器人集成了最新的多模态技术，包括 3D 视觉传感器、力觉传感器、激光雷达等，使其能够精确感知与认知周围环境。同时，通过机器学习和深度学习算

法，能够不断自我优化，提高决策和执行任务的能力。

3.2.3 功能上的复合性

复合多态机器人的功能不局限于单一任务，能够执行生产制造、清洁搬运、客户服务、安全监控等多种服务职能，真正实现一机多用。

3.2.4 协作上的群智性

复合多态机器人还具备群体智能，能够通过网络进行通信和协作，实现群体行为的协调和优化，提高整个服务系统的效率和效果。

3.3 复合多态机器人与模块化机器人异同

模块化机器人(Modular Robots)^{[22][23]}和复合多态机器人存在大量相似，群体化的模块化机器人与复合多态机器人存在场景、技术上仍有可区分。

3.3.1 模块化机器人

模块化机器人由一系列独立的模块组成，这些模块是标准化的，并且可以按照不同的组合方式进行连接，就像计算机配件的接口标准化。模块化机器人通常在设计时就考虑了模块间的互换性和接口标准化，使得机器人的升级和维护更加方便。它们的主要特点是可扩展性和可重构性。通过添加或移除模块，机器人可以适应不同的任务或环境，但是机器人本身还是机器。硬件模块化配置也是工业机器人研发和生产的重要方向。

3.3.2 复合多态机器人

复合多态机器人延续了接口标准化等模块化机器人的优势，但更侧重于机器人的连续形态变化能力，通过改变自身结构或配置来适应不同任务。复合多态机器人的设计更复杂，除了允许机器人在物理形态上进行动态调整，变形或自我重组，更多设计与实现体现在其智能化感知、认知环境，与人交互等，在控制算法、智能算法上比模块化机器人要求更高。开放的模块化结构，允许复合多态机器人能够开放集成不同的认知能力，适应环境变化并进行自我调整，适合快速满足与人相关的服务。模块化机器人需要在人的参与下快速重构以适应不同任务的场景，适合大规模生产制造。模块化机器人也将进化，不排除演变到复合多态机器人的形态。

虽然他们在功能和技术实现上有高度的相似性，但是设计理念、应用场景差异较大；复合多态机器人与人交互、与人协作、与人互信、与人互联、向人学习、为人服务，所以他们有显著的区别。

3.4 复合多态机器人与人形机器人的异同

人形机器人与复合多态机器人都是具身智能的具体实现形式，但各有异同。人形机器人(Humanoid Robots)^[24]：设计成模仿人类的形态和功能，具备环境感知能力、运动能力和操作执行能力，是连接数字世界和物理世界的载体。人形机器人的设计理念是为了适应人类的社会环境，它们能够更好地与人类互动，并在人类设计的环境中工作。例如，楼梯、门把手等都是为人类设计的，人形机器人能够适应这些环境，从而在家庭服务、医疗、教育、设施巡检等领域发挥作用。复合多态机器人具备了人形机器人的关键特质，如感知环境、人机协同和云端智能，但也有其不同的特质。

3.4.1 共性部分

强调与环境的交互和适应性：复合多态机器人与人形机器人都具备环境感知能力、认知能力、运动能力和操作执行能力，是连接数字世界和物理世界的载体。两者都率先在家庭服务、医疗、教育、设施巡检等领域发挥作用。

强调群体协同和人机协同：复合多态机器人与人形机器人都发展到群体协同的应用场景，大部分场景下都不是以独立个体机器人的形式存在，因此在环境感知、认知基础上，就需要多个机器人间的协作与互动。并且也将走向与人协作的人机互助场景。

强调与云智协同：复合多态机器人与人形机器人都不仅依赖自身的机器学习能力，都会与云端保持通信，获得云端的 AI 能力，从而获得更新的认知，更高的智能。

3.4.2 不同部分

形态多样程度不同：人形机器人未来虽然不会只有一种尺寸规格，但是它的形态基本上是一种：人形。复合多态机器人不是单一形态，通常具有多种组合、功能和形态，它们可以是两足、四足机器人，轮式机器人、复合机器人等，具有多样化的运动能力和操作机构。

功能解耦程度不同：复合多态机器人可以在形态上解耦，移动的底盘和功能载荷都可以是机器人，它们可以根据任务分离工作，也可以根据需要组合执行任务。但形态和功能可能与人类形态不同，人形机器人形态上很难再解耦。

场景适配程度不同：人形机器人的优势在于与人类伴随，如战场上战士的伴随，但在很多场景并不占优势，仿鱼的潜航器形态上更适合水中机动，人形不适合水下作业；狭窄的城市地下管廊也一样。人形机器人可能在模仿人类动作和执行一些需要精细操作的任务上更有优势。复合多态机器人则可能在力量、耐力或特定环境下

的操作能力上更为出色。

第四章：复合多态机器人的突出特征和特点

通过对比模块化机器人、人型机器人，复合多态机器人的功能特征和优势特点更加显著，更加辩证的看待复合多态机器人的特征特点。

4.1 复合多态机器人的突出特征

复合多态机器人与单一功能集群机器人、人形机器人、模块化机器人形成鲜明的对比，在以下5个方面有突出特征：

4.1.1 自主性方面

复合多态机器人突出有人环境的自主能力。多源信息融合技术：机器人利用激光雷达、摄像头、红外和超声波传感器等多源传感器收集环境信息，实现全面态势感知。自主导航技术：依托先进的视觉SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技术和激光雷达场景语义地图构建技术，机器人能够实时构建环境地图并定位自身位置，进行路径规划和避障。任务规划技术：机器人能够根据任务需求和环境信息，智能规划任务执行流程，自主完成导航、搬运等预定任务。

4.1.2 交互性方面

复合多态机器人突出与人的交互体验。语音交互技术：语音识别 (ASR)、自然语言处理 (NLP)、语音合成 (TTS) 等，理解和处理人类语言，包括语法、语义等。以及最新的情感识别：通过分析语音、面部表情或生理信号来识别用户的情绪状态。多模态交互技术：触摸屏操作控制，多种显示方式，通过机器人“面部”的LED灯或表情变化传达情感或状态信息；通过摄像头或3D传感器识别用户的手势，实现非接触式交互。如通过屏幕显示信息、语音播报等，确保客户能够实时了解服务状态。

4.1.3 适应性方面

复合多态机器人突出与人的协同配合。机器学习技术：利用机器学习和深度学习算法，机器人能够识别和适应不同的服务场景，实现快速响应和调整。自动化画像：通过学习客户的偏好和行为模式，机器人能够在服务中考虑个性化因素，提供

定制化服务。紧急处理机制：面对突发事件或未知障碍，机器人能够迅速调整行动策略，确保任务的顺利进行。

4.1.4 实时性方面

复合多态机器人突出多机器人的实时规划控制、实时决策。其搭载有导航算法、行为控制软件、人工智能处理引擎等。这些软硬件的集成，为机器人提供了强大的计算能力和灵活的行动能力。集成导航技术：自主构建语义地图，集成先进的相对定位导航算法，使机器人能够在复杂环境中进行有效导航和路径规划。行为控制软件：软件负责协调机器人的行为，根据环境信息和任务需求，控制机器人的动作和反应。协同控制技术：使多个机器人互相感知和理解任务、分配任务等。

4.1.5 安全性方面

复合多态机器人突出对人的安全保障。机器人的操作系统和通信协议都采用了高标准的安全措施，如数据加密、访问控制等。此外，机器人的行为控制软件中也集成了安全策略，如紧急停止、避障等，以确保人财的安全。

4.2 复合多态机器人的技术特点

对上述5个方面，按照技术总结，复合多态机器人以其结构的多样性、认知的多模态性、平台的解耦性、场景的自适应性以及功能的复合性，在生产和服务行业中展现出巨大的潜力和价值。

4.2.1 多态与重构

结构多样性是复合多态机器人的关键技术特征之一，它使得这些机器人在执行复杂或多变任务时具有更高的灵活性和适应性。随着材料科学、控制理论和人工智能等领域的不断进步，复合多态机器人的结构多样性将变得更加丰富和精细。在模块化技术高度成熟和解耦后会涌现多种变化，能够根据特定任务或环境需求进行调整。机械结构可能包括可伸缩的臂膀、旋转关节、多足或轮式移动系统，这些设计使得机器人能够适应狭窄或开放的空间，执行从精细操作到重物搬运等多样化任务。复合多态机器人则可能在力量、耐力或特定环境下的操作能力上更为出色。总结技术特征包括了以下多个层面的能力：

(1) 结构变化能力：复合多态机器人能够从一种形态转换到另一种形态，以适应不同的操作环境或执行不同的任务。这种变化可能是连续的或离散的。

(2) 重构多态能力：机器人的设计允许根据不同的应用需求进行扩展或定制，以满足特定任务的需求。机器人的某些部分可能设计为可重构的，能够通过机械连

接或铰链在不同位置和方向上进行重组。UR (Universal Robots) 是一家丹麦小型灵活工业协作机器人手臂 (cobots) 制造商, 其生产的机器人机械臂可以根据不同的任务需求进行重新配置, 例如改变臂长、关节角度或末端执行器的类型。

(3) 环境优化结构: 复合多态机器人通常配备有先进的控制算法, 能够根据环境反馈和任务需求自动调整其结构形态。如E-puck是一种小型的模块化机器人, 用户可以根据自己的需求添加传感器、执行器或其他模块, 从而扩展机器人的功能。

(4) 重构运动模式: 机器人可能具备多种运动模式, 例如滚动、爬行、飞行或游泳, 以适应不同的地形或环境条件。麻省理工学院媒体实验室开发出了一款LineFORM可变形机器人原型。LineFORM是一种蛇形机器人, 可以形成许多形状, 同时具备灵活性和刚性, 能够通过改变其内部结构来适应不同的地形, 例如从四足行走模式变为两足行走模式, 甚至能够像蛇一样蠕动。

(5) 感知按需重构: 为了实现有效的形态变化, 机器人可能集成了多种类型的传感器, 如触觉、视觉、声音或环境传感器, 以感知外部环境并做出相应的结构调整。Roomba是iRobot公司生产的一系列自主机器人吸尘器, 用户可以根据清洁任务的需求更换不同的清洁头或传感器模块。

(6) 结构重构最低能耗原则: 在设计时考虑能量效率, 确保形态变化过程不会消耗过多的能量, 这对于电池供电的移动机器人尤其重要。

(7) 智能启发结构设计: 许多复合多态机器人的设计受到自然界生物的启发, 模仿它们适应环境的能力, 如模仿章鱼的触手或壁虎的脚来实现粘附和移动。如以色列Temi是一种多功能服务机器人, 集成了导航、语音识别、物体识别和自主充电等功能, 能够根据任务需求在不同的模式之间切换^{[25][26]}。

4.2.2 功能解耦

复合多态机器人的关键技术特征之二是功能解耦, 用多种层次上的解耦实现功能和应用上的解耦, 功能解耦意味着将机器人的不同功能(如感知、决策、运动控制等)分离开来, 使得每个功能模块可以独立开发和优化。这种解耦可以提高系统的灵活性和可维护性, 对一个功能的修改或升级不会影响其他功能。功能解耦也有助于实现模块化设计, 使得机器人可以更容易地适应不同的任务或环境, 在设计和操作过程中将不同的功能、组件或系统分离开来, 以便它们可以独立地进行开发、优化和控制。主要包括平台与载荷解耦, 软件与硬件解耦:

(1) 平台载荷解耦: 平台载荷解耦涉及到将机器人的移动平台与其携带的有效载荷(如工具、传感器等)分离开来。允许机器人根据不同任务需求快速更换或升级其载荷, 而不需要改变整个平台的设计。载荷解耦还可以提高机器人的适应性和多用途性, 因为它可以根据特定任务选择最合适的载荷。传感器与执行器解耦意

