



·粒子束及加速器技术·

# 基于 Marx 自激监测控制的闪光照相 试验可靠性提高技术研究\*

江孝国, 杨兴林, 蒋 薇, 荆晓兵, 陈 楠, 李 劲, 李 远,  
王 远, 刘邦亮, 臧宗畅, 陈 茂, 王永伟

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 强流直线感应加速器(LIA)主要应用于闪光照相试验,对其工作可靠性的要求很高。但LIA中包含了庞大的高压脉冲功率系统,在充电及等待时期,存在发生自激的可能性,从而导致试验失败,并造成重大经济损失及严重影响。从对Marx等装置发生自激后进行立即监测控制的角度,提出了一种提高闪光照相试验可靠性的方法,并研制了可靠性高、适应各种高压放电装置的无源放电检测探头,采用大规模可编程集成电路作为系统中的逻辑处理单元,提高了系统集成度,降低了线路的复杂程度,降低了系统调试的难度,研制的监测控制器可方便地进行监测路数的扩充,适应多达几十路放电装置的检测与监控。功率系统装置自激后,自激监测控制系统响应速度快,最快可以达到100 ns级,且系统抗干扰能力强,满足在闪光试验环境工作的要求,达到了在一定程度上提高闪光照相试验可靠性的目的。

**关键词:** 直线感应加速器;脉冲功率系统;闪光照相;自激;可靠性

中图分类号: TL53

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210133

## Technique study to improve radiographic-testing reliability basing on self-excitation of pulsed power system

Jiang Xiaoguo, Yang Xinglin, Jiang Wei, Jing Xiaobing, Chen Nan, Li Jin, Li Yuan,  
Wang Yuan, Liu Bangliang, Zang Zongyang, Chen Mao, Wang Yongwei

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The high current linear induction accelerators (LIA) is mainly made for advanced radiography which is the most important test method in hydrokinetics study. The required reliability of the whole test system is very high. The pulsed power system of LIA is very huge and complex. It includes several different kinds of high voltage equipment. There are some possibilities of self-excitation for the equipment when they are charging or waiting after charged. If self-excitation happens and no measure is taken, radiographic test would be unsuccessful, and heavy economic loss and bad effect are ineluctable. A method of improving the reliability of advanced radiography is developed based on monitoring the self-excitation of pulsed power system. Passive detector with high reliability for high voltage pulse discharging is first developed based on a certain extent linear principle and several type of detectors are also developed for different discharging equipment. Programmable large scale integrated circuits (LSIs) are adopted to make up of the logic processor in the system to improve the system integration degree, to simplify the circuit and to reduce the debugging difficulty. The monitor and controller system can be easily extended to meet more lines monitor demand. The fast response of the system is about hundred nanoseconds. Its anti-jamming ability can fully meet the demand of the radiographic test environment condition and achieve the goal of improving the the reliability of advanced radiography.

**Key words:** linear induction accelerators (LIA), pulsed power system, advanced radiography, self-excitation, reliability

\* 收稿日期:2021-04-07; 修订日期:2021-12-13

基金项目:国家专项工程

联系方式:江孝国, j\_xg\_caep@sina.com。

通信作者:蒋 薇, 13881171371@163.com。

强流脉冲直线感应加速器<sup>[1-2]</sup>(LIA)是进行闪光照相试验的重要关键设备,但由于工作于较高的脉冲电压下,不管采用何种开关结构<sup>[3-6]</sup>,功率系统在充电过程中、充满电后的等待过程中均存在一定几率的各种可能的自激<sup>[7-8]</sup>,如果控制不成功则会导致试验失败,产生重大的影响和经济损失,因此其可靠性一直是 LIA 研制中的一个重要方面。为了提高 LIA 工作的可靠性,需要在两个方面开展研究工作:一方面在功率系统本身的工作原理、部件材料及开关结构上进行性能提升的研究,为可靠性提升奠定最根本的基础;另一方面,则是研究当自激发生后的快速补救措施,以便可以及时地终止试验的进行,确保不产生严重后果,从而相当于提高了试验的可靠性。

