

BEPC 实验电子枪系统的研究

刘波¹⁾ 顾孟平 池云龙 杨兴旺 田双敏

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 E5-4 实验电子枪系统是 BEPC 电子枪系统的改进版本,文中首先对其进行了理论分析,并介绍了利用 Y796 阴栅组件和新的电源及 Pulser 系统进行测试的结果,分析了各个参数对束流的影响,给出了电子枪流强与直流高压、pulser 电压、栅偏压、阴极参数等的关系曲线,对 BEPC II 电子枪系统的研制和调试起到了重要的指导作用.

关键词 电子枪 模拟 束流测试

1 背景

在 20 世纪 90 年代中期,曾经提出过 BEPC(Beijing Electron Positron Collider,北京正负电子对撞机)电子枪的改造计划,并已经加工制造出实验电子枪 E5-4,但因为当时工程任务很紧,没有条件进行测试,而且原来使用的 E5-3 电子枪(Y824 阴栅组件)流强基本足够,因此该实验电子枪并没使用到 BEPC 工程上.现在 BEPC II 工程上马,为了提高 BEPC II 直线加速器的正电子注入效率,需要更大发射电流的新电子枪,并将应用双束流(双脉冲)产生技术,以提高产生正电子的初级电子流强.新电子枪工作的重复频率为 50Hz,使用脉冲高压电源,要求能够在 150kV 高压下提供大于 10A 的脉冲束流;束流为 1ns 的单双束团或者 2.5 μ s 的长脉冲束团.在新枪的设计和加工阶段,E5-4 实验电子枪为我们提供了很好的进行实验和分析的手段,对新电子枪系统的研制和调试起到了重要的指导作用.

BEPC II 电子枪系统计划采用的是 EIMAC Y796 阴栅组件,并且将为 BEPC II 工程提供单、双 1ns 脉冲束流.为此,我们给 E5-4 电子枪装上了 Y796 阴栅组件,并连接了新的 Kentech Pulser 系统和电源系统,使用原有的直流高压电源进行了测试.E5-4 电子枪调试的主要任务包括:测试新的阴栅组件,分析

它的工作状态,并相应确定合适的工作参数;测试新的 Pulser 系统;测试新的真空系统;测试和改进新的电源系统;测试并完善新的控制系统等.

2 计算机模拟

对 E5-4 电子枪首先使用 EGUN 程序进行了束流性能的模拟,束流特性如图 1 所示.在这种几何结构下,EGUN 模拟的结果认为这把枪的导流系数为 0.28 μ P,在 100kV 高压时产生的束流流强为 8.86A.同时利用 DGUN 程序对该电子枪也进行了模拟计算(见图 2),计算结果稍有差异,其计算出的导流系数为 0.30 μ P,在 100kV 高压时产生的束流流强为 9.46A.

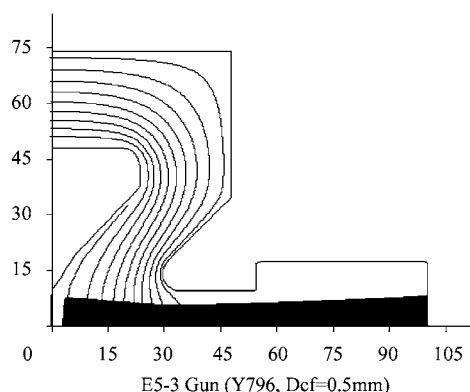


图 1 E5-4 电子枪束流特性(EGUN 模拟)

