

物联网环境下机电系统运行监测与智能控制研究

邹 鹏

台州新名匠人力资源服务有限公司 浙江台州 318000

摘要: 随着物联网 (IoT) 技术的快速发展, 机电系统在智能制造、能源管理、交通运输和建筑运维等领域的应用模式正在发生深刻变革。传统机电系统监测与控制方式存在信息孤岛、实时性不足和响应滞后的问题, 已难以满足现代复杂系统对高可靠性、高效率与智能化的需求。研究认为, 物联网驱动的机电系统智能化转型, 不仅有助于提升系统运行的安全性与经济性, 还为工业4.0与智慧城市建设提供了关键支撑。

关键词: 物联网; 机电系统; 运行监测; 智能控制; 数字孪生

引言

机电系统作为现代工业和基础设施的核心支撑, 其运行状态直接关系到生产效率、安全保障与能源利用水平。随着工业装备复杂度不断提升, 传统基于人工巡检与定时维护的模式已无法适应大规模、实时化与动态环境下的运行需求。本文旨在系统研究物联网环境下机电系统运行监测与智能控制的体系架构与关键技术, 分析其在工业制造、能源装备、交通运输和智慧建筑等领域的应用实践, 并提出未来发展趋势与挑战, 以期对相关领域的科研人员与工程实践提供理论参考和技术借鉴。

一、物联网与机电系统融合的理论基础

1. 物联网的体系结构与技术特征

物联网的体系结构呈现出多层次与多维度的特征, 常见的三层模型 (感知层、网络层、应用层) 在实际工程应用中逐渐演化为“五层模型”, 即在原有三层基础上增加了“处理层”和“业务层”。其中处理层主要负责对数据进行清洗、聚合与建模, 确保信息能够以高效、低冗余的方式传输至上层; 业务层则侧重于不同应用场景的功能实现, 如预测性维护、能耗管理和智能调度等。五层结构更符合现代机电系统在复杂工况下的运行需求, 也为未来大规模智能工厂与智慧城市的建设提供了理论支撑。

在技术特征方面, 物联网强调全面感知、可靠传输与智能处理。全面感知体现在传感器类型与布设方式的

多样化, 不仅涵盖温度、压力、振动、电流等常规参数, 还逐步拓展至图像识别、声学检测与多模态融合, 从而实现机电系统运行状态的多维映射。可靠传输依托5G、工业以太网、TSN (时间敏感网络) 等技术, 既保证了低延迟与高带宽, 也提升了数据传输过程的确信性与鲁棒性。智能处理则与人工智能、云计算和数字孪生紧密相关, 通过在边缘端完成快速响应, 在云端完成全局优化, 实现“分布式—集中式”的协同机制。而物联网不仅仅是技术叠加的结果, 而是一种全新范式的构建。在机电系统的应用中, 它打破了传统信息孤岛, 将分散的设备、控制单元和监测终端整合为一个可交互、可演进的整体网络。随着技术演进, 未来的物联网将进一步朝着自组织网络、泛在计算与沉浸式交互方向发展, 使机电系统具备更强的适应性与扩展性

2. 机电系统运行监测与控制的需求

机电系统的运行监测与控制需求, 根源于其复杂性与多样性。一方面, 机电设备的运行状态往往受到负荷波动、环境扰动与人机交互的共同作用。如在风电机组中, 风速的时空变化直接导致负荷的动态不平衡; 在数控机床中, 加工工艺的变化对电机转速与刀具振动提出不同要求。这些动态变化不仅加大了监测难度, 也提升了控制系统对实时性与精确性的要求。

另一方面, 随着绿色低碳与节能减排目标的推进, 机电系统运行监测与控制的关注点逐渐从单纯的设备安全扩展到综合性能优化。这不仅包括传统的故障检测与寿命预测, 还涉及能耗优化、碳排放监控与全生命周期健康管理。例如, 在大型商业建筑的空调机电系统中, 物联网监测平台可实时采集环境参数与设备负荷, 并通过人工智能算法动态调节制冷机组的启停与风阀开度,

作者简介: 邹鹏 (1994.01—), 男, 汉族, 2016年6月毕业于湖南城市学院计算机科学与技术专业, 现从事教育行业, 通讯地址: 浙江台州。

从而实现10%—20%的节能效果。这表明运行监测与控制已不仅是保障安全的“底线”，更是提升效能与符合政策导向的“抓手”。机电系统运行监测与控制还需满足预测性、协同性与智能性的综合要求。预测性要求监测平台能够基于历史数据和实时信息，对潜在风险进行提前预警；协同性强调多个子系统之间的互联互通与信息共享，避免因信息割裂导致控制指令冲突；智能性则要求控制系统具备自适应学习与优化能力，在面对未知工况或突发事件时能够迅速做出合理决策。这些需求凸显了物联网技术在机电系统应用中的不可替代性，也为未来研究指明了方向。