在目前用于闪光试验的加速器中,功率系统包括了增强器、小 Marx、大 Marx 等高压充放电装置,均工作在一定的高电压下,存在非正常触发的情况(自激);虽然发生的概率较低,但确实存在。在以往的工作中,由于测试与控制的分离,导致自激被测试到后需要人工进行试验流程中断的操作,可以有效地进行中断的过程需要耗费 s 级的时间,且存在人员压力大、操作失误的可能,因此靠人工进行控制的方式具有极大的风险,能否成功进行及时的中断具有很大的不确定性。本文针对自激发生后缺失一种自动快速的中断方法的状况,提出了一种基于功率系统放电检测、快速监控的自动控制方法,并采用大规模可编程集成电路构建中央控制器提高集成度与系统的抗干扰能力,并便于调试与监控能力的扩充。在原精密光纤同步触发技术基础上<sup>[9]</sup>,开展了相应的扩展研究工作,成功研制了无源式的触发阈值更低但仍然可靠的放电检测探头,能够及时准确地检测到功率系统的自激放电状态,通过改进触发判断的标准,可以更快速地对功率系统的自激放电作出反应,达到了以较可靠的自动控制方式代替人工操作控制方式的目的,且可以将响应时间从原来的秒级大幅度地降低到约百 ns 量级的水平;基于 Marx 自激监测的控制系统具有一定的扩充能力,可以根据实际应用系统的情况进行控制功能的扩充,从而扩大其得到应用的范围。

## 1 闪光试验时序简要分析及监控基本要求

图 1 是闪光试验的一个宏观时序。当全系统准备就绪后,计算机给出一个系统零时同步脉冲信号,该信号作为系统各部分工作的零时刻信号,起到时间基准的作用。对于试验装置而言,在零时刻信号  $\tau_0$  后发出点火起爆命令,装置起爆,随后的爆轰过程需要持续一段时间;对于闪光照相试验而言,则需要记录其后的某一个时刻  $\tau_1$  的瞬态图像。明显地,起爆点火信号是一个分界限,起爆前如果系统中存在问题(如功率系统自激、恒流源加载失败等),可以采取中断起爆,但起爆后的爆轰过程将不再受控。因此,当闪光试验系统不正常时(包括功率系统自激),希望在起爆命令发出前能够进行起爆点火的中断,这就是自动监控的基本要求和目的。

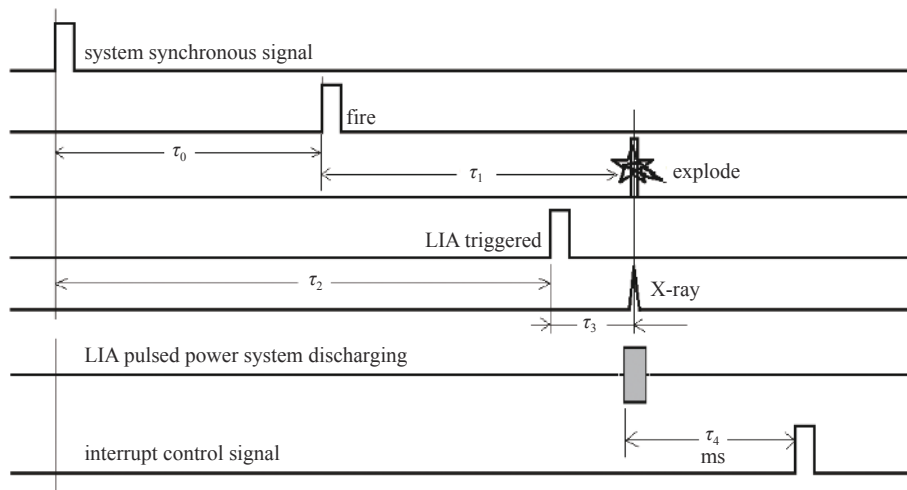


Fig. 1 Typical macro-scheduling for radiographic test

图 1 闪光照相试验的典型宏观时序图

在实际系统中,基于简化起爆链路控制的考虑,中断控制信号采用了继电器触点信号的形式给出。因此,继电器触点开启的响应时间就是中断信号产生作用的时间,由于触点开启是机械动作,其动作过程一般达到数 ms 级。但监测控制系统本身可以产生的控制信号的响应时间一般在百 ns 左右。

