

文章编号: 1001-4322(2004)04-0514-03

# 纳秒脉冲电压的波形重建\*

韩英杰<sup>1,2</sup>, 孙广生<sup>1</sup>, 严 萍<sup>1</sup>, 王 珏<sup>1</sup>, 张适昌<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 电工研究所 脉冲功率及电源技术实验室, 北京 100080; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100080)

**摘 要:** 介绍了一种根据脉冲电压测量系统的输入输出波形对纳秒脉冲电压信号测量系统进行参数计算的方法和技术, 该方法基于最优化原理, 并将其应用于快脉冲电压波形的重建。重建的波形用电容分压器实测波形进行了检验, 表明重建波形有比用积分器更好的效果。

**关键词:** 纳秒脉冲信号; 电容分压器; 波形预测; 波形重建

**中图分类号:** TM835 **文献标识码:** A

近年来随着高功率微波技术的发展, 对脉冲功率提出了新的要求, 不仅脉冲上升时间要快(皮秒到几纳秒)、而且脉宽要窄(几 ns 到几十 ns)。测量纳秒级窄脉冲电压信号往往采用电容分压器, 这是因为电容分压器具有响应时间快、结构紧凑、容易制作、对被测量系统影响小等特点。但是由于用电容分压器不能直接测(图 1)出脉冲电压的波形, 往往需要在后面加一个积分回路(图 2)。由于这种测量回路的设计通带窄, 甚至没有平坦的通频带, 因而其分压比与频率有关<sup>[1]</sup>。曾有学者试图用反卷积的方法进行波形重建<sup>[2]</sup>, 但是由于对于脉宽已经很短的纳秒脉冲来说, 获得其冲击响应将很困难。本文将电容分压器视为黑箱子并计算其参数, 进而反演出测量对象的真实波形, 并成功应用于纳秒脉冲信号预测、重建, 这种方法尚未见到相关报道。

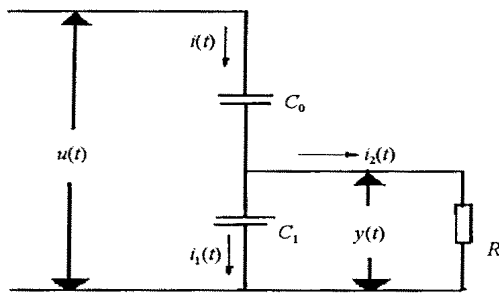


Fig. 1 Circuit of capacitive divider  
图 1 电容分压器电路原理图

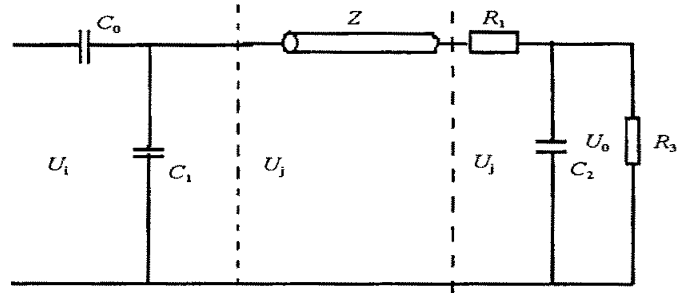


Fig. 2 Circuit of capacitive divider with integrator  
图 2 带积分器的电容分压器电路图

## 1 测试回路的等值电路

电容分压器的等值电路如图 1 所示, 图中  $C_0$  是高压电容,  $C_1$  是低压电容,  $R$  代表分压器输出电缆的波阻抗。这样, 当输入电压为  $u(t)$  时, 其输出电压是  $y(t)$ 。根据电路图列出电路方程为

$$C_0 \frac{d[u(t) - y(t)]}{dt} = i_1(t) + i_2(t) = \frac{y(t)}{R} + C_1 \frac{dy(t)}{dt}$$

整理后有

$$(C_1 + C_0) \frac{dy(t)}{dt} + \frac{y(t)}{R} = C_0 \frac{du(t)}{dt}$$

采用差分方程离散化上式, 有

$$(C_1 + C_0) [y(k) - y(k - 1)] / T + y(k) / R = C_0 [u(k) - u(k - 1)] / T$$

式中:  $T$  是示波器的采样周期,  $y(k)$  是分压器输出采样序列,  $u(k)$  是原始输入采样序列。整理后得

$$y(k) = [1 - \frac{T}{R(C_1 + C_0) + T}]y(k - 1) + \frac{C_0 R}{R(C_1 + C_0) + T}[u(k) - u(k - 1)] \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2003-09-04; 修订日期: 2003-11-10

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 韩英杰(1975—), 男, 工程师, 研究助理, 硕士生, 主要从事脉冲信号测量方面的研究; 北京 2703 信箱; E-mail: hanyj@mail. iec. ac. cn.

