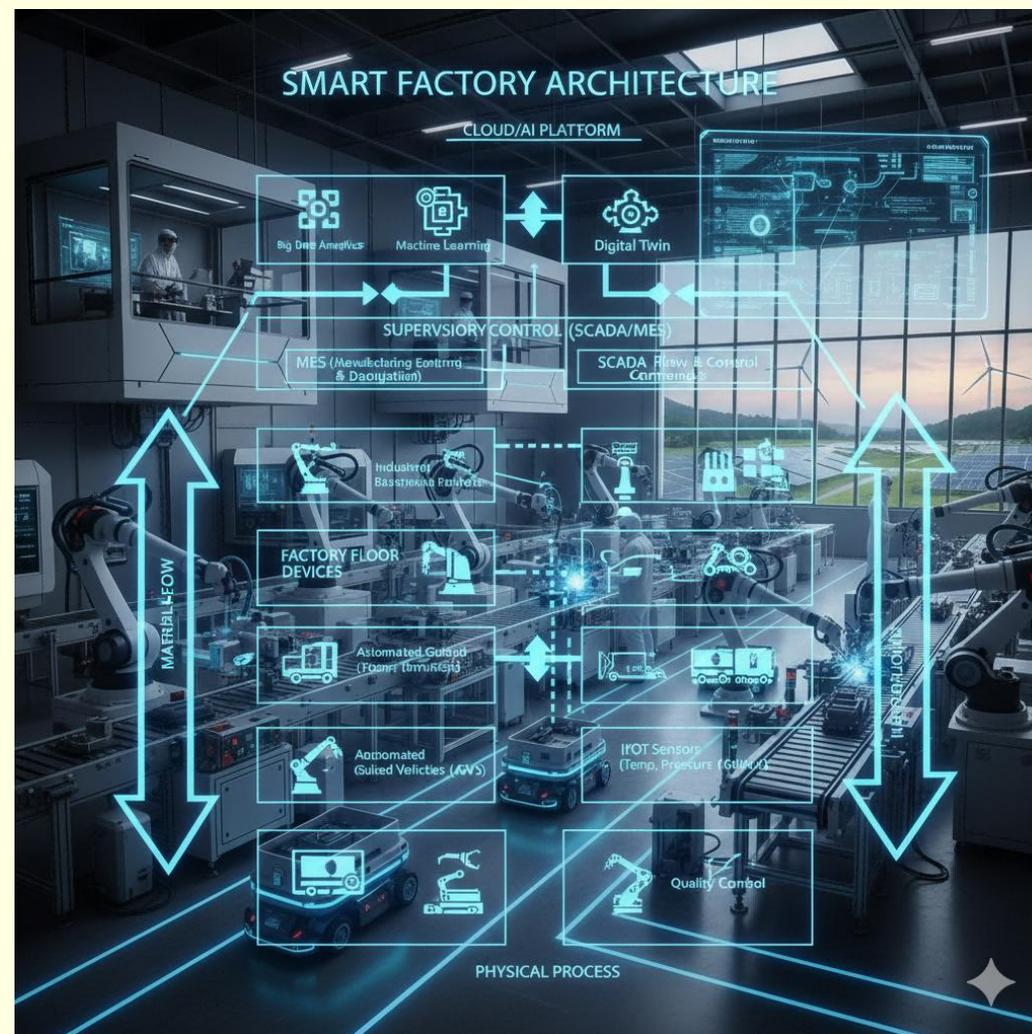


6 控制与自动化技术展望

自动化技术的发展水平是一个国家在高技术领域发展水平的重要标志之一，它涉及到工农业生产、国防建设、商业、家用电器、个人生活诸多方面。

6.1 智能工厂

- 智能工厂（Smart Factory）是数字化转型在制造业的终极形态。它不仅仅是“机器代替人”，而是通过物联网（IoT）、大数据、人工智能（AI）和云计算，让工厂拥有了“大脑”和“神经系统”。
- 在智能工厂里，生产设备、原材料和信息系统能够实时“交流”，实现从订单到交付的全自动化与智能化。



