

电感储能加速器运行中电磁辐射的实验研究

钟建忠¹⁾ 刘列 李立民 文建春

(国防科学技术大学光电科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 发现了一个被普遍忽视的问题, 在电感储能加速器运行中产生很强的电磁辐射. 这种电磁辐射在一定距离范围内可以对测量仪器造成破坏. 通过多次测量, 发现此辐射主频在75MHz左右, 频谱较宽, 是一低频电磁波. 以同轴电缆作为测量仪器的替代物, 测量辐射场对同轴电缆的作用, 罗氏线圈测得电流幅值达217mA. 辐射可能是由回路LC振荡或者加速器中的电爆炸丝开关引起的. 基于LC振荡和电爆炸丝的工作原理, 分别讨论了辐射产生的物理过程. 我们更倾向于认为辐射来源于开关导通引起的回路LC振荡. 此外, 辐射强度受电流的变化率影响, 初级回路电流变化慢, 次级回路变化快, 这样产生了一弱一强的两个辐射信号. 这些为进一步研究电感储能加速器运行中的电磁辐射及防护提供实验支持.

关键词 电感储能 开关 电磁辐射 LC振荡

1 引言

高电压脉冲加速器可分为电感储能型、电容储能型. 电感储能加速器的储能密度是电容储能加速器的100倍以上. 此外, 利用电爆炸丝断路器代替庞大的水介质脉冲形成线和传输线, 直接产生高压快脉冲, 使电感储能装置结构更为简单紧凑, 有利于装置的小型化. 因此, 近年来世界各国都非常重视对电感储能加速器的研究^[1].

人们关心最多的是加速器的输出特性以及系统中各种部件的性能. 在电感储能型加速器系统中有很多的开关、电感和电容, 这些部件在快物理过程中往往会产生一定的电磁辐射, 这一点在加速器研究中很容易被忽视. 我们在实验当中发现这种辐射在近距离内的强度很大, 经常造成对加速器附近测量仪器的破坏, 影响了我们实验的正常进行.

本文针对实验中发现的这一现象, 采用两种方法进行了实验测量, 分析讨论了实验结果, 给出了辐射可能的成因.

2 实验系统和结果

实验系统为典型的电感储能系统, 主要由储能系统、脉冲变压器和负载三大部分组成, 如图1. 其中I

由电容器组和触发开关组成, 为初级储能系统; II由脉冲变压器、电爆炸丝断路器(EEOS)和主开关组成, 为电感储能脉冲功率调节系统; III为负载二极管,

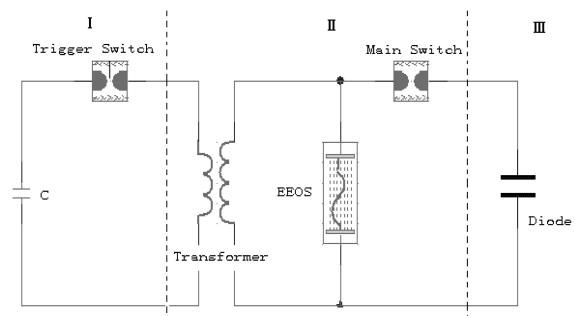


图1 实验系统的示意图

用于产生电子束. 首先充电系统对电容器进行充电, 能量储存在电容器中. 其后通过触发开关导通, 电容器向初级感应线圈放电, 形成初始脉冲. 与此同时次级感应线圈电路导通, 电爆炸丝断路器上有十几千安的大电流通过. 如此大的电流在短时间内产生大量的焦耳热, 开关中的金属丝瞬间爆炸, 切断了变压器次级回路中的电流, 实现了电流的突变^[2]. 通过次级线圈的电流瞬间突变, 这时在次级电感两端产生了巨大的电压差, 使主开关击穿, 从而为二极管提供一个高电压脉冲, 使阴极发射电子产生电子束, 实现高功率微波的输出.

2008 - 01 - 07 收稿

1) E-mail: azhongguilin@163.com

在加速器的运行过程中, 即使没有输出微波, 加速器仍然能够对附近的测量设备造成破坏, 其作用距离在 10m 以内. 对测量设备的破坏来自于加速器自身所产生的辐射, 这一点是肯定的. 实验中, 我们采用拉杆天线和同轴电缆来测量辐射信号. 并用电爆炸丝开关的电流来触发示波器, 达到同步触发. 我们在示波器端加 30dB 衰减器后测得的信号如图 2. 从图中我们可以看出, 在电爆炸丝开关导通瞬间, 系统附近产生一信号; 在电爆炸丝开关切断瞬间, 有一更强的信号产生. 通过对测量到的信号进行傅立叶变换, 得到主频率大约 75MHz. 此外还有其它频率成份, 范围在 0—200MHz 之间, 这是一个低频宽带电磁波.

