

文章编号: 0258-7025(2009)09-2399-05

高能激光能量测量装置的现场标定方法

魏继锋 关有光 周 山 张 凯

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 在高能激光能量测量装置标定方法中, 现场标定的方法可以有效地消除各种外在因素对测量结果造成的影响。介绍了 3 种现场标定方法, 分析了这 3 种方法的原理以及数据处理过程。由于标定中多个参量未知, 因此采用了最小二乘法拟合。对于分光镜反射率和透射率比值不确定造成的影响, 采用了现场标定分光比的方法予以消除。通过对实验数据分析和比较可以看出直接传递法最简单, 可有效消除环境因素、激光光斑特性等造成的影响; 间接传递法可以同时消除包括分光比改变在内的几乎所有外在因素造成的影响, 但是由于标定过程较复杂, 测量不确定最大; 交叉传递法标定过程比间接传递法简单, 同时也可以消除分光镜分光比改变产生的影响, 且数据处理过程是这 3 种方法中最简单的。

关键词 测量; 现场标定; 测量不确定度; 传递; 激光

中图分类号 O348.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2399

Online Calibration Methods for High Energy Laser Energy Measuring Equipment

Wei Jifeng Guan Youguang Zhou Shan Zhang Kai

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In the calibration methods for high energy laser (HEL) energy measuring equipment, the online calibration method can eliminate various effects imposed on measurement results by extrinsic elements. Three online calibration methods were introduced to analyse the theories and data treatment processes. Since several parameters are unknown, least square fitting method was used. The ratio of reflectivity to the spectroscopy transmittance was calibrated online to eliminate its uncertainty imposed on the measurement results. By analyzing and comparing data of the three methods conclusions show that direct transfer method is the simplest which can eliminate effect caused by environment elements, laser beam spot characteristic, and so on. Indirect transfer method can eliminate the effect caused by almost all extrinsic elements including change of the ratio of reflectivity to transmittance, but its calibration processes are complex, its uncertainty in measurements is the biggest. Calibration processes of intersectional transfer method are simpler than indirect transfer method's. It can also eliminate effect caused by changes of the ratio of reflectivity to the spectroscopy transmittance, and its data treatment processes are the simplest.

Key words measurements; online calibration; uncertainty in measurements; transmit; laser

1 引 言

为了达到准确测量激光能量的目的, 高能激光能量测量中大多选用全吸收型能量测量装置, 这类能量测量装置通常为量热型, 可以吸收绝大部分入

射能量, 因此具有更加准确、简洁和直观的优点^[1~4]。然而其标定却存在较大的难度, 目前所能采用的方法主要有两种: 等效标定法和不确定度传递法。等效标定法利用其他形式的能量代替激光能

收稿日期: 2008-12-19; 收到修改稿日期: 2009-01-19

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 魏继锋(1980—), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事激光参数诊断技术方面的研究。

E-mail: wjfcem2000@163.com

导师简介: 张 凯(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光物理、激光技术及光电子技术等方面的研究。

E-mail: zhangkai217@sohu.com

量,达到标定的目的,上述方法对能量测量装置的结构设计、传感器的安装及标定过程中各项条件要求都比较高,通常在实验室环境内实施,其最大优点是测量不确定度可以控制得较小;不确定度传递法利用一个或者多个已经经过标校的能量测量装置与需标定的能量测量装置进行比对,以达到标定的目的,该方法可以在实验室环境内实施也可以在现场采用,其最大优点是实现简单,但测量不确定度会较等效标定法大一些^[5]。现场标定是一项保证测量值可信度及不确定度之不可替代的重要实验环节,本文根据不确定度传递原理提出了3种现场标定方法,并

表1 影响因素分析

Table 1 Analysis of effect factors

Sequence	a	b	c	d	e	f
	Environment	Laser	Caloric loss	Reflection and	Absorption and	Difference causing
Effect	difference(including	characteristics	in	permeation rate	scattering of	by various methods
factors	temperature	(including beam	different	change of mirror	mirror	data is deal with
	humidity, radiation,	size, distribution,	condition	in strong beam		
	<i>et al.</i>)	<i>et al.</i>)		and weak beam		

实际上影响测量结果的因素应该还包括系统自身的各种特性,例如系统响应度的线性、空间非均匀性、时间响应的非线性、系统温漂等^[7],这些因素通常在系统设计和装调过程中解决,因此不对其进行深入的讨论。表1列出的6项属于影响测量结果的外在因素,通过科学标定方法能将其消除或将其影响降低到尽可能小的范围内。

