

防眩光 LED 工矿灯的设计与优化

陈超泉¹ 王敏¹ 罗时睿²

¹福建师范大学光电与信息工程学院医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007

²福建鸿博光电科技有限公司, 福建 福州 350007

摘要 设计了一种防眩光 LED 工矿灯, 在工矿灯中加入漏斗形自由曲面反光件, 优化工件外表面的形状使灯杯内壁照度变均匀, 大大降低工矿灯的眩光值。通过 SolidWorks 建模、TracePro 模拟计算分析, 优化后的眩光值由 52.8 降为 24, 能够满足各类体育照明的要求。从人眼视觉角度分析设计结果, 优化前人眼直接看到极亮的 LED 芯片且灯杯内壁均匀度只有 0.383, 优化后人眼看不到 LED 芯片只能看到灯杯内壁, 其照度均匀度达 0.824, 平均照度值也大大降低, 人眼可以直视灯具而不刺眼。与现有灯具比较, 防眩光优势突出, 市场前景广阔。

关键词 光学设计; 防眩光; 工矿灯; 体育照明; 自由曲面; 照度均匀度

中图分类号 O432; TD62

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.042201

Design and Optimization of Anti-Glare LED Mining Lamp

Chen Chaoquan¹ Wang Min¹ Luo Shirui²

¹Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine Ministry of Education, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

²Fujian Hongbo Opto-Electronics Technology Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350007, China

Abstract A kind of anti-glare LED mining lamp is designed, by adding a infundibular free-form surface reflector into it. The workpiece surface is optimized to make the inner surface uniform. It greatly reduces the glare value of the mining lamp. With SolidWorks modeling and TracePro simulation analysis, the glare value is reduced from 52.8 to 24, which can meet the requirements of all kinds of sports lighting. Further analysis of the results from the visual of human eye shows that, it can see the very bright LED chips and the illumination uniformity of the inner surface is only 0.383 before optimization. It is very dazzling and may cause eyes damage when staring. After optimization, only the inner surface but not the LED chips can be seen, its illumination uniformity is up to 0.824 and the average illumination value is also greatly reduced, the human eyes can look directly at the lamp without glare. Its anti-glare advantage is outstanding when compared with the existing lamps, and has a broad market prospect.

Key words optical design; anti-glare; mining lamp; sports lighting; free-form surface; illumination-uniformity

OCIS codes 220.2945; 220.4298; 230.3670

1 引言

工矿灯最早是为保证工厂、矿井的正常生产而设计的灯具, 如今也被广泛应用于体育照明。随着大功率白光发光二极管(LED)芯片的发展, 以及其高光效、长寿命等优点逐渐取代传统光源成为照明的主力军。传统的以金属卤化物作为发光体的工矿灯也逐渐被 LED 工矿灯取代^[1]。

一般照明灯通常均匀布置在体育场、工厂等上方或侧壁上, 照明整个工作面。LED 工矿灯适用于工厂企业、工矿企业、商场、体育馆等场所作投光或泛光照明, 具有优良的防爆性能、低光衰、高光效、节能环保、长寿命等优点, 已经在全球普及推广应用。

收稿日期: 2015-08-03; 收到修改稿日期: 2015-11-18; 网络出版日期: 2016-03-11

基金项目: 国家 863 计划(2013AA03A116)

作者简介: 陈超泉(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计和光学仪器开发方面的研究。

E-mail: chaoquan_chen@163.com

导师简介: 王敏(1963—), 女, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事精密光学仪器开发方面的研究。

E-mail: mwang@fjnu.edu.cn(通信联系人)

随着LED工矿灯的广泛应用,其存在的问题也逐渐暴露出来,其中高眩光值尤为突出。传统工矿灯没有防眩光措施,眩光问题严重,对生产、生活有很大影响,对人眼可能造成伤害。普通防眩光的LED工矿灯在传统工矿灯前加磨砂扩散板或者防眩光透镜,虽然可以一定程度地降低眩光值,但远远达不到使用要求,还会带来较大的光能损失。

本文设计了一种防眩光LED工矿灯,通过在工矿灯中加入漏斗形自由曲面反光件,优化工件外表面的形状使灯杯内壁照度均匀,大大降低工矿灯的眩光值。

2 眩光及其评价方法

2.1 眩光指数

眩光是指视野中由于不适宜亮度分布,在空间或时间上存在极端的亮度对比,引起视觉不舒适和降低物体可见度的视觉条件。视野内在视野中某一局部出现过高的亮度或前后发生过大的亮度变化,产生人眼无法适应的光亮感觉,可能引起厌恶、不舒服甚至失明。

