

# 纳秒高压脉冲电阻分压器的结构优化

胡景森<sup>1</sup>, 陈炜峰<sup>2</sup>

(1. 中国电子技术标准化研究所, 北京 100007; 2. 南京信息工程大学信息与控制学院, 南京 210044)

**摘要:** 由电阻分压器和存储示波器组成的纳秒级高电压脉冲测量系统中, 各组成部分间的阻抗匹配与否, 对测量结果影响很大。笔者基于高频电磁场仿真软件 FEKO, 建立了电阻分压器的仿真模型, 分析了其结构对测量结果的影响, 并比较了 4 种典型结构的优劣, 对选中的结构进行了过渡段的选型和锥角优化。仿真结果表明, 为减小反射, 分压器应采取过渡结构, 且锥形过渡较佳; 分压器输入过渡段锥角对波形上升沿的响应影响较大, 使测得的脉冲上升时间延长; 输出过渡段锥角影响波形下降沿测量的准确性, 可能造成电压波形畸变。优化分析发现输入过渡段最佳锥角为 20°左右, 输出过渡段可根据测量要求选择较大的锥角。试验证明仿真分析结果正确, 依据其所设计的小型电阻分压器性能理想, 满足实际测量要求。

**关键词:** 纳秒高压脉冲; 电阻分压器; 阻抗匹配; 分压器结构; 仿真优化

**中图分类号:** TM933.21      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-1609(2011)01-0086-05

## Structure Optimization of Resistance Divider for Measuring Nanosecond High Voltage Pulse

HU Jing-sen<sup>1</sup>, CHEN Wei-feng<sup>2</sup>

(1. China Electronics Standardization Institute, Beijing 100007, China; 2. College of Information & Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In a system with resistance voltage divider for measuring nanosecond high voltage pulse, its impedance matching between the divider and else elements influences measuring result much. The simulation model was built based on simulation soft FEKO. Analysis results indicate it would cause reflection, oscillating and changing of the voltage divider ratio when the system impedance mismatch, and the structure of a divider is very important in order to get ideal response performance. Four different typical structures of a resistor divider were analyzed. The results show that conical transition structure is better. The cone angle of input transition section influences the response rising time much, while the cone angle of output transition section influences distortion level of the response fall portion. Optimization shows that the best angle of input transition cone is 20°, and bigger cone angle of output transition can be adopt according to measuring demand. A small voltage divider was designed and developed based on the result of simulation. The experiments show that the conclusion of simulation is proper. The divider performance can satisfy actual demand for measuring nanosecond high voltage pulse.

**Key words:** nanosecond high voltage pulse; resistor divider; impedance match; divider structure; simulation optimization

## 0 引言

纳秒级高电压脉冲变化过程极快, 其测量存在着诸多值得研究和重视的问题: 被测脉冲前沿快、幅

值高; 快脉冲情况下的电磁干扰严重; 测量系统内部各组成部分间的阻抗匹配与否; 对测量结果的影响突出。随着计算电磁学的不断向前发展, 用于电磁仿真计算的方法按照数学方程的不同, 分为微分方程法(如有限元方法 FEM、时域有限差分方法 FDTD

等)和积分方程法(如矩量法 MoM 等)<sup>[1-8]</sup>,基于这些算法的电磁场仿真计算软件也相继出现,大大提高了工作的效率和计算的可靠性。

### 1 分压器结构对性能影响的初步分析

#### 1.1 电阻分压器实体模型

常见的电阻分压器结构见图 1(a),采用电磁场分析软件 FEKO 进行电磁仿真计算<sup>[9]</sup>。初步参数为:外部为圆柱体,直径为 70 mm,长(高)度为 200 mm;高压臂电阻采用分布式电阻,总阻值为 5.0 kΩ,直径为 20 mm,长度为 150 mm,相对磁导率  $\mu = 1$ ,密度  $\rho = 2.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,电阻率  $\sigma = 3.33 \times 10^3 \text{ } \Omega/\text{m}$ ;低压臂电阻采用点电阻,阻值为 50  $\Omega$ ;分压器输入端口、输出端口分别与 50  $\Omega$  同轴电缆相接,电缆长为 20 m。

