

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416128

基于现代通信技术的电参数远程校准方法研究^{*}

王思云 陈铭明 李志新 卢树峰 鲍进

(国网江苏省电力有限公司营销服务中心 南京 210000)

摘要: 在现有计量仪器远程校准与溯源实现方式的基础上,提出了一种基于现代通信技术的电参数远程校准方法。该校准方法结合以非实物标准为传递对象的远程校准方法和直流电压源校准的标准源法,将标准器安放在实验室而非传递至现场,解决了传统电参数校准方法的校准周期长和附加误差难以测量等问题。基于卫星共视法对时间频率进行校准的原理,将标准电压源和被校准电参数转换为可靠的数字量进行电参数的远程传递,可将现场端电参数溯源至实验室标准源,建立起电参数的传递和溯源链;设计了AD转换模块参考电压远程校准模块,建立了AD转换模块远程自校准模型,研究了基于卫星共视的电参数远程校准算法与A/D模数转换远程自校准算法,对高精度电参数采集模块的转换结果进行修正。经数据分析,其准确度为0.1级。

关键词: 卫星共视;AD转换;参考电压;远程校准

中图分类号: TB971;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4

Research on remote calibration method of electrical parameters based on modern communication technology

Wang Siyun Chen Mingming Li Zhixin Lu Shufeng Bao Jin

(Marketing Service Center of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: On the basis of existing ways of realizing remote calibration and traceability of measuring instruments, a remote calibration method of electrical parameters based on modern communication technology is proposed. The calibration method combines the remote calibration method with non-physical standards as the transmission object and the standard source method of DC voltage source calibration, which places the standards in the laboratory rather than transmitting them to the field, solving the problems of long calibration period and difficult to measure additional errors of the traditional electrical parameter calibration method. Based on the principle of time-frequency calibration by the satellite co-vision method, the standard voltage source and the calibrated electrical parameters are converted into reliable digital quantities for the remote transmission of the electrical parameters, and the transmission and traceability chain of the electrical parameters is established; the reference voltage remote calibration module of the AD conversion module is designed, and a model of the remote self-calibration of the AD conversion module is established, and the remote calibration algorithm of the electrical parameters based on the satellite co-vision is investigated, and the remote self-calibration algorithm of the A/D conversion is also investigated. The remote self-calibration algorithm of analog-to-digital conversion is studied, and the conversion results of high-precision electric parameter acquisition module are corrected. After data analysis, its accuracy is 0.1 level.

Keywords: satellite co-vision; AD conversion; reference voltage; remote calibration

0 引言

随着第四次工业革命的到来,全球科技迅猛发展,各个领域对高精度产品的需求日益增长。高精度仪器的研发不仅需要先进的科技和制造工艺,还需要确保仪器的长期稳

定运行。为了实现标准量值的传递和被校准仪器的溯源,量值传递与溯源技术变得至关重要。目前,最常用的计量仪器校准方式是将待校准设备通过物流运输至上级实验室或计量技术机构进行检定和校准,然后返回使用单位。然而,这种离线校准方式效率低下,与现代高速生产理念相矛

收稿日期:2024-05-28

^{*} 基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023139)资助

盾,且附加误差对于校准活动产生的影响无法被修正。更严重的是,在仪器拆卸、安装和运输过程中可能发生不可逆的损坏,严重影响工业生产效率。因此,离线校准方式已经逐渐被时代淘汰。

电参数在工业生产和科学研究中是重要的参数。传统的电参数校准方式是将电参数传递到实验室进行离线校准,这种方式周期长、效率低,且难以测量现场工作状态下的误差。传感器的智能化和网络化,以及通信技术和物联网的迅速发展,使得远程校准成为计量学领域的热点研究方向。当前的远程校准方式是通过物联网技术将标准电压源传输至现场进行回传,但依然无法避免周期长、效率低的问题。本课题研究拟针对标准表在实验室的远程校准方式技术难度较大不易实现且目前只局限在以非实物标准作为计量基准的校准领域的问题,探索新的实现方式。参考非实物基准的远程校准方式和物联网技术在远程校准领域内的应用,研究了基于现代通信技术的电参数远程校准方法,并进行了系统设计。基于卫星共视法对时间频率进行校准的原理,将电参数由模拟信号转换为数字信号进行传输与比对,研究了基于无线通信技术的电参数远程校准方法,并通过研究电压、频率和时间偏差之间的关系,建立了模数转换(analog-to-digital converter, ADC)远程自校准模型。

