

文章编号: 1001- 2486(2009) 01- 0043- 04

基于金属膜电阻的大功率低电感负载*

高景明, 刘永贵, 杨建华, 周 相, 龙霞锋

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 利用金属膜电阻设计并制作了用于陡化前沿 Marx 发生器调试的大功率低电感负载。其阻值约为 90Ω , 电感约为 55nH , 基本不具备分散电容。该负载采用线性渐变的圆锥外型结构, 有利于减小信号在负载上的反射, 配合电容分压器使用能够很好地完成对前沿约为几 ns 的快前沿高压脉冲的测量。理论估算了该负载的功率容量, 并利用 PSpice 软件模拟了对其进行脉冲方波加载的情况。该负载用于调试陡化前沿的 Marx 发生器的实验中, 获得了幅值约 210kV , 脉宽近 40ns , 前沿为 5ns 的快前沿高压脉冲。多次实验结果表明该负载性能稳定, 适用于陡化前沿 Marx 发生器的调试工作。

关键词: 大功率低电感负载; 陡化前沿 Marx 发生器; 快前沿高压脉冲; 测量

中图分类号: TN927 文献标识码: A

High Power Low Inductance Dummy Load Made of Metal Film Resistors

GAO Jing-ming, LIU Yong-gui, YANG Jian-hua, ZHOU Xiang, LONG Xia-feng

(College of Opto-electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper presents a high power low inductance dummy load made of metal film resistors, of which the resistance is 90Ω , and the inductance is $\sim 55\text{nH}$, nearly without stray capacitance. Cooperated with a capacitive divider, the dummy load has been utilized to measure high voltage pulse with a rise time of several ns for testing a 10-stage wave erection Marx generator. Experimental results verify the high performance of this load, compared with a water resistor load of the same resistance. This high performance is determined by two virtues in the design: one is for using non-capacitance of the metal film resistors and the other is for adopting a structure of impedance tapering line. Power tolerance of the load is evaluated theoretically. In addition, the response ability fed by a square voltage wave is simulated by PSpice software. The dummy load has been tested on the wave erection Marx generator, producing a high voltage pulse with an amplitude of $\sim 210\text{kV}$, a pulse width of $\sim 40\text{ns}$ and a rise time of $\sim 5\text{ns}$, and long term operations show its high reliability and stability.

Key words: dummy load of high power capability and low inductance; wave erection marx generator; fast rise time high voltage pulse; measurement

在高功率脉冲调制器装置的小型化进程中, 陡化前沿 Marx 发生器越来越引起人们的关注^[1-4]。这种 Marx 发生器通过对总体结构及分布参数的合理设计, 在不增加陡化结构的情况下实现陡化前沿高压脉冲的建立, 具有结构紧凑、性能可靠及制作成本低廉等优点, 是一条值得探索的技术路径, 文献[5]给出了 10 级陡化前沿 Marx 发生器的电路仿真模型与初步实验结果。如何对陡化前沿 Marx 发生器进行更加细致的调试, 得到理想的输出电压电流波形是实验研究的重要任务。为此需要研制一个能够响应 ns 量级快前沿信号的大功率纯阻性负载, 显然具有较大分布电容参数的水电阻负载不能满足我们的实验要求^[6], 利用电阻丝绕制的金属负载往往会因为局部绕线不均匀导致烧毁不能多次使用^[7], 而真空二极管类型的负载是变阻抗负载^[8], 也不适合作为发生器调制期的负载。这样, 本文利用金属膜电阻制作了一个具有变阻抗传输线结构的大功率低电感负载, 其阻值约为 90Ω , 电感约为 55nH , 实验中在该负载上获得了幅值约 210kV , 脉宽为近 40ns , 前沿为 5ns 的快高压脉冲。

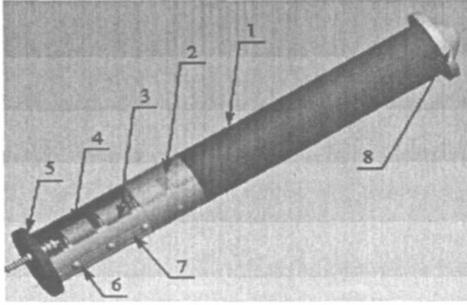
* 收稿日期: 2008- 05- 23

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 高景明(1981-), 男, 博士生。

1 结构设计

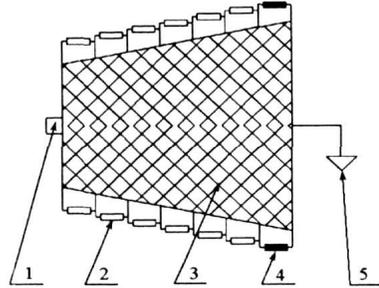
负载的设计首先应满足功率容限要求。根据前期实验结果,当充电40kV时,10级陡化前沿 Marx 发生器(如图1所示)在90Ω负载上建立幅值约为200kV,脉宽约为40ns的高压脉冲。大致计算此电脉冲的平均功率为18W,然而实验中的瞬时功率要高达几百MW;以接近平均功率100倍左右的标准设计此负载,并用实验来检验其可靠性。



