

天津市地方计量技术规范

JJF(津) XX—2024

光伏组件旁路二极管测试系统 校准规范

Calibration Specification for PV Modules Bypass

Diode Test System

(报批稿)

2024—XX—XX 发布

2024—XX—XX 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

光伏组件旁路二极管测试 系统校准规范

JJF(津) XX-2024

Calibration Specification for
PV Modules Bypass Diode Test System

归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津市计量监督检测科学研究院

本规范委托天津市计量监督检测科学研究院负责解释

本规范主要起草人：

柳云秀 (天津市计量监督检测科学研究院)

马新新 (天津市计量监督检测科学研究院)

杨学毫 (天津市计量监督检测科学研究院)

参加起草人：

冯 宇 (天津市计量监督检测科学研究院)

任 晟 (天津市计量监督检测科学研究院)

于彩娟 (天津市计量监督检测科学研究院)

目 录

| | |
|-------------------------------|----|
| 引言..... | II |
| 1 范围..... | 1 |
| 2 引用文件..... | 1 |
| 3 术语和计量单位..... | 1 |
| 3.1 突变时间 switching time | 1 |
| 4 概述..... | 2 |
| 5 计量特性..... | 2 |
| 6 校准条件..... | 3 |
| 6.1 环境条件..... | 3 |
| 6.2 主要测量标准及配套设备..... | 3 |
| 7 校准项目和校准方法..... | 4 |
| 7.1 校准项目..... | 4 |
| 7.2 校准方法..... | 4 |
| 8 校准结果..... | 11 |
| 9 复校时间间隔..... | 12 |
| 附录 A 原始记录参考格式..... | 13 |
| 附录 B 校准证书内页推荐格式 | 16 |
| 附录 C 校准结果不确定度评定示例 | 19 |

引 言

本规范依据国家计量技术规范 JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》基础性系列规范进行编写。

本规范为首次发布。

光伏组件旁路二极管测试系统校准规范

1 范围

本规范适用于光伏组件旁路二极管测试系统的校准，以下简称测试系统。

本规范包括直流电压、直流电流、恒定电压、恒定电流、脉冲电源电压表示值、脉冲电流、脉冲宽度、突变时间、采集电压、采集电流、温度等关键参数的计量特性、校准方法、校准结果表述等内容。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1462 直流电子负载校准规范

JJF 1587 数字多用表校准规范

JJF 1597 直流稳定电源校准规范

JJG(浙)76 数字温度计检定规程

IEC 61215-2 地面用光伏组件 设计鉴定和定型 第 2 部分：测试程序（Terrestrial photovoltaic (PV) modules -Design qualification and type approval - Part 2: Test procedures）

IEC 62979 光伏组件旁路二极管热失控测试（Photovoltaic modules -Bypass diode-Thermal runaway test）

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 突变时间 switching time

光伏组件旁路二极管电路从正向电流注入切换到施加反向偏压的时间，单位为秒（s）。

4 概述

光伏组件旁路二极管测试系统主要用于光伏组件旁路二极管热性能测试、功能测试和热失控测试。该测试系统主要由直流电源、脉冲电源、电子负载、电压电流温度采集系统、控制系统等构成，其原理如图 1 所示。

