

物理AI：将人机协作推向新高度

报告日期：2026 中文版整理：Wang Hua 英文原文：Capgemini Research Institute

谁应阅读本报告及其原因？

本报告旨在面向那些正在塑造其组织在机器人与自动化领域战略的高管。它探讨了物理AI如何变革机器人技术——从其所赋予的能力，到其释放的价值、采用的时间表，以及为安全有效地规模化部署必须克服的障碍。本报告尤其适用于技术和创新领导者（包括首席技术官、首席创新官、首席数字官，以及AI或机器人技术部门负责人），以及负责机器人战略和部署的制造、供应链和物流领域领导者。

随着机器人技术扩展到面向消费者和服务的环境——例如医疗保健、零售、酒店和娱乐业——本报告同样适用于首席产品官、产品策略师和体验设计领导者，他们正在塑造人与智能机器之间的交互方式。

此外，本报告为首席风险官及安全或监管领导者提供了实用指导，帮助他们为其组织更广泛的机器人技术采用做好准备——包括治理和风险监督方面的相关影响。

本报告基于一项涵盖15个行业、1,678位高管的全球调查，并辅以与行业专家、机器人制造商、基础模型初创公司、技术提供商、投资者和学术界的深入访谈。

更多详情，请参阅报告末尾的研究方法部分。

执行摘要

物理AI将AI从屏幕带向现实世界——使机器能够感知、推理和自主行动。本报告重点关注其在机器人技术中的应用，其中物理AI代表着一个根本性转变：从遵循固定、预编程路径的机器人，转变为能够跨任务泛化、感知和导航复杂环境、做出情境感知决策并适应现实世界变化的机器人。这使得机器人能够在远更多样化和动态的环境中运行，将其应用范围扩展到几乎所有主要行业，并解锁了早期自动化无法解决的问题。

“AI的过去十年是关于信息的。未来十年将关乎行动。”

Rebecca Yeung

Dexterity 战略顾问，前 FedEx 运营科学和先进技术企业副总裁

执行摘要 传统机器人技术与物理AI驱动的机器人技术：比较

比较维度	传统机器人技术	物理AI驱动的机器人技术
任务执行	只能以严格编程的方式执行装配；一旦出现与预设顺序的轻微偏差，就容易失败	能够自主适应装配过程中的变化，并通过动态调整每个独特产品来支持定制化装配
环境	只能在结构化*环境中运行	能够在非结构化环境中运行，包括此前未见过的情境
感知	感知能力有限，只能感知而不能解读	通过丰富的多模态感知（视觉、深度、触觉、音频）感知并解读复杂环境
决策与自主性	没有真正的自主性，遵循预编程指令	能够实时做出情境感知决策
学习	不进行持续学习；除非重新编程，否则行为保持静态	通过演示、仿真和经验学习，随时间推移提高性能，无需手动重新编程
任务范围	为单一、专门的任务而设计	可在单台机器人上处理多种场景，将已学技能推广到新任务和不熟悉的情境
集体学习	机器人独立运行，不共享知识	机器人机队共享技能和学习成果

比较维度	传统机器人技术	物理AI驱动的机器人技术
自然语言理解	需要精确的编码命令	理解自然语言指令

关键特性： 感知能力、适应性、自主性、学习能力、泛化能力、集体学习。 结构化环境： 布局、任务和条件可预测且一致的环境，允许机器人遵循固定路径和常规操作，变化极小。示例： 装配线、受控仓库通道。 非结构化环境： 多变且不可预测的环境，机器人必须适应变化和不确定性。示例： 零售场所、医院、农场、建筑工地。 关于物理AI、其在机器人技术中的应用以及指示性行业用例的更详细描述，请参阅附录。 来源： 凯捷研究院分析。

执行摘要

为了解物理AI对机器人技术的影响及其潜在解锁的价值，本报告基于一项涵盖15个行业、1,678位高管的全球调查，并辅以与物理AI和机器人生态系统专家的深入访谈（详情请参阅研究方法）。

物理AI正处于一个转折点

多模态基础模型正在通过实现跨任务和环境的泛化能力，重新定义机器人智能。这些进步使机器人能够适应不熟悉的情境，而无需针对特定任务进行重新编程，从而将其部署扩展到非结构化环境——即早期机器人系统无法处理的杂乱、动态的环境。与此同时，仿真的进步正在缩短机器人训练周期，而AI-机器人-数据飞轮正随着每次实际部署加速改进。结合传感器、执行器和电机等关键硬件组件成本的下降，以及机器人即服务（RaaS）等商业模式的兴起，这些变化正在降低采用门槛。同时，人口和经济压力——包括劳动力老龄化和持续的劳动力短缺——正加剧对能够承担越来越难以招聘人手的角色的机器人系统的需求。创纪录的风险投资涌入物理AI和机器人技术领域，进一步推动了这些转变。

跨多个维度的游戏规则改变者

物理AI标志着与早期自动化的显著不同。通过使机器人能够解读情境、实时适应并在非结构化环境中运行，物理AI将它们从被动工具提升为工作空间中的主动协作者——为重新构想的工作环境打开了大门，在这个环境中，人类、机器人和AI代理协同工作。同时，物理AI允许机器人技术作为共享智能平台进行扩展，学习和能力在部署中不断累积。通过这样做，物理AI将代理范式扩展到现实世界，使机器人能够充当具身AI代理，能够规划、编排和

执行摘要

执行复杂的物理任务。超过三分之二 (67%) 的高管认为它对其行业具有变革性意义，并且大多数高管相信它将成为竞争力的关键驱动力。

67% 的高管认为物理AI对其行业具有变革性意义

物理AI的价值是多方面的。高管们预计在生产力、效率和质量方面将获得最显著的提升，同时，随着自适应机器人帮助组织管理波动性和快速重新配置运营，运营韧性和灵活性也将增强。物理AI还通过让机器人承担危险和体力要求高的任务来改善工作场所安全并减少身体劳损。除了运营影响之外，物理AI正在开辟新的增长途径：近四成的高管预期会有新的收入机会，60% 的高管认为它将使机器人技术能够在以前不可能或不切实际的领域得到应用。高影响力的用例涵盖危险作业、微物流、拾取和放置以及现场

64% 的高管认为物理AI将成为竞争力的关键驱动力

检测，同时还包括特定行业的应用，如制造业的动态装配、公共部门的医疗保健和老年人护理，以及保险业的灾害损害评估。

执行摘要

采用物理AI的迫切性日益增长

物理AI的采用已全面展开：近八成（79%）的组织已经在参与其中，其中27%正在部署或扩展，65%预计将在五年内实现规模化。主要的催化剂是结构性的：劳动力短缺（74%）和劳动力成本上升（69%）。在短期内，增长将来自用于特定任务应用的、成熟且经过验证的形态。随着基础模型的成熟和各行业采用度的加深，可能会出现全新的机器人类别——为多样化环境、复杂任务和新型人机协作模式而专门设计。尽管有大量投资，人形机器人仍然是一个长期赌注，因为关键技术挑战——包括技术成熟度（可靠性和灵巧性）、安全性和成本-投资回报率可行性——仍需解决。

短期内，增长将来自用于特定任务应用的成熟形态；随着基础模型的成熟，可能会出现新的专用机器人类别

规模化物理AI超越技术范畴——还需要建立安全、网络安全、监管和运营就绪性

在实践中，规模化物理AI需要的不仅仅是更好的算法——它需要重新思考系统的设计、安全、治理和运行方式。当前的系统尚未达到工业和其他安全关键环境所需的高可靠性阈值，且灵巧性仍然有限。进展还因数据稀缺而放缓——现实世界的物理交互数据难以获得且成本高昂。为了在能力发展过程中保障人员和资产安全，必须通过独立于AI层的确定性机制来强制执行安全。

规模化物理AI超越技术范畴（续）

此外，随着机器人自主性的增长，网络安全风险敞口扩大，需要采取控制措施以防止未经授权的访问和操纵。监管框架落后于自主物理行动的现实，导致关于责任和可接受风险的问题仍未解决。在运营层面，企业必须为硬件限制、大规模机队管理、加强数据和AI治理以及员工再培训进行规划。

人形机器人激发了强大的行业信念——但规模化部署仍是长期赌注

三分之二的高管（67%）认为人形机器人最终将改变其行业，理由是它们能够在人类建造的环境中运行，并具有成为通用系统的潜力；53%的高管已经在投资或计划投资。然而，实现规模化部署的条件尚未具备。尽管78%的高管预计最终会规模化部署人形机器人，但平均时间跨度约为七年，只有30%认为人形机器人能在三到五年内成为可行的通用工人。技术不成熟、高成本、不确定的投资回报率和安全问题仍是重大障碍；此外，社会就绪度也存在缺口，62%的高管认为公众接受度是一个关键障碍。

67%的高管认为人形机器人最终将改变其行业

执行摘要

建议：释放物理AI潜力的行动

物理AI的采用是一个多年的过程，但该技术目前已足够成熟，能够交付切实的价值。

五项优先行动：

1. 建立理解：清晰了解物理AI当前的能力、局限性以及数据和基础设施要求。
2. 从建立信心的用例开始：从可行且有意义的的应用入手，例如枯燥、肮脏或危险的任务，以建立熟悉度和信心。
3. 通过形态探索进行设计：迭代多种设计方案，评估形态如何影响信任、交互以及在不同任务和环境中的适用性，而不是默认选择人形机器人。

4. 重新设计工作流程：为人机协作重新设计流程，明确交接、监督、安全和升级路径。
5. 通过平台进行扩展：为可复用的机器人技能和机队级编排创建可扩展的架构，以实现超越孤立试点的有序扩展。

这些行动必须以信任为基础——通过明确的安全、治理和人类监督保障措施——并随着技术、标准和法规的不断发展，通过与物理AI生态系统的持续互动来提供支持。

“物理AI标志着从描述世界的系统向能够在其中行动的系统的转变。但我们必须保持清醒。机器人技术有着长期过度承诺的历史，早期的突破创造了技术尚无法满足的期望。今天的不同之处不在于炒作，而在于AI、数据和工程成熟度的融合。机遇是真实的，前提是我们专注于在大规模下有效的方法，并超越那些在演示中令人印象深刻的东西。”

Pascal Brier

集团首席创新官，凯捷

物理AI驱动的机器人技术实践

物理AI机器人系统在几乎所有主要行业都有潜在应用。以下示例突显了这些应用在复杂、动态的现实世界环境中的情况。

仓储与物流

- **Ultra 与 Physical Intelligence**：总部位于美国的工业AI机器人公司 Ultra 已与开发通用机器人基础模型的美国初创公司 Physical Intelligence 合作，在真实仓库环境中运行的工业机器人上部署 PI 的 $\pi 0.6$ 模型。该模型用于电子商务订单打包。由于物品类型差异大、包装材料易变形且涉及多步骤操作，基于规则的系统往往会失效，这项任务历来难以自动化。PI 的机器人基础模型使 Ultra 的机器人能够实时感知、推理和适应。早期部署显示，Ultra 的机器人在现实世界自主性能方面取得了进步，展示了物理AI如何解锁以往被认为无法自动化的仓库任务。¹
- **FedEx 与 Dexterity**：FedEx 正与总部位于美国的机器人初创公司 Dexterity 合作，试点“超人形”机器人用于卡车装卸。这是物流业最复杂、体力要求最高的任务之一，因为包裹在尺寸、形状和重量上差异很大，并以不可预测的顺序到达。机器人自主解读传入的包裹组合，并将其堆叠成密集、稳定的墙体。借助 Dexterity 的 Foresight 世界模型，它们在毫秒内为每件物品评估数百种可能的放置位置，预测每种选择对堆叠完整性的影响。这使其能够快速处理不规则物品，同时在高吞吐量操作中提高产量并减少身体劳损。²⁻³

制造业

- **富士康与 Intrinsic**：富士康正与 Alphabet 旗下开发机器人AI模型和软件的公司 Intrinsic 合作，帮助实现未来智能工厂。该合作针对电子装配这一快速增长、但仍受刚性自动化和人工流程制约的行业，目标是从需要跨代产品进行大量重新工程的产品特定自动化，转向更通用的智能机器人。初期合作将利用 Intrinsic 的机器人基础模型，专注于装配、检测、机器看护和物流等关键用例。⁴

建筑业

建筑行业面临劳动力短缺以及对更高效、可持续建筑方法日益增长的需求，同时需要提高建筑质量和安全性。建筑工地由于地形、布局和人类活动不断变化，是自动化最具挑战性的环境之一。

- **FBR 的 Hadrian X**：澳大利亚机器人公司 FBR 的 Hadrian X 通过自动化建筑中最劳动密集型的任务之一——结构墙建造——来应对这些限制。Hadrian X 是一款自主移动建筑机器人，使用安装在车辆平台上的机械臂放置混凝土砌块。该机器人已在美国一个活跃建筑工地进行试点，并已证明能够在一天内建造结构承重墙。⁵
- **Boston Dynamics 与 FieldAI**：两家公司正在解决建筑环境中的另一个瓶颈：现场监测和检查。该合作将 Boston Dynamics 的四足机器人 Spot 与 FieldAI 的 Field 基础模型相结合，实现自主检查、测绘和监控。该解决方案已在多个地点部署，支持机队级自主和协调操作，并已实现检查和文档记录时间减少超过 90%、更早发现问题从而降低返工成本，以及提高工人安全性。⁶

农业

随着许多地区劳动力短缺加剧，自动化在农业中变得越来越关键。然而，农业环境高度可变——光照、地形和作物品种在田间差异很大——且行业依赖包括拖拉机、收割机和喷雾机在内的异构机队，因此扩展农业自动化仍然具有挑战性。TorqueAGI 是一家总部位于美国、为机器人自主性构建基础模型的初创公司，正通过物理信息AI基础模型应对这些限制。该模型能够处理茂密的树叶、不规则的植物几何形状和多模态感知，同时在不同机器上运行。TorqueAGI 正与 John Deere 合作，推进用于下一代智能农业机器人的AI基础模型。⁷⁻⁸

医疗保健/老年人护理

- **Wandercraft:** 总部位于法国和美国的机器人公司 Wandercraft 正在开发AI驱动的医疗外骨骼，使脊髓损伤、中风和其他严重行动障碍患者能够站立和行走。其最新设备——Personal Exoskeleton（个人外骨骼）——目前正在进行临床试验，设计用于日常室内和室外使用。该设备使用AI进行平衡和运动，在混凝土、地毯和瓷砖等不同表面上实时连续适应，以支持稳定行走。⁹
- **ElliQ:** 由 Intuition Robotics 开发的面向老年人的AI驱动伴侣机器人 ElliQ，正通过与日本贸易公司 Kanematsu Corp. 的合作引入日本。该合作针对日本快速老龄化的人口，以及由此导致的护理人员和养老院工作人员短缺问题。ElliQ 主动支持老年人的日常需求，包括健康管理、预防保健、沟通、监测以及社交和认知活动。¹⁰

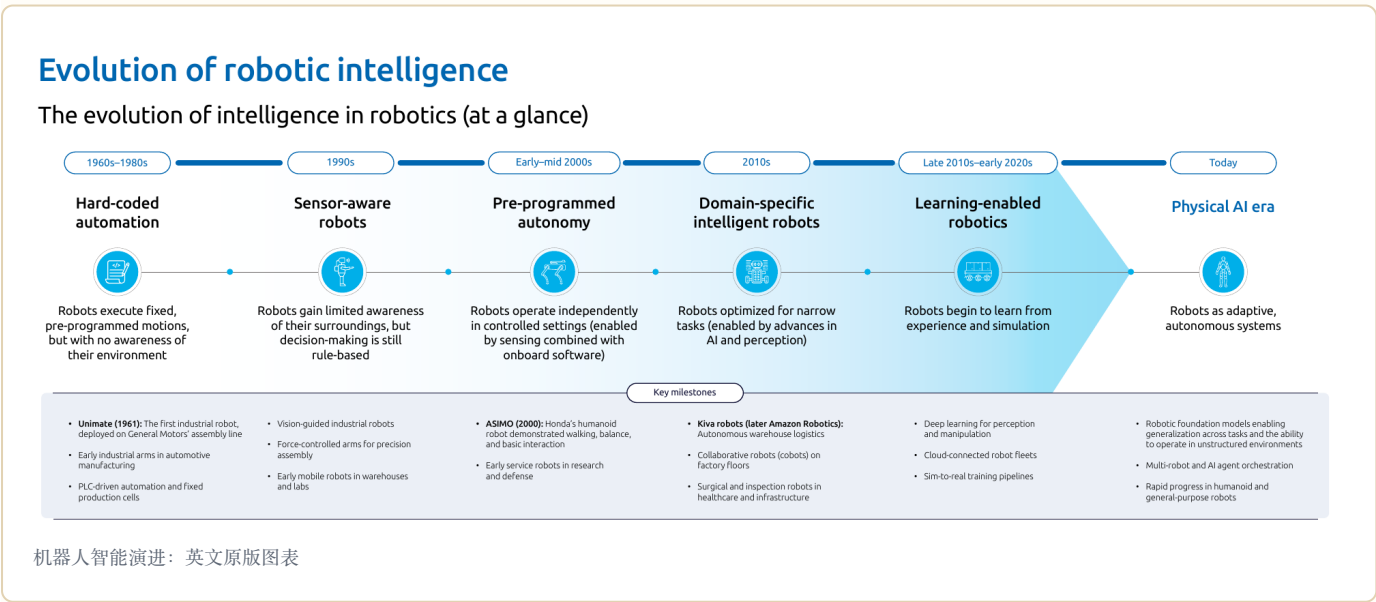
能源

总部位于美国的 Luminous Robotics 公司的AI驱动机器人帮助在 ENGIE 位于澳大利亚维多利亚州的 250 MW 太阳能农场安装了近 50 万块太阳能电池板。Luminous 的 LUMI 机器人使用AI驱动的拾取和放置系统，自主将电池板提起并放置到安装结构上，而人工团队完成最终紧固。这减少了繁重的体力劳动，提高了安全性和效率。机器人在各种天气条件下都表现出高度的灵活性。更广泛地说，自动化太阳能建设预计将降低成本、加快施工速度，从而支持更大规模的太阳能开发，同时减少在偏远和不宜人居的户外环境中对人工的需求。¹¹

来源：根据公开二手资料汇编的信息。

英国某大学的一位机器人学教授表示：“传统机器人被优化用于执行预定义运动，对意图或现实世界影响的理解有限。物理AI通过使机器人能够感知周围环境并推理情境，从根本上改变了这一点。通过这样做，它打开了数十年来一直抵制自动化的难题领域——恰恰是因为它们需要理解，而不仅仅是执行。”

机器人智能的演进



Milad Malekzadeh博士，德国机器人公司Neura Robotics联合创始人兼AI副总裁表示：“物理AI将几乎应用于所有类型的环境——从工业环境到医疗、家庭和服务环境。进展不仅由单个模型的进步驱动，而且越来越多地由平台方法驱动，这些方法使得在不同机器人和用例之间组合、复用和部署智能变得更加容易。”

哪些行业将率先受到物理AI的影响？

制造业和物流业既是短期内需求最大的行业（由劳动力短缺驱动），也是今天最容易解决的领域：许多任务依赖于运动能力和导航能力，这些已足够好；涉及刚性物体，可用简单的夹爪或吸盘处理；并且可以通过将机器人用围栏与人隔离，或在人员靠近时减速或降低扭矩来处理安全问题。精细、灵巧的操作仍然是一个长期挑战，但许多有意义的应用已经可以在今天部署。

代理范式如何转化到机器人的物理世界？

工业部署将越来越多地涉及具有不同形态的机器人机队，它们作为协调系统的一部分协同工作。在此模式下，每个机器人自主行动，而数字AI代理则观察跨机器人、传感器、摄像头和安全系统的活动，以建立情境感知并编排工作。这种编排由一个实时数字孪生——整个设施的物理精确虚拟副本——作为系统的“世界模型”来驱动。人类的角色从逐步编程转变为定义更高级别的目标和约束，例如在整个班次内需要完成什么。基于这些目标，数字AI代理使用数字孪生运行持续的“假设”模拟，允许它们在虚拟空间中规划、排序和协调机器人机队的任务，然后在物理世界中执行。这使得实时适应和更长周期的工作得以实现，并减少人工干预。

规模化物理AI的主要障碍是什么？

准确性是最重要的障碍，且所需的准确性水平因用例而异。某些应用可以容忍较低的准确性，而其他应用——如手术机器人——则需要极高的阈值。安全性也至关重要，同样取决于用例。它可以通过内置在机器人中的机制、外部安全系统（如地理围栏）或两者的组合来解决。成本和投资回报率对规模化至关重要。设计和用户体验也很重要，特别是对于消费级机器人。

信任和伦理考量应如何指导物理AI的部署？

信任始于安全性和准确性，并在特定用例的背景下进行评估。一旦达到这些阈值，下一个问题是部署是否真正对人类和社会有益。即使机器人安全、准确且具有成本效益，也可能存在因社会原因而不适合部署的情况。同时，当今许多应用涉及危险、单调或重复性的工作。最终，部署需要平衡这些考量。

“物理AI是AI雄心遇见原子的地方。AI现在与人类一起在物理世界中行动，用机器精度补充人类判断。机器预测风险，减少劳损，并解锁生产力和韧性的阶跃变化。但规模化不仅仅是代码。它是通过安全、网络安全、治理、法规遵从和劳动力转型来工程化信任。领导者将构建能在各站点累积的共享智能。成功将以更安全的工作、有韧性的绩效和新的竞争优势来源来衡量。”

Alexandre Embry

副总裁，CTIO，凯捷AI机器人与体验实验室负责人，凯捷

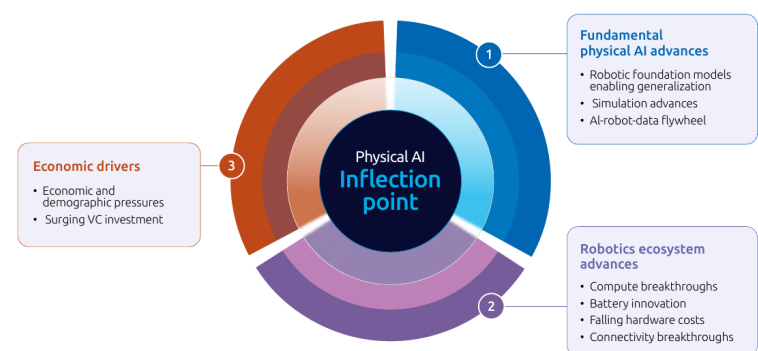
01 为什么物理AI正处于转折点

2026年，物理AI已成为全球科技叙事中的一个决定性主题，由多种力量的汇聚驱动（见图2）。部署已初具规模——尤其是在制造业和物流业——产生了现实世界的运营数据，这些数据正在推动快速迭代和技术进步。同时，市场力量也在汇聚，从劳动力短缺驱动的运营压力上升，到风险投资的激增，使得当前成为加速和规模化发展的关键时期。

图2. 驱动物理AI转折点的技术与市场力量汇聚

In 2026, physical AI has emerged as a defining theme in the global technology narrative, driven by a convergence of forces (see **Figure 2**). Deployments are already taking shape – particularly in manufacturing and logistics – generating real-world operational data that is fueling rapid iteration and technical progress. At the same time, market forces are converging, from rising operational pressures driven by labor shortages to surging venture investment, making this a pivotal moment for acceleration and scale.

Figure 2.
The converging technological and market forces driving the physical AI inflection point



Source: Capgemini Research Institute analysis.

