

doi: 10.3788/gzxb20134209.1097

基于全滤色片匹配方法的滤色片漫入射光谱透过率评价

袁琨¹, 严惠民¹, 王聪²

(1 浙江大学 国家光学仪器工程技术研究中心, 杭州 310027)

(2 深圳汉谱光彩科技有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 为了获得特定的探测器光谱响应, 可以采用全滤色片法对滤色片进行精确匹配. 在匹配计算时, 通常使用滤色片的垂直光谱透过率作为计算依据; 而实际应用中斜入射的光线会导致匹配计算结果和测试结果不一致. 本文在光线漫入射条件下对圆柱形状滤色片的漫入射光谱透过率计算方法进行了分析, 提出了一种由滤色片垂直入射光谱透过率计算滤色片漫入射光谱透过率的修正模型. 设计了双积分球测量装置对滤色片的漫入射透过率进行检测. 在该装置下检测不同滤色片的漫入射光谱透过率, 并与修正模型计算结果进行对比验证. 实验结果表明, 修正模型可以在较小误差范围内由滤色片的垂直入射光谱透过率计算其漫入射光谱透过率, 应用于全滤色片匹配可以显著提高匹配结果和实际测量结果的一致性.

关键词: 光学测量; 漫入射透过率; 算法修正; 双积分球测量透过率

中图分类号: O438.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)09-1097-5

Diffuse Incident Spectral Transmittance Evaluation of Filter Based on Full-color Filter Match

YUAN Kun¹, YAN Hui-min¹, WANG Cong²

(1 National Engineering Research Center for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 Shenzhen Chinaspec Optics&Color Technology Co. Ltd, Shenzhen, Guangdong 518101, China)

Abstract: In order to realize the specific spectral response of the detector, full-color filter method can be used to calculate the match plan of color filter. During the calculation, normal spectral transmittance of the filter often be employed as the calculation basis. In many practical applications, obliquely incident light will lead the disagreement between calculated result and the actual result. In this paper, the calculation method of diffuse incident spectral transmittance about the cylindrical color filter is analyzed; a correcting model which can derive the diffuse incident spectral transmittance from normally incident spectral transmittance is proposed; a experiment system is designed for diffuse incident spectral transmittance measurement based on double integrating sphere. A set of experiments are employed to evaluate performance of the correcting model. The measurement results show that the correcting model can effectively derive the diffuse incident spectral transmittance from normally incident spectral transmittance with obviously lower match error. The agreement between actual measurement result and calculated result is observably improved by applying the correcting model to full-color filter method.

Key words: Optical measurements; Diffuse incident transmittance correction; Algorithm correction; Double integrating sphere measurements transmittance

基金项目: 国家科技支撑计划课题(No. 2011BAF06B02)资助

第一作者: 袁琨(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光学测量技术和仪器. Email: 10930014@zju.edu.cn

导师: 严惠民(1961-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学测量技术和仪器. Email: yhm@zju.edu.cn

收稿日期: 2013-03-11; 录用日期: 2013-04-18

0 引言

在光电测量仪器的设计中,为了得到理想的探测器光谱响应,通常需要采用滤色片对探测器的光谱响应进行修正^[1-5],即按照卢瑟条件规定的三刺激值 X、Y、Z 的光谱响应曲线,结合探测器的光谱响应曲线来设计滤色片的相对光谱透过率^[6-10].在滤色片的设计中,多采用分离全滤色片法、密接全滤色片法和部分滤色片法等三种滤色片匹配方法^[11-12].由于加工工艺的限制,多采用密接全滤色片法.在设计滤色片的匹配方案时,采用分光光度计对有色玻璃的光谱透过率进行测量,获得已知有色玻璃种类的典型光谱透过率曲线,以此为依据进行匹配方案的计算^[13].这种计算方法会导致虽然匹配结果计算误差很小,但是在实际测试中误差较大的情况,需要在后期对匹配方案进行大量的调整,进行相关的算法处理,所得到匹配方案的准确度仍然不高^[14-15].

