

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.013



LED照明环境下照明参数对人眼 视疲劳的影响

杨春宇, 胡皓, 向奕妍, 汪统岳

(重庆大学建筑城规学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:通过析因实验,测量被试者在不同色温和照度组合的照明环境下进行不同时长学习的眼电信号,分析其眨眼频次和闭眼时间变化率,从而判断视疲劳程度的变化。结果表明:照度、色温、光照时间、色温和照度的交互作用对眨眼频次和闭眼时间的变化率具有显著性影响,其中,色温和照度的交互作用影响力最大;视疲劳随着照度的提高,总体呈现先降低后上升的趋势,照度的最优水平为1 000~2 000 lx,超过3 000 lx的高照度应避免;4 000 K色温条件下,眨眼频次和闭眼时间的变化率均较小,视疲劳相对较低;随着光照时间的增加,眨眼频次和闭眼时间变化率均变大,视疲劳加重;光照时间最佳为0.5~1 h,且不宜超过1.5 h。

关键词:照明;视疲劳;眨眼频次;闭眼时间;析因实验

中图分类号:TU113.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)04-0088-06

Effects on visual fatigue of the human eyes of lighting parameters under LED luminous environment

Yang Chunyu, Hu Hao, Xiang Yiyen, Wang Tongyue

(Faculty of Architecture and Urban Planning; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: By factorial experiment, the frequency of blink and rate of time of closed eyes of the measuring subjects are analyzed to judge the degree of visual fatigue when they are in different time learning with the eyes of the electrical signal under the lighting environment of a combination of different color temperature and different shades of light. The results showed that: the interaction effects of illumination, color temperature, illumination time and light intensity have significant influence on frequency of blink and the rate of change in closed eye time. Among them, the color temperature and illumination has the greatest interaction effects. With the increasing of illumination, visual fatigue decreases firstly and then rises. The optimal level of illumination is 1 000~2 000 lx, and the high illumination of over 3 000 lx should be avoided. Under the condition of 4 000 k color temperature, the blink frequency and the rate of closed eyes time are both less and the visual fatigue is relatively low. With the increase of the time of illumination, the rate of blink frequency and the time of closed eyes increase and the visual fatigue aggravates. The optimum

收稿日期:2017-09-28

基金项目:国家自然科学基金(51478060)

作者简介:杨春宇(1953-),男,教授,博士生导师,主要从事建筑光学研究, E-mail:ycu11@163.com。

Received:2017-09-28

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51478060)

Author brief:Yang Chunyu (1953-), professor, doctoral supervisor, main research interest: building lighting, E-mail: ycu11@163.com.

illumination time is 0.5~1 h and should not exceed 1.5 h.

Keywords: lighting; visual fatigue; blink frequency; time of closed eyes; factorial experiment

视疲劳是伴随着视知觉活动而产生的一种现象,主要表现为眼酸、眼痛、视觉作业的速度和精确度的降低^[1]。人眼作为直接感受光刺激的器官,眼部活动的变化最能直观地反映出视疲劳,比如,眨眼频次(每分钟内的眨眼次数)和闭眼时间百分比(眨眼时80%以上眼闭合度的时间占每次眨眼总时间的百分比)。研究表明,人在焦虑时眨眼频次会增加,在高度警惕的状态下眨眼频次会减少;Borghini等^[2]通过建立视疲劳模型发现眨眼次数也会随着视疲劳的加重而增加;Papadelis等^[3]发现疲劳时的闭眼时间百分比显著上升。眨眼频次和闭眼时间百分比的变化与人眼的视疲劳程度息息相关,而人眼在不同的光环境下疲倦程度不同,通过对这两项指标变化的研究可以评价照明环境对视疲劳的刺激和影响。在不同色温的荧光灯对人视觉的影响方面,不同的研究结论不尽相同。林丹丹^[4]认为5 000 K和6 500 K色温可延缓视觉疲劳,提高学习效率;严永红等^[5]研究表明4 000 K色温适合,6 500 K不适合。LED相对于传统荧光灯更节能、寿命更长,其发光原理和光谱特征与传统光源不同,安全性和舒适性也尚不明确^[6];视疲劳随色温增加,先增大后减小,随照度的增加,先减小后增大^[7]。在照度值和色温相同的条件下,被试者在LED光环境下的总体视疲劳显著小于荧光灯下的视疲劳,同时,在LED光环境下的阅读效率也优于荧光灯下的阅读效率,但并未达到显著性^[8]。黄海静等^[9]研究发现,大学教室照度值应在500~750 lx,500 lx时瞳孔面积变化率最大,4 000 K荧光灯下瞳孔变化率和生理指数变化率小,视觉作业最舒适;LED照明环境下不同色温和照度条件对人眼视疲劳的影响尚不明确,人眼最敏感的光谱为555 nm^[10]。为选择适宜的LED照明参数,使用LED灯管提供不同色温和照度,探究人在不同环境下学习不同时长后眼睛的视疲劳状况。

