

ANALOG DEVICES

超越一切可能™

从自动化迈向物理智能

塑造人形机器人未来的架构、技术与系统

敬请访问ANALOG.COM/CN/HUMANOID-ROBOTICS



前言

作者：DARA O'SULLIVAN，ADI公司工业自动化智能机器与机器人系统应用总监

数十年来，凭借传感、控制和自动化领域的渐进式进步，机器人技术不断发展。如今的机器人行业已截然不同。我们正见证传感、连接、边缘计算、运动控制、电源管理和人工智能等领域突破性技术的融合。这些创新汇聚到一起，共同造就了新一代机器，能够以前所未有的适应性在物理世界中进行感知、推理和行动。

赋予这一时代节点独特属性的，并非某一项单一技术，而是多项技术之间相互促进、协同增益的作用机制。更多维度的传感产生更多数据，更多的数据需要分布式智能，分布式智能使机器的运动能力变得更强，而更强的运动能力需要更高的感知力、连接性、安全性和能效。最终形成了一个不断累积的创新循环，加速了机器人技术的演进。

本电子书探讨了实现这一转变的基础技术和系统级设计考量。从物理智能和分布式计算架构，到多模态感知、灵巧操作、运动控制、电源智能和功能安全，每一章都深入剖析了现代机器人技术栈中的关键组成部分。

归根结底，机器人技术的未来不由单个组件决定，而取决于各组件的无缝协作。这样的未来已初见端倪，而它的根基正是物理智能。

目录

工业机器人新时代：为何创新正在加速叠加	4
实时机器人技术：物理智能的崛起	8
分布式大脑内部：机器人智能的载体	12
多模态感知与连接：人形机器人的神经系统	16
人形机械手：边缘计算的终极考验	20
实时电机控制：人形机器人运动的基础	24
实时电源管理：以智能驾驭现实约束	28
平衡人形机器人领域的创新与安全	32
从演示样机走向实用：打造现实世界可信赖的人形机器人	36



工业机器人新时代：为何创新正在加速叠加

想象这样一幅图景：一台机器人走出安全笼，不再执行单一预设动作，而是与人类并肩协作。它在杂乱的过道中自如穿行。当托盘意外移位时，它会暂停作业。它能拾取从未见过的零件，根据力反馈调整抓握力度，在不中断生产线的情况下完成任务。

直到最近，这种场景还只存在于实验室演示和展会宣传片中。在工业领域，机器人技术过去一直依赖于可预测的条件：结构化环境、确定性程序和漫长的集成周期。

如今，形势正在发生变化。机器人技术正进入一个“超级周期”，创新不断加速。过去需要数十年才能走向普及的技术，如今仅需数年乃至数月便能落地。最先感受到这股变革力量的并非消费电子产品，而是工厂车间、仓库和物流网络。在这些领域，毫秒级响应、持续运行和安全性是不容妥协的要求。

机器人技术正进入一个“超级周期”，创新不断加速。过去需要数十年才能走向普及的技术，如今仅需数年乃至数月便能落地。

变革：从线性缓慢发展到指数级融合突破

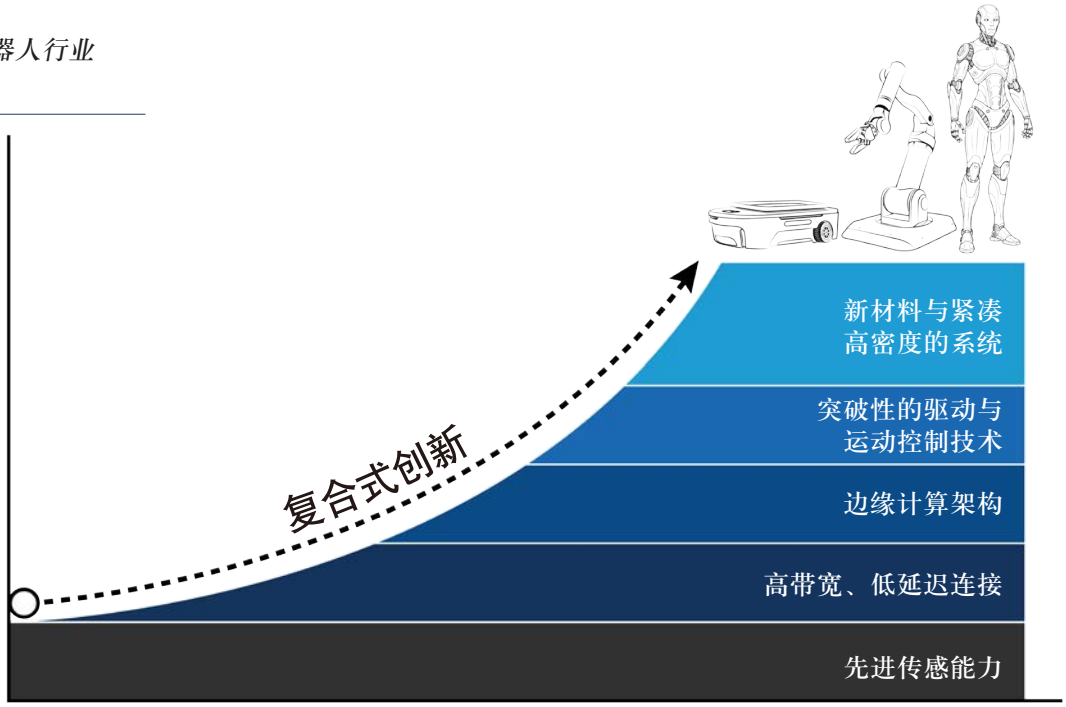
机器人技术之所以给人以突飞猛进之感，是因为我们正见证过往各自独立发展的创新轨道开始交汇：

- **高级检测技术**赋予机器人接触感知能力，从而实现细腻精准的操作
- **高带宽、低延迟连接**支持机器人系统实现同步、实时控制
- **边缘计算架构**消除了云端延迟，支持实时机器人控制
- **突破性的驱动和运动控制技术**支持安全、自适应、灵巧的机器人运动
- **新型材料和紧凑高密度的系统**支持轻量化、高能效的机器人设计

这些技术各自都在进步，但至关重要的是，每一项技术的进步都会推动其他技术更快发展。这就形成了一个闭环：

1. 更好的传感器产生更丰富、更频密的数据
2. 更丰富的数据需要边缘计算，避免云端处理带来的延迟瓶颈
3. 边缘计算支持更复杂、自适应的运动
4. 自适应运动需要更好的执行器和材料
5. 执行器产生新的、更高保真度的反馈数据

图1： *复合式创新推动机器人行业进入超级周期*



这个闭环正持续收紧并加速运转。每一次突破都为下一次突破注入更强动力。这正是复合式创新周期的标志，同时也解释了为何机器人**理论潜能**与**现实能力**之间的差距正以前所未有的速度缩小。

为何工业机器人是这场变革的前沿阵地

消费级机器人（割草机、吸尘器、教育机器人）往往备受舆论关注，而率先取得技术突破的是工业机器人。原因很简单：工业环境要求确定性、强韧性和高速度。

工业机器人运行在消费级机器人极少遇到的严苛约束条件之下：安全要求不容妥协；停机可能造成数百万元的经济损失；作业环境动态多变、杂乱无章且不可预测；人类与机器必须每天并肩协作。

要在这样的条件下高效运行，机器人必须直接在边缘端以毫秒级时间完成感知、决策和行动。机器人在工厂车间穿梭或操作精密元件时，等待200毫秒以上的云端往返时间是不可接受的。因此，“感知-决策-执行”的闭环必须在本地运行，并具备确定性时序。这一需求正在推动实时边缘智能的复兴，同时也在重新定义机器人的能力边界。

图2： *闭环加速技术进步*



工业机器人已超越传统自动化，演变成自适应自主系统：能够即时重新配置，响应不断变化的情况，与人类协作，在分布式计算节点间协调复杂任务。

传统工厂的设计以可预测性为核心。生产线采用固定布局，工作流程静态不变。机器人行为一经编程和验证，便多年不变。这种效率源于尽可能减少变化，而非应对变化。

如今，这套模式正在崩塌。现代工厂必须在充满变数、产品生命周期缩短、持续变化的环境中生存发展。因此，工厂正积极转向：

- **即时重新配置**，生产线和工作流程无需长时间停机即可灵活调整
- **动态物流**，物料、库存和机器人根据需求不断重新规划路线
- **连续检测**，将检测直接嵌入生产流程，而非仅在产线末端单独进行
- **人机协作**，机器与人类安全地并肩工作，而不是被关在安全笼里
- **产品快速切换**，产品切换时间以小时甚至分钟计，而非以周计

> 这种实时检测、本地决策和自适应运动的结合，我们称之为物理智能。

要实现上述能力，需要一种全新的机器人范式：将检测、感知与自适应行为深度整合，并由边缘端的实时、确定性智能驱动。如此一来，工厂运作方式将发生根本性转变：不再是僵化的顺序执行机器，而更像**动态的生态系统**，具备响应能力、韧性，并能随环境变化而灵活调整。

为何当下至关重要

机器人终于开始在真实世界中运行，不再局限于结构化作业单元内。它们穿梭于过道之间，与人类协作，在杂乱的环境中移动，操作各种并非预先为它们规划的物品。灵巧性和移动能力正同步提升。如果说上个时代的机器人技术让机器人变得精准，这个时代则让机器人具备自适应能力。上述要求普遍适用于各类先进的工业机器人，而人形机器人则将全部这些要求集于一身，系统复杂度达到前所未有的水平。核心问题不再是工业机器人能否实现自适应和通用化，而是企业能以多快的速度学会如何设计、部署并信任机器人。

当更丰富的检测能力与更快速、确定性的边缘智能、自适应运动控制、先进连接技术、能耗感知型运行模式深度融合时，将带来根本性的转变。机器人不再是限定用途的专用机器，而开始成为工业环境中兼具智能与韧性的通用作业单元。这种实时检测、本地决策和自适应运动的结合，我们称之为**物理智能**。



实时机器人技术：物理智能的崛起

何为物理智能？本章重点阐述物理智能的定义、它与传统自动化或云端AI的根本区别，并探讨当智能脱离抽象数据世界进入运动、力和相互作用交织的物理世界时需考量的因素。

随着机器人技术进入超级周期，传感、确定性边缘计算、连接和自适应运动相互促进，推动机器人摆脱僵化的自动化模式，形成了一类不仅执行预编程步骤而且具备**物理智能**的新系统。

物理智能源于一个闭环：

- 感知现场状况
- 制定应对策略
- 对环境作出动作响应
- 观测执行结果
- 即时进行调整

在物理世界中，这套闭环不可或缺。它是保障设备稳定、运行安全、作业有效的基本前提。当机器人移动、操作或交互时，这套闭环持续运行。与软件工作流或云推理流水线不同，物理世界中不存在自然暂停。在物理世界中，时间永不停歇，智能必须与之同步运作。

