

文章编号 1004-924X(2011)02-0367-07

神光原型诊断设备:门控针孔分幅相机的研制

白晓红^{1,2},白永林¹,刘百玉¹,秦君军¹,赵军平¹,王 博^{1,2},杨文正¹,缙永胜¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:为满足 X 射线针孔分幅相机在神光 III 原型中的安装与正常测试,在原有分幅相机成像理论的基础上,研制了新型结构门控针孔分幅相机。设计了锥筒针孔成像系统,用于排除系统内杂散光干扰,从而在原型靶室内顺利实现小孔成像。设计了新型分幅像管结构,利用长微带结构充分改善了耦合匹配参数,利用新型荧光屏结构和装夹方式以及两块光纤面板耦合结构,实现在有限空间内成像仍为 16 幅。使用了屏压脉冲加电方式,使像管使用安全性能大大提高。设计了圆柱桶式真空密封结构,将相应的高压脉冲发生器和各种相机状态监测设备全部装入,并可通过 PC104 进行远程控制。

关键词:惯性约束聚变;超快诊断;微通道板;荧光屏

中图分类号: TB853. 17 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20111902. 0367

SG diagnostic equipment: Gating pinhole framing camera

BAI Xiao-hong^{1,2}, BAI Yong-lin¹, LIU Bai-yu¹, QIN Jun-jun¹,
ZHAO Jun-ping¹, WANG Bo^{1,2}, YANG Wen-zheng¹, GOU Yong-sheng¹

(1. *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an 710119, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to install an X-ray Pinhole Framing Camera (X-PFC) conveniently and run smoothly in the SG3 prototype system (SG3-PS) of Inertial Confinement Fusion (ICF), a novel type X-PFC was developed on the basis of original models and a conical barrel pinhole imaging system was desined to eliminate the stray light and to obtain the pinhole imaging in the SG3-PS. The matching parameters were evidently improved by designing a long micro-strip in new tube, which could keep the number of imagings to be still 16 frames in the limited space by using new type fluorescent screen, steady clamp method and the way of sealing up with two optics fiber plates. The save quality of new tube was improved greatly by gating pulse voltage on the screen. Furthermore, the high-voltage pulse generators and all of monitoring facilities were assembled in the cylinder barrel type vacuum seal configuration by PC104. Experiments show that all kinds of technical indexes have been upgraded when some parts of the new camera structure are redesigned and experimental results are received better.

Key words: Inertial Confinement Fusion (ICF); fast diagnosis; Micro-channel Plate (MCP); screen

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(No. 60777027)

1 引言

“惯性约束聚变”是在极小的空间、极短的时间、高温、高密度等极端条件下产生的物理过程。其基本原理是把强大的激光束聚焦到热核材料制成的微型靶丸上,瞬间产生的极高温和极大压力将靶丸内部的聚变燃料压缩聚集至高密度,被压缩的稠密等离子体在扩散之前,即小于惯性约束时间内完成全部核反应^[1]。运用聚变原理,我国已经将神光 I 发展至神光 III,神光 III 原型装置“十五”建设目标已圆满完成,达到“8 束出光,脉冲——万焦耳”的水平,标志着中国成为继美国、法国之后世界上第三个掌握新一代高功率激光驱动器总体技术的国家。

神光的发展促使配备的图像诊断系统升级换代,只有诊断技术的提升和设备更新才能更精确地提供内爆、停滞和崩毁各阶段辐射场的空间分布随时间变化的信息,得到压缩比、压缩对称性等重要数据,以分析等离子体的不稳定性 and 内爆阶段末期的动能等信息,为优化负载提供直观的参考信息,并为辐射磁流体力学理论研究提供比对数据等^[2]。

随着 ICF 实验研究的深入,急需建立高时空分辨的诊断设备来诊断等离子体运动的特性和靶球的辐照环境。因为时间和空间均是一维分辨的,X 光针孔条纹相机不能满足诊断要求,所以本课题组研制了第一代针孔分幅相机^[3-5]。它主要由微带型(Micro-channel Plate, MCP)选通 X 射线皮秒分幅管和多针孔阵列构成,兼有针孔相机的二维空间分辨特性和皮秒级时间分辨特性,在黑洞物理等离子体运动和状态特性研究和内爆动力学特性研究^[6-7]中都起到了重要的诊断作用。

