

夜间照明环境对电纸书阅读工效的影响

郭西雅, 尚宪茹, 田津津, 胡志刚, 胡昕
(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 探究夜间照明环境对电纸书阅读工效及视疲劳的影响, 探索更有益于用户生理与心理的照明方式及相对应的照明参数。**方法** 采用内外置照明方式对比实验, 以视觉搜索绩效和瞳孔直径变异系数分别作为阅读工效与视疲劳症状的评价指标, 结合主观生理评价指标作为对照。**结论** 在两种照明方式下, 照度为 350 lux 时阅读绩效最高, 且视疲劳程度更大。从主观生理感受评价可知, 内置照明方式下采用最低照度 150 lux 时被试感到麻木, 使用外置照明方式被试整体感受较好, 头晕与眼部疲劳症状不明显。综合可得, 外置照明方式在阅读工效以及视疲劳症状上优于内置照明方式。

关键词: 电纸书; 阅读工效; 照明方式; 视疲劳

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)18-0171-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.18.027

Influences of Night Illumination Environment on E-book Reading Efficiency

GUO Xi-ya, SHANG Xian-ru, TIAN Jin-jin, HU Zhi-gang, HU Xin
(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore the effects of night lighting on the reading efficiency of e-book and the visual fatigue of subjects, and to explore the ways of lighting and corresponding lighting parameters which are more beneficial to the users' physiological and psychological conditions. Internal and external illumination contrast experiments were compared. The visual search performance and pupil diameter variation coefficient were used as evaluation indicators for reading ergonomics and visual fatigue symptoms respectively, and subjective physiological evaluation indexes were taken as the control. Under two lighting modes, the reading performance is the highest at an illumination of 350 lux and the visual fatigue is more serious. From the subjective physiological experience evaluation, the subjects will feel numbness at the minimum illumination of 150 lux under the built-in lighting method, and the overall feeling of the subjects using the external lighting method is good, and the symptoms of dizziness and eye fatigue are not obvious. In conclusion, external lighting is superior to built-in lighting in reading ergonomics and visual fatigue symptoms.

KEY WORDS: E-book; reading efficiency; lighting methods; asthenopia

近年来, 电纸书在全球的热销及电脑阅读、手机阅读、电纸书阅读的三流合一, 宣告数字阅读时代已经到来^[1]。其应用 E-ink 显示技术, 兼容多项文本格式, 便携环保, 成为人们日常阅读的“掌中宝”。通过对市场现有电纸书设备以及大学生阅读习惯的调研可知, 大学生夜间使用电纸书阅读时照明来源主要为内置阅读灯与外置阅读灯。内置阅读灯虽在一定

程度缓解了夜间阅读对眼部的危害, 但由于电纸书显示屏幕面积有限, 内置阅读灯不易安装过多过密, 照度不易过强。因此, 难以达到弱光环境下阅读的健康照度。外置阅读灯可以根据用户需求调节亮度, 但在不宜的照明环境下长时间阅读会造成眼睛酸涩、视力下降等危害。因此关于电纸书智能照明的研究迫在眉睫。

收稿日期: 2019-04-21

作者简介: 郭西雅(1977—), 女, 陕西人, 陕西科技大学副教授, 主要研究方向为应用人机工程学、工业设计创新服务平台等。

通信作者: 尚宪茹(1993—), 女, 陕西人, 陕西科技大学硕士生, 主攻人机交互。

1 国内外研究现状

林丹丹等^[2]研究了不同照度、色温照明环境对疲劳程度、主观评价、工作绩效等指标的影响,发现照明环境对视觉工效存在显著性影响。姚其等^[3]通过不同光照环境下的视觉绩效实验研究,认为合适的光照环境可以缓解视疲劳并提高视觉绩效。严永红等^[4-5]认为视觉工效与光源色温、照度值呈现负相关关系。郭西雅等^[6]研究发现,一定时间内随着照度和色温的增加,瞳孔直径变异系数减小,眨眼频率增高,照度增加时阅读速度无明显变化,色温增加则阅读速度加快。Benedetto S 等^[7]通过实验得出,在高屏幕亮度下阅读,眨眼次数的减少可反映出视疲劳程度的增加;处于更高水平的屏幕亮度或者环境照度中时,会提高机敏性和工作绩效。Rosenfield^[8]认为过强的灯光通常会引引起眼干,这一症状可以通过观察眨眼频率的变化得到。Scott 等^[9]通过对人体 24 小时褪黑激素的检测,探究照明对人体昼夜节律的影响以及对长期睡眠障碍的缓解作用,研究表明夜间光照度变化对昼夜节律相对位移存在影响。Chang P C 等^[10]通过实验指出,在弱光环境下,200 lux 照度为保证眼部舒适的最低电纸书阅读照度。然而现阶段市场仍有绝大部分电纸书内置阅读灯最大照度仅在 245 lux,由于熄灯后光线较暗,仅依靠设备背景光源照明,采光条件不佳,极易引起视疲劳^[11]。

