

# 嵌入式 Linux 系统在电力监测网关中的设计与应用

张民

广东 佛山 528200

DOI:10.61369/EPTSM.2025110011

**摘要：**本文围绕嵌入式 Linux 系统在电力监测网关中的应用展开，涵盖硬件架构、软件框架、数据获取、边缘计算、系统优化、驱动开发、EMC 特性、远程维护及性能测试等方面。该系统实现电力监测数据精准采集与就地分析，经实验验证具有实时性与可靠性优势，为智能电网边缘节点提供有效解决方案。

**关键词：**嵌入式 Linux 系统；电力监测网关；智能电网边缘节点

## Design and Application of Embedded Linux System in Power Monitoring Gateway

Zhang Min

Foshan, Guangdong 528200

**Abstract :** This paper focuses on the application of embedded Linux system in power monitoring gateway, covering hardware architecture, software framework, data acquisition, edge computing, system optimization, driver development, EMC characteristics, remote maintenance and performance testing. This system achieves precise collection and on-site analysis of power monitoring data, and has been experimentally verified to have real-time and reliability advantages, providing effective solutions for edge nodes in smart grids.

**Keywords :** **embedded linux system; power monitoring gateway; edge nodes of smart grid**

## 引言

随着电力行业的不断发展，对电力监测网关的性能要求日益提高。2021 年颁布的《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》，强调要提升电力系统智能化水平。在此背景下，电力监测网关围绕嵌入式处理器打造硬件架构，基于 Linux 内核搭建软件框架，从数据采集、边缘计算、系统优化等多方面展开设计。通过优化硬件接口、开发通信协议栈等实现仪表计量数据获取；设计算法与模型进行边缘计算处理。同时，对系统的中断响应、内存管理等进行优化，并开展计量精度验证、通信可靠性测试等。这些工作有效提升了电力监测网关性能，为电力系统稳定运行提供有力保障。

## 一、电力监测网关系统总体设计

### (一) 网关硬件架构设计

电力监测网关硬件架构围绕嵌入式处理器展开，旨在打造一个支持多模数据采集与多种通信方式的仪表计量专用硬件平台。选用合适的嵌入式处理器，其具备强大数据处理能力，能高效处理各类电力监测数据<sup>[1]</sup>。在数据采集方面，设计多模采集电路，可兼容不同类型电力数据信号输入，满足多样化监测需求。通信模块上，集成 RS485、Modbus 以及以太网通信接口。RS485 接口用于连接具备相应接口的电力设备，实现稳定的串行数据传输；Modbus 协议确保数据交互的标准化与兼容性；以太网接口则方便与上层监控系统快速、高效通信，完成数据的远程传输与共享，最终构建出功能完备、性能可靠的电力监测网关硬件架构。

### (二) 系统软件框架设计

电力监测网关系统的软件框架基于 Linux 内核搭建实时数据

处理架构。此架构实现数据采集、协议解析与边缘计算模块的协同工作。数据采集模块负责从电力设备获取各类实时运行数据，确保数据的准确性与及时性<sup>[2]</sup>。协议解析模块针对采集到的数据，依据不同电力通信协议进行解析，使数据能够被后续模块有效处理。边缘计算模块对解析后的数据进行本地计算与分析，如计算电量、监测设备状态等，从而及时发现潜在问题。各模块间相互协作，数据有序流转，在 Linux 内核的支撑下，高效完成电力监测网关的各项任务，为电力系统的稳定运行提供有力保障。

## 二、多源数据采集与分析方法

### (一) 仪表计量数据获取技术

在电力监测网关中，仪表计量数据获取技术至关重要。针对电能表谐波数据采集，需深入研究高效的采集方法。一方面，基于嵌入式 Linux 系统的特性，优化硬件接口设计，确保与各类电

能表稳定连接，实现数据的可靠传输。另一方面，精心开发支持 DL/T645 规约的嵌入式通信协议栈<sup>[3]</sup>。该协议栈需精准解析电能表按照 DL/T645 规约发送的谐波数据，包括电压谐波、电流谐波等关键参数。通过对协议栈的深度开发，提高数据采集的准确性与实时性，从而满足电力监测对仪表计量数据高精度、及时性的要求，为后续电力系统的分析与决策提供坚实的数据基础。

## (二) 边缘计算处理算法

在电力监测网关的边缘计算处理环节，设计基于滑动窗口的负荷特征提取算法以及构建异常用电模式识别模型具有重要意义。滑动窗口算法通过设定合适的窗口大小与滑动步长，对电力多源数据进行逐段分析，提取诸如功率、电流等关键负荷特征参数，这些参数反映了用电设备的运行状态<sup>[4]</sup>。基于提取的负荷特征，构建异常用电模式识别模型。该模型可利用机器学习中的分类算法，如支持向量机、决策树等，对正常与异常用电模式进行训练与分类。通过不断优化模型参数，提高对异常用电行为的识别准确率，实现对电力使用情况的实时监测与异常预警，有效保障电力系统的稳定运行与合理用电管理。

