

具身智能机器人和移动通信技术研究报告  
(2025 版)

SAC/TC 597

全国机器人标准化技术委员会  
2025 年 12 月

# 目录

引言 .....	III
1 具身智能机器人的发展愿景与网络关系 .....	1
1.1 具身智能机器人产业愿景及市场空间 .....	1
1.2 具身智能机器人和移动通信网络的关系 .....	2
2 具身智能机器人政策体系与产业协同建议 .....	3
2.1 具身智能机器人、移动通信网络国家和行业政策 .....	3
2.2 具身智能机器人和移动通信产业协同建议 .....	6
3 具身智能机器人智能化分级和演进路线 .....	7
3.1 具身智能机器人智能化分级 .....	7
3.2 具身智能机器人核心能力演进 .....	9
3.2.1 本体演进要素和方向 .....	9
3.2.2 小脑演进要素和方向 .....	10
3.2.3 大脑演进要素和方向 .....	11
3.2.4 大小脑端云协同架构演进 .....	14
4 具身智能机器人应用场景与移动通信网络需求 .....	17
4.1 具身智能机器人应用场景分析 .....	18
4.1.1 行业领域（ToB）应用场景 .....	18
4.1.2 个人领域（ToC/ToH）应用场景 .....	20
4.2 具身智能机器人业务流特征分析 .....	21
4.2.1 行业领域（ToB）业务特征 .....	21
4.2.2 个人领域（ToC/ToH）业务特征 .....	23
4.3 具身智能机器人对移动网络的业务保障需求 .....	25
4.3.1 行业领域（ToB）网络保障需求 .....	25
4.3.2 个人领域（ToC/ToH）网络保障需求 .....	29
4.3.3 具身智能机器人对网络保障需求指标 .....	32
4.4 具身智能机器人业务指标与网络需求 .....	32
4.4.1 具身智能机器人业务指标 .....	32
4.4.2 具身智能机器人网络需求 .....	34

5 具身智能机器人移动通信网络技术体系与关键技术 .....	39
5.1 具身智能机器人通信网络关键技术 .....	41
5.1.1 近期解决方案：5G-A 基础连接能力 .....	42
5.1.2 中期解决方案：5G-A 增强与优化（1~3 年） .....	46
5.1.3 长期解决方案：移动通信未来网络持续创新 .....	49
5.2 具身智能机器人终端要求和技术 .....	61
5.2.1 具身智能机器人终端关键指标 .....	61
5.2.2 具身智能机器人终端关键特性 .....	62
5.3 具身智能机器人网络安全技术 .....	63
5.3.1 具身智能机器人主要面临的安全风险 .....	63
5.3.2 具身智能机器人通信安全技术 .....	64
6 现有标准体系和标准建议 .....	66
7 总结与发展倡议 .....	70
A1 缩略语 .....	73
A2 投入报告写作相关组织与机构 .....	74

## 引言

人工智能技术正加速与实体经济深度融合，走向物理世界。在这一进程中，具身智能机器人作为能与环境进行实时交互与操作的智能实体，已成为推动新一轮产业变革的核心力量。其实现规模化、高级智能应用的关键，在于与移动通信技术的深度协同。通过充分挖掘并引入面向具身智能机器人的大上行带宽、超低时延、超高可靠等核心增强特性，将推动网络向可重构、自适应的智能架构演进，为机器人提供性能强大、稳定可靠且高度智能的连接服务。与此同时，智能体通信技术的快速发展也将带来新的变化，未来的具身智能机器人将不再是信息孤岛，而是能够通过高效的网络进行实时感知共享、任务协商与协同。移动通信网络将成为承载这一群体智能的神经系统，支撑具身智能机器人从单体智能迈向网络化群体智能协作的全新阶段。

本报告旨在系统构建具身智能机器人与移动通信融合发展的整体框架。首先阐述具身智能机器人的发展愿景及其与移动通信网络的共生关系，分析相关的政策体系与产业协同建议，并综合业界信息给出了具身智能机器人的智能化分级与技术演进路线。随后，深入探讨两大技术领域深度融合的具体方向与关键技术，专项展望面向具身智能机器人的移动通信网络核心能力发展，系统梳理现有标准体系并提出标准化建议。最后，总结提出发展倡议，以期全面梳理融合现状与挑战，剖析关键技术，描绘应用蓝图，研判未来趋势，为产学研各界提供一个清晰的共通框架，促进跨领域深度合作，引导技术创新与标

准共建，共同推动具身智能机器人产业和移动通信网络的深度融合。

SAC/TC 597

# 1 具身智能机器人发展愿景与网络关系

## 1.1 具身智能机器人产业愿景及市场空间

具身智能机器人作为具身智能的核心载体，其产业愿景在于构建一个智能、自主且与人类无缝协作的生态系统。这些机器人不仅仅是工具，更是能够感知、决策和执行的“智能体”，适用于从工业制造到家庭服务等多样化场景。

目前，具身智能机器人产业正处于爆发式增长期。根据中华人民共和国国家互联网信息办公室发文，预计到 2025 年，中国具身智能市场规模将达 52.95 亿元，占全球约 27%。国务院发展研究中心发布的《中国发展报告 2025》显示，当前中国具身智能产业发展处于起步期，在具身智能大模型研发和产品制造方面具有较好基础，市场规模有望在 2030 年达到 4000 亿元、在 2035 年突破万亿元，并将引领带动交通物流、工业制造、商业服务等多个应用领域新质生产力进一步跃升。这一增长得益于 AI 算法的成熟、传感器成本的下降以及应用需求的激增，特别是人形机器人市场，其潜在规模到 2050 年或将达到数万亿美元级别，涵盖供应链、维护和服务等领域。宽泛而言，这一市场空间不仅限于硬件制造，还延伸至软件生态、数据服务和标准化规范，预计将催生万亿美元级的经济价值链条，为全球经济增长注入新动能。然而，这一愿景的实现面临技术瓶颈，如计算资源分配、网络连接的稳定性和智能体通信协同，需要通过产业协作来克服。展望未来，具身智能机器人将通过持续的技术迭代创新，实现从基本感

知与执行到完全自主通用智能的能力跃升，推动产业向智能化、商业化、可持续发展的方向转型，并将引领带动交通物流、工业制造、商业服务等多个应用领域新质生产力进一步跃升。

## 1.2 具身智能机器人和移动通信网络的关系

具身智能机器人天然具备移动属性，这意味着它们需要在动态环境中自由导航和操作，而非固定位置的静态系统。这种移动性要求机器人具备实时环境感知和适应能力，同时移动性也带来了机器人间信息交互和协作，从而对通信网络提出更高的诉求。

具身智能机器人的演进可类比为生物体的“大脑—小脑”结构：本地“小脑”负责即时感知和执行，云端“大脑”处理复杂决策，而移动通信网络则充当中枢神经系统，连接并协调这些组件实现指令下达和反馈接收。通过移动通信网络，机器人能够实现端网云协同，确保数据的高效传输和计算卸载。

具身智能机器人与传统手机业务相比网络需求存在显著差异。手机服务主要面向个人用户，强调点对点通信和娱乐消费，而具身智能机器人涉及高并发场景、高可靠要求和高时长持续操作。这些特性导致具身智能机器人网络需处理海量数据流、确保零故障容忍，并支持群体智能，如智能体动态组网、消息路由分发和多模态实时通信。同时进一步放大对专网和广域网的需求，包括人机通信用于与人更好的协同、智能体与机器人协作用于新协作场景、机器人自组网用于小规模协作，以及广域通信用于大规模部署。总体而言，这些差异凸显了具身智能机器人对移动通信网络的独特诉求：不仅仅是连接，更是赋

能突破单机能力边界，实现人机/机机通信、全域感知、语义高效传输和群体智能协作的平台。

移动通信网络可以提供“无处不在的连接”，支持 Anywhere、Anytime 的操作模式，包括大带宽上行用于上传高分辨率传感器数据，以及低时延决策以应对不确定性环境。具身智能机器人与移动通信技术的融合至关重要，它不仅能解决当前机器人面临的网络挑战，还将加速产业生态构建，促进从 ToB（如智能制造）到 ToC（如家庭服务）的应用落地，最终支撑国家战略性新兴产业的可持续发展。本研究报告将从具身智能机器人业务出发，结合具体场景和业务需求，给出具身智能机器人通信网络的技术方向。同时，报告将探讨标准和规范的推进方向，旨在通过国内和国际标准的制定，推动产业规范化落地，提供从政策响应到技术展望的全面框架。

## 2 具身智能机器人政策体系与产业协同建议

在明确了具身智能机器人的发展愿景、市场前景及其与移动通信网络的共生关系后，为实现这一产业蓝图，需要从顶层设计、政策引导及产业生态等多方面协同推进。本章将聚焦于政策体系构建与跨产业协作路径，提出具体建议，以营造良好的创新环境，加速技术成熟与应用落地。

### 2.1 具身智能机器人、移动通信网络国家和行业政策

当前，全球科技产业正迎来以具身智能机器人为代表的新一轮技术革命与产业变革。具身智能机器人通过赋予机器物理实体与环境交

互能力，打破了传统人工智能“纯算法”的局限，成为推动智能制造、智慧医疗、智能物流等领域转型升级的关键力量。移动通信网络作为具身智能机器人高效运行的“神经中枢”，是保障具身智能在复杂场景下精准响应、协同作业的核心支撑，直接决定了具身智能机器人终端与云端、终端与终端之间数据交互的效率。

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》明确将具身智能列入前瞻布局的未来产业，定位为“新的经济增长点”，并提出全面实施“人工智能+”行动，推动其与千行百业深度融合。国家及地方层面高度重视具身智能机器人与移动通信产业的融合发展，出台了一系列政策文件（见表 1 所示），从战略规划、技术攻关、场景应用、生态构建等多维度提供系统性支持。

**表 1 具身智能机器人与移动通信产业相关政策**

时间	政策	内容
2021 年 11 月	《“十四五”信息通信行业发展规划》	加强产业链协同创新，引导多类企业协同开展关键技术攻关等，共建产业生态；丰富 5G 相关产品种类，加快智能产品推广；支持传统线下文化等业态向线上拓展，开展 5G+广播电视试点示范，推进相关产业链发展
2021 年 12 月	《“十四五”智能制造发展规划》	完善信息基础设施，加快工业互联网等新型网络基础设施规模化部署；鼓励企业开展内外网升级改造，加强算力基础设施建设，支撑人工智能等新技术应用
2022 年 7 月	《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》	在制造、物流、医疗等领域优先探索不同的智能场景，如工业大脑、机器人分流分拣、医疗影像智能辅助诊断等
2023 年 1 月	《“机器人+”应用行动实施方案》	以产品创新和场景推广为着力点，分类施策拓展机器人应用深度和广度，培育机器人发展和应用生态，增强自主品牌机器人市场竞争力
2023 年 2 月	《数字中国建设整体布局规划》	夯实数字中国建设基础，打通数字基础设施大动脉，系统优化算力基础设施布局，整体提升

时间	政策	内容
		应用基础设施水平，加强传统基础设施数字化、智能化改造
2023年10月	《人形机器人创新发展指导意见》	面向高实时协调运动控制等需求，研发专用芯片和智能芯片，提升人形机器人协调控制能力；到2025年，人形机器人创新体系初步建立，整机产品达到国际先进水平，并实现批量生产；到2027年技术创新能力显著提升，构建具有国际竞争力的产业生态，综合实力达到世界先进水平
2024年1月	《关于加快应急机器人发展的指导意见》	重点聚焦“断路、断网、断电”等极端条件下应急指挥通信保障及灾情侦察需求，依托无人机等加强新型应急通信保障平台研制，研制基于无人机的自主部署通信基站，研制基于临近空间太阳能无人机、飞艇等航空器的应急指挥通信平台等，提升极端条件下应急指挥通信网络构建、灾情侦察等能力，打通应急指挥通信“最后一公里”
2024年7月	《北京市推动“人工智能+”行动计划（2024—2025年）》	整合创新资源，结合真实场景需求，推出融合具身智能的机器人，以应用牵引具身智能迭代演进；搭建具身智能应用试验场，规范训练数据采集标准，建设高质量数据库
2024年8月	《工业和信息化部办公厅关于推进移动物联网“万物智联”发展的通知》	提升网络智联能力，加快探索人工智能技术在移动物联网的应用部署，加强面向城市智联等场景适配，更好满足业务需求
2024年8月	《工业和信息化部等十一部门关于推动新型信息基础设施协调发展有关事项的通知》	推进多种网络端到端协同升级，深入开展“双千兆”网络建设，持续建设移动物联网体系，协同推进卫星通信系统与地面网络等融合组网，深入推进IPv6规模部署和应用
2024年9月	《青岛市人形机器人产业发展行动计划（2024—2027年）》	统筹算力设施建设，科学布局智能算力中心，引导人形机器人企业向“5G+边缘计算+分布算力”算力网络转型，强化智能算力模组研发应用
2024年12月	《重庆市支持具身智能机器人产业创新发展若干政策措施》	引导智能机器人企业向“5G网络+边缘计算+分布算力”算力网络转型
2025年2月	《北京具身智能科技创新与产业培育行动计划（2025—2027年）》	开展国产具身智能芯片等与具身大小脑模型等的系统适配，构建全栈国产化软硬件生态；以打造具有国际影响力的具身智能科技创新策源

时间	政策	内容
		地和产业发展增长极为主线，立足优势，加强统筹，创新机制
2025年3月	《2025年政府工作报告》	建立未来产业投入增长机制，培育生物制造、量子科技、具身智能、6G等未来产业
2025年8月	《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》	支持智能化研发工具和平台推广应用，加强人工智能与生物制造、量子科技、第六代移动通信（6G）等领域技术协同创新，以新的科研成果支撑场景应用落地，以新的应用需求牵引科技创新突破。
2025年10月	《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》	前瞻布局未来产业，探索多元技术路线、典型应用场景、可行商业模式、市场监管规则，推动量子科技、生物制造、氢能和核聚变能、脑机接口、具身智能、第六代移动通信等成为新的经济增长点

## 2.2 具身智能机器人和移动通信产业协同建议

### 1) 强化政策引导，构建“网络—算力—场景”协同支撑体系

将“具身智能机器人+移动通信”融合发展纳入国家人工智能、信息通信业发展战略规划，重点从三方面强化支撑保障：一是推进网络底座升级，统筹开展5G-A、万兆光网试点部署，加快全国一体化算力网络建设，针对智家服务、工业巡检、养老服务、物流分拣等具身智能机器人高频应用场景，优先保障端到端低时延、高可靠性的通信服务能力；二是加强场景示范牵引，支持行业龙头企业联合电信运营商、人工智能厂商，打造“具身智能机器人+移动通信”标杆项目（如工厂智能协作机器人、社区陪伴机器人、家庭服务机器人应用项目），通过设立财政补贴、布局专项课题等方式，引导技术成果落地应用；三是健全生态协同机制，搭建中央与地方联动的产业创新平台，推动

