

文章编号: 1672-8785(2014)01-0014-04

光学双向反射分布函数的测量装置研究

刘若凡 张宪亮 苏红雨 曾道全 刘夏茹

(中国测试技术研究院, 四川成都 610021)

摘 要: 介绍了双向反射分布函数的测量原理和方法, 搭建了双向反射分布函数的测量装置。该装置可以测量可见光和红外两个波段的双向反射分布函数。在可见光波段采用卤钨灯作为光源, 采用光纤光谱仪作为光接收器, 以 10 nm 的波长间隔测量双向反射分布函数。在红外波段采用碳化硅作为红外光源, 采用热释电探测器作为光接收器, 采用标准板相对定标的方法测量待测样板的双向反射分布函数。可见光波段双向反射分布函数的测量重复性不大于 1.5%; 3 μm ~5 μm 红外波段双向反射分布函数的测量重复性分别小于或等于 2.5%、8 μm ~12 μm 波段的小于或等于 3.0%。测量结果表明, 该测量装置的有效性较高。

关键词: 双向反射分布函数; 可见光谱; 红外光谱; 测量重复性

中图分类号: O432.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.01.003

Study of Setup for Measuring Optical Bidirectional Reflectance Distribution Function

LIU Ruo-fan, ZHANG Xian-liang, SU Hong-yu, ZENG Dao-quan, LIU Xia-ru

(National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu 610021, China)

Abstract: The measurement principle and method of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) are presented. A setup for measuring BRDF is built. The setup can be used to measure the BRDF in both the visible band and the infrared band. In the visible band, a tungsten halogen lamp is used as a light source and a fiber optical spectrometer is used as an optical receiver. The BRDF is measured at a wavelength interval of 10 nm. In the infrared band, a silicon carbide material is used as an infrared source and a pyroelectric detector is used as an optical receiver. The BRDF of a sample is measured through indirect calibration of a standard plate. The measurement repeatability of BRDF is less than 1.5 percent in the visible band, equal to or less than 2.5 percent in the range from 3 μm to 5 μm and less than or equal to 3.0 percent in the range from 8 μm to 12 μm . The experimental result shows that the BRDF measurement setup is highly effective.

Key words: bidirectional reflectance distribution function; visible; infrared; repeatability

0 引言

双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 能够描述各种不同

表面的空间反射分布特性, 它在目标光散射计算、地物遥感、计算机图像处理、目标识别和材料的光学性能研究领域等领域都有广泛的应用。

BRDF 由 Nicodemus 提出, 并于 1977 年被以

收稿日期: 2013-11-22

作者简介: 刘若凡 (1974-), 男, 四川成都人, 工程师, 硕士, 主要研究光学计量。

E-mail: rliu@126.com

美国国家标准局的名义推荐使用。BRDF 的测量就是在不同方向光入射条件下测量材料表面在不同反射方向上信号的强度分布特性。

目标材料表面对入射光的散射能力与目标的材料、表面的粗糙度以及几何结构有关。大多数表面对光反射同时存在镜面反射和漫反射,但在某些情况下会出现畸变。BRDF 的空间几何关系如图 1 所示。图 1 中 θ_i 为入射天顶角, θ_r 为反射天顶角; φ_i 为入射方位角, φ_r 为反射方位角。

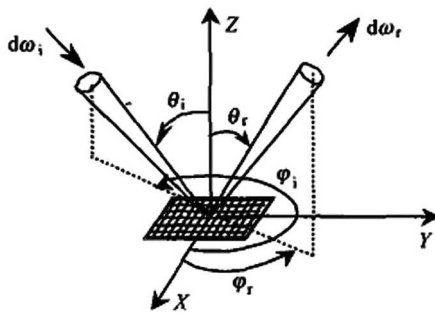


图 1 BRDF 示意图

定义 BRDF 为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

式中, f_r 为 BRDF, 它是在 (θ_r, φ_r) 方向上的反射光辐射亮度 dL_r 与在 (θ_i, φ_i) 方向上立体角 $d\omega_i$ 内入射光的辐照度 dE_i 之比, 其单位为 sr^{-1} 。

当施照体为一准直光束, 光束截面内光强分布均匀时, 有:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_r)} = \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (2)$$

$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 与空间位置有关, 也与入射光的波长有关, 其表示式为

$$\begin{aligned} f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) &= \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_r; \lambda)} \\ &= \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r; \lambda)}{E_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda)} \end{aligned} \quad (3)$$

材料表面的光学性质存在各向同性和各向异性。各项同性的 BRDF 只须测量入射平面内 BRDF 的方向分布, 而各向异性表面的 BRDF 则需测量立体空间的 BRDF。

2 BRDF 定标原理

2.1 绝对定标

由 BRDF 的定义可知, BRDF 是入射光谱辐照度和反射光谱辐亮度之比。直接测量 BRDF 就是分别用照度计和亮度计测量入射光谱辐照度和反射光谱辐亮度。这种测量方法虽简单, 但容易引入较大的系统误差和随机误差, 而且精度不高。国家基准量值的光谱辐射照度和光谱辐射亮度的绝对测量值的不确定度大于等于 5%, 经过量值传递, 不确定度又大大增加。