3 现场标定原理及数据处理方法

3.1 直接对标法

直接对标法实现最为简单,它需一个经过标校的激光能量测量装置 m_1 作为标准以及一块已知分光比为 l 的分光镜 M 作为中介,被校能量测量装置 m_2 的修正因子 k 可通过三者之间的关系计算得到。 m_1 标准能量测量装置的标校可采用等效标定法或者不确定度传递方法实现,分光镜的分光比 l 通常可由光谱仪测得,直接对标法的光路示意图如图1所示。

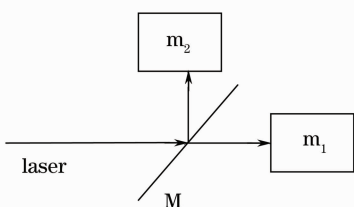


Fig. 1 直接对标法示意图

图1 Schematic of direct transfer measurement

对这3种方法的原理及数据处理过程逐一作了详细的分析,对其标定效果及优缺点进行了深入的探讨。

2 影响测量结果的各种因素

由于高能激光器出光功率及能量无法精确控制(即没有标准的激光源),其标定无法按照常规校准规程中先用标准能量测量装置标定激光器,然后利用激光器标定被检能量测量装置的方法^[6]。高能激光能量测量装置标定过程中必须借助分光镜完成上述标定过程。比较在实验室与现场使用过程中的差异,可能对测量结果造成影响的各种因素如表1所示。

由于采用的是现场标定方法,因此实际测量条件与标定条件基本相同,光斑的各种特性也与实际使用时基本一致,这样就可以基本消除影响测量结果的因素中 a, b 和 c 3项,由于分光比仍然采用实验室的测量结果, d, e 和 f 3项的影响仍然无法消除。

设已知 m_1 的相对标准不确定度为 u_{11} , 分光镜 M 的分光比 $l(l = R/T, 其中 R 为反射率, T 为透射率)$ 的相对标准不确定度为 u_1, m_2 的相对标准不确定度为 u_{22}, m_2 相对于 m_1 的修正因子为 k , 则可得到^[6]

$$E_2 = l \times E_1 / k, \quad (1)$$

式中 E_1 和 E_2 分别为 m_1 和 m_2 所测得的能量示值, 由于式中 E_2 和 k 的测量不确定度都是未知量, 且不同发次测量条件并不完全相同, 无法按照常规的不确定度传递法对其求解, 因此这里采用最小二乘法来处理, 只需保证 E_2 的残差最小即可。实际上(1)式中等式右侧应该还包括一个常数项, 该项的含义为系统漂移量, 但由于该项数值较小, 通常对测量结果的影响很小, 因此经常将其省略, 这里不妨设为 E_0 , 令 $a = E_0, b = l/k$, 将 a 和 b 看成两个待定系数, 则可得到关系式

$$E_2 = a + b \times E_1, \quad (2)$$

利用最小二乘法可得^[8,9]

$$n \times a + b \times \sum_{m=1}^n E_{1m} = \sum_{m=1}^n E_{2m},$$

$$\left(\sum_{m=1}^n E_{1m} \right) \times a + \left(\sum_{m=1}^n E_{1m}^2 \right) \times b = \sum_{m=1}^n E_{1m} \times E_{2m}, \quad (3)$$

修正因子 k 的表达式为

$$k = l/b, \quad (4)$$

解(3)式即可求出待定系数 a 和 b , E_2 的标准偏差 s 可表示为^[9]

$$s = \sqrt{\left(\sum_{m=1}^n V_m^2\right)/(n-2)}, \quad (5)$$

b 的标准偏差 u_b 则可根据方程组^[9]

$$\begin{aligned} q_{11} \times \sum_{m=1}^n E_{1m}^2 + q_{12} \times \sum_{m=1}^n (E_{1m} \times E_{2m}) &= 1 \\ q_{11} \times \sum_{m=1}^n (E_{2m} \times E_{1m}) + q_{12} \times \sum_{m=1}^n E_{2m}^2 &= 0 \\ q_{21} \times \sum_{m=1}^n E_{1m}^2 + q_{22} \times \sum_{m=1}^n (E_{1m} \times E_{2m}) &= 0 \\ q_{21} \times \sum_{m=1}^n (E_{2m} \times E_{1m}) + q_{22} \times \sum_{m=1}^n E_{2m}^2 &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

