

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0293-05

# 激光能量测量线性度的优化

唐菱 李小群 王超 陈骥 陈德怀 孙志红 党钊

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 在大型高功率激光系统中,实时监测对激光能量传输控制起着重要的作用。通过对激光能量的实时检测,可以准确判断高功率激光装置系统中每一个环节的工作状态,对保证激光装置的正常运行,缩短装置的发射周期,提高激光装置的工作效率有着重要意义。而激光能量测量的线性度对激光能量测量准确度有着直接的影响。在大型激光装置中,激光光束多、分布广,且存在严重的电磁干扰和环境温度漂移,成为影响激光能量测量的线性度、降低激光能量测量精确性的主要因素。利用热电偶材料来完成对激光能量的测量,并通过改进探头结构和扣除本底、补偿电位的方法来克服激光能量测量中的温度漂移。实验研究表明,采用本方法测量激光能量的线性度优于 2%。

**关键词** 测量; 温度漂移; 扣除本底; 补偿电位; 优化线性度

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0293

## Research of Optimizing Linearity of Laser Energy Detecting

Tang Ling Li Xiaoqun Wang Chao Chen Ji Chen Dehuai Sun Zhihong Dang Zhao

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** In large-scale high-power laser system, real time detecting is of great importance to laser energy transmission. There are a large number of beams and they are distributed in a large area, furthermore, intensive electromagnetic disturbing affects the linearity of the laser energy detecting severely. A method of measuring laser energy is introduced in this paper, which uses thermopile to change the laser energy, and analogue digital module to process the signal. Subtracting the background and compensating the potential to overcome the effects of the temperature drift is focused on. Optimizing linearity result is achieved in this paper. The linearity of laser energy measurement has been optimized to more than 2% in our method.

**Key words** measurement; temperature drift; subtracting the background; compensating the potential; linearity optimization

## 1 引言

在高功率激光系统中,实时监测对激光能量传输控制具有至关重要的意义。通过对这些监测点能量的实时分析,可以准确地判断出高功率激光系统中每一个环节的工作状态,从而对保证激光装置的正常运行,缩短装置的发射周期、提高激光驱动器的效率有着重要意义<sup>[1,2]</sup>。对于大型多光束激光装置,激光束间能量平衡的测量需要大量使用高精度、高稳定性和高可靠性的激光能量计。目前,国内外高重频的高能量和微能量激光能量卡计的发展比较成熟<sup>[3]</sup>,但对于大型激光装置中的多光束能量的集中测量,强电磁辐射和环境温度的漂移对能量测量

的线性度带来了极大的影响,目前国内外还没有比较成熟的技术和产品。

线性度是描述能量卡计的测试值随入射激光能量的线性程度,即能量计测试输出值在工作范围内相对于理想拟合直线的最大偏差。优化能量测量的线性度就是在能量计原有测量范围内降低测量的误差。本文通过介绍在大型激光装置中多光束激光能量测量的原理<sup>[3~8]</sup>,分析了影响能量测量线性度的因素,通过实验研究扣除本底和补偿电位的方法来克服激光能量测量中温度漂移带来的影响,优化了大口径大能量激光测量的线性度。

**作者简介:** 唐菱(1986—),女,硕士研究生,主要从事快电子学方面的研究。E-mail: atl\_1234@163.com

**导师简介:** 李小群(1952—),男,研究员,硕士生导师,主要从事快电子学方面的研究。E-mail:lixiaoqun229@163.com

## 2 激光能量测量的线性度

激光能量测量单元的工作原理如图 1 所示,被测激光入射到吸收体上,吸收体在吸收激光的能量后,将其转变为热能,热能被热电偶转换成对应的电势差,经过处理以后,得出被测激光的能量值。图中的吸收体和热电偶阵列传感器构成了卡计的探头,热电偶阵列传感器转换的电压信号,被模拟信号放大器放大,经过峰值保持,然后通过 A/D 转换成数字信号经 CPU 处理单元处理后通过以太网传输到终端处理器。