2.2 防眩光的重要性

眩光是引起视觉疲劳的重要原因之一。眩光对人体的影响主要是人眼对眩光的感受,其主要评定指标有:眩光源或反射源亮度、眩光源对眼睛张角、背景亮度以及眩光源偏离视线角度。

眩光对车间生产、体育赛事的顺利进行产生了巨大的影响,甚至会影响到人们的生命安全。在这样的背景下,设计优化防眩光效果好、光能损失小的防眩光工矿灯,已然成为业界的共识。

2.3 眩光的评价方法

到目前为止,针对室内环境、体育场馆、机动车道路等照明场合,已经总结出以下四种主要的眩光评价方法:统一眩光值、眩光值、道路照明眩光评价的阈值增量和道路照明中的眩光控制等级^[2-5]。

其中,室外体育场地的眩光值为

$$G_R = 27 + 24 \lg \frac{L_{v1}}{L_{ve}^{0.9}}, \quad (1)$$

式中 L_{v1} 是由灯具发出的光直接射向眼睛所产生的光幕亮度, L_{ve} 是由环境引起直接入射到眼睛的光所产生的光幕亮度。

经过研究证明^[6],国际照明委员会(CIE)推荐的室外眩光评价方法可以应用于室内场地的眩光评价,即室内眩光程度可以用眩光指数 G_R 来表示。参照人的主观感受和眩光评价尺度,对于室内体育场馆,其最大眩光指数应满足表1要求。

表1 室内场地眩光限制值
Table 1 Indoor glare value limit

| Competition category | G_R |
|---|-------|
| Training | 35 |
| Official competition(TV broadcast included) | 30 |

3 普通工矿灯模拟分析

市面上最常见的LED工矿灯如图1(a)所示。通过SolidWorks进行建模,灯具结构示意图如图1(b)所示,将模型导入TracePro进行光线追迹。可得到追迹结果如图2、3所示,照度图中最小值为 3.2183×10^{-12} ,最大值为1195.1,平均值为44.999,总光通量4499.9 lm,光通量/发射光通量为0.99999。

由上述模拟结果分析得到:该灯具的发光角度较小,约为 14° ,接收面的最大照度为1195 lx。灯具的悬挂高度为5 m,灯具的总光通量 $\phi=4500$ lm,地面反射率 $\rho=0.4$, Ω_0 为一个单位立体角,下面以计算灯具半光强角度的眩光值为例,分析灯具的眩光控制:

$$E_{\text{horav}} = \phi/S = 3800.45 \text{ lx}, \quad (2)$$

$$L_{\text{av}} = E_{\text{horav}} \cdot \rho / \pi \Omega_0 = 484.076 \text{ cd/m}^2, \quad (3)$$

