

基于光谱分析的电光源频闪研究

王珏敏^{1*}, 赵威梓^{2,3}, 阳帆⁴

¹山西职业技术学院, 山西 太原 030006;

²商洛学院化学工程与现代材料学院, 陕西 商洛 726000;

³商洛学院陕西省尾矿资源综合利用重点实验室, 陕西 商洛 726000;

⁴南昌大学国家硅基 LED 工程技术研究中心, 江西 南昌 330047

摘要 为了便于广大基层质检人员工作,提出了一种仅利用光谱仪即可定量研究电光源频闪的方法。该方法无需使用光源频闪测试仪、数字示波器等设备,仅需利用普通光谱仪采集一段时间内被测电光源的瞬态光谱数据,通过光谱分析即可定量研究电光源频闪。通过对明视觉光谱光效率函数的高质量拟合和对被测电光源的相对光通量计算及其 8 阶傅里叶拟合,分别计算并分析了白炽灯、LED 灯丝灯、碘钨灯三种电光源的闪烁百分比、频闪深度和频率,并与 LFA-2000 型光源频闪测试仪的测量结果进行比较。结果表明:该方法计算得到的三种电光源的闪烁百分比、频闪深度和频率平均相对误差分别为 4.93%、4.89% 和 10.17%,对应的最大相对误差分别为 8.31%、7.95% 和 14.22%。在被测光源频闪频率不大于 200 Hz 时,该方法准确、可行,可为相关仪器设备的开发及人工照明设备研究和质检等提供参考。

关键词 视觉光学; 频闪; 光谱分析; 电光源; 拟合

中图分类号 TM923.07; O433.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP56.203301

Flicker of Electric Light Sources Based on Spectral Analysis

Wang Juemin^{1*}, Zhao Wenzhi^{2,3}, Yang Fan⁴

¹Shanxi Polytechnic College, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

²College of Chemical Engineering and Modern Materials, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China;

³Shaanxi Provincial Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources,
Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China;

⁴National Engineering Technology Research Center for LED on Silicon Substrate,
Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China

Abstract This study develops a spectral analysis method to provide a convenient method for quantitatively analyzing flicker of electric light sources for mass basic quality inspectors. This method only requires the use of transient spectral data of electric light sources measured by a common spectrometer within a certain period of time, instead of using light source stroboscope and digital oscilloscope. By the means of high-quality fitting of the spectral luminous efficiency function of photopic vision, calculation of relative light flux, and eight-step Fourier fitting, the scintillation percentage, stroboscopic depth, and stroboscopic frequency of incandescent, LED filament, and iodine tungsten lamps are calculated and analyzed, and the test results are compared with data measured by an LFA-2000 light source stroboscope. The results show that the average relative errors of scintillation percentage, stroboscopic depth, and stroboscopic frequency for these three types of electric light sources calculated by this method are 4.93%, 4.89%, and 10.17%, respectively, and the corresponding maximum relative errors are 8.31%, 7.95%, and 14.22%, respectively. The method is proven to be correct, feasible and accurate when the stroboscopic frequency of the measured light source is less than 200 Hz. This method can provide references for the development

收稿日期: 2018-10-29; **修回日期:** 2018-12-17; **录用日期:** 2019-01-07

基金项目: 国家重点研发计划“战略性先进电子材料”重点专项(2017YFB0403700)、山西省教育科学规划课题(GH-18155)

* **E-mail:** 298836058@qq.com

of related instruments and equipment, as well as the research and quality inspection of artificial lighting equipment.

Key words visual optics; flicker; spectral analysis; electric light source; fitting

OCIS codes 330.5370; 070.4790; 120.4800

1 引言

电光源的频闪是指电光源发出的光随时间呈快速、重复变化,导致光源跳动和不稳定、光源光通量波动的现象^[1-3]。产生电光源频闪的原因主要有光源供电频率低、电压波动大、光源发光原理等^[4-7]。当前的研究表明,电光源频闪的危害主要包括:错觉引发工伤事故;诱发光敏人员出现癫痫、偏头痛、恶心等症状;伤害青少年的眼睛,造成近视^[8-10]。

