

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210160

# 基于共视法的电压源远程校准方法及 一致性评价研究\*

方立德<sup>1,2,3</sup>, 段思涵<sup>1,2,3</sup>, 唐佐<sup>1,2,3</sup>, 李宜明<sup>1,2,3</sup>, 梁玉娇<sup>1,2,3</sup>

(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心 保定 071000;  
3. 河北省能源计量与安全检测技术重点实验室 保定 071000)

**摘要:**本文针对传统电压源校准方法存在的问题,提出了一种基于卫星共视法的电压源远程校准方法,该方法以非实物标准传递为基础,实现将标准器置于实验室而无需传递至现场进行远程校准,可解决引入附加误差的问题,通过设计基于共视法的电压源远程校准系统,建立校准模型,根据共视原理,实现标准端和被校端电压值远程比对,完成校准。本文对远程校准方法和传统校准方法在直流0~1 V校准点校准结果进行了对比,结果显示两种方法的校准结果差距在 $5.2 \times 10^{-5}$  V以内。本文给出了两种方法在直流1 V校准点的不确定度评定过程,并通过传递比较法对两种方法的校准结果进行了一致性评价,结果表明,远程法在1 V校准点的扩展不确定度为 $9.18244 \times 10^{-5}$  V ( $k=2$ ),且校准结果与传统法具有一致性。

**关键词:** 计量学;共视法;远程校准;一致性评价;不确定度

中图分类号: TB971 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.55 460.40

## Research on the remote calibration method of voltage source based on common-view method and consistency evaluation

Fang Lide<sup>1,2,3</sup>, Duan Sihan<sup>1,2,3</sup>, Tang Zuo<sup>1,2,3</sup>, Li Yiming<sup>1,2,3</sup>, Liang Yujiao<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. National & Local Joint Engineering Research Center of Metrology Instrument and System, Baoding 071000, China;  
3. Hebei Key Laboratory of Energy Measurement and Safety Testing Technology, Baoding 071000, China)

**Abstract:** In this article, a remote calibration method of voltage source based on the GPS common-view method is proposed to address the problems of traditional voltage source calibration methods. This method is based on the transfer of non-physical standards and can enable the standard to be placed in the laboratory without having to be transferred to the calibrated site for remote calibration. It can solve the problem of introducing additional errors. By designing the voltage source remote calibration system based on the common-view method, the calibration model is formulated. According to the common-view principle, remote comparison of voltage values between the standard side and the calibrated side can be achieved, and remote calibration of the voltage source can be completed. The calibration results of the remote calibration method and the traditional calibration method at the DC voltage 0~1 V calibration point are compared. The results show that the difference between the voltage differences measured by the two methods is within  $5.2 \times 10^{-5}$  V. The uncertainty evaluation process of the two methods at the DC voltage 1 V calibration point is given, and the consistency evaluation of the calibration results of the two methods is carried out by the transfer comparison method. The uncertainty evaluation results show that the extended uncertainty of the remote calibration method at the 1 V calibration point is  $9.18244 \times 10^{-5}$  V ( $k=2$ ). The calibration results of the remote method are consistent with the traditional results of the remote method.

**Keywords:** metrology; common-view method; remote calibration; consistency evaluation; uncertainty

## 0 引言

计量是实现单位统一,保证量值准确可靠的活动。计量仪器的量值传递与溯源是通过计量检定及校准实现的。传统实验室校准或现场校准方式,需将被校仪器或标准器以物流方式进行传递,无法得到仪器在应用现场中的附加误差,且成本高,效率低。随着计算机网络技术和物联网技术的迅速发展,各类仪器设备趋于智能化,远程校准技术成为计量学未来发展的热点方向。远程校准是为实现简化校准可溯源性所需的步骤和流程,以减少校准的时间和成本。利用互联网和物联网技术建立起计量仪器远程量值传递与溯源系统,可解决附加误差问题,更好地保证计量的准确性,为智慧计量的发展以及仪器设备的智能应用奠定基础。

国内外科研人员对多种校准对象,基于多种校准方法,进行远程校准技术研究。Kobata等<sup>[1]</sup>开发了一种传播压力标准的远程校准技术,利用传输标准和互联网进行现场校准。Matsumoto等<sup>[2]</sup>利用光学干涉原理实现了对量块长度的远程校准。Albu等<sup>[3]</sup>讨论了使用移动技术、多代理技术进行远程校准的相关理论。Raouf等<sup>[4]</sup>研究了一种全自动电阻远程校准系统。Jebroni等<sup>[5]</sup>研究了一种智能电能表远程校准系统。Wang等<sup>[6]</sup>提出了一种使用边缘智能的远程校准装置和一种基于人工智能的抄表方法,实现了电表的远程校准。Kong等<sup>[7]</sup>提出了一种在线智能电表测量误差估计方法,用于大量用户端智能电表的远程校准。美、英、法等国家计量院运用卫星共视技术开展了时间频率校准工作<sup>[8-10]</sup>。

段伟群<sup>[11]</sup>最早介绍了远程校准的概念,对在我国开展远程校准的必要性和可行性提出了看法。已实现的远程校准方案,按传递标准的形式,可分为实物标准型和非实物标准型两种。以实物标准传递为基础的远程校准,涵盖电学、光学、力学等领域,如郭景涛等<sup>[12]</sup>提出了一种基于互联网的通用远程校准平台。吴静等<sup>[13]</sup>探讨了利用互联网校准数据采集板、电参量、多功能校准器的方法。袁鑫等<sup>[14]</sup>提出了一种激光投射式位移计在线比较校准方法。荆根强等<sup>[15]</sup>提出了一种基于被动激励的桥梁结构应变监测系统的在线校准方法。以非实物标准传递为基础的远程校准,是通过远程量值传递或是共同观测同一基准信号实现的,标准器置于实验室无需实物传递,校准周期较短,更加便捷高效。高小珣等总结了时间频率远距离高精度量值传递的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<sup>[16-17]</sup>。左建生等<sup>[18]</sup>基于GPS共视法设计了一套时间频率远程校准系统,对大型或长期不间断工作频标进行了远程校准。陈瑞琼等<sup>[19]</sup>提出了一种改进的卫星共视法。以非实物标

准传递为基础的远程校准仅局限于时间频率校准领域,其他参量的远程校准依然建立在实物标准传递的基础上。

计量领域远程量值传递的实现主要通过传递标准器或将标准器置于现场的方式,这种方式存在标准器在现场附加误差不可知以及标准器在传递过程中量值可能改变的问题。计量标准器置于实验室的方式是理想的远程量值传递与溯源方式<sup>[20]</sup>。但目前该方式只限于时间频率的远程校准,参考该校准方式,如何将其他参量转化为时间频率参数进行远程校准成为重要问题。

直流电压是电磁计量学的基本参数,为电磁计量及诸多计量领域提供溯源依据。直流电压源常作为保存和复现直流电压量值的标准设备。传统校准方法采用实验室校准方式,得不到电压源在应用现场的附加误差,因此有必要引入远程校准方式,也可为电参量输出的计量仪器的远程校准提供新思路。

本研究团队在前期研究基础上搭建一种基于卫星共视法的电压源远程校准系统<sup>[21]</sup>,通过研究电压、频率和时间偏差之间的关系,建立远程校准模型。通过高精度电压频率转换以及时间偏差等参数的测量,根据卫星共视原理,实现标准端和被校端的电压远程比对,得到两端电压差,完成校准。通过实验,对远程校准方法和传统校准方法的校准结果进行对比,并通过不确定度分析,进行两种方法校准结果的一致性评价研究。