匹配方案准确度低的主要原因在于匹配计算和实际测量情况存在着区别.在进行匹配方案设计时,已知有色玻璃种类的典型光谱透过率曲线须考虑实际使用情况的差异性.通常测量滤色片光谱透过率采用的方法是用分光光度计测量滤色片的垂直透过率.这种情况下测量得到的数据是入射光线与滤色片成垂直角度时的测量结果,并不符合实际测量情况^[16].在实际的测量中,光线是以不同方向入射至滤色片内.不同方向入射的光线在滤色片中通过的光程不同,其光谱透过率也会产生较大的区别.所以对滤色片的匹配计算必须将垂直入射测量条件下得到的有色玻璃光谱透过率按照实际使用情况进行修正,采用该数据进行匹配计算,才能得到更准确的匹配结果^[17].

本文提出了一种从滤色片的垂直光谱透过率计算得到滤色片的漫入射透过率的修正模型,根据滤色片的几何形状,结合滤光片的光谱透过率对该滤色片进行从垂直入射透过率到漫入射透过率的转换;并提出了一种双积分球实验装置来测量在漫入射情况下滤色片的光谱透过率.

1 滤色片在漫入射情况下的光谱透过率计算

如图 1 所示,对于厚度为 d/mm 的有色玻璃, A 光线透过率为 $T(\lambda)$, 而 B 光线的光谱透过率为 $T(\lambda)^{1/\cos(\theta)}$. 如图 2 所示, 标号为 LB16 的有色玻璃, 在厚度为 2.4 mm 和 1.2 mm 的相对光谱透过率有较大区别.

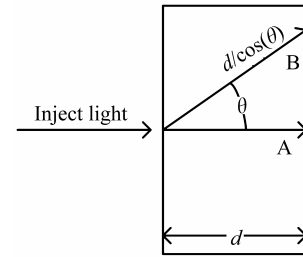


图 1 光线沿不同方向入射有色玻璃

Fig. 1 Light incident along different directions

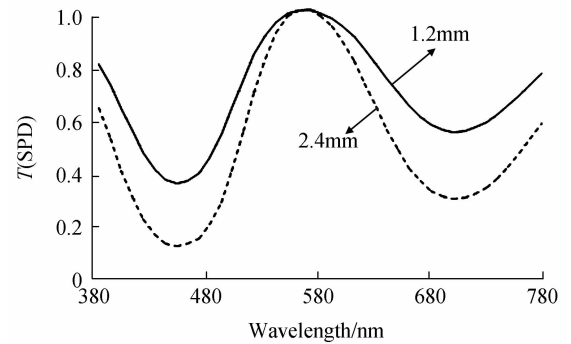


图 2 不同厚度有色玻璃的归一化光谱透过率曲线

Fig. 2 Relative spectral transmittance of LB16 at 1.2 mm and 2.4 mm

对漫入射光进行测量的光电积分测量仪器,通常采用如图 3 所示的设计^[18].被测光线首先通过余弦矫正器,消除被测光的方向性,之后光线入射滤色片,从滤色片出射后的光投射到光电探测器表面.此处以圆柱形滤色片为例,设定光电探测器的光敏面面积大于滤色片出射面的面积.若滤色片的形状改变,或光电探测器光敏面的面积小于滤色片出射面的面积,对下面算法则需要做相应的修正.

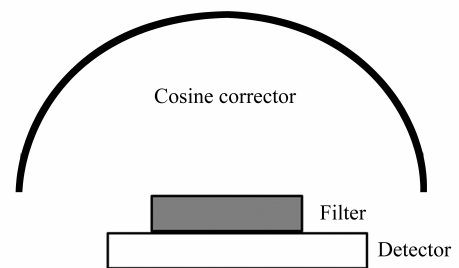


图 3 漫入射光测量仪器光路结构

Fig. 3 Diffuse incident light measuring instrument optical structure

由于余弦校正器对入射光的均匀化,入射光在有色玻璃表面每一点分布为近似均匀,而且在滤色片表面一点入射有色玻璃内部的光为近似朗伯体分布的点光源.

