



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1872—2020

直流电压比例标准装置自校准方法

Self-Calibration Method for
Apparatus of DC Voltage Ratio Standards

2020-09-11 发布

2021-03-11 实施

国家市场监督管理总局 发布

**直流电压比例
标准装置自校准方法**

**Self-Calibration Method for
Apparatus of DC Voltage Ratio Standards**

JJF 1872—2020

归口单位：全国电磁计量技术委员会高压计量分技术委员会

起草单位：国家高电压计量站

中国电力科学研究院有限公司

国家电网有限责任公司直流部

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司

国网江西省电力公司电力科学研究院

国网河南省电力公司计量中心

国网四川省电力公司计量中心

本规范委托全国电磁计量技术委员会高压计量分技术委员会负责解释

本规范起草人：

李登云（国家高电压计量站）

周 峰（中国电力科学研究院有限公司）

郭贤珊（国家电网有限责任公司直流部）

王 奇（中国南方电网有限责任公司超高压输电公司）

靳绍平（国网江西省电力公司电力科学研究院）

赵玉富（国网河南省电力公司计量中心）

张福州（国网四川省电力公司计量中心）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和定义	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 分压比	(2)
5.2 分压比电压系数	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 直流耐压	(2)
6.3 测量标准及其他设备	(2)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准前准备	(3)
7.3 校准方法	(3)
8 校准结果表达	(6)
9 复校时间间隔	(6)
附录 A 分压比测量不确定度评定示例	(7)
附录 B 原始记录与数据处理	(12)
附录 C 校准证书内页格式	(17)
附录 D (资料性附录) 直流电压加法原理及公式推导	(19)

引 言

JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》、JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》共同构成支撑本规范的基础性系列规范。本规范参考了 GB/T 16927.1—2011《高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求》。

本规范为首次发布。

直流电压比例标准装置自校准方法

1 范围

本规范适用于采用直流电压加法原理的直流电压比例标准装置的自校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于该规范；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 术语和定义

以下术语和定义适用于本规范。

3.1 主标准分压器 main standard voltage divider

用于保存分压比标准量值的标准分压器，即直流电压比例标准装置。

3.2 辅助标准分压器 auxiliary standard voltage divider

用于校准主标准分压器分压比电压系数的标准分压器。

3.3 传递标准分压器 transfer standard voltage divider

用于校准主标准分压器在 $10\% U_N$ (U_N ：主标准分压器的额定电压，下同) 下分压比量值的标准分压器。

3.4 直流电压比例标准装置自校准系统 self-calibration system of DC voltage ratio standards

一套可以通过自校准确定主标准分压器分压比和分压比电压系数的系统，包括主标准分压器、辅助标准分压器和传递标准分压器。

3.5 分压比电压系数 voltage coefficient of voltage division ratio

分压器上施加的电压从参考电压（参考电压下的分压比为 K_0 ）升高至另一电压（此电压下的分压比为 K_x ）时分压比的相对变化量 $\gamma = (K_x - K_0) / K_0$ 。

3.6 分压比倒数的电压系数 voltage coefficient of reciprocal voltage division ratio

分压器上施加的电压从参考电压（参考电压下的分压比倒数为 $1/K_0$ ）升高至另一电压（此电压下的分压比倒数为 $1/K_x$ ）时分压比倒数的相对变化量 $\beta = (1/K_x - 1/K_0) \times K_0$ 。

4 概述

直流电压比例标准装置自校准系统由 1 台主标准分压器、2 台辅助标准分压器和

1 台传递标准分压器组成。采用本规范规定的自校准方法，能够获得主标准分压器的分压比量值和分压比电压系数。自校准按以下步骤进行：1) 在 $10\% U_N$ 下校准分压比；2) 以 $10\% U_N$ 为参考电压，评定分压比电压系数；3) 计算分压比。评定主标准分压器分压比电压系数时采用直流电压加法原理，直流电压加法原理及公式推导见附录 D。

5 计量特性

5.1 分压比

主标准分压器在 $10\% U_N$ 、 $20\% U_N$ 、 $30\% U_N$ 、 $40\% U_N$ 、 $50\% U_N$ 、 $60\% U_N$ 、 $70\% U_N$ 、 $80\% U_N$ 、 $90\% U_N$ 、 $100\% U_N$ 下的一次电压值与二次电压值之比。

5.2 分压比电压系数（以 $10\% U_N$ 为参考电压）

主标准分压器在 $10\% U_N$ 、 $20\% U_N$ 、 $30\% U_N$ 、 $40\% U_N$ 、 $50\% U_N$ 、 $60\% U_N$ 、 $70\% U_N$ 、 $80\% U_N$ 、 $90\% U_N$ 、 $100\% U_N$ 下的分压比，相对于 $10\% U_N$ 下的分压比的相对变化量。

6 校准条件

6.1 环境条件

自校准时的环境条件应满足以下要求：

- 高压设备与其他物体（包括墙壁）、测量及控制装置保持安全距离；
- 环境温度： $15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度： $40\%\sim 65\%$ ；
- 试验场所附近无强电磁干扰及机械振动源；
- 试验场所具备直接接地装置；
- 试验场所备有频率为 $(50\pm 0.5)\text{ Hz}$ 、波形失真不大于 5% 的交流电源。

6.2 直流耐压

自校准试验中的分压器承受 1.1 倍额定直流电压，历时 1 min，无闪络或击穿现象。试验电压下降到工作电压范围内，仍能保持原有的测量准确性。

6.3 测量标准及其他设备

6.3.1 直流电压源

由直流电压源稳定性和纹波系数引入的不确定度，不大于主标准分压器不确定度的 $1/10$ 。

6.3.2 误差测量系统

由误差测量系统的测量准确性引入的不确定度，不大于主标准分压器不确定度的 $1/10$ 。

由误差测量系统输入阻抗引入的不确定度，不大于主标准分压器不确定度的 $1/10$ 。

6.3.3 传递标准分压器

传递标准分压器的额定电压为 $10\% U_N$ 。

由传递标准分压器分压比量值不准引入的不确定度，不大于主标准分压器不确定度

的 1/2。

6.3.4 辅助标准分压器

单台辅助标准分压器的额定电压为 50% U_N ，串联辅助标准分压器的额定电压为 U_N 。

由辅助标准分压器短时稳定性引入的不确定度，不大于主标准分压器不确定度的 1/10。

由辅助标准分压器串联引入的不确定度，不大于主标准分压器不确定度的 1/10。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