1 基于现代通信技术的电参数远程校准方法研究

1.1 基于卫星共视的频率远程校准方法

建立在以非实物标准传递为基础的远程计量校准,即校准所用标准器不需要通过物流方式传递到校准现场,标准器在实验室通过量值远程传递或是共同观测同一基准信号实现。基于非实物标准传递的远程计量校准不涉及实物标准的传输和物理连接。校准周期更短,因此更加便捷和高效。时间频率标准可以使用电磁波作为载体进行远距离广播和传输,不需要直接逐级传输。特别是,全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的广泛应用使得用 GNSS 作为时间频率标准参考和传输介质来校准本地时间频率标准或仪器成为可能。国际上许多国家计量机构,如美国国家标准与技术研究院(national institute of standards and technology, NIST)、英国国家物理实验室(national physical laboratory, NPL)、澳大利亚国家计量研究院(national measurement institute, Australia, NMIA)和日本国家计量研究院(national metrology institute of Japan, NMIJ)都运用 GNSS 卫星共视技术开展了时间频率校准工作。国内的研究者也在致力于基于 GNSS 卫星共视技术的时频远程校准的研究。高小珣等总结了时间频率远距离高精度量值传递的全球定位系统(global positioning system, GPS)共视法原理及共视法标准数据格式中各参数的实现方法^[1-2]。左建生等^[3]基于 GPS 共视法设计了一套时频远程校准系统,对大型或长期不间断工作的频标进行了远程校准。陈瑞琼等^[4]提出了一种改进的卫星共视

法,实现了时间频率的连续比对,并利用改进的卫星共视法研制了一套高精度远程时间频率校准系统。Zhang 等^[5]研究了基于不同电离层扰动的远程 GPS 共视精确时间传递方法。这种远程计量校准方式是更理想的方式,然而,由于现有技术水平的限制,基于非实物标准传递的远程计量校准,仅限于时间频率校准领域的应用。而对于别的物理参量和领域的远程计量校准,仍然基于实物标准传递。

1.2 基于卫星共视的直流电压源远程校准方法

传统的电参数计量检定校准是采用实验室校准方式,需将被校电参数通过物流方式传递到上级实验室或计量机构进行检定校准,这种计量方式,是得不到电参数在应用现场的附加误差的。因此,研究一种无需设备传递的电参数远程计量方法,搭建一套电参数远程计量系统,构建准确有效的电参数远程计量模型可为电参量输出的计量仪器的远程计量的发展提供新的有效的思路。

国内外学者针对远程校准技术开展了许多相关的研究,并取得了一些阶段性的成果。Winarno 等^[6]对量块的远程测量提出了相干干涉测量法,并进行了相应的实验。Matsumoto 等^[7]也基于干涉技术通过互联网技术完成了对几何量的远程校准系统。Jebroni 等^[8]研究了一种智能电能表远程校准系统,在该系统的研发过程中开发了一种集成校准板卡的智能电表新结构,可以将电表进行远程校准。Wang 等^[9]借助现有的应用工具设计了一种基于人工智能的抄表方法的使用边缘智能的远程校准装置。Kong 等^[10]提出了一种基于扩展卡尔曼滤波和极限递归最小二乘的方法应用于估计在线智能电表测量误差。Douglas 等^[11]进行了网络时间协议(network time protocol, NTP)服务器时间的远程校准,并能提供实时结果和警报。在国际大趋势的影响下,国内计量学领域内的学者也对远程量值传递与溯源方式进行了重点研究。辽宁电力科学研究所的许静等^[12]基于云技术建立了变压器测温装置远程校准系统,实现了对装置的远程智能识别、监控和托管等功能。国防科技大学的李先友^[13]设计了能使扭矩传感器在实际工况条件下进行动态校准的远程校准系统。郭景涛等^[14]提出了一种基于互联网的通用远程校准平台,通过物流传递和互联网与校准实验室主机通信,实现远程校准。北京航空航天大学梁志国等^[15]提出了实现远程校准的核心是实现量值的远程无实物传递的观点,并基于此提出了数据采集系统的远程校准构想。中国电力科学研究所的赵莎等^[16]也根据卫星共视技术,设计了可及时溯源到国家时间频率基准的电力系统远程时间频率溯源体系,解决了溯源的同步性和时效性的问题。河北大学的方立德等^[17-20]归纳了已有的传递标准器方式、标准器置于校准现场方式与标准器置于实验室的方式等 3 种远程量值传递与溯源的实现方式及各自优缺点,设想未来远程价值传递和追溯技术的应用场景,提出一种基于卫星共视法的直流电压源远程校准模型,并进行了一致性分析。

