

光电积分式光源颜色照度测量仪器的 滤光片优化设计

袁 琨^{1,2} 严惠民¹ 金尚忠² 王 聪³

¹ 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027
² 中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018
³ 深圳汉谱光彩科技有限公司, 广州 深圳 518000

摘要 介绍了一种光电积分式光源颜色照度测量仪器中的滤光片优化设计方法。研究了实际测量时由于光束斜入射导致的滤光片光谱透射率与垂直入射的不同所导致的设计误差,建立了漫入射有色玻璃透射率的修正模型,提出了一种基于修正模型的滤光片匹配方法,应用于颜色照度测量仪器的设计。设计了实验对匹配结果进行验证,实验结果证明修正模型有效地减小了设计误差。

关键词 测量;滤光片匹配;漫入射透射率修正;颜色照度测量

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0812002

Filter Optimization Design for Photoelectric Integral Light Source Color Illumination Instrument

Yuan Kun^{1,2} Yan Huimin¹ Jin Shangzhong² Wang Cong³

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China
² College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China
³ Shenzhen Chinaspec Optics and Color Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China

Abstract Filter optimization design method of photoelectric integral light source color illumination instruments is introduced. The design error is caused by the beam oblique incidence which leads to the filter spectral transmittance different from that under of normal incidence. The diffuse incident colored glass transmittance correction model is established. The model is applied to the color illuminance measurement instrument design. Experiments are designed to verify the matching results, and the experimental results demonstrate that the correction model reduces the design error effectively.

Key words measurement; filter match; diffuse incident transmittance correction; color illumination measurement

OCIS codes 120.2440; 120.4640; 120.5240

1 引 言

光电积分式的光源颜色照度仪器中,光敏器件的相对光谱响应应满足卢瑟条件。测量被测光源的三刺激值 X 、 Y 、 Z ,再根据三刺激值计算出照度、色坐标和色温等光色参数。为了得到符合卢瑟条件的滤光片,一般采用多片有色玻璃组合来匹配实现^[1-3]。在光源颜色照度测量仪器的设计中,被测光源发出的光首先通过余弦校正器,再通过滤光片,

然后入射到光敏器件。在确定了光敏器件和余弦校正器后,需要根据光敏器件的光谱响应和余弦校正器的光谱透射率计算出所需滤光片的光谱透射率,通过多片有色玻璃组合,采用全滤光片法或部分滤光片法得到符合要求的滤光片组^[4-5]。首先测量出有色玻璃库中各种有色玻璃的光谱透射率曲线,然后通过若干种有色玻璃进行匹配,选择最佳有色玻璃组合^[6-8]。但是,对有色玻璃的光谱透射率曲

收稿日期: 2013-02-25; **收到修改稿日期**: 2013-03-22

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAF06B02)

作者简介: 袁 琨(1982—),男,博士研究生,主要从事光谱检测仪器方面的研究。E-mail: 10930014@zju.edu.cn

导师简介: 严惠民(1961—),男,博士,教授,主要从事光学测量技术和仪器等方面的研究。E-mail: yhm@zju.edu.cn

线进行测量时,常用垂直入射的测量方法。而光源颜色照度测量仪器在实际测量时,光线并不是垂直入射至滤光片中,而是以不同方向漫入射至滤光片内。漫入射和垂直入射情况下光线在滤光片中通过的光程不同,导致有色玻璃漫入射光谱透射率与垂直入射光谱透射率存在较大差异^[9]。本文提出了一种基于修正模型的滤光片匹配方法,并设计了实验进行验证。

2 有色玻璃的光谱透射率修正

如图1所示,对于厚度为 d 的有色玻璃,垂直入射的 a 光线透射率为 $T(\lambda)$,根据光通过均匀介质时的布格-朗伯(Bouguer-Lambert)吸收定律^[10],与法线方向成 θ 角入射的 b 光线的光谱透射率为 $T(\lambda)1/\cos\theta$ 。因此用垂直入射的透射率作为依据进行计算在实际测量时会产生较大误差。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时的归一化相对光谱透射率有较大区别。所以必须将垂直入射测量条件下得到的有色玻璃光谱透射率按照实际使用情况进行修正,才能得到更准确的匹配结果。

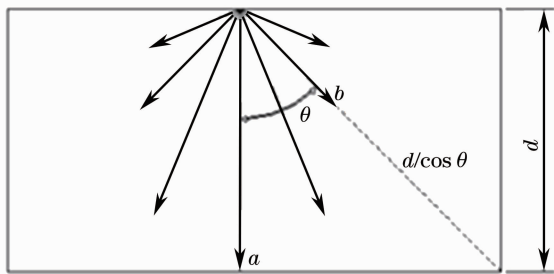


图1 光线沿不同方向入射有色玻璃
Fig. 1 Light incidence along different directions

光线透射余弦校正器后,入射至有色玻璃内部。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,而且在有色玻璃表面一点入射有色玻璃内部的光为近似朗伯分布的点光源。

