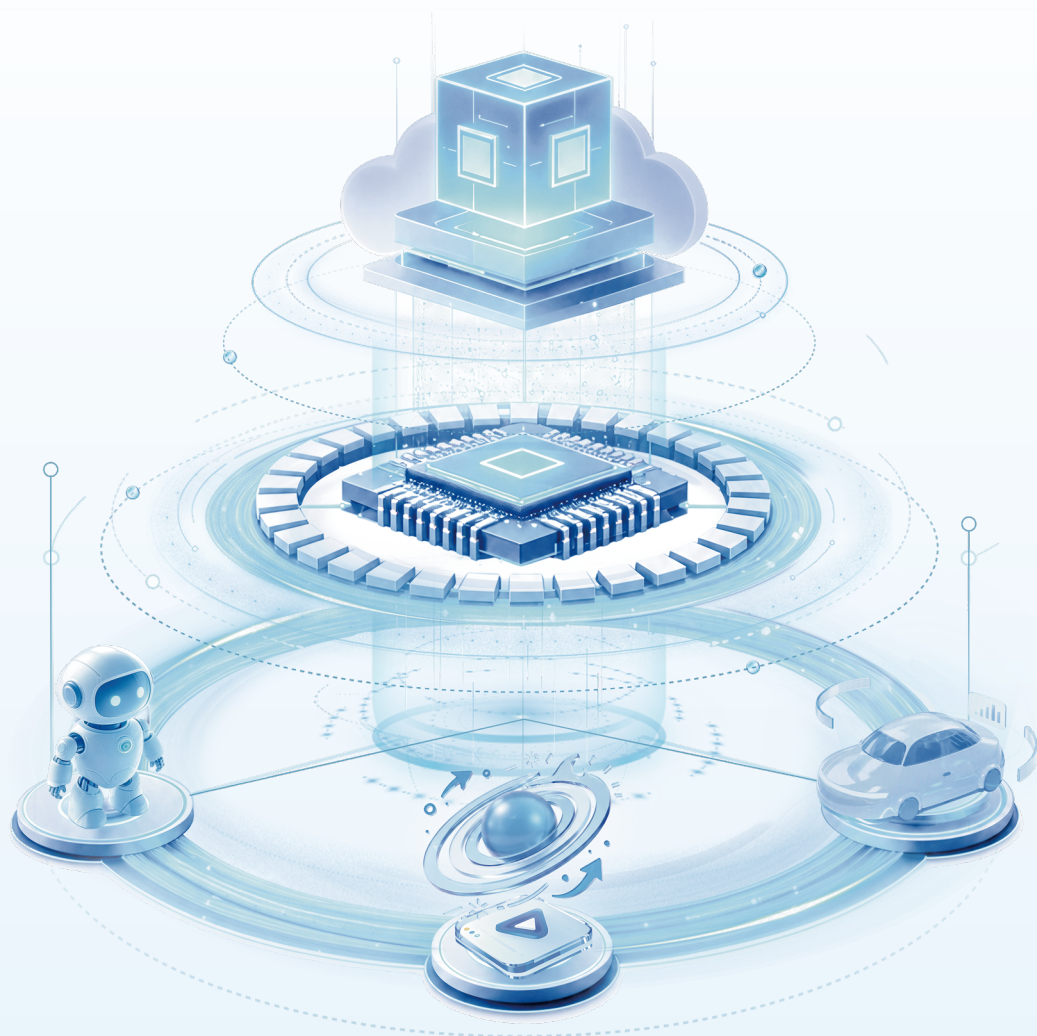




迈向智能世界系列

物理智能云边端协同架构 研究报告



构建万物互联的智能世界

序言

具身智能机器人是我国前瞻布局的新兴产业，已上升为国家重要战略方向，是打通数字空间与物理世界、发展新质生产力的关键载体，事关我国人工智能与机器人产业的全局竞争实力。当前具身智能/物理智能快速兴起，技术从数字智能向真实物理世界延伸，但物理闭环实时性保障、多智能体群体协同、模型持续迭代、异构系统互联互通等工程问题突出，产业迫切需要一套可落地的参考架构与深度的产业研判。

《物理智能云边端协同架构研究报告》立足物理智能产业发展现状，聚焦云边端协同这一核心技术范式，针对物理智能“端侧实时闭环、边侧增强智能、云侧全局演进”的分层特征，系统阐释云-边-端协同架构的生成逻辑，提出“三域协同·一网贯通”参考架构，区分不同场景下架构的适用条件与风险边界，既解析实时控制、多机协同、虚实仿真训练等技术价值，也对产业链分工、差异化部署模式、服务化商业演进路径开展系统研判。报告为芯片、模型、机器人本体、系统集成等产业各方提供架构设计与商业落地的重要参照，对具身智能机器人走向规模化商用有重要价值。

物理智能/具身智能是复杂技术、产品和应用的产业生态领域，跨计算、电子、通信、自动化、机械多个领域，因此离不开产学研用各环节和各产业领域的深度协同。期待本报告能够成为产业沟通的基础之一，推动产业链在架构理念、技术路径、产品形态、生态建设上形成广泛共识，凝聚产业合力，攻克跨层调度、异构互操作、安全可信等关键技术瓶颈，加速技术向产业场景落地转化，推动我国具身智能机器人产业行稳致远。



曾鹏

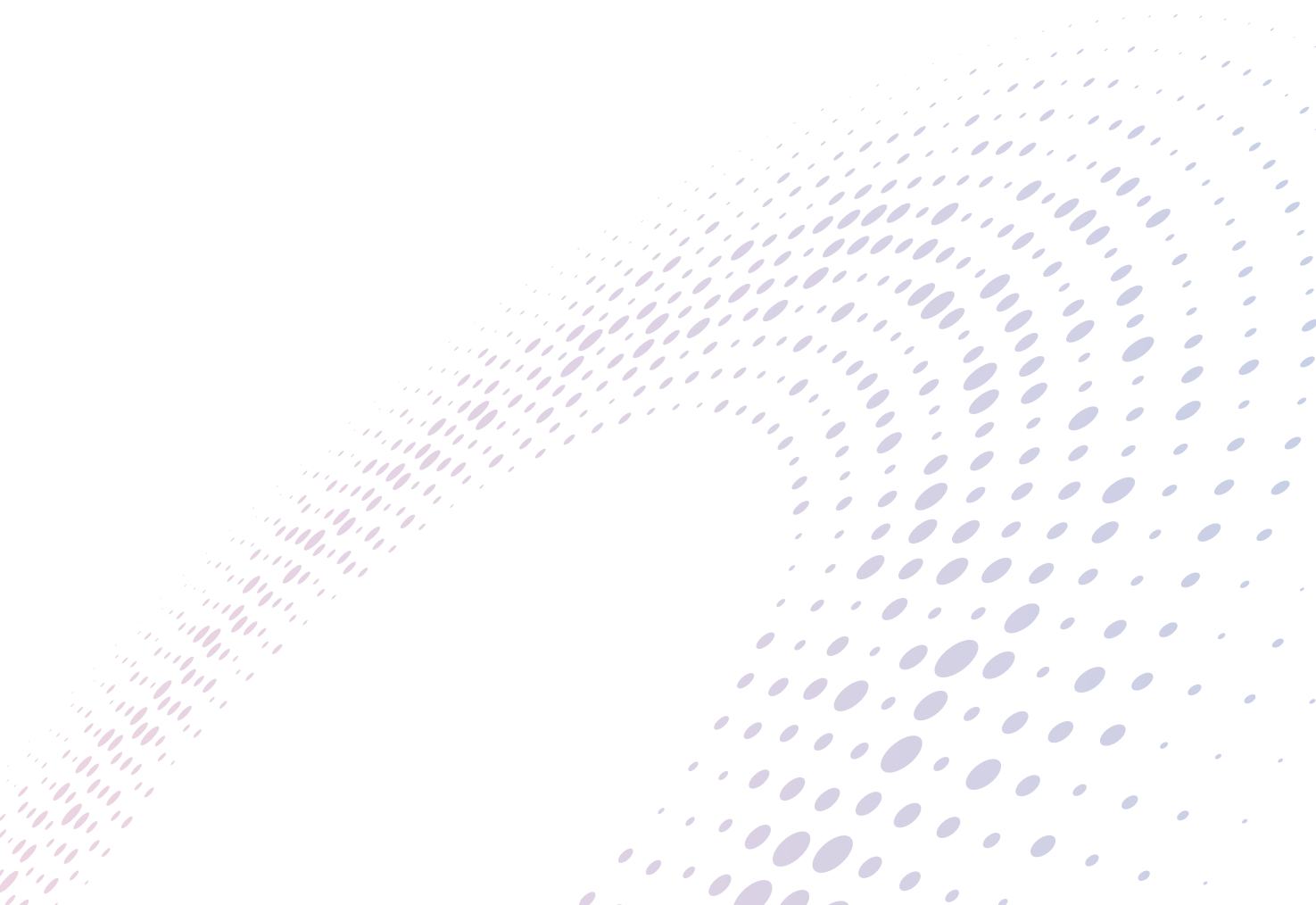
中国科学院沈阳自动化研究所副所长
全球计算联盟具身智能产业发展委员会主任

2026年9月

目录 CONTENTS

第一章	破壁时刻：AI从数字智能走向物理智能	04
1.1 智能跃迁：	智能技术从数字世界走向物理世界	05
1.2 场景演进：	从专业场景走向开放复杂场景	06
1.3 范式转移：	从单点智能到云边端协同智能	09
1.4 产业趋势：	技术成熟与商业闭环仍待突破	10
第二章	协同逻辑：物理智能云边端协同的必要性	11
2.1 场景驱动：	从应用场景看协同必要性	12
2.2 任务驱动：	从任务拆解看协同必要性	15
2.3 技术驱动：	从技术趋势看协同必要性	17
第三章	架构定义：物理智能云边端协同参考架构	22
3.1 价值主张：	三域协同·一网贯通	23
3.2 设计原则：	总体架构设计准则	24
3.3 参考架构：	物理智能云边端协同总体架构	25
3.3.1	云边端参考架构	26
3.3.2	应用协同参考架构	28
3.3.3	数据协同参考架构	30
3.3.4	算力协同参考架构	32
3.3.5	网络贯通参考架构	33
专栏：	云边端协同核心技术成熟度评价	35
3.4 架构演进：	云边端协同架构演进趋势	38
3.5 适用与风险：	云边端协同适用条件与风险分析	40

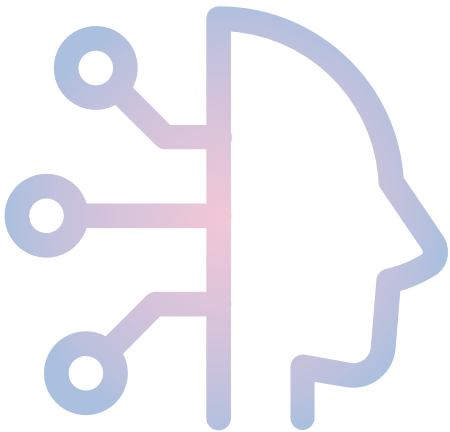
第四章	生态支撑：物理智能云边端产业协同体系	45
4.1 产业链协同：	物理智能云边端产业链协同发展	46
4.2 商业模式：	需求方与供应方协同构建	51
4.3 生态机制：	物理智能云边端生态协同	53
第五章	未来展望：物理智能云边端发展趋势	55
附录	缩写词汇表	58



第一章

破壁时刻

AI从数字智能走向物理智能



1.1 智能跃迁：从数字世界走向物理世界



人工智能正在从以信息处理为核心的数字智能，迈向能够理解并作用于真实世界的物理智能。从以图像识别、语音识别为代表的Perception AI，到能够生成文本、图像和代码的Generative AI，再到能够自主规划、调用工具并完成复杂任务的Agentic AI，人工智能持续提升对数字信息的感知、理解、生成和推理能力。随着大语言模型（LLM）、视觉语言动作模型（VLA）、世界动作模型（World Action Model）、世界模型（World Model）等技术不断突破，以及传感器、机器人本体、端侧芯片、智能汽车、无人机等物理载体加速成熟，AI的能力边界开始由数字空间进一步延伸至真实物理世界。智能系统能够综合视觉、声音、触觉、力觉、空间位置等多模态信息感知环境，理解物体、空间、运动及相互作用关系，并通过物理载体执行行动，人工智能由“处理和生成信息”进一步发展为“感知、理解并作用于世界”。

2026年正在成为物理智能由技术概念进入产业现场的重要转折点。Gartner在《2026十大技术趋势》¹

中将 Physical AI 列为重要技术方向，将其定义为能够感知现实世界并采取行动的实体AI系统，包括机器人、无人机和智能装备等；ADI在2026年2月以“2026: The Year Intelligence Gets Physical”为题，判断人工智能正在突破屏幕边界进入真实物理环境²；WAIC 2026进一步举办“物理智能创新生态论坛”，并由32家产学研资单位成立国内首个物理智能创新联合体。与此同时，全球主要经济体正加速推动人工智能由数字世界向物理世界延伸。北美依托人工智能基础模型、芯片算力和软件平台优势，加快布局机器人、自动驾驶等领域；欧洲依托汽车、工业自动化和高端制造基础，推动人工智能与工业物理系统深度融合；中国则依托完整制造业体系、丰富应用场景和机器人产业基础，加快具身智能、多机协同及规模化应用探索。全球物理智能产业正在形成技术创新与场景落地同步推进的发展格局。从技术趋势判断到产品布局，再到产业生态形成，物理智能正在由前沿技术方向加速进入产业化验证与规模化应用阶段。

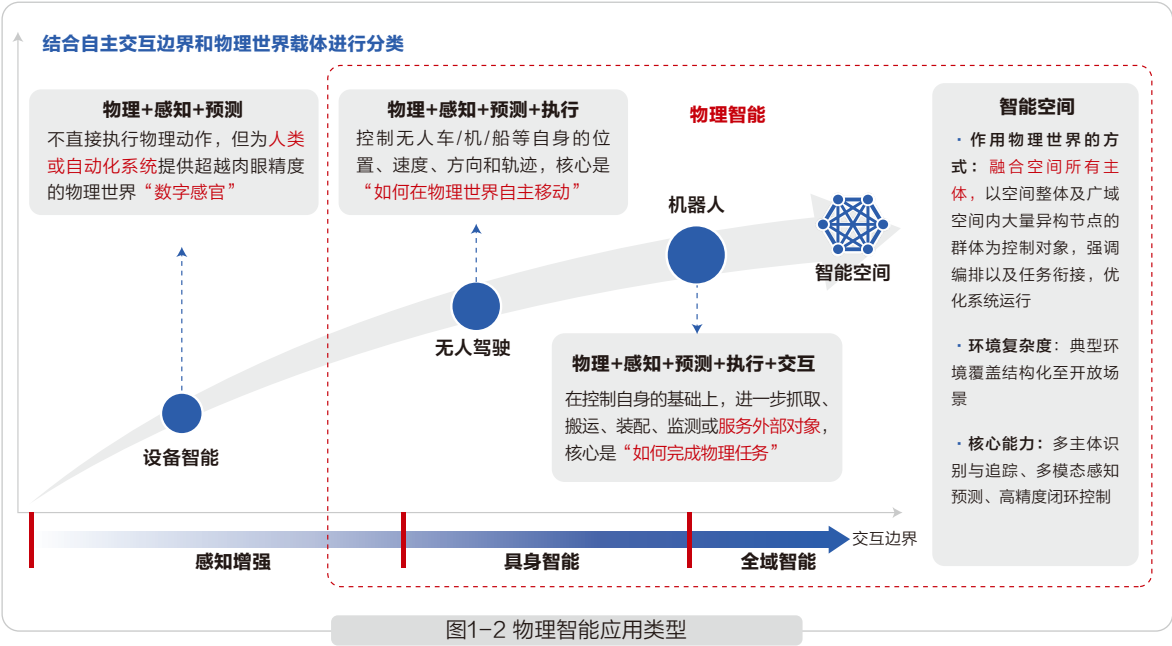
1、Gartner《Top Strategic Technology Trends for 2026: Physical AI》

2、ADI《2026: The Year Intelligence Gets Physical》

全球产业界与学术界虽然从不同视角出发，对 Physical AI 的理解正在逐步形成共同内核。NVIDIA 从产业实践出发，强调自主系统感知、理解和推理现实世界，并在物理世界中执行复杂行动³；IBM 将 Physical AI 理解为在物理世界中运行并与之交互的人工智能系统⁴；Nature Machine Intelligence 从具身智能向 Physical AI 演进的视角出发，强调智能系统进一步走向在物理世界中感知、行动和持续适应⁵；IEEE TPAMI 相关研究则从技术体系出发，将 Physical AI 概括为感知、推理、建模与具身交互相互衔接的能力体系，通过物理行动与环境反馈形成智能闭环。不同表述共同指向三个核心变化：智能对象从数字信息扩展至真实物理环境，AI 能力从感知和推理延伸至建模、规划和行动，智能过程从数字结果输出发展为基于环境反馈持续调整的物理闭环。

基于上述产业趋势与技术共识，本报告将物理智能（Physical AI）定义为：AI 在真实物理世界中完成感知、理解、推理、规划、行动和反馈闭环的能力体系。其核心在于将 AI 能力融入各类物理产品、系统与空间，使其能够感知环境、理解状态、自主决策、执行任务，并根据现实世界反馈持续调整和进化。从这一视角看，各类物理产品、系统与空间都具有进一步 AI 化的潜力，物理智能的本质是以 AI 重塑物理产品与系统，并进一步拓展至区域空间。其载体既包括人形机器人、工业机器人、智能汽车、无人机、工业装备、工程机械等智能载体，也包括智能工厂、智能建筑、智能交通等复杂物理系统，并进一步延伸至园区、港口、矿山、城市等区域空间，推动物理智能由单体智能向复杂系统和区域空间持续拓展。

1.2 场景演进：从专业场景走向开放复杂场景



3、NVIDIA COMPUTEX 2024主题演讲 4、IBM《What is Physical AI?》
5、Nature Machine Intelligence《From embodied intelligence to physical AI》

物理智能应用可根据与物理世界自主交互的边界及物理载体，划分为无人驾驶、机器人和智能空间三类应用类型⁶。其中，无人驾驶以自主控制车辆、无人机、船舶等载体的位置、速度、方向和轨迹为主要特征，核心是实现物理世界中的自主移动；机器人进一步通过抓取、搬运、装配、服务等方式与外部对象发生物理交互，核心是自主完成各类物理任务；智能空间则进一步融合空间内多类型智能主

