

# 基于虚拟仪器的激光能量集成测量与分析

王大辉<sup>1</sup> 张启江<sup>2</sup> 张永生<sup>1</sup> 赵学庆<sup>1</sup> 郑国鑫<sup>1</sup> 赵 军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)  
<sup>2</sup>清华大学工程物理系, 北京 100084)

**摘要** 在传统能量测量的基础上,利用能量探测器、模数(AD)采集卡以及信号分析软件,建立了一套基于虚拟仪器的激光能量集成采集和处理系统。利用傅里叶变换得到了激光与不同探测器相互作用输出能量信号的不同计算方法。针对不同探测器选用不同能量算法,基于虚拟仪器编写了能量信号处理软件,并进行了界面设计。在对能量计标定实验基础上,实现了多路激光同步测量和处理,完成了对能量探测器的标定和激光信号的能量测量。实验结果表明,测量系统最大能量误差控制在 5% 以内,重复性较好,能够满足普通能量探测需求。方法简便可靠,为激光系统能量测量集成化和自动化奠定了基础。

**关键词** 激光技术;激光能量;虚拟仪器;能量探测器;信号卷积;标定

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s202005

## Integrated Measurement and Analysis of Laser Energy Based on Virtual Instrument

Wang Dahui<sup>1</sup> Zhang Qijiang<sup>2</sup> Zhang Yongsheng<sup>1</sup> Zhao Xueqing<sup>1</sup>  
Zheng Guoxin<sup>1</sup> Zhao Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710024, China  
<sup>2</sup>Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Based on traditional energy measurement, an integrated acquisition and processing system of laser energy using energy detector, analog digital (AD) acquisition card and signal analysis system is established. Different calculation methods of output energy signal by laser interaction with different detectors using Fourier transform is acquired. Different arithmetic is adopted related to different detectors. Energy signal processing software is compiled based on virtual instrument and its processing interface is designed. Synchronous measurement and processing of multi-channel lasers are achieved. The calibration of energy detectors and measurement of laser are accomplished by different energy algorithms for different detectors. Experiments show that the biggest energy error of the measurement system is less than 5% and the repetition of measurement is good, which can satisfy the demand of general detection. The method is handy and credible, which lays the foundation for integration and automation of laser system with energy measurement.

**Key words** laser technique; laser energy; virtual instrument; energy detector; signal convolution; calibration

**OCIS codes** 040.1240; 200.3050; 350.3390

## 1 引言

高功率激光主振荡功率放大(MOPA)系统需要多台放大器协同工作,为实现大能量激光输出往往采用多程放大方式,这使得系统非常复杂。传统的分散能量测量需要人工读取,且多路测量需要配

备多个表头,不能实现远程测量而且功能不能拓展,已远远不能满足实际需求<sup>[1~5]</sup>。

本文对传统能量测量进行数字化改进,将多个能量探测器配以数据采集卡,实现对激光能量信号的实时采集,并根据不同的探测器以及激光脉宽选

收稿日期: 2012-06-01; 收到修改稿日期: 2012-07-01

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1106)资助课题。

作者简介: 王大辉(1986—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光测量和控制等方面的研究。E-mail: chsslw@163.com

用不同的数据处理方式,可得到信号的能量参数并予以显示保存。系统利用数据采集卡进行多路采集,采用所编写的软件对信号进行多路读取和处理,实现激光能量的多路测量。相对于传统能量测量方式,该系统实现了对激光系统的多路能量同步采集、处理以及显示,具有功能可拓展、远程传输、界面友好、成本低廉等优点,已应用于高功率准分子激光 MOPA 系统。

## 2 原 理

### 2.1 能量探测器

激光能量探测器是基于激光和物质相互作用而产生的相关效应来进行能量测量的,依据相关效应的不同可分为光电式、热释电式以及量热式三种<sup>[6~10]</sup>。

