

文章编号: 0253-2239(2009)10-2871-05

神光 III 主机 X 射线条纹相机设计

胡 昕¹ 刘慎业¹ 丁永坤¹ 杨勤劳² 田进寿³ 何小安¹

(¹ 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; ² 深圳大学光电工程学院, 广东 深圳 518060)
³ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要 根据神光 III 激光器的运作方式和靶室结构, 配套建设的 X 射线条纹相机在结构和性能上同以往有很大不同, 建成后不仅应用于高时间分辨的实验诊断, 也将用于神光 III 主机各束激光同步性能的检验。设计的 X 射线条纹相机将全部采用模块化组件, 拥有优于 10 ps 的时间分辨、15 lp/mm 以上的空间分辨以及 100 eV-10 keV 能区的光阴极响应。相机在结构方面采用了非常独特的密闭气室结构, 变像管、CCD, 所有的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, 通过一根以太网线获得相机所有功能的远程控制。相机其它的特性还包括拥有完善的安全互锁系统以确保相机远程控制的安全; 满足严格的 EMI/EMP 屏蔽要求以避免神光 III 主机高能激光发射带来的电磁干扰, 并可采用光纤引入紫外时标光建立信号的绝对时间基准。

关键词 激光光学; X 射线条纹相机; 诊断技术; 气室; 公共诊断搭载平台

中图分类号 O434; TL65; TN2; **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092910.2871

Design of SG-III X-Ray Streak Camera

Hu Xin¹ Liu Shenye¹ Ding Yongkun¹ Yang Qinlao² Tian Jinshou³ He Xiao'an¹

¹ Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900, China;

² College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

³ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract According to its' operation and target chamber's structure, the X-ray streak camera built synchronously would make a great difference from the traditional one. It will be used not only to measure the time history of the physical process but also to monitor the synchronization among the 48 laser beams on SG-III laser facility. The X-ray streak camera is composed of modules, which has a goal of temporal resolution of 10 ps and spatial resolution of 15 lp/mm. Its' photocathode is sensitive to photon energy ranging from 100 eV to 10 keV. The camera system contains a hermetical air box, streak tube, CCD and all the electrical devices residing in a chamber to maintain themselves working at normal temperature and standard atmospheric pressure. The whole camera system is controlled by an embedded computer, which communicates through main control computer by Ethernet. The camera has a perfect security-lock system to ensure the safety of remote control and meets strict shielded requirement for EMI/EMP, which also has the ability of taking ultraviolet(UV) laser light introduced by optic fiber to build the absolute time fiducial for x-ray emission signal.

Key words laser optics; X-ray streak camera; diagnostic technology; air box; diagnostic instrument manipulator (DIM)

1 引 言

神光 III 高功率激光器装置(简称神光 III 主机)是一个拥有 48 束三倍频激光、靶室直径为 6 m 的钨玻璃巨型激光器, 建成达标后总能量可达到 150 kJ, 并

具备脉宽为 1~3 ns 的脉冲整形能力, 是未来惯性约束聚变(ICF)研究的主力科研装置。

X 射线条纹相机是一种基于扫描变像管的高时间分辨诊断设备, 通过配接成像组件, 比如针孔相

收稿日期: 2008-11-13; 收到修改稿日期: 2009-03-02

基金项目: 国家 863 计划(2008AA8040901)资助课题。

作者简介: 胡 昕(1968—), 男, 工程师, 主要从事 X 射线超快诊断方面的研究。E-mail: huxin88@21cn.com

机^[1]、KB显微镜^[2,3]等可以获得目标的一维空间分辨,配接谱分辨组件,比如晶体谱仪^[4]、透射光栅谱仪^[5]、掠入射平面镜^[6]等可以获得时间分辨的X射线发射谱,相机的所有这些诊断能力都将在未来的神光III主机上获得建立。