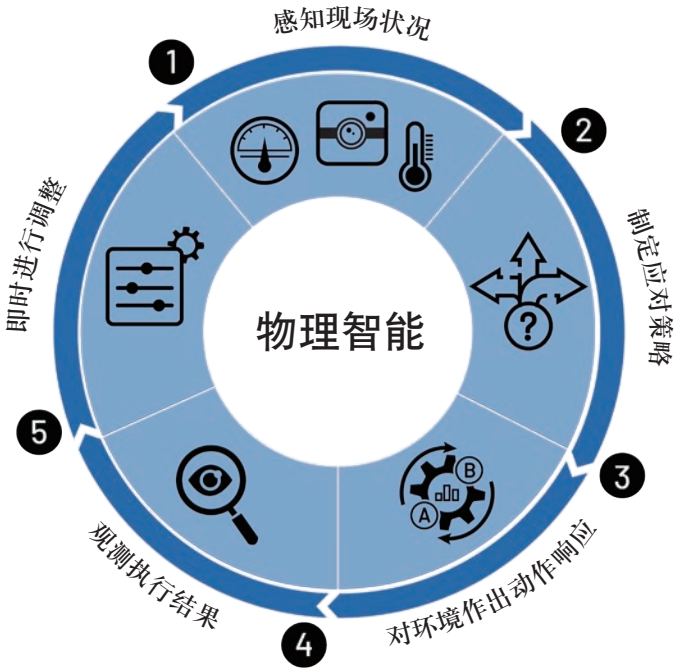


***图3：** 物理智能闭环*

物理智能源于闭环系统。

当整套闭环运转协调有序时，机器人动作流畅，可从容应对不确定工况，并与人类自然协同作业。一旦闭环失效，故障表现通常十分明显，具体表现为动作迟疑、振荡、零件掉落、急停或安全事故。在软件中，响应延迟可能意味着页面加载缓慢。在机器人领域，延迟意味着不稳定、设备损坏或不可接受的风险。

由此可见，物理智能本质上是一项系统层面的挑战。它不仅依赖于模型和算法，更要求将感知、决策、控制三大模块协同调度，形成一套时序完全同步的完整系统。

从感知到行动

现代机器人具备丰富的感知能力：视觉和深度摄像头用于环境建图，力-力矩传感器用于测量交互作用，惯性测量单元(IMU)、关节编码器和触觉传感器提供关于机器人自身状态的持续反馈。这些系统共同生成连续的状态流：并非快照，而是针对环境和机器本身持续更新的认知信息。

然而，单纯的感知并不等同于智能。只有当感知转化为受控的行动，并在现实条件下保持稳定时，智能才会显现。依托这一转化过程，系统能够实现接触感知操作、人机近距离安全交互、作业期间的持续检测及动态环境导航等功能。这些功能需要在不确定性条件下持续运行，并且机器人与周边环境均处于运动变化状态。为此，下一代机器人不再依靠单个“大脑”间歇性输出决策，而是采用可实现持续感知、控制与响应的架构。

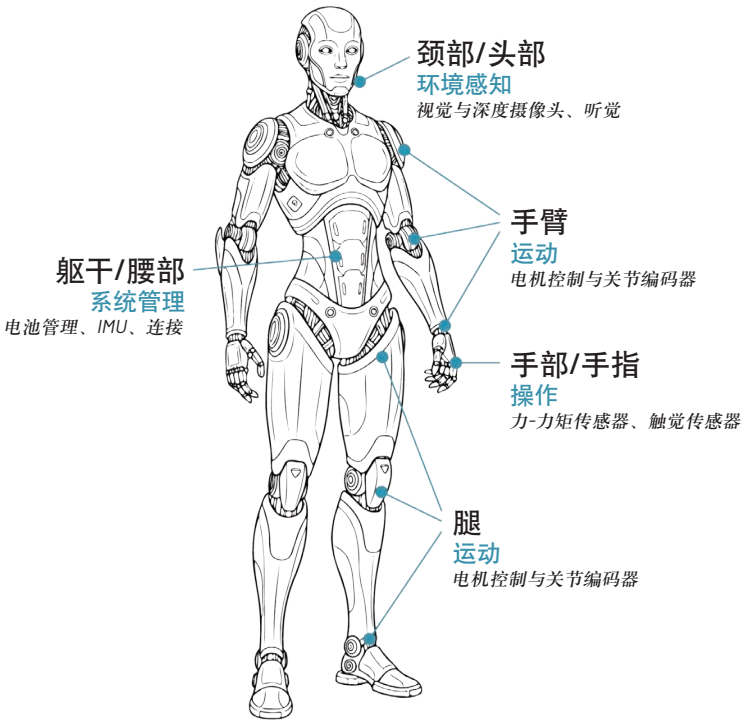


图4：*现代机器人具备丰富的感知能力*

> 感知并非叠加在自动化之上的功能，而是一种持续维持的状态，是在物理世界中实现自主性的前提。

感知力才是真正的前沿

物理智能的前景不只是性能更优异的机器人，而是具备更强适应能力的系统。

具备物理智能的机器人能够：

- 无需长时间停机即可重新配置工作流
- 无需重新编程即可处理零件和工艺变化
- 在生产过程中进行检测和调整，而非在故障后修正
- 在共用空间中直接与人类协作
- 在动态环境中灵活移动，不受僵化约束

所有这些能力都依赖于感知力：即持续关注事态发展并在条件变化时做出适当反应的能力。感知并非叠加在自动化之上的功能，而是一种持续维持的状态，是在物理世界中实现自主性的前提。

为何物理智能始于边缘端

物理智能的核心是具身：它由能够感知、运动并与世界交互的物理本体所塑造，与本体不可分割。物理智能体现在机器人的物理结构和动力学特性中。物理智能并非仅作为抽象计算存在，而是依靠传感器、执行器和环境三者之间的持续反馈而产生。因此，物理智能必须贴近机器人本体，靠近传感器、执行器及其所控制的动力学特性。但这并不意味着所有智能都是本地的，也不意味着集中计算毫无作用。更高层次的推理、规划、学习和协调得益于更广泛的上下文和更长的时间跨度。然而瞬时感知能力，也就是保障机器人运行稳定、响应及时、作业安全的智能，必须与机器本体紧密耦合。

因此，智能机器人越来越像生物系统：在更高层级具备意图和认知，全身则分布着快速反射和协调能力，所有部分作为一套同步系统协同运行。正是从集中式自动化向具身物理智能的架构转变，使机器人能够在开放的现实条件下可靠运行。

未来展望

我们常常认为是人工智能在推动机器人发展。而如今，机器人技术正在反向重塑人工智能，推动人工智能更加立足现实工况、兼顾能耗特性、走向分布式架构，同时更加遵从物理规律。物理智能所要求的不只是精度或者规模，而是要求围绕运动、交互和时序进行系统设计。

如果想要打造出能在现实世界中行动的人工智能，就必须以现实世界为出发点开展设计。当下，我们需要从根本上重新思考智能，而起点正是具备运动、感知与交互能力的机器。



分布式大脑内部：机器人智能的载体

随着机器人逐步进入人机交互的开放场景，明确感知、决策与控制模块的部署位置，对设备的稳定性、安全性、响应能力及使用可信度至关重要。人形机器人存在一项核心的全身控制难题：所有关节、传感器与执行器必须协同运作，以此维持机体平衡并完成定向动作。一旦协同机制失效，机器人便会摔倒。

上一章介绍了物理智能，并阐释了当智能脱离抽象的数据领域，进入运动、受力与交互并存的物理场景后，智能的形态会发生怎样的变化。本章节将解析机器人智能的实际承载位置，梳理中央计算单元、边缘系统与本地控制模块的职能划分，并说明此类架构设计的核心意义。

实时性为何至关重要：时机转瞬即逝

现代机器人属于分布式系统，感知、状态估计、策略运算、路径规划与控制指令会在整机范围内持续协同，最终实现稳定、实时的动作输出。

在物理系统中，时延会直接引发稳定性问题：迈步稳健与失足摔倒、平稳抓取与物件脱落、正常停驻与安全事故，往往只有一线之差。对于姿态修正、碰撞应急、打滑检测、接触感知动作等功能而言，数十毫秒的时延都会造成显著影响。时序抖动（即时序不可预测）带来的危害，甚至超过固定时延。

由此可总结出物理智能的第一准则：机器人执行动作时，动作决策可由中央单元集中处理，但动作控制必须在本地完成，且运行时序需具备可预测性与确定性。

仅有速度远远不够：确定性是根基

机器人需要**确定性时延**，而非单纯的低时延。物理智能依托闭环持续运转：感知、决策、执行、监测、调整，周而复始。整个闭环必须次次准时运行。一旦时序出现偏差，闭环系统就会失稳，进而引发振荡、动作迟滞、碰撞、物件掉落或紧急停机等问题。

确定性运行是所有功能正常运转的基础。缺失这一特性，安全机制将失效，人机协同也无从实现。只有具备确定性，机器人才能动作流畅，即便面对各类不确定因素也可维持稳定状态。

全身智能：集中决策，分布执行

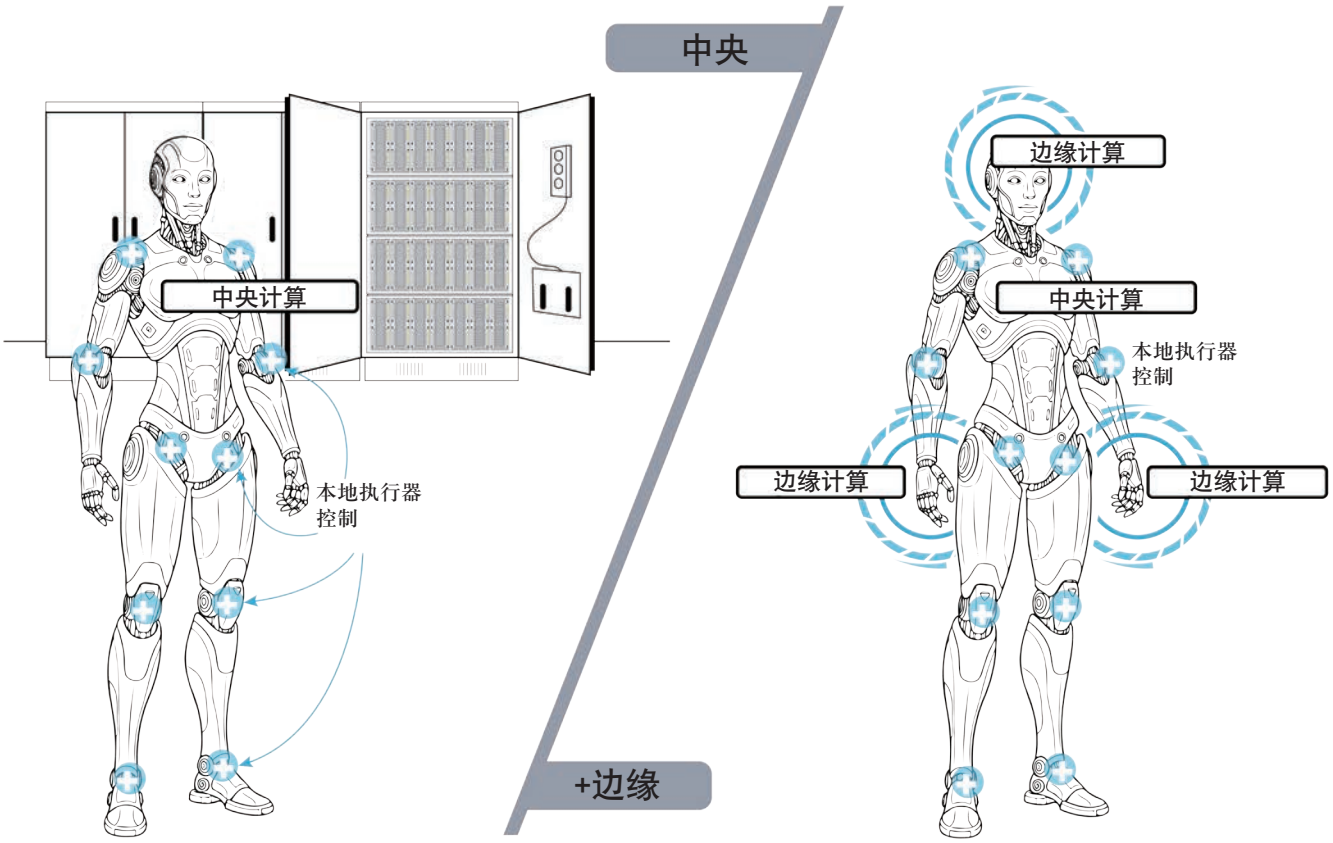
人形机器人进一步放大了集中式架构与分布式架构之间的取舍矛盾。机器人整机各部件相互耦合，依靠中央“大脑”分析整机状态，并统筹所有动作，形成一套协调统一的运行体系。这也使得产品设计普遍趋向**高度集中化智能**架构。

