

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0303-05

白光干涉色的计算机仿真及应用

刘兆栋¹ 边疆² 王军¹ 陈磊¹

(¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)
²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 为了得到白光干涉颜色与样品厚度等物理量的对应关系,研究了给定光程差条件下干涉色的标准计算机表示方法。基于 CIE 1931 XYZ 色度系统,由已知的标准照明体相对光谱功率分布,计算了迈克尔孙干涉仪白光干涉场中每一点的 XYZ 值,处理了将其转换为红绿蓝(RGB)系统时出现的负值问题,实现了颜色的连续性显示。给出了理想波面的白光等厚、等倾干涉图,并采用真实干涉波面以及实际光源得到了仿真白光干涉图。该方法可以在已知光源光谱功率分布的情况下,方便迅速地得到干涉场的干涉色分布,从而为解决玻璃应力测量、薄膜厚度测量等问题提供了依据。

关键词 光学测量;干涉色;三刺激值;迈克尔孙干涉仪;计算机仿真

中图分类号 O432.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0303

Computer Simulation and Application of White Light Interference Color

Liu Zhaodong¹ Bian Jiang² Wang Jun¹ Chen Lei¹

(¹ School of Electrical Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)
² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract In order to obtain the relationship between the white light interference color and the physical quantities of a sample such as the thickness, the standard computer representation of an interference color on a given optical path difference is studied. Based on the CIE1931XYZ color space, we use the known spectral power distribution of standard illuminant to calculate XYZ values of each point in Michelson interference field. The problem of the negative RGB values which convert from XYZ values is isolated to realize the continuity of color display. The simulated white light equal-thickness and equal-inclination interferograms of an ideal wavefront are demonstrated. A real interference wavefront and a real lamp are used to obtain simulated white light interferograms. This method makes it easy to obtain the interference color distribution of an interference field on the condition that the spectral power distribution is known. It provides the basis for glass stress measurement, film thickness measurement, and other related field.

Key words optical measurement; interference color; tristimulus values; Michelson interferometer; computer simulation

1 引 言

当两束单色相干光发生干涉时,将产生一系列明暗相间的干涉条纹。而白光发生干涉时,则产生由紫到红的一系列彩色条纹。这些由干涉作用形成的颜色,称为干涉色。白光光源的波长在 380~780 nm 范围内,它的辐射包含了整个可见光谱区域的连续光谱成分。发生干涉时,各波长将产生各自

的一组干涉条纹,当光程差为零时,各波长的零级条纹完全重合,条纹对比度最大。随着光程差及干涉级数的增加,各波长的干涉条纹彼此逐渐错开,这种错开使得条纹对比度逐步下降,到一定程度时,干涉条纹消失。

目前,干涉色得到了非常广泛的应用,例如在地质测量中,通过对矿石光谱干涉色的测试来分析矿

收稿日期: 2010-04-20; 收到修改稿日期: 2010-06-03

作者简介: 刘兆栋(1984—),男,博士研究生,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: liuzhaodong6@hotmail.com

导师简介: 陈磊(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光学计量测试与光电智能化仪器等方面的研究。

E-mail: chenleiy@126.com

物质中的成分;应力控制是玻璃生产工艺中极其重要的一环,利用干涉色可以准确测定玻璃应力,从而解决玻璃生产中应力测量与控制的难题;还可以利用干涉色对薄膜的厚度进行测量,不同干涉色对应着不同的光程差值,通过与标准色的比对,便可得出被测薄膜的厚度。

已有学者从色度学的角度对干涉色进行了研究,并找到了光程差与刺激值之间的关系。A. Ajovalasit 等^[1]利用彩色 CCD 采集白光干涉图,并标定出双折射晶体延迟量和白光干涉图红绿蓝(RGB)值之间的定量关系。T. Kato^[2]通过主波长等能白光点的原理得到了干涉色的比色图表,并用于矿物质成分的测量中,得到了比较满意的结果。Carole C. Montarou 等^[3]利用分光光度计测量白光干涉色的 X, Y 色度坐标值,并在 XYZ 色度系统中标定了白光干涉色的 X, Y 色度坐标值和延迟量的对应关系。A. Miks 等^[4~7]提出了白光干涉仪测量微小的相位变化,并推导出了复色光下利用干涉仪测量相位的理论公式。本文采用国际发光明委员会(CIE)的标准照明体,改进了 Kato 的变换方法,利用计算机对干涉场的干涉色进行了模拟。

