

面向篮球场的新型LED照明光源的设计与研究

王至知^{1*}, 焦飞宇², 张博², 马丙戌²

¹南京工程学院, 材料科学与工程学院, 江苏 南京

²华南理工大学, 材料科学与工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2022年2月7日; 录用日期: 2022年3月24日; 发布日期: 2022年3月31日

摘要

在篮球运动日益发展的今天, 对篮球场馆室内设施提出了更高的要求, 此类视觉状态对整体比赛状态影响重大。为了满足如今篮球场馆照明效果日趋提高的要求, 针对室内篮球场馆传统灯具光学结构粗放、照明效果差等问题, 结合篮球场馆的实际情况提出了一种新型的应用于室内篮球场馆的LED光源。在借鉴LED面光源的基础上, 利用新型的复合型聚光器, 将LED发出的光线汇聚并掠射在出光面板上, 在理论分析结构参数对于照明效果影响的前提下, 借助Tracepro软件进行模拟研究, 首先模拟聚光器和LED组成的光源模块在不同掠射角度下获得的光斑面积和均匀度, 发现0°掠射角下获得较大的光斑面积和光斑均匀度, 并以此为基础进行整灯设计并模拟研究, 获得了一个均匀度92.17%的高均匀度LED光源。

关键词

篮球场照明, 光学设计, LED光源, 聚光器, Tracepro

Design and Research of New LED Lamp Used in Basketball Court

Zhizhi Wang^{1*}, Feiyu Jiao², Bo Zhang², Bingxu Ma²

¹School of Materials Science and Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu

²School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong

Received: Feb. 7th, 2022; accepted: Mar. 24th, 2022; published: Mar. 31st, 2022

Abstract

With the development of basketball today, higher requirements are put forward for indoor facilities of basketball stadiums. This kind of visual state has a great impact on the overall state of the game. In order to meet the requirements of improving the lighting effect of basketball stadiums, aiming at the problems of extensive optical structure and poor lighting effect of traditional lamps in indoor basketball stadiums, a new LED light source applied in indoor basketball stadiums was proposed in combination with the actual situation of basketball stadiums. Based on the LED sur-

*通讯作者。

文章引用: 王至知, 焦飞宇, 张博, 马丙戌. 面向篮球场的新型 LED 照明光源的设计与研究[J]. 光电子, 2022, 12(1): 31-42. DOI: 10.12677/oe.2022.121004

face light source, a new type of composite concentrator is used to concentrate and sweep the light emitted from LED onto the light emitting panel. Under the premise of theoretical analysis of the influence of structural parameters on the lighting effect, the simulation study is carried out with the help of Tracepro software. Firstly, the area and uniformity of the spot obtained by the light source module composed of the concentrator and the LED at different grazing angles are simulated. It is found that a larger area and uniformity of the spot are obtained at 0° grazing angle. Based on this, a high uniformity LED light source with 92.17% uniformity is designed and simulated.

Keywords

Basketball Court Lighting, Optical Design, The Led Light Source, The Condenser, Tracepro

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来篮球逐渐成为不同年龄段人群所喜欢的体育运动,随着篮球运动的深入发展,专业性的室内训练、教学场地的建设此起彼伏,同时也对篮球场内部设施提出了更高的要求。对于对抗激烈,需要在短时间内做出迅速、准确反应的篮球运动,保证比赛和训练过程中的视觉状态至关重要[1] [2],而实现这一点的关键就在于场馆内部光源的选择和相关的照明设计。目前的非专业型篮球场馆多采用常见的工矿灯,或者大功率筒灯,虽然这些光源可靠性高,但是对于当今节奏日趋加快的篮球比赛,传统灯具带来严重的场地重影以及照度分布不均等低劣的照明效果[1] [2],难以满足篮球比赛和训练的需求,甚至在此照明环境中会带来运动员的视觉疲劳,严重影响比赛发挥[3]。

为此,本文在借鉴侧入式LED平板灯[4]-[9],特别是无导光板LED平板灯的设计的基础上[7] [8] [9],利用一种复合式新型聚光器初步对LED发出的光线进行汇聚,进而掠射在出光面板上,达到均光目的,进而设计并制备出面向篮球场馆的具有高均匀度的新型LED面光源,掠射均光理念虽然大幅度提高均匀度但是会使得光线较为发散,进而限制了此理念在大功率LED平板灯[4] [5] [6]和高亮度背光源[6] [10] [11]中的发展,但是篮球场LED光源设计中,对于灯具的要求恰恰是对亮度要求较低但是对均匀度要求极高,并且需要尽量地避免光源和人眼的直接接触。与此同时,灯具若亮度过于集中,也会在某一角度带来较高的眩光值[3],这是目前体育场馆照明设计所极力避免的问题。这种掠射均光理念在体育场馆高均匀度光源的设计中具有广阔的应用前景。作为汇聚光斑掠射理念的关键部分,起到光线汇聚作用的光学元件的设计至关重要,但是目前的聚光器多为复杂的菲涅尔透镜结构的派生产物[12],导致已有的设计结构略显复杂,降低了灯具的可靠性。基于以上问题,本文在提出一种复合抛物面反射器(CPC) [13] [14] [15] [16] [17]和管状反射器相结合的新型复合聚光器的基础上,进一步利用掠射均光理念设计了一种新型的高均匀度室内篮球场照明灯具,通过Tracepro光学模拟软件进行模拟实验[7] [8] [9] [12]-[17],优化各个参数对于整灯照明效果的影响,设计了一款结构简单、照明效果优越的新型篮球场LED光源。

2. 设计原理与理论分析

2.1. 结构模型

本文所述新型光源的整灯内部结构如图1所示,主要包括LED灯珠、包含了复合抛物面反射器和管状反射器的新型聚光器、出光面板及后面板。其中,LED灯珠发出的发散光束,经聚光器会聚并掠射在出光

面板上。出光面板为透射型扩散板，后面板为漫反射板。由于灯体空腔种没有像 LED 平板灯以及背光源那样的导光板元件，进而大幅度避免了由于光线在光学元件种的多次耦合和吸收带来的光能衰减，提高了整体的光效，简单的结构保证了灯具在使用过程中的可靠性。另外值得注意的是无论 LED 平板灯还是背光源的设计，在兼顾照明效果的前提下，窄边框和超薄的设计都是一个极具挑战的难题，这是处于美观和功能性上的考虑。但是本文研究的面向篮球场的 LED 光源不存在这一问题，这也就使得本文设计的灯具的光学构架具有更大的扩展空间，可以在后续的应用研究中针对功率的提升和受照面积的增大，进行更加灵活的调整。

