

基于激光扫描法的光阑有效面积计量技术研究



刘志伟, 刘文德, 许宁, 林永杰, 林延东, 徐楠*

中国计量科学研究院, 北京 100029

【摘要】 光阑作为限制光束通光面积的常用器件, 在光学与光辐射测量中具有广泛的应用。如何准确地测量光阑面积, 世界各国计量机构进行了大量的研究。本文首先介绍了激光二维扫描方法, 建立了光阑有效通光面积的测量装置, 利用此装置测量了一个直径为 8 mm 的光阑的有效通光面积。本文对有效面积测量的各项不确定度分量进行了分析, 包括激光功率稳定性、光阑边缘附近的信号波动, 以及积分球散斑和内壁均匀性等。实验表明光阑有效面积测量结果的相对扩展不确定度达到 $1.8 \times 10^{-4} (k=2)$ 。

【关键词】 光阑有效面积; 辐照度; 激光扫描法; 计量学; 测量不确定度

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2020.9046

【引用本文】 刘志伟, 刘文德, 许宁, 等. 基于激光扫描法的光阑有效面积计量技术研究 [J]. 计量科学与技术, 2021, 65(6): 14-18.

Research on Measurement of the Effective Area of Apertures Based on a Laser Scanning Method

LIU Zhiwei, LIU Wende, XU Ning, LIN Yongjie, LIN Yandong, XU Nan

Corresponding author: XU Nan, Email: xunan@nim.ac.cn

【Abstract】 As a common device to limit the passing-through area of a light beam, apertures are widely used in optics and optical radiation measurement. In order to precisely measure the aperture area, metrology institutes around the world have done a lot of research. In this paper, an effective-aperture-area measurement facility based on a two-dimensional scanning method is established and the area of a circular aperture with a diameter of 8 mm is measured using the facility. The factors affecting the area measurement are analyzed, including the stability of the laser power, the signal fluctuation near the edge of the aperture, the speckle of the integrating sphere, and the uniformity of the inner wall. The experimental results showed that the relative extended uncertainty of the measured effective aperture area was $1.8 \times 10^{-4} (k=2)$.

【Key words】 effective aperture area, irradiance, laser scanning, metrology, measurement uncertainty

0 引言

随着科技的发展与工业的进步, 高精度光辐射计量技术在空间遥感、光伏电池、太阳观测、辐射温度计校准、光度辐射度测量等领域有着广泛的应用。比如在气候观测领域中, 高精度的卫星观测数据成为应对全球气候研究的重要依据, 而辐射定标准确度已经成为制约测量结果的定量水平的关键因素。而在基于低温辐射计的光辐射标准量值传递链

中, 除了基本的辐射功率量值之外, 光阑面积成为制约光辐射测量准确度提升的关键量值^[1-3]。

目前测量光阑面积的方法有很多, 有使用探针接触光阑边缘测量探针移动距离的接触法^[4,5], 有过去常用的使用工具显微镜对孔径光阑直径进行放大测量的光学放大测距法^[6], 有通过比较标准光阑光通量计算面积的通量法^[7]。此外, 英国 NPL^[8] 和美国 NIST^[9-11] 都使用装置较为复杂的几何光学法。在辐射计量体系中, 探测器接收到的辐射通量受到

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0504601)。

作者简介: 刘志伟(1997-), 中国计量科学研究院研究生, 研究方向: 太阳总辐照度计量, 邮箱: liuzhw@nim.ac.cn; 通讯作者: 徐楠(1982-), 中国计量科学研究院副研究员, 研究方向: 低温辐射计与光纤光学计量, 邮箱: xunan@nim.ac.cn。

前置光阑的直接影响,因此需要采用光学的方法定义主光阑的有效通光面积(而非几何面积),基于这种思想的方法被称作有效通光面积法。1997年, Lassila 等提出这种方法并测量了直径为 3 mm 的光阑,合成标准不确定度达 2.5×10^{-4} [12]。在 2002 年,国际光学咨询委员会组织了光阑面积的国际比对,部分主要机构的比对结果见表 1[13]。