2004-09-10 收稿

1)E-mail: liubo@mail.ihep.ac.cn

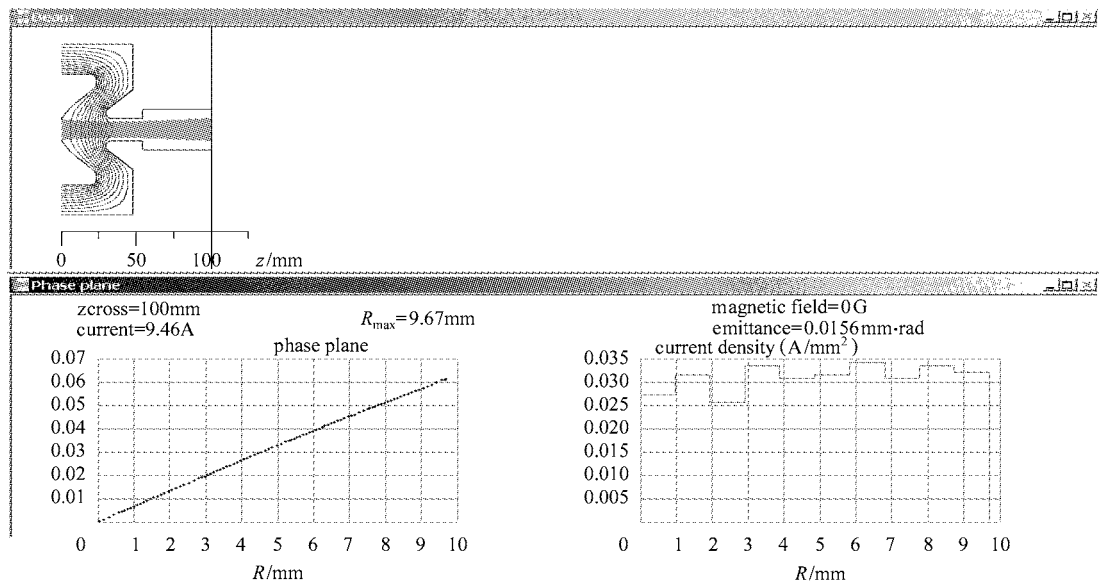


图 2 E5-4 电子枪束流特性(DGUN 模拟)

考虑到实际安装时因为法兰垫片厚度的不确定因素,以及机械加工所造成的偏差,阴极和栅极的实际位置在束流方向上可能会有大约一个毫米的偏差,针对不同的情况也做了相应的模拟计算,结果表明可能存在的安装偏差对于束流强度的影响也是比

较大的。

由表 1 可以看出,如果安装位置相差 1mm,束流会有超过 2A 的差异,而且束流发射度、半径的变化也很大,因此电子枪零部件的加工精度必须很高,组装时的配合也必须非常小心。

表 1 阴栅位置对束流强度的影响

相对位置 ¹⁾ /mm	EGUN 模拟结果				DGUN 模拟结果			
	电流 /A	导流系数 /μP	半径 ²⁾ /mm	归一化发射度/ ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$)	电流 /A	导流系数 /μP	半径 ²⁾ /mm	发射度/ ($\text{mm} \cdot \text{mrad}$)
-0.5	10.19	0.32	9.97	16.25	10.79	0.34	11.52	11.6
0.0	8.86	0.28	8.14	17.65	9.46	0.30	9.66	15.6
0.5	7.65	0.24	6.41	20.68	8.21	0.26	7.86	18.5
1.0	6.64	0.21	5.13	24.87	7.07	0.22	6.07	20.0
1.5	5.54	0.18	3.86	29.26	6.05	0.19	4.40	28.4

1) 相对位置是指与图 1 和图 2 中阴栅组件的位置相比前后移动的距离

2) 半径指距离阴极面 100mm 处的束流半径

3 系统测试

电子枪系统作为一个完整的系统,除了枪体之外,还包括相关的电源、真空、控制等一系列配套设备.作为整个系统的一个部分,这些相关系统的设计也直接关系着整个电子枪系统的性能。

我们为 E5-4 电子枪装配了 Y796 阴栅组件之后,连接了将在 BEPC II 系统上使用的 Pulser、电源、真空和控制系统.这样改造之后,E5-4 电子枪系统

目前与 BEPC II 新电子枪的区别就是枪体几何结构不同,高压电源不同,其他配套设备几乎完全相同.在此基础上进行了一系列的测试,了解了各个相关设备的性能,对完善各个系统的设计起到了很大的促进作用,为 BEPC II 新枪的测试打下了良好的基础。

3.1 单脉冲束流测试

首先进行的是单脉冲束流测试.Pulser 的输出负载为阴栅组件,其阻抗约为 15Ω,输出幅度比负载阻

抗 50Ω 时有一定的下降, 监测到的输出脉冲幅度在 250—570V 之间可调. 测试时使用的仍然是直流高压系统, 因为这个电子枪的陶瓷筒有一定的损伤, 耐压性能不够好, 所以测试中高压没有能够加到很高.