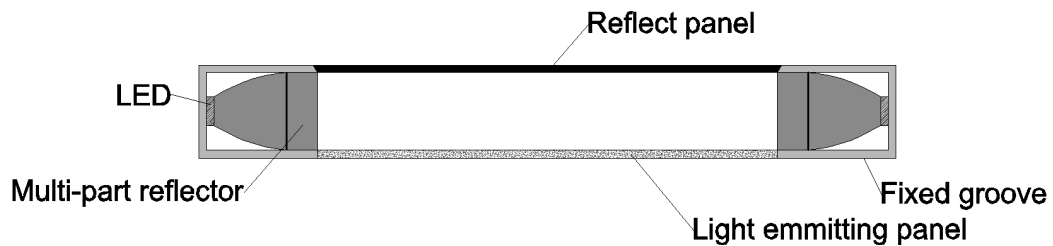


Figure 1. Structure model of this light
图 1. 整灯结构图

2.2. 新型聚光器的设计原理

本文所述新型聚光器，为一种 CPC 反射器和管状反射器组成的复合型聚光器。首先借助文献[17]对 CPC 建模的几个重要参数进行推导，图 2 中 ω_{\max} 为最大接收角， H 为 CPC 高度， R_1 为出口半径， R_2 为入口半径。

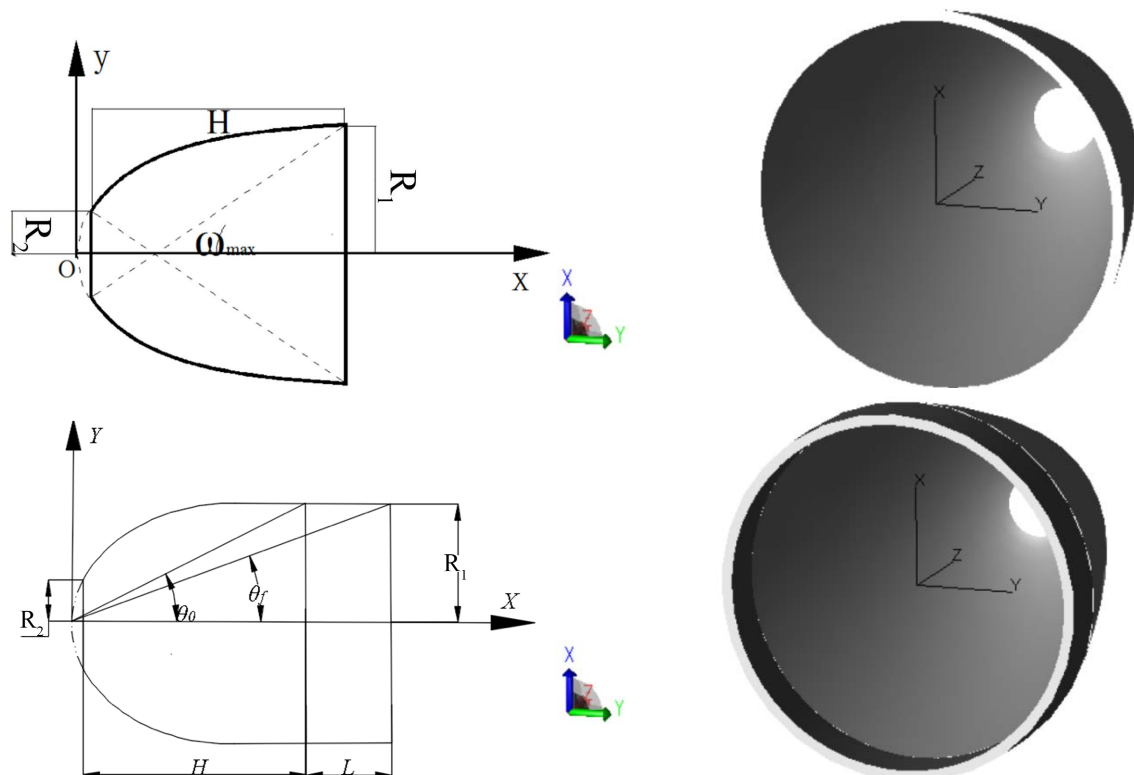


Figure 2. The diagram to analyze the reflector
图 2. 聚光器理论分析图

反射器的接收角[17]定义为边缘光线被反射器反射一次后出射在接收器边缘时的入射光线与垂直方向的夹角 ω , 最大接收角 ω_{\max} 。文献[15]给出了反光杯各关键参数与最大接收角之间的关系式(f 为 CPC 的焦距):

$$\omega_{\max} = \arcsin\left(\frac{f}{R_1} - 1\right) \quad [15] \quad (1)$$

$$f = \frac{\sqrt{H^2 + (R_1 + R_2)^2} - 1}{2} \quad [15] \quad (2)$$

在已知出口半径 R_1 , 入射口半 R_2 , 并根据实际情况设定高度 H 的前提下, 可以根据(3), (4)式计算出焦距 f 和最大聚光角 ω_{\max} 。如图 3 所示当采用 CPC 对光线进行汇聚时, θ_0 为 CPC 所能反射的最小 LED 出光角, 其计算公式如(5)式, 这样 LED 发出的出光角 $\theta < \theta_0$ 的光线将不会受到反射, 这一部分光线将以发散的形式发出, 又由于本设计是利用掠射原理达到均匀出光的效果, 这一部分发散光势必会使得出光面两侧的照度大幅度升高, 降低灯具的均匀性, 因此我们提出了在 CPC 的前端加上一段管状反射器用以对这一部分未反射的光线进行处理, 达到削减出光面靠近边缘一侧照度值的目的, 管状反射器的原理是通过增加一段长度为 L 的管状反射器, 对出光角度在 θ_0 到 θ_f 之间的光线进行反射处理, 提高了反射器的反射效率, 进而通过改变管长 L 的值, 可以改变反射器最大反射角度 θ_f , 使反射器的反射效率不断提升, 但是随着管长的增加, 必将会对出光面板上靠近边缘的光线产生遮挡, 削弱边缘部分的照度值使得均匀度下降, 甚至会出现中间亮周围出现暗环的现象, 因此需要合理的设置管状反射器的长度。