随着人们对光健康的重视,很多消费者在选购电光源时会利用手机在拍照或摄像状态下对准目标电光源,通过观察手机屏幕上是否出现条纹或明暗不同的闪烁现象来判断电光源是否存在频闪现象。该方法仅可对电光源进行粗略的定性判断,无法精确定量研究频闪^[11-12]。国际照明委员会(CIE)、美国电气和电子工程师协会(IEEE)等权威机构常通过测量电光源的照度随时间变化来计算其闪烁指数、频闪深度、调制深度、波动深度等,从而对电光源的频闪现象进行定量研究^[13-14]。然而,该方法需要利用光源频闪测试仪、数字示波器等,这些设备相对较为昂贵,且普及程度较低。光谱仪是光学研究过程中的基本设备,普及程度较高。因此,本文采用光谱仪高频采集一定时间内被测电光源的瞬态光谱数据,根据光谱的峰值闪烁初步判断电光源的频闪情况。利用明视觉光谱光效率函数计算人眼观察到的光强闪烁及频率,研究电光源频闪情况。利用该方法分别计算了白炽灯、LED灯丝灯、碘钨灯三种电光源的闪烁百分比、频闪深度和频率,并将其与LFA-2000型光源频闪测试仪的测量结果进行比较。结果表明该方法是可行的,且准确度较高,可为相关仪器设备的开发及人工照明设备的研究、质检提供参考。

2 实验

2.1 实验原理

表征电光源频闪的主要参数有闪烁百分比(R_{PF} ,也称为波动深度)、频闪深度 δ 及频率 f 。图1给出了某种光源在空间某点产生的照度随时间变化的示意图,结合图1可得闪烁百分比 R_{PF} 与频闪深度 δ 的计算公式分别为

$$R_{PF} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2 \times E_{\text{avg}}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: E_{\max} 、 E_{\min} 和 E_{avg} 分别为电光源照度的最大值、最小值和平均值。图1中 A_1 (阴影部分面积)、 A_2 分别为电光源照度值大于平均值和小于平均值的面积, $t_1 \sim t_4$ 均为一个周期内照度值等于平均值 E_{avg} 时对应的时间点, T 为照度的变化周期。

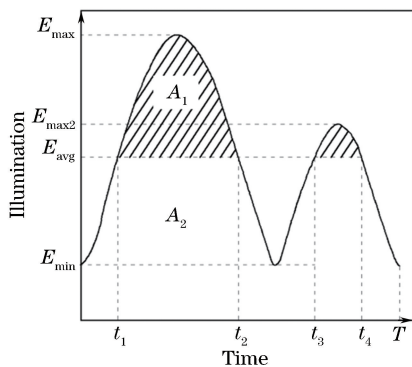


图1 光源在空间某点产生的照度随时间变化示意图

Fig. 1 Schematic of time-dependent illumination produced by light source at certain point in space

照度指单位面积上所接收到的可见光的光通量。光通量可由 $\Phi = K \int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda$ 算出,式中: K 为明视觉最大光谱光效能,其值等于683 lm/W; $P(\lambda)$ 为光谱函数,可由光谱仪测得; $V(\lambda)$ 为明视觉光谱光效函数,1924年CIE已经给出了 $V(\lambda)$ 的具体数据。故利用光谱仪高频采集一段时间内被测电光源的瞬态光谱数据,经过计算分析可得到该电光源的照度随时间的变化情况,进一步可得到该电光源的闪烁百分比、频率、频闪深度等相关参数。

2013年4月,IEEE发布了“IEEE PAR 1789: 2013 Draft risk assessment-potential health effects of flicker from LED lighting”。该文给出了闪烁频率与闪烁百分比对健康影响的评估方法,如图2所示。根据光谱仪采集数据的计算结果,结合图2,即可对电光源频闪进行评估。

2.2 光谱测量

被测电光源为来自知名大型企业的白炽灯、LED灯丝灯、碘钨灯,灯的功率均为20 W。在光学暗室中,保持被测电光源在市电(交流电的电压为220 V、频率为50 Hz)下正常工作,正式测量前对其

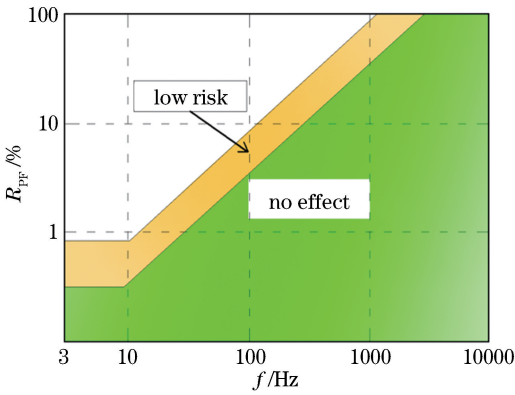


图2 IEEE PAR 1789 给出的闪烁频率与闪烁百分比对健康影响的评估方法

Fig. 2 Evaluation for health effects of scintillation frequency and percentage in IEEE PAR 1789

