

文章编号: 2095-4980(2018)05-0845-05

强电磁辐射下 X 射线条纹相机可靠性分析

易 涛¹, 于瑞珍¹, 胡 昕¹, 杨 鸣^{1,2}, 王 峰¹, 李廷帅², 陈 铭¹, 江少恩¹, 刘慎业¹

(1.中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999; 2.电子科技大学 能源科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: X 射线条纹相机是激光惯性约束聚变研究中的核心测量设备, 用于捕获聚变反应中瞬态 X 射线发射。对 X 射线条纹相机在聚变反应中强电磁辐射下的可靠性进行研究, 给出了 X 射线条纹相机的可靠性框图及结构, 并对 X 射线条纹相机各功能单元进行可靠性分配, 针对其故障进行了故障模式和影响分析(FMEA)。可靠性分析和 FMEA 显示, X 射线条纹相机中变像管单元其可靠性分配值在各个分系统单元中最高, 其故障能够引起严重故障和试验损失, 是制约 X 射线条纹相机可靠性和稳定性的重要部件。通过对 X 射线条纹相机内各单元的可靠性以及故障模式分析, 有助于研究人员开展有针对性的电磁辐射加固, 提升相机在强电磁脉冲辐射环境中运行的可靠性。

关键词: X 射线条纹相机; 可靠性; 强电磁辐射

中图分类号: TN306; O532

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201805.0845

Reliability analysis of X-ray streak camera under strong electromagnetic radiation

YI Tao¹, YU Ruizhen¹, HU Xin¹, YANG Ming^{1,2}, WANG Feng¹, LI Tingshuai²,CHEN Ming¹, JIANG Shaoen¹, LIU Shenye¹

(1.Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China; 2.School of Materials Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: X-ray streak camera is one of the key measurement instruments in laser inertial confinement fusion experiment for capturing transient X-ray pulse radiation during fusion. The reliability for X-ray streak camera working under strong electromagnetic pulses in laser fusion experiments is studied. A reliability model is presented and the reliability coefficients are assigned for each part of X-ray streak camera. A Failure Mode and Effects Analysis(FMEA) is carried out for X-ray streak camera. Reliability and FMEA analysis indicates that the streak tube is the most important part in the X-ray streak camera whose reliability coefficient is higher than others and the streak tube's breakdown can cause serious problems in experiments. The reliability and FMEA analysis provides guidance to carry out electromagnetic hardening for X-ray streak camera and enhance its operation reliability under strong electromagnetic radiation environment.

Keywords: X-ray streak camera; reliability; strong electromagnetic radiation

激光惯性约束聚变是利用高功率激光对聚变材料进行压缩, 在实验室内实现材料的聚变燃烧和能量释放。激光惯性约束聚变实验中使用的激光脉冲非常短, 通常为皮秒或纳秒量级, 在短脉冲激光的快速作用下, 材料被强激光高速烧蚀产生各类瞬态物理过程。激光惯性约束聚变反应研究对测量设备的时间分辨能力有很高要求。X 射线条纹相机是一种高时间分辨的测量仪器, 可用于记录超快物理过程中 X 射线的瞬态发射, 为实验提供高时间分辨的精密诊断数据。X 射线条纹相机已成为极端条件实验研究的核心诊断设备, 是神光装置、星光装置等聚变物理研究装置开展实验的重要仪器。

在神光等聚变实验装置上开展高功率激光试验,往往会产生强电磁脉冲辐射。欧美国家在高功率激光装置上报道的强电磁脉冲辐射效应^[1-5]神光装置现场实验研究显示,物理实验中强激光诱导产生的强电磁脉冲辐射,具有瞬态强度高(峰值强度可达 10 kV/m),频段覆盖极宽(0.1~5 GHz 以上更宽),脉冲持续时间短(~3 ns,与激光脉冲相当)的特点^[6-11]。在这种极端恶劣的电磁辐射环境下,X 射线条纹相机运行的稳定性与可靠性值得关注^[12]。本文针对 X 射线条纹相机在强激光物理实验中强电磁辐射环境下的可靠性进行了研究。根据 X 射线条纹相机功能结构特点,提出了其可靠性框图,对 X 射线条纹相机各功能单元进行了可靠性分配,并针对其故障进行故障模式和影响分析(FMEA)。

