部分磁芯的带绕式脉冲变压器的研制

李士忠¹,刘金亮²

(1. 北京特种机电研究所,北京 100012;2. 国防科技大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

摘 要:针对空芯变压器传输效率低的缺点,采取了在带绕式空芯变压器中加入部分磁芯以提高其性能的改进措施。通过比较选择,最终确定用铁基非晶带材料作为磁芯材料,用计算机软件仿真确定只加内磁芯的圆环式结构并根据分析结果制作了初级电感 3.1 µH、次级电感 298.7 µH、耦合系数 0.87 的高功率带绕式脉冲变压器。理论计算和模拟试验得到变压器的变比相一致,部分磁芯变压器是空芯变压器变比的 1.2 倍,部分磁芯带绕式脉冲变压器的输出电压 > 635 kV,满足设计和实验要求。

关键词:磁芯材料;带绕式脉冲变压器;铁基非晶;空芯;耦合系数;电感 中图分类号:TM417 文献标志码:A 文章编号:1003-6520(2007)10-0118-04

Development of the Spiral Strip Pulse Transformer with Magnetic Core

LI Shi-zhong¹, LIU Jin-liang²

(1. Beijing Institute of Special Electromechanical Technology, Beijing 100012, China;

2. College of Science National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract : For the air-core pulse transformer has no magnetic material to form the magnetic loop, its coupling coefficient and energy efficiency is lower. In order to improve its properties, a partial magnetic material is inserted in air-core spiral strip transformer. The influence of performance of the transformer is investigated when the part magnetic core is assembled to an air-core spiral strip pulse transformer. On the basis of comparing many kinds magnetic materials, the amorphous iron material is acted as magnetic core of high power spiral strip pulse transformer. According to the previous simulated results, an inner cylindrical magnetic core is used in the air-core spiral strip pulse transformer with primary inductance 3.1 μ H, second inductance 298.7 μ H, coupling coefficient 0.87 has been constructed. Its output voltage is more than 635 kV. Compared with the air-core spiral strip pulse transformer of the same dimension, the output voltage ratio is increased by 20 percent. The characteristics of transformer satisfied the requirements of experiment and design.

Key words: magnetic material; strip pulse transformer; amorphous iron material; air-core; coupling coefficient; inductance

0 引 言

在相对论电子加速器领域,常常将脉冲的电压 升高后给脉冲形成线充电。传统的方法是用 Marx 发生器,但其体积庞大,很难实现加速器的重复频率 运行,而脉冲变压器具有结构简单,重频运行能力强 和能量转换效率高等优点¹¹¹,因而在脉冲功率系统 中得到广泛应用。

空芯变压器没有软磁材料为其提供磁回路,因 而变压器耦合系数较小,能量传输效率较低^[2,3]。 在空芯带绕式脉冲变压器中加部分磁芯材料为其提 供磁回路以提高变压器耦合系数,进而提高其能量 传输效率,此方法弥补了空芯变压器耦合系数低的 缺点,并且可以使变压器小型化^[4],因此对部分磁芯 本文设计的脉冲变压器主要用于连接暴磁压缩 发生器和虚阴极二极管之类的高阻抗负载。变压器 初级作为暴磁压缩发生器的输出端,变压器的初级 电感不能过小,否则不能从暴磁压缩发生器中耦合 出能量,一般要求初级电感 > 3 µ H,但又不能太大, 否则会增加变压器的漏磁,且变压器的体积也会相 应地增大。变压器输出通过能量压缩后驱动真空二 极管,所以要求变压器输出电压 > 500 kV,在实验室 现有条件下,变压器输出一般为四五十 kV,所以要求 变压器的变比约为 10 倍。一般空芯带绕式脉冲变压 器的耦合系数在 0.7~0.8 之间^[5],为提高变压器能 量传输效率,要求设计的变压器耦合系数 > 0.85。

1 变压器的设计

脉冲变压器对磁芯材料的要求为: 高饱和磁

基金资助项目:国家 863 计划项目。

脉冲变压器理论和试验的进一步研究具有重要的理 论和实践意义。

感应强度 B_s 值; 高脉冲磁导率; 低剩余磁感应 强度 B_r ; 损耗小。铁氧体材料虽然适合作为高频 变压器的磁芯材料,但其 B_s 值很低^[6,7];硅钢片饱 和磁感应强度很高,但损耗很大,磁导率较低;铁基 纳米晶材料满足高功率脉冲变压器的要求,但价格 昂贵,所以本实验最终选定铁基非晶态材料作为高 功率带绕式脉冲变压器的磁芯,其饱和磁感应强度 1.5 T,电阻率 130 µ cm,居里温度为 410 °C,最大 相对导磁率 >5 ×10⁴,剩余磁感应强度很低,且实验 采用单次脉冲时,剩余磁感应强度会慢慢降低至接 近于 0。另外铁基非晶态材料还具有很好的温度稳 定性、时效稳定性、脉冲稳定性等优点^[8],很适合做 高功率脉冲变压器的磁芯。

