

未来网络技术发展系列白皮书(2026)

云端机器人确定性网络架构 白皮书



紫金山实验室、江苏未来网络集团有限公司
达塔机器人(济南)有限公司、山东马尔斯机器人有限公司

编写说明

主要编写单位（排序不分先后）：紫金山实验室、江苏未来网络集团有限公司、
达塔机器人（济南）有限公司、山东马尔斯机器人有限公司。

本白皮书是 2026 年 9 月 24 日由紫金山实验室首席科学家刘韵杰院士主持、达塔机器人首席科学家黄晓庆先生牵头召开的具身智能确定性网络联合工作会议确定的编制任务：围绕“云端大脑接入、确定性网络对接、端到端质量与安全保障、统一机器人连接器”等核心内容，形成支持具身智能互联网发展的创新体系《云端机器人确定性网络架构》的完整产业化白皮书，并在第十届未来网络发展大会期间联合发布。

本白皮书引用的确定性网络技术指标来源于紫金山实验室《确定性网络技术与产业发展应用白皮书》及《确定性网络完整技术体系》文档；机器人本体规格来源于《马尔斯人形机器人 M1 产品定义报告》；达塔云端大脑和产业数据与政策标准信息来源于公开发布的官方文件与行业研究（详见脚注与附录 B、附录 C）。

本白皮书版权归联合编写单位所有。转载、摘编或以其他方式引用本白皮书内容时，请注明来源。

目 录

前 言	6
一、总结论证：云端智能机器人可管可控的必然架构	8
1.1 具身智能互联网：第三代互联网的历史机遇	8
1.2 本体智能的天花板：具身智能不能仅有“动物大脑”	9
1.3 双脑架构：云端智能机器人是具身智能的必由之路.....	10
1.4 全球产业同频：多模态大模型与机器人芯片共指双脑架构.....	11
1.5 可管可控：AGI 时代具身智能的核心命题	12
1.6 确定性网络：连接云端大脑与机器人本体的唯一合宜“神经束”	13
1.7 国家级创新底座：国家重大科技基础设施与国家级开放创新平台	15
1.8 本白皮书的核心论断	16
二、确定性网络技术架构	17
2.1 确定性网络的定义与核心特征	17
2.2 两大国际标准体系：IEEE TSN 与 IETF DetNet	18
2.3 五层核心技术体系	19
2.4 与传统网络的关键指标代际差异	20
2.5 分级 SLA 与全套测试验证体系.....	21
2.6 中国工程实践：国家 6G 确定性网络重大专项与运营商核心网打通.....	21
2.7 面向 AI 与云端机器人的超低误码演进（ $10^{-12} \rightarrow 10^{-15}$ ）	22
三、云端机器人架构体系	23
3.1 云端机器人与“云-网-端”总体架构.....	23
3.2 云端大脑：超级智能体平台、多模态大模型平台与数字孪生世界.....	24
3.3 机器人本体控制系统现状：ROS2+LPR 双系统及其局限	24
3.4 机器人连接单元 RCU：云端大脑的标准接入终端	25
3.5 参考实现：马尔斯 M1 公版开放人形机器人平台	26
四、云端大脑、确定性网络与机器人本体的关系	27
4.1 三元架构的生物学映射：新皮质、神经束与小脑.....	27
4.2 频率分层与职责边界	28
4.3 国际路线对比：本体单脑、本体双脑与云端双脑.....	29
4.4 确定性网络五大能力与云端机器人需求的精确匹配.....	30
4.5 断网降级与本体安全自治	30
五、端到端统一架构：云-网-端一体化设计	31
5.1 端到端统一架构总览	31

5.2 业务平面、控制平面与管理平面	32
5.3 端到端 QoS 与安全一体化管控框架	32
5.4 双数字孪生闭环：机器人数字孪生与网络数字孪生.....	32
5.5 面向 6G 的架构演进	33
六、接口定义与通信协议体系	34
6.1 接口体系总览（I1 - I5）	35
6.2 I1：云端大脑与确定性网络操作系统（CNOS）接口.....	36
6.3 I2：CNOS 与 5G 核心网/运营商对接网关接口	36
6.4 运营商 5G 切片与 UPF 已发布能力：I2 对接的市场验证	38
6.5 I3：确定性网络网关与机器人连接单元 RCU 接口及通信协议	40
6.6 I4：RCU 内置确定性网络网关软件接口	41
6.7 I5：RCU 与本体 CCU 接口	41
6.8 智能 eSIM 跨运营商接入与统一结算接口.....	41
6.9 太始 OS 开源融合动议：共建标准化开源体系	42
七、可管可控安全体系：具身智能的中国方案	43
7.1 可管可控的总体框架	43
7.2 身份认证与运营商级接入管控	43
7.3 数据安全、隐私保护与算法可审计	44
7.4 与国家 AI 安全治理体系的对齐	44
7.5 中国方案的全球意义	44
八、标准体系与产业生态	45
8.1 国际标准映射	45
8.2 中国标准体系与合规框架	46
8.3 公版开放生态与测试认证体系	46
8.4 运营商商业模式：从流量经营到机器人运营	46
九、产业应用与落地路线图	47
9.1 产品矩阵：公版终端体系	47
9.2 首批应用场景：视频伴侣机器人、机器人店长与中医机器人.....	48
9.3 首批试点部署：全国重点城市万台示范	49
9.4 机器人赋能 OPC 创业：青年“一人公司”的具身商业计划.....	51
9.5 市场规模预判与网络演进逻辑	51
9.6 2026 - 2030 发展路线图	52
十、全球方案对比研究：跨层贯通的世界前列架构	53
10.1 对比口径与方法	53

10.2 总览矩阵：十三项功能覆盖对比	54
10.3 矩阵之上的三个基本事实	55
10.4 五条相对优势与诚实的边界	56
10.5 结论：站在世界前列的整体架构	56
十一、总结与展望	57
附录 A：术语与缩略语	59
附录 B：主要参考标准与文献	60
附录 C：重要参考资料与出处	65

前言

人类文明正在经历第三代互联网的历史性跃升。第一代固定互联网以 PC 为终端，把静态信息数字化；第二代移动互联网以智能手机为终端，把人的连接随身化；正在到来的第三代——具身智能互联网——以人形机器人为通用终端，把数字世界的智能延伸到物理世界。人形机器人是继个人计算机、智能手机之后人类的“第三台计算机”，也是具身智能互联网的标准接入终端。

2026 年，全球人形机器人产业正式跨过规模化量产的门槛：2025 年全球人形机器人出货量约 1.7 万台，其中中国占比 84.7%；2026 年 7 月，中国企业率先实现双足人形机器人累计下线约 1.8 万台，产业从“样品展示”迈入“商品交付”阶段。2026 年因此被定义为人形机器人的“本体元年”——本体已经跨过规模化量产门槛，但规模化应用尚未开启，本体元年还不是产业化元年。¹

据行业研究测算，2025 年全球具身智能市场规模约 900 亿元，2026 年预计达到 1500 至 2000 亿元；中国已成为全球最大的具身智能市场与产业中心。²

沿终端产业的经典发展曲线推演，本白皮书预判：2028 年，人形机器人将迎来自己的“iPhone 时刻”，全球年销售量达到 100 万台，产业化正式起步；2035 年，全球人形机器人数量将超过 1 亿台；2050 年，全球人形机器人数量将超过全球人口总和，达到 100 亿台以上。软银集团创始人孙正义、特斯拉 CEO 埃隆·马斯克等全球产业领袖的公开预测与这一曲线相互印证（详见 1.1 节）。

然而，产业爆发的前夜，一个比“能不能造出来”更根本的问题摆在了所有人面前：当人形机器人具备了接近通用人工智能（AGI）的认知能力，并能以物理躯体直接作用于人类社会时，我们如何确保它始终是可管、可控、可信的？本体黑盒式的智能无法回答这个问题。机器人本体算力有限、系统封闭、行为不可审计，一旦智能体

¹数据来源：北京赛迪与中国电子报 2025 年人形机器人市场统计及公开产业报道整理（2026 年 8 月）：2025 年全球人形机器人出货量约 1.7 万台，中国占比 84.7%；2026 年 7 月宇树科技双足人形机器人累计下线约 1.8 万台。

²数据来源：《具身智能（人形机器人）产业发展蓝皮书》（2026 年 7 月）：2025 年全球具身智能市场规模约 900 亿元，2026 年预计 1500 - 2000 亿元；中国 2025 年约 600 亿元。

在物理世界的行为超出预设边界，人类将缺乏有效的介入手段。具身智能要走向千家万户、千行百业，必须先解决“可管可控”这一产业级的信任命题。

本白皮书给出我们的回答：以云端大脑承载 AGI 级智能，以机器人本体承载实时运动智能，以确定性网络作为连接二者的“神经束”，构建“云端大脑—确定性网络—机器人本体”三位一体的端到端确定性网络体系。确定性网络所独有的有界时延、严格受限抖动、极低误码、业务硬隔离、故障毫秒自愈与全程可审计能力，恰好构成云端智能机器人在广域网上安全运行所必需的全部网络条件；而云端集中管控的架构，又使每一台机器人的感知、决策、行为全程可视、可审、可溯、可控。二者结合，具身智能机器人的可管可控第一次具备了完整的工程实现路径。这就是具身智能机器人可管可控的中国方案。

本白皮书首先给出总结论证（第一章），随后系统阐述确定性网络架构（第二章）与云端机器人架构体系（第三章），论证云端大脑、确定性网络与机器人本体三者的关系（第四章）及三者共同构成的端到端统一架构（第五章），并在此基础上给出全套接口定义（第六章）——包括云端大脑（海豹 HAREIX）与确定性网络操作系统（CNOS）的接口、CNOS 与 5G 核心网/运营商对接的网关接口、确定性网络网关与机器人连接单元（RCU）的接口及通信协议、RCU 内置确定性网络网关软件的接口，以及与运行在 RCU 上面的云端机器人本体操作系统太始 OS（Taishi OS）融合共建标准化开源体系的动议。第七章阐述可管可控安全体系，第八章给出标准体系与产业生态设计，第九章给出产品矩阵、首批应用场景、全国试点部署与 2026—2030 年产业路线图。

本白皮书由紫金山实验室、江苏未来网络集团有限公司、达塔机器人（济南）有限公司、山东马尔斯机器人有限公司联合编制（排序不分先后），并在第十届未来网络发展大会期间正式发布。我们期望以此凝聚产业共识，联合运营商、设备商、本体厂商、开发者与监管机构，共同建设一个安全、可信、繁荣的具身智能互联网。

一、总结论证：云端智能机器人可管可控的必然架构

1.1 具身智能互联网：第三代互联网的历史机遇

互联网的每一次代际跃迁，都由终端形态的革命所驱动，并带来数量级的规模扩张。固定互联网以 PC 连接了桌面，移动互联网以智能手机连接了每一个人，终端规模扩大了百倍以上。具身智能互联网以人形机器人为终端，把“连接”从信息世界推进到物理世界：机器人 7×24 小时在线、全天候作业、数量不受人口上限约束。沿终端产业的经典发展曲线推演，我们预判：2028 年，人形机器人将迎来自己的“iPhone 时刻”——全球年销售量达到 100 万台，产业化正式起步；2035 年，全球人形机器人数量将超过 1 亿台，这是本白皮书设定的主要发展目标；2050 年，全球人形机器人数量将超过全球人口总和，达到 100 亿台以上。以机器人 7×24 小时联网的特性和近乎无上限的机器人需求推算，具身智能互联网最终将推动互联网整体规模较当前增长一万亿倍。也就是说，云端机器人是推动确定性网络发展的最大动力，未来由确定性网络技术组建的具身智能互联网将远远大于今天的互联网规模，这不是一次产品迭代，而是一次网络文明级的扩容。

产业拐点已经到来。2026 年被公认为人形机器人的“本体元年”：中国企业在量产能力、供应链响应速度与商业化落地上建立起全球领先优势；工信部《人形机器人与具身智能标准体系（2026 版）》发布，确立了覆盖全产业链、全生命周期的标准顶层设计；万台级超级工厂投产、头部企业启动上市，产业从“0 到 1”迈入“1 到 10”。终端规模的爆发，意味着“机器人如何接入网络、如何被管理”从局部工程问题升级为全局基础设施问题。

需要清醒认识的是，本体元年还不是产业化元年——2026 年的万台级交付只是起点，但全球产业领袖的长期预判已经为终点描出了轮廓：软银集团创始人孙正义早在 2017 年即预测，到 2047 年人类社会将有 100 亿台机器人；特斯拉 CEO 埃隆·马斯克在 2024 年股东大会上预测，人形机器人与人类的数量比将达到甚至超过 2:1，即全球人形机器人数量将达 100 亿至 200 亿台以上。今天，全球产业界已经形成一个基本共识：人工智能是人类历史上最重要的产业革命——第四次工业革命，而人形机器人将是这个时代最重要的产品，它将给人类带来一次从根本上重塑生产力的革命，实现社会财富的极大丰富。当机器人以百亿台计、万台联网时，“用什么网络连接它们”就

不再是工程细节，而是文明级的基础设施命题。³

1.2 本体智能的天花板：具身智能不能仅有“动物大脑”

当前主流机器人本体控制系统分为两类：一类是开源的 ROS2，另一类是面向双足机器人的实时系统 LPR（Linux PREEMPT RT，Linux Realtime 增强模块，源自 MIT Chetta 技术体系）。国内双足厂商普遍采用双系统架构——上位机用 ROS2 做全方位 AI 控制，下位机用 LPR 做实时运动控制，中间通过网关实现数据互通。这一架构在工程上是成熟的，但在智能上是受限的。

目前国内几乎所有具身智能机器人公司都采用“本体单一大脑”架构。该架构能够实现机器人的物理机械控制与传感，但无法承载 AGI 级能力和长流程任务规划——它无法实现人类大脑的智能，只是一个“动物大脑”。这一事实证明了：具身智能不能仅仅依靠本体智能。其根源在于三重硬约束：

- 算力约束：AGI 级多模态大模型与世界模型的推理需要千卡万卡级算力，无法塞入一个功耗、重量、成本都受限的本体；
- 数据约束：单机的感知经验有限，无法形成“一台学会、万台受益”的集群智能飞轮；
- 管控约束：本体黑盒无法被外部审计，智能体的决策链路不可见、不可追溯，不具备社会化部署的信任基础。

1.3 双脑架构：云端智能机器人是具身智能的必由之路

破解之道是为机器人建立“双脑架构”：在本体保留一个负责实时运动控制的“小脑”，在云端建立一个承载 AGI 级认知的“云端大脑”。达塔机器人提供的云端大脑——海豹 HAREIX，是基于达闼机器人承建的国家新一代人工智能开放创新平台升级实现，为所有机器人建立统一的云端智能底座，它提供强大的超级智能体平台、

³资料来源：C114 通信网《达闼黄晓庆：6G 时代机器人是伟大产业》（2023 年 3 月 22 日）；黄晓庆引用软银董事长孙正义 2017 年预测“到 2047 年人类社会将有 100 亿台机器人”；特斯拉 2024 年股东大会（2024 年 6 月）：埃隆·马斯克预测人形机器人与人类数量比至少 1:1、或达 2:1，即约 100 亿至 200 亿台（摩根士丹利研究报告引述，2024 年 6 月）；另马斯克于 2025 年沙特-美国投资论坛进一步预测人形机器人数量将突破数百亿台；花旗全球洞察预测 2050 年人形机器人市场规模有望达 7 万亿美元。

强大的多模态大模型平台和一个全方位的数字孪生世界，映射到机器人服务的所有物理场景。应用云端大脑，机器人即形成“双脑架构”——这是实现具身智能的必由之路，这样的机器人就是云端智能机器人。

国际同行的进展反向印证了双脑路线的正确性：Figure AI 的 Helix 系统同样采用“大脑 + 小脑”的双脑架构——“系统 2”（慢思考，7B 参数视觉语言模型，7 - 9 Hz 语义推理）承担“大脑”职责，“系统 1”（快反应，80M 参数视觉运动策略，200 Hz）承担本体“小脑”职责，并于 2026 年演进为加入 1 kHz 全身平衡层的三层架构。尤其值得注意的是，Helix 以一套统一的神经网络权重实现了“一个大脑同时控制多台本体”的多机协作——这正是云端大脑“一脑多机”集中式架构所指引的正确方向。⁴

但必须指出，Helix 目前只是本地化部署：其“大脑”运行在本地部署 GPU 服务器上，大脑与本体之间依赖本地 WiFi 连接，尚未形成真正的云端架构。WiFi 覆盖半径以十米计，无广域移动性管理，无运营商级认证与计费，无法支撑百万台级机器人在城市、国家乃至全球范围内统一调度与统一管控。“一个大脑控制多台本体”证明了一脑多机的可行性，但把这样的“大脑”真正放到云上、用一张广域确定性网络连接成千上万台本体，才是这条路线的完全体。把“小脑”留在本体是对的，而把“大脑”困在本地，就等于放弃了 AGI 的算力天花板、集群进化能力和集中管控能力。云端大脑必须上云——而云端大脑一旦上云，连接大脑与本体的网络就成为整个体系的成败关键。