人形机器人面临一项根本性的全身控制难题：一旦协同机制失效，机器人便会摔倒。

中央计算单元负责全局状态估计、全身动作协同、学习型策略推理、任务层级逻辑判断、行为意图解析及长周期规划。这类功能需要结合全局信息，依托对机器人整体状态的统一研判才能实现。

但如果所有触觉信号、电机电流峰值、关节编码器脉冲、**惯性测量单元**(IMU)数据及图像流，都以原始形式全部上传至中央单元，机器人系统会迅速面临带宽不足、调度混乱的困境。边缘节点需完成数据优先级划分与筛选过滤，判定数据的上传范围与紧急等级。整套系统遵循**集中统筹、分布执行和嵌入式反射响应**的运行模式，所有环节时序保持同步。

图5：*现代工业系统的分布式大脑*



三层智能架构及各层存在的价值

- **中央智能：行为意图、运行策略与全身协同**

  这一层主导机器人的作业目标。中央智能负责全局统筹，但很少处理响应速度最快的应急动作。对于人形机器人而言，这一点尤为关键：整机协同具备整体性，当平衡状态受到威胁时，脚踝、肩部、躯干的控制无法割裂处理。目前最新的系统会在这一层搭载基于AI的策略学习模块，用于处理复杂的高维度控制任务。

- **边缘智能：实时控制、安全防护与数据精简**

  这一层可在现实场景的时序约束下，保障系统响应灵敏。边缘智能负责稳定动作姿态、限定安全扭矩与受力阈值、完成本地传感器数据融合，并将高频原始信号提炼为支撑决策的核心信息。系统不会将全部数据向上游传输，而是在本地完成筛选与聚合。

- **嵌入式智能：执行器和接触端的应急响应**

  速度最快的控制环路部署在这一层。每台执行器均配备独立的本地电机控制器，可快速响应各类瞬时事件，规避额外时延带来的风险。应急响应层涵盖电机电流调节、关节位置控制、安全规则执行、微小接触事件检测，例如触觉突变、部件打滑等。这类控制环路无需调用主计算机：最安全的响应，全程仅在关节、手部或末端执行器本地完成。

简易示例：搬运敞口容器

试想一台人形机器人，在人员往来繁忙的工业通道内，搬运一个装有部分物料的敞口容器。这项看似简单的任务，实则涉及多个不同时间响应区间。

- **嵌入式控制与应急响应（响应时长低于5毫秒）**：关节稳定、本地扭矩控制环路及限值、握持微调、打滑检测和快速干扰抑制。此类控制环路必须在执行器、手部本地运行。
- **全身控制（响应时长5–20毫秒）**：全身规划、感知与运动传感器融合、接触状态估计、关节协调、障碍物接近反应及安全执行。
- **学习型策略（响应时长50毫秒以上）**：路线选择、人类运动预测、任务意图判定（“行进过程中保持容器直立”）及策略级决策。

架构过度集中，会导致动作迟缓、反应犹豫；架构过度分散，虽能快速响应，却会造成动作缺乏统一目标。物理智能的精髓，就在于实现全局意图与本地应急的平衡，让整套系统时序同步、协同运转。

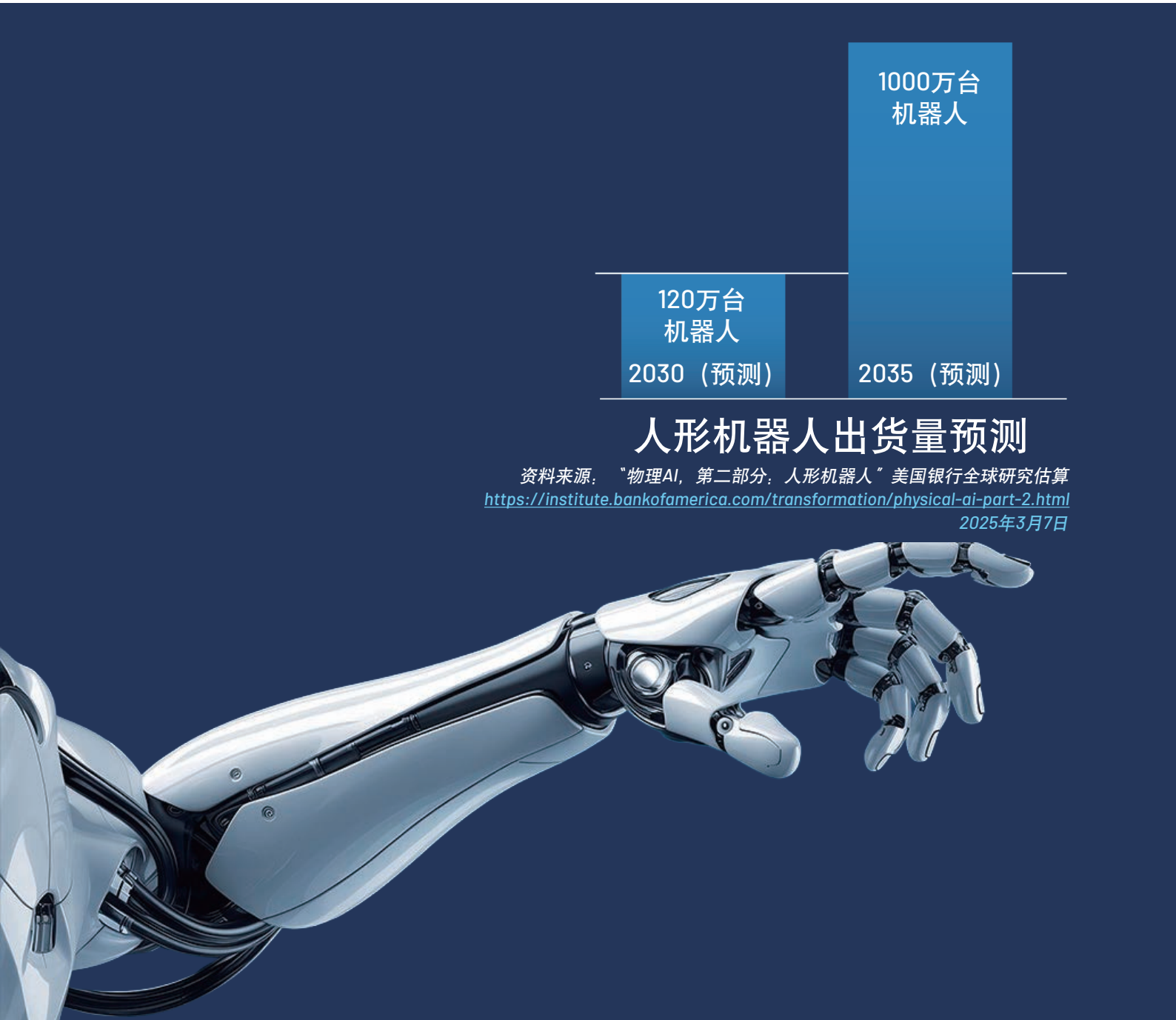
物理智能的精髓，就在于实现全局意图与本地应急的平衡，让整套系统时序同步、协同运转。

这种架构为何重要

分布式大脑架构并非单纯的性能优化手段，更是实现以下能力的重要根基：

- 动作自然、运行稳定
- 安全的人机协同作业
- 灵活操作与接触感知能力
- 在不确定场景下稳定运行
- 高适配、可灵活重组的工业作业流程

机器人正是依托这一架构，将智能部署到对时序、交互与安全有着严苛要求的环节，从而突破传统自动化范畴，真正实现物理智能。



人形机器人出货量预测

资料来源：“物理AI，第二部分：人形机器人”美国银行全球研究估算
https://institute.bankofamerica.com/transformation/physical-ai-part-2.html
2025年3月7日

多模态感知与连接：人形机器人的神经系统

人类并非仅凭单一感官认知所处的环境。

人形机器人并非通过单一传感器或决策点来体验世界，而是依靠贯穿机身的连续信息流，完成感知、解读与响应，确保传感器、计算节点和执行器之间的数据传输精准同步。

本章重点探讨机器人如何通过多种模态感知世界，并讲解高性能连接如何将数据流同步为统一且时间一致的环境认知信息。继前面的章节探讨物理智能如何从实时传感、分布式计算及确定性控制中涌现之后，本章将阐述下一个基础层面。

现代人形机器人并非孤立的机器，而是联网的多模态智能平台，依赖于传感、驱动及高性能通信的融合。此种融合正重新定义机器人在人类环境中安全可靠作业的能力边界。

为何多模态感知不可或缺

人类并非仅凭单一感官认知所处的环境。移动过程中，我们会持续整合视觉、听觉、触觉、平衡感及本体感觉，以维持对环境的上下文感知。在真实的人机共存环境中运行的机器人必须具备同等能力。单一传感器模态不足以应对现实世界的复杂性。现代人形机器人日益融合以下多类感知技术：

- **视觉**：实现空间解析与场景语义识别
- **深度感知**：获取物体外形与距离信息
- **听觉**：识别意图、检测异常、感知视野外的情况
- **触觉感知**：操作与接触感知
- **惯性测量单元(IMU)与关节编码器**：维持机体平衡、朝向控制与本体感知
- **力与扭矩感知**：保障安全交互、感知载荷

