

感应叠加型固态冲击磁铁脉冲发生器设计与实验*

刘超 尚雷¹⁾ 刘祖平 郭亮

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 文章介绍了用于冲击磁铁的感应叠加型脉冲发生器的实验装置. 电路中采用 3.3kV/800A IGBT 开关, 大尺寸纳米晶磁环, 2.5kV/50 μ F 储能电容. 设计了基于 CPLD 的多路延时可调、光耦输入触发驱动电路. 探讨了 IGBT 短路时的失效原因及保护措施. 利用现有的组元电路, 进行了多个单元叠加的样机实验, 给出了实验波形. 结果表明输出脉冲上升下降时间较快, 脉宽可调, 最大脉冲电流可达 2kA, 可以满足束流注入技术的进一步提高的要求.

关键词 脉冲发生器 CPLD 固态调制 感应叠加 冲击磁铁

1 引言

在同步加速器和电子储存环中, 冲击磁铁用于改变电子束的轨迹以便注入和引出. 随着粒子加速器技术的进步, 要求脉宽更短(数百纳秒), 流强更高(几千安培), 上升、下降很快的的电流脉冲来激励冲击磁铁, 磁场的一致性和稳定性要求更加严格. 要产生这样的脉冲磁场, 脉冲发生器技术是关键. 目前大多数采用传输线型或简化 PFN 型, 在耐压、寿命和可靠性等方面已不能满足新型调制器的要求. 随着 IGBT 和 MOSFET 开关应用, 感应叠加型固态调制器技术作为一种新颖的冲击磁铁脉冲发生器方案得到了发展. 如 SLAC 为 SPEAR III 设计的固态冲击磁铁及 LLNL 开展的工作^[1, 2].

2 冲击磁铁脉冲发生器类型

用于冲击磁铁的脉冲发生器可分为传输线型、简化 PFN 型和固态感应叠加型. 传输线型和简化 PFN 型脉冲发生器仍占据主导地位, 氢闸流管在打火、短路等不利因素下不易于损坏, 电路稳定可靠. 感应叠加型是一种新颖的冲击磁铁脉冲发生器方案, 借鉴了感应加速器的原理, 使用 IGBT 开关, 有效解决 IGBT 短路保护后, 开关寿命长, 维护工作量小, 是一种很有发展潜力的脉冲发生技术. 固态感应叠加型的最大优点是漏感小, 脉宽可调. 其原理图如图 1 所示, 采用

多个功率单元组合, 每个单元采用 IGBT 开关在低压(约 2 ~ 3kV)条件下驱动一个环形磁环, 环形磁芯共用一匝次级线圈并组成同轴输出结构, 输出电压是所有初级单元电压的叠加, 输出电流和单元电流相同^[3]. 单元电路的等效电路见图 2. 主要部件包括纳米晶磁环、2.5kV/50 μ F 储能电容、3.3kV/800A IGBT 开关及驱动保护电路、反向吸收电路等. 大尺寸磁环采用国产纳米晶材料. 3kV 高压电源用于补充储能电容的降落, 漏电感及分布电感中的储能由反向吸收电路吸收. 反向吸收回路由快恢复二极管和电容组成.