图2：驱动物理AI转折点的技术与市场力量汇聚

基础物理AI进展

基础模型正在重新定义机器人智能

要使机器人在不可预测的现实世界环境中自主运行，它们需要对物理世界——其基础物理、动力学和因果结构——有更实质性的理解。历史上，机器人系统缺乏这种基础。早期的AI驱动方法，包括传统视觉系统，依赖于感知、规划和控制的分立组件，但缺乏一个统一的、可泛化的、具有物理意识的模型来整合它们。结果是产生了一套在现实世界条件下失效的脆弱架构。

现实世界的自主性需要更广泛的认知能力：解读复杂视觉场景、理解人类指令、为目标进行推理，以及预测行动的物理后果的能力。大型语言模型（LLMs）显著推进了推理和语义理解，但它们无法感知或建模物理世界。

一类新的多模态和物理感知AI模型正在出现，以弥合这一差距，并为机器人提供在复杂现实世界环境中运行所需的核心智能。

多模态基础模型

多模态基础模型是跨不同类型数据（包括图像、文本、音频、视频和触觉输入）训练的大规模AI系统，以增强情境理解并实现跨任务的更广泛泛化。从大型科技组织和机器人初创公司到构建领域特定模型的行业参与者，众多参与者都在开发这些基础模型。

视觉-语言-行动 (VLA) 模型

VLA模型将感知、语言理解和运动控制统一到一个单一架构中。通过在涵盖视觉输入、文本指令和行动轨迹的大规模数据集上训练，VLA模型正在展示出跨任务和环境的早期泛化能力，尽管可靠性仍然是一个活跃的研究挑战。例子包括NVIDIA的Isaac GROOT；Google DeepMind的Gemini Robotics模型，以及来自机器人初创公司（包括Physical Intelligence、Skild AI和TorqueAGI）的VLA模型。此外，开源AI平台Hugging Face正在开发LeRobot，这是一个开源库，提供即用型数据集、可复用的训练流程和预训练模型——包括VLA模型——以降低训练机器人的实际障碍。

世界模型

世界模型为机器人提供预测性的、物理感知的推理能力。这些系统学习物理世界的内部表征，使机器人能够预测结果、规划并推理物理交互。

例子包括由AI先驱Fei-Fei Li创立的世界实验室（World Labs），其已筹集超过10亿美元资金并开发了Marble世界模型；由AI先驱Yann LeCun联合创立的AMI Labs，其也已筹集超过10亿美元资金；以及Runway，一家以创意视频生成闻名的AI初创公司，现正

将其世界模型扩展到机器人领域。同时，NVIDIA的Cosmos平台提供了一个数据和训练流程，旨在支持世界模型出现后的开发和整合，说明更广泛的行业正围绕这一架构层汇聚。

Ashutosh Saxena博士，TorqueAGI创始人兼首席执行官，一家总部位于美国的机器人初创公司，表示：“一个单一的基础模型现在可以为许多机器人提供动力，实现真正的跨形态智能，而无需为每个任务、技能和机器人形态重建AI。开发工作跨机器人共享，模型随着从每次部署中学习而变得更强大。在未来五年内，这将减少对许多传统机器人单元的需求，因为机器人将能够在具有真实变异性和复杂性的环境中执行更广泛的任務。这是行业一直等待的解锁。”

机器人生态系统进展

仿真的进步正在压缩机器人训练周期

机器人现在可以在合成环境中大规模练习，在部署前快速迭代数百万种场景、边缘情况和故障模式，而不是主要通过缓慢、昂贵且风险高的物理试验进行学习。这极大地压缩了机器人的学习周期，并减少了对稀缺现实世界数据的依赖。虽然现实世界的训练和验证仍然必不可少，但仿真减少了对广泛物理试验的依赖，有助于降低成本并缩短开发周期。

例如，NVIDIA的Isaac Sim是一个机器人仿真应用和合成数据生成工具，允许开发者在基于物理的照片级真实虚拟环境中设计、测试和训练AI驱动的机器人。²⁰

AI-机器人-数据飞轮正在加速进步

一个增强的AI-机器人-数据飞轮现在正在出现，其中AI的改进提升了机器人性能，部署的机器人生成新的现实世界数据，而这些数据又为进一步的模型开发提供信息。尽管现实世界数据仍存在显著缺口，但这个飞轮正开始加速在物理AI中提升性能、泛化能力和可扩展性的进展。

Mind Robotics是电动汽车制造商Rivian分拆出来的工业机器人公司，它使用Rivian高生产运营中的数据来训练机器人，然后将其部署回Rivian的工厂，生成用于进一步优化的新数据——说明了数据飞轮在实践中如何形成。²¹

计算能力的突破使得实时边缘推理成为可能

物理AI系统需要强大的机载计算能力来处理实时感知、推理和行动。最近计算能力的进步正使这成为可能。例如，NVIDIA的Jetson AGX Thor模块、高通的Robotics RB5平台以及荷兰的Axelera AI的Metis AI平台，旨在将高性能AI处理带到边缘，使机器人能够在本地运行先进的AI模型。²² 同时，大型模型的训练以及机队级编排继续严重依赖云基础设施，使得混合边缘-云架构成为部署物理AI系统的标准方法。

电池创新正在提高机器人运行时间

在机载运行计算密集的AI模型对能源有很高的需求，使得电池性能对自主性至关重要。电池化学、封装以及热能和工程方面的进步正有助于缓解移动和人形机器人的运行时间限制。正在进行的固态电池研究旨在进一步提高能量性能

和安全性。例如，中国电动汽车制造商XPENG正在探索用于人形机器人的固态电池技术，以提高能量密度和安全性，并支持计算密集的机载AI任务。²³

硬件成本下降和新的商业模式正在拓宽机器人技术的可及性

关键硬件组件——特别是传感器、执行器和电机——成本的下降正使先进机器人技术在经济上更具可行性。例如，在过去十年中，人形机器人的生产成本已下降约30倍——从约300万美元降至约10万美元（低端和尖端型号差异很大），这由AI推理、执行器设计和电池系统的进步驱动。执行器是最大的成本组成部分，约占生产成本的50%。²⁴ 同时，机器人即服务（RaaS）和灵活租赁等新商业模式正使机器人技术无需大量前期资本即可获得。²⁵

连接性突破正在为机器人解锁实时自主性和空间感知能力

连接性的进步正在解锁机器人在现实世界环境中学习、导航和有效行动所需的边缘智能和空间感知能力。5G网络提供了可靠、低延迟、高带宽的连接，使机器人能够在边缘执行感知和控制，而精确的无线地理定位为它们提供了对物体和资产位置的准确、持续的理解——这是早期定位方法无法可靠提供的。无线定位创新的一例来自ZaiNar，一家总部位于美国的初创公司，其开发的技术可将现有的5G、Wi-Fi和其他无线网络转变为亚米级精度的传感层，无需新硬件或计算即可实现连续、实时的定位。²⁶

Daniel Jacker，ZaiNar首席执行官，表示：“关键的连接能力正同时成熟，以支持工业规模下的实时、空间感知自主性。私有5G现在提供了大型站点所需的可靠性、低延迟和覆盖范围，而无线定位的进步提供了厘米级精度和纳秒级时间同步——为机器人提供了对其环境的共享实时理解，为群体智能、机队优化和更自主的操作铺平了道路。”

经济驱动力

经济和人口压力正在加速采用

劳动力短缺是一个全球性挑战，因为人口老龄化使劳动力萎缩。在欧洲，65岁以上人口与工作年龄人口的比例预计将从2050年的每100人中有28人上升到43人。核心的25-54岁年龄组预计将减少3500万人，即使老年群体增长，劳动力也将减少约1000万人。在美国，随着人口持续老龄化，预计到2030年，五分之一的美国人将达到65岁或以上。²⁸ 中国的劳动年龄人口也在迅速下降，到2035年，超过30%的人口将年满65岁或以上。²⁹ 同时，随着雇主争夺工人，主要经济体的劳动力成本持续上升。这些人口和经济因素的结合正在强化自动化的商业案例。

风险投资激增推动物理AI和机器人技术进步

机器人技术的风险投资在2025年创下历史新高，机器人公司筹集了创纪录的407亿美元，占总风险投资资金的9%，使该行业与AI软件并列成为领先的投资类别之一。仅世界模型的投资就从2024年的14亿美元飙升至2025年的69亿美元。此外，主要的人形机器人初创公司获得了该行业一些最大规模的融资轮次，包括Figure（15亿美元）、1x Technologies（10亿美元）、Apptронik（7.34亿美元）、Agility Robotics（4亿美元）和Neura Robotics（1.24亿美元），表明投资者对通用具身AI的强烈信心。³¹

世界模型的投资激增

2024年 14亿美元

2025年 69亿美元

“物理AI和下一代机器人技术将像生成式和代理式AI正在改变数字工作一样，改变体力劳动的世界。我们正处于临界点，那些尽早建立能力并着眼长远的组织将建立可持续的优势。这不仅仅关乎商业效率，这场颠覆中的赢家将建立新的业务和价值流。”

Tim Ensor

执行副总裁兼总经理 - 智能服务，Cambridge Consultants，凯捷Invent旗下

与以下专家的讨论

Daniela Rus,

主任，计算机科学与人工智能实验室 (CSAIL)，麻省理工学院

物理AI与传统AI有何不同？

当今的AI在数字领域表现出色，但在物理领域则不那么有效。支撑它的技术是统计性的，默认情况下对物理没有理解。当AI理解文本、图像和其他在线信息的能力与对物理世界的理解相结合，并用于使物理机器变得智能时，就产生了物理AI。这对机器人技

术具有重大意义。而且，由于许多物理和安全关键设备需要以低延迟在设备上运行AI，物理AI需要不同于为数字世界构建的模型那种类型的AI。

物理AI将对哪些行业产生最大影响？

仓储和物流行业是当今从物理AI中获得最大收益的领域，物理AI让机器人处理远更动态的任务分配并做出更好的预测，实现真正自主的货物移动。制造业是下一个重大机遇：传统的工业自动化是为大批量、低变异性任务而构建的，因此它适用于汽车等行业，但在电子产品制造等领域则不太适用，因为这些领域的产品周期不断变化。有了物理AI，我们可以开始设想即插即用的单元，只需通过几次演示就能学习新的装配流程，为自动化在制造业内更多领域的广泛应用打开了大门。

建筑和野外机器人技术是物理AI的其他强大领域。这些环境混乱，有杂物、灰尘和恶劣天气，物理AI可以通过为机器人提供鲁棒的3D感知、对材料和负载更好的理解以及自适应控制，真正发挥作用，使它们能够承担安全关键任务，支持现场测绘，并更有效地与人工团队协作。

农业是另一个强大的领域：以节能、耐候的方式在设备上运行AI可以实现精准作物监测、疾病和杂草分析，以及水果采摘和修剪等精细任务——这些工作体力要求高且人体工学上困难。

物理AI还可以扩展到服务机器人、老年人护理、采矿和医院机器人。底线是，物理AI是一种真正的颠覆性技术，它克服了当今预编程机器人的脆弱性，使它们能够在条件变化时适应，并学习可以独立于情境执行的技能。

构建值得信赖的物理AI系统需要什么？

信任来自于可以安全使用的技术。这意味着要在多个层面考虑安全——通过可验证的控制器、可靠的感知和可靠的适应。但技术设计只是其中的一部分。与机器人并肩工作的人类需要时间和经验来适应机器能做什么，这就是为什么逐步增加系统能力的渐进式部署有助于建立信心。目标是实现安全设计，增强这一点的方法之一是指定人类对机器人的明确权威：易于操作的紧急停止按钮、直观的监督界面，以及在事情看起来不对劲时易于干预的流程。

当前阻碍物理AI的技术和实践障碍是什么？

最困难的挑战之一是确保长尾情况下的可靠性——机器人在物理环境中可能遇到的所有意外现实世界情况。在安全关键环境中，千分之一的故障可能是灾难性的，因此鲁棒性至关重要。数据是另一个主要障碍：为物理任务收集丰富标注的安全关键数据是缓慢、昂贵且危险的，而对学习最重要的近事故情况最难安全捕获。这就是仿真变得重要的地方，因为它允许我们生成那些罕见的边缘情况而没有物理风险。硬件仍然是一个限制因素：即使处理器和传感器正在迅速改进，复杂机器人的故障修复时间可能比软件修复长得多。最后，成功部署需要将机器人整合到人类工作流程中——这意味着要考虑法规、培训、IT集成和日常协作——所有这些都远非易事。

我们距离在现实世界中部署人形机器人还有多远？

虽然运动能力已经取得进展，但操作仍然非常具有挑战性。手部仍然相当原始，触觉传感粗糙，需要动态稳定性或响应外力的任务对当前系统来说很困难。从长远来看，人形形态的吸引力很强，因为我们的工作场所是围绕人类的移动和互动方式设计的。但让人形机器人为复杂的现实世界任务做好准备还需要一些时间。

02 物理AI是行业的游戏规则改变者

物理AI将机器人从工具转变为协作者

物理AI代表了与之前自动化浪潮的显著不同。通过使机器人能够解读情境、学习、适应并在非结构化的现实世界环境中运行，物理AI为各行业提供了一条解决其最复杂和持久运营挑战的途径——这些挑战长期以来一直超出传统机器人技术和自动化的能力范围。但其影响远不止于克服当前的限制。自适应、情境感知的机器人为一个新的工业范式奠定了基础：一个机器人从工具演变为协作者的范式，使得不再仅仅是优化现有流程，而是重新构想工作的设计、协调和执行方式，让人类、AI代理和机器人以全新的方式协同工作。

从特定任务机器人到共享智能平台

此外，物理AI通过将智能与机器人硬件分离，并将其置于共享模型和数据中，实现了机器人技术从特定任务机器人向共享智能平台的转变。学习转移到系统层面——跨机队——而不是局限于单个机器人。随着这种共享智能通过数据、仿真和现实世界反馈得到改进，在一个情境中开发的能力可以以远更低的边际成本在其他地方复用。这种从孤立改进到累积学习的转变从根本上改变了自动化的扩展方式，使组织能够建立一个可以持续改进并在整个业务中复用的共享智能基础，而不是依赖一次性的部署。

行业情绪强调物理AI的变革潜力

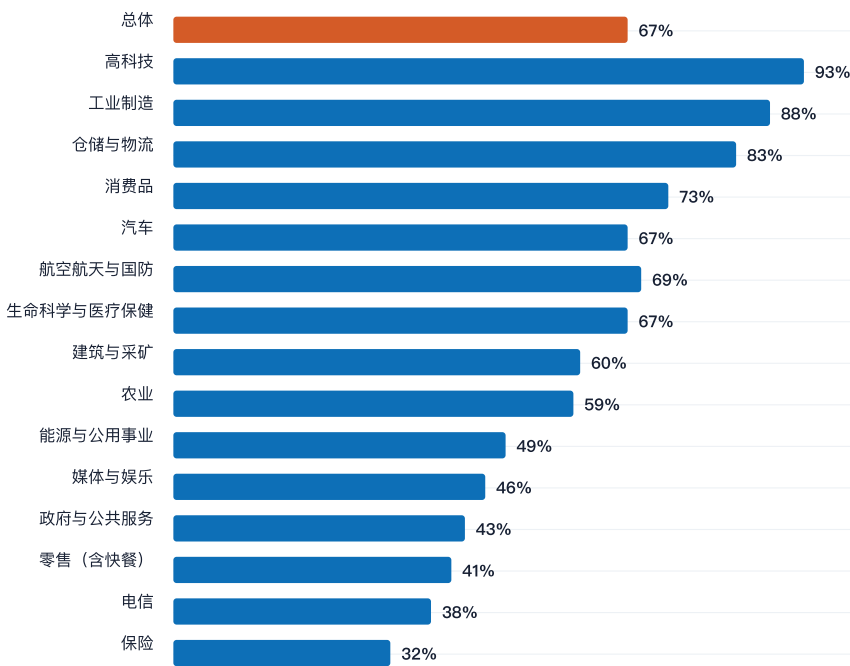
三分之二 (67%) 的高管认为物理AI具有颠覆性。这种观点遍及多个行业（见图3），并在全球范围内得到认同，美国 (73%)、欧洲 (64%) 和亚太地区 (67%) 的大多数高管都表示同意（见图4）。总体而言，近三分之二 (64%) 的高管认为物理AI将成为其行业竞争力的关键驱动力，预示着这将重新定义各行业绩效的转变。

图5展示了物理AI如何推动各行业的转型。工业和物流环境正在成为物理AI的首个试验场，因为它们结合了强大的经济压力和相对结构化的任务、可重复的工作流程以及清晰的绩效指标——使其非常适合早期部署和扩展。随后，采用预计将扩展到建筑、采矿和农业等领域，这些领域的环境控制较少，适应性变得更加重要。随着能力的进一步成熟，增长将越来越多地扩展到面向服务的领域，其特点是更密切的人际互动和高度动态的运营条件。

图3. 三分之二的高管预期物理AI将具有颠覆性

图3：各行业高管普遍认为物理AI将带来变革

认为物理AI将改变所在行业的受访高管比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

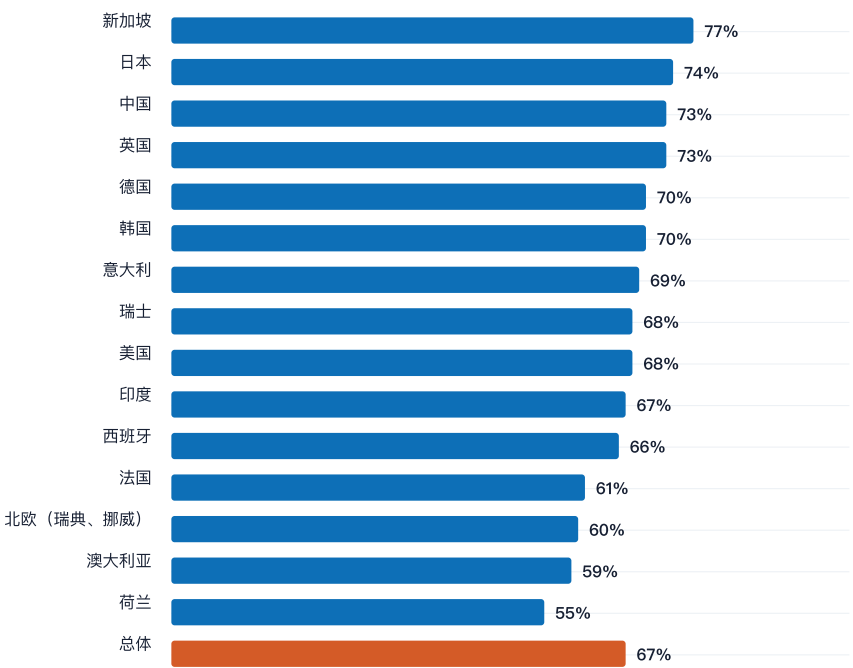
图3：物理AI颠覆性影响

图4. 大多数国家的高管认为物理AI具有颠覆性

物理AI将对我的行业具有颠覆性 按国家划分的赞同受访者百分比

图4：不同国家对物理AI变革性的判断

认为物理AI将改变所在行业的受访高管比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图4：各国高管对物理AI颠覆性的判断

图5. 物理AI为何在各行业具有变革性

图5：物理AI为何能在各行业带来变革

行业核心挑战与物理AI带来的变化

行业	核心行业挑战	物理AI带来的变化
制造业	劳动力短缺；高混合低批量生产；产线频繁重构；人工和半自动流程导致	机器人适应变化中的产品、任务和布局，减少换线时间，稳定质量并缓解劳动力约束
物流与仓储	需求波动、劳动力短缺、安全风险、SKU多样且形状不规则	机器人感知杂乱环境并处理多样SKU，提升拣选和履约能力
建筑与采矿	环境动态且非结构化；危险任务；技能劳动力短缺；返工造成生产率损失	自动化劳动密集型任务，提升安全性，加快检测并减少返工
农业	劳动力短缺、户外环境恶劣、地形不平、天气变化和作物差异	在非结构化户外环境中执行农业任务，降低人员暴露风险并适应作物和地形变化
能源	高风险操作、重体力劳动、可再生能源扩张压力、难以抵达的资产	将危险工作交给自主机器人，并对复杂地形中的远程资产进行检查
医疗与养老	人员短缺、重复性体力任务、护理需求增长	部署能够适应不同护理任务和环境的辅助机器人

来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图5：物理AI在各行业的变革性

物理AI具有多维价值

生产力、效率和质量是最受期待的收益

在物理AI带来的预期改进中，高管们最常提及生产力提升 (76%)，其次是成本效率提升 (70%) 以及产品质量和精度提升 (65%)（见图6）。

虽然早期世代的机器人在严格控制的环境中提供了这些好处，但物理AI将它们扩展到更动态的环境：

- 生产力提高，因为机器人可以承担更广泛的任務，以更少的中断保持更高的运行时间，而跨机队的学习和协调提升了整体系统性能。
- 成本在工程、运营、培训和质量方面下降：通过减少特定任务重编程降低工程投入；通过减少人工监督降低运营成本；培训和技能提升成本降低；错误和返工减少。质量提高，因为机器人即使在输入变化时也能保持精度，执行更广泛任务，同时避免了影响人工工作的疲劳相关错误和变异性。

Julien Perrin，法国机器人初创公司Niryo首席运营官，表示：“物理AI正在开辟以前不经济的自动化机会。通过将智能转移到软件中，物理AI允许我们为以前需要复杂昂贵机器的任务使用更简单、更具成本效益的硬件。它还大大减少了集成和设置时间：不再是工程师花费数小时或数天，生产线上的人员可以在几分钟内配置系统。这种智能驱动的转变降低了自动化的总成本，并使工厂内全新的领域对机器人技术变得可行。”

物理AI提升运营韧性和灵活性

超过半数的高管 (57%) 预期其将增强运营韧性。另有 45% 的高管强调灵活性是关键优势，指出相较于传统机器人技术或固定自动化，能够更快速地重新配置生产系统或工作流程的潜力。

物理AI解锁新产品、体验和业务线

虽然运营收益目前领先，但物理AI也提供了显著的收入增长潜力。组织可以开始设想基于物理AI驱动的机器人系统的全新产品、服务和业务线。

例如：

- 汽车制造商可以通过扩展为电动汽车和自动驾驶汽车开发的能力（如电池、传感器、实时决策系统和大规模制造）来建立专门的机器人业务线。例如，特斯拉正将人形机器人作为其更广泛商业战略的一部分进行探索。³²
- 工业制造商可以为建筑、物流和能源等行业设计专门的机器人解决方案。
- 旅游、休闲和娱乐组织可以提供新的服务体验，例如机器人礼宾或宾客互动系统。例如，迪士尼为其主题公园开发了一种新的机器人形象，可以自主移动并与游客互动。³³

近四成 (37%) 的高管已经看到了这一上升潜力，预期物理AI将创造新的收入机会。

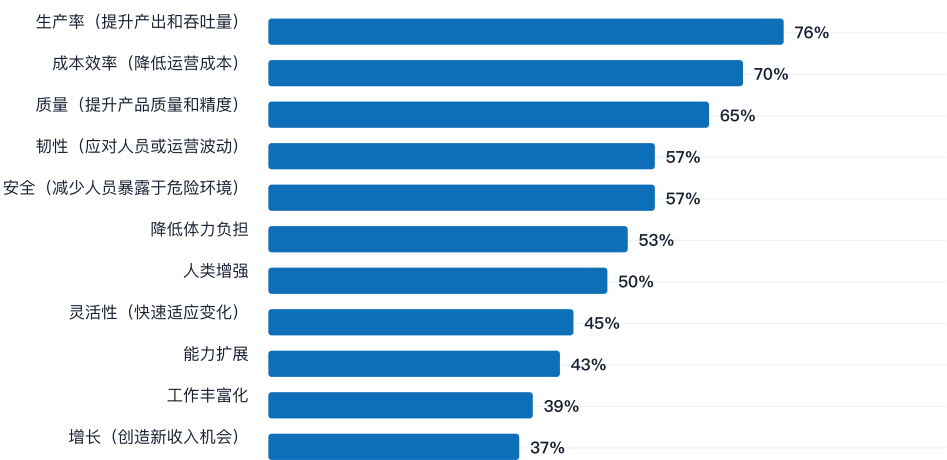
37% 的高管预期物理AI将创造新的收入机会

图6. 物理AI的价值超越运营绩效

如果采用物理AI，您的组织能获得哪些商业价值？ 将每项收益评为高价值的受访者百分比

图6：物理AI的价值超越运营绩效

认为各项商业收益具有高价值的受访高管比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图6：物理AI的商业价值

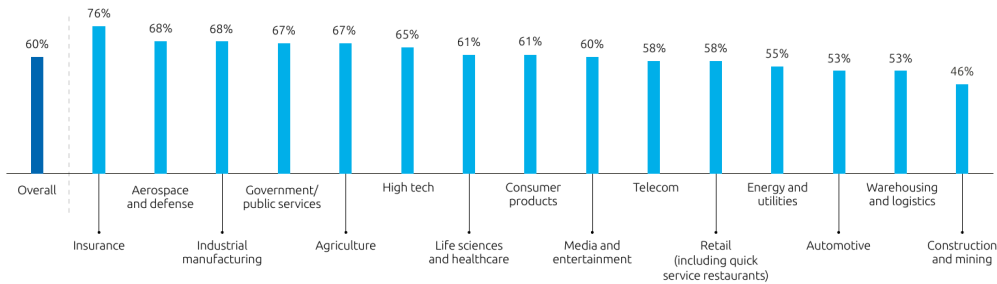
60% 的高管认为物理AI将解锁在以前不可能或不切实际领域的机器人技术采用

图7. 物理AI将机器人技术推向超越以往的可能性

物理AI将解锁在以前不可能或不切实际领域的机器人技术采用（例如，非结构化环境、情境依赖型任务、自主适应） 按行业划分的赞同受访者百分比

Figure 7.
Physical AI pushes robotics beyond previous possibilities

Physical AI will unlock robotics adoption in previously impossible or impractical areas (e.g., unstructured environments, context-dependent tasks, autonomous adaptation)
Percentage of respondents who agree – by industry



Source: Capgemini Research Institute, Physical AI for robotics survey, January–February 2026, N = 1,678 executives.

