

热量表高精度计量及无线远传系统的嵌入式实现

毛祖宾

广东 佛山 528200

DOI:10.61369/ME.2025100015

摘要：本文围绕热量表高精度计量及无线远传系统的嵌入式实现展开，涉及建立流体热能计算模型、计量误差补偿、数据采集与处理、无线远传及多种功能设计等，经测试优化确保系统性能。研究成果具创新与应用价值，但温差补偿精度和极端网络下通信可靠性待提升，5G RedCap技术或可解决。

关键词：热量表；高精度计量；无线远传

Embedded Implementation of High Precision Measurement and Wireless Remote Transmission System for Heat Meter

Mao Zubin

Foshan, Guangdong 528200

Abstract : This article focuses on the embedded implementation of high-precision measurement and wireless remote transmission system for heat meters, involving the establishment of fluid thermal energy calculation model, measurement error compensation, data acquisition and processing, wireless remote transmission, and various functional designs. Through testing and optimization, the system performance is ensured. The research results have innovative and practical value, but the accuracy of temperature difference compensation and communication reliability under extreme networks need to be improved, which may be solved by 5G RedCap technology.

Keywords : heat meter; high precision measurement; wireless remote transmission

引言

《计量发展规划（2021－2035年）》着重强调了提升计量技术与服务水平的重要性，热量表高精度计量及无线远传系统的研究正契合这一政策导向。基于热力学定律建立流体热能计算模型，结合传感器融合技术，实现温度、流量多参数同步测量，为热量表高精度计量奠定基础。同时，从计量误差动态补偿、多源异构数据采集、低功耗无线远传、实时数据处理等多方面展开研究，致力于提升系统性能。尽管当前成果具有创新性与应用价值，但在温差补偿精度与极端网络环境通信可靠性方面仍存不足，未来5G RedCap技术有望带来突破。

一、高精度计量原理及算法实现

（一）热量表计量模型构建

基于热力学定律建立流体热能计算模型是热量表计量模型构建的关键。在热力学中，热量传递遵循特定规律，依据此建立的模型能够准确反映流体携带的热能。该模型通常涉及温度、流量等关键参数，其中温度体现流体的热状态，流量反映单位时间内流体的输送量。通过传感器融合技术，可实现温度、流量多参数同步测量算法^[1]。这一技术将多种传感器的数据进行有效整合，消除测量时间差与数据误差，从而确保在同一时刻获取准确的温度与流量数据，为热能精确计算提供可靠基础，使热量表的计量

更为精准，进而提升整个热量表高精度计量系统的性能。

（二）计量误差动态补偿策略

在热量表高精度计量中，计量误差动态补偿策略至关重要。研究管道流态特征对测量精度的影响机制，可知管道内流体流动状态复杂多变，会导致不同程度的计量误差。基于此，开发基于神经网络的自适应误差补偿算法具有显著意义。神经网络强大的非线性映射能力，能够对复杂的流态与计量误差关系进行精准建模。通过大量实际测量数据对神经网络进行训练，使其学习到流态特征与误差之间的内在联系，进而实时动态地对计量误差进行补偿。这种自适应算法可根据管道流态的实时变化，及时调整补偿参数，有效提高热量表计量的准确性^[2]。

二、数据采集与传输技术研究

(一) 多源异构数据采集系统

设计具备 RTD/Pt1000 兼容接口的采集电路是多源异构数据采集系统的关键。该接口能够适应不同类型的温度传感器，增强系统对多种数据来源的采集能力。同时，建立面向不同工况的采样频率自适应调节机制十分必要。在工况较为稳定时，可适当降低采样频率，以减少数据冗余和系统资源消耗；而当工况变化剧烈，如热量表使用环境温度、流量等参数波动较大时，提高采样频率，确保能够精确捕捉数据的动态变化，从而为热量表高精度计量提供准确可靠的数据基础^[3]。这样的设计既满足了多源数据采集的需求，又能针对不同工况灵活调整，有效提升了数据采集的效率与质量。

(二) 低功耗无线远传协议

在热量表高精度计量及无线远传系统的嵌入式实现中，低功耗无线远传协议的选择与优化至关重要。LoRa 和 NB-IoT 作为当下流行的低功耗广域网技术，各具特性。LoRa 具有传输距离远、功耗低、抗干扰能力强等特点；NB-IoT 则在网络覆盖、连接数及功耗方面表现出色^[4]。通过对二者技术特性，能够根据热量表实际应用场景，如安装环境、数据传输频率等，做出更适宜的选择。同时，开发支持加密校验的 MQTT 协议栈，可确保数据传输的安全性与完整性。而抗干扰重传机制的构建，能有效应对复杂环境下数据传输易受干扰的问题，保障数据准确、稳定地传输至远端服务器，为热量表高精度计量数据的可靠无线远传奠定基础。

