

基于新型色貌模型 CAM16 的颜色空间均匀性研究

白雪琼, 廖宁放*

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 对新型色貌模型 CAM16 的颜色空间均匀性进行分析评估, 发现该模型颜色空间仍旧存在视觉均匀性不够理想的问题, 这将会影响跨媒体颜色再现的准确性, 导致相同颜色在不同观察环境下产生色差。为此, 通过 BFD 色差数据集对该模型进行优化, 以修正视觉均匀性, 进而提出更为均匀的色貌模型 CAM16- $J'a'b'$, 同时采用国际通用的芒塞尔表色系统对优化后的颜色空间进行均匀性检验。结果表明, 优化后的颜色空间均匀性有所提高, 为跨媒体颜色再现研究提供了参考。

关键词 视觉光学; 色度学; CAM16; 均匀颜色空间; 芒塞尔表色系统

中图分类号 TS801.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0433001

Research on Color Space Uniformity Based on New Color Appearance Model CAM16

Bai Xueqiong, Liao Ningfang*

Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education,
School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In this study, the color space uniformity of a new color appearance model CAM16 is analyzed and evaluated. The vision uniformity of the color space of the CAM16 model is insufficient, which will affect the cross-media color reproduction accuracy and result in color difference with respect to the same colors under different viewing conditions. Therefore, a BFD color difference dataset is used to optimize the model for ensuring visual uniformity, and an optimized color appearance model CAM16- $J'a'b'$ is proposed. Subsequently, the optimized color space is subjected to a uniformity test based on international Munsell color system. The results denote an improvement in the uniformity of the optimized color space, thereby providing a reference for cross-media color reproduction research.

Key words visual optics; colorimetry; CAM16; uniform color space; Munsell color system

OCIS codes 330.1730; 330.1690; 330.7310; 330.7320

1 引 言

色貌模型^[1]能够预测包含色适应状态在内的不同观察条件下的颜色。因此 CIECAM02 模型作为颜色管理中的特征文件连接空间, 一经推出, 就被广泛地研究和应用, 但该模型在某些情况下存在数学计算问题, 如在明度计算过程中, CAT02 色适应变换矩阵会导致某些颜色出现负值。Süsstrunk 等^[2-3]发现 CIECAM02 模型存在“黄蓝问题”以及“紫色边缘问题”, 即在极端蓝色适应情况下, 蓝色在 HPE 颜色空间的坐标为负值, 另外, 饱和紫色在光源略带紫色的情况下经过色适应转换后, 其颜色坐标会移

至光谱轨迹之外, 甚至在 HPE 颜色空间的坐标为负值。Li 等针对该问题提出了相应的解决方案, 方案虽能解决“黄蓝问题”, 但“紫色问题”仍旧难以解决。Li 等^[4-5]又进一步采用约束条件得到了新的色适应变换矩阵, 进而避免了“紫色问题”, 但色貌的正向模型与逆向模型的三刺激值不一致的问题仍未能解决。

2017 年, Li 等^[6]发现色貌问题无法解决的原因在于研究人员一直试图解决色貌模型中的数学问题, 忽略了视觉实验结果的预测准确性。要想解决 CIECAM02 模型的数学计算问题, 仅从色适应变换矩阵方面考虑是不可行的, 而应从色貌模型的结构

收稿日期: 2019-07-30; 修回日期: 2019-09-23; 录用日期: 2019-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(61575020)

* E-mail: liaonf@bit.edu.cn

上去解决数学计算问题。因此 Li 等提出最新的色貌模型——CAM16,该模型在 CIECAM02 模型的基础之上通过制定约束条件和改变局部色貌模型结构的方法解决了数学计算中的负值问题,并简化了原有的色貌模型结构,降低了模型计算的复杂性。与此同时,基于对明度 J 和视彩度 M 的优化给出了针对大色差数据、小色差数据和均匀颜色空间的 CAM16-LCD、CAM16-SCD、CAM16-UCS 色差公式。