图7：物理AI拓展机器人应用边界

最高影响力的用例包括危险作业、微物流、拾取和放置以及现场检测——同时还包括特定行业的应用，如动态装配和老年人护理。图8突出了具有广泛跨行业相关性的关键物理AI用例，以及在个别行业中具有强大潜力的用例。完整的用例影响评级请参见图9。

图8. 具有高潜在影响力的关键物理AI用例

Highest-impact use cases include hazardous ops, micro-logistics, pick-and-place, and field inspection – alongside sector-specific applications such as dynamic assembly and eldercare

Figure 8 highlights key physical AI use cases with broad cross sector relevance, as well as those with strong potential within individual industries. For the full set of use-case impact ratings, see Figure 9.

Figure 8.
Key physical AI use cases with high potential impact

Use cases	Description	Illustrative example
Broad-based use cases with high potential impact (applications viewed as impactful across industries)		
Hazardous environment operations	Robots performing tasks in conditions unsafe for humans	A robot inspecting tanks in a chemical facility
Field inspection	Robots assessing equipment or environments in dispersed locations	A mobile robot scanning wind turbines for structural issues
Micro-logistics	Small-scale, point-to-point movement of items within a site	An autonomous robot transporting medication or samples along busy hospital corridors, negotiating patients, staff, and sudden obstructions
Adaptive pick-and-place	Robots that can identify, grasp, and place varied objects	A vision-guided arm sorting mixed packages on a conveyor
Dynamic facilities management	Autonomous robots monitoring and responding to facility conditions in real time	A mobile sanitation robot operating in a busy airport terminal and negotiating unpredictable obstacles

Sources: Capgemini Research Institute analysis.

Continued on next page

图8（上）：高影响力物理AI用例

来源：凯捷研究院分析。

Use cases	Description	Illustrative example
Sector-specific use cases with high potential impact (applications viewed as impactful within individual sectors)		
Manufacturing: Dynamic product assembly	Robots assembling a range of product variants	An arm switching from assembling EV battery modules to powertrain parts
Government: Healthcare and eldercare	Assistive robots supporting mobility, care routines, or monitoring	An assistive robot guiding an older adult through daily routines, while adjusting to sudden movements and restricted posture
Insurance: Disaster response and disaster damage assessment	Automated on-site or aerial evaluation of damage post-event	A robot navigating debris, exposed wiring, gas leaks, and unstable foundations to document structural damage following a natural disaster
Construction and mining: Robotic surveying and mapping	Robots creating precise maps of large or complex sites	An autonomous robot navigating a construction site and capturing changes in ground conditions and partially built structures in real time
Agriculture: Precision crop care	Robots applying treatment only where needed based on real-time sensing	A robot identifying and spraying pest-affected rows
Media and entertainment: Intelligent lighting and effects	Automated systems generating dynamic visuals or movements	A robotic rig adjusting lighting cues live during a performance

Sources: Capgemini Research Institute analysis.

图8（下）：行业特定高影响力用例

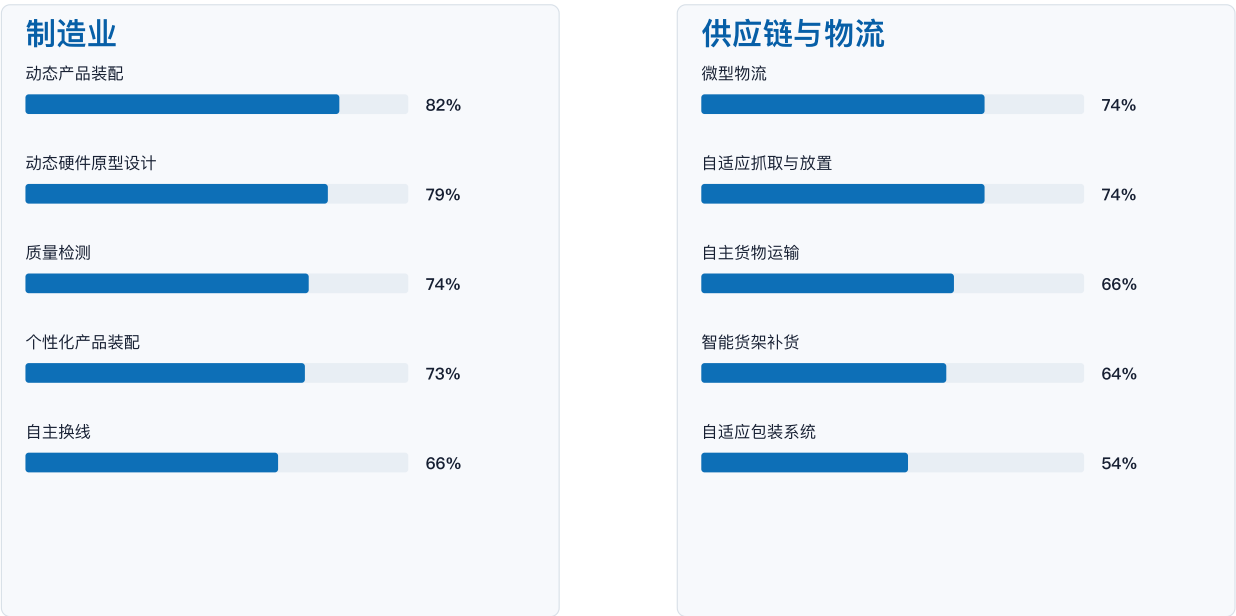
图9. 物理AI用例及其影响

将每个用例评为高影响力的高管百分比供应链与物流

来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。注：并非所有用例都得到了所有受访者的评价。有关用例的更多详情，请参阅附录。

图9：物理AI用例及其影响

认为用例具有高影响力的高管比例



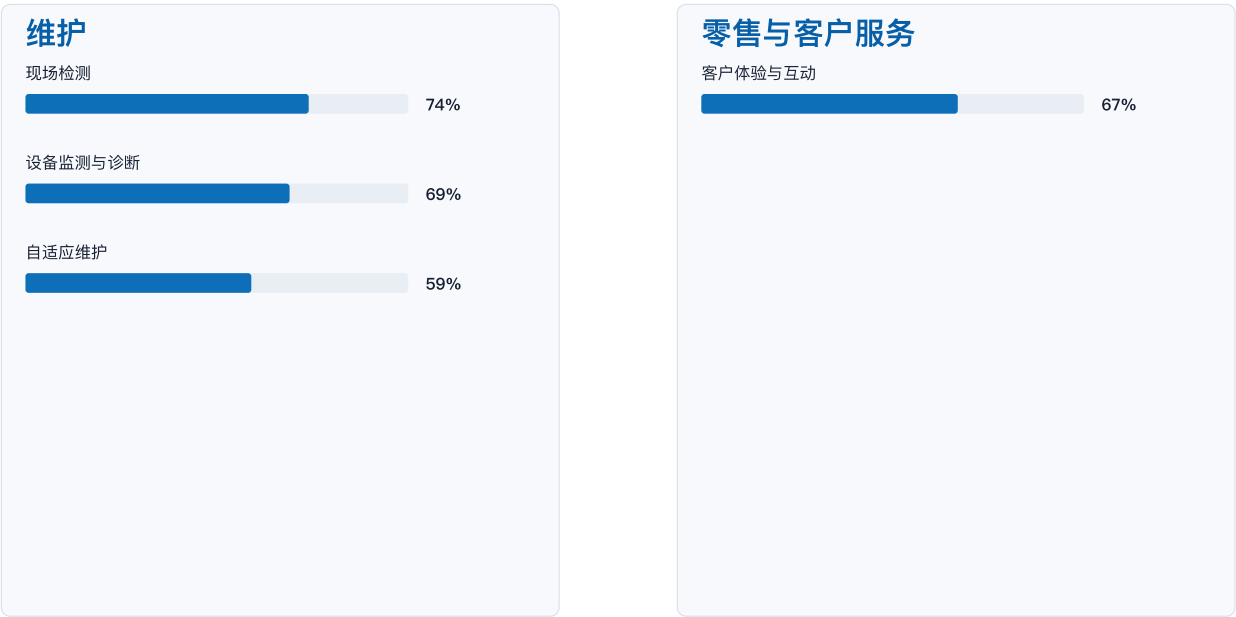
来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey, 2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图9（供应链与物流）：物理AI用例及其影响

将每个用例评为高影响力的高管百分比零售与客户服务

图9：物理AI用例及其影响

认为用例具有高影响力的高管比例



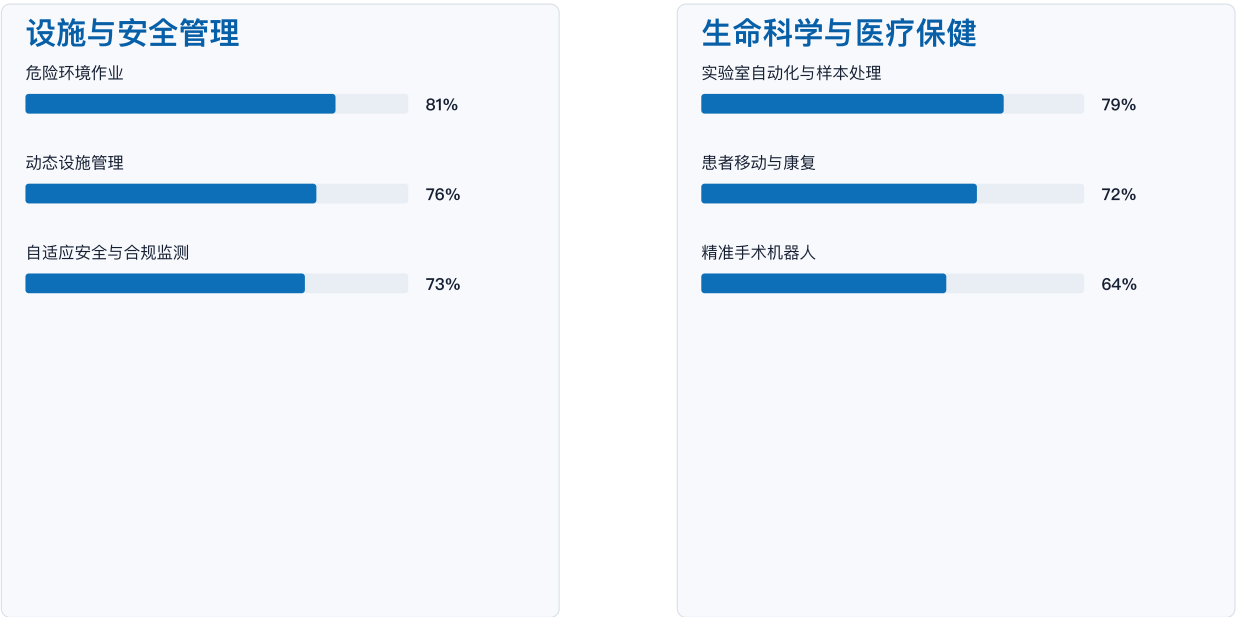
来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图9（零售与客户服务）：物理AI用例及其影响

将每个用例评为高影响力的高管百分比

图9：物理AI用例及其影响

认为用例具有高影响力的高管比例



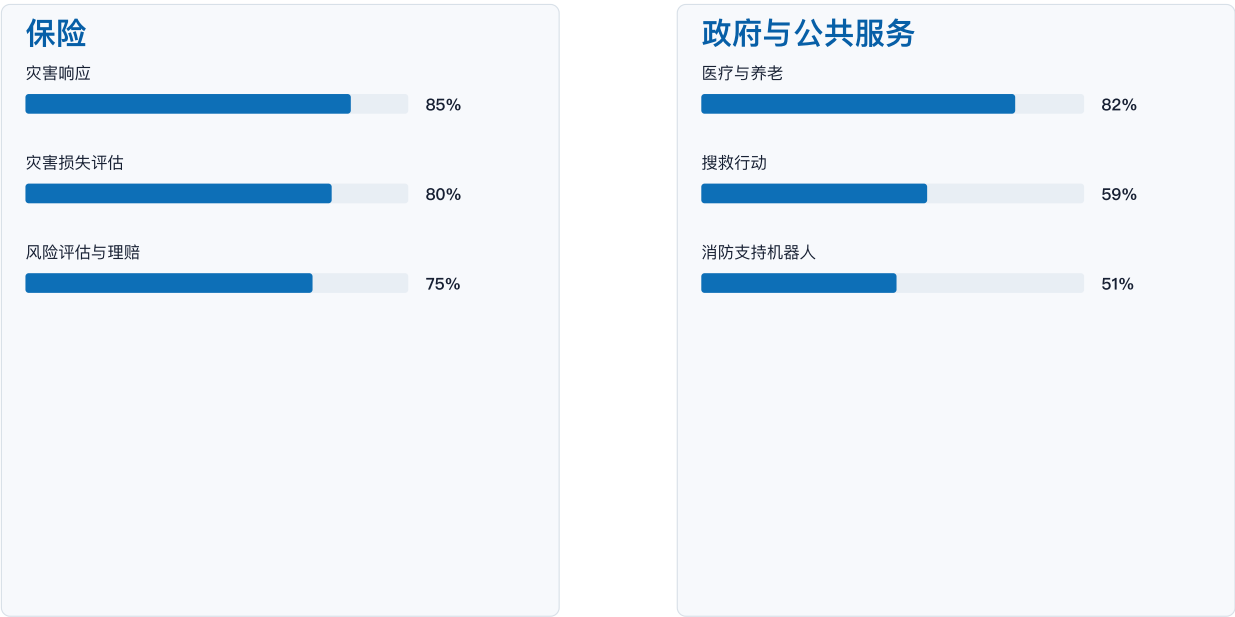
来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图9（设施与安全管理、生命科学与医疗保健）：物理AI用例及其影响

将每个用例评为高影响力的高管百分比政府/公共服务

图9：物理AI用例及其影响

认为用例具有高影响力的高管比例



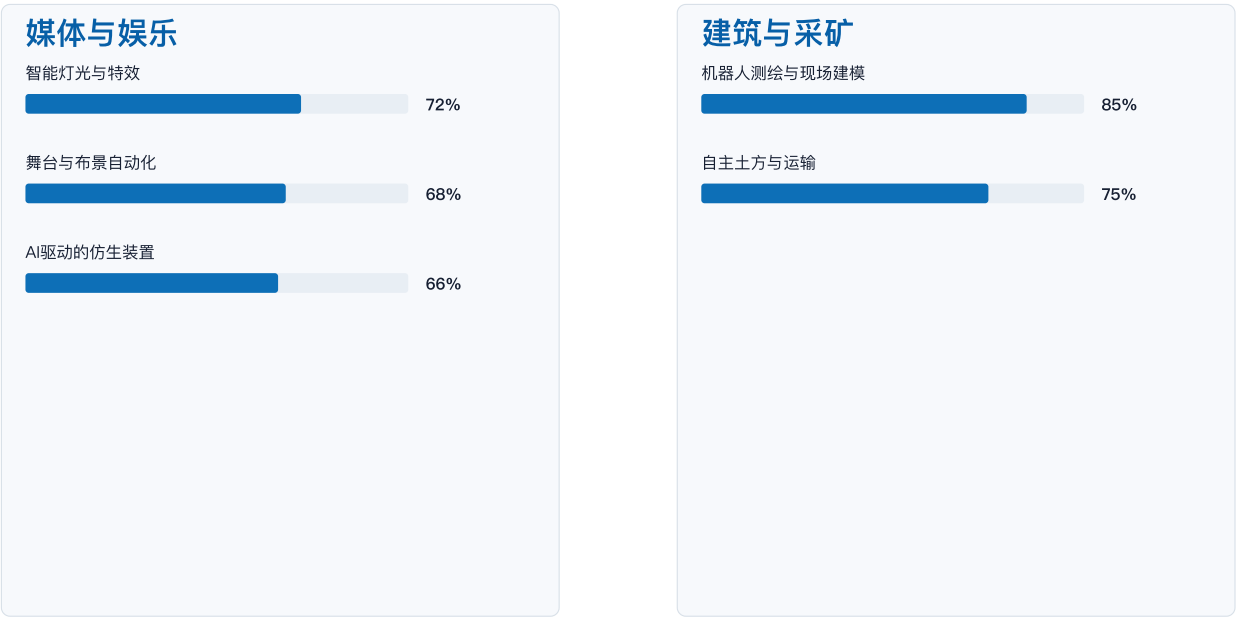
来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图9（保险与政府/公共服务）：物理AI用例及其影响

将每个用例评为高影响力的高管百分比建筑与采矿

图9：物理AI用例及其影响

认为用例具有高影响力的高管比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

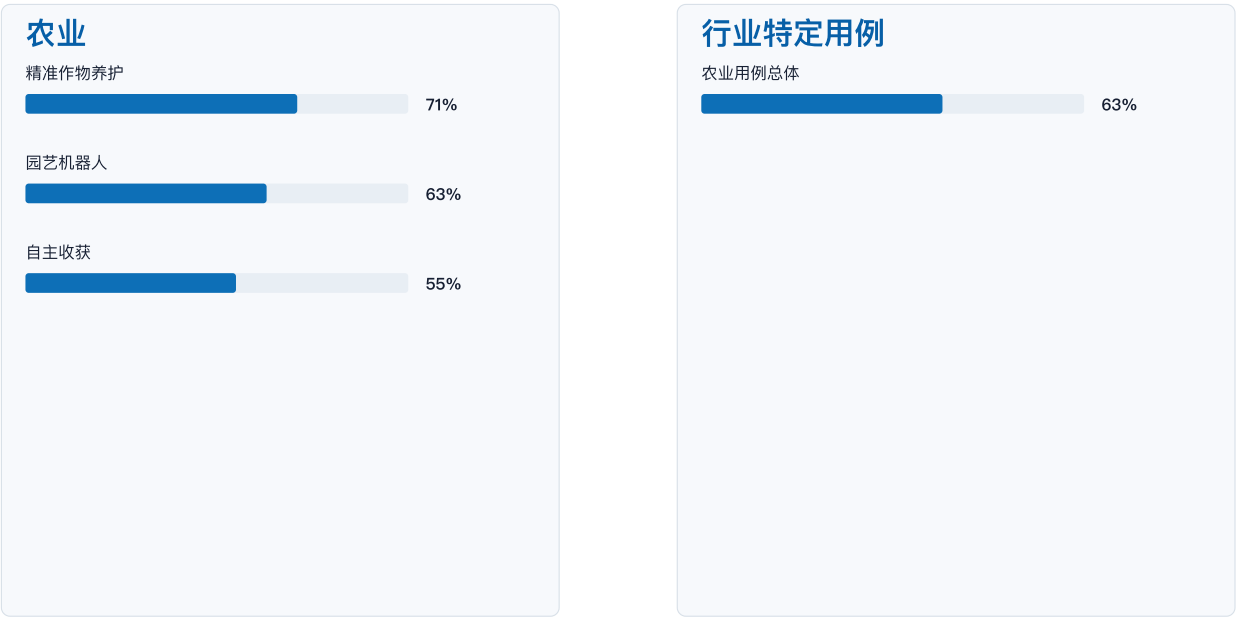
图9（媒体与娱乐、建筑与采矿）：物理AI用例及其影响

将每个用例评为高影响力的高管百分比

来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。注：并非所有用例都得到了所有受访者的评价。有关用例的更多详情，请参阅附录。

图9：物理AI用例及其影响

认为用例具有高影响力的高管比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图9（农业）：物理AI用例及其影响

“未来的工作和人类体验将是人、代理和机器人无缝协作的编排，以放大人类潜力。物理AI承担需要物理存在和实时判断的工作，特别是劳动密集型或无人值守的任务。它为人类的创造力创造了空间，并通过机器精度加以放大。”

John Robins

frog物理AI负责人，凯捷Invent旗下

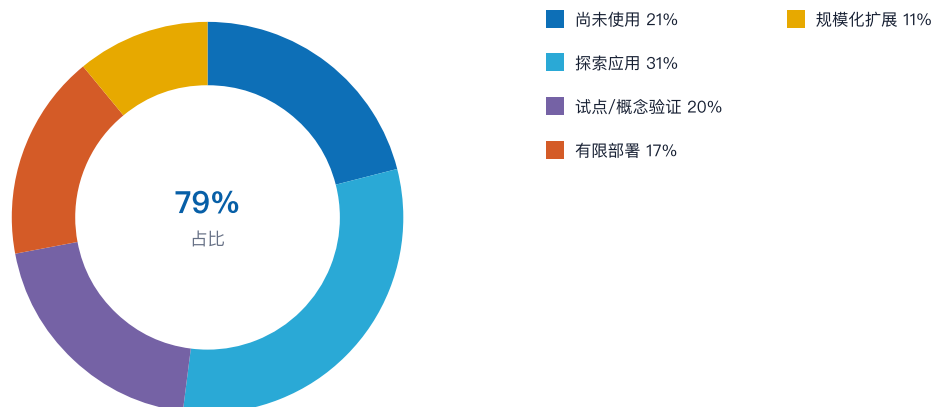
03 采用物理AI的迫切性日益增长

组织正从早期探索转向部署

近八成 (79%) 的组织正在参与物理AI，其中31%处于探索阶段，20%处于试点阶段，27%已在部署或扩展解决方案。势头明显正从实验转向现实世界的实施（见图10）。