1. Metal shell; 2. Perspex sheet; 3. Charging resistor;
4. Capacitor; 5. Charging plate; 6. Electrode;
7. Insulating supporter; 8. Output plate

图1 10级陡化前沿 Marx 发生器的结构示意图

Fig. 1 Structure of 10-stage wave erection Marx generator



1. Input post; 2. Single resistor; 3. Insulating holder;
4. Sampling resistor; 5. Ground end

图2 金属膜电阻负载的结构示意图

Fig. 2 Structure of the metal film resistor load

用于陡化前沿 Marx 发生器调试的负载的结构如图2所示,主要由8片金属圆环、金属膜电阻及圆锥型绝缘支撑体组成,其中金属膜电阻总数为660,单支额定功率为3W,这样负载总吸收功率为1980W,是发生器输出电脉冲平均功率的110倍。所有电阻分为7层固定在圆锥型绝缘支撑体上,每一层的电阻焊接于相邻的两片金属圆环之间,阻值逐层增加,这样可以降低前面几级电阻的功率吸收压力,最后一级为采样电阻(0.088Ω),可以同时测量负载上的电压电流信号。负载的总长度为15cm,前后两端金属圆环的外径分别为8cm和16cm,这种圆锥型的结构有利于消除负载端引起的信号反射^[9]。

使负载的锥体外形呈指数规律渐变,是一种比较理想的情况,这样能够保证负载与金属外筒之间的阻抗线性下降,然而这种指数渐变的结构在工程上不容易实现,选择了一段线性变化的外形结构,计算表明在所选择的尺寸范围内,两种渐变形式所产生的阻抗下降效果比较接近。

如果不考虑电阻在轴上引起的压降,在轴向 d 处的阻值为

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \left(\frac{R}{r(d)} \right)$$

其中, R 与 $r(d)$ 分别表示外导体与内导体的半径, $R = 10.35\text{cm}$, $r(d)$ 在轴向上渐变, ϵ 为相对介电常数。对于我们的负载结构,两种渐变的 $r(d)$ 可以表示如下:

$$\begin{cases} r_1(d) = 0.04 + 0.273d \\ r_2(d) = 0.04e^{4.621d} \end{cases}$$

两种渐变情况的阻抗下降情况对比如图3所示,可见在所选取的尺寸范围内,线性规律变化与指数规律变化的效果基本一致,不过负载的前端存在着一个阻抗不匹配点,此处可以通过使用一段锥形渐变的连接导体在以后的实验中加以改进。

2 脉冲方波的电路模拟与实验定标

2.1 脉冲方波加载的电路模拟

方波加载的模拟电路见图4。设置脉冲源输出一个近似方波,其电压幅值为-200kV,前沿时间为5ns,后沿时间为40ns,平顶宽度为40ns。将此负载等效为一个电感 L_{load} 与 R_{load} 电阻串联然后与一个分布电容 C_{load} 并联,设置 $L_{\text{load}} = 55\text{nH}$, $R_{\text{load}} = 90\Omega$,这两个参数均来自RLC仪的测量值,由于分散电容 C_{load}

较小,模拟中暂设置为 1pF ;另外 L_{circuit} 代表了发生器加载与负载之间过渡段的电感,设置为 20nH 。模拟计算结果如图 5 所示,可以看出负载可以很好地响应所加载的快前沿脉冲信号,不受 L_{circuit} 的影响,这一点将在下面的实验定标中进一步验证。

