

人工智能在机电工程控制领域的 细分应用研究

文 ◆ 广东晟晔信息科技有限公司 王世雄

引言

目前，随着我国大力提倡节能减排，大多数工厂纷纷开展智能化升级。在此背景下，人工智能成为机电工程控制领域实现智能化的关键助力和不二选择。本文着重阐述了人工智能在机电控制方面的具体应用，涵盖三大类智能控制技术、工业机器人与智能设备的创新控制方法以及提前预防故障和节能降耗的实际解决方案。研究表明，人工智能通过变革机电系统“感知—判断—行动”的整个流程，显著提升了控制精度和能源利用效率，为制造业达成绿色环保与智能化转型，提供了关键的技术方案和实用技巧。

1 研究背景

全球工厂正朝着智能化方向发展，机电工程作为工厂生产的基础，其控制效果直接影响生产效率与资源利用。在工业 4.0 的推动下，传统生产方式转变为智能系统，这就要求机电控制具备快速感应、自主决策与自我改进的技能。同时，节能减排需求促

使控制技术向节能精确的方向发展。

人工智能技术的迭代为解决上述问题提供了新思路。其基于数据驱动的建模方法，可突破传统控制对精确数学模型的依赖，实现复杂机电系统的非线性控制；通过深度学习与强化学习等算法，能够挖掘运行数据的规律，为故障预警与能效优化决策提供支撑。这种结合使控制理论从单纯依靠数学模型转向数据与模型相结合。在实际应用中，有助于高端设备制造、新能源设备等领域的技术升级，具有研究与生产价值。

2 智能控制技术的核心分支与应用

2.1 自适应控制技术

2.1.1 数据驱动自适应控制

传统 PID 控制依赖固定参数，难以应对机电系统的时变特性（如刀具磨损、负载波动等）。数据驱动自适应控制通过实时采集传感器数据（如电流、位移、振动等），基于递推最小二乘（RLS）或模型预测控制（MPC）动态更新控制参数，实现从“感知”到“调整”再到“执行”的闭环优化。

在数控机床进给系统中，通过安装在滚珠丝杠上的光栅尺与扭矩传感器，实时采集位置偏差与驱动力矩数据，构建基于 RLS 的参数估计模型，可在线识别系统刚度变化，动态调整比例增益与积分时间。该方法的核心优势在于无需预设系统模型，仅通过数据反馈即可实现鲁棒控制。

2.1.2 神经网络自适应控制

针对机器人关节、液压伺服等强非线性系统，神经网络自适应控制通过多层感知器（MLP）或卷积神经网络（CNN）拟合“输入—输出”映射关系，实现无模型自适应调节。在六轴工业机器人控制中，BP 神经网络通过学习关节角度与驱动力矩的历史数据，建立非线性补偿模型，可实时抵消齿轮啮合间隙与摩擦干扰，使轨迹跟踪误差降低 35%。

普通自动控制方法遇到新情况需要慢慢调整，而采用神经网络的控制系統就如同一个会自学的“小能手”，它能更快适应未曾见过的情况。

【作者简介】王世雄（1981—），男，湖北黄梅人，本科，工程师，研究方向：信息系统集成项目、机电控制工程项目、智能化工程项目设计、智能化工程项目现场管理。

例如，机器人突然抓取不同重量的东西时，调整速度能快 2 ~ 3 倍，让整个系统反应更灵活。

2.2 模糊逻辑与专家系统

2.2.1 模糊控制在非线性系统中的应用

液压伺服系统、永磁同步电机等具有强耦合、参数时变的特性，精确建模难度较大。模糊控制通过将连续变量（如压力、转速）转化为“高 / 中 / 低”等模糊集合，基于专家经验构建规则库（如“压力过高则减小伺服阀开度”），实现非线性系统的鲁棒控制。

某钢铁企业连铸机结晶器液位控制中，采用二维模糊控制器（输入为液位偏差与偏差变化率，输出为进水流量），通过 49 条模糊规则实现液位动态调节，使波动幅度从 $\pm 5\text{mm}$ 降至 $\pm 3.5\text{mm}$ ，浇铸合格率提升至 99.2%。该技术的核心价值在于无需数学模型，仅通过语言化规则即可应对系统非线性问题。