## 1 远程校准方法研究

### 1.1 理论依据

根据国家计量技术规范JJF1638-2017《多功能标准源校准规范》<sup>[22]</sup>,标准源法是现行直流电压示值误差的校准方式之一。被校准与标准多功能标准源输出相同示值的直流电压,先用过渡数字多用表测量标准多功能标准源的输出电压,其测量值为 $U_i$ 。然后测量被校准多功能标准源的输出电压,其测量值为 $U_o$ 。标准多功能标准源输出电压实际值为 $U_{ref}$ ,被校准多功能标准源输出示值为 $U_x$ ,则被校准多功能标准源示值误差 $\Delta U$ 如式(1)。

$$\Delta U = U_x - U_{ref} - U_o + U_i \quad (1)$$

要探索将电压量转换成频率参数,构建以非实物标准传递的直流电压源远程校准系统,需要参考时间频率远程校准方法,GPS共视法时间频率传递是目前时间频率远距离量值传递的主要方式之一。

基于GPS共视法的时间频率远程校准基本原理<sup>[17]</sup>是在一颗GPS卫星的视角内,位于不同两地的原子钟可以利用在同一时间接收到的卫星的时间信号进行时间频率远程比对。校准和被校实验室两地的卫星共视接收机在同一共视时间表下,在同一时刻接收同一颗GPS卫星

信号。接收机内置的时间间隔计数器测量 GPS 秒脉冲与本地原子钟秒脉冲时差。将被校实验室端的数据通过互联网传到校准实验室端,然后将两端数据作差可得两台原子钟之间的时间偏差。设校准实验室端和被校实验室端的钟时间分别为  $t_A$  和  $t_B$ ,GPS 时间为  $t_{GPS}$ ,校准实验室端和被校实验室端原子钟秒脉冲与 GPS 秒脉冲的时间偏差分别为  $\Delta t_{AGPS}$  和  $\Delta t_{BGPS}$ ,则有:

$$\Delta t_{AGPS} = t_A - t_{GPS} \quad (2)$$

$$\Delta t_{BGPS} = t_B - t_{GPS} \quad (3)$$

$$\Delta t_{AGPS} - \Delta t_{BGPS} = t_A - t_B = \Delta t_{AB} \quad (4)$$

经多次测量可得多组两端时间偏差值  $\Delta t_{AB}$ ,由此可算出两台原子钟在一段时间内平均相对频率偏差  $\Delta f/f$ 。

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_A - f_B}{f} = \frac{\Delta t_{ABi+7} - \Delta t_{ABi}}{\tau} \quad (5)$$

式中: $f_A$  和  $f_B$  分别为校准实验室端和被校实验室端时钟的频率, $\Delta t_{ABi}$  为  $i$  时刻的时间偏差, $\tau$  为平均时间间隔。

## 1.2 基于卫星共视法的电压源远程校准方法研究

基于多功能标准源校准规范中直流电压示值误差测量的标准源法和时间频率远程校准的 GPS 共视法原理和方法,进行本电压源远程校准系统的设计。

基于卫星共视法的电压源远程校准系统结构如图 1 所示。本校准系统可由一个标准器所在的远程校准终端和分析中心,同时对多个校准现场的电压源进行校准工作,校准效率高且易于统一管理。

以 GPS 卫星的时钟信息作为非实物标准传递的媒介,通过标准端与被校端的卫星同步时钟源同步 GPS 卫星上的时钟信息,输出两路标准一致的秒脉冲信号,

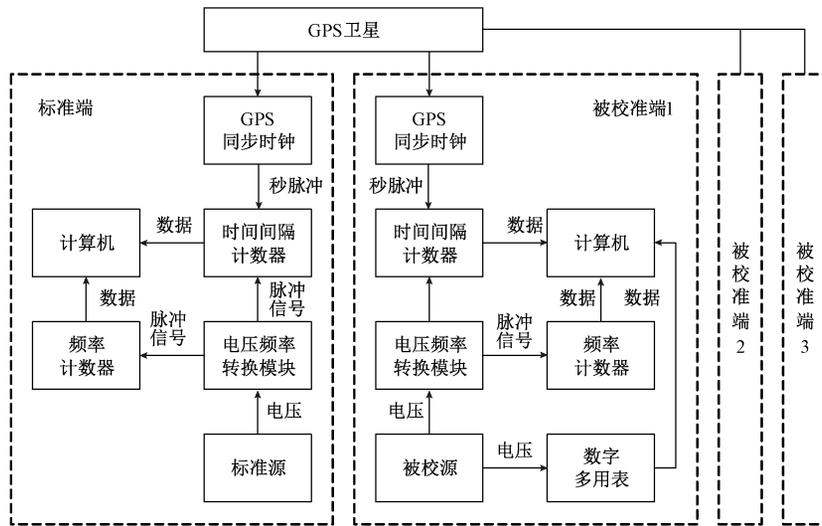


图1 基于卫星共视法的电压源远程校准系统

Fig.1 Remote calibration system of voltage source based on the GPS common-view method

作为两端共同观测的基准信号,通过高精度电压频率转换模块(voltage frequency converter, VFC),输出连续方波脉冲信号,转换脉冲频率值与所输入的电压值成正比关系,利用该模块将标准和被校电压源输出的电压信号均转换成对应频率的脉冲信号,由时间间隔计数器测量将此路脉冲与卫星同步时钟源输出的秒脉冲的时间偏差。根据卫星共视原理,以及频率与时间偏差的关系模型,可实现两端转换脉冲频率远程比对,结合电压频率关系,实现两端的电压远程比对,得到两端电压差,完成校准,即:

$$\Delta U = U_A - U_B \quad (6)$$

$$\Delta U = \frac{\Delta f}{\lambda} = \frac{f_A - f_B}{\lambda} = \frac{F(\Delta t_A) - F(\Delta t_B)}{\lambda} \quad (7)$$

式中: $\Delta U$  为两端的电压差, $U_A$  和  $U_B$  分别为标准端和被校准源端的电压,单位为 V; $\Delta f$  为两端转换脉冲频率差, $f_A$

和  $f_B$  为分别为标准端和被校准源端的转换脉冲频率,单位为 Hz; $\lambda$  为电压频率转换模块的 V-F 转换系数,即输出频率与输入电压的比值,单位为 Hz/V; $\Delta t_A$  为标准端的时间偏差, $\Delta t_B$  为标准端的时间偏差,单位为 s。

如图 2 所示,某一端的时间偏差来自于 VFC 模块输出的携带频率信息的转换脉冲与卫星同步秒脉冲的上升沿在时域上的差值,一秒得到一个时间偏差值,时间偏差的大小可以反映转换脉冲信号的频率大小,反之,脉冲信号的频率大小决定了时间偏差的大小。当开始时间偏差计数时,秒脉冲与转换脉冲的第一个上升沿在时域上的偏差取值是在转换脉冲周期范围内随机分布的,当两路脉冲的第一个上升沿在时域上重合时,这一秒记录的时间偏差为转换脉冲的周期  $T$ ,即脉冲频率  $f$  的倒数。所以,在一段测量时间内,记录的时间偏差的最大值,是无

限趋近于转换脉冲的周期  $T$ , 即:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \Delta t_{\max} = T = \frac{1}{f} \quad (8)$$