在神光 III 和神光原型中,配套的诊断设备必须满足其特殊的环境要求:靶室巨大,远大于相机的诊断距离;实验期间,靶室内部全程高真空运作,严格限制诊断设备的热量辐射;影响超快诊断设备的电磁干扰也变得更加严重等等。所以,为神光 III 主机配套建设的 X 射线门控针孔分幅相机在结构和性能上和第一代分幅相机有很大的不同,在结构上将采用工程化、模块化的设计。

本文介绍了用于神光原型上的门控针孔分幅相机的主要结构及其能达到的技术指标。

2 门控针孔相机结构及工作原理

2.1 门控针孔相机结构

图 1 是为神光 III 原型配备的 X 射线门控针孔分幅相机。从结构上,相机主要分为 4 部分:气室部分、电控系统部分、分幅管部分和针孔成像系统。

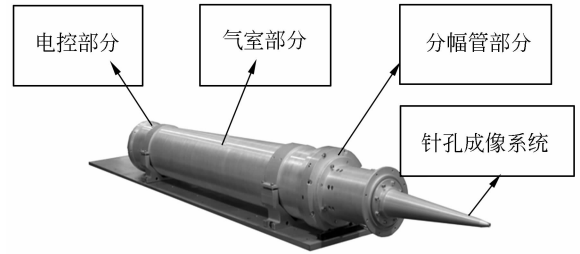


图 1 门控针孔分幅相机结构

Fig. 1 Gating framing camera system

2.1.1 相机整体气室部分

气室是连接分幅管,针孔成像系统以及内部安装电控部分的装置。气室内部为大气环境,整体处于高真空靶室,具有真空密封结构。分幅相机在神光主机靶室内使用时,复杂的电控部分需要良好的散热环境;如果整个系统均处于真空环境下,无法正常散热,会影响电控部分的功能,因此,将电控部分装入真空密封的气室中,使其在大气环境中工作。

分别设计了圆柱筒体结构和方箱结构,经比较,圆柱结构因具有密封长度小,易于实现真空密封,减小漏率等优点而被采用。

2.1.2 电控系统部分

电控系统非常复杂,核心单元为选通脉冲单元、屏压控制单元和计算机控制单元。初级同步模块、直流高压控制模块等亦为其重要组成部分。

分幅管选通所必需的快门脉冲由选通脉冲单元产生,决定了选通脉冲的幅度、脉冲宽度及时间稳定性等各项技术指标,是相机系统时间分辨率的两个关键技术之一。为方便相机各个微带选通脉冲的同步调节,有利于计算机远程控制和调节同步时间,实现电控系统通过次级同步模块调节各微带的同步时间,同步模块需要有很小的触发晃动值,以保证四路选通脉冲之间时间的同步。

该分幅相机次级同步模块的触发晃动时间优于 5 ps。

由于该相机系统工作环境的特殊性,需在荧光屏上加载脉冲电压,以便在大幅提高分幅管的使用安全系数的同时,提高相机系统的空间分辨率。对该电控系统中脉冲屏压模块的要求是:具有很好的幅度稳定性和较长的平顶维持时间^[8]。

内嵌计算机控制系统由主控 PC104 计算机、AD 接口卡、气室环境监控传感器、循环水监控传感器与水流控制系统、CCD 图像采集卡等组成,具有完成内外信息交换以及气包环境监控的关键功能。通过以太网线和外界相连,操作人员只需操作对应的控制软件执行各项命令即可。但这对相机安全提出更高要求,气室内部环境监测和传感组件必须在发生故障时,采取自动保护措施以保证相机的安全使用。