纵观这些研究,照明环境对阅读工效及生理都存在显著的影响。内置照明方式虽有提高阅读工效,缓解视疲劳,但是也存在很大弊端。因此可调节的智能照明方式对夜间阅读十分重要。本文通过内外置照明方式对比实验,研究照明环境与电纸书夜间阅读对被试视疲劳的影响,探索更有益于用户生理与心理的照明方式及相对应的照明参数,为智能照明设备的开发提供理论依据。

2 实验

2.1 实验设计

实验评价两个自变量:照明方式和照度。照明方式为内置 LED 照明与外置 LED 照明,照度值选取内置照明电纸书产品规定的 3 个代表照度:150 lux, 245 lux, 350 lux (照度测量均以屏幕上接收到的照度为准)。实验采用控制变量法,对影响实验结果的所有变量进行严格控制。实验中色温为定值为 5700 K (采用电纸书的产品规定)。两种设备屏幕尺寸均为 9.7 英寸,分辨率为 1200×825,显色指数为 80。设备显示内容容量相同,每屏均 44 行,每行 33 个字符,字体为 Sans-Serif,字号为 20 px,颜色为黑色,文本背景色为白色。

2.2 被试

选取 14 名在校大学生(男女生各 7 名)作为被试,年龄为 (25.3±2.3) 岁,身高为 (166.3±8.7) cm,体质量为 (60.0±13.5) kg,每名被试双眼视力或矫正视力正常,无色盲和色弱等视觉问题。被试实验前一天晚上保证正常睡眠以避免实验过程中出现疲劳现象。

2.3 实验设备

在实验室,通过模拟夜间电纸书阅读电光源照明条件,搭建实验环境,实验设备采用 Topsisir 系列电子书产品。无内置照明设备产品型号为 Topsisir H5,内置照明 LED 设备产品为 Topsisir H9,均为 E-ink 电子水墨屏成像,表面均经过防眩光保护片处理。外置模拟电光源设备采用的是小米 Yeelight 彩光版智能灯泡功率 6~10 W,色温可调范围为 1700~6500 K,照度可调范围为 0~3000 lux。本实验采用日本柯尼卡美能 CL-200A 色彩照度仪,主要测量照度与色温。用计时器进行计时。使用 Tobii X2-60 型号眼动仪,记录被试记录眼动指标。

2.4 实验环境

实验室为 3 m×2 m×4 m 的暗室,室内设有空调、加湿器等设备用于温湿度控制,保持恒定室温为 24 ℃。电脑显示器放置在办公桌较远位置便于主试操作,为排除显示器光源形成干扰,主试完成操作开始实验时将显示器用黑色遮光板盖住。

实验用显示器放置在高 700 mm 的桌上,座椅高度可调,显示器中心距桌面距离 100 mm,电纸书阅读设备装在桌边的支架上,眼动仪置于电纸书下方与被试视线垂直。被试眼睛电纸书中心的垂直距离 $d=500$ mm。根据人机工程学中人的垂直面内视野参数,坐姿时自然视野为水平向下视角 $\alpha=15^\circ$,被试坐高均值为 930 mm,设置电纸书倾角为 105° ^[12],对高于或低于坐高均值的被试,实验中通过调节座椅高度,使其达到标准值。

2.5 实验任务与过程

本次实验中包含的两个因素:照明方式与照度均为被试内变量,其中照明方式(A)有内置照明(A1)与外置照明(A2)两种方式;照度(B)有 3 个水平 B1, B2, B3 分别是 150 lux, 245 lux, 350 lux。因此,这是一个 2×3 被试内设计,照明模式组合见表 1。

