

# 基于数码相机图像的室内照明眩光测量方法研究

田会娟<sup>1,2\*</sup>, 洪振<sup>2,3</sup>, 郝甜甜<sup>2,3</sup>, 张辉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>天津工业大学电气工程与自动化学院, 天津市电工电能新技术重点实验室, 天津 300387;

<sup>2</sup>大功率半导体照明应用系统教育部工程研究中心, 天津 300387;

<sup>3</sup>天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387

**摘要** 针对室内照明, 提出了一种基于数码相机图像的眩光测量方法。系统推导了眩光源位置指数、立体角、眩光源平均亮度的解析表达式, 采用自适应阈值方法提取眩光源轮廓信息, 并对实际办公室照明场景的统一眩光评价指数(UGR)进行计算与分析。实验结果表明: 由该方法计算的位置指数、立体角、眩光源平均亮度的平均相对误差分别为 1.319%, 4.296%, 3.001%; 当背景亮度为  $12.910 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  时, UGR 的计算值为 12.606, 其相对误差为 4.326%。该方法计算简单、精度高, 易于硬件实现, 可应用室内照明的眩光测试与分析, 并为开发方便、快捷的眩光测试系统提供了理论支撑。

**关键词** 图像处理; 不舒适眩光评价; 统一眩光评价指数; 数字图像; 亮度标定

中图分类号 TM923

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.022201

## Method for Glare Measurement Based on a Digital Camera Image in Interior Lighting

Tian Huijuan<sup>1,2\*</sup>, Hong Zhen<sup>2,3</sup>, Hao Tiantian<sup>2,3</sup>, Zhang Hui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology, School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China.*

<sup>2</sup> *Engineering Research Center of the Ministry of Education on High Power Solid State Lighting Application System, Tianjin 300387, China;*

<sup>3</sup> *School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China*

**Abstract** A digital imaging method is proposed to measure the uncomfortable glare in interior lighting. Our study includes the systematic derivation of three parameters: the position index, solid angle from the viewer's perspective, and average luminance of glare source. To extract the profile information of the lighting sources, an adaptive threshold method was employed. The Unified Glare Rating (UGR) was calculated and analyzed with a digital camera image of actual office lighting conditions. The results show that the mean relative errors of the obtained position index, solid angle, and average luminance of the glare source were equal to 1.319%, 4.296%, and 3.001%, respectively. For a background luminance of  $12.910 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ , the calculated value of the UGR was equal to 12.606, with a relative error of 4.326%. The advantages of this method are its simple calculations, high accuracy, and easy implementation. By applying our method to the glare test in indoor lighting, a theoretical framework for the development of a convenient and fast glare test system can be constructed.

**Key words** image processing; discomfort glare evaluation; unified glare rating; digital image; brightness calibration

**OCIS codes** 220.2945; 330.7326; 230.6080; 220.4840

收稿日期: 2018-06-28; 修回日期: 2018-07-15; 录用日期: 2018-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(61504095)、天津市教委科研计划项目(自然科学)(2017ZD06)、天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5035)

\* E-mail: tianhjgx@126.com

# 1 引言

眩光评价是照明质量评价的一个重要研究内容<sup>[1-4]</sup>。根据眩光对视觉影响的程度,可分为失能眩光和不舒适眩光。失能眩光会引起视觉工效的下降,而不舒适眩光会影响人们的视觉舒适度,在一定程度上会削弱视觉功能,进而影响视觉绩效和工作效率,尤其是在交通、航空航天、重工业等一些重要的作业场所中甚至会造成安全隐患,长期作用则会造成视觉疲劳和心理不适,引发注意力不集中、烦躁、眼部疾病等生理不适现象<sup>[3-5]</sup>。对于不舒适眩光评估,研究者们提出了不同的眩光评价模型<sup>[6-11]</sup>。Petherbridge等<sup>[6]</sup>曾研究了观察者在一定背景亮度下的视觉舒适度问题,并提出了减少眩光的评价方法。Einhorn<sup>[7-8]</sup>提出了一套眩光指数评价系统,该系统适用于灯具的光轴与铅垂线一致的室内照明。国际照明委员会(CIE)在1995年提出了统一眩光评价指数(UGR)<sup>[9]</sup>,该模型适用于室内中小光源(指立体角在 $3 \times 10^{-4} \sim 0.1$  sr之间的光源),以及发光顶棚和均匀间接照明的眩光评价,与主观评价一致性较高。Tashiro等<sup>[10]</sup>提出了一种室内眩光测试方法,经研究发现该方法对单灯具光源适用性较好。