2.1.3 分幅管部分

分幅管部分是相机的核心器件之一,主要由阴极,电子倍增器件微通道板(MCP),荧光屏 3 部分组成。

该设计的特殊之处在于有限的空间中,成像画幅数不减少,且每幅像的大小不变。设计方形结构的像管结构,比之前的圆形结构节省空间,并且安装方便。由于多结构的光纤面板加工和在其上制作荧光屏^[9-10]都是第一次尝试,所用的 MCP 的结构是方形的,而购买的 MCP 只有圆形的,因此需要将圆形变为方形结构。厂家没有专门的工艺线,很难加工,为此课题组重新设计切割工具,摸索清洗工艺,试制洗液的配比,以最佳的工艺流程降低增益的影响。为降低传输损耗,设计了弯曲形长微带线结构,如图 2 的“L”形机械结构,将长微带固定在其中,改善了耦合匹配参数,减少了脉冲在微带上的损耗。图 3 是分幅管静态加电和传输特性测试结果^[11]。

MCP 微通道直径为 12 μm ,MCP 厚度是 0.5 mm,MCP 板至荧光屏距离为 0.5 mm,P20 荧光粉使用离心法制作在纤维直径为 6 μm 的光纤面板上。MCP 分幅管分辨率优于 15 lp/mm。皮秒高压脉冲发生器发射的选通脉冲宽度为 500 ps,对应的曝光时间为 200 ps。镀有反射式金阴极的

微带对 0.1~10 keV 的 X 射线具有较高的量子效率^[12]。

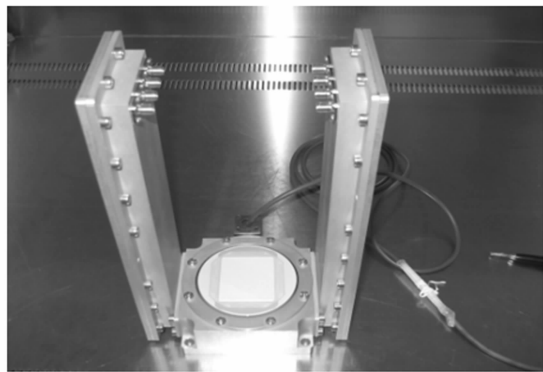


图 2 分幅管结构

Fig. 2 Structure of framing tube



图 3 分幅管静态测试

Fig. 3 Static state of framing tube

2.1.4 针孔成像系统部分

针孔成像原理是简单的几何光学,是一种经典的成像技术。如图 4 所示,构成源目标的点 A 和 B 分别经直径为 d 的针孔在记录介质上投射出一些斑点,这些斑点组合起来即构成源目标(倒立放大)的像。成像的放大率 $M=b/a$,其中, a 为靶与针孔间的距离,即物距; b 为针孔与成像面间的距离,即像距。

根据神光实验需要,共设计了 5 套不同放大倍数的针孔成像系统。主体结构由圆筒结构和锥筒结构组成。圆筒结构上设计有透气孔,并设计了旋转遮光结构,以便使分幅管前端的真空度能达到比较高的状态。锥筒前设计了猪嘴头结构,既方便安装针孔板,也有利于安装适当厚度的滤片,阻挡飞散的靶碎片,对针孔板和分幅管进行防护。

