
中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 1068—××××

固态电压标准

DC reference Standard

(报批稿)

××××—××—××发布

×××—××—××实施

国家市场监督管理总局 发布

固态电压标准

DC reference Standard

JJG XXXX-XX

归口单位：全国电磁计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

中国航天科工集团二院二〇三所

参加起草单位：北京东方计量测试研究所

本规程委托全国电磁计量技术委员会负责解释。

本规程主要起草人：

赵洪刚（中国计量科学研究院）

康 焱（中国航天科工集团二院二〇三所）

李红晖（中国计量科学研究院）

参加起草人：

王 莺（北京东方计量测试研究所）

王曾敏（中国计量科学研究院）

朱 珠（中国航天科工集团二院二〇三所）

黄小钉（北京东方计量测试研究所）

目 录

引言.....	1
1 范围.....	2
2 引用文件.....	2
3 术语.....	2
4 概述.....	2
5 计量性能要求.....	3
5.1 输出电压的稳定性.....	3
5.2 常用量程输出电压的允许范围.....	3
5.3 短期稳定性.....	3
6 通用技术要求.....	3
6.1 外观及附件.....	3
6.2 工作正常性检查.....	3
7 计量器具控制.....	3
7.1 检定条件.....	3
7.2 检定项目及检定方法.....	5
7.3 检定结果的处理.....	11
7.4 检定周期.....	11
附录 A 检定证书和检定结果通知书（内面）格式.....	12
附录 B 分压器及指零仪的校准方法.....	14

引言

本规程依据国家计量技术规范 JJF1002《国家计量检定规程编写规则》编制。

本规程替代 JJG 1068-2011《固态电压标准》检定规程。

相对于 JJG 1068-2011，主要变化如下：

- 增加 100 mV 检定点，提出了对该点计量性能及对相应计量器具的要求
- 在计量性能中，对输出电压的稳定性技术指标重新进行了描述，增加了对短期稳定性的要求
- 对检定需要测量的项目重新进行了要求
- 对检定环境条件的温度进行了修改
- 对约瑟夫森常数值进行了修改
- 修改了检定证书和检定结果通知书格式
- 增加了引用文件部分

所替代规程的历次版本发布情况：

- JJG 1068-2011《固态电压标准》

固态电压标准

1 范围

本规程适用于输出直流电压值为 10V、1.018V、1V、100mV 固态电压标准的首次检定、后续检定和使用中检查。

2 引用文件

本规程引用了下列文件：

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

JJF 1094 测量仪器特性评定

JIG 2087 直流电动势计量器具检定系统表

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

3 术语

日漂移率（DRIFT RATE）：一段时期内输出电压的变化除以这段时期所包含的天数。

4 概述

固态电压标准作为直流电压标准，用于检定/校准高准确度的数字电压表和多功能标准源等，也可以日常保存直流电压量值。

固态电压标准的核心元件是齐纳二极管，主要分为分立齐纳二极管型固态电压标准和参考放大器型固态电压标准。

一般情况下固态电压标准的输出电压都设计成 10V，其 1.018V、1V、100mV 输出则是通过对 10V 参考电压分压得到的，原理图如图 1 所示。

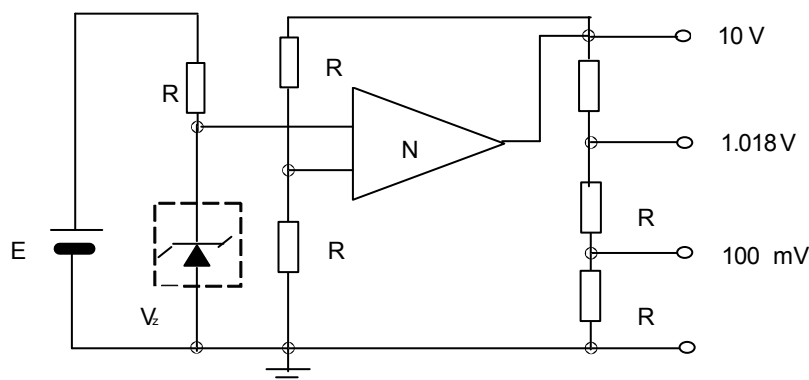


图 1 固态电压标准原理图

V_z —温补齐纳二极管；N—集成运放

5 计量性能要求

5.1 输出电压的稳定性

固态电压标准输出电压的稳定性应满足表 1 要求。

表 1 固态电压标准输出电压的稳定性

10V (年稳定性)	1V/1.018V (年稳定性)	1V/1.018V (月稳定性)	100mV (年稳定性)
$\pm 3 \times 10^{-6}$	$\pm 4.5 \times 10^{-6}$	$\pm 1.5 \times 10^{-6}$	$\pm 1.5 \times 10^{-5}$

