

文章编号:1000-582X(2013)01-140-05

教室照明条件下瞳孔大小变化规律

黄海静^{1a,1b,2}, 陈 纲^{1a,1b,2}, 严永红^{1a,1b}

(1. 重庆大学 a. 建筑城规学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘 要:为研究教室照明条件下学生瞳孔大小随亮度水平的变化规律,选择 3 位大学生作为被试者,采用 iView X 眼动仪,通过模拟教室照明条件的教室照明瞳孔大小测量系统实验,对 3 种教室常用色温(2 700 K, 4 000 K, 6 500 K)荧光灯光源提供的 5 种背景亮度下的瞳孔面积变化值进行测量。结果显示,3 种色温荧光灯下的瞳孔面积与背景亮度呈负指数函数关系;在教室照明条件下人眼瞳孔面积随背景亮度的变大而减小,并逐渐趋于稳定;在相同背景亮度下,色温越高的荧光灯照明时瞳孔面积越小。

关键词:教室照明;光生物效应;瞳孔变化;亮度

中图分类号:

文献标志码:A

The variation rules of pupil size under classroom lighting condition

HUANG Haijing^{1a,1b,2}, CHEN Gang^{1a,1b,2}, YAN Yonghong^{1a,1b}

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

Abstract: For the purpose of studying the rule of the pupil size variation while the luminance level is changing under the classroom's lighting condition, the variation values of 3 student's pupil area that under 5 kinds background luminance affording by three kinds of fluorescent illuminant of different color temperature (2 700 K, 4 000 K, 6 500 K) are measured, with iView X eye tracking and the experiment of the measure system of pupil size under classroom lighting to simulate the classroom lighting. The result shows that, the relationship between pupil area and background luminance is negative exponential function under 3 color temperature fluorescent illuminant; under the classroom lighting condition, the pupil area gets smaller when the background luminance is higher, and is getting stable gradually; under the same background luminance, the pupil area is smaller under the lighting of higher color temperature fluorescent.

Key words: classroom lighting; cirtopic; pupil change; luminance

教室照明品质不仅影响学生用眼健康,还对学生的视觉功效、心理感受和生理变化等生物性反应产生影响。学生在教室的教与学活动除了书本读写,更主要的视觉活动是看黑板(同时听老师讲课)。“看黑

板”的视知觉活动涉及人眼瞳孔大小和大脑皮层功能 2 个方面的变化。一般室内照明条件下,瞳孔变化越小,视觉疲劳度越小;可见度越好,识别时间越短^[1]。可见度是人眼辨认物体存在或形状的难易程度^[2],受

收稿日期:2012-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108479);中央高校基本科研业务费科研专项自然科学类资助项目(CDJZR11190003);华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题资助项目(2012KB19)

作者简介:黄海静(1974-),女,重庆大学副教授,博士,主要从事建筑设计及建筑技术科学方面的研究,
(E-mail)cqhj@126.com。

亮度、物体相对尺寸、亮度对比、识别时间及眩光等因素影响,而可见度好坏又影响学习效率。

基于光生物效应的照明研究是 21 世纪 3 个照明发展趋势之一^[3]。已有研究表明,光生物效应与光源辐射光谱中蓝绿色光成份含量有关^[4]。在富含蓝绿色光的光源照明下,人眼瞳孔收缩多,视看清晰,视觉功效好^[5]。练莘等研究了瞳孔对光反射的特征^[6]。杨公侠等研究发现瞳孔大小随被试眼睛上的照明水平和光谱分布不同而变化^[7-8]。Berman 教授等研究指出瞳孔大小变化与 Cirtopic(光生物效应)下的照度相关性最高^[9],并认为在富含蓝光的高色温光源照明下,实际亮度感觉增加^[10]。Dacey 等也研究发现,光生物效应能影响人对中、低照明水平时的亮度感知^[11]。此外,石路对照度和色温 2 个重要的照明参数进行了综述^[12]。

