

合肥光源二分割三角型光位置检测器的研制*

孙葆根^{1;1)} 何多慧¹ 卢平¹ 王筠华¹ 郭从良² 王勇¹ 曹涌¹
李吉浩¹ 郑普¹

1 (中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

2 (中国科学技术大学电子科学与技术系 合肥 230026)

摘要 介绍了一种用于合肥光源的二分割三角型光位置检测器的研制,对其主要性能(如灵敏度和线性范围)进行了理论分析和实际测量,测量结果与理论分析相当吻合.文中还给出了光位置测量系统的组成.

关键词 同步光 光电效应 光位置检测器 灵敏度 线性范围

1 引言

在电子储存环中,电子束流轨道的稳定对实验用户而言是非常重要的.显然,为了稳定束流轨道,首先要精确测量轨道,因此应制作具有所需分辨率和灵敏度的位置检测器.通常人们用电子束流位置检测器(BPM)进行束流位置测量.这种位置检测器通常有两种类型,即钮扣(Button)型和条带(Strip-line)型.但是这种位置检测器通常位于四极铁附近,不能直接测量光源点束流位置和角度的变化.对于要求高稳定高精度光源的用户而言,测量并稳定光源点束流的位置和角度更为重要.为此,国外很多实验室非常重视同步光位置检测器的研制^[1-4].

同步光位置检测器有几种不同类型.根据测量原理,可以分为光电效应检测器、分割离子室(SIC)、荧光辐射检测器、位置敏感检测器和多丝正比室.由于光电效应检测器具有很宽的波长测量范围(从VUV到X射线)、位置分辨率高、稳定性好以及超高真空工作等优点,因此它被广泛应用.光电效应检测器可分为狭缝型和面型.狭缝型检测器将测量同步光的边缘,而并不阻挡主同步光的通过,它通常分

为双丝型和刀片型;面型检测器,通常是由两个二分割的三角形单元组合在一起,它将阻挡小部分同步光.由于二分割三角型光位置检测器具有同步光尺寸 σ ,对灵敏度影响较小的优点,所以在合肥光源的二期工程改造中,我们采用了二分割三角型光位置检测器用于两条弯铁光束线——软X射线磁性圆二色光束线U18和表面物理光束线U17.

2 工作原理

二分割三角型光位置检测器的结构示意图如图1所示.

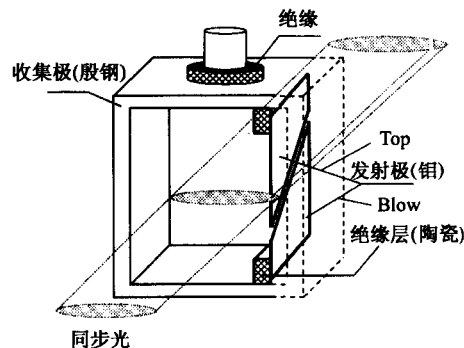


图1 二分割三角型光检测器的示意图

2003-04-29 收稿,2003-07-14 收修改稿

* 国家自然科学基金(10275062),国家计委重大科研项目“国家同步辐射实验室二期工程”和科学院创新项目(KY4206)资助

1) E-mail: bgsun@ustc.edu.cn

当同步光束流穿过检测器中心孔径时,同步光的垂直侧面撞击一对由金属钨制成的二分割三角型发射电极,从其表面激发光电子.在发射电极和外部电极(称为收集电极)之间加一个电压差,则在电极之间产生光电流.根据 Столетов 定律^[5],在入射光的光谱成分不变时,单位时间内发射的光电子数目与入射光强成正比.当同步光距离检测器中心位置不同时,入射到上下发射极的光强不同,即上下电极的光电流不同,所以可以通过上下电极的电流差计算束流位置.记上下电极的光电流分别为 I_T 和 I_B ,则位置信号 P 计算公式为

$$P = (I_T - I_B)/(I_T + I_B), \quad (1)$$

3 性能分析

对于一个光位置检测器而言,衡量其性能的主要指标是灵敏度、线性范围.

灵敏度定义为 $S = (dP/d\delta)_{\delta=0}$,其中 P 为位置信号, δ 为同步光中心到检测器中心的偏差.这样,在线性范围内,可以根据位置信号 P 和灵敏度 S 计算出同步光的中心位置,其计算公式为

$$y = P/S. \quad (2)$$

线性范围定义为在允许的线性位置误差情况下的位置变化范围,定义线性位置误差为

$$\Delta = P/S - \delta. \quad (3)$$

二分割三角型光位置检测器的示意图如图 2 所示.这里 H 是三角极板的高度, L 是同步光看到的三角极板的长度.为了保证检测器仅阻挡部分同步光,该检测器在水平方向必须偏离同步光中心,记从检测器的边缘到同步光中心的水平距离为 x_0 .

