

文章编号: 0253-2239(2003)06-0724-5

# 宽锥角光束对分色合色膜色再现性能的影响\*

杨立功 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 考虑了在 CIE  $L^* a^* b^*$  3D 色空间中以色立体作为综合评价分色合色膜色再现性能的标准, 分析了宽锥角光束入射时分色合色膜空间角度特性对图像色再现质量的影响, 从优化色立体体积出发提出了用预补偿的方法来优化膜系设计, 提高了宽锥角光束入射下膜系的色再现性能。

**关键词:** 色度学; 液晶投影显示; 色再现性能; 分色合色膜系; CIE LAB 色空间

中图分类号: O423.3 文献标识码: A

## 1 引 言

对于高质量液晶投影显示系统, 除了要保证高对比度、高亮度外, 图像的色再现性能也是最直观的指标之一。具体评价色再现性能的参量有颜色均匀性、色纯度、颜色亮度等。在原理上, 当由几何像差引起的色差经过校正已经很小时, 液晶投影显示系统的色再现性能就由分色合色系统和光源的光谱特性所决定。在一般分析中, 总是先选定照明光源, 这时分色合色系统的光谱特性将直接决定最终显示图像的色彩性能。分色合色膜的光谱特性和角度特性决定了分色合色系统能否在颜色分解、传递和还原过程中对色彩产生尽量小的畸变。具有较高色再现性能的分色合色膜应保证再现的颜色有尽可能宽的色域范围、尽可能高的三基色纯度和颜色亮度, 使显示图像尽可能真实地再现原图像。

实际上, 为了实现高亮度显示, 总希望有尽可能大的数值孔径的光束能够通过系统成像; 同时, 为了使结构更加紧凑, 也会因液晶片尺寸越来越小和光路的缩短使得进入到分色合色系统的光束的孔径角增大。于是入射光束形成了一个空间立体角, 其中除了其轴心光线以外, 其他光线的入射角均不等于膜系的设计角, 因而导致反射或透射光谱发生改变, 膜系的再现颜色发生畸变, 从而严重影响投影图像的色彩质量。为了在宽锥角光束入射时仍能得到高色再现性能的分色合色膜系, 应综合考虑各项因素, 对膜系的色再现性能进行合理评价, 并采用不同方

法对膜系设计参量进行改进和优化。

根据分色合色膜系在锥光束入射时的角度特性, 提出在 CIE LAB 色空间中用简化色立体作为评价膜系色再现性能的标准, 然后分析了宽锥光束对分色合色膜系的色再现性能的影响, 并从色度学角度提出在实际的分色合色系统的设计中可以采用预补偿的方法来得到锥光束入射的分色合色膜系, 以提高图像的色彩质量, 最后针对实例给出了优化结果。

## 2 色再现性能评价方法和标准的确定

在表征色再现性能的各项指标中, 最关心的是色域范围、颜色均匀性、色浓度(纯度)和颜色亮度。根据人的视觉特点, 观察者对颜色浓度(纯度)的感受不仅单纯与色饱和度有关, 而且与该颜色的亮度也有关。这就是说, 当某种颜色的亮度比周围环境光弱时, 即使该颜色有很高的浓度, 也不能令观察者感受到这种颜色所具有的色纯度。这一点对于液晶投影显示很重要, 因为在很多实际场合显示的图像都会受到环境光的影响。因此为了正确评价膜系的色再现性能, 以及在后面的膜系设计中能包含这些因素, 将同时考察由膜系得到的三基色及白色的色饱和度、亮度和均匀性等指标。液晶投影显示系统的分色合色机理属于色相加体系, 所以只要分析膜系对三基色和白色的色再现质量, 就可以确定膜系对其它颜色的色再现性能。在研究中, 选用在 CIE1976  $L^* a^* b^*$  均匀色空间中对这些指标进行计算和评价。其中,  $L^*$  表示颜色亮度,  $a^*$  和  $b^*$  表示色彩度。

