

基于Taguchi方法的乒乓球场地照明设计 对于场地照明均匀度影响的研究

王至知^{1*}, 马丙戌², 焦飞宇², 张博², 卢允乐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

针对我国室内体育场馆的照明设计缺乏理论依据, 设计简单粗放等问题, 以乒乓球场的照明设计为切入点, 在研究各类常用LED面光源的基础上, 对光源进行合理建模, 并以此为基础进行理论分析和公式推导, 定量推导出各影响因子对受照面上照度分布的影响。借助Trace-Pro模拟仿真软件进行模拟研究, 利用Taguchi方法设计分组实验简化实验过程, 并结合ANOVA理论分析, 最终在兼顾受照空间内不同功能区域的情况下, 获得了最优的照明设计方案, 最终结果显示在乒乓球桌参照面上可以获得均匀度92.39%、平均照度287.04 lux的照明效果, 并且其他区域也具有均匀度59.37%、平均照度176.34 lux的照明效果。本文的研究将对室内体育场馆的照明设计提供更为高效合理的设计方法, 并且提供了相关理论支撑, 具有一定的借鉴指导意义。

关键词

乒乓球场, 照明设计, LED光源, Taguchi, ANOVA

The Study of Illumination for Table Tennis Venue Influenced by Illumination Design Based on Taguchi Method

Zhizhi Wang^{1*}, Bingxu Ma², Feiyu Jiao², Bo Zhang², Yunle Lu²

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

*通讯作者。

文章引用: 王至知, 马丙戌, 焦飞宇, 张博, 卢允乐. 基于 Taguchi 方法的乒乓球场地照明设计对于场地照明均匀度影响的研究[J]. 光电子, 2022, 12(1): 43-53. DOI: 10.12677/oe.2022.121005

Abstract

Indoor illumination design is an important part but lack of system theory study. This paper is aimed to optimize the illumination for indoor stadium particularly the table tennis venue. We have given a light source model to describe these LED lamps used in the venue, also derived a formula to describe the illumination distribution on reference surface further. We use Trace-Pro a usual optical simulation software to study, and the experiment process is simplified by Taguchi method. Further combining the theory of ANOVA analysis we achieve the optimized factors. Finally, considering the different functional areas in the illuminated space, the optimal lighting design scheme is obtained. The results have shown that the uniformity of panel I can get 92.39%, the average illuminance is 287.04 lux, panel II also has 59.37% for uniformity, 176.34 lux for average illuminance. The study of this paper will provide a more efficient and reasonable design scheme for illumination design, and our theories and standpoints will provide some reference and guidance.

Keywords

Table Tennis Venue, Illumination Design, LED Light Source, Taguchi, ANOVA

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

作为国球的乒乓球历来备受政府和人民的重视,我国乒乓球事业自建国以来就是大力发展的体育事业之一,进入新世纪以来我国乒乓球选手多次在诸多国际赛事上摘金夺银更是增加了大众对其关注度。随着我国“乒乓王国”的声誉在世界范围内的传播以及民众的高度参与和关注,进而对相关赛事场馆以及普通民众乒乓球训练中心的建设提出了更高的要求。对于运动员来讲,需要在超短距离内进行高速运动,因此无论训练还是比赛,都需要极高的视觉要求,对于室内场馆而言,照明成为了满足这一极高要求需要考虑的首要因素[1] [2] [3],与此同时教练员、教学人员以及观众等,为了在室内有限空间内辨别瞬息万变的场上情况,依旧需要室内场馆优良的照明效果[2] [3]。杨笛等[4]提出在进行体育场馆的照明设计时需要充分考虑的关键因素包括照度均匀度以及眩光值;具体的,刘闵等[5]提出为了满足当代网球场馆的比赛和训练需求,需要针对照度、照度均匀度以及眩光值进行合理的照明设计;邵晓萍等[6]研究了场馆内存在的眩光问题,发现通过合理地控制灯具的布局以及场馆的施工材料可以有效地控制眩光。纵观已有的研究成果,我们可以清晰地认识到解决室内场馆照明设计问题的关键在于通过合理布光实现对于均匀度的控制以及眩光的控制,而随着LED照明灯具的发展,特别是针对乒乓球馆的照明,光线柔和的LED面板灯[7] [8] [9]日益受到设计者的追捧,进而眩光问题显得无足轻重,但是无论是针对何种场馆,尤其是针对乒乓球馆以及羽毛球馆这种对照明均匀度要求极高的体育场馆[5],如何合理地通过光源的排布提高照明均匀度成为亟待解决的问题,与此同时目前始终缺乏针对乒乓球场馆的照明设计的研究,并且所有室内场馆的照明设计问题的解决亟需要强有力的理论支撑作为参考。对于像乒乓场馆这种室内场馆需要密集的光源模块以达到合适的照明效果,从能耗层面上带来的较大用电量,不利于体育事业的“绿色”发展,进而在保证能耗的基础上满足不同客体对照明的需求成为当下面临的又一问题[10] [11]。

最近,Taguchi实验因为其实用性强,广泛应用于多参数优化设计的实验上。Taguchi实验是Taguchi和Konishi为了解决表现、质量、成本或工艺等工程问题的优化,而提出的一种比试错法高效能、系统的

实验设计工具。对于传统室内照明设计,需要兼顾多个因素对于受照面的影响,多参数影响下的实验过程繁琐,工作量巨大,难以准确快速地寻找最优解决方案,Taguchi方法作为一种高效的实验设计方法有效地避免了大量试错实验,通过相应的直角表引导实验设计,大幅度减少了实验数量,有助于快速寻找局部最优解,进一步之于室内照明设计,这种方法有助于高效地对高照明要求的功能化区域,提供优质的照明设计解决方案。

