

文章编号: 1002-2082(2006)SO-0047-04

激光能量计测量不确定度评定

史继芳, 宋一兵, 吉 晓

(西安应用光学研究所 国防科工委光学计量一级站, 西安 710065)

摘 要: 激光能量是激光辐射的基本参数之一, 是评价激光光源的关键参数, 而激光能量计校准结果的准确性直接关系到激光能量测量的准确性。笔者通过对激光能量计检定过程的分析, 找出了影响检定结果的几个因素。通过分析用作标准器的激光能量计和直读式激光能量计测量不确定度的来源, 建立了测量不确定度的数学模型, 并给出不确定度的 A 类评定和 B 类评定等的评定方法。对检定结果的不确定度进行了评定, 给出检定结果不确定度的计算方法和表示方法。

关键词: 激光能量计; 检定; 测量不确定度

中图分类号: TN247-34

文献标志码: A

Evaluation of uncertainty measurement for laser energy meter

SHI Ji-fang, SONG Yi-bing, JI Xiao

(Optical Metrology Laboratory, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Laser energy is one of the basic parameters of laser radiation and a key parameter for the evaluation of the laser source, so the calibration result of the laser energy meter has a direct relationship to the accuracy of the laser energy measurement. A factor which effect the verification result is find out through the procedure analyses of calibration of the laser energy meter. By analyses of measuring the source of uncertainty with the laser energy meter and direct-reading laser energy meter which were used as standard measurement devices, a mathematical model of uncertainty of measurement was built up. Two evaluation methods (Type A and Type B) of uncertainty of measurement are presented in this paper. The uncertainty of the calibration results is evaluated. The methods of calculation and expression for the uncertainty of calibration results are given.

Key words: laser energy meter; verification; uncertainty of measurement

引言

激光能量是激光辐射的基本参数之一, 反映了激光的有无和强弱, 是评价激光光源的关键参数。随着激光技术的迅速发展, 激光器在军、民两用上的应用日益广泛, 科研、生产及使用部门都十分关注激光能量测量的准确性, 测量结果的准确与否直接关系到激光产品的质量、可靠性及安全性。本文通过对激光能量计检定过程的分析, 找出影响检定

结果的因素。用不确定度的 A 类评定和 B 类评定等评定方法对检定结果的不确定度进行了评定, 给出检定结果不确定度的计算方法和表示方法。

1 检定方法

激光能量计检定依据的是 JJG 312-83《激光能量计检定规程》。图 1 为激光能量计检定的原理示意图。

收稿日期: 2006-07-20; 修回日期: 2006-08-30

作者简介: 史继芳(1964—), 女, 河南开封人, 西安应用光学研究所高级工程师, 主要从事微光夜视计量、激光参数计量及测试技术研究工作。E-mail: shijifangveal@126.com

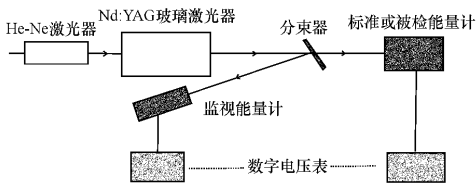


图1 激光能量计检定原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calibration principle for laser energy meter

借助与脉冲激光器同轴的 He-Ne 激光器,将标准能量计对准脉冲激光器。在一定放电电压下,用标准能量计接收脉冲激光,若它和监视能量计的净响应分别为 u_0 和 u'_0 ,则有计算监视比:

$$R = \frac{u_0}{u'_0} \tag{1}$$

测量数次,得到平均监视比 \bar{R} 。

将被检能量计(用作标准器的激光能量计和直读式激光能量计)通过 He-Ne 激光调准到脉冲激光的光轴上。在与上述相同的放电电压下触发激光,同时读取被检能量计和监视能量计的净响应 u 和 u' ,则检定时的实际能量为

$$Q_{\text{标}} = \frac{u' \bar{R}}{S_Q} \tag{2}$$

式中 S_Q 为标准能量计的灵敏度(由上一级计量部门给出)。

由此,被检能量计(用作标准器的激光能量计)的灵敏度为

$$S = \frac{u}{Q_{\text{标}}} = \frac{u S_Q}{u' \bar{R}} \tag{3}$$

被检能量计为直读式能量计时,可由被检能量计 $Q_{\text{检}}$ 示值和检定时的实际能量 $Q_{\text{标}}$,按下式求得修正系数:

$$C = \frac{Q_{\text{标}}}{Q_{\text{检}}} = \frac{u' \bar{R}}{Q_{\text{检}} S_Q} \tag{4}$$

2 数学模型

1) 对于标准器的激光能量计,有

$$S = \frac{u}{Q_{\text{标}}} = \frac{u S_Q}{u' \bar{R}}$$

2) 对于直读式激光能量计,有

$$C = \frac{Q_{\text{标}}}{Q_{\text{检}}} = \frac{u' \bar{R}}{Q_{\text{检}} S_Q}$$

式中: S 为被检能量计的灵敏度; u 为被检能量计的净响应; u' 为监视能量计的净响应; \bar{R} 为通过监视比测量的算术平均值; S_Q 为标准能量计的灵敏度; C 为被检能量计的修正系数; $Q_{\text{标}}$ 为检定