5.2 常用量程输出电压的允许范围

固态电压标准常用量程输出电压值的允许范围见表 2。

表 2 固态电压标准常用量程输出电压值的允许范围

10V	1.018V	1V	100 mV
10.000 V ± 0.001 V	1.018 V ± 0.001 V	1.000 V ± 0.001 V	100 mV ± 0.1 mV

5.3 短期稳定性

测量期间 (3 天到 5 天) 被测固态电压标准的变化量应小于表 1 中允许年变化值的 1/4。

6 通用技术要求

6.1 外观及附件

被检固态电压标准的外观应完好, 无影响正常工作的机械损伤; 附件应齐全, 非首次检定时应有前次检定证书。被检固态电压标准的开关、接线柱、输入输出端口应有明确识别标志。

6.2 工作正常性检查

被检固态电压标准的供电电源输入方式应符合仪器的技术要求。通电后, 仪器前面板各指示灯应指示正常。当断开外部电源时, 仪器校准指示灯应显示正常。

7 计量器具控制

7.1 检定条件

7.1.1 检定用设备

7.1.1.1 约瑟夫森电压标准

约瑟夫森结输出电压: 100mV~10 V;

约瑟夫森结超导临界电流 > 60 μ A;

测量不确定度: 1×10^{-7} , $k=2$ 。

7.1.1.2 工作标准组

由连续四年以上经约瑟夫森电压标准检定的多只固态电压标准组成。工作标准组 1 V、1.018 V 和 10 V 输出电压平均值的年稳定性应优于 $\pm 3 \times 10^{-7}$ ，100 mV 输出电压平均值的年稳定性应优于 $\pm 2 \times 10^{-6}$ 。

7.1.1.3 数字电压表

约瑟夫森电压标准法和工作标准组法中的差值法对数字电压表的量程和允许误差的要求如表 3 所示。

表 3 差值法对数字电压表的量程及允许误差的要求

量程	允许误差
100 mV	$\pm 6 \times 10^{-6}$
10 mV	$\pm 1.5 \times 10^{-5}$

工作标准组法中的替代法对数字电压表的量程和短期稳定性的要求如表 4 所示。

表 4 替代法对数字电压表的量程及短期稳定性的要求

量程	短期稳定性
10 V、1 V	$\pm 5 \times 10^{-7}$
100 mV	$\pm 1.5 \times 10^{-6}$

7.1.1.4 指零仪(标准电池法)

量程：10 mV~200 mV；

测量 10V 差值引入的不确定度： 5×10^{-7} ， $k=2$

7.1.1.5 低热电势换向开关

热电势： $\leq 50\text{nV}$ 。

7.1.1.6 电池工作基准组

年稳定性： $\pm 2 \times 10^{-7}$ 。

7.1.1.7 分压器

比例不确定度： 1×10^{-7} ， $k=2$ 。

7.1.1.8 辅助电压源

稳定性： $\pm 1 \times 10^{-7}/\text{h}$ 。

7.1.2 检定环境条件

温度： $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ；

相对湿度：30%～65%；

供电电源：电压(220±10)V，频率(50±1)Hz；

周围无影响检定系统正常工作的电磁干扰和机械振动。

7.2 检定项目及检定方法

检定项目见表 5

表 5 检定项目一览表

项目名称	首次检定	后续检定	使用中检查
固态电压标准输出电压	+	+	+
固态电压标准输出电压年稳定性	-	+	-
固态电压标准输出电压月稳定性	+	-	-

注： 1. “+”为应检项目，“-”为可不检项目；
2. 修理后检定项目与首次检定项目相同；
3. 检定时以被检固态电压标准说明书的技术要求为准。

7.2.1 外观及工作正常性检查

7.2.1.1 外观及附件

用目视法检查被检固态电压标准的外观，其结果应符合第 6.1 条的规定。

7.2.1.2 工作正常性检查

所有检定用设备均需按各自技术说明书规定的时间预热。将被检固态电压标准接入供电电源，通电后各指示灯应显示正常，并至少在检定条件下放置 24h。若校准状态指示灯熄灭，应按仪器使用说明书要求恢复校准状态后进行检定。

