



**物理AI:**  
开启加速新纪元



# 目录

## 01 智创未来：物理AI迈向成熟

---

为何是现在？重塑全局的共振合力

一场全球竞赛：治理加速跟进

物理AI的现实图景

## 02 物理AI的关键价值领域：工业机器人

---

验证场景

物理AI技术栈

突破瓶颈

## 03 实现价值：双重成熟度视角

---

技术应用成熟度：四个阶段

运营成熟度与转型准备度

治理：不可或缺的关键维度

路径推进：需规避的三类模式

## 04 运营负责人应重视的三大关键议题

---

# 智创未来： 物理AI迈向成熟

在全球范围内，2025年或将成为物理AI正式从科幻范畴迈入主流商业认知的一年。物理AI指的是物理系统与人工智能的融合。长期以来被视为未来概念的这一领域，如今正逐步走向现实应用。这一进展主要得益于成本更低、性能更强的硬件，以及能够不断提升自身学习能力的软件的发展。

当前，仅有5%的企业表示物理AI正在对其组织产生变革性影响。预计在未来三年内，这一比例将上升至41%。现实影响与未来预期之间的差距，正是本文关注的核心。这一趋势也具有现实紧迫性：目前仅有3%的企业已将物理AI广泛融入其运营体系，但预计在两年内这一比例将提升至18%。<sup>1</sup>那些率先采取行动的企业，不仅能够在运营层面获得优势，还将积累组织学习能力，从而在未来十年塑造持续的竞争优势。



**5% → 41%**

预计物理AI将对组织产生变革性影响的企业占比  
(当前vs.未来三年)



**3% → 18%**

已将物理AI广泛融入运营体系的企业占比  
(当前vs.未来两年)



**41%**

将成本与资源投入视为物理AI应用首要障碍的企业占比

本文主要围绕两个方面展开。首先，阐明2025至2026年为何构成真正的临界点，即该技术为何已达到实际可行性的关键阶段，以及竞争格局与治理环境如何共同推动其应用加速。其次，也是本文的重心所在，为企业管理者在推进物理AI应用

过程中提供一套兼具结构化与实操性的行动框架——包括明确切入点、把控投资节奏，以及构建充分释放技术潜力所需的组织基础。全文重点聚焦物理AI与工业机器人领域，这是当前价值已获验证、且实施经验正快速积淀的关键方向。

图1: 物理AI解析

物理AI是指嵌入或控制各类物理硬件的AI系统,包括机器人、自动驾驶车辆、无人机以及智能制造系统,这些系统能够与现实世界进行交互并对其产生实际作用。与纯数字形态的AI不同,物理AI依托传感器对环境进行感知,做出实时决策,并执行具有现实影响的操作。这一数字智能与物理世界的深度融合,建立在三大核心技术领域的协同交汇之上。



由AI驱动的机器打通了数字智能与多种应用形态,使物理智能得以在多样化能力场景与复杂环境中得到有效发挥。

如何利用AI赋能机器人技术?

- 机器人**  
 机器人可通过编程执行各类物理操作,在不同环境中自主导航,并在现实世界中完成对物体的操控。
- 边缘服务**  
 部署于网络边缘节点的硬件设备,可在本地进行数据处理,从而有效降低延迟。

先进AI

- AI智能体**  
 AI智能体无需持续的人工干预,加速了决策过程的高效推进。

先进AI (续)

- 生成式AI**  
 基于在大规模数据集上训练的算法,生成全新且具有原创性的内容。
- 计算机视觉**  
 实现实时感知的关键技术,可观察人类行为来训练机器人或机器设备,并对物理空间进行建模,以支持仿真等应用。
- 机器学习**  
 通过算法使计算机能够进行经验迭代,并持续优化其性能。  
 深度学习
- 深度学习**  
 利用神经网络对复杂数据模式进行建模,以实现异常检测等功能。



AI赋能机器人

AI赋能机器人将物理AI与机器人技术相结合,是一种可在多行业场景中广泛应用的高效工具。

关键形态

- 人形机器人**  
 人形机器人通过模拟人类的特征与功能,用于增强劳动力并提升产出水平。
- 任务专用型机器人**  
 任务专用型机器人在形态上约束较少,主要用于执行标准化、可重复的流程与任务。
- 四足机器人**  
 四足机器人兼具稳定性、灵活性与环境适应能力,能够在复杂环境中实现高效移动与导航。
- 自主移动机器人 (AMRs)**  
 自主移动机器人依托智能导航技术,可在环境中自主移动,并适用于多样化应用场景。
- 自动驾驶车辆**  
 自动驾驶车辆在设计理念与智能能力上与其他类型机器人具有相似性。
- 无人机**  
 无人机是一种飞行设备,可借助物理AI及相关技术实现自主运行模式。

## 为何是现在? 重塑全局的共振合力

物理AI从理论潜力走向商业现实，源于多项关键进展在同时跨越临界点后产生的共振效应。

**硬件成本与性能：**近年来，多模态传感器成本显著下降，同时精度提升约60%，从而拓展了可自动化任务的边界。<sup>2</sup>力控技术的升级，使更复杂的操作得以实现自动化，当前柔性抓取的成功率已超过95%。同时，边缘计算的成本正沿着当年工业相机的普及曲线快速下探。

**基于仿真的学习型软件：**AI模型如今可在高保真数字孪生环境中完成训练，这些数字孪生是对真实工厂的虚拟映射，并能够将所学习的行为稳定迁移至现实世界。新一代开源物理引擎的出现，不仅使训练环境更具真实性，还大幅降低了其成本。<sup>3</sup>由仿真负责训练、云端负责迭代、边缘负责执行构成的三层计算架构，正逐步成为行业标配。

**开放生态加速创新：**2025年，Hugging Face凭借一款售价299美元的桌面机器人吸引了超百万用户，并实现了软硬件设计的全面开源。<sup>4</sup>面向自主系统的开放推理视觉语言行动模型不断涌现。此前仅限于专有系统的能力，如今已向全球研究人员开放。同时，跨形态学习的突破正在推动机器人训练与灵活性的提升，使得在某一机器人平台上获得的技能，无需重新训练即可迁移至形态完全不同的机器人。<sup>5</sup>

这些趋势所汇聚而成的合力，已在规模化层面产生了可量化的成果。全球企业管理者正积极评估如何将物理AI融入其运营体系。2024年，全球部署的工业机器人超过50万台，预计到2028年，年度新增安装量将达到70万台。协作型工业机器人的占比持续攀升，2024年安装量近6.5万台。<sup>6</sup>根据花旗全球洞察（Citi GPS）报告，目前全球各类在役机器人约为4.05亿台，预计到2035年将增长至13亿台。<sup>7</sup>在这股增长浪潮中，越来越多的机器人将通过引入不同形式的物理AI实现能力跃迁。



