

基于黑板灯透镜的复合非对称主动偏光设计研究及应用

阮程¹, 徐天宇¹, 黄耀伟¹, 汪洋^{1,2}, 张鑫^{1,2}

(1. 长春希达电子技术有限公司, 吉林 长春 130103; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130103)

摘要:黑板照明是影响课堂教学质量的关键因素之一, 黑板照明产品光学设计是保证黑板照明质量的先决条件, 标准严格的安装要求也是实现最终设计的重要闭环, 因此从设计、选型、工艺、安装及测试验收全链条的把控才能保障高质量黑板照明的成功应用。本文结合以上影响因素及市场产品现状, 模拟和分析不同因素对讲台区域照明光品质和光健康的影响, 提出一种基于复合型非对称主动偏光设计的黑板照明策略, 为照明设计师和终端应用客户提供设计建议, 为儿童青少年视力健康保驾护航。

关键词:黑板照明; 光品质; 光健康; 偏光设计; 视觉健康

中图分类号: TM923 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2022.01.011

Research and Application of Compound Asymmetric Active Partial Optical Design Based on Blackboard Lamp Lens

RUAN Cheng¹, XU Tianyu¹, HUANG Yaowei¹, WANG Yang^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}

(1. Changchun Cedar Electronics Technology Co., Ltd., Changchun 130103, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130103, China)

Abstract: Blackboard lighting is one of the key factors affecting the quality of classroom teaching. The optical design of blackboard lighting products is the prerequisite to ensure the quality of blackboard lighting, and the strict installation requirements are also an important closed loop to realize the final design. Therefore, the successful application of high-quality blackboard lighting can be guaranteed from the control of the whole chain of design, type selection, process, installation, test and acceptance. Combined with the above influencing factors and the current situation of market products, the paper simulates and analyzes the effects of different factors on the lighting quality and light health of the podium area, and puts forward a blackboard lighting strategy based on composite asymmetric active partial optical design, so as to provide design suggestions for lighting designers and terminal application customers, and escort the vision health of children and adolescents.

Key words: blackboard lighting; light quality; light health; partial optical design; visual health

引言

自 2018 年习总书记提出“呵护好儿童青少年的眼睛”重要指示以来, 教育部联合十五部门印发

《儿童青少年近视防控光明行动工作方案(2021—2025 年)》, 加强落实后疫情时代儿童青少年近视防控战略部署。经研究发现, 教室光环境质量与学生眼睛发生疲劳的概率有密切关系^[1], 讲台区域照明光环境作为教室光环境质量的重要组成部分, 提高

基金项目: 吉林省科技发展计划技术攻关项目(批准号: 20200401004GX)

通信作者: 阮程, E-mail: ruanc@ccxida.com

黑板照明光品质和师生视觉舒适度意义重大。目前讲台区域照明普遍存在以下问题：黑板面照度和均匀度不足、灯具安装位置不标准、不舒适眩光造成师生视疲劳^[2]。本文以基于复合型非对称主动偏光设计的黑板照明为研究对象，通过对目前背景现状调研，进行光学和照明设计模拟分析，提出黑板照明设计策略，推动我国教室健康照明应用落地。

1 背景现状

常规中小学校黑板面尺寸为 $4.0\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ ，根据黑板灯具对老师的眩光影响研究，黑板灯具发光面距离黑板面水平距离小于 600 mm ，距离黑板上边沿垂直距离大于 200 mm 时，老师眼睛不受直接眩光影响或者受到的眩光影响相对会有所减少^[3]。

根据《中小学校教室采光和照明卫生标准》^[4]以及黑板照明防眩目标，本文旨在设计一款黑板灯透镜，出光均匀、距黑板面水平距离近，能够有效解决老师的眩光问题；光束照亮黑板集中度高，有益于光利用效率及改善老师一侧直接眩光；黑板面及黑板边缘无明显彩虹斑及黄斑，为师生提供良好的黑板照明环境。

2 分析与设计

2.1 黑板灯透镜材料及加工工艺分析

在进行黑板灯透镜的光学设计之前，需要明确透镜设计中拟采用的加工工艺和透镜材料，这与透镜设计过程中黄斑问题处理方式以及材料选择息息相关，直接影响黑板灯透镜的结构和光学特性。