三、边缘计算与数据分析方法

(一) 嵌入式边缘计算框架

1. 实时数据处理架构

在嵌入式边缘计算框架的实时数据处理架构中，设计基于消息队列的流式处理引擎是关键所在。通过构建消息队列，能实现数据的有序接收与缓冲，确保数据处理的连续性与稳定性。在此基础上，流式处理引擎以毫秒级的响应速度，对热量表采集到的数据进行实时分析，快速且精准地完成热值计算^[5]。同时，该引擎可同步执行异常检测任务，利用预先设定的规则和算法，敏锐捕捉数据中的异常波动。这种毫秒级的处理能力，不仅满足了热量表高精度计量的需求，能够及时准确提供热值数据，也为系统稳定运行提供保障，一旦发现异常可及时预警并处理，为无线远传数据的可靠性奠定基础。

2. 数据压缩与存储优化

开发面向时间序列的 Delta 编码压缩算法，此算法聚焦热量表采集到的时间序列数据。时间序列数据具有连续性和一定的变化规律，Delta 编码通过计算相邻数据间的差值来进行压缩，能有效减少数据冗余，在保证数据精度的前提下，大幅降低数据量，以满足无线远传对数据量的限制要求^[6]。同时，构建循环存储缓冲区管理机制。在嵌入式设备资源有限的情况下，循环存储缓冲区可实现数据的高效存储与管理。它能自动覆盖旧数据，确保缓

冲区始终存储着最新且关键的数据，避免因数据量过大导致存储溢出，为热量表高精度计量数据的临时存储提供稳定且高效的方法，也为后续的数据处理与远传奠定良好基础。

(二) 计量数据分析模型

1. 用户能耗特征分析

建立基于 K-means 的用热模式聚类模型，能有效实现对用户能耗特征的分析。K-means 算法是一种经典的聚类分析方法，通过将用户的用热数据进行聚类，可以挖掘出不同用户群体的用热模式^[7]。在热量表高精度计量及无线远传系统的嵌入式实现背景下，收集用户的历史用热数据，包括不同时段的热量消耗、室内外温度等相关参数。运用 K-means 算法对这些数据进行处理，算法会自动将数据划分到不同的聚类中，每个聚类代表一种典型的用热模式。例如，某些聚类可能反映出白天用热需求高、夜间较低的用户群体特征，而另一些聚类则可能代表全天用热较平稳的用户。通过这种方式，能够清晰地了解各类用户的能耗特征，为后续的负荷预测与能效评估提供有力支持。

2. 故障诊断专家系统

故障诊断专家系统以构建故障知识图谱为基础，通过对热量表运行过程中各类故障信息的深度挖掘与分析，梳理出故障之间的逻辑关系，为故障诊断提供全面且准确的知识支撑。在此之上，开发基于决策树的诊断规则引擎。决策树算法能够对大量计量数据进行有效处理，依据数据特征划分节点，生成诊断规则，快速定位故障原因。例如，根据热量表的流量、温度等参数变化，判断是否存在管道堵塞、传感器故障等问题。同时，开发可视化预警界面，将诊断结果以直观易懂的方式呈现给用户，及时发出故障预警信号，方便用户快速采取应对措施，保障热量表高精度计量及无线远传系统的稳定运行^[8]。

四、嵌入式系统实现与验证

(一) 硬件系统架构设计

1. 主控单元选型与配置

在热量表高精度计量及无线远传系统的嵌入式实现中，主控单元选型与配置至关重要。需对比 ARM Cortex-M4 与 RISC-V 架构特性。ARM Cortex-M4 具有较高的性能与丰富的生态系统，其运算能力强，能快速处理复杂的计量算法与数据传输任务，同时众多的开发工具和软件库可加快开发进程。而 RISC-V 架构则以开源、灵活定制著称，可根据热量表具体需求对指令集等进行定制优化，降低成本并提升特定功能的执行效率。经深入对比分析^[9]，综合考虑热量表对成本、性能、功耗及功能定制性的要求，最终确定处理器外围电路设计方案，确保主控单元能精准高效地实现热量表高精度计量及无线远传功能，为整个系统稳定运行奠定基础。

2. 低功耗电源管理系统

在热量表高精度计量及无线远传系统的嵌入式实现中，低功耗电源管理系统至关重要。通过研究动态电压调节技术，设计出支持锂电池与市电双模供电的电源模块。此模块可根据系统实际

运行状况，智能选择供电模式。当市电稳定时，优先采用市电供电，为系统提供稳定充足的能源；而在市电断电或不稳定等特殊情况下，自动切换至锂电池供电，确保系统持续正常运行。这样的设计不仅保障了系统的供电可靠性，还利用动态电压调节技术，在不同工作负载下精准调整电压，降低不必要的功耗，极大提升了能源利用效率，从而实现低功耗运行^[10]。

