

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415930

便携式双向反射分布函数测量系统研究*

张琳 王泥栋 陆有涛 司佳乐
(东北林业大学机电工程学院 哈尔滨 150040)

摘要: 双向反射分布函数(BRDF)是对材料表面的散射和反射特性进行描述,鉴于目前 BRDF 测量系统具有结构复杂、不易拆卸、光路调试困难等特点,设计了一套便携式双向反射分布函数测量系统。该测量系统主要是由光源系统、探测系统以及转角装置 3 个部分组成,其中对转角装置和探测部分在机械结构上进行了优化。为了验证所设计的测量系统的综合性能,利用该测量系统对典型涂层材料表面进行实验测量,分析了入射角度对物体表面反射特性的影响。实验结果表明典型涂层材料石英、氧化铝及氧化锆的表面粗糙度越大,其镜反射所占比例越小,在 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的入射角之间,随着入射角度的增加,表面 BRDF 值也不断增加。再利用改进的 Torrance-Sparrow 模型所预测得测量数据与实验数据进行拟合分析,拟合结果表明测量的实验数据与理论模型预测数据拟合程度较好,最小拟合度大于 96%。

关键词: 双向反射分布函数;便携式;实验测量

中图分类号: TN247 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4035

Research on portable bidirectional reflectance distribution function measurement system

Zhang Lin Wang Yidong Lu Youtao Si Jiale

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF) describes the scattering and reflection characteristics of material surfaces. Considering the complex structure, difficult disassembly, and difficult optical path debugging of current BRDF measurement systems, a portable BRDF measurement system has been designed. The measurement system mainly consists of three parts: the light source system, the detection system, and the angle device. The mechanical structure of the angle device and the detection part has been optimized. In order to verify the comprehensive performance of the designed measurement system, experimental measurements were conducted on the surface of typical coating materials using the measurement system, and the influence of incident angle on the surface reflection characteristics of objects was analyzed. The experimental results show that the larger the surface roughness of typical coating materials such as quartz, alumina, and zirconia, the smaller the proportion of mirror reflection. Between 0° and 60° incidence angles, the surface BRDF value also increases with the increase of incidence angle. The measurement data predicted by the improved Torrance Sparrow model was used for fitting analysis with the experimental data. The fitting results showed that the measured experimental data had a good fit with the theoretical model prediction data, with a minimum fit greater than 96%.

Keywords: Bidirectional Reflection Distribution Function; portable; experimental measurements

0 引言

双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)是描述反应材料表面空间散射和反射特性的物理量,描述了来自特定方向的入射光经材料表面反射到半球空间内的反射光分布情况^[1]。目前,在航天、光散射

计算、卫星遥感、目标识别、图像处理、材料的性能研究等方面有着广泛的应用^[2-5]。

国内外研究人员对于双反射分布函数的理论模型和测量装置进行了研究,在对于目标样品进行测量时,需要对以样品为中心的半球空间范围内的全部散射光进行检测^[6-9]。因此,国内外研究人员针对不同的应用场景设计了

收稿日期:2024-04-25

* 基金项目:国家自然科学基金(51306030)项目资助

不同结构的测量装置, Melchert 等^[10]利用机器人对于不规则曲面完成表面特性的测量, Yang 等^[11]改进了测量装置,大大提高了分辨率和测量效率, Small 等^[12]研制一种同时获取面内和面外 BRDF 数据的测量装置。李卓然等^[13]提出了基于等面积亮度的单次绝对测量方案,使用六轴机械臂作为变角装置,实现了全半球空间角度的 BRDF 测量。赵云等^[14]通过无人机获取地面光谱影像,通过算法读取数据,完成散射特性的测量。杨玉峰^[15]利用空间卫星材料的光谱 BRDF,通过对卫星进行三维建模、面元剖分,对其在某轨道下的光谱散射特性进行了研究。目前的 BRDF 测量装置测量精度高、测量范围广,但存在结构复杂、光路调试困难等问题。

本文针对上述问题,设计并搭建了一种便携式 BRDF 测量装置,将装置分为光源系统、探测系统、控制系统、承载板、底盘五部分,不同部分作为单独部件装配,在装卸中每个部件作为整体进行拆装,节省时间,降低装配难度。采用双导轨的方法完成半球空间内的散射特性测量,整体结构简单紧凑,光路调试方便。