预热 20 min. 利用美国海洋光学公司的 Ocean Optics UBS2000+型光谱仪(积分时间为 1 ms), 在 50 ms 内连续采集上述三种电光源在 380~780 nm 光波段的光谱数据, 即三种电光源分别连续采集 50

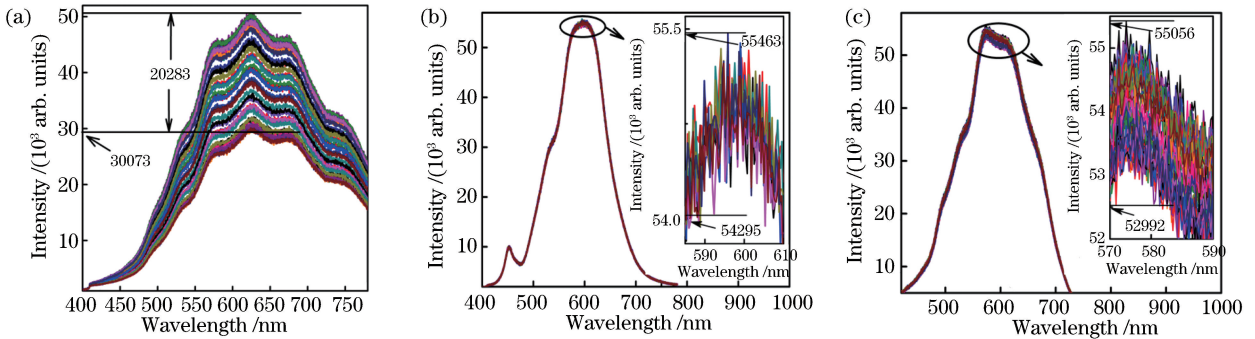


图3 三种电光源在 50 ms 内的光谱数据。(a) 白炽灯光谱数据; (b) LED 灯丝灯光谱数据; (c) 碘钨灯光谱数据

Fig. 3 Spectral distributions of three types of electric light sources within 50 ms. (a) Spectral distribution of incandescent lamp; (b) spectral distribution of LED filament lamp; (c) spectral distribution of iodine tungsten lamp

3 结果与讨论

结合人眼视觉效果对电光源光谱闪烁情况进行定量分析。利用 OriginPro 软件的 Fit Multi-peaks 功能, 采用 Asym2Sig 函数对 1924 年 CIE 给出的明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 进行拟合, 拟合结果为

$$V(\lambda) = 3.659 \times 10^{-4} + \frac{1.182}{1 + \exp(32.651 - \lambda/15.731)} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \exp(24.558 - \lambda/20.915)} \right], \quad (4)$$

相关系数 $R^2 = 0.99903$ 。

人眼观测到的亮度等于单位立体角、单位投影面积上的光通量。本文的主要目的是分析闪烁频率, 故为了计算方便, 仅研究相对光通量, 其计算公式为

组光谱数据, 如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 三种电光源在 50 ms 内光谱强度的变化幅度较大, 白炽灯光谱的变化幅度远大于 LED 灯丝灯和碘钨灯。光谱强度的变化会直观地表现为肉眼观测到的亮度闪烁。为了定量描述电光源设备光谱强度的闪烁情况, 定义光谱闪烁比 R_{SFP} 为

$$R_{SFP} = \frac{2 \times [P(\lambda)_{\max} - P(\lambda)_{\min}]}{P(\lambda)_{\max} + P(\lambda)_{\min}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: $P(\lambda)_{\max}$ 、 $P(\lambda)_{\min}$ 分别为测定时间段内光谱的最大峰值与最小峰值。利用(3)式分别计算白炽灯、LED 灯丝灯、碘钨灯光谱闪烁比 R_{SFP} , 结果分别为 50.44%、2.13%、3.82%。所用美国海洋光学公司的 Ocean Optics UBS2000+ 型光谱仪的信噪比为 0.4%, 三种电光源中 LED 灯丝灯光谱的闪烁比 R_{SFP} 最小, 为 2.13%, 是光谱仪信噪比的 5.325 倍, 故可认为图 3 中光谱强度跳动不是由光谱采集设备引起的。

$$R(t) = \int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda, \quad (5)$$