意味着将机器人的感知系统（传感器）与其执行系统（执行器）分离开来。这允许独立地优化传感器的性能和执行器的响应，同时保持它们之间的有效协调。后续可对感知单元、智能单元单独升级和推向市场。足够开放的解耦最终实现不同厂家的平台、不同载荷的兼容和融合。如国外的TUG机器人。这些机器人在医院中用于运送药品和医疗用品，TUG机器人的载物平台是可更换的，可以根据不同的运输需求进行调整，同时其传感器系统也可以根据医院的具体环境进行优化^{[13][27]}。

（2）软件硬件解耦：软件解耦是指在软件架构中将不同的软件组件或服务分离开来，以实现松耦合的设计和单独升级更新，以实现软件定义服务（Software Defined Service）的可能。在复合多态机器人中软件与硬件解耦，可以实现不受硬件限制的智能升级。这种设计允许各个组件独立开发和更新，同时保持与其他组件的兼容性。软件解耦可以提高系统的可扩展性和灵活性，使得新功能可以更容易地集成到现有系统中。可以实现解耦之后对其他厂家的模块化机器人、复合多态机器人以及人形机器人的兼容与控制。硬件与软件解耦意味着机器人的硬件平台与其运行的软件系统之间保持独立性。这使得软件可以独立于硬件进行开发和优化，同时也允许在不同的硬件平台上运行相同的软件。国外Jibo是一种家庭服务机器人，其软件系统可以在不同的硬件平台上运行。用户可以根据自己的需求添加不同的功能，如语音识别、面部识别或环境监测。Agribot系列农业机器人。这些机器人的硬件平台和软件系统是解耦的，使得农民可以根据不同的作物和种植条件选择不同的软件配置。例如，可以为同一台机器人更换不同的传感器和控制算法，以适应不同的农业任务。

平台与载荷解耦、软件与硬件解耦是复合多态机器人设计理念，解耦是为了提高系统灵活性、可维护性和可扩展性，同时减少模块间的依赖，使得复合多态机器人能够更加灵活地适应各种环境和任务，降低软件与硬件维护和升级的成本。这种设计理念对于未来机器人技术的发展至关重要，它不仅提高了机器人的实用性，也为机器人的创新和进步打下了坚实的基础。

4.2.3 跨模态学习与场景自适应

解耦和多态结构是场景自适应的基础，进一步在AI对场景的认知能力支持下，复合多态机器人将具备强大的场景自适应能力，展示出超越模块化机器人和人形机器人的场景自适应能力特征。复合多态机器人通过本体的感知与环境交互获取环境的数据、变化等，通过多模态感知、跨模态感知和知识关联形成认知，在AI的加持下能够感知场景变化并实时调整形态、功能、行为。

认知多模态（Cognitive Multimodality，学术上也有称 Multimodality in Cognitive）^[28]通常指的是人类或其他智能体在感知、处理和理解世界时，能够同时利用和整合

来自不同感官通道（如视觉、听觉、触觉等）的信息。在人工智能和机器学习领域，跨模态学习（Cross-Modal Learning）或跨模态融合（Cross-Modal Fusion）是实现认知多模态的一种技术手段。

（1）认知多模态：复合多态机器人的认知系统是多模态的，集成了视觉、听觉、触觉等多种感知方式。通过高级的传感器和算法，能够理解和解释周围世界的复杂信息，实现对环境的精确感知和智能决策。

①数据融合：认知多模态需要通过自身采集和机器人本体的传感器系统来理解其环境，这些感知方式可能包括视觉、听觉、触觉、嗅觉和环境感知等。机器人需要能够处理和融合来自不同感知模态的数据，以获得对环境的全面理解。数据融合技术可以帮助机器人从不同角度和不同层面上理解环境信息。

②学习和适应：机器人通过认知多模态的人工智能模型，适应新的服务需求、环境条件，学习与人类或其他机器人的交互能力，能够理解语言、手势和表情等非言语交流方式。

③性格与情绪：认知多模态还包括对环境上下文的理解，对客户需求的上下文理解，机器人需要能够识别和解释环境中的情境，能够识别客户的情绪和性格特点，同时做出带有自身性格与情绪方式的服务输出。软银的Pepper机器人集成了多种传感器，包括摄像头（视觉）、麦克风阵列（听觉）和触觉传感器。通过这些多模态感知系统，Pepper能够理解人类的语言、表情和情绪，并做出相应的反应。

（2）场景自适应

场景自适应是指机器人能够根据不同的环境和情境，自动调整其行为和策略。这种自适应能力不仅基于机器人的内部状态，还依赖于其对外部环境的感知和理解。通过实时分析环境数据，机器人可以识别出当前所处的场景，并选择最合适的行动方案。例如，在人流密集的商场还是在需要安静操作的医院，复合多态机器人都能够自主调整操作模式，以最佳方式融入当前环境。根据识别的环境特征，机器人能够动态调整其行为和策略，以适应不同的操作条件，如改变运动模式、调整传感器参数等。在自适应过程中，机器人受云端人工智能模型控制考虑安全和伦理问题，确保其行为不会对人类或环境造成伤害。

第五章：复合多态机器人成为具身智能的现实途径

复合多态机器人作为伴随需求应运而生的机器人类型，是技术发展的必然趋势，是市场对性能和优势的一种选择，其设计理念和技术实现正在不断推动着具身智能的发展，成为具身智能的途径之一。

5.1 复合多态机器人的性能优势

5.1.1 无死角感知与综合态势感知

初级阶段的服务机器人普遍没有达到无死角感知，更无法实现群体联合态势感知。高级阶段的服务机器人不仅自身感知无死角，同时多个机器人组网感知形成态势感知，这种感知闭环机制是复合多态机器人的性能优势之一，可提高机器人对环境变化的响应速度和准确性，不仅能够实时监控和理解其周围环境的状态，包括物体、人、障碍物等，还能够对整体态势变化，服务变化，安全变化等做出预测，增强其适应性和鲁棒性。

5.1.2 高性能算力与智能人机交互

具身智能对数据处理能力、响应速度和智能化的决策支持的需求实质上是对算力的必然需求。复合多态机器人的感知与智能交互，对算力需求普遍超过 5TOPS，算力低于 5TOPS 本地处理不了复杂环境数据，需要依赖云端算力才能实现环境适应和智能交互。触摸屏和语音传统人机交互是复合多态机器人的基本性能，智能人机交互的复合多态机器人具备多模态交互，能够提供更加丰富和直观的交流方式。从第一时间接触服务对象到结束服务，全流程都有多模态的方式感知、与客户交互，交互手段延展到广播或电话语音、手势等，才能够实现超预期客户体验，服务高难度对象的能力才能显现。

5.1.3 可靠低延时组网与通信

可靠通信和组网能力要求冗余的通信能力，复合多态机器人的每个组成部分都具有通信和组网能力，能够通过不同的通信协议和网络技术与其他设备或机器人进行数据交换和协作，确保一种通信链路或组网故障时仍可以继续通信和完成任务；同时，通信要求低延时，适应环境和多种交互的快速需求响应。

5.1.4 7X24 小时接力续航服务

高性能算力和感知对能源消耗要求较高，解耦后的机器人多个组成部分可以单独供电和储能，每个部分也可以单独充电，不影响其他移动底盘、载荷的工作，充分优化了机器的使用效率。使得机器人能够在没有外部电源的情况下长时间工作。实现服务的持久性，并且具有连续接力的服务能力，适合长时间或远程作业，真正实现7x24小时接力“续航”。

5.2 复合多态机器人的应用优势

5.2.1 功能复合一机多能

相比传统服务机器人，复合多态机器人服务规模大幅度扩展，功能更丰富。机器人的采购模式不再单一，可以根据场景需要搭配机器人和载荷的比例，实现弹性采购。例如在酒店服务中，传统机器人内置仓位有限且不能更换，而复合多态机器人解耦后服务规模大幅度扩展，不仅实现无限仓位的资源适配，还可以适配更多功能的载荷，实现更多服务种类，如运布草并且投递布草、烘干布草、收纳布草等等。

5.2.2 服务效率高

复合多态机器人与服务场景的中央控制集成、协同，例如对酒店的控制系統、电梯等自动设备集中管理和优化、调度分配，整体流畅度高、可用性强。利用人工智能实现请求服务的触发途径多种，如电话电视、遥控器、声控中控等，服务调度更人性化和更优化。其多模态交互和智能决策支持提高了任务执行的效率，快速的感知和决策能力使得机器人能够迅速响应客户需求，峰值服务能力更优。复合多态机器人能够执行复杂的任务，角色可实现0延时调整，如打扫卫生时可立刻听到孩子哭，转身表演哄孩子。

5.2.3 服务质量高

个性化服务：复合多态机器人能够根据客户的具体需求提供个性化服务，比如通过多模态智能人机交互理解客户偏好，服务VIP化。**服务一致性：**标准化的操作和流程确保了服务的一致性，避免了人为错误和偏差。通过多种交互方式的结合，可以减少单一交互模式可能产生的误解，提高服务的准确性。**提升客户体验：**多模态交互能够提供更加丰富和直观的交流方式，使客户感受到更加人性化和个性化的服务。**适应不同客户群体：**不同的客户可能对交互方式有不同的偏好，多模态交互能够满足不同客户的需求，包括听力或语言障碍者。**提高服务扩展性：**多模态交互系统可以根据酒店服务的不同场景和需求进行定制和扩展，如添加新的语言支持或

交互方式。数据收集与分析：从场景的端上收集客户交互数据，由云端人工智能模型帮助酒店更好地了解客户需求和偏好，进而优化服务。技术创新形象：作为高端技术产品，复合多态机器人代表了最新技术的发展，能够吸引客户并提升品牌形象。

5.2.4 稳定运行安全可靠

复合多态机器人具备群体协同工作模式，在一个出现故障之后可以及时自主补充接替，达到端上的稳定运行和服务水平的稳定。机器人能够根据环境变化和任务量动态调整其速度模式，以优化任务执行效率和安全性，避免全时峰值运行，提高机器人的可靠性。复合多态机器人7x24小时全时段待命，减少了人员的使用和人为故障的产生，减少了故障带来的服务延迟，提高服务效率。多重安全保护，网络安全保护指令安全、态势感知保护行动安全等。

5.2.5 多维度降低成本

性能的提高必然带来传感器成本增加、算力成本增加、能源成本增加、通信冗余增加，在这种情况下复合多态机器人替代初级的模块化机器人等的优势，必须是综合的成本降低，不仅服务能力提升，而且成本必须可控。成本降低手段如下：第一提高部件复用比例，借鉴模块化的设计，复用部件的批量规模可降低生产成本；第二提高国产化率和自研比例，机器人的多态性允许它们在不同的任务和环境中重用，减少了为特定任务开发专用机器人的成本；第三，降低生命周期成本，机器人之间被场景中台控制，调度任务容错率低、协同效率高，以及优化能源管理降低使用成本，通过远程监控和诊断功能机器人的维护效率提高，减少现场维护的需求和成本，故障更换可以减少整体更换带来的全生命周期成本。

5.3 复合多态机器人是具身智能落地的客观选择

具身智能被定义为一种智能系统，它能够通过其物理形态与环境进行互动，利用感知系统收集信息，并通过认知处理实现对环境的理解和行为的决策。这种智能的实现不局限于任何特定的物理形态^[29]。当前一个认知误区是将具身智能与人形机器人等同起来。著名人工智能科学家李飞飞认为：“具身智能不单指人形机器人，任何能在空间中移动的有形智能机器都是具身智能的一种形式”。从轮式到多足，从扑翼到旋翼，每一种形态都是为了适应特定的应用场景和任务需求而设计。当我们谈论具身智能时，我们是在谈论一个广泛而多样化的领域，其中包含了各种形态的机器人，共同的目标是通过特定的结构形态实现与特定场景的吻合，加上与环境的智能交互，实现更高级别的自动化和服务，能够更好地适应和服务人类社会。它们通过不同的形态和功能来展现具身智能的特点。人形机器人更侧重于模仿人类的