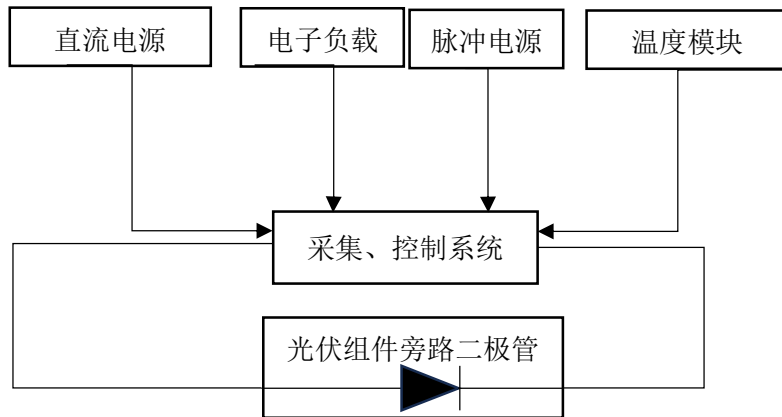


图 1 光伏组件旁路二极管测试系统原理图

5 计量特性

技术指标要求见表 1。

表 1 技术要求

| 序号 | 技术参数名称 | 测量范围 | 最大允许误差 |
|----|-----------|---------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 直流电压 | $\pm (0.1 \sim 150) \text{ V}$ | $\pm 2\%$ |
| 2 | 直流电流 | $\pm (0.1 \sim 80) \text{ A}$ | $\pm 2\%$ |
| 3 | 恒定电压 | $\pm (0.1 \sim 150) \text{ V}$ | $\pm 1\%$ |
| 4 | 恒定电流 | $\pm (0.1 \sim 80) \text{ A}$ | $\pm 1\%$ |
| 5 | 脉冲电源电压表示值 | $(0.1 \sim 150) \text{ V}$ | $\pm 2\%$ |
| 6 | 脉冲电流 | $(0.1 \sim 30) \text{ A}$ | $\pm 2\%$ |
| 7 | 脉冲宽度 | $(0.1 \sim 10) \text{ ms}$ | $\pm 5\%$ |
| 8 | 突变时间 | $< 10 \text{ ms}$ | — |
| 9 | 采集电压 | $(0.1 \sim 5) \text{ V}$ | $\pm 1\%$ |
| 10 | 采集电流 | $(0.1 \sim 5) \text{ A}$ | $\pm 0.5\% \text{ FS}$ |
| 11 | 温度 | $(0 \sim 250) \text{ }^\circ\text{C}$ | $\pm 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ |

注：具体计量特性，可参照被校测试系统的技术要求。以上要求不适用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度： $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ；环境湿度：20%RH~75%RH；

电源电压： $220\text{V} \pm 22\text{V}$ ；电源频率： $50\text{Hz} \pm 0.5\text{Hz}$ ；

周围无影响校准工作的机械振动和电磁干扰，并具有良好的接地；无腐蚀性及易燃、易爆气体。

6.2 主要测量标准及配套设备

根据所采用的校准方法，选择可以满足以下校准要求的测量设备，见表 2。

表 2 校准用标准器主要技术指标

| 序号 | 标准器具 | 技术指标 | 校准项目 |
|----|-------------------|--|---|
| 1 | 示波器 | 测量带宽：DC~500MHz； 最大允许误差：电压： $\pm(5\% \text{输入} + 3\text{mV})$ ， 时间： $\pm(0.005\%T + 10\text{ps})$ | 脉冲电流、脉冲宽度 突变时间 |
| 2 | 数字多用表 | 电压范围： $\pm(0.1 \sim 150) \text{V}$ 电流范围： $\pm(0.1 \sim 10) \text{A}$ 扩展不确定度应不大于被校仪器最大允许误差的 1/3 | 直流电压、直流电 流、恒定电压、恒定 电流、脉冲电源电压 表示值 |
| 3 | 直流电源 | 电压范围： $\pm(0.1 \sim 150) \text{V}$ 电流范围： $\pm(0.1 \sim 80) \text{A}$ 扩展不确定度应不大于被校仪器最大允许误差的 1/3 | 恒定电压、恒定电 流、脉冲电源电压表 示值 |
| 4 | 标准电阻 | 电流范围： $(0.1 \sim 30) \text{A}$ 扩展不确定度应不大于被校仪器最大允许误差的 1/3 | 脉冲电流、脉冲宽 度、突变时间 |
| 5 | 直流电流电压转换器或直流标准分流器 | 测量范围： $\pm(0.1 \sim 80) \text{A}$ 与数字多用表配合使用，扩展不确定度应不大于被校仪器最大允许误差的 1/3 | 直流电流、恒定电流 |
| 6 | 多功能标准源 | 电压范围： $\pm(0.1 \sim 5) \text{V}$ 电流范围： $\pm(0.1 \sim 5) \text{A}$ 扩展不确定度应不大于被校仪器最大允许误差的 1/3 | 采集电压、采集电流 |
| 7 | 数字温度计 | 测量范围： $(0 \sim 250) ^\circ\text{C}$ ，最大允许误差： $\pm 0.1 ^\circ\text{C}$ | 温度 |
| 8 | 干体式温度校准器 | 测量范围： $(0 \sim 250) ^\circ\text{C}$ ，孔间温差： $\pm 0.05 ^\circ\text{C}$ ，温度波动度： $\pm 0.05 ^\circ\text{C}$ | 温度 |

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 3。

表 3 校准项目

| 序号 | 项目名称 | 校准方法的条款 |
|----|-----------|---------|
| 1 | 直流电压 | 7.2.3 |
| 2 | 直流电流 | 7.2.4 |
| 3 | 恒定电压 | 7.2.5 |
| 4 | 恒定电流 | 7.2.6 |
| 5 | 脉冲电源电压表示值 | 7.2.7 |
| 6 | 脉冲电流 | 7.2.8 |
| 7 | 脉冲宽度 | 7.2.9 |
| 8 | 突变时间 | 7.2.10 |
| 9 | 采集电压 | 7.2.11 |
| 10 | 采集电流 | 7.2.12 |
| 11 | 温度 | 7.2.13 |

