

# 白光 LED 不舒适眩光模型的验证和优化

冯阿阳<sup>1</sup>, 李 乐<sup>2</sup>, 周 莉<sup>1</sup>, 林燕丹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>复旦大学电光源研究所先进照明技术教育部工程研究中心, 上海 200433;

<sup>2</sup>中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

**摘要** 为了验证小尺寸光源的不舒适眩光评估模型对 LED 的适用性, 使用两种色温的白光 LED 产生不舒适眩光, 在 4 种眩光源亮度和 4 种观察角度下进行实验, 并在每种条件下进行 deBoer 评分。实验结果表明, 白光 LED 的偏心角增大, 会增加亮度对比度; 白光 LED 的亮度越大, 偏心角越小, 则 deBoer 评分越高, 即产生更多的不舒适眩光。对小尺寸光源模型  $UGR_{small}$  以及位置系数修正模型  $UGR_{S1}$  和  $UGR_{S2}$  进行实验验证, 结果表明模型计算值与主观实验不舒适眩光评分的相关性较高。将  $UGR_{S2}$  模型增加优化系数并进行优化得到模型  $UGR_{S3}$ , 将偏心角加入模型  $UGR_{small}$  并修正后得到  $UGR_{Sk}$ ,  $UGR_{S3}$  和  $UGR_{Sk}$  均具有更好的性能。

**关键词** 视觉光学; 不舒适眩光评估模型;  $UGR_{small}$ ; 验证和优化

中图分类号 TM923 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0733001

## Validation and Optimization of Discomfort Glare Model for White LED

Feng Ayang<sup>1</sup>, Li Le<sup>2</sup>, Zhou Li<sup>1</sup>, Lin Yandan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Engineering Research Center of Advanced Lighting Technology, Ministry of Education, Institute for Electric Light Sources, Fudan University, Shanghai 200433, China;

<sup>2</sup>China Ship Development and Design Center, Wuhan, Hubei 430064, China

**Abstract** In order to verify the applicability of the discomfort glare evaluation model of small size light source to LED, the discomfort glare is generated by white LED of two kinds of color temperature. The experiment is conducted under four kinds of glare luminance and viewing angles. Observers are asked to give a deBoer rating score under each condition. The results show that larger eccentric angle of white LED leads to larger contrast ratio. Larger glare luminance and smaller eccentric angle lead to higher deBoer rating score, namely more discomfort glare. The small size light source model  $UGR_{small}$  and the position coefficient modified models  $UGR_{S1}$  and  $UGR_{S2}$  are verified experimentally. The results show the high correlation between the calculated value of the model and the subjective experiment of discomfort glare rating. Further, model  $UGR_{S3}$  is obtained by adding optimal coefficients of  $UGR_{S2}$  and optimizing them. Model  $UGR_{Sk}$  is obtained by adding eccentric angle into model  $UGR_{small}$  and correcting it.  $UGR_{S3}$  and  $UGR_{Sk}$  both have better performance.

**Key words** visual optics; discomfort glare evaluation model;  $UGR_{small}$ ; validation and optimization

**OCIS codes** 330.7326; 330.4595; 220.2945; 330.1800

## 1 引 言

传统的照明光源多采用白炽灯或气体放电灯, 但这些光源由于寿命短、稳定度差等原因, 正在逐渐被市场淘汰。发光二极管(LED)具有长寿命、高稳定性、易集成、绿色环保等诸多优点<sup>[1-4]</sup>。但是, LED 照明时存在极不均匀的光分布, 产生与传统光源不同的视觉感受。

收稿日期: 2016-12-20; 收到修改稿日期: 2017-01-13

基金项目: 复旦大学第三批“卓学计划”

作者简介: 冯阿阳(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事照明与视觉方面的研究。E-mail: ayfeng14@fudan.edu.cn

导师简介: 林燕丹(1978—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事视觉基础与光健康方面的研究。

E-mail: ydlin@fudan.edu.cn(通信联系人)