体，通过统一感知、任务编排、资源调度和协同控制实现空间级系统智能。从产业落地看，三类应用覆盖的具体场景受到环境结构化程度、任务复杂度、技术成熟度、安全要求以及产业配套能力等因素影响，规模化时间存在明显差异，形成由成熟场景率先突破、复杂场景持续扩张、开放场景逐步拓展的梯次发展格局。



图1-3 物理智能场景落地趋势

无人驾驶产业化相对领先，并沿着“封闭区域、限定环境、开放空间”的方向逐步拓展。2026年前后，矿山、港口、机场以及巡检、植保等运行边界相对清晰的专业场景率先实现规模化应用；2026—2028年，随着环境感知、实时决策、路径规划和安全控制能力持续提升，物流无人机、无人城配、无人环卫、Robotaxi、短程接驳等应用进入增量扩张阶段，无人驾驶逐步进入交通参与者更多、环境动态性更强的城市和区域运营场景；2028—2030年，无人干线物流、载人eVTOL等场景进一步发展，自主移动范围、环境复杂度和安全要求持续提升，无人驾驶应用由特定区域的自主运行逐步向更广范围的开放空间拓展。

机器人将沿着“结构化简单任务、精细化复杂任务、综合复杂长程任务”的方向持续演进。2026年前后，场内物流、搬运转运、制造工艺加工、家庭清洁等任务边界清晰、技术基础相对成熟的场景率先规模化；2026—2028年，随着感知、规划、操作和泛化能力提升，机器人应用逐步向柔性装配、精细操作、工业检测、生产运维以及医疗、商业等高价值复杂任务扩展；2028—2030年，随着长时序任务执行、复杂交互和通用操作能力进一步成熟，家庭综合服务等开放程度更高的场景逐步发展，机器人由面向单一任务的专用设备向能够理解环境、持续获取技能并承担多种任务的通用智能终端演进。

6、NVIDIA《What is Physical AI?》

智能空间将成为物理智能由单体智能向空间级智能拓展的重要形态，其核心是将AI能力由车辆、机器人等单一设备进一步融入物理空间，使空间具备对环境及其中人、车辆、机器人等多类型主体的持续感知、理解、分析和协同能力。2026年前后，智能空间已率先在工厂、仓库、园区等相对结构化环境中落地，通过固定摄像头、计算机视觉和AI智能体等实现多主体追踪、异常检测、动态路径规划和运营优化，空间开始由被动承载智能设备向主动感知和理解环境演进。2026—2028年，随着空间智能、世界模型、数字孪生和物理仿真等技术持续发展，智能空间将进一步增强空间建模、状态预测和仿真推演能力，并与无人驾驶、智能机器人及各类智能设备形成双向协同，实现跨主体任务编排、资源调度和安全管理；2028—2030年，随着多主体协同决策和虚实融合能力进一步成熟，智能空间将逐步形成面向空间整体的预测、决策、调度和全局优化能力，推动物理智能由“单体自主”向“空间整体智能”演进。

总体来看，物理智能应用将呈现由近期规模化铺开、中期增量扩张到远期开放拓展的梯次演进节

奏。近期，以环境相对结构化、任务边界清晰、不确定性可控的专业场景为主，无人驾驶在封闭及限定区域加速规模化，机器人在流程相对明确、复杂度可控的生产作业等成熟任务中持续渗透，智能空间则率先在工厂、仓库、园区等场景形成空间感知、状态识别和运营优化能力，物理智能整体以特定环境下的专用智能为主要形态；中期，随着感知、推理、规划和执行能力持续提升，无人驾驶向更加动态的城市和区域运营环境延伸，机器人向柔性化、高价值复杂任务扩展，智能空间进一步向空间理解、预测推演、任务协同和资源调度演进，多主体协同和系统化运营能力逐步增强；远期，随着通用智能、复杂交互和多主体协同能力进一步成熟，应用将向开放环境和综合任务持续拓展，并逐步形成能够理解环境、预测变化、协同决策和全局优化的空间级系统智能。整体上，物理智能的自主交互边界持续扩大，应用场景由专业可控向开放复杂拓展，应用形态由专用化向通用化、由单体智能向系统智能演进；随着运行环境和任务复杂度不断提升，模型需要具备更强的泛化、推理和持续学习能力，对算力规模、数据丰富度及实时处理能力也将提出更高要求。

1.3 范式转移：从单点智能到云边端协同智能



物理智能对计算架构提出了区别于数字AI的新要求。搜索、推荐、内容生成等数字应用主要在信息空间完成状态与信息的交互，机器人、汽车、无人机、工业设备等物理智能载体需要持续感知环境状态、实时做出决策并执行动作，动作又会进一步改变自身及环境状态，形成持续的动态交互闭环，对时延、可靠性、安全性和业务连续性提出更高要求。特别是物理世界具有持续运行、实时交互和结果难以逆转等特征，感知、决策或控制链路的延迟和误差可能直接影响设备运行和人员安全。实时性由传统数字应用中的体验指标，逐步成为物理智能稳定运行的基础条件，也推动计算能力向更靠近物理现场的位置延伸。

与此同时，物理智能对实时性与智能能力的双重需求，也使单一计算节点越来越难以承载完整智能闭环。端侧最贴近传感器和执行机构，能够快速完成环境感知、运动控制和安全响应，如机器人避障、机械臂运动控制和车辆紧急制动等，但受到算力、功耗、散热和设备形态等约束，端侧算力难以独立承担复杂智能任务，需将高算力向其它资源卸载，因此需要更多的算力协同；云侧拥有更充足的算

力、数据和模型资源，适合基础模型训练、大规模仿真、复杂推理和跨区域全局优化等任务，但距离物理现场较远；边缘侧位于二者之间，可以承接模型推理、算力卸载、现场数据汇聚和多设备协同；由此可见，云、边、端在算力、数据和任务角色划分上具有明显的分层特性和协同互补的特性，这种差异本身即是协同的内在驱动力。学术界也开始关注这一趋势，施巍松教授团队提出“边缘物理智能（Physical Intelligence on the Edge, PIE）”愿景⁷，强调在真实环境中构建感知、决策、行动的实时闭环。云、边、端不同的资源禀赋与响应能力，为物理智能形成分层协同架构提供了基础。

总体来看，物理智能正在推动计算体系从“单点智能”向“云边端协同智能”演进，形成端侧实时闭环、边侧增强智能、云侧全局演进的分层体系，也要求算力、数据和应用在云、边、端三者之间互相协同。三者通过网络连接和协同调度形成完整闭环，使智能能力能够根据任务需求在云、边、端之间合理分布，逐步形成面向物理世界的一体化智能计算架构。

7、Weisong Shi, Zheng Dong, Peipei Zhou《Physical Intelligence on the Edge: A Vision for the Decade Ahead》

1.4 产业趋势：技术成熟与商业闭环仍待突破

与此同时，物理智能整体仍处于规模化发展的早期阶段。从技术成熟度到商业可复制性之间仍存在多重尚未跨越的鸿沟。

技术层面，当前物理智能的核心能力尚未完全跨越从实验室验证到真实环境部署的鸿沟。在通用智能方面，现有模型在面对复杂、动态、非结构化的物理世界时，泛化与场景迁移能力远未达到规模化要求；在安全可靠方面，智能系统在不确定性环境中的决策鲁棒性、容错机制及失效边界缺乏充分验证，尚难匹配工业级稳定性标准；在持续自主能力方面，开放场景下的长期运行、在线学习与跨场景自适应迁移仍是尚未攻克的关键难题。此外，技术路线高度发散，架构、方案与产品形态快速迭代，行业尚未形成统一范式。

商业层面，物理智能的应用正从技术验证迈向商业验证。一方面，支撑规模化部署的投入产出不清晰，硬件成本、部署成本与运维成本的结构化分析缺乏足够的数据支撑，投资回报周期及闭环路径尚不明朗；另一方面，合适的商业模式仍在探索之中，现有软硬件一体化交付与服务交付模式尚未找到稳定、可复制的组合形态，用户对于购买能力还是服务亦缺乏统一的消费预期；产业链上下游之间的价值分配机制也远未成熟，芯片、整机、算法、平台、集成各环节的话语权博弈与利润分配格局仍在动态变化之中。

未来，物理智能仍将经历技术持续突破、产品加速成熟、场景规模验证和商业模式逐步闭环的过程，推动产业从方向共识和局部突破逐步迈向规模化、体系化发展。

第二章

协同逻辑

物理智能云边端协同的必要性



2.1 场景驱动：从应用场景看协同必要性



图2-1 物理智能端侧能力局限

物理智能应用场景覆盖制造、医疗、公共服务、交通出行、物流运输、应急救援等多类行业，随着应用场景不断拓展、任务复杂度持续提升，智能能力逐步由单体自主向多设备协同和系统级智能演进，对端侧能力提出更高要求。但端侧受算力、功耗、散热、成本及设备形态等资源条件约束，一方面存在单端能力边界，复杂智能处理、多设备协同、全局任务调度、跨系统联动和大规模数据处理等能力难以完全由单端承载，需要借助边缘和云侧实现算力补充、跨设备协同与全局能力支撑；另一方面存在端侧智能缺口，大量存量自动化设备自身缺少智能计算能力，且受既有软硬件架构和改造条件限制，难以直接部署AI模型和智能应用，需要通过边缘或云侧实现智能能力外挂，推动既有设备智能化升级。



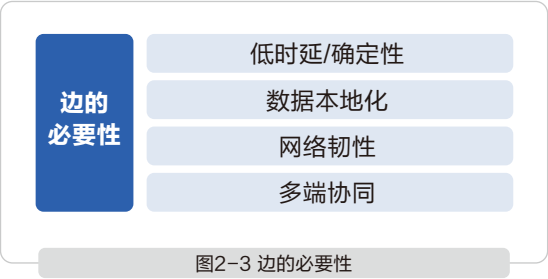
图2-2 应用场景筛选因素

基于物理智能应用场景的产业发展阶段与规模化落地节奏，优先选取未来五年规模化落地可能性较高的典型细分场景，进一步从时延、安全、通信、算力、可靠性和数据本地化六个维度开展业务需求筛选，识别不同场景对ICT基础设施的关键约束。筛选结果显示，不同场景的业务需求存在明显差异：制造工艺加工、装卸/上下料、柔性装配与精细操作、无人出租车、无人公交与短程接驳等需要实现感知、决策和执行的快速闭环，对时延要求较高；制造作业、危险实验、无人驾驶及专业无人作业等涉及人机协作、生命安全或公共安全，对安全性要求较高；场内物流、生产运维、公共服务、无人驾驶及无人作业等涉及设备持续连接、多设备协同或远程作业，对通信能力要求较高；教学科研、工艺加工、工业检测、柔性装配、无人驾驶及应急巡检测绘等涉及复杂模型、多模态感知或环境理解，对算力要求较高；制造作业、物流运输、公共服务及无人驾驶等需要持续稳定运行，对可靠性要求较高；工业检测与生产运维、感知数据采集、危险实验、无人驾驶、矿山/港口/机场运输及应急巡检测绘等涉及生产、科研、空间和公共安全等敏感数据，对数据本地化具有较强诉求。不同场景通常同

时具有多类业务约束，不同约束及其组合进一步形成对计算位置和资源部署方式的差异化需求，并由此产生对端、边、云不同层级能力的需求。

表2-1 物理智能典型场景关键约束

行业	细分场景	约束
企业场景	教学实验/科研辅助	强算力
企业场景	制造工艺加工	强时延、强安全、强算力、强可靠性
企业场景	装卸/上下料	强时延、强安全、强可靠性
企业场景	场内物流/搬运转运	强时延、强安全、强通信、强可靠性
企业场景	工业检测/盘点巡检	强算力、数据本地化
企业场景	分拣包装/柔性装配/精细操作	强时延、强安全、强通信、强算力、强可靠性
企业场景	种养导入/生长管理	强通信
企业场景	生产运维管理	强安全、强通信、强算力、强可靠性、数据本地化
商业服务场景	商业物品流转	强通信、强可靠性
商业服务场景	商业环境服务	强安全、强可靠性
商业服务场景	商业现场作业	强时延、强安全、强通信、强算力、强可靠性
公共服务场景	感知数据采集	强通信、强算力、数据本地化
公共服务场景	机构物流/基本流转	强时延、强安全、强通信、强可靠性
公共服务场景	特殊环境处理/消杀	强时延、强安全、强通信、强可靠性
公共服务场景	危险实验作业	强时延、强安全、强通信、强算力、强可靠性、数据本地化
载人场景	无人出租车	强时延、强安全、强通信、强算力、强可靠性、数据本地化
载人场景	无人公交/短程接驳	强时延、强安全、强通信、强算力、强可靠性、数据本地化
载物场景	矿山/港口/机场运输	强时延、强安全、强通信、强算力、强可靠性、数据本地化
载物场景	物流无人机	强时延、强安全、强通信、强算力、强可靠性
载物场景	无人城配车	强时延、强安全、强通信、强算力、强可靠性
专业作业场景	应急巡检/测绘无人机	强时延、强安全、强通信、强算力、强可靠性、数据本地化
专业作业场景	无人植保机	强时延、强安全、强通信、强可靠性
专业作业场景	无人环卫	强时延、强安全、强通信、强可靠性



从典型场景的业务约束看，低时延、安全、通信、可靠性和数据本地化等需求共同推动部分计算与智能能力向现场下沉。边的必要性主要来自物理智能的现场约束，其核心是将“不能远离现场、又不适合完全由单端承担”的计算能力留在现场。一是低时延与确定性，部分任务需要快速响应，远距离云端处理难以满足实时要求；二是数据本地化，生产、医疗、空间等敏感数据需要尽可能在现场处理；三是网络韧性，在云连接中断或网络条件不稳定时，现场业务仍需持续运行；四是多端协同，多个机器人、车辆和设备需要共享现场状态并进行统一协同⁸。边侧通过本地计算、数据处理、多机协同和断网自治承接上述需求，典型应用包括工艺加工、柔性装配、运维管理、临床诊疗、应急处理以及港口、机场、矿山运输等专业场景，也包括家庭服务、社区服务和康养照护等对隐私保护、实时响应和本地自治要求较高的生活服务场景。



与此同时，算力需求以及物理智能规模化部署带来的资源共享、跨区域协同、数据积累和能力迭代需求，进一步推动部分能力向云侧集中。云的必要性主要来自物理智能规模化发展带来的规模与全局需求，其核心是将“需要规模效应、全局视角和持续进化”的能力集中起来。一是大算力，大模型训练、仿真和复杂模型优化需要集中计算资源；二是规模经济，通过算力池化和资源共享，减少不同现场按照峰值需求重复建设；三是全局协同，对跨工厂、跨园区、跨区域的设备和任务进行统一调度与优化；四是数据沉淀，汇聚不同现场的数据和经验，形成可复用的数据集、知识库和经验库；五是持续迭代，通过云端训练和优化模型，再向边侧和端侧持续更新。云侧由此承担大规模训练、仿真、全局优化和模型迭代等集中式任务，其中交互陪伴对公有云大模型能力具有较强需求，导诊、教学演示、实验助手、迎宾服务等场景也可根据实际需要调用公有云能力。

物理智能应用不断向复杂场景和规模化应用拓展，端侧受算力、功耗、散热、成本及设备形态等条件约束，同时大量存量设备存在端侧智能能力缺口，单端难以满足物理智能规模化发展的整体需求。与此同时，不同应用场景在时延与确定性、数据本地化、网络韧性、多端协同、大算力、规模经济、全局协同、数据沉淀和持续迭代等方面呈现差异化需求，进一步形成对边侧和云侧能力的客观需要。因此，物理智能需要突破单端部署模式，形成端、边、云分层部署与协同运行的整体架构，通过不同层级能力的合理配置与协同，支撑物理智能由单体应用向规模化应用演进。

8、ETSI《Multi-access Edge Computing (MEC); Use Cases and Requirements》

2.2 任务驱动: 从任务拆解看协同必要性



图2-5 物理智能任务特征对云边端协同的驱动

物理智能需要在真实物理世界中持续完成“感知、决策、执行、学习”的闭环，单一模型或单一计算节点难以覆盖完整任务流程。从任务链条看，物理智能系统可以进一步拆解为感知、决策、执行、协同、学习和运营六个层级：感知层通过多模态感知、目标识别、定位建图和环境理解获取物理世界状态，形成环境状态、目标位置等感知信息；决策层通过模型推理、任务规划、路径规划和行为决策生成行动方案，形成任务指令、路径及动作策略；执行层通过运动控制、末端执行和实时避障作用于

物理世界，并反馈设备状态和执行结果；协同层负责多机协同、任务调度和资源共享，传递任务、状态和资源信息；学习层通过模型训练、持续学习和OTA更新实现能力迭代，实现数据回传与模型、策略下发；运营层则承担数据治理、设备管理、数字孪生和运营监控，汇聚运行数据并下发管理和配置指令，保障物理智能系统长期稳定运行。六类任务相互衔接，通过状态、指令、数据和模型等信息持续交互，共同构成从环境输入、智能决策、物理执行到能力迭代和持续运营的完整闭环。

表2-2 物理智能任务分层、典型任务及时间尺度

层级	典型任务示例	典型执行频率/时间尺度
感知层	多模态感知、目标识别、定位建图、环境理解	10 - 100 Hz, 约10 - 100 ms
决策层	模型推理、任务规划、路径规划、行为决策	1 - 20 Hz, 约50 ms - 1 s
执行层	运动控制、末端执行、实时避障	50 - 1,000+ Hz, 约1 - 20 ms
协同层	多机协同、任务调度、资源共享	0.1 - 10 Hz, 约100 ms - 10 s
学习层	模型训练、持续学习、OTA更新	分钟 - 天级, 按需/周期执行
运营层	数据治理、设备管理、数字孪生、运营监控	秒 - 天级, 实时监测与周期执行并存

注：执行频率及时间尺度为典型任务的可能范围，不同本体、算法及应用场景存在差异，具体指标以实际系统设计与测试结果为准。

不同任务层级在运行频率和时间尺度上存在显著差异，并进一步形成对实时性、算力、数据流向和协同范围的差异化要求，也因此具有不同的适宜计算位置。以Helix 02⁹为例，其语义推理层负责目标理解和任务序列规划，全身视觉运动策略以200Hz运行，底层身体控制进一步达到1kHz，呈现出越接近物理执行，实时性要求越高，越接近任务理解和知识推理，模型与算力需求越高的特征。