为了获得新阴栅组件的合适工作点, 首先进行了阴极发射能力与灯丝功率之间关系的实验. 也就是固定栅极偏压和 Pulser 输出电压, 调节灯丝电流, 测量在不同的灯丝功率下该电子枪的束流发射情况. 不同灯丝功率下的束流——高压曲线如图 3 所示.

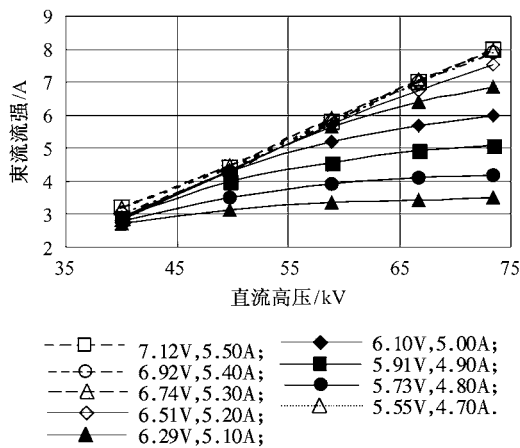


图 3 阴栅组件的特性: 发射电流与灯丝功率之间的关系
Pulser 输出电压 480V, 栅极偏压 - 80V

从结果可以看出, 灯丝电流达到 5.3A 以上之后, 在我们当前实验能够达到的高压条件下, 阴极发射能力已经足够, 电子枪工作在空间电荷效应限制区, 束流流强不再随灯丝功率的增长而增加. 考虑到阴栅组件的寿命问题, 选取 5.2A 灯丝电流为阴栅组件的正常工作点, 而灯丝电压由于受到线路长度、接触情况的影响, 所以不能作为参考的依据.

选定了阴栅组件的工作点之后, 测试了 Pulser 和偏压这两个重要参数对束流发射情况的影响. 图 4 表明了在不同 Pulser 输出电压下束流强度的变化情况.

由图 4 可以看出, 在相同的直流高压下, 发射电流随着 Pulser 输出电压的升高也明显增大. 实际上, 影响发射电流的因素应该是 Pulser 输出电压减去栅极偏压之后的值, 也就是栅极上感受到的净电压. 在电子枪实际工作的时候, 不仅可以调节 Pulser 输出, 也可以调节栅极偏压来改变束流的流强, 而且在通常情况下, 栅极电压的调节更为简单和可靠. 图 5 就是固定了 Pulser 输出为 380V, 然后调节栅极偏压所得到的结果.

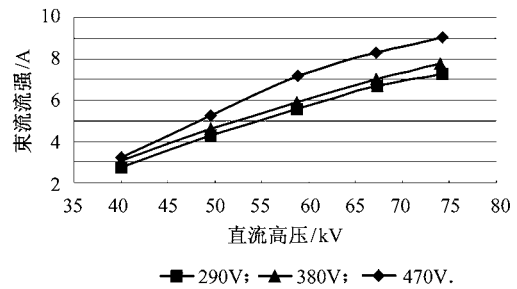


图 4 灯丝功率一定, 发射电流与脉冲电压、直流高压之间的关系

灯丝电压 6.38V, 灯丝电流 5.20A, 栅极偏压 - 100V

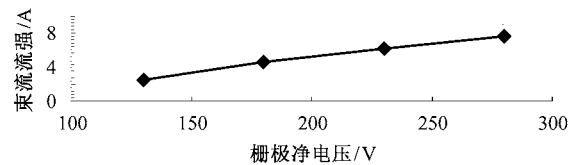


图 5 灯丝功率一定, 发射电流与栅极净电压之间的关系
灯丝电压 6.38V, 灯丝电流 5.20A, 直流高压 80kV.