目前关于高压侧  $C_0$  的计算方法有多种,且每种计算方法所得结果相差较大<sup>[3~5]</sup>,这里暂不对计算方法进行判别,采用辨识的方法来确定系统参数,进而对脉冲测量波形进行处理。

### 2 测试回路的参数计算

根据(1)式,并将其改写,令系数为  $a_1, b_0, c_1$ ,  $(k)$  是误差及干扰,有

$$y(k) + a_1(k - 1) = b_0 u(k) + b_1 u(k - 1) + (k) \tag{2}$$

根据时间采样序列列写线性递推方程

$$y = H +$$

其中

$$y = \begin{bmatrix} y(2) \\ y(3) \\ y(4) \\ \dots \\ y(N) \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} -y(1) & u(2) & u(1) \\ -y(2) & u(3) & u(2) \\ -y(3) & u(4) & u(3) \\ \dots & \dots & \dots \\ -y(N-1) & u(N) & u(N-1) \end{bmatrix}, \quad = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}, \quad = \begin{bmatrix} (2) \\ (3) \\ (4) \\ \dots \\ (N) \end{bmatrix}$$

因为  $y$  和  $H$  都是可以实测的数据,是待求的参数,取误差函数

$$J(\ ) = \sum_{k=1}^L [y(k) - H(k)]^2$$

根据最优化原理,设使得  $J(\ )|$  取最小值,有

$$\frac{\partial J(\ )}{\partial} | = \frac{\partial}{\partial} (y - H) (y - H) | = 0$$

得到正则方程

$$(H H) = H y$$

从而有

$$= (H H)^{-1} H y \tag{3}$$

另外,由于

$$\frac{\partial^2 J(\ )}{\partial^2} | = 2 H H > 0$$

所以满足(3)式的能使得  $J(\ )|$  最小。

用脉冲发生器产生 20ns 脉宽,200V 的电压施加于电容分压器的输入端,用 4G 采样率的示波器测试得出结果(如图 3),根据  $= (H^T H)^{-1} y$  编制计算程序进行计算,得模型系数值  $a_1 = -0.9380, b_0 = 0.0079, b_1 = -0.0078$ 。可以看出,  $b_0$  和  $b_1$  数值基本相等,符号相反,这样  $b_0 u(k) + b_1 u(k - 1)$  对于输入  $u(t)$  变化量将十分敏感,这反映出二者之间是微分的成分,表示  $y(t)$  对高频的响应,而  $a_1$  则代表着对低频成分的衰减程度。

### 3 测试回路的波形预测以及波形重建

将(2)式进行变换,有

$$y(k) = -a_1 y(k - 1) + b_0 u(k) + b_1 u(k - 1) + (k) \tag{3}$$

可以看出这是一个递推关系式,当原始输入信号经过示波器采样信号后的  $u$  已知时,设定  $y$  的初值为  $y(1) = 0$ ,根据此递推关系式可以依次推出  $y(2), y(3) \dots$ 。这样就可以由原始输入数据预测出信号经过分压器后的输出数据,从而实现波形预测,结果如图 4。可以看出输出与实测波形能很好吻合,说明模型能准确反映原分压器参数。若将(3)式进行变换,可得出递推关系式

$$u(k) = [-b_1 u(k - 1) + y(k) + a_1 y(k - 1)] / b_0 \tag{4}$$

同样,当分压器输出信号经过示波器采样后的信号  $y$  已知时,设定  $u$  的初值为  $u(1) = 0$ ,这样根据此递推关系式可以依次推出  $u(2), u(3) \dots$ 。就可以由分压器输出数据逆向得出原始输入数据,从而实现波形重建,如图 5。可以看出此波形能快速跟踪原始信号,说明重建波形能很好地反映原始输入。

为了进行对比,我们又给出了电容分压器信号经过积分器后的的波形,如图 5。经计算在脉冲的平顶部

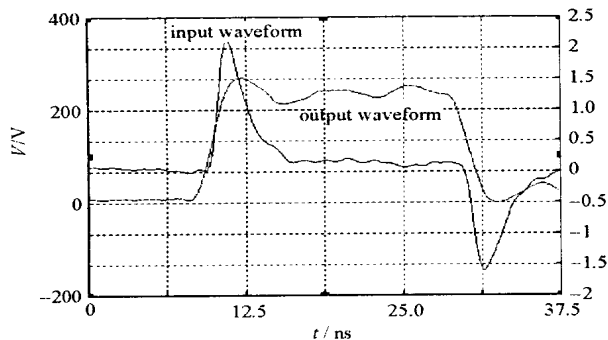


Fig. 3 Waveform by measurement

图1 试验测试波形

分,重建信号均方差为 8.19%,优于积分器处理后信号的均方差 13.55%。这是信号经过积分器后,由于引线电感、电容等的存在,实测波形存在比较严重的振荡,而重建的波形则不存在这种现象。同时由于积分回路电容的作用,输出波形中波头的能量被部分衰减了,而重建的波形则不存在这种现象。