然而,神光III主机对配套建设的诊断设备提出了非常苛刻的要求,神光III主机拥有6 m的靶室直径,远大于X射线条纹相机的最佳诊断距离;实验期间,靶室内部全程高真空运作,并严格限制诊断设备的热量辐射;随着主机激光发射能量的提高,要求X射线条纹相机拥有更大的动态范围。与此同时,容易影响超快诊断设备的电磁干扰也变得更加严重。所有这些要求反应到X射线条纹相机的制造上,就是需要在相机结构和相机性能两个方面进行改进。因此,为神光III主机配套建设的X射线条纹相机在结构和性能上和传统的仪器型扫描相机将有很大的不同,在结构上,将采用工程化、模块化的设计,工程化的结构设计须适应神光III主机公共诊断搭载平台(DIM)送进、收回和指向调整功能,在性能上,相机将拥有更大的动态范围,很好的屏蔽电磁干扰能力,相机的操作也将由远程自动控制取代传统的手动操作模式。在神光III主机建成后,X射线条纹相机将首先用于检验主机各束激光到达靶点的时间同步性,随后将应用于主机各项物理实验的诊断测量。

本文主要介绍了神光III主机X射线条纹相机的工程结构设计,描述了相机内部的电气控制系统和主要技术指标。

2 相机工程结构设计

设计的X射线条纹相机将置于神光III主机靶室内运行,靶室内部完全是高真空的,由于相机拥有复杂的电气控制系统,因此制造一台在高真空中工作的X射线条纹相机将面临散热这一巨大的难题,尽管做到这一点不是不可能的,但毫无疑问将面临高难度的制造技术和高昂的制造成本。为解决这一问题,相机采用了一种称之为“气室”的工程结构,将相机所有的组件,包括扫描变像管、像增强器、CCD、电气控制系统寄宿在一个空气盒中,空气盒里面是正常的大气环境,但却是完全密闭的,漏气率控制在小于 $1.33 \text{ Pa} \cdot \text{l/s}$,这样就确保相机的所有组件工作在正常的大气压环境下,减少了相机电气组件的制造难度,同时变像管内部依然处于靶室的高真空环境中。

本项目为神光III主机X射线条纹相机设计了两种工程结构,图1显示的是其中一种设计结构,其气室为长方体结构,气室横截面设计为 $165 \text{ mm} \times 165 \text{ mm}$,长度约为1450 mm,壁厚约为13 mm,为铝制作^[7,8]。采用长方体气室结构的优点是有益于相机模块组件的集成、安装和维护,但这种结构同时满足高真空密封和轻薄要求有一定制造难度。气室这种结构除了为相机组件提供合适的寄宿空间,同时相当于一个法拉第笼,可以屏蔽主机高功率激光发射带来的严重电磁干扰,再配合相机电控组件自身的电磁屏蔽措施,可确保相机符合EMI/EMP电磁防护要求^[7,8]。

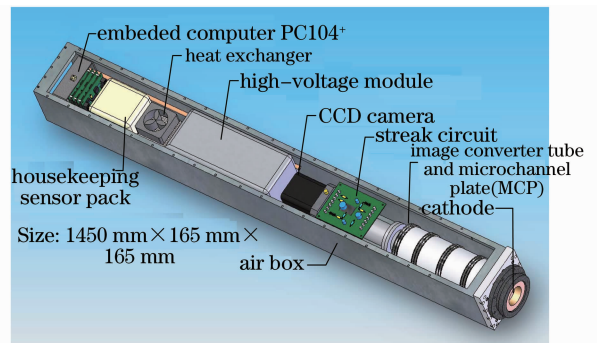


图1 相机工程设计示意图(气室为长方体结构)

Fig. 1 Diagram of the engineering design of streak camera (Air box is of the cuboid shape)

图2和图3所示为相机另外一种设计结构,其气室为圆柱形,气室横截面直径为180 mm,长度为1600 mm,这种结构的优点是高真空密封非常容易实现,但相机模块的组装和维护便利性不如长方体结构。

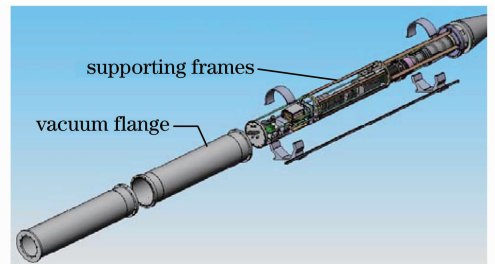


图2 相机工程设计示意图(气室为圆柱体结构)

Fig. 2 Diagram of the engineering design of streak camera (Air box is of the cylindric shape)