1 原理分析

一台典型的条纹相机主要由变像管(含光阴极)、像增强器、扫描电路、电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)以及控制电路等分系统组成。相机运行原理如图 1 所示,X 射线脉冲辐照在光阴极上产生光电子,在光阴极线性响应区内,光电子数目正比于辐射强度。随后在电压作用下,光电子束进入变像管。变像管的主要结构为一个电脉冲驱动的偏转板,扫描电路同步产生扫描脉冲加载在偏转板上会对光电子进行偏转。在电压线性区内,电子在纵轴方向的位移正比于电子进入偏转板的时刻。不同时刻产生的光电子被偏转到变像管末端荧光屏上的不同位置,形成一个可见光“条纹”信号。该信号经过倍增大最终被 CCD 记录。条纹信号的强度体现 X 射线的强度,其空间位置体现 X 射线发射的时刻。

从 X 射线条纹相机的工作原理看,电磁辐射干扰是影响相机稳定工作的重要危害来源。除了可干扰电子系统正常工作外,强 X 射线电磁辐射还可以造成变像管工作失常,干扰电子束偏转,导致时序信号或扫描信号失真。强 X 射线辐射下会出现 CCD 突然死机、扫描电路误触发等现象,导致采集失败等严重故障。

强电磁辐射下 X 射线条纹相机可靠性与各个单元所受到的电磁辐射强度密切相关,而各个单元所受到的电磁辐射强度与其在相机中安装位置有关联。如图 2 和图 3 所示,整体相机为直线结构,依次排布变像管、像增强器、CCD、扫描电路和控制系统等单元。其中位于相机最前端的变像管直接瞄准激光聚变试验的靶点,其所处位置的电磁辐射干扰强度最大。从靶点传播过来电磁脉冲辐射经过变像管后,随着距离传播以及经过各个相机内部壳体,将受到不同程度的衰减。因此评估相机各分系统在强电磁环境下的可靠性需要综合考虑电磁脉冲在相机内的传播特性。

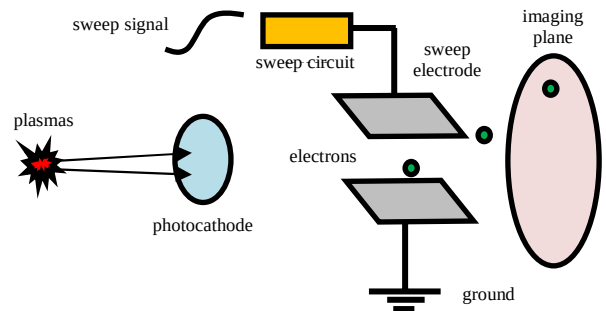


Fig.1 Operation principle of X ray streak camera
图 1 X 射线条纹相机工作原理示意图



Fig.2 Reliability block diagram
图 2 可靠性框图

2 可靠性模型

根据 X 射线条纹相机的结构特点,其可靠性框图如图 2 所示,根据工作流程 5 个子系统依次排列为:扫描电路、变像管、像增强器、CCD 以及控制电路,其可靠性模型属于串联模型。

可靠性分配是将 X 射线条纹相机的可靠性定量要求合理分配到分系统上,以明确各单元的可靠性要求,及时发现设计中的薄弱环节,并为优化设计提供依据。本文采取评分分配法对 X 射线条纹相机进行可靠性分配,对 X 射线条纹相机 5 个分系统的复杂度 n_1 、技术成熟度 n_2 、重要程度 n_3 以及环境严酷度 n_4 等 4 个指标进行评分,其中脚标 i 代表不同分系统。复杂度根据组成单元的零部件数量以及组装的难易度评估,最复杂 10 分,最简单 1 分;技术成熟度根据组成单元的技术成熟程度评定,最高的 1 分,最低的 10 分;重要度根据组成单元的重要程度评定,单元重要程度最高的 10 分,最低的 1 分;环境严酷度根据组成单元所处的环境评定,单元工作过程中会经受恶劣且严酷的环境评 10 分,环境条件最好的评 1 分。本文研究 X 射线条纹相机在强电磁辐射环境下的可靠性,因此环境严酷度主要根据 X 射线条纹相机组成单元所处的电磁辐射环境进行评估。