光电型探测器基于光电元件在线性范围内工作时光电流与光强度成正比特性,对光脉冲时间进行积分即得光脉冲能量。热释电型探测器将热释电晶体作为热电转换元件,在晶体表面上涂以全黑材料构成激光面吸收工作方式,所产生的热释电压正比于入射的激光能量,通过适当的电路系统测出该电压,就可对连续或重复频率脉冲及单脉冲激光能量的空间分布进行快速测定,还可观察脉冲波形。量热型探测器的工作原理在于当激光辐照其吸收体后温度上升,在测温元件热电偶的工作端与参考端之间造成温差而产生热电势,由此测定激光能量。

### 2.2 信号分析

系统的特性行为不随时间而变,而且系统具有叠加性质,所以能量探测器测量系统是时不变线性系统,可以采用卷积来表征能量测量系统的输入输出关系。根据信号时域卷积定理<sup>[7]</sup>,假定激光脉冲信号为  $x(t)$ ,探测器响应函数为  $h(t)$ ,则探测器输出响应信号  $y(t)$  为上述两者的时域卷积,即  $y(t) = x(t) * h(t)$ ,根据卷积定义有  $y(t) = x(t) * h(t) =$

$\int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau$ 。任意时刻的输出  $y(t)$  是输入  $x(t)$  的加权积分,对  $x(\tau)$  其权是  $h(t-\tau)$ 。 $h(t-\tau)$  可以利用  $h(\tau)$  的反转再加上平移( $t > 0$  向右移  $t$ ,  $t < 0$  向左移  $|t|$ ) 得到,所以  $y(t)$  是  $h(t-\tau)$  与  $x(\tau)$  乘积在  $\tau \in (-\infty, +\infty)$  的积分。

通过脉冲信号与探测器响应信号卷积可得:

1) 若探测器响应函数时间  $h(t)$  远大于输入信号  $x(t)$  脉宽,则可以认为在输入信号时间尺度内,探测器工作在线性范围内,其响应率假定为常数  $h_{aver}$ ,则输出信号幅值  $y_{amp} = h_{aver} s_y$ ,  $s_y$  代表输入信号面积。利用输入信号面积来表征输入信号能量值,则通过实验测量  $y_{amp}$  和标定  $h_{aver}$  可以得到输入信号的能量,即利用输出信号  $y(t)$  的幅值可以测量输入信号的能量。

2) 若探测器响应函数时间  $h(t)$  远小于输入信号  $x(t)$  脉宽,则得到的输出信号  $y(t)$  包络形状与输入信号  $x(t)$  相同,输出信号  $y(t) \approx s_h x(t)$ ,  $s_h$  代表响应函数  $h(t)$  面积。利用输入信号面积来表征输入信号能量值,则通过实验测量  $y(t)$  和标定响应函数  $h(t)$  面积可以得到输入信号的能量,即利用输出信号  $y(t)$  的时间积分可以测量出输入信号的能量。

3) 若探测器响应函数时间  $h(t)$  近似于输入信号  $x(t)$  脉宽时间尺度时,假定探测器工作在线性范围内,其响应率假定为常数  $h_{aver}$ ,若输入信号上升沿很陡,则可以分析得出此时利用输出信号  $y(t)$  的幅值来标定输入信号能量。

## 3 信号处理及软件编写

### 3.1 信号处理

实验拟选用光电、热释电以及量热三种类型探测器。激光信号为 Nd:YAG 激光器 532 nm 绿光,脉宽为 10 ns,三个探测器相应输出电压信号波形如图 1 所示。

