

文章编号: 0253-2239(2009)07-1801-06

基于物体表面色的超大色差评价

王 寒¹ 徐海松¹ Guihua Cui² M. Ronnier Luo²

¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027
²Department of Colour Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

摘要 基于物体表面色样本的视觉评价,测试了典型色差公式对超大色差的预测性能。由 18 名观察者按照倍率法对 60 组颜色样本对进行心理物理视觉评价实验,获得视觉色差的评价数据。利用实验数据对两个常用色差公式 CIELAB 和 CIEDE2000 以及基于色貌模型的最新色差公式 CAM02-UCS 和 CAM02-LCD 的超大色差预测性能进行了详细的比较和分析,结果表明基于色貌模型的两个公式性能优异。同时,使用本实验视觉数据考察了 Attridge 等人提出的幂指数模型,并得到了一致的结论。

关键词 视觉光学; 超大色差; 物体表面色; 视觉评价; 色差公式; 色貌模型

中图分类号 O432.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092907.1801

Evaluation of Very Large Colour Difference Based on Object Surface Colours

Wang Han¹ Xu Haisong¹ Guihua Cui² M. Ronnier Luo²

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China
² Department of Colour Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

Abstract The performances of colour-difference formulae were investigated for predicting very large colour difference based on visual evaluation of object surface colours. The experiment of psychophysical visual assessment of 60 sample pairs with ratio judgement was carried out on 18 observers. The evaluation data of visual colour difference were obtained. The data were used to evaluate the two common colour-difference formulae, CIELAB and CIEDE2000, and the two latest CAM-based colour-difference formulae, CAM02-UCS and CAM02-LCD. The detailed comparison and analysis indicated that CAM02-UCS and CAM02-LCD outperformed others for very large colour difference. In addition, the experimental data were employed to test the power law model proposed by Attridge et al. and the consistent result was obtained.

Key words visual optics; very large colour difference; object surface colour; visual evaluation; colour-difference formula; colour appearance model (CAM)

1 引 言

在图像工业中常需对图像的色差进行评价,这时就会遇到幅值跨度很大的色差,涵盖了从中小到超大色差的范围。目前常用的色差公式主要是用来评价中小色差的^[1~3],对较大幅度的大色差(如 15 CIELAB 单位以上)评价能力知之甚少,且相关专题研究也比较缺乏。因此,本实验针对具有超大色差

(22.38~117.78 CIELAB 单位)的物体表面色样本采用倍率法进行心理物理视觉实验,并以获得的视觉实验数据测试和评价两个常用色差公式 CIELAB^[4] 和 CIEDE2000^[4] 以及基于 CIECAM02 色貌模型的最新色差公式^[5] CAM02-UCS 和 CAM02-LCD 对超大色差的预测性能。

收稿日期: 2008-04-16; 收到修改稿日期: 2008-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(60578011)资助课题。

作者简介: 王 寒(1984—),男,硕士研究生,主要从事颜色科学、图像技术等方面的研究。

E-mail: wanghan.1026@hotmail.com

导师简介: 徐海松(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色与影像科学、光辐射测量、光电技术、光学工程等方面的研究。E-mail: chxsxu@zju.edu.cn

2 视觉实验

2.1 实验样本

实验所用 60 对颜色样本选自于 Kittelmann 实验^[6]中所使用的色样。每个色样的大小为 $1.5\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ ，并将其贴在白纸板上。采用 GretagMacbeth 分光光度计 CE-7000A 测量所有样本的颜色，并将测得的光谱反射比数据在 CIE 标准

照明体 D65 和 CIE1931 标准色度观察者条件下转化为三刺激值 XYZ。

该 60 对色样良好地覆盖了 CIELAB 颜色空间中的各个色区和色调方向，其具体分布如图 1 和图 2 所示，其中每一条线代表一个色样对。所有实验色样对的色差大小范围为 $22.38 \sim 117.78$ CIELAB 单位，其平均色差为 50.30 CIELAB 单位。