7.2.2 输出电压和输出电压稳定性的检定

7.2.2.1 约瑟夫森电压标准法

a) 输出电压

约瑟夫森电压标准的基本原理是交流约瑟夫森效应，即输出的量子化台阶电压 U_J 与辐照在约瑟夫森结上的微波频率 f 的关系满足公式 (1)：

$$U_J = n_J f / K_J \quad (1)$$

式中： U_J ——台阶标号为 n 的量子电压，V；

f ——辐照在阵列结上的微波频率，GHz；

n_J ——量子化台阶数；

K_J ——约瑟夫森常数。

用约瑟夫森电压标准装置检定固态电压标准时，采用差值法进行测量，即将固态电压标准的输出电压与阵列结的量子电压输出端按图 2 连接。从输出端到其它仪器的连接应使用低热电势屏蔽引线。当仪器和电源地间有电位时或者在使用长引线连接一个高阻抗负载时，以及在高阻抗环境中操作时，要使用保护（GUARD）接线。

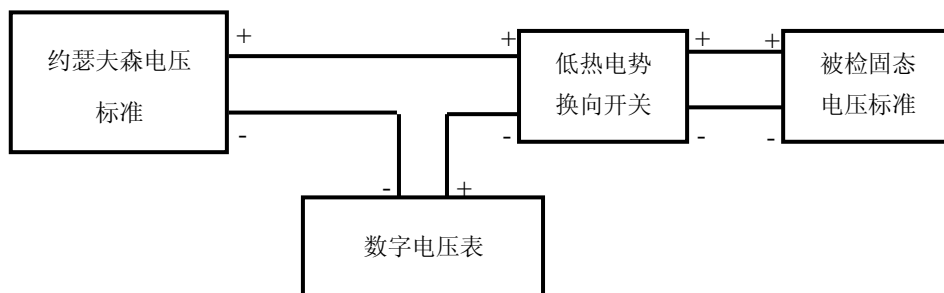


图 2 用约瑟夫森电压标准装置进行检定的原理框图

通过一台数字电压表读取被检固态电压标准的输出电压与阵列结的量子电压输出端之间的差值并按公式（2）计算出被检固态电压标准的输出电压：

$$U = U_j - \Delta U \quad (2)$$

式中： U ——被检固态电压标准的输出电压计算值，V；

U_j ——量子电压，V；

ΔU ——数字电压表测量的量子电压与被检固态电压标准输出电压的差值。

在测量过程中，应采取必要措施如换向法^①、最小二乘法以及通过设定最佳采样次数和采样时间等措施，以减小固有热电势、漂移热电势、噪声等因素对测量结果的影响，设定的采样次数应能够满足检定要求。

约瑟夫森电压标准装置（包括测量电路）应具有良好的屏蔽保护和接地措施，并远离强电、磁场，以避免外界电磁场干扰和静电感应等影响。

检定步骤如下：

- ①. 按照图 2 连接好各测试设备，仪器按规定时间预热；
- ②. 约瑟夫森结装入低温测试探杆后，将低温测试探杆缓慢插入已灌注液氮的杜瓦瓶中，液氮的液面应能将其淹没；
- ③. 确认约瑟夫森结无冻结磁通现象，其超导临界电流应能满足约瑟夫森结稳定工作的要求；
- ④. 运行约瑟夫森电压标准检定程序，根据程序预先设定的检定步骤测量被检固态电压标准输出电压 U ；
- ⑤. 连续测量 3 个工作日，将 3 个工作日的测量结果进行平均作为被检固态

电压标准输出电压的检定结果。

b) 输出电压的稳定性

1) 输出电压的年稳定性

对被检固态电压标准每年检定一次,用第二年的检定值减去第一年的检定值所得到的差值作为当年的输出电压年稳定性。

2) 输出电压的月稳定性

对被检固态电压标准以 30 天为周期进行测量,测量工作日不少于 15 天,用最小二乘法拟合出漂移曲线,并计算出日漂移率,其月稳定性为:

$$U_{ms}=30U_{ds} \quad (3)$$

式中: U_{ds} ——日漂移率, V/d;