1 BRDF 原理

目标材料表面的散射特性与物体表面粗糙度、目标材料、光源和几何结构等因素相关,大多数情况下漫反射和镜面反射同时存在于半球空间内。BRDF 定义为物体表面反射方向单位立体角内的辐亮度与入射方向单位立体角内入射辐照度的比值,测量 BRDF 不仅与入射、反射辐射量相关,而且和光源波长以及光源和探测装置之间的几何关系有关,BRDF 的空间几何关系如图 1 所示,具体的表达式为^[15]:

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

其中, φ 和 θ 表示方位角和天顶角,下标 i 和 r 表示入射方向和反射方向, λ 为波长, dE_i 为入射辐照亮度, dL_r 为反射辐射亮度。

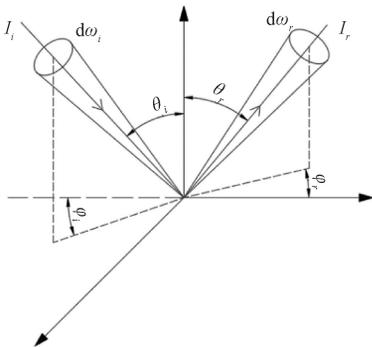


图1 BRDF 测量几何关系

Fig. 1 Geometric relationship of BRDF measurement

材料表面的光学性质分为各向同性和各向异性,对于各向同性的材料表面只需要测量入射平面内的辐射特性的

分布情况,对于各项异性的材料表面需要测量整个空间内的辐射特性的分布情况。对于绝对测量方案可以采用探测器对入射光直接测量,无需通过标准传递计算入射光的强度。

双向反射分布函数的测量方法共有两种:一种是绝对测量方法,一种是相对测量方法。绝对测量方法不需要任何参照物直接测量,相对测量方法通过待测样品和标准板进行对比实现测量。绝对测量就是直接对于样品表面进行测量,分别测出入射光的入射照度和反射光的反射亮度,反射亮度的与入射照度的比值就是 BRDF 值,绝对测量方法简单,可操作性低,测量误差较大;相对测量方法主要是借助标准板对样品进行相对测量,通过在相同条件下,分别对于样品和标准板进行测量反射分布,通过标准板的 BRDF 值求解待测样品的 BRDF 值,本文主要采用绝对测量方法。

在传统的 BRDF 测量装置中,其一般主要包括光源系统、转角装置以及探测系统 3 个部分,其中转角装置与探测结构的设计直接影响了 BRDF 测量的结果。在一些典型的 BRDF 传统装置中,例如美国 SOC 公司所研制的 SOC-200 BRDF 测量装置,它的转角装置主要包括两个转台和两个转臂,但其整体体积巨大,不易拆装,测量地点也受限于实验室中。Sparrow 等^[16]设计了一种传统的 BRDF 测量装置,其转角装置为控制光源和样品的转台,仅只能够实现一维的转动。李新等^[17]设计了一套应用于室外 BRDF 测量的多角度测量装置,其转角及探测结构的体积巨大,不易拆装和携带。综上所述,针对传统测量装置中转角与探测部分所具有的结构复杂、成本较高、不易拆装等特点,对便携式辐射特性测量装置进行研制。

2 BRDF 测量装置结构设计

本次所设计的便携式辐射特性测量装置主要由光源系统、探测系统、转角系统和控制系统四部分组成,拆装方便,结构紧凑,整体尺寸小,机械结构图如图 2 所示。此次设计的便携式 BRDF 测量装置,主要是对传统测量装置的转角与探测部分的结构进行优化,采用双弧形轨道结构和旋转台配合的方式完成探测运动,此测量装置的方位角可以达到 $\pm 180^\circ$,天顶角一般小于 $\pm 90^\circ$,该结构中探测器安装在天顶轨道上,通过运动组件带动其沿天顶轨道运动,探测器的接收中心正好处于旋转台和弧形轨道组成的半球空间内中心处,通过两个轨道的组合运动实现对于样品的 BRDF 特性的全部测量。

BRDF 测量装置主要由光源部分、探测器部分以及转角部分组成,测量原理示意图如图 3 所示。激光发生器产生特定功率的激光,经由光纤发射出来,获得其此功率下直射探测器产生的电压值,将光纤和准直镜连接起来,产生均匀、光斑固定的光束,且固定在特定入射角度,使光束以特定角度入射到样品上,探测器经由转角装置收集在半球空间内的散射光信号,经由放大电路,由采集卡将电压信号转