综合国内外研究现状,目前国际上各个国家标准实验室针对远程校准项目所开展的研究还是以实物对象为主。相较于传递标准表法与将标准表置于现场的方法,将标准表置于实验室进行非实物量值传递是最理想的远程校准方法。但此方法实现难度较高,目前还只局限于时间频率的远程校准。

1.3 基于现代通信技术的电参数远程校准方法研究

为了解决传统电参数校准方法的校准周期长和附加误差难以测量等问题,结合以非实物标准为传递对象的远程校准方法和直流电压源校准的标准源法,提出了基于现代通信技术的电参数远程自校准方法,其中现代通信技术包括卫星共视技术与无线通信技术。本文基于前期研究进展,主要探讨了电参数中的电压远程自校准方法,但根据电压与电流的关系以及欧姆定律,也可类推出电流远程校准方法。

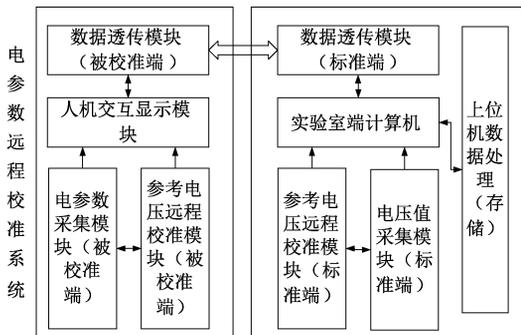


图1 基于现代通信技术的电参数远程校准系统结构图

Fig.1 Structure of electrical parameter remote calibration system based on modern communication technology

图1所示为基于现代通信技术的电参数远程自校准系统结构。系统主要由电参数采集模块(标准端)、电参数采集模块(被校准端)、参考电压远程校准模块(标准端)、参考电压远程校准模块(被校准端)、数据透传模块(标准端)、数据透传模块(被校准端)、实验室计算机等部分组成。考虑到传统标准源法中的数字多用表的过渡作用,和基于卫星共视法对时间频率进行校准的中心思想,将电参数传输转换为可靠的数字量进行电参数的远程校准。通过两端电参数采集模块中的AD转换模块对标准电压源和被校准电参数进行电参数模拟信号向电参数数字信号的转换,为了保证电参数采集模块能够完成准确远程校准工作,需保证被校准现场和校准实验室两端的电参数采集模块的高度一致。在完成电参数采集以后,需要进行电参数的回传比对。通过两端数据透传模块将被校准现场的电参数数字信号进行回传,可将现场端电参数溯源至实验室标准源,从而建立起电参数的传递和溯源链。为了保证模数转换的精确性,在电参数采集模块中设计了参考电压远程校准模块,可以对AD转换模块的参考电压进行校准,测量出高精度电参数采集模块中参考电压的误差值,根据测量的参考电压误

差数据,建立补偿算法,计算出补偿值,对高精度电参数采集模块的转换结果进行修正。最后由实验室上位机进行数据的存储和处理,并出具检定报告;并且通过数据透传模块还可以将上位机指令传递至被校准现场,完成对校准流程的实时控制。图2所示为基于现代通信技术的电参数远程校准流程。

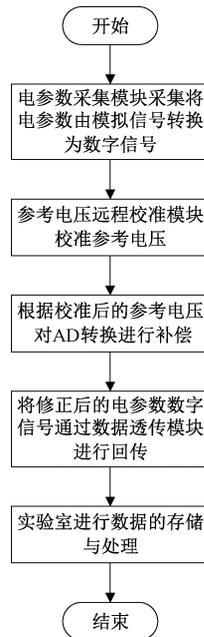


图2 基于现代通信技术的电参数远程校准流程图

Fig.2 Flow chart of remote calibration of electrical parameters based on modern communication technology

2 基于现代通信技术的电参数远程校准系统设计

基于现代通信技术的电参数远程校准系统需要两个含AD转换模块的电参数采集模块分别放置于校准实验室和被校准现场,因此需要设计高精度电参数采集模块两个,并且为了保证电参数采集模块能够完成远程校准工作,需进行被校准现场和校准实验室两端的电参数采集模块的一致性验证。并且为了保证电参数采集模块能够同时受控于同一个指令,能够完成数据同时回传,因此需要设计数据透传方案,使得整个校准流程变得可控,且能够同时完成校准实验室和远程被校准现场电参数数据的同时采集。为了提高电参数采集模块的精确性,设计了基于卫星共视的参考电压远程校准模块,可以对AD转换模块中的基准电压进行检验并校准。图3所示为电参数远程校准系统硬件设计方案。