感知层通常需要持续、高频处理传感器数据，原始数据量大且实时性较强，主要部署于端侧；决策层覆盖从高频实时决策到低频复杂规划的不同时间尺度，实时决策主要在端侧完成，复杂推理和区域规划可进一步由边侧承担；执行层直接控制物理设备，运行频率最高，需要形成毫秒级甚至更高频的

控制闭环，主要部署于端侧；协同层根据多设备状态和任务变化开展任务调度与资源协调，运行频率相对降低，但对区域内多设备低时延交互具有较高要求，主要由边侧承担；学习层以模型训练、持续学习和OTA更新等周期性或按需任务为主，需要大规模算力和数据汇聚，主要部署于云侧，轻量级模型更新、微调 and 增量训练等对现场数据和响应效率要求较高的任务，可部署于边侧，以提升模型迭代的实时性和场景适应能力；运营层覆盖实时监控与周期性管理任务，面向全局资源管理、跨区域运营和长期数据沉淀，主要由云侧承担，并由边侧提供现场运营支撑。从毫秒级实时控制到小时、天级持续学习与运营，任务时间尺度跨越多个数量级，推动物理智能完整任务链形成端、边、云分层承载与协同运行的架构特征。

表2-3 物理智能分层部署及依据

层级	主要部署	部署依据
感知层	端	原始数据量大、时延敏感、依赖本地传感器
决策层	端 / 边	简单决策端侧完成，复杂推理和区域规划边缘完成
执行层	端	毫秒级闭环控制，不能依赖网络
协同层	边	需要区域内多设备低时延协同
学习层	云（边辅助）	大规模算力、数据汇聚、统一模型管理
运营层	云（边辅助）	全局资源管理、跨区域运营、长期数据沉淀

随着任务在实时性、计算复杂度、数据范围和协同范围上的需求持续分化，计算资源由固定部署逐步走向按任务分工，端侧最接近传感器和执行器，重点承载感知、控制和实时决策，保障物理交互的实时闭环；边侧连接多个端侧设备，重点承载复杂决

策、区域规划、多机协同和现场运营支撑，在实时性与计算能力之间形成平衡；云侧汇聚更大范围的数据和计算资源，重点承载模型训练、持续学习、全局运营和长期数据沉淀，为边侧和端侧持续提供模型、知识和策略能力。端侧产生的状态和运行数

9、Helix 02：Figure公司发布的视觉-语言-动作（VLA）通用模型

据可以向边侧、云侧汇聚，云侧训练和优化形成的模型与策略再向边侧和端侧下发，使感知、决策、执行、协同、学习和运营形成跨层级的持续闭环。

因此，从任务拆解视角看，云边端协同的必要性来自物理智能完整任务链对不同计算能力的内在分工需求。感知与执行要求计算靠近物理现场，学习与

运营需要集中算力、数据和全局能力，决策与协同则根据任务复杂度和协同范围在端侧与边侧之间灵活分布。云边端协同可以将不同任务部署在更适合的计算位置，并实现数据、模型、任务和状态在不同层级之间持续流动，在保障实时闭环的同时支撑复杂决策、多机协同、能力迭代和长期运营，从而形成贯穿物理智能完整生命周期的协同运行体系。

2.3 技术驱动：从技术趋势看协同必要性



综合国内外科研机构及典型厂商的技术研究与产业实践，中国科学院、斯坦福大学等科研机构持续开展具身智能、世界模型、多模态感知、强化学习及多智能体等方向研究，英伟达等典型厂商则围绕机器人基础模型、VLA、世界模型、仿真训练和具身推理等形成较为系统的技术布局。在此基础上，本报告从能力链条出发，以大模型与机器人基础模型为代表的智能生成能力，以 VLA/VLN/WAM 为代表的行动能力，以世界模型为代表的预测能力，以多模态感知为代表的输入感知能力，以触觉与本体

感知为代表的精细交互能力，以强化学习与持续学习为代表的进化能力，以仿真为代表的训练环境能力，以数字孪生为代表的虚拟运行空间能力，以及以多智能体与群体协同为代表的协同交互能力。随着这些技术由单点能力向融合智能持续演进，模型规模、实时交互、持续学习、虚实融合和多主体协作等需求同步增强，智能能力也逐步分布于不同计算层级，为云边端协同提出更加系统性的技术要求。



图2-7 物理智能关键技术能力演进及架构要求

大模型与机器人基础模型将从“知识与推理中枢”走向“物理世界通用智能底座”。当前，大模型主要承担理解、推理与规划，并与VLA、底层控制器形成分层架构，已初步具备任务泛化能力；随着三维空间理解、具身推理和多步骤规划能力增强，模型将逐步具备自主验证、失败恢复等能力，并通过蒸馏、量化等方式提升部署效率。未来，基础模型将进一步融合世界模型、技能库和本体适配能力，建立统一的本体描述、技能表示和动作接口，以及“数据回传—训练—评测—下发”的持续学习闭环。长期来看，大模型、VLA与世界模型将逐步融合，形成能够理解物理世界、预测状态变化、规划并执行任务的统一智能体系，并通过标准化接口适配机器人、车辆等不同物理载体，成为连接设备、环境与多智能体的通用智能底座。模型规模、推理复杂度与实时性需求同步提升，大规模模型难以全部部署于端侧，端侧同时受到算力、功耗、散热和设备形态等约束，而训练、复杂推理与实时执行对

算力规模和响应速度的要求又存在明显差异，需要根据任务复杂度、执行频率和实时性要求，将不同规模模型和计算任务在云、边、端之间动态分配，并实现跨节点算力调用与协同供给。同时，模型、技能、策略与任务之间的组合关系更加复杂，也需要形成跨层的应用协同机制，实现模型能力、技能能力和任务执行的统一组织。

VLA/VLN/WAM将从“理解指令”走向“在开放物理环境中持续完成任务”。当前，VLA已初步打通视觉、语言与动作链路，VLN能够支持自然语言导航、目标定位和路径规划，但整体仍以短流程、单技能和相对封闭环境中的任务为主。未来，行动能力将由单一动作生成向多技能组合、任务自主拆解和长时程任务执行演进，导航、操作、预测和控制逐步融合，并建立跨本体的统一动作表示。随着任务状态管理、行动前推演和行动后学习等能力逐步增强，VLA/VLN将进一步与WAM、UAM等能

力融合，由“执行指令”走向“围绕目标持续组织行动”，最终形成连接世界模型、多智能体与底层控制系统的通用行动能力。长时程任务将同时涉及目标理解、任务分解、局部规划、动作生成、实时控制和状态反馈，不同环节的执行频率和计算复杂度差异明显，高层任务规划可以在较长时间尺度内完成，动作生成和控制则需要持续高频运行，因此需要将任务和智能能力在云、边、端之间拆分、编排和协同执行，并根据不同环节的实时性和算力需求动态配置计算资源，由此同时形成应用协同和算力协同需求。

世界模型将从“预测未来状态”走向“面向决策的物理世界预测引擎”。当前，世界模型已经能够基于视频、轨迹和状态数据进行短时预测，但对动作影响、物理因果和长时动态规律的理解仍较有限。未来，世界模型将从二维视觉预测扩展至三维空间、接触关系和物体状态变化，从被动预测进一步走向行动条件预测，将动作、环境状态和任务目标纳入统一预测框架，并通过多时间尺度预测、反事实推演和不确定性评估支撑规划与决策。随着对跨物体、跨场景物理规律的理解不断增强，世界模型将逐步形成可持续更新的物理世界内部模型，并与VLA形成“预测—规划—行动—反馈”闭环，最终成为连接感知、行动、仿真与数字孪生的通用物理世界预测层。世界模型训练和更新需要持续汇聚视觉、轨迹、动作、环境状态及任务结果等多源数据，并建立动作与环境变化之间的时空对应关系和语义关联，因此需要跨设备、跨场景的数据对齐、融合和持续回流。同时，世界模型的大规模训练、复杂推演与现场实时预测在算力规模和执行频率上存在明显差异，单一节点难以同时承载，需要将训练、推演和实时预测任务分布于不同计算节点，并通过云边端算力协同实现动态调用。

多模态感知将从“多传感器识别”走向“面向行动的统一环境理解”。当前，视觉、语音、深度、雷达等多源信息已经能够支持目标检测、定位建图和基础场景理解，但跨模态统一表征以及复杂环境下的鲁棒感知能力仍有不足。未来，多模态感知将从二维识别进一步扩展至三维空间、物体关系和可供性理解，融合时序信息持续跟踪环境变化，从识别“有什么”升级为理解“在哪里、能否交互、如何行动”。随着与世界模型进一步结合，感知系统将能够根据任务目标主动选择视角、传感器和信息采集策略，并利用预测补全遮挡和缺失信息，逐步形成跨设备、跨场景可迁移的统一世界表征，成为连接真实环境、世界模型与行动系统的统一感知层。不同传感器产生的数据在采样频率、空间坐标、数据格式和语义表达上存在明显差异，需要完成时间同步、空间标定、标识映射和语义对齐，并在不同设备和云边端节点之间协同流动，由此形成多源异构数据协同需求。与此同时，视觉、雷达等高频感知数据持续产生，全部上传云端处理将受到带宽和时延限制，需要在端侧、边缘和云侧之间合理分配感知、融合和分析任务，并通过高带宽、低时延网络实现数据与计算协同。

触觉与本体感知将从“身体状态感知”走向“精细交互与柔性操作”。当前，本体感知已经广泛用于姿态估计和运动控制，触觉主要应用于抓取稳定、滑移检测和力控反馈等局部交互。未来，触觉覆盖将从末端执行器向手掌、关节和机身扩展，并与视觉、力觉和本体状态形成统一表征，推动感知能力从“检测接触”进一步走向理解材料、受力状态和交互意图，实现柔性物体操作、精密装配和人机协作等复杂任务。随着全身触觉与本体感知网络逐步形成，智能体将能够持续感知接触与身体状态，并根据触觉反馈动态调整力度、姿态和动作轨迹，最

终形成连接感知、行动模型与控制系统的统一身体感知与实时反馈能力。高频触觉、本体状态与控制数据需要在毫秒级甚至更短时间尺度内完成采集、计算和反馈，相关感知与控制能力需要优先部署于端侧；同时，复杂环境理解、任务决策等能力又可能由边缘或云侧提供支持，由此要求不同计算层级按照任务执行频率进行分工，并保持模型、状态与控制信息的快速交换，进一步形成端边算力协同、应用协同以及低时延、高可靠、确定性通信需求。

强化学习与持续学习将从“离线能力优化”走向“真实环境中的持续进化”。当前，强化学习主要依赖仿真、离线数据和人工设计奖励，真实环境中的自主试错仍受到成本和安全风险制约。未来，示范学习、离线强化学习与在线反馈将进一步融合，通过模型评估、任务结果和安全规则形成复合反馈，并建立“运行数据—失败筛选—训练—评测—更新”的持续学习闭环，实现部署后的安全探索与受控适应。随着世界模型和经验抽象能力进一步发展，单机运行经验将逐步沉淀为可复用的策略与技能，并在不同任务和场景间迁移共享，最终形成覆盖感知、预测、规划和行动全链路的终身学习体系，使物理智能由一次性训练走向持续学习，由单机经验积累走向群体经验复用。持续学习意味着真实运行数据需要从端侧持续回流，并与仿真数据、历史数据和其他智能体经验数据共同完成筛选、标注、训练和评测，再将优化后的模型、策略和技能重新下发，由此形成跨云边端的数据飞轮。与此同时，大规模训练通常需要集中算力，现场微调和在线推理又要求靠近业务运行环境，训练、微调和推理之间需要共享和动态配置算力资源，推动算力由固定部署走向跨节点、训推协同。

仿真将从“虚拟验证工具”走向“物理智能规模化

训练基础设施”。当前，仿真已经广泛用于数据生成、策略训练、算法验证和安全测试，并通过并行采样、场景随机化和极端工况复现降低真实世界试错成本。未来，生成式AI将进一步提升场景、任务、轨迹和失败样本的规模化生成能力，仿真范围也将从单体扩展至多机器人、人机协作和复杂系统，并通过真实运行数据持续校准仿真环境，缩小虚实差距。随着世界模型与物理引擎进一步融合，数据生成、模型训练、策略评测、安全验证和部署回归将逐步贯通，形成真实运行与仿真训练持续迭代的闭环，最终构建融合真实数据、仿真数据和生成数据的“物理智能经验工厂”，持续生产和复用成功、失败、长尾及极端交互经验，成为物理智能训练、验证与能力进化的基础设施。真实数据、仿真数据和生成数据需要建立统一的场景、对象、动作和任务描述，并在真实运行与虚拟训练环境之间持续交换和校准，推动数据协同由单一数据管理进一步走向虚实数据协同。同时，大规模并行仿真、模型训练和现场实时运行需要用到图算、智算和通算等不同类型算力，且资源需求随任务阶段动态变化，需要通过异构调度和训推协同实现不同算力资源的统一组织和动态供给。

数字孪生将从“数字镜像”走向“物理智能运行底座”。当前，数字孪生主要应用于设备监测、产线规划、机器人训练和运行分析，但多数仍停留在可视化、离线仿真和分析辅助阶段。未来，数字孪生将由静态映射向实时智能孪生发展，持续同步设备、环境和任务状态，并通过AI参与建模、预测、优化和仿真，从状态展示进一步延伸至运行推演、策略生成和闭环控制。随着孪生对象从单设备扩展至工厂、园区乃至城市，并与世界模型进一步融合，数字孪生将逐步具备未来推演、动态优化和双向控制能力，使数字空间成为物理智能进行推演、

协同、验证和优化的可计算运行空间，最终形成连接真实系统、世界模型、仿真与多智能体的智能运行底座。数字孪生需要设备、环境、任务和空间数据持续保持时空一致，并在真实系统、孪生系统以及云边端节点之间双向流动，因此对跨系统的数据映射、时空对齐和跨域共享提出更高要求。同时，端侧状态采集、边缘区域分析与云端大规模推演具有不同的实时性、计算规模和执行频率，需要在云、边、端之间分层部署，并通过算力协同保证实时更新、区域优化与全局推演之间的连续衔接。

多智能体与群体协同将从“集中调度”走向“蜂群智能”。当前，多机器人、无人机和车队协同主要依赖中心系统掌握全局状态，完成任务分配、路径规划和冲突消解，智能体之间的直接协商与能力共享仍较有限。未来，协同方式将逐步由统一指挥向“中心协调、局部自治”演进，智能体通过共享位置、地图、任务状态和局部环境认知实现动态重调度；进一步发展后，智能体将能够基于目标、能力和环境状态自主协商、动态分工和联合执行，并由同构设备协作扩展至机器人、车辆和设备之间的异构协同。长期来看，群体将能够根据环境与任务变化自主组队、调整角色和重构网络，由个体规划和局部认知共同驱动群体协作与能力涌现，最终形成覆盖不同物理载体和智能空间的自组织智能网络。群体智能意味着任务需要在多个智能体之间持续分解、分配、调整和协同执行，推动应用协同由单机任务管理走向多智能体任务编排与协同执行。同时，位置、状态、环境认知、任务和能力信息需要在智能体之间高频交换，全局任务规划、区域协同决策和端侧实时执行又分别适合由不同计算层级承担，由此需要在云边端之间协同调度任务和算力，并通过低时延、高可靠和动态组网的网络保障多智能体实时协作。

总体来看，九项关键技术虽然沿着不同路径演进，却共同推动物理智能由单模型、单设备、单节点运行走向跨模型、跨智能体和跨云边端的系统协同。首先，大模型、VLA、世界模型和多智能体技术使物理智能任务逐步演变为目标理解、任务分解、技能调用、局部决策、实时执行和状态反馈组成的复杂任务链，不同任务环节由不同模型、智能体和计算层级承担，需要实现任务、技能、策略和执行状态的跨层编排与协同，由此形成应用协同需求。其次，多模态感知、世界模型、强化学习、仿真和数字孪生持续产生视觉、雷达、触觉、状态、动作、轨迹、仿真及合成等不同来源的数据，不同数据在时间、空间、格式和语义上存在差异，需要经过时空对齐、标识映射、格式转换和语义对齐，并在设备、智能体、区域和云边端之间持续共享与回流，由此形成多源协同、跨域共享和数据飞轮驱动的数据协同需求。再次，随着大模型、世界模型和仿真规模持续扩大，单一端侧设备受到算力、功耗、散热和形态约束，难以承载全部智能能力；同时，大规模训练、复杂推理、区域协同、实时感知和运动控制的计算规模与执行频率差异显著，高层规划可能以秒级运行，感知和动作决策需要更高频执行，底层控制甚至需要毫秒级闭环，因此需要将不同任务部署于适宜的云、边、端节点，并通过异构调度、训推协同、任务卸载和跨节点资源调度实现算力协同。与此同时，应用、数据和算力协同都需要持续的信息交换，多模态数据上行、模型和策略下发、状态反馈、多智能体协作以及不同频率计算任务之间的交互，对大带宽、低时延、高可靠、确定性、时间同步和动态组网提出更高要求，由此推动网络由基础连接能力进一步演进为支撑端内、端间和端云协同的一体化通信底座。

第三章

架构定义

物理智能云边端协同参考架构



3.1 价值主张：三域协同 · 一网贯通

面向物理智能由单体自主向群体协同、由局部智能向系统智能持续演进，单一节点越来越难以同时满足实时控制、复杂推理、持续学习和多主体协同等需求，智能能力需要根据任务特征分布于云、边、端不同位置。与此同时，能力的分布式部署也带来了新的系统挑战：任务跨层执行，需要解决任务拆解、动态调度和运行连续性问题；真实运行数据规模大、模态多且持续产生，需要实现跨层流动、汇聚处理和持续回流；端侧受体积、重量、功耗和散热约束，单点算力有限，需要通过云边端多地异构算力协同实现按需补充和动态调度；感知数据上行、模型下发、远程推理和多机协同进一步对网络提出大上行、低时延、高可靠、确定性和高精度同

步等要求。物理智能的规模化运行由此从单点能力问题进一步转变为跨层系统协同问题。基于上述挑战，构建“三域协同 · 一网贯通”的云边端协同架构。三域协同围绕应用、数据和算力解决“智能如何组织”：应用协同支撑任务跨层分解、调度与执行，以及设备、模型、策略、应用和配置的统一管理，数据协同支撑多模态数据跨层流动与持续循环，算力协同支撑多地异构资源统一纳管、动态调度和按需供给；一网贯通解决“智能如何连接”，面向端内、端间和端云提供大上行、低时延、高可靠、确定性和高精度同步等网络能力。通过三域与网络协同，构建端侧实时智能、边侧区域智能和云侧全局智能相互衔接的协同体系。

