

# 嵌入式智能电表检定装置时间激活 误差自动控制方法研究

赵泾雄, 宋祉霖

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

**摘要:** 在核电工程中, 精确的时间控制对于确保反应堆的安全运行和数据的准确记录至关重要。例如, 在核电站的控制系统中, 时间激活误差可能会影响反应堆的控制信号, 进而影响反应堆的稳定性和安全性。因此, 该文提出了一种基于模糊 PID 的嵌入式智能电表检定装置时间激活误差自动控制方法。首先, 通过分析电表检定装置时间激活误差的来源, 建立误差子模型, 并通过叠加拟合得到误差综合模型, 以明确检定装置时间激活误差与误差源之间的关系。然后, 结合模糊 PID 方法针对检定装置的时间激活误差设计控制器。最后, 引入反馈机制对控制器的控制参数进行调整与优化, 得到最优控制参数, 以此对检定装置时间激活误差进行控制, 得到校正后的测量时间, 完成检定装置时间激活误差的校正。实验结果表明, 利用所提方法对检定装置时间激活误差进行自动控制后, 误差漂移较小, 控制性能更加优异。

**关键词:** 嵌入式; 智能电表; 检定装置; 时间激活; 误差自动控制

中图分类号: TH741

文章编号: 1000-0682(2025)01-0088-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.01.016

## Research on automatic control method for time activation error of embedded intelligent electricity meter calibration device

ZHAO Jingxiong, SONG Zhilin

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

**Abstract:** In nuclear power engineering, precise time control is crucial for ensuring the safe operation of the reactor and accurate recording of data. For example, in the control system of a nuclear power plant, time activation errors may affect the control signal of the reactor, thereby affecting the stability and safety of the reactor. Therefore, this article proposes an automatic control method for time activation error of an embedded intelligent meter calibration device based on fuzzy PID. Firstly, by analyzing the sources of time activation errors in the electric meter calibration device, an error sub model is established, and a comprehensive error model is obtained through superposition fitting to clarify the relationship between the time activation error of the calibration device and the error source. Then, combined with the fuzzy PID method, a controller is designed for the time activation error of the calibration device. Finally, a feedback mechanism is introduced to adjust and optimize the control parameters of the controller, obtaining the optimal control parameters. This is used to control the time activation error of the calibration device, obtain the corrected measurement time, and complete the calibration of the time activation error of the calibration device. The experimental results show that using the proposed method to automatically control the time activation error of the calibration device results in smaller error drift and better control performance.

**Keywords:** embedded; smart electricity meter; calibration device; time activation; automatic error control

收稿日期: 2024-07-10

基金项目: 安徽公司安庆电厂智能仓储管理系统的研究和应用科技创新项目(KJXM2023-003)

第一作者: 赵泾雄(1988—), 男, 高级工程师, 现主要从事核电工程设计工作。E-mail: jingxiong\_zhao@163.com

## 0 引言

在核电工程领域,精确的时间同步和误差控制是确保核电站安全稳定运行的关键因素之一。核电站的控制系统需要对各种参数进行实时监控和精确控制,包括反应堆的温度、压力、流量以及安全系统的响应时间等。任何时间激活误差的累积都可能导致控制信号的延迟或提前,进而影响反应堆的稳定性和安全性,甚至可能触发不必要的紧急停堆。随着核电技术的不断发展,对控制系统的时间精度要求越来越高。传统的控制方法往往依赖于固定的参数设置,难以适应核电站复杂多变的运行环境,特别是在面对时间激活误差时,传统的控制器可能无法提供足够的校正能力。因此,研究嵌入式智能仪表校验装置的时间激活误差自动控制方法,对提高仪表性能、保证功率测量精度具有重要意义。