形态和动作，以适应人类环境；而复合多态机器人则可能更侧重于特定的功能和任务执行能力，形态上不一定要模仿人类。因此，人形机器人和复合多态机器人都是具身智能的具体实现形式。

人形机器人是具身智能的一种表现形式，但并非唯一。整体来看，由于人形机器人尚有多种关键技术未突破，如材料技术、能源技术、控制技术 etc 还有待大幅度提高，在迈向具身智能的征途上，复合多态机器人是实现具身智能的现实途径。

当人形机器人可以解构，更换不同部件组合，也属于复合多态机器人的定义，因此复合多态机器人广义上讲包含了人形机器人。复合多态机器人之所以成为具身智能的现实途径，除了性能优势和应用优势之外，还基于以下几个方面的原因：**场景适应性：**能够根据不同服务场景进行快速响应和调整，满足特定应用需求，如医疗、餐饮、酒店、零售等。**成本效益：**随着技术的发展和规模化生产，复合多态机器人的成本逐渐降低，使其在多个行业中的经济可行性和应用潜力增大。**社会与经济需求：**随着社会对自动化和智能化需求的增加，特别是在劳动力短缺和人口老龄化的背景下，复合多态机器人提供了有效的解决方案。**政策支持与推动：**许多国家和地方政府出台了支持机器人技术和产业发展的政策，为复合多态机器人的研发和应用提供了良好的环境。**产业链成熟度：**随着相关技术和产业链的成熟，复合多态机器人在研发、制造、部署和维护方面变得更加高效和便捷。由于这些原因，复合多态机器人不仅在技术上可行，而且在实际应用中展现出巨大的潜力和价值，成为实现具身智能的有效途径。

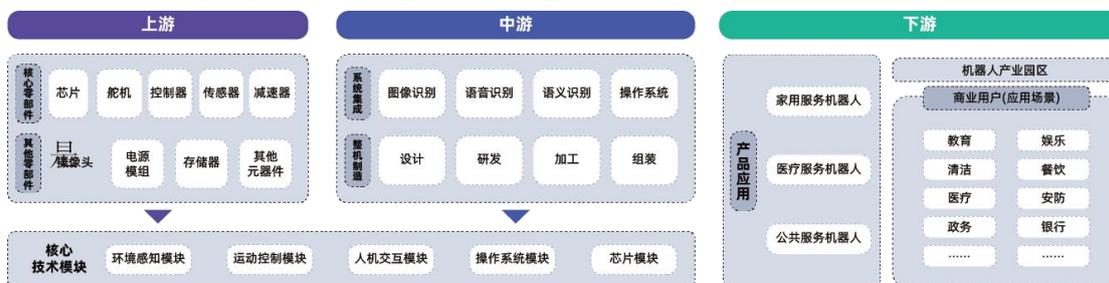
第六章：复合多态机器人技术体系与生态

复合多态机器人走向应用，要依赖于产业生态的保障和技术体系的完备，我国在这些方面都走在了前列，在关键技术方面逐步实现了自主可控，为跻身世界机器人强国奠定了基础。

6.1 复合多态机器人技术产业链^{[30][31]}

复合多态机器人集成态势感知、行动控制、认知决策、人机交互、轻量级大模型（tinyLLM）等先进技术，具备多模态感知、多功能解耦、多场景适应等技术，通过近年的市场培育，形成了与服务机器人共享的上下游配套的技术产业链。上游关键部件包括：芯片、舵机、控制器、减速器、摄像头、激光雷达等；中游核心技术包括：基于硬件开发的图像识别、语音识别、语义识别、操作系统、设计加工等；下游包括各种服务机器人的应用场景。这个技术体系和生态里面，我国逐步实现了国产自主可控。我们重点就复合多态机器人的上游产业链展开。

图表1：复合多态机器人技术产业链



6.1.1 芯片(计算、控制等)

在计算芯片领域：包括数据处理、信号控制等关键芯片供应商。目前整体趋势是视觉计算、MCU

通信基带等集成SoC，让感知、计算、控制高度集成，降低功耗和降低开发成本。计算芯片领域我国起步较晚，一直处于国外垄断为主，如高通、英伟达、英特尔等。因大模型的算力竞争和美国贸易壁垒，我国国产化计算芯片发展迅速，如紫光展锐UMS9620S处理器集成了2G/3G/4G/5G调制解调器；还包括一套广泛的接口，包括接口到摄像头、触摸面板显示和UFS/eMMC/SD卡，支持ARM架构的最新的开

放操作系统。多媒体加速器和先进的音频子系统也被集成起来，以提供先进的多媒体应用程序和服务，如流媒体音频和视频。总的来说，UMS9620S芯片组为5G移动设备提供了一个高性能、高效的平台。

在电机控制芯片领域：如意法半导体的STM32系列微控制器、德州仪器的TMS320系列数字信号处理器、英飞凌科技Tricore系列微控制器，恩智浦半导体的S32K系列微控制器、安森美半导体电机

控制专用集成电路和微控制器等。国外产品占据了大部分全球市场。国内的企业包括：兆易创新作为国内高性能通用MCU的领跑者，已广泛应用于工业自动化、机器人等领域。兆易创新还量产了GD30系列的电机驱动芯片，主要应用于电动工具、机器人、工业自动化三相无刷直流电机和永磁同步电机。峰昭科技专注于电机驱动控制专用芯片的研发，尤其在高速吸尘器、直流变频电风扇、无绳电动工具等电机驱动控制细分领域已经颇具优势。在高速吸尘器、直流变频电扇两个细分市场的国内占有率优势显著。灿瑞科技是智能磁传感器、集成电路领先供应商，其产品广泛应用于工业控制、移动终端等领域。公司产品包括有刷直流电机驱动器产品等，使用不同的电流衰减模式，通过对输入进行脉冲调制来实现电机的控制。

6.1.2 传感器(视觉、力矩等)

传感器包括各种力矩、压力、加速度、视觉传感器等

MEMS惯性产品市场份额集中在 Honeywell、ADI、Northrop Grumman/Litef 等行业巨头手中，市场份额前三的公司合计占有50%以上的份额。芯动联科：产品性能达国际先进水平。2021年惯性传感器市场份额约3.67%，在全世界高性能MEMS惯性传感器市场占有率较小，产品性能达国际先进水平，但与国际巨头公司相比整体规模较小，仍处于快速发展期。

多维力/力矩传感器是机器人末端执行器与机械臂的基础器件。南京高华科技股份有限公司是以研发、设计、生产及销售高可靠性传感器和传感器网络系统的高新技术企业，主要产品为各类压力、加速度、温湿度、位移等传感器，以及通过软件算法将上述传感器集成为传感器网络系统。公司承担了国家科技部、工信部等各部委和各级部门的多项传感器研制项目。万讯自控专注于自动化产业，主营业务涵盖MEMS传感器、机器人3D视觉、高端数控系统等工业自动化领域产品，并提供相关解决方案。公司布局高端传感器、工业机器人3D视觉等新兴领域。

针对服务机器人视觉场景，国内光电公司都在自主研发的ASIC芯片，算力要求更低，整机更高性能，企业有图漾科技、奥比中光和华捷艾米等。如奥比中光推出的高性能双目结构光相机，平均功耗低于1.2W，终端只需USB2.0接口，即可获得高精度的3D深度信息，供后端调用，赋能机器人实现感知、避障、导航等功能；大

视场角，视场角提升20%，更大视野范围避障；高性能输出，提供高分辨率，高帧率，高精度的深度数据输出。奥比中光为全球超过1000家客户与开发者提供“研发+制造”的一站式产品和服务，其中机器人视觉业务在中国服务机器人市场占有率超过 70%。

全球毫米波雷达市场逐步转变成国内主导。过去博世、大陆、海拉、富士通天、电装为全球前五的厂商，国内随着电动汽车的无人驾驶发展，毫米波雷达公司成熟度和价格占据优势，无人机公司大疆都投入了雷达产品线。华为在毫米波雷达领域也有布局，首发亮相了77GHz角雷达和4D成像雷达。森思泰克专业从事智能传感器应用产品研究、生产与销售的高科技型企业。其77GHz毫米波雷达成为国内首个真正实现“上路”的ADAS毫米波雷达传感器，已成为红旗、一汽、韩国现代、东风日产、长城、长安等国内外车企体系内供应商。华为：承泰科技基于国产雷达芯片方案的商用车FCW前向雷达已经在市场上占据份额领先地位。其第五代毫米波雷达可以将车辆测量距离提升至300米。

6.1.3 电机、丝杠等

服务机器人、人形机器人使用的无框力矩电机，空心杯电机，谐波减速机，行星滚柱丝杠较为普遍，这些机器人推动了伺服电机系统的尺寸改进，电机趋向高度集成化，将减速器、编码器、力传感器等核心硬件进行一体化设计，不仅使得工作范围更加宽广，也同时提升器件性能，降低成本。机器人的电机种类也非常丰富。分为液压驱动、气体驱动和电机驱动三种。美国波士顿动力公司在其 Atlas 机器人中使用液压驱动方式因其驱动强劲、爆发力强，适用于弹跳、负重等活动，适用于注重运动能力的 Atlas 机器人。其余的大部分机器人公司采用电机驱动如特斯拉人形机器人 Optimus 更注重智能化，采用高扭矩密度电机伺服技术。电机驱动在动作的精准控制方面与其他驱动方式相比更胜一筹，配合处理器编码器可获得实时运动状态反馈，更适合如今注重智能化、多功能的机器人发展趋势，服务机器人的小型化普遍使用电机驱动。

直流电机：国外电机品牌厂家占据市场比例仍然较大，主要有：尼得科在服务机器人领域拥有大量的零部件、模块和单元的开发制造技术。公司提供低耗电、小型轻量、高控制性、长寿命、静音等适用于服务机器人的特征的无刷 DC 电机，以及齿轮、传感器、驱动器、控制装置等产品。ABB 是全球知名的工业机器人制造商之一，其产品和技术广泛应用于工业自动化和机器人技术领域。安川电机是全球领先的工业机器人制造商之一，公司还推出了新型协作机器人。川崎重工在机器人技术领域具有丰富的经验，提供多种工业和服务机器人产品。国内的产品主要有：宇树科技专注于仿生机器人关节电机的研发，其产品如 GO 系列永磁同步电机专为

高性能机器人设计，具有高集成度和强劲动力。电机与减速器完美匹配，内置 FOC 控制算法，内置温度、绝对值式编码器，广泛应用于各类机器人关节、动力部件。

框力矩电机：不同于传统的伺服电机，无框力矩电机没有机壳，只有定子和转子 2 个部件。这一设计使得无框力矩电机不再受限于电机的外壳结构件来建立运动控制轴，而是将电机内置于机器本身的结构中，空间更加紧凑，且整体系统的惯量降低，运动控制更加平稳。无框力矩电机领域，美国科尔摩根、瑞士 Maxon、日本尼得科等属第一梯队厂商。科尔摩根是无框无刷电机设计和制造领域的先驱，其前身 Inland 电机公司在 1949 年设计出世界上首个无框力矩电机，技术积淀深厚。科尔摩根的 TBM2G 系列无框力矩电机最大连续转矩可达 15.1Nm，领先全行业。与海外龙头相比，以步科股份为代表的国产厂商虽起步较晚，但技术追赶步履不停。步科股份于 2016 年推出首代无框电机，此后首创 18 槽的灌封工艺应用于第二代产品中，提高了槽满率，降低了温升。2022 年，步科推出第三代无框力矩电机 FMC 系列，最大连续转矩可达 4.40Nm。目前步科股份无框力矩电机的营收规模在百万量级。

