

文章编号: 2095-4980(2014)06-0932-05

ICF 同步触发信号传输的可靠性研究

唐 菱, 陈 骥, 黄 夏, 汪凌芳, 王 超, 李克洪, 党 钊*

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 为提高惯性约束聚变(ICF)装置同步触发信号传输可靠性, 收集、整理了该传输系统的故障, 并将故障模式、影响和危害性分析(FMECA)方法应用到同步触发信号传输系统, 故障模式危害度最高的两类故障为同步触发信号时序漂移和同步触发信号受到干扰, 并在此基础上提出了相应的改进措施, 开展了可靠性验证试验, 试验研究结果表明, 该方法将原型装置同步触发信号传输的可靠性成功地提高至平均无故障发次大于 1 256 发, 并为 ICF 激光装置的可靠性研究提供了一种可行、有效的方法。

关键词: ICF 同步触发信号传输; 可靠性研究; 危害性分析方法; 时序漂移

中图分类号: TN16

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201406.0932

Improving reliability of timing system in ICF driver based on FMECA method

TANG Ling, CHEN Ji, HUANG Xia, WANG Ling-fang, WANG Chao, LI Ke-hong, DANG Zhao*
(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Failure Mode and Effects and Criticality Analysis(FMECA) of timing system in SG-III prototype is developed in order to improve the reliability of time system in Inertial Confinement Fusion(ICF) facility. This work effectively analyzes the most severe faults, concludes the disadvantages of the timing system, and puts forward improvement methods. The experimental results show that FMECA has successfully improved the reliability of the timing system, enabling the mean shot between failures above 1 256 shots. This work can provide a feasible and effective method for studying on the reliability of laser facility for ICF.

Key words: timing signal transferring of laser facility for ICF; reliability research; Fault Mode Effects and Criticality Analysis; time drift

大型激光装置是用于 ICF 研究的重要平台, 对于大型激光装置, 同步触发信号传输系统是一个非常重要、必不可少的环节^[1]。由于这类装置要求同步触发信号和激光同步, 因此微秒级抖动精确度仅为基本要求, 通常需要纳秒级以上的抖动精确度^[2], 而且同步触发对象工作在强放电脉冲场合, 因此同步触发信号在同步信号源与触发对象之间经常需要采用光传输, 以提高抗干扰能力^[3], 如图 1 所示。

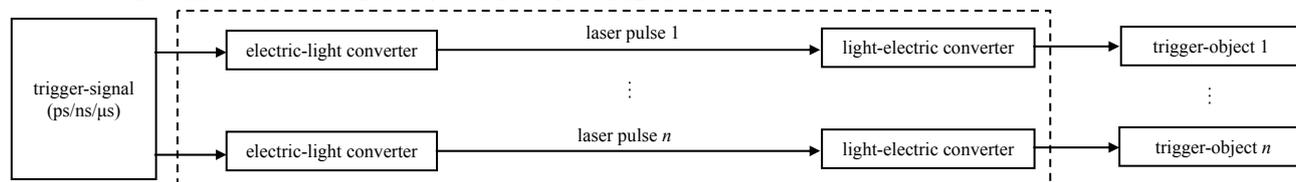


Fig. 1 Principle for trigger-signal light propagation

图 1 同步触发信号光传输的工作原理

其传输要求为可靠送达被触发对象, 以及被触发对象按照规定的时间节点触发工作。在如此极端条件下, 同步触发信号的传输过程易发生故障, 并将有可能影响到装置的每一个运行环节, 降低装置的运行效率, 因此, 有必要开展同步触发信号传输过程的可靠性研究^[4]。

本文将 FMECA 分析方法应用到用于 ICF 研究的神光 III 原型装置(以下简称原型装置)同步触发信号传输的

收稿日期: 2014-09-10; 修回日期: 2014-10-12

* 通信作者: 党钊 qingzhaodang@163.com

可靠性研究，根据 FMECA 分析方法^[5]，首先整理、分析了同步触发信号传输环节所出现的故障，并进行了故障模式和影响分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)以及故障危害性分析(Criticality Analysis, CA)，该分析总结了对装置运行影响最严重的技术薄弱环节，据此薄弱环节制定了设计改进和使用补偿措施，并开展了试验验证。

