

面向光源颜色质量普适评价方法的研究

章夫正¹ 徐海松¹ 吴晓玟¹ 蔡建奇²

¹浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

²中国标准化研究院, 北京 100088

摘要 鉴于国际照明委员会(CIE)显色指数无法满足发光二极管(LED)等新型光源的颜色质量评价问题,探讨了普遍适用的光源颜色质量评价方法,对于促进新型光源性能的改善和发展并进一步提高其市场认可度具有重要意义。采用16种典型的评价指标对不同照明体和光源的颜色质量进行评估实验,结果表明,多数评价指标之间具有相关性,且基于颜色保真性和基于色域面积的评价方法能较为全面地表征光源的颜色质量。初步尝试了光源颜色质量综合性评价指标的构建,并获得验证。

关键词 视觉光学; 光源; 显色性; 颜色质量; 评价方法

中图分类号 O432.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0833001

Towards Universal Evaluation Method for Color Quality of Light Sources

Zhang Fuzheng¹ Xu Haisong¹ Wu Xiaomin¹ Cai Jianqi²

¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

²China National Institute of Standardization, Beijing 100088, China

Abstract Commission internationale de l'Eclairage (CIE) color rendering index has many deficiencies when applied to evaluating color quality of new-type light sources such as light emitting diode (LED). The universal evaluation method of light source color quality is discussed, which can play a vital role in contributing to the application of new-type light sources. 16 typical indexes are adopted to evaluate different types of illuminants and light sources in the experiment. The results indicate that most indexes are correlated with each other, and color fidelity based and gamut based methods are proposed to totally evaluate the color quality of light sources. An attempt is made and further verified to construct a comprehensive index of color quality for evaluating light sources.

Key words visual optics; light source; color rendering; color quality; evaluation method

OCIS codes 330.1730; 330.1690; 330.1715

1 引 言

一种新技术或新产品的推广和使用,关键在于有配套的且与实际相符的质量评价方法,对于照明光源也不例外。随着发光二极管(LED)等新型光源技术的不断发展,其显著的节能、长寿及可控特性越来越受到人们的广泛关注^[1-5]。但是,目前被业界广泛认可的光源颜色质量评价方法,即国际照明委员会(CIE)显色指数(CRI),已不能完全适用于评价这些光源的颜色质量^[6-7],进而在一定程度上限制了新型光源技术的发展。CIE于1965年推荐显色指数用于评价光源的颜色质量,虽已被应用了半个世纪,但其也存在一定的局限性,如测试样本、参考照明体、颜色空间与色适应变换等方面的问题,特别是不能很好地满足新型光源的评价问题^[8-9]。因此,研究具有普遍适用性的光源颜色质量评价方法具有十分重要的现实意义。本文针对不同类型的照明体和光源,采用统计方法分析和比较目前16种典型评价指标的性能,并由此探讨了构建全面描述光源颜色质量综合性评价指标的尝试。

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-04-02

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAK28B01-7)、国家973计划(2013CB328802)

作者简介: 章夫正(1987—),男,博士研究生,主要从事颜色科学与照明工程方面的研究。E-mail: zh-fuzheng@163.com

导师简介: 徐海松(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色科学、影像技术、照明工程等方面的研究。

E-mail: chsxu@zju.edu.cn(通信联系人)

2 主要评价方法

针对 CIE 显色指数在评价光源颜色质量中所存在的问题,近年来研究人员开展了大量的相关探索,并提出了多种评价方法。其中,Davis 等^[9]提出的颜色品质量值(CQS)以及 Smet 等^[10]提出的显色指数 2012(CRI2012)为两个最具代表性的评价方法^[11],前者与 CIE 显色指数相比有了多方面的改善,包含了更多的评价指标,而后者则更着重于测试样本的改进。