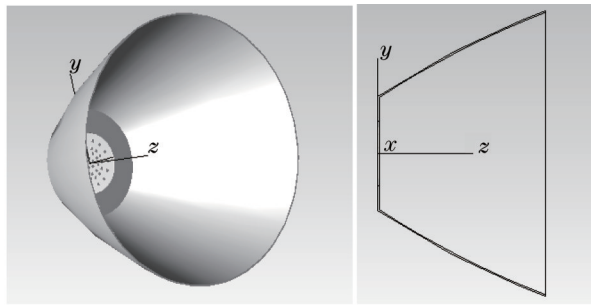


图1 矿灯结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the mining lamp

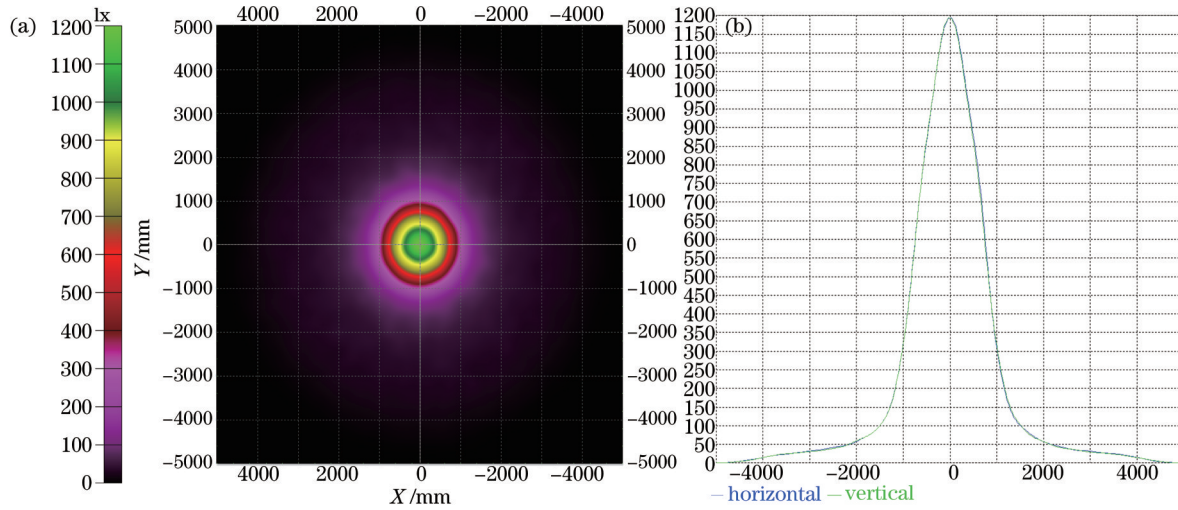


图2 (a)照度图及(b)其剖面曲线

Fig.2 (a) Illumination map and (b) profile curve

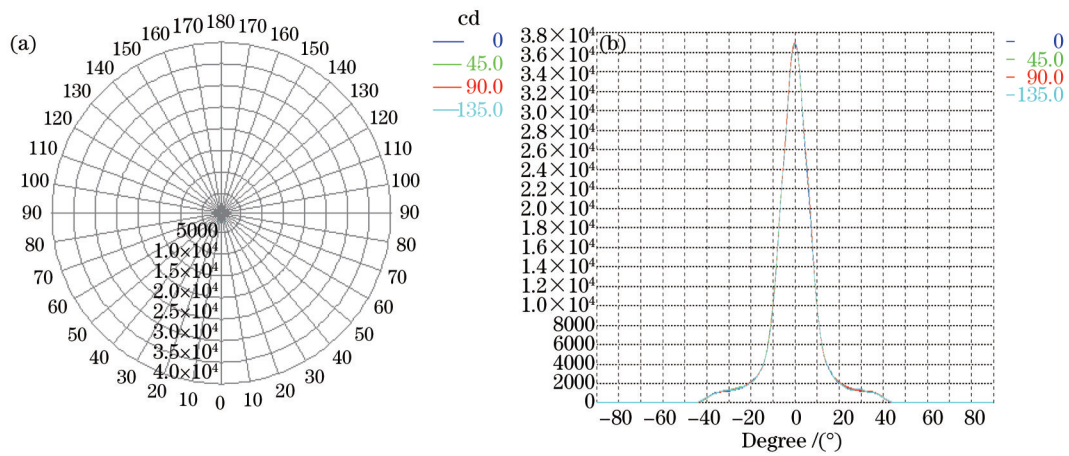


图3 (a)极坐标和(b)直角坐标光度分布图

Fig.3 Candela distribution of (a) polar and (b) rectangular coordinates

$$L_{ve} = 0.035L_{av} = 16.943 \text{ cd/m}^2, \tag{4}$$

$$L_{ve}^{0.9} = 12.767 \text{ cd/m}^2, \tag{5}$$

$$L_{v1} = 10 \sum_{i=1}^n \frac{E_{eyei}}{\theta_i^2}, \tag{6}$$

式中灯具数量 $n=1, \theta=14^\circ$, 故:

$$L_{v1} = 10 \times [(1195/2)/142] = 152.4235 \text{ cd/m}^2. \tag{7}$$

故其眩光值 G_R , 由(1)式计算可得:

$$G_R = 27 + 24 \lg \frac{L_{v1}}{L_{ve}^{0.9}} = 52.8 \quad (8)$$

通过计算得到该灯具的 G_R 值为 $52.8 > 30(35)$, 可知其眩光值远大于人眼所能接受的范围, 但无法满足体育照明的要求, 需做出合理的防眩光优化。

4 防眩光工矿灯

4.1 设计思路

普通 LED 工矿灯眩光高, 其主要原因是 LED 光源发光强度大, 且方向性强, 人眼直视 LED 光源时其眩光值必然很大。要使人眼看工矿灯不会有很大的眩光值: 1) 使人眼无法看到光源; 2) 增大发光面积。

基于这两点考虑, 设计通过在灯杯中加入二次反光体遮挡光源直射光线, 使其反射到反光杯内壁上, 这样只需优化自由曲面使内壁上照度均匀, 就能达到防眩光的效果。常见的二次反光面形状主要有抛物面、球面、双曲面以及自由曲面等, 在照明灯具设计中由于芯片发光的不规则分布导致规则形状的反光面往往难以实现较好的照明效果, 而自由曲面以其对光线精准的控制能力明显优于其他形状, 自由曲面能够实现对不同光线不同的曲率分布, 这一点在视觉分析中也得到进一步验证。