传统的眩光测试方法存在操作复杂、响应速度慢、成本高等问题。随着数码相机的普及和数码成像技术的提高,基于数字图像的眩光测量技术使实现方便、快捷、成本低的大范围眩光测试分析成为可能。Wienold等<sup>[11]</sup>基于CCD相机的亮度映射技术构建了一种新的DGP(daylight glare probability)眩光评价模型,该模型在眩光预测能力上有很大优势,但数学模型较为复杂,与UGR模型相比计算量较大。Błaszczak<sup>[12]</sup>基于数字图像技术提出了一种不舒适眩光的测量方法,该方法测试简便、操作性强。本文基于该测试方法,研究了UGR模型中各参数的计算,系统推导了位置指数、立体角、眩光源亮度的解析表达式。为提高计算精度,采用自适应阈值方法提取眩光源轮廓信息,并进行实际办公室照明现场的图像采集,以及UGR参数计算和误差分析,验证了该方法的合理性和准确性。

## 2 基于数字图像UGR参数提取方法

统一眩光评价指数UGR是室内照明不舒适眩光评价的主要方法之一<sup>[4,9]</sup>。UGR的表达式为

$$R_{UG} = 8 \lg \frac{0.25}{L_b} \sum_{i=1}^n \frac{L_{a,i}^2 \omega_i}{P_i^2}, \quad (1)$$

式中: $L_{a,i}$ 为眩光源亮度(单位为 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ); $L_b$ 为背景亮度(单位为 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ); $\omega_i$ 为眩光源与观察者眼睛位置所成立体角(单位为sr); $P_i$ 为眩光源位置指数。UGR主要取决于观察者对当前照明环境直观的视觉感受。

Iwata<sup>[13]</sup>研究表明,在相同情况下,视野上方和下方的眩光源产生的眩光影响是不同的,视野下方的眩光源对人眼造成的不舒适感要大于视野上方的眩光源。图1为视野上方光源和下方光源坐标示意图, $R$ 和 $D$ 分别为眩光源位于视野上方、视野下方时光源发光中心投影与视线的水平距离; $T$ 和 $Y$ 分别为眩光源位于视野上方、视野下方时光源发光中心投影与视线的垂直距离; $H$ 和 $H'$ 分别为眩光源位于视野上方、视野下方时光源发光中心到视线所在水平面的距离,即高度。

$$\begin{cases} \frac{1}{P} = \frac{d^2 \cdot \exp\left(-0.18 \frac{s^2}{d} + 0.011 \frac{s^3}{d}\right)}{d^2 + 1.5d + 4.6} + \\ 0.12 \left[ 1 - \exp\left(-0.18 \frac{s^2}{d} + 0.011 \frac{s^3}{d}\right) \right], \quad (2) \\ d = \left| \frac{R}{H} \right| \\ s = \left| \frac{T}{H} \right| \end{cases}$$

$$\begin{cases} P = 1 + 0.8 \times \frac{R'}{D}, R' < 0.6D \\ P = 1 + 1.2 \times \frac{R'}{D}, R' \geq 0.6D \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $R' = \sqrt{H'^2 + Y^2}$ ,位置指数 $P$ 表示眩光源位置对不舒适眩光的影响。 $P = f(T, R, H)$ ,它取决于 $T, R, H$ 3个位置坐标的值(如图1所示),其值越小,产生的不舒适眩光越强。(2)式和(3)式分别

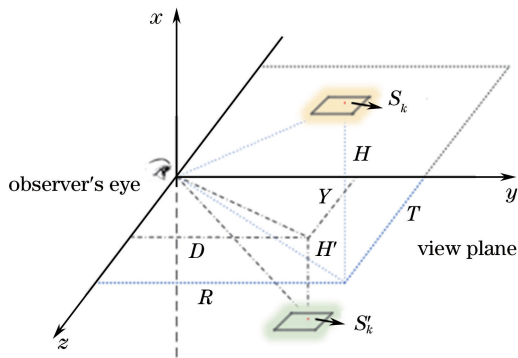


图1 以观察者位置为原点的位置指数坐标系图  
Fig. 1 Position index coordinate system with the observer position as the origin