对主标准分压器进行自校准，得到主标准分压器在 10% U_N 、20% U_N 、30% U_N 、40% U_N 、50% U_N 、60% U_N 、70% U_N 、80% U_N 、90% U_N 、100% U_N 下的分压比和以 10% U_N 为参考电压的分压比电压系数。

7.2 校准前准备

在分压器本体上进行直流耐压试验，试验电压波形和容差满足 GB/T 16927.1—2011 中 5.2.1 的规定，试验结果满足 6.2 的要求。

7.3 校准方法

7.3.1 10% U_N 下分压比

以传递标准分压器为标准器，采用差值法或电压比法，校准主标准分压器在 10% U_N 下的分压比。

7.3.1.1 差值法

采用差值法时，传递标准分压器与主标准分压器的标称分压比应相同。差值法的接线原理如图 1 所示。将传递标准分压器在 10% U_N 下的分压比 K'_0 及其扩展不确定度、传递标准分压器的输出电压 u_0 、差值电压测量仪表的测量电压值 Δu 填入表 B.1 中，并根据式 (1) 计算主标准分压器在 10% U_N 下的实测分压比 K'_x ：

$$K'_x = K'_0 \left(1 - \frac{\Delta u}{u_0} \right) \quad (1)$$

式中：

K'_x ——主标准分压器在 10% U_N 下的实测分压比；

K'_0 ——传递标准分压器在 10% U_N 下的分压比；

u_0 ——传递标准分压器的输出电压；

Δu ——差值电压测量仪表的测量电压值。

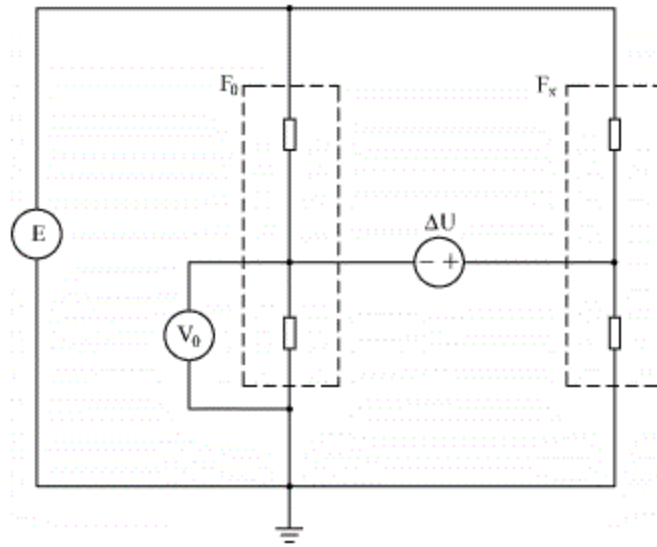


图 1 差值法接线原理图

E—直流电压源； V_0 —直流电压测量仪表； ΔU —差值电压测量仪表；
 F_0 —标准分压器； F_x —被校分压器

7.3.1.2 电压比法

电压比法的接线原理如图 2 所示。将传递标准分压器在 $10\% U_N$ 下的分压比 K'_0 及其扩展不确定度、传递标准分压器的输出电压 u_0 、主标准分压器的输出电压 u_x 填入表 B.2 中，并根据式 (2) 计算主标准分压器在 $10\% U_N$ 下的实测分压比 K'_x ：

$$K'_x = K'_0 \frac{u_0}{u_x} \quad (2)$$

式中：

K'_x ——主标准分压器在 $10\% U_N$ 下的实测分压比；

K'_0 ——传递标准分压器在 $10\% U_N$ 下的分压比；

u_0 ——传递标准分压器的输出电压；

u_x ——主标准分压器的输出电压。

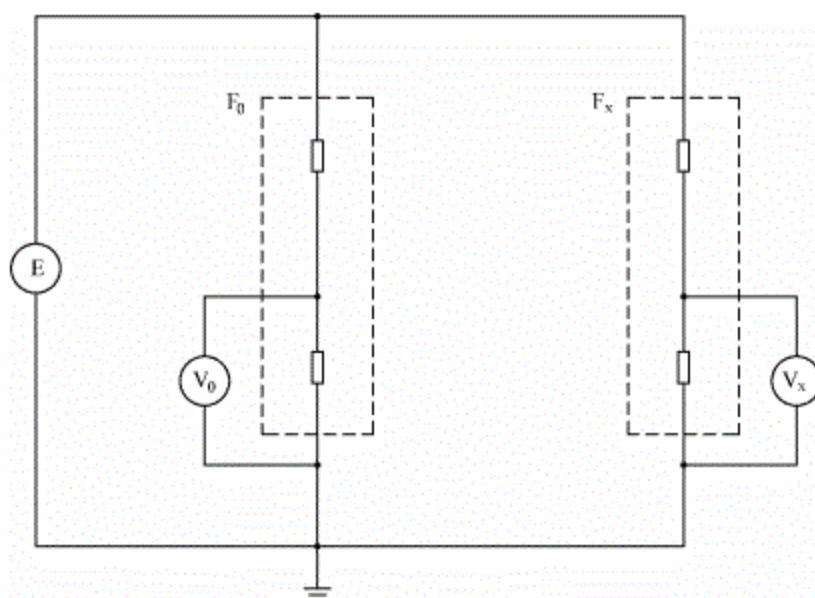


图 2 电压比法接线原理图

E—直流电压源； V_0 、 V_x —直流电压测量仪表 F_0 —标准分压器； F_x —被校分压器

7.3.2 分压比电压系数

1) 试验 a

以 1# 辅助标准分压器为标准分压器，以主标准分压器为被校分压器，采用电压比法，在 5% U_N 、10% U_N 、15% U_N 、20% U_N 、25% U_N 、30% U_N 、35% U_N 、40% U_N 、45% U_N 、50% U_N 下分别进行多次测量（每个测量点测量次数不少于 10 次），将输出电压相对误差的平均值 ϵ_a 及其标准偏差 σ_a 填入表 B.3 中。

