

多光源模块植物光源系统的设计

张博¹, 文尚胜^{1,2*}, 马丙戌¹, 焦飞宇¹, 卢允乐¹, 黄玮钊¹

¹华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510640;

²华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640

摘要 针对现有植物光源系统架构难以提供优质的照明环境, 提出空间照明均匀度理论。采用多光源模块的植物光源系统实现植物生长空间内的高空间照度均匀度以及色度均匀度, 多光源模块由倒置光源、直下式光源以及在生长空间的中部光源组成。通过多光源模块的立体化混光方式达到设计的目的, 根据 Taguchi 理论简化实验过程并结合变异数分析深入优化关键因子, 从而找到植物光源系统的最优解。进一步优化 LED 灯珠的形状和间距, 最终获得水平面和竖直面的照度均匀度分别为 91.35% 和 89.71%, 混色均匀度分别为 87.67% 和 88.54% 的立体化植物光源系统。对植物生长进行模拟和实物测试, 实验结果表明植物光源系统能够在整个植物生长空间提供高质量的照明效果。

关键词 光学器件; 植物照明; 空间均匀度; 立体化照明; 发光二极管; 光学设计

中图分类号 O432; O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1923001

Design of Plant Light Source System Based on Multi-Light Source Module

Zhang Bo¹, Wen Shangsheng^{1,2*}, Ma Bingxu¹, Jiao Feiyu¹, Lu Yunle¹, Huang Weizhao¹

¹College of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

²State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract Existing plant light source systems do not provide a sufficiently high-quality lighting environment for optimal plant growth, the theory of spatial illumination uniformity is proposed. The plant light source system with multiple light source modules is adopted to achieve high spatial illumination uniformity and color-mixed uniformity in the plant growth space. The multi-light source module is composed of inverted light source, straight down light source and central light source in the growth space. The experimental process is simplified according to the Taguchi theory and the key factors are optimized in conjunction with an analysis of variance to find the optimal plant light source system. The shape and spacing of LED beads are further optimized to obtain a three-dimensional plant light source system with the illumination uniformity of horizontal and vertical planes of 91.35% and 89.71%, and color-mixed uniformity of 87.67% and 88.54%, respectively. Plant growth is simulated and tested in kind, the experimental results show that the three-dimensional plant light source system can provide high-quality lighting effects for the entire plant growth space.

Key words optical devices; plant lighting; spatial uniformity; three-dimensional lighting; light emitting diode; optical design

OCIS codes 230.2090; 230.3120; 220.2740; 170.2945

收稿日期: 2020-04-24; **修回日期:** 2020-05-10; **录用日期:** 2020-06-12

基金项目: 广东省科技计划(2017B010114001, 201704030140, 2015B010127004)、省级大学生创新创业训练计划(S201910561198)、广东省应用型科技研发专项(2015B010134001)、广州市科技计划(201604040004, 201604016010)、广东省扬帆计划(2015YT02C093)

* **E-mail:** shshwen@scut.edu.cn

1 引 言

植物工厂通过调控室内光照和营养等环境因素来实现农作物的连续高效生产,打破了环境因素对传统农业生产的制约^[1]。光照作为植物生长的必要因素之一,其调控着植物的代谢^[2],而研究显示只有在波长为 460 nm 附近的蓝紫光和 640 nm 附近的红光主要参与植物光合作用以调控植物的生长^[3],故吸收光谱窄且精准可调的冷光源 LED (Light Emitting Diode) 广泛应用在植物工厂实际的生产过程中^[4]。由此可见人工光源在自然光照微弱的植物工厂中起到不可或缺的核心作用,高质量植物光源的研究具有重要意义。

传统的植物光源系统多参考室内照明系统,采用的设计方案是在培养架的顶部添加简单的 LED 阵列光源,简易的光学结构使得培养架在不同位置的照度分布不均匀,导致受照面的照明均匀度较低。姜昕宇等^[5-6]设计了将光源放置在植物培养架种植面的倒置型植物光源系统,使得培养架在水平方向的照明均匀度有了很大改善。但其仅对单一受照面进行优化,未考虑立体的植物生长过程和生长过程中所占空间的照明情况,设计的植物培养架仅在植物生长到特定高度时具有良好的照明效果。

为了解决上述问题,本文根据植物生长过程的空间照明均匀度理论,以整个三维照明空间为研究对象建立水平和竖直两个方向的参考面,采用两参考面的光量子通量密度 (PPFD) 的均匀度与光谱分布的均匀度两个评价指标研究高质量的植物光源系

统。基于三光源模块的立体混光原理,提出结合倒置光源、直下式光源和培养架中部光源的多光源模块植物光源系统^[5-6]。将光源系统分为三大模块,其中底部光源模块为设置在培养架种植面的倒三棱柱灯架斜面上的红、蓝 LED 阵列,中部 LED 阵列模块放置在培养架中心四棱柱灯架的侧面上,该四棱柱灯架可看作两个三棱柱的贴合,顶部光源模块为等距排布在反射面上的红、蓝 LED 阵列。对于底部和中部光源模块,通过设计放置在 LED 光源的斜面倾角即可改变其出光角度以获得最优的设计方案,而顶部光源模块的优化主要是通过设计其灯珠形状和排列方式来实现的。通过多光源模块互补出光的设计方案可以实现培养架在竖直方向上的高照明均匀度,从而当植物生长到各个高度时,系统的受照面都能获得高质量照明。进一步应用 Taguchi 实验和变异数分析 (ANOVA) 对光源系统的关键影响参数进行设计优化,并且对 LED 的灯珠形状和间距进行设计,最终得到光源系统的最优设计方案。通过模拟植物生长和搭建的测试实物模型,证实设计的植物光源系统在实际应用中具有参考意义。

2 空间照明均匀度理论

2.1 基于植物生长过程的参考维度转换

植物光源系统的受照面随着植物的生长而不断改变,这就要求植物光源系统需顾及整个植物生长周期的照明。依据经典的针对某一水平受照面的研究方法,植物在不同的生长阶段而派生出若干待研究参考面,并将其最终体现为一参考空间,如图 1(a)所

