

太阳辐照绝对辐射计主光阑面积测量

陈祥子^{1,2} 方 伟¹ 杨振岭¹ 夏志伟¹ 王玉鹏¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 精确且已知面积的主光阑对于搭载在气象卫星上的太阳辐照绝对辐射计(SIAR)有着重要作用,其带来的不确定度分量是太阳辐射计测量辐照度不确定度的重要组成部分。有效面积法是一种测量主光阑面积的方法,其通过叠加高斯光束形成一个统一的照度均匀分布的光源区域,利用辐射测量中光阑对光束的限制效应定义主光阑面积。对SIAR进行简单介绍,主要对有效面积法的测量原理进行理论分析及模拟仿真,提出了具体搭建测量装置的方案,并对主光阑面积进行测量,测量合成不确定度达到 8.2×10^{-5} 。该测量方法提高了太阳辐照绝对辐射计主光阑面积的测量精度,使得太阳辐照绝对辐射计测量辐照度的标准不确定度从 8×10^{-4} 提高到 6.3×10^{-4} 。

关键词 测量; 太阳辐照度绝对辐射计; 有效面积法; 主光阑面积; 测量装置; 不确定度分析

中图分类号 V11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0912003

Main Aperture Area Measurement of the SIAR

Chen Xiangzi^{1,2} Fang Wei¹ Yang Zhenling¹ Xia Zhiwei¹ Wang Yupeng¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For solar irradiance absolute radiometer (SIAR) boarded on meteorological satellites, the main aperture of known area plays an important role. The uncertainty of the main aperture area is at present one of the largest components of the uncertainty in SIAR measurement. The effective area method is a way to measure the main aperture area. It defines the main aperture area based on the aperture of beam-limiting effect in radiometric measurement. Through a superposition of Gaussian beams to generate a known constant irradiance covers the surface of the measured apertures. The ratio of the flux to the irradiance gives the aperture area. We introduce the SIAR, and expound theoretical analysis of the measurement method using Matlab and TracePro software to make simulations. Put forward the specific measurement scheme, and make the uncertainty budget of the measurement device. The combined measurement uncertainty of the main aperture is about 8.2×10^{-5} . This method improves the measurement accuracy of the main aperture, makes the uncertainty of the irradiance measurement about the SIAR from 8×10^{-4} to 6.3×10^{-4} .

Key words measurement; SIAR; effective area method; main aperture area; measurement device; uncertainty budget

OCIS codes 120.6085; 120.3940; 120.5630; 140.3298

1 引 言

为了研究地球上能量循环与辐射收支及其对全球气候的变迁、天气与环境变化的影响,需要对太阳辐照度精确测量与长期监测。为此,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所于20世纪60年代开始研制平面型辐射计,到90年代研制出了腔型太阳辐照绝对辐射计(SIAR)。接着又开发出了由多台SIARs组成的

收稿日期: 2015-04-18; 收到修改稿日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(41227003)

作者简介: 陈祥子(1989—),女,博士研究生,主要从事激光测量方面的研究。E-mail: xzchen913@163.com

导师简介: 方 伟(1965—),女,博士,研究员,主要从事太阳绝对辐射计方面的研究。E-mail: fangwei@ciomp.ac.cn

太阳常数监测仪,在“神州三号”飞船轨道舱上测得了太阳辐照度数据。此外开发的“风云三号”气象卫星太阳辐照度监测仪也是由SIARs组成的,其成功搭载风云三号A、B、C星,实现了对地面和空间太阳总辐照度的测量,并且对太阳辐照度变化进行了长期的监测。

SIAR在其主腔开口前端放置了一个精密加工且需要测准面积的主光阑,其为一种圆形的刀口型孔径光阑。主光阑面积的大小限制了入射光的几何区域,决定了用于计算辐射照度时的入射面积以及辐射亮度的立体角。因此高精度测量主光阑面积对提高SIAR的辐照度测量精度有着至关重要的意义^[1-7]。