芯片、设备、算法、网络等产业链上下游主体开展协同攻关，着力破解数据孤岛与技术碎片化问题。

## 2) 深化创新协同，强化“技术—应用”迭代

支持高校、科研机构与产业界建立协同创新机制，联合开展关键技术攻关，重点突破具身智能机器人终端轻量化通信模块等核心技术瓶颈；鼓励电信运营商开放网络能力接口，助力具身智能机器人企业提升网络应用能力，探索构建“以网强智、以智促网”的闭环发展生态；依托相关专项政策与项目资源，推动具身智能与移动通信融合应用向偏远地区延伸，提升技术应用的普惠性。

## 3 具身智能机器人智能化分级和演进路线

在构建了支撑产业发展的政策框架与协同机制后，为引导技术有序迭代与产品成熟，需进一步明确其具身智能机器人的发展阶梯与长期路径。本章将从智能化水平出发，系统阐述具身智能机器人的分级体系，及其核心能力演进。

### 3.1 具身智能机器人智能化分级

2025年，中国政府工作报告首次将具身智能机器人纳入未来产业培育计划，标志着其成为推动新质生产力发展的核心赛道。全球具身智能机器人正逐步从实验室走向场景落地，然而商用化进展仍低于预期，效率、成本、场景适配三大方面均让商用化面临各方面挑战。当前具身智能机器人的发展正处于 L2 阶段，并向 L3 级别迈进，其智能化分级见表 2 所示。

表 2 具身智能机器人智能化分级（综合业界信息）

分级	感知认知能力	决策学习能力	执行表现能力	协作交互能力	商业化前景	详解
L1 级	基本传感器输入	预编程固定任务	简单重复动作	无协作能力	已大规模应用	机器人能够执行预编程的固定任务，在高度结构化的环境中完成简单动作。感知能力局限于基本传感器输入，决策能力几乎为零，执行动作需要人工全程干预或预设指令。这一级别的机器人常见于传统工业流水线，完成如单一物品搬运或基础装配工作。
L2 级	有限环境感知	受控环境中适应	处理轻微变化	基本人机接口	特定场景应用	机器人具备有限的环境感知和适应能力，能够在受控环境中处理轻微变化。当前具身智能的发展正处于 L2 阶段，机器人可以在特定约束条件下完成多项任务，但仍需定期人工干预。例如物流仓储中的 AGV 小车能够自主导航但运行区域受限。
L3 级	多模态感知整合	动态环境决策	精细操作任务	安全自然交互	2025—2027 年落地	机器人具备动态环境中的自主决策能力，能够处理非预期情况并完成复杂任务。L3 级别的机器人将增加电子皮肤和触觉模态，能够完成精细操作任务，标志着从专业机器人向通用机器人的转变。此级别机器人能够学习人类演示的动作并泛化到类似场景，开始具备一定的常识推理能力。
L4 级	深度环境理解	长期自主规划	复杂动作序列	多智能体协作	2028—2030 年试点	机器人能够在复杂多变的环境中实现长期自主运行，具备多模态感知和深度推理能力。通过大模型、强化学习和模仿学习等技术，机器人能够理解抽象指令并拆解为具体动作序列。此级别机器人仅在异常情况下需要人类干预，能够与人类和其他机器人进行高效协作。
L5 级	全环境感知	通用人工智能	人类水平执行	无缝社会交互	2030 年后远景	机器人达到通用人工智能水平，具备人类水平的认知和行动能力，能够应对未知环境并解决前所未见的问题。机器人在感知认知、决策学习、执行表现和协作交互四个方面全面超越人类特定领域能力，实现真正的“具身智能”。此级别机器人尚未实现，是领域发展的远期目标。

具身智能机器人分级体系不仅为技术研发提供了明确的演进路

径，也成为企业评估产品成熟度与市场定位的重要参考标准。从发展现状看，全球具身智能机器人市场正处于有限环境感知向多模态感知整合跃迁的关键期。

### 3.2 具身智能机器人核心能力演进

据 IDC 数据显示，2023 年全球服务机器人出货量突破 2.1 亿台，其中搭载 AI 视觉算法的机器人占比达 68%，但具备多模态交互能力的产品不足 15%。技术瓶颈主要集中在能耗比优化、长时自主决策稳定性及复杂场景泛化能力。不过，OpenAI 的人形机器人 O1、DeepMind 的 RT-2 等项目已展示出通过大语言模型 + 视觉 Transformer 架构突破技术壁垒的潜力，推动产业向通用智能级加速演进。具身演进关键技术将围绕本体、大脑、小脑、数据等核心软硬件开展。

#### 3.2.1 本体演进要素和方向

机器人本体核心由智能类脑、灵巧手、机械臂、一体化关节、轻量化骨骼架、高强度外壳、机械双足以及核心零部件组成，再由大、小脑系统协调电机、液压、结构、感知等多模块实现稳定、灵巧、拟人的运动。当前行业主要聚焦 3 个维度：

**1) 高精度操作。**机器人肢体复杂度高，大量电机集成导致控制难度大，操作精细度差，需要准确的力觉信息感应以及力觉控制以提升机器人的运动精度、反应速度、平衡控制。

动态平衡与灵巧操作是具身智能机器人在复杂环境中稳定运动

和完成精细任务的核心能力。融合惯性导航、力矩控制与强化学习算法，机器人能够实时感知自身的运动状态和周围环境的变化，并通过调整自身的姿态和运动参数，保持在复杂地形上的运动稳定性。同时，通过对机械臂和关节的精确控制，机器人可以实现各种灵巧的操作，如抓取、装配、搬运等。

**2) 本体轻量化。**机器人本体重大操作难度大，耗能大，需要轻量化可大幅提高运动的机动性和工作效率，进而改善操作速度和动作准确度，同时减轻运动惯性，提高安全性。

轻量化驱动与能源管理对于具身智能机器人的续航能力和负载能力提升至关重要。采用高功率密度电机（如空心杯电机）、摆线减速器等核心部件，能够在减小机器人体积和重量的同时，提高其动力输出和运动效率。能量回收技术的应用则可以将机器人在运动过程中产生的能量进行回收和再利用，有效提升续航能力。

**3) 高质量数据。**机器人训练需要大量机器人在真实世界中与环境交互的数据集，但现实中的机器人保有量太少，可用于收集训练数据的机器人也较少，且厂商倾向于保护自有数据，造成了数据壁垒。

在全国机器人厂商的共同推进下，预计 25 年开始机器人将逐步上量。人形机器人本体硬件产业供应链将趋向智能手机发展，达到生态成熟、规模量产且成本可控的状态。

### 3.2.2 小脑演进要素和方向

机器人小脑核心技术为全身运动控制系统，负责实时协调机器人运动过程中的关节运动和动态平衡；机器人小脑的发展趋势主要为全

身运动控制能力泛化、边缘算力轻量化、高安全性及鲁棒性。

1) **运控算法**。运控算法在平坦路面已实现稳定，但在复杂地形（如斜坡、碎石）需依赖惯性导航动态补偿，能耗大大增加。

2) **实时性**。人形机器人需独立控制多个关节，配合视觉 SLAM 和力觉反馈，需要能够支撑动作快速闭环的高效算力，及低时延通信。

3) **训练数据**。人形机器人小脑训练依赖海量真实环境数据，目前缺乏真实数据，影响泛化能力提升。

4) **控制精度**。传感器灵敏度不足，如六维力传感器在强电磁场中易受干扰，激光雷达在镜面地面易失效等，影响小脑的控制精度。

小脑演进，从传统基于简化模型的位控准静态运动，转为全动力学模型高动态运动方向发展，最终实现拟人化柔顺运动性能。

### 3.2.3 大脑演进要素和方向

大模型主要采用 Transformer 架构，以预训练+微调的形式有效摆脱对基于场景数据训练的依赖，解决了长距离信息关联的问题，其在人形机器人上的应用，大幅提升了机器人的环境感知、人机交互、上层规划的能力，其在感知、决策、运控方面的智能、自主进一步提高。当前主要演进要素：

1) **数据**。大脑训练需要海量高质量的数据，目前缺乏数据成为大脑能力突破的重要壁垒。

大模型的 Scaling Law 已在通用文本处理与生成、自动驾驶等领域得到论证，机器人领域的智能涌现需要结合文本、图片、视频、力觉、传感器等多类不同模态的高质量数据，而当前真机采集数据获取

成本高达 40-100 元/单条，采集效率、数据质量等都存在诸多挑战。

具身智能机器人需要对物理世界有更准确的理解，包括对形状、物理属性的感知，对结构关系，动态规律等的推理，还需要考虑符合物理规模的交互方式。未来具身智能需要的数据流将是自动驾驶的 10 倍以上。

**2) 多模态感知和融合。**从复杂与不确定性的环境中获取对任务有用的数据困难，以及将数据进行精准融合面临挑战。

多模态融合感知技术是具身智能机器人实现精准环境认知的关键。通过集成视觉、力觉、听觉等多种类型的传感器，机器人能够从多个维度获取环境信息，然后借助深度学习算法对这些信息进行融合处理，从而实现对环境的全面理解。以 3D 摄像头和深度相机为代表的视觉传感器，能够为机器人提供周围环境的图像信息，使其能够识别物体的形状、颜色、位置等特征；力觉传感器则通过触觉反馈，让机器人感知与物体接触时的力度和压力，从而实现更加精细的操作；麦克风阵列作为听觉传感器，能够使机器人接收声音信号，实现语音识别、声源定位等功能。

**3) 认知和决策。**大脑缺乏人类般的抽象思维、常识推理和应对未知的能力，需提升高层任务规划的分解与推理以及对不确定性和异常的处理能力。

自然交互与任务拆解能力是具身智能机器人与人类进行高效沟通并完成复杂任务的重要保障。依托大语言模型（LLM）与多模态大模型（如 VLA 模型），机器人能够对自然语言指令进行准确解析，

理解人类的意图，并将复杂任务分解为一系列可执行的子任务，然后通过合理的规划和控制，完成任务的执行。

具身智能机器人的交互体验与端到端推理时延直接相关 —— 从传感器感知环境变化（如用户发出语音指令、物体位置移动），到“大脑”解析数据、生成指令，再到“小脑”执行动作，全链路时延需满足最小 SLA。如与人交互的内容需要匹配人类认知与反应习惯、涉及环境快速变化的交互场景（如抓取快速移动的物品，柔性物体交互等）则可能需要比人的反应时延更严苛的时延需求，否则可能导致交互卡顿、操作失误。基于 8000 千万+次数据统计，人类反应时延 90 百分位约为 300ms，人类反应时延统计见图 1 所示。

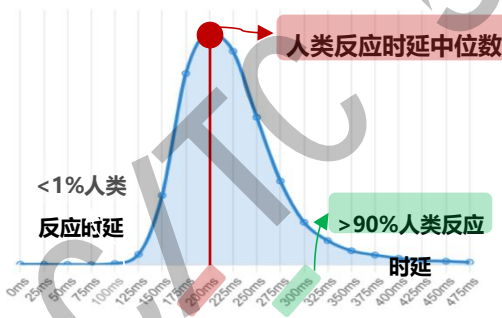


图1 人类反应时延统计

4) 算力。大脑对算力需求巨大，尤其要在极端苛刻的功耗、体积、延迟和成本约束下，提供持续、稳定且高效的算力。

典型 7B 参数的 VLM 模型单次推理需 100TOPS 以上算力，而当前典型机器人本地芯片的峰值算力约为 200TOPS，若同时运行多模态感知、运动控制任务，易出现算力不足。大规格算力还会导致近百瓦的功耗，严重影响具身智能机器人的续航需求，且对散热也是巨

大挑战。综合因素考虑，未来需要合适的算力能力和模型能力，支撑具身智能机器人的健康发展。

### 3.2.4 大小脑端云协同架构演进

具身智能机器人已取得飞速发展，正逐步进入日常生活。但具身智能机器人单体数据、算法与算力的确定性，难以应对场景、环境、任务的不确定性，具身智能机器人鲁棒性不足是制约规模发展的重要制约因素。类比自然人从裤兜里掏钥匙操作，人可以在不经意间完成，并未进行姿态算法、钥匙位置精确感知，机器人则需要大脑进行精确测量计算，包括力度、角度、三维坐标、姿态等。缺少鲁棒性，当钥匙晃动时，需要重新规划计算。当前受限于任务的复杂度、本体算力限制、大量数据存储限制、功耗的限制、海量知识资源获取等，很多复杂任务端到端完成需要利用边端、网端或者云端资源协同完成。

另外，人形机器人的发展可能从高级单体智能阶段发展到高级群体智能阶段，从主动思考、理解世界、通过自身的多模交互规划和完成特定的任务，向机机协同、群体协同，完成开放环境的多任务能力演进。在这个发展的过程当中，由于人形机器人的环境复杂度高，任务复杂度高，多模态交互需求大等因素与本体体积小、本体可安装算力小、本体电池容量小之间的矛盾。人形机器人智能部署架构有可能是端云协同和端边网云协同将在较长一段时间共存，在未来随着算力和电池等技术的发展可能会再次走向超级单体智能。

当前业界端-云协同决策架构成为具身智能机器人实现高效智能决策的重要支撑。在这种架构下，端侧负责实时感知与本地化推理，

能够快速处理传感器采集到的大量数据，并根据本地模型进行初步的决策和判断，响应时间小于 50ms，确保机器人对环境变化做出及时反应；云端则承担大规模模型训练与全局优化的任务，利用强大的计算资源和海量的数据，不断优化模型的性能和准确性，为端提供更强大的决策支持。

典型的端-云架构有两种，分别为强云弱端架构与强端弱云架构，示例图如图 2 所示。强云弱端协同对网络依赖太大，复杂实时性任务以及多机协同任务存在时延上的挑战。强端弱云协同，大小脑均在端侧，本体成本/体积/功耗均存在较大挑战，复杂任务能力受限。



图2 两种端—云架构示例

从中期来看，未来网络会发展到“云边端协同”的阶段，通过开放移动通信网络无线接入网（RAN）侧边缘算力和存储，实现毫秒级极致时延与超高可靠性，解决本体算力不足，满足工业场景的高可靠性和精细化控制要求。区别于“端-云”两层架构，最具革命性的演进在于引入“边”。本阶段，运营商将重点推动开放无线接入网与移动边缘计算深度融合。通过在基站侧（或靠近基站的机房）部署开放化的边缘算力节点，将云端 AI 能力部分下沉至网络边缘。这使得数据

无需绕行至遥远的中心云，即可在本地完成处理与闭环，从而实现了毫秒级的极致时延和三个9以上超高可靠性。

此时，网络架构演变为“云-边-端”协同：“端”侧负责感知和执行，“边”侧负责实时推理和敏捷控制，“云”侧负责海量数据存储、模型训练和非实时宏观决策。这种架构为人形机器人提供了全新的架构模式。通信与算力基础设施深度融合，从集中式云计算走向云一边一端协同的算力分层架构，满足局域场景下毫秒级极致性能要求。端一边一云架构示例如图3所示。



图3 端一边一云架构示例

未来既需要定义端、边、云分层的垂直通信标准框架，兼容 5G-A 及未来网络标准演进，增加确定性网络的相关定义（低时延、上行大带宽、高可靠性等），还需要定义机器人和机器人之间的横联网络架构标准。

