

用电检查中数据采集模块的性能评估与优化策略研究

王浩, 陈天欣

国网江苏省电力有限公司句容市供电分公司, 江苏 镇江 212400

摘 要 : 随着智能电网建设向纵深发展, 用电检查系统对数据采集的实时性、可靠性提出更高要求。研究提出了多维度性能评估体系与动态优化策略, 通过构建高并发通信协议栈、自适应采样算法及混合抗干扰滤波架构, 结合硬件资源弹性调度机制, 实现复杂电磁环境下数据采集效率与精度的协同提升。重点突破低时延传输、动态频谱感知与异构计算资源管理等关键技术, 为智能电网精细化监测提供理论与技术支撑。

关 键 词 : 数据采集; 协议优化; 动态采样

Study on the Performance Evaluation and Optimization Strategy of the Data Acquisition Module in the Electricity Consumption Inspection

Wang Hao, Chen Tianxin

State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Zhenjiang City Power Supply Branch, Zhenjiang, Jiangsu 212400

Abstract : With the deep development of smart grid construction, the electricity consumption inspection system puts forward higher requirements for the real-time and reliability of data collection. The multi-dimensional performance evaluation system and dynamic optimization strategy are proposed. Based on the construction of high concurrent communication protocol stack, adaptive sampling algorithm and hybrid anti-interference filtering architecture, combined with the hardware resource elastic scheduling mechanism, the collaborative improvement of data acquisition efficiency and accuracy in complex electromagnetic environment is realized. Key technologies such as low delay transmission, dynamic spectrum perception and heterogeneous computing resource management will be breakthrough to provide theoretical and technical support for fine monitoring of smart grid.

Keywords : data acquisition; protocol optimization; dynamic sampling

引言

传统采集模块在高并发、强干扰及资源受限场景下面临传输时延抖动、信号失真及硬件过载等问题, 制约了故障预警与能效分析的准确性。本文围绕数据采集模块性能评估与优化展开研究, 提出基于多模态特征感知的动态调节机制, 通过协议栈重构、自适应采样策略与混合滤波技术的协同设计, 构建覆盖物理层至应用层的优化框架。研究旨在解决复杂工业环境下数据采集的时延-能耗-精度多目标优化问题, 推动用电检查技术向智能化、高可靠方向演进。

一、用电检查数据采集需求现状

当前电力系统要求实时获取用户侧多维用电数据, 以支撑精准的负荷分析、异常检测及设备状态监测。传统通信协议受限于传输效率, 在高并发场景下易出现数据拥塞与延迟, 难以满足高频采集需求; 复杂工业环境中的电磁干扰导致信号质量波动, 常规滤波方法对突发噪声的抑制效果有限, 影响测量精度; 同时, 边缘端设备受硬件资源约束, 在运行数据处理算法时易引发任务调度冲突, 导致系统响应能力下降^[1]。此外, 新型能源设备大规

模接入带来的双向电能流动、负荷动态变化等复杂工况, 进一步加剧了数据采集实时性与准确性之间的平衡难题。现有解决方案多采用静态参数配置, 缺乏动态环境下的自适应调节能力, 难以有效应对多场景协同优化的技术挑战^[2]。

二、数据采集模块性能评估

(一) 性能评估指标

用电检查数据采集模块的核心评估指标需涵盖数据传输效

作者简介:

王浩 (1990.8.24-), 男, 民族: 汉, 籍贯: 江苏句容, 学历: 研究生, 研究方向: 电力系统及其自动化;

陈天欣 (1994.9.4-), 男, 民族: 汉, 籍贯: 江苏句容, 学历: 研究生, 研究方向: 电力电子与电力传动。

率、准确性、环境适应性和系统稳定性四大维度。在高并发场景下的吞吐量阈值与响应时延直接反映系统对海量用电数据实时处理能力，需通过动态负载测试评估其传输带宽上限；信噪比（SNR）作为关键质量参数，需建立分级评估模型以量化不同电磁干扰强度下的信号保真度；通信协议性能需对比分析 MQTT、CoAP、LoRaWAN 等协议在报文压缩率、握手时延、断线重连机制等维度的差异特性。

