

# BEPC II 直线加速器的束流调试\*

陈延伟<sup>1)</sup> 王书鸿 裴国玺 刘渭滨 叶强

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** 叙述了北京正负电子对撞机二期工程(BEPC II)直线加速器的调束过程. 针对调束目标和束流物理特性, 提出了调束方法, 并对调束过程中出现的问题进行了分析和研究, 给出了初步调束结果, 为今后的进一步调试和稳定运行提供了有益的参考.

**关键词** 束流调试 束流物理特性 调束结果

## 1 引言

北京正负电子对撞机二期工程(BEPC II)将在北京正负电子对撞机(BEPC)的基础上, 改造为粒子工厂级的双环对撞机. 为使对撞亮度提高约两个量级( $1 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \rightarrow 1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 其直线加速器的性能也需有很大的提高<sup>[1]</sup>: 要求直线加速器提供更高能量(1.89GeV)的正负电子束流, 以实现全能量注入; 更高的正电子( $e^+$ )束流流强( $\geq 40 \text{mA}$ ), 使得储存环的正电子注入速率 $\geq 50 \text{mA}/\text{min}$ ; 更高的电子( $e^-$ )束流流强( $\geq 300 \text{mA}$ ), 使得储存环的电子注入速率 $\geq 0.375 \text{A}/\text{min}$ . 此外, 为达到高注入速率, 还要求在直线加速器出口正负电子( $e^+$ ,  $e^-$ )束流的发射度分别小于 $1.6 \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 和 $0.2\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、能散度均小于 $\pm 0.5\%$ <sup>[1]</sup>, 以满足储存环接受度的要求. 这些高指标要求直线加速器必须作比较多的改进, 包括强流、小发射度的新电子枪、高产额的正电子源、高功率和高稳定性的微波功率源和微波传输系统、高稳定性的相位控制系统、高效率的束流测量和调整系统以及高品质的真空和控制系统等. 整个直线加速器的改进始于2003年, 于2004年10月1日如期完成安装, 随后进行了各系统设备的调试、老炼以及直线加速器的全线调试工作. 2004年11月19日, 在直线加速器出口成功调试出电子束流, 而正电子束流也于2005年3月19日调试成功. 对束流性能的初步测量表明<sup>[2]</sup>, 改进后的直

线加速器可望达到设计指标. 在直线加速器束流调试成功后, 除为BEPC储存环同步辐射运行模式提供定点注入的电子束流外, 还同时向核物理实验厅提供实验束.

## 2 直线加速器的基本结构

BEPC II 直线加速器总长202m, 由56根长度为3m的等梯度加速管以及束流聚焦、束流调整和束流测量等系统组成. 56根加速管所需的功率由16套射频(RF)功率源提供. 由2856MHz晶振源、PSK倒相系统(用来为能量倍增器, SLAC Energy Doubler, 简称SLED, 产生倒相信号)以及1kW固态放大器组成的激励源用来激励第1套射频功率源K1, 而K1输出的功率除了用来激励预注入器(包括电子枪、预聚束器、聚束器及第1根加速管A0)中的各部件外, 还通过20dB定向耦合器和15/8"硬同轴馈线激励其余15台射频功率源(K2—K16). 正电子产生系统位于第2套射频功率源K2的下游, 射频功率源K3用来激励正电子捕获节(Capture Section, 简称CS, 由一节加速管组成), 而射频功率源K4则用来激励两节加速管, 从而达到提升正电子能量的目的. 在16台功率源中, 除K1, K3和K4外, 其余13台功率源都配有能量倍增器, 从能量倍增器输出的功率分别激励一个由4节加速管组成的标准加速单元.

2005-10-18 收稿

\* BEPC II 工程项目资助

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

### 3 电子束的调试

#### 3.1 电子枪的调束

为获得强流正电子束, BEPC II 直线加速器新研制了 10A 电子枪, 并将电子枪的输出脉冲宽度降低到了 1ns 左右, 以适应储存环纵向接受度的需求; 此外, BEPC II 直线加速器将逐步采用双束团产生、加速以及注入技术以期进一步提高正电子注入速率. 由于 BEPC II 电子枪高压的输出脉冲有约为 2.5μs 的平顶, 所以, 必须将电子枪脉冲发生器的输出套在该脉冲波形的平顶里面才能获得稳定的电子束流, 如图 1 所示. 然后, 再通过逐步调整电子枪的延时来使脉冲发生器的触发正好处于电子枪高压输出脉冲波形的中间.

