

基于螺旋线强流电子束加速器初级能源的初步研究

詹天文¹⁾ 刘金亮 葛斌 殷毅

(国防科技大学光电科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 对基于螺旋线的强流电子束加速器的初级能源系统进行了初步的研究,该系统由恒流充电机、低电感高压脉冲电容器、触发场畸变开关和电感保护系统等组成,能够使加速器的变压器初级获得电压幅值为40kV、电流幅值为80kA、脉宽为8 μ s的高压脉冲,并且能够在5Hz的重复频率下工作.该初级能源系统已经应用在基于螺旋线的强流电子加速器上,具有体积小、效率高、运行稳定可靠等特点.

关键词 初级能源 重复频率 强流电子加速器

1 引言

目前高功率、长脉冲和重复频率是强流电子加速器发展的重要方向^[1].螺旋脉冲形成线是获得长脉冲的一个重要的技术途径^[2].传统的强流电子束加速器往往用Marx发生器作为初级能源,但是Marx发生器难以小型化,且很难在高功率下重复频率运行.运用脉冲电容器对脉冲变压器放电升压代替Marx发生器对脉冲形成线充电,具有体积小,能量传输效率高,容易实现重复频率运行等特点.如何能在更短的时间内给脉冲电容器更快地充上所要求的电压,成为一个非常值得研究的问题.常用的可调电压^[3]的充电方式是采用变压器升压整流后,以脉动直流对电容器充电,越到充电后期,电容器的电压增长越缓慢,这已经很难满足快速充电的需要.L-C谐振恒流充电方式^[4]输出电流恒定,电容器电压随时间线性增长,大大加快了充电速度,在重复频率实验中得到广泛的应用^[5].本文所介绍的初级能源系统正是采用了L-C谐振恒流充电的方式,该初级能源系统由恒流充电机、低电感高压脉冲电容器、触发场畸变开关和电感保护系统等组成,初步实现了对脉冲电容器快速、高效和可重复频率地充电.

2 初级能源系统结构

初级能源的系统主要由恒流充电机、低电感高压脉冲电容器、场畸变触发开关和电感保护系统组成,如图1所示.该系统通过脉冲电容器对加速器的变压器初级放电,能够使变压器的初级获得电压幅值为

40kV、电流幅值为80kA、脉宽为8 μ s的高压脉冲,且重复频率为1—5Hz可调.

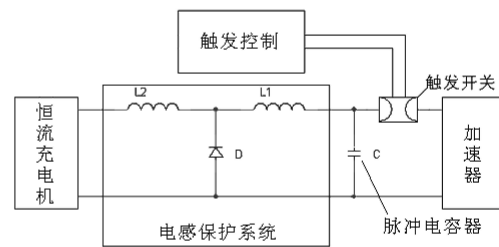


图1 初级能源系统框图

2.1 恒流充电机

恒流充电机采用L-C谐振充电,其输入为三相交流电,电压幅值380V,频率50Hz;输出为电压幅值40kV,电流幅值1.5A的直流.L-C谐振变换的原理是电感L和电容C的本征谐振频率与输入电压的频率相等,此时输出电流只和输入电压成正比,而与负载的大小没有关系.这种方式具有工作负载范围宽,充电速度快,效率高的优点.

2.2 脉冲电容器

脉冲电容器采用3台电容量为3 μ F,耐压50kV的低电感高压脉冲电容器并联而成.当加速器工作时,脉冲电容器与脉冲变压器初级的回路中将产生近百千安的脉冲电流,这就要求当多个脉冲电容器并联放电时,尽可能的减小连接线之间的电阻和电感.传统的方法是电容器之间采用铜管连接,并将电容器组浸泡在变压器油里.这增加了初级能源系统的体积,同时

也使脉冲电容器的维护和修理更加困难. 因此, 我们对连接方法进行了改进, 将脉冲电容器的高压端和接地端均用铜板连接, 铜板之间采用高分子套筒和高压绝缘薄膜绝缘. 这种方法较传统方法有效的减小了体积、连接电阻和电感.