2.2 相对定标

最常用的相对定标方法是借助参考试样对 BRDF 做相对测量。相对测量可分为比对测试法和单一参考标准测试法。采用普遍认可的相对测量方法进行测量不但可以减小系统误差, 对杂散光也能起到较好的抑制作用。

测量一已知标准板的 $f_{ref}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)$ 的 $L_{ref}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)$, 在相同条件下测量待测样板的 $L(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)$, 则:

$$f(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{L(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{L_{ref}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)} \quad (4)$$

2.3 标准板的选择

标准板需满足以下条件: 标准板的绝对光谱反射比的值要稳定, 随时间的变化率应该足够小; 标准板的余弦特性要好, 镜向反射要小; 标准板的光谱范围要宽, 要能覆盖测量的光谱范围; 标准板的绝对光谱反射值最好和待测样板的绝对光谱反射比相当, 或处在同一个数量级, 以获得最大的信噪比。

在可见光波段选用聚四氟乙烯压制的标准白板, 在红外波段选用在铝板上喷涂美国 3M 公司生产的黑漆。

3 BRDF 实验装置组成

用来测量双向反射的仪器称为双向反射仪, 它由光源、转角装置、亮度计(探测器和成像系统)以及数据接收与处理系统构成。实验装置如图 2 所示。

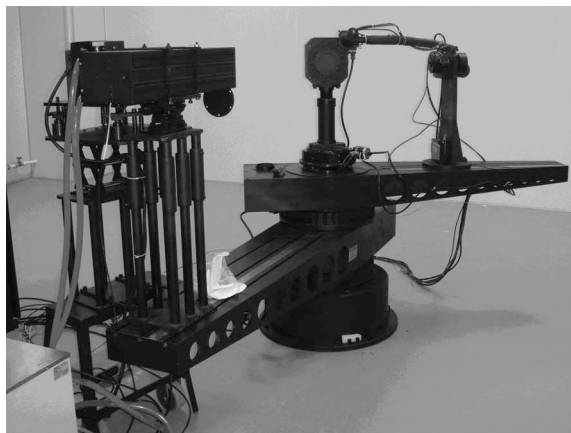


图 2 BRDF 测试装置图

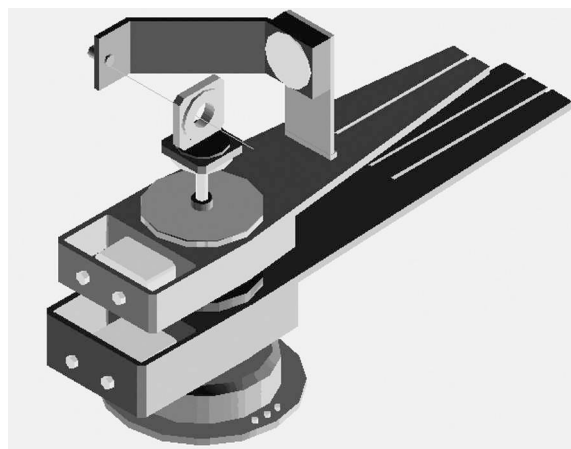


图 3 转角装置示意图

3.1 转角装置

转角装置可以用来控制探测器、样片和光源的相对位置。装置中样板围绕自己的中心轴 $0\sim 360^\circ$ 旋转, 用以改变入射方位角 (ϕ_i); 入射光源在水平面上以样板的中心为圆心 $0\sim 90^\circ$ 转动, 以改变入射的天顶角 (θ_i); 探测器围绕样板的中心水平和竖直转动, 以改变出射的天顶角 (ϕ_r) 和方位角 (θ_r)。如图 3 所示。

3.2 光源

在系统的研制过程中, 光源是影响测量稳定性的主要因素之一。光源发出的光应是平行的非偏振光, 且光束均匀。

可见光波段的光源采用卤钨灯。卤钨灯在可见光谱区是连续的, 且具有发光效率高、体积小、重量轻、发光强度稳定性好和寿命长等特点。

红外波段的光源采用碳化硅红外光源, 其最大的特点是能连续产生 $1\ \mu\text{m}\sim 16\ \mu\text{m}$ 的光谱, 工作温度高 ($1500\ \text{K}\sim 1700\ \text{K}$), 辐射强度稳定, 且体积小, 重量轻, 升温快, 寿命长。

由于可见和红外共用一个光源准直系统, 所以采用反射式物镜。它的优点是没有色差, 其结构如图 4 所示。

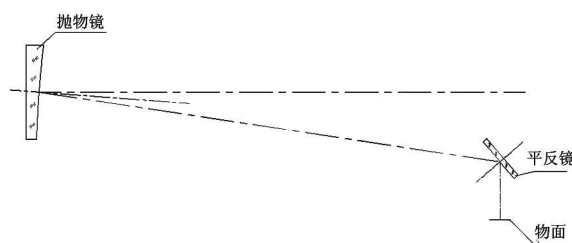


图 4 反射式物镜

3.3 亮度计

可见光波段的 BRDF 测量装置由光学成像系统和光谱仪等组成。采用的 Maya2000 光纤光谱仪是美国海洋光学公司生产的高灵敏度背照式 2DFFT-CCD 光谱仪。它的量子效率高达 90%, 且动态范围和紫外响应高, 适用于低亮度和要求紫外灵敏度高的科学实验。该光谱仪的光谱范围为 $200\ \text{nm}\sim 1100\ \text{nm}$ 。

