文章编号：2095-4980(2021)02-0342-05

脉冲氙灯瞬态放电电流诊断单元设计分析

苏　东[1]，陈德怀[1]，张公全[2]，张雄军[1]，沈　昊[1]，赖贵友[1]，唐海波[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.许继电源有限公司，河南 许昌 461000)

摘　要：脉冲氙灯瞬态放电电流诊断单元是惯性约束聚变(ICF)激光装置中能源系统的重要组成部分，基于对其面临的强电磁干扰、噪声耦合、多路并行采集电路拓扑约束等问题的分析，提出了一种多级隔离和基于现场可编程门阵列(FPGA)的多路并行架构的诊断单元设计方法，并依据该方法完成了样机研制。实验表明，诊断单元的电流测量范围为 0~25 kA，采样率为 200 kHz，测量准确度优于±0.5%，满足 31 kV 工作点电压下 20 路脉冲氙灯放电电流的同步诊断需求。相比传统设计，该方法具备更强的电磁兼容性和更高的并行采集设计集成度。

关键词：脉冲氙灯；能源组件；电流波形；电磁干扰；并行采集

中图分类号：TN245　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA2019462

Design and analysis of diagnosis unit for pulsed xenon lamp transient discharge current

SU Dong[1]，CHEN Dehuai[1]，ZHANG Gongquan[2]，ZHANG Xiongjun[1]，SHEN Hao[1]，LAI Guiyou[1]，TANG Haibo[1]

(1.Research Center of Laser Fusion，China Academy of Engineering Physics，Mianyang Sichuan 621999，China；
2.Xuji Power Company Limited，Xuchang Henan 461000，China)

Abstract：The diagnostic unit of pulsed xenon lamp transient discharge current is an important part of the energy system in an Inertial Confinement Fusion(ICF) laser device. Based on the analysis of problems such as strong electromagnetic interference, noise coupling, and topological constraints of multiple parallel acquisition circuits, a design method of multi-level isolation and Field Programmable Gate Array(FPGA)-based multi-channel synchronous parallel architecture is proposed and the prototype is developed. Experiments show that the current measurement range of the diagnostic unit is 0–25 kA, the sampling rate is 200 kHz, and the measurement accuracy is better than ±0.5%. This design meets the requirements of synchronous diagnosis of the discharge current of 20 pulsed xenon lamps under 31 kV of working point voltage. Compared with traditional design, this method has stronger electromagnetic compatibility and higher integration of parallel acquisition design.

Keywords： pulsed xenon lamp；energy component；current waveform；electromagnetic interference；parallel acquisition

大型强激光装置是惯性约束聚变(ICF)研究的主要实验条件，能源系统作为激光装置重要的组成部分[1-4]，通过高压储能、大电流放电过程为脉冲氙灯提供高能量瞬态电流脉冲，为片状放大器提供匹配的泵浦能量。由于该瞬态电流脉冲的幅值、脉宽、时序等波形特性直接关联片状放大器的增益系数，是影响激光能量输出的关键因素之一。此外，该放电电流波形也能反映当前能源组件及脉冲氙灯的运行状态，给相关系统的故障判定及运行维护提供依据。因此，脉冲氙灯瞬态放电电流波形的实时诊断分析具有重要意义。

随着 ICF 研究的深入发展，强激光装置[5-7]需要创造更高的激光驱动能量，由此对片状放大器的泵浦能量密度和泵浦效率提出了更高要求。能源系统的工作点电压由 23.5 kV 提升到 31 kV，单台套能源组件驱动的氙灯倍增到 20 路，这些提升会使脉冲氙灯电流波形的诊断设计面临更复杂的问题。高电压大电流充放电过程必然会引入强烈的噪声耦合和电磁干扰效应[8-10]，降低脉冲氙灯电流波形的采集质量；倍增的波形采集路数对诊断单元

收稿日期：2019-11-19；**修回日期：**2020-01-14
作者简介：苏　东(1987–)，男，硕士，工程师，主要研究方向为脉冲功率。email:sudong_sc @163.com

