

doi: 10.3788/gzxb20144304.0414001

# 高功率激光装置前端能量控制系统

殷冰雨, 李国杨, 李学春, 范薇

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要:**针对神光 II 高功率激光装置前端预放系统输出的能量设计了一种远程能量控制系统, 包括半波片-偏振片组合衰减装置以及闭环负反馈控制系统的设计. 在光学调整方案上, 设计了半波片-偏振片组合衰减装置, 对激光能量进行衰减控制. 在控制算法上, 实现了对能量控制的闭环比例积分微分调整. 在调整准确度上, 实现了调整准确度为 1%, 误差低于 0.1% 的精确控制. 本文所设计的高功率激光装置前端能量控制系统利用能量计、步进电机与计算机软件之间的相互通信来实现对能量的闭环比例积分微分控制, 适用范围广, 可扩展性好, 并具有简单易调整、控制精密、结果准确等特点.

**关键词:**激光物理; 自动控制应用理论; 闭环比例微分积分控制; 脉冲激光能量; 激光应用; 激光脉冲; 能量控制; 控制设备

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0414001-6

## High Power Laser Facility Front-end Energy Control System

YIN Bing-yu, LI Guo-yang, LI Xue-chun, FAN Wei

(National laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** A remote energy control system for shengguang-II high power laser is designed, including a half-wave plate-polarizer combination attenuation device and a closed-loop negative feedback control method. For the optical adjustment programs, a half-wave plate-polarizer combination attenuation device is designed to control the laser energy. For the control algorithm, a closed-loop proportion integral derivative control adjustment of energy is realized. For the adjustment precision, it achieves a regulation accuracy of 1% and the relative error is lower to 0.1%. The remote energy control system of high power pulsed laser in this article uses the communication of energy meter, stepper motor and computer software to achieve the closed-loop proportion intergral derivative control of the laser energy. It has the feature of widely range of applications, easy adjustment, high control accuracy and good expansibility.

**Key words:** Laser physics; Automation application theory; Closed loop proportion integral derivative control; Pulse laser energy; Laser applications; Laser pulses; Energy control; Control facilities

**OCIS Codes:** 140.3538; 200.4560; 260.0260; 350.0350

## 0 引言

惯性约束核聚变 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 高功率激光驱动器系统包括前端预放系统、主放大系统、终端靶场系统等. 为了实现聚变点火, 要求高功率激光器具有光束的全域控制能力, 重点包括对光

束的时间波形整形、强度的空间调制、光谱特性、输出能量控制以及功率稳定性控制等. 其中各路精确灵活的能量控制系统, 对实现整个系统的功率平衡具有重要作用, 而在线远程、主动、迅速、准确的能量调控手段将有效提升系统的运行效率和人员安全.

本文在闭环负反馈控制理论以及计算机远程控制

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61205103) 资助

第一作者: 殷冰雨 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为时间脉冲整形波形的监控和安全反馈装置. Email: lanxue\_1988@126.com

通讯作者: 李国杨 (1983-), 男, 博士, 主要研究方向为神光 II 集总控制以及参数测量. Email: 33774287@qq.com

导师: 范薇 (1972-), 女, 研究员, 硕导, 主要研究方向为激光技术以及高功率激光应用. Email: fanweil@siom.ac.cn

收稿日期: 2013-01-01; 录用日期: 2013-04-01

<http://www.photon.ac.cn>

的基础上,针对神光 II 装置前端预放系统输出的“种子激光”设计了一套精确的远程能量控制系统,包括对激光能量精密衰减控制的硬件设计方案,远程能量控制系统硬件平台的建立,以及对能量闭环比例积分微分(Proportion Integral Derivative, PID)控制算法的设计.在硬件设计上实现了对脉冲激光能量的精密衰减控制以及闭环反馈控制系统硬件平台的建立,并且,实现了能量计、步进电机以及远程计算机软件之间的相互通信;在控制算法上,实现了对脉冲激光能量的闭环 PID 控制.该系统在神光 II 大功率激光装置上,实现了对神光 II 前端“种子激光”能量的精确反馈调节以及远程控制,调节准确度为 1%,误差为 0.1%.

