高精度测量孔径光阑面积方法概述*

陈祥子1)2) 方伟1)† 王玉鹏1) 杨振岭1) 全向前1)2)

1)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

2) (中国科学院大学,北京 100049)

(2013年3月25日收到; 2013年4月13日收到修改稿)

一些辐射学和光度学的测量是以高精度测量精密光阑面积为基础的,因此高精度测量孔径光阑的面积有着至 关重要的意义.目前高精度测量孔径光阑面积主要有以下两类方法:接触法与非接触法,几何法与有效面积法.本文 首先对各种方法进行简单介绍,并对非接触法、几何法和有效面积法进行重点阐述.最后通过对比不同方法的测量 精度、实现难易程度以及测量设备成本情况,得出结论:几何法和有效面积法是非常有前景的.然而要进一步提高 孔径光阑面积的测量精度,稳定的激光光源、精准的移动平台是必不可少的.

关键词:高精度测量,测量方法,光阑面积 PACS: 42.79.Ag, 43.20.Ye, 01.50.fd, 42.79.-e

1 引 言

已知面积的孔径光阑在基于探测器的辐射计 和光度计中扮演了很重要的角色,其面积的测量精 度是限制辐射计和光度计测量精度的重要因素.因 为孔径光阑的大小限制了入射光几何区域,决定了 计算辐射照度时的入射面积以及辐射亮度的立体 角.目前基于探测器的辐射计量和光度计量仪器的 测量精度不断提高,孔径光阑面积测量精度不能满 足实际应用需求,所以需要更精确地测量孔径光阑 面积,从而降低整个辐射测量系统的不确定度,提 高辐射定标和光度学测量精度.因此光度学和辐射 学委员会在 1999 年从事一次国际对比试验,精确 测量光阑面积^[1].

目前测量孔径光阑面积的方法有很多,按照测量过程中是否与光阑表面接触可以分为接触法和 非接触法.按照测量手段又可以分为几何法和有效面积法.接触法是比较传统的测量方法,其采用 坚硬的球形探针与待测光阑边缘接触,通过精确测 量探针移动距离,求出光阑面积,其测量不确定度 达到 0.15×10⁻⁶ m^[2,3].非接触法最初利用简单的

© 2013 中国物理学会 Chinese Physical Society

DOI: 10.7498/aps.62.164211

光学放大原理测出距离,算出面积,发展到现在的 通量比较法^[4-7],测量精度得到很大提高.几何法 测量分为接触几何法和光学几何法.目前 National Physical Laboratory (NPL)^[1] 和 The National Institute of Standards and Technology (NIST)^[8-10] 采用的光 学几何法,光阑面积的测量不确定度达到十万分之 一,代表国际上最高精度的测量水平.

本文介绍了测量圆形光阑面积的各种方法,对 它们的测量原理、测量设备以及测量不确定度进 行阐述.重点介绍非接触法、几何法、有效面积 法^[1,2,11-14]的具体测量过程.对前人的工作进行了 总结,为今后的研究提供参考.

2 接触法与非接触法

2.1 接触法

接触法测量一般是用坚硬的球形探针与待测 光阑边缘接触,使用力度约为 0.06 N. 探针由光阑 的一端移动到其相应的另一端,移动的距离可以由 高精度的激光干涉仪测得,其测量不确定度可以达 到 0.15 × 10⁻⁶ m^[2,3]. 此方法常用来测量形状规则

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 61077080) 资助的课题.

[†]通讯作者. E-mail: xzchen913@163.com

的圆形孔径光阑的直径,从而实现面积的测量.但 是对于有着锋利边缘的光阑采用接触法测量时可 能造成光阑边缘细微的形变,影响到测量结果,或 是对光阑造成损伤.

接触法测量孔径光阑的边缘厚度至少需要 0.7×10⁻⁴ m,适用于测量边缘较厚、形状较为规则 的光阑.测量范围较为狭窄,测量精度较低.