颜色空间的不均匀性会影响跨媒体颜色再现的准确性,导致相同颜色在不同的观察设备条件下产生色差。Li 等^[6]所提出的色差公式中视彩度 M 与彩度 C 呈非线性关系,因此无法直接应用于色貌的 JCh 颜色空间。本文采用国际通用的芒塞尔表色系统,通过明度 J 、彩度 C 和色调 h 对新型色貌模型 CAM16 的均匀性进行分析评价,发现该模型的 Jab 颜色空间存在视觉均匀性不够理想的缺点,从而使得在对 CAM16 色貌模型进行色差评价时产生误差。为此,本文应用最为广泛的 BFD 色差数据集,对该模型的明度 J 和彩度 C 进行优化,来修正视觉的均匀性,进而提出更为均匀的色貌模型 CAM16- $J'a'b'$,并对优化后的颜色空间进行了均匀性检验。

2 CAM16 模型的均匀性评价

对于 CAM16 模型均匀性的检验,本文从明度、彩度和色调 3 个指标来衡量。芒塞尔表色系统是美国国家标准协会和材料测试协会的颜色标准,被广为应用于在各个颜色样本以及色差公式的检验中^[7]。该表色系统的颜色样本均有对应的 CIE 表征色度系统的色品坐标和不同照明下的三刺激值。这些样本数据经 CAM16 模型转换到 Jab 颜色空间中,可用于检验色貌模型的均匀性。

2.1 明度视觉均匀性评价

芒塞尔表色系统包含 9 个明度面,这 9 个等级

表 1 CIECAM02/CAM16 的明度相关系数

Table 1 Brightness correlation coefficient of CIECAM02/CAM16

h	5R	5YR	5Y	5GY	5G	5BG	5B	5PB	5P	5RP
R^2 (CIECAM02)	0.9954	0.9968	0.9863	0.9912	0.9967	0.9965	0.9967	0.9946	0.9779	0.9971
R^2 (CAM16)	0.9954	0.9967	0.9862	0.9911	0.9967	0.9966	0.9969	0.9946	0.9784	0.9970

2.2 彩度视觉均匀性评价

理想情况下,均匀颜色空间中相同彩度、不同色相的颜色所构成的彩度圈在色品图上应为标准的

圆,即同一彩度圈内的半径处处相等,且相邻彩度圈之间的间距也相等,即彩度圈的半径是递增的。本文通过彩度圈偏离圆形的方均根误差和各彩度圈间

经过视觉实验,验证其在视觉上是等距的。因此在理想情况下,若色貌颜色空间中的明度 J 也是均匀的,则明度 J 和芒塞尔明度 V 应呈正比线性关系。从芒塞尔表色系统中选取彩度为 6 的 5 个主色调和 5 个中间色调作为样本,将明度值转换到色貌模型的 Jab 颜色空间中,并与芒塞尔的明度标尺进行线性回归分析,以样本相关系数 R^2 作为衡量指标来评价颜色空间明度的均匀性,其中, R^2 越接近于 1,说明明度 J 的视觉均匀性越好。

从图 1 可以看出,CIECAM02 模型和 CAM16 模型的明度 J 曲线几乎重合,两个模型的明度 J 均接近于拟合直线,说明色貌颜色空间的明度分量 J 的均匀性表现较好,但在芒塞尔明度 V 较小和较大时,两个模型的明度 J 还存在不均匀的情况。

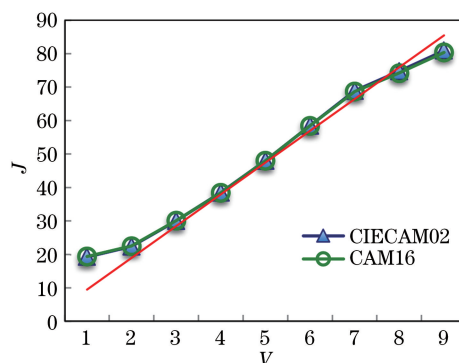


图 1 色貌颜色空间明度 J 与芒塞尔明度 V 的线性回归分析

Fig. 1 Linear regression analysis between color appearance color space lightness J and Munsell value V