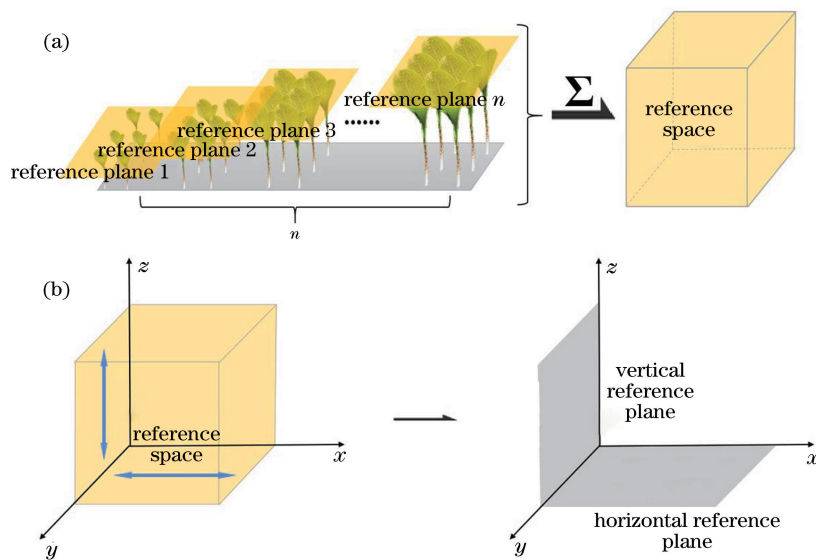


图 1 空间均匀度理论。(a)参考维度的转换;(b)空间均匀度的测量

Fig. 1 Space uniformity theory. (a) Conversion of reference dimensions; (b) measurement of spatial uniformity

示。与仅研究某一特殊参考面相比,此三维参考空间的照明情况更能反映植物光源系统的质量。

在植物照明领域中最关注的两个指标为PPFD的均匀度与光谱分布的均匀度^[7-8],这两个关键指标可以反映受照空间的光强分布和光质分布的均匀情况,能够直接决定某一批次植物生长的均齐度,对品质和后续人工成本的影响重大。具体的研究过程中,两个均匀度的优化提升是通过三维照明空间中水平种植面和垂直立面的均匀度来实现的,如图1(b)所示。

2.2 PPFD均匀度与混色均匀度

PPFD指单位时间内通过单位面积的光子数,单位为 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在植物照明领域中,植物对光的响应过程多采用PPFD对应照度来描述照明系统的质量^[7-8]。相较于人眼,植物对光更敏感,受照面光照的差异最终体现为同一批次植物生长状态的差异,故提高植物光源的发光均匀度是植物照明研究的一大方向,受照面的PPFD均匀度和混色均匀度是衡量植物光源质量的重要指标^[9]。

PPFD均匀度 a 的表达式为^[10]

$$a = \frac{\sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{r=1}^R K_{\text{PPFD}} / (f \cdot q \cdot r)}{K_{\text{PPFD, max}}} = \frac{\frac{1}{k_{\text{rb}}} \sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q \sum_{r=1}^R E_v / (f \cdot q \cdot r)}{\frac{1}{k_{\text{rb}}} E_{v, \text{max}}}, \quad (1)$$

式中: F 和 Q 为取样面的长和宽; R 为单位面积的取点数; K_{PPFD} 为PPFD; E_v 为照度值; k_{rb} 为常数,用来反映 E_v 与PPFD之间的关系。

归一化的混色均匀度 U_{color} ^[10-11]可以表示为

$$\Delta u'v' = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_i^M [(u'_i - u'_{\text{avg}})^2 + (v'_i - v'_{\text{avg}})^2]}, \quad (2)$$

$$U_{\text{color}} = \frac{100}{1 + k_1 \Delta u'v'} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: M 为样本点的数目; (u', v') 为样本点的色坐标; u'_{avg} 和 v'_{avg} 为样本点色坐标的平均值; $\Delta u'v'$ 为各个样本点色坐标的均方根值; k_1 为 $\Delta u'v'$ 取最小、 U_{color} 为90%的计算值。由(1)式可以看到,在保证实验准确性的前提下,实验中难以测量的PPFD均

匀度可以由照度均匀度来代替,从而可以简化实验过程。

基于以上分析,实验采用九点取样法来测量和研究三维照明空间中水平和竖直方向两个参考面的PPFD均匀度和混色均匀度,用以表示在三维空间中的照明质量。

3 植物光源的理论分析

3.1 多光源模块植物照明系统的设计

光源系统依托常见的植物培养架进行设计,该系统包含底部种植位孔两侧的倒置型光源模块、培养架中部的光源模块和顶部的直下式光源模块。通过三光源模块的立体混光来实现高空间均匀度的照明效果,混光原理如图2所示。

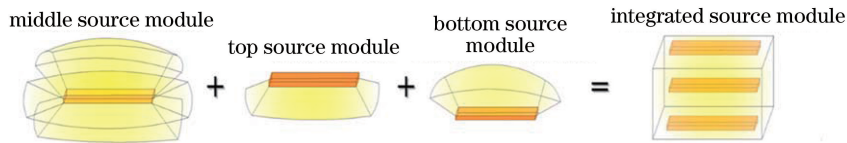


图2 三光源模块的混光原理

Fig. 2 Light mixing principle of three-light source module

具体的植物光源系统结构如图3所示,其中 H 为顶部反射面到种植面的距离, h 为倒三棱柱的高宽比,即 $h = s/D$, D 为三棱柱灯架的截面三角形最长边的边长, s 为三棱柱的高, L 为种植面的宽度。考虑到植物工厂的实际应用需求^[10], L 为200 mm, D_1 为30 mm, D_2 为50 mm。

培养架的顶部设计成漫反射面以增加光在空间中的耦合距离,从而提高光源均匀度。光源模块1的

LED光源放置在底部种植面的倒三棱柱上,光源模块2的LED光源放置在培养架中心的四棱柱灯架上,该四棱柱灯架可看作两个倒三棱柱的贴合体,对于模块1和模块2的光源,通过调整三棱柱倾角可以实现出射光线的初次分配。光源模块3的LED光源的排列方式如图4所示,均放置在顶部反射面上。

