

文章编号 2097-1842(2024)03-0648-13

## 基于 Philips 棱镜 3CMOS 相机的 光学设计及其光谱优化

陈塑湜<sup>1,2</sup>, 吕博<sup>1\*</sup>, 刘伟奇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对彩色数码相机高成像质量以及高色准的需求, 本文研究了基于 Philips 棱镜的 3CMOS 相机的光学系统设计以及相机光谱优化方法。通过对 Philips 棱镜进行光路建模, 优化了棱镜的结构参数。在保证全内反射以及出射窗口大小的条件下, 减小了系统的体积, 并由此设计了 Philips 棱镜 3CMOS 相机光学系统。其视场角为 45°, 相对孔径为 1/2.8, 在 110 lp/mm 的奈奎斯特采样频率下, 系统的 MTF 全视场全波段均大于 0.4。基于色度学基本原理建立了 Philips 棱镜相机的矢量成像模型, 分析了由光线入射角度变化造成的薄膜光谱偏移, 提出了宽光束下光谱偏移的修正模型。利用该模型设计并优化了相机中的 4 组光学薄膜。通过光路仿真实验以及色差分析, 基于优化后的相机光学系统的平均色差降低了 15.8%, 像面颜色不均匀性降低了 60%。结果表明: 本文设计的光学系统拥有良好的成像质量, 优化后的相机光谱实现了良好的颜色性能以及颜色均匀性。

**关键词:** 光学设计; 3CMOS 相机; 色度学; 相机光谱优化

中图分类号: O432.3; O435.2 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0155

## Optical design and spectral optimization of Philips prism 3CMOS camera

CHEN Su-hao<sup>1,2</sup>, LV Bo<sup>1\*</sup>, LIU Wei-qi<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: jllvbo@163.com

**Abstract:** According to the demand for high imaging quality and high chromaticity in color digital cameras, we investigated the optical system design and camera spectral optimization methods of 3CMOS cameras based on Philips prisms. By constructing the model of the optical path of the Philips prism, the structural parameters of the prism were optimized. The volume of the system was reduced while ensuring total internal reflection and exit window size. Based on this method, the Philips prism 3CMOS camera optical system was designed, with a field of view angle of 45° and a relative aperture of 1/2.8. The system's MTF was greater

收稿日期: 2023-08-31; 修订日期: 2023-09-22

基金项目: 高分专项装备预研项目 (No. GFZX0403260206)

Supported by Equipment Pre-research of GF Project (No. GFZX0403260206)

than 0.4 in the full field of view and full band at Nyquist sampling frequency of 110 lp/mm. Subsequently, based on the fundamental principles of chromaticity, a vector imaging model for Philips prism cameras was established. The problem of thin film spectral shift caused by changes in light incidence angle was analyzed, and a correction model for spectral shift under wide beam conditions was proposed. Four sets of optical thin films in the camera were designed and optimized using this model. Through optical path simulation experiments and color error analysis, based on the optimized camera spectrum, the average color error of the system was reduced by 15.8%, and the color non-uniformity of the image plane was reduced by 60%. The results indicate that the designed optical system has good imaging quality, and the optimized camera spectrum achieves good color performance and uniformity.

**Key words:** optical design; 3CMOS camera; colorimetry; camera spectral optimization

## 1 引言

近年来,随着机器视觉技术的迅猛发展,相机也逐渐成为人们工作生活中的重要工具。从早期的单色胶片相机到如今的彩色数字相机,不断涌现的技术革新为图像捕捉和处理带来了质的飞跃。目前的彩色数字相机主要通过 Bayer 滤光片和基于棱镜的多传感器两种方案实现。其中, Bayer 滤光片是将多种颜色的滤光片排列在传感器上,通过颜色插值的方法获取完整的彩色图像。由于其成本低廉,采用 Bayer 滤光片的彩色相机已成为目前市场的主流,但是该技术也存在一定局限性,例如较低的光谱能量效率,插值算法带来的低成像清晰度,以及颜色偏差<sup>[1]</sup>。而基于棱镜的多传感器方案中,目前应用最为广泛的是基于 Philips 棱镜的 3CCD/3CMOS 方案。其利用棱镜分光以及三组探测器,分别采集 RGB 三通道颜色信息<sup>[2]</sup>。虽然该技术中相机装配复杂且需要非常高的精度,但是凭借优秀的图像质量以及准确的色彩,其在高速成像,三维测量,光谱分析,医学成像和工业质检等领域中具有广泛应用<sup>[3-7]</sup>。

在 Philips 棱镜 3CMOS 相机的设计中,由于棱镜结构的加入,系统对镜头的后截距要求较高,此外,棱镜中的全内反射约束也限制了镜头的体积以及相对孔径,从而加大了光学设计难度<sup>[6-8]</sup>。为此,本文研究了 Philips 棱镜结构的优化方法,使其在满足探测器耦合以及全内反射条件下,对棱镜体积进行优化。

由于相机的颜色特性由其光谱响应决定,而 Philips 棱镜 3CMOS 相机的光谱特性则主要取决于棱镜中的两组二向色薄膜的光谱特性。根据卢瑟条件,理想的颜色记录要求相机的光谱响应是颜色匹配函数的线性组合<sup>[9]</sup>,并且当相机的光谱响应越接近颜色匹配函数时,颜色再现的准确性就越高。因此,需要通过相机光谱优化以及颜色校正方法来提高相机的颜色性能<sup>[10]</sup>。本文基于色度学的基本原理,结合 3CMOS 相机的光学特性,对薄膜光谱进行了优化设计,以提高 3CMOS 相机颜色的准确度。此外,在薄膜膜系设计过程中,由于介质膜的光学性质,薄膜的透射光谱会随着光线入射角度的变化而变化。这可能会导致不同视场的成像光线对应的薄膜透过率光谱发生偏移<sup>[11]</sup>。而光谱的偏移则会导致像面上各个位置对应的 RGB 三通道光谱响应各不相同,从而造成相机颜色响应的不均匀性。为了解决该问题,本文从光学薄膜以及 Philips 棱镜的光学特性出发,通过光线追迹以及光学建模来修正光谱偏移对相机颜色性能的影响,利用修正后的优化方法提高相机的颜色均匀性。

## 2 光学系统设计

### 2.1 Philips 棱镜 3CMOS 相机的光学结构

基于棱镜分光的 3CMOS 相机光学系统通常由成像物镜,分光棱镜以及三组探测器组成,如图 1 所示。其中物镜负责收集成像光线以及进行像差校正,分光棱镜负责将光束分成 RGB 三个波段,通过三组探测器接收,再通过图像处理融合成

彩色图像。根据相机的使用需求,成像物镜的视场角  $2\omega$  应为  $45^\circ$ , 相对孔径应大于  $1/3$ , 畸变小于  $1\%$ 。所选用的探测器对角线长度约为  $29.5\text{ mm}$ , 由此可以计算出镜头的焦距约为  $35.5\text{ mm}$ , 又知探测器的像元大小为  $4.5\ \mu\text{m}$ , 因此, 其奈奎斯特采样频率约为  $110\text{ lp/mm}$ 。为了保证成像质量, 在该频率下 MTF 值应不低于  $0.3$ 。综上所述, 3CMOS 相机的成像物镜设计指标如表 1 所示。

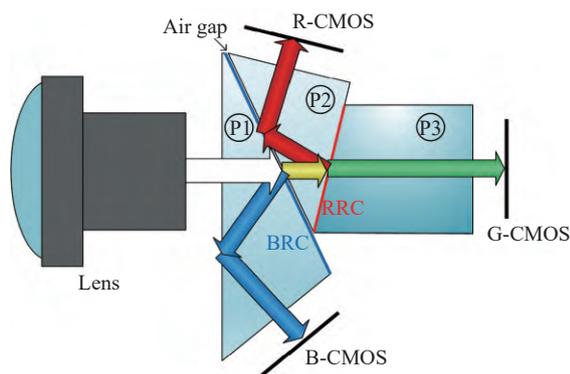


图 1 3CMOS 相机光学系统

Fig. 1 3CMOS camera optical system

表 1 光学系统设计指标

Tab. 1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Field of view: $2\omega$	$45^\circ$
Focal length	$35.5\text{ mm}$
F#	$<3$
Distortion	$<1\%$
Incident angle	$<6\text{ degree}$
MTF@110 lp/mm	$>0.3$