## 2 自激的判断条件及监控滞后的风险

针对 LIA 功率系统本身而言的,自激的简单判断标准是装置触发放电是否在触发指令发出之后发生。如果是,则是正常的;否则,则是自激,如图 2 所示。

基于图 2 所示的检测原理, 只能在其触发完全完成后才能获得触发放电的检测信号, 相对于触发时刻仍然具有约数  $\mu\text{s}$  (充电过程) 的滞后性, 并且由于采用了继电器触点输出中断信号的形式而导致响应时间达到 ms 级, 这些滞后实际上也存在一定的风险。这种风险就是在起爆命令发出的前后一段时间内(横跨充放电过程), 如果功率系统装置发生自激, 基于上述检测原理的监控系统由于需要等候一个完整的充放电过程后才能获得检测信号, 可能无法对起爆进行有效的阻止, 如图 3 所示。

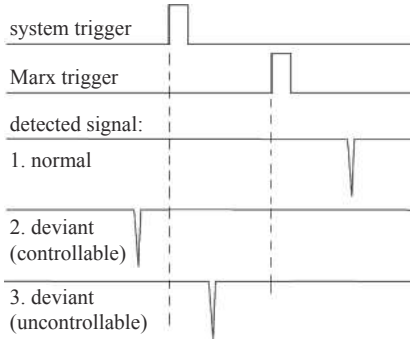


Fig. 2 Judgement of self-excitation for equipment of pulsed power system

图 2 功率系统装置自激的判断

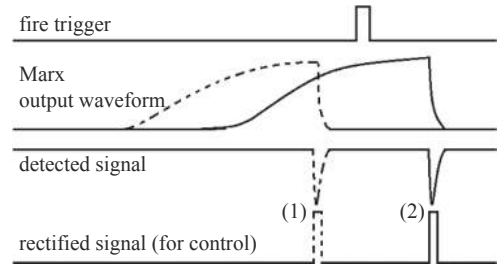


Fig. 3 Potential risk if the control is delayed

图 3 监控滞后的风险示意

在通常情况下, 如果等待放电完成后进行自激判断, 则至少需要一个完整的充放电的时间, 一般有约几  $\mu\text{s}$ 。由于加速器正常出光(也相当于功率系统装置放电)均在装置起爆后, 所以如果对其进行常态监控(不进行图 2 所示的时序判断, 直接进行放电的检测, 而在时间上相当于在图 1 中产生 X-ray 的位置), 由于中断控制的滞后性, 不会对正常时序产生影响。基于这个认识, 取消了采用微分型探头进行完整放电过程的检测再监控的思路, 而是直接采用基于线性转换原理的放电检测探头对放电的有效波形进行检测, 相当于功率系统装置刚开始放电就进行检测并监控, 从而可以将响应极限时间进一步提高一个充电脉冲的时间(约数  $\mu\text{s}$ ), 将检测滞后的风险降到最低。图 4 显示了这个过程。对于系统触发几乎与自激同时发生的情况, 如图 4(a) 中的 E 所示, 也具有相应的检测能力, 如果起爆系统可以处理这个监控信号, 则系统也具有一种极限的监控处理能力了, 充分体现了不进行自激判断与监控策略改变后的监控能力的提升程度; 对于自激监控比触发指令晚的情况, 如图 4(a) F 所示, 虽然可以获得检测结果, 但已无法进行有效监控。