分压器输入输出端分别与电缆相接,电缆定义为细线模型,低压臂电阻加在细线中间也是细线模型,均采用线段单元划分;分压器(含高压臂电阻)为规则的圆柱体,结构简单,采用三角形单元进行划分,且为了减少计算量、提高计算效率,采取粗划;而分压器的输入端和输出端是相对结构尺寸较小、部件较多、连接较为复杂的关键部位,存在细线连接和线面连接的问题,因此网格划分得更精细,以保证计算精度。将支承与空气视为同一介质进行简化,采用不等边网格划分技术,划分的网格模型见图 1(b)。

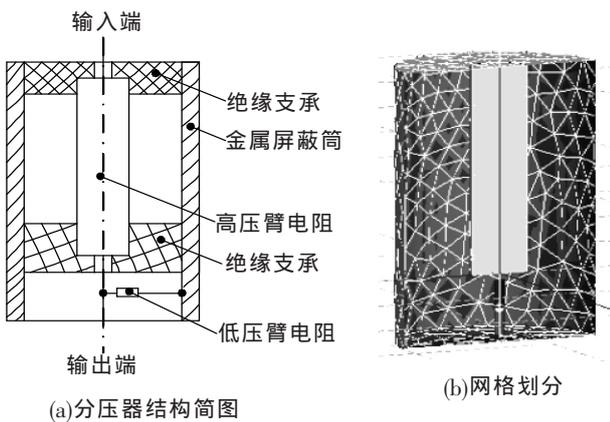


图 1 电阻分压器网格模型

Fig.1 Mesh model of resistance divider

#### 1.2 分压器形状对波形的影响

对于 FEKO 软件,常用的激励源有:高斯脉冲、双指数脉冲、正弦波,此处采用双指数脉冲,波形参数为:脉冲上升时间  $t_r = 10 \text{ ns}$ ,半脉宽  $t_{hw} = 71.5 \text{ ns}$ 。所加激励源波形见图 2,纵坐标为归一化的电压值,横坐标为时间,以“光米”(lm)<sup>[9]</sup>为单位,即光在  $t$  时间内所走过的路程,以便直接从图上看出电压波形的畸变位置。

的畸变位置。

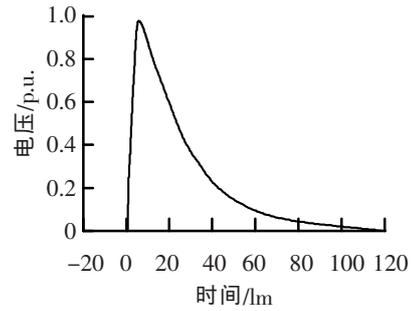


图 2 激励源波形

Fig.2 Excitation waveform

选取 4 种典型的结构,见图 3,对分压器进行仿真计算,4 种不同结构的输入输出端口分别与 50  $\Omega$  同轴电缆相接,在建立仿真模型时,除直径外(平均直径仍为 70 mm),分压器其他参数不变。在输入端口分别加双指数波激励源,在输出端口得到的波形见图 4。

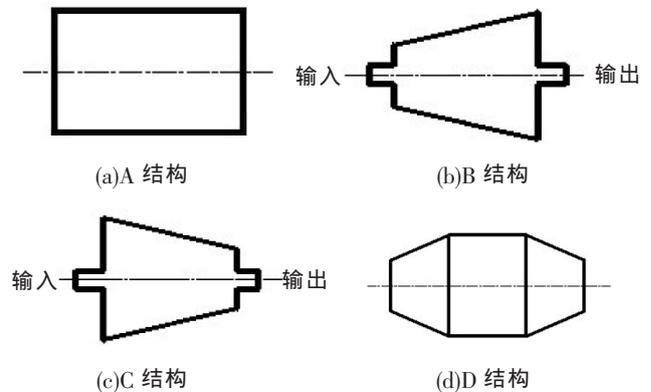
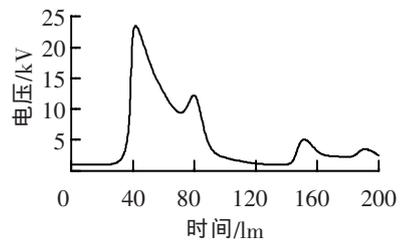
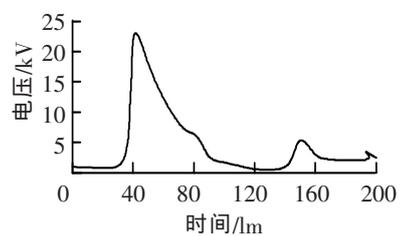