$$\theta_0 = \arctan \frac{R_1}{H} \quad (3)$$

$$\theta_f = \arctan \frac{R_1}{L + H} \quad (4)$$

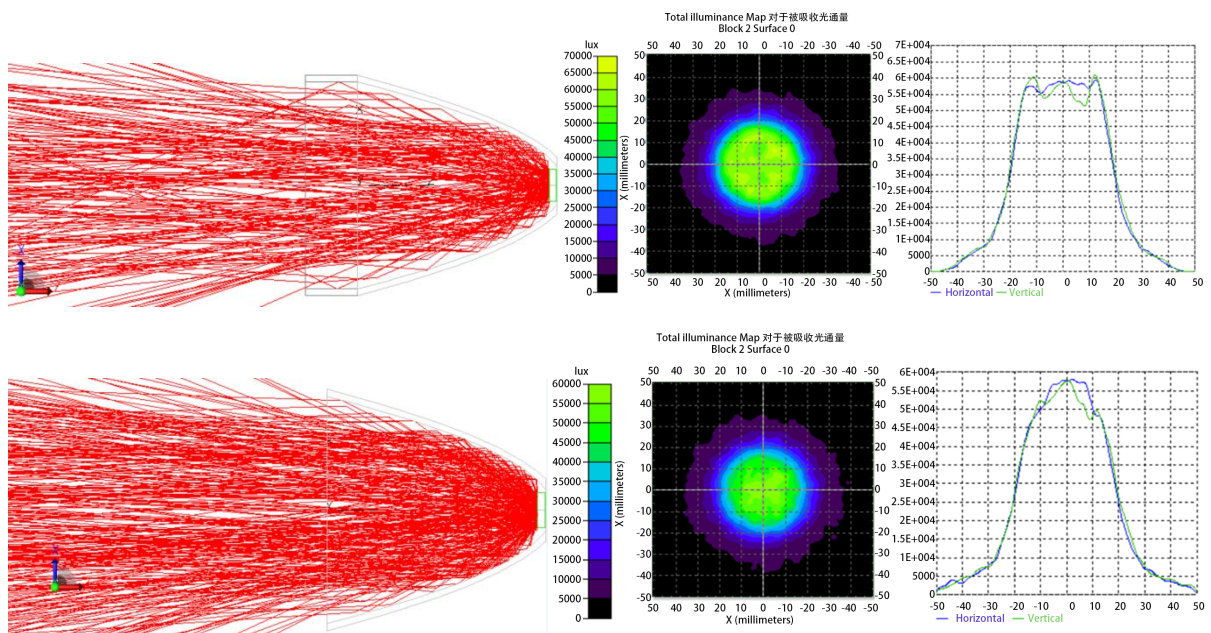


Figure 3. Schematic of designing tubular reflector
图 3. 管状反射器设计原理图

2.3. 整灯设计原理

进一步从一个光源模块(一个 LED 灯珠和一个与之对应的聚光器组成)上升到整灯设计, 需要考虑的关键性因素就是光源模块的排列, 光源模块发出的光线以照度圆的形式叠加, 排列方式决定了照度圆的叠加情况, 和混光暗区的分布以及大小。为了大幅度削减出光面板上混光暗区提高出光均匀度, 采用如图 4 所示的光源模块对称双边线形排列的方式。设在灯具两个侧边均有 N 个光源模块沿 x 方向等间距排列, 间距为 d , 光源模块光轴方向与 z 轴夹角即投射角为 α , 灯具宽度为 l 。将 LED 辐射照度分布近似朗伯分布处理[18] [19] [20]。

$$E(r, \theta) = E_0(r) \cos(\theta) \quad (5)$$

经过 CPC 反光杯汇聚后, 在 xz 平面和 yz 平面照度分布均为压缩的朗伯分布

$$E(x, y_0, z, \theta) = E_0(x, y_0, z) \cos\left(\frac{\pi}{2\theta_{\max 1}} \theta\right) \quad (6)$$

$$E(x_0, y, z, \theta) = E_0(x_0, y, z) \cos\left(\frac{\pi}{2\theta_{\max 2}} \theta\right) \quad (7)$$

$\theta_{\max 1}$ 和 $\theta_{\max 2}$ 为光源模块在 xz 、 yz 平面上的发散角。根据叠加原理, 可得面板上任一点 (x, y, z) 的照度 $E(x, y, z)$ 公式为

$$E(x, y, z) = \frac{A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \left| y \sin \alpha + z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} \cos \alpha \right|}{\sum_{n=1}^N \left\{ \left[x - (N+1-2n) \left(\frac{d}{2} \right) \right]^2 + \left(y \cos \alpha - z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} \sin \alpha \right)^2 + \left(y \sin \alpha + z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} \cos \alpha \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

$$+ \frac{A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \left| y \sin(\pi - \alpha) + \left(z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} - 1 \right) \cos(\pi - \alpha) \right|}{\sum_{n=1}^N \left\{ \left[x - (N+1-2n) \left(\frac{d}{2} \right) \right]^2 + \left(y \cos(\pi - \alpha) - \left(z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} - 1 \right) \sin(\pi - \alpha) \right)^2 + \left(y \sin(\pi - \alpha) + \left(z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} - 1 \right) \cos(\pi - \alpha) \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}$$

式中: L_{LED} 是 LED 芯片的辐射照度; A_{LED} 是 LED 芯片的发光面积。 N 为灯具一侧光源模块的数量, 光源模块沿 x 方向等间距排列, d 为光源模块间距, α 为投射角即光源模块光轴方向与 z 轴夹角, l 为灯具宽度。由于光源模块发出的光线都以压缩的照度圆的叠加方式进行混光, 因此随着光源模块间距 d 的加大, 会造成两个照度圆交叠面积下降, 进一步影响灯具的照度与均匀度。为了获得最大的照度和均匀度应使得照度圆具有最大的交叠面积, 所以光源模块间距选择 0 mm, 即光源模块紧密排列。则此时面板上任一点 (x, y, z) 的照度 $E(x, y, z)$ 公式为:

$$E(x, y, z) = \frac{A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \left| y \sin \alpha + z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} \cos \alpha \right|}{\sum_{n=1}^N \left\{ \left(y \cos \alpha - z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} \sin \alpha \right)^2 + \left(y \sin \alpha + z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} \cos \alpha \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

$$+ \frac{A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \left| y \sin(\pi - \alpha) + \left(z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} - l \right) \cos(\pi - \alpha) \right|}{\sum_{n=1}^N \left\{ \left(y \cos(\pi - \alpha) - \left(z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} - l \right) \sin(\pi - \alpha) \right)^2 + \left(y \sin(\pi - \alpha) + \left(z \frac{\pi}{4\theta_{\max 1} \theta_{\max 2}} - l \right) \cos(\pi - \alpha) \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}$$

