

典型立体目标等效 BRDF 测试方法

王 伟, 李 铁, 侯亚丽

(机电动态控制重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对现有 BRDF 测试大多针对平面目标开展, 缺乏有效立体目标测试手段, 提出了一种典型立体目标等效 BRDF 测试方法, 该方法利用不同反射率涂层的子块, 通过不同子块组合成母块, 等效相应典型立体目标光散射空间分布, 利用 BRDF 测试系统获取了轴对称圆柱体目标和等效母块的 BRDF 数据, 完成了两者之间测试结果曲线相关性分析。测试结果表明: 该测试方法可测量入射角小于 30° 范围内轴对称立体目标 BRDF, 完成了小角度入射情况下典型立体目标等效 BRDF 测试。该方法通过平面目标构型, 实现了轴对称立体目标的等效测试。

关键词: 等效 BRDF 测试; 轴对称立体目标; 小角度入射

中图分类号: TN247 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0403011

BRDF equivalent test method of typical stereo target

Wang Wei, Li Tie, Hou Yali

(Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: In view of the existing BRDF tests are for planar targets, not for stereo targets, equivalent test method was proposed for stereo targets BRDF. By combining different reflectivity coating child-blocks into corresponding parent-block, stereo target spatial distribution of light scattering was equivalent. BRDF of axisymmetric cylinder target and its equivalent parent-block were tested by using the BRDF measuring system, and the curve correlation analysis was completed. The test results show that the BRDF equivalent method can measure the axisymmetric stereo targets and equivalent BRDF of stereo targets, when incident angle is small, or less than 30° . BRDF equivalent test method of axisymmetric stereo targets can be realized by founding planar ones.

Key words: BRDF equivalent test; axisymmetric stereo target; small incident angle

收稿日期: 2020-02-15; 修订日期: 2020-03-20

作者简介: 王伟 (1982-), 男, 副研究员, 主要从事目标特性光电测试方面的工作。Email: wwhero@126.com

0 引言

双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 可以描述粗糙面的散射与辐射特性, 在目标探测、跟踪、识别、特征提取和隐身技术等领域具有重要的应用价值^[1]。实际应用中, 人们除了测试平面目标 BRDF 外, 对立体目标的 BRDF 也有相当迫切的研究需求^[2]。目前 BRDF 测试方法主要利用相对测量法, 通过测量已知反射率的标准板和未知的平面样片, 经过对比计算得出测试样片的 BRDF, 测量的样品为平面样片^[3]。刘若凡等^[4]研制的双向反射仪通过转角装置实现对样品的半球空间光散射特性测量。李俊麟等^[5]研制的 BRDF 高精度绝对测量装置, 可快速、高精度、无遮挡、全自动地实现全角度 BRDF 绝对测量。杨钰琦^[6]结合双向反射分布函数研究空间随机粗糙面的电磁散射特性。然而, 上述测量装置和方法全部针对粗糙平面的散射与辐射特性进行测量研究, 存在一定的局限性。对于立体目标的周向散射与辐射特性, 上述测量装备和方法都不适用, 具有无法避免的较大测试误差^[7]。针对现有 BRDF 测试只是针对平面目标, 无法测试立体目标的问题, 文中提出了一种典型立体目标等效 BRDF 测试方法。

1 BRDF 定义和测试系统

1.1 BRDF 定义

BRDF 能够描述各向同性材料粗糙表面半球空间的光辐射特性和方向散射特性。在特定的条件下, 包括均匀的照度、均匀且各向同性的平面和由于次平面散射而产生的边界效应, 一个反射表面的几何反射特性是根据双向反射分布函数来确定的。

如图 1 所示, 双向反射分布函数其定义为反射方向 (θ_r, Φ_r) 小立体角的反射亮度的 $dL_r(\theta_r, \Phi_r; \theta_i, \Phi_i)$ 与入射方向 (θ_i, Φ_i) 小立体角入射照度 $dE_i(\theta_i, \Phi_i)$ 的比值^[8], 其定义公式为:

$$f_r(\theta_i, \Phi_i; \theta_r, \Phi_r) = dL_r(\theta_r, \Phi_r; \theta_i, \Phi_i) / dE_i(\theta_i, \Phi_i) [\text{sr}^{-1}] \quad (1)$$

