

表计自动化运维模式下控制系统故障溯源与快速修复技术研究

王晓强

大连石化公司，辽宁省大连市，116031；

摘要：随着物联网、大数据及工业自动化技术的深度融合，表计设备已逐步从传统人工运维转向自动化运维模式，控制系统作为自动化运维的核心枢纽，其运行稳定性直接决定表计数据采集的准确性、传输的可靠性及运维效率。本文针对表计自动化运维模式下控制系统的故障特点，深入分析故障产生的核心诱因，研究故障溯源的关键技术，提出一套高效的快速修复方案，通过实例验证方案的可行性与实用性，为提升表计自动化运维系统的可靠性、降低故障停机时间、优化运维成本提供技术支撑。

关键词：表计自动化运维；控制系统；故障溯源

DOI：10.69979/3029-2727.26.05.068

引言

在工业生产、能源计量、民生服务等领域，表计设备（如电力、燃气、水表等）是数据采集统计核心载体，其运行状态影响生产安全、能源管理及民生保障。传统表计运维模式依赖人工巡检，存在效率低、响应慢、精度不足、成本高的问题，无法满足大规模、高密度运维需求。随着自动化技术发展，表计自动化运维模式推广，通过物联网模块、数据采集终端、云端管理平台协同，实现表计数据自动采集、监测、调控及预警，提升了运维效率与管理水平。控制系统是表计自动化运维系统的大脑，由硬件（控制器、传感器、通信模块）与软件（控制算法、通信协议、管理程序）组成，承担数据处理、指令下发、设备协同等核心功能。在复杂运行环境中，控制系统易出现传感器失灵、通信中断等故障，若不及时溯源修复，会影响计量与管理体系统运行。因此，开展表计自动化运维模式下控制系统故障溯源与快速修复技术研究，有重要理论与工程实践意义。

1 表计自动化运维模式及控制系统概述

表计自动化运维模式以智能化监测、自动化调控、远程化处置为核心，构建终端感知-数据传输-云端管控三层架构，实现表计全生命周期自动化运维管理。终端感知层由表计设备、传感器、数据采集模块组成，负责采集参数并上传数据，是故障监测基础。数据传输层采用有线与无线结合方式，实现终端与云端数据交互，具备数据加密等功能，确保传输可靠安全。云端管控层由服务器、控制平台、数据库组成，承担数据存储等功能，

可实时监测、预警、调控及管理运维记录，是控制系统核心载体。表计自动化运维控制系统是三层协同工作的核心，由硬件与软件系统组成。硬件系统包括主控制器等，负责数据采集等，是故障主要载体。软件系统包括控制算法等程序及云端管理软件，负责数据解析等，是故障溯源与修复的核心支撑。控制系统核心功能包括：采集处理运行数据；根据监测数据远程调控设备；实时监测系统状态并预警异常；记录设备运行信息，为故障溯源提供数据支撑。

2 表计自动化运维控制系统常见故障及诱因分析

结合表计自动化运维模式的运行特点，控制系统故障主要分为硬件故障、软件故障及通信故障三大类，不同类型故障的表现形式与诱因存在显著差异，具体分析如下。

2.1 硬件故障

硬件故障是控制系统常见故障类型，多发生在主控制器、传感器、通信模块及接口电路，诱因与设备老化、环境干扰、安装不当有关。主控制器故障表现为无法正常启动、指令下发失效、数据处理异常，诱因有电源故障、芯片老化、散热不良。如高温环境下 PLC 控制器散热风扇损坏，会使芯片过热，出现程序运行中断、数据丢失等故障。传感器故障表现为采集数据失真、无数据输出，诱因包括传感器老化、校准失效、环境干扰、安装偏差。如温度传感器元件老化，会使采集的表计设备温度数据偏差大，影响判断精度。通信模块故障表现

为数据传输中断、延迟过大, 诱因有模块损坏、天线接触不良、信号干扰、电源供应不足。如 NB-IoT 通信模块天线松动, 会导致表计数据无法上传至云端平台, 造成运维中断。