## 1 系统硬件设计

### 1.1 精密衰减装置的硬件设计

本系统采用半波片-偏振片组合装置对激光能量进行衰减控制.由于半波片-偏振片组合装置可实现透过率  $T=1\sim 0$  之间全范围连续可调衰减,使用方便,并且,通过在组合装置上配置精密步进电机,即可实现对能量的高准确度控制.因此,半波片-偏振片组合装置可作为激光能量精密衰减控制的硬件设计方案.

半波片-偏振片衰减组合装置由两个平行放置的偏振片对(起偏器,检偏器)以及在它们之间插入的一个半波片组成,如图 1 所示.入射光通过起偏器起偏后形成一束偏振光,随后通过半波片产生双折射现象.因此,偏振光通过半波片后偏振方向发生旋转,导致光束不能全部通过检偏器,产生了衰减.所以,当半波片围绕法线旋转时,半波片-偏振片组合衰减装置的透过率也会产生相应的变化,其变化范围可从 1 降低到 0.

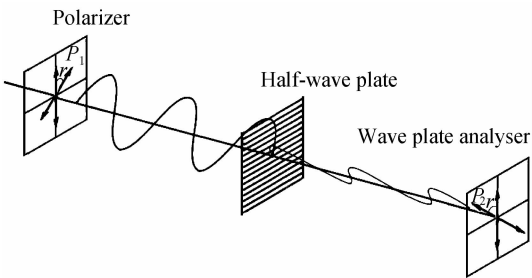


图 1 半波片-偏振片组合衰减装置

Fig. 1 Half-wave plate and polarizer equipment

对半波片-偏振片衰减组合装置的透过率的求解过程如下:

入射光束的振动方向  $P_1$  与光轴夹角  $r$ ,反射光振动方向  $P_2$  如图 1 所示.

设:通过起偏器的偏振光为矢量  $E_1$ ,进入检偏器的光束为矢量  $E_2$ ,通过检偏器的透射光束为矢量  $E_3$ ,

$$E_1 = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

出射光束矢量  $P_1$  表示为

$$P_1 = R(-r) \times E_1 = A \begin{bmatrix} \cos r \\ \sin r \end{bmatrix}.$$

$R(-r)$  为旋转矩阵,光束通过半波片以后,两分量之间发生相位延迟  $\Delta\varphi = (\varphi_y - \varphi_x) = \pi$ .半波片的琼斯矩阵  $J_1$  表达式为

$$J_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\Delta\varphi) \end{bmatrix}.$$

同理,可以求出出射光束  $P_2, E_2$  的表达式为

$$P_2 = A * J_1 = A \begin{bmatrix} \cos r \\ (\sin r) \exp(i\Delta\varphi) \end{bmatrix},$$

$$E_2 = R(r) \times P_2 =$$

$$A \begin{bmatrix} \cos^2(r) + \sin^2(r) \exp(i\Delta\varphi) \\ -\sin(r)\cos(r) + \sin(r)\cos(r) \exp(i\Delta\varphi) \end{bmatrix}.$$

又因为 Jones 矩阵  $J_2$  表达式

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

且

$$E_3 = J_2 \times E_2 = A \begin{bmatrix} \cos^2(r) + \sin^2(r) \exp(i\Delta\varphi) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

综合以上各式,可以求出组合装置的琼斯矩阵

$$J_3 = A \begin{bmatrix} \cos^2(r) + \sin^2(r) \exp(i\Delta\varphi) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

进而,由组合装置的琼斯矩阵  $J_3$ ,可以求出出射光强  $I_3$  为

$$I_3 = A^2 \times [\cos^2(r) + \sin^2(r) \exp(-i\Delta\varphi) \quad 0] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \cos^2(r) + \sin^2(r) \exp(i\Delta\varphi) \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$A^2 \left\{ 1 - \frac{\sin^2(2r)[1 - \cos(\Delta\varphi)]}{2} \right\} =$$

$$A^2 [1 - \sin^2(2r) \sin^2(\Delta\varphi/2)].$$

所以,半波片-偏振片组合装置的透过率  $T$  表达式为

$$T = I_3 / I_1 = 1 - \sin^2(2r) \sin^2(\Delta\varphi/2)$$

由此可以得出,波片-偏振片组合装置的透过率

3D 曲线如图 2.

