

文章编号 1004-924X(2017)11-2810-07

软 X 射线光发射电子显微镜光束线聚焦用 KB 镜系统

陈家华^{1,3}, 龚学鹏^{2*}, 薛松¹, 卢启鹏², 彭忠琦², 宋源², 王依²

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:研制了光发射电子显微镜(PEEM)高精度微聚焦系统,以实现上海光源软 X 射线 PEEM 光束线的高质量聚焦。根据上海光源 PEEM 光束线的概况,给出微聚焦系统光学元件的基本参数。基于 Kirkpatrick-Baez(KB 镜)两镜方案,设计了 PEEM 线微聚焦系统。介绍了 KB 镜姿态调整机构的设计方案,即利用三垂直线性驱动装置和两水平线性驱动装置相结合来实现五维调节,分析了姿态调节机构的原理与工作过程,给出了微聚焦系统的整体设计方案。测试了 KB 镜系统的机械性能,给出水平调节机构以及第一面镜子 Pitch 运动的测试结果,结果显示:水平调节机构分辨率为 $0.6\ \mu\text{m}$, 重复精度为 $0.85\ \mu\text{m}$, Pitch 角度分辨率为 $0.4''$, 重复精度为 $0.5''$, 优于指标要求。其它参数的测试结果亦均优于指标要求。实验表明,微聚焦系统机械指标的实现保证了 PEEM 线光斑的高质量聚焦。

关键词:同步辐射;光发射电子显微镜(PEEM);X 射线显微镜;KB 镜;结构设计

中图分类号:TH742.9;TN305.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172511.2810

KB mirror system of X-ray photo-emission electron microscope beamline

CHEN Jia-hua^{1,3}, GONG Xue-peng^{2*}, XUE Song¹,
LU Qi-peng², PENG Zhong-qi², SONG Yuan², WANG Yi²

(1. *Shanghai Institute of Applied Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: gong.xuepeng120@foxmail.com*

Abstract: A high accuracy micro-focusing system was designed to improve the light spot focusing quality of the X-ray beam-line for Photo-emission Electron Microscope (PEEM) in Shanghai Synchrotron Radiation Facility(SSRF). The layout of PEEM beam-line of the SSRF was introduced and basic parameters of optics of the micro-focusing system were presented. Two Kirkpatrick-Baez mirrors (KB mirror) were adopted to finish the design of micro-focusing system. The design scheme of a key component-posture adjusting mechanism in the system was introduced. Namely, a three

收稿日期:2017-03-27;修订日期:2017-05-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61404139);应用光学国家重点实验室自主基金资助项目(No. Y5743FQ158);吉林省重点科技成果转化项目(No. 20150307039GX)

vertical linear driving equipment and a two horizontal linear driving device were combined to implement five-dimensional adjustment of the system. The working principle and process of the posture adjusting mechanism were introduced, and the overall design scheme of micro-focusing system were analyzed deeply. The mechanical performance of KB mirror system was tested, and the testing results of the horizontal adjusting mechanism and the pitch motion of first mirror were given. That the resolution and repeat accuracy of horizontal adjusting mechanism are $0.6 \mu\text{m}$ and $0.85 \mu\text{m}$ respectively, and those of pitch motion are $0.4''$ and $0.5''$ respectively, which are better than that of the technical requirements. The other parameters were tested as well, and the results also satisfy the technical requirements. The realization of technical targets of KB mirror system guarantees the high quality focusing of PEEM beam-line.