2.2 非接触法

2.2.1 光学放大测距法

光学放大测距法是早期比较常用的一种非接触法测量方案,该方法采用工具显微镜通过光学原理对孔径光阑直径进行放大测量,根据放大比例及测量得到的数据计算出直径的实际平均长度.此方法的测量不确定可达到 0.1×10⁻⁶ m,测量过程中除了工具显微镜自身精度外,还有人为误差因素^[14].此测量方法简单且容易操作,但是测量精度较低,不适合科学研究测量.

2.2.2 通量比较法

目前测量精度较高的一种非接触法是通量比 较法,即在入射光照度相同时,通过待测光阑的光 通量与通过已知面积光阑的光通量成比例,通量比 与面积比相同,从而测得待测光阑的面积.此方法 重点在于需要基准光阑作为已知光阑,基准光阑面 积的精确度直接影响测量精确度.

测量原理: 在辐照度均匀的光域区, 面积不同 的孔径光阑光通量将不同, 将光通量用探测器接收 变成电信号, 电信号放大后被精确测量, 则光通量 间接被测量. 按照辐射学原理, 光通量比与孔径光 阑面积比相同, 面积比与电信号比相同. 若已知一 个孔径光阑的面积, 则其他孔径光阑的面积可以间 接测量得到.

图 1 是测量装置示意图. 该测量装置包括一个 在相反两端开口的积分球光源, 被测光阑和已知光 阑放置在距离光源一定长度的适当位置, 使得产生 一个均匀的照度. 通过孔径光阑的辐射通量被一个 球形反射镜反射, 聚焦到硅探测器上. 将探测器上 的电流转化为电压从而放大, 使用精密电压表进行 测量, 与此同时灯的辐射量需要用相同型号的探测 器进行监测.

均匀光源是由氦灯产生,球面反射镜用来增加 有用的光通量,整个结构放置在密封的盒子中.灯 发出的光由一个透镜聚焦到积分球里.从灯箱到积 分球入口,整个光辐射路径用一个涂有黑色的箱子 密封.





标准光阑与待测光阑放置在一个圆形的样品 支撑架上. 样品支撑架的直径为 0.305 m, 每隔 45° 有一个直径为 0.05 m 的孔用来安放样品光阑, 样品 支撑架在电脑控制下按一定规律旋转. 支撑架放置 在密封箱的前方, 距离积分球出口 2 m 处, 密封箱 设有一个直径为 0.5 m 的孔, 内部装有一个直径为 0.1 m 的圆形反射镜和一个硅探测器.

装置检测: 在距离出口光阑 2 m 远处在样品支 撑架测试位置, 需要测量光的均匀性. 位置调节器 上装有直径为 0.002 m 孔径光阑的探测器来记录光 通量, 该调节器在 *x-y* 方向上以 0.001 m 间距对光束 进行扫描. 从探测器出来的信号记录为一个 50×50 点的矩阵.所有数据与光束中心处数据相比所允许的最大偏离是万分之一.同样,只用直径是0.002m的光阑扫描直径是0.05m的光束,光通量由圆形反射镜输入到主探测器进行测量,主探测器记录的数据是反射镜的反射不均匀性和积分球光源不均匀性等带来误差大小的重要评价参数,偏差最多不能超过1.8‰.

测量方程:理想情况下辐照区域是均匀的,探 测器反应值是稳定的,测量方程为

$$A_1 = A_2 \times I_1 / I_2, \tag{1}$$

即待测光阑面积 A₁等于标准光阑面积 A₂和两个 光阑后积分球产生的电流比 I₁/I₂的乘积.电流可 以表示为探测器前的光阑面积 A, 辐照度 E, 响应度 R 的方程:

$$I = A \cdot E \cdot R, \tag{2}$$

方程2假设R与E是相互独立的,采用的二极管为 线性的,并且每次测量电流值前都要关上开关使电 流表归零.对于标准光阑和待测光阑,每一次测量 都需要测量10个数据,根据这些数据的平均值来 计算待测光阑的面积.

这个方法的优点是可以测量任意形状、直径 从 2×10⁻³ m 到 2.5×10⁻² m 的光阑, 测量不确定 度可达 0.04%^[3]. 缺点是由于此方法测量过程较为 复杂, 且测量精度相对较低, 对基准光阑面积精度 要求较高, 一般用其测量孔径较小、不易测量的小 孔径光阑.