时的实际能量; $Q_{\text{检}}$ 为被检能量计的示值能量。

3 测量不确定度来源

3.1 激光能量计检定结果测量的不确定度

由用作标准器的激光能量计数学模型可以看出,影响检定结果测量不确定度的分量主要有:

- 1) 监视比测量引起的不确定度分量 u_1 ;
- 2) 标准能量计引入的不确定度分量 u_2 ;
- 3) 监视能量计测量不准引起的不确定度分量 u_3 ;
- 4) 被检能量计测量不准引起的不确定度分量 u_4 ;
- 5) 测量重复性引起的不确定度分量 u_5 。

表1 给出了这些分量评定方法的分类和不确定度。

表1 用作标准器的激光能量计测量不确定度一览表

Table 1 Uncertainty measured by laser energy meter used as calibrator

不确定度分量	不确定度来源	不确定度 u	评定方法	分布	k 值	灵敏系数	自由度
u_1	监视比测量不准	0.23%	A类			1	5
u_2	标准能量计引入	1.5%	B类	正态	2	1	∞
u_3	监视能量计不准	0.16×10^{-4}	B类	正态	3	1	∞
u_4	被检能量计不准	1.7×10^{-4}	B类	正态	3	1	∞
u_5	测量重复性	0.11%	A类			1	5

3.2 直读式激光能量计检定结果测量的不确定度

由直读式激光能量计的数学模型可以看出影响测量不确定度的分量有:

- 1) 监视比测量引起的不确定分量 u_1 ;
- 2) 标准能量计引入的不确定分量 u_2 ;
- 3) 监视能量计测量不准引起的不确定度分量 u_3 ;
- 4) 测量重复性引起的不确定度分量 u_4 。

表2 给出了这些分量评定方法的分类和不确定度。

表2 直读式能量计测量不确定度一览表

Table 2 Uncertainty measured by direct-reading laser energy meter

不确定度分量	不确定度来源	不确定度 u	评定方法	分布	k 值	灵敏系数	自由度
u_1	监视比测量不准	0.23%	A类			1	5
u_2	标准能量计引入	1.5%	B类	正态	2	1	∞
u_3	监视能量计不准	0.16×10^{-4}	B类	正态	3	1	∞
u_4	测量重复性	0.23%	A类			1	5

4 测量不确定度评定

4.1 用作标准器的激光能量计

4.1.1 监视比测量引起的不确定度分量 u_1

在标准装置预热 30 min 后开始测量监视比, 连续测量 6 次, 其测量不确定度评定方法为 A 类评定, 不确定度由下式计算:

$$u_1 = S(R) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}$$

表 3 给出了监视比重复性测量值及不确定度计算结果。

表 3 监视比测量引起的不确定度

Table 3 Uncertainty caused by surveillance ratio measurement

测量次数	监视比(R)	平均值(\bar{R})	标准不确定度/%
1	6.205	6.207	0.23
2	6.203		
3	6.208		
4	6.214		
5	6.199		
6	6.212		

4.1.2 标准能量计引入的不确定度分量 u_2

标准能量计的灵敏度 S_Q 由计量部门给出, 其扩展不确定度为 1.5% ($k=2$), 其测量不确定度评定方法为 B 类评定, 则有

$$u_B(S_Q) = \frac{1.5\%}{2} = 0.75\%$$

因其灵敏度系数为 $\left| \frac{\partial S}{\partial S_Q} \right| = 1$, 所以 $u_2 =$

$$\left| \frac{\partial S}{\partial S_Q} \right| u_B(S_Q) = 0.75\%$$

4.1.3 监视能量计测量不准引起的不确定度分量 u_3

用于接收监视能量计输出信号的数字电压表的扩展不确定度由计量部门给出, 其值为 0.16×10^{-4} ($k=3$), 其测量不确定度评定方法为 B 类评定, 则有

$$u_B(u') = \frac{0.16 \times 10^{-4}}{3} = 5.3 \times 10^{-6}$$

其灵敏度系数为 $\left| \frac{\partial S}{\partial u'} \right| = 1$, 所以 $u_3 = \left| \frac{\partial S}{\partial u'} \right| \times$

$$u_B(u') = 5.3 \times 10^{-6}。$$

因其数值太小, 不足以影响结果的不确定度, 可忽略不计。

4.1.4 被检能量计测量不准引起的不确定度分量 u_4

用于接收被检能量计输出信号的数字电压表的扩展不确定度由计量部门给出, 其值为 $1.7 \times$

10^{-4} ($k=3$), 其测量不确定度评定方法为 B 类评定, 则有

$$u_B(u) = \frac{1.7 \times 10^{-4}}{3} = 5.7 \times 10^{-5}$$

其灵敏度系数为 $\left| \frac{\partial S}{\partial u} \right| = 1$, 所以 $u_4 = \left| \frac{\partial S}{\partial u} \right| \times u_B(u) = 5.7 \times 10^{-5}。$