1 ICF 驱动器同步触发信号传输的 FMECA 分析

据统计结果，原型装置从试运行至 2009 年 12 月，同步触发信号传输共发生了 101 次故障，运行故障率为 9.2%，降低了装置的运行效率和可靠性^[6]。通过对系统进行定义对同步触发信号传输故障进行了 FMEA 和 CA，结果表明，同步触发信号传输故障严酷度主要集中在 II 类和 III 类，有电缆传输故障、光纤传输故障所导致的同步触发信号无或者同步触发信号时有时无的现象，也有在同步触发信号传输过程中由于设计导致的时序漂移、受干扰提前触发等现象。

表 1 同步触发信号传输故障的 FMEA 分析
Table1 FMEA for trigger-signal propagation fault

products or function module	function	failure mode	failure cause	task and work mode	
electro-optical transferring module for ns signal	trigger oscilloscope and physics diagnosis equipments	the drift of ns signal reaches several nano-seconds	electro-optical transferring design	preparing for and doing experiment	
optical receiver module of ns signal	trigger the electro optical switch in the preamplifier	optical receiver modules of ns signal are interfered	electro- magnetic interference	preparing for and doing experiment	
failure effects					
part effects	higher level effects	ultimate effects	failure check method	make up measure	criticality level
framing is not able to acquire the image	experiment is not able to be completed in accordance with the provisions of technical indicators	experiment fails	observe the time waveform complete or not	improving the design	level II
electro optical switch in the preamplifier can not work normally	sometimes there is no laser pulse output from the preamplifier	experiment fails or causes economic loss	observe if there is laser pulse from the preamplifier	improving the design	level II

表 2 同步触发信号传输故障的 CA 分析
Table2 CA for trigger-signal propagation fault

products or function module	function	failure mode	failure cause	task and work mode	criticality level
electro-optical transferring module for ns signal	trigger oscilloscope and physics diagnosis equipments	the drift of ns signal reaches several nano-seconds	electro-optical transferring design	electro-optical transferring design	level II
optical receiver module of ns signal	trigger the electro optical switch in the preamplifier	optical receiver modules of ns signal are interfered	electromagnetic interference	preparing for and doing experiment	level II
failure mode probability level or failure data source	failure rate λ_p	failure mode frequency ratio α_j	failure effect probability β_j	working time	failure mode's harm degree C_{mj}
GJB1391	3.25%	0.415 8	0.85	753	8.650 2
GJB1391	3.1%	0.168 3	1.00	753	3.929 0

以时序漂移、同步触发信号受电磁干扰两类故障模式为例描述工作流程，其故障模式影响与危害性分析(FMEA)如表 1 所示^[7-8]。

根据 FMEA 分析结果，开展了同步触发信号传输故障定量的危害性分析(CA)，如表 2 所示。定量 CA 分析法中每个故障模式危害度 C_{mj} 和产品危害度 C_r 的计算方法分别如式(1)和式(3)所示。对给定的严酷度类别和任务阶段而言，产品的第 j 个故障模式危害度 C_{mj} 由式(1)计算：

$$C_{mj} = \alpha_j \beta_j \lambda_p t \tag{1}$$

式中： C_{mj} 为产品在工作时间 t 内，以第 j 种故障模式发生的某严酷度等级下的危害度； α_j (故障模式频数比)为产品第 j 种故障模式发生次数与产品所有可能的故障模式数的比率； β_j 为故障模式影响概率，即产品在第 j 种故障模式发生的条件下，其最终影响导致“初始约定层次”出现某严酷度等级的条件概率，GJB1391 对 β_j 值的取值做出了规定； λ_p 为被分析产品在其任务阶段内的故障率，在将其对装置的本地化过程中，为故障次数与部件工作次数之比； t 为产品任务阶段的工作时间。 j 通过统计、试验、预测等方法获得。当产品的故障模式数为 N ，则 $j(j=1,2,\dots,N)$ 之和为 1，即

$$\sum_{j=1}^N \alpha_j = 1 \tag{2}$$

产品的危害度 C_r ：产品的危害度 C_r 是该产品在给定的严酷度类别和任务阶段下的各种故障模式危害度 C_{mj} 之和，即

$$C_r = \sum_{j=1}^N \alpha_j \beta_j \lambda_p t \tag{3}$$

如表 2，在 II 类故障中，故障模式危害度最高的两类故障为同步触发信号时序漂移和同步触发信号受到干扰，危害度分别达到 8.650 2 和 3.929 0，在所有 II 类故障中影响为严重，是设计改进、补偿措施研究重点。