表 1 比对结果
Tab.1 Results of the comparison

机构	5 mm 铜制光阑		5 mm 铝青铜制光阑	
	相对误差	相对不确定度	相对误差	相对不确定度
PTB	0.0326%	0.0127%	0.5144%	0.0750%
NPL	0.0087%	0.0107%	0.1465%	0.0168%
MIKES	0.0148%	0.0382%	-0.0387%	0.0391%
BIPM	0.0171%	0.0108%	0.0073%	0.0147%
NIST	0.0254%	0.0105%	0.0086%	0.0139%

其中,芬兰计量院(MIKES)和国际计量局(BIPM)使用的是有效通光面积法,与其他机构使用几何法等其他方法的光阑面积比对结果证明了这个方法的可行性。由于有效通光面积法不仅能测圆形光阑,对于其他形状的光阑面积同样能够精确的测量,同时,有效面积法更接近实际光辐射的传播与探测路径,因此更适用于高精度光度辐射度的测量应用。

在本文中,使用该方法搭建了光阑有效通光面积法的测量装置,并测量了一个直径 8 mm 的光阑的有效面积,经评定其扩展不确定度达到 0.018%($k=2$)。

1 有效通光面积法

1.1 测量原理

这种方法的基本测量原理如图 1 所示[12],使用一稳定均匀的辐照度场 E , 让其垂直照射在待测光阑上,使用高精度光探测器测量通过被测光阑的总辐射通量 P , 便可以根据式(1)计算出光阑面积 A 的值。

$$A = P/E \quad (1)$$

而在辐射计量领域,为了能够得到光阑的准确面积值,对辐照度场的稳定性提出了高要求,因此往往使用多束高斯激光束叠加来得到一个稳定的辐照度场。在光阑后面放置高精度探测器,使两者距离尽可能的小,并保持光阑和探测器的相对位置不变,使用激光垂直扫描照射光阑面,如图 2 所示。

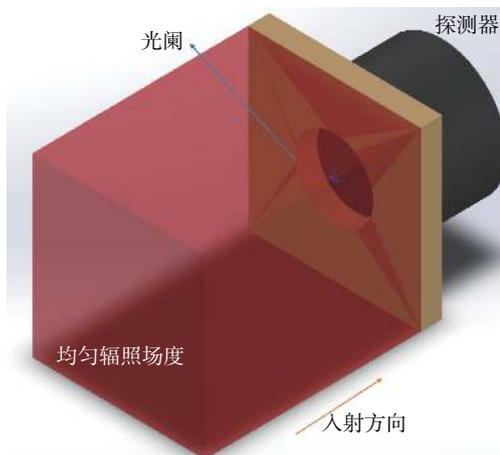


图 1 有效通光面积法基本原理图
Fig.1 Schematic diagram of the effective area method

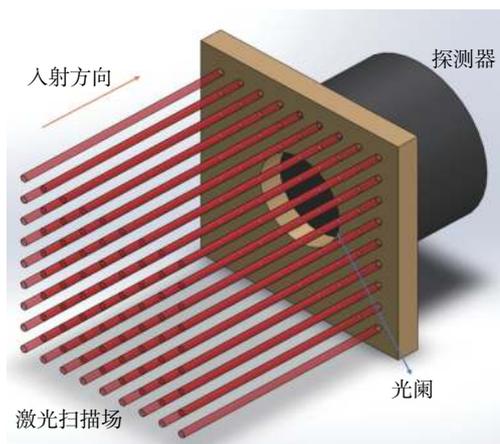


图 2 采用激光扫描方式的原理图
Fig.2 Schematic diagram of the laser scanning method

1.2 实际测量步骤

为了保证辐照度场的稳定性,在实际测量时要保持激光束的位置不变,将待测光阑固定在一高精度 x - y 位移台上,通过相对于激光束的运动实现扫描。根据所要测量的光阑大小,设计合适的扫描步长 Δx 和 Δy , 计算好各行各列需要测量的点的个数 n_x 和 n_y , 则整个扫描场的大小为 $n_x \Delta x \times n_y \Delta y$ 。记录探测器在这个扫描场内各坐标点 (j, k) , $j = 1, 2, \dots, n_x$, $k = 1, 2, \dots, n_y$ 处测得的功率值 $P_{j,k}$, 根据式(2)进行计算[12]:

$$P = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_y} P_{j,k} \quad (2)$$

得到的功率值 P 就是式(1)中的功率值。在步长 Δx 和 Δy 足够小的情况下,则各个独立的扫描光束加在一起就相当于一个均匀的辐照度场。那么扫

扫描场有效辐照度 E 可通过式(3)计算^[12]:

$$E = \frac{n_x n_y P_L}{n_x \Delta x n_y \Delta y} = \frac{P_L}{\Delta x \Delta y} \quad (3)$$

其中 P_L 是激光束的总功率。联立式(1)、(2)和(3), 可以得到光阑面积的式(4)^[12]:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_y} P_{j,k} \Delta x \Delta y}{P_L} \quad (4)$$

需要注意的是光束直径 d_L 、光阑直径 D 和扫描步长 Δx 三者间的关系。当光束从光阑中心通过时, 应该使激光能量尽可能多的透过光阑, 根据激光能量的高斯分布特性, 可以得到光阑直径和光束直径的比例关系, 即 $D/d_L \geq 2.2$ ^[12, 14]。利用激光阵列叠加形成等效均匀辐照场, 要求相邻激光束的间距不能太大, 而太小又使扫描时间成几何级数增加, 因此二者关系是 $d_L/\Delta x \geq 2.8$ 。最后, 在选定扫描网格大小时, 为了减少杂散光的影响, 并且尽可能使辐照场在光阑表面实现均匀的覆盖, 则扫描范围应至少为孔径直径的两倍^[12]。

1.3 测量装置

根据上面的原理, 搭建了有效通光面积法的测量装置如图3所示。一台高稳定性氦氖激光器发出的激光, 经过偏振器和功率稳定器调整偏振态并进一步稳定, 然后入射到空间滤波器进行滤波和调整光束大小, 接着通过分束镜分出一束光进行光稳定性监测, 另一路激光入射到光阑面上完成扫描测量, 最后使用一个嵌入进积分球的高精度探测器测量数据。

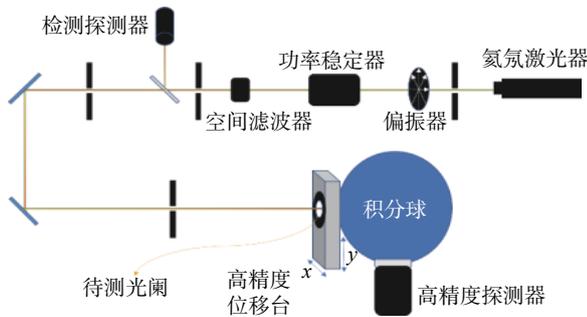


图3 测量装置光路图
Fig.3 Schematic of the measuring device

在扫描时, 待测光阑被固定在一个高精度位移台上。因为该方法测得的光阑面积溯源到 x - y 位移台的移动距离上, 所以对位移台移动的范围和精度提出了要求。这里使用的位移台定位精度优于 50 nm。

由光阑出射的光束入射进一个积分球中, 光阑

的背面相当于积分球的一部分, 在积分球出口嵌入一个高精度探测器。选择这种探测器方式是为了减少光阑边缘处衍射效应和空间杂散光的影响。但是积分球本身具有散斑效应^[15, 16], 为了探究其带来的影响, 还通过在积分球内壁加一个步进电机使其旋转来降低这种效应, 并对比了开关电机两种情况光阑面积的差异。