文献[2]通过电压互感器和电流互感器采集设备的电压和电流信号,利用大数据挖掘技术,系统自动校验采集到的电压、电流信号,识别设备异常,并采用 K-means 聚类分类对误差进行动态补偿。该方法可以实现设备误差的自动检测、诊断和补偿,大大减少了人工干预的需要。然而,此方法对数据的依赖性很高。如果数据收集不准确或丢失,可能会影响最终误差控制精度。文献[3]使用自回归移动平均模型,对设备的每个干扰信号进行平稳化,并使用最小二乘法拟合设备时间序列的误差模型,结合卡尔曼滤波器在最小均方误差的约束下,得到了最优测量值。该方法不需要保留大量的历史数据,只需要保留之前的状态变量,因此在处理大数据方面具有很大的优势。但该方法仍然受到线性系统假设的限制,可能对高度非线性系统无效,无法保证误差控制精度。文献[4]根据设备的电压等级和测量要求,设计了一个自动化校准系统。该系统包括校准软件、标准信号源和通信接口等关键组件。通过设置校准模式、单位、校准方法等,配置每个仪器和模块的通信参数,并根据初始模式,控制信号源输出,实现误差控制。该方法可以同时处理多级数字设备的校准,大大提高了校准效率。然而,该方法的校准过程会受到温度、湿度等外部条件的影响,使得误差控制准确性偏低。文献[5]使用自适应线性神经元(ALN)构建神经网络模型。ALN 可以根据输入数据的特性自动调整权重和偏差,从而实现对设备测量误差的补偿。该方法具有自适应学习能力,可以根据设备的实际测量数据进行自我调整,以满足不

同工作环境下的误差补偿要求。但是此方法的参数调整困难,参数设置不当可能导致误差补偿精度较低。

基于上述分析,为切实提高电能表检定装置时间激活误差控制的精度,该研究重点研究嵌入式智能电表校准装置中时间激活误差的自动控制方法,旨在提高电表测量的准确性和稳定性,提高电力系统的整体运行效率。

## 1 嵌入式智能电表检定装置时间激活误差自动控制方法设计

### 1.1 建立时间激活误差模型

该次研究主要针对嵌入式智能电表检定装置时间激活误差的来源进行分析,建立数学模型来描述时间激活误差与误差源之间的关系,以量化检定装置在时间激活过程中可能出现的误差,由此为后续自动控制器提供数据基础。

根据经验可知,电能表检定装置时间激活误差的来源主要包括漂移误差、硬件延迟误差和算法计算误差 3 个方面<sup>[6]</sup>。因此,该文通过构建以上 3 个误差子模型,并对其进行叠加拟合,得到综合误差模型。

假设时钟漂移为与时间具有显著正相关关系的线性漂移,则其可用下列公式表示:

$$\Delta t_1 = \frac{k_p}{s_v} j_s \quad (1)$$

式中: $k_p$ 表示检定装置的电流被控对象在  $p$  域的传递函数; $s_v$ 表示检定装置的开关周期; $j_s$ 表示脉冲系数,其计算公式如下:

$$j_s = \frac{d_0(1 + y_s)}{\sqrt{D_r}} \quad (2)$$

式中: $d_0$ 表示离散化系数; $y_s$ 表示系统的电感系数; $D_r$ 表示信号信噪比。

硬件延迟误差通常可以视为一个线性方程<sup>[7]</sup>,计算公式为:

$$\Delta t_2 = \frac{u_o}{\left\| \frac{\sqrt{A_0}}{\beta_c/m'} \right\|} \quad (3)$$

式中: $u_o$ 表示硬件延迟导致的误差时间; $A_0$ 表示延迟因子; $\beta_c$ 表示实际经过的时间; $m'$ 表示混合系数。

算法计算误差通常可以视为一个随机变量<sup>[8]</sup>,其计算公式如下:

$$\Delta t_3 = \frac{f_d \cdot h_0}{a_s} \times \frac{\alpha_p}{\varepsilon_j} \quad (4)$$

式中:  $f_d$  表示算法计算误差的期望;  $h_0$  表示期望误差值;  $\mathbf{a}_i$  表示系数矩阵;  $a_p$  表示有效激活函数;  $\varepsilon_j$  表示模拟参数。

将上述误差源综合考虑,可以得到总的时间激活误差模型  $\Delta t$ ,表达式如下:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 \oplus \Delta t_2 \oplus \Delta t_3}{b_0} \quad (5)$$

式中:  $\oplus$  表示叠加拟合符号;  $b_0$  表示电表使用次数。

通过分析电表检定装置时间激活误差的来源,建立误差子模型,并通过叠加拟合得到误差综合模型,以明确检定装置时间激活误差与误差源之间的关系,为后续设计误差控制器奠定基础。

## 1.2 构造误差控制器

考虑到电能表检定装置具有高精度、高扩展性的特点,该研究采用模糊 PID 方法针对其时间激活误差设计控制器,以有效控制其误差。

首先结合历史数据和误差模型,对未来的时间激活误差进行预测<sup>[9]</sup>,公式为:

$$r_w = \frac{\Delta t \times \nu_0}{h_\varphi} \exp \left( -\frac{\gamma_j}{1 + d_g} \right) \quad (6)$$

