

# 双向反射分布函数绝对量值复现的系统设计

刘子龙<sup>1,2</sup> 廉玉生<sup>1</sup> 王佳佳<sup>1</sup> 廖宁放<sup>1</sup> 王 煜<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081  
<sup>2</sup>中国计量科学研究院光学所, 北京 100013)

**摘要** 双向反射分布函数(BRDF)是材料表面光学反射性能的重要指标。大多数测量系统都以理论上对入射照度和反射亮度的分别测量,结构上直观的弓型结构半球空间模拟为基础建立。为了提高 BRDF 量值计量的不确定度,提出了一种新型的 BRDF 绝对量值复现系统设计。理论上将所有测量量转化为一个测量量并用一个探测器实现测量,结构上尽可能减少光源和探测器等精密部件的空间转动,而以样品的多维转动实现 BRDF 的空间定位。实验分析表明,这样的系统设计提高了测量的不确定度,适合做 BRDF 的绝对量值复现,实现绝对测量,而传统的弓型结构适合做 BRDF 的相对测量,实现应用终端的大量测量。

**关键词** 测量;双向反射分布函数;绝对量值复现;空间双定位;不确定度

**中图分类号** O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100404

## System Design for Absolute Value Realization of Bidirectional Reflectance Distribution Function Value

Liu Zilong<sup>1,2</sup> Lian Yusheng<sup>1</sup> Wang Jiajia<sup>1</sup> Liao Ningfang<sup>1</sup> Wang Yu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Photoelectric, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)  
(<sup>2</sup> Optic Department, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

**Abstract** Bidirectional reflectance distribution function (BRDF) is an important reflective parameter of object surface. In many measurement systems, the value is achieved in a bow-liked mechanism which simulates the hemisphere space, and the incident illuminance and reflect luminance are measured respectively. To raise the uncertainty of BRDF value measuring, a new BRDF absolute value realization system is established. All factors which should be measured are translated to one factor in theory. In structure design, the movement of light source and detector are reduced indeed. The realization of angles for measurement depends on the rotation of sample in multi-dimension. This design is fit for BRDF absolute measurement and it improves the uncertainty.

**Key words** measurement; bidirectional reflectance distribution function(BRDF); absolute value realization; double location in space; uncertainty of measurement

**OCIS codes** 290.1483; 120.5820; 120.6085

## 1 引 言

标定一块标准板的绝对双向反射分布函数(BRDF)数值是研究或应用 BRDF 都面临的一个难题。国内现有的各种研究 BRDF 实际测定的(研究后续理论可以暂时避开这个问题,即在别人公布的

测试数据上进行理论研究,如 BRDF 的数学建模)方法中,大都采用朗伯体作为承载物进行理论过渡,在实际操作中则用漫射性能比较好的白板作为标准板<sup>[1,2]</sup>。

朗伯体是一个理论上的理想漫反射体,把理想

**收稿日期**: 2010-06-09; **收到修改稿日期**: 2010-12-07

**基金项目**: 国家 973 计划(2009CB72400504)、国家质检科技计划项目(2010QK384)资助课题。

**作者简介**: 刘子龙(1980—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事空间光谱成像、计量测控技术和医学影像计量等方面的研究。E-mail: liuzl@nim.ac.cn

**导师简介**: 廖宁放(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色与彩色图像以及光谱成像技术等方面的研究。E-mail: liaonf@bit.edu.cn

朗伯体作为绝对测量的对象,它的绝对 BRDF 很容易用半球反射率  $\rho$  简单地测定。用它做相对测量的标准板,就可以用相对法获得被测样品 BRDF 的绝对值。但朗伯体是一个只存在于理论中的理想模型,实际中只有一些做的很好的漫反射面可以近似地认为是朗伯体,比如海伦板(聚四氟乙烯)和硫酸钡板等<sup>[3,4]</sup>。这种做法得到的只是 BRDF 的近似值,无论选择的漫反射面在多大程度上接近朗伯体,理论上已经决定了它不是真实值。其中的误差不是测量误差,而是人为的系统误差。

另一方面,对于一束均匀的入射平行光来说,BRDF 可以表示为反射亮度和入射照度的比值。 $L_r$  和  $E_0$ 。如果用相应的亮度计和照度计,也可以分两个步骤分别测出来。可是这种做法中,两种不同仪器的使用就带来了极大的误差,引起了非常大的不确定度,只有在低级的粗糙测量中才可使用,数据仅可作为参考估值。这种做法在高级别,高精度的测量中是不可取的,是不能作为基标准方案的。