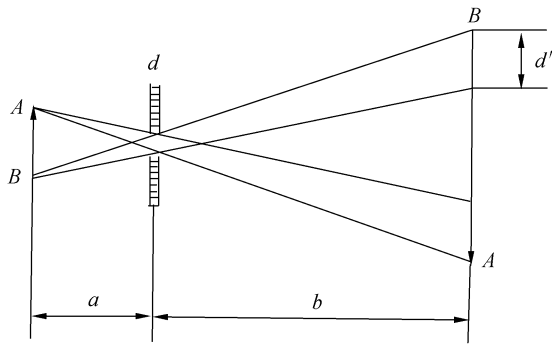


图 4 针孔成像原理

Fig. 4 Principle of pinhole imaging

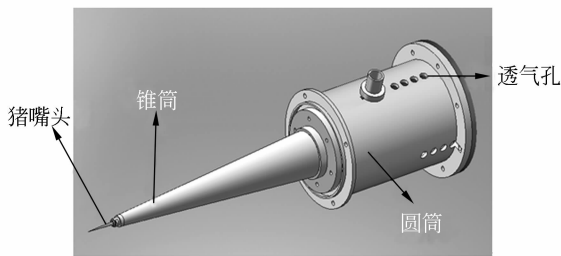


图 5 针孔成像系统

Fig. 5 System of pinhole imaging

2.2 门控针孔相机的工作原理

X 射线辐射源通过 16 个针孔,成像到 Au 微带的不同位置上。MCP 面板上镀制的 Au 微带有两个作用,既是 MCP 电极,又是光电转换阴极。把电控系统选通脉冲单元产生的高压电脉冲作为 MCP 快门,选通脉冲沿微带传输,在选通脉冲所到之处,由光图像转换成的电图像被 MCP 倍增后,轰击荧光屏,产生可见光图像输出,通过 CCD 记录结果。而选通脉冲通过 MCP 微带的某一区域后,该区域就不会再产生增益,即处于关闭状态。X 射线源经过针孔所成的多幅像,随着脉冲在微带上传输,将在不同的时间范围内被选通成像。图像的空间分辨率由 MCP 分幅管的空间分辨率和针孔直径决定;图像之间的时间间隔由针孔之间的距离和相机的放大倍数确定;每幅图像的曝光时间则由选通脉冲宽度确定^[13]。

3 技术指标和现场实验

3.1 针孔分幅相机的主要技术指标

ICF 物理实验的研究决定工程化 X 射线门

控针孔分幅相机的主要技术指标,如表 1 所示。

表 1 针孔分幅相机的主要技术指标

Tab. 1 Parameters of gating framing camera

项目	指标
X 射线阴极响应能区范围:	0.1~10 KeV
微带阴极结构参数:	条数 4;宽度 6.6 mm; 长度 36 mm
变像管空间分辨:	优于 20 lp/mm
选通脉冲 3 种曝光时间:	70 ps, 500 ps, 1 500 ps
4 路选通脉冲一致性:	幅度晃动 < 20 V
同步精度:	< 10 ps
程控初级延迟箱调整范围:	0~30 ns
步进精度:	0.2 ns
程控二级延迟箱调整范围:	0~3 ns
步进精度:	0.05 ns
脉冲屏压幅度:	3~6 kV 可调
幅值晃动:	< 2%
脉冲屏压与脉冲同步精度:	≤ 500 ps
脉冲屏压固有延迟:	< 50 ns
针孔成像系统放大倍数:	2×, 4×, 8×, 12×, 18×

选通脉冲具有监控输出功能。

相机具有水温、水压、水流动性,气室气温、气压、湿度、MCP 变像管真空度等的监控功能,可实现异常报警和自动保护。

总控制器基于 PC104 系统,在实现电控系统控制的同时进行 CCD 系统控制以及数据自动存储,并通过网络系统完成数据以及命令的传送。

3.2 现场实验

实验在神光 III 原型装置上进行,入射激光通过靶室上的窗口注入靶室。如图 6 所示,相机通过旁边的公共搭载平台(DIM)送入靶室。在送入之前需要进行相机准直,即检测靶球是否能精确成像在微带上。先在加工针孔阵列时,对针孔位置要进行精确定位,再对针孔位置和相机阴极位置进行精确准直。

相机的针孔和微带的精确准直过程分两步。首先建立经纬仪、模拟靶球和 MCP 上某一微带三者之间的基准线,使模拟靶球既投影到经纬仪叉丝中心,又投影到 MCP 微带某一位置上。然后,在相机前端猪嘴头位置安装多针孔板,将经纬仪聚焦到多针孔板上,微调针孔板,将一个针孔调至经纬仪的叉丝中心。由于设计的针孔板和 MCP 微带同轴心且平行,所以该针孔对应的投影

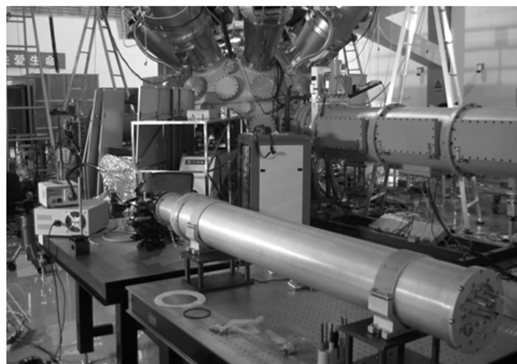


图6 相机准直现场

Fig. 6 Collimation of framing camera

就是第一步中模拟靶球投影在 MCP 微带上的位置。这样,模拟靶球、针孔板和 MCP 微带三者已经精确准直。

准直后,将相机送入靶室,计算各路的延迟时间,使打靶和相机诊断同步完成,通过以太网,在程控机上发出选通脉冲指令和 CCD 拍摄指令,获得打靶结果。图 7 为原形上拍摄到的离子膨胀过