3CMOS 相机中常用的分光棱镜是 Philips 棱镜, 它由三组棱镜组成, 其 Y-Z 方向的结构如图 2 (彩图见期刊电子版) 所示。其中棱镜 P1 和棱镜 P2 之间留有非常小的空气间隙, 光线在玻璃与空气界面上根据第一个二向色膜 BRC 的光谱特性被分成反射和折射两组光线。其中: 反射光再次经过棱镜 P1 的全内反射, 从棱镜射出并进入探测器 B; 折射光线则继续进入棱镜 P2。棱镜 P2 和棱镜 P3 通常是采用胶合的方式, 并在胶合面设置第二个二向色膜 RRC。光线在该界面上再次被分为两个方向: 经过棱镜 P2 的全内反射进入探测器 R, 以及经过棱镜 P3 进入探测器 G。

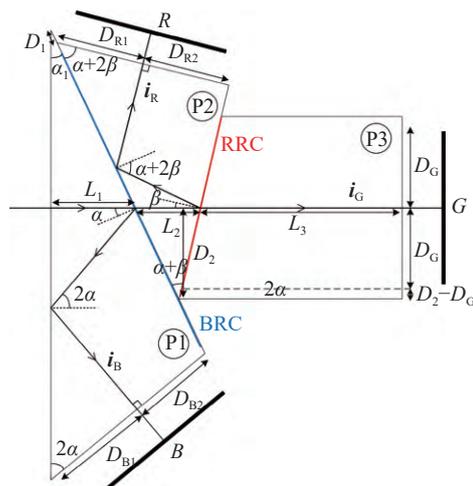


图 2 Philips 棱镜结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Philips prism structure

## 2.2 棱镜结构优化方法

由于 RGB 三通道的成像光线在棱镜中的光程相同, 且反射不会带来像差, 因此在相机镜头的设计过程中, 分光棱镜可以等效为一个矩形棱镜<sup>[12]</sup>, 只需要考虑其材料, 等效长度以及孔径参数。在镜头设计时, 一方面希望棱镜的尺寸尽可能的小, 以降低相机的体积与重量, 并且希望有较短的等效长度, 以减小棱镜色散的影响。另一方面, 还需要保证像面大小能够覆盖探测器, 且棱镜内各表面不能遮挡成像光线, 因此棱镜的截面又不能太小。此外, 为了满足全内反射条件, 还需要对棱镜的两组楔角进行优化。棱镜结构的优化方法主要有优化变量、评价函数以及优化约束 3 个部分。

优化变量: 图 2 中  $L_1, L_2, L_3$  分别为零视场主光线在棱镜 P1, P2, P3 内的长度, 棱镜总长  $L=L_1+L_2+L_3$ 。 $\alpha$  为零视场主光线在棱镜 P1 的薄膜 BRC 上的入射角度,  $\beta$  为主光线与棱镜 P2 和 P3 胶合面 RRC 薄膜上的入射角度。如图 2 所示, 蓝, 红通道的主光线  $i_B, i_R$  在射出棱镜时, 其出射表面应与主光线垂直。根据 3 组光线的传播路径以及光线与表面间的几何关系知, 在给定总长  $L$  的情况下, 可以由  $L_1, L_2, \alpha, \beta$  计算出棱镜 Y-Z 截面内的所有参数, 因此, 这 4 个参数即可作为棱镜结构优化的变量。

评价函数: 取蓝色通道的主光线  $i_B$  在棱镜 P1 上的出射点, 计算该点到棱镜两个顶点的距离, 如图 2 所示, 分别记为  $D_{B1}$  和  $D_{B2}$ , 对  $i_R$  同样计算出  $D_{R1}$  和  $D_{R2}$ , 则蓝, 红通道的有效出射面高度可分别记为  $2 \times \min(D_{B1}, D_{B2})$  和  $2 \times \min(D_{R1}, D_{R2})$ 。相对

应的绿色通道的有效出射面高度则可以取红蓝两通道中的最小值,记为  $2 \times \min(D_{B1}, D_{B2}, D_{R1}, D_{R2})$ 。由优化变量计算出该数值,即可对出射面高度进行优化。此外,对于折射率为  $n$  的玻璃材料,其全内反射角为  $\theta_0 = \arcsin(1/n)$ 。蓝色通道的主光线  $i_B$  在棱镜 P1 中第二次反射时入射角  $\theta_B = 2\alpha$ ,红色通道的主光线  $i_R$  在棱镜 P2 中第二次反射时入射角为  $\theta_R = \alpha + 2\beta$ ,  $\theta_B$  和  $\theta_R$  均需要大于  $\theta_0$ ,并且还要考虑边缘光线相对于主光线的孔径角,所以要求  $\theta_B$  和  $\theta_R$  尽可能大,以保证全部视场内的光线均能满足全内反射条件。最终的评价函数可写为  $\varepsilon = \min(D_{B1}, D_{B2}, D_{R1}, D_{R2}) + k \times \min(\theta_B, \theta_R)$ ,通过调整权重系数同时优化入射角度以及有效出射面高度。

**优化约束:** 为了保证合理的棱镜结构,并给装调留出一定的调整空间,需要约束图中  $D_1 > 0$ ,以及  $D_2 - D_G > 0.5 \text{ mm}$ 。

最终棱镜结构的优化过程为,给出一个默认的总长  $L$ ,变量  $L_1, L_2, \alpha, \beta$  的初始值及其取值范围,由此计算评价函数以及约束所需的各项参数。在满足各项约束的前提下,通过优化算法寻找一组最优的  $L_1, L_2, \alpha, \beta$ ,使评价函数达到最大值,优化出射面高度以及光线入射角度,得到的变量即为该约束下最优的棱镜结构参数,之后对其进行等比放大,使有效出射面高度满足需求,即可确定最终的棱镜结构。

在优化得到一组合理的棱镜结构参数后,即可将棱镜总长作为玻璃厚度,将出射面高度作为  $Y$  方向的孔径代入光学系统中。根据全内反射条件,玻璃的折射率越大,则全内反射角越小,故需要选择折射率较大的玻璃以满足全内反射条件。但是折射率越大的玻璃通常会带来更大的色散,综合考虑,需要选择相对高折射率且低色散的玻璃材料。同时过高的折射率也可能导致蓝色通道的边缘光线在棱镜 P1 中第一次反射时就达到全内反射,因此棱镜的玻璃材料还需要在光学设计过程中根据光线追迹数据进行调整。

### 2.3 棱镜优化结果

所选 CMOS 探测器  $Y$  方向高度约为 18.4 mm,考虑到边缘光线的入射角度以及像面与棱镜的间距,棱镜出射面高度需要大于 22 mm,以留出调整余量。通过优化设计以及结构缩放之后,在棱

镜总长为 44 mm 时,三通道出射面高度均能大于 22 mm,同时两组入射角  $\theta_B$  和  $\theta_R$  均大于  $50^\circ$ ,且棱镜结构参数满足约束。具体如表 2 所示。

表 2 Philips 棱镜参数  
Tab. 2 Philips prism parameters

Parameter	Value
$\alpha$	25.1 mm
$\beta$	12.9 mm
$L_1$	10.6 mm
$L_2$	8.1 mm
$L$	44 mm
$\theta_B$	$50.2^\circ$
$\theta_R$	$50.9^\circ$
$D_B$	22.17 mm
$D_R$	22.15 mm
$D_1$	1.62 mm
$D_2 - D_G$	0.53 mm

根据以上设计结果,蓝色通道主光线在棱镜 P1 内的两次反射角度分别为  $\alpha = 25.1^\circ$  和  $2\alpha = 50.2^\circ$ ,如果考虑边缘光线相对于主光线的偏转角  $\delta$  的影响,则大致需要使  $\alpha + \delta < \theta_0 < 2\alpha - \delta$ 。而对于红色通道主光线在棱镜 P2 内的第二次反射,则需要  $\alpha + 2\beta - \delta > \theta_0$ 。偏转角  $\delta$  与镜头的相对孔径正相关,为了兼容更大孔径的镜头,可以计算出  $\theta_0$  在  $3\alpha/2 = 37.65^\circ$  左右时,  $\delta$  可以达到最大值。因此,我们需要寻找蓝光折射率在  $n = 1/\sin(37.65^\circ) = 1.637$  左右的低色散玻璃材料。通过查找玻璃库,材料 HZK9B 在 435.83 nm 下的折射率约为 1.633,阿贝数  $v_d = 60.34$ ,且在短波 380 nm 处透过率大于 0.99,可以满足使用需求。