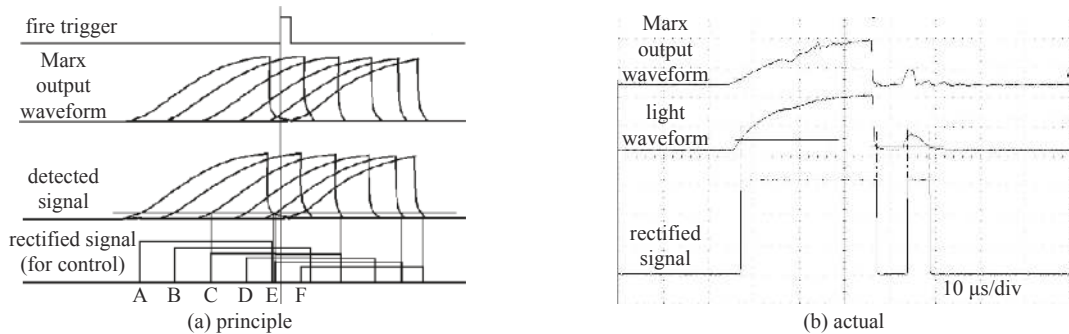


Fig. 4 Improvement after control strategy and technique change

图 4 监控策略改变后的监控能力的提升示意

### 3 无源的放电检测探头技术

无源的放电检测探头技术是基于已有的精密光纤同步触发技术<sup>[9]</sup>发展而来的。在功率系统中的自激实际上就是充放电装置发生的各种非正常的放电(触发型、自发型)。触发型以放电回路存在突变的时间常数为标志, 通常是回路中的某一个元件导通(如开关触发导通)形成的, 故其放电回路时间常数远小于其充电回路的时间常数, 放电波形中往往存在一个跳变的放电沿(20~30 ns); 而自发型是在没有元件导通的情况下发生的, 是一种泄放型的放电, 不存在突变的时间常数, 充放电回路具有同样的时间常数, 故其放电波形中不存在陡峭的放电沿, 其波形往往是对称的、形状如“馒头”一样, 故而俗称馒头波。图 5 显示了功率系统中存在的两种典型的放电波形(针对 Marx 放电)。



Fig. 5 Typical discharging waveforms in LIA pulsed power system

图 5 LIA 脉冲功率系统中存在的两种典型的放电波形

为了更好地满足快速响应时间的要求,放电检测探头原理经历了从微分型到一定线性型的转变。基于完整放电脉冲的检测,早期采用了微分型的检测原理:针对陡峭的放电后沿,获取检测信号,以示放电完成,再进行是否是自激的判断从而给出监控要求,如图 3 所示。对闪光试验时序的分析表明:如果检测到放电就进行监控、不进行上述判断的话,既不影响正常工作时序,又可以将响应时间再缩短一个充电脉冲的时间、进一步降低自激带来的风险。因此,结合无源工作的要求,最终的放电检测探头采用了具有一定线性度的检测探头,获取放电波形的有效特征用于检测信号产生。为了适应宽泛的放电电压范围,内部线路采用了一定的变换驱动原理,使得探头可以安全地工作于数 kV 到 250 kV 而不损坏,不仅可以获得非常灵敏的检测阈值,而且能够获得足够充分的检测范围,确保检测的高可靠性。图 6 中虚线框内的部分是无源检测探头的原理。

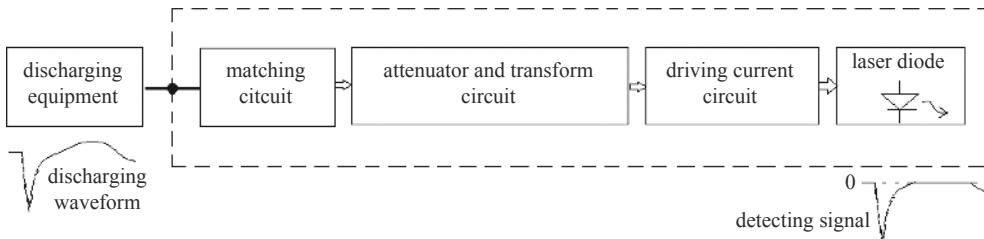


Fig. 6 Principle of passive detector for discharging

图 6 无源检测探头原理

为了验证无源探头的抗干扰能力,将探头悬空直接放置在 Marx 输出端处的外壳上,Marx 放电时,探头均无检测信号输出,说明在 Marx 工作电压下产生的电磁干扰环境里探头也能正常工作,因此无源工作方式大幅度地提高了检测探头的抗干扰能力,进而提高了系统工作的可靠性,更好地满足了闪光试验对可靠性的要求。

