

电解液分压器的优化设计

邬昌峰, 蒋全兴, 何鹏

(东南大学电磁兼容研究室, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了避免脉冲分压器的杂散参数的影响, 笔者采用非线性规划的复合形法对按传输线原理设计的电解液电阻分压器的结构参数进行了优化设计, 通过分析优化结果得出: 在满足测量精度和耐压的情况下, 分压器的尺寸越小越好; 该型电阻分压器由于其自身结构的特点, 要求硫酸铜液电阻的阻值尽量小; 对该型电阻分压器进行优化设计时应综合考虑测量的要求。

关键词: 高压; 脉冲; 电阻分压器; 优化设计; 复合形法

中图分类号: TM83

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)03-0232-04

Optimum Design of a Aqueous-electrolyte Divider

WU Chang-feng, JIANG Quan-xing, HE Peng

(Electromagnetic Compatibility Laboratory of Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to avoid spurious parameters of pulse divider, an optimum design was performed for the structure parameters of a novel aqueous-electrolyte resistance divider by using the complex method of the nonlinear programming problems. After analyzing the results of the optimum design, the following conclusions can be drawn: firstly, the smaller the dimensions of the divider are, the better its performance can be obtained when the measuring accuracy and withstanding voltage are satisfied; secondly, the resistance of copper sulphate should be as small as possible to match with the structure features of the resistance divider; lastly, the requirements of measurement should be considered in the optimum design.

Key words: high voltage; pulse; resistance divider; optimum design; complex method

0 引言

在脉冲功率技术和高电压冲击测量中, 由于被测信号具有幅值高、前沿快以及环境电磁干扰强等特点, 而实验室所用的示波器、数字记录仪等通用仪器的耐高压和强干扰的能力差, 此时需要通过分压器才能进行峰值和波形的测量。在测量系统中, 最主要的误差来自于分压器, 所以分压器的设计是关键。如何根据被测信号和测量环境设计出较符合测量要求的分压器, 使被测信号的畸变较小、分压比稳定可靠, 是设计冲击测量系统时首先要考虑的问题。考虑到高压快脉冲的前沿为纳秒甚至亚纳秒量级, 应该尽量避免脉冲分压器的杂散参数的影响。笔者针对一种新型脉冲电阻分压器进行了优化设计, 获得了预期效果。

1 电阻分压器的结构特点

对于二级高压脉冲测量系统, 必须尽量减小分压器杂散参数对测量系统的影响, 有效的办法就是

将分压器本身或者一部分用传输线代替。笔者采用装在有机玻璃管里的硫酸铜溶液作为两级电阻分压器的高压臂, 外部采用按旋转指数曲线渐缩的外导体组成的喇叭形同轴线段, 此时硫酸铜溶液水电阻相当于一个高频电阻 R_1 。第1级低压臂 R_2 和第2级分压电阻 R_3, R_4 都采用金属膜无感电阻^[2]。该分压器的结构见图1, 分布参数电路图见图2。其中 C_{e1} 为分压器第1级高压臂对地杂散电容, $C_{e1}=C_{e11}+C_{e12}+\dots+C_{e1n}$, C_{e3} 为分压器第2级高压臂对地杂散电容。

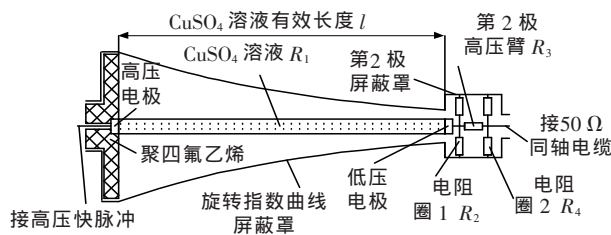


图1 电阻分压器示意图

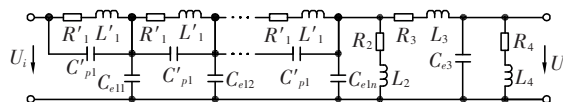


图2 二级电阻分压器分布参数电路图

收稿日期: 2007-07-09; 修回日期: 2007-12-29

作者简介: 邬昌峰(1974-), 男, 在读博士研究生, 河南省固始县人, 主要从事电磁脉冲方面的研究。

为了实现阻抗匹配,喇叭形外罩的形状由式(1)确定^[2]

$$b_x = a \exp\left[\frac{5}{6} + \frac{R_1}{60} \frac{x}{l}\right] \quad (1)$$

其中 a 为硫酸铜溶液水电阻的半径; R_1 为硫酸铜溶液水电阻的阻值; b 为旋转指数曲线外导体最大半径; l 为硫酸铜溶液水电阻有效长度; b_x 为从指数型外罩小端开始沿硫酸铜溶液水电阻有效长度 l 方向坐标为 x 处旋转指数曲线外导体的内径^[2], 该处等效阻抗为 R_x 。