综上,基于乒乓球馆目前的照明设计现状,本文借助 Trace-Pro 软件,首先通过构建常用光源的模型,分析了多种光源的发光特性,并以此为基础,进一步合理抽象并建立光源模型,推导出在受照空间内的照度分布理论公式,最后在有限的光源数量内以优化照明均匀度以及照度平均值为目标,借助高效的 Taguchi 实验方法[12] [13]针对布灯方式 X ,光源距离地面高度 h ,以及灯具间距 d 进行模拟研究,以 Taguchi 方法得出的初步最优解为对象,进一步利用变异数分析(Analysis of Variance, ANOVA)推导出对品质影响最大的因子,对该因子进行精细化调整得出最优光学设计方案。

2. 模型构建和理论分析

2.1. 光源模型的构建

随着 LED 灯具的发展,目前比较先进的场馆常采用柔和的 LED 面光源进行照明,常见的乒乓球场照明灯具如下图 1 所示的三种 LED 面光源,分别为正方形和长方形的 LED 平板灯以及圆形吸顶灯(图 1(a)),但是我们发现三种灯具虽然具有不同的出光面形状但是其配光曲线相差不大,通过简单的二次光学设计后均呈类朗伯型配光曲线,如图 1(b)。我们在 Trace-Pro 中建立 $10,000\text{ mm} \times 10,000\text{ mm} \times 2000\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)的立方参照空间,研究相同功率参数(功率 14 W ,光通量 100 lm/W)不同形状面光源(长方形($300\text{ mm} \times 400\text{ mm}$)——图 1(d);正方形($300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$)——图 1(e);圆形($R = 200\text{ mm}$)——图 1(f))在底面的照度分布情况发现在宏观参照空间中,配光曲线相近似的三种灯具在同一参照空间中具有近乎一致的照度分布。进而我们可以选用一种光源形状进行下一步的研究。

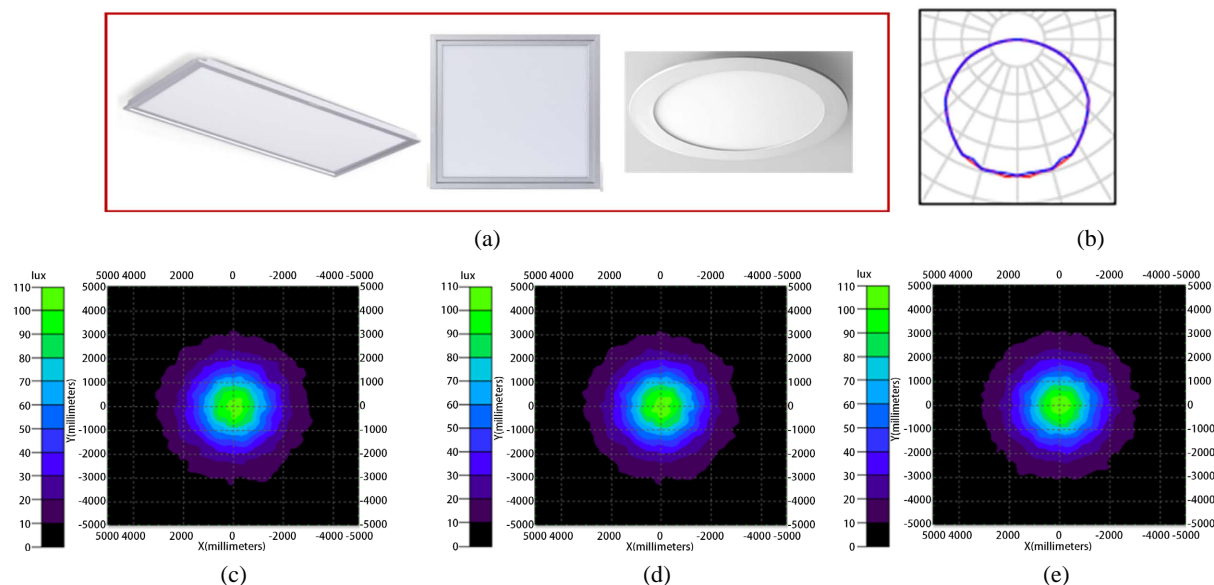


Figure 1. Common LED surface light sources and lighting effects in table tennis training venues: (a) Several common LED surface light sources used in indoor training venues; (b) Light distribution curve of common area light source; (c)-(e) Simulation comparison of surface light sources with different shapes on the illuminated surface ((c) rectangle; (d) square; (e) circular)

图 1. 乒乓球训练场馆常见的 LED 面光源及照明效果: (a) 常见的几种室内训练场馆用 LED 面光源; (b) 常用面光源的配光曲线; (c)-(e) 不同形状面光源在受照面上的模拟对比((c) 长方形; (d) 正方形; (e) 圆形)

2.2. 光源排列对目标平面照度分布的理论分析

根据 2.1 的研究, 宏观参照空间中, 具有相近或者相同配光曲线的光源不受光源形状的影响, 在理论分析过程中为了方便分析将光源处理为朗伯光源, 则空间中的光强分布为[14] [15] [16],

$$I(\theta) = I_0 \cos^m \theta \quad (1)$$

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})} \quad (2)$$

式(1)中, $I(\theta)$ 是视角为 θ 方向上的光照强度; I_0 是灯具轴线($\theta = 0^\circ$)方向上的光照强度; 其中 m 由 LED 的结构参数 $\theta_{1/2}$ 决定。(2)中, $\theta_{1/2}$ 定义最大光强衰减为一半 $I_0/2$ 时的角度。