黑板灯透镜一般为不同位置截面相同的长条形，通常具有两种成型工艺，一种为拉伸成型，一种为注塑成型。拉伸工艺模具仅考虑透镜截面形状，材料通过模具挤塑成型，最后截断成需要长度的透镜；注塑工艺模具完全根据透镜的形状进行制作。拉伸成型的透镜精度低，模具成本以及透镜成本低，而注塑成型精度高，成本也更高。

黄斑是黑板灯透镜具有的普遍问题，其具体现象是照射在黑板上的光斑存在宽度不一的黄色条纹，十分影响师生授/听课质量，解决黄斑的主要方式为黄斑均匀化，弱化黄斑的区域集中性。黑板灯透镜拉伸成型与注塑成型有不同处理黄斑问题的方案，

拉伸成型通常采用在材料中掺入扩散剂解决黄斑问题，注塑成型通常采用晒纹解决黄斑问题，也可以采取掺入扩散剂方式。

透镜内加入扩散剂是在透镜成型前均匀加入到材料中，扩散剂用量越大，对透镜配光改变程度越大，每次加工透镜均需要控制扩散剂所占比例，也会导致不同批次透镜配光略有不同。由于扩散剂是分布在整个透镜中，设计的透镜配光会被很大程度改变，拉伸成型的透镜，同一模具可以输出多种透镜长度，根据需要进行截断。晒纹是在模具上进行操作，对透镜的某一个或者某几个面进行晒纹，晒纹的程度调控并不复杂，可以选择不同的晒纹程度在解决黄斑问题的同时最大程度地实现设计的透镜配光，注塑成型的透镜长度由模具长度确定。

黑板灯透镜加工还需考虑长度、变形度以及材料属性。以黑板面的长度 4.0 m 为例，市场上与之匹配的黑板灯具一般为 $1\ 200\text{ mm}$ 或 $1\ 500\text{ mm}$ ，由于透镜越长变形量越大，大多数透镜选择 300 mm 拼接，也有少部分采用 100 mm 拼接。市场上常见的黑板灯透镜通常采用两种材料，PC (Polycarbonate, 聚碳酸酯) 以及 PMMA (Polymethacrylate, 聚甲基丙烯酸树脂)，PMMA 材料较 PC 不易黄化，但透镜易变形。

结合上述黑板灯透镜的成型方式以及其他影响因素，在本文的黑板灯透镜设计中，选用拼接式 300 mm PC 材料透镜，选取注塑成型工艺并采用晒纹方式解决黄斑问题。

2.2 黑板灯透镜光学设计

由于 LED 光源为类似朗伯体光源，需要对其进行二次配光才能满足黑板面照明要求。根据黑板灯具与黑板面的相对位置关系，本文采用透镜旋转式主动偏光结合透镜不对称式被动偏光进行复合型光学设计，实现对黑板面均匀有效的照明需求。黑板灯透镜设计目标：黑板灯透镜发光面距离黑板水平距离小于 500 mm ，距离黑板上边沿垂直距离大于 200 mm ，实现黑板面的照度均匀度达到 0.8 以上，维持平均照度达到 500 lx 。

本文设计的黑板灯透镜，采用 TIR (Total Internal Reflection) 透镜设计原理^[5-7]，利用自由曲面进行折反射一体控光设计。如图 1 (a) 所示，透镜左侧设有入光部，右侧设有出光部，上、下两侧分别设有反光面 d 和反光面 e，顶端和底端分别设

置安装结构 3 和安装结构 4。入光部由倾斜平面 a、倾斜平面 b 以及入光面 c 构成入光腔体，反光面 d 和反光面 e 均为凹面反光面面向透镜内侧的弧面，出光部由出光面 f 构成，出光面 f 为凸面面向光源方向的弧面。光源 1 为长 3.5 mm、宽 2.8 mm、厚度 0.7 mm 的 2835 LED 光源，呈长条形排布设置在入光部一侧，出光面距透镜左端面距离为 0.2 mm，光源 1 的长边与黑板灯透镜拉伸方向平行，短边与黑板灯透镜的左端面平行。单根透镜结构如图 1 (b) 所示，透镜入光腔体的平面 a、平面 b 以及入光面 c 进行晒纹处理，初始设计采用轻度晒纹，黄斑情况需根据透镜实物进行具体细节处理。