空心杯电机，无铁芯结构有效提升了电机性能，具备效率高、响应快、转速高、噪声小、寿命长等特点，空心杯电机按照换向方式可分为空心杯有刷电机和空心杯无刷电机两类。德国 Faulhaber 和瑞士 Maxon 销售的空心杯电机+齿轮箱+编码器集成件年销售额约 32 亿欧元，产品主要面向军工和工业市场。Faulhaber 是空心杯电机的起源地，其空心杯电机最小外径可以做到 3mm。国内具备空心杯电机生产能力的厂商有鸣志电器、江苏雷利等。江苏雷利与合作方共同研发绕线设备，已实现空心杯电机全自动量产，在小批量验证中。鸣志电器 2019 年收购瑞士 TMotion100%股权，加强空心杯电机生产能力，公司具备人形机器人手掌模组及指模所用的控制电机模组的研发和制造技术。

行星滚柱丝杠以往产能主要集中于欧洲、美国等。舍弗勒集团于 2022 年收购 ewellix 公司，其前身为 SKF 行星滚柱丝杠部门，结合旗下传统高端行星滚柱丝杠品牌 GSA，舍弗勒基本垄断国际高端行星滚柱丝杠市场。国内行星滚柱丝杠目前还处于早期阶段，生产难度较大，国内企业较少布局。近年来以华中科技大学、西北工业大学、南京理工大学为代表的高校力量逐步推动底层研究。近期人形机器人、精密机床等行业的发展带动了国内企业在行星滚柱丝杠方面的投入。中国目前的主要参与企业包括秦川机床和鼎智科技。

从竞争格局来看，中国与日本、欧美技术差距仍然很大，尤其是减速机和伺服电机，约有 75% 的精密减速器由日本进口，主要供应商是哈默纳科、纳博特斯克和住友公司等；伺服电机和驱动超过 80% 依赖进口，主要来自日本、欧美，如 ABB、Bosch 等。然而，核心零部件国产化的趋势逐渐显现。例如谐波减速器出货量已经

达到了每年 8 万台，RV 减速器近几年累计在自主品牌机器人上实现近 2 万台的应用；国内电机企业也逐步成熟稳定，如埃斯顿、汇川。

机器人操作系统是面向智能服务机器人产品及应用研发的一套操作系统与工具集。这套操作系统主要面向多种复杂应用场景，解决服务机器人环境适应性差、运行与协同效率低、服务难以闭环等行业挑战。以高性能定位导航、运动控制和轻量化 AI 算法为核心，实现快速开发低成本、高性能、智能化水平更高的机器人产品。国外起步早，改进多年，且依赖开源发展较为成熟。例如 ROS-2 在 ROS（机器人操作系统）的基础上发展而来，增加了稳定性、生命周期管理、多机协同及加密等功能。

6.1.4 机器人操作系统

国外：微软在 ROS 领域有显著的市场份额和影响力，提供相关的产品和解决方案。eProsima 是一家专注于 ROS 的公司，提供相关的产品和解决方案。ADLINK 公司在 ROS 领域也有布局，提供相关的产品和解决方案。英伟达发布了最新版本的 Isaac Sim 平台，用于开发和测试人工智能机器人。英特尔的解决方案在移动机器人、视觉抓取等方面进行应用验证，基于 ROS2 开源项目，英特尔提出了建图和路径规划、机器视觉、智能操控等开放解决方案。AMD 推出专为机器人设计的 Kria KR260，支持本机 ROS2，便于机器人功能开发。

国内也有一批 ROS 开发企业。思岚科技发布性能更强、体积更小、部署更轻的运动机器人平台雅典娜 Athena2.0，搭载了全新的 SLAM Cube2 自主定位导航系统及激光视觉多重导航方案，能够实现自主上下电梯等多楼层之间的自主移动。平台提供了标准的开发软硬件接口支持用户快速二次开发。除激光雷达、开发平台等硬件，思岚科技的还为用户提供了导航算法套件和开发软件等。作为深耕机器人多年的云迹科技也推出了专为机器人量身定制的 YunEye 操作系统。此系统不仅提供了支持多语言的软硬件接口 SDK 框架，还配备了自动化开发工具链，以及一套闭环的数据回流自迭代训练系统。平台对各类算力的模块进行了统一抽象处理，从而实现了感知算法开发者与软硬件环境的虚拟隔离，使得开发者的感知算法开发过程更加纯粹和专注。此外，平台还提供了超过 20 个与机器人相关的感知组件 App，涵盖了分类、检测、分割、定位、OCR、匹配、语音检测等多个开发实例，并且能够无缝与 ROS1/2 进行数据流链接。是一款可在云边端等不同算力层面为机器人提供 AI 能力的系统平台产品。国讯芯微专注于实时操作系统和 EtherCAT 协议栈的研发与应用，公司基于 ARM 体系芯片平台研发自主化 NOM 系列产品，并结合自主研发的工业实时操作系统 NECRO 囚牛和 NECRO SUPER STUDIO 软 PLC IDE 构成了一套完整的控制系统平台产品，为智能制造领域提供实时操作系统 SDK、IDE

工具链和完整的自动化、运动控制解决方案，具有强大的 AI 计算能力，能够部署最大、最复杂的模型以解决自然语言理解、3D 感知、多传感器融合等领域的边缘 AI 和机器人技术挑战。目前已集成 YOLOv5 目标检测算法，其开放的架构和易于二次开发的特点，展现出了强大的灵活性和通用性。北京魔山科技有限公司专注于智能驾驶领域，提供工业机器人、服务机器人等领域的机器人移动解决方案。北京钢铁侠科技有限公司提供 ROS 服务机器人，专为机器人行业、企业、院校及研究机构打造，产品支持地图构建、自主导航、语音交互、深度视觉、机器学习等功能。通过对 ROS 系统进行二次开发，既保留了 ROS 系统的开放性，又解决了 ROS 系统实时性差的缺点。瑞森可公司智能协作机器人软件平台是基于 ROS 系统开发的，使得机器人更加易用与易学。形成了以下的产业格局。

图2：机器人产业链生态图谱



6.2 复合多态机器人产业生态

复合多态机器人的产业生态是跨政府、技术、制造、服务多个领域的体系，涵盖了从制度建设、基础研发、核心部件制造、系统集成到应用服务的全链条。以下是服务机器人产业生态的主要组成部分：

6.2.1 基础技术研究

复合多态机器人研究涉及到材料科学、机械工程、电子工程、计算机科学以及人工智能等多个学科。在国内有许多高校、研究机构和企业在进行相关领域的基础

研究。中科院、清华大学为首的科研机构在传感器、驱动器、控制系统、人工智能算法等关键技术的创新和开发走在了全国前列，如中科院自动化所设有“多模态人工智能系统全国重点实验室”。但是国内缺少开放的服务机器人科研组织。国外 MassRobotics 是一家独立的非营利组织，也是世界上最大的机器人创业中心，致力于创新机器人和自动化初创公司提供开发、原型设计、测试和商业化其产品和解决方案所需的工作空间和资源，帮助其创建和扩展下一代成功的全球机器人和互联设备公司。2018 年，MassRobotics 与机器人工业协会（RIA）战略合作，推进机器人组织的创新和技术。2022 年 10 月，MassRobotics 宣布与 AMD 合作，向机器人初创公司介绍和提供技术，确保初创公司能够围绕自动化、移动性、人工智能和机器视觉等相关应用开发创新解决方案。

6.2.2 核心部件制造

包括从芯片到电机、传感器、控制器等硬件部件的上下游供应商。传统机器人出现伺服电机比机器人尺寸更长时直接影响周边设备动作，将减速器、编码器、力传感器等核心硬件进行一体化设计，不仅使得工作范围更加宽广，也同时提升器件性能，降低成本。且机器人核心部件、共性部件朝着芯片化、多传感器融合的方向发展，目前整体趋势是多种视觉、计算 MCU、通信基带等集成 SoC，让感知、计算、控制高度集成，降低功耗和开发成本。国内逐步呈现替代国外核心部件的良好局面。

6.2.3 机器人操作系统

机器人操作系统中间件处于应用和操作系统之间，提供标准接口、协议、数据与服务管理等机器人基础通用功能模块。对底层服务能力的需求已趋于统一化与标准化，为后续多厂家机器人兼容提供了基础。呼吁在国内成立类似鸿蒙一样的机器人操作系统的开发公司、开源组织等。

6.2.4 服务和维护

服务型机器人的广泛部署为其服务运维带来挑战，随着部署规模的扩大，服务运维工作趋向平台化、自动化。从复合多态机器人的服务提供商和运维服务提供商一体逐步转向分离，通过 DevOps、AIOps 技术逐步促进开发和运维的紧密配作，通过自动化、智能化提高服务于维护的效率。甚至运维开始采用远程维护，使得运维人员可以远程协助维护机器人，提高响应速度和运维效率。目前还未达到分离的阶段。

6.2.5 政策监管机构行业协会组织第三方检测机构

政府或相关机构制定政策和法规，对服务机器人的生产和应用进行监管。借鉴韩国机器人产业协会主导的自动驾驶机器人联盟成立，LG 电子等 18 家公司参与，加快智能自动驾驶机器人的商业化，行业协会应促进行业内的交流合作，代表行业利益，推动产业发展，在产业的技术引领方面发挥作用。协会和第三方机构制定行业标准，进行产品测试和认证，确保安全性和可靠性，发挥行业监管作用；以及推动和提供机器人技术和应用相关的教育和培训，培养专业人才。

培育新产品过程中需发挥各方合力，开展形式多样的活动，激发社会创造力。推进智能机器人高端产品入选“首台套”，即将符合条件的智能机器人领域项目纳入首台（套）重大技术装备和重点新材料首批次应用保险补偿范围，增强高端产品创新应用能力；发挥国家产融平台作用，鼓励采用融资租赁、产品保险、购买服务等方式推广先进适用的智能机器人产品；支持龙头企业牵头联合产学研用组成创新联合体，加强关键技术和高端产品攻关，加快前沿技术融合，探索跨学科、跨领域的创新模式；举办中国智能机器人产业大会，鼓励地方举办智能机器人发展大会、博览会等活动，推进产研对接、产需对接、产融对接；开展智能机器人创新大赛，面向工业机器人、特种机器人、服务机器人、人形机器人等赛道开展技术创新和应用创新，遴选形成一批优秀机器人产品和解决方案。

服务机器人产业生态的健康和可持续发展，需要各个环节之间的紧密合作和协调。随着技术进步和市场需求的不断增长，服务机器人产业生态将继续扩展和深化，为社会带来更多创新和价值。

6.3 复合多态机器人产业规模预测

根据报告显示 2022 年，全球智能机器人市场规模超过 500 亿美元，预计在 2024 年将超过 660 亿美元。尽管市场规模持续扩大，但增速有所回落，2021 年全球市场增速超过 20%。教育、医疗等领域需求扩增，我国智能机器人市场预计 2024 年将达到 251 亿美元，年均复合增长率达到 20%。2022 年，全球服务机器人市场规模达到 217 亿美元，中国服务机器人市场规模达到 65 亿美元，到 2024 年，全球服务机器人市场规模将有望增长到 290 亿美元，随着新兴场景的进一步拓展，中国服务机器人市场规模将有望突破 100 亿美元。（资料来源：IFR，中国信通院、电子学会）

经编写组初步分析，复合多态机器人是与 人形机器人共存的市场，基于国际上对人形机器人的市场规模评估可以推测复合多态机器人的市场规模。

初步判断一：2030 年前，人形机器人和复合多态机器人是共存互补的发展时期，

以复合多态机器人快速发展和占有服务类市场为主。根据 Markets and Markets 的数据：2023-2028 年人形机器人市场规模将从 18 亿美元增长到 138 亿美元，年均复合增长率为 50.2%。编写组初步推测，这一时期人形机器人还不够完善，难以撼动复合多态机器人在服务市场上的地位，2030 年复合多态机器人与人形机器人市场比例达到 4:1，复合多态机器人市场规模将超过 1000 亿美元。