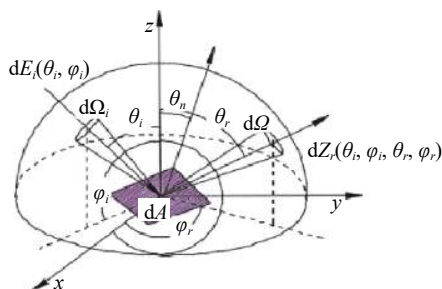


图 1 BRDF 的定义

Fig.1 Definition of BRDF

1.2 BRDF 测试系统

测试系统如图 2 所示, 主要由 BRDF 装置测量架及传动系统、光源及探测系统、数据采集及控制系统和数据库系统组成。该系统通过入射光源电机、探测器接收天顶角电机、水平方位电机 3 个电机的运动, 得到测量样品在整个上半球空间中的光强分布情况。测量过程中, 样品保持不动, 且始终处于方位圆的圆心水平的载物平台上; 入射光源的方向始终照射样品, 入射角范围为 $(0 \sim 75^\circ)$; 探测器接收天顶角为 $(-70 \sim +70^\circ)$, 接收方位角为 $(0 \sim 360^\circ)$; 从而实现在半球空间中不断变化入射和接收方向的目的。

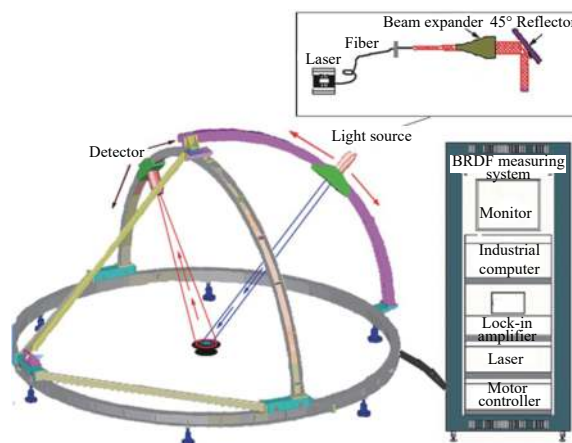


图 2 BRDF 测试系统图

Fig.2 BRDF test system diagram

2 典型立体目标等效 BRDF 测试方法

2.1 等效思路

BRDF 对立体目标测试受限于几何形体, 为探索 BRDF 测量系统对立体目标的空间光散射特性测试, 采用等效 BRDF 概念, 即在小入射角度入射光照射目标时, 任一轴对称立体目标在空间的光学散射特性表

征, 总能找到与之对应的平面目标表征, 两者表征完全一致, 该平面目标的空间光散射特性表征即可等效相应立体目标表征。按照等效的概念, 首先制备不同反射率涂层的平面小区域块 (称之为子块), 测试已有典型立体目标的 BRDF, 根据测试结果将制备的子块按一定规律组合成可测试的平面大区域块 (称之为母块), 该母块即为等效的平面目标。利用 BRDF 测试系统测量母块, 对两者测试结果曲线进行相关性分析, 依据相关系数大小判断该平面目标等效程度, 验证典型立体目标等效 BRDF 测试方法。需要说明的是, 将典型立体目标等效成相应平面目标, 则可以利用 BRDF 测试系统测量平面目标的能力对其进行测试, 其测试结果也能真实反映对应典型立体目标的 BRDF 散射特性, 完成典型立体目标的 BRDF 测试。

2.2 等效子/母块制作

测试系统入射光采用准直光源, 入射光斑大于 50 mm, 考虑光斑大小, 选取 10 mm×10 mm 尺寸的方块制作不同反射率涂层子块若干组, 根据立体目标空间光散射特性将不同反射率涂层的子块依序排列, 形成一个 50 mm×50 mm 的不同反射率涂层区域组成的母块, 该母块即为等效立体目标的平面目标样品。

涂料选用美国 Avian Technologies 公司的 Avian 系列漫反射涂料。该系列涂料适合温度、湿度条件苛刻的野外环境使用, 主要用作校正板和遥感靶标, 也可用于积分球内壁涂料。将水相色素层和催化层按照不同的比例混合, 可得到不同反射率涂料。

喷涂时, 按照子块的底部颜色选取绿、黄、白、橙、蓝 5 种颜色基底, 将涂料水相色素层和催化层根据不同比例混合成 5 种不同反射率涂料, 具体比例划分如表 1 所示。

表 1 5 种不同反射率涂料混合比例表

Tab.1 List of mixed ratios of 5 different reflective coatings

Base color	Aqueous pigment layer/mL	Catalytic layer/mL	Distilled water/mL	Remarks
Green	0	30	2	
Yellow	0.5	30	2	
White	1	30	2	
Orange	2	30	2	
Blue	3	30	2	