6.1.1 智能工厂的主要特征

1

互联互通 (Connectivity) : 所有的传感器、机器人和设备都连在同一个网络上, 消除信息孤岛。

2

透明化 (Transparency) : 管理人员可以通过看板实时看到每一台机器的运行状态、能耗和产量。

3

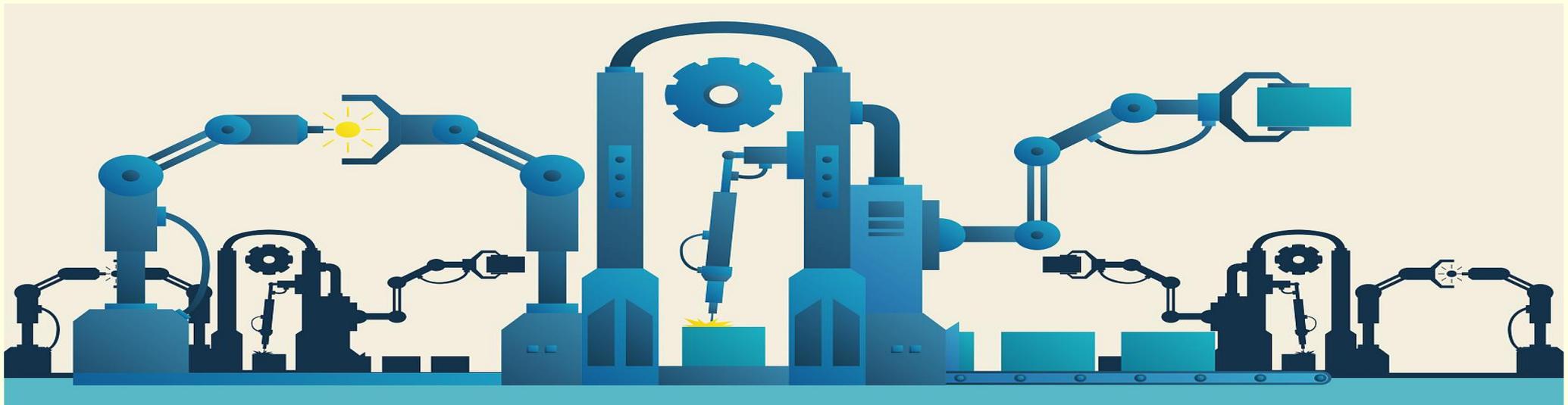
预测能力 (Predictive Power) : 借助 AI, 系统可以在机器坏掉之前就提醒维修 (预测性维护), 或者预判订单延迟。

4

敏捷性 (Agility) : 生产线可以根据需求快速调整。比如上午生产 A 型号手机, 下午就能无缝切换生产 B 型号。

6.1.2 智能工厂的技术支柱

技术支柱	作用说明
数字孪生 (Digital Twin)	在电脑里创建一个 1:1 的虚拟工厂，先在虚拟世界模拟生产过程，没问题了再在现实中开工。
工业物联网 (IIoT)	赋予万物“感官”，让零件能告诉机械臂它们是谁、需要加装什么。
协同机器人 (Cobots)	不再是关在笼子里的笨重机器，而是能感知人类位置并安全协作的智能助手。



6.1.3 智能工厂与传统工厂差异

1. **大规模定制：** 过去流水线只能生产一模一样的产品。现在，即便客户要一双印有自己的名字的鞋，工厂也能在不降低速度的前提下为客户单件排产。
2. **降低能耗：** 系统会自动优化电力和原材料使用，减少浪费。
3. **应对用工荒：** 将人类从重复、危险、枯燥的环境中解放出来，转而从事监控和系统维护工作

■ 误区：智能工厂 = 无人工厂。

- **真相：** 人的角色发生了转变。智能工厂依然需要人类进行决策、创新和复杂问题的处理，只是不再需要人类去做“搬运工”。

■ 误区：买几台机器人就是智能工厂。

- **真相：** 如果软件系统（如 MES、ERP）没有打通，硬件再先进也只是“自动化孤岛”，算不上真正的智能工厂。

智能工厂涉及的自动化技术

包括:

模型预测控制 (MPC)、自适应控制、自主学习控制、强化学习、分布式控制 (DCS)、AGV/AMR (移动机器人)、协作机器人 (Cobots)、机器视觉 (Machine Vision)、智能传感器、现场总线与工业通信。



6.2 数字孪生

- 数字孪生被视为实体的虚拟代表，旨在通过模型、数据、一对一关联及可监控性来实现特定的业务目标。
- 在智能工厂中，数字孪生跨越了资产、人员与流程的边界，将物理世界的动态变化实时映射到数字空间，并利用分析、控制和模拟等可选要素，为复杂的工业决策提供非线性、确定性的支持。
- 数字孪生与智能工厂的虚实共生关系，使得工厂能够从“反思已发生的事件”转变为“预测并优化未来的状态”，从而显著增强供应链的韧性与响应能力。

