

文章编号: 0258-7025(2004)04-0407-05

# 强激光驱动器能源系统瞬态特征 实时测控系统研究

柴 毅, 廖传锦, 李 佳, 黄席穉, 樊友平

(重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

**摘要** 随着惯性约束核聚变研究的发展, 强激光驱动器能源系统的研究备受关注。为了向激光驱动能源系统传输效率的研究提供可靠的实验数据, 研究了强激光驱动器能源系统中氙灯瞬态放电特征数据进行实时检测的方法和测控系统结构。采用量化传输模式进行特征量的检测与传输, 既实现了高压隔离, 又避免了在远距离传输过程中受到干扰, 确保测量精度。配合系统的模块化设计, 采用多线程工作模式, 对计算机系统的控制功能进行工作线程划分, 提高了系统的实时性和协调性。实验表明, 系统有效地实现了弱电系统对强电系统的远程控制, 测量精度满足测量要求, 已成功应用于能源系统的实验研究。

**关键词** 能源计算与测量; 能源系统; 实时检测; 氙灯; 瞬态特征

**中图分类号** TN 245 **文献标识码** A

## Research on Real-Time Measuring the Instantaneous Discharging Characteristic for High Power Laser Power Conditioning System

CHAI Yi, LIAO Chuan-jin, LI Jia, HUANG Xi-yue, FAN You-ping

(Chongqing University Automation College, Chongqing 400044, China)

**Abstract** Developing with the research on ICF, more and more attention is paid to the high power laser power conditioning system. In order to obtain accurate experiment data for researching on transmission efficiency of the high power laser power conditioning system, the structure of the controlling, measuring system and its real-time measure method for the characteristic data during the instantaneous discharging process of the xenon flash lamp were presented. A quantified-transmit model was adopted to measure and transmit the characteristic data, and it realized not only separating high voltage, but also preventing from being disturbed during long-distance transmission to ensure measuring precision. Cooperating to the modularize design of the system, the control function was divided into several threads to enhance the ability of real-time and harmony, and it realized the remote controlling high power system by low one effectively. The results show that the precision of the system is satisfied with the requirement of analysis and now the system is applied in experiment and research on power conditioning system.

**Key words** calculation and measurement of energy source; power conditioning system; real-time measurement; xenon flash lamps; instantaneous characteristic

## 1 引 言

随着惯性约束核聚变(ICF)的发展,对激光驱动器的要求越来越高,要求抽运源具有比较高的抽

运能量密度和抽运效率,新一代钕玻璃激光放大器需要使用大口径的氙灯。以往已有许多工作研究了用于固体激光器的氙灯的放电特性<sup>[1]</sup>,但是在研究对象规模和研究的深度和精度上,都不能满足

收稿日期:2002-12-06;收到修改稿日期:2003-03-31

基金项目:863-416-5子课题资助项目。

作者简介:柴毅(1962—),男,博士,教授,主要从事自动控制、检测技术、信息处理、图像处理与模式识别。E-mail: chaiyi@cqu.edu.cn

ICF的发展要求。近年来,国际上若干著名实验室,如美国里弗莫尔国家实验室等在“国家点火装置”(NIF)的设计中继续深入研究了这一课题<sup>[2]</sup>,该装置采用模块化设计,将充电单元、储能单元、开关单元与内嵌式控制单元集成为一个模块,同时应用光纤通讯网来排除干扰并隔离高压<sup>[3]</sup>。在国内,激光驱动器能源系统的测控单元研究已开始起步,在局部范围内应用了计算机自动检测技术<sup>[4]</sup>。对强激光驱动器能源系统瞬态特征的研究,重点在于如何提高脉冲氙灯以及抽运系统的效率,为能源系统传输效率的研究提供可靠的实验数据。为此,我们采用高速采样装置和量化传输模式,实现了高压隔离,又避免了模拟信号在远距离传输中受到干扰;采用计算机多线程技术,实时地实现了弱电系统对强电系统的远程控制。