选择自由曲面作为二次反光面的整体设计方案主要包括: 工矿灯, 包括光源板、灯杯和呈漏斗型的自由曲面遮光体, LED 光源呈环形均匀分布在光源板上, 自由曲面工件置于灯杯内并遮挡住环形发光体直射向灯杯开口的光线, 调整自由曲面的形状直至得到最优结果。整体方案如图 4 所示, 工件实物如图 5 所示。

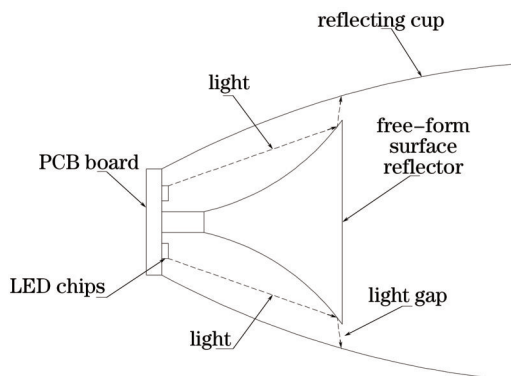


图 4 防眩光工矿灯的结构示意图

Fig.4 Structure of the anti-glare mining lamp



图 5 自由曲面反光件示意图

Fig.5 Schematic of the free-form surface reflector

4.2 优化分析

LED 照明灯具的光学设计主要方法有两种: 计算法和手调法。其中计算法是以计算机程序语言为基础进行精准的计算, 手调法则是在一定模型基础上进行手动调节直至满足需求。手调法相对于计算法速度较快, 且基本能够满足所有照明设计需求。计算法主要适用于点光源的一些准直透镜设计上, 在面光源的设计上设计结果与实际结果相差甚远。而现今的 LED 芯片以贴片式面光源为主, 因此业界很少使用计算法进行灯具设计。本文采用手调法进行设计^[7-10]。

将所设计的模型通过 SolidWorks 进行建模, 并且导入 TracePro 进行光线追迹。通过不断的调节自由曲面的特征曲线形状以及长度, 得到最优结果, 追迹结果如图 6、7 所示, 照度图中最小值为 7.6758×10^{-13} , 最大值为 431.86, 平均值为 43.745, 总光通量 4374.5 lm, 光通量/发射光通量为 0.97211。

由上述模拟结果分析得到: 该灯具的发光角度较小, 约为 36° , 接收面的最大照度为 431.86 lx。同理, 由 (1)~(6) 式计算其半光强角度的眩光值为

$$E_{\text{horav}} = \phi/S = 542.7, \quad (9)$$

$$L_{\text{av}} = E_{\text{horav}} \cdot \rho / \pi \Omega_0 = 69.100, \quad (10)$$

$$L_{\text{ve}} = 0.035 \cdot L_{\text{av}} = 2.418, \quad (11)$$

$$L_{v1} = 10 \sum_{i=1}^n \frac{E_{\text{eyei}}}{\theta_i^2}, \quad (12)$$

式中灯具数量 $n=1$, $\theta=36^\circ$, 故:

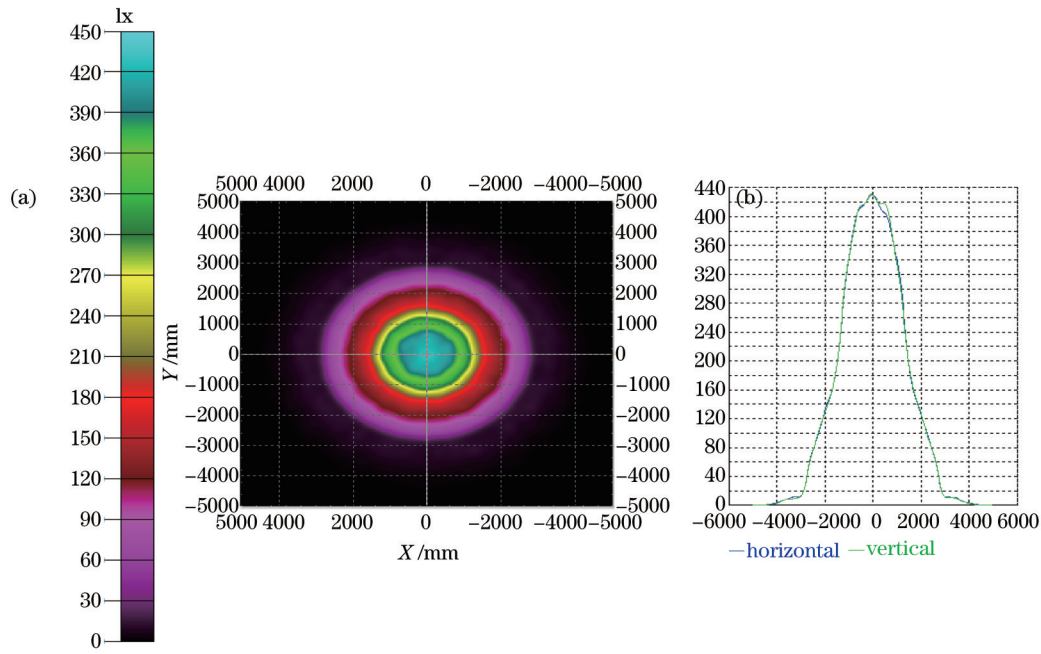


图6 优化后的(a)照度图及(b)其剖面曲线

Fig.6 Optimized (a) illumination map and (b) profile curve

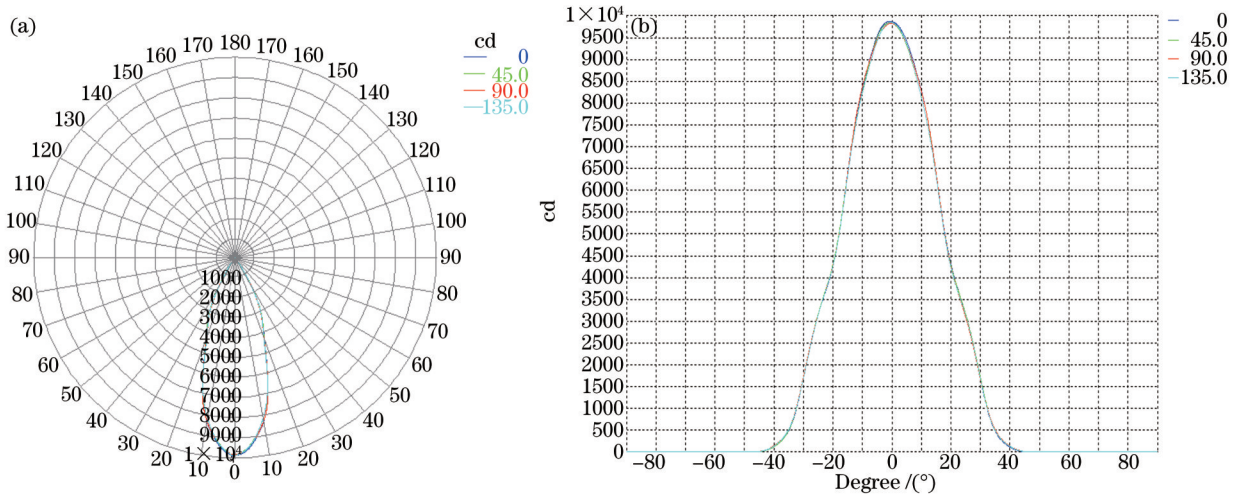


图7 优化后的(a)极坐标和(b)直角坐标光度分布图

Fig.7 Candela distribution of optimized (a) polar and (b) rectangular coordinates

$$L_{v1} = 10 [(431.86/2)/362] = 1.666 , \tag{13}$$

故其眩光值为

$$G_R = 27 + 24 \lg \frac{L_{v1}}{L_{ve}^{0.9}} = 24 . \tag{14}$$

通过计算得到该灯具的 G_R 值为 $24 < 30(35)$, 可知其眩光值已经小于体育照明的标准, 可以满足体育照明的要求。

4.3 视觉分析

通过上述计算分析, 可以得到结论: 经过优化的工矿灯, 眩光值远远小于优化前的工矿灯。并从人眼的视觉角度出发, 分析二者的区别。

1) 分析优化前的 LED 工矿灯。

此灯 LED 光源暴露的视野范围之内, 人眼可以直接看到 LED 芯片, 由于 LED 芯片的发光效率极高 (已经超过 150 lm/W , 实验室值已经大于 250 lm/W), 而芯片的尺寸又很小, 相当于人眼看到一点极亮的点光源,

通过计算可以得到芯片表面的照度值大于 $8 \times 10^8 \text{ lx}$,短时间会使人感到极其刺眼,长时间甚至会使人出现短暂失明等。

人眼除了可以直接看到光源外,还可以看到LED工矿灯的漫反射面(内壁),为了更加准确地衡量其照度值,通过软件模拟得到其照度分布图如图8所示,照度图中最小值为 4.2984×10^{-8} ,最大值为37747,平均值为14450,总光通量1319.6 lm,光通量/发射光通量为0.29324。