图10：组织正在从探索走向部署

组织当前的物理AI采用阶段



79%的组织已经参与物理AI。

图10：组织从早期探索转向部署

79% 的组织已经参与物理AI

图10. 大多数组织已经参与物理AI

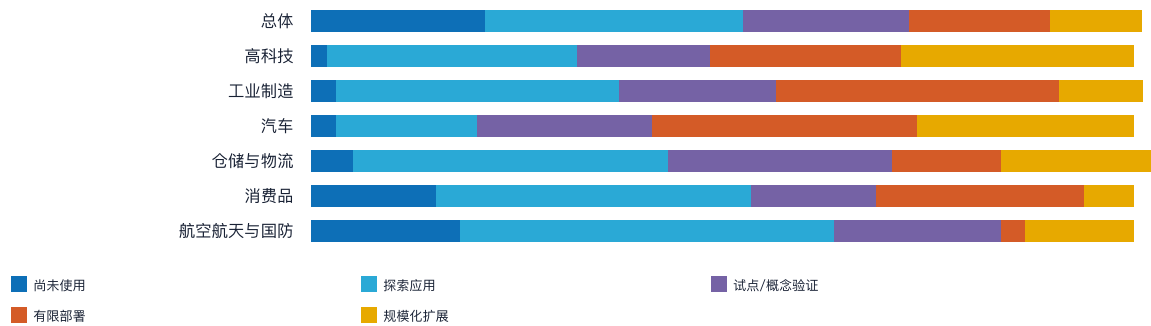
来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。

图11. 自动化密集型行业引领物理AI采用，但参与度正在扩大

以下哪项最能描述您的组织当前在物理AI方面的采用阶段？（按行业）来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。注：术语“物理AI”在此仅用于机器人技术背景。

图11（上）：各行业物理AI采用阶段

各阶段占比；每一行合计约为100%



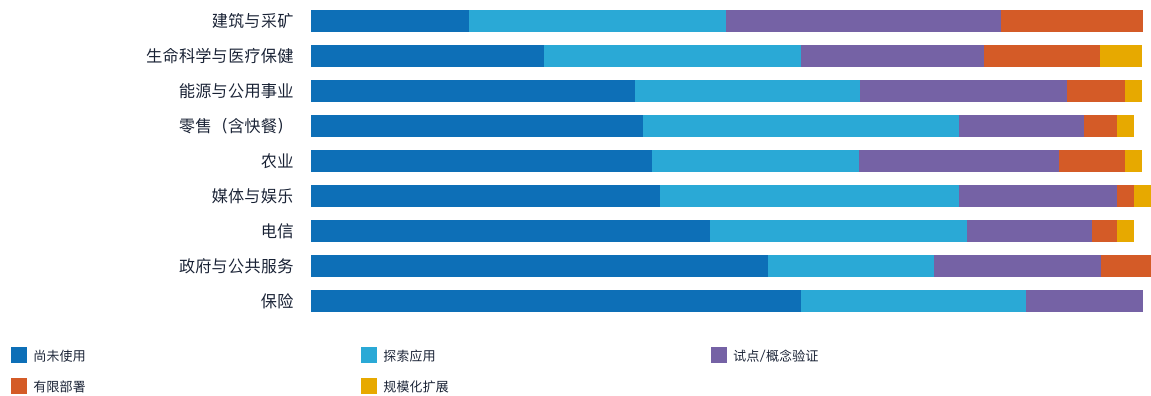
来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图11（上）：各行业物理AI采用阶段

来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。注：术语“物理AI”在此仅用于机器人技术背景。

图11（下）：各行业物理AI采用阶段

各阶段占比；每一行合计约为100%



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图11（下）：各行业物理AI采用阶段

运营压力正在加速采用

虽然部署水平因运营条件和既有自动化基础而异，但所有主要行业都表现出浓厚兴趣：

- 拥有成熟机器人基础设施的行业，如汽车、工业制造和物流，其部署和扩展水平显著更高（见图11）。
- 生命科学、航空航天和建筑行业显示出较强的探索和试点活动，但部署更为谨慎（16-19%对比总体27%）；这些行业通常在严格的安全和监管要求下运营，这可能减缓从试点到部署的进程。
- 即使是历史上机器人技术采用有限的行业，如公共服务、媒体娱乐和保险业，也正在探索和试点物理AI。

高管们最常将劳动力短缺（74%）和劳动力成本上升（69%）列为投资物理AI的首要驱动因素。竞争压力（63%）和安全期望（59%）也占据突出位置（见图12）。

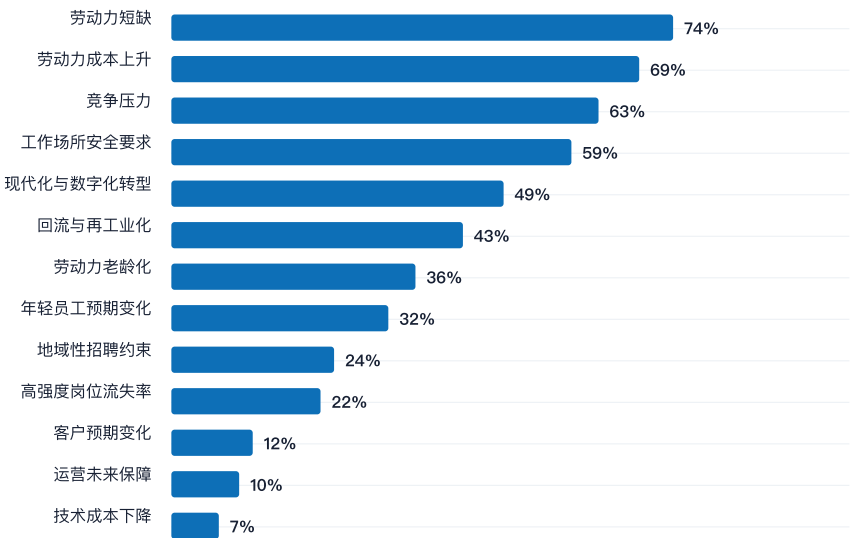
74% 的高管将劳动力短缺列为投资物理AI的首要驱动因素

图12. 劳动力压力是物理AI采用的主要驱动因素

来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。注：术语“物理AI”在此仅用于机器人技术背景。

图12：劳动力压力是采用物理AI的主要驱动因素

选入前五项驱动因素的受访高管比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图12：劳动力压力是主要采用驱动因素

再工业化是物理AI采用的催化剂

随着政府和企业应对供应链脆弱性，再工业化在美国和欧洲正获得动力。但恢复制造业的努力受到劳动力稀缺的制约。根据美国劳工统计局的数据，美国目前有近50万个制造业岗位空缺。³⁴ 欧洲面临类似挑战：欧洲劳工局报告称，由于劳动力老龄化和技能错配，制造业和工业领域普遍存在持续且往往严重的短缺，特别是在焊接、金属加工、机械和机械维修职业。³⁵

物理AI的作用在于弥合结构性产能缺口：承担在国内生产扩大时无法持续配备人员的任务。反映这一点的是，43% 的受访高管表示，回流和再工业化正在增加他们对物理AI作为国内规模化生产推动者的兴趣。

物理AI正成为战略重点

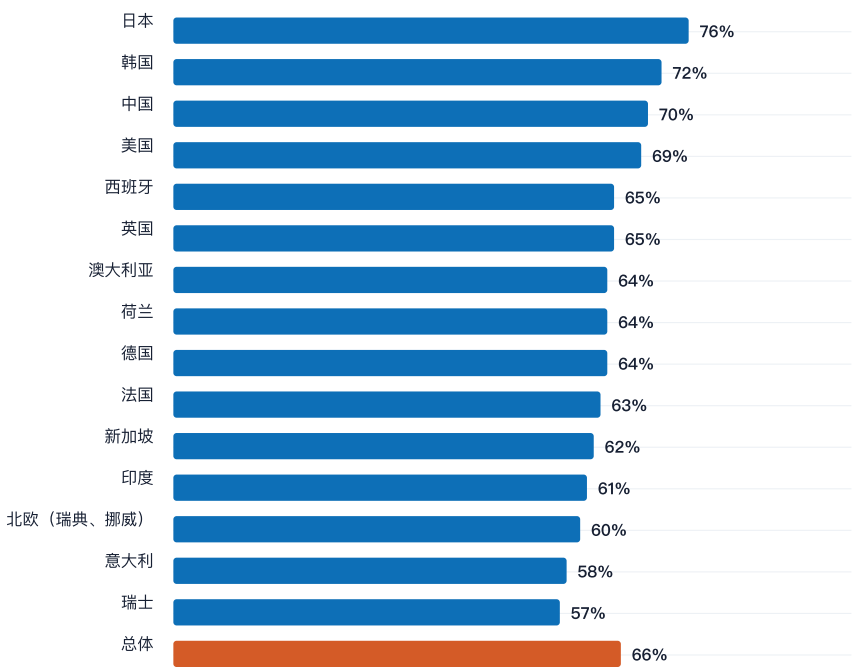
三分之二的组织 (66%) 现在将物理AI列为未来三到五年自动化议程中的高优先级。在高科技 (80%)、工业制造 (79%) 和汽车 (79%) 等行业，优先级更高。在国家层面，日本、韩国、中国和美国显示出最高的优先级水平（见图13）。

66% 的组织现在将物理AI列为未来三到五年的高优先级

图13. 日本、韩国、中国和美国在物理AI优先级方面领先 来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。注：术语“物理AI”在此仅用于机器人技术背景。

图13：日本、韩国、中国和美国优先级最高

未来3至5年将物理AI评为自动化战略高优先级的比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图13：各国对物理AI的优先级

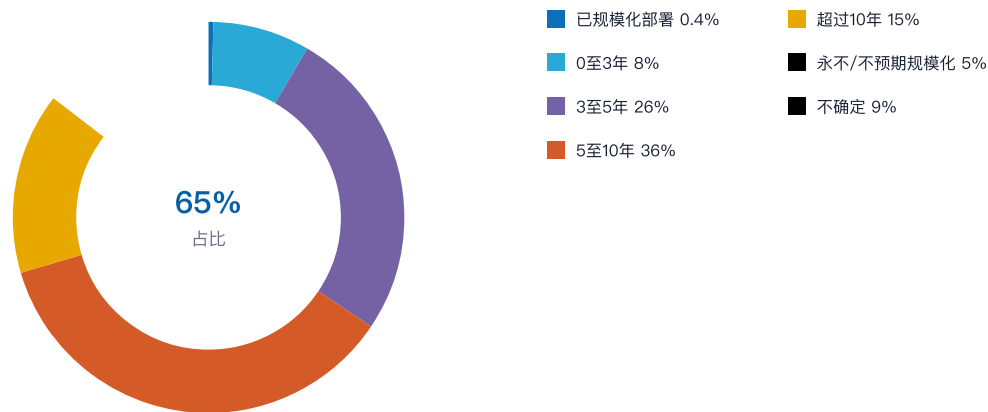
65% 的组织预计在未来五年内规模化物理AI

图14. 大多数组织预计在五年内部署物理AI机器人系统

来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。注：术语“物理AI”在此仅用于机器人技术背景。

图14：大多数组织预计五年内实现规模化部署

预计何时将物理AI部署到规模化阶段



65%的组织预计在未来五年内实现规模化部署。

图14：物理AI规模化部署时间

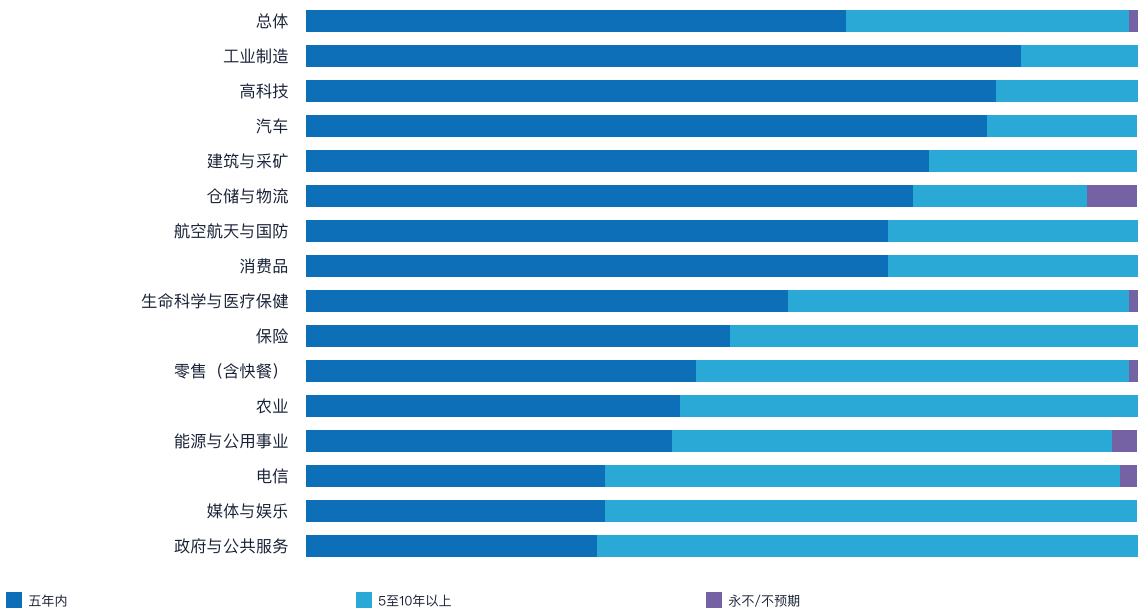
图15. 工业制造、高科技和汽车行业是物理AI机器人系统采用最快的领域

您预计您的组织何时（如果有的话）将大规模部署物理AI（超越试点或试验）？按行业

来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。注：术语“物理AI”在此仅用于机器人技术背景。* 电信、能源、零售和生命科学领域的其余受访者选择了“不确定”。

图15：工业制造、高科技和汽车行业推进最快

预计部署到规模化阶段的时间窗口



注：部分行业另有受访者选择‘不确定’，因此各行可能因四舍五入不满100%。

图15：各行业物理AI规模化部署时间

短期增长将来自将智能嵌入成熟平台

短期内，增长将由用于特定任务应用的、成熟且经过验证的机器人形态驱动。自主移动机器人（AMRs）预计将经历最强劲的扩张（60%），其次是工业手臂（56%）和协作机器人（51%）（见图16），这反映了物理AI在增强已广泛部署的平台而非替换既有设备方面的作用。

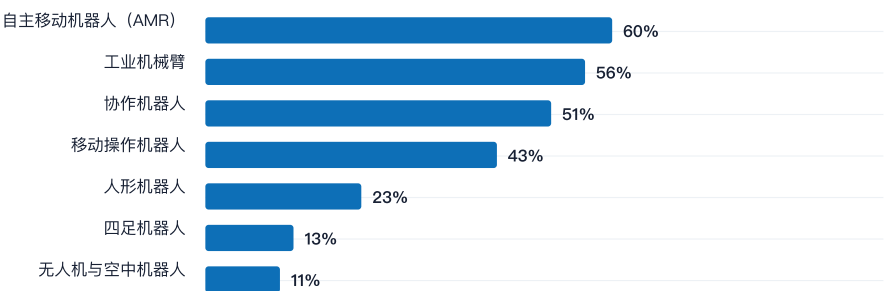
随着基础模型的成熟和各行业采用度的加深，可能会出现全新的机器人类别——为多样化环境、复杂任务和新型人机协作模式而专门设计。值得注意的是，43% 的高管预计移动操作器将增长最快，尽管其作为形态目前尚不成熟，这表明对依赖于新兴物理AI能力（如灵巧操作、空间推理和实时适应）的新机器人类别的需求。尽管有大量投资，人形机器人仍然是一个长期赌注，因为关键技术挑战——包括技术不成熟（可靠性和灵巧性）、安全性和成本-投资回报率可行性——仍需解决，本报告稍后将对此进行探讨。

图16. 短期增长将由已建立的机器人类型引领

来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。

图16：短期增长将来自成熟的机器人形态

预计未来3至5年在组织中增长最快的机器人形态



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图16：短期增长最快的机器人形态

Angelo Cangelosi，曼彻斯特大学机器学习和机器人学教授，曼彻斯特机器人与AI中心联合主任，表示：“完全通用的人形智能需要时间来成熟。然而，企业已经可以通过局部的、特定任务的物理AI能力实现价值，早在这些系统成为可实现目标之前。”

与以下专家的讨论

Rebecca Yeung,

Dexterity 战略顾问，前 FedEx 运营科学和先进技术企业副总裁

为什么现在是物理AI的重要时刻？

多种力量正在汇聚，使这成为物理AI真正的转折点。在技术上，我们已经从确定性的、特定任务的编程转向了VLA和世界模型，它们能够推理以前从未遇到过的物理任务——而且仿真让我们能够大规模训练它们，压缩了曾经需要数年的开发周期。资本正在涌入机器人领域，给予初创公司快速成熟的跑道。执行器、传感器和计算成本已大幅下降。如今的机器人处理着比以往任何一代都大得多的多样性、复杂性和可靠性。所有这些的背后是一种不会消失的结构性需求：劳动力短缺、劳动力老龄化和全球生产力放缓意味着，对于依赖体力劳动的行业来说，物理AI已经从可选变为必需。AI的过去十年是关于信息的。未来十年将关乎行动。

什么样的商业案例对物理AI来说是有说服力的？

大多数组织把商业案例搞错了，因为他们将物理AI框定为成本替代练习。这几乎总是导致令人失望的投资回报率。正确的视角是战略转型。如果你将

机器人引入一个破损的工作流程，你只不过是自动化低效环节。

真正的问题是：真正的瓶颈在哪里——那些制约增长、使劳动力紧张或造成安全和质量风险的任务？这些是高价值的切入点。

您认为人形机器人会塑造工业工作的未来吗？

今天的人形机器人感觉很像十年前的自动驾驶汽车——有巨大的兴奋和真正的潜力，但走向实际运营部署的道路比头条新闻所暗示的要长。核心能力正在快速进步；真正的瓶颈将是最后的几个百分点：边缘情况、安全性、速度以及在混乱环境中的可靠性。今天缺失的关键部分是触觉智能。机器人可以以令人印象深刻的流畅度移动；它们尚不能做到的是感觉。这就是为什么即时价值将来自专门建造的工业系统，而不是人形机器人。在三到五年内，我们将看到重大突破。在五到十年内，格局将完全不同。那些将有意识地在现在构建的公司将会领先。

04 规模化物理AI超越技术范畴，涵盖安全、网络安全、监管和运营

工业自动化传统上依赖于确定性逻辑。物理AI将概率性决策引入受监管环境，需要坚实的信任、认证和韧性基础。同时，它也带来了核心的技术挑战，从实现可靠性和灵巧性到克服现实世界训练数据的稀缺。

可靠性、灵巧性和数据限制制约了物理AI的实际应用

当前存在若干技术挑战限制了物理AI系统所能提供的功能：

- **可靠性：**最近在VLA和世界模型方面的进展通过加强AI的语义和情境推理能力，改善了其对现实世界的理解。然而，虽然模型可以识别物体、解读场景并预测可能的结果，但它们仍然难以可靠地估计基本的物理属性，如距离、方向和物体大小。这种在物理基础的定量推理方面的差距继续限制着自主性，并构成了模拟到现实差距的基础：在受控训练环境中表现良好的机器人往往在现实世界条件下无法可靠行动。因此，机器人无法将其在模拟器中学习到的内容推广到现实世界场景中的微小差异，使得可靠性成为一个核心瓶颈。

Jeff Mahler博士，美国机器人初创公司Ambi Robotics联合创始人兼首席技术官，表示：“尽管AI在物理世界中的潜力巨大，但可靠性仍然是该领域的一个重大挑战。”³⁶

QuantiPhy是由斯坦福大学研究人员开发的一个基准测试框架，旨在通过评估模型是否能够从视频中生成物理属性的数值准确估计来解决这一限制。通过使物理感知推理变得可测量，它为提高现实世界自主系统的可靠性提供了一条途径。³⁷

“迄今为止，模型似乎严重依赖预训练的世界知识——即记忆的事实——而非从视觉和文本输入中进行真正的定量推理，”斯坦福转化人工智能（STAI）实验室主任Ehsan Adeli说。³⁸

- **灵巧性：**机器人操作仍然是一个主要的技术限制：机械手、夹爪和精细运动控制仍然有限，特别是对于涉及不同物体、软材料或精确协调的非结构化任务。物理接触期间的微小变化会迅速导致失败，而机器人缺乏人类赖以恢复的探测和微调剂制。此外，触觉数据难以解读，而支撑灵巧性的失败和恢复经验数据难以大规模捕获。进展取决于硬件和能够管理接触、力和恢复的物理感知模型的进步。
- **数据稀缺：**与在互联网数据上训练的语言和视觉模型不同，物理AI依赖于能够捕捉现实世界行为、准确反映几何形状、力、摩擦、时间、因果性和边缘情况的数据——这些数据在现实环境中收集起来昂贵、缓慢且风险高。尽管仿真的进步有助于压缩早期训练周期并减少对物理试验的初始依赖，但模型最终仍然需要高保真的现实世界数据来跨越“模拟到现实”的差距并处理不可预测的物理边缘情况。

为弥合这一差距，物理AI模型越来越多地在现实世界数据和通过仿真生成的合成数据的组合上进行训练，有助于扩大覆盖范围并减少对昂贵现场数据收集的依赖。同时，近期的努力反映了推动更广泛获取高质量物理交互数据的趋势。例如，AgiBot World是中国机器人组织AgiBot开发的一个大规模、开源数据集，旨在向学术界和工业界更广泛地提供现实世界机器人交互数据。

类似地，中国的UBTECH Robotics选择将其Thinker模型开源，这是一个为具身智能设计的视觉-语言基础模型。UBTECH Robotics海外销售总监Viki Yang解释说：“我们将Thinker模型开源，因为数据问题无法由任何一家公司单独解决。越多的研究人员、机构和合作伙伴能够在一个共享基础上构建，整个领域的发展就越快。”

然而，仅扩大数据集并不能解决可靠性挑战。TorqueAGI创始人兼首席执行官Ashutosh Saxena博士表示：“机器人不能依赖无休止的现场试验或数十亿美元的数据管道。这种方法缓慢、昂贵且从根本上不可扩展。物理AI必须高效学习——从有限的经验中提取结构和因果性，而不是依靠蛮力规模。真正的进步不在于收集更多，而在于理解得更好。”

Viki Yang, UBTECH Robotics海外销售总监, 解释说:“我们将Thinker模型开源, 因为数据问题无法由任何一家公司单独解决。越多的研究人员、机构和合作伙伴能够在一个共享基础上构建, 整个领域的发展就越快。”

为非确定性AI工程化保障措施

在需要可预测、可证明的安全性的环境中, 安全是物理AI的核心挑战, 这些环境中的故障可能产生现实世界的后果。由于监管落后于创新步伐, 组织需要立即采取行动, 实施切实可行的功能安全措施, 而不是等待正式标准。在实践中, 这需要为机器人系统配备独立于AI层运行的确定性安全机制, 定义一个约束行为并强制执行安全操作限制的安全包络。这确保了即使AI行为不确定或意外, 机器人也能继续在已知的、可验证的安全边界内运行。

保护自主系统免受操纵和滥用

随着机器人变得更加自主, 并更深入地嵌入运营环境, 恶意干扰和滥用的风险也在增加。在此背景下保护系统完整性需要强有力的保障措施, 以防止未经授权的访问、行为操纵或对关键功能的控制。组织需要网络安全基础, 使其与物理AI系统不断扩展的能力和运营角色同步发展。