### 2.4 光学设计结果及性能分析

考虑到镜头的视场角为  $45^\circ$ ,且需要较长的后截距来放置棱镜及其固定组件,本文选择前组为负光焦度,后组为正光焦度的反远距物镜的形式作为初始镜头结构。由于物光经过镜头以及 Philips 棱镜到 RGB 三个探测器像面的光程相等,根据棱镜结构优化结果,在镜头设计过程中棱镜可以等效为一个长 44 mm,高 22 mm,材料 HZK9B 的平板玻璃。但是由于 RGB 三通道光路实际上是分离成 3 个方向,因此在镜头优化过程中,对于不同波长的光路可以分别优化其像面位置,从而

实现三路独立调焦,降低了轴向色差的校正难度。同时,为了便于后期的图像合成,需要对三通道的实际像高之差进行严格的控制。最终设计得到的 3CMOS 相机结构的前置成像物镜的 Y-Z 向视图如图 3 所示。系统总长为 173 mm,全视场为  $45^\circ$ ,  $F\#$  为 2.8。

光学系统在全工作波段 420 ~ 650 nm 的调制传递函数 MTF 如图 4(彩图见期刊电子版) 所示。可见,在 110 lp/mm 的奈奎斯特采样频率下全视场 MTF 大于 0.4,并且在三波段独立调焦后 R

通道(中心波长为 620 nm), G 通道(中心波长为 545 nm) 和 B 通道(中心波长为 450 nm) 的 MTF 均大于 0.4,具有良好的成像质量。

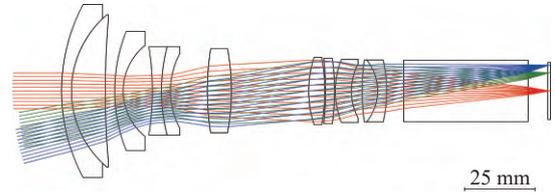


图 3 镜头光路

Fig. 3 Optical path of the lens

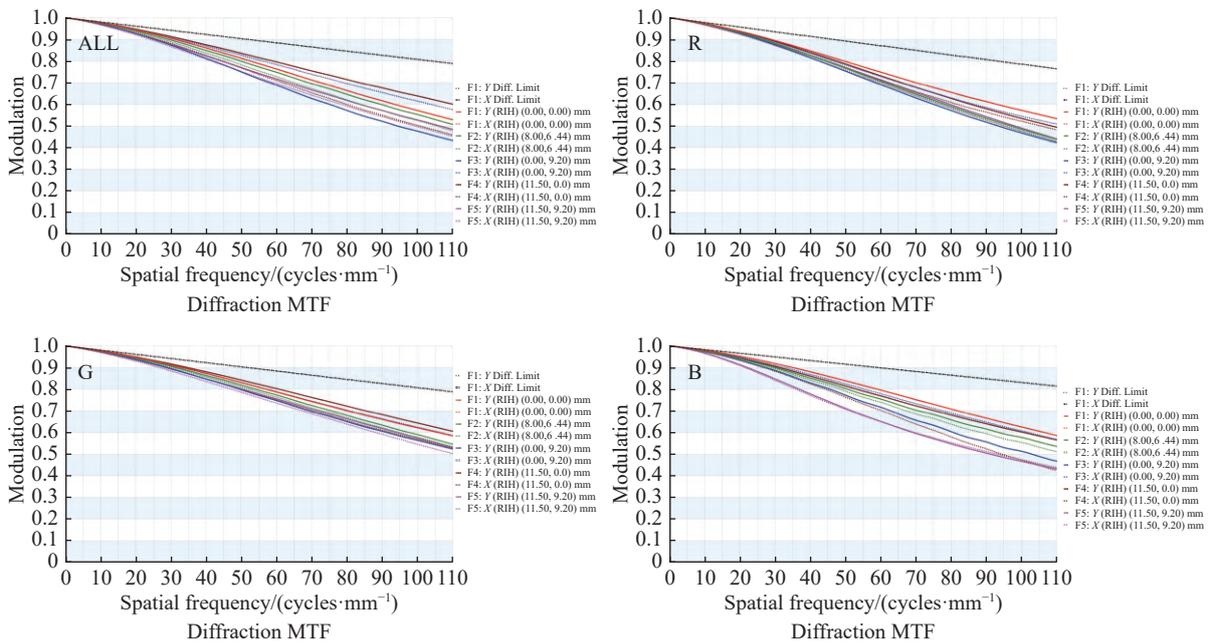


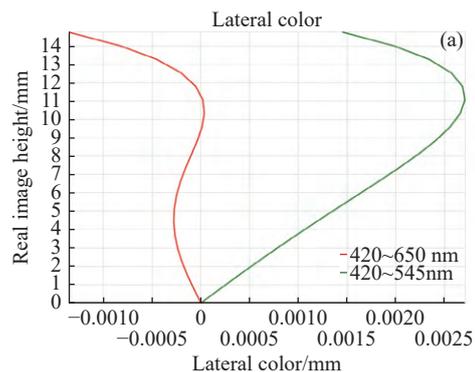
图 4 各通道 MTF 值

Fig. 4 MTF of each channel

物镜的垂轴色差如图 5(a)(彩图见期刊电子版) 所示,其中短波 420 nm 和长波 650 nm 之间的最大垂轴色差值约为  $2.7 \mu\text{m}$ ,小于  $4.5 \mu\text{m}$  的像元大小,不会对后续的三通道图像融合造成影响。成像物镜相对畸变网格如图 5(b)(彩图见期刊电子版) 所示。可见,最大相对畸变出现在边缘视场,约为 0.4%,光学畸变校正效果良好。

在物镜设计完成后,将 Philips 棱镜结构加入系统中。分析了棱镜中最大视场边缘光线在 3 个玻璃-空气界面上的入射角度,其中蓝色通道  $2\alpha-\delta$  最小约为  $38.96^\circ$ ,红色通道  $\alpha+2\beta-\delta$  最小约为  $39.65^\circ$ ,均大于 HZK9B 玻璃对蓝光和红光的全内反射临界角  $37.76^\circ$  和  $38.18^\circ$ 。同时,所有通道的光线在棱镜 P1 出射面上的最大边缘光线

入射角  $\alpha+\delta$  约为  $36.37^\circ$ ,小于蓝光的全内反射角  $37.76^\circ$ ,满足棱镜中光线入射角度的限制。在系统光路中建立 Philips 棱镜模型,通过光线追迹验证了边缘视场光线均能按照设计的光路传播,如图 6 所示。



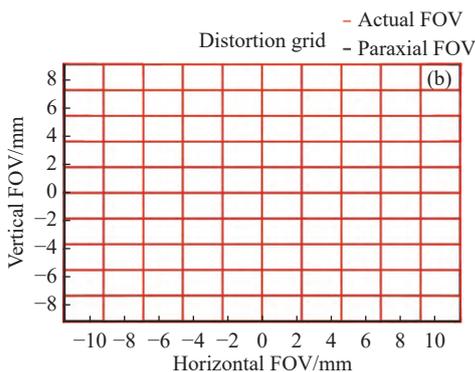


图 5 (a) 垂轴色差和 (b) 畸变网格

Fig. 5 (a)Lateral color difference and (b)distortion grid

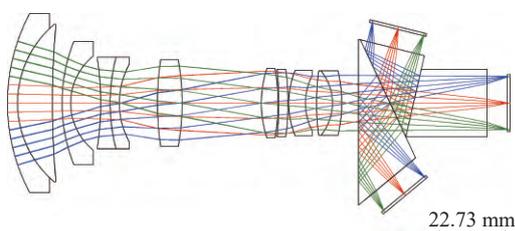


图 6 3CMOS 相机光路

Fig. 6 3CMOS camera optical path

### 3 3CMOS 相机光谱优化设计方法

#### 3.1 相机 RGB 光谱优化原理

矢量成像模型是本文相机光谱优化的基础, 在该模型中所有涉及颜色的方程都是通过矩阵形式表达的。对于某一物体, 其颜色可根据式 (1) 由三刺激值定义, 在矢量成像模型中其矩阵方程可写为:

$$t = A^T Lr \quad (1)$$

其中,  $t$  为三刺激值向量, 对于 CIE XYZ 颜色空间,  $t=[X, Y, Z]^T$ 。矩阵  $A$  是  $N \times 3$  矩阵, 它的列对应 CIE 颜色匹配函数  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ 。 $L$  是  $N \times N$  的对角矩阵, 光源光谱排列在其主对角线上,  $r$  是  $N \times 1$  的矩阵, 表示样本的光谱反射率。其中  $N$  代表光谱采样数量, 例如, 在 400 ~ 700 nm 范围内每间隔 10 nm 采样一次,  $N=31$ 。