2 原 理

人眼的颜色视觉是视网膜上三种锥体细胞对 380~780 nm 范围的光辐射可选择性吸收而产生的。这种可选择性的颜色刺激可用光谱功率分布(SPD)函数来表示。由于不同的人,三种锥体细胞的光谱功率分布有所不同,故为了统一色度学中的评价标准,1931 年 CIE 在 RGB 系统的基础上,改用三个设想的原色 X, Y, Z 建立了一个新的色度系统^[8]。同时将匹配等能光谱各颜色的三原色数值标准化,即将波长 555 nm 的 $\bar{y}(\lambda)$ 值标准化为 1, 所得匹配等能光谱的三原色刺激值,定名为“CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值”。

对于干涉场中某点 (u, v) 的三刺激值计算公式为^[4]

$$\begin{cases} X(u, v) = \int_0^{\infty} \bar{x}(\lambda) I(u, v, \lambda) W(\lambda) d\lambda \\ Y(u, v) = \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) I(u, v, \lambda) W(\lambda) d\lambda, \\ Z(u, v) = \int_0^{\infty} \bar{z}(\lambda) I(u, v, \lambda) W(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 为 CIE 规定的标准色度观察者的光谱三刺激值, $W(\lambda)$ 为发光物体辐射的相对光谱功率分布, $I(u, v, \lambda)$ 为干涉场中的光强分布。

由(1)式可以看出,只要能够得到干涉场的光强分布 $I(u, v, \lambda)$, 便可以很方便地计算出干涉场的三刺激值。下面以迈克耳孙干涉仪为例来说明。迈克耳孙干涉仪如图 1 所示,干涉光强的计算公式为

$$I(u, v) = a(u, v) + b(u, v) \cos[k\Delta(u, v)], \quad (2)$$

式中 $a(u, v)$ 为干涉场的背景光强, $b(u, v)$ 为干涉条纹的幅值调制度, k 为波数, $\Delta(u, v)$ 为光程差。(2)式也可以表示为

$$I(u, v) = I_0(u, v) \{1 + c(u, v) \times \cos[k\Delta(u, v)]\}, \quad (3)$$

式中 $I_0(u, v) = a(u, v)$, $c(u, v)$ 为干涉图的对比度,当干涉图对比度最佳时,即 $c(u, v) = 1$, (3)式化简为

$$I(u, v) = I_0(u, v) \{1 + \cos[k\Delta(u, v)]\}, \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式,可得到迈克耳孙干涉仪干涉场中三刺激值的计算公式。归一化后消去 $I_0(u, v)$, 可以得到整个干涉场中干涉色三刺激值近似的表达式

$$\begin{cases} X(u, v) = \sum_i \bar{x}(\lambda_i) W(\lambda_i) \{1 + \cos[k\Delta(u, v)]\} \\ Y(u, v) = \sum_i \bar{y}(\lambda_i) W(\lambda_i) \{1 + \cos[k\Delta(u, v)]\} \\ Z(u, v) = \sum_i \bar{z}(\lambda_i) W(\lambda_i) \{1 + \cos[k\Delta(u, v)]\} \end{cases} \quad (5)$$

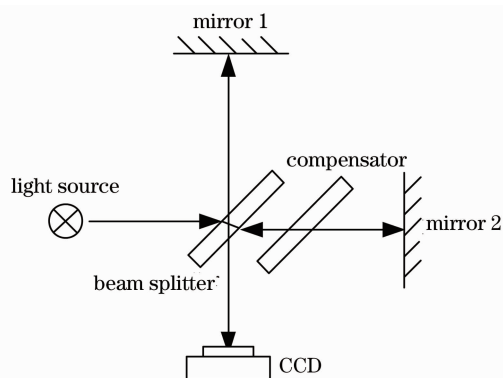


图 1 迈克耳孙干涉仪示意图

Fig. 1 Schematic of Michelson interferometer

由(5)式可得到干涉场中三刺激值,但要在计算机上显示出干涉场的干涉色,还需要将三刺激值转换为 RGB 值。为了避免 CIE1931RGB 系统中的 $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ 光谱三刺激值和色品坐标那样出现负值,引入了 CIE1931 XYZ 系统。在确定了三原色和等能白点在 RGB 系统和 XYZ 系统中的坐标