2.1 颜色品质量值

CQS 包含四个评价指标,即总体 CQS(Q_a)值、颜色保真量值(Q_i)、颜色喜好性量值(Q_s)及色域面积量值(Q_g)^[9]。其中, Q_a 为总体性评价指标,其余为补充性指标,适用于专家用户。在具体计算中,CQS 综合考虑了 CIE 显色指数存在的测试样本、色适应变换及颜色空间等问题,从蒙赛尔色样集中选择了 15 个高饱和度的测试样本,采用 CMC 的 CAT2000^[12]进行色适应变换,在 CIELAB 空间中计算色差。计算 Q_a 时,对于能够增加样本彩度的光源采取折中的做法,即计算色差时不考虑彩度增加的影响。同时,对于评价相关色温(CCT)极低的光源,使用 CCT 系数进行校正,以避免计算的结果过于偏高。计算 Q_i 时,除计算色差考虑彩度变化的影响外,其余计算过程与 Q_a 类似。计算 Q_s 时,对于能够增加样本彩度的光源,计算色差时考虑这一积极影响,以更好地符合视觉评价。 Q_g 为待测光源下 15 个测试样本在 a^*b^* 坐标平面所围成多边形的相对面积(参照标准照明体 D65)。

2.2 显色指数 2012

CRI2012^[10]的显著特点在于测试样本的选择,其计算一般 CRI 与特殊 CRI 分别采用了不同的测试样本。为了避免光源生产商针对性地优化光源的光谱以获得较高的显色指数(实际并没有提高光源的颜色质量),CRI2012 在计算一般 CRI 时采用了数学推导的 17 个测试样本(HL17),其光谱反射比曲线如图 1 所示,可见其光谱特性在整个可见光波长范围内是均匀分布的。为了获得待测光源下更具体的颜色变化信息,计算特殊 CRI 时则采用了 210 个实际存在的测试样本光谱反射比。色差计算采用了 CAM02-UCS,并用均方根来综合每个测试样本的色差(而非 CIE 显色指数中简单的算术平均),考虑了人眼的视觉特性而采用 S 型函数来获得一般 CRI,其特殊 CRI 的计算方法也类似。

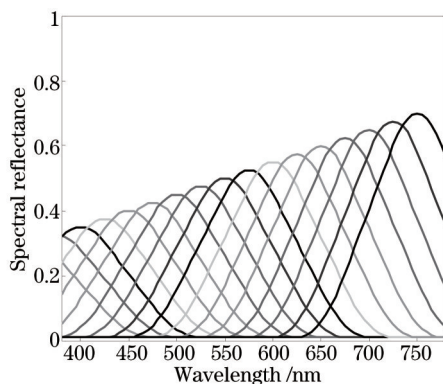


图 1 CRI2012 中测试样本(HL17)的光谱反射比曲线

Fig.1 Spectral reflectance curves of test color samples (HL17) adopted in CRI2012

2.3 其他评价方法

除 CIE 显色指数及上述介绍的两种方法外,还有很多其它评价方法。Li 等^[13]提出的基于 CAM02-UCS 模型的显色指数(CRI-CAM02UCS)主要改进了 CIE 显色指数中所用的色适应变换及颜色空间,故评价结果与 CIE 显色指数类似,但与视觉评价更相符。Bodrogi 等^[14]从评价方法易于理解的角度出发,尤其为了便于非专业用户理解使用,提出了基于排序的显色指数(RCRI),采用了 5 个判断等级,即优异、良好、可接受、不能接受及非常差,根据在待测光源下测试样本表现出优异与良好的数量来对光源的颜色质量进行评价,即优异与良好的样本数量越多,光源的颜色质量越高。Hashimoto 等^[15]基于光源照明下颜色的视觉清晰度与感觉对比度密切相关的研究,提出了感觉对比指数(FCI)对光源相关的颜色质量属性进行评价,采用特殊选择的红、绿、黄、蓝四种颜色组合,并经过色适应变换后在 CIELAB 空间或 CIECAM02 空间(J, a_c, b_c)中所形成的红绿蓝与红绿黄两个三角形面积之和来计算感觉对比指数。Judd^[16]基于前人关于喜好色与记忆色的研究,提出奉承指数(R_f)来评价光源对颜

色喜好性的影响,类似的方法还有颜色喜好性指数(CPI)^[17]以及记忆色显色指数(MCRI)^[18]等。

另外,基于色域面积的评价方法在一定程度上也能够体现光源对颜色喜好性的影响。色域面积是指在待测光源下,测试样本在某均匀色品图或颜色空间中所围成的多边形面积或立体表面积,该色域面积越大往往伴随着颜色饱和度的增加,而已有研究表明^[16-17],人们往往更喜欢高饱和度的颜色,故光源若能适当增加颜色的饱和度,则该光源具有更好的颜色视觉效果。同时,色域面积越大意味着在该光源下所能区分的颜色越多,因此色域面积还能度量光源的辨色能力。这类指标有辨色指数(CDI)^[19],色域面积指数(GAI)^[20]以及圆锥表面积指数(CSA)^[21]等,这些方法十分相似,其差别主要在于选用的测试样本以及采用的色品图或颜色空间不同。