相机三通道响应值的表达式 (2) 与式 (1) 类似:

$$t_c = C^T Lr \quad (2)$$

其中,  $t_c$  是  $3 \times 1$  的向量, 表示相机的 RGB 响应,  $t_c=[R, G, B]^T$ 。 $C=[S_R, S_G, S_B]$  是  $N \times 3$  的矩阵, 表示 RGB 三通道的光谱响应。为了更准确地记录目

标的颜色信息, 需要对相机进行颜色校正, 通常将设备相关的相机 RGB 空间映射到标准的 CIE XYZ 颜色空间:

$$\hat{t} = \mathcal{F}(t_c) \quad (3)$$

其中  $\mathcal{F}(\cdot)$  代表颜色校正方法,  $\hat{t}$  为由相机 RGB 响应  $t_c$  估算出的三刺激值。本文选择根多项式颜色校正方法。利用带根的高次项来扩展相机的 RGB 响应, 再通过一个校正矩阵, 计算校正后的色差。该方法计算简单且性能良好, 同时还受环境光照强度的影响<sup>[13]</sup>。根多项式颜色校正方法如式 (4) 所示, 将  $t_c=[R, G, B]^T$  扩展为  $\bar{\rho}_i$ ,  $i$  表示多项式的项数。则  $\hat{t}$  可由式 (5) 计算得到, 其中  $3 \times i$  的校正矩阵  $M_{3 \times i}$  可由式 (6) 通过最小二乘法计算得到<sup>[14]</sup>,  $M_{opt}$  为校正矩阵的最优解,  $Q$  和  $R$  分别为  $3 \times n_s$  和  $i \times n_s$  的矩阵, 分别表示  $n_s$  组样本的三刺激值和相机响应。

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_3 &= [R \ G \ B]^T \\ \bar{\rho}_6 &= [R \ G \ B \ \sqrt{RG} \ \sqrt{RB} \ \sqrt{GB}]^T \\ \bar{\rho}_{13} &= [R \ G \ B \ \sqrt{RG} \ \sqrt{RB} \ \sqrt{GB} \ \sqrt{RG^2} \ \dots \\ &\quad \sqrt{RB^2} \ \sqrt{GB^2} \ \sqrt{R^2G} \ \sqrt{R^2B} \ \sqrt{G^2B} \ \sqrt{RGB}]^T, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\hat{t} = M_{3 \times i} \bar{\rho}_i \quad (5)$$

$$M_{opt} = QR^T(RR^T)^{-1} \quad (6)$$

$$\mathcal{F}_{Lab}(t) = \begin{bmatrix} 116f\left(\frac{t_2}{w_2}\right) - 16 \\ 500\left(f\left(\frac{t_1}{w_1}\right) - f\left(\frac{t_2}{w_2}\right)\right) \\ 200\left(f\left(\frac{t_2}{w_2}\right) - f\left(\frac{t_3}{w_3}\right)\right) \end{bmatrix}$$

$$f(x) = \begin{cases} x^{\frac{1}{3}} & x > 0.008856 \\ 7.787x + \frac{16}{116} & x \leq 0.008856 \end{cases} \quad (7)$$

除此之外, 由于 CIE XYZ 颜色空间不是均匀颜色空间, CIE XYZ 空间中的欧式距离并不能等同于人眼识别的色差的大小, 因此在计算色差时还需要使用式 (7) 将颜色空间转换到均匀颜色空间 CIE LAB 中, 即可得到由根多项式校正后的均匀颜色空间的色差值<sup>[10]</sup>:

$$\Delta E_{ab}^* = E \{ \|\mathcal{F}_{lab}(t) - \mathcal{F}_{lab}(M_{3 \times 13} \bar{\rho}_{13})\|_2 \} \quad (8)$$

通过优化变量计算相机光谱响应  $C$ , 在光源  $L$ , 样本  $r$ , 颜色匹配函数  $A$  确定的前提下, 由式 (8) 计算评价函数。在满足约束条件的情况下, 即可通过优化算法实现相机光谱的优化。

### 3.2 Philips 棱镜 3CMOS 相机的矢量成像模型

在 3CMOS 相机中, 其矢量成像模型仅相机的光谱响应  $C=[S_R, S_G, S_B]$  与普通相机不同。3CMOS 相机的光谱特性主要是由光学系统的透过率、分光棱镜的光谱、截止膜的光谱以及 CMOS 的响应决定的, 而棱镜的光谱则取决于其胶合表面上的两个二向色膜 RRC 和 BRC。截止膜的光谱则包括长波和短波截止膜 Rcut 和 Bcut 的光谱特性。通常两个二向色薄膜在绿色波段 (550 nm 附近) 有共同的高透区域, 并且 RRC 反射红光, BRC 反射蓝光, 两个截止膜则负责过滤掉可见光波段以外的光谱信息, 即通过 4 个薄膜的组合即可将可见光分成 RGB 3 个波段, 如式 (9) 所示:

$$\begin{aligned} S_R &= S_{BRC} \times (1 - S_{RRC}) \times S_{Rcut} \times D_{lens} \times D_{cmos} \\ S_G &= S_{RRC} \times S_{BRC} \times S_{Rcut} \times D_{lens} \times D_{cmos} \\ S_B &= S_{RRC} \times (1 - S_{BRC}) \times S_{Rcut} \times S_{Bcut} \times D_{lens} \times D_{cmos}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $S_{BRC}$ ,  $S_{RRC}$  为二向色膜透射光谱, 因为介质膜中薄膜的吸收可以忽略不计, 因此其反射光谱可以写成  $1 - S_{BRC}$  和  $1 - S_{RRC}$ 。  $S_{Rcut}$  和  $S_{Bcut}$  为截止滤光片的透过率,  $D_{lens}$  和  $D_{cmos}$  分别表示镜头透过率和探测器响应。在镜头和探测器确定的情况下, 3CMOS 相机的光谱优化问题就变成了  $S_{BRC}$ ,  $S_{RRC}$ ,  $S_{Rcut}$  和  $S_{Bcut}$  4 个薄膜光谱的优化问题。

根据薄膜光学的基本原理, 当光线的入射角度发生变化时, 薄膜的光谱特性也会随之变化<sup>[15]</sup>。在实际的成像光路中, 不同视场的主光线在薄膜上的入射角度会随着视场的变化而变化, 并且每个视场对应的成像光束都具有一定的孔径角, 其在薄膜上的入射角度存在着一定的分布, 并不完全与主光线一致。因此, 像面上每个像素点的光谱是由其对应视场的成像光束在薄膜上的入射角度分布, 以及薄膜在不同入射角下的光谱特性共同决定的。该特性会使像面上不同位置的相机光谱响应不一致, 从而导致颜色不均匀的问题。

基于系统的光学设计结果进行分析, 成像光束在棱镜中的两组二向色膜 BRC 和 RRC 上的入射角度分别约为  $15^\circ \sim 37^\circ$  和  $4^\circ \sim 25^\circ$ 。两组截止膜

Bcut 和 Rcut 则分别被放置在入射角度较小的第一组胶合镜片上以及棱镜的蓝色通道出射面上, 如图 7 所示。由于 BRC 和 RRC 入射角度相对较大, 因此不同入射角度下的薄膜光谱之间会产生较大的偏移, 如图 8 中的  $F_{RRC}$  所示。在薄膜优化过程中, 需要考虑二向色膜的光谱偏移特性, 对式 (9) 进行入射角度的修正。而对于两组截止薄膜 Bcut 和 Rcut, 根据初期的膜系设计结果, 在较小入射角度下其光谱偏移量相对较小, 因此在本文中不对其进行额外的修正。