7.2 校准方法

7.2.1 校准前准备

a) 外观检查

光伏组件旁路二极管测试系统面板、机壳或铭牌上一般有以下主要标志和符号：仪器名称、型号、制造厂名称或商标、出厂编号、额定输入电压和频率、输出参数额定值等；端钮标识明显且齐全，无松动和脱落等。

b) 正常工作性检查

通电后，开关、按键或调节旋钮功能正常，显示屏、测量仪表和状态指示灯显示正常。

c) 预热

在规定的环境条件下，按照说明书和实际工作需要进行了预热。

7.2.2 校准点的选取

在电压量程、电流量程、温度量程均匀选取不少于 3 至 5 个校准点, 包括量程的 10%、50%、100%。

注: 可根据客户实际需要选择校准点。

7.2.3 直流电压的校准

按图 2 连接线路, 接好数字多用表, 通电稳定。将测试系统直流电源电压设定选择的校准点, 测量一次, 读取数字多用表的电压值, 直流电压示值误差 ΔV 按公式(1)计算。

$$\Delta V = V_x - V_s \quad (1)$$

式中:

ΔV ——直流电压示值误差, V;

V_x ——测试系统直流电源电压显示值, V;

V_s ——数字多用表电压值, V。

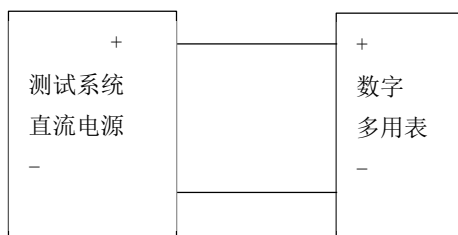


图 2 测试系统直流电压校准连接图

7.2.4 直流电流的校准

a) 直接比较法

根据电流校准点和数字多用表电流测量量程, 连接方法如图 3 (a), 通电稳定后将测试系统直流电源电流设定选择的校准点, 测量一次, 读取数字多用表的标准值。直流电流示值误差 ΔI 按公式(2)计算。

$$\Delta I = I_x - I_s \quad (2)$$

式中:

ΔI ——直流电流示值误差, A;

I_x ——测试系统直流电源电流显示值, A;

I_s ——数字多用表标准值, A。

b) 直流电流/电压转换器法

根据电流校准点和数字多用表电流测量量程，连接方法按照图 3 (b) 所示，连接直流电流/电压转换器或直流标准分流器至测试系统直流电源。通电稳定后，将测试系统直流电源电流设定选择的校准点，测量一次，读取数字多用表的标准值。直流电流示值误差 ΔI 按公式(3)计算。

$$\Delta I = I_x - G V_0 \quad (3)$$

式中：

ΔI ——直流电流示值误差，A；

I_x ——测试系统直流电源电流显示值，A；

G ——为直流电流/电压转换器的电流电压转换比例系数或电导值，S；或直流标准分流器标准电阻值的倒数；

V_0 ——数字多用表标准值，V。

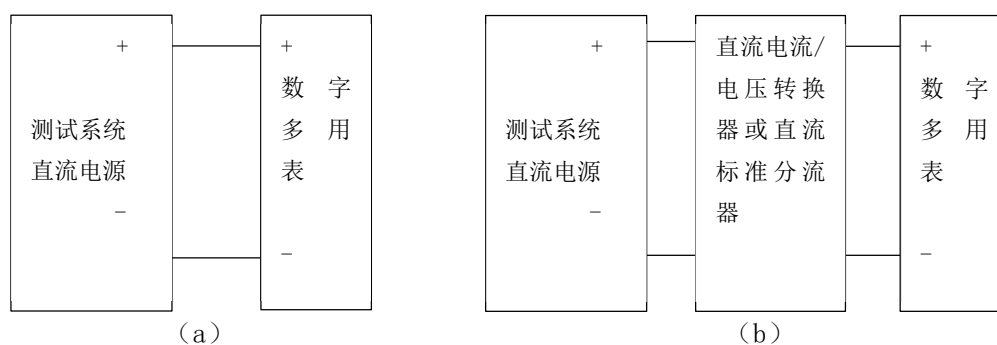


图 3 测试系统直流电流校准连接图

7.2.5 恒定电压的校准

按照图 4 连接，测试系统电子负载空载，按校准点调节直流电源电压，测量一次，读取数字多用表标准电压值，恒定电压误差 ΔV_z 用公式(4)计算。

$$\Delta V_z = V_{zx} - V_{zs} \quad (4)$$

式中：

ΔV_z ——恒定电压示值误差，V；

V_{zx} ——测试系统电子负载电压显示值，V；

V_{zs} ——数字多用表标准电压值，V。

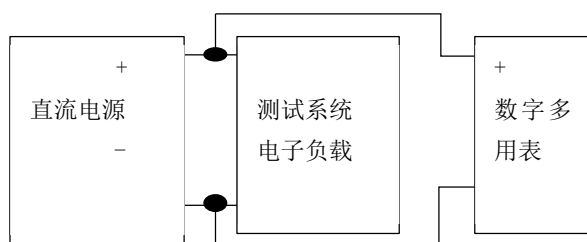


图4 测试系统恒定电压校准连接图

7.2.6 恒定电流的校准

a) 直接比较法

按照图 5 (a) 连接, 调节直流电源电流为电子负载电流量程的上限, 以避免电子负载过载, 从零开始调节直流电源的电压, 使电子负载吸收的功率接近该量程满功率的 10% 或略高于最低工作电压进行校准。测量一次, 读取数字多用表的标准值。恒定电流示值误差 ΔI_z 按公式(5)计算。

$$\Delta I_z = I_{zx} - I_{zs} \quad (5)$$

式中:

ΔI_z ——恒定电流示值误差, A;

I_{zx} ——测试系统电子负载电流显示值, A;

I_{zs} ——数字多用表电流显示值, A。

b) 直流电流/电压转换器法

按照图 5 (b) 连接直流电流/电压转换器或直流标准分流器至测试系统电子负载和直流电源, 从零开始调节直流电源的电压, 使电子负载吸收的功率接近该量程满功率的 10% 或略高于最低工作电压进行校准。测量一次, 读取数字多用表的标准值。恒定电流示值误差 ΔI_z 按公式(6)计算。

$$\Delta I_z = I_{zx} - G V_{z0} \quad (6)$$

式中:

ΔI_z ——恒定电流示值误差, A;

I_{zx} ——测试系统电子负载电流显示值, A;

G ——为直流电流/电压转换器的电流电压转换比例系数或电导值, S; 或直流标准分流器标准电阻值的倒数;

V_{z0} ——数字多用表电压显示值, V。

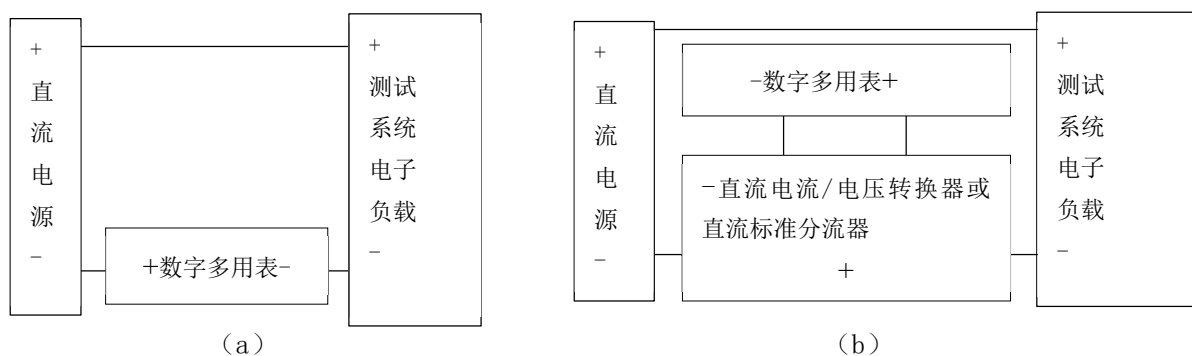


图 5 测试系统恒定电流校准连接图

7.2.7 脉冲电源电压表示值的校准

按图 6 连接线路, 连接直流电源和数字多用表, 通电稳定。根据测试系统脉冲电源电压表校准点设置直流电源输出电压, 测量一次, 读取数字多用表的标准电压值和脉冲电源电压表示值, 脉冲电源电压表示值示值误差 ΔV_m 按公式(7)计算。

$$\Delta V_m = V_{mx} - V_{ms} \quad (7)$$

式中:

ΔV_m ——脉冲电源电压表示值误差, V;

V_{mx} ——测试系统脉冲电源电压表示值, V;

V_{ms} ——数字多用表标准电压值, V。



图 6 测试系统脉冲电源电压表示值校准连接图

7.2.8 脉冲电流的校准

将示波器、标准电阻连接测试系统脉冲电源, 如图 7, 设置示波器上升沿触发, 直流耦合, 调节示波器的输入衰减, 使被测信号占屏幕垂直刻度的 80%, 调节示波器的扫描速度使一个完整的脉冲宽度占屏幕水平刻度的二分之一以上, 被测波形清晰稳定地显示在屏幕上, 读取屏幕中被测波形的峰峰值 V_{ms} , 标准电阻阻值 R , 脉冲电源电流标准值 $I_{ms} = V_{ms}/R$, 脉冲电流误差 ΔI_m 按照公式(8)计算。

$$\Delta I_m = I_{mx} - I_{ms} \quad (8)$$

式中：

ΔI_m ——脉冲电流误差，A；

I_{mx} ——测试系统脉冲电源电流设定值，A；

I_{ms} ——脉冲电源电流标准值，A。

7.2.9 脉冲宽度的校准

将示波器、标准电阻连接测试系输出端口，如图 7，设置示波器上升沿触发，直流耦合，调节示波器的输入衰减，使被测信号占屏幕垂直刻度的 80%，调节示波器的扫描速度使一个完整的脉冲宽度占屏幕水平刻度的二分之一以上，被测波形清晰稳定地显示在屏幕上，读取屏幕中被测信号脉冲幅度 50% 处的时间间隔，脉冲宽度误差 ΔT_m 按照公式 (9) 计算。

