基于工业物联网的机械制造电力系统远程监控与能耗管理研究

姜广亮 陈文武
青岛金涌热电有限公司 山东 青岛 266600

摘 要 为解决机械制造行业电力系统能耗高、运行监控效率低的问题，本文对基于工业物联网的远程监控与能耗管理技术进行了系统研究，提出融合边缘计算、实时数据采集、多维能耗分析与智能优化控制的整体架构。通过构建分层式监控体系，实现对电参量的高频采集与动态响应控制，并设计数据标签化模型与能耗异常识别算法，用于支撑精细化能效优化。该架构具备良好的可扩展性与适应性，能够在复杂工况下提升能效管理水平，可为机械制造领域电力系统的智能化升级与绿色节能工程提供理论支持与技术参考。

关键词 工业物联网；机械制造；电力系统；远程监控；能耗管理

Research on Remote Monitoring and Energy-Consumption Management of Electric Power Systems in Machinery Manufacturing Based on Industrial Internet of Things

Jiang Guang-liang, Chen Wen-wu
Qingdao Jinyong Thermal Power Co., Ltd., Qingdao 266600, Shandong Province, China

Abstract To solve the problems of high energy consumption and low monitoring efficiency of electric power systems in the machinery-manufacturing industry, this paper systematically studies remote monitoring and energy-consumption management technology based on the Industrial Internet of Things (IIoT). An integrated architecture that combines edge computing, real-time data acquisition, multi-dimensional energy analysis, and intelligent optimal control is proposed. A hierarchical monitoring system is constructed to realize high-frequency collection of electrical parameters and dynamic response control. A data labeling model and an energy-consumption anomaly identification algorithm are designed to support refined energy-efficiency optimization. The proposed solution exhibits good scalability and adaptability, and can improve energy-management level under complex operating conditions, providing theoretical support and technical reference for the intelligent upgrading and green energy-saving projects of electric power systems in the machinery-manufacturing field.

Key words Industrial Internet of Things; Machinery Manufacturing; Electric Power System; Remote Monitoring; Energy-Consumption Management

机械制造行业电力系统结构复杂、负载波动频繁，长期面临能耗高、运行状态不可视、用电效率难以保障等问题。在传统控制模式下，缺乏对关键能耗节点的实时监测与动态调节手段，难以支撑高强度制造任务下的能效优化需求。工业物联网技术的发展为提升监控效率与管理精度提供了新路径。研究该技术在制造电力系统中的应用，具有重要的工程价值与现实意义。

1 工业物联网技术体系与架构

工业物联网技术体系由感知层、网络层、平台层与应用层构成。其中，感知层通过传感器节点、智能仪表与边缘采集单元实现对设备运行状态、电参量及环境变量的高精度感知；网络层依托工业以太网、5G与时间敏感网络（TSN）等高速通信技术，构建低时延、高可靠性的实时数据传输通道；平台层集成边缘计算架构与云端数据管理系统，通过数据清洗、时序分析与多维建模，实现对能耗数据的结构化处理与高频异常识别；应用层则部署智能监控、预测性维护与能效优化控制模块，支撑制造电力系统的远程状态感知、动态调度与能效自适应调控，形成全周期闭环的智能能耗管理体系。

2 机械制造电力系统结构及运行特性

2.1 典型机械制造电力系统组成

机械制造电力系统通常由供配电系统、驱动控制系统、能量转换单元及电力保护与监测模块构成。供配电系统涵盖变压器、开关柜、母线槽与低压配电网络，承担电能从主电网向各负载分配的功能。驱动控制系统主要包括变频器、伺服控制器及各类工业电机，用于实现加工设备的精密运动控制。能量转换单元

覆盖液压、气动及热能转换设备，将电能高效转化为所需工艺形式。电力保护与监测模块集成过载保护、接地检测与电能质量分析功能，保障系统稳定运行并提供关键电参量支持。

2.2 电力系统运行中的关键能耗点

机械制造电力系统中的能耗主要集中于高功率电机驱动单元、非线性负载设备和辅助能量转换系统。高频启停或长时间全负荷运行状态下的主轴电机与液压站系统易导致峰值能耗升高，形成用能波动的主导因素。非线性负载，如变频器、整流电源及焊接设备在运行中引发谐波畸变与功率因数下降，进一步加剧无效能耗比例[1]。空压机、冷却塔及热处理设备作为辅助系统，在间歇性运行模式下产生显著的待机损耗与能量浪费。