## 2 能源系统及脉冲氙灯瞬态特征

在氙灯的放电过程中,等离子体放电柱直径随时间变化,尤其在小能量放电情况下,氙灯放电过程是一个动力学过程。而且,由于氙灯侧壁的影响,等离子体可能不能充满内径。这些特性在大口径氙灯放电过程中尤其重要。由于氙灯等离子体在放电过程中,其电阻存在非线性性质,Goncz 首先给出了氙灯上的电流和电压的关系

$$V(t) = K_0(t)I(t)^{1/2} \quad (1)$$

式中 $V(t)$ 为 $t$ 时刻氙灯两端电压, $I(t)$ 为 $t$ 时刻氙灯放电电流, $K_0(t)$ 为 $t$ 时刻氙灯等离子体的非线性电阻系数

$$K_0(t) = 1.3 \frac{s}{d(t)} \left| \frac{P}{450} \right|^{0.2} \quad (2)$$

式中 $s$ 是指每一放电回路中串联灯的总弧长(cm), $d(t)$ 为 $t$ 时刻氙灯电弧直径(cm), $P$ 为氙灯充气气压(Pa)。

研究氙灯高压快速放电特性,是为了适应激光工作物质上能级寿命极短的需要。例如掺钛蓝宝石( $Ti^{3+}:Al_2O_3$ ),激光上能级寿命为 $3.2 \mu s$ ,比通常的 $Nd^{3+}:YAG$ ,红宝石小 $2\sim 3$ 个数量级。为了使氙灯抽运脉宽与激光物质上能级寿命相匹配,要求氙灯高压快速放电。氙灯放电脉宽可由下式估算(峰值电流的90%)

$$T = 3 \sqrt{LC} \quad (3)$$

$L$ 为回路电感, $C$ 为回路电容(储能电容)。要实现快速放电,储能电容应较小,一般为 $0.5\sim 5 \mu F$ ,而

分布电感与回路引线长度和回路形状有关。图1给出示波器实际测得的氙灯高压放电曲线。

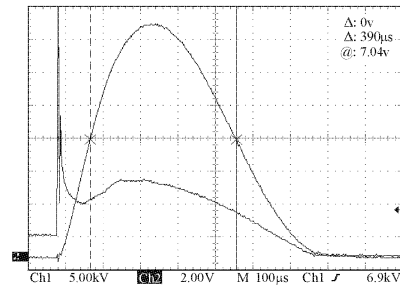


图1 氙灯高压放电曲线

Fig. 1 Xenon flashlamp current and voltage waveforms during the firing

## 3 系统构成及工作原理

激光驱动系统测控主要是对能库电容器(主储能单元和预电离储能单元)充电电压、放电过程氙灯电压、放电后的剩余电压、氙灯放电电流进行测量,并对氙灯闪光的光强进行监测。

能源模块控制接口单元控制主充电机和预电离充电机分别向相应的储能单元充电储能,对主充电机和预电离充电机工作状态进行监测;放电模块控制接口单元、同步控制器和高压触发器,从而控制放电开关,把储能电容的电能提供给脉冲氙灯。

系统结构框图如图2所示。其中I为能源子系统,II为放电子系统,III为监测子系统。

系统主要工作原理为:控制台控制充电机的工作状态,充电机将电网的交流电能转化为预定的直流电能,对储能电容进行恒流充电,当电容器储存的电能达到预定值后,计算机控制同步控制器,给出一系列的时序控制触发信号。该信号一方面作为氙灯的同步信号,通过高压触发器形成外触发信号,点燃脉冲氙灯组,使储能电容通过氙灯回路放电,把电容器的储能转化为光能;另一方面进行信号检测,启动放电电流、电压检测模块、光能检测模块工作。信号检测完毕,启动计算机虚拟界面和数据分析处理模块。实验现场视频监控系统作为一个独立的工作程序,从系统整个控制系统工作初始到结束一直工作。

### 3.1 L-C 恒流对电容器充电

充电机是能源子系统的关键单元器件,其性能的好坏直接影响系统工作稳定性和光能输出的稳定性,为此采用了L-C恒流充电机对储能电容器进行充电。同时,为保证充电机有较方便的调节能力、较高的充放电电压重复精度和通信功能,L-C恒流充