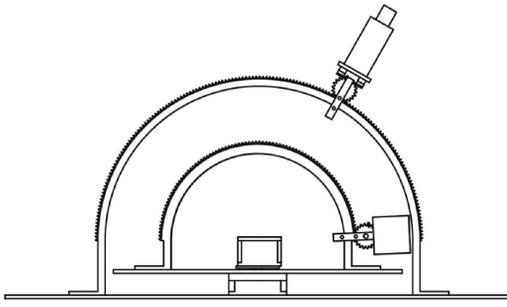


图 2 BRDF 测量机械结构图

Fig. 2 Mechanical structure diagram of BRDF measurement

化为数字信号传输到计算机中进行数据处理,得到物体表面的 BRDF 分布,物体表面的 BRDF 测量结果与探测器散射电压值之间的计算公式如式(4)所示。

$$f_{BRDF} = \frac{V_s}{V_i \cdot \cos\theta_r} \quad (2)$$

其中, V_s 为散射电压值, V_i 为入射光电值, θ_r 为反射天顶角。

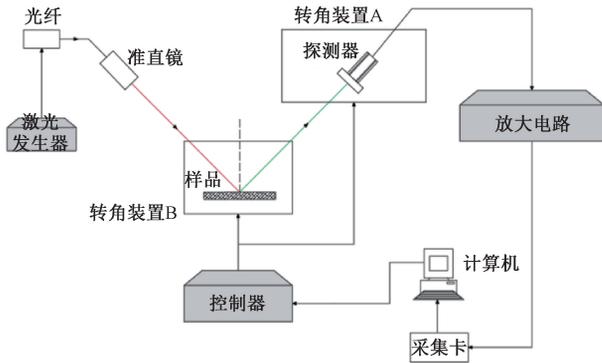


图 3 测量原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement principle

具体测量装置实物图如图 4 所示。在图 4 所示的实物中,便携式特点主要体现在转角装置和探测系统的机械结构优化方面。对于转角装置,本文主要采取双弧形轨道模式,通过两个弧形轨道的结合运动,完成半球空间内的角度变化。双弧形轨道的优点在于便于拆卸,定位精度方面考虑加工和装配误差,在每次装配后的调试环节简单快捷,在结构方面也更加简单,占用空间小。在探测部分中,探测器所在的弧形导轨上加工有齿形,与齿轮相配合,通过电机控制驱使探测器在弧形导轨上进行转动以完成自动测量。且探测系统中的旋转台采用精研蜗轮蜗杆传动,定位精度高,可以尽量减小角度误差,保证长期使用的精度要求。从总体来看,本文所设计的测量装置具有机械结构简单、各部分易拆卸安装以便于携带以及不拘泥于测量场合,可进行异地测量等便携式特点。

接下来对测量装置的主要部分进行详细描述。对于光源部分,本文主要采用人工调整的方法,主要由轨道、激光

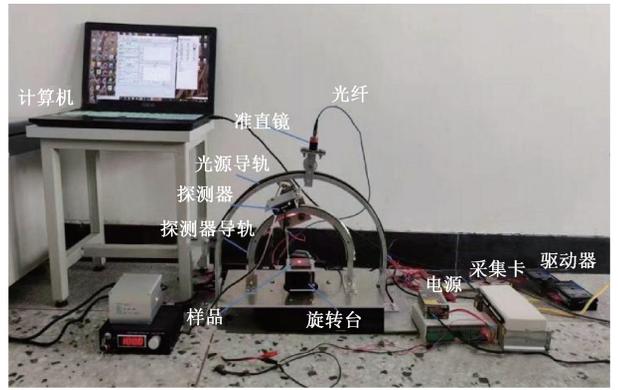


图 4 BRDF 测量装置实物图

Fig. 4 Physical diagram of BRDF measurement device

器、连接件三部分组成,光源轨道上安装有同步带,便于光源进行移动和定位,连接件上安装有滑轮,用于支撑组件和光源,光源沿着导轨进行运动,实现不同天顶角的入射光照射。

对于探测器部分,方位角和天顶角驱动组件安装有步进电机,天顶角驱动组件电机与小齿轮直连,轨道上有与齿轮啮合的弧形齿圈,方位角驱动组件的电机带动支撑件和天顶组件沿旋转中心转动,完成方位角的变动。轨道的安放位置偏离方位角轨道的圆心位置,通过调整探测器安装板伸出天顶角轨道的距离,保证探测器沿两个轨道运动的中心重合在一定的误差范围内。方位角驱动组件在整个运动过程中,其驱动力矩基本保持一致,天顶角驱动组件在由最高点向两侧运动的过程中,主要受重力作用。方位角的驱动组件采用电机带动涡轮蜗杆旋转,涡轮带动平面轴承进行旋转,轴承上安装一个承载平面,平面与导轨之间采用承载板进行连接,电机驱动承载平面进行旋转,继而带动导轨完成方位角的变化。

