

地铁车站照度对乘客主观情绪和视觉绩效认知的影响研究*

张琳 李鑫 刘倩倩 杜云梦 薛丽婷

(太原理工大学建筑学院, 030024, 太原)

摘要 [目的] 合理的照明环境对提高地铁车站服务水平、保证乘客疏散安全、促进公共交通可持续发展起着重要作用。为促进地铁车站照明环境设计的科学化和合理化,需研究地铁车站不同照度环境对乘客主观情绪和视觉绩效认知的影响。[方法] 采用眼动追踪技术、视觉绩效认知评估技术、三维情绪评估模型相结合的方法,提出了眼动试验评估、视觉绩效认知评估、主观情绪评估3个评估类别共计8个参数的计算方法。设置了试验流程,将照度作为自变量,选取了5个照度水平进行试验研究。构建了不同照度同乘客主观情绪、视觉绩效认知参数之间的关系模型,并对试验结果分别进行了单因素方差分析、相关度分析及综合分析。[结果及结论] 照度对乘客主观 PAD(愉悦度、唤醒度、控制度)、视觉绩效认知均有显著影响。提高乘客的愉悦度和唤醒度,能够缩短乘客的视觉认知时间。照度在 200 ~ 230 lx 时,乘客的主观情绪、视觉绩效认知水平均达到最优。

关键词 地铁车站; 照度; 乘客主观情绪; 视觉绩效认知; 眼动追踪技术

中图分类号 U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.011

Research on the Impact of Metro Station Illuminance on Passengers' Emotion and Visual Cognition

ZHANG Lin, LI Xin, LIU Qianqian, DU Yunmeng, XUE Liting

(College of Architecture, Taiyuan University of Technology, 030024, Taiyuan, China)

Abstract [Objective] Proper illuminance environment plays an important role in improving the service level of metro stations, ensuring the safety of passenger evacuation and promoting the sustainable development of public transportation. In order to promote the scientific and proper illuminance environment design in metro stations, it is necessary to study the influence of different illuminance environments on passengers' sub-

jective emotions and visual performance cognition. [Method] Based on the integration of the eye movement tracking technology, visual performance cognitive evaluation technology, and the three-dimensional emotion evaluation model, a calculation method is proposed, which consists of three evaluation categories and a total of 8 parameters, i. e. eye movement test evaluation, visual performance cognitive evaluation and subjective emotion evaluation. The test process is set up with illuminance as variable and 5 illuminance levels are selected for test research. The relationship model between different illuminances and the parameters of passengers' subjective emotion and visual performance cognition is constructed. Test results are treated with one-way ANOVA (analysis of variance), correlation analysis and comprehensive analysis. [Result & Conclusion] The results show that the illuminance has significant effects on passengers' subjective PAD (pleasantness, arousal, dominance) and visual cognitive performance. Improving passengers' pleasure and arousal emotions can shorten their visual cognition time. When the illuminance is between 200 ~ 230 lx, the passengers' subjective emotion and visual performance cognition will reach the optimal level.

Key words metro station; illuminance; passenger's subjective emotion; visual performance cognition; eye movement tracking technology

建筑物的照明对空间舒适性起着重要作用,合理的照度不仅可以为用户提供良好的视觉条件,还会直接影响用户的情绪和视觉感知能力^[1]。由于地铁车站大多建于地下,缺乏自然光,其照明对乘客的情绪和视觉认知影响更为显著^[2]。既有研究中,对地铁车站光环境的研究以主观测评为主。信息采集技术逐渐发展成熟,为光环境的定量评价提供了技术支持。文献[3]基于生理脑电测试,对办

* 山西省哲学社会科学项目(2023YY049);山西省回国留学人员科研资助项目(2023-082);山西省研究生教育创新项目(2021Y270, 2022Y292)

公空间中的光舒适度进行了研究,发现改善环境照度有助于改善人的心理状态。文献[4]利用眼动追踪技术,对地铁车站导向标识进行使用后评价,记录了使用者与导向标识进行视觉交互的过程。文献[5]对照度与情绪进行了研究,指出室内照度与人体情绪、舒适度及唤醒水平呈正相关。