Key words: synchrotron radiation; Photo-emission Electron Microscope(PEEM); X-ray microscopy; KB mirror; structure design

1 引言

光发射电子显微镜(Photo-Emission Electron Microscopy, PEEM)是一种功能极为强大的表面成像技术,通过观察样品表面发射的电子,可以获得极高分辨率的表面形貌、化学成分和磁性信息^[1]。PEEM 具有以下主要特点:平行成像,不需要对样品表面进行扫描,成像速度快;配合多种激发源使用,如氩灯、氙灯、X 射线源、电子束、离子束、甚至同步辐射光源等;通过选配多种能量分析器,如成像能量分析器(IEF)、微区能量分析器等,PEEM 不仅可以获得图像,还可以进行能谱分析^[1]。同步辐射光源具有高亮度、准直性、相干性、偏振性和宽能量波段等特性,不仅是进行 PEEM 实验的优先选择,还是获得良好实验结果的有效保证,因此,世界各大同步辐射装置都在建设高性能的 PEEM 光束线站。

上海光源梦之线的建设目标是建设一条宽能段、超高能量分辨率的软 X 射线光束线,它有 ARPES 和 PEEM 两个实验站。PEEM 实验站的能量为 $20 \sim 2000 \text{ eV}$,聚焦光斑大小为 $5.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ 。为了能够实现宽能段、高分辨和较小的聚焦光斑,对梦之线各个部件的性能提出了近乎苛刻的要求。其中的一个关键部件是微聚焦系统,用于将单色光聚焦于样品处。为了保证微聚焦系统的性能,并兼顾经济条件,采用 Kirkpatrick-Baez (KB)镜聚焦系统,可获得几微米的聚焦光斑。鉴于 KB 镜系统的重要性,近年来国内外各大同步辐射装置及相关研究机构对 KB 镜系统进行了大量研究。Patrick P. Naulleau 等人研究了一种 KB 光学元件原位扫描狭缝调试

系统^[2]。S. Matsuyama 等人对先进 KB 光学元件的四镜调试系统进行模拟研究^[3]。Gene E. Ice 等人研究了热中子 KB 微聚焦光学元件以及高性能的 KB 超级镜^[4-5]。C. Rau 等人对锥形光束低于 100 nm 聚焦尺寸的 KB 镜进行了研究^[6]。在国内,王占山等人对 X 射线 KB 显微成像系统的光学设计、成像质量、分辨率模型以及反射镜研制等内容进行探讨和研究^[7-8]。

由于 KB 镜系统是梦之线的关键部件,KB 镜系统性能的优劣直接影响到光束线的整体性能。上海光源能够提供高光子通量、高光谱分辨和高空间分辨,而单色光聚焦光斑尺寸非常小,KB 镜的姿态对于聚焦光斑的大小至关重要,因此,对 KB 镜系统的设计、加工、安装和调试都提出了非常高的要求。本文在介绍梦之线基本概况的基础上,研究了 PEEM 微聚焦系统的设计方案,并对微聚焦系统的性能进行了测试。

2 PEEM 光束线概况

PEEM 线是上海光源梦之线的一个分支,其光学布局如图 1 所示。考虑到锯齿墙与光源的距离约为 18 m ,因此四刀狭缝的位置选为距光源 20 m 处,用来定义整条光束线的接收角。对于不同的光栅,根据对通量和能量分辨率的要求来选择四刀狭缝的开度。四刀狭缝吸收了大部分的热负载,因此需要采用水冷。 22 m 处是一块垂直放置的平面镜 M1,主要用于吸收热负载和抑制高次谐波。减小掠入射角可以提高样品处的光子通量,但是会增大第二块平面镜上的热负载,同时会降低谐波抑制能力。综合考虑,掠入射角取为 1.2° 。由于 M1 的热负载很大,因此需要内部水

冷。27 m 处是 SX700 型平面光栅单色仪, 采用变线距的平面光栅, 共有 4 块光栅, 可以沿横向进行切换, 分别用于不同的能量范围和分辨率要求。1 块平面镜表面分为 2 个镀层区域, 分别是 Ni 和 Au 镀层。29.59 m 处是一块垂直放置的平面偏转镜, 表面镀金, 用于将光偏转到 PEEM 分支线, 偏转角是 2.5° 。45 m 处分别是 ARPES 线和 PEEM 线的单色光狭缝。由于在狭缝之前光束在水平方向没有聚焦, 因此狭缝的水平开口很大, 取固定值 15 mm, 垂直开口可调。由于狭缝水平刀口很长, 为防止热负载引起刀口形变, 采用水冷。在两个单色光狭缝之后, 分别采用一对 KB 镜将单色光聚焦到各自的样品处, 由于 PEEM 实验站比 ARPES 实验站的光斑要求更小, 因此将 PEEM 实验站放置在 ARPES 实验站之后, 增大 PEEM 线 KB 镜的物距, 从而减小样品处的光斑。