图 4 中,对于圆柱形滤色片,由上表面入射至滤色片内部的光辐射量可以用式(1)表示为

$$\phi_i = \int M_e dS = M_e^{\text{pi}} \int_0^{2\pi} \int_0^r r dr d\theta \quad (1)$$

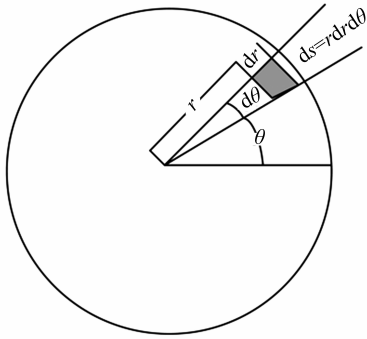


图 4 圆柱形滤色片光入射面

Fig. 4 Light incident surface of Cylindrical filter

式中, M_e^{pi} 为滤色片表面任一点面积为无限小的 P 点的整体出射光辐射量, 由于余弦矫正器对入射光的均匀化, 可以近似认为入射光在滤色片的表面处处相等, 即 P_e^{pi} 为一常量; dS 为滤色片中任一点面积为无限小的 P 点滤色片面积; P 点可认为是点光源, 光强角分布近似为朗伯体, 其任意方向光辐射量为

$$I_p^\epsilon = I_p^0 \cos(\epsilon) = \frac{1}{\pi} M_e^{pi} \cos(\epsilon) \quad (2)$$

式中, I_p^0 为有色玻璃表面任意一点 P 表面积为 dS 的区域入射光辐射量的法向光强, 由朗伯定理易知大小为 $\frac{1}{\pi} M_e^{pi}$; I_p^ϵ 为有色玻璃表面任一点表面积为 dS 的区域入射光与法向成 ϵ 角度方向的光强; ϵ 为 I_p^ϵ 与法向夹角, M_e^{pi} 为有色玻璃表面任意一点表面积为 dS 的区域入射光辐射量。

图 5 所示圆柱形滤色片的圆柱体上表面为光入射面, 下表面为光出射面. 对于光入射面上的 P 点, 其从下表面的出射光辐射量和从 ABCD 平面出射光辐射量之间的关系为

$$\phi_p = \int_0^{2\pi} \int_0^\alpha M_e^{ABCD} d\delta \quad (3)$$

对于有色玻璃表面任意一点, 其在有色玻璃内的 ABCD 平面内只有与法向成 $+\alpha$ 和 $-\beta$ 角度内的光线可以到达探测器表面. 而光线沿不同角度在有色玻璃内传播的光程不同, 根据朗伯比尔定律, 对于厚度为 d_0 mm 时, 特定波长 λ , 从 P 点入射的光辐射量, 经过垂直光谱透过率为 T_{λ_0} 的滤色片在 ABCD 平面整体出射光辐射量为

$$\phi_p = \int_0^{2\pi} \int_{-\beta}^\alpha I_p^\epsilon T_{\lambda_0}^{\frac{d}{\cos(\epsilon)}} d\epsilon d\delta \quad (4)$$