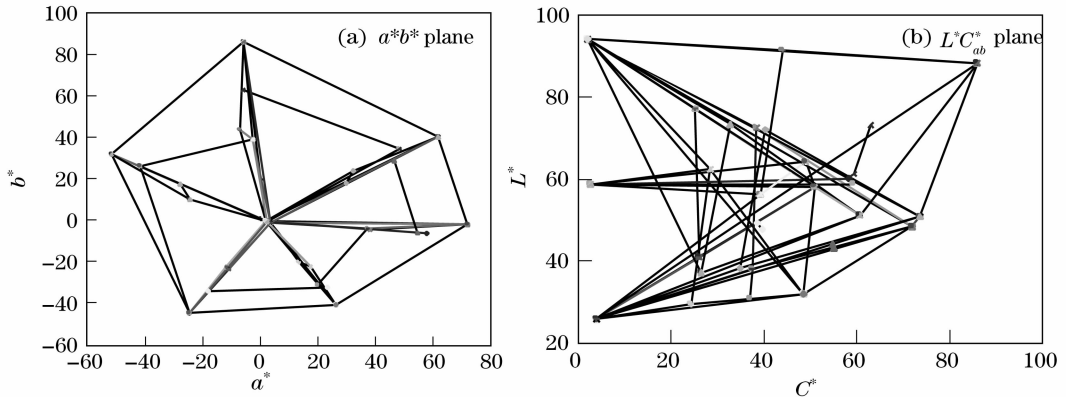


图 1 大色差颜色样本对在 (a) a^*b^* 平面和 (b) $L^*C_{ab}^*$ 平面上的位置分布

Fig. 1 Distribution of LCD (large colour difference) sample pairs on (a) a^*b^* plane and (b) $L^*C_{ab}^*$ plane

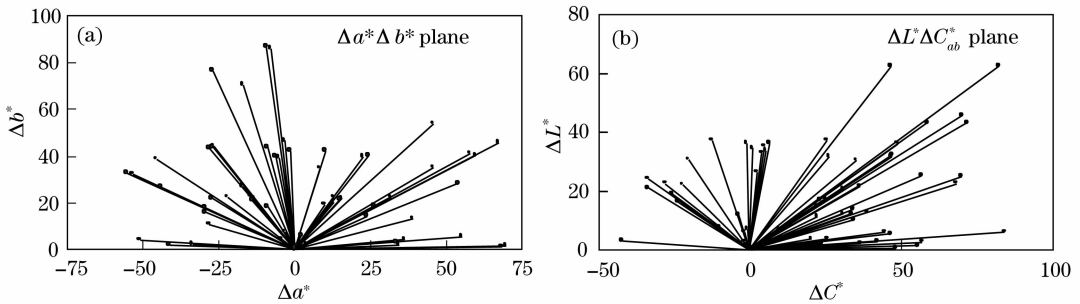


图 2 大色差颜色样本对在 (a) $\Delta a^* \Delta b^*$ 平面和 (b) $\Delta L^* \Delta C_{ab}^*$ 平面上的位置分布

Fig. 2 Distribution of LCD sample pairs on (a) $\Delta a^* \Delta b^*$ plane and (b) $\Delta L^* \Delta C_{ab}^*$ plane

2.2 视觉评价及数据处理

由 18 名色觉正常观察者按照倍率法^[7]在 GretagMacbeth 标准灯箱 SpectraLight III 中采用 D65 光源对 60 对超大色差颜色样本进行视觉评价实验，其中 5 名观察者对每个样本对评价两次以用来评估测试的重复性，故每个色样对共被评估 23 次。倍率法是对中大色差视觉评价的一种常用心理物理实验方法，实验中参考色样对与测试色样对的空间布局如图 3 所示。

参考色样对由一个白色样本和一个灰色样本组成，其色差为 53.39 CIELAB 单位，接近于所有测试色样对的平均色差；测试色样对即为 60 对超大色差实验样本对，其在实验过程中以随机顺序出示给观察者。视觉评估时，将参考色样对的色差设定为 1