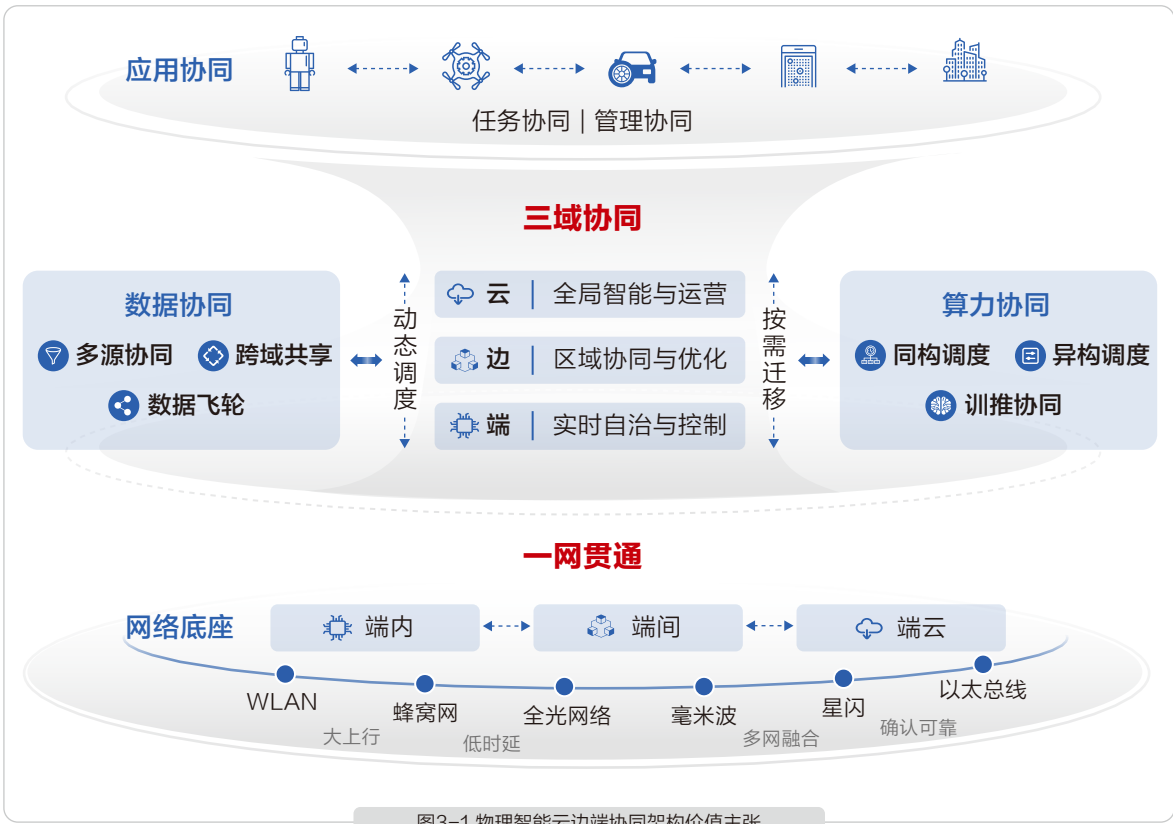


图3-1 物理智能云边端协同架构价值主张

三域协同。围绕应用、数据、算力三类核心对象，构建跨云、边、端协同运行的智能组织机制。应用协同涵盖任务协同与管理协同，任务协同通过任务分解、编排、调度与跨层执行实现多主体、多层次任务协作，管理协同通过设备、模型、策略和运行状态的统一管理支撑系统持续运行；数据协同通过多模协同、多源异构协同、跨域共享与数据飞轮，推动多源数据融合、跨层流动和持续回流，实现数据持续沉淀与模型迭代；算力协同通过同构调度、异构调度和训推协同，实现不同类型计算资源的统一调度与动态匹配。三域联动推动任务有序协同、数据持续循环、算力动态配置，并通过动态调度与按需迁移，同时也促进了云侧全局智能与运营、边缘区域协同与优化、端侧实时自治与控制相互协同

的一体化体系的形成。

一网贯通。以网络连接物理主体、智能节点与计算资源，构建覆盖端内、端间、端云的全域连接体系。端内贯通感知、决策、控制与执行，端间支撑机器人、车辆、设备等多主体实时协同，端云承载数据汇聚、模型下发、状态反馈与能力迭代；融合WLAN、5G、全光网络、毫米波、星闪、以太网总线等多种网络能力，形成泛在连接、多网融合、确定可靠、按需适配的网络底座。通过网络贯通任务流、数据流、模型流和控制流，使分布于不同空间、不同层级的智能节点持续连接、实时交互、协同运行，支撑物理智能由“单体在线”迈向“全域协同”。

3.2 设计原则：总体架构设计准则

物理智能云边端协同架构应面向真实物理环境中的感知、决策、执行与反馈闭环，兼顾实时运行、智能协同、资源效率和持续演进，重点遵循以下四项设计原则。

- 分层解耦、协同自治。根据任务实时性、复杂度和物理闭环要求，明确云、边、端职责边界，保障端侧自主闭环、边缘区域自治与云端全局协同。
- 实时优先、安全闭环。感知、控制与安全响应优先就近执行，复杂推理与多机协同按需上移，保障物理交互的实时性、确定性与可靠性。

- 弹性调度、按需供给。结合端侧算力、功耗和形态约束，根据任务、网络和资源状态动态调度算力、模型与数据，实现云边端资源协同供给。
- 开放兼容、持续进化。支持异构本体、多模态数据和模型技能开放兼容，通过真机数据回流、模型迭代与能力下发，支撑物理智能持续学习和演进。

3.3 参考架构：物理智能云边端协同总体架构



图3-2 物理智能云边端协同参考架构

云边端协同架构既要考虑分层也要考虑协同。端侧作为最贴近物理世界的执行单元，在承担实时感知、推理决策和运动控制与执行等关键任务时，需要保障低时延响应、实时自治与安全闭环；同时，端侧会受到成本、功耗、体积和散热等约束，需要在“低成本、低功耗、高算力”之间寻求平衡。边缘侧在承担区域自治、数据汇聚处理、多机协同、区域调度和轻量化训推的角色，将算力和数据处理能力部署在现场附近，需要确保低时延和数据本地化的管理；同时边缘侧肩负为端侧提供弹性算力补给、共享推理、模型动态下发与跨节点协同调度的能力，并通过本地自治保障弱网、断网情况下的业务连续性。云端作为全局智能与运营中枢，承担海

量数据训练、全局模型进化、数字孪生仿真与跨域资源编排等核心任务时，需要保障超大吞吐量、高精度与全局最优决策；同时，云端侧需要发挥集中算力、资源池化和全局视角优势，担负为边端提供基础模型预训练、全局算力弹性伸缩与知识图谱持续沉淀的普惠赋能职责，指导边端突破局部视野局限。实现规模化算力供给、全局优化和模型持续迭代。

通过三层能力互补与“三域协同、一网贯通”，端侧发挥实时、安全与自主优势，边缘发挥就近计算与区域协同优势，云端发挥规模算力与全局智能优势；应用、数据、算力三域协同推动任务、数据与

资源在云边端之间动态配置与高效流转，网络贯通云边端及智能体之间的连接与交互，共同支撑物理智能能力持续演进，实现实时性、安全可靠、智

能水平、系统性能、部署成本与资源利用效率的整体最优。



云边端参考架构

云端构建全局智能与运营中枢。依托集中化、规模化的算力、数据与模型资源，形成数据处理与模型训练、真机强化学习、全局任务规划、一脑多机和全局运营与管理五类核心能力，承担数据处理与模型训练、真实环境持续学习、复杂任务全局规划、多智能体统筹以及全局运营等任务。通过汇聚边端运行数据、日志、指标和异常样本，持续开展模型训练、策略优化、任务规划和运营优化，并将形成的模型、策略、应用、配置及OTA更新向边端下发。

- **数据处理与模型训练**：通过数据汇聚、数据处理、模型训练和模型评测等能力，对真实运行数据、行业知识和场景数据进行统一处理，支撑大模型与机器人基础模型、世界模型等模型的训练、优化与评测，为模型持续迭代和边端部署提供支撑。
- **真机强化学习**：通过经验回流、奖励建模、策略训练和策略优化等能力，利用真机运行过程中产生的经验数据开展强化学习与持续学习，持续优化模

型、策略与技能，推动智能能力在真实物理环境持续进化。

- **全局任务规划：**通过目标理解、任务分解、全局规划和任务编排等能力，将复杂任务目标分解为可执行的任务序列，并结合全局环境、智能体能力和运行状态进行统一规划，为边缘和端侧任务执行提供全局指导。

- **一脑多机：**通过智能体管理、能力发现、任务分配和跨机调度等能力，对多个机器人、车辆、无人机及其他智能体进行统一组织，根据不同智能体的能力、位置和运行状态进行任务匹配与调度，支撑多智能体与群体协同。

- **全局运营与管理：**通过设备管理、模型管理、应用管理和运营监控等能力，统一掌握跨区域设备、模型、应用和任务运行状态，实现全局资源统筹、运行分析和运营优化。

边缘构建区域协同与优化中枢。面向工厂、园区、道路、楼宇等局部物理空间，形成微调与增训、技能智能体、单任务规划、多机协作和区域运营与运维五类核心能力。边缘承接云侧模型、策略和应用能力，并结合区域环境、设备状态和任务需求进行现场适配，将全局任务进一步细化为面向具体智能体的任务、技能与局部策略，同时汇聚端侧状态、特征数据和感知结果，为区域自治、多机协作和持续优化提供支撑。

- **微调与增训：**通过数据筛选、模型微调、增量训练和模型适配等能力，利用现场数据、异常样本和任务反馈持续适配模型与策略，提升智能能力对区域环境和任务变化的适应性。

- **技能智能体：**通过技能封装、技能编排、技能调用和技能管理等能力，将模型、策略和工具能力组织为可调用、可组合的技能，根据任务需求进行动态编排和调用，为端侧任务执行提供智能能力支撑。

- **单任务规划：**通过任务理解、步骤分解、局部规划和动态调整等能力，将云侧全局任务进一步细化为面向具体智能体的可执行任务，并根据现场环境和运行状态动态调整任务执行过程。

- **多机协作：**通过协作编排、任务分工、状态共享和协同执行等能力，组织区域内多个智能体围绕共同任务开展协作，实现不同智能体之间的任务衔接、状态交互与协同运行，支撑多智能体与群体协同。

- **区域运营与运维：**通过设备监控、故障诊断、配置管理和区域运维等能力，统一掌握区域内智能体、任务和资源运行状态，实现故障响应、配置管理和现场运行维护。

端侧构建面向物理世界的实时自治与控制闭环。面向机器人、自动驾驶车辆、无人机、智能设备、智能传感器和智能空间设施等物理载体，形成主控与运控两类核心能力，在本地完成从多模态感知、动作规划、导航到运动控制和物理执行的实时闭环。端侧优先承载实时性、安全性要求高的任务，并通过边端协同按需获得模型、技能和算力增强。

- **主控：**通过多模态感知、动作规划和导航等能力，融合视觉、激光雷达、IMU、触觉、语音等多模态信息，结合VLA/VLN、世界模型等模型能力理解自身与周边环境，根据任务目标形成行动方案，并向运控下发控制目标和执行指令。

• **运控：**通过真机实采、动作状态回馈、操作和移动等能力，结合触觉与本体感知，将主控生成的行动方案转化为底层控制指令，驱动执行机构完成物理任务，并根据物理状态和环境变化持续修正执行过程，保障动作的实时性、稳定性和安全性，同时将真实运行状态和环境信息持续反馈至上层。

云边端通过能力下发与数据回流形成持续协同闭环。云侧持续训练和优化模型、策略与应用能力，并向边侧下发模型、策略、应用、配置及OTA更

新；边侧结合区域环境开展模型适配、技能编排、单任务规划和多机协作，将任务、技能、局部策略和配置进一步下发至端侧；端侧完成感知、规划、控制与执行，并将状态、特征数据和感知结果反馈至边侧，边侧进一步汇聚运行数据、日志、指标和异常样本回传云侧。通过“云侧训练进化与全局规划一边侧适配规划与区域协作一端侧实时自治与执行—真实数据持续回流”的双向闭环，实现物理智能能力在真实运行过程中持续学习、持续优化和持续演进。

应用协同参考架构



图3-4 物理智能应用协同参考架构

从应用协同来看，物理智能场景中的任务往往难以由单一层级独立完成，需要云、边、端不同层级的智能能力协同配合。例如具身智能中的全局任务规划、局部决策与运动执行，需要类似“大脑—小脑—执行机构”的跨层协同，才能完成从任务理解、规划决策到实时执行的完整闭环，实现复杂任务的分解、调度与协同执行。为支撑跨层任务协

同，需要首先将设备、数据、智能体和应用等基础对象统一接入和管理，并进一步通过任务协同与管理协同组织不同层级的能力。因此，应用协同由接入层、使能层和应用层组成：接入层实现基础对象统一接入，使能层实现任务与管理协同，应用层面向工业产线操作、商业服务和家庭服务等场景，实现云边端能力按需组合与协同运行。

应用层形成面向不同业务场景的应用服务体系。基于接入层提供的设备、数据、智能体和应用资源，以及使能层提供的任务与管理协同能力，根据不同物理环境和业务需求组合形成工业产线操作、商业服务和家庭服务等典型应用，使底层设备与智能能力最终转化为面向生产、经营和生活的具体服务。

- **工业产线操作：**面向制造生产环境，通过工艺加工、柔性装配、上下料和检测巡检等应用，实现机器人及智能设备在生产过程中的自主作业与协同执行，支撑生产环节柔性化、智能化运行。

- **商业服务：**面向商场、酒店、园区、公共空间等服务环境，通过导览接待、配送零售、清洁服务和安防巡检等应用，实现智能体面向人员、物品和空间提供自主化服务。

- **家庭服务：**面向家庭及生活环境，通过生活照护、家庭清洁、安全看护和陪伴交互等应用，将感知、交互、决策和执行能力融入日常生活服务，支撑智能体在家庭环境中的持续自主服务。

使能层构建跨主体任务与管理协同中枢。基于接入层形成的设备、数据、智能体和应用能力，形成任务协同和管理协同两类核心能力，将分散的设备与智能体能力按照任务目标进行组织，并对运行过程中的智能体、应用和任务进行统一协调，实现由单体应用向多主体协同应用拓展。

- **任务协同：**通过全局规划、全局调度和多机协同等能力，根据任务目标、智能体能力及运行状态进行任务规划和动态调度，协调多个机器人、车辆及其他智能体共同完成复杂任务，实现跨主体任务分工、执行协同和动态调整。

- **管理协同：**通过智能体调度、OTA升级和任务接管等能力，对智能体及任务运行过程进行统一管理，在设备状态、任务需求或运行环境发生变化时进行能力调配、版本更新和任务接续，保障协同应用持续稳定运行。

接入层构建应用协同的统一接入与管理基础。面向设备、数据、智能体和应用等核心对象，形成设备管理、数据管理、智能体管理和应用管理四类能力，通过统一注册、识别、状态管理和生命周期管理，将不同类型的物理设备、数据资源、智能体能力和应用服务纳入统一体系，为上层任务协同、管理协同及场景应用提供标准化的对象与能力基础。

- **设备管理：**通过设备接入、设备发现、身份认证和状态监测等能力，实现机器人、车辆、无人机、传感器及各类智能设备的统一接入与识别，持续掌握设备身份、连接状态和运行状态，为设备调用与协同提供基础。

- **数据管理：**通过多源数据接入、数据标识、数据治理和数据共享等能力，对设备、智能体及应用运行过程中产生的数据进行统一管理，支撑数据在不同对象和应用之间有序使用与共享。

- **智能体管理：**通过智能体注册、能力描述、生命周期管理和状态管理等能力，建立智能体身份及能力信息，持续掌握智能体可提供的技能、服务和运行状态，为任务匹配、调度和多智能体协同提供基础。

- **应用管理：**通过应用注册、版本管理、配置管理和应用发布等能力，对不同场景应用进行统一管理，支撑应用能力的注册、配置、迭代和部署，为应用跨设备、跨区域运行提供管理基础。

数据协同参考架构



从数据协同来看，物理智能的感知、推理、训练和持续学习依赖不同来源、不同形态以及分布于云边端的数据协同，单一来源、单一层级的数据难以支撑完整智能闭环，需要实现多源数据统一关联、跨云边端共享以及运行数据持续回流，从而形成从数据采集、处理、流动到训练优化的持续循环。为支撑这一过程，需要通过多源协同、跨域共享和数据飞轮组织数据的关联、流动与持续利用，通过实采数据时空对齐、物理多模态检索以及实采、仿真、合成数据协同形成面向物理世界的的数据资源，并由热存、温存和冷存等分级存储设施承载不同实时性、访问频率和生命周期的数据。因此，数据协同由方案层、资源层和设施层组成，共同支撑物理智能数据跨来源、跨模态、跨区域、跨云边端协同流动与持续增值。

方案层构建面向物理智能数据流动与循环利用的协同体系，形成多源协同、跨域共享和数据飞轮三类

方案，推动分散在不同设备、系统、区域和云边端的数据由单点使用向统一关联、跨域流动和持续循环演进。

- **多源协同**：通过标识映射、格式转换和语义对齐等能力，解决不同设备、系统、平台以及虚实环境之间的数据结构、格式与语义差异，打通摄像头、位姿、力的多种数据来源，实现多源异构数据的统一关联和协同使用，为多模态感知、数字孪生、世界模型等能力提供一致的数据基础。
- **跨域共享**：通过数据发现、授权访问和跨域交换等能力，实现数据在不同设备、智能体、区域以及云边端之间安全共享与按需流动，交互环境、位置、动作等多类数据，为多智能体协同、虚实融合以及跨区域智能应用提供数据支撑。
- **数据飞轮**：通过数据回流、筛选标注、训练评测

和反馈优化等能力，将智能体运行与任务执行过程中产生的真机数据持续转化为模型训练和能力优化资源，支撑模型、策略和技能持续迭代，形成“运行—回流—训练—评测—优化—再运行”的持续循环。

资源层构建面向物理世界的数据资源体系。围绕真实环境数据的采集、关联与检索，以及实采数据、仿真数据和合成数据的协同使用，形成实采数据时空对齐、物理多模态检索以及实采、仿真、合成三类数据资源能力，为模型训练、推理、仿真和持续学习提供数据基础。