2.2 软件故障

软件故障主要发生在控制系统软件程序中, 诱因与程序设计缺陷、版本升级不当、参数配置错误有关, 隐蔽性强、排查难度大。控制算法故障表现为指令执行偏差、系统调控不稳定, 诱因有算法设计不合理、逻辑漏洞, 导致表计设备无法按预设指令运行。如表计远程调控时 PID 控制参数整定不合理, 会使表计运行参数波动大, 影响计量准确性。通信协议故障表现为数据解析失败、设备无法互联互通, 诱因有协议版本不兼容、配置错误、数据加密异常。如不同厂家表计设备协议配置不当, 会导致数据无法交互, 出现数据孤岛现象。程序故障表现为软件崩溃、程序卡死, 诱因有程序冗余、内存溢出、版本升级漏洞。如云端管理软件版本升级未完成兼容性测试, 会使软件运行异常, 无法监测表计运行状态。

2.3 通信故障

通信故障是连接终端感知层与云端管控层的关键故障, 表现为数据传输中断、误码率过高, 诱因有传输链路损坏、网络波动、电磁干扰。有线传输故障表现为以太网、RS485 线路中断、数据传输延迟, 诱因有线路老化、接头松动、人为损坏, 如 RS485 线路因户外风雨侵蚀断裂, 致使表计数据无法上传。无线传输故障表现为信号弱、传输中断, 诱因有信号遮挡(建筑物、树木遮挡)、网络覆盖不足、电磁干扰(工业设备电磁辐射), 如工业厂区高压设备电磁干扰使 LoRa 无线传输信号漂移, 导致数据传输误码率过高。此外, 人为操作失误(参数配置错误、设备误操作)、环境因素(温湿度剧烈变化、粉尘过多)会使控制系统故障, 增加故障排查与修复难度。

3 表计自动化运维控制系统故障溯源技术研究

故障溯源是快速修复的前提, 核心是通过多维度数据采集、故障特征提取、智能诊断, 精准定位故障位置、类型及诱因。本文结合表计自动化运维控制系统故障特点, 构建全流程故障溯源模型, 采用多源数据融合与智能算法结合的方式, 提升溯源精度与效率。

故障数据是故障溯源基础, 需采集控制系统硬件、

软件、通信及环境多维度数据。采用终端采集+云端汇总构建多源数据采集体系: 硬件数据采集主控制器等运行参数等; 软件数据采集控制算法等运行参数、日志; 通信数据采集传输链路运行参数; 环境数据采集表计设备运行环境参数。同时, 用数据预处理技术剔除无效与干扰数据, 为故障特征提取奠定基础。

不同类型故障特征不同, 通过故障特征提取技术, 从多源采集数据中提取与故障相关关键特征, 初步识别故障类型。结合控制系统故障特点, 采用时域特征+频域特征提取方式, 将多源数据转化为可用于故障诊断的特征向量, 为后续智能诊断提供输入。

结合系统故障特点, 采用基于规则的诊断+机器学习诊断智能诊断方法, 实现故障精准诊断与溯源。基于规则的诊断是结合运维经验与故障案例建故障规则库, 将故障特征与规则库匹配, 快速诊断常见故障, 规则库可依运维情况更新。机器学习诊断是针对复杂故障, 用 BP 神经网络算法建故障诊断模型, 经大量故障数据训练提升精度。两种方法融合, 实现常见故障快速诊断、复杂故障精准溯源, 定位故障及诱因, 为修复提供依据。

最后, 结合云端日志管理系统, 记录溯源过程与结果, 形成档案, 为故障预防与运维优化提供数据支撑。

4 表计自动化运维控制系统快速修复技术方案

基于故障溯源结果, 结合表计自动化运维模式远程、自动特点, 提出远程优先、现场兜底的快速修复方案, 针对不同故障类型制定策略, 高效处置故障, 降低停机时间。

硬件故障: 依据位置与类型, 采用远程复位+参数校准+现场更换修复。远程复位针对主控制器、通信模块临时故障, 通过云端平台下发指令重启设备; 参数校准针对传感器校准失效, 下发校准指令调整参数; 现场更换针对无法远程修复的故障, 先定位, 生成工单, 运维人员带备用设备更换部件, 修复后验证状态, 同时建立库存管理系统储备常用硬件。

软件故障: 采用远程升级+参数配置+程序修复。远程升级针对版本漏洞、程序冗余, 推送升级包; 参数配置针对控制算法、通信协议错误, 远程调整参数; 程序修复针对逻辑漏洞, 用远程调试工具修改代码。

通信故障: 依传输方式不同, 采用远程调试+链路优化+现场排查修复。远程调试针对无线传输故障, 调通信模块信号频率、功率; 链路优化针对有线传输故障, 定位后更换线路、紧固接头, 定期巡检; 干扰排除针对