不仅要求视觉上的高保真，更要求逻辑与行为上的高度一致。

物理与虚拟对象之间双向实时反馈。

6.2.1 数字孪生三类关键应用

1. **产品数字孪生**：将工程设计、PLM（产品生命周期管理）与运营相连，支持早期流程阶段的模拟验证，缩短研发周期。（**虚拟验证与性能仿真**）
2. **生产资产数字孪生**：专注于单台设备或生产线的优化，通过模拟运行参数来实现预测性维护和虚拟启动。（**利用传感器采集的实时数据与历史维护记录，系统能够提前预知潜在故障。**）
3. **工厂数字孪生**：涵盖建筑基础设施的规划与设计，支持工厂全球布局的可视化监测与资源协同优化。（**先试后造的变革**）



6.2.2 数字孪生关键技术

1. **工业互联网技术**：例如TSN（时间敏感网络），解决标准以太网的延迟不确定性，确保控制指令在微秒级达到同步。
2. **建模技术**：涵盖了机械、电控、热力学、流体力学等多物理场仿真，确保数字空间与现实世界在物理性能上高度一致。
3. **模型精化与数据同化技术**：非线性估计理论等。
4. **工业人工智能（Industrial AI）**：通过机器学习算法分析历史与实时数据，系统能够识别隐藏的趋势、相关性与异常规律。在数字世界中，这种演绎与归纳的推理路径为探索未知规律提供了强大动力。
5. **沉浸式技术**：如增强现实（AR）与虚拟现实（VR）为用户提供了直观的交互手段。通过AR可穿戴设备，工厂员工可以实时查看到叠加在物理设备上的库存水平、流程状态以及装配引导，从而提升自然感官的操作精度。

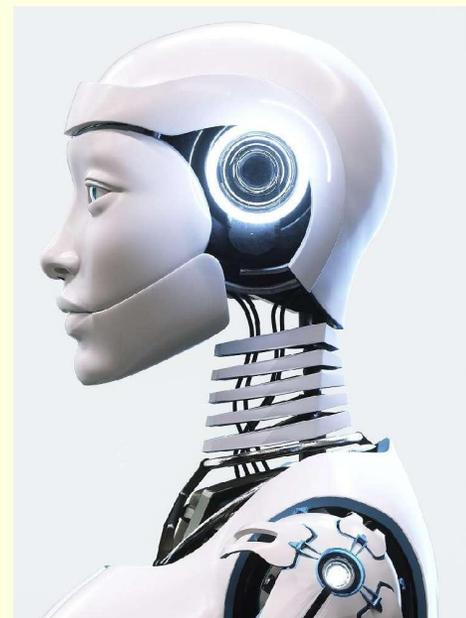
6.3 具身智能与人形机器人

■ 具身智能赋予“感知与反馈”：

- 传统的机器人是按照预设程序执行任务（如机械臂）。具身智能则让机器人通过视觉、触觉传感器，实时理解环境。比如：它不仅知道要把杯子拿起来，还能根据杯子的材质（玻璃还是纸杯）动态调整力度。

■ 人形机器人提供“通用性”：

- 人类世界的所有基础设施（楼梯、门把手、工具、厨房高度）都是围绕人体形态设计的。人形机器人无需改变现有环境即可投入使用，是通往“通用人工智能（AGI）”的最佳路径。