3 几何法与有效面积法

3.1 几何法

所谓几何法就是通过各种手段,找到光阑边缘,

测量直径长度,利用几何公式中直径与面积的关系 来确定光阑面积.几何法按测量手段可以分为机械 几何法与光学几何法.几何法测量的光阑面积为几 何面积.与实际光阑应用时略有差别,几何面积与 有效面积只有在理想情况下两者才等同.

3.1.1 接触几何法

接触几何法与接触法相同,一般就是机械测量, 利用探针找到光阑边缘位置,使用激光干涉仪测量 直径长度,从而计算出面积.机械接触法找光阑边 缘位置容易损坏光阑,不利于实际应用,并且测量 精度较低.

3.1.2 光学几何法

为了弥补接触法所造成的损坏这一问题,提出 光学几何法.该方法利用光学原理,首先使用光学 显微镜或光学传感器确定光阑边缘位置,再利用干 涉仪测量位移,测得直径从而求出光阑面积.下面 介绍几种常用的光学几何法.

1) NPL 光学几何法

测量原理:每个孔径光阑安装在电脑高精准控制的转台上,在一束聚焦的激光束下扫描,从孔径光阑表面反射的光经二极管探测.对光阑位置进行调整,使入射到孔径光阑上的光只有 50%被反射到探测器上,确定此处的光阑位置为其边缘位置.孔径光阑在 *x*,*y* 方向上移动距离由干涉仪测得.用此方法分别测量 *x* 轴和 *z* 轴方向的直径.根据这两个方向上孔径光阑的直径的平均值来计算孔径光阑的几何面积.

测量装置:包括三部分,即装有 HeNe 激光器的 探针,激光干涉仪,高精度平移台.





①激光探针:图 2 为测量装置示意图.使用功率稳定且大小为 15 mW, 波长为 632 nm 的 HeNe 激光器作光学探针, 激光器发出的激光束通过可以对光束稳定度进行控制普客盒子再经空间滤波器滤

波后瞄准焦距为 0.1 m 的透镜, 光束通过偏振器后 再经可变光阑提取衍射光束的中心部分, 该中心部 分光束被二极管接受, 信号反馈到普客盒子里, 普 客盒子根据反馈回来的信号来控制激光束的强度 及能量,随后光束经过另一个可变光阑来减小散射 后通过一个薄膜分光器.薄膜分光器为光束从孔径 表面反射提供一个返回式路径,使光束偏转到光电 二极管探测器上以此探测反射光能量值.

②干涉仪:用来测量 x, z 方向移动的距离.

③平移台:在x,z方向精准移动.

测量方法:首先,发明一种算法用来找到孔径 光阑的边缘位置,即当仅有 50%入射光被反射时, 此位置为光阑边缘位置,此法可任意测量孔径光阑 的弦,找到弦的中点,过孔径光阑弦的中点且垂直 于此弦的直线与边缘的交点便可以找到,以这两个 点为端点的线段便是直径.这样第一条直径便找到, 直径的中点即为圆心,那么可以对直径进行多次测 量求平均值.

①确定光阑边缘位置

测量装置的主要部分是测距系统, HeNe 激光 发出的激光束聚焦到被测样品表面, 调整转台位置 使孔径光阑按一定方向移动, 从样品表面反射回来 的光输入到位移测距装置. 当仅有 50%入射光被反 射时, 此位置为光阑边缘位置, 此时干涉仪的读数 位置可以用来估算边缘位置. 边缘位置确定后, 孔 径光阑的弦便可确定.

②确定光阑中心位置

避免测量时误把弦当作直径,所以每次测量直 径时激光束的焦点应该通过孔径光阑中心,此时测 量的弦才为直径,所以有必要先确定光阑中心.找 到弦的中点,过孔径光阑弦的中点且垂直于此弦的 直线与边缘的交点便找到,以这两个点为端点的线 段便是直径,这样第一条直径便找到,直径的中心 便是孔径光阑中心.

③测量光阑直径

光阑中心确定后,移动孔径光阑,使其中心经 过激光束焦点,确定光阑边缘位置,测出直径长度. 面积的确定需要多次测量光阑直径,若测量 N (N 足够大)次直径,每次测量直径为 d_i,直径平均值为 d,面积可以根据公式

$$A = \frac{\pi}{4N} \sum_{i=1}^{N} d_i^2 = \frac{\pi}{4} d^2$$

求出.