## 一场全球竞赛: 治理加速跟进

除技术进步之外, 物理AI之所以加速发展, 还在于其所依托的生态体系正逐步成型。资本投入、超大规模平台、国家产业战略以及新兴标准相互支撑、协同发力, 正在形成持续的增长动能。正如云计算和数字平台的发展路径一样, 率先领跑者不仅会更快部署AI, 还将参与塑造其技术架构、行业规范与供应链体系, 后来者则往往需要遵循既定框架。

资本正以前所未有的规模持续涌入。仅2025年前11个月, 美国机器人相关的初创企业融资总额已超过103亿美元, 同比增长61%。美国已启动总规模达5000亿美元的AI算力基建计划; 欧盟通过InvestAI承诺投入2000亿欧元; 中国在2025年《政府工作报告》中正式将“具身智能”纳入未来产业重点发展方向。

治理体系也在同步推进。欧盟《人工智能法案》将于2026年正式生效, 同时配套的自愿实践准则已开始引导企业提前合规。中国正加速推进国家层面的顶层设计, 同时鼓励地方因地制宜打造差异化产业集群。国际标准化组织 (ISO) 与国际电工委员会 (IEC) 已于2025年发布首批国际AI标准。<sup>8</sup>这一变化具有重要意义。监管的介入意味着物理AI正从实验探索阶段走向规模化应用——这并非约束, 而是技术与产业迈向成熟的信号。

## 物理AI的现实图景

对于公众而言, 物理AI的认知更多来源于科幻作品, 而非工业实践。近年来, 半自动扫地机器人和割草机等日常设备的普及, 以及自动驾驶汽车和人形机器人相关报道的增加, 正在逐步塑造公众预期。对于制造业与工业领域的管理者而言, 嵌入物理系统的智能正日益普及, 不再显得新奇。这种“常态化”正在改变企业行为, 既降低了组织阻力, 也使风险更具可控性, 并进一步提升了企业开展试点与探索的意愿。这意味着, 物理AI正日益被视为数字化转型向物理世界延伸的现实路径。

物理AI的影响已在多个行业与应用场景中逐步显现 (见图2)。在制造领域, 比亚迪西安工厂的自动化水平约为97%, 由AI驱动的机器人与自主移动机器人能够对实时物理信号做出精准响应, 使该工厂在本质上成为高度自动化的机器人化生产体系。<sup>9</sup>在仓储与物流领域, 基于物理AI的机器人正大规模应用于拣选与打包作业, 并逐步扩展至配送环节。<sup>10</sup>中美两国的自动驾驶及机器人出租车服务已在公共道路上运行, 其他地区也在开展试点与小规模测试。在医疗领域, 机器人可在医院中完成药品配送, 将护理人员释放至更高价值的工作中; 约克大学研发的一款AI诊断机器人原型已可辅助开展患者分诊。<sup>11</sup>

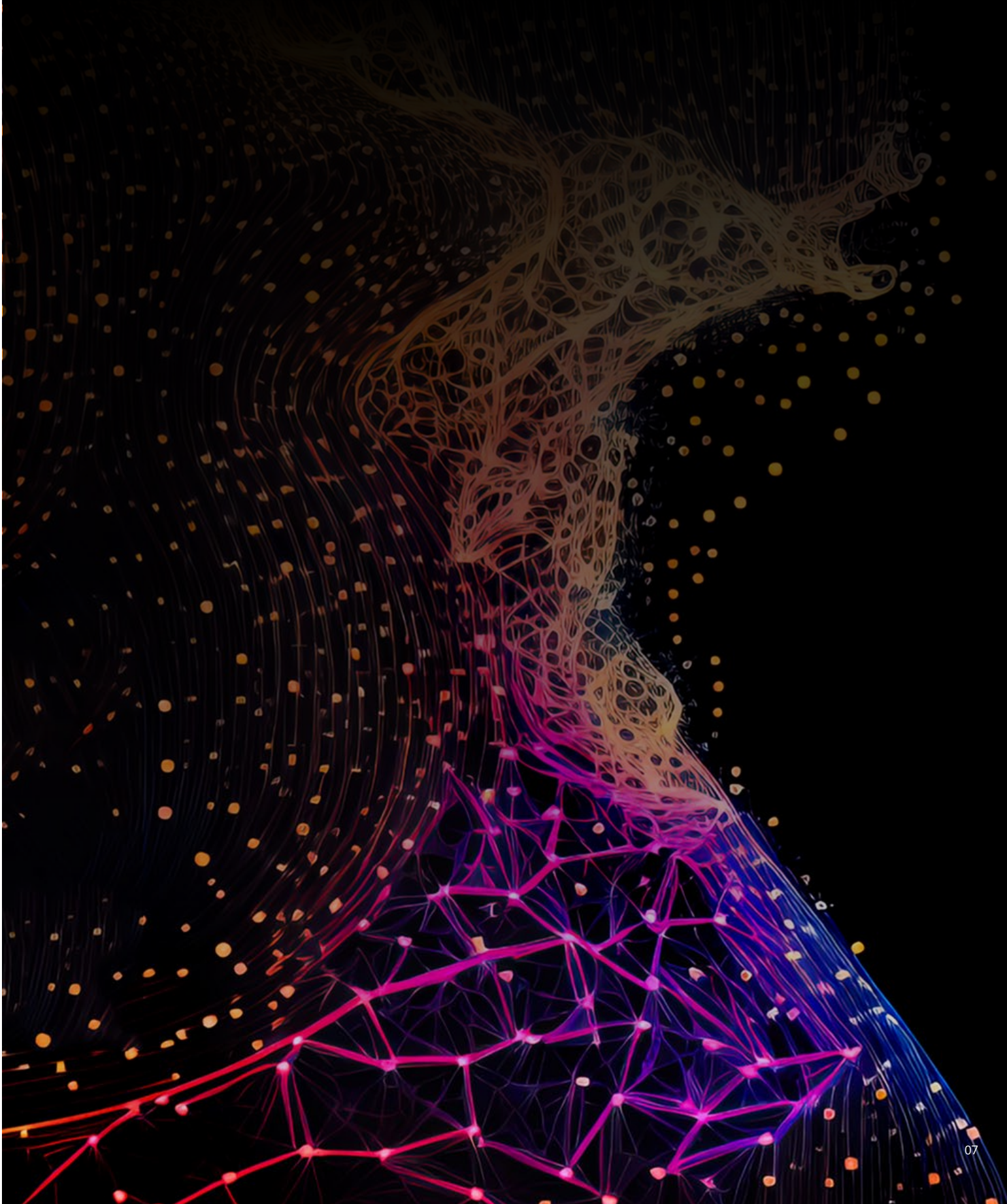
对于大多数企业管理者而言，物理AI当下的实质性影响依然有限。德勤2026年《企业人工智能现状》调研显示，仅有5%的受访企业表示物理AI正对其行业产生变革性影响，而传统AI与机器学习的这一比例为45%。<sup>12</sup>然而，其发展趋势已十分清晰：10%的企业预计物理AI将在未来一年内释放变革性影