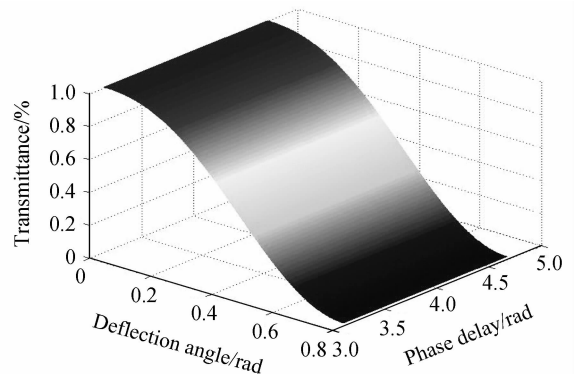


图 2 半波片-偏振片组合装置的透过率 3D 曲线

Fig. 2 Half-wave plate and polarizer Equipment 3D curves transmission apparatus

又因为对于半波片通过光束的两分量的相位延迟  $\Delta\varphi=\pi$ ,所以半波片-偏振片组合装置的透射率  $T$  表达式为

$$T_{\text{half}}=I_3/I_1=1-\sin^2(2r)\sin^2(\Delta\varphi/2)=\cos^2(2r).$$

由半波片-偏振片组合装置的透射率  $T_{\text{half}}$  表达式可以看出,该表达式是一个周期函数,周期为  $\pi/2$ ,而且还是一个偶函数.所以,入射偏振光的夹角  $r$  角的变化范围在  $0\sim\pi/4$  时,就可以得出所有情况下组合装置的透过率取值(1~0),如图 3.

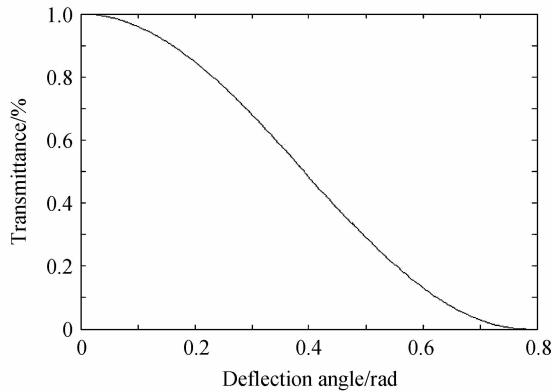


图 3 半波片-偏振片组合装置透过率曲线

Fig. 3 Half-wave plate-polarizer combination device transmittance curves

### 1.2 系统硬件平台的建立

神光 II 激光装置作为惯性约束核聚变的驱动源,为实现热核聚变提供高能量的激光束.为此,装置需要将由主振荡器产生的 mJ 能量级别的激光脉冲不断放大,直到能量和均匀性达到聚变反应的要求.神光 II 的总体光路示意图,如图 4.工作过程为:

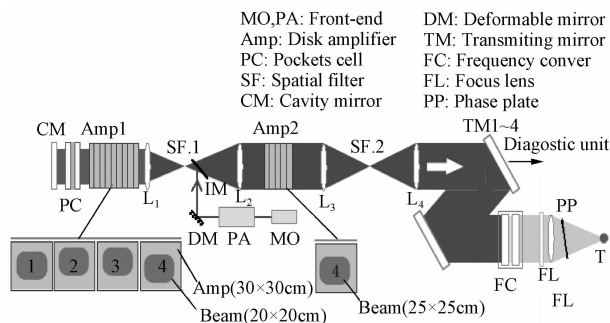


图 4 神光 II 激光装置总体光路

Fig. 4 SG-II laser device optical path schematic

首先,前端预放系统产生一个连续的脉冲激光,即“种子激光”.然后,“种子激光”经过时间波形整形.整形后的光束经过变形镜和光束转换器通过一系列的片装放大器,由能源系统向氙灯组放电,点亮氙灯照射光束,实现激光放大.