图 3 4 种典型的分压器结构

Fig.3 Four typical structure of the divider



(a)A 结构波形



(b)B 结构波形

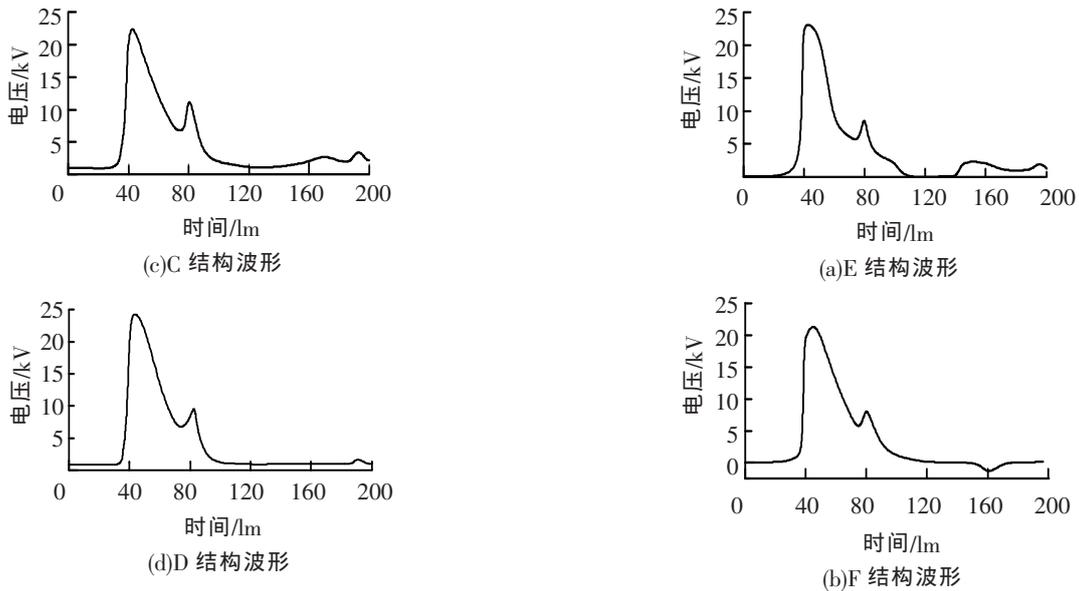


图4 4种典型结构对应的输出波形

Fig.4 The corresponding output waveform of four typical structure

由图4可见,A结构在主峰值后出现了3个正脉冲;第1个为终端反射的结果;第2个为电磁波反射回源端的结果;第3个为再次传向终端反射的结果。与A结构相比,B结构的终端反射明显减小,只在波反射回源端时有明显的反射,表明B结构输出端口的阻抗匹配比A结构有明显的改善。C结构输出波形中,主脉冲后出现2个正脉冲,其中第1个出现在波传向终端的位置,波返回源端没有出现明显反射,而在波再次传向终端时,又出现一个主脉冲,表明C结构输入端口匹配良好,输出端口出现由于阻抗失配的反射波。D结构的两端反射都明显减小,输出端波形趋于理想。