表 1 实验照明参数
Tab.1 Experimental lighting parameters

	B1	B2	B3
A1	A1B1	A1B2	A1B3
A2	A2B1	A2B2	A2B3

实验文本材料共有 36 篇，均节选自《契诃夫短篇小说精选》，内容被试先前均未读过，且同一被试每次实验阅读的材料内容也不同，36 篇材料顺序随机。每篇材料页数均为 5 页，汉字“的”的个数均为 160 个。

正式实验前，主试详细告知被试实验过程并熟悉实验环境，提醒被试实验内容和实验过程中应注意的问题、演示联系实验，以熟悉实验流程，理解指导语。根据实验设置，被试选择自己合适的照度，并静坐 3~5 min，充分适应实验光环境。

开启实验设备，调整被试阅读坐姿及视距，被试放松并做好实验心理准备。

实验开始，被试被要求在启动眼动仪、按下计时器后，数出 5 页文本中汉字“的”的个数，每完成一页翻页的同时报出数字，由实验员记录任务字数以及完成时间。实验结束，被试填写主观感受评价表。为避免视觉作业产生的疲劳影响实验结果，同一个被试当天只完成一次实验，保证每次实验前均未进行过视觉作业。

2.6 实验评价指标

本研究将视觉搜索绩效作为阅读工效评价指标，瞳孔直径变异系数为视疲劳指标，将主观生理评价指标作为对照。

汤洪涛等^[13]在基于眼动的目标搜索绩效研究中提出，视觉搜索的搜索绩效通常是通过搜索时间与正确性来衡量。考虑到每个被试完成任务所消耗时间不同，仅采用准确率作为阅读行为衡量指标不够客观，因此将视觉搜索绩效 P 定义为准确率 p 与完成任务所用时间 t (单位 min) 之商。瞳孔直径变异系数 C_v 为单为时间内的瞳孔直径标准差 σ 与瞳孔直径平均值 μ 的比。

3 实验结果

使用 SPSS19.0 进行统计分析，若被试完成任务字数大于总字数，被作为异常数据剔除。实验数据符合正态分布，显著性水平为 0.05。

在自变量不同水平下，被试视觉搜索绩效、瞳孔直径变异系数的描述性统计见表 2 和表 3。

表 4 中可看出照明方式对阅读工效及视疲劳影响显著，分别为 ($F(1,13)=3.062, p=0.012<0.05$) 和

表 2 内置照明方式描述性统计表
Tab.2 Descriptive statistics of built-in lighting

	内置照明方式					
	150 lux		245 lux		350 lux	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
P	0.076	0.020	0.078	0.023	0.089	0.023
C_v	0.260	0.080	0.290	0.080	0.440	0.100

表 3 外置照明方式描述性统计表
Tab.3 Descriptive statistics of external lighting

	外置照明方式					
	150 lux		245 lux		350 lux	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
P	0.077	0.028	0.080	0.039	0.098	0.025
C_v	0.270	0.060	0.250	0.060	0.360	0.070

表 4 方差分析
Tab.4 Variance analysis

源	因变量	ss	df	F	Sig
照明方式	视觉搜索绩效	0.013	1	3.062	0.012
	瞳孔直径	0.065	1	4.143	0.009
	差异系数				
照度	视觉搜索绩效	0.020	1	4.298	0.020
	瞳孔直径	0.159	1	5.702	0
	差异系数				
照明方式 ×照度	视觉搜索绩效	0.747	2	7.237	0.128
	瞳孔直径	0.640	2	8.058	0.438
	差异系数				

($F(1,13)=4.143, p=0.009<0.05$)。在自变量不同水平下，比较各影响因素不同水平下视觉搜索绩效均值可得，被试使用外置照明方式下视觉搜索绩效较内置照明方式更佳，眼动数据可看出在外置照明方式下被试的视疲劳低于内置照明方式。