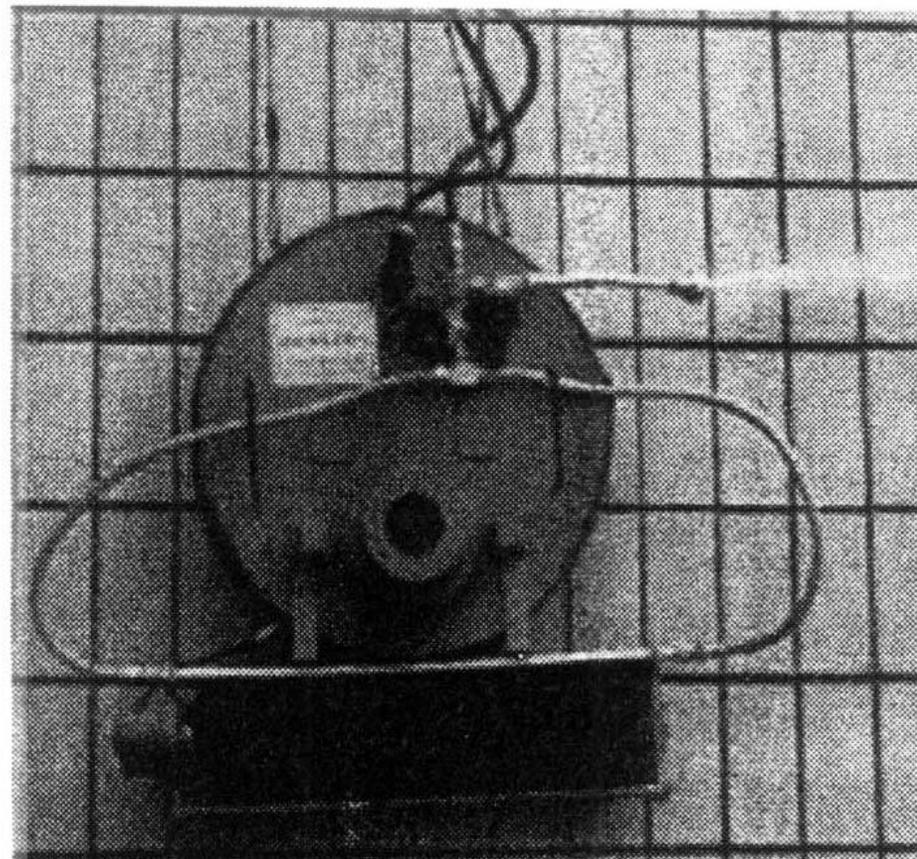
过去，AI 更多是存在于屏幕里（比如现在的DeepSeek），它能思考、能写作，但无法直接感知和干预物理世界。而具身智能的目标，就是让 AI 拥有“身体”，在与物理世界的交互中学习和进化。

6.3.1 关键技术

维度	技术要点	作用
大脑 (Intelligence)	多模态大模型 (VLA Models)	赋予机器人视觉、语言和动作 (Vision-Language-Action) 的统一理解能力。
小脑 (Control)	强化学习 & 模仿学习	处理平衡、行走、避障等精细动作, 让机器人像生物一样产生“肌肉记忆”。
躯干 (Hardware)	高性能执行器 (Actuators)	模拟人类关节的灵活性, 要求高功率密度和极高的控制精度。

6.3.2 智能移动机器人

- 智能移动机器人是机器人研究领域中的一个重要分支。
- 机器人正在向**个人机器人**的方向发展。
- 特种机器人在海洋与农业、服务与医疗、生物与基因工程、航空与航天等领域的应用显示出强大的生命力，如安全微创的**脑外科辅助定位机器人**、**雕刻机器人**、**导游机器人**、**酒店服务机器人**等都进入实用化阶段。



机器人正在清洗瓷砖壁面

6.3.3 迈向二十一世纪的中国机器人

- 我国把智能机器人列为高技术发展计划，主要是围绕特种机器人进行攻关。
- 完成了10000m水下无缆自治机器人的研制，并完成了无人驾驶振动式压路机、隧道凿岩机、大型喷浆机、机器人化装载机、自动摊铺机等机器人化工程机械。
- 已经研制出遥控移动机器人、爬壁机器人、酒店服务机器人、排爆机器人、面壁清洗机器人、医疗辅助机器人、足球机器人等。

