

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.02.15

在使用状态下校准 BY22 标准分压箱

朱赤炜

(南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211106)

摘要: 分压箱的检定/校准状态与使用状态不一致是造成误差的主要原因之一。本文介绍了一种用 8508A-1 数字多用表、5720A 多功能校准源在使用状态下校准 BY22 标准分压箱的简便方法。

关键词: 标准分压箱; 分压比; 使用状态; 校准; 不确定度

中图分类号: TB9; TM933.21

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)02-0051-04

Calibrating BY22 Standard Volt Ratio Boxes in Working Condition

ZHU Chiwei

(Nanjing Electrical and Hydraulic Engineering Research Center, Nanjing 211106, China)

Abstract: The difference between the condition of verifying or calibrating volt ratio boxes and the working condition is one of the main reasons for causing errors. This article introduces a simple method which uses 8508-1 digital multi-meter and 5720A multi-function calibrator to calibrate a BY22 standard volt ratio box in working condition.

Key words: standard volt ratio box; rated voltage ratio; working condition; calibration; uncertainty

1 问题的提出

BY22 标准分压箱是一种 0.001 级的级联式直流电阻分压箱, 具有 18 个比率, 可将 20 ~ 1000 V 被检/校电压转变成 10 V 电压。在 JJG531-2003《直流电阻分压箱检定规程》中, 0.005 级及以上直流电阻分压箱采用对检法, 在对检法中用作标准的分压箱, 目前只能采取不在额定工作状态下检定的电桥法或标准电阻比例箱法。而构成分压箱的电阻是温度的函数, 其阻值随温度的变化而变化。如果分压箱在使用状态下与检定/校准时的电流不一致, 温升就不一致; 且各段电阻值不同, 所选用的线材及其温度系数也会不同; 另外分压箱本身绝缘电阻有限, 加上环境中空气的湿度和灰尘杂质对绝缘电阻的影响, 在电压较高时往往会造成线路对机壳的漏电^[1]。故不在使用状态下检定/校准分压箱是造成检定/校准误差的主要原因之一^[2]。本人在工作中就发现好几例直流电阻分压箱在额定工作状态(使用状态)下与非额定工作状态下检定结果不一致的情况。

2 解决方法

为了实现在额定使用状态下检定/校准 BY22 标准分压箱, 本人根据多年的工作经验, 经过大量实验, 采用分段依次测量电压法校准 BY22 标准分压箱, 其校准原理如图 1 所示。

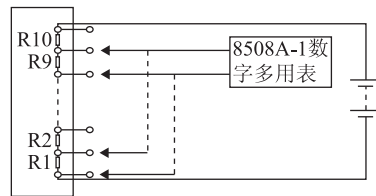


图1 BY22 标准分压箱校准原理图

2.1 分压比 2:1, 3:1, ..., 10:1 的校准

分别把 BY22 前面板 100 V 的保护端和电压端、0 V 的保护端和电压端用紫铜片短接。5720A 四线输出 100 V 电压至 BY22 的 100 V 和 0 V 电压端与敏感端, 用 8508A-1 分别测量并记录 BY22 敏感端 10 V 与 0 V, 20 V 与 10 V, ..., 100 V 与 90 V 间的电压值 $U_1, U_2, \dots, U_{10}$, BY22 的电压比率按式(1)计算。

$$K_N = \sum_{i=2}^N A_i + 1 \quad (N = 2, 3, \dots, 10) \quad (1)$$

式中: $A_i = U_i/U_1$ ($i = 2, 3, \dots, 10$)。

收稿日期: 2015-10-24 修回日期: 2015-11-26

作者简介: 朱赤炜(1971-), 男, 工程师, 长期从事电学、无线电、热学的检定、校准及试验台现场校准工作。

2.2 分压比 20:1, 30:1, …, 100:1 的校准

断开 100 V 保护端和电压端的短接片, 短接 1000 V 保护端和电压端, 5720A 四线输出 1000 V 电压至 BY22 的 1000 V 和 0 V 电压端与敏感端, 8508A-1 分别测量并记录 BY22 敏感端 100 V 与 0 V, 200 V 与 100 V, …, 1000 V 与 900 V 间的电压值 U_{10} , U_{20} , …, U_{100} (注意: 只能用8508A 系列数表, 目前世界上只有此款数表的输入低端可承受 920V 直流电压), BY22 的电压比率按式(2)计算。