目前测量光阑面积的方法可划分为接触法与非接触法。非接触法又可划分为光学几何法、通量比较法和有效面积法。接触法是一种比较传统的测量手段,其采用坚硬的探针与被测光阑边缘接触,通过精确的测量探针移动的距离,求出被测光阑直径,再利用几何关系求出被测光阑面积。该方法不适用于光阑边缘较薄的刀口型孔径光阑,其将伤害光阑边缘。非接触法由早期简单的利用光学放大测距原理,求出被测光阑直径,从而计算出面积,发展到现在的几何法和通量比较法,测量孔径光阑的面积精度大大提高,但这些方法的测量过程都较为繁琐。有效面积法是一种新的测量主光阑面积的方法,该方法不会伤害被测孔径光阑边缘,且不需要基准光阑,所测得面积的测量精度较高^[8-11]。本文主要从有效面积法的测量原理进行阐述,采用Matlab、TracePro等专业软件进行模拟仿真,提出了具体搭建测量装置的方案;并对主光阑面积进行测量,分析给出了测量合成不确定度。使用有效面积法测量主光阑的面积,提高了SIAR测量辐照度的标准不确定度。

2 太阳辐照绝对辐射计简介

太阳辐照绝对辐射计是一种双锥腔补偿型绝对辐射计,由两个制作工艺完全相同的锥腔互相背对背放置形成对称双腔结构。前腔与后腔分别为工作腔(主腔)和参考腔,工作腔接收光辐射,且与参考腔相互补偿,以抵消热沉温漂的影响。辐射计的锥腔壁内采用了双线无感绕制加热丝,锥腔开口位置处接有铜-康铜热电堆型温度传感器,温度传感器外圆与热沉相连。辐射计的主腔前放置了一个精密加工且需要测准面积的主光阑,主光阑和视场光阑之间装有消杂散光光阑以减少杂散光进入腔内,绝对辐射计视场是由主光阑和视场光阑共同确定的。

其工作原理是利用光电等效性,用可精确测量的已知电功率标定未知的入射光辐射功率。在测量过程中采用交替开、关快门,使锥腔接收光辐射;利用电加热定标的方法,用电加热功率定标辐射功率。 $P_o = EA\varepsilon$ 为光辐射加热功率,其中 A 为主光阑面积, ε 为锥腔的吸收率, E 为辐射照度。 $P_e = V^2/R$ 为电加热功率, R 为电阻丝加热时电阻, V 为所加电压,根据辐射加热和电加热功率等效 $P_o = P_e$ 便可定标待测辐射量(照度)。

SIAR测量辐照度的数学公式为 $E = V^2/(A\varepsilon R) + \Delta P_{el}/(A\varepsilon)$,其中 ΔP_{el} 是观测与电加热阶段,主腔从其视场接收到的辐射差。根据不确定度公式,计算辐照度的标准不确定度公式为

$$\frac{\sigma E}{E} = \sqrt{\frac{\partial A^2}{A} + \frac{\partial \varepsilon^2}{\varepsilon} + \frac{\partial R^2}{R} + \frac{2\partial V^2}{V} + \frac{\partial \Delta P_{el}^2}{A\varepsilon E} + \beta^2}$$
,其中 β 为除SIAR测量辐照度的数学公式中各项以外,光学系统中光阑杂散光衍射带来的相对不确定度分量,经计算SIAR测量辐照度的标准不确定度 $\sigma E/E = 8 \times 10^{-4}$ 。其中由主光阑面积测量所带来的不确定度分量为 $\partial A/A = 2.5 \times 10^{-4}$,占总不确定度的很大部分。

实验室之前所使用测量主光阑面积的方法是简单的非接触法,该方法是在万能工具显微镜下,选取不同方向测量主光阑直径,求出直径平均值,从而根据几何关系计算出主光阑面积值。这种测量方法的相对不确定度为 $\sigma A/A = 2.5 \times 10^{-4}$,测量精度相对较低,为了提高SIAR的不确定度,需要研究新的测量主光阑面积的方法。

3 有效面积法测量主光阑面积原理

被测主光阑放置在一个均匀分布照度为 E 的光源区域,被测光阑所在平面与光束传播方向垂直,用高精度的探测器接收传输通过孔径光阑的辐射通量 P ,根据辐照度与面积的基本关系式 $E = P/A$,求出光阑面积 $A = P/E$ 。

