

文章编号: 1001-4322(2004)02-0231-04

冲击磁铁回路电感对传输线放电的影响*

冯德仁, 王相纂, 尚 雷, 裴元吉, 樊宽军

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘 要: 分析了脉冲调制器产生短脉冲时冲击磁铁回路电感对脉冲前后沿和宽度不可忽略的影响, 从理论上导出了冲击磁铁回路电感与脉冲前后沿的关系, 给出并分析了几组实验结果, 提出了采用屏蔽结构和适当增加阻抗等两种可行的减小脉冲前沿的方案。

关键词: 传输线; 冲击磁铁; 回路分布电感

中图分类号: TL503.3 文献标识码: A

在加速器中, 常常需要将传输线对冲击磁铁放电, 产生脉冲励磁电流。对脉冲电流的上升沿和平顶, 有时要求并不是很严格, 如注入系统中用来形成凸轨的脉冲磁场所需的脉冲励磁电流, 只需脉冲励磁电流是半个正弦波^[1,6]。而另一种情况下对脉冲电流的上升沿以及平顶的要求非常严格, 如利用轨道扰动法产生长时间间隔光脉冲所需的脉冲励磁电流^[2], 要求脉冲电流的上升沿和平顶都很短。对于合肥光源(HLS)储存环, 即使是单束团运行的情况下, 其上升沿要求在 50ns 左右, 平顶要求在 100ns 左右, 整个脉冲底宽不能超过 220ns^[2]。当所需的脉冲非常短时, 就必须考虑冲击磁铁回路的电感对传输线放电形成脉冲的影响了。

1 理论分析与仿真

考虑冲击磁铁回路电感的传输线放电电路如图 1 所示。图中 L 为冲击磁铁回路的电感, 包括冲击磁铁电感 L_k 和分布电感 L_d , 分布电感 L_d 主要由闸流管主开关导通电感 L_{th} , 匹配电阻分布电感 L_r , 以及连线的分布电感 L_l 构成。因而有:

$$L = L_k + L_d = L_k + L_{th} + L_r + L_l$$

当开关 K 合上后, 自 $t \geq 0$ 至 $t < 2\tau$ 时刻, 匹配负载 R 上的电流为^[3,4]

$$I = \frac{V}{(R + Z)} \left[1 - e^{-\frac{(R+Z)t}{L}} \right] \quad (1)$$

式中: Z 为传输线的阻抗; V 为传输线充电电压; 2τ 为脉冲宽度 ($2\tau = 2l/v$) l 为传输线的长度; v 为波在传输线中的传播速度。

$t \geq 2\tau$ 后, 负载 R 上的电流为

$$I = \frac{V}{(R + Z)^2} \left[R - Z + 2Z \left(1 + \frac{R + Z}{L} t \right) e^{-\frac{(R+Z)t}{L}} \right] \quad (2)$$

为方便起见, 假定 $Z = R$, 脉冲平顶处电流为

$$I_0 = V/(R + Z) = V/2R \quad (3)$$

如果将负载电流由 0 上升至 $(1 - e^{-1})I_0$ 所需的时间定义为放电电流上升时间并记为 τ_u , 则由 (1) 式可得

$$\tau_u = L/2R \quad (4)$$

可以看出, 只有在 $L = 0$ 或无电流的理想情况下, τ_u 才为零。

假定回路总电感为 $0.2 \mu\text{H}$, 对阻抗为 50Ω 和 12.5Ω 两种情况进行 PSpice 模拟^[5] 结果如图 2 所示。

冲击磁铁回路的电感, 传输线阻抗和匹配负载对脉冲的上升时间 τ_u 的影响可以明显地看出, 尤其是匹配

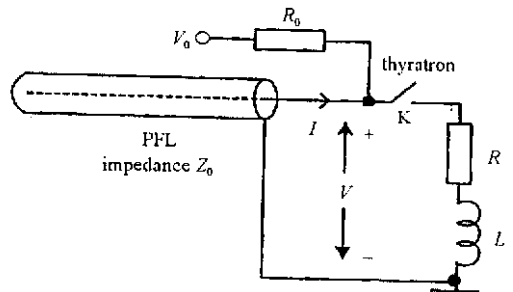


Fig. 1 Simplified circuit model of pulse modulator

图 1 基本的脉冲调制器电路图

* 收稿日期 2003-04-22; 修订日期 2003-09-01
基金项目 国家自然科学基金资助课题(10175062)
作者简介 冯德仁(1967—), 男, 博士研究生, 从事脉冲功率技术的研究, 合肥 6022 信箱。