3.2 整体光学架构的理论分析

根据图3(c)的结构对光源进行分析。光线主要

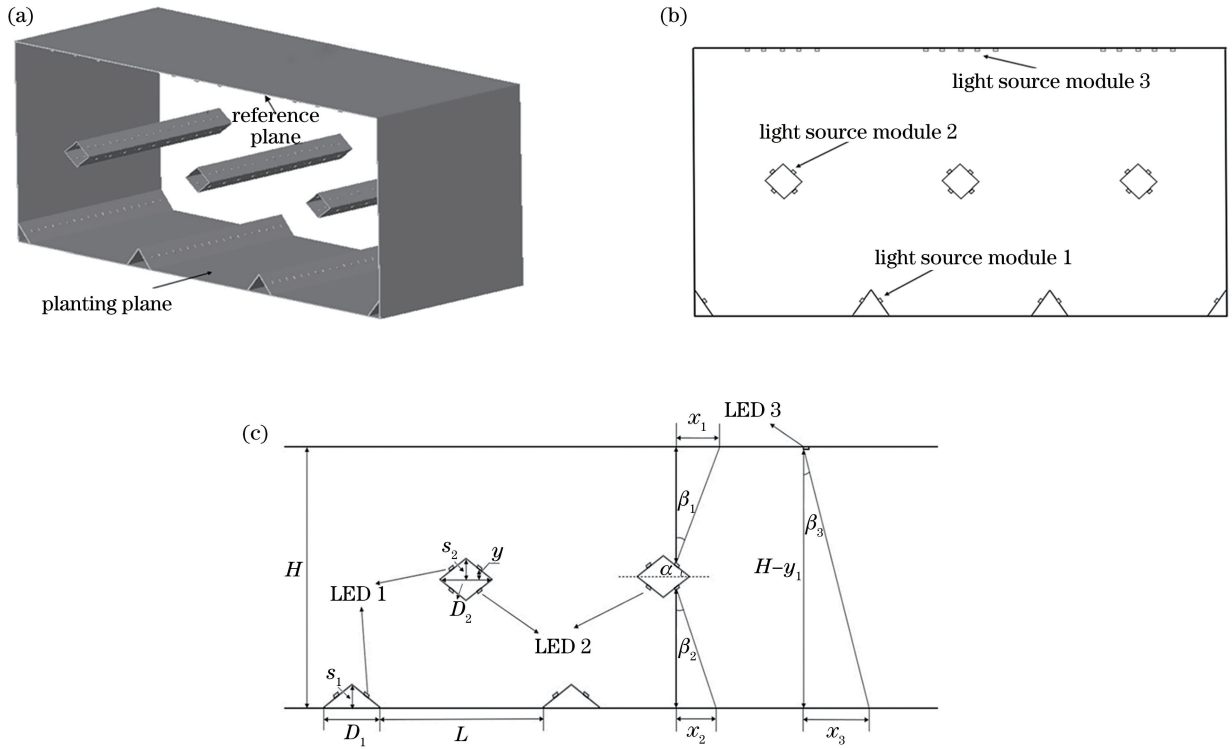


图 3 植物培养架的结构。(a)植物培养架结构；(b)植物培养架剖面图；(c)植物培养架剖面图及相关参数
Fig. 3 Structure of plant cultivation rack. (a) Plant culture rack structure; (b) plant culture rack section view; (c) plant culture rack section view and related parameters

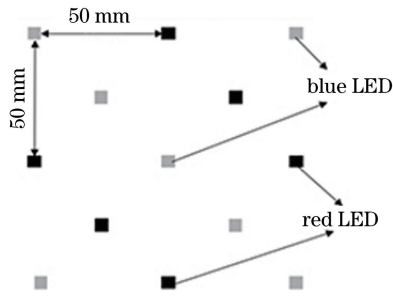


图 4 光源模块 3 的结构
Fig. 4 Structure of light source module 3

分为直射光和反射光两部分,现将所有光源分为三部分并对其进行分析,如图 3(c)所示。入射至反射面的光源可看作次朗伯光源^[12-13]。

对于 LED 1 的反射光,以模块 2 的 LED 光源为研究对象,光线照射至顶部漫反射板上任一点 G, G 点照度为

$$E(x_1) = I_0 \cos \beta_1 / [(H/2) - y]^2, \quad (4)$$

式中: I_0 为光源中心的光强; $\beta_1 = \arctan\{x_1 / [(H/2) - y]\}$, $y = D_2 \tan a / c$, $a = \arctan(s_2 / D_2)$, c 为一常数。照射至种植位点的照度为

$$E(\beta_1) = \int_0^L I_0 \cos^3 \omega / [(H/2) - y]^2 dx, \quad (5)$$

式中: ω 为 LED 出射光线与法线的夹角。

对于 LED 2 的直射光,光线照射至种植位点的照度为

$$E(x_2) = I_0 \cos^3 \beta_2 / [(H/2) - y]^2, \quad (6)$$

式中: $\beta_2 = \arctan\{x_2 / [(H/2) - y]\}$ 。照射至种植位点的照度为

$$E(\beta_2) = \int_0^L I_0 \cos^3 \omega / [(H/2) - y]^2 dx. \quad (7)$$

对于 LED 3 的直射光,光线照射至种植位点的照度为

$$E(x_3) = I_0 \cos^3 \beta_3 / (H - y_1)^2, \quad (8)$$

式中: $\beta_3 = \arctan[x_3 / (H - y_1)]$; y_1 为 LED 3 出光面到顶部反射面的距离。照射至种植位点的照度为

$$E(\beta_3) = \int_0^L I_0 \cos^3 \omega / (H - y_1)^2 dx. \quad (9)$$

由上述分析可知, h 、 H 以及光源模块 2 的 s_2 都会影响种植位点的照度,从而影响受照面的光谱分布和色度分布^[14]。实验将 h 、 H 以及 s_2 作为考察指标并进行下一步研究。

4 实验与讨论

4.1 Taguchi 实验设计

通过正交表来挑选满足实验条件和设计分组的

Taguchi 方法,其可以在保证准确度的前提下极大地简化实验过程^[15-16]。将 h 、 H 以及 s_2 取不同水平

(表 1)并代入 $L_{16}(4^5)$ 正交矩阵中,实验参数设计如表 2 所示,其中 S/N 为信噪比。

表 1 植物培养架的影响因子及标准

Table 1 Influencing factors and standards of plant cultivation racks

Code	Factor	Number of levels	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
A	h	4	0.25	0.50	0.75	1.00
B	s /mm	4	12.5	25.0	37.5	50.0
C	H /mm	4	200	300	400	500