表 1 BY22 串联电阻阻值

分压比	10 个分压电阻阻值/kΩ									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10:1	9.995103	9.995096	9.995187	9.995128	9.995196	9.995054	9.995214	9.995055	9.995258	9.995078
100:1	99.52470	99.52551	99.52510	99.52542	99.51773	99.52673	99.52563	99.52382	99.52438	99.51502

表 2 BY22 分压比较准数据

序号	10:1		100:1(BY22 的 1000 V 与 0 V 间加 100 V 电压)		100:1(BY22 的 1000 V 与 0 V 间加 1000 V 电压)		用电阻比值法测分压比	
	电压值/V	比值	电压值/V	比值	电压值/V	比值	10:1	100:1
1	9.999980		10.000033		99.11572			
2	9.999987	2.0000007	10.000036	20.000031	99.11757	20.000215	1.9999993	20.000149
3	10.000035	3.0000062	10.000086	30.000099	99.11715	30.000374	3.0000077	30.000223
4	9.999971	4.0000053	10.000021	40.000101	99.11694	40.000511	4.0000102	40.000330
5	10.000046	5.0000119	10.000094	50.000176	99.10927	49.999874	5.0000195	49.999663
6	9.999950	6.0000089	9.999995	60.000152	99.11828	60.000147	6.0000146	59.999901
7	10.000058	7.0000167	10.000106	70.000239	99.11742	70.000332	7.0000257	70.000028
8	9.999906	8.0000093	9.999955	80.000176	99.11615	80.000390	8.0000209	79.999974
9	10.000073	9.0000186	10.000124	90.000281	99.11736	90.000570	9.0000364	89.999976
10	9.999936	10.0000142	9.999988	00.000250	99.10901	99.999907	10.0000339	99.999037

分析实验数据可知, 在不同状态下校准分压箱, 结果不太一致。

4 分段依次测量电压法的不确定度分析

分段依次测量电压法是一种用各段电压与基准电压相比较的方法^[3]。在额定工作状态下校准 BY22 时, 连接线采用没经过镀锡、低热电势的高纯度单股镀金线; 5720A, 8508A-1 和 BY22 的 GUARD 端短接; 读数时, 等热平衡建立、读数稳定后记录。BY22 各分压电阻上均流过约 1 mA 电流, 5720A 输出 1000 V 电压时可输出 20 mA 电流, 其噪声的技术指标为 $(0.15 \times 10^{-6}$ 读数 + 0.3×10^{-6} 量程), 8508A-1 使用滤波器功能后串模抑制比达 110 dB 以上, 故由 5720A 带载能力、噪声、分压箱内温升、泄漏电流、环境中空气的湿度和灰尘杂质等影响带来的不确定度分量都可忽略。

$$K_{10 \ast N} = (\sum_{i=2}^N A_{10 \ast i} + 1) K_{10} \quad (N = 2, 3, \cdots, 10) \quad (2)$$

式中: $A_{10 \ast i} = U_{10 \ast i} / U_{10} \quad (i = 2, 3, \cdots, 10)$ 。

3 实验数据

用编号为 8830204 的 5720A, 编号为 860946866 的 8508A-1 对编号为 036 的 BY22 进行校准, 所得 BY22 每个分压电阻的电阻值数据见表 1, BY22 分压比较准数据见表 2。

