

PSD 位置测量系统在波荡器磁场测量中的应用

王晓勋^{1,2} 王宏飞¹ 周巧根¹ 朱亚¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)是一种基于横向光电效应(x 和 y 方向)的光电位置敏感器件,可直接探测到入射光斑的能量中心位置,在波荡器磁测中可用于获得霍尔探头测量过程中的横向位置变化。为了在狭小或封闭空间内实现对波荡器(尤其是真空内波荡器)磁场进行高精度的测量,我们设计并搭建了测试系统,对导轨直线度(x 和 y 方向)进行了测量。实验结果表明,该位置测量系统具有 $5\ \mu\text{m}$ 的测量精度,可以满足霍尔探头在波荡器磁测过程中的位置精度要求。

关键词 位置敏感探测器, 光阑, 真空内波荡器, 磁场测量, 数据采集

中图分类号 TL506

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.050103

The application of position measuring system based on PSD in undulator magnetic field measurement

WANG Xiaoxun^{1,2} WANG Hongfei¹ ZHOU Qiaogen¹ ZHU Ya¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: A set of high-precision magnetic field measuring system can guarantee the undulator magnetic field optimization and meet the measurement requirements. **Purpose:** We can operate magnetic field measurement in an enclosed space and construct a set of measuring system to obtain the coordinates of the Hall sensor. **Methods:** The base is designed using Solid Edge and data acquisition program can be written by LabVIEW. Position sensitive detector (PSD) is used to acquire the exact position coordinates of Hall probe. At last, we create points and plot by MATLAB to analyze the data change. **Results:** The position measuring system based on PSD accurately reflects the position changes and the fitting curve shows the guide rail variation trend. **Conclusion:** The measurement accuracy can reach $5\ \mu\text{m}$. PSD has an advantage over optical system, which can be widely used in measurements of position and small displacement.

Key words PSD, Iris, In-vacuum undulator, Magnetic field measurement, Data acquisition

国家大科学工程上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)是第三代同步辐射光源。而第三代光源最显著特征就是大量引入插入件,尤其是真空内波荡器,能够工作在很小的间隙下,可以获得更强的磁场,与真空外插入件相

比,可以获得更好品质的同步辐射光,所以在第三代同步辐射光源中有非常广泛的应用^[1]。目前研制真空内插入件,垫补磁场参数是在没有真空腔体的情况下进行的,当垫补完成后,磁阵列需要被整体拆下安装到真空腔体内。由于腔体内的空间非常有

国家自然科学基金(No.11175238)资助

第一作者: 王晓勋, 男, 1989年出生, 2013年毕业于安徽大学, 现为硕士研究生, 研究领域为波荡器技术

通信作者: 周巧根, E-mail: zhouqiaogen@sinap.ac.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11175238)

First author: WANG Xiaoxun, male, born in 1989, graduated from Anhui University in 2013, master student, focusing on undulator technology

Corresponding author: ZHOU Qiaogen, E-mail: zhouqiaogen@sinap.ac.cn

收稿日期: 2016-03-03, 修回日期: 2016-04-01

限,目前常用的基于大理石平台的磁测系统由于无法在安装真空腔体后对插入件磁场参数进行测量,所以真空插入件磁场性能好坏受机械拆装的重复性影响非常大。为了能够测量到真空腔体内磁阵列的磁场参数,我们设想把一根直线导轨安装到真空腔体内,霍尔探头安装到直线导轨的滑块上,这样滑块做往返带动霍尔探头一起运动就可以测量到插入件的磁场分布了。

一般,真空插入件的长度在 1.6 m 左右,测量用的直线导轨需要在 2.4 m 左右(为覆盖两端的漏场)。根据已有的经验,这么长的导轨安装到真空腔体后会有比较大的变形,导轨变形量级在 $\pm 150 \mu\text{m}$ 左右。这样的变形对磁场测量结果有非常大的影响,折算到光学相位误差,可达到 $2^\circ\text{--}3^\circ$,这将影响我们对波荡器磁场参数的判断,因此,准确测量导轨的变形量并且根据变形量对磁场加以矫正是非常有必要的。本课题研究的主要目标就是为了解决真空插入件在安装了真空腔体后磁场的精确测量问题,一套基于 PSD (Position Sensitive Detector) 的位置测量系统被用于测量直线导轨的形变数据。本文将对实验系统的搭建和实验结果进行详细的描述。