1.4 全球产业同频：多模态大模型与机器人芯片共指双脑架构

在“大脑”一侧，多模态前沿大模型正在全面进军具身智能。Google DeepMind 自 2025 年 3 月首次发布 Gemini Robotics 以来快速迭代：2025 年 9 月的 Gemini Robotics 1.5 系列让机器人具备“先思考、再行动”的智能体能力，并通过 Motion Transfer 机制实现跨机器人本体的零样本技能迁移；2026 年 7 月发布的 Gemini Robotics 2 系列进一步实现人形机器人全身控制与多机协同，其具身推理模型 ER 2 作为机器人的“高级大脑”通过 Gemini API 向全球开发者开放，并在云端企业级平台提供。OpenAI 在解散

⁴资料来源：Figure AI Helix 公开技术资料（2025 年 2 月）：S2 为 7B 参数视觉语言模型（7 - 9 Hz），S1 为 80M 参数视觉运动策略（200 Hz）；Helix 02（2026 年 1 月）新增 1 kHz S0 全身平衡层；Helix 2.5（2026 年 9 月）发布。

机器人团队六年之后，于 2026 年 6 月正式宣布成立 OpenAI Robotics、重启具身智能自研，其技术路线脱胎于“世界模拟（WorldSim）”项目，复用 Sora 的世界模型能力让 AI 先在虚拟环境中学习物理规律、再迁移到真实机器人；在此之前，OpenAI 已通过投资 Figure AI、1X Technologies、Physical Intelligence 等公司深度布局具身智能赛道。

5

在“小脑”与算力底座一侧，以英伟达为首的机器人芯片与开源模型生态已然成形：专为人形机器人设计的 Jetson Thor 计算平台（2070 FP4 TFLOPS）成为波士顿动力 Atlas 等全球头部本体的共同选择；Isaac GR00T 开源人形机器人基础模型迭代至 N1.6，实现全身智能控制；2026 年 6 月，英伟达联合宇树科技推出 Isaac GR00T 开源人形机器人参考设计，向全球开发者开放全套 workflow。黄仁勋提出的“三台计算机”架构——云端 DGX 训练大脑、Omniverse/Cosmos 构建数字孪生世界、Jetson Thor 承载本体实时推理——本质上正是“云端训练大脑+数字孪生世界+本体小脑”的云端机器人思想。⁶

大脑越来越大、越来越集中（大模型化、平台化、开放化），小脑越来越专用、越来越实时（芯片化、本地高频闭环）——在“云端大脑+本体小脑”的发展路径上，全球产业界已经形成了公认的技术趋势。然而纵观全球，产业界的注意力几乎全部集中在大脑与小脑两端，连接二者的“神经束”——网络——恰恰是整条链路的最大短板：WiFi 困于局域，公网尽力而为，5G 切片缺乏自动化编排，现有网络没有任何一种能为百万台级机器人提供有界时延、硬隔离、可审计的广域连接。

⁵资料来源：Google DeepMind 官方博客及公开报道：2025 年 3 月发布 Gemini Robotics 与 Gemini Robotics-ER，2025 年 6 月发布 On-Device 版本，2025 年 9 月发布 1.5 系列（Motion Transfer 零样本跨本体迁移），2026 年 7 月 30 日发布 Gemini Robotics 2 / ER 2 / On-Device 2（全身控制、多机协同，ER 2 经 Gemini API 开放）；界面新闻《OpenAI 时隔六年重启机器人业务，短期押注协助型机器人》、科学网《OpenAI 官宣进军机器人赛道》（2026 年 6 月 1 日）：OpenAI CEO 奥特曼宣布组建 OpenAI Robotics 团队，源自“世界模拟”（WorldSim）研究项目、由 Aditya Ramesh 领导，此前先后投资 Figure AI、1X Technologies、Physical Intelligence。

⁶资料来源：英伟达公开资料：Jetson Thor 平台（2070 FP4 TFLOPS、128 GB 统一内存）；CES 2026 发布 Isaac GR00T N1.6 全身控制模型与 Cosmos 开源世界模型，波士顿动力 Atlas 搭载 Jetson Thor 与 GR00T N1.6；COMPUTEX/GTC 台北（2026 年 6 月 1 日）：英伟达联合宇树科技发布 Isaac GR00T 开源人形机器人参考设计（宇树 H2 Plus + Sharpa Wave 灵巧手 + Jetson AGX Thor T5000），2026 年底供货，工作流向 GitHub 与 Hugging Face 开发者开放。

这个短板，中国的确定性网络架构恰好能够有效解决。以确定性网络叠加 5G 网络切片服务，可以为机器人构建一张端到端的“神经网络”：有界时延与严格抖动保证云端指令确定可达，物理硬切片保证控制业务与其他业务彻底隔离，路径固化与全程遥测保证每一次通信可审计、可追溯。由此，我们既能保证机器人的可管可控，又能保证机器人“神经网络”自身的网络安全，为下一代具身智能互联网提供高质量的基础设施。这正是本白皮书的使命，也是中国方案对全球具身智能产业的关键补位。

1.5 可管可控：AGI 时代具身智能的核心命题

人工智能安全治理已上升为国家制度设计：全国网络安全标准化技术委员会发布《人工智能安全治理框架》2.0 版（2025 年 9 月），建立了跨场景的 AI 风险分类分级体系；工信部《人形机器人与具身智能标准体系（2026 版）》将“安全伦理”作为贯穿产业全生命周期的六大板块之一；国家网信办、国家发展改革委、工信部联合印发《智能体规范应用与创新发展实施意见》（2026 年 5 月），对智能体的规范应用提出系统要求。⁷

具身智能与纯软件 AI 的根本区别在于：它拥有物理躯体，能够直接改变物理世界。一个失控的大模型至多产生错误信息，一个失控的机器人则可能直接造成人身与财产伤害。因此，具身智能的可管可控必须满足四个“可”：可视（感知与行为全程可见）、可审（决策链路可被审计）、可溯（每一次动作可追溯到指令来源与模型版本）、可控（人类拥有最高优先级的介入、限制与停止权限）。

本体黑盒路线无法满足上述要求。机器人若完全依赖本体智能自主行动，其决策过程封闭在厂商私有系统之内，监管者无从介入，出了事故无法定责，模型被篡改无从察觉。相反，云端大脑架构天然提供了管控抓手：所有任务级决策在云端发生，可被记录、审计、回放；所有下行指令经过网络传输，可被鉴权、过滤、拦截；所有机器人统一接入，可被远程限制、降级或停止。人工智能始终置于人类管控之下——这正是中国方案对具身智能治理的核心回答，而这一回答能够成立的前提，是云端大脑

⁷全国网络安全标准化技术委员会（TC260）：《人工智能安全治理框架》1.0 版（2024 年 9 月 9 日）、2.0 版（2025 年 9 月 15 日）；《智能体规范应用与创新发展实施意见》（国家网信办、国家发展改革委、工信部，2026 年 5 月 8 日）。

与本体之间存在一条绝对安全、绝对可靠、绝对受控的连接通道。

1.6 确定性网络：连接云端大脑与机器人本体的唯一合宜“神经束”

云端智能机器人对“神经束”的要求是苛刻的：云端大脑以 1 - 30 Hz 频率向本体下发任务级指令、接收场景语义与遥测，任何一次指令的迟到、乱序、失真或被篡改，都可能直接转化为物理世界的危险动作。逐项检视现有网络形态：传统互联网“尽力而为”，跨城公网抖动 50 - 500 ms 且无上限、误码率 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 、拥塞随机丢包 0.1% - 5%，完全无法承载控制类业务；WiFi 仅限局域，无广域覆盖与移动性；运营商 5G 切片虽具备理论基础，但现有切片编排流程繁琐，在无高等级 AI 辅助下人工操作成本极高，实际使用率极低，无法支撑海量机器人的自动化开通与保障。

确定性网络恰好是为这类业务而生的网络形态。它以“端到端有界时延、严格受限抖动、极低误码/丢包、业务完全隔离、故障毫秒自愈”为设计目标：广域 DetNet 可实现跨城端到端时延 ≤ 10 ms、抖动 ≤ 20 μ s，局域 TSN 可实现 8 跳抖动 ≤ 1 μ s，业务等效误码率可达 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ 乃至面向未来的 10^{-15} ，物理硬切片确保控制流与其他业务彻底隔离，多路径冗余使故障切换小于 50 ms。更重要的是，确定性网络的内生机制——路径固化、资源预留、准入控制、全程 OAM 遥测——使网络本身成为可管可控的设施：每一条机器人业务流从哪条路径走、占用多少资源、是否履约，全部可量化、可审计、可追责。

“恰好”的三重匹配：其一，频率匹配——云端大脑 1 - 30 Hz 任务级语义指令对应的是毫秒级而非微秒级闭环，确定性网络 ≤ 10 ms 的有界时延恰好覆盖云端环路，而毫秒级以内的反射动作由本体小脑自治完成，二者职责无缝衔接；其二，架构匹配——可管可控要求决策可见、链路可控，确定性网络的路径固化与全程遥测恰好把网络变成了管控体系的一部分；其三，商业匹配——确定性网络由运营商建设运营，切片计费、统一结算恰好支撑云端机器人运营商的商业模式。

1.7 国家级创新底座：国家重大科技基础设施与国家级开放创新平台

本白皮书提出的端到端架构并非纸面设想，而是建立在两大国家级创新底座之上。先看确定性网络一侧：确定性网络技术由紫金山实验室历经十余年攻关研发，其研发、验证与部署依托的是国家重大科技基础设施——未来网络试验设施（CENI）。CENI

是国务院在“十二五”时期列入的 16 个国家重大科技基础设施项目之一，是我国通信与信息领域的首个大科学装置，2021 年 3 月又被国家“十四五”规划列入国家战略科技力量；2024 年 8 月 22 日，CENI 在第八届未来网络发展大会上宣布正式建成投入服务。设施覆盖全国 40 个主要城市、线路全长 3.4 万公里，建成 88 个主干网络节点、主干链路带宽达 100G，具备“分钟级”按需定制网络、“微秒级”确定性保障、“千万级”大规模多云交换、“TB 级”智驱安全防护四大能力；在 10 个城市、超过 1 万公里的拥塞环境测试中实现零丢包、平均负载 5.45 Gbps、最大时延抖动小于 50 微秒；基于 CENI 的确定性网络试验更在途经 13 个省市、13000 公里、100% 负载的极端条件下实现零丢包、抖动小于 20 微秒。⁸

国家级设施之上，确定性网络已经形成了完整的运营与区域部署体系。江苏未来网络集团有限公司（未来网络集团）成立于 2011 年，是 CENI 的运营与产业化单位，并与紫金山实验室牵头建成全球首个光电融合确定性新型算网基础设施，实现 2000 公里以上无电中继无损承载、400G 速率下全网抖动小于 5 微秒的确定性传输。在区域落地方面，山东省以“一院一企一基金”模式引入紫金山实验室确定性网络技术——山东未来网络研究院承接技术研发与成果转化，山东未来集团（山东未来网络集团）负责市场化与产业化运营，配套设立亿元级成果转化基金；2022 年 2 月 23 日，全球首张确定性网络——山东确定性网络正式建成发布，覆盖全省 16 个地市，同年 6 月全网升级至 2.0 版本，实现 20 微秒级时延抖动、零丢包的确定性控制，目前网络总长已超过 1.4 万公里，并在智慧矿山、超算算力共享、远程手术、协同制造等场景规模化应用。本白皮书第六章所述 CNOS 与运营商核心网 QoS 打通验证，正是在山东确定性网络现网环境中完成的。⁹

⁸资料来源：第一财经《第八届未来网络发展大会今日开幕，紫金山实验室发布多项重大成果》（2024 年 8 月 22 日）：CENI 正式建成，覆盖 40 个核心城市节点及沿途 133 个城市节点，10 城市超 1 万公里拥塞场景零丢包、最大时延抖动小于 50 微秒；江苏未来网络集团有限公司官方资料：CENI 列入国务院“十二五”时期 16 个国家重大科技基础设施项目、“十四五”规划国家战略科技力量，全长 3.4 万公里；新华三《多层次网络架构探索与实践》：基于 CENI 在途经 13 个省市、13000 公里、100% 负载条件下实现零丢包、抖动小于 20 微秒。

⁹资料来源：新华网《跨越 800 公里的“确定性”奔赴，紫金山下“铺网”的山东青年》（2026 年 8 月 7 日）及光明网问题报道：山东构建“一院一企一基金”协同架构，2022 年 2 月 23 日山东未来网络研究院、山东未来集团正式揭牌，全球首张确定性网络同步发布；山东未来网络研究院公开资料：山东确定性网络覆盖 16 市、总长 5600 公里，2022 年 6 月升级 2.0 版实现 20 微秒级时延抖动、零丢包，现已建成 1.45 万公里；江苏未来网络集团公开资

再看云端大脑一侧：本白皮书所采用的云端大脑，是国家科技部批复建设的国家级平台。云端机器人理念由达闼机器人（现达塔机器人）于 2015 年创立之初在全球首倡，2020 年 12 月发布云端机器人操作系统 HARIX OS（海睿）；2022 年 7 月，国家科技部正式批复支持其建设“云端机器人国家新一代人工智能开放创新平台”——国家新一代人工智能开放创新平台被称为“人工智能国家队”，是贯彻落实《国家新一代人工智能发展规划》、在人工智能重点领域择优遴选领军企业建设的国家级创新载体，达闼是其中首家、也是目前唯一一家面向云端机器人方向的国家级平台企业；2023 年 9 月，其机器人多模态具身大模型 RobotGPT 通过国家网信办算法备案，海睿 OS 升级至 5.1 版本；2023 年底，当选全国信标委人形机器人（具身智能）工作组联合组长单位，并作为核心企业参与工信部牵头组建的国家人形机器人制造业创新中心。该国家级平台面向全行业开放云端大脑能力，是全体机器人厂商与开发者共享的国家智能底座。¹⁰

本白皮书所述的云端大脑，正是达塔机器人基于国家级平台升级实现的新一代云端大脑——海睿 HAREIX：它完整继承国家级平台十余年积累的数字孪生、多模态通用智能与云端机器人生态运营能力，在超级智能体平台、多模态大模型平台与数字孪生世界三大方向上全面升级，并以国家级开放平台的姿态与紫金山实验室确定性网络体系深度合作，向全体机器人厂商与开发者开放。

两大国家级底座的叠加，赋予本白皮书提出的架构以独特的战略位势：我们的云端大脑，是科技部批复的国家级开放创新平台；我们的确定性网络，是国家级大科学装置孕育并经过现网规模验证的网络体系。在“国家平台+国家设施”的双重基础之上，本白皮书正式提出云端机器人确定性网络端到端架构——把两大国家战略科技力量汇聚成一张可管可控的具身智能互联网。这正是中国方案区别于一切企业级私有方案的根本所在：它不是一家公司的产品白皮书，而是国家创新体系面向具身智能时代

料：光电融合确定性新型算网基础设施实现 2000 公里以上无电中继无损承载、400G 速率 5 微秒抖动。

¹⁰资料来源：C114 通信网《达闼获批建设“国家新一代人工智能开放创新平台”，入选国家队》（2022 年）；中共西藏自治区委员会网信办转载《黄晓庆预言：人形机器人生态规模，将是手机 100 倍！》（2024 年 6 月 9 日）：达闼于 2022 年获科技部正式批复建设“云端机器人国家新一代人工智能开放创新平台”，2023 年底当选全国信标委（SC42）人形机器人（具身智能）工作组联合组长单位；达闼公开资料：2023 年 9 月 RobotGPT 多模态具身大模型通过国家网信办备案，2023 年作为核心企业参与工信部国家人形机器人制造业创新中心。

交出的一份体系化答卷。

1.8 本白皮书的核心论断

论断一：完整的具身智能必须采用“云端大脑 + 本体小脑”的双脑架构，本体单一大脑无法通向 AGI。论断二：连接双脑的神经网络必须是确定性网络——在广域尺度上，唯有确定性网络能同时满足有界时延、严格抖动、极低误码、硬隔离与全程可审计的全部要求，它是安全有效且唯一合宜的“神经束”。论断三：“云端大脑—确定性网络—机器人本体”通过五大标准接口（I1 - I5）构成端到端统一架构，可标准化、可产业化、可规模化复制。论断四：该体系使 AGI 与人形机器人始终处于人类可视、可审、可溯、可控之下，是具身智能机器人可管可控的中国方案。论断五：本架构建立在国家级大科学装置（未来网络试验设施 CENI 孕育并验证的确定性网络）与国家级开放创新平台（科技部批复的云端机器人国家新一代人工智能开放创新平台）的双重国家底座之上，具备企业级私有方案不可复制的战略位势与公共属性。

以下各章将依次展开：第二章给出确定性网络的完整技术架构与指标体系；第三章给出云端机器人架构体系；第四章论证三者的关系；第五章给出端到端统一架构；第六章给出全套接口定义与开源动议；第七至九章分别给出安全体系、标准生态与产业落地路线。

二、确定性网络技术架构

2.1 确定性网络的定义与核心特征

确定性网络（Deterministic Networking）的核心目标是：端到端有界时延、严格受限抖动、极低误码/丢包、业务完全隔离、故障毫秒自愈。它区别于传统以太网/IP “尽力而为”（Best-Effort）的无保障传输，在传统以太网物理介质基础上，为多种业务提供“准时、准确”的确定性服务质量保障，具备确定带宽、确定时延、确定抖动、确定丢包率的特征。经过近年理论研究与实践探索，确定性网络已形成以 FlexE、MTN、TSN、DetNet、DetWiFi、5GDN 为核心的完整技术体系：FlexE/MTN 解决物理层硬切片与承载，TSN 解决二层局域网确定性，DetNet 解决三层广域网确定性，DetWiFi 与 5GDN 解决无线接入侧确定性。