3 实验及讨论

3.1 实验与结果

为测试并分析各种评价方法的特性及其相互关系,实验选择不同类别的照明体和光源实施评价。采用的评价方法包括 CIE 一般显色指数(R_a)、CQS 中的四个评价指标(Q_a 、 Q_t 、 Q_p 及 Q_g)、CRI-CAM02UCS(记为 $R_{a,02}$)、CRI2012(记为 $R_{a,12}$)、RCRI、FCI、FCI02、 R_f 、CPI、MCRI、GAI、CDI 以及 CSA 等 16 个典型的评价指标。

实验所用照明体及光源的相对光谱功率分布数据主要有三个来源:1) 采用 Konica Minolta 的光谱辐射计 CS-2000 对 JUST Normlicht 的 ColorControl LED 灯箱实际测量获得其 5 个不同 CCT 下(分别为 2500 K、2856 K、4000 K、5000 K 及 6500 K)LED 光源的相对光谱功率分布数据;2) 取自 CIE 15:2004 色度学技术报告中的 CIE 照明体^[22],具体包括 CIE 标准照明体 A 和 D65,照明体 D50、D55 及 D75,荧光灯 FL1~12 及 FL3.1~3.15,高压气体放电灯 HP1~5 等 37 组照明体的相对光谱功率分布数据;3) 其余数据均取自 CIE TC1-69 网站中所提供用于计算 CQS 和 MCRI 的表格,共 101 组相对光谱功率分布数据,其中包含了传统光源(如白炽灯、荧光灯及高压气体放电灯等)、新型光源(如 RGB 白光 LED、RGBO 白光 LED 及荧光粉型白光 LED 等)以及一些理论照明体(如等能光谱、色温为 3000K 的黑体辐射、Ideal Prime Color 等)。可见,以上照明体和光源覆盖了当前已有的照明光源类型,以测试相关评价方法的性能,并为进一步的分析提供坚实的数据基础。

所有照明体和光源的相对光谱功率分布数据均分布在以 5 nm 为间隔的 380~780 nm 波长范围内,CCT 覆盖 1950 K~7500 K,即包含了常用照明光源的色温区域,其色品坐标具体分布如图 2 所示。将总共 143 组测试照明体和光源数据划分成 6 种类别,即白炽灯系列 I (10 组)、荧光灯系列 II (50 组)、高压气体放电灯系列 III (16 组)、汞灯系列 IV (3 组)、LED 系列 V (61 组)及理论照明体 VI (3 组)。

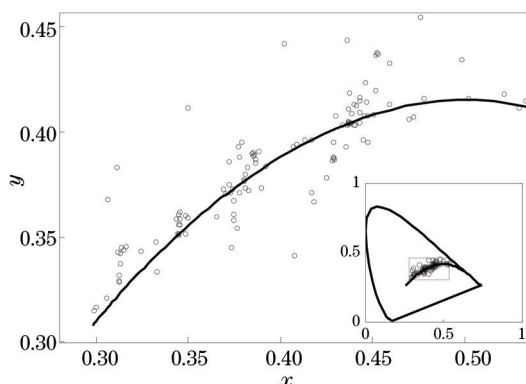


图2 实验所用测试照明体和光源在 CIE 1931 色品图上的分布

Fig.2 Distribution of test illuminants and light sources in CIE 1931 chromaticity diagram

图 3 以较为典型的 R_a 与 Q_g 比较为例给出了测试照明体和光源的评估结果。横坐标表示按照不同类型依次排列的测试照明体和光源(即 I、II、III、IV、V、VI)。可见,对于不同类型的照明体和光源, R_a 与 Q_g 具有大致相似的变化趋势。由于 R_a 是一种基于色差的评价方法,而 Q_g 则为基于色域面积的指标,二者在数值上具有一定差别是可以预期的。而对于第 V 类 LED 光源, R_a 与 Q_g 的评估结果差别最为显著,甚至在某些 LED 光源中出现了相反的变化趋势,表明某些 LED 光源虽然其 CIE 显色指数较低但却具有较大的色域面积。已有