在 $B = U_m t_d / NS_c e^{191}$,脉冲幅值 U_m 取 40 kV,脉宽 t_a 取 3 µs, 匝数 N 取 2.75, S_c 为所需铁心 截面积。对于铁基非晶态磁性材料, Bs 取 1.5 T, 单 次脉冲下取 B_r 为 0,所以 $B = B_s - B_r = 1.5$ T, 可 得 $S_c = U_m t_d / N B = 229 \text{ cm}^2$,由计算结果可见,所 需磁芯截面积比较大,所以为尽量增加磁芯截面积, 其形状设计为圆环。即便如此,变压器内部空间仍 不能满足所需的磁芯截面积。为使用较小截面积的 磁芯而不致磁芯达到磁饱和,设计时在闭合磁路中 加入气隙,可以增加漏磁,部分磁通经过圆环截面内 部的油隙导磁,在闭合磁路中加入气隙还可以改善 磁芯材料的不良性能(不稳定、非线性和损耗)¹⁷¹。 最终确定磁芯为两个圆柱筒的形状,内磁芯内直径 为 80 mm,外直径为 150 mm,外磁芯的内直径为 280 mm,外直径为 320 mm,长度均为 250 mm。

经理论分析及计算机模拟仿真^{110]},外磁芯对变 压器的耦合系数影响不是很大,并且外磁芯很重,体 积也大,不利于装置的小型化、轻型化,所以最终确 定在变压器中单独加内磁芯导磁。

内筒磁芯圆环柱与高压绕组之间用高分子材料 来绝缘,高分子材料的机械性能比较好,可以为绕组 和薄膜结构提供支撑,其抗电强度为 50 kV/mm,设 计的绝缘圆环筒厚度为 20 mm,能承受的电压为 1 000 kV,高压绕组的电压输出一般 < 600 kV,所以 设计的高分子绝缘筒满足高压绕组输出与内磁芯圆 环筒之间的绝缘,并留有很大的裕度。

初级用厚 0.5 mm,次级用厚 0.2 mm,宽 200 mm 的铜带绕制。绕组间的绝缘用聚酯薄膜聚酯纤 维非织布柔软复合材料,0.15 mm 厚的此绝缘薄膜 的抗电强度 > 7 kV,初级用 5 层,耐压强度为 35 kV,而初级的每层电压为 16.67 kV,初级绝缘薄膜 满足绝缘强度并留有一定的裕度。带绕式变压器 (见图 1)的线匝相互交叠,匝间耦合电容很小,初次



图 1 带绕式脉冲变压器的结构图

Fig. 1 Configuration of spiral strip pulse transformer 级间杂间电容串联直接接地,所以绕组的动态电容 很小,绕组电压近似均匀分布^[11]。次级每匝间用 3 层绝缘膜绝缘,每匝间的耐压强度为 21 kV,次级输 出电压为 500 kV,每层电压为 12.5 kV,次级绝缘薄 膜满足其绝缘强度并留有一定的裕度^[12-16]。

最终确定变压器参数为初级绕组 2.75 匝,次级 绕组 40 匝,变压器内腔长度 370 mm,外径 320 mm。 制作变压器是一个非常复杂的过程^[5],首先要设计 内外筒及支撑器件进行加工,铜带要经过打磨除毛 刺等程序,并用棉布浸汽油擦洗,力求使铜带洁净, 无棱角毛刺,因为铜带毛刺和棱角会引起电场畸变, 局部电场过高而引起打火。

最后变压器还要在一定温度下进行真空浸油, 祛除变压器内部的气泡和水分,以提高其绝缘性能。 制作完成后测量变压器的基本参数,与空芯变压器 的基本参数进行比较,结果见表1。

表1 变压器参数的比较

Tab.1 Results of transformer's parameters

参数	初级电感/µH	次级电感/µH	互感/µH	耦合系数
空芯变压器	2.55	213.5	17.9	0.77
部分磁芯变压器	3.14	298.9	26.7	0.87

空芯变压器的初级电感较小,仅为 2.55 µH,加 磁芯后变压器的初级电感增加到 3.14 µH,可以从 爆磁压缩装置中提取更多的能量。空芯变压器的耦 合系数为 0.77,相同尺寸的带磁芯的脉冲变压器的 耦合系数达到 0.87,耦合系数增加了 13.4%。