2.2 两大国际标准体系：IEEE TSN 与 IETF DetNet

确定性网络分为两大标准分支：TSN（IEEE 802.1 时间敏感网络）提供二层局域网确定性，面向工厂、车载、航空、电力等局域场景；DetNet（IETF 广域确定性网络）提供三层 IP/MPLS 广域确定性，面向跨城、跨域、长距离骨干。云端机器人广域连接以 DetNet + 5GDN 为主线，机器人本体内部及园区局域以 TSN 为主线，二者通过 RFC 9024 等标准跨域互通。从完整技术体系看，确定性网络自物理层到移动广域还包括 FlexE、MTN、DetWiFi 与 5GDN 等方向，共同构成当前确定性网络的研究重点（图 2-1）。

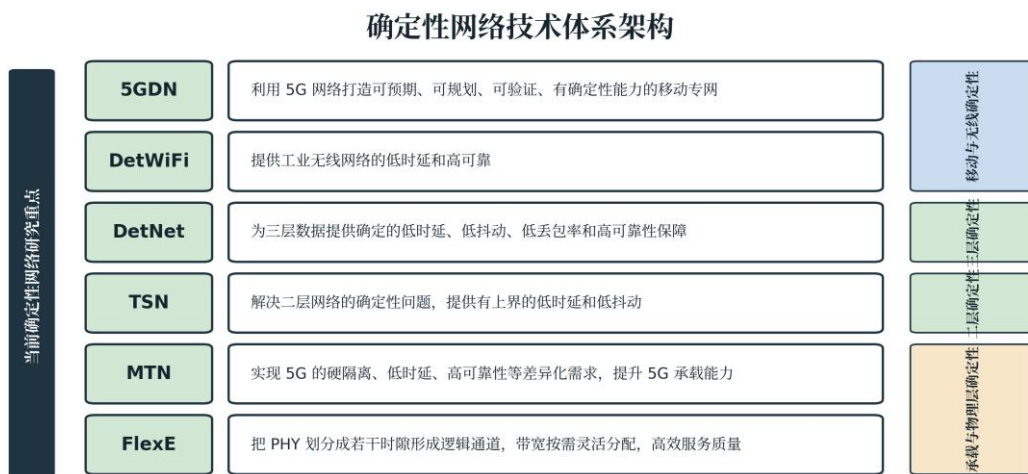


图 2-1 确定性网络技术体系架构（来源：紫金山实验室《确定性网络技术发展与产业应用白皮书》，2022）

标准编号	标准名称	核心作用
802.1AS	gPTP 通用精确时间同步	全网纳秒级时钟同步，所有调度机制的基础
802.1Qbv	时间感知调度 TAS	TDMA 时隙门控，硬隔离、控抖动的核心机制
802.1Qav	CBS 信用整形	带宽预留，抑制突发流量
802.1Qch	CQF 循环排队转发	异步低抖动调度，降低同步依赖
802.1Qcr	ATS 异步流量整形	非周期流量平滑，混合业务共存
802.1CB	FRER 帧复制与消除	多路径冗余，丢包/误码兜底
802.1Qbu/802.3br	帧抢占	高优先级业务打断低优先级帧，削减最大时延
802.1CM	5G 前传 TSN 扩展	承载基站前传确定性传输
802.1DG / 802.1DP	车载 / 航空机载确定性网络	自动驾驶车内通信、航空高可靠低误码需求

表 2-1 IEEE 802.1 TSN 核心标准明细（局域网二层）

类别	标准编号	核心作用
基础架构	RFC 8655 / RFC 8578	DetNet 整体架构、业务模型与需求定义；工业、电力、远程手术、AR/VR 等行业用例
数据平面	RFC 9024 / RFC 9346	TSN over MPLS 跨域互通；SRv6 DetNet 段路由确定性转发
数据平面增强	TCQF（draft-eckert-detnet-tcqf）	广域增强 CQF，适配长距离链路抖动补偿
控制平面	RFC 8964 / RFC 9030	路径计算与资源预留；OAM 运维检测
可靠性	RFC 9107	广域多发选收、冗余路径故障切换

表 2-2 IETF DetNet 核心 RFC 标准明细（三层广域 IP/MPLS）

配套协同标准还包括：ITU-T Y.3121（跨域确定性 QoS 架构与时延/抖动/误码分级指标）；3GPP R17/R18 TSC（5G-TSN 互通与无线侧确定性承载）；OIF FlexE（物理层硬切片）；中国主导的 SPN/MTN 体系（G.8310 MTN 架构、G.8312 MTN 接口已由 ITU-T SG15 正式发布，标志着中国在传送网原创技术标准上的突破）；以及国内工业

互联网、电力（IEC 61850 确定性扩展）、轨道交通（TRDP）等行业标准。

2.3 五层核心技术体系

确定性网络的核心技术按“同步层—调度层—隔离层—可靠性层—控制层”五层架构组织：

- 同步层（无同步则无严格抖动控制）：TSN 侧采用 802.1AS gPTP，节点间时钟偏差 ≤ 100 ns，工业典型 5 - 50 ns；DetNet 广域侧融合 1588v2 与北斗/GPS 授时并做长距光纤时延补偿，TCQF 异步调度可将广域同步精度要求放宽至微秒级仍保障抖动。
- 调度层（有界时延与控抖动核心）：TAS 时间感知门控（802.1Qbv）为关键控制流提供独占时隙，单跳抖动 < 500 ns、8 跳端到端抖动 ≤ 1 μ s；CQF/TCQF 循环排队转发以双缓存周期化转发消除队列竞争，适配广域链路，抖动 ≤ 20 μ s 级；CBS 信用整形（802.1Qav）限制突发；帧抢占（802.1Qbu）大幅削减最坏排队时延。
- 隔离层（防止非关键业务干扰）：二层 VLAN + 优先级队列分级；FlexE 物理硬切片实现时隙级完全隔离；DetNet 三层流隔离为每条确定性流分配专属转发通道、独立缓存与资源预留；队列隔离调度杜绝拥塞扩散。
- 可靠性层（极低误码/丢包的直接保障）：FRER 帧复制消除（802.1CB）使单链路丢包 10^{-3} 时业务等效丢包降至 10^{-9} ；DetNet 广域多发选收配合 OAM 故障检测 5 ms 内完成路径倒换；光链路 FEC（ITU-T G.709）将光纤原始误码从 10^{-5} 提升至 10^{-12} ；流级 CRC 校验与错误包隔离避免误码连锁恶化。
- 控制层（端到端资源预留与路径固化）：控制器离线路径规划，禁止传统 IP 动态路由跳变（路由跳变正是传统网络抖动的根源）；交换机/路由器为每条流预分配缓存、时隙与端口带宽；网络演算准入控制——上线前计算业务最大时延、最坏抖动、最大突发，资源不足直接拒绝接入，保障存量业务确定性不变；OAM 逐跳实时采集时延、抖动、误码、丢包并告警重规划。

2.4 与传统网络的关键指标代际差异

确定性网络与传统以太网/IP 网络的差异不是程度差异，而是机制差异：前者以

“资源硬预留、固定路径、时分调度、流隔离”取代后者的“尽力而为、共享队列、动态路由、无资源预留”。关键量化指标存在明确的代际鸿沟：

指标	传统 IP / 以太网	TSN 局域网	DetNet 广域网
端到端最大时延	无界，拥塞可达数百 ms	$\leq 1\text{ ms}$ （10 跳以内）	$\leq 5 - 10\text{ ms}$ （跨城数百公里）
抖动（PDV）	局域轻载 1 - 10 ms；拥塞 20 - 200 ms；跨城公网 50 - 500 ms 无上限	单跳 $<500\text{ ns}$ ；8 跳端到端 $\leq 1\text{ }\mu\text{s}$	SLA 上限 $\leq 20\text{ }\mu\text{s}$ （电力等场景收紧至 $5\text{ }\mu\text{s}$ ）
误码率（BER）	$10^{-6} \sim 10^{-5}$ ，工业干扰环境恶化至 10^{-4}	底层链路 $\leq 10^{-12}$ ，业务等效 $\leq 10^{-9}$	业务等效 $\leq 10^{-9} \sim 10^{-12}$
丢包率	拥塞随机丢包 0.1% - 5%	稳态 0 丢包	稳态 0 丢包，故障时等效 $<10^{-9}$
故障切换	30 - 300 s（路由收敛）	$<5\text{ ms}$ （FRER 冗余）	$<50\text{ ms}$ （多路径倒换）
带宽保障	统计复用、峰值抢占	流级硬带宽预留	端到端带宽切片固化
SLA 履约	无强制时延/抖动承诺	硬实时 SLA，违约可溯源	运营商级确定性 SLA

表 2-3 确定性网络与传统网络关键指标对比

2.5 分级 SLA 与全套测试验证体系

确定性网络按业务需求实行分级 QoS 服务模型，将业务映射到确定性的服务等级并在报文头封装分级标记，按等级保障端到端转发：

等级	指标要求	典型业务	云端机器人业务映射
Level-1	基本带宽保障，时延/抖动无要求	下载类（FTP 等）	日志回传、OTA 升级包下载
Level-2	抖动 $<50\text{ ms}$ ，时延 $<300\text{ ms}$	同步语音类	机器人语音交互回传
Level-3	时延 $<50\text{ ms}$ ，抖动 $<50\text{ ms}$	视频、生产监控	8K 视觉/全景视频回传
Level-4	时延 $<20\text{ ms}$ ，抖动 $<5\text{ ms}$	AR/VR、云游戏、全息通信	遥操作、数字孪生实时映

等级	指标要求	典型业务	云端机器人业务映射
			射
Level-5	时延 <10 ms，抖动 <100 μs	电力保护、远程控制	云端大脑任务指令闭环、急停链路

表 2-4 确定性 QoS 五级服务模型与云端机器人映射

全套测试体系覆盖四个维度：一致性测试（IEEE TSN / IETF DetNet RFC 协议合规）、性能测试（时延、抖动、误码、丢包、吞吐）、可靠性测试（冗余切换、故障注入、72 小时长稳、电磁抗扰）、组网级系统测试（多流混合、跨域互通、≥300 条并发确定性流的大规模组网）。抖动测试以 99.999% 分位为判定指标（TSN 工业控制 ≤1 μs、广域 DetNet 骨干 ≤20 μs），误码测试分层进行——物理链路 BERT 测试要求开启 FEC 后原始 BER ≤10⁻¹²，业务等效 BER 测试在故障注入下要求工业控制 ≤10⁻⁹、电力保护 ≤10⁻¹²。中国信通院 D-CUBE 两维五级评测框架（网络维度：链路级→节点级→单域→多域大规模；业务维度：视频→普通工控→高可靠电力保护/远程手术）输出量化评测报告，可作为云端机器人网络准入的评测依据。

2.6 中国工程实践：国家 6G 确定性网络重大专项与运营商核心网打通

确定性网络在中国已完成从标准跟随到工程引领的转变。紫金山实验室牵头国家百亿级 6G 确定性网络重大专项，已建成覆盖全国的未來网络试验设施（CENI），并在广域骨干上完成 DetNet 超低抖动远距离通信验证。面向云端机器人场景的关键工程进展是：紫金山实验室已与中国移动在山东完成 5G 核心网与传输层 QoS 的打通验证——这意味着确定性网络的调度能力已经穿透到运营商核心网，云端机器人业务流可以获得“空口—承载—核心网”端到端的确定性保障，而非仅在封闭园区成立。这一验证为本白皮书第六章的 I2 接口（CNOS 与运营商核心网对接）提供了现网实证基础，为全国主要城市的规模化试点扫清了核心网对接障碍。

在此基础上，确定性网络与运营商 5G 网络的互联互通已在江苏、山东的主要城市率先实现——云端机器人业务在上述城市的现网环境中已经可以获得端到端的确定性接入服务；目前，产业各方正在规划和实施全国主要城市的互联互通，逐步形成覆盖全国主要商业市场的“确定性网络+5G”一体化接入能力，为全国万台级试点与后续规模化商用提供网络底座。

2.7 面向 AI 与云端机器人的超低误码演进（ $10^{-12} \rightarrow 10^{-15}$ ）

当前商用确定性网络的成熟指标为业务等效 $BER \leq 10^{-12}$ ，可满足工业控制、电力、远程手术等场景。但云端机器人 7×24 小时不间断运行、百万台集群协同，残余微量误码会持续累积，引发感知数据失真、推理结果偏差、动作指令抖动等隐性问题。下一代确定性网络通过四级体系向稳态业务等效 $BER \leq 10^{-15}$ 演进：物理层超低损耗纯芯光纤与动态自适应超高阶 FEC，将纠错后链路 BER 压制至 10^{-16} 以下；链路层升级为三路径独立物理链路冗余与帧级实时比对纠错，错误帧主动修复而非丢弃重传；转发层实现纳秒级时序绝对同步、专属硬件缓存固化与零突发扰动；业务层搭载轻量 AI 监测模型，实时预判链路衰耗与误码趋势，在误码发生前完成带宽补偿与路径切换，实现从“被动纠错”到“主动防错”的升级。 10^{-15} 超低误码将彻底消除云端机器人业务的隐性损耗，支撑感知数据百分百无损上传、云端指令精准下发与集群协同时序统一，是高端机器人承载网络的差异化准入标准。

三、云端机器人架构体系

3.1 云端机器人与“云-网-端”总体架构

云端机器人（Cloud Robot）是指将高级认知智能部署于云端、将实时运动智能保留于本体、通过运营商机网络安全连接二者的新型机器人形态。其“云-网-端”总体架构为：云端大脑承担“想什么”，网络承担“传得准”，本体承担“怎么动”与“微执行”。

云端机器人理念由达闼机器人于 2015 年创立之初提出，其云端机器人操作系统 HARIX OS（海睿）于 2020 年 12 月正式发布，2022 年获科技部批准承建“新一代人工智能云端机器人开放创新平台”，2023 年发布海睿 OS 5.1，形成数字孪生、多模态通用智能与云端机器人生态运营能力。¹¹

云端机器人架构的产业意义在于：把昂贵的通用智能集中部署在云端，显著降低单机成本，使本体可以标准化、可制造、可规模化复制；智能主要来自云端并可远程迭代，终端具备运营商级的安全认证、远程管理与计费能力。这决定了云端机器人不是一次性售卖的硬件，而是持续运营的智能终端——其产业地位相当于智能手机时代的“公版旗舰机”。

3.2 云端大脑：超级智能体平台、多模态大模型平台与数字孪生世界

云端大脑（海睿 HAREIX）是机器人的高级认知中枢，即机器人的“新皮质”，由三大平台构成：

- 超级智能体平台：承担复杂决策、自然语言理解与多步任务分解，支持“Show&Tell”一次示教学习——人类演示一次，机器人即可拆解技能、生成策略并在仿真验证后部署；同时开放技能编排能力，支持第三方开发店长、视频伴侣等垂域应用技能。

¹¹资料来源：达闼机器人公开资料：2020 年 12 月发布 HARIX OS 海睿云端机器人操作系统；2022 年获科技部批准承建新一代人工智能云端机器人开放创新平台；2023 年发布海睿 OS 5.1。达闼机器人的云端大海睿 HAREIX 系基于该国家级平台升级实现。

- 多模态大模型平台：可以在数字孪生里面实时运行视觉-语言-动作大模型与世界模型，构建环境的三维表征与动态预测，使机器人在陌生环境中也能自主规划行动，大幅降低对预设地图与编程的依赖；云端大脑以 1 - 30 Hz 频率向 RCU 下发任务级指令与场景语义，不直接参与毫秒级本体运动控制。
- 数字孪生世界：为机器人服务的所有物理场景建立全方位数字孪生实时映射，机器人可以在孪生世界中完成训练、验证与预演后再进入物理世界执行；云端大脑的另外一个独特能力，是这些行为也可以直接进入运营的操控环节；全球机队经验通过共享技能的云端大脑形成集群数据闭环，一台学会、万台受益。

云端大脑同时是多机集群调度中枢：百万台机器人的任务分配、路径协同、负载均衡在云端统一优化。世界模型与数字孪生使云端大脑具备“先仿真、后执行”的能力——每一项新任务、每一个新技能，先在数字孪生世界中充分验证其安全性与成功率，再下发到物理机器人，这是云端机器人安全性优于本体自主机器人的又一结构性原因。

3.3 机器人本体控制系统现状：ROS2+LPR 双系统及其局限

当前国内双足人形机器人普遍采用“上位机 ROS2 + 下位机 LPR + 中间网关”的双系统架构：ROS2 负责全方位 AI 控制与感知处理，LPR 负责实时运动控制。该架构保证了本体实时性，但存在三重局限：一是智能局限于本体，无法获得 AGI 级认知与长流程任务规划能力；二是两系统通过网关互通，协议私有、安全薄弱，无法直接接入运营商网络；三是各厂商软硬件互不兼容，产业协同成本高。云端机器人架构并不推翻本体双系统，而是将其升级为“云-网-端”三层体系中的“端”：本体保留实时运动智能与安全自治能力，通过标准化机器人连接单元（RCU）接入云端大脑。

3.4 机器人连接单元 RCU：云端大脑的标准接入终端

机器人连接单元 RCU（Robot Connect Unit）是云端机器人体系的关键创新，其产业定位对标手机的 SIM 卡：它是一个独立的、可插拔的标准硬件模块，本质是一台运行云端机器人操作系统的 5G 终端。RCU 通过 5G/WiFi（未来 6G）接入确定性网络网关，与云端大脑建立有效连接，再连接机器人本体的上位机（CCU），从而实现对整个机器人的云端控制，并从通信质量与安全两个维度全面实现具身智能网络管理。RCU 承担四项职责：