• **实采数据时空对齐：**通过数据采集、时间同步和空间标定等能力，对摄像头、雷达、触觉、设备状态等真实运行数据建立统一的时间与空间基准，实现不同传感器、不同设备和不同采集时刻数据的准确关联。

• **物理多模态检索：**通过语义检索、跨模态检索和时空检索等能力，对视觉、语音、传感器、设备状态等物理世界多模态数据进行统一检索与关联，使模型和智能体能够根据语义、模态和时空条件快速获取所需数据。

• **实采、仿真、合成：**通过实采数据、仿真数据和合成数据的协同使用，形成真实运行数据与虚拟生成数据互补的数据资源体系，扩展复杂场景、长尾场景和高风险场景的数据覆盖，为模型训练、仿真验证和能力迭代提供持续的数据供给。

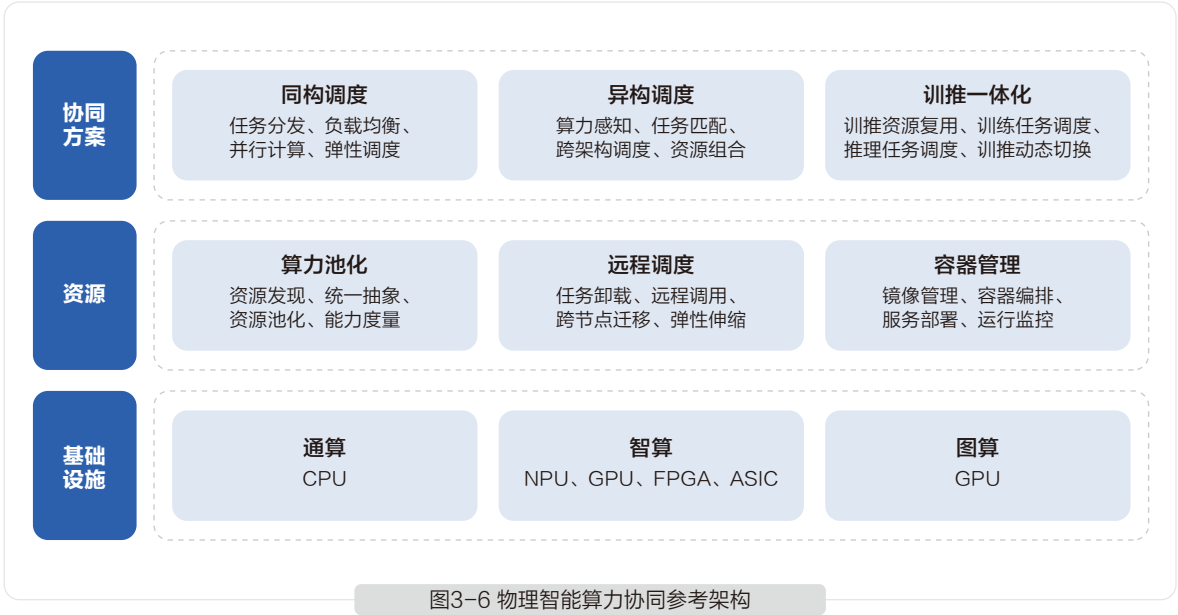
设施层构建分级数据存储基础。根据物理智能数据的访问频率、实时性要求和保存周期，形成热存、温存和冷存三级存储体系，实现实时感知数据、运行数据、训练数据、仿真数据及长期沉淀数据的分级承载，在满足实时访问、训练调用和长期沉淀需求的同时提升存储资源使用效率。

• **热存：**通过高速缓存、本地高速存储和高性能分布式存储等方式，承载高频访问和实时处理数据，为多模态感知、实时推理、智能体运行和高频数据交互提供低时延数据访问能力。

• **温存：**通过分布式文件存储、对象存储和近线存储等方式，承载访问频率适中、需要持续保留的数据，为模型训练、仿真与数字孪生、数据分析和历史数据调用提供存储支撑。

• **冷存：**通过低频对象存储、归档存储和备份存储等方式，承载低频访问和长期保存的数据，实现历史运行数据、训练数据、模型相关数据及重要数据资产的长期沉淀、归档和备份。

算力协同参考架构



从算力协同来看，物理智能的感知、推理、训练、仿真和多智能体协同等任务具有不同的算力类型、性能和实时性需求，单一节点、单一类型算力难以支撑完整智能闭环，需要实现跨节点算力调度、异构资源协同以及训练与推理资源协同，从而使不同任务能够匹配适宜的算力资源。为支撑这一过程，需要通过同构调度、异构调度和训推协同实现算力与任务动态匹配，并通过算力池化、远程调度和容器管理等能力组织和调用分散算力资源，由通算、智算和图算设施提供底层计算能力。因此，算力协同由方案层、资源层和设施层组成，共同支撑物理智能算力跨节点、跨架构、跨任务动态调度与协同供给。

方案层构建面向不同资源与任务的算力协同体系。根据算力类型、硬件架构和任务负载差异，形成同构调度、异构调度和训推协同三类能力，实现算力资源与任务需求的动态匹配，支撑云边端不同节点

之间的算力协同与按需供给。

- **同构调度**：通过任务分发、负载均衡、并行计算和弹性调度等能力，对跨节点或跨域的计算资源进行统一调度，根据任务负载和资源状态动态分配算力，提高资源利用效率和任务执行效率。
- **异构调度**：通过算力感知、任务匹配、跨架构调度和资源组合等能力，动态捕获不同计算资源的性能与能力特征，调整xPU、内存、缓存等计算资源用于匹配不同类型任务的需求。
- **训推一体化**：通过训推资源复用、训练任务调度、推理任务调度和训推动态切换等能力，根据训练与推理任务的优先级、资源需求和运行状态动态配置算力，实现训练与推理资源的协同调度和弹性使用。

资源层构建算力资源统一组织与运行基础。面向分布在云、边、端不同节点的计算资源，形成算力池化、远程调度和容器管理三类能力，将底层分散、异构的算力资源转化为可发现、可调用、可调度的资源，为上层算力协同提供统一的资源组织和运行支撑。

• **算力池化**：通过资源发现、统一抽象、资源池化和能力度量等能力，对不同节点和不同类型算力进行统一纳管，形成可统一识别和使用的算力资源池，并持续掌握资源规模、性能和运行状态。

• **远程调度**：通过任务卸载、远程调用、跨节点迁移和弹性伸缩等能力，使计算任务能够根据资源供给、任务需求和网络状态在不同计算节点之间灵活部署和迁移，实现跨节点算力调用。

• **容器管理**：通过镜像管理、容器编排、服务部署和运行监控等能力，为模型、应用和计算任务提供标准化运行环境，支撑计算负载在不同节点快速部

署、迁移和弹性运行。

设施层构建多类型算力供给基础。面向物理智能中通用计算、人工智能计算以及图形与仿真计算等不同负载需求，形成通算、智算和图算三类算力资源，并通过不同硬件提供计算能力，为上层算力池化和协同调度提供基础资源。

• **通算**：以CPU为主要计算硬件，承担操作系统、业务逻辑、任务管理、数据处理等通用计算负载，为物理智能系统运行提供基础计算能力。

• **智算**：以NPU、GPU、FPGA、ASIC等为主要计算硬件，承担模型训练、模型推理及相关AI计算负载，为感知、理解、预测和决策等智能任务提供算力支撑。

• **图算**：以GPU为主要计算硬件，承担图形渲染、三维计算、物理仿真和数字孪生等计算负载，为场景构建、仿真训练和虚实交互提供算力支撑。

网络贯通参考架构



图3-7 物理智能网络贯通参考架构

物理智能的感知、决策、执行和协同分布在智能体内部、多个智能体之间以及云边端不同层级，分别由端内网、端间网、端云网来支撑，不同通信范围对网络能力提出差异化要求：端内网重点保障感知、控制与执行链路的低时延、高可靠和确定性，端间网重点满足多智能体移动过程中快速发现、动态组网和协同通信需求，端云网重点支撑大规模感知数据上行、模型与策略下发以及跨层任务协同。为满足上述需求，需要通过TSN、自组网、智能体通信和异构协同等能力增强网络的确定性、动态组网、智能体协作和多网协同能力，并由WLAN、蜂窝网、全光网络、毫米波、星闪和以太总线等多种连接技术提供基础支撑。因此，网络贯通由物理智能融合通信网、网络增强和基础能力三层组成，共同支撑端内实时闭环、端间群体协同和端云跨层协同。

物理智能融合通信网构建端内、端间和端云一体化连接体系。根据智能体内部、多智能体之间以及云边端之间不同的通信对象和协同需求，形成端内网、端间网和端云网三类网络，实现从智能体内部感知与控制，到多智能体协作，再到云边端跨层交互的网络贯通。

• **端内网**：面向单个智能体内部传感器、控制器、计算单元和执行器之间的高频交互，需要重点支持低时延、高可靠、确定性传输和高精度同步等能力，保障感知数据、决策指令和控制信息稳定传输，支撑智能体本地实时控制闭环。

• **端间网**：面向机器人、车辆、无人机等多个智能体在移动和动态环境下的协同通信，需要重点支持节点快速发现、动态组网、群组通信和多机协同等能力，实现位置、状态、任务和环境信息实时交

互，支撑多智能体与群体协同运行。

• **端云网**：面向端侧、边缘与云端之间的数据和能力交互，需要重点支持大上行、广覆盖、高可靠和移动连续性等能力，满足多模态感知数据、运行数据和异常样本持续回流，以及模型、策略、技能和任务配置下发需求，支撑云边端跨层协同运行。

网络增强构建面向物理智能差异化通信需求的增强能力。针对端内实时控制、端间动态协作和端云数据与能力交互等需求，形成TSN、自组网、智能体通信和异构协同四类能力，进一步增强网络的确定性、动态组网、智能体协作和多网协同能力。

• **TSN**：面向端内网运动控制、执行器协同等高实时、高可靠通信需求，需要支持高精度时间同步、确定性时延、流量整形和资源预留等能力，保障端内感知、计算、控制和执行链路稳定运行。

• **自组网**：面向端间网多智能体移动运行、拓扑动态变化和临时组网等需求，需要支持节点发现、弹性自组网、多跳转发和拓扑快速重构等能力，星闪等近距离无线通信技术可用于支撑智能体间快速发现和动态组网。

- **智能体通信**：面向端间网由设备连接向智能体协作演进的需求，需要支持智能体身份识别、能力发现、任务协商和消息交互等能力，使不同智能体能够围绕任务、状态和能力自主建立通信与协作关系。
- **异构协同**：面向端云网大上行、广覆盖、移动性以及多网络并存等需求，需要支持多网融合、多链路协同、智能选网和无缝切换等能力，根据任务对带宽、时延、可靠性和移动性的要求动态选择网络，保障数据回流、模型下发和跨层任务协同。

基础能力构建多制式连接底座。面向端内、端间和端云在通信距离、带宽、时延、可靠性、移动性和部署环境等方面的差异化需求，综合采用WLAN、蜂窝网、全光网络、毫米波、星闪和以太总线等有线与无线连接技术。其中，WLAN、蜂窝和星闪等无线技术重点支撑移动接入和端间协同，全光网络支撑大带宽、低时延的边云、端边和端云连接，毫米波可支撑近距离高速数据传输，以太总线等有线技术重点支撑端内稳定、确定的设备互联。通过不同网络制式按场景组合部署，为物理智能端内实时控制、端间动态协同和端云数据交互提供基础网络能力。

专栏：云边端协同核心技术成熟度评价

为系统判断物理智能云边端相关核心技术的发展阶段和产业化水平，可从技术验证程度、工程化能力、规模复制能力及生态标准化程度等方面建立统一评价体系，并对云端、边缘侧、端侧、跨层协同及生态接口等关键技术进行综合评价。总体来看，当前物理智能核心技术已由单点技术验证逐步进入工程化和场景商用阶段，其中云端训练管理、端侧运动控制等能力成熟度相对较高，而跨云边端的异

构算力统一调度、任务卸载与动态迁移等能力仍处于较早阶段，是后续体系化发展的重点突破方向。

为避免不同技术领域因评价口径不一致导致结果难以横向比较，本研究建立统一的五级成熟度评价标准，重点从技术验证、工程实践、产品成熟度、规模复制能力以及标准与生态完善程度等维度，对各项核心技术所处发展阶段进行判断。

表1 核心技术成熟度评价标准

分值	定义
1	概念验证：处于研究或实验室阶段，缺乏工程实践
2	原型验证：已有PoC或局部验证，尚未形成成熟产品
3	场景商用：已在部分行业应用，但规模化和通用性有限
4	规模成熟：形成成熟产品，可跨行业复制部署
5	基础设施：形成标准体系和产业生态，成为通用基础能力

从核心技术成熟度看，物理智能云边端协同已具备较好的技术基础，但不同技术层级的发展进度仍存在明显差异。云侧整体成熟度较高，数据汇聚与治理、模型训练与评测、模型仓库与版本管理、全局运营与设备管理等能力已具备规模应用基础；边缘侧的数据接入与预处理相对成熟，共享推理、多设备协同、区域运营等能力已进入场景应用阶段；端侧多模态感知与融合、运动控制与安全闭环等能力基础较好，但复杂模型实时推理、开放环境下的规

划决策仍有提升空间。相比单层技术，跨层协同能力整体成熟度相对较低，模型分发与OTA已较成熟，而异构算力统一调度、任务卸载与动态迁移、确定性通信、跨层可观测性等仍处于持续探索和完善阶段。总体来看，云、边、端各层核心能力已基本形成，下一阶段技术突破将更多集中于跨层资源协同、动态任务调度、安全可信以及跨厂商互操作等方面。

表2 核心技术成熟度评价

层级	核心技术	成熟度	核心判断
云端	数据汇聚与治理	4	数据湖、数据治理和数据处理平台已经成熟，但机器人多模态数据及动作数据标准化仍不足
云端	仿真与数字孪生	3	工业设计与离线仿真较成熟，实时同步、自动建模和双向闭环仍依赖场景定制
云端	模型训练与评测	4	大模型训练和分布式计算体系成熟，但物理智能训练数据、真实场景评测及安全评测仍不完善
云端	模型仓库与版本管理	4	模型登记、版本控制和发布体系较成熟，但跨云边端模型兼容与联合验证能力仍需增强
云端	全局运营与设备管理	4	设备监控、资产管理和远程运维较成熟，跨厂商机器人统一管理能力仍有限
边缘	数据接入与预处理	4	协议接入、数据过滤和边缘预处理已有成熟方案，但异构设备语义统一仍存在难度
边缘	共享推理与模型缓存	3	技术路径明确并已在视觉分析等场景应用，但机器人实时推理共享和弹性扩缩容仍在探索
边缘	多设备协同与任务调度	3	AMR、车路协同等封闭场景已可应用，跨本体、跨厂商动态协同尚未成熟
边缘	区域运营与故障隔离	3	现场监控和局部故障处理具备实践基础，但大规模边缘节点自治和容灾能力仍需完善

层级	核心技术	成熟度	核心判断
端侧	多模态感知与融合	4	视觉、雷达及本体传感技术相对成熟，但开放环境理解和跨模态统一表示仍在发展
端侧	端侧模型推理	3	轻量视觉模型已广泛部署，VLA、世界模型等复杂模型的端侧实时运行仍受算力和功耗制约
端侧	局部规划与行为决策	3	规则及专用模型较成熟，开放环境下长任务规划、异常恢复和泛化能力仍不足
端侧	运动控制与安全闭环	5	传统实时控制、PLC及专用控制器体系成熟，是当前物理智能安全运行的确定性底座
跨层	模型分发、OTA与回滚	4	软件和模型远程升级已有成熟工具，但物理设备上的安全验证、灰度升级和失效回退要求更高
跨层	确定性通信与时间同步	3	TSN、5G-A、DDS、QoS、万兆全光网络、星闪、WLAN等通信技术逐步成熟，但端到端确定性时延、统一时间同步及跨节点状态一致性仍难以满足大规模物理智能协同需求
跨层	异构算力调度与资源统一编排	2	已具备云资源调度能力，但跨CPU/GPU/NPU、跨云边端及异构本体的统一资源感知、任务编排和动态调度仍处于早期探索阶段
跨层	轻量虚拟化与运行时隔离	3	容器、MicroVM等轻量虚拟化技术已较成熟，但面向实时控制、异构硬件和边缘AI的低时延运行时、资源隔离和快速启动能力仍需进一步发展
跨层	任务卸载与动态迁移	2	已有研究和局部验证，但任务状态迁移、时延预测及安全连续运行尚未解决
跨层	数据与模型闭环迭代	3	自动驾驶等领域已有较完整数据闭环，机器人领域仍受数据规模、标注和本体差异限制
跨层	安全可信与功能安全	3	网络安全和传统功能安全体系较成熟，但生成式模型、动态任务迁移和多智能体协同带来新风险
跨层	统一可观测性与AIOps	3	云和边缘监控工具较成熟，但缺少覆盖感知、模型、控制和物理执行效果的一体化观测体系
生态	标准接口与跨厂商互操作	3	OPC UA、ROS 2和DDS等提供了基础接口，但技能、动作、模型及多智能体语义尚未统一

3.4 架构演进：云边端协同架构演进趋势



随着物理智能从单体设备智能逐步走向多设备协同、区域智能和智能空间，云、边、端之间的关系也将由相对固定的功能分工，逐步演进为面向任务和资源的动态协同体系。整体来看，架构演进将经历三个阶段：近期呈现“固定分工、边缘按需”的特征，以端侧实时自治为基础，云端承担集中训练和全局管理，边缘根据场景需求按需部署；中期进入“端边协同、区域自治”阶段，随着多智能体和区域协同需求快速增长，边缘逐步承担局部智能中枢角色，端边协同成为主流；长期走向“无界融合、动态协同”，随着算网融合、通用基础模型和跨节点调度能力成熟，云、边、端的固定边界进一步弱化，形成模型、数据、技能、任务和算力跨层流动的分布式智能网络。

近期（2026至2028年），物理智能仍以端侧实时自治为基础，整体呈现“端侧实时自治、云端集中训练、边缘按需部署”的架构特征。机器人场景仍以“端云”架构为主，端侧重点承担多模态感知、模型推理、运动控制和安全闭环等实时任务，云端承担模型训练、模型管理、OTA更新和设备运营等集中式任务；自动驾驶逐步由单端智能向“云边端”架构演进，路侧边缘节点开始承担感知融合、

车路协同、局部交通调度等区域任务；智能空间则率先形成“边云协同”模式，由边缘连接楼宇、园区内部设备并实现局部联动，云端负责跨区域管理和全局运营。边缘部署在这一阶段仍主要集中于工业、车路协同、智慧园区等高价值场景。