初步判断二：2030-2035 年，人形机器人将得到较大的发展，部分复合多态机器人的场景会由人形机器人参与补充，复合多态机器人将处于稳定发展时期，从服务类市场逐步向非服务类市场迁移。编写组初步推测 2035 年比 2030 年市场领域更广泛，复合多态机器人与人形机器人共同分享服务市场，人形机器人补充复合多态机器人原有服务市场的比例约 30%（综合服务功能的互补性等因素考虑该比例）；复合多态机器人新拓展非服务市场如工业场景等有望达到原有服务市场规模的 30%以上。在服务市场和非服务市场，人形机器人和复合多态机器人各有优势，互相弥补，复合多态机器人与人形机器人市场比例可趋于 1:1，也就是说复合多态机器人保守估计市场规模也将超过 1000 亿美元。

第七章:服务场景的复合多态机器人及其近期发展

复合多态机器人仍然在快速发展的过程中，也仍处于发展的早期，从近期的发展可以看出，走在前列的机器人企业迭代给复合多态机器人的发展趟出了一条可行的路径。

7.1 解构服务场景内的复合多态机器人

复合多态机器人是一个具备物理身体的智能体，它能够感知环境改变环境，并接收环境的反馈。复合多态机器人技术密集，硬件平台包括移动系统、传感器、计算单元、通信模块等，搭载有导航算法、行为控制软件、人工智能处理引擎等。这些软硬件的高度集成，为机器人提供了灵活的行动能力和场景快速适应能力。

在复合多态机器人自我行为优化的整个架构设计上，允许机器人行为的输出存在一定的“活性”，该特性是一种低概率极小范围调整行为输出的，通过输出与环境的反馈为机器人的行为优化提供方向，其“活性”强度配置不同使机器人在行为稳定性和行为探索能力上获得平衡，该特性是复合多态机器人成为具身智能体基石，当本体算力难以满足这种多态输入和多态输出需求时，可以将数据传输到“云”，让“云”来为具身智能本体提供算力，达成复合多态机器人的超本体智能。

复合多态机器人可以解耦推向市场，除了向市场销售机器人（底盘），还可以为其他机器人企业提供：功能舱、场景感知物联网（IoT），以及为行业下游输出解决方案、为行业上游输出复合多态机器人操作系统，输出开放的感知单元、智能单元，为构建异构无人服务场景协作共建生态。

7.1.1 功能舱

复合多态机器人实现了从单体机器人向分体组合机器人的转变，实现无限舱的复合功能，打破功能边界、结构形态、服务时间。如：云迹科技的智能货柜、置物舱、清扫舱、清废舱、喷雾舱等均属于复合多态机器人的前置工具舱，一方面，这些功能舱不再是储物空间，也具有更多专业化功能。以餐饮为例，从前客户需要花费时间与距离成本，走入餐厅用餐；现在客户点一份外卖，只需花费时间与小部分距离成本，即可享用美食；未来，客户只需屋内点餐，机器人自动从功能舱取来餐品或举升起一个会煮面、会做冰激凌、会煮咖啡的机器人上舱来到客户门前，即可将美食送到客户面前，让时间与距离成本无限降低。另一方面，复合多态机器人最

大程度的包容功能舱的形态，从单一的货架、到智能清扫，其适配性逐渐接近“通用”。真正实现了功能舱的本质，用“通用”解决了空间与时间成本，与机器人一起为用户带来便利。

7.1.2 服务机器人操作系统

服务机器人操作系统也是基于 ROS 系统发展来的针对服务行业优化的 ROS 系统。服务机器人操作系统的主要特点：支持场景语义理解和路权记忆；定位鲁棒、建图更快、地图动态更新；支持多机、多 IOT 数据共享感知、决策；支持多机、多 IOT 设备协同调度；支持触控、语音、视觉及虚拟人等多模态交互；支持算法的量化加速，成本低；以数字化场景、机器人和 IOT 设备为主；摆脱对硬件的无节制依赖，通过软件算法对硬件的补偿提效，实现对资源的最佳利用。

7.1.3 机器人的感知单元、智能单元

复合多态机器人解构后的硬件，应该可以从功能、电磁环境将控制、感知、智能三个部分解耦。由于电机控制等机械部分功率较大，多数由智能单元控制继电器等完成，相对独立，这部分每个机器人公司有自己的特殊性或者独特性，难以统一。但是复合多态机器人的智能源于感知和智能算力，这两个部分与其他机器人公司有高度的相似，例如特斯拉的FSD，与华为等、乃至与国内公司的技术路线、硬件配置有大量相似，这个部分的硬件趋于芯片主导，未来统一硬件的可能性极大，各家机器人公司的区别在于软件，工作环境的匹配。

7.1.4 场景感知 IoT

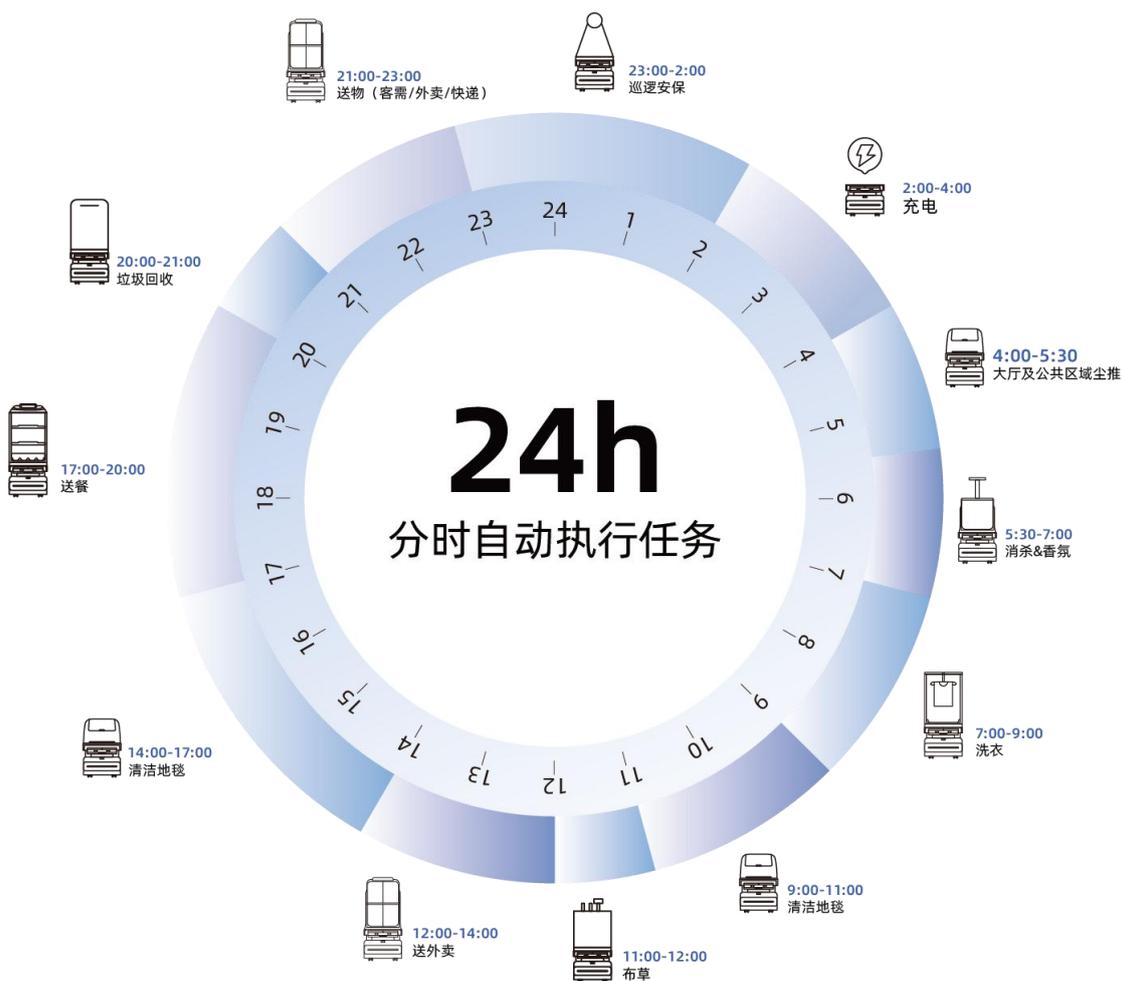
机器人与场景内的智能设备相互通信，增强了机器人与环境的互动，IoT 设备感知环境数据实现近场协调，设备间可互检健康状态，机器人可实时使用其他机器人或 IoT 设备反馈的场景数据、用以决策。如：机器人已经与电梯、电话、闸机、安全门实现成熟的物联方案，并广泛应用于超 3 万家酒店、楼宇、公寓、社区场景。除此，机器人正在积极打通与餐厅、智能洗衣机、健身器材等更多元设备的互联。复合多态机器人配合机械手，上门取走脏衣，投放至洗衣机，完成后再送物至用户手中；客户有健身需求，可手机预约服务，复合多态机器人举升健身器械、按摩椅等设备来到用户面前。闸机、电梯、开关门是机器人通行的保障；电话、电视、智能音箱是机器人信息通知的保障；洗衣机、健身器材等多元化的设备是便捷服务的保障。但是有些场景可能会省略场景感知的 IoT 部分，完全由复合多态机器人自身建立场景感知。

7.2 复合多态机器人发展过程^{[32][33][34]}

如今，国内众多酒店、商场、医院、公寓、园区等场所都配备了服务机器人，负责送物、清扫、指引、咨询等，24小时提供服务，像这样投入忙碌工作的机器人已成为服务业全链路数智化转型的驱动力，服务的能力范围、智能水平还在随着复合多态机器人的进化而进步。专注于服务机器人技术与产品研发的云迹科技，从2023年前开发的润和格格系列到2024年推出的「UP」机器人，从市场需求到技术牵引，在业界率先实践了复合多态机器人的孕育和诞生，也代表了服务场景的智能服务水平。

首台模块化、定制化的“复合多态机器人”——「UP」，作为服务机器人的全新形态，早于“人形机器人”，在数万家酒店、医院、公寓等各类服务场景实际应用，不但具备物品移动能力，还有作为工具载具并操作不同工具（清扫/香氛/巡检等不同的上舱实质上都是工具）的能力。

图表3:复合多态机器人无人化工作日志



资料来源：云迹科技

复合多态机器人在服务场景具备全时段、多场景、多任务执行能力。复合机器人同时具备移动能力

和操作能力这两种重要的能力。在服务机器人赛道，复合多态机器人应具备几个特点：会使用工具、多功能、效率高、具身智能。就像一个“变形金刚”式的多面手，可以满足同一时段多任务需求、个性化潜在需求（自己找活干），进行多任务的协调工作，可满足机器人场景化的服务需要。“一机多能，分时复用”扩展了运力的价值，能够 24 小时全时段、跨场景做不同的工作，是具身智能机器人的规模化应用的典型代表。

复合多态机器人与多模态大模型一起在服务场景中协作。利用语音、视觉、雷达等多模态感知大模型能够更准确地理解环境语义、态势和可供性，提供更加精准和个性化（超越期待）的服务。此外，通过大模型的自适应学习能力，机器人能够根据用户的反馈和环境变化，不断优化其行为和交互方式，实现自我进化和持续改进。让机器人参与服务流程的感知、认知、决策、执行、反馈的全流程，帮助酒店了解服务全链路，提升宾客体验及运营管理。复合多态机器人与多模态大模型率先在服务行业应用和实践。

「UP」机器人“云—端”技术架构，实现由「UP」产数、由数生智，以智赋能的智能闭环。为更好优化资源配置、提升服务质效，基于“云—边—端”架构打造多功能、多模态的人机物融合酒店服务体系，为用户提供层次化、柔性化、定制化的软硬一体智能服务，为未来适应多场景的灵活性、可扩展性、安全性，降低成本打下基础。云端由大模型驱动，感知认知场景和自适应场景，赋能边缘和端侧。端侧动态调整资源分配，理解任务、指挥端侧完成任务，减少对中心云资源的依赖，整体解决方案更加经济高效。「UP」机器人是智慧云端和智能终端结合、移动平台与任务载荷解耦，能够与人自然交互、能够自主学习、主动探索、动态适应环境变化，能够自主规划、操作多种异构工具执行复杂任务的智能机器人，已经成为复合多态机器人的典范。