在该方案中对于外部电参数的检测,首先需要通过采样保持电路,将电参数进行初步处理,再经过滤波电路减少电参数采集模块受到外界环境的影响,随后通过高精度模数转换芯片将连续变换的模拟量变为易于存储的数字量信号,再将数字量信号传递到微控制单元(microcontroller

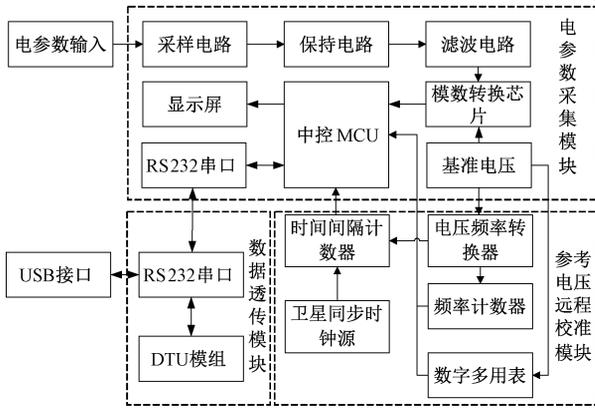


图 3 电参数远程校准系统硬件设计方案

Fig. 3 Hardware design scheme of electrical parameter remote calibration system

unit, MCU)中,在 MCU 中结合更高级的滤波算法对电参数数字量进行更进一步的处理;因校准方案中存在人机交互功能,因此需要连接外设显示屏,将校准指令和测试的实时数据进行显示,方便被校准现场人员和校准实验室人员实时观察。对数据透传模块,需设置串口连接电参数采集模块,方便 MCU 连接数据透传模块,将数据回传。对参考电压远程校准模块,通过压频转换器将电压转换为频率信号,使用时间频率远程校准的 GPS 共视法原理和方法,测得基准电压的误差值并校准。

3 远程校准其算法及模型研究

3.1 基于卫星共视的电参数远程校准算法

GPS 共视法的基本原理是:在一颗 GPS 卫星视角内,位于远距离两地的原子钟可通过在同一时刻接收到的卫星的时钟信号,进行时间频率比对。设校准端和被校准端的原子钟的时间分别为 t_A 和 t_B , GPS 原子钟时间为 t_{GPS} , 两端原子钟秒脉冲与 GPS 秒脉冲的时差分别为 Δt_{AGPS} 和 Δt_{BGPS} , 则有:

$$\Delta t_{AGPS} = t_A - t_{GPS} \quad (1)$$

$$\Delta t_{BGPS} = t_B - t_{GPS} \quad (2)$$

$$\Delta t_{AGPS} - \Delta t_{BGPS} = t_A - t_B = \Delta t_{AB} \quad (3)$$

多次测量后得到多组两端时间偏差值 Δt_{ABi} , 可得两端

原子钟一段时间内的平均相对频率偏差 $\frac{\Delta f}{f}$ 。

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_A - f_B}{f} = \frac{\Delta t_{ABi+\tau} - \Delta t_{ABi}}{\tau} \quad (4)$$

其中, f_A, f_B 分别为校准端和被校准端原子钟的频率, τ 为平均时间间隔。

非实物对象校准不需要将标准仪器或标准器具通过物流等方式运输至校准现场,参考时间频率的校准技术,对比直流电压源的传统标准源法,将用于传递的实物标准转换为这种非实物上进行标准量值的传递与被校准量值的溯源。

通过所设计的电参数采集模块将标准表电压源输出和被校准电参数建立数值联系,从而进行被校准电参数示值误差的求解。记录实验室多功能标准源的电压实际输出值为 U_{ref} , 电参数采集模块所采集到的实验室多功能标准源输出值为 U_{std} , 现场回传电参数采集模块所采集到的被校准电参数输出的值记为 U_{clb} , 由此可得出被校准电参数的实际输出电压为:

$$U_s = U_{ref} + U_{clb} - U_{std} \quad (5)$$

传回被校准电参数的输出示值为 U_x , 所以被校准电参数的示值误差公式为:

$$\Delta = U_x - U_s \quad (6)$$

其中, U_x 为被校准电参数的输出示值,将式(5)代入式(6)可得被校准电参数的示值误差公式为:

$$\Delta = U_x - U_{ref} - U_{clb} + U_{std} \quad (7)$$

3.2 A/D 转换模块远程自校准算法

1) ADC 输出电压和参考电压的关系

ADC 采样模拟信号提供表示输入信号的量化数字码。数字输出代码得到后处理,并且结果可以报告给使用该信息做出决定和采取行动的操作者。因此,重要的是将数字码正确地与它们表示的模拟信号建立关联。

u_0 为输出电压, D 为输出十进制编码(机器输出为二进制), ΔV 为分辨率,即最低有效位(least significant bit, LSB)的步长。一般而言,ADC 输入电压通过简单的关系与输出代码相关,如式(8)所示:

$$u_0 = D \times \Delta V \quad (8)$$

完成 ADC 转换后,将输出代码的十进制值乘以 LSB 大小来计算输入电压。LSB 大小是代码和电压之间转换的关键。式(9)可确定 LSB 大小。

$$\Delta V = \frac{FSR}{2^N} \quad (9)$$

要注意所使用 ADC 的满量程电压(full scale range, FSR),因为不同的 ADC 有不同的 FSR。FSR 总是与基准电压成正比,也可能取决于任何内部增益,如式(10)所示:

$$FSR = \frac{mV_{ref}}{Gain} = V_{ref} \text{ (当 } m = Gain = 1 \text{)} \quad (10)$$

$$u_0 = \frac{D \times V_{ref}}{2^N} \quad (11)$$

当参考电压在 ADC 的运行过程中发现偏差时,ADC 的满量程电压会随之受到影响,如果不加测量的使用理想数据计算出来的量化单位(LSB),就会造成输出结果的附加误差。如图 4 所示,是以 3 位 AD 为例,展示参考电压对 AD 转换的误差的影响。

2) ADC 的参考电压校准

参考电压是 AD 转换器用来进行模拟信号转换的参照电压,它决定了 AD 转换器的测量范围和精确度。通常情况下,AD 转换器会将模拟输入信号与参考电压进行比较,并将其转换为相应的数字信号,参考电压的稳定性和精度

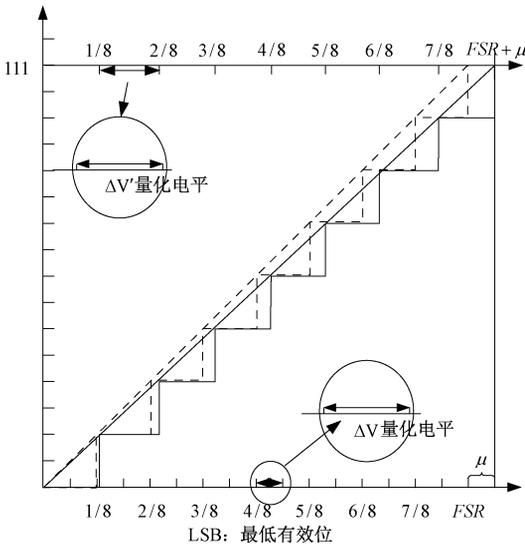


图 4 基于 3 位 ADC 的参考电压误差分析图

Fig. 4 3-bit ADC-based reference voltage error analysis plot

对 AD 转换的结果至关重要。基于卫星共视原理对参考电压进行校准,当参考电压有误差引入时,利用远程校准模块实现对参考电压的间隔采样,计算出新的满量程电压和 LSB 步长,以确保对未知采样信号识别和最终输出结果的准确性。

为了保证模数转换的精确性,在电参数采集模块中设计了参考电压远程校准模块,测量高精度电参数采集模块中参考电压的误差值。该模型结合了标准源法和已实现的时间频率远程校准的 GPS 共视法原理。电压源的校准主要在同一示值的输出电压偏差的基础上进行测量,而电压量则以时间频率的形式进行远程计量校准,需要利用电压频率转换器实现电压量与频率量的转换。实现远程计量的关键在于建立频率与时间间隔的关系模型。

$$\Delta U = \frac{\Delta f}{\lambda} = \frac{f_A - f_B}{\lambda} = \frac{F(t_A) - F(t_B)}{\lambda} \quad (12)$$

其中, ΔU 为两端的电压偏差, Δf 为两端的频率偏差, f_A 为标准端的频率, f_B 为被校端的频率, t_A 为标准端的时间间隔, t_B 为被校端的时间间隔, λ 为电压频率转换器的转换系数,即输出频率与输入电压的比值,单位为 Hz/V。图 5 所示为秒脉冲与秒脉冲或连续方波脉冲的时间间隔规律。