建立如图 2 所示的平面模型, 假设所有的灯具呈等间距的阵列型排列, 任意光源 $P(x_0, y_0, h)$, 在距离光源 h 的受照平面上任意点 $A(x, y, 0)$ 点处所产生的光照度可表示为,

$$E_v(x, y, h) = \frac{h^m I_0}{\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + h^2 \right]^{\frac{m+2}{2}}} \quad (3)$$

在受照平面上任意点处的照度分布图本质上是由多个灯具在目标平面上的照度圆叠加而成, 因此可推导在受照面上点 $A(x, y, 0)$ 的照度值为,

$$E_v(x, y, h) = \sum_{i=1}^n \frac{h^m I_0}{\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + h^2 \right]^{\frac{m+2}{2}}} \quad (4)$$

式中, n 表示为灯具的总数量。进一步根据均匀度的定义, 用受照面上照度的最小值除以平均照度即为照度均匀度。

$$U = \frac{\min\{E_v(x, y, h) | (x, y) \in A\}}{E_v} \quad (5)$$

通过(4)式和(5)式我们发现影响照度的关键参数包括灯具排列的结构参数, 也即灯具坐标 (x_i, y_i, h) , 灯具轴线($\theta = 0^\circ$)方向上的强度 I_0 , 光源距离受照面的高度 h 以及灯具数量 n 的影响。在市面上选定灯具的类型和功率后 I_0 可以视为一致并基本不变, 为了控制场馆的整体照明设备的功率, 因此不能无限制的增加灯具数量来提高照度和均匀度, 因此在实验过程中控制灯具数量 n 一致。具体灯具排列的方式和每一种方式灯具间隔的距离不同都会带来 (x_i, y_i, h) 的差异, 从而进一步引起照度和均匀度的差异, 灯具距离受照面高度 h 的变化对照度的影响不仅通过上式得到定量的解释, 定性的可以理解为 h 的不同会带来照度圆叠加程度的不同, 进而引起均匀度的变化, 而照明距离的增长带来光强的劣化导致了照度随之衰减。

3. 利用 Taguchi 方法设计并进行实验

Taguchi 方法是一种寻找局部最优解的实验设计方法, 可用于高效的解决科研和工程中参数的优化问题。近年来在简化繁琐的工程实验步骤上的应用愈发广泛。在建筑照明设计中往往设计多重相互交叉影响的结构参数, 对于照明效果的优化多采用试错法逐步优化之, 步骤冗杂, 耗时耗力, 本文首次将该方法运用到建筑照明设计中进行照明方案的优化。使用 Taguchi 方法实验设计, 首先是要选定品质特性及判定品质特性的理想机能。对于本文研究的乒乓球场馆的照明设计问题, 其品质特性有出受照面上的照度均匀度及平均照度。在设计实验时, 为了有效评判实验的结果, 一定要对品质特性定立合适的目标值来指导控制因子水准的调试。因此, 在选定好品质特性后, 要列出影响此品质的控制因子, 并定出它们

的水准，并且在上述基础上选择合适直角表进行实验方案的设计[17]。具体针对 2.2 中分析的乒乓球照明设计中影响照明效果的灯具排列结构参数，光源受照面高度 h 进行优化。而结构参数可以形象的从几何坐标系中的坐标值 (x_i, y_i, h) 转化为更加形象的结构因素 X(灯具排列方式)以及结构因素中每一个元素的间距 d (优化参数具体见图 2(a))。针对分析得出的需要优化的因子如表 1 分别为 A(排列方式 X)，B(灯具间距 d)以及 C(灯具距离受照面之间的高度 h)，其中每个因子取三个不同参数，A 取排列方式 X1, X2, X3(具体排列方式见图 2(a))；B 取 $d = 500$ mm, 800 mm, 1000 mm；C 取 $h = 2000$ mm, 2500 mm, 3000 mm。进一步选用 $L_9(3^4)$ 直交表设计实验(表 2)，研究目标平面的平均照度值和均匀度值，而由于乒乓球馆中对象的复杂性，需要兼顾运动员以及场边教练人员和观众，研究过程中将受照平面细分为乒乓球台面和高于地面 0.6 m 的常用室内照明参照面(图 2(b))。在实验过程中，利用 Tracepro 对灯具以及受照空间进行建模，灯具为 300 mm × 300 mm 的正方形 LED 面光源，控制灯具参数为 14 W 的 LED 正方形面光源，光电转换效率为 100 lm/W，每个灯具设置光线数目为 20,000 根[18]。S/N 值即信噪比，是 Taguchi 方法中度量质量特性的指标，依据品质特性的需求，存在望大特性和望小特性，两者分别对应品质特性越大越好和越小越好[19]。本实验中的照明均匀度以及平均照度均希望越大越好，进而为望大特性，对应 S/N 值的公式为[20]：

$$L_{TB}(S/N) = -10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \quad (6)$$