由(9)式可见, 投射角 α , 灯具宽度 l , 光源模块数量 N 等都将对出光面板上的照度产生影响, 每一点处的照度随着灯具宽度 l 的增大, 出光面板上某一点 (x, y, z) 的照度将减小, 进一步的将会影响面板上的平均照度和最大/最小照度, 而根据均匀度的计算公式: 均匀度 = 最小照度/平均照度, 因此 l 的变化同时也将对均匀度造成影响。投射角 α 的变化会带来光斑大小的变化, 进而影响在出光面上照度的分布, 借助(9)式可以定量的对 α 对于每一点处照度的影响进行分析, 因此 α 的变化同样会带来照度和均匀度的变化。

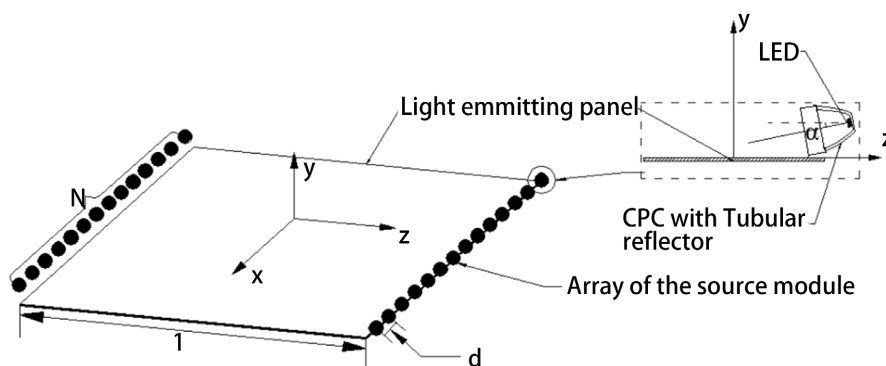


Figure 4. This light's simple model to analysis
图 4. 灯具简易理论分析模型图

3. 实验与分析

3.1. 聚光器的实验与分析

我们在进行整灯实验前, 首先借助 Tracepro 软件对聚光器进行实验与分析, 根据 2.2 和 2.3 的分析, 我们首先研究了在不同角度下管状反射器管长对光斑长度的影响。图 5(a)给出了单个光源模块(一个 LED 灯珠和一个聚光器, LED 模型参数, 4 mm (长) × 4 mm (宽) × 1.5 mm (高), 发光效率为 90 lm/W, 功率为 1 W, 发光面出射光线 20,000 条)在掠射角度分别为 0°、1°、2°、3°下, 掠射光斑的长度随管状反射器长度的变化情况, 其中我们发现当掠射角度为 0°时, 掠射光斑的长度在管状元件的长度为 4 mm 和 5 mm 时达到最大值, 为 106 mm, 其余几个掠射角度下的掠射光斑的长度均随着管状元件的增长呈缓慢的下降趋势, 并且光斑长度始终小于 95 mm。进一步需要研究光斑均匀度的变化情况, 如图 5(b)给出了在掠射角度分别为 0°、1°、2°、3°下, 掠射光斑均匀度随管状反射器长度的变化情况, 总体上我们可以发现随着管状元件的增长, 均匀度基本呈先上升后下降的趋势, 其中当掠射角为 1°, 管长 4 mm 时出现均匀度最大值为 67.43%, 其次是掠射角为 0°, 管长 5 mm 时的光斑均匀度为 65.87%, 并且在不同的掠射角下, 较大的均匀度基本上都在管长为 4 mm 或者 5 mm 处取得。由于在整灯设计时要综合考虑光斑长度和均匀度, 因此, 我们选定管长为 5 mm 的管状元件进行灯具的设计, 并且设定掠射角度为 0°。这一点也可以从照度均匀度的角度定性分析为在一定的厚度 h 下随着 α 增大, 更多的光线以大角度投射在出光面板上, 也即导致掠射并叠加在出光面板上的照度圆面积减小从而带来了出光面板中央部分由于叠加面积小而照度下降, 靠近光源一侧由于叠加面积大而照度增大, 进而导致两侧过亮、中央过暗而产生均匀度降低, 因此要在投射角 α 最小值处取得均匀度的最大值, 进而需要设定投射角为 0°, 这一分析与图 5 的实验结果想吻合, 即对应任意管状反射器长度, 投射角为 0°时的均匀度最大。并且利用 Tracepro 研究一系列光源模块(15 个/列, 一个模块为一个聚光器和一个 LED, LED 在模型中设定参数为 4 mm (长) × 4 mm (宽) × 1.5 mm (高), 发光效率为 90 lm/W, 功率为 1 W, 发光面出射光线 20,000 条)。从不同的角度照射在出光面板上后的照度分布情况发现, 反射器对 LED 的发散光线进行汇聚后投射在垂直于出光轴的平面上呈现为细长条形光斑如图 6(a), 而掠射在几乎平行于出光轴的平面上呈现为矩形光斑, 如图 6(b)。