双因素被试内方差分析结果显示，对因变量视觉搜索绩效，照明方式主效应显著 ($F(1,13)=3.062, p=0.012<0.05$)，Tukey-HSD 事后检验显示外置照明方式下被试的视觉搜索绩效显著高于内置照明方式；照度主效应显著 ($F(1,13)=4.298, p=0.02<0.05$)，事后检验显示阅读绩效在 350 lux 时达到最佳，在 150 lux 时最差；对视觉搜索绩效交互效应不显著 ($F(2, 27)=7.237, p=0.128>0.05$)，可以说明在本次实验中照度对于阅读绩效的影响与照明方式无关。对因变量瞳孔直径变异系数，照明方式主效应显著 ($F(1,13)=4.143, p=0.009<0.05$)，Tukey-HSD 事后检验显示外置照明方式下被试的视觉搜索绩效显著高于内置照明方式；照度主效应显著 ($F(1,13)=5.702, p=0<0.05$)，事后检验显示瞳孔直径变异系数 245 lux 下达到最小值，即视疲劳程度最小，在 350 lux 时视疲劳程度最大；照明方式与照度对瞳孔直径变异系数交互效应不显著 ($F(2,27)=8.058, p=0.438>0.05$)，可以说明在本次实验中照度对于瞳孔直径变异系数的影响与照明方式无关。

图 1 和图 2 为两种照明方式下照度对视觉搜索绩效和瞳孔直径变异系数影响的变化趋势，从对视觉搜索绩效的影响可看出，被试在两种照明方式下，照度升高，视觉搜索绩效也随之提高；在外置照明方式中，350 lux 照度值下，视觉搜索绩效显著提高；在内置

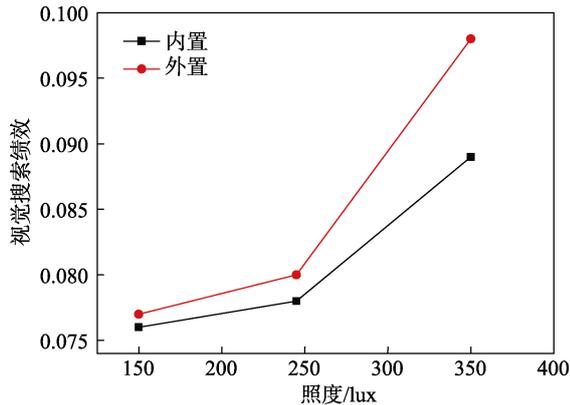


图1 照度对视觉搜索绩效的影响

Fig.1 Impacts of illumination on visual search performance

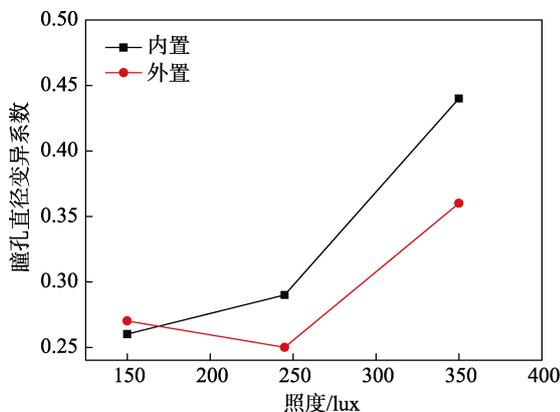


图2 照度对瞳孔直径变异系数的影响

Fig.2 Influences of illumination on coefficient of pupil diameter variation

照明方式中, 阅读绩效在 245 lux 时显著提高, 在 350 lux 时依然保持上升趋势, 但涨幅降低。

从对瞳孔直径变异系数的影响可看出, 在内置照明方式下, 照度越高, 瞳孔直径变异系数越大, 在照度为 245 lux 时保持较小幅度增长, 当照度为 350 lux 时, 瞳孔直径变异系数急剧增大; 在外置照明方式下, 照度值为 245 lux 时较 150 lux 时瞳孔直径变异系数有缓缓下降趋势, 而在 350 lux 时瞳孔直径变异系数开始逐步增大。

实验后, 不同照明模式下被试填写主观感受变化的问卷, 对表 5 内的项目进行评分, 其中“完全没有”为 1 分, “非常严重”为 10 分, 最终将结果进行统计整理。

表 5 主观感受评价量表

Tab.5 Subjective feeling evaluation scale

主观感受	完全没有——非常严重										
1. 难以看到	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2. 看到的模糊	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3. 容易走神	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4. 眼睛感到累	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5. 感到浑身麻木	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6. 感到头痛眩晕	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