表 2 采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表的实验设计参数

Table 2 Experimental design parameters using $L_{16}(4^5)$ orthogonal table

Serial No.	A	B	C	Plane	Illumination uniformity /%	Color-mixed uniformity /%	S/N of illumination uniformity	S/N of color-mixed uniformity
1	1	1	1	J	89.664	89.616	38.856	39.047
				V	51.307	90.529	34.203	39.135
2	1	2	2	J	93.479	86.415	39.414	38.712
				V	81.128	81.634	38.183	38.237
3	1	3	3	J	94.528	82.221	39.511	38.299
				V	89.887	90.246	39.073	39.108
4	1	4	4	J	92.561	85.547	39.329	38.644
				V	90.780	85.135	39.160	38.602
5	2	1	2	J	91.889	90.000	39.265	39.085
				V	84.705	85.091	38.558	38.597
6	2	2	1	J	89.511	87.775	39.037	38.864
				V	81.146	86.989	38.185	38.789
7	2	3	4	J	94.247	86.148	39.485	38.704
				V	95.109	87.517	39.564	38.841
8	2	4	3	J	90.884	88.457	39.169	38.935
				V	92.917	88.414	39.362	38.930
9	3	1	3	J	89.201	85.538	39.007	38.643
				V	88.052	88.658	38.895	38.954
10	3	2	4	J	93.039	87.947	39.373	38.884
				V	92.983	89.999	39.368	39.084
11	3	3	1	J	91.629	88.242	39.241	38.913
				V	84.265	83.350	38.513	38.418
12	3	4	2	J	92.176	88.221	39.292	38.911
				V	92.357	81.416	39.309	38.214
13	4	1	4	J	92.142	87.449	39.289	38.835
				V	89.295	86.281	39.016	38.718
14	4	2	3	J	91.665	81.694	39.244	38.244
				V	92.667	86.433	39.338	38.733
15	4	3	2	J	91.642	80.662	39.241	38.133
				V	88.566	88.071	38.945	38.897
16	4	4	1	J	91.543	87.546	39.232	38.845
				V	88.769	84.271	38.965	38.513

从表 1 可以看到,对于因子 A 和 B,不同水平最终体现为灯珠在斜面倾角间的差异。考虑到在不同因子水平下的培养架质量参数应有较为明显的差别,以及所设计的光源系统在实际应用中的可行性,

选取因子 A 为 0.25、0.50、0.75 和 1.00 4 个水平,选取因子 B 为 12.5、25.0、37.5、50.0 mm 4 个水平,分别对应灯架的斜面倾角为 26.57°、45.00°、56.31°和 63.43°。对于因子 C,培养架的高度需设

置在 200 mm 以上才可适用于植物幼苗的培养以及多数草本蔬菜和花卉的培育,而培养架的单元结构尺寸过大会降低光源系统的能量利用率以及植物工厂的空间利用率,所以选取因子 C 为 200,300,400,500 mm 4 个水平进行实验研究。

参考已有的实验研究成果^[15],综合考虑植物照明系统对光源的要求,仿真模拟过程中设置红、蓝 LED 相间分布,红光 LED 的波长为 640 nm,蓝光 LED 的波长为 460 nm,发光效率分别为 90 lm/W 和 45 lm/W,功率分别为 1 W 和 2 W,每个灯珠均出射 10000 条光线。

通过计算和分析模拟结果的 S/N 值可以找到最优解, S/N 值是数量化品质特性的方法。实验研

究的均匀度为望大特性, S/N 值^[15]可表示为

$$L_{TB}(S/N) = -10 \cdot \lg \left[\left(\sum_{i=1}^n 1/m_i^2 \right) / n \right], \quad (10)$$

式中: m_i 为第 i 次模拟获得的品质; n 为实验次数。经过 TracePro 软件模拟后,采用九点取样法来测量照度和色度,使用(1)~(3)式计算两个参考面的照度均匀度和混色均匀度($k_1 = 61.84$, $k_2 = 69.42$, k_1 为计算水平参考面混色均匀度; k_2 为计算竖直参考面混色均匀度),根据(10)式计算 S/N 值,计算结果如表 2 所示,其中 J 表示水平种植面, V 表示中心竖直面。将各因子品质的 S/N 值统计绘制成折线图以便找到最优的因子水平,结果如图 5 所示。

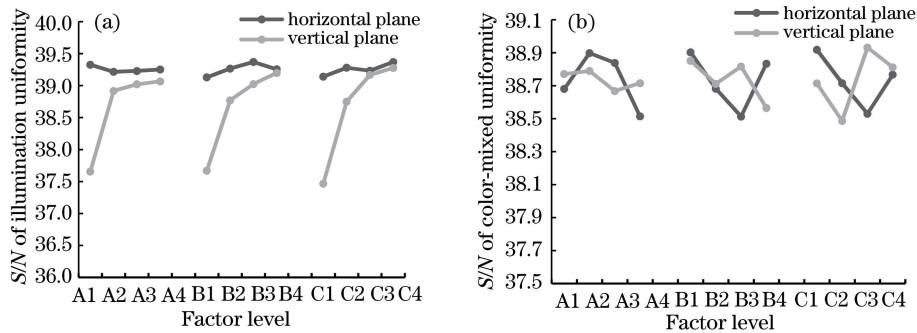


图 5 各因子水平对应的 S/N 值。(a)照度均匀度;(b)混色均匀度

Fig. 5 S/N values corresponding to each factor level. (a) Illumination uniformity; (b) color-mixed uniformity

对于因子 $A(h)$ 和 $B(s_2)$,当放置光源的倒三棱柱斜面倾角过大或过小时,均会导致光线在空间某一区域中聚集分布,从而难以获得均匀的照明效果。从图 5 可以看到,照度均匀度和混色均匀度的 S/N 值在 $A3(h=0.75)$ 和 $B2(s_2=25 \text{ mm})$ 处均能达到较优;当两个因子取其余水平时,均会出现某一评判质量的 S/N 值很差的情况,故实验选择 $A3(h=0.75)$ 和 $B2(s_2=25 \text{ mm})$ 为最优的因子水平。对于因子 $C(H)$,当 H 取较大值时,各光源模块的出射光线在空间中的传播距离更长,光线在到达受照面前会得到充分耦合,更容易获得高均匀度的光分布。为此,呈现的照明质量变化趋势如图 5 所示,水平面和竖直面的照度均匀度的 S/N 值在 $C4$ 处达到最优,两面混色均匀度的 S/N 值在 $C4$ 处与最优值相差较小,故实验选择 $C4(H=500 \text{ mm})$ 为最优的因子水平。综上可初步得到 $A3B2C4$ 的组合为最优解,仿真模拟获得水平参考面的照度均匀度为 93.039%,混色均匀度为 87.947%;竖直参考面的照度均匀度为 92.983%,混色均匀度为 89.999%。获得的最优解结构 $A3$ 为光源模块 1 倒三棱柱灯架