式中:  $\Delta t_{\max}$  指一段测量时间内, 记录的时间偏差的最大值,  $t$  指测量时间, 测量时间越长, 该段时间内的时间偏差最大值越接近于  $T$ , 即  $1/f$ 。

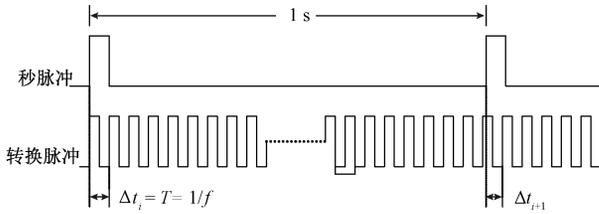


图 2 时间偏差测量原理图

Fig. 2 The principle of time difference measurement

所以, 理想状况下, 连续方波脉冲频率与时间偏差最大值呈反比关系。

$$f = \frac{1}{\Delta t_{\max}} \quad (9)$$

若保证标准端和被校端的 VFC 模块的 V-F 转换系数一致, 则两端电压差  $\Delta U$  的测量模型为:

$$\Delta U = \frac{\Delta f}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \quad (10)$$

式中:  $t_{A\max}$  和  $t_{B\max}$  分别为标准端和被校端的 VFC 模块输出的连续方波脉冲与 GPS 同步秒脉冲的时间偏差在一个测量周期内的最大值,  $\lambda$  为 V-F 转换系数。

实际上, 标准端和被校端的 VFC 模块由于处在不同的环境中, 受环境影响, V-F 转换系数可能会存在微小差异, 为消除由此带来的影响, 采用在 VFC 模块输出端接入频率计数器, 测量 VFC 模块输出脉冲频率, 结合输入电压值, 可实时监测两端 V-F 转换系数  $\lambda_A$  和  $\lambda_B$ , 同时在校准模型中引入  $\lambda_A$  和  $\lambda_B$ , 得到最终的校准模型:

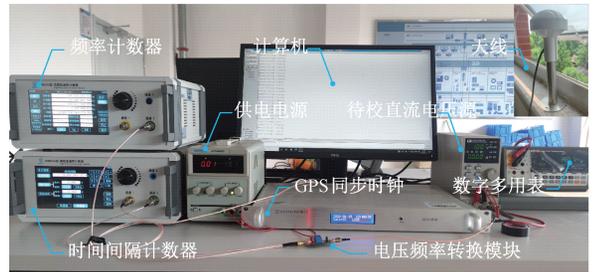
$$\Delta U = U_A - U_B = \frac{f_A}{\lambda_A} - \frac{f_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\lambda_A \cdot t_{A\max}} - \frac{1}{\lambda_B \cdot t_{B\max}} \quad (11)$$

远程校准实验装置如图 3 所示。标准源和被校源的直流电压输出端分别与该端的 VFC 模块输入端连接, 模块输出端与时间间隔计数器的通道 2 连接, 同时 GPS 同步时钟源的秒脉冲信号输出端与时间间隔计数器的通道 1 连接, 以测量两路脉冲信号间的时间偏差。跟据 BIPM 制定的共视法数据标准 CGGTTS 标准格式文件及《GPS 接收机软件标准化指南》中的相关要求<sup>[23]</sup>, GPS 接收机每次进行数据接收的间隔为 16 min, 即 960 s。因此, 控制单个校准点的测量时长为 960 s, 即时间偏差数据采集个数为 960 个。时间间隔计数器通过网络接口连

接到计算机端, 通过上位机实时采集时间偏差数据并存储。此外, 为获取两端的 VFC 模块的实时转换系数, 在两端模块输出端分别接入频率计数器, 此外, 为获取被校源的更准确的输出电压值以测算 V-F 转换系数, 在被校源输出端接入数字多用表, 实时采集模块的输出频率值和输入电压值数据并记录到上位机端。最后, 对两端计算机存储的数据进行后续处理, 根据校准模型, 得出校准结果。



(a) 标准端  
(a) Standard side



(b) 被校准端  
(b) The calibrated side

图 3 远程校准实验装置

Fig. 3 The device for remote calibration experiments

通过实验, 对本文所述的远程校准方法和传统标准源法对同一台直流电压源进行校准, 校准点电压值分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 V 时的两种方法的校准结果如图 4 所示。

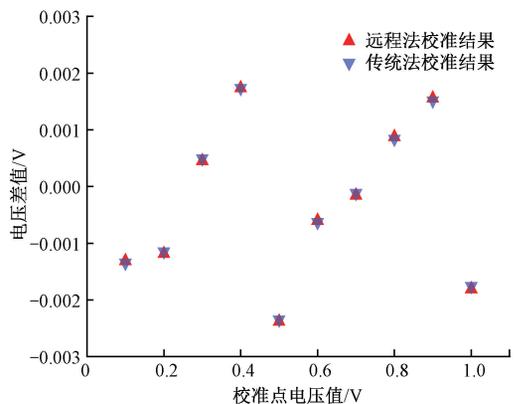


图 4 远程法和传统法的校准结果对比

Fig. 4 The comparison between the calibration results of the remote method and the traditional method

两种方法对直流电压源 0~1 V 校准点的校准结果显示,本文所述的远程校准方法测得的两端电压差与传统标准源法测得的电压偏差的差距在  $5.2 \times 10^{-5}$  V 以内。

## 2 一致性评价研究

根据 JJF 1033-2016《计量标准考核规范》<sup>[24]</sup>,检定或校准结果的验证一般应通过更高一级的计量标准采用传递比较法进行验证。用被考核的计量标准测量一稳定的被测对象,然后将该被测对象用另一更高级的计量标准进行测量。若用被考核计量标准和高一级计量标准进行测量时的扩展不确定度 ( $U_{95}$  或  $k=2$  时的  $U$ ,下同) 分别为  $U_{\text{lab}}$  和  $U_{\text{ref}}$ 。若它们的测量结果分别为  $y_{\text{lab}}$  和  $y_{\text{ref}}$ ,在两者的包含因子相等的前提下若满足:

$$|y_{\text{lab}} - y_{\text{ref}}| \leq \sqrt{U_{\text{lab}}^2 + U_{\text{ref}}^2} \quad (12)$$

则说明检定或校准结果是合理的。本文将通过此方法对基于卫星共视法的电压源远程校准方法和传统标准源法对同一台电压源在直流电压 1 V 校准点的校准结果进行一致性评价,需先对两种校准方法进行不确定度分析。

### 2.1 远程校准方法不确定度分析

根据国家计量技术规范 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》<sup>[25]</sup>对远程校准方法在电压源直流电压 1 V 校准点进行不确定度分析,该校准点下的校准结果如表 1 所示。

表 1 直流电压 1 V 校准点校准结果

Table 1 Results at the calibration point with DC voltage of 1 V

| 标准端时间<br>偏差最大值<br>$t_{\text{Amax}}/s$ | 被校端时间<br>偏差最大值<br>$t_{\text{Bmax}}/s$ | 标准端 V-F<br>转换系数<br>$\lambda_A/(Hz/V)$ | 被校端 V-F<br>转换系数<br>$\lambda_B/(Hz/V)$ | 两端电<br>压差<br>$\Delta U/V$ |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| $9.980\ 07 \times 10^{-3}$            | $9.972\ 03 \times 10^{-3}$            | 100.199 24                            | 100.099 06                            | -0.001 808                |

该结果是在环境温度为  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 45%~75% 的实验环境条件下测得的。

