

文章编号 1004 924X(2002)05 0513-05

BEPC 储存环同步光束流测量光学系统

温利¹, 姚多舜², 周泗忠¹, 夏绍建³, 周仁魁¹, 罗长洲¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068;

2. 中国兵器工业 205 研究所, 陕西 西安 710065;

3. 国家上海同步辐射中心, 上海 201800)

摘要: 概括了同步光束流测量的特点, 简单描述了北京正负电子对撞机(BEPC)现有同步光束流测量系统。根据 BEPC 改造对同步光束流测量系统提出的最新指标, 提出了改造原有系统的新方案。对同步光引出镜进行了全新设计; 采用高分辨率面阵 CCD 实现束团横截面尺寸测量、束团强度测量和束团位置检测; 采用条纹相机实现束团纵向长度的测量; 利用 Zemax 程序对新方案进行成像质量分析, 束团纵向长度测量分辨率为 2ps, 束团横截面尺寸测量分辨率为 20 μ m。

关键词: BEPC; 同步光; 束流测量; 光学系统

中图分类号: TH73 文献标识码: A

1 引言

加速器束流测量系统对于优化机器参数和保证加速器正常运行十分重要, 是加速器物理学家和调束人员的“眼睛”。束流测量系统的设计应遵循以下基本原则: 1) 能够长期稳定运行; 2) 宽量程, 高灵敏度, 能满足初调时弱信号处理的要求; 3) 能够满足机器研究时的特殊要求。利用同步光进行束流测量具有以下优点: 1) 由于电子束团在储存环内接近光速运动, 所以同步光脉冲的长度和横截面尺寸几乎同电子束团相同; 2) 采用同步光测量束流截面, 对运动着的束流无任何阻拦, 能准确、真实地反映束团中的电荷分布, 直接获得电子束团的时间结构; 3) 采用同步光测量束流强度, 由于自然的光电隔离, 抗干扰能力强, 灵敏度很高; 4) 对于储存环工作在不同能量模式时, 具有同样稳定的监测效果。

2 BEPC 现有同步光束流测量系统

北京正负电子对撞机(BEPC)是一台用于高能物理实验及同步辐射应用研究的大型实验装置, 其储存环上现有的两个同步光测量系统位于

II区和IV区的B10弯转磁铁处, 现有测量系统的原理如图1所示。

同步光测量系统要实现以下功能: 1) 测量束流横向截面尺寸, 监测束团位置; 2) 测量束团纵向长度; 3) 测量束流强度, 监测强度分布; 4) 单束团弱流测量。

从图1可以看出, 现有系统的主光路采用望远系统。束长测量通过触发信号光路和延时光路实现; 流强测量通过会聚透镜和光电二极管实现; 单束团弱流测量通过插入反射镜、会聚透镜和光电倍增管实现; 截面尺寸测量通过望远光组、分光棱镜和两组光电二极管线阵实现; 监视系统由位置基准、标尺投影器、电视摄像机和CRT监视器组成。现有系统具有以下不足以及有待于改进的方面:

1) 主光路采用望远系统, 结构相当复杂, 光路中需要彼此协调的部件比较多, 难于调试。为了避免中心遮拦, 望远物镜离轴安装, 致使由物镜成的中间过渡像成在望远光路的外面, 并且产生象散和彗差。物镜相对孔径很小, 视场角也很小, 因而焦深很大。