的高宽比 $h=0.75$, $B2$ 为光源模块 2 灯架的结构参数 $s_2=25 \text{ mm}$, $C4$ 为种植面到反射面的距离 $H=500 \text{ mm}$ 。

4.2 ANOVA

ANOVA 是通过评估各因子对质量的影响程度来判断其对结果贡献率的科学分析方法^[17-18],进一步精细化设计影响力最大的因子以提高实验的准确度。因子影响力的强弱由参量 P 来表示,即各因子变异与总变异之比^[19],表达式为

$$P = S_A / S_T, \quad (11)$$

$$S_T = S'_A + S_E, \quad (12)$$

式中: S_A 和 S'_A 为数据间的差异; S_E 为随机误差所引起的差异(多次重复实验中常认为 S_E 值为 0)。 S_A 的表达式为

$$S_A = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \bar{\eta})^2, \quad (13)$$

式中: η_i 为因子第 i 次的模拟结果; $\bar{\eta}$ 为该因子模拟结果的平均值。实验研究对象为第 4.1 节得到的各质量 S/N 值, $\eta = L_{TB}(S/N)$ 。计算得到各因子对质量的贡献率如表 3 和表 4 所示。

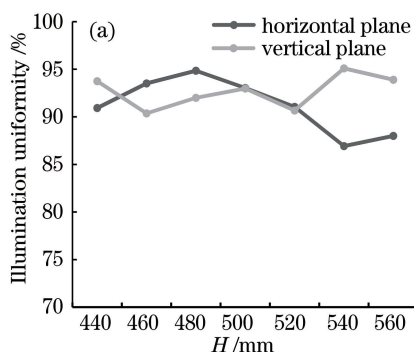
表 3 各因子对照度均匀度的贡献率
Table 3 Contribution rate of each factor to illumination uniformity

Code	Horizontal plane /%	Vertical plane /%
A	11.72	28.22
B	46.03	29.18
C	43.11	42.59

表 4 各因子对混色均匀度的贡献率
Table 4 Contribution rate of each factor to color-mixed uniformity

Code	Horizontal plane /%	Vertical plane /%
A	34.73	5.54
B	35.19	29.96
C	30.07	64.49

从表 3 和表 4 可以看到,因子 C 对两个参考面照明均匀度的贡献最大。由第 4.1 节分析可知,当 H 取较大值时光线会得到充分耦合, H 值过大会导致三个光源模块的间隔距离变大,互补



混光效果变差,空间照度圆叠加不充分致使所测取样面的照明均匀度较低,所以需要因子 C 取 7 个水平进行进一步研究,以减小误差而获得精确解。

在保持因子 A 取 $A_3(h=0.75)$,因子 B 取 $B_2(s_2=25\text{ mm})$ 的情况下, H 值分别取 440,460,480,500,520,540,560 mm 7 个水平,使用 TracePro 软件对其进行模拟仿真并计算两个参考面的照度均匀度和混色均匀度($k_1=88.68, k_2=80.75$),结果如图 6 所示。

从图 6 可以看到,当因子 C 选择 $H=480\text{ mm}$ 时,各评价指标均达到最优水平。在最优解的情况下,培养架的结构参数:种植面宽度 $L=200\text{ mm}$ 、 $s_2=25\text{ mm}$ 、 $H=480\text{ mm}$ 和 $h=0.75$,则培养架在水平参考面的照度均匀度为 94.85%,混色均匀度为 90%;竖直参考面的照度均匀度为 91.99%,混色均匀度为 88.79%,照度色度分布如图 7 所示。

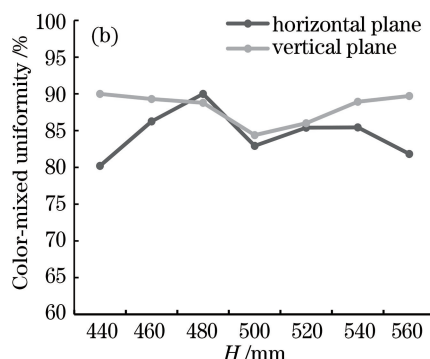


图 6 照明质量与 H 的关系。(a)照度均匀度;(b)混色均匀度

Fig. 6 Relationship of lighting quality and H . (a) Illumination uniformity; (b) color-mixed uniformity

4.3 灯珠形状与间距

由不同的形状与排列间距的 LED 灯珠组成的光源系统在工作时,照明空间的光强分布有较大差异,进而影响水平和竖直方向上的照度均匀性和混色均匀性,接下来基于培养架最优解进一步研究 LED 灯珠的形状与间距对植物光源空间照明均匀度的影响。

首先设置灯珠的发光面,用来研究 LED 灯珠形状对光源系统照明质量的影响,如图 8 所示。图 8(a)为 2.5 mm 半径的圆形 I_1 ,图 8(b)为 3 mm 半径的圆形 I_2 ,图 8(c)为 5 mm×5 mm 大小的方形 I_3 ,图 8(d)为 4 mm×6 mm 大小的矩形 I_4 ,图 8(e)为 6 mm×4 mm 大小的矩形 I_5 。经过 TracePro 软件模拟后,计算不同形状的灯珠在两个参考面的照度均匀度和混色均匀度($k_1=41.80$, 直方向的照明质量明显变差。从图 10 可以看到,当

$k_2=57.23$),结果如图 9 所示。从图 9 可以看到,方形的灯珠配合所得的最优解可以表现出最佳的混光效果,得到培养架种植面的照度均匀度为 94.85%,混色均匀度为 90.00%;竖直面照度均匀度为 92.00%,混色均匀度为 89.65%。

进一步对光源模块 1 和模块 2 中的 LED 灯珠间距进行研究,考虑到植物培养对环境光强度的需求^[20],设置灯珠的间距分别为 10,15,20,25 mm,使用 TracePro 软件仿真模拟获得图 10 的结果($k_1=88.68, k_2=80.75$)。实际光源发出的光线在空间各方向上的分布并不均匀,所以当光源系统中灯珠的间距过小时,照明空间特定位置的光线聚集分布,出现空间小范围的光强明显大于其他区域的现象。当模块 1 和模块 2 光源系统中灯珠的间距大于 20 mm 时,三光源模块互补混光效果变差,导致竖灯珠间距为 15 mm 时,光源系统达到最优的照明效