#### 1) 数学模型

$$\Delta U = \frac{1}{\lambda_A \cdot t_{\text{Amax}}} - \frac{1}{\lambda_B \cdot t_{\text{Bmax}}} \quad (13)$$

按不确定度传播律,  $\Delta U$  的合成标准不确定度为:

$$u_c(\Delta U)^2 = c_1^2 u(\lambda_A)^2 + c_2^2 u(t_{\text{Amax}})^2 + c_3^2 u(\lambda_B)^2 + c_4^2 u(t_{\text{Bmax}})^2 \quad (14)$$

其中,各分量的灵敏系数为:

$$c_1 = \frac{\partial \Delta U}{\partial \lambda_A} = \frac{1}{\lambda_A^2 \cdot t_{\text{Amax}}} = 0.009\ 98\ \text{V}^2 \cdot \text{s} \quad (15)$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta U}{\partial t_{\text{Amax}}} = \frac{1}{\lambda_A \cdot t_{\text{Amax}}^2} = 100.485\ 88\ \text{V/s} \quad (16)$$

$$c_3 = \frac{\partial \Delta U}{\partial \lambda_B} = -\frac{1}{\lambda_B^2 \cdot t_{\text{Bmax}}} = -0.010\ 01\ \text{V}^2 \cdot \text{s} \quad (17)$$

$$c_4 = \frac{\partial \Delta U}{\partial t_{\text{Bmax}}} = -\frac{1}{\lambda_B \cdot t_{\text{Bmax}}^2} = -100.785\ 31\ \text{V/s} \quad (18)$$

#### 2) 标准不确定度分量评定

(1) 由 VFC 模块(标准端)重复性引入的不确定度分量  $u_1(\lambda_A)$  (A 类评定)

设定标准源输出直流电压为 1V,用频率计数器对 VFC 模块输出的脉冲信号每个校准周期(960 s)内的频率进行测量,并取得均值,连续测量 10 次,结合输入电压得出 V-F 转换系数,结果如表 2 所示。

表 2 VFC 模块(标准端)重复性测量结果

Table 2 Repeatability of VFC (standard)

| 序号 | 标准源电压<br>示值 $U_A/V$ | 频率计数器示值均值<br>$f_A/Hz$ | V-F 转换系数<br>$\lambda_A/(Hz \cdot V^{-1})$ |
|----|---------------------|-----------------------|---|
| 1  | 1.000 000           | 100.199 427           | 100.199 427                               |
| 2  | 1.000 000           | 100.199 752           | 100.199 752                               |
| 3  | 1.000 000           | 100.199 472           | 100.199 472                               |
| 4  | 1.000 000           | 100.199 412           | 100.199 412                               |
| 5  | 1.000 000           | 100.199 440           | 100.199 440                               |
| 6  | 1.000 000           | 100.199 252           | 100.199 252                               |
| 7  | 1.000 000           | 100.199 634           | 100.199 634                               |
| 8  | 1.000 000           | 100.199 642           | 100.199 642                               |
| 9  | 1.000 000           | 100.199 321           | 100.199 321                               |
| 10 | 1.000 000           | 100.199 922           | 100.199 922                               |

根据贝塞尔公式,计算实验标准偏差  $s(\lambda_A)$ :

$$s(\lambda_A) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\lambda_{Ai} - \bar{\lambda}_A)^2}{10 - 1}} = 2.063\ 32 \times 10^{-4}\ \text{Hz/V} \quad (19)$$

实际测量情况是以测量一次作为测量结果,则不确定度分量为:

$$u_1(\lambda_A) = s(\lambda_A) = 3.801\ 46 \times 10^{-5}\ \text{Hz/V} \quad (20)$$

(2) 由电压频率转换模块(标准端)的非线性误差引入的不确定度分量  $u_2(\lambda_A)$  (B 类评定)

本系统的电压频率转换模块是以 LM331 芯片为核心设计的,由芯片数据表可知,其在输出频率为 100 Hz 时的非线性误差小于 0.001%,即由此造成的输出频率最大误差为  $\pm 0.001$  Hz,对于输入电压 1 V,转换系数的最大误差为  $\pm 1 \times 10^{-3}$  Hz/V,半宽度为  $1 \times 10^{-3}$  Hz/V,概率分布为均匀分布,包含因子主要取决于概率分布,查表<sup>[25]</sup>得

包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 则不确定度分量为:

$$u_2(\lambda_A) = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ Hz/V}}{\sqrt{3}} = 5.773\ 50 \times 10^{-4} \text{ Hz/V} \quad (21)$$

(3) 由频率计数器测量准确度 (标准端) 引起的不确定度分量  $u_3(\lambda_A)$  (B 类评定)

本系统的频率计数器选用 SYN5636 型高精度通用计数器, 其内部时基恒温晶振频率准确度  $\leq 1 \times 10^{-7}$ , 由此带来的最大误差为  $\pm 1 \times 10^{-7}$  Hz/V, 半宽度  $1 \times 10^{-7}$  Hz/V, 概率分布为均匀分布, 包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 不确定度为:

$$u_3(\lambda_A) = \frac{1 \times 10^{-7} \text{ Hz/V}}{\sqrt{3}} = 5.773\ 50 \times 10^{-8} \text{ Hz/V} \quad (22)$$

(4) 由标准源的不确定度引起的不确定度分量  $u_4(\lambda_A)$  (B 类评定)

Fluke5522A 型多产品校准器作为标准源提供直流电压, 根据用户手册技术指标, 在量程为 0~1 V 内, 绝对不确定度为  $11 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 2 \mu\text{V}$ , 则示值为 1 V 时, 绝对不确定度为  $1.3 \times 10^{-5}$  V, 对于频率为 100 Hz, 转换系数的绝对不确定度为  $\pm 1.3 \times 10^{-3}$  Hz/V, 半宽度  $1 \times 10^{-3}$  Hz/V, 均匀分布,  $k = \sqrt{3}$ , 则不确定度分量为:

$$u_4(\lambda_A) = \frac{1.3 \times 10^{-3} \text{ Hz/V}}{\sqrt{3}} = 7.505\ 55 \times 10^{-4} \text{ Hz/V} \quad (23)$$

(5) 由时间偏差最大值 (标准端) 测量重复性引入的不确定度分量  $u_1(t_{Amax})$  (A 类评定)

设定标准源输出直流电压 1 V, 用时间间隔计数器测量 VFC 模块输出的连续方波脉冲与 GPS 同步秒脉冲的时间偏差, 以 960 s 为一个测量周期, 测量 10 次, 取每个周期内的时间偏差最大值, 结果如表 3 所示。

表 3 时间偏差最大值 (标准端) 重复性测量结果

Table 3 Repeatability of maximum time difference (standard)

| 序号 | 时间偏差最大 $t_{Amax}/s$        | 序号 | 时间偏差最大 $t_{Amax}/s$        |
|----|----------------------------|----|----------------------------|
| 1  | $9.980\ 07 \times 10^{-3}$ | 6  | $9.979\ 68 \times 10^{-3}$ |
| 2  | $9.979\ 87 \times 10^{-3}$ | 7  | $9.979\ 28 \times 10^{-3}$ |
| 3  | $9.979\ 38 \times 10^{-3}$ | 8  | $9.979\ 55 \times 10^{-3}$ |
| 4  | $9.979\ 52 \times 10^{-3}$ | 9  | $9.979\ 70 \times 10^{-3}$ |
| 5  | $9.979\ 18 \times 10^{-3}$ | 10 | $9.979\ 84 \times 10^{-3}$ |