二、物联网环境下机电系统运行监测技术

随着物联网技术的深入应用，机电系统运行监测正逐步从传统的分散采集、事后分析，转向以实时感知、边缘预处理、云端智能和闭环控制为核心的体系化框架。本文将其抽象为三大关键环节。多源感知与边缘协同、网络通信与数据传输、智能分析与闭环控制，其整体逻辑如图1所示。

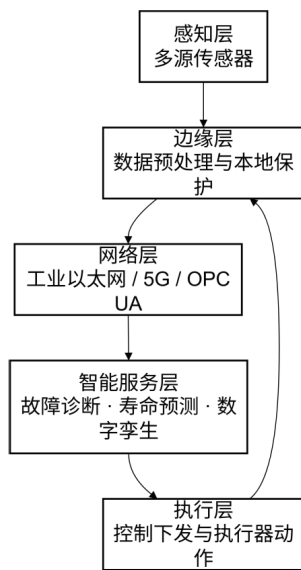


图1 物联网环境下机电系统运行监测三环节架构示

1. 多源感知与边缘协同

感知层是运行监测的基础，其核心在于利用多源传感器全面获取机电系统的运行状态信息。振动、温度、电流、电压与转速等传统信号在监测中仍占据主导地位，而随着工况复杂度提升，视觉传感器、声学阵列与红外热成像等新型传感器逐渐成为补充，使监测数据具备更强的多维度与多模态特征。多源传感不仅提高了监测的覆盖度和准确性，也为后续的智能诊断提供了数据支撑。传感器规模化部署带来数据量的指数级增长，直接上传

至云端会造成网络拥塞与处理延迟。边缘层的引入有效解决了这一问题。边缘网关与工业PC能够在靠近设备端完成数据的预处理与压缩，同时利用轻量化的机器学习算法进行初步诊断与异常检测。如电机电流波形异常时，边缘节点可在毫秒级时间内触发保护逻辑，避免系统因延迟而造成损坏。通过“多源感知+边缘协同”的模式，监测系统在实时性、可靠性和数据利用率上均显著提升。

2. 网络通信与数据传输

网络层是连接现场与平台的关键纽带，其性能直接影响监测系统的稳定性和扩展性。在物联网环境下，工业以太网、5G专网与OPC UA协议构成了主流的通信方式。工业以太网以高带宽和良好兼容性适合车间内部实时监测；5G则凭借低时延与大连接优势，在远程运维与分布式场景中表现突出；OPC UA提供了跨厂商、跨系统的标准化接口，为设备互联互通奠定基础。同时网络层不仅承担数据传输，还负责优先级调度与差异化服务。例如，关键安全告警必须优先传输，而能耗数据则可批量延迟上传。新兴的时间敏感网络（TSN）技术进一步增强了数据传输的确定性，使不同类型数据在同一网络中实现无冲突传输。通过这些手段，网络层保证了运行监测的低延迟与高可靠性，为上层智能分析提供稳定的数据通道。

3. 智能分析与闭环控制

智能服务层与执行层共同构成了系统的“大脑与肌肉”，在物联网运行监测中发挥核心作用。第一，智能服务层基于大数据分析 with 人工智能算法，实现对设备的故障诊断与健康评估。卷积神经网络（CNN）、长短期记忆网络（LSTM）和聚类分析等方法能够识别早期故障特征，预测关键部件的剩余寿命。进一步地，数字孪生模型通过虚拟—现实映射，将设备运行状态在虚拟空间中实时再现，使预测性维护与运行优化成为可能。第二，执行层负责将上层决策落实到设备操作中，并通过反馈机制实现监测与控制的闭环。如当智能分析发现电机温升过高时，执行层可立即调节冷却系统参数；若执行效果不理想，反馈信息会促使智能服务层修正模型与策略。这种持续的闭环优化，使机电系统在复杂环境中具备更强的自适应与鲁棒性。

三、物联网环境下机电系统智能控制技术

物联网不仅为机电系统运行监测提供了实时数据支撑，也为智能控制注入了新的动力。与传统依赖经验公式和线性模型的控制方式不同，物联网架构下的智能控制更强调数据驱动—模型驱动—自适应优化的融合特征。

1. 人工智能辅助的控制决策

人工智能为机电系统的智能控制提供了强大的建模与推理能力。传统控制多采用PID、模糊控制或状态空间方法，在处理非线性、多约束和动态耦合的复杂机电系统时往往存在精度与鲁棒性不足的问题。而人工智能算法能够基于物联网采集的多维度大数据，挖掘设备运行规律与潜在模式，进而生成自适应的控制策略。