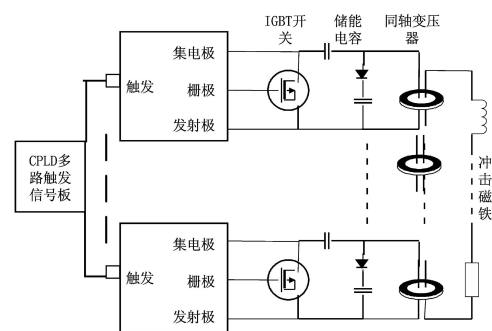


图 1 磁耦合固态感应叠加型脉冲发生器原理图

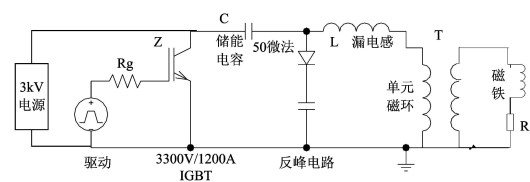


图 2 等效单元电路图

2008 - 01 - 07 收稿

* 国家自然科学基金(10475073)资助

1) E-mail: lshang@ustc.edu.cn

3 基于CPLD的多路触发、IGBT驱动

随着固态高频开关代替真空管和线型调制设备, 为了进一步提高功率系统调制的稳定性, 功率系统要求有更高的集成度, 更复杂的分析和控制功能. 针对特定的功率系统需要研制低功耗的控制信号电路板模块. 在感应叠加型冲击磁铁设计中, 多路感应叠加需要多路脉冲输入、触发驱动IGBT, 为了有效控制触发信号, 我们研制了基于CPLD的多路触发、IGBT驱动信号板. 系统模块组成见图3. 触发信号板的输入输出都是采用光耦隔离的, 多路输出脉冲宽度、频率和延时独立可调, 该信号板也可用于固态RF调制器和磁铁功率源等.

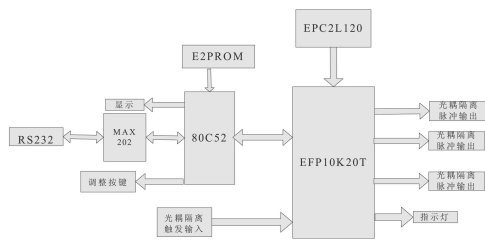


图3 多路触发、IGBT驱动电路示意图

多路脉冲信号板的主要器件是单片机和CPLD, 单片机完成调整对象(脉宽或延时)的选择、调整数值的设定及存储显示, 然后送给CPLD, 在外触发信号驱动下, 完成多路脉冲的产生及频率、宽度和延时的独立调整, 最后通过光耦隔离输出。

4 IGBT短路失效原因和保护

在快速开关切换或短路过程中, 电压、电流的变化率很大, 在杂散电感和感性负载的共同作用下会形成很大的电压尖峰, 使IGBT承受很大的电压应力, 常导致IGBT失效. 在多路叠加的实验过程中, 也出现IGBT的CE间击穿损坏, 而 V_{ce} 并未超过额定电压值, 初步判断是短路过流损坏, 需要对IGBT的短路保护进行改进。

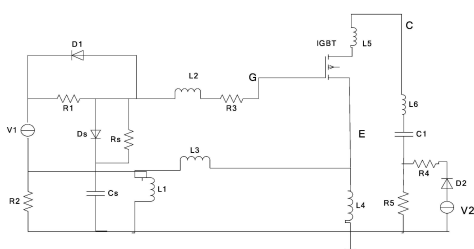


图4 IGBT短路保护电路模型

现有的IGBT驱动保护电路是使用2SD315AI驱动模块, 通过监测 U_{ce} , 当出现短路或多流现象时, 监

测电路会将异常状态回馈到驱动模块, 产生故障信号并将它锁存, 封锁时间典型值为1s, 在期间将IGBT截止. 在磁环内部绝缘失效或打火短路时, 由于驱动电路板的漏感很小, 电流上升很快. 随着IGBT饱和, 快速上升的 dV/dt 和米勒电容耦合, 使内部 V_{ge} 的电压更高. 由于监测的延迟, 动态检测 V_{ce} 来关断触发脉冲不能阻止快速上升的短路电流. 为了控制短路电流, 必须依靠内部降低 V_{ge} 阻止电流上升. 一个简单的方法是使用 dI/dt 反馈来限制过流^[4]. 在栅极和功率发射极之间增加一个反馈电路, 如图4所示使用二极管 D_s 和电阻 R_s 并联后再和电容 C_s 串联, 同时在功率发射极和地之间并上电感 L_1 , 使其值远大于IGBT模块内部的发射极电感 L_3 . 当IGBT导通情况下发生短路时, 上升的 dI/dt 成比例产生的负 V_{ge} 使IGBT关断, 这样降低了短路(故障)电流; 关断时 dI/dt 是下降的, 通过电压负反馈使 V_{ge} 升高, IGBT导通, 防止了关断时 dI/dt 的快速变化, 从而有效保护IGBT.