2) 试验 b

以 2# 辅助标准分压器为标准分压器，以主标准分压器为被校分压器，采用电压比法，在 5% U_N 、10% U_N 、15% U_N 、20% U_N 、25% U_N 、30% U_N 、35% U_N 、40% U_N 、45% U_N 、50% U_N 下分别进行多次测量（每个测量点测量次数不少于 10 次），将输出电压相对误差的平均值 ϵ_b 及其标准偏差 σ_b 填入表 B.3 中。

3) 试验 c

以 3# 串联辅助标准分压器为标准分压器，以主标准分压器为被校分压器，采用电压比法，在 10% U_N 、20% U_N 、30% U_N 、40% U_N 、50% U_N 、60% U_N 、70% U_N 、80% U_N 、90% U_N 、100% U_N 下分别进行多次测量（每个测量点测量次数不少于 10 次），将输出电压相对误差的平均值 ϵ_c 及其标准偏差 σ_c 填入表 B.3 中。

试验 a、b、c 中，输出电压的相对误差 ϵ ，根据式 (3) 计算：

$$\epsilon = \frac{u'_x - u'_0}{u'_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

ϵ ——输出电压的相对误差；

u'_0 ——辅助标准分压器的输出电压；

u'_x ——主标准分压器的输出电压。

8 校准结果表达

校准结果为主标准分压器在 $10\% U_N$ 、 $20\% U_N$ 、 $30\% U_N$ 、 $40\% U_N$ 、 $50\% U_N$ 、 $60\% U_N$ 、 $70\% U_N$ 、 $80\% U_N$ 、 $90\% U_N$ 、 $100\% U_N$ 下的分压比和以 $10\% U_N$ 为参考电压的分压比电压系数，应在校准证书（报告）上反映，校准证书（报告）应至少包括以下信息：

- a) 标题，如“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) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- 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和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 对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) 校准证书和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，不得部分复制证书或报告的声明。

测量不确定度评定示例见附录 A，原始记录与数据处理见附录 B，校准证书内页格式见附录 C。

9 复校时间间隔

建议自校准的复校时间间隔为 1 年。

附录 A

分压比测量不确定度评定示例

A.1 概述

采用本规范方法对 1 000 kV 主标准分压器进行自校准。

1) 环境条件

温度：18 ℃，相对湿度：48%。

2) 计量标准器具

校准所使用的计量标准器具见表 A.1。

表 A.1 校准所使用的计量标准器具

名称	型号	出厂编号	测量范围	不确定度
传递标准分压器	100 kV	100 kV-A	10 kV~100 kV	$U_{\text{rel}}=2\times 10^{-5}(k=2)$
1 [#] 数字多用表	3 458 A	MY45046977	0.2 V~10 V	$U_{\text{rel}}=3\times 10^{-6}(k=2)$
2 [#] 数字多用表	3 458 A	MY45046910	0.2 V~10 V	$U_{\text{rel}}=3\times 10^{-6}(k=2)$
1 [#] 辅助标准分压器	500 kVS	500 kVS-A	50 kV~500 kV	$U_{\text{rel}}=1\times 10^{-4}(k=2)$
2 [#] 辅助标准分压器	500 kVX	500 kVX-A	50 kV~500 kV	$U_{\text{rel}}=1\times 10^{-4}(k=2)$

3) 校准对象

1 000 kV 主标准分压器，不确定度为 5×10^{-5} 。

A.2 测量模型

$$K_p = K_x$$

式中：

K_p ——分压比；

K_x ——实测分压比。

A.3 不确定度来源

1) 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时重复性测量引入的不确定度分量 u_1 ，采用 A 类方法评定；

2) 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时测量系统引入的不确定度分量 u_2 ，采用 B 类方法评定；

3) 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时测量系统输入阻抗引入的不确定度分量 u_3 ，采用 B 类方法评定；

4) 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时 100 kV 传递标准引入的不确定度分量 u_4 ，采用 B 类方法评定；

5) 1 000 kV 主标准电压系数引入的不确定度分量 u_5 ，采用 B 类方法评定；

6) 1 000 kV 主标准电压系数测量时测量系统引入的不确定度分量 u_6 ，采用 B 类方法评定；

- 7) 100 kV 传递标准稳定性引入的不确定度分量 u_7 ，采用 B 类方法评定；
 8) 邻近效应影响引入的不确定度分量 u_8 ，采用 B 类方法评定；
 9) 辅助标准串联后测量电阻连接点和屏蔽电阻连接点之间电位差影响引入的不确定度分量 u_9 ，采用 B 类方法评定；
 10) 引线电阻和接触电阻影响引入的不确定度分量 u_{10} ，采用 B 类方法评定；
 11) 温度影响引入的不确定度分量 u_{11} ，采用 B 类方法评定。

A.4 标准不确定度评定

A.4.1 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时重复性测量引入的不确定度分量 u_1

用差值法在 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准的 10 000/1 分压比，在重复性条件下进行了 30 次测量，所引入的标准不确定度近似正态分布，大小为：

$$u_1' = \frac{4.5}{9.99} \times 10^{-6} = 0.5 \times 10^{-6}$$

用电压比法在 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准的 100 000/1 分压比，在重复性条件下进行了 30 次测量，所引入的标准不确定度近似正态分布，大小为：

$$u_1'' = 0.1 \times 10^{-6}$$

则 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时重复性测量引入的不确定度为：

$$u_1 = 0.5 \times 10^{-6}$$

A.4.2 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时测量系统引入的不确定度分量 u_2

用差值法在 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准的 10 000/1 分压比，测量电压差值的数字多用表选用 100 mV (DC) 挡，最大允许误差为 $\pm(0.000 9\% \text{ 读数} + 0.000 3\% \text{ 量程})$ ，输入阻抗大于 10 G Ω ，测差桥路两端的差值电压为 458 μV 。差值电压的最大相对误差为 $\frac{9 \times 458 + 3 \times 100\ 000}{458} \times 10^{-6} \times 100\% = 0.07\%$ ，流过测差桥路的电流对测量结果的影响可以忽略不计，则测量系统引入的不确定度 u_2' 可以忽略不计。