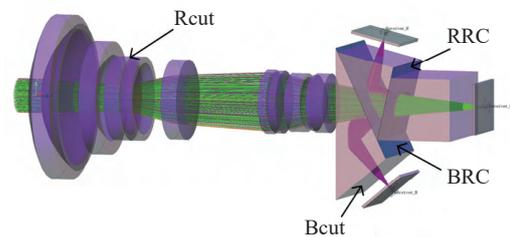


图 7 蒙特卡洛光线追迹及 4 组薄膜位置

Fig. 7 Monte Carlo ray tracing and four sets of film positions

虽然宽光束入射角度变化造成的相机光谱偏移问题可以在光学设计软件中通过蒙特卡洛光线追迹的方法进行模拟分析, 但是该方法计算量庞大且不适用于薄膜的膜系优化。本文提出了一种简化的计算模型, 在膜系优化过程中实现光谱偏移的修正。在引入宽光束入射角度的情况下, 二向色薄膜的光谱可通过式 (10) 计算:

$$S_{RRC} = \int F_{RRC}(\theta) P_{RRC}(\theta) d\theta, \quad (10)$$

其中,  $\theta$  为光线在薄膜上的入射角,  $F_{RRC}(\theta)$  为 RRC 薄膜在  $\theta$  入射角时的透过率光谱,  $P_{RRC}(\theta)$  则表示宽光束中入射角度为  $\theta$  的光线的占比, 且  $\int P_{RRC}(\theta) d\theta = 1$ 。在实际计算过程中, 选取  $1^\circ$  的采样间隔,  $F_{RRC}(\theta)$  直接通过膜系计算得到, 而对于  $P_{RRC}(\theta)$ , 则通过光线追迹方法, 统计一组均匀分布的平行光线阵列在薄膜上的入射角度分布情况, 最后用求和的方式简化计算。以中心视场下的 RRC 薄膜为例, 计算过程如图 8(彩图见期刊电子版) 所示。

在该计算过程中,  $F(\theta)$  仅与薄膜参数相关, 而  $P(\theta)$  则与视场角或者像面位置相关, 因此对于像面上归一化坐标为  $(x, y)$  的点, 其对应的  $P(\theta)$

可写作  $P(x, y, \theta)$ , 则该点对应的 RRC 透过率光谱

可由式 (11) 计算。

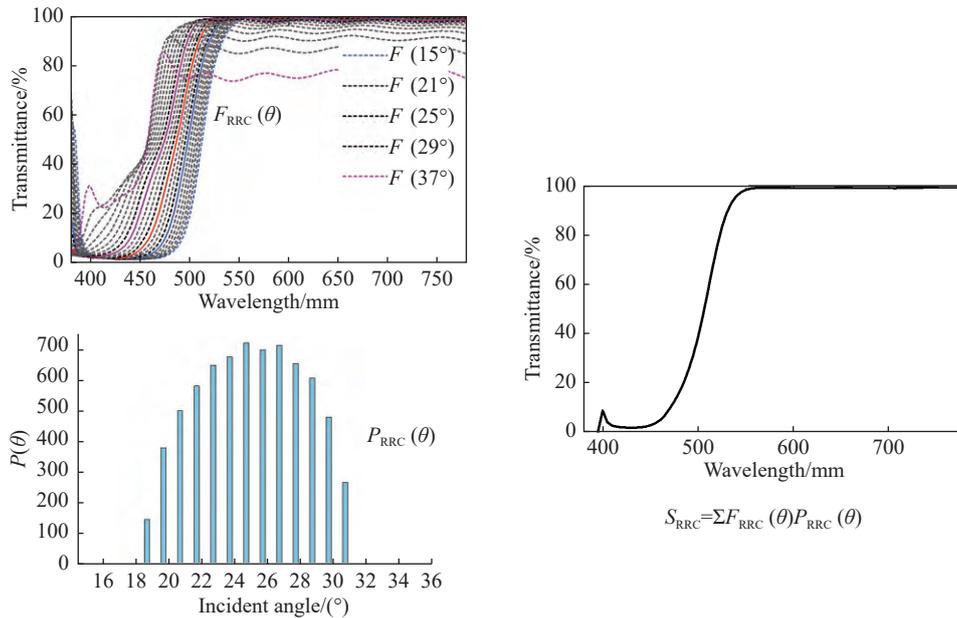


图 8 简化的宽光束薄膜光谱计算模型

Fig. 8 Calculation model of simplified broad beam thin film spectral

$$S_{RRC}(x, y) = \sum_{\theta} F_{RRC}(\theta) P_{RRC}(x, y, \theta) \quad (11)$$

因此, 经过宽光束入射角度修正后的相机响应为:

$$\begin{aligned} S_R(x, y) &= S_{BRC}(x, y) \times [1 - S_{RRC}(x, y)] \times S_{Rcut} \times D_{lens} \times D_{cmos} \\ S_G(x, y) &= S_{RRC}(x, y) \times S_{BRC}(x, y) \times S_{Rcut} \times D_{lens} \times D_{cmos} \\ S_B(x, y) &= S_{RRC}(x, y) \times [1 - S_{BRC}(x, y)] \times S_{Rcut} \times S_{Bcut} \times D_{lens} \times D_{cmos} \end{aligned} \quad (12)$$

在薄膜优化过程中, 可以选择若干像素点, 预先通过光线追迹计算其入射角度分布函数  $P(\theta)$ , 在每次优化迭代中通过薄膜参数获取其光谱  $F(\theta)$ , 之后计算对应像素点的相机光谱响应  $C(x, y) = [S_R(x, y), S_G(x, y), S_B(x, y)]$ , 并由此计算评价函数, 对薄膜进行优化。

在实验过程中, 直接使用宽光束入射角度修正后的模型优化膜系时, 由于计算量太大会导致优化速度缓慢, 因此本文将薄膜的优化设计分为 2 个步骤: (1) 使用参数化的方法优化理想情况下 4 组薄膜的透过率函数, 并根据理想透过率曲线设计基础膜系。(2) 使用宽光束入射角度修正后的模型优化膜系。这样在进行薄膜膜系优化时,

第一步中设计得到的膜系已经具备了基本的颜色性能, 从而缩短了优化时间。

### 3.3 理想薄膜光谱优化及膜系设计

在理想薄膜的光谱优化中, 为了使得到的光谱曲线便于薄膜设计以及减少优化时的计算量, 对每个薄膜光谱使用 3 个高斯函数  $a \cdot \exp(-(\lambda - \mu)^2 / \sigma^2)$  的组合来拟合  $S_{BRC}$ ,  $S_{RRC}$ ,  $S_{Rcut}$  和  $S_{Bcut}$  的透过率曲线。由于 4 个滤光片都是带通形式, 所以实际使用半个高斯型曲线进行拟合。根据卢瑟条件, 若相机的光谱响应越接近颜色的匹配函数, 其颜色性能就会越好。因此, 参照 CIE XYZ 颜色匹配函数, 使用高斯函数拟合获得 4 组薄膜对应的高斯参数作为优化起点。

使用式 (8) 中由根多项式校正后的 CIE LAB 空间  $\Delta E_{ab}^*$  色差作为评价函数, 在优化时, 约束薄膜透过率曲线的取值范围为 0 ~ 1, 并且曲线在工作波段内只能有单一峰值。为了保证融合图像的对比度, R, G, B 三通道光谱响应在可见光波段内的光谱占比均应大于 20%。为了抑制光线在棱镜内来回反射从而产生杂散光影响成像, 还需要保证两个二向色薄膜在工作波段内不能同时拥有较高的反射率, 即  $(1 - S_{RRC}) \times (1 - S_{BRC}) < 0.02$ 。