为视野上方和视野下方眩光源位置指数计算公式<sup>[11,14]</sup>。

根据相机成像原理,在忽略相机镜头成像扭曲和其他光线干扰的基础上,建立成像系统的空间直角坐标系,如图2所示,图中O为相机镜头中心,眩光源的中心点坐标为 $S_k(t_k, r_k, h_k)$ ,其对应的成像点的空间位置坐标为 $S'_k(t'_k, r'_k, h'_k)$ ,相机中每个像素大小为 $a \times b$ ,则 $r_k$ 为眩光源发光部分的中心点

投影与视线的水平距离,其等于相机焦距 $f'$ ;  $t_k$ 为眩光源发光部分的中心点投影与视线的垂直距离;  $h_k$ 为眩光源发光部分的中心点到视线所在水平面的距离,即高度;  $r'_k$ 为眩光源发光部分的中心点的成像点投影与视线的水平距离,等于焦距 $f$ ;  $t'_k$ 为眩光源发光部分的中心点的成像点投影与视线的垂直距离;  $h'_k$ 为眩光源发光部分的中心点的成像点到视线所在水平面的距离。

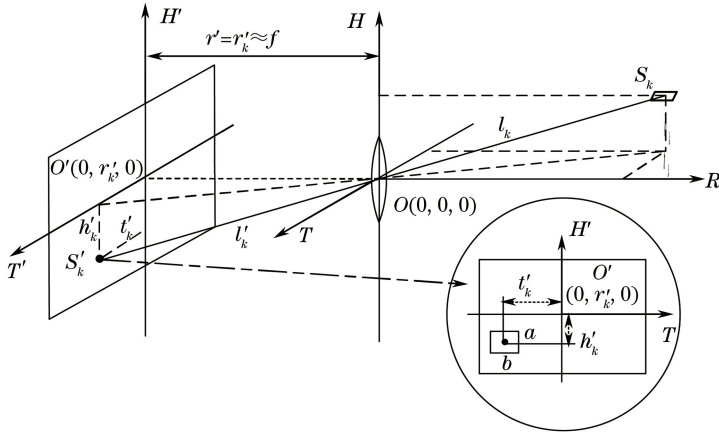


图2 像素点提取空间坐标系

Fig. 2 Pixel extraction spatial coordinate system

根据光线直线传播及相似原理,由以上分析可得一般性关系如下:

$$\begin{cases} t_k = t'_k \\ r_k = r'_k \\ h_k = h'_k \\ r_k = r'_k \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} h'_k = i_k \cdot a \\ t'_k = j_k \cdot b \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} h_k = \frac{i_k \cdot a}{f'} \\ t_k = \frac{j_k \cdot b}{f'} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $i_k, j_k$ 分别为 $T'$ 方向和 $H'$ 方向上的坐标值,即为对应方向上的像素点个数。(4)~(6)式中坐标值单位为mm。

立体角是指一个物体对特定点的三维空间的角度,它是描述观察者在某一点测量到物体大小的尺度,如图3所示。统一眩光评价指数中立体角 $\omega$ 定义为眩光源发光部分在观察者眼睛方向上的投影面积与眩光源发光中心与观察者眼睛的距离平方的比值,单位为sr,即

$$\omega = \frac{A_p}{r^2} = \frac{S \cdot \cos \alpha}{r^2}, \quad (7)$$

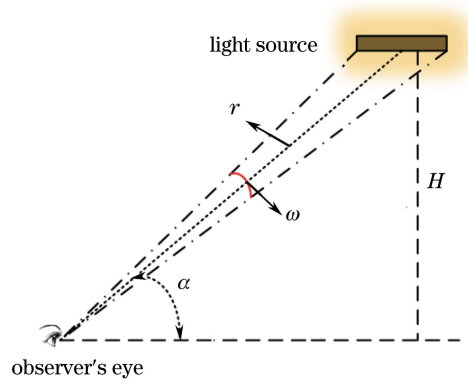


图3 以观察者位置为原点的位置指数坐标系图  
Fig. 3 Position index coordinate system with the observer position as the origin