此测量方法的优点是可以用来测量边缘锋利的孔径光阑,不伤害光阑边缘,测量不确定度可达 0.007%^[7],测量精度与激光束腰半径直接相关.缺 点是此方法只能用来测量形状规则的圆形孔径光 阑,且测量过程较为复杂. 2) NIST 光学几何法

测量原理:通过激光干涉仪控制的平移台移动 被测光阑,使用带有 CCD 相机的显微镜对孔径光 阑内部圆周上具有代表性的边缘点进行定位,将这 些边缘点在 x,y 方向的坐标用最小二乘法及椭圆 拟合法来计算孔径光阑面积.为了实现测量,孔径 光阑安放在计数环上,使带有斜面的一侧面向照明 光源.最初测量四个边缘点用来确定孔径内部边界 作为圆周.每隔 1°测量一个点的位置,用 360 个点 测定孔径光阑边缘,每个孔径光阑测量 5 次.

测量装置:图 3 所示装置主要包括六部分, *x-y* 平移台,花岗岩平台,HeNe 激光干涉仪,显微镜,光 源,CCD 相机等.



图 3 NIST 光学几何法测量装置

x, y 平移台放置在花岗岩平台上, HeNe 激光干涉仪反馈系统固定在敞开的转台上, 用来定位 x, y 方向的坐标. z 轴方向的转台装有一个线性编码器 带动长物镜显微镜运动. 样品由宽光谱光源经过柯 勒照明器从花岗岩平台底部照亮, 测量图像传输到 数字 CCD 相机上, 电脑控制整个测试过程.

测量步骤:

①为了测量孔径光阑的面积,操作者将孔径光阑放在转台的固定器上,手动调节使孔径光阑的边缘大概放置在 CCD 视野中央,用操纵杆控制,开始测量;这样操作迅速可以节省时间;接下来一步,决定相机观察孔径边缘的最佳焦点;

②控制平移台以固定步距增量移动,使得孔径 光阑轮廓边缘片段在 CCD 上成像,在每一个转台 位置,根据像素点数据采用边缘探测器算法来决定 边缘位置;

③给出一系列孔径光阑边缘点像素位置后,用 线性插值法决定中间位置像素,边缘点位置确定后, 使用最小二乘法及椭圆拟合法求出光阑面积.

此方法用来测量直径为 5×10⁻³ m 的孔径 光阑, 面积不确定度达到 0.0046%, 测量直径为 2.5×10⁻² m 的孔径光阑,面积不确定度达到 0.0028%^[8]. 由此可见,此种方法的优点是其测量 精度较高,缺点是只能用其测量形状比较规则的孔 径光阑,且操作过程较为复杂,数据处理比较烦琐.

3.2 有效面积法

有效面积法是通过叠加高斯光束形成一个统 一均匀照度分布的光源,利用辐射测量中光阑对光 束的限制效应定义光阑面积.此面积不等同于光阑 的几何面积,只有在非常理想的情况下它们才相同, 有效面积测量法的测量过程更接近于光阑的实际 应用过程.

测量原理: 被测光阑在一个空间照度统一分布 为 *E* 的光域区被照亮, 如果被测光阑被放置在与光 束传播方向垂直的平面内, 传输通过孔径光阑的功 率 *P* 被理想探测器测量, 那么根据公式: *A* = *P*/*E* (*A* 为孔径面积, *P* 为通过孔径光阑的光辐射通量, *E* 为辐射照度) 光阑面积便可测量. 即当光辐射通量 和辐照度已知的情况下, 根据公式可以计算孔径光 阑面积.