的并行处理能力也提出了更高要求。目前，已有部分针对脉冲氙灯放电电流波形诊断单元的设计，文献[11]介绍了一种工作点电压为 23 kV 的 10 通道并行诊断设计，但难以解决更高工作点电压、更多路电流并行诊断的需求。文献[12]设计了以 FPGA 为核心的多路数据实时采集及传输系统，具有一定的借鉴意义，但不能匹配本文所述应用环境。本文提出了一种多级隔离和基于 FPGA 多路同步并行架构的设计方法，在强化电磁兼容性设计的基础上，显著提高了单机集成度，为强激光装置甚多路氙灯电流的并行诊断提供了新的技术选择。

1　脉冲氙灯放电电流波形诊断原理

1.1 基本构成及工作原理

如图 1 所示，能源组件放电回路由预储能模块、主储能模块、固体开关(K_1, K_2)、调波电感(L_1~L_n)、传输电缆(T_1~T_n)、脉冲氙灯(X_1~X_n)构成。能源组件首先通过充电控制单元给预、主储能模块充电，待预、主储能模块达到设定电压值后停止充电，随即通过外触发组合信号控制固体开关 K_1,K_2 先后导通，使预、主储能模块中储存的能量通过调波电感、传输电缆送入到脉冲氙灯，从而形成放电电流脉冲。脉冲氙灯放电电流波形诊断单元由罗氏线圈(S_1~S_n)、多路并行采集电路以及信号线缆组成。罗氏线圈通过信号线缆同多路并行采集电路连接，采集电路作为独立的模块放置于高压环境远端，负责完成脉冲氙灯放电电流波形的采集与分析。

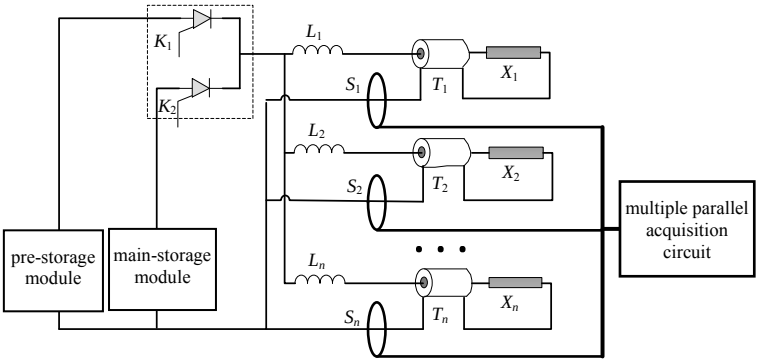

Fig.1 Power component discharge circuit and discharge waveform diagnostic unit
图 1 能源组件放电回路及放电波形诊断单元

1.2 面临的问题

1.2.1 强电磁干扰与噪声耦合

能源组件作为大电流驱动电源，其强电单元在充放电过程中会对弱电单元造成强电磁干扰。特别是空气或固体开关在导通瞬间会产生较强的干扰脉冲信号，使诊断单元采集的波形存在尖峰毛刺与截断现象，如图 2(b)、2(c)所示。其次，信号传输过程中耦合的噪声也会影响采集波形的质量，如图 2(d)所示。

利用 Montena 的空间电场 D-DOT 探头及空间磁场 B-DOT 探头对能源组件的空间辐射干扰进行测量，结果如图 3 所示，由于电场探头与磁场探头接近同点测量，测试空间电磁场结果呈现一定相位差且磁场滞后于电场，表明测试结果有一定的参考意义，验证了靠近能源组件的位置存在明显的空间辐射干扰。