事实上, 在电子枪的运行过程中, 高压和灯丝功率这两个量必须保持恒定以维持电子枪的稳定运行, 因此只能通过调节栅极偏压和 Pulser 输出来控制束流强度, 从上图可以看出, 通过对这两个量的调节, 在高压不变的情况下, 可以获得 2—8A 的束流, 调节范围很宽, 完全能够满足正、负电子束流的不同需求.

3.2 双脉冲束流测试

BEPC II 将会逐步采用双束团注入的方式来提高注入速率, 根据 BEPC II 的设计, 实现双束团注入就必须产生两个间隔为 56.02ns 的束团. 产生双 1ns 短脉冲的原理如图 6 所示.

采用如上这种脉冲产生方式, 两路脉冲的幅度和延时均可独立调节, 并且因为将会采用高稳定度的延时插件 TD4RA, 时间的 Jitter 比较小, 可以满足 BEPC II 工程 $\pm 70ps$ 的时间抖动需求. 由于当前实验条件的限制, 脉冲触发源的时间抖动比较大, 而且 TD4RA 也没有合适的工作条件, 因此并没有在实验中测量实际束流的时间抖动.

图 7 是双脉冲束流测试的结果. 测试条件为: 直流高压 80kV, 栅偏压 100V, 灯丝电流 5.2A, 灯丝电压 6.4V, 双脉冲间隔 56ns. 加上高压之后, 成功的观测到了双脉冲束流的输出.

由图 7 可以看到, 当两个 Pulser 的输出电压相

等,约为 400V 时,输出束流脉冲的幅度并不相等.为使输出束流脉冲幅度一致,需要对 Pulser 的输出电压进行调节,当 $V_{p1} = 440V$, $V_{p2} = 470V$ 时,束流脉冲的

幅度基本达到一致.当工作在双脉冲模式的时候,任意一个脉冲的幅度均小于单脉冲时的幅度,其原因很可能与阴栅组件以及栅偏压电源的工作状态相关.

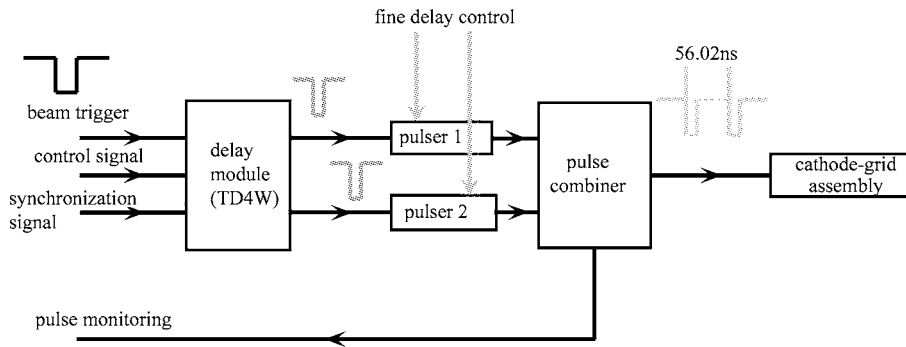


图 6 双脉冲的产生原理

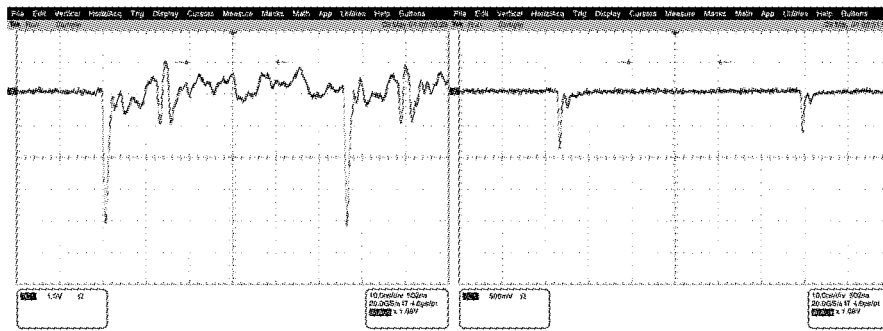


图 7 栅极上的双脉冲信号(左)和加上高压后产生的束流信号(右)