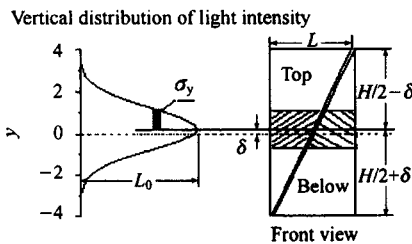


图 2 二分割三角型检测器的示意图

对于弯铁光源,同步光在一定接受角内水平分布近似为均匀分布,垂直分布可以用高斯分布近似,则其垂直光强度分布可表示为

$$\Phi(y) = \Phi_0(t)(\sqrt{2\pi}\sigma_y)^{-1} \exp(-y^2/2\sigma_y^2), \quad (4)$$

这里, σ_y 是光位置检测器处的同步光强度垂直分布

标准偏差对应的尺寸.对于合肥光源,在光位置检测器处 σ_y 约为 3.5mm.

则上下电极感应的光电流正比于相应的光强度,可分别表示为

$$\begin{cases} I_T = k \frac{\Phi_0(t)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_{-H/2}^{H/2} \left(\frac{L}{2} + \frac{L}{H}y\right) \exp\left[-\frac{(y-\delta)^2}{2\sigma_y^2}\right] dy \\ I_B = k \frac{\Phi_0(t)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_{-H/2}^{H/2} \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{H}y\right) \exp\left[-\frac{(y-\delta)^2}{2\sigma_y^2}\right] dy, \end{cases} \quad (5)$$

这里, k 是转换系数

根据式(5),可得到上下电极感应的归一化光电流随位置的变化曲线,如图 3 所示.

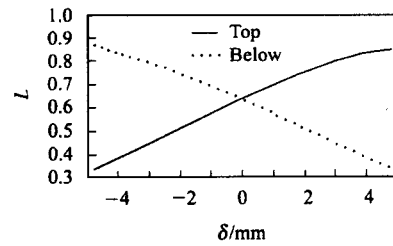


图 3 上下电极归一化光电流随位置的变化曲线

由式(1)和(5),可推导出面型检测器的位置信号计算公式为^[6]

$$P(\delta) = \frac{2}{H} \frac{\int_{-H/2}^{H/2} y \exp[-(y-\delta)^2/2\sigma_y^2] dy}{\int_{-H/2}^{H/2} \exp[-(y-\delta)^2/2\sigma_y^2] dy}. \quad (6)$$

当 $H \gg \sigma_y$ (常取 $H = 6\sigma_y$) 时,则位置检测器的灵敏度近似为

$$S = (dP(\delta)/d\delta)_{\delta=0} \approx 2/H. \quad (7)$$

显然,位置灵敏度与 σ_y 基本无关,所以对二分割三角型光位置检测器而言同步光尺寸 σ_y 对灵敏度影响较小.

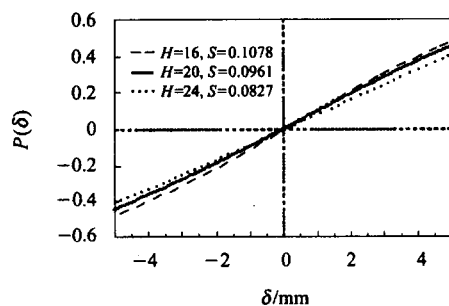


图 4 二分割三角型检测器的位置信号曲线

对于 $H = 21\text{mm}$, $\sigma_y \approx 3.5\text{mm}$, 则位置灵敏度 S 约为 $0.09249(1/\text{mm})$.

根据式(6), 可用数值计算得到在不同 H 的情况下位置信号曲线如图 4 所示, 其对应线性范围曲线如图 5 所示. 由图可知, 当 H 增大时, 位置灵敏度下降, 而位置线性范围增加. 在允许线性位置误差为 $5\mu\text{m}$ 情况下, 当 $H = 20\text{mm}$ 时位置线性范围约为 $\pm 1.3\text{mm}$.