2 同步触发信号传输故障改进措施研究

2.1 同步触发信号时序漂移较大原因分析及改进措施研究

如图 2 所示，同步触发对象为 PC 高压脉冲模块，实验研究发现，电光转换模块中的发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)作为电光发射模块，光发射单元会引入约 5 ns 的时间漂移，超出了同步触发信号漂移的设计指标(同步触发信号漂移小于 1 ns)。因此，必须改进光同步触发信号的光源设计。

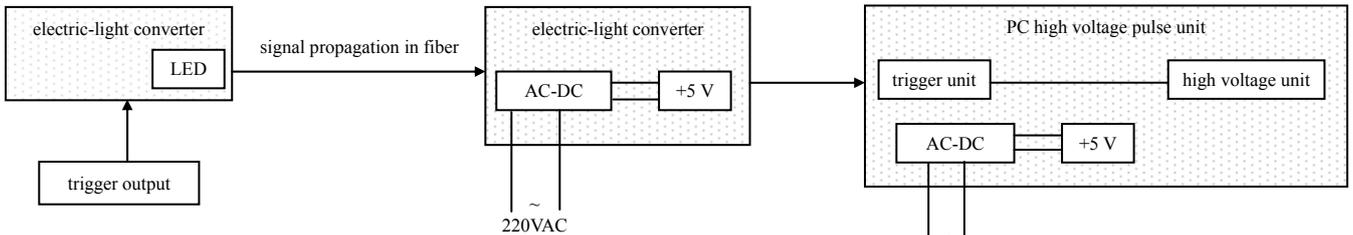


Fig.2 Principle for design of trigger-signal propagation
图 2 同步触发信号光传输设计原理图

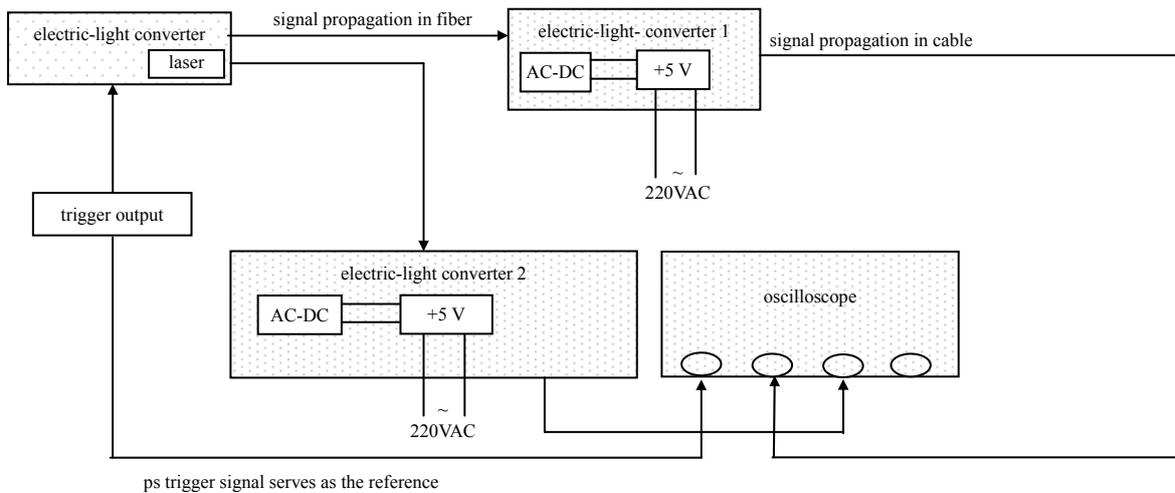


Fig.3 Verification principle for the improved design of trigger-signal propagation
图 3 改进设计后的同步触发信号光传输试验验证原理图

图 3 所示为同步触发信号时序漂移技改措施的验证试验，将原来的 LED 作为光发射单元改成了以激光器作为光发射单元，送出 2 路具有精密同步关系的光脉冲信号，示波器的通道 2,3 分别为光电转换盒 1,2 输出的同步信号，示波器通道 1 以同步系统直接输出的 ps 信号作为测量基准，观察基准信号与光电转换盒输出信号的时间间隔抖动，监测时间为 8 h，得到测试结果如表 3 所示。经过改进设计后，在 8 h 内进行测试，同步触发信号时间漂移小于 1 ns，满足设计要求。