由图 5 和图 6 可知

$$\alpha = \arctan \frac{\sqrt{R^2 - r^2} \sin \delta + r \cos \delta}{d}$$

$$\beta = \arctan \frac{\sqrt{R^2 - r^2} \sin \delta - r \cos \delta}{d}$$

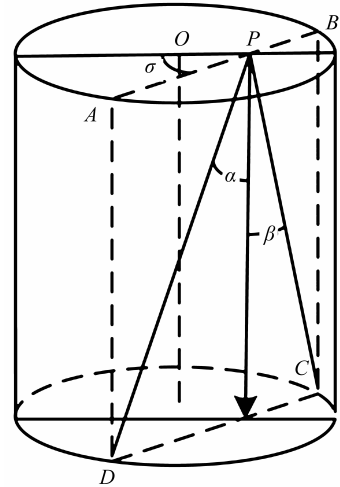


图 5 圆柱形滤色片

Fig. 5 Cylindrical filter

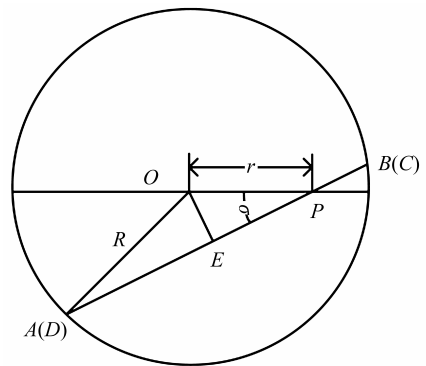


图 6 滤色片的 ABCD 平面

Fig. 6 ABCD plane of the filter

光线在经过余弦校正器均匀化后, 可近似认为其在滤色片表面入射光辐射量处处相等. 对于整片滤色片, 特定波长 λ 处的整体出射光辐射量为

$$\phi_0 = M_e^{pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\alpha \int_{-\beta}^\alpha \frac{1}{\pi} \cos(\epsilon) T_{\lambda_0}^{\frac{d}{\cos(\epsilon)}} r d\epsilon d\delta dr d\theta \quad (5)$$

在评价滤色片的透过率曲线形状特征时, 绝对值大小并不会对滤色片透过率相对分布产生影响. 所以在这里, 可以把常量项提取出, 以 K 表示. 入射滤色片特定波长处的光线漫入射情况下的光谱透过率可以用式(6)表示

$$T_\lambda = K \int_0^{2\pi} \int_0^\alpha \int_{-\beta}^\alpha \cos(\epsilon) T_{\lambda_0}^{\frac{d}{\cos(\epsilon)}} r d\epsilon d\delta dr d\theta \quad (6)$$

从式(6)可以发现, 在漫入射情况下滤色片的相对光谱透过率, 不仅与该滤色片的材料有关, 同样与滤色片的厚度和形状有关. 在滤色片的匹配设计中, 对已有的有色玻璃在垂直入射条件下测得的光谱透过率曲线需要按照式(6)进行修正, 得到该有色玻璃在漫入射情况下的特定厚度、特定尺寸的光谱透过率曲线, 再以此为基础进行有色玻璃的匹配.

2 滤色片的漫入射光谱透过率的测量方法

为了测量滤色片在实际使用情况下的漫入射透过率,采用双积分球的设计,实现了如图7所示的装置对被测滤色片的漫入射透过率进行测量.设计两个30 cm直径积分球,内表面涂覆漫白色反射材料硫酸钡,在积分球A侧面开光源孔,放置卤钨灯光源.被测滤色片置于两个积分球中间.在两个积分球内均设置硫酸钡涂覆的挡板,保证卤钨灯、滤色片、测量光纤之间的隔离.

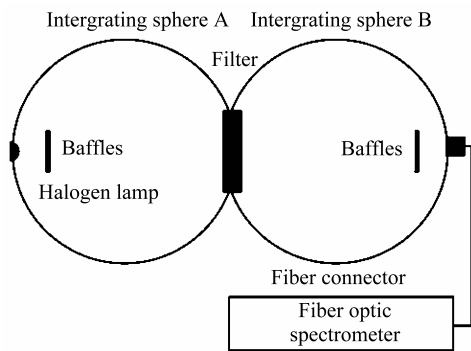


图7 测量被测滤色片的漫入射光谱透过率实验装置
Fig. 7 Experimental system of diffuse incident spectral transmittance measurement

使用该装置对滤色片的光谱透过率进行测量,可以保证入射至被测滤色片的光线为无方向特异性的漫入射;同时从滤色片出射光经积分球漫反射后,保证用光纤光谱仪接受到无方向特异性的出射光.测量过程为:将被测滤色片覆盖至两积分球中间,用光纤光谱仪测量滤色片透射光的光谱分布 $T_1(\lambda)$.然后将被测滤色片取出,直接测量出光孔光谱分布 $T_2(\lambda)$.被测滤色片的光谱透过率可通过式(7)计算.

$$T = \frac{T_1(\lambda)}{T_2(\lambda)} \quad (7)$$

3 实验结果与分析

单片厚度为1 mm,牌号为LB6的有色玻璃,使用分光光度计测量其垂直入射光谱透过率相对光谱曲线.根据垂直入射透过率相对光谱曲线采用式(6)计算其漫入射光谱透过率相对光谱曲线,使用图7所示的装置实际测量其光谱透过率曲线,结果如图8.