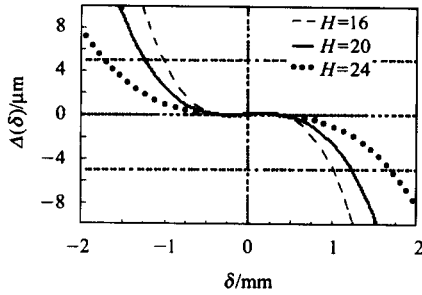


图 5 二分割三角型检测器的线性范围

4 结构设计

图 6 给出了二分割三角型光位置检测器的实物图. 这里, 二分割刀片选用钼, 在迎着同步光侧有一个光阑, 其垂直孔径为 22mm , 它既阻挡了杂散光, 又限定了三角极板的高度为 21mm . 为了防止上下刀片的阻挡效应, 上下刀片与同步光方向有一个 3.8° 的倾斜.

此外, 探头可以垂直方向可调, 可调范围为 $\pm 5\text{mm}$. 为了对光位置检测器进行在线标定, 在光位置检测器上安装了光栅测微传感器和光栅数显表.

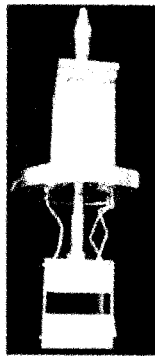


图 6 光位置检测器的实物图

5 光位置测量系统的组成

光位置测量系统包括光位置检测器、电流放大

器、光位置信号处理器和数据获取系统. 图 7 示出光位置测量系统的系统框图.

在图 7 中, 对于弯铁光束线的光位置检测器的输出信号先经电流放大器放大后, 送至一个光位置信号处理器, 由光位置信号处理器得到光位置的垂直信号, 再由光位置信号获取系统进行光位置信号的采集和处理; 对于 Undulator 光束线的光位置检测器, 由于光位置信号需要经过扣除本底处理^[7], 所以光位置检测器的输出光电流经电流放大器放大后, 直接由光位置信号获取系统进行采集和处理.

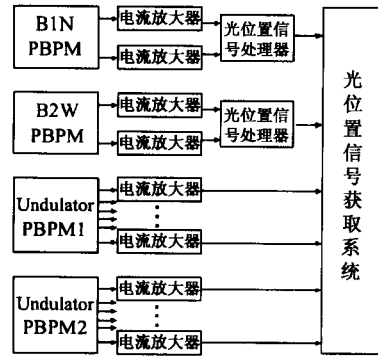


图 7 光位置测量系统的方框图

电流放大器用来将光位置检测器的光电流转换成电压信号, 由于光位置检测器输出的光电流为 nA 量级, 所以必须采用微弱电流放大器. 采用美国 Kethly 公司生产的 Model 428 电流放大器, 该电流放大器的增益为 $10^3 - 10^{11} \text{V/A}$.

光位置信号处理器用来将经电流放大器放大后的光电流信号转换成光位置信号. 根据式(1)知, 弯铁光位置检测器的垂直位置信号为上下电极光电流的差比和, 由此设计了光位置信号处理器, 其原理框图如图 8 所示.

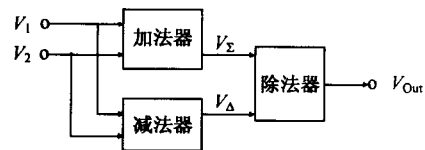


图 8 光位置信号处理器的原理框图

光位置信号处理器由加法器、减法器 and 除法器组成. 加法器和减法器采用运算放大器 LF351 构成, 除法器采用除法器芯片 AD534KD 构成.

我们采用 VXI 系统构成光位置信号的数据获取系统^[8]. 由于共有 14 路光位置信号输出, 所以光位置测量系统中数据获取系统占用 14 个 VXI 系统的 14 个通道, 即信号调理模块 VXI - SC - 1102B 的 14

个通道和数据采集模块 VXI-MIO-64XE-10 的 14 个通道,其他通道将用于 BPM 信号的数据采集,从而实现束流闭轨的测量。

我们采用 LabVIEW 可视化软件编写光位置信号的数据获取系统软件。

6 检测器的标定和测量结果

光位置检测器的灵敏度虽然可以估算,但是为了得到精确值,必须利用同步光进行实际标定。已将光位置检测器安装到软 X 射线磁性圆二色光束线 U18, 在该光束线对光位置检测器进行了标定和测量。

在对光位置检测器进行了标定和测量时,采用保持同步光位置不变,而调整光位置检测器垂直位置的方法。为了保证同步光位置稳定,选择束流流强在 50mA 以下,这时储存环束流比较稳定,图 9 示出了利用 Button 型束流位置检测器测得在约 2 分钟时间内束流位置变化。由此可知,束流位置变化在 $\pm 5\mu\text{m}$ 内。