使监管适应物理AI的风险和现实

物理AI引入了根本不同的风险和治理要求。与传统AI或工业自动化不同, 物理AI涉及机器人做出决策并自主行动, 通常靠近人员。由于这些决策是概率性的而非确定性的, 且可靠性尚无法保证, 错误可能直接转化为物理伤害。这在安全和责任方面带来了新的挑战。然而, 大多数现有的AI和机器人法规并非为这些现实而设计, 很少有国家明确更新其框架以

应对物理AI。中国作为早期行动者脱颖而出, 发布了其首个针对人形机器人和具身(物理)AI的国家标准体系。该框架涵盖人形机器人整个产业链和全生命周期, 以安全和伦理考量作为核心焦点。⁴⁰

在欧洲, 欧盟AI法案将AI监管扩展到纯数字系统之外, 对用于某些高风险物理应用(如交通、运输和关键基础设施)的AI系统施加要求, 这些应用中的故障可能导致物理伤害。同时, 欧盟机械法规更新了产品安全规则, 以解决包括自主和协作机器人系统在内的AI赋能机械问题。⁴¹

Anto Patrex, 美国机器人初创公司CosmicBrain AI创始人兼首席执行官, 表示:“随着机器人, 特别是人形机器人变得越来越有能力, 并开始与人类更紧密地合作, 我们需要坚定的伦理边界和强有力的护栏。机器人可能故障、被滥用或造成实际的物理伤害, 因此安全规则必须从一开始就内置——包括在机器人越过某些界限时自动关闭它的硬性限制。这些系统将在任何地方运行, 而不仅仅是它们在它们被制造的地方, 因此治理必须是全球性的。五到十年后的世界将大不相同, 我们必须负责任地建设这条道路。”

01 理解和应对硬件现实

物理AI的部署受到硬件现实的影响, 如边缘计算限制、电池性能和充电周期、热管理、机器人和组件的机械磨损、机器人耐用性和故障率。这些因素不仅影响工程选择, 还影响劳动力规划、服务模式和生命周期成本。

为物理AI部署建立运营基础

部署物理AI不是传统IT转型的延伸, 而是企业在如何设计、运营、维护、保护和扩展智能物理系统方面的多维转变。

02 管理机队运营

随着组织规模化物理AI, 部署从单个机器人转向需要持续运营管理的协调机队。这要求预测性维护计划、空中软件更新、充电基础设施和电池更换工作流程、大规模传感器数据处理, 以及对棕地设施进行升级以确保足够的连接性、电力和安全区域。企业还必须确定供应商主导和内部维护之间的正确平衡。这需要专业技术人员和机队协调员来监控系统健康状况和更新, 结构化的维护和事件响应工作流程, 以及跟踪正常运行时间、可靠性和利用率的机队级KPI。

03 加强数据治理和AI生命周期管理

物理AI显著增加了从传感器、感知模块和设备上决策系统生成的数据量。数据所有权和使用权的清晰界定——特别是在AI系统以“即服务”方式交付时——至关重要，需要涵盖数据权利、隐私、保留和安全的健全治理框架。同样重要的是管理完整的AI生命周期，包括模型的训练、更新、验证、监控和退役方式。

04 准备劳动力

运营就绪性还取决于人。内部运营团队需要新技能——从机器人支持到边缘系统诊断和安全系统管理。建立这些能力对于在大规模下维持性能、正常运行时间和安全运营至关重要。

05 构建物理AI平台战略

为充分实现物理AI的价值，组织需要超越部署单个机器人，并思考平台战略。这包括采用新兴的物理行动API，使企业能够从通用智能层访问物理技能——如导航、操作或检查。在此基础之上，组织必须定义一个编排层，协调AI代理和机器人机队如何共同规划、排序和执行任务——实现跨站点和环境的协调行为、共享学习和一致治理。如此对待，物理AI便成为跨任务、环境和业务需求扩展机器人技术的可扩展基础。

06 解决OT/IT集成问题

要将物理AI扩展到试点之外，组织必须规划机器人如何与现有的运营技术（OT）和企业IT系统集成。当物理AI系统连接到ERP、MES和资产管理系统等核心平台时，价值才能实现。这需要解决集成考量，包括与遗留SCADA系统的交互、采用工业通信标准（如OPC-UA），以及将ERP数据转换为机器人可执行的操作。对集成层、中间件和编排能力的精心设计支撑着可靠运营、协调机队管理和跨站点的可扩展部署。

“物理AI不仅仅是现实世界中的AI。它是失败不再虚拟的地方。它关乎安全、安保和合规。真正的挑战不是让机器人变得智能，而是让它们足够可靠，能够在无法控制的环境中行动。在未来十年，赢家不会是那些拥有最聪明模型的，而是那些将信任和合规性工程化到系统每一层的人。”

Marc Blanchon 物理AI负责人，凯捷工程

05 人形机器人为通用机器人技术奠定基础

人形机器人*因其通用实用性以及在现有以人为中心设计的环境中的运行能力而脱颖而出——使得在棕地环境下部署时所需的物理基础设施变更较少。然而，采用所需的基础条件尚不具备。进展取决于可靠性、安全性、成本和社会接受度的提升。

大多数高管认为人形机器人将在其行业中发挥变革性作用

三分之二的高管认为人形机器人将改变其行业。这种信心源于其能够在为人类建造的环境中工作（75%）、通用实用性（72%）以及与现有工具和界面的兼容性（55%）。

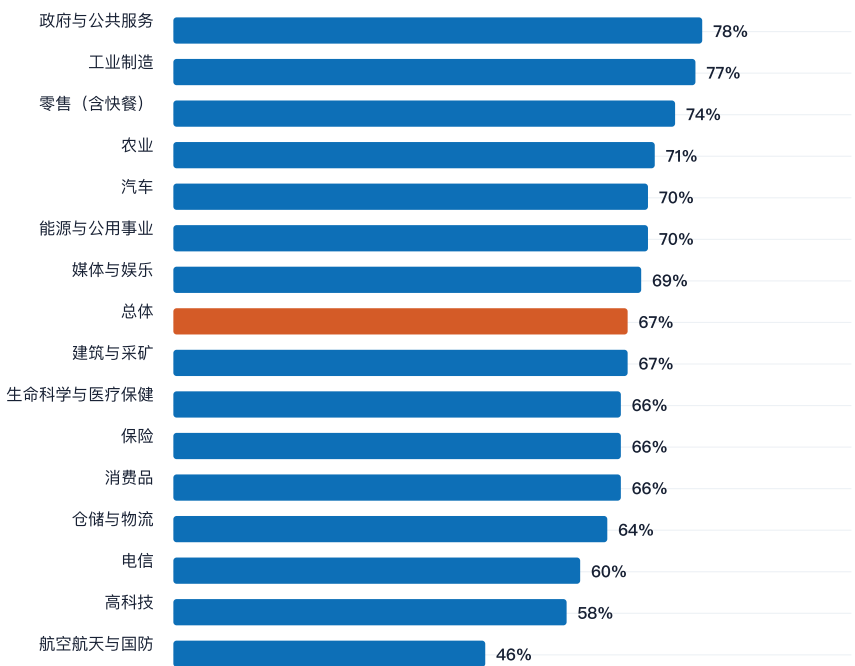
公共部门对人形机器人变革潜力的信念最强（见图17）。公共服务严重依赖于围绕人类移动和互动设计的环境和工作流程，使得人形机器人非常适合许多政府职能（如老年人护理、面向公众的服务和应急响应）。

相比之下，在仓储物流、建筑和采矿行业，认为人形机器人具有变革性的高管较少，这可能反映出人们担心类人形态可能并不总是非常适合这些行业的物理需求。例如，FedEx正在探索超人形机器人——与传统人形机器人相比，具有更高强度和敏捷性的受人类启发的机器人。⁴²

图17. 跨行业高管一致认为人形机器人将产生变革性影响

图17：各行业普遍认为人形机器人将带来变革

认为人形机器人将改变所在行业的受访高管比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

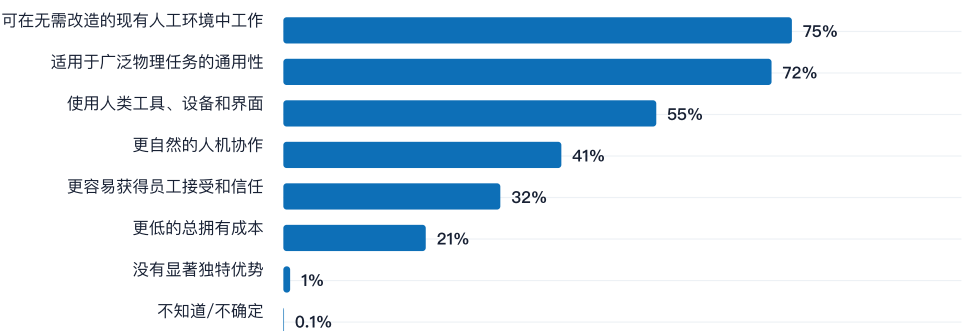
图17：各行业对人形机器人变革性影响的判断

图18. 人形机器人的价值在于其在为人类设计的空间中工作的潜力及其通用实用性

与其他机器人形态（AMR、协作机器人、传统工业机器人）相比，人形机器人为您的组织提供了哪些独特优势？

图18：人形机器人的独特优势

相较于AMR、协作机器人和传统工业机器人，认为人形机器人具备以下优势的比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图18：人形机器人的独特优势

部署人形机器人的意向正在形成

超过半数的组织已经在投资 (16%) 或计划投资 (37%) 人形机器人。早期活动正在形成：近四分之一 (25%) 正在探索应用，12% 正在进行试点和概念验证，类似比例已进入部署阶段（见图19）。早期通过试点和有限部署形成的势头在多个行业可见。

例如：

- 汽车： 多家汽车制造商正在生产环境中积极试点人形机器人，用于物料搬运、装配、物流和体力要求高的车间任务，包括宝马（与Figure AI和Hexagon Robotics合作）、梅赛德斯-奔驰（与Appttronik的Apollo合作）、丰田（与Agility Robotics的Digit合作）以及小米（在电动汽车装配线上测试内部人形机器人）。⁴⁶
- 物流： 物流供应商正在试点人形机器人，用于手提袋搬运、线边喂料和重复性物料搬运。例如，总部位于美国的物流组织GXO已试点了Agility Robotics的Digit、Appttronik的Apollo和其他人形机器人原型。⁴⁷
- 工业制造： 西门子与英国机器人公司Humanoid合作，在其位于德国埃尔兰根的工厂试点了用于生产物流任务的人形机器人。⁴⁸
- 航空航天： 空客已与中国UBTECH Robotics进入早期合作阶段，探索UBTECH的Walker S2人形机器人如何支持飞机制造。⁴⁹
- 电子： 富士康和NVIDIA计划在位于德克萨斯州休斯顿的新制造工厂的生产线上部署人形机器人，该工厂将生产NVIDIA AI服务器。⁵⁰
- 电信： 中国移动的一家子公司已向中国机器人制造商AgiBot和Unitree授予了一份价值1730万美元的合同，用于在网络设施中部署人形机器人。⁵¹
- 生命科学： 总部位于美国的生物技术初创公司Insilico Medicine已在其药物发现实验室部署了一台人形机器人，以协助科学家进行移液、使用试剂和操作实验室设备等任务。⁵²

- **能源：**Orano，一家总部位于法国的综合核能组织，已部署Hoxo——核工业首款智能人形机器人——与人类团队并肩工作，包括在高风险环境中。⁵³

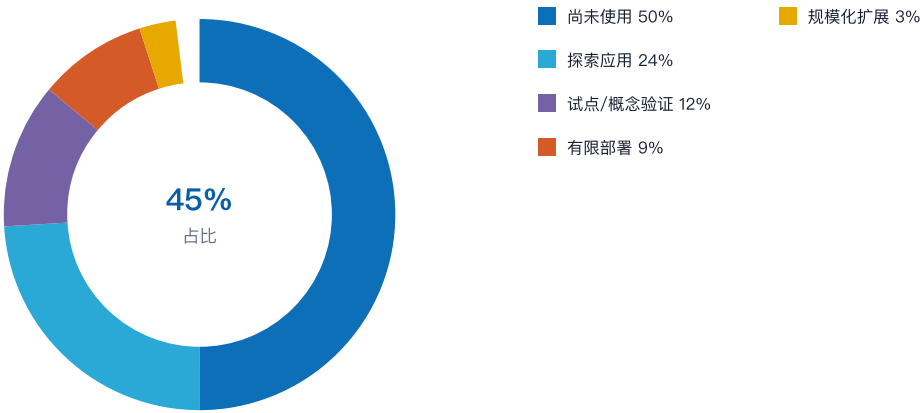
“Hoxo通过将智能且符合人体工学的机器人解决方案与我们现场团队的专业知识相结合，为我们的运营开辟了新前景。这是我们希望发展以满足我们工业需求的一项创新，在我们应对当今和未来挑战的同时，为安全和竞争力做出贡献，”Orano Melox总监Arnaud Capdepon说。⁵⁴

图19. 人形机器人部署的势头正在形成

以下哪项最能描述您的组织目前在类人机器人方面的采用阶段？ 来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。

图19：人形机器人采用势头正在形成

组织当前的人形机器人采用阶段



45%的组织预计到2030年将让人形机器人与员工协同工作。

图19：人形机器人采用阶段

展望未来，45% 的组织期望到2030年人形机器人能与员工并肩工作，表明部署意向正在加强。然而，势头各不相同：农业、高科技、公共服务和保险显示出最强的行业兴趣（见图20），而在地理上，计划采用率在韩国、日本、中国和新加坡最高（见图21）。

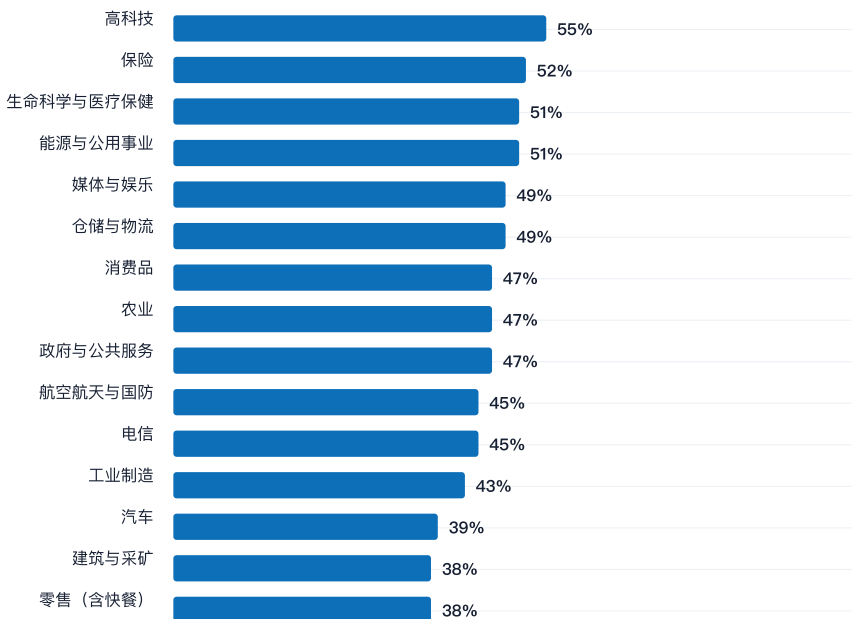
这种意向正开始转化为具体的部署计划：

- 雷诺集团计划在未来18个月内在其制造工厂部署350台人形机器人。该部署是与法国机器人公司Wandercraft合作进行的，包括共同开发其Calvin工业人形机器人。⁵⁵
- 持有Boston Dynamics多数股权的现代汽车，计划部署Boston Dynamics的Atlas人形机器人在其全球运营中与人类工人协同工作。到2030年，Atlas预计将支持部件装配，并随着时间的推移，承担重复性、重型和复杂任务，以创造更安全的工作环境。这些部署是现代汽车在其全球价值链中推动人机协作更广泛努力的一部分，机器人承担劳动密集型或高风险任务，而人类工人则专注于培训和监督。⁵⁶

图20. 多个行业正加紧准备在2030年前部署人形机器人与人类工人协同工作

图20：多个行业计划在2030年前部署人形机器人

计划让人形机器人在2030年前与员工协同工作的比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

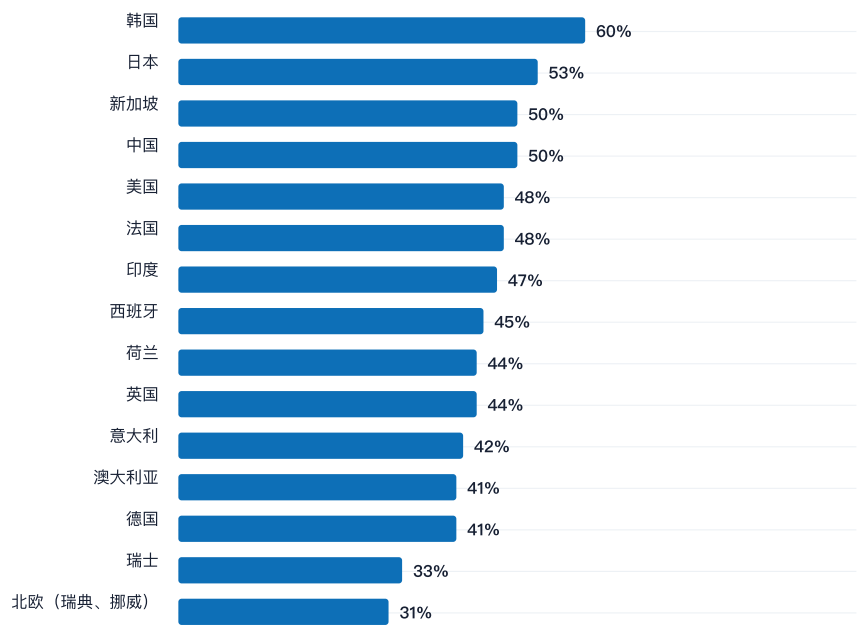
图20：各行业计划在2030年前部署人形机器人

图21. 人形机器人部署计划在各国逐步形成，韩国、日本、中国和新加坡领先

我们的组织将在2030年前部署人形机器人与人类工人协同工作 按国家划分的赞同受访者百分比

图21：各国的人形机器人部署计划正在成形

计划让人形机器人在2030年前与员工协同工作的比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

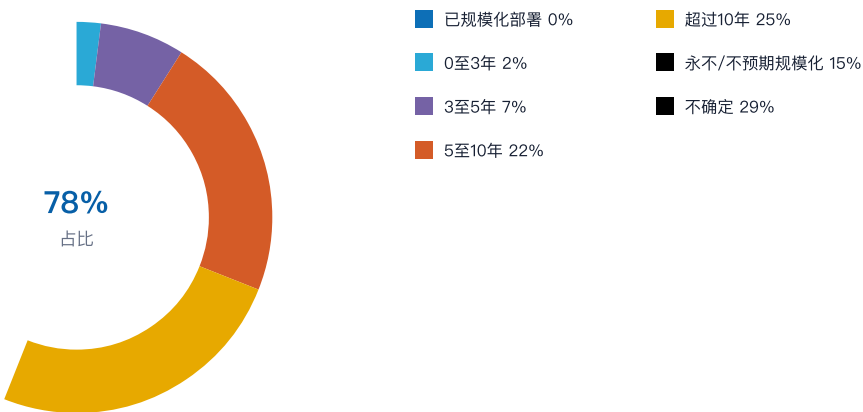
图21：各国人形机器人部署计划

规模化将是渐进的

大多数组织 (78%) 预期将采用人形机器人，但不会很快实现规模化（见图22）。平均而言，组织预计大约七年后才能实现规模化部署，且仅30% 的组织认为人形机器人将在三到五年内成为可行的通用工人。如下所述，人形机器人采用的障碍仍然很大。

图22：人形机器人的规模化部署将渐进发生

预计何时将人形机器人部署到规模化阶段



78%的组织预计最终会规模化采用人形机器人，但大多不是近期。

图22：人形机器人规模化部署时间

78% 的组织预期将采用人形机器人，但不会很快实现

图22. 大多数组织预期将扩展人形机器人部署

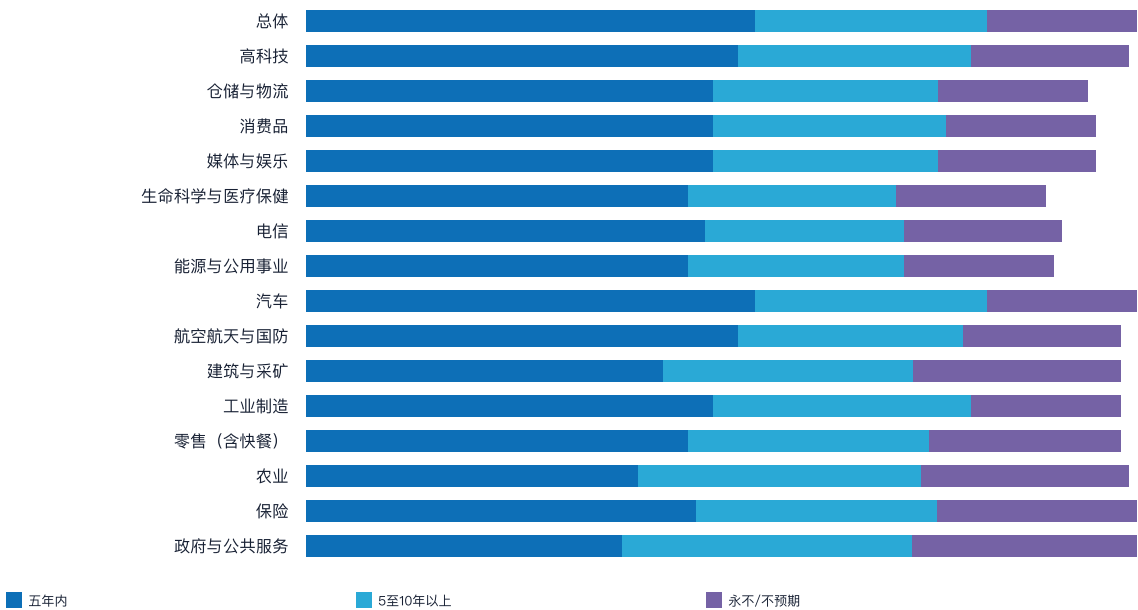
来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。

图23. 汽车、高科技、航空航天和物流行业计划引领人形机器人部署

您预计您的组织何时（如果有的话）将大规模部署人形机器人？ 按行业

图23：汽车、高科技、航空航天和物流将领先部署

预计人形机器人规模化部署的时间窗口



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

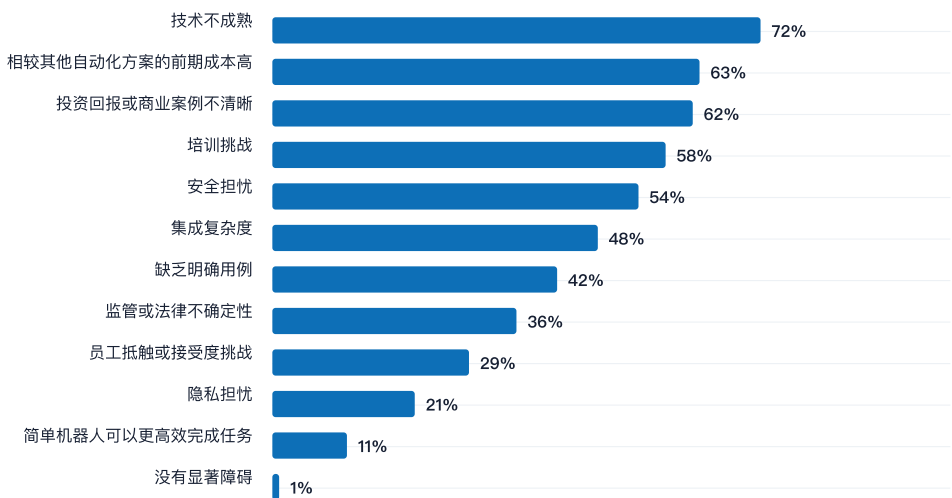
图23：各行业人形机器人规模化部署时间

多种因素正在减缓采用

人形机器人的采用受到若干重大障碍的阻碍：技术不成熟 (72%)、高成本 (63%)、投资回报率不明确 (62%)、培训挑战 (58%) 和安全担忧 (54%)。值得注意的是，只有 12% 的组织认为AMR或协作机器人等更简单的机器人是更有效的替代方案——表明准备就绪度，而非价值主张缺陷，是关键所在（见图24）。投资回报率的不确定性也持续存在，但并非人形机器人独有：39% 的高管表示人形机器人的商业案例是清晰的，而物理AI总体为 42%，表明组织对更先进的AI赋能机器人技术总体上持谨慎态度。