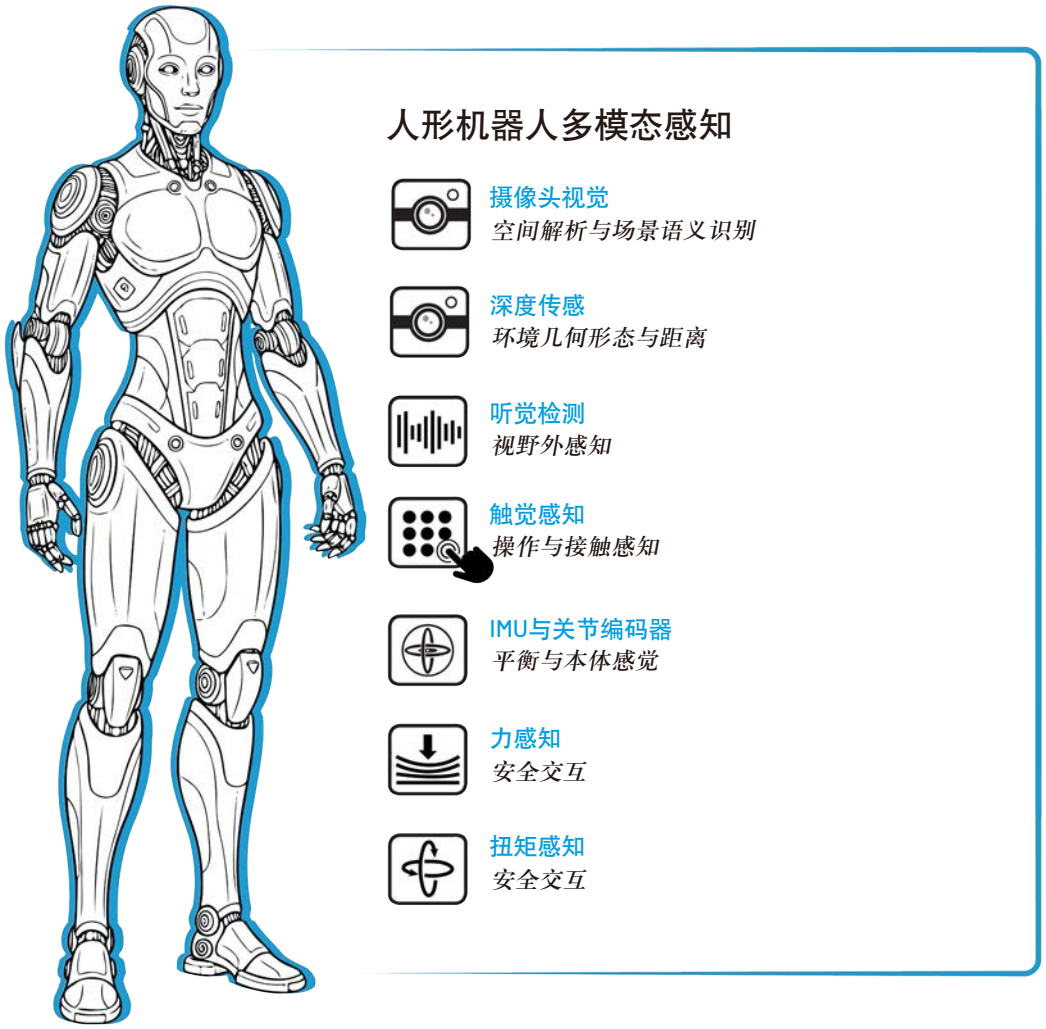
各模态互为补充，弥补彼此局限。多种感知模式协同作用，让机器人在运动、强光、视线遮挡、环境杂乱、信号干扰及各类不确定工况下，依然保持稳定感知能力。机器人唯有实现智能、连续且结合上下文的感知，方能表现出真正的智能行为。

连接：机器人的神经系统

感知模块会源源不断产生数据，连接模块则负责数据传输与时序同步。对人形机器人而言，连接系统就好比是协调全身的神经系统。人形机器人的架构不再采用一体式整机设计，而是逐步演变为分布式互联网络。摄像区域、传感区域及执行区域通过层级通信链路互连，涵盖边缘端的中等速率传输至高速骨干网络连接。

头部视觉传感器、指尖触觉传感器、躯干IMU、关节力传感器、四肢执行器及分布式处理器必须实现步调一致的通信。即便毫秒级的延迟或抖动也可能导致失稳、接触失败或危险行为。倘若感知不同步，机器人不仅会减速，更将危及安全。

图6：*人形机器人多模态感知概览*



连接骨干网

人形机器人的内部网络必须支持以下特性：

- 亚毫秒级协调
- 确定性时序
- 高带宽传感器融合
- 安全关键型通信
- 受限形态下的电力与数据传输

上述需求推动了以下技术的应用：

- 时间敏感网络(TSN)以太网
- 高速相机与传感器链路
- 低延迟执行器总线
- 分布式传感网络
- 电力与数据复合传输架构

如果缺乏上述的骨干网，边缘智能将因缺失同步的上下文而无法运作。网络慢，则机器人慢。网络不可靠，则机器人不安全。随着感知栈日益丰富，连接需求呈指数级增长。千兆多媒体串行链路(GMSL™)、TSN以太网和ADI $E^2B^®$ 边缘以太网总线等技术正相互融合，以确保整个人形机器人神经系统实现可靠通信。

从数据流到统一认知

当多模态感知与确定性连接相融合，机器人便获得了人类习以为常的能力：对自身及周围环境的连贯认知。

凭借这种统一认知能力，机器人得以实现平稳的运动控制、安全的人机协作、自适应的操控、预测性的运动规划，在不确定环境下保持稳定可靠的表现。这也正是只会移动的机器人与具备理解能力的机器人的本质区别。

归根结底，多模态感知和连接不仅是工程层面的挑战，也是实现更贴近人类行为模式的赋能技术。通过分布式部署智能、合理划分数据优先级，并把互联架构设计为分层式神经系统，机器人在与外界交互时，响应会更为迅速、功能更为强大，交互方式也更加直观。

图7： *人形机器人连接架构概览*

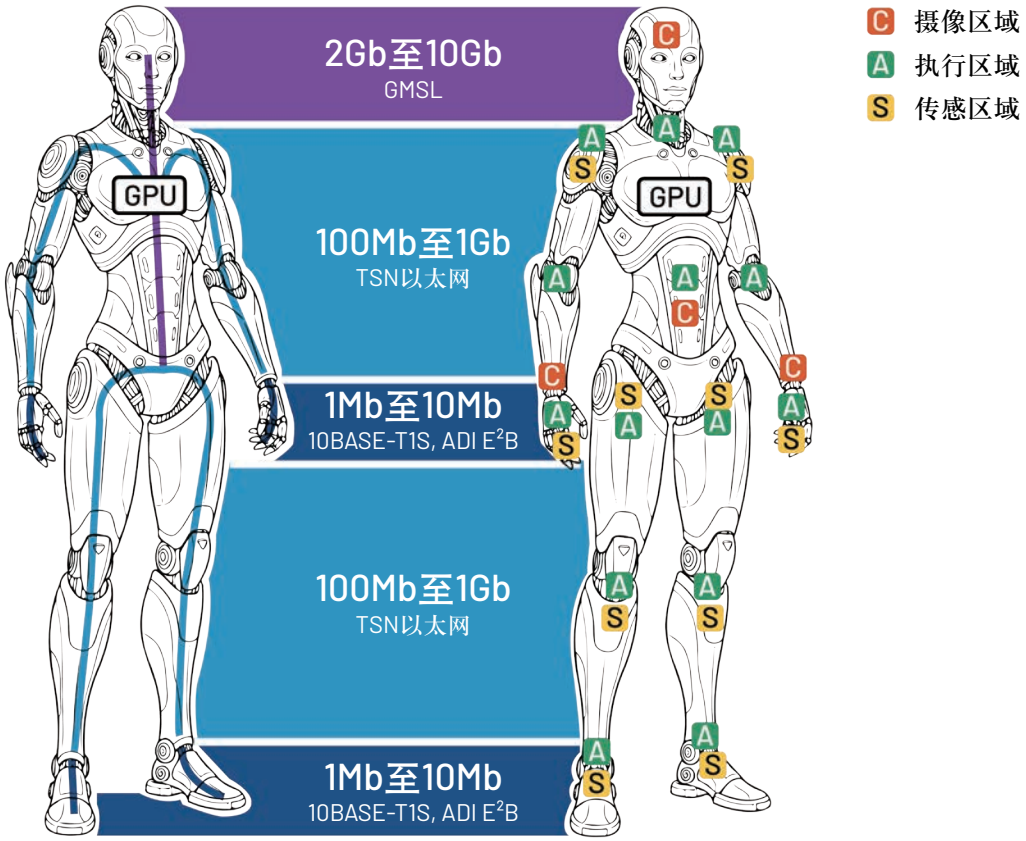


表1： *连接技术详解*

连接技术	速率*	用途
千兆多媒体串行链路 (GMSL)	*2Gb至10Gb*	*通过远程同轴电缆或屏蔽双绞线，传输高分辨率未压缩视频数据、控制信号及电力*
TSN以太网 ADIN3310 ADIN6310	*100Mb至1Gb*	*提供确定性连接（保证数据包传输且延迟有界），包括较低分辨率的传感与视觉数据（例如手部相机）*
RS-485	*>10Mb*	*用于需要超过10Mb速率的边缘连接*
边缘以太网总线 (ADI E²B)/T1S AD3300	*1Mb至10Mb*	*10BASE-T1S远程控制协议，支持以太网直接连接至边缘节点，用于关节驱动及触觉/力/惯性传感器数据传输*

** 速率等级仅作说明用途；实际划分方式因机器人架构和控制策略而异*

人形机械手：
边缘计算的终极考验

如果说移动能力使人形机器人得以在现实世界中穿行，灵巧性则赋予它实际应用价值。人形机器人在工厂中行走固然令人惊叹，但行走并非最难之处。真正的挑战在于操作：拿起工具、穿引线缆、调节阀门或将易碎物品放置于传送带上。此类任务要求机器人在感知、控制带宽及延迟等严格约束下，对各类物理交互实现泛化处理。

为实现灵巧操作，人形机器人需要推理如何与物体交互，从而将感知、计算及控制推向边缘端极限。

- 此为把手：侧向抓握
- 此表面具反射性：调整深度策略
- 此物体可变形：减小握力

人形机械手是整台机器人中边缘计算工程难点最密集的部位。

在整台机器人中，人形机械手是边缘计算工程密度最高的部件，感知、驱动、布线及微反射控制均需在极严苛的延迟、功耗、散热及尺寸约束下协同运作。

为何手部设计是最艰巨的挑战

人类调节握力无需刻意思考。物体滑落前，我们便能感知到滑动趋势。接触面变化时，我们会自动调整接触压力。我们在操控物体的过程中会进行微调，此类修正细微到根本不会引起我们的主观察觉。