因其值太小, 不足以影响结果的不确定度, 可忽略不计。

4.1.5 测量重复性引起的测量不确定度分量 u_5

测量标准重复性的详细数据参见本报告中测量标准重复性灵敏度检定一项, 以中国计量科学研究院生产的 B 型激光能量计作为被检能量计, 连续测量 6 次被检能量计的灵敏度, 测量标准重复性由实验标准偏差来表示, 由此引起的测量不确定度评定为 A 类评定, 其值为 $u_5 = 0.11\%$ 。测量结果见表 4 所示。

表 4 灵敏度测量重复性引起的测量不确定度

Table 4 Uncertainty caused by sensitivity repeating measurement

测量次数	标准能量计 $Q_{\text{标}}/\text{J}$	被校能量计 u/mV	灵敏度(S) $/\mu\text{V} \cdot \text{J}^{-1}$
1	2.240	0.705	314.73
2	2.553	0.800	313.36
3	2.613	0.824	315.35
4	2.058	0.649	315.35
5	2.527	0.797	315.39
6	2.471	0.780	315.66
平均值			315.0
标准不确定度 $S(\bar{x})$	$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$		0.11%

4.2 直读式激光能量计

4.2.1 监视比测量引起的不确定度分量 u_1

由 4.1.1 知监视比测量引起的不确定度分量 $u_1 = 0.23\%$ 。

4.2.2 标准能量计引入的不确定度分量 u_2

由 4.1.2 知标准能量计引入的不确定度分量 $u_2 = 0.75\%$ 。

4.2.3 监视能量测量不准引起的不确定度分量 u_3

由 4.1.3 知监视能量测量不准引起的不确定度分量 $u_3 = 5.3 \times 10^{-6}$, 可忽略不计。

4.2.4 测量重复性引起的不确定度分量 u_4

用 Rj-7200 型激光能量计作为被检能量计, 连续测量 6 次被检能量计的修正系数, 测量标准重复

性用实验标准偏差来表示,由此引起的测量不确定度评定为A类评定,其值为 $u_4=0.23\%$ 。测量结果见表5所示。

表5 修正系数测量重复性引起的测量不确定度

Table 5 Measurement uncertainty effected by correct-coefficient repeating measurement

测量次数	标准能量计	被校能量计	修正系数(C)
	$Q_{标}/\mu J$	$Q_{检}/\mu J$	
1	172.57	164.51	1.049
2	152.85	146.83	1.041
3	160.55	152.47	1.053
4	160.55	152.47	1.053
5	165.05	158.09	1.044
6	173.16	164.13	1.055
平均值			1.05
标准不确定度 $S(\bar{x})$	$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$		0.23%

5 合成标准不确定度的计算

5.1 用作标准器的激光能量计

由于各分量之间独立不相关,则有

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_5^2} = \sqrt{(0.23\%)^2 + (0.75\%)^2 + (0.11\%)^2} = 0.79\%$$

5.2 直读式激光能量计

由于各分量之间独立不相关,则有

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_4^2} = \sqrt{(0.23\%)^2 + (0.75\%)^2 + (0.23\%)^2} = 0.82\%$$

6 扩展不确定度

6.1 用作标准器的激光能量计

若要求置信水平为 0.95% ,则 $k=2$,此时扩展不确定度为 $U=ku_c=1.58\%$ 。

6.2 直读式激光能量计

若要求置信水平为 0.95% ,则 $k=2$,此时扩展不确定度为 $U=ku_c=1.64\%$ 。

7 测量不确定度在报告中的表示

激光能量计灵敏度的测量结果有效位数通常取4位,修正系数的测量结果有效位数通常取3位,不确定度的有效位数最多取2位。

7.1 用作标准器的激光能量计

如上述灵敏度的测量平均值为 $S=314.97(\mu V \cdot J^{-1})$,则检定报告中测量结果的表示方法为

$S=315.0(\mu V \cdot J^{-1})$;扩展不确定度 $U=2.0\%$ ($k=2$)。

7.2 直读式激光能量计

直读式激光能量计通常有许多档位,不同档位的修正系数也各不相同,因此在报告中必须注明修正系数的档位。上述修正系数是在 $200 \mu J$ 档位时测量的,其测量平均值为 $C=1.05$,则检定报告中测量结果的表示方法为

$200 \mu J$; $C=1.05$; 扩展不确定度 $U=2.0\%$ ($k=2$)

参考文献:

- [1] 史继芳. 建立测量标准技术报告实例汇编[S]. 北京: 国防科工委计量考核办公室,2004.
- [2] JJF 1059-1999 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 国家质量技术监督局,1999.
- [3] GJB3756-99 测量不确定度的表示与评定[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会,1999.
- [4] 测量不确定度评定与表示实例[S]. 北京: 中国计量出版社,2000.
- [5] 测量不确定度评定与表示指南[S]. 北京: 中国计量出版社,2000.