负载的影响,当 L 一定时,因为 $\tau_u = L/2R$,在增大充电电压前提下适当增加阻抗,可以减少上升时间。

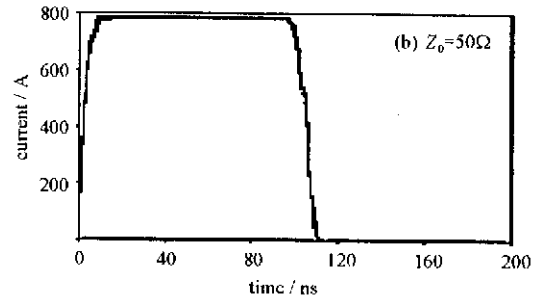
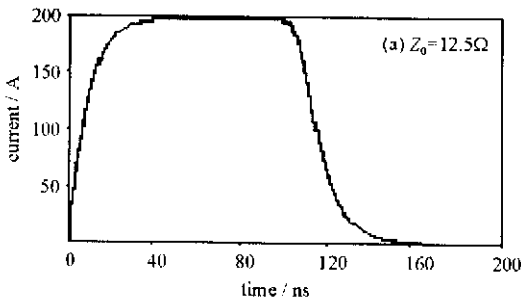


Fig. 2 Simulation of the discharging pattern

图 2 放电电流模拟图

2 实验结果与分析

我们进行了一系列的传输线充放电实验,希望获得 200ns 左右的短脉冲。实验条件如下:LAMBDA EMI 公司的恒流源电源,一台脉冲调制器,同轴传输电缆(内径 1.5mm,外径 8mm,电磁波传播速度 $v = 0.25 \times 10^9$ m/s), Rogowski 感应线圈, TDS3032 示波器,匹配电阻,冲击磁铁(电感约为 $0.25 \mu\text{H}$),为了获得不同条件下的数据,我们在不同长度的同轴传输电缆(50m, 25m 二根并联和 12.5m 四根并联),不同的充电电压下进行了实验,结果分别如图 3 ~ 图 5 所示。测出上升时间分别为 $\tau_u = 36\text{ns}$, 55ns 和 70ns 。