求出,再根据 b 与 k 之间的关系得到修正因子的相对标准不确定度 u_k 的表达式为

$$u_k = \sqrt{u_l^2 + (u_b/b)^2}, \quad (7)$$

m_2 的合成相对标准不确定度则可以由 A 类与 B 类标准不确定度合成得到,则 m_2 的 B 类相对标准不确定度 $u_{2,b}$ 为^[10,11]

$$u_{2,b} = \sqrt{u_k^2 + u_{11}^2}, \quad (8)$$

被标能量测量装置的合成相对标准不确定度为

$$u_{22} = \sqrt{u_{2,b}^2 + s^2 / \left(\sum_{m=1}^n E_2/n\right)^2}, \quad (9)$$

3.2 间接传递标定法

强光和弱光作用下透镜的膜系状态会有所改变,这种变化将直接反映在分光比上,另外强光作用下分光镜的散射吸收也会对测量结果造成一定的影响,因此需要在现场对透镜的分光比进行测量,间接传递标定法测量光路如图 2 所示。

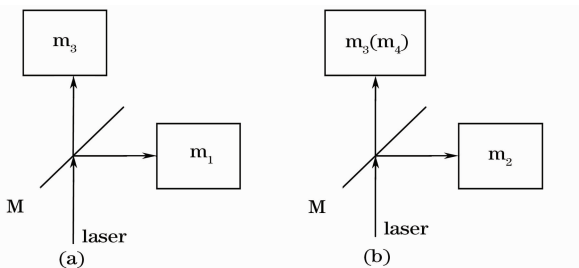


图 2 间接传递法示意图

Fig. 2 Schematic of indirect transfer measurement (a) Schematic of reflection and permeation rate online measurement; (b) schematic of online calibration

间接传递法中引入了一个参考能量测量装置 m_3 , 它主要在其中起到一个量值传递作用,如图 2 中所示可以首先用标准能量测量装置 m_1 和参考能量测量装置 m_3 标出分光比,然后用被标能量测量装置 m_2 替换标准能量测量装置 m_1 ,通过上述措施可以基本消除强弱光作用下分光比变化及分光镜散射和吸收造成的影响^[6]。

设标定分光比的次数为 n 次,则可得到分光比 l 的表达式为

$$l = \left(\sum_{m=1}^n E_{1m}/E_{3m}\right)/n, \quad (10)$$

其 A 类相对标准不确定度 u_{lA} 可由贝赛耳公式得到^[7,12]

$$u_{lA} = \sqrt{\left[\sum_{m=1}^n (E_{1m}/E_{3m} - l)^2\right]/[(n-1) \times n]}, \quad (11)$$

其合成相对标准不确定度为其 A 类和 B 类合成,其表达式为^[13]

$$u_l = \sqrt{u_{lA}^2 + u_{11}^2 + u_{33}^2}. \quad (12)$$

在数据处理过程中,由于上述方法中前后多次使用 m_3 ,因此分光比 l 与 m_3 之间必然存在相关^[6],整个数据处理过程就比较复杂。文献[4]中采用了一种工程近似方法分析了其修正因子以及测量不确定度,就不再详细讨论。如果需要减少数据处理的复杂度,也可以采用一种简便的方法,即在更换标准能量测量装置 m_1 时将参考能量测量装置 m_3 同时更换,如果将 m_3 更换为另外一个参考能量测量装置 m_4 后,就不存在上述相关关系了,这样就可以得到

$$E_2 = l \times E_4/k, \quad (13)$$

式中 E_4 为更换后的参考能量测量装置的测量值,这样(13)式的形式与(1)式就完全相同,唯一的区别就是 E_1 变成 E_4 ,因此后续数据的处理过程与直接标定法完全相同,这里不再作详细分析。

3.3 交叉标定法

间接传递标定法尽管消除了影响测量结果的因素 e 和 f 两项,可以提高测量的准确性,但是由于其引入了参考能量测量装置 m_3 和 m_4 ,这也会增加测量不确定度,同时整个操作过程也比较复杂。为了减小测量不确定度,同时简化操作过程,采用一种交叉标定方法,其原理示意图如图 3 所示。仍然采用分光镜将光束分成两束,标准能量测量装置 m_1 接收透射光,被标能量测量装置 m_2 接收反射光,一共测量 n 发,接着将 m_1 与 m_2 的位置互换,即 m_2 接收

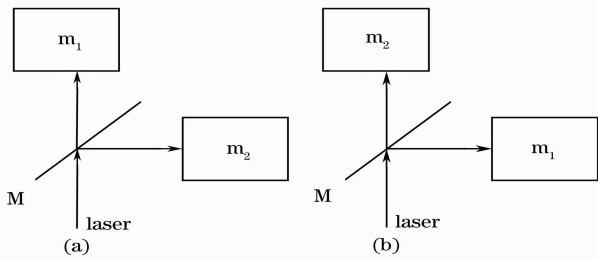


图3 交叉传递法示意图

Fig. 3 Schematic of intersectional transfer measurement

(a) Schematic before position exchange;