由于本文采用绝对测量方法,在实际测量时,整个测量过程的测量时间尽可能缩短,继而尽可能保持入射光源的辐照度稳定。光源的入射天顶角和方位角基本不变,探测器固定在天顶角轨道的驱动部件上,固定几个测量点,一般取 10 个以上,方位角轨道固定几个探测点,每个采样位置稳定和采样时间为 3 s,方位角轨道转动速度为 2 rad/s,一个测量周期时长约为 10 min 左右。根据测量要求,BRDF 测量装置要求,方位角轨道的转动范围为 $\pm 180^\circ$,天顶角轨道的运动范围为 $\pm 88^\circ$ 。

3 装置不确定性分析

BRDF 测量装置的整体不确定性主要来自元器件、机械误差和环境 3 个方面,根据设计的便携式 BRDF 测量装置的结构,对于光源、探测器、机械误差、杂散光、温度等因素产生的误差进行分析,测量装置不确定性计算公式如下:

$$\Delta_{BRDF} = \sqrt{\sum (\Delta_i)^2} \lim_{x \rightarrow \infty} \quad (3)$$

其中, Δ_i 为各种因素引起的误差。

1) 光源稳定性

便携式 BRDF 测量装置对于光路处理进行了简化,对于光源主要是考虑其在长时间内输出功率的稳定性,采用探测器对于不同功率下的光源信号进行采集,测量结果如图 5 所示,稳定性计算公式如下所示,计算结果为 2.2%。

$$\Delta_i = \frac{1}{N} \sum_i \left| \frac{V_i - \bar{V}}{\bar{V}} \right| \quad (4)$$

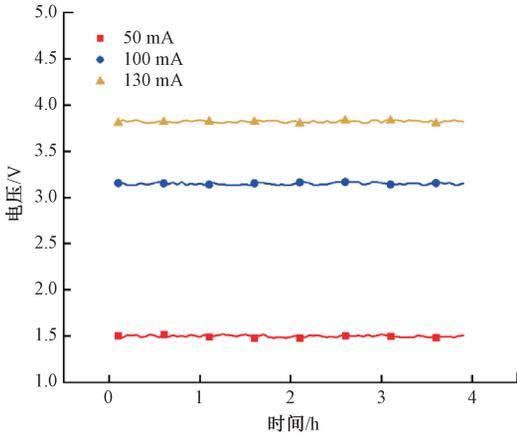


图 5 光源波动图

Fig. 5 Light source fluctuation chart

2) 探测器准确性

影响探测器的因素主要包括波长、温度、振动等,本文采用硅光探测器作为采集端,其在 638 nm 波长处的响应度较好,使用探测器在相同条件下间隔一段时间测量,分析其采集数据的波动,计算公式如式(5),测量结果如图 6 所示,计算结果为 2.4%,考虑外界温度,传输损耗等因素,探测器的最终误差应在 3% 以内。

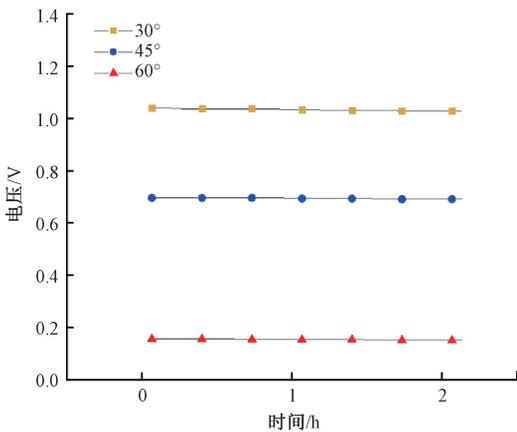


图 6 探测器测量图

Fig. 6 Measurement diagram of detector

3) 机械定位误差

机械定位误差主要是由加工误差和装配误差影响的, BRDF 测量装置的机械定位误差主要体现在探测器方位角

轨道和天顶角轨道两方面,在测量过程中对于探测器在反射角度的采集信号影响较大。机械定位误差的计算公式如下:

$$\Delta_m = \left| \frac{f(\theta + \Delta\theta, \varphi + \Delta\varphi) - f(\theta - \Delta\theta, \varphi - \Delta\varphi)}{2f(\theta, \varphi)} \right| \quad (5)$$

其中, $\Delta\theta$ 为天顶角误差; $\Delta\varphi$ 为方位角误差; $f(\theta, \varphi)$ 为反射角度 (θ, φ) 下的 BRDF 值。