- 云端协议栈：与云端大脑世界模型建立加密会话，执行任务下发与遥测上报；
- 运营商能力：身份认证、安全启动、远程管理、OTA 升级与用量计费；
- 端侧轻量推理：语音唤醒、关键词识别、应急避障等低时延任务；
- 通信中枢：管理 5G/5G-A（可演进 6G）与 WiFi 7 双链路聚合，保障云脑连接 99.99% 可用。

RCU 的职责铁律是：RCU 只与云端大脑交互，不直接输出运动指令；所有毫秒级运动控制由本体 CCU 独立完成。这一职责划分保证了网络波动时机器人本体行为的确定性与安全性。RCU 的可插拔设计同时支撑机器人租赁商业模式：更换机器人时无需重新配置，拔出 RCU 即带走用户身份与数据，避免隐私泄露与数据恢复风险。

特别值得强调的是 RCU 的安全基因：RCU 已经实现 VBN（Virtual Backbone Network，安全神经网络）技术的商业应用。VBN 为机器人与云端之间提供基于身份的端到端加密通道、设备认证与网络层访问控制，使每一台机器人从接入伊始就运行在一张可管可控的安全神经网络之上。VBN 解决“连接的安全”，确定性网络解决“连接的确定”——二者叠加，恰好构成云端机器人对“安全有效的神经网络”的全部要求。下一步，通过 5G 网络与确定性网络核心网的端到端打通，RCU 将把这张安全神经网络升级为“云端大脑—确定性网络—机器人本体”三位一体的云端机器人体系的终端锚点。

3.5 参考实现：马尔斯 M1 公版开放人形机器人平台

马尔斯机器人有限公司的马尔斯人形机器人 M1 是本架构的首个全尺寸公版参考实现。M1 身高 1.68 m、整机约 58 kg、全身 82 个自由度（含双手 44 个）、双臂负载 30 kg，采用达塔“七仙女”人形机器人 ID 标准，以“公版化、可制造、标准化”为核心设计目标，面向富士康、比亚迪电子、领益智造等第三方制造巨头开放公版设计包。

层级	配置	职责
云	海豹 HAREIX 云端大脑（GPU 集群）	数字孪生，世界模型、任务规划、集群调度、联邦学习

层级	配置	职责
网	5G/5G-A（可演进 6G）+ WiFi 7 双链路聚合	运营商级确定性接入，预留通感一体演进
边（RCU）	高通骁龙高端平台	云端大脑客户端、安全认证、远程管理、计费
端（CCU）	NVIDIA Jetson Thor，2070 FP4 TFLOPS，128 GB	本体 VLA 推理、1 kHz 全身闭环、多传感器融合
区域	8 × 车规 MCU，EtherCAT/CAN FD 实时总线	2 - 4 kHz 关节伺服闭环与传感预处理，TSN 保障同步抖动<1 μs
感知	8K 双目 + 双 4K 全景鱼眼 + 全身触觉皮肤	“中央视力 + 余光”人类级感知，0.01 N 触觉分辨率

表 3-1 马尔斯 M1 云-网-端核心配置（公版参考实现）

M1 本体主控选用 NVIDIA Jetson Thor 机器人超级计算机（Blackwell 架构，2070 FP4 TFLOPS，128 GB 统一内存），可在本体端运行多模态 VLA 大模型与全身强化学习控制策略，支撑断网情况下的安全降级自治。¹²

M1 证明了本白皮书架构的工程可行性：82 个自由度的位置、速度、力矩、温度均以 1 kHz 频率在 SDK 中可读写并向开发者开放；断网时本地 VLA 策略保障机器人继续安全作业或优雅停机；公版架构、公版制造、公版定制与 8S 店渠道（销售、展示、服务、备件、技能、培训、调度、回收）构成完整的产业放大器。

¹²数据来源：NVIDIA Jetson Thor 官方规格（2026 年）：2070 FP4 TFLOPS AI 算力、128 GB 统一内存、40 - 130 W 功耗。

四、云端大脑、确定性网络与机器人本体的关系

4.1 三元架构的生物学映射：新皮质、神经束与小脑

人类神经系统为云端机器人提供了最深刻的架构参照。人的智能并非集中在一个器官：新皮质负责认知、语言与长期规划；小脑负责运动协调与平衡；脊髓与周围神经负责反射与微执行；连接它们的神经束则必须保证信号传输的高度保真与严格时序——神经信号的延迟与失真会直接表现为运动失调。云端机器人体系正是这一亿年进化成果的工程映射：云端大脑是“新皮质”，机器人本体 CCU 与区域控制网络是“小脑与脊髓”，确定性网络则是连接高级中枢与躯体的“神经束”。这一映射揭示了一个常被忽视的事实：神经束的质量与大脑、小脑同等重要。一个传导不稳定、时延不确定、可被干扰的神经束，会使最聪明的大脑也无法安全地驱动躯体。

4.2 频率分层与职责边界

三元架构成立的技术基础是严格的频率分层：不同层级的智能工作在不同的时间尺度上，各层职责互不越界。云端大脑以 1 - 30 Hz 工作于任务级时间尺度，输出“做什么”的语义指令；确定性网络以毫秒级有界时延完成传输；RCU 以百毫秒级完成会话与链路管理；本体 CCU 以 1 kHz 完成全身闭环控制；区域嵌入式 MCU 以 2 - 4 kHz 完成关节伺服。毫秒级以内的动态平衡、反射动作、精细操作全部在本体实时完成，不依赖网络；网络只需保证云端环路的确信性与安全。这一分层使“云端大脑上云”在控制理论上严格成立——网络时延被隔离在慢环路，快环路永远本地闭环。

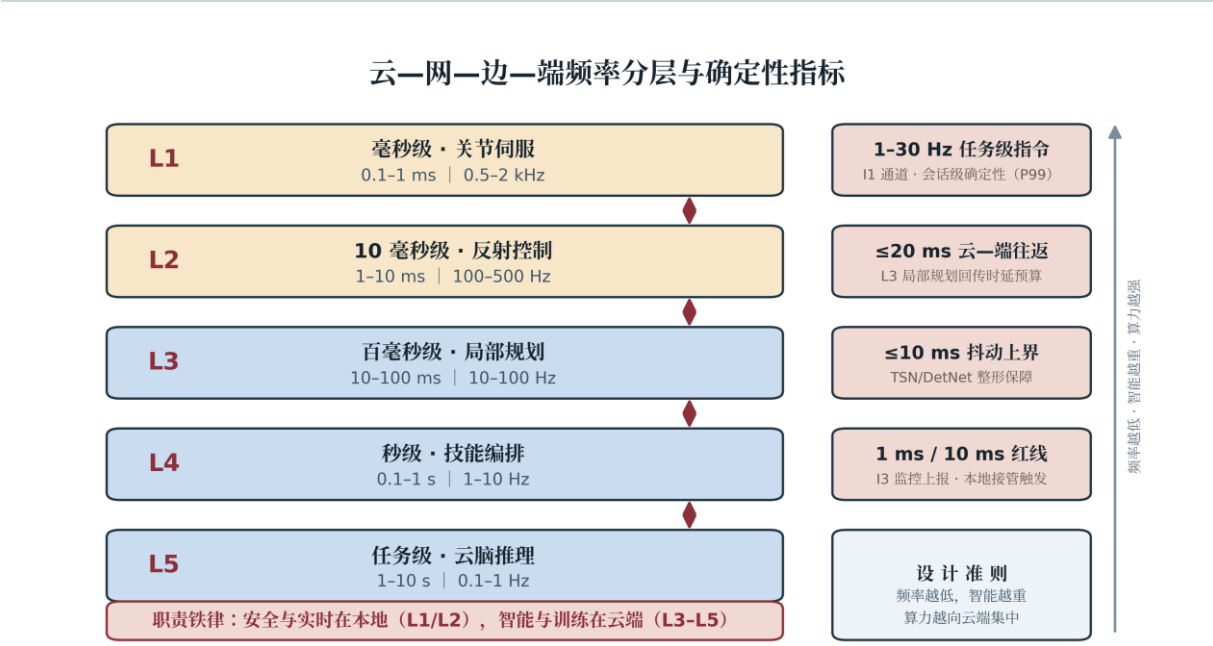


图 4-1 云端机器人控制频率分层与职责边界

层级	工作频率	核心职责	对网络的需求
云端大脑 海叡 HAREIX	1-30 Hz	任务规划、集群调度、联邦学习	端到端时延 ≤10 ms、抖动 ≤ 20 μs、零丢包
确定性网络	毫秒级闭环	准时、准确、可审计的指令与遥测传输	—（自身即保障者）
RCU（连接器）	100-1000 Hz	加密会话、任务下发、遥测上报、链路聚合、认证计费	链路可用性 99.99%，双链路聚合
CCU（小脑）	1 kHz	全身闭环控制、多传感器融合、断网安全降级	不依赖网络实时性
区域 MCU + 关节	2-4 kHz	力矩闭环、编码器采集、微秒级执行	本体内部 TSN 总线，抖动<1 μs

表 4-1 三元架构频率分层与职责边界

4.3 国际路线对比：本体单脑、本体双脑与云端双脑

全球具身智能正在形成三条技术路线。国内多数厂商的“本体单一大脑”路线已触及智能天花板；Figure AI 的 Helix 以 S2（7B 视觉语言模型，7 - 9 Hz）+ S1（80M 视觉运动策略，200 Hz）实现“大脑 + 小脑”分层，于 2026 年演进为加入 S0 全身平衡层的三层架构，更以一套统一权重实现“一个大脑同时控制多本体”，验证了分层智能与一脑多机的正确性；但其“大脑”目前仅本地化部署（嵌入式 GPU+本地

WiFi），尚未形成广域云端架构，不具备广域规模化部署能力，也无从支撑集中管控与运营商级商业运营。¹³

维度	本体单脑路线	本地双脑路线（Helix 式）	云端双脑路线（本方案）
智能上限	动物大脑：仅机械控制与传感	受本体算力限制的中等智能	AGI 级：云端万卡集群，算力无上限
连接方式	无/局域	仅本地 WiFi，无广域能力	5G/5G-A + 确定性网络，广域全域覆盖
集群进化	单机孤立学习	一脑多机但限于本地，数据难共享	联邦学习集群闭环，一台学会万台受益
可管可控	黑盒，不可审计	封闭私有，外部不可审计	决策在云端，全程可视、可审、可溯、可控
规模运营	无	无运营商级认证计费	运营商级认证、计费、远程管理与调度
单机成本	高（智能随本体售卖）	高（双 GPU 本体部署）	低（智能集中在云端摊薄）

表 4-2 三条具身智能架构路线对比

对比的结论清晰：本地双脑解决了“智能分层”问题，但只有云端双脑才能同时解决“智能上限、集群进化、集中管控、规模运营”四大问题；而云端双脑的成立，又必须以确定性网络为前提。三条路线的竞争，本质是“有没有一条合格的神经束”的竞争。

4.4 确定性网络五大能力与云端机器人需求的精确匹配

将云端机器人的网络需求逐项展开，可以发现确定性网络的五大核心能力与之形成一一对应的精确匹配——这正是本白皮书“确定性网络的独特能力恰好实现安全有效的云端机器人神经网络”这一论断的技术展开：

¹³资料来源：Figure AI Helix 公开技术资料（2025 年 2 月）：S2 为 7B 参数视觉语言模型（7-9 Hz），S1 为 80M 参数视觉运动策略（200 Hz）；Helix 02（2026 年 1 月）新增 1 kHz S0 全身平衡层；Helix 2.5（2026 年 9 月）发布。

云端机器人需求	确定性网络能力	达标指标
任务指令闭环时延有上界，慢环路控制稳定	资源硬预留 + 固定路径 + 时分调度	跨城端到端时延 $\leq 10\text{ ms}$
指令到达时刻精确，动作语义不因抖动变形	TAS/CQF/TCQF 严格抖动控制	广域抖动 $\leq 20\text{ }\mu\text{s}$ ，局域 $\leq 1\text{ }\mu\text{s}$
感知与指令数据零失真，长期无累积差错	FEC + FRER + 多发选收三级纠错	等效误码 $\leq 10^{-9} \sim 10^{-12}$ ，演进至 10^{-15}
控制业务绝不受视频流、公众业务挤占	FlexE 物理硬切片 + 流级隔离 + 准入控制	硬隔离，新增业务不改变存量 SLA
7×24 不间断运营，链路故障业务无感	多路径冗余 + OAM 实时检测	故障自愈 $< 10\text{ ms}$ ，稳态 0 丢包
每一字节可审计、每一次决策可追溯	路径固化 + 全程 OAM 遥测	逐跳时延/抖动/丢包可视，SLA 违约可溯源

表 4-3 云端机器人网络需求与确定性网络能力匹配

尤其值得强调的是第六行：传统网络是“管道”，用完即走、无迹可查；确定性网络是“受控设施”，每条流的路径、资源、履约全程留痕。当机器人执行的是一个涉及人身安全的物理动作时，网络留痕能力与机器人行为审计共同构成完整证据链——这是可管可控在工程上的最后一公里。

4.5 断网降级与本体安全自治

确定性网络把断网概率压到极致，但架构设计必须假设极端情况仍然发生。三元架构的最后一道安全网在本地：当 RCU 检测到与云端大脑的连接中断或 SLA 违约时，CCU 立即接管完整控制权，由本地 VLA 策略保障机器人继续安全作业或优雅停机——原地稳定站立、减速回安全位、完成手头关键动作后待命。本体小脑的自治能力（1 kHz 全身闭环、多传感器融合、触觉皮肤碰撞感知）在任何网络条件下都完整可用。网络恢复后，RCU 向云端大脑同步断网期间的状态摘要，由云端重新校准任务上下文。由此形成“常态云端智能、极端本体自治”的双保险，运营商级可靠性由此闭环。

五、端到端统一架构：云-网-端一体化设计

5.1 端到端统一架构总览

云端大脑、确定性网络与机器人本体三者并非简单串联，而是通过统一架构设计融合为一个端到端系统。总体架构如图 5-1 所示：云端大脑层提供智能，确定性网络层提供传输与管控，机器人本体层提供执行与安全自治，端到端安全与可管可控体系纵向贯穿三层。

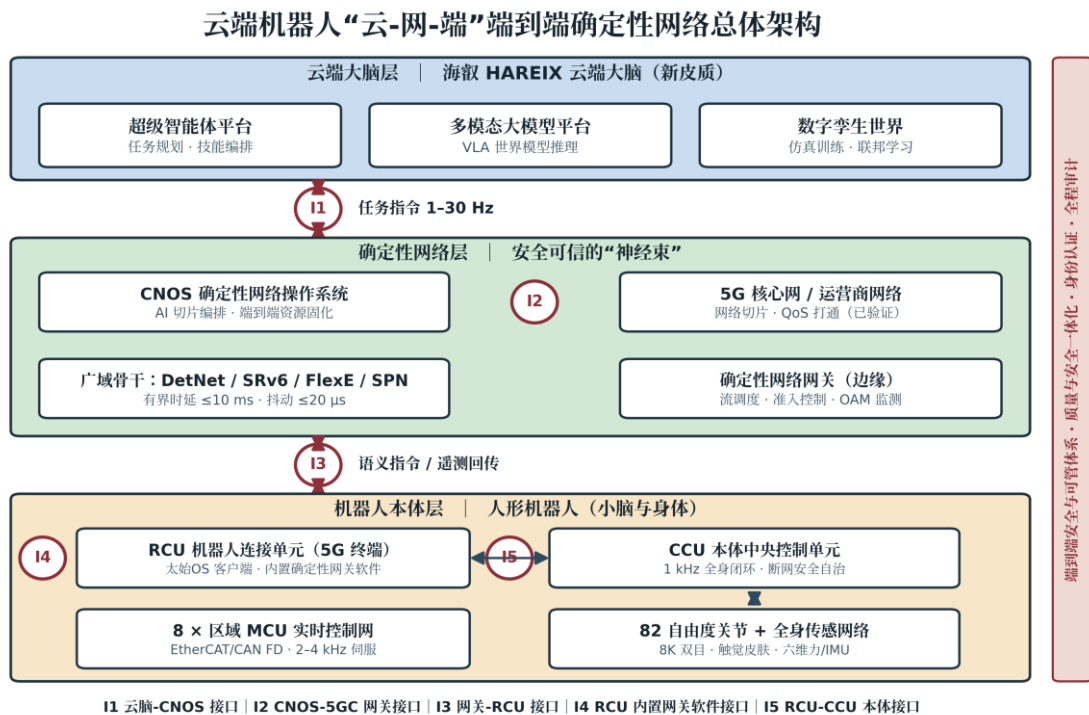


图 5-1 云端机器人“云-网-端”端到端确定性网络总体架构

统一架构遵循四项设计原则：一是分层解耦——智能、传输、执行各司其职，接口标准化；二是网络内生安全——安全能力内建于网络架构而非外挂；三是确定性闭环——每一项业务都有明确的 SLA 承诺与履约验证；四是双脑协同——云端智能与本体自治互为冗余备份。