本文针对神光 II 激光装置前端预放系统输出的“种子激光”设计并建立了一套能量远程控制系统.该系统的硬件平台包括能量控制系统以及远程控制系统两部分.能量控制系统通过半波片-偏振片组合装置对

激光能量进行衰减控制.远程控制系统接收能量计反馈的数据,经过处理后,对步进电机发出调整命令,最终实现脉冲激光能量的精确控制.系统结构如图 5.

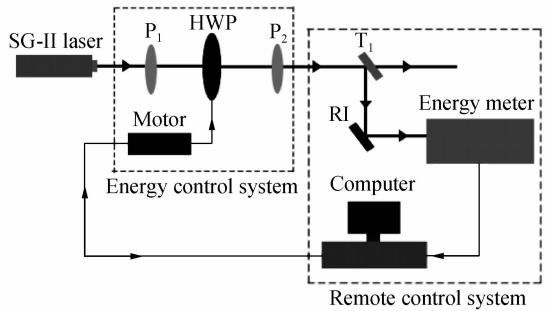


图 5 能量控制系统实验平台

Fig. 5 Energy control system experimental platform

能量控制系统由半波片-偏振片组合衰减装置以及精密步进电机组成.远程控制系统由透射镜、反射镜、能量计以及远程计算机组成.精密步进电机与半波片-偏振片衰减装置连接,组成对激光能量精密衰减控制的硬件装置.同时,远程计算机,能量计,精密步进电机之间采用以太网通信接口以及网络通信协议进行相互通信.

神光 II 前端输出的脉冲激光首先经过半波片-偏振片组合衰减装置,随后通过透射镜、反射镜进入脉冲能量计,然后脉冲能量计将当前脉冲的能量值实时反馈给计算机,计算机通过处理当前当值与设定目标能量的差值来控制精密步进电机的转动,对脉冲能量进行闭环反馈的调整,直到闭环反馈调整结束,完成对输出激光脉冲能量的调整.

## 2 能量闭环比例积分微分控制算法

在工程控制中,PID 控制是应用最为广泛的调节器控制算法.PID 控制算法采用闭环反馈调节的方式,可提高系统的调整准确度、鲁棒性以及可靠性.PID 反馈控制系统,以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便等优点,而成为工程控制的主要技术之一.

### 2.1 比例积分微分控制算法介绍

比例积分微分控制算法包括三种算法:比例控制算法,积分控制算法和微分控制算法.反馈控制系统即,基于负反馈(设定量与反馈量相减)基础上的“检测误差,用以纠正误差”这一原理组成的系统.由于此类系统的信息传递途径有一个闭合回路,所以也称为闭环控制系统,PID 闭环控制系统示意图如图 6.

PID 控制系统,由比例积分微分控制器,以及受控对象(Process)组成.PID 控制系统将设定值(Setpoint)与当前输出值(Output)相减来计算系统的偏差信号.然后,将偏差信号的比例、积分、微分通过线性组合来构成控制量,从而对受控对象进行控制.PID 算法的具体表达式为

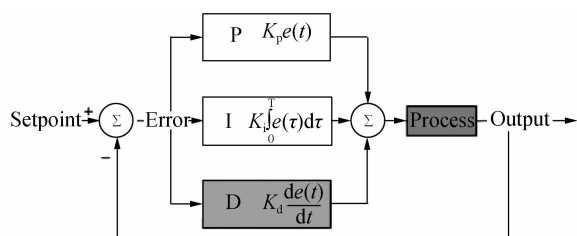


图 6 比例积分微分闭环控制系统示意图

Fig. 6 Proportion Integral Derivative closed-loop control system diagram

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + \frac{K_d de(t)}{dt} = K_p \times \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right].$$

式中  $t$  为当前时刻,  $e(t)$  为单次偏差,  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数,  $K_d$  为微分系数,  $T_i$  为积分时间,  $T_d$  为微分时间。

### 2.2 能量控制闭环比例积分微分算法的设计

模拟的 PID 控制算法为

$$u(t) = K_p \times \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right].$$

而对于使用计算机来实现 PID 算法时, 必须要先将其做离散化处理, 然后才能对算法进行实现. PID 算法的离散形式为

$$u(t) = K_p \left\{ e(k) + \frac{1}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + T_d [e(k) - e(k-1)] \right\}.$$