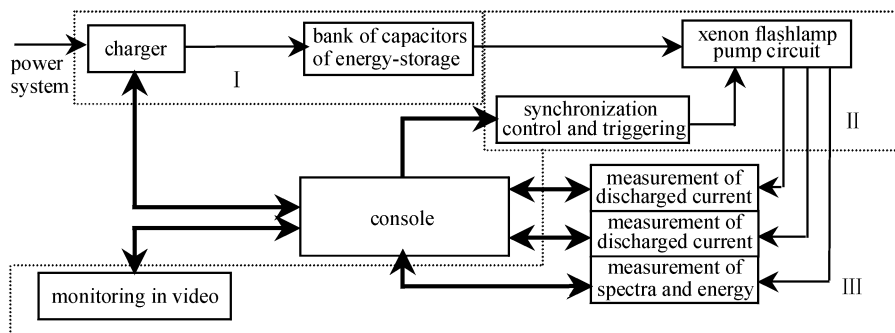


图 2 系统结构框图

Fig. 2 Structure of the system

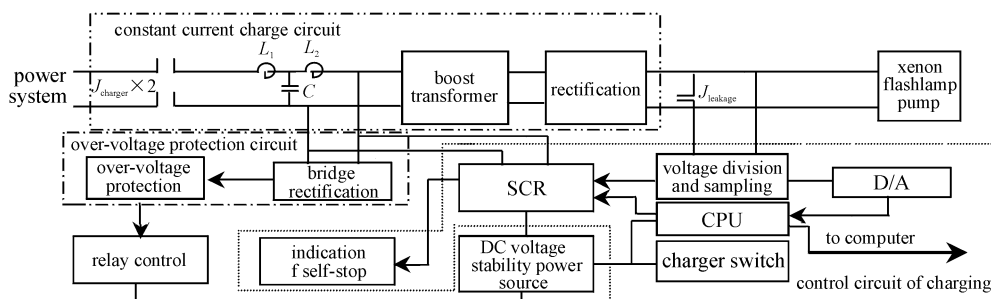


图 3 L-C 恒流充电机原理图

Fig. 3 Structure of L-C constant current charger

电机还采用了 586CPU, D/A 变换器, 自停, 自补的充放电方式和过压保护等措施, 其工作原理如图 3 所示。

充电机启动后, CPU 判断工作模式为计算机控制模式还是手动控制模式, 在计算机控制模式下, 开放通信口, 接收计算机的命令信号, 设定充电电压, 在手动控制模式下, 启动读取拨码盘的电压设定值; L-C 恒流变换器将电网的恒压源变成恒流源, 再经过变压器升压、高压整流桥整流后, 以脉冲电流给氙灯抽运电路中的储能电容器充电, 当储能电容器中的电压充至预先设定的电压值时, 自停电路产生翻转, 使 SCR 开关导通, 把充电电路中的升压变压器的初级短路, 使充电机处于停止充电状态, 同时通过自停指示电路, 在充电机的控制面板上用指示灯指示该状态; 因为各种泄漏的存在, 储能电容器上的电压在停充后会下降, 这时储能电容器上的电压小于预先设定的值, 自停电路又产生翻转, SCR 开关截止, 使充电机又回到充电状态, 如此实现了充电自停、自补功能, 保证了充电机输出电压的重复精度。整个过程中, CPU 适时地将充电机所处的状态及当前储能电容器的电压值通知计算机以记录备案。

### 3.2 信号检测模块及量化-传输模式

脉冲氙灯的放电电压具有以下特征: 1) 电压幅度变化大: 从 0 V~40 kV(虚地); 2) 电压频带宽, 从 0 Hz~100 kHz; 3) 电压信号虚地, 对地电压约 5 kV(由储能电容器上的电能不能瞬间放完造成)。结合这些特征, 采用了现场采样, 光纤网络传输数据的方式, 称其为量化-传输模式, 如图 4 所示。电压信号包含放电电压信号经过分压器分压、电流信号通过电流互感器转换或光能信号通过光敏器件转换所得的电压信号, 在此选用了线性度达  $10^{-6}$  的光敏器件。