上述研究中,将眼动追踪技术与情绪模型结合起来的较少,且尚未形成公认的结论。本文以地铁车站乘客停留时间较长的候车区域为研究范围,将眼动追踪试验与三维情感模型、视觉认知试验相结合,定量确定照度同乘客主观情绪、视觉绩效认知之间的关系,获取让人产生积极情绪及较高认知效率的照度范围,以期对地铁车站光环境的设计提供参考。

1 研究方法

1.1 试验环境及被测者

考虑到真实地铁车站客运量大且环境复杂,试验在1个封闭的光环境实验室进行。试验时,将人工照明作为唯一光源,并设置了不同的照度方案。试验前,对地铁乘客群体的相关数据进行了分析。地铁乘客中,20~39岁的乘客占比约为70%。因此,试验共招募了30名20~39岁的被测者,其男女比例为1:1,所有被测者均签署了试验知情书并自愿参与试验。

1.2 试验内容

1.2.1 照度设置

GB 50843—2018《城市轨道交通照明设计规范》规定:“地铁车站中,站厅(地下)正常照度标准值为200 lx,站台(地下)照度标准值为150 lx。”对太原市现有地铁车站的照度进行实地调研,发现大多数地铁车站照度高于GB 50843—2018的要求。

为明确现有照度是否会影响人们视觉认知,试验根据GB 50843—2018,设置了5个照度水平:100 lx、150 lx、200 lx、250 lx及300 lx。在每次试验的开始和结束时刻,采用照度计测量环境中的照度,以确保试验前后照度保持不变。每个照度水平下,每位被测者均需进行1次眼动试验和1次视觉认知试验。

1.2.2 视觉绩效认知评估

相关研究指出,采用任务评价方法可以直接分析视觉认知水平和工作效率^[6]。试验采用指针表测试方式,以评估被测者的视觉绩效认知。指针表

测试由80个带指示箭头的图案组成(见图1),包括8个不同的方向箭头,每个方向箭头均出现10次。

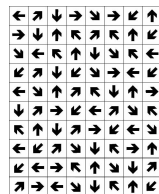


图1 指针表测试图案

Fig. 1 Test pattern of pointer table

同步设计了测试所需的导向标识示意图(见图2)。测试时,随机指定图2中的某个车站,要求被测者对该车站的导向标识箭头方向进行记忆,随后请被测者根据记忆删去图1中对应的箭头。整个测试过程不允许复查导向标识图。测试人员记录被测者从记忆图片到删去箭头的的时间。被测者选择了错误箭头或遗漏了箭头,均被判定为答案错误。为确保每组测试的难度一致,每组测试时均采用了相同的测试材料。



图2 测试所需的导向标识示意图

Fig. 2 Diagram of the guidance marks for test

为了全面评估测试所需时间和测试准确性 η ,试验进一步选用了视觉认知等效时间 t_e 来评估视觉绩效认知水平。 η 、 t_e 的计算式为:

$$\eta = [(80 - n_{\text{错}})/80] \times 100\% \quad (1)$$

$$t_e = t_a / \eta \quad (2)$$

式中:

$n_{\text{错}}$ ——所有被测答案中错误答案的数量;

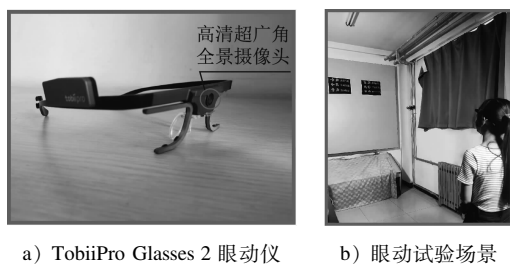
t_a ——所有被测者完成测试任务所需时间之和。

1.2.3 眼动试验评估

试验使用TobiiPro Glasses 2眼动仪,以50 Hz的采样频率记录被测者眼动指标(包括瞳孔直径、眼跳频率和注视时间等)数据。试验设备及测试场景如图3所示。

1.2.3.1 瞳孔直径

瞳孔直径的变化与情绪密切相关,常用作测量被测者情绪反应的工具。为了更准确地描述情绪



a) TobiiPro Glasses 2 眼动仪 b) 眼动试验场景

图3 试验设备及测试场景

Fig. 3 Test equipment and test scenario

的变化情况,试验使用 Adler 公式^[7] 计算得到瞳孔不安指数 I_{pu} 。 I_{pu} 可反映被测者面对环境刺激时的情绪投入程度和疲劳程度。根据 1.56 Hz 采样频率的计算标准,50 Hz 下 I_{pu} 的计算式为:

$$I_{pu} = \frac{1}{(N-32)\Delta t} \sum_{i=2}^{N/32} |d_i - d_{i-1}| \quad (3)$$