通过实体测量和仿真软件相结合得到方位角轨道的偏移量为 0.32 mm,天顶角轨道偏移量为 0.5 mm,其理论位置 and 实际位置如图 7 所示。

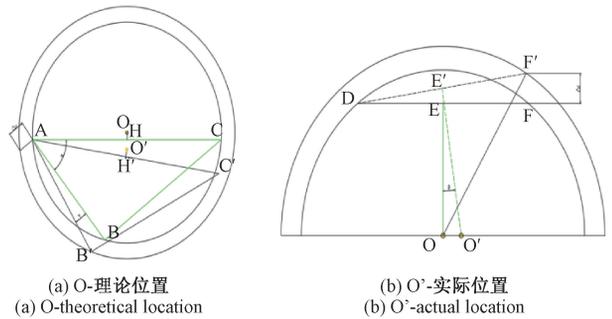


图 7 轨道定位误差示意图

Fig. 7 Schematic diagram of orbit positioning error

根据图 7 所示,对于方位角轨道,其中心点偏移量 $OH=53$ mm,半径 $OA=170$ mm,天顶角轨道的跨距 $AC=328$ mm, $\gamma=43.82^\circ$, $AB=AB'=159.73$ mm 根据方位角轨道的加工精度测量得到其误差为 0.3 mm,承载变形量通过仿真得到其误差为 0.12 mm,综合两者得到方位角轨道的晃动量 $\Delta r=0.32$ mm,根据图 5 中的几何关系,可得到:

$$\Delta\varphi = \arccos\left(\frac{OA^2 + AB'^2 - OB'^2}{2OA \cdot AB'}\right) - \angle OAC - \angle CAB \quad (6)$$

将已知参数带入其中,得到方位角轨道的偏移角度为 $\gamma=0.129^\circ$ 。

对于天顶角轨道,其轨道半径 $r=170$ mm,滚轮之间的跨距为 20 mm,由于天顶角导轨材料,其变形量非常微小,本文在计算时将其忽略,则其晃动量主要是定位误差 $\Delta r=0.5$ mm,根据图 5 中的几个关系,可得到:

$$\Delta\theta = \arccos\left(\frac{OD^2 + DF'^2 - OF'^2}{2OD \cdot DF'}\right) - \angle ODF \quad (7)$$

将已知参数带入其中,得到天顶角轨道的偏移角度为 $\beta=0.721^\circ$ 。由式(7)计算得到机械定位误差为 0.202%。

4) 环境误差

环境误差主要是杂散光导致的,在光束入射到材料表面,然后发生散射,探测器采集散射光的过程中,杂散光在半球空间内无处不在,导致探测器接收的散射光信号不准确,最终对于 BRDF 测量装置的测量精度产生影响。通过

分析和结合其他案例,系统杂散光导致的误差在 3% 以内。

综上,各项误差之间相互独立,不互相影响,根据式(5)计算得到,BRDF 测量装置的总体误差为 4.78%。

4 实验测量

4.1 BRDF 模型

本文采用改进的 Torrance-Sparrow 模型对于物体表面的 BRDF 分布进行预测,可以直观地看出物体表面的粗糙情况,其计算公式如式(9)所示^[18]。

$$f = \frac{F \cdot D(\alpha)}{\cos\theta_i \cdot \cos\theta_r} \cdot G(\theta_i, \theta_r) \quad (8)$$

其中, $D(\alpha)$ 为表面分布函数,其将微元粗糙表面看做 V 型槽组合而成的,将物体表面分布函数假设为微元表面倾斜角 α 相关的函数:

$$D(\alpha) = b \cdot \exp(-d^2 \cdot \alpha^2)$$

其中: b 和 d 为固定参数,

$$d = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot v}$$

$$\cos\alpha = \frac{\cos\theta_i + \cos\theta_r}{2 \cdot \cos\beta}$$

$$\cos^2\beta = (\cos\theta_i \cdot \cos\theta_r + \sin\theta_i \cdot \sin\theta_r + 1)/2$$

F 为非涅尔函数,其计算公式为:

$$F = \left(\left| \frac{n_1 \cos\theta_i - n_2 \cos\theta_r}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \cos\theta_r} \right|^2 + \left| \frac{n_1 \cos\theta_r - n_2 \cos\theta_i}{n_1 \cos\theta_r + n_2 \cos\theta_i} \right|^2 \right) / 2$$