影响教室学生视觉健康和学习效率的因素比较复杂,既有背景亮度、亮度对比、照明光源位置、照明光源的光色等教室光环境和学生生理条件状况等客观因素;也有学生心理状态等主观因素。目前,现有《建筑照明设计标准》(GB50034-2004)^[13]仅对视觉效果有规定,而从未考虑光生物效应的作用;且规范^[13]中教室照明标准只是明视觉条件下的照度值和显色指数平均值,并没考虑光生物效应的影响和视觉生理、心理对教室照明的要求。笔者拟统筹视觉效应和生物学效应两方面的作用研究教室照明,通过分析不同光源光色和亮(照)度的照明环境下识别目标物时的人眼瞳孔大小变化规律,从而得到利于学生视觉功效、生理反应,提高学习效率的教室照明量化指标。本研究可为完善我国教室照明在光生物效应下,新的教室照明设计标准提供理论依据和技术参考。

1 教室照明瞳孔大小变化实验

“教室照明瞳孔大小变化实验”旨在通过模拟教室照明条件的测量系统,整合眼动仪和识别时间实验装置,设定光源光色、背景照度(亮度)、视标大小和颜色组合 4 方面的参数条件(表 1),定量分析不同光源光色和照度(亮度)水平下人眼瞳孔大小的变化规律。

表 1 实验条件参数

光源	色温/ K	背景照度 E/lx	视标大小 $\alpha /(^{\circ})$	视标颜色
荧光灯	2 700,	100,150,	1,2, 4,10	黑底白字,白底黑字,黑底品红字,黑底青字,黑底黄字
	4 000,	300,750,		
	6 500	1 000		

综合国内外教室照明对照度的相关规定,根据照度标准分级,实验确定了从 100~1 000 lx 的 5 个照度参数。教室常用光源为荧光灯,实验选择了具有典型冷暖感受的 3 种不同色温荧光灯,分别是色温 2 700 K 的白炽灯色(暖色光,含红光成份较多)荧光灯、色温 4 000 K 的冷白色(中间色光,含黄、绿光成份较多)荧光灯、色温 6 500 K 的日光色(冷色光,含蓝光成份较多)荧光灯。

教室里学生看黑板的目标对象主要是黑板上的文字和图形,此目标对象具有形状、大小、颜色等多方面的差异。为此,实验设计了不同大小的多种视看目标对象(简称视标),采用视觉实验常用的“郎道尔环”(C 环)^[14]作为视标。综合视力标准及大学教室现状主观感受调查统计,设计实验用视标分别为视角 1'、2'、4'和 10'共 4 种;考虑大学教室教学除了有黑板板书,也采用白板教学的方式,视标大小和颜色组合共构成 14 种视标参数变化如图 1 所示。

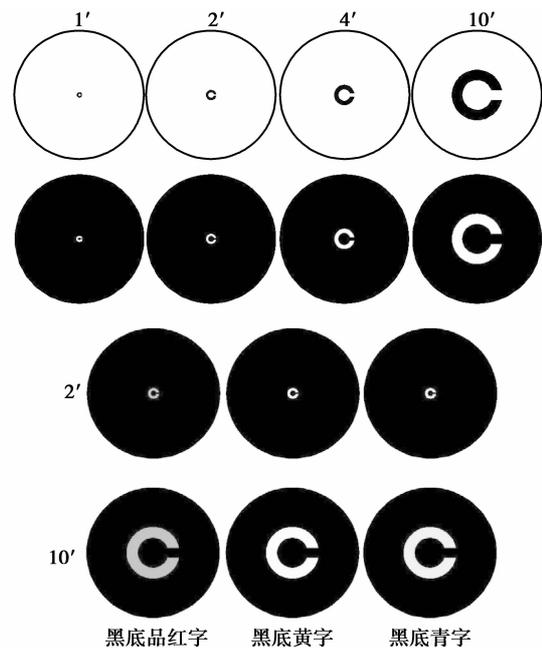


图 1 视标大小及颜色组合

教室照明瞳孔变化及识别时间的实验研究受人体生理、心理状态等多种因素影响,为减少实验人为因素干扰,实验对象的选择必须严格满足标准被试的要求。参照一般生理心理小样本实验方法,对实验对象严格筛选后,选择具有正常视力和色觉的在校大学生,在光屏蔽的光学实验室,利用模拟教室人工照明环境的实验装置进行实验(如图 2)。