喷涂完成后的不同反射率涂层表面母块如图 3 所示, 喷涂子块就可以作为立体目标等效 BRDF 测试模型的最小单元, 将不同反射率涂层的各子块按照某一立体目标空间光散射特性分布规律组合拼接成图中的母块, 其空间光散射特性即可等效为该立体目标 BRDF。



图 3 喷涂的不同反射率涂层表面母块图

Fig.3 Parent-block diagram with different reflectivities

3 等效 BRDF 测试方法验证

首先, 对制作的 5 种反射率涂层样品进行测量标定, 得出同一反射率涂层样品光散射空间分布特征, 然后对某一典型立体目标样品进行 BRDF 测试, 分析空间光散射特性分布规律, 根据分布规律变化组合拼接不同反射率涂层子块, 形成等效母板, 等效典型立体目标的 BRDF。

验证该方法的可行性, 其实就是验证制作的等效母板与对应典型立体目标空间光散射特性分布规律的相似程度, 两者相似程度高, 说明等效成功, 该方法可行, 反之则不可行。

3.1 5 种反射率涂层样品测试标定

利用 BRDF 测试系统对喷涂的 5 种涂层 (图 3) 母块进行 BRDF 测试, 得出其不同涂层母块空间光散射特性。测试时, 入射角 0°、接收方位角 0°、接收天顶角 -70~70°, 分辨率 5°, 镜向加密, 入射光波长 940 nm。测试样品放置于近似黑体内小型高低和水平可调的载物平台上, 样品四周用黑绒布遮挡用以降低背景干扰。具体测试样品放置如图 4 所示。

测试的绿色基底涂层样品测量结果如图 5 所示。

黄、白、橙、蓝 4 种颜色基底涂层样品测量结果曲线与之相似, 不再一一罗列。由测试结果得出涂料

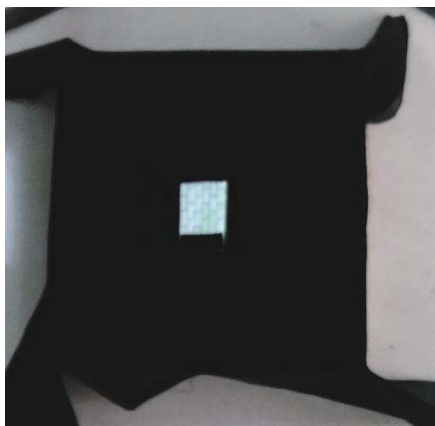


图 4 涂层母块样品测试照片

Fig.4 Test photo of coating parent-block sample

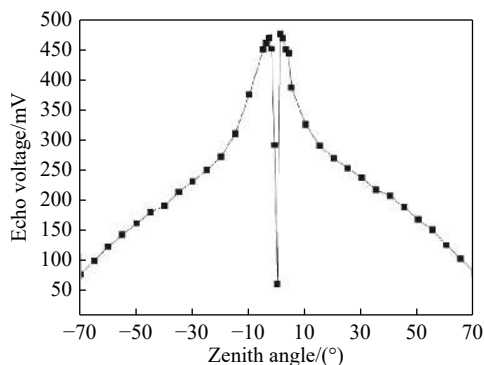


图 5 0°入射绿色基底 BRDF 测试结果图

Fig.5 BRDF test results of green substrate at 0° incident angle

中随着水相色素层含量的逐渐增多,喷涂的涂层 BRDF 测试回波幅值逐渐减小:绿 (471 mV)>黄 (423 mV)>白 (384 mV)>橙 (319 mV)>蓝 (152 mV)。