表 1 给出了两个色貌模型的明度相关系数,其中第一行表示所选取的 10 个芒塞尔表色系统色调。明度相关系数 R^2 可详细地分析各个色调的明度均匀性,其中 CIECAM02 模型和 CAM16 模型有 80% 明度相关系数超过 0.99,甚至高达 0.9971,几乎接近于 1,说明两个模型的明度 J 均与芒塞尔明度 V 高度拟合,即模型明度 J 的视觉均匀性好。

圆,即同一彩度圈内的半径处处相等,且相邻彩度圈之间的间距也相等,即彩度圈的半径是递增的。本文通过彩度圈偏离圆形的方均根误差和各彩度圈间

距的标准差分别评价各彩度圈接近圆形的程度和彩度圈间距的均匀性。彩度圈偏离圆形的方均根误差 (RMSE)公式为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (C_{ij} - \bar{C}_j)^2}, \quad (1)$$

式中: C_{ij} 表示第*i*个色调的第*j*个彩度; \bar{C}_j 表示第*j*个彩度圈的彩度均值; N 表示第*j*个彩度圈包含的颜色样本数。彩度圈偏离圆形的方均根误差越小,说明彩度圈越接近于圆;彩度圈间距标准差(STD)越小,说明彩度圈间距均匀性越好。本文采用芒塞

尔样本中明度值*V*为5的所有样本来评价彩度视觉均匀性,其色品图如图2所示。

由表2可知:在间距标准差方面,CIECAM02模型的间距比CAM16模型更为均匀;在彩度圈偏离圆形方面,CAM16模型在彩度*C*为2到10时均匀性优于CIECAM02模型,在彩度*C*为1和12时均匀性较差。色貌模型的彩度圈偏离圆形的方均根误差值会随彩度的增加逐渐增加,表明彩度圈接近圆形的程度会随彩度的增加逐步降低,说明彩度的均匀性不够理想,色貌模型的彩度均匀性仍需进一步改进。

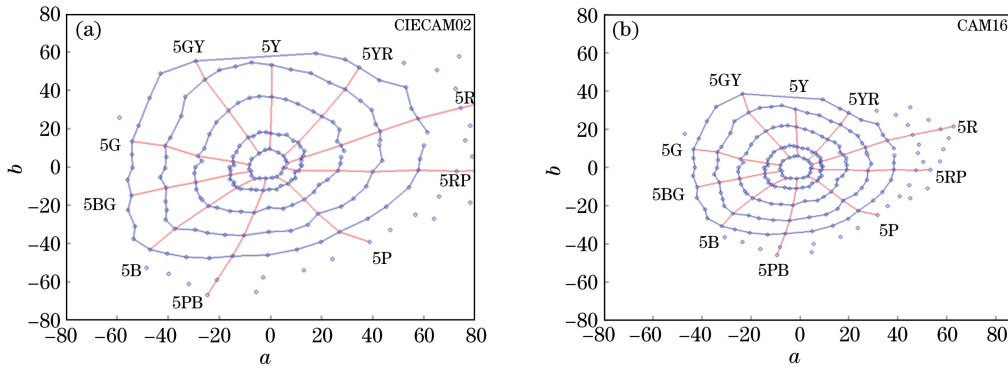


图2 明度*V*为5的芒塞尔颜色样本在色貌颜色空间*Jab*的分布。(a) CIECAM02模型的彩度圈分布图; (b) CAM16模型的彩度圈分布图

Fig. 2 Distribution of Munsell color sample with *V* of 5 in color appearance space *Jab*.