研究表明^[9],某些 CIE 显色指数低的 LED 光源其实际颜色质量并不一定差,反过来也存在 CIE 显色指数高但色域面积较小的 LED 光源,这进一步说明了 CIE 显色指数在评价 LED 等新型光源时所存在的局限性。类似地,其余指标也多在评估 LED 光源时存在相对明显的差异性。

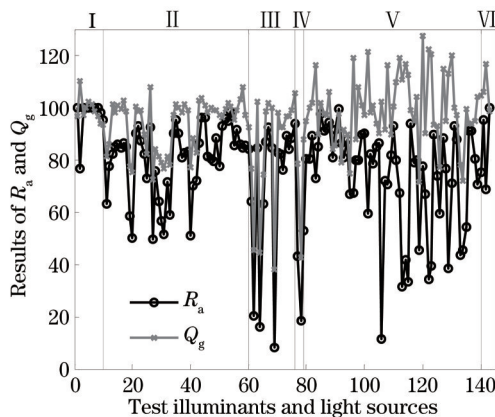


图 3 R_a 和 Q_g 对测试照明体和光源的评估结果

Fig.3 Evaluating results of test illuminants and light sources with R_a and Q_g

3.2 分析与讨论

光源颜色质量评价方法研究的最终目标是建立一个具有普适性且指标参量尽可能少的评价方法,而待测试的 16 种目前比较典型的评价指标,对于照明工业界或最终消费者,其选择应用均是非常困难甚至是不现实的。另一方面,这 16 种评价指标仅从计算方法上看其部分参量之间应该具有一定的相关性,基于表示多列等级变量相关程度的肯德尔等级相关系数对各个评价指标的测试数据进行相关性分析,其结果如表 1 所示。同时,对各个指标之间相关性的显著性水平进行了 p 值检验。表中标注下划线的相关系数代表其 p 值大于 0.01,即相关性较差;其他系数的 p 值均小于 0.01,即存在一定相关性,且相关系数越大相关性越高,其中加粗字体表示其相关系数接近 0.9 甚至 1。

表 1 不同评价指标之间的肯德尔等级相关系数

Table 1 Kendall rank correlation coefficients between different metrics

Metrics	R_a	Q_a	Q_t	Q_p	Q_g	$R_{a,02}$	$R_{a,12}$	RCRI
R_a	1.000							
Q_a	0.805	1.000						
Q_t	0.845	0.892	1.000					
Q_p	0.607	0.760	0.652	1.000				
Q_g	0.206	0.325	0.222	0.549	1.000			
$R_{a,02}$	0.876	0.838	0.889	0.623	0.215	1.000		
$R_{a,12}$	0.718	0.799	0.767	0.670	0.256	0.745	1.000	
RCRI	0.817	0.811	0.840	0.610	0.199	0.860	0.742	1.000
FCI	<u>0.077</u>	0.150	<u>0.069</u>	0.338	0.557	<u>0.072</u>	<u>0.084</u>	<u>0.073</u>
FCI02	<u>0.157</u>	0.235	<u>0.149</u>	0.431	0.622	<u>0.149</u>	0.174	<u>0.146</u>
R_t	0.702	0.718	0.713	0.625	0.326	0.748	0.614	0.697
CPI	0.362	0.468	0.384	0.606	0.630	0.383	0.375	0.345
MCRI	0.482	0.570	0.495	0.685	0.537	0.504	0.478	0.501
GAI	0.167	0.262	0.201	0.358	0.436	0.190	0.265	0.160
CDI	0.167	0.261	0.200	0.358	0.435	0.190	0.264	0.160
CSA	0.144	0.211	0.179	0.250	0.287	0.164	0.229	0.128
Metrics	FCI	FCI02	R_t	CPI	MCRI	GAI	CDI	CSA
FCI	1.000							
FCI02	0.883	1.000						
R_t	0.158	0.218	1.000					
CPI	0.497	0.540	0.530	1.000				
MCRI	0.436	0.520	0.549	0.687	1.000			
GAI	<u>0.015</u>	<u>0.096</u>	0.207	0.300	0.280	1.000		
CDI	<u>0.015</u>	<u>0.096</u>	0.206	0.300	0.279	0.999	1.000	
CSA	<u>-0.130</u>	<u>-0.049</u>	0.160	0.179	0.175	0.840	0.840	1.000