根据测试结果选取两个反射率涂层相差最大的样品,进行入射角 10°、20°、30°和 40°相同条件下的 BRDF 测量。其测试结果如图 6、7 所示。

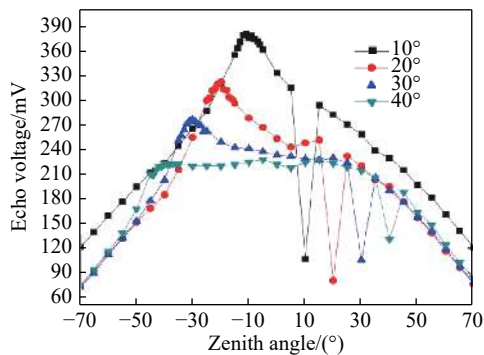


图 6 10~40°入射绿色基底 BRDF 测试结果图

Fig.6 BRDF test results of green substrate at 10-40° incident angle

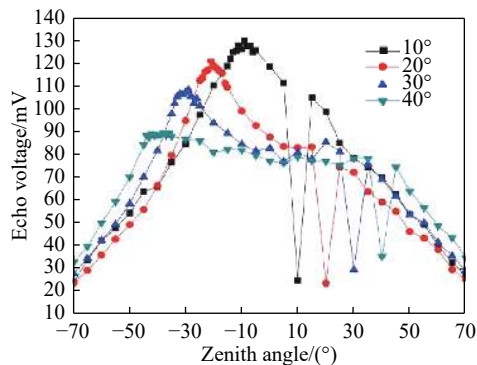


图 7 10~40°入射蓝色基底 BRDF 测试结果图

Fig.7 BRDF test results of blue substrate at 10-40° incident angle

3.2 典型立体目标 BRDF 测试

选取金属圆柱体作为典型立体目标进行测试。选取的圆柱体直径 50 mm,高 70 mm,表面进行氧化发黑处理,并且涂覆了深蓝色涂层。测试结果如图 8 所示。

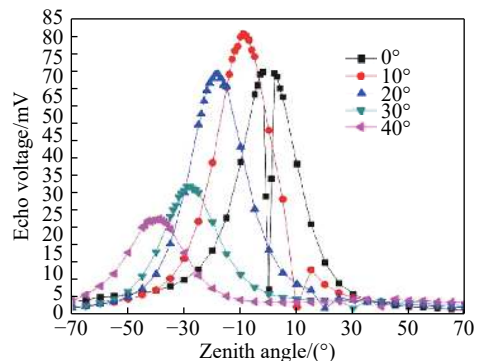


图 8 0~40°入射圆柱体立体目标 BRDF 测试结果图

Fig.8 BRDF test results of cylinder at 0-40° incident angle

3.3 典型立体目标 BRDF 等效

根据图 8 测试结果曲线,分析空间光散射特性分布情况,组合不同反射率涂层区域目标样品母块,等效圆柱体目标。等效结果如图 9 所示。

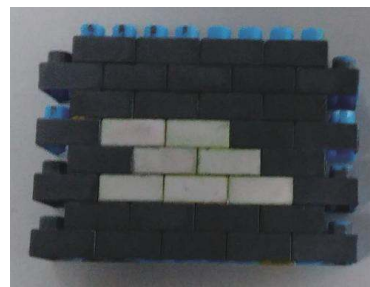


图 9 圆柱体 BRDF 等效母块实物图

Fig.9 BRDF equivalent parent-blocks of cylinder

对上述等效母块按照立体目标的测试条件进行 BRDF 测试, 所得测试结果如图 10 所示。

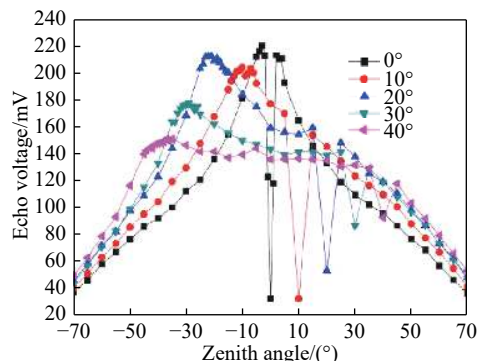


图 10 0~40°入射圆柱体等效母块 BRDF 测试结果图

Fig.10 BRDF test results of equivalent parent-blocks of cylinder at 0-40°incident angle

3.4 测试方法验证

为了验证等效母块与对应典型立体目标空间光散射特性分布规律的相似程度, 利用 MATLAB 软件分析上述测试结果数据曲线的相关性, 得出相关系数。通过相关系数大小评价两者测试结果曲线相似程度, 进而验证典型立体目标等效 BRDF 测试方法的可行性。

利用 MATLAB 软件处理了圆柱体目标和绿内-蓝外基底涂层母块 BRDF 测试结果, 按照入射角度不同 (0°、10°、20°、30°和 40°入射) 对两者测试数据曲线的相关性进行了对比分析, 得出两者的相关系数。其中 0°入射分析相关性曲线如图 11 所示。

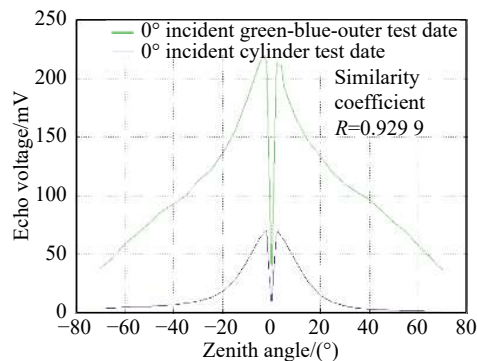


图 11 0°入射绿内-蓝外母块与圆柱样品散射光强测试数据相关性对比图

Fig.11 Comparison of the accuracy of the scattering light intensity test data between the 0° incident green-blue-outer parent block and the cylindrical sample