4.1 分压比 2:1, 3:1, …, 10:1

4.1.1 数学模型

各分压比的不确定度分析方法基本相同, 现以 2: 1 为例, 其数学模型为

$$K_2 = A_2 + 1 = \frac{U_2}{U_1} + 1 \quad (3)$$

4.1.2 输入量 A_2 的标准不确定度 $u_c(A_2)$ 的评定

4.1.2.1 U_2 引入的不确定度分量 $u(U_2)$ 的评定

1) 用 A 类评定方法评定测量重复性引入的不确定度 $u_1(U_2)$

$u_1(U_2)$ 是由于 5720A、8508A-1 和 BY22 的短期稳定性、8508A-1 分辨力、BY22 在额定工作状态下分压电阻温度系数等的影响, 为了简化, 通过重复测量综合考虑, 简称测量的重复性。

8508A-1 重复 10 次测量 BY22 敏感端 20 V 与 10 V

间的电压值 U_2 ，用贝塞尔公式法计算得： $u_1(U_2) = 0.952 \mu\text{V}$ 。

2) 8508A-1 测量电压不准确引入的不确定度分量 $u_2(U_2)$

8508A-1 在 99% 置信概率下，20 V 量程的不确定度为 $\pm(4.5 \times \text{读数} + 0.25 \times \text{量程}) \times 10^{-6}$ ，其服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则 $u_2(U_2) = 28.867 \mu\text{V}$ 。

3) 8508A-1 测量电压时由输入阻抗影响引入的不确定度分量 $u_3(U_2)$

数字多用表输入阻抗对所测电压的影响可用式(4)表示为

$$\Delta = U_m - U_s = U_m - U_m \left(\frac{R_0 + R_i}{R_0} \right) = -U_m \frac{R_i}{R_0} \quad (4)$$

式中： U_m 为测量值； U_s 为电压实际值； R_i 为分压电阻值； R_0 为 8508A-1 的输入阻抗值。

8508A-1 的输入阻抗在 20 V 量程时是 10 G Ω ，8508A-1 测量分压电阻不准确带来的不确定度分量可忽略。其服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则 $u_3(U_2) = U_2 R_i / (2\sqrt{3} R_0) = 2.885 \mu\text{V}$ 。

4) 8508A-1 测量电压时由零电流影响引入的不确定度分量 $u_4(U_2)$

数字多用表零电流对所测电压的影响为

$$U_m = U_s + I_0 R_i \quad (5)$$

式中： I_0 为 8508A-1 的零电流。

8508A-1 的零电流小于 50 pA，8508A-1 测量分压电阻不准确带来的不确定度分量可忽略。其服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则 $u_4(U_2) = I_0 R_i / 2\sqrt{3} = 0.144 \mu\text{V}$ 。

5) 接触电势影响引入的不确定度分量 $u_5(U_2)$

接触电势经过实验，测得小于 1 μV 。其服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则 $u_5(U_2) = 1 \mu\text{V} / \sqrt{3} = 0.577 \mu\text{V}$ 。

6) 8508A-1 测量电压时由共模电压影响引入的不确定度分量 $u_6(U_2)$

数字多用表共模抑制比为

$$\text{CMR} = 20 \lg(U_c / \Delta U_c) \quad (6)$$

式中： U_c 为共模电压值； ΔU_c 为共模电压对测量电压值的影响。

8508A-1 的共模抑制比是 140 dB，则： $\Delta U_c = U_c / 10^7$ 。其服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则 $u_6(U_2) = U_c / (2\sqrt{3} \times 10^7) = 0.289 \mu\text{V}$ 。

以上各不确定度分量互不相关，得

$$u(U_2) = \left(\sum_{i=1}^6 u_i^2(U_2) \right)^{\frac{1}{2}} = 29.034 \mu\text{V}$$

4.1.2.2 U_1 引入的不确定度分量 $u(U_1)$ 的评定

1) 用 A 类评定方法评定测量重复性引入的不确定度 $u_1(U_1)$

8508A-1 重复 10 次测量 BY22 敏感端 10 V 与 0 V 间的电压值 U_1 ，用贝塞尔公式法计算得： $u_1(U_1) = 0.791 \mu\text{V}$ 。

