

智能电网中电子式互感器误差 在线监测系统设计

王 骞

(大连第一互感器有限责任公司)

摘要：为实现智能电网中电子式互感器的高精度在线误差监测，本文设计基于 32 位 ARM 处理器的监测系统。该系统采用双通道 16 位高精度 ADC 实现互感器一次、二次侧信号的同步采样，通过 FPGA 完成数字信号处理，并设计了包含比值误差和相位误差的补偿算法模型。系统硬件采用模块化设计，包括数据采集、信号处理、主控制器、通信接口和电源管理五大功能模块；软件采用分层架构，基于 FreeRTOS 实现多任务实时处理。性能测试结果表明，系统在额定条件下比值误差优于 $\pm 0.08\%$ ，相位误差优于 $\pm 3.5'$ ，具有良好的测量精度和稳定性。

关键词：电子式互感器；在线监测；系统设计

0 引言

电子式互感器作为智能电网中的关键测量设备，其测量准确性直接影响电能计量和继电保护的可靠性。随着智能电网建设的深入推进，对互感器测量精度和稳定性的要求不断提高。传统的互感器校验多采用离线方式，难以及时发现运行中的误差变化。在线监测技术的发展为解决此问题提供了新思路，但目前普遍存在测量精度不足、抗干扰能力弱等问题。基于此，本文从系统硬件设计和软件实现两个层面，探讨了一种高精度互感器误差在线监测方案。

1 电子式互感器误差分析与监测原理

在智能电网中，电子式互感器主要通过将高电压或大电流转换为低电压或小电流信号来实现测量功能^[1]。互感器误差主要来源包括电磁感应过程中的非线性特

性、磁心材料的磁滞特性以及温度漂移效应。按照表现形式，这些误差可分为比值误差和相位误差。比值误差主要由互感器一次、二次绕组匝数比的偏差引起，相位误差则由磁心材料特性和负载参数变化导致。

误差监测建立在电磁感应定律和电流互感定理基础之上。一次侧电流发生变化时，二次侧会感应出与之成比例的电动势。在理想情况下，一次电流与二次电流的比值应等于互感器的标称变比，但实际运行中会因各种因素产生偏差。通过对二次侧输出信号与理论值差异的分析，可以实现对误差的定量表征。

2 在线监测系统硬件设计

2.1 系统整体架构设计

本系统采用分层设计思路，构建一套完整的电子式互感器误差在线监测硬件平台。系统主要由数据采

集模块、信号处理单元、主控制器、通信接口和电源管理五大功能模块组成，如图 1 所示。

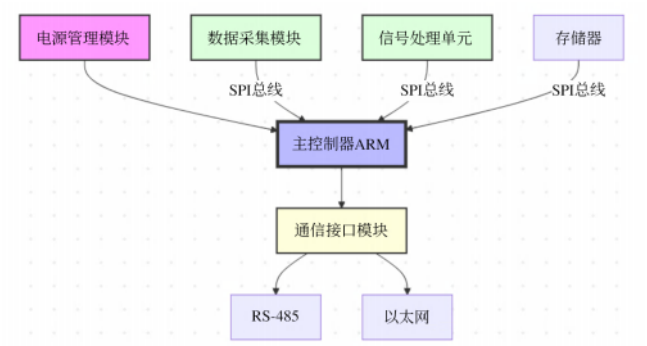


图 1 系统硬件架构

数据采集模块负责对互感器一次、二次侧信号进行同步采样；信号处理单元完成信号调理和数字滤波；主控制器基于 32 位 ARM 处理器，负责数据运算、存储和控制；通信接口支持 RS-485 和以太网两种方式；电源管理模块提供稳定可靠的工作电源。整个系统采用模块化设计理念，各功能单元通过标准接口 interconnect 实现互连。主控制器与各模块之间采用 SPI 总线进行高速数据交换，确保实时性要求。系统设计充分考虑电磁兼容性，采用多层 PCB 设计，实现模拟、数字电路的有效隔离。