## 三、嵌入式 Linux 系统实现

### (一) 实时内核优化策略

#### 1. 中断响应优化

在嵌入式 Linux 系统用于电力监测网关时，中断响应优化对提升多传感器并发处理能力至关重要。一方面可改进内核抢占机制，降低内核关中断时间，使高优先级中断能更及时得到响应。传统内核中，某些临界区操作会关闭中断，导致其他中断等待，通过合理调整内核代码结构，减少这类情况，让中断能迅速被处理。另一方面，采用中断线程化技术，将部分中断处理任务放到线程中执行，避免中断处理程序过长阻塞其他中断。这样主中断处理程序能快速处理关键部分后退出，其余任务由线程在合适时机完成，确保电力监测网关能及时响应各传感器中断信号，提高系统整体实时性和稳定性<sup>[5]</sup>。

#### 2. 内存管理优化

在嵌入式 Linux 系统应用于电力监测网关时，内存管理优化至关重要。设计基于 CMA (Contiguous Memory Allocator) 的连续内存分配方案，能够显著提升电力波形数据的缓存效率。传统内存分配方式可能导致内存碎片化，影响数据缓存与处理速度。而 CMA 方案可预留一块连续物理内存区域，专门用于电力波形数据的缓存。当需要缓存大量连续数据时，可从该区域直接分配内存，减少内存碎片产生，保障数据的高效读写。这不仅优化了内存的使用效率，也为电力监测网关对电力波形数据的实时、准确处理提供了有力支持，使得系统在电力监测场景下能更加稳定、高效地运行<sup>[6]</sup>。

## (二) 设备驱动开发

#### 1. 计量芯片驱动开发

在嵌入式 Linux 系统中，计量芯片驱动开发聚焦于实现 ADE7953 计量芯片的 SPI 接口驱动与电能参数校准算法。SPI 接

口驱动开发至关重要，需依据 SPI 通信协议特性，针对 ADE7953 芯片进行配置，精确设置时钟极性、相位以及数据传输速率等参数，确保与芯片之间数据交互的准确与高效。同时，要考虑系统中断机制，当芯片数据准备就绪时，能及时通知内核进行处理<sup>[7]</sup>。电能参数校准算法同样关键，需分析芯片输出数据与实际电能参数间的偏差，通过数学模型建立校准关系，依据现场环境变化实时调整校准系数，以保障计量的高精度，为电力监测网关提供可靠的电能数据计量支持，实现对电力参数的准确监测。

#### 2. 通信模块驱动开发

开发支持 4G 透传与 MQTT 协议的网络通信驱动模块，对实现电力监测网关的高效通信至关重要。4G 透传驱动需适配电力监测网关的硬件平台，优化数据传输速率与稳定性，确保海量电力数据能实时、准确地通过 4G 网络传输。MQTT 协议驱动则侧重于消息的发布与订阅机制，在电力监测场景中，可根据不同设备与监测指标设置主题，以实现精准的数据交互。通过对 Linux 内核网络子系统进行针对性配置与开发，将 4G 透传与 MQTT 协议深度融合，保障数据在复杂电力环境下可靠传输<sup>[8]</sup>。同时，注重驱动的兼容性与可扩展性，以适应未来电力监测业务的发展与变化，为电力监测网关与后台管理系统之间建立稳定、高效的通信链路。

## 四、系统应用与测试验证

### (一) 现场部署方案

#### 1. 电磁兼容设计

电力现场存在复杂的电磁环境，因此需深入分析其 EMC 特性。在 PCB 布局方面，合理规划各功能模块位置，将敏感电路与干扰源分开，缩短信号传输路径，减少电磁耦合。同时，对关键信号线进行包地处理，降低串扰。在屏蔽防护方面，采用金属屏蔽罩对易受干扰或产生干扰的部件进行屏蔽，确保良好接地，有效阻挡外部电磁干扰侵入，并防止内部干扰泄漏。此外，选用具有良好电磁兼容性的电子元器件，从源头提升系统抗干扰能力。通过这些优化与防护方案，能显著增强嵌入式 Linux 系统在电力监测网关中的电磁兼容性，满足电力现场复杂电磁环境下的稳定运行需求<sup>[9]</sup>。

#### 2. 远程维护机制

在电力监测网关中，远程维护机制基于构建的 OTA 技术远程固件更新与参数配置系统。借助该系统，运维人员无需到现场，就能通过网络对网关的固件进行更新。在电力环境复杂多变的情况下，及时更新固件可提升网关性能与稳定性，确保电力监测工作的精准性。同时，参数配置功能允许远程调整网关的监测参数，如采样频率、数据传输间隔等，以适应不同电力监测场景需求。这一远程维护机制大大降低了维护成本，提高了维护效率。此外，为保证远程维护的安全性，采用加密传输和身份认证等技术，防止非法入侵与数据篡改<sup>[10]</sup>。