2) 8508A-1 测量电压不准确引入的不确定度分量 $u_2(U_1)$

与 $u_2(U_2)$ 相同，则 $u_2(U_1) = 28.867 \mu\text{V}$ 。

3) 8508A-1 测量电压时由输入阻抗影响引入的不确定度分量 $u_3(U_1)$

与 $u_3(U_2)$ 相同，则 $u_3(U_1) = 2.887 \mu\text{V}$ 。

4) 8508A-1 测量电压时由零电流影响引入的不确定度分量 $u_4(U_1)$

与 $u_4(U_2)$ 相同，则 $u_4(U_1) = 0.144 \mu\text{V}$ 。

5) 接触电势影响引入的不确定度分量 $u_5(U_1)$

与 $u_5(U_2)$ 相同，则 $u_5(U_1) = 0.577 \mu\text{V}$ 。

以上各不确定度分量互不相关，得

$$u(U_1) = \left(\sum_{i=1}^5 u_i^2(U_1) \right)^{\frac{1}{2}} = 29.028 \mu\text{V}$$

4.1.2.3 K_2 的合成标准不确定度

采用非统计的实验估计方法，确定 U_2 和 U_1 的相关系数为

$$\rho_{12} = \frac{\delta_2 / u(U_2)}{\delta_1 / u(U_1)} = 0.9998$$

则： $u_c(A_2) =$

$$\sqrt{\left(\frac{\partial A_2}{\partial U_2} \right)^2 u^2(U_2) + \left(\frac{\partial A_2}{\partial U_1} \right)^2 u^2(U_1) + 2\rho_{12} \frac{\partial A_2}{\partial U_2} \frac{\partial A_2}{\partial U_1} u(U_2) u(U_1)} = 0.59 \times 10^{-7}$$

4.1.2.4 K_2 的扩展不确定度

根据式(3)， K_2 的合成标准不确定度 $u_c(K_2)$ 等于 $u_c(A_2)$ ，其扩展不确定度 $U(K_2) = 1.2 \times 10^{-7} (k=2)$ 。

评定其余比例的不确定度时方法相同，因 $A_2, A_3, \dots, A_{10}$ 间强相关，相关系数为 1，得 K_N 的扩展不确定度，见表 3。

表 3 K_N 的扩展不确定度

不确定度	i, N								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$u_c(A_i)/10^{-7}$	0.59	0.83	1.05	1.32	1.56	1.85	2.10	2.40	2.67
$u_c(K_N)/10^{-7}$	0.59	1.42	2.47	3.79	5.35	7.20	9.30	11.70	14.37
$U(K_N)/10^{-7}$	1.2	2.8	4.9	7.6	10.7	14.4	18.6	23.4	28.7

为了形式统一及使用方便,采用相对扩展不确定度的表示方法,并使其大于2:1, ..., 10:1 各比例的相对扩展不确定度,得 $U_{\text{rel}}(K_N) = 3 \times 10^{-7}$, $N=2, 3, \dots, 10$ 。

4.2 分压比 20:1, 30:1, ..., 100:1

4.2.1 数学模型

各分压比的不确定度分析方法基本相同,现以 20:1 为例,其数学模型由公式(2)得

$$K_{20} = (A_{20} + 1)K_{10} = \left(\frac{U_{20}}{U_{10}} + 1\right)K_{10} \quad (7)$$

4.2.2 输入量 A_{20} 的不确定度分量 $u(A_{20})$ 的评定

1) 测量重复性引入的不确定度: $u_1(U_{20}) = 12.47 \mu\text{V}$, $u_1(U_{10}) = 12.01 \mu\text{V}$ 。

2) 测量电压不准确引入的不确定度分量: 由于 8508A-1 在 99% 置信概率下, 200 V 量程的不确定度为 $\pm(7 \times \text{读数} + 0.25 \times \text{量程}) \times 10^{-6}$, 则 $u_2(U_{20}) = 429.45 \mu\text{V}$, $u_2(U_{10}) = 429.44 \mu\text{V}$ 。