这一阶段的主要驱动力来自端侧AI芯片能力提升、VLA等模型开始向端侧部署，以及5G-A、TSN、万兆全光网络、车路协同等网络基础设施逐步成熟。随着机器人、车辆和智能设备数量增加，单设备独立运行逐渐难以满足区域任务协同需求，边缘开始承担部分共享计算和协同能力。同时，边缘GPU/NPU成本下降、多机协同逐步进入规模化部署、边缘AI平台开始标准化，将成为这一阶段的重要技术拐点。但边缘部署仍受到机器人商业规模不足、边缘资源利用率和商业模式尚待验证、跨厂商接口和生态标准不统一等因素制约，因此整体仍以场景驱动和按需建设为主。

中期（2028至2030年），随着单体智能逐步成熟，架构重点将由“设备自身智能”转向“区域协同智能”，形成“端边协同成为主流、边缘承担局部智能中枢”的新阶段。边缘节点将不再主要承担

简单的数据转发和计算卸载，而是逐步承担区域模型推理、任务编排、地图共享、技能缓存、多机协同和局部资源调度等智能任务，成为连接单体智能和全局智能的重要节点。机器人也将由“独立智能”向“区域协同智能”发展，在工厂、园区、仓储、机场、港口、家庭、社区等区域内共享地图、模型、任务状态和部分技能能力。云端则继续承担大模型训练、全局知识沉淀、跨区域模型管理和全局资源优化，端侧重点保障感知、执行、安全闭环和弱网条件下的自主运行。

中期的重要变化还在于模型和任务开始具备跨节点动态流动能力。模型可以根据任务复杂度、时延要求和资源状态在云、边、端之间按需分发和卸载，边缘也能够根据区域任务需求动态缓存模型和技能。随着多智能体快速发展、世界模型进入实际部署、边缘GPU和边缘AI平台进一步成熟，边缘节点将逐步从计算节点演变为区域智能节点。这一阶段的重要拐点包括边缘AI平台标准化、MCP、A2A等智能体协议逐步成熟，以及区域协同类应用快速增长。与此同时，边缘资源调度复杂度、跨节点模型一致性以及网络QoS和确定性通信要求也将明显提升，成为架构进一步扩展需要解决的关键问题。

长期（2030年以后），物理智能架构将进一步走向“云边端一体化”，形成面向大规模物理智能系统的分布式智能网络。云、边、端之间将不再保持固定的任务边界，而是根据算力规模、任务时延、网络状态、能耗和业务需求动态选择执行位置。模型、数据、技能和任务能够在不同节点之间跨层迁移，部分原本固定在云端或端侧的能力也可以根据实际运行状态动态调整。边缘由单一节点进一步演变为区域算力网络，多个边缘节点之间实现资源共享和协同调度，多机器人、自动驾驶和智能空间则

可共享统一的区域智能基础设施。

这一阶段的关键驱动力将来自通用机器人基础模型成熟、算网融合发展以及大规模物理智能部署。世界模型、数字孪生和多智能体能力将进一步融合，物理设备可以在数字空间进行推演、协同和验证，并根据实际运行状态动态调整任务和计算资源。跨厂商统一标准的形成，也将推动不同本体、不同模型和不同基础设施之间实现更广泛的互联互通。与此同时，跨域资源调度将更加复杂，安全可信要求持续提升，分布式模型的一致性、节点自治以及故障恢复能力将成为长期阶段的核心挑战。

总体来看，物理智能云边端架构将沿着“端侧自治、边缘按需增强、云端集中”逐步演进至“端边协同、区域智能”，最终走向“云边端一体化、分布式智能网络”。从而形成端侧实时闭环、边侧增强智能、云侧全局演进的分层体系。这一过程中，计算位置将由相对固定走向按需动态调度，边缘将由局部计算节点逐步演变为区域智能节点，云端由单纯集中计算中心进一步承担全局知识、训练和资源协调，端侧则持续强化实时自治和安全闭环能力。最终，云、边、端将从分层部署关系演进为统一资源体系下的协同智能网络，根据任务需求动态组织算力、模型、数据和协同关系，支撑物理智能从单体自主走向区域协同和大规模分布式智能。

3.5 适用与风险：云边端协同适用条件与风险分析

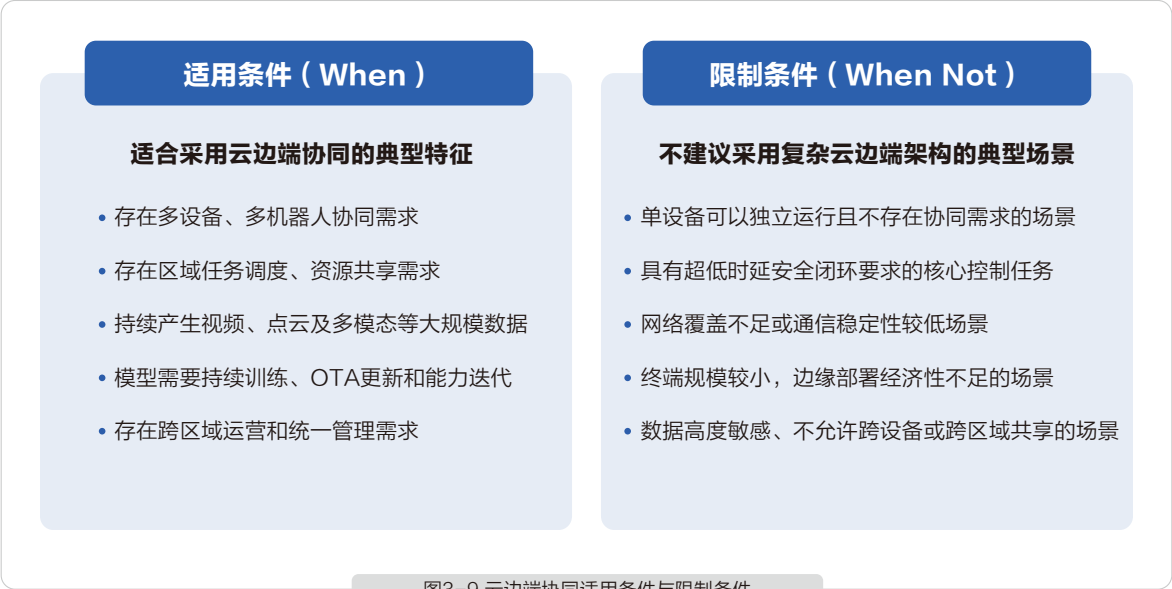


图3-9 云边端协同适用条件与限制条件

云边端协同并非物理智能应用的必选架构，其核心价值在于通过端侧实时执行、边缘区域协同和云端集中训练运营，实现不同层级算力、数据和模型能力的合理分工。因此，应结合终端规模、协同需求、数据特征、网络条件及经济性综合判断，避免“一云到底”或“一端到底”，也避免为追求架构完整性而过度建设边缘节点。

多设备协同、数据闭环和规模化运营是云边端协同的主要驱动力。从物理智能运行特征看，当单个终端已无法独立完成任务，或者需要利用云端、边缘侧资源实现能力增强时，引入云边端协同具有较强必要性，主要体现在以下五类情况。

01

存在多设备、多机器人协同需求。

当机器人、无人车辆、智能设备由单体作业向集群化运行发展后，需要实时掌握区域内多个终端的位置、任务和运行状态，并开展任务分配、路径协调及异常处置。此类任务仅依靠单个终端难以形成全局视角，需要通过边缘节点进行局部协同，并与云端全局管理能力联动。

02

存在区域任务调度和资源共享需求。

在工厂、园区、仓库、港口、机场、家庭、社区等相对集中区域内，多类型设备可能需要共享算力、地图、技能和业务数据。通过边缘节点集中部署区域公共能力，可以减少设备重复建设，实现任务统一编排和资源动态调用，提高区域资源利用效率。

04

模型需要持续训练、OTA更新和能力迭代。

物理智能不同于传统一次部署型软件，需要利用真实场景运行数据持续开展模型训练、仿真验证和版本更新。云端负责集中训练与模型管理，边缘承担轻量级更新与训练、区域分发和部分推理，端侧完成实际运行，能够形成“运行—数据回流—训练—验证—模型下发—再运行”的持续学习闭环。

03

持续产生视频、点云及多模态等大规模数据。

机器人、车辆及各类智能终端运行过程中将持续产生视频、图像、点云、轨迹、触觉及设备状态等大量数据。若全部直接上传云端，不仅带来较高网络压力，也可能影响实时业务。通过端侧预处理、边缘聚合和云端集中治理，可以形成更加合理的数据分层处理体系。

05

存在跨区域运营和统一管理需求。

当机器人、车辆和设备由局部试点走向多园区、多城市乃至跨区域部署后，需要建立统一的设备管理、模型管理、运行监控、数字孪生及运营分析体系。云端承担全局运营，边缘承担区域自治，端侧负责现场执行，可以支撑物理智能由单点应用向规模化运营转变。

总体而言，终端数量越多、设备协同程度越高、数据规模越大、模型迭代越频繁、运营范围越广，采用云边端协同架构的必要性越强。

部分场景不宜简单采用复杂云边端架构，应优先保障端侧自治或采用简化架构。云边端协同能够增强系统能力，但同时也会增加网络依赖、系统复杂度和建设运维成本。因此，应根据业务特征判断是否确有必要设置边缘层或云端依赖，重点关注以下限制条件。

01

单设备可以独立运行且不存在协同需求的场景。

对于单机作业、任务相对固定且数据交互有限的设备，端侧已经能够完成感知、决策和执行闭环，没有必要为了架构完整而额外部署边缘节点，可采用“纯端”或简单“端云”模式。

04

终端规模较小、边缘建设经济性不足的场景。

边缘节点涉及算力、网络、存储、软件平台和运维投入，如果区域内仅存在少量终端，资源利用率较低，可能难以形成合理投资回报。对此，可优先采用端云架构，并随着设备规模扩大再逐步建设边缘能力。

02

具有超低时延安全闭环要求的核心控制任务。

运动控制、机器人平衡、车辆制动、安全停车等功能直接关系人员和设备安全，不宜依赖边缘或云端网络完成实时闭环。此类能力应优先部署在端侧，并建立本地安全兜底机制，云边能力只能作为增强而不能替代端侧控制。

05

数据高度敏感、不允许跨设备或跨区域共享的场景。

部分工业生产、关键基础设施等场景存在严格的数据安全和数据域要求，不宜将原始数据跨区域传输。此类场景应根据数据分级分类要求强化本地化部署，通过端侧或本地边缘形成数据闭环。

03

网络覆盖不足或通信稳定性较低的场景。

在矿山、偏远区域、地下空间及部分移动作业环境中，如果网络覆盖不连续或时延波动较大，过度依赖云边协同可能降低系统稳定性，应优先保证终端本地自治，并在网络条件允许时进行异步数据同步。

因此，云边端协同架构不应追求“层级越多越先进”，而应根据业务价值和实际约束选择最优组合。能够端侧完成的任务原则上优先在端侧闭环，需要区域协同再引入边缘，需要集中训练和全局运营再向云端延伸。

面向规模化部署将带来网络、算力、模型、数据和安全等系统性风险。

01

网络确定性风险。网络中断、时延抖动和带宽波动可能造成实时闭环失效、多机协同效率下降，需要通过5G-A、TSN、万兆全光网络、星闪、WLAN、网络QoS等提升网络确定性，同时保留端侧安全兜底能力。

05

功能安全风险。云边通信异常、边缘节点故障或模型逻辑异常可能直接影响机器人、车辆等物理系统运行，应坚持关键控制端侧闭环，建立故障隔离和安全降级机制。

02

算力调度风险。云、边、端算力资源分布不均、任务迁移机制不完善，可能导致局部节点过载或资源闲置，需要加强算网融合、统一资源编排和智能任务调度。

06

异构互操作风险。不同机器人、本体、芯片、操作系统和通信协议之间缺乏统一标准，将增加跨厂商协同和能力复用难度，需要推动统一接口、身份体系和通信协议建设。

03

模型一致性风险。云边端模型版本不同、OTA更新失败或持续迭代节奏不一致，可能造成不同设备决策能力存在差异，应建立模型版本管理、灰度发布、持续验证和回滚机制。

07

边缘经济性风险。边缘节点建设、部署和运维成本较高，若设备数量和业务负载不足，容易造成资源利用率偏低，应逐步推动边缘资源池化、算力共享和按需部署。

04

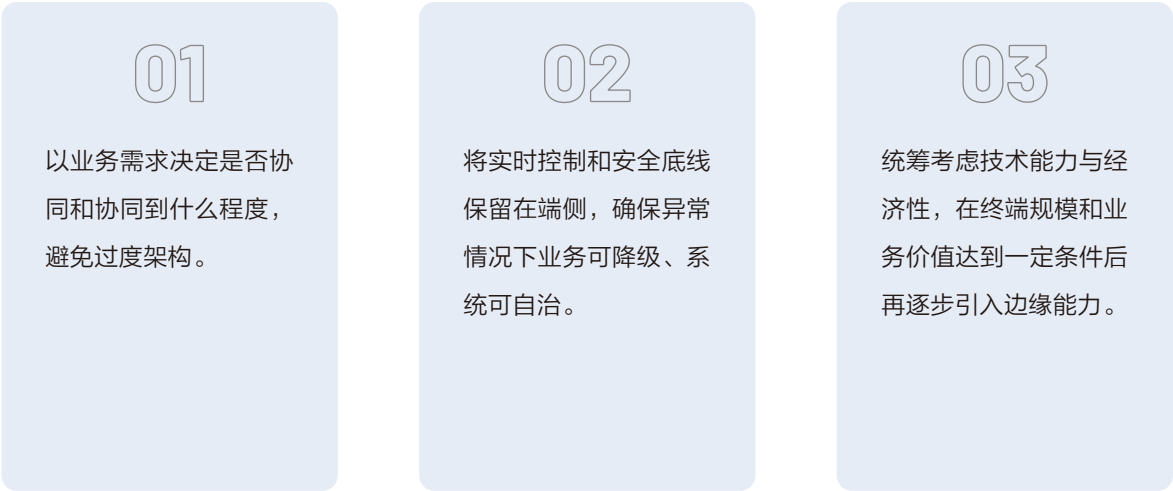
数据一致性风险。地图、环境状态、知识库和任务信息同步不及时，可能导致环境认知偏差和任务规划冲突，需要强化数据治理、状态同步、统一时钟及数字孪生能力。

08

运维复杂性风险。随着边缘节点数量增加，监控、升级、故障定位和版本管理复杂度明显提升，需要建设统一边缘管理平台，并通过AIOps等手段提高自动化运维能力。

总体来看，云边端协同的价值主要体现在解决端侧实时自治、区域协同优化、云端训练和全局运营之间的能力分工问题，尤其适合多设备协同、大规模数据处理、持续模型迭代及跨区域运营等场景。但

对于单机运行、超低时延安全控制、弱网、小规模终端和高度敏感数据场景，则不应简单追求复杂三层架构。因此，未来物理智能云边端架构建设应遵循三方面原则：



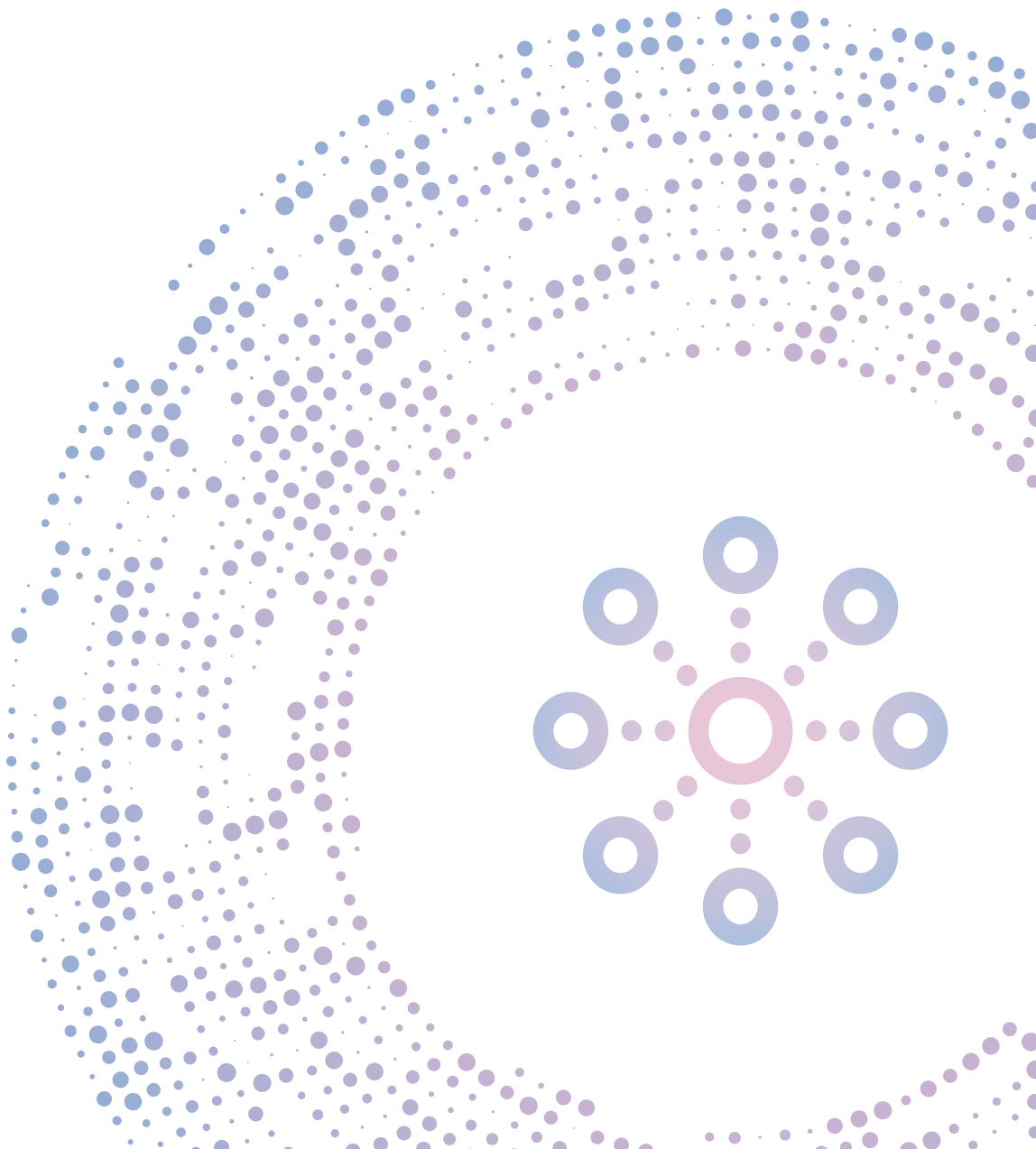
在此基础上，通过强化确定性网络、算网一体调度、模型和数据一致性管理、功能安全、统一接口以及自动化运维能力，逐步形成“端侧有自治、边