式中:

N ——样本总数;

d_i ——32 个连续值中的第 i 个值;

Δt ——32 个连续值中第一个值与最后一个值之间的时间差。

1.2.3.2 眼跳频率

眼跳是一种快速的眼球运动。在受到空间环境刺激时,高频率的眼跳意味着视觉注意力分散,认知负荷较大。眼跳频率 R_s 的计算式为:

$$R_s = N_s / N_t \times 100\% \quad (4)$$

式中:

N_s ——每个被测者的眼跳次数;

N_t ——每次视觉任务测试中,每个被测者总的眼动次数。

1.2.3.3 注视时间

注视时间是视觉环境研究中的重要指标,其主要指标包括平均注视时间、首次注视时间等,其中:平均注视时间 t_{af} 表示被测者对 1 个区域的关注时间, t_{af} 越大越高,关注程度越高,相应的视觉加工越困难;首次注视时间 t_{ff} 是被测者第 1 次注视某一对象的持续时间, t_{ff} 越大,刺激物的初始识别程度越复

杂,视觉认知越困难。

1.2.4 主观情绪评估

主观情绪评估包括被测者 PAD 三维情绪模型评估和情感量表评估 2 个方面。PAD 三维情绪模型的“三维”分别为:愉悦度 P (Pleasure, 情绪的正负状态), 其情绪值为 p ; 唤醒度 A (Arousal, 生理激活水平), 其情绪值为 a ; 控制度 D (Dominance, 对环境的控制状态), 其情绪值为 d 。

该模型具有较好的可操作性,利用这 3 个维度 (P 、 A 、 D) 可以有效评估人的情感。在每次试验结束后,被测者根据实际感受从这 3 个维度对所处照度进行评价。

情感量表是由 6 对表示不同情感状态的形容词构成的 7 级语义差异量表,每对情感形容词的量值具有在非本身维度上相同、在本身维度上相反的特点。这 6 对形容词分别为:① 不适的—舒适的;② 厌烦的—愉悦的;③ 困倦的—清醒的;④ 平静的一兴奋的;⑤ 我被干扰的—我被主导的;⑥ 坐立不安的一注意集中的。 p 、 a 、 d 均取对应组内词汇的总分均值。

1.3 试验流程

整个试验流程分为 2 个部分:

1) 第 1 部分为试验准备阶段。试验前调整并测量场所中的照度,告知被测者试验注意事项,采集被测者的基本信息,完成眼动校准。

2) 第 2 部分为试验进行阶段。试验包括眼动试验评估、视觉绩效认知评估、主观情绪评估 3 个方面。具体内容为:① 被测者佩戴眼动仪站在距导向标识牌一定距离的位置,对标识牌进行 3 min 的自由浏览;② 要求被测者记忆目标站点并进行视觉绩效认知评估,采集被测者的眼动数据和认知任务完成时间;③ 试验完成后,被测者根据自己进行视觉任务时的感受填写主观情绪评估问卷。每个照度试验结束后,让被测者休息 10 min,直至 5 个照度测试全部完成。

每个照度的试验流程示意图如图 4 所示。



图4 每个照度的试验流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test flow for each illuminance

2 试验数据分析

2.1 单因素方差分析

为探讨地铁车站中不同照度诱发的乘客主观情绪、视觉绩效认知和眼动指标的差异,对试验数据进行了 ANOVA(方差分析)。通过数据处理软件生成箱形图,先对试验数据进行预处理,剔除数据中的异常值,然后对预处理后的数据进行正态性检验。计算结果表明,试验所得数据的显著性均大于 0.050,符合正态分布。

将照度作为影响因子,对眼动指标评估、主观情绪评估、视觉绩效认知评估 3 个方面的 8 个参数(R_s 、 I_{pu} 、 t_{af} 、 t_{ff} 、 p 、 a 、 d 、 t_e)进行方差分析,得到这 8 个参数的显著性水平,分别为 0.000、0.000、0.309、0.414、0.000、0.000、0.000、0.034。由此可知:不同照度下 R_s 、 I_{pu} 、 p 、 a 、 d 和 t_e 的显著性水平均小于 0.050,这表明随着地铁车站空间中照度水平的改