响，31%的企业预计将在三年内实现。物理AI应用最为集中的行业包括消费行业、生命科学与医疗（均为22%）、科技、传媒和电信（18%），以及能源、资源与工业（16%）。现阶段，工业机器人领域已成为物理AI释放其价值的最前沿阵地，也是为后续大规模应用探明路径、积淀经验的关键场景。

图2: 物理AI与机器人正在执行多种功能

在不同行业与领域中，物理AI机器人凭借一套核心功能特性，能够衍生出多样化的应用场景。





# 物理AI的关键价值领域： 工业机器人

工业机器人是物理AI的重要验证场景，其必须在真实运行环境中通过提供可量化的投资回报来建立技术可信度。在工业环境中成功部署物理AI，要求系统能够稳定可靠地进行感知、决策与执行，从而形成坚实的技术与运营基础。尽管这一基础至关重要，但制造环节所创造的价值并非终点，而是更大范围转型的起点。源自工厂车间的实践经验，将为数字智能与物理资产的融合提供可复制的路径，从而推动企业内部的系统化扩展，并进一步延伸至整个价值链。

其价值将沿三个层级向外辐射（见图3）：

## 运营价值：聚焦制造核心

传统机器人高度依赖固定程序，且仅擅长在高度受控的重复性任务中运行，而物理AI赋能的机器人则不会疲劳、不会分心，也无需人工重新配置，能够自主应对可预期的变化。其带来的结果是：在高精度任务中几乎消除人为误差，显著降低停机时间，优化资源配置，实现更高水平的复杂自动化，并最终推动“自优化”工厂车间的形成。

## 价值外溢：贯通全价值链的协同整合

在研发环节，AI智能体可在数字孪生环境中完成设计原型构建与测试，从而缩短新产品导入周期。在物流领域，结合实时数据的AI机器人，可实现更加灵活的供应链运作与动态库存管理。从设计到交付的全流程协同，将减少浪费与人为错误，提升响应效率，并加快新产品上市进程。

## 颠覆性创新：催生新型商业模式

物理AI正在推动新的生产模式形成，例如“工厂即服务”（Factory-as-a-Service, FaaS），通过按需部署可重构生产线，以支持短周期或定制化制造；以及“运营即服务”（Operation-as-a-Service, OaaS），使企业能够将工厂的运营智能进行外包。这些模式将使竞争优势由实体资产转向算法能力。曾经高度依赖资本投入的先进制造，将逐步转变为触手可及的按需服务。

图3: 物理AI从运营优化到商业模式演进

物理AI的影响将超越制造环节的优化与创新,进一步重塑供应链中的价值流动方式,并推动新型商业模式的形成。

### 物理AI部署的三层业务价值



### 物理AI技术栈

物理AI与工业机器人并非单一技术,而是一个高度集成的技术体系(见图4)。透彻理解其六个层级及相互依赖关系,是做出稳健投资决策、避免高昂试错成本的关键前提:

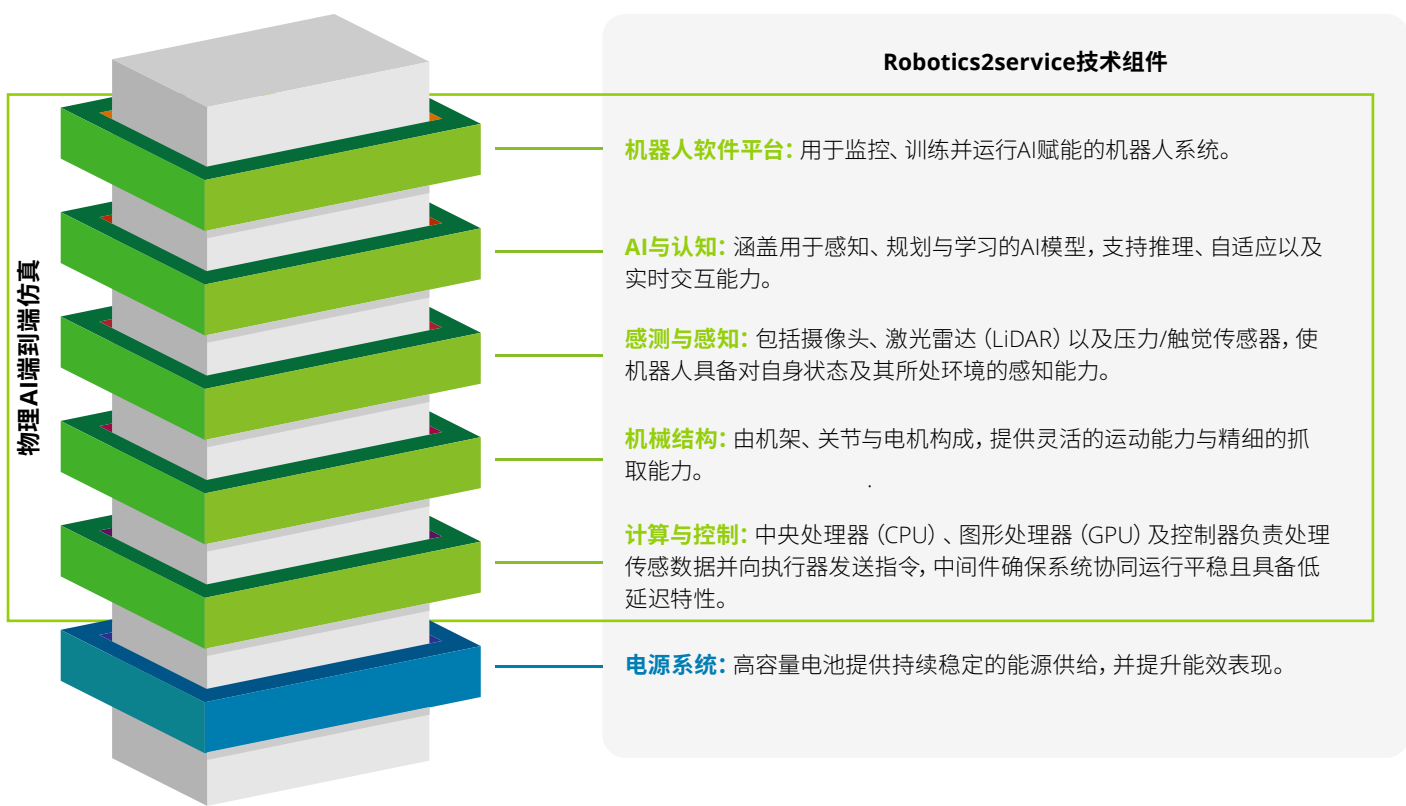
- **平台层:** 用于训练AI模型,并在实际部署前对工作流程进行模拟的数字孪生环境。
- **AI与认知层:** 系统的“大脑”,负责推理与决策,并控制与物理世界的自适应交互,包括环境理解以及任务与运动规划。
- **感知与感测层:** 系统的“眼睛、耳朵与触觉”,由摄像头、力矩传感器及声波探测器构成,通过多源数据融合构建物理世界的实时模型。

