

完全等电位屏蔽高值电阻器

桑琳¹ 王斌¹ 顾大伟²

(1. 北京东方计量测试研究所, 北京 100086;

2. 北京康拓科技开发总公司, 北京 100190)

摘要 利用实验数据描述了湿度对高值电阻的影响程度,介绍了降低湿度对高值电阻影响程度的常用方法。提出了一种具有完全等电位屏蔽作用的高值电阻器,它能有效降低湿度影响和电磁干扰影响。介绍了完全等电位屏蔽高值电阻器的结构,理论阐述了克服湿度影响和电磁干扰影响机理。

关键词 等电位屏蔽 高值电阻 湿度

Completed Equipotential Shielded High Value Resistor

SANG Lin¹ WANG Bin¹ GU Da-wei²

(1. Beijing Orient Institute of Measurement & Test, Beijing 100086;

2. Beijing Control Industriad Compater Corporation, Beijing 100190)

Abstract Describe the effect of humidity to high value resistance, based on experimental data, and introduce the common methods of decreasing the effect of humidity to high value resistance. Propose a completed equipotential shielded high value resistance, which can effectively decrease humidity effect and electromagnetic (EM) disturbance. The structure of completed equipotential shielded high value resistor and the mechanism to overcome humidity effect and EM disturbance are also described.

Key words Equipotential shielded High value resistance Humidity

1 引言

在微弱电信号精密测量仪器和小信号标准源中,高值电阻器通常作为内部标准器件,其电阻值标称误差的影响可以通过校准消除,电阻值的稳定性成为决定仪器性能关键因素。使用高值电阻的电路对静电和电磁干扰相当敏感,合理地采用屏蔽技术将明显地改善电路和仪器性能。

介绍一种具有完全等电位屏蔽功能的高值电

阻器,很好地克服了湿度对高值电阻器电阻值的影响,对静电和电磁干扰有很好的抑制作用。

2 湿度对高值电阻的影响及其抑制措施

影响高值电阻稳定性的一个重要因素是环境湿度。这是因为潮湿的空气能在高值电阻器表面形成一层水膜,特别是高值电阻器表面被污染后,

附着的灰尘、盐分等易电离的物质溶解于水膜中,水膜具有一定的导电特性,形成泄漏电流,从而显著降低高值电阻器的电阻值^[1]。

普通高值电阻器,其表面没有采用低吸水性绝缘漆,如图 1 试验结果所示,电阻值受环境湿度

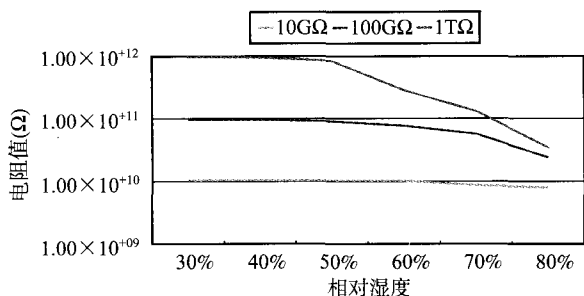


图 1 湿度对普通绝缘漆高值电阻器的影响曲线图

降低湿度对高值电阻器影响的另一种方法是将高值电阻器密封在真空玻璃管内,电阻膜更不容易腐蚀、氧化和损伤,电阻值比较稳定,真空管内部泄漏电流可以忽略,真空合成膜电阻就是该方法的典型产品。由于玻璃管的外表面电阻随湿度的提高而降低,湿度的影响还是比较大,真空玻

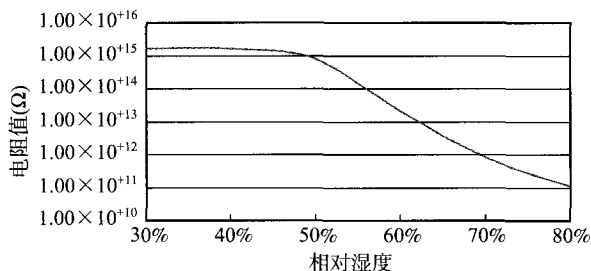


图 3 真空玻璃管绝缘电阻随湿度变化情况曲线图

高值电阻器常用于高压分压器。为了克服环境湿度对分压比的影响,普遍采用如图 5 所示等电位屏蔽的措施。在 R 和 R_0 组成的主分压电路上增加一路辅助分压电路,使得 A' 节点和 A 节点的电位相等,电路中其它部位的漏电流不会对主分压器产生影响^[2]。这种技术为单点等电位屏蔽,适合克服 A 节点的绝缘端子和电路板等的泄漏电阻对分压性能的影响,无法解决分压电阻器表面电阻的影响,无法解决分压电阻器对地、电源、静电聚集区等横向泄漏对分压比的影响。

