

BEPC II 直线加速器的束流调试和稳定运行

王书鸿¹⁾ 裴国玺 池云龙 陈延伟 曹建社 孔祥成 赵凤利 侯汭
陈志比 刘渭滨 邓秉林 耿哲峤 裴士伦 沈莉 乐琪 叶强

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 BEPC II 重大改造工程要求将对撞机的峰值亮度提高近百倍, 并具有高积分亮度, 为此必须对作为注入器的直线加速器进行重大改造, 提供高能、强流、小发射度和小能散度的正负电子束, 达到高注入速率(正电子 50mA/min.) 的要求. 这对直线加速器各系统和束流调试是一个挑战. 在成功建造了新电子源、新正电子源、新微波功率源、相位控制系统和束流轨道测量系统等的基础上, 着重叙述了束流参数的调试结果, 束流能量、能散度、发射度、传输效率均达到(或优于)设计指标. 描述了束流参数稳定性的研究、改进和成功地达到稳定运行. 最后简述了新建中的次谐波聚束系统, 以进一步提高束流性能和注入速率.

关键词 BEPC II 直线加速器 重大改造 束流调试 稳定运行

1 引言

北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II) 计划将对撞机的峰值亮度提高近百倍并具有高积分亮度, 为此必须对作为注入器的直线加速器进行重大改造, 提供全能量(1.89GeV)、大流强、小发射度和小能散的正负电子束, 达到高注入速率(正电子 50mA/min.) 的要求^[1]. 直线加速器的重大改造已基本完成. 成功建造了大流强、小发射度的新电子枪系统; 新建了具有高产额、大接受度的正电子源; 新建了高功率和高稳定性的微波功率源; 新建了相位控制系统和束流轨道测量系统; 改进了控制系统和真空系统等. 在这些新建和改进设备的基础上, 全面地调试了束流性能, 均达到或优于设计指标. 进行了束流轨道和能量的稳定性研究和改进, 实现了束流性能的长期稳定性. 为进一步提高束流性能, 具有两个不同频率的次谐波聚束器的新聚束系统正在建造中.

2 束流参数调试测量结果

表 1 给出了 BEPC II 直线加速器束流性能参数表. 表中的测量值, 是经过几个月的调试和不断改进后达到的, 并在 2006 年 6—7 月, 经 BEPC II 工程指挥部组织的预验收测试组详细地测试核实. 其中, 能量的测

量是采用位于直线加速器末端的能量分析仪确定的; 流强的测量是采用流强探测器测定的; 发射度测量是采用多次改变聚焦强度法, 将相应的多个束流截面尺寸经最小二乘法拟合计算确定的; 电子束的能散度, 是采用能量分析仪测定的; 正电子束能散度的测量, 由于其流强相对电子束要小很多, 以致在能谱仪的截面靶上很难给出清晰的光强分布图象, 因此采用处在束流输运线大色散处的束流准直器及其下游的流强探测器测定的. 该准直器所在位置的色散函数为 1.85m, 将准直器的间隙设置在 18.5mm, 能通过该准直器间隙的束流的能散处在 $\pm 0.5\%$ 内, 测到的流强为 37mA. 由于这套准直器和流强探测器处在直线加速器出口下游约 30m 处, 故可估计在加速器出口且能散在 $\pm 0.5\%$ 内的正电子束流强会超过 37mA.

表 1 BEPC II 直线加速器束流性能参数表

		设计值	测量值
能量/GeV	e ⁺	1.89	1.89
	e ⁻		
流强/mA	e ⁺	37	61
	e ⁻	500	800
发射度(1 σ) /(mm·mrad)	e ⁺	0.40	0.39-0.41 (40-46 mA)
	e ⁻	0.10	0.09-0.11 (600 mA)
能散度/(%)	e ⁺	0.50	0.50(≥ 37 mA)
	e ⁻	0.50	0.50(600 mA)
重复频率/Hz	e ⁺	50	50
	e ⁻		