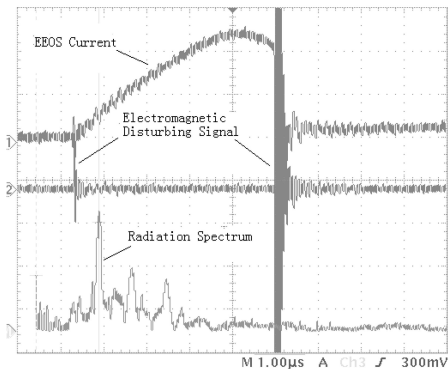


图 2 测量得到的电磁辐射和频谱图

前一脉冲比后一脉冲低很多, 我们减小衰减 (20dB), 并调整示波器, 测到只有前一脉冲的波形, 如图 3, 变换后主频为 75MHz. 加大衰减 (34dB), 测到后一脉冲如图 4, 变换后主频也为 75MHz. 从测量结果可看出, 所产生的电磁辐射信号随时间呈现了一个指数衰减的趋势, 并且频率成份不单一.

以普遍使用的同轴电缆为例, 做此低频电磁辐射的效应实验, 用罗氏线圈^[3]测量电缆上产生的感应电流. 在作用距离内, 发现电爆炸丝开关切断时刻, 电缆处场强约 500V/m, 电缆上电流峰值 217mA, 如图 5. 可见, 此低频电磁辐射在近距离内有很强作用.

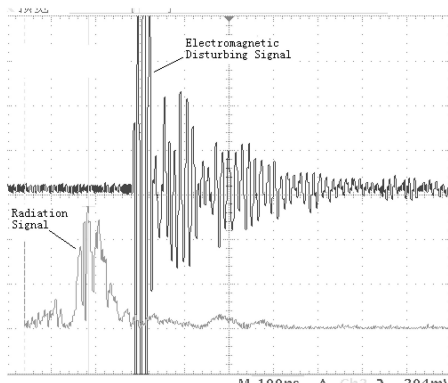


图 3 前一脉冲和频谱图

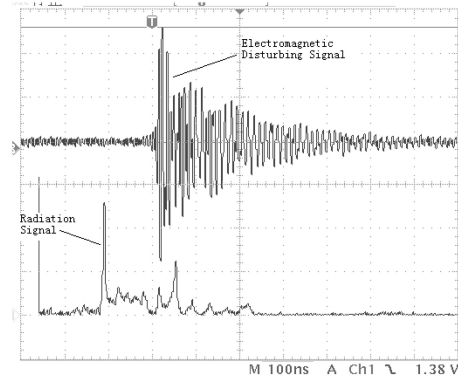


图 4 后一脉冲和频谱图

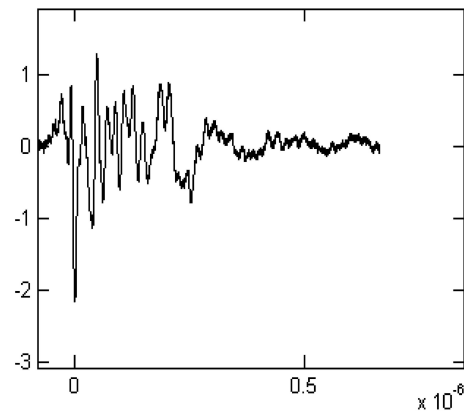


图 5 电缆上感应电流

3 分析和讨论

电爆炸丝电流的启动和截止, 时间上分别对应于触发开关的导通和主开关的导通. 从时间上对应情况, 我们认为此辐射可能是由开关导通引起的.

由于开关电极放电要消耗一定的能量用于分子电离或者电子发射, 可等效成一电容. 导通瞬间, 与回路中的电感构成一 LC 振荡电路. 而任何 LC 振荡电路原则上都可以作为发射电磁波的振源^[4], 因此电路里会辐射出一电磁波. 当开关导通以后, 电极放电趋于稳定, 电容作用就不明显. 从图中我们可看出, 每当开关刚开始放电瞬间, 就产生一电磁波; 而当开关导通以后, 就没有明显的辐射了.

相比储能电容、变压器电感及其它元器件, 我们认为开关的电容和变压器的电感在回路振荡中起主要作用. 把开关的电容当成两球间电容, 由球间电容计算公式^[5]及已知的变压器电感, 我们估算初级和次级回路振荡的频率与测量的频率都在一个量级. 实际中整个放电过程是非线性及复杂的, 电容值变化幅度很大, 我们认为所得辐射很可能来自于回路中 LC 振荡.