7.2.2.2 工作标准组法

a) 输出电压

1) 确定工作标准的预期值

根据工作标准组中作为工作标准的每一只固态电压标准的日漂移率 U_{ds} 和最近一次用约瑟夫森电压标准检定的日期到当前日期之间的天数 n_d , 即可通过式

(4) 计算出该只固态电压标准在此期间的预期值:

$$U_{pre} = U + n_d \cdot U_{ds} \quad (4)$$

式中: U ——用约瑟夫森电压标准进行检定的标准值;

n_d ——用约瑟夫森电压标准进行检定的日期到当前日期之间的天数 (n_d 应小于 365 天);

U_{ds} ——将历年数据 (一般选取 4~6 年) 用最小二乘法拟合后得出的日漂移率;

U_{pre} ——工作标准电压的预期值。

2) 差值法检定输出电压

工作标准组差值法检定固态电压标准输出电压的接线如图 3 所示。

①换向法: 在测量直流小电压时, 为了消除热电势的影响, 可以将测量回路换向, 进行正、反向两次测量, 取平均值, 即可消除热电势中的固定项。

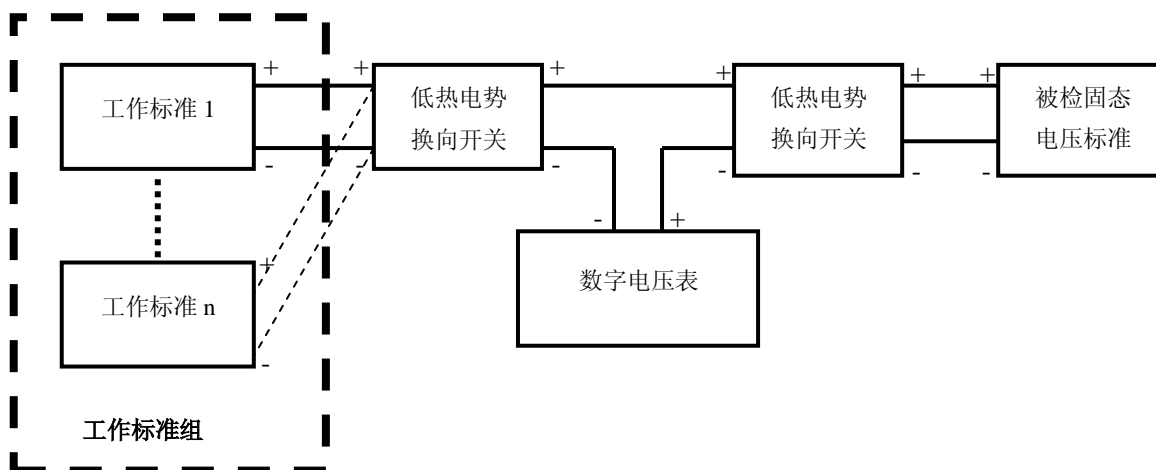


图3 工作标准组差值法检定固态电压标准

检定步骤如下：

- ①. 被检固态电压标准在校准状态下应在实验室放置 24h 以上；
- ②. 将工作标准的预期值 U_{pre} 作为标准值；
- ③. 按图 3 连接被检固态电压标准、工作标准、换向开关和数字电压表等，并进行测量；
- ④. 数字电压表稳定 1 min 后，读取其读数为 U_1 ；
- ⑤. 将被检固态电压标准和工作标准的高端和低端引线反向，再进行测量；
- ⑥. 数字电压表稳定 1 min 后，读取其读数为 U_2 ；
- ⑦. 被检固态电压标准的测量值 $U_i = U_{pre} - (U_1 - U_2) / 2$ ；
- ⑧. 按以上方法每只工作标准对被检固态电压标准各检一遍，其测量值为