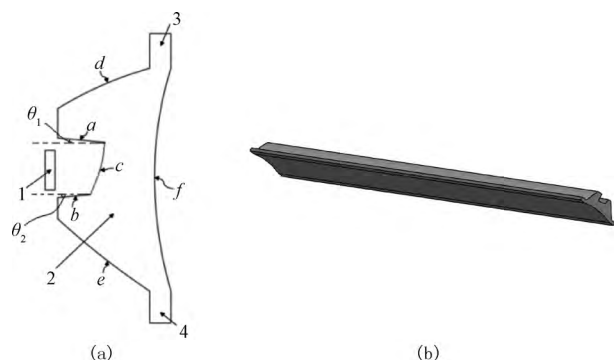


图 1 黑板灯透镜 (a) 透镜结构截面, (b) 单根透镜结构图

Fig. 1 Blackboard lamp lens (a) lens structure section, (b) single lens structure diagram

利用 Lighttools 模拟软件对透镜控光进行模拟，为清晰地表明透镜各面对光线的折反射作用，图 2 (a) 为追迹光线在透镜内部的光路图，大角度光线通过倾斜平面 a 照射向反光面 d，通过倾斜平面 b 照射向反光面 e，小角度光线通过入光面 c 发散进入透镜主体当中；由反光面 d 反射的光线从出光面 f 的上部出射，向下方弯折；由反光面 e 反射的光线从出光面 f 的下部出射，向下方弯折，由入光面 c 照射向出光面 f 的光线经过出光面 f 后再次发散，照射到黑板面。图 2 (b) 为光源光线照射向黑板面时侧面观察模拟图，设计的黑板灯透镜能够有效的将光源发出的光线照射向黑板面，集中度高，光线利用效率高。

黑板灯透镜 0° 水平照明时，横向与纵向配光曲线如图 3 (a) 所示，横向发光角度约为 91°，纵向发光角度约为 18°。向黑板面照明时透镜出光面朝向黑板墙面，向下旋转 45° 安装后横向与纵向配光曲线如图 3 (b) 所示，横向发光角度约为 122°，纵

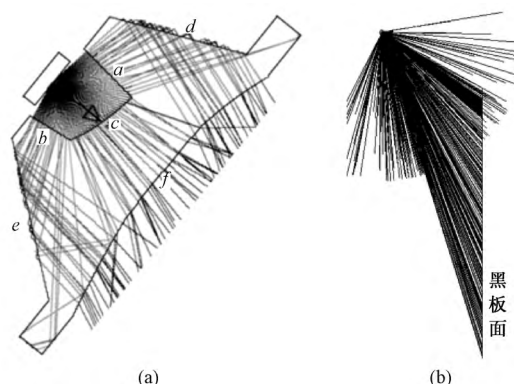


图 2 黑板灯透镜控光示意图 (a) 追迹光线在透镜内部光路图, (b) 光源光线黑板照明模拟侧面图

Fig. 2 Schematic diagram of blackboard lamp lens light control (a) light path diagram of tracing rays inside the lens, (b) side view of simulated blackboard lighting with light source

