



·惯性约束聚变物理与技术·

可见光条纹相机可靠性实验研究*

黄展常, 张成俊, 陈进川, 杨建伦, 李林波, 游海波, 王东明,
尤文豪, 何超, 杨高照, 赵学水, 谢红卫

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 基于“晨光号”X光机开展了可见光条纹相机在复杂的辐射/电磁环境中的可靠性实验研究。利用序列脉冲激光的成像状态表征条纹相机的扫描状态, 采取了不同的辐射/电磁防护措施, 研究其对扫描状态的影响。实验研究获得了该类相机在此类复杂环境中正常工作的防护方法, 主要包括增强辐射屏蔽使条纹相机附近的单次等效空气吸收剂量不超过 $6 \mu\text{Gy}$ 、减少相机机壳的缝隙、采取光电隔离的触发方式等。

关键词: 可见光条纹相机; 辐射干扰; 电磁干扰; 可靠性

中图分类号: TL65

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210382

Reliability experimental study of optical streak camera

Huang Zhanchang, Zhang Chengjun, Chen Jinchuan, Yang Jianlun, Li Linbo, You Haibo,
Wang Dongming, You Wenhao, He Chao, Yang Gaozhao,
Zhao Xueshui, Xie Hongwei

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The reliability of optical streak camera in the environment of extreme radiation and electromagnetic field has been investigated on “Chenguang” Accelerator. The image of a series of pulse laser was used to indicate the scanning status of the streak camera. The influence of different manners of radiant and electromagnetic shield has been explored. At last, the conditions of this kind of streak camera working normally in these extreme environments were gained in this experiment: enhancing radiation shield to reduce the equivalent air absorbed dose of single shot near the streak camera to $6 \mu\text{Gy}$, reducing the outer covering gaps of the streak camera, using photoelectric trigger and so on.

Key words: optical streak camera; radiant disturbance; electromagnetic disturbance; reliability

条纹相机是惯性约束聚变物理实验中研究内爆动力学过程以及内爆压缩规律, 获取等离子体辐射连续一维时空变化图像的重要诊断仪器^[1]。研究团队在“强光一号”、“Angara-5”、某大功率电流装置上开展了大量丝阵负载构型的实验研究工作。基于条纹相机获取的实验图像, 可以分析等离子体内爆压缩过程中的内爆速度、内爆轨迹等重要参数^[2-7]。随着大电流实验装置的发展与升级, Z 箍缩惯性约束聚变实验研究要求可见光条纹相机具备高时空分辨率、大动态范围、高可靠性的特点^[8-9]。Z 箍缩是通过电流流过负载形成的强磁场压缩柱形等离子体, 把驱动器的储能转化成负载内能, 等离子体箍缩并辐射 X 光脉冲^[10]。实验场所存在复杂的电磁辐射场、X/γ 辐射场等干扰因素。本文利用“晨光号”X 光机模拟该复杂环境^[11], 开展可见光条纹相机的可靠性实验研究, 并根据实验结果采取一系列的防护措施, 探索研究可见光条纹相机在此类复杂环境中正常工作的条件。

1 实验系统

基于“晨光号”X 光机的实验条件, 研究团队开展了可见光条纹相机可靠性实验研究^[12-13]。实验布局如图 1 所示。其中, 箭头表示束流入射正方向。成像单元主要包含带狭缝闪烁体、收光透镜组。该成像单元把 X 光转换成

* 收稿日期: 2021-08-30; 修订日期: 2021-11-11

基金项目: 中国工程物理研究院创新发展基金项目 (CX20210014)

联系方式: 黄展常, huangzhanchang@foxmail.com。

通信作者: 张成俊, zcj1034@126.com。

适合可见光条纹相机记录的信号。成像单元被植入了一根多模光纤。激光器产生的序列脉冲激光(简称时标信号)经该多模光纤传输, 收光透镜组成像于条纹相机光阴极, 用于表征条纹相机扫描工作状态^[14]。激光单脉冲宽度小于 1 ns, 脉冲之间时间间隔 20 ns。条纹相机与成像单元之间采用遮光筒减少杂散光的影响。条纹相机置于金属电磁屏蔽箱中, 并与该屏蔽箱绝缘。辐射屏蔽体除了束流通道可通视外, 其余六个面由铅砖或铅皮搭建而成。1#剂量探测器和 2#剂量探测器为热释光剂量片。其中 1#剂量探测器主要用于监测辐射束流通道中的等效空气吸收剂量; 2#剂量探测器主要用于监测条纹相机附近的等效空气吸收剂量^[15]。