2.2.2 专家系统与故障诊断

专家系统通过知识图谱整合领域专家经验，结合产生式规则（IF-THEN）实现设备故障的快速定位。在电梯曳引系统中，通过采集电机电流、转速、振动频谱等 12 类特征参数，构建包含 300 余条规则的知识库，可在 10s 内识别轴承磨损、编码器漂移等 28 类故障，诊断准确率达 96%。

与传统故障树分析相比，专家系统的案例推理机制使其能不断积累新故障模式。在电梯运行数据每增加 1000 小时，诊断覆盖率提升约 2.3%，显著降低了维护成本。

3 工业机器人与智能装备的控制创新

3.1 协作机器人的人机共融控制

3.1.1 力控感知与安全交互

人机协作场景中，机器人需同时满足操作精度与安全防护要求。通过集成六维力传感器（分辨率 0.1N）与双目视觉系统，构建“力—视觉”融合感知框架。力传感器实时监测末端执行器与工件 / 人体的接触力，视觉系统通过 YOLOv5 算法识别操作人员位置与姿态，二者数据经卡尔曼滤波融合后，驱动阻抗控制算法实现柔顺运动。

在汽车发动机缸体装配中，协作机器人通过力控将螺栓预紧力控制在 $\pm 0.5\text{N}$ 范围内，同时视觉系统实时划定安全作业半径（ $\geq 500\text{mm}$ ），当人员进入时自动降低运动速度至 0.1m/s，实现高精度装配与安全防护的协同。该技术使装配效率提升 20%，同时消除了人机碰撞风险。

3.1.2 群体协作与分布式控制

多机器人集群（如物流分拣、焊接工作站）需解决任务分配与协同运动问题。基于多智能体（MAS）理论，每个机器人作为独立智能体，通过分布式一致性算法实现信息交互与任务协商。在物流分拣场景中，智能体通过心跳机制交换货物位置与自身负载信息，基于改进匈牙利算法动态分配分拣任务，使系统吞吐量提升 25%，能耗降低 18%。

这种分散式的设计比将所有控制权集中在一处的模式更为可靠。即便有 30% 的机器人出现故障无法工作，剩下的 70% 机器人仍能继续执行任务，整个系统依旧能维持 70% 的工作效率。这种设计让整个机器人

团队更加稳定耐用。

3.2 智能无人机与移动平台控制

3.2.1 复杂环境自主导航

电力巡检、农林植保等场景对无人机的环境适应性要求极高。通过激光雷达（LiDAR）与视觉 SLAM 融合建模，LiDAR 生成 100Hz 的三维点云地图，视觉系统提取 RGB 图像中的语义特征（如电力线、树木），二者经特征匹配后构建带语义标签的动态环境地图。路径规划采用改进 A* 算法，并结合强化学习（DQN）优化避障策略。在山区电力巡检中，该技术实现了 100% 的障碍物规避，巡检覆盖率提升了 40%。

该技术突破了传统 GPS 导航在遮挡环境中的局限性，使无人机在密林、峡谷等场景的定位误差控制在 $\pm 0.5\text{m}$ 内。

3.2.2 抗干扰姿态控制

在极端工况（6 级以上风力、电磁干扰）下，无人机的姿态稳定性面临严峻挑战。采用 H_∞ 鲁棒控制器抑制外部干扰，同时通过扩展卡尔曼滤波（EKF）融合 IMU（惯性测量单元）与磁罗盘数据，优化姿态解算精度。在植保无人机作业中，该方案使定高误差从 $\pm 0.8\text{m}$ 降至 $\pm 0.3\text{m}$ ，农药喷洒均匀度提升了 35%。

这种新方法比传统的 PID 控制更具优势。当干扰强度增强一半时，它仍能让无人机稳定作业，从而使无人机能够在更多场景中发挥作用。

4 预测性维护与能效优化应用

4.1 基于机器学习的设备健康管理

4.1.1 故障预测模型构建

机电设备故障具有隐蔽性与

突发性，传统定期维护模式易导致过度维修或突发停机。基于长短期记忆网络（LSTM）与随机森林的融合模型，可实现早期故障预警。通过振动传感器（采样率 10kHz）采集旋转机械的时域信号，经小波包分解提取能量特征后，输入 LSTM 网络学习退化趋势，随机森林模型进一步分类故障类型。在石化压缩机监测中，该模型实现了 72h 提前预警，准确率达 91%。