2) 束长测量部分结构尺寸很大且位于储存环地下隧道内, 调试困难且占用较大的隧道空间。

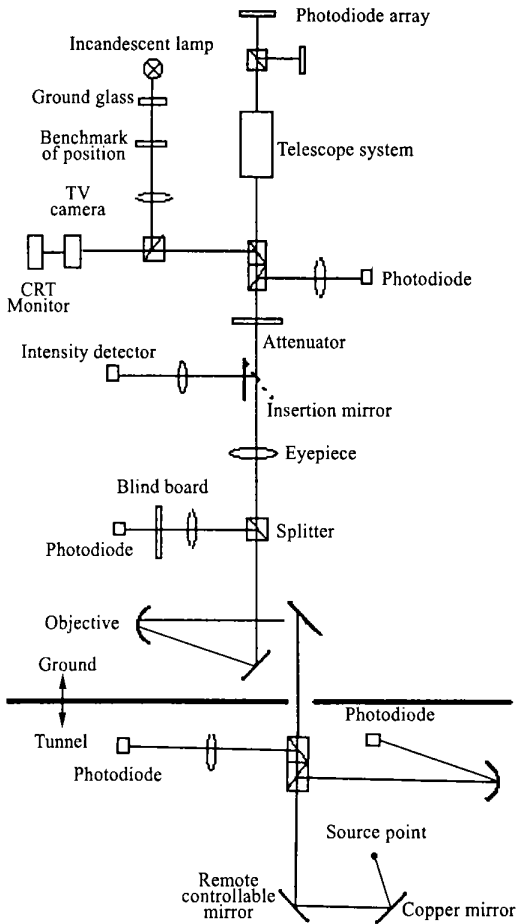


图 1 现有束流测量系统光路

Fig. 1 Schematic optical path of the present BEPC beamline measurement system.

3) 监视系统中使用的标尺投影器由白炽灯、毛玻璃、分划板实现。当前可以使用编程语言很方便地实现软标尺。

4) 使用光电管测量束长。当前已有时间分辨率达 2ps、重复频率达 1000Hz 的高速条纹相机, 可用于观察束团的精细结构。

5) 使用光电管测量流强和横截面尺寸。当前已有高分辨率的面阵 CCD, 可以通过计算机处理 CCD 图像从而得到强度分布和横截面尺寸。

6) 现有同步光束流测量系统采用 488~700nm 的波段范围。为了进一步提高测量的空间分辨率, 就要压低成像光的衍射尺寸 σ_d , 应尽量采用更短波长的成像光。

7) 不同波长的光通过透镜时有不同的折射率, 由此造成色差。现有束流测量系统没有采用单色光, 因此存在色散误差。

8) BEPC 储存环改造后, 束流强度大幅度提高, 同步光功率密度增加, 必须对同步光引出镜进行严格的热计算, 并对镜子的材料、冷却方式、结构、光学表面加工精度以及 X 射线的屏蔽与吸收等环节, 给予细致的考虑。

3 改进后的同步光束流测量系统

BEPC 除了保持目前储存环 III 区和 IV 区 B10 弯转磁铁处的两个同步光测量点外, 还将在 III 区和 IV 区的外环各增加一个同步光测量点, 该测量点将位于束流色散大的地方, 以便测量束流能散度。针对上节的分析, 现有的两套同步光束流测量系统也要进行改造以满足 BEPC 的要求。此外, 对 BEPC 同步光束流测量系统提出了更严格的性能指标, 如表 1 所示。

表 1 BEPC 同步光束流测量系统性能指标 (1.89 GeV)
Table 1 Parameters of BEPC SR measurement system (1.89 GeV)

Curvature of dipole ρ	10.345 m
Critical energy of SR of dipole (E_c)	1.45 keV
Critical wavelength of SR of dipole (λ_c)	0.858 nm
Wavelength of the monitored SR light (λ)	210~488 nm
Half open angle of the monitored SR light	1.68~2.24 mrad
Horizontal dimension of electron bunch σ_x	~2 mm
Vertical dimension of electron bunch (σ_y)	~0.2 mm
Accuracy	±5%
Resolution of transverse dimension measurement	20 μ m
Resolution of bunch length measurement	2 ps

改进后的同步光束流测量系统原理见图 2 所示。该系统的测量原理如下: 来自光源点的同步光在引出镜表面形成被测光斑, 由准直透镜组将光束准直为平行光, 并中继成像在遥控反射镜上, 遥控反射镜在实现光路转向的同时, 也可调节不同能量运行模式的束团光斑的偏移, 平行光束经窄带滤光片和可调狭缝后, 由位于光路中的分光棱镜将平行光束分为两路: 一路经衰减器后由接收透镜组成像在面阵 CCD 靶面上, 进行束团横截面尺寸测量、束团强度测量和束团位置监测; 另一路由物镜将束团成像在条纹相机狭缝处, 进行束团