3.1 均匀光源区域形成

光学方法上,组合叠加相同的高斯型激光束,形成一个统一的照度均匀分布的光源区域。激光光束的总

辐射通量为 P_L , 参与叠加的每束高斯光束被编号为 (j, k) , 其中 $j = -n_x, -n_x + 1, \dots, +n_x, k = -n_y, -n_y + 1, \dots, +n_y$, 在 x 及 y 方向上形成了一个以间隔为 Δx 和 Δy 的、形状规则的 $(2n_x + 1) \times (2n_y + 1)$ 的激光束矩阵列, 如图 1 所示, 从而得到一个统一的照度均匀的光源区域。事实上每台激光器所产生的高斯光束都是不完全相同的, 输出功率也是不稳定的, 这将对所形成的光源区域均匀性产生很大的影响。考虑到以上因素影响, 这个已知的且照度均匀分布的光源可以通过固定一束激光束, 并在垂直于光束传播的平面分别以步距为 Δx 和 Δy 移动被测光阑代替多束激光束叠加, 从而等效生成一个照度均匀的光域, 如图 2 所示。

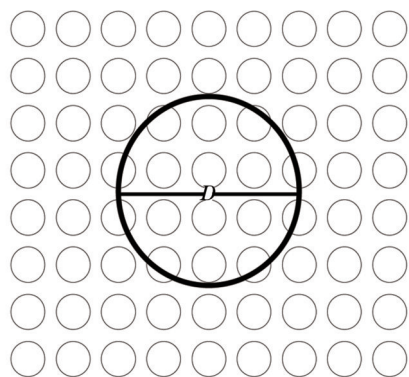


图 1 激光束矩阵

Fig.1 Matrix of the lasers

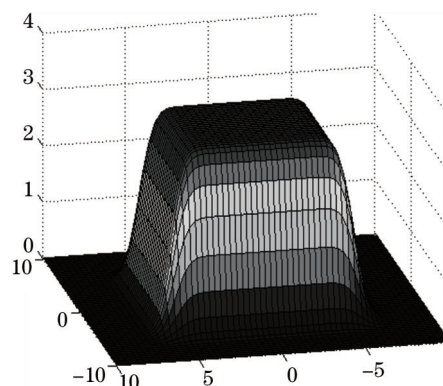


图 2 Matlab 仿真生成照度均匀光区域

Fig.2 Matlab simulation of the uniform irradiance light region

3.2 通过孔径光阑的总辐射通量

在测量过程中孔径光阑需放置在二维平移台上跟随其一起移动, 代替多束激光束叠加从而形成一个照度均匀的光源区域, 即孔径光阑位置是时刻改变的。这就需要设计一个探测器, 使其能够收集探测所有透过孔径光阑和从光阑边缘散射的辐射通量。这个探测器采用积分球与探测器组合的方法。将积分球探测器固定在孔径光阑后方, 二维平移台带动孔径光阑每移动一步, 通过孔径光阑的辐射通量为 $P_{j,k}$, 则通过孔

$$\text{径光阑的总辐射通量为 } \sum_{j=-n_x}^{n_x} \sum_{k=-n_y}^{n_y} P_{j,k}$$

3.3 光源照度

如何移动被测光阑等效生成一个照度均匀且统一的光源区域, 以及光源的照度为多少是需要研究的。沿传播方向总辐射通量为 P_L 的高斯光束, 叠加所形成光源区域的照度 E 与步距 Δx 和 Δy 是有关系的, 其均匀性是步距 $\Delta x, \Delta y$ 和高斯光束直径 d_L 的函数。叠加所形成光源区域照度的均匀性将直接影响孔径光阑面积的测量精度, 在给定高斯光束直径 d_L 时, 使用数学工具 Matlab 模拟仿真不同的步距测量已知面积的孔径光阑, 总结模拟结果可以得出光束直径和步距的比例为 $d_L/\Delta x = 2.8$ 时, 面积测量误差约为 10^{-5} 量级, 这对测量孔径光阑面积产生的影响可以忽略不计。当步距满足或大于此条件时叠加高斯光束便可近似得到一个照度均匀的光源区域, 叠加区域形成的光源照度为 $E = \frac{(2n_x + 1)(2n_y + 1)P_L}{(2n_x + 1)\Delta x(2n_y + 1)\Delta y} = \frac{P_L}{\Delta x\Delta y}$ 。因此孔径光阑面积可

$$\text{以根据 } A = P/E = \frac{\Delta x\Delta y \sum_{j=-n_x}^{n_x} \sum_{k=-n_y}^{n_y} P_{j,k}}{P_L} \text{ 求出。}$$