对于传统均匀光源的不舒适眩光评估,国际照明委员会(CIE)在1995年提出统一眩光值(UGR)<sup>[5]</sup>,在2002年提出针对小尺寸光源的眩光源模型 UGR<sub>small</sub><sup>[6]</sup>(该模型的使用条件是光源尺寸小于 0.005 m<sup>2</sup>)。研究表明,对于相同的平均亮度,均匀光分布照明设备和非均匀光分布照明设备的不舒适眩光感受明显不同,因此,UGR<sub>small</sub>不是评价不均匀照明设备(高亮度对比度)可靠的方法。针对此问题,研究者们提出了 UGR<sub>small</sub>参数的改进方法,将亮度对比度应用在不舒适眩光的评价模型中。

在2007年,Takahashi等<sup>[7]</sup>发现均匀光源和不均匀光源最大的不同是在中心凹区域,越向外部延伸,均匀眩光源和不均匀眩光源的差别影响越小,因此提出使用偏心角修正 UGR公式,将光源的对比度代入修正位置系数  $p$  的指数,取代了  $p$  的指数 2。在2015年,Yang等<sup>[8]</sup>针对小尺寸 UGR 计算公式,提出使用 LED 数目和不均匀度计算一个新的参数亮度对比度,代替  $p$  的指数 2,研究得到模型 UGR<sub>S1</sub> 和 UGR<sub>S2</sub>。

UGR<sub>small</sub>模型是基于传统的白炽灯得到的,是否适用于小尺寸的 LED 芯片还有待验证。对 UGR<sub>S1</sub> 和 UGR<sub>S2</sub>模型的适用性也需验证。本文使用小尺寸白光 LED 产生不舒适眩光,选择不同的偏心角和亮度下的不均匀 LED 作为光源,验证了 UGR<sub>small</sub>模型及其改进模型对于 LED 光源的适用性,同时提出了适用性更好的改进模型。

## 2 不舒适眩光评估模型

UGR 和 UGR<sub>small</sub>的计算公式<sup>[5-6]</sup>分别为:

$$V_{UGR} = 8 \cdot \log_{10} \left( \frac{0.25}{L_b} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_{s,i}^2 \cdot \omega_i}{p_i^2} \right), \quad (1)$$

$$V_{UGR_{small}} = 8 \cdot \log_{10} \left( \frac{0.25}{L_b} \cdot \sum_{i=1}^n \cdot 200 \frac{I_i^2}{r_i^2 p_i^2} \right), \quad (2)$$

式中  $L_b$  为背景亮度,单位为 cd/m<sup>2</sup>;  $L_s$  为光源的平均亮度,单位为 cd/m<sup>2</sup>;  $\omega$  为眩光源相对人眼所形成的立体角度,单位为 sr;  $p$  为眩光源相对人眼的位置系数;  $n$  为光源个数;  $I$  为小尺寸光源的光强,单位为 cd;  $r$  为灯具发光部分中心到观察者眼睛之间的距离,单位为 m。

UGR<sub>S1</sub> 和 UGR<sub>S2</sub>的计算公式<sup>[8]</sup>分别为:

$$V_{UGR_{S1}} = 8 \cdot \log_{10} \left( \frac{0.25}{L_b} \cdot \sum_{i=1}^n \cdot 200 \frac{I_i^2}{r_i^2 p_i^W} \right), \quad (3)$$

$$V_{UGR_{S2}} = 8 \cdot \log_{10} \left( \frac{0.25}{L_b} \cdot \sum_{i=1}^n \cdot 200 \frac{I_i^2}{r_i^2 p_i^{W+C}} \right), \quad (4)$$

式中  $W$  为权重因数,  $C$  为亮度对比度。  $W$  的计算公式<sup>[8]</sup>为:

$$W = 2 + \frac{4}{N_{LED}}, \quad (5)$$

式中  $N_{LED}$  为眩光源中 LED 的个数。

亮度对比度  $C$  的计算公式<sup>[9]</sup>为:

$$C = \left[ \sum \sum (L'_{i,j} - L'_{i,j-1})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i,j+1})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i-1,j})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i+1,j})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i-1,j-1})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i-1,j+1})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i+1,j-1})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i+1,j+1})^2 \right] / N, \quad (6)$$