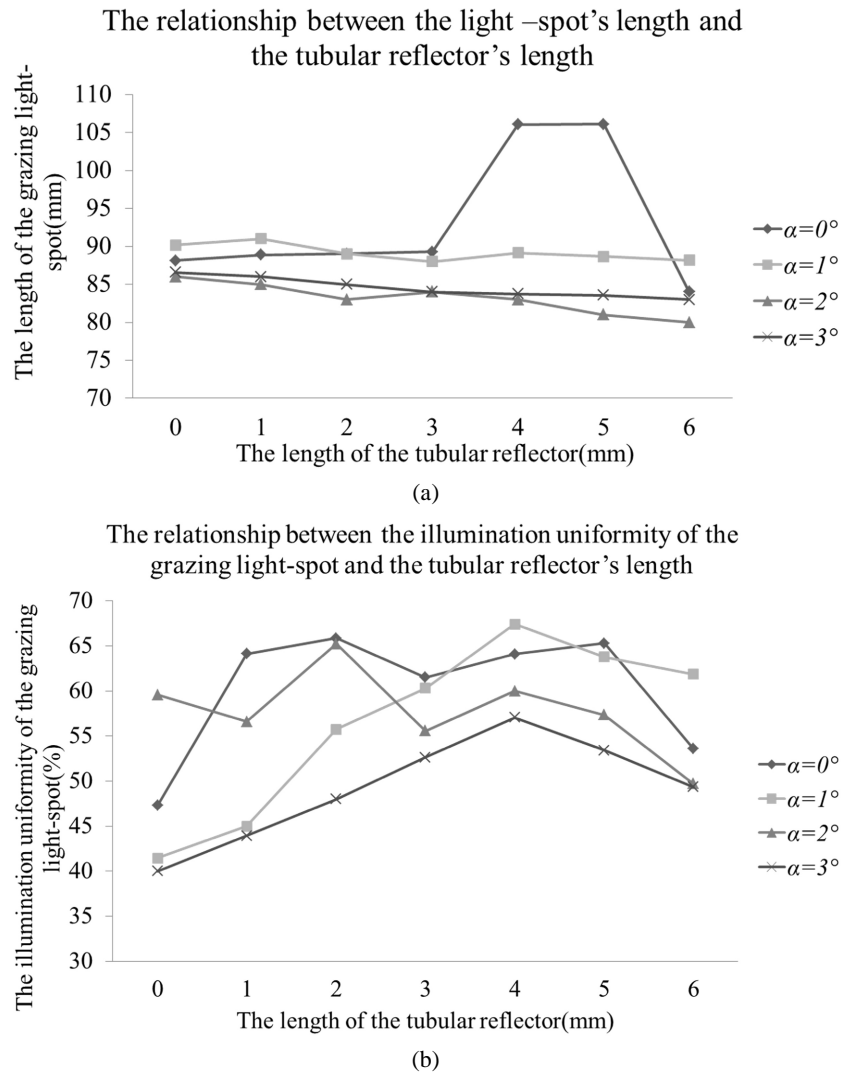


Figure 5. The relationship between (a) the light-spot’s length & (b) the light-spot’s illumination uniformity and the tubular reflector’s length

图 5. 管状元件长度对(a)掠射光斑长度和(b)掠射光斑均匀度的影响

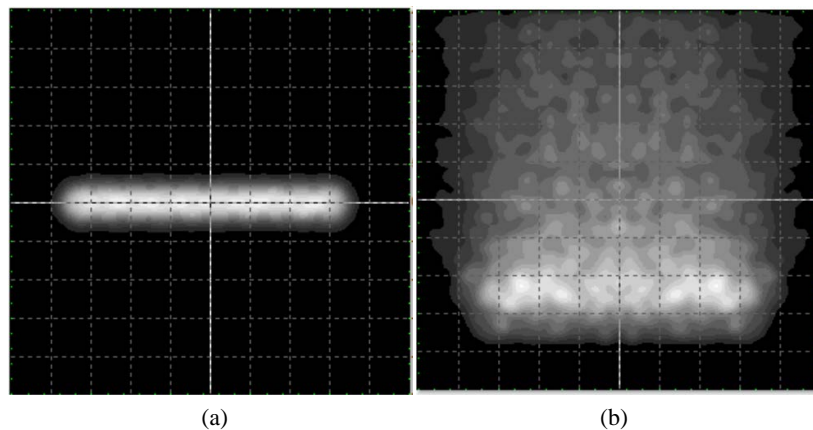


Figure 6. The output beam spot of reflector (a) vertical irradiation (b) grazing irradiation

图 6. 反光杯输出光斑图(a)垂直照射(b)掠射

3.2. 整灯实验与分析

根据 3.1 的实验结果，我们需要对式(9)做进一步修正，由于掠射角度通过实验确定为 0° 因此可得此时出光面板上任意一点 (x, y, z) 的辐射照度 $E(x, y, z)$ 变为：

$$E(x, y, z) = \frac{A_{LED} L_{LED} \left| z \frac{\pi}{4\theta_{max1}\theta_{max2}} \right|}{\sum_{n=1}^N \left\{ y^2 + \left(z \frac{\pi}{4\theta_{max1}\theta_{max2}} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} + \frac{A_{LED} L_{LED} \left| z \frac{\pi}{4\theta_{max1}\theta_{max2}} - l \right|}{\sum_{n=1}^N \left\{ y^2 + \left(z \frac{\pi}{4\theta_{max1}\theta_{max2}} - l \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (10)$$

根据(10)式可得，此时整灯的出光效果仅与厚度和光源阵列的间距 l 和灯具厚度 h 有关(整灯设计中光源阵列分别在出光面板两侧，每列 15 个模块)，因此进一步研究了在不同光源阵列间距 l (180 mm, 190 mm, 200 mm, 210 mm, 220 mm)下，照度均匀度随灯具厚度 h 的变化情况，如图 7 所示。在阵列间距 l 取 180 mm, 190 mm, 200 mm, 210 mm, 220 mm 时研究厚度 h 对灯具平均照度的影响，实验结果如图 8 所示。从图 7 我们可以发现，随着灯具厚度的增加，四种间距下灯具的均匀度均出现了先增大后迅速下降，而后再略微上升并且趋于稳定的趋势，这是因为在对应 $\alpha = 0^\circ$ 的前提下，在厚度 h 增大的过程中出光面板上照度圆的叠加面积将会出现先增大后减小的过程，并且最后由于受限于出光面的面积，叠加状态会趋向于稳定，因此叠加面积最大的位置将在 h 变化过程中的某一中间值处取得，并且会出现如图 7 所示的均匀度先增大后下降最后基本趋于稳定的现象。而且在厚度超过 16 mm 后，均匀度基本都下降到 80% 以下，甚至远低于 80%；而对于厚度对于照度影响则没有对于均匀度的影响大，随着厚度的变化平均照度值缓慢下降，并随着厚度的逐渐增加又出现了略微的上升或者趋于稳定，且对于不同的宽度，其平均照度值基本都维持在 25,000~40,000 lux 之间。对于平板灯的设计要综合考虑其照度和均匀度，因此对于灯具宽度 $l = 180$ mm, 190 mm, 200 mm, 210 mm, 220 mm 时拥有较高照度和均匀度时所对应的厚度 h 分别为 $h = 14$ mm, 12 mm, 14 mm, 14 mm, 14 mm，其对应的照度分别为 89.97%、85.12%、90.07%、87.03%、90.05%，均匀度分别为 34,689 lux、33,870 lux、34,010 lux、34,970 lux、39,280 lux 其模拟照明效果图如图 9 所示，最优的效果在 $l = 200$ mm, $h = 14$ mm 时的照明效果，其均匀度达到 92.17%，完全达到甚至远超过市面上常用的任意一款体育场馆的 LED 照明灯具。