如上文所述，除了单体具身智能机器人在端云协同对于通信的需求外，未来具身智能机器人将由单体工作模式向群体智能通信协作模式演进，智能体间广域互联互通的需求持续增强。同时，为更高效地服务人类，人与智能体的交互需求日益凸显。借助移动通信网络广域互联互通及高安全可信能力，具身智能机器人将具备移动通信网络接入能力，以实现人与具身智能机器人、具身智能机器人与其他智能体的高效通信与协同。

移动通信技术也在持续迭代升级，5G-A 及未来网络为具身智能系统提供了低时延、高可靠、广连接的网络支撑。这种网络支撑使得“云-网-边-端”协同架构得以深化落地，一方面各种具身智能机器人可以通过高速网络与云端进行实时数据交互，获取更强大的计算能力和更丰富的知识资源，从而实现更加复杂的任务。另一方面，一些低时延、高可靠性要求的任务，可以在边端获得算力支撑，这些“云-网-边-端”垂直协同以及具身智能机器人与其他智能体的横联网络协同都需要移动通信网络做出针对性的演进。

第四章和第五章将聚焦具身智能机器人场景、业务流特征，以及如何与移动通信技术的融合，深入剖析业务需求、关键技术以及未来发展方向，旨在为技术研发与商业化落地提供有价值的参考。

## 4 具身智能机器人应用场景与移动通信网络需求

在明确了具身智能机器人的智能化分级与核心能力演进路径后，其最终价值需通过具体应用场景的实现来分析和检验。本章将结合典

型应用，系统分析不同场景下机器人的业务特征及其对移动通信网络的差异化需求，从而推动网络能力与机器人产业发展更精准地对接与适配。

#### 4.1 具身智能机器人应用场景分析

具身智能机器人（涵盖双足、四足及轮式形态）凭借其自主感知、决策与执行能力，已在行业（ToB）和个人（ToC/ToH）领域形成多元化应用场景。

##### 4.1.1 行业领域（ToB）应用场景

###### 1) 智能制造场景：

在大型装备制造（如大飞机部段装配、汽车精密加工）、电子元件分拣等场景中，双足机器人负责高精度装配（如螺栓拧紧、部件对接），四足机器人承担车间巡检与设备状态监测，轮式移动机器人（AMR）完成物料跨区域搬运与工序衔接。例如海信集团智能制造工厂中，轮式机器人配合机械臂实现零部件自动分拣与产线补给，双足机器人在复杂工装区域完成人工难以触及的精密焊接辅助操作；智元机器人的搬运分拣机器人在华为南方工厂中，通过多机协同实现生产线物料的动态调度与精准配送。

###### 2) 公共安全与应急救援场景：

治安巡逻场景中，轮式机器人搭载高清摄像头、红外传感器在幼儿园门口、车站广场等区域自主巡逻，实现可疑人员识别、异常行为检测与实时音视频回传；抢险救灾场景中，四足机器人（如云深处机

器狗)可进入地震废墟、火灾现场等高危区域,通过激光雷达构建三维环境地图,同步传输生命体征探测数据;鼎桥研发的巡逻机器人还具备破门前危险排查、近距离催泪喷射器发射等功能,辅助民警执行高危任务。例如在城市广场夜间巡逻中,机器人可自动规避行人与障碍物,发现翻越护栏等违规行为时,实时联动指挥中心并进行广播预警。在应急指挥或大型公共安保现场,不同类型的四足机器人根据其专用能力可以组成一个高效协同的群组,实时通信、共享环境信息与任务状态,并自主进行任务协商与分工。

### **3) 能源电力巡检场景:**

在变电站、高压输电线路、风电场等场景中,四足机器人(如宇树四足机器人)攀爬输电塔架检测绝缘子破损、导线腐蚀情况,轮式机器人沿变电站巡检路线采集设备温度、电压电流数据,双足机器人在复杂电缆沟区域完成线路接头检测与故障定位。例如在偏远地区风电场,四足机器人可抵御强风、低温环境,通过多光谱相机识别风机叶片裂纹,将数据实时回传至电力调度中心,替代人工登塔巡检,降低高空作业风险。

### **4) 石化等高危生产作业场景:**

在炼油、化工、核电站、冶炼、矿山等场景,以及高压、易燃、易爆等高风险区域作业中,双足机器人搭载防爆机械臂执行阀门调节、管道封堵与设备检修,轮式机器人集成或携带气体传感器实现有毒有害气体浓度实时监测与泄漏点定位。例如某石化企业的炼油装置区,双足机器人通过远程操控完成法兰密封垫更换,避免人工进入高浓度

油气环境；某研发机构正设计研发石化装置远程巡检机器人，使作业人员在控制室即可完成装置区阀门操作、工艺介质取样与故障排查，显著降低作业人员暴露在高危环境中的时间和频次。

#### **5) 展馆与商业服务场景：**

在博物馆、科技馆、大型商场中，双足机器人作为“智能讲解员”，通过自然语言交互为游客介绍展品信息，支持语音问答与路线引导；轮式机器人搭载货舱在商场内为消费者提供商品配送服务，四足机器人则承担场馆内环境清洁与人流疏导辅助工作。例如数字华夏研发的展馆代言机器人，在科技馆中可结合 AR 技术，动态演示科学原理并与游客进行互动实验操作。

#### **6) 具身智能训练场景：**

为满足真实数据采集、模拟仿真等业务需求，北京人形机器人创新中心等国地中心和各大厂商建设了大型训练场馆，完成具身智能应用的模型训练任务。一般地，训练任务可分为四类：1) Cloud-Robot 分布式训练：采集感知数据，实时上传远端算力集群；2) Robot-Robot 协同训练：多个机器人协同任务训练，共享各自的环境感知信息、位置和意图；3) Robot-Human 交互训练：操作员通过 VR/AR 设备远程临场操作机器人；4) 大规模仿真与数字孪生：在云端运行数千个并行的物理仿真环境，即数字孪生，训练和验证 AI 模型。

### **4.1.2 个人领域 (ToC/ToH) 应用场景**

#### **1) 家庭服务场景：**

双足机器人可协助老人起床、取放物品（如从高处书架拿取书籍），

四足机器人承担家庭安防巡逻（如夜间检测门窗异常开启）与宠物陪伴，轮式机器人则负责地面清洁、食材采购配送与家居设备控制（如联动空调、灯光）。例如中移杭研研发的家庭服务机器人，用户通过语音指令“取客厅桌上的蓝色水杯”，机器人可自主避开沙发、地毯等障碍物，完成抓取与交付；在运营商网络个人智能助理的协同下，管家机器人协同扫地机器人完成家庭清洁，清洁完成后录制家庭环境视频发送给远端用户，家里老人摔倒，管家机器人快速拨打应急电话。

### **2) 个人移动与辅助场景：**

在家庭或社区中，轮式助老机器人为行动不便老人提供代步服务，同时具备健康数据采集（如心率、血压监测）与紧急呼叫功能；双足陪伴机器人可与儿童进行互动游戏、知识教学，通过表情识别感知儿童情绪并调整交互方式。例如某品牌轮式助老机器人，支持语音控制导航至社区药店，途中自动规避台阶与障碍物，同步将老人位置信息共享给家属。

### **3) 休闲与服务场景：**

在露营、野餐等户外场景中，四足机器人可携带露营装备、食材，轮式机器人作为移动电源与冷藏箱，双足机器人协助搭建帐篷与户外照明布置。例如移动研究院设想的智能配送场景中，用户露营时通过管家机器人下单披萨，机器狗与外卖平台无人机协同确定取餐地点，完成数字身份验证后接收外卖，解决露营地无人机禁飞问题。

## **4.2 具身智能机器人业务流特征分析**

### **4.2.1 行业领域（ToB）业务特征**

## 1) 智能制造场景

(1) 工作模式：采用“云 - 网 - 边 - 端”协同模式，机器人端（本地）负责实时环境感知（如视觉识别零部件位置、激光雷达检测障碍物）与动作执行（如机械臂抓取、路径跟随），边缘端（车间边缘服务器）处理低时延任务（如多机协同调度、动态路径规划），云端负责全局生产计划优化、模型训练与系统升级。网端负责机器人连接和机器人协作。

### (2) 业务流类型：

①控制流：云端 / 边缘端向机器人下发装配参数、搬运路径等控制指令，如“螺栓拧紧扭矩  $15\text{N}\cdot\text{m}$ ”、“从 A 区搬运 10 个零件至 B 区”；

②数据流：机器人上传传感器数据（如高清图像、力反馈数据、设备状态参数），如零部件位置坐标、机械臂运行温度、产线物料库存数据；

③协同流：多机器人间通过网络共享任务状态与环境信息，如轮式机器人向双足机器人发送“B 区物料已到位，可开始装配”的协同信号。

## 2) 公共安全与应急救援场景

(1) 工作模式：以“端 - 边 - 网 - 指挥中心”协同为主，机器人端自主完成巡逻路线规划、环境感知与初步异常识别，边缘端（现场临时基站）实现数据本地缓存与低时延转发，网端负责机器人接入和机器人协作，指挥中心负责全局任务调度、异常事件决策与指

令下发。

(2) 业务流类型：

①感知流：机器人上传音视频数据（如 4K 实时视频、红外热成像画面）、环境监测数据（如可疑人员位置、气体浓度）；

②控制流：指挥中心向机器人下发巡逻路线调整、重点区域排查、广播指令（如“前往车站东入口加强巡逻”、“播放防诈骗宣传语音”）；网络负责为哪些共同完成任务的机器人建立群组 and 通信协作。

③应急流：紧急情况下的指令交互，如“停止前进，检测到前方火源”、“启动催泪喷射器”，同步回传处置现场画面。

### 3) 能源电力巡检场景

(1) 工作模式：“端 - 云”协同结合本地自主决策，机器人端具备离线巡检能力（如预设路线巡检、本地故障初步判断），云端负责数据存储、故障深度分析与巡检任务优化。

(2) 业务流类型：

①监测流：机器人上传设备状态数据（如绝缘子表面图像、导线温度、风机振动频率）、环境数据（如风速、降雨量）；

②控制流：云端向机器人下发巡检路线更新、重点设备复测指令（如“对 3 号输电塔绝缘子进行二次拍摄”）；

③故障流：机器人发现故障后，上传故障位置、类型与严重程度数据，接收云端故障处置指导（如“标记故障点，等待维修人员到达”）。

## 4.2.2 个人领域（ToC/ToH）业务特征

## 1) 家庭服务场景

(1) 工作模式：“端-网-云”轻量协同，机器人端负责基础感知（如视觉识别物体、语音采集）与简单执行（如抓取、移动），网端负责机器人接入与机器人协同，网端或云端处理复杂任务（如自然语言理解、多模态大模型推理、场景地图构建）。

(2) 业务流类型：

①交互流：用户与机器人的语音交互数据（如“取蓝色水杯”、“打开空调”）、视频交互数据（如远端用户与家人的双向高清视频通话）；

②控制流：云端向机器人下发任务指令（如“规划从客厅到厨房的路线”、“调整机械臂抓取角度”）；网端负责人与机器人、机器人与人之间的通信及协同；

③状态流：机器人上传设备状态（如电量、传感器故障）、家庭环境状态（如门窗开关状态、燃气浓度）。

## 2) 休闲与服务场景

(1) 工作模式：“多机器人协同 + 云端/网端辅助”，本地机器人间通过直连通信（如 5G Sidelink）或智能体通信网络实现任务协作，云端提供位置服务、订单管理，网端提供跨网跨域通信支持。

(2) 业务流类型：

①协作流：机器狗与无人机的交互数据（如“取餐地点定位在北纬 30°15′，东经 120°30′”、“预计 10 分钟后到达”）；

②订单流：管家机器人与外卖平台的订单数据交互（如订单编号、

商品类型、取餐人数字身份)；

③状态流：机器人上传位置、电量、任务进度数据（如“机器狗剩余电量 50%，距离取餐点 1km”）。

### 4.3 具身智能机器人对移动网络的业务保障需求

基于上述场景的业务特征，可从业务流提取出三个业务 QoE 关键指标：感知能力、交互能力、执行能力，并可以继续向下分解为 KQI 指标，基于 KQI 指标可以推导出网络的保障需求包括带宽、时延、可靠性及其他保障需求。

比如在智能制造场景中，控制流的 KQI 指标中的数据码率较低，但执行响应和业务包可靠性要求高，因此与数据流相比，带宽需求低，时延和可靠性要求高。本节将列举在不同行业领域和个人领域的网络保障需求指标，而具体业务指标与网络需求的计算过程将在后续 4.4 节展开阐述。

#### 4.3.1 行业领域 (ToB) 网络保障需求

##### 1) 智能制造场景

###### (1) 带宽需求

①上行带宽：机器人需传输高清图像（如 4K 工业相机数据）、激光雷达点云数据（单台机器人每秒产生数 Gbps 数据）、力觉反馈数据，三维测量场景上行带宽需  $\geq 400\text{Mbps}$ ，加工装配场景需  $\geq 10\text{Mbps}$ ；

②下行带宽：云端 / 边缘端下发控制指令、模型参数更新数据，带宽需求相对较低，一般  $\geq 10\text{Mbps}$  即可满足。

(2) 时延需求:

①控制时延: 加工装配、移载对接等高精度场景, 端到端往返时延 (RTT)  $\leq 1\text{ms}$ ;

②数据传输时延: 三维测量、协同搬运场景, 时延需  $\leq 10\text{ms}$ ;

③协同时延: 多机器人任务调度与状态同步, 时延需  $\leq 20\text{ms}$ 。

(3) 可靠性需求:

①丢包率: 控制指令、力觉反馈等关键数据丢包率需  $\leq 10^{-6}$ ;

②可用性: 网络全年可用性需  $\geq 99.999\%$  (即每年中断时间  $\leq 5.256$  分钟), 避免因网络中断导致产线停工;

③抗干扰能力: 需抵御车间电磁设备 (如电焊机、变频器) 的干扰, 确保数据传输稳定。

(4) 安全性需求:

①数据隔离: 通过网络切片将生产控制流、数据监测流、管理流逻辑隔离, 防止非授权访问;

②数据加密: 机器人与云端 / 边缘端的交互数据 (如工艺参数、设备图纸) 需端到端加密 (如 AES-128 加密算法);

③身份认证: 机器人接入网络时需通过双向认证 (如基于 SIM 卡的硬件级认证), 防止伪造机器人接入篡改数据。

(5) 其他需求:

①高精度定位: 支持厘米级定位 (如基于 5G-A 的室内定位技术), 辅助机器人在复杂车间环境中精准导航;

②移动性管理: 机器人在车间内移动时, 网络切换中断时间需  $\leq$

10ms，确保任务连续性。

## 2) 公共安全与应急救援场景

### (1) 带宽需求：

①上行带宽：实时音视频回传（4K 视频需 10-20Mbps，多路视频并发需 $\geq 50$ Mbps）、激光雷达点云数据传输（ $\geq 100$ Mbps）；