5.2 业务平面、控制平面与管理平面

- 业务平面：承载三类业务流——控制流（云端大脑任务指令与场景语义，1 - 30 Hz，小字节、最高优先级）、遥测流（机器人状态、关节数据、传感摘要上

行）、媒体流（8K 视觉与全景视频回传、语音交互）。三类流分级切片承载，互不干扰。

- 控制平面：由 CNOS 确定性网络操作系统集中掌控，负责流级路径计算、资源预留、准入控制、切片编排与调度策略下发；控制平面本身通过带内/带外管理通道与网络设备、网关、RCU 内置网关软件联动。
- 管理平面：负责业务开通、计费结算、故障管理、性能分析、审计日志与安全策略管理；面向运营商、机器人运营商与监管机构分权分域开放。

5.3 端到端 QoS 与安全一体化管控框架

传统体系中，网络质量（QoS）与网络安全分属两套系统，安全设备串接往往破坏时延确定性，QoS 调度又可能绕过安全策略。本架构将过往研发的端到端安全技术与端到端 QoS 体系融合，形成质量与安全一体化管控框架：安全策略随流而生——每条确定性流在注册时即绑定身份、权限、加密套件与 QoS 等级；加密零妥协——控制流全程端到端加密（支持国密算法），加密开销计入 SLA 时延预算统一调度；审计随路而行——OAM 遥测与安全日志同管道采集，质量异常与安全事件统一关联分析。一体化的结果是：安全不再是确定性的敌人，而是确定性的一部分。

5.4 双数字孪生闭环：机器人数字孪生与网络数字孪生

端到端架构中存在两个数字孪生：云端大脑维护机器人与物理场景的数字孪生（任务孪生），CNOS 维护网络资源与 SLA 履约的数字孪生（网络孪生）。双孪生协同形成完整闭环：机器人接到新任务时，先在任务孪生中仿真验证动作安全性与成功率；CNOS 同时在网络孪生中推演该任务所需业务流的资源可行性与 SLA 可达性，网络演算不满足则拒绝接入或请求扩容；两个孪生都通过后，任务才被允许下发到物理世界执行。执行过程中，真实世界的遥测数据持续回流校准两个孪生模型，AI 预测性运维在故障发生前完成路径切换与资源补偿。“先孪生验证、后物理执行”——数字孪生由此成为具身智能安全的第二道结构性防线。

5.5 面向 6G 的架构演进

本架构在设计之初即面向 6G 演进：3GPP 已于 2026 年 6 月敲定首个 6G 标准版本 Release 21 的时间表——2027 年 3 月启动规范性研制，2029 年 3 月完成全版本冻结，

业界普遍预期 2030 年前后商用；6G 将把通感一体、原生 AI、超高可靠低时延作为核心场景，与确定性网络形成原生融合。¹⁴

RCU 在硬件层面已预留 6G 演进空间，支持通感一体与空口信令/承载分离架构；确定性网络骨干的 SRv6 可编程能力与网络孪生将平滑演进到 6G 原生确定性。网络演进的终局正如本体系设计之初所预判：具身智能机器人是确定性网络落地的第一个规模化场景，随着机器人数量的大幅增长，确定性能力将从机器人切片逐步扩展到通信网的全面改造，最终让具身智能互联网延伸到全部互联网——整个互联网由此完成从“尽力而为”到“确定性”的历史性升级。

¹⁴GPP 于 2026 年 6 月 RAN 第 112 次全会（新加坡）敲定 Release 21 时间表：2027 年 3 月启动规范性研制，2029 年 3 月全版本冻结，业界预期 2030 年前后 6G 商用。

六、接口定义与通信协议体系

6.1 接口体系总览（I1 - I5）

端到端统一架构通过五个标准接口连接六个功能实体（云端大脑、CNOS、5G 核心网/运营商网络、确定性网络网关、RCU、机器人本体 CCU）。五个接口的定义遵循“意图化、标准化、可审计”原则，全部接口协议面向产业开放，形成可互操作、可测试认证的标准体系。

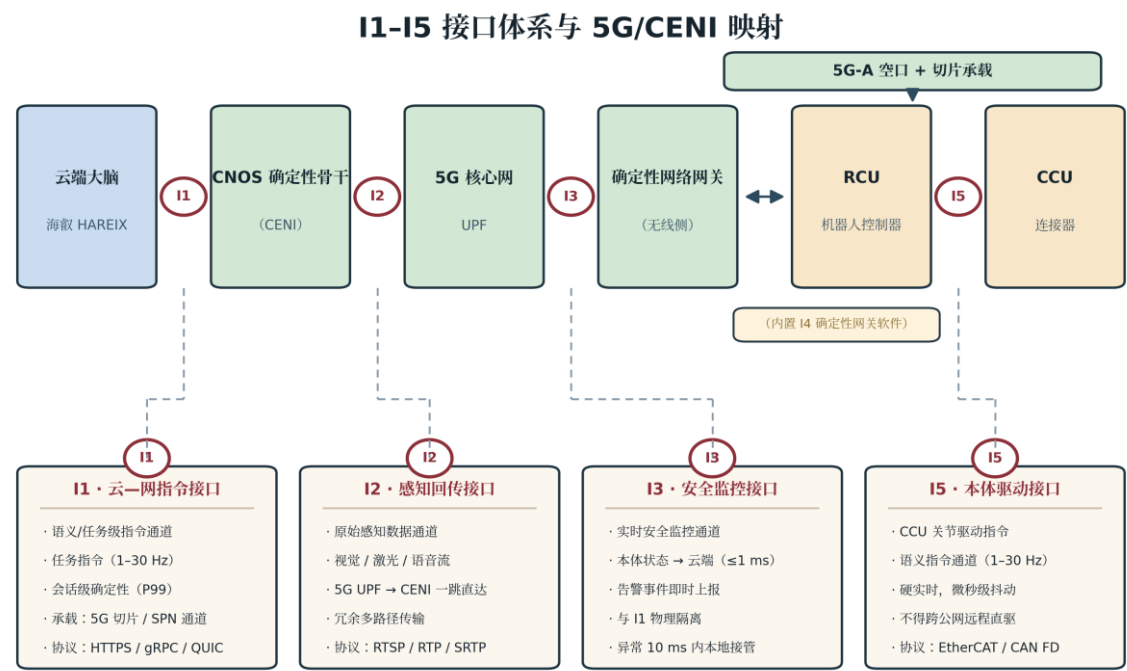


图 6-1 云端机器人端到端接口体系（I1 - I5）

接口	连接双方	核心功能	协议族 / 对齐标准
I1	云端大脑 ↔ CNOS	确定性流注册、SLA 协商、会话绑定、遥测订阅、策略下发	gRPC/RESTful + YANG; 对齐 RFC 8655、draft-ietf-detnet-yang
I2	CNOS ↔ 5G 核心网/运营商	AI 切片自动编排、QoS 映射、能力开放、计费结算	NEF/PCF/SMF 服务化接口; 对齐 3GPP R17/R18 TSC、TS.23/29 系列
I3	确定性网络网关 ↔ RCU	接入认证、三流分级承载、SLA 保障、移动性管理	5G-A 空口 + SRv6/FlexE 承载; DTLS/IPsec + 国密 SM4; 应用层二进制帧/QUIC

接口	连接双方	核心功能	协议族 / 对齐标准
I4	RCU 内置确定性网关软件	流表执行、本地队列调度、OAM 探针、断网降级触发	CNOS-Agent API（随太始 OS 开源）
I5	RCU ↔ 本体 CCU	语义指令通道、状态回传、时间同步、安全仲裁	千兆/万兆以太网 TSN（802.1AS/Qbv/CB）；太始 OS 标准设备模型

表 6-1 端到端接口总览

6.2 I1：云端大脑与确定性网络操作系统（CNOS）接口

I1 是“智能”与“网络”的握手接口。云端大脑作为业务方，通过 I1 向 CNOS 声明每一条机器人业务流的确定性需求；CNOS 作为网络方，通过网络演算给出承诺并全程履约。I1 采用意图化设计——云端大脑描述“要什么”（SLA 意图），而非“怎么做”（路径与队列配置），网络实现细节由 CNOS 自治完成。

API 原语	功能定义	关键参数
Flow.Register	注册一条机器人确定性业务流	流标识、源/目的（云脑集群—机器人群组）、SLA 等级、带宽、时延上限、抖动上限、误码上限、生命周期
Flow.Negotiate	SLA 协商与准入应答	网络演算结果：承诺 SLA / 降级建议 / 拒绝原因
Session.Bind	业务流与机器人身份、任务会话绑定	机器人一机一码标识、RCU 证书指纹、任务会话 ID
Telemetry.Subscribe	订阅网络侧遥测	逐跳时延/抖动/丢包、SLA 履约率、异常事件推送
Policy.Update	动态调整流策略	带宽升降配、优先级变更、冗余路径启停
Audit.Report	审计数据上报	流级通信留痕、SLA 违约记录、安全事件关联标识

表 6-2 I1 接口核心 API 原语定义

I1 的数据模型采用 YANG 建模（对齐 draft-ietf-detnet-yang），保证跨厂商设备可

配置、可互操作。典型工作时序为：云端大脑为一批机器人注册任务流 → CNOS 网络演算并承诺 SLA → 会话绑定到具体机器人 → 任务执行中遥测持续回流云端大脑与网络孪生 → 任务结束流注销、资源释放。I1 使“每一个机器人任务都有一张可审计的网络承诺书”。

6.3 I2：CNOS 与 5G 核心网/运营商对接网关接口

I2 解决运营商网络侧的关键痛点：当前运营商核心网 5G 切片编排流程繁琐，在无高等级 AI 辅助下人工操作成本极高，实际使用率极低。I2 通过 CNOS 与运营商核心网打通，以 AI 技术实现切片自动编排：机器人业务的切片申请、QoS 配置、资源调度由 CNOS 的意图引擎自动翻译为核心网与承载网配置，分钟级完成端到端确定性通道开通。紫金山实验室与中国移动在山东完成的核心网、传输层 QoS 打通验证，即为 I2 接口的现网实证。

功能域	功能定义	对接网元 / 标准
切片编排	意图化切片模板实例化：按机器人业务等级自动创建/调整切片	NSSF/SMF；S-NSSAI 切片标识分配
QoS 映射	确定性 QoS 五级（L1 - L5）与 5QI/QoS Flow 双向映射	PCF 策略下发；3GPP R17/R18 TSC 时间敏感通信
能力开放	网络状态、覆盖、负荷、时延预测能力向 CNOS 开放	NEF 能力开放接口
移动性管理	机器人跨基站、跨城市移动时的会话连续与 SLA 保持	AMF/SMF；PDU 会话锚定与切换
计费结算	切片用量计量、机器人 ARPU 归集、跨合作方转移支付结算	CHF/OCS；统一结算体系（含虚拟运营商）

表 6-3 I2 接口功能与 5GC 网元映射

QoS 映射示例：云端大脑任务指令流（Level-5，时延<10 ms、抖动<100 μs）映射为专属 5QI 与硬切片资源，空口侧启用 URLLC 增强与 TSC 时间敏感通信辅助信息（TSCAI）；视频回传流（Level-3）映射为大带宽 QoS Flow；日志与 OTA（Level-1）走普通切片。I2 的 AI 编排能力使“万台机器人同时入网开通”从工程幻想变为标准运维动作。

6.4 运营商 5G 切片与 UPF 已发布能力：I2 对接的市场验证

I2 接口所定义的切片编排与 QoS 打通能力，并非纸面设想——三大运营商均已将网络切片与 UPF 定制能力发布为正式的商用产品体系，I2 对接的是已经规模商用五年以上的成熟市场能力。中国移动的布局最为系统：2020 年 6 月发布《中国移动 5G 行业专网技术白皮书》，确立“优享、专享、尊享”三级专网模式——优享基于端到端网络切片实现公网逻辑隔离与优先级保障；专享通过 UPF 下沉至区县或企业园区，实现数据不出场与超低时延；尊享以专用基站、专用频率与专用核心网提供最高等级隔离。¹⁵

更早的 2020 年 3 月，中国移动发布《5G OpenUPF 白皮书》，同步发布《面向垂直行业的 N4 解耦 UPF 设备规范》与《面向垂直行业的 N4 接口规范》两项规范，并启动“OpenUPF——面向行业的 5G UPF 及 N4 接口开放合作伙伴计划”，以“接口开放、设备开放、服务开放、智能开放”四个开放推动 UPF 面向垂直行业解耦开放；至 2020 年底，该计划合作伙伴已从年初的 25 家发展到 44 家，覆盖 UPF、仪表、芯片、网卡等端到端产业链。N4 接口开放意味着 UPF 可以被标准化调度与管理——这正是本白皮书确定性网络网关部署于运营商边缘（UPF/MEC 侧）这一设计（I3 接口）的产业基础。¹⁶

中国电信于 2020 年 11 月正式发布“网定制、边智能、云协同、应用随选”的 5G 定制网，提供“致远、比邻、如翼”三类服务模式：致远模式以 QoS、DNN 定制与切片技术面向广域客户提供端到端差异化保障；比邻模式将边缘 UPF 下沉、配合 MEC 实现低时延与数据本地卸载，已在美的 5G 边缘专网实现边缘 UPF 商用落地；如翼模

¹⁵资料来源：C114 通信网《中国移动发布 5G 行业专网技术白皮书：力争 Q4 具备商用能力》（2020 年 6 月 19 日）；《中国移动 5G 行业专网技术白皮书》（2020 年 6 月）：行业组网模式划分为优享、专享、尊享三个等级；C114 通信网《中国移动 OpenUPF 回顾与展望》（2021 年 4 月）：中国移动 2020 年初启动 OpenUPF 计划，2020 年 3 月发布《5G OpenUPF 白皮书》及《面向垂直行业的 N4 解耦 UPF 设备规范》《面向垂直行业的 N4 接口规范》，2020 年底合作伙伴达 44 家。

¹⁶资料来源：C114 通信网《中国移动发布 5G 行业专网技术白皮书：力争 Q4 具备商用能力》（2020 年 6 月 19 日）；《中国移动 5G 行业专网技术白皮书》（2020 年 6 月）：行业组网模式划分为优享、专享、尊享三个等级；C114 通信网《中国移动 OpenUPF 回顾与展望》（2021 年 4 月）：中国移动 2020 年初启动 OpenUPF 计划，2020 年 3 月发布《5G OpenUPF 白皮书》及《面向垂直行业的 N4 解耦 UPF 设备规范》《面向垂直行业的 N4 接口规范》，2020 年底合作伙伴达 44 家。

式以园区级 UPF 与专用网络设备构建高安全专属方案，已在国网青岛 5G 智慧电网实验区部署。中国联通于 2020 年 8 月发布《5G 行业专网白皮书》，将 5G 专网划分为虚拟专网（端到端 QoS/切片逻辑专网）、混合专网（核心网用户面 UPF 为行业用户私有化部署、数据不出园区）、独立专网三类产品，并于 2021 年 12 月升级为“5G 专网 PLUS”产品体系 2.0。¹⁷

进入 5G-A 阶段，运营商开始把切片能力直接对准具身智能机器人：2026 年 9 月，中国电信在合肥完成全国首批 5G-A 大上行网络连片规模化部署，发布全国首个面向具身机器人的专属通信套餐“具身翼联”，依托 5G-A 网络切片与边缘计算提供 500 Mbps 峰值上行、20 ms 超低时延与业务优先调度；2026 年 8 月，中国联通为 2026 世界人形机器人运动会构建机器人专属 5G-A 独立载波专网，将机器人控制端到端时延严格管控在 30 ms 以内、开幕式实测低至 18 ms，并部署“一机一码一平台”的机器人全生命周期管控体系，赛后已被大型安保公司采购用于跨品牌机器人协同巡查。¹⁸

三大运营商的能力谱系与本白皮书的接口定义形成清晰映射：“优享/致远/虚拟专网”对应 I2 的切片编排与 QoS 映射能力；“专享/比邻/混合专网”对应 I2 与 I3 交汇处的 UPF 下沉与边缘网关部署形态；“尊享/如翼/独立专网”对应最高安全隔离等级的云端机器人场景。确定性网络与运营商 5G 切片能力的对接，不是在白纸上新建网络，而是在运营商已商用多年的切片与 UPF 能力之上叠加确定性 SLA——这使 I1 - I5 全链接口体系具备“今天即可对接、明天即可放量”的工程现实性。

¹⁷资料来源：国务院国资委网站《中国电信正式发布 5G 定制网》（2020 年 11 月 10 日）、人民网同日报道：中国电信发布“网定制、边智能、云协同、应用随选”5G 定制网及《中国电信 5G 定制网产品手册》，致远模式落地深圳公安 5G SA 切片警务应用，比邻模式在美的 5G 边缘专网实现边缘 UPF 商用落地，如翼模式落地国网青岛 5G 独立专网；中国联通《5G 行业专网白皮书》（2020 年 8 月）：5G 专网分为虚拟专网、混合专网（UPF 私有化部署）、独立专网三类；《中国联通 5G 行业专网产品体系 2.0 白皮书》（2021 年 12 月，5G 专网 PLUS）。

¹⁸资料来源：C114 通信网《全国首个具身机器人通信产品正式发布，5G-A 大上行融合样板点落户合肥》（2026 年 9 月 12 日）：中国电信安徽公司携手华为发布全国首个面向具身机器人的专属通信套餐“具身翼联”，依托 5G-A 网络切片与边缘计算提供 500 Mbps 峰值上行、20 ms 超低时延、业务优先调度；C114 通信网《从护航 2026 世界人形机器人运动会到赋能产业：中国联通如何成为“最懂具身智能”的运营商》（2026 年 8 月 27 日）：中国联通构建机器人专属 5G-A 独立载波专网，机器人控制端到端时延管控在 30 ms 以内、开幕式实测 18 ms，并部署“一机一码一平台”全生命周期管控体系。