4 有效面积法实验方案设计

4.1 搭建实验装置

整套测量装置是在光学平台上搭建的, 激光器输出的高斯光束经过空间滤波器后得到了一束干净的高斯光束, 后又经激光功率稳定器使得输出功率不稳定性低于万分之一的量级, 装置中开关用来控制光束通过。高斯光束通过分光镜后一束进入监测系统称为参考光束, 另一束打到测量系统称为测量光束。监测系统由积分球和探测器组成, 用来监测激光束功率稳定性。参考光束入射到积分球内部经探测器将光信号转

化为电信号。在测量系统中光阑固定在二维平移台上,光阑所在平面与测量光束入射面垂直。二维平移台带动被测光阑以固定步距在与测量光束传播方向垂直的平面内移动,等效生成照度稳定的光域区。测量光束透过被测光阑入射到积分球内部,探测器将测量光信号转换为测量电信号。监测系统与测量系统的两路探测器都与吉时利万用表 2700 连接,电信号转换为电压值输出。整个测量过程由 Labview 程序控制,实验装置图如图 3,程序操作界面如图 4。

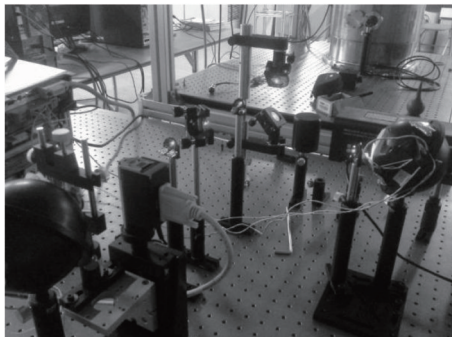


图3 测量装置

Fig.3 Experimental setup

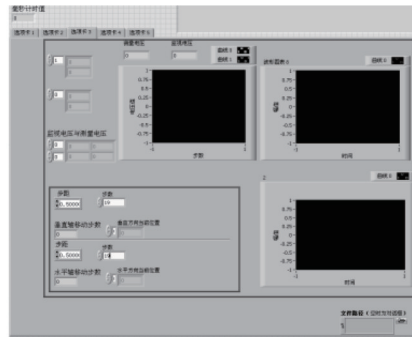


图4 程序操作界面图

Fig.4 Experimental program interface

4.2 设计实验步骤

- 1) 光路搭建好之后,调节空间滤波器和可变光阑,使其产生一个干净并有着合适束腰的高斯光束。
- 2) 将快门关闭,测量监视系统偏置电压 V_{1-d_1} 和系统的偏置电压 V_{2-d_1} 。
- 3) 被测光阑固定在平移台上,平移台带动孔径光阑运动到积分球开口中心处。打开快门,测量监视系统光束总功率 V_{1-1} 和系统光束总功率 V_{2-1} 。
- 4) 平移台带动被测光阑,移动到光束矩阵边缘,以固定步距移动,探测器记录每动一次监视系统读数和测量系统电压表读数 ($V_{1-j,k}, V_{2-j,k}$)。
- 5) 平移台带动孔径光阑移回中心位置,关闭快门,重复测量偏置电压 V_{1-d_2} 和系统的偏置电压 V_{2-d_2} 。
- 6) 打开快门,重复测量测量监视系统光束总功率 V_{1-2} 和系统光束总功率 V_{2-2} 。

通过记录的数据,孔径的面积可以用下式进行计算:

$$A = \frac{\sum_{j,k} \left\{ \left[V_{2-j,k} - (V_{2-d_1} + V_{2-d_2})/2 \right] \frac{(V_{1-1} + V_{1-2} - V_{1-d_1} - V_{1-d_2})/2}{V_{1-j,k} - (V_{1-d_1} + V_{1-d_2})/2} \right\}}{(V_{2-1} + V_{2-2} - V_{2-d_1} - V_{2-d_2})/2} \Delta x \Delta y。$$