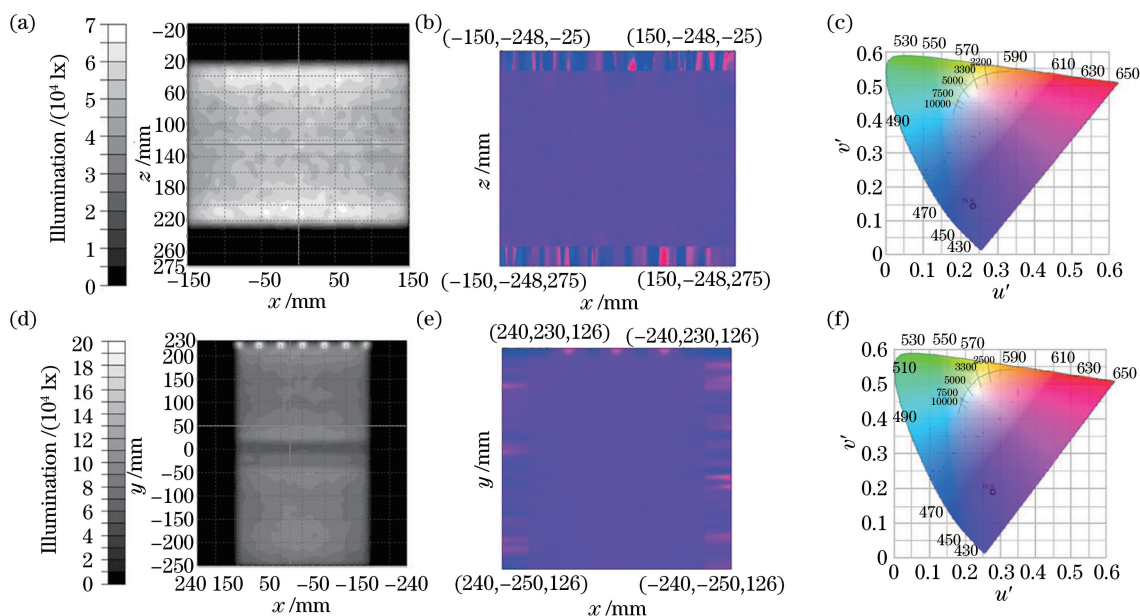


图 7 培养架在不同取样面的最终优化结果。水平取样面(a)照度分布,(b)光质分布,(c)色度图;竖直取样面(d)照度分布,(e)光质分布,(f)色度图

Fig. 7 Final optimized results of culture rack on different sampling surfaces. Horizontal sampling plane (a) illuminance distribution; (b) light quality distribution; (c) chromaticity diagram; vertical sampling plane; (d) illuminance distribution; (e) light quality distribution; (f) chromaticity diagram

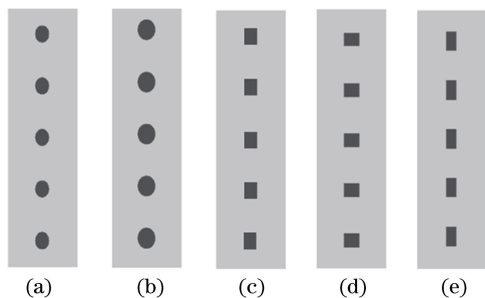


图 8 LED 芯片的形状。(a) I_1 ; (b) I_2 ; (c) I_3 ; (d) I_4 ; (e) I_5

Fig. 8 Shape of LED chip. (a) I_1 ; (b) I_2 ; (c) I_3 ; (d) I_4 ; (e) I_5

果,水平取样面照度均匀度达到 94.85%,混色均匀度达到 90%;竖直取样面照度均匀度达到 91.99%,混色均匀度达到 88.79%。当灯珠间距取不同水平时,两个取样面的照度均匀度保持在 90%左右的较高水平,水平方向的混色均匀度保持在 85%以上,只有当灯珠间距大于 20 mm 时,照明空间在竖直方向的混色均匀度略差,可以看到只有灯珠间距过大才会明显影响光源系统的照明质量。

4.4 植物生长模拟与实物测试

实际使用的环境中,所育植物对光具有遮挡和吸收的作用,其会对植物光源系统的照明均匀度产生影响,并且随着植物的生长,植株受照面变大,对

光源系统照明质量的影响愈加明显。接下来利用不同高度的倒三棱柱来模拟不同生长状态的植物,研究所育植物的遮挡和吸收对所设计光源系统照明质量的影响,结果如图 11 所示。选择倒三棱柱的顶面和侧面为参考面,分别对应植物顶受照面和侧受照面。经过 TracePro 软件模拟仿真,利用(1)~(3)式计算两个参考面的照度均匀度和混色均匀度,结果如图 12 所示($k_1=56.8227, k_2=48.1119$)。

从图 12 可以看到,随着植物高度的增加,叶片的表面积增大,其对光的遮挡和吸收效果更为明显,所以随着植物高度的增加,两个参考面的照度均匀度均有下降趋势。由仿真模拟结果可以看到,所育植物高度在 20~160 mm 范围内,其顶受照面和侧受照面的照度均匀度保持在 82%以上,混色均匀度保持在 83%以上,可见植物的遮挡和吸收对光源系统的照明质量影响较小,表明基于三光源立体混光原理的植物光源系统可广泛应用于植物工厂幼苗的培育以及草本植物的培养。

为了进一步验证仿真模拟结果的准确性与完备性,在所得仿真最优解的基础上进行简易实物模型的搭建和测试,实物模型如图 13 所示。考虑到实验环境、材料、工艺限制和用电安全,搭建实物模型使用光通量为 30 lm、功率为 1 W 的红、蓝 LED 灯珠作为光源。实物模型的顶部光源为间隔 50 mm 排