式中:  $\Delta t$  表示综合误差模型;  $\nu_0$  表示通过历史数据拟合得到的参数;  $h_\varphi$  表示检定装置的频率调节细度;  $\gamma_j$  表示检定装置标准偏差估计值;  $d_g$  表示装置功率稳定度;  $C_e$  表示装置电压输出容量;  $r_w$  表示在  $w$  时段内的预测误差。

假设时间激活过程中,数据传输存在固定延迟<sup>[10]</sup>,则平均传输时间间隔可表示为:

$$t' = \frac{r_w \times \eta_0}{F_0} / e_c \quad (7)$$

式中:  $\eta_0$  表示数据传输延迟常数;  $F_0$  表示存储的检表记录个数;  $e_c$  表示装置功率因数。

以线性组合函数的形式表示控制器的输出控制律<sup>[11]</sup>,即:

$$G(s) = t' \times (1 + S_d / g_y) \quad (8)$$

式中:  $S_d$  表示控制器的输入变量;  $g_y$  表示积分函数。

为加强控制器的抗干扰能力,同时保证控制器的响应速度加快,在控制器中添加 3 个误差控制变量<sup>[12]</sup>,添加后的参数表达式为:

$$\begin{cases} x = G(s) \times \gamma_r \\ y = K_t \times q_0 / l_\lambda \\ z = \frac{\pi}{\sqrt{\kappa_c}} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\gamma_r$  表示控制率对时间的变化率;  $K_t$  表示基本概率赋值;  $q_0$  表示信任函数;  $l_\lambda$  表示截断误差;  $\pi$  表示自由度;  $\kappa_c$  表示传感矩阵;  $x, y, z$  分别表示比例系数、积分系数和微分系数。

因此,可得到控制器的控制输出表达式为:

$$\zeta = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} / H_r \quad (10)$$

式中:  $H_r$  表示时间常数。

由上式可知,决定检定装置时间激活误差控制效果的参数主要  $x, y, z$ 。因此,该文接下来通过添加反馈机制确定控制器的最优参数,以得到最佳控制效果。

## 1.3 误差校正计算

为进一步优化检定装置时间激活误差的控制效果,基于误差控制模型,添加反馈机制,对控制器的控制参数进行设计,以实现误差的最佳控制<sup>[13]</sup>。

根据误差模型,可得到检定装置在时间激活前后发生的追随偏差,即:

$$e_s = \frac{\vartheta_g}{V_h / j_\zeta} \quad (11)$$

式中:  $\vartheta_g$  表示下一次迭代控制器参数的调整量;  $V_h$  表示分辨系数;  $j_\zeta$  表示实际误差与预测误差的差值。

由此可得到控制器的连续调节函数为:

$$f(x) = \frac{e_s \times \zeta_b}{S_r \times m_k} \quad (12)$$

式中:  $\zeta_b$  表示控制器的理想输出量;  $S_r$  表示采样周期;  $m_k$  表示决策函数。

设计反馈机制以实时监测误差并特征控制器的参数<sup>[14]</sup>,表达式为:

$$c_t = f(x) \times \nu_b \times \varpi_0 \quad (13)$$

式中:  $\nu_b$  表示状态矩阵;  $\varpi_0$  表示指示函数;  $c_t$  表示反馈控制增益。

将反馈控制增益作为调节系数对控制器的控制参数进行补偿,以得到最佳控制参数  $x, y, z$ ,从而利用优化后的控制器对检定装置时间激活误差进行控制<sup>[15]</sup>,得出控制器的实际输出表达式为:

$$\zeta' = \zeta / \theta \quad (14)$$

式中:  $\zeta$  表示优化前控制器;  $\theta$  表示测量得到的时间;  $\zeta'$  表示校正后的时间。

在初步设计的控制器基础上,引入反馈机制对控制器的控制参数进行调整与优化,得到最优控制参数,以此对检定装置时间激活误差进行控制,得到校正后的测量时间,完成检定装置时间激活误差的校正。至此,完成嵌入式智能电表检定装置时间激