在分析计算中, 对所用光源的光谱分布和已求得的分色膜系反射率或透射率光谱进行等波长间隔采样  $n$  个点, 用矢量可表示为

\* 浙江省产业化基金资助课题。

E-mail: yanglig@zju.edu.cn

收稿日期: 2002-04-27; 收到修改稿日期: 2002-06-21

$$\begin{aligned} P_\lambda &= [P_1 \cdots P_n], \quad R_{\text{red}} = [r_1 \cdots r_n], \\ R_{\text{blue}} &= [b_1 \cdots b_n], \quad T_{\text{green}} = [g_1 \cdots g_n], \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $P_\lambda$  为光源的光谱矢量,  $R_{\text{red}}, R_{\text{blue}}, T_{\text{green}}$  分别表示分色膜系得到的红色、蓝色的反射率矢量以及绿色的透射率矢量。根据 1931CIE-XYZ 三刺激值计算方法, 我们可以分别求得 R、G、B 三色的三刺激值。下式计算红色的 X 刺激值:

$$X_{\text{red}} = ([P_1 \cdots P_n] \times [r_1 \cdots r_n]) [\hat{x}_1 \cdots \hat{x}_n]^T \times (\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}) / n, \quad (2)$$

(2) 式中  $[\hat{x}_1 \cdots \hat{x}_n]$  是 CIE-XYZ 色匹配函数, 符号表示两个同维向量对应元素相乘。其它刺激值和其它颜色的刺激值的计算方法与此相同。将红、绿、蓝三色的三刺激值相加即可得到白色的三刺激值。根据求得的刺激值以及参考光源的刺激值  $X_0, Y_0, Z_0$ , 经过色空间坐标的换算<sup>[1]</sup>, 可以得到三基色和白色在 CIE1976  $L^* a^* b^*$  均匀色空间中的相应坐标值  $(L_r^*, a_r^*, b_r^*), (L_g^*, a_g^*, b_g^*), (L_b^*, a_b^*, b_b^*)$  和  $(L_w^*, a_w^*, b_w^*)$ 。计算中, 选择 CIE-C 标准光源作为参考光。

现在可以在 CIE LAB 色空间中仔细分析锥光束入射时分色膜系对再现颜色的色均匀性和色稳定性的影响。当锥光束入射时, 总的反射或透射光谱曲线决定了三基色的主色调在色空间的位置, 由于光束中包含不同角度的光线, 而且是分散在空间一定体积内的, 这就会引起出射光的颜色在主色调周围存在一个波动范围。而改变整个锥光束的锥角大小时, 总的光谱曲线改变, 三基色和白色的色坐标随之改变, 改变量反映整个色域的稳定性的影响。在色空间中, 可以用两种颜色之间的空间距离即色差值  $\Delta E$  来表征色均匀性和色稳定性, 但计算时参考基准不同。根据最新 CIE94 标准<sup>[2]</sup>中对  $L^* a^* b^*$  色差公式的修正, 这里给出三基色色  $\Delta E$  差计算公式:

$$\Delta E_{\text{CH}}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L_{ab}^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H}\right)^2}, \quad (3)$$

式中,  $\Delta L_{ab}^*, \Delta C_{ab}^*$  和  $\Delta H_{ab}^*$  分别表示在  $L^* a^* b^*$  空间中计算得到的颜色之间的亮度差、色彩度差和色调角差,  $k$  和  $S$  是相应的干扰因子和权重因子。

此外, 还确定了在 CIE LAB 色空间中对色再现性的评价和优化的依据。正如在 2D 色品图中评价、优化色再现性能的方法, 是使色三角的三个顶点尽可能的向均匀色空间 CIE 标准的红绿蓝三个方向移动, 使色三角的面积尽可能的大, 本文采用了在均匀色空间中比较色立体的体积大小的方法作为评价、优化膜系的色再现性能的衡量标准, 色立体的大小直观表明了膜系再现颜色的色域范围, 而且同

