

基于 LabVIEW 的同步光数据采集及处理系统

戴 兴^{1,2} 叶恺容¹ 陈 杰¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 加速器束流测量对优化系统参数、确保加速器运行至关重要,上海光源工程采用同步光来测量束流的截面尺寸,具有无阻拦、实时等优点。本文介绍了同步光测量系统的整体架构,特别是其中的数据采集处理系统。将干涉法测量同步光束流截面尺寸应用于束流测量工作,可使测量精度达到 μm 量级。

关键词 同步光,干涉法测量,数据处理

中图分类号 TL506

上海同步辐射装置 (SSRF) 具有高辐射功率、高度准直性、广阔连续的光谱、偏振性、脉冲时间结构、洁净性、高亮度、高稳定性和多学科共享等优点,可开展众多的前沿科学领域基础研究和应用研究。加速器束流测量系统对优化机器参数、确保加速器正常运行十分重要。利用同步光进行束流测量具有实时、无阻拦、灵敏度高等优点。同步辐射监测系统的作用,是监测储存环和增强器的同步光特性,以得到它们的各种运行参数。采用同步光测量束团横向截面和束团纵向长度等参数,也可监测电子束流的不稳定性,是加速器测量系统中必不可少的组成部分。LabVIEW 是美国国家仪器公司 NI (National Instruments) 推出的虚拟仪器开发平台软件,用于测试测量、运动控制、数据采集与自动化

等,在加速器领域应用广泛,合肥光源束测系统就用以测量束团截面尺寸及发射度^[1]。

1 系统结构——同步光监测系统光路

由图 1,第 1 面萃取镜设在距光源点 9 m 处,将可见光经第一面反射镜从同步光中滤出并水平反射,由另四个平面反射镜将可见光引出隧道(隧道口须加辐射屏蔽措施)并引入光学实验室的光学平台。为避免光学器件加大波前形变,可见光进入干涉双缝前的非线性光学器件数量应尽量减少,故从第 1 面萃取镜到光学平台入口均无压缩可见光束的截面尺寸的聚焦系统,第 1 面萃取镜前的标定靶则测试同步光在系统传输中的波前形变,对系统标定。

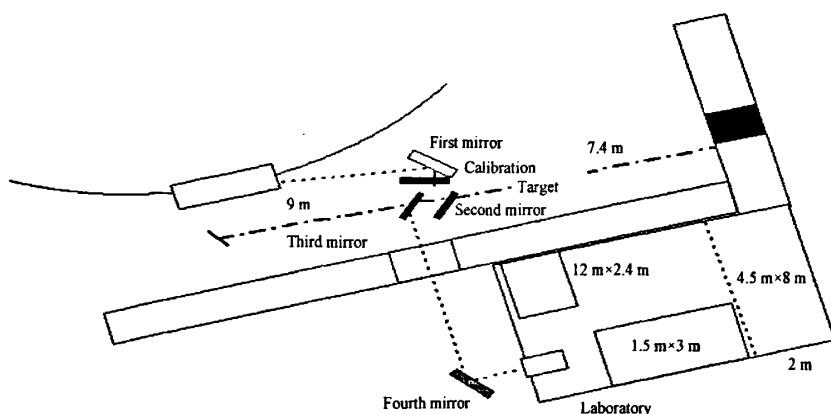


图 1 同步光监测系统光路图
Fig.1 Light path of the light measurement system at SSRF

光学平台上共有五路光学监测光路(图 2),其中四路作同时监测,一路(左起第 1 路)专用于条纹相

机测量。现用 HAMAMASHU C5680 条纹相机,空间分辨率为 2 ps。左 1 光路聚焦后送入条纹相机,

用作束团长度和束流不稳定性的监测。左 2 光路是干涉法测量的垂直束流截面尺寸。左 3 光路反射后,其 CCD 不用于截面精确测量,而用作平时监测。左 4 光路是干涉法测量的水平束流截面尺寸。左 5

光路用于安装束流位置探测器。采用反射镜而非半透半反棱镜分光,以减小衰减。用干涉法测量束流截面尺寸主要考虑左 2、左 4 光路,它们分别测量同步光在垂直和水平方向上的束团尺寸(图 3)。

