

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2024) 05-088-05 中图分类号: TP216

智能物联电表软硬件设计与实现

Design and Implementation of Software and Hardware for Intelligent IoT Energy Meters

★ 叶超, 程铨, 马越, 程昊旻 (杭州电力设备制造有限公司桐庐白云源成套电气制造分公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 为了弥补现有能源计量体系的不足, 本项目开发了一种面向分布式、大负荷等复杂电力场景的智能电能采集计量装置。该装置不仅可以对用户的用电情况进行实时监测和数据分析, 还可以根据监测结果对用电设备进行智能控制, 实现了能源的高效利用。该装置不仅可以在典型的工业、商业和民用领域进行应用示范, 具有较高的优越性和应用价值, 还可以实现计量装置与智能技术的深度融合, 为实现能量计量与碳市场的合理交互以及双碳目标的达成提供了强力而有效的技术支撑。

关键词: 智能电表; 碳排放; 校准

Abstract: To address the shortcomings of the existing energy metering system, this project developed an intelligent energy collection and metering device for distributed, large-load and other complex power scenarios. This device not only provides real-time monitoring and data analysis of the user's electricity consumption, but also enables intelligent control of the electrical equipment according to the monitoring results to achieve efficient use of energy. At the same time, it is also necessary to demonstrate the application of this device in typical industrial, commercial and residential applications to demonstrate its superior performance and application value. In this way, the deep integration of metering devices and intelligent technology can be achieved, and strong and effective technical support can be provided for the effective interaction between energy metering and carbon market and the achievement of dual-carbon goals.

Key words: Smart meters; Carbon emission; Calibration

2021年, 碳达峰、碳中和首次被写入政府工作报告, 成为社会各界热议的焦点话题。习近平总书记指出, 要实施积极应对气候变化国家战略, 推动《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》和《环境影响评价与排污许可领域协同推进碳减排工作方案》落地。为应对气候变化, 中国提出力争在2030年前实现碳达峰, 在2060年前实现碳

中和^[1,2]。

落实双碳目标的关键在于节能减排, 而能源计量的智能化研究、实施与推广将为评价能源配置优劣、衡量全社会节能提效水平、评估新设备新技术的应用效果等提供准确可靠的量值数据^[3,4], 是实现精准化节能减排的重要基础。

随着工业化、城镇化的深入推进, 我国能源消费总量在2030年左右达峰后, 电力需求仍将保持增长, 而电力计量在我国能源以化石能源为主转向以清洁能源为主的过程中, 面临着电力系统“双高”与“双峰”特征凸显、能效计量供给不足、电碳市场融合有限等挑战^[5,6]。

此外, 为进一步从能源消费侧助力实现碳达峰、碳中和目标, 需积极开展非侵入式负荷辨识技术研究, 拓展计量数据维度, 深化能效数据应用范围, 智能感知用户的用能情况, 辨识用户生产过程; 需聚焦工业、建筑、交通、农业与居民用户, 形成用户能效优化、用电结构识别、环保排放电力监测、电能替代分析等场景, 为政府与企业推送个性化能效建议; 需依托能源控制器和新一代用电信息采集系统, 研制分布式碳计量监测传感终端和碳汇计算方法, 实现碳排放在线监测^[7,8]。

但现有的能量计量装置与碳汇计算方法存在如下问题:

(1) 目前以电能表、互感器为代表的电力计量装置面临新的技术问题, 主要表现为“双高”干扰电力计量装置正常运行, “双峰”超出电力计量装置量程范围; 在大电流复杂电力场景下测量精度较低, 在线误差诊断方面存在一定短板, 且运行稳定性较难满足需求。因此, 急需提升电力计量对“双高”“双峰”特征的适

配性及自身运行稳定性^[9]。

此外, 现有电力计量功能单一, 无法对用户用能分析, 难以实现用户能效优化; 无法对负荷的运行状态与安全进行实时判断, 不利于用电设备安全监测; 未搭载碳排放计算模块, 节能减排措施难以得到精准反馈^[10]。