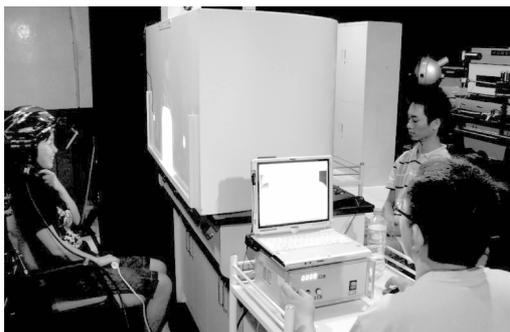


图 2 教室照明中的光生物效应研究实验场景

实验装置由教室照明环境模拟系统、识别时间测量系统、眼动仪瞳孔大小测量系统和系统分析软件电脑系统 4 部分组成。装置箱内表面模拟真实教室环境采用白色漫反射材料喷涂,光源照射下构成均匀可变的漫反射光环境。箱体正中间是观察窗口,测试时被试者的双眼贴近箱体直面,以保证视看距离与视线计算数据吻合,并完全处于模拟的教室照明环境中。通过测量记录在不同光色和照度值的照明条件下观测不同大小和颜色组合的视标时人眼瞳孔大小变化数据,统计分析瞳孔大小与光源光色、背景照度(亮度)之间的变化规律。

2 瞳孔变化与背景亮度及光源色温的关系

在 3 种色温(2 700 K、4 000 K、6 500 K)的教室用荧光灯和不同背景亮度下视看不同视标时,对所有被试者的瞳孔面积实测数据取平均值作为相应照明条件下的瞳孔大小数据,得到不同背景亮度时 3 种色温荧光灯下的瞳孔面积值(见表 2),3 种色温荧光灯下瞳孔大小随亮度变化的曲线如图 3 所示。

表 2 不同背景亮度时 3 种色温荧光灯下的瞳孔面积值

背景照度 E/lx	背景亮度 $L_b/(cd \cdot m^{-2})$	6 500 K	4 000 K	2 700 K
		瞳孔面积 A_p/mm^2	瞳孔面积 A_p/mm^2	瞳孔面积 A_p/mm^2
100	29.34	15.04	19.01	21.45
150	44.02	11.60	14.31	18.16
300	88.03	8.16	9.83	12.29
750	220.08	5.09	6.28	7.92
1 000	293.44	4.15	5.43	6.78

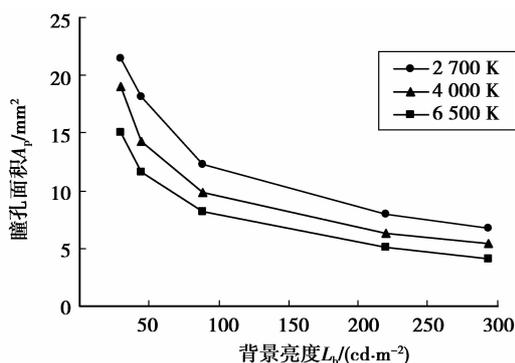


图 3 不同背景亮度时 3 种色温荧光灯下瞳孔变化曲线图

图 3 表明,在 3 种色温荧光灯的照明条件下,随着亮度水平的提高,瞳孔收缩加大。通过回归分析,得到 3 种色温荧光灯的瞳孔面积变化值与背景亮度的拟合结果呈负指数函数关系,满足如下基本关系式:

$$A_p = a + b * e^{(-L_b/c)} \quad (1)$$

式中: A_p 为瞳孔面积, mm^2 ; L_b 为背景亮度, cd/m^2 ; a, b, c 是与光源光谱分布、背景亮度、视标大小和视标对比有关的系数。

利用式(1)拟合 3 种色温荧光灯下瞳孔面积与背景亮度的关系,并计算其判定系数 R^2 、标准偏差 S 来综合判断公式的拟合优度和可信度,拟合结果见表 3。

表 3 三种色温荧光灯下瞳孔面积与背景亮度关系拟合结果

光源	a	b	c	R^2	S
2 700 K 荧光灯	6.940 3	23.609 5	59.692 1	0.998 3	0.369 1
4 000 K 荧光灯	5.798 1	24.245 6	45.842 7	0.990 4	0.790 7
6 500 K 荧光灯	4.456 6	17.692 4	53.479 7	0.989 5	0.659 2

拟合结果显示,3 种色温荧光灯照明条件下的实测数据都聚集在拟合曲线附近,且判定系数 R^2 值均接近于 1,标准偏差 S 均小于 1,表明拟合结果与实测数据吻合度好^[14],拟合公式能准确反映瞳孔变化与背景亮度之间的关系。可以看到,在 3 种色温荧光灯下,瞳孔变化与背景亮度都呈现出规律性的变化关系:

1) 相同背景亮度时,低色温(2 700 K)荧光灯下的瞳孔面积最大,中间色温(4 000 K)荧光灯下的瞳孔面积次之,高色温(6 500 K)荧光灯下的瞳孔面积最小;

2) 3 种光色荧光灯的变化规律相似,随着背景亮度增大,瞳孔面积总体趋势缩小,并趋于稳定;

3) 对于 3 种光色的荧光灯,当背景亮度从 29.34 cd/m^2 增大到 220.08 cd/m^2 (相应照度 100~750 lx) 时,瞳孔面积变化幅度较大;当背景亮度从

220.08 cd/m^2 增大到 293.44 cd/m^2 (相应照度 750~1 000 lx) 时,瞳孔面积变化幅度较小。

3 用瞳孔大小变化规律研究教室照明条件

根据 3 种色温荧光灯下瞳孔变化与背景亮度的回归关系式(1)分别计算得到照明水平从 100~1 500 lx,3 种色温荧光灯下的瞳孔面积变化率如表 4 所示。

表 4 三种色温荧光灯下瞳孔面积变化率

背景照度 E/lx	背景亮度 $L_b/(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	变化率/%	2 700 K		4 000 K		6 500 K	
			瞳孔面积 A_p/mm^2	变化率/%	瞳孔面积 A_p/mm^2	变化率/%	瞳孔面积 A_p/mm^2	变化率/%
100	29.34		21.38		18.58		14.68	
150	44.02	50.0	18.23	-14.73	15.08	-18.85	12.22	-16.72
200	58.69	33.3	15.77	-13.50	12.54	-16.86	10.36	-15.24
300	88.03	50.0	12.34	-21.74	9.35	-25.41	7.87	-24.06
500	146.72	66.7	8.96	-27.40	6.79	-27.44	5.60	-28.89
750	220.08	50.0	7.53	-15.96	6.00	-11.62	4.75	-15.19
1 000	293.44	33.3	7.11	-5.55	5.84	-2.65	4.53	-4.54
1 500	440.16	50.0	6.96	-2.22	5.80	-0.66	4.46	-1.51

如表 4 所示,当背景亮度从 88.03 cd/m^2 (即照度 300 lx) 提高到 146.72 cd/m^2 (即照度 500 lx) 时,照度值提高了约 67%,3 种色温荧光灯下的瞳孔面积变化率最高,瞳孔面积都缩小了 28% 左右。但亮度达 220.08 cd/m^2 (即照度 750 lx) 之后,随着亮度(照度)水平的提高,瞳孔面积变化率减小,即亮度增大对瞳孔收缩的影响大大减缓。因此,教室照明并非越亮越好,选择照度标准必须与教学要求的视觉工作相适应。照度太低,会损害学生视力,影响身心健康和学习效率;不合理的高照度则会造成电力浪费。

教室照明中瞳孔大小变化的实验结果表明,在色温越高的光源照明条件下,瞳孔收缩越大,视看越容易。根据回归关系式(1),通过图解法(如图 4),即可得到相同瞳孔面积下,色温 6 500 K、4 000 K 和 2 700 K 荧光灯下对应的背景亮度值 X_1 、 X_2 、 X_3 。

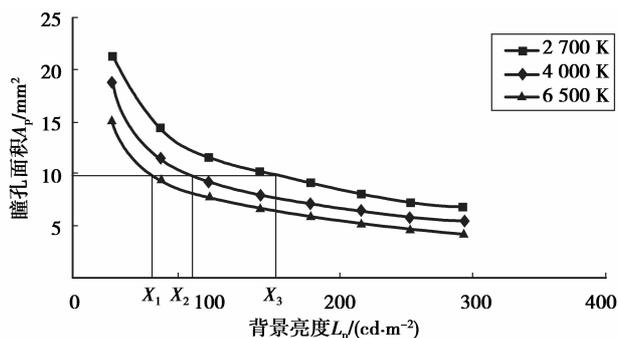


图 4 基于瞳孔变化的亮度对比

从图 4 看到,瞳孔面积相等时对应的背景亮度值 $X_1 < X_2 < X_3$ 。人眼瞳孔大小变化不仅反应人的生理舒适状况,也与视觉功效相关^[15]。这就是说,要达到相同视觉功效(即瞳孔面积相等),色温 6 500 K 荧光灯需要产生的亮度最少,因而耗电量最少,节能效果最好,色温 4 000 K 荧光灯次之,色温 2 700 K 荧光灯耗电量最多。