为了更加直观具体地研究被试在不同照明模式下的主观感受, 对不同照明模式下被试的每项分值绘制成直方图进行对比, 见图 3。

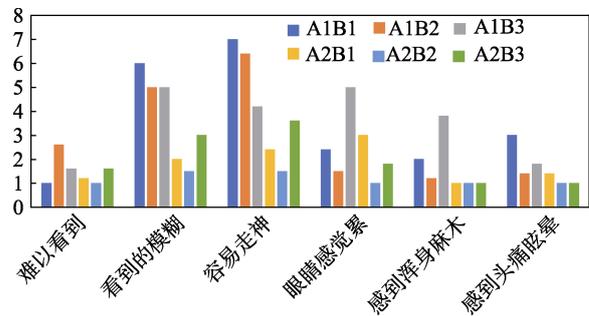


图3 不同照明模式下被试主观感受变化

Fig.3 Subjective feeling changes of subjects under different lighting modes

1) 外置照明方式下的整体感受优于内置照明方式, 外置照明方式的主观感受评价得分均值为 1.67, 而内置照明方式的主观感受评价得分均值为 3.83。

2) 两种照明方式和 3 种照度下, 被试在阅读工效上不会感到困难; 在高分区集中在眼睛感到累和酸痛这项, 被试视疲劳反应明显。

3) 在眼睛感到累和酸痛这项中, 外置照明方式下照度值为 245 lux 时分值最低, 平均分为 1.5, 内置照明方式下照度值为 350 lux 时分值最低为 4.2。

4) 可以看出在内置照明方式下, 照度值为 350 lux 时, 被试会感到头痛眩晕, 在两种照明方式下, 照度值为 150 lux 时, 会明显出现麻木感, 麻木感是脑疲劳在生理上的主观感受, 在大学生电子书夜间阅读调研中会发现, 通常会在出现疲劳状态下停止阅读, 进入睡眠。然而, 也有部分人反应在工作或学习内容阅读时, 过早的进入疲劳会影响工作效率。

4 结语

通过对比视觉搜索绩效与瞳孔直径差异系数发现, 外置照明方式均优于内置照明方式。两种照明方式均在照度为 350 lux 时阅读绩效最高。结合主观感受评价可看出, 高照度下会对视觉以及大脑产生刺激, 从而激发更高的阅读效率; 瞳孔直径变异系数在 350 lux 达到最大值, 说明视疲劳程度最大。从主观生理感受来看, 被试在电子书夜间阅读时视疲劳症状较为显著, 高照度下使用内置照明方式被试易引起头晕, 眼部感到乏累和酸痛, 照度在 245 lux 时会有很大改观, 内置照明方式下采用最低照度 150 lux 时被试会感到麻木; 使用外置照明方式, 被试整体感受较好, 头痛与眼部疲劳症状不明显, 被试在生理感受上不适感会降低。从主观生理感受评价可以看出, 被试在阅读过程中会出现脑疲劳症状, 影响工作效率。综合以上研究来看, 外置照明方式在阅读工效以及视疲劳症状上优于内置照明方式。

参考文献:

- [1] 王子舟. 随电纸书洪流走入数字阅读时代[J]. 图书馆建设, 2010(6): 7-9.
WANG Zi-zhou. Digital Reading Era with the Flow of Paper and Books[J]. Library Construction, 2010(6): 7-9.
- [2] 林丹丹, 郝洛西. 关于中小學生视力健康与光照环境关系的实验研究[J]. 照明工程学报, 2007, 18(4): 38-42.
LIN Dan-dan, HAO Luo-xi. Experimental Study on the Relationship between Visual Health and Light Environment of Primary and Middle School Students[J]. Journal of Illuminating Engineering, 2007, 18(4): 38-42.
- [3] 姚其. 民机驾驶舱 LED 照明工效研究[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
YAO Qi. Civil Aircraft Cockpit LED Lighting Efficiency Research[D]. Shanghai: Fudan University, 2012.
- [4] 严永红, 关杨, 王宁. 不同色温 T5 荧光灯光色配比识别率对比实验研究[J]. 照明工程学报, 2010, 21(5): 59-62.
YAN Yong-hong, GUAN Yang, WANG Ning. Comparative Study on Recognition Rate of Different Color Temperature T5 Fluorescent Lamps[J]. Illuminating Engineering Journal, 2010, 21(5): 59-62.
- [5] 严永红, 晏宁, 关杨. 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 Yong-hong, YAN Ning, GUAN Yang. Effect of Light Source Color Temperature on Brain Wave Rhythm and Learning Efficiency[J]. Civil Engineering and Environmental Engineering, 2012, 34(1): 76-79.
- [6] 郭西雅, 田津津. 不同书面阅读时长下照明对视疲劳和大脑唤醒水平的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(4): 164-169.
GUO Xi-ya, TIAN Jin-jin. Effects of different Reading Hours on Lighting Fatigue and Brain Arousal Level[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(4): 164-169.
- [7] BENEDETTO S. Effects of Luminance and Illumination on Visual Fatigue and Arousal During Digital Reading[J]. Computers in Human Behavior, 2014, 41(9): 112-119.
- [8] ROSENFELD M. Computer Vision Syndrome: a Review of Ocular Causes and Potential Treatments[J]. Ophthalmic & Physiological Optics, 2011, 31(5): 502-515.
- [9] SCOTT L D, HWANG W T, ROGERS A E, et al. The Relationship between Nurse Work Schedules, Sleep Duration, and Drowsy Driving[J]. Sleep, 2007, 30(12): 1801-1807.
- [10] CHANG P C, CHOU S Y, SHIEH K K. Reading Performance and Visual Fatigue when Using Electronic Paper Displays in Long-duration Reading Tasks under Various Lighting Conditions[J]. Displays, 2013, 34(3): 208-214.
- [11] 李本燕. 近视的影响因素研究进展[J]. 中国实用眼科杂志, 2011, 29(10): 993-996.
LI Ben-yan. Research Progress on the Influencing Factors of Myopia[J]. Chinese Journal of Practical Ophthalmology, 2011, 29(10): 993-996.
- [12] LEE D S, SHIEH K K, JENG S C, et al. Effect of Character Size and Lighting on Legibility of Electronic Papers[J]. Displays, 2008, 29(1): 10-17.
- [13] 汤洪涛, 苏丹丹, 兰秀菊. 基于眼动的多目标视觉搜索绩效研究[J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45(1): 108-113.
TANG Hong-tao, SU Dan-dan, LAN Xiu-ju. Research on the Performance of Multi Object Visual Search Based Eye Movement[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2017, 45 (1): 108-113.
- [14] 田会娟, 赵一聪, 刘欢. LED 液晶显示器对视疲劳的影响[J]. 天津工业大学学报, 2016, 35(5): 72-76.
TIAN Hui-juan, ZHAO Yi-cong, LIU Huan. Effect of LED Liquid Crystal Display on Visual Fatigue[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2016, 35 (5): 72-76.
- (上接第 144 页)
- JIA Yan-lin. Modular Design[M]. Beijing: China Machine Press, 1993.
- [4] 江牧, 胡书可, 林鸿. 人类可持续发展视野下的工业设计产品反思[J]. 包装工程, 2013, 34(12): 79—83.
JIANG Mu, HU Shu-ke, LIN Hong. Reflections on Industrial Product Design in the Perspective of Sustainable Development[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(12): 79-83.
- [5] 于东玖, 凡荣. 基于 D4S 理论的竹材家具设计研究[J]. 包装工程, 2014, 35(8): 67-70.
YU Dong-jiu, FAN Rong. The Bamboo Furniture Design Based on D4S Theory[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(8): 67-70.
- [6] 周浩明. 可持续设计是一种风格或流派吗[J]. 美术观察, 2010(11): 28-29.
ZHOU Hao-ming. Is the Sustainable Design a Style or School[J]. Art Observation, 2010(11): 28-29.
- [7] 陈永超, 彭霞霞. 我国儿童家具产业现状初步分析[J]. 林产工业, 2015(8): 10-12.
CHEN Yong-chao, PENG Xia-xia. Preliminary Analysis of Current Situation of Children's Furniture Industry in China[J]. Forest Product Industry, 2015(8): 10-12.
- [8] 郭劲锋, 袁哲. 儿童家具材质的感性工学分析与研究[J]. 家具与室内装饰, 2015(11): 100-103.
GUO Jin-feng, YUAN Zhe. Analysis and Research on Kansei Engineering of Children's Furniture Materials[J]. Furniture & Interior Design, 2015(11): 100-103.
- [9] 罗碧娟. 基于模块化设计方法的儿童产品设计研究[J]. 机械设计, 2014, 31(7): 121-123.
LUO Bi-juan. Research on Children's Product Design Based on Modular Design Method[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(7): 121—123.
- [10] 李兵, 关惠元, 吴智慧. 面向 MC 的家具模块化设计研究[J]. 包装工程, 2011, 32(4): 66-69.
LI Bing, GUAN Hui-yuan, WU Zhi-hui. Study on Furniture Modular Design for Mass Customization[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(4): 66-69.