PEEM 线 KB 镜系统的第一面镜子水平放置, 第二面镜子垂直放置, 如图 2 所示, 其基本参数如表 1 所示。KB 镜成像的基本原理为: 光线由光源 A 发出, 经过两块镜子 M 和 N 后聚焦于理想像面 B, 两块反射镜沿光轴放置, 如图 2 所示, 分别满足成像公式^[8]:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{k+q} = \frac{2}{R_1 \sin \theta_1}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{p+k} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R_2 \sin \theta_2}. \quad (2)$$

其中: θ_1 和 θ_2 分别为两块反射镜的掠入射角, R_1 和 R_2 分别为两块反射镜的曲率半径, p 为光源到反射镜中心的物距, q 为反射镜中心到理想像面的像距。

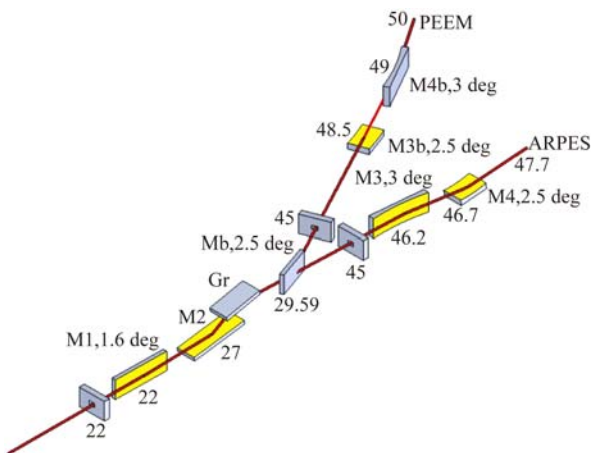


图 1 梦之线布局

Fig. 1 Layout of dreamline

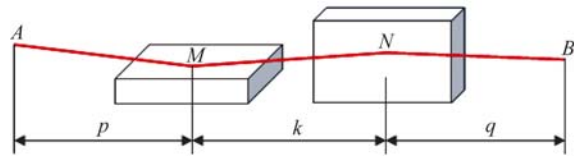


图 2 KB 镜系统原理

Fig. 2 Principle of KB mirror system

KB 镜系统中采用了椭圆柱面镜。两块椭圆柱面镜都是直接加工获得的, 其面形误差小于 $5 \mu\text{rad}$, 表面粗糙度小于 0.3 nm, 加工精度已经达到了很高的水平。KB 镜的加工精度尽管很高, 但还不能保证 KB 镜系统具有优良的性能, 只有结合合理的机械结构以及精密的姿态调节机构, 才能使 KB 镜系统达到预期的效果, 获得良好的聚焦能力, 为 PEEM 实验的顺利开展提供高质量的光斑。

表 1 KB 镜光学元件的主要参数

Tab. 1 Parameters of KB mirrors

名称	M3b	M4b
镜面中心到光源的距离/m	48.5	49
镜面中心距地面的高度/mm	1 320	1 341.81
能量/eV	100~2 000	100~2 000
材料	Si	Si
入射角/ $^\circ$	1.25	1.5
长轴/m	(2.5±0.05)	(25±0.5)
短轴/m	(0.05±0.001)	(0.183±0.003 66)
光学尺寸(L×W)/mm	200×20	400×10
镜子尺寸/mm	250×40×50	450×30×40
镜子尺寸误差/mm	±0.1	±0.1
镀层	Au	Au
子午/弧矢面型误差/ μrad	0.8/5	2/5
粗糙度(RMS)/nm	0.3	0.3
冷却方式	侧冷+铜辫	侧冷+铜辫
真空度/Pa	$\leq 666.61 \times 10^{-10}$	$\leq 666.61 \times 10^{-10}$