光源形成: 在光学方法上, 可以通过组合完 全相同的高斯激光束, 形成一个在 x, y 方向上, 以 间隔为 Δx 和 Δy 规则的 $(2n_x + 1) \times (2n_y + 1)$ 的激 光束矩阵 (Δx , Δy 满足足够小), 从而实现一个统 一均匀照度区域. 每束激光束被编号为 (j,k)j = $-n_x, -n_x + 1, \dots, +n_x, k = -n_y, -n_y + 1, \dots, +n_y,$ 激 光束的辐射通量为 P_L . 而实际上, 每束高斯光束是 不稳定的, 这对照度的均匀性产生很大的影响, 所 以这个已知的恒定照度的光源分布可以由移动孔 径光阑代替激光束叠加而得到,最后等效生成一个 照度均匀的光域.

光源照度:等效生成的光源域其照度分布应该 稳定且统一.当孔径光阑直径 D 与光束直径 d_L 的 比值满足大于 2.2 时,照度均匀性是有关步距 Δx, Δy 与光束直径 d_L 的函数关系.关于这些参数合适 的数量关系运用数学手段研究,方法是给定孔径光 阑直径 D,当高斯光束直径 d_L 满足 $d_L = D/2.2$ 时, 用不同的步距模拟测试结果.总结测试结果可以得 出光束直径和步距的合适比例为大于或等于 2.8. 若步距 Δx,和 Δy 的长度满足条件,通过对组成的光 束求和便可得到分布统一的照度值. 晶格型大光束 即叠加后的光区域的有效照度可以用方程

$$E = \frac{n_x n_y P_{\rm L}}{n_x \Delta x n_y \Delta y} = \frac{P_{\rm L}}{\Delta x \Delta y}$$

计算得到, PL 为激光束的总辐射通量,结合以上几 个方程得到如下测量孔径光阑面积的方程:

$$A = \frac{1}{P_{\rm L}} \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_y} p_{j,k} \Delta x \Delta y$$

测量装置:如图 4,系统主要包括一个 HeNe 激 光器,一个二维平移台,一个积分球探测器.

功率稳定的红色 HeNe 激光器输出的光束经空 间滤波器后,得到一个干净的高斯光束.高斯光束 入射到光束分离器,使 50%能量反射 50%能量透过, 光束分离板将一部分光束分到陷阱探测器用来作 为激光器的监视器,确保激光器输出光束功率稳定. 一部分透过消杂散光屏,打到被测光阑表面. *x-y* 平 移台带动被测光阑移动,等效生成照度稳定的光域 区,积分球用来测量透过孔径光阑的辐射通量,整 个测量过程由电脑控制.



图 4 有效面积法测量装置示意图

164211-5

测量过程:

①测量之前仔细调节空间滤波器和可变光阑, 使得产生一个干净并有着合适束腰的高斯光束;

②孔径光阑被放置在中央位置,为了测试光强 透过率,将积分球暂时换成陷阱探测器,分两种情 况测量,一种是放孔径光阑,一种不放孔径光阑,然 后分别将陷阱探测器和监视器测得的值做比较,如 果测得的光强透过滤相当的不统一,那么需要重新 调节,或者实施修正;

③真正开始测量是从陷阱探测器的暗电流 *I*_{d1} 和积分球的残余电压 *V*_{d1} 开始的, 然后是整束激光 束的能量, 陷阱探测器的响应 *I*₁ 和积分球的响应 *V*₁ 被记录, 之后使得孔径光阑移动到矩阵角落处, 以 规定的步长 (Δ*x*, Δ*y*) 扫描测量面积, 同时记录探测 器在每一个 (*j*,*k*) 位置时的读数 (*I*_{*j*,*k*}, *V*_{*j*,*k*}), 然后将 孔径光阑移回中心位置, 重复测量暗电流 *I*_{d2}, 残余 电压 *V*_{d2} 和激光总功率 (*I*₂, *V*₂).

通过记录的数据,孔径的面积可以用以下方程 进行计算:

$$A = \frac{\sum_{j,k} \left(\left[V_{j,k} - (V_{d1} + V_{d2})/2 \right] \frac{(I_1 + I_2 - I_{d1} - I_{d2})/2}{I_{j,k} - (I_{d1} + I_{d2})/2} \right)}{(V_1 + V_2 - V_{d1} - V_{d2})/2}$$

 $\times \Delta x \Delta y$

激光能量开始和结束时响应值的平均值的应

用和暗态排除了由于光束分离比例、干扰和补偿 的改变引起的迟缓的线性漂移流.