变,乘客的情绪反应和视觉绩效认知会发生显著变化。对相关数据进行具体分析,可获取最佳的照度区间。

2.2 相关性分析

为进一步探讨照度同主观情绪、视觉绩效认知、眼动指标之间的影响机制,将后者三者进行了相关性分析,分析结果如表 1 所示。

由表 1 可知: I_{pu} 与 p 呈显著负相关关系, R_s 与 p 呈显著负相关关系; I_{pu} 与 a 呈显著负相关关系, R_s 与 a 呈显著负相关关系; I_{pu} 与 t_e 呈显著正相关关系, R_s 与 t_e 呈显著正相关关系。这说明客观的眼动指标、主观情绪评分均与 t_e 有显著相关性,试验获取的主客观数据具有高度一致性。由表 2 还可知: t_e 与 p 呈显著负相关, t_e 与 a 呈显著负相关,因此,若能提高乘客在地铁车站空间中的 p 和 a ,则能缩短乘客的 t_e ,进而提高寻路效率,为乘客节省站内通行时间。

表 1 主观情绪、眼动指标、视觉绩效认知参数的相关性分析

Tab.1 Correlation analysis of subjective emotion, eye movement indicators and visual performance cognition parameters

指标	指标间的相关性							
	p	a	d	t_e	I_{pu}	R_s	t_{ff}	t_{af}
p	1.000							
a	0.653 **	1.000						
d	0.234 **	-0.064	1.000					
t_e	-0.542 **	-0.453 **	-0.158	1.000				
I_{pu}	-0.663 **	-0.467 **	-0.158	0.870 **	1.000			
R_s	-0.551 **	-0.426 **	-0.176 *	0.717 **	0.594 **	1.000		
t_{ff}	0.123	0.175 *	0.034	-0.007	0.053	-0.165 *	1.000	
t_{af}	-0.074	-0.028	-0.004	-0.073	-0.010	-0.100	-0.073	1.000

注:**表示数据在 0.01 级别(双尾),相关性非常显著;*表示数据在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

3 试验结果分析

将试验数据生成箱形图,以获取不同照度同眼动指标、主观情绪、视觉绩效认知的变化规律。

3.1 不同照度下的眼动指标变化情况分析

不同照度下的眼动指标变化如图 5 所示。由图 5 可知:被测者的 I_{pu} 和 R_s 均随照度的增加先减小后增大。200 lx 和 250 lx 照度下,不同被测者的 I_{pu} 波动范围较小(在 0.10~0.15 mm/s 波动),被测者情绪最稳定。由于 I_{pu} 和 R_s 均同愉悦度、唤醒度呈负相关,因此在地铁车站中,随着 I_{pu} 和 R_s 的增加,意味着乘客情绪体验的下降。在 200 lx 照度下, I_{pu} 和

R_s 均最小,被测者会产生积极的情绪,生理激活度最高。

3.2 不同照度下的主观情绪变化情况分析

不同照度下的主观情绪指标变化如图 6 所示,由图 6 可知:200 lx 照度下 p 、 a 、 d 均最高,这表明在地铁车站中,200 lx 照度所诱发的乘客情绪最积极。300 lx 照度水平下, a 较大,但 p 和 d 均较低,这可能是由于较高的照度会产生较强的视觉刺激,让被测者产生了烦躁的情绪。