要在人形机器人上复现上述部分能力，仅靠精巧的机械设计远远不够，还需在以下领域取得突破：

- 高密度触觉传感
- 精密运动控制
- 紧凑驱动
- 精细运动协调
- 高效布线
- 低延迟本地计算
- 稳健电源管理

所有这些都必须集成于轻量化、耐用且对人安全的形态之中。因此，机械手并非单纯的末端执行器，更是嵌入高度受限形态中的闭环控制系统，而非等待指令的外设。

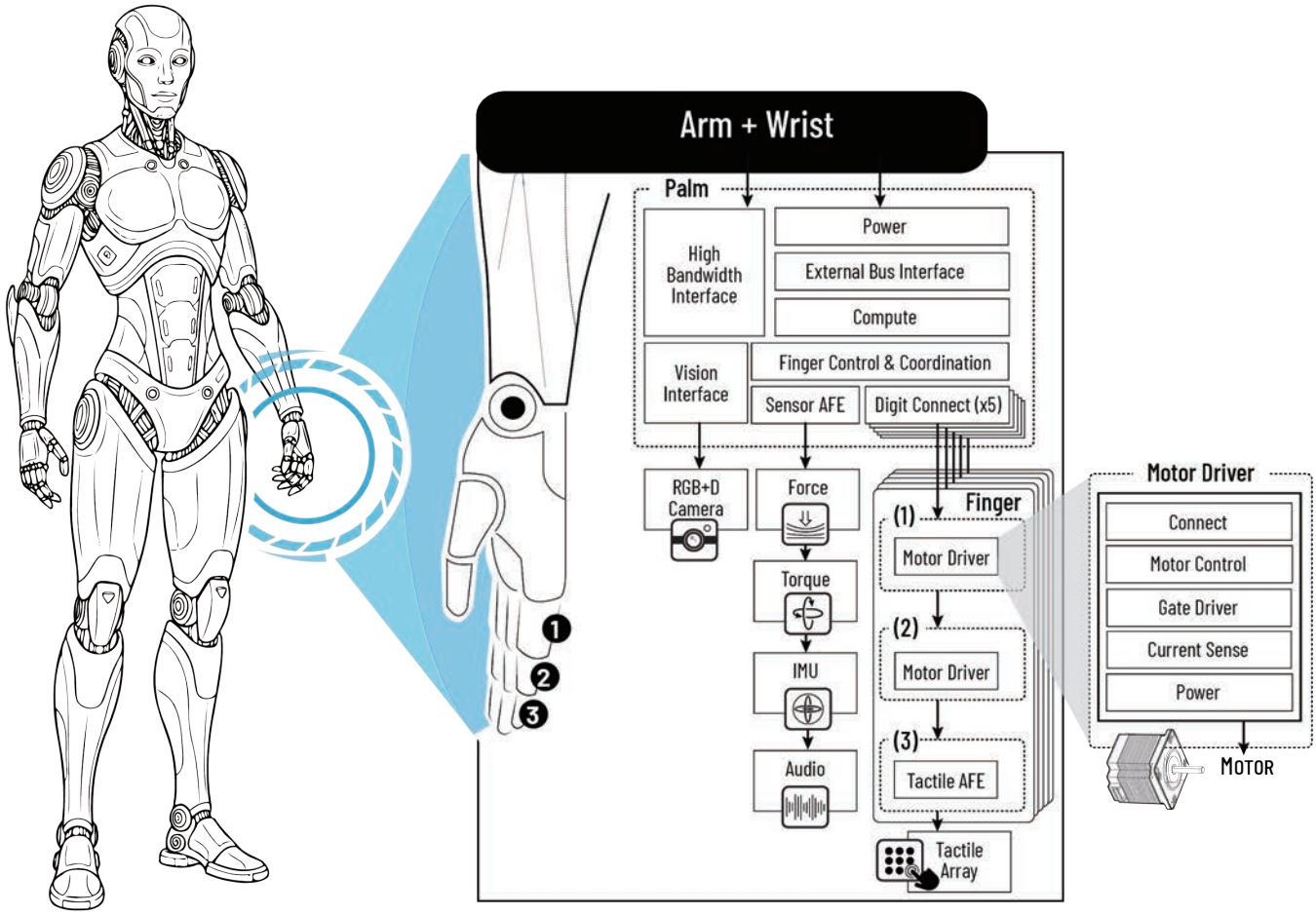


***图8：**人形机械手：面向精细运动控制的多传感器、多执行器平台*

操作依赖分层感知

灵巧操作需跨多种感知模态对现实场景进行交叉验证，各模态提供不同维度的感知信息：

- **视觉**：物体为何物？位于何处？
- **深度**：几何形状与距离如何？
- **触觉传感**：是否发生滑动？作用力是否恰当？
- **本体感觉**：人形机器人关节与躯体处于何种状态？

人形机械手在处理软质包裹、易碎元件或反光金属件时，必须持续融合上述信号。通过融合此类输入信息，机器人能够实时调整握力、指位及运动轨迹。这种分层感知能力是实现人类般灵巧操作的基础。

深度：人体尺度的几何感知

飞行时间(ToF)深度传感是对RGB视觉的重要补充。通过融合RGB数据与深度信息，人形机器人可实现三维感知。将RGB+D相机置于手腕或手掌内，可使手部获得完整视场，从而高效完成任务。

触觉：手部的〝皮肤〞

考虑到接触面几何、压力分布、微滑移特征、表面摩擦及振动等因素，触觉传感是人形机器人胜任各类任务的关键。背后的工作原理可参考如下具体步骤：

1. 传感器检测接触变化（或微滑移）
2. 本地处理器解析信号
3. 微型执行器调整抓握/姿态
4. 闭环响应稳定物体
5. 手部向上级控制系统上报相关事件

手部的核心真相在于：灵巧性既是机械问题，更是感知、计算与控制问题。因此，手部日益需要智能集成：在紧凑坚固的堆叠结构中，对传感、信号链、本地计算、供电及热管理进行紧密协同设计。

音频被低估的感知维度

视觉与深度感知主导了机器人感知的讨论，听觉却常被低估。然而，听觉提供了视觉无法替代的感知维度。人形机器人的听觉通过振动和声学特征来检测机械异常。机器人可通过识别表明线缆锁定到位的独特“咔嗒”声，验证线缆是否正确插入。执行任务的手部正是捕捉此类特征信号的最佳位置。

***图9：**人形机械手灵巧操作的触觉闭环*



惯性传感：验证交互事实，而非仅监测运动

视觉与触觉告知人形机器人预计会发生的状态。惯性传感有助于确认实际发生的状态。嵌入手部的高带宽加速度计可检测微小事件（冲击、咔嗒声、振动特征或力的突变），此类事件仅凭单一模态难以解读。例如，连接器完全就位时的机械“咔嗒”声虽然可通过听觉识别，但也会产生特征脉冲，可通过精密惯性传感检测到。

融合音频、触觉及惯性信号，可提高置信度并减少误报。

精细运动技能依赖微边缘计算

人们常误以为机器人“最智能”的计算单元位于头部或躯干。在人形机器人中，反应最灵敏的智能必须部署于时序与交互需求最迫切之处：即执行器与接触点。滑移检测、握力调整、压力调节、摩擦调制及微调等任务发生极快，无法容忍“上传数据、等待、再响应”的架构。即便微小延迟也会导致操作失稳：易损部件被压碎、物体跌落、接触状态变得不可预测。

攻克人形机器人最大难题：灵巧操作

随着人形机器人走出隔离防护区、融入人类工作环境，机械手的能力将与电机动力同等重要。攻克机械手相关难题，是将人形机器人转变为真正通用机器的关键，使机器人能在真实工业环境的复杂变量中稳定运行。

人形机械手不仅是机械奇迹，更是感知、计算与控制的交汇点。正是在此交汇之处，边缘计算的未来正被书写：每一次抓取皆是一步跨越。

实时电机控制：人形机器人运动的基础

人们评价人形机器人，往往看它的运动表现：迈步是否轻盈流畅，运动中能否随机应变，姿态调整是否不着痕迹。真正令人叹服的，并非力气多大或跑得多快，而是各自由度(DoF)之间的协同配合。

现代人形机器人在全身集成了数十个自由度。每个自由度均提升了能力，但也增加了复杂性。关节越多，交互越频繁，耦合越紧密，失稳风险也越大。流畅的运动不再是单一指令的结果，而是贯穿整个系统的涌现行为。正因如此，人形机器人的运动必须建立在实时电机控制的基础之上。

自由度：能力与代价

高自由度使人形机器人实现类人运动成为可能：持续调整姿态、稳定操作、在干扰下保持平衡。但协调开销会迅速攀升。单个关节的误差或延迟不会局限于局部，而是会传播到全身。踝关节校正延迟会影响膝关节扭矩，腕关节扰动会传递至肩部，躯干调整则会影响整体平衡。

为何运动是智能中最具挑战的部分

人形机器人需要持续调节力、扭矩、电流及位置，以对抗重力、惯性、摩擦及外部扰动。微小的时序误差可能级联引发振荡或不稳定，**使得即便静止站立也成为需要主动控制的问题。**

在高自由度系统中，各关节处微小的效率损失经累积后会迅速表现为明显的机械应力。有效的电机控制依赖于：

- 高保真电流检测，用于实现平滑的扭矩控制
- 低噪声的集成电机控制回路，用于实现稳定的微调
- 高效紧凑的电机控制架构，用于降低热约束和空间限制

实现此类连续调节需要在关节层级进行高度集成的电机控制。现代人形机器人日益依赖紧凑的实时电机控制解决方案，将电流检测、控制环路及运动序列集成于单一架构中。ADI Trinamic™电机控制平台等解决方案能够以极低延迟实现确定性扭矩和速度控制，即便系统复杂性增加，仍有助于维持稳定性。随着人形机器人设计方案在不增加系统尺寸或功率预算的前提下追求更高关节密度，紧密集成变得愈发关键。

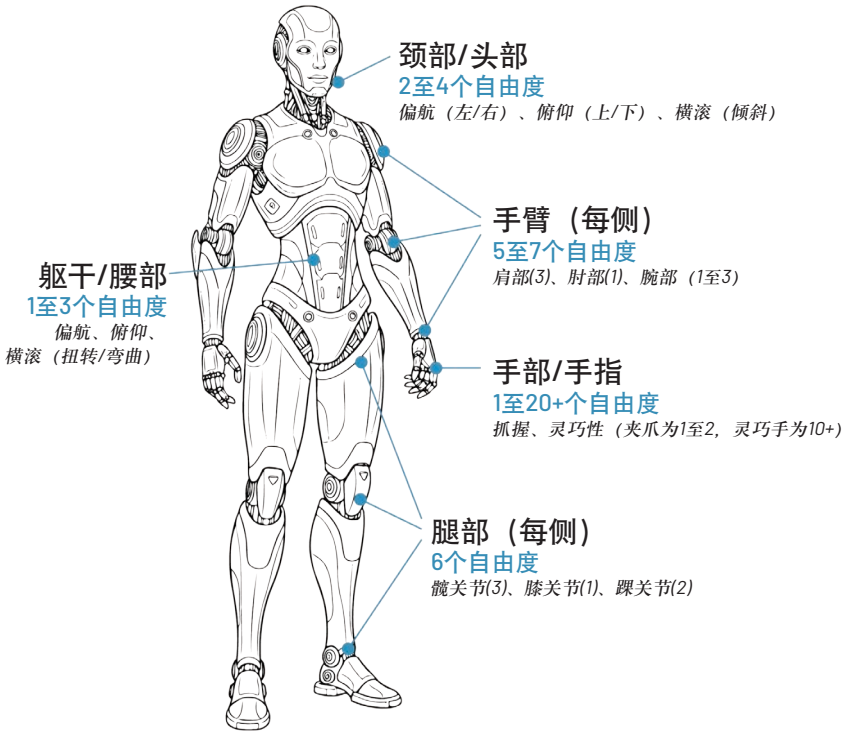


***图10：**人形机器人自由度概览*

确定性始于关节感知

精确控制始于准确的关节位置感知。人形机器人依赖于旋转执行器（髋部、膝部、肩部）和线性执行器（手指、头部）的绝对位置检测。

这一层级的确定性日益需要多圈绝对检测。ADI ADMT4000等技术能够实现多圈非接触式跟踪，即使在断电情况下亦可检测；可省去外部换能器和备用电池，同时减小了执行器尺寸和系统复杂性。

关键在于，绝对位置感知在断电后依然有效。每个关节均能保持自身状态，使控制环路无需回零或执行回退行为，即可从首个周期起确定性地恢复运行；对于复杂系统而言，更是迅速响应和可靠运行的基础。