根据递推原理, 则

$$u(k-1) = K_p \left\{ e(k-1) + \frac{1}{T_i} \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + T_d [e(k-1) - e(k-2)] \right\}.$$

所以

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p \left\{ \Delta e(k) + \frac{1}{T_i} e(k) + T_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \right\} \Delta e(k) = e(k) - e(k-1).$$

式中:  $\Delta u(k)$  为步进电机调整步数,  $\Delta e(k)$  为与调整步数  $\Delta u(k)$  对应的能量. 对于参量  $K_p$ ,  $T_i$  以及  $T_d$  的测定, 本设计采用的是通过实验, 人工测量出参量  $K_p$ ,  $T_i$  以及  $T_d$ . 通过设置单次步进电机的调整步数  $\Delta u(k) = 10\ 000$  步, 同时记录每次电机调整后实时能量值的变化. 通过 MATLAB 绘制出  $\Delta e(k)$  和  $\Delta u(k)$  的相应曲线如图 7.

根据图 7 所示的数据, 可以对比例系数  $K_p$  进行测定, 测定结果  $K_p = 3.33 \times 10^6$  (步数/nJ), 同时, 考虑到消除系统静差以及减少相应的调节时间, 设定积分时间  $T_i = 2$ , 微分时间  $T_d = 0.5$ . 然而, 在进行能量调整时, 如果单次电机调整步数, 即调整步长, 设置太大会导致一开始的误差会比较大, 有可能造成不收敛, 而且一开始需要调整迅速进行, 设置的步长之间的等待时

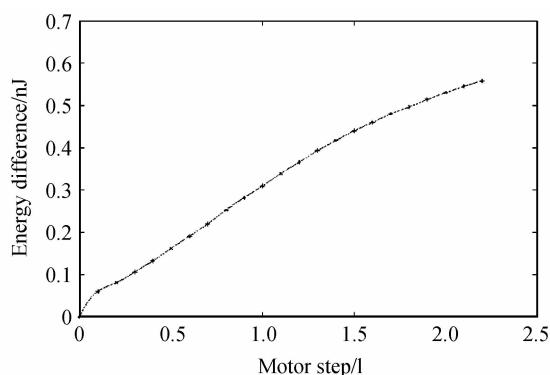


图 7 电机调整步数  $\Delta u(k)$  与能量差  $\Delta e(k)$  的关系

Fig. 7 Relationship of motor adjustment steps  $\Delta u(k)$  and the energy difference  $\Delta e(k)$

间也可以更短, 而调整接近结束时, 调整步长比较小, 要求比较高的准确度, 步长之间的等待时间也要更长, 所以设置了两个负反馈环, 第一个负反馈逼近目标之后再启动第二个负反馈环。

本文所设计的能量闭环 PID 算法对能量进行反馈控制, 算法流程图如图 8 所示. 在能量调整的开始, 首先进行系统的初始化, 设定目标能量值以及读取当前脉冲激光的能量值. 然后, 进入第一环能量调整回路, 在此回路中, 主要是对能量做出大幅度, 迅速的调整. 此时的调整准确度较低. 在第一环能量调整结束后, 进入第二环能量调整回路, 通过改变比例系数以及设定步长, 来提高能量调整的准确度, 直到反馈的当前能量与设定的目标能量满足准确度要求 (小于 0.1%) 时, 退出第二能量调整回路, 此时整个能量调整过程结束.