向发光角度约为 18°。图 3 (c) 为单个灯具的模拟光斑，光斑均匀，视觉感知无明显黄斑。

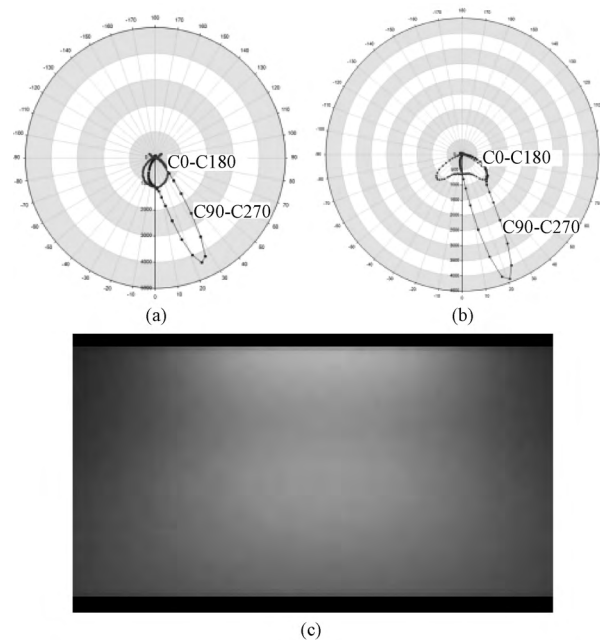


图 3 黑板灯透镜配光及模拟光斑 (a) 0° 配光曲线, (b) 45° 配光曲线, (c) 45° 模拟光斑

Fig. 3 Blackboard lamp lens light distribution and simulated spot (a) 0° light distribution curve, (b) 45° light distribution curve, (c) 45° simulated spot

利用照明模拟 Dialux 软件进一步评估黑板照明效果，维护系数 0.8，如图 4 所示，黑板长 4 000 mm，高 1 200 mm。每个灯具装配三根透镜，使用三个装配有此黑板灯透镜的灯具对黑板进行照明，间距为 400 mm，透镜相对黑板面向下旋转 45°，

黑板灯透镜出光面距黑板水平距离 480 mm，垂直距离 200 mm。黑板面照度如图 5 所示，可以看出，光照射到 1 200 mm 高度黑板面上均匀度 0.825，维持照度 679 lx，符合设计目标。

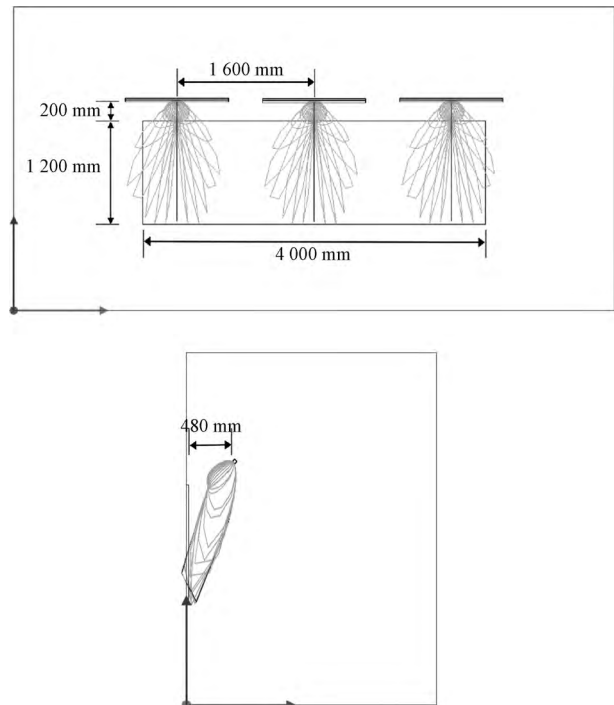


图 4 黑板灯透镜安装位置
Fig. 4 Installation position of blackboard lamp lens

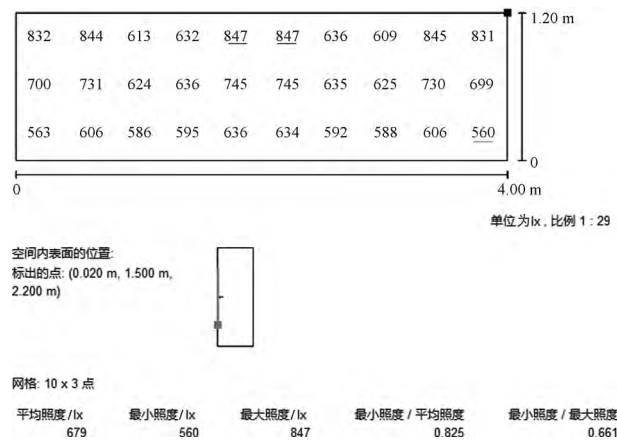


图 5 黑板灯透镜照度模拟结果
Fig. 5 Simulation results of illuminance of blackboard lamp lens

2.3 照明设计

用注塑工艺对黑板灯透镜开模成型，黑板灯透镜实物如图 6 所示。结合外壳结构对透镜进行实测验证，实测配光曲线如图 7 (a) 所示；利用照明模拟软件对照明效果进行验证，如图 7 (b) 所示，黑板面照度均匀，光线集中照射在黑板面，灯具后侧、两