#### 4 监测控制系统研制

图 7 是监测控制系统的原理框图,包括适用于大 Marx、小 Marx、增强器等脉冲功率装置的触发放电波形的无源检测探头、长距离的传输光纤、监测控制器、输出光电隔离电路、自激装置指示等部分,其中监测控制器包含了

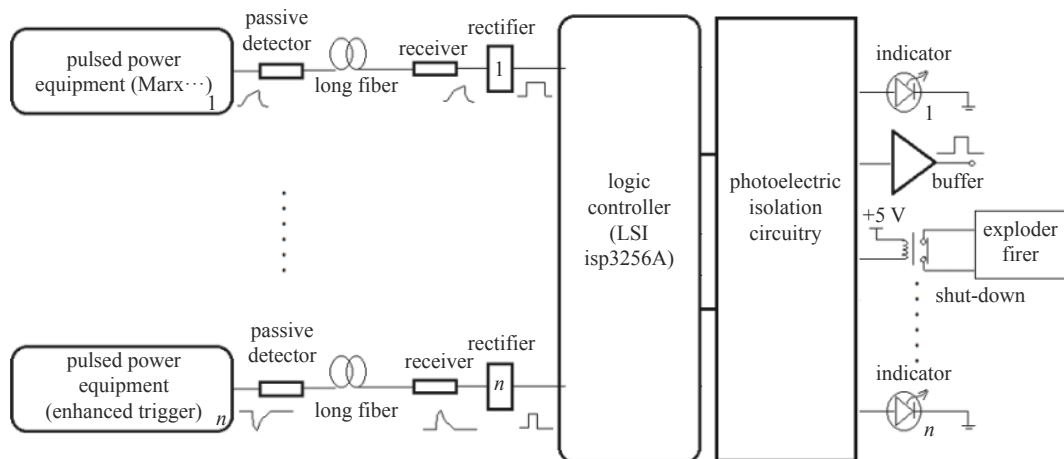


Fig. 7 Principle and structure of monitor and control system

图 7 监控系统原理与结构



光脉冲接收及转换电路、波形整形电路及可编程的大规模集成电路芯片(LSI),而 LSI 实现监控中的最重要的逻辑电路的功能并输出监控信号,监控信号分为两种:驱动继电器进行起爆系统刹车的触点信号(ms 级延迟时间)、由缓冲器输出的可直接被使用的标准 TTL 电信号(约百 ns 延迟时间)。

由于点火装置需要产生高电压、大电流的信号进行装置起爆,这个过程会产生极大的干扰,并且可能从继电器输出触点的连线串入监控系统,故而在输出级增加一级光电隔离线路以进一步抑制干扰信号的影响,验证实验表明该措施起到了非常重要的干扰隔离作用。

采用可编程的大规模集成电路芯片作为中心逻辑处理器,利用硬件电路的高速工作速度达到了快速的响应,同时具有调试便捷、能力扩充方便的特点,目前的监控系统覆盖了全部需要监测的功率装置,满足了闪光照相试验的监控范围要求。

图 8 是系统中典型的检测波形与监控信号示意。对于某加速器的增强器而言,由于其触发放电输出波形是一个多周期的振荡波形,其输出波形中出现的第一个负向跳变信号表示了触发放电(包括自激)的有效状态,因此监控系统针对出现的第一个有效信号进行监控并产生监控输出信号,如图 8(a)所示,其中上边波形为检测信号的有效部分波形,电压幅度为数伏的水平,并转换为光信号,中间为增强器的放电输出波形,幅度可以达到数十 kV 的水平,而最下面的波形为提供给检测电路进行处理的数字信号波形。大、小 Marx 触发放电的波形极为相似,只是在幅度上有一点差异,其检测波形情况则均如图 8(b)所示,其中红色波形为小 Marx 放电输出波形,幅度可以达到数十 kV 的水平,蓝色曲线为小 Marx 的放电输出波形的光信号检测波形,电压幅度为数伏的水平,而绿色波形为提供给检测电路进行处理的数字信号波形。检测输出信号为光脉冲信号(具有放电波形中的有效信号特征),整形信号为监控系统内部用于处理产生监控输出的中间信号,其响应速度可以通过比较阈值的调节而使得其前沿尽量与放电前沿早期同步,即在触发放电的早期即可对(自激)触发放电进行响应,从而具有了对放电过程的检测能力。对于用于起爆链路中断的信号输出,由于采用了继电器触点输出,其响应时间(一级继电器)具体在 1.5 ms 左右,如图 8(c)所示:图中蓝色和红色两个波形为两个 Marx 放电的模拟波形,绿色波形为检测到 Marx 等装置自激后产生的中断控制信号波形(TTL 信号),最下面的波形为继电器触点开启(断开)信号波形,测试时外接+5 V 电源,故其幅度为 5 V。