6.5 I3：确定性网络网关与机器人连接单元 RCU 接口及通信协议

I3 是机器人接入确定性网络的“最后一跳”，也是空口与承载协同的关键接口。确定性网络网关部署于运营商边缘（UPF/MEC 侧），RCU 经 5G/5G-A 空口与切片承载接入网关。I3 的协议栈自下而上定义如下：

层次	协议与技术	功能与指标
无线接入层	5G/5G-A NR，URLLC 增强，TSC（3GPP R17/R18）	空口低时延高可靠；双链路聚合（5G + WiFi 7），云脑连接可用性 99.99%
承载层	SRv6 DetNet / FlexE 硬切片 / SPN MTN	骨干段有界时延 ≤10 ms（跨城）、抖动 ≤20 μs、稳态 0 丢包
安全层	双向证书认证 + DTLS/IPsec，国密 SM4 加密套件，TEE 可信启动	身份可信、传输加密、抗中间人与重放攻击
传输层	QUIC（控制/遥测流，0-RTT 快速重连）+ RTP/UDP（媒体流）	多路复用、弱网快速恢复、流级优先级
应用层	云端机器人应用协议 CRAP（Cloud Robot Application Protocol，二进制帧）	任务指令帧、遥测帧、心跳帧、急停帧、协商帧的统一封装

表 6-4 I3 接口通信协议栈定义

I3 将机器人业务划分为三类流并分级保障：

业务流	内容与方向	SLA 等级与指标	帧特征
控制流	云端大脑任务指令下行、场景语义与关键状态上行	Level-5：时延 ≤10 ms，抖动 ≤100 μs，等效误码 ≤10 ⁻¹² ，稳态 0 丢包	1 - 30 Hz 周期小包（≤256 B），最高优先级，帧抢占保障
遥测流	关节状态、电量、位置、健康度上行	Level-3/4：时延 ≤20 - 50 ms，按需弹性带宽	1 - 10 Hz 中包，可压缩聚合
媒体流	8K 双目、全景鱼眼视频与音频上行，语音交互双向	Level-3：时延 ≤50 ms，带宽 20 - 200 Mbps 弹性	持续大流量，独立切片承载，与控制流硬隔离

表 6-5 I3 三类业务流定义与 SLA

I3 的接入流程定义为六步：RCU 开机安全启动（TEE 度量启动）→ 智能 eSIM 完成运营商网络附着与身份认证 → CNOS 经 I2 完成切片资源编排 → RCU 与确定性网关

建立双向证书安全通道 → 按业务注册建立三类流并激活 SLA 监测 → 进入心跳保活与常态运营。跨基站、跨城市移动时由 I2 移动性管理保障会话连续；跨运营场景由智能 eSIM 动态切换并统一结算。急停帧在协议栈中享有绝对优先级：任何状态下急停指令必须经由控制流确定性送达，这是可管可控在协议层的硬规定。

6.6 I4：RCU 内置确定性网络网关软件接口

确定性能力不能只到网关为止，必须延伸到机器人端侧。RCU 内置确定性网络网关软件（CNOS-Agent），是 CNOS 在终端侧的轻量驻留代理，随太始 OS 开源发布。I4 接口定义 CNOS-Agent 与 CNOS、与 RCU 应用框架之间的交互：

功能模块	功能定义	接口说明
流表缓存与执行	接收 CNOS 下发的端侧流表，在 RCU 本地执行队列调度与优先级控制	北向：FlowTable.Update (CNOS→Agent)
本地队列调度	将 802.1Qbv 时间感知调度思想延伸至端侧协议栈，控制流独占发送时隙	南向：以太网/5G 模组驱动 API
本地 OAM 探针	端侧逐流时延/抖动/丢包测量，秒级上报	北向：OAM.Report (Agent→CNOS)
断网检测与降级仲裁	SLA 违约/断链检测，触发本体降级策略并通知云端	南向：I5 安全仲裁通道；北向：Alarm.Event
双链路聚合管理	5G/5G-A 与 WiFi 7 链路质量实时评估与流量分配	南向：链路管理 API
证书与密钥管理	设备证书、会话密钥生命周期管理，支持远程证明	北向：Attestation.Report

表 6-6 RCU 内置确定性网关软件（CNOS-Agent）功能与接口定义

I4 使每一台机器人都成为确定性网络的“可管理端点”：网络不仅能管理到网关，还能管理到机器人内部的协议栈。这为全程可审计补齐了端侧数据源，也使断网降级策略的触发有了标准、可信的执行者。

与此同时，RCU 已实现 VBN 安全神经网络技术的商业应用：VBN 在身份认证与端到端加密层面保障“连接的安全”，CNOS-Agent 在资源调度与业务隔离层面保障“连接的确定”，二者在 RCU 上合流，构成云端机器人端侧的“安全+确定”双引擎。

这也是 I4 接口区别于一般终端管理协议的核心特征。

6.7 I5：RCU 与本体 CCU 接口

I5 是云端体系与机器人本体的边界接口，设计上贯彻“职责铁律”：RCU 只传递任务级语义，绝不直接输出运动指令；本体 CCU 保持运动控制的完整主权。I5 物理层采用千兆/万兆车载级以太网，运行 TSN（802.1AS 时间同步 + 802.1Qbv 调度 + 802.1CB 冗余），本体内部同步抖动<1 μs。逻辑上定义四条通道：

通道	功能定义	方向与频率
语义指令通道	云端大脑任务级指令（目标、约束、场景语义），经 RCU 透传至 CCU 任务解释器	RCU→CCU，1 - 30 Hz
状态回传通道	本体状态摘要（姿态、电量、任务进度、健康度）	CCU→RCU，1 - 10 Hz 可配
时间同步通道	gPTP 时间同步分发，保证云端指令与本体时钟对齐	双向，持续
安全仲裁通道	断网降级触发、急停透传、权限边界仲裁；CCU 对任何越界指令有一票否决权	双向，事件触发

表 6-7 I5 接口通道定义

I5 的“CCU 一票否决”设计是本体安全的最后防线：任何违反本体动力学约束、安全围栏或任务上下文的语义指令，CCU 拒绝执行并通过状态通道上报原因。云端大脑再聪明，也不能命令机器人做物理上危险的动作——智能的边界由本体安全层刚性守护。

6.8 智能 eSIM 跨运营商接入与统一结算接口

为支撑机器人全域漫游与商业模式闭环，体系引入可编程智能 eSIM 卡：支持跨运营商网络动态切换，机器人无论部署在哪个城市、哪家运营商网络下，都可自动选择最优网络接入，并由统一结算体系完成跨网费用清算，可联合虚拟运营商落地运营。结算模式参考中国移动咪咕的转移支付模式：终端用户付费后统一归集，再由合作方向运营商结算网费，所有网络和增值服务都结算到最终用户，形成面向海量机器人用户的简洁商业闭环。对运营商而言，人形机器人单用户 ARPU 预计是全新的高价值市场。

6.9 太始 OS 开源融合动议：共建标准化开源体系

接口标准的生命力在于生态。我们正式提出开源动议：将内置在机器人连接器 RCU 标准单元中的云端机器人操作系统——太始 OS（Taishi OS）——与确定性网络网关软件（CNOS-Agent）融合，共建标准化开源体系。开源规则参照谷歌安卓“开源系统 + 闭源服务”的成熟模式：

- 全开源部分：太始 OS 操作系统代码、RCU 设备框架、I4/I5 接口协议与本白皮书全部接口规范，面向产业完全开源；
- 闭源函数库部分：部分云端业务能力与确定性网络调度 API 以闭源函数库形式提供，保障云端大脑与确定性网络核心知识产权；
- 标准共建部分：I1 - I5 接口规范将提交 CCSA 及工信部人形机器人与具身智能标准化技术委员会，推动成为行业标准；条件成熟后向 3GPP、IEEE、IETF 贡献提案，推动中国方案走向国际标准。

任何机器人厂商接入该体系，只需在硬件上兼容 RCU 标准模块、在软件上集成开源太始 OS，即可获得云端大脑接入、确定性网络质量保障与安全认证的一体化能力；第三方组装完成标准测试认证即可直接入网。这与人形机器人产业“公版化”的历史趋势完全一致——如同联发科、高通公版方案催生了智能手机产业的爆发，RCU + 太始 OS + 确定性网络的公版体系将催生具身智能互联网终端的大繁荣。

七、可管可控安全体系：具身智能的中国方案

7.1 可管可控的总体框架

本白皮书将“可管可控”操作化为可工程验证的定义：可管，即机器人的身份、行为、数据全程可视、可审、可溯；可控，即人类对机器人拥有有限、可停、可收的最高权限。端到端确定性网络体系把这两个目标分解到三个层面落实：网络层（路径固化、准入控制、全程 OAM 遥测使通信全程留痕）、平台层（云端大脑集中决策，行为审计、任务回放、模型版本可追溯）、终端层（RCU 安全认证、TEE 可信启动、CCU 一票否决）。三层叠加，构成没有管控盲区的完整体系。

7.2 身份认证与运营商级接入管控

每一台云端机器人拥有唯一可信身份：全国人形机器人全生命周期管理服务平台已上线运行“一机一码”机制，截至 2026 年 5 月已接入 100 余家企业、200 余个产品型号，完成 2.8 万余台机器人赋码注册。¹⁹

在本体系中，“一机一码”与 RCU 证书体系、智能 eSIM、云端大脑账号四方绑定：没有合法身份，机器人无法附着网络；没有网络切片授权，无法建立控制流；没有云端大脑会话，无法获得任务指令。公版生态下，第三方组装的机器人必须通过标准测试认证方可入网——入网许可、切片授权、云端会话三级闸门，使“黑机器人”“山寨机器人”在架构上无法接入具身智能互联网。

7.3 数据安全、隐私保护与算法可审计

数据安全体系执行分级分类：涉及人脸、家庭环境等敏感数据在端侧脱敏后上行，存储采用国密 SM4 算法加密，运营数据留存不少于 5 年，禁止非必要生物特征收集；政企客户可选私有化部署（云端大脑行业专区）。租赁场景下，RCU 可插拔设计使“拔卡即清”——用户身份与数据随模块带走，杜绝二手机器人的隐私残留风险。算法可审计方面，云端大脑的模型版本、任务决策、指令下发全程留痕，配合确定性网络的通信留痕，任何一次机器人行为都可以完整回放：它看到了什么（感知上行）、

¹⁹全国人形机器人全生命周期管理服务平台于 2026 年 5 月 22 日发布，实行“一机一码”，已接入 100 余家企业、200 余个产品型号，2.8 万余台机器人完成赋码注册。

想了什么（云端决策）、做了什么（指令下行与本体执行）。

7.4 与国家 AI 安全治理体系的对齐

本体系与国家治理框架逐项对齐：《人工智能安全治理框架》2.0 版的风险分类分级要求，映射为本体系“感知—决策—执行—传输”四环节的风险清单与管控措施；

《人形机器人与具身智能标准体系（2026 版）》“安全伦理”板块对物理安全、数据安全与伦理审查的要求，落实为第七章全部技术措施与第八章测试认证体系；《智能体规范应用与创新发展实施意见》对智能体规范应用的要求，落实为云端大脑对机器人智能体的统一注册、统一授权与统一审计。具身智能机器人是 AI 智能体中物理风险最高的形态，理应率先纳入最严格的可管可控体系——本白皮书提供的正是承载该治理要求的技术基座。

7.5 中国方案的全球意义

海外路线把具身智能的答案押注在封闭的本体黑盒上——智能不可审计、行为不可追溯、监管无从介入，其治理只能依赖事后立法与企业自律。中国方案给出了结构性不同的答案：以云端大脑实现智能的集中与可审计，以确定性网络实现连接的可靠与可管控，以公版开源实现产业的开放与可繁荣。技术架构、治理框架、商业模式三位一体，使“人工智能始终置于人类管控”从原则变为工程现实。具身智能互联网是人类共同的未来，一个可管可控的技术底座，是中国为全球智能时代提供的公共产品。

八、标准体系与产业生态

8.1 国际标准映射

本架构全面建立在现有国际标准之上，不做私有封闭发明，确保全球互操作性：

标准组织	代表标准	在本架构中的应用
IEEE 802.1	802.1AS/Qbv/Qav/Qch/Qcr/CB/Qbu、 802.1CM/DG/DP	机器人本体内部 TSN 总线（I5）、园区局域确定性接入
IETF DetNet	RFC 8655/8578/8964/9024/9030/9107/9346、 TCQF、detnet-yang	广域骨干确定性传输、I1 接口数据模型
ITU-T	Y.3121、G.8310/G.8312（MTN）、 G.709	跨域 QoS 分级、SPN/MTN 承载、光层 FEC
3GPP	R16/R17/R18 TSN 互通与 TSC、 URLLC、网络切片；R21（6G）	5G/5G-A 无线确定性承载、I2 接口、6G 演进
OIF	FlexE 1.0/2.0/2.1	物理层硬切片，控制流与公众业务彻底隔离
ISO/IEC	机器人安全与服务机器人系列标准	整机与系统安全认证的国际对接

表 8-1 国际标准映射

8.2 中国标准体系与合规框架

《人形机器人与具身智能标准体系（2026 版）》确立的“类脑与智算”标准要求“大脑—小脑”双架构协同响应时间 $\leq 200\text{ ms}$ ——本体系云端环路端到端时延预算（网络 $\leq 10\text{ ms}$ + 云端推理 + 本体执行）完全满足并大幅优于该要求；具身智能首份行业标准 YD/T 6770-2026 已于 2026 年 6 月 1 日实施。²⁰

在确定性网络侧，CCSA 已建立确定性承载测试规范，信通院 D-CUBE 评测体系提供两维五级量化评测。建议以本白皮书为基础，尽快立项“云端机器人确定性网络”系列行业标准：I1 – I5 接口规范、云端机器人业务 SLA 分级、RCU 模组技术规范与测

²⁰ 《人形机器人与具身智能标准体系（2026 版）》“类脑与智算”标准要求大脑—小脑协同响应时间 $\leq 200\text{ ms}$ ；YD/T 6770-2026 为具身智能领域首份行业标准，2026 年 3 月发布、2026 年 6 月 1 日实施。

试方法、云端机器人入网安全认证规范，使产业生态有标可依。

8.3 公版开放生态与测试认证体系

产业生态采用“公版开放 + 测试认证”双轮驱动：公版层面，公开所有标准化模块的尺寸、性能与连接标准（RCU 模组、I5 本体接口、结构电气接口），任何合格供应商均可按图生产，企业客户可定制品牌、外观与行业技能包；认证层面，建立三级测试认证——网络准入认证（I1 - I3 协议一致性、SLA 分级实测）、本体安全认证（I5 职责隔离、断网降级、一票否决的有效性验证）、整机安全伦理认证（对齐标准体系 2026 版）。通过认证的公版机器人直接入网运营。8S 店渠道网络承担体验、交付、培训与全生命周期运维，把认证与服务的闭环落到线下。

8.4 运营商商业模式：从流量经营到机器人运营

对电信运营商而言，云端机器人是历史性机遇：人形机器人单用户 ARPU 显著高于普通手机用户，是高 ARPU 值业务，且 7×24 小时在线、流量与算力消费持续稳定，是全新的高价值市场。运营商的角色从“卖流量”升级为“经营机器人连接”：提供确定性切片、云脑接入认证、计费结算与运维保障。当前运营商对云端智能机器人的必要性认知尚不充分，本白皮书建议推动主管部门出台文件明确行业规范，并参考咪咕转移支付模式简化多方结算，先在全国主要商业市场与重点城市试点跑通商业闭环，再依托确定性网络的全国覆盖向 31 个省、市、自治区全面复制。

九、产业应用与落地路线图

9.1 产品矩阵：公版终端体系

产品	定位与形态	成本与量产目标
第一代：轮式双臂公版机	极简设计、折叠收纳，优先满足基础服务场景，快速规模落地	量产 1 万台成本<5 万元；10 万台<3 万元
第二代：双足人形机器人	“七仙女” ID，82 关节，主打银发经济与家庭照护，参考马尔斯 M1 平台	2028 年推出；10 万台<2 万美元；100 万台<1.5 万美元，规模扩大后可下探至 1 万美元以下
统一接入模块：RCU	对标 SIM 卡的可插拔标准模块，内置太始 OS 与确定性网关软件	随公版体系规模化降本，支持插拔租赁

表 9-1 云端机器人公版产品矩阵

第二代双足机型的全部关节与传感器设计验证已完成，现有技术可支撑量产落地。两代产品共用同一套 RCU、同一套云端大脑、同一张确定性网络——终端形态分层，云端体系统一。

9.2 首批应用场景：视频伴侣机器人、机器人店长与中医机器人

在终端形态上，本架构同时支持两类公版通用终端——轮式人形机器人与双足人形机器人（见 9.1），二者共用同一 RCU、同一云端大脑与同一张确定性网络，可按场景的成本与运动能力要求灵活选配。在应用场景上，云端机器人首批聚焦三类已经具备成熟产品与市场基础的方向。

第一类是视频伴侣机器人（机器人视频伙伴），面向内容创作市场。它依托云端大脑的多模态大模型与超级智能体能力，自主完成选题策划、脚本撰写、出镜拍摄、剪辑包装与账号运营：帮助年轻人以极低的门槛成为内容创作者，也帮助不熟悉数字工具的老年人自主完成内容的设计、创造与发布。视频伴侣机器人把“一个人的创作工作室”装进了机器人身体，是创作者经济与银发经济的交汇点。