为了保证具有相同亮度分布、不同亮度等级的光源具有相同的亮度对比度  $C$ ,  $L'_{i,j}$  由第  $i, j$  个像素值  $L_{i,j}$  除以  $L_s$  获得,  $N$  为像素点的总个数。

## 3 实 验

### 3.1 实验条件

在室内搭建用于放置实验装置的独立实验空间,实验空间来自实验室平台<sup>[10-13]</sup>。实拍图如图 1(a)所示,空间尺寸为 2 m × 2 m × 2 m,空间的四壁贴有反射率为 90% 的白纸,在空间的顶棚处安装了 4 盏 60 cm × 60 cm 的 LED 平板灯,色温约为 8000 K,它们可以在整个空间内提供较为均匀的环境光,实现亮视

觉光环境。整个实验装置的示意图如图 1(b)所示,被试者距离眩光源的水平距离为 1.5 m,垂直仰角为 10°。眩光源是高功率 LED 投光灯,选择两种色温的白光 LED,排列方式为 3×10,尺寸为 0.018 m×0.018 m,通过调节与之相连的直流稳压源进行亮度调节,具有较宽的亮度范围。

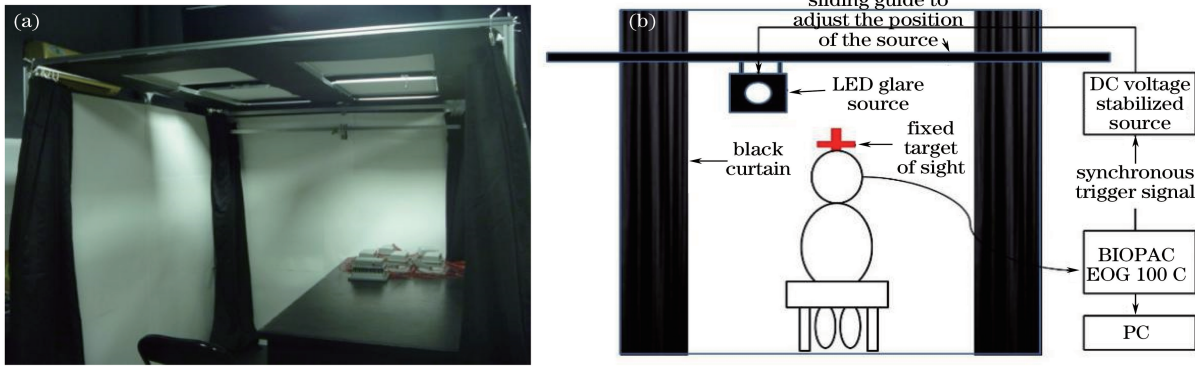


图 1 实验平台。(a)实验空间实拍图;(b)实验装置示意图

Fig. 1 Experimental platform. (a) Experimental space picture; (b) schematic diagram of the experimental device

### 3.2 实验参数及测量

实验背景为亮视觉环境,环境眼位垂直照度为 200 lx。控制变量为眩光源垂直眼位照度、眩光源偏心角、眩光源色温。眩光源偏心角是指眩光源与视线的水平夹角。两种色温的光源相对光谱分布如图 2 所示,高色温的光源中蓝光成分较高,人眼的眩光光谱敏感度在蓝光区域会高于其他波段,所以不同色温的光源对眼睛的刺激有所差异。实验参数如表 1 所示。

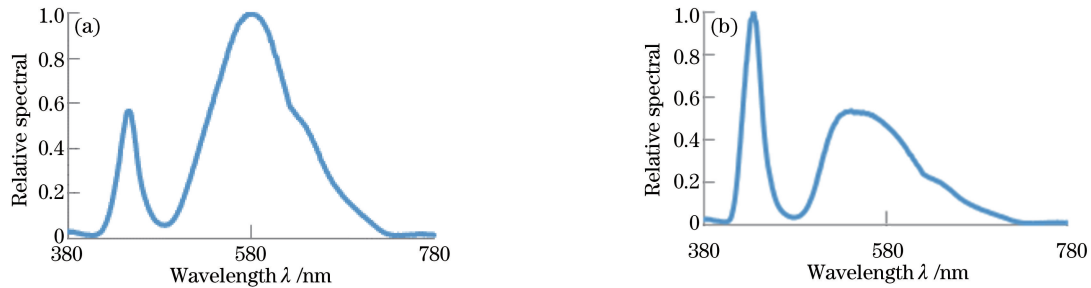


图 2 实验中所用的 LED 光源的相对光谱功率分布。(a) 3300 K;(b) 5700 K

Fig. 2 Relative spectral power distribution of LED sources used in experiments. (a) 3300 K; (b) 5700 K