2008 - 01 - 07 收稿

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

3 束流轨道的稳定性研究和测试结果

作为将长期稳定运行的直线注入器,其束流的稳定性是至关重要的,它直接影响到束流向储存环的注入速率、对撞机的积分亮度和运行效率.但在调试的初期,明显地观察到了束流轨道的不稳定性,表现为在束流位置探测器(条形BPM,沿途共19个)上显示的束流轨道有周期性的变化.轨道的振荡周期,在几秒到几百秒内变化;振荡的幅度在 $\pm 0.5\text{mm}$ — $\pm 3.0\text{mm}$ 内变化.为寻找产生轨道周期性振荡的原因,我们曾经仔细检查了各种设备在运行中是否存在随时间变化的不稳定因素,如微波功率源的输出功率和相位、预聚束器和聚束器的幅度和相位、聚焦线圈和磁铁的励磁电流、冷却水温度和流量等随时间的变化,均没有发现问题.2006年7月,我们举办了“BEPC II 直线加速器 Mini-workshop”,来自日本KEK的加速器专家和我们一起,进一步分析束流轨道振荡的原因.期间,在BPM14上用示波器观察束流位置的模拟信号,发现束团的纵向位置(或时间分布)有振荡现象;同时,在聚束器下游的流强探测器上,也观察到束团电荷量的随时间变化.由这两个同时出现的现象,可初步推断,这是由于电子枪的触发抖动(27ps (rms))加上直线加速器的工作频率(2856MHz)和储存环高频频率(499.8MHz)之间的不同步,造成一个束流脉冲内(1ns, FWHM, 底宽1.6ns)的5个束团的位置和电荷量的随时间变化,再通过横向尾场效应,导致束流轨道的周期性变化.

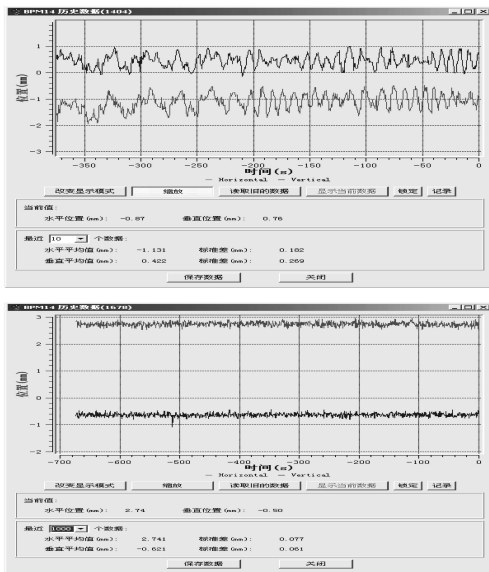


图1 在BPM14上观察到的束流轨道振荡(上图和下图分别为实行同步前和后的情况)

为了确认这一点,将上述两个工作频率实行同步,很快发现在BPM6及其上游的各BPM上,振荡的幅

度减少到原来的1/5,即约 $\pm 0.2\text{mm}$;在BPM6下游的各BPM上,虽仍有约 $\pm 1.0\text{mm}$ 以上的振荡,但在实行轨道校正后,它们的振荡幅度也减小到 $\pm 0.2\text{mm}$ 左右.图1给出了在BPM14上观察到的束流轨道随时间的变化情况,其中上、下图分别为实行同步前和后的情况.

4 束流能量的稳定性研究和测试结果

束流能量的不稳定性,可通过测量在大色散处的BPM的变化来确定.在束流轨道不稳定性问题解决后,利用处在加速器末端的能量分析磁铁下游的BPM(所在处的色散函数为 0.63m),测量其轨道随时间的变化范围为 $\pm 1.0\text{mm}$,由此可推断束流中心能量的变化范围约为 $\pm 0.15\%$.表2给出了经过预验收测试组在6h内测定的束流稳定性的参数表.

表2 束流稳定性参数表

	设计值	测量值
束流轨道稳定性	$\pm 0.20\text{mm}$	$\pm 0.16\text{mm}$
能量稳定性	$\pm 0.15\%$	$\pm 0.15\%$
电子枪触发抖动	35ps(1σ)	39ps(1σ) 27ps(rms)

影响束流能量稳定性的主要因素有两个,一是环境温度等慢变化引起微波加速相位的变化,导致束流能量的慢变化,这可通过建立恒温系统和相位控制系统加以限制;另一个是脉冲调制器输出高压的快变化,引起微波幅度和相位的快变化,导致束流能量的快变化.

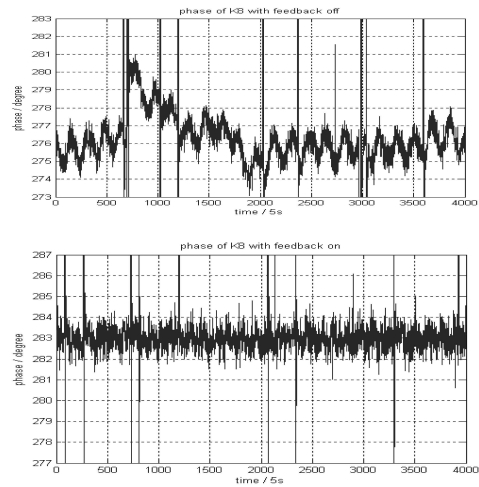


图2 8#微波功率源输出相位随时间的变化,并比较了相控系统开环和闭环时的差别 (a)相控开环,6h内相位变化约 6.5° ; (b)相控闭环,6h内相位变化约 $\pm 1.0^\circ$.

