

一种测量高压快脉冲用电阻分压器的设计

邬昌峰

(东南大学机械系, 江苏 南京 210096)

Design of Resistance Divider Used for High Voltage Fast-response Pulse Measurement

WU Chang-feng

(Department of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘要: 运用传输线原理设计了一种测量高压快脉冲用的新型电阻分压器。该分压器结构合理, 在 1 GHz 范围内传输特性好, 分压比误差 8.7%, 上升时间误差 5.38%。该分压器的分压比可调, 适用范围广, 使用方便, 能够满足不同工作条件下高压快脉冲的测量工作。

关键词: 高压; 脉冲; 电阻分压器; 测量

中图分类号: TM83

文献标识码: A

Abstract: A new type of resistance divider used for high voltage pulse measurement has been developed based on the theory of transmission line. The configuration of the divider is reasonable, and it has good transmission characteristic in the frequency range up to 1 GHz. The error of the voltage scale factor is 8.7%, and rise time error is 5.38%. The voltage scale factor can be adjusted, and the divider can be used conveniently for high voltage measurement in many circumstances.

Key words: high voltage; pulse; resistance divider; measurement

0 前言

高速快脉冲电压的瞬时幅值可达几百 kV, 脉冲的上升沿一般在 10 ns 甚至亚 ns 量级, 即响应带宽可达 1 GHz。相对于直流或者低频高压测量用电阻分压器而言, 为了不使测量系统的上升时间影响到被测波形, 应该尽量避免脉冲分压器的杂散参数的影响。由于电压的瞬时值很高, 分压器的衰减倍数应达 $10^3 \sim 10^4$ 量级, 要采用 2 级甚至 3 级分压^[1]。另外, 由于脉冲电压的前沿快, 很容易在测量回路中形成干扰, 所以分压系统的屏蔽也很重要。本文介绍了一种新型脉冲电阻分压器的研制, 并应用于实际测量。

1 电阻分压器的测量原理

高压脉冲信号在自然界中主要有雷电脉冲信

号, 人工的有核电磁脉冲(NEMP)信号, 以及脉冲模拟器产生的信号等。以脉冲模拟器产生的信号作为被测信号, 则脉冲测量系统示意图见图 1。脉冲分压器的原理图见图 2。

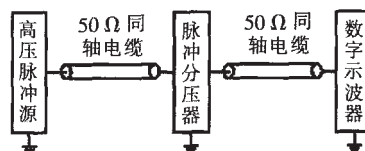


图 1 测量系统示意图

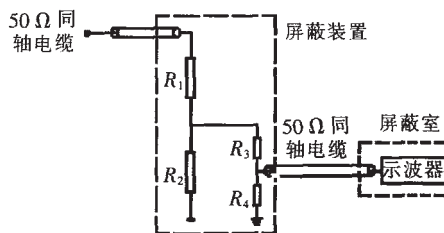


图 2 两级脉冲电阻分压器原理图

R_1 ——第 1 级高压臂电阻 R_2 ——第 1 级低压臂电阻
 R_3 ——第 2 级高压臂电阻 R_4 ——第 2 级低压臂电阻

对于传统的线绕式电阻分压器而言, 由于其杂散电容和电阻自身电感的影响, 容易产生谐振和振铃^[2], 因此传统的线绕式电阻分压器不适于测量带宽 1 GHz, 上升时间为亚 ns 的快脉冲。

为了尽量消除杂散参数的影响, 笔者采用硫酸铜溶液作为二级电阻分压器第 1 级的高压臂电阻 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。根据测量电压幅值的大小, 其分压比可调。分压比的调节可以通过两种方式实现:
① 调节硫酸铜溶液的浓度以调节第 1 级分压比;
② 调节分压器第 2 级高压臂以调节第 2 级分压比。

2 结构确定

对于如图 2 所示的二级分压系统, 必须尽量减

收稿日期: 2005-11-16

作者简介: 邬昌峰(1974-), 男, 博士研究生, 主要从事电磁脉冲测量方面的研究。

小杂散参数对分压器测量系统的影响,有效的办法就是将分压器本身或者一部分用传输线代替^[3-4],以兼顾高频分压及耐压的要求。

基于以上的构想,笔者制作了如图3所示的快脉冲电阻分压器。分压器第1级的高压臂电阻采用装在有机玻璃管中的硫酸铜水溶液,可以克服传统线绕式电阻的分布电容和杂散电感的影响^[5-7]。将硫酸铜溶液水电阻作为内导体,此时硫酸铜溶液水电阻相当于一个高频电阻^[8]。用硫酸铜溶液水电阻作为内导体,根据无耗传输线特性阻抗的计算公式^[3]:

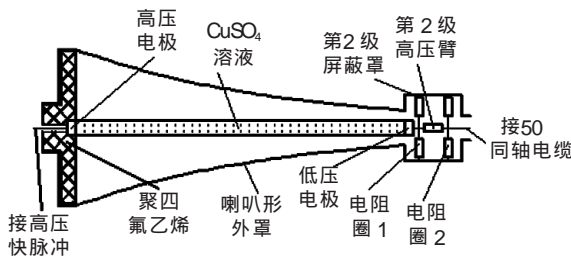


图3 传输线式分压器示意图

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad (1)$$

式中: a, b 分别为无耗传输线内、外导体半径; ϵ_r 为同轴线内、外导体间填充介质的相对介电常数。由于在硫酸铜液电阻段内、外导体间的介质为空气,则式(1)即为:

$$Z_0 = 60 \ln \frac{b}{a} \quad (2)$$

根据式(2),再将硫酸铜溶液装在有机玻璃管里作为水电阻,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^[8]。考虑到分压器第1级与第2级和同轴电缆的阻抗匹配^[9],喇叭形同轴线段和硫酸铜溶液内导体应从 $Z_0=50$ 处开始,然后在此处与分压器第1级低压臂和第2级连接。为了尽量减小引线电感,电阻圈1和电阻圈2均由10个呈辐射状的电阻做成^[10]。电阻圈1相当于分压器第1级的低压臂,电阻圈2相当于分压器第2级的低压臂,两个电阻圈之间的电阻为分压器第2级的高压臂。电阻圈1、第2级高压臂电阻和电阻圈2用金属屏蔽罩包围起来。为了保证脉冲在第2级输出时与电缆之间不发生反射,此时电阻圈1的等效电阻 R_1 、第2级高压臂电阻 R_2 和电阻圈 R_3 之间应满足:

$$\begin{cases} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2+R_3} = \frac{1}{50} \\ R_3=50 \end{cases} \quad (3)$$

为了尽量减小杂散参数的影响,电阻圈1,2和第2级高压臂电阻采用金属膜无感电阻。适当选择 R_1 和 R_2 的阻值,即可调节第2级分压比。

假设 CuSO_4 溶液水电阻的阻值为 R_0 ,由式(2)可得如图4所示外导体的指数曲线阻抗匹配图。易知:

$$R = 50 + R_0 \quad (4)$$

$$R_x = 50 + R_0 \frac{x}{l} \quad (5)$$

为了使脉冲在喇叭部分传输时不发生反射,应使分压器的总阻抗等于同轴线的特性阻抗^[8]。即:

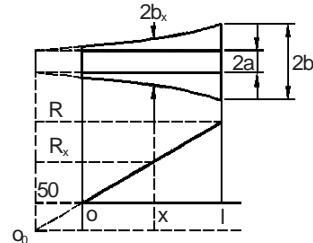


图4 指数曲线阻抗匹配图

$$Z_x = 60 \ln \frac{b_x}{a} = R_x = 50 + R_0 \frac{x}{l} \quad (6)$$

即:

$$b_x = a \exp \left[\frac{5}{6} + \frac{R_0}{60} \frac{x}{l} \right] \quad (7)$$

由式(7)即可确定喇叭形外罩的形状。

图4为根据(7)式的指数曲线阻抗匹配图,其中: a 为 CuSO_4 溶液水电阻半径; b 为旋转指数曲线外导体最大半径; l 为 CuSO_4 溶液水电阻有效长度; b_x 为 R_x 处旋转指数曲线外导体半径。由于 b_x 随 x 的增大按指数增大,所以实际加工中采用准指数曲线近似,在高压端采用聚四氟乙烯将高压电极和外导体绝缘,以免击穿。

3 分压器的校准与测量结果

3.1 分压器的阻抗特性

按照上述原理设计的电阻分压器具有很好的幅频特性。图5为分压比为500时分压器在0.3 MHz~1 GHz范围内的阻抗特性。

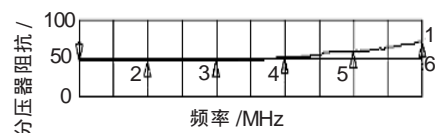


图5 电阻分压器在1 GHz范围内的频率响应

由图5可见,在0.3~600 MHz范围内,分压器的阻抗特性变化在47.95~51.72之间;在600 MHz~1 GHz之间,分压器的阻抗逐渐上升,从51.72变化到76.16。因此,所设计的电阻分压器完全能够满足前沿为ns级的高压快脉冲的测量。

3.2 分压器的校准

分压器采用Agilent示波器进行校准。示波器型号为Infiniium 54833A,该示波器响应带宽为1 GHz,

最大采样频率为4 GSa/s。图6为示波器输出5 V校
验用方波脉冲波形。图7为分压器分压后的方波响
应波形。图8为校准前后波形比较图。表1为其数据
对照数值。由图可见,示波器输出5 V方波脉冲波形
的电压幅值为5.067 V,上升时间为1.66 ns;经分压