用电压比法在 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准的 100 000/1 分压比，测量系统引入的不确定度由测量系统的一致性引起，近似均匀分布，根据测量系统在 1 V (DC) 量程下测量 1 V (DC) 的一致性校准试验结果，大小为：

$$u_2'' = \frac{2}{\sqrt{3}} \times 10^{-6} = 1.2 \times 10^{-6}$$

则 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时测量系统引入的不确定度为：

$$u_2 = 1.2 \times 10^{-6}$$

A.4.3 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时测量系统输入阻抗引入的不确定度分量 u_3

用差值法在 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准的 10 000/1 分压比，测量 100 kV 传递标准二次输出电压的数字多用表选用 10 V (DC) 挡，输入阻抗大于 10 G Ω ，100 kV 传递标准的输出电阻为 40 k Ω ，测量系统输入阻抗引入的不确定度近似均匀分布，大小为：

$$u_3' = \frac{40/10}{\sqrt{3}} \times 10^{-6} = 2.3 \times 10^{-6}$$

用电压比法在 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准的 100 000/1 分压比, 测量系统的数字多用表选用 1 V (DC) 挡, 输入阻抗大于 10 G Ω , 1 000 kV 标准分压器的输出电阻为 40 k Ω , 测量系统输入阻抗引入的不确定度近似均匀分布, 大小为:

$$u_3'' = \frac{40/10}{\sqrt{3}} \times 10^{-6} = 2.3 \times 10^{-6}$$

则 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时测量系统输入阻抗引入的不确定度为:

$$u_3 = 2.3 \times 10^{-6}$$

A. 4. 4 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时 100 kV 传递标准引入的不确定度分量 u_4

根据 100 kV 传递标准的有效校准证书, 100 kV 传递标准在 100 kV 下 10 000/1 和 100 000/1 的扩展不确定度为 2×10^{-5} ($k=2$), 100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时 100 kV 传递标准引入的不确定度近似均匀分布, 大小为:

$$u_4 = 10 \times 10^{-6}$$

A. 4. 5 1 000 kV 主标准电压系数引入的不确定度分量 u_5

根据 1 000 kV 直流电压加法试验结果, 1 000 kV 主标准分压比的电压系数为 1×10^{-5} , 标准偏差为 2.5×10^{-6} , 近似均匀分布, 所引入的标准不确定度为:

$$u_5 = \frac{10 + 2 \times 2.5}{\sqrt{3}} \times 10^{-6} = 8.7 \times 10^{-6}$$

A. 4. 6 1 000 kV 主标准电压系数测量时测量系统引入的不确定度分量 u_6

用 1 000 kV 直流电压加法试验测量电压系数时, 测量系统引入的不确定度由测量系统的一致性引起, 近似均匀分布, 根据测量系统在 10 V (DC) 量程下的一致性校准试验结果, 大小为:

$$u_6 = \frac{2}{\sqrt{3}} \times 10^{-6} = 1.2 \times 10^{-6}$$

A. 4. 7 100 kV 传递标准稳定性引入的不确定度分量 u_7

对 100 kV 传递标准进行稳定性考核, 表 A. 2 为考核数据统计表, 分压比相对误差的最大变化量为 6×10^{-6} , 所引入的标准不确定度近似均匀分布, 大小为:

$$u_7 = \frac{6}{\sqrt{3}} \times 10^{-6} = 3.5 \times 10^{-6}$$

表 A. 2 100 kV 传递标准稳定性考核数据统计表

$\times 10^{-5}$

核查标准	标准直流高压分压器: 100kV-B, 2×10^{-5} ($k=2$)			
考核时间	2013. 12. 10	2014. 10. 11	2014. 11. 14	2015. 01. 16
分压比相对误差	-11. 8	-12. 3	-11. 9	-12. 4

A. 4. 8 邻近效应影响引入的不确定度分量 u_8

通过改变试验布局评估邻近效应对测量结果的影响, 所引入的标准不确定度近似均匀分布, 大小为:

$$u_8 = 2 \times 10^{-6}$$

A.4.9 辅助标准串联后测量电阻连接点和屏蔽电阻连接点之间电位差影响引入的不确定度分量 u_9

两台 500 kV 辅助标准串联后，在测量电阻连接点和屏蔽电阻连接点之间会有电压差，从而产生泄漏电流，所引入的标准不确定度近似均匀分布，根据辅助标准串联后测量层与屏蔽层连接点间的电压差测量结果，评估该电位差对测量结果的影响，大小为：

$$u_9 = 1 \times 10^{-6}$$

A.4.10 引线电阻和接触电阻影响引入的不确定度分量 u_{10}

测量引线的引线电阻和接触点的接触电阻约在 10 mΩ 数量级，分压器的低压臂电阻最小都在 10 kΩ 数量级，所引入的不确定度近似均匀分布，大小为：

$$u_{10} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 10^{-6} = 0.6 \times 10^{-6}$$

A.4.11 温度影响引入的不确定度分量 u_{11}

分压器所用电阻的标称温度系数为 $\pm 2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，在分压器的安装制作过程中，将正温度系数的电阻和负温度系数的电阻搭配使用，可以使分压器总电阻的温度系数降低到 $\pm 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。试验环境温度在 $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ 范围时，温度影响为 $\pm 5 \times 10^{-6}$ ，所引入的不确定度近似均匀分布，大小为：

$$u_{11} = \frac{5}{\sqrt{3}} \times 10^{-6} = 2.9 \times 10^{-6}$$

A.5 不确定度合成

1) 填写不确定度分量表

将各标准不确定度分量的值填入不确定度分量表 A.3 中，灵敏系数均为 1。

表 A.3 不确定度分量表

$\times 10^{-6}$

标准不确定度符号	评定方法类别	不确定度分量来源	测量结果的分布	标准不确定度分量的值
u_1	A	100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时重复性测量引入的不确定度分量	正态分布	0.5
u_2	B	100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时测量系统引入的不确定度分量	均匀分布	1.2
u_3	B	100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时测量系统输入阻抗引入的不确定度分量	均匀分布	2.3
u_4	B	100 kV 下校准 1 000 kV 主标准分压比时 100 kV 传递标准引入的不确定度分量	均匀分布	10
u_5	B	1 000 kV 主标准电压系数引入的不确定度分量	均匀分布	8.7
u_6	B	1 000 kV 主标准电压系数测量时测量系统引入的不确定度分量	均匀分布	1.2