> 精确控制始于准确的关节位置感知。

将数字意图转化为物理运动

当人形机器人在伸展时调整姿态：

- 躯干重新定位以维持平衡
- 腿部重新分配负载
- 肩部补偿伸展动作
- 手腕及手指微调对准

此类校正无需等待中央决策。学习策略可定义意图，但稳定执行依赖于确定性电机控制环路。

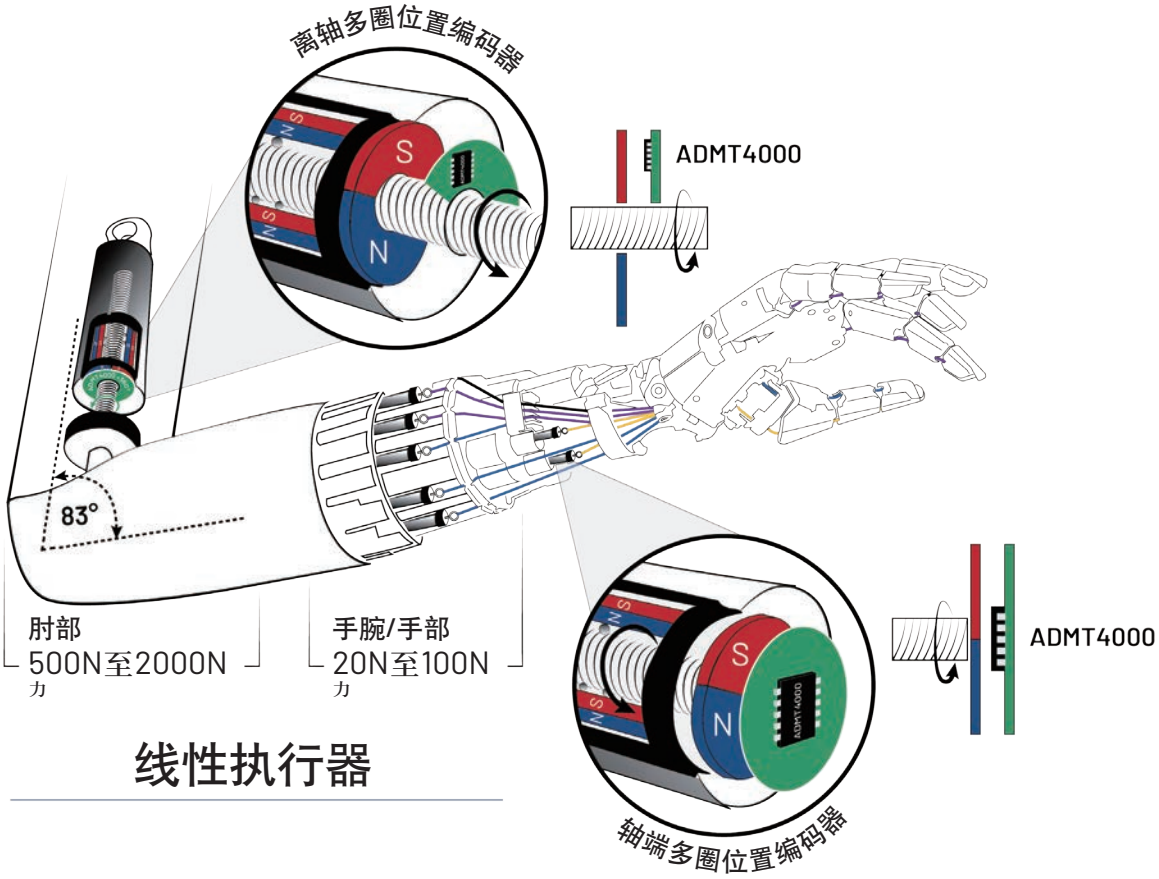
电机控制是系统功能在伺服驱动器、关节模块及嵌入式控制器中落地的关键环节，用于将数字命令转化为平稳安全的运动。ADI Trinamic TMC6460等高度集成的电机控制解决方案可在此过程中发挥关键作用。通过将实时控制环路、电流检测及运动控制集成于紧凑架构中，此类解决方案可在关节层级实现精确低延迟执行。配合可靠的位置反馈，能够提供协调数十个关节所需的确定性基础，确保时序稳定。

智能运动的基础

人形机器人将在感知、连接及高层策略方面持续进步，但若缺乏精确执行，一切皆无意义。智能运动的关键不在于自由度的数量，而在于如何有效地控制和同步各个自由度，真正做到放心可靠。

为此，需要各个层级（电机控制、位置检测及嵌入式智能）同步运行，实时提供稳定可预测的运动控制。此乃实现智能运动的基石：步步稳健，行稳致远。

***图11：** 腱驱动人形手臂中的多圈磁感应*





人形机器人增长预测

资料来源：“人形机器人市场规模、份额及全球预测2026-2035”
https://www.snsinsider.com/reports/humanoid-robot-market-1616
2026年2月16日

实时电源管理：以智能驾驭现实约束

对于有线供电的工业机器人而言，电源问题已基本解决。只需接入电源，合理配置供电规格，即可推进后续工作。但在人形机器人中，电力供应是动态的、受限的，且与行为密不可分。能源不再仅仅是燃料，而是作为一种实时系统变量，决定了机器人能够执行何种任务、何时能够执行以及能否安全执行。

人形机器人属于**能量受限的智能系统**，依赖于在动态现实环境中准确测量、预测和管理自身能量与热裕度的能力。

为何能源成为人形机器人的核心制约因素

人形机器人运行于能量稀缺且不可预测的环境中。

- 无缆化运行，容量有限
- 持续稳定，人体尺度的运动
- 负载分布随任务变化而改变
- 不可逾越的安全裕度

因此，能源与运动质量和安全性紧密耦合。低裕度电力事件不仅会降低性能，还可能引发明显的不稳定现象：步态迟疑、操作策略降级、紧急停止，或在关键时刻触发热降额。

从电源供应到决策系统

电池系统不再处于被动状态，而是成为自主控制环路的一部分。系统在任何时刻都必须回答以下问题：

- *当前能源储备是否足以安全完成此项动作？*
- *是否需要调整步态以避免高扭矩爆发？*
- *提举此物体时能否避免触及温度或电压极限？*

上述问题并非抽象的规划问题，而是属于实时物理约束条件，需要快速传感、局部估算和决策执行。在实际应用中，能源子系统开始发挥类似副驾驶的作用。它的作用不是决定机器人的任务，而是持续约束和引导安全可行的操作。

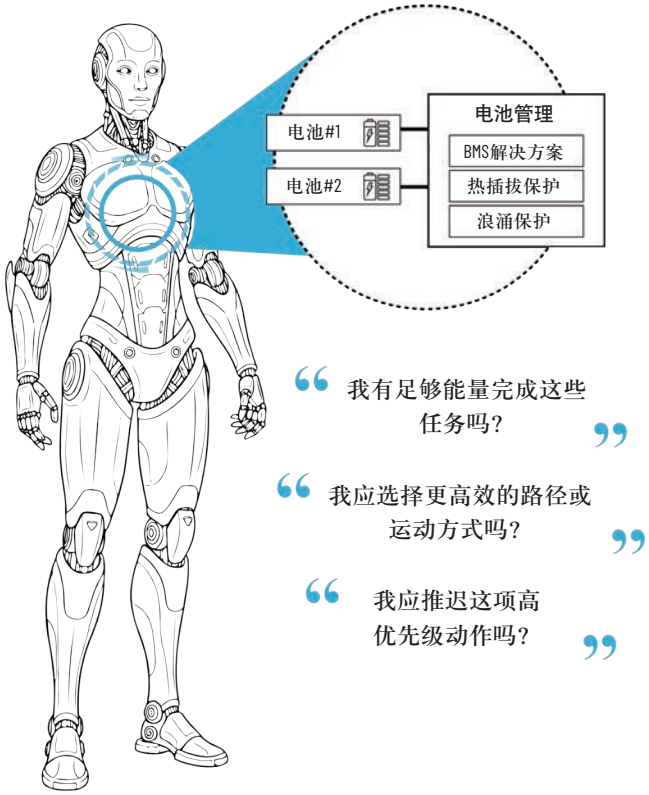


***图12：**人形机器人任务执行评估*

> 人形机器人的能耗既非线性，也难以预测，具有状态依赖性且呈现高度瞬态特征。

能量感知运动：并非所有行为的能耗均相同

人形机器人的能耗既非线性，也难以预测，具有状态依赖性且呈现高度瞬态特征。

- **动态运动**（如提举、加速）会产生峰值电流需求。
- **运动能耗**因步态效率和地形差异而产生显著变化。
- **灵巧操作**会驱动高频传感和计算回路。
- **工具使用**会引入不可预测的负载和振动。

这意味着“剩余电量百分比”本身并非可操作的指标。关键在于机器人将能量状态转化为行为决策的能力。具备能量感知能力的人形机器人能够实时在两种动作间选择，这两种动作在任务层面看似相似，但在风险和裕度上差异显著。

逐渐显现的模式如下：

1. 持续测量能量和热状态。
2. 预测候选动作的能耗。
3. 选择能够维持稳定性和安全裕度的行为。
4. 若执行过程中条件发生变化，则在本地强制执行限制。

这一回路反映了我们在第8页“实时机器人技术：物理智能的崛起”中定义的物理智能闭环，区别在于受控变量变成了**运行包络**。

实时电源智能的兴起

要使电源管理成为自主系统的一部分，人形机器人需要专用的**能量智能层**，并具备五项核心能力：

1. **实时状态感知**

   掌握瞬时需求、剩余可用容量、温度梯度及安全放电极限，而非仅关注平均能耗。

2. **预测性建模**

   估算未来运动及任务序列的能量与热成本，包括最坏情况下的瞬态过程。

3. **电池感知**

   随着电池老化和性能衰退，必须监控并调整运行包络以适应此类变化。电池监控能力是实现电池感知的关键。点击此处了解ADI解决方案的更多信息。

4. **约束条件下的行为选择**

   根据能量和热裕度，动态选择步态、操作或充电策略及计算模式。

5. **确定性安全执行**

   当裕度过低时拒绝或修改动作，并在本地执行此类操作，以确保响应即时且具备确定性。

此举遵循人形机器人其他部分采用的相同架构逻辑：中央计算负责规划，但事关安全的控制必须在本地准时执行。

***图13：** 实时电源智能层*



真实环境中的能量智能

表2分析了几个真实场景。

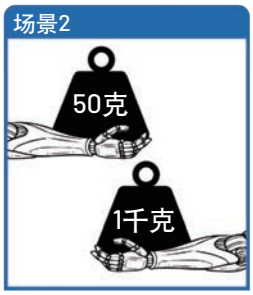
场景1	场景2	场景3
		
场景1： **工厂车间导航** 人形机器人不仅在选择路径，同时也在选择能量策略。坡度、摩擦力、有效载荷变化及启停动态均会产生影响。具备能量感知能力的机器人会主动调整速度、路线或时序以维持裕度。	**场景2：** **提举与操作** 在确认执行提举动作前，系统会评估峰值电流需求、电压稳定性及热裕度。若裕度不足，机器人会进行调整：改变姿态、降低加速度或推迟动作。	**场景3：** **多步骤任务** 真正的自主性并非“能否执行第一步？”而是“能否安全完成整个序列？”行走、拾取、搬运、放置及返回必须被视为**连续的能量轨迹**，而非孤立的动作。

表2：真实环境中的能量智能

将能量智能作为差异化优势

具备能量感知能力的机器人能够延长运行时间、减少任务中途故障，并在条件变化时保持一致的运动操作水准。此类机器人还能为事关安全的事件保留热裕度，最终表现出更高的可预测性，而可预测性对于赢得人类信任至关重要。