第二类是机器人店长，面向商业门店市场。机器人店长驻店工作，依托云端大脑的行业知识与营销智能体，承担门店获客（门口迎宾、互动引流）、到店服务（导购讲解、会员服务）与线上推广（直播带货、短视频宣传、社群运营）三重职责，让每

一家中小门店都拥有一位“永不疲倦、永远在线”的金牌店长，并通过云端技能商店持续获得新的营销技能。

第三类是中医机器人，面向医疗健康市场。我们把优秀老中医数十年积累的极其丰富的诊疗经验训练成机器人超级智能体——中医智能体，再通过云端大脑将其具身到机器人本体之上：机器人以一流中医师的水平完成望闻问切辅助、辨证论治建议与康养指导，被部署到三线、四线城市和广大农村、边远地区，为长期得不到优质医疗服务的人民大众看病。中医机器人一方面大幅提高优质医疗服务的覆盖水平，另一方面也让中药与中医药文化借助具身智能得到有效的推广与传承。

三类场景的共同特征是：智能在云端、数据在云端、管控在云端——视频内容可审、营销行为可管、诊疗建议可溯。这正是“云端大脑+确定性网络+机器人本体”架构在社会场景中的价值兑现；特别是中医机器人这类直接涉及人身健康的场景，确定性网络的可靠传输与全程审计能力不是加分项，而是准入门槛。

9.3 首批试点部署：全国重点城市万台示范

2026 年底至 2027 年初，首批 1 万台公版机将在全国各地——全国主要商业市场与主要城市——同步开展试点，不再局限于个别省份。支撑这一部署的，是确定性网络已经建成的网络能力和计划中的全国性覆盖：依托未来网络试验设施与各区域确定性网络工程，确定性网络能力正在覆盖全国 31 个省、市、自治区的主要城市，任何一座重点城市都可以在现网条件下分钟级开通云端机器人确定性切片。本白皮书于 2026 年 10 月在南京第十届未来网络发展大会（10 月 15 - 17 日）期间正式发布，同期发布具身智能互联网体系架构的相关成果。²¹

从网络就绪情况看：确定性网络与运营商 5G 网络的互联互通已在江苏、山东的主要城市率先实现，全国主要城市的互联互通正在规划与实施之中，覆盖全国 31 个省、市、自治区的确定性网络为互联互通提供了现网基础。从终端就绪情况看：机器人本体 RCU 已经实现 VBN 安全神经网络技术的商业应用，公版机具备即插即用条件。下一步，通过 5G 网络与确定性网络核心网的端到端打通，将云端大脑、确定性网络、机

²¹第十届未来网络发展大会于 2026 年 10 月 15 - 17 日在南京举办，发布紫金山实验室重大科研成果与未来网络十大场景（南京日报，2026 年 9 月 21 日）。

机器人本体三个节点贯通为“三点一线”的云端机器人体系——首批万台试点即运行在这一体系之上。

试点不设地域边界、不设场景边界：凡是确定性网络覆盖的城市，均可“同城同网、即接即用”地接入云端机器人体系，首批场景即 9.2 所述视频伴侣机器人、机器人店长与中医机器人，并同步拓展政务导览、场馆接待、园区巡检、养老陪护等公共场景。试点目标不是演示，而是跑通“开通—运营—计费—运维—审计”的完整商业闭环，形成可全国复制的部署模板与运维规范。

9.4 机器人赋能 OPC 创业：青年“一人公司”的具身商业计划

2026 年以来，“一人公司”（OPC，One Person Company）成为从中央到地方密集部署的创业新形态：个人在人工智能技术的协同支持下，独立完成从产品设计、生产到市场投放、用户运营与客服响应的全链路业务闭环，即“一人+AI 即公司”。上海、江苏已率先将 OPC 写入“十五五”规划《纲要》，国家层面持续跟踪研判 OPC 发展；国家市场监督管理总局课题组 2026 年 3 月发布的《中国 OPC 发展调研报告 2026》显示，我国 OPC 呈快速增长态势，创业者以 90 后、00 后为主，行业分布呈“轻资产、高智力、新业态”特点——OPC 本质上是属于青年一代的创业形态。本白皮书的云端机器人体系，正是为这一形态提供“具身商业计划”的基础设施。²²

省级政策随之密集跟进：山东省工业和信息化厅等十二部门联合印发《关于支持人工智能 OPC 创新发展的行动方案》，辽宁、广东、湖北、四川、云南、海南等省及深圳、北京海淀区、朝阳区相继出台专项政策，从创业资金、算力补贴、OPC 社区到人才安居形成系统支持。但政策解决的是“敢创业”的问题，“创什么业”仍然稀缺——纯软件类 OPC 已普遍遭遇算力昂贵、场景模糊、同质化内卷的成长阵痛，青年人真正需要的是具备确定性现金流、可复制、可放大的商业计划。²³

²²资料来源：国家发展改革委网站《被写入多地“十五五”规划，OPC 凭什么站上风口？》（2026 年 5 月 15 日）；上海市“十五五”规划《纲要》明确“打造一人公司（OPC）创新创业生态”，江苏省“十五五”规划《纲要》提出“大力推广 OPC 创新创业模式，支持苏州等地打造 OPC 创业城市”；国家市场监督管理总局课题组《中国 OPC 发展调研报告 2026》（2026 年 3 月）：OPC 创业者以 90 后、00 后为主，行业分布呈“轻资产、高智力、新业态”特点；2024 年 7 月新《公司法》实施，取消自然人设立一人公司数量限制。

²³资料来源：山东省工业和信息化厅等十二部门《关于支持人工智能 OPC 创新发展的行动方案》（2026 年 7 月 24

本白皮书 9.2 所述三大首批应用场景，恰好构成三类“开箱即用”的具身商业计划：一名内容创作者加一台视频伴侣机器人，就是一间短视频与直播内容工作室，机器人承担出镜、拍摄、互动与全天候运营；一名青年加一台机器人店长，就是一家 7×24 小时不间断营业的零售或社区服务门店；一名健康管理师加一台中医机器人，就是一个社区健康服务点。与纯线上 OPC 相比，机器人是看得见、摸得着的“具身员工”，把“一人公司”从屏幕之内扩展到实体服务业，现金流当天可见、商业模式一目了然。

OPC 之所以能够成立，深层支撑在于云端大脑的超级智能体平台为“一人公司”准备了完整的三类员工：人类员工——创业者本人，负责创意、决策与对外关系；机器人员工——人形机器人，负责实体世界的生产与服务；数字员工——云端智能体，负责数字世界的运营与协同。一个人创业不再是“一个人做所有事”，而是“一个人管理一支人类与机器混合的团队”。

其中，数字员工承担企业运营所需的几乎全部支撑职能，把 OPC 商业活动的各个层面一一接管：人力资源管理——招聘、排班、培训与绩效；财务管理——记账、报税、结算与现金流；客户管理——获客、客服、售后与会员运营；销售推广——内容生产、投放、渠道与品牌运营。机器人员工与数量不受限的数字员工一起，有效化解了“一人公司”最致命的生产力瓶颈：企业管理的每个层面，都有不知疲倦的员工在岗。

更重要的是这支混合团队的管理秩序：人形机器人本身是“有实体身体的数字员工”，凭借其在物理世界的在场能力与本体算力，成为所有数字员工的信息系统底座与管理者，协助人类进行统筹——机器人是数字员工的总经理。人类员工把握方向，机器人员工居中协同，数字员工负责执行，层级清晰的三元组织使一家“一人公司”真正像一家公司一样运转——这是云端机器人赋予 OPC 的最重要的管理理念，也是

日，鲁工信数据〔2026〕117 号）；《辽宁省人工智能 OPC 培育发展实施方案（2026—2028 年）》（2026 年 5 月，人民网报道：到 2028 年培育 OPC 企业 300 家、集聚 OPC 人才超 3000 名）；《广东省支持人工智能 OPC 创新发展行动方案（2026—2028 年）》（2026 年 3 月）；《深圳市打造人工智能 OPC 创业生态引领地行动计划（2026—2027 年）》（2026 年 1 月）；湖北省、四川省、云南省、海南省及北京海淀区、朝阳区 OPC 专项政策文件（2026 年）。

9.2 所述三类具身商业计划得以批量复制的组织保障。

云端机器人与 OPC 政策需求天然契合：公版机免除硬件自研，确定性切片分钟级开通，云端大脑按 SLA 订阅、成本可预期，“一机一码”与运营商级可管可控体系把合规与审计内建于架构之中——创业者“拎包入驻”各地 OPC 社区即可开张，政府也敢于把机器人创业纳入扶持目录。云端大脑的集群调度与联邦学习能力，更意味着每台机器人在全网经验共享中持续增值：一台机器人学会的技能，万台机器人即刻共享——这正是 OPC 最稀缺的“组织能力”的云端化供给。

按此设计，9.3 所述首批万台公版机试点将预留相当比例面向 OPC 创业者投放，与各地 OPC 社区及共青团青年创业服务体系对接，形成“政策给土壤、机器人给生意、网络给保障”的青年创业支撑体系：中央与各省政策支持 OPC 创业的政策，经由云端机器人获得具体、可落地、可考核的产业承接。

9.5 市场规模预判与网络演进逻辑

从固定互联网到移动互联网，终端形态革命使互联网规模扩大百倍以上；具身智能互联网的终端是 7×24 小时联网、数量不设上限的机器人：2028 年全球年销量将达 100 万台（人形机器人的“iPhone 时刻”），2035 年全球保有量将超过 1 亿台，2050 年将超过全球人口总和、达到 100 亿台以上，长期将推动互联网规模较当前增长一万亿倍。网络演进的逻辑因此清晰：具身智能机器人是确定性网络落地的首个规模化场景；当亿级机器人都运行在确定性切片之上时，确定性能力将从专用切片扩散为通信网的基础能力，最终完成对整个互联网的确定性改造——具身智能互联网与互联网的未来是同一张网。

9.6 2026 – 2030 发展路线图

阶段	关键里程碑	成功判据
2026 Q4	白皮书于未来网络发展大会发布；太始 OS 开源动议启动；试点筹备完成	I1 - I5 接口规范 1.0 发布；全国重点城市试点签约
2027	首批 1 万台公版机试点运营；接口行业标准立项；双足机型 Beta 样机与场景试点	试点 SLA 履约率 ≥99.99%；商业闭环跑通
2028	第二代双足人形机器人量产上市；十万台级规	BOM 达目标成本；技能生态 1000+；全

阶段	关键里程碑	成功判据
	模商用；技能商店生态成型	国多城市复制
2029-2030	对接 6G 首个标准版本（R21）预商用；百万台级部署；接口标准国际化	具身智能互联网规模化；中国方案进入国际标准体系

表 9-2 产业发展路线图（2026 - 2030）

十、全球方案对比研究：跨层贯通的世界前列架构

10.1 对比口径与方法

为厘清本白皮书在全球工作中的位置，本章将六个海外可比方案与一个国内参照体系（中国标准体系 2026 版）摆上同一张矩阵：纵列为方案、横列为功能，逐项对比十三项功能覆盖。对比口径为 2026 年 10 月公开可查的标准文本、学术论文与产业公开信息；符号 ◎ 领先、○ 完整、● 部分、— 公开资料未见——符号仅表示“公开资料是否见到覆盖”，不代表、也不构成对任何第三方实际产品能力高低的评价。²⁴

10.2 总览矩阵：十三项功能覆盖对比

矩阵前七项功能覆盖“云—脑—网—体—治”主链，后六项功能覆盖孪生、标准、生态与落地支撑。六个海外方案各管一段，唯有本白皮书一行十三项功能无空白。国际标准组织体系（IETF DetNet、IEEE 802.1 TSN、3GPP、ISO/IEC 在研标准）是本架构的底座而非对手——本白皮书全面建立在这些现成标准之上（见第二章、第八章），故不列入矩阵逐行对比。

方案 \ 功能	① 云端认知	② 本体执行	③ 双脑分工	④ 确定性网络	⑤ 广域承载	⑥ 跨层接口	⑦ 可管可控
Figure AI / Helix 02	○	◎	◎	—	—	—	●
Google / Gemini Robotics-ER	○	●	●	—	—	—	●
NVIDIA / GR00T • Thor • Isaac	○	◎	●	—	—	●	—
B2X Networks（学术）	●	●	●	●	○	●	—

²⁴资料来源：本白皮书课题组《〈云端机器人确定性网络架构白皮书〉海外方案对比与本方案优势》（全讯物联技术（济南）有限公司，2026 年 10 月，V1.0）；底层事实依据为公开可查的标准文本（IETF DetNet、IEEE 802.1 TSN / IEC 60802、3GPP TS 23.501 R18、ISO/CD 26264-1）、学术框架公开论文（B2X Networks、HDT-Nets）与产业公开信息（Figure AI Helix 02、Google Gemini Robotics-ER、NVIDIA GR00T / Isaac、NTT docomo），检索时间 2026 年 10 月。

方案 \ 功能	① 云端认知	② 本体执行	③ 双脑分工	④ 确定性网络	⑤ 广域承载	⑥ 跨层接口	⑦ 可管可控
HDT-Nets（学术）	○	—	●	●	○	●	—
NTT docomo+庆应 （运营商验证）	—	●	—	○	○	●	●
中国标准体系（2026版） （国内参照）	●	●	●	●	●	●	●
■ 本白皮书	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

表 10-1 全球方案功能覆盖总览（功能 ① - ⑦）

方案 \ 功能	⑧ 数据边界	⑨ 数字孪生	⑩ 标准归属	⑪ 国家级底座	⑫ 开源生态	⑬ 产业落地	空白项合计
Figure AI / Helix 02	—	●	—	—	—	○	8
Google / Gemini Robotics-ER	—	—	—	—	●	●	8
NVIDIA / GR00T • Thor • Isaac	—	◎	—	—	◎	○	7
B2X Networks（学术）	—	—	—	—	●	—	8
HDT-Nets（学术）	—	◎	—	—	●	—	8
NTT docomo+庆应 （运营商验证）	●	—	—	—	●	○	8
中国标准体系（2026版） （国内参照）	○	●	◎	◎	○	●	0（参照）
■ 本白皮书	●	◎	●	◎	○	○	0

表 10-2 全球方案功能覆盖总览（功能 ⑧ - ⑬）

10.3 矩阵之上的三个基本事实

第一，海外方案各管一段。产业方案（Figure、Google、NVIDIA）的能力集中在

本体与模型；学术框架（B2X Networks、HDT-Nets）提出“网络与智能联合设计”的方向而未经工程验证；运营商验证（NTT docomo+庆应）打通了蜂窝广域承载，却未触及云端认知与治理——产业强在“体”，学术强在“想”，运营商强在“网”，没有一家通吃。国际标准（DetNet、TSN、3GPP）则专注于“网”与“标准归属”一侧，本白皮书直接建立其上、不另起炉灶。

第二，“确定性网络”与“本体执行”分属两个世界。确定性网络的 ◎ 集中在国际标准组织（DetNet、TSN、3GPP——本白皮书全面采用，见第二章），本体执行的 ◎ 集中在产业公司，没有任何一家海外企业同时打满这两列。“网”与“体”之间的跨层地带，正是全球产业至今的空白——也是云端机器人规模化必须逾越的关键地带。

第三，本白皮书是矩阵中唯一在十三项功能上没有空白格的方案，其中九项获评 ◎（领先），“国家级底座”一项接近独占——学术框架不具备设施，企业方案不具备平台，国际标准组织作为规范机构亦不配套国家级设施。

10.4 五条相对优势与诚实的边界

逐条审视，本白皮书的相对优势可以归纳为五条，每条同时给出论据与边界，以免夸饰：

#	定位	优势点	论据	边界
1	近独占	国家级设施与平台背书	依托国家重大科技基础设施 CENI 与国家级云端机器人开放创新平台；学术框架与企业方案均不具备	应表述为“依托”，而非“拥有”
2	领先	端到端接口四段贯通（I1 - I5）	单段接口各方都有定义，四段之间的完整贯通定义未见他人公开给出	到标准采纳仍有距离
3	领先	可管可控与安全前置	急停类帧在协议栈中拥有绝对优先级，合规内生于架构	外部是先做出来再谈合规，两种路径各有约束
4	领先	广域承载（跨城+多运营商）	跨城、多运营商、可管可控三者同时覆盖的公开对象极少	DetNet 跨域仍在演进，优势窗口可能收窄
5	并跑	三层分工与确定性网络指标绑定	把频率分工与网络指标绑在一起定义，且有现网实证	标准完备度不及 DetNet / TSN / 3GPP

表 10-3 本白皮书五条相对优势（论据与边界）

对比同样需要诚实：本架构在开源生态规模上不及 NVIDIA（其开源模型、参考硬件与开发者生态明显更大），标准完备度不及 DetNet / TSN / 3GPP（规范成体系、多厂商互操作已验证），数据治理的系统性不及在研的 ISO/CD 26264-1；在标准体系归属上，本白皮书是中国标准体系中“网络+云端架构”板块的候选内容，验证类型亦与机器人产线实证分属两类、不可直接比较。这三处差距的正确应对不是重复投入，而是直接采用现成标准、融入现成生态——这正是本白皮书“全面建立在现有国际标准之上、不做私有封闭发明”的开放性所在（见第八章）。