根据贝塞尔公式, 计算实验标准偏差  $s(t_{Amax})$ 。

$$s(t_{Amax}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (t_{Amax\ i} - \overline{t_{Amax}})^2}{10 - 1}} = 2.525\ 05 \times 10^{-7} \text{ s} \quad (24)$$

实际以测量一次作为测量结果, 不确定度分量为:

$$u_1(t_{Amax}) = s(t_{Amax}) = 2.525\ 05 \times 10^{-7} \text{ s} \quad (25)$$

(6) 由 GPS 同步时钟源精度影响 (标准端) 引起的不确定度分量  $u_2(t_{Amax})$  (B 类评定)

本系统选用 SYN4102 型 GPS 同步时钟源, 其输出 1 pps 脉冲信号的同步误差  $\leq 30$  ns, 均匀分布,  $k = \sqrt{3}$ , 则不确定度分量为:

$$u_2(t_{Amax}) = \frac{30 \times 10^{-9} \text{ s}}{\sqrt{3}} = 1.732\ 05 \times 10^{-8} \text{ s} \quad (26)$$

(7) 由时间间隔计数器测量准确度 (标准端) 引起的不确定度分量  $u_3(t_{Amax})$  (B 类评定)

本系统的时间间隔计数器选用 SYN5636 型高精度通用计数器, 其时间间隔分辨率为 100 ps, 均匀分布,  $k = \sqrt{3}$ , 则不确定度分量为:

$$u_3(t_{Amax}) = \frac{100 \times 10^{-12} \text{ s}}{\sqrt{3}} = 5.773\ 50 \times 10^{-11} \text{ s} \quad (27)$$

(8) 由 VFC 模块 (被校端) 重复性引入的不确定度分量  $u_1(\lambda_B)$  (A 类评定)

设定被校源输出直流电压为 1 V, 用频率计数器对 VFC 模块输出的脉冲信号每个校准周期 (960 s) 内的频率进行测量, 并取得均值, 连续测量 10 次, 结合输入电压得出 V-F 转换系数, 结果如表 4 所示。

表 4 电压频率转换模块 (被校端) 重复性测量结果

Table 4 Repeatability of VFC (calibrated)

| 序号 | 数字多用表示值 $U_B/V$ | 频率计数器示值 $f_B/V$ | V-F 转换系数 $\lambda_B / (\text{Hz} \cdot \text{V}^{-1})$ |
|----|-----------------|-----------------|--|
| 1  | 1.001 738       | 100.273 234     | 100.099 261  |
| 2  | 1.001 746       | 100.274 110     | 100.099 337  |
| 3  | 1.001 738       | 100.272 985     | 100.099 013  |
| 4  | 1.001 744       | 100.273 658     | 100.099 085  |
| 5  | 1.001 734       | 100.272 765     | 100.099 193  |
| 6  | 1.001 748       | 100.274 830     | 100.099 855  |
| 7  | 1.001 744       | 100.273 439     | 100.098 866  |
| 8  | 1.001 746       | 100.273 984     | 100.099 211  |
| 9  | 1.001 742       | 100.273 434     | 100.099 062  |
| 10 | 1.001 740       | 100.273 325     | 100.099 153  |

由贝塞尔公式计算标准偏差, 得出不确定度分量。

$$u_1(\lambda_B) = s(\lambda_B) = 2.652\ 00 \times 10^{-4} \text{ Hz/V} \quad (28)$$

(9) 由 VFC 模块 (被校端) 的非线性误差引入的不确定度分量  $u_2(\lambda_B)$  (B 类评定)

$$u_2(\lambda_B) = u_2(\lambda_A) = 5.773\ 50 \times 10^{-4} \text{ Hz/V} \quad (29)$$

(10) 由频率计数器测量准确度 (被校端) 引起的不

确定度分量  $u_3(\lambda_B)$  (B类评定)

$$u_3(\lambda_B) = u_3(\lambda_A) = 5.773\ 50 \times 10^{-8} \text{ Hz/V} \quad (30)$$

(11)由数字多用表测量准确度引入的不确定度

$u_4(\lambda_B)$  (B类评定)

选用 Fluke8846A 型数字多用表,量程为 0~1 V 内,准确度为 0.001 8%×读数+0.000 6%×量程,示值为 1 V 时,最大误差为±2.4×10<sup>-5</sup> V,对于频率为 100 Hz,转换系数的绝对不确定度为±2.4×10<sup>-3</sup> Hz/V,半宽度 2.4×10<sup>-3</sup> Hz/V,均匀分布,  $k = \sqrt{3}$ , 则不确定度分量为:

$$u_4(\lambda_B) = \frac{2.4 \times 10^{-3} \text{ Hz/V}}{\sqrt{3}} = 1.385\ 64 \times 10^{-3} \text{ Hz/V} \quad (31)$$

(12)由时间偏差最大值(被校端)测量重复性引入的不确定度分量  $u_1(t_{Bmax})$  (A类评定)

设定被校源输出直流电压 1 V,以 960 s 为周期,测量时间偏差最大值,测量 10 次,结果如表 5 所示。

由贝塞尔公式计算标准偏差,得出不确定度分量。

$$u_1(t_{Bmax}) = s(t_{Bmax}) = 3.337\ 94 \times 10^{-7} \text{ s} \quad (32)$$

(13)由 GPS 同步时钟源精度影响(被校端)引起的不确定度分量  $u_2(t_{Bmax})$  (B类评定)

$$u_2(t_{Bmax}) = u_2(t_{Amax}) = 1.732\ 05 \times 10^{-8} \text{ s} \quad (33)$$

表 5 时间偏差最大值(被校端)重复性测量结果

Table 5 Repeatability of maximum time difference (calibrated)

| 序号 | 时间偏差最大 $t_{Bmax}/s$       | 序号 | 时间偏差最大 $t_{Bmax}/s$       |
|----|---------------------------|----|---------------------------|
| 1  | 9.990 15×10 <sup>-3</sup> | 6  | 9.989 63×10 <sup>-3</sup> |
| 2  | 9.989 79×10 <sup>-3</sup> | 7  | 9.990 08×10 <sup>-3</sup> |
| 3  | 9.989 50×10 <sup>-3</sup> | 8  | 9.990 49×10 <sup>-3</sup> |
| 4  | 9.989 73×10 <sup>-3</sup> | 9  | 9.989 51×10 <sup>-3</sup> |
| 5  | 9.990 04×10 <sup>-3</sup> | 10 | 9.990 25×10 <sup>-3</sup> |

(14)由时间间隔计数器测量准确度(被校端)引起的不确定度分量  $u_3(t_{Bmax})$  (B类评定)

$$u_3(t_{Bmax}) = u_3(t_{Amax}) = 5.773\ 50 \times 10^{-11} \text{ s} \quad (34)$$

3)合成标准不确定度

基于卫星共视法的电压源远程校准方法在直流电压 1 V 校准点的不确定度分量汇总表如表 6 所示。计算系统合成标准不确定度为<sup>[25-26]</sup>:

$$u_c(\Delta U) = \sqrt{\sum_i (c_i u_i)^2} = 4.591\ 22 \times 10^{-5} \text{ V} \quad (35)$$