将电力视为后台基础设施的机器人在面临压力时会表现出难以预测的行为。将能量整合至智能回路中的机器人则将**表现出一致、安全且可预测的行为**。

在人形机器人中，自主性不仅关乎做出决策，更关乎**在每一毫秒内都遵循物理规律做出决策**。而能源正是界定此类物理规律限制的关键变量。

平衡人形机器人领域的创新与安全

人形机器人失稳可能带来重大危险，人机近距离作业时风险尤为突出。

人形机器人早已不再局限于实验室环境，开始逐步落地工厂、仓库、医院乃至各类公共空间。随着这类新一代自动化技术走入现实，有一个问题无法回避：人形机器人是否足够安全，能够和人类协同工作？

在探讨安全问题之前，我们先引入一个新的缩写DSIMR，即动态稳定工业移动机器人。这类机器人的一大特点是可自主维持本体平衡，但一旦断电就会发生倾倒。人形机器人便属于这一类别，故障后可能产生不可预判的复位动作，因此需要配套专门的安全规范。

本章将梳理人形机器人面临的新兴安全挑战，同时介绍相关技术、安全功能与标准规范，保障机器人可以与人类安全协同作业。为应对这些新兴挑战，ISO第299技术委员会（机器人技术）组建专家工作组，着手编制多项标准，聚焦人形机器人和其他动态稳定移动机器人的安全部署。首批制定的标准之一是ISO/CD 25785-1《机器人——动态稳定工业移动机器人（足式、轮式及其他移动形式）安全要求——第1部分：机器人》。这份标准针对工业环境下的DSIMR给出了有关风险降低措施的相关要求与实施指引，帮助制造商应对这类高机动、高适应性设备带来的特殊安全难题。这份标准的第2部分将针对DSIMR的集成与应用提出安全要求，但本电子书不对第2部分展开详述。

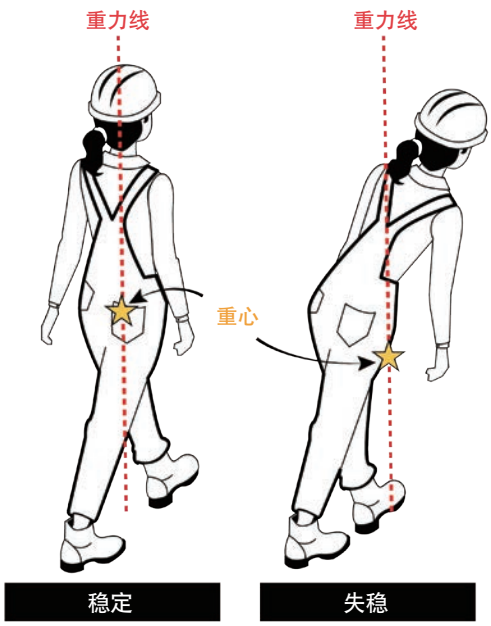
立足现有标准体系

ISO 10218-1:2025将工业环境定义为“限制公众进入的作业场所，或是在对应任务与机器人应用场景下，公众按常理不会出现的作业场所”。因此，ISO 25785-1仅适用于工业场景，不适用于在公共空间运行的人形机器人。后续人形机器人逐步走出工厂、进入社会场景后，相关标准也会迭代更新，覆盖新的场景；但现阶段，人形机器人标准的适用范围仍以工业环境为主。

直立运行的力学机理

我们平时很少留意维持身体直立需要哪些条件。然而，我们的每一步行走，都依靠大脑、感官、肌肉骨骼共同构成一套精密的平衡系统。这套系统持续监测、调整姿态，保证重心落在支撑基底，也就是双脚覆盖及双脚之间的区域。当重心偏移出此区域时，平衡将无法维持，除非迅速采取纠正措施，否则跌倒不可避免。理解这一原理，对于研究人形机器人如何在现实世界中实现和维持稳定性至关重要。

图14： *重心基础示意*



人形机器人失稳可能带来重大危险，人机近距离作业时风险尤为突出。与通常固定在原地的传统工业机器人不同，人形机器人依赖动态平衡保持直立并执行任务。因此，想要保障安全运行，就需要制定全新的风险缓解方案，包括稳定性管控、人机安全间距监测、持续的平衡状态监测，以便及时识别和处理可能引发失衡、倾倒的工况。

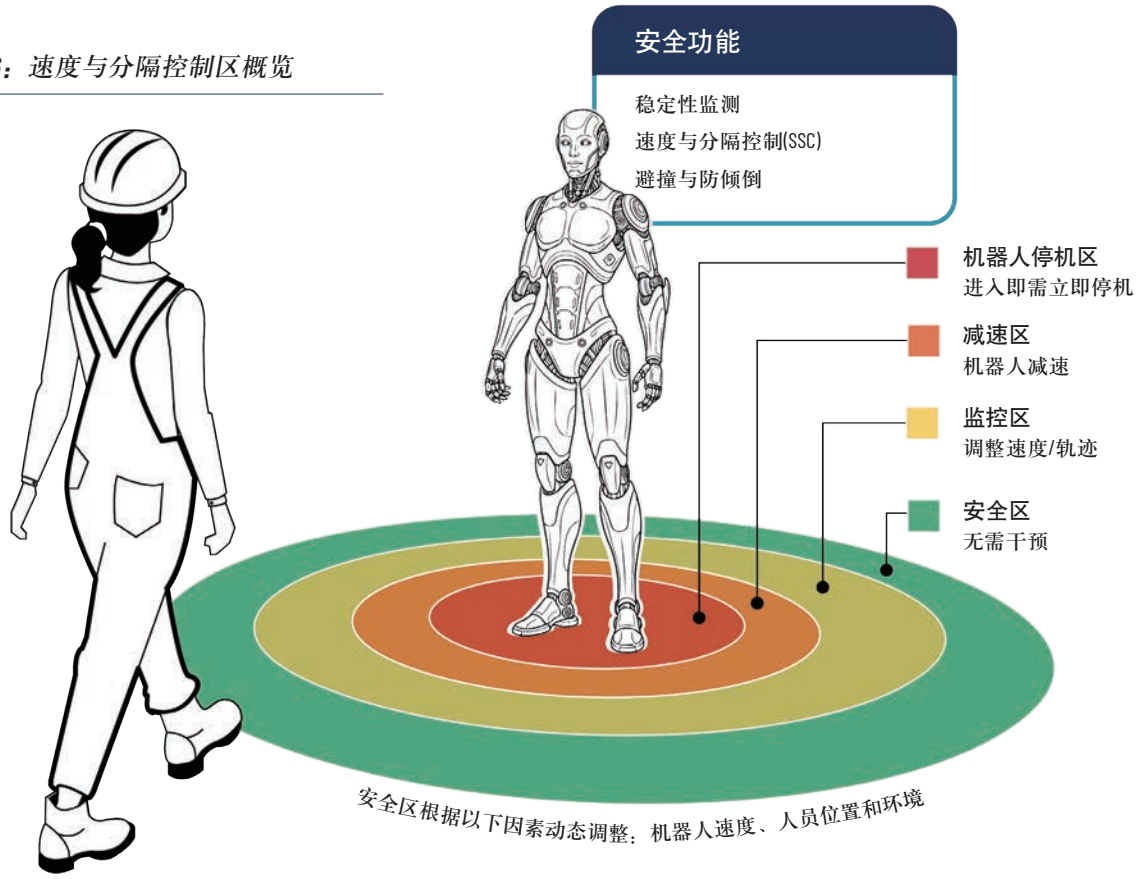
图15： *ISO 13855:2024 第4.8条*

> *4.8速度与分隔控制(SSC)*
>
> *SSC通过动态调整设备或部件危险运动的速度、轨迹，维持动态安全间距，以此达成风险降低目标。调整设备或部件危险运动的速度或轨迹时，可包含停机操作。*

速度与分隔控制(SSC)

为保持人形机器人与人类之间的安全距离，需部署ISO 13855:2024描述的**SSC安全防护技术**。这项技术会根据人员移动情况，动态调节机器人的运行速度、运动轨迹，持续保持人机防护距离，以此降低风险。若分隔距离低于预设的阈值，机器人可在发生危险接触前减速、停止或过渡到安全状态。

图16：速度与分隔控制区概览



为确保人员能安全地与人形机器人协同工作，规避危险工况的各项安全功能必须高度可靠。无论是监测稳定性、停机功能还是保持安全分隔距离，均需要参照国际公认的功能安全标准进行设计和验证，以满足性能要求，包括ISO 13849-1、IEC 62061和IEC 61508。

关键要点

与传统工业机器人不同，人形机器人在人机共用环境中移动时需要持续维持动态平衡。因此，未来的安全框架将日益关注稳定性监测、速度与分隔控制、功能安全和运动控制系统。ISO 25785等新兴标准对于确保人形机器人能在工业环境中与人类安全共存和协作至关重要。

ADI凭借严格的产品开发流程、零缺陷文化和内部功能安全专业知识，为功能安全研发提供支撑，助力客户满足第三方认证要求，同时降低系统开发风险。如需了解更多信息，可阅读Tom Meany的“安全事项”技术博客系列。


18

从演示样机走向实用：打造现实世界可信赖的人形机器人

人形机器人行走、转向、伸臂抓取时，如果动作流畅度贴近人类，很容易收获一片喝彩。但衡量技术进步的真正标准，不在于机器人能否完成令人印象深刻的演示，而在于它能不能置身真实环境，在人类身旁开展工作，在充满不确定性、受物理条件约束的前提下，稳定、安全、重复地执行任务。这才是人形机器人面临的核心挑战。

人形机器人不仅仅是“具有躯体的AI”，而是一体化的物理系统，感知、连接、计算、运动、供电、安全模块必须同步协同运转。人形机器人的未来，并不取决于某一项单点技术突破，而是看各类技术在系统层面的整合效果。

> 身处真实物理环境的机器人，外部环境时刻变化，机器人必须不间断完成感知、决策、行动、观测和调整。

物理智能是系统性难题

机器人行业正迎来技术叠加创新的时代，传感、计算、连接、驱动、能源、安全各领域技术同步迭代。带来的变化不只是机器人能力不断变强，更在于系统闭环的响应周期持续收窄。

身处真实物理环境的机器人，外部环境时刻变化，机器人必须不间断完成感知、决策、行动、观测和调整。重力、接触、惯性、摩擦、温度上限、人员近距离存在等因素依然适用。这正是物理智能和传统自动化的本质区别。它不是“先思考，再行动”，而是一套在时序和物理规律约束下连续运行的闭环。倘若闭环的运行难以预测，智能就不具备可信度。

当能力转化为信任

一套可落地的人形机器人，依靠多层级智能协同，覆盖底层的实时感知和控制，到高层的推理与规划：

- 系统0。物理信号与执行底层，响应时延<5毫秒：包括传感器、执行器、关节状态、电机电流、触觉信号、惯性测量单元(IMU)更新及低延迟本地回路。
- 系统1。快速解读与反射响应，响应时延5至20毫秒：包括传感器数据融合、防打滑响应、平衡修正、力度调节、本地运动控制、接触状态建模与安全管控执行。
- 系统2。认知推理与任务规划，响应时延≥50毫秒：包括路径规划、人体动作与意图预判、任务目标解析、策略统筹与全局规划。

只有各层级高度协同，物理智能才能显现。真实工况下的性能表现，离不开感知、推理、执行三者的紧密同步。脚踝处的扰动会传递至整机；指尖打滑会改变手臂负载；即便是传感器数据流延迟或电源出现波动，也可能破坏整机平衡。