云迹科技机器人结合云端不断强化 AI 服务能力的发展过程，恰恰是复合多态机器人发展形成的过程。基于大模型技术，云迹科技研发实现了 AI 智能客服、语音客诉预警、视频安防预警、知识库管理与应用以及机器人自诊断的一整套技术方案，为酒店等服务场景带来一定的劳动力价值和创造力价值，既有“运力”牵引作用，又能提升整体产品的“服务”价值。「UP」机器人正在接近于人的思考和行动能力，实现更高质量的赋能服务场景。

7.3 复合多态机器人行业的近期发展重点

根据芯片等技术发展的速度预测，到 2025 年，复合多态机器人将具备工具使

用、多功能复合、高效率、群体智能协同的能力。

7.3.1 功能复合的复合多态机器人

基于功能舱的扩展，功能更丰富，用户可以根据场景需要搭配机器人和载荷弹性采购，只需要在[云-端]系统增加资源，系统可自动分配调用载荷、功能舱等。除了支持储物、消杀、香氛、垃圾回收等，扩展到支持卫生间清洁、健身房、洗衣房等全无人运行。

7.3.2 服务高效的复合多态机器人

复合多态机器人与酒店服务场景的中央控制集成，对酒店的控制系统、电梯等自动设备集中管理和优化、调度分配，流程优化后流畅度更高效率更高。特别是峰值服务能力将实现100%满足。

[云-端]的统一调度实现了服务的标准化和个性化兼顾，将满足同一时段多任务需求、个性化潜在需求（自己找活干），进行多任务的协调工作。

复合多态机器人可智能创建地图、自主乘坐电梯、自主避障、自动拨打电话、自动回位充电等智能功能，执行任务综合成功率99.999%。服务标准化：标准化的操作和流程确保了服务的一致性，避免了人为错误和偏差。通过多种交互方式的结合，减少单一交互模式可能产生的误解。服务个性化：复合多态机器人能够根据客户的具体需求提供个性化服务，比如通过多模态智能人机交互理解客户偏好，服务VIP，客户体验明显提高。

7.3.3 稳定可靠的复合多态机器人

复合多态机器人依靠[云-端]的故障自检，保修等全周期健康管理。单点出现故障之后可以及时自主补充接替，确保端上的运行和服务水平的稳定。复合多态机器人 7x24 小时全时段 standby，传感器实现碰触即可激活，且全使用周期成本更低。

第八章:[云-端] 协同的复合多态机器人服务技术架构

“云”（服务端）是复合多态机器人（设备端）智能的依托，包含自适应任务场景管理平台、自适应任务管理系统等部分，负责快速处理与服务机器人直接相关的业务逻辑和数据。“端”是复合多态机器人群体，依靠灵活功能解耦，实现多功能服务、多场景适配。通过“云”赋能“端”、“端”提升服务，可以进一步提高复合多态机器人群体协作水平和智能化水平。[云-端]协同能够更好地降低算力成本，优化全周期使用成本，解决客户自主网络维护能力弱这一关键难题，促进应用生态发展；加速培育新业态、新模式，从而赋能不同定位酒店的智能化转型。

8.1 复合多态机器人的[云-端]构成

这里我们针对服务行业举例阐述[云-端]的技术构成、能力构成。

复合多态机器人在功能方面：数据处理，对服务机器人收集的数据进行预处理，以减少传输到[云-端]的数据量，提高数据处理效率。业务逻辑，实现与服务业主相关的特定业务逻辑，如房间管理、客户服务流程等。实时响应，提供对服务机器人的实时控制和响应，以适应快速变化的服务需求。决策支持，为服务机器人的决策提供支持，如路径规划、任务调度等。资源管理，管理酒店服务所需的各种资源，如机器人调度、客房管理等。服务优化，根据互联网评价反馈和服务数据，不断优化服务流程和质量。

8.1.1[云-端]的技术构成

[云-端]是一套指挥复合多态机器人工作的解决方案。它将物理环境、服务需求、物品资源、数字员工、现实员工集合在一个数智化系统中，实现 AI 大脑对环境、需求的充分感知，对人、机、资源进行最优的任务调度与协作分配。在任务中，机器人不断收集服务数据，进行自我训练与迭代，从而形成由机器人感知到认知到执行到反馈的服务流，更有效地利用计算资源，实现复杂任务的高效执行。一般根据场景配置不同的系统，酒店场景中基本包含：云端业务调度系统，通过 AI 电话/智能音箱/C 端小程序等进来的客人的服务需求，业务调度系统会智能调度复合多态机器人和人类员工，同时兼顾酒店要求的闭环率(比如 15 分钟内完成服务)，以及系统自动化执行率(减少人类员工参与，提升机器人价值)。智能新零售，配合智能前置功能舱，可以实现全流程自动化新零售。客户在房间扫码下单，机器人自动购物并

送到门口，除了方便客人，也可以提升酒店的非房收入。

8.1.2[云-端]的系统构成

[云-端]客诉预警系统，通过分析酒店客人和 AI 话务员或者服务员的通话，识别潜在的投诉风险和投诉内容，除了可以给酒店管理者提供及时补救的机会，还可以智能调度机器人给客人送水果等，起到第一时间的情绪安抚价值。同时客诉预警系统提供的酒店服务体验改进报表，可以给管理者非常有针对性的改进建议，比如什么类型的设备近期出问题比较多，或者那几个房间经常被投诉等等。

[云-端]交通控制系统，酒店勘测和部署物联网后，[云-端]系统生成该酒店的交通控制系统，复合多态机器人根据交通控制系统下载语义地图、协作规则、行驶策略后才能正式投入运营。语义地图包括构建酒店的二维三维地图、地点语义、岗位语义；协作规则给每个复合多态机器人分配不同优先级、交互规则、行使策略等。

[云-端]大模型，辅助用户复杂意图解析实现对客户意图的精准采集，实时理解、应答，生成服务任务，自动分发。传统智能客服系统善于处理简单、直接的指令。借助大语言模型（LLM）丰富的世界知识和高级语义理解能力，将用户的自然语言指令无缝转换为机器人的控制命令。不仅提高了系统的响应速度和准确性，使得与智能客服的交互更加流畅和自然。

[云-端]大数据分析系统，大数据从若干酒店收集的海量客户交互记录、服务请求、机器人行动轨迹中挖掘高价值信息，实现“数字世界的评价反馈助力 AI 服务”的闭环迭代。大模型通过分析可以深入了解客户的需求、偏好以及行为模式，帮助优化服务流程、提升服务质量，同时，这些数据回流给机器人，让机器人在大规模数据驱动下拥有了持续学习、进化迭代的生命力。例如：通过机器人智能诊断系统，分析机器人故障远程解决故障/协助工程师解决故障，并构建故障知识库，最后能够提前预测故障，将问题处理在发生之前；通过酒店场景电话语音信息，帮助酒店提升服务质量，预警重要事件；在医院工厂场景下通过大数据分析，预测到可能的任务并提前做好准备等等。

8.2 云：持续进化的服务智能——优化提升服务体验

复合多态机器人与[云-端]构建了一套高效协同的自适应任务管理系统，通过任务规划、协同调度、数据与知识双驱动、辅助决策、自诊断与维护这五个模块的紧密协作，实现自规划、自适应、自协同、自维修，大幅提升用户体验、降低使用成本。

以智能规划实现最优体验，提升服务效能，增加用户群整体好评通过自主设计开发一系列智能算法，实现“需求精准理解、任务合理排序、资源最优分配、效果

可信评估”。

以“知识+数据”双轮驱动实现最优决策，提高机器人复杂环境适应能力。以先验知识和数据为基础，构建“数据与知识双轮驱动模块”，形成知识图谱，并开展持续优化迭代，不断提升机器人对复杂场景的理解和适应能力。

以无缝协同实现最优效能，提升机器人使用率，高效完成任务。设计“协同调度模块”，实现人—机、机—机的合作协同。在全局视角下，根据任务紧迫性、资源消耗和对顾客满意度的影响等因素，实现任务优先级自动调整，确保高优先级任务得以优先完成。通过协同导航技术，机器人之间可以共享位置信息，避免碰撞，实现高效路径规划和避障，减少等待时间，提升通行效率。

以实时自主诊断实现最优状态，减少机器人运行故障，保证用户体验。通过内置传感器和异常检测算法，研判机器人当前运行以及潜在的故障和性能下降情况，并通过“智能诊断与预防性维护模块”自行调整。

8.3 端：[云-端]具身智能的物理载体

端是智能的载体，云是智能的本体。复合多态机器人是物理实体，直接与现实世界交互，执行具体的任务和服务。包括：

8.3.1 环境适应性

复合多态机器人通过传感器和执行器与环境进行交互，具备感知环境、理解环境和适应环境的能力。这种适应性是[云-端]具身智能依靠端采集数据实现。

8.3.2 任务执行能力

复合多态机器人能够执行清洁、搬运、接待、教育、医疗辅助等多种服务任务，体现了具身智能在实际应用中的价值，是智能决策的显现。

8.3.3 人机交互

复合多态机器人通常具备高级的人机交互界面，如触摸屏、语音识别和自然语言处理技术，使得它们能够与人类用户进行自然和直观的交流。是[云-端]智能与人对话的 UI。每个复合多态机器人以及组合的集群都是智能终端，具备感知、认知和执行的能力，在其上实时采集大量数据，并根据需要及时地做出决策并执行业务。复合多态机器人都是移动终端，能耗制约连续工作时长，将大计算量的智能放到机器人本体上不现实，因此云端汇聚具身智能数据完成智能计算，成为具身智能的载体。

第九章:复合多态机器人服务场景的应用与迁移

复合多态机器人通过本体的感知与环境交互获取环境的数据、变化等，在AI的加持下能够感知场景变化并实时调整形态、功能、行为，具备迁移到新的服务场景的基础。跨模态学习与场景自适应是复合多态机器人的显性技术特征，这两个特征的结合实现AI定义服务、AI适应场景、AI定义个性，使得复合多态机器人不仅能够静态环境中执行预定任务，还能够动态和不可预测的环境中进行有效的交互和任务执行。总的来说，认知多模态和场景自适应是复合多态机器人智能化的基石，它们赋予了机器人更高级的功能和更强的适应性，为机器人的未来应用开辟了广阔的前景。随着人工智能和机器人技术的进一步发展，这些特征将变得更加精细和高级，为机器人在更广泛领域的应用提供支持，复合多态机器人正在逐步将解决方案由酒店向更多场景迁移。

9.1 复合多态机器人服务场景的扩展

9.1.1 智能化酒店

智能化酒店中，复合多态机器人能提供的服务是最成熟的场景，包括：引领带路：服务机器人能够引领客人至酒店内的特定地点，如餐厅、会议室。送物服务：机器人可以为客人提供送物服务，如送餐、送水或送其他物品到客房。客房服务：在客房内，机器人可以清扫，与智能控制系统配合根据客人的喜好调节室内环境，如温度、灯光等。清洁服务：机器人能够进行客房清洁工作，提供更卫生的住宿环境。安全保护：部分服务机器人具备监控功能，可以用于酒店的安全巡逻，提高安全性。24小时服务：服务机器人能够实现24小时不间断服务，提高了服务的可获取性和便利性。广告宣传：服务机器人的屏幕可以用来播放酒店的广告和宣传信息，作为一种新型的营销工具。

9.1.2 智能化医院

在医院环境中，复合多态机器人通过承担运送医疗样本、药物、废物等任务，显著减轻了医护人员的重复性工作负担。辅助病房巡视，实时监测患者状况，并向医护人员报告异常，提升病患监护效率。已实现功能包括：消供中心至手术室的手术服和器材运送；护士站至病房区的药品和餐食配送；放射核药的运送；以及废物