由此可以得出,BRDF 的绝对量值复现,必须在理论和结构上进行新的设计,才可以达到精密测量的要求。

## 2 BRDF 绝对量值复现的理论设计

理论设计的首要原则就是在不改变光路的前提下用一个探测器测出  $L_r$  和  $E_0$  两个量。避开直接测量得到这两个量的最后量值,而是对其中一个或者两个测量值都通过计算获得最后的结果,保证所有测量值源于同一个测试条件。

理论设计基于一定的硬件条件,本设计基于一台亮度计测量。对于一束均匀的入射平行光来说,BRDF 可以表示为<sup>[5]</sup>

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{E_0 \cos \theta_i}, \quad (1)$$

式中入射子午角为  $\theta_i$ 、入射弧矢角为  $\phi_i$ 、反射子午角为  $\theta_r$ 、反射弧矢角为  $\phi_r$ 。反射亮度为  $L_r$ 、 $E_0$  为入射照度。

$$\Phi_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \Omega_r A_r \cos \theta_r, \quad (2)$$

式中  $\Phi_r$  为反射光通量,  $\Omega_r$  为反射立体角,  $A_r$  为反射面的面积。

同理,

$$\Phi_i(\theta_i, \phi_i) = E_0 A_i \cos \theta_i, \quad (3)$$

式中  $\Phi_i$  为入射光通量,  $A_i$  为入射面的面积。

将(2)式与(3)式作比较:

$$\frac{\Phi_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{\Phi_i(\theta_i, \phi_i)} = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \Omega_r A_r \cos \theta_r}{E_0 A_i \cos \theta_i}. \quad (4)$$

在(4)式中,如果令  $\Phi_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) / \Phi_i(\theta_i, \phi_i) = 1$ , 则有

$$\frac{L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \Omega_r A_r \cos \theta_r}{E_0 A_i \cos \theta_i} = 1. \quad (5)$$

在物理意义上,条件  $\Phi_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) / \Phi_i(\theta_i, \phi_i) = 1$  可以理解为一个全反射的样品,它将接收到的入射能量全部反射,当然这样的实验条件在实际中无法满足。采用下面的推导来实现这一实验条件。

此时如果令  $\theta_i = 0^\circ, \theta_r = 180^\circ$ , 则  $\cos \theta_i = 1, \cos \theta_r = -1$ , (5)式可以转换为(略去代表反方向的负号)

$$\frac{L_r(0, 0, 180, 0) \Omega_r A_r}{E_0 A_i} = 1. \quad (6)$$

这种角度条件的实现是将光源垂直于样品入射,即  $\theta_i = 0^\circ$ 。同时将探测器直接对准样品的背面,其镜头聚焦到样品位置,即  $\theta_r = 180^\circ$ 。然后将样品取掉,就实现了  $\Phi_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) / \Phi_i(\theta_i, \phi_i) = 1$ , 此时是  $\Phi_r(0, 0, 180, 0) / \Phi_i(0, 0) = 1$ 。

如果令  $A_r = A_i$ , 则从(6)式可推导出

$$E_0 = L_r(0, 0, 180, 0) \Omega_r. \quad (7)$$

(7)式是推导出来的  $E_0$  的计算式,而不是它的定义式。这个计算式满足单位的换算关系,但它只是在全面推导所设定的种种条件束缚下成立的。它并不代表物理意义上入射照度和反射亮度有这样的普适关系。

将(7)式代入(1)式即得

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{L_r(0, 0, 180, 0) \Omega_r \cos \theta_i}, \quad (8)$$

式中  $\Omega_r$  是可以透过透镜系统的几何参数计算出来的常量。这样利用(8)式就可以完成空间光学分布函数的绝对测量。为方便起见,定义一个  $K_f$  值,  $K_f = \frac{1}{L_r(0, 0, 180, 0) \Omega_r}$ ,  $K_f$  是通过测量垂直入射的亮度和相应的立体角得到的。则(8)式简化为

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = K_f \frac{L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{\cos \theta_i}. \quad (9)$$

(9)式即为实际测量计算公式。利用它,可以实现 BRDF 的绝对标定<sup>[6,7]</sup>。

## 3 BRDF 绝对量值复现的结构设计

目前用于 BRDF 测量的转动结构有不少设计,但这些设计都以直观的弓形结构为基础,其不足之

处主要有：1)转动结构需要支撑负载的转动惯量，从而影响转动精度；2)转动结构将双定位的位置都置于多维运动结构中，这样大量的运动会将对双定位位置中的负载造成损伤，尤其是当负载是精密仪器时<sup>[8,9]</sup>。