值之后,可以求得 RGB 系统和 XYZ 系统三刺激值之间的转换公式为^[9]

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.41845 & -0.15865 & -0.08283 \\ -0.09116 & 0.25242 & 0.01571 \\ 0.00092 & -0.00255 & 0.17859 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (6)$$

3 计算机仿真

同一物体在不同的照明体或光源的照明下呈现出不同的颜色,这一因素给颜色测量与国际交流带来极大困难。因此,为了统一颜色评价的标准,便于比较,CIE 针对颜色的测量和计算推荐了几种标准照明体和标准光源,包括标准照明体 A, B, C, D, E 和标准光源 A, B, C 等。CIE 对“光源”和“照明体”做出了不同的定义:“光源”是指能发光的物体辐射体;“照明体”具有特定的光谱功率分布,而这种光谱功率分布不是必须有一个具体的光源直接提供,也不一定要用某种光源来实现,它可以由表格的形式给出。在这里,均采用 CIE 标准照明体作为计算机的模拟对象。

由(5)式可以知道,只要能够确定干涉场的光强分布,便可得到与之相对应的干涉色。假设参考镜与测试镜均为平面镜,两镜的夹角为 θ , CCD 接收面能接收到的图像宽度为 l , 零光程差位置与最大光程差位置的横向距离为 d , 如图2所示。由于 CCD

离散采样,所以光程差是由 $-d \times \tan \theta$ 到 $(l-d) \times \tan \theta$ 线性离散地映射到 CCD 接收面上,这样可以很方便地得到干涉场中每一点的光程差值。CIE1931 标准色度系统的三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 可以在 CIE1986 年发布的标准中得到^[10]。CIE 标准照明体 A, B, C, D 的相对光谱功率分布,也可以从同样标准中得到。这里所仿真的白光波段在 380~830 nm 之间,采样间隔为 1 nm。

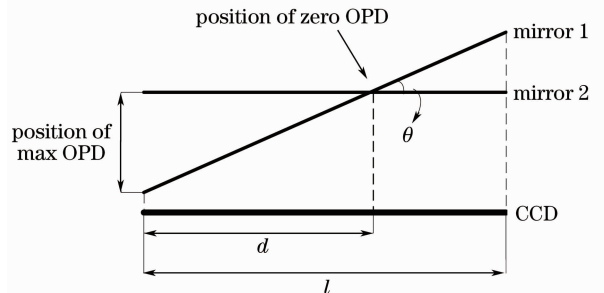


图2 迈克耳孙干涉仪干涉场示意图
Fig. 2 Schematic of Michelson interferometer interference field

将这些值代入(5)式后便可得到干涉场中某点的三刺激值。利用(6)式可以得到该点的 r, g, b 值,如图3所示即为标准照明体 A 和 D65 的 RGB 值在色品坐标中的分布,由于麦克斯韦颜色三角形并不能完全覆盖色品坐标,使得变换后的 r, g, b 值出现了负值,而计算机不能显示这些负的 r, g, b 值,所以需要对这些负值单独进行处理。