2 实验与讨论

结合上述原理和装置, 对一直径 8 mm 的殷钢光阑进行了光阑有效通光面积的测量。在实验中, 扫描光束的直径约为 2 mm, 采用的扫描场大小为 16 mm×16 mm, 扫描步长为 0.5 mm, 采用的扫描方式为水平一行一行从上至下扫描, 并且分别对积分球内壁旋转和不转两种情况进行了实验。

2.1 激光功率稳定性

激光功率的稳定性对光阑面积测量非常重要。在使用有效通光面积法测量光阑面积时, 根据扫描场的大小和扫描步长的选择, 所需耗费的时间也不同。但总体来看都需要较长的扫描时间。在持续的测量过程中, 由于功率稳定装置、环境温度的变化, 会引起激光功率发生漂移, 这种漂移有时可能达到 10^{-4} 水平。为了改善该问题, 选用了温度不敏感的机械支架, 并对功率稳定装置进行了隔热处理以保持温度稳定。实验结果如图4所示。实验表明, 在 19 小时的持续时段, 激光的稳定性达到 2.2×10^{-5} , 这足以保证多次重复扫描光阑面积。

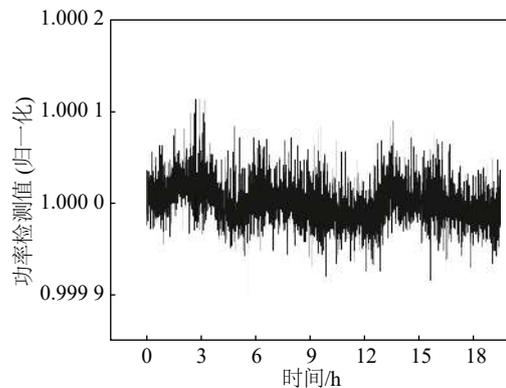


图4 完整时间稳定性
Fig.4 Total time stability

2.2 光阑边缘对光阑测量的影响

实验获得的光阑扫描信号的三维分布图如图5所示。

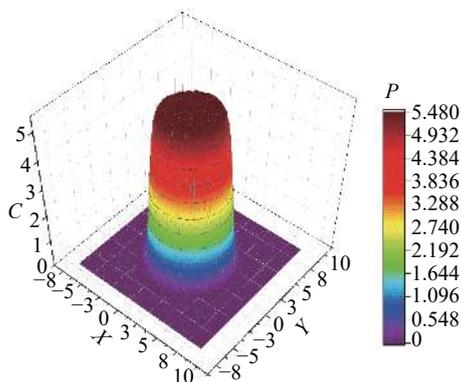


图 5 光阑扫描信号的三维分布图
Fig.5 Three-dimensional distribution of the scanning signal

需要注意的是,当激光束照射在光阑的边缘时,由于激光束被遮挡,测得的功率值会下降。在边缘处,激光束的位置(位移台定位不够准确引入)、指向的微小变化都会对测量值造成较明显的影响。本实验中,在不考虑光阑外围小信号较大波动后,6次重复面积测量的相对实验标准差如图 6 所示。