表 1 控制变量的参数设置

Table 1 Parameter settings of control variables

Control variable	Value
Glare source vertical eye position illumination $E_g$ /lx	20/50/125/300
Glare source orientation angle $\theta$ /( $^\circ$ )	2/4/8/16
Glare source color temperature $T$ /K	3300/5700

眼位照度测量使用 Konica-Minolta CL-200A 照度计,用环境眼位照度  $E_b$  计算可得背景亮度  $L_b$ ,计算公式为:

$$L_b = \frac{E_b}{\pi} \quad (7)$$

设置 4 种眩光源垂直眼位照度,测量光源亮度和各像素点的亮度,通过计算可得平均亮度  $L_s$ 。眩光源亮度测量使用远方 CX-2B 成像亮度计。将亮度  $L_s$  与面积相乘得到光强  $I$ ,计算公式为:

$$I = L_s \cdot A \cdot \cos \alpha, \quad (8)$$

式中  $\alpha$  为灯具表面法线与其中心和观察者眼睛连线所夹的角度,单位为 $^\circ$ ;  $A \cdot \cos \alpha$  为灯具在观察者眼睛方向的投影面积,单位为  $m^2$ 。

### 3.3 实验过程

在 4 种光源亮度、4 种偏心角和两种色温光源的条件下进行实验。被试者首先在光环境下适应 10 min, 在每种实验条件下, 被试者观察正前方用于视线固定的十字视标。不同光刺激持续的时间为 3 s, 光刺激出现后, 请被试者在最短的时间内给出基于 deBoer 评分的心理物理评分。在刺激结束后, 用挡板将眩光源遮住并调节至下一组实验条件。为使被试者的生理参数有一定的恢复时间并达到稳定水平, 不同眩光刺激的呈现间隔至少为 1 min。总共有 32 种不同的实验条件。

不舒适眩光的评价表为 deBoer 评分九点量表<sup>[14]</sup>, 如表 2 所示。经过调查问卷的筛选, 对被试者的性别、年龄、饮食习惯、吸烟状况、用眼习惯、睡眠习惯、近期心理状态、近期生理健康状况、前历光环境等信息以调查问卷的形式进行采集, 对明显出现异常信息的被试者进行排除, 最终有 8 名男性、2 名女性, 年龄平均值和标准差为  $(24.5 \pm 1.6)$  岁的 10 名被试者参与该实验。

表 2 deBoer 评分表  
Table 2 deBoer rating scale

Glare rating (deBoer rating) scale	Description
1	Unbearable
2	
3	Disturbing
4	
5	Just admissible
6	
7	Acceptable
8	
9	Noticeable

## 4 实验结果

通过(6)式计算不同偏心角条件下 LED 光源的亮度对比度  $C$ 。图 3(a)和(b)分别为 3300 K 和 5700 K 的 LED 偏心角与  $C$  的关系图, 图中高低线表示 95% 置信区间。横坐标表示偏心角, 纵坐标表示  $C$  计算值。

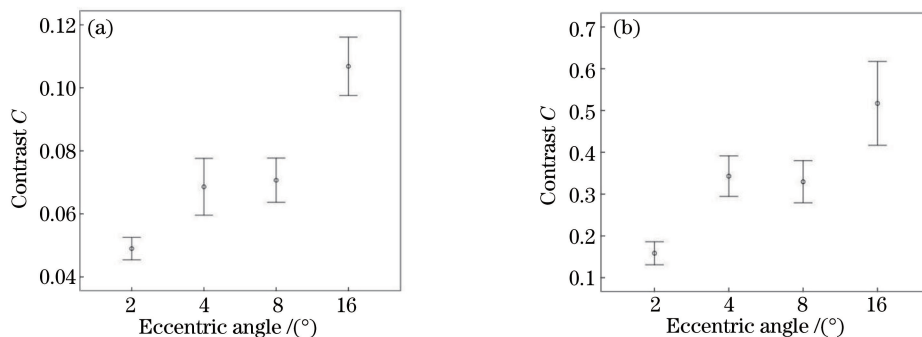


图 3 白光 LED 偏心角与亮度对比度的关系。(a) 3300 K; (b) 5700 K

Fig. 3 Relation between the eccentric angle of white LED and the luminance contrast. (a) 3300 K; (b) 5700 K