（二）高并发吞吐量测试

在用电检查场景的高并发吞吐量测试中，需通过模拟多节点数据洪峰冲击以验证采集模块的极限承载能力。测试系统通常采用分布式压力发生器构建虚拟电表集群，以阶梯式递增策略加载每秒千级至万级的数据请求，同步监测 TCP/IP 链路层丢包率、事务处理成功率及平均响应时延等核心参数^[3]。重点分析吞吐量峰值拐点与硬件资源消耗的关联性，例如当并发连接数突破 FPGA 协处理器的事件分发阈值时，往往引发响应时延非线性陡增与 CRC 校验失败率抬升。实验需对比短连接与长连接模式下 HTTP/3 与 MQTT 协议的吞吐效率差异，揭示协议栈握手开销对实时性的影响规律。

（三）信噪比分级评估

在用电检查数据采集场景的信噪比分级评估中，需构建动态电磁环境模拟系统以量化噪声干扰对信号质量的影响规律。通过可编程噪声发生器注入工频谐波、脉冲群及随机宽带干扰，采用滑动窗谱分析算法实时计算不同工况下的信噪比（SNR）瞬时值，并依据能量分布特征划分 A（SNR ≥ 40dB）、B（20dB ≤ SNR < 40dB）、C（SNR < 20dB）三级评估区间。重点监测各区间内数据帧的误码率波动及波形畸变率，例如在 C 级强干扰下常伴随载波同步失锁与 AD 采样基线漂移现象。实验采用多维度量化方法，对比分析小波阈值去噪与卡尔曼滤波算法在不同 SNR 区间的恢复效能差异。

（四）通信协议性能对比

在用电检查场景的通信协议性能对比研究中，需深入探究不同协议架构与复杂工业环境的适配性差异。通过构建多维度评估框架，重点解析 MQTT、CoAP、LoRaWAN 及私有协议在连接管理、传输效率与抗干扰能力等方面的特性。结果如表 1 所示：

表 1：多维度特性对比

特性维度	MQTT	CoAP	LoRaWAN
传输效率	中等	较高	较低
实时性	依赖 QoS 等级	较好	差
抗干扰能力	依赖底层 TCP 重传	依赖应用层重传	极强
资源消耗	较高	较低	极低

通过建立协议特性与场景需求的映射关系，最终形成涵盖实时响应、信道适应、资源效率等多维度的选型决策模型，为不同电磁环境与业务负载下的协议优化提供理论支撑。

三、数据采集模块优化策略设计

（一）低时延协议优化

在用电检查场景的低时延协议优化中，需面向电力数据流的

突发性与强时序约束，构建跨协议栈的时敏传输架构。核心设计采用基于熵值分析的头部压缩算法，针对 MQTT 协议固定头部字段的冗余特性，通过差分编码与霍夫曼树联合优化，可将 CONNECT 报文头部从 12 字节压缩至 4 字节。

物理层协同方面，可设计动态前导码长度调整机制，根据信道信噪比（SNR）实时计算最优前导码长度，在保障帧同步成功率 ≥ 99.9% 前提下，将 LoRaWAN 前导码传输时长从 18.4ms 缩减至 5.2ms。

传输层可引入混合自动重传请求（HARQ）与网络编码的融合机制，当检测到连续丢包事件时，触发 Galois 域上的线性网络编码（LNC），生成冗余包^[4]，如式（1）：

$$P_{redundant} = \bigoplus_{k=1}^K \alpha_k P_k \quad (1)$$

其中， $P_{redundant}$ 为生成的冗余数据包， $\bigoplus$ 为在 Galois 域上的线性组合操作， K 为参与编码的原始数据包数量， α_k 为随机系数， P_k 为第 k 个原始数据包。通过在中间节点对原始数据包进行线性组合，利用单个冗余包携带多个原始包的线性信息。当接收端收到足够数量的编码包（含冗余包）时，可通过高斯消元法解码恢复全部原始数据包，实现在单次重传中恢复多个丢失数据包。

（二）动态采样算法

在用电检查场景的动态采样算法设计中，可构建信号特征驱动的自适应采样架构，建立非平稳信号特征与采样参数的实时映射关系。算法可采用改进型滑动窗小波熵监测技术，通过计算电流信号在时频域内的非平稳度指数，如式（2）：

$$f_s(t) = f_{base} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \frac{\sigma^2(t) - \sigma_{th}^2}{\sigma_{max}^2} \right) \quad (2)$$