的影响比较严重。采用低吸湿性绝缘漆的高值电阻器,环境湿度对电阻值的影响明显降低,试验结果如图 2 所示。但在 $10\text{ G}\Omega$ 以上高值电阻器,湿度的影响仍不能忽略。

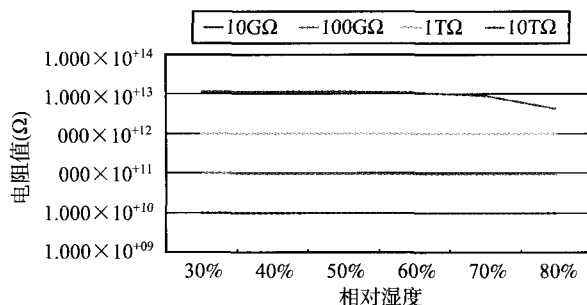


图 2 湿度对低吸水性绝缘漆高值电阻器的影响曲线图

璃管在不同湿度环境下测得的表面电阻变化情况如图 3 所示。真空合成膜高值电阻器受湿度影响试验结果如图 4 所示。结果表明,在相对湿度为 80% 的环境下,玻璃表面电阻将给内部 $1\text{ G}\Omega$ 电阻带来近 100% 的误差,对 $1\text{ G}\Omega$ 以上电阻影响更为严重。

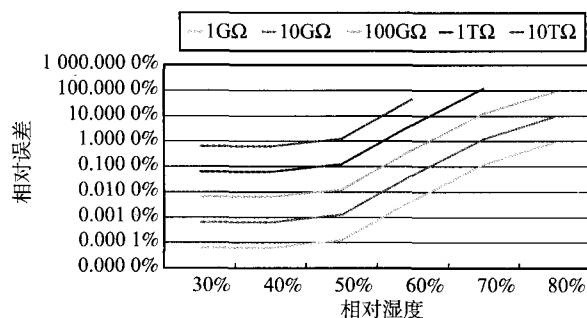


图 4 玻璃表面泄漏对高值电阻器带来的相对误差曲线图

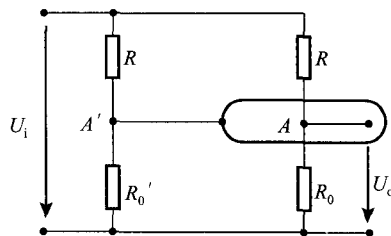


图 5 单点等电位屏蔽图

图 6 所示多点等电位屏蔽分压器,将电阻元件用金属外壳屏蔽起来,屏蔽的电位由辅助分压器来供给^[3]。电阻和屏蔽之间最大电位差为电阻上压降的一半,所以电阻和屏蔽之间的电压比分压电阻

直接对地或对电源的电压减小,而且由于分压电阻高端和低端对屏蔽的电压极性相反,泄漏电流可以相互抵消一大部分。分压电阻的表面泄漏电流明显减小,绝缘端子和电路板的泄漏电阻对分压性能的影响明显减小。节点屏蔽上的漏电由辅助分压器提供而与分压器本体基本无关。由于分压电阻与金属屏蔽壳之间的泄漏电阻并非线性和均匀分布,他们之间的漏电流仍然存在。

图7所示高压分压器具有更为完善等电位屏蔽措施^[4,5]。在分压电阻表面两端人为地建立等电位点,使这段的等效电阻为无穷大,可以有效地阻断沿着电阻本身表面的泄漏电流。同时也克服了绝缘端子和电路板对分压电阻器连接节点的泄