在图3中,对于圆柱形滤光片,由上表面任意一点 P 入射至滤光片内部的光辐射通量参照图4可以用下式来表示:

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

式中 M_e^{pi} 为滤色片表面单位面积处的入射光辐射通量,可近似认为 M_e^{pi} 为一常数; P 点可认为是点光

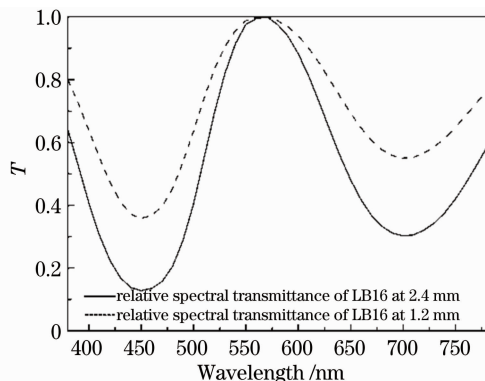


图2 不同厚度有色玻璃的归一化光谱透射率曲线
Fig. 2 Normalized spectral transmittance curves of colored glass of different thicknesses

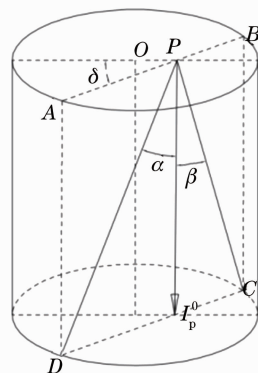


图3 圆柱形滤光片
Fig. 3 Cylindrical filter

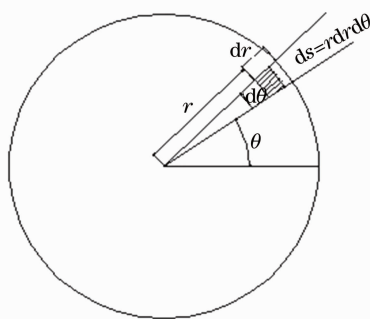


图4 圆柱形滤光片光入射面
Fig. 4 Light incident surface of cylindrical filter

源,光强角分布近似为朗伯体,其任意方向光辐射通量为

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

式中 I_p^0 为入射光辐射通量的法向光强,由朗伯定理易知其大小为 $\frac{1}{\pi} M_e^{pi}$; ϵ 为 I_p^ϵ 与法向的夹角; I_p^ϵ 为有色玻璃表面 P 点入射光与法向成 ϵ 角度方向的光强。如图5所示,由 P 点入射的光从下表面的出射

光辐射通量 ϕ_p 和从 $ABCD$ 平面出射光辐射通量 M_c^{ABCD} 之间的关系为

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

式中 δ 为 $ABCD$ 平面与参考轴所成角度。

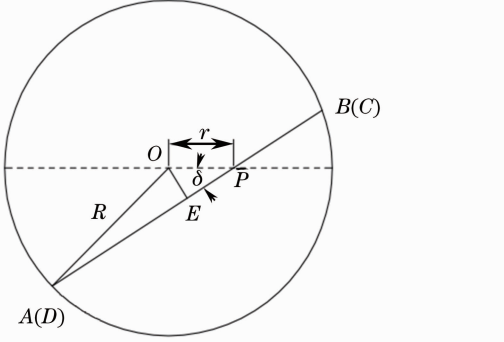


图5 滤光片的 $ABCD$ 平面

Fig. 5 $ABCD$ plane of the filter

如图3所示, $ABCD$ 平面内与法向成 $+\alpha$ 和 $-\beta$ 角度内的光线可以到达探测器表面。根据朗伯比尔定律, 厚度为 d_0 时, 对于特定波长 λ , 从 P 点入射后经过垂直光谱透射率为 T_{λ_0} 的滤色片在滤光片下表面整体出射光辐射通量可表示为

$$\begin{aligned} \phi_p &= \int_0^{2\pi} \int_{-\beta}^{\alpha} I_p^\epsilon T_{\lambda_0} \frac{d}{d_0 \cos \epsilon} d\epsilon d\delta = \\ &= \frac{1}{\pi} M_c^{pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\beta}^{\alpha} \cos \epsilon T_{\lambda_0} \frac{d}{d_0 \cos \epsilon} r d\epsilon d\delta. \end{aligned} \quad (4)$$