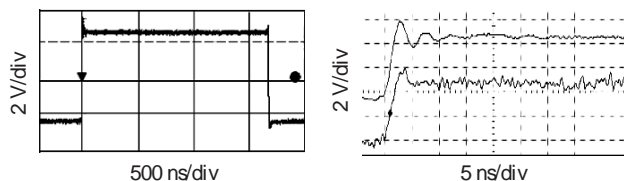


图6 示波器输出5 V方波脉冲波形(上升时间1.66 ns)

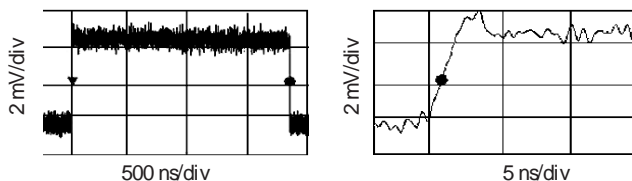


图7 分压器分压后的方波响应波形(上升时间1.799 ns)

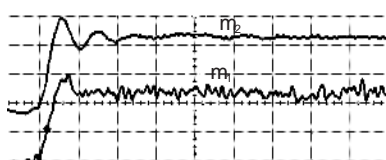


图8 校准前后波形比较图

注: m_1 为示波器输出5 V方波脉冲波形,上升时间1.799 ns,幅
值5.112 V; m_2 为5 V方波脉冲经电阻分压器分压后的波形,
上升时间1.660 ns,幅值5.050 V。

表1 校准前后的波形数据对照表

	上升时间		幅值	
	m_1 /ns	m_2 /ns	m_2 /V	m_1 /mV
电流	1.799 30		5.112	5.050
平均值	1.799 30	1.660 05	5.112	5.050
最小值	1.799 30	1.660 05	5.112	5.050
最大值	1.799 30	1.660 05	5.112	5.050

影响,电流主要集中在硫酸铜溶液的表面,将造成分
压比不稳定。另外,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。
因此通过调节硫酸铜溶液浓度来调节分压比的可调
范围有限,一般只能达到25~30^[5,11]。

对于已经过第1级分压后的第2级分压器,电压
幅值大幅下降,其分压电阻装在屏蔽筒中,且按照阻
抗匹配原则选择电阻阻值,可以进行二级甚至三级分
压,可操作性较好。但要事先计算出各个电阻阻值,并
且为了拆卸方便,应将第2级做成3段,以便灵活更
换不同阻值的电阻,从而实现分压比的调节。

3.3 测量结果

图9为在分压器总的分压比为3 900时测量幅
值为22 kV的双指数脉冲的波形。图10为分压器分
压比为500时脉冲源产生的脉冲方波的实测波形,
此时方波的上升时间为5.83 ns。

4 结语

这种电阻分压器结构设计合理,传输性能好,分
压比稳定,上升时间误差小,分压比可调,能够满足
不同工作条件下的高压快脉冲的测量要求。

器分压后方波波形的电压幅值为5.05 mV,上升时
间为1.799 ns。分压器的理论分压比为950,实际分压
比为1 003.4,误差为5.6%。上升时间误差为8.37%。可
见电阻分压器的精度能够满足测量要求。

对于第1级分压器,在高频时由于集肤效应的

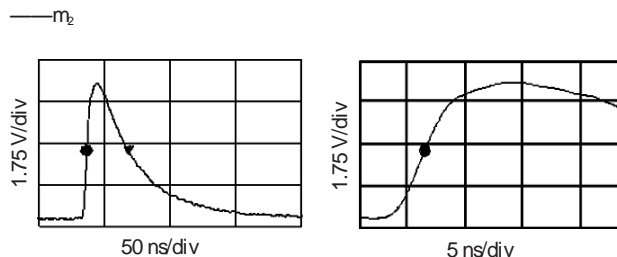


图9 脉冲模拟器输出电压测量波形(上升时间5.219 ns)

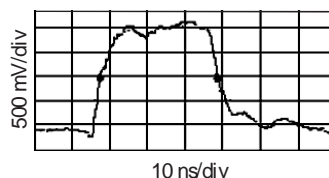


图10 方波脉冲源输出实测波形(上升时间5.83 ns)

参考文献:

- [1] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003.
- [2] Jayaram S, Xu X Y, Cross J D. High-divider-ratio Fast-response Capacitive Dividers for High-voltage Pulse Measurements[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2000. 36(3): 920-922.
- [3] 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.
- [4] 李正瀛. 脉冲功率技术 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [5] Lee Z Y. Subnanosecond High-voltage Two-stage Resistive Divider[J]. Rev. Sci. Instrum., 1983, 54(8): 1 060-1 062.
- [6] Lee Z Y. Improved CuSO₄ HV Pulse Divider [J]. Rev. Sci. Instrum., 1988, 59(6): 1 244-1 245.
- [7] Racz B, Poatocis A. Fast High-voltage Resistive Pulse Divider [J]. Meas. Sci. Technol., 1992, 5(3): 926-928.
- [8] 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.
- [9] 周璧华, 陈 彬, 石立华. 电磁脉冲及其工程防护 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [10] 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.
- [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.