侧以及黑板下方地面无效照明区域小。黑板面照度模拟结果如图 8 (a) 所示，使用 3 个黑板灯具对黑板面进行照明，灯具相对黑板面向下旋转 40°~50°，透镜出光面距黑板水平距离 490 mm，垂直距离 240 mm，光照射到 1 200 mm 高度黑板面上均匀度高于 0.8，维持照度 658 lx。图 8 (b) 为 1.75 m 老师在讲台区域的眩光模拟结果，老师面向学生侧，眼睛在距离黑板面 70 mm 内有眩光感受，根据研究发现，老师眼睛离黑板最近的极限状态距离大于 150 mm^[3]，在本文的教室黑板面照明设计中，无不舒适眩光影响。

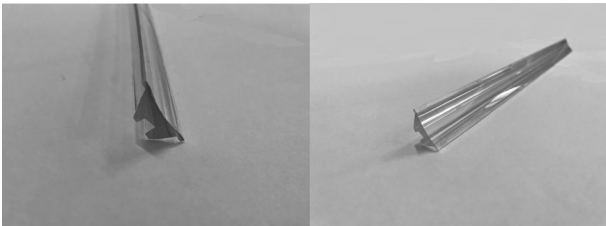


图 6 黑板灯透镜实物
Fig. 6 Physical object of blackboard lamp lens

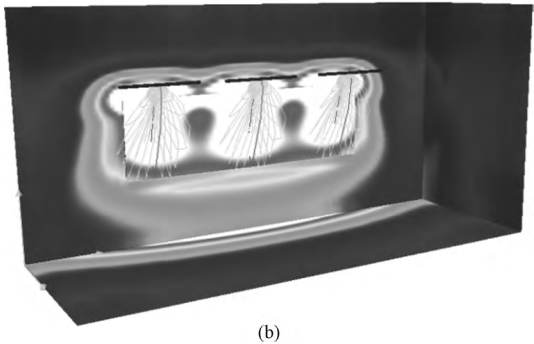
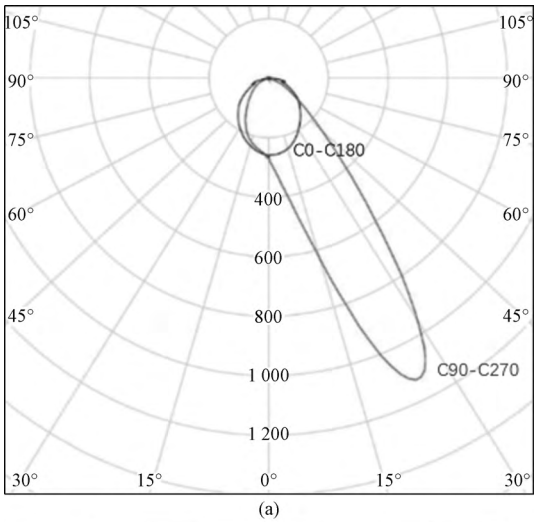


图 7 (a) 黑板灯透镜实测配光曲线，(b) 黑板照明模拟效果伪彩图
Fig. 7 (a) Measured light distribution curve of blackboard lamp lens, (b) pseudo color diagram of blackboard lighting simulation effect