无论是长方体还是圆柱体结构,相机扫描变像管头部和气室的封装形式是该项设计最为关键和复杂的部分,除了要求将变像管的真空环境同气室的大气环境隔断,也要求可从此处利用一个带石英窗口的密封帽单独将相机变像管真空密封起来,满足相机紫外光校准和真空维护保养等要求。同时相机

头部还要求能挂接不少于 20 kg 的其它诊断包组件,比如针孔相机、晶体谱仪等,实现相机的空间分辨和能谱分辨测量。更为重要的是,相机的头部大小有严格的体积限制,以避免对激光和其它诊断设备产生干涉。

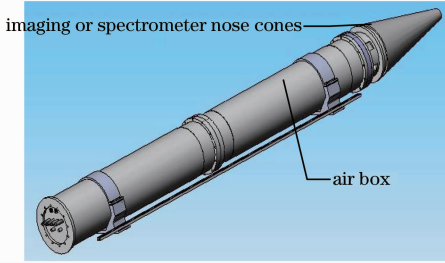


图 3 圆柱体结构条纹相机外形示意图

Fig. 3 The figuration of streak camera with cylinder air box

为了将 X 光条纹相机在高真空激光靶室中自由送进和收回,同时不破坏靶室的高真空环境,本项目配套建设了一种称之为公共诊断搭载平台(DIM)^[9]的搭载设备。建造这种设备的目的主要有两个:一个是利用其高达几米的精密运动行程来将 X 光条纹相机送入和退出靶室,如此大的运动行程是依靠轴向的两级伸缩运动完成的,DIM 自身也带有高真空系统和高真空电动阀门,这样在运送相机过程中不会影响靶室的高真空;另外一个目的就是其具备精确的指向瞄准能力,其通过双脚的万向调节运动获得精密的指向调节功能,在相机负载重达 60 kg 的情况下,其指向调节的 X、Y 向定位精度优于 $\pm 25 \mu\text{m}$,轴向精度可达 $100 \mu\text{m}$ 。这一精密指向调节功能满足了 X 射线条纹相机实验时的各种精密准直需求,是相机投入应用不可缺少的重要手段。图 4 和图 5 为 DIM 搭载 X 光条纹相机送入和退出靶室运作示意图。

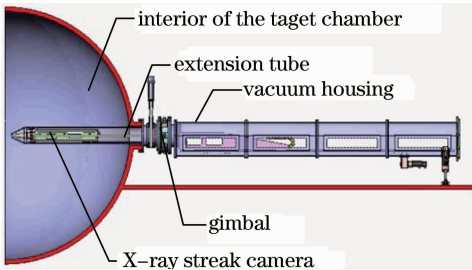


图 4 条纹相机由诊断搭载平台送入靶室

Fig. 4 The streak camera sent into the target chamber by DIM

DIM 也提供了相机所需的低压电源、致冷循环水接口、光纤通讯以太网接口和提前约 100 ns 的触发脉冲接口,所有这些控制引线将通过脐带的形式

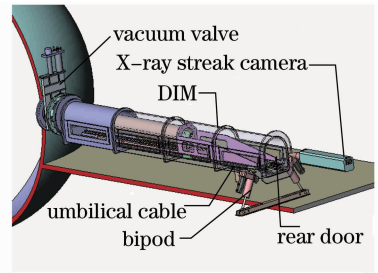


图 5 条纹相机从靶室中收回

密封连接到相机气室的后部面板上,从而不影响相机的伸缩运动。相机放置在 DIM 中时,相机将倾斜放置,使得相机变像管的中心轴线和靶室法拉第轴心线有个 3 度左右的夹角,确保避免 X 射线直穿光对相机带来的干扰。

3 相机技术指标

ICF 物理实验研究的要求决定了主机工程化 X 射线条纹相机的主要技术指标,包括时间分辨、动态空间分辨、动态范围和响应能区等,这一技术指标要求如表 1 所示。

表 1 X 射线条纹相机主要技术指标

Table 1 specifications of X-ray streak camera

X-ray energy range /keV	0.1~10
Temporal resolution	0.5% of sweep time
Photocathode length /mm	≥ 28
Dynamic range	$\geq 150:1$ (15 ps temporal resolution)
Spatial resolution	15 lp/mm at CTF 5% (1.5 ns sweep time)
Spatial distortion /%	< 10
Sweep time /ns	1.5, 3, 5, 10, 20
Sweep linearity /%	< 5
Time distortion /ps	< 40
Flat-field nonuniformity /%	≤ 10
Signal-to-noise ratio	$\geq 10:1$
Trigger	5V/50Ω
Trigger jitter /ps	< 50
Operation vacuum /(10^{-3} Pa)	6
Fiducial input (fiber optic) /nm	260