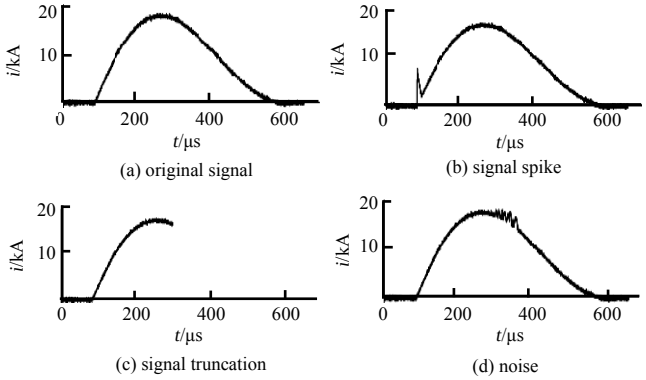

Fig.2 Discharge current waveform under the influence of strong electromagnetic interference and noise coupling
图 2 强电磁干扰和噪声耦合情况下放电电流波形采集结果

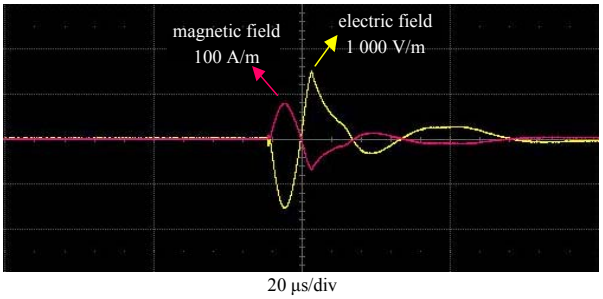

Fig.3 Test results of space transient electromagnetic field
图 3 空间瞬态电磁场测试结果

1.2.2 电路拓扑

传统的多路数据采集电路原理如图 4(a)拓扑 A 所示，每路信号经过调理后送入独立的 ADC 通道作模数转化。该电路拓扑受限于单 ADC 芯片通道数及微控制器的并行处理能力，难以同时满足多路、高采样率特点的信号采集应用需求。拓扑 B(图 4(b))是在电路拓扑 A 的基础上设计，它充分利用了总线扩展技术，能够在一定程

度上解决多路信号同步并行采集的问题，该设计模式在已有的强激光装置能源组件中获得验证。但面对脉冲氙灯放电回路数倍增的实际需求，电路拓扑 B 集成度偏低的缺陷愈发突出。

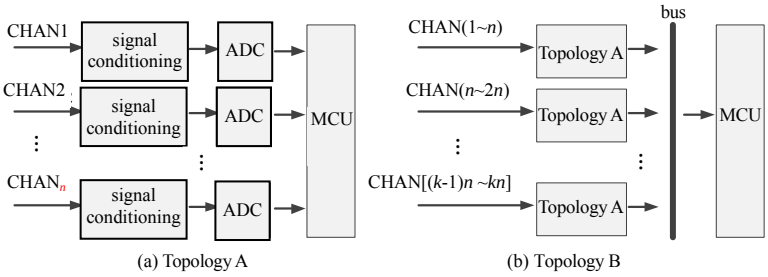

Fig.4 Topology of multiple parallel acquisition circuits
图 4 多路并行数据采集电路原理拓扑

2 放电电流波形诊断单元设计

2.1 罗氏线圈的参数设计

考虑到积分型罗氏线圈输出的电压信号在传输过程中易受到干扰和衰减，因此设计中选用电流型罗氏线圈。能源组件工作点电压为 31 kV，产生的放电电流峰值约为 20 kA，罗氏线圈变比设计为 10 000:1，输出的峰值电流为 2 A。该电流信号通过同轴电缆传输到远端采集电路的输入通道，并在采集电路上通过电流互感器再次衰减后取样积分，从而获得可测量的电压值。

2.2 多级隔离设计

能源组件在充放电瞬间会产生强电磁干扰，包括空间辐射电磁场、传导干扰。针对传导干扰，采用三级隔离设计，第一级为安装在放电回路处的罗氏线圈，由于罗氏线圈利用电磁感应原理对电流进行转化，输出为弱信号，使远端采集单元与待测电流回路完全隔离；第二级为板级电流互感器，从罗氏线圈输出的电流信号通过电流互感器(500:1)再次衰减后进入采集电路的信号调理通道，实现次级隔离；第三级为采集电路中的模数隔离设计，该设计防止模拟信号中的尖峰脉冲串扰到数字电路部分，导致数字器件的损坏。针对空间辐射干扰，信号传输选用同轴电缆，降低信号在传输过程中空间电磁场的影响。同时，信号采集电路设计有严密的机壳用于整体屏蔽。