红外波段的 BRDF 测量装置则采用光学成像系统(波段范围为 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$)、热释电探测器和锁相放大器组成。BRDF 测量属于微弱光信号检测, 所以使用传感器与前放一体化的响应度高的热释电探测器。该探测器的光谱响应度平坦, 输出信号由锁相放大器测定。锁相放大器是一种对交变信号进行相敏检波的放大器。它以和被测信号有相同频率和相位关系的参考信号为比较基准, 只对被测信号

本身和那些与参考信号同频同相的噪声分量有响应。因此,能大幅度抑制噪声,改善检测信噪比。此外,锁相放大器有很高的检测灵敏度,而且信号处理比较简单。因而锁相放大是弱光信号检测的一种有效方法。本实验采用的锁相放大器型号是美国产的 SR830。

根据照度平方反比定律,测量探测器的线性时,光源与光谱仪的距离选为 4.0 m、4.5 m、5.0 m、5.5 m、6.0 m、6.5 m、7.0 m。测量结果是光谱仪 CCD 探测器的线性优于 0.1%,热释电探测器的线性优于 0.5%。

4 测量仪器的重复性

测量仪器的重复性是指在相同测量条件下重复测量同一个物理量时测量仪器提供相近示值的能力。重复性实质上反映测量仪器示值的随机误差分量,它是衡量测量仪器计量性能的指标之一。重复性用实验标准偏差定量表示。

4.1 可见光波段 BRDF 的重复性

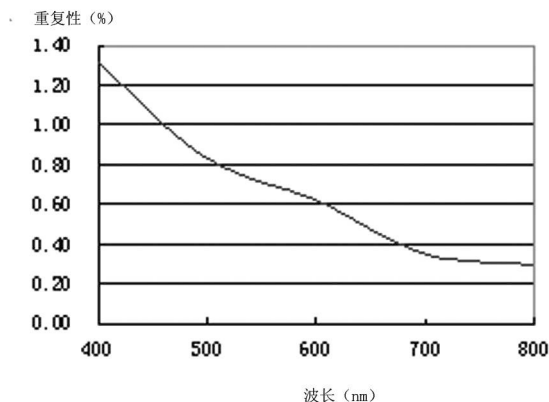


图 5 可见光波段 BRDF 测量的重复性

用同一块样板在相同的积分时间内以相同的灯电流在入射天顶角和入射方位角都为 0° 时改变出射天顶角和方位角,进行 7 次实验。由于卤钨灯光源的色温比较低,只有 2850 K 左右,其短波辐射能量较弱。由于硅探测器在可见光

波段的响应不强,光谱仪在短波范围的信噪比会降低。我们在实验中发现,400 nm 波长以下的重复性数据比较差。随着反射天顶角的增大,反射光会减弱,实验的重复性也会变差。重复性数据结果如图 5 所示。

4.2 红外波段 BRDF 的重复性

采用同一块样板以相同的灯电流在入射天顶角和入射方位角都为 0° 时改变出射天顶角 (15° 、 45°) 和方位角 (45° 、 135° 、 225° 、 315°),进行 6 次实验测量。在 $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 波段的重复性小于或等于 2.5%,在 $8\mu\text{m}\sim 12\mu\text{m}$ 波段的重复性小于或等于 3.0%。

5 结论

采用相对定标的方法测量待测样板的 BRDF。在 $380\text{ nm}\sim 780\text{ nm}$ 波段范围,使用高稳定性的溴钨灯光源,先进的瞬态光谱仪和精密机械装置等,保证了光谱 BRDF 测量的线性度和精度。在 $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m}\sim 12\mu\text{m}$ 波段,使用稳定性高的红外光源、锁相放大器和前置放大器一体的热释电探测器及精密机械装置等组成来实现,从而保证了系统的线性度和测量精度。

参考文献

- [1] Nicodemus F E. Geometric Consideration and Nomenclature for Reflectance[R].NBS MN-160,1977.
- [2] 赵忠义,钮文艳,齐超,等.多光谱 BRDF 测量系统转角装置研制[J].光电工程,2006,33(11): 61-64.
- [3] 张伟,汪洪源,王治乐.材料表面双向反射分布函数测量方法研究[J].中国光学快报,2009,7(1): 88-91.
- [4] 赵忠义,齐超,戴景民.多光谱双向反射分布函数测量系统的研制[J].中国光学快报,2007,5(3): 168-171.
- [5] 魏庆农,刘建国,江荣熙.双向反射分布函数的绝对测量方法[J].光学学报,1996,16(10): 1425-1430.
- [6] 吴振森,韩香娥,张向东,等.不同表面激光双向反射分布函数的实验研究[J].光学学报,1996,16(3): 262-268.