2 实验研究

2.1 辐射干扰可靠性

在 X 光机出束前, 采集一幅扫描像, 此时的时标信号表征条纹相机的正常扫描状态。X 光机出束时, 记录另一幅扫描像, 此时的时标信号表征条纹相机在 X 光机出束时的扫描状态。为了更直观地对比分析, 在本文展示的条纹相机扫描图像中已把该两种工况的时标信号绘制在一张图中。在扫描图中, 第 1 行是 X 光机出束前的时标信号, 第 2 行是 X 光机出束时的时标信号。水平方向表示扫描方向, 垂直方向表示一维空间方向。竖直点划线为 X 光机出束时的 X 光峰值时刻。

为了探索条纹相机正常工作的剂量阈值, 把图 1 的金属电磁屏蔽箱及其内部仪器组件直接放置在晨光号实验大厅的地平面上, 使其远离束流通道。此时, 条纹相机主要受空间散射 X 光的辐射干扰。采取不同屏蔽条件时, 条纹相机扫描图像如图 2 所示。其中, 1224 发次出束时, 电磁屏蔽箱外围无铅砖屏蔽; 1225 发次出束时, 电磁屏蔽箱外围有铅砖屏蔽, 此时 2#剂量探测器的监测值为 6 μGy 。由图 2(a) 可得, 当条纹相机外围无铅屏蔽时, X 光到达后, 条纹相机时标信号在空间方向发生上下波动, 时标信号在 X 光峰后约 180 ns 发生散焦。主要原因为: 当 X 光机出束后, 受 X 光机装置周围散射 X 光的影响, 条纹相机的条纹管受到 X 光辐射影响, 在条纹管内部产生局部电磁场, 影响扫描管的聚焦及偏转电场。此外, 条纹相机的高压模块以及扫描电路模块均采用模拟电路, 其内部的电子元器件受到辐射干扰后, 工作状态也会发生变化。由图 2(b) 可得, 当条纹相机周围加铅屏蔽时, 相机受到辐射干扰的影响较小, 相机的扫描状态恢复正常。由此可得, 对于单发次 X 光, 当条纹相机附近的等效空气吸收剂量不超过 6 μGy 时, 该类条纹相机可正常工作。



Fig. 2 Scanning images of streak camera which was far from the radiation channel

图 2 远离束流通道时条纹相机扫描图像

根据上述分析, 初步确定当条纹相机受到的辐射干扰不超过 6 μGy , 相机可正常工作。把电磁屏蔽箱置于束流通道中, 如图 1 所示, 开展正式考核实验。铅衰减片探测器被安装在束流通道入口附近, 与 1#剂量探测器相结合用于探测 X 光的注量及能量。本轮实验束流通道入口附近的 X 光注量范围为: $1 \times 10^9 \sim 5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, X 光能量为 $(380 \pm 20) \text{ keV}$ 。存在大量的 X 光与金属电磁屏蔽箱、成像单元作用, 并产生大量的自由电子。此时, 条纹相机主要受到空间散射 X 光的辐射干扰以及空间电磁场干扰。研究不同辐射屏蔽条件时, 条纹相机的扫描情况, 其典型结果如图 3 所示, 其剂量监测数据见表 1。图 3(a) 出现了与图 2(a) 一致的现象: X 光到达后, 条纹相机时标信号在空间方向发生上下波动, 时标信号在 X 光峰后约 180 ns 发生散焦。此时 2#剂量探测器的监测剂量为 13 μGy 。说明 13 μGy 超过了相机抗辐射干扰的阈值。1234 发次出束时, 虽然 2#剂量探测器的监测剂量低于相机可正常工作的辐射干扰值, 但是

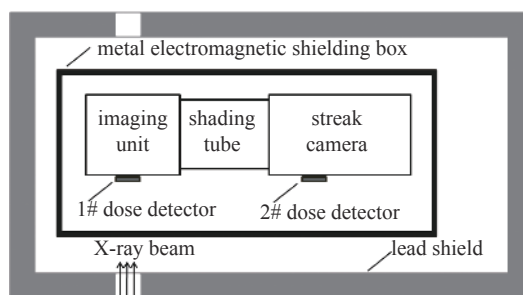


Fig. 1 The schematic diagram of experiment setup

图 1 实验布局示意图

表 1 不同发次不同位置的剂量监测数据

Table 1 Dose monitoring data of different shots in different positions

| shot No. | 1# dose detector/ μGy | 2# dose detector/ μGy |
|----------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1233 | 3356 | 13 |
| 1234 | 2970 | 5 |



Fig. 3 Scanning images of streak camera which was near the radiation channel

图3 靠近束流通道时条纹相机扫描图像

X光到达相机后时标信号不正常,如图3(b)所示。根据时标信号未出现散焦现象可以排除辐射直接作用条纹管的干扰影响。但是,空间方向上下有波动,说明存在空间电磁场的影响。时间方向局部扫速不均匀,说明模拟电路中耦合了电磁干扰信号。