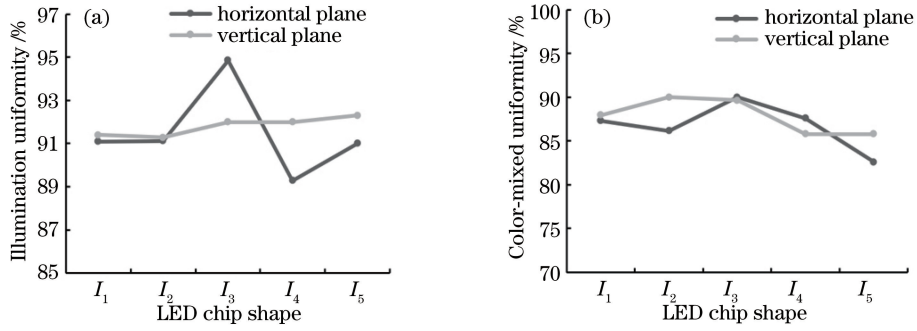


图 9 照明质量与 LED 芯片形状的关系。(a)照度均匀度;(b)混色均匀度

Fig. 9 Relationship between lighting quality and LED chip shape. (a) Illumination uniformity; (b) color-mixed uniformity

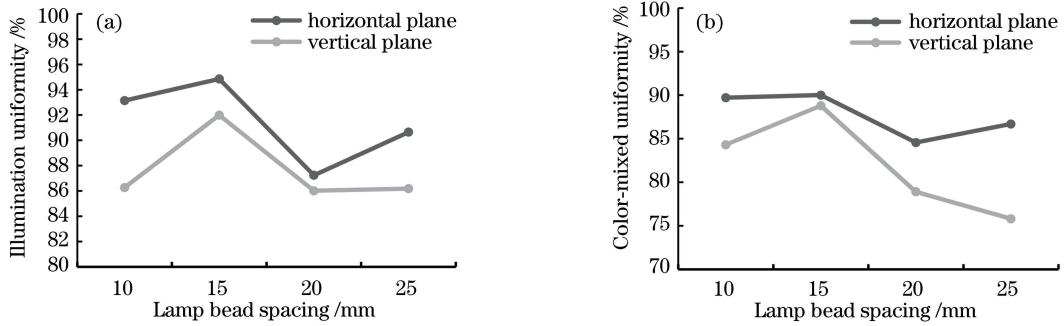


图 10 照明质量与 LED 灯珠间距的关系。(a)照度均匀度;(b)混色均匀度

Fig. 10 Relationship between lighting quality and LED lamp bead spacing. (a) Illumination uniformity; (b) color-mixed uniformity

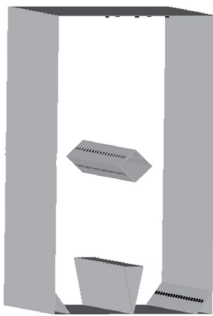


图 11 植物生长模拟测试模型

列的 13 颗红、蓝 LED 灯珠,体心光源模块的排布方式参照仿真模型的 4 列,共 24 颗红、蓝 LED 灯珠,底部光源模块为排列在种植面倒三棱柱斜面上的两列,共 12 颗红、蓝 LED 灯珠。除了灯珠功率与数量的差别外,实物植物光源系统的各项参数均严格参照仿真结果。仿真模型与实物模型在灯珠功率和数量上的差异,在一定程度上会带来两者照明空间光强度的差别,对空间照明均匀度的影响较小,所以简易模型的实测数据具有一定的参考价值。

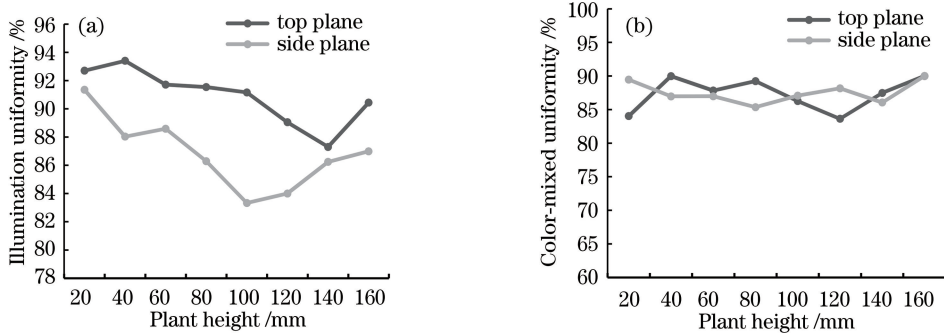


图 12 植物高度与光源照明质量的关系。(a)照度均匀度;(b)混色均匀度

Fig. 12 Relationship between plant height and light source lighting quality. (a) Illumination uniformity; (b) color-mixed uniformity



图 13 实物测试模型

Fig. 13 Physical test model

表 5 实物测试结果与仿真结果对比

Table 5 Comparison of physical test results and simulation results

Condition	Plane	Physical test result	Simulation result
Illumination uniformity / %	J	87.38	91.35
	V	84.09	89.71
Color-mixed uniformity / %	J	86.26	87.67
	V	86.89	88.54

对比各项实验结果,由于受到实际环境和模型制作工艺等影响,实物模型两个参考面的照度均匀度略低于仿真结果,混色均匀度与仿真结果持平。从表 5 可以看到,简易实物模型的照明质量虽与仿真结果略有差距,但其差距在允许范围内,所得结果证实植物光源系统可以在实际植物工厂应用中提供高质量的照明环境。

5 结 论

以空间照明均匀度理论为依据,通过研究培养架在水平、竖直两方向上的 PPFD 均匀度和混色均匀度来实现整个种植空间的高照明均匀度。设计基于三光源模块的混光原理,并结合倒置光源、直下式光源以及种植空间中部光源模块的多光源模块植物光源系统,进一步参考 Taguchi 实验具体研究 h 、 H 以及 s_2 三个影响因素对两个取样面照明均匀度的影响,应用 ANOVA 理论对影响最大的因子进行精细化设计,更深入地研究灯珠的形状和间距对植物光源系统质量的影响,最终获得高空间照明质量植物光源系统的设计方案。仿真得到培养架在水平面的照度均匀度为 91.35%,混色均匀度为 87.67%;竖直面的照度均匀度为 89.71%,混色均匀度为 88.54%。最后依据仿真得到的最优解进行植物生长模拟与实物测试。实验结果表明搭建的实物模型的照明均匀度与仿真结果相差较小,证实设计的植物光源系统可以实现植物生长空间内的高空间照明

使用照度计来测量实物模型的各项光学参数,计算水平和竖直方向上两个参考面的照度均匀度与混色均匀度($k_1=88.68, k_2=80.75$),得到仿真模型和简易实物模型的照明质量参数,如表 5 所示。