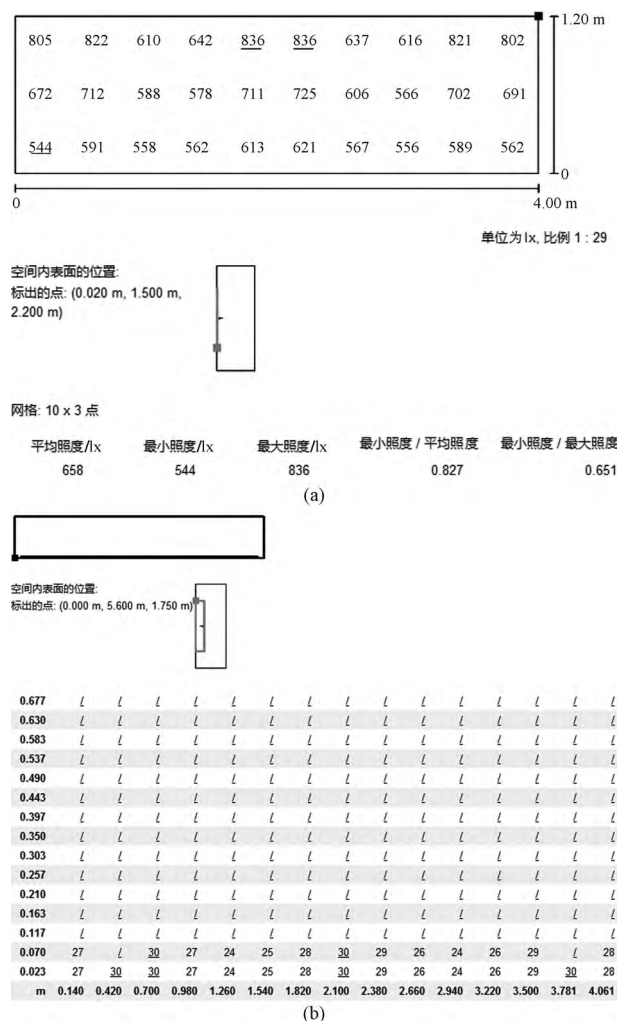


图8 黑板灯透镜实测配光曲线照明模拟结果

(a) 照度模拟结果; (b) 眩光模拟效果

Fig. 8 Lighting simulation results of measured light distribution curve of blackboard lamp lens (a) illuminance simulation results, (b) glare simulation results

3 总结

本文针对目前教室黑板照明光环境痛点, 基于复合非对称主动偏光设计, 通过透镜主动偏光和灯具旋转控光, 实现黑板照明平均照度和照度均匀度满足国家标准要求同时, 降低老师不舒适眩光感受, 提高学生学习效率和视觉健康, 实现讲台区域教学光环境舒适度整体提升, 为领域内照明设计师和技术人员提供设计参考, 助力儿童青少年视觉健康。

参考文献

- [1] 郭娅, 曾珊珊, 郝文涛, 等. LED 教室照明灯具对人眼生理特性的影响 [J]. 照明工程学报, 2019, 30 (3): 7-14.
- [2] 李仁杰, 王俊杰. 教室照明设计中的光源选择 [J]. 光源与照明, 2020 (10): 16-19.
- [3] 张怡妮, 贺晓阳, 邹念育, 等. 教室黑板灯的眩光影响分析 [J]. 照明工程学报, 2020, 31 (3): 140-144.
- [4] 《中小学校教室采光和照明卫生标准》: GB 7793—2010 [S].
- [5] 周士康, 杜金, 陈春根, 等. LED 全反射透镜计算新方法 [J]. 照明工程学报, 2020, 31 (1): 70-76.
- [6] 张世鑫, 赵爽, 王一璋, 等. 自由曲面透镜白光 LED 光束整形技术 [J]. 激光技术, 2021 (3): 357-361.
- [7] 甄艳坤, 白燕, 陈恩果, 等. 基于 Skew-Ray 追迹法的均匀准直照明 TIR 透镜设计 [J]. 光学技术, 2019 (6): 647-652.

热烈祝贺广州市浩洋电子股份有限公司入选第六批制造业单项冠军示范企业

2021 年 11 月 24 日, 工业和信息化部、中国工业经济联合会发布《关于印发第六批制造业单项冠军及通过复核的第三批制造业单项冠军企业 (产品) 名单的通知》。中国照明学会理事单位广州市浩洋电子股份有限公司成功入选第六批制造业单项冠军示范企业。

据悉, 制造业单项冠军企业, 是指长期专注于制造业某一特定细分产品市场, 生产技术和工艺处于国际领先, 具有强大的市场竞争力和综合实力, 单项产品市场占有率位居全球前列的企业。制造业单项冠军企业评选由工业和信息化部、中国工业经济联合会组织开展。

广州市浩洋电子股份有限公司是一家高新技术企业, 是中国照明学会理事单位。公司主要从事专业舞台灯光等演艺科技产品的研发与生产, 入选第六批制造业单项冠军示范企业, 是对公司在行业的地位、技术领先水平的认可, 是公司自主创新能力和市场影响力等综合实力的体现, 有助于提升公司品牌影响力, 对公司业务经营将产生积极影响。