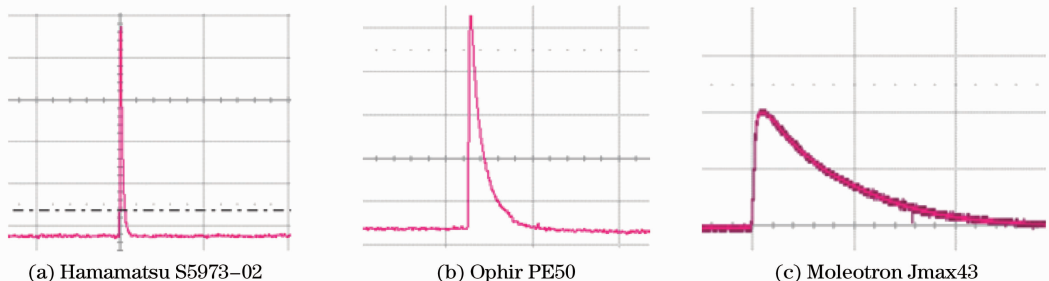


图 1 三个探测器输出电压波形

Fig. 1 Output voltage waveforms of three detectors

光电探测器是把光电流对光脉冲时间进行积分来得到光脉冲能量, Hamamatsu S5973-02 型光电探测器[图 1(a)]的输出电压波形脉宽为 10 ns, 选用输出信号波形积分来标定激光能量。对于 Ophir PE50 型热释电探测器[图 1(b)], 其响应时间为 267  $\mu$ s, 实验选用输出信号积分来标定激光能量。电偶电极变化产生的热释电电压正比于入射的激光能量, 所以在信号脉宽较长时, 则需要选用输出信号幅值来标定激光能量。对于 Moletron Jmax43 型量热探测器[图 1(c)], 输出电压波形脉宽为 5.2 ms, 实验选用输出信号幅值来标定激光能量。

### 3.2 软件编写

软件基于 Labview2009 编程环境编写, 利用提供的 NI-DAQmx 数据采集驱动程序实现多路采集, 软件在实现能量测量既定功能的前提下, 拓展了能量分析的功能。

利用 Labview 软件的 DAQ 助手设定通道<sup>[11]</sup>, 并利用模拟开关控制通道的选通与否, 根据实验需要选择采样通道实现信号的多路采集。对采集到的各路信号进行低通滤波、直流零偏置等处理, 保证了信号的准确还原。调用公式节点 C 语言程序, 程序包括计算被测信号频率以及信号能量, 其中信号能量根据不同情况可选择幅值或者积分算法, 而对于单次脉冲信号则不需要计算信号频率, 完成对信号能量的准确计算。对能量数组进行阈值处理, 设定量程, 超过量程显示‘over’, 低于最小数值则显示上次能量, 实现对能量值的显示。对能量数值进行保存, 同时打开保存数据, 在前面板利用时间触发结构实现了对高重复频率信号能量值的同步显示。增加很多信号分析功能, 比如计算显示所有能量值的平均值, 显示激光能量直方图等。所编写的 4 路能量采集与处理软件界面如图 2 所示。

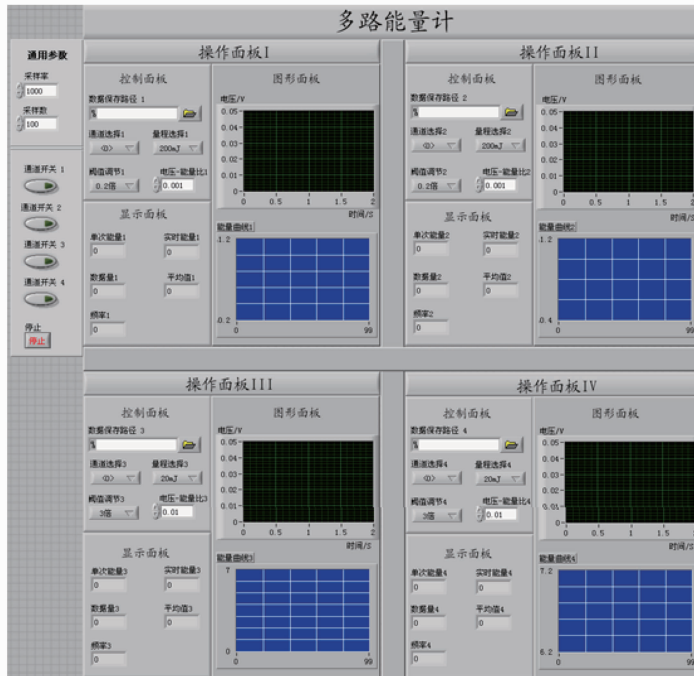


图 2 多路激光能量采集分析软件

Fig. 2 Software for collection and analysis of multi-channels laser energy

## 4 实验

高功率准分子激光系统光路长、设备多, 需要对系统前端、各级放大器以及靶室的能量进行同时监测, 测点较多, 所以需要多路能量进行实时同步采集。为了验证多路测试系统的可行性和准确性, 选用 2 路信号进行实验验证, 选择 Moletron 公司生产的两个 Jmax43 探测器进行了实验。光源选择 Nd:YAG 激光器, 选取 532 nm 绿光进行测量, 输出