根据复杂度 r_{i1} 、技术成熟度 r_{i2} 、重要程度 r_{i3} 以及环境严酷度 r_{i4} 等 4 个指标评分可以计算出每个组成单元的评分数 w_i ：

$$w_i = \prod_{j=1}^4 r_{ij}$$

(1)

式中： r_{ij} 代表第 i 个组成单元的第 j 个因素评分数； $j=1$ 代表复杂度， $j=2$ 代表技术成熟度， $j=3$ 代表重要程度， $j=4$ 代表环境严酷度。根据组成单元的评分数可以得到评分系数：

$$C_i = \frac{w_i}{w}$$

(2)

式中： w_i 是第 i 个组成单元的评分数； w 为产品的总评分数， $w = \sum_{i=1}^4 w_i$ 。组成单元的故障率分配根据产品的总故障率，依据评分数系数进行分配。

环境严酷度主要根据 X 射线条纹相机组成单元所处的电磁辐射环境进行评估。在激光聚变物理实验中，电磁脉冲辐射主要来源于激光与靶作用产生的等离子体。在试验中，X 射线条纹相机探测端面需要对准等离子体以获取 X 射线信号，因此电磁脉冲辐射将沿着 X 射线光路进入到相机内部，其内部结构以及实验布局示意图如图 3 所示。法国科研人员对 X 射线条纹相机的腔体内电磁脉冲辐射分布进行了仿真^[12]，仿真结果显示 X 射线条纹相机内部电磁脉冲分布不均匀。由于辐射随着距离增加功率密度不断衰减，在相机内部经过各个壳体也会逐级衰减。位于前端的变像管受到的电磁脉冲辐射较大，其他组成单元受到辐射强度较弱，后置控制电路遭受的电磁辐射强度最弱。因此在考虑各组成单元的环境严酷度时，需要综合参考各个组成单元在相机中的方位以及实际遭受的电磁辐射强度大小。

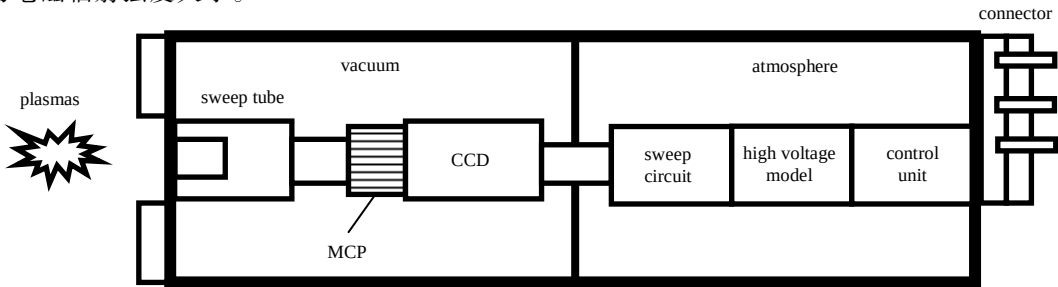


Fig.3 Internal structure of a streak camera and experiment setup
图 3 X 射线条纹相机内部结构以及实验布局示意图

3 可靠性分配与 FMEA 分析

根据物理实验基本要求，X 射线条纹相机的故障率不大于 0.1/h，结合 X 射线条纹相机内部电磁脉冲辐射分布仿真与测量的数据^[12]，对相机各个组成单元进行评分，得到表 1 所示的 X 射线条纹相机可靠性分配^[12]。

表 1 X 射线条纹相机可靠性分配

Table1 X ray streak camera reliability assignment							
subsystem	complexity	technical maturity	importance	environmental severity	rating of subsystem	rating coefficient of subsystem	failure rate
sweep circuit	5	1	8	5	200	0.048 3	0.005
image converter	9	3	10	8	2 160	0.521 5	0.052
image intensifier	5	3	5	7	525	0.126 8	0.013
CCD	8	3	8	6	1 152	0.278 1	0.028
control unit	7	1	5	3	105	0.025 4	0.003
					4 142	1.0	