根据图 3 可以看出, 对于两种色温的白光 LED, 偏心角增大时, 亮度对比度增大。因此, 不均匀 LED 的不均匀度随偏心角的增大而增加。眩光源为一个各个方向非均匀发光的 LED 光源。当偏心角改变后, 眩光源与视线方向的夹角有变化, 各个点在视线方向的亮度产生变化。因此各像素点亮度改变, 亮度对比度也随之改变。

图 4(a)和(b)分别为 3300 K 和 5700 K 的 LED 垂直眼位照度、偏心角与主观评价关系图, 图中高低线表示 95% 置信区间。横坐标表示光源眼位垂直照度和偏心角, 纵坐标表示 deBoer 评分的平均值。

由图 4 可以看出, 对于两种色温的白光 LED, 眩光源亮度相同时, 偏心角增大, deBoer 评分增大, 即不舒适度降低; 眩光源偏心角相同时, 光源亮度增大, deBoer 评分下降, 即不舒适度增加。

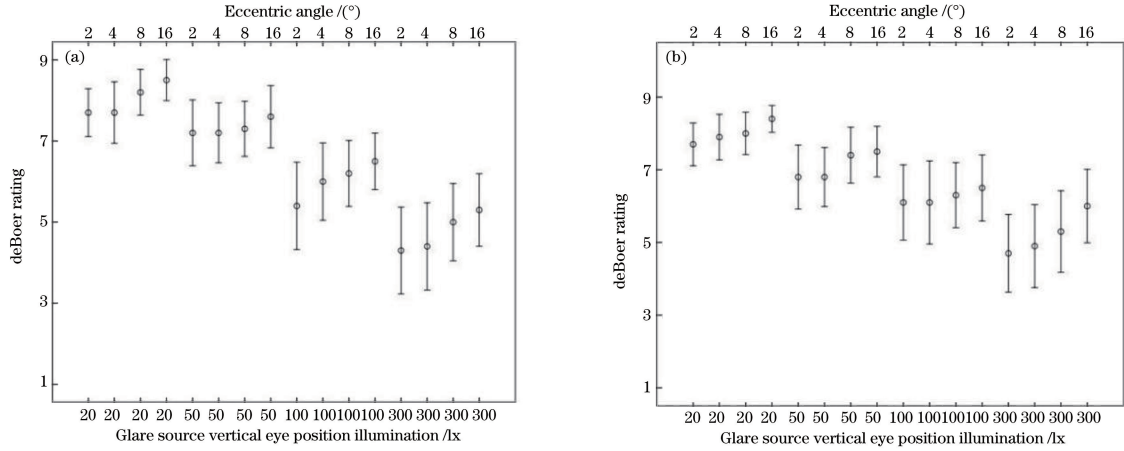


图 4 白光 LED 眼位垂直照度、偏心角与实验结果的主观评价关系。(a) 3300 K; (b) 5700 K

Fig. 4 Relation between vertical eye position illumination, eccentric angle of white LED and subjective evaluation of experimental results. (a) 3300 K; (b) 5700 K

## 5 分析和讨论

小尺寸光源的 UGR 计算公式如(2)式所示,用实验数据对其进行验证。图 5(a)和(f)分别为 3300 K 和 5700 K 白光 LED 的  $UGR_{small}$  计算值与 deBoer 评分关系图。两种色温的光源  $UGR_{small}$  与主观评价的相关系数平方值  $R^2$  分别为 0.883 和 0.892。