电路中, 忽略变化空间电荷分布 ρ , 则空间任意点

的电磁场强度^[6]:

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{J(x', t - \frac{r}{c})}{r} dV' \approx -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{I(x', t - \frac{r}{c})}{r} dl. \quad (1)$$

可见,电磁辐射场 E 大小与电流的变化率成正比关系.触发开关导通时,电容器刚开始放电,这时电流的变化缓慢,初级回路中 $\frac{di}{dt}$ 较小,所以图2中第一个脉冲相对较弱.回路中电流达到峰值时,电爆炸丝开关爆炸,瞬间切断电爆炸丝回路.此时,次级回路电感端感应电压 $L\frac{di}{dt}$ 大于主开关击穿电压,主开关迅速在极短时间内击穿.由于这时 $\frac{di}{dt}$ 变化很大,因而图2中第二个脉冲较强.

在实验中,我们通过改变拉杆天线的摆放位置,不论在系统装置的左侧、右侧、前方或者后方,所测得的实验结果基本不变.这是由于电磁辐射是从回路中

辐射出来的,没有经过发射天线,基本没有方向性.电磁信号频率低,加上空气中的衰减,传播距离不会太远.实验中发现10m以外,其作用效能已大大减弱.

当然,此低频辐射可能还由于回路其它元器件或者是电爆炸丝运行过程产生.根据我们初步的实验分析,我们认为开关导通瞬间产生的可能性较大.

4 结论

通过对电感储能加速器运行中电磁辐射问题的初步研究,我们认为,运行过程中产生的低频宽带电磁辐射很可能是由开关导通瞬间引起的回路中LC振荡.这种辐射是基于LC振荡模型的,辐射频率与电路LC振荡的频率相当,其中 L 主要是脉冲变压器的电感, C 主要是开关的电容;辐射强度受电流变化率影响.当然,这只是目前我们根据实验情况分析的一种原因.深入分析辐射源及产生机制,有待于我们下一步工作中进一步研究.

参考文献(References)

- ZENG Zheng-Zhong. Introduction of Practical Pulsed Power Technique. Xi'an: Shanxi Scientific and Technique Press, 2005 (in Chinese)
(曾正中.实用脉冲功率技术引论[M].西安:陕西科学技术出版社,2005)
- WANG Ying. High Power Pulse Source. Beijing: Atomic Energy Press, 1991 (in Chinese)
(王莹.高功率脉冲电源[M].北京:原子能出版社,1991)
- Ward D A, J. La T. Exon, Using Rogowski Coils for Transient current measurements [J]. Engineering Science And Education Journal, 1993: 105—113
- ZHAO Kai-Hua, CHEN Xi-Mou. Electromagnetics. Beijing: Hign Education Press, 2004 (in Chinese)
(赵凯华,陈熙谋.电磁学[M].北京:高等教育出版社,2004)
- XIE Guang-Run. High Voltage Electrostatic Field. Shanghai: Shanghai Scientific and Technique Press, 1987 (in Chinese)
(解广润.高压静电场[M].上海:上海科学技术出版社,1987)
- GUO Shuo-Hong. Electrodynamics. Beijing: Hign Education Press, 2001 (in Chinese)
(郭硕鸿.电动力学[M].北京:高等教育出版社,2001)

Experimental Research on Electromagnetic Radiation in Inductive Energy Storage Accelerator

ZHONG Jian-Zhong¹⁾ LIU Lie LI Li-Min WEN Jian-Chun

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract There exists strong electromagnetic radiation in inductive energy storage accelerators. It can destroy a measuring device at a distance. By repeated experiments, we found that it is a wide-spectrum electromagnetic wave with a main frequency of 75MHz. The effector such as coaxial transmission line is effected strongly in short distance. The current in the coaxial transmission line can be measured in Rogowski coils. The strength of field in it is about 500V/m and the peak current is 217mA. The radiation source may be LC oscillating or electric exploding opening switch. Through the experimental research, we think it probably may be caused by the LC oscillating in the circuit when the switches conduct. And its strength is correlated to current change ratio. The change rate in secondary circuit is stronger than in primary circuit. So the radiation generated in secondary circuit is stronger than in primary circuit. It may be a reference for further research in inductive energy storage accelerators and shielding electromagnetic disturbing.

Key words inductive energy storage, switch, electromagnetic radiation, LC oscillating

Received 7 January 2008

1) E-mail: azhongguilin@163.com