表 A.3 (续)

标准不确定度符号	评定方法类别	不确定度分量来源	测量结果的分布	×10 ⁻⁶
				标准不确定度分量的值
u_7	B	100 kV 传递标准稳定性引入的不确定度分量	均匀分布	3.5
u_8	B	邻近效应影响引入的不确定度分量	均匀分布	2
u_9	B	辅助标准串联后测量电阻连接点和屏蔽电阻连接点之间电位差影响引入的不确定度分量	均匀分布	1
u_{10}	B	引线电阻和接触电阻影响引入的不确定度分量	均匀分布	0.6
u_{11}	B	温度影响引入的不确定度分量	均匀分布	2.9

2) 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2 + u_{11}^2}$$

$$= 1.5 \times 10^{-5}$$

扩展不确定度为

$$U = 3.0 \times 10^{-5}, k = 2$$

附录 B

原始记录与数据处理

B.1 原始记录信息页

原始记录号 ××××××—××××

送校单位		额定一次电压				
型号		标称分压比				
制造厂名		不确定度				
出厂编号		输出电阻				
校准环境条件及地点：						
温度	℃	相对湿度	%			
校准地点						
校准所依据的技术文件(代号、名称)：						
校准所使用的主要测量标准：						
名称	型号	出厂编号	测量范围	准确度等级/ 不确定度/ 最大允许误差	检定/校准 证书编号	证书有 有效期至
校准结果：						
1. 直流耐压：_____						
2. 10% U_N 下分压比校准：_____						
3. 以 10% U_N 为参考电压的分压比电压系数校准：_____						
结论及说明：						

校准：

记录：

核验：

B.2 10% U_N 下分压比较准数据处理

根据表 B.1 和表 B.2 中的试验数据, 计算出主标准分压器在 10% U_N 下的分压比 K'_x 的平均值及其标准偏差 σ_1 , 并填入表 B.1 和表 B.2 中。

表 B.1 分压比较准试验记录 (差值法)

标称分压比:	传递标准的分压比 $K'_0(10\% U_N)$		K'_0 的扩展不确定度	
	第 n 次	传递标准输出电压 u_o/V	差值电压 Δu μV	主标准的实测分压比 $K'_x(10\% U_N)$
	1			
	2			
	3			
	⋮			
	N			
	K'_x 的平均值		K'_x 平均值的 标准偏差 σ_1	

表 B.2 分压比较准试验记录 (电压比法)

标称分压比:	传递标准的分压比 $K'_0(10\% U_N)$		K'_0 的扩展不确定度	
	第 n 次	传递标准输出电压 u_o/V	主标准输出电压 u_x/V	主标准的实测分压比 $K'_x(10\% U_N)$
	1			
	2			
	3			
	⋮			
	N			
	K'_x 的平均值		K'_x 平均值的 标准偏差 σ_1	

B.3 分压比电压系数校准数据处理

表 B.3 中, 以第一列数据为参考点, 根据式 (B.1)~(B.3) 计算 $\epsilon'_a(U)$ 、 $\epsilon'_b(U)$ 、 $\epsilon'_c(2U)$, 并填入表 B.3 中:

$$\epsilon'_a(U) = \epsilon_a(U) - \epsilon_a(5\%U_N) \quad (\text{B.1})$$

$$\epsilon'_b(U) = \epsilon_b(U) - \epsilon_b(5\%U_N) \quad (\text{B.2})$$

$$\epsilon'_c(2U) = \epsilon_c(2U) - \epsilon_c(10\%U_N) \quad (\text{B.3})$$

根据式 (B.4)~(B.6) 计算 $\sigma'_a(U)$ 、 $\sigma'_b(U)$ 、 $\sigma'_c(2U)$ 并填入表 B.3 中:

$$\sigma'_a(U) = \sqrt{\sigma_a^2(U) + \sigma_a^2(5\%U_N)} \quad (\text{B.4})$$

$$\sigma'_b(U) = \sqrt{\sigma_b^2(U) + \sigma_b^2(5\%U_N)} \quad (\text{B. 5})$$

$$\sigma'_c(2U) = \sqrt{\sigma_c^2(2U) + \sigma_c^2(10\%U_N)} \quad (\text{B. 6})$$

根据式 (B. 7) 计算 $[\beta(2U) - \beta(U)]$ 并填入表 B. 3 中:

$$[\beta(2U) - \beta(U)] = \epsilon'_c(2U) - \frac{\epsilon'_a(U) + \epsilon'_b(U)}{2} \quad (\text{B. 7})$$

根据式 (B. 8) 计算 σ^* 并填入表 B. 3 中:

$$\sigma^* = \sqrt{\sigma'_c(2U) + \frac{\sigma'^2_a(U) + \sigma'^2_b(U)}{4}} \quad (\text{B. 8})$$

表 B.3 分压比电压系数校准试验记录

$\times 10^{-6}$

电压 U ($\times U_N$)	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
ϵ_a										
σ_a										
ϵ'_a										
σ'_a										
电压 U ($\times U_N$)	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
ϵ_b										
σ_b										
ϵ'_b										
σ'_b										
电压 $2U$ ($\times U_N$)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
ϵ_c										
σ_c										
ϵ'_c										
σ'_c										
$[\beta(2U) - \beta(U)]$										
σ^*										

B.4 分压比电压系数校准结果统计

进行多次分压比电压系数的校准试验，并将每次试验得到结果 $[\beta(2U) - \beta(U)]$ 和 σ^* 填入表 B.4 中，计算出 $[\beta(2U) - \beta(U)]$ 的平均值、合并样本标准偏差 s_p 、组间标准偏差 s_b 和合成后的标准偏差 s_c 并填入表 B.4 中。