式中: $A_p$ 为光源发光中心与观察者眼睛连线方向上的投影面积,单位为 $m^2$ ;  $S$ 为光源发光部分的表面积,单位为 $m^2$ ;  $r$ 为光源发光中心与观察者眼睛之间的距离, $r = \sqrt{R^2 + T^2 + H^2}$ ,单位为m;  $\cos \alpha$ 为光源中心与观察者眼睛连线与视线间夹角的余弦值,即 $\cos \alpha = H/r$ 。

由(7)式可得光源立体角 $\omega$ 的表达式为

$$\omega = \sum_{k=1}^N \omega_k = \sum_{k=1}^N \frac{A'_k}{l_k'^2} = \sum_{k=1}^N \frac{S'_k \cdot \cos \alpha'_k}{l_k'^2}, \quad (8)$$

式中:  $N$  为眩光源对应成像的像素点数目;  $\omega_k$  为光源像中第  $k$  个像素点的立体角;  $A'_k$  为第  $k$  个像素点的投影面积;  $l'_k$  为像素点中心到镜头中心的距离,  $l'_k = \sqrt{l_{i_k}^2 + l_{h_k}^2 + f'^2}$ , 单位为 mm,  $l_{i_k}$  为第  $k$  个像素点的投影与镜头的垂直距离,  $l_{h_k}$  为第  $k$  个像素点到镜头所在水平面的距离, 即高度;  $S'_k$  为第  $k$  个像素点与镜头中心的投影面积,  $S'_k = a \times b$ ,  $\cos \alpha'_k = \frac{f'}{\sqrt{l_{i_k}^2 + l_{h_k}^2 + f'^2}}$ ; 因此, 光源立体角  $\omega$  可简化为

$$\omega = \sum_{k=1}^N \frac{a \cdot b \cdot f'}{(\sqrt{l_{i_k}^2 + l_{h_k}^2 + f'^2})^3} \quad (9)$$

根据感光材料特性和照相光度的基本原理, 相机拍摄的图像上的每个像素点的灰度值  $D$  与被拍摄物对应点的曝光量  $I$  对数值之间存在如图 4 所示的关系<sup>[15-16]</sup>。

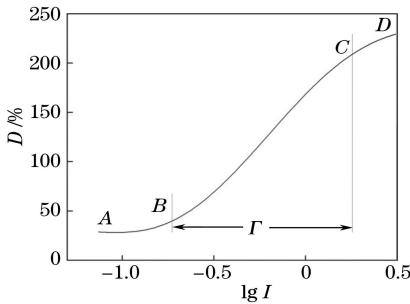


图 4 感光材料特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of photosensitive material

由图 4 可知, 在相机的感光特性曲线中, 在 B~C 区, 灰度值  $D$  与曝光量对数  $\lg I$  之间存在良好的线性关系, 相机在该区间段能获得清晰的像。

这是亮度计算所采用的区段, 宽容度  $\Gamma$  用来限定亮度测量时曝光量的使用范围<sup>[14]</sup>。因此, 由摄影理论, 相机的曝光量  $I$  和像面照度  $E$  满足<sup>[17]</sup>

$$I = E \cdot t, \quad (10)$$

式中:  $t$  为相机获取图像时的曝光时间。已知相机的光圈大小  $F = f'/\varphi$ , 像面照度为  $E_0 = (\tau\pi/4F^2) \cdot L$ ,  $L$  为所拍摄目标物的亮度,  $\tau$  为相机镜头透射率。实验采用同一相机, 则  $\tau$  相同, (10)式可简化为

$$I = \frac{\tau\pi t}{4F^2} \cdot L = \frac{\tau\pi}{4} \cdot \frac{t}{F^2} L = k \cdot \frac{t}{F^2} L. \quad (11)$$

由于常数  $k$  对线性关系没有影响, 所以将(11)式简化为  $I' = tL/F^2$ 。为计算方便, 将  $I'$  记为  $I$ , 则亮度计算公式为

$$L = \frac{IF^2}{t}. \quad (12)$$

根据数字图像处理的基本原理与方法, RGB 图像上任意一像素点灰度值  $D = 0.30R + 0.59G + 0.11B$ <sup>[18]</sup>, 结合(12)式, 可计算实际测试光源的亮度  $L$ <sup>[15]</sup>。