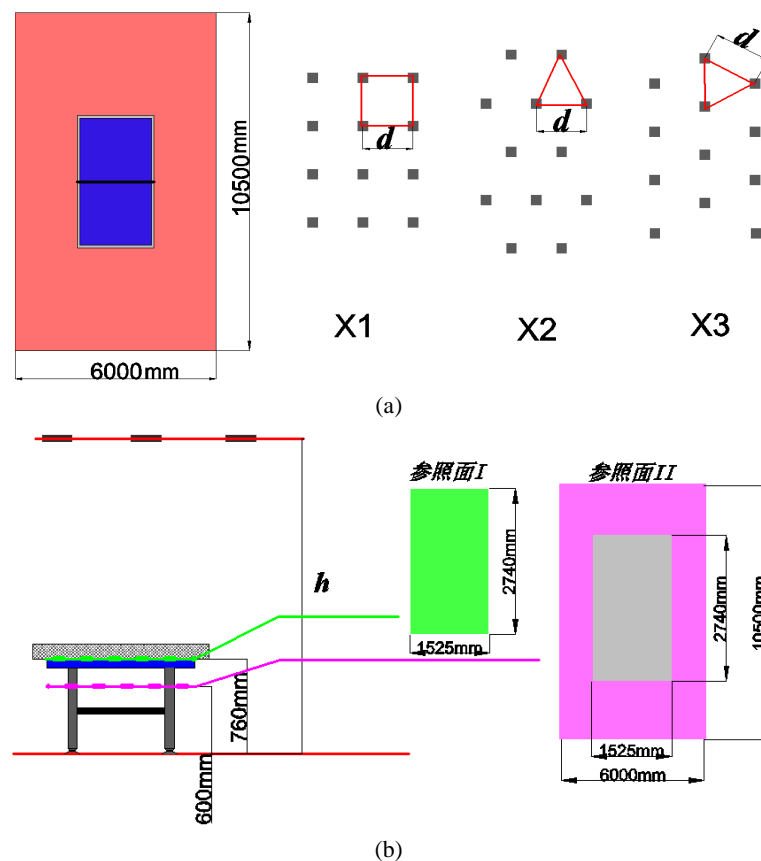


Figure 2. Table tennis court lighting effect simulation space diagram: (a) Top view and corresponding research factors; (b) Side view and corresponding research factors

图 2. 乒乓球照明效果模拟空间示意图：(a) 俯视图及相应的研究因子；(b) 侧视图及相应的研究因子

其中 y_i 表示第 i 个品质特性, n 为实验次数。利用 TracePro 模拟仿真并计算平均照度和均匀度, 再将实验结果带入式(6)计算相应两参考平面(平面 I——球桌平面, 平面 II——高于地面 0.6 m 参照面)上平均照度和照度均匀度的 S/N 值, 如表 2 所示。

Table 1. Influencing factors and control level

表 1. 影响因子及其控制水准

代号	因子名称	水准数	水准一	水准二	水准三
A	排列方式 X	3	X1	X2	X3
B	灯具间距 d	3	1000 mm	1400 mm	1800 mm
C	灯具距离受照面的高度 h	3	2000 mm	2500 mm	3000 mm

Table 2. The experiment was designed with $L_9(3^4)$ right angle meter. (a) Statistical calculation of reference plane I and (b) Reference plane II

表 2. 采用 $L_9(3^4)$ 直角表实验设计。(a)参照面 I 和(b)参考面 II 的统计计算情况

(a)							
实验序号	A	B	C	参照面 I 的均匀度(%)	参照面 I 的照度(lux)	均匀度的 S/N	平均照度的 S/N
1	1	1	1	98.01	570.30	39.83	55.12
2	1	2	2	96.26	334.00	39.67	50.47
3	1	3	3	97.78	267.85	39.80	48.56
4	2	1	2	98.51	467.95	39.87	53.40
5	2	2	3	98.20	294.70	39.84	49.39
6	2	3	1	94.37	342.80	39.50	50.70
7	3	1	3	92.60	337.15	39.33	50.56
8	3	2	1	96.54	454.65	39.69	53.15
9	3	3	2	91.99	284.90	39.28	49.09

(b)							
实验序号	A	B	C	参照面 II 的均匀度(%)	参照面 II 的照度(lux)	均匀度的 S/N	平均照度的 S/N
1	1	1	1	25.15	194.47	28.01	45.78
2	1	2	2	41.365	185.68	32.33	45.38
3	1	3	3	60.31	160.37	35.61	44.10
4	2	1	2	33.08	182.38	30.39	45.22
5	2	2	3	49.34	163.89	33.86	44.29
6	2	3	1	47.84	203.89	33.59	46.19
7	3	1	3	36.19	165.22	31.17	44.36
8	3	2	1	28.41	202.85	29.07	46.14
9	3	3	2	47.50	181.55	33.53	45.18

将各组实验中各因子的 S/N 值进行计算统计并绘图, 结果如图 3(a)和图 3(b)所示。分析发现, 对于参考面 I, 也即乒乓球桌平面, 从均匀度角度而言, 在 A1B2C1 处取得均匀度最佳, 但从平均照度而言则在 A1B1C1 处取得最佳结果, 进一步分析每一个因子的影响, 因子 A 无论是 A1 还是 A2 对于均匀度的影响和平均照度的影响较小, 但是在取 A3 时会造成均匀度的迅速下降但是平均照度不发生明显变化; 因子 B 在取 B1 时的均匀度略小于 B2, 但是却造成了两者平均照度较大的变化, 为了兼顾照度和均匀度, 因此选择结构参数 B1 更加合适; 因子 C 在 C1 处取得均匀度和平均照度的最大值, 但是我们不难发现因子 C 对于照度的影响大于均匀度, 由于因子 C 对应于灯具平面距离参考面的高度, 由公式(4)分析得出高

度越大,照度值下降。综上针对平面 I,最优解在 A1B1C1。而通过数据统计我们不难发现每组结果平面 I 的均匀度均高于 90%,这充分达到甚至高于正式比赛或者日常训练对于该平面照明质量的要求,并且分析结果显示的最优解的取值均趋向于更加紧凑的排列方式和结构参数,但是这样的设计方案虽然有利于提高比赛或者训练区域的照明效果,却是以牺牲其他功能区域的照明效果为代价。对于乒乓球桌照明方案的研究和优化,一方面在于追求比赛或训练区域(参照面 I)最佳照明效果,但是也要兼顾其他功能区域,也即上文提到的对于参照面 II 的研究和优化。