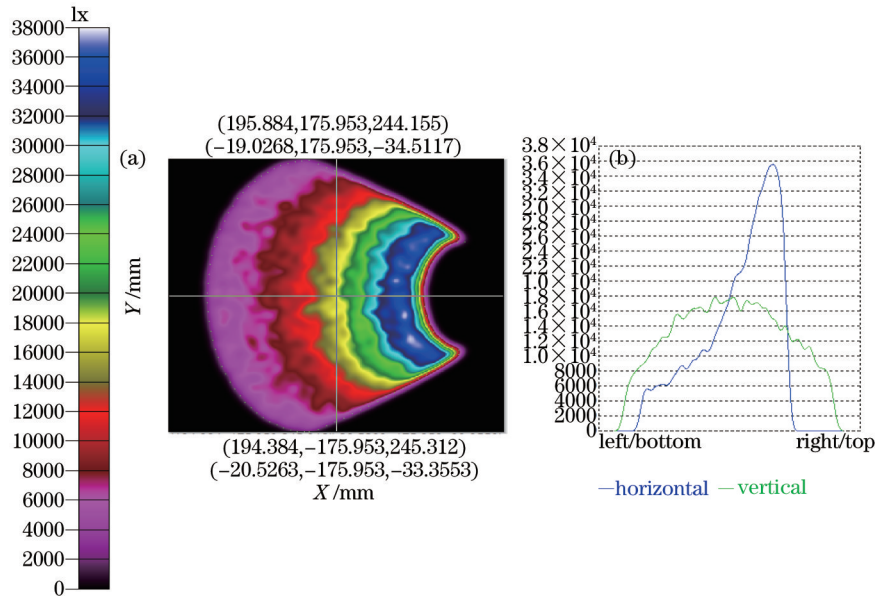


图8 优化前的灯杯内壁(a)照度图及(b)其剖面曲线

Fig.8 (a) Illumination map and (b) profile curve of inner surface before optimization

从图8可以看出,靠近灯杯底部照度值远大于灯杯边缘,其中最大值为37747 lx,平均值为14450 lx,其照度均匀度为: $E_{av}/E_{max}=0.383$,从其照度均匀度可以得到其照度分布非常的不均匀,人眼看到的也是中心极亮边缘较暗的分布,舒适度很差。

2) 分析优化后的LED工矿灯。

此时,人眼已经无法直接看到工矿灯的LED芯片,因此芯片的极大照度对人眼无直接影响,人眼可直接

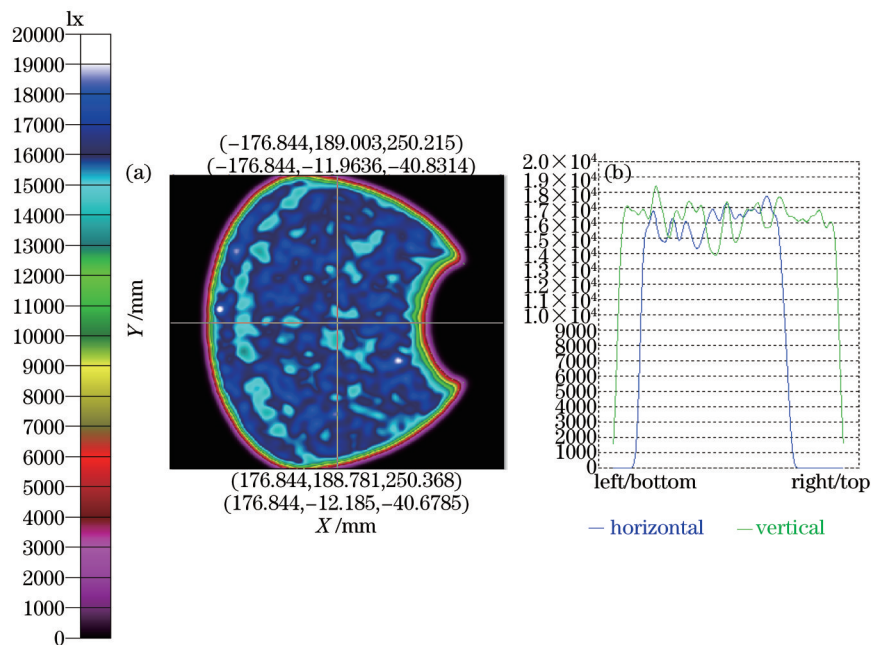


图9 优化后的灯杯内壁(a)照度图及(b)其剖面曲线

Fig.9 (a) Illumination map and (b) profile curve of inner surface after optimization