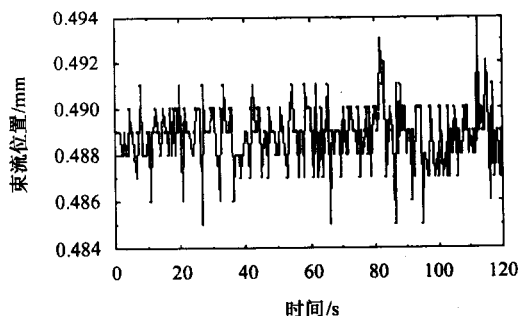


图 9 2 分钟时间内束流位置变化

为了精确测量光位置检测器垂直位置的变化,在光位置检测器上安装了光栅测微传感器和光栅数显表。光栅测微传感器采用长春光机所生产的

GCQ-D 传感器,测量范围为 10mm,显示分辨率为 $0.5\mu\text{m}$,测量精度为 $\pm 1\mu\text{m}$ 。

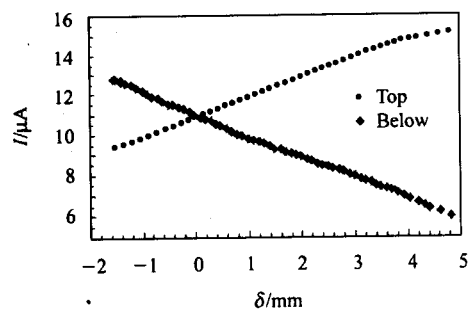


图 10 光位置检测器实测光电流随位置的变化曲线

图 10 给出了光位置检测器的上下电极的光电流随垂直位置的变化。由此可得,光位置检测器的灵敏度标定曲线如图 11 所示。根据拟合曲线可得,光位置检测器的灵敏度为 0.0925,这与计算值相当吻合。这样,光位置检测器的中心位置可以由下式计算:

$$y = 10.811 P$$

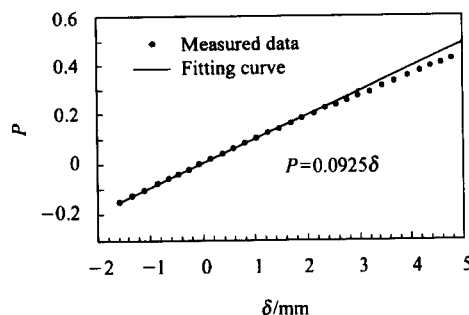


图 11 光位置检测器灵敏度标定曲线

感谢刘祖平研究员、李为民研究员、徐宏亮副研究员对本文工作有益讨论和大力支持。

参考文献 (References)

- Warwick T, Andresen N et al. Rev. Sci. Instrum., 1995, 66(2): 1984—1986
- Galimberti A et al. Proceedings of EPAC'96, June 1996, 1728—1730
- Schildkamp W, Pradervand C. Rev. Sci. Instrum., 1995, 66(2): 1956—1959
- Hollmack K, Peatman W B, Schroeter T. Rev. Sci. Instrum., 1995, 66(2):1889—1891
- XUE Z Q, Wu Q D. Electron Emission and Electron Energy Spectrum [M]. Beijing: Peking University Press, 1979 (in Chinese)
- SUN B G, HE D H et al. High Power Laser and Particle Beams., 2000, 12(5):652—656 (in Chinese)
(孙葆根,何多慧等. 强激光与粒子束,2000,12(5):652—656)
- SUN B G. Thesis for Ph. D Degree. Hefei: Published by University of Science and Technology of China, 2000 (in Chinese)
(孙葆根. 博士论文. 合肥:中国科学技术大学出版社,2000)
- Lu P, SUN B G et al. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(2):173—176 (in Chinese)
(卢平,孙葆根等. 强激光与粒子束,2002,14(2):173—176)

Development of a Split Photon Beam Position Monitor for HLS*

SUN Bao-Gen^{1,1)} HE Duo-Hui¹ LU Ping¹ WANG Jun-Hua¹ GUO Cong-Liang²
WANG Yong¹ CAO Yong¹ LI Ji-Hao¹ ZHENG Pu¹

1 (NSRL, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

2 (Dept of Electronic Sci. and Tech., University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract This paper described the development of a split photon beam position monitor of HLS (Hefei Light Source). The main performances (e.g. sensitivity, position offset and linearity range) were analyzed. The performances of this device were tested, the results are well matched with the calculated results.

Key words synchrotron radiation, photoelectric effect, beam position monitor, sensitivity, linearity range

Received 29 April 2003, Revised 14 July 2003

* Supported by Natural Science Foundation of China (10275062), Important Science Project of National Project Committee-NSRL Phase-II Project and CAS Knowledge Innovation Project (KY4206)

1) E-mail: bgsun@ustc.edu.cn