由此设计了新测量机构，即“空间双定位转动机构”。这种结构抛弃了双弓形设计定式，其优点在于：1)机构4个转动相互独立，每个都可以绕自身的中心轴实现360°转动；2)机构4个转动结构均实行了依托底座的平面转动方式，没有架空等增加额外转动惯量的结构，实现了较高的转动精度；3)机构通过对平面物的4个转动实现了入射射线与反射射线的空间双定位，从而将入射射线与反射射线的发生机构“解放”出来，成为可以固定的机构<sup>[10]</sup>。该结构可以实现如图1所示的BRDF角度定位，其几何联系由图2所示的等价立体几何图给出。

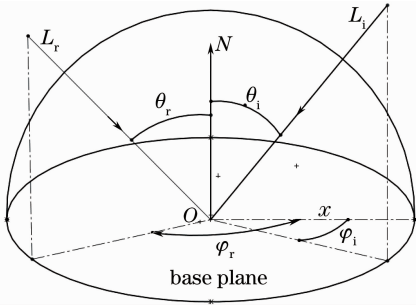


图1 BRDF角度定义图示

Fig. 1 Angle definition diagram of BRDF

如图2所示， $\varphi$ 为入射射线 $L_i$ 与反射射线 $L_r$ 之间的夹角，表示入射射线 $L_i$ 与反射射线 $L_r$ 的相对位置； $S_1$ 为入射射线 $L_i$ 与反射射线 $L_r$ 所确定的平面； $\theta$ 为轴 $N$ 与平面 $S_1$ 之间的夹角； $n$ 为轴 $N$ 在平面 $S_1$ 内的投影线； $S_2$ 为轴 $N$ 与线 $n$ 所确定的平面； $S_3$ 为与轴 $N$ 相垂直的平面。入射平面指入射射线 $L_i$ 与轴 $N$ 形成的平面，反射平面指反射射线

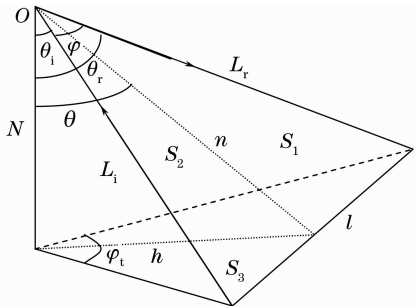


图2 空间双定位转动机构等价立体几何图示

Fig. 2 Equivalent geometrical diagram for double-location rotation facility in space

$L_r$ 与轴 $N$ 形成的平面，底平面内角度的初始边为轴 $X$ ，坐标原点即轴心为 $O$ 。

几何关系推导如下：

$$\varphi_t = \varphi_r - \varphi_i. \quad (10)$$

则根据立体几何，设 $N=1$ ，则有以下关系式：

$$l^2 = \sec^2 \theta_r + \sec^2 \theta_i - 2 \sec \theta_r \sec \theta_i \cos \theta, \quad (11)$$

$$l^2 = \tan^2 \theta_r + \tan^2 \theta_i - 2 \tan \theta_r \tan \theta_i \cos \varphi_t. \quad (12)$$

由(11),(12)两式可以得到 $\theta$ 的解析式：

$$\cos \theta = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \varphi_t. \quad (13)$$

又由 $S_2$ 和 $S_3$ 的面积相等关系，可以得到

$$\begin{cases} S_2 = \frac{1}{2} \tan \theta_i \tan \theta_r \sin \varphi_t \\ S_3 = \frac{1}{2} l h \end{cases}. \quad (14)$$

因为 $S_2 = S_3$ ，所以

$$h = \frac{1}{l} \tan \theta_i \tan \theta_r \sin \varphi_t, \quad (15)$$

式中 $l = \sqrt{\tan^2 \theta_i + \tan^2 \theta_r - 2 \tan \theta_i \tan \theta_r \cos \varphi_t}$ 。则有： $\varphi = \arctan h$ ，从而得到 $\varphi$ 的解析式。

从以上推导可以得到，所谓空间双定位，即指 $(\theta_i, \varphi_i), (\theta_r, \varphi_r)$ 4个角度的确定。当这4个角度确定时，角度 $\varphi$ 和 $\theta$ 也就确定了，而这两个角度可以在设计方案中实现。反过来，即4个电机的独立转动实现了4个角度的独立确定，从而实现了通用空间双定位。