看到的是灯杯的内壁,同样通过软件模拟分析,得到其照度分布图如图9所示,照度图中最小值为 1.0913×10^{-8} ,最大值为 19355,平均值为 15949,总光通量 1695.7 lm,光通量/发射光通量为 0.37683。

从图9可以看出,靠近灯杯底部照度值与灯杯边缘照度值相当,其中最大值为 19355 lx,平均值为 15949 lx,其照度均匀度为 $E_{av}/E_{max}=0.824$,优化后的灯杯内壁的照度均匀度已经远大于原灯杯内壁,均匀度达到非常理想的效果。并且灯杯内壁的平均照度值相比于芯片表面已经大大降低,此时人眼看到的漫反射

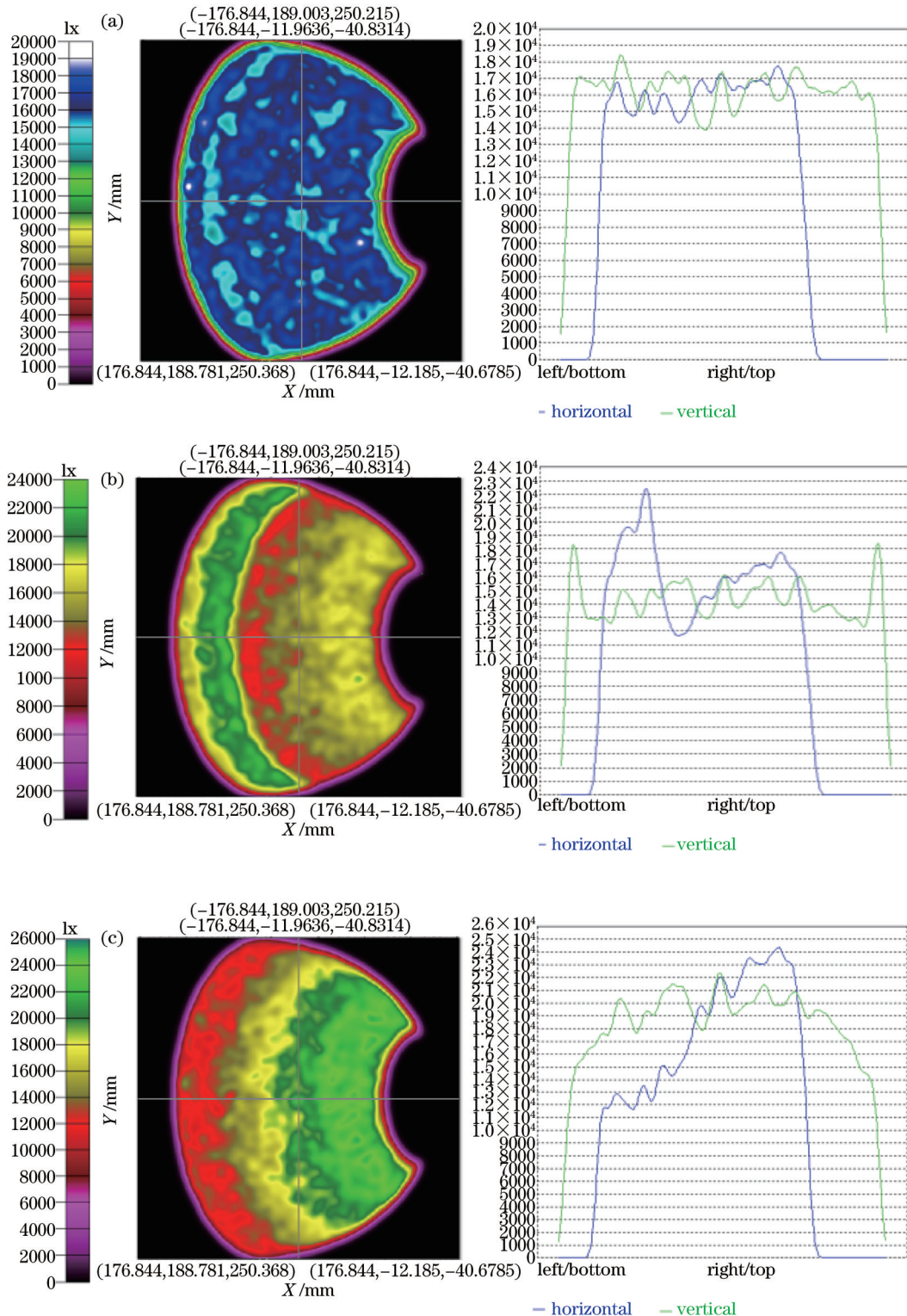


图10 不同曲面的灯杯内壁照度分布示意图。(a)自由曲面;(b)抛物面;(c)双曲面

Fig.10 Illumination map and profile curve of inner surface of different shapes. (a) Free-form surface; (b) paraboloid; (c) hyperboloid