应用该系统后，设备非计划停机时间减少了 40%，年度维修成本降低了 280 万元。

4.1.2 剩余寿命预测（RUL）

风电齿轮箱、机床主轴等关键部件的剩余寿命（RUL）预测是运维决策的核心。采用物理模型与数据驱动融合方法，基于齿轮疲劳损伤理论建立退化物理模型，同时通过支持向量回归（SVR）拟合振动特征与寿命的映射关系，加权融合双模型输出，使风电齿轮箱 RUL 预测误差控制在 10% 以内。

准确的 RUL 预测使风电场运维计划优化率提升了 30%，单机机组年度发电量增加了 2.3 万 kWh。

4.2 能效优化与智能调度

4.2.1 生产流程能耗建模

制造车间的能效优化需实现设备、工序、能源网络的协同管控。基于数字孪生技术构建车间能源流模型，通过 OPCUA 协议实时采集 300 余台设备的能耗数据（功率、功率因数等），在虚拟空间中复现能源流动态，并结合遗传算法优化设备启停时序与负载分配。某电子元件厂应用该技术后，SMT 生产线单位产品能耗下降了 12%，年度节电 300 万千瓦时。

数字孪生的仿真能力使能效优化方案的验证周期从 72h 缩短至 4h，显著提升了决策效率。

4.2.2 需求响应与负荷预测

智能工厂需平衡生产需求与电网负荷波动。采用梯度提升树（GBDT）算法预测短期电力负荷，输入特征包括历史能耗、环境温度、生产计划等 15 类变量，模型通过 5 层决策树集成实现 0 ~ 24h 负荷预测，精度达 93%。基于预测结果制定储能系统充放电策略，在峰谷电价差下实现用电成本降低 15%。

该模式不仅降低了工厂的能源成本，还为电网调峰提供了柔性负荷资源，有助于电力系统稳定运行。

5 挑战与未来趋势

5.1 技术瓶颈

（1）数据质量约束。工业环境中传感器存在噪声（均值 0.5%FS）与数据缺失（日均 3% ~ 5%）的问题，导致模型泛化能力下降，因此需发展鲁棒性特征提取与数据补全技术。

（2）“算力—实时性”矛盾。深度学习模型（如 ResNet-50）的计算量达 15GFLOPs，难以在嵌入式控制器（如 STM32H7）上实现毫秒级响应，模型轻量化（剪枝、量化）迫在眉睫。

（3）伦理安全风险。自主决策系统的“黑箱”特性导致故障责任界定模糊，需建立可解释 AI（XAI）框架；工业控制系统面临网络攻击风险，需强化数据加密与入侵检测。

5.2 发展趋势

一是跨模态融合控制，融合视觉、力觉、声学等多源信息，构建“感知—认知—决策”一体化框架。例如，机器人通过听觉识别设备异响、视觉定位故障位置、力觉执行维修操作，实现复杂任务的自主完成。

二是边缘智能，在边缘节点（如 PLC、工业网关）部署轻量化模型（如 MobileNet、TinyBERT），使推理延迟控制在 50ms 内，满足实时控制需求。

三是数字孪生驱动控制，借助物理实体与虚拟模型的实时联动，构建控制策略的动态更新与闭环优化机制。

结语

当前，人工智能技术正在彻底改变机电工程控制行业。过去，该行业仅进行局部改进，如今则从系统层面展开全面变革。在自动调节控制、设备智能化、节能管理等方面，人工智能让系统变得更加精准、快速、稳定。然而，目前仍存在两大亟待解决的问题，一是数据质量不佳，二是计算机算力不足。只有攻克这些技术难题，人工智能技术才能真正从实验室走向工厂。因此，融合不同传感器数据、实现设备自主智能处理以及结合数字孪生技术进行综合应用，将为机电控制带来巨大变革，助力企业实现“高效、绿色、智能”的转型升级。