## 4 系统测量不确定度分析

根据(11)式得BRDF量值 $f(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 的测量不确定度影响分量有： $\lambda$ (测试波长)、 $\theta_i$ (入射平面内的入射角)、 $\theta_r$ (反射平面内的反射角)、 $\varphi_i$ (入射平面的空间角)、 $\varphi_r$ (反射平面的空间角)、 $\Omega_r$ (探测立体角)、 $L_r$ (探测器的示值)。测量中还需要考虑3个附加因素的影响<sup>[11]</sup>：1)光路调整中带来的准直性影响 $R_c$ ；2)减光器的位置重复性带来的影响 $R_d$ ；3)光源(氙灯)的影响 $L_s$ 。包括光源(氙灯)的稳定性和均匀性带来的影响。综合这些因素，最后的不确定度分析的数学模型可以写成<sup>[12]</sup>

$$f = K_f L_{rc} (\cos \theta_i)^{-1} R_c R_d L_s F_a, \quad (16)$$

$L_{rc}$ 表示 $L_r$ 的不确定度分量。

BRDF的相对标准不确定度分析式如下<sup>[13]</sup>：

$$\begin{aligned} U_{\text{rel}}^2(f) &= U_{\text{rel}}^2(K_f) + U_{\text{rel}}^2(L_{rc}) + \left( \frac{\tan \theta_i}{\cos \theta_i} \right)^2 \times \\ &U_{\text{rel}}^2(\theta_i) + U_{\text{rel}}^2(R_c) + U_{\text{rel}}^2(R_d) + U_{\text{rel}}^2(L_s) + U_{\text{rel}}^2(F_a), \end{aligned} \quad (17)$$

式中  $U_{\text{cref}}^2(K_f) = U_{\text{cref}}^2(L_{0c}) + U_{\text{ref}}^2(\Omega_r)$ ,  $U_{\text{cref}}^2(L_{rc}) = U_{\text{ref}}^2(L_r) + [0.7U_{\text{ref}}(\theta_i) + 1.2U_{\text{ref}}(\theta_r)]^2$ 。

表 1 给出了分析  $L_r$  相对不确定度的分量汇总。

表 1  $L_r$  相对不确定度的分量汇总

Table 1 Relative uncertainty factor list of  $L_r$

No.	Symbol	Source	Relative standard uncertainty	Probability model	Freedom coefficient
1	$L_r$	Reflect radiance measurement	0.009	Gauss	64
2	$\theta_i$	Incident angle	0.005	Gauss	36
3	$\theta_r$	Reflect angle	0.007	Gauss	7

所以  $L_r$  相对不确定度为

$$U_{\text{cref}}(L_{rc}) = \{U_{\text{ref}}^2(L_r) + [0.7U_{\text{ref}}(\theta_i) + 1.2U_{\text{ref}}(\theta_r)]^2\}^{1/2} = 0.015, \quad (18)$$

其有效自由度为  $\nu(L_{rc})=109$ 。

表 2 给出了分析  $K_f$  相对不确定度的分量汇总。

表 2  $K_f$  相对不确定度的分量汇总表

Table 2 Relative uncertainty factor list of  $K_f$

No.	Symbol	Source	Relative standard uncertainty	Probability model	Freedom coefficient
1	$L_{0c}$	Luminance measurement of light source	0.009	Gauss	64
2	$\Omega_r$	Solid angle	0.001	Gauss	24

所以  $K_f$  相对不确定度为

$$U_{1\text{cref}}(K_f) = [U_{2\text{cref}}^2(L_{0c}) + U_{8\text{ref}}^2(\Omega_r)]^{1/2} = 0.009, \quad (19)$$

其有效自由度为  $\nu(K_f)=64$ 。

表 3 给出了分析 BRDF 相对不确定度的分量汇总。

表 3 BRDF 不确定度分量汇总表

Table 3 Uncertainty factor list of BRDF

No.	Symbol	Source	Relative standard uncertainty	Probability model	Freedom coefficient
1	$K_f$	BRDF coefficient	0.009	Synthesize	64
2	$L_{rc}$	Reflect radiance measurement	0.015	Synthesize	109
3	$\theta_i$	Incident angle	0.005	Gauss	36
4	$R_e$	Level influence of light line regulation	0.003	Uniform	50
5	$R_d$	Location repeat of spectral meshwork	0.021	Gauss	8
6	$L_s$	Influence of Xenon lamp	0.0046	Uniform	8
7	$F_a$	Synthesize influence of surrounding	0.003	Uniform	12.5

合成相对标准不确定度为

$$U_{\text{crel}}(f) = [U_{\text{crel}}^2(K_f) + U_{\text{crel}}^2(L_{rc}) + (\tan \theta_i / \cos \theta_i)^2 U_{\text{rel}}^2(\theta_i) \times U_{\text{rel}}^2(R_e) + U_{\text{rel}}^2(R_d) + U_{\text{rel}}^2(L_s) + U_{\text{rel}}^2(F_a)]^{1/2} = [0.786 + 0.025(\tan \theta_i / \cos \theta_i)^2]^{1/2}. \quad (20)$$