缘能协同、云端可统筹、异常可降级、整体可运营”的云边端协同体系，为物理智能由局部试点向规模化部署提供可靠的ICT基础。

第四章

生态支撑

物理智能云边端产业协同体系



4.1 产业链协同：物理智能云边端产业链协同发展

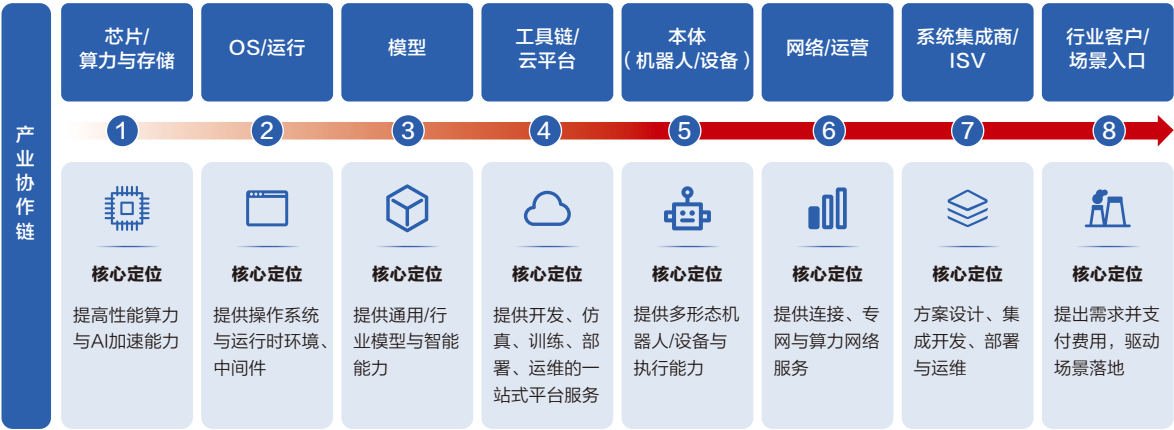


图4-1 产业生态分工

物理智能产业链横跨算力、操作系统、模型、工具链、机器人本体、网络、系统集成及行业应用等多个环节，单一企业难以独立覆盖从底层技术到场景落地的完整链条。随着产业逐步由技术验证走向规模化应用，生态分工将更加清晰，整体形成“芯片与算力提供基础能力、操作系统构建运行底座、模型提供智能能力、工具链与云平台支撑开发部署、本体承载物理执行、网络保障连接协同、集成商完成方案落地、行业客户牵引场景需求”的产业协作体系，各参与方围绕技术供给、平台服务、设备交付和业务价值形成差异化定位。

芯片/算力与存储环节，共同提供物理智能运行所需的底层基础能力。其中，芯片与算力重点提供CPU、NPU、GPU等计算芯片及云、边、端全域算力资源，支撑模型训练、智能推理、环境感知处理与设备实时控制；存储环节负责多模态感知数据、模型参数、任务日志、仿真数据的分级留存、高速读写与安全持久化，保障数据回流、模型迭代与场景状态连续。本环节核心竞争力主要体现在算力性

能、能效水平、运行可靠性、存储吞吐时延及软硬件一体化协同能力，商业模式以芯片采购、算力服务、存储服务及软硬件授权为主。随着物理智能由端侧设备向云边端协同演进，算力与存储环节将从单芯片、单设备能力竞争，全面转向异构算力、分级存储与算网存一体化协同能力的综合竞争。

操作系统与运行环境承担软硬件之间的基础连接和资源管理。Linux、Ubuntu、RTOS、ROS、Android等开发操作系统及框架，以及面向机器人和实时控制的系列中间件与Runtime，共同支撑设备管理、任务运行、资源调度和软硬件接口标准化。该环节的价值主要体现在系统稳定性、安全性、实时性和接口兼容性，未来将逐步由单一OS能力向跨OS统一抽象和分布式Runtime演进，商业模式主要包括操作系统授权、技术服务和运行环境服务。

模型环节提供物理智能的核心认知、推理和决策能力。基础模型、行业模型、VLA、世界模型等将逐步成为机器人和智能设备的“智能中枢”，模型厂

商通过提升模型性能、泛化能力、持续迭代能力和安全水平形成差异化竞争。随着模型能力逐渐平台化，其商业模式将由传统软件授权进一步转向模型授权、API调用、订阅及按量付费，并通过与工具链、本体和行业场景深度结合形成持续的数据和能力闭环。

工具链与云平台承担连接底层技术与上层应用的关键枢纽作用。云平台及工具链厂商通过提供数据治理、仿真、训练、模型评测、部署、运维等一站式服务，降低物理智能开发和工程化门槛。该环节价值不仅体现在开发效率和平台易用性，更在于能够连接算力、模型、开发者、本体和场景数据，具有较强的生态聚合能力。其商业模式主要包括平台订阅、云资源使用费和工具链授权费。随着产业成熟，工具链与云平台有望成为生态控制力较强的环节之一，竞争重点将由单项工具能力转向开发者生态和全生命周期服务能力。

机器人及智能设备本体承担物理世界感知与执行功能，是智能能力最终落地的载体。本体企业重点围绕机器人机械结构、运动控制、传感器集成和整机可靠性形成能力，并通过标准接口与模型、工具链和云边端平台进行连接。本体环节的核心价值在于运动控制能力、感知交互水平、可靠性及场景适配能力，其收入主要来源于设备采购、维保服务和软件授权。未来本体市场预计呈现多元化发展，不同场景将形成差异化产品体系，难以由单一厂商全面覆盖。

网络与运营环节是支撑云边端协同和多智能体运行的重要连接底座。通信设备商和运营商主要提供5G-A、万兆全光网络、专网、园区网络及算力网络等服务，保障机器人、车辆和智能设备之间的低

时延、高可靠、安全可控连接。随着多智能体协同和任务动态卸载增加，网络将由传统连接服务进一步向任务级QoS和算网协同演进，商业模式也将由基础通信资费逐步拓展至专网服务、算力网络及综合运维服务。

系统集成商和ISV承担技术能力向行业方案转化的重要作用。该环节主要围绕具体行业需求完成方案设计、软硬件集成、应用开发、部署实施和持续运维，将芯片、模型、平台、机器人和网络等能力组合形成完整解决方案。其核心竞争力更多体现在行业Know-how、项目实施能力和定制开发能力，商业模式主要以项目费、技术服务费和软件订阅费为主。随着物理智能行业化程度提升，集成商将成为连接通用技术与复杂行业流程的重要纽带。

行业客户和场景入口是整个产业生态最终价值实现的核心。制造、物流、能源、交通、医疗、农业、城市治理等行业客户提出真实业务需求，并通过设备采购、项目建设、服务订阅等方式实现价值支付。其核心诉求并非单纯采用某一项AI技术，而是通过物理智能实现降本增效、生产安全、业务创新和智能化升级。因此，谁能够更深入掌握行业流程、真实数据和场景入口，谁就更容易形成稳定的数据反馈和业务迭代闭环，并对上游技术路线产生更强牵引作用。

从产业利益分配看，不同环节将逐步形成与其价值贡献相匹配的商业模式，即底层厂商通过芯片、授权和算力获取收益，平台和模型厂商通过订阅及调用收费，本体厂商通过设备和软件服务变现，网络运营方通过连接和算力网络收费，集成商通过项目和服务获取收入，行业客户则通过实际业务价值实现投资回报。产业价值将由一次性硬件销售逐步向

软件订阅、平台服务、持续运维和场景运营等长期收入模式延伸。

总体来看，物理智能产业生态更可能形成“底层标准开放、平台工具主导、本体多元共生、数据持续闭环、场景价值牵引”的发展格局。未来生态主导权将不再单纯取决于某一芯片、模型或设备的技术

领先，而更多取决于企业能否同时连接开发者生态、云边端平台、本体设备、运行数据和行业场景入口。产业竞争将由单点产品能力竞争逐步转向生态组织和系统协同能力竞争，掌握平台工具、数据闭环及核心场景入口的企业将具备更强的产业影响力和价值获取能力。



图4-2 物理智能工具链

物理智能工具链是支撑智能体由虚拟研发走向真实物理世界运行，并实现持续迭代和规模化运营的工程化基础体系。物理智能进一步将AI开发过程延伸至真实物理环境，通过感知与数据采集连接物理世界，通过仿真与数字孪生构建虚拟训练环境，通过模型训练与算法形成智能能力，通过虚实迁移实现能力从虚拟环境向真实设备迁移，通过规划与控制将智能决策转化为物理动作，通过边缘部署与执行实现真机稳定运行，并进一步通过多机协同调度支撑群体智能和规模化应用，最终依托反馈迭代、安

全验证与可观测体系形成持续优化闭环。由此形成覆盖“感知与数据采集—仿真与数字孪生—模型训练与算法—虚实迁移—规划与控制—边缘部署与执行—多机协同调度—反馈迭代、安全与可观测性”的全生命周期工具链。

感知与数据采集是物理智能工具链连接物理世界的基础入口，核心是实现物理世界数字化。机器人、车辆等智能体通过相机、激光雷达、IMU、力觉及本体传感器持续获取真实环境和设备状态，并利用

传感器接入、数据采集、标定同步和数据预处理等工具，将现实世界信息转化为可供模型训练、仿真和决策使用的数据资源。随着感知模态不断丰富，视频、点云、轨迹、动作、触觉等数据需要进一步实现时空对齐、统一表征和协同治理，推动物理交互数据由分散采集走向标准化管理和跨设备复用。

仿真与数字孪生是物理智能研发、训练与验证的重要底座，核心是构建可规模化复现和探索物理世界的虚拟环境。通过物理仿真、场景构建、数字孪生和合成数据生成等工具，可在虚拟环境中复现真实设备、任务和环境状态，并规模化生成极端工况、长尾场景和故障样本，降低真实设备训练的成本和安全风险。随着世界模型和生成式AI发展，仿真平台将进一步融合数据生成、模型训练、策略验证和能力评测等功能，由研发辅助工具逐步演进为支撑物理智能规模化开发与训练的基础设施。

模型训练与算法是物理智能能力构建的核心环节，核心是将数据与经验转化为可泛化、可执行的智能能力。依托训练框架、基础模型、强化学习及模型优化等工具，持续开发和提升感知、理解、决策与控制能力。随着VLA、世界模型等技术发展，模型能力将由感知和识别进一步延伸至任务规划、动作生成和长时序决策，并持续融合仿真数据与真实运行数据，形成数据、训练、评测和模型版本持续迭代的能力生产体系。

虚实迁移是连接虚拟研发与真实应用的关键环节，核心是推动仿真环境形成的智能能力高效迁移至真实物理世界。针对仿真与真实环境在传感器特性、环境条件、动力学模型和执行机构等方面的差异，通过域随机化、系统辨识、模型校准和迁移验证等工具缩小Sim-to-Real差距。当前模型进入真实

设备后仍普遍需要现场调优和反复验证，未来需要进一步强化自动化校准、迁移效果评测和在线适配能力，提高模型跨本体、跨设备和跨场景迁移复用效率。

规划与控制是智能能力转化为物理行动的关键环节，核心是打通从高层智能决策到低层实时控制的执行链路。通过任务规划、路径规划、运动规划和实时控制等工具，将模型形成的环境理解、任务意图和决策结果逐级转化为可执行动作，驱动物理载体在动态环境中自主完成任务。随着基础模型逐步进入机器人决策与控制体系，规划控制需要进一步衔接概率性的模型输出与确定性的物理控制要求，在智能决策能力与实时、安全、稳定执行之间建立可靠转换机制。

边缘部署与执行是智能能力进入真实设备并稳定运行的工程化环节，核心是实现模型、算法和控制能力在异构物理载体上的高效部署。通过模型部署、推理运行、设备接入和运行编排等工具，使训练完成的模型适配不同芯片、操作系统、运行环境和机器人本体，并在低时延、有限算力、功耗和存储条件下稳定运行。当前不同本体、芯片和软件栈之间差异较大，异构系统适配仍需要较多工程投入，未来需要进一步通过统一Runtime、硬件抽象和标准化设备接口降低重复适配成本，提高智能能力的部署效率和可移植性。

多机协同调度是物理智能由单体自治迈向群体协同和规模化运行的重要支撑，核心是实现多智能体统一管理 with 协同运行。随着机器人、车辆及无人设备由单机应用向多智能体协同演进，工具链需要支持多机管理、任务调度、通信协同和远程运维，对不同智能体的身份、能力、位置、任务和运行状态进

行统一管理，并根据任务和资源变化动态开展任务分配、冲突消解和资源调度。当前相关工具更多围绕特定厂商和特定场景构建，未来需要进一步提升跨厂商、跨本体、跨系统的协同能力，支撑大规模智能体集群运行。

反馈迭代、安全与可观测性构成贯穿研发、部署和运行全过程的持续优化闭环，核心是推动系统在真实物理世界中持续进化和可信运行。数据反馈与迭代通过运行数据回流、问题样本沉淀、数据治理和持续学习，驱动模型与策略不断优化；测试验证与安全覆盖仿真与真实环境中的功能、性能、安全及故障测试，对感知、模型、控制和智能体行为进行持续验证；可观测与运维持续监测模型、系统和设备运行状态，支撑异常诊断、版本升级和远程运维。真实运行产生的数据、问题和经验持续回流至

数据、仿真和模型训练环节，形成“开发—训练—部署—运行—反馈—再优化”的持续演进闭环。

总体来看，物理智能工具链正由单点工具向全生命周期工程体系演进，呈现出“研发工具逐步成熟、全链条贯通持续深化，单体开发能力加快完善、规模化工程与运营能力仍需增强”的发展特征。下一阶段需要重点加强物理交互数据标准与治理、虚实迁移自动化、异构软硬件适配、安全验证与可观测以及多智能体规模化运维等关键能力，并推动数据格式、模型接口、设备能力描述和安全评测等逐步标准化，最终形成贯通“物理数据获取—虚拟训练验证—智能能力构建—真实世界部署—群体协同运行—反馈持续进化”的完整工具链体系，为物理智能由技术研发走向规模化产业应用提供工程化支撑。

4.2 商业模式：需求方与供应方协同构建



图4-3 物理智能商业模式演进趋势

物理智能云边端服务的商业模式将由客户部署需求驱动，不同类型客户将根据数据安全、实时性、业务规模、自身IT能力和投资偏好，在自建、外购及混合部署之间形成差异化选择，并进一步决定云、边、端能力组合、生态分工及收费方式。总体来看，资源服务商的价值将由传统“提供算力和基础资源”，逐步向“提供仿真、训练、部署、协同和持续运营的一体化智能服务”延伸，商业模式也将由一次性产品销售向订阅化、服务化和按结果付费方向演进。

部署模式由单一上云向差异化组合演进。不同客户在云边端部署方式上将呈现明显分化。大型工业及汽车企业通常具备较强IT基础和较高的数据安全、实时性要求，更倾向采用自建或混合云模式，将核心数据、关键控制和生产系统保留在本地，同时使用公有云承担大规模训练、仿真和弹性算力需求。机器人及物理智能创业企业自身基础设施投入能力有限，更倾向使用公有云或外购平台，通过弹性算力、预置模型和工具链快速完成产品开发与部署。中型制造企业通常采用“云+边托管”的混合方式，既利用云端训练和运营能力，又通过边缘节点保障设备接入、实时推理和本地业务连续性。公共

事业及高安全行业更强调数据不出域和安全隔离，通常采用专属云、私有化部署并结合边缘节点。对于多机器人运营型客户，则更需要云边端整体协同，以支撑集群管理、多机调度、OTA、远程诊断和持续更新。因此，未来商业模式不宜采用统一产品包，而应按照“客户部署方式+能力需求+安全等级”形成分层服务组合。

服务能力由算力供给向全生命周期智能服务扩展。从能力供给看，外购云服务将逐步形成六类核心服务。首先是弹性智算服务，面向大模型训练、强化学习训练、异构算力调度和突发算力需求，提供GPU/NPU等按需计算资源和弹性扩容能力，解决客户一次性建设成本高、算力利用率波动大的问题。其次是高保真仿真服务，围绕物理仿真、数字孪生、合成数据、并行仿真及Sim-to-Real等能力，为机器人和智能设备提供低成本、高效率的虚拟研发和验证环境。再次是数据与模型闭环服务，通过运行数据回流、数据治理、自动标注、模型训练、版本管理和持续学习，帮助客户形成“运行—数据—训练—验证—更新”的持续演进机制。同时提供云边端协同服务，支持模型下发、边缘推理、任务卸载、算力调度和断网自治，实现云端训练与

边缘、端侧运行的协同衔接。在设备规模扩大后，还需要提供设备与多机运营服务，包括设备管理、OTA、集群管理、多机器人任务调度、远程诊断和运营监控，帮助客户降低大规模智能终端的运维复杂度。安全可信能力则将逐步成为基础服务，由云服务商统一提供数据安全、模型安全、身份与权限、可信执行和安全审计等能力，保障物理智能系统跨云边端运行过程中的安全可靠。总体上，云厂商提供的服务将逐步形成“算得动—仿得真—学得快—云边协同—管得住—保安全”的一体化能力体系。