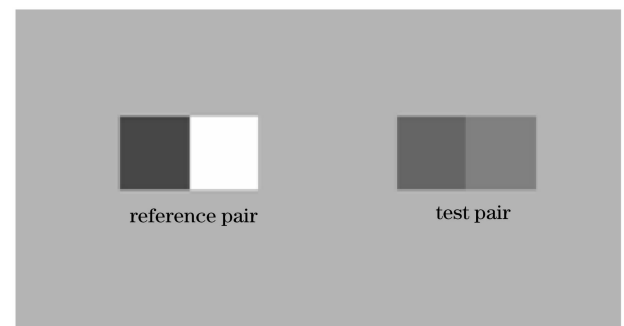


图 3 倍率法视觉实验中参考色样对和测试色样对的空间布局

Fig. 3 Arrangement of reference and test pairs for ratio judgement method

个单位，由观察者给出一个小数或者整数来表示测试色样对的色差。例如，观察者认为测试样本对的

色差为参考样本对色差的一半,则给出的应答为 0.5;如果观察者认为测试样本对的色差为参考样本对色差的两倍,则给出的应答为 2。

按照 Elamin 对倍率法视觉实验数据的处理方法^[8],可将实验所得的原始倍率数据在 CIELAB 空间中转化为视觉色差。首先,由 23 组实验倍率数据求出其几何平均值 $R_{\text{Visual,raw}}$ 。如果测量色差的倍率表示为 $R_{\text{Measured}} = d_{\text{ab,tst}} / d_{\text{ab,ref}}$,其中 $d_{\text{ab,tst}}$ 和 $d_{\text{ab,ref}}$ 分别表示测试样本对和参考样本对中两色样在 CIELAB 空间中的欧氏距离即 CIELAB 色差 $\Delta E_{\text{ab,tst}}^*$ 和 $\Delta E_{\text{ab,ref}}^*$,而 $\Delta E_{\text{ab,ref}}^* = 53.39$ CIELAB 单位。Elamin 认为测量色差的倍率可以与视觉评估的倍率建立如下关系:

$$R_{\text{Visual,raw}}^\alpha = R_{\text{Measured}} = \frac{d_{\text{ab,tst}}}{d_{\text{ab,ref}}} = \frac{\Delta E_{\text{ab,tst}}^*}{\Delta E_{\text{ab,ref}}^*}, \quad (1)$$

式中 α 为常数。因此,根据 Elamin 的理论,对于一组特定的观察者, α 可用来校正视觉实验的原始倍率,并由此获得真实的视觉倍率数据,即

$$R_{\text{Visual,true}} = R_{\text{Visual,raw}}^\alpha. \quad (2)$$

为了求取校正系数 α , (1) 式可改写为

$$\ln R_{\text{Measured}} = \alpha \ln R_{\text{Visual,raw}}. \quad (3)$$

则由 $\ln R_{\text{Measured}}$ 与 $\ln R_{\text{Visual,raw}}$ 的关系图并利用最小二乘法可拟合得到如图 4 所示的直线方程,其斜率即为校正系数 α ,故 $\alpha = 0.7032$ 。因此,所有样本对的视觉色差为

$$\Delta V_{\text{raw}} = \Delta E_{\text{ab,ref}}^* R_{\text{Visual,true}} = \Delta E_{\text{ab,ref}}^* R_{\text{Visual,raw}}^\alpha = 53.39 R_{\text{Visual,raw}}^{0.7032}. \quad (4)$$

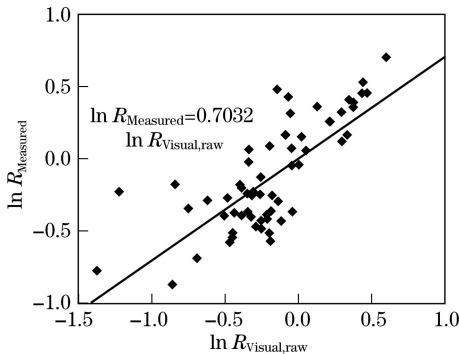


图 4 $\ln R_{\text{Measured}}$ 与 $\ln R_{\text{Visual,raw}}$ 的关系

Fig. 4 Relation between $\ln R_{\text{Measured}}$ and $\ln R_{\text{Visual,raw}}$

最后,由(4)式计算出的原始视觉色差数据再按一定比例进行缩放以得到最终的视觉色差,而该比例值即为全部样本的原始视觉色差平均值与待评估四个色差公式的计算色差平均值之比,其目的是为了视觉色差 ΔV 与计算色差 ΔE 关系图(如图 5)

上的点靠近 45° 线,而不影响其性能比较结论。

3 结果与讨论

3.1 观察者的重复性与精确度

观察者的重复性是指任一观察者在重复实验中所取得结果的一致性,而观察者的精确度考察某一次观察的结果与总体结果的符合程度。实验采用性能因子 $PF/3$ ^[9] 来评价观察者的重复性和精确度,而 $PF/3$ 主要用以评价两组数据之间一致性的优劣,即当两组数据完全一致时其 $PF/3$ 取最小值 0,且 $PF/3$ 值越大则说明该两组数据的一致性越差。