2.2 数据采集模块设计

数据采集模块是系统的前端核心，直接影响测量精度。模块采用双通道 16 位高精度 ADC 芯片 ADS8691，采样率配置为 50kSPS，可同时采集互感器一次、二次侧信号。信号调理电路采用精密运算放大器 OPA2277 构建，实现信号放大和电平转换。为确保采样同步性，设计了基于 FPGA 的采样时钟产生电路，采样抖动控制在 50ps 以内。同时，在 ADC 前端配置抗混叠滤波器，截止频率设置为 10kHz。模块电路采用四层 PCB 设计，顶层和底层布置信号线，内部两层分别作为电源层和地层。模拟部分和数字部分采用独立的接地系统，通过单点接地方式相连。信

号线采用差分布线，并预留测试点，便于系统调试。在 PCB 布局上，严格控制关键信号线长度，减少寄生参数影响，确保采样精度满足 0.1 级测量要求。

2.3 信号处理电路设计

信号处理电路主要完成模拟信号调理和数字信号处理两大功能。模拟前端采用三级放大电路结构，第一级为差分放大，采用 AD8221 精密仪表放大器，共模抑制比达到 120dB；第二级为可编程增益放大，通过 DAC 控制增益，实现量程自动切换；第三级为精密整流和低通滤波，确保信号调理的线性度。数字处理部分基于 FPGA 实现，采用 Cyclone IV 系列芯片，时钟频率 100MHz，主要完成数字滤波、频谱分析和有效值计算。

为提高系统的抗干扰能力，电路采用多点隔离设计。信号通道之间采用光耦隔离，电源采用 DC-DC 隔离模块，确保各功能单元之间的电气隔离。在 PCB 设计中，采用星形布局方式，模拟地和数字地分别独立布线后在单点相连，抑制数字电路对模拟电路的干扰。

2.4 通信接口设计

通信接口模块实现系统与上位机的数据交互功能，系统提供 RS-485 和以太网两种通信方式，满足不同应用场景需求^[2]。其参数对比见表 1。

表 1 系统通信接口参数对比

通信参数	RS-485 接口	以太网接口
传输速率/bps	115200	100M
通信距离/m	1200	100
抗干扰能力	强	较强
组网方式	总线型	星形/总线型
故障隔离	光电隔离	变压器隔离
适用场景	现场总线	远程监控

RS-485 接口采用 MAX3485 芯片，支持多点通信，传输速率可达 115200bps，通信距离最大 1200m。以太网接口基于 W5500 控制器实现，支持 10/100Mbps 自适应，采用 TCP/IP 协议栈，可实现远

程数据传输和在线监控。

通信模块采用独立的电源供电和信号隔离设计，确保系统安全可靠运行。接口电路设计中加入过压保护和浪涌保护电路，提高抗干扰能力。通信协议采用 Modbus-RTU 和 Modbus-TCP 两种标准协议，支持数据加密传输，保证数据安全性。同时预留 CAN 总线和光纤接口扩展位置，便于系统功能扩展。

2.5 电源模块设计

电源模块采用多级转换方案，为系统各功能单元提供稳定可靠的工作电源^[3]。输入电源支持 AC 220V 和 DC 24V 两种方式，通过自动切换电路实现冗余供电。AC 输入经 EMI 滤波和整流后，采用准谐振式开关电源变换为 24V 中间电压。DC-DC 转换采用同步整流技术，转换效率达到 92% 以上。

模块输出包括 +5V、+3.3V、±12V 等多路电源，分别用于数字电路、模拟电路和接口电路供电。每路输出均采用 LDO 稳压，纹波控制在 5mV 以内。电源模块集成过压、过流、短路等多重保护功能，并设计有软启动电路，确保系统可靠启动。在 PCB 设计上，采用厚铜箔工艺和多层设计，减小供电回路阻抗，提高电源品质。