②下行带宽：指挥中心下发控制指令、地图数据更新，带宽需求 $\geq 5$ Mbps。

### (2) 时延需求：

①音视频传输时延： $\leq 100$ ms，确保指挥中心实时掌握现场情况；

②控制指令时延： $\leq 50$ ms，避免因时延导致机器人动作滞后引发安全风险；

③应急指令时延：紧急情况下（如发现爆炸物），时延需 $\leq 20$ ms。

### (3) 可靠性需求：

①丢包率：音视频数据丢包率 $\leq 1\%$ ，控制指令丢包率 $\leq 10^{-5}$ ；

②网络覆盖：支持无公网环境下的通信（如通过卫星、Mesh 组网），确保救灾现场网络不中断；

③容错能力：单一路径中断时，网络需在 2s 内切换至备用链路（如无线 + 有线双冗余）。

### (4) 安全性需求：

①数据脱敏：回传的音视频数据中，需对无关人员面部进行模糊处理，保护隐私；

②抗攻击能力：防范网络攻击（如 DDoS 攻击、指令篡改），确

保机器人不被恶意控制；

③日志审计：记录所有数据传输与指令交互日志，便于事后追溯。

(5) 其他需求：

①多域通信：支持陆域（机器人）、空域（无人机）通信协同，实现空地一体化调度；

②快速部署：应急场景下，网络设备（如临时基站）需在 30 分钟内完成部署并提供服务。

### 3) 能源电力巡检场景

(1) 带宽需求：

①上行带宽：设备高清图像（2K 视频需 5-10Mbps）、温度 / 电流等传感数据（ $\leq 1\text{Mbps}$ ）、三维环境地图数据（ $\geq 50\text{Mbps}$ ）；

②下行带宽：巡检任务指令、固件升级数据，带宽需求 $\geq 2\text{Mbps}$ 。

(2) 时延需求：

①数据传输时延： $\leq 50\text{ms}$ ，确保云端及时获取设备异常数据；

②控制时延：机器人路径调整、传感器参数配置，时延需 $\leq 30\text{ms}$ 。

(3) 可靠性需求：

①丢包率：传感数据丢包率 $\leq 0.1\%$ ，控制指令丢包率 $\leq 10^{-4}$ ；

②环境适应性：网络设备需耐受  $-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$  温度、强电磁干扰、高湿度环境；

③连续性：偏远地区风电场、输电线路场景，需通过卫星通信补充覆盖，确保网络不中断。

(4) 安全性需求：

①接入控制：仅授权的运维人员与机器人可接入网络，防止非法获取电力设备数据；

②数据完整性：传输的数据需通过哈希校验，防止被篡改；

③应急加密：网络中断时，机器人本地存储的数据需加密，避免泄露。

(5) 其他需求：

①低功耗：机器人通信模块需支持低功耗模式(如休眠唤醒机制)，延长续航时间；

②远程维护：支持网络设备远程故障诊断与升级，减少现场运维成本。

#### 4.3.2 个人领域 (ToC/ToH) 网络保障需求

##### 1) 家庭服务场景

(1) 带宽需求：

①上行带宽：双向高清视频通话 (1080P 视频需 2-5Mbps)、激光雷达点云数据 (家庭环境建模需  $\geq 30\text{Mbps}$ )；

②下行带宽：云端下发的任务指令、模型更新数据 ( $\leq 10\text{Mbps}$ )、高清视频流 (如用户查看家庭画面需 5-10Mbps)。

(2) 时延需求：

①交互时延：用户语音指令到机器人响应，时延需  $\leq 300\text{ms}$  (避免用户感知卡顿)；

②控制时延：机器人抓取、移动等动作控制，时延需  $\leq 50\text{ms}$ ；

③视频时延：双向视频通话时延需  $\leq 200\text{ms}$ ，防止画面与声音不

同步。

(3) 可靠性需求:

①丢包率: 音视频数据丢包率 $\leq 3\%$ , 控制指令丢包率 $\leq 10^{-3}$ ;

②覆盖完整性: 消除家庭内网络死角(如地下车库、电梯、卫生间), 确保机器人始终在线;

③稳定性: 高峰时段(如家庭多人同时使用网络), 机器人业务带宽需优先保障。

(4) 安全性需求:

①隐私保护: 家庭音视频数据仅存储在本地或加密云端, 严禁未授权的第三方访问;

②身份鉴权: 用户通过指纹、面部识别等方式授权机器人执行敏感操作(如打开房门);

③病毒防护: 机器人操作系统需具备病毒查杀能力, 防止被恶意软件入侵。

(5) 多模态通信需求:

人与具身智能机器人, 网络个人助理与具身智能机器人, 具身智能机器人间, 应具备消息、文本、语音、视频、数据等多模态实时通信能力。

(6) 其他需求:

①网络切片: 为家庭机器人业务分配专属切片, 保障业务质量不受其他设备影响;

②低功耗: 机器人通信模块需支持动态电压调节, 降低设备功耗。

## 2) 休闲与服务场景

### (1) 带宽需求:

①上行带宽: 机器人位置数据 ( $\leq 100\text{kbps}$ )、任务进度数据 ( $\leq 1\text{Mbps}$ )、现场照片 ( $\leq 5\text{Mbps}$ );

②下行带宽: 订单数据、导航地图 ( $\leq 5\text{Mbps}$ )、用户指令 ( $\leq 100\text{kbps}$ )。

### (2) 时延需求:

①协同时延: 机器狗与无人机的任务协同, 时延需  $\leq 100\text{ms}$ ;

②交互时延: 用户与机器人的语音交互, 时延需  $\leq 500\text{ms}$ 。

### (3) 可靠性需求:

①丢包率: 订单数据、位置数据丢包率  $\leq 1\%$ ;

②漫游能力: 机器人随用户在不同区域 (如从城市到郊区) 移动时, 支持无缝漫游, 切换时延  $\leq 200\text{ms}$ ;

③抗干扰: 户外复杂电磁环境 (如高压线路、无线基站密集区域) 下, 数据传输稳定。

### (4) 安全性需求:

①数字身份认证: 机器人与无人机、外卖平台间的交互需通过数字身份验证 (如基于 DID 的身份标识), 防止订单篡改;

②数据销毁: 任务完成后, 临时存储的用户数据 (如位置、订单信息) 需自动销毁。

### (5) 其他需求:

①跨运营商跨网络互通: 支持不同运营商网络下的机器人协同

(如用户使用 A 运营商网络, 无人机使用 B 运营商网络), 以及跨运营商和 OTT 网络下的机器人协同;

②轻量化: 机器人通信模块需体积小、重量轻, 不影响其移动与续航。

### 4.3.3 具身智能机器人对网络保障需求指标

具身智能机器人对移动网络保障需求指标如下表所示。

表 3 具身智能机器人对移动网络保障需求指标

指标名称	行业场景 (ToB)	个人场景 (ToC/ToH)
端到端时延	加工装配 $\leq 1\text{ms}$ , 协同搬运 $\leq 10\text{ms}$ , 巡检 $\leq 50\text{ms}$	语音交互 $\leq 300\text{ms}$ , 视频通话 $\leq 200\text{ms}$ , 控制 $\leq 50\text{ms}$
上行带宽	三维测量 $\geq 400\text{Mbps}$ , 常规巡检 $\geq 50\text{Mbps}$	双向视频 $\geq 5\text{Mbps}$ , 环境建模 $\geq 30\text{Mbps}$
下行带宽	控制指令 $\geq 10\text{Mbps}$ , 模型更新 $\geq 20\text{Mbps}$	任务指令 $\geq 2\text{Mbps}$ , 视频流 $\geq 10\text{Mbps}$
丢包率	控制指令 $\leq 10^{-6}$ , 音视频 $\leq 1\%$ , 传感数据 $\leq 0.1\%$	控制指令 $\leq 10^{-3}$ , 音视频 $\leq 3\%$
抖动	$\leq 1\text{ms}$ (加工装配、应急救援), $\leq 10\text{ms}$ (常规场景)	$\leq 20\text{ms}$ (语音交互), $\leq 50\text{ms}$ (视频通话)

## 4.4 具身智能机器人业务指标与网络需求

### 4.4.1 具身智能机器人业务指标

基于上面各场景的详细业务流介绍, 我们可以归纳总结出网络关键能力需求。首先, 可从业务流提取出三个业务 QoE 关键指标: 感知能力、交互能力、执行能力。感知能力是指机器人从环境感知获取输入信息的质量, 具体包括视觉感知、音频感知和触觉感知。交互能力是指机器的交互是否贴近人与人交互体验或者完成任务是否像人一样自然, 主要包括执行响应、动作平滑性和操作体验。执行能力是

指机器人按预期、高效、精准完成核心任务的能力，主要对应到任务成功率指标。

进一步地，向下一级分解 KQI 指标，对应业务指标，如表 4 所示。具体地，按三类展开：

1) 感知能力与视觉、音频和触觉感知输入的质量强相关。视觉感知输入包括输入的分辨率、帧率、码率、FOV、景深和机器人视角数量等。音频感知输入主要包含音频码率，触觉感知输入主要指触觉点阵码率。

2) 交互能力中，执行响应主要与交互响应时延相关，动作平滑与机器人自身动作控制帧率相关，操作体验指人远程操控机器人时的控制响应时延。

3) 执行能力中，闭环任务的成功率与传输业务包可靠性相关，也与各模块间系统时间同步相关，例如，端云架构的快慢系统的时间同步指标（端侧快系统和云侧慢系统组成异频双系统，两者时间不一致可能导致模型推理失败）。

**表 4 业务指标映射关系**

QoE		KQI
感知能力	视觉感知输入	分辨率
		帧率
		码率
		FOV
		景深
		视角数量
	音频感知输入	音频码率
	触觉感知输入	触觉码率
交互能力	执行响应	交互响应频率
	动作平滑	动作控制频率
	操作体验	控制响应频率

执行能力	任务成功率	业务包可靠性
		系统时间同步

上述各 KQI 指标与实际业务需求相关，作为一个示例，表 5 给出了感知能力中音频、视频、触觉 KQI 数值及信号压缩率，可供参考。

表 5 具身智能机器人三类感知模态的 KQI 值示例

参数项	感知信号原始码率	感知信号压缩率	感知信号采样频率
音频	1Mbps	10	50Hz
视频	300Mbps (1080p)	50	10~30Hz
触觉	0.8Mbps (500 点阵)	1	10~100Hz

#### 4.4.2 具身智能机器人网络需求

基于上面给出的各业务 KQI 值，可计算出网络传输带宽、网络最大时延、网络时延抖动和网络包丢包率四个关键网络需求。基于感知能力的 KQI 项，网络传输速率的计算公式如下：

$$\text{上行最大速率} = \sum_{\text{模态}} \text{个数} * \text{感知信号原始码率} / \text{感知信号压缩率}$$

其中，个数是指对应模态在本体部署的传感器个数，感知源原始码率是指对应感知源经采样量化后的传输速率，感知源压缩率是对应感知源采用压缩算法获得的压缩比例。需要说明的是，由于各模态传输为时间上突发的 burst 业务形式，仅当所有模态数据在时间上对齐传输才会一起叠加，因此这里速率给的是最大值。

考虑到各模态采用 burst 形式传输，实际空口传输带宽可表示为：

$$\text{空口传输带宽} = \text{上行最大速率} * \text{体验系数}$$

其中，体验系数反映了业务在时间上存在占空比的影响，典型值

大于 1。

基于交互能力的关键 KQI 项，网络最大时延的计算公式如下：

$$\text{网络最大时延} = 1/\text{交互频率} - \text{大模型处理时延} - \text{终端处理时延}$$

其中，交互频率是指交互响应频率、动作控制频率、控制响应频率三者中选择最重要的一项，比如，交互响应频率，其倒数反映了整个系统设计的 RTT 时延要求；大模型处理时延是指，AI 大模型从接收完信号到输出指令的处理时延，即边/云端处理时延；终端处理时延是指整个本体接收到指令到执行闭环的时延，是终端处理时延的部分。如第三章所述，整个系统一般分为端、网和边/云三个模块，在整体系统 RTT 时延设计要求下，各模块按上式完成指标分解，网络最大时延包含了空口接入部分和核心网部分。需要指出的是，应用层业务下发的数据通常是一个包集合（包含各个模态），或者叫 PDU 集合，网络最大时延指标是从首包开始发射到尾包传输结束的时延统计。作为一个示例，在 5Hz 交互频率下，50ms 大模型处理时延，100ms 终端处理时延，对应的网络最大时延为 50ms。

执行能力中，任务成功率与系统时间同步和传输业务包可靠性两者相关。系统时间同步影响端云（快慢）系统模型推理的成功率与准确性，空口时延抖动需满足：

$$\text{网络时延抖动} = \max_{\text{模态}} \{ \text{RTT 最大时延} - \text{RTT 最小时延} \} < \text{端云系统时间同步余量}$$

其中， $\max_{\text{模态}}$  表示所有模态的 RTT 时延差中取最大值，端云系统时间同步余量由大模型快慢系统正确推理允许值确定。该抖动指标

的通信系统统计定义参考了 CCSA 行标,具体对应 YDT 4760-2024 的第 7.5 节。该抖动指标主要是为了使得端云模型输入同步,作为一个示例,端云系统时间同步余量为 20ms 时,网络时延抖动统计值应小于 20ms。

最后,对于传输业务包的可靠性而言,网络包丢包率的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{网络丢包率} &= 1 - (1 - \text{业务包集合丢包率})^{1/\text{空口包个数}} \\ &\approx \text{业务包集合丢包率} / \text{网络包个数} \end{aligned}$$

其中,网络包个数是指一个业务包集合的大小需要网络包传输的个数,一般地,一个业务包集合比较大,需要多个网络包承载传输。需要说明的是,以业务包集合为最小传输单元,可统计出业务包集合丢包率;以网络包为最小传输单元,可统计出网络丢包率。进一步地,网络丢包率可分模态,也可定义为所有模态的综合值,取决于业务包集合是单模态集合,还是多模态集合。作为一个例子,按 99% 的音视频业务丢包率,1~3 个空口包传输下,空口丢包率为 99%~99.7%。

为方便理解,介绍机器人本体感知需求的一个例子:音频的上行速率为 0.1Mbps,视频的上行速率为 6Mbps,触觉的上行速率为 0.8Mbps,网络最大时延要求 50ms,网络时延抖动指标 20ms,网络丢包率 99%~99.7% (按空口包个数 1~3 计算)。业务整体的上行速率由模态维度和每个模态速率需求决定,例如,双声道音频+3 摄像头视频的上行速率需求为 18.2≈20Mbps,双声道音频+6 摄像头视频+10 面触觉的上行速率需求为 44.2≈45Mbps。

基于上面机器人业务指标到网络指标的映射关系，可以建立网络能力对业务性能影响评估体系，进而形成标准指导网络能力建设。尤其对于整体上行速率，回顾第三章机器人智能化 L1~L5 水平，随着智能化水平升级，本体感知能力逐步提升，模态维度增多，单模态精度也变高，以助于完成更复杂任务。同时，多模态信号回传的上行速率需求也在相应增加。

1) 数字身份：移动通信网络从面向均质化手机 SIM 认证接入，到面向具身智能机器人，提供数字身份分配、网络接入及认证授权能力，实现以人为中心的管理，面向具备多样性、自主性特征的具身智能机器人，实现动态授权。