(2) 现有非侵入式负荷识别模型需要大量的历史数据, 训练数据获取及模型实时调整成本较高, 识别精度与实时性要求难以同时满足。

(3) 随着用能用户多元互动的频繁, 对计量采集产生边缘计算及云边协同通讯需求增加; 在应对高复杂应用场景时, 现有数据通讯技术传输不稳定, 容易造成数据丢失。

针对现有能源计量体系的不足, 本项目开发了一种面向分布式、大负荷等复杂电力场景的智能电能采集计量装置, 并在典型的工、商和民用领域进行了应用示范, 从而实现了计量装置与智能技术的深度融合, 为实现能量计量与碳市场的合理交互以及双碳目标的达成提供了强力而有效的技术支撑^[11,12]。

1 数字仪表硬件设计

本项目研制的智能物联电表仪表硬件主要包括通信模块、计量模块、主控模块、电源模块及显示模块五部分, 其整体硬件结构如图1所示。

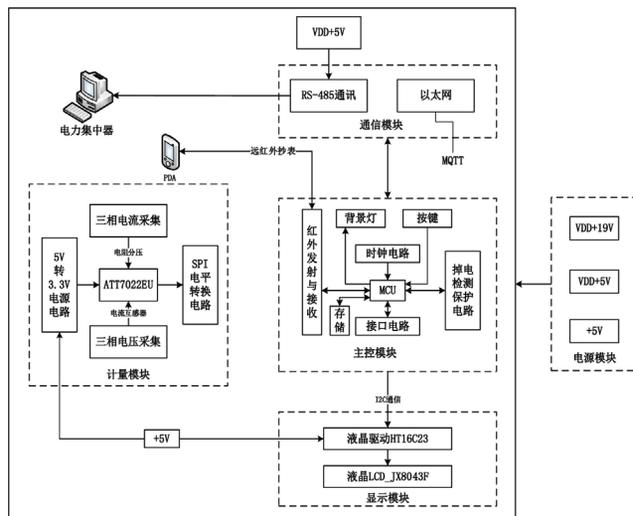


图1 硬件结构框图

1.1 RS-485通信模块

本项目选用SN65LBC184DR这款RS-485通信接口模块用于完成数字仪表的校表功能。SN65LBC184接收器包括一个高输入电阻, 该电阻等效于1/4单位的负载, 允许在总线上挂接最多128个类似器件。SN65LBC184的工作温度为-40℃~+85℃, 可以满足工作要求。

为了防止上位机和下位机之间互相的干扰, 采用光电隔离器件是一种简单而有效的方法。本项目在RS-485的接口电路中选用的也是高速光电耦合器。TVS是一种二极管形式的高效能保护器件。当TVS二极管的两极受到反向瞬态高能量冲击时, 它能以10的负12次方秒量级的速度, 将其两极间的高阻抗变为低阻抗, 吸收高达数千瓦的浪涌功率, 使两极间的电压箝位于一个预定值, 可有效地保护电子线路中的精密元器件, 使其免受各种浪涌脉冲的损坏。

RS-485电平转换芯片采用单电源供电和半双工通讯方式, 将TTL电平转换成RS-485电平。SN65LBC184芯片内部含有一个驱动器和接收器, R和D引脚分别为SN65LBC184接收器的输出端和驱动器的输入端; DE和RE端分别是接收和发送的使能端, 当RE为逻辑0时, 芯片处于接收状态, 当DE为逻辑1时, 芯片处于发送状态。A和B分别为接收和发送的差分信号端, 当A的电平高于B时, 代表发送的数据为1, 当A的电平低于B时, 代表发送的数据为0。其相应的接口电路如图2所示。

