

文章编号: 1001-2486(2001)01-0110-04

高压强流脉冲变压器*

李永忠, 张建德, 李传胪, 刘金亮, 李继键

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 在脉冲功率调制系统研究中, 其核心技术之一是脉冲变压器的研制。本文描述了脉冲变压器的技术要求和结构参数设计, 并给出了实验测试结果: 变压器的初级电感为 $3.6\mu\text{H}$, 耦合系数为 0.77。当初级输入电压为 60kV 时, 次级输出电压可达到 500kV。

关键词: 脉冲功率调制; 脉冲变压器; 高电压; 强电流

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A

Pulsed Transformer with High Voltage and Intense Current

LI Yong-zhong, ZHANG Jian-de, LI Chuan-lu, LIU Jin-liang, LI Ji-jian

(College of science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The study of pulse transformer is one of the key problems of pulsed power conditioning system. The technical requirement and the construction parameters of the pulse transformer are presented. Test results of the transformer are also given. The inductance of the primary coil is $3.6\mu\text{H}$, and the coupling efficiency is 0.77. When input voltage is 60kV, output voltage can be 500kV.

Key words: pulsed power conditioning; pulsed transformer; high voltage; strong current

目前是爆炸磁压缩技术研究由高潮转入低谷后, 又开始上升的时机, 也是此项技术在实际应用方面开始找准位置的新阶段, 各研究单位纷纷对过去的工作进行总结和综述, 普遍认为爆炸磁压缩发生器 (EMCG) 的设计和研制相对来说比较成熟。在低电感负载 (10nH) 上取得 $10^6 \sim 10^8\text{A}$ 电流, 或在 μH 级负载上获得几十 kV 电压输出, 已为众多型号的 EMCG 实验结果所证实。尤其是自 20 世纪 80 年代以来, 研制大电感负载, 高电压输出的 EMCG 成为主要动向, 其主要应用是作为小型化微波源的电源, 但是要把内阻抗不大的这类电源用于实际的负载, 又不影响它自身的工作, 关键在于研制连接此种电源和负载的阻抗变换电路或功率调节系统。过去常用的一种较简单的方法是采用电爆炸丝开关, 通过爆炸丝的瞬间断开, 实现能量的压缩, 获得高功率输入。然而直接采用电感储能加电爆炸丝开关的方法来压缩脉冲存在很大的局限性^[1]。采用脉冲变压器的功率调节系统成为一个主要研究途径。变压器首先作为一个储能元件, 其初级的小电感有利于爆磁发生器的工作, 次级的大电感又有利于满足负载的要求。通过变压器的升压作用, 也降低了对初级能源的要求。一个高性能的高压强流脉冲变压器的研制成为脉冲功率调制系统研究的关键所在。本文将从脉冲功率调制系统的分析入手, 给出脉冲变压器的技术要求和结构参数设计, 并给出实验测试结果。

1 变压器技术条件

本文设计的脉冲变压器主要用于连接爆炸磁压缩发生器和虚阴极二极管之类的高阻抗负载。变压器的初级作为爆炸磁压缩发生器的输出端, 其电感值 L_1 只能为微亨量级, 才可能获得几十 kV 的电压输入。而虚阴极二极管之类的高阻抗负载若想得到较高效率的能量输出, 至少应得到 450kV 的电压输入。如果在爆磁发生器和负载之间采用这样一个脉冲功率调制系统, 如图 1 所示, 即通过变压器的升压把爆磁发生器的几十千伏的电压输出升高到 500kV 以上电压, 再通过脉冲形成线进行能量压缩, 来