2) 通信协作：移动通信网络应具备具身智能机器人的运营商网络内、跨运营商网络、跨运营商和 OTT 之间的协作，跨协议实现不同生态具身智能机器人间生态互通，以及人与具身智能机器人，网络个人助理与具身智能机器人，具身智能机器人间的协作。

3) 生成式组网：具身智能机器人广域范围内互联互通与任务协作中，移动通信网络应理解用户意图，结合具身智能机器人业务类型和应用场景，实现动态自组网，经过授权的具身智能机器人加入群组，并根据任务需求，动态生成群组东西向转发策略。具身智能机器人通过移动通信网络以东西向会话方式，实现具身智能机器人之间的直接交互，减少消息在云端迂回，提升智能体通信的整体效率。

4) 消息路由：具身智能机器人与移动通信网络建立连接，通过连接复用降低连接创建和维护的开销，用户面节点 MESH 组网，基

于订阅/发布机制感知端侧的数据分发需求，或组播组方式，向有相同订阅的具身智能机器人统一分布消息，降低端侧计算和网络开销。机器人之间不直接基于 IP 地址通信，保护用户隐私，规避安全攻击。

5) 多机多模态实时通信：移动通信网络应具备人与具身智能机器人、网络个人助理与具身智能机器人以及具身智能机器人间的实时多模态通信能力，包括消息、语音、视频、文本、数据等。

6) 全球漫游：支持智能体通信全球可达，实现具身智能机器人在不同国家与地区自动接入本地优质网络，实现低延迟、高可靠的全球通信可达，有效保障机器人在巡检、远程操作、多机协同等任务中的实时响应与连续通信。

7) 能力发布发现：移动通信网络应具备具身智能机器人能力发布和能力发现能力，作为能力扩散的媒介，把具身智能机器人能力高效提供给使用者，并能基于权限或子网范围按需对外发布。网络构建具身智能机器人能力汇聚平台，实现按需搜索匹配所需服务与任务协同。

8) AI 流量 QoS 保障：根据具身智能机器人特征、任务特征，动态生成网络的 QoS 策略，满足任务需求。

9) 意图交互：根据用户、具身智能机器人的意图，提供网络能力实现智能体通信，如建立任务级组网等。

具身智能机器人已在制造、巡检、展馆等 ToB 和家庭等 ToC 场景开始逐步走向商用，带来全新的网络能力需求。网络需求主要来自感知信号的回传，用于云端大模型进行意图理解和任务规划，感知信

号要求可参考人类能力定义，最终可导出网络能力需求。比如，参考视力定义视频分辨率，进而转化为速率需求，参考人类反应速度定义网络 E2E 时延指标，参考人类出错率定义网络可靠性要求。最后，需要网络各层分解整体指标，达成具身智能机器人业务能力要求。结合用户接入、认证、漫游、组网等能力最终形成具身智能机器人网络能力全景。

## 5 具身智能机器人移动通信网络技术体系与关键技术

基于第四章对具身智能机器人典型场景、业务特征及其网络需求的分析，为满足其差异化、高可靠的通信保障要求，需要构建与之相匹配的移动通信网络技术体系。本章将系统阐述面向具身智能机器人的网络关键技术架构，并针对其核心能力与典型场景，梳理技术体系和关键技术。

具身智能机器人的智能化和核心能力分不同的节奏演进，为匹配具身智能机器人的演进，网络技术能力也在持续演进，网络能力的整体演进趋势如下图所示。

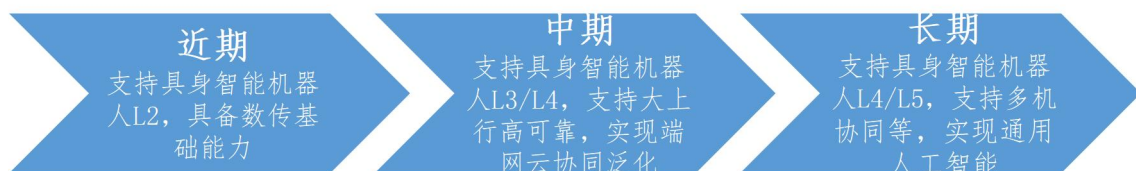


图4 具身智能机器人网络能力演进趋势

近期：支持具身智能机器人 L2 的相关能力，包括远程遥控，智能化原子能力等。对网络的需求，上行速率 $\geq 5\text{Mbps}$  支持数采等数据提取、下行速率（10~50Mbps，指令可靠性 99.9%）支持远程 OTA 升级，端到端时延与可靠性（100ms~200ms，97%~99%以上）支持遥控等操作能力。

中期：支持具身智能机器人 L3/L4 的相关能力，包括部分场景的泛化端网云协同智能化能力。对网络的需求从尽力而为走向了确定性连接，且包含局域和广域的确定性，确保推理的成功率。预计广域网络需求为，上行速率 20Mbps，上行可靠性 99%，下行速率 50Mbps+，端到端时延 50ms，端到端可靠性 99%+等。

长期：支持具身智能机器人 L4+相关能力，包括多机协同工作，场景泛化性任务等。相对中期演进，预计未来数据量和带宽将进一步增加，上行速率 $\geq 100\text{Mbps}$ ，下行速率 100Mbps~300Mbps，端到端时延 20ms，端到端可靠性 99%，支持具身智能机器人东西向会话横向连接。

具身智能机器人的实现依赖于一个多层次、异构融合的通信体系。这个体系不仅要确保机器人内部毫秒级的精准控制，还要保障机器人之间、机器人与云端之间高效、可靠的信息交互。其关键技术可从管道能力、用户管理、平台与计算能力等维度进行解构。其业务需求的主要特征如下：

1) 上下行带宽需求不对称：与消费互联网以下行为主不同，机器人需要将大量感知数据上传，上行带宽需求远大于下行。

2) 确定性与时延敏感性：控制环路、力反馈等业务对时延和抖动有严格上限，超出阈值直接导致任务失败或安全事故。

3) 极致的可靠性要求：在工业控制、应急响应中，通信中断或指令错误可能造成巨大损失，需实现“五个九”（99.999%）甚至更高的可靠性。

4) 业务流的多样性与异构性：同一系统中，控制流、感知流、管理流等共存，其业务需求差异巨大，需要精细化的资源调度。

5) 移动性与业务连续性：机器人在执行任务中持续移动，需要保障全程业务可靠连续。

6) 安全与隐私：既要防止机器人被恶意控制造成物理伤害，也要保护家庭环境音视频、企业生产数据等敏感信息绝不泄露。

## 5.1 具身智能机器人通信网络关键技术

在数字经济的浪潮中，移动通信技术从实现“万物互联”向赋能“万物智联”进行关键战略转变。这一深刻变革不仅依赖于终端与云端的强大算力，更对作为底层支撑的移动网络提出了高性能、高可靠性的严苛要求。5G/5G-A 并非 4G 的简单线性升级，而是一次深刻的技术革命，包含 eMBB、URLLC、UCBC、eMTC、HCS 等六大维度升级。

当前，依托于 5G 网络初步实现的广域连续覆盖，可以为早期的 AI 应用提供基础的网络连接能力，打通“端”到“云”的业务流程。例如，保障智能摄像头采集的图片/视频流能够上传至云端 AI 推理平台，并接收处理结果。然而，在此阶段，网络主要提供的是“尽力而为”（Best-

Effort) 的服务，上行速率和网络时延存在较大波动，无法提供严格的确定性保障。这种模式虽然降低了 AI 应用的初始门槛，助力产业界完成了技术可行性的初步验证和商业模式的早期探索，但也为后续网络能力的升级方向划定了清晰的起跑线。

具身智能机器人的兴起，对移动网络提出了远超连接本身的更高维度的要求。其核心在于赋予智能体（如自主移动机器人、智能网联汽车、增强现实设备等）感知、认知、决策并物理作用于现实世界的能力。这意味着，移动网络不能再仅仅是一个被动的数据传输管道，而必须演进为嵌入在智能体与环境之间的、高可靠、低时延的“神经纤维系统”或“系统级器官”。具身智能机器人的每一个决策闭环，从高保真的环境感知、复杂的云端或边缘智能推理，到最终的执行器控制指令下发，都强烈依赖于网络的实时性与稳定性。任何微小的数据包丢失、时延抖动或连接中断，都可能直接导致决策失误、动作异常，甚至引发严重的安全事故。

因此，面向具身智能机器人的下一代网络解决方案，需能够提供端到端的确定性性能保障，并深度融合通信、计算与控制能力。中近期内，产业界应立足于 5G-A 技术的持续增强，通过灵活的架构优化与技术增强，为具身智能机器人应用提供可行、高效的网络支撑；长远来看，则必须面向网络架构进行全面突破，构建原生支持人工智能、内生智能的新型移动通信网络架构，最终实现“网络即智能体”的终极目标，为全域智能时代的到来奠定基石。

### 5.1.1 近期解决方案：5G-A 基础连接能力

### 1) eMBB 增强型移动宽带能力:

具身智能机器人作为嵌入物理世界的智能终端，其核心能力依赖于对环境的实时感知与交互。这首先产生了对网络上行能力的极致需求，支持传感器回传云端“大脑”进行处理与决策。5G 的增强型移动宽带（eMBB）通过大规模天线技术（Massive MIMO）、毫米波通信、高阶调制（如 1024QAM）、波束赋形（Beamforming）等关键技术，实现了在峰值速率、用户体验速率和频谱效率等关键指标上相较于 4G 的数量级跨越，带来数百 Mbps 的极高的上行传输容量，使得 eMBB 能够轻松承载具身智能机器人上传的感知数据流，如同为其构建了一条超宽、通畅的“视觉神经”。

### 2) 低时延高可靠能力:

除了海量的感知数据传输，具身智能还需要将控制指令在极短的时间之内准确无误地在端云之间完成交互，任何微小的延迟或数据丢失都可能导致任务失败甚至安全事故。5G 的原生能力 URLLC 则是完美匹配了这一需求。为了达成局域毫秒级时延与 99.99% 以上可靠性的极致目标，URLLC 从无线空口到核心网进行了一系列深度优化。在空口，它引入迷你时隙（Mini-slot）调度和免授权调度（Grant-free）技术，省去了终端申请资源的等待过程，将上行传输时延降至最低；同时，通过 PDCP 层数据包复制与双连接技术，让同一数据包经由两条独立无线路径发送，以空间冗余对抗信道波动，极大提升了传输可靠性。此外，为避免复杂环境中设备移动或者网络切换出现短暂中断，DAPS（Dual Active Protocol Stack）/CHO（Conditional Handover）与

“5G/Wi-Fi 双链接保活”保障了跨 AP/小区时视频“0 丢帧”与控制不断连；同时通过分层 QoS 和自适应速率在拥塞时优先保障控制数据不受影响，视频按需自适应，从而形成连续、可控、稳定的远程临场体验。在网络架构上，核心网用户面功能（UPF）下沉至园区边缘是至关重要的一环，它使得数据在接入基站后即可就近处理，无需绕行至遥远的中心机房，将端到端时延显著降低至 5 毫秒以内。这种“云-边-端”协同的初级形态，为多智能体协同作业、基于云端视觉 AI 的实时导航以及遥操作等复杂应用提供了坚实的网络确定性保障，让具身智能在动态环境中能够安全、精准、自如地行动。

### 3) 模态级业务识别与差异化服务保障：

实现差异化服务保障的首要前提是网络能够智能、精准地识别出具身智能业务流。基于五元组（源/目标 IP 地址、端口号、传输层协议）、数据网络名称（DNN）、切片选择辅助信息（S-NSSAI）以及报文关键字等应用特征，实现毫秒级地识别出关键业务特征，结合边缘部署的智能板，可以针对业务流进行更进一步的细化，以支撑多模态业务更精细的保障。

识别出多模态的业务流之后，网络策略控制系统将自动触发预配置的规则，为这些关键数据流分配高的调度优先级并将其绑定至预先创建的、资源隔离的专属网络切片上。这确保了具身智能的关键业务在任何网络负载情况下都能获得优先使用的资源，避免公众互联网业务流量的冲击，从而为上层应用提供可预期的网络服务质量。同时可以实现针对多模态的业务量，生效不同的保障策略。例如针对感知数

据流配置大上行传输策略，最大化利用网络资源，实现数百 Mbps 的传输容量，针对控制消息流配置低时延高可靠传输策略，充分提升传输可靠性，实现空口下行 8~20ms @99.99%可靠性。

#### 4) 上行能力为核心的能力增强：

具身智能应用的典型业务的共同特征在于产生了远高于下行数据量的上行数据洪流，因此，网络增强方案必须将重点放在显著提升上行传输能力上。具体将通过规模部署上行载波聚合（CA）与辅助上行（SUL）两项关键技术来实现：前者通过捆绑多个频谱载波以聚合带宽，有效提升上行传输速率；后者则利用专有低频段频谱扩展上行覆盖范围与容量，尤其在边缘区域发挥关键作用。结合中频重耕所构建的大上行目标网络，能够为 5G 系统提供更高的上行资源储备，最高可支持 1Gbps+上行峰值传输速率，极大拓宽终端与云端的传输通道，为下一阶段 Mobile AI 业务的大规模发展奠定坚实的网络基础。

#### 5) 高精度定位：

基于蜂窝网络实现 UTDOA 和 AOA 协同，由 UE 发送上行 SRS 信号，一个 gNodeB 的多个 TRP 接收该 SRS 信号并测量 TOA（Time of Arrival）和 AOA（Angle of Arrival），gNodeB 将测量结果上报给 LMF，LMF 根据 AOA 以及两两 TRP 间的 TDOA（Time Difference of Arrival）并结合已知的 TRP 位置计算 UE 位置，达成高精度定位，LOS 场景下精度为 3m@90%。

#### 6) 分层 QoS：

现有 5G 网络 QoS 机制的最小粒度为 QoS Flow，即 QoS Flow 内

针对每个数据包提供相同且独立的 QoS 处理。而根据不同的业务场景, 同一 QoS Flow 中不同数据包 QoS 处理需求可能不同, 因此 3GPP 引入 PDU Set 的概念。PDU Set 为携带应用层同一个信息单元的一个或多个 PDU 集合。为了保障时延敏感类业务的传输时延和可靠性, 可以基于分层 QoS 解决方案实现更小粒度的基于 PDU SET 的 QoS 处理机制。针对不同业务场景, 核心网完成业务特征感知, 将 PDU Set 相关信息传递给网络侧, 网络侧通过差异化调度优先级、帧重要性识别与丢弃等处理, 实现高精度差异化保障, 以节省空口资源、提升业务体验。

### 5.1.2 中期解决方案: 5G-A 增强与优化 (1~3 年)

在现有 5G-A 网络基础设施之上, 充分挖掘和引入了面向具身智能机器人上行、低时延和高可靠等核心业务需求的关键增强特性, 为具身智能机器人提供可用、可靠、可管理的网络服务。

#### 1) FSA 多载波增强:

3GPP R18 协议引入的灵活频谱接入 (Flexible Spectrum Access, FSA), 旨在解决 5G 网络从双频 (1T+1F) 向多频 (多 T+多 F) 演进时, 因传统 RRC 重配导致的载波变更延迟问题。通过全量配置载波并利用 DCI 动态选择最优载波组合, 实现上行数据的全时隙传输, 达到 TTI 级的动态智能寻优, 为具身智能机器人提供低时延、高可靠的实时上行链路, 同时为实时响应与连续作业 (如遥操作、环境感知) 提供了决定性通信保障。