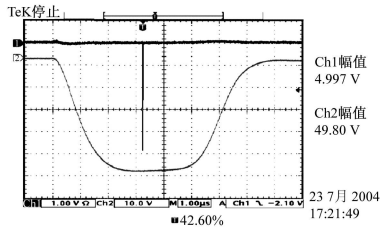


图 1 电子枪脉冲发生器与脉冲高压位置图

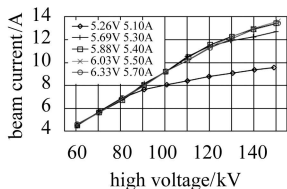


图 2 发射电流-灯丝功率曲线图

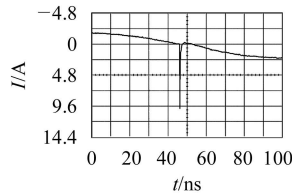


图 3 电子枪出口束流波形

从减少低能强流电子束的空间电荷效应、限制其发射度增长等方面考虑, 尽可能提高电子枪的阳极电压是非常必要的. 经过模拟计算研究以及对当前设备的综合考虑, 选定 BEPC II 电子枪的阳极脉冲电压范围为 150—200kV, 在直线加速器调试的初期则维持在 150kV. 图 2 给出了电子枪发射电流与灯丝功率之间的关系曲线<sup>[3]</sup>. 经过分析可以知道, 当电子枪高压低于 120kV 时, 电子枪工作在空间电荷限制范围以内, 因为当灯丝电流超过 5.40A (相应的灯丝功率为 32W) 以后, 再提高灯丝功率对电子枪发射电流的增大没有太大的意义, 也就是说, 即使在更高电压下没有达到空间电荷效应限制的极限, 但此时电子枪的发射能力基本达到饱和. 在 BEPC II 的工作条件下, 电子枪阴栅组件的工作点选取在 5.40A 比较合适, 能够在 150kV 高压下完全发挥阴栅组件的能力, 通过调节栅极偏压以及脉冲发生器输出, 可以获得 0—12A 的束流, 完全可以满足不同工作状态的需要.

图 3 是在电子枪出口第 1 个束流流强探测器上 (BCT1) 观测到的束流波形, 对应的电子枪流强为 9.6A. 在这种情况下, 通过精心调节电子枪出口的一对聚焦透镜和校正线圈, 可获得流强为 10.8A 的束流, 从而达到 BEPC II 设计指标 10A 的要求. 图 4 为 BEPC II 电子枪下游束流传输系统的设计布局示意图, 图中显示出了电子枪出口的一对聚焦透镜和校正线圈等.

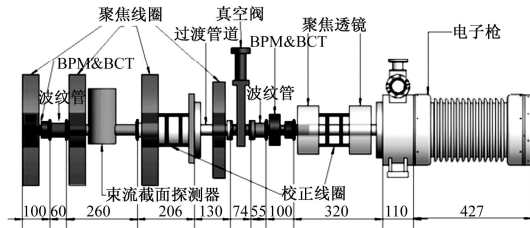


图 4 BEPC II 电子枪下游束流传输系统的设计布局示意图

#### 3.2 聚束系统的束流调试

在电子枪出口下游的调束中, 利用束流截面靶 PR1 和 PR2 (图 4 中显示出的束流截面探测器即为 PR1, PR2 位于 PR1 的下游, 没有显示在图 4 中) 对束流轨道进行调整时遇到了一些困难. 现象为: 当束流打到 PR1 和 PR2 上时, 发现束流开始会显示出一个集中的比较好的圆形, 然后迅速扩散变为空心, 且半径不断变大, 到最后从靶上基本上看不到束流, 然后束流在某个时刻又会突然恢复, 如此不断重复, 如图 5 和图 6 所示. 与此同时, BCT1 所测量的流强信号却没有任何变化. 从束流外形变化的种种表现来看, 可推测这是低能 (40MeV) 强流电子束在 PR 上面的电荷积累造成的充放电现象. 为此将在前两个处于低能段的 PR 靶上覆盖一层金属丝网, 使电荷能够迅速的流走, 从而消除这种现象.