- **机械结构层:** 即机器人的“身体”,包括机械臂、人形机器人及自主移动机器人,决定其物理能力与自由度。模块化设计与高级计划与排程 (APS) 能力,使生产具备更高灵活性,并可在不同任务间快速切换。
- **计算与控制层:** 边缘计算将AI“大脑”与机械“身体”连接起来。低延迟处理能力确保系统运行平稳、精准且安全,这在人机协作场景中尤为关键。
- **动力与执行层:** 这是一个常被低估的制约因素。物理AI属于高能耗技术,其规模化应用依赖于高效的电池管理与稳定的供电体系。

该技术栈的核心优势在于各层之间的协同效应。从整体来看，这一体系类似于生物系统：感知提供视觉与触觉，认知构成大脑，机械结构对应身体，而计算与控制则相当于连接感知与行动的神经系统。

对该技术体系的掌握，是将分散、单一的自动化系统转变为具备智能性、适应性与自学习能力的物理系统的关键。任何一层的短板，例如数字孪生精度不足、边缘计算能力不足或感知数据缺乏标准化，都会限制AI层的发挥，无论模型本身多么先进。

图4: 物理AI机器人技术构成要素



## 突破瓶颈

尽管物理AI的潜力已十分明确，但要从当前具备机器人能力的工厂迈向全面自主、端到端的运营模式，企业仍需跨越一系列关键的技术与运营瓶颈。

在德勤2026年《企业人工智能现状》调研中，企业在推进物理AI应用时最常提及的障碍包括：成本与资源需求（41%）、难以识别适用场景（36%）、人才与技能短缺（33%），以及技术或数据可获得性问题（31%）。<sup>13</sup>这些问题可归纳为两类性质不同、需采取差异化应对策略的挑战。



“物理AI技术体系自身的演进仍面临一些基础性挑战，而这些问题在很大程度上并非企业管理者能够直接掌控。我们认为，对于许多工业与制造业管理者而言，更为可行的路径，是以具备充分认知的观察者身份参与其中，并在试点项目中发挥战略合作作用。”

### 技术瓶颈 (在很大程度上超出大多数组织的直接控制范围):

相关进展主要由科技企业与学术界推动。关键限制之一在于，AI尚未充分形成对物理世界的“常识性”认知，即在面对新情境时，对物体行为的直观理解能力仍然有限。

此外，还存在“仿真到现实”的迁移差距，即在数字孪生环境中训练的模型，无法始终稳定地迁移至现实环境。其他挑战还包括，在与人类共享空间中对自主系统进行安全认证的复杂性，以及先进传感器与边缘计算成本仍然较高，使其在诸多应用场景中的推广受到限制。

对于大多数管理者而言，更为合理的应对方式，是作为具备专业认知的观察者参与其中，并在试点项目中发挥战略合作作用，而非尝试独立解决上述技术约束。

### 运营瓶颈 (由组织自身主导，并在多数情况下成为决定性因素):

突破运营瓶颈，需要在流程、技术与人才等多个维度开展协同推进的系统性行动。其中一项关键挑战在于自动化基础是否充分，因为在自动化水平较低、变化程度较高且尚未建立精益化与标准化流程的环境中，AI的应用效果往往受限。

第二项约束在于数字基础设施的成熟度，包括可编程逻辑控制器（PLC）、监控与数据采集系统（SCADA）以及制造执行系统（MES）是否能够与AI编排平台实现有效集成。在缺乏工业物联网（IIoT）连接的情况下，物理AI难以实现规模化运行。

人才同样构成重要瓶颈。既具备运营理解能力又掌握数据科学技能的复合型人才十分稀缺，且培养周期较长。在规模化应用阶段，算力与电力供应也不再只是工程层面的问题，高性能芯片资源的竞争以及稳定电力基础设施的可获得性，将直接影响企业部署与运行物理AI的能力。

与技术层面的约束不同，这些运营瓶颈可通过有意识的战略决策与组织推动加以解决。



“企业内部存在一系列准备度因素，这些因素决定了其在当下及未来部署与规模化推进物理AI解决方案的效果，而关键在于，这些因素掌握在企业自身手中。成功实施物理AI，不仅在于技术的引入，更在于组织的适配与转型能力。”

关键洞察：技术瓶颈将由技术行业逐步解决，而运营瓶颈则掌握在各个组织自身手中。在实践中，从物理AI中获取价值，既依赖于新技术的部署，也依赖于围绕其对流程、技能及运营模式进行系统性重构。

# 实现价值： 双重成熟度视角

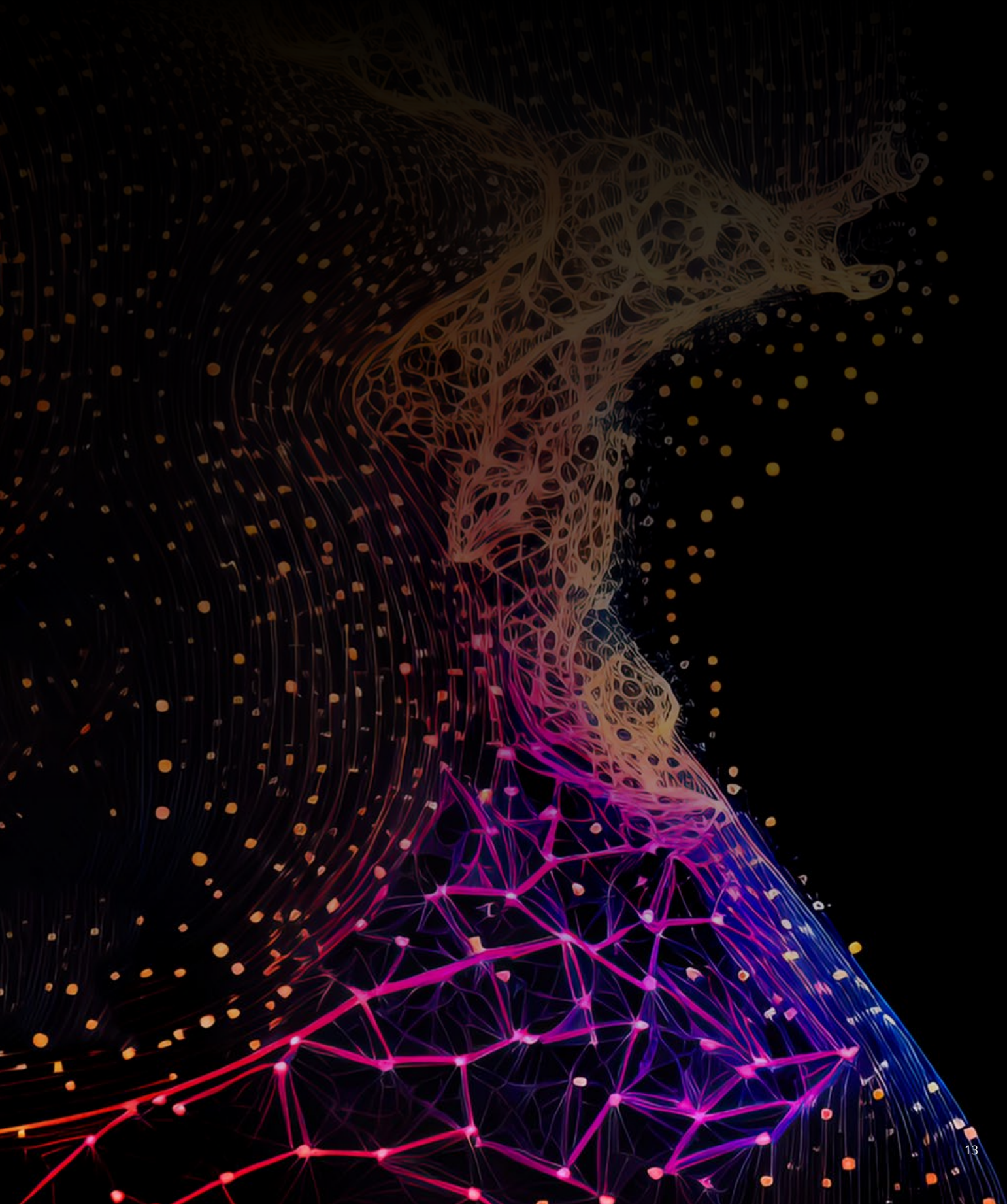
物理AI并不会自动产生价值。在推进过程中，不同领域的发展节奏可能存在差异，部分环节快速演进，而部分环节则可能因组织能力或技术条件尚未成熟而出现滞后。要实现成功，需要两条不同的成熟度曲线协同推进（见图5）。

