

BEPC II 直线加速器重大改造和束流调试进展*

王书鸿¹⁾ 裴国玺 孙耀霖 池云龙 陈延伟 曹建社

孔祥成 赵风利 侯汨 邓秉林

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 BEPC II 直线加速器的重大改造旨在获得高流强、小发射度和小能散的正负电子束, 以满足对撞机亮度提高两个两级的要求. 这对直线加速器各系统和束流物理是一个挑战. 文章介绍了直接决定束流性能的新电子源、新正电子源、新微波功率源、相位控制系统和束流测量系统等改造情况; 叙述了束流物理研究; 介绍了束流调试进展情况和进一步改进计划.

关键词 BEPC II 直线加速器 重大改造 束流物理 束流调试

1 引言

BEPC II 是高亮度的双环正负电子对撞机, 它与 BEPC 相比, 要求直线注入器提供更高的能量, 以实现全能量注入; 更高的流强和小发射度、小能散, 使环的注入速率达 $\geq 50 \text{ mA/min}^{[1]}$. 这些高指标 (见表 1) 要求原直线注入器作重大改造, 包括建立强流、小发射度的新电子枪, 高产额的新正电子源, 高功率和高稳定性的微波功率源, 高性能的相位控制系统、束流测量和控制系统等. 这些系统已基本完成了设计、加工、安装, 并进行了初步调试.

表 1 BEPC II 直线加速器设计指标

	e ⁺ beam	e ⁻ beam
能量/GeV	1.89	1.89
流强/mA	37	500
发射度/(mm·mrad)(1 σ)	0.53	0.20
能散度(%)	0.50	0.50
注入速率/(mA/min)	50	300
重复频率/Hz	50	50
束脉宽度/ns	1.0	1.0

2 新电子枪系统

为获得强流正电子束, 设计和建造了强流、小发射度的新电子枪. 采用 Y796 阴-栅组件, 电流发射密度可达 10 A/cm^2 , 脉冲流强 $\geq 10 \text{ A}$, 1 ns (FWHM). 阳极电压采用脉冲高压 150—200 kV, 以有效抑制发射度增

长. 新电子枪的另一个特点是在枪下游配置了一套较完整的束流检测和调束装置.

3 新正电子源系统

为获得高产额的正电子, 采用 240 MeV, 6 A, 1.5 mm 半径的初级电子束轰击厚为 8 mm 的钨靶. 用大径向接受度的磁号 (Flux Concentrator), 将靶后大角度、小束斑的束流相分布转换到小角度、大束斑的相分布, 与下游的加速和聚焦系统匹配. 磁号长 10 cm, 入口和出口的轴向磁场强度分别为 4.5 T 和 0.5 T, 由峰值电流为 12 kA、底宽 5 μs , 50 Hz 的脉冲电源励磁. 在磁号下游的 3 根加速管上, 套有 7 个长约 1 m 的聚焦线圈, 提供 0.5 T 的均匀聚焦磁场.

4 新微波功率源

为将加速器的能量由 1.3 GeV 提高到 1.89 GeV, 采用比原用 HK-1 (30 MW) 更高功率的速调管, 相应的调制器也需更新. 共 16 套微波功率源中, 2 号位和 12 号位用 SLAC 5045 速调管 (65 MW), 前者为提高打靶电子能量; 其余 14 套微波功率源使用 TH2128C 速调管 (45 MW) 和 E3730A 速调管 (50 MW). 改造后的脉冲调制器峰值输出脉冲功率将达到 115 MW (320 kV/360 A), 调制器高压稳定度要求接近 $\pm 0.1\%$, 以满足 $\pm 0.5\%$ 的束流能散的要求.

* BEPC II 重大改造工程资助

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

5 相位控制系统

采用束流能量最大法来确定最佳相位. 然后由相控装置, 锁定该最佳相位. 要求相位控制的精度达 $\pm 2^\circ$. 用于精确测量相位的鉴相器(PAD), 拟采用I/Q解调器, 相位测量的分辨率可以达到 0.2° , 可以同时测量微波信号的幅度和相位. 相位调控的执行部件为 $I\Phi A$ 单元. 用沿速调管长廊铺设的相位稳定同轴线, 作为相位参考线, 由温度引起的最大相位变化为 $0.2^\circ/\text{C}$, 满足要求. 参考线由恒温水系统冷却.

6 束流测量系统

新建了轨道测量系统, 采用条型(Stripline) BPM, 其特点是阻抗大, 灵敏度高. 15个条型BPM分别位于各“三合一”透镜中. BPM探头全长163mm, 电子学使用Bergoz的Log-ratio对数宽带高频前端, 加14bit高速ADC数字化, 其优点是精度高, 测量范围宽, 适用于同时测量电子及正电子的需要. 要求BPM的测量分辨率为 $0.1\text{--}0.2\text{mm}$.