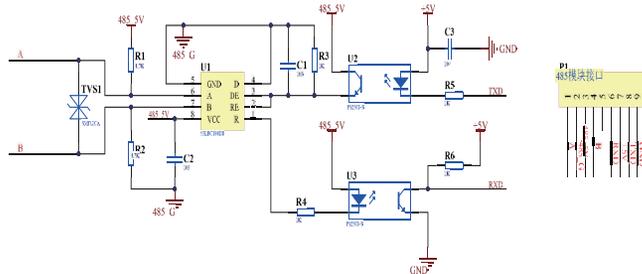


图2 RS-485通信接口模块电路

1.2 计量模块

系统的计量模块包括三相电压采集电路、三相电流采集电路、计量芯片电路、主控模块接口电路、SPI电平转换电路以及三相电接入接口电路等部分。其中,

三相电压采集电路和三相电流采集电路完成对低压开关柜中三相交流电压、三相交流电流的测量；计量芯片则是完成对低压开关柜中三相电各相以及合相的有功功率、无功功率、电压电流的有效值、功率因数等参数的测量功能；控制模块对接接口电路主要完成数据采集模块与单片机之间的数据传输功能。由于系统的单片机为5V供电，计量芯片为3.3V供电，所以本项目通过SPI电平转换电路完成单片机与计量芯片之间的通讯功能；三相接入接口电路完成将低压开关柜中三相电接入数据采集模块的功能^[14]。

本项目选用ATT7022E芯片作为数据采集电路的计量芯片。这是一款多功能高精度的三相电能专用计量芯片，适用于三相三线和三相四线应用，能够测量各相以及合相的有功功率、无功功率、视在功率、有功能量及无功能量，还能测量各相电流、电压有效值、功率因数、相角、频率等参数。该芯片提供一个SPI接口，方便与外部MCU之间进行计量以及校表参数的传递，其通信速率可达10Mbps。其应用方法如图3所示。

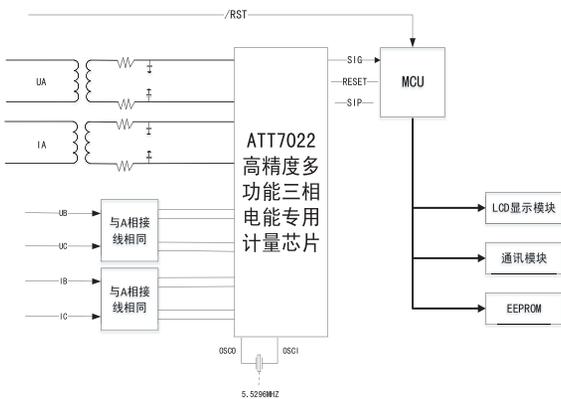


图3 ATT7022E计量芯片应用框图

2 碳排放因子更新

本项目基于MQTT协议实现碳排放因子更新。MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) 是一种轻量级的消息传输协议，其基于发布-订阅模

式，使用TCP/IP协议进行通信，具有低功耗、带宽占用小、易于实现等特点，适用于各种网络环境和设备。

在进行碳排放因子更新时，智能电表基于如图4所示的方法通过MQTT协议接收服务器传递过来的上下游电表进行电碳信息交互。以计算支路 b_3 的碳流密度为例，智能电表在本地计算碳排放流的具体步骤如下：

(1) 电表3获取本支路 b_3 的有功功率数据 P_3 ；

(2) MQTT服务器向电表3推送支路 b_1 、 b_2 的碳流密度 ρ_1 、 ρ_2 和有功功率 P_1 、 P_2 ；

(3) 电表3通过节点碳排放因子迭代方程式1的分量形式在本地进行迭代运算，计算出本次迭代中节点 j_3 的碳排放因子，也即是本支路 b_3 的碳流密度 ρ_3 。

$$e_i = \frac{\sum_{b \in I_i^+} (P_b \rho_b) + \sum_{s \in I_i^+} (G_s e_s)}{\sum_{b \in I_i^+} P_b + \sum_{s \in I_i^+} G_s} \quad \text{式 (1)}$$

式(1)中： I_i^+ 和 I_i^- 分别表示所有向节点 i 注入有功功率的支路集合和与节点 i 相连的发电机组集合（这里即是 j_1, j_2 ）； P_b 表示支路 b 的有功功率； ρ_b 表示支路 b 的支路碳流密度； G_s 表示发电机组 s 出力的有功功率； e_s 表示发电机组 s 的碳排放因子。