收集等。区域接待方面，复合多态机器人提供信息咨询、引导患者至诊疗区，并协助挂号、缴费等流程，优化患者就医体验。行业贡献方面，复合多态机器人在武汉、广州、杭州等地的方舱医院和隔离酒店提供“无接触服务”，创下30台机器人协同工作的行业记录，为防疫安全做出重要贡献。国际服务方面，复合多态机器人已服务于泰国10多家医院及北京天坛医院、同济医院等，获得行业专家的高度评价。创新范本方面，如云迹科技定制开发了裸眼3D-AIGC空中成像机器人，为医院这种人流量大、卫生安全要求高的场所提供无接触的空中成像操作，再次突破行业界限，保障卫生安全。

9.1.3 智能化楼宇

在商业楼宇中，复合多态机器人发挥着多面手的作用。前台接待：迎接访客，提供信息查询和登记服务。快递分发：自动将邮件和快递分送到指定的办公室或个人。清洁服务：定期清洁公共区域，如大厅、走廊和会议室。安全监控：巡逻楼层，监控安全状况，预防潜在的安全隐患。设备维护：检查和维护公共设施，如打印机、咖啡机等。餐饮服务：协助订餐、送餐或管理自动售货机。紧急响应：在紧急情况下提供快速响应，如火灾或医疗紧急情况。能源管理：监控能源使用情况，优化照明和空调系统。环境监测：检测空气质量、温湿度等，确保办公环境舒适。

9.1.4 智能化社区

在社区环境中，复合多态机器人可以安全巡逻：监控社区环境，预防和报告可疑活动或紧急情况。

清洁服务：自动清扫街道、公园和其他公共区域，收集垃圾。送货服务：将快递或杂货从配送点送到居民家中。信息提供：向居民提供社区新闻、活动信息和紧急通知。交通管理：协助指挥交通，确保行人和车辆安全。老年人和残疾人士辅助：为需要帮助的居民提供日常生活支持。环境监测：检测空气质量、噪音水平等环境因素，确保社区环境健康。导览服务：为新居民或访客提供社区导览和信息介绍。维修和维护：检查和维护社区设施，如公共健身器材、儿童游乐设施等。紧急响应：在紧急情况下提供初步响应，如火灾、医疗紧急情况等。

这些应用场景凸显了复合多态机器人依托其开放平台和先进的智能技术，能够灵活适应多样化的环境和需求，实现效率提升、成本降低和用户体验改善。在物流配送，复合多态机器人通过户外无人车与机器人底盘的无缝对接，实现了室内外闭环接力送，与传统末端配送相比，智慧物流效率提升了50%，显著优化了到家到户的配送流程。

9.1.5 智能化商超

商超也是与人共同存在的场景，也是复合多态机器人服务的优势场景。可以提供：顾客服务：提供信息查询、导购、解答顾客疑问等前台服务。库存管理：监控库存水平，自动补货或提醒工作人员补货。商品推荐：根据顾客的购物习惯和偏好推荐商品。结账助手：在自助结账区域协助顾客快速完成结账流程。货物搬运：在仓库或货架间搬运商品，减少人力搬运需求。清洁维护：定期清洁商超地面和货架，保持环境整洁。安全监控：监控商超内的安全状况，预防盗窃和其他安全问题。促销活动：参与促销活动，吸引顾客注意力，增加销售机会。订单处理：协助处理线上订单，准备商品打包和配送。顾客引导：在商超内引导顾客到特定区域或帮助他们找到所需商品。交互体验：提供互动体验，如通过触摸屏或语音交互与顾客沟通。数据分析：收集顾客行为数据，帮助商家优化商品布局和营销策略。

9.2 复合多态机器人非服务场景的扩展

9.2.1 制造业工厂

在制造业工厂环境中，复合多态机器人以其高适应性和自动化能力，有效承担高重复性和危险性任务，如重物搬运、产品质量检查，以及在极端条件下的工作。能够无缝整合进工厂自动化系统，优化生产流程，提升效率。复合多态机器人的自适应多场景能力，使其能够根据生产线的多样化需求快速调整和部署。在工厂服务中，复合多态机器人在生产线上自动运输物料，通过自组网和群体协作技术，无需额外定位设备即可高效运作。目前，已服务于北京、广州等地区的多家工厂，助力实现成本降低30%，效率提升60%，推动制造业向智能化转型。

9.2.2 芯片业工厂

在封闭的芯片洁净车间内，自动化程度已经很高，但是这些设备多数都是无法由人操作的芯片生产工艺中某个环节的快速高效重复工作。一个芯片从晶圆到芯片至少要经过几十道工艺，每个工艺的衔接目前大量依靠人员完成，且人员存在更换服装、休息等不便利的时候；同时芯片工厂环境大量人员在移动操作，并不适合固定路线的AGV等运行，AGV更适合没有人干扰的局部环境。复合多态机器人可以与人更好的协作完成各环节衔接工作，从晶圆入厂到切片的各个环节的衔接。在无尘室环境中，复合多态机器人具有毫米级别的定位精度，可以记录物料的位置，搬运晶圆片等易碎且昂贵的材料，减少人工搬运带来的风险；在晶圆封测等精密生产工艺中，复合多态机器人利用振动抑制与补偿算法，精准执行物料操作，一台机器

人的工作效能可替代多名工人，同时满足无尘、防震、防静电的高标准要求。作为PCB贴片行业也是类似需求，这类企业在长三角、珠三角大量存在。

第十章:复合多态机器人的商业路径

复合多态机器人概念不是为了学术探讨，是实实在在的商业探索。通过调研服务机器人行业企业，可以看到巨大的商业机会，也看到了这些企业的商业实践和商业模式的创新正在适应市场转变。

10.1 复合多态机器人是抢先具身智能机遇的商业路径

人工智能国内没有芯片算力等基础优势，但是我国具有场景和数据优势，能够支撑未来具身智能的训练与应用部署。应用场景带来的数据优势将是确保具身智能借助复合多态机器人在中国发起和演进的前提，依靠中国产业链优势未来一定是大规模数据价值和商业化价值。

随着技术的成熟和市场的扩大，复合多态机器人的成本将逐渐降低，使得更多场景更多企业能够负担得起机器人成本，大规模应用才能确保具身智能体成本足够低，成本优势将是确保我国具身智能向国外输出的基础。

复合多态机器人在未来的技术迭代中将迎来更大的发展空间，成为智能制造和服务领域的重要力量，但纯粹的智能硬件容易发生价格内卷，复合多态机器人生产商应该从生产制造逐步转入多场景服务解决方案提供商，产生服务流价值“软硬兼施”盯住场景的需求，迎接具身智能时代。

10.2 复合多态机器人的[云—端]一体化核心价值

数据的积累和模型的进化是建立核心壁垒的资产。通过复合多态机器人在多个行业和场景中的应用，将累积大量的行为数据。这些数据不仅帮助机器人企业不断优化复合多态机器人的性能，还为 AI 算法提供了丰富的训练材料。随着数据量的增加和算法的不断迭代，复合多态机器人在任务执行、决策制定和环境适应性方面的表现将越来越出色。这种基于大量实际应用数据和经验的技术积累，构成了复合多态机器人的商业壁垒，为竞争对手设置了较高的进入门槛。只靠产品、只靠大模型无法形成绝对的商业优势，谁拥有场景入口、场景数据才是根本优势。在快速迭代和竞争激烈的市场环境下，复合多态机器人服务提供商应从战略上由产品优势向数据优势转变，产品可以代工、机器人可以兼容多个厂家，只有数据是服务提供商的核心资产、是未来的核心优势。

10.3 复合多态机器人的收益模式

10.3.1 复合多态机器人的 ToB 购买租赁收益

[云-端]一体的收益是复合多态机器人服务提供商当前的主要盈利来源。在端侧复合多态机器人服务提供商不仅可以输出复合多态机器人、输出功能舱、场景感知物联网（IoT）、复合多态机器人操作系统，还可以输出开放的感知单元、智能单元为后续构建异构无人应用场景。在“云”侧，可以输出复合多态机器人“工具”集——复合多态机器人自适应任务管理系统；还可以输出基于定制化、私有化的场景大模型的数字化服务方案。复合多态机器人服务提供商可以根据客户的具体要求，设计和部署专门的复合多态机器人服务和运维服务，如与美团的社区本地生活的全面合作，是根据美团需求对产品与系统进行定制化和优化。此外，随着解决方案的不断优化和升级，服务提供商还可以通过提供持续的维护和升级服务来获得持续的收入。

10.3.2 复合多态机器人的 ToC 租售服务收益

复合多态机器人服务提供商建立的成本优势将下沉到消费市场，可以将[云-端]服务+复合多态机器人直接转变成消费品或服务。用户可以通过复合多态机器人服务提供商的 APP 定制机器人类型、定制服务类型，服务提供商的[云-端]提供 AI 服务，复合多态机器人由本地化运营提供各种异构的组合需求送货上门，可租可售可修。将为农业生产、保洁、厨房、护理等未来生活统一提供服务。

10.3.3 复合多态机器人的开放系统的价值

面向机器人公司，复合多态机器人服务提供商可以提供智能单元+[云-端]开发系统的服务模式，在获得数据的同时与不同行业生态合作伙伴共同服务客户；面向大模型公司，复合多态机器人服务提供商可以提供端侧服务场景，与生态合作伙伴共同开发大模型和开拓应用，衍生若干垂直领域大模型；面向物联网公司，复合多态机器人服务提供商可以提供应用场景和客户，与生态合作伙伴共同创新应用。开发者可以利用复合多态机器人的大模型和AI能力，开发出更加复杂和高级的功能，如自然语言处理、图像识别、预测性维护等。这些新功能的集成，使得复合多态机器人能够提供更加智能化和个性化的服务，提高用户体验，并推动服务机器人技术的发展。

随着复合多态机器人服务提供商建立的生态合作伙伴越来越多，越来越专业，这种开放体系可以让技术领域参与者都专注在自己擅长的领域，从而实现降本增效的效果，使生态越来越健壮，能够让合作伙伴们在各自擅长的场景中保持优势。

第十一章:复合多态机器人价值潜力

复合多态机器人的商业发展促进了其价值释放,复合多态机器人的价值潜力巨大,影响深远,我们都将在不久的将来看到因老龄化、服务机器人的规模化带来的社会的变更。

11.1 服务农业和工业生产的巨大潜力

11.1.1 农业生产的变革

自动化和智能化: 复合多态机器人可以执行播种、施肥、除草、收割等农业任务,提高农业生产的自动化水平。**精准农业:** 通过集成的传感器和数据分析能力,机器人能够实现精准施肥、灌溉和病虫害防治,提高作物产量和质量。**劳动力替代:** 在劳动力短缺的地区,机器人可以替代人力,减轻农民的劳动强度。

11.1.2 工业制造的创新

灵活制造: 复合多态机器人可以根据不同的生产线需求快速调整形态和功能,实现多品种、小批量的生产。**质量控制:** 机器人可以进行精确的检测和质量控制,减少产品缺陷,提高生产效率。**危险环境作业:** 在高温、高压、有毒等危险环境中,机器人可以替代人工作业,保障工人安全。

11.2 生活模式变化和老龄化催生服务机器人需求

11.2.1 日常生活的便利化

家庭服务: 复合多态机器人可以作为家庭助手,进行清洁、烹饪、照顾老人或儿童等家务活动。**个性化服务:** 机器人可以根据个人喜好提供定制化服务,如个性化健康咨询、教育辅导等。**社交互动:** 具备多模态交互能力的机器人可以作为伴侣,提供情感支持和社交互动。中国社会结构的变化,特别是人口老龄化的趋势,为服务机器人的发展提供了巨大的需求空间。民政部披露,截至2023年底,全国60周岁及以上老年人口接近3亿人,占总人口的21.1%,其中65周岁及以上老年人口21676万人,占总人口的15.4%。在医院、养老院、社区以及家庭中,对服务机器人的需