3 在线监测系统软件设计

3.1 软件系统架构

软件系统采用分层架构设计，从底向上依次为硬件抽象层、设备驱动层、系统服务层和应用层，如图 2 所示。

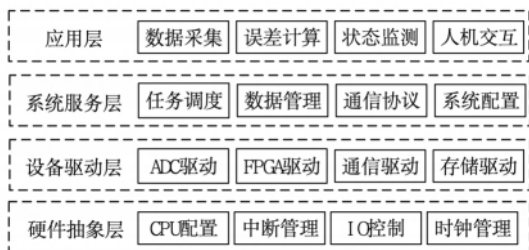


图 2 软件系统层次结构

硬件抽象层（HAL）负责底层硬件初始化和基本操作；设备驱动层包含 ADC、FPGA、通信接口等外设驱动程序；系统服务层提供任务调度、数据管理、通信协议等基础服务；应用层实现数据采集、误差计算、状态监测等具体功能。系统基于 FreeRTOS 实时操作系统开发，采用多任务方式处理并行事件。

3.2 数据采集算法

数据采集算法采用同步采样技术，通过高精度 ADC 实现互感器一次、二次侧信号的同步采集^[4]。为提高采样精度，算法实现了动态量程自适应和交叉补偿功能。采样数据经过数字滤波后，计算有效值和相位差，最终得到互感器误差值。系统采用滑动窗口方式处理数据，窗口长度为一个工频周期。

基于采样数据计算有效值的数学模型如下：

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

式中， X_{RMS} 为信号有效值，V； x_i 为采样值，V； N 为采样点数； i 为采样序号。相位差计算采用过零检测法，其数学模型为：

$$\phi = \frac{360^\circ}{T} (t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中， ϕ 为相位差，°； T 为信号周期，s； t_1 为一次侧过零时刻，s； t_2 为二次侧过零时刻，s。

算法设计中重点考虑了采样同步性和计算实时性。采用 FPGA 产生高精度采样时钟，采样定时误差控制在 50ns 以内。数据处理采用流水线结构，充分利用 DSP 资源，确保计算过程实时完成。

3.3 误差计算模型

互感器误差计算主要包括比值误差和相位误差两部分。比值误差反映了实际变比与标称变比的偏差，相位误差表征一次、二次侧信号的相位差。计算模型考虑了互感器的频率响应特性和温度漂移影响，通过

补偿算法提高计算精度。

1) 比值误差的数学模型为：

$$\epsilon = \frac{K_n I_s - I_p}{I_p} \times 100\% \quad (3)$$

式中， ϵ 为比值误差，%； K_n 为标称变比； I_s 为二次侧电流有效值，A； I_p 为一次侧电流折算值，A。

2) 相位误差补偿模型为：

$$\delta = \phi_{\text{actual}} - \phi_{\text{theory}} + K_t(T - T_0) \quad (4)$$

式中， δ 为相位误差，min； ϕ_{actual} 为实测相位差，min； ϕ_{theory} 为理论相位差，min； K_t 为温度补偿系数，min/°C； T 为当前温度，°C； T_0 为参考温度，°C。

3.4 数据存储与管理

系统采用分级存储策略，实现对采样数据和计算结果的高效管理^[5]。实时数据存储在 RAM 中，采用循环缓冲区结构，保存最近一小时的采样数据。历史数据按照时间戳存储在 Flash 中，支持按时间、误差类型等多维度检索。数据存储格式采用自定义的压缩算法，有效提高了存储效率。数据管理模块实现了数据备份、压缩和清理功能。系统每天自动进行数据备份，将重要数据同步到 E²PROM 中。针对长期存储的历史数据，采用无损压缩算法减小存储空间占用。同时实现了数据生命周期管理，超过保存期限的数据自动清理。

3.5 人机交互界面设计

人机交互界面采用分层菜单结构，实现系统参数配置、运行状态显示和数据查询功能。主界面采用 4.3 寸 TFT 液晶显示器，分辨率 480×272，显示当前测量数据和系统状态。界面布局采用区块式设计，合理划分显示区域，提高信息展示的直观性。系统提供触摸屏操作和按键操作两种交互方式。触摸屏支持多点触控，实现参数调节、波形缩放等功能。按键操作主要用于快速切换显示内容和紧急操作。界面设计充