考虑到电压频率转换器输出的其频率与所输入的电压成正比关系的脉冲信号与卫星同步的秒脉冲信号并非同频。因此,除了时间间隔是由电压频率转换器输出的脉冲信号与卫星同步的秒脉冲信号的上升沿在时域上的差值,即时间间隔之外,在每一个卫星同步的秒脉冲周期内的电压频率转换器输出的脉冲信号的脉冲数(即上升沿个数)与脉冲信号的频率是相关的,也应该被考虑作为被测量,引入到计量模型中,用来准确测算两端电压偏差的大小。

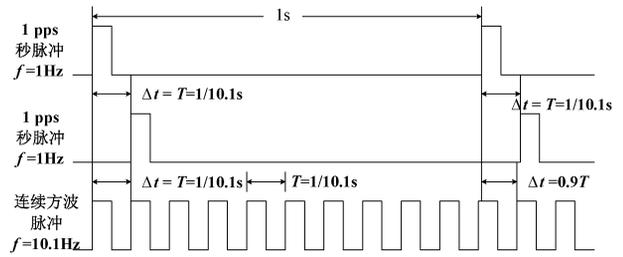


图 5 秒脉冲与秒脉冲或连续方波脉冲的时间间隔规律图
Fig. 5 Plot of time interval pattern of second pulse vs. second pulse or continuous square wave pulse

$$\Delta U = \frac{\Delta f}{\lambda} = \frac{f_A - f_B}{\lambda} = \frac{F(t_A, N_A) - F(t_B, N_B)}{\lambda} \quad (13)$$

其中, N_A 为标准端的脉冲数, N_B 为被校端的脉冲数。

3) AD 转换模块远程自校准误差分析

参考电压在 AD 转换中扮演着重要角色,它是 AD 转换器用来指导模拟信号转换为数字信号的基准电压。参考电压不仅决定了 AD 转换器的测量范围和精度,其稳定性和准确性也直接影响着转换结果的质量。在 AD 转换过程中,模拟输入信号会与参考电压进行对比,然后转换为对应的数字信号。因此,需要选择合适稳定的参考电压,以确保 AD 转换器能够准确可靠地执行转换操作。

设定 AD 转换模块输入电压 u_0 为 3 V,参考电压额定值为 5 V,选择 12 位 AD 转换器。在 4~5 V 之间以 0.1 V 为间隔选取 10 个参考电压实际值进行计算,得出当参考电压实际值与额定值产生误差时,对 AD 转换模块计算输入电压的误差:

$$\Delta u_0 = \frac{u_0 (V'_{ref} - V_{ref})}{V'_{ref}} \quad (14)$$

其中, V_{ref} 为参考电压额定值, V'_{ref} 为参考电压实际值。表 1 所示为参考电压实际值与额定值产生误差时输入电压的计算误差,图 6 所示为参考电压实际值与输入电压误差的拟合图。

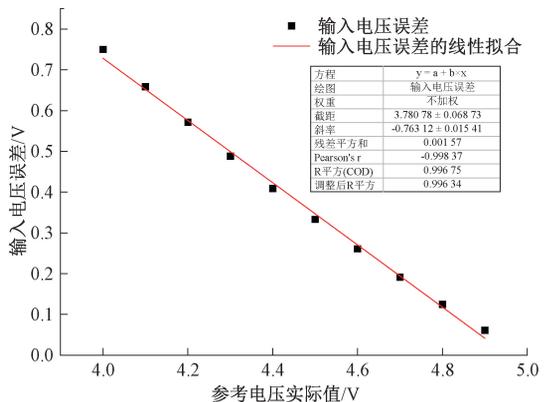


图 6 输入电压误差线性拟合图

Fig. 6 Input voltage error linear fitting plot

表 1 参考电压实际值与额定值产生误差时输入电压的计算误差

Table 1 Calculation error of the input voltage when the actual value of the reference voltage generates an error from the rated value