3 KB 镜系统设计

对于 KB 镜系统而言, 除两块高精度椭圆柱面反射镜外, 两块反射镜的姿态调节机构是另一

关键点。在梦之线 KB 镜系统中,每一块反射镜都需要独立进行五维调节,而且两块反射镜的间距非常近,这对 KB 镜系统的结构设计提出了很高的要求。在本文中,KB 镜的姿态调节机构采用真空内调节与真空外馈入调节相结合的方式来实现。梦之线 KB 镜的关键指标是姿态定位精度和姿态恢复精度,前者主要与镜子的位移调节分辨率和角度调节分辨率有关,后者主要与位移调节的重复精度和角度调节的重复精度有关。根据梦之线 PEEM 实验站的整体性能要求,两块 KB 镜的位移调节分辨率应小于 $1\ \mu\text{m}$,重复精度应小于 $5\ \mu\text{m}$ 。第一面镜子的角度调节分辨率为:滚角方向(Roll)和摆角方向(Yaw)小于 $1''$,投角方向(Pitch)小于 $0.5''$;重复精度小于 $5''$ 。第二面镜子的角度调节分辨率为:滚角方向(Roll)和投角方向(Pitch)小于 $1''$,摆角方向(Yaw)小于 $0.5''$;重复精度小于 $5''$ 。

3.1 姿态调整机构

KB 镜是梦之线的关键部件,其制造和安装过程中产生误差会对光束线的性能产生影响。因此,必须通过性能良好的姿态调整机构来保证 KB 镜空间位置的精确性。针对 KB 镜的特点,采用球面-圆锥面,球面-凹槽面和球面-平面的三点支撑结构来实现 KB 镜的五维调节。将 KB 镜安装在 KB 镜支架上,KB 镜支架安装在两层 3 点支撑结构上,三点的位具体位置如图 3 所示。一层三点支撑结构与三个垂直驱动器(Z 方向)联接在一起,另一层三点支撑结构与两个水平驱动器(X 方向)联接在一起。三个垂直驱动器可以实现 KB 镜 Z 方向,R-X 方向和 R-Y 方向的调节,两个水平驱动器可以实现 KB 镜 X 方向和 R-Z 方向的调节。姿态调整机构的设计方案如图 4 所示。

为了便于装配,以及实时调整 KB 的姿态,三个垂直驱动器放置在真空腔外面,两个水平驱动器放置在真空腔内。无论是垂直驱动器,还是水平驱动器,都是采用步进电机驱动滚柱丝杠转动来实现精密位移的输出。垂直驱动器的行程为 $-25\sim 25\ \text{mm}$,水平驱动器的行程为 $-20\sim 20\ \text{mm}$,两种驱动器都配备了雷尼绍光栅尺对其进行闭环控制。

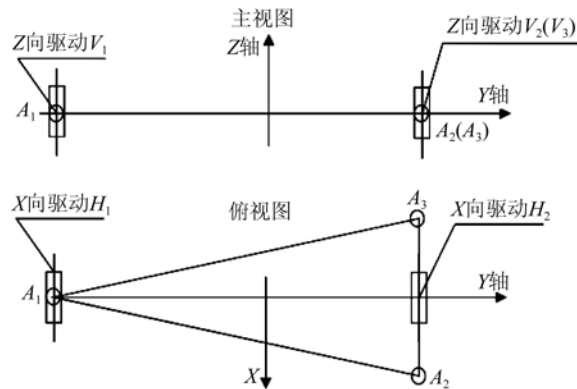


图 3 点槽面支撑系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of point-groove-plane support system