### 3 实验与测试

#### 3.1 亮度标定实验

采用亮度可调的 LED 面光源(作为均匀亮度源进行亮度标定)、CX-2B 成像亮度计、恒流电源(DC source)组成亮度标定系统, 对该 EOS700D 数码相机进行标定。为减少杂散光影响, 提高测试的精度, 标定实验在暗室中进行。如图 5 所示, EOS700D 数码相机和成像亮度计 CX-2B 放置在标定光源正前方 1.2 m 处, 高度设置为 1.0 m, 与光源中心在同一水平线上。

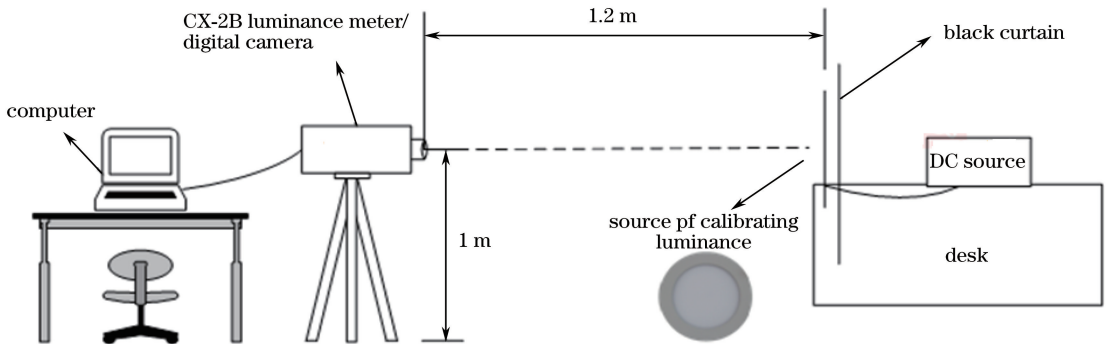


图 5 亮度实验标定装置图

Fig. 5 Experiment setup for luminance calibration

在亮度标定过程中, 首先使用 CX-2B 成像亮度计对面光源亮度进行测试, 记录相应的亮度信息, 在同一位置用 EOS700D 数码相机进行图像拍摄, 拍摄时需关闭相机的闪光功能, 并将相机的各种参数

设为默认值。在不同曝光时间下进行面光源图像的拍摄, 并记录拍摄光圈值。根据数码相机感光特性曲线选择曝光时间范围为 0.0025~0.0333 s, 实验标定亮度为 62.0, 188.1, 322.1, 845.0  $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

### 3.2 室内照明数字图像采集实验

本实验选择天津工业大学科研中心 D213 作为室内照明数字图像采集及 UGR 指数测试的实验环境。科研中心 D213 房间规格为 14 m×7 m×3 m，

室内照明光源为长方形 LED 格栅灯，尺寸为 1200 mm×300 mm，色温为 6000 K。对 6 个 LED 格栅灯进行了实验测试与分析，如图 6 所示，将 6 个格栅灯进行了 1~6 号的位置标定。



图 6 光源编号示意图

Fig. 6 Serial number of the six sources

实验装置如图 5 所示，分别使用远方 CX-2B 与数码相机 EOS700D 进行实验图像采集。为测试与分析方便，开发了 UGR 眩光测试软件系统。该系统可以实现室内数字图像的读取、处理、参数提取、UGR 计算等功能，并且增加了与外部控制系统的通

信功能。图 7 为 UGR 眩光测试软件界面。从图 7 中可以看出，在该眩光测试中相机焦距为  $f' = 34$  mm，曝光时间  $T = 0.003125$  s，相机孔径为  $\varphi = 13$  mm，通过该软件可计算位置指数、立体角、眩光源亮度、背景亮度、UGR 值等参数。