求日益增长。服务机器人不仅可以提供基础的护理服务，比如辅助行走、日常监护，还能在更复杂的医疗场景中发挥作用，如辅助手术、药物管理等。此外，随着家庭结构的变化，小型化家庭增多，服务机器人在填补家庭服务需求缺口方面也显示出巨大潜力。服务机器人的应用，将有助于缓解因人口老龄化带来的劳动力短缺问题，同时提高老年人的生活质量，这在社会转型期显得尤为重要。

11.3 促进文化观念更新和社会治理创新

11.3.1 文化观念的更新

人机关系：随着机器人在日常生活中的普及，人们对机器人的接受度和依赖度将提高，人机关系将更加紧密。**伦理和法律：**机器人的普及将引发对机器人伦理和法律问题的讨论，如机器人的权利、责任和隐私问题。**教育和培训：**为了适应机器人技术的发展，教育和培训体系将更加重视STEM（科学、技术、工程和数学）教育。**社会治理的创新：智慧城市：**复合多态机器人可以用于城市管理，如交通监控、环境监测、公共安全等，提高城市管理的智能化水平。**应急响应：**在自然灾害或突发事件中，机器人可以快速响应，进行搜救、物资运输等工作。

11.4 人才发展与机器人人口红利的转变

11.4.1 人才发展

智能机器人行业的快速发展，正推动着人才需求的转变。**劳动力需求的变化：**机器人技术的应用减少了对传统、重复性和程序化劳动的需求，同时增加了对高技能劳动力的需求，如数据科学家、算法工程师等。这种变化导致了劳动力市场的极化，即对高技能和低技能劳动力的需求增加，而对中等技能劳动力的需求减少。**教育和培训的调整：**为了适应新的劳动力市场需求，教育体系需要调整课程和培训项目，以培养具备机器人操作、维护和开发等专业技能的人才。这包括编程、机械工程、自动化技术等领域的教育和培训。**人才结构的转变：**智能机器人的应用不仅改变了工作的性质，也改变了就业结构。一些传统的工作岗位可能会被机器人取代，而新的工作岗位，如机器人维护工程师、人工智能伦理专家等，将会被创造出来，人才需求的结构也随之发生变化。

根据测算，目前中国机器人行业的人才需求有750万，缺口达到300万。现有人才主要集中在理论研究和产品研发领域，面向产品具体落地的应用型人才、技能型人才，以及上下游产业链整体人才的需求缺口，数量会更加庞大。这种转变不仅

为机器人行业本身带来了巨大的发展机遇，也为中国的经济发展提供了新的动力和增长点。

11.4.2 机器人人口红利

人口红利主要体现在劳动力的规模和供给，劳动力成本和效率，从而实现国际竞争力和消费规模提升。中国依赖人口红利实现了经济的快速增长，但随着人口结构的变化，这种优势正在逐渐减弱。机器人与人相比在生产周期上更短、学习时间更短、维护保养成本更低、危险处置能力更强，将成为劳动力市场上最具竞争力的“劳动力产品”，机器人的数量和工作时长、能力都比人更可控，机器人作为一种劳动力的替代品逐步走向劳动力舞台，像一种新人口补充着我们的劳动力市场，这是全球性的新红利——机器人人口红利。

强大的制造业能力是孕育机器人人口红利的基础条件，科技是机器人人口红利的优势。我国在机器人科技、制造、市场方面具有明显优劣势。我国拥有完整的工业体系和强大的制造业能力，这为机器人技术的发展和应用提供了坚实的基础。我国庞大的市场规模为机器人产业提供了广阔的发展空间和需求。我国在人工智能、机器人学习、仿生、数据挖掘以及模式、语言和图像识别技术方面取得了显著进展。特别是政府积极推动机器人产业的发展，提供政策和资金支持，以促进技术创新和产业升级，让我国可继续保持着新时代“人口红利”。

不利方面。高端技术差距：在高端零部件和系统技术方面，中国与发达国家相比仍存在一定差距，尤其是在关键核心技术方面。高端人才短缺：机器人领域的专业人才供不应求，教育培训体系相对滞后，难以满足行业需求。高端技术封锁：随着全球制造业的竞争加剧，主要来自发达国家的高端封锁，也有来自后发国家的中低端追赶。我们可以通过加强技术创新、人才培养和国际合作，进一步提升中国在全球机器人产业中的竞争力，让“机器人人口红利”发生在中国，发展在中国，推向全球，共享红利。

11.5 复合多态机器人推动生产服务范式的转型

服务机器人在餐饮酒店业的率先推动着服务范式的转型，这种服务范式的转型已然悄悄地从酒店业向其他行业、产业蔓延。服务机器人在酒店业的应用推动了服务范式的转型，从“服务机器人”到“机器人服务”，再到从协助人工到解放人工。这一转型不仅提高了服务效率，也重新定义了服务人员的角色，为客人提供了更加便捷、个性化和有趣的服务体验，同时为酒店运营带来更高的效率和可持续性。从最初的“服务机器人”概念，即机器人作为服务人员的辅助工具，到现在的“机器人服务”，即机器人提供全面的服务解决方案，这一转变不仅提高了服务效率，也重新

定义了服务人员的角色。服务机器人与人工服务的协作。服务机器人与人工服务的协作是转型过程中的关键一步。机器人可以处理重复性高、劳动强度大的任务，而人工服务人员则可以专注于提供更加个性化和创造性的服务。服务机器人的自主性提升。随着自主导航、智能决策等技术的发展，服务机器人的自主性得到了显著提升。能够更有效地在酒店内移动，避开障碍物，找到目的地，并根据环境变化和客人需求做出适当响应。从协助人工到解放人工。服务机器人的应用正在从协助人工转变为解放人工。

随着社会的发展和科技的进步，人类的角色也在经历着深刻的转变。过去，人们更多地被视为劳动力的提供者，参与到各种生产和服务活动中。然而，随着自动化和智能化技术的发展，特别是复合多态服务机器人的应用，人类正逐步从单纯的劳动提供者转变为生活享受者。服务行业的水平不断提高，科技在其中扮演着越来越重要的角色，提供了一系列创新的解决方案。这些解决方案不仅提高了服务效率和质量，还为人们释放了更多的个人时间，使他们能够更多地投入到创造性工作和个人兴趣中。科技的进步，复合多态机器人的应用，正在帮助人类构建一个更加和谐、舒适的生活环境，推动社会向更加人性化和高质量的方向发展。

参考文献

- [1]OFweek 《机器人网 什么是智能机器人？智能机器人的定义》 <https://robot.ofweek.com/2021-08/ART-8321200-8300-30516119.html> 2021
- [2]亿欧智库 《2020中国服务机器人产业发展研究报告》 <http://www.iyiou.com/intelligence> 2020
- [3]工业互联网产业联盟 《智能机器人技术产业发展白皮书(2023)》 <http://www.ai-alliance.org/> 2023
- [4]工业和信息化部 《“十四五”机器人产业发展规划》 <https://www.gov.cn/> 2021
- [5]工业和信息化部 《“机器人+”应用行动方案》 <https://www.gov.cn/> 2023
- [6]工业和信息化部 《人形机器人创新发展指导意见》 <https://www.gov.cn/> 2023
- [7]科技部 《关于加快场景创新以人工智能高水平应用促进经济高质量发展的指导意见》 <https://www.gov.cn/> 2022
- [8]全国机器人标准化技术委员会 《服务机器人云平台分类及参考体系结构》(征求意见稿) <https://std.samr.gov.cn/> 2023
- [9]中国人工智能学会 《中国人工智能系列白皮书——大模型技术(2023 版)》 <https://www.caaai.cn/> 2023
- [10]中国信息通信院 北京人形机器人创新中心有限公司 《具身智能发展报告2024年》 <http://www.caict.ac.cn/> 2024
- [11]Levatas Levatas is the world's first AI developer to integrate ChatGPT with the Spot robots from Boston Dynamics <https://levatas.com/blog/levatas-integrates-chatgpt-spot> 2023
- [12]陈鹭伊 哈工深聂礼强:多模态大模型是具身智能发展的关键动力 雷锋网 2024
- [13]FROST&SULLIVAN 《全球商用服务机器人市场研究报告(2023)》 <https://img.frostchina.com/attachment/17233920/gWgCt27HDwwYyCqVprnjQi.pdf> 2023
- [14]王田苗 陶永 陈阳 服务机器人技术研究现状与发展趋势 北京航空航天大学机器人研究所 中国科学:信息科学 2012年第9期 2012
- [15]德勤洞察 机器人迈向广阔未来 2020科技、传媒和电信行业预测 www.deloitte.com/insights 2020
- [16]Cristiano Castelfranchi Alan Turing’s “Computing Machinery and Intelligence” DOI:10.1007/s11245-013-9182-y 2013
- [17]Eric Sihite, Multi-Modal Mobility Morphobot (M4) with appendage repurposing for locomotion plasticity enhancement Nature Communications volume 14,

Article number: 3323 2023

- [18]李学龙 多模态认知计算 中国科学信息, 第1期 2023
- [19]Jill L. Drury Changing Shape: Improving Situation Awareness for a Polymorphic Robot https://www.researchgate.net/profile/Jill-Drury/publication/221473177_Changing_shape_improving_situation_awareness_for_a_polymorphic_robot/links/02bfe50db0a3c4d37b000000/Changing-shape-improving-situation-awareness-for-a-polymorphic-robot.pdf 2006
- [20]Dickson R.Yao Multimodal Soft Robotic Actuation and Locomotion <https://doi.org/10.1002/adma.202308829> Advanced Materials, Volume36, Issue19 2024
- [21]CHENG Kwang-Ting Rise of the Robots <https://seng.hkust.edu.hk/sites/default/files/IMCE/PR/infocus30.pdf> 香港科技大学 2019
- [22]Kyle Gilpin; Daniela Rus Modular Robot Systems IEEE Robotics & Automation Magazine (Volume:17, Issue:3, 2010)
- [23]Reem J. Alattas, Sarosh Patel Evolutionary Modular Robotics: Survey and Analysis Journal of Intelligent & Robotic Systems Volume 95, pages 815–828, (2019)
- [24]Yuchuang Tong; Haotian Liu 等Advancements in Humanoid Robots: A Comprehensive Review and Future Prospects IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica Volume: 11, Issue: 2 2024
- [25]刘志 可重构模块机器人引领高端制造 https://www.sohu.com/a/194169143_465915 2017
- [26]王濛著 模块化实物用户界面研究 清华大学优秀博士学位论文 清华大学出版社 2023
- [27]peppermint robotics https://www.gulfworldwide.net/wp-content/uploads/2023/07/4B.-Peppermint-Material-Handling-Robots_2023.pdf 2023
- [28]Yunhao Zhang, Xiaohan Zhang等 MulCogBench: A Multi-modal Cognitive Benchmark Dataset for Evaluating Chinese and English Computational Language Models <https://arxiv.org/abs/2403.01116> 2024
- [29]forbes china 李飞飞团队发布“具身智能”成果:机器人接入大模型直接听懂人话 <https://www.forbeschina.com/entrepreneur/64820> 2023
- [30]深企投产业研究院 《2024人形机器人行业研究报告:人形机器人产业链》 https://www.sohu.com/a/789989460_121823491 2024
- [31]华安证券 《人形机器人风起云涌—产业链梳理概况》 2024
- [32]云迹科技 <https://www.yunjichina.com.cn/> 2024

- [33]Henkens B,Verleye K,Larivière B. The smarter, the better?! Customer well-being, engagement,and perceptions in smart service systems. *International Journal of Research in Marketing*,38(2):425-447.2021
- [34]Huang M H, Rust RT. Artificial intelligence in service. *Journal of Service Research*,21(2):155-172. 2018