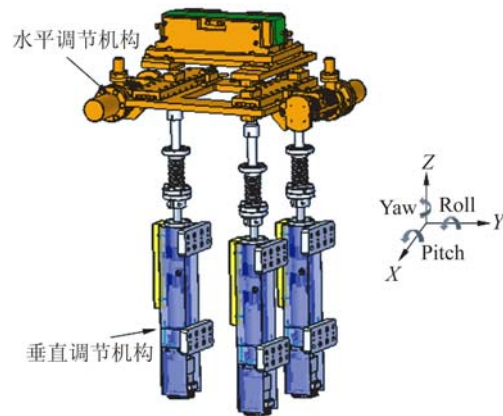


图 4 姿态调整机构设计方案

Fig. 4 Design scheme of posture adjusting mechanism

3.2 KB 镜聚焦系统的整体结构

图 5 是 PEEM KB 镜系统的结构设计图,其核心部分是两面镜子的支撑结构和姿态调节机构。对于姿态调节机构而言,两水平线性驱动装置位于超高真空内,三个垂直线性驱动装置位于超高真空外,所以,两水平线性驱动装置要具备真空兼容性,三垂直线性驱动装置要具备真空馈入性。为了保证 X 射线的光通量和其它性能,PEEM KB 镜系统要工作在 $133.322 \times 10^{-10}\ \text{Pa}$ 的真空环境中,所以,真空腔内的零件全部按照超高真空规范进行设计和加工,编码器采用超高真空高精度光栅尺。为了保证 KB 镜的面形精度,两面 KB 镜都配备了冷却装置,以保证在最短时间内达到热平衡。

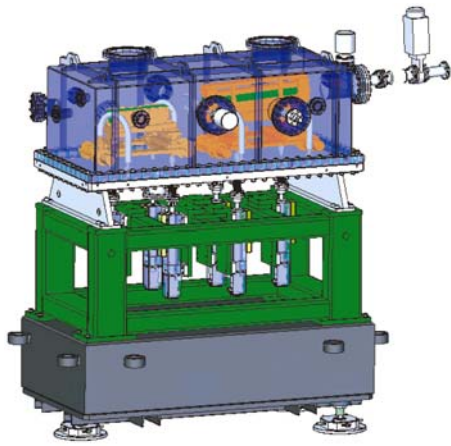


图 5 PEEM KB 镜系统的整体设计方案

Fig. 5 Design scheme of PEEM KB mirror system

4 KB 镜系统的性能测试

图 6 为梦之线 PEEM KB 镜系统装配后的照片。为了满足梦之线的整体性能要求,需要对 KB 镜系统的主要技术参数进行测试,主要包括 KB 镜的位移分辨率和重复精度,以及角度分辨率和重复精度。在实际工作中,对 KB 镜所有线性驱动装置的线性分辨率和重复精度,以及 KB 镜姿态调节机构的角度分辨率和重复精度都进行了测试。这里给出第一面镜子的测试结果。线性分辨率和重复精度采用 Agilent5529A 型号激光干涉仪进行测试,角度分辨率和重复精度采用 ELCOMAT 3000 型号自准直仪进行测试^[9-10]。