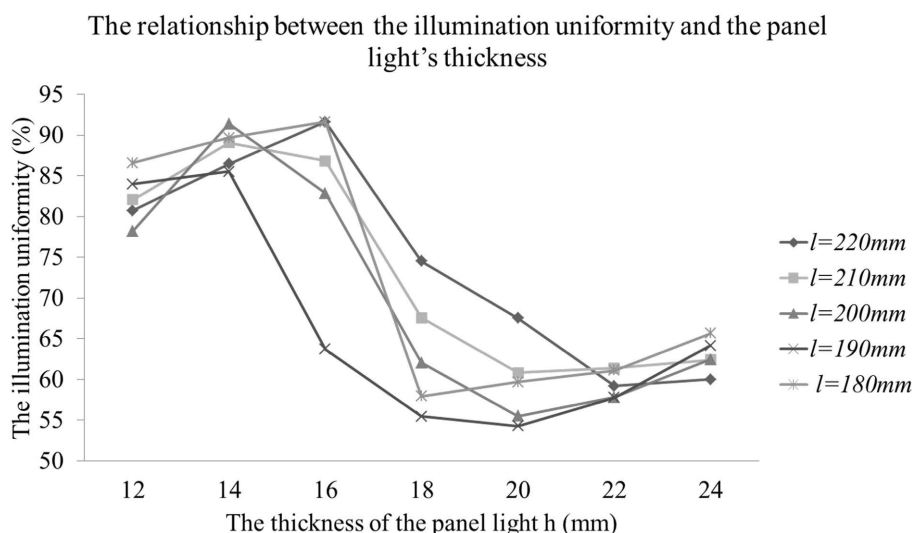


Figure 7. The relationship between the illumination uniformity and the panel light's thickness
图 7. 不同灯具宽度下灯具厚度对于均匀度的影响

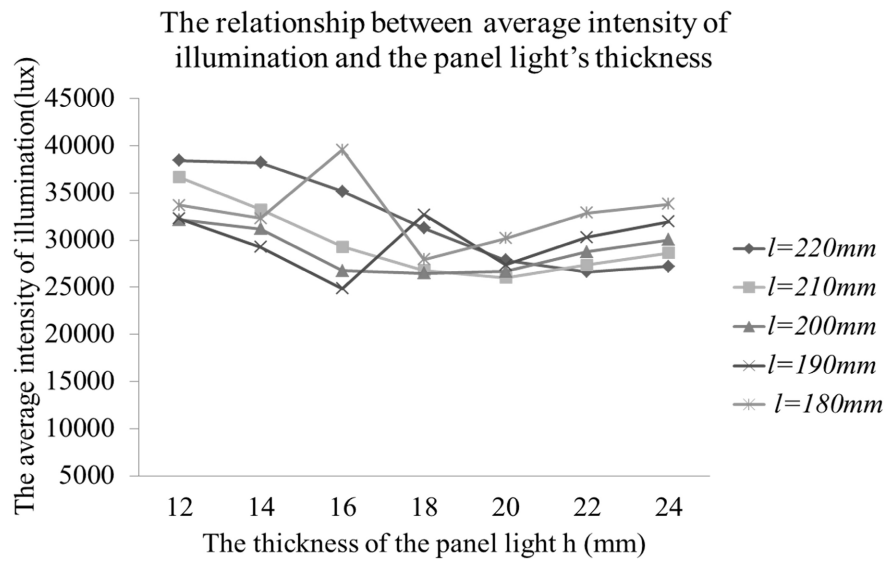
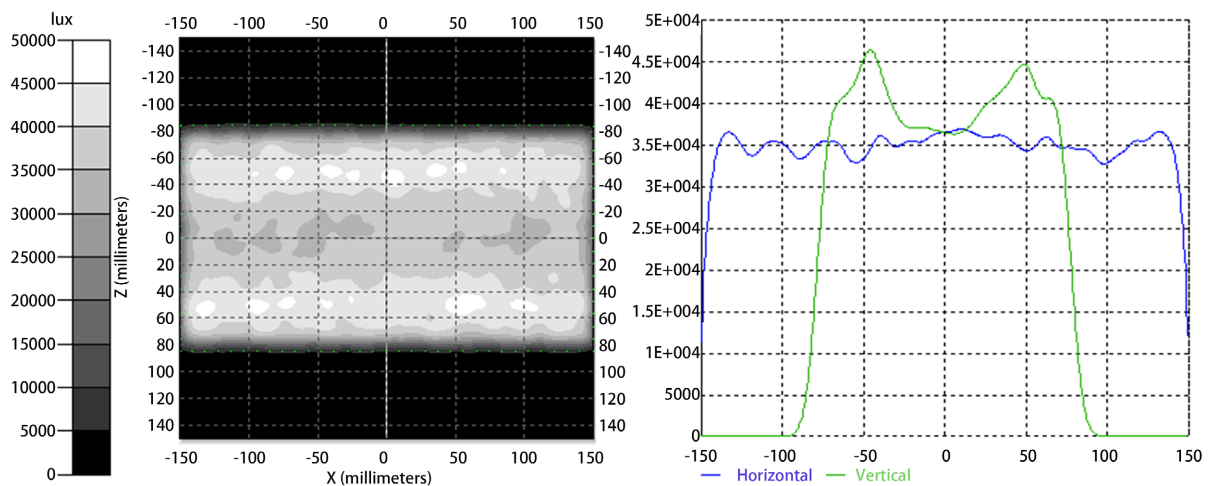
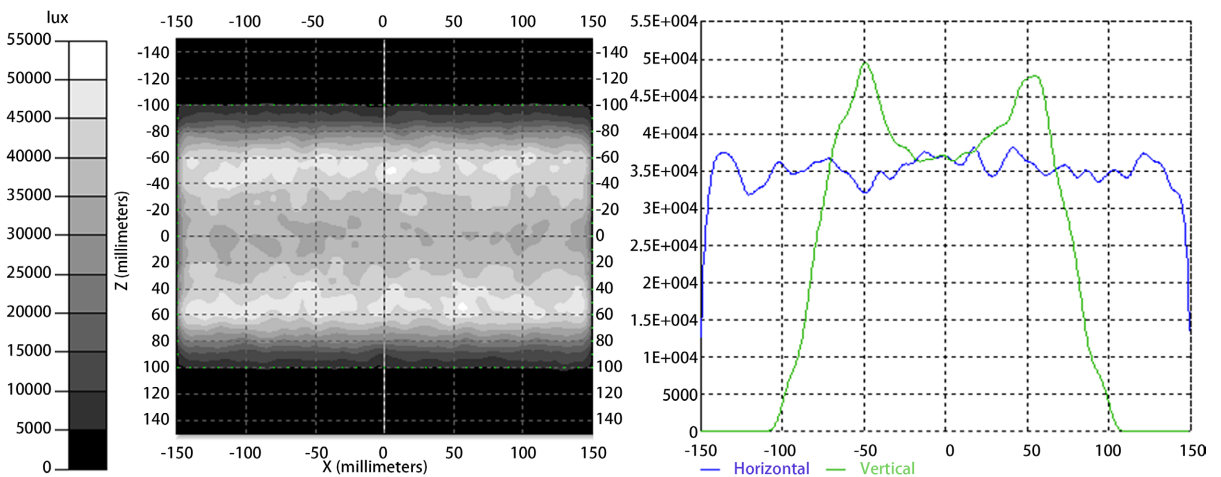