2.3 基于 FPGA 的多路并行采集电路设计

诊断单元需同时满足 20 路脉冲氙灯回路、地线、高压机柜地、反射体回路等的电流波形采集，设计单路采样率为 200 kHz。基于前文分析，提出一种基于 FPGA 多路同步采集电路的设计，如图 5 所示。信号经过罗氏线圈及电流互感器两级衰减后送入信号调理电路，依次做滤波、跟随、放大、二次滤波、钳位保护等处理，处理完成后送入模数转换器中进行采样。模数转换器选用具备 8 路同步采样通道的芯片 ADS8588，最大采样率为 500 kSPS，满足设计目标。FPGA 利用自身时序处理优势控制片选信号和采集时序，通过并行总线同多个模数转换芯片实现数据通信。在并行总线电气连接处设计了数字隔离，有效地防止外界干扰信号串扰到逻辑处理电路部分。本设计预留有 CAN 总线，多个相同并行采集模块可共享该总线，从而实现更多路数的同步并行采集。

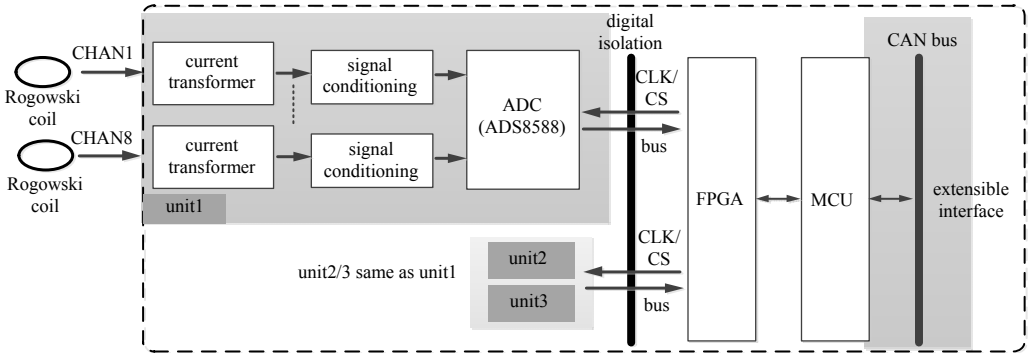

Fig.5 Multi-channel synchronous acquisition circuit based on FPGA
图 5 基于 FPGA 的多路同步采集电路

3　实验分析

依据本文设计方法完成了脉冲氙灯放电电流诊断单元样机的研制，并在某激光装置上开展测试实验。工作点电压为 31 kV，充放电选择主预模式，诊断单元同时采集 20 路电流信号，上位机软件绘制的采集结果如图 6 所示。图中两处波峰分别代表预、主储能模块对脉冲氙灯放电的电流波形，20 路脉冲氙灯电流波形平滑完整，无明显噪声和毛刺，基本反映了完整的放电过程，能够为放电评估提供支撑数据。20 路脉冲氙灯放电电流波形基本接近重叠，一致性较好，主放电脉冲波峰处的细微差异是由放电回路参数、脉冲氙灯负载差异等因素所致。经测试，诊断单元采样率优于 200 kHz，在 25 kA 测量范围内未出现饱和现象。