$$U = \sum_{i=1}^{n_i} U_i / n_i, \text{ 其中 } n_i \text{ 为作为工作标准的固态电压标准的只数。}$$

- ⑨. 连续测量 3 个工作日，将 3 个工作日的测量结果进行平均作为被检固态电压标准输出电压的检定结果。

3) 替代法检定输出电压

工作标准组替代法检定固态电压标准输出电压的接线如图 4 所示。

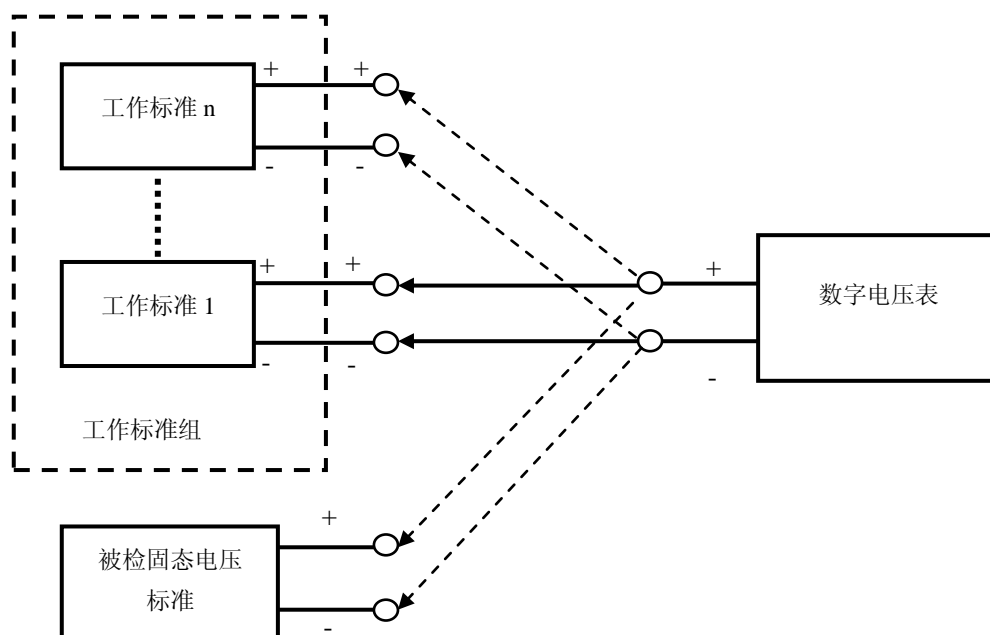


图4 工作标准组替代法检定固态电压标准

检定步骤如下：

- ①. 被检固态电压标准在校准状态下应在实验室放置 24h 以上；
- ②. 将工作标准的预期值 U_{pre} 作为标准值；
- ③. 根据图 4 首先用数字电压表测量工作标准组中的工作标准，其测量值为 U_s ；
- ④. 再用数字电压表测量被检固态电压标准，其测量值为 U_x ；
- ⑤. 被检固态电压标准的测量值 $U_i = U_{pre} - (U_s - U_x)$ ；
- ⑥. 按以上方法将被检固态电压标准分别由其余工作标准各检定一遍，