表 3 采用激光作为光发射单元的时间漂移测试

Table3 Timing shift test for the light unit using laser

signal source	average/ns	minimum/ns	maximum/ns	RMS/ps	statistical time/h	time jitter peak to peak/ns	result
1	17.39	17.17	17.92	56	8	0.75	reach the standard
2	15.45	15.17	15.78	67	8	0.61	reach the standard

2.2 同步触发信号被干扰原因分析以及改进措施

如图 2 所示，同步触发信号工作在强放电场合(瞬间电流达到数十千安)^[9]，触发对象为 PC 高压脉冲模块。

如果采用独立于触发对象之外的光电转换模块，光电转换模块与被触发对象不共电磁环境，强电磁干扰会改变光电转换模块的地电平^[10]，使得光电转换模块输出电平变高，而被触发单元的地电平仍为原地电平，就有可能导致被触发单元被提前触发。因此，将同步系统的光电转换模块放置于触发对象(PC 高压脉冲模块)内，且供电都由 PC 高压脉冲模块内的直流电源直接供电，让光电转换模块与 PC 高压脉冲模块共用一个直流电源，实现共地，增强抗共模干扰的能力，设计方案如图 4 所示。

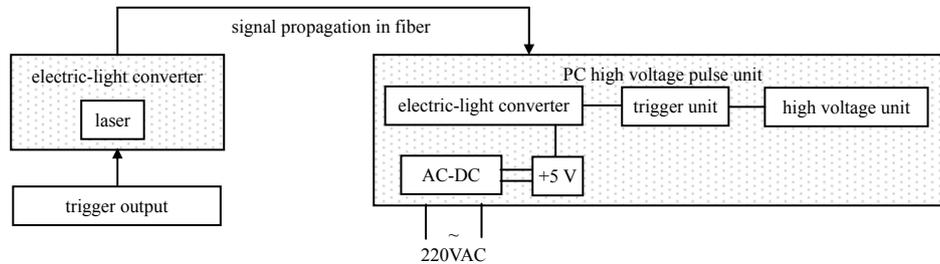


Fig.4 Principle for the improved design

图 4 改进设计后的设计原理图

利用激光装置前端预放离线联机实验开展了该技改措施的验证试验，改进前同步触发信号光电转换模块与 PC 高压脉冲模块都是独立仪器，如图 2 所示，干扰比较严重，约有 50%发次的同步信号被干扰；采用技术改进后的设计，其设计原理图如图 4 所示，同步触发信号与被触发对象共电磁环境，在其后开展的实验研究中未发生干扰现象，试验验证结果如表 4 所示。

表 4 同步触发信号受到干扰采用改进措施后的试验验证

Table4 Verification of the improved system for the interference of trigger signal

experiment conditions	electro-optical transferring module stay in the same electromagnetic environment with the PC high voltage module
total shots	96
interfered shots	0

3 结论

后期跟踪结果表明，通过设计改进和使用补偿措施以后，使用过程中原型装置同步信号传输过程的故障率小于 0.1%，该项研究成功避免了同步触发信号传输过程中所出现的故障，将装置同步触发信号传输的可靠性成功提高到了大于 1 256 发。本文通过对 FMECA 的深入理解和在 ICF 装置的工程应用，验证了应用 FMECA 分析方法开展 ICF 装置可靠性研究的可行性和有效性，为 ICF 激光装置的可靠性研究提供了一种有效的方法。

参考文献：

- [1] 党钊,袁晓东,袁小兵,等. 星光 II 激光装置自动控制系统的研制[J]. 光学与光电技术, 2004,2(4):36-39. (DANG Zhao, YUAN Xiao-dong, YUAN Xiao-bing, et al. Research and manufacture of automatic control system in Xing Guang II facility[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2004,2(4):36-39.)
- [2] 李小群,党钊,陈骥,等. 一种单次精密时序电脉冲的产生方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2007,5(2):126-129. (LI Xiao-qun, DANG Zhao, CHEN Ji, et al. Method of single low jitter timing electronic pulse sequence generation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2007,5(2):126-129.)
- [3] 党钊,陈德怀,王超,等. 基于可编程数据发生器的高精度同步系统的研制[J]. 电子测量技术, 2008(10):191-193. (DANG Zhao, CHEN De-huai, WANG Chao, et al. Research and manufacture of the high precision synchronization system based on programmable data generator[J]. Electronic Measurement Technology, 2008(10):191-193.)
- [4] 杨东,贺少勃,陈远彬. 用于 ICF 的高功率激光放大器系统的可靠性[J]. 中国工程物理研究院科技年报, 2006(1): 288. (YANG Dong, HE Shao-bo, CHEN Yuan-bin. Reliability of high power laser amplifier system of ICF[J]. Annals of Science and Technology of China Academy of Engineering Physics, 2006(1):288.)
- [5] 康锐,石荣德. FMECA 技术及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2006. (KANG Rui, SHI Rong-de. FMECA technology and its application[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2006.)
- [6] 孙权,周经伦,魏晓峰. 惯性约束聚变激光装置系统可靠性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2003,40(1):12-15. (SUN Quan, ZHOU Jing-lun, WEI Xiao-feng. Reliability study of inertial confinement fusion laser system[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2003,40(1):12-15.)