3.3 不同照度下的视觉绩效认知分析

不同照度下的 t_e 变化如图 7 所示。由图 7 可知:250 lx 照度下 t_e 变化范围最小,30 名被测者的

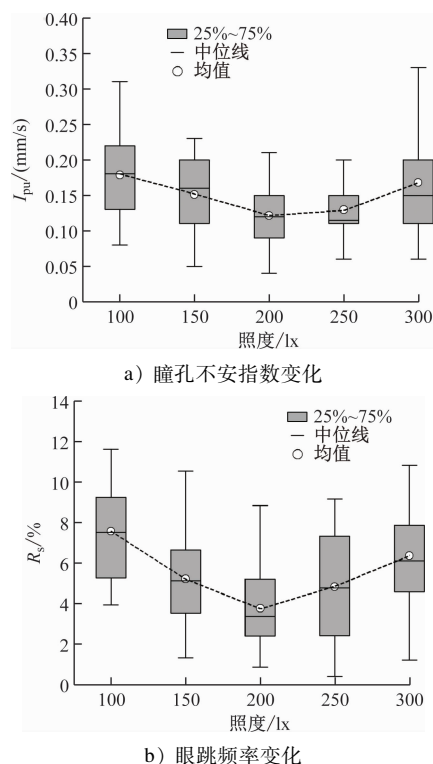


图5 不同照度下眼动指标变化图

Fig. 5 Graph of eye movement indicator changing under different illuminance

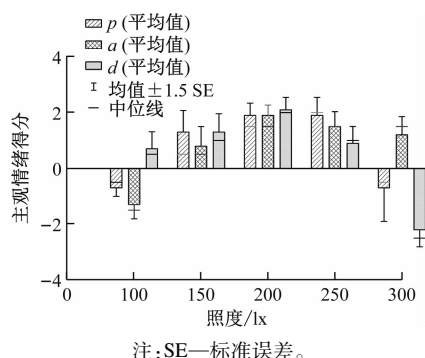


图6 不同照度下主观情绪指标变化图

Fig. 6 Graph of subjective emotion indicator changing under different illuminance

认知效率较稳定。照度低于 150 lx 时 t_e 增加,这可能是由于低照度环境下被测者的生理激活度较低,对视觉认知性能产生了负面影响;提高环境照度后,人的视觉认知表现显著提高,但若持续增加环境照度,则会引起被测者的眼部疲劳,反而会降低认知效率。因此,在 250 lx 照度下,用户的视觉认知表现最好。

3.4 不同照度下主观情绪与视觉绩效认知的综合分析

采用逐步回归方法建立回归模型。由于眼动

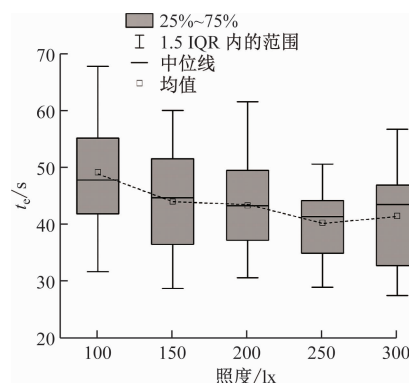


图7 不同照度下的视觉认知等效时间变化图

Fig. 7 Equivalent time changing diagram visual cognition under different illuminance

指标无法测量,将眼动指标作为中间变量。结合方差分析结果,照度 e 同 p 、 a 、 d 、 t_e 的交互作用均较显著,且 e 易于控制和测量,因此将 e 作为自变量, p 、 a 、 d 、 t_e 作为因变量,获取回归模型。

在进行回归分析前,先将所有变量的原始数据进行量纲一化处理,眼动指标、视觉绩效认知的模型拟合优度 R^2 分别为 0.808 10 和 0.804 40,模型的适配度较高。而主观情绪中的 p 、 a 的 R^2 较低(均小于 0.800 00),分别为 0.666 80 和 0.701 87,因此将模型拟合优度较高的眼动指标作为中间变量,依据上文的相关性分析,优化 p 和 a 的回归模型,其结果如表 2 所示。

表2 照度同主观情绪、视觉绩效认知的回归模型

Tab. 2 Regression model of illuminance, subjective emotion and visual performance cognition

类别	预测变量	回归模型
主观情绪	p	$p = -0.000\ 026e^2 + 0.010\ 60e - 1.493\ 09$
	a	$a = -0.000\ 020e^2 + 0.008\ 34e - 1.160\ 95$
	d	$d = -0.000\ 040e^2 + 0.014\ 29e - 0.653\ 33$
视觉绩效认知	t_e	$t_e = 0.000\ 01e^2 - 0.005\ 16e + 0.967\ 49$

依据回归方程建立各模型的回归曲线,得到量纲一化后照度同主观情绪、视觉绩效认知的综合分析图,如图 8 所示。由图 8 可知:① 视觉绩效认知方面,照度为 200 ~ 300 lx 时,乘客的认知效率较高。② 主观情绪方面,照度为 175 ~ 230 lx 时,乘客会获得较高的愉悦度;照度为 170 ~ 245 lx 时,乘客的唤