Figure 8. The relationship between average intensity of illumination and the panel light's thickness

图 8. 不同灯具宽度下平均照度随灯具厚度的变化



(a)



(b)

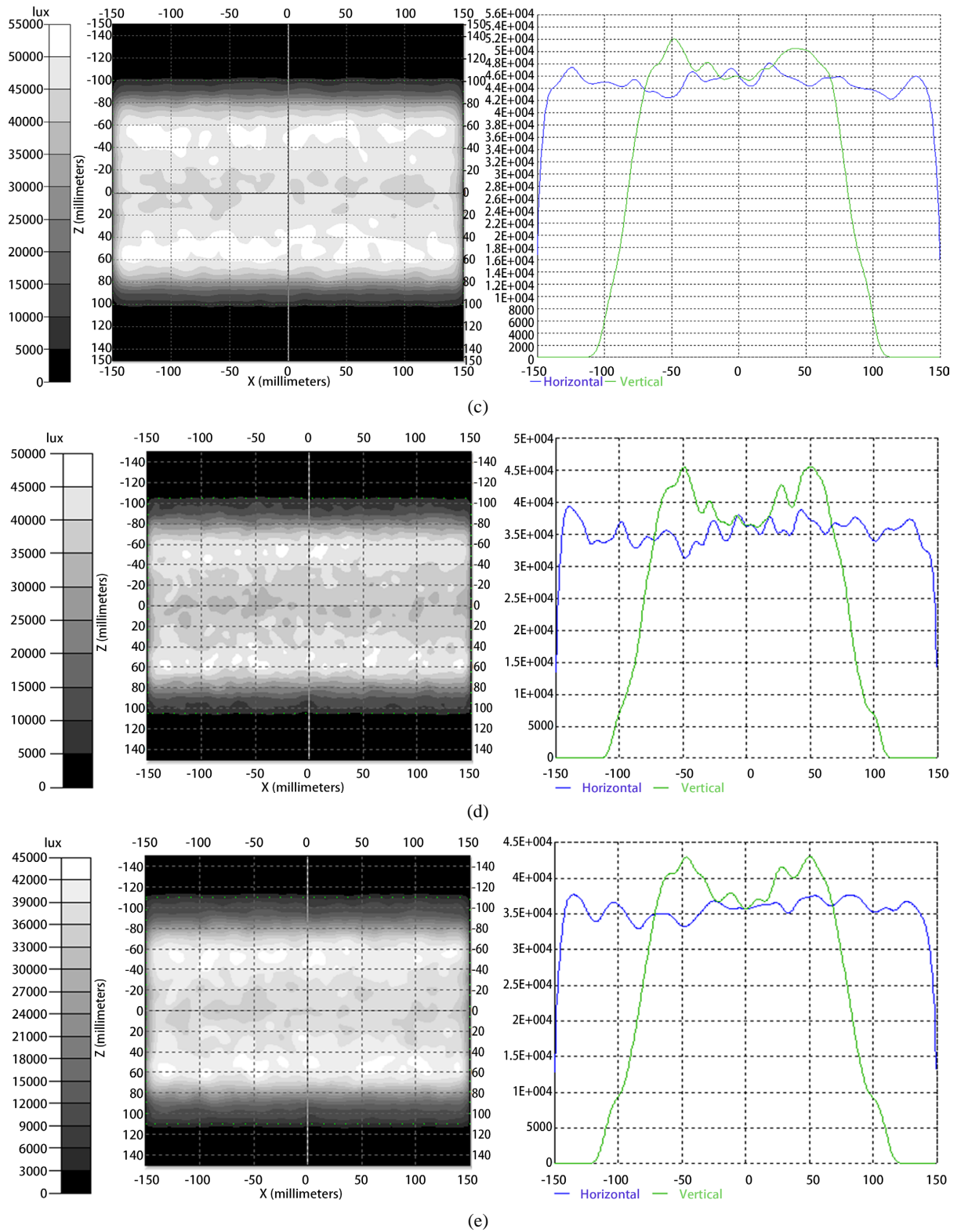


Figure 9. The illumination maps for (a) $l = 180$, $h = 14$ mm; (b) $l = 190$, $h = 12$ mm; (c) $l = 200$, $h = 14$ mm; (d) $l = 210$, $h = 14$ mm; (e) $l = 220$, $h = 14$ mm