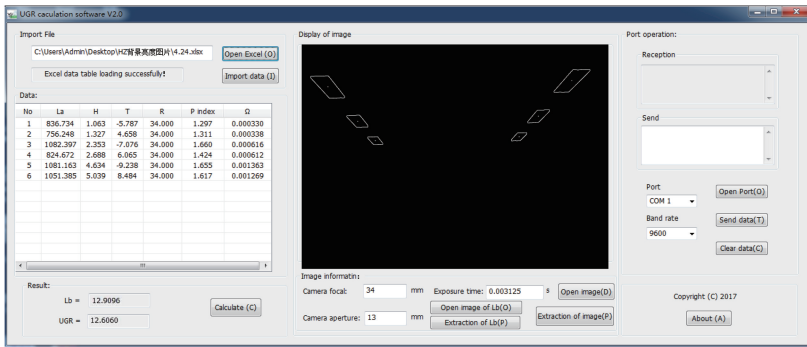


图 7 UGR 眩光测试软件界面及图像信息提取计算结果

Fig. 7 UGR glare test software interface and the calculation results from image information extraction

## 4 结果分析

采用相对误差分析方法对 UGR 各参数进行计算及误差分析，相对误差计算的表达式为<sup>[19]</sup>

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{|x - x_0|}{x_0}, \quad (13)$$

式中： $x$  为被测量的真值， $x_0$  为测量值。

位置指数计算结果比较如表 1 所示，除 5 号光源的位置指数误差偏差比较大为 1.909%，其他光源的位置指数与实际测量值一致性较好，准确度较高，平均相对误差为 1.319%。

表 1 位置指数计算与测试结果比较

Table 1 Contrast relationship between the measured and calculated values of position index

Serial number of lighting sources	1	2	3	4	5	6
Measured position index	1.312	1.305	1.418	1.406	1.624	1.592
Calculated position index	1.297	1.311	1.396	1.424	1.655	1.617
Relative error $\delta / \%$	1.143	0.460	1.551	1.280	1.909	1.570

在立体角参数提取中，为避免光源亮度与背景

亮度对比度低影响光源像的轮廓的准确提取<sup>[20]</sup>,采用自适应阈值方法进行了光源轮廓提取<sup>[21]</sup>,计算结果如表 2 所示。

表 2 立体角计算与测试结果比较

Table 2 Contrast relationship between the measured and calculated values of solid angle

Serial number of lighting sources	1	2	3	4	5	6
Measured solid angle / (10 <sup>-3</sup> sr)	0.334	0.324	0.608	0.583	1.271	1.189
Calculated solid angle / (10 <sup>-3</sup> sr)	0.330	0.338	0.616	0.612	1.363	1.269
Relative error $\delta$ / %	1.198	4.321	1.316	4.974	7.238	6.728

由表 2 可以看出,由该方法计算的最大误差为 7.238%,平均误差为 4.296%,与未采用自适应阈值方法得到的立体角相比,其计算精度的最大相对误差有了一定的提高<sup>[12]</sup>。在亮度参数提取中,为保证最终输出的画面效果与拍摄的图像信息保持一致,对相机采集的图像进行了伽马校正<sup>[22]</sup>。分别在 62.0, 188.1, 322.1, 845.0 cd·m<sup>-2</sup> 的光源亮度下进行了多组曝光时间的图像采集,总体曝光量对数值 lg I 与图像灰度值 D 的趋势图,如图 8 所示。

由图 8 可以看出,曝光量的对数值与灰度值之间关系基本符合图 4 的变化趋势,灰度值的分布在中间区域(60<D<210)时,即 A~B 段区域灰度值与曝光量对数值存在较好的线性关系,该区域即为数码相机 EOS700D 的测试的线性范围。将线性区域 A~B 段内的数据选取出来通过 Origin 软件进

表 3 亮度计算与测试结果比较

Table 3 Comparison between the calculated and measured values of the luminance

Serial number of lighting sources	1	2	3	4	5	6
Measured luminance / (cd·m <sup>-2</sup> )	818.021	717.132	1108.101	800.732	1051.702	1074.403
Calculated luminance / (cd·m <sup>-2</sup> )	836.734	756.248	1082.397	824.672	1081.163	1051.385
Relative error $\delta$ / %	2.288	5.455	2.320	2.990	2.801	2.142

由表 3 可知,由图像提取信息计算得到的光源亮度值准确度较高,最小相对误差为 2.142%,最大相对误差为 5.455%。根据表 3 中的数据对比可以看出:除了 2 号光源区域所提取的亮度误差偏差较大外,其他光源区域提取计算的亮度值与 CX-2B 所测试的亮度值的一致性较好,平均相对误差为 3.001%。采用眩光源亮度提取方法对背景亮度进行计算,图像提取计算结果为 12.910 cd·m<sup>-2</sup>,测试结果 12.124 cd·m<sup>-2</sup>,相对误差为 6.483%。同时,