### (二) 数据准确性测试

#### 1. 计量精度验证

在嵌入式 Linux 系统于电力监测网关的应用中，计量精度验

证采用标准源对比法。通过高精度标准电压、电流源输出已知准确值的电信号，接入电力监测网关。网关对这些信号进行采样并计算功率。将网关测量所得的电压、电流及功率值与标准源输出的精确值进行对比。详细记录偏差数据，依据电力行业相关标准，分析判断采样精度及功率计算准确度是否达标。若偏差超出允许范围，需排查硬件电路（如采样电路的元件参数偏差）及软件算法（如计算功率的算法是否存在误差）等方面的问题。经多次测试不同数值范围的标准源信号，全面验证系统在各种工况下的计量精度，确保电力监测网关能准确测量电力参数，为电力系统稳定运行提供可靠数据支持。

## 2. 通信可靠性测试

在电力监测网关中，通信可靠性测试至关重要。针对恶劣工况，开展长时通信稳定性试验。模拟高温、潮湿、强电磁干扰等电力系统常见恶劣环境，让网关在该环境下长时间运行，持续监测与电力设备的通信链路状态。通过专用监测工具，实时记录通信连接的建立、中断次数及持续时间等信息。同时，进行误码率分析。在通信过程中，发送特定格式和长度的数据帧，接收端对比接收到的数据与原始数据，计算误码率。分析不同恶劣工况对误码率的影响，评估网关在恶劣环境下准确传输数据的能力，确保在电力监测场景中，即使面临恶劣工况，网关与电力设备之间的通信依然可靠，数据传输准确无误，为电力系统稳定运行提供保障。

## （三）边缘计算效能评估

### 1. 数据处理时延测试

在电力监测网关中，针对嵌入式 Linux 系统进行数据处理时延测试时，需测量典型负荷场景下的数据整周期处理响应时间。选择不同的典型负荷场景，如轻负荷、正常负荷、重负荷等。模拟这些场景下电力数据的持续流入，从数据采集模块获取数据的时刻开始计时，直至数据在嵌入式 Linux 系统中完成整周期处理，包括数据解析、计算、存储以及可能的简单分析等操作，记

录结束时间，从而得出数据整周期处理响应时间。通过多组不同场景下的测试数据，分析系统在不同负荷状况下的数据处理时延特性，评估嵌入式 Linux 系统在电力监测网关实际运行中的边缘计算效能，为系统优化提供有力依据。

### 2. 资源占用率分析

在电力监测网关中，监控多任务并发时的 CPU 与内存资源消耗特性对评估嵌入式 Linux 系统的资源占用率至关重要。当多个电力监测任务同时运行，如实时数据采集、数据处理与传输等，CPU 需快速切换处理不同任务。过高的 CPU 占用率会导致任务响应延迟，影响监测实时性。通过特定工具监测 CPU 的使用率、负载情况等参数，可分析任务调度与资源分配的合理性。同时，内存作为数据临时存储地，多任务并发易引发内存泄漏或过度占用。监测内存的使用量、空闲内存大小以及内存碎片情况，能确保系统稳定运行，避免因内存不足导致任务崩溃，为优化系统性能、提升资源利用率提供数据支持，保障电力监测网关高效、可靠地工作。

## 五、总结

嵌入式 Linux 系统在电力监测网关的设计与应用实现了电力监测数据的精准采集与就地分析。经实验验证，该系统在实时性与可靠性方面优势显著，为智能电网边缘节点构建了切实有效的解决方案。它不仅满足电力监测网关对数据处理及时性和稳定性的要求，还提升了整个电力监测系统的性能。随着 5G 技术的发展，未来可将 5G 与嵌入式 Linux 系统深度融合于电力监测网关，进一步拓展数据传输的速度与范围，优化系统功能。这一设计与应用的成果为电力监测领域发展奠定基础，为后续研究和实践提供参考，推动智能电网边缘节点技术不断进步。

## 参考文献

- [1] 马俊. 基于嵌入式 Linux 系统内核移植的无线共享系统应用实现 [D]. 重庆邮电大学, 2021.
- [2] 孙贵华. 基于嵌入式 Linux 系统的流量计算机研究 [D]. 温州大学, 2021.
- [3] 姜悦. 基于龙芯 2K1000 的嵌入式 Linux 系统移植和驱动程序设计 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [4] 张康. 基于嵌入式 Linux 的植物视觉监控系统的设计与实现 [D]. 江苏大学, 2022.
- [5] 梅军桥. 基于 Linux 的嵌入式色选机上位机系统的设计与实现 [D]. 安徽大学, 2023.
- [6] 赵献立, 王志明, 田鹏飞. 基于嵌入式机器视觉的玉米苗分级检测系统设计 [J]. 农机化研究, 2023, 45(9): 66–70.
- [7] 程耀, 谢华, 万思宇, 等. 基于嵌入式 Linux 的双通道 DVR 系统设计与实现 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022(11): 179–183.
- [8] 张先锋. 基于嵌入式 Linux 的矿用多协议网关设计与应用 [J]. 自动化与仪表, 2022, 37(10): 97–100.
- [9] 张拓智, 孔德岐, 郑涛, 等. 基于嵌入式 Linux 系统的 NVRAM 驱动架构设计 [J]. 航空计算技术, 2022, 52(3): 109–111, 129.
- [10] 陈城, 孙峰, 曲金秋, 等. 基于嵌入式 Linux 的水位视频在线监测系统设计 [J]. 水利信息化, 2021(3): 41–44.