#### 2) 系统间多链路协同:

5G 与 Non 3GPP 协议之间，例如 5G 和 Wi-Fi 之间发生切换，会由于业务流 IP 地址不一致，导致数秒的业务中断，基于 ATSSS 方案（Access Traffic Steering, Switching and Splitting），通过 TN3IWF（非 3GPP 接入网集成功能）技术可以支持 3GPP 与非 3GPP 协议数据多链路动态调度，可达成具身智能机器人在 Wi-Fi 与 5G 网络间切换时保持会话的连续性，极大的提升了具身智能机器人在移动性场景中业务的可靠性，保障了具身智能机器人在复杂环境（如跨区巡检、移动人机协同）中移动时，关键任务不受网络切换影响。

### 3) 上行 3Tx 增强:

为提升上行链路传输性能，3GPP R19 协议支持在单一载波上实现上行 3 发射天线（3Tx）能力。通过引入新定义的 3 天线非相干码本、3 端口探测参考信号（SRS）资源，以及支持 3T3R/3T6R SRS 天线选择等关键技术，显著增强了具身智能机器人上行链路的信道容量与传输鲁棒性，为具身智能机器人高维感知数据（如多路高清视频、点云）的实时、高可靠上传提供了关键能力保障。

### 4) 动态 QoS:

针对无线信道波动性，3GPP R19 支持应用程序根据实时网络状况动态调整业务流量特征，以改善具身智能机器人的业务体验。通过动态资源适配，提升具身智能机器人在真实场景中的任务执行成功率与效率。核心网可通知无线接入网对指定 QoS 流执行上行速率控制；无线接入网则通过下行 MAC 控制单元（MAC CE）向用户设备（UE）指示各 QoS 流的推荐上行速率。无线接入网评估指定 QoS 流的可用

上下行比特率，并通过 NG-U 接口将满足的比特率阈值上报至用户面功能(UPF)。UPF 还可进一步将可用比特率信息传递至应用功能(AF)或网络开放功能 (NEF)。

### **5) 子带全双工:**

子带全双工是 5G-A 及演进中的关键无线技术，其通过在系统带宽内动态划分与灵活配置子带，使基站在部分重叠的频率资源上同时进行发射与接收，实现在现实场景下的“同时同频”双向通信。该技术可显著提升网络频谱效率、降低传输时延，并能依据业务需求动态调整上下行资源配比，提高网络灵活性与资源利用效率，使得具身智能机器人能在移动中连续同步上传环境感知数据与接收控制指令，显著提升诸如实时视频建图与远程操控等复杂任务的流畅性与可靠性。实现子带全双工需克服自干扰与交叉链路干扰等关键挑战，主要依赖射频/数字干扰消除、大规模 MIMO 波束成形及智能干扰协调等技术予以解决。

### **6) 网络智能化管理:**

随着网络复杂度的提升和业务需求的动态变化，传统的人工运维模式难以满足要求。引入基于人工智能的无线网络智能运维平台变得至关重要。该平台能够对全网流量、时延、抖动、误码率等海量数据进行实时采集与分析，利用机器学习算法精准预测网络可能出现的拥塞点和性能劣化趋势，并实现动态、自适应的网络参数调整。例如，系统可以自动优化特定小区下具身智能终端的调度策略，或动态调整波束赋形方向以跟踪移动中的机器人，从而在面对无线环境变化和业

务波动时，依然能为具身智能机器人业务提供高度稳定的服务质量（QoS）保障，实现从“被动响应”到“主动保障”的运维模式转变。

### **7) 无线确定性网络架构：**

具身智能机器人对移动网络的要求极高，它融合了工业自动化对确定性时延和移动设备对无线灵活性的双重需求。传统的“尽力而为”网络无法满足要求，因此无线确定性网络，特别是基于 TSN（时间敏感网络）与无线技术融合的方案，成为核心发展方向。具身智能机器人的网络通信分为实时控制指令、多传感器数据回传、状态信息与安全数据、非实时数据等，“确定性”的核心在于数据包不仅在规定时间内到达，而且其到达时间的波动（抖动）必须被严格限制在一个极小的范围内。广域场景下，可以采用 5G(URLLC)+TSN 技术，具体技术点包括：1) 5G 高精度时钟分发与资源预留调度；2) URLLC 的 mini 时隙、授权辅助接入和多链路冗余；3) 网络切片支持专用资源预留。

### **5.1.3 长期解决方案：移动通信未来网络持续创新**

长期的目标是攻克短期方案无法解决的根本性挑战，例如在广域移动环境下提供无缝的确定性保障、实现通信与感知及计算的深度一体化、支持海量智能体间的高效自主协同等。这要求我们超越现有网络框架，构建一种革命性的、原生智能的新型网络架构。

#### **1) 具身智能机器人通信网络架构：**

面向 ToB 和 ToC/ToH 的具身智能机器人通信协作场景，其业务流程主要包括：具身智能机器人向移动通信网络申请数字身份并注册到网络中，发布其属性能力。发起方机器人向移动通信网络发布任务

意图，移动通信网络基于能力发现机制找到与之任务需求匹配的协作机器人，并基于接收方机器人的数字身份进行路由转发，同时建立消息、语音、视频、数据等的多模态通信通道，支持机器人任务的协同。面向具身智能机器人协同的智能体通信主要包含以下关键技术：

### （1）数字身份体系能力

具身智能机器人通信网络是以用户主控 SIM 卡永久标识为中心，以运营商码号系统为基础向前演进，其他附属终端智能体身份可灵活派生的数字身份体系。该数字身份体系在兼容既有的标识体系基础上，拓展引入了各个层级终端 Agent 所包含的属性信息，体现 Agent 不同的软硬件能力并支持差异化业务授权，并通过引入凭据机制，为运营商第一方业务和第三方业务提供方提供的属性信息进行可验证背书。

数字身份体系包括如下 5 个能力：

①泛在接入：随着终端形态拓展，数字身份机制成为现有 SIM 体系的有效补充，支持 non-SIM 智能体、虚拟数字人、具身智能机器人等新型终端的身份派生与接入认证。

②用户关联：智能体设备的长时间在线、高度自主化及可代理用户执行任务的特性，要求全新的安全管理机制。

③技能感知：随着通信对象从人到智能体的转变，终端 Agent 不再是传统均质终端设备，网络需要能够感知和理解智能体的能力属性，以便提供更好的差异化服务保障。

④业务灵活：网络服务从均质化走向个性化，传统静态授权机制已无法满足智能体对个性化网络资源调度及编排的需求。

⑤跨域互通：全网架构从封闭走向相对开放，数字身份技术在保障通信网络安全的基础上，支持跨网络、跨域的数字身份互通。

## （2）能力发布发现

具身智能机器人能够在移动通信网络进行能力注册与发布，并基于能力和授权进行智能体间的发现。

具身智能机器人依托于移动通信网络为其提供能力在移动通信网络中的发布，以实现能力声明和跨网络、跨厂商和跨生态的发现功能，而无需依赖特定生态的提前共建，从而有望打破传统协同模式中对专属平台或封闭生态的依赖限制。

跨厂商/跨生态能力发布发现包括：

①能力信息上报：具身智能机器人能够通过移动通信网络接口，在能力发布请求中提供其身份和能力描述，包括核心功能、运行条件限制、通信协议和方式以及安全隐私等关键信息。

②能力档案生成：具身智能机器人能够在移动通信网络中生成可以被识别与调用的能力档案，同时依托移动通信网络的分布式架构实现跨厂商/生态能力资源的精准曝光。

跨生态能力发现：在具身智能机器人请求能力发现其他智能体时，移动通信网络通过解析请求包含的任务意图，依据智能体的能力档案，对智能体进行能力匹配，并响应请求方式可以理解的智能体描述文件。

## （3）生成式组网

具身智能机器人能够在移动通信网络进行广域范围内互联互通与任务协作。

具身智能机器人可以向网络发送意图，移动通信网络通过解析具身智能机器人意图，结合具身智能机器人业务类型和应用场景，实现动态自组网；具身智能体机器人也可以在通过跨厂商/跨生态能力发布发现过程中获取其他组成员具身智能体机器人数字身份标识，并携带组成员数字身份标识向发起组网请求。移动通信网络为请求方和请求方所携带的组成员动态组网。

经过授权的具身智能机器人加入群组，并根据任务需求，动态生成群组东西向转发策略。具身智能机器人通过移动通信网络以东西向会话方式，实现具身智能机器人之间的直接交互，减少消息在云端迂回，提升智能体通信的整体效率。

生成式组网包括如下内容：

①流粒度组网：应对同一系统中控制流、感知流、管理流等多类型数据流共存的复杂场景——不同数据流的 QoS 需求存在显著差异。为适配这种差异化需求，流粒度组网需依托移动通信网络的动态调度能力，结合具身智能机器人的组网模式实现精细化资源分配。

②跨运营商组网：跨运营商组网是具身智能机器人实现广域互联互通与跨场景任务协作的关键前提，其核心目标是打破不同运营商之间的技术壁垒与资源隔离，实现跨运营商具身机器人集群的无缝协同与差异化数据流的精准传输。

③不限制区域组网：摆脱传统区域组网对地理范围、网络归属的约束，对于跨城市、跨国家的远距离协作，能够通过统一的网络架构与调度机制，实现机器人集群的动态组网与协同作业，为具身智能机

器人在全球供应链协同、跨国应急救援、大范围环境监测等跨区域场景的应用提供可能。

#### (4) 任务协同

单个智能体在面对复杂任务和动态环境时仍存在能力上限，面向任务的管理成为多智能体协议中的重要环节。

任务协同需要包含如下能力：

①任务表示与分解：定义任务描述的统一格式可以确保参与任务执行的智能体对任务理解的一致性，中间结果的标准化定义可以明确参与任务执行的智能体的输出结果格式，如文本、文件或数据流。

②通信与状态管理：支持结构化消息传递，定义消息类型如用户请求、任务通知和消息格式如 JSON-RPC，支持异步通知推送，确保智能体之间交互的实时性。

③任务生命周期管理：需要考虑在任务执行过程中的状态描述，例如启动、运行、挂起（等待进一步的输入或其他智能体的执行结果）、成功、失败等，同时支持任务状态更新、状态查询和中间结果获取。根据任务执行时长，任务还可能分为一次请求响应交互即可完成的短期任务和需要多轮交互或较长时间等待的长期任务。

④上下文共享：在将任务分发给执行智能体时，智能体可能会包含与任务相关的上下文信息，例如最终用户的联系信息、用户的历史偏好信息以及其他必要的对话数据，提高任务执行的效率和准确性。

⑤安全与隐私：参与任务执行的智能体需要遵循任务描述最小化原则，即每个智能体应该只接收完成其任务所需的最少的、必要的信

息，以防止未经授权访问敏感信息。此外，上下文共享可能会对用户的隐私产生影响，需要考虑上下文共享范围的限制。

#### (5) 实时多模态通信能力：

为了支撑具身智能机器人间实时多模态通信能力，需要移动通信网络具备基于码号的寻址路由、多模态媒体协商和多模态媒体传输能力。

①基于码号的寻址路由：码号是运营商实现人人、人物互通的重要资源，码号路由相比 IP 和域名等直接通信方式，具备天然的全球互联互通、可信溯源、业务体验更稳定等优势。将码号嵌入数字身份体系，并以此进行具身智能体间的通信与协作，可构建具身智能体间广域互联互通、可信协作基础通信能力。

②多模态媒体协商：当具身智能机器人需要传输实时多模态媒体，如实时音频和视频流时，需要一个专用的媒体通道来传输这些数据流。同时，不同智能机器人支持的音视频编解码可能不同，因此，在传输之前，具身智能机器人之间需要进行音视频编解码的协商。

③多模态媒体传输：多模态数据种类繁多，具身智能机器人对不同类型的多模态数据传输网络 QoS 需求各不相同，这要求不同的模态数据采用不同的传输流。为了减少因流连接带来的 IP 端口资源开销，需支持多流复用功能，并为不同流设置不同的传输优先级。同时，在多智能体协同处理任务场景，为了更好的完成任务，同一个智能体会收到音频、视频、文本等不同的媒体信息，为了更好的理解和完成任务，需要多模态媒体传输同步和协同。不同模态数据也可能需要协

调传输策略，如当音频和视频流同时传输时，若因连接带宽下降导致视频帧冻结，需自动降低视频分辨率和比特率，以确保音频流的传输质量。

#### （6）跨网络跨协议多实体通信协作

为实现智能体在复杂环境中的广泛协作，其通信技术必须突破现有的网络与生态壁垒。这要求构建一个跨网络、跨协议的融合通信框架。具体而言，在“跨网络”层面，需实现智能体在不同运营商的基础网络之间无缝漫游与切换，并打通运营商网络与互联网 OTT 服务之间的高效协作，确保通信连接的广度与韧性。在“跨协议”层面，核心在于解决不同厂家、不同技术生态之间的互联互通，通过建立开放、统一的标准与接口，或者协议协商，使得用户的智能体（如机器人）能够与来自其他厂家或其他异构网络中的智能体进行无缝、安全的数据交换与任务协同。多实体协作包括人与具身智能机器人，网络个人助理与具身智能机器人，具身智能机器人间的协作。

#### （7）消息路由

机器人首先与移动通信网络建立稳定连接，并采用连接复用以显著降低连接建立与维护的开销。在核心网内部，用户面节点采用 MESH 组网结构，通过订阅/发布机制动态感知并响应端侧的数据分发需求。对于具备相同订阅目标的机器人群体，网络侧可启用组播方式进行统一消息推送，从而有效降低端侧的计算负荷与整体网络流量。此外，该机制规定机器人间不直接基于 IP 地址进行点对点通信，此举一方面保护了用户的位置隐私，另一方面也从网络架构层面规避了

因暴露 IP 地址而可能引发的直接网络攻击，增强了系统的整体安全性。

#### （8）AI 流量 QoS 保障

为满足具身智能机器人多样化任务的差异化需求，移动通信网络需具备智能化的 QoS 动态保障能力。该能力核心在于网络能够实时感知机器人的本体特征（如移动性、算力）与任务特征（如时延、可靠性要求），并据此自动生成与下发差异化的服务质量策略。通过对带宽、时延、抖动及可靠性等关键指标的精细化控制，实现对关键任务数据流的端到端保障，确保从高精度操作到环境感知等各类机器人业务的服务质量。

#### （9）端网协同

①意图交互：支持具身智能机器人以自然语言等非结构化形式从端侧上报任务意图，取代传统依赖结构化接口的方式，并由网络侧提供高精度的意图解析与执行机制，从而准确理解端侧指令并转化为可操作的服务流程。

②端侧无感调用：确保具身智能机器人在使用移动通信网络能力时，无需针对特定能力进行专门适配或仅需极简配置，即可获得一致性的增强体验。例如，网络侧算力资源可无缝注册至端侧环境，使机器人能够像调用本地资源一样，无障碍地调度与使用网络算力。该机制的关键在于推动网络算力与具身智能机器人的原生融合，从而在系统层面实现算力资源调用的通用性与统一性。