4 结论

对 E5-4 电子枪系统进行的一系列理论分析和实际测试,能够对新电子枪的设计和改进工作起到很重要的指导作用.

通过比较模拟计算的结果和实际测试的结果,我们发现模拟计算的值要小于实测的值.因此,在设计 BEPC II 的新电子枪时,没有预留较多的余量,基本上理论设计值就是最后要求达到的目标值.从模拟计算的结果看,在高压一定的时候,导流系数越大则发射度也越大,所以新枪设计中采用了较小的导流系数,可以获得有比较小的发射度,能够更容易的和聚束系统相匹配.

另外一个很重要的作用就是检验了将会应用到 BEPC II 工程中的 Y796 阴栅组件、新电源系统和 Pulser 系统.新 Pulser 的工作状态相当稳定,而且输

出脉冲的幅度,宽度等性能指标均超过原有的 Pulser.利用新 Pulser 在 E5-4 电子枪上进行的直流高压测试,在高压 80kV 时获得了大约 8A 的单脉冲束流,超过了以前的测试记录.同时对双脉冲束流的产生进行了初步的测试,成功的获得了符合时间要求的双束团.

由于实验条件的限制,在对 E5-4 电子枪进行的实验中高压没有加到很高,但是从工作的情况来看,在 150kV 高压时肯定能够提供大于 10A 的束流;而且因为某些设备未到货,目前也还没有进行精确调节延时的实验.因此目前的实验结果并不够完整,很多现象也没有能够完全解释清楚.但是,从已有的实验结果看,在 E5-4 电子枪系统上进行的实验还是很成功的,新的阴栅组件、新的电源系统和新 Pulser 系统肯定都能顺利的用在 BEPC II 直线加速器的电子枪系统上.可以说, E5-4 电子枪已经顺利的完成了它现阶段的使命.

参考文献 (References)

- 1 Iwata H et al. Development of an Electron Gun for the KEK Positron Generator, KEK Preprint 89—95. September, 1989
- 2 Koontz R et al. SLAC Collider Injector, RF Drive Synchronization and Trigger Electronics and 15 AMP Thermionic Gun Development, SLAC - PUB - 2686. February, 1981
- 3 Isamu Sato et al. Desigh Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB, KEK Report 95-18. March, 1996. 273—275
- 4 Ohsawa S et al. Pre-Injector of the PF 2.5-GeV Linac for the KEKB and its Performance. Proc. of the International Workshop on $e^+ e^-$ Sources and Pre-Accelerators for Linear Colliders. Schwerin, Germany: Sept.29-Oct.4, 1994. 465—479
- 5 Sannibale F et al. DAΦNE Linac Commissioning Results, DAΦNE Technical Note BM-2. Frascati: April 4, 1997
- 6 Herrmannsfeld. W B EGUN—an Electron Optics and Gun Design Program, SLAC Report 331. October, 1988

Study on BEPC Experimental Electron Gun System

LIU Bo¹⁾, GU Meng-Ping, CHI Yun-Long, YANG Xing-Wang, TIAN Shuang-Min

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract E5-4 experimental electron gun system is the improved version of BEPC gun system. Firstly, some theoretical analyses on E5-4 gun are performed. Beam testing result is then introduced. The test is based on Y796 cathode-grid assembly, new power supply system and new pulser system. Impacts of different parameters on beam current are analyzed. This experimental electron gun system has played an important directive role on the research and manufacturing of BEPC II electron gun system.

Key words electron gun, simulation, beam testing