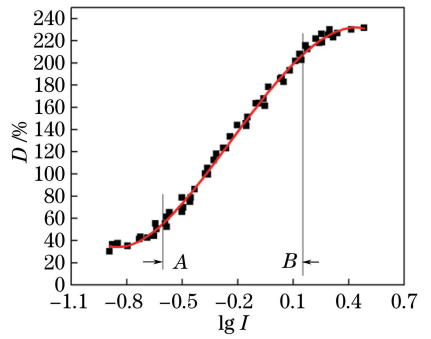


图 8 图像灰度与曝光量对数值关系图

Fig. 8 Relationship between image grey-scale and logarithm of exposure

行线性拟合,如图 9 所示,得到线性回归方程:  $D = 208.6603 \times \lg I + 178.7318$ , 其相关系数  $R^2$  为 0.991, 结合 (11) 式, 可得亮度回归方程为:  $L = [10^{(D-178.7318)/208.6603} \cdot F^2] / t$ 。

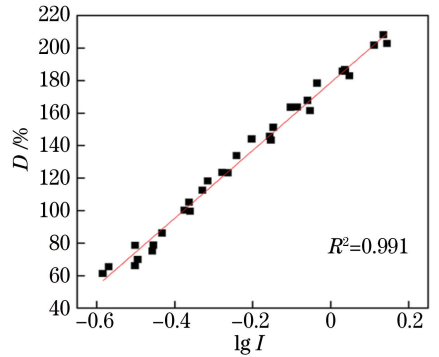


图 9 测试数据与亮度拟合曲线

Fig. 9 Measured data and fitted luminance function

采用上述公式对图像进行亮度信息提取及计算,其计算结果如表 3 所示。

结合上文中眩光源位置指数、立体角、亮度参数数据,对 UGR 值进行测试和计算,其测量值为 13.176,图像提取参数值为 12.606,相对误差为 4.326%。

## 5 结 论

基于数字图像提取光源 UGR 参数方法中,为提高计算精度,采用自适应阈值方法提取光源轮廓信息,同时在亮度参数提取中,为保证最终输出的画面效果与拍摄的图像信息一致,对相机采集的图像

进行了伽马校正,并进行实际办公室照明现场的图像采集和参数计算。结果表明:位置指数的相对误差范围可控制在1.909%以内;提取的眩光源立体角的相对误差范围在1.198%~7.238%;提取的眩光源亮度的相对误差最大为5.455%;当背景亮度计算结果为 $12.910 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,统一眩光指数UGR的相对误差为4.326%。该测试方法可应用于室内照明的眩光测试与分析,其操作简便、精度高、成本低、测试范围广、定位准确、易于硬件实现,为开发方便、快捷的眩光测试系统提供了理论支撑。需要注意的是,研究发现,立体角和背景亮度的计算误差较大,这些问题不仅涉及到相机CMOS感光器件响应不均匀,还涉及到镜头成像畸变、相机分辨率、图像的光谱光视效率函数 $V(\lambda)$ 修正、校准光源的平场校正、观察位置、天气变化等对实验结果的影响。因此,后续工作将对这类问题进行系统研究和讨论,探索健康、舒适的室内照明环境解决方案。