相机光阴极的响应能区从 0.1 keV 到 10 keV,采用不同的光阴极可以获得不同的响应能区,设计的光阴极长度为 28 mm 以上,该长度对于变像管制造技术来说属于较高的要求,光阴极前置缝宽为 $50 \mu\text{m}$ 到 0.5 mm 可变,这样可以在相机灵敏度和时间分辨两个相互矛盾的方面根据需要取舍。

相机的动态范围要求在 150:1,这样相机具备足

够的灵敏度记录微弱的 X 射线发射信号,同时也能适应神光Ⅲ主机高功率激光发射产生的高强度 X 射线。为了获得这一较大的动态范围,一个大动态带有微通道板(MCP)的像增强器是必要的,像增强器的平场非均匀性和空间畸变都要求优于 5%。一个光纤面板将 P20 荧光屏和科学级 CCD1:1 耦合在一起,可最大限度减少光能损失。为提高空间分辨,CCD 面阵为 4096×4096 ,每个像素直径为 $9 \mu\text{m}$,CCD 的所有组件都将是可置于气室中的小型化组件。

相机的动态空间分辨至少要达到 15 lp/mm (目视),满足类似瑞利-泰勒不稳定增长等需要高空间分辨的物理研究需求。相机时间窗设为 1.5 ns , 3 ns , 5 ns , 10 ns , 20 ns 五段以适应各种实验不同的 X 光脉宽,每个时间窗的时间分辨为全屏扫描时间的 0.5%,这样实用的最高时间分辨可优于 10 ps (1.5 ns 窗),同时相机的扫描速度非线性要求小于 5%。

相机将采用光纤引入时标光作为信号的绝对时间基准,该时间基准对于关注时间演绎过程的物理研究来说是非常重要的,设计将采用紫外传输优化的石英光纤获取四倍频时标信号,激光时标将是序列脉冲,这样的时标信号除了用于建立绝对时间基准,也可应用于相机扫描速度和非线性实时校准,可提高物理实验数据处理精度。

4 相机电气控制系统

为神光Ⅲ高功率激光器装置配套建设的 X 射线条纹相机拥有非常复杂的电气控制系统,除了传统的高低压模块、扫描与触发模块,在相机的气室内还设计有水冷循环热交换控制系统、内嵌计算机控制系统和安全互锁系统。

相机依靠诊断搭载平台深入靶室后,为了不对物理实验的靶靶带来影响,相机向靶室辐射的热量不能超过 $10 \text{ W}^{[7]}$,为了达到这一目标,一个水冷循环散热控制系统将确保相机温度控制在常温状态,该系统除了直接利用循环水带走气室内 CCD 等模块的热量,也采用了基于半导体热电制冷器(Peltier)原理的微型空气调节器,并将空气热量通过循环水排出相机气室,带走气室内诸如内嵌计算机芯片以及各种电路模块的热量,这个致冷循环控制系统的采用使得相机不仅不会对靶室带来额外散热影响,同时还会成为一个吸热设备,有利于靶室环境辐射热量的减少。图 6 为相机水冷循环热交换系统设计示意图。

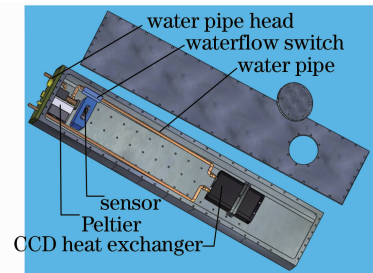


图 6 气室热交换系统示意图

Fig. 6 Diagram of the heat exchanging system of air box

相机投入运行时,相机的所有控制功能都将实现远程计算机控制,这些控制功能包括相机 CCD 数据采集、相机功能控制、气室环境监视和安全互锁控制等。为此,在相机内部内嵌了计算机控制系统,内嵌计算机控制系统采用基于 pc104+ 的总线构架,该总线结构具备开放的高可靠性工业规范、低功耗和结构紧凑的小尺寸,板卡的标准尺寸是 $90 \text{ mm} \times 96 \text{ mm}$,加上堆栈式连接结构,可以适应气室狭小空间,该远程控制系统的采用,使得相机操作人员只需通过一根以太网线即可控制相机的所有运行功能,操作控制软件将是基于 Web 页面和远程控制命令两种方式的远程控制软件。