* 收稿日期: 2000-09-06
基金项目: 国家 863 高技术项目资助 (863-410-7)
作者简介: 李永忠 (1968-), 男, 讲师。

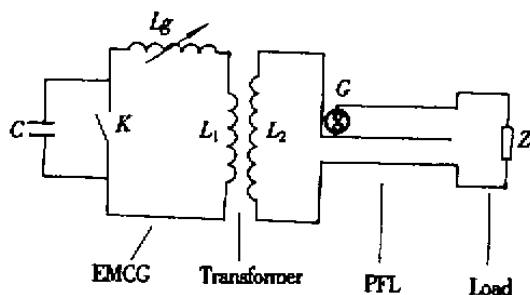


图1 脉冲功率调制系统等效电路

Fig.1 Equivalent circuit for pulsed power conditioning system

满足负载的高功率输入要求，那么可以确定脉冲变压器的基本技术要求如表1所示。

表1 变压器技术要求

Tab.1 Technical requirement of the transformer

输入电压	60kV	脉冲宽度	10 μ s
输入电流	100kA	负载阻抗	8 Ω
输入电压	500kV	初级电感	3.5 μ H
输出电流	5kA	变比	10倍

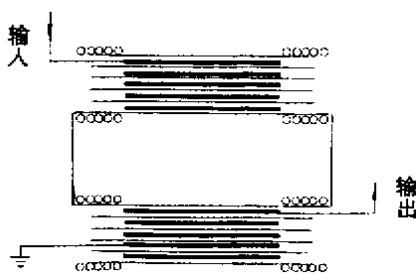


图2 变压器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the transformer

2 变压器结构设计

在脉冲功率调制系统中，一般采用空心变压器结构^[2]。变压器的性能主要取决于变压器的耦合效率和耐压。要想有较高的耦合效率，必须保证初次级绕组紧密绕制，尽可能减少其间的缝隙。采用铜箔带层绕的结构，如图2所示，可以有效地解决线绕脉冲变压器低耦合效率问题。同时初级和次级直接互相重叠，其匝间电容全部相互串联，所以对快电压瞬变具有较小的击穿可能性。由于高电压绝缘的要求，一般把低压的初级绕组放在高压绕组的外面，以便高压输出能通过装置的中心引出。这种层绕变压器的初次级间的磁通损失主要由层间绝缘层总厚度 D 和绕组平均半径 r 决定，耦合系数可由下式近似给出^[1]

$$K = 1 - D/r \quad (1)$$

绝缘层厚度取决于变压器的工作电压和材料的绝缘强度。经过比较，我们选用聚酯薄膜聚酯纤维非织布柔软复合材料。这种材料的击穿电压大于 10kV/0.2mm，且其表面可以吸附变压器油，便于变压器紧密绕制成型后，进行真空浸油时，排除绕组间的残余空气。

绕组导体采用铜箔绕制，一方面便于焊接引线，另一方面也可减少电阻。为了便于绕制，在满足电流密度要求的情况下，使初次级铜箔厚度一样，并在脉宽为 10 μ s 的脉冲情况下，使其厚度比铜的趋肤深度小得多，这样可不考虑趋肤效应的影响。变压器结构参数如表2所示。

表2 变压器结构参数

Tab.2 The construction parameter of the transformer

绕组内径 (mm)	铜箔厚度 (mm)	铜箔宽度 (mm)	绝缘层厚度 (mm)	初级匝数
340	0.2	200	1.2	2.6

由于螺旋带边缘强电场的存在,在最后的高压匝的边缘处可能发生击穿,为了使场强均布,在初级和次级的高压匝的两边各使用了一组同心金属屏蔽环,且每个环至少开一个间隙缝,以防止沿环产生涡流。

3 变压器实验描述和实验结果

用 HP4284A 精密 LCR 仪对变压器初、次级电感进行测量。互感采用串联法测量,即分别测量变压器的初、次级电感 L_1 、 L_2 和初、次级的串联电感 L_{12} 。变压器的互感 M 满足