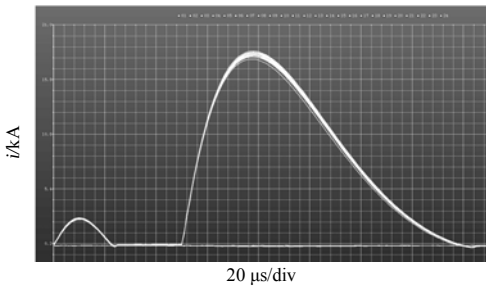

Fig.6 Discharge current waveform of 20 channels pulsed xenon
图 6 20 路脉冲氙灯放电电流波形

为进一步评测电流波形采集的准确性，利用积分型罗氏线圈 Person 5664 及示波器搭建对比测试系统。任意选取 20 个电流回路中的一路，将罗氏线圈直接安装在被测回路，其输出信号导入示波器进行分析。实验中对比测试系统和本文设计诊断单元同步运行，对比测试系统的测试结果如图 7 所示。将诊断单元测试结果同对比测试系统作对比，由图 8 可知，两种方式获取的波形基本一致。由于示波器采样率较高(500 MHz)，因此图 8 中对比测试系统的数据为图 7 数据的间隔取样，且未做平滑或拟合处理，存在毛刺和波动；此外，对比测试系统裸露在外，无法做到良好电磁防护，易受到干扰，对测试结果造成一定影响，也侧面验证了诊断单元抗干扰设计的有效性。多次重复上述测量，获取结果基本一致，验证了诊断单元的测量准确度满足要求。进一步对数据进行分析，评测诊断单元的测量准确度优于±0.5%。

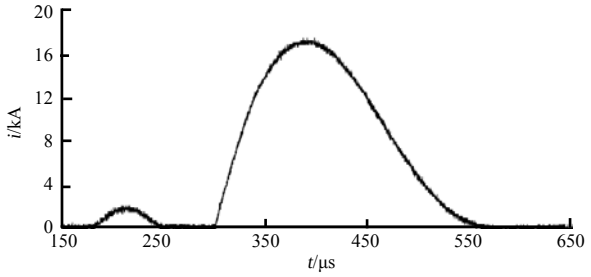

Fig.7 Single pulsed xenon lamp discharge current waveform measured by the test system
图 7 对比测试系统单路脉冲氙灯放电电流波形

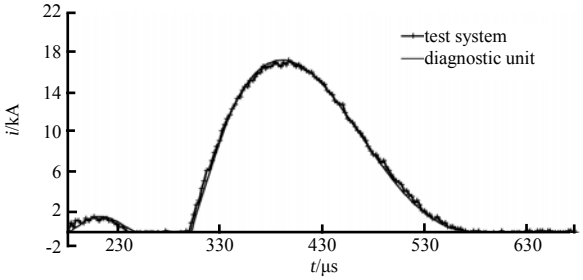

Fig.8 Waveform comparison between current waveform diagnostic unit and test system
图 8　电流波形诊断单元同测试系统获取波形对比

4　结论

本文针对脉冲氙灯放电电流诊断单元设计面临的诸多问题，提出了一种多级隔离和基于 FPGA 的多路同步并行架构的设计方法，并依据该方法完成了样机研制。实验表明，诊断单元的电流测量范围为 0~25 kA，采样率为 200 kHz，测量准确度优于±0.5%，满足 31 kV 工作点电压下 20 路脉冲氙灯放电电流的同步诊断需求。

参考文献：

[1] 周丕璋,郭良福,陈德怀,等. 激光聚变放大器能源系统述评[J]. 强激光与粒子束, 2003,15(4):346-351. (ZHOU Pizhang, GUO Liangfu,CHEN Dehuai,et al. Overview of main amplifier power conditioning system for the laser fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003,15(4):346-351.)

[2] ARNOLD P A,JAMES G F,PETERSEN D E,et al. An update on NIF pulsed power[C]// 2009 IEEE Pulsed Power Conference. Washington,DC,USA:IEEE, 2009:352-356.

[3] ARNOLD P A,HULSEY S D,ULLERY G T,et al. Status of the NIF power conditioning system[C]// 2007 16th IEEE International Pulsed Power Conference. Albuquerque,NM,USA:IEEE, 2007:1457-1461.

[4] ARNOLD P A,HULSEY S D,ULLERY G T,et al. An update on the status of the NIF power-conditioning system[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008,36(2):383-388.