表 6 基于卫星共视法的电压源远程校准方法在直流电压 1 V 校准点的不确定度分量汇总表

Table 6 The summary of uncertainty components of the remote calibration method of voltage source based on GPS common-view method at DC voltage 1 V calibration point

| 标准不确定度分量         | 不确定度来源            | 类型 | 数值                             | 概率分布 | 包含因子 $k$   | 标准不确定度 $u(x_i)$                | 灵敏系数 $c_i$                  | 不确定度贡献 $u_i(y)$               |
|------------------|-------------------|----|--------------------------------|------|------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| $u_1(\lambda_A)$ | VFC 模块重复性(标准端)    | A  | 2.063 32×10 <sup>-4</sup> Hz/V | 正态   | -          | 2.063 32×10 <sup>-4</sup> Hz/V | 0.009 98 V <sup>2</sup> ·s  | 2.059 23×10 <sup>-6</sup> V   |
| $u_2(\lambda_A)$ | VFC 模块非线性误差(标准端)  | B  | 1×10 <sup>-3</sup> Hz/V        | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 5.773 50×10 <sup>-4</sup> Hz/V | 0.009 98 V <sup>2</sup> ·s  | 5.770 26×10 <sup>-6</sup> V   |
| $u_3(\lambda_A)$ | 频率计数器测量准确度(标准端)   | B  | 1×10 <sup>-7</sup> Hz/V        | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 5.773 50×10 <sup>-8</sup> Hz/V | 0.009 98 V <sup>2</sup> ·s  | 5.770 26×10 <sup>-10</sup> V  |
| $u_4(\lambda_A)$ | 标准源的不确定度          | B  | 1.3×10 <sup>-3</sup> Hz/V      | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 7.505 55×10 <sup>-4</sup> Hz/V | 0.009 98 V <sup>2</sup> ·s  | 7.501 33×10 <sup>-6</sup> V   |
| $u_1(t_{Amax})$  | 时间偏差最大值重复性(标准端)   | A  | 2.525 05×10 <sup>-7</sup> s    | 正态   | -          | 2.525 05×10 <sup>-7</sup> s    | 100.485 88 V/s              | 2.537 32×10 <sup>-5</sup> V   |
| $u_2(t_{Amax})$  | GPS 同步时钟精度影响(标准端) | B  | 30 ns                          | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 1.732 05×10 <sup>-8</sup> s    | 100.485 88 V/s              | 1.740 47×10 <sup>-6</sup> V   |
| $u_3(t_{Amax})$  | 时间间隔计数器准确度(标准端)   | B  | 100 ps                         | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 5.773 50×10 <sup>-11</sup> s   | 100.485 88 V/s              | 5.801 55×10 <sup>-9</sup> V   |
| $u_1(\lambda_B)$ | VFC 模块重复性(被校端)    | A  | 2.652 00×10 <sup>-4</sup> Hz/V | 正态   | -          | 2.652 00×10 <sup>-4</sup> Hz/V | -0.010 01 V <sup>2</sup> ·s | -2.654 18×10 <sup>-6</sup> V  |
| $u_2(\lambda_B)$ | VFC 模块非线性误差(被校端)  | B  | 1×10 <sup>-3</sup> Hz/V        | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 5.773 50×10 <sup>-4</sup> Hz/V | -0.010 01 V <sup>2</sup> ·s | -5.787 52×10 <sup>-6</sup> V  |
| $u_3(\lambda_B)$ | 频率计数器测量准确度(被校端)   | B  | 1×10 <sup>-7</sup> Hz/V        | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 5.773 50×10 <sup>-8</sup> Hz/V | -0.010 01 V <sup>2</sup> ·s | -5.787 52×10 <sup>-10</sup> V |
| $u_4(\lambda_B)$ | 数字多用表准确度          | B  | 2.4×10 <sup>-3</sup> Hz/V      | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 1.385 64×10 <sup>-3</sup> Hz/V | -0.010 01 V <sup>2</sup> ·s | -1.389 01×10 <sup>-5</sup> V  |
| $u_1(t_{Bmax})$  | 时间偏差最大值重复性(被校端)   | A  | 3.337 94×10 <sup>-7</sup> s    | 正态   | -          | 3.337 94×10 <sup>-7</sup> s    | -100.785 31 V/s             | -3.364 16×10 <sup>-5</sup> V  |
| $u_2(t_{Bmax})$  | GPS 同步时钟精度影响(被校端) | B  | 30 ns                          | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 1.732 05×10 <sup>-8</sup> s    | -100.785 31 V/s             | -1.746 56×10 <sup>-6</sup> V  |
| $u_3(t_{Bmax})$  | 时间间隔计数器准确度(被校端)   | B  | 100 ps                         | 均匀   | $\sqrt{3}$ | 5.773 50×10 <sup>-11</sup> s   | -100.785 31 V/s             | -5.818 84×10 <sup>-9</sup> V  |
| 合成标准不确定度 $u_c$   |                   |    |                                |      |            |                                |                             | 4.591 22×10 <sup>-5</sup> V   |

## 4) 扩展不确定度

扩展不确定度是被测量可能值包含区间的半宽度,由合成标准不确定度  $U$  乘包含因子  $k$  得到<sup>[25]</sup>,取  $k=2$ ,校准结果的置信水平是 0.95,则基于卫星共视法的电压源远程校准方法在 1 V 校准点的扩展不确定度为:

$$U = k \cdot u_c(\Delta U) = 9.182\ 44 \times 10^{-5} \text{ V} \quad (36)$$

## 2.2 传统校准方法不确定度分析

对标准源法<sup>[22]</sup>在电压源直流电压 1 V 校准点进行不确定度分析<sup>[27]</sup>,该校准点下的校准结果如表 7 所示。

表 7 直流电压 1 V 校准点校准结果

Table 7 Results at the calibration point with DC voltage of 1 V

| 被校电压源<br>输出示值<br>$U_x/\text{V}$ | 标准源输出<br>电压实际值<br>$U_{\text{ref}}/\text{V}$ | 数字多用表<br>测被校源值<br>$U_o/\text{V}$ | 数字多用表<br>测标准源值<br>$U_i/\text{V}$ | 被校电压源<br>的示值误差<br>$\Delta U/\text{V}$ |
|---------------------------------|---|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| 1.000 000                       | 1.000 000                                   | 0.999 989                        | 1.001 745                        | -1.001 756                            |

校准实验是在环境温度为  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 45%~75% 的环境条件下进行的。

## 1) 数学模型

$$\Delta U = U_x - U_{\text{ref}} - U_o + U_i \quad (37)$$

按不确定度传播律,  $\Delta U$  的合成标准不确定度为:

$$u_c(\Delta U)^2 = c_1^2 u(U_x)^2 + c_2^2 u(U_{\text{ref}})^2 + c_3^2 u(U_o)^2 + c_4^2 u(U_i)^2 \quad (38)$$

其中,各分量的灵敏系数为:

$$c_1 = 1; c_2 = -1; c_3 = -1; c_4 = 1。$$

## 2) 标准不确定度分量评定

(1) 由数字多用表测量被校电压源的重复性引入的不确定度  $u_1(U_o)$  (A 类评定)

用数字多用表对被校源直流电压 1 V 点连续测量 10 次,测量结果分别为 1.001 774 4、1.001 749、1.001 748、1.001 749、1.001 747、1.001 742、1.001 738、1.001 745、1.001 741、1.001 746 V。

由贝塞尔公式计算标准偏差,得出不确定度分量。

$$u_1(U_o) = s(U_o) = 3.665\ 15 \times 10^{-6} \text{ V} \quad (39)$$

(2) 由数字多用表测量被校电压源的准确度引入的不确定度  $u_2(U_o)$  (B 类评定)