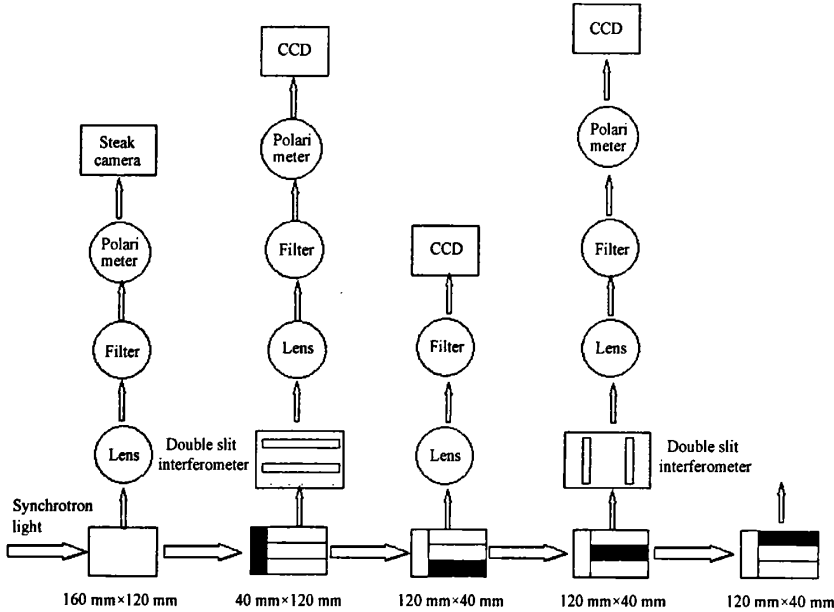


图 2 光学平台上 5 路监测光路
Fig.2 Five light paths on optic table

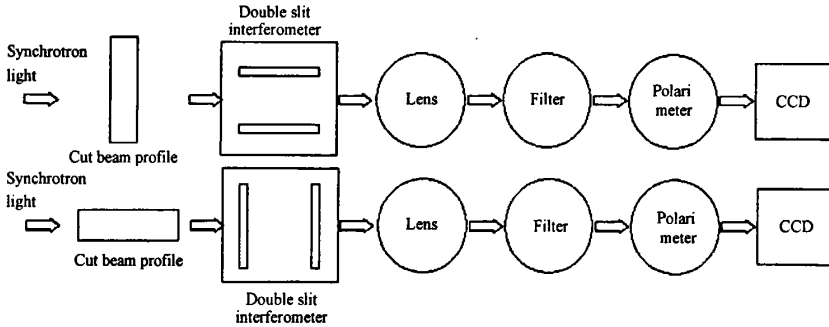


图 3 干涉法测量束流截面尺寸光路
Fig.3 Light path of interferometer measurement

光学平台入口处的光束被分割并反射转向,分配到干涉测量装置的可见光束直接照射在干涉双缝上,双缝的两束光由消球差聚焦透镜组聚焦,再通过一偏振片和 $550\text{ nm}\pm 5\%$ 的带通滤波片,最后由摄像机测量采集。聚焦透镜组的作用是在其焦点附近形成干涉条纹(同步光张角很小,双缝的两束光近似平行光);偏振片的作用是取得偏振态单一稳定的干涉光,以提高精度;滤波片的作用是消除色差,并滤出摄像机最为敏感的 550 nm 绿光进行测量。其中,垂直干涉分支由一块 $56\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ 的反射镜从光束一侧反射出 $40\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ 的光,其高度满足垂直干涉测量双缝的最大间距 $80\text{ mm}^{[2]}$,且切割

光束在垂直方向上对称,满足干涉法经过双缝的光强要一致的要求。水平干涉分支由一块 $169\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 的反射镜从光束的下部反射出 $120\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 的光。双缝间距的最大值也满足水平干涉 80 mm 的要求。

2 光路调试控制

从光源点到光学平台的光程约 17 m ,为便于系统光路的校准调试,须遥控第 2 面与第 4 面反射镜(图 1)的转动角度。还要控制第 1 面萃取镜后标定靶的上下移动,以测试同步光在系统中传输的波前形

变。NI 系列的控制卡有强大的运动控制功能，用其配合步进电机可在 PXI 硬件平台上对任何复杂运动作精确控制。

图 4 是运动控制系统原理框图。其采用图形化编程软件 Labview，NI FlexMotion-7344 运动控制卡，UMI-7764 运动控制附件，步进电机驱动器