通过表 2 和图 3(c)、图 3(d),经过分析我们发现参考面 II 在 A2B3C3 处取得均匀度最大值而在 A2B2C1 处取得平均照度的最大值,对比发现排列方式也即因子 A 虽然大幅度影响参考面 I 的均匀度但对参考面 II 而言影响甚小,但是照度和均匀度都在 A2 处取得最大,这是因为 A2 对应的排列方式相对发散,有利于提高光能在周边区域的分布进而有利于参考面 II 平均照度和均匀度的提高;因子 B 对平面 II 的均匀度影响较大但是对平均照度影响不大, B2 和 B3 对应的平均照度的变化幅度几乎可以忽略,为此在求解最优解的过程中选取参数 B3,相比平面 I,转换参考面后因子 B 均在参数较大时得到较大的照度和均匀度,这也是随着灯具间距 d 的增加灯具阵列向四周扩展,兼顾周围区域后带来了平面 II 照度和均匀度的提升;因子 C 对于照度和均匀度的影响均较大但是呈相反的趋势,为了兼顾两者选择 C2。最后若以平面 II 为

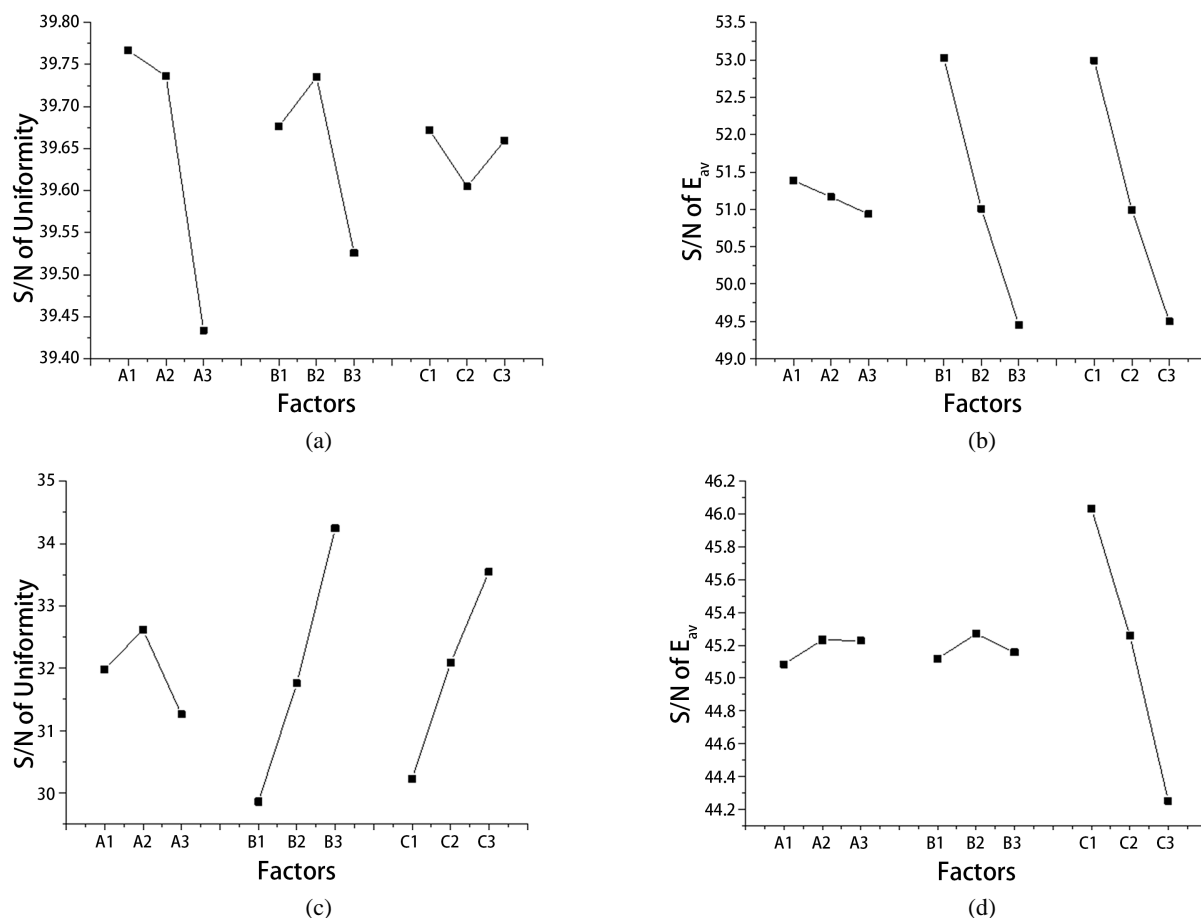


Figure 3. S/N value corresponding to each factor level: (a) S/N value of illuminance uniformity of reference plane I; (b) S/N value of average illuminance of reference plane I; (c) S/N value of illuminance uniformity of reference plane II; (d) S/N value of average illuminance of reference plane II

图 3. 各因子水准对应的 S/N 值: (a) 参照面 I 照度均匀度的 S/N 值; (b) 参照面 I 平均照度的 S/N 值; (c) 参照面 II 照度均匀度的 S/N 值; (d) 参照面 II 平均照度的 S/N 值

参照面，得到最优解为 A2B3C2。其最优解与参照面的最优解无任何交叉因子，但是由表 2 可以发现，当研究参量取平面 II 最优解时，平面 I 均可以保持非常优越的照明效果，因此以 A2B3C2 作为兼顾两参照面后的最优解，对应的具体参数为：排列方式为 X2，灯具间距 $d = 1800 \text{ mm}$ ，灯具平面距离地面 $h = 2500 \text{ mm}$ 。最优解在两个参照面上的照明效果如图 4，进一步计算发现最优解对应的参照面 I 上的照度均匀度为 92.77%，平均照度为 309.90 lux；而参照面 II 上对应的均匀度为 55.99%，平均照度为 178.17 lux。