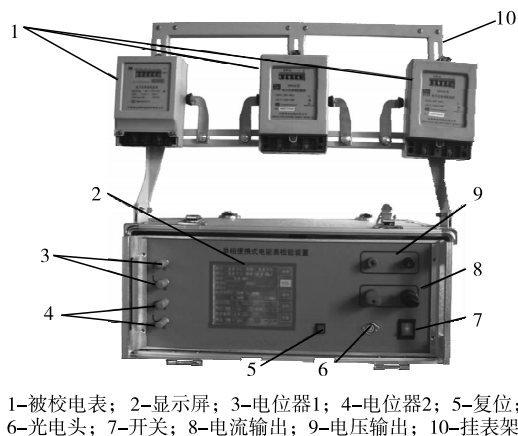
活误差自动控制方法的设计。

2 实例论证分析

该次测试主要是针对嵌入式智能电表检定装置时间激活误差自动控制方法的实际应用效果进行验证与研究,并通过对比实验的方式分析该方法的性能有效性。

2.1 实验准备

该次实验以 TK1030F 嵌入式电能表检定装置为研究对象。该装置采用全数字闭环标准源技术,具有高精度的时间测量和校准功能。同时采用嵌入式系统与高精度 A/D 器件以及 CPLD 芯片,可实现表源一体化测量。其基本结构如图 1 所示。



1-被校电表; 2-显示屏; 3-电位器1; 4-电位器2; 5-复位; 6-光电头; 7-开关; 8-电流输出; 9-电压输出; 10-挂表架

图 1 TK1030F 嵌入式电能表检定装置的基本结构

该检定装置的基本性能参数如表 1 所示。

表 1 实验检定装置的基本性能参数

参数类别	参数名称	数据
交流电压输出	调节细度	0.01% RG
	分辨率	5 位有效数字
	准确度	准确度
	稳定度	0.01% RG/1 min
	失真度	0.2%
	输出功率	额定 20 VA
	满负载调整率	±0.01% RG
	输出范围	10 V~456 V
功率输出	档位设置	57.7 V、100 V、220 V、380 V
	功率因数调节范围	[ -1,1]
	分辨率	0.001°
	谐波次数	2~31 次
谐波	谐波含量显示准确度	0.1%
	谐波含量显示分辨率	4 位有效数字
	谐波相位调节范围	0~359.99°

实验平台采用 MATLAB 仿真系统,利用 高精度时钟源作为基准时钟,对校准装置的时间基准进行校准。设置时间激活频率为每天一次,模拟智能电表在实际操作中的时间激活过程;时间激活误差范围为  $\pm 10\text{ ms}$ ,以验证自动控制方法的校正效果;自动校准周期为每小时一次,用于实时监测和校准时间激活误差;校准阈值为  $\pm 5\text{ ms}$ ,即当时间激活误差超过  $\pm 5\text{ ms}$  时自动触发校准过程。通过计算,得到控制器的比例系数、积分系数和微分系数分别为  $x=0.5$ ,  $y=0.05$ ,  $z=0.01$ 。

实验过程如下。将嵌入式智能电表校准设备连接到高精度时钟源,以确保设备的准确时间参考。同时,连接数据采集和记录系统,实现数据的实时采集和记录;在没有任何校正的情况下进行初始测试。根据设定的时间激活频率模拟智能电表的时间激活过程,并记录时间激活错误数据;激活自动校准功能,根据设置的校准周期和阈值实时监测和校准误差,并激活校准时间。在自动校准过程中,连续记录时间激活错误数据;使用数据分析软件对收集到的数据进行处理和分析。比较初始测试和自动控制方法验证过程中的时间激活误差数据,以评估自动控制方法的有效性。

2.2 检定装置时间激活误差控制结果与分析

实验采用对比的形式进行,选取当前较为成熟的文献[3](方法 1)、文献[4](方法 2)检定装置时间激活误差控制方法作为对照组方法,分别采用 3 种方法对该检定装置的时间激活误差进行控制,实验结果如表 2 所示。

表 2 误差控制结果

校正次数	初始测试误差/ms	控制后误差/ms		
		方法 1	方法 2	该方法
1	+8.51	+4.33	+5.12	+0.02
2	-9.22	-6.29	-5.23	0
3	+7.64	+5.45	+6.20	+0.01
4	-6.95	-6.55	-5.36	0
5	-3.38	-1.26	-1.51	-0.03
6	+4.70	+2.79	+3.66	+0.02
7	+2.83	+2.81	+1.59	0
8	+9.66	+7.20	+7.43	0
9	-8.78	-3.41	-6.37	-0.02
10	-6.62	-5.12	-3.51	0
11	-7.82	-0.88	-2.28	0
12	+8.09	+7.63	+4.47	0