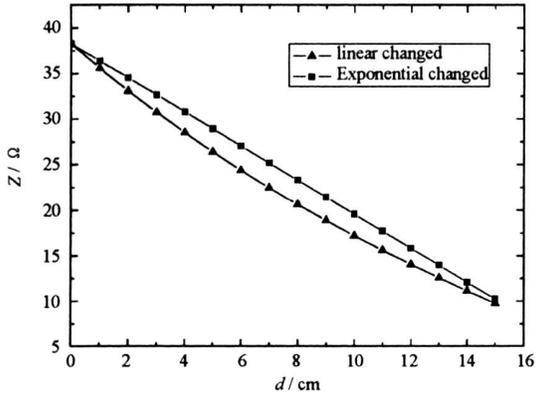


图 3 两种渐变结构的阻抗变化对比

Fig. 3 Comparison of impedance variation with two kinds of structure

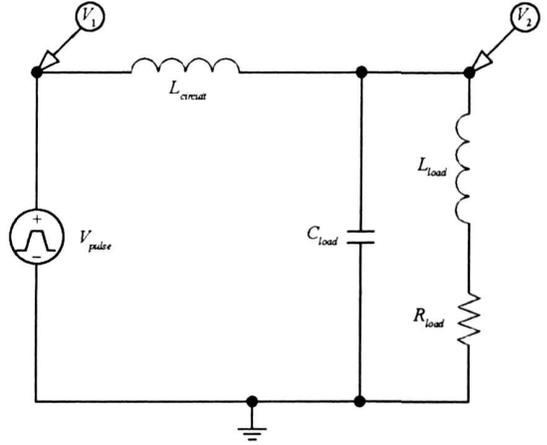


图 4 假负载脉冲方波加载的电路图

Fig. 4 Schematic of dummy load with impulse source

2.2 实验定标

将负载安装后,首先对测量使用的电容分压器与电阻采样手段进行定标。定标结果如图 6 所示,其中通道 1 为脉冲源信号(8V),通道 2 为电容分压器的测量信号(5.25mV),通道 3 为电阻采样测量信号(7.5mV),计算得到电容分压器的分压比为 1524,电阻采样的分压比约为 1066,同时电阻采样的分流比计算为 11.36。

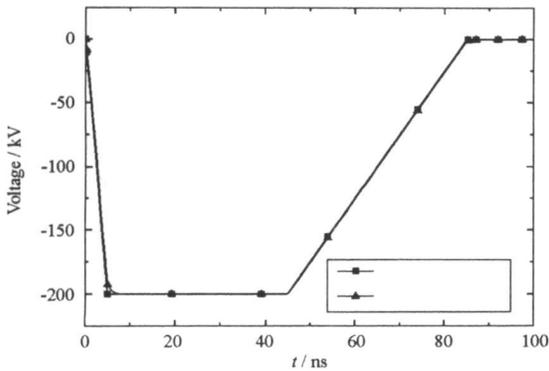


图 5 假负载脉冲方波加载的模拟结果

Fig. 5 Simulated results of the dummy load with impulse source

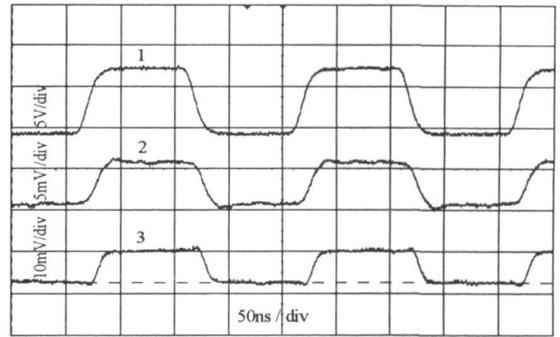


图 6 电容分压器与采样电阻的定标结果

Fig. 6 Calibrating results of capacitive divider and resistor sampling

3 实验测试

实验测试的装置示意图 7,陡化前沿 M_{arx} 发生器与负载筒分别充满 0.25MPa 的 SF_6 气体与变压器油进行绝缘。高压脉冲的测量是通过电容分压器^[10]实现的,电容分压器薄膜安装于负载筒内壁,提取的信号通过二级电阻分压后送至 Agilent 数字示波器观察;电流波形通过负载的末级电阻采集。

当充电 40kV 时,利用该负载得到的实验结果与前期使用相同阻值水电阻负载实验得到的结果对比如图 8 所示,这里将电压与电流波形分别进行对比,为方便观察只取了波形的主体部分,可以看出金属膜电阻负载的电压波形相对于水电阻负载在脉冲前沿方面有较大的改善,波形中寄生振荡产生的原因