则被检固态电压标准的测量值为 $U = \sum_{i=1}^{n_i} U_i / n_i$ ，其中 n_i 为作为工作标准的固态电压标准的只数。

- ⑦. 连续测量 3 个工作日，将 3 个工作日的测量结果进行平均作为被检固态电压标准输出电压的检定结果。

b) 输出电压的稳定性

同 7.2.2.1 b) 条。

7.2.2.3 标准电池法

a) 输出电压

1) 采用 10:1 分压器法

由稳定电源产生 10.186V 电压，通过 10:1 的分压器与 1.0186V 的标准电池

比较，得到准确的 10.186V 的量值，用此值校准被检 10V 固态电压标准。标准电池的接线如图 5 所示。

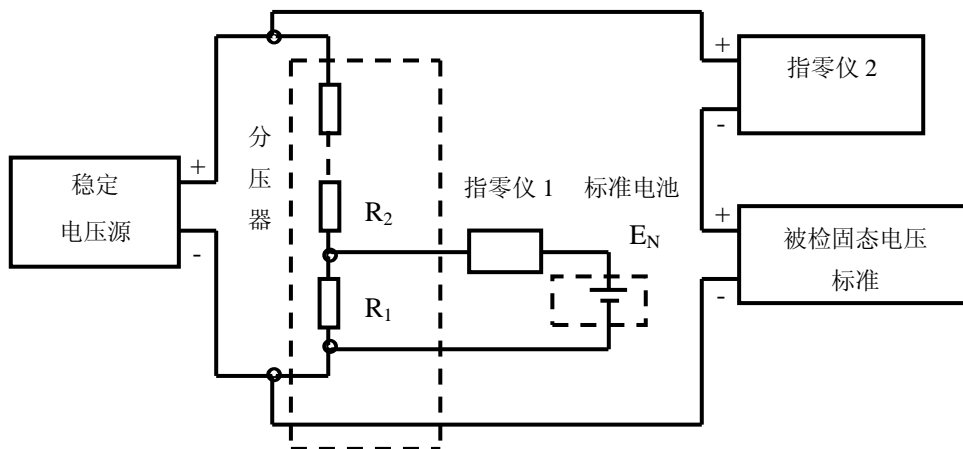


图 5 标准电池法检定固态电压标准的原理框图

检定步骤如下：

- ①. 被检固态电压标准在实验室应放置 24h，测量时固态电压标准一般应使用内部电池供电；
- ②. 校准分压器，比率不确定度满足 $1 \times 10^{-7}/h$ 的要求；
- ③. 按图 5 连接被检固态电压标准、标准电池、稳定电压源、分压器、作为指零仪的数字电压表等，稳定电压源和指零仪预热 2 小时后进行测量；
- ④. 由指零仪 2 读出标准分压器两端的电压 U_K 与被检固态电压标准 U_X 的差值，

$$\Delta U_X = U_K - U_X, \text{ 因 } U_K = KV_{E_N},$$

$$\text{则: } U_X = KV_{E_N} - \Delta U_X \quad (5)$$

式中： U_X ——被检固态电压标准的计算值，V；

K ——标准分压器的分压系数；

V_{E_N} ——标准电池电动势值，V；

ΔU_X ——标准分压器两端的电压 U_K 与被检固态电压标准 U_X 之差，V。

- ⑤. 连续测量 3 天，将 3 天的测量结果进行平均作为被检固态电压标准输出电压的检定结果。
- ⑥. 有关分压器及指零仪的校准方法见附录 B。

2) 采用任意比分压器法（此方法包含了采用自动电位差计）

由稳定电源产生 10V 电压，通过分压器与 1.0186V 的标准电池比较，得到准确的 10V 量值，用此值校准被检 10V 固态电压标准。接线如图 5 所示。

检定步骤如下：

- ①. 被检固态电压标准在实验室应放置 24h，测量时固态电压标准一般应使用内部电池供电；
- ②. 校准分压器，比率不确定度满足 $1 \times 10^{-7}/h$ 的要求；
- ③. 按图 5 连接被检固态电压标准、标准电池、稳定电压源、分压器、指零仪等，稳定电压源和指零仪预热 2 小时后进行测量；
- ④. 由指零仪 2 读出标准分压器两端的电压 U_K 与被检固态电压标准 U_X 的差值， $\Delta U_X = U_K - U_X$ ，因 $U_K = KV_{EN}$ ，