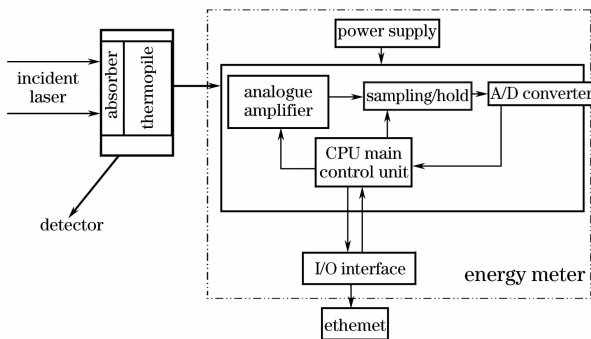


图 1 激光能量测量单元的逻辑结构

Fig. 1 Logic structure of laser energy meter

吸收体吸收激光能量以后温升比较小,最高温升  $\Delta T$  与吸收能量  $E_a$  以及热容量之间的关系有<sup>[9]</sup>

$$\Delta T = E_a / C_t. \quad (1)$$

以本能量计使用条件为例,设被测激光能量为 200 mJ,吸收体平均比热为  $0.7 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ ,玻璃的密度约为  $2.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,入射激光口径为  $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ ,探头面积为  $7000 \text{ mm}^2$ ,吸收厚度为 1 mm,热容  $C_t$  约为  $13.72 \text{ J}/^\circ\text{C}$ ,则由计算可知在测量能量时吸收体温度上升约为  $0.015 \text{ }^\circ\text{C}$ 。但在 1 h 内,环境温度的变化可达到  $5 \sim 6 \text{ }^\circ\text{C}$  左右,假设室温上升过程是一个等速过程,即平均温升速率约为  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ min}$ ,设单发激光能量测量的平均时间为 1 min,则在此过程中温度上升为  $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ ,这一温升已经和激光能量造成的温升可比拟。由此可以看出,室温的变化带来的误差已经达到了 40%,室温的变化对能量计的测量线性度造成的影响非常严重,是影响激光能量测量线性度的主要因素。

由图 1 的逻辑结构图分析可得影响能量测量线性度的因素还有:探头材料传感器的选择以及探头结构的设计;电路本身的线性范围和抗电磁干扰能力,即电路的线性度;能量计对于外界条件改变时的自动调节功能;对于不同频率的激光测量还必须考虑吸收体对于不同频率光的吸收率等。设计中,除

了选择线性度良好的热传感器和设计具有抗电磁干扰能力的电路,能量计还必须具有应对温度变化的自动调节功能。

## 3 激光能量测量线性度的优化方法

### 3.1 室温参考法

为了优化线性度,首先采用了一种常见的对称式结构探头以消除室温变化带来的误差达到自动调节的功能<sup>[10]</sup>,其结构原理如图 2 所示。

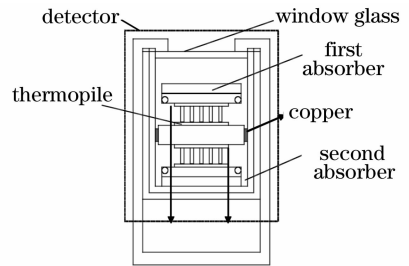


图 2 对称式探头结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the symmetrical detector

由图 2 可见,当激光入射到第一吸收体时,该吸收体将激光的光能线性地转换为一定的温升;第二吸收体作为环境温度的参考值,两吸收体之间的温差通过热电偶转化为一定的电势差进入电路处理。

同时,采用了具有良好线性度的半导体传感器,其内部空间结构如图 3 所示。

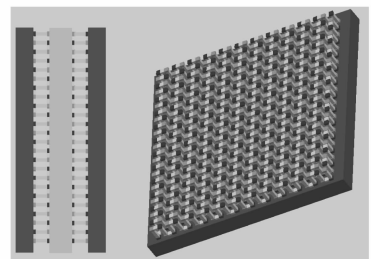


图 3 卡计探头内部实物示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the practical detector