1 实验过程

1.1 实验对象

经过预实验,筛选得出有稳定生理参数的被试者共10人,矫正视力在5.0以上,无眼部疾病且色觉正常,生活作息规律。将10名被试者划分为A、B两组,进行交叉实验。每组被试者完成1 d测量后休息1 d再进入下一组光环境进行测量。

1.2 实验方法

视疲劳作为光环境评价的重要指标,一般采用近点作业法^[11]和闪光融合频率法^[12]测量,其中眼电信号能比较客观、准确地获取视疲劳信息^[13]。研究采用眼电信号来评价不同照明环境下的视疲劳程度,使用美国BIOPAC公司生产的MP150型号16导生理信号仪采集被试者的眼电信号,利用AcqKnowledge软件内置的阈值频次检测方法,提取眨眼频次,进一步算出闭眼时间,定量评价被试者在不同照明环境下的视疲劳程度。

1.3 实验场景

使用全析因实验方法,选定影响视疲劳的3个因素:色温、照度和光照时间。虽然《建筑照明设计标准》(GB 50034—2013)规定,教室、阅览室、办公室等场所的工作面照度标准值为300~500 lx(宜采用中间色温3 300~5 300 K)^[14],但还规定了照度分级标准最高达5 000 lx;日本照明学会对于该类工作房间的照度值规定为500 lx,色温宜在4 000 K以上^[15];CIE标准规定色温不得低于4 000 K,部分空间要求达到6 500 K^[16];欧盟的照度标准值为500 lx,色温宜介于4 000~6 500 K^[17];有研究表明^[18],随照度增加,满意人数百分比上升,超过3 000 lx时,满意人数反而减少。Partonen等^[19]发现人在2 500 lx的眼部照度下活力度显著提升。为进行视觉疲劳的研究,将实验照度值划分为500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000 lx共6个水平,结合相关研究成果,色温取4 000、5 000、6 500 K共3个水平;共组合成18种不同的光环境。实验室使用黑色遮光布划分成9个隔间(见图1),互不干扰,窗户使用黑色遮光帘布遮挡,排除室外天然光的影响(见图2)。光源采用飞利浦LED灯管,单只功率16 W,可通过开关控制改变隔间工作面的照度值,不同照度值使用已校准准确的XYI-III全数字照度计结合工作面网格均匀布点法进行测定;不同色温采用相应色温的灯管,并用CL-500A分光辐射照度计核实。将光照时间分为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 h共6个时长,各水平交叉组合,搭配出108种光照组合,通过实验得出最佳的色温、照度和光照时间组合。

1.4 实验步骤

通过预实验,每位被试者已熟悉实验流程,且适应检测仪器。实验时间为下午14:00—17:00,持续3 h。光照前对被试者按顺序进行第一次剂量作业

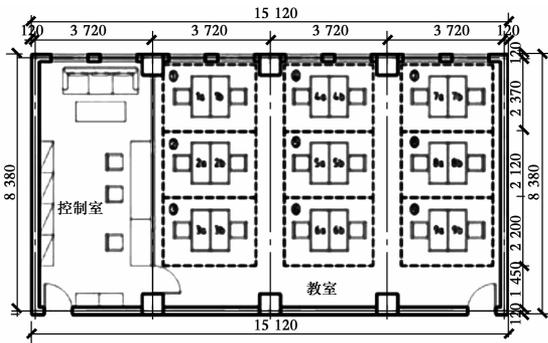


图 1 实验室隔间平面布置图

Fig. 1 Floor plan of the compartment



图 2 实验室隔间实景图

Fig. 2 Picture of laboratory

任务、生理指标的采集和疲劳主观自评,生理参数持续测量 5 min;疲劳自评结束后,被试者进入对应光环境隔间自习,学习材料自行准备;光照时间达到 0.5 h 后,让被试者按顺序完成第 2 次剂量作业任务、生理指标的采集和疲劳主观自评,生理参数仍测量 5 min;光照时间达到 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 h 后,再让被试者依次测量;第 7 次任务结束后,当天的测量结束。A 组被试者和 B 组被试者交叉进行实验,每组完成测量后休息一天,再进行下一组光环境的实验。