增加了磁芯材料后,变压器的耦合系数增加,但 在高频情况下,由于磁心材料有磁滞效应^[6,13],会影 响其能量传输效率,所用的铁基非晶带材最佳频率 使用范围为10 Hz~30 kHz,变压器输入信号的频 率在铁基非晶带材磁心材料的上限,所以采用圆环 形磁心,并在磁心回路中加入很大的气隙,从而不至 于使磁心材料工作在饱和状态,能量传输效率比空 芯变压器有较大提高。

2 变压器对电容充电的实验

脉冲变压器在脉冲功率系统中起着及其重要的 作用,变压器性能的改变对脉冲功率系统的输出产 生很大影响。以下通过具体实验研究磁芯对高功率 带绕式脉冲变压器性能的影响,进而研究变压器对 脉冲功率系统输出的影响。

实验装置主要由初级储能电容器、高功率脉冲 变压器、触发开关、充电电容、去离子水处理系统和 电压测量系统组成。初级储能电容器上储有 U₀的 初始电压后,触发开关,通过脉冲变压器升压后对同 轴电容进行充电(外筒接地,内筒充负电),变压器输 出电压波形通过水电阻分压器衰减后由示波器测 量,见图 2。

连接好试验装置,将水介质电容器中水介质进 行水循环,用 DDS-11A 型电导率仪测其水的电阻 率,直到水的电阻率 > 10 M cm,以保证水介质电 容放电时间与充电时间很长^[14]。调节触发开关中 氮气的气压,以保证开关能够正常触发。

给初级储能电容上充 10 kV 的电压,通过触发 装置触发充气开关,使初级储能电容上的电压给脉 冲变压器初级供电,然后用示波器通过水阻分压器 测量脉冲变压器次级的电压波形和变压器输入波形 进行比较,取波形的最大值和脉宽进行数据记录,然 后给初级储能电容充 15 kV 的电压,重复上述试 验,最高充电电压为 20 kV,结果记录如下表 2;图 3 为 15 kV 时变压器输入和输出波形。

将磁芯加入带绕式空芯脉冲变压器中,两边设 计挡板固定磁芯的位置,加入时要避免铜带和绝缘 薄膜暴露于空气中,因为气泡进入绝缘薄膜将会大 大降低其绝缘强度,造成变压器击穿。

将带磁芯的带绕式脉冲变压器连接到脉冲功率 系统中,重复以上试验,结果见表3,图4为输入15 kV时的输入和输出波形。

带磁芯带绕式脉冲变压器变比的平均值 12 89, 比同尺寸结构空芯变压器变的比平均值 10.70 有很 大提高。按照理论计算变比 $N = k \int_{2^{2}/L_{1}}$,根据 表1中空芯和部分磁芯变压器的测量数据,可以分

表 2 空芯变压器实验数据记录

(输入衰减 3 200 倍;输出衰减 200 ×322.3 倍)

|--|

输入	变压器输入波形		变压器输出波形		ーホレ
电压	测量幅值/ \	/ 实验电压/ V	测量幅值/ V	实验电压/ \	/ 受几
10kV	3.68	11 776	1.92	123 763	10.5
15kV	5.36	17 152	2.92	188 223	10.9
20kV	5.92	18 944	3.16	203 693	10.7





Fig. 2 Schematic of the experiment circuit



图 3 15 kV 时空芯变压器的波形图







图 4 15 kV 时部分磁芯变压器的波形图

Fig. 4 Output voltage waveform of magnetic core transformer

表 3 部分铁心变压器实验数据记录

(输入衰减 3 200 倍;输出衰减 187 ×322.3 倍)

```
Tab. 3 Test results of magnetic core transformer
```

输入	变压器输入波形		变压器轴	파니스	
电压	测量幅值/ V	实验电压/ V	测量幅值/ V	实验电压/ V	受几
10kV	2.88	9 216	1.84	118 606	12.87
15kV	4.32	13 824	2.76	177 909	12.88
20kV	5.60	17 920	3.60	232 056	12.94

别计算出空芯变压器的变比为 7.01,部分磁芯变压器的变比为 8.48,为空芯变压器的 1.2倍。理论计算的变压器变比是在理想情况下,而试验过程中变

压器的初级和次级均接入电容,形成 LC 振荡回路, 所以试验时变压器的输出电压幅值较高,试验得出 的变压器变比比理论计算值大^[15]。从试验测量的 对同一电容充电电压幅值可以得出,部分磁芯变压 器的变比大约是空芯变压器的1.2倍,与理论计算 值相基本一致。从试验结果可以看出,部分磁芯变 压器的性能比空芯变压器的性能有很大提高,在输 入电压幅值相同时,部分磁芯变压器的输出电压比 空芯变压器的输出电压提高20%。