从表 5 可以看到,仿真得到培养架在水平面的照度均匀度为 91.35%,混色均匀度为 87.67%;竖直面的照度均匀度为 89.71%,混色均匀度为 88.54%。进一步对高度为 80~140 mm 的黄瓜幼苗在实物模型光照的环境下进行研究,测得植物叶片表面的照度均匀度为 86.31%,混色均匀度为 88.74%($k_1=88.68$)。

均匀度,能够有效改善植物的培养光环境,对高质量植物光源系统设计有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Liu H C. Development status and trend of LED plant lighting industry[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2018, 29(4): 8-9.
刘厚诚. LED 植物照明产业的发展现状与趋势[J]. 照明工程学报, 2018, 29(4): 8-9.
- [2] Xu D Q. Several problems in the research of plant light stress [J]. Plant Physiology Communications, 2003(5): 493-495.
许大全. 植物光胁迫研究中的几个问题[J]. 植物生理学通讯, 2003(5): 493-495.
- [3] Li L Y, Li J, Tong X J, et al. Simulation on photosynthetic light-responses of leaves of *Quercus variabilis* and *Robinia pseudoacacia* under different light conditions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2295-2306.
李理渊, 李俊, 同小娟, 等. 不同光环境下栓皮栎和刺槐叶片光合光响应模拟[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2295-2306.
- [4] Han L L, Cheng Z, Niu P J, et al. Design of LED family plant factory control system [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2019, 30(2): 71-80.
韩丽丽, 程峥, 牛萍娟, 等. LED 家庭植物工厂控制系统设计[J]. 照明工程学报, 2019, 30(2): 71-80.
- [5] Jiang X Y, Wen S S, Ma B X, et al. Design of high illumination uniformity inverted LED plant light

- source system[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(9): 1172-1184.
- 姜昕宇, 文尚胜, 马丙戌, 等. 高照明均匀度倒置型 LED 植物光源系统的设计[J]. 发光学报, 2019, 40(9): 1172-1184.
- [6] Jiang X Y, Wen S S, Zuo X, et al. High illumination uniformity inverted plant light source design with bulge structure [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(3): 339-349.
- 姜昕宇, 文尚胜, 左欣, 等. 具有凸台结构的高照明均匀度倒置型植物光源设计[J]. 发光学报, 2020, 41(3): 339-349.
- [7] Yu L, Niu Z M, Lin L, et al. Influence of trunk height on PPFD and UV distribution of the crown of open center system apple tree[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(11): 1755-1759.
- 蔚露, 牛自勉, 林禄, 等. 树干高度对苹果开心形叶幕 PPFD 与 UV 的影响[J]. 山西农业科学, 2017, 45(11): 1755-1759.
- [8] Ye Z P. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO₂ [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2010, 34(6): 727-740.
- 叶子飘. 光合作用对光和 CO₂ 响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 727-740.
- [9] Liu X D, Ma W M, Shen Y G. State transition of the photosynthetic apparatus in plant [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2006, 32(2): 127-132.
- 刘贤德, 马为民, 沈允钢. 植物光合机构的状态转换[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(2): 127-132.
- [10] Zhang S, Wen S S, Ma B X, et al. High uniformity LED panel-light for plant lighting [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(3): 403-413.
- 张帅, 文尚胜, 马丙戌, 等. 适用于植物照明的高均匀度 LED 面光源设计[J]. 发光学报, 2018, 39(3): 403-413.
- [11] Wang H C, Chiang Y T, Lin C Y, et al. All-reflective RGB LED flashlight design for effective color mixing [J]. Optics Express, 2016, 24(5): 4411-4420.
- [12] Zhu Z M, Qu X H, Jia G X, et al. Uniform illumination design by configuration of LED array and diffuse reflection surface for color vision application[J]. Journal of Display Technology, 2011, 7(2): 84-89.
- [13] Zhu Z M, Qu X H, Liang H Y, et al. Uniform illumination study by light-emitting diode ring array and diffuse reflection surface[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0115001.
- 祝振敏, 曲兴华, 梁海昱, 等. 基于发光二极管环形阵列与漫反射表面的均匀照明光源研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0115001.
- [14] Jin X L, Wen S S, Ma B X, et al. Design of high uniformity LED plant lamp [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(10): 1466-1477.
- 靳肖林, 文尚胜, 马丙戌, 等. 高均匀度 LED 植物光源的设计[J]. 发光学报, 2018, 39(10): 1466-1477.
- [15] Zhang D S, Zhang X, Wang H, et al. Robust optimization of powertrain mounting system based on Taguchi method[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(4): 475-480, 514.
- 张代胜, 张旭, 王浩, 等. 基于 Taguchi 方法的动力总成悬置系统稳健优化[J]. 汽车工程, 2014, 36(4): 475-480, 514.
- [16] Zhao K, Liang X D, Wang W, et al. Multi-objective optimization of coaxial powder feeding laser cladding based on NSGA-II [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102004.
- 赵凯, 梁旭东, 王伟, 等. 基于 NSGA-II 算法的同轴送粉激光熔覆工艺多目标优化[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102004.
- [17] Ting Y, Huang J S, Chuang F K, et al. Dynamic analysis and optimal design of a piezoelectric motor [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(6): 601-613.
- [18] Qiao J P, Qiu Y B, Zhang S, et al. Application of one-way ANOVA in analysis of experimental results of the degree of gravel soil compaction under different freeze-thaw cycles conditions [J]. Engineering & Test, 2019, 59(2): 85-87.
- 乔介平, 邱银宝, 张帅, 等. 单因素方差分析在不同冻融条件下砾石土料压实性研究试验成果分析中的应用[J]. 工程与实验, 2019, 59(2): 85-87.
- [19] Ma B X, Wen S S, Chen Y C, et al. Design of edge-lighting LED flat panel light without light guide plate [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 0418001.
- 马丙戌, 文尚胜, 陈颖聪, 等. 侧入式无导光板 LED 平板灯设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0418001.
- [20] Chen H W, Wen S S, Ma B X, et al. Design of plant lighting LED lamp with freeform surface substrate based on light quantum theory [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0222001.
- 陈浩伟, 文尚胜, 马丙戌, 等. 基于量子光学的植物照明用自由曲面底板 LED 光源设计[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0222001.