两种  $UGR_{small}$  位置系数  $p$  的改进模型如 (3)、(4) 式所示,用实验数据对其进行验证。图 5(b)和(g)分别为 3300 K 和 5700 K 白光 LED 的  $UGR_{S1}$  计算值与 deBoer 评分关系图。两种色温的光源  $UGR_{S1}$  与主观评价的  $R^2$  分别为 0.884 和 0.893。图 5(c)和(h)分别为 3300 K 和 5700 K 白光 LED 的  $UGR_{S2}$  计算值与 deBoer 评分关系图。两种色温的光源  $UGR_{S2}$  与主观评价的  $R^2$  分别为 0.887 和 0.905。

研究发现,当白光 LED 偏心角增大时,亮度对比度增加,不舒适评分增加,不舒适度下降。偏心角增加时,(4)式中  $UGR_{S2}$  的计算值偏大,即亮度对比度  $C$  的系数为 1,对  $UGR_{S2}$  的计算值影响较小,可以对模型进行优化。优化后得到模型计算结果与主观评价的最大相关系数,使模型可以更好地评估不舒适眩光。增加  $C$  的优化系数  $a$ ,从而优化亮度对比度  $C$  对计算结果的影响,得到评估模型  $UGR_{Sa}$  为:

$$V_{UGR_{Sa}} = 8 \cdot \log_{10} \left( \frac{0.25}{L_b} \cdot \sum_{i=1}^n \cdot 200 \frac{I_i^2}{r_i^2 p_i^{W+a \cdot C}} \right), \quad (9)$$

经过优化得到两种色温光源的  $a$  值分别为 48 和 10.2。图 5(d)和(i)分别为 3300 K 和 5700 K 白光 LED 的  $UGR_{Sa}$  计算值与 deBoer 评分关系图。两种色温的光源  $UGR_{Sa}$  与主观评价的  $R^2$  分别为 0.953 和 0.961。

研究结果表明,偏心角对不舒适眩光的评分有影响。眩光源亮度相同时,偏心角增大,deBoer 评分增加,即不舒适度下降。根据实验结果可知,偏心角相同条件下,不同亮度的 LED 光源的亮度对比度  $C$  相近,且  $UGR_{Sa}$  模型中  $p$  的指数与  $W+a \cdot C$  的计算值相近,所以可将(9)式中  $p$  的指数用偏心角  $\theta$  代替。

加入偏心角  $\theta$  和优化系数  $k$ ,对  $UGR_{small}$  中位置系数  $p$  的指数进行修正,增加偏心角对计算结果的影响,得到  $UGR_{Sk}$  模型,即:

$$V_{UGR_{Sk}} = 8 \cdot \log_{10} \left( \frac{0.25}{L_b} \cdot \sum_{i=1}^n \cdot 200 \frac{I_i^2}{r_i^2 p_i^{\theta/k}} \right), \quad (10)$$

经过优化得到两种色温的光源的优化系数  $k$  均为 3.6,得到模型计算结果与主观评价的最大相关系数。图 5 (e)和(j)分别为 3300 K 和 5700 K 白光 LED 的  $UGR_{Sk}$  计算值与 deBoer 评分关系图。两种色温的光源  $UGR_{Sk}$  与主观评价的  $R^2$  分别为 0.961 和 0.970。