图7 神光原型实验结果

Fig. 7 Results of SG experiments

程。由于延迟时间计算稍有误差,虽然只获得了 4 幅图像,但足以证明相机系统完整且运行正常。

4 结 论

为满足压缩聚变发展的测试要求,首次将 X 射线门控针孔分幅相机整体放入靶球内部观测聚变过程,整个诊断过程均在高真空环境下进行。相机全部采用模块化组件,具有优于 80 ps 的时间分辨、15 lp/mm 以上的空间分辨以及 0.1~10 KeV 能区的光阴极响应。相机结构采用了独特的密闭气室结构,CCD 和所有电气控制设备都寄宿在气室内并保持常温和一个大气压的工作状态。整个相机系统内嵌了计算机工控设备,通过一根以太网线完成相机所有功能的远程控制。相机还拥有完善的安全互锁系统,确保相机远程控制的安全,满足严格的 EMI/ EMP 屏蔽要求,能够避免神光 III 主机高能量激光发射带来的电磁干扰。

由于该相机为试用相机,一些技术指标还没有检测,整个系统也没有进行完全标定,还需要进一步完善,关键技术指标和各种精细结构也在不断改进中。

X 射线门控针孔分幅相机在神光装置上的实验中扮演着重要的角色,但只有在稳定可靠的基础上获得高性能的技术指标,才能满足未来神光 III 主机物理实验对诊断的需求。

参考文献:

- [1] KOCH J A, LANDEN O L, BARBEE T W, *et al.*. High energy X-ray microscopy techniques for laser fusion plasma research at the national ignition facility[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(10):1784-1795.
- [2] OERTEL J A, ARAGONEZ R, ARCHULETA T, *et al.*. Gated X-ray detector for the national ignition facility [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, 77(10): 10E308.
- [3] CHANG Z H, SHAN B, LIU X Q, *et al.*. Gated MCP framing camera with 60 ps exposure time[J].

SPIE, 1995, 2549:53-59.

- [4] 邱孟通,张美,罗建辉,等.微带像增强器的选通特性研究[J].光子学报,2003,32(4):505-508.
- QIU M T, ZHANG M, LUO J H, *et al.*. Study of gating characteristics of micro-strip image intensifier [J]. *Acta Photonics Sinica*, 2003, 32(4):505-508. (in Chinese)
- [5] 常增虎,山冰,刘秀琴,等.微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机[J].光子学报,1995,24(6):501-508.
- CHANG Z H, SHAN B, LIU X Q, *et al.*. Uniform design method of the exposure time of X-ray picoseconds framing camera with gated microchannel [J]. *Acta Photonics Sinica*, 1995, 24(6):501-508.

(in Chinese)