#### 4 结论

通过一组输入、输出波形计算出系统参数,然后利用所给出的递推方程实现波形预测、重建。所反映的原始波形能够达到并优于积分器的效果。

由于空间电磁场干扰、以及示波器内部噪声和计算精度的存在,重建波形与原始波形没有完全重合,因此采用屏蔽以及小波的方法尽量降低干扰将有助于提高波形重建效果。

此方法可以应用于对电容分压器测得信号的分析,并还原真实信号,也可以应用于罗柯夫斯基线圈测量电流的波形预测、重建。在纳秒脉冲信号测量、冲击电压信号测量、冲击电流测量等领域都有广泛的推广价值。

#### 参考文献:

- [1] 刘金亮,怀武龙,霍哲,等.一种测量脉冲高电压的电容分压器[J].强激光与粒子束,2000,12(1):122—124. (Liu J L, Huai W L, H Z, et al. A compact capacitive divider for measuring pulse high voltage. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(1):122—124)
- [2] Lagnese J, Mcnight R H. Calculation of confidence intervals for high voltage impulse reconstruction[J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 1988, 37(2):201—206.
- [3] Edson W A, Oetzel G N. Capacitance voltage divider for high-voltage pulse measurement[J]. *Rev Sci Instrum*, 1981, 52(4):604.
- [4] Mankoski J J. High voltage subnanosecond dielectric breakdown[D]. Texas: Texas Tech University, 1997.
- [5] 张永辉,常安碧,甘延青,等.一种同轴高压电容分压器的设计[J].高电压技术,2003,(1):37—41. (Zhan Y H, Chang A B, Gan Y Q, et al. Design of a high voltage coaxial capacitive voltage divider. *High Voltage Engineering*, 2003,(1):37—41)

## Waveform reconstruction of nanosecond pulse voltage

HAN Ying-jie<sup>1,2</sup>, SUN Guang-sheng<sup>1</sup>, YAN Ping<sup>1</sup>, WANG Jue<sup>1</sup>, ZHANG Shi-chang<sup>1</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, the Chinese Academy of Sciences, Pulsed Power and Supply Technology Laboratory, P. O. Box 2703, Beijing 100080, China;

2. Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Application of optimization principle was employed to evaluate the parameter of nanosecond pulse signal measurement system by input waveform and output waveform. Input waveform was reconstructed from the output waveform. The calculated results agree with analysis and experiment results well. To test suitability of the methods, compared with waveform from integrator, the reconstructed waveform has better performance and accuracy.

**Key words:** Nanosecond pulse signal; Capacitive divider; Waveform forecast; Waveform reconstruction

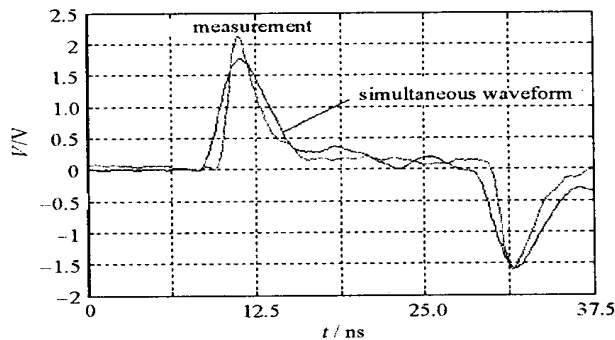


Fig. 4 Comparison of output waveforms

图4 试验波形和计算波形

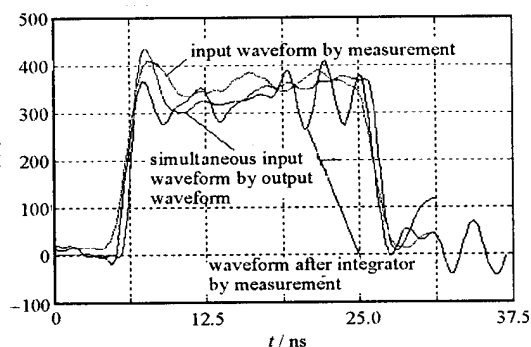


Fig. 5 Comparison of input waveforms

图5 计算波形和积分器处理波形的对比