量化-传输模式的工作过程为: 计算机在控制同步控制器发出同步信号时, 给该模块发出了启动命令, C51 单片机初始化 A/D 采样卡, 等待采样; 当信号到来, 触发 A/D 采样卡采样, 将结果存放于 A/D 卡内的寄存器中, 采样结束, A/D 采样卡通知单片机, 单片机从 A/D 卡中读出数据并按照通信协议将其打包, 存放到模块的寄存器中。在接到计算机的通信允许信号后, 由 RS232 将数据通过光纤网络传给计算机。这种方式既实现了高压隔离, 又避免了模拟信号在远距离传输中受到干扰。

电流检测由电流检测罗氏线圈和测量系统构

成。电流检测结果可在计算机测量系统显示器上显示测量信号波形,并可对测控数据进行分析处理。

系统由抽运电源监控和单路光信号光纤传输,二路互感形大电流瞬态信号传输,二路 30 kV 高压检测,高抗干扰光电隔离并行数字 I/O 口及计算机虚拟仪器信号检测处理。

### 4 多线程系统软件工作模式

该子系统完成整个系统的控制和信号测量分析和虚拟界面的实现。为了到达实时控制与监测,采用多线程工作模式,有机地实现了系统的各项功能并且大量地节约了时间。各线程工作时序如图 5 所示。图中,  $T_0 \sim T_6$  表示一次完整的实验周期。 $T_0$

表示系统启动时刻视频监控线程开始工作,同时虚拟界面实现线程和数据分析线程可以工作,对历史实验数据进行处理; $T_1$  表示能源子系统控制线程工作,充电机开始充电; $T_2$  表示充电结束,能源子系统控制线程停止工作,放电子系统控制线程和信号检测线程开始工作(事实上,能源子系统控制线程和电子系统控制线程实现了互锁); $T_3 \sim T_5$  时段,放电结束,进行下一次充电,但条件是  $T_5 > T_4$ ,  $T_4$  为信号检测传输完毕时刻(单次实验只有一个充电过程); $T_4$  时刻,虚拟界面实现线程和数据分析线程开始工作,如果它们在  $T_4$  时刻前处于工作状态,将自动记录当前信息和操作,转向对新实验数据进行处理,完毕后,再回到先前的工作状态,继续工作; $T_6$  时刻,即实验数据处理完毕,实验结束。

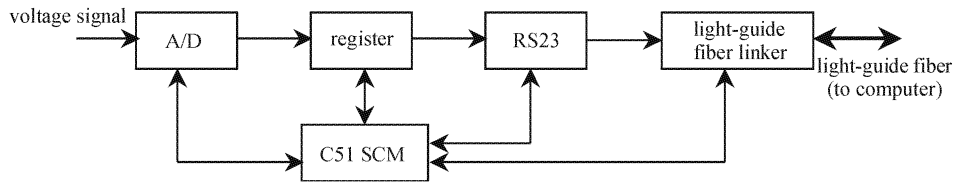


图 4 放电电压检测模块结构图

Fig. 4 Structure of model of measuring discharging voltage

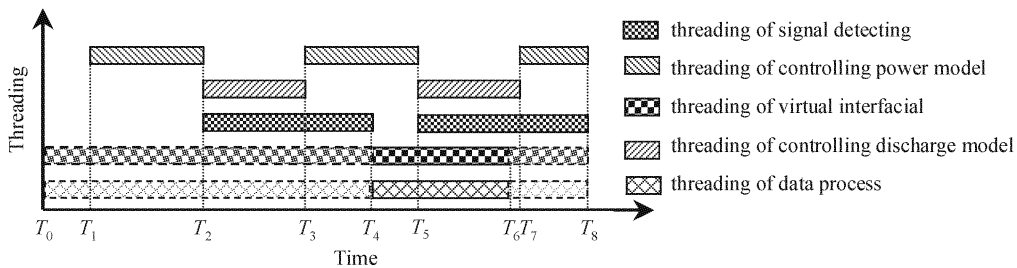


图 5 各线程工作时序

Fig. 5 Time sequence of multi-threading

### 5 实验结果

实验采集的信号为两路放电电压信号、一路放电电流信号和一路光能信号。放电过程中按电路单元部件分段进行测量。

该系统采用了 L-C 恒流充电机、量化-传输模式的信号检测模块和多线程的计算机控制系统,实现了实时控制与监测。系统运行上百次,工作安全可靠,精度高。部分测量结果见图 6 所示。实验数据从放电时刻开始,时间间隔为  $2 \mu s$ 。对实验数据的分析可得到能量在传输过程中的损耗及其他情况。