2 数据分析与讨论

2.1 眨眼频次和闭眼时间的计算

对 16 导生理信号仪采集得到的眼电信号先进行降噪处理,然后采用双阈值眨眼检测算法,设置眨眼动作产生的眼电压最低阈值,把电压超过 7 mV 的眼电信号自动标记为眨眼动作,计算样本每分钟的眨眼次数和闭眼时间;每个样本有 7 组数据,每组取 5 min 实验的平均值作为该组的代表值;最后,计算出所有被试者光照后的眨眼频次和闭眼时间的变化率。

2.2 方差分析

利用 SPSS 软件先对眨眼频次和闭眼时间变化

率的数据进行正态分布检验(数据均通过 95% 的置信度检验), P 值均大于 0.05,说明数据具有正态性,可进行方差分析;然后进行单因变量多因素方差分析,可得光照时间、照度、色温、色温和照度的交互作用对眨眼频次和闭眼时间变化率的影响具有显著性($P < 0.05$),而色温和光照时间的交互作用、照度和光照时间的交互作用影响不显著($P > 0.05$)。

2.3 各因素单独效应分析

分别算出不同光照时间、照度和色温条件下的眨眼频次、闭眼时间变化率及其平均变化率 \overline{K}_{ab} (见式(1)~(3)),其中眨眼频次和闭眼时间的平均变化率越大,说明视疲劳越严重。

眨眼频次变化率 =

$$\frac{\text{光照后的眨眼频次} - \text{光照前的眨眼频次}}{\text{光照前的眨眼频次}} \times 100\% \quad (1)$$

闭眼时间变化率 =

$$\frac{\text{光照后的闭眼时间} - \text{光照前的闭眼时间}}{\text{光照前的闭眼时间}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\overline{K}_{ab} = \frac{\sum K_{ab}}{N} \quad (3)$$

式中: a 为因素(即色温、照度、时间); b 为因素水平, n 为实验编号, N 为 a 因素按照 b 水平参与的实验组数之和。 K_{ab} 为 a 因素按照 b 水平参与 n 实验组的实验指标结果。

眨眼频次和闭眼时间变化率随着光照时间的增加呈上升趋势,说明视疲劳越来越严重(见图 3);光照开始的 0.5~1.0 h 内,各指标变化率较低,视疲劳并不明显;1.5~2.0 h 期间,各指标变化率有所提高,视疲劳开始加重;2.0 h 以后,平均变化率急剧增加,视疲劳现象严重;以视疲劳为评价指标,光照时间的最优水平为 0.5~1.0 h,不宜超过 1.5 h。

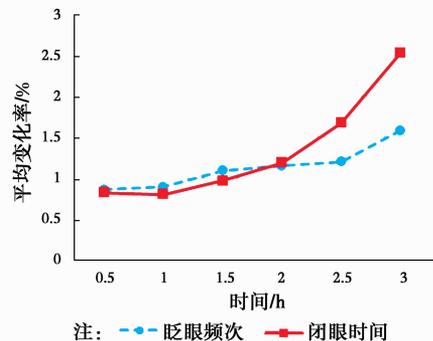


图 3 眨眼频次和闭眼时间平均变化率随光照时间的变化

Fig. 3 Average change rate of eye frequency and closed time changed with lighting time

不同照度水平对眨眼频次和闭眼时间的变化率影响显著,随着照度的提高,各指标变化率总体呈现先降低后上升的趋势(见图 4)。1 500 lx 照度下闭眼时间的平均变化率有所突变,可能与实验误差有关,具体原因有待进一步分析。以视疲劳为评价指标,照度的最优水平为 1 000~2 000 lx,超过 2 000 lx 后,照度越高视疲劳越严重。