2.3 场畸变开关

场畸变开关的结构如图2所示, 开关主要由电极A、电极B、触发环、高分子外壳等组成. 电极A、电极B均设计为空心, 便于在重复运行时在开关电极内进行液体循环冷却. 其中电极A与变压器的初级相连接, 电极B与脉冲电容器相连接. 开关为封闭结构, 充有 N_2 和 SF_6 的混合气体, 并经过吹气循环冷却.

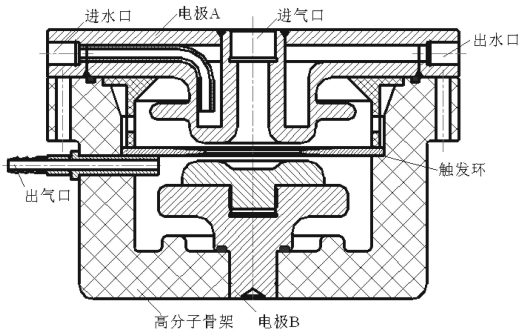


图2 场畸变开关结构图

为了进一步研究触发开关的工作机制, 我们用ANSYS对触发开关的电场分布进行了静态场模拟. 图3为开关触发前的电压等势线图, 触发环位于两电极的正中间, 电极A电压为0, 电极B电压为40kV, 触发环电压为20kV. 从图中可以看出, 触发环的存在, 有利于使电极之间的电场均匀. 当开关触发时, 一个100kV的高压正脉冲加载到触发环上, 其电场强度分布如图4所示. 从图中可以看出, 原来较均匀的电场发生了畸变, 触发环尖端与开关电极B之间电场强度很大, 会首先出现击穿.

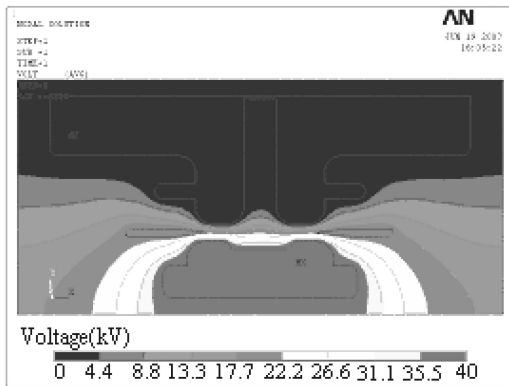


图3 电压等势线图

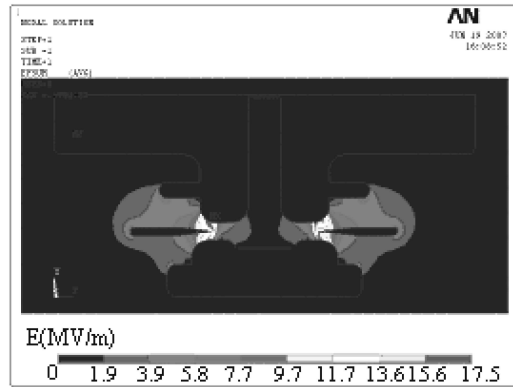


图4 电场强度图

2.4 电感保护系统

电感保护系统由两个电感和一个高压硅堆组成, 该系统是为了防止脉冲电容器对加速器的变压器初级放电时产生的反向电流给恒流充电机的整流硅堆造成损坏. 其电路如图5所示, 图中L1和L2分别为所制作的大电感和小电感, D1和D2分别为恒流充电电源的整流硅堆和保护系统的反向保护硅堆. 当触发开关导通, 电容器对变压器初级电感放电, 两个硅堆上都会产生电流50A左右, 脉宽为 $20\mu s$ 左右的脉冲电流. 所采用的硅堆为耐压100kV, 可以承受幅值为200A, 脉宽在 $20\mu s$ 左右的脉冲电流. 因此, 所产生的反向脉冲电流不会对硅堆造成损坏. 并且反向保护硅堆所承受的脉冲电流值比整流硅堆的电流值大10A左右, 这样保证即使在反向脉冲电流过大的情况下, 首先损坏的是反向保护硅堆D2, 而不是整流硅堆D1.