以采用图7装置实际测量的有色玻璃漫入射光谱透过率相对光谱曲线为标准,根据式(8)比较分光光度计测量的垂直入射光谱曲线和计算得到的漫入射光谱曲线相对误差,结果如表1.

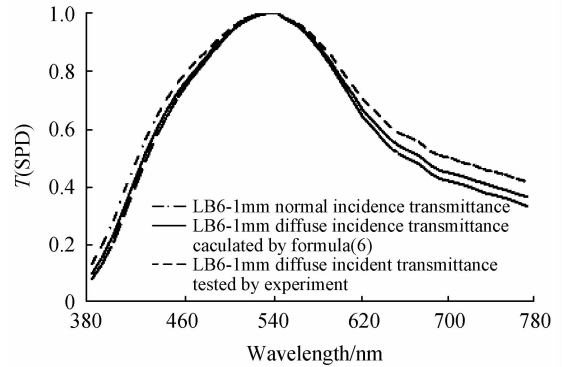


图8 有色玻璃LB6 1 mm厚度测量结果对比

Fig. 8 Result contrast of colored glass LB6(thickness:1 mm)

表1 有色玻璃LB6 1 mm厚度测量结果相对误差对比
Table 1 Error contrast of colored glass LB6(thickness 1mm)

Contrast	f Error/(%)
Normal incidence transmittance tested by SpectroPhotometerVS	8.68
Diffuse incidence transmittance tested by SpectroPhotometer	
Diffuse incidence transmittance tested by formula 6VS Diffuse incidence transmittance tested by SpectroPhotometer	1.66

$$f = \frac{\int_{380}^{780} |T'(\lambda)_{SPD} - T(\lambda)_{SPD}| d\lambda}{\int_{380}^{780} T(\lambda)_{SPD} d\lambda} \times 100\% \quad (8)$$

式中, $T'(\lambda)_{SPD}$ 表示被测滤色片的光谱透过率相对光谱分布, $T(\lambda)_{SPD}$ 表示参照滤色片的光谱透过率相对光谱分布.

选取15种不同牌号,不同光谱透过率分布的有色玻璃,厚度均为1 mm,进行以上实验,以图7所示的实验装置测得的漫入射光谱透过率为标准,比较分光光度计测量的垂直入射光谱曲线和计算得到的漫入射光谱曲线相对误差,结果如图9.采用修正算法后的光谱透过率曲线,与漫入射测量结果之间的匹配误差均小于2%,显著优于垂直入射光谱曲线和漫入射实验测量结果之间的匹配误差.

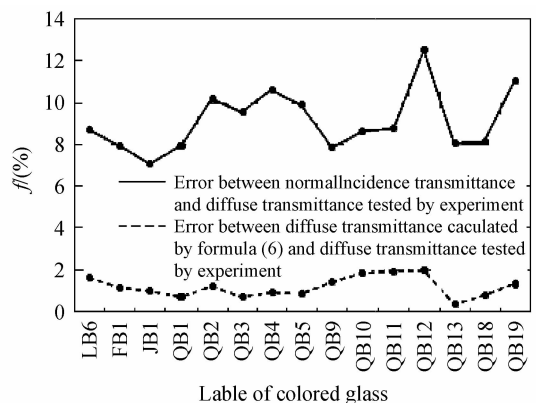


图9 15种有色玻璃测量结果相对误差对比

Fig. 9 Error contrast of 15 kinds of colored glass

实验结果表明,滤色片漫入射透过率和垂直入射透过率有较大区别,根据式(6)对滤色片的垂直入射透过率曲线进行修正可以使测量结果更加接近实际测量情况下滤色片光谱透过率。

4 结论

对于采用全滤色片法进行匹配的有色玻璃滤色片,其漫入射透过率与垂直入射透过率光谱曲线有较大区别.滤色片的匹配应使用有色玻璃的漫入射透过率光谱曲线作为计算依据.采用本文推荐的修正模型算法,可以显著地减小计算结果和实测数据之间的误差.在对匹配结果进行检验时,应采用可以客观评价滤色片漫入射透过率的实验装置对滤色片漫入射透过率进行检验。