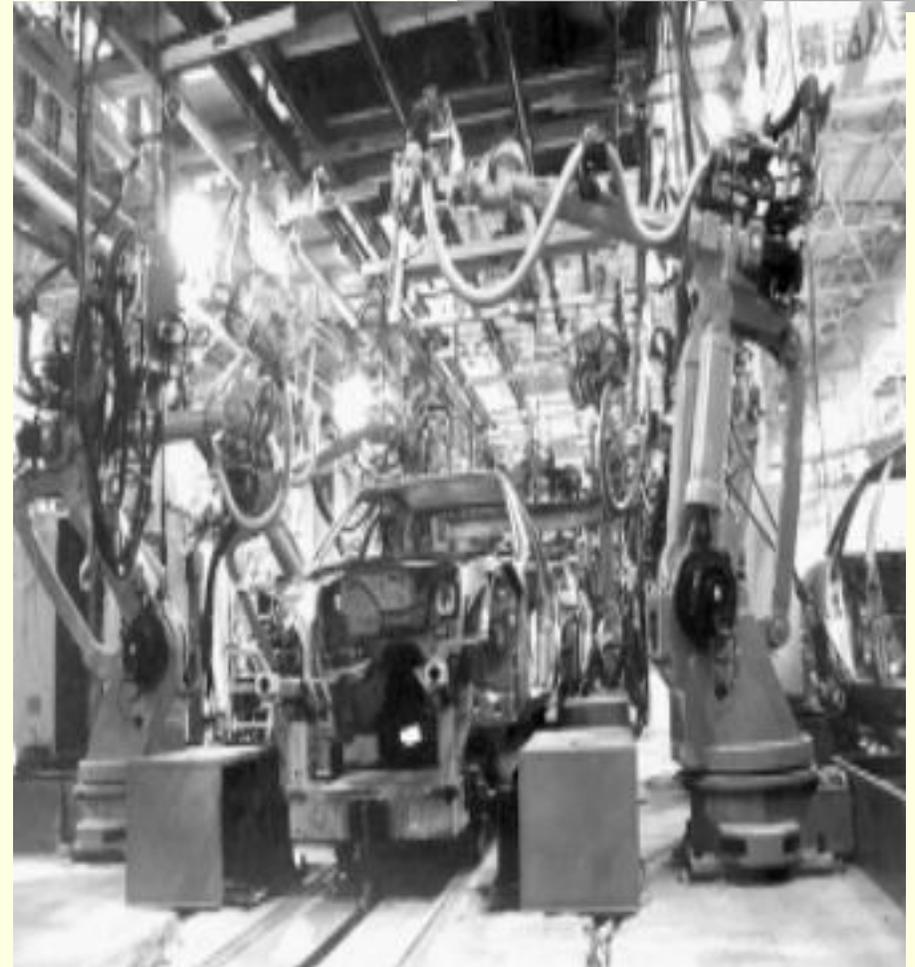


图6.3 焊接机器人

6.3.4 机器人涉及的自动化技术

- **变结构控制与学习控制** 变结构滑动模控制一直是机器人控制研究的重点，因其直观上的合理性而得到特别的重视。自适应滑动模控制等新的方法对传统的方法做了重要的改进。
- **机器视觉与机器智能** 如何获取场景和目标的图像信息，并把其处理成机器能够理解的特征或模式，是机器智能中非常困难的研究课题。
- **智能控制与信息融合** 室外智能移动机器人所涉及的关键技术包括移动机器人的控制体系结构、机器人视觉信息的实时处理、车体的定位系统、多传感器信息融合技术，以及路径规划技术与车体控制技术¹⁴等。

6.4 空间站与深空探测

人类航天正处于从“近地轨道长期驻留”向“深空探测中转站”转型的关键期。空间站不再仅仅是实验室，它正逐渐演变为人类前往月球、火星的“大本营”和技术验证场。

- **中国空间站（天宫）**：已进入常态化运营模式。2026年，神舟二十一号与二十二号乘组接力驻留。天宫站目前的重点是大规模空间科学实验（如生命科学、微重力物理）以及为后续载人登月验证关键技术（如闭路生命保障系统的超长周期运行）。
- **国际空间站（ISS）**：计划于2030年退役，NASA已委托 SpaceX 研制专用航天器，准备在2030年后引导其安全坠毁。
- **深空门户空间站（Gateway）**：NASA “阿尔忒弥斯（Artemis）”计划的核心，预计2026年后开始实质性组装。它将运行在月球轨道，作为宇航员往返月表的“中转候车厅”。

6.4.1 人类太空飞行与空间站

α国际空间站是一座有两个足球场大小的空间站，是人类历史上第一个完备的太空实验室。

- ◆ 神舟号载人飞船
- ◆ 嫦娥登月飞船
- ◆ 中国空间站



6.4.2 空间站与深空探测涉及的自动化技术

包括：自主导航与制导（GNC）技术、空间机器人与精细操控技术、自主任务规划与调度技术、故障诊断与自愈（FDIR）技术、表面作业与采样技术、全自主巡视机器人、环境生命保障的自动化系统等。

	空间站（近地）	深空探测（远地）
实时性要求	高（有人在轨，安全第一）	极高（时延大，需秒级响应）
感知对象	合作目标（预设接口、靶标）	非合作目标（未知地形、随机小行星）
计算模式	地面辅助+在轨执行	本地大算力+边缘推理

6.5 高超声速飞行器

高超声速飞行器（Hypersonic Vehicle）是指飞行速度超过5倍音速的飞行器，具有飞行高度高、速度快、突防能力强等优点，能在很短的时间内抵达地球上的任何地方，在军事和民用领域均具有特殊的战略意义，已成为各国航空航天领域的研究热点。