时包含了颜色亮度信息和浓度信息。对于色相加体系, 色立体是近似由六个平面四边形包围的空间立体, 该立体的八个顶点对应红(R)、绿(G)、蓝(B)三基色, 白色(W), 黄(Y)、蓝绿(C)、品红(M)三个二级色和色空间坐标原点, 即黑色(O)。可以将色立体分割成六个四面体分别计算来得到总体积, 但具体计算过程相当繁复<sup>[3]</sup>。考虑到在实际评价中三基色的特性为主要评价对象, 所以在色空间中忽略了二级色对色立体体积的贡献, 近似用由三基色、白色和原点构成的六面体体积大小作为色再现性能的衡量标准, 同样可以得到较好的评价优化结果, 而计算和表示则更加简单直观。该六面体如图 1 所示。由此我们得到了第一个重要的色度评价依据:

$$C_1 = V_{\text{hexahedron}}(O, R_{\text{lab}}, G_{\text{lab}}, B_{\text{lab}}, W_{\text{lab}}), \quad (4)$$

式中  $O, R_{\text{lab}}, G_{\text{lab}}, B_{\text{lab}}, W_{\text{lab}}$  分别表示黑色、三基色和白色坐标顶点。

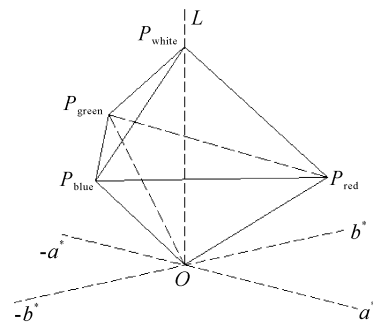


Fig. 1 Simplified color gamut in CIE LAB space

为了在优化膜系时更准确地衡量膜系的色再现质量, 又补充计算了红、绿、蓝三基色的色彩度之和作为第二条评价依据。在 CIE  $L^* a^* b^*$  色空间中, 三基色的色彩度之和可以表示为

$$C_2 = \sum_{j=r,g,b} C_j^* = \sum_{j=r,g,b} \sqrt{(a_j^*)^2 + (b_j^*)^2}, \quad (5)$$

### 3 宽锥角光束对分色膜系色再现性能的影响

图 2 是实际系统中锥光束倾斜入射到一个分色膜系上的简单表示,  $N$  是膜层界面法线;  $\gamma_0$  是光锥轴心和界面法线  $N$  之间的夹角, 也是分色膜系设计时的光线入射角。依据先前研究过程中建立起来的锥光束入射条件下分色膜系光谱特性的分析模型<sup>[4]</sup>, 就可以得到入射锥光束时二色性膜系的反射率  $R_{\text{Conic}}$ 。在该文中将宽锥角光束对分色膜色再现性能的影响分析简化为对  $S$  偏振光的长波通和短波通膜系进行分析, 分析方法同样适于其他合色膜

系。在液晶投影显示系统中,分色膜系常按照  $45^\circ$  入射角设计,所以以  $45^\circ$  入射角为例进行计算分析。在分析中,长波通膜系(即反蓝膜系)的初始结构为玻璃/膜/空气结构,即

$$\text{Glass}/\left(\frac{H}{2}\text{L}\frac{H}{2}\right)^{10}/\text{Air},$$

短波通膜系(即反红膜系)的初始结构为

$$\text{Glass}/\alpha\left(\frac{L}{2}\text{H}\frac{L}{2}\right)\beta\left(\frac{L}{2}\text{H}\frac{L}{2}\right)^{10}\alpha\left(\frac{L}{2}\text{H}\frac{L}{2}\right)/\text{Air},$$

高(H)、低(L)折射率材料分别为  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$ 。试验前所有的膜系均经过膜系优化,以消除未经优化