本节中, 使用 24 色色卡作为反射率样本  $r$ ,

使用 CIE D65 作为光源  $L$ , 以及 CIE 1931 2° 标准观察者作为颜色匹配函数  $A$ , 如图 9(彩图见期刊

电子版) 所示。计算时, 在 380 ~ 780 nm 范围内使用 1 nm 间隔的采样。

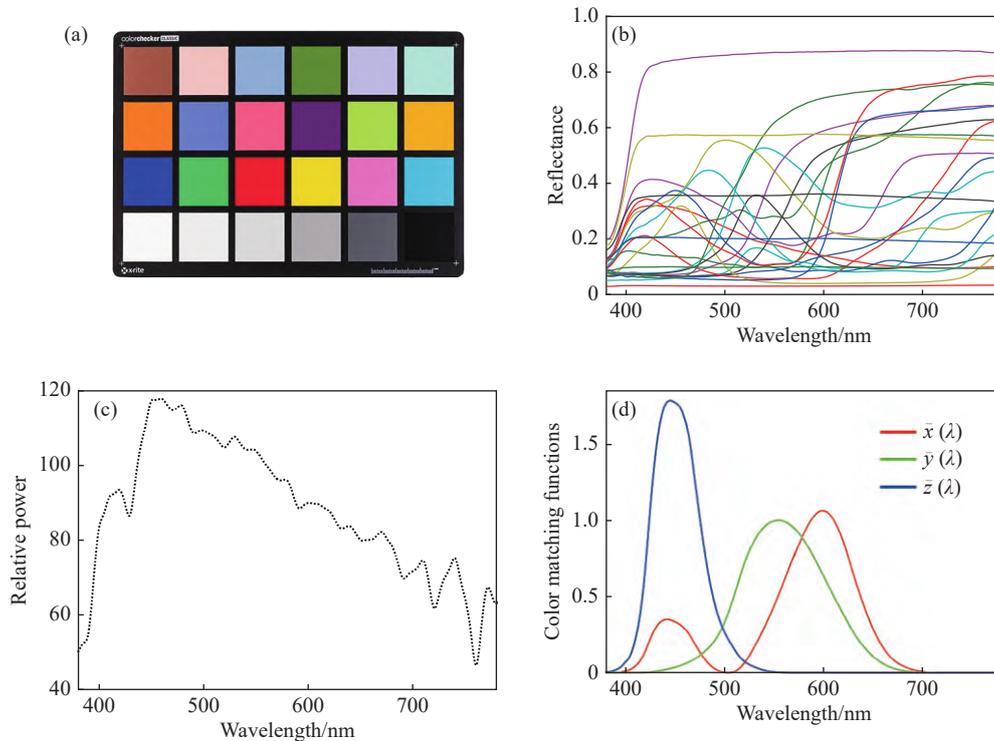


图 9 优化中使用的 (a) 24 色卡样本、(b) 样本反射率、(c) 光源光谱以及 (d) 颜色匹配函数

Fig. 9 (a) 24 color checker samples, (b) sample reflectance, (c) light source spectrum, and (d) color matching functions used in optimization

将经过初始化以及参数化的高斯参数矩阵作为优化起点, 同时作为评价函数的输入, 计算高斯函数并且通过组合得到 4 组薄膜光谱曲线。再由式 (9) 计算相机的光谱响应  $C$ , 结合样本矩阵  $r$ , 光源矩阵  $L$  和颜色匹配函数矩阵  $A$ , 计算样本的三刺激值和相机响应矩阵  $Q$  和  $R$ 。通过最小二乘法计算校正矩阵  $M_{opt}$ 。最终计算得到 CIE LAB 空间的样本色差均值  $\Delta E_{ab}^*$ , 将其作为评价函数对高斯参数进行优化, 将得到的 4 组薄膜光谱曲线则作为目标函数, 进行基础膜系的设计。

### 3.4 宽光束入射角度修正的薄膜优化

在宽光束入射角度修正的薄膜优化中, 不再使用高斯函数拟合, 而是直接在薄膜设计软件中对膜系进行优化, 并且以理想薄膜光谱优化中设计得到的基础膜系作为优化的初始值。

在构建入射角度影响的评价函数时, 首先要选择像面上参与优化的视场点。在优化时选择更多的采样点能帮助我们全面地分析像面各位置的颜色性能, 然而这也会进一步增加评价函数的计

算量, 对后续的优化速度带来很大的影响。在 Philips 棱镜中, 边缘视场的成像光线相比于中心视场有着最大的入射角度差值。因此, 边缘视场点是全视场中相机光谱响应和中心视场偏离最大的点。此外, 相机的光谱响应在像面上是连续变化的, 所以只需要通过优化设计, 使得色差最大的边缘视场点的颜色偏移在合理范围内, 那么就可以认为由光谱偏移问题带来的像面颜色不均匀性可以通过后期的标定实验<sup>[16-17]</sup> 或者分区域的颜色校正方法<sup>[10]</sup> 来进行校正。

由于 Philips 棱镜在水平方向 ( $\pm x$  方向) 具有对称性, 在实际分析时只需考虑像面  $+x$  方向的半个区域即可, 因此选取中心视场点 (0, 0), 以及  $+x$  方向两个边缘视场点 (1, 1) 和 (1, -1) 来计算评价函数。除了 3 个采样点的色差值以外, 还要考虑 3 个采样点两两之间的色差值。因为对于成像系统而言, 不仅希望像面上所有像素点都有较低的色彩, 同时也要求像面上各个区域之间不能有明显的颜色差异, 最终评价函数可以写为:

$$\varepsilon = \Delta E_0 + \Delta E_1 + \Delta E_2 + k(\Delta E'_{01} + \Delta E'_{02} + \Delta E'_{12}) \quad (13)$$

其中  $\Delta E_0 = \Delta E_{ab}^*(0, 0)$ ,  $\Delta E_1 = \Delta E_{ab}^*(1, 1)$ ,  $\Delta E_2 = \Delta E_{ab}^*(1, -1)$ , 分别表示 3 个采样点与真实颜色的  $\Delta E_{ab}^*$  色差。  $\Delta E'_{01}$ ,  $\Delta E'_{02}$ ,  $\Delta E'_{12}$  则分别为 3 个采样点两两之间的  $\Delta E_{ab}^*$  差值,  $k$  为权重系数。该次优化由于是直接优化的膜系, 因此仅保留了 R, G, B 三通道光谱响应在可见光波段内的光谱占比均大于 20%, 以及二向色薄膜在工作波段内不能同时拥有较高的反射率的约束, 并且为了加快优化速度, 设置光谱采样间隔为 5 nm。

在进行优化前, 由成像系统中的光线追迹方法, 获取 3 个像面采样点对应的二向色膜上光线入射角分布函数  $P_{RRC}(x, y, \theta)$  和  $P_{BRC}(x, y, \theta)$ 。在薄膜设计软件中, 如果使用自定义的评价函数, 那么每次优化只能针对 4 个薄膜中的一个来运行, 因此需要根据当前优化的膜层参数计算出  $F_{RRC}(\theta)$ ,  $F_{BRC}(\theta)$ ,  $S_{Rcut}$ ,  $S_{Bcut}$ , 其中之一, 其余三者均读取上一轮优化数据。之后结合 3 个采样点的  $P_{RRC}(x, y, \theta)$  和  $P_{BRC}(x, y, \theta)$ , 根据式 (11), 式 (12) 可以在每次优化迭代中计算出 3 个采样点的相机响应矩阵  $C(x, y)$ 。再计算出评价函数  $\varepsilon$  对 4 组膜系进行循环优化, 直至单次循环内 4 个薄膜的优化均能收敛。

### 3.5 薄膜优化设计结果

图 10(彩图见期刊电子版) 为设计得到的滤光片透过率  $S_{RRC}$ ,  $S_{BRC}$ ,  $S_{Rcut}$  和  $S_{Bcut}$ , 以及结合镜头透过率和 CMOS 响应计算的相机光谱响应曲线, 由此计算得到对应的 24 色色卡的  $\Delta E_{ab}^*$  色差均值为 0.332。相比于 CIE LAB 空间中的恰可察觉色差 2.3 个色差单位, 理想情况下设计得到的 3CMOS 相机光谱具有非常好的颜色性能。

利用得到的理想薄膜透过率曲线作为目标函数进行膜系设计, 且各薄膜的入射角度均使用全视场光线的评价入射角度。其中 RRC 以 13°入射角设计, 且基底与入射介质均为 H-ZK9B; BRC 以 25°入射, 基底为 H-ZK9B, 入射介质为空气; Rcut 以 4.5°入射, 基底为 H-ZF6, 入射介质为 H-LAK53A; Bcut 以 11°入射, 基底为 H-ZK9B, 入射介质空气。所有薄膜均使用  $\text{SiO}_2$  以及  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  两种材料, 设计得到的 4 组薄膜在零视场以及边缘视场主光线入射角度下的光谱如图 11(a)(彩图见期刊电子版) 所示。