在BEPC II 直线加速器的重大改造工程中,我们新建了分布式相位控制系统,它有相位参考线、幅度和相位监测器(PAD)以及移相器(I Φ A)三部分组成,16台微波功率源的参考相位均由能量最大法确定.调

试结果表明, 相位控制系统的设计、建造和调试是成功的. 它们能将微波功率源的输出相位控制在 $\pm 2^\circ$ 以内. 图2例举了第8号微波功率源的输出相位随时间的变化, 并比较了相控系统开环和闭环时的情况.

为了稳定脉冲调制器的输出高压幅度, 采用了D-Qing电路, 以稳定充电电压; 并采用带有直流高压反馈功能的晶闸管调压器来稳定调制器的直流高压, 从而使调制器的输出脉冲高压稳定度达到优于设计要求的 $\pm 0.15\%$. 表3给出了在7#和10#调制器上的测量结果.

表3 第7和第10号调制器高压稳定度测量结果

50Hz, 8h	高压稳定度
无D-Qing电路	$\pm 0.16\%$
有D-Qing电路	$\sim \pm 0.10\%$

随着相位控制系统的作用发挥和调制器高压稳定度的提高, 束流中心能量的稳定度又有提高, 如近期在电子束流输运线上, 用位于大色散处(2.0m)的BPM测量到束流位置随时间的变化约为 $\pm 1.0\text{mm}$, 因而相应的束流中心能量的变化约为 $\pm 0.05\%$, 远小于束流的能散度.

5 束流传输效率的调试结果

表4 束流传输效率的调试结果

位置	电子枪出口	聚束出口	e^+ 产生靶	正电子源	直线出口
设计值	10A	7.5A	6.5A	50mA	37mA
测量值	11.8A	8.9A	7.9A	80mA	61mA

在直线加速器出口, 且能散在 $\pm 0.5\%$ 内的 e^+ 流强

只有 $\geq 37\text{mA}$. 原因是由初级电子束轰击钨靶产生的正电子束具有较长的低能尾巴, 但可用束流输运线大色散处的准直器将低能尾巴刮去.

6 正负电子束运行模式的快速稳定切换

实现正负电子束运行模式的快速切换, 对提高对撞机的积分亮度具有重要的意义. 为此, 我们实行了“一键多能”的集成转换模式, 即单击“ e^+/e^- 切换”, 同时实行以下6个系统切换: 正电子产生靶的移位, 束流的光路和轨道, 正电子脉冲电源时间移动, 微波功率源的Stand-by, 流强探测器信号放大器的开关, 电子枪偏压变换等. 使得切换时间只需几秒钟, 且切换稳定, 切换后一般不需要作任何调整.

7 建造次谐波聚束系统进一步提高束流性能

具有两个不同频率的次谐波聚束器(142.8MHz和571.2MHz)的新聚束系统正在建造中, 它将使聚束率从70%提高到90%; 使现有每脉冲中的5个束团变成1个束团, 从而避免了多束团的尾场效应, 提高束流的稳定性, 并减少注入束流的丢失和降低储存环中的本底; 可采用每脉冲的双束团模式, 使 e^+ 的注入速率增加近一倍. 次谐波聚束器的功率源将采用脉冲固态放大器(脉冲功率 $\leq 20\text{kW}$). 预期2008年投入运行.

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)

BEPC II Linac Beam Commissioning and Operation

WANG Shu-Hong¹⁾ PEI Guo-Xi CHI Yun-Long CHEN Yan-Wei CAO Jian-She KONG Xiang-Cheng
 ZHAO Feng-Li HOU Mi CHEN Zhi-Bi LIU Wei-Bin DENG Bing-Lin
 GENG Zhe-Qiao PEI Shi-Lun SHEN Li LE Qi YE Qiang
 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The BEPC II injector linac upgrade goal aims at higher beam energy with smaller beam emittance and energy spread to meet the colliding luminosity upgrade by two orders of magnitude. This paper describes the beam commissioning and operation. The beam energy, energy spread, current, transmission and emittance have met the design goal. The beam orbit and energy instabilities have been studied and a steady beam operation has been realized.

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

Received 7 January 2008

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