表 B.4 分压比电压系数校准结果统计表

 $\times 10^{-6}$

序号	电压 $2U$ ($\times U_N$)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1	$[\beta(2U) - \beta(U)]$										
	σ^*										
⋮	$[\beta(2U) - \beta(U)]$										
	σ^*										
N	$[\beta(2U) - \beta(U)]$										
	σ^*										
[$\beta(2U) - \beta(U)$]平均值											
合并样本标准偏差 s_p											
组间标准偏差 s_b											
合成后的标准偏差 s_c											

B.5 分压比电压系数计算

将表 B.4 中统计得到的 $[\beta(2U) - \beta(U)]$ 平均值和合成后的标准偏差 s_c 填入表 B.5。在表 B.5 中， $\beta'(10\% U_N) = 0$ 。

根据 $[\beta(20\% U_N) - \beta(10\% U_N)]$ 平均值、 $[\beta(40\% U_N) - \beta(20\% U_N)]$ 平均值、 $[\beta(80\% U_N) - \beta(40\% U_N)]$ 平均值，计算出 $\beta'(20\% U_N)$ 、 $\beta'(40\% U_N)$ 、 $\beta'(80\% U_N)$ 及相应的标准偏差并填入表 B.5 中。

根据 $\beta'(10\% U_N)$ 和 $\beta'(20\% U_N)$ ，用线性插值法计算出 $\beta'(15\% U_N)$ 及相应的标准偏差，根据 $[\beta(30\% U_N) - \beta(15\% U_N)]$ 平均值、 $[\beta(60\% U_N) - \beta(30\% U_N)]$ 平均值，计算出 $\beta'(30\% U_N)$ 、 $\beta'(60\% U_N)$ 及相应的标准偏差并填入表 B.5 中。

根据 $\beta'(20\% U_N)$ 和 $\beta'(30\% U_N)$ ，用线性插值法计算出 $\beta'(25\% U_N)$ 及相应的标准偏差，根据 $[\beta(50\% U_N) - \beta(25\% U_N)]$ 平均值、 $[\beta(100\% U_N) - \beta(50\% U_N)]$ 平均值，计算出 $\beta'(50\% U_N)$ 、 $\beta'(100\% U_N)$ 及相应的标准偏差并填入表 B.5 中。

根据 $\beta'(30\% U_N)$ 和 $\beta'(40\% U_N)$ ，用线性插值法计算出 $\beta'(35\% U_N)$ 及相应的标准偏差，根据 $[\beta(70\% U_N) - \beta(35\% U_N)]$ 平均值，计算出 $\beta'(70\% U_N)$ 及相应的标准偏差并填入表 B.5 中。

根据 $\beta'(40\% U_N)$ 和 $\beta'(50\% U_N)$ ，用线性插值法计算出 $\beta'(45\% U_N)$ 及相应的标准偏差，根据 $[\beta(90\% U_N) - \beta(45\% U_N)]$ 平均值，计算出 $\beta'(90\% U_N)$ 及相应的标准偏差并填入表 B.5 中。

根据式 (B.9) 计算出分压比的电压系数 $\gamma'_4(2U)$ 并填入表 B.5 中:

$$\gamma'_4(2U) = -\beta'_4(2U) \quad (\text{B.9})$$

表 B.5 分压比电压系数计算表

$\times 10^{-6}$

电压 $2U(\times U_N)$	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$[\beta(2U) - \beta(U)]$ 平均值										
合成后的标准偏差 s_c										
分压比例数的电压系数 $\beta'(2U)$										
$\beta'(2U)$ 的标准偏差										
分压比的电压系数 $\gamma'(2U)$										
$\gamma'_4(2U)$ 的标准偏差										

B.6 分压比计算

将表 B.5 中计算得到的分压比电压系数 $\gamma'_4(2U)$ 和表 B.1 或表 B.2 中计算得到的主标准分压器在 10% U_N 下的实测分压比填入表 B.6 中, 根据式 (B.10) 计算出被校直流高压分压器在 20% U_N 、30% U_N 、…、90% U_N 、100% U_N 下的实测分压比并填入表 B.6 中:

$$K_x(2U) = K_x(10\%U_N)[1 + \gamma'_4(2U)] \quad (\text{B.10})$$

表 B.6 分压比计算表

$\times 10^{-6}$

电压 $2U(\times U_N)$	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
分压比的电压系数 $\gamma'_4(2U)$										
实测分压比 $K_x(2U)$										

附录 C

校准证书内页格式

证书编号 ××××××—××××

〈校准机构授权说明〉				
校准结果不确定度的评估和表述均符合 JJF 1059.1 的要求。				
校准环境条件及地点：				
温 度		℃	地 点	
相对湿度		%	其 他	
校准所依据的技术文件(代号、名称)：				
校准所使用的主要测量标准：				
名称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	证书编号	证书有效期至 (YYYY-MM-DD)

第×页 共×页

证书编号 ××××××—××××

校准结果

1. 直流耐压

_____。

2. 10% U_N 下分压比

一次电压/kV	标称分压比	实测分压比

3. 分压比电压系数

电压 $2U(\times U_N)$	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
分压比电压系数($\times 10^{-6}$)										
实测分压比										
扩展不确定度 $U_{rel}(k=2)$										

说明：

根据客户要求和校准文件的规定,通常情况下_____个月校准一次。

声明：

1. 仅对加盖“×××××校准专用章”的完整证书负责。
2. 本证书的校准结果仅对本次所校准的计量器具有效。

校准员：

核验员：

第×页 共×页

附录 D

直流电压加法原理及公式推导

(资料性附录)

采用直流电压加法原理评定主标准分压器的分压比电压系数。实施直流电压加法试验的分压器组如图 D.1 所示：1[#] 和 2[#] 为辅助标准分压器；3[#] 由 1[#] 和 2[#] 串联组成，为串联辅助标准分压器；4[#] 为主标准分压器。1[#] 和 2[#] 的额定电压为 50% U_N ，3[#] 的额定电压为 U_N 。 R_1 、 R_3 、 R_5 为各分压器的高压臂电阻标称值， R_2 、 R_4 、 R_6 为各分压器的低压臂电阻标称值，且 $2R_1=2R_3=R_5$ 、 $2R_2=2R_4=R_6$ 。