$$\Delta T_m = T_{mx} - T_{ms} \quad (9)$$

式中：

ΔT_m ——脉冲宽度误差，us；

T_{mx} ——脉冲宽度设定值，us；

T_{ms} ——脉冲宽度实测值，us。

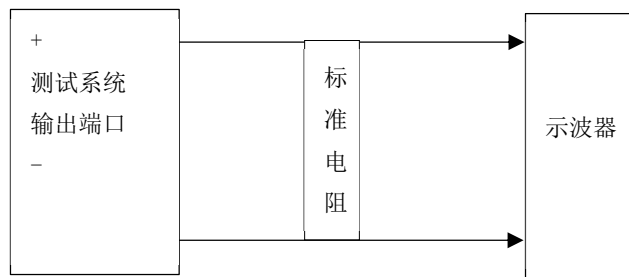


图 7 测试系统脉冲电流、脉冲宽度、突变时间校准连接图

7.2.10 突变时间的校准

将标准电阻、示波器和测试系统按照图 7 连接，调节示波器的输入衰减，使被测信号占屏幕垂直刻度的 80%，调节示波器的扫描速度使一个完整的脉冲宽度占屏幕水平刻度的二分之一以上，被测波形清晰稳定地显示在屏幕上，突变时间波形图如图 8，读取波形突变时间 T 。

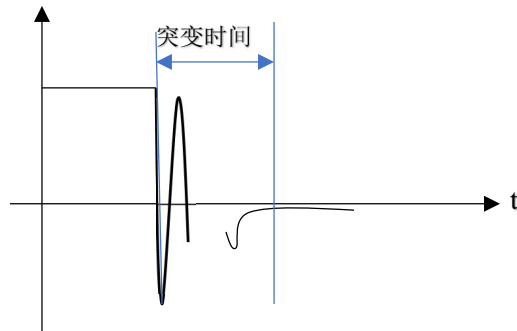


图 8 测试系统突变时间示意图

7.2.11 采集电压的校准

按图 9 连接线路，连接多功能标准源与测试系统的采集系统，通电稳定。根据校准点设定多功能源的输出值并记录采集系统显示值，采集电压示值误差 ΔV_c 按公式(10)计算。

$$\Delta V_c = V_{cx} - V_{cs} \quad (10)$$

式中：

ΔV_c ——采集电压示值误差，V；

V_{cx} ——测试系统采集电压显示值，V；

V_{cs} ——多功能标准源标准电压值，V。

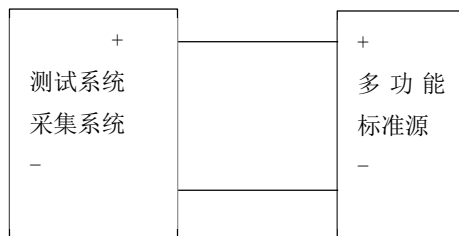


图 9 测试系统采集电压、采集电流校准连接图

7.2.12 采集电流的校准

按图 9 连接线路，连接多功能标准源与光伏组件旁路二极管测试系统的采集系统，通电稳定。根据校准点设定多功能源的输出值并记录采集系统显示值，采集电流示值误差 ΔI_c 按公式(11)计算。

$$\Delta I_c = I_{cx} - I_{cs} \quad (11)$$

式中：

ΔI_c ——采集电流示值误差，A；

I_{cx} ——测试系统采集电流显示值，A；

I_{cs} ——多功能标准源标准电流值，A。

7.2.13 温度的校准

将被校温度传感器和标准温度计插入干体式温度校准器中，确保插入深度在同一平面上。温度点可根据客户需要进行选取。设定干体式温度校准器至需要的温度点，启动校准程序，待温度稳定后读取标准温度计示值和被校温度传感器的指示值。按照公式(12)计算温度偏差。

$$\Delta T_t = T_{tx} - T_{ts} \quad (12)$$

式中：

ΔT_t ——温度偏差， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_{tx} ——被校温度传感器的显示值， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_{ts} ——标准温度计显示值， $^{\circ}\text{C}$ 。

8 校准结果

校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的地址和名称；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性应用相关时，应对被样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；

- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量问题等诸因素所决定的, 因此, 送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

原始记录参考格式

| | |
|-----------------|---------------|
| 证书编号: _____ | 原始记录编号: _____ |
| 客户名称: _____ | 客户地址: _____ |
| 仪器名称: _____ | 型号规格: _____ |
| 制造厂: _____ | 出厂编号: _____ |
| 校准地点: _____ | |
| 校准依据: _____ | |
| 环境条件: 温度: _____ | 相对湿度: _____ |
| 校准日期: _____ | |
| 校准员: _____ | 核验员: _____ |

| 标准器名称 | 编号 | 不确定度或准确度等级 或最大允许误差 | 证书编号 | 证书有效期 | 溯源机构名称 |
|-------|----|-----------------------|------|-------|--------|
| | | | | | |
| | | | | | |