5 不确定度分析及实验验证

5.1 实验仪器带来的不确定度分析

根据测量不确定度评定与表示指南中的规定^[12],测量结果的不确定度评估需要考虑方法、环境、装置等多方面因素。本实验由测量装置引入不确定度因素的仪器有 He-Ne 激光器、二维平移台、积分球、万用表、探测器等。

1) 激光器

实验需要测量测量光束的总辐射通量,设高斯光束的束腰直径为 d_l ,被测光阑的直径为 D 。在高斯光束学中,光束通过垂直于 z 轴半径为 r 的圆形孔,其功率为 $P(r,z) = P_L \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-2r^2}{\omega^2(z)} \right] \right\}$,由此可知当使高斯光束

通过被测孔径光阑的能量为高斯光束总能量的 99.999% 时,要求束腰直径 d_l 应满足 $d_l \leq D/2.5$ 。已知激光器输出功率的不稳定性达万分之一的量级;使用 Matlab 程序仿真功率稳定的高斯光束与功率不稳定性达万分之一量级的高斯光束叠加所形成的光源照度,其所带的相对偏差为百万分之一的量级,此偏差对面积测量结果带来的不确定度可以忽略不计,仿真结果如表 1。

表 1 照度仿真结果

Table 1 Simulation results of the irradiance about the light region

Type of laser beam	Irradiance / (mW/cm ²)	Relative deviation
Instable laser	30.64084	2.6 × 10 ⁻⁶
Stable laser	30.64076	

2) 积分球

本实验采用不均匀性约为 0.3%、直径为 100 mm、内壁涂层为一级优质 F4 漫反射涂料的积分球,积分球的不均匀性将会对面积测量结果产生影响。用蒙特卡罗法在 TracPro 程序中仿真可知,当光斑正好通过孔径光阑即激光束在中心位置时,这种不均匀性所带来的影响是可以忽略的。光斑打到积分球表面的大小是随孔径光阑位置时刻变化的,当光斑尺寸小于或等于总光斑 1%时,积分球不均匀性将对结果产生影响,其带来的面积测量相对不确定度为 3.2×10⁻⁵。

在测量过程中,被测主光阑每移动一步,其背部才会充当部分积分球内壁,所以每次移动孔径光阑势必会影响积分球对入射光束的响应,由此带来的相对不确定度分量由 Tracpro 与 Matlab 软件模拟仿真,其值为 1.4×10⁻⁵。

3) 平移台

主光阑面积的测量精确度溯源于二维平移台,其应有好的定位精度,确保以固定的步距移动。根据光源照度中激光光束直径和步距的关系式 $d_L/\Delta x \geq 2.8$ 可知,当激光高斯光束的直径为 2 mm 时,步距需小于或等于 0.7 mm 即可,实验步距定为 0.5 mm。现有分辨率为 0.0085 μm 二维平移台,使用 Zygo 干涉仪标定,平移台在 10 mm 量程范围内,以 0.5 mm 步距移动,记录标定数据。采用数学工具 Matlab 模拟仿真其对面积测量结果带来的相对不确定度为 2 × 10⁻⁵。

4) 万用表与探测器

本实验采用型号为 2700 的吉时利万用表,根据说明书,其不确定度可以用 B 类分量评定,其带来的相对不确定度为 1.4 × 10⁻⁵。探测器使用的是滨松(S1227)系列,其非线性所带来的不确定度分量可以忽略不计。

有效面积法测量主光阑面积带来的相对不确定度评定预算结果如表 2。

表 2 相对不确定度评定预算结果

Table 2 Budget of the relative standard uncertainty

Component	Relative standard uncertainty
Translation stage	2×10 ⁻⁵
Non-uniformity of sphere	3.2×10 ⁻⁵
Rear of aperture serves as the wall of the sphere	1.4×10 ⁻⁵
Multimeter	1.4×10 ⁻⁵
Instability of laser beam	Negligible
Non-linearity of photodiode	Negligible