式中: t 为时间。

利用图 3 中电光源的光谱数据以及(4)式、(5)式分别计算白炽灯、LED 灯丝灯、碘钨灯在 50 ms 内对应的 50 组相对光通量 $R(t)$ 。计算结果分别见图 4~6 中黑色圆点所示, 其中 T 、 A 分别为相对光通量的周期和振幅。

图 4~6 中相对光通量的计算结果可直观反映出肉眼观测到的三种电光源的亮度闪烁情况。闪烁频率是定量描述频闪的重要参数, 为了精确计算闪烁频率 f , 利用 MATLAB 软件中的 cftool 工具箱, 采用 8 阶傅里叶级数分别拟合图 4~6 中的 50 个相对光通量 $R(t)$ 随时间变化的函数表达式。8 阶傅里叶级数为

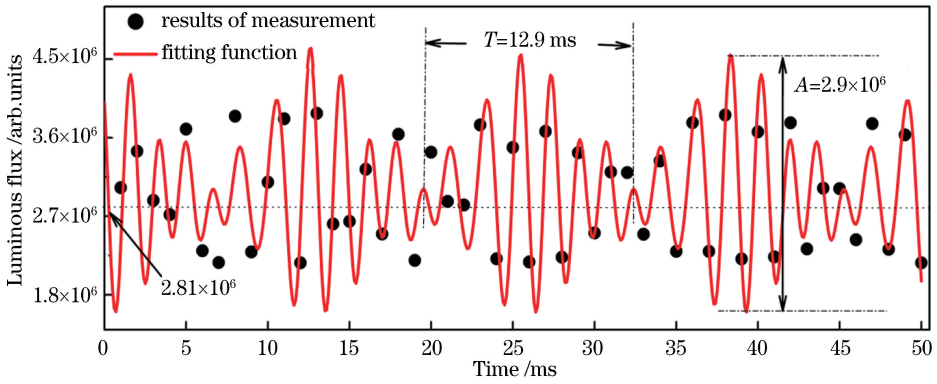


图4 白炽灯的相对光通量的计算结果及其傅里叶拟合

Fig. 4 Calculation result and Fourier fitting of relative luminous flux of incandescent lamp

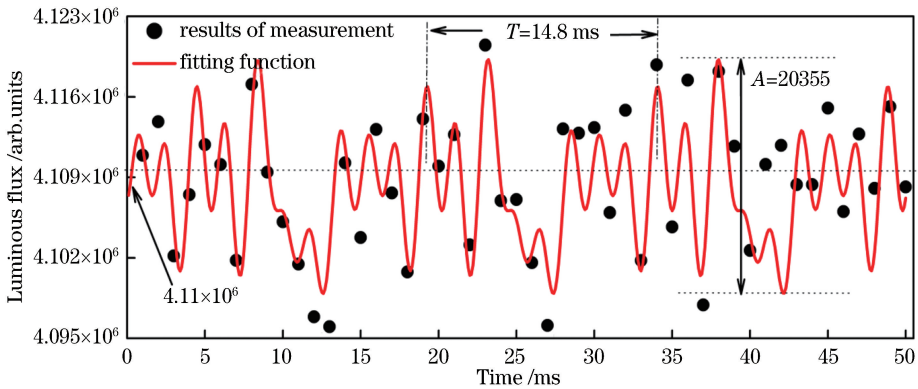


图5 LED灯丝灯相对光通量的计算结果及其傅里叶拟合

Fig. 5 Calculation result and Fourier fitting of relative luminous flux for LED filament lamp

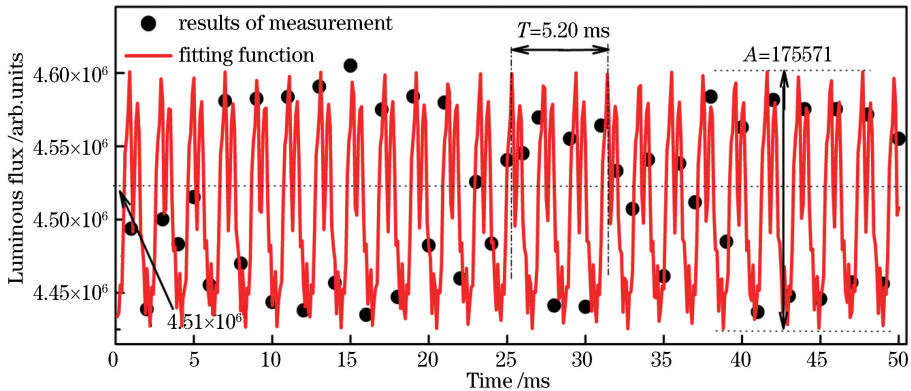


图6 碘钨灯相对光通量的计算结果及其傅里叶拟合

Fig. 6 Calculation result and Fourier fitting of relative luminous flux for iodine tungsten lamp