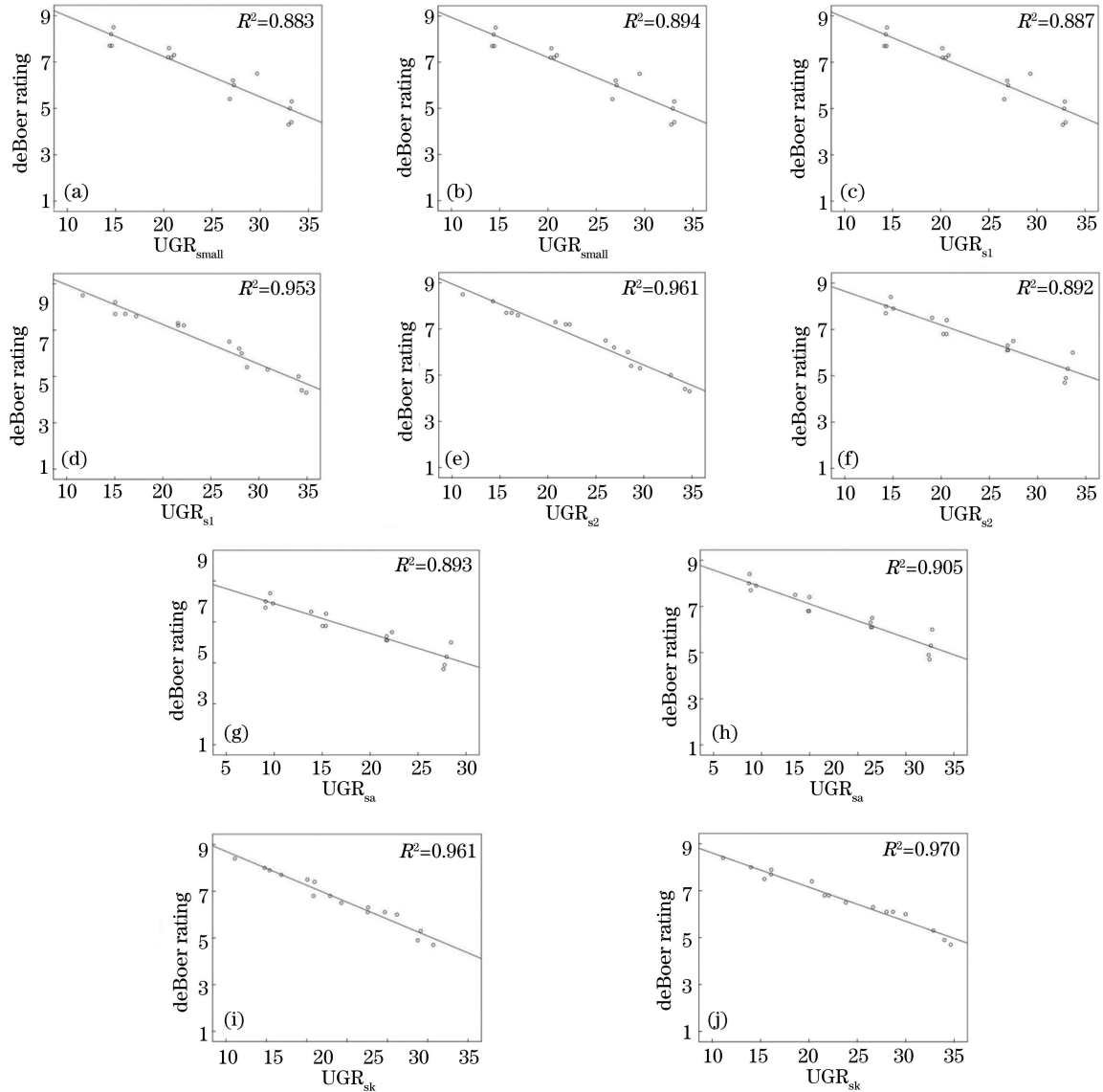


图 5 白光 LED 的模型计算值与实验结果的主观评价关系。(a) 3300 K 光源  $UGR_{small}$ ; (b) 3300 K 光源  $UGR_{s1}$ ; (c) 3300 K 光源  $UGR_{s2}$ ; (d) 3300 K 光源  $UGR_{sa}$ ; (e) 3300 K 光源  $UGR_{sk}$ ; (f) 5700 K 光源  $UGR_{small}$ ; (g) 5700 K 光源  $UGR_{s1}$ ; (h) 5700 K 光源  $UGR_{s2}$ ; (i) 5700 K 光源  $UGR_{sa}$ ; (j) 5700 K 光源  $UGR_{sk}$

Fig. 5 Relation between the model calculated value of white LED and subjective evaluation of experimental results. (a)  $UGR_{small}$  of 3300 K LED; (b)  $UGR_{s1}$  of 3300 K LED; (c)  $UGR_{s2}$  of 3300 K LED; (d)  $UGR_{sa}$  of 3300 K LED; (e)  $UGR_{sk}$  of 3300 K LED; (f)  $UGR_{small}$  of 5700 K LED; (g)  $UGR_{s1}$  of 5700 K LED; (h)  $UGR_{s2}$  of 5700 K LED; (i)  $UGR_{sa}$  of 5700 K LED; (j)  $UGR_{sk}$  of 5700 K LED