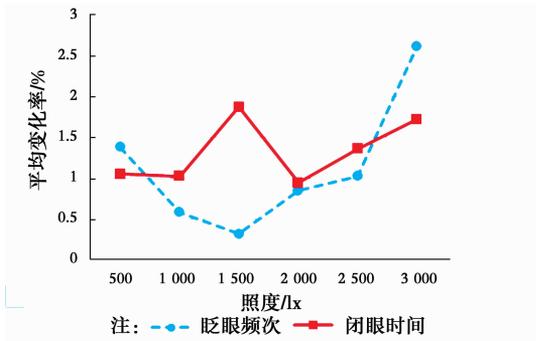


图 4 眨眼频次和闭眼时间平均变化率随照度的变化
Fig. 4 Average change rate of blink frequency and closed time changed with illumination

4 000 K 条件下,眨眼频次和闭眼时间平均变化率最低,视疲劳程度最轻;6 500 K 时视疲劳较严重;5 000 K 时,视疲劳程度最高(见图 5)。以视疲劳为评价指标,色温的最优水平为 4 000 K。

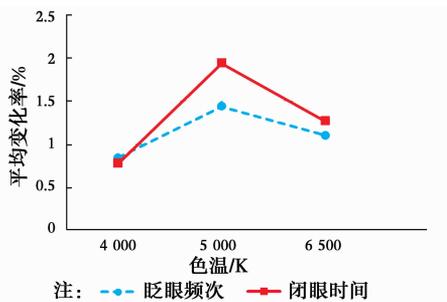


图 5 眨眼频次和闭眼时间平均变化率随色温的变化
Fig. 5 Average change rate of the frequency and closed time changed with color temperature

2.4 交互效应分析

通过方差分析,色温和光照时间的交互作用、照度和光照时间的交互作用对眨眼频次和闭眼时间平均变化率的影响不显著($P > 0.05$),仅有色温和照度的交互作用具有显著性($P < 0.05$),分别计算出眨眼频次和闭眼时间平均变化率在不同色温和照度条件下的估算边际均值(数据均通过 95% 的置信度检验)。在色温 4 000 K 条件下,照度处于 500~1 500 lx 范围内,眨眼频次的变化率保持较低水平;照度超过 1 500 lx 后,变化率迅速上升,3 000 lx 时反而有所下降;5 000 K 条件下,除 500 lx 低照度和

3 000 lx 高照度外,中间照度时眨眼频次的变化率均较低;6 500 K 条件下,照度从 500 lx 提高到 2 500 lx 时,眨眼频次的变化率始终较低,达到 3 000 lx 时急剧上升;以眨眼频次为评价指标,4 000 K 色温和 1 500 lx 照度的条件下,眨眼频次的变化率最低,视疲劳最不明显(见图 6)。

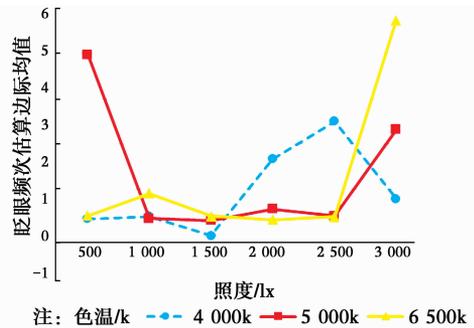


图 6 不同色温和照度条件下眨眼频次的估算边际均值
Fig. 6 Estimated marginal mean values of winking frequency under different color and illumination

不同色温和照度条件下闭眼时间平均变化率的估算边际均值各不相同(见图 7);4 000 K 色温条件下,照度的增加对实验指标的影响并不大,总体保持较低水平;5 000 K 色温条件下,低照度段(500~1 500 lx)的闭眼时间变化率较低,超过 1 500 lx 后,平均变化率随着照度的升高急剧增加;6 500 K 色温条件下的变化趋势与 5 000 K 正好相反,闭眼时间变化率在低照度段(500~1 500 lx)始终较高,超过 1 500 lx 后反而降低;以闭眼时间为评价指标,6 500 K 色温和 2 500 lx 照度的条件下,闭眼时间的平均变化率最低,视疲劳程度最小。