5.2 实验验证

实验对碳素钢材料制造、直径标称值为 5 mm 的太阳辐照绝对辐射计的主光阑面积进行测量。实验光源采用波长为 632 nm 的 He-Ne 激光器,移动步距设定为 0.5 mm,对主光阑面积进行 7 次测量,测量结果分别为 21.1307、21.1321、21.1331、21.1280、21.1268、21.1262、21.1221 mm²,测量数据的平均值为 21.12843 mm²。由此得出,主光阑面积测量数据的重复性达到 7×10⁻⁵,总合成不确定度达到 8.2 × 10⁻⁵,提高了辐射计主光阑面积测量精度,实验稳定可靠。

6 结 论

有效面积法利用辐射测量中光阑对光束的限制效应定义主光阑面积,测量过程更接近于主光阑的实际应用过程,所测面积不等同于光阑的几何面,故称为有效面积。此方法测量主光阑面积合成不确定度达到 8.2 × 10⁻⁵,测量精度目前国内达到最先进水平。同时,提高了太阳绝对辐射计辐照度的测量精度,使其标

准不确定度从 8×10^{-4} 提高到 6.3×10^{-4} 。

参 考 文 献

- 1 Fang Wei, Yu Bingxi, Wang Yupeng, *et al.*. Solar irradiance absolute radiometers and solar irradiance measurement on spacecraft[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(1): 23–28.
方 伟, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 太阳辐照绝对辐射计及其在航天器上的太阳辐照度测量[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(1): 23–28.
- 2 Gong Chenghu, Fang Wei. Software design and implementation for solar irradiance monitor on FY-3A satellite[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1476–1482.
弓成虎, 方 伟. FY-3A 太阳辐射监测仪的程控设计与实现[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1476–1482.
- 3 Wang Hongrui, Fang Wei. Solar irradiance absolute radiometer with ability of automatic solar tracking[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 252–258.
王红睿, 方 伟. 自动寻日的太阳辐照绝对辐射计[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 252–258.
- 4 Fang Wei, Yu Bingxi, Yao Haishun. Solar irradiance absolute radiometer and international comparison[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 112–116.
方 伟, 禹秉熙, 姚海顺. 太阳辐照绝对辐射计与国际比对[J]. 光学学报, 2003, 23(1): 112–116.
- 5 Yu Bingxi, Fang Wei, Wang Yupeng. The radiation exchange between the space and the absolute radiometer along with the solar observation on spacecraft[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(8): 1048–1052.
禹秉熙, 方 伟, 王玉鹏. 卫星上绝对辐射计观测太阳时与太空的辐射交换[J]. 光学学报, 2005, 25(8): 1048–1052.
- 6 Yu Bingxi, Yao Haishun, Fang Wei. Rapid measurement method of absolute radiometer by using forecast radiation in electrically heating compensation[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 786–790.
禹秉熙, 姚海顺, 方 伟. 绝对辐射计预测辐射电补偿的快速测量方法[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 786–790.
- 7 Zhang Jiaqi, Qi Jin, Fang Wei, *et al.*. Correction of observation angle in solar radiation monitor[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0212003.
张佳琪, 齐 瑾, 方 伟, 等. 太阳辐射监测仪观测角度变化的修正[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0212003.
- 8 Chen Xiangzi, Fang Wei, Wang Yupeng, *et al.*. An overview of the method of high-precision measuring the aperture diaphragm area[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(16): 164211.
陈祥子, 方 伟, 王玉鹏, 等. 高精度测量孔径光阑面积方法概述[J]. 物理学报, 2013, 62(16): 164211.
- 9 Lassila A, Toivanen P, Ikonen E. An optical method for direct determination of the radiometric aperture area at high-accuracy[J]. Meas Sci & Technol, 1997, 8(9): 973–977.
- 10 Stock M, Goebel R. Practical aspects of aperture-area measurements by superposition of Gaussian laser beam[J]. Metrologia, 2000, 37(5): 633–636.
- 11 Ikonen E, Toivanen P, Lassila A. A new optical method for high-accuracy determination of aperture area[J]. Metrologia, 1998, 35(4): 369–372.
- 12 CSBTS. Guide to Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2000: 23–24.
国家质量技术监督局计量司. 测量不确定度评定与表示指南[M]. 北京: 中国计量出版社, 2000: 23–24.

栏目编辑: 何卓铭