2 优化问题的描述

对于电阻分压器而言, 单位阶跃响应是衡量其性能的一项重要指标^[3-6]。而在冲击脉冲测量系统中, 由于在高频时组成分压器电阻本身的残余电感、分布电容、极间电容、引线电感以及分压器本体对地杂散电容等因素的影响, 使得电阻分压器的阶跃响应特性是振荡型或者指数型(阻尼型)^[7]。对于图1所示电阻分压器, 由于其本身结构的特点^[2], 第1级高压臂为硫酸铜溶液, 其自身电感对分压器的阶跃响应影响不明显^[8]; 由于极间电容很小, 其影响也可以忽略; 第1级低压臂和第2级高、低压臂均是金属膜无感电阻, 其自身电感可以忽略。通过尽量减小引线的长度以减小引线电感对分压器性能的影响, 这样大大改善了分压器阶跃响应波形的振荡。忽略了以上的这些次要因素后, 此时影响电阻分压器性能的最主要因素即为电阻分压器的电阻与其对地杂散电容的乘积。第1级低压臂和第2级高、低压臂放在金属屏蔽筒中, 一经设计好后第2级高压臂对地杂散电容即已确定, 即图2中的 C_{e3} 。因此, 第1级高压臂及其对地杂散电容的乘积 $R_1 C_{e1}$ 是可调环节。

由于硫酸铜液电阻的阻值受其浓度的影响, 可以通过调节硫酸铜溶液的浓度来调节电阻分压器的分压比^[2]。而硫酸铜液电阻的阻值除与其浓度(影响电阻率)有关外, 还与有机玻璃管的内径和硫酸铜溶液液柱的有效长度有关。具体公式即

$$R_1 = \frac{\rho l}{\pi r^2} \quad (2)$$

式中 ρ 为硫酸铜溶液的电阻率。此时硫酸铜液电阻对地杂散电容 C_{e1} 为^[8]

$$C_{e1} = \int_0^l \frac{dx}{1.8\left(\frac{5}{6} + \frac{R_1}{60} \frac{x}{l}\right)} = \frac{100}{3} \frac{l}{R_1} \ln\left(1 + \frac{R_1}{50}\right) \quad (3)$$

3 数学模型的建立

3.1 对测量系统的要求

3.1.1 对示波器的要求

笔者使用的是 Agilent 通用示波器, 型号为

Infinitium 54833A。该示波器响应带宽为 1 GHz, 最大采样频率为 4 GS/s; 时标扫描速度: 最快为 200 ps/div, 最慢为 20 s/div; 电压扫描速度: 最快为 1 mV/div, 最慢为 5 V/div, 完全能够满足冲击电压测量的要求^[4]。

3.1.2 对分压器的要求

根据设计要求, 待测信号为高压快脉冲, 幅值 30 kV 左右, 上升时间为 ns 量级。由于采用高压脉冲分压器进行测量, 分压后的脉冲信号应能复现于常规示波器上。因此所设计的分压器的分压比 k 不能太小, 否则无法在示波器上显示出波形的完整信息。分压比 k 可以通过调节 CuSO_4 溶液浓度、调节分压器第2级分压比或者同时采取以上两种方法进行调节^[2]。

3.2 设计变量的选定

由式(1)可知, 影响 R_1 的变量为硫酸铜溶液的电阻率 ρ 、液柱半径 r 和液柱长度 l 。 ρ 与 R_1 成正比, 浓度越大, 阻值越小^[9]。液柱半径 r 和液柱长度 l 也是影响 R_1 的因素。由式(3)可知, 影响 C_{e1} 的变量为硫酸铜溶液的电阻 R_1 和液柱长度 l , 而 R_1 是 ρ 、 r 和 l 的函数, 相应地, C_{e1} 也是变量 ρ 、 r 和 l 的函数。因此选择 ρ 、 r 和 l 为优化的设计变量。即