醒度较高,生理反馈被激活;照度为 145 ~ 230 lx 时,乘客的控制度较高,受到的视觉干扰较小。

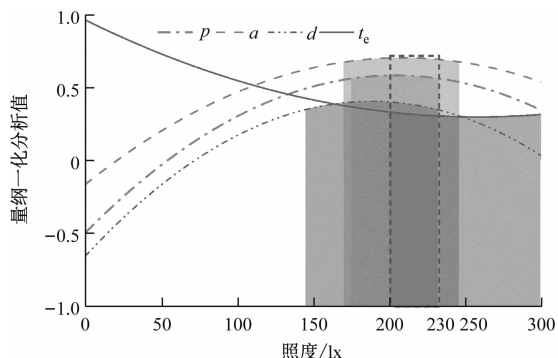


图8 照度同主观情绪、视觉绩效认知参数的综合分析图

Fig. 8 Comprehensive analysis graph of illuminance, subjective emotion and visual performance cognition parameters

主观情绪和视觉绩效认知参数的综合分析结果表明,当照度在 200 ~ 230 lx 时,地铁乘客的主观情绪、视觉绩效认知均较优,这与地铁车站现场测量的照度结果基本一致。照度低于 100 lx 时,乘客的各项指标均较低,这说明在地铁车站中,较暗的环境会导致乘客产生消极的情绪,影响其视觉绩效认知水平,因此,应避免设置较低照度的光线,尤其是与视觉绩效认知相关的导向信息,其照度应适当增加,以方便乘客寻路。

4 结语

本文基于眼动追踪试验与主观 PAD 情绪模型,探讨了人工照明环境中不同照度对乘客主观情绪和视觉绩效认知的影响,揭示了照度同主观情绪、视觉绩效认知之间的关系,并通过回归分析构建了照度同主观情绪、视觉绩效认知参数之间的关系模型。

试验结果表明,在地铁车站空间中,若照度过低,会使乘客产生消极情绪,视觉绩效认知水平随之降低。提高乘客的愉悦度和唤醒度,可有效提高其视觉绩效认知水平。本研究采用了定性与定量结合的方式,为地铁车站空间中光环境的设计提供了理论依据。

参考文献

[1] 朱莹莹,杨敏齐,姚颖,等. 室内照度对认知加工的影响:主

观情绪和警觉性的中介作用[J]. 心理科学, 2017, 40(6): 1328.

ZHU Yingying, YANG Minqi, YAO Ying, et al. Effects of indoor illuminance on cognitive performance: the mediating role of subjective mood and alertness[J]. Journal of Psychological Science, 2017, 40(6): 1328.

[2] 李彦洁. 动态照明对地铁调度员警觉性、认知表现和情绪的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.

LI Yanjie. Effects of dynamic lighting on alertness, cognitive performance and mood of subway dispatchers [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[3] 何梦渊, 胡松涛, 马浩南, 等. 视觉诱发电位在人体视觉舒适性研究中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(26): 11102.

HE Mengyuan, HU Songtao, MA Haonan, et al. Application of visual evoked potential in human visual comfort [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(26): 11102.

[4] 刘畅, 李俊达, 李莹莹. 基于眼球追踪技术的城市轨道交通导向标志评价试验[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 113.

LIU Chang, LI Junda, LI Yingying. Evaluation of guiding signs of urban rail transit based on eye-tracking technology [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 113.

[5] 辛淦, 胡松涛, 刘国丹. 基于主观评价和生理脑电的光舒适评价研究[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(1): 75.

XIN Song, HU Songtao, LIU Guodan. Evaluation of light comfort based on subjective evaluation and physiological EEG [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(1): 75.

[6] 鹿铭理, 胡松涛, 孙洁, 等. 基于视觉诱发电位时频能量分析的办公环境照度的实验研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(2): 44.

LU Mingli, HU Songtao, SUN Jie, et al. An experimental study on illumination of office environment based on time-frequency energy analysis of visual evoked potential [J]. Building Science, 2021, 37(2): 44.

[7] LÜDTKE H, WILHELM B, ADLER M, et al. Mathematical procedures in data recording and processing of pupillary fatigue waves [J]. Vision Research, 1998, 38(19): 2889.

· 收稿日期:2022-11-26 修回日期:2023-02-07 出版日期:2024-09-10

Received:2022-11-26 Revised:2023-02-07 Published:2024-09-10

· 通信作者:张琳,副教授,zhanglin@tyut.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license