3 变压器耐压试验

把同轴电容的内筒换成小筒进行耐压试验,可 提高充电电容的击穿电压。试验从10kV输入电压 开始,每隔5kV做3次实验,因为初级储能电容的 额定电压为60kV,所以初级输入电压做到55kV, 此时输出电压为635kV,图5是输出波形图。

经过连续多次实验,连接触发开关与变压器初级的电缆多次烧断,但变压器并无异常现象,且温升 不大,部分磁芯变压器所能承受的电压 > 635 kV。

4 结 语

设计的带磁芯的脉冲变压器比相同结构尺寸的 空芯带绕式脉冲变压器的耦合系数有很大提高,提 高了 13.4%,达到了 0.87,经过对电容的充电实验 对比,在相同输入电压下,带磁芯的带绕式脉冲变压 器的充电电压幅值增加 20%,变压器的变比有很大 提高。通过耐压实验可以看出,实验设计的带磁芯 的带绕式脉冲变压器的耐受电压 > 635 kV,满足实 验要求,可很好地应用在脉冲功率系统中。

参考文献

- Rohwein GJ. A three megavolt transformer for PFL pulse charging[J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1979, 26(3): 4211-4213.
- [2] Liu Jinliang. A spiral strip transformer-type electron-beam accelerator[C]. The Third International Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications. Mianyang, China, 2002.
- [3] James P O Loughlin, Jack D Sidler, Gerry J Rohwein. Air core pulse transformer design [C]. 18th IEEE Power Modulator Symposium. Hilton Head SC, USA, 1988.
- [4] Rohwein G J , Lawson R N , Clark M C. A compact 200 kV pulse transformer system[C]. 18th Power Modulator Symposium. San Dieqo , USA , 1998.
- [5] 刘金亮,张建德,李永忠,等. 一种给脉冲形成线充电的带绕式 高压脉冲变压器[J]. 强激光与粒子束, 2003,15(4):394-396.
 LIU Jin-liang, ZHANG Jian-de, LI Yong-zhong, et al. High voltage pulse transformer for PFL charging[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2003, 15(4): 394-396.
- [6] 陈 燕. 脉冲变压器铁心的研究[J]. 江苏电器, 2001(5): 28-29.





Fig. 5 Output voltage waveform with 55 kV input voltage CHEN Yan. Study on pulse transformer iron core [J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2001(5):28-29.

- [7] V. W. 卡姆普曲克, E 勒斯. 铁氧体磁芯[M]. 北京: 科学出版 社, 1986.
- [8] 李士忠. 高功率带绕式脉冲变压器的研究[D]. 长沙: 国防科技 大学, 2006.
- [9] 王瑞华. 脉冲变压器设计[M]. 北京:科学出版社, 1987.
- [10] 李士忠,刘金亮,杨建华,等.带磁芯的高功率带绕式脉冲变压 器的初步研究[C].首届强流加速器会议.成都,中国,2005.
- [11] 李名加,阮江军,康 强,等. 脉冲变压器锥形绕组电压分布数 值分析[J]. 高电压技术,2004,30(6):51-53.
 LI Mingjia, RUAN Jiangjun, KANG Qiang, et al. Numerical calculation of the voltage distribution on pulse transformer's taper windings[J]. High Voltage Engineering, 2004,30(6):51-53.
- [12] 姚永和. 双次级绕组高压脉冲变压器的研制[J]. 高压电器, 2000,36(2):46-48.
- [13] 易敬曾. 磁场计算与磁路设计[M]. 成都:成都电讯工程学院 出版社,1987.
- [14] 张自成. 水介质耐高电压击穿技术的进一步研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.
- [15] 贺元吉,张亚洲. 非共振态下空心变压器的理论分析与实验研究[J]. 高电压技术,2003,29(10):11-12,34.
 HE Yuan-ji, ZHANG Ya-zhou. Theoretical analysis and experimental study of off-resonance air core transformer [J].
 High Voltage Engineering, 2003, 29(10):11-12,34.
- [16] 常安碧,张德泉,张之福,等. 600 kV 高压大电流脉冲变压器的研制[J]. 强激光与粒子束,1998,10(3):462-466.
 CHANGAmbi, ZHANGDe-quan, ZHANGZhi-fu, et al. Development of a 600 kV high voltage and high current pulse transformer[J]. High Power Laser & Particle Beams, 1998, 10(3):462-466.



 李士忠
 1980 —,男,助工,研究方向为脉

 冲功率技术。电话:(010)

 66714890;
 E-mail:

 izhong22226 @163.com

李士忠

收稿日期 2007-06-06 编辑

编辑 卫李静