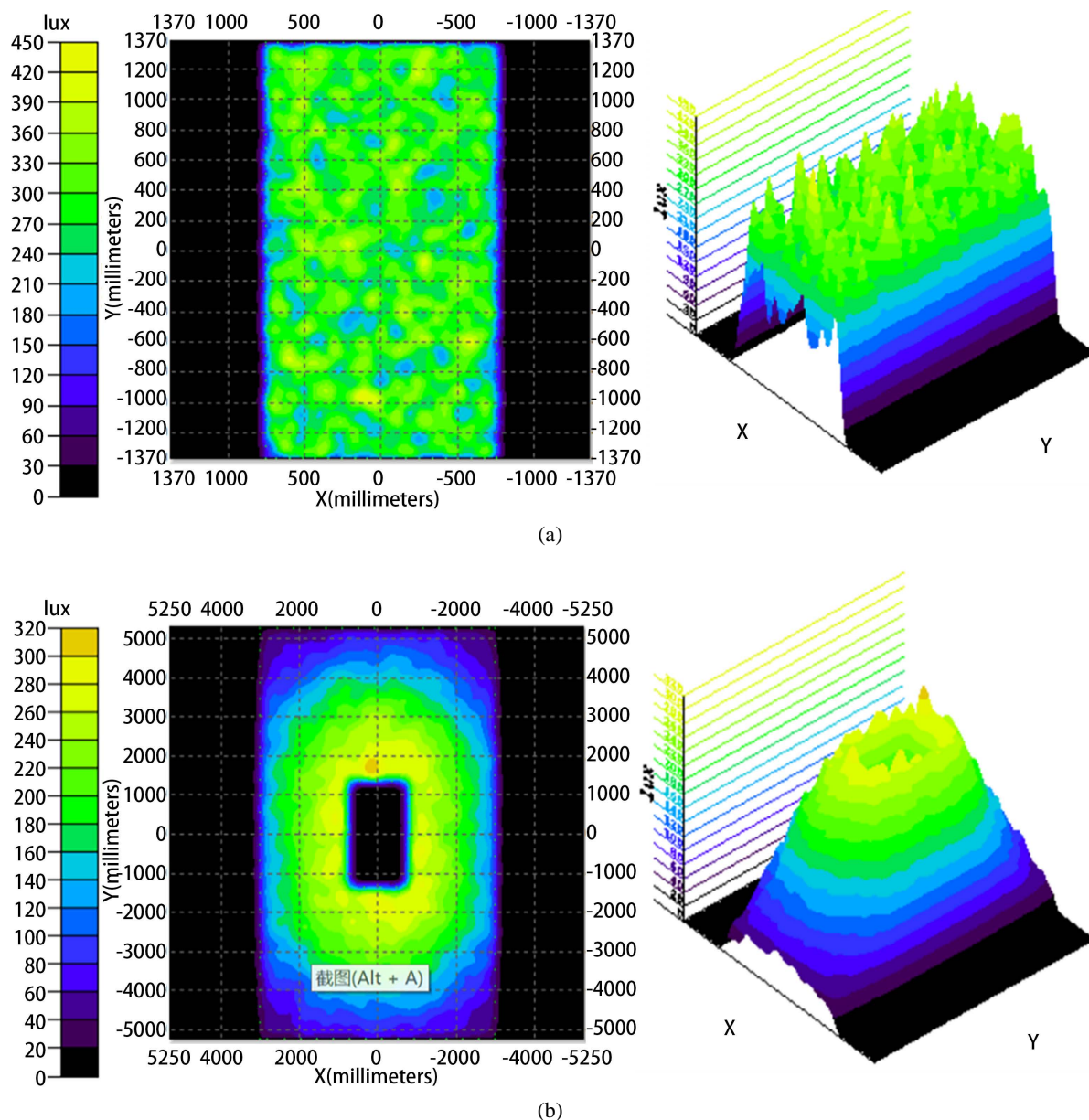


Figure 4. The illuminance distribution of reference surface I (a) and reference plane II (b) corresponding to the optimal solution condition

图 4. 最优解条件对应的参照面 I (a) 和参照面 II (b) 的照度分布情况

4. 变异数分析(Analysis of Variance, ANOVA)

进一步进行变异数分析量化各因子对于照明效果的影响程度。进一步采用 ANOVA 方法进一步分析

估量各因子对品质影响的贡献度。ANOVA 的首要目的是评估实验误差并以百分比的方式来协助判断。在 Taguchi 方法中, 常将交互作用视为误差的一部分, 当因子效应和实验误差比较起来足够大时, 才认定此因子效应为“有意义的”或是“重要的”。有了实验误差后, 可以评估每一个因子效应相对于实验误差的“重要性”。只有“重要性”达到某一程度的因子效应, 才会被用在预测的公式中, 其他“重要性”不足以达到该程度的因子效应则视为可能只是实验误差造成的偶发现象。