也正因为设计的扫描相机采用了自动化的控制,对相机的安全运行也提出了更高的要求,故相机设计有气室环境监视和安全互锁控制系统,气室环境监视包括气室温度、气压、水压、循环水泄漏、气室外部真空度和相机高低压检测等传感组件,当故障发生时,相机能迅速自动采取断电、断水等保护措施,确保相机运行的安全,图 7 为相机电气控制系统流程图。

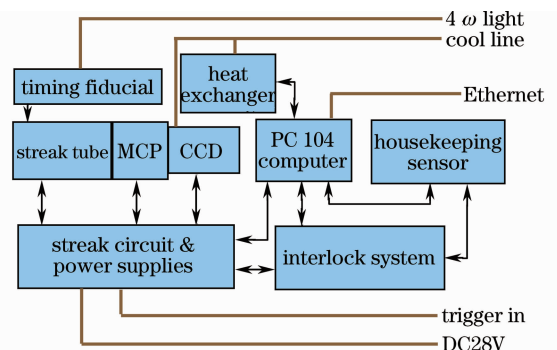


图 7 条纹相机控制流程图

Fig. 7 Control flow chart of X-ray streak camera

5 结 论

神光Ⅲ主机两种 X 射线条纹相机设计方案均

通过了各自的专家组评审,它的特点是拥有独特的气室结构并配合有专门的诊断搭载平台,性能上追求大的动态范围和强电磁干扰屏蔽能力,操作上采用自动化的远程控制。对于即将到来的验收,首先会在超短时间的紫外皮秒激光器上进行细致的指标检测,这些指标包括动态范围、时间分辨、空间分辨和扫描线性等^[10],随后在神光Ⅲ原型激光器上考核,以检验相机的抗电磁干扰能力、电控系统稳定性以及和诊断搭载平台的配合情况,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。

致谢 感谢中国工程物理研究院刘忠礼研究员在相机结构设计方面给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 J. A. Koch, O. L. Landen, T. W. Barbee *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 Dong Jianjun, Liu Zhongli, Miao Wenyong *et al.*. Imaging simulation of KBA microscope system and X-ray imaging experiment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1231~1235
董建军,刘忠礼,缪文勇等. KBA 显微镜成像系统的成像模拟及 X 光成像实验的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1231~1235
- 3 Zhao Lingling, Hu Jiasheng, Sun Delin. Precision controlling of KBA X-ray microscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2441~2445
赵玲玲,胡家升,孙德林. KBA 型 X 射线显微镜精度控制方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2441~2445
- 4 Wang Ruirong, Chen Weimin, Dong Jiaqin *et al.*. High-resolution X-ray crystal spectrometer and its application in laser plasmas[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1220~1224
王瑞荣,陈伟民,董佳钦等. 高分辨 X 射线晶体谱仪及其在激光等离子体中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1220~1224
- 5 R. T. Eagleton, S. F. James. Transmission grating streaked spectrometer for the diagnosis of soft x-ray emission from ultrahigh intensity laser heated targets[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(10): 3969~3973
- 6 Hu Xin, Jiang Shaoen, Cui Yanli *et al.*. A time-resolved three-channel soft x-ray spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(3): 1447~1449
胡 昕,江少恩,崔延莉等. 一种时间分辨三通道软 X 光光谱仪[J]. *物理学报*, 2007, **56**(3): 1447~1449
- 7 J. R. Kimbrough, P. M. Bell, G. B. Christianson *et al.*. National ignition facility core X-ray streak camera[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(1): 748~750
- 8 J. A. Oertel, R. Aragon, T. Archuleta *et al.*. Gated x-ray detector for the national ignition facility[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(10): 10E308
- 9 W. J. Hibbard, M. D. Landon, M. D. Vergino *et al.*. Design of the national ignition facility diagnostic instrument manipulator[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(1): 530~532
- 10 Niu Lihong, Yang Qinlao, Niu Hanben *et al.*. A wide dynamic range x-ray streak camera system[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, **79**(2): 023103