$G(\theta_i, \theta_r)$ 为遮蔽函数,其表达式为:

$$G(\theta_i, \theta_r) = \min \left\{ 1, 2 \cdot \frac{\cos(\beta) \cdot \cos\theta_i}{\cos\alpha}, 2 \cdot \frac{\cos(\beta) \cdot \cos\theta_r}{\cos\alpha} \right\}$$

v 为均方根斜率:

$$v = \sqrt{2} \sigma / \tau$$

θ_i, θ_r 为入射天顶角和反射天顶角,单位为 rad。

综上,BRDF 计算公式如式(11)所示。

$$f = \frac{b \cdot F \cdot \exp[-\alpha^2 / (2 \cdot v^2)]}{\cos\theta_i \cdot \cos\theta_r} \cdot G(\theta_i, \theta_r) \quad (9)$$

4.2 标定实验

测量数据的准确性是 BRDF 测量装置可靠性的重要指标之一。采用 BRDF 测量装置对单晶硅样品在波长为 638 nm 的非偏振光的照射下进行测量,入射方位角 $\varphi = 0$, 间隔 5° 对于不同入射角度下的样品表面的镜反射率进行测量,即只测量固定入射角度下镜反射方向上的散射光信号,由于探测器导轨与光路之间的遮挡作用,入射角为 90° 时,样品表面的镜反射率无法测量。理论反射率采用菲涅尔函数进行计算,单晶硅的折射率 $n_s = 3.88$ 。测量数据和理论数据对比在图 8 中所示,从图中可以看出,样品表面的反射率随着入射角度的增加在不断上升,入射角度越大,其变化率越大。实验数据与理论数据存在一定的差异,这是由于误差导致的,但两者的数据较为接近,总体误差低于 4.78%,从而验证了本文 BRDF 测量装置的可靠性。

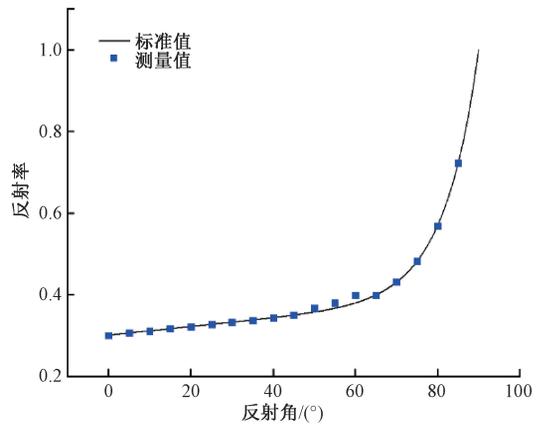


图 8 测量数据对比

Fig. 8 Comparison of measurement data

4.3 典型涂层材料实验测量

涂层设计有时需要考虑涂层的外观和光学性能^[19],因此对于石英、氧化铝、氧化锆 3 种典型涂层材料进行实验测量,实物如图 9 所示,分析入射角度不同对于物体表面反射特性的影响。本文选用入射光源为 638 nm 的光纤激光器,在 0°、15°、30°、45°、60° 五种入射角度下对于样品表面 BRDF 分布进行测量,将测量结果和 BRDF 半经验模型进行拟合,采用拟合优度对于拟合程度进行描述,计算公式如式(12)所示,结果如图 10 所示。

$$R^2 = 1 - \frac{1}{N} \sum \left(\frac{f_m - f_e}{f_m} \right)^2 \quad (10)$$

其中, f_m 为模型计算值; f_e 为实验测量值。

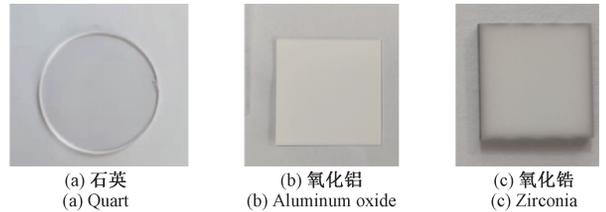
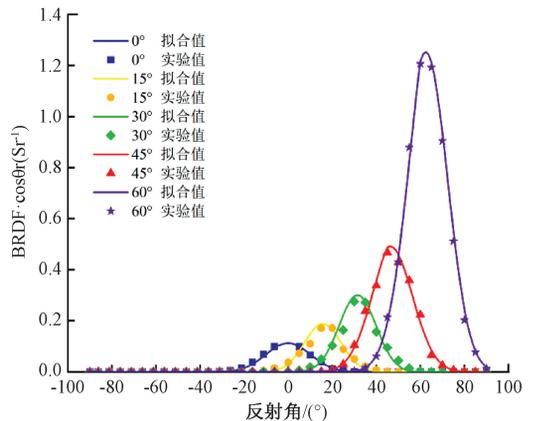