在本实验中有 5 名观察者对每个样本对进行了两次重复的视觉评价,这两次观察所得视觉色差之间的 $PF/3$ 值表征了本实验的重复性;而对于全部 23 次视觉评价,每次观察所得的视觉色差与全体观察者得到的总体视觉色差之间的 $PF/3$ 值则表示本实验的精确度,其实验结果如表 1 所示。

表 1 观察者的重复性和精确度($PF/3$ 值)

Table 1 Observer's repeatability and accuracy ($PF/3$ unit)

Repeatability				Accuracy			
Max	Min	Median	Mean	Max	Min	Median	Mean
55	25	28	35	49	19	28	29

3.2 原始形式色差公式的评价

利用本实验的视觉数据分别对 CIE 推荐的 CIELAB 和 CIEDE2000 色差公式以及基于色貌模型 CIECAM02 的两个色差公式^[5] 即专用于大色差的 CAM02-LCD 和通用的 CAM02-UCS 进行了比较研究。

对于各色差公式的原始形式即 CIELAB、CIEDE2000 和 CAM02-UCS 的 $k_L = k_C = k_H = 1$ 以及 CAM02-LCD 的 $k_L = 0.77$,各样本对的视觉色差 ΔV 与相应计算色差 ΔE 的比较如图 5 所示。

由图 5 可见,四个色差公式的表现接近,其中 CIELAB 略差,其部分数据点的分布远离趋势线。为定量比较这些公式的色差预测性能,分别采用 $PF/3$ 、 $STRESS$ ^[10] 和 F 检验^[10] 对实验测试数据进行评价,其结果列于表 2 和表 3 中。表 3 中对角线右上部的数据与左下部数据互为倒数,其数值说明了所在行与列的色差公式性能差异的显著性:若 F 值小于 F_c ,则表示该数据所在列公式的性能明显优于所在行的公式;如果 F 值大于 $1/F_c$,那么表示该数据所在列的公式明显劣于所在行相应公式的色差预测性能。

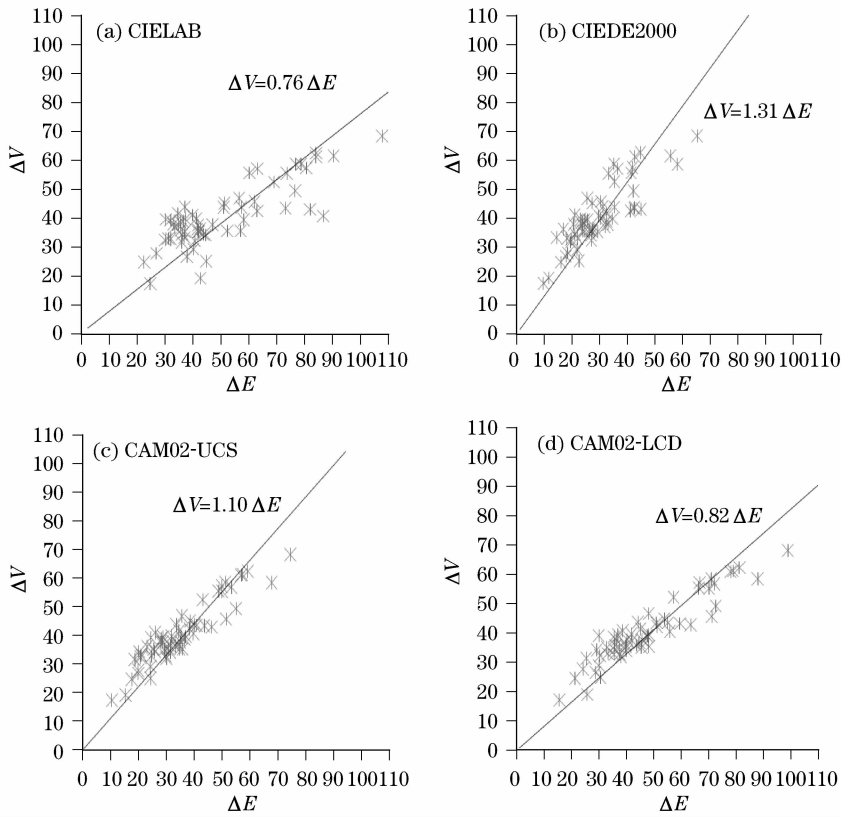
图 5 视觉色差 ΔV 与四个色差公式的计算色差 ΔE 之比较Fig. 5 Comparison for ΔV against ΔE by four colour-difference formulae