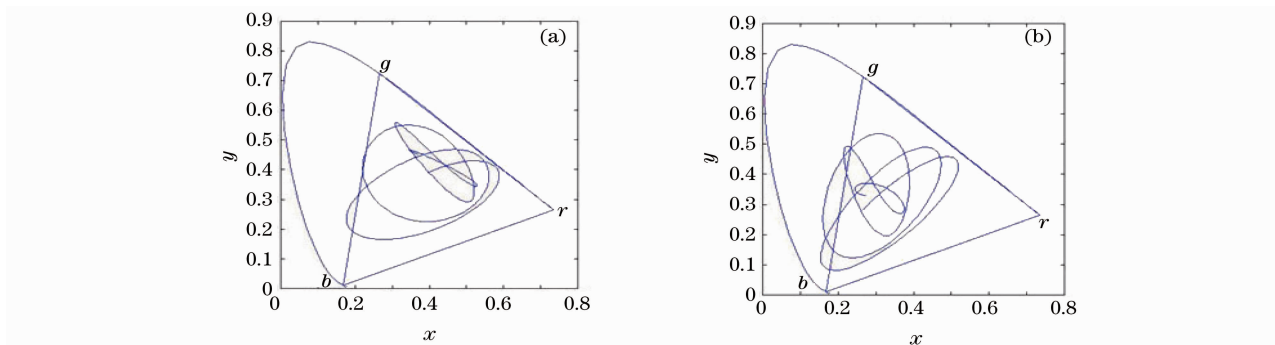


图3 标准照明体 A(a)和 D65(b)所得干涉场的三刺激值在色品图中的分布

Fig. 3 Distributions of standard illuminant tristimulus values of A (a) and D65 (b) in chromaticity diagram

由图3可以看出,在对标准照明体的仿真过程中,部分干涉色的三刺激值超过了麦克斯韦三角形的色域范围,超出的部分主要集中在 g, b, gb 混合这三个区域,需要对这些范围内的值进行处理。该方法的思路如图4所示,由等能白光点 E 向色品图上一色样点 C 引直线,并延长至光谱轨迹相交与 P 点,交点 P 的光谱色波长即是所求颜色的主波长。颜色的主波长大致相当于颜色感觉中颜色的色调,

恒定主波长线上的颜色并不对应于恒定的色调感觉,利用主波长线与 gb 连线的交点 C' 来代替 C 的颜色值。在实际处理过程中,Kato 采用的是找出 r, g, b 三分量中最小的值,将 r, g, b 值分别加上这个最小值,从而使得三分量都不小于0,但这种方法可能会造成颜色变化的不连续。这里采用的是直接忽略掉小于零的 r 分量,即将 r 分量赋值为0,而用 g, b 两分量代替原有的 r, g, b 三个分量。这样做不仅

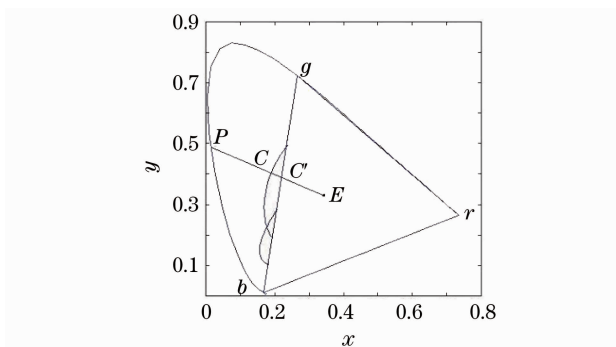


图 4 主波长示意图

Fig. 4 Schematic of dominant wavelength

保留了原始的颜色,还能很好地解决颜色的连续性问题。

最后需要将 r, g, b 值量化至 $0 \sim 255$, 得到 R, G, B 值。找出 r, g, b 值三分量中的最大值 M, r, g, b 值线性拉伸至 $0 \sim 255$ 的范围内^[11]的表达式为

$$\begin{cases} R = \frac{r}{M} \times 255 \\ G = \frac{g}{M} \times 255. \\ B = \frac{b}{M} \times 255 \end{cases} \quad (7)$$

4 仿真结果

利用计算机对该过程进行了仿真,程序主要分成计算和显示两部分。计算部分是根据标准观察者光谱三刺激值计算出干涉场中每点的三刺激值。显示部分将计算出的光谱三刺激值转换成计算机能够