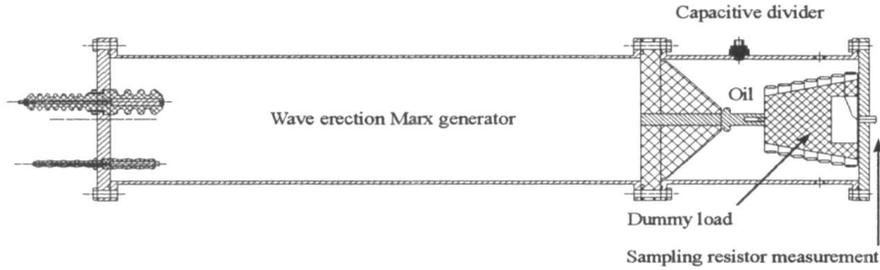


图7 陡化前沿 Marx 发生器与金属膜电阻负载的连接示意图

Fig. 7 Diagram of wave erection Marx generator terminated with dummy load made of metal film resistors

尚有待进一步的研究,其半高宽约为 40ns,前沿约为 5ns,幅值达到了 210kV;同时电流波形相对于水电阻负载也显得平滑很多,说明金属膜电阻负载的性能优于水电阻负载,更适用于陡化前沿 Marx 发生器的调试。

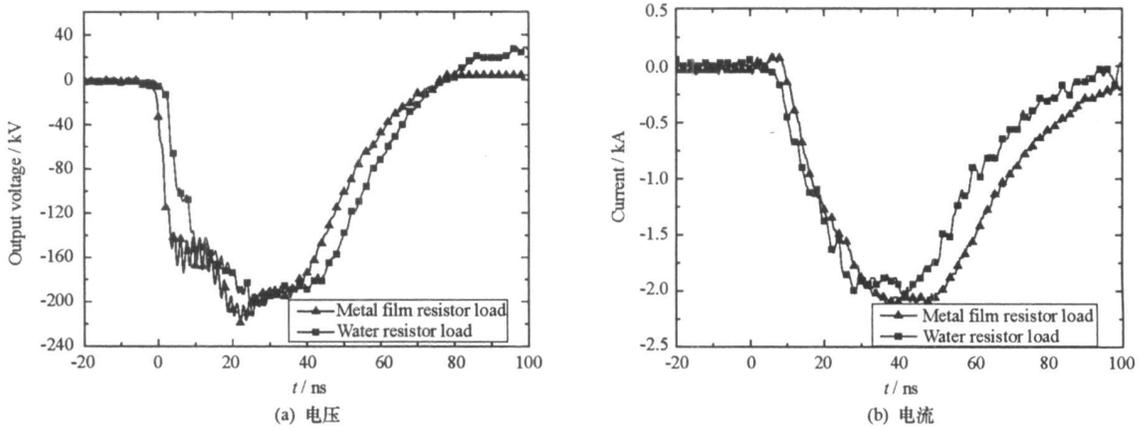


图8 两种负载上的实验结果对比

Fig. 8 Comparison of experimental results on the two loads

4 结论

利用金属膜电阻设计并制作了适用于 10 级陡化前沿 Marx 发生器调试的大功率低电感负载,该负载集成了金属膜电阻无容性与变阻抗线结构两大优点,其阻值约 90Ω ,电感约 55nH ,配合电容分压器使用能够很好地完成对快前沿高压脉冲信号的测量。实验中在此负载上建立了幅值约为 210kV,脉宽为 40ns,前沿约为 5ns 的快前沿高压脉冲;与水电阻负载的实验结果对比,表明了该负载的优越性。

参考文献:

- [1] Mayes J R, Carey W J, Numally W C, et al. The Marx Generator as an Ultra Wideband Source[C]//13th IEEE International Pulsed Power Conference, 2001: 1665-1668.
- [2] Mayes J R, Carey W J. The Generation of High Electric Field Strength RF Energy Using Marx Generators[C]//Conference Record for the 25th International Power Modulator Symposium, 2002.
- [3] Beverly III R E, Campbell R N. Triggering Techniques for a Compact Marx Generator[J]. Rev. Sci. Instrum., 1994, 65(1): 259-260.
- [4] Kekez M M, Vetri J, Podgorski A S, et al. A 60 Joule, 600kV, Ins Rise-time Marx System[C]//7th IEEE Pulsed Power Conference, 1989: 123-127.
- [5] 高景明,刘永贵,刘金亮,等. 陡化前沿 Marx 发生器的设计与初步实验[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 167-170.
- [6] 欧阳佳. 折叠型平板 Blumlein 线及其应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [7] 吕治辉. 高功率自击穿气体火花开关多脉冲运行特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [8] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [9] Dolan J E, Bolton H R, Shapland A J. A 50 Ω , 50kV Ceramic Disc Coaxial Load[C]//Digest of Technical Papers, 10th IEEE International Pulsed Power Conference, 1995: 1443-1448.
- [10] 高景明,刘永贵,杨建华. 一种电容补偿型高压电容分压器的设计[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 76-79.