由表1可见,多数指标之间存在一定的相关性,且某些指标之间的相关系数接近于0.9,如 R_a 与 $R_{a,02}$ 、 Q_a 与 Q_f 、 Q_f 与 $R_{a,02}$ 、FCI与FCI02等,而CDI与GAI的相关系数甚至接近于1,这主要源于其计算方法的高度相似性。 R_a 与 $R_{a,02}$ 的计算过程基本相同,其差别主要在于两者采用的颜色空间和色适应变换不同,但这并不会影响不同光源之间的相对排序,FCI与FCI02的关系也同样如此。 Q_f 在CQS的补充指标中代表颜色保真性量值,与 Q_a 的差别在于没有包含饱和度系数,即在被测光源照明下样本颜色饱和度发生任何变化都会降低其 Q_f ,而对于 Q_a 则只有饱和度减小才会对其产生影响,且实际计算中发现这两个值之间的差别很小,并具有相同的变化趋势。 Q_f 与 $R_{a,02}$ 均旨在度量光源的颜色保真性,故具有较高的相关性。

p 值大于0.01的相关系数主要出现于FCI、FCI02与其他指标(即 R_a 、 Q_f 、 $R_{a,02}$ 、 $R_{a,12}$ 、RCRI及GAI、CDI、CSA)之间。FCI和FCI02采用四个颜色所形成的两个三角形面积之和衡量光源对所照明颜色的对比度或清晰度的影响,与参考照明体相比,三角形面积之和越大则FCI和FCI02的值越高,但这同时也意味着在该光源下测试样本的颜色可能发生了变化(尤其是颜色的饱和度),进而影响了颜色的保真性。而从原理上看, R_a 、 Q_f 、 $R_{a,02}$ 、 $R_{a,12}$ 及RCRI均衡量光源对颜色的保真性,因此其与FCI和FCI02的相关性较差。CSA与 R_a 、RCRI相关性不高的原因也类似。GAI、CDI及CSA均计算8个测试颜色样本在CIE 1960 uv 色品图或CIE 1976 $u'v'$ 色品图上所围成的八边形面积,而FCI和FCI02仅使用四个测试样本,同时考虑了色适应并采用不同的颜色空间(即CIELAB和CIECAM02)计算色域面积,这均在一定程度上影响了它们之间的相关性。

此外,GAI、CDI及CSA等基于色域面积的评价方法与其他指标之间的相关系数较小,这说明GAI、CDI及CSA等评价指标与其它指标之间可能表征的是光源颜色质量的不同方面。

基于以上相关性分析并结合各评价指标的计算原理,从定性的角度来看这些评价指标可以划分成不同的类别,从而对光源颜色质量进行分类评估,无需面对如此多的评价指标而不知所措。鉴于此,进一步采用聚类分析方法从定量的角度来探讨评价指标的类别属性,结果如图4所示,其中横坐标表示对不同指标间相似程度的度量,该值越大则两个评价指标差别也越明显。