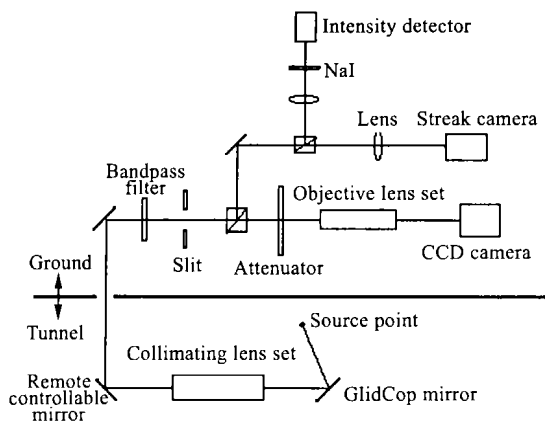


图 2 改进后的束流测量系统光路

Fig. 2 Schematic optical path of the novel BEPC beam line measurement system.

纵向长度的测量, 该光束的另一支路由物镜将单束团光斑成像在光电倍增管的像面上, 进行弱电

3.1 同步光引出镜

同步光引出镜将同步光反射并引出储存环, 位于 BEPC 储存环 II 区和 IV 区 B10 弯转磁铁出口端 1355.4mm 处, 距光源点 1723.35mm, 在垂直照射时要承受 $10\text{W}/\text{mm}^2$ 的高热负载, 由此而产生的镜子表面形变将影响成像质量, 因此镜子的机械结构设计、热分析、应力形变分析等极其重要。

综合考虑材料的热传导系数、热膨胀系数、屈服强度以及材料焊接、机械加工等工艺要求, 同步光引出镜的基底材料最终选用 GlidCop(一种用精细氧化铝粒子渗透强化的铜), 其机械性能如表 2 所示。

表 2 GlidCop AL-15 的机械性能

Table 2 Mechanical properties of GlidCop AL₁₅

Thermal conductivity	365W/(m·°C)
Thermal expansion	1.66E-5/°C
Yield strength(1hr@1000°C)	303MPa
Modulus of elasticity	131GPa

使用 ANSYS 软件对同步光引出镜进行优化设计, 最终结构为: 镜子形状为中空长方体, 4 条管径为 3mm 的纵向平行水冷通道, 距镜子表面 3mm, 镜面尺寸 $35 \times 35\text{mm}^2$, 镜面与光轴的夹角为 $45^\circ 55' 48''$, 可有最大为 $36' 44''$ 的调整余量。

3.2 准直透镜组

准直透镜组(焦距为 2000mm)将光束准直为平行光, 并分段传递束团光斑, 以提高 CCD 摄像系统的角分辨能力, 其机械结构应满足焦点沿光轴方向精确可调, 以保证透镜组焦点与光源点重合度小于 $\pm 0.01\text{mm}$ 的要求, 使出射光严格平行, 保证束团横截面尺寸测量精度。

3.3 遥控反射镜

高反射率遥控平面反射镜($75 \times 50\text{mm}^2$)与水平线夹角为 45° , 其中心距光源点 2228mm, 用步进电机驱动实现绕 X 轴和 Z 轴的转动, 转角大于 $\pm 5^\circ$, 实现不同运行能量模式引起的光束偏移, 两个方向的转角由角位置检测装置检出, 送计算机显示, 实现归零控制及反射镜调整, 构成闭环自动控制系统。

3.4 带通滤波片

平行光路中采用波长为 $365 \pm 5\text{nm}$ 的带通滤波片, 将被测光斑单色化, 以改善衍射分辨率, 减小色差, 控制横向色差小于 0.02mm。

3.5 可调孔径光阑

光路中水平方向和垂直方向都会有孔径限制同步光的张角进而产生衍射误差, 衍射误差由下式确定: $\Delta_d = 0.61 \lambda / \theta$, 式中: λ 为光波长, θ 为光学系统的半张角。采用可调孔径光阑, 调试时进行标校确定。