$$x = [x_1, x_2, x_3]^T = [\rho, r, l]^T \quad (4)$$

3.3 目标函数的确定

根据第2部分的描述, 为了改善电阻分压器的阶跃响应, 应使 $R_1 C_{e1}$ 尽可能地小。由于第1级高压臂及其对地杂散电容的乘积 $R_1 C_{e1}$ 是影响分压器性能的最主要因素, 为了简化数学模型, 忽略第1级的自身电容、极间电容和自身电感。因此, 由式(2)、(3)得电阻分压器优化设计的目标函数为

$$R_1 C_{e1} = \frac{100}{3} l \ln\left(1 + \frac{\rho l}{50\pi r^2}\right) \quad (5)$$

3.4 约束条件的确定

3.4.1 边界约束

3.4.1.1 电阻率 ρ

对于硫酸铜液电阻而言, 采用有机玻璃管来盛溶液, 在有机玻璃管两端用紫铜电极(高压电极和低压电极)和密封材料密封, 以防硫酸铜溶液泄漏。由于硫酸铜溶液的溶解度受温度的影响, 在不同温度下在水中的溶解度值不同, 因此在特定温度下, 硫酸铜溶液的浓度有一个上限值, 在该温度下相应的硫酸铜溶液的电阻率即为设计变量 x_1 的下界。18 °C 时硫酸铜溶液浓度为 17.5% 时, 其电阻率值为 $21.834 \Omega \cdot \text{cm}^{[9]}$, 因此取 $22 \Omega \cdot \text{cm}$ 为 ρ 的下界。同时, 硫酸铜溶液液电阻的阻值也不能太大^[10, 11], 即其浓度不能太稀。18 °C 时当硫酸铜溶液浓度为 2.5% 时的电阻率为 $91.743 \Omega \cdot \text{cm}^{[9]}$, 因此取 $100 \Omega \cdot \text{cm}$ 为 ρ 的上界。

3.4.1.2 硫酸铜液柱半径 r

对于按图 1 结构设计的分压器, 希望其轴向尺寸不要太大。因为该分压器是按传输线原理设计, 为了与第 2 级进行阻抗匹配, 在其指数型外罩的小端起始处的特性阻抗为 50Ω , 根据无耗传输线计算公式^[12]

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad (6)$$

其中 Z_0 为特性阻抗, ϵ_r 为同轴线内外导体间填充介质的相对介电常数, a, b 分别为内外导体半径。对于设计变量 r , 限于有机玻璃管的规格、强度以及耐压的要求, 不能取值太小, 否则无法满足加工和耐压的需要, 根据经验取其下界为 0.3 cm 。此时根据式(6)算出指数型外罩最小端(阻抗为 50Ω 处)的半径为 0.69 cm , 内外导体间的最小间隙为 0.39 cm 。考虑到经第一级分压后高压快脉冲信号的幅值已经衰减到最大值的 $1/30 \sim 1/20$, 而空气的直流击穿强度为 3.3 kV/mm , 常态下击穿电压为 30 kV/cm ^[13], 此时内外导体之间的空气间隙的耐压足够。同时分压器的总体尺寸不能太大, r 的上界值也就不能取得太大。如果 r 较大, 则指数型外罩的小端横截面尺寸变大, 大端则将更大。因此, 取 r 的上界值为 2 cm 。此时根据式(6)算出指数型外罩最小端(阻抗为 50Ω 处)的半径为 6.283 cm , 内外导体间的最小间隙为 4.283 cm , 完全能够满足耐压的要求。

3.4.1.3 硫酸铜液柱长度 l

由于该分压器用于实验室测量电压小于 100 kV 的高压快脉冲, 尽管在分压器的高压端有绝缘措施, 考虑到安全性, 硫酸铜液柱的长度不能太小, 以防内外导体之间的空气击穿。因为常态下空气的击穿电压为 30 kV/cm ^[13], 取 l 的下限值为 10 cm , 此时完全能够满足耐压的要求。考虑到分压器的尺寸过大时, 其自身分布电容、分布电感和对地杂散电容也相应地增大直至不能忽略, 必然使分压器的性能下降, 因此取其上限值为 30 cm 。