- [6] SHAN B, CHANG Z H, LIU J Y, *et al.*. Gated MCP framing camera system [J]. *SPIE*, 1997, 2869:182-188.
- [7] 邹异松. 电真空成像器件及理论分析[M]. 北京:国防工业出版社, 1989.
ZOU Y S. *Electron Imaging Tube and Theory Analyse* [M]. Beijing: National Industry Press, 1989. (in Chinese)
- [8] 李东, 刘百玉, 刘进元等. 用于高功率激光装置中的电脉冲整形系统[J]. 光子学报, 2005, 34(9):1304-1309.
LI D, LIU B Y, LIU J Y, *et al.*. Electrical pulse-shaping system on the high power laser system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(9):1304-1309. (in Chinese)
- [9] 冯志庆, 王淑荣, 王晓君, 等. PDP 荧光粉的相对亮度与 VUV 激发光谱的测量[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(1):59-63.
FENG ZH Q, WANG SH R, WANG X J, *et al.*. Measurements of relative luminance and VUV excitation spectra for PDP phosphors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):59-63. (in Chinese)
- [10] 白晓红, 刘进元, 白永林, 等. 高效透明导电膜荧光屏的研究[J]. 光子学报, 2006, 35(2):176-179.
BAI X H, LIU J Y, BAI Y L, *et al.*. Study of the phosphor screen with the transparent conducting film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(2):176-179. (in Chinese)
- [11] 邢玉梅, 惠春, 徐爱兰, 等. 多通道柔性神经微电极加工工艺[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(10):2465-2472.
XING Y M, HUI CH, XU A L, *et al.*. Microfabrication of multichannel flexible neural microelectrodes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10):2465-2472. (in Chinese)
- [12] 李敏, 范鲜红, 尼启良, 等. 微通道板在 12~40 nm 波段的量子效率测量[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(1):1-5.
LI M, FAN X H, NI Q L, *et al.*. Quantum efficiency of microchannel plate in 12-40 nm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):1-5. (in Chinese)
- [13] 白晓红, 白永林, 刘百玉, 等. 一种双 MCP 选通型 30~40 ps 软 X 射线分幅相机[J]. 光子学报, 2006, (35)2:176-179.
BAI X H, BAI Y L, LIU B Y, *et al.*. A kind of 30-40 ps cascade gating x-ray framing camera with chevron MCPs[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, (35)2:176-179. (in Chinese)

作者简介:



白晓红(1975—),女,山西临县人,博士研究生,副研究员,1998年于西北大学获理学学士学位,主要从事用于ICF诊断技术的分幅管设计与关键技术的研究。E-mail: bxh@opt. ac. cn



白永林(1972—),男,陕西宝鸡人,研究员,博士生导师。2003年于中科院西安光学精密机械研究所获博士学位,目前为超快诊断技术实验室执行主任,主要从事高时间、空间分辨诊断技术的研究。

刘百玉(1964—),男,研究员,博士生导师,1986年于清华大学工程物理系获学士学位,主要从事超快电脉冲产生与测试技术的研究。

秦君军(1978—),女,高级工程师,2000年、2003年于西安工业学院分别获工学学士、工学硕士学位,主要从事光学全息和超快诊断方面的结构设计工作。E-mail: qjj@opt. ac. cn

赵军平(1979—),男,陕西兴平人,助理研究员,2001年于中国科学技术大学获理学学士学位,2004年于中国工程物理研究院获工学硕士学位,主要从事超快诊断设备中的电磁脉冲产生与传输技术的研究。

王博(1983—),男,陕西渭南人,助理研究员,2006年于西安电子科技大学获学士学位,2009年于中科院西安光学精密机械研究所获硕士学位,主要从事超快诊断与瞬态光谱探测方面的研究。

杨文正(1975—),女,陕西礼泉人,博士,副研究员,中科院超快诊断技术国防科技创新实验室学术秘书,主要从事超快现象和超快诊断理论和技术的研究。

缙永胜(1984—),男,陕西富平人,助理研究员,2007年于西安电子科技大学获学士学位,2010年于中科院西安光学精密机械研究所获硕士学位,主要从事高低压脉冲产生技术的研究。E-mail: yshgou@163.com

●下期预告

对准系统中调焦机构机械摆动引入误差补偿

王权岱^{1,2},李言¹,肖继明¹

(1. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院,陕西西安710048;

2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,陕西西安710049)

为了消减压印对准系统焦平面调整过程中由于机构机械不稳定性而产生的对准误差,提出了通过拟合调整架摆动轨迹并进行软件补偿的方法。通过亚像素模板匹配算法对调焦过程中标记图像坐标进行定位运算并对算法的有效性进行了分析,结果表明,该算法的理论误差小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 。采用该算法计算随调整架摆动的标记坐标,对调整架的摆动轨迹进行实验标定,实验结果表明,分别考察上升和下降时调整架的摆动特性时具有较好的重复性。以此为基础,建立了调整架的摆动轨迹模型及误差补偿方法,并对模型的预测补偿精度进行了实验研究。结果表明,通过预测调整架摆动轨迹并进行补偿,调焦系统机械不稳定性误差从 $2.84\ \mu\text{m}$ 减小到 $1.29\ \mu\text{m}$,可以满足 $2\ \mu\text{m}$ 的总体对准精度要求。