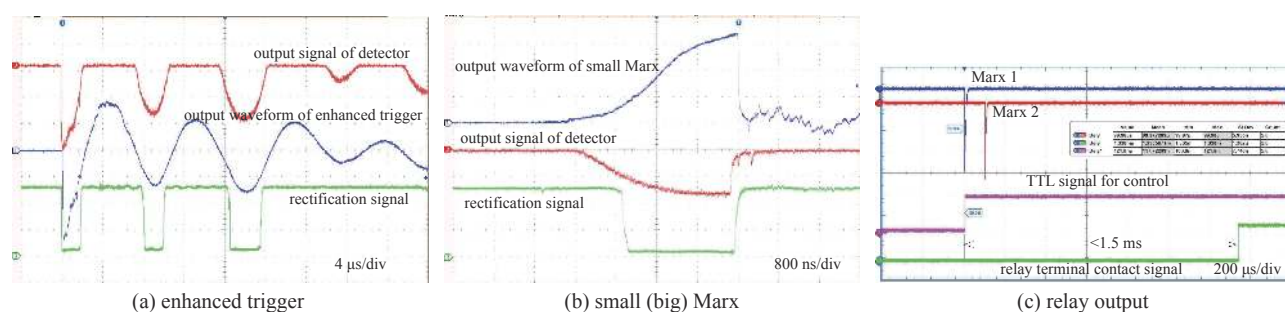


Fig. 8 Signal process of monitor and control system

图 8 监控系统的信号处理

## 5 讨论

在闪光照相试验中,由于各系统工作方式的原因,需要满足一定的时序要求。而系统工作的特点(系统干扰强、装置起爆后不可控),使得系统研制需要分别对待。根据这些情况,本文确定采用线性转换的无源检测探头提高检测的可靠性及满足尽量快速的响应要求,制定的监控策略同样尽量满足及时中断的响应要求,争取将一切不可控的因素影响降低到最低限度。

而监控盲区的存在,使得在起爆后、正常触发前的一段时间内发生的自激即使可以进行检测,但已无法对爆轰流程进行有效监控,仍有可能产生严重后果,虽然属于极限状态,但也是可能存在的。这种情况需要依靠功率系统装置自身的性能可靠性提高来解决,使用外部监控技术手段则无法解决这个问题。

本文虽然是针对提高闪光照相试验可靠性、对起爆系统进行中断控制而进行的研究工作,但完全适用于加速器的各种保护要求,除了脉冲功率系统,还可以包括真空系统、磁铁、恒流源等各部分<sup>[10]</sup>,只要将这些系统失效或发生错误的信息接入本控制系统进行扩充,就可以在加速器发生故障时及时地终止实验或工作进程。如果要将加速器工作时的所有参数或主要参数纳入监控,由于数量庞大,为了控制系统结构维护的方便性,则应该采用具有一

定总线功能的组合式的模块化仪器结构,系统中的每一模块功能完全相同,完成对需要进行监控的相关工作参数的监控,通过总线控制技术获取加速器工作状态并发出是否继续流程的指令,而总线同时担负各模块的组合功能,采用总线技术使得模块的增加、减少、更换或损坏均不影响控制系统工作,进而提高控制系统本身的可靠性。