### 2) 语义通信：迈向高效智能交互

随着具身智能感知能力需求不断升高，具身智能机器人传感器密度也在持续提升，视觉、点云、触觉等传感器的增多导致需上传的数据量呈指数级增长。一台配置 10 个视觉传感器的人形机器人每分钟将产生 1GB 的原始数据，传统“全量传输 + 云端/边缘推理”的模式必然导致带宽拥塞、覆盖受限，尤其是小区边缘用户。

作为 AI 与通信深度融合的下一阶段，语义通信旨在传输信息背后最关键的“意义”，而非原始的数据比特。例如，仅需传输“前方有障碍物，建议绕行”等指令级语义信息，替代庞大的视频或点云数据流，从而以极低的带宽占用实现高效、准确的机器间协同，将通信效率提升数个数量级。典型的语义通信的传输模式包含以下 2 种。

(1) 传输模式 1：为实现具身智能云端/边缘推理的实时性，用户通常利用 Tokenizer 从原始输入数据中提取关键相关语义特征，将其传输至云端、边缘或网络侧服务器以支持 AI 推理。这一过程既能显著降低数据传输量，也可以降低由于云端/边缘拥塞导致的推理时延。得益于语义特征间的上下文关联特性，传输过程中出现的错误或丢失问题可通过预测机制实现补偿。

(2) 传输模式 2：借助深度学习模型的特征提取与自适应编码能力，Token1 由用户设备进行语义提取后，经网络传输至服务器端，用于两种核心场景：一是重建原始 AI 输入数据，二是对恢复数据进行二次 Token 化处理，为后续 AI 推理提供基础特征支撑。

由于具身智能推理通常针对特定任务，只需理解输入信息中的相关信息，因此部分输入到推理模型中的应用数据具有一定的错误容忍

性。在随机丢包的情况下，正确的语义传输，仍可达到可接受的 AI 推理质量。

无线传输可以利用具身智能任务推理过程中语义传输的可容错特性提升信息交互效率，通过两层优化实现效率跃升：在应用层提取多模态数据的关键特征，根据传输网络反馈的实时传输状态调整高感知质量的信号表征；在传输层则利用可容错特性，通过网络的动态资源调度，优先保障重要语义信息的低时延传输，从而整体提升具身智能的覆盖和容量。

### 3) 空间智能与通感一体化

在复杂多变的环境中，具身机器人需要具备空间感知能力，增加视频感知的景深维度，获知周围物体的距离信息。该信息可用于实时导航功能，实现视觉语言导航，也可用于构建世界模型，完成基于立体视觉的训练阶段。未来网络将打破通信的壁垒，实现原生通感一体化设计，为具身机器人的空间智能增加基站感知途径。具体而言，基站（或接入点）将不再仅仅是数据收发设备，而是演变为集成了强大感知能力的“通感一体”节点。它们能够利用自身发射的无线信号（如毫米波）对周围环境进行高精度、三维、实时的成像、测距与定位，从而为覆盖范围内的所有具身智能体提供一个共享的、远超其自身传感器能力的“上帝视角”高精度环境地图。这极大地增强了智能机器人（尤其是成本、功耗受限的设备）的环境感知与理解能力，并降低了其对昂贵机载传感器的依赖。同时，计算能力将作为一种原生、可调度的资源深度嵌入网络基础设施的各个层面（终端、边缘节点、云

中心)。网络能够根据任务的实时需求，智能地、动态地将计算负载在“端-边-云”之间进行最优分配与协同执行，实现通信资源与计算资源的高效联合优化。

#### 4) 内生 AI 网络

人工智能将成为未来网络架构的内生要素。网络本身将具备强大的 AI 能力，能够实时构建并运行一个与物理网络完全映射、并持续同步的数字孪生网络。这个虚拟孪生体成为一个绝佳的测试和预测平台，允许网络运营商在投入实际资源前，对新的调度算法、网络配置或故障预案进行无损的模拟与推演。更重要的是，它可以提前数百毫秒甚至更长时间预测网络状态的变化，从而为具身智能机器人提供“预期性”的、端到端的确定性资源保障（如提前预留带宽、动态规划最优通信路径）。在空口设计上，将出现 AI 原生空口，其波形、编码、调制等关键参数可能由 AI 根据实时信道条件和业务特征动态生成与优化，从而实现前所未有的频谱效率和传输可靠性。

#### 5) 平台与计算能力

通信与计算融合：通过移动边缘计算（MEC）技术，网络将强大的 AI 计算与数据处理能力部署至靠近机器人的边缘节点。这使得机器人无需将海量数据回传云端，即可就近调用边缘算力完成实时环境感知、路径规划和模型推理等复杂任务，实现低时延的端一边智能协同。

传统架构中通信与计算/AI 推理过程相互独立，由于通信链路的波动性以及通信和计算/AI 推理负载的波动性，一方面若分段保障通

信时延和计算/AI 推理时延会导致资源的冗余开销和低系统容量，另一方面若无分段保障则导致端到端时延（包含通信与计算/AI 推理）难以稳定保障。与此同时，在多用户场景下，业务无感知的传输也会导致系统的非理想编排和系统性能恶化，例如由于传输调度导致的计算/AI 推理突发和时延增长。

在 5G MEC 降低路径时延的基础上，面向下一代移动通信系统，3GPP 正在讨论核心网提供计算和 AI 推理服务，以使能通信与 AI 推理的深度融合，进一步提升系统性能，实现稳定的低时延端边智能协同。通过建立 AI 专有会话，从两个层面实现端到端时延的保障和系统容量的提升：一方面，根据业务特征、推理状态和通信能力进行差异化传输调度，实现通信和计算/AI 推理互补以及系统理想编排；另一方面，在获取计算/AI 推理业务特征基础上，针对传输也可以进一步实现传输拥塞控制和空口调度联合最优，使能传输层拥塞控制匹配空口能力，提升传输资源效率，降低传输时延。

## 6) 数据服务

未来网络可提供海量、高质量的低成本训练数据，解决具身智能大脑训练数据匮乏、采集成本高等问题。随着业界 AIGC 技术的发展，基于 Stable Diffusion、Auto-regressive 架构的环境—动作生成世界模型逐渐成为具身智能数据合成的主流技术路径。通过输入一张图片/一段视频及相关文本描述，世界模型可生成一段隐含具身智能体动作规律的环境视频。但当前世界模型仅通过视觉的平面演化规律执行预测，所生成视频的 3D 一致性与物理遵从性不足，难以充分学习真实

世界的客观物理规律。

得益于基础设施部署广泛等优势，未来网络结合内生感知（位置、深度、速度）、定位（移动轨迹）等蕴含真实世界物理环境规律的广泛通用数据，可基于条件生成、控制生成等关键技术为世界模型注入真实世界物理环境的空间演化规律，通过提升合成训练数据质量并提供海量合成训练数据来为具身智能厂商提升具身智能大脑能力。

此阶段的终极目标是构建一个原生智能、通感算深度融合、确定性能力内生的全新网络架构。届时，网络将实现从被动连接的“管道”到主动赋能“协同神经系统”的根本性升维，成为支撑具身智能在物理世界中实现自由、安全、高效感知、认知与行动的不可或缺的基础设施，最终引领社会步入真正的全域智能时代。

## 5.2 具身智能机器人终端要求和技术

### 5.2.1 具身智能机器人终端关键指标

1) 频段：支持国内典型的 5G 频段和制式。终端应具有备用天线且备用天线至少支持频段表格中 5G N28/N1 频段，避免天线断开导致通信功能失效。

2) 连接：终端需要必选 5G-A/Wi-Fi 能力其中 5G-A 作为身份认证的关键连接方式，支持随时随地安全管理。

3) 射频指标：终端射频性能指标参考，符合 3GPP TS 38 系列规范要求，满足 GCF 5G 终端协议、射频和 RRM 一致性验证要求。

4) 通信协作：接入统一的数字身份标识体系，支持能力属性凭

证，具备接入认证，能力发布，多模态媒体协商及通道建立能力，支持向网络发送多机协同和端网协同的意图指令。

### 5.2.2 具身智能机器人终端关键特性

具身智能机器人终端需要支持大上行、高可靠、移动性、短延等关键能力，需要支持关键特性，具体技术如下表所示。

表 6 具身智能机器人终端关键技术列表

分类	特性属性	典型特性名称举例	功能简要描述
基础能力体验升级	大上行增强	超级上行	支持 700/FA/1.8/2.1 等作为上行补充，实现上行边缘 20Mbps+
	上行体验增强	上行发射动态选择增强	支持 2Band up to 3CC 和 3Band up to 4CC UplinkTxSwitching
	下行体验增强	下行 3 载波聚合	支持下行 3 载波聚合
		1024QAM	支持 1024QAM PDSCH 配置、1024QAM 专用的 MCS 表和 CQI 表
	移动性增强	DAPS/CHO/LTM	支持软切换或缩短切换用户面时延的移动性增强
定位增强	SRS 定位	支持室内高精度 SRS 定位	
网业协同体验升级	网络感知业务	用户面/控制面的特征信息	如支持 PDU set 特征信息、PDU setQoS 参数、DSR 和精细化 BSR 上报
	业务感知网络	网络拥塞感知与业务自适应码率调整	业务基于网络报告感知网络拥塞状态（如 ECN）或网络传输速率（如 MAC CE），进行动态自适应码率调整
可保障体验升级	切片增强	支持切片增强	支持 URSP 动态多切片
异系统可靠性	Wi-Fi /5G 双链接及双发选收	Wi-Fi /5G 双链接保活及双发选收	支持双链接保活确保切换时不丢帧，支持双链路冗余发送和去重接收提高可靠性和降低时延
智能体通信	智能体连接	数字身份、任务级组网、意图交互	支持基于数字身份的标识和凭证体系，支持基于任务协作的群组及组内通信，支持基于意图的非结构化指令交互
	智能体协作	数字身份、能力发布、通信协作	支持基于数字身份的接入与认证，支持向网络发布、变更、注销能力属性，支持与人、虚拟智能体、其他机器人交互协作
端网协同	意图交互	基于意图的网络协同	支持向网络发送非结构化的意图请求，包括网络体验、通感通算等
	应用无感调用	原生调用网络能力	支持网络能力的原生调用，把网络能力作为终端的内生服务

## 5.3 具身智能机器人网络安全技术

### 5.3.1 具身智能机器人主要面临的安全风险

具身智能机器人是将大模型与物理实体（机器人）深度融合的系统，其存在跨域特点，即同时存在于物理世界（机器人本体与实际生活相接触）和信息世界（软件/AI/大模型等与虚拟世界相接触），相对于传统的信息安全来说，它的安全边界更加模糊；一旦系统失控或遭到恶意攻击，结果不仅仅影响到虚拟世界的资产信息，更可能直接对物理世界造成严重破坏（设备损坏、人员伤亡，甚至社会/国家安全威胁），风险远高于纯 IT 软件等。

当前从国内已经发布或在筹备中的机器人相关安全标准上来看，行业重点关注机器人本体的硬件安全风险（如：机械安全和电气安全等），控制/功能安全风险（即机器人在操控过程中的物理失效风险），信息安全风险（如：软件漏洞风险，通信安全风险，数据安全风险，应用安全风险等），AI 交互决策风险（具身智能机器人相关性最强）以及其他类型风险。具身智能机器人安全标准及关注点如下表所示。

表 7 具身智能机器人安全标准及关注点

安全标准编号	安全标准名称	安全主要关注点
GB 11291.1-2011	工业环境用机器人（安全要求）	硬件/控制
GB/T 38244-2019	机器人安全总纲	硬件/控制/信息/其他
GB/T 44253-2024	巡检机器人安全要求	硬件/控制/信息/运行
GB/T 45502-2025	服务机器人信息安全通用要求	硬件/控制/通信/应用

其中，与通信安全相关的风险，主要分为以下三类：

**1) 终端接入风险：**具身智能机器人接入移动网络或其他网络中

时，需要有双向身份认证，并在特定场景下叠加额外验证要求来保障整体网络端侧暴露面安全，否则一旦有非法或被操控机器人接入到网络中，容易对整个系统带来系统性风险，通过单点突破实现全网渗透。

**2) 数据泄露风险：**具身智能机器人身上的传感器和摄像头等数据采集单元，在持续迭代增加，以帮助其提升操控精度和数据分析准确性等，势必会在不同行业使用中采集各类海量数据，并在大脑决策后，向本地小脑等下发控制指令执行相关动作，其中潜在会涉及到部分用户敏感信息的上传和关键控制指令的下达，所以保障这些数据不泄露和不被篡改至关重要，需要在数据传输中提升数据安全性和完整性，同时防止恶意重放攻击对机器人本体造成影响。

**3) 网络被攻击风险：**具身智能机器人依赖于大模型的分析 and 指令下达的基础是建立在其通信网络之上，当前主流的通信方式包含移动网络，Wi-Fi，蓝牙等，如果底层网络基础设施被渗透、漏洞利用或攻击导致无法正常提供通信服务，会导致整个系统的工作异常，所以需要通信网络在构建可靠性、可用性的同时，提升自身的抗攻击能力，为具身智能机器人提供坚实可靠安全的通信底座。

### 5.3.2 具身智能机器人通信安全技术

移动通信网络作为具身智能机器人的中枢神经系统，在高速、高效、低时延的传输数据和控制指令的同时，如何保障具身智能机器人的网络合法接入，关键数据和控制指令的数据安全隐私，消减外部对移动网络的恶意攻击保障通信稳定性等安全措施更是尤为重要。

从现阶段来看，移动互联具身智能机器人场景是万千物联终端联

网的一个特殊分支，同样需要基于移动通信网络构建体系化、纵深防护的具身智能机器人网络安全架构，其中可重点围绕终端接入安全，网络通信安全，网络韧性和异常攻击防护等方面实现具身网络的安全防护。

首先，合法终端的网络接入是移动通信安全互联的基础。具身移动网络需基于 3GPP 标准要求，对终端接入进行双向认证（如：5G AKA/EAP-AKA'），以防止未经授权的机器人或其他终端非法接入具身网络。针对特殊场景的具身业务，如：存在固定作业区域，固定作业时间段等指定性要求情况下，需要网络提供附加认证能力，如：二次接入认证，电子围栏，SIM 卡号与设备序列号绑定功能等，实现多维度移动网络接入安全加固。

其次，具身智能机器人相对于服务型和工业机器人，需要通过更多的传感器和控制单元实现类人的操作行为，期间采集或产生的大量数据直接关系到整个系统的感知、决策及执行。所以，具身智能机器人的数据隐私安全关系到系统的稳定运行及敏感数据的保护，移动通信网络在其中重点承担保障数据通信传输安全和终端标识防泄漏的职责。在无线空口接入侧，基站需提供基于 3GPP 标准的空口加密和完整性保护能力，如：ZUC/AES/Snow 3G。在承载数据回传侧，网络需提供 IPSec 等数据加密和完整性保护能力；针对特殊场景，需支持采用商用密码部署满足不同行业的合规要求。通过 5G 提供的 SUCI/GUTI 终端身份标识符隐藏机制减少机器人接入网络被仿冒的风险，进而减少网络上被追踪和被中间人操控等风险。