1 测量原理

1.1 二维 PSD 工作原理

PSD 的工作原理是基于横向光电效应。PSD 光敏面是半导体材料,当一束光射到 PSD 光敏面(图 1)上时,会产生电子空穴对。在耗尽层内电场作用下载流子会发生定向移动,空穴进入 P 层,电子进入 N 层,从而在 PSD 表面会产生光电流。由 PSD 等效电路图可知,这种电流信号大小与表面 P 层电阻呈反比,又因为 P 层电阻是均匀的,因此电阻大小和光斑位置是线性关系,于是电流信号大小和光斑位置也呈反比并且是线性变化的^[2]。

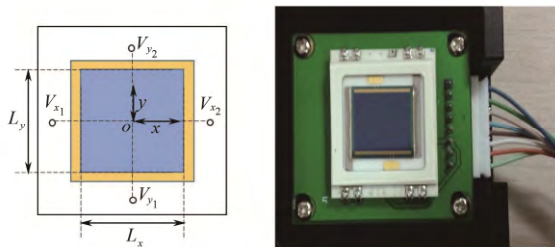


图 1 二维 PSD 光敏面

Fig.1 Two-dimension PSD sensitivity surface.

一般来讲电流信号会经放大电路转换为电压信号再进行计算,因此只要测得入射点在 PSD 光敏面

边缘的电压 V_1 和 V_2 , 就能得到光斑位置。当坐标原点选取 PSD 中心位置时, 横纵坐标表示为^[2-3]:

$$x = \frac{L_x}{2} \frac{V_{x_2} - V_{x_1}}{V_{x_2} + V_{x_1}}, \quad y = \frac{L_y}{2} \frac{V_{y_2} - V_{y_1}}{V_{y_2} + V_{y_1}} \quad (1)$$

PSD 对不同波长的光敏感性也不同,随着波长(300 nm 以上)的增加敏感性先增大后减小,如图 2 所示,峰值出现在 900 nm 附近,但由于 900 nm 已经进入不可见光范围,对于光学系统的准直调整不利,因此我们选取波长 630 nm、功率 1 mW 的光源以便于准直和调整。同时,我们还在 PSD 表面加装了一片 600-700 nm 带通滤波片,尽可能减弱背景光的干扰。

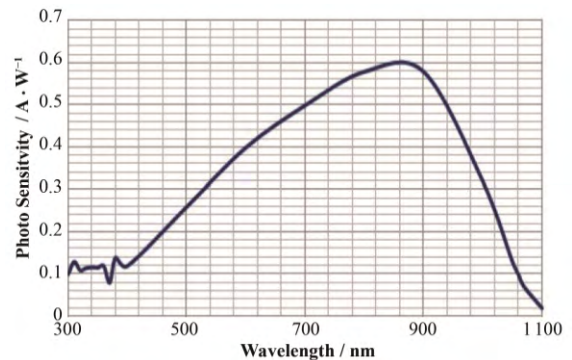


图 2 PSD 光敏性参数曲线

Fig.2 PSD photosensitive parametric curves.

1.2 Hall Sensor 位置测量原理

在实际应用于波荡器磁测时需要两片 PSD 才可以实现导轨的直线度和霍尔探头三个欧拉角度 pitch(θ)、yaw(ψ)和 roll(ϕ)的测量。在图 3 所示的 PSD 位置测量系统原理三视图中,A 和 B 分别代表两个光阑(iris),它是一种通过改变孔径大小来调节光束强弱的光学器件。光阑在沿导轨行进过程中产生的横向位移与导轨形变是一致的,只要入射光斑半径足够大,透过光阑照射到 PSD 光敏面上的光斑位移变化就能反应出导轨形变。连接导轨的霍尔探头支撑系统和光阑在波荡器真空腔内的空间位置如图 4 所示,真空腔体的直径是 300 mm,导轨安装位置在波荡器极面上处于中心悬空。