漏。该技术不能克服分压电阻器对地、电源、静电聚集区等空间泄漏和电阻体间泄漏的影响。

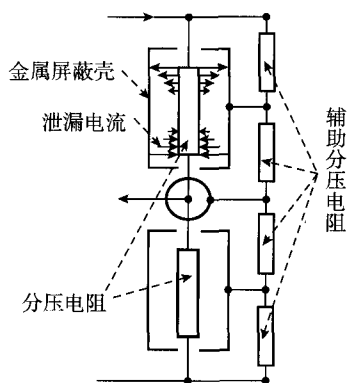


图6 多点等电位屏蔽分压器图

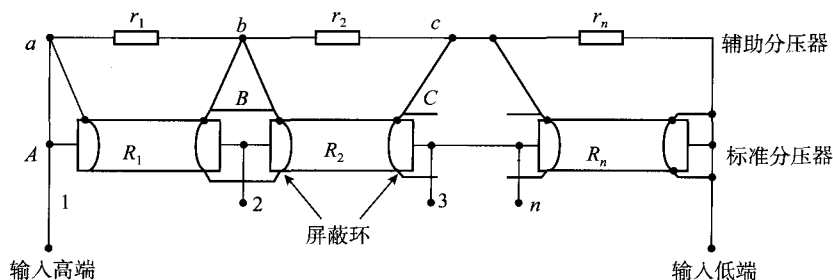


图7 等电位屏蔽高压分压器图

综上所述,高值电阻器受湿度影响严重,特别是电阻值高于 $1\text{ G}\Omega$ 的高值电阻器。一些分压器结构,在一定程度上解决了高值电阻器表面泄漏问题,解决了支撑的连接点的绝缘材料和电路板对连接点的泄漏问题。但是不能彻底解决高值电阻器(特别是电阻值高于 $1\text{ G}\Omega$ 的高值电阻器)环境湿度带来的表面泄漏和电阻器对地、电源、静电聚集区等空间泄漏和电磁干扰。

为此,设计了一种完全等电位屏蔽高值电阻器,并利用这种电阻器设计了完全等电位屏蔽分压器,比较完善地解决了湿度造成的表面泄漏,比较完善地解决了电阻器对地、电源、静电聚集区等空间泄漏和电磁干扰。

3 等电位屏蔽高值电阻器结构介绍

完全等电位屏蔽高值电阻器结构示意图如图8所示。

首先将阻值为 R 的高值电阻器密封在真空玻璃管内,然后,在玻璃管外壁均匀地附着一层电阻膜,电阻膜长度与内部高值电阻器电阻膜长度相等,

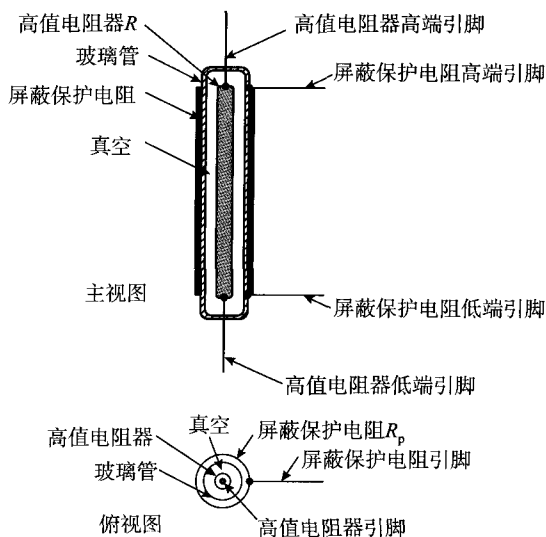


图8 等电位屏蔽高值电阻器结构示意图

高度位置一致。在外层形成一个电阻值为抗 kR 的屏蔽保护电阻 R_p 。并在屏蔽保护电阻两端分别引出引脚。对于高值电阻器, k 值一般取 $1/10^n$,即保护电阻 R_p 比内部电阻小 n 个数量级。

工作时,在外层的屏蔽保护电阻 R_p 上施加与内部高值电阻相同的电压,整个内部高值电阻得到

完全等电位保护,内部电阻值几乎不受环境湿度的影响。比较完善地解决了电阻器对地、电源、静电聚集区等横向泄漏等问题。

如图 9 所示,为了进一步降低电磁干扰的影响,将等电位屏蔽保护电阻器安装在用纯铁制造的屏蔽壳内,利用三同轴插座作为连接口,可以作为高值标准电阻器使用。这种高值标准电阻器,内外电阻比例 k 值相同时可以用三同轴电缆直接连接,组成等电位屏蔽分压器,便于检定或校准。