图 9 样品照片

Fig. 9 Sample photo



(a) 石英
(a) Quartz

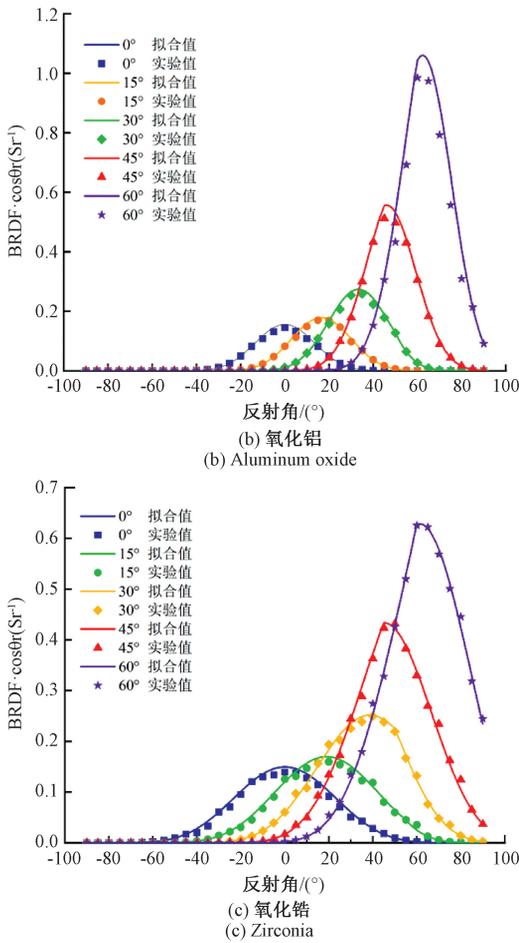


图10 拟合对比图

Fig. 10 Fitting comparison chart

从图10中可以看出,在相同的条件下,3种样品表面的辐射特性分布也不相同,与材料表面的粗糙度相关,表面越光滑,其 $BRDF \cdot \cos\theta$ 峰值越大,且随着入射角度的增加,3种材料呈现相同的变化趋势,即增加到峰值然后减小,且随着入射角度的增加,变化趋势越大,3种材料表面的镜反射现象越强。从图10中可以看出模型和实验数据拟合度较好,两者之间的拟合度最小大于96%,结果较为理想。最优拟合参数如表1所示。

表1 拟合参数表

Table 1 Fitting parameters table

材料	均方根粗糙度	b	角度/(°)	R^2 /%
石英	0.42	5.13	0	99.24
		5.09	15	99.4
		5.12	30	99.6
		5.10	45	99.98
		5.07	60	99.98
氧化铝	0.85	1.50	0	99.78
		1.47	15	99.97
		1.65	30	99.57
		1.81	45	99.88
		2.1	60	99.52
氧化锆	1.43	1.35	0	99.46
		1.38	15	99.95
		1.36	30	99.87
		1.37	45	99.91
		1.45	60	99.71

5 结论

本文针对于现有BRDF装置结构复杂、光路调试困难等问题,设计并搭建了一种便携式BRDF测量装置,对转角装置采用双导轨的结构,减小探测器的运动部件占据空间,采用带动探测器导轨转动的方式完成半球空间内BRDF的测量。通过对整体装置的各部分机械结构和探测器等部分的误差进行分析,得到总体BRDF测量装置的误差在5%以内,满足测量要求。使用研制的BRDF测量装置对单晶硅样品进行反射率的测量,通过实验数据与理论数据的对比,验证了BRDF测量装置的可靠性,同时使用BRDF测量装置对于典型涂层材料表面进行实验测量,可以对相关涂层的外观和光辐射特性设计提供参考。实验结果显示,随着其入射角度的增加,其表面BRDF值也不断增加,采用Torrance-Spawrrow模型与实验数据进行拟合,整体拟合度较好,最小拟合度大于96%。

参考文献

- [1] LAI Q Z, LIU B, ZHAO J M, et al. BRDF characteristics of different textured fabrics in visible and near-infrared band [J]. Optics Express, 2020, 28(3):3561-3575.
- [2] KATARINA Z, BACHMANN CHARLES M, GRAY DERIC J, et al. Wavelength dependence of the bidirectional reflectance distribution function(BRDF)of beach sands [J]. Applied Optics, 2015, 54(31): 243-245.
- [3] ZOU Y Y, ZHANG L, ZHANG J, et al. Developmental trends in the application and