由于  $25(\tan \theta_i / \cos \theta_i)^2$  相对于整体来说是一个非常小的项,所以在忽略这一项的情况下,  $U_{\text{rel}}(f) = 0.028$ 。合成标准不确定度的有效自由度为

$$\nu(f) = 24.6. \quad (21)$$

将有效自由度取整,得  $\nu(f) = 25$ ,给出置信水平 0.99,由  $t$  分布查表得  $K_{99} = t_{99}(25) = 2.8$ 。为简便起见,本文给出的实验结果分析中都用这个扩展因

子值。  $U_{\text{rel}}$  表达为

$$U_{\text{rel}}(f) = KU_{\text{crel}}(f) = 2.8[0.786 + 0.025(\tan \theta_i / \cos \theta_i)^2]^{1/2} \approx 0.078. \quad (22)$$

## 5 结 论

通过理论和实际结构的双重设计,并对基于这种系统设计的 BRDF 测量不确定度的分析,可以得到明显改善的 BRDF 绝对量值复现的测量方法。该系统已经在中国计量院实现了实际测量,能够应用于不同行业的 BRDF 相关研究和应用中。通过对不确定度分量的再研究和提高,可以获得更好的 BRDF 量值复现结果。

参 考 文 献

- 1 Wei Qingnong, Liu Jianguo, Jiang Rongxi. Measurement method of absolute bidirectional reflectance-distribution function[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1425~1430  
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
- 2 Wu Zhensen, Han Xiange, Zhang Xiangdong *et al.*. Experimental study on bidirectional reflectance distribution function of laser scattering from various rough surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3): 262~268  
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
- 3 Qi Chao, Li Wenjuan, Dai Jingmin. Application and research progress of the infrared bidirectional reflectance measurement[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(6): 391~393  
齐超, 李文娟, 戴景民. 红外双向反射率测量应用及研究进展[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(6): 391~393
- 4 Liu Wenqing, Zhang Yujun, Xie Pinhua *et al.*. Angular distribution properties of polytetrafluoroethylene diffuse reflectance plate under multiwavelength illumination[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(7): 633~637  
刘文清, 张玉钧, 谢品华 等. 多波长照射下聚四氟乙烯漫反射板的角散射分布特性[J]. *中国激光*, 2000, **27**(7): 633~637
- 5 American Society for Testing and Materials. ASTM Standard E-1392. Standard practice for angle resolved optical scatter measurements on specular or diffuse surface[S]. United States: ASTM, 1996
- 6 Liu Zilong. The Measurement Research of Bidirectional Reflectance-Distribution Function[D]. Beijing: National Institute of Metrology, 2007. 20~37  
刘子龙. 双向反射分布函数 BRDF 的测量研究[D]. 北京: 中国计量科学研究院, 2007. 20~37
- 7 Xu Tianzhou. Applied Functional Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2002. 38~77  
许天周. 应用泛函分析[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 38~77
- 8 M. Barilli, A. Mazzoni. An equipment for measuring 3D bidirectional scattering distribution function of black painted and differently machined surfaces[C]. *SPIE*, 2005, 5962, 59620L
- 9 Julian Bucknall. Algorithms and Data Structures in Delphi[M]. Lin Qi, Zhu Taojiang Transl. Beijing: China Electric Power Press, 2003. 110~145  
巴克纳尔. Delphi 算法与数据结构[M]. 林琪, 朱涛江译. 北京: 中国电力出版社, 2003. 110~145
- 10 S. C. Foo. A Gonioreflectometer for Measuring the Bidirectional Reflectance of Material for Use in Illumination Computation[D]. USA: Cornell University, 1997. 58~83
- 11 Jia Hui, Li Futian. Anlysis of factors effecting spectral radiance calibration by applying a diffuse plane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 383~387  
贾辉, 李福田. 影响光谱辐亮度标定因素的分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 383~387
- 12 Li Tie, Yan Wei, Wu Zhensen. A parametric model of bidirectional reflectance distribution function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 769~773  
李铁, 阎炜, 吴振森. 双向反射分布函数模型参量的优化及计算[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 769~773
- 13 Ni Yucai. Practical Evaluation and Analysis of Uncertainty[M]. Beijing: Metrology Press of China, 2005. 98~115  
倪育才. 实用不确定度评定与分析[M]. 北京: 中国计量出版社, 2005. 98~115