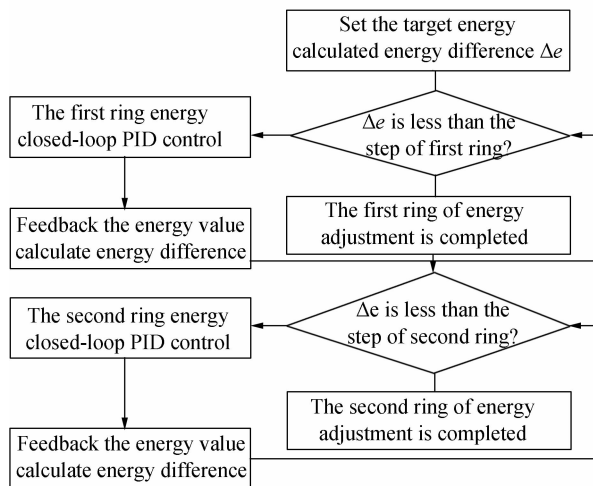


图 8 能量闭环比例积分微分控制流程

Fig. 8 Closed-loop Proportion Integral Derivative control energy flow chart

### 3 脉冲激光能量控制测试实验

在如图 5 所示的实验平台上, 对本文所设计的脉冲激光能量控制系统进行测试, 脉冲激光通过半波片-偏振片衰减组合装置, 然后经过取样, 取样率为 4%.

取样能量进入能量计. 实时记录并反馈当前脉冲激光能量值. 步进电机, 能量与远程计算机通过以太网进行通信.

在进行能量调整前, 控制系统软件界面上显示当前能量值, 即能量计读数以及设定的目标能量值, 如图 9.

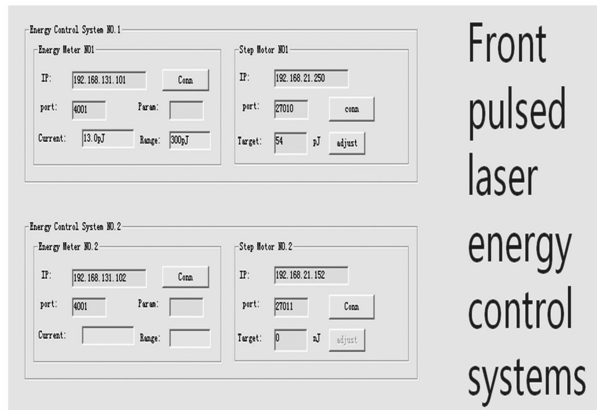


图 9 能量调整前-远程控制软件界面

Fig. 9 The software interface of remote energy control system-before adjustment

当前能量值为 13.0 pJ, 设定目标能量为 54.0 pJ, 能量量程为 300 pJ, 经过闭环反馈 PID 算法对脉冲激光能量进行调整, 并记录每一步调整后的实时相对误差, 设目标能量为  $E_{target}$ , 当前能量为  $E_{current}$ , 能量量程为  $E_{range}$ , 实时相对误差  $\Delta n$  的计算方式为

$$\Delta n = |E_{target} - E_{current}| / E_{range} \times 100\%$$

通过记录每一步能量调整后的实时能量值和实时相对误差, 得到的实验数据分析图, 如图 10 所示. 然后, 对能量控制系统进行多次实验, 实验结果列于表 1 中.

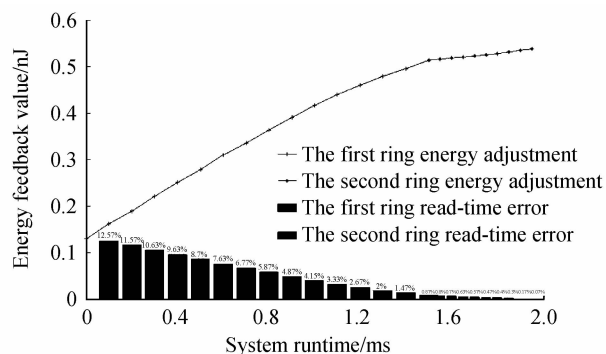


图 10 能量反馈调整记录

Fig. 10 Energy feedback adjustment records

输入的脉冲激光, 首先经过第一环能量调整进行粗调, 如图 10 中“+”标记的曲线所示, 随后进入第二环能量调整进行细调, 如图 9 中“\*”标记的曲线所示. 每一步能量调整后的实时误差如图 9 柱状图显示, “+”表示第一环能量调整的实时误差, “\*”表示第二环能量调整的实时误差. 在本次实验中, 初始能量值为