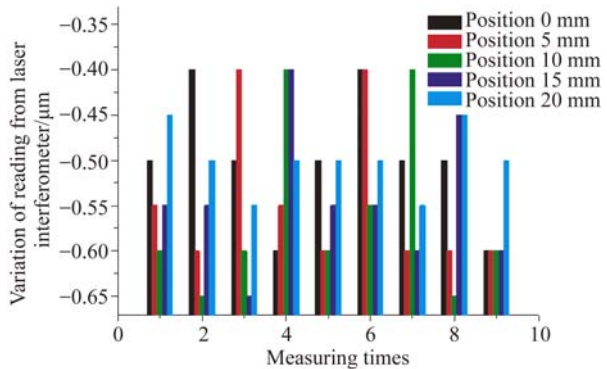


图 6 PEEM KB 镜系统照片

Fig. 6 Photo of PEEM KB mirror system

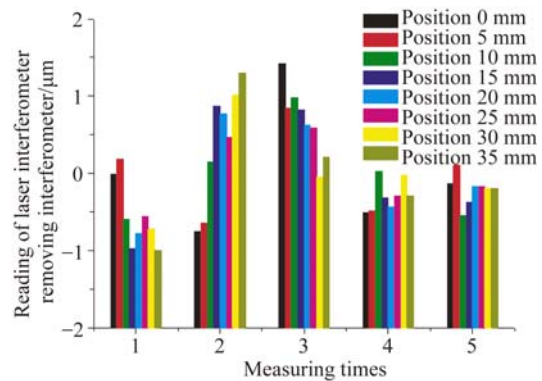
图 7 是水平调节机构的测试结果。为了得到其分辨率,对线性驱动装置行程范围内的 5 个位置进行测试,通过控制程序设定步长为 0.5 μm,每走一步,记录激光干涉仪的读数差值,共走十步。在 0,5,10 和 20 mm 的位置,最大平均差值

为 0.6 μm,因此,可以认为垂直线性驱动装置在步长 0.5 μm 时的分辨率为 0.6 μm。除分辨率外,重复精度是水平调节机构的另一项重要指标,它保证了在调节过程中线性驱动装置的位置恢复能力。对行程范围内的 8 个位置进行测试,由于测试系统存在系统线性误差,所以,测试结果为去除系统线性误差之后的数据。分别取这 8 组数据的标准偏差,其中最大值为 0.85 μm,将其作为重复精度。



(a)分辨率

(a)Resolution

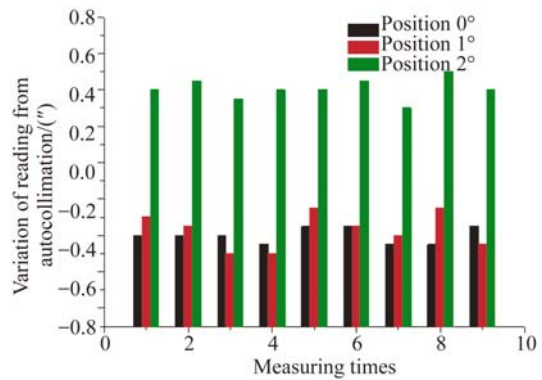


(b)重复精度

(b)Repeat accuracy

图 7 水平调节机构的测试结果

Fig. 7 Testing results of horizontal adjusting mechanism



(a)分辨率

(a)Resolution

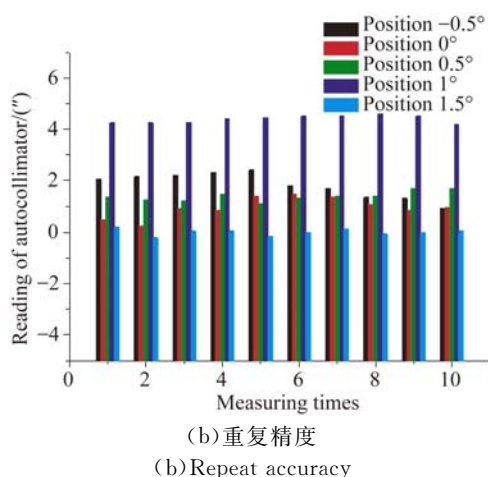


图 8 第一面镜子的投角测试结果

Fig. 8 Testing results of pitch motion of first mirror

图 8(a)是第一面镜子投角的测试结果。角度分辨率测量选择三个不同位置,设定步长为 0.0001° ,每走一步,记录自准直仪读数的差值。 0° 时,平均值为 $0.4''$; 1° 时,平均值为 $0.37''$; 2° 时,平均值为 $0.4''$,所以,投角的分辨率在步长 0.0001° 时为 $0.4''$ 。采用自准直仪分别对 $-0.5^\circ, 0^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ$ 和 1.5° 位置进行重复精度测试,图 8(b)是自准

参考文献:

- [1] 光发射电子显微镜[EB/OL]. <http://www.instrument.com.cn/netshow/sh100250/c29168.htm>, 2012. Photoemission electron microscope [EB/OL]. <http://www.instrument.com.cn/netshow/sh100250/c29168.htm>, 2012. (in Chinese)
- [2] NAULLEAUP P, BATSON P, DENHAM P, et al.. An in situ scanning-slit alignment system for Kirkpatrick-Baez optics [J]. *Optics Communications*, 2002, 212(4-6): 225-233.
- [3] MATSUYAMAS, FUJII M, YAMAUCHI K. Simulation study of four-mirror alignment of advanced Kirkpatrick-Baez optics [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 616(2-3): 241-245.
- [4] ICEG E, HUBBARD C R, LARSON B C, et al.. Kirkpatrick-Baez microfocusing optics for thermal neutrons [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, 539(1-2): 312-320.

直仪读数去除系统线性因素之后的数据,分别取这五组数据的标准偏差,其中最大值为 $0.50''$,将其作为重复精度。

由测试结果可以看出,线性驱动装置和投角的分辨率和重复精度满足要求。其他参数的测试过程与此类似,测试结果均优于技术指标要求。

5 结 论

本文对上海光源 X 射线 PEEM 光束线微聚焦系统进行研制,给出了其关键部件 KB 镜的姿态调整机构方案,即三垂直线性驱动装置和两水平线性驱动装置相结合实现五维调节的方案。分析了姿态调节机构的原理与工作过程,给出了微聚焦系统的整体设计方案。测试了微聚焦系统的机械性能,结果表明:水平调节机构的分辨率为 $0.6 \mu\text{m}$,重复精度为 $0.85 \mu\text{m}$,第一面镜子的投角分辨率为 $0.4''$,重复精度为 $0.5''$,优于指标要求。微聚焦系统机械指标的完成为 PEEM 线光斑的高质量聚焦提供了保障。

- [5] ICE GE, HUBBARD C R, LARSON B C, et al.. High-performance Kirkpatrick-Baez supermirrors for neutron milli- and micro-beams [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 437(1): 120-125.
- [6] RAU C, LIU W. Cone-beam imaging with sub-100 nm focal-sized Kirkpatrick-Baez mirrors [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007, 582(1): 132-134.
- [7] 穆宝忠,伊圣振,黄圣铃,等. ICF 用 Kirkpatrick-Baez 型显微镜光学设计[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(3): 409-412. MU B ZH, YI SH ZH, HUANG SH L, et al.. Optical design of Kirkpatrick-Baez microscope for ICF [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(3): 409-412. (in Chinese)
- [8] 潘宁宁,王占山,顾春时,等. X 射线用 Kirkpatrick-Baez 显微镜成像质量的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(1): 61-65. PAN N N, WANG ZH SH, GU CH SH, et al.. Image quality with Kirkpatrick-Baez microscope in hard X-ray [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(1): 61-65. (in Chinese)

- [9] 于海, 万秋华, 卢新然, 等. 光电编码器误差检测转台的动态精度标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2699-2704.
YU H, WAN Q H, LU X R, *et al.*. Calibration of dynamic precision for measurement platform of photoelectric encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2699-2704. (in Chinese)
- [10] 刘书桂, 宋宣晓, 韩振华. 球形靶标中心成像点的高精度定位[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1861-1870.
LIU SH G, SONG X X, HAN ZH H. High-precision positioning of projected point of spherical target center [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 1861-1870. (in Chinese)

作者简介:

陈家华(1982—),男,浙江嘉兴人,博士研究生,高级工程师,2005年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事同步辐射技术的研究。E-mail: chenjiahua@sinap.ac.cn

通讯作者:

龚学鹏(1982—),男,内蒙古赤峰人,博士,副研究员,2010年于吉林大学获得博士学位,主要从事精密机械设计与工程 CAE 分析的研究。E-mail: gongxuepeng120@foxmail.com