4 结 论

综合不同背景下瞳孔大小变化规律的分析可以认为,教室照明适宜采用中、高色温的荧光灯光源照明。具体结论如下:

1)教室照明条件下,瞳孔面积随背景亮度(照度)的增大而减少,并在达到一定的亮度条件后逐渐趋于稳定。

2)同一背景亮度时,色温 6 500 K 荧光灯下的瞳孔面积最小,4 000 K 荧光灯的次之,2 700 K 荧光灯的最大。

3)瞳孔面积小,瞳孔收缩多,说明高色温荧光灯照明下视看清晰,可见度最好。但中、高色温光源的影响差异不大。

参考文献:

- [1] 刘加平. 建筑物理[M]. 4版. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T119-2008 建筑照明术语标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [3] 海信. 2005年CIE中期会议和西班牙国际照明会议专题报导[J]. 光源与照明, 2005, 27(2):35-37.
HAI Xin. Special coverage of 2005 CIE Medium Meeting and Spanish International Lighting Conference [J]. Lamps and Lighting, 2005, 27(2):35-37.
- [4] 章海聪. 照明科学新进展:眼睛的非视觉效应[J]. 照明工程学报, 2006, 17(3):1-3.
ZHANG Haicong, New progress among the lighting science; the non-visual effect of eye [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2006, 17(3):1-3.
- [5] 陈仲林,李毅,杨春宇,等. 道路照明中的光生物效应研究[J]. 照明工程学报, 2007, 18(3):1-5.
CHEN Zhonglin, LI Yi, YANG Chunyu, et al. Study on photobiomodulation of road lighting [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2007, 18(3):1-5.
- [6] 练苹,顾欣祖,叶秀兰. 正常人瞳孔及瞳孔对光反射的特征[J]. 中国实用眼科杂志, 2005, 23(10): 1038-1041.
LIAN Ping, GU Xinzu, YE Xiulan, The characteristics of the pupil and pupillary light reflex in the normal subjects [J]. Chinese Journal of Practical Ophthalmology, 2005, 23(10):1038-1041.
- [7] 杨公侠,杨旭东. 人类的第三种光感受器(上)[J]. 光源与照明, 2006, 6(2):30-31.
YANG Gongxia, YANG Xudong, The third receptor of human (part 1) [J]. Lamps and Lighting, 2006, 6(2):30-31.
- [8] 杨公侠,杨旭东. 人类的第三种光感受器(下)[J]. 光源与照明, 2006, 9(3):28-30.
YANG Gongxia, YANG Xudong, The third receptor of human (part 2) [J]. Lamps and Lighting, 2006, 9(3): 28-30.
- [9] Berman S M, Navvab M, Martin M J, et al. Children's near acuity is better under high colour temperature lighting[C]// CIE Midterm Meeting and International Lighting Congress, May 18-21, 2005, León, Spain. Vienna: CIE, 2005.
- [10] Dacey D M, Liao H W, Peterson B B, et al. Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN[J]. Nature, 2005, 433:749-754.
- [11] Berman S M, Navvab M, Martin M J, et al. A comparison of traditional and high colour temperature lighting on the near acuity of elementary school children [J]. Light Research & Technology, 2006, 38(1): 41-52.
- [12] 石路. 照明光源色温对人体中枢神经生理功能的影响[J]. 人类工效学, 2006, 12(2):59-61, 71.
SHI Lu. The Influence of illuminant light source color temperature to human central nervous system physiological function [J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2006, 12(2):59-61, 71.
- [13] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50034-2004 建筑照明设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社. 2004.
- [14] 庞蕴凡. 视觉与照明[M]. 北京:中国铁道出版社, 1993.
- [15] 胡英奎,翁季,李毅,等. 道路照明条件下驾驶员瞳孔大小变化规律[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(8): 85-90, 102.
HU Yingkui, WENG Ji, LI Yi, et al. The change rule of driver's pupil size under road lighting conditions[J]. Journal of Chongqing university, 2010, 33(8): 85-90, 102.

(编辑 郑洁)