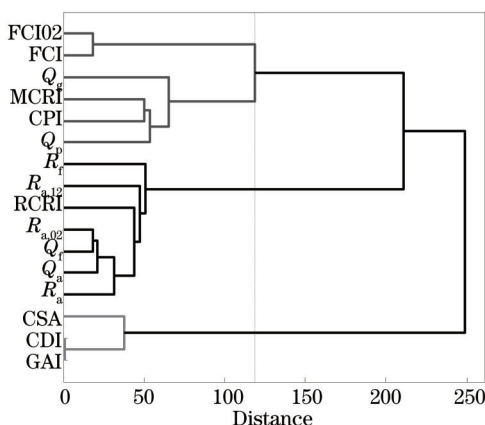


图4 各评价指标的聚类分析结果

Fig.4 Cluster analysis result for different metrics

从图4中可清晰地看出,在虚线截断处16个评价指标聚为3类。第一类(GAI、CDI、CSA)均为基于色域面积的评价方法,如在某光源下计算的色域面积越大,则其能再现的颜色越多,即在该光源下分辨颜色的本领越强。同时,色域面积越大意味着测试样本的颜色可能由于饱和度的增加而发生了变化,且往往是被人们所喜好的。因此,可认为基于色域面积的评价方法侧重于描述光源的辨色性和颜色喜好性。第二类(R_a 、 Q_a 、 Q_f 、 $R_{a,02}$ 、RCRI、 $R_{a,12}$ 、 R_f)主要衡量光源的颜色保真性。尽管 R_f 最初设计用来评价光源的颜色喜好性能,但其在计算时为了能与 R_a 一致而将颜色喜好性的色品增量降低到初始值的五分之一,所以该指标并不能很好地评估光源的颜色喜好性,而可看作是一种颜色保真性指标。第三类(Q_g 、CPI、MCRI、 Q_g 、FCI、FCI02)主要表征光源对颜色喜好性的影响。 Q_g 作为CQS中的色域面积量值但并没有聚到第一类中,其原因可能是计算 Q_g 所用的测试样本和颜色空间不同,且计算 Q_g 的颜色刺激值是经过色适应变换后的三刺激值,而GAI、CDI、CSA的计算均没有经过任何色适应变换。另外,如同第一类,色域面积本身能够反映出光源对颜色喜好性的影响,

所以 Q_g 包含在第三类中也是可以理解的。注意到在第三类评价指标中,除了 Q_p 、CPI 与 MCRI 外,其余均为基于色域面积的评价方法,这进一步说明了色域面积能衡量光源对颜色喜好性的影响。通过前文的相关性分析可看出每个类别中的指标间确实具有较高的相关性,进一步对聚类分析结果的有效性进行了验证。

综上,评价光源的颜色质量总体上可采用两类方法,即基于保真性的评价方法与基于色域面积的方法,前者侧重于光源对颜色还原性能的作用,而后者则强调光源对颜色喜好性和辨色性的影响。但是,这两者在某种程度上又会产生矛盾。如某光源具有较好的颜色保真性,意味着在该光源下颜色的失真程度较小,适用于颜色复现等领域;而家居等一些照明应用中人们往往更喜欢高饱和度的颜色,若光源能增加颜色的饱和度则其色域面积便会增大,即在该光源下样本的颜色发生了变化,故其颜色保真性较差,前文的相关性分析也说明了这一点。因此,可根据实际的应用场合来选择或兼顾考虑基于保真性(如 Q_a 、CRI2012 等)或基于色域面积(如 Q_g 、GAI 等)的评价方法,以满足描述光源颜色质量的不同需求,而两者的结合可能更为全面地表征光源的颜色质量。Rea 等^[20]、Guo 等^[21]以及 Houser 等^[23]的研究也推荐采用基于保真性和基于色域面积的评价方法对光源颜色质量进行较为全面的评价,本文正是从统计分析的角度对此论断作出了进一步的定量验证。

4 综合性评价指标的探索

为了全面地表征光源的颜色质量,采用主成分分析技术对 16 个评价指标进行特征提取,最终获取三个主成分,分别记为 F 、 P 、 D ,其包含了原始评价指标 95% 以上的信息含量,故而能有效地代表原有的各评价指标。以每个主成分的方差贡献率为权重对主成分进行综合,即

$$C_e = 0.693F + 0.172P + 0.135D, \quad (1)$$

式中 C_e 作为各评价指标主成分的综合较为全面地代表了光源的颜色质量属性,可为进一步构建综合性指标提供优化依据。同时,基于前文聚类分析,尝试探索可兼顾基于颜色保真性和基于色域面积评估方法的综合性评价指标的构建。

颜色保真性的表征融合 CQS 中的 Q_a 以及 CRI2012 各自的优点。以两者的测试样本作为新颜色保真性指标的测试样本(共 32 组),从而避免 CIE 显色指数中测试样本存在的两方面突出问题,即样本中缺少高饱和度的颜色以及易被光源生产商针对性地优化光源光谱而获得不真实的显色性。构建的颜色保真性指标计算流程与 Q_a 类似,差别主要在于考虑人眼的视觉特性将最终计算的色差均方根按照 S 型函数转换。于是,提出了新的颜色保真性指标 C_r , 即

$$C_r = M_{\text{cct}} \times \left[\frac{2}{\exp(k|\Delta E_{\text{rms}}|^{1.5}) + 1} \right]^2, \quad (2)$$