### 参 考 文 献

- [1] Yang G X, Yang X D. Unpleasant glare and evaluation of unpleasant glare[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2006, 17(2): 11-15.  
杨公侠, 杨旭东. 不舒适眩光与不舒适眩光评价[J]. 照明工程学报, 2006, 17(2): 11-15.
- [2] Feng A Y, Li L, Zhou L, *et al.* Validation and optimization of discomfort glare model for white LED [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0733001.  
冯阿阳, 李乐, 周莉, 等. 白光LED不舒适眩光模型的验证和优化 [J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0733001.
- [3] Boyce P R. Human factors in lighting[M]. 2nd ed. London: CRC Press, 2003.
- [4] Lin Y D, Qiu J J, Liu Y H. Research status and development on discomfort glare[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2016, 27(2): 7-13.  
林燕丹, 邱婧婧, 刘弈宏. 不舒适眩光研究的国内外现状及进展[J]. 照明工程学报, 2016, 27(2): 7-13.
- [5] Chen C Q, Wang M, Luo S R. Design and optimization of anti-glare LED mining lamp [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 042201.  
陈超泉, 王敏, 罗时睿. 防眩光LED工矿灯的设计与优化[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 042201.
- [6] Petherbridge P, Hopkinson R G. Discomfort glare and the lighting of buildings[J]. Lighting Research and Technology, 1950, 15(2): 39-79.
- [7] Einhorn H D. Discomfort glare: a formula to bridge differences[J]. Lighting Research and Technology, 1979, 11(2): 90-94.
- [8] Einhorn H D. Unified glare rating (UGR): Merits and application to multiple sources [J]. Lighting Research and Technology, 1998, 30(2): 89-93.
- [9] Commission Internationale de Léclairage. Discomfort glare in interior lighting[M]. Vienna: CIE, 1995.
- [10] Tashiro T, Kawanobe S, Kimura-Minoda T, *et al.* Discomfort glare for white LED light sources with different spatial arrangements[J]. Lighting Research and Technology, 2015, 47(3): 316-337.
- [11] Wienold J, Christoffersen J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras [J]. Energy and Buildings, 2006, 38(7): 743-757.
- [12] Błaszczak U J. Method forevaluating discomfort glare based on the analysis of a digital image of an illuminated interior[J]. Metrology and Measurement Systems, 2013, 20(4): 623-634.
- [13] Iwata T, Tokura M. Position Index for a glare source located below the line of vision[J]. Lighting Research and Technology, 1997, 29(3): 172-178.
- [14] Cai H, Chung T. Evaluating discomfort glare from non-uniform electric light sources [J]. Lighting Research and Technology, 2013, 45(3): 267-294.
- [15] Yu W J, Guo Z Y, Liao Q L, *et al.* Research on luminance distribution measurement using a digital camera [J]. Journal of China University of Metrology, 2014, 25(3): 273-278.  
俞文杰, 郭子杨, 廖启栗, 等. 数码相机的亮度分布测试研究[J]. 中国计量学院学报, 2014, 25(3): 273-278.
- [16] Yang L B, Xiong X M, Zhang W T, *et al.* A real-time illumination measurement method based on video camera image[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2017, 37(3): 223-227.  
杨立彬, 熊显名, 张文涛, 等. 基于摄像机图像的实时亮度测量方法[J]. 桂林电子科技大学学报, 2017, 37(3): 223-227.
- [17] Krüger U, Schmidt F. The impact of cooling on CCD-based camera systems in the field of image luminance measuring devices[J]. Metrologia, 2009, 46(4): S252-S259.
- [18] Wu Y, Yang W H, Li M. Fusion algorithm of multispectral and high-resolution panchromatic images[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(2):

- 174-178.
- 吴艳, 杨万海, 李明. 多光谱与高分辨率图像融合算法研究[J]. 光子学报, 2003, 32(2): 174-178.
- [19] Yang G Y, Wang J. Predication model error analysis: relative error and absolute error [J]. Statistics and Information Tribune, 2003, 18(4): 21-24.
- 杨桂元, 王军. 对预测模型误差的分析: 相对误差与绝对误差 [J]. 统计与信息论坛, 2003, 18(4): 21-24.
- [20] Xiang Y, Ye Q H, Liu J G, *et al.* Retrieve of planetary boundary layer height based on image edge detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0704003.
- 项衍, 叶擎昊, 刘建国, 等. 基于图像边缘检测法反演大气边界层高度 [J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0704003.
- [21] Mao X Y, Leng X F, Wang B H, *et al.* Introduction to Open CV3 programming [M]. 1st ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 2-38.
- 毛星云, 冷雪飞, 王碧辉, 等. Open CV3 编程入门 [M]. 1 版. 北京: 电子工业出版社, 2015: 2-38.
- [22] Kykta M, Dai Y P (translation). Gamma, brightness, and luminance considerations for HD displays [J]. Advanced Display, 2009, 20(12): 13-18.
- Kykta M, 代永平(译). 高清显示中的伽马校正、亮度和明视度探索 [J]. 现代显示, 2009, 20(12): 13-18.