光相当柔和,即使长时间看也不会有很大影响。

分析其中原因,不难发现通过将LED芯片发光(点光源)转换为灯杯内壁发光(面光源),加大发光面积的同时提高其照度分布均匀度,使得最后设计出来的工矿灯眩光值低于最低标准值,可以满足各类应用场景。

为了进一步验证自由曲面的优越性,还将其与抛物面、双曲面等自由曲面进行优化对比,得到结果如图10所示。从图中可以明显地看出,抛物面、双曲面的设计结果比自由曲面设计结果要差很多。

5 结 论

在工矿灯中间加入漏斗形自由曲面反光件遮挡光源,使原来直射到人眼的光线先反射到灯杯内壁再漫反射到人眼,并优化漏斗形自由曲面反光件的外表面形状,使工矿灯的内壁照度均匀,此时人眼直接看到的内壁照度值远远小于人眼直视光源的照度值。

通过计算对比,优化前的工矿灯眩光值为52.8,远大于体育照明的要求,无法直接使用在体育照明中;优化后的工矿灯眩光值为24,小于体育照明的标准值,已经能够满足体育照明的需求。通过视觉分析,优化前灯杯内壁的照度均匀度仅为0.383,优化后灯杯内壁照度均匀度达到0.824,已经达到了很好的均匀性和视觉舒适性。与现有灯具比较,防眩光优势突出,市场前景广阔。

参 考 文 献

- 1 Li Linhong. Study on heat transfer for the high-power led modules and high bay lamp[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 20-35.
李琳红. 大功率LED模组及工矿灯散热分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 20-35.
- 2 He Penglin, Sun Yue, Zhong Li. Glare evaluation system of outdoor sports and area lighting(CIE Technical Report No.112-1994)[J]. China Standards Review, 2008, 4: 13-16.
何鹏林, 孙岳, 钟栗. 室外运动场地和区域照明的眩光评价系统(CIE技术报告 No.112-1994)[J]. 中国标准导报, 2008, 4: 13-16.
- 3 Kawakami K, Kohko S, Uozumi T. Applicability of CIE's Glare (GR) evaluation system for outdoor facilities to indoor sports facilities[J]. Journal of Light & Visual Environment, 1999, 23(2): 31-37.
- 4 Li Binghua, Wang Yuqing. Guide to the lighting of modern sports venues[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 150-165.
李炳华, 王玉卿. 现代体育场馆照明指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 150-165.
- 5 Wang Ke, Pan Ning, Liu Chunwang. Discussion of the glare rating and the color rendering index of lighting system for the 11th national games stadium[J]. Intelligent Building, 2010, 3: 28-31.
王可, 潘宁, 刘春旺. 第11届全运会体育馆场地照明系统眩光指数及显色指数测量方法的探讨[J]. 智能建筑, 2010, 3: 28-31.
- 6 Luo Tao, Yao Mengming, Yao Meng. Study of glare evaluation system for indoor sports lighting[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2008, 2(1): 19-23.
罗涛, 姚梦明, 姚萌. 室内体育馆照明的眩光评价系统研究[J]. 智能建筑电气技术, 2008, 2(1): 19-23.
- 7 Li Lin, Li Guangzhen, Wang Lili, *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222002.
李林, 李光珍, 王丽莉, 等. 实现均匀照明的LED系统设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222002.
- 8 Qian Keyuan, Hu Xiaojia. Study of the optical systems with illuminance and luminance uniformity simultaneously for LED lighting[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0208001.
钱可元, 胡晓佳. 同时实现路面照度与亮度均匀性的LED光源光学系统研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0208001.
- 9 Hao Jian, Liu Hua, Sun Qiang, *et al.*. Optimization of freeform surface lens for collimating illumination of led[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 032302.
郝剑, 刘华, 孙强, 等. LED自由曲面准直透镜的优化设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 032302.
- 10 Zheng Yunfei, Yan Yu, Li Xiangning, *et al.*. A vector design method for led cyclorama light based on light curves[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 112201.
郑云飞, 闫钰, 李湘宁, 等. 一种基于配光曲线的LED天幕灯矢量设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 112201.

栏目编辑: 张雁