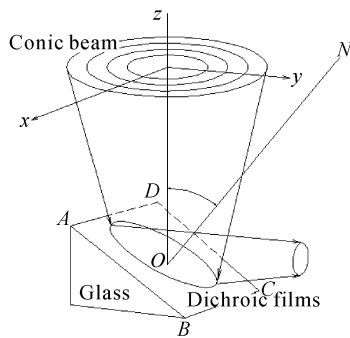


Fig. 2 The conic beam incident to the dichroic filter

膜系的波纹对色差的影响<sup>[5]</sup>。同时,为了便于比较,设计膜系时过渡带宽度均为 10 nm。

图 3(a)是根据仿真模型计算出来的宽锥角 ( $2\theta$ ) 光束下的反射率光谱与设计的理想光谱的比较,入射主光线角为  $45^\circ$ ,可以看见光谱曲线变化很大。图 3(b)、图 3(c)分别是锥角增加时,膜系再现色在色品图和色空间中的变化趋势。从图中可以看到,随着锥角的增大,分色膜系再现色的色三角面积缩小,而考虑了颜色亮度因素的色立体体积也缩小很快,当锥角增大到  $30^\circ$  时,色体积值就只有平行光束时的 80% 左右。这表明分色膜系的色再现随着锥角增大而显著减少,这对显示图像是很不利的。

为了分析入射角度对色均匀性的影响,首先分析了光束锥角较小、光束整体偏离设计角度时的情形,图 4(a)和图 4(b)分别给出了相对于光束轴心光线偏离角的大小对红、绿、蓝三色色差的影响,以及不同锥角对分色膜系色稳定性的影响。从图 4(a)可以看出,按照国家标准局<sup>[6]</sup>的标准,当入射光线偏离膜系的设计角度超过  $\pm 2^\circ$  时,三基色的变化程度已被明显察觉。图 4(b)表明当锥角大于时,分色膜的色稳定性就开始变得很差。