显示的 RGB 值。程序流程图如图 5 所示。

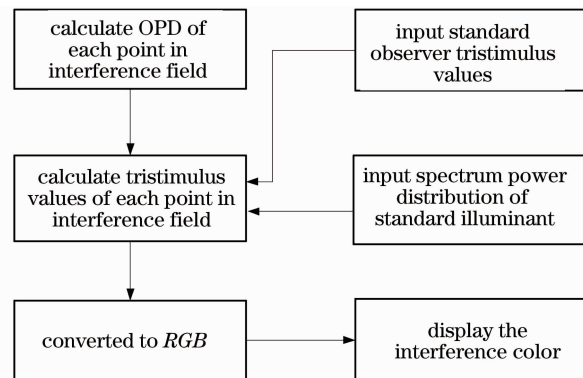


图 5 程序流程图

Fig. 5 Program flow chart

模拟标准光源 D65, CCD 宽度为 512 pixel, 参考镜与测试镜之间的夹角为 $0.5''$ 。参考镜的宽度为 60 mm, 零光程到参考镜最大光程端的距离为 40 mm 干涉场的干涉色如图 6(a) 所示。图 6(b) 是利用该算法模拟的标准照明体 D65 照明下的牛顿环。图 7(a) 为利用 ZYGO 干涉仪得到的实际波面的干涉图, 图 7(b) 为该波面的三维相位分布, 图 7(c) 是利用该算法得到的该干涉场标准光源 D65 的干涉色。

为了对实际光源的干涉色进行模拟分析, 采用 Andor 公司的 SR-303i 光谱仪对一卤钨灯的光谱功率分布函数进行了测量, 测量结果如图 8 所示。由此光谱功率分布得到的干涉场的仿真干涉色如图 9 所示。

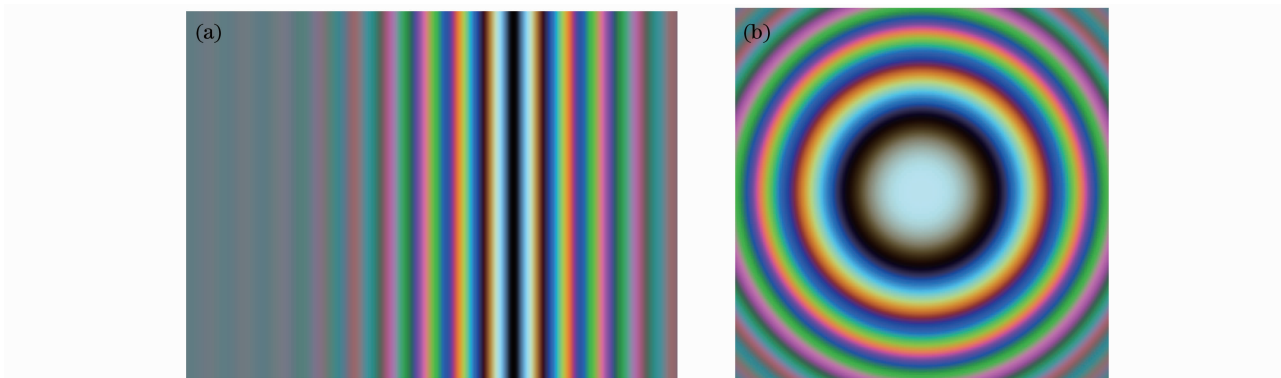


图 6 标准照明体 D65 所得干涉场的干涉色。(a)等厚干涉, (b)等倾干涉

Fig. 6 Interference color of standard illuminant D65. (a) interference color of equal thickness interference field, (b) interference color of equal inclination interference field

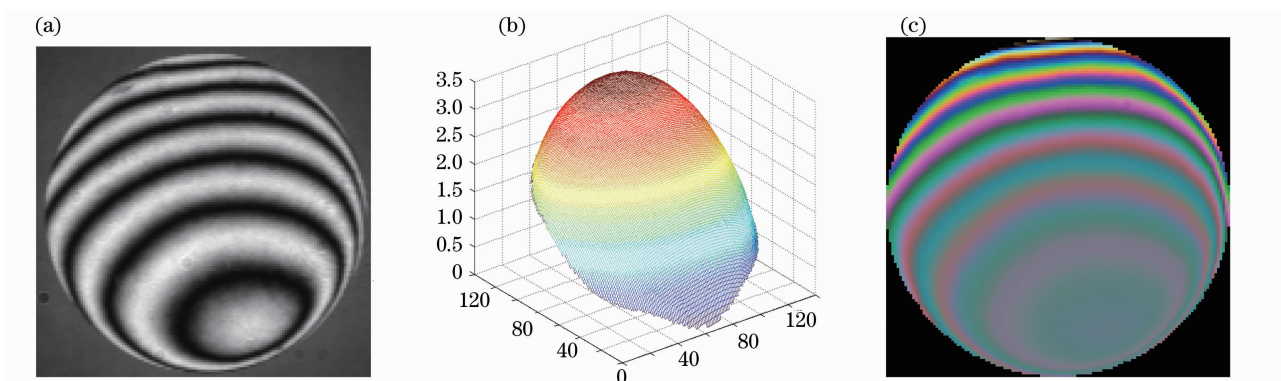


图7 (a)实际波面干涉图,(b)该波面的三维相位分布,(c)利用该算法得到的此干涉场的干涉色

Fig.7 (a) Real interferogram, (b) wavefront data, (c) interference color of this interference field