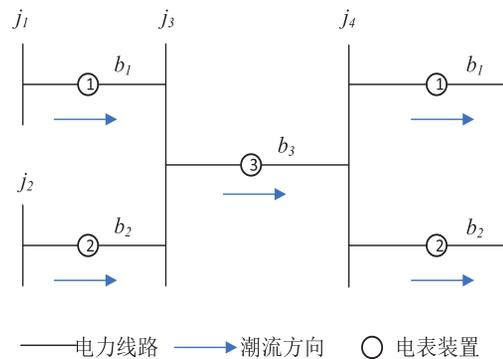


图4 排放因子更新方法

3 数字仪表软件设计

数字仪表软件系统整体框架如图5所示，整个软件系统分为硬件接口层与业务层。

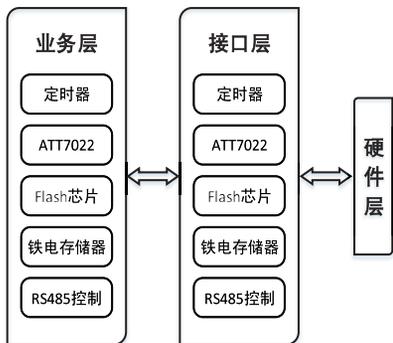


图5 软件系统整体框架

硬件接口层包括ATT7022、Flash芯片、铁电存储器、RS485收发控制的接口程序与两个通用定时器的定时中断程序。ATT7022接口程序包括读写一个字节函数、读写一个缓冲区以及复位控制函数等；Flash芯片接口程序包括读写指定地址开始的一段缓冲区和擦除函数；铁电存储器接口程序包括读写指定地址开始的一段缓冲区的函数；RS485收发控制程序使用CART4与LART5的收发中断完成报文的自动发送与接收；两个通用定时器的定时中断程序包括通用定时器TIM2的20ms定时相关函数与通用定时器TIM3的5ms定时相关函数。

业务层软件主要包括通讯管理模块、时间管理模块、事件管理模块、存储模块、计量模块与主控程序。通讯管理模块完成报文的组帧、发送、扫描、解帧、规约处理；存储模块提供所有需要存储的数据的索引，及根据数据标识读写某项数据的函数^[15]。

软件系统开发流程如图6所示。

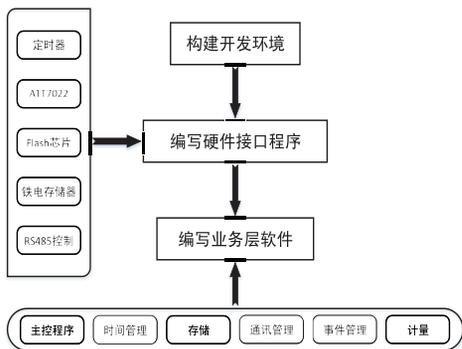


图6 软件系统开发流程

4 数字仪表校表软件开发

数字仪表在投入使用之前需要对电压、电流、功率等参数的测量功能进行校准。针对该需求，本项目使用C#语言开发了数字显示仪表自动化校准软件，便于批量校准数字显示仪表，并可以对多种电力仪表进行测试，主要包括单相交流电压表、单相交流电流表、单相有功功率表、三相交流电压表、三相交流电流表、三相四线功率表、三相三线功率表、三相三线多功能表、三相四线多功能表等。通过此软件与三相便携式电能表测试装置结合使用，可以快速完成对被测电力仪表的校准和测试，可同时对5台电力仪表进行校准和测试^[16]。

校表协议采用Modbus RTU通信协议，如表1所示。

表1 校表参数地址映射表

序号	地址映像	变量名称	字长	读/写
1	0x0001-0x0071	校表命令	1	W
2	0x0100	登录认证	1	W
3	0x0110	正向有功读取错误计数	1	R
4	0x0111	反向有功读取错误计数	1	R
5	0x0112	正向无功读取错误计数	1	R
6	0x0113	反向无功读取错误计数	1	R
7	0x0114	电表状态	2	R
8	0x0200	设置表号	5	R/W
9	0x0210	显示内容	11	R/W
10	0x1000	总清	1	W