SH-2H090MH，步进电机 34HS300D，按上述控制结构进行硬件连接并对目标物(标定靶片或反射镜)进行精确控制。软件部分的程序流程图如图 5。

首先设置目标物的运行模式，判断相对移动还是绝对移动，然后设置目标位置，开始移动。系统移动到目标位置后等待新的目标位置输入。

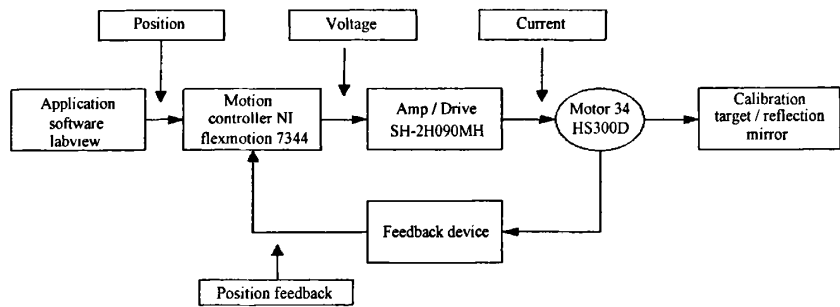


图 4 运动控制系统结构图
Fig.4 Structure diagram of motion control system

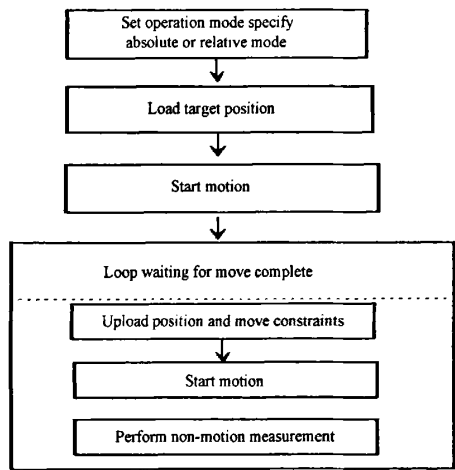


图 5 运动控制程序流程图
Fig.5 Framework of motion control software

3 束流截面尺寸测量

3.1 测量原理

由 Van Cittert-Zernike 原理^[3]，时域上不相干的非点光源，且发出诸如可见光等波长较长的光，光经过某平面的任意两点的相干度 $\gamma(\nu)$ 可由光源的发射函数 $f(x)$ 的傅氏变换给出：

$$\gamma(\nu) = \int f(x)e^{-2\pi i(\nu x)} dx$$
$$\nu = \frac{2\pi D}{\lambda R}$$

(1)

式中， λ 为光波长， $\nu = 2\pi D/\lambda R$ 为空间频率， R 为光源距双缝平面的距离， D 为双缝的中心距。

可用干涉法求得两点的相干度。同步光的光强分布近于高斯分布，其干涉条纹的光强分布为^[4]：

$$I(x_1) = I_0 [\text{sinc}(\frac{2\pi a}{\lambda R_1} x_1)]^2 [1 + \gamma \cos(\frac{2\pi D}{\lambda R_1} x_1 + \phi)]$$

(2)

其中， a 为双缝半缝宽， R_1 为 CCD 到聚焦透镜组的像方主点的距离， D 是双缝中心间距， ϕ 是干涉条纹的相位。

处理 CCD 采集到的光斑图像，即可得光束的截面尺寸。将其强度分布按式(2)进行拟合，可得特定空间频率 ν 的相干度 $\gamma(\nu)$ ，由式(1)，截面尺寸为：

$$\sigma = \frac{\lambda R}{\pi D} \sqrt{-\frac{\ln \gamma}{2}}$$

(3)

将 $\gamma(\nu)$ 、 R 、 D 、 λ 代入计算即可得到光源尺寸 σ_0 。

3.2 采集图像数据处理

同步光通过干涉仪、滤光片、偏振片后，在 CCD 靶面上形成干涉图像。干涉图像本身会有很多噪声，如背景噪声、仪器噪声等，须对采集到的干涉图像进行本底噪声扣除以及数据平滑处理^[5]。测量束流截面的尺寸，需求出干涉条纹的相干度 γ ，主要有如下两种方法：

- (1) 对干涉条纹强度分布曲线数据按(2)式进行非线性拟合得到系数 γ ；
- (2) 测得干涉条纹最大峰值 $I_{\max}$ 与相邻的谷值 $I_{\min}$ ，根据干涉条纹对比度公式计算得到 γ 。

先从干涉图像中获取干涉条纹的强度分布，根据成像情况选取图象数据框，Labview 内建 600 多个分析函数，用于从所采集的数据中提取有用信息，或进行测量数据分析和信号处理，以完成数据分析