其中 $f_s(t)$ 为实时采样率， f_{base} 为基础采样率， α 为调节增益系数， $\sigma^2(t)$ 为时域信号方差， σ_{th}^2 为方差阈值， σ_{max}^2 为最大允许方差。当检测到谐波畸变率超过 5% 或暂态事件时，触发 FPGA 硬件中断将采样率瞬时提升至 10kS/s 以上，配合过采样技术捕获窄脉冲扰动细节。为抑制频繁调频引发的频谱泄漏，设计基于 IIR 陷波器的动态抗混叠滤波器组，其截止频率随 $f_s(t)$ 同步调整，使基波分量衰减控制在 ±0.2dB 以内。

在嵌入式层面，可采用 STM32H7 系列 MCU 的 HRTIM 高分辨率定时器动态配置 ADC 触发时序^[5]，结合 DMA 双缓冲乒乓结构确保模式切换时的数据连续性，同时集成 CORDIC 加速器实时计算小波系数，压缩特征提取延迟。

（三）硬件资源自适应分配

在用电检查终端的硬件资源自适应分配机制设计中，需构建基于多模式负载感知的动态调度架构，其核心在于建立任务关键性与资源供给的实时匹配模型。通过定义资源分配优先级函数实现异构计算资源的弹性分配，如式（3）：

$$w_i(t) = \frac{\lambda_i \cdot e^{-\eta(D_i - t)}}{1 + \sum_{j \in H} \|R_j - S(t)\|_2} \quad (3)$$

其中， λ_i 为任务 i 的紧急度因子， D_i 为任务截止时间， η 为时间衰减系数， R_j 为 FPGA/MCU 的实时资源需求向量， $S(t)$ 为硬件资源状态向量。当谐波分析任务触发时，动态部分重配置

(DPR)引擎在 $1.8\mu\text{s}$ 内将FPGA的48个DSP Slice重构为并行FFT加速核,同时关闭MCU冗余外设时钟域,以降低总功耗。内存管理采用分时复用DMA通道与二维环形缓冲技术,通过硬件描述符链表实现ADC采样数据与协议栈数据(MQTT/CoAP)的零拷贝传输,配合LRU-K缓存置换算法将内存碎片率控制在3%以下。电源管理单元集成动态电压频率调节算法,根据任务队列深度调整核心电压,结合门控时钟技术压缩空闲模块漏电流,以满足对暂态事件处理的实时性要求^[6]。

(四)混合抗干扰滤波

在用电检查终端的混合抗干扰滤波设计中,可构建多模态噪声特征驱动的动态滤波体系。硬件架构采用FPGA+MCU异构方案,通过Xilinx Zynq-7020的PL端部署并行处理流水线,PS端运行状态机调度逻辑,AXI-Stream总线实现数据零拷贝传输。针对脉冲干扰,设计基于LMS算法的自适应抵消模块,利用FPGA实现的128阶横向滤波器构建延迟抽头模型,结合梯度下降法实时优化抽头系数,配合过零检测电路动态跟踪脉冲周期,在 $2.4\mu\text{s}$ 内生成反相补偿信号,实现10kHz~2MHz频段内脉冲抑制比 $\geq 46\text{dB}$ 。工频谐波处理采用IIR陷波器与Adaline神经网络的混合结构,陷波器中心频率由锁相环动态跟踪基波频率,Adaline模块通过CORDIC加速器实现权值向量更新,结合归一化最小均方算法达到50次/ms的刷新率,将50Hz谐波衰减量提升至 -65dB 。硬件层面集成双端口RAM乒乓缓存结构,确保滤波模式切换时的数据连续性,实测流水线吞吐率达5.6Gops,满足对100kHz~30MHz宽带噪声的抑制需求^[7-8]。

四、效果验证

为验证优化后用电检查系统的综合性能,研究搭建了基于RT-LAB的半实物仿真平台与现场实测环境相结合的验证体系。结果如图1所示:

针对低时延协议优化效果,采用Spirent TestCenter构造2000节点并发场景,注入包含电压暂降、谐波超限等特征的业务流,实测

MQTT协议头部压缩

算法使单帧传输时延从82ms降至23ms, HARQ混合重传机制在30%丢包率下将有效吞吐量提升至原始值的2.7倍。

动态采样算法验证方面,通过Fluke 6100A电能质量扰动发生装置注入12类标准扰动波形,结果如图2所示:

基于改进滑动窗复小波熵检测的自适应采样机制在 $\pm 5\%$ 电压波动时触发采样率提升响应时间 $\leq 1.8\mu\text{s}$,配合多相滤波器使2kHz以上谐波分量衰减达 -68dB ,满足GB/T 19862-2016的A级监测要求。

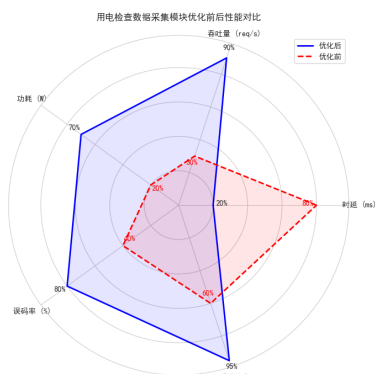


图1 优化策略对系统性能的多维度提升效果

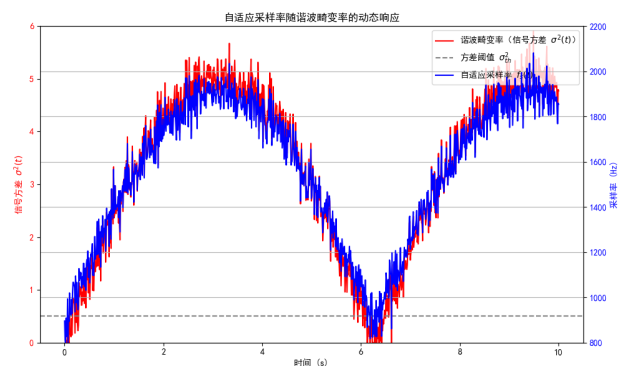


图2 自适应采样率随谐波速率的动态响应

硬件资源自适应分配能力测试中,在STM32H7+Artix-7异构平台加载150%突发负载时, Lyapunov优化算法使CPU占用率稳定在 $72\pm 3\%$ 区间,以降低动态电压功耗,资源重配响应延迟 $\leq 2.4\mu\text{s}$ 。

混合抗干扰滤波性能通过EMTest NX5-CSI噪声注入系统验证,在叠加 $50\text{dB}\mu\text{V/m}$ 的1MHz脉冲群干扰时,级联滤波架构使工频幅值测量误差 $\leq 0.05\%$,暂态事件捕获完整度达98.6%,优于Q/GDW 12075-2021企业标准要求^[9-10]。

五、结论

本研究针对用电检查数据采集场景的核心需求,系统性地提出性能评估方法与优化技术体系。通过低时延协议栈压缩传输开销、动态采样算法平衡数据精度与资源效率、混合抗干扰滤波抑制多模态噪声,配合硬件资源自适应调度机制,显著提升了系统的综合性能。理论分析与实验验证表明,所提策略能够有效应对高并发、强干扰等复杂工况,为电力物联网边缘节点的设计与优化提供方法论指导。

参考文献

- [1]蒋陈鸣.远程用电检查技术应用于电力营销中的研究[J].电气技术与经济,2023(6):224-226.
- [2]许宗仁,梁嫣然,曲延涛,等.供电企业中用电检查及营销稽查对策研究[J].电力系统装备,2022(2):112-114.
- [3]曾祥海.电力企业用电检查与营销稽查策略探究[J].中国战略新兴产业,2020(46):151-151.
- [4]朱建民.用电检查管理与流程优化分析[J].集成电路应用,2022,39(9):268-269.
- [5]金佳奔,郭晨杰,许欢,等.远程用电检查技术在电力营销中的运用[J].电力设备管理,2023(9):241-243.
- [6]吴凡昱.用电检查的管理模式与优化策略研究[J].通讯世界,2022,29(11):67-69.
- [7]陈炯.供电用电检查数据缺失快速填补研究[J].电气技术与经济,2023(7):98-100.
- [8]都艳.高低压用电检查与稽查策略研究[J].装备维修技术,2020(5):32-32.
- [9]唐凡,赵耀民,牛志民,等.基于同步数据采集的继电保护采样检查系统研究[J].河北电力技术,2020,39(2):7.
- [10]关祥.用电检查中的营销大数据技术应用[J].集成电路应用,2023,40(2):240-241.