3) 测量电压时由输入阻抗影响引入的不确定度分量: 200 V 量程的输入阻抗为 10 M Ω , 则 $u_3(U_{20}) = 284770.10 \mu\text{V}$, $u_3(U_{10}) = 284762.50 \mu\text{V}$ 。

4) 测量电压时由零电流影响引入的不确定度分量: $u_4(U_{20}) = 1.44 \mu\text{V}$, $u_4(U_{10}) = 1.44 \mu\text{V}$ 。

5) 接触电势影响引入的不确定度分量: $u_5(U_{20}) = 0.58 \mu\text{V}$, $u_5(U_{10}) = 0.58 \mu\text{V}$ 。

6) 测量电压时由共模电压影响引入的不确定度分量: $u_6(U_{20}) = 2.89 \mu\text{V}$ 。

由于测量电压不准确和输入阻抗影响引入的不确定度分量占绝对优势, 故 U_{10} 和 U_{20} 强相关, 相关系数为 1, $u_c(A_{20})$ 的评定方法与 $u_c(A_2)$ 的相同, 则 $u_c(A_{20}) = 0.23 \times 10^{-7}$ 。

4.2.3 输入量 K_{10} 的不确定度分量 $u(K_{10})$ 的评定

由表 3 可得 $u(K_{10}) = 14.37 \times 10^{-7}$ 。

4.2.4 K_{20} 的合成标准不确定度与扩展不确定度

K_{10} 与 A_{20} 不相关, 根据式(7), K_{20} 的合成标准不确定度 $u_c(K_{20})$ 为

$$u_c(K_{20}) = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{20}}{\partial A_{20}}\right)^2 u^2(A_{20}) + \left(\frac{\partial K_{20}}{\partial K_{10}}\right)^2 u^2(K_{10})} \\ = 2.88 \times 10^{-6}$$

其扩展不确定度 $U(K_{20}) = 5.8 \times 10^{-6} (k=2)$ 。

其余比例的不确定度评定方法相同, 得 $K_{N \times 10}$ 的扩

展不确定度, 见表 4。

表 4 $K_{N \times 10}$ 的扩展不确定度

不确定度	i, N								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$u(A_{i \times 10})/10^{-6}$	0.023	0.011	0.021	0.201	0.059	0.027	0.025	0.009	0.279
$u_c(K_{N \times 10})/10^{-6}$	2.88	4.32	5.77	7.63	9.18	10.62	12.07	13.47	15.79
$U(K_{N \times 10})/10^{-6}$	5.8	8.6	11.5	15.3	18.4	21.2	24.1	26.9	31.6

为了使用方便,采用相对扩展不确定度的表示方法,并使其大于 20:1, ..., 100:1 各比例的相对扩展不确定度,得: $U_{\text{rel}}(K_{N \times 10}) = 4 \times 10^{-7} (N=2, 3, \dots, 10)$ 。

5 结论

各比例的扩展不确定度均小于 BY22 准确度等级的 1/5。用 BY22 和 732B 校准 5720A 输出的 100 V, 1000 V 电压, 再用 732B 和 8508A-1 的前后面板比率功能校准 5720A 输出的 100 V, 1000 V 电压(8508A-1 的前后面板比率功能目前无法溯源, 但技术说明书指出, 其技术指标为某量程的 24 h 的不确定度指标), 比较两者的差值, 小于这两种测量方法不确定度的均方根。本人连续实验了 5 年, 在额定工作状态下校准的重复性与稳定性均优于 2.5×10^{-6} , 故认为此校准方法是可行的。

参考文献

- [1] 黄小钉, 焦昶. 高准确度标准分压箱的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2005, 19(3): 34-37.
- [2] 曾令儒. 电磁学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [3] 李宗扬. 计量技术基础[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.



计量测控微信

微信号: cnjlk

微信名称: 计量测控

计量测控微信公众平台由计测传媒亲情打造, 隶属中航工业北京长城计量测试技术研究所(航空304所), 为广大粉丝推送最热、最新的计量资讯, 提供各种计量检测类信息咨询服务, 教学视频等。