(a) Chroma performance of CIECAM02 model; (b) chroma performance of CAM16 model

表2 *Jab*空间各彩度圈偏离圆形的方均根误差

Table 2 Root mean square errors of each chromatic circle deviating from the circle in *Jab* space

Model	R_{MSE}							STD
	1	2	4	6	8	10	12	
CIECAM02	1.3175	2.1171	2.9093	4.1734	4.3453	3.7516	4.0099	2.8786
CAM16	1.2780	2.0961	2.7771	3.7994	4.0617	3.5290	5.7325	3.0822

2.3 色相视觉均匀性评价

具有相同色相的颜色所构成的色相连线在均匀颜色空间中,应从色品图的非彩色点向四周辐射成各色相线间的夹角都相等的射线状态。本文选用芒塞尔数据集中明度值*V*为5的10个主要色调,即5个主色调和5个中间色调的颜色作为样本,分别将样本数据转换到CIECAM02和CAM16的*Jab*颜色空间中。

通过方均根误差来衡量色调线偏离直线的程度,即

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N'} \sum_{j'=1}^{N'} \frac{(Y_{i'} - a_{j'} X_{i'j'})^2}{1 + a_{j'}^2}}, \quad (2)$$

式中: X 、 Y 表示色品图的坐标; j' 表示第*j'*条色调线; i' 表示色相线上的第*i'*个颜色; N' 表示样本个

数; $a_{j'}$ 表示该色调线的回归倾斜系数; $\sqrt{(Y_{i'} - a_{j'} X_{i'j'})^2 / (1 + a_{j'}^2)}$ 表示实际坐标点到拟合直线的垂直距离。

从表3的整体研究结果可知,CIECAM02模型的平均线性回归方均根误差小于CAM16模型的平均线性回归方均根误差,其中CAM16模型只有5R、5Y和5B三个色调的均匀性优于CIECAM02模型,说明CAM16模型的*a-b*色品面色调均匀性相比CIECAM02模型较差,仍需进一步优化。另外,色相线间的夹角在理想的均匀颜色空间中应该为36°,而实际的色相线之间的夹角各不相同。CIECAM02的色调夹角均值为36.421,优于CAM16的色调夹角均值36.791。根据色相均匀性检验结果,可以看出色貌模型CAM16的颜色空间

中色相指标仍不均匀,还需进一步改进。

表3 色相线的线性回归方均根误差

Table 3 Root mean square error of linear regression of the hue lines

<i>h</i>	5R	5YR	5Y	5GY	5G
R_{MSE} (CIECAM02)	0.6646	0.5799	0.3455	0.2456	0.6258
R_{MSE} (CAM16)	0.6172	1.3307	0.2796	0.2577	1.2033
<i>h</i>	5BG	5B	5PB	5P	5RP
R_{MSE} (CIECAM02)	0.1670	0.8909	0.6386	1.4341	0.6142
R_{MSE} (CAM16)	0.1866	0.7284	1.9092	2.6120	1.1714

3 CAM16 模型颜色空间优化

经过对新型色貌模型 CAM16 的 *Jab* 颜色空间均匀性检验分析发现,尽管该模型能解决 CIECAM02 模型的数学计算问题且简化了模型结构,但其颜色空间仍不够均匀。BFD 色差数据集^[8]是在不同实验条件下对各种色样材料采用不同实验方法获取而来的,由英国 Derby 大学的 M.R.Luo 和 B.Rigg 教授搜集并进行相应的视觉实验得到的数据集,其中包括 Bradford 数据^[9]、ISCC 数据^[10]、MMB 数据^[11]等 6 个数据集,共计 2776 对颜色样本对,常用来对颜色空间进行色差分析和校正。本文将采用该色差数据集对色貌颜色空间进行优化,以期建立更具均匀性的 CAM16 色貌颜色空间。