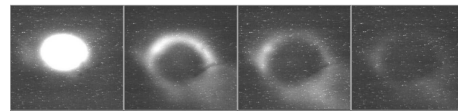


图 5 PR1 上观测到的束流光斑信号的变化情况

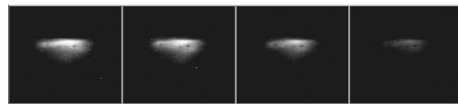


图 6 PR2 上观测到的束流光斑信号的变化情况

通过调整束流并对 PR1 和 PR2 的瞬时变化进行观察, 发现束流在 A0 加速管之前有偏轴现象. 初步调试表明, 仅仅使用电子枪出口的束流轨道校正子 C01

和C02基本上可以将束流调整到PR1的中心,但不能将束流调整到PR2的中心,只有启用预埋在A0聚焦线圈内的一对备用校正子C03,才可以将束流基本调整到PR2的中心。

直线加速器的束流能散度主要取决于聚束系统出口电子束团的相位宽度。对BEP C II聚束系统来说,调整预聚束器、聚束器的功率和相位不仅可以使电子束团以合适的相位宽度进入下一个系统,还可以降低束流的能散、增大聚束系统输出束流的流强。BEP C II设计要求预聚束器的输入功率为20kW,但是,由于当前预聚束器馈线的衰减过大,实际只能达到17kW;聚束器的输入功率虽然能达到设计要求的1.7MW,但是其幅度和相位调整机构出现故障。由于以上原因,只能在二者输入功率尽可能大的情况下匹配他们的相位。最终,在对磁场、聚束系统等进行调节之后,在位于加速管A0出口的BCT2上可获得7.2A的束流,如图7所示。由此可以知道,当前聚束系统的聚束效率约为 $7.2/10.8=67\%$ ,与PARMELA模拟计算的结果基本一致。目前,已经为预聚束器、聚束器设计制造了新的幅度和相位调整单元,并将在下一轮开机运行前安装就位、投入使用。

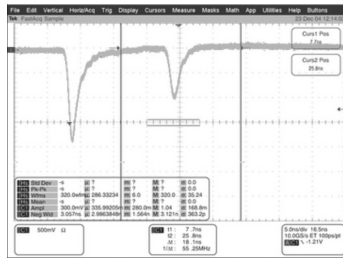


图7 在BCT1和BCT2上观测到的束流信号

### 3.3 时间关系的确定

为了满足储存环纵向接受度的要求, BEP C II 直线加速器的定时系统以电子枪触发时间作为基准。因此,在调束初期需要对各台功率源的定时进行调整,以使功率源的输出波形与微波输出波形嵌套、电子束通过直线加速器各部位时处于微波后沿。同时,还需要保证PSK倒相信号在每一加速单元内约超前于电子束(即微波后沿)一根加速管的填充时间,约 $0.83\mu\text{s}$ 。图8为调整好的时间关系曲线。

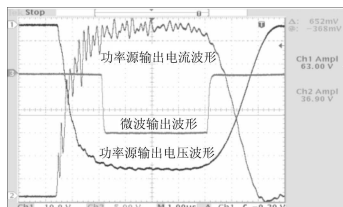


图8 微波与功率源时间关系图

### 3.4 电子束两种运行模式的调试

对BEP C II直线加速器来说,电子束的两种运行模式指的是向储存环注入电子束时采用的小流强模式和产生正电子时采用的大流强模式,其调试结果如表1所示。之所以在产生正电子时采用大流强模式,主要是因为正电子的产额与初级电子束的流强具有很大关系,流强越高,正电子产额越高。对表1中给出的调试结果进行分析可以知道,小流强模式运行时的聚束效率和束流传输效率要远好于大流强模式,并且,直线出口处的流强足以满足储存环的注入要求。多次调试表明,小流强模式运行较稳定(例如,当电子枪流强为2A时,可以在BPM5上观察到束流轨道在 $\pm 0.3\text{mm}$ 内变化,而当流强提高到10A时,束流轨道在 $\pm 0.6\text{mm}$ 内变化)。因此,在向储存环注入电子时应尽可能采用小流强模式,而大流强模式只能在产生正电子时采用。

表1 电子束两种运行模式的调试结果

运行模式	电子枪出口流强/A	A0出口流强/A	聚束效率(%)	直线出口流强/A	直线出口能量/GeV	束流传输效率(%)
$e^+$ 产生	12.0	7.2	60	4.7	1.89	65
$e^-$ 注入	2.8	2.0	71	1.65	1.89	83

## 4 正电子调试

### 4.1 正电子靶上初级电子束最小束截面的获得

直线加速器的正电子是由初级电子束轰击金属钨靶获得的,正电子的产额正比于初级电子束的能量和流强,反比于初级电子束在靶上的束截面半径,其中束截面半径对正电子产额的影响最大。BEP C II设计指标要求初级电子束在靶上的能量为240MeV,流强 $\geq 6\text{A}$ ,束流截面半径1.5—2.5mm ( $1\sigma$ )。调试获得的初级电子束能量210MeV(由于真空保护原因,K2输出功率稍小于设计值),流强 $\geq 6.5\text{A}$ ,束流截面半径1.0—1.5mm ( $1\sigma$ )。参考模拟计算得到的束流光路,仔细调整正电子靶上游的聚焦线圈磁场、打靶前初级电子束的轨道、正电子靶上游的两组“三合一”四极磁铁(如图9所示),可以使初级电子束在靶上的束流截面达到最小(约为1mm,  $1\sigma$ ),从而使正电子源出口的束流流强达到63mA,高于设计值的37mA。