表 1 能量控制系统测试结果

Table 1 Energy control system test results

Experiment No.	Initial energy/pJ	Target energy/pJ	Adjust result/pJ	Single error/%	Average error/ms%
1	13.0	54.0	53.8	0.07	0.0856
2	15.6	40.5	40.8	0.1	
3	21.2	47.0	47.1	0.03	
4	30.3	81.5	81.1	0.13	
5	27.7	42.0	41.8	0.03	
6	19.3	45.5	45.1	0.13	
7	18.6	43.5	43.3	0.07	
8	25.5	65.0	65.4	0.13	
9	33.1	70.5	70.4	0.03	
10	42.2	82.0	82.1	0.03	

13 pJ, 目标能量值为 54 pJ, 能量计量程为 300 pJ. 能量调整开始后, 实时误差逐步减小, 在第一环能量调整的过程中, 能量值迅速的向目标能量逐步逼近, 经过第一环能量调整后, 实时误差减小到 0.87%, 随后在第二环能量调整过程中, 能量较为平缓的向目标能量逐步逼近, 经过第二环能量调整结束后, 实时误差减小到 0.07%, 满足设计要求的 0.1% 相对误差, 能量调整结束. 如图 8 所示, 第一环能量调整幅度较大, 较迅速, 第二环能量调整幅度较小, 较平缓, 与本文所设计的闭环能量控制算法相符合. 能量调整结束后, 远程控制软件界面显示如图 11 所示. 能量调整结束后, 能量计显示的当前脉冲激光能量值 53.8 pJ, 设定的目标能量值为 54 pJ. 所以, 计算得出的相对误差为 0.07%, 调节准确度为 1%. 同时, 经过多次测试, 系统的平均误差 rms% 为 0.0856%, 以上的实验结果与本文的设计相吻合.

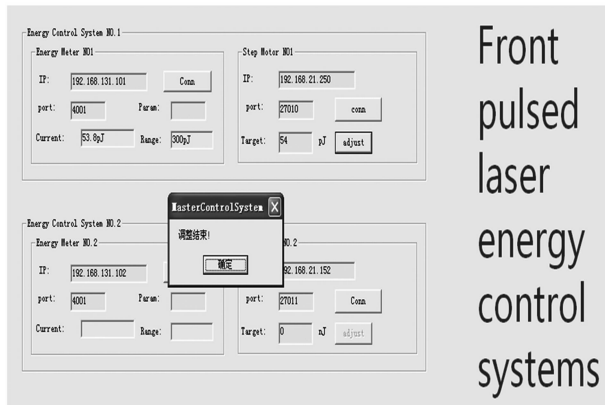


图 11 经过调整后-远程控制软件界面

Fig. 11 The software interface of remote energy control system-after adjustment

经过多次实验测量和验证, 本文所设计的高功率激光装置前端能量控制系统能够精确地、迅速地将当前输出脉冲激光输出能量调整到设定的目标能量, 同时将能量误差控制在 0.1%. 并且, 已在神光 II 前端集总控制平台中良好的运行.

## 4 结论

用半波片-偏振片组合衰减装置对高功率脉冲激光能量进行衰减控制,同时利用闭环反馈PID算法对脉冲激光能量的控制流程进行了设计,从而实现了脉冲激光能量的精确控制.最后,通过能量计、步进电机、与计算机软件之间相互通信,实现了对脉冲激光能量的远程控制.在神光II装置前端预放系统输出的“种子光”平台上,搭建了一个精确的脉冲激光能量远程控制系统.并且,针对神光II装置前端预放系统输出的“种子激光”能量,实现了调节准确度为1%,误差为0.1%的精确控制.