(b) schematic after position exchange

透射光, m_1 接收反射光, 再测量 t 发, 则可得到

$$\begin{aligned} E_2 &= l \times E_1 / k, \\ E'_2 &= E'_1 / (k \times l), \end{aligned} \quad (14)$$

式中 E_2 和 E'_1 分别为交换前 m_2 和 m_1 的测量值, E_2 和 E_1 分别为交换后 m_2 和 m_1 的测量值, 由(14)式得

$$k = \sqrt{(E_1 \times E'_1) / (E_2 \times E'_2)}, \quad (15)$$

由于在交换前后共测了 $(n+t)$ 组数据, 因此可以获得 nt 个 k 值, 则任意 k 的表达式为

$$k_m = \sqrt{(E_{1p} \times E'_{1q}) / (E_{2p} \times E'_{2q})} \quad (16)$$

因此可求出修正因子 k 的期望值 k_c .

$$k_c = \left(\sum_{m=1}^{n \times t} k_m \right) / (n \times t). \quad (17)$$

由于(16)式中 k_m 是采用交换前后任意两组数据组合计算得到的, 因此在分析其不确定度时可考虑采用极差法, 其相对标准不确定度可表示成^[9]

$$u_k = (k_{\max} - k_{\min}) / d_m, \quad (18)$$

其中 d_m 为极差系数, 它由 nt 决定, 可通过查表的方式得到。由不确定度传递法则可求出被标能量测量

装置 m_2 的相对标准不确定度 u_{22} 的表达式为

$$u_{22} = \sqrt{u_k^2 + u_{11}^2}. \quad (19)$$

4 数据处理结果及讨论

采用图3中两种光路现场测得了若干组数据, 其中分光镜的分光比在实验室利用光谱仪测得为6:4 ($u_1 = 2\%$), 标准能量测量装置 m_1 的相对标准不确定度为8% ($k=2$), 按照直接对标法中提出的数据处理方法, 首先可以按照(3)式中的方程组解出待定系数 $a = -0.0014$ 和 $b = 1.558$, 接着由(4)式求出修正因子 $k = 0.963$, $s = 0.007$, 由(6)式可解出 $q_{22} = 92.9$, $u_b = 0.067$, 再由(7)式测量装置算出 $u_k = 4.5\%$, 最后由(9)式测量装置算出 $u_{22} = 6.0\%$ 。如果按照交叉对标法中提出的数据处理方法对上述数据进行处理, 首先按照(16)式测量装置算出 k_m 的值, 然后根据(17)式可求出其期望值为 $k_c = 0.982$, $nt = 15$ 时 $d_m = 3.47$, 则根据(18)式测量装置可算出 $u_k = 1.2\%$, 根据(19)式测量装置可算出 $u_{22} = 4.2\%$ 。

同样采用图2中的光路现场测得若干组数据, 标准能量测量装置 m_1 的相对标准不确定度为8% ($k=2$), 参考能量测量装置 m_3 和 m_4 的相对标准不确定度 u_{33} 和 u_{44} 均为5% ($k=2$)。按照间接传递法中提出的数据处理方法, 由(10)式和(11)式可求出分光比 $l = 1.393$, $u_l = 4.7\%$, 同理利用最小二乘法拟合得到 $a = 0.0007$ 和 $b = 1.427$, $k = 0.976$, $s = 0.009$, $q_{22} = 47.0$, $u_b = 0.060$, $u_k = 6.3\%$, $u_{22} = 7.6\%$ 。

三种不同方法标定结果如表2所示。

表2 标定结果比较

Table 2 Compare of different calibration methods

Methods	l	$u_l / \%$	k	$U_k / \%$	$E_{22} / \%$
Direct transfer	1.500	2.0	0.963	4.5	6.0
Indirect transfer	1.393	4.7	0.976	6.3	7.6
Intersectional transfer			0.982	1.2	4.2

由表2可以看出现场标定的分光比与实验室条件下的分光比存在一定差异, 这也进一步说明了现场对透镜的分光比进行标定的必要性, 但由于现场标定中增加了标定环节, 其测量不确定度也会相应增加。表中修正因子 k 也有所不同, 这种差异既包括测量过程引入的误差, 也包括不同数据处理方法