## 6 结 论

本文使用两种色温白光 LED 产生不舒适眩光,在不同的光源亮度和观察角度下进行实验。研究发现,眩光源亮度相同时,偏心角增大,亮度对比度  $C$  增加,但不舒适度下降;眩光源偏心角相同时,亮度增加,不舒适度增加,产生更多的眩光。

通过实验数据验证了针对小尺寸的  $UGR_{small}$  模型、Yang 等提出的两个改进模型  $UGR_{s1}$  和  $UGR_{s2}$ 。三个模型的计算结果与主观评估的相关系数  $R$  值近似且稍有增加。通过改进  $UGR_{s2}$  模型,增加优化系数  $a$ ,得到模型  $UGR_{sa}$ ,相关系数增加显著。研究发现偏心角对主观评估的影响,提出  $UGR_{small}$  修正模型,加入偏心角和优化系数  $k$ ,得到  $UGR_{sk}$  模型。实验数据表明,修改后的模型相关系数高,且性能得到很大提高。

致谢 感谢项目团队邱婧婧、刘羿宏的支持。

## 参 考 文 献

- [1] Cheng Zhiming, Zeng Ping, Zhang Zhihai, *et al.* Research on multi-direction collimation beam on the plane parallel with LED lighting plane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1008001.  
程治明, 曾平, 张志海, 等. 与LED发光面平行平面上多向准直光束的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1008001.
- [2] Hao Fei, Shi Jinfei, Zhu Songqing, *et al.* Optimal positioning of forward installed square LED arrays for machine vision system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1215001.  
郝飞, 史金飞, 朱松青, 等. 机器视觉系统前置矩形LED阵列的优化布置[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1215001.
- [3] Xin Di, Liu Hua, Lu Zhenwu, *et al.* Optical design of the LED illumination system with adjustable view angle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522003.  
辛迪, 刘华, 卢振武, 等. 可变视场角LED照明光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522003.
- [4] Xu Yuzhen, Lin Weiming. A novel LED photo-electro-thermal model with simplified variables[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0523001.  
徐玉珍, 林维明. 一种简化变量的新型LED光电热模型[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0523001.
- [5] Commission Internationale de L'éclairage. Discomfort glare in interior lighting[R]. Vienna: CIE, 1995.
- [6] Commission Internationale de L'éclairage. CIE collection on glare[R]. Vienna: CIE, 2002.
- [7] Takahashi H, Kobayashi Y, Onda S, *et al.* Position index for the matrix light source[J]. *Journal of Light & Visual Environment*, 2007, 31(3): 128-133.
- [8] Yang Y, Ma S N, Lou M R, *et al.* Discomfort glare by non-uniform white LED matrices[C]. Proceedings of the 28th Session of the CIE, Manchester, 2007: 393-399.
- [9] Yang Y, Luo M R, Ma S N. Assessing glare. Part 2: modifying unified glare rating for uniform and non-uniform LED luminaires[J]. *Lighting Research & Technology*, 2016: 1-16.
- [10] Lin Y, Liu Y, Sun Y, *et al.* A pilot study of the physiological mechanism of the glare caused by LED based on the fluctuation of the electro-oculogram[C]. CIE Lighting Quality and Energy Efficiency Conference. Kuala Lumpur, 2014: 281-286.
- [11] Lin Y, Liu Y, Sun Y, *et al.* Model predicting discomfort glare caused by LED road lights[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18056-18071.
- [12] Lin Y, Fotios S, Wei M, *et al.* Eye movement and pupil size constriction under discomfort glare[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2015, 56(3): 1649-1656.
- [13] Liu Yihong. A study on the influence mechanism of the glare from LED on the psychological and physiological response [D]. Shanghai: Fudan University, 2014.  
刘羿宏. LED眩光的心理与生理影响机理研究[D]. 上海: 复旦大学, 2014.
- [14] Boer J B D, Schreuder D A. Glare as a criterion for quality in street lighting[J]. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 1967, 32(2): 117-135.