$$M = \frac{1}{2}(L_{12} - L_1 - L_2) \quad (2)$$

耦合系数为

$$K = M / \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (3)$$

变比为

$$n = K \cdot \sqrt{L_2 / L_1} \quad (4)$$

LCR 仪测量变压器参数结果如表 3 所示。

表3 LCR 仪测量结果

Tab.3 The measurement results with LCR instrument

L_1 (μH)	L_2 (μH)	L_{12} (μH)	M (μH)	K	N
3.6	402	464	29.2	0.77	8.14

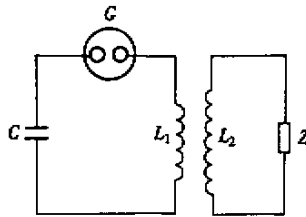


图3 变压器动态实验的电路图

Fig.3 Circuit of dynamic experiment

变压器的动态性能实验在一套 $12\mu\text{F}$ 的电容器能源组上进行。其等效电路图如图 3 所示。分别进行了变压器次级的短路和开路实验,以及用 $0.4\mu\text{F}$ 的电容器模拟脉冲形成线作负载的实验。实验中电流的测量采用罗柯夫斯基线圈,电压的测量采用硫酸铜水电阻分压器。记录示波器为 TDK210。

变压器动态实验结果如图 4~6 所示。图 4 中输入电压为 17.6kV ,输出电压为 145.4kV ,电压变比为 8.26。图 5 中输入电流为 31.6kA ,输出电流为 2.68kA 。电流变比为 11.8。图 6 (a) 为变压器接 $0.4\mu\text{F}$ 电容负载时,次级输出电压和输出电流的波形图,电流和电压波形间存在着一定的相位差,这是进行电容性负载研究时所需考虑的。图 6 (b) 为初级输入电压和次级输出电压的波形图,其中初级第一峰值电压为 10.2kV ,次级第一峰值电压为 57.8kV 。

4 结束语

从实验结果可看出,该脉冲变压器的初级电感为 $3.6\mu\text{H}$,变比为 8.2,耦合系数为 0.77,和设计要求基本相符,达到了预期效果。然而由于实验条件的限制,我们还没有进行真正含义的耐压实验及

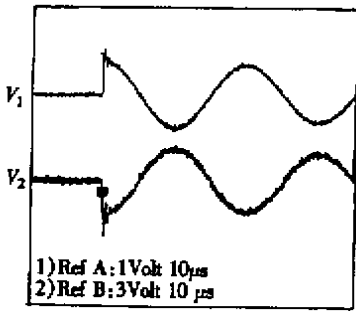


图4 变压器次级开路时电压波形

Fig.4 Waveform of voltage with open circuit of the second coil

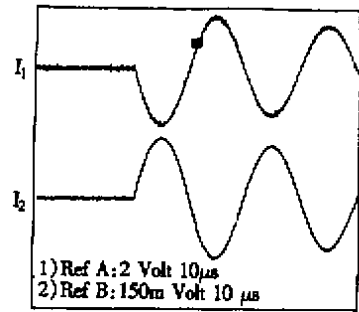
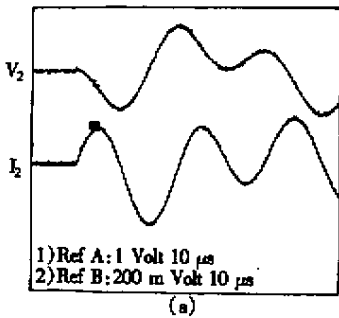
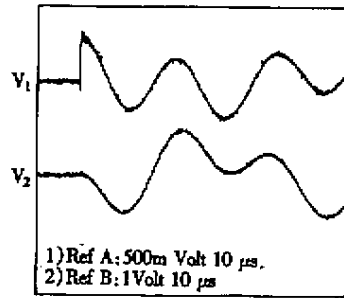


图5 变压器次级短路时电流波形

Fig.5 Waveform of current with short circuit of the second coil



(a)



(b)

图6 变压器接电容负载时输出波形

Fig.6 Output waveform with capacitor load

整个脉冲功率调制系统的连调实验。这有待于下一步的工作进行。同时在实验中还可以看到，由于脉冲变压器的初级电感比较小，连线问题变得相当重要，输入引线和地线电感稍微变大，就可改变变压器的输出特性，降低整个系统的传输效率，因此有效地解决变压器与其它装置的连线问题是提高变压器输出能力的关键之一。

参考文献：

- [1] 刘烈峰等. 变压器脉冲功率调节系统的研究 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(2): 177-181.
- [2] 王莹. 高功率脉冲电源 [M]. 北京: 原子能出版社, 1991.