式中 M_{cct} 为饱和度系数,计算同 CQS, ΔE_{rms} 由 32 组测试样本计算出的色差均方根,对于标准色度观察者,除计算 CCT 采用 2° CIE 标准色度系统外,其余均采用 10° 标准色度系统,系数 k 按照 CIE 的 12 组荧光灯 FL1~12 进行光谱优化以使其 C_r 平均值与相应的 CIE 显色指数平均值相等,从而在一定程度上维持传统照明光源 C_r 与 CIE 显色指数的一致性,最终优化得到 $k=1/101$ 。

色域面积的表征采用 GAI 和 CQS 中的 Q_g 。由此,将新的颜色保真性指标 C_r 与色域面积指标 G_{GAI} 和 Q_g 进行加权组合,构建了综合性颜色质量指标 C_{CQI} , 即

$$C_{\text{CQI}} = wC_r + 0.5(1-w)(G_{\text{GAI}} + Q_g), \quad (3)$$

式中 w 为权重,通过最优化方法获得,使之能综合代表不同评价指标所描述的光源颜色质量信息。

基于各种测试照明体和光源导出 C_e , 并以其为目标可优化得到 CQI 中的权重 $w=0.489$ 。通常,对于一般的普通用户或工业应用,权重 w 取值为 0.489 可较为综合地表征光源的颜色质量,即能兼顾对光源的颜色保真性、喜好性以及辨色性等质量属性的评估。但对于专业应用而言,权重 w 可根据实际的需求进行适当的调整。若更强调光源的颜色保真性, w 可取较大值直至最大值 1; 若更强调光源对颜色喜好性和辨色性的影响, w 可取较小值直至最小值 0。其中, w 取 1 或 0 分别对应于两种极端情形: 当 $w=1$ 时, CQI 仅包含颜色保真性指标, 适用于仅对光源的颜色保真性有特定要求的场合; 当 $w=0$ 时, CQI 仅包含色域面积指标, 则适用于仅对光

源的颜色喜好性和辨色性有明确要求的情形。

表 2 CQI 与各评价指标的相关性

Table 2 Correlations between CQI and existing different metrics

Color fidelity-based metrics				Color preference-based metrics			Color gamut-based metrics		
Mean		0.829		Mean		0.731	Mean		0.748
R_s	Q_s	Q_f	$R_{s,02}$	Q_p	CPI	MCRI	GAI	CDI	CSA
0.780	0.895	0.813	0.833	0.945	0.845	0.839	0.780	0.780	0.684
$R_{s,12}$	RCRI	R_f		Q_g	FCI	FCI02			
0.881	0.765	0.835		0.795	0.431	0.530			

为验证所构建综合性评价指标的有效性,采用 CQI 对所有测试照明体和光源进行评价,并将其与原有 16 个评价指标进行相关性分析,结果列于表 2 中。可见,除 FCI 和 FCI02 外,CQI 与其他各指标之间均具有明显的相关性($p < 0.01$)。而前文相关性分析已表明 FCI 和 FCI02 与其余多数评价指标间的相关性较差,故可知这两个指标对光源颜色质量属性的表征能力有限。构建的综合性指标虽仅包含颜色保真性与色域面积指标,但聚类分析表明 CQS 中的色域面积量值 Q_s 隶属于颜色喜好性指标,而表 2 中 CQI 与颜色喜好性指标间均具有较高相关性的结果进一步验证了这一点,尤其与 CQS 中的颜色喜好性量值 Q_p 到达了最显著的相关性。因此,所构建的综合性评价指标能较为全面地表征光源颜色质量属性,适用于各种测试照明体和光源,同时也为光源颜色质量评价方法的深入研究进行了有益地探索。

5 结 论

针对当前尚无可被广泛接受并能适用于 LED 等新型光源颜色质量评价之方法的困境,测试了 16 种已有的典型评价指标,并从统计学角度对这些指标进行了定量分析,表明多数评价指标之间具有一定的相关性。采用聚类分析方法总结出分别基于保真性和色域面积的两类评价方法,且进一步得出了这两者的结合能较为全面描述光源颜色质量的论断。基于此论断探索性地构建了一种综合性的评价指标,并经全部测试照明体和光源的评估分析,验证了该指标的可行性和有效性,为光源颜色质量评价的深入探讨提供了有益的数据积累和技术基础。