3.4.2 性能约束

对于按图 1 设计的分压器, 由于采用传输线式设计, 第 1 级高压臂电阻不能过大, 否则将在前端造成严重失配, 这就决定了通过调节硫酸铜溶液浓度来调节分压比的可调范围有限^[2]。因此, 第 1 级分压比受到一定限制, 一般只能达到 $25 \sim 30$ ^[10, 11]。基于这一考虑, 取第 1 级高压臂电阻值下限为 $1 \text{ k}\Omega$, 上限为 $2 \text{ k}\Omega$ 。

3.5 优化问题的数学模型

对于不同的环境温度, 具体的约束条件是不同的。如当环境温度为 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 优化问题的数学模型可表达为

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \frac{100}{3} x_3 \ln \left(1 + \frac{x_1 x_3}{50 \pi x_2^2} \right) \\ \text{s.t.} \quad & 22 - x_1 \leq 0 \\ & x_1 - 100 \leq 0 \\ & 0.3 - x_2 \leq 0 \\ & x_2 - 2 \leq 0 \\ & 100 - x_3 \leq 0 \\ & x_3 - 30 \leq 0 \\ & 1000 - \frac{x_1 x_3}{\pi x_2^2} \leq 0 \\ & \frac{x_1 x_3}{\pi x_2^2} - 2000 \leq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

3.6 优化方法的选择

对于式(5), 由于该目标函数中有对数项, 求导较困难, 不易利用求导信息, 因此选用直接解法^[14, 15]。当优化问题的维数低、约束个数少而目标函数与约束条件中的函数又很复杂且对精度要求不高时, 复合形法有较大的优越性, 因为它程序简单, 使用方便, 不需要对函数进行很多的加工, 其收敛速度比随机试验法要快些, 因此在工程实际中应用较多。由于该优化问题的维数不高(3 维), 约束个数也不太多(8 个), 因此选用复合形法进行优化设计是合适的。但当在维数高或约束条件多时, 工作量很大, 收敛速度也将很慢。

对于式(7), 取复合型顶点个数为 4, 初始点为 $[50, 1, 15]$, 其余 3 点由程序自动生成。复合型的计算精度为 1×10^{-3} , 经 61 次迭代, 求得约束最优解为 $x^* = [69.1017, 0.468995, 10.0]$, $f(x^*) = 1004.69$ 。

4 优化结果分析

4.1 优化结果分析

由 3.4 知, 当 $\rho = 69.1017 \Omega \cdot \text{cm}$, $r = 0.468995 \text{ cm}$, $l = 10.0 \text{ cm}$ 时, 目标函数取得最优解。此时由式(6)得指数型外罩最小端(阻抗为 50Ω 处)的半径为 1.079 cm , 内外导体间的最小间隙为 0.61 cm , 满足耐压的要求。可见, 对于按图 1 设计的电阻分压器, 在满足测量精度和耐压的情况下, 分压器的尺寸越小, 其阶跃响应时间将越小。将 x^* 代入式(2), 得此时硫酸铜液电阻的阻值为 $1 \text{ k}\Omega$, 这说明基于传输线原理设计的该新型电阻分压器由于其自身结构的特点, 要求硫酸铜液电阻的阻值尽量小。但由于硫酸铜在特定工作温度下有溶解度的限制, 其阻值不可能一直减小。同时, 由于高压脉冲的幅值高达几十 kV , 第 1 级分压比也不宜太小, 这二者显然是矛盾的。此时要根据具体的测试条件、待测信号的幅值和上升时间的快慢等因素进行综合考虑, 从而对分压器的结构参数进行优化设计, 进而提高分压器的性能。

4.2 优化前后分压器方波响应的比较

阶跃响应是衡量分压器性能的一项重要指

标^[4-6],因此对优化前后分压器的阶跃响应进行比较在很大程度上能够反映优化设计的效果。图3为笔者按图1原理经优化设计后的一种CuSO₄溶液分压器。图4为在27℃时Agilent Infiniium 54833A示波器自带校准方波与该方波经过优化前分压器及优化后分压器(见图3)的波形比较图。限于条件,优化前分压器结构参数取为: $\rho=25.72\ \Omega\cdot\text{cm}$, $r=0.45\ \text{cm}$, $l=20\ \text{cm}$,分压比 $k=962.1$;优化后分压器结构参数取为: $\rho=52.1\ \Omega\cdot\text{cm}$, $r=0.45\ \text{cm}$, $l=10\ \text{cm}$,分压比 $k=712.5$ 。图4中 m_1 为示波器自带校准方波波形,上升时间为1.684 ns; m_2 为该方波经过优化前分压器分压后的波形,上升时间为2.478 ns; m_3 为该方波经过优化后分压器分压后的波形,上升时间为1.843 ns。由图4可见,分压器经优化设计后性能有显著改善。