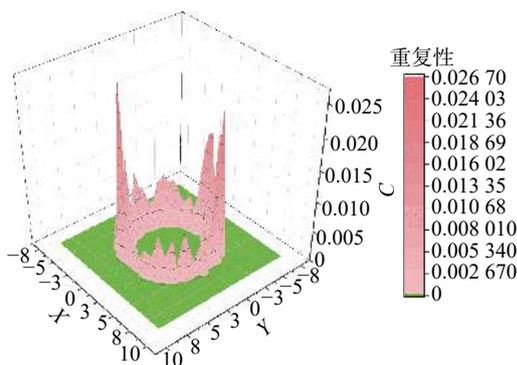


图 6 探测器接收功率各点重复性
Fig.6 Repeatability of the measurements

由图 6 看出,扫描重复性比较差的点基本集中在光阑边缘处,甚至个别点的重复性达到了 2.0×10^{-2} 。除了前面提到的激光束位置、指向的因素外,光阑加工的精度不够精密,导致光阑边缘不光滑,存在突起和毛刺,以及光阑边缘壁对光束的反射、散射,这些可能导致光束传播方向发生变化,进而对边缘点扫描的重复性产生影响。尽管边缘点信号重复性较差,但信号的随机抖动在多次平均之后,对面积的影响有限,最终面积的单次重复性已经满足目前需要。

2.3 散斑和积分球内壁均匀性的研究

由于激光入射积分球内壁处存在非均匀性,激光束位置不稳定会引起信号变化。考察了积分球均匀性对面积测量的影响,其水平在 2.0×10^{-5} 。

另外,由于干涉效应,激光在积分球内会形成散斑效应,散斑会使积分球上探测器处的信号稳定性下降。通过在入射位置引入高速旋转盘(表面材质和积分球内壁相同),比较了消除散斑对面积测量的影响。实验对比的结果如图 7 所示。

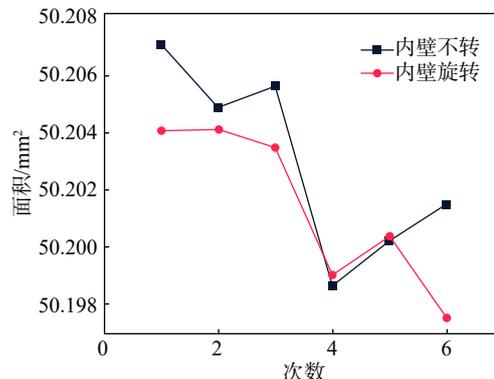


图 7 光阑面积测量结果对比
Fig.7 Comparison of measurement results of the aperture area

由实验结果可见,内壁不转的情况下,6次测量的光阑面积平均值是 50.2029 mm^2 ,重复性是 6.6×10^{-5} ;内壁旋转的情况下,6次测量的光阑面积平均值是 50.2014 mm^2 ,重复性是 5.6×10^{-5} 。由数据可知,内壁旋转比内壁不转时重复性降低了约十万分之一。同时内壁旋转测得的光阑面积比内壁不转时小了约 3×10^{-5} 。但这个数值还处于两者的重复性之内,可见在本测量装置中,散斑对光阑面积测量结果影响很小。

3 不确定度分析

从式 (4) 可评估 x 和 y 方向绝对定位准确度对面积的影响,由于位移台具有位置反馈,位移误差不累积;光阑面积越小,定位误差的影响更大。如果 x - y 位移台绝对定位准确度为 100 nm ,按照 16 mm 扫描范围估计其对面积的影响为 1.2×10^{-5} 。位移台经过调整后使得 x - y 位移方向基本垂直,激光束与 x - y 平移面垂直度调整到 0.1° ,对于面积的影响可忽略。光阑倾斜会直接导致面积投影效应,实验中估计倾斜角度在 0.3° ,因此对面积的影响是 $\cos(0.3^\circ)$,约 1.4×10^{-5} 。扫描步长引入的不确定度分量可选取 0.25 mm 和 0.5 mm 进行比较,测量得到的面积相对变化为 1.5×10^{-5} 。光阑边缘扫描数据离散性较大,需要考虑在单次测量中的影响,在获取多次扫描数据集后,借助数据实验的方式考察,即将数据中除边

缘点外的其他点数据用其平均值代替,重新计算面积,本次实验中边缘点的影响为 5×10^{-5} 。温度效应考虑光阑材料的线膨胀以及温度的波动影响,其影响在 0.9×10^{-5} 水平。环境以及光路中的杂散光可以忽略,但光阑对从其中心通过的激光束仍有反射、散射,通过将光阑置于探测器前考察,其影响在 1×10^{-5} 水平。单次面积测量的不确定度评估见表 2 所示。