选取光阑中心和反射镜几何中心水平面作为参考平面,光阑 B 和反射镜中心距离 d' 作为霍尔探头的臂长,两个光阑 A 和 B 的中心距离固定为 d ,霍尔传感器置于两个光阑之间的中心位置。使用同一台 He-Ne 激光器,通过 1:1 的分光镜将光束分成两束,PSD 和光阑的空间位置关系如图 3 所示。这样通过测得 A 和 B 两点位置坐标就可以计算得到霍尔传感器的横向位置偏离 Δx 、 Δy 和滚转角 ϕ :

$$\Delta x = \frac{x_A + x_B}{2}, \quad \Delta y = \frac{y_A + y_B}{2} \quad (2)$$

$$\sin \varphi = \frac{y_B - y_A}{d} \quad (3)$$

$$\Delta z = l_y \sin \theta + l_x \sin \psi \quad (6)$$

Δz 将破坏霍尔传感器在纵向位置测量点的等距性, Δx 和 Δy 使得霍尔传感器的相对横向位置发生偏离, θ 、 ψ 和 φ 导致霍尔传感器与被测磁场的正交性发生变化, 根据相关插入件磁场理论和霍尔传感器磁测原理可知, 这些位置偏差和角度偏差使得磁测结果发生误差。

对于垂直方向 y 来说, 磁场测量值与理想位置的 y_0 之间的关系为:

$$B_{ym} = B_{y0}(z_n) \cosh\left(\frac{2\pi a}{\lambda_{ID}} \Delta y(z_n)\right) \quad (7)$$

式中: λ_{ID} 代表波荡器磁场周期长度; a 是由磁场周期长度、材料和 gap 决定的系数。

对于纵向位置 z 来说, 磁场测量值和理想位置的值之间的关系式为:

$$B_{zm} = B_{z0}(z_n + \Delta z) \quad (8)$$

根据这些关系校正磁测结果的误差, 否则将影响到我们对真空插入件真实磁场参数的判断, 从而进一步影响对磁场参数的垫补和优化。

1.3 PSD 位置测量系统构成

我们先选取一片 PSD 搭建 PSD 位置测量系统以近似获得霍尔传感器横向位置坐标。PSD 位置测量系统由 PSD (10 mm×10 mm)、光阑 (孔径调节范围 0.5–6.8 mm)、He-Ne 激光器、数据采集系统、运动控制系统构成。系统整体结构设计如图 5 所示, 系统局部放大如图 6 所示。光阑和霍尔探头固定放置在同一滑块, PSD 放置在另一滑块, He-Ne 激光器放置在 PSD 相对的一侧, 光斑位置穿过光阑入射到 PSD 光敏面。He-Ne 激光器、光阑和 PSD 光敏面中心位置通过调节使其保证在同一直线上, 原因是 PSD 在距离器件中心 2/3、光敏面总面积的 75% 范围内线性度较好, 从而保证测量范围较大^[4]。PSD 探测器输出的 4 路信号由 4 台 Keithley2701 数字电压表同时采集, 采样方式为外部触发模式, 触发信号来自用于测量霍尔探头纵向位置 HS20 激光器的差分输出信号, 因此该系统可实现 On-flying 测量。On-flying 测量是能基于光栅尺位置的连续测量, 中间不停顿并且测量的步长可编程, 我们采用 LabVIEW 编写了应用程序接口和人机界面。

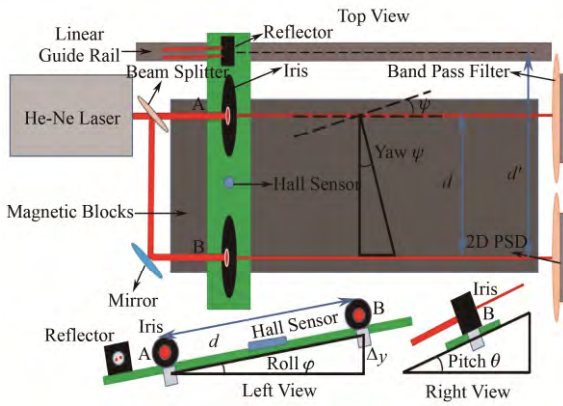


图 3 应用于波荡器磁测的 PSD 位置测量系统的原理
Fig.3 Principle of PSD system in undulator magnetic field measurement.

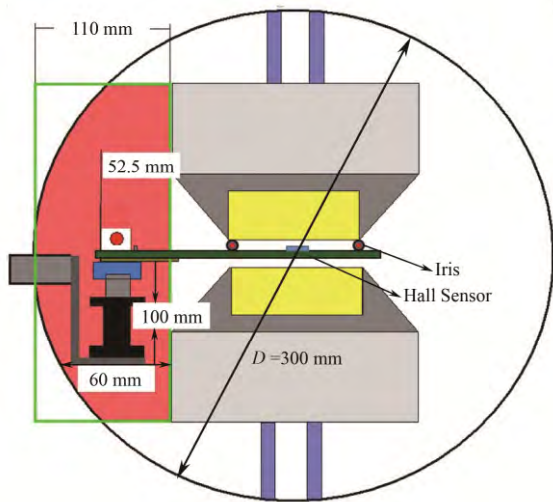


图 4 霍尔探头和光阑在波荡器的空间位置
Fig.4 Location of Hall Sensor and iris in undulator.