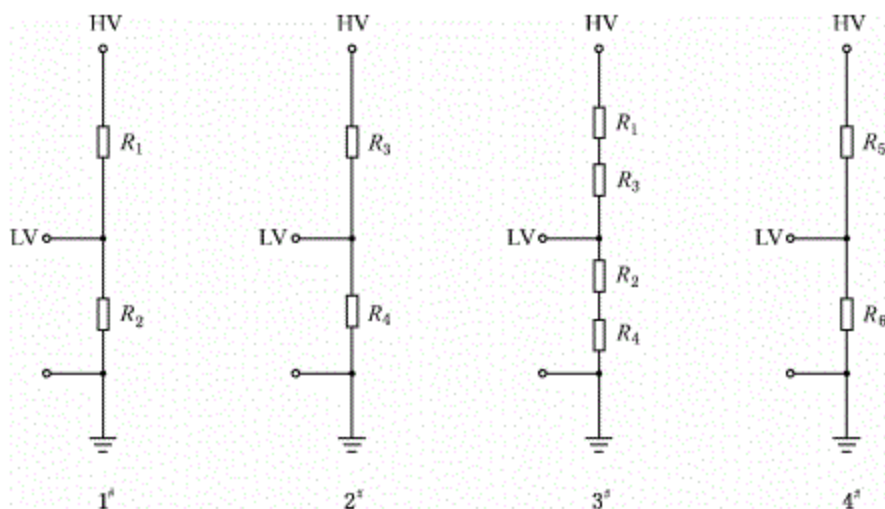


图 D.1 实施直流电压加法试验的分压器组

1[#]、2[#]—辅助标准分压器；3[#]—串联辅助标准分压器；4[#]—主标准分压器； R_1 、 R_3 、 R_5 —高压臂电阻标称值； R_2 、 R_4 、 R_6 —低压臂电阻标称值；

HV—高压端；LV—分压输出端

直流电压加法试验分三步：1) 试验 a：在电压 U 下，以 1[#] 为标准器，校准 4[#] 主标准分压器， ϵ_a 为输出电压的相对误差；2) 试验 b：在电压 U 下，以 2[#] 辅助标准分压器为标准器，校准 4[#] 主标准分压器，输出电压的相对误差为 ϵ_b ；3) 试验 c：在电压 $2U$ 下，以 3[#] 串联辅助标准分压器为标准器，校准 4[#] 主标准分压器，输出电压的相对误差为 ϵ_c 。

1[#] 分压器在电压 U 下的分压比为 $K_1(U)$ ，令：

$$Q_1(U) = \frac{1}{K_1(U)} = \frac{R_{20}[1+\alpha_2(U)]}{R_{10}[1+\alpha'_1(U)]+R_{20}[1+\alpha_2(U)]} \quad (\text{D.1})$$

式 (D.1) 中， R_{10} 为电压 U_0 时 1[#] 分压器的高压臂电阻值， R_{20} 为电压 U_0 时 1[#] 分压器的低压臂电阻值， $\alpha'_1(U)$ 为 1[#] 分压器高压臂电阻的电压系数， $\alpha_2(U)$ 为 1[#] 分压器低压臂电阻的电压系数。

因 $R_{20} \ll R_{10}$ ，则有：

$$Q_1(U) \approx \frac{R_{20}}{R_{10} + R_{20}} \cdot \frac{1 + \alpha_2(U)}{1 + \alpha_1'(U)} \approx \frac{R_{20}}{R_{10} + R_{20}} \cdot [1 - \alpha_1'(U) + \alpha_2(U)] = Q_{10}[1 + \beta_1(U)] \quad (\text{D. 2})$$

式 (D. 2) 中, $Q_1(U)$ 为 1[#]分压器在电压 U 下的分压比的倒数, Q_{10} 为 1[#]分压器在电压 U_0 下的分压比的倒数, $\beta_1(U)$ 为 1[#]分压器分压比倒数的电压系数。通过相同的推导, 有:

$$Q_2(U) \approx \frac{R_{40}}{R_{30} + R_{40}} \cdot [1 - \alpha_3'(U) + \alpha_4(U)] = Q_{20}[1 + \beta_2(U)] \quad (\text{D. 3})$$

式 (D. 3) 中, $Q_2(U)$ 为 2[#]分压器在电压 U 下的分压比的倒数, R_{30} 为电压 U_0 时 2[#]分压器的高压臂电阻值, R_{40} 为电压 U_0 时 2[#]分压器的低压臂电阻值, $\alpha_3'(U)$ 为 2[#]分压器高压臂电阻的电压系数, $\alpha_4(U)$ 为 2[#]分压器低压臂电阻的电压系数, Q_{20} 为 2[#]分压器在电压 U_0 下的分压比的倒数, $\beta_2(U)$ 为 2[#]分压器分压比倒数的电压系数。

$$Q_3(2U) \approx \frac{R_{20} + R_{40}}{R_{10} + R_{20} + R_{30} + R_{40}} \cdot \left[1 - \frac{\alpha_1'(U) + \alpha_3'(U)}{2} + \frac{\alpha_2(U) + \alpha_4(U)}{2} \right] \\ = Q_{30}[1 + \beta_3(2U)] \quad (\text{D. 4})$$

式 (D. 4) 中, $Q_3(2U)$ 为 3[#]分压器在电压 $2U$ 下的分压比的倒数, Q_{30} 为 3[#]分压器在电压 $2U_0$ 下的分压比的倒数, $\beta_3(2U)$ 为 3[#]分压器分压比倒数的电压系数。

$$Q_4(2U) \approx \frac{R_{60}}{R_{50} + R_{60}} \cdot [1 - \alpha_5'(2U) + \alpha_6(2U)] = Q_{40}[1 + \beta_4(2U)] \quad (\text{D. 5})$$

式 (D. 5) 中, $Q_4(2U)$ 为 4[#]分压器在电压 $2U$ 下的分压比的倒数, R_{50} 为电压 $2U_0$ 时 4[#]分压器的高压臂电阻值, R_{60} 为电压 $2U_0$ 时 4[#]分压器的低压臂电阻值, $\alpha_5'(2U)$ 为 4[#]分压器高压臂电阻的电压系数, $\alpha_6(2U)$ 为 4[#]分压器低压臂电阻的电压系数, Q_{40} 为 4[#]分压器在电压 $2U_0$ 下的分压比的倒数, $\beta_4(2U)$ 为 4[#]分压器分压比倒数的电压系数。