表 2 相对不确定度分析
Tab.2 Uncertainty analysis

不确定度分量	不确定度贡献($\times 10^{-5}$)
x-y位移台定位准确度	1.2
待测光阑倾斜	1.4
扫描步长大小	1.5
光阑边缘的影响	5.0
积分球均匀性	2.0
温度效应	0.9
杂散光	1.0
重复性	6.6
合成标准不确定度	8.9
扩展不确定度($k=2$)	18

4 结论

本文介绍了有效通光面积法的基本原理,并依据该原理搭建了相关的测量装置,本装置对高精度光度辐射度测量中光阑面积的准确定标具有重要意义。本文使用该装置对一个直径约为 8 mm 的光阑面积进行测量,最终的扩展不确定度约为 1.8×10^{-4} ($k=2$)。同时对积分球散斑的影响进行研究,发现散斑会使重复性增大约 1.0×10^{-5} ,但对光阑面积测量结果没有太大影响。另外,在测量和分析的过程中发现光阑边缘对激光束的切割会对结果的重复性和不确定度产生不利影响,未来将针对该问题进行改善。

参考文献

[1] 赵文贤,李新,张艳娜.不同光阑面积比值高精度测量方法[J].大气与环境光学学报,2018,72(3):70-76.
[2] 王馨梓.固定发射率辐射温度计校准中的温度修正分析[J].

计量技术,2017(10):40-43.
[3] 陈祥子,方伟,杨振岭,等.太阳辐照绝对辐射计主光阑面积测量[J].光学学报,2015,35(9):153-158.
[4] Lassila A, Toivanen P, Ikonen E. An optic-al method for direct determination of the radiome-tric aperture area at high accuracy[J]. Measurement ence & Technology, 1997, 8(9): 973.
[5] Goodman T M, Key P J. The NPL radiometric realization of the candela[J]. Metrologia, 1988, 25(1): 29-40.
[6] Ikonen E, Toivanen P, Lassila A. A new optical method for high-accuracy determination of aperture area[J]. Metrologia, 1998, 35(4): 369-372.
[7] Neugebauer M. The uncertainty of diameter calibrations with the comparator for diameter and form[J]. Meas Sci Technol, 1998, 9(7): 1053-1058.
[8] Litorja M, Fowler J. Report on the CCPR-S2 Supplementary Comparison of Area Measurements of Apertures for Radiometry[M]. National Institute of Standards and Technology, 2007.
[9] Litorja M, Johnson B C, Fowler J. Area measurements of apertures for exoatmospheric solar irradiance for JPL[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007, 6677: 667708.
[10] Fowler J, Durvasula R S, Parr A C. High accuracy aperture-area measurement facilities at the National Institute of Standards and Technology[J]. Metrologia, 1998(35): 497-500.
[11] Joel, Fowler, Maritoni, et al. Geometric area measurements of circular apertures for radiometry at NIST[J]. Metrologia, 2003, 40(1): 9-12.
[12] Lassila A, Toivanen P, Ikonen E. An optical method for direct determination of the radiometric aperture area at high accuracy[J]. Measurement Science & Technology, 1997, 8(9): 973.
[13] US Department of Commerce. Report on the CCPR-S2 Supplementary Comparison of Area Measurements of Apertures of Radiometry[J]. Metrologia, 2007(44): 02002.
[14] Timo Dönsberg, Henrik Mäntynen. Optical aperture area determination for accurate illuminance and luminous efficacy measurements of LED lamps[J]. Optical Review, 2016, 23(3): 510-521.
[15] Brown S W, Eppeldauer G P, Lykke K R. Facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources[J]. Applied Optics, 2006, 45(32): 8218-37.
[16] 徐秋云,李雅男,翟文超,等.激光散斑去除效果定量分析[J].光电工程,2010,37(5):32-36.

本文编辑:石亚楠