对称式探头对应的原理如图 4 所示。热电偶串连在一起,它们的电势差随温度变化,并叠加起来,

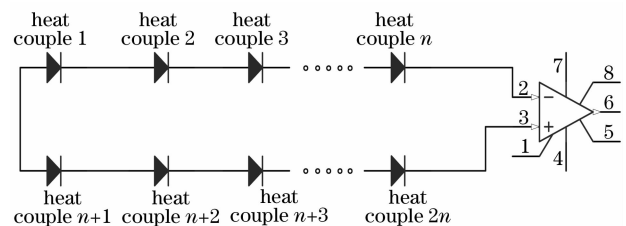


图 4 对称式结构的等效电路示意图

Fig. 4 Equivalent schematic circuit of the symmetrical detector

分别输入到放大器的正负输入端,理想情况下,无激光入射的时候,第一第二吸收体温度一致,则放大器输入端两端的电势一致,放大器输出为 0。这种对称式结构相对于单吸收体结构,加入了第二吸收体作为室温参考,采取了差分式输出,具有一定抗温度漂移能力,提高了测量的线性度。但在测量中发现了无被测激光入射时,显示值缓慢漂移的情况,这表明实际使用中,第二吸收体不能完全作为第一吸收体的温度参考,因为在测量中,为了抗电磁信号干扰第二吸收体处于密封的盒子中,而第一吸收体裸露于空气中,两者随室温变化的不同步造成了上述结果。实验结果表明,仅仅依靠对称式探头还不能完全实现能量计对环境温度改变的自动调节功能。

### 3.2 基于电位补偿的扣除本底法

为了解决温漂带来的问题,人们在程序和电路中采用了以下办法:在主控单元的程序中,采用了扣除本底法,即在每次采样数据前减去上一次采样的本底计数,由于在激光入射之前,温度的变化是很缓慢的,如果采样间隔设为 10 ms 一次,同样以温度变化为匀速过程来计算,则 10 ms 温升约为  $1.67 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ ,在这个数量级的偏差,是远小于实际要求需要的,可以被接受。只要在程序中每采集一次数据就扣除一次本底,能量计每次采样的数据都保证能够有效扣除温度带来的影响,提高了测量线性度。但此方法仅适合本底为正的过程,受电路热漂移和电磁干扰的影响,当放大器输入端负端值高于正端值,放大器的输出为负,单片机内部 A/D 对于负电压的直接采样会采集不到数据,导致本底为负时不能正确补偿,使得测量结果偏小,降低了测量的线性度。

在本底为负的情况下,采用了 D/A 电位补偿使得本底变为正,采用了内部 D/A 负反馈控制放大器输入端信号的措施,其逻辑图如图 5 所示。

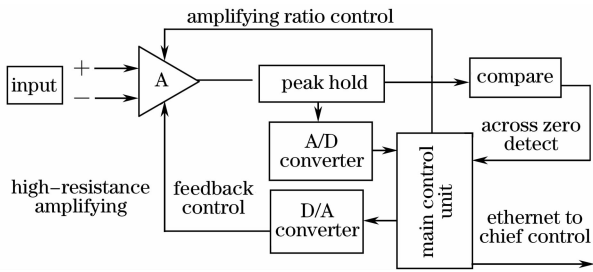


图 5 采用 D/A 消除温度漂移

Fig. 5 Overcome other drifts with D/A converter

由图 5 可见,在峰值保持后加入比较器跟踪信号,如果比较器检测到模拟放大输出信号为负,主控 CPU 控制内部 D/A,改变模拟放大器输入端的电位

使模拟放大器输入为正。在输入部分采用了高阻放大器,原理如图 6 所示。

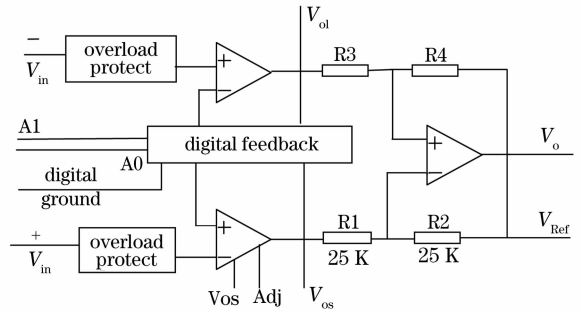


图 6 高阻放大器原理图

Fig. 6 High-resistance amplifier

在图 6 所示的电路中,  $V_o$  输出至峰值保持,并通过比较器得到放大输入端子信号与零的关系,主控 CPU 单元在通过 Ref 调整高阻放大部分的输入,使得 A/D 输入在零以上,这样就可以准确得到本底值再准确补偿,从而彻底消除由于环境温度或者其他因素变化而带来的漂移。