## 2 过渡段的结构分析与设计

### 2.1 结构选型

以直线过渡(E结构)、凹形过渡(F结构)和凸形过渡(G结构)3种典型结构为例进行仿真分析,结构型式及仿真输出分别见图5、6。

由图6可见,G结构采用凸形过渡,波形畸变情况和E结构相似,但输出端电压峰值比E结构减小得多;F结构输出电压峰值有所减小,且在主峰值后

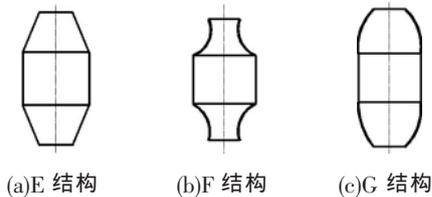


图5 过渡段的设置

Fig.5 The set of transition

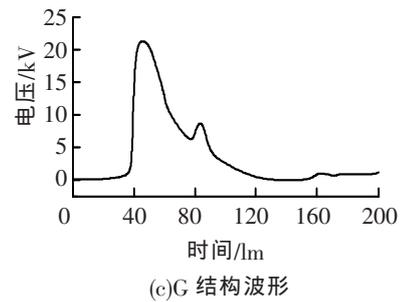


图6 输出波形

Fig.6 Output waveform

又出现了一个负脉冲,这是由于脉冲返回到输入端,结构不连续处发生突变形成的。考虑到实际加工,选定直线过渡结构E。

### 2.2 过渡段锥角设计

将输出过渡段设为规则的圆柱形,只改变输入过渡段的锥角 $\alpha$ ,仿真结果表明,锥角对电压波形的形状影响很小,但对上升时间影响较大,结果见表1。由表1可见,半脉宽随着 $\alpha$ 值的减小而单调减小,但影响有限;当 $\alpha$ 大于 $20^\circ$ 时,随着 $\alpha$ 的减小,电压波形的上升时间单调减小;当 $\alpha$ 小于 $20^\circ$ 时,随着 $\alpha$ 的减小,上升时间开始缓慢延长。这是由于当 $\alpha < 20^\circ$ 时, $\alpha$ 有很小的减小,前过渡段的长度将会显著增加,造成较大的高频衰减,从而导致波形的上升时间延长。考虑加工等因素,选定输入过渡段的锥角 $\alpha = 20^\circ$ 。

输入过渡段保持 $\alpha = 20^\circ$ 不变,改变输出过渡段的锥角 $\beta$ ,进行建模仿真计算。图7是 $\beta = 60^\circ$ 时,得到的输出端波形。电压波形的衰落部分已经发生了畸变,在横坐标大约55 nm和120 nm的位置分别出现了一个负脉冲和一个正脉冲,而这一畸变正是由于后过渡段引起的。为了定量衡量后过渡段锥角对

表 1 锥角  $\alpha$  对电压波形的影响

Tab.1 Influence of angle  $\alpha$  on voltage waveform

前锥角 $\alpha$	上升沿/ lm	半脉宽/ lm	前锥角 $\alpha$	上升沿/ lm	半脉宽/ lm
85°	11.368	24.493	40°	7.004	24.566
80°	11.212	24.476	35°	6.885	24.467
75°	10.979	24.414	30°	6.163	24.412
70°	9.377	24.323	25°	5.866	23.865
65°	8.566	24.399	20°	5.677	23.636
60°	7.274	24.393	15°	5.678	23.563
55°	7.265	24.435	10°	5.721	23.393
50°	7.238	24.603	5°	5.729	23.341
45°	7.203	24.657			

电压波形的影响程度, 定义反射叠加效应系数  $\delta = \Delta U / U_0$ , 即由于反射引起的电压的增量与电压波形峰值的比值。

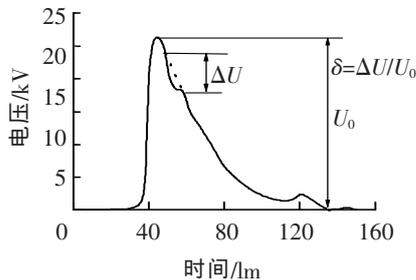


图 7  $\beta=60^\circ$  时输出端电压波形

Fig.7 Output voltage waveform when  $\beta=60^\circ$

表 2 为后锥角从  $5^\circ$  变化到  $85^\circ$  的计算结果。随着  $\beta$  角的减小, 上升时间和反射叠加效应系数单调下降, 但前者不是特别明显。