参考文献

- [1] 滕秀金. 颜色测量技术[M]. 北京:中国计量出版社, 2007: 260-262.
- [2] HUNTER S, HAROLD W. The measurement of appearance [M]. New York: Wiley Interscience Publication, 1987: 334-339.
- [3] GONG Jian. Portable color recognition and reconstruction system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005:17-20.
龚健. 便携式颜色识别与重建系统的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2005:17-20.
- [4] van DALEN G. Digital measurement-colour and appearance of soup[J]. *Food Science and Technology*, 2010, **24**(4): 52-53.
- [5] LEE S, LEE J. An illumination adaptive colorimetric measurement using color image sensor [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2008, **91**(10): 1608-1610.
- [6] JIANG Yue-juan. A design method of correction color filter photoelectric colorimeter[J]. *Optical Technology*, 2000, **26**(1): 92-94.
蒋月娟. 光电色度计校正滤色器的一种设计方法[J]. 光学技术, 2000, **26**(1):92-94.
- [7] CHEN Jia-sheng, LUO Xiao-bing, GE Xue-feng, et al. Design of a new color sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2003, **12**(4): 468-469.
陈家胜, 罗小彬, 葛学峰, 等. 一种新型颜色传感器的设计[J]. 传感器技术学报, 2003, **12**(4): 468-469.
- [8] 徐海松. 颜色信息工程[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2005: 199-201.
- [9] YANGP K, CHENC H. Calibration of a sequentially reflective colorimeter using a tri-color LED[J]. *Journal of Modern Optics*, 2008, **55**(15): 2401-2413.
- [10] JERNESH J K, HASSING S. Analysis of reflectance and transmittance measurements on absorbing and scattering small samples using a modified integrating sphere setup[J]. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(8): 879-888.
- [11] GAO Shi-zhi, JIN Shang-zhong, YUAN Kun. Influence of oblique beams on matching accuracy of correcting filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 135-138.
高世芝, 金尚忠, 袁琨. 斜光束对校正滤光片匹配准确度的影响[J]. 光子学报, 2013, **42**(2): 135-138.
- [12] YE Wei, XU Yu, ZHANG Yu-wei. Study on optical system of the mirror type brightness chromaticity sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, **10**(2): 205-208.
叶炜, 许煜, 张钰唯. 分镜式亮度色度传感器光学系统研究[J]. 传感器技术学报, 2010, **10**(2): 205-208.
- [13] HAN Yu-ming, XU Xiao-li, LIANG Fu-ping. Colorimeter filter matching technology research[J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2004, **19**(4): 12-15.
韩玉明, 徐小力, 梁福平. 色差计滤色器匹配技术研究[J]. 北京机械工业学院学报, 2004, **19**(4):12-15.
- [14] DU Xin-zheng, XU Xiao-li, ZHANG Feng-shen. Analysis of the factors affecting the measurement accuracy of the colorimeter[J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2004, **19**(3): 43-44.
杜新征, 徐小力, 张凤山. 影响色差计测量准确度的因素分析[J]. 北京机械工业学院学报, 2004, **19**(3):43-44.
- [15] LEI Xu, TONG Zi-quan, ZHANG Xiao-bing. Improved mathematical model to determine the accuracy of color measuring system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, **18**(2): 183-185.
雷旭, 童子权, 张晓冰. 提高测色系统准确度的数学模型的确定[J]. 仪器仪表学报, 2000, **18**(2):183-185.
- [16] JIANG Yue-juan. Influence of oblique beam on accuracy of correction color filter[J]. *Optical Technology*, 2001, **27**(2): 113-114.
蒋月娟. 斜光束对校正滤色器校正准确度的影响[J]. 光学技术, 2001, **27**(2): 113-114.
- [17] MOU Jing-jing. Industrial online color measurement method and system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 17-20.
牟晶晶. 工业在线颜色测量方法及系统的研究[D]. 浙江:浙江大学, 2006:17-20.
- [18] HUANG Bo, DAI Cai-hong, YU Jia-lin. Test research on response characteristics of UV radiation illuminance meter cosine[J]. *Optical Technology*, 2010, **36**(2): 436-439.
黄勃, 代彩红, 于家琳. 紫外辐射照度计的余弦响应特性测试研究[J]. 光学技术, 2010, **36**(2):436-439.