表 2 原始形式色差公式的性能

Table 2 Performance for the original forms of the colour-difference formulae

Formula	CIELAB	CIEDE2000	CAM02-UCS	CAM02-LCD
PF /3	24	20	17	17
STRESS	21	19	15	15

表 3 原始形式色差公式的 F 检验结果 (F_c : F -test 的临界值)Table 3 F-test results for the original forms of the colour-difference formulae (F_c : F critical value)

$F_c = 0.60$; $1/F_c = 1.67$				
F-value	CIELAB	CIEDE2000	CAM02-UCS	CAM02-LCD
CIELAB		0.80	0.49	0.48
CIEDE2000	1.26		0.62	0.61
CAM02-UCS	2.04	1.62		0.99
CAM02-LCD	2.07	1.64	1.01	

综合表 2 与表 3 的数据分析可知,对于这四个色差公式的原始形式,当评价超大色差时,CAM02-LCD 的性能最佳,然后依次是 CAM02-UCS、CIEDE2000 和 CIELAB。表 3 中黑体的数据表明,CAM02-LCD 和 CAM02-UCS 均明显优于 CIELAB;而 CAM02-LCD 和 CAM02-UCS 的性能非常接近,其中 CAM02-LCD 略优。同时,比较表 2 与表 1 的数据可以看出各个色差公式的 PF/3 值都小于观察者的平均精确度,说明对于超大色差的评价,色差公式比人眼判断更加可靠。

3.3 明度参数因子的优化

以本实验的视觉数据分别对四个色差公式的明度参数因子 k_L 进行优化使其对应色差公式的计算色差与视觉色差之间的 PF/3 值达到最小,然后仍以 PF/3、STRESS 和 F 检验来评价其优化后色差公式的预测性能,得到如表 4 和表 5 所示的结果。

由表 4 和表 5 的数据可知,经 k_L 优化后,除 CIEDE2000 之外的另三个色差公式对超大色差的评价能力均有提高,其中 CIELAB 和 CAM02-UCS 的性能改善较为明显。这时,表现最优的变为

表 4 优化形式色差公式的性能

Table 4 Performance for the optimised forms of the colour-difference formulae

Formula	CIELAB	CIEDE2000	CAM02-UCS	CAM02-LCD
Optimised k_L	0.69	1.11	1.12	0.86
PF/3	22	20	16	16
STRESS	19	19	14	15

表 5 优化形式色差公式的 F 检验结果 (F_c : F -test 的临界值)Table 5 F -test results for the optimised forms of the colour-difference formulae (F_c : F critical value)

$F_c=0.60; 1/F_c=1.67$				
F -value	CIELAB	CIEDE2000	CAM02-UCS	CAM02-LCD
CIELAB		0.97	0.58	0.58
CIEDE2000	1.03		0.59	0.60
CAM02-UCS	1.74	1.68		1.01
CAM02-LCD	1.72	1.66	0.99	

CAM02-UCS, 然后依次是 CAM02-LCD、CIEDE2000 和 CIELAB。表 5 中黑体数据表明, CAM02-UCS 明显优于 CIELAB 和 CIEDE2000, 而 CAM02-LCD 明显优于 CIELAB。同时, CIELAB 和 CIEDE2000 的表现相似, 且 CIELAB 相对较差; 而 CAM02-LCD 和 CAM02-UCS 的色差预测性能接近, 其中 CAM02-LCD 略差。

3.4 幂指数模型

Attridge 等^[11]认为幂指数模型 $y=ax^b$ 可以用来表示视觉色差与仪器测量色差(计算色差)之间的关系, 即 $\Delta V=a\Delta E^b$, 并且考察了对于四个色差公式(CIELAB, CIELUV, CMC 和 CIE94)幂指数模型的优化参数, 发现幂指数 b 的范围为 0.56~0.68。为此, 对本实验数据应用最小二乘法来优化该模型的参数 a 和 b , 然后仍以 PF/3 评价各色差公式的表现, 其结果如表 6 所示。

表 6 最优幂指数模型 $y=ax^b$ 的表现Table 6 Performance of the best fitted power law $y=ax^b$