同时,主控 CPU 单元通过图 6 中的 A1 和 A0 控制高阻放大器的放大倍数:测量小能量时,增大放大倍数;测量大能量时,减小放大倍数,使放大器不至于截止饱和,增大了线性范围。

## 4 实验结果及分析

由以上影响激光能量测量的因素分析可知,能量测量线性度依赖于电路本身线性度、探头结构设计以及能量计单元对环境温度变化的自调节功能,因此,对能量计线性度测试分模拟数字处理模块离线线性度验证和能量计单元在线线性度标定,前者用于测试电路性能,后者用于测试能量计单元对温度改变的自调节功能。

### 4.1 模拟数字处理模块离线线性度验证

实验方案:在模拟放大器的输入端输入可变电

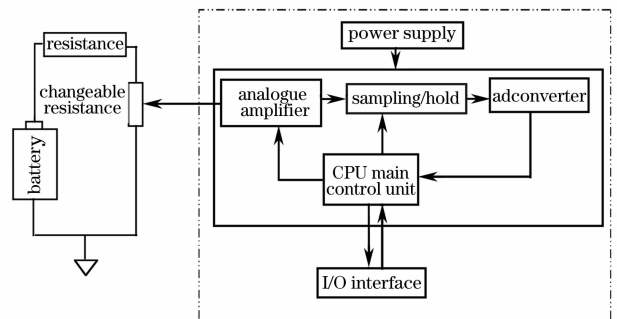


图 7 电路线性度的测试

Fig. 7 Test for the electric circuit linearity

压信号,对模拟电路部分输出进行检测,检验其线性度。测试实验框图如7所示。

在图7中,改变可变电阻的阻值,再分别测量输入和输出电压大小,记录所得数据,输入输出值曲线如图8示,图中包含了实际数据点和把数据进行一次模拟所得曲线。计算表明,模拟数字电路线性度非常好,优于1%。

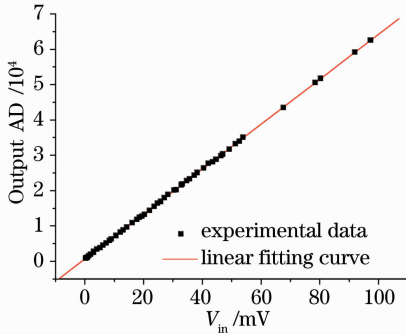


图8 电路线性测试输入输出曲线

Fig. 8 Curve of electrocircuit linearity testing

#### 4.2 能量计单元在线线性度标定

在此基础上,对能量计单元进行测试,测试光路如图9所示<sup>[11]</sup>。

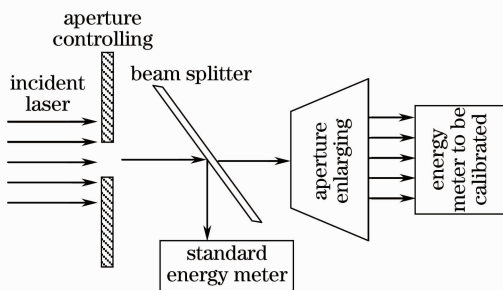


图9 能量计单元测试

Fig. 9 Test for laser energy meter unite

如图9所示,分束镜的反射率确定并已知,限束孔用于限制被测激光的孔径,使光束大小适合测量,扩束孔用于扩大入射到被测能量单元激光的孔径。按图9原理图有

$$\frac{1-R}{R} = \frac{E_2}{E_1}, \quad (2)$$

其中 $R$ 为分束镜反射率, $E_1$ 为1处能量, $E_2$ 为2处能量,根据标准能量计所示值,计算得到入射到被测能量计单元的能量,根据被测能量计单元输出示值,得到标定比(灵敏度)。在测量过程中,控制温度不断上升,输入能量计单元能量不断改变,得到输入输出曲线如图10所示(包括了一次模拟曲线和原数据点)。