3.1 明度标尺 *J* 的均匀性优化

从色差数据集中选取 $\Delta J/\Delta E > 0.85$ 的数据对^[12]作为样本,以确保样本颜色的色差主要是由明度差引起的,其中 ΔJ 为 CAM16 模型 *Jab* 颜色空间的明度差, ΔE 为色差。

首先建立一个一元线性回归方程,即

$$\Delta J/\Delta V = mJ + n, \quad (3)$$

式中: ΔV 为色差数据的视觉色差。然后利用线性回归系数 m 和 n 对新的颜色空间明度进行相应地调整,使得明度具有更好的视觉均匀性,即明度差不再随明度的变化而变化,从而得出

$$dJ' = dJ/(mJ + n). \quad (4)$$

最后对(4)式进行积分处理,推导出新建颜色空间中的明度分量,即

$$J' = \int_0^J dt/(mt + n). \quad (5)$$

根据色差样本对的筛选判据,从色差数据中筛选出 52 对符合判据要求的色差数据对,其 $\Delta J/\Delta V$

与 J 的关系如图 3 所示。

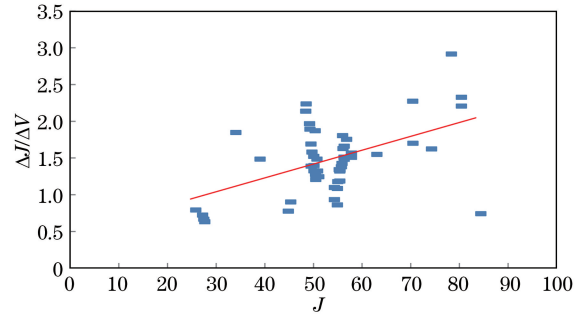


图3 明度标尺 J 与 $\Delta J/\Delta V$ 的线性关系

Fig. 3 Linear relationship between brightness scale J and $\Delta J/\Delta V$

为改善明度均匀性,对色差数据进行线性回归得到

$$\Delta J/\Delta V = 0.0189J + 0.4763. \quad (6)$$

设新建优化颜色空间的明度标尺为 J' ,对该标尺进行微分求导,得到优化后的明度 J' 为

$$dJ' = dJ/(0.0189J + 0.4763), \quad (7)$$

$$J' = \int_0^J \frac{dt}{0.0189t + 0.4763} = \frac{\ln(0.0189J + 0.4763) + 0.7417}{0.0189}. \quad (8)$$

3.2 彩度标尺 C 的均匀性优化

新建色貌颜色空间彩度的优化同样采用 BFD 色差数据集,从中筛选出 $\Delta C/\Delta E > 0.95$ 的颜色样本共 98 对,以确保样品色差仅由彩度引起,其中 ΔC 为 CAM16 模型 *Jab* 颜色空间的彩度差。 $\Delta C/\Delta V$ 与原始空间的彩度 C 关系如图 4 所示,可以看出两者关系并非线性,说明彩度标尺 C 仍需进一步优化,以得到更好的均匀性。

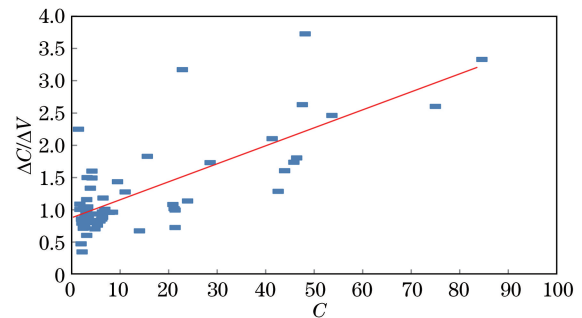


图4 彩度标尺 C 与 $\Delta C/\Delta V$ 的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between chroma scale C and $\Delta C/\Delta V$