从表 2 中的数据可以直观看出,在检定装置时间激活误差控制方法的验证过程中,通过 3 种方法

进行控制后,装置的误差均得到了显著的降低。其中,基于该方法的误差减小幅度明显高于对照组方法,说明该方法能够有效实现装置的误差控制,证明了该方法的可行性。

### 2.3 对比实验与分析

为进一步体现该方法在检定装置时间激活误差控制中的优越性能,统计基于 3 种方法控制后检定装置的测量误差漂移。该指标衡量的是在长时间运行下,时间激活测量值与真实值之间的偏离程度。数值越小,表明装置的时间激活测量值越准确,方法的控制效果越好。对比结果如图 2 所示。

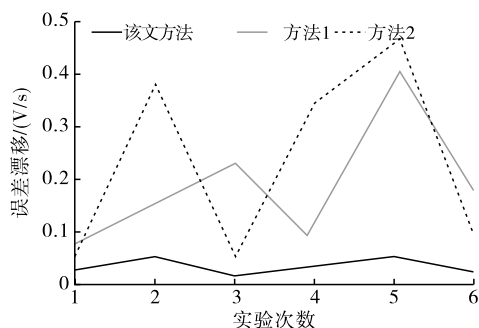


图2 基于不同方法的装置时间激活误差控制结果

根据图 2 可知,应用该方法对装置进行误差控制后,输出的误差漂移值远小于方法 1 和方法 2,说明该方法能够较好地控制装置时间激活误差,大大地提高了电能表计量的准确性。

### 3 结束语

该文深入研究了嵌入式智能仪表校准装置中时间激活误差的自动控制方法,通过建立误差模型和构造误差控制器,实现了装置的时间激活误差自动控制。未来,将集中在进一步优化控制算法,增强装置的智能性和适应性,以应对更复杂和不断变化的电力环境。

#### 参考文献:

- [1] 臧晓伟,王琳珠,徐锴. 基于滚轮测距法的出租汽车计价器计程误差计量比对方法[J]. 上海计量测试, 2024, 51(02): 37-39.
- [2] 赵小凡,杜舒明,刘超. 基于大数据挖掘的电能计量互感器误差自动化控制系统[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(03): 151-154+164.
- [3] 倪毓希,李毅. 基于改进卡尔曼滤波的电力计量装置误差补偿方法[J]. 大众用电, 2024, 39(01): 37-38.
- [4] 侯永辉,王赛爽,李帅,等. 新型配电系统多层级交直流数字高压表自动化计量校准方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(02): 250-254.
- [5] KIM D H, KIM S H. Adaptive linear neuron-based encoder measurement error compensation in vector control of two-phase stepping motors[J]. Journal of Power Electronics, 2024, 24(5): 745-755.
- [6] 钟磊,姜雪娇,吴民,等. 基于电力宽带载波通信的电能计量动态误差检测研究[J]. 长江信息通信, 2024, 37(01): 97-99.
- [7] 史三省,付国栋,宋珊珊. 基于机器视觉的电能表计量误差自动检测方法[J]. 自动化应用, 2023, 64(24): 222-223+226.
- [8] 庞桂兵,杨逸,樊双蛟,等. 质量砝码和压力砝码活塞式压力计的计量误差[J]. 计量学报, 2023, 44(12): 1842-1846.
- [9] 王鹏,焦阳,李昕钰,等. DCS 控制器中电表接触传感器计量误差检测方法[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(01): 98-101+106.
- [10] 刘晓君. 基于卡尔曼滤波的电子计量设备测量误差预测方[J]. 工业计量, 2023, 33(06): 40-44.
- [11] 袁艳兵. 基于图像识别的电力测量仪表计量误差校正技术[J]. 大众用电, 2023, 38(10): 40-41.
- [12] 钟洪友. 计量检测中天平砝码检定误差原因与控制[J]. 中国质量监管, 2023(10): 88-89.
- [13] 梁丽,马亚珍. 基于深度学习的电力系统谐波电能计量误差校正方法[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(09): 49-52+57.
- [14] 李娜. 基于 RBF 神经网络的自控仪表计量误差校正方法[J]. 石油化工自动化, 2023, 59(03): 96-99.
- [15] 李萍. 基于小波变换的电力测量仪表计量误差校正方法[J]. 科学技术创新, 2023(26): 25-28.