7 束流物理研究

7.1 正电子束的模拟计算

由于正电子束的初试发射度很大, 计算表明, 在上述正电子源聚焦线圈下游主加速段的前部, 必须采用套在加速管外的24块大孔径Q铁. 用TRANSPORT, EGS4, PARMELA和LIAR程序的联合模拟计算表明, 在采用和优化束流光路和轨道校正系统后, 并在初始束流偏轴 $\leq \pm 0.3\text{mm}$, 加速管、四极透镜的安装公差 $\leq \pm 0.2\text{mm}$ 、相位控制精度 $\leq \pm 2^\circ$ 、微波功率源调制器高压稳定度 $\leq \pm 0.1\%$ 等条件下, 直线加速器出口40mA的正电子束的能量、能散和发射度可达到设计要求. 模拟计算还表明, 当靶上电子束半径为2.0mm, 1.5mm时, 加速器出口 e^+ 流强将分别提高到 $\geq 50\text{mA}$ 和 $\geq 63\text{mA}$.

7.2 电子束的模拟计算

由于电子束团的电荷量大(2.2nC), 其尾场效应, 包括单束团和多束团的尾场效应, 对发射度增长的影响较严重. 图1是束流初始偏轴导致的发射度增长, 并给出了束流轨道校正对抑制发射度增长的显著效果. 计算还表明, 聚焦透镜径向安装误差引起的色散效应将导致发射度增长; 加速管径向安装误差在尾场作用

下将导致发射度增长, 如图2所示.

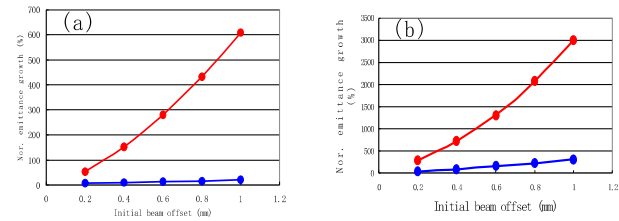


图1 单束团短程(a)和多束团长程(b)尾场效应对发射度增长的影响(上、下曲线分别为无、有轨道校正)

用EGUN, TRANSPORT, PARMELA和LIAR程序联合模拟计算了电子束的性能. 在优化束流光路和轨道校正系统后, 并在上述同样的误差条件下直线加速器出口1.89GeV, 500mA的电子束的能散和发射度可达到设计要求. 对用于产生正电子的初级电子束的模拟计算结果表明, 可望在正电子产生靶上获得6A, 240MeV, 束斑半径为1.0—1.5mm的初级电子束. 模拟计算和测量研究表明, 来自预注入器电子束的大能散在聚焦系统中的色差效应导致的发射度增长, 限制了最小束斑的获得. 此外, 强流下的尾场效应导致发射度增长, 也影响最小束斑的获得. 因此, 严格控制设备安装公差, 并采用轨道校正系统是很必要的.

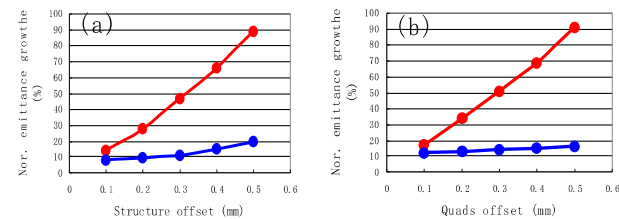


图2 加速结构偏轴(a)和聚焦磁铁偏轴(b)导致的发射度增长(上、下曲线分别为无、有轨道校正)

8 束流调试进展

BEPC II 直线加速器在2004年5月前完成了设计和制造, 2004年9月底完成了整体安装, 之后进入调试阶段. 2004年11月19日首次获得电子束, 并开始向储存环提供电子束用于同步辐射运行和试验束实验. 期间直线加速器继续调试, 2005年3月19日首次获得正电子束. 这一轮机器运行和调试直到2005年7月初关机. 至今初步测到的束流参数见表2.

表2说明: 1) 测量时, 有2台微波功率源未投入运行; 2) 用多次改变磁透镜的聚焦强度, 测量了 e^- 束在直线出口的发射度(1.30GeV, 500mA)为 $0.42\mu\text{m}$, 对应1.89GeV的发射度约为 $0.10\mu\text{m}$. 3) 测量 e^+ 束在直线出口的发射度(1.35GeV, 44mA)为 $0.43\mu\text{m}$, 对应1.89GeV的发射度约 $0.31\mu\text{m}$; 4) e^+ 能散度的测量,

是采用改变输运线的束流挡块(置于大色散位置)间隙和其下游的流强测量了1.3GeV, 40mA e^+ 能散为 $\pm 0.73\%$; 对应1.89GeV的能散约为 $\pm 0.50\%$. 已测量到1.30GeV, 500mA的电子束能通过能散为 $\pm 0.80\%$ 的狭缝, 对应1.89GeV的能散约 $\pm 0.55\%$.