3.6 合成衰减器

束团横截面尺寸测量使用的 CCD 摄像系统对光斑的灵敏度很高, 最低照度小于 10lux, 光路中设计光衰减器对波长 365nm 的光束进行减光, 以避免光电探测器损伤。衰减器透过率分为 1/10、1/100、1/1000 三档, 并可进行有机组合。衰减器安装在转盘上, 由步进电机驱动实现衰减器不同组合。

3.7 束团横截面尺寸测量

光学系统将同步光引出镜上的光斑成像在面阵 CCD 摄像机上, 进行束团横截面尺寸及光强分布测量。

根据物理设计要求, 物方束团光斑 $\varnothing 10\text{mm}$, 分辨率 0.02mm, 设计的光学系统放大率为 0.5, 像方成像为 $\varnothing 5\text{mm}$, 则探测器应满足光敏面大于 $5 \times 5\text{mm}^2$, 像元尺寸小于 0.01mm。最终选用 NEW TMC-1000 型面阵 CCD 摄像机, 其主要技术指标为: 像素 1008(H) \times 1018(V), 像元尺寸 9

$\times 9\mu\text{m}^2$, 光敏面尺寸 $10 \times 10\text{mm}^2$, 最低照度 10lux, 可调电子快门 $1/60 \sim 1/32000$ 。

束团横截面尺寸测量用 CCD 光敏面作为聚焦系统(焦距为 1000mm)的成像面,为使成像面位置准确,保证物像共轭关系,采用高精度复合式滑台对成像面进行精密调整,实现沿 X、Y、Z 方向平移,行程 $> 5\text{mm}$,最小分辨率 $< 0.01\text{mm}$;绕 Y 轴、Z 轴旋转,转角范围 $\pm 5^\circ$,最小分辨率 $< 3'$ 。

3.8 束团纵向长度测量

物镜将束团成像在条纹相机狭缝上,由条纹相机测量出束团纵向长度。物镜焦距为 500mm,相对孔径 $1/10$,像面尺寸为 $5 \times 5\text{mm}^2$ 。像面精密调节机构保证成像焦点和条纹相机狭缝重合。

3.9 单束团检测

单束团发光强度很弱,用测量物镜将光束聚焦在碘化钠晶体上(利用碘化钠晶体的荧光性质),再采用波长峰值在 365nm 的光电倍增管检测弱电流。为提高光电倍增管单位面积上的强度,物镜的聚焦效果要好。最终采用焦距为 50mm 的物镜,聚焦光斑为 $\varnothing 1\text{mm}$,机械结构保证光学系统成像面沿轴向可调,并与光电倍增管光敏面对中。

4 系统成像质量分析

系统几何像差曲线如图 3 所示,其中三个图分别表示纵向球差、横向球差和 OSC 正弦差。

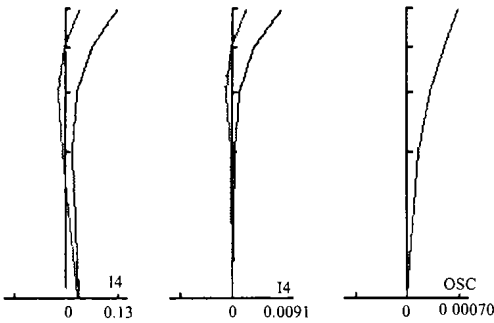


图 3 几何像差曲线

Fig. 3 Curvature of geometric aberration.

系统点列图如图 4 所示,该曲线表示系统物方一个几何点在像平面上成像点光斑的几何

尺寸,和系统的几何分辨率有关,一般来说在集中系统 70% 能量时的光斑大小决定着系统的几何分辨率。

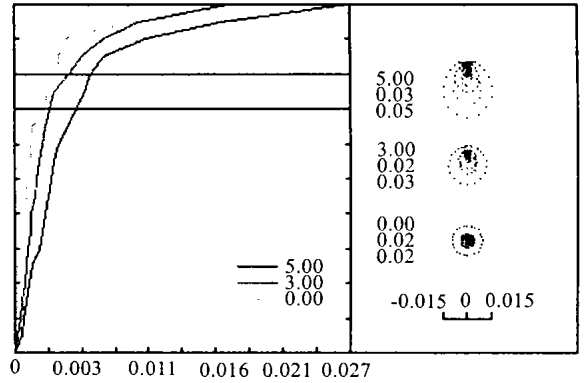


图 4 点列图曲线

Fig. 4 Point spread function.