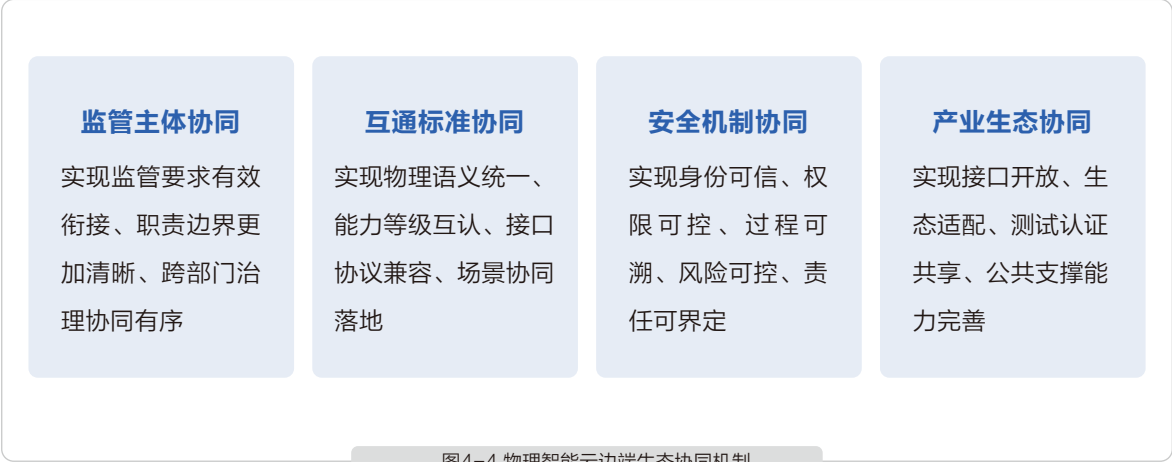
商业模式由产品销售向订阅和服务化演进。随着能力逐渐软件化和平台化，物理智能商业模式将由一次性硬件采购进一步延伸至长期服务收入。芯片和设备仍以采购或授权为主，但云端训练、模型调用、仿真平台、工具链和运营平台将更多采用订阅和按量计费方式；边缘节点可采用设备采购、托管服务或按资源使用量收费；多机运营和设备管理可按照设备数量、任务量或运行规模进行收费。在此基础上，部分能力还将进一步演进至机器人/设备等服务化模式。对于客户而言，不再单纯购买机器人或软件，而是按设备使用、任务完成量、运行时长甚至业务结果付费，从“买产品”逐步转向“买能力、买服务、买结果”。这一模式有助于降低客户初始投入，同时使设备厂商、平台厂商和运营商能够通过持续运营获取长期收益。因此，未来物理智能云边端服务可能形成“一次性销售+平台订阅+资源按量+设备按量+结果付费”并存的多元收费体系。

运营商可形成连接算力边缘和运营一体化差异化方案。运营商在云边端商业模式中具备网络覆盖、边

缘节点、算力资源和客户运营等综合优势，可围绕“5G专网/万兆全光网络+边缘算力设备+算力调度平台+云端AI+设备管理”形成一体化服务方案。其中，5G-A、TSN、万兆全光网络、星闪、WLAN和专网重点解决机器人、车辆和智能设备的低时延、高可靠连接需求；边缘算力设备承担区域推理、多设备协同和本地自治；算力调度平台实现云边端异构资源统一管理；云端AI承担训练、仿真和模型管理；设备管理平台进一步覆盖OTA、Fleet Management、远程诊断和多机运营。通过将网络、算力、平台和运营能力打包，可由传统“连接服务商”向“物理智能基础设施服务商”转型。在收费模式上，可根据行业 and 客户需求形成专网服务费、边缘算力资源费、算力使用费、平台订阅费、设备管理费及运维服务等组合，并逐步探索按照设备规模、任务规模和业务结果收费的长期运营模式。

总体来看，物理智能云边端服务商业模式将经历从“卖资源”向“卖平台”、再向“卖能力和运营结果”演进的过程。短期以芯片、算力、网络和设备等基础资源供给为主；中期随着仿真、模型、数据闭环和云边协同成熟，平台订阅和服务收入占比将持续提升；长期随着多机器人规模化运营和智能体持续学习成为常态，机器人、设备及按任务结果付费等模式有望进一步发展。未来真正具有较高客户粘性和持续收入能力的环节，将不再只是提供单一算力或设备，而是能够同时提供“弹性算力+高保真仿真+数据模型闭环+云边端协同+多机运营+安全可信”的综合服务能力。云边端商业模式也将由单次项目交付逐步向长期订阅、持续运营和业务价值共享转变，成为物理智能规模化落地的重要商业支撑。

4.3 生态机制：物理智能云边端生态协同



物理智能云边端协同的规模化发展，需要以标准互联互通打通不同主体、不同层级和不同生态之间的协作边界。随着智能能力分布于云、边、端不同节点，设备、平台、模型和数据之间的协同关系更加复杂，互联互通也从传统的网络连接和协议兼容，进一步延伸至物理语义、能力描述、安全规则、身份认证和场景协作等层面。面向这一趋势，需要围绕监管协同、互通互认、安全互操作和生态协同建立系统化机制，通过统一标准语言、完善测试认证、强化安全保障、推动生态开放，为跨品牌、跨厂商、跨区域的物理智能协同构建共同规则基础。

物理智能云边端协同横跨人工智能、机器人、通信网络、数据安全及行业应用等领域，标准互联互通需要加强与现有多部门监管体系的衔接，逐步形成

统筹协调、分业监管、专业支撑、属地落地的协同治理机制。在国家层面，可加强与网信办、工业和信息化部在算法、数据、网络、产业及频谱等领域监管要求的衔接；在行业层面，充分考虑市场监管总局（国标委）、公安部、科技部、无线电管理机构，以及交通运输、应急管理、卫生健康、住房城乡建设等部门在标准认证、公共安全、科技伦理、无线通信和场景应用等方面的既有管理要求；在技术层面，可依托电子标准院、信通院、国家机器人检测中心等专业机构开展标准研制、测试验证与认证支撑，并与地方应用监管形成协同。共同围绕实体功能、网络算法、数据安全、伦理行为、通信可靠性、身份追溯及场景准入等关键维度，推动形成适应物理智能云边端协同发展的标准治理体系。

跨品牌、跨生态互通应由“协议能连接”进一步迈向“物理语义能统一、能力等级能互认、场景协同能落地”，按照“标准先行、测试验证、认证采信、生态适配”四步推进。首先建立覆盖数字身份、通信协议、安全基线、动作语义、能力描述和应急指令等共性要求的标准体系，并结合制造、物流、交通、能源等领域形成场景化标准；其次建设国家级基础测试床和行业场景测试床两级测试体系，分别验证基础互联能力和真实场景协同能力；再次构建基础互通认证和场景能力认证两级认证体系，推动认证结果跨厂商、跨区域采信；最后通过统一适配中间件、协议转换层和智能体网关兼容存量私有协议，并联合行业协会和产业联盟推动公共接口、测试用例和认证结果共享。依托ISO、ITU-T等国际标准化组织，围绕物理智能参考架构、智能体互操作、云边端协同机制、物理语义表达、安全可信及测试评价等方向，推动我国成熟技术方案和实践经验向国际标准转化。

跨厂商物理智能体安全互操作应坚持“有限信任、最小权限、全程可溯、风险可控、权责清晰”，建立覆盖事前准入、事中校验、事后追溯和持续评估的全生命周期论证机制。事前通过第三方安全基线检测、能力信息披露和联合风险评估，验证设备身份、通信安全、漏洞防护、权限边界及安全等级；事中实行双向身份认证、动态最小授权、指令合规监测、关键动作二次确认和异常熔断，通过统一策略机制实时约束设备权限；事后对任务来源、调用关系、模型版本、执行过程和结果进行全链路存

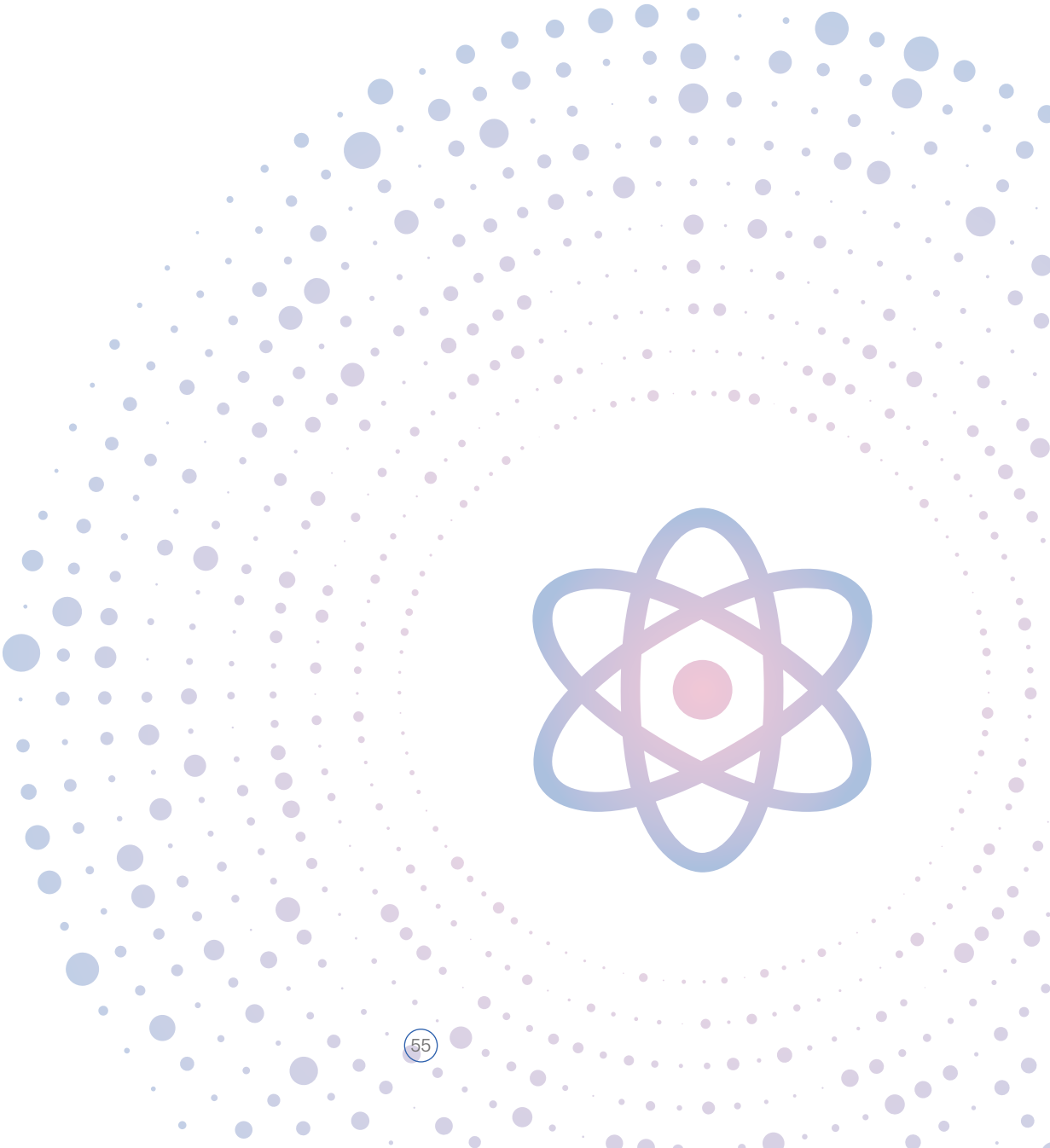
证，并根据硬件故障、算法缺陷、操作违规等情形形成标准化定责依据；运行期间持续开展安全复评、漏洞扫描和版本升级再论证，实现交互持续验证、权限动态控制和行为全过程可审计。

物理智能跨生态规模化协同仍面临技术底层、制度规则、商业生态和产业支撑四类核心障碍，需要围绕统一语义、明确责任、推动开放、补齐支撑协同突破。技术层面重点解决不同厂商硬件结构、控制方式、运动模型和数据表达差异，统一物理动作语义和能力描述，完善适配中间件、测试床及数字孪生验证工具；制度层面完善物理层安全互操作标准、测试方法、评价指标、责任划分及跨部门监管机制；商业层面通过重大项目牵引、生态联盟、第三方认证和商业秘密保护机制推动必要接口开放；产业支撑层面加强国家级专业实验室和公共技术平台建设，提升跨品牌测试、物理安全验证、仿真评估和认证工具能力。

总体来看，物理智能标准治理正在由单一设备和数字协议层面的规范管理，走向覆盖监管主体、互通标准、安全机制和产业生态的系统治理。未来应以统一标准体系为基础，以测试验证和认证互认为抓手，以全生命周期安全论证为底线，以开放生态和公共技术平台为支撑，逐步实现跨品牌、跨厂商、跨区域的标准统一、能力互认、安全可信、责任清晰和生态开放，为多智能体规模化协同和物理智能产业化落地构建统一治理基础。

未来展望

物理智能云边端发展趋势



人工智能正在加快由数字世界向物理世界延伸。物理智能推动AI从处理和生成信息，走向感知、理解并作用于真实世界。智能的边界正在不断打开，由单体设备向多主体、复杂系统和区域空间拓展；智能的形态也在不断升级，由专用智能向通用智能、由单体自主向群体协同和系统智能演进。

物理智能的关键，在于把不同智能能力部署到合适的位置。物理世界同时存在实时控制、复杂推理、现场处理、多机协同、持续学习和全局优化等不同任务，单一计算节点难以承载完整智能闭环。端侧解决“必须立即做”的任务，边侧解决“必须现场做”的任务，云侧解决“适合集中做”的任务。云边端协同的核心，也将从固定分层部署走向面向任务的动态协同。

物理智能需要新的基础设施支撑。应用、数据和算力需要跨云边端协同，网络需要贯通端内、端间和端云。网络将从连接设备进一步走向连接任务、模型和智能能力。真实运行数据将持续回流，成为模型训练、系统优化和能力迭代的重要生产要素。物理智能最终的竞争，也将从单一模型、芯片或设备的能力，走向整个系统稳定协同、持续运行和持续进化的能力。

未来，物理智能将由场景验证逐步迈向规模化产业应用。产业发展重点将由“技术能否实现”转向“系统能否稳定运行、方案能否规模复制、投入产出能否形成闭环”。制造、物流、巡检、无人作业和智能空间等环境相对结构化、任务边界清晰的场景有望率先规模部署，并通过真实运行数据持续优化模型和系统能力；随着感知、推理、控制和本体能力成熟，应用将进一步向复杂任务和开放环境拓展。产业竞争的衡量标准也将由单项技术和单机性能，逐步转向系统稳定性、持续学习能力、工程化能力和业务价值。

云边端将由固定分工逐步迈向任务驱动的一体化协同。近期仍将以端侧实时自治和云端集中训练为主体，边缘根据算力卸载、区域数据处理、低时延推理和多设备协同等需求按需部署；随着边缘平台、网络和分布式运行环境成熟，边缘将进一步承担共享推理、区域协同和现场运营等能力。长期看，云、边、端的固定边界将逐步弱化，模型、数据、技能、任务和算力将综合任务复杂度、实时性、网络状态、资源负载、能耗和安全等级动态选择执行位置，形成任务可拆解、资源可感知、能力可调用、运行可迁移的分布式智能网络。

ICT基础设施将由连接和计算底座升级为物理智能基础设施。计算由单节点供给向云边端异构算力统一管理 and 动态调度演进；运行环境由单机资源管理向面向Model、Agent和Skill的分布式运行环境演进；网络由“连接设备”向“连接任务、模型和智能能力”演进，并与计算、存储共同参与资源编排；数据由运行附属数据转变为持续学习的核心生产要素，模型、技能、记忆和经验逐步形成可跨云边端流动和复用的智能资产。ICT建设将由追求“更多算力、更快网络”转向构建计算、网络、数据、模型和安全深度融合的物理智能基础设施。

产业竞争将由单点产品竞争逐步转向系统能力和生态能力竞争。随着芯片与算力、操作系统、基础模型、工具链、网络、本体、云平台、系统集成和行业应用等环节专业化分工深化，竞争重点将由单一芯片、模型或设备性能，逐步转向平台能力、数据

闭环、开发者生态和行业场景整合能力。产业价值也将由提供单点资源逐步走向提供持续智能能力，商业模式由设备采购和项目建设向平台订阅、能力服务、持续运营和业务价值共享延伸。

标准、安全和治理将成为产业规模化发展的基础保障。随着物理智能直接作用于现实环境，安全对象将由设备和网络扩展至模型、数据、智能体、任务和行为，推动安全体系向云边端系统级可信演进。互联互通也将由通信协议互通进一步拓展至数字身份、能力描述、数据语义、任务接口、安全等级和物理行为边界，实现身份可确认、能力可识别、行为可约束、过程可追溯、责任可认定。未来需要进一步完善标准研制、测试验证、认证互认、安全评估和运行监管体系，为跨厂商、跨平台、跨场景规模化应用建立统一基础。

附录：缩写词汇表

缩写	英文全称	中文
5G	5th Generation Mobile Communication Technology	第五代移动通信技术
5G-A	5G-Advanced	5G演进
A2A	Agent to Agent Protocol	智能体间通信协议
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AIOps	Artificial Intelligence for IT Operations	智能运维
AMR	Autonomous Mobile Robot	自主移动机器人
API	Application Programming Interface	应用程序编程接口
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit	专用集成电路
CPU	Central Processing Unit	中央处理器
DDS	Data Distribution Service	数据分发服务
eVTOL	electric Vertical Take-Off and Landing	电动垂直起降航空器
FPGA	Field-Programmable Gate Array	现场可编程门阵列
GPU	Graphics Processing Unit	图形处理器
ICT	Information and Communication Technology	信息与通信技术
IMU	Inertial Measurement Unit	惯性测量单元
ISO	International Organization for Standardization	国际标准化组织
ISV	Independent Software Vendor	独立软件供应商
IT	Information Technology	信息技术
ITU-T	International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector	国际电信联盟电信标准化部门
LLM	Large Language Model	大语言模型
MCP	Model Context Protocol	模型上下文协议
MicroVM	Micro Virtual Machine	微型虚拟机
NPU	Neural Processing Unit	神经处理单元
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture	开放平台通信统一架构
OS	Operating System	操作系统
OT	Operational Technology	运营技术
OTA	Over-the-Air	空中下载技术
PLC	Programmable Logic Controller	可编程逻辑控制器
PoC	Proof of Concept	概念验证
QoS	Quality of Service	服务质量
ROS 2	Robot Operating System 2	第二代机器人操作系统
TSN	Time-Sensitive Networking	时间敏感网络
UAM	Unified Action Model	统一动作模型
VLA	Vision-Language-Action	视觉-语言-动作模型
VLN	Vision-Language Navigation	视觉-语言导航
WAM	World Action Model	世界动作模型

商标声明

 HUAWEI, HUAWEI,  是华为技术有限公司商标或者注册商标，在本手册中以及本手册描述的产品中，出现的其它商标，产品名称，服务名称以及公司名称，由其各自的所有人拥有。

免责声明

本文档可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的财务、运营、产品系列、新技术等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本文档信息仅供参考，不构成任何要约或承诺，华为不对您在本文档基础上做出的任何行为承担责任。华为可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。

版权所有© 华为技术有限公司 2026。保留一切权利。

非经华为技术有限公司书面同意，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本手册内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。