$$\text{则： } U_X = KV_{EN} - \Delta U_X \quad (6)$$

式中： U_X ——被检固态电压标准的测量值，V；

K ——标准分压器的分压系数；

V_{EN} ——标准电池电动势值，V；

ΔU_X ——标准分压器两端的电压 U_K 与被检固态电压标准 U_X 之差，V。

- ⑤. 连续测量 3 天，将 3 天的测量结果进行平均作为被检固态电压标准输出电压的检定结果。
- ⑥. 有关分压器及指零仪的校准方法见附录 B。

b) 输出电压的稳定性

同 7.2.2.1.b) 条

7.3 检定结果的处理

按本规程要求检定合格的固态电压标准，出具检定证书；检定不合格的，出具检定结果通知书，并注明不合格项目。检定证书及检定结果通知书格式参见附录 A。

7.4 检定周期

固态电压标准的检定周期一般为一年。

附录 A

检定证书和检定结果通知书（内面）格式

A.1 检定证书（内面）格式

A.1.1 外观检查：

A.1.2 电压测量值：

表 A1 电压测量值

输出示值	输出实测值	扩展不确定度 U_{rel} , $k=2$ (V/V)
10V		
1.018V		
1V		
100 mV		

A.1.3 输出电压稳定性：

表 A2 输出电压稳定性

示 值	输出电压年变化	电压允许年变化
10V		
1.018V		
1V		
100 mV		

A.2 检定结果通知书（内面）格式

A.2.1 外观检查：

A.2.2 电压测量值：

表 A1 电压测量值

输出示值	输出实测值	扩展不确定度 U_{rel} , $k=2$ (V/V)
10V		
1.018V		
1V		
100 mV		

A.2.3 输出电压稳定性：

表 A2 输出电压稳定性

示 值	输出电压年变化	电压允许年变化
10V		
1.018V		
1V		
100 mV		

A.2.4 不合格项：

附录 B

分压器及指零仪的校准方法

B1 分压器的校准方法

B1.1 级联式分压器校准方法

B1.1.1 参考电压法

按图 B1 接线, 分别用参考电压 U_N 通过指零仪测出第 1 段的分压值 $U_N + \Delta U_1$ 和第 i 段分压值 $U_N + \Delta U_i$, 则被校准分压器的电压比例系数如公式 B1 所示。

$$k_n = \sum_{i=1}^{10} \left(\frac{U_N + \Delta U_i}{U_N + \Delta U_1} \right) \approx 10 \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta N_i - \Delta U_{1,i})}{10U_N} \right] \quad (\text{B1})$$

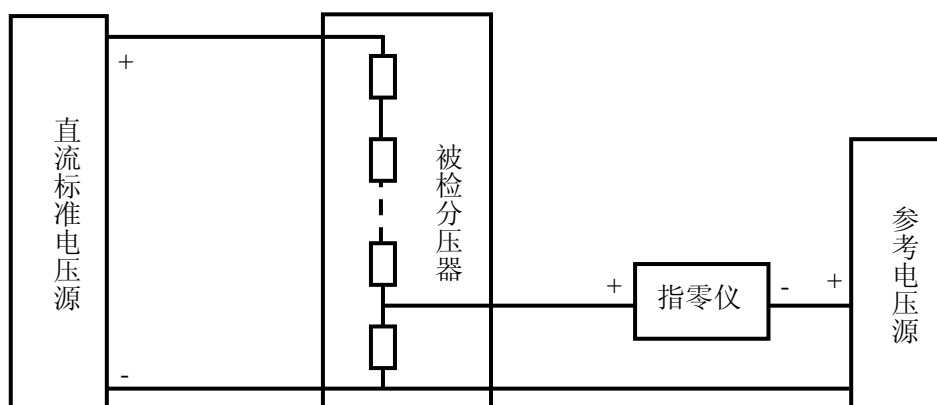


图 B1 参考电压法接线图

B1.1.2 专用电桥法

以分压器的第一段电阻为基准, 用专用电桥将带有可调电阻的分压器的每一段电阻都调到与第一段电阻相同, 从而得到准确的整数分压比率系数。

B1.2 开尔文式分压器校准方法

开尔文式分压器校准原理采用的是专用电桥, 即以分压器的第一段电阻为基准, 用专用电桥将带有可调电阻的分压器的每一段电阻都调到与第一段电阻相同, 从而得到准确的整数分压比率系数。

B1.3 哈蒙分压器的校准方法

按图 B2 接线,校准哈蒙分压器是基于可串并联换接的哈蒙电阻网络的原理,校准时把分压器的上臂分成相等的 3 组。把它们并联起来,形成一个数值和输出电阻器相等的电阻器。这两个电阻器形成了惠斯登电桥两个桥臂。电桥的另两个桥臂由两只标准电阻器组成。在电路中的位置可以互相交换。通过调节仪器面板上的平衡旋钮使电桥平衡,得到准确的 10:1 和 100:1 的比率。