Formula	CIELAB	CIEDE2000	CAM02-UCS	CAM02-LCD
a	4.44	4.91	3.91	3.13
b	0.57	0.63	0.66	0.67
PF/3	17	14	10	10

对比表 2、表 4 和表 6 可见, 通过优化幂指数模型对计算色差值进行修正后, 各色差公式的性能甚至比 k_L 优化后的表现均有显著提高, 说明相关公式的色差预测性能仍有进一步改善的可能性; 另一方面, 本实验的优化幂指数 b 处于 0.57 到 0.67 之间, 与 Attridge 等的结论一致。

4 结 论

本文基于物体表面色样本采用倍率法测得了超大色差的视觉实验数据, 评价并比较了两个常用色差公式以及两个基于色貌模型的色差公式对超大色差的预测性能。采用原始形式时, CAM02-LCD 的表现最佳, 其次是 CAM02-UCS 和 CIEDE2000, CIELAB 最差; 在 k_L 优化条件下, 最好的是 CAM02-UCS, 然后依次是 CAM02-LCD、CIEDE2000 和 CIELAB。值得指出的是, CAM02-UCS 和 CAM02-LCD 的性能非常接近, 尤其是 CAM02-UCS 作为最新的通用色差公式对超大色差具有优异的预测性能, 期待其将得到更广泛的工业应用。同时, 本研究测试了 Attridge 等人提出的幂指数模型, 并得到了一致的结论。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhehong, Xu Haisong. Study of color discrimination threshold using CRT display. Part II: evaluation of classical color-difference formulae[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1344~1348
汪哲弘, 徐海松. 用阴极射线管显示器研究辨色阈值 II: 典型色差公式评价[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1344~1348
- 2 Wang Zhehong, Xu Haisong. Investigations for weighting functions of color-difference formulae based on small suprathreshold color differences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1215~1219
汪哲弘, 徐海松. 基于阈值上小色差的色差公式权重函数研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1215~1219
- 3 Wang Han, Xu Haisong, Cui Guihua *et al.*. Evaluation of very small colour difference at human eye's threshold level based on object surface colours[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1628~1632
王 寒, 徐海松, Cui Guihua 等. 基于物体表面色的人眼阈值水平微小色差评价[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1628~1632

- 4 CIE. Colorimetry 3rd Edition. *CIE Publ.*, 15: 2004 [S]. Vienna: Central Bureau of the CIE, 2004
- 5 M. Ronnier Luo, Guihua Cui, Changjun Li. Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model [J]. *Col. Res. Appl.*, 2006, **31**(4): 320~330
- 6 Philipp Kittelmann. Visual assessment of large colour difference using 3 and 5 step colour series [D]. Berlin: Technical University of Berlin, 2005
- 7 M. R. Pointer, G. G. Attridge. Some aspects of the visual scaling of large colour differences [J]. *Col. Res. Appl.*, 1997, **22**(5): 298~307
- 8 Elfaith Yousif Mohamed Elamin. Chromaticity discrimination and relative size ellipses [D]. University of Bradford, 1983
- 9 M. Ronnier Luo. Development of colour-difference formulae [J]. *Rev. Prog. Color.*, 2002, **32**: 28~39
- 10 Pedro A. Garcia *et al.*. Measurement of the relationship between perceived and computed color differences [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2007, **24**(7): 1823~1829
- 11 G. G. Attridge, M. R. Pointer. Some aspects of the visual scaling of large colour differences-II [J]. *Col. Res. Appl.*, 2000, **25**(2): 116~122

《中国激光》“激光制造”专题征稿启事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术，近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于2009年12月正刊(EI核心收录)上推出“激光制造”专题栏目，现特向国内外广大专家学者征集“激光加工”方面原创性的研究论文和综述，旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括：

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧结与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

特邀组稿专家：

钟敏霖 教授 清华大学机械工程系 E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期：2009年9月30日

投稿方式以及格式：

可直接将稿件电子版发至“激光制造”专题组稿专家、《中国激光》常务编委、清华大学钟敏霖教授邮箱：zhml@tsinghua.edu.cn(主题标明“激光制造专题”投稿)，或通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“激光制造专题”投稿)，详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>。本专题投稿文体不限，中英文皆可，其电子版请使用MS-word格式，有任何问题请咨询马沂编辑，E-mail: CJL@siom.ac.cn；电话：021-69918427。

《中国激光》编辑部