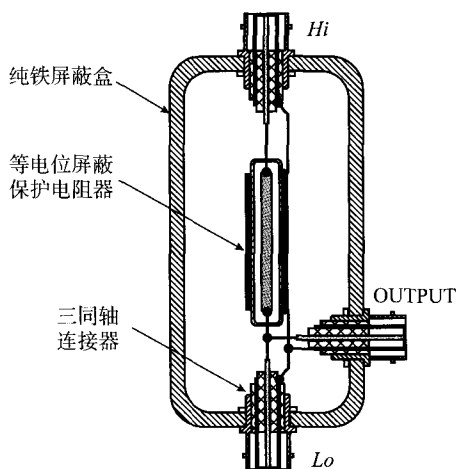


图 9 等电位屏蔽高值标准电阻器图

4 等电位屏蔽保护原理分析

除被保护的高值电阻 R 和屏蔽保护电阻 R_s 外,考虑到真空玻璃管玻璃的绝缘电阻(体电阻和表面电阻) R_g 和管内真空电阻 R_v ,潮湿空气形成的表面泄漏电阻 R_q ,完全等电位屏蔽高值电阻器的等效电路如图 10 所示。

图中 R_a 和 R_b 分别是 R 两端引脚到屏蔽保护电阻 R_s 的引脚之间的玻璃电阻(包括玻璃体电阻和有潮湿空气的表面电阻)。

从图 10 可以看出,当 $U_a = U'_a$ 和 $U_b = U'_b$ 时,有 $I_a = 0, I_b = 0, I_3 = 0$,高值电阻器的等效电阻值为 $(U_a - U_b)/I_{b2} = (U_a - U_b)/I_{b1} = R$,由于真空管内部横向电位处处相等,且真空管内部的真空电阻可以达到 $10^{17} \Omega$ 以上,内部的泄漏电流 $I_3 = 0$,高值电阻器 R 得到有效保护。

对于单只等电位屏蔽电阻,如果由于水气分布不均匀,表面电阻分布不均匀,分析在内部任意一点 k 处的横向泄漏电流 I_k 的具体情况如下:

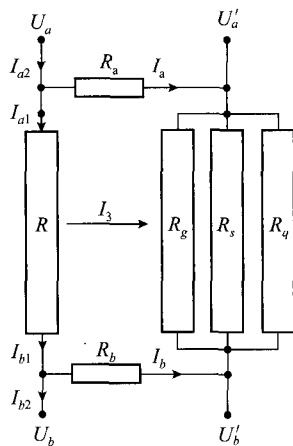


图 10 等效电路 1 图

由于玻璃管和屏蔽电阻膜紧密相贴,阻值分布也较为均匀,屏蔽电阻 R_s 比玻璃电阻值 R_g 要小 4 个数量级以上,因此,玻璃电阻 R_g 和屏蔽电阻 R_s 可以并联成一个电阻,并且由于屏蔽电阻远小于玻璃电阻,并联电阻即为屏蔽电阻 R_s 。

考虑到表面电阻分布不均匀,有如图 11 所示等效电路。图中 R_v 为玻璃腔内真空电阻,与真空度有关。真空合成膜电阻的真空电阻可以达到 $10^{17} \Omega$ 。

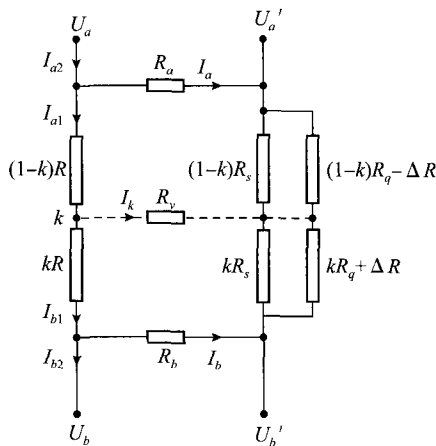


图 11 等效电路 2 图

从图 11 可得

$$I_k = \frac{\frac{kR_s // (kR_q + \Delta R)}{R_s // R_q - \frac{\Delta R^2 R_s}{(R_s + R_q)^2 k(1-k)}} (U'_a - U'_b) - \frac{kR}{R} (U_a - U_b)}{R_v} \quad (1)$$

$$= \frac{\frac{kR_s // (kR_q + \Delta R)}{R_s // R_q} (U'_a - U'_b) - k(U_a - U_b)}{R_v} \quad (2)$$

在屏蔽保护电阻 R_s 两端施加与内部电阻 R 相同电压,有

$$(U'_a - U'_b) = (U_a - U_b) = U \quad (3)$$

代入式(3)并化简得

$$I_k \approx \frac{\Delta R}{R_q} \times \frac{U}{R_v} \times \frac{R_s}{R_s + R_q} \quad (4)$$

$\frac{\Delta R}{R_q}$ 为泄漏表面电阻的不均匀程度, $\frac{U}{R_v}$ 为泄漏电流来源。

式(4)表明:

1) 泄漏表面电阻的分布不均匀时,即 $\frac{\Delta R}{R_q} \neq 0$ 存在横向泄漏电阻。图 5 和图 7 所示电路的等电位屏蔽技术是以泄漏表面电阻的均匀分布为前提的, $\frac{\Delta R}{R_q} = 0$ 。实际上,泄漏表面电阻的分布存在不均匀性,而且针对图 5 和图 7 电路的元件,式(4)中的 $R_v \leq R$,所以均存在横向泄漏电流;

2) 屏蔽电阻 R_s 相对与表面泄漏电阻 R_q 越小,横向泄漏电流越小,保护作用越明显。

试验表明,在没有等电位保护的情况下,当环境湿度达到 80% 时,湿度和其它环境条件对 10 TΩ 高值电阻器的影响达到 2 个数量级,表面泄漏电阻值 $R_q \approx R/10^2$ 。当取 $R_s = R/10^3$,有 $R_s \approx R_q/10$ 。即使表面泄漏电阻的不均匀程度达到 30%,从式(4)可知,由于屏蔽作用,横向泄漏电流将降为 3%,即降低一个数量级。

式(4)还可以表示为

$$I_k \approx \frac{\Delta R}{R_q} \times \frac{U}{R} \times \frac{R}{R_v} \times \frac{R_s}{R_s + R_q} = I \times \frac{\Delta R}{R_q} \times \frac{R}{R_v} \times \frac{R_s}{R_s + R_q} \quad (5)$$

式(5)表明, R 越小,横向泄漏电流影响越小。图 5 和图 7 电路所用电阻的阻值 R 较小,不考虑横向泄漏电流的影响也是合理的。

将 $R = 10^{13} \Omega$, $R_v = 10^{17} \Omega$, $\Delta R/R_q = 30\%$, $R_s \approx R_q/10$ 代入式(5),可得,在等电位屏蔽的作用下,横向泄漏电流的影响只有 0.000 3%。可以忽略不计。也就是说,在没有等电位屏蔽的情况下,湿度对高值电阻器电阻值的影响达到 2 个数量级,而经过本项目提出的等电位屏蔽技术,环境湿度达到 80%,表面泄漏电阻的不均匀程度达到 30% 时,对电阻值的影响只有 0.000 3%,效果明显。

5 用等电位屏蔽电阻组成分压器性能分析

如图 12 所示,可以用 k 值相同的 2 只或者多只等电位屏蔽高值电阻器,组成完全等电位屏蔽电路,等效图如图 13 所示。图中, R_g 为端口绝缘电阻,包括玻璃电阻、接口和连接器绝缘电阻。

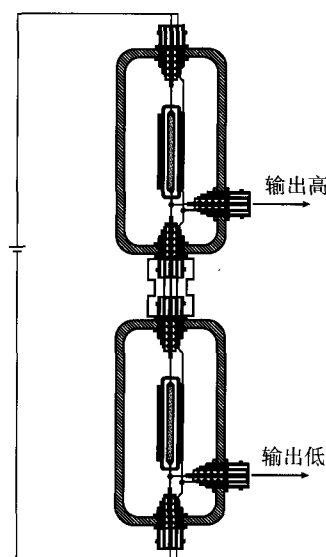


图 12 等电位屏蔽分压器示意图

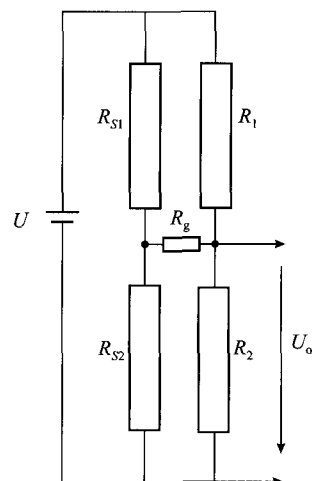


图 13 等电位屏蔽分压器等效图

从图 13 可知,在理想情况下, $R_{s1} = kR_1$, $R_{s2} = kR_2$ 。实际中, k 值存在一定的误差,本项目 k 值误

差为 $\gamma_k = 0.1\%$ 。

在最不利的情况下,流经 R_g 的电流为

$$I_g \approx \frac{2 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 U \gamma_k}{R_g} \quad (6)$$

由此引入的分压比相对误差

$$\gamma \approx 2 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \frac{R_1}{R_g} \gamma_k \quad (7)$$

式(7)表明:

1) 绝缘性能越好,即 R_g 越大,产生分压比误差越小;