为了进一步减小分布电感,我们设计了如图 6 所

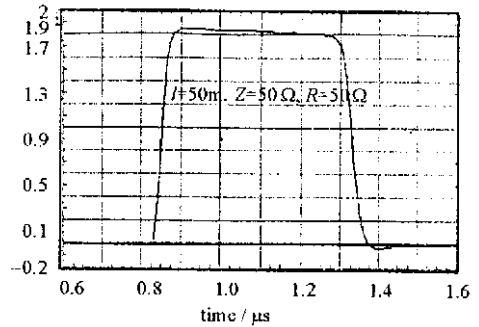


Fig. 3 Discharging pattern at 2kV charging voltage

图 3 充电电压为 2kV 时的放电波形

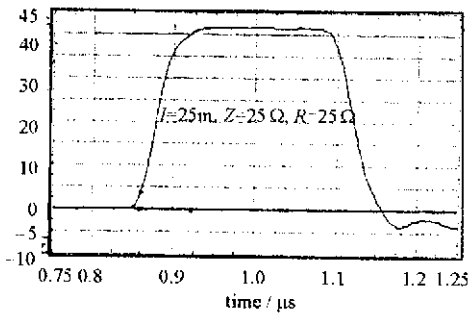


Fig. 4 Discharging pattern at 21kV charging voltage

图 4 充电电压为 21kV 时的放电波形

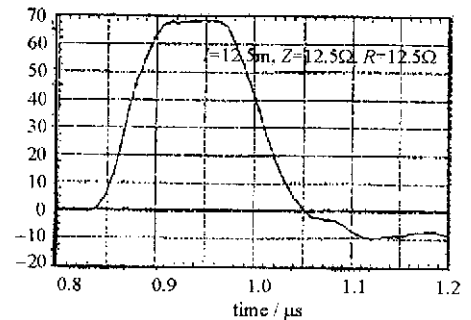


Fig. 5 Discharging pattern at 18kV charging voltage

图 5 充电电压为 18kV 时的放电波形

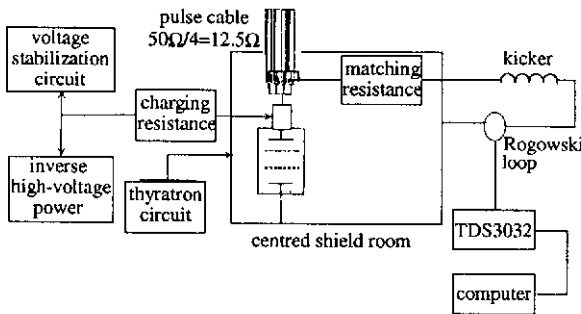


Fig. 6 System after improvement

图 6 改进后带同轴屏蔽结构的系统

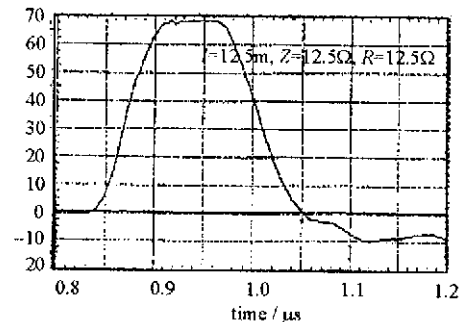


Fig. 7 Discharging pattern at 18kV charging voltage

图 7 改进后系统充电电压为 18kV 时的放电波形

示的同轴屏蔽结构并重复了 $l = 12.5\text{m}$, $Z = 12.5\Omega$, $R = 12.5\Omega$ 条件下的实验,结果如图 7 所示。同轴屏蔽结构的外壳用薄铜板做成,并与地联接,构成同轴结构,这样可以有效地降低分布电感。最后测出上升时间 $\tau_u = 50\text{ns}$ (原上升时间为 70ns ,见图 5),的确有所改善。

3 相关问题与分析

3.1 回路电感的计算

从上面的实验结果结合 $\tau_u = L/2R$,可以计算出冲击磁铁回路的电感,扣除冲击磁铁自身的电感量后可得在 50m 单根 25m 二根并联,12.5m 四根并联以及 12.5m 四根并联并采用屏蔽电路时(阻抗分别为 50, 25, 12.5 和 12.5 Ω),分别为 3.4, 2.5, 1.5 和 1.0 μH 。可以看出,几个值相差很大。事实上冲击磁铁回路的分布电感会随传输线的长度的改变而略有变化,但不应出现如此大的相对误差。出现这种结果主要是因为,在理论分析中我们考虑的是理想的传输线,没有考虑传输线的衰耗。我们在实验中所用的传输线最长达 50m,且填充有介质,其传输衰耗的影响不能不予以考虑。可以预料,减小传输线的长度,其相对误差也会随着减小。因此,式 $\tau_u = L/2R$ 并不适合长度或衰耗很大的传输线。同时我们也可以看出采用同轴屏蔽结构后,冲击磁铁回路的分布电感减小很多。将 $L_k = 0.25 \mu\text{H}$, $L_d = 2.5 \mu\text{H}$ 和 $L_d = 1.5 \mu\text{H}$ 分别代入式(1)和式(2),并利用 Origin 作图,得到如图 8 的 25m 二根并联(a)、12.5m 四根并联(b)传输线的放电波形。比较图 4,图 5 与模拟结果,波形吻合得较好。实验实测波形下降沿有过冲现象,是因为匹配电阻与阻抗不完全相等所致。

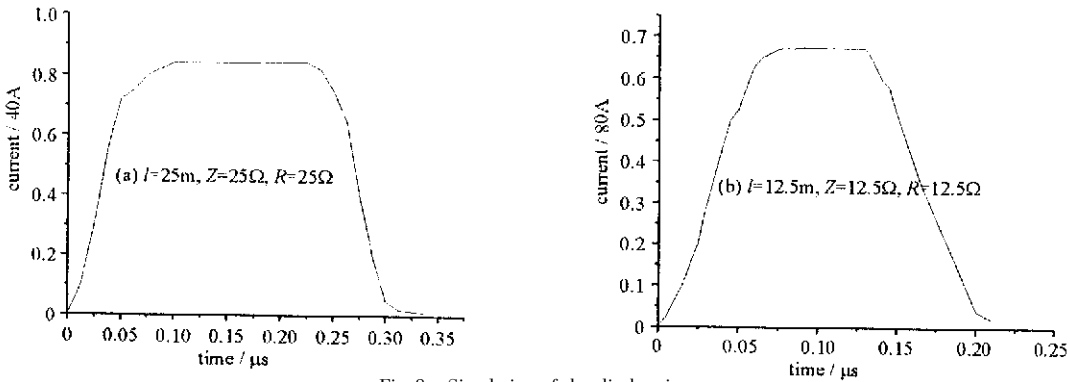


Fig. 8 Simulation of the discharging pattern

图 8 放电波形模拟

3.2 理论与实测的脉冲底宽(5% I_0)

从上面的实验结果可以看出,进一步减小传输线的长度,冲击磁铁回路的分布电感对脉冲的前沿尤其是脉冲底部宽度(定义为 5% I_0)的影响是很明显的,脉冲底宽与传输线长度 l 的关系见图 9。图中 A 为实验结果, B 为理论结果,二者近乎平行。当 l 渐趋于零时,实验结果的脉冲宽度渐趋于一个极限值约 100ns,这个极限值主要是由于冲击磁铁回路的分布电感引起的。因此,即使在充电电源许可的情况之下,完全依靠减小传输线的长度并不能获得更短的脉冲,必须设法减小冲击磁铁回路的分布电感。