X-43A



X-51A

6.5.1 高超声速飞行器控制面临的挑战

- **强烈的气动加热：** 极高的速度导致空气剧烈压缩和摩擦，表面温度可达数千度。这不仅影响结构强度，还会导致气动特性随温度剧烈变化。
- **非线性与强耦合：** 推进系统（如超燃冲压发动机）与机身气动布局高度集成。发动机进气道的状态直接受飞行姿态影响，而姿态变化又会反过来改变推力。
- **弹性形变：** 为了减重，机身通常设计得较为轻薄，在高速下会产生显著的气动弹性效应，即机身会像面条一样轻微扭曲，导致飞行姿态感知模糊。
- **执行器约束：** 由于空气稀薄或压强巨大，舵面（襟翼、方向舵）的偏转范围和速率受限。

6.5.2 高超声速飞行器涉及的主要控制理论

- 鲁棒控制与自适应控制 (Robust & Adaptive Control)
- 滑模控制 (Sliding Mode Control, SMC)
- 模型预测控制 (MPC)
- 智能控制 (AI & Neural Networks)

	传统超音速飞行器	高超声速飞行器
模型特性	线性化模型为主	强非线性、时变参数
耦合度	气动/动力系统相对独立	机身/发动机推进一体化耦合
控制带宽	较低	极高 (需处理高频振动)
主要理论	PID、LQR	非线性控制、鲁棒/自适应控制

6.6 信息物理系统CPS

- 信息物理系统 (Cyber-Physical Systems, 简称 CPS) 是一个深度融合了计算进程 (Cyber) 与物理进程 (Physical) 的智能系统。
- 简单来说, 它不仅仅是将电脑连接到机器上, 而是通过传感器、网络和执行机构, 让计算核心与物理实体在空间和时间上形成一个紧密的闭环反馈。



6.6.1 CPS 的核心构成 (3C 融合)

- **计算 (Computation):** “大脑”。负责处理数据、逻辑推理、自主决策。
- **通信 (Communication):** “神经”。实现物理世界与信息世界之间的实时、高可靠数据交换。
- **控制 (Control):** “肌肉”。根据计算结果，对物理实体进行精准的操作和干预。



6.6.2 CPS 的工作流程

CPS 的运作可以概括为一个不断循环的过程：

- **感知 (Sensing):** 传感器将物理世界的状态 (如温度、压力、位置) 转化为数字信号。
- **传输 (Networking):** 通过网络将数据实时传送到计算单元。
- **决策 (Analysis):** 计算单元利用算法 (或 AI) 分析数据并做出判断。
- **执行 (Actuation):** 指令传回物理世界的执行机构 (如电机、阀门) , 改变物理状态。



6.6.3 CPS 与物联网 (IoT) 的区别

特性	物联网 (IoT)	信息物理系统 (CPS)
重点	连接与识别。 重点在于让物体联网。	控制与反馈。 重点在于信息与物理的深度闭环。
主要目标	数据收集、远程监控。	实现物理系统的自主、精确、高效运行。
典型例子	智能水表、共享单车定位。	自动驾驶汽车、智能电网、手术机器人。



6.6.4 典型应用场景

- ◆ **智能制造:** 工厂里的机器能根据原材料的状态自动调整加工参数，实现零失误生产。
- ◆ **智慧交通:** 自动驾驶汽车之间通过无线通信协同行驶，避免碰撞并最大化路网效率。
- ◆ **智能电网:** 根据用电负荷的实时变化，自动调配不同能源（风能、太阳能等）的输入，保障电网稳定。
- ◆ **医疗健康:** 植入式起搏器根据患者的心率变化，实时计算并释放精准的电脉冲。



6.7 人工智能广泛应用

■人工智能（Artificial Intelligence, AI），研究和开发用于**模拟、延伸和扩展人的智能**的理论、方法、技术及应用系统，是**自动化未来重要的发展方向**，也是新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力量。

- AlphaGo 与 AlphaZero
- **ChatGPT、豆包、DeepSeek**——大模型
- 多智能体系统（MAS）理论及应用
- **智能导弹**
- 机器人化UAV
- **多对多智能攻防对抗**
- **智能工厂**



小结

	传统自动化 (4.0 早期)	未来自动化 (2026+ 展望)
控制核心	基于规则 (Rule-based)	基于学习与推理 (AI-driven)
灵活性	刚性流水线, 改产困难	模块化、软件定义, 快速重构
交互方式	专业编程/触摸屏	自然语言/视觉感知/手势
数据处理	中心化云端处理	边缘计算与分布式决策