因此机器人不能只是零部件的堆砌，而要像**有机生命体一般协同运行**，兼顾全局任务目标与局部快速反射。

这种协同体系以**感知**作为起点。人形机器人整合视觉、触觉传感、力和扭矩检测等多类输入信息，构建环境态势认知。没有哪一类传感器可以独立胜任全部工作，各类传感器需要互为补充、增强彼此。

但仅有感知并不能产生认知。传感器数据必须同步并可预测地传输。**连接**不仅仅是通信链路，也充当机器人的神经系统，确保信息在需要的时刻输送至对应模块。

运动环节则把智能转化为物理动作。稳健迈步、姿态平衡调整、可靠抓取，全都依赖于确定性电机控制、精准位置感知和配合紧密的反馈闭环。只有当控制过程快速、稳定且可重复时，数字意图才能转化为物理动作。

供电同样重要。对比有线供电的工业自动化设备，人形机器人的能源供给存在上限。人形机器人必须持续评估电池状态、热裕度、预期负载和瞬态功率需求。能量感知成为一项控制参数，会影响机器人的移动方式、可执行的任务和运行的安全性。

最后，信任取决于**安全**是否被工程化植入系统的每一层。人形机器人不光要在理想工况下稳定工作，工况发生改变时，输出行为同样要可预测。

诊断、故障检测、边界限制、确定性行为和可控降级，都有助于打造出让人放心共事的机器人。当机器在意外发生时仍保持行为可控、运行安全，信任便由此建立。

从工厂走向更广阔的世界

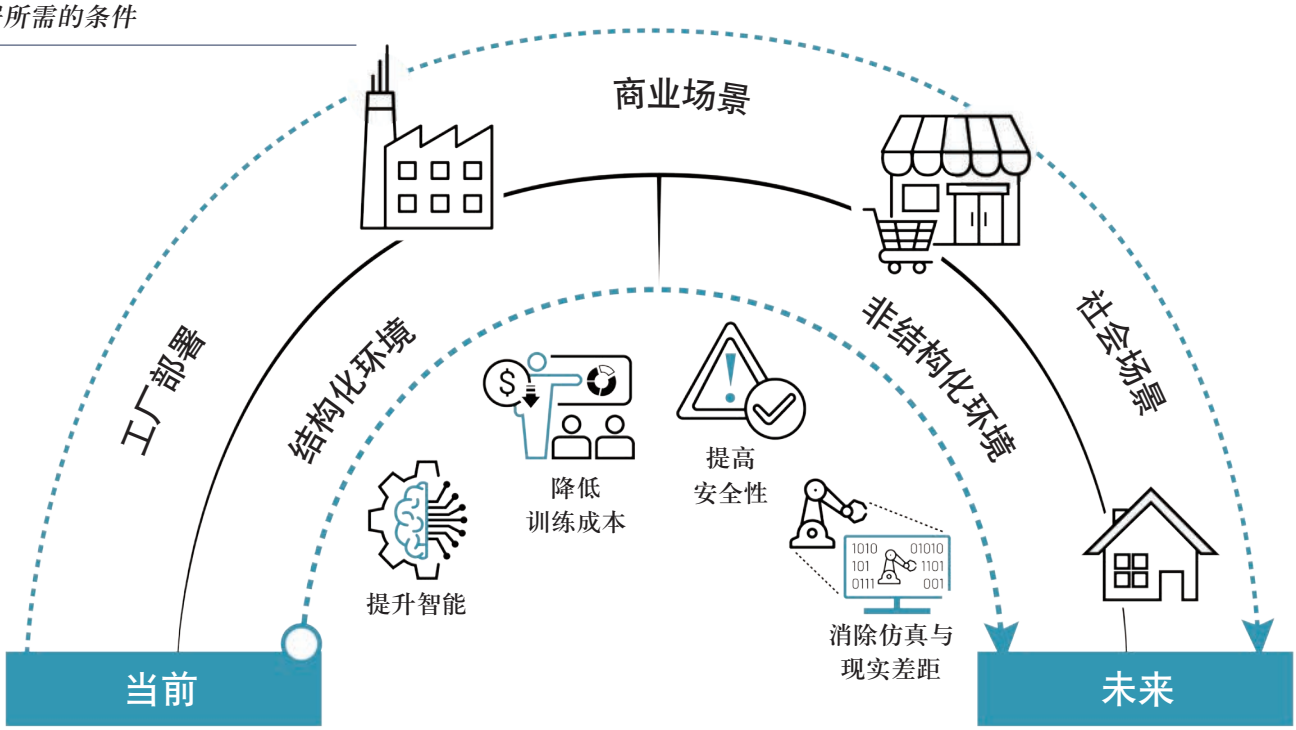
人形机器人的首批大规模落地，大概率优先出现在工业、商业场景。这类场景中的任务价值突出、风险可控，且安全框架能与技术一同迭代完善。工厂、仓库、物流中心、医院、零售及服务行业，是高度结构化的自动化技术通往开放家庭场景的重要过渡。

在这类场景中，机器人会面对愈发多样的工况，但整体约束依旧可控，能够加速完善大规模普及所需的能力：智能能力升级、训练成本下降、安全体系强化、缩小仿真与现实之间的性能差距。

当上述技术与能力成熟后，人形机器人便有望走入家庭与各类社会场景服务人类。但家庭环境的工况有着本质差异：空间布局、生活习惯、物品形态、光照条件、交互模式全都各不相同。想要适配家庭场景，机器人需要理解场景上下文、持续自适应，同时具备极高的运行可信度。

这样的未来，无法依靠演示样机实现，只能依靠扎实完善的**系统工程**建设落地。

图17：*人形机器人在社会环境中部署所需的条件*



完备的机器人

两台硬件配置（传感器、电机、AI模型）相近的人形机器人，在实际工况中的表现也可能天差地别。区别在于看不见的系统层面：依靠**系统集成**，在真实环境的各类扰动之下，保障时序、裕量、安全能力与态势感知正常工作。

这将是人形机器人下一阶段决胜的关键。

未来的发展方向，不只是单纯提升智能水平，而是打造根植物理规律、分布于整机本体、受能源约束、依靠互联实现时序同步、依托运动完成执行、受安全体系约束的智能。只有做到这一点，人形机器人才能脱离演示属性，转变为值得信赖的基础设施。

“机器人技术的未来不由单个组件决定，而取决于各组件的无缝协作。这样的未来已初见端倪，而它的根基正是物理智能。”

Dara O'Sullivan

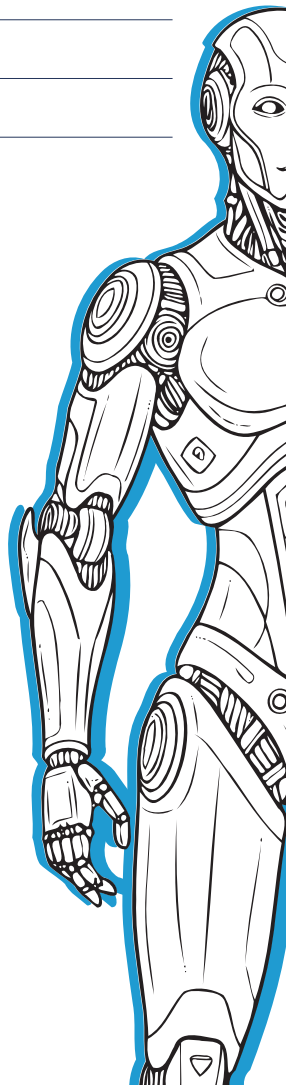
ADI工业自动化智能机器与
机器人系统应用总监



	连接
3/6端口工业以太网时间敏感网络交换机	ADIN3310 ADIN6310
集成10BASE-T1L PHY的2端口以太网交换机	ADIN2111
10BASE-T1S双模边缘以太网总线(ADI E^{2}B)收发器	AD3300
GMSL串行器/解串器	MAX96717 MAX96724
基于FPGA的8路GMSL转10Gb以太网边缘计算平台	ADRD8012-01Z
稳健型、工业级、低功耗10BASE-T1S MAC-PHY	ADIN1140
10Mbps、100Mbps和1Gbps工业以太网PHY	ADIN1200 ADIN1300
稳健型、工业级、低功耗10BASE-T1L以太网PHY	ADIN1100 ADIN1101
稳健型、工业级、低功耗10BASE-T1L以太网MAC-PHY	ADIN1110 ADIN1111
	运动
全集成磁场定向控制无刷直流驱动器	TMC6460
70V智能栅极驱动器，集成硬件伺服(FOC)控制器和降压转换器	TMC9660
	感知
100万像素飞行时间模块	ADTF3175
飞行时间(ToF)深度成像信号处理器(ISP)	ADSD3500
精密微型MEMS IMU	ADIS16500
宽动态范围微型MEMS IMU	ADIS16470
ADIS16470和ADIS16500评估板	EVAL-ADRD2121-EBZ

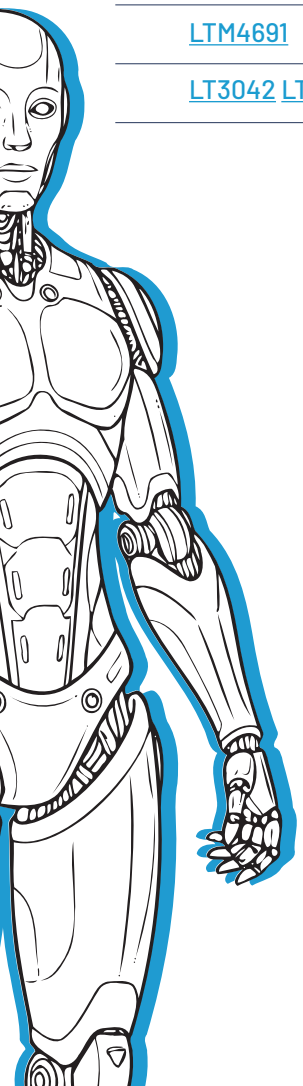
以上产品代表了ADI与人形机器人传感、连接、运动和电源架构相关的精选技术。

产品适用性取决于系统要求、运行条件和设计配置。



传感	
ADMT4000	具有真正上电能力的多圈及角度位置传感器
MAX40109	精密信号调理压力传感器AFE
AD4170-4	500kSPS多通道、低噪声精密Σ-Δ ADC，集成PGA
AD4190-4	62.5kSPS多通道、低噪声精密Σ-Δ ADC，集成PGA

能源与电源管理	
ADBMS6948	16通道电池包监控系统
LTC4287	集成功率监控器的高功率正热插拔控制器
LTM4740	15A降压µModule稳压器
LT8418	带有智能集成Bootstrap开关的100V半桥GaN驱动器
AD8410A	高压、高带宽电流检测放大器
LTC4364	集成理想二极管控制器的浪涌抑制器
MAX17614	理想二极管/电源选择器，具有限流、欠压、过压保护功能
LTC7821	混合式降压型同步控制器
LTC7871	六相同步双向升降压控制器
LT8708	80V同步4开关降压-升压DC/DC控制器
ADuM361N	5.7kV/3.0kV rms 6通道数字隔离器
LTM4691	低V_{IN}、高效率、双通道2A降压型DC/DC µModule®稳压器
LT3042 LT3045	超低噪声、超高PSRR线性稳压器





超 越 一 切 可 能 ™

敬请访问ANALOG.COM/CN/HUMANOID-ROBOTICS

©2026 ADI公司, Inc.保留所有权利。所有商标和注册商标均属各自所有人所有。