图 9. 不同尺寸下灯具的出光效果。(a) $l = 180$, $h = 14$ mm; (b) $l = 190$, $h = 12$ mm; (c) $l = 200$, $h = 14$ mm; (d) $l = 210$, $h = 14$ mm; (e) $l = 220$, $h = 14$ mm

4. 结论

本文借助 Tracepro 光学仿真软件, 设计并研究了一款新型的面向室内篮球场的 LED 灯具, 利用一种新型复合聚光器将 LED 发出的光线汇聚并掠射在出光面板上, 并通过掠射和叠加的方法实现出均匀的出光效果。本文研究内容的核心首先涉及到一种带有管状元件的新型聚光器的设计, 新型聚光器由 CPC 和管状反射器共同组成, 掠射均光理念的重点是在出光面板上获得较长且均匀的光斑, 为此研究了管长和光源模块掠射角对于掠射光斑长度和光斑照度均匀度的影响, 得出在管状反射器管长为 5 mm、掠射角度为 0° 时获得的光斑在具有较大长度的同时照度均匀度也较大。进一步在此基础上进行平板灯的设计, 研究了在灯具宽度 $l = 180 \text{ mm}$ 、 190 mm 、 200 mm 、 210 mm 、 220 mm 时灯具出光均匀度和平均照度随灯具厚度 h 的变化情况, 最终发现, 在综合考虑平均照度和均匀度的前提下, 对于 5 个宽度的灯具当厚度分别取 14 mm、12 mm、14 mm、14 mm、14 mm 时可获得较大的平均照度和照度均匀度, 五种结构所对应的平均照度分别是 38,621 lux、33,698 lux、40,215 lux、32,310 lux、30,950 lux; 均匀度分别是 88.47%、85.12%、90.07%、87.03%、90.05%, 其中对于此款灯具的设计最关注的参数照度均匀度的值最大超过了 90%, 远优于市面上任何体育场馆的照明灯具, 本文面向篮球场馆设计的 LED 照明灯具, 不仅照明效果优良, 并且整灯结构简单, 所有光学元件均可以通过注塑加工制备, 并且结构紧凑, 便于模块化大规模生产, 进而在保证照明效果的同时, 降低了成本并且可靠性也得到了充分的保障。

参考文献

- [1] 杨雅文. 综合体育馆场地照明设计概述及实际应用[J]. 建筑电气, 2015, 34(1): 44-49.
- [2] 杨笛, 张明宇, 韩国帅. 京津地区高校体育馆建筑采光典型模型研究[J]. 照明工程学报, 2017, 28(5): 115-122.
- [3] 邵晓萍, 王敏, 周群. 体育场所照明灯具眩光的研究[J]. 光学仪器, 2017, 39(6): 56-63.
- [4] 肖箫, 文尚胜, 陈建龙, 等. 直下式 LED 背光源模组第二扩散导光板光学特性分析[J]. 光电子激光, 2013, 24(4): 679-686.
- [5] 李为军. LED 平板灯现状分析[C]//2012 (杭州)中国长三角照明科技论坛论文集, 2012: 32-34.
- [6] Tsuei, C.-H., Pen, J.-W. and Sun, W.-S. (2008) Simulating the Illuminance and Efficiency of the LED and Fluorescent Lights Used in Indoor Lighting Design. *Optics Express*, **16**, 18692-18701. <https://doi.org/10.1364/OE.16.018692>
- [7] 马丙戌, 文尚胜, 陈颖聪, 刘磊, 史晨阳. 侧入式无导光板 LED 平板灯设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 174-181.
- [8] 陈浩伟, 文尚胜, 马丙戌, 等. 基于 Taguchi 法设计带有圆锥台元件的超薄直下式 LED 平板灯[J]. 光子学报, 2015, 44(10): 20-28.
- [9] 庞培元, 文尚胜, 黄雅琪, 等. 高均匀度超薄直下式 LED 平板灯混光元件的设计与研究[J]. 光子学报, 2017, 46(5): 148-157.
- [10] Lin, C.F., Wu, C.C., Yang, P.H., et al. (2009) Application of Taguchi Method in Light-Emitting Diode Backlight Design for Wide Color Gamut Displays. *Journal of Display Technology*, **5**, 323-329. <https://doi.org/10.1109/JDT.2009.2023606>
- [11] Chen, C.-H. and Chen, Z.-P. (2008) An Integrated LED Reflector for Backlight System. *SPIE Conference Proceedings*, Vol. 7058, 705-810. <https://doi.org/10.1117/12.797075>
- [12] 赖丽萍, 庄其仁, 梁德娟, 等. 基于近场侧面均匀照明的 LED 投射器研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0322002.
- [13] 刘灵芝, 李戡洪. 复合抛物面聚光器(CPC)光学分析研究[J]. 能源技术, 2006, 27(2): 52-59.
- [14] 王洪, 张奇辉, 张小凡, 等. 实现道路均匀照明的自由曲面反射器设计[J]. 光电工程, 2009, 36(12): 143-146.
- [15] 汪乐, 张树生, 翟静. 基于复合式抛物面聚光器的 LED 反光杯建模研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 102202.
- [16] 王洪, 张小凡, 王海宏, 等. 自由曲面 LED 路灯反射器设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 727-731.
- [17] 余桂英, 金骥, 倪晓武, 等. 基于光学扩展量的 LED 均匀照明反射器的设计[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2297-2301.

- [18] 黄启禄, 吴逢铁. 基于近场均匀照明的 LED 二次曲线阵列的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3039-3043.
- [19] Wu, F.-T. and Huang, Q.-L. (2011) A Precise Model of LED Lighting and Its Application in Uniform Illumination System. *Optoelectronics Letters*, **7**, 334-336. <https://doi.org/10.1007/s11801-011-1031-x>
- [20] Fang, Y.C., Zeng, Y.F. and Li, S.X. (2008) Multi-Objective Design and Extended Optimization for Developing a Miniature Light Emitting Diode Pocket-Sized Projection Display. *Optical Review*, **15**, 241-250. <https://doi.org/10.1007/s10043-008-0038-4>