- measurement of the bidirectional reflection distribution function[J]. *Sensors*, 2022,22(5):1739-1739.
- [4] 张文杰,赵军明,刘林华. 泡沫金属导热-辐射耦合传热的相似分析[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(6):1114-1117.
ZHANG W J, ZHAO J M, LIU L H. Similar analysis of thermal conductivity-radiation coupling heat transfer in metal foam [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(6):1114-1117.
- [5] OHNO H, KAMIKAWA T. One-shot BRDF imaging system to obtain surface properties [J]. *Optical Review*, 2021, 28(6):1-7.
- [6] WITTMANN B, MONTMITONNET P, BURR A, et al. BRDF and gloss computation of polyurethane coatings from roughness measurements: Modelling and experimental validation [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2021, 156, DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106247.
- [7] 梁顺林,白瑞,陈晓娜,等. 2019 年中国陆表定量遥感发展综述[J]. *遥感学报*, 2020, 24(6):618-671.
LIANG SH L, BAI R, CHEN X N, et al. Review on the development of quantitative remote sensing of land surface in China in 2019 [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(6):618-671.
- [8] 赵春艳,张艳娜,韦玮,等. 基于场地高光谱 BRDF 模型的绝对辐射定标方法[J]. *光子学报*, 2019, 48(5):58-67.
ZHAO CH Y, ZHANG Y N, WEI W, et al. Absolute radiation calibration method based on site hyperspectral BRDF model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(5):58-67.
- [9] 孙华燕,郭惠超,范有臣,等. 激光主动成像中的 BRDF 特性[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(S1):24-29.
SUN H Y, GUO H CH, FAN Y CH, et al. BRDF characteristics in laser active imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1):24-29.
- [10] MELCHERT N, KAESTNER M, REITHMEIER E. Robot assisted BRDF measurement and surface characterization of in-homogeneous freeform shapes[C] *Conference on Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology*, 2020.
- [11] YANG S K, SONG I U, OH E, et al. Development of a new image based BRDF measurement system using a semicircular ring [J]. *Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces VII*, 2020, 11485: 75-81.
- [12] SMALL T V, BUTLER S D, MARCINIAK M A. Scatter coordinate mapping and out-of-plane BRDF measurements for specular materials using an augmented CASI measurement system[C]. *Conference on Algorithms, Technologies, and Applications for Multispectral and Hyperspectral Imaging*, 2021.
- [13] 李卓然,李雨霄,刘子龙. 近红外波段高精度 BRDF 测量系统研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(12):177-184.
LI ZH R, LI Y X, LIU Z L. High-precision BRDF measurement system in near infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(12):177-184.
- [14] 赵云,谢东海,邓磊,等. 利用多角度影像计算 BRDF 的方法与系统实现[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(4):741-749.
ZHAO Y, XIE D H, DENG L, et al. The method and system implementation of BRDF calculation using multi-angle image [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(4):741-749.
- [15] 杨玉峰. 复杂目标的光谱散射特性研究[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(9):99-102.
YANG Y F. Research on spectral scattering characteristics of complex target [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(9):99-102.
- [16] SPARROW E M, TORRANCE K E, BIRKEBAK R C. Polarization, directional distribution, and off-specular peak phenomena in light reflected from roughened surfaces [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(7):916-924.
- [17] 李新,郑小兵,寻丽娜,等. 多角度测量系统实现室外 BRDF 测量[J]. *光电工程*, 2008(1):66-70.
LI X, ZHENG X B, XUN L N, et al. Outdoor BRDF measurement with multi-angle measurement system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008(1):66-70.
- [18] GREGORY J W. Measuring and modeling anisotropic reflection [P]. *Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1992, 26(2):265-272.
- [19] 于启明,蔡红星. 基于 BRDF 的钛合金氧化着色特性研究[J]. *科技创新与应用*, 2020(5):10-13, 18.
YU Q M, CAI H X. Research on the Oxidative Coloring Characteristics of Titanium Alloy Based on BRDF [J]. *Technology Innovation and Application*, 2020(5):10-13, 18.

作者简介

张琳(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为热辐射传输。

E-mail: lzhang@nefu.edu.cn

王浥栋,硕士研究生,主要研究方向为热辐射传输。

E-mail: wangyidong971230@163.com

陆有涛,硕士研究生,主要研究方向为热辐射传输。

E-mail: lyt17355360805@163.com

司佳乐,硕士研究生,主要研究方向为热辐射传输。

E-mail: 15546532051@163.com