表 2 输出过渡锥角  $\beta$  对电压波形的影响

Tab.2 Influence of angle  $\beta$  on voltage waveform

锥角 $\beta$	上升沿/ lm	反射叠加 效应系数 $\delta$	锥角 $\beta$	上升沿/ lm	反射叠加 效应系数 $\delta$
85°	5.746	0.062 2	40°	5.723	0.020 3
80°	5.742	0.059 8	35°	5.723	0.019 6
75°	5.739	0.052 1	30°	5.722	0.014 4
70°	5.733	0.050 2	25°	5.723	0.006 8
65°	5.729	0.049 6	20°	5.722	0.006 4
60°	5.727	0.045 6	15°	5.723	0.006 2
55°	5.727	0.038 5	10°	5.721	0.006 0
50°	5.726	0.030 5	5°	5.721	0.006 0
45°	5.726	0.024 3			

### 3 试验

图 8 是在仿真分析基础上设计的一种小型二级电阻分压器, 高压级高压臂电阻为  $4.5 \text{ k}\Omega$ , 低压臂

电阻为  $50 \Omega$ ; 低压级高压臂电阻为  $2.55 \text{ k}\Omega$ , 低压臂电阻为  $50 \Omega$ , 都是高频低感电阻, 理论分压比为  $4\ 732:1$ 。分压器设计成封闭式屏蔽接地结构, 一方面能保证其分布参数尤其是分布电容的相对稳定, 防止由于测量环境的改变而导致其性能的差异; 另一方面, 可以实现与外界的电磁隔离, 同时兼顾到使用的安全性。

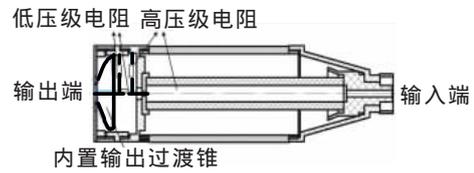


图 8 小型电阻分压器结构

Fig.8 Structure of the small resistor divider

由于高压级高压臂传输的信号很大, 若不采取防护措施, 将对低压级造成较大的干扰, 因而将低压级和高压级的低压臂与高压级的高压臂进行了屏蔽隔离。高压级高压臂大功率高频电阻通过绝缘筒及高压硅脂等进行密封, 可以起到良好的绝缘效果, 既防止对空气放电, 又可以阻止沿面闪烁, 也保证了补偿部分(未示出)<sup>[10-12]</sup>与高压臂的局部绝缘隔离。

图 9 为对某核电磁脉冲模拟器的脉冲电压测量试验, 测量系统由电阻分压器及带宽为  $500 \text{ MHz}$ 、采样率为  $1 \text{ GS/s}$  的 Infiniium 数字存储示波器组成, 分压器输出端电缆长  $2 \text{ m}$ 。

Infiniium 数字存储示波器 衰减器 电阻分压器



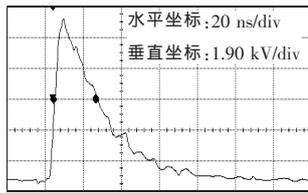
图 9 测量试验系统组成

Fig.9 Compose of measurement test system

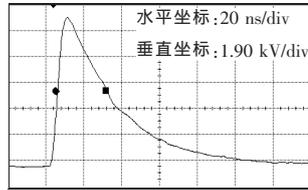
测得的电压波形见图 10, 图 10(a)为分压器输出端未内置锥形过渡时测得的波形, 图 10(b)则为加入过渡段得情形。由图 10 可见, 不采取过渡时, 波形上有明显的反射波的叠加, 且时间间隔正好为波通过输出电缆时间的 2 倍( $10 \text{ ns}$ ), 而采取过渡后, 反射消失, 波形光滑, 与仿真分析结果吻合。

### 4 结语

利用高频电磁场仿真软件 FEKO 对电阻分压器结构进行仿真分析, 结果表明, 分压器和同轴电缆连接处, 由于阻抗不同, 电磁波会存在反射, 采取渐变



(a)未加输出过渡段



(b)加输出过渡段

图10 试验测量结果

Fig.10 The result of test measurement

式过渡结构,可以减小由此引起的畸变,试验验证了仿真分析的正确性,依据仿真优化结果所设计的小型分压器符合实际测量要求。

参考文献:

[1] SCHILLING H, SCHLUTER J, PETERS M, et al. High voltage generator with fast risetime for EMP simulation[C] // Digest of Technical Papers, Tenth IEEE International Pulsed Power Conference, 1995: 1359-1364.