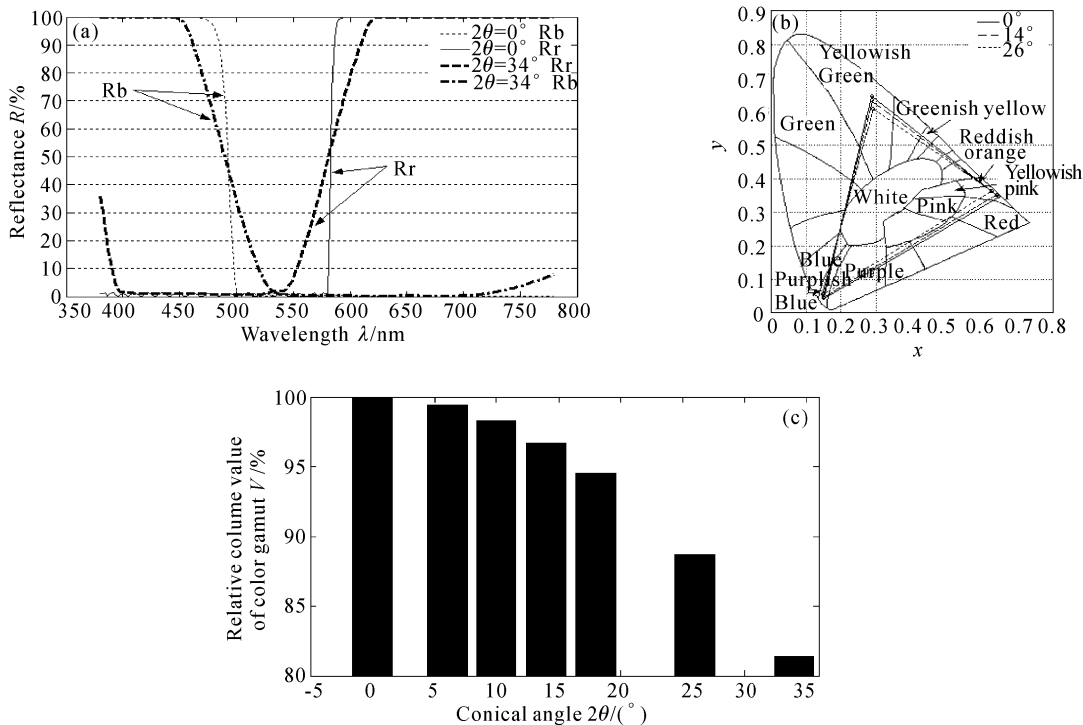


Fig. 3 (a) Reflectance spectra of dichroic filters under 0 and  $34^\circ$  conic angle ( $2\theta$ ); (b) Variance of color triangle for different conic angles ( $2\theta$ ) incidence; (c) Variance of color gamut for different conic angles ( $2\theta$ ) incidence

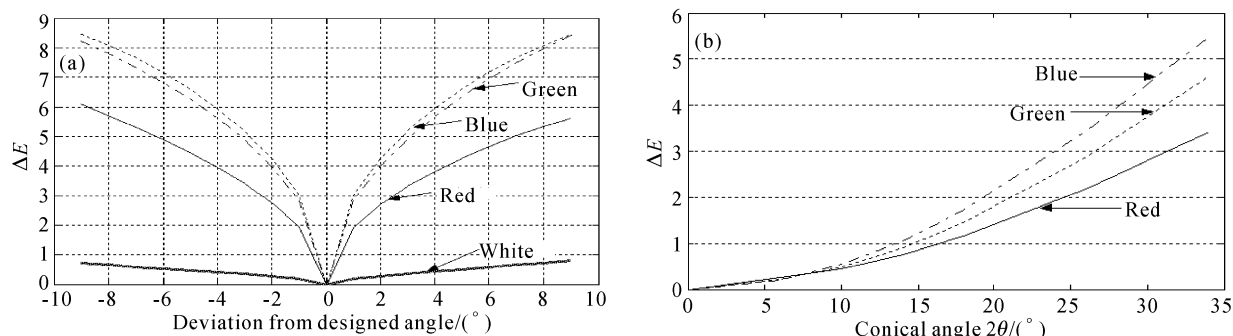


Fig. 4 (a) Relationship between the deviation  $\Delta E$  of incident angles and the uniformity of reproduced colors; (b) Relationship between beam's conic angle and the stability of reproduced colors

#### 4 宽锥角光束入射下的膜系优化

从上面的分析可知,随着入射光束锥角的增大,分色膜系再现颜色的各项指标都变得很差。要提高色再现性能,必须对分色合色膜系进行优化。首次从优化色立体体积出发,提出了用预补偿的方法来达到接近要求的高色再现性能。基于这种思想,结合前面提出的两条评价的依据,以截止波长 $\lambda_c$ 为优化对象,对反蓝和反红两种分色膜系组成的合色系统的色再现性能进行优化。优化目标设定为截止波长分别为 500 nm 和 580 nm 时理想分光条件时的

色再现性能,此时色立体体积值为  $2.506 \times 10^5$ ,三基色色浓度总和为 401.99。设计入射锥光束的锥顶角为  $26^\circ$ 。图 5 给出了优化结果。图 5(a)是按色立体体积最大化标准优化的结果,图 5(b)是按三基色色浓度总和标准的优化结果。图中 $\lambda_{sB}$ , $\lambda_{sR}$ 分别表示反蓝分色膜系和反红分色膜系的截止波长,黑点表示所要达到的目标值。表 1 是得到的最佳截止波长和最佳优化值。可见这种预补偿法可以较好地提高膜系的色再现性能,而对膜系的设计、制备又没有特殊要求。