## 6 结 论

本文针对直线感应加速器中功率系统的自激监控问题,在时间关系上分析了监控的要求,研制了可靠性较高的具有一定线性转换关系的无源触发放电检测探头,采用光纤进行检测信号的传输,提高了在强电磁干扰环境里进行自激检测的可靠性,采用可编程的大规模集成电路实现了功率系统中几十路装置触发信号的异步检测及快速的集中处理,最终采用的监控策略进一步将闪光照相试验中因功率系统自激形成的不可控影响降低到了最低限度,实现了对功率系统自激的快速自动监控功能<sup>[11]</sup>。基于 Marx 自激监测进行控制的起爆中断系统已经过较长时间的实际应用,工作稳定,具有较高的可靠性,解决了人工控制存在的各种问题,在闪光照相试验中获得了成功的应用,等效地提高了闪光照相试验系统工作的可靠性。如果起爆系统的中断控制进行适应性改进的话,可以将监控系统的响应时间降低到百纳秒级,最大限度地减轻操作人员的工作压力,也最大限度地提高进行闪光试验的可靠性。

### 参考文献:

- [1] 丁伯南, 邓建军, 王华岑, 等. “\*\*直线感应电子加速器[J]. *高能物理与核物理*, 2005, 29(6): 604-610. (Ding Bonan, Deng Jianjun, Wang Huacen, et al. \* linear induction electron accelerator[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005, 29(6): 604-610)
- [2] 石金水, 邓建军, 章林文, 等. \*\*加速器及其关键技术[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 010201. (Shi Jinshui, Deng Jianjun, Zhang Linwen, et al. \* accelerator and its key technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 010201)
- [3] 王嘉煜, 何鹏军, 闫自让, 等. Marx发生器开关击穿特性研究[J]. *火控雷达技术*, 2014, 43(3): 79-82. (Wang Jiayu, He Pengjun, Yan Zirang, et al. Research on switch breakdown characteristic of Marx generator[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2014, 43(3): 79-82)
- [4] 刘红, 屈光辉, 王馨梅, 等. 高压ns光电导开关及其击穿特性研究[J]. *高电压技术*, 2009, 35(1): 59-63. (Liu Hong, Qu Guanghui, Wang Xinmei, et al. High-voltage nanoseconds GaAs photoconductive switch and its breakdown characteristic[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(1): 59-63)
- [5] 刘娟, 李寅鑫, 苏伟, 等. 共面型GaAs光导开关的击穿特性研究[J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(2): 23-25,29. (Liu Juan, Li Yinxin, Su Wei, et al. Research on breakdown character of coplanar GaAs photoconductive switch[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(2): 23-25,29)
- [6] 李蕊, 谭向宇, 李贻博, 等. 基于触发回路的Marx装置同步性能优化[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(16): 170-174. (Li Rui, Tan Xiangyu, Li Yibo, et al. The Marx device synchronous performance optimization based on trigger circuit[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(16): 170-174)
- [7] 彭建昌, 王颖, 王利民, 等. 气体开关击穿机理的初步研究[J]. *现代应用物理*, 2014, 5(2): 129-134. (Peng Jianchang, Wang Ying, Wang Limin, et al. Preliminary research on breakdown mechanism of gas switch[J]. *Modern Applied Physics*, 2014, 5(2): 129-134)
- [8] 丛培天, 邱爱慈, 孙铁平. 气体开关自击穿概率的分析方法比较[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(7): 1831-1834. (Cong Peitian, Qiu Aici, Sun Tieping. Comparison of Gaussian and Weibull models used for gas switch self-breakdown probability analysis[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1831-1834)
- [9] 江孝国, 李成刚, 王远, 等. \*\*一号电子束参数测量系统猝发式的精确触发方式研究[J]. *高能物理与核物理*, 2006, 30(8): 784-787. (Jiang Xiaoguo, Li Chenggang, Wang Yuan, et al. Accurate burst trigger mode for \* electron beam measurement system[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2006, 30(8): 784-787)
- [10] Panov A N, Fatkin G A. LIA-20 experiment protection system[C]//16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems. 2018,doi: 10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-TUPHA103.
- [11] 江孝国, 杨兴林, 蒋薇, 等. 一种起爆装置的紧急自动刹车控制系统及方法: CN105573231B[P]. 2018-02-06. (Jiang Xiaoguo, Yang Xinglin, Jiang Wei, et al. Emergency automatic brake control system and method of initiation device: CN105573231B[P]. 2018-02-06)