理论上我们可以对导轨 x 和 y 方向的直线度数据进行多项式拟合得到拟合函数 $F_x(z)$ 和 $F_y(z)$, 对于导轨上任意一点 z_n , 霍尔探头的俯仰角 θ 和偏航角 ψ 可通过对相应的函数求导计算获得:

$$\tan \theta = F'_y(z_n) \quad (4)$$

$$\tan \psi = F'_x(z_n) \quad (5)$$

假设霍尔传感器与纵向位置反射镜之间的垂直距离和水平距离是 l_y 和 l_x , 那么俯仰角 θ 和偏航角 ψ 导致霍尔传感器在纵向位置上偏离 Δz :

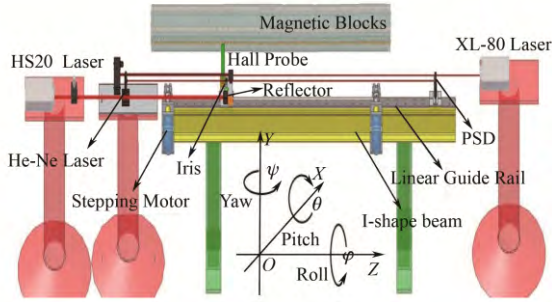


图 5 PSD 位置测量系统结构设计
Fig.5 Structural design of PSD position measuring system.

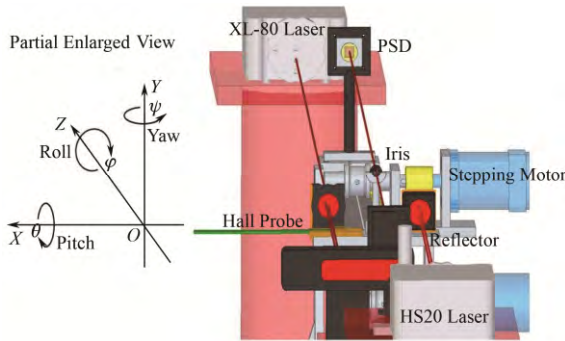


图 6 PSD 位置测量系统局部放大
Fig.6 Partial enlarged view of PSD position measuring system.

根据系统结构设计的布局,在工字梁上逐个安装系统部件。实验进行之前,先对光斑中心位置进行初始化校准,实际测量位置是根据式(1)求得的坐标减去零点偏置。PSD 位置测量系统搭建完成后如图 7 所示。



图 7 PSD 位置测量系统
Fig.7 PSD position measuring system.

2 PSD 位置测量实验结果

随着导轨两端的步进电机转动,载有光阑和霍尔探头的滑块从直线导轨的一端平稳移动到另一

端。雷尼绍(Renishaw)XL-80 激光光斑直径为 6 mm,调节光阑孔径在 2 mm 左右,这样使得该系统有 ± 2 mm 的直线度测量范围。整个过程中光阑随着导轨的形变而发生位置变化,穿过光阑孔径的光斑横向位置相应改变,PSD 光敏面测量到的光斑变化也就测量出了导轨的形变。

PSD 放大电路的 4 路电压信号被 4 台 Keithley 电压表同步采集,LabVIEW 编写的数据采集程序将测量数据输出到表格中,通过计算就可以转换为直线导轨的横向直线度数据。我们利用 MATLAB 编程作图可得 x 和 y 方向沿导轨(z 方向)的大致变化,进行分段拟合可得到变化曲线,拟合的目的主要是尽可能减弱随机噪声信号对测量结果的影响。

图 8 是 x 方向变化曲线,图 9 是 y 方向变化曲线。图 8 和图 9 的横坐标表示沿 z 方向的位移,导轨总长度是 2 500 mm。 z 方向每隔 0.5 mm 等距触发采样,坐标点沿 z 方向是均匀分布。由图 8 可见,直线导轨在 1 500 mm 处形变最大,达到 0.20 mm。拟合曲线有多处拐点,说明导轨横向位置 x 沿 z 方向有多处扭曲。由图 9 显示, y 方向的直线度最大值达到 0.15 mm。拟合曲线最大拐点有一处,说明导轨在 y 方向有一小段凸起。结合两图采样点坐标轴上的数值,可得到采样点的测量精度达到微米级, y 方向最大的临近点跳变约为 $10 \mu\text{m}$ 。实验过程中我们还发现背景光的干扰和直线导轨的微小振动对测量结果有一定影响。