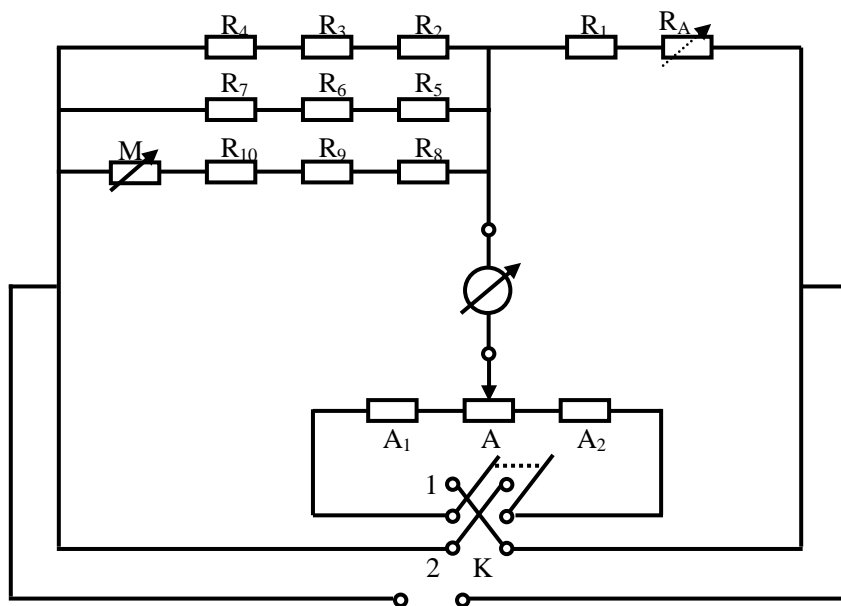


图 B2 哈蒙分压器校准接线图

B1.4 电位差计的校准方法

按说明书要求输入相关参数,根据程序预先设定的步骤进行自动校准。

B2 指零仪的校准方法

当分压比为 2:11 时, $K_{2:11}$ 约为 0.182, 其对 1.0186 的分压结果约为 0.185V, 与需要校准的 0.186V 差值电压接近。按图 B3 接线,用调压电阻使“指零仪 1”读数为零,则分压器两端的电压为标准电池 E_N 的电动势值,被校指零仪的读数 U 与标准值 U_S 的差值 ΔV 即为被校指零仪的示值误差,见式 (B4),因此就实现了对指零仪的校准。其中分压器的校准过程与 B1.1.1 同理,计算公式如下:

$$K_{2:11} \approx 2/11 \left\{ 1 + \sum_{i=1}^2 (\Delta U_i - \Delta U_1) / 2V_{EN} - \sum_{i=1}^2 (\Delta U_i - \Delta U_1) / 11V_{EN} \right\} \quad (B2)$$

式中: $K_{2:11}$ ——十一个抽头的分压器的 2: 11 的分压系数;

V_{EN} ——标准电池电动势值, V;

ΔU_I ——第 1 个分压段与标准电池的差值, V;

ΔU_i ——第 i 个分压段与标准电池的差值, V。

被校指零仪的标准值按公式 B3 计算。

$$U_s = K_{2:11} V_{EN} \quad (B3)$$

式中: U_s ——被校指零仪的标准值, V。

被校指零仪的示值误差按公式 B4 计算。

$$\Delta V = U - U_s \quad (B4)$$

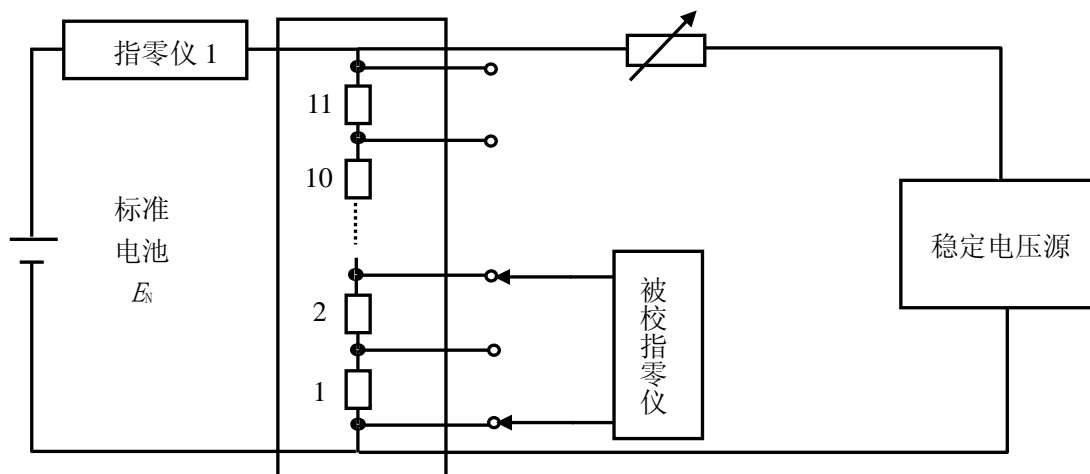


图 B3 指零仪校准原理框图