序号	参考电压额定值 V_{ref} / V	输入电压值 u_0 / V	参考电压实际值 V'_{ref} / V	输入电压计算值 u'_0 / V	输入电压误差 $ \Delta u_0 / V$
1	5.00	3.00	4.90	3.061 2	0.061 2
2	5.00	3.00	4.80	3.125 0	0.125 0
3	5.00	3.00	4.70	3.191 5	0.191 5
4	5.00	3.00	4.60	3.260 9	0.260 9
5	5.00	3.00	4.50	3.333 3	0.333 3
6	5.00	3.00	4.40	3.409 0	0.409 0
7	5.00	3.00	4.30	3.488 4	0.488 4
8	5.00	3.00	4.20	3.571 4	0.571 4
9	5.00	3.00	4.10	3.658 5	0.658 5
10	5.00	3.00	4.00	3.750 0	0.750 0

基于卫星共视的电参数远程校准方法可对 AD 转换模块的参考电压进行远程校准,进而减少 AD 转换模块对于输入电压的转换误差。设参考电压额定值为 5 V,输入电压为 3 V,实际参考电压以 0.01 V 为步进值从 4.96 V 依次调整到 5.05 V,共计 10 个校准点,以实验验证基于卫星共视的电参数远程校准方法对 AD 转换模块的校准结果。表 2 所示为参考电压实际值校准后与额定值产生误差时输入电压的计算误差,图 7 所示为参考电压校准值与输入电压误差的拟合图。

由校准前后的输入电压误差线性拟合图可知,使用基于卫星共视的电参数远程校准方法对 AD 转换模块的参考电压进行校准,其准确度可以达到 0.1。

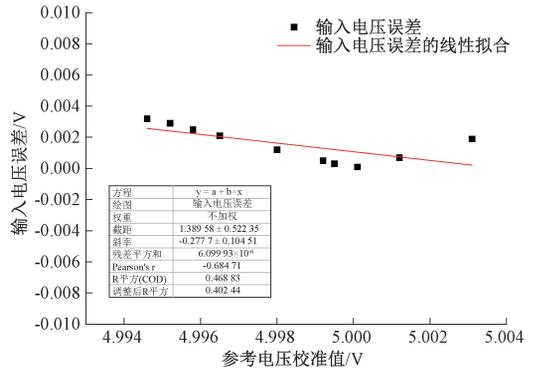


图 7 校准后的输入电压误差线性拟合图

Fig. 7 Linear fit of input voltage error after calibration

表 2 参考电压实际值校准后的输入电压的计算误差

Table 2 Calculation error of the input voltage calibrated to the actual value of the reference voltage

序号	参考电压额定值 V_{ref} / V	输入电压值 u_0 / V	参考电压实际值 V'_{ref} / V	参考电压校准值 V_{cref} / V	输入电压误差 $ \Delta u_0 / V$
1	5.00	3.00	4.96	4.995 2	0.002 9
2	5.00	3.00	4.97	5.003 1	0.001 9
3	5.00	3.00	4.98	4.999 5	0.000 3
4	5.00	3.00	4.99	5.001 2	0.000 7
5	5.00	3.00	5.00	4.998 0	0.001 2
6	5.00	3.00	5.01	5.000 1	0.000 1
7	5.00	3.00	5.02	4.994 6	0.003 2
8	5.00	3.00	5.03	4.996 5	0.002 1
9	5.00	3.00	5.04	4.999 2	0.000 5
10	5.00	3.00	5.05	4.995 8	0.002 5

4 结 论

本文在现有计量仪器远程校准与溯源实现方式的基础上,提出了一种基于现代通信技术的电参数远程校准方法。该校准方法结合以非实物标准为传递对象的远程校准方法和直流电压源校准的标准源法,将标准器安放在实验室而非传递至现场,解决了传统电参数校准方法的校准周期长和附加误差难以测量等问题。基于卫星共视法对时间频率进行校准的原理,将标准电压源和被校准电参数转换为可靠的数字量进行电参数的远程传递,建立起电参数的传递和溯源链。参考电压的稳定性和精度对AD转换的结果至关重要,如果参考电压不稳定或精度不高,那么转换出来的数字信号也会受到影响。因此,设计了AD转换模块参考电压远程校准模块,建立了AD转换模块远程自校准模型,研究了基于卫星共视的电参数远程校准算法与A/D模数转换远程自校准算法,可对高精度电参数采集模块的转换结果进行修正,保证其稳定性和精度。经数据分析可知,使用基于卫星共视的电参数远程校准方法对AD转换模块的参考电压进行校准,其准确度可以达到0.1级。