### 参考文献

- [1] ZHAO Run-chang, TANG Jun, LI Ping, LIANG Yue, *et al.* Precise energy control of preamplifier system output for laser facility prototype[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(9): 1335-1338.  
赵润昌,唐军,李平,梁岳等.精确的能量控制前置放大器系统输出的激光装置原型[J].*强激光与粒子束*,2009,**21**(9): 1335-1338.
- [2] IVAN G, SPOREA D. Proceedings of SPIE-The international society for optical engineering: LabVIEW remote control for a laser power/energy meter[C]. Romanian, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000: 621-626.
- [3] PAUL H, JOHN R. Beam control for high-energy laser devices[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(2): 021005.
- [4] JACBOS C, BOLLIG C, JONES T. Conference on Lasers and Electro-Optics:Laser pulse energy control using a high speed digital feedback controller[C]. Baltimore, IEEE Computer Society, 2011: 5950351.
- [5] LI G, TSANG K. Concurrent relay-PID control for motor position servo systems[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2007, **5**(3): 234-242.
- [6] CALMETTE W, CAUSSIN G. Move with modified PID loops [J]. *Motion System Design*, 2006, **48**(2): 28-29.
- [7] GARDARIN B, CHANETZ B, BENAY R. Collection of technical papers-37th AIAA fluid dynamics conference: control of shock waves interferences by laser energy deposition[C]. California, 2007: 1914-1923.
- [8] LI Gao-ping, WANG Lei, YANG Zhao-jin, *et al.* Long pulse high power laser energy research[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1111-1114.  
黎高平,王雷,杨照金,等.长脉冲高能激光能量测试技术的研究[J].*光子学报*,2004,**33**(9):1111-1114.
- [9] LIU Guo-rong, WU Hong-cai. High energy laser energy meter research of calibration method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 982-985.  
刘国荣,吴洪才.高能激光能量计校准方法研究[J].*光子学报*,2007,**36**(6):982-985.
- [10] LIN Zun-qi. The development of laser fusion[J]. *Chinese Lasers*, 2010, **37**(9): 2202-2207.  
林尊琪.激光核聚变的发展[J].*中国激光*,2010,**37**(9): 2202-2207.
- [11] SHEN Wei-min, WU Quan-ying, XUE Ming-qiu. SG-III Intense laser beam diagnostic system far-field optical design [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 964-969.  
沈为民,吴泉英,薛鸣球.神光III强激光光束远场诊断系统光学设计[J].*光子学报*,2004,**33**(8):982-985.
- [12] ZHU Jian-qiang. SG-II High power laser equipment for experiment[J]. *Chinese Academy of Sciences*, 2005, **1**(1): 42-45.  
朱健强.神光II高功率激光实验装置研制[J].*中国科学院院刊*,2005,**1**(1):42-45.
- [13] DUAN Yin-gong, YANG Shuo. Fuzzy-PID control of stepping motor[J]. *Computer Simulation*, 2006, **23**(2): 290-293.  
段英宏,杨硕.步进电动机的模糊PID控制[J].*计算机仿真*,2006,**23**(2):290-293.
- [14] ZHANG Hai-ying, HUANG Hua-wei, HU Jin-gao. Curve design of stepper motor and simulation[J]. *Small&Special Electrical Machines*, 2008, **38**(1): 11-13.  
张海英,黄华蔚,胡金高.步进电动机运行曲线设计与仿真[J].*微特电机*,2008,**38**(1):11-13.
- [15] YU Tian-yan, CAI Xi-jie, LIU Ren-hong, *et al.* Study on the precision energy measurement system for high power laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(3): 267-270.  
于天燕,蔡希洁,刘仁红,等.高功率激光精密小能量测量系统研究[J].*中国激光*,2002,**29**(3):267-270.
- [16] LIU Jia, WANG Cun-hong. Experimental physics and industrial control system (EPICS) and LabVIEW interface application reseach [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2009, **29**(1): 128-131.  
刘佳,王春红.实验物理和工业控制系统(EPICS)与LabVIEW接口应用研究[J].*核电子学与探测技术*,2009,**29**(1):128-131.
- [17] HU Li-xia, ZHAO Guang-yu. Hierarchical structure based remote monitoring system communication protocol design[J]. *Mechanical and Electrical Engineering*, 2007, **24**(1): 28-30.  
胡丽霞,赵光宙.基于分层结构的远程监控系统通信协议的设计[J].*机电工程*,2007,**24**(1):28-30.
- [18] FENG Yuan-kai, WANG Yu-bao, ZOU Fang. Based Ethernet fiber optic sensing information remote monitoring system[J]. *Computer Security*, 2011, **2**(120): 2-4.  
冯元凯,王玉宝,邹芳.基于以太网的光纤传感信息远程监控系统设计[J].*计算机安全*,2011,**2**(120):2-4.