能量通过开关电压控制, 选用 Ophir PE50 热释电能量计作为标定源。实验选用 16 通道 NI USB-6281 通道同步采集卡, 采样率 625 kS/s, 18 位采样精度。

### 4.1 标定

标定方案如图 3 所示, 激光脉冲通过标准 50% 分束片成为两束光, 一束用 PE50 测量值作为参考标准能量, 另一束将被标定探测器的信号通过采集卡来读取, 通过信号处理程序得到激光能量。将上

述两数值相除,得到的比值即是软件前面板中的电压/能量比。

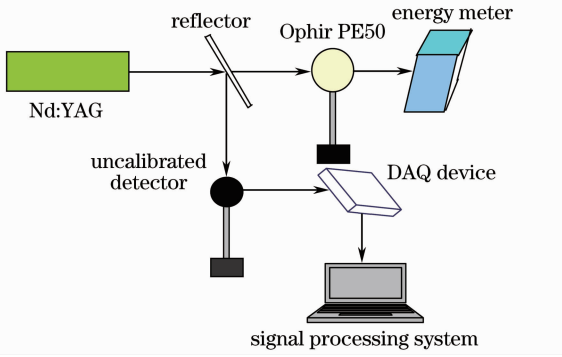


图 3 能量探测器标定方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of calibration for energy detectors

对两个 Jmax43 探测器进行标定,得到电压/能量比分别为 0.001 和 0.00095。

### 4.2 实验结果分析

将激光分为两束,分别利用两个 Jmax43 探测器测量两束激光能量,并且利用两个 PE50 标准能量计进行对比。设定 Nd:YAG 激光器工作电压为 958 V,采样率为 300 kS/s,采样数为 600000,软件测量量程均设定为 200 mJ,打开软件通道开关 1、2,设定两通道的能量数据保存路径,输入上述标定得到的两探测器的电压/能量比,完成对两路信号的采集。针对激光器 1、3、5、10 Hz 重复频率运行测量,每个频率测量三组,每组 60 个数据,取其平均值,测量结果如表 1 所示(结果只给出一个 Jmax43 探测器及用于对比的 PE50 测量数据,另一个测量结果相似)。

表 1 量热探测器与热释电探测器能量测量及对比

Table 1 Energy measurement and comparison of calorimetric detector Jmax43 and pyroelectric detector PE50

Frequency /Hz	1			3			5			10		
	Jmax / mJ	PE50 / mJ	Ratio	Jmax / mJ	PE50 / mJ	Ratio	Jmax / mJ	PE50 / mJ	Ratio	Jmax / mJ	PE50 / mJ	Ratio
No. 1	75.76	76.66	1.012	75.18	76.54	1.018	79.47	76.77	0.966	82.66	80.25	0.971
No. 2	74.17	76.96	1.038	75.43	76.23	1.011	78.21	77.36	0.989	83.53	80.43	0.963
No. 3	74.12	76.53	1.033	74.35	76.13	1.024	78.43	77.20	0.984	84.47	80.94	0.958
Average	74.68	76.72	1.028	74.99	76.30	1.018	78.70	77.11	0.980	83.55	80.54	0.964

从表 1 可知,基于虚拟仪器和采集卡的能量采集系统测得的能量和标准能量计测量的激光能量结果具有很好的一致性,该系统最大测量误差控制在 5%之内,结果准确可靠,具有很好的推广性。

另外,随着激光重复频率的提高,作为标定标准的 PE50 能量计与 Jmax43 实验系统测得的能量值均变大,而两者比值变小。分析原因是激光信号重复频率越高,能量探测器散热越不充分,发与发之间遗留热量越多,所以两种能量测量方式测得的能量值规律上均变大;但由于 PE50 探测器响应时间快,散热快,而 Jmax43 探测器相对散热慢,所以随着重复频率的提高 Jmax43 测得的能量变化率更大,PE50 标定能量计与 Jmax43 实验系统测得的能量比值也就变小。