10.5 结论：站在世界前列的整体架构

综合十三项功能的矩阵对比，可以得出三个结论：其一，海外六个可比方案各管一段，没有一个跨层贯通；其二，本白皮书是唯一一行十三项功能无空白的方案，“国家级设施与平台背书”近独占，“端到端接口”“可管可控前置”“广域承载”三项领先；其三，最准确的表述不是“我们全面领先”，而是——本白皮书把已经成熟的几条线（确定性网络、5G 切片、双脑架构、云端大脑），用一套接口（I1 - I5）和一套治理（可管可控）串了起来，并且放在国家级底座之上。就“云端机器人 × 确定性网络”的整体架构而言，本白皮书站在当前全球工作的最前列。

十一、总结与展望

本白皮书完成了五件事：第一，论证了具身智能的完整智能必须走“云端大脑 + 本体小脑”的双脑架构，本体单一大脑只是“动物大脑”，无法通向 AGI；第二，论证了在广域尺度上，唯有确定性网络能同时满足云端机器人对时延、抖动、误码、隔离与可审计的全部硬要求，是连接云端大脑与机器人本体唯一合宜的“神经束”；第三，给出了“云端大脑—确定性网络—机器人本体”三位一体的端到端统一架构，以及贯穿其中的质量与安全一体化管控框架；第四，定义了 I1 - I5 全套接口与通信协议，并提出太始 OS 与确定性网关软件融合开源的动议，使架构可标准化、可测试认证、可产业化复制；第五，将技术体系与国家 AI 安全治理框架、人形机器人标准体系逐项对齐，使可管可控从原则落地为工程。

具身智能互联网的大幕正在拉开。从 RCU 上 VBN 安全神经网络的商业应用，到确定性网络与运营商 5G 在江苏、山东主要城市的互联互通，再到全国主要城市互联互通的规划推进，“三点一线”的云端机器人体系已经从架构设计走向现网现实。当亿级机器人通过确定性网络接入云端大脑，人类将获得前所未有的生产力，也承担着前所未有的责任。我们呼吁：运营商加快确定性切片与 AI 编排能力建设，拥抱机器人高价值 ARPU 的新市场；设备商与芯片厂商共建 RCU 标准模组生态；本体厂商接入公版体系，共享云端智能；开发者基于开源太始 OS 创造千行百业的技能应用；监管机构与标准组织共同推动接口标准与安全认证体系落地。让我们共同建设一个安全、可信、繁荣的具身智能互联网——让人工智能始终置于人类管控之下，让机器人服务全人类。

附录 A：术语与缩略语

术语/缩略语	英文全称	释义
确定性网络 DetNet	Deterministic Networking	提供端到端有界时延、有界抖动、极低丢包的网络技术体系
TSN	Time-Sensitive Networking	IEEE 802.1 时间敏感网络，二层局域确定性
CNOS	Cloud-network deterministic Network Operating System	确定性网络操作系统，负责切片编排与端到端资源管控
HARIX	Human Augmented Robotic Intelligence with eXtreme reality	达闼原创云端机器人操作系统（海睿 OS），2020 年 12 月发布
海睿 HAREIX	基于 HARIX 升级实现的新一代云端大脑	达塔机器人基于国家级平台升级实现，本白皮书所述云端大脑即海睿 HAREIX
CENI	China Environment for Network Innovations	国家未来网络试验设施，我国通信与信息领域首个国家重大科技基础设施
太始 OS	Taishi OS	云端机器人操作系统（RCU 侧），拟开源
RCU	Robot Connect Unit	机器人连接单元，5G 终端形态的标准接入模块
VCN	Virtual Backbone Network	安全神经网络技术，为机器人与云端提供基于身份的端到端加密通道与访问控制，已在 RCU 上实现商业应用
CCU	Central Control Unit	机器人本体中央控制单元（小脑）
VLA	Vision-Language-Action	视觉-语言-动作大模型
世界模型	World Model	对物理世界的三维表征与动态预测模型
数字孪生	Digital Twin	物理对象/场景在数字空间的实时映射
SLA	Service Level Agreement	服务等级协议

术语/缩略语	英文全称	释义
QoS / PDV / BER	Quality of Service / Packet Delay Variation / Bit Error Rate	服务质量 / 抖动 / 误码率
FlexE / MTN / SPN	Flexible Ethernet / Metro Transport Network / Slicing Packet Network	物理层硬切片与承载网技术体系
SRv6	Segment Routing over IPv6	基于 IPv6 的段路由，DetNet 广域转发技术
FRER	Frame Replication and Elimination for Reliability	802.1CB 帧复制与消除冗余机制
TAS / CQF / TCQF / CBS / ATS	Time-Aware Shaper 等	TSN/DetNet 调度与整形机制族
gPTP	generalized Precision Time Protocol	802.1AS 通用精确时间同步协议
5GDN	5G Deterministic Networking	5G 确定性网络
TSC / TSCAI	Time-Sensitive Communication	3GPP 时间敏感通信及辅助信息
eSIM	embedded SIM	可编程嵌入式 SIM 卡，支持跨运营商切换
TEE	Trusted Execution Environment	可信执行环境
OAM	Operations, Administration and Maintenance	网络运维监测机制
D-CUBE	—	信通院确定性网络两维五级评测体系
ARPU	Average Revenue Per User	单用户平均收入
AGI	Artificial General Intelligence	通用人工智能

表 A-1 术语与缩略语

附录 B：主要参考标准与文献

国际标准：IEEE 802.1AS/Qbv/Qav/Qch/Qcr/CB/Qbu/CM/DG/DP；IETF RFC 8655、8578、8938、8939、8964、9024、9030、9107、9346 及 DetNet YANG/TCQF 草案；ITU-T Y.3121、G.8310、G.8312、G.709；3GPP R16/R17/R18（TSN 互通、TSC、URLLC、网络切片）与 Release 21（6G）；OIF FlexE 1.0/2.0/2.1。

中国标准与政策：工信部《人形机器人与具身智能标准体系（2026 版）》；YD/T 6770-2026；《人工智能安全治理框架》（1.0/2.0）；《智能体规范应用与创新发展的实施意见》；CCSA 确定性承载测试规范；信通院 D-CUBE 评测体系；《人形机器人创新发展指导意见》。

产业与技术文献：紫金山实验室等《确定性网络技术与产业发展应用白皮书》；《确定性网络完整技术体系：标准、核心技术、指标差异、全套测试体系》；《马尔斯人形机器人 M1 产品定义报告》（马尔斯机器人有限公司，2026 年 8 月）；Figure AI Helix 技术资料；NVIDIA Jetson Thor 官方规格；行业公开产业研究数据（2025 - 2026）。

附录 C：重要参考资料与出处

本附录汇集本白皮书编制过程中依据与引用的重要参考资料，作为文中相关论断、事实与数据的出处，便于审阅者查证。标准类文献另见附录 B。

C.1 编制依据文件

编号	资料名称	编制/发布单位与说明
C1-1	《确定性网络联合发布会纪要》（9·25 修改稿）	具身智能确定性网络联合工作会议（2026 年 9 月 24 日，南京紫金山实验室）；本白皮书编制任务来源
C1-2	《确定性网络技术与产业发展应用白皮书》	紫金山实验室等；本白皮书第二章技术素材来源
C1-3	《确定性网络完整技术体系：标准、核心技术、指标差异、全套测试体系》	确定性网络技术体系文档；第二章标准、指标与测试体系素材来源
C1-4	《马尔斯人形机器人 M1 产品定义报告》	马尔斯机器人有限公司；第三章云端机器人架构与本体规格素材来源

表 C-1 编制依据文件

C.2 国家级设施与国家级平台出处资料

编号	事实要点	出处
C2-1	未来网络试验设施（CENI）正式建成投入服务：覆盖 40 个核心城市节点及沿途 133 个城市节点，具备分钟级按需定制、微秒级确定性保障等四大能力；10 城市超 1 万公里拥塞场景零丢包、平均负载 5.45 Gbps、最大时延抖动小于 50 微秒	第一财经《第八届未来网络发展大会今日开幕，紫金山实验室发布多项重大成果》，2024 年 8 月 22 日
C2-2	CENI 列入国务院“十二五”时期 16 个国家重大科技基础设施项目，是我国通信与信息领域首个大科学工程；“十四五”规划将其列入国家战略科技力量；全长 3.4 万公里；江苏未来网络集团有限公司（2011 年揭牌）为 CENI 运营单位	江苏未来网络集团有限公司官方资料（fngroup.com.cn）
C2-3	基于 CENI 的确定性网络试验：途经 13 个省市、13000 公里、100% 负载，零丢包、抖动小于 20 微	新华三集团《多层次网络架构探索与实践》

编号	事实要点	出处
	秒	
C2-4	全球首个光电融合确定性新型算网基础设施：2000公里以上无电中继无损承载、单波单端口400/800G、全网抖动低于5微秒、丢包率小于十万分之一，400G设备功耗降低50%、建设成本降低60%以上	紫金山实验室与江苏未来网络集团牵头建设；江苏未来网络集团公开资料
C2-5	山东确定性网络：2020年山东省引进紫金山实验室确定性网络技术，构建“一院一企一基金”协同架构（山东未来网络研究院+山东未来集团+亿元级成果转化基金）；2022年2月23日全球首张确定性网络发布，覆盖全省16市、总长5600公里；2022年6月升级2.0版，实现20微秒级时延抖动、零丢包；现已建成超过1.4万公里，落地智慧矿山、超算算力共享、远程手术、协同制造等场景	新华网《跨越800公里的“确定性”奔赴，紫金山下“铺网”的山东青年》（2026年8月7日）；光明网同题报道（2026年8月7日）；山东未来网络研究院公开资料
C2-6	2022年7月，国家科技部正式批复支持建设“云端机器人国家新一代人工智能开放创新平台”，为首家也是目前唯一一家面向云端机器人方向的国家级平台企业（“人工智能国家队”）；2023年9月RobotGPT通过国家网信办算法备案；2023年底当选全国信标委（SC42）人形机器人（具身智能）工作组联合组长单位；作为核心企业参与工信部国家人形机器人制造业创新中心	C114通信网《达闼获批建设“国家新一代人工智能开放创新平台”，入选国家队》（2022年）；中共西藏自治区委员会网信办转载《黄晓庆预言：人形机器人生态规模，将是手机100倍！》（2024年6月9日）；达闼公开资料

表 C-2 国家级设施与国家级平台出处资料

C.3 国家政策与治理文件

编号	文件名称	发布机构与时间
C3-1	《国家新一代人工智能发展规划》	国务院，2017年7月
C3-2	《人形机器人创新发展指导意见》	工业和信息化部，2023年10月
C3-3	《人形机器人与具身智能标准体系（2026版）》	工信部人形机器人与具身智能标准化技术委员会，2026年2月28日
C3-4	《人工智能安全治理框架》1.0版 / 2.0版	全国网络安全标准化技术委员会（TC260），2024年9月9日 / 2025年9月15日

编号	文件名称	发布机构与时间
C3-5	《智能体规范应用与创新发展实施意见》	国家网信办、国家发展改革委、工业和信息化部，2026 年 5 月 8 日
C3-6	全国人形机器人全生命周期管理服务平台（“一机一码”）	2026 年 5 月 22 日发布，已接入 100 余家企业、200 余个产品型号、2.8 万余台机器人完成赋码注册

表 C-3 国家政策与治理文件

C.4 产业数据与技术资料

编号	资料要点	来源与时间
C4-1	人形机器人出货量统计：2025 年全球约 1.7 万台、中国占比 84.7%；2026 年 7 月宇树科技双足人形机器人累计下线约 1.8 万台	北京赛迪、中国电子报及公开产业报道整理，2025 - 2026 年
C4-2	《具身智能（人形机器人）产业发展蓝皮书》：2025 年全球具身智能市场约 900 亿元，2026 年预计 1500 - 2000 亿元	2026 年 7 月
C4-3	Figure AI Helix 技术资料：S2/S1 双系统（7 - 9 Hz / 200 Hz），Helix 02 新增 1 kHz S0 层	Figure AI，2025 年 2 月起
C4-4	NVIDIA Jetson Thor 官方规格：2070 FP4 TFLOPS、128 GB 统一内存、40 - 130 W	NVIDIA，2026 年
C4-5	3GPP Release 21（6G）时间表：2027 年 3 月启动规范性研制，2029 年 3 月冻结，2030 年前后商用	3GPP RAN 第 112 次全会（新加坡），2026 年 6 月
C4-6	第十届未来网络发展大会于 2026 年 10 月 15 - 17 日在南京举办	南京日报，2026 年 9 月 21 日
C4-7	产业领袖预测：孙正义（2017 年）预测 2047 年人类社会将有 100 亿台机器人；马斯克（2024 年股东大会）预测人形机器人与人类数量比达 1:1 - 2:1，即 100 亿 - 200 亿台以上	C114 通信网（2023 年 3 月 22 日）；特斯拉 2024 年股东大会；摩根士丹利研究报告（2024 年 6 月）；花旗全球洞察
C4-8	Google DeepMind Gemini Robotics 系列：2025 年 3 月首发，2025 年 9 月 1.5 系列（先思考再行动、Motion Transfer 零样本迁移），2026 年 7 月 2.0 系	Google DeepMind 官方博客及公开报道，2025 - 2026 年

编号	资料要点	来源与时间
	列（全身控制、多机协同、ER 2 开放 API）	
C4-9	OpenAI 时隔六年重启机器人业务，成立 OpenAI Robotics（源自 WorldSim 项目）；此前投资 Figure AI、1X Technologies、Physical Intelligence	界面新闻、科学网，2026 年 6 月 1 日
C4-10	NVIDIA 具身智能开源开放生态：Isaac GR00T 开源人形机器人基础模型（N1/N1.6）、Cosmos 开源世界模型、Isaac GR00T 开源人形机器人参考设计（宇树 H2 Plus，2026 年底供货）	NVIDIA，2025 - 2026 年（CES 2026、COMPUTEX/GTC 台北 2026 年 6 月）
C4-11	全球对比研究：六个海外可比方案 × 十三项功能覆盖矩阵，本白皮书为唯一十三项无空白方案、五项相对优势（第十章）	本白皮书课题组《海外方案对比与本方案优势》（全讯物联技术（济南）有限公司，2026 年 10 月，V1.0）

表 C-4 产业数据与技术资料

C.5 运营商 5G 切片与 UPF 能力出处资料

编号	事实要点	出处
C5-1	中国移动：《中国移动 5G 行业专网技术白皮书》确立“优享、专享、尊享”三级专网模式；《5G OpenUPF 白皮书》及 N4 解耦 UPF 设备规范、N4 接口规范发布，OpenUPF 合作伙伴计划 2020 年底达 44 家	C114 通信网（2020 年 6 月 19 日、2021 年 4 月）；《中国移动 5G 行业专网技术白皮书》（2020 年 6 月）
C5-2	中国电信：5G 定制网“致远、比邻、如翼”三类模式正式发布，边缘 UPF 商用落地（美的）、园区级 UPF 独立专网部署（国网青岛）；2026 年发布全国首个具身机器人专属通信套餐“具身翼联”（5G-A 切片，500 Mbps 上行、20 ms 时延）	国务院国资委网站、人民网（2020 年 11 月 9 - 10 日）；《中国电信 5G 定制网产品手册》；C114 通信网（2026 年 9 月 12 日）
C5-3	中国联通：《5G 行业专网白皮书》划分虚拟专网/混合专网（UPF 私有化部署）/独立专网，2021 年升级 5G 专网 PLUS 产品体系 2.0；2026 世界人形机器人运动会机器人专属 5G-A 独立载波专网，端到端时延实测 18 ms	中国联通《5G 行业专网白皮书》（2020 年 8 月）；《中国联通 5G 行业专网产品体系 2.0 白皮书》（2021 年 12 月）；C114 通信网（2026 年 8 月 27 日）

表 C-5 运营商 5G 切片与 UPF 已发布能力出处

C.6 OPC 创业政策出处资料

编号	事实要点	出处
C6-1	OPC 上升为国家层面关注的创业新形态：上海、江苏将 OPC 写入“十五五”规划《纲要》；《中国 OPC 发展调研报告 2026》显示 OPC 创业者以 90 后、00 后为主；2024 年 7 月新《公司法》取消自然人设立一人公司数量限制	国家发展改革委网站（2026 年 5 月 15 日）；国家市场监督管理总局课题组《中国 OPC 发展调研报告 2026》
C6-2	山东省十二部门联合印发 OPC 创新发展行动方案（鲁工信数据〔2026〕117 号）；辽宁到 2028 年拟培育 OPC 企业 300 家、集聚人才超 3000 名；广东到 2028 年拟建成百个 OPC 生态社区、培育千家标杆企业	山东省工业和信息化厅（2026 年 7 月 24 日）；人民网（2026 年 5 月 13 日）；广东省发展改革委（2026 年 3 月 12 日）
C6-3	深圳打造人工智能 OPC 创业生态引领地（最高 100 万元研发资助、人才安居保障）；北京海淀区对符合条件的新创 OPC 给予 10 万元创业资金支持、朝阳区建设 OPC 特色创业社区；湖北、四川、云南、海南等省出台专项措施	深圳市工业和信息化局（2026 年 1 月）；中关村科学城管理委员会（2026 年 4 月）；北京市朝阳区政府（2026 年 5 月）；相关省份工信、人社部门公开文件（2026 年）

表 C-6 中央与地方 OPC（一人公司）创业政策出处