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^8 [a_i \cos(i\omega x) + b_i \sin(i\omega x)], \quad (6)$$

式中： x 为自变量； Y 为因变量； a_0 、 a_i 、 b_i 、 ω 均为待定系数； i 为阶数，取值范围为 $1 \sim 8$ 。拟合结果如表 1 所示。由表 1 可知，白炽灯与碘钨灯拟合相关系数均大于 0.8，LED 灯丝灯的拟合相关系数最低，但也接近 0.8。这表明拟合函数与计算结果高度相关，该拟合结果能够保证下文的计算和分析。

表 1 三种电光源相对光通量的拟合结果

Table 1 Fitting results of relative luminous flux of three types of electric light sources

Electric light source	Correlation coefficient R^2	Root mean square error (RMSE)
Incandescent lamp	0.8193	4.038×10^3
LED filament lamp	0.7623	439.8
Iodine tungsten lamp	0.8724	2431

由图 4~6 可清晰地看出,三种电光源的相对光通量的拟合结果均为周期函数。白炽灯、LED 灯丝灯和碘钨灯相对光通量的拟合结果的周期分别为 12.9, 14.8, 5.02 ms, 相对光通量振幅分别为 2.9×10^6 , 20355, 175571。为了进一步量化和分析频闪,仿照上文闪烁百分比 R_{PF} 与频闪深度 δ 的定义,定义本文提出的频闪分析方法所对应的闪烁百分比 R_{PF} 与频闪深度 δ 为

$$R_{PF} = \frac{R(t)_{\max} - R(t)_{\min}}{R(t)_{\max} + R(t)_{\min}} \times 100\%, \quad (7)$$

表 2 三种电光源的频闪计算结果及其相对误差

Table 2 Calculation results and relative errors of flicker of three types of electric light sources

Electric light source	Scintillation percentage R_{PF}		Depth stroboscopic δ		Frequency f	
	Result of computation /%	Relative error /%	Result of computation /%	Relative error /%	Result of computation /Hz	Relative error /%
Incandescent lamp	27.635	8.31	28.437	7.95	87.52	12.48
LED filament lamp	0.35	2.76	0.31	3.12	57.11	14.22
Iodine tungsten lamp	1.925	3.72	1.945	3.61	192.31	3.81

由表 2 可知,根据本文所提分析方法计算得到的闪烁百分比、频闪深度与测试仪的测量结果相差不大,但两种方法所得频率的相对误差较大。根据表 2 中三种电光源的闪烁百分比和频率的结果,结合图 2 可知,白炽灯频闪处于高风险区域,LED 灯丝灯和碘钨灯均处于低风险区域。

为了验证本文所提出的电光源频闪分析方法的重复性,在相同的测试条件下,采用同款光谱仪分别采集三种被测电光源在 50 ms 内的光谱数据,并重复 5 次。利用上述方法计算三种被测电光源的闪烁百分比、频闪深度和频率三个参数。以上文的计算结果作为参考值,分别计算三个参数的平均相对误差,结果见表 3 所示。

表 3 三种电光源的闪烁百分比、频闪深度和频率的平均相对误差

Table 3 Average relative errors of scintillation percentage, stroboscopic depth, and stroboscopic frequency of three types of electric light sources %

Electric light source	Scintillation percentage R_{PF}	Depth stroboscopic δ	Frequency f
Incandescent lamp	4.37	2.72	6.71
LED filament lamp	3.42	4.61	4.82
Iodine tungsten lamp	5.61	3.53	7.32

由表 3 可知,该方法计算所得的三种电光源的闪烁百分比、频闪深度和频率的平均相对误差均小于 8%。对于三种不同的电光源,闪烁百分比、频闪深度和频率的平均相对误差的平均值分别为

$$\delta = \frac{R(t)_{\max} - R(t)_{\min}}{2 \times R(t)_{\text{avg}}}, \quad (8)$$