该测量系统通过电缆或者 RS485 信号线实现了信号远程传输及测量。

## 5 结 论

利用虚拟仪器技术,通过采集卡将探测器与计算机连接起来,组成一个激光能量集成的自动采集

与处理系统。根据探测器种类以及信号脉宽的不同,选用了不同的能量计算算法;通过软件编程实现和扩展了能量计的功能;实现了多路激光信号的远程传输。通过对能量计的标定和实例结果可知,该系统具有远程多路测量、结果准确、操作简便及成本低廉等优点,已准备应用于高功率准分子激光 MOPA 系统。

随着计算机和数据采集技术的发展,采用采样率较高的信号采集卡,对信号进行更为优化的输出分析与处理工作,该系统的功能将更为强大,能量测量结果也更为准确,应用前景也更为广阔。

### 参 考 文 献

- Lin Zunqi. Progress of laser fusion[J]. *Chinese J. 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
- Liu Hua, Ye Jinxiang, Xia Yanwen *et al.*. Real-time energy acquisition and multi-path data transportation system on Xingguang II [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(1): 36~38  
刘 华, 叶金祥, 夏彦文 等. 星光 II 装置激光能量实时采集和传输系统[J]. *强激光与离子束*, 2000, **12**(1): 36~38
- Su Chunxiao, Li Wenhong, Yang Cunbang *et al.*. Development

- of the high sensitivity multichannel bulk absorption laser calorimeter[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(2): 68~69
- 苏春晓, 李文洪, 杨存榜等. 高灵敏度多通道激光能量计卡[J]. *激光杂志*, 2008, **29**(2): 68~69
- 4 Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao *et al.*. Mid-infrared high energy laser beam detector array[J]. *Chinese J. Laser*, 2011, **38**(7): 0702008
- 杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝等. 中红外激光光斑探测阵列[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0702008
- 5 Qu Weidong, Wang Fei. Expanding the function of laser energy/power meter based on VI and its application[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, **28**(8): 293~295
- 曲卫东, 王非. 基于虚拟仪器计数的能量计功能扩展及应用[J]. *仪器仪表学报*, 2005, **28**(8): 293~295
- 6 Wu Yao, Li Gaoping, Yu Shuai *et al.*. Measurement method of thermal loss coefficient of calorimetric laser energy meter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(3): 398~402
- 吴遥, 黎高平, 于帅等. 量热式激光能量计热损失系数测定方法的研究[J]. *应用光学*, 2008, **29**(3): 398~402
- 7 Cai Dafeng, Wang Jian, Zhao Zongqing *et al.*. Impact of laser duration on quasimonoenergetic proton energy[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(9): 2533~2536
- 蔡达峰, 王剑, 赵宗清等. 脉冲宽度对准单能质子的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(9): 2533~2536
- 8 Zhang Yuliang, Tao Ruhua, Dong Weiwei *et al.*. Development of application of new thin film in laser energy/power meter[J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(4): 4~6
- 张玉亮, 陶汝华, 董伟伟等. 新型膜材料在激光能量/功率计应用中的新进展[J]. *激光杂志*, 2009, **30**(4): 4~6
- 9 Jiao Chunye, Wang Feng, Jiang Xiaohua *et al.*. Optimization design of full aperture backscattering diagnosis system based on ShenGuang III prototype laser facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0522002
- 焦春晔, 王峰, 蒋小华等. 基于神光III原型的全孔径背反诊断系统光路优化设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0522002
- 10 Zhang Lei, Zhao Jun, Yang Pengling *et al.*. Pyroelectric detecting of high repetition frequency pulse laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 071404
- 张磊, 赵军, 杨鹏翎等. 重频脉冲激光的热释电探测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(7): 071404
- 11 Li Xiaofeng, Zhang Hongmin, Mei Kangping. Design of multi-channel and multi-parameter virtual instrument based on Labview[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2009, **221**(3): 148~150
- 李晓峰, 张红民, 梅康平. 基于Labview的多通道多参数虚拟仪器设计[J]. *计算机与数字工程*, 2009, **221**(3): 148~150

栏目编辑: 韩峰