图24：技术不成熟、成本高和安全是主要障碍

选择各项作为人形机器人采用前五大障碍之一的比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图24：人形机器人采用障碍

Dirk Geiger，英飞凌科技人形机器人高级总监兼团队负责人，表示：“人形机器人的安全性高度依赖于情境——机器人必须根据其执行的任务和所处的环境表现出不同的行为。可靠地理解环境以做出适当响应仍然是一个重大挑战。安全也取决于系统设计：当问题出现时，人形机器人必须能够可靠地过渡到安全状态。”

图24. 技术不成熟、高成本和安全担忧是主要障碍

来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。

社会接受度是人形机器人采用的主要结构性障碍

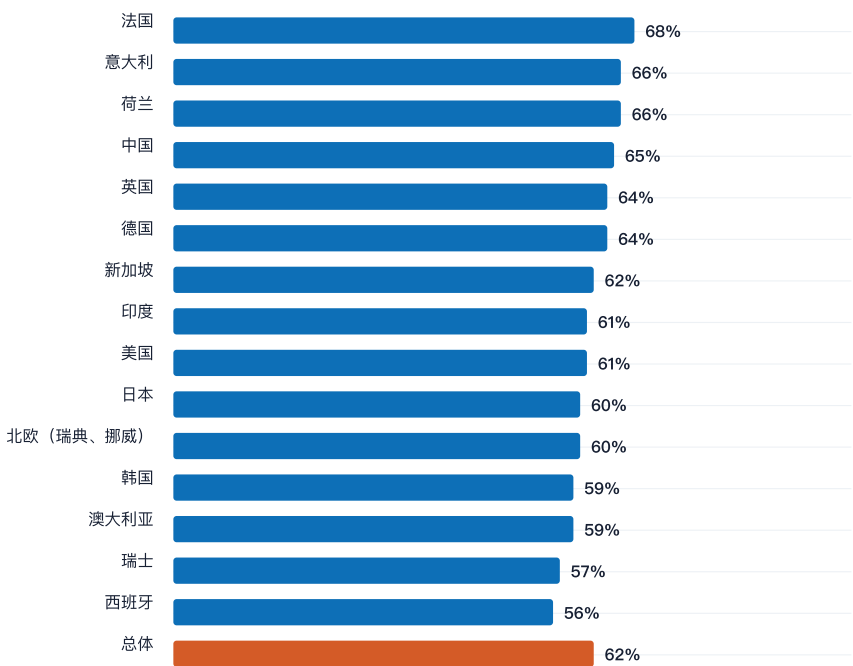
超过六成 (62%) 的高管认为公众抵制将是人形机器人采用的关键障碍。法国 (68%) 的担忧最高，西班牙 (56%) 最低。

中国正在推行一系列高知名度的举措，可能有助于提高公众对人形机器人的熟悉度。2025年8月，它在北京主办了首届世界人形机器人运动会，约500台人形机器人在现场观众面前参加了跑步、足球、拳击和武术等体育项目的比赛。在2026年春节联欢晚会上，来自Unitree、Galbot、Noetix和MagicLab等组织的人形机器人与人类表演者同台演出——跳舞和表演武术。除了娱乐之外，人形机器人还被部署在公共服务岗位上，例如在春运期间作为列车服务员，提高了它们的可见度，并将其定位为有用且不具有威胁性的存在。

图25. 对人形机器人社会接受度的担忧普遍存在

图25：各国对人形机器人社会接受度的担忧

认为社会接受度不足将成为关键障碍的受访高管比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

图25：各国对人形机器人社会接受度的担忧

Pedro Zheng，Unitree Robotics高级区域销售经理：“从案例最清晰的地方开始——恶劣、高风险的环境，过去对人工来说很危险。这是人形机器人可以首先介入的地方。从那里，公司需要建立正确的基础：一个数字孪生平台、强大的运营管理系统，以及围绕人形机器人构建的AI安全和安保框架。因为人形机器人不是一台独立的机器——它是一个运营渠道，连接到企业系统、数据和日常运营。”

Jim Ma，Unitree Robotics区域技术总监：“达到物理AI的下一个水平不是任何一家公司可以单独完成的——我们需要跨行业合作、分享知识并共同进步。同时，创新不能脱离其更广泛的社会影响而发生。随着AI驱动的设备越来越多地在人类环境中运行，围绕安全、认证和信任的问题变得更加重要。这些是该行业必须共同应对的挑战。”

2025年被广泛视为中国人形机器人量产元年，超过140家国内制造商发布了超过330款人形机器人型号，部署从实验室扩展到制造业、家庭服务、医疗保健和老年人护理。

中国在标准化方面也作为早期行动者脱颖而出，发布了其首个针对人形机器人和具身（物理）AI的国家标准体系。该框架由超过120家研究机构、企业和行业用户协作制定，涵盖人形机器人整个产业链和全生命周期。它旨在消除兼容性障碍，实现模块化和可互操作的组件，定义特定于应用的功能和安全要求，并从一开始就嵌入安全和伦理考量——有助于加速从试点向规模化现实世界部署的过渡。

在跨国市场运营的组织将需要评估中国标准如何与新兴的欧盟和美国监管框架互动——以及互操作性假设是否能在地缘政治边界中成立。

“物理AI的兴起标志着从数字认知到完整感觉神经系统的转变，机器学习与触觉感知和边缘计算融合。在劳动力短缺、成本上升和对韧性的需求驱动下，制造业、物流、医疗保健等领域的组织正在部署能够感知、推理并在现实世界中行动的系统。机遇是清晰的。但是，由于76%的高管指出从试点到规模的过渡是一个重大挑战，62%的高管担心社会接受度，前进的道路需要对人与AI的化学反应给予与技术同等程度的关注。”

Charlotte Pierron-Perlès 执行副总裁，智能产业董事总经理，凯捷Invent

Sanjay Aggarwal

风险合伙人，F-Prime Capital，一家总部位于美国的风险投资公司

物理AI的投资格局发生了怎样的变化？

在 F-Prime，我们每年都会跟踪机器人技术的投资格局，而 2025 年是迄今为止最重要的一年。机器人领域的风险投资达到历史新高。私营机器人独角兽企业的总企业价值大幅飙升，上市机器人企业的表现也优于大盘。中国上市机器人企业的市场表现更加强劲。2025 年的投资步伐，一方面由在物流、医疗、国防、制造、农业、建筑和采矿等行业构建垂直领域机器人技术的企业推动，另一方面也由通用机器人技术推动。总体而言，人形机器人和基础模型是机器人技术中增长最快的细分领域。投资者对大额融资轮次的兴趣，受到商业化规模已经得到明确验证、以及公开市场成功表现的共同推动。

投资者如何评估物理AI的商业案例？

用例选择决定了投资回报率等式的成败。要证明其经济合理性，系统必须全天候运行。第二个变量是可靠性。即使一个高利用率场景，如果系统只能达到 80%-90% 的性能，运营人员也会失去信心，最终陷入死胡同。由于规模经济，成本是这个等式中最容易解决的部分。

您如何看待物理AI和机器人技术的发展前景？

未来五到十年将由两件事定义。第一是扩展到难以自动化的行业，如农业、建筑和采矿，这些行业将看到物理AI系统的成熟和扩展。第二是在那些已经高度自动化但仍依赖人工完成非结构化任务的设施内部发生的事情，例如装配操作、制造业中的线束以及物流中的单个物品处理。基础模型正是使这些用例变得可解锁的关键，我预计当今通用机器人技术的首批部署将出现在那里，出现在那些工业空白地带，而不是更显眼但更难商业化的消费应用。

06 建议：加速物理AI革命

尽管对物理AI的长期影响有着强烈信念，组织仍面临一系列阻碍采用和限制扩展的障碍（见图27）。最突出的挑战与技术准备度相关，由可靠性、灵巧性方面的限制以及训练数据的稀缺性驱动。高成本和不确定的投资回报率、熟练人才短缺，以及集成和协调多个机器人系统的复杂性，进一步限制了部署。这些障碍因缺乏成熟的安全标准和监管清晰度，以及社会对工作影响的担忧——尤其是在人形机器人方面——而更加复杂。因此，许多组织难以超越实验阶段，76% 的高管表示从试点到规模化部署是一个重大挑战。

在此背景下，仅 42% 的高管认为投资物理AI的商业案例目前是明确的，这并不令人意外。克服这些限制将需要生态系统层面的协调行动，以降低采用风险并加强规模化基础。

以下行动概述了企业今天可以采取的实际步骤，以推进其物理AI之旅。我们同时强调了技术开发商、政策制定者和标准机构需要考虑的更广泛的生态系统因素，这些因素将影响现实世界部署的速度和安全性。

部署物理AI的企业行动

采用物理AI是一个多年的转型之旅，但组织应立即开始：该技术已足够成熟，可以支持有意义的早期进展，且切实的价值已经可用。以下行动概述了企业如何建立势头并随时间推移扩展采用。

1. 建立对物理AI的理解

对物理AI今天能做什么和不能做什么建立现实的认识——它能交付的价值和它能解锁的能力——以及其当前的技术限制、人机交互挑战以及工程和监管约束。评估现有数据基础设施如何支持物理AI部署——或在哪些方面需要填补空白。

2. 从建立熟悉度和信心的用例开始

从明显有益、可行部署并提供切实投资回报率的用例开始——例如枯燥、肮脏和危险的任务——以建立信心、减少不确定性并向一线团队展示价值。

3. 通过形态探索进行设计

迭代多种设计方案，了解形态如何塑造信任、交互以及跨任务和环境的适用性，而不是过早地默认选择人形机器人。

4. 为人机协作重新设计工作流程

重新设计流程，以反映人员、AI代理和机器人之间新的交互模式，包括清晰的交接、监督模型、安全协议和升级路径。尽早让车间团队参与进来，确保将与机器人并肩工作的一线工人的需求从部署一开始就纳入其中。

5. 通过平台方法进行扩展

创建一个支持跨任务、站点和机器人类型扩展的可扩展基础。这包括使用允许机器人访问通用技能的架构，以及协调AI代理和机器人机队的编排层。为支持扩展，应尽早定义和标准化核心架构和运营要素，如数据管道、安全和网络安全实践、合规框架和编排机制，从而允许增长超越孤立试点，实现多站点部署。

上述行动必须建立在信任的基础之上。这意味着建立使物理AI安全且可预测的护栏和运营原则：定义机器人可以在哪里操作、哪些任务仍由人类独占、可接受的风险阈值，以及人类在环监督在实践中如何运作。尽早建立这些条件将增强对初始部署的接受度，并为随时间推移扩展物理AI采用创造一个更强大的平台。

同时，随着该领域的快速发展，组织应与物理AI和机器人生态系统保持密切联系。与机器人供应商、集成商、研究实验室、标准机构和监管机构持续互动，将为新兴进展和实际限制提供早期可见性，支持在整个过程中做出更明智的决策。

图26. 加速物理AI采用之旅

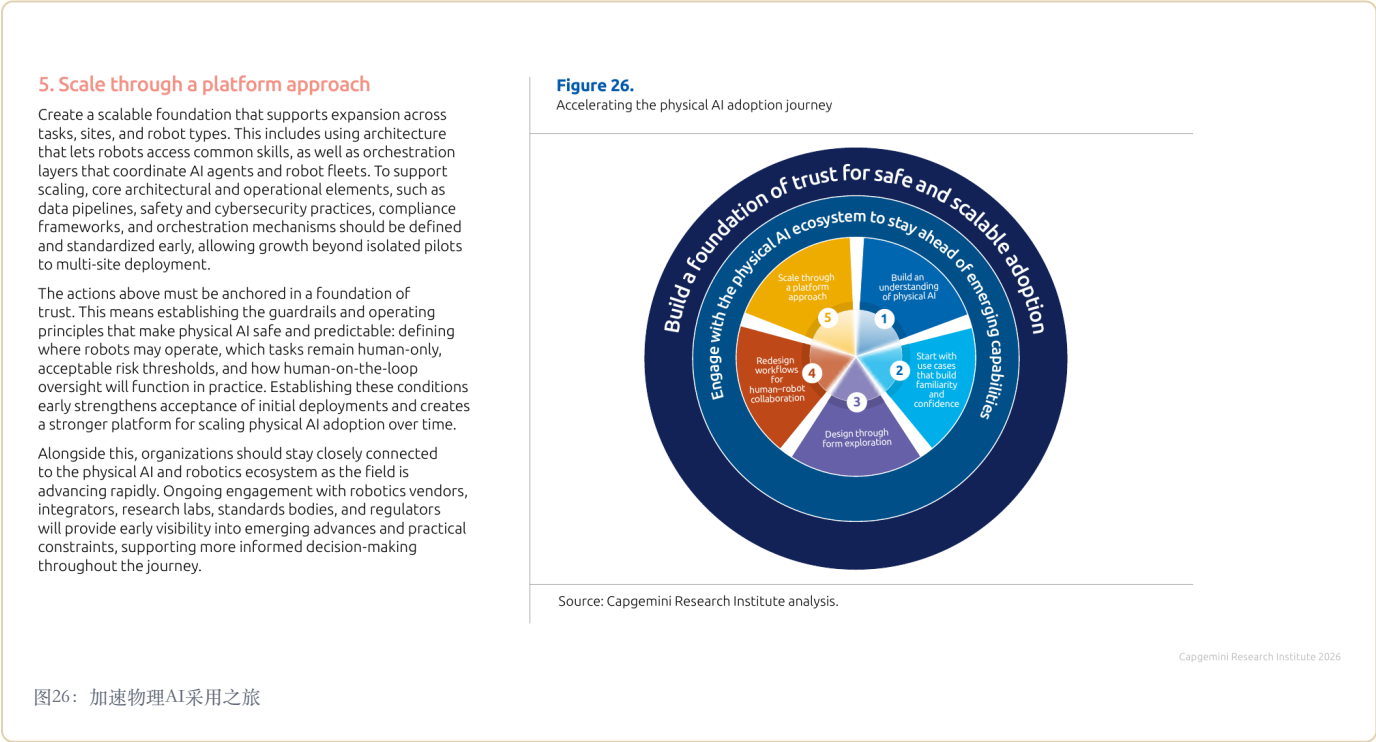


图26：加速物理AI采用之旅

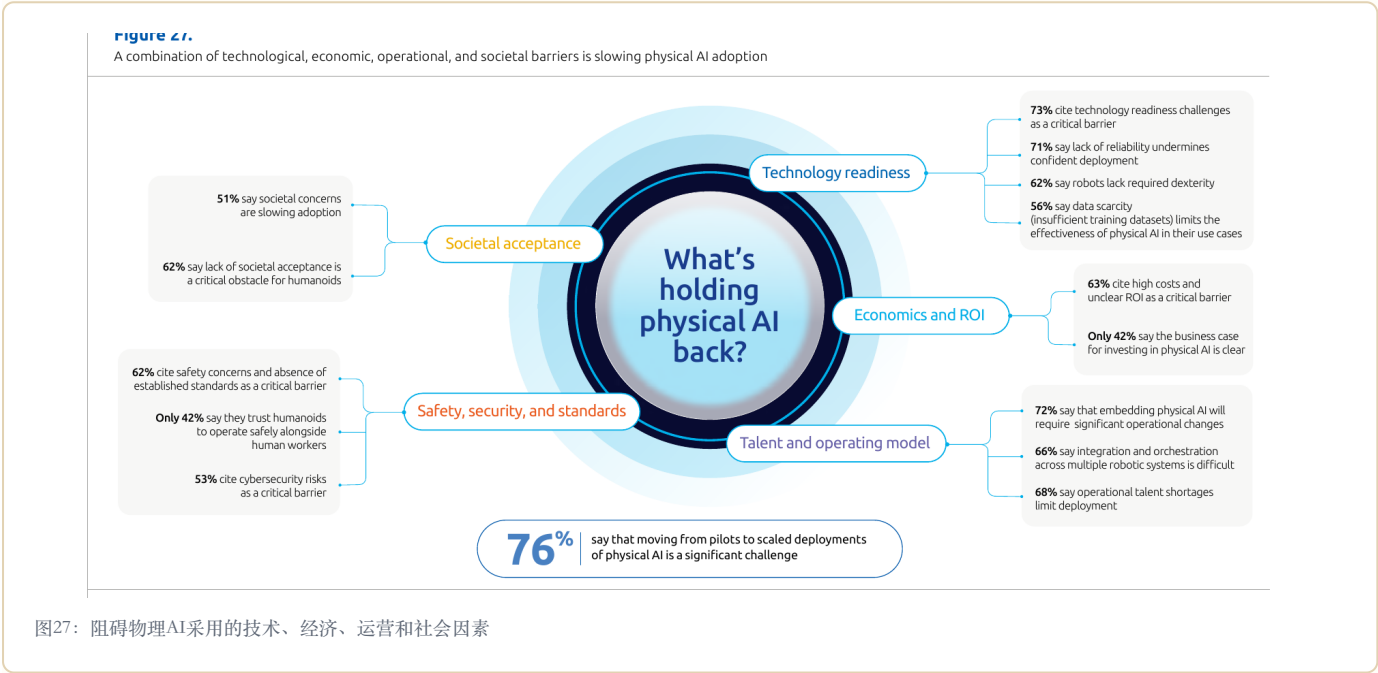
“部署必须是与劳动力建立的伙伴关系，特别是在社会接受度被确定为一个关键障碍时。我们必须确保物理AI系统透明地引入，使用人在环监督，以建立信任，并确保我们的步伐不超过我们管理变革的能力。”

生态系统考量

在企业行动之外，企业采用的进展还将取决于整个生态系统的持续进步。可靠性和灵巧性的改进、更强的安全性和网络安全设计、通过开放接口和编排框架实现的更大互操作性，以及降低前期投资和采用风险的商业模式，都将影响物理AI能够多快和多广泛地扩展。势头还将受到安全、网络安全和数据保护标准的演进、明确的责任框架、多供应商环境的互操作性标准，以及建立社会信任的透明公共沟通的影响。

Nagesh Puppala，英特尔公司客户端计算事业部机器人技术与物理AI总经理，表示：“物理AI是人工智能中最复杂的领域之一。大规模推进它需要更广泛的生态系统协作——分享经验教训，并跨形态、领域和用例为机器人构建共享的多模态数据集。”

图27. 技术、经济、运营和社会障碍的组合正在减缓物理AI的采用



为可持续性设计物理AI系统

近四成 (38%) 的高管对部署物理AI系统的可持续性影响表示担忧，包括能源消耗、碳排放和生命周期影响。这些问题涵盖物理硬件和为这些系统提供动力的AI模型，强调需要尽早将可持续性嵌入设计决策。

- **硬件**——通过更好的设计避免材料浪费。硬件方面的一个关键可持续性风险是材料浪费，因为无法维修或升级的机器人可能被丢弃并填埋。设计可模块化、可维修和可回收的机器人将是防止过早处置和减少物理AI系统整体环境足迹的关键。
- **AI**——减少模型训练和推理的能源足迹。AI模型本身也会带来环境足迹。训练可能能源密集，而推理——尽管每次操作的能源需求远低于训练——随着部署规模的扩大，可以在整个机队中累积。这使得节能的AI模型设计对于降低机器人整个运营寿命期间的累积能源使用至关重要。

采用生命周期聚焦的设计和部署方法——涵盖物理硬件以及AI模型随时间推移的训练和运营方式——有助于确保物理AI的增长与更广泛的环境期望保持一致。

结论

AI正在超越数字环境，进入物理世界，将机器人从僵化、预编程的工具转变为自适应、情境感知的协作者。这一转变正在为传统自动化无法解决的非结构化环境中的运营挑战解锁解决方案。同时，汇聚的力量——全球劳动力短缺、劳动力老龄化、劳动力成

本上升以及再工业化新获得的动力——正在使物理AI成为一个紧迫的优先事项，而非遥远的愿景。组织已经从早期探索转向现实世界的部署。但获取价值，特别是在从概念验证转向规模化采用时，需要的不仅仅是更好的算法。它要求在工作设计方式、安全性和可靠性管理方式，以及劳动力支持和技能提升方式上进行转型。

虽然人形形态可能随着时间的推移发挥重要作用，但今天可以通过自主移动机器人和工业手臂等成熟形态实现即时价值。组织现在可以通过成熟技术开始获取投资回报率，同时为其基础设施和劳动力做好准备，迎接未来几年将出现的更具能力、以人为本的形态。

最终，未来十年的领导者将是那些今天就在为物理AI奠定基础的人。现在就开始将智能、自适应的机器人系统整合到其核心运营中的组织，将最有能力塑造——并从物理AI时代中受益。

研究方法

在2026年1月和2月，我们对北美、欧洲和亚太地区16个国家的1,678名高管进行了一项全球调查，这些高管来自年收入超过10亿美元*的组织，涵盖15个行业。

涵盖的国家包括：美国、英国、法国、德国、意大利、西班牙、荷兰、北欧（瑞典和挪威）、瑞士、印度、中国、日本、韩国、澳大利亚和新加坡。

涵盖的行业包括：汽车、航空航天与国防、工业制造、生命科学与医疗保健、能源与公用事业、高科技、电信、零售（包括快速服务餐厅）、消费品、仓储与物流、保险、公共服务、媒体与娱乐、建筑与采矿以及农业。