A.1 直流电压校准

| 被校仪器设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |
| | | | |

A.2 直流电流校准

| 被校仪器设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |
| | | | |

A.3 恒定电压校准

| 被校仪器设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |
| | | | |

A.4 恒定电流校准

| 被校仪器设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |

A.5 脉冲电压表示值校准

| 被校仪器设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |

A.6 脉冲电流校准

| 被校仪器设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |

A.7 脉冲宽度校准

| 设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|-----|--------|------|--------|
| | | | |

A.8 突变时间校准

| 实测值 | 允许范围 | 测量不确定度 |
|-----|------|--------|
| | | |

A.9 采集电压校准

| 通道 | 被校仪器显示值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|----|---------|--------|------|--------|
| | | | | |

A.10 采集电流校准

| 通道 | 被校仪器显示值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|----|---------|--------|------|--------|
| | | | | |

A.11 温度校准

| 通道 | 校准点 | 被校仪器显示值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|----|-----|---------|--------|------|--------|
| | | | | | |
| | | | | | |

附录 B

校准证书内页推荐格式

证书编号: XXXXXX-XXXX

| 校准机构授权说明 | | | | | |
|--------------------|----|-----------------------|------|--------|------|
| 校准所依据的技术文件(代号、名称): | | | | | |
| 校准所使用的主要计量器具: | | | | | |
| 名称 | 编号 | 准确度等级/最大允许 误差/不确定度 | 证书编号 | 证书有效期至 | 溯源机构 |
| | | | | | |
| 校准地点及其环境条件: | | | | | |
| 地点: | | | | | |
| 温度: | | 相对湿度: | | 其他: | |

第 × 页 共 × 页

证书编号: XXXXXX-XXXX

校准结果

B.1 直流电压校准

| 被校仪器设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |

B.2 直流电流校准

| 被校仪器设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |

B.3 恒定电压校准

| 被校仪器设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |

B.4 恒定电流校准

| 被校仪器设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |

B.5 脉冲电压表示值校准

| 被校仪器设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |

校准结果

B.6 脉冲电流校准

| 被校仪器显示值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|---------|--------|------|--------|
| | | | |

B.7 脉冲宽度校准

| 设定值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|-----|--------|------|--------|
| | | | |

B.8 突变时间校准

| 实测值 | 允许范围 | 测量不确定度 |
|-----|------|--------|
| | | |

B.9 采集电压校准

| 通道 | 被校仪器显示值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|----|---------|--------|------|--------|
| | | | | |

B.10 采集电流校准

| 通道 | 被校仪器显示值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|----|---------|--------|------|--------|
| | | | | |

B.11 温度校准

| 通道 | 校准点 | 被校仪器显示值 | 标准器显示值 | 示值误差 | 测量不确定度 |
|----|-----|---------|--------|------|--------|
| | | | | | |
| | | | | | |

第 × 页 共 × 页

校准员: _____

核验员: _____

附录 C

校准结果不确定度评定示例

C.1 直流电压示值误差

C.1.1 数学模型

$$V = \bar{V} + \delta \quad (\text{C.1})$$

式中：

V ——被校测试系统直流电压测量结果，V；

\bar{V} ——被校示值 n 次测量的电压算术平均值，V；

δ ——电源电压的示值误差，V。

C.1.2 测量标准

数字多用表

C.1.3 灵敏系数

模型中各输入量对输出量的灵敏系数绝对值均为 1。

C.1.4 各输入量的标准不确定度的分析与评定

不确定度主要来源：测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ；标准器引入的不确定度分量 u_2 ；读数分辨力引入的不确定度分量 u_3 。

C.1.4.1 测量重复性引入的不确定度 u_1

设置测试系统直流电源输出电压为 10V，测量条件固定，用数字多用表对测试系统独立重复测量输出电压 10 次，测量数据见表 C1：

表 C1 10 次测量数据

| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 标准器示值/V | 9.998 | 9.999 | 10.001 | 9.999 | 9.997 | 10.000 | 10.001 | 10.000 | 10.001 | 10.000 |

十次测量平均值： $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} x_i = 9.9996 \text{ V}$

单次实验标准差：

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}(x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 1.35 \times 10^{-3} \text{ V}$$