系统光学传递函数曲线如图 5 所示,该曲线从系统衍射极限角度评价光学系统成像质量,一般来说当 $\text{MTF} = 0.3$ 时对应的空间频率即为系统的空间分辨率。

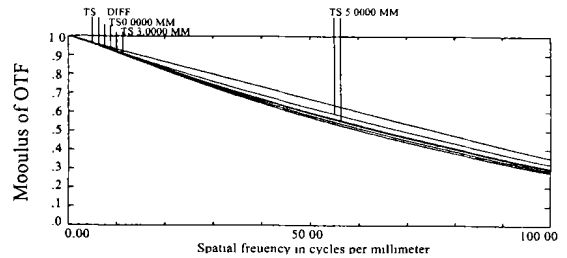


图 5 光学传递函数曲线

Fig. 5 Curvature of modulation transfer function.

5 结束语

设计了全新的 BEPC 储存环同步光束流测量系统:采用高分辨率面阵 CCD 实现束团横截面尺寸测量,束团强度测量和束团位置检测;采用条纹相机实现束团纵向长度测量;利用 Zemax 程序进行成像质量分析;束团纵向长度测量分辨率为 2ps,束团横截面尺寸测量分辨率为 $20\mu\text{m}$ 。本文设计的 BEPC 储存环同步光束流测量系统将应用于 BEPC 储存环改造。

参考文献:

- [1] Mitsuhashi T, Flanagan J W, Hiramatsu S. Optical diagnostic system for the KEK B_factory[A]. *Proceedings of EPAC 2000, Vienna* [C]. Austria: 2000, 1783_1785.
- [2] Flanagan J W, Hiramatsu S, Mitsuhashi T. Optical beamlines for the KEK B_factory synchrotron radiation monitors[A]. *Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference* [C]. New York, 1999, 2120_2122.
- [3] 宋克非, 米宝永. 用于同步辐射测量的光子计数器[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9: 85_87.
- [4] Hofmann A, Meot F. Optical resolution of beam cross_section measurement by means of synchrotron radiation[J]. *Nucl. Instrum. Methods*, 1982, 203: 483_493.
- [5] Ieiri T. A real time bunch_length monitor using the beam spectrum and measurements of bunch lengthening[J]. *Nucl. Instrum. Methods*, 1993, 329: 371_380.
- [6] Obina T, Kasuga T, Tobiyama M, *et al.* Measurement of the longitudinal bunch structure in the photon facotr positron storage ring with a photon counting method[J]. *Nucl. Instrum. Methods*, 1995, 354(1): 204_214.

Design of the synchrotron light measurement system for BFPC storage ring

WEN Li¹, YAO Duo_shun², ZHOU Si_zhong¹, XIA Shao_jian³, ZHOU Ren_kui¹, LUO Chang_zhou¹

- (1. *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068, Shanxi, China;*
 2. *Institute 205 of China Ordnance Industry, Xi'an 710065, Shanxi, China;*
 3. *Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai 201800, China*)

Abstract: This paper generalizes the properties of a synchrotron light measurement system and describes the present measurement system for BEPC. A novel system is presented according to the latest specifications. The SR extraction mirror was redesigned. The profile and intensity of beam were measured by CCD camera, and the bunch length was measured by streak camera. The imaging quality of the new system was analyzed through Zemax program, the measurement resolution of beam_size and of bunch length being 20 μ m and 2ps, respectively.

Key words: BEPC; synchrotron light; beamline measurement; optical system

作者简介: 温 利(1971), 男, 山东人, 1997年毕业于青岛海洋大学, 获硕士学位。现在西安光学精密机械研究所攻读博士学位, 主要从事同步辐射光束线设备及技术研究。E_mail: wenli513@yahoo.com.cn