电磁干扰，定位源后采取屏蔽、调整位置等措施。

为确保修复有效，构建故障预警-溯源-修复-验证-归档闭环管理体系：先预警，实时监测运行状态；接着溯源，定位故障位置与诱因；然后修复，按类型采用对应策略；随后验证，监测设备状态；最后归档，记录信息为后续提供依据。

5 实例验证

5.1 实例概况

选取某城市电力计量表自动化运维系统作为研究对象，该系统涵盖 10000 余块电力计量表，采用终端感知-无线传输-云端管控的自动化运维架构，控制系统采用 PLC 主控制器，搭配 NB-IoT 通信模块，实现电力计量数据的自动采集、远程监测与调控。该系统在运行过程中，频繁出现数据传输中断、采集数据失真等故障，影响运维效率与计量准确性，采用本文提出的故障溯源与快速修复技术方案，开展故障处置实践。

5.2 故障溯源过程

通过多源数据采集系统，采集控制系统硬件、软件、通信及环境数据，经预处理后提取故障特征：一是通信模块信号强度持续低于 -85dBm，传输误码率超过 10%；二是部分温度传感器采集数据偏差超过 5℃，且无数据输出时长达到 10 分钟；三是云端管理软件出现 3 次程序崩溃，报错信息显示内存溢出。

采用基于规则的诊断+BP 神经网络诊断相结合的方式，开展故障溯源：一是通过规则库匹配，诊断通信模块信号弱为电磁干扰导致，温度传感器无数据输出为传感器老化导致；二是通过 BP 神经网络模型诊断，程序崩溃为软件版本过低、程序冗余导致的内存溢出故障。最终定位故障位置：NB-IoT 通信模块、温度传感器、云端管理软件；故障诱因：工业电磁干扰、传感器老化、软件版本漏洞。

5.3 快速修复过程

根据故障溯源结果，采用针对性的修复策略：一是针对通信模块信号弱故障，通过云端远程调整通信模块功率，将信号强度提升至 -75dBm 以下，同时在通信模块周围加装屏蔽罩，排除电磁干扰；二是针对温度传感器老化故障，生成维修工单，运维人员携带备用传感器前往现场更换，更换后通过云端远程校准，确保采集数据精度；三是针对软件崩溃故障，通过云端推送软件升

级包，完成远程升级，修复程序冗余漏洞，优化内存占用。

5.4 验证结果

故障修复完成后，对系统运行状态进行为期 1 个月的监测，结果显示：通信模块传输误码率降至 1% 以下，数据传输中断次数从日均 15 次降至 0 次；温度传感器采集数据偏差控制在 1℃ 以内，无数据输出故障彻底消除；云端管理软件未出现程序崩溃现象，运行稳定。同时，故障平均修复时间从原来的 2.5 小时缩短至 0.8 小时，运维效率提升 68%，验证了本文提出的故障溯源与快速修复技术方案的可行性与实用性。

6 结论

本文针对表计自动化运维模式下控制系统故障特点，开展故障溯源与快速修复技术研究，结论如下：表计自动化运维控制系统故障分硬件、软件、通信故障，诱因与设备老化、环境干扰、程序缺陷、参数配置不当有关，不同类型故障表现与排查难度差异大。构建的故障溯源模型采用多源数据融合与规则诊断+机器学习诊断结合方式，能精准定位故障，溯源精度超 95%。提出的快速修复技术方案以远程修复优先、现场修复兜底，针对不同故障制定策略并结合闭环管理，大幅缩短故障修复时间、提升运维效率，实例验证故障平均修复时间缩短 68%，系统稳定性显著提升。随着人工智能、物联网技术发展，表计自动化运维模式将向智能化、精细化升级，未来可从三方面研究：一是引入深度学习算法优化故障诊断模型，提升溯源精度；二是构建数字孪生故障仿真平台，开展预防与修复演练；三是推动故障修复全自动化，实现无人化操作，提升运维效率、降低人力成本。

参考文献

- [1] 张旭东,周宁,孙立雪.基于人工智能的网络故障自动检测与修复技术研究[J].家电维修,2025(4):68-70.
- [2] 邱伟娜,张新超.基于 A I + 的跨域端到端感知溯源技术研究及应用[J].2025.
- [3] 师严,胡雅坤,吕文琳,等.数字孪生在光网络中的应用研究[J].信息通信技术,2023,17(3):21-27.
- [4] 张光耀.电力调度自动化系统业务异常检测与故障溯源技术研究[D].北京邮电大学,2023.