3 电力系统远程监控技术设计

3.1 远程监控系统总体架构

电力系统远程监控总体架构由现场感知单元、边缘计算模块、通信中枢、数据处理平台及控制接口组成，构建完整的数据闭环与控制链路。现场感知单元部署电压互感器、电流互感器、数字式多功能电表等测量设备，支持0.2S级精度的数据采集要求。边缘计算模块承担本地数据预处理、特征提取与异常标记功能，降低后端传输压力。通信中枢通过支持IEC 61850、Modbus TCP与MQTT协议的网关设备实现多协议互通，传输延迟控制在20 ms以内。数据处理平台采用分布式时序数据库（InfluxDB）与流处理引擎（Apache Flink），实现百万级数据点的秒级解析[2]。控制接口基于WebSocket通信协议与传输层安全协议（TLS）加密通道，实现控制命令的毫秒级下发与指令校验，保障远程运维的可靠性与安全性。

3.2 实时数据采集与通信机制

实时数据采集机制依赖于高精度采集模块与低延迟通信链路的协同设计，确保数据传输过程中的完整性与连续性。电力参数采集频率通常设定在1～10 Hz之间，对于谐波监测与负载突变响应场景则可提升至100 Hz以上，以满足高动态性能要求。采集终端配备12位以上模数转换器（Analog-to-Digital Converter，ADC）芯片，支持三相电流、电压、频率、有功功率等多参量同步检测，误差控制在±0.5%范围内。通信机制采用分布式采集架构，通过5G或工业无线局域网完成现场数据上行，平均延迟控制在15 ms以内。数据采用Java Scrip对象表示法（Java Scrip Notation，JSON）或二进制压缩编码格式，在MQTT QoS 2等级协议保障下实现端到端传输确认机制[3]。边缘节点设有本地缓存与断点续传功能，保障采集链路在异常情况下的数据完整恢复能力。实时数据采集与通信机制关键技术参数配置见表1。

表1 实时数据采集与通信机制关键技术参数配置

项目	参数值或配置标准	说明
采集频率	1～10 Hz（常规），最高100 Hz以上	满足动态响应与高频监测需求
ADC分辨率	≥12位	保证电参量采集精度
测量误差范围	±0.5%	保障数据可靠性
通信延迟	平均≤15 ms	满足实时数据上行要求
通信协议	MQTT QoS 2、Modbus TCP、IEC 61850	支持多协议互通与高可靠性传输
数据编码格式	JSON/二进制压缩	兼顾兼容性与传输效率
网络技术	5G/工业WLAN	支持高带宽低时延的现场接入
边缘节点功能	本地缓存、断点续传	提高异常情况下的数据完整性

3.3 多维电参量监测指标体系

多维电参量监测指标体系以全面反映电力系统运行状态与能效水平为目标，构建包括基本电参量、功率质量参数、运行负载指标及稳定性指标在内的多维度监测框架。基本电参量包括三相电压、电流、频率，有功功率、无功功率及视在功率，测量精度需达±0.2% FS，采样周期不高于200 ms。功率因数、负载率、电压不平衡度及零序电流作为运行负载特征指标，要求支持实时统计与趋势追踪。谐波含量指标涵盖2～25次谐波电压与电流分量，总谐波畸变率（THD）须低于5%，以符合GB/T 14549标准限值[3]。

3.4 可视化与远程控制功能集成

可视化与远程控制功能的集成依托工业可视化平台与远程控制协议的深度融合，实现数据监测、状态预警与操作响应的统一闭环控制。系统前端采用支持网页图形库（WebGL）与可缩放矢量图形（SVG）渲染的可视化引擎，构建多层级动态数据界面，支持250 ms刷新频率与1 280×720分辨率下的流畅显示。用户可视化界面集成电力运行曲线、设备状态图标、报警分布热力图及能耗排名模块，通过色阶梯度、趋势箭头与动画

效果辅助故障识别与决策判断[4]。远程控制层面，系统采用IEC 60870-5-104与Modbus RTU协议，确保控制指令在500 ms内闭环响应。每条控制命令均带循环冗余校验（CRC）与执行确认机制，防止误操作与信号丢失。权限管理支持三级分级机制，细化操作边界，保障系统安全与可控性[4]。