表2 直线加速器总体参数

参量	设计	初步测试
能量/GeV(e^-)	1.89	1.89(1)
能量/GeV(e^+)	1.89	1.55(1)
流强/mA (e^-)	500	> 500
流强/mA (e^+)	37	63
重复频率/Hz	50	25—50
发射度/ $\mu\text{m}(1\sigma)e^-$	0.07	0.42@1.30GeV 2)(0.10@1.89GeV)
发射度/ $\mu\text{m}(1\sigma)e^+$	0.53	1.30@1.35GeV 3)(0.31@1.89GeV)
能散度($\%)e^-$	± 0.50	$\pm 0.80@1.30\text{GeV}(\pm 0.55@1.89\text{GeV})$
能散度($\%)e^+$	± 0.50	$\pm 0.73@1.30\text{GeV} 4)(\pm 0.50@1.89\text{GeV})$

以上测量是初步的, 有待机器进一步稳定和达到设计能量后进一步全面确认. 调试所得正电子流强大于设计值, 是因为正电子流强的设计值是基于初级电子束在靶上的束斑半径为2.5mm(1σ), 而实际的束斑半径可调到1.0mm—1.5mm(1σ).

9 今后的工作和进一步改进

按计划直线加速器将在2007年底前全面达到设计指标并验收. 在这之前, 还有许多工作待完成, 如让16台微波功率源全投入稳定运行, 使正电子的能量

(Stand-by一台功率源)达到设计值; 相位控制系统完成建造并投入运行; BPM稳定读出的获得和束流轨道校正系统投入运行; 束测系统需进一步的完善; 改进旧的定时系统, 克服较大的时间抖动导致束流平均能量的漂移; 在前期的调试和运行中, 由于原有真空泵、电源和真空检测系统的严重老化, 不适应改造后的新要求, 将在2005年夏天停机期间对真空系统作较全面的更新.

在束流物理方面, 由于电子枪的实际脉冲宽度为0.95ns(FWHM), 低宽为1.6ns, 大于原希望的1.0ns, 经现有的聚束系统后, 产生5个束团, 它们的电荷量相对中间束团的比例分别为0.26, 0.73, 1.0, 0.67和0.11. 显然这5个束团的能量、能散、轨道和发射度等都会由于电荷量的不同而有差别, 并将导致束流性能的不稳定、束流向储存环注入效率的降低和在环内辐射本底增加等. 子谐波聚束系统的设计研究表明, 采用频率分别为142.8MHz和571.2MHz的两个子谐波聚束腔, 将它们置于现有聚束腔的上游, 可获得干净、大电荷的单束团, 聚束效率可达90%以上. 再采用双束团运行和注入(双束团的时间间隔为52.02ns), 可使注入效率提高近一倍, 并减少在环上的束损和辐射本底. 目前, 整个新聚束系统的设计研究已经完成, 第二个子谐波聚束腔在加工、研制中. 预期新聚束系统将在2007年夏建成并投入运行后, BEPC II 直线加速器的性能又将有一个大的提升.

参考文献(References)

- 1 PEI Guo-Xi, WANG Shu-Hong, CHI Yun-Long et al. Concept Design of the BEPC II Injector Linac, IHEP-BEPC II-SB-03-2, IHEP, November 2003 (in Chinese) (裴国玺, 王书鸿, 池云龙等. BEPC II 直线加速器初步设计, IHEP-BEPC II-SB-03-2, 中国科学院高能物理研究所, 2003年11月)

BEPC II Linac Upgrade and Beam Commissioning*

WANG Shu-Hong¹⁾ PEI Guo-Xi SUN Yao-Lin CHI Yun-Long CHEN Yan-Wei CAO Jian-She
KONG Xiang-Cheng ZHAO Feng-Li HOU Mi DENG Bing-Lin
(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The BEPC II injector linac upgrade aims at having higher beam energy with smaller beam emittance and energy spread to meet the colliding luminosity upgrade by two orders of magnitudes higher. It is a great challenge to various systems and the beam physics for this injector linac. This paper describes the constructions of the new electron gun, the new positron source, the new RF power supply, the new phasing system and the upgraded beam instrumentation, which are immediately affected on the beam performance. The beam physics with high current and small emittance and energy spread are systematically studied. The preliminary beam commissioning results and the further machine improvement plans are presented.

Key words BEPC II-linac, upgrade, beam physics, beam commissioning

*Supported by BEPC II Project

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