新型颜色空间的彩度 C 分量优化方法同明度标尺的优化方法,同样利用线性回归方法和积分推导出均匀度更高的新彩度分量 C' ,推导公式为

$$\Delta C/\Delta V = m'C + n', \quad (9)$$

$$dC' = dC/(m'C + n'), \quad (10)$$

$$C' = \int_0^C dt/(m't + n'). \quad (11)$$

通过上述的优化过程,对所筛选出来的色差数据进行线性回归,得到新的彩度标尺方程式为

$$\Delta C/\Delta V = 0.0283C + 0.8547, \quad (12)$$

$$dC' = dC/(0.0283C + 0.8547), \quad (13)$$

$$C' = \int_0^C \frac{dt}{0.0283t + 0.8547} = \frac{\ln(0.0283C + 0.8547) + 0.157}{0.0283}. \quad (14)$$

由新的 CAM16 色貌颜色空间彩度标尺 C' 可以推导出相应的色品坐标,即

$$a' = C' \cos \theta_h = \cos \theta_h \cdot [\ln(0.0283C + 0.8547) + 0.157/0.0283], \quad (15)$$

$$b' = C' \sin \theta_h = \sin \theta_h \cdot [\ln(0.0283C + 0.8547) + 0.157/0.0283], \quad (16)$$

式中: θ_h 表示色调角。

4 新型色貌颜色空间 CAM16- $J'a'b'$ 的均匀性检验

对于新型色貌颜色空间 CAM16- $J'a'b'$,同样采用国际通用的芒塞尔数据来检验其均匀性。检验方法与 CAM16 模型相同,分别从颜色空间的明度、

表 5 各彩度圈偏离圆形的方均根误差

Table 5 Root mean square error of chromatic circle deviating from the circle

Model	R_{MSE}						STD	
	1	2	4	6	8	10		12
Jab	1.2780	2.0961	2.7771	3.7994	4.0617	3.5290	5.7325	3.0822
$J'a'b'$	1.2325	1.7607	1.8869	2.1957	2.0746	1.6682	2.4123	2.6718

4.3 色调均匀性检验

采用检验彩度均匀性的数据对优化后的色调均匀性进行检验,并计算出 10 条色调线的线性回归方均根误差。

由色调均匀性检验结果可以看出, $a'-b'$ 面的所有色调线 R_{MSE} 均小于原 CAM16 模型 $a-b$ 面的 R_{MSE} ,说明新型色貌颜色空间的色调均匀性有了较大改善,主色调间的夹角分布也更为均匀,如表 6 所示。

彩度以及色调标尺进行均匀性检验。

4.1 明度均匀性检验

将芒塞尔颜色空间的明度标尺 V 转换到 CAM16- $J'a'b'$ 颜色空间,并将 J' 与明度 V 进行线性回归,并通过回归方均根误差进行比较,结果如表 4 所示。

表 4 CAM16 模型新明度标尺 J' 与 J 的比较

Table 4 Comparison of new brightness scales J' and J of CAM16 model

Brightness	R^2	R_{MSE}
J	0.96403	4.0698
J'	0.97417	2.4904

从表 4 可知,明度标尺优化前后线性相关系数差别不大,原因是 CAM16 模型的明度标尺本身已具有较高的均匀度,但从线性回归方均根误差来看,优化后明度的均匀性有所提高。

4.2 彩度均匀性检验

对于新型色貌颜色空间 CAM16- $J'a'b'$,同样采用芒塞尔颜色系统中明度 V 为 5 的色品面来进行色调均匀性检验。检验过程采用芒塞尔数据集中明度为 5 的 10 个主要色调,通过计算各彩度圈间距标准差以及其偏离理想圆形的方均根误差来比较优化前后的结果。

由表 5 可知,新型色貌颜色空间 $a'-b'$ 面的两个彩度均匀性衡量指标均优于 CAM16 模型的 $a-b$ 面,说明新型色貌颜色空间在彩度方面的均匀性有较大改善。