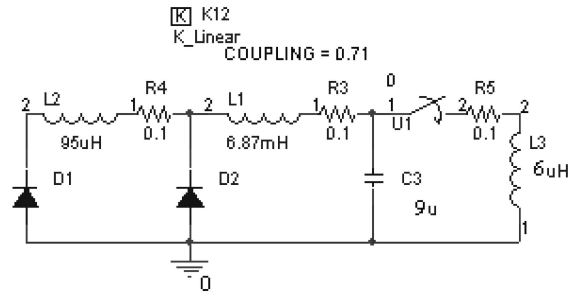


图5 保护系统电路图

3 实验结果

研制的初级能源系统已经应用于基于螺旋线的强流电子加速器上. 该加速器主要由Tesla脉冲变压器、气体间隙火花开关、螺旋脉冲形成线、真空二级管等部件组成. Tesla变压器的变压比为15倍. 测得变压器对螺旋脉冲形成线充电电压波形如图6所示. 系统在5Hz重复频率下运行了4s. 从图中可以看出, 螺旋脉冲形成线的充电电压波形比较好的重合在了一

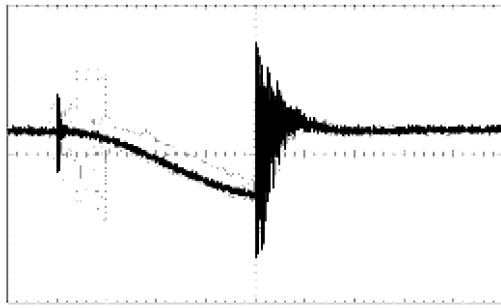


图 6 充电电压波形图 (Voltage: 400kV/div Sweep=2 μ s)

起, 电压的幅值和充电时间都比较稳定, 这说明了该初级能源系统在 5Hz 以下能够给加速器提供稳定的初级储能。

4 结论

对基于螺旋线的强流电子束加速器的初级能源系统进行了初步研究, 该系统能够使加速器在 5Hz 的重复频率下工作. 在将来的工作中将对提高能量效率和重复频率做进一步的研究。

参考文献(References)

- 1 Sergei A. Kitsanov et al. A Vircator With Electron Beam Premodulation Based on High-Current Repetitively Pulsed Accelerator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, **30**(1): 278—285
- 2 YANG J H et al. High Power Laser Particle Beams, 2005, **17**(8): 1191—1194 (in Chinese)
(杨建华等. 强激光与粒子束, 2005, **17**(8): 1191—1194)
- 3 GUO Ming-An et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(7): 947—949 (in Chinese)
(郭明安等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(7): 947—949)
- 4 SHANG Lei et al. High Power Laser and Particle Beams, 2001, **13**(2): 241 (in Chinese)
(尚雷等. 强激光与粒子束, 2001, **13**(2): 241)
- 5 LUO Ming et al. High Voltage Engineering, 2002, **29**(12): 28—29 (in Chinese)
(罗敏等. 高电压技术, 2003, **29**(12): 28—29)

Preliminary Research on Primary Energy Source of High Current Electron Beam Accelerator Based on Spiral Pulse Forming Line

ZHAN Tian-Wen¹⁾ LIU Jin-Liang GE Bing YIN Yi

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

Abstract In this paper, the primary energy source of high current electron beam accelerator based on spiral pulse forming line is investigated. It consists of the constant-current power supply, the high voltage pulse capacitor, the field distortion switch, and the protection system. The primary energy source can discharge to the primary winding of the transformer with high voltage pulses whose amplitude of voltage is 40kV, current is 80kA, pulse width is 8 μ s and repetition frequency is less than 5Hz. The primary energy source is applied to a high current electron beam accelerator, and is featured by its compactness, stability and reliability.

Key words primary energy source, repetition frequency, high current electron beam accelerator