2.2 电磁干扰可靠性研究

根据图3(b)的分析结果,虽然2#剂量探测器的监测剂量值已低于相机可正常工作的辐射干扰值,但是条纹相机依然扫描不正常。根据时标信号初步分析其原因主要是相机受到空间电磁场干扰以及相机的模拟电路被耦合电磁干扰。因此,开展电磁干扰研究,解决不同来源的电磁干扰,以提高条纹相机抗电磁干扰的可靠性。

通过采取与1234发次相同的辐射屏蔽措施,以保障相机附近的等效空气吸收剂量低于相机抗辐射干扰的阈值。通过采取不同的抗电磁干扰屏蔽措施并评估其有效性,以提高条纹相机正常扫描的可靠性。

为了降低空间电磁场干扰的影响,采取的主要措施为改善条纹相机金属外壳以及电磁屏蔽箱的电磁屏蔽条件,使其无直通的孔洞、缝隙结构。采取该措施后,条纹相机的扫描情况如图4所示。由图4可得,X光峰后的时标信号未出现图3(b)中在空间方向上下波动的现象。说明空间电磁场对条纹相机的扫描状态有影响,并且采取的屏蔽措施有效。但是,X光峰后的时标信号依然出现间隔不均匀现象,一直到扫描结束都未恢复正常。说明相机依然受到另外一种途径耦合的电磁干扰——内部电路。

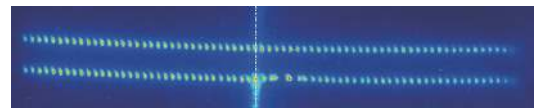


Fig. 4 Scanning image of streak camera with enhanced spatial electromagnetic shield

图4 加强空间电磁屏蔽后条纹相机扫描图像

根据条纹相机的电路组成原理,干扰主要来源通道为:电源通道以及触发信道。为了解决电源通道耦合干扰问题,首先对条纹相机的地电位进行了悬浮处理,然后采用UPS为相机供电,并且在X光机出束期间将相机用电与装置用电进行分离处理。采取该措施后,条纹相机的时标信号如图5所示。由图5可得,X光峰后,时标信号依然出现了间隔不均匀现象并在X光峰后约100 ns恢复正常。此时,相机受到的电磁干扰有所减缓。由于相机的触发信道经过同步机后最终与X光机装置相连,初步判断触发信道耦合了来自装置的电磁干扰造成相机扫描不正常。为了解决该触发干扰问题,采取光电隔离的方式进行触发。采取该措施后,条纹相机的时标信号如图6所示。由图6可得,X光峰后,时标信号在空间方向无散焦、上下波动现象,在时间方向无间隔不均匀现象。由此可推断,采取上述一系列措施后,条纹相机可在“晨光号”X光机此类复杂的辐射干扰、电磁干扰环境中正常工作。

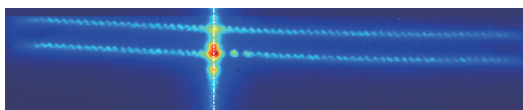


Fig. 5 Scanning image of streak camera with insulating power supply

图5 独立悬浮供电后条纹相机扫描图像

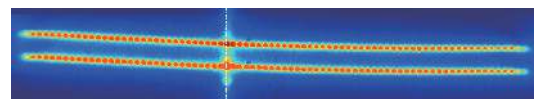


Fig. 6 Scanning image of streak camera with separating photoelectric trigger

图6 光电隔离后条纹相机扫描图像

3 结论

本文基于“晨光号”X光机模拟的复杂脉冲电磁场、X/γ辐射场,开展了可见光条纹相机的可靠性实验。在X光机出束期间,条纹相机受到了辐射干扰、电磁干扰的影响后处于不正常工作状态。该不正常状态主要表现在:相机受辐射干扰后,时标信号发生散焦现象;相机受电磁干扰后,时标信号发生上下波动、间隔不均匀现象。研究表明:当条纹相机附近的单次等效空气吸收剂量不超过 $6\mu\text{Gy}$ 、条纹相机的金属屏蔽外壳完整、条纹相机采用独立的供电方式并采取光电隔离的触发方式时,该类条纹相机可在此类复杂脉冲电磁场、X/γ辐射场正常工作。本研究为条纹相机在Z箍缩实验区的应用提供了参考措施。根据实验结果,下一步工作考虑对条纹相机进行

优化设计,主要包括优化机械结构以及优化内部电路。在此基础上,开展可靠性考核相关工作,进一步提升条纹相机的环境适应性。

致 谢 感谢“晨光号”X光机运行组提供的实验条件,感谢激光聚变研究中心胡昕团队提供的可见光条纹相机。

参考文献:

- [1] 胡昕,李晋,刘慎业,等.激光聚变领域高性能条纹相机研究现状与展望[J].强激光与粒子束,2020,32:112005.(Hu Xin, Li Jin, Liu Shenyue, et al. State of the art and future perspective of high performance streak cameras for laser fusion. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 112005)
- [2] 徐荣昆,李正宏,郭存,等.Z-pinch一维时空分辨x射线辐射功率测量系统[J].物理学报,2003,52(5):1203-1206.(Xu Rongkun, Li Zhenghong, Guo Cun, et al. One-dimensional imaging system for the diagnosis of the Z-pinch X-ray radiation[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(5): 1203-1206)
- [3] 李林波,杨建伦,钟耀华,等.丝阵Z箍缩实验1维X光辐射功率分布[J].强激光与粒子束,2007,19(11):1822-1826.(Li Linbo, Yang Jianlun, Zhong Yaohua, et al. 1-D axial X-ray power distribution of wire-array implosions[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1822-1826)
- [4] 李林波,杨建伦,钟耀华,等.丝阵Z箍缩可见光辐射区径向变化过程[J].强激光与粒子束,2008,20(9):1570-1574.(Li Linbo, Yang Jianlun, Zhong Yaohua, et al. Plasma convergence studies via visible radiation diagnostic in wire-array Z-pinch implosions[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(9): 1570-1574)
- [5] 蒋树庆,叶繁,杨建伦,等."强光一号"锥形丝阵内爆特性研究[J].物理学报,2012,61:195205.(Jiang Shuqing, Ye Fan, Yang Jianlun, et al. Implosion characteristics of conical wirearray Z pinches on Qiangguang1 facility. Acta Physica Sinica, 2012, 61: 195205)
- [6] 蒋树庆,潘英俊,甯家敏,等.铝丝阵Z箍缩辐射形成特征实验研究[J].强激光与粒子束,2013,25(7):1731-1735.(Jiang Shuqing, Pan Yingjun, Ning Jiamin, et al. Experimental study on radiation characteristics of aluminum wire-array Z-pinch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7): 1731-1735)
- [7] 黄展常,杨建伦,徐荣昆,等."聚龙一号"丝阵实验轴向一维X光辐射功率分布[J].强激光与粒子束,2016,28:122001.(Huang Zhanchang, Yang Jianlun, Xu Rongkun, et al. Axial 1-D X-ray power distribution of wire-array implosions on JL-I[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 122001)
- [8] 易涛,于瑞珍,胡昕,等.强电磁辐射下X射线条纹相机可靠性分析[J].太赫兹科学与电子信息学报,2018,16(5):845-849.(Yi Tao, Yu Ruizhen, Hu Xin, et al. Reliability analysis of X-ray streak camera under strong electromagnetic radiation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(5): 845-849)
- [9] 顾礼,李翔,宗方轲,等.分压电路对X射线条纹相机成像稳定性的影响[J].深圳大学学报(理工版),2017,34(5):532-536.(Gu Li, Li Xiang, Zong Fangke, et al. Influence of voltage divider circuit on imaging stability of X-ray streak camera[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2017, 34(5): 532-536)
- [10] 华欣生,彭先觉,李正宏,等.快Z箍缩钨丝阵内爆物理研究[J].强激光与粒子束,2006,18(9):1475-1480.(Hua Xinsheng, Peng Xianjue, Li Zhenghong, et al. Physical research of fast Z-pinch implosion for the W multi-wire arrays[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9): 1475-1480)
- [11] 易爱平,郭建明,罗志宏,等."晨光号"加速器主开关的实验研究[J].高电压技术,2001,27(4):47-48.(Yi Aiping, Guo Jianming, Luo Zhihong, et al. Experimental study on the main switches of "Chenguang" Accelerator[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 47-48)
- [12] 李晋,刘慎业,陈韬,等.双板电极条纹变像管设计[J].强激光与粒子束,2012,24(1):119-122.(Li Jin, Liu Shenyue, Chen Tao, et al. Bilamellar type streak tube design[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 119-122)
- [13] 李晋,胡昕,杨品,等.大动态双聚焦条纹变像管设计[J].强激光与粒子束,2013,25(10):2616-2620.(Li Jin, Hu Xin, Yang Pin, et al. Double focusing lens streak tube with wide dynamic range[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(10): 2616-2620)
- [14] 邓博,曹柱荣,陈韬,等.基于时标系统的条纹相机动态畸变[J].强激光与粒子束,2011,23(7):1718-1720.(Deng Bo, Cao Zhurong, Chen Tao, et al. Streak camera dynamic distortion based on on-line temporal system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(7): 1718-1720)
- [15] 窦玉玲,张国光,王国宝.用于脉冲 γ 剂量测量装置数据采集系统的设计与研制[J].核技术,2014,37:060402.(Dou Yuling, Zhang Guoguang, Wang Guobao. Design and study of data acquisition system for pulsed γ dose measurement device[J]. Nuclear Techniques, 2014, 37: 060402)