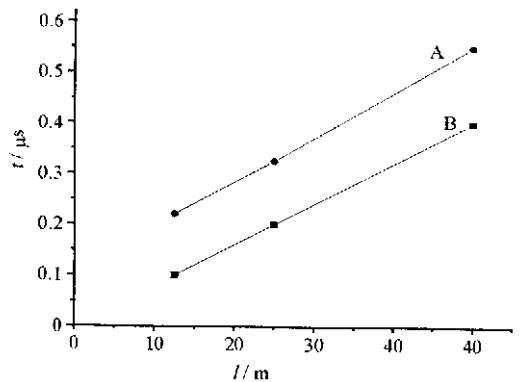


Fig. 9 Data of theory (B) and experiment (A)

图 9 理论结果与实验结果的比较

3.3 阻抗对脉冲前沿的影响

从实验结果中可以明显看出,增加匹配电阻与传输线的阻抗可以改善脉冲的前沿从而相对地缩短脉宽。如 $R = 25 \Omega$ 时,脉冲前沿约为 55ns,而 $R = 50 \Omega$ 时,脉冲前沿约为 36ns,不过,此时输出电流减小了一半。因此,在增加充电电压的同时,通过增加阻抗来减小脉冲的前沿仍不失为一个可行的,简单的办法。

3.4 工程上的措施

采用同轴结构是很有效地减小分布电感的方法。它在不增加阻抗的情况下使脉冲的前后有明显的变陡。由于分布电感还包括引线及引线间的连接电感,因此,工程上应尽量缩短引线的长度,使各个结点电接触良好,使引线及引线间的连接电感降低到最小。

参考文献：

[1] 尚雷,王相暴,樊宽军,等. 7kA 半个衰减正弦波闸流管脉冲成形瞬态特性研究[J]. 中国科学技术大学学报,1998,28(2):172—177. (Shang L, Wang X Q, Fan K J et al. The research of transient character of thyatron pulse forming at 7kV half decaying sine wave. *Journal of University of Science and Technology of China*, 1998, 28(2):172—177)

[2] Fan K J, Feng G Y, Pei Y J et al. A new method for lengthening SR pulses periodicity in HLS[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2000, 11(2):

124—129.

- [3] 樊宽军. 产生长时间间隔同步辐射光脉冲的研究 [D]. 合肥 : 中国科学技术大学 , 2000. (Fan K J. The research of making long time interval synchronous radiation light pulse. Hefei : University of Science and Technology of China , 2000)
- [4] 东冲. 线性脉冲调制器理论基础与专用电路 [M]. 北京 : 国防工业出版社 , 1978. (Dong C. Theory base of linear pulse modulator and its special circuit. Beijing : National Defence Industry Press , 1978)
- [5] 高文焕, 汪蕙. 模拟电路的计算机分析与设计—PSpice 程序应用 [M]. 北京 : 清华大学出版社 , 1999. (Gao W H , Wang H. Computing analyze and design of simulation circuit. Beijing : Tsinghua University Press , 1999)
- [6] 尚雷, 王相琴, 裴元吉. 冲击磁铁脉冲调制器的谐振开关高压充电电路及数值模拟 [J]. 强激光与粒子束 , 1998 , 10 (1) : 103—107. (Shang L , Wang X Q , Pei Y J. The resonance switch high voltage charging circuit of pulse modulator and its mathematical analyze. *High Power Laser and Particle Beams* , 1998 , 10 (1) : 103—107)

Effect of kicker circuit inductance on the transmission-line discharging

FENG De-ren , WANG Xiang-qi , SHANG Lei , PEI Yuan-ji , FAN Kuan-jun
(*National Synchrotron Radiation Laboratory , University of Science and Technology of China ,
P O Box 6022 , Hefei 230029 , China*)

Abstract : Circuit inductance exists at discharging circuit of transmission-line , it includes the inductance at the main switch of thyatron when conducts , the linking inductance between the linking cables , the matching resistance inductance and the load inductance. When a long pulse is generated by transmission-line , the circuit inductance can be omitted. However , when the pulse is short (such as shorter than 200 ns) , especially when ferromagnetic core kicker acts as the load , the effect is obvious. The short pulse current is needed in order to generate long time interval synchronous radiation light pulses by using online assembly of pulse convex orbit and DC convex orbit. This paper analyses the effect and presents several experimental results. It also supposes two practical cases to decrease the rise time of the pulse.

Keywords : Transmission-line ; Kicker ; Circuit distributing inductance