从评分以及可靠性分配来看，变像管在重要度和复杂度指标上分值较高，并且环境严酷度分值也非常高，表明变像管在 X 射线条纹相机设计中要给予高度重视，并且在产品电磁加固上要加强设计。对于扫描电路，技术成熟度高，复杂度低，应当简化设计，设计更加紧凑可靠的单元。

FMEA 分析产品中所有潜在的故障模式及其对产品造成的所有可能影响。通过 FMEA 有助于对设计方案进行客观评价，充分考虑各种失效模式及其对产品可靠性的影响，进而建立相应的改进优化方法。根据各个单元的功能，结合实验数据分析，对 X 射线条纹相机出现的各种故障模式进行评估，得到 FMEA 如表 2 所示。

表 2 X 射线条纹相机设计 FMEA
Table2 FMEA for X-ray streak camera

function unit	function	breakdown mode	consequence	severity rating	design improvement
sweep circuit	impulse generation	sweep distortion wrong triggering	distorted data data capture failure	III	electromagnetic radiation hardening
sweep tube	photoelectric deflection	sweep distortion	wrong data	II	electromagnetic radiation hardening
image intensifier	signal amplification	signal distortion	wrong data	IV	structure optimization
CCD	signal recording	cram	data capture failure	II	electromagnetic radiation hardening
control unit	system control	control lost	data capture failure	IV	electromagnetic radiation hardening

表 2 中严酷度类别(severity rating)是指产品的故障模式最终影响的严重程度。分为 4 个等级, I 类(灾难), II 类(致命), III 类(中等), VI 类(轻度)。值得设计人员注意的是 II 类(致命)主要来自于变像管和 CCD 单元。变像管和 CCD 位于 X 射线条纹相机较为前端的部位, 电磁辐射环境极为恶劣。在强电磁脉冲的干扰下, 变像管对信号扫描失真会导致获取错误的实验信号、设计人员的误判, 从而对整体物理实验造成严重影响。CCD 在强电磁干扰下会突然死机, 直接导致采集失败。与扫描电路不同, 其严酷度定义为 III 类, 扫描电路在强电磁环境下会出现扫描信号波形失真和误触发现象, 同样会导致采集失败和试验采集数据失真。但由于扫描电路在试验前可以通过测试确认其工作状态, 可以及早发现问题并更换单元, 并且扫描电路技术成熟度较高, 单元模块化程度和稳定性都较高, 与其他单元接口也比较简单, 在强电磁环境下出现故障的概率小于 CCD 和变像管, 因此造成的危害要低于变像管和 CCD 故障。

结合可靠性分配和 FMEA, 可以看到, 从辐射加固方面看, X 射线条纹相机内的变像管、CCD 以及扫描电路的辐射加固要求较高, 对这几个单元进行加固, 能够显著提升相机的可靠性。特别是变像管单元, 其可靠性分配值在各个分系统单元中最高(0.052), 其故障能够引起严重实验损失, 是制约 X 射线条纹相机可靠性和稳定性的重要部件, 值得设计人员的高度关注。

4 结论

本文对激光聚变物理研究中核心诊断仪器——X 射线条纹相机的可靠性进行了研究。根据 X 射线条纹相机功能结构特点, 给出了其可靠性框图。针对可靠性结构, 对 X 射线条纹相机各功能单元进行了可靠性分配, 并针对其故障进行了 FMEA。本文研究工作对于 X 射线条纹相机的可靠性设计具有参考意义, 为相机设计人员全面考虑 X 射线条纹相机辐射加固, 提升相机在恶劣辐射环境下运行的稳定性和可靠性提供技术参考。

参考文献:

- [1] MEAD M J, NEELY D, GAUOIN J, et al. Electromagnetic pulse generation within a petawatt laser target chamber[J]. Review of Scientific Instrument, 2004, 75(10):4225-4227.
- [2] RAIMBOURG J. Electromagnetic compatibility management for fast diagnostic design[J]. Review of Scientific Instrument, 2004, 75(10):4234-4236.
- [3] BROWN C G, CLANCY T J, EDER D C, et al. Analysis of electromagnetic pulse(EMP) measurements in the National Ignition Facility's target bay and chamber[C]// EPJ Web of Conferences. Bordeaux, France: [s.n.], 2013:08012-1-08012-4.
- [4] BROWN C G, AYERS J, FELKER B, et al. Assessment and mitigation of diagnostic-generated electromagnetic interference at the National Ignition Facility[J]. Review of Scientific Instrument, 2012, 83(10):10D729-1-10D729-3.
- [5] BENEDETTI L R, BELL P M, BRADLEY D K, et al. Crosstalk in x-ray framing cameras: effect on voltage, gain, and timing (invited)[J]. Review of Scientific Instrument, 2012, 83(10):10E135-1-10E135-6.
- [6] CHEN Ziyu, LI Jianfeng, YU Yong, et al. Influence of lateral target size on hot electron production and electromagnetic pulse emission from laser-irradiated metallic targets[J]. Physics Plasmas, 2012, 19(11):113116-1-113116-6.
- [7] YI Tao, YANG Jinwen, YANG Ming. Investigation Into the electromagnetic impulses from long pulse laser illuminating solid targets inside a laser facility[J]. IEEE Photonic Sensors, 2016, 6(3):249-255.
- [8] 高崇信, 易涛, 王传珂, 等. 用于强激光靶耦合诊断的脉冲天线[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6):0606007-1-0607007-6. (GAO Chongxin, YI Tao, WANG Chuanke, et al. Pulse antenna in application of high power laser target electromagnetic pulse diagnosis[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(6):0606007-1-0607007-6.)
- [9] 杨鸣, 易涛, 王传珂, 等. 强激光辐照平面靶与柱腔靶产生电磁脉冲对比研究[J]. 中国激光, 2016, 43(8):0801009-1-0801009-8. (YANG Ming, YI Tao, WANG Chuanke, et al. Comparative investigation of electromagnetic pulses generated by strong laser irradiating planar and hohlraum targets[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8):0801009-1-0801009-8.)

- [10] 杨为明,王传珂,易涛,等. 神光 III 原型高功率激光装置电磁脉冲辐射[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(6): 905-909. (YANG Weiming,WANG Chuanke,YI Tao,et al. Investigation of electromagnetic pulse emission from Shenguang high power laser facilities[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(6):905-909.)
- [11] ZUBER C,BAZZOLI S,GAZAVE J,et al. LMJ X-ray streak cameras vulnerability to EMP[R/OL]. [2017-09-05]. http://www.lle.rochester.edu/media/publications/presentations/documents/CEANNSA16/8_Streak/1_Zuber.pdf.
- [12] 李良巧. 可靠性工程师手册[M]. 北京:中国人民大学出版社, 2012. (LI Liangqiao. Handbook of certified quality engineer[M]. Beijing:China Renmin University Press, 2012.)

作者简介:



易 涛(1980-), 男, 武汉市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为 ICF 实验电磁辐射和设备可靠性研究.email:ylexington@sina.com.

杨 鸣(1993-), 女, 四川省广元市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为强激光实验中电磁脉冲效应研究.

李廷帅(1983-), 男, 山东省青岛市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为高功率激光装置精密诊断技术研究.

陈 铭(1976-), 男, 四川省南部县人, 本科, 工程师, 主要研究方向为高功率激光装置运行与维护.

于瑞珍(1966-), 女, 山东省潍坊市人, 本科, 工程师, 现从事高功率激光装置电子学系统研究.

胡 昕(1968-), 男, 安徽省来安县人, 本科, 副研究员, 主要研究方向为高功率激光装置上高时间分辨条纹相机研发.

王 峰(1975-), 男, 河南省洛阳市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率激光装置精密诊断技术研究.

江少恩(1964-), 男, 湖北省黄冈市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为惯性约束聚变理论及诊断.

刘慎业(1962-), 男, 湖南省湘潭市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为惯性约束聚变诊断.

(上接第 806 页)

作者简介:



田 甜(1993-), 女, 四川省资阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星通信系统载波同步技术.email:tiantian20118@163.com.

李雄飞(1979-), 男, 陕西省榆林人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星扩频通信.

朱立东(1968-), 男, 四川省广安市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星通信、信号处理、信道建模与仿真、资源管理等, 发表论文百篇, 出版教材 3 部.

黄长文(1993-), 男, 山东省滕州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星与空间通信.

翟继强(1985-), 男, 河南省新乡市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为扩频通信.