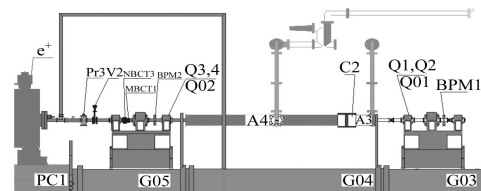


图9 正电子打靶上游的设备布置示意图

## 4.2 正电子束俘获和高传输效率的调试

由于靶后正电子束的截面半径很小但横向散角很大,为有效地俘获和收集正电子,需在靶后安装磁号(Flux Concentrator),并且,在长度仅为10cm的磁号内,轴向磁场强度由入口的4.5T迅速下降到出口的0.5T,这样,当束流通过磁号后,其截面半径会增大而横向散角则会变小,以使束流的发射度与下游加速管和聚焦结构的接受度相匹配.磁号脉冲电流初值约为10—12kA,脉冲波形为半正弦,底宽为5 $\mu$ s.为了使正电子束在磁号下游的传输效率尽可能高,除磁号下游3根加速管上套有7个长度约为1m、工作磁场为0.5T的螺线管聚焦线圈外,再下游的几根加速管上还安装了24块大孔径四极磁铁.7段聚焦线圈共有5台直流电源,其电流值可达450—750A.

表2 正电子束流参数表

参量	设计	初步测试
靶上 $e^-$ 半径/(mm, $1\sigma$ )	2.5	1.0—1.5
$e^-$ 打靶能量/MeV	240	210
聚焦线圈出口 $e^+$ 流强/mA	88	100
聚焦线圈出口 $e^+$ 能量/MeV	100	100
直线加速器出口 $e^+$ 流强/mA	37	$\geq 63$
直线加速器出口 $e^+$ 能量/GeV	1.89	1.55

表2给出了迄今获得的正电子束流参数,并与设计参数做了比较.可见,调试获得的正电子流强优于设计值,正电子在直线加速器出口的能量为1.55GeV,小于设计值1.89GeV,这是因为有两台射频功率源尚未投入运行.

## 5 总结

BEPC II 直线加速器的初步调试已取得重大进展,成功地与储存环的同步辐射运行模式定点注入束流.初步调试表明,正电子的流强优于设计值;正、负电子的能散度和发射度可望达到设计值<sup>[2, 4]</sup>,基本反映出改造工程的设计、制造、安装和调试是成功的.在即将完成的相位控制系统建造、真空系统更新、微波和功率源系统的进一步改进以及完善束流测量和控制系统的基礎上,将继续束流的调试,可望进一步提高束流性能和稳定性.

作者衷心感谢BEPC II 直线加速器全体同事的通力合作以及加速器中心束测组同事的大力帮助.

## 参考文献(References)

- 1 PEI Guo-Xi, WANG Shu-Hong et al. BEPC II Design Report-Injector Part: IHEP-BEPC II-SB-03-2. Institute of High Energy Physics, CAS, November 2003
- 2 WANG Shu-Hong. Upgrade and Beam Commissioning of BEPC II Injector Linac. Proceedings of The Ninth Particle Accelerator Physics Symposium. Yunnan, August 2005
- 3 LIU Bo. Study of New Electron Gun System for BEPC II. PhD Thesis, IHEP, 2005 (in Chinese)  
(刘波. BEPC II 电子枪系统的研究. 博士论文, 中国科学院高能物理研究所, 2005年, 6月)
- 4 CHEN Yan-Wei. Record of Beam Commissioning and Machine Study for BEPC II Injector Linac, Internal Report. IHEP, October 2004-July 2005

# Beam Commissioning of BEPC II Injector Linac<sup>\*</sup>

CHEN Yan-Wei<sup>1)</sup> WANG Shu-Hong PEI Guo-Xi LIU Wei-Bin YE Qiang

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract** This paper describes the beam commissioning process of BEPC II Injector Linac. Aiming at the beam design goal and the beam physics characteristics of this injector linac, the beam commissioning method has been proposed, and some problems met in the beam commissioning process have been analyzed and studied. In addition, the preliminary beam commissioning results have been obtained.

**Key words** beam commissioning, beam physics characteristics, beam commissioning result

Received 18 October 2005

<sup>\*</sup>Supported by BEPC II Project

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