在实际应用中，深度学习方法（如卷积神经网络CNN、循环神经网络RNN）已被用于非线性系统的建模与预测。以数控机床主轴转速控制为例，传统方法难以兼顾动态响应与能耗优化，而引入深度神经网络后，可以基于历史时序数据预测转速变化趋势，从而提前调整控制指令，实现平稳过渡。强化学习（Reinforcement Learning, RL）则在复杂环境下展现出显著优势。通过“状态—动作—奖励”的交互机制，控制器可以不断学习不同策略的效果，最终形成最优决策。例如，在柔性制造系统中，强化学习算法能够动态分配任务与调整工序，实现整体产能与能效的同步提升。同时人工智能还为多目标控制问题提供了有效解决方案。遗传算法、粒子群优化等群体智能方法可以在多个目标函数（如能耗最小化、效率最大化、安全性约束）之间进行权衡，为复杂场景下的机电控制提供全局最优解。

2. 边缘—云协同的控制架构

随着机电系统规模不断扩大，单一控制中心已难以满足实时性与可靠性要求。边缘—云协同架构成为智能控制的重要趋势。该架构的基本思路是：边缘节点负责处理实时性要求高、任务相对局部的控制功能，而云平台则承担跨区域、跨设备的全局优化与调度。

在典型的生产线中，边缘节点可在毫秒级完成电机过载保护、液压系统压力调节等关键任务，确保设备运行的安全性与稳定性。同时，边缘节点将预处理后的特征数据上传至云端，云平台基于全局数据运行优化模型，完成生产节拍调整、能耗平衡和维护策略制定。云端生成的控制指令通过网络层下发到执行层，最终落实到设备操作中。边缘—云协同的优势主要体现在三个方面。其一，提升了实时响应能力，即便网络短时中断，边缘节点也能独立维持基本控制功能；其二，实现了全局资源优化，避免各设备“各自为政”；其三，增强了系统的容错性和可扩展性。已有实证表明，在冶金行业引入边缘—云协同控制后，生产线的平均响应延迟降低了60%，系统能耗下降约12%，显示出显著的综合效益。

3. 数字孪生驱动预测性控制

数字孪生技术的引入，使机电系统智能控制具备了前瞻性与仿真验证能力。通过建立与物理设备一致的虚拟模型，并实时对接物联网采集的数据，数字孪生能够动态映射系统的运行状态，并在虚拟空间中对控制策略进行预演。在风电场应用中，传统的桨距控制依赖实时风速测量，往往存在响应滞后。而基于数字孪生的预测性控制可以在虚拟风场中模拟风速变化趋势，提前计算出最佳桨距角，并将策略同步下发至执行层，从而提升能量捕获效率。研究表明，该方法可使整体发电量提升5%—8%，并有效延缓关键部件的疲劳损伤。

数字孪生还为安全关键型机电系统提供了重要保障。在高铁供电系统中，通过孪生模型实时仿真电压波动与负荷冲击的影响，可以在执行调度前筛选出最优方案，避免潜在风险。这种“虚拟先行—现实执行”的控制模式，使预测性维护、风险规避与能效优化有机统一。值得注意的是，数字孪生不仅是监测与控制的工具，更是实现持续优化的平台。随着实际运行数据的不断积累，孪生模型可进行参数自校正，从而保持长期有效性与高精度。这种自进化特征，标志着机电系统控制正从“经验驱动”向“数据—模型双驱动”转变。

结论

本文系统研究了物联网环境下机电系统运行监测与智能控制的理论基础、关键技术与应用实践。研究表明，物联网驱动的感知—传输—控制闭环机制显著提升了机电系统的运行安全性、经济性与智能化水平。未来的发展应重点关注数据安全、系统标准化与智能算法可解释性，并推动数字孪生与边缘—云协同的深度融合。该研究不仅为机电系统的智能化升级提供了理论依据，也为工业4.0与智慧城市建设提供了实践指导。

参考文献

- [1] 张阳, 李超, 符立梅, 等. 基于物联网技术的煤矿机电设备运行状态智能监测系统研究与应用[J]. 中国煤炭, 2025, 51(7): 164-169.
- [2] 南志超, 叶续雷, 张阿丰, 等. 物联网技术在机电设备运行状态监测中运用分析[J]. 模具制造, 2025, 25(7): 183-185.
- [3] 王平. 基于物联网技术的井下机电设备运行状态监测方法[J]. 科学与信息化, 2024(4): 130-132.