[2] KLAASEN J J A. An efficient method for the performance analysis of bounded-wave nuclear EMP simulator[J]. IEEE Trans. on Electromagnet Compact, 1993, 35(3): 329-338.

[3] AHMED S, SHARMA D, CHATURVEDI S. Modeling of an EMP simulator using a 3-D FDTD code[J]. IEEE Trans. on Plasma Sci., 2003, 31(2): 207-215.

[4] HANSEN D, RISTAU D, SPAETH T, et al. Analysis of the measured field structure in a GTEM 1750[J]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1994(3): 144-149.

[5] HARRINGTON T E. GTEM fields FDTD modeling [J].

IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1997(5): 614-619.

[6] ISHIGAMI S, HARIMA K, YAMANAKA Y. Estimation of E-field distribution in a loaded GTEM cell [J]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2001(1): 129-134.

[7] HUANG Ka-ma, LIU Yong-qin. A simple method for calculating electric and magnetic fields in GTEM cell [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1994, 36(4): 355-358.

[8] HANSEN D, RISTAU D, SPAETH T, et al. Sources of problems in the GTEM field structure and recommended solutions [J]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1996(3): 48-51.

[9] FEKO User's Manual. EM software & systems-S.A. (Pty) Ltd. [Z]. South Africa, 2004: 49-50.

[10] 曾正中, 邱爱慈. 一种陡脉冲高电压电阻分压器的补偿方法[J]. 强激光与粒子束, 1993, 5(3): 367-373.

ZENG Zheng-zhong, QIU Ai-ci. A method of compensating for resistive voltage dividers[J]. High Power Laser & Particle Beams, 1993, 5(3): 367-373.

[11] 陈炜峰, 蒋全兴. 一种电阻脉冲分压器的研制[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 76-78.

CHEN Wei-feng, JIANG Quan-xing. Design of resistive divider for measuring HV pulse [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 76-78.

[12] 陈炜峰, 蒋全兴. 电阻分压器性能与高压纳秒双指数脉冲的测量[J]. 东南大学学报, 2006, 36(3): 374-379.

CHEN Wei-feng, JIANG Quan-xing. Performance of resistance divider and measurement of high-voltage nanosecond double exponential pulse[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(3): 374-379.

胡景森(1964—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电磁兼容性测试技术。

陈炜峰(1964—),男,博士,教授,主要从事高电压技术、电气测量技术和电磁兼容性等方面的教学研究工作。

(上接第85页)

Hydrogen Energy, 2008(33):5545-5553.

[6] SHIKI H, MOTOKI J, ITO Y, et al. Development of split gliding arc for surface treatment of conductive material [J]. Thin Solid Films, 2008, 16(5):3684-3689.

[7] FRIDMAN A, NESTER S, LAWRENCE A, et al. Gliding arc gas discharge [J]. Progress in Energy and Combustion, 1999, 25(2):211-231.

[8] PELLERIN S, CORMIER J M, RICHARD F, et al. Determination of the electrical parameters of a Bi-dimensional DC glidarc [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999(32):891-897.

[9] 杨驰, 林烈, 吴彬. 滑动弧非平衡等离子体研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2006(26):59-65.

YANG Chi, LIN Lie, WU Bin. Study of gliding arc

discharge plasma [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2006(26):59-65.

[10] DALAINE V, CORMIER J, PELLERIN S. Study and modeling of a 50 Hz gliding discharge [J]. Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 1998(5):161-166.

[11] DELAIR L, BRISSET J L, CHERON B G. Spectral electrical and dynamical analysis of a 50 Hz air gliding arc [J]. Journal of High Temperature Material Processes, 2001(5):381-403.

[12] RAIZER Y P. Gas discharge physics[M]. Berlin: Springer, 1997.

钟犁(1985—),男,硕士,研究方向为低温等离子体技术。