ANOVA 方法即方差分析法, 由 R. A. Fisher 发明, 其主要用于两个及两个以上样本均数差别的显著性检验, 即通过由于实验条件和随机误差所带来的组间差异和组内差异, 来表征实验的总偏差[21]。通过比较各影响因子在实验偏差中的占比, 来评估各影响因子的贡献率, 即对实验结果的影响程度, 贡献率大的因子被选出进一步研究, 而贡献度较小的因子则被当作偶然事件处理, 影响程度的强弱程度通过参量 ρ [13] [14]来表示:

$$\rho = \frac{S_{sd}}{S_{sT}}, \quad (7)$$

$$S_{sT} = S'_{sd} + S_{se} \quad (8)$$

其中 S_{sd} 和 S'_{sd} 表示方差和, S_{se} 为错误方差和(由于实验的重复性, 可近似认为 S_{se} 为 0)。 S_{sd} 由 S/N 比的方差和可表示为:

$$S_{sd} = \sum_{i=1}^m (\eta_i - \bar{\eta})^2 \quad (9)$$

式中, m 是实验次数, η_i 是每个因子第 i 次实验的 S/N 比, $\bar{\eta}$ 是每个因子 S/N 的平均值, 在本实验中, $\eta = L_{TB}(S/N)$ 。计算得出各影响因子对品质的贡献度, 如表 3 所示, 对于参照面 I 而言, 影响均匀度的主要因素是排列方式 X, 灯具间距 d 次之, 而对于平均照度的影响最大的是灯具间距 d 和灯具平面距离地面的距离 h 。对参照面 II, 影响均匀度的主要因素是灯具间距 d 和灯具平面距离地面的距离 h , 而对于平均照度的影响最大的是灯具平面距离地面的距离 h 。由于需要兼顾两个参考平面的照明效果, 深入的优化过程应该更倾向于以优化参照面 II 的照明效果为目的, 进一步针对 ANOVA 分析的结果, 希望通过研究因子 C 对参照面 II 上照明效果的影响, 深入优化实验结果。如图 5(a)、图 5(b)所示在具优解(A2B3C2)的基础上研究了 h 在 C2 ($h = 2500$ mm)附近取不同数值时参照面 II 上的照度分布情况的变化。通过研究发现对于参照面 II 的均匀度而言在 h 增加到 2400 以上时基本波动较小, 而平均照度随着 h 的增大逐渐减小

Table 3. Contribution rate of contrast uniformity and color mixing uniformity of each factor on reference plane I (a) and reference plane II (b)

表 3. 在参照面 I (a)和参照面 II (b)上各因子对照度均匀度和混色均匀度的贡献率

(a)		
影响因子	对参照面 I 照度均匀度的贡献率	对参照面 I 平均照度的贡献率
A	56.13%	5.97%
B	32.92%	47.56%
C	10.95%	46.46%
(b)		
影响因子	对参照面 II 照度均匀度的贡献率	对参照面 II 平均照度的贡献率
A	14.96%	7.94%
B	48.41%	7.41%
C	36.64%	84.63%

但是也呈现出先快速减小后趋势逐渐放缓。综合考虑,选择 2700 mm 为最优高度,此时在参照面 II 上的照度分布情况如图 5(d),均匀度为 59.37%,平均照度为 176.34 lux,相比最优解在保证平均照度基本不变的前提下将均匀度提高了 10%。参照面 I (5(c))上的均匀度为 92.39%,平均照度为 287.04 lux,依旧保持着极高的均匀度和较大的平均照度。

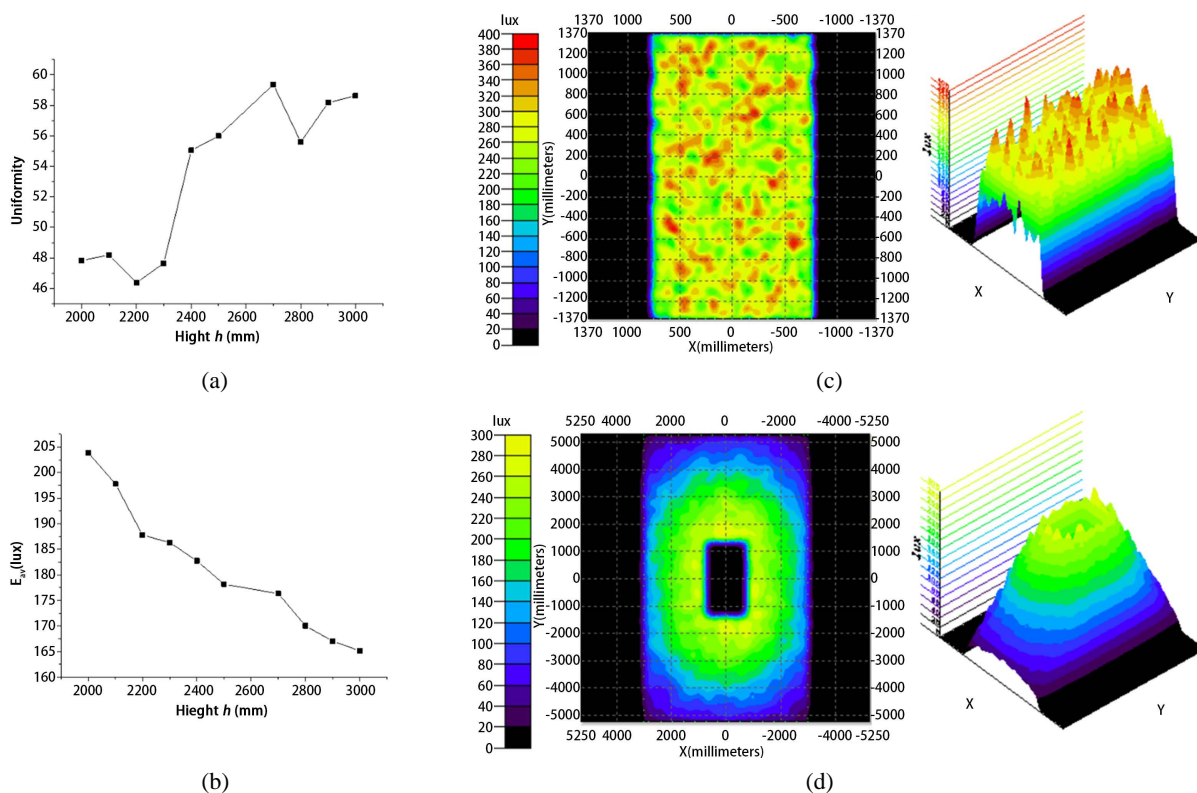


Figure 5. The variation of illuminance uniformity (a) and average illuminance (b) on reference plane II with the height h from the lamp to the ground under different heights, and the distribution of illuminance on reference plane I (c) and reference plane II (d) under optimal conditions