从图10可见,即使环境温度改变,能量测量单元测量得到的示值与入射到能量单元的激光能量的

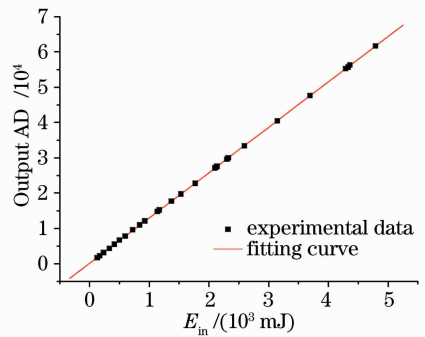


图10 能量计单元线性范围测试曲线

Fig10 Linearity range of laser energy meter

比值平均值为0.0771,标准偏差为0.00081136,即偏差百分比为1%,这个百分比已经远远小于温度漂移带来的偏差的百分比,能量测量单元克服了温度漂移问题。在图10中,拟合曲线和实际数据线性度偏差优于2%。

## 5 结 论

本文采用对称式吸收体探头,采用扣除本底和电位补偿两种方式结合,大大优化了测量线性度。改变环境温度的情况下对能量计单元进行标定,得到很好的线性度(优于2%),与国际知名Gentec公司产品线性度相比,已经接近于同等水平。目前,该能量测量单元已经在大型激光装置中用于对激光能量的远程集中控制,对于保证激光装置的正常运行,提高激光驱动器的工作效率并缩短装置的发射周期起着较为重要的作用。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Chengcheng. Optimizing design of sub-beam laser system used in benchmark physical experiment [J]. *Optics and Optoelectrical Intercommunication*, 2003, 1(5): 35~38  
王成程. 用于ICF基准物理实验的子束激光系统优化设计[J]. *光学与光电交流*, 2003, 1(5): 35~38
- 2 Dang Zhao. Remote integrated measurement system of large aperture laser energy [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2007, (6): 199~202  
党 钊. 大口径激光能量的远程集中测量[J]. *信息与电子工程*, 2007, (6): 199~202
- 3 Chamberlain G. E., Simpson P. A., Smith R. L.. Improvements in a calorimeter for high-power CW lasers [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1978, **IM27**(1): 81~86
- 4 Smith R. L., Russell T. W. et al.. A calorimeter for high-power CW lasers [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1972, **IM21**(4): 434~438
- 5 Heard H G. *Laser Parameter Measurements Handbook* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1968
- 6 Sun Baogui. Laser energy working standard [J]. *Measurement Technique*, 1999, (6): 36~37  
孙宝贵. 激光能量工作标准[J]. *计量技术*, 1999, (6): 36~37
- 7 Lin Kangchun, Tian Li et al.. A calorimeter for measurement of

- frequency-doubled laser light [J]. *Chinese J. Lasers*, 1993, **A20**(5): 362~364  
林康春,田 莉等. 用于倍频激光测量的能量计[J]. 中国激光, 1993, **A20**(5): 362~364
- 8 Tian Li, Lin Kangchun *et al.*. A bulk absorption calorimeter for measurement of high power laser light [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1995, (8): 24~27  
田 莉,林康春等. 测量高功率激光的体吸收能量计[J]. 激光与光电子学进展, 1995, (8): 24~27
- 9 Zhou Fuzheng. PE-calorimeter with broad spectra high sensitivity and fast response[J]. *Chinese J. Lasers*, 1991, **18**(10): 743~748  
周复正. 宽波段高灵敏快响应热释电型光卡计的研究[J]. 中国激光, 1991, **18**(10): 743~748
- 10 User's instructions for HEM-Xa laser energy meter[Z]. 1999 SIOM  
上海光机所. HEM-Xa型激光能量测量装置说明书[Z]. 1999
- 11 Liu Hua. Real-time sampling and data transfer system for XG II laser measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, (2): 35~38  
刘 华. 星光II装置激光能量测量实时采集和数据传输系统[J]. 强激光与粒子束, 2002, (2): 35~38