先进技术只有在组织具备有效整合能力的前提下，才能真正释放其价值；同样，运营成熟度也必须与现代技术能力相匹配，否则将导致潜在价值无法充分实现。

其根本原因在于，物理AI并非简单的可部署解决方案，而是一种需要通过运营规范与组织学习持续培育的能力。未来十年的领先者，将是那些能够系统性地将运营成熟度与快速演进的技术前沿相匹配的组织，而非仅依赖先进研发能力的企业。前行路径在于循序渐进地构建具备物理AI能力的运行环境，从标准化工作单元、人员技能提升，到数字孪生的逐步部署，稳步推进。

图5: 双重成熟度视角





## 技术应用成熟度: 四个阶段

从刚性机械系统演进至真正具备自主性与适应能力的物理系统，通常遵循一个结构化的四阶段路径。每一阶段均对应明确的目标状态、关键路径以及前置技术条件，同时也标志着机器在物理世界中感知、决策与执行能力的显著跃迁。理解这一演进框架，是实现战略性推进的基础，即明确“建设什么、何时建设以及为何建设”。

**阶段一：自动化。** 机器按照预设流程执行任务，具备高精度、高速度与高重复性。系统对环境缺乏感知能力，但在受控条件下运行稳定。系统的设置、切换及异常处理仍依赖人工干预。成熟的自动化体系具有资本密集与工程驱动特征，其核心在于机械精度与控制逻辑，而非机器智能。关键前提条件：可编程逻辑控制器（PLC）、伺服电机、专用工装、安全系统以及基础人机界面（HMI）。目前，许多组织仍停留在第一阶段，且存在较多人工操作环节。实现价值流范围内的全面自动化，是后续发展的基础，而试图跳过该阶段，往往是试错成本高昂的最常见误区。

**阶段二：协同数字化。** 机器开始具备对人类存在及环境情境的感知能力，传统的物理防护逐步被协同安全架构所取代。人与机器能够在同一工作空间中实现灵活协作。数据开始从生产现场向上流动。本阶段由传感器集成与控制软件演进共同驱动。既有设备通过新增传感器、操作系统及软件升级获得新能力，同时引入新型协作机器人。关键前提条件：协作机器人（cobots）、二维/三维视觉相机、力矩传感器、工业物联网（IIoT）网关以及边缘计算节点。阶段2使运营过程实现可视化，其产生的数据（如节拍时间、错误率及操作交互等）将成为第三阶段的重要基础。

**阶段三：数字孪生。** 实现物理系统与其虚拟映射之间持续的双向同步。每一台设备、每一个工件及每一道工序，均拥有反映其实时状态的数字映射。仿真从离线设计工具演进为支持预测、优化与调试的运行环境。这一阶段是整个技术成熟路径中最具挑战性的环节，因为其要求运营技术与信息技术的深度融

合，同时需要对数据基础设施进行投入，并获得组织层面对仿真精度的认可。关键前提条件：数字孪生平台、物理引擎、高带宽低延迟连接、时序数据库以及制造执行系统（MES）与企业资源计划系统（ERP）的集成层。阶段三是迈向物理AI的关键门槛：若缺乏经过验证的数字孪生体系，基于仿真训练的AI模型将难以在现实环境中有效运行。

**阶段四：物理AI。** 系统能够在非结构化环境中进行感知，对最优行动进行推理，并以自主方式执行。在这一阶段，“大脑”（通用智能）、“眼睛”（感知能力）与“身体”（物理载体）之间的分工关系由隐性转为清晰显性。

物理AI具备跨任务的泛化能力，能够同时从真实环境与仿真环境中学习，并持续实现自我优化。在这一过程中，人的角色将由直接操作执行者，转变为监督者、异常处理者以及协同创新的参与者。

在这一阶段，一个具有标志性的转变是智能与物理载体的解耦。不同于以往针对单个机器人逐一编程的方式，物理AI系统正逐步将通用智能与具体物理形态分离。通用智能在仿真环境中训练，并通过群体学习不断优化，而物理载体则作为执行载体存在。由此，在某一设备上获得的能力，可以在不同类型的机器人及任务之间迁移，且仅需极少的再训练。这一机制大幅缩短了部署周期，并显著提升了能力复用效率，使机器人从定制化自动化系统演进为可规模化扩展的物理智能体系。

这一阶段代表着技术前沿。尽管其发展路径尚未完全验证，但领先实践者已逐步勾勒出其基本轮廓。关键前提条件包括：面向具身任务优化的AI基础模型、强化学习框架、群体编排与调度平台、边缘AI加速器，以及自动化数据标注流程。阶段四并非终点，而是一种新的运行范式：系统不再是由单个机器人构成的工厂，而是一个在运行过程中持续学习与优化的生产系统。