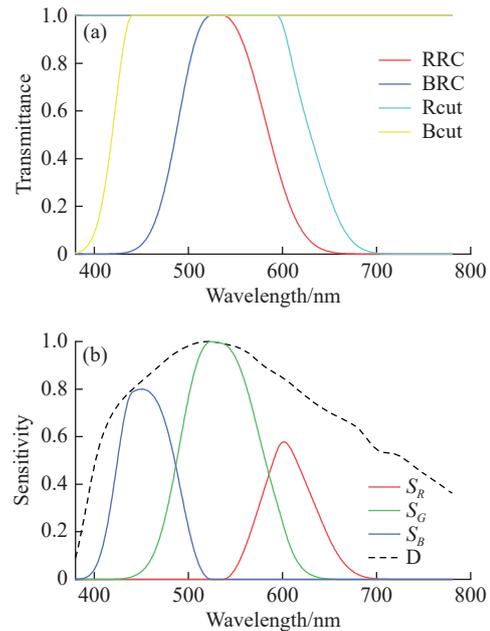


图 10 优化得到的 (a) 理想薄膜透过率以及 (b) 相机光谱  
Fig. 10 Optimized (a) ideal film transmittance and (b) camera spectra

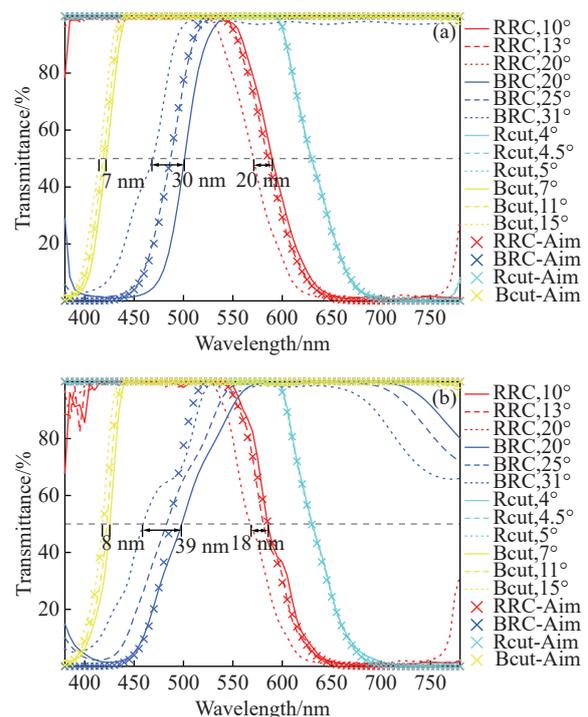


图 11 (a) 设计得到的基础薄膜光谱; (b) 优化后的薄膜光谱

Fig. 11 (a) Designed basic thin film spectrum and (b) optimized thin film spectrum

可以看到 4 组薄膜在零视场主光线入射角度下的设计结果基本与理想值一致, 但是在 50% 透过率处对应的波长, RRC 在对应的主光线以 10 ~ 20°入射时, 其光谱偏移量达到了 20 nm, 而 BRC

在对应的主光线以  $20 \sim 31^\circ$  入射时, 光谱偏移量达到了  $30 \text{ nm}$ 。较大的偏移量可能会对像面颜色的均匀性造成严重的影响。相比之下, 两组截止膜的主光线对应的入射角度分别为  $4^\circ \sim 5^\circ$  和  $7^\circ \sim 15^\circ$ , 其光谱的偏移较小, 因此在本文后续的优化中不对其进行额外的入射角度修正。

最后, 利用宽光束入射角度修正后的膜系优化方法, 对 RRC, BRC,  $R_{\text{cut}}$  和  $B_{\text{cut}}$  4 个薄膜膜系进行循环优化, 最终得到的薄膜光谱如图 11(b) 所示。由于优化过程中评价函数与约束的改变, 仅从光谱曲线上看, 优化后的薄膜光谱特性明显与不考虑入射角度影响的设计得到的理想值相差较大。而在光谱偏移量上, 优化后的 RRC 的光谱偏移相较于基础薄膜来说略有减少, 但是 BRC

的光谱偏移从  $30 \text{ nm}$  扩大到了  $39 \text{ nm}$ , 并且两组二向色膜的透过率曲线的平滑度也有了明显下降。

利用简化的宽光束入射角度修正模型, 计算了基础膜系和优化后的膜系对应的 3 个采样点的相机光谱响应, 结果如图 12(a), 12(b)(彩图见期刊电子版) 所示。R<sub>0</sub>, G<sub>0</sub> 和 B<sub>0</sub> 为中心视场的相机光谱, 另外两组虚线的 RGB 曲线则为两个边缘视场点的相机光谱。此外, 将薄膜代入到光学系统中进行了蒙特卡洛光线追迹, 直接从仿真软件中获取 3 个采样点位置的光谱特性。该仿真过程包含了简化方法忽略掉的两组截止膜的光谱偏移以及不同视场镜头透过率的差异, 优化前后的两组结果如图 12(c), 12(d)(彩图见期刊电子版) 所示。

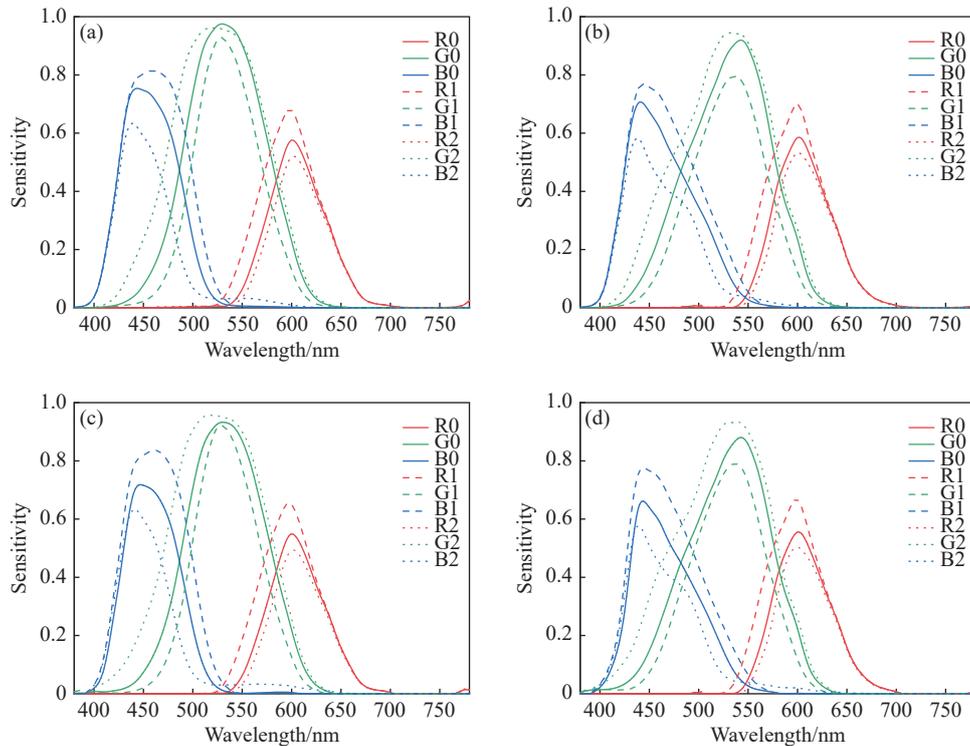


图 12 简化模型计算的 (a) 优化前和 (b) 优化后的相机光谱; 蒙特卡洛光线追迹得到 (c) 优化前和 (d) 优化后的相机光谱  
Fig. 12 Camera spectra obtained from simplified model (a) before and (b) after optimization; camera spectra obtained from Monte Carlo ray tracing (c) before and (d) after optimization

虽然基础薄膜是以理想曲线的拟合度作为目标进行的优化, 但是由于只考虑了零视场主光线入射时的曲线拟合度, 因此在两个边缘视场的宽光束相机光谱中, 其结果与图 10(b) 中理想的相机光谱出现了较大的偏差, 并且 3 个采样点的光谱间, 无论是峰值波长还是半高宽均存在较大差异。而经过宽光束入射角度修正的膜系优化后的