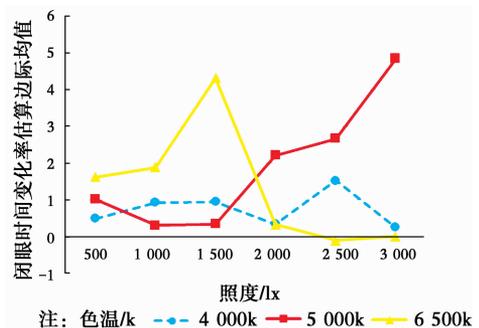


图 7 不同色温和照度条件下闭眼时间变化率的估算边际均值

Fig. 7 Estimated marginal mean values of change rate of closed time under different color and illumination

2.5 极差分析

极差是最大值与最小值的差值,体现了统计数据的变异量数(见式(4))。不同因素对实验指标影响的主次顺序也是通过极差大小判断,极差越大说

明该因素的影响能力越大。总体而言,色温与照度的综合效应影响最大,色温的影响较小;以眨眼频次为评价指标,色温与照度的综合效应>照度>光照时间>色温;以闭眼时间变化率为评价指标,色温与照度的综合效应>光照时间>色温>照度(见图8)。

$$R_a = \max \bar{K}_{ab} - \min \bar{K}_{ab} \quad (4)$$

式中: R_a 为 a 因素的极差, R_a 的数值等于 a 因素眨眼频次、闭眼时间变化率平均值的最大值和最小值的差值。

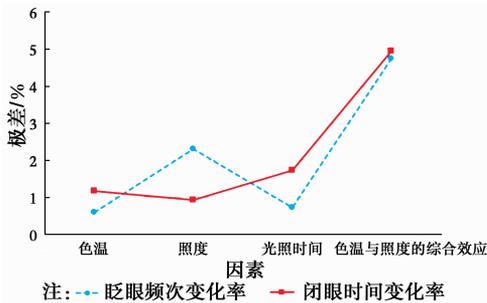


图8 不同条件下眨眼频次和闭眼时间变化率的极差统计

Fig. 8 Difference between the blink frequency and the rate of closed time in different conditions

3 结论

通过对色温、照度和光照时间3个因素对眼电信号的眨眼频次和闭眼时间变化率进行统计分析,得到以下结论:

1)光照时间、照度、色温、色温和照度的交互作用对眨眼频次和闭眼时间变化率的影响具有显著性($P < 0.05$),而色温和光照时间的交互作用、照度和光照时间的交互作用影响不显著($P > 0.05$)。

2)随着光照时间的增加,眨眼频次和闭眼时间平均变化率均变大,视疲劳加重;光照时间最佳为0.5~1.0 h,且不宜超过1.5 h;随着照度的提高,各指标平均变化率总体呈现先降低后上升的趋势,以视疲劳为评价指标,照度的最优水平为1 000~2 000 lx,超过3 000 lx的高照度应予以避免;4 000 K色温条件下,眨眼频次和闭眼时间的平均变化率均较小,视疲劳相对较低。

3)以眨眼频次为评价指标,4 000 K色温和1 500 lx照度的条件下,眨眼频次的平均变化率最低;以闭眼时间为评价指标,6 500 K色温和2 500 lx照度的条件下,闭眼时间平均变化率最低,视疲劳程度最小。

4)色温与照度的交互作用影响最大,色温的影响较小;以眨眼频次为评价指标,色温与照度的综合

效应>照度>光照时间>色温;以闭眼时间变化率为评价指标,色温与照度的综合效应>光照时间>色温>照度。

5)照明环境设计中,为减少视疲劳,色温和照度值需要分段考虑;500~1 500 lx照度环境下,色温宜选用4 000 K;2 000~2 500 lx照度环境下,色温宜选用6 500 K;3 000 lx的照度环境下,色温宜选用4 000 K;总体而言,照度值宜为1 000~2 000 lx。

参考文献:

- [1] 黄海静. 大学教室照明中的光生物效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
HUANG H J. Study on the classroom lighting in university on circ topic [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [2] BORGHINI G, ASTOLFI L, VECCHIATO G, et al. Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness [J]. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 2014, 44: 58-75.
- [3] PAPADELIS C, CHEN Z, KOURTIDOU PAPADELIS C, et al. Monitoring sleepiness with on-board electrophysiological recordings for preventing sleep-deprived traffic accidents [J]. Clinical Neurophysiology, 2007, 118(9): 1906-1922.
- [4] 林丹丹. 上海市中小学生视力健康与光照环境的分析研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
LIN D D. Analysis and research on vision health and illuminated environment for the primary and middle school students of Shanghai [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [5] 严永红, 晏宁, 关杨, 等. 光源色温对脑波节律及学习效率的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(1): 76-79.
YAN Y H, YAN N, GUAN Y, et al. Impact on brain wave rhythm and learning efficiency by color temperature of artificial light sources [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(1): 76-79. (in Chinese)
- [6] 姚华周, 希媛, 严永红, 等. LED光源环境下短时间阅读对视功能及眼表的影响[J]. 激光杂志, 2012, 34(3): 59-60.
YAO H Z, XI Y, YAN Y H, et al. Effects of short term on visual functions and color surface as LED being the light source [J]. Laser Journal, 2012, 34(3): 59-60. (in Chinese)
- [7] 向奕妍. 第V类光气候区高校图书馆阅览室秋冬季节LED照明光生物效应研究[D]. 重庆: 重庆大

- 学, 2017.
- XIANG Y Y. Study on the effect of LED on the V light in the reading room of the university library in the light of the category [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [8] 王庆, 徐海松, 宫睿, 等. LED照明光源对于视疲劳的影响研究[C]//2013年中国照明论坛——LED照明产品设计、应用与创新论坛论文集, 2013: 144-152.
- WANG Q, XU H S, GONG R, et al. Research on the influence of LED lighting source on visual fatigue [J]. 2013 China Illuminating Conference; LED light products design, application and innovation conference essays, 2013: 144-152. (in Chinese)
- [9] 黄海静, 陈纲. 不同光色教室照明环境下的视觉功效研究[J]. 灯与照明, 2011, 25(4): 14-18.
- HUANG H J, CHEN G. Influence on visual performance under light sources with different color temperatures in classroom lighting [J]. Light & Lighting, 2011, 25(4): 14-18. (in Chinese)
- [10] 杨春宇, 段然, 马俊涛. 园林照明光源光谱与植物作用关系研究[J]. 西部人居环境学刊, 2015, 30(6): 24-27.
- YANG C Y, DUAN R, MA J T. The study of garden lighting spectrum and plants [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2015, 30(6): 24-27. (in Chinese)
- [11] 骆知俭, 毛晓全, 屠广治. 视觉近点测定修布和验布作业视疲劳的初步探讨[J]. 职业医学, 1988, 15(3): 144-152.
- LUO Z J, MAO X Q, TU G Z. Preliminary study on the visual approach of fixing cloth and cloth inspection [J]. China Occupational Medicine, 1988, 15(3): 144-152. (in Chinese)
- [12] 詹皓. 临界闪光融合频率和眼动反应检测在不同作业任务中枢疲劳评价中的应用[J]. 中华航空航天医学杂志, 2014, 25(1): 62-68.
- ZHAN H. Applications of critical flick fusion frequency and oculomotor responsive measures in the evaluation of mental fatigue during different operative tasks [J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2014, 25(1): 62-68. (in Chinese)
- [13] 朱学敏. 基于卷积神经网络的眼电信号疲劳检测[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- ZHU X M. Drowsiness detection from EOG using convolutional neural networks [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [14] 建筑照明设计标准: GB 50034—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Standard for lighting design of buildings; GB 50034-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [15] 日本照明学会. 照明手册(原书第二版)[M]. 李农, 杨燕, 译. 北京: 科学出版社, 2005.
- The Illuminating Engineering Institute of Japan. Lighting manual [M]. Translated by LI N, YANG Y. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [16] 吴春蕾, 李国宾, 梁晨. CIE S 008/E—2001 CIE标准室内工作场所的照明(下)[J]. 光源与照明, 2004(3): 25-29.
- WU C L, LI G B, LIANG C. CIE S 008/E-2001 CIE Standard Lighting of indoor work places [J]. Lamps & Lighting, 2004(3): 25-29. (in Chinese)
- [17] 欧盟. 灯光和照明——室内工作场所照明(BS EN 12464—2011)[S]. 北京: 科学出版社, 2011.
- European Union. Light and lighting-lighting of work places[S]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [18] 刘加平. 建筑物理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 186.
- LIU J P. Building Physics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 186 (in Chinese)
- [19] PARTONEN T, LONNQVIST J. Bright light improves vitality and alleviates distress in healthy people [J]. Journal of Affective Disorders, 2000, 57(1/2/3): 55-61.

(编辑 胡英奎)