5 多路叠加样机设计与实验

我们对固态感应叠加型脉冲发生技术进行了原理性实验. 在单元等效负载阻抗为 1Ω , 单元电路漏感 $0.6\mu\text{H}$, 电源电压为2.3kV情况下, 实验得到的波形如图5所示. 脉冲电流达2.3kA, 上升时间约700ns.

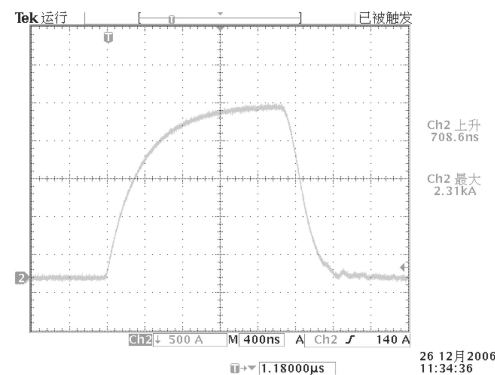


图5 单元电路电流输出波形

在单元电路试验成功的基础上, 我们设计了四个单元电路叠加的样机, 图6是样机装置图, 样机安装完成后进行了实验, 负载阻抗为9欧姆时, 输出的脉冲波形见图7, Ch1为电压波形, Ch2为电流波形。

6 结论

感应叠加型脉冲发生器是一种新颖优良的冲击磁铁脉冲发生技术. 应用大功率IGBT开关, 在有效保护IGBT防止短路失效情况下, 寿命长, 维护工作量小, 是一种很有发展潜力的冲击磁铁脉冲发生技术。



图 6 样机装置图

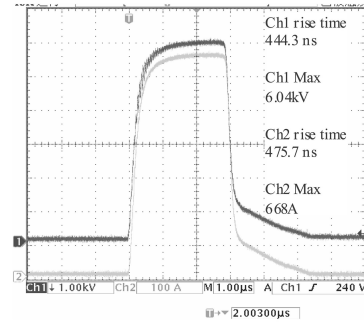


图 7 样机输出波形

参考文献(References)

- 1 Pappas C, Cassel R. An IGBT Driven Slotted Beam Pipe Kicker for SPEAR III Injection. In: Proceedings of Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001, **5**: 3747—3749
- 2 Watson J A, Cook E G, CHEN Y J et al. A Solid-State Modulator for High Speed Kickers. In: Proceedings of Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001, **5**: 3738—3740
- 3 SHANG Lei et al. Nuclear Techniques, 2006, **29**(10): 787—790 (in Chinese)
(尚雷等. 核技术, 2006, **29**(10): 787—790)
- 4 Nguyen M N. Short Circuit Protection of High Speed, High Power IGBT Modules. In: Proceeding of International Pulsed Power Conference, Dallas TX, 2003, **2**: 815—818

Design and Test of Inductive Adder Pulse Generator for KickerMagnet^{*}

LIU Chao SHANG Lei¹⁾ LIU Zu-Ping GUO Liang

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract The cell circuit design and test of inductive adder pulse generator for kicker magnet are presented in the paper. The 3.3kV IGBT, a large dimension nanocrystalline core and a 2.5kV 50µF energy storage capacitor are used. The multi-channel trigger IGBT driver board is designed. IGBT failures under short circuit condition and protection scheme are explored. The multi-cell prototype is designed. The waveforms of experiments are presented. It turns out that the rise and fall time of the output pulse is fast and the pulse width is adjustable. The maximum current of pulse reaches 2kA. It satisfies the higher requirement of beam injection technology.

Key words pulse generator, CPLD, solid state modulator, inductive adder, kicker

Received 7 January 2008

^{*} Supported by National Natural Science Foundation of China (10475073)

1) E-mail: lshang@ustc.edu.cn