用单元部件分段测量能量传输效率。在放电后的一段时间内,因电压突变,产生的电容、电感效应,

测得的等效阻抗幅值均有较大的波动,若讨论放电过程中比较稳定的部分,截取时间段  $100 \sim 500 \mu s$ ,则氙灯放电过程中的特性阻抗  $R_L$  为  $900 m\Omega$ 。

### 6 结 论

本文所讨论的系统初步应用于能源系统实验平台中,并得到了较好的效果,使能源实验平台的自动化程度有很大的提高。计算机自动测控技术在能源系统上的应用,是通过计算机对能源系统进行自动检测和控制来提高激光驱动器运行的可靠性、稳定性和安全性,有效地实现了弱电系统对强电系统的远程测控。

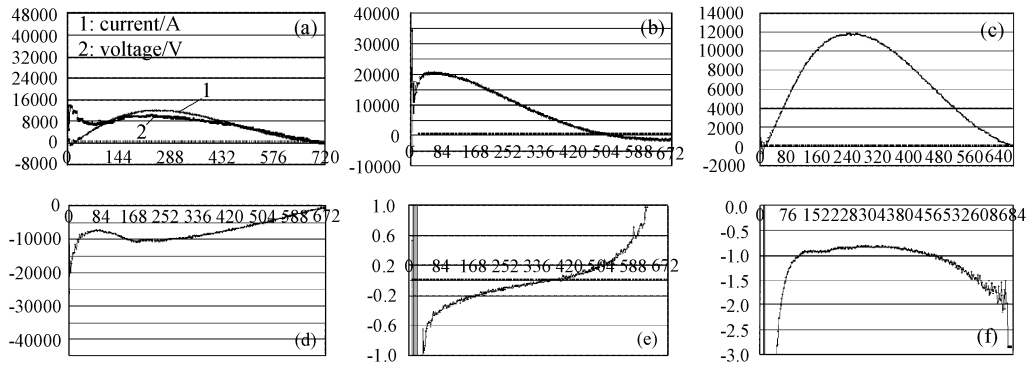


图 6 实验测量结果

(a) 氙灯电压、电流波形；(b) 电容电压波形；(c) 引燃管电流波形；  
 (d) 氙灯端电压波形；(e) 引燃管等效阻抗；(f) 氙灯电缆等效阻抗

Fig. 6 Result of experiment

(a) waveforms of current and voltage of xenon flashlamp; (b) waveform of voltage of capacitance;  
 (c) waveform of voltage of ignitron; (d) waveform of voltage of xenon flashlamp;  
 (e) equivalent impedance of ignitron; (f) equivalent impedance of xenon flashlamp

参 考 文 献

- 1 Matjaz Lukac, Marko Marincek. Energy storage and heat deposition in flashlamp-pumped sensitized erbium glass lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(10):1779~1787
- 2 E. I. Moses. The National Ignition Facility; Tatus and Plans for Laser Fusion and High-Energy-Density Experimental Studies [C]. 8th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems, 2001, San Jose, California. 3
- 3 A. C. Erlandson, C. Marshall, M. Rotter *et al.*. Design and Performance of Flashlamp-pumped Nd:glass Amplifiers for the NIF [P]. UCRL-LR-105821-98-4, 162~170
- 4 Chen Li-hua, Xue Xi-gang, Li Yi-zheng *et al.*. The research of testing and controlling system for experiment bed of the power condition system [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2000, **12**(s1):217~220  
 陈文华, 薛锡钢, 力一峥 等. 激光驱动器能源系统实验平台测控系统的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(s1):217~220