由图4和图5可知,

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctan\left(\frac{\sqrt{R^2 - r^2 \sin^2 \delta} + r \cos \delta}{d}\right), \\ \beta &= \arctan\left(\frac{\sqrt{R^2 - r^2 \sin^2 \delta} - r \cos \delta}{d}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

对于整片滤光片, 特定波长 λ 处的光线漫入射情况下的光谱透射率可以用下式表示, 把常数项 K 提出, K 的取值不会影响光谱透射率的相对分布:

$$T_\lambda = K \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_{-\beta}^{\alpha} \cos \epsilon T_{\lambda_0} \frac{d}{d_0 \cos \epsilon} r d\epsilon d\delta dr d\theta. \quad (6)$$

在对颜色照度计的 X 、 Y 、 Z 三种滤光片进行匹配时, 对已有的有色玻璃在垂直入射条件下测得的光谱透射率曲线需要按照(6)式进行修正, 得到该有

色玻璃在漫入射情况下的特定厚度、特定尺寸的光谱透射率曲线, 再以此为基础进行有色玻璃的匹配。

3 滤光片匹配方案的计算方法

滤光片匹配的的目的是找到合适的有色玻璃, 采用不同的厚度组合, 使滤光片归一化后的光谱透射率和所需滤光片的匹配误差尽量小。Y 滤光片的匹配误差 f_1 可表示为^[11]

$$f_1 = \frac{\int_{380}^{780} |S(\lambda)_{SPD} - V(\lambda)| d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda) d\lambda} \times 100\%, \quad (7)$$

式中 $V(\lambda)$ 是 CIE1931 规定的光源色三刺激值中 Y 的光谱响应曲线, $S(\lambda)_{SPD}$ 为归一化后的探测器和滤光片综合相对光谱灵敏度。

在实际设计中需要考虑到如下几个因素: 首先, 有色玻璃的种类是有限的。以德国肖特玻璃为例, 其有色玻璃生产的种类共有 40 种。由于数量有限, 则可以采用穷举法对有色玻璃透射率进行匹配运算, 不会导致过大的计算量。其次, 为了保证光敏器件测量的信噪比, 有色玻璃组合成滤光片的光谱透射率不能过低。如果片面追求低 f_1 误差, 会导致厚度过大、透射率过低。这个指标要根据实际的探测器性能、系统测量性能综合决定。另外, 为了保证实际加工时质量稳定, 单片有色玻璃的厚度应大于 0.2 mm, 单片厚度公差为 ± 0.01 mm。具体匹配过程如下。

准备不同品种的有色玻璃片, 使用分光光度计按照垂直入射测量方法测量出每片有色玻璃的光谱透射率 $T_0(\lambda)$, 并测量出该片有色玻璃的厚度 d_0 。按照下式计算出每种有色玻璃在不同厚度 d 情况下的垂直光谱透射率 $T_d(\lambda)$:

$$T_d(\lambda) = T_0(\lambda) \frac{d}{d_0}, \quad (8)$$

如果有色玻璃库中有 n 种材料的有色玻璃, 取每种有色玻璃最小厚度 0.2 mm, 计算其厚度每增加 0.1 mm 后该种有色玻璃的光谱透射率, 每种有色玻璃最大的厚度为 4 mm。计算后可以得到 $n \times 39$ 矩阵 $\mathbf{T}(\lambda)$:

$$\mathbf{T}(\lambda) = \begin{bmatrix} T_{0.2}^1(\lambda) & T_{0.3}^1(\lambda) & T_{0.4}^1(\lambda) & \cdots & T_{3.9}^1(\lambda) & T_4^1(\lambda) \\ T_{0.2}^2(\lambda) & T_{0.3}^2(\lambda) & T_{0.4}^2(\lambda) & \cdots & T_{3.9}^2(\lambda) & T_4^2(\lambda) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ T_{0.2}^n(\lambda) & T_{0.3}^n(\lambda) & T_{0.4}^n(\lambda) & \cdots & T_{3.9}^n(\lambda) & T_4^n(\lambda) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 $T_d^n(\lambda)$ 为序号为 n 的有色玻璃厚度为 d 时在波长 λ 处的垂直入射光谱透射率, n 为该有色玻璃编号。按照 (6) 式计算出修正后的光谱透射率曲线。按照之前的限定条件: 如果有色玻璃库中有 n 种有色玻璃, 取有色玻璃最小厚度 0.2 mm, 计算以厚度间隔 0.1 mm 为标准, 每种有色玻璃最大的厚度为 4 mm。计算后可以得到 $n \times 39$ 矩阵 $T'(\lambda)$:

$$T'(\lambda) = \begin{bmatrix} T_{0.2}^1(\lambda) & T_{0.3}^1(\lambda) & T_{0.4}^1(\lambda) & \cdots & T_{3.9}^1(\lambda) & T_4^1(\lambda) \\ T_{0.2}^2(\lambda) & T_{0.3}^2(\lambda) & T_{0.4}^2(\lambda) & \cdots & T_{3.9}^2(\lambda) & T_4^2(\lambda) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ T_{0.2}^n(\lambda) & T_{0.3}^n(\lambda) & T_{0.4}^n(\lambda) & \cdots & T_{3.9}^n(\lambda) & T_4^n(\lambda) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 $T_d^n(\lambda)$ 为序号为 n 的有色玻璃厚度为 d 时在波长 λ 处的漫入射光谱透射率, n 为该有色玻璃在有色玻璃库中的编号。至此得到了 n 种有色玻璃在 39 种不同厚度情况下的光谱透射率曲线。

对不同种类、不同厚度的有色玻璃, 以穷举法进行组合, 计算其归一化后的光谱透射率, 并计算其与目标光谱透射率之间的 f_1 匹配误差, 对其进行筛选。筛选的标准为: f_1 匹配误差尽量小, 并且整体光谱透射率尽量大。在颜色照度计的设计中, 光谱透射率的峰值大于 30% 即可接受。如果对结果不满意, 可以尝试更多种有色玻璃的数量组合, 并减小厚度间隔, 会带来更大的计算量, 但是有可能得到 f_1 误差更小或相同 f_1 误差滤光片整体透射率更高的匹配方案。

4 实验验证

采用不经漫入射修正的垂直入射匹配算法和应用漫入射修正的漫入射匹配算法对 Y 滤光片进行匹配实验, 得到了如表 1 和表 2 所示的两种结果。

表 1 漫入射算法滤光片匹配结果

Table 1 Diffuse incident filter matching results

Label of colored glass	LB6	LB16	BG39	JB450
Thickness /mm	1	2.4	0.3	1
f_1 error /%	5.6			

表 2 垂直入射算法滤光片匹配结果

Table 2 Normal incident filter matching results

Label of colored glass	QB23	CB1	BG39	JB450
Thickness /mm	1	1.2	0.3	0.2
f_1 error /%	5.0			

为了对滤光片匹配的测试结果进行检验, 设计了两种实验方法对漫入射滤光片匹配结果和垂直入

射滤光片匹配结果进行检验。

4.1 对不同光源进行测试

首先, 对两种匹配方案的颜色照度计探头用卤钨灯进行标定。然后设计一个暗室, 用下列标准光源对颜色照度计探头直射, 获得测量结果, 以测量结果中的 Y 值为例, 对两种匹配结果做评价。实验结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 垂直入射滤光片匹配方案实验结果

Table 3 Experimental results of normal incident filter matching

Light source	Y (standard value) /lx	Y (tested value) /lx	Error /%
Tungsten lamp	3689	3662	0.731
Xenon lamp	7233	7121	3.234
F11 lamp	2702	2882	10.362
White LED	973	1035	6.372

表 4 漫入射滤光片匹配方案测量结果

Table 4 Experimental results of diffuse incident filter matching

Light source	Y (standard value) /lx	Y (tested value) /lx	Error /%
Tungsten lamp	3689	3670	0.515
Xenon lamp	7233	7001	3.207
F11 lamp	2702	2791	3.293
White LED	973	992	1.952

从以上检测结果可知, 由于对探头在卤钨灯下进行定标, 所以两种方案在卤钨灯下的测试结果均偏差较小。但是在不同光谱分布的光源条件测量下, 采用漫入射匹配算法的颜色照度计其测量结果要优于垂直入射的匹配算法。

4.2 验证被测滤光片的漫入射光谱透射率

为了测量滤光片的漫入射透射率, 设计了如

图6所示的装置。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。被测滤光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、滤光片、测量光纤之间的隔离。

用光纤光谱仪测量滤光片透射光的光谱分布 $T_1(\lambda)$ 。然后将被测滤光片取出，直接测量出光孔光

谱分布 $T_2(\lambda)$ 。被测滤光片的光谱透射率为 $T = \frac{T_1(\lambda)}{T_2(\lambda)}$ 。再计算滤光片匹配的目标光谱曲线和被测滤光片光谱曲线的匹配误差。测量结果如表5所示。从结果可知，采用漫入射匹配算法的匹配结果和实验计算结果有更好的一致性。