（二）核心功能模块开发

1. 实时操作系统移植

在热量表高精度计量及无线远传系统的嵌入式实现中，实时操作系统移植选用 FreeRTOS。FreeRTOS 作为轻量级实时操作系统，具备高效的任务调度机制。将其移植到系统硬件平台，首先要完成底层硬件驱动适配，确保系统能与处理器、定时器等硬件设备良好交互。随后对 FreeRTOS 进行配置，依据系统需求合理设置任务栈大小、调度算法等参数。通过这种方式，基于 FreeRTOS 实现任务调度优化，促使计量、通信、存储等多线程协同工作。让计量线程能精确采集热量数据，通信线程及时将数据无线远传，存储线程妥善保存重要数据，从而保障整个系统高效、稳定运行，实现热量表高精度计量及无线远传功能。

2. OTA 远程升级机制

在热量表高精度计量及无线远传系统的嵌入式实现中，OTA 远程升级机制十分关键。首先设计安全引导程序，它是系统升级的第一道防线，确保升级过程起始于安全可信的状态，防止非法程序的植入。接着开发差分升级包生成算法，该算法通过分析新旧版本软件的差异，生成只包含差异部分的升级包，大幅减少数据传输量，降低网络压力与升级成本。同时，传输完整性验证方案必不可少，采用数据校验和、数字签名等技术，对传输过程中的升级包进行完整性验证，若发现数据损坏或被篡改，及时触发重传机制，保证升级包准确无误地传输到设备，从而实现系统稳定、可靠的 OTA 远程升级，提升系统的维护效率与功能扩展性。

（三）系统测试与优化

1. 计量性能验证实验

搭建标准流量标定装置对热量表高精度计量及无线远传系统

的嵌入式系统进行测试。在重复性测试中，多次以相同流量工况运行系统，记录每次测量的热量值与流量数据，通过计算测量数据的偏差和标准差，评估系统测量的重复性精度。针对长期稳定性监测，让系统持续运行较长时间，间隔一定时间采集并分析数据，观察测量结果是否在允许误差范围内波动，分析漂移趋势。依据重复性测试和长期稳定性监测结果，对系统进行优化调整，如校准测量参数、优化算法等，确保嵌入式系统的计量性能稳定、准确，满足高精度计量需求。

2. 无线通信压力测试

构建多节点组网环境，针对热量表高精度计量及无线远传系统进行无线通信压力测试。着重测试丢包率、续航时间等关键性能指标。丢包率反映无线通信在不同压力下数据传输的准确性，若丢包率过高，会导致热量表数据传输不完整，影响计量结果上报。续航时间关乎系统长期稳定运行，热量表通常需在无人值守下工作较长时间，续航能力不佳将频繁中断数据传输。通过在不同通信距离、节点密度、数据传输频率等条件下展开测试，全面评估系统无线通信性能，依据测试结果优化通信协议、调整硬件参数，提高系统在复杂环境下的可靠性与稳定性，保障热量表高精度计量数据能准确且持续地无线远传。

五、总结

本研究实现了热量表高精度计量及无线远传系统的嵌入式设计，成果具有创新性与应用价值。创新性在于，通过精准算法与高效硬件设计，实现了高精度热量计量与稳定无线远传。应用价值体现在，能为供热企业提供准确数据，助力节能减排与精细化管理。然而，当前研究仍存在不足。温差补偿精度方面，虽已有一定成果，但仍有提升空间，这会影响热量计量准确性。在极端网络环境下，通信可靠性有待提高，可能导致数据传输丢失或错误。未来，5G RedCap 技术有望解决这些问题，其高速、稳定、低功耗的特性，可提升温差补偿精度与通信可靠性，为下一代产品带来更广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 朱宇.关于无线远传超声水表的研究 [D].沈阳工业大学,2023.
- [2] 陶柱.无线传屏系统的软硬件设计与实现 [D].东南大学,2021.
- [3] 胡宁波.基于嵌入式高精度激光测距系统的研究和实现 [D].广东工业大学,2021.
- [4] 何发瑛.磁共振的无线数据同传系统设计与实现 [D].中国科学院大学,2021.
- [5] 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.
- [6] 孔健,杨勇,张开宇,等.计量检测数据无线远传开发应用 [J].计量与测试技术,2021,048(011):93-95.
- [7] 赵丹.热量表流量计量比对分析 [J].科学与信息化,2021(9):72-72.
- [8] 段绪江.浅析涪陵气田电能计量远传系统存在的问题 [J].江汉石油职工大学学报,2023.
- [9] 刘冠宇,高立亮,朱国喜,等.城镇供热一级网热计量点的数据无线传输系统架构的研究 [J].现代信息科技,2022,6(3):165-168,173.
- [10] 柴华芳,毛德兴,陈海华,等.基于 OPENCPU 的无线远传水表探究 [J].仪器仪表用户,2022,29(7):12-14,83.