软件使用界面如图7所示。



图7 软件使用界面

5 结论

本项目设计了一款面向分布式、大负荷等复杂电力场景的智能电能采集计量装置，完成了智能物联网电表仪表硬件和软件设计。该装置不仅可以实时监测和分析用户的用电情况，还可以根据碳排放因子计算碳排放量，从而实现了能源的高效利用，为实现绿色、低碳的能源转型目标提供了一定的支撑。**AP**

★基金项目：浙江大有集团有限公司科技项目 (DY2022-11)。

作者简介：

叶超 (1987-)，男，浙江杭州人，高级工程师，学士，现就职于杭州电力设备制造有限公司桐庐白云源成套电气制造分公司，主要从事技术管理工作。

程铖 (1987-)，男，湖北孝感人，高级工程师，硕士，现就职于杭州电力设备制造有限公司桐庐白云源成套电气制造分公司，主要从事公司综合管理工作。

马越 (1985-)，男，浙江宁波人，高级工程师，学士，现就职于杭州电力设备制造有限公司桐庐白云源成套电气制造分公司，主要从事安全质量管理工作。

程昊旸 (1995-)，男，浙江杭州人，助理工程师，学士，现就职于杭州电力设备制造有限公司桐庐白云源成套电气制造分公司，主要从事电气试验工作。

参考文献：

- [1] 彭迪栋, 董武, 蔡诚. 基于无线物联网LORA技术的电网智能集采系统[J]. 信息技术, 2021 (09): 149 - 154.
- [2] 胡钢, 高旋, 徐成泽, 等. 基于边云协同的配电网智能网关设计[J]. 现代信息科技, 2023, 7 (19): 51 - 54 + 58.
- [3] 邹敏. 无线数传式三相电能表的设计与实现[D]. 山东: 山东科技大学, 2021.
- [4] 林华城, 叶泳泰, 陈锦迅, 等. 基于计算智能的窃电检测模型研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44 (07): 24 - 29.
- [5] 陈佳杰, 蒋文美, 傅连涛, 等. 基于STM32的集体宿舍智能用电系统[J]. 物联网技术, 2023, 13 (07): 124 - 126 + 130.
- [6] 王涛, 赵芝莹, 吴昱璇. 基于LoRa技术的游乐设备监测系统的设计[C]. 第二十一届中国科学家论坛论文集, 2023: 9.
- [7] 涂家海, 文松, 李渊, 等. 基于物联网的智能电表技术应用思考[J]. 襄阳职业技术学院学报, 2023, 22 (02): 92 - 98.
- [8] 申永鹏, 孙高楠, 赫婷, 等. 基于数字人民币的智能电表及实时电力交易新模式[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (07): 178 - 187.
- [9] 靳松, 徐众. 基于LoRa技术的智能电表通讯方案的设计[J]. 自动化应用, 2023, 64 (06): 123 - 124 + 136.
- [10] 姚书杰, 曾钰, 谢启旋. 智能计费服务系统设计[J]. 机电工程技术, 2023, 52 (03): 219 - 221 + 231.
- [11] 彭迪栋, 董武, 蔡诚. 基于LoRa技术的智能电表安全状态透明化监控系统设计[J]. 微型电脑应用, 2023, 39 (01): 122 - 126.
- [12] 宋艳. 一种基于LoRa和Arduino的低成本电力监控系统[J]. 计算技术与自动化, 2022, 41 (04): 64 - 73.
- [13] 胡志杰, 傅仕琛, 钟敏, 等. 支撑电力大数据的LoRa覆盖网研究[J]. 电力大数据, 2022, 25 (10): 87 - 92.
- [14] 陈琪, 王珊珊, 陈丹琼, 等. 基于物联网技术的智能电力计量系统研究[J]. 中国设备工程, 2022 (17): 38 - 40.
- [15] 安立源, 葛红舞, 赵华, 等. LoRa与轻量化5G的用电信息采集系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2022, 22 (05): 4 - 8.
- [16] Yang Y, Chuang Z, Weiwei Y, et al. [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2218 (1).
- [17] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (7): 38 - 43.