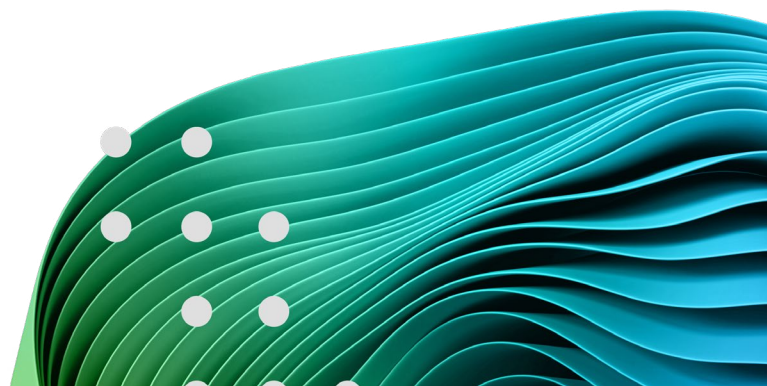


图6: 物理AI成熟度路线图



## 运营成熟度与转型准备度

技术应用成熟度决定“能做什么”，而运营成熟度决定“能否真正落地执行”。即便是最先进的物理AI系统，如果部署在缺乏基础规范、流程能力与组织支撑的环境中，其价值也难以有效释放。要实现物理AI的规模化应用，必须推动三个相互依赖的维度，与技术演进阶段协同发展。

### 维度一：标准化——规模化的基础语言

物理AI依赖高度一致的运行环境。零部件、流程或接口的不确定性，会对传统自动化系统与AI模型造成干扰。标准化并不意味着僵化，而是指对变化进行可控、可记录、可被系统学习的管理。在成熟度较低阶段，流程知识主要依赖操作人员的经验积累，质量水平受限于当班技能最弱的员工。随着成熟度提升，系统化的标准为协作机器人与视觉系统提供稳定、可预测的运行环境。在数字孪生阶段，标准由系统加以执行：设备通过统一协议实现互联，数据结构保持一致，虚拟模型与物理资产实现规模化同步。在物理AI阶段，标准进一步演进为自适应且具备自描述能力：设备接入后可自动完成配置，工件能够携带自身的工艺参数与流程指令。

### 维度二：精益运营——消除浪费是实现智能化的前提

对低效流程进行自动化，只会将浪费固化。价值流映射、连续且可视化的流程、解耦式工序设计以及基于根因分析的问题解决机制，是构建高效运营体系的基础。在此基础上，物理AI才能发挥放大效应。在成熟度较低阶段，自动化往往仅带来局部效率提升，但容易被等待与搬运等环节所抵消。随着精益能力的提升，拉动式系统使价值流更加清晰且具备可预测性，从而为传感器部署与协同自动化提供基础。在数字孪生阶段，精益管理转向以预测与模型驱动为核心。在物理AI阶段，运营将实现高度自主化：AI智能体能够识别异常、分析根因，并通过基于仿真验证的策略实施改进。持续改进的精益文化，也为员工将AI视为能力增强工具而非岗位替代提供了重要的认知基础。

### 维度三：组织与人才转型——最具挑战且最易被忽视的关键维度

物理AI的引入，将重塑岗位设置、技能结构、决策机制及职业发展路径。管理者当前需要重点思考：是否具备同时理解运营与数据科学的复合型人才？工程与信息技术之间的壁垒是否已打通？数字孪生与机器人系统的协同管理由谁负责？员工是否已准备好从手动执行转向对AI系统的监督与持续优化？

每一轮技术演进，都会推动劳动力结构的重塑。自动化时代，将作业标准从依赖操作经验转变为机器参数设定，例如将“凭经验拧紧”转变为在控制系统中设定45牛·米的扭矩值。操作人员的角色也由直接创造价值，转向支持价值实现。

进入数字孪生阶段，流程知识由人工经验与手册转向系统沉淀，一类既理解工艺原理又掌握代码逻辑的“翻译型”人才开始出现。而在物理AI阶段，这一演进迈向新的纵深：操作人员转变为自主系统的监督者，管理者负责智能体群的编排与协调，当下的“翻译者”将成长为未来人机协同流程的架构设计者。应用场景的识别与开发，也将更多源自一线实践。在物理AI驱动下的组织形态，将不再是单一的人类层级结构，而是由人类智能与人工智能共同构成的协同网络，在持续互动中不断学习与优化。

## 治理: 不可或缺的关键维度

上述三个运营维度并非静态的检查清单，而是需要伴随技术成熟度持续演进的组织能力形态。同时，治理已成为不可或缺的关键维度。随着物理AI进入生产现场，一类新的风险逐步显现，包括物理安全与健康、系统自主性、责任界定以及运营控制等。这些风险往往以机器运行速度产生，且可能超出人工直接干预的范围。领先企业正加快构建企业级AI治理体系，包括对数据使用与AI应用的规范、可量化的可解释性方法，以及清晰的责任划分框架。当前治理趋势偏向约束导向，即界定AI“不应使用”的情境。随着高风险场景在完善规则下得到有效管控、组织信心逐步提升，这一趋势将逐步演进。长期来看，治理重点将从限制自主性，转向在明确边界与防护机制下，界定其可被安全赋予的范围与方式。

### 3.4 路径推进: 需规避的三类模式

即便具备清晰战略的组织，在实践过程中仍反复遭遇相似的失效模式。在物理AI部署的全生命周期中，应以压缩转型周期为目标，同时通过将技术、流程与人才围绕统一成果进行协同对齐，确保业务价值的持续实现，即在真实运营环境中形成稳定且可持续的业务影响。

#### 部署过程中的运营不稳定

每一次物理AI的部署，都会对生产节奏、员工工作方式以及价值流的平衡产生冲击。若缺乏基于仿真的前置验证与分阶段推进机制，系统不稳定将引发组织阻力，并延长恢复稳定的周期。应对之策是在技术实施过程中嵌入严格的变革管理机制，以在各关键节点保障产出与质量。