则由测量重复性引入的不确定度分量 u_1 为:

$$u_1 = S(x_i) = 1.35 \times 10^{-3} \text{ V}$$

C.1.4.2 标准器引入的不确定度分量 u_2

根据本规范的要求, 数字多用表的扩展不确定度应不大于被校仪器直流电压最大允许误差的 1/3, 即数字多用表最大允许误差为 $\pm 0.67\%$, 包含概率 95%, 估计为均匀分布, $k=\sqrt{3}$ 。

$$u_2 = \frac{0.67\% \times 10}{\sqrt{3}} = 3.87 \times 10^{-2} \text{ V}$$

C.1.4.3 读数分辨力引入的不确定度分量 u_3

测试系统直流电源读数分辨力为 0.001V, 即区间半宽度值为 $a_3=5 \times 10^{-4}$ V, 认为服从均匀分布, 取包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。则分辨力引入的标准不确定度为:

$$u_3 = a_3/k = 2.89 \times 10^{-4} \text{ V}$$

C.1.5 合成标准不确定度的评定

主要标准不确定度汇总表如表 C2 所示

表 C2 标准不确定度一览表

| 标准不确定度分量 | 不确定度来源 | 标准不确定度值 | $ c_i $ | $ c_i u(x_i)$ |
|----------|----------|---------------------------------|---------|---------------------------------|
| u_1 | 测量重复性 | $1.35 \times 10^{-3} \text{ V}$ | 1 | $1.35 \times 10^{-3} \text{ V}$ |
| u_2 | 标准器 | $3.87 \times 10^{-2} \text{ V}$ | 1 | $3.87 \times 10^{-2} \text{ V}$ |
| u_3 | 标准器读数分辨力 | $2.89 \times 10^{-4} \text{ V}$ | 1 | $2.89 \times 10^{-4} \text{ V}$ |

重复性引入的标准不确定度分量大于被测仪器的分辨力所引入的不确定度分量时, 可以不考虑分辨力所引入的不确定度分量, 各不确定度分量独立不相关, 则合成标准不确定度 u_c 为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 3.872 \times 10^{-2} \text{ V}$$

C.1.6 扩展不确定度的评定

对应 p 约为 95% 包含概率, 取 $k=2$, 以 10V 为例, 则扩展不确定度为:

$$U = k u_c = 2 \times 3.872 \times 10^{-2} \text{ V} = 7.74 \times 10^{-2} \text{ V}$$

换算至相对扩展不确定度为: $U_{rel} = 0.8\%$, $k=2$ 。

C.2 脉冲宽度校准不确定度的评定

C.2.1 数学模型

$$t = \bar{t} + \delta \quad (\text{C.2})$$

式中:

t ——被校测试系统脉冲宽度测量结果, ms;

\bar{t} ——被校示值 n 次测量的时间算术平均值, ms;

δ ——脉冲宽度的示值误差, ms。

C.2.2 测量标准

示波器、标准电阻

C.2.3 灵敏系数

模型中各输入量对输出量的灵敏系数绝对值均为 1。

C.2.4 各输入量的标准不确定度的分析与评定

不确定度主要来源: 测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ; 标准器引入的不确定度分量 u_2 ; 读数分辨力引入的不确定度分量 u_3 。

C.2.4.1 测量重复性引入的不确定度 u_1

设置测试系统脉冲宽度, 使用示波器读取加载时间, 在重复性条件下进行 10 次连续测量, 测量数据见表 C3:

表 C3 10 次测量数据

ms

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.96 | 0.96 | 0.98 | 0.96 | 0.96 | 0.94 | 0.96 | 0.94 | 0.96 | 0.96 |

十次测量平均值: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} x_i = 0.958 \text{ms}$

单次实验标准差:

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 1.14 \times 10^{-2} \text{ms}$$

则由测量重复性引入的不确定度分量 u_1 为:

$$u_1 = S(x_i) = 1.14 \times 10^{-2} \text{ms}$$

C.2.4.2 分辨力引入的不确定度 u_2

读数分辨力为 0.01ms, 即区间半宽度值为 $a_2 = 5 \times 10^{-3} \text{ms}$, 认为服从均匀分布, 取包含因

子 $k=\sqrt{3}$ 。则读数分辨力的标准不确定度 u_2 为:

$$u_2 = a_2 / k = 2.89 \times 10^{-3} \text{ms}$$

C.2.4.2 标准器引入的不确定度 u_3

(1) 根据示波器说明书, 时间最大允许误差为 $\pm 50\text{ppm}$, 即区间半宽度值为 $a_{31}=5 \times 10^{-5}$, 认为服从均匀分布, 取包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。取量程中最大点作为标准器引入的标准不确定度 u_{31} 为:

$$u_{31} = (a_3 \times \bar{x}) / k = 2.89 \times 10^{-4} \text{ms}$$

(2) 根据本规范的要求, 标准电阻的扩展不确定度应不大于被校仪器脉冲宽度最大允许误差的 $1/3$, 即标准电阻最大允许误差为 $\pm 1.67\%$, 包含概率 95% , 估计为均匀分布, $k=\sqrt{3}$ 。

$$u_{32} = \frac{1.67\% \times 1\text{ms}}{\sqrt{3}} = 0.96 \times 10^{-2} \text{ms}$$