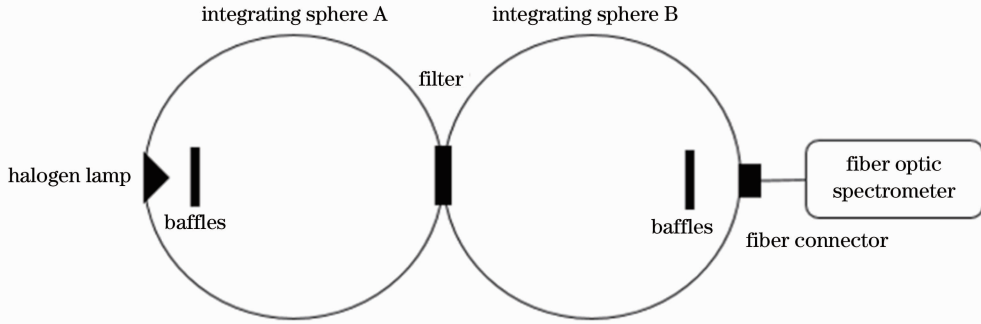


图6 测量被测滤光片的漫入射光谱透射率的实验装置

Fig. 6 Experimental setup for diffuse incident spectral transmittance measurement of the filter

表5 漫入射透射率测量实验结果

Table 5 Experimental results of diffuse incident transmittance measurement

Filter matching method	f_1 error tested by equipment /%	f_1 error calculated /%
Calculated according to the diffuse incident algorithm	5.831	5.6
Calculated according to the normal incident algorithm	10.226	5.0

5 结 论

实验结果表明，在光电积分式光源颜色照度测量仪器的设计中，若以有色玻璃的垂直入射光谱透射率为依据进行滤光片的匹配，会导致漫入射情况下的实际测试效果和计算结果有较大的偏差。应该对有色玻璃的垂直入射光谱透射率进行修正，以此为依据进行滤光片的设计。修正后的结果减小了实际测试结果和计算结果之间的误差。

参 考 文 献

- 1 Wu Jizong, Ye Guanrong. Optical Radiation Measurement [M]. Beijing: China Machine Press, 1989. 339-401.
吴继宗, 叶关荣. 光辐射测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989. 339-401.
- 2 Teng Xiujin. Color Measurement Technology [M]. Beijing: China Metrology Press, 2007. 260-262.
滕秀金. 颜色测量技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007. 260-262.
- 3 Du Xinzhen, Xu Xiaoli, Zhang Fengshan. Analysis of the factors affecting the measurement accuracy of the colorimeter [J]. J. Beijing Institute of Machinery, 2004, 19(3): 41-45.
杜新征, 徐小力, 张凤山. 影响色差计测量精度的因素分析[J].

北京机械工业学院学报, 2004, 19(3): 41-45.

- 4 Ye Wei, Xu Yu, Zhang Yuwei. Study on optical system of the mirror type brightness chromaticity sensor [J]. Chinese J Sensors and Actuators, 2010, 23(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]. 传感技术学报, 2010, 23(2): 205-208.
- 5 Han Yuming, Xu Xiaoli, Liang Fuping. Colorimeter filter matching technology research [J]. J. 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.
- 6 Chen Jiasheng, Luo Xiaobin, Ge Xuefeng, et al.. Design of a new color sensor [J]. Chinese J Sensors and Actuators, 2003, 16(4): 467-470.
陈家胜, 罗小彬, 葛雪峰等. 一种新型颜色传感器的设计[J]. 传感技术学报, 2003, 16(4): 467-470.
- 7 Lei Xu, Tong Ziquan, Zhang Xiaobing, et al.. Improved mathematical model to determine the accuracy of color measuring system [J]. Chinese J Scientific Instrument, 1997, 18(2): 183-188.
雷 旭, 童子权, 张晓冰, 等. 提高测色系统精度的数学模型的确定[J]. 仪器仪表学报, 1997, 18(2): 183-188.
- 8 Jiang Yuejuan. 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.
- 9 Jiang Yuejuan. 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精度的影响[J]. *光学技术*, 2001, 27(2): 113-114.
- 10 Xu Haisong. *Color Information Engineering* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005. 199-201.
- 徐海松. *颜色信息工程* [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005. 199-201.
- 11 Ye Guanrong, Ying Zijian. The filter method is used to correct the relative spectral response of photodetector [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1986, 7(1): 36-44.
叶关荣, 应子健. 用全滤色片法进行光探测器相对光谱响应的修正[J]. *计量学报*, 1986, 7(1): 36-44.

栏目编辑: 何卓铭