受访高管为总监及以上级别。调查受访者的分布情况见下图。

我们进行了一项全球调查 涉及1,678位高管 涵盖16个国家 组织年收入超过 10亿美元*



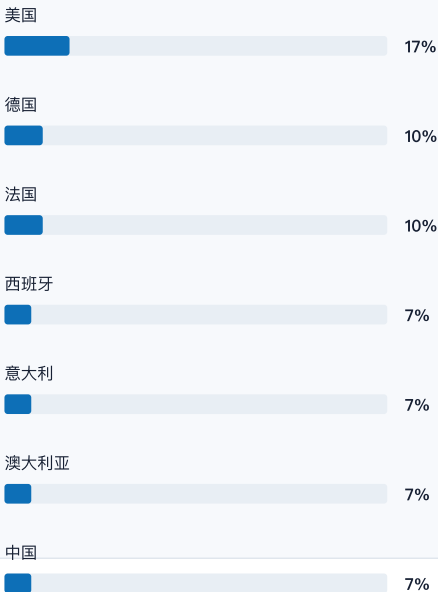
- 对于航空航天与国防以及政府/公共服务，门槛为5亿美元。

按总部所在地划分的组织按行业划分的组织

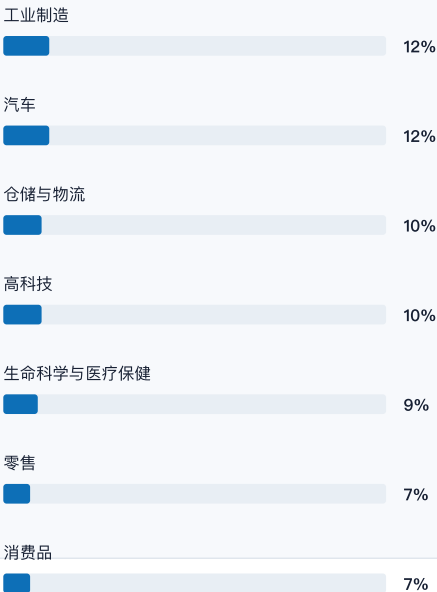
研究样本：受访组织的总部与行业分布

受访组织分布（百分比）

总部所在地



行业



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

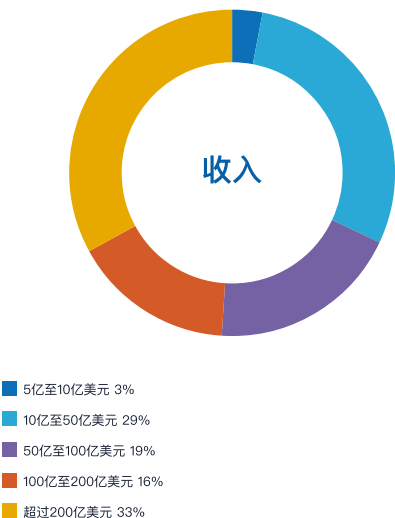
受访组织的总部所在地与行业分布

按年收入（或政府/公共服务的预算）划分的组织（美元）按职位划分的高管

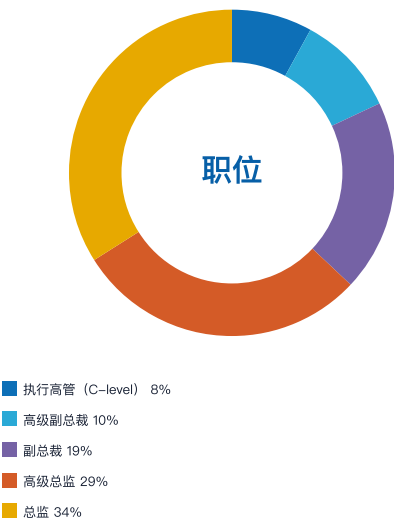
研究样本：组织收入与高管职位

受访组织的年度收入与受访高管职位分布

组织年度收入



高管职位

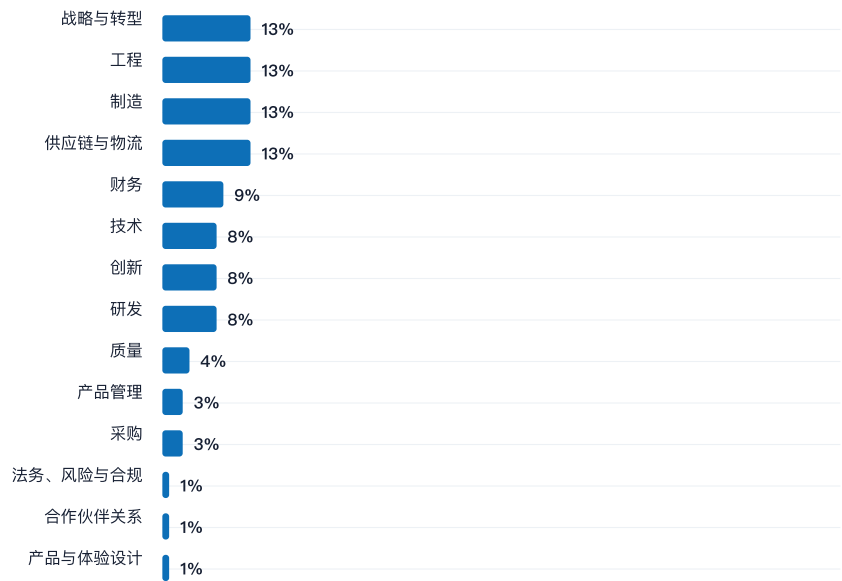


来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

受访组织收入与高管职位分布

研究样本：受访高管职能分布

受访高管所在职能（百分比）



研究结果反映受访者对在线问卷的看法；各项因四舍五入可能不合计为100%。

受访高管职能分布

研究结果反映了受访者对本研究在线问卷的看法，旨在提供方向性指导。请参阅方法部分了解受访者详情，并与凯捷专家联系讨论具体影响。

附录

物理AI及其在机器人技术中的作用介绍

物理AI代表了AI下一个主要演进阶段：在物理世界中行动的AI。虽然AI迄今为止主要是在数字环境中运行——分析数据、优化数字工作流程和生成数字输出——但物理AI应用于物理系统，使机器能够在现实世界中感知、推理和自主行动。它通过将AI“大脑”（能够感知、推理和学习）与物理实体（如机器人、自动驾驶汽车、医疗设备、工业机器或互联基础设施）相结合来实现这一点。虽然物理AI适用于广泛的物理系统（见图28），但本报告特别关注其在机器人技术中的应用。在本报告中，“物理AI”指的是用于机器人技术的物理AI——即由AI驱动的、能够在物理世界中感知、推理和自主行动的机器人。

物理AI在机器人技术中实现的功能

机器人技术是物理AI最重要的应用之一。物理AI使机器人能够感知周围环境，做出情境感知决策，并自主行动。AI模型在云端训练，并在机器人边缘运行推理（见图29）。早期AI在机器人技术中的应用主要是确定性和基于规则的，而物理AI使用概率性的、学习驱动的模式，使机器人能够实时适应和决策。

这赋予了机器人以前无法实现的能力：在非结构化环境中运行、无需重新编程即可处理多种场景、适应现实世界变化，并随时间推移学习新任务。这些能力将机器人远远带离固定的、预编程的行为，为在制造业、物流、医疗保健、农业、建筑、采矿等领域的部署开辟了新的可能性。

从特定任务机器人到共享智能平台 从数字AI代理到具身AI代理 物理AI适用于广泛的机器人形态——传统机器人技术仍然必不可少 物理AI通过将焦点从特定任务机器转移到共享智能平台，重新定义了机器人技术。传统上，机器人能力紧密绑定于单个机器，通过固定编程定义并为特定环境设计。这在受控环境中提供了强大的性能，但在现实世界运营中证明是脆弱、昂贵且难以扩展的。物理AI通过将智能从单个机器人解耦来改变这一点。核心智能驻留在共享模型和数据中，而不是硬编码的机器逻辑中，机器人充当通用智能层的具身化，该智能层跨机队、环境和用例学习。随着模型通过数据、仿真和现实世界反馈得到改进，在一个情境中开发的能力可以在其他情境中复用。学习随时间累积，使机器人技术能够作为一个持续改进的平台而不是孤立系统的集合进行扩展。通过在机器人之间引入共享智能层，物理AI将代理范式扩展到现实世界。机器人成为能够规划、编排和执行复杂物理任务的具身AI代理。物理AI适用于许多不同的机器人形态，每种形态适合不同的任务和环境。然而，在涉及重复性、高精度和高吞吐量操作的高度结构化环境中，传统机器人技术仍然至关重要，是物理AI系统的补充。

图28. 物理AI如何应用于机器，其中机器人技术是领先的前沿

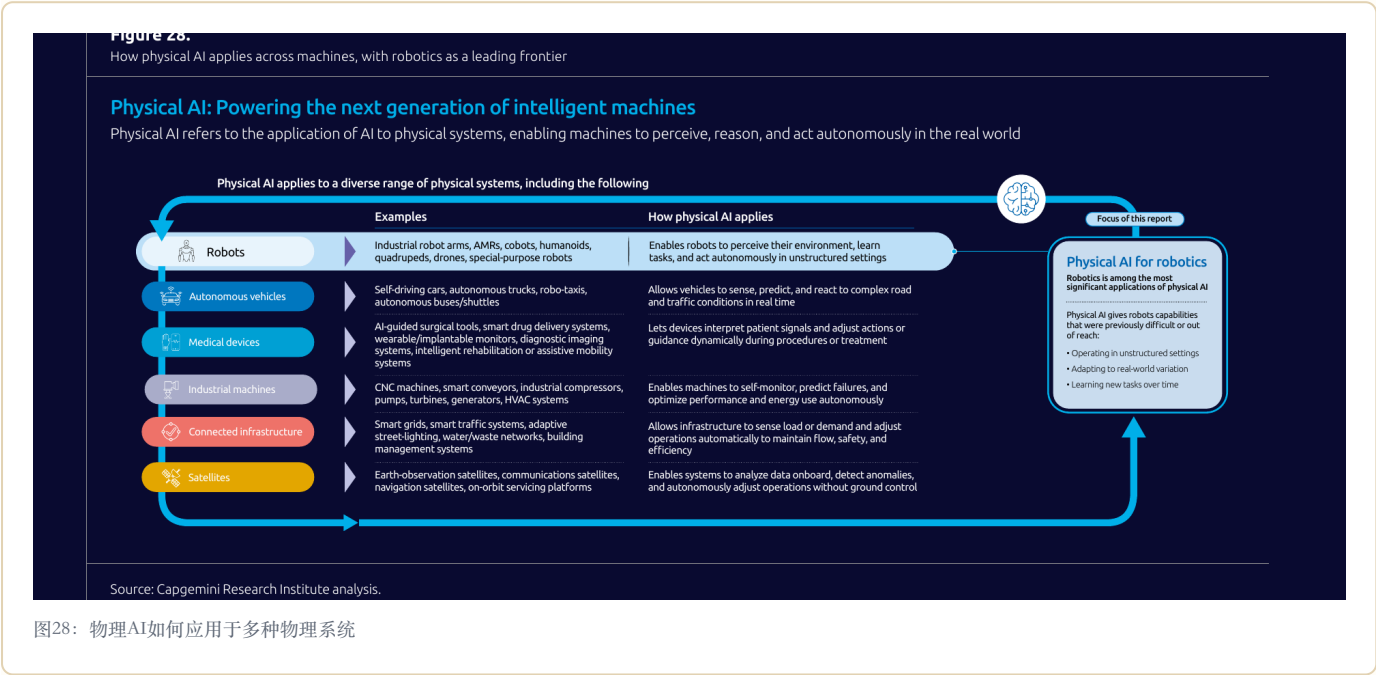


图28：物理AI如何应用于多种物理系统

物理AI：为下一代智能机器赋能

物理AI是指AI在物理系统中的应用，使机器能够在现实世界中感知、推理和自主行动

物理AI应用于多种物理系统，包括以下 来源：凯捷研究院分析。

图29. 物理AI如何在机器人技术中运作

步骤	描述
云端模型预训练以获取通用物理智能	大规模基础模型（例如视觉-语言-行动模型）在云端使用图像、视频和基于物理的仿真进行预训练，以学习物体、行动和物理交互的通用表征，这些表征可跨任务和环境迁移。
特定任务技能获取	预训练模型通过仿真学习，并在需要时通过远程操作数据进行适配，以适应特定任务。根据任务，系统使用模仿学习*、强化学习或两者的结合来学习特定任务策略，即决定机器人如何在现实世界变异性下行动的习得决策模型。
策略边缘部署	策略被部署到机器人的机载（边缘）计算单元，实现低延迟、实时推理，无需依赖持续的云连接。
现实世界操作	在操作过程中，机器人通过视觉、力觉和触觉传感器持续感知环境，执行实时推理以解读情境和评估行动，并通过执行器执行任务。在工业环境中，要大规模释放价值，还需要将机器人运营与ERP、WMS和更广泛的制造系统集成，使运营执行与业务流程保持一致。
持续适应和机队学习	现实世界执行产生的数据用于进一步优化云端模型和策略，更新后的策略部署到整个机器人机队，实现持续的机队范围学习。

来源：凯捷研究院分析。

图30. 新兴的机器人技术物理AI生态系统

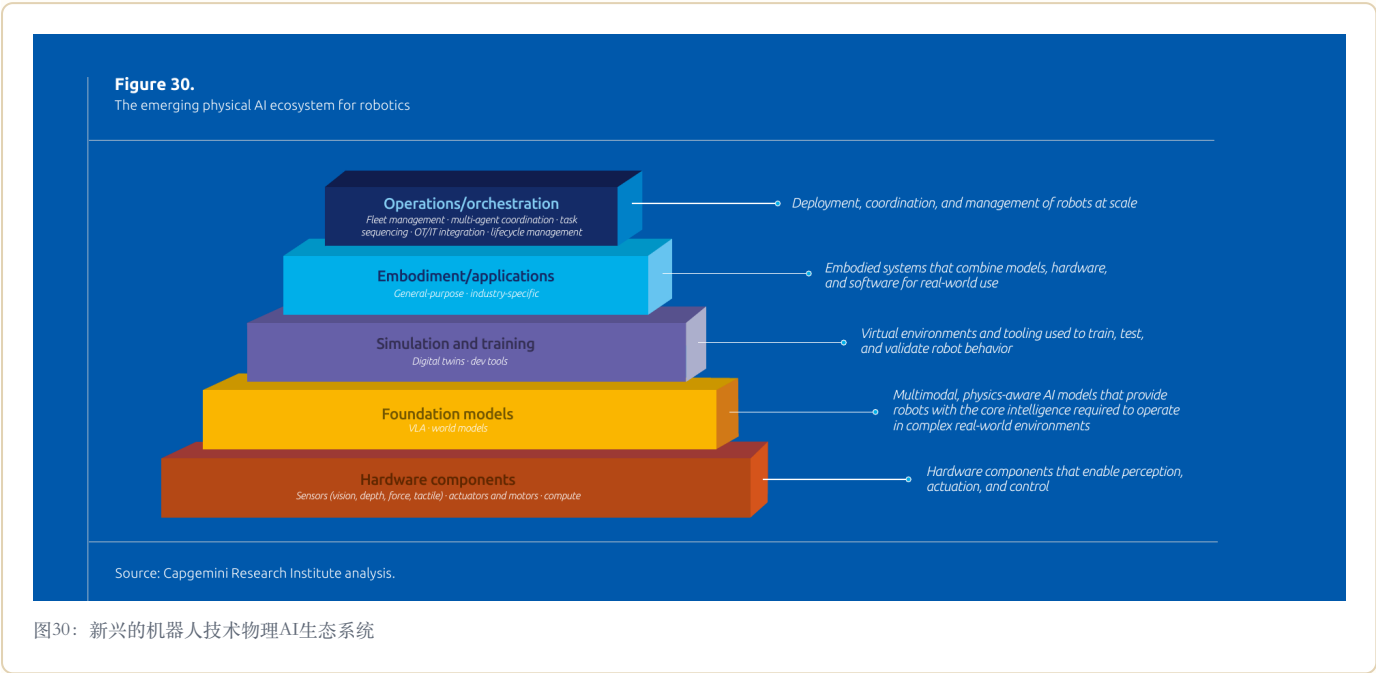


图30：新兴的机器人技术物理AI生态系统

物理AI用例

制造业

- 自适应物料搬运：管理不规则的原材料或半成品，根据形状和重量变化调整抓取和移动。
- 动态硬件原型制作：装配和重新配置原型，适应频繁的设计变更而无需手动干预。
- 动态产品装配：在生产线上自主适应，识别不同的产品型号并调整抓取、力度和顺序，无需重新编程。
- 个性化产品装配：适应定制配置和可变组件，为每个独特产品动态调整装配步骤。
- 自主生产线换型：自主重新配置生产线以适应新产品型号，识别形状和材料差异，并调整工具、对准和操作参数。
- 质量检测：围绕复杂物体移动，在变化的光照和角度下检测缺陷，并动态调整检测路径。

供应链与物流

- 自适应包装系统：检测不规则产品形状并实时调整包装或包裹技术。
- 自适应拾取和放置：使用视觉和触觉传感实时调整抓取和放置，以处理不规则或易变形物品。
- 智能货架补货：识别不同产品形状，调整放置技术，并预测人类移动以在拥挤空间中导航。
- 自主货物运输：在繁忙设施中安全移动货物，实时预测交通模式并重新规划路线以避免碰撞。
- 微物流：在设施内执行短距离、本地化任务，如拣选、分拣或运送工具和物资。

维护

- 设备监测与诊断：自主检查机械，并在变化的运行和环境条件下检测新出现的故障。
- 现场检测：自主检查设备、结构和多样化物理环境（包括田地和作物），并适应地形和环境条件。
- 自适应维护：自主维护机器人检测磨损和损坏，解读传感器数据，并动态调整工具和运动以执行维修，无需手动干预。

零售与服务

- **客户体验与互动：**通过互动参与、指导、服务和实时信息支持增强客户旅程。
- **人行道配送机器人：**能够在城市环境中导航，以完成电子商务和食品订单的最后一公里配送。
- **快速服务餐厅（QSR）自动化装配：**复制精确、可重复的食品准备任务，如烧烤、油炸或组装订单。
- **货架智能：**配备视觉能力的机器人自主穿越零售通道，检测库存水平、错放、定价错误和合规差距，以改善零售运营。
- **餐厅服务机器人：**自主前场机器人在餐厅内导航，将食品和饮料从厨房送到餐桌。

设施与安全管理

- **自适应安全与合规监控：**在动态、不可预测的环境中监控安全和合规性。例如，机器人在工厂车间巡逻，检测未经授权的进入，并调整路线进行调查。
- **动态设施管理：**在工厂车间、办公室、医院或公共场所进行清洁和消毒。例如，机器人在检测到溢出物或污垢后，增加高流量区域的清洁频率。
- **危险环境操作：**在危险、高风险或难以进入的区域执行任务，如极端温度、辐射、有毒化学品、密闭空间或不稳定结构的区域，从而减少工人风险。

生命科学与医疗保健

- **精准手术机器人：**使用成像和传感器反馈指导切口和器械移动，实时适应组织状况。
- **患者移动与康复：**适应姿势、力量和移动模式，以支持安全移动和恢复的辅助及康复机器人。
- **实验室自动化与样本处理：**在临床、生物制药或诊断实验室中处理样本、移液、涂布和高通量工作流程。
- **老年人护理伴侣机器人：**具有社交意识，监测生命体征，提供认知参与和提醒，检测行为变化，并向护理人员发出安全警报。
- **医院物流机器人：**在医院环境中运输药物、床单、餐食和医疗用品的自主系统。

保险

- **风险评估与理赔：**对家庭、车辆或设施进行自主资产级检查，为承保和理赔决策收集证据。
- **灾害损害评估：**在飓风、洪水或野火等事件后，进行大范围灾后评估，测绘损害严重程度并对社区或区域内的索赔进行分类。
- **灾害响应：**进入危险区域、移动碎片，并在适应混乱条件的同时协助救援行动。

媒体与娱乐

- **AI驱动电子动画：**为主题公园、景点和沉浸式娱乐体验提供逼真动作、表情和互动的机器人角色。
- **舞台与布景自动化：**精确移动布景、道具和背景，在排练、演出或广播期间与提示同步，并适应最后一刻的变化。
- **智能灯光与效果：**自主重新定位、重新聚焦并调整照明或效果，以响应编排、走位或场景转换。

建筑与采矿

- **自主土方运输与搬运：**AI引导的挖掘机、装载机和运输卡车，在变化的场地条件下进行自适应控制，完成导航、挖掘、装载和运输物料。
- **机器人勘测与场地测绘：**自主捕捉地形、进度和竣工数据，持续更新地图，并与项目或矿山计划对齐。

农业

- **自主收割：**识别成熟农产品，并使用柔和、自适应的抓取采摘水果或蔬菜而不造成损坏。
- **精准作物护理：**检测杂草、害虫或植物级需求，并提供针对性处理，如微量喷洒或机械清除。

- 园艺机器人：在果园、葡萄园和受控环境中执行修剪、搭架、授粉、冠层管理和其他植物护理活动。

政府/公共服务

- 搜索与救援行动：测绘混乱的灾难环境，在瓦砾中导航，并调整提升技术以安全到达被困人员。
- 消防支援机器人：在充满烟雾的环境中导航、灭火、处理危险材料，并降低人类消防员的风险。
- 医疗保健与老年人护理：在医院或护理机构提供协助，支持人员短缺。

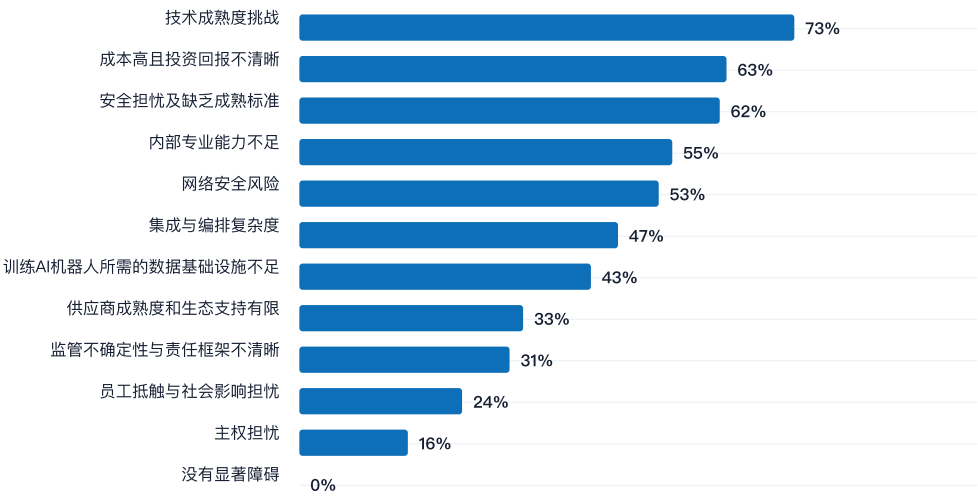
阻碍物理AI采用和扩展的障碍

您认为在您的组织中采用或扩展物理AI最关键障碍是什么？将以下选项列为前五名障碍的受访者百分比

来源：凯捷研究院，物理AI机器人技术调查，2026年1-2月，N = 1,678位高管。

图27：阻碍物理AI采用和规模化的主要障碍

选择各项作为前五名障碍之一的受访高管比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

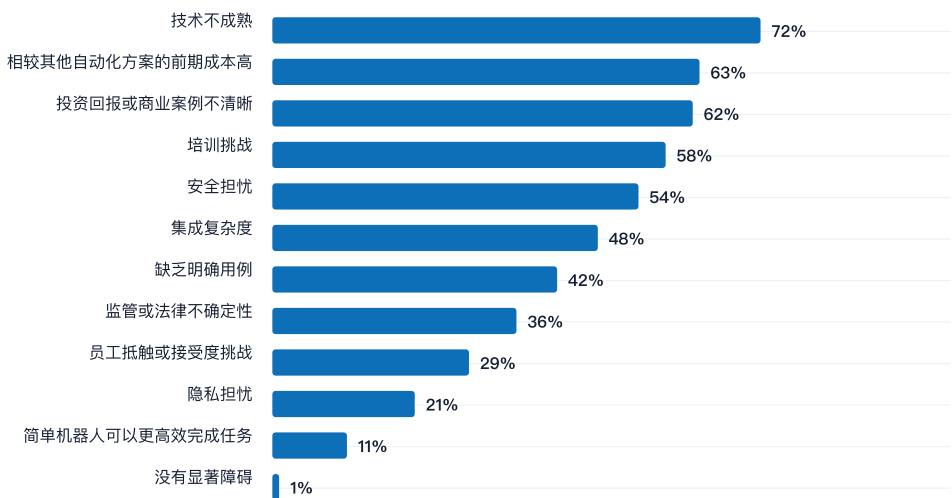
阻碍物理AI采用和扩展的障碍

阻碍人形机器人采用的障碍

您认为人形机器人采用的最大障碍是什么？将以下选项列为前五名障碍的受访者百分比

图28：阻碍人形机器人采用的主要障碍

选择各项作为前五大障碍之一的受访高管比例



来源：凯捷研究院，Physical AI for robotics survey，2026年1月至2月，N = 1,678 位高管。

阻碍人形机器人采用的障碍

参考文献

1. Physical Intelligence (π), “The Physical Intelligence Layer,” 2026年2月.
2. Dexterity的“超人形”机器人(Mech)是一款轮式移动工业机器人，带有两个高伸展臂，设计用于自主执行重型物流和制造任务。
3. PR Newswire, “Dexterity's World Model, Foresight, Delivers a Big Leap for Physical AI Powered Truck Loading,” 2026年3月.
4. Foxconn, “Hon Hai Technology Group (Foxconn) And Intrinsic Launch Joint Venture To Build AI Factory Of The Future,” 2025年11月.
5. FBR, “Robotic Construction Is Here,” 检索自 <https://www.fbr.com.au/view/hadrian>; Business Wire, “PulteGroup Pilots Innovative New Construction Process,” 2025年2月.
6. Boston Dynamics, “Boston Dynamics & FieldAI Partner to Bring Robots into Uncharted, Dynamic Environments,” 2026年3月; Boston Dynamics, “Case study: How FieldAI and Boston Dynamics Made Autonomy Practical on Construction Sites,” 检索自 <https://bostondynamics.com/case-studies/field-ai-boston-dynamics-made-autonomy-practical-on-construction-sites/>
7. OECD, “Attracting new farmers for the future of agriculture,” 2025年10月; Newsweek, “America Has a Farming Crisis,” 2024年3月.
8. TorqueAGI, “In collaboration with John Deere to build Agricultural Foundation AI,” 2026年2月; TorqueAGI, “Foundation Models for Robots,” 检索自 <https://www.torqueagi.com/#about-us>
9. NVIDIA, “Wandercraft Begins Clinical Trials for Physical AI-Powered Personal Exoskeleton,” 2025年5月.
10. Kanematsu, “Kanematsu Invests in Intuition Robotics to Collaborate on Japanese Expansion of AI Companion Robot, ‘ElliQ’,” 2025年9月; Wired, “Review: ElliQ AI Companion Robot,” 2025年7月.
11. Renew Economy, “Future of solar: Robots put finishing touches on large Victoria PV Project,” 2026年3月.