#### 盈亏平衡周期延长

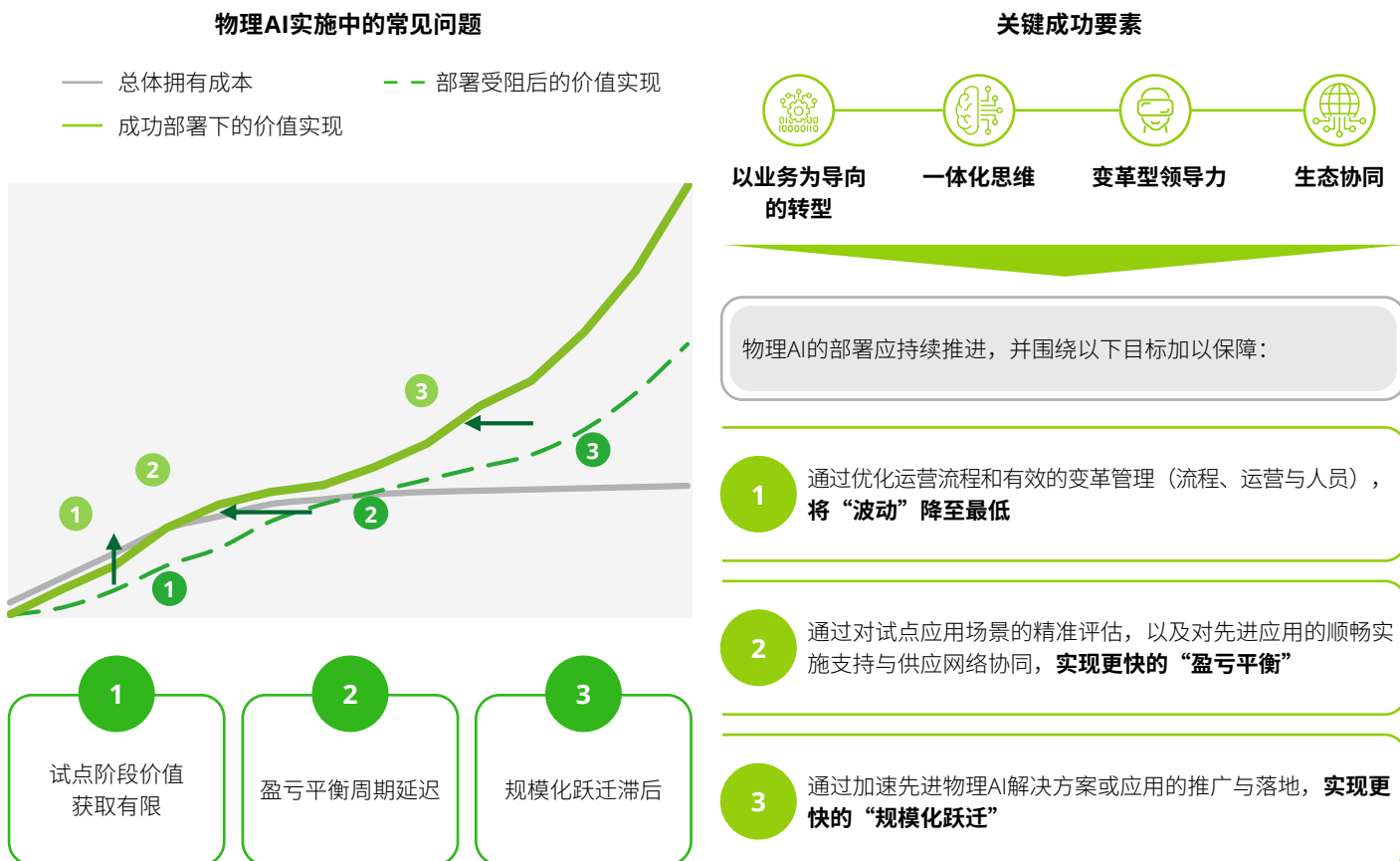
从初始投资到首次价值实现之间的阶段，是组织最为脆弱的时期。通过将物理AI转型拆解为模块化、可独立实现价值的单元，可以在数个季度内实现可量化的现金回报，而非以年为单位。早期成果有助于增强利益相关方信心，为后续投资提供支撑，并推动项目由成本中心转变为自我驱动的价值引擎。

#### 上线后未能实现规模化跃迁

许多在物理AI领域进行大量投入的组织（类似于以往数字化转型过程中的情况），在试点之后难以实现规模化扩展。除机器人与软件系统本身外，组织还需同步构建支撑其运行、优化与扩展的操作蓝图、培训体系及治理机制。技术必须转化为可复制、可扩展的能力引擎，并在每一轮实施中持续加速演进。

图7: 对物理AI价值实现的信心提高

物理AI的商业化应用，要求企业构建坚实的组织与技术基础。



# 运营负责人应重视的三大关键议题

物理AI已不再是“是否”或“何时”采用的问题，而是“就绪度”的问题。已有41%的企业管理者预计其将在三年内带来变革性影响，而物理AI的集成应用预计将在两年内实现六倍增长，构建运营基础的时间窗口正持续收紧。<sup>14</sup>

与任何快速演进的技术一样，物理AI的诸多影响仍在不断显现之中。尽管如此，其发展路径正日益清晰并趋于结构化。随着

其应用范围不断扩大、可见性不断增强，以及价值逐步显现，其在各行业及价值链中的应用将加速扩展。行动过慢的代价，不仅在于效率提升机会的丧失，更在于错失作为先行者所积累的组织学习能力。

对于工业与制造领域的管理者而言，应围绕以下三个问题来制定行动方向：

## 您目前处于技术成熟度阶梯的哪个阶段？

阶段一的完成，即实现一致性、精益化且具备数字化可接入能力的自动化，是后续一切发展的基础前提。如果生产现场仍主要依赖经验性知识运作，且存在未受控的差异性，那么无论技术能力如何先进，此时开展物理AI投资仍属时机未成熟。

## 您的运营基础是否已准备好部署物理AI？

需要对三个关键维度进行客观评估：标准化水平、精益流程成熟度以及人才结构。真正能够释放物理AI价值的组织，并非那些试点项目最为炫目的企业，而是那些具备最为扎实运营基础的企业。在运营基础尚未成熟的环境中部署技术，难以实现预期价值。

## 您是否正在构建合适的人才体系？

人才瓶颈是客观存在的长期挑战。既理解生产运营又具备数据科学能力的复合型人才，是连接生产现场与技术系统的关键桥梁，其培养通常需要数年时间。当前已着手组建跨职能团队，并推动由一线驱动应用场景识别的组织，将在技术规模化扩展过程中显著占据先发优势。