分考虑了工业现场使用环境，采用大字体显示关键参数，并通过不同颜色标识系统状态。

4 系统测试与性能分析

4.1 测试环境搭建

系统测试平台由标准电压互感器、标准电流互感器、电压源、电流源和高精度测量仪器组成。测试用标准互感器精度等级为 0.02 级，可作为参考标准。信号源采用 Fluke 6100A 多功能校准器，可提供稳定的测试信号，并具备相位调节功能。测量仪器选用 0.01 级高精度数字多用表和示波器，用于采集测试数据。测试环境的温度控制在 (23±2) °C，相对湿度控制在 45%~75%。所有测试设备经过计量认证，确保测量溯源性。测试平台采用屏蔽室搭建，降低外部电磁干扰影响。

4.2 测试结果分析

系统性能指标测试结果见表 2。

表 2 系统主要性能指标测试结果

测试项目	测试条件	技术指标	测试结果	是否达标
比值误差	额定电流 100%	±0.1%	±0.08%	是
相位误差	额定电流 100%	±5'	±3.5'	是
采样精度	50Hz 信号	16 位	15.8 位有效位	是
工作温度	-10~+50°C	误差≤1.5 倍	误差≤1.3 倍	是
长期稳定性	运行 720h	漂移≤0.1%	漂移≤0.08%	是
通信可靠性	连续传输 24h	错误率≤10 ⁻⁶	错误率≤10 ⁻⁷	是

测试结果表明，系统各项性能指标均满足设计要求。在额定工作条件下，比值误差和相位误差均优于设计指标。系统在不同温度环境下保持良好的稳定性，长期运行的误差漂移控制在允许范围内。通信接口测试验证了系统数据传输的可靠性，满足工业现场应用要求。

5 结束语

本文设计了一套智能电网电子式互感器误差在线监测系统，通过模块化硬件设计和分层软件架构，

实现了互感器误差的高精度实时监测。性能测试结果验证了系统在测量精度、稳定性和可靠性方面的优越性。未来研究方向包括进一步优化误差补偿算法，探索基于人工智能的自适应校准技术，以及系统在更复杂工况下的应用验证，为智能电网计量设备的在线监测提供更可靠的技术支持。

参考文献

- [1] 吴静. 电网电子式电压互感器检定测量结果不确定度评定方法研究 [J]. 电气时代, 2024 (11): 67-69.

- [2] 李舒宸, 高欣怡. 电子式互感器在变压器状态监测中的应用 [J]. 集成电路应用, 2025, 42(1): 304-305.
- [3] 裴婷婷. 电子式电流互感器的误差及在线试验分析 [J]. 机械工程与自动化, 2023 (3): 132-134.
- [4] 张银. 电子式互感器的电磁兼容性能优化设计研究 [J]. 中国设备工程, 2023 (6): 129-131.
- [5] 裴婷婷. 电子式电压互感器在智能变电站中的应用 [J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7 (2): 85-88.

(收稿日期: 2025-03-29)

(上接第 71 页)

- [4] 张书瀚. 考虑流量变化的并联给水水泵变频调速节能集中控制方法 [J]. 沈阳工程学院学报 (自然科学版), 2024, 20 (2): 48-53.
- [5] 刘伟, 张建强, 王晓爽, 等. 某污水处理厂 3# 中压进水泵变频改造及节能优化 [J]. 电气时代, 2024 (4): 42-45.
- [6] 黄国瑞, 刘宏伟, 赵耀, 等. 某数据机房低负载率下冷却系统水泵变频节能研究 [J]. 制冷与空调, 2024, 24 (7): 76-82.
- [7] 旷金国, 王朝晖, 罗曙光, 等. 一机一泵组合的冷却水泵工作区与变频运行分析 [J]. 暖通空

- 调, 2024, 54 (1): 119-124, 156.
- [8] 曾娜, 魏佳佳, 余长军. 超临界 350 MW 机组汽轮机给水泵变频运行共振诊断方法 [J]. 韶关学院学报, 2023, 44 (9): 56-62.
- [9] 王东旭, 张军峰, 胡佳佳, 等. 300MW 机组凝结水泵变频经济性方式运行研究与优化 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13 (8): 298-300.
- [10] 黄思林, 唐昊, 王善同, 等. 330 MW 机组电动给水泵变频改造及电液并存调速控制策略研究 [J]. 广东电力, 2023, 36 (2): 143-150.

(收稿日期: 2024-11-06)