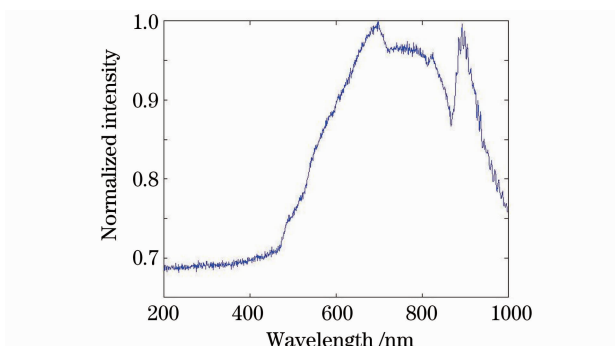


图8 卤钨灯的光谱功率分布函数

Fig.8 Spectrum power distribution of a halogen lamp



图9 卤钨灯干涉场的仿真干涉色

Fig.9 Simulated interference color of the halogen lamp

5 结 论

提出一种可以很方便地进行干涉色的仿真模拟的算法。在玻璃应力测量过程中,能够提供标准色卡,通过所测试的干涉色与标准色的对比,可以计算得到玻璃的应力值,从而解决了玻璃生产中应力控制这一难题。改变光程差值还可以实现薄膜厚度测量中干涉色偏色的模拟。将该方法应用于白光扫描显微干涉测量表面微观轮廓的课题研究,根据光源的光谱密度分布及预先给定的光学表面微观轮廓,

可以模拟实际白光干涉图及干涉条纹扫描过程,为白光显微移相干涉算法的设计、优化及误差分析提供了仿真的实验数据。

参 考 文 献

- 1 A. Ajovalasit, S. Baronne, G. Petrucci. Towards RGB photoelasticity: full-field automated photoelasticity in white light [J]. *Exp. Mech.*, 1995, **35**(3): 193~200
- 2 T. Kato. A method to synthesize interference color chart with personal computer [J]. *J. Geol. Soc. Japan*, 2001, **107** (1): 64~67
- 3 Carole C. Montarou, Thomas K. Gaylord, Ricardo A. Villalaz *et al.*. Colorimetry-based retardation measurement method with white-light interference [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41** (25): 5290~5297
- 4 A. Miks, J. Novak, P. Novak. Colorimetric method for phase evaluation [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, **23**(4): 894~901
- 5 J. Novak, A. Miks, P. Novak. Evaluation of small phase changes of wave field using colorimetric analysis [C]. *SPIE*, 2006, **6158**: 615801
- 6 A. Miks, J. Novak, P. Novak. Colorimetric method for phase evaluation in optical testing [C]. *SPIE*, 2005, **5965**: 596517
- 7 P. Novak, J. Novak, A. Miks. Phase evaluation using interference of polychromatic light and colorimetric analysis [C]. *SPIE*, 2005, **5856**: 254~264
- 8 Su Datu. *Optical Measuerent Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 59~62
苏大图. *光学测试技术* [M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996. 59~62
- 9 Xu Haisong. *Colorimetry Information Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005. 46~52
徐海松. *颜色信息工程* [M]. 杭州:浙江大学出版社, 2005. 46~52
- 10 Jing Qicheng, Jiao Shulan, Yu Bailin. *Colorimetry* [M]. Beijing: Science Press, 1979. 304~353
荆其诚, 焦书兰, 喻柏林. *色度学* [M]. 北京:科学出版社, 1979. 304~353
- 11 Ye Chunfang, Liu Yuling, Yu Feihong. Realization of active X control of CIE chromatic spaces [J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(3): 27~32
叶春芳, 刘玉玲, 俞飞鸿. CIE色度空间的控制实现 [J]. *光学仪器*, 2005, **27**(3): 27~32