- [7] CHEN Guang-yu, HUANG Xi-zi, TANG Xiao-wo. A BDD & SEA based analysis of phased-mission system reliability[C]// Proceedings Annual Reliability and Maintainability. Newport Beach, CA: IEEE, 2006:456-463.
- [8] 陈光宇, 黄锡滋, 张小民, 等. 不完全覆盖的多阶段任务系统可靠性综合分析[J]. 系统工程学报, 2007, 22(5):539-545. (CHEN Guang-yu, HUANG Xi-zi, ZHANG Xiao-min, et al. Synthetic methods for reliability analysis of phased-mission system with imperfect coverage[J]. Journal of Systems Engineering, 2007, 22(5):539-545.)
- [9] 童金禄, 杨兰均, 郭良福. 强激光能源系统的 Marx 触发器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(5):1251-1255. (TONG Ji-lu, YANG Lan-jun, GUO Liang-fu. Marx trigger of power conditioning system in high power laser facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(5):1251-1255.)
- [10] 童金禄, 郭良福, 齐珍. 强激光能源系统故障保护对策与电磁干扰抑制方法[J]. 电力系统运行与规划, 2012, 32(28):97-103. (TONG Ji-lu, GUO Liang-fu, QI Zhen. Fault protective measures and EMI depressing approach for power conditioning systems in high power lasers[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(28):97-103.)

作者简介:



唐 菱(1986-), 女, 四川省南充市人, 硕士, 主要研究方向为高功率固体激光装置自动化控制. email: atl_1234@163.com.

陈 骥(1964-), 男, 湖南省湘潭市人, 高级技师, 主要从事高功率固体激光装置相关控制系统研制.

黄 夏(1987-), 女, 四川省绵阳市人, 学士, 主要研究方向为高功率固体激光装置自动化控制.

李克洪(1992-), 男, 成都市人, 主要研究方向为高功率固体激光装置自动化控制.

汪凌芳(1974-), 女, 南昌市人, 硕士, 主要研究方向为高功率固体激光装置自动化控制.

党 钊(1970-), 男, 四川省射洪县人, 研究员, 主要研究方向为快电子学、高功率固体激光器驱动控制技术. email: qingzhaodang@163.com.

王 超(1987-), 男, 西安市人, 学士, 主要研究方向为高功率固体激光装置自动化控制.

(上接第 931 页)

- [16] Chvala A, Donoval D, Beno P, et al. Analysis of reliability and optimization of ESD protection devices supported by modeling and simulation[J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(6):1031-1038.
- [17] Cha H Y, Choi Y C, Eastman L F, et al. Simulation study on breakdown behavior of field-plate SiC MESFETs[J]. International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2004, 14(03):884-889.

作者简介:



黄 薇(1991-), 女, 湖南省衡阳市人, 本科, 主要从事ESD相关技术研究, 主持并参与大学生创新实验项目“瞬态电压抑制器的建模及仿真”. email: wdzsanban@163.com.

罗启元(1992-), 男, 湖南省岳阳市人, 本科, 主要从事ESD相关技术研究.

蒋同全(1993-), 男, 湖南省岳阳市人, 本科, 主要从事ESD相关技术研究.

汪 洋(1981-), 女, 湖南省邵阳市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为高压ESD器件.

金湘亮(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 教育部“新世纪优秀人才支持计划”获得者, 美国电气及电子工程师学会 IEEE 会员, 国际光学工程学会 SPIE 高级会员, 中国电子学会高级会员, 中国光学学会高级会员.