12. NVIDIA, “NVIDIA Announces Isaac GR00T N1 — the World's First Open Humanoid Robot Foundation Model — and Simulation Frameworks to Speed Robot Development,” 2025年3月.
13. CNBC, “Google's DeepMind says it will use AI models to power physical robots,” 2025年3月; Arxiv, “Gemini Robotics: Bringing AI into the Physical World,” 2025年3月.
14. Physical Intelligence (π), “The Physical Intelligence Layer,” 2026年2月; Skild AI, Any robot. Any task. One brain. 检索自 <https://www.skild.ai/>; TorqueAGI, “Inside the VLAM Stack: Building Generalist Agents That See, Understand, and Act,” 2025年7月.
15. Hugging Face, LeRobot, 检索自 <https://huggingface.co/lerobot>
16. Channel News Asia, “AI pioneer Fei-Fei Li's World Labs raises \$1 billion in funding,” 2026年2月.
17. Wired, “Yann LeCun Raises \$1 Billion to Build AI That Understands the Physical World,” 2026年3月.
18. TechCrunch, “Runway releases its first world model, adds native audio to latest video model,” 2025年12月.
19. NVIDIA, “NVIDIA Launches Cosmos World Foundation Model Platform to Accelerate Physical AI Development,” 2025年1月.
20. NVIDIA Developer, NVIDIA Isaac Sim, 检索自 <https://developer.nvidia.com/isaac/sim>.
21. TechCrunch, “Rivian creates another spinoff company called Mind Robotics,” 2025年11月.
22. NVIDIA, “Robotics and Edge AI,” 检索自 <https://www.nvidia.com/en-sg/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-thor/>
23. Financial Times, “Chinese EV maker plans to use solid-state batteries in humanoid robots,” 2025年11月.
24. Barclays, “Impact Series 14 - AI Gets Physical - AI-powered humanoid robots are set to augment the workforce,” 2026年1月.
25. Forbes, “Why the Robotics Revolution Is Stalling, And How Smart Companies Are Breaking Through with Financing,” 2025年7月.
26. PR Newswire, “ZaiNar, the Foundation Layer of Physical AI, valued at \$1B+ with \$100M investment,” 2026年2月.
27. International Labour Organization, “Responding to Demographic Shifts in the Labour Market in Europe and Central Asia,” 2025年6月.
28. S&P Global, “1 in 5 Americans to be 65 years old or older by 2030,” 2024年11月.
29. Global Times, “China to be a severely aging society by 2035; quick aging, large population pose challenges: health authority,” 2022年9月.
30. CB Insights, State of Venture 2025, 2026年1月.
31. F-Prime Capital, State of Robotics Report 2026, 2026年3月.
32. Tesla, “AI & Robotics,” 检索自 <https://www.tesla.com/AI>; NBC News, “Elon Musk says Tesla will stop producing its S and X models as it shifts to making robots,” 2026年1月.
33. Fast Company, “How Disney brought a robotic Olaf to life for its new Paris park,” 2026年3月.
34. NPR, “Why aren't Americans filling the manufacturing jobs we already have?” 2025年5月.
35. European Labour Authority, Report on labour shortages and surpluses 2024, 检索自 https://www.ela.europa.eu/sites/default/files/2025-06/EURES_Report_on_labour_shortages_and_surpluses_2024.pdf
36. Forbes, “Why Reliability Is The Hardest Problem in Physical AI,” 2025年6月.
37. Stanford University Human-Centered Artificial Intelligence, “AI Can't Do Physics Well - And That's a Roadblock to Autonomy,” 2026年1月; Li, P., Xiang, T., Mao, E., Wei, S., Chen, X., Masood, A., Li, F.-F., & Adeli, E. (2025). “QuantiPhy: A Quantitative Benchmark Evaluating Physical Reasoning Abilities of Vision-Language Models,” arXiv:2512.19526, <https://arxiv.org/abs/2512.19526>
38. 同上.
39. Agibot World, “Agibot World: The First Large Scale, Enterprise Quality, Realistic Task Dataset and Ecosystem for Embodied AI,” 检索自 <https://agibot-world.com/>
40. Tech in Asia, “China unveils first national standards for humanoid robots,” 2026年3月; Xinhua, “China's first national standard system for humanoid robotics poised to spur industry development,” 2026年3月.

41. EU Artificial Intelligence Act, Annex III: High-Risk AI Systems Referred to in Article 6(2), 检索自 <https://artificialintelligenceact.eu/annex/3/>; European Commission, “Commission welcomes political agreement on new rules to ensure the safety of machinery and robots,” 2022年12月; European Union, Regulation (EU) 2023/1230 on machinery (consolidated version), 检索自 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02023R1230-20230629>
42. Business Insider, “FedEx's CEO explains why regular humanoid robots can't get the job done in its warehouses,” 2026年1月.
43. BMW Group, “BMW Group to deploy humanoid robots in production in Germany for the first time,” 2026年2月; Hexagon, “BMW deploys the humanoid robot AEON in production sites in Germany,” 2026年2月; BMW Blog, “Inside BMW's Humanoid Robot Reveal: What We Saw at the Talent Campus in Munich,” 2025年3月.
44. Reuters, “Mercedes-Benz takes stake in robotics maker Appteronik, tests robots in factories,” 2025年3月.
45. TechCrunch, “Toyota contracts seven Agility humanoid robots for Canadian factory,” 2026年2月.
46. SCMP, “Xiaomi tests humanoid robots in car plant as firm plans to deploy ‘large number’ in 5 years,” 2026年3月.
47. GXO, “Shaping the supply chain of tomorrow,” 检索自 https://gxo.com/news_article/shaping-supply-chains-with-humanoid-technology/#:~:text=Shaping%20the%20supply%20chain%20of,and%20reducing%20risk%20of%20injury.
48. Technology Magazine, “How Siemens and Humanoid Shape the Future of Automation,” 2026年1月.
49. Reuters, “UBTech agrees Airbus deal to expand robot use in aviation manufacturing,” 2026年1月.
50. Reuters, “Foxconn to deploy humanoid robots at Houston AI server plant,” 2025年10月.
51. SCMP, “Robot makers AgiBot, Unitree and UBTech land more orders from Chinese enterprises,” 2025年7月.
52. Interesting Engineering, “Video: US unveils ‘scientist’ humanoid robot to boost drug discovery, experiments,” 2025年3月.
53. Orano, “Capgemini and Orano deploy the first intelligent humanoid robot in the nuclear sector,” 2025年11月.
54. 同上.
55. Auto Express UK, “Renault Calvin is an industry-first humanoid robot that's already helping build cars,” 2026年3月.
56. Hyundai, “Hyundai Motor Group Announces AI Robotics Strategy to Lead Human-Centered Robotics Era at CES 2026,” 2026年1月.
57. Al Jazeera, “Humanoid robots race and tumble at China's first robot Olympics,” 2025年8月.
58. NBC News, “China's humanoid robots take center stage for Lunar New Year showtime,” 2026年2月.
59. Xinhua, “Humanoid robot attendant joins high-speed train crews for Spring Festival travel rush,” 2026年2月.
60. Tech in Asia, “China unveils first national standards for humanoid robots,” 2026年3月.
61. Xinhua, “China's first national standard system for humanoid robotics poised to spur industry development,” 2026年3月.
62. 模仿学习: 一种学习方法, 机器人通过观察和模仿专家演示(例如, 人类远程操作)来学习任务。
63. 强化学习: 一种学习方法, 机器人通过试错来改进其行为, 根据定义的目标和约束优化行动。

作者

认识专家

Pascal Brier 凯捷集团首席创新官 pascal.brier@capgemini.com Pascal Brier是凯捷集团首席创新官兼全球执行委员会成员。自2021年起,他领导集团全球技术、创新与风险投资议程,监督新兴技术的识别、探索和跨行业应用方式。在他的领导下,公司帮助组织利用技术进步创造新形式的商业价值和对社会的积极影响。

Alexandre Embry 凯捷AI机器人与体验实验室副总裁兼负责人 alexandre.embry@capgemini.com Alexandre领导着一个全球团队,推动数字世界与物理世界的融合,并通过物理AI和通用机器人技术加速自动化,将能够感知、推理和自主行动的智能机器跨行业投入大规模生产。他就代理式AI、物理AI、数字孪生、IT与OT融合、高级可视化和人机协作的实际整合向C-suite高管提供建议,将前沿技术转化为可衡量的业务成果。Alexandre是一位公认的思想领袖和常邀主题演讲人,也是多份塑造自主工业系统未来的有影响力出版物的作者。

Tim Ensor 执行副总裁兼总经理 - 智能服务, Cambridge Consultants, 凯捷Invent旗下 tim.ensor@cambridgeconsultants.com Tim与其团队合作, 帮助Cambridge Consultants的客户通过识别、开发和部署改变世界的AI和数字服务创新来实现业务影响。他经常担任公开演讲者和活动主席。在加入Cambridge Consultants之前, Tim曾在高增长技术和咨询企业担任多个商业领导职务, 涉及电信、能源、消费品和物流等领域。Tim是Cambridge Wireless的董事会成员, 也是Cambridge Tech Week组委会成员。Tim拥有英国巴斯大学电子工程一等学士学位和剑桥大学MBA学位。

John Robins frog物理AI负责人, 凯捷Invent旗下 john.robins@frog.co John的工作核心是创建智能系统与人员无缝协作的互联生态系统。凭借超过18年的产品战略和创新经验, 他与雄心勃勃的公司合作, 利用机器人技术、计算机视觉、边缘AI、物联网和地理空间技术构想新的未来。此前, John曾在领先科技公司担任产品管理工作, 并运营过一家工业物联网初创公司。John拥有德蒙福特大学MBA学位, 正在佐治亚理工学院攻读计算机科学(AI)硕士学位, 并经常就物理AI发表演讲和撰写文章。他还是Gartner产品管理大使。

作者

认识专家

Dr. Mat Gilbert 总监, AI与数据负责人, Synapse Product Development, 凯捷Invent旗下 mat.gilbert@synapse.com Mat Gilbert是Synapse的物理AI负责人, 在跨行业复杂环境下的先进技术解决方案方面拥有超过15年的深厚经验。他拥有计算机科学和电子工程博士学位, 专攻运动跟踪和增强现实。Mat在物理和边缘AI、NVIDIA边缘硬件、传感器融合、实时空间计算和加固型物联网架构方面拥有深厚的专业知识。他领导跨职能团队设计和部署大规模的物理和边缘AI系统, 确保复杂的AI模型和物理硬件能够无缝集成成为高度要求的复杂环境量身定制的、健壮的生产级系统中。

Charlotte Pierron-Perlès 执行副总裁, 智能产业董事总经理, 凯捷Invent charlotte.pierron@capgemini.com Charlotte是凯捷Invent智能产业全球业务的董事总经理, 她为世界领先的组织塑造研发和运营的未来。作为拥有20年经验的可信顾问, 她指导CXO进行复杂的转型, 其中AI、机器人技术和先进技术成为盈利、韧性和脱碳的引擎。Charlotte是将数据驱动战略转化为有竞争力、可持续和全球性工业现实的公认专家。

Dr. Marc Blanchon 物理AI负责人, 凯捷工程 marc.blanchon@capgemini.com Marc领导凯捷工程的物理AI业务, 专注于从仅感知AI向在现实世界环境中运行、决策和行动的自主系统转变。凭借计算机视觉博士学位和超过9年的经验, 他在先进AI、机器人技术和大规模工业部署的交叉领域工作。他架构了涵盖计算机视觉、机器人技术、边缘AI和实时决策的生产级系统, 应用于制造业、能源、航空航天和零售业。

作者

认识专家

Kary Bheemaiah 副总裁, 首席技术与创新官 (CTIO), 凯捷Invent kary.bheemaiah@capgemini.com Kary Bheemaiah是凯捷Invent的副总裁兼CTIO, 负责物理AI等新兴技术战略。他还是世界经济论坛的执行研究员, 指导技术融合方面的工作。作为前AI初创公司负责人和欧盟研究员, 他是TEDx演讲者、书籍作者, 并为MIT Tech Review、WIRED和HBR供稿。

Craig Suckling 代理式AI规模化全球负责人, 凯捷 craig.suckling@capgemini.com Craig是凯捷的代理式AI规模化全球负责人。在加入凯捷之前, Craig是英国政府的首席数据官, 负责政府的数据和AI战略与变革议程, 同时他也是亚马逊科技的数据和AI战略全球负责人。Craig还曾担任私营部门CDO、初创公司创始人和顾问委员会成员。他在2020-2026年位列欧洲数据与AI领袖百强, 并在2024年位列全球数据与AI领袖百强。

作者

认识凯捷研究院

Jerome Buvat 凯捷研究院负责人 jerome.buvat@capgemini.com Jerome是凯捷研究院的负责人。他与行业领袖和学者紧密合作, 帮助组织理解新兴技术的业务影响。

Subrahmanyam KJV 凯捷研究院高级总监 subrahmanyam.kvj@capgemini.com Subrahmanyam是凯捷研究院的高级总监。他热衷于探索技术对业务和消费者行为的影响，在一个正被软件“吞噬”的世界中跨越各行业。

Roopa Nambiar 凯捷研究院总监 roopa.a.nambiar@capgemini.com Roopa是凯捷研究院的总监，在提供战略洞察和发表关于新兴技术、创新和可持续发展的研究方面拥有丰富经验。

Nupur Sinha 凯捷研究院经理 nupur.sinha@capgemini.com Nupur是凯捷研究院的经理。她与C-suite利益相关者在数字化转型主题上合作。她最受认可的工作包括对八版《世界能源市场观察》（WEMO）报告的贡献——这是凯捷在能源和公用事业领域的旗舰出版物。她还是技术及市场趋势方面的出版作者。

作者们要特别感谢凯捷研究院的Deepakshi Goyal和Amol Khadkar对本报告的贡献。

作者们还要感谢Sergey Patsko, Ramon Antelo, Nicolas Rousseau, Dheeran Velu, Andreas Sjostrom, Kevin Cloutier, Antonio Jesus Jaramillo Mesa, Xavier Navarro Munculi, Nitin Dhemre, Andy Vickers, Kedar Pimplikar, Efi Raili, Vincent Drouin, Dylan Garrett, Jason Severs, Paul Gittins, Antoine Martin, Anders E Nilsson, Daniela Rittmeier, Daniel Lichtwald, Johannes Pogoda, Carlos Mendez Perez, Martin Bendel, Naomi Kurian, Utkarsh Maheshwari, Sanna Ostberg, Frédéric Arquien, Julian Fowler, Anne-Laure Cadene, Laura Immonen Beatty, Vincent Godenir, Esther Buck, Anthony DeMarco, Elsa Estager Bergerou, Aparajita Paul, Amitabha Dutta 和 Mithun Dutta 对本报告的贡献。

凯捷共鸣AI框架 (Resonance AI Framework)

凯捷共鸣AI框架提供了一种顺序性的方法，用于成功构思、构建和实施AI驱动的转型。它帮助商业领袖实现AI的潜力并取得市场领导地位，无论其行业如何。以转型战略为基础，该框架有助于整合运营和文化，同时加速AI价值创造——既为今天转型，也为未来而建。

AI基础 (AI essentials)

要获取AI的变革力量，组织必须建立“智能即服务”。这包括可扩展且稳健的企业数据基础，结合先进的语言和视觉模型，以及内置AI能力的应用。这些为构建、运营和扩展具有真实、企业特定影响力的AI提供了基础。

AI就绪性 (AI-readiness)

使AI适应组织环境需要正确的使能因素和防护措施，以保护、治理、定制和运营化AI。成功取决于赋予组织扩展AI的能力，同时确保在可信数据基础上部署安全、合乎道德且协调一致的组织AI能力，并将其作为业务资源进行管理。

人-AI化学反应 (Human-AI chemistry)

组织通过设计明确的角色和直观的交互来采用混合作形式，实现人类与AI之间的无缝协作。这种相互的可靠性和协作定义了“人-AI化学反应”——创新的新炼金术，也是您AI之旅中决定性的成功因素。

价值浪潮 (Waves of value)

在技术、治理和协作基础到位后，AI价值创造已准备好在整个组织中加速发展，准备好交付运营效率、个性化体验、业务重塑和前沿创新，使组织能够今天转型并为未来而建。

今天，凯捷处于行业前沿，我们早期就发起了努力，以推动客户的运营转型

通用机器人技术是凯捷的一个关键投资领域。我们很早就对这一技术进行了战略押注，在当前市场炒作之前就投入巨资建立了我们专门的AI机器人与体验实验室。这展示了我们通过对该领域的大量投资和深厚专业知识发展的真正承诺，将我们定位为一个严

肃的长期参与者，而非机会主义的跟随者。

- 我们拥有机器人：物理AI是凯捷创新实验室的关键投资领域。我们已经建立了深厚的专业能力，将自己定位为长期合作伙伴。
- 我们拥有合作伙伴：凯捷与NVIDIA、Gemini Robotics及领先的机器人制造商等行业参与者建立了合作关系。
- 我们提升商业影响：我们将业务战略、行业知识、技术专长和变革管理结合起来，创造并跟踪可衡量的客户价值。
- 我们拥有技术：凯捷跨所有技术栈和组件增强并开发新资产，保持平台无关；网络安全和安全性是每个多功能机器人项目的基础支柱。
- 我们提供端到端支持：从机器人初始配置到规模化部署和变革管理，凯捷具备完整的行业与技术能力。

凯捷AI机器人与体验实验室

AI集成的进步、自主代理的兴起和机器人技术的快速创新正在加速物理世界与数字世界的融合。

凯捷AI机器人与体验实验室探索了从代理式和多代理AI系统、人形机器人、强化学习、空间计算、实时3D环境和对话式AI等人性化界面等先进技术的融合中可以获取的价值。

通过其对这些技术的研究和应用，实验室探索了人机理解的下一前沿，揭示了将塑造我们客户运营转型的机遇和挑战。

凯捷AI机器人与体验实验室聚焦于：

- 通过探索技术、机器和机器人技术的融合来设计工业运营的未来
- 模拟人类体验，研究人与机器如何最佳互动
- 通过可扩展的运营用例实施具身AI和物理AI

研究与思想领导力

通过研究和学术界，超越炒作，展望未来。

内部开发与客户探索

结合技术和运营洞察，持续发展内部专业知识，并追求平台无关的解决方案。

内部与外部创新生态系统

利用凯捷的内部专家和我们世界级的合作伙伴生态系统。

我们的能力从硬件到原型设计驱动独特价值

我们不开发发现成的解决方案，而是显著增强并开发跨所有任务和组件的新资产，为我们的客户提供定制化和一流的物理AI解决方案。

认知 - 高级推理

由AI和NVIDIA技术支持的车载计算机，能够分析环境并做出实时决策，得到模块化架构的支持，允许添加智能和自主模块，并设计为可在多个站点进行更广泛部署和演变的可扩展解决方案。

感知 - 情境理解

通过LIDAR、3D和RGB-D摄像头对环境的动态理解，结合众多传感器对环境的实时感知。

机器人 - 精确快速的动作

硬关节电机使机器人能够执行高度精确的动作，同时执行所有基本的移动，如起身、行走和抓取简单物体，并且机器人能够在受限环境中有效导航。

如需更多信息，请联系：

全球

- Pascal Brier: pascal.brier@capgemini.com
- Alexandre Embry: alexandre.embry@capgemini.com

北美

- Dylan Garrett: dylan@synapse.com
- Masood Amin: masood.amin@capgemini.com

英国

- Tim Ensor: tim.ensor@cambridgeconsultants.com

荷兰

- Sander Van Lingen: sander.van.lingen@capgemini.com

西班牙

- Antonio Jaramillo: antoniojesus.jaramillomesa@capgemini.com
- Borja Tinao: borja.tinao@capgemini.com

法国

- Marc Blanchon: marc.blanchon@capgemini.com

北欧

- Meghan Young: meghan.young@capgemini.com

中东

- Ramon Antelo: ramon.antelo@capgemini.com

德国

- Daniel Lichtwald: daniel.lichtwald@capgemini.com

葡萄牙

- João Neves: joao.neves@capgemini.com

亚太

- Dheeren Velu: dheeren.velu@capgemini.com

关于凯捷研究院

凯捷研究院是凯捷内部关于所有数字化议题的智库。该研究院发布关于数字技术对大型传统企业影响的研究。团队利用凯捷的全球专家网络，并与学术和技术合作伙伴紧密合作。该研究院在印度、新加坡、英国和美国设有专门的研究中心。该研究院因其研究质量连续六次被独立分析师评为全球第一——这是行业首创。请访问我们 www.capgemini.com/researchinstitute/

更多凯捷研究院出版物

AI展望 2026代理式AI的兴起AI与决策欧洲与美国的再工业化 2025明日对话 #10工程生物学

订阅凯捷研究院的最新研究

扫描二维码或访问 <https://www.capgemini.com/capgemini-research-institute-subscription/> 获取我们的报告副本

关于凯捷

凯捷是一家AI驱动的全球商业和技术转型合作伙伴，交付切实的商业价值。我们想象组织的未来，并通过AI、技术和人才使其成为现实。凭借我们近60年的深厚传承，我们是一个负责任且多元化的团队，在50多个国家拥有超过42万名团队成员。我们利用深厚的行业专业知识和强大的合作伙伴生态系统，跨战略、技术、设计、工程和业务运营等能力，提供端到端的服务和解决方案。集团报告2025年全球营收为225亿欧元。

使其成为现实 | www.capgemini.com