表 6 色相线的线性回归方均根误差

Table 6 Root mean square error of linear regression of hue lines

h	5R	5YR	5Y	5GY	5G
$R_{MSE}(Jab)$	0.4973	1.1043	0.7632	0.5792	1.2962
$R_{MSE}(J'a'b')$	0.6646	0.5799	0.3455	0.2456	0.6258
h	5BG	5B	5PB	5P	5RP
$R_{MSE}(Jab)$	0.1974	0.8606	0.9757	2.3827	1.1240
$R_{MSE}(J'a'b')$	0.1670	0.8909	0.6386	1.4341	0.6142

5 结 论

在 CIECAM02 模型的基础上,最新色貌模型 CAM16 通过制定约束条件和改变局部色貌模型结构的方法解决了 CIECAM02 色貌模型中“黄蓝问题”和“紫色问题”等数学计算问题,并简化了原有的色貌模型结构,降低了模型计算的复杂性。采用芒塞尔表色系统对新型色貌模型 CAM16 进行均匀性检验评估,评估结果表明模型的明度标尺均匀性较好,但还存在改善的空间,其次,模型的彩度和色调均匀性仍需进一步优化改善。采用 BFD 色差数据集对 CAM16 色貌模型的明度标尺和彩度标尺分布进行优化,建立了新的优化色貌空间 CAM16- $J'a'b'$ 。均匀性检验结果表明,优化后的颜色空间的明度标尺略有改善,而模型的彩度和色调均匀性改善较为明显,与原 CAM16 模型颜色空间相比,均匀性有了进一步的提高,相关结果可为跨媒体颜色再现的研究提供有益的参考。

参 考 文 献

- [1] Fairchild M D. Color appearance models [M]. 3rd ed. UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005: 265-274.
- [2] Süsstrunk S, Brill M H. The nesting instinct: repairing non-nested gamuts in CIECAM02 [C] // Late-breaking-news paper at 14th SID/IS&T Color Imaging Conference. [S.l.: s.n.], 2006.
- [3] Brill M H, Süsstrunk S. Repairing gamut problems in CIECAM02: a progress report [J]. Color Research & Application, 2008, 33(5): 424-426.
- [4] Li C J. R1-42 extensions of CIECAM02 [C] // CIE 26th Session, Beijing, China, 2007, also SID/IS&T 15th Color Imaging Conference, Albuquerque. [S.l.: s.n.], 2007.
- [5] Li C J, Perales E, Luo M R, et al. Mathematical approach for predicting non-negative tristimulus values using the CAT02 chromatic adaptation transform [J]. Color Research & Application, 2012, 37(4): 255-260.
- [6] Li C J, Li Z Q, Wang Z F, et al. Comprehensive color solutions: CAM16, CAT16, and CAM16-UCS [J]. Color Research & Application, 2017, 42(6): 703-718.
- [7] Ma R Q, Liao N F. Influence of illuminant chromaticity on color constancy under RGB-LED light source [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0933001.
马瑞青, 廖宁放. RGB-LED 光源下光源色度对颜色恒常性的影响 [J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0933001.
- [8] Luo M R, Cui G, Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 [J]. Color Research & Application, 2001, 26(5): 340-350.
- [9] Melgosa M, Hita E, Poza A J, et al. Suprathreshold color-difference ellipsoids for surface colors [J]. Color Research & Application, 1997, 22(3): 148-155.
- [10] Stroocka D, Brockes A, Paffhausen W. Influence of experimental parameters on the evaluation of color-difference ellipsoids [J]. Color Research & Application, 1983, 8(3): 169-175.
- [11] Morley D I, Munn R, Billmeyer F W, Jr. Small and moderate colour differences: II the Morley data [J]. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 1975, 91(7): 229-242.
- [12] Huan H, Li W, Zhao D Z. Uniform color space based on CIECAM97s [J]. Progress in Nature Science, 2001, 11(4): 70-74.
宦晖, 李为, 赵达尊. 在 CIECAM97s 中建立均匀颜色空间 [J]. 自然科学进展, 2001, 11(4): 70-74.