参 考 文 献

- 1 Shen Xiaoxia, Dong Guoyan, Ren Yazhou, *et al.*. Light extraction enhancement of photonic crystal LEDs with complex technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100006.
沈晓霞,董国艳,任亚洲,等.利用复合技术提高光子晶体 LED 发光效率的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100006.
- 2 Kun Yuan, Huimin Yan, Shangzhong Jin. LED-based spectrally tunable light source with optimized fitting[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(3): 032301.
- 3 Zheng Yunfei, Yan Yu, Li Xiangning, *et al.*. A vector design method for LED cyclorama light based on light curves[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 112201.
郑云飞,闫钰,李湘宁,等.一种基于配光曲线的 LED 天幕灯矢量设计方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 112201.
- 4 Wu Yuxiang, Liu Chunyan, Wen Shangsheng. Calculation of sky luminance distribution at arbitrary time based on the CIE sky model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1101004.
吴玉香,刘春燕,文尚胜.基于 CIE 天空模型计算任意时间天空亮度分布[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1101004.
- 5 Xu Daisheng, Chen Xiao, Zhu Xiang, *et al.*. A dimming lighting source based on cold and warm white LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0123004.
徐代升,陈晓,朱翔,等.基于冷暖白光 LED 的可调色温可调光照明光源[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0123004.
- 6 CIE. Method of measuring and specifying color rendering properties of light sources[R]. Vienna: CIE Central Bureau, 1995.
- 7 CIE. Color rendering of white LED light sources[R]. Vienna: CIE Central Bureau, 2007.
- 8 Baniya R R. Study of Various Metrics Evaluating Color Quality of Light Sources[D]. Espoo: Aalto University, 2012: 32-33.
- 9 Davis W, Ohno Y. Color quality scale [J]. *Opt Eng*, 2010, 49(3): 033602.
- 10 Smet K A G, Schanda J, Whitehead L, *et al.*. CRI2012: A proposal for updating the CIE colour rendering index[J]. *Lighting Research*

- and Technology, 2013, 45(6): 689–709.
- 11 Houser K W. If not CRI, then what?[J]. LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America, 2013, 9 (3): 151–153.
- 12 Li C, Luo M R, Rigg B, *et al.*. CMC 2000 chromatic adaptation transform:CMCCAT2000[J]. Color Research & Application, 2002, 27 (1): 49–58.
- 13 Li C, Luo M R, Li C, *et al.*. The CRI–CAM02UCS colour rendering index[J]. Color Research and Application, 2012, 37(3): 160–167.
- 14 Bodrogi P, Bruckner S, Khanh T Q. Ordinal scale based description of colour rendering[J]. Color Research & Application, 2011, 36 (4): 272–285.
- 15 Hashimoto K, Yano T, Shimizu M, *et al.*. New method for specifying color–rendering properties of light sources based on feeling of contrast[J]. Color Research & Application, 2007, 32(5): 361–371.
- 16 Judd D B. A flattery index for artificial illuminants[J]. Illuminating Engineering, 1967, 62: 593–598.
- 17 Thornton W A. A validation of the color–preference index[J]. Journal of the Illuminating Engineering Society, 1974, 4(1): 48–52.
- 18 Smet K A G, Ryckaert M R, Pointer M R, *et al.*. A memory colour quality metric for white light sources[J]. Energy and Buildings, 2012, 49: 216–225.
- 19 Thornton W A. Color–discrimination index[J]. J Opt Soc Am, 1972, 62(2): 191–194.
- 20 Rea M S, Freyssinier–Nova J P. Color rendering: a tale of two metrics[J]. Color Research and Application, 2008, 33(3): 192–202.
- 21 Guo X, Houser K W. A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources[J]. Lighting Research and Technology, 2004, 36(3): 183–197.
- 22 CIE. Colorimetry [R]. Vienna: CIE Central Bureau, 2004
- 23 Houser K W, Wei M, David A, *et al.*. Review of measures for light–source color rendition and considerations for a two–measure system for characterizing color rendition[J]. Opt Express, 2013, 21(8): 10393–10411.

栏目编辑: 苏 岑