此方法优点是可以用来测量任意形状的孔径 光阑,测量不确定度为 0.0055%^[2],测量精度较高, 测量过程相对较为简单,有较好的应用前景.

4 结 论

高精度测量孔径光阑面积的方法需要从光阑 大小、厚度、成本综合来考虑.本文对目前常用的 几种测量孔径光阑面积的方法进行了介绍和对比, 对通量比较法、几何法、有效面积法的测量过程、 测量精度等做了详细的分析.对比表明,通量比较 法测量不确定度可达到 0.04%,测量精度相对较低, 但是其优点在于其适合测量直径较小的孔径光阑. 几何法测量不确定度可达 0.007%,测量精度较高, 但其仅适合测量形状规则的圆形孔径光阑.有效面 积法测量不确定度为 0.005%,测量精度高,适合用 于测量任意形状的孔径光阑.

综上所述,几何法和有效面积法是非常有前景的.然而要进一步提高孔径光阑面积的测量精度,稳定的激光光源、精准的移动平台是必不可少的.

感谢中国科学院长春精密机械与物理研究所空间一部 的研究生方茜茜、张浩等的帮助.

- [1] Litorja M, Fowler J 2007 Report on the CCPR-S2 Supplementary Comparison of Area Measurements of Apertures for Radiometry
- [2] Sheng J J, Zhang L M, Li S 2006 J. Atmosph. Environ. Opt. 1 117 (in Chinese) [盛建军, 张黎明, 李双 2006 大气与环境光学学报 1 117]
- [3] Lassila A, Toivanen P, Ikonen E 1999 Meas. Sci. Technol. 8 973
- [4] Fowler J B, Dezsi G 1995 J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 100 277
- [5] Neugebauer M, Lüdicke F 1999 Meas. Sci. Technol. 8 849
- [6] Hartmann J 2001 Meas. Sci. Technol. 12 1678
- [7] Ghazi B A, Razet A, Bastie J 2005 Metrologia 42 271
- [8] Litorja M, Johnson B C, Fowler J 2007 Proc. SPIE 6677 667708

- [9] Fowler J B, Durvasula R S, Parr A C 1998 Metrologia 35 497
- [10] Fowler J, Litorja M 2003 Metrologia 40 S9
- [11] Sheng J J, Zhang L M, Zheng X B 2008 Infrared and Laser Engineering 37 534 (in Chinese) [盛建军, 张黎明, 郑小兵 2008 红外与激光 工程 37 534]
- [12] Ikonen E, Toivanen P, Lassila A 1998 Metrologia 35 369
- [13] Stock M, Goebel R 2003 Metrologia 37 633
- [14] He B, Zheng X B, Li X 2011 J. Atmosph. Environ. Opt. 6 122 (in Chinese) [何波, 郑小兵, 李新 2011 大气与环境光学学报 6 122]

An overview of the method of high-precision measuring the aperture diaphragn area*

 $\begin{array}{ccc} \mbox{Chen Xiang-Zi}^{1)2} & \mbox{Fang Wei}^{1)\dagger} & \mbox{Wang Yu-Peng}^{1)} & \mbox{Yang Zhen-Ling}^{1)} \\ & \mbox{Quan Xiang-Qian}^{1)2)} \end{array}$

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

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

(Received 25 March 2013; revised manuscript received 13 April 2013)

Abstract

Some radiometric and photometric measurements need high accuracy knowledge of the area of the aperture. So the accurate knowledge of the area of the limiting aperture is very important. There are two types of methods to measure the aperture areas. Typeone contains contract method, and no-contract method, and type-two contains geometrical method and effective area method. In this paper we first describe all the methods briefly, then emphatically explain the no-contract method, geometrical method and effective area method. Finally, a comparison of measurement accuracy, degree of difficulty in measurement, and equipment cost among different methods, indicates that the geometric method and the effective area method are very promising. In order to improve the uncertainty of the measurement, more stable laser and accurate translation stage are needed.

Keywords: high-precision measurement, measurement method, aperture area

PACS: 42.79.Ag, 43.20.Ye, 01.50.fd, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.62.164211

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61077080).

[†] Corresponding author. E-mail: xzchen913@163.com