这些直线度测量数据将被用于校正霍尔探头的磁场测量数据。我们同时还用 XL-80 激光干涉仪系统对导轨 x 和 y 方向的直线度做了测量,测量结果与 PSD 位置测量系统的结果基本吻合。为获得空间有限的腔体内的插入件磁场参数,在狭小或封闭空间内进行磁场测量,我们搭建了 PSD 位置测量系统。相对于 XL-80 激光干涉仪系统,该系统的光阑尺寸比光学反射镜镜头尺寸小,光阑孔径便于调整和快速安装;PSD 有分辨率高,响应速度快等优点。

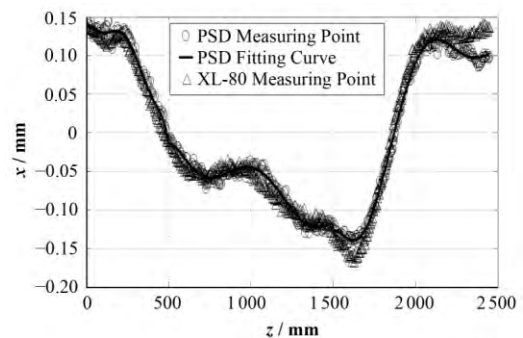


图 8 导轨横向位置 x 的变化曲线
Fig.8 Curves of lateral position x along the guide rail.

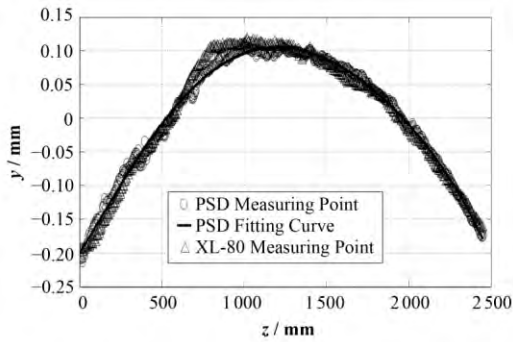


图9 导轨横向位置 y 的变化曲线
Fig.9 Curves of lateral position y along the guide rail.

3 结语

本实验成功搭建了国内首套基于真空内波荡器磁场测量的 PSD 位置测量系统，该系统实现了 On-flying 测量，能快速准确地测量霍尔探头横向位置坐标，实验结果显示，该系统定位精度在 $5\ \mu\text{m}$ 左右，基本满足磁场校正的精度要求。未来如想进一步提高测量精度，需要选择功率和稳定性更高的激光器（PSD 位置测量用），滤波效果更好的带通滤波片尽可能减弱背景光对测量结果的影响，对 PSD 的 4 路输出电压信号进行低通滤波以减弱电信号噪声。

参考文献

1 刘祖平. 同步辐射光源物理引论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 216-240

LIU Zuping. Physics instruction of synchrotron radiation facility[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 216-240

2 裴先登, 罗春, 黄浩. PSD 高精度测量系统的研究与设计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 7-9. DOI: 10.3321/j.issn:1671-4512.2004.02.003

PEI Xiandeng, LUO Chun, HUANG Hao. Research of high precision position measurement system and its design based on PSD[J]. Journal Huazhong University of Science & Technology (Nature Science Edition), 2004, 32(2): 7-9. DOI: 10.3321/j.issn:1671-4512.2004.02.003

3 Blank S, Shen Y T, Xi N, *et al.* High precision PSD guided robot localization: design, mapping, and position control[C]. Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems San Diego, CA, USA, 2007: 52-57. DOI: 10.1109/IROS.2007.4399621

4 施隆照, 杨琦. 高精度二维四边形结构 PSD 信号调理电路设计[J]. 福州大学学报(自然科学), 2008, 36(2): 215-216. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2243.2008.02.012

SHI Longzhao, YANG Qi. A design of signal processing circuit for high precision two dimensional tetra-lateral PSD[J]. Journal of Fuzhou University (Nature Science), 2008, 36(2): 215-216. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2243.2008.02.012