式中: $R(t)_{\max}$ 、 $R(t)_{\min}$ 、 $R(t)_{\text{avg}}$ 分别为电光源相对光通量拟合函数的最大值、最小值、平均值。分别计算白炽灯、LED 灯丝灯和碘钨灯三种电光源的闪烁百分比 R_{PF} 、频闪深度 δ 和频率 f 三个参数,并采用杭州远方光电信息股份公司研制的 LFA-2000 型光源频闪测试仪测量三种电光源的相关参数。比较本文计算结果与频闪测试仪的测量结果,并分析二者的相对误差,结果如表 2 所示。

4.47%、3.62% 和 6.28%。这表明了基于光谱分析的电光源频闪分析方法具有一定的重复稳定性。另外,由于实验室常用光谱仪的最高光谱采样频率为 1000 Hz,即最快 1 ms 采集一次光谱数据,参考正弦余弦曲线的 5 点法画图,可以认为当每个周期有不小于 5 个点时,可利用该方法计算被测光源的频闪。也就是说,本文所提方法的适用范围为被测光源频闪频率不大于 200 Hz。

4 结 论

采用光谱仪在 50 ms 内高频采集白炽灯、LED 灯丝灯和碘钨灯三种被测电光源的瞬态光谱数据,并通过光谱分析对三种被测电光源的频闪进行研究。得到以下结果:利用所提方法分析三种电光源的闪烁百分比的平均相对误差仅为 4.93%,最大相对误差为 8.31%;频闪深度的平均相对误差仅为 4.89%,最大相对误差为 7.95%;频率的平均相对误差仅为 10.17%,最大相对误差为 14.22%。结果表明基于光谱分析的电光源频闪分析方法是可行的,可为相关仪器设备的开发及人工照明设备的研究、质检提供参考。

参 考 文 献

- [1] Blair N P, Tan M R, Felder A E, *et al.* Retinal tissue oxygen tension and consumption during light flicker stimulation in rat [J]. *Experimental Eye Research*, 2018, 175: 207-211.

- [2] Huang J, Wu X C. LED lighting product flicker risk monitoring [J]. *China Light & Lighting*, 2018(1): 41-45.
黄骏, 吴晓晨. LED照明产品频闪风险监测 [J]. *中国照明电器*, 2018(1): 41-45.
- [3] Drapela J, Langella R, Slezinger J, *et al.* Generalized lamp model for light flicker studies [J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 154: 413-422.
- [4] Yang C P, Fang W Q, Liu M B, *et al.* Blue light hazard and non-visual biological effect of LED backlight displayer at different color temperatures [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 101701.
杨超普, 方文卿, 刘明宝, 等. 不同色温LED背光屏的蓝光危害和非视觉生物效应 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 101701.
- [5] Gutierrez J J, Saiz P, Azcarate I, *et al.* Sensitivity of modern lighting technologies at varying flicker severity levels [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, 92: 34-41.
- [6] Ni W. The latest international standardization progress on flicker and stroboscopic effect [J]. *China Light & Lighting*, 2018(3): 21-28.
倪伟. 闪烁和频闪效应评价的国际标准化进展 [J]. *中国照明电器*, 2018(3): 21-28.
- [7] Yoshimoto S, Garcia J, Jiang F, *et al.* Visual discomfort and flicker [J]. *Vision Research*, 2017, 138: 18-28.
- [8] Lu H J, Chang G W, Su H J. A new method for flicker severity forecast [C]//2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE, 2013: 13932999.
- [9] Virulkar V B, Aware M V. Flicker detection, measurement and means of mitigation: a review [J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series B*, 2014, 95(2): 149-162.
- [10] 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.
- [11] Yang C P, Fang W Q, Wang Z, *et al.* Comparison on blue light hazard and circadian effect of different displays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121701.
杨超普, 方文卿, 王昭, 等. 不同显示器的蓝光危害及节律效应比较研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121701.
- [12] Albistur C, Aravena P, Morán L, *et al.* A simple predictive method to estimate flicker [C]//2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October 6-11, 2013, Lake Buena Vista, FL, USA. New York: IEEE, 2013: 14318138.
- [13] Gil-de-Castro A, Rönnerberg S K, Bollen M H J. Light intensity variation (flicker) and harmonic emission related to LED lamps [J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 146: 107-114.
- [14] Lu S M, Liu L, Yu A Q. Flicker analysis of lighting products and effect of functional lighting [J]. *Light & Lighting*, 2014, 38(4): 22-27.
陆世鸣, 刘磊, 俞安琪. 照明产品的频闪分析及对功能性照明的影响 [J]. *灯与照明*, 2014, 38(4): 22-27.