此外，移动通信网络自身需要具备较强的韧性能力，保障中枢系统的稳定性、可靠性和可用性。因此通信网络除了需具备负载分担、冗余备份、过载保护的通用韧性能力外，还能够抵御外部恶意的主动攻击，如：信号干扰、畸形报文、DDoS 攻击等，结合具身智能机器人通信网络的部署情况，识别和划分关键业务区域，做好边界访问隔离和入侵防护，构建分层纵深的网络防御体系。

最后，随着移动通信网络向自动化和智能化演进，未来潜在具身智能机器人与通信感知融合，网络算力向智能开放和网络分布式架构部署等多类场景。各类机器人的应用规模和形态种类上会持续增多，需要移动通信网络有更大通量的加解密通信能力，轻量化、分布式和更高效的认证接入方式以及相关通信协议安全能力提升。在数据处理和存储安全方面，需要考虑网络感知数据的隐私保护，如：匿名化、数据脱敏、去标识化等技术的应用提升数据采集和处理的安全性。面向网络算力开放场景，探索隐私增强相关技术，如：差分隐私，同态加密，联邦学习等，实现对 AI 模型和数据的安全保护。

## 6 现有标准体系和标准建议

综上所述，前述章节系统梳理了具身智能机器人在“大脑-小脑-本体”的协同演进、多样化业务场景下的网络保障需求（如超低时延、高可靠、大带宽），以及 5G-A 乃至未来移动通信网络的关键支撑技术。分析表明，机器人智能化与网络化的深度融合是一个涉及多层次硬件、异构算法、实时通信与安全保障的复杂系统工程。为确保不同

厂商的机器人系统与通信网络能够高效、可靠、安全地互操作，同时移动通信网络能够赋能具身智能机器人实现从单机智能向多机协同的演进，打通具身智能机器人与移动通信融合的技术和生态断线，并推动产业从技术验证走向规模化应用，建立统一、前瞻的标准体系已成为不可或缺的基础性工作。为构建统一、兼容的产业生态，需汇聚机器人、通信、人工智能领域主要厂商，体系化推进具身智能机器人与移动通信融合的标准建设，协同国内与国际两条路径，并推动标准在实际场景中落地验证。本章将聚焦于具身智能机器人与移动通信技术融合的标准化需求，提出相应的标准体系框架与具体实施建议。

### **1) 加快构建全链条标准框架**

一是制定基础性能标准，明确具身智能机器人对移动通信网络的核心需求（包括时延、带宽、边缘算力调度等关键指标），做好与 5G-A、移动通信网络代际演进方向的衔接；二是统一协同接口与协议标准，规范具身智能机器人终端、无线基站、边缘云、核心网之间的数据交互协议，实现不同厂商设备的互联互通。

### **2) 建立测试评价标准**

具身智能机器人和移动通信融合，需要打通“端-网-云”全产业链条，综合业务场景建模，体验指标评测，以及网络能力匹配等维度，构建可量化、可落地的体验评测体系，推动具身产业高质量发展。围绕具身智能机器人的响应时延、任务完成率、网络资源利用率等核心指标，制定可量化、可落地的评测体系。

一是加速具身智能机器人中多模态实时交互体验质量的客观评

估标准研制。依托主观实验数据研究多模态实时交互体验质量客观评估模型，着力破解当前具身应用行业面临的用户体验评估缺乏量化标准和主观评价效率偏低的问题，构建统一的具身应用用户体验评估标准。二是识别具身智能机器人体验的 KQI 和网络能力 KPI 的映射规则。具身智能机器人在工业精密装配、高危环境巡检、家庭陪护等不同场景对网络的需求差异显著，可能在传统网络 KPI 是“优良”时，由于上行带宽不足，或时延抖动偏大，导致机器人的动作执行偏差，动作执行无法精准匹配，故需要识别具身智能与网络能力供给的映射规则。三是明确具身智能机器人业务体验评测方法和指标，精准指导网络能力适配。建立行业全流程分级认证机制（如工业级、消费级），基于“KQI-KPI”量化对应关系，制定网络 KPI 波动对 KQI 的影响评估方法。规范场景化测试床（如多基站切换、电磁干扰环境）的搭建标准，明确时延、带宽等测试工具的精度要求。

### 3) 加强跨机器人与通信领域标准协同

在国内标准层面，应依托全国机器人标准化技术委员会（SAC/TC 591）与中国通信标准化协会（CCSA），构建面向具身智能机器人和移动通信的技术体系和标准框架。该体系框架需重点聚焦以下关键领域的技术与标准制定：

（1）智能体连接：智能体数字身份、生成式组网、AI 流量 QoS 保障、端网意图交互等；

（2）智能体协作：实时多模态通信、跨网络跨协议多实体通信协作、能力发布与发现，以及任务协同等；

- (3) 端网协同：基于意图的网络协同、原生调用网络能力等。
- (4) 人形机器人通信规范：包含场景，通信需求和关键技术。
- (5) 人形机器人终端规范：通信频段，射频能力和天线性能等。
- (6) 人形机器人安全规范：终端接入安全，通信传输安全和网络韧性安全等。

通过以上系统性、分层次的技术研究和标准化工作，旨在加速关键技术的成熟与规模化应用落地，促进跨行业技术成熟并实现技术路线的统一。

在国际标准层面，应充分依托国内在具身智能机器人与移动通信融合领域的技术积累与跨行业联创经验，主动布局并引领关键标准的制定。具体而言，在 3GPP 标准中，应系统推动面向具身智能机器人的智能体通信网络架构、端网智能体协同交互机制、通算、通感融合等关键技术的标准化工作，构建具备满足智能体连接与智能体协作的网络基础设施，为机器人的大规模通信协同提供技术底座。同时，在 IETF 组织中积极推动智能体通信协议的制定与发布，统一智能体间的交互语言与通信机制，解决跨平台、跨厂商设备在互联互通中的协议壁垒，为规模化部署与生态协作奠定基础。此外，需协同 ISO/TC299 等国际机器人标准组织，共同定义跨层协议集成框架、语义通信模型与端到端安全架构，实现从网络到应用层的全局协同，促进国产创新成果与国际标准体系的双向融合。

#### 4) 标准落地：以测促用，构建产业闭环

推动标准落地，需同步建立符合性测试与认证体系。建议建设国家级测试验证平台，针对具身智能机器人的通信需求、多机器人协同时延、定位精度、服务可靠性等关键指标开展标准符合性评测。同时，通过重点行业的示范应用，形成“技术—标准—测试—应用”的迭代闭环，加速技术成熟与生态壮大。

为确保前述标准体系的有效落地与产业赋能，必须同步构建权威、统一的符合性测试与认证体系。依托国家级平台，建设具备公信力的测试验证环境，重点针对具身智能机器人的核心功能，如多机器人通信协同、跨网络跨生态协议一致性、多模态通信、端网意图交互等——开展严格的标准符合性评测与认证。为产品研发与市场准入提供权威的技术依据，并通过标准化评测引导产业技术迭代方向，加速核心技术的成熟与产品化，并通过可复制的成功案例吸引更多产业力量加入，最终驱动开放、协同的产业生态不断发展壮大。

## 7 总结与发展倡议

随着人工智能与实体经济的深度融合，具身智能机器人作为能与物理世界交互的智能实体，正成为推动产业变革的重要力量。其与移动通信技术深度融合，在现有 5G-A 网络基础上，通过充分挖掘和引入面向机器人的大上行、低时延和高可靠等核心业务需求的关键增强特性，构建可重构、自适应的网络架构，为具身智能机器人提供高性能、高可靠与高智能的网络服务。同时随着智能体技术

的快速发展，以及智能体通信技术的成熟，将彻底打破单体智能的局限，迈向群体智能通信协作的新阶段。为进一步推动具身智能机器人与移动通信技术融合发展，现从场景需求、技术研究、标准化和产业联创四个维度提出以下总结与发展倡议。

**1) 场景需求与技术创新：以应用为牵引，推动技术扎根现实。**

未来应坚定以场景需求为牵引的技术发展路径，在工业制造、家庭服务等 ToB 和 ToC 领域，需进一步挖掘高频、高价值场景，例如在物流、巡检、商业服务及家庭陪护等具体环境中实现商业化闭环。倡议产业链各方深入合作，共同梳理典型场景，明确移动通信技术为具身智能机器人带来的价值收益。

**2) 产业样板与标准推进：共建示范生态，加速价值闭环。**

打破行业壁垒，构建开放协同的产业生态是融合发展的关键。我们倡议移动通信、具身智能机器人、人工智能三大领域的企业持续深化合作，共同组建更多跨行业的创新联合体，整合“产学研用”全链条资源。各方应协力规划和建设一批典型行业的联创样板点与示范项目，通过这些高质量的示范应用，验证技术方案的可行性，展示商业模式的潜力，从而凝聚行业共识，树立产业标杆，加速核心技术的规模落地与价值闭环。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家互联网信息办公室发文  
[https://www.cac.gov.cn/2025-09/18/c\\_1759916098343469.htm](https://www.cac.gov.cn/2025-09/18/c_1759916098343469.htm)
- [2] 国务院发展研究中心《中国发展报告 2025》  
<http://www.xinhuanet.com/20251001/a9a32ba0c5c0473e928dfd93e89372e9/c.html>
- [3] 工业环境用机器人（安全要求） GB11291.1-2011 2011 年 5 月
- [4] 机器人安全总纲 GB/T 38244-2019 2019 年 10 月
- [5] 巡检机器人安全要求 GB/T 44253-2024 2024 年 7 月
- [6] 服务机器人信息安全通用要求 GB/T 45502-2025 2025 年 3 月
- [7] 面向行业的 5G 网络通用安全能力技术要求 YD/T 6308-2024 2024 年 12 月
- [8] 5G 业务安全通用防护要求 YD/T 4696-2024 2024 年 3 月
- [9] 5G 网络运行安全风险与防护要求 YD/T 4695-2024 2024 年 3 月
- [10] 3GPP: TS 33.501 Security architecture and procedures for 5G System
- [11] NGMN:6G TRUSTWORTHINESS CONSIDERATIONS 2023 年 9 月
- [12] 面向公众应用的移动互联网网络质量评测方法 移动终端 APP 测速 YD/T 4760-2024

## 附录 A

### A1 缩略语

AMR:自主移动机器人(Autonomous Mobile Robot)

CA:载波聚合(Carrier Aggregation)

CAGR:年复合增长率(Compound Annual Growth Rate)

CHO:条件切换(Conditional Handover)

DDoS:分布式拒绝服务(Distributed Denial of Service)

DAPS:双激活协议栈(Dual Active Protocol Stack)

E2E:端到端(End to End)

eMBB:增强移动带宽(Enhanced Mobile Broadband)

eMTC:增强型机器类通信(Enhanced Machine Type Communication)

FOV:视野范围(Field of View)

HCS:通信感知融合(Harmonized Communication and Sensing)

KPI:关键性能指标(Key Performance Indicator)

KQI:关键质量指标(Key Quality Indicator)

LLM:大语言模型(Large Language Model)

LMF:位置管理功能(Location Management Function)

MEC:移动边缘计算(Mobile Edge Computing)

MIMO:多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output)

OTT:通过互联网提供服务(Over The Top)

OTA:空中下载(Over The Air)

PDU:协议数据单元(Protocol Data Unit)

QoE:客户感知体验(Quality of Experience)

QoS:服务质量(Quality of Service)

RAN:无线接入网(Radio Access Network)

RRC:无线资源控制器(Radio Resource Controller)

RTT:往返时延(Round Trip Time)

SIM:用户识别模块(Subscriber Identity Module)

SLA:服务水平协议(Service Level Agreement)

SUL:辅助上行(Supplementary Uplink)

ToB:面向企业(To Business)

ToC:面向用户(To Customer)

ToH:面向家庭(To Home)

TRP:传输接收点(Transmission Reception Point)

TTI:传输时间间隔(Transmission Time Interval)

UCBC:上行超带宽(Uplink Centric Broadband Communication)

UPF:用户面功能(User Plane Function)

URLLC:超高可靠性超低时延通信(Ultra-Reliable Low-Latency Communication)

VLA:视觉语言动作模型(Vision-Language-Action)

## A2 投入报告写作相关组织与机构

本研究报告由以下单位联合完成和发布：

中国移动通信研究院、华为技术有限公司、北京机械工业自动化研究所有限公司、乐聚智能（深圳）股份有限公司、宇树科技股份有限公司、机器人质量基础与共性技术工业和信息化部重点实验室、鼎桥技术有限公司、中国移动具身智能产业创新中心、湖南大学、北京理工大学、上海人工智能研究院、北京人形机器人创新中心、北京邮电大学、海信集团控股股份有限公司、五八智能科技（杭州）有限公司、中国电信股份有限公司研究院、浙江人形机器人创新中心有限公司、浪潮通信技术有限公司、中兴通讯股份有限公司、深圳市优必选科技股份有限公司、中国联合网络通信有限公司研究院、上海电器科学研究院、启智（芜湖）智能机器人有限公司、北京航空航天大学、中信科移动通信技术股份有限公司、数字华夏（深圳）科技有限公司、上海机器人产业技术研究院有限公司、维沃移动通信有限公司、江苏移动信息系统集成有限公司、杭州云深处科技股份有限公司、上海灵慧智能科技有限公司、深圳市人工智能与机器人研究院、美的集团人形机器人创新中心、重庆凯瑞机器人技术有限公司、上海灵境智源科技有限公司、杭州海康机器人股份有限公司

本研究报告主要的作者（作者按姓氏笔画排序，排名不分先后）：

丁雪、于金杨、于括、马传辉、王世超、王吉滨、王启舟、王昀、王法辉、王相博、王俊芳、王晔、王涛、王梦涵、王磊、车竞择、毛翊超、方峥、方海鹏、左俊、申林子、邢琳、朱秋国、仲琛、任驰、任容玮、全琪、刘人齐、刘少山、刘佳璐、刘勇、刘莹、刘新、闫维新、许超、阮航、孙钊、孙洁香、孙博、李本旺、李汉成、李汉涛、李金村、李晓华、李浩来、李晨仪、李琛、李磊、李晶、杨玮玮、杨秋影、杨前进、杨铮、肖扬、肖寒、吴为、吴永海、吴雨璁、吴健、吴敏、冷晓琨、汪汝伟、张驰、张杰、张雨婷、张浩男、张琪瑶、陈永伟、陈兴、陈志丹、陈虹、陈曦、和诚凯、金晨光、周汉、周忠祥、周琳、赵玉峰、赵军、赵孝武、赵泽桐、胡凤旺、段洋洋、须海江、姜旭、秦文龙、秦修功、秦熠、聂永丰、晋英豪、夏章抓、晁军显、徐志军、徐彦军、徐晖、徐婧文、徐瑞、奚伟、栾恺、陶永、黄正磊、黄玥、黄雪、符海芳、章宇、梁乔玲、梁辰、梁学修、梁诗雨、董丙银、蒋品、焦继超、曾捷、谢伟良、蓝华、雷丹丹、鲍磊、廖承斌、谭斌、熊蓉、熊鑫、颜志、潘杰