2) 分压比率越大,即 $R_2/(R_1 + R_2)$ 越小,分压比误差越小;

3) k 值误差越小, γ_k 越小,分压比误差越小。

当 $R_2/(R_1 + R_2) = 1/10$, $R_1 = 10^{13} \Omega$, $R_g = 10^{14} \Omega$, $\gamma_k = 0.1\%$ 时,产生的分压比误差为: 2×10^{-6} 。即使由于潮湿,绝缘电阻 R_g 降到 $10^{11} \Omega$,产生的分压比误差为 0.2% 。

如果没有等电位屏蔽,由于潮湿的表面电阻为 $10^{11} \Omega$,分别与 10^{13} 和 10^{12} 电阻并联, $1/10$ 分压比变成 $1/1$ 分压比,误差很大。

因此,采用本项目的等电位屏蔽电阻,可以有效克服湿度的影响。可以采用任何两只 k 值相同的等电位高值电阻器,很方便组成分压器。

6 电磁屏蔽作用分析

如图 14 所示,假如干扰电压为 E ,干扰阻抗(包

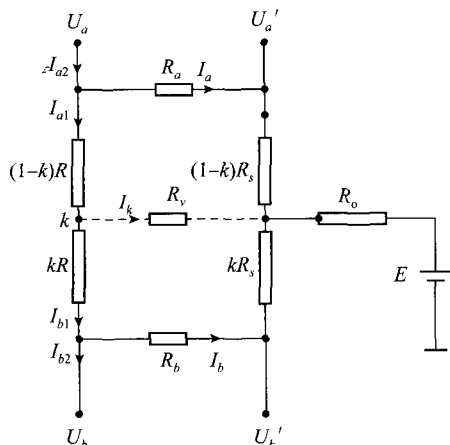


图 14 抗干扰分析等效电路图

括源内阻和空间绝缘电阻) R_0 , 当没有等电位屏蔽

电阻时,也既 $R_s = \infty$, 干扰电流直接经过电阻表面(线绕电阻或金属膜电阻)或者经过玻璃绝缘电阻(真空合成膜电阻)注入高值电阻。由干扰引起的电流误差为 $\Delta I = \frac{E}{R_g + R_0}$, 电流相对误差为

$\frac{\Delta I}{I} = \frac{E}{R_g + R_0} \times \frac{R}{U_a - U_b}$, 由此引起等效电阻的相对变化为

$$\gamma_R = \frac{\Delta R}{R} = -\frac{\Delta I}{I} = \frac{E}{R_g + R_0} \times \frac{R}{U_b - U_a} \quad (8)$$

加入等电位屏蔽后,干扰电压 E 经过 R_0 在 $kR_s // (1-k)R_s$ 上形成干扰电压。由于: $kR_s // (1-k)R_s = k(1-k)R_s$, $k=1$ 或者 $k=0$, 干扰电压 E 经过 R_0 在 $kR_s // (1-k)R_s$ 上形成的干扰电压均为 0, 这是因为电源内阻为 0 而短路。当 $k=1/2$ 时, 将取得最大值, $kR_s // (1-k)R_s = R_s/4$, 干扰电压 E 经过 R_0 在 $kR_s // (1-k)R_s$ 上形成干扰电压为

$$U_i = \frac{\frac{R_s}{4} E}{R_0 + \frac{R_s}{4}} \approx \frac{R_s E}{4R_0} \quad (9)$$

$$\Delta I = \frac{R_s E}{4R_g R_0} \quad (10)$$

引入电阻误差为

$$\gamma_R \approx \frac{ER_s}{4R_g R_0} \times \frac{R}{U_b - U_a} \quad (11)$$

由于 $R_s = 10^{-4} R_g$, 干扰引入误差减小 4 个数量级效果明显。

参考文献

- [1] 欧阳润泽. 湿度对绝缘电阻的影响及解决方式[J]. 电气时代, 2001, 12: 37-38.
- [2] 宋宏伟, 欧海鹏, 李艾励. 标准直流分压箱的研制与等电位屏蔽技术[J]. 黑龙江电力, 2002, 4.
- [3] 彭丽. 10 kV/35 kV 电子式电压/电流互感器研究. 华中科技大学, 硕士学位论文, 2004, 4: 32.
- [4] 刘星, 顾杰, 王建军. 10 kV 直流高压标准分压器的设计[J]. 计量技术, 2002: 17-19.
- [5] 丁网根. 组合式高阻箱及高压表检定装置[J]. 航空计测技术, 2002, 21(4): 12-15.