其他角度入射相关性曲线与 0°入射大致相同, 就不再一一罗列。由对比结果可以看出, 五种典型入射角度下, 圆柱体和绿内-蓝外涂层母块样品回波电压测试数据相关系数依次为: 0.929 9、0.895 5、0.880 7、0.792 9 和 0.535 8。根据测试数据相关系数及等效的经验判据, 设置等效成功时两者测试结果相关系数大于 0.7(相关系数大于 0.7 的设置是一个经验数值, 是专家认可的数值)。因此, 绿内-蓝外母块等效圆柱体样品时在入射角度 0°、10°、20°和 30°时等效程度比较高, 而入射角度 40°时等效效果较差。分析原因: 随着入射角度逐渐增大, 圆柱体样品的侧面散射光强对测试结果的影响逐渐加大, 以至于该方法只能等效出入射角 30°内的圆柱体目标样品。随着入射角的增大, 相关系数由 0.929 9 逐渐减小到 0.535 8 也说明了该问题。

综上, 绿内-蓝外基底涂层母块样品可以等效小角度内 (30°入射角内) 圆柱体样品的 BRDF, 但是入射角大于 40°后, 由于圆柱体侧面散射光强对测试结果的影响逐渐加大, 该母块对圆柱体样品的等效效果较差, 该测试方法误差变大。

4 结 论

文中提出了一种典型立体目标等效 BRDF 测试方法。该方法利用不同反射率涂层的子块, 通过不同子块组合成母块等效相应轴对称立体目标光散射空间 BRDF 分布, 经 BRDF 测试系统测量了轴对称圆柱体目标和等效母块 BRDF, 完成了测试结果曲线相关性对比分析。测试结果表明: 等效母块在入射角小于 30°范围内可以有效表征圆柱体样品的 BRDF, 超出该范围时, 由于目标侧面散射光强对测试结果的影响逐渐加大, 等效效果变差, 该测试方法误差变大。

参考文献:

[1] Gao Qi. Study of the receiving system of the bidirectional reflectance distribution function measurement[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
高奇. 双向反射分布函数测量装置接收系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.

[2] Liu Dingyu, Yi Jiawei, Zhang Xuzhou, et al. Measurement and analysis of bidirectional reflectance distribution in monocotyledons [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019,

- 39(7): 2100–2106. (in Chinese)
- 刘丁瑜, 易加维, 张徐洲, 等. 单子叶植物叶片双向反射分布的测量与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(7): 2100–2106.
- [3] Li Xin, Zheng Xiaobing, Xun Lina, et al. Design of automated field hyperspectral BRDF measurement system [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(2): 262–264. (in Chinese)
- 李新, 郑小兵, 寻丽娜, 等. 室外高光谱BRDF自动测量系统的设计[J]. *光学技术*, 2008, 34(2): 262–264.
- [4] Liu Ruofan, Zhang Xianliang, Su Hongyu, et al. Study of setup for measuring optical bidirectional reflectance distribution function [J]. *Infrared*, 2014, 35(1): 14–17. (in Chinese)
- 刘若凡, 张宪亮, 苏红雨, 等. 光学双向反射分布函数的测量装置研究[J]. *红外*, 2014, 35(1): 14–17.
- [5] Li Junlin, Zhang Liming, Chen Hongyao, et al. Development of BRDF absolute measuring device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0528002. (in Chinese)
- 李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0528002.
- [6] Yang Yuqi. Study on electromagnetic scattering from rough surface based on BRDF[D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
- 杨钰琦. 粗糙面散射的BRDF方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [7] Zhao Qing, Zhao Jianke, Xu Liang, et al. BRDF measurement of matte coating and its application [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(11): 2627–2635. (in Chinese)
- 赵青, 赵建科, 徐亮, 等. 航天消光黑漆双向反射分布函数的测量与应用[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2627–2635.
- [8] Wang Wei, Li Tie, Li wei, et al. Test method of the low detectable target under the background shielded by blackbody [J]. *Guidance & Fuze*, 2018(1): 6–10. (in Chinese)
- 王伟, 李铁, 李伟, 等. 黑体屏蔽背景的低可探测目标测试方法[J]. *制导与引信*, 2018(1): 6–10.