所产生的差异, 但考虑到间接传递法和交叉传递法外在影响因素的消除方面有更好的效果, 因此具有更高的可信度。间接传递法使用的设备最多, 方法相对最复杂, 因此引入的测量不确定度也最大。交叉传递法相对最简单, 涉及的环节也较少, 同时又消除了分光镜的影响, 因此测量不确定度最小。

5 结 论

高能激光能量测量装置在实验室标定条件与实际使用条件之间存在较大差异, 这点决定了现场标定成为一项保证测量值可信度及不确定度不可替代的重要实验环节, 常用的现场标定方法包括直接传递标定法、间接传递标定法和交叉传递标定法。直接传递标定法实现最为简单, 但无法消除分光比变化造成的影响; 间接传递法引入了参考能量测量装置, 可现场对透镜的分光比进行标定, 从而消除分光比变化造成的影响, 但是由于标定过程中环节较多, 造成其测量不确定较大; 交叉传递法实现难度介于直接传递法与间接传递法之间, 由于消除了透镜分光比的影响, 同样具有较高的测量精度, 测量不确定度最小。在数据处理方面, 直接传递法和间接传递法中 k 与 E_{22} 均为未知量, 因此采用了最小二乘法原理对其进行了拟合, 在标定过程中还采用相应措施消除了变量之间相关影响, 大大简化了数据处理过程。

参 考 文 献

- 1 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004
苏毅, 万敏. 高能激光系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- 2 R. L. Smith, T. W. Russell, W. E. Case *et al.*. A calorimeter for high power CW lasers [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1972, **21**(4): 434~438
- 3 Pan Xuemin, Len Zhenkun, Wang Cunshan *et al.*. DSC investigation on self-propagating high-temperature synthesis of alTiC master alloy induced by laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 36~38
潘学民, 雷振坤, 王存山等. 激光引燃自蔓延合成 Al-Ti-C 中间合金差示扫描量热法分析 [J]. 中国激光, 2007, **34**(s1): 36~38
- 4 Liu Feng, Wu Zhensen, Wang Lijun *et al.*. Reconstruction Theory of laser beam intensity temporal and spatial distribution measurement by thermal image method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 98~104
刘峰, 吴振森, 王立君等. 热图法测量激光强度时空分布的重
- 构理论研究 [J]. 光学学报, 2007, **27**(1): 98~104
- 5 Wei Jifeng, Zhang Kai, Zhou Shan *et al.*. Research on calibration of high-energy-laser calorimeter [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(11): 1798~1802
魏继锋, 张凯, 周山等. 高能激光能量计溯源问题研究 [J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(11): 1798~1802
- 6 Wei Jifeng, Zhang Kai, Qian Shaosheng *et al.*. Evaluation of uncertainty in online energy measurement of high energy-laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7): 1102~1106
魏继锋, 张凯, 钱绍圣等. 高能激光能量在线测试中的不确定度分析 [J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(7): 1102~1106
- 7 Tian Xiaoli, Zhou Wenchao, Peng Yong *et al.*. Calibration technique of light beam quality measurement system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(s1): 365~368
田小强, 周文超, 彭勇等. 光束质量测试系统标定技术 [J]. 中国激光, 2006, **33**(s1): 365~368
- 8 Shen Tingmei, Gu Ying, Wang Tianshi *et al.*. Speckle reduction in optical coherence tomography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1437~1440
沈婷梅, 顾瑛, 王天时等. 光学相干层析成像中散斑噪声减小算法 [J]. 中国激光, 2008, **35**(9): 1437~1440
- 9 Qian Shaosheng. Uncertainty in Measurement [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002
钱绍圣. 测量不确定度 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- 10 Xing Jin, Wang Shurong, Li Futian. Comparison of spectral radiance calibrations of spectroradiometer for ultraviolet space remote sensing using three calibration techniques [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 509~515
邢进, 王淑荣, 李福田. 空间紫外遥感光谱辐射计光谱辐亮度定标三种方法的比较 [J]. 中国激光, 2006, **33**(4): 509~515
- 11 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 259~264
吴庆阳, 苏显渝, 向立群等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法 [J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 259~264
- 12 Chen Shaowu, Wang Qunshu, Zhao Hong *et al.*. On-line parameters measurement method for high energy laser with large beam profile [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1589~1592
陈绍武, 王群书, 赵宏等. 一种大面积高能激光光束参数的在线测量方法 [J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(10): 1589~1592
- 13 Gao Xueyan, Su Yi, He Junzhang *et al.*. Uncertainty of spot moment parameters measured with array detectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1411~1416
高学燕, 苏毅, 何均章等. 光斑矩阵参量阵列测试法的不确定度 [J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1411~1416