图 5. 不同高度下参照面 II 上照度均匀度(a)和平均照度(b)随灯具距地面高度 h 的变化情况以及最优条件下参照面 I (c) 和参照面 II (d) 上照度的分布情况

5. 结论

本文以乒乓球比赛/练习场馆的照明设计方案的深入理论研究为目的,在研究光源特性的基础上对光源进行了合理的建模,研究发现对于具有相似配光曲线的灯具在空间中具有近乎相同的照明效果,以类朗伯光源为模型进行理论分析,推导出灯具阵列结构以及灯具高度对受照面上照度分布的具体影响,分析出影响照明效果的关键参数进行深入研究,并且提出了新的研究理念:乒乓球馆照明设计应该针对不同的功能区域设置不同的参照面,分别为需要保证高照明效果的乒乓球台区域(参照面 I),以及对照明效果要求相对较低的其他区域(参照面 II)。在实验设计的过程中借助 Taguchi 方法简化实验过程,利用光学模拟软件模拟进行各组实验,通过计算不同参照面上的实验结果以及 S/N 值,发现在选择排列方式为 X2,灯具间距 $d = 1800$ mm,灯具平面距离地面 $h = 2500$ mm 时获得初步最优解,此时参照面 I 上的照度均匀度为 92.77%,平均照度为 309.90 lux;而参照面 II 上对应的均匀度为 55.99%,平均照度为 178.17 lux。进一步通过 ANOVA 分析各因子影响照明效果的比重,在兼顾参照面 I 的照明效果的前提下深入优化参照面 II 的照明效果,调整灯具距离地面的高度时发现,在高度为 2700 mm 时参照面可以获得更好的照明

效果, 此时均匀度为 59.37%, 平均照度为 176.34 lux。并且在这一参数下参照面 I 依旧保持着 92.39% 的均匀度, 以及 287.04 lux 的平均照度。本文的研究方法对于室内照明特别是体育场馆的照明设计具有一定的参考价值, 并且本文推导的理论公式将基于定性研究的照明设计推向定量的深入研究, 摆脱了建筑照明设计无理论可依的现状。

参考文献

- [1] 董青. 体育场馆特殊空间照明浅析[J]. 智能建筑电气技术, 2018, 12(4): 11-13.
- [2] 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): 44-48+49.
- [3] 陈逸泉. 体育馆照明设计与分析[J]. 照明工程学报, 2006, 17(1): 55-58.
- [4] 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.
- [5] 刘闵, 喻辉, 陈逸泉. 网球场场地照明设计初探[J]. 建筑电气, 2020, 39(3): 41-49.
- [6] 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.
- [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, 陈颖聪, 黄诗敏. 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] 蒋淑华, 秦建凡, 李志文. 体育场馆金卤灯与 LED 灯的使用效果对比[J]. 中国照明电器, 2017(8): 40-42.
- [10] Beccali, M., Bellia, L., Fragliasso, F., Bonomolo, M., Zizzo, G. and Spada, G. (2020) Assessing the Lighting Systems Flexibility for Reducing and Managing the Power Peaks in Smart Grids. *Applied Energy*, **268**, Article ID: 114924. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114924>
- [11] Gorgulu, S. and Kocabey, S. (2020) An Energy Saving Potential Analysis of Lighting Retrofit Scenarios in Outdoor Lighting Systems: A Case Study for a University Campus. *Journal of Cleaner Production*, **260**, Article ID: 121060. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121060>
- [12] 杨敏, 田雨波, 陈凤. 基于变异田口算法的多层吸波材料优化设计[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(1): 250-256.
- [13] Chen, Y.C., Wen, S.S. and Song, P.C. (2015) Design of a Backlight Module with a Freeform Surface by Applying the Taguchi Method. *Chinese Optics Letters*, **13**, Article ID: 032302.
- [14] Su, Z., Xue, D. and Ji, Z. (2012) Designing LED Array for Uniform Illumination Distribution by Simulated Annealing Algorithm. *Optics Express*, **20**, A843-A855. <https://doi.org/10.1364/OE.20.00A843>
- [15] Moreno, I. and Tzonchev, R.I. (2006) Designing Light-Emitting Diode Arrays for Uniform Near-Field Irradiance. *Applied Optics*, **45**, 2265-2272. <https://doi.org/10.1364/ao.45.002265>
- [16] Qin, Z., Wang, K., Chen, F., Luo, X. and Liu, S. (2010) Analysis of Condition for Uniform Lighting Generated by Array of Light Emitting Diodes with Large View Angle. *Optics Express*, **18**, 17460-17476. <https://doi.org/10.1364/OE.18.017460>
- [17] 郭惠昕. 望大望小特性设计目标的模糊稳健优化设计方法[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(5): 532-535+540.
- [18] Fang, Y.C., Tzeng, 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.
- [19] 靳肖林, 文尚胜, 马丙戌, 付萌, 蔡明兴, 左欣, 等. 高均匀度 LED 植物光源的设计[J]. 发光学报, 2018, 39(10): 1466-1477.
- [20] 庞培元, 文尚胜, 黄雅琪, 张帅, 陈心雅, 陈浩伟, 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): 148-151.
- [21] 赵海峰, 高天驰. 基于 ANOVA 的特征选择方法及其在齿轮箱故障诊断中的应用[J]. 内燃机与配件, 2017(6), 110-113.