当前在生产一线探索物理AI的先行者，正在书写未来十年的竞争法则。前沿阵地已然转移，未来正在此刻铸就。

## 作者



**孙晓臻**  
德勤亚太  
物理人工智能卓越中心  
主管合伙人



**龚戈亮**  
德勤中国  
供应链与网络运营  
合伙人



**郭大江**  
德勤亚太  
物理人工智能卓越中心  
合伙人



**孙易磊**  
德勤中国  
供应链与网络运营  
总监



**邓卓**  
德勤中国  
供应链与网络运营  
经理



**樊俊**  
德勤亚太  
物理人工智能卓越中心  
经理



**胡旭柯**  
德勤中国  
供应链与网络运营  
高级咨询顾问

## 主要联系人



**孙晓臻**  
德勤亚太  
物理人工智能卓越中心  
主管合伙人  
scottsun@deloittecn.com.cn



**Chris Lewin**  
德勤亚太  
人工智能与数据  
主管合伙人  
chrislewin@deloitte.com

# 术语表

AMR – 自主移动机器人	能够借助传感器、环境建模及机载智能，在动态环境中实现安全移动与任务执行的自主导航机器人，无需依赖固定路径。
单件流拉动	一种以需求驱动的生产模式，即每个产品单元均根据特定客户订单进行生产，从而在尽可能降低库存与浪费的前提下，实现大规模定制。
边缘设备	在设备端或其邻近位置进行本地数据处理的工业硬件（而非依赖云端），从而支持低延迟控制、实时分析以及自主决策。
ERP – 企业资源计划	用于协调企业核心业务流程的集成化企业软件系统，涵盖财务、供应链、制造与采购等环节，并基于统一的数据体系运行。
LLM – 大语言模型	一种在海量文本数据上训练的深度学习模型，用于理解、生成并推理人类语言，是现代AI及多模态系统的重要认知基础。
MES – 制造执行系统	用于对工厂生产运营进行实时监控、管理与优化的软件系统，连接企业规划系统与实际制造过程。
NPI – 新产品导入	将产品从概念阶段推进至设计、验证、量产爬坡直至全面规模化生产与市场发布的结构化流程。
PLM – 产品生命周期管理	用于在产品全生命周期内管理产品数据、流程与决策的数字化框架，涵盖从构思与设计到生产、服务及退役的全过程。
SCADA – 监控与数据采集系统	用于对工业运行进行实时监测与控制的软件与硬件系统层。
VLA – 视觉语言行动模型	一种多模态AI模型，融合视觉与自然语言理解能力，可直接生成可执行的物理动作，使机器人能够基于高层指令在现实世界中完成感知、推理与执行。
VLM – 视觉语言模型	一种多模态AI模型，将视觉感知与语言理解相结合，使系统能够对图像或视频进行解析，并通过自然语言进行推理。

# 尾注

1. Deloitte, State of AI in the Enterprise, January 2026
2. <https://www.deloitte.com/cz-sk/en/issues/generative-ai/state-of-ai-in-enterprise.html>
3. NVIDIA, Train a Quadruped Locomotion Policy and Simulate Cloth Manipulation with NVIDIA Isaac Lab and Newton, 29 September 2025, [Train a Quadruped Locomotion Policy and Simulate Cloth Manipulation with NVIDIA Isaac Lab and Newton | NVIDIA Technical Blog](#)
4. Arxiv.org, OpenVLA: An Open-Source Vision-Language-Action Model, 5 September 2024, <https://arxiv.org/abs/2406.09246>;
5. NVIDIA Physical AI at NeurIPS: Alpamayo-R1 and the Cosmos Ecosystem, 12 December 2025, <https://introl.com/blog/nvidia-physical-ai-alpamayo-cosmos-neurips-2025>
6. TechCrunch, Hugging Face opens up orders for its Reachy Mini desktop robots, 9 July 2025, <https://techcrunch.com/2025/07/09/hugging-face-opens-up-orders-for-its-reachy-mini-desktop-robots/>
7. Gemini Robotics 1.5 brings AI agents into the physical world, 25 September 2025, <https://deepmind.google/blog/gemini-robotics-15-brings-ai-agents-into-the-physical-world/>
8. IFR, World Robotics 2025, September 2025
9. CitiGPS, The Rise of AI Robots: [Physical AI is Coming for You](#) [https://www.citifirst.com.hk/home/upload/citi\\_research/rsch\\_pdf\\_30297368.pdf](https://www.citifirst.com.hk/home/upload/citi_research/rsch_pdf_30297368.pdf)
10. AI Impact Assessment Guideline (ISO/IEC FDIS 42005:2025); AI Explainability Guideline (ISO/IEC TS 6254:2025); AI Risk Management Guideline (ISO/IEC 23894)
11. Sustainability Magazine, How BYD is Harnessing AI to Accelerate Global EV Production, 9 October 2025, <https://sustainabilitymag.com/news/how-chinas-byd-is-using-ai-to-scale-global-ev-manufacturing>
12. Forbes, The Rise of AI-Powered Robotics, And The Future of Work, 15 April 2025, <https://www.forbes.com/sites/jackkelly/2025/04/15/the-rise-of-ai-powered-robotics-and-the-future-of-work/>
13. <https://www.york.ac.uk/news-and-events/news/2024/research/ai-robotics-emergency-room-waiting-time/>
14. Deloitte, State of AI in the Enterprise, January 2026





#### 关于德勤

德勤中国是一家立足本土、连接全球的综合性专业服务机构，由德勤中国的合伙人共同拥有，始终服务于中国改革开放和经济建设的前沿。我们的办公室遍布中国31个城市，现有超过2万名专业人才，向客户提供审计、税务、咨询等全球领先的一站式专业服务。

我们诚信为本，坚守质量，勇于创新，以卓越的专业能力、丰富的行业洞察和智慧的技术解决方案，助力各行各业的客户与合作伙伴把握机遇，应对挑战，实现世界一流的高质量发展目标。

德勤品牌始于1845年，其中文名称“德勤”于1978年启用，寓意“敬德修业，业精于勤”。德勤全球专业网络的成员机构遍布150多个国家或地区，以“因我不同，成就非凡”为宗旨，为资本市场增强公众信任，为客户转型升级赋能，为人才激活迎接未来的能力，为更繁荣的经济、更公平的社会和可持续的世界开拓前行。

Deloitte（“德勤”）泛指一家或多家德勤有限公司，以及其全球成员所网络和它们的关联机构（统称为“德勤组织”）。德勤有限公司（又称“德勤全球”）及其每一家成员所和它们的关联机构均为具有独立法律地位的法律实体，相互之间不因第三方而承担任何责任或约束对方。德勤有限公司及其每一家成员所和它们的关联机构仅对自身行为承担责任，而对相互的行为不承担任何法律责任。德勤有限公司并不向客户提供服务。请参阅[www.deloitte.com/cn/about](http://www.deloitte.com/cn/about)了解更多信息。

德勤亚太有限公司（一家担保责任有限公司，是境外设立有限责任公司的其中一种形式，成员以其所担保的金额为限对公司承担责任）是德勤有限公司的成员所。德勤亚太有限公司的每一家成员及其关联机构均为具有独立法律地位的法律实体，在亚太地区超过100个城市提供专业服务，包括奥克兰、曼谷、北京、班加罗尔、河内、香港、雅加达、吉隆坡、马尼拉、墨尔本、孟买、新德里、大阪、首尔、上海、新加坡、悉尼、台北和东京。

本通讯中所含内容乃一般性信息，任何德勤有限公司、其全球成员所网络或它们的关联机构并不因此构成提供任何专业建议或服务。在作出任何可能影响您的财务或业务的决策或采取任何相关行动前，您应咨询合资格的专业顾问。

我们并未对本通讯所含信息的准确性或完整性作出任何（明示或暗示）陈述、保证或承诺。任何德勤有限公司、其成员所、关联机构、员工或代理方均不对任何方因使用本通讯而直接或间接导致的任何损失或损害承担责任。

© 2026。欲了解更多信息，请联系德勤中国。



这是环保纸印刷品