[5] LINDL J,LANDEN O,EDWARDS J,et al. Review of the national ignition campaign 2009-2012[J]. Physics of Plasmas, 2014,21(2):1-72.

[6] ZHENG W,WEI X,ZHU Q,et al. Laser performance upgrade for precise ICF experiment in SG-Ⅲ laser facility[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2017,2(5):243-255.

[7] ZHENG W,WEI X,ZHU Q,et al. Laser performance of the SG-III laser facility[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2016,4(3):5-12.

[8] 童金禄,陈德怀,齐珍,等. 强激光能源系统故障保护对策与电磁干扰抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2012,32(28):97-103. (TONG Jinlu,CHEN Dehuai,QI Zhen,et al. Fault protective measures and EMI depression approach for power conditioning systems in high power lasers[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(28):97-103.)

[9] 孟萃,杨超,李鑫,等. 高功率激光装置电磁环境研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(1):70-74. (MENG Cui,YANG Chao,LI Xin,et al. Development of electromagnetic environment research of high power laser facility[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(1):70-74.)

[10] XU Z,MENG C,XU Z,et al. Evaluation of cable SGEMP response using Monte Carlo and Finite-Difference Time-Domain methods[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017,64(11):2829-2836.

[11] 陈实,熊吉,李网生. 基于 DSP 和 CPLD 的脉冲氙灯电流实时采集系统的研制[J]. 信息化研究, 2009,35(8):22-24. (CHEN Shi,XIONG Ji,LI Wangsheng. Development of a xenon lamp current real-time data acquisition system based on DSP and CPLD[J]. Informatization Research, 2009,35(8):22-24.)

[12] 冯希辰,杨帆,刘登学,等. 基于 FPGA 的多路数据实时采集与传输系统[J]. 微电子学, 2016,46(4):511-514. (FENG Xichen,YANG Fan,LIU Dengxue,et al. A multi-channel real-time data acquisition and transmission system based on FPGA[J]. Microelectronics, 2016,46(4):511-514.)

(上接第 341 页)

参考文献:

[1] EFTAXIOPOULOS N,AXELOS N,PEKMESTZI K. Donut:a double node upset tolerant latch[C]// IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. [S.l.]:IEEE, 2015:509-514.

[2] FAVALLI M,METRA C. TMR voting in the presence of crosstalk faults at the voter inputs[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2004,53(3):342-348.

[3] CALIN T,NICOLAIDIS M,VELAZCO R. Upset hardened memory design for submicron CMOS technology[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996,43(6):2874-2878.

[4] 王佳,李萍,郑然,等. 一种单粒子效应加固 RS 触发器的电路设计[J]. 微电子学与计算机, 2018(9):55-59. (WANG Jia,LI Ping,ZHENG Ran,et al. Design of a single event effects hardened RS flip-flops[J]. Microelectronics and Computer, 2018(9):55-59.) DOI:10.19304/j.cnki.issn 1000-7180.2018.09.12.

[5] SHAH J S,SACHDEV M. Radiation hardened pulsed latches in 65 nm CMOS[C]// IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering(CCECE). [S.1.]:IEEE, 2016:1-4.

[6] TADROS R N,HUA W Z,MOREORA M T,et al. A low power low-area error-detecting latch for resilient architectures in 28 nm FDSOI[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems Ⅱ:Express Brief, 2016,63(9):858-862.

[7] UENO H,NAMBA K. Construction of a Soft Error(SEU) hardened latch with high critical charge[C]// IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance(DFT) in VLSI and Nanotechnology Systems. [S.1.]:IEEE, 2016:27-30.

[8] 黄正锋,张阳阳,李雪健,等. 一种容忍单粒子双节点翻转的锁存器设计[J]. 合肥工业大学学报, 2019,43(4):493-499. (HUANG Zhengfeng,ZHANG Yangyang,LI Xuejian,et al. Design of a single event double node upset tolerant latch[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2019,43(4):493-499.) DOI:10.3969/j.issn.1003-5060. 2019.04.011.