参考文献

- [1] 张越,高小珣. GPS共视法定时参数的研究[J]. 计量学报,2004(2):167-170.
ZHANG Y, GAO X X. A study of GPS co-vision timing parameters [J]. Acta Metrologica Sinica, 2004(2):167-170.
- [2] 高小珣,高原,张越,等. GPS共视法远距离时间频率传递技术研究[J]. 计量学报,2008(1):80-83.
GAO X X, GAO Y, ZHANG Y, et al. Research on GPS co-vision method of long-distance time-frequency transmission technology[J]. Acta Metrologica Sinica, 2008(1):80-83.
- [3] 左建生,董莲,陆福敏,等. 时间频率远程校准系统的设计与实现[J]. 电子测量技术,2010,33(4):1-3.
ZUO J SH, DONG L, LU F M, et al. Design and realisation of a time-frequency remote calibration system [J]. Electronic Measurement Technology, 2010,33(4):1-3.
- [4] 陈瑞琼,刘娅,李孝辉. 基于改进的卫星共视法的远程时间比对研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(4):757-763.
CHEN R Q, LIU Y, LI X H. Study of remote time comparison based on improved satellite co-vision method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(4):757-763.
- [5] ZHANG J K, GAO J X, YU B G, et al. Research on remote GPS common-view precise time transfer based on different ionosphere disturbances [J]. Sensors, 2020, 20(8): 2290.
- [6] WINARNO A, TAKAHASHI S, HIRAI A, et al. Absolute measurement of gauge block without wringing using tandem low-coherence interferometry [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(12): 125001.
- [7] MATSUMOTO H, SASAKI K, HIRAI A. Remote calibration of length standards using 47-km-long optical fiber network[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(7L): L970-L972.
- [8] JEBRONI Z, CHADLI H, CHADLI E, et al. Remote calibration system of a smart electrical energy meter[J]. Journal of Electrical Systems, 2017, 13(4):806-823.
- [9] WANG Q, LI H B, WANG H, et al. A remote calibration device using edge intelligence[J]. Sensors, 2022, 22(1):322.
- [10] KONG X Y, ZHANG X P, LU N, et al. Online smart meter measurement error estimation based on EKF and LMRLS method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5):4269-4279.
- [11] DOUGLAS R, CHARBONEAU A, GERTSVOLF M. Remote time and frequency calibration with holdover traceability from a new treatment of non-white noise in rubidium clocks[J]. Metrologia, 2021, 58(5):055003.
- [12] 许静,李正文,李光,等. 物联网模式下变压器温控器远程测控系统设计与实现方法[J]. 计量学报,2019, 40(S1):140-144.
XU J, LI ZH W, LI G, et al. Design and implementation of remote measurement and control system for transformer thermostat in internet of things mode[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019,40(S1):140-144.
- [13] 李先友. 扭矩传感器远程校准系统研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2013.
LI X Y. Research on remote calibration system for torque sensor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [14] 郭景涛,金志刚. 基于互联网的通用远程校准平台[J]. 仪器仪表学报,2011,32(4):932-940.
GUO J T, JIN ZH G. Internet-based universal remote calibration platform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011,32(4):932-940.
- [15] 梁志国,孟晓风. 数据采集系统的远程校准问题讨论[J]. 测试技术学报,2009,23(6):526-529.
LIANG ZH G, MENG X F. Discussion of remote calibration of data acquisition systems[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2009, 23(6): 526-529.

- [16] 赵莎,卢达,孟静,等. 时间频率远程校准在电力系统中的应用[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(4):14-18.
ZHAO SH, LU D, MENG J, et al. Application of time-frequency remote calibration in power systems [J]. Metrology Science and Technology, 2021, 65(4):14-18.
- [17] 方立德,徐潇潇,马鑫月,等. 计量仪器的远程量值传递与溯源技术探讨[J]. 中国测试, 2021, 47(3):1-8.
FANG L D, XU X X, MA X Y, et al. Discussion on the remote value transfer and traceability technology of measuring instruments [J]. China Measurement & Test, 2021, 47(3):1-8.
- [18] FANG L D, LI Y M, DUAN S H, et al. Remote value transmission and traceability technology of measuring instruments based on wireless communication[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(2): 021501.
- [19] FANG L D, DUAN S H, LI Y M, et al. A new model for remote calibration of voltage source based on GPS common-view method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-9.
- [20] 方立德,段思涵,唐佐,等. 基于共视法的电压源远程校准方法及一致性评价研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8):308-318.
FANG L D, DUAN S H, TANG Z, et al. Study on remote calibration method and consistency evaluation of voltage source based on covariance method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 308-318.

作者简介

王思云(通信作者), 中级, 硕士, 主要研究方向为电能计量技术。

E-mail: 317892035@qq.com