选用 Fluke8846A 型数字多用表,量程为 0~1 V 内,准确度为  $0.001\ 8\% \times \text{读数} + 0.000\ 6\% \times \text{量程}$ ,示值为 1 V 时,最大误差为  $\pm 2.4 \times 10^{-5} \text{ V}$ ,半宽度  $2.4 \times 10^{-5} \text{ V}$ ,均匀分布,  $k = \sqrt{3}$ ,则不确定度分量为:

$$u_2(U_o) = \frac{2.4 \times 10^{-5} \text{ V}}{\sqrt{3}} = 1.385\ 64 \times 10^{-5} \text{ V} \quad (40)$$

(3) 由引线电阻导致电压源输出电压值变化引入不

确定度  $u_3(U_o)$  (B 类评定)

被校源和数字多用表间引线电阻一般小于  $0.2 \ \Omega$ ,数字多用表的输入阻抗至少为  $10 \ \text{M}\Omega$ ,由引线电阻导致电压源输出电压值变化量为  $\pm 2 \times 10^{-8} \text{ V}$ ,半宽度  $2 \times 10^{-8} \text{ V}$ ,均匀分布,  $k = \sqrt{3}$ ,则不确定度分量为:

$$u_3(U_o) = \frac{2 \times 10^{-8} \text{ V}}{\sqrt{3}} = 1.154\ 70 \times 10^{-8} \text{ V} \quad (41)$$

(4) 由数字多用表测量标准源的重复性引入的不确定度  $u_1(U_i)$  (A 类评定)

用数字多用表对标准源直流 1 V 点连续测量 10 次,测量结果分别为 0.999 989、0.999 989、0.999 990、0.999 989、0.999 989、0.999 989、0.999 989、0.999 989、0.999 989、0.999 990 V。

由贝塞尔公式计算标准偏差,得出不确定度分量。

$$u_1(U_i) = s(U_i) = 4.216\ 37 \times 10^{-7} \text{ V} \quad (42)$$

(5) 由数字多用表测量被校电压源的准确度引入的不确定度  $u_2(U_i)$  (B 类评定)

$$u_2(U_i) = u_2(U_o) = 1.385\ 64 \times 10^{-5} \text{ V} \quad (43)$$

(6) 由标准源的不确定度引起的不确定度分量  $u(U_{\text{ref}})$  (B 类评定)

Fluke5522A 型标准源在量程为 0~1 V 内,绝对不确定度为  $11 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 2 \ \mu\text{V}$ ,则示值为 1 V 时,绝对不确定度为  $1.3 \times 10^{-5} \text{ V}$ ,均匀分布,  $k = \sqrt{3}$ ,则不确定度分量为:

$$u(U_{\text{ref}}) = \frac{1.3 \times 10^{-5} \text{ V}}{\sqrt{3}} = 7.505\ 55 \times 10^{-6} \text{ V} \quad (44)$$

## 3) 合成标准不确定度

标准源法在直流电压 1 V 校准点的不确定度分量汇总表如表 8 所示。计算系统合成标准不确定度为:

$$u(\Delta U) = \sqrt{\sum_i (c_i u_i)^2} = 2.130\ 60 \times 10^{-5} \text{ V} \quad (45)$$

## 4) 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ,校准结果的置信水平是 0.95,则传统直流电压源校准方法标准源法在直流电压 1 V 校准点的扩展不确定度为:

$$U = k \cdot u_c(\Delta U) = 4.261\ 19 \times 10^{-5} \text{ V} \quad (46)$$

## 2.3 校准结果的一致性评价

通过对标准源与被校源在直流电压 1 V 校准点的电压差的测量,本文设计的基于卫星共视法的电压源远程校准方法的校准结果为  $-0.001\ 808 \text{ V}$ ,扩展不确定度为  $9.182\ 44 \times 10^{-5} \text{ V}$  ( $k=2$ ),传统校准方法校准结果为  $-0.001\ 756 \text{ V}$ ,扩展不确定度为  $4.261\ 19 \times 10^{-5} \text{ V}$  ( $k=2$ ),满足式(47)~(49)。

$$|y_1 - y_2| = -0.001\ 808 \text{ V} - (-0.001\ 756 \text{ V}) = 5.2 \times 10^{-5} \text{ V} \quad (47)$$

表8 传统直流电压源校准方法在1 V校准点的不确定度分量汇总表

Table 8 The summary of uncertainty components of the traditional calibration method for DC voltage sources at 1 V calibration point

| 标准不确定度分量       | 不确定度来源           | 类型 | 数值                           | 概率分布 | 包含因子 $k$   | 标准不确定度 $u(x_i)$              | 灵敏系数 $c_i$ | 不确定度贡献 $u_i(y)$               |
|----------------|------------------|----|------------------------------|------|------------|------------------------------|------------|-------------------------------|
| $u_1(U_0)$     | 数字多用表测量被校电压源的重复性 | A  | $3.665\ 15 \times 10^{-6}$ V | 正态   | -          | $3.665\ 15 \times 10^{-6}$ V | -1         | $-3.665\ 15 \times 10^{-6}$ V |
| $u_2(U_0)$     | 数字多用表测量被校电压源的准确度 | B  | $2.4 \times 10^{-5}$ V       | 均匀   | $\sqrt{3}$ | $1.385\ 64 \times 10^{-5}$ V | -1         | $-1.385\ 64 \times 10^{-5}$ V |
| $u_3(U_0)$     | 引线电阻导致电压源输出电压值变化 | B  | $2 \times 10^{-8}$ V         | 均匀   | $\sqrt{3}$ | $1.154\ 70 \times 10^{-8}$ V | -1         | $-1.154\ 70 \times 10^{-8}$ V |
| $u_1(U_i)$     | 数字多用表测量标准源的重复性   | A  | $4.216\ 37 \times 10^{-7}$ V | 正态   | -          | $4.216\ 37 \times 10^{-7}$ V | 1          | $4.216\ 37 \times 10^{-7}$ V  |
| $u_2(U_i)$     | 数字多用表测量被校电压源的准确度 | B  | $2.4 \times 10^{-5}$ V       | 均匀   | $\sqrt{3}$ | $1.385\ 64 \times 10^{-5}$ V | 1          | $1.385\ 64 \times 10^{-5}$ V  |
| $u(U_{ref})$   | 标准源的不确定度         | B  | $1.3 \times 10^{-5}$ V       | 均匀   | $\sqrt{3}$ | $7.505\ 55 \times 10^{-6}$ V | -1         | $-7.505\ 55 \times 10^{-6}$ V |
| 合成标准不确定度 $u_c$ |                  |    |                              |      |            |                              |            | $2.130\ 60 \times 10^{-5}$ V  |

$$\sqrt{U_1^2 + U_2^2} = \sqrt{(9.182\ 44 \times 10^{-5} \text{ V})^2 + (4.261\ 19 \times 10^{-5} \text{ V})^2} = 1.012\ 30 \times 10^{-4} \text{ V} \quad (48)$$

$$|y_1 - y_2| < \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \quad (49)$$