设 $\epsilon_a(U)$ 为试验 a 在电压 U 下的相对误差测量结果, 则有:

$$\epsilon_a(U) = \frac{\Delta U}{u} \approx \frac{UQ_4(U) - UQ_1(U)}{UQ_4(U)} = 1 - \frac{Q_1(U)}{Q_4(U)} \approx 1 - \frac{Q_{10}}{Q_{40}} - \beta_1(U) + \beta_4(U) \quad (\text{D. 6})$$

类推可得试验 b 在电压 U 下和试验 c 在电压 $2U$ 下的相对误差测量结果:

$$\epsilon_b(U) \approx 1 - \frac{Q_{20}}{Q_{40}} - \beta_2(U) + \beta_4(U) \quad (\text{D. 7})$$

$$\epsilon_c(2U) \approx 1 - \frac{Q_{30}}{Q_{40}} - \beta_3(2U) + \beta_4(2U) \quad (\text{D. 8})$$

为便于推导, 令:

$$\delta_a(2U) = \epsilon_a(2U) - \epsilon_a(U) = \beta_4(2U) - \beta_4(U) - [\beta_1(2U) - \beta_1(U)] \quad (\text{D. 9})$$

$$\delta_b(2U) = \epsilon_b(2U) - \epsilon_b(U) = \beta_4(2U) - \beta_4(U) - [\beta_2(2U) - \beta_2(U)] \quad (\text{D. 10})$$

$$\delta_c(4U) = \epsilon_c(4U) - \epsilon_c(2U) = \beta_4(4U) - \beta_4(2U) - [\beta_3(4U) - \beta_3(2U)] \quad (\text{D. 11})$$

根据式 (D. 2)、式 (D. 3) 和式 (D. 4) 可得:

$$\beta_3(2U) = \frac{\alpha_2(U) + \alpha_4(U)}{2} - \frac{\alpha_1'(U) + \alpha_3'(U)}{2} = \frac{\beta_1(U) + \beta_2(U)}{2} \quad (\text{D. 12})$$

由式 (D.12) 得:

$$\beta_3(4U) - \beta_3(2U) = \frac{\beta_1(2U) + \beta_2(2U)}{2} - \frac{\beta_1(U) + \beta_2(U)}{2} \quad (\text{D.13})$$

式 (D.9) 和式 (D.10) 相加, 得:

$$\frac{\delta_a(2U) + \delta_b(2U)}{2} = \beta_4(2U) - \beta_4(U) - \frac{\beta_1(2U) - \beta_1(U)}{2} - \frac{\beta_2(2U) - \beta_2(U)}{2} \quad (\text{D.14})$$

根据式 (D.13) 和式 (D.14) 可得:

$$\beta_3(4U) - \beta_3(2U) = \beta_4(2U) - \beta_4(U) - \frac{\delta_a(2U) + \delta_b(2U)}{2} \quad (\text{D.15})$$

将式 (D.15) 代入式 (D.11), 得:

$$\begin{aligned} \beta_4(4U) - \beta_4(2U) &= \delta_c(4U) + [\beta_3(4U) - \beta_3(2U)] \\ &= \delta_c(4U) + \beta_4(2U) - \beta_4(U) - \frac{\delta_a(2U) + \delta_b(2U)}{2} \end{aligned} \quad (\text{D.16})$$

用式 (D.16) 递推:

$$\begin{aligned} &[\beta_4(4U) - \beta_4(2U)] + [\beta_4(2U) - \beta_4(U)] + \dots + [\beta_4(4U_0) - \beta_4(2U_0)] \\ &= \delta_c(4U) + \delta_c(2U) + \dots + \delta_c(4U_0) - \frac{1}{2}[\delta_a(2U) + \delta_a(U) + \dots + \delta_a(2U_0)] \\ &\quad - \frac{1}{2}[\delta_b(2U) + \delta_b(U) + \dots + \delta_b(2U_0)] + \{[\beta_4(2U) - \beta_4(U)] + \dots + [\beta_4(2U_0) - \beta_4(U_0)]\} \end{aligned} \quad (\text{D.17})$$

根据式 (D.9)、式 (D.10) 和式 (D.11), 将式 (D.17) 简化为:

$$\begin{aligned} \beta_4(4U) - \beta_4(2U_0) &= [\beta_4(2U) - \beta_4(U_0)] + [\epsilon_c(4U) - \epsilon_c(2U_0)] \\ &\quad - \frac{\epsilon_a(2U) - \epsilon_a(U_0)}{2} - \frac{\epsilon_b(2U) - \epsilon_b(U_0)}{2} \end{aligned} \quad (\text{D.18})$$

整理得:

$$\begin{aligned} \beta_4(2U) - \beta_4(U) &= [\epsilon_c(2U) - \epsilon_c(2U_0)] - \frac{\epsilon_a(U) - \epsilon_a(U_0)}{2} - \frac{\epsilon_b(U) - \epsilon_b(U_0)}{2} \\ &\quad + [\beta_4(2U_0) - \beta_4(U_0)] \end{aligned} \quad (\text{D.19})$$

当选取的电压 U_0 足够小时, 可认为 $\beta_4(2U_0) = \beta_4(U_0)$, 并令 $\epsilon'_a(U) = \epsilon_a(U) - \epsilon_a(U_0)$ 、 $\epsilon'_b(U) = \epsilon_b(U) - \epsilon_b(U_0)$ 、 $\epsilon'_c(2U) = \epsilon_c(2U) - \epsilon_c(2U_0)$, 则式 (D.19) 可以写成:

$$\beta_4(2U) - \beta_4(U) = \epsilon'_c(2U) - 0.5\epsilon'_a(U) - 0.5\epsilon'_b(U) \quad (\text{D.20})$$

当电压从 U 升高到 $2U$ 时, 将试验 a、b、c 测量得到的数据代入式 (D.20), 就可以计算出 4# 分压器的分压比例数的电压系数。