C.2.5 合成标准不确定度的评定

主要标准不确定度汇总表如表 C4 所示

C4 标准不确定度一览表

| 标准不确定度分量 | 不确定度来源 | 标准不确定度值 | $ c_i $ | $ c_i u(x_i)$ |
|----------|--------|---------------------------------|---------|---------------------------------|
| u_1 | 测量重复性 | $1.14 \times 10^{-2} \text{ms}$ | 1 | $1.14 \times 10^{-2} \text{ms}$ |
| u_2 | 分辨力 | $2.89 \times 10^{-3} \text{ms}$ | 1 | $2.89 \times 10^{-3} \text{ms}$ |
| u_{31} | 示波器 | $2.89 \times 10^{-4} \text{ms}$ | 1 | $2.89 \times 10^{-4} \text{ms}$ |
| u_{32} | 标准电阻 | $0.96 \times 10^{-2} \text{ms}$ | 1 | $0.96 \times 10^{-2} \text{ms}$ |

重复性引入的标准不确定度分量大于被测仪器的分辨力所引入的不确定度分量时, 可以不考虑分辨力所引入的不确定度分量, 各不确定度分量独立不相关, 则合成标准不确定度 u_c 为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_{31}^2 + u_{32}^2} = 1.51 \times 10^{-2} \text{ms}$$

C.2.6 扩展不确定度的评定

对应 p 约为 95% 包含概率, 取 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U=ku_c=2 \times 1.51 \times 10^{-2} \text{ms} = 3.03 \times 10^{-2} \text{ms} \approx 0.03 \text{ms}$$

C.3 温度示值误差校准不确定度的评定

C.3.1 数学模型

$$T = \bar{T} + \delta \quad (\text{C.3})$$

式中:

T ——被校测试系统温度示值测量结果, $^{\circ}\text{C}$;

\bar{T} ——被校示值 n 次测量的温度示值算术平均值, $^{\circ}\text{C}$;

δ ——温度示值误差, $^{\circ}\text{C}$ 。

C.3.2 测量标准

标准数字温度计、干体式温度校准器

C.3.3 灵敏系数

模型中各输入量对输出量的灵敏系数绝对值均为 1。

C.3.4 各输入量的标准不确定度的分析与评定

不确定度主要来源: 测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ; 标准器引入的不确定度分量 u_2 ; 读数分辨力引入的不确定度分量 u_3 。

C.3.4.1 测量重复性引入的不确定度 u_1

温度达到并稳定在校准温度点上时, 被测试系统温度传感器和标准温度计插入干体式温度校准器至少 20min, 读取温度示值。在重复性条件下进行 10 次连续测量, 测量数据见表 C5:

表 C5 10 次测量数据

$^{\circ}\text{C}$

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 50.1 | 50.1 | 50.1 | 50.1 | 50.2 | 50.2 | 50.1 | 50.1 | 50.1 | 50.2 |

十次测量平均值: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} x_i = 50.13^{\circ}\text{C}$

单次实验标准差:

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 4.83 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}$$

则由测量重复性引入的不确定度分量 u_1 为:

$$u_1 = S(x_i) = 4.83 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

C.3.4.2 标准器引入的不确定度 u_2

(1) 根据技术说明书, 数字温度计最大允许误差为 $\pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$, 则区间半宽度值为 $a_{21} = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$, 认为服从均匀分布, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。则标准不确定度 u_{21} 为:

$$u_{21} = a_{21}/k = 5.77 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

(2) 根据技术说明书, 干体式温度校准器温度波动度: $\pm 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$, 则区间半宽度值为 $a_{22} = 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$, 认为服从均匀分布, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。则标准不确定度 u_{22} 为:

$$u_{22} = a_{22}/k = 2.89 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

C.3.4.3 读数分辨力引入的不确定度 u_3

读数分辨力为 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$, 即区间半宽度值为 $a_3 = 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$, 认为服从均匀分布, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。取其最大值作为整个量程读数分辨力的标准不确定度 u_3 为:

$$u_3 = a_3/k = 2.89 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

C.3.5 合成标准不确定度的评定

主要标准不确定度汇总表如表 C6 所示。

表 C6 标准不确定度一览表

| 标准不确定度分量 | 不确定度来源 | 标准不确定度值 | $ c_i $ | $ c_i u(x_i)$ |
|----------|--------|---|---------|---|
| u_1 | 测量重复性 | $4.83 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ | 1 | $4.83 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| u_{21} | 数字温度计 | $5.77 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ | 1 | $5.77 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| u_{22} | 温度校准器 | $2.89 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ | 1 | $2.89 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| u_3 | 分辨力 | $2.89 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ | 1 | $2.89 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ |

重复性引入的标准不确定度分量大于被测仪器的分辨力所引入的不确定度分量时, 可以不考虑分辨力所引入的不确定度分量, 各不确定度分量独立不相关, 则合成标准不确定度 u_c 为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_{21}^2 + u_{22}^2} = 8.06 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

C.3.6 扩展不确定度的评定

对应 p 约为 95% 包含概率, 取 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U=ku_c=2\times 8.06\times 10^{-2}\text{°C}=0.16\text{°C}\approx 0.2\text{°C}$$