薄膜, 其相机光谱的形态已经偏离了理想相机光谱, 但是 3 个视场的 RGB 峰值波长间的差距有了一定的减小。此外, 通过对比简化的计算方法和蒙特卡洛光线追迹方法, 可以看到两种方法得到的相机光谱整体上非常接近, 验证了简化计算方法的可靠性。利用 4 组相机光谱数据, 分析了采样点色差  $\Delta E$  和采样点两两之间的色差值  $\Delta E'$  对

于 24 色卡样本的平均值和最大值, 以及  $k=0.7$  时的评价函数  $\varepsilon$ , 结果如表 3 所示。

表 3 4 组相机光谱的色差值  
Tab. 3 Color errors of four sets of camera spectra

		$\Delta E_0$	$\Delta E_1$	$\Delta E_2$	$\Delta E'_{01}$	$\Delta E'_{02}$	$\Delta E'_{12}$	$\varepsilon$
Basic film, Simplified	Avg	0.248	0.460	0.777	0.457	0.673	1.105	1.017
	Max	1.245	1.526	4.190	1.537	3.051	4.553	
Basic film, Monte Carlo	Avg	0.238	0.501	0.678	0.372	0.709	1.038	0.967
	Max	0.865	1.471	4.557	1.149	3.937	4.992	
Optimized film, Simplified	Avg	0.387	0.431	0.431	0.222	0.212	0.360	0.601
	Max	1.577	1.667	1.579	0.851	0.804	1.299	
Optimized film, Monte Carlo	Avg	0.417	0.466	0.311	0.239	0.278	0.329	0.595
	Max	1.522	1.629	1.401	0.987	1.111	1.152	

首先, 通过对比简化方法和蒙特卡洛方法得到相机光谱对应的色差数据, 可以看到虽然在部分色差项中两种方法的差异明显, 但整体色差大小相差不大, 仅有约 14% 的平均差异, 且从评价函数上来说两种方法得到的相机光谱在颜色性能的表现上基本一致, 再次验证了简化方法的有效性。

其次, 对于未考虑光谱偏移问题的基础薄膜, 各采样点的色差以及三采样点之间的色差均值均小于恰可察觉色差  $2.3 \Delta E_{ab}^*$  色差单位<sup>[18]</sup>, 但是三采样点中, 中心视场的色差值  $\Delta E_0$  要显著优于边缘视场, 并且从采样点之间的色差  $\Delta E'_{01}$ ,  $\Delta E'_{02}$ ,  $\Delta E'_{12}$  中也能看出像面颜色存在显著的不均匀特性, 部分色差项在 24 色样本中的最大值接近 5, 远大于 2.3 的恰可察觉色差。

相比之下, 经过在宽光束入射角度修正优化后的薄膜, 虽然中心视场的色差项  $\Delta E_0$  要较基础薄膜差, 但是三采样点的色差  $\Delta E_0$ ,  $\Delta E_1$ ,  $\Delta E_2$  的色差值相差不大, 且采样点之间的色差  $\Delta E'_{01}$ ,  $\Delta E'_{02}$ ,  $\Delta E'_{12}$  也有大幅减小。以蒙特卡洛方法计算的结果为例, 优化后的采样点色差均值相较于基础薄膜减小了约 15.8%, 采样点之间的色差即颜色不均匀性减小了约 60%, 同时评价函数  $\varepsilon$  也由基础薄膜的 0.967 降至 0.595, 降低了约 40%, 像面颜色均匀性以及整体颜色性能都显著提高。在 24 色

色卡样本中, 优化后的薄膜在各项色差的最大值仍然小于 2.3。很大程度上减小了光谱偏移带来的影响, 实现了良好的颜色性能。

## 4 结 论

本文通过 Philips 棱镜光路建模方法优化了 3CMOS 相机中的棱镜结构, 在保证全内反射条件以及出射窗口大小的条件下, 优化棱镜的体积, 并由此设计了 Philips 棱镜 3CMOS 相机光学系统, 镜头视场角为  $45^\circ$ , 相对孔径 1/2.8, 其 MTF 在 110 lp/mm 的奈奎斯特采样频率下全视场全波段均大于 0.4, 畸变小于 0.4%, 实现了良好的成像质量。基于设计的光学系统, 建立了 Philips 棱镜相机的矢量成像模型, 分析了由入射角度变化造成的薄膜光谱偏移, 并且提出了宽光束下光谱偏移的修正模型。利用该模型设计并优化了相机中的 4 组光学薄膜。通过仿真实验以及色差分析, 优化后的相机平均色差降低了 15.8%, 像面颜色不均匀性降低了 60%, 优化后对 24 色卡样本的平均色差值为 0.398, 最大色差值为 1.629, 小于人眼恰可察觉色差 2.3。结果表明引入了宽光束入射角度修正的薄膜优化方法可以降低 Philips 棱镜 3CMOS 相机的整体色差, 同时大幅提高像面颜色的均匀性。

## 参考文献:

- [1] WOOTTON C. *A Practical Guide to Video and Audio Compression: from Sprockets and Rasters to Macro Blocks* [M].

- New York: Routledge, 2005.
- [2] DE L H, GIJSBERTUS B. Optical system for a color television camera: US, 3202039A [P]. 1965-08-24.
- [3] HIJAZI A, FRIEDL A, CIERPKA C, *et al.*. High-speed imaging using 3CCD camera and multi-color LED flashes [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(11): 115401.
- [4] ZHONG F Q, SHAO X X, QUAN C. 3D digital image correlation using a single 3CCD colour camera and dichroic filter [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(4): 045401.
- [5] LEE H, PARK S H, NOH S H, *et al.*. Development of a portable 3CCD camera system for multispectral imaging of biological samples [J]. *Sensors*, 2014, 14(11): 20262-20273.
- [6] 付秀华, 席佩花, 孟繁有, 等. 多路谷物色选光学成像系统分光器件的研究 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2022, 45(1): 1-8.
- FU X H, XI P H, MENG F Y, *et al.*. Research on splitter of multi-path optical imaging system for grain color selection [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 45(1): 1-8. (in Chinese).
- [7] JIANG Y, QUAN X Q, XING Y, *et al.*. Design of optical imaging system for full-ocean-depth low-light colors [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 154: 107042.
- [8] SLAGLE T M, LYON R F, RUDA M C, *et al.*. Color separation prism with adjustable path lengths: US, 6330113B1 [P]. 2011-12-11.
- [9] LUTHER R. Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik [J]. *Zeitschrift für Technische Physik*, 1927, 8: 540-558.
- [10] CHEN S H, LÜ B, WU X T, *et al.*. Filter design and color correction for the X-cube prism 3CCD camera [J]. *Applied Optics*, 2023, 62(4): 979-988.
- [11] KWOK H S, CHENG P W, HUANG H C, *et al.*. Trichroic prism assembly for separating and recombining colors in a compact projection display [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(1): 168-172.
- [12] 陈新华, 罗宗平, 杨惠林, 等. 高分辨率可视穿刺针光学系统的设计与研制 [J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1162-1168.
- CHEN X H, LUO Z P, YANG H L, *et al.*. Design and development of the optical system for the high resolution visual puncture needle [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1162-1168. (in Chinese).
- [13] FINLAYSON G D, MACKIEWICZ M, HURLBERT A. Color correction using root-polynomial regression [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(5): 1460-1470.
- [14] ASTER R C, BORCHERS B, THURBER C H. *Parameter Estimation and Inverse Problems* [M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2018.
- [15] 卢进军, 刘卫国, 潘永强. 光学薄膜技术 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- LU J J, LIU W G, PAN Y Q. *Optical Thin Film Technology* [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)
- [16] 修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1365-1373.
- XIU J H, HUANG P, LI J, *et al.*. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1365-1373. (in Chinese).
- [17] 王成龙, 王春阳, 谷健, 等. 一种基于定标的非均匀性校正改进算法 [J]. 中国光学, 2022, 15(3): 498-507.
- WANG CH L, WANG CH Y, GU J, *et al.*. An improved non-uniformity correction algorithm based on calibration [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 498-507. (in Chinese).
- [18] SHARMA G, TRUSSELL H J. Digital color imaging [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(7): 901-932.

#### 作者简介:



陈塑溟(1993—), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, 2015 年于南开大学获得学士学位, 主要从事光学系统设计以及色度学方面的研究。E-mail: chensuhao1993@gmail.com



吕博(1986—), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 2015 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: jllvbo@163.com