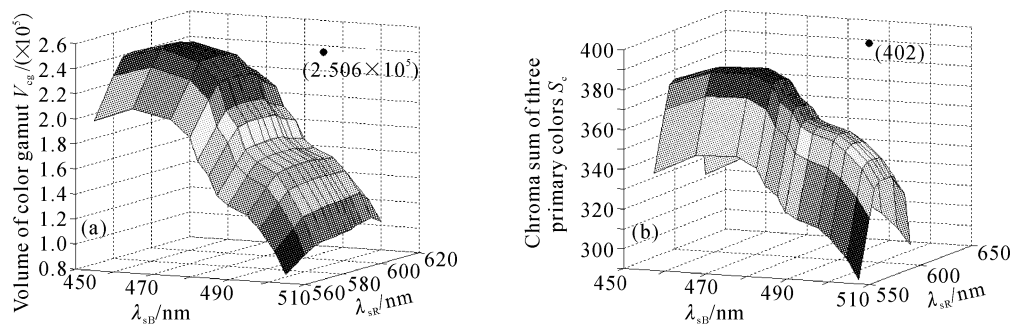


Fig. 5 (a) Optimized result of color reproducibility according to maximum volume of color gamut; (b) Optimized result according to the chroma sum of three primary colors

Table 1 Comparison of color reproducibility between the target value in filter's design and the optimized value in precompensation method

	Conical angle / ( $^\circ$ )	Volume of color gamut	Chroma sum of primary colors	$\lambda_{sB}/\text{nm}$	$\lambda_{sR}/\text{nm}$
Target value	0	$2.506 \times 10^5$	401.99	500	580
Optimized value	26	$2.459 \times 10^5$	388.23	475	570

**结论** 本文提出了在 CIE LAB 色空间中以简化的色立体为依据来评价液晶投影显示系统中分色合色膜的色再现性能,并详细分析了宽锥角光束入射对膜系的色再现性能的影响。针对在宽锥角光束入射条件下提高膜系的再现色质量,从色度学角度提出

了预补偿的方法,给出了优化设计结果。这种方法不仅效果明显,而且简单可行。

#### 参 考 文 献

- 1 Wyszecki G, Stiles W. *Color Science*. 2nd ed., New York: Wiley, 1982. 130~168

- 2 Zhang Xuemei, Wandell B A. Color image fidelity metrics evaluated using image distortion maps. *Signal Processing*, 1998, **70**(3):201~214
- 3 Meyer G, Peting L, Rakoczi F. A color gamut visualization tool. *Proc. Color Imaging Conf.*, IS&T and SID, Scottsdale, Arizona, 1993. 197~201
- 4 Yang Ligong, Gu Peifu. Research on Spatial Angle Characteristic of Dichroic Filters in LC Projection Display. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2003, **32**(1):117~120 (in Chinese)
- 5 Gu Peifu, Zheng Zhenrong. Color Excitation Purity and Color Uniformity of Liquid Crystal Projection Display. *Opto-Electronic Engineering* (光电工程), 2002, **29**(5):30~32 (in Chinese)
- 6 Wu Jizong, Ye Guanrong. *Radiation Measurement* (光辐射测量). Beijing: China Machine Press, 1989. 297~301 (in Chinese)

## Effect of Broad Conic Angle Incidence on Color Reproducibility of Dichroic Filters

Yang Ligong Gu Peifu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 27 April 2002; revised 21 June 2002)

**Abstract:** A reproducible color gamut in CIE  $L^* a^* b^*$  3D color space is proposed as a performance index for evaluating the reproducibility of dichroic filters used in color separation/recombination system. Using this method, the effect of broad conic angle incidence on the color reproducibility from the special angle characteristic of dichroic filters is analyzed. And from the viewpoint of optimizing the volume of the color gamut, a precompensation method is presented to optimize the filters' design parameter so that the color reproducibility of the films will be promoted remarkably when the incident beam is broad conic angle beam.

**Key words:** colorimetry; liquid crystal projection display; color reproducibility; dichroic filter; CIE LAB color space