说明本文提出的基于卫星共视法的电压源远程校准方法与传统电压源校准方法的校准结果具有一致性,远程校准方法在直流电压1 V校准点的校准结果是有效的、合理的。

### 3 结 论

本文在目前计量仪器远程量值传递与溯源实现方式的基础上,提出了一种基于卫星共视法的电压源远程校准方法。该校准方法以非实物标准传递为基础,可实现将标准器置于实验室而无需传递至现场进行远程校准,可解决标准器在现场工作中引入附加误差的问题。通过研究电压、频率和时间偏差之间的关系,建立了基于卫星共视法的电压源远程校准模型。通过高精度电压频率转换以及时间偏差、V-F转换系数的测量,根据卫星共视原理,实现标准端和被校端的电压值远程比对,得到两端电压差,完成电压源远程校准过程。本文对远程校准方法和传统校准方法在直流电压0~1 V校准点的校准结果进行了对比,结果显示,两种方法测得的电压偏差的差距在 $5.2 \times 10^{-5}$  V以内,证明了所提出方法的有效性。本文给出了两种方法在直流电压1V校准点的不确定度评定过程,通过以传统校准方法的校准结果作为更高一级的计量标准,采用传递比较法对两种方法的校准结果进行了一致性评价,不确定度评定结果显示,本文所述的远程校准方法在直流电压1 V校准点的扩展不确定度为

$9.182\ 44 \times 10^{-5}$  V ( $k=2$ ),且基于共视法的电压源远程校准方法与传统校准方法的校准结果具有一致性。

### 参考文献

- [1] KOBATA T, KOJIMA M, KAJIKAWA H. Development of remote calibration system for pressure standard [J]. Measurement, 2012, 45(10):2482-2485.
- [2] 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(28/32): L970-L972.
- [3] ALBU M, FERRERO A, MIHAI F. Remote calibration using mobile, multiagent technology [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(1):24-30.
- [4] RAOUF M, ALI R, GADELRAH MS. Construction and remote calibration of an automated resistance measuring system [J]. Mapan: Journal of Metrology Society of India, 2011, 26(2):125-131.
- [5] 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.
- [6] WANG Q, LI H B, WANG H, et al. A Remote Calibration Device Using Edge Intelligence [J]. Sensors, 2022, 22(1):322.
- [7] 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.
- [ 8 ] LOMBARDI M A, NOVICK A N. Remote time calibrations via the NIST time measurement and analysis service[J]. NCSLI Measure, 2006, 1(4): 50-59.
- [ 9 ] DAVIS J A, STEVENS M, WHIBBERLEY P B, et al. Commissioning and validation of a GPS common-view time transfer service at NPL [ C ]. IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003. IEEE, 2003: 1025-1031.
- [ 10 ] ROVERA G D, CHUPIN B, ABGRALL M, et al. A simple computation technique for improving the short term stability and the robustness of GPS TAIP3 common-views[C]. 2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), IEEE, 2013: 827-830.
- [ 11 ] 爻伟群. 走近网络化校准——远程校准技术初探(之一)[J]. 计算机应用研究, 2002(9): 23-26.
- SHU W Q. Coming nearer to the internet-based calibration-A primary survey about the technology of the Tele-calibration[J]. Application Research of Computers, 2002(9): 23-26.
- [ 12 ] 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.
- GOU J T, JIN ZH G. General tele-calibration platform based on Internet [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 932-940.
- [ 13 ] 吴静, 赵伟, 胡毅飞. 基于 Internet 的计量校准方法探讨[J]. 计量学报, 2005(1): 70-73.
- WU J, ZHAO W, HU Y F. Study on the application of Internet in metrology calibration [ J ]. Acta Metrologica Sinica, 2005(1): 70-73.
- [ 14 ] 袁鑫, 荆根强, 彭璐, 等. 激光投射式位移计在线校准方法与系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 23-30.
- YUAN X, JING G Q, PENG L, et al. On-line calibration method and system design for laser-projection displacement meter [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 23-30.
- [ 15 ] 荆根强, 段发阶, 彭璐, 等. 基于被动激励的结构应变监测系统在线校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 137-145.
- JING G Q, DUAN F J, PENG L, et al. On-line calibration method for structural strain monitoring system based on passive excitation [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 137-145.
- [ 16 ] 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. Research on timing parameters for GPS common-view method [ J ]. Acta Metrologica Sinica, 2004(2): 167-170.
- [ 17 ] 高小珣, 高源, 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. GPS common view method for remote time and frequency transfer[J]. Acta Metrologica Sinica, 2008(1): 80-83.
- [ 18 ] 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 implementation of time-frequency remote calibration system[J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(4): 1-3.
- [ 19 ] 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 on remote time comparison based on improved satellite common-view method [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 757-763.
- [ 20 ] 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, 35.
- FANG L D, XU X X, MA X Y, et al. Discussion on remote transfer and traceability of quantity values technology of measuring instruments [ J ]. China Measurement & Test, 2021, 47(3): 1-8+35.
- [ 21 ] 方立德, 马鑫月, 段思涵, 等. 一种电压源远程校准系统及校准方法[P]. 河北省: ZL202110535361. 6, 2022-03-29.
- FANG L D, MA X Y, DUAN S H, et al. A remote calibration system and calibration method of voltage source [ P ]. ZL202110535361. 6, 2022-03-29.
- [ 22 ] JJF 1638-2017, 多功能标准源校准规范[S]. 国家质量

监督检验检疫总局,2017.

JJF 1638 - 2017. Calibration specification for multi-function standard sources [ S ]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2017.

- [ 23 ] ALLAN D W, THOMAS C. Technical directives for standardization of GPS time receiver software [ J ]. Metrologia, 1994, 31: 69-79.

- [ 24 ] JJF 1033-2016. 计量标准考核规范[S]. 国家质量监督检验检疫总局,2020.

JJF 1033-2016. Rule for the examination of measurement standards [ S ]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2020.

- [ 25 ] JJF 1059.1-2012. 测量不确定度评定与表示[S]. 国家质量监督检验检疫总局,2013.

JJF 1059.1-2012. Evaluation and expression of uncertainty in measurement [ S ]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2013.

- [ 26 ] 秦瑶,吴艳丽,刘潇. 基于电流探头的标准场法环天线校准及不确定度分析 [ J ]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9):37-44.

QIN Y, WU Y L, LIU X. Standard field method for loop antenna calibration and uncertainty analysis based on the current probe [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 37-44.

- [ 27 ] 李轶. 多功能标准源直流电压测量不确定度评定 [ J ]. 计量与测试技术, 2016, 43(9):96-97,100.

LI Y. Uncertainty evaluation of multifunction standard source for DC voltage [ J ]. Metrology & Measurement Technique, 2016, 43(9): 96-97,100.

## 作者简介



E-mail: fanglide@hbu.edu.cn

**Fang Lide** received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 1998, received his M. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2005, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2008. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Hebei University. His main research interests include remote calibration technology and multiphase flow measurement technology and instruments.



**段思涵**, 2018年于河北大学获得学士学位, 现为河北大学在读硕士研究生, 主要研究方向为远程计量校准技术。

E-mail: duansihan@stumail.hbu.edu.cn

**Duan Sihao** received his B. Sc. degree from Hebei University in 2018. He is currently a master student at Hebei University. His main research interest is remote calibration technology.



**梁玉娇** (通信作者), 2011年于河北大学获得学士学位, 2014年于河北大学获得硕士学位, 现为河北大学实验师, 主要研究方向为远程计量校准技术、多相流测试技术及仪器。

E-mail: liangyujiao@hbu.edu.cn

**Liang Yujiao** (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 2011 from Hebei University, received her M. Sc. degree in 2014 from Hebei University. She is currently an experimentalist at Hebei University. Her main research interests include remote calibration technology and multiphase flow measurement technology and instruments.