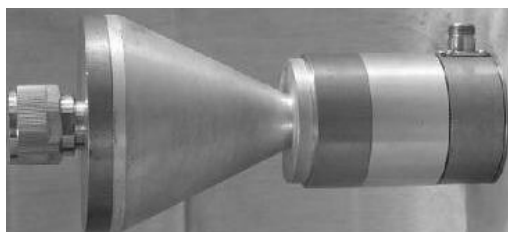


图3 结构优化后的CuSO₄溶液分压器

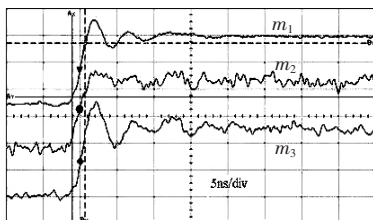


图4 优化前后分压器方波响应比较图

5 结语

对按传输线原理设计的电解液电阻分压器的结构参数进行了优化设计,得出了以下结论:①在满足测量精度和耐压的情况下,分压器的尺寸越小越好;②该型电阻分压器由于其自身结构的特点,要求硫酸铜液电阻的阻值尽量小;③对该型电阻分压器进

行优化设计时应综合考虑测量的要求。

当然,由于在优化设计时为了突出影响电阻分压器性能的主要因素而忽略了一些次要因素,而这些次要因素中的一种或几种在某些测量条件下可能成为影响分压器性能的重要因素(如温度对硫酸铜液电阻阻值的影响)。这就要求根据测量要求、待测信号特性等采取相应措施(如尽量保持环境温度恒定),并在测量前对设计的分压器进行校准,也可以考虑定制高频固体电阻以减小环境温度对硫酸铜液电阻阻值的影响。

参考文献:

- [1] 郑兆翁. 同轴式 TEM 模通用无源器件[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1982.
- [2] 邬昌峰. 一种测量高压快脉冲用电阻分压器的设计[J]. 高压电器, 2006, 42(5): 362-364.
- [3] JJG 2015-1987. 中华人民共和国国家计量检定系统 脉冲波形参数计量器具[S].
- [4] ZBF 240001-1990. 中华人民共和国行业标准 冲击电压测量实施细则[S].
- [5] IEC 60060 -2. High-voltage Test Techniques, Part 2: Measuring System[S].
- [6] GB/T 16927.2-1997. 中华人民共和国国家标准 高电压试验技术 第2部分:测量系统[S].
- [7] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [8] 邬昌峰, 蒋全兴. 新型脉冲分压器的分析与误差补偿[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 168-171.
- [9] 张向宇. 实用化学手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [10] LEE Z Y. Subnanosecond High-voltage Two-stage Resistive Divider[J]. Rev Sci Instrum, 1983, 54(8): 1 060-1 062.
- [11] BARRER D M, BYRON S R, CRAWFORD E A, et al. Low-inductance Capacitance Probe for Spark Gap Voltage Measurement[J]. Rev Sci Instrum, 1985, 56(11): 2 111-2 115.
- [12] 刘学观, 郭辉萍. 微波技术与天线[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [13] 李金伴, 陆一心. 电气材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [14] 孙靖民. 机械优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [15] 郭鹏飞, 韩英仕. 结构优化设计[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2005.

简讯

2008年高压开关技术研讨会暨中国高压电器网年会和一届三次网委会在西安召开

2008年高压开关技术研讨会暨中国高压电器网年会和一届三次网委会于2008年5月5~7日在陕西省西安市召开,共有来自行业和相关单位的约150名代表参加了会议。

会议期间还举行了2008年高压开关技术研讨会,针对国网公司2007年开关设备运行情况、HVDC国际标准动态和高压直流输电用开关设备技术要求、中压配电设备的新技术和应用、雨雪冰冻灾害对输变电设备造成的破坏和影响、高压开关行业国家标准和行业标准制修订情况、24 kV 电网及设备应用、真空断路器及其在高电压等级的应用以及高压电器型式试验状况和高压开关行业型号证书发放情况等专题做了报告。

会议由中国高压电器网、中国电机工程学会变电专委会、中国电工技术学会输变电设备专委会和西安高压电器研究所共同主办。