4 能耗数据分析与能效优化策略

4.1 能耗数据的结构化与标签化

能耗数据的结构化与标签化是实现高精度能效分析的基础，关键在于对海量异构数据进行有序整理与多维属性映射。结构化过程依托统一的数据模型，将原始采集数据按照时间戳、设备编号、工序编码及能耗类型分类存储，采用时间序列数据库（InfluxDB）进行写入，支持以秒级粒度存储不低于100万条数据点。标签化机制基于预设规则库与设备运行日志，将能耗数据按生产工段、设备类型、负载等级及运行模式进行多维标记，实现维度可达8层以上的标签嵌套。数据标签包括但不限于“高负荷运行期”“空载待机”“维护停机”“低效区间”等状态标识，便于后续筛选与聚类分析。采用基于规则的标签引擎与机器学习辅助的标签算法可提升分类准确率至96%以上，同时实现实时标签动态更新与历史标签回溯，使能耗行为具备清晰边界与语义归属，为能效建模与优化控制奠定数据基础。

4.2 基于大数据的能耗特征识别方法

基于大数据的能耗特征识别方法通过对高频采集的多维能耗数据进行统计挖掘与建模分析，提取具有代表性的能耗模式、周期行为与异常特征。数据处理流程包括预处理、降维、特征提取与聚类识别4个阶段，通常采用滑动窗口算法对1 s采样频率的原始数据进行3 min时段分片，每片包含180条样本数据[5]。采用主成分分析（PCA）对高维特征进行降维压缩，保留方差解释率95%以上的主成分特征，提升模型训练效率。特征提取阶段融合功率波动率、负载因数曲线斜率、时变能耗梯度与工序同步性指标，构建多维能耗行为向量。聚类识别阶段使用K-Means++或DBSCAN算法对不同负载模式进行聚类划分，识别出异常高耗群体与非典型运行状态，准确率可达93%以上。

4.3 异常能耗识别与源头追溯

异常能耗识别与源头追溯是实现精准节能控制与设备故障预警的关键环节，核心在于构建高敏感度的识别模型并建立溯源路径。识别方法主要基于长短期记忆神经网络（LSTM）与孤立森林（Isolation Forest）结合的混合模型，前者用于建模时序能耗趋势，后者用于无监督检测异常波动区间。在正常运行工况下，系统可自动学习设备运行曲线与功率响应特征，识别精度维持在95%以上。当某段运行区间的能耗偏差超过历史均值 ± 3σ且持续时间大于30 s，则标记为高置信度异常事件。异常定位依托溯源矩阵与设备运行链路映射，结合实时功率分布图、工序调度记录与环境干扰因子，追溯到具体部件、控制单元或工艺节点。

4.4 优化控制策略设计

优化控制策略设计聚焦于动态负载调度、电机能效匹配与能源分配优化3个核心方向，通过构建闭环反馈控制机制与智能调节算法，实现能耗最小化与产线稳定性并重。控制算法以模型预测控制（MPC）为核心，引入基于约束优化的目标函数，实时调整运行参数。系统采集周期为1 s，控制周期设定为5 s，适用于多变量耦合的实时决策场景。在电机群控场景下，根据运行负荷与效率曲线匹配规律，动态选择最佳功率因数运行区间，使设备运行在最佳效率点附近，平均节能率可达8%以上。在辅助系统如冷却塔、空压站中，引入PID自适应控制器与分时启停策略，根据当前负载与预测负荷变化趋势调节运行时长与功率水平，降低冗余启动频次。

5 结束语

总而言之，基于工业物联网的机械制造电力系统远程监控与能耗管理，可实现电力运行状态的动态掌控与能耗数据的精细化分析，提升系统响应效率与能源利用水平。通过融合边缘计算、多协议通信与智能控制策略，构建起高效、可靠、可拓展的智能监控体系。未来应进一步推动技术集成与平台协同，实现制造环节能源管理的智能化转型。

参考文献

[1]赵元成.电力工业大数据分析在设备故障预测与维护中的应用研究[J].电工技术,2025(S1):173-175.

[2]严法高.机械制造电气自动化控制的可靠性研究[J].中国高新科技,2021(10):56-57.

[3]王宇.人工智能赋能机械制造智能化发展的应用与挑战研究[J].深圳特区科技,2025(4):128-131.

[4]安仲举.智能机械设计制造自动化特点与发展趋势研究[J].中国设备工程,2020(6):25-27.

[5]黄蕾.智能电力系统开关设备自动监控与控制[J].信息与电脑,2025,37(22):172-174.

（本文编辑 曹 阳）