处理过程。数据分析处理可实时进行，为系统调整提供了实时监测的手段，也为干涉仪调整提供了方便。图像的噪声消除预处理流程如图 6。

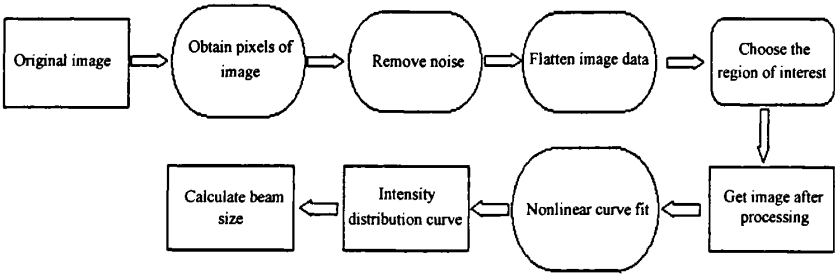


图 6 图像处理流程图
Fig.6 Framework of image processing

原始图像通过像素值提取、数据平滑、本底噪声扣除等过程得到处理后图像，再从处理后图像中提取强度分布进行曲线拟合最终得到所需的强度分布曲线。图 7 为上海同步辐射光源初调阶段(束流流强 10 mA, $R=18.8\text{ m}$, $a=1\text{ mm}$, $R_1=500\text{ mm}$, $D=20\text{ mm}$)CCD 采集到的垂直干涉方向同步光光斑图像。

拟合后得出垂直干涉方向的相干度 γ 值为 0.22197，垂直方向束团截面尺寸 σ 为 $62.6\text{ }\mu\text{m}$ 。实际值与理论值($22\text{ }\mu\text{m}$)差距较大的原因是由于上海光源处于调试阶段，束流还不稳定。

4 结论

上海同步辐射光源同步光测量系统采用 Labview 开发软件配合干涉法测量束流截面尺寸，其测量精度可达 μm 量级，为加速器的调试和运行带来了极大的方便^[6]。目前世界各国多数的加速器束流测量系统采用此类方法，以 Labview 为开发平台的虚拟仪器技术在数据采集领域有着广阔的发展前景，干涉法测量束流截面成为高分辨率加速器束流测量的手段。

参考文献

1 孙葆根, 郑普. 高能物理与核物理, 2006, 30(8): 792-796
SUN Baogen, ZHENG Pu. High Energy Phys Nucl Phys, 2006, 30(8): 792-796

2 吴茂源. 干涉法测量同步辐射光的研究: [学位论文]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2006
WU Maoyuan. Thesis for Master Degree. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006

3 Toshiyuki Mitsuhashi. Joint US-CERN-Japan-Russia School on Particle Accelerators, Montreux, Switzerland, 1998 (World Scientific, Singapore), 399-427

4 Katoh M, Mitsuhashi T. Measurement of beam size at the photon factory with the SR interferometer. Proceedings of PAC, 1999. 2307-2309

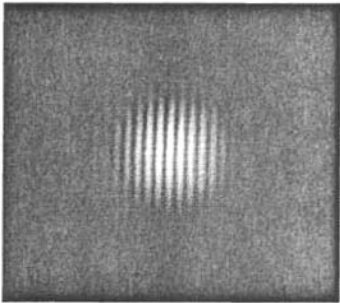


图 7 垂直干涉方向采集图像
Fig.7 Vertical interference pattern

图 8 是用 Labview 对干涉条纹图像进行本底扣除，图像数据非线性拟合后的强度分布曲线。经过

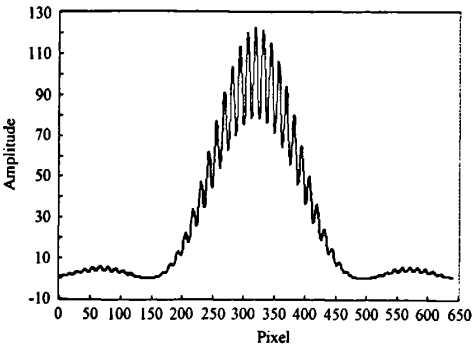


图 8 处理后图像及干涉条纹强度分布曲线
Fig.8 Image after processing and intensity curve of interference pattern

- 5 林 敏, 黄建军, 岑国荣. 深圳大学学报(理工版), 1999, 16(1): 24–27
LIN Min, HUANG Jianjun, CEN Guorong. J Shenzhen University (Sci Engineer), 1999, 16(1): 24–27
- 6 黄国庆, 虞孝麒, 张鹏飞. 核电子学与探测技术, 2007, 27(3): 439–443
HUANG Guoqing, YU Xiaoqi, ZHANG Pengfei. Nucl Electro Detect Technol, 2007, 27(3): 439–443

A LabVIEW-based data acquisition and processing system for synchrotron radiation monitoring

DAI Xing^{1,2} YE Kairong¹ CHEN Jie¹

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

2 (Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Beam size measurement of an accelerator is very important to parameter optimization of the system's operation. The Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) adopts synchrotron light measurement to perform real-time monitoring of the beam size without let or hindrance. In this paper, we introduce the light measurement system, including the light path control, data acquisition and data processing, in which LabVIEW is used to treat data from double slits interferometer. Precision of the beam size measurement can be at μm level.

Key words Synchrotron radiation, Interferometer, Data processing

CLC TL506