

光净化用紫外 LED 阵列模组的均匀照度优化设计

经周¹, 樊嘉杰^{1,2,3*}, 陈威^{1,2}, 刘杰¹, 吴伟子¹, 熊衍建²

¹河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022;

²常州市武进区半导体照明应用技术研究院, 江苏 常州 213161;

³代尔夫特理工大学电气工程、数学和计算机科学学院微电子系, 荷兰 代尔夫特 2628

摘要 针对紫外光净化系统应用提出了一种紫外发光二极管(LED)阵列模组的均匀照度优化设计方法。该方法首先基于单颗 LED 的光强度分布采用几何光学理论计算净化层接收面上的照度;再结合阵列模组与净化层的间距、净化层最小照度与最大照度之比、单颗 LED 发光角度等要求,采用二分法和 TracePro 仿真分别得到最佳 LED 阵列间距和照度分布模拟结果;最后,还进行了阵列模组均匀照度测量实验,用于验证仿真模拟结果的准确性。研究表明,提出的设计方法能够实现不同照度均匀性、结构、光源要求下的 LED 阵列排布优化设计,对紫外光净化系统设计和开发有重要指导意义。

关键词 光学器件; 紫外 LED; 阵列模组; 紫外光净化; 均匀照度

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.192303

Optimized Uniform Illumination Design of Ultraviolet LED Array Module Used in Light Purification

Jing Zhou¹, Fan Jiajie^{1,2,3*}, Chen Wei^{1,2}, Liu Jie¹, Wu Weizi¹, Xiong Yanjian²

¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China;

²Changzhou Institute of Technology Research for Solid State Lighting, Changzhou, Jiangsu 213161, China;

³Department of Microelectronics, EEMCS Faculty, Delft University of Technology, Delft 2628, the Netherlands

Abstract We propose an optimized uniform illumination design method for the ultraviolet (UV) light-emitting diode (LED) array module considering its application in UV light purification systems. First, the geometrical optics theory is used to evaluate the illumination of the purification layer receiving surface based on the luminescence intensity distribution in case of a single LED. Then, by combining the requirements of the spacing between the array module and purification layer, the ratio of the minimum and maximum illuminances of the purification layer, and illumination angle of a single LED, the optimal array spacing and simulation results of illuminance distributions are obtained by the dichotomy method along with the TracePro simulation. Finally, an uniform illumination measurement test has been designed for the array module to verify the accuracy of the simulation results. The research results demonstrate that the proposed method can realize an optimal design of the LED array module under different requirements with respect to the illumination uniformity, structure, and light source; furthermore, the proposed method exhibits important guiding significance for the design and development of UV light purification systems.

Key words optical devices; ultraviolet LED; array module; ultraviolet light purification; uniform illumination

OCIS codes 230.3670; 220.4298; 220.2945; 080.4298

收稿日期: 2019-03-05; 修回日期: 2019-03-27; 录用日期: 2019-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51805147, 61673037)、江苏省六大人才高峰项目(GDZB-017)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(2017B15014)

* E-mail: jay.fan@connect.polyu.hk

1 引言

目前,许多建筑采用封闭式结构,比如医院、办公楼等,导致室内空气不流通,容易滋生细菌,从而危害人们的身体健康。紫外光具有破坏病毒的核酸结构的能力,使其功能遭到破坏,从而达到消毒、灭菌、净化空气的作用^[1-3]。新型紫外(UV)发光二极管(LED)光源具有节能、环保、体积小和寿命长等优点,人们开始运用紫外LED开发光净化系统。

紫外LED光净化系统已经逐渐被应用于民用、工业、医疗及餐饮等行业^[4-5]。该系统一般由风道、过滤器、紫外LED模块和净化层等部分组成。近年来,国内外学者已经开发了一些大功率紫外LED模组系统,例如, Schneider等^[6]开发的大功率模组由98颗395 nm紫外LED构成,其输入功率达到162 W,辐射功率密度最高可以达到 31.6 W/cm^2 。Horng等^[7]制作了一种新型的DAC(diamond-added copper)散热器,该散热器能够极大地改善紫外LED的热学性能,提高辐射输出功率和辐射效率。Yapici等^[8]用172颗380 nm的InGaN芯片设计了一种低成本的便携式紫外LED曝光系统,最大辐射功率密度为 20 mW/cm^2 。韩秋漪等^[9]开发了高功率紫外LED封装模组,由6颗芯片构成的封装模组则可以取得极高的功率密度,辐射面积为 0.6 cm^2 ,电功率密度大于 720 W/cm^2 。除了满足紫外LED模块的高光功率,实现净化层照度均匀也很重要。紫外LED模块发出的紫外光照射在净化层上发生光催化反应实现杀菌净化,为提高灭菌效果,对净化层照度均匀性也提出了要求。实现均匀照度的方法一般包括:采用柯勒照明匀光系统、积分棒、梯形混光筒、非球面或自由曲面透镜、匀光板或衍射光学元件、复眼透镜阵列等^[10-12]。但是,柯勒照明匀光系统过于复杂,不便应用于光净化系统中;匀光板或衍射光学元件需针对特定的光源单独设计;光线在积分棒、梯形混光筒、复眼透镜中经过多次反射输出匀光,光能的损耗大;非球面或自由曲面透镜设计求解过程复杂,使用不方便^[13-15]。

鉴于以上分析,再综合考虑操作空间与成本,LED本身排列方式也会影响LED模组的匀光效果等,通过优化紫外LED灯珠在线路板上的阵列排布,以及与净化层的间距等来调节净化层接收紫外光照的强度和均匀性是较为常用的方法。因此,在紫外光净化系统中如何通过合理排布紫外LED阵列来提高净化层接收面的照度均匀性,是提高紫外

光净化系统工作效率、降低成本的关键因素之一,也是研究的重点和难点之一。目前,实现均匀照度的主要排列方式有圆环阵列和矩形阵列等^[16],其光接收目标面可以是平面也可是曲面^[17]。另外,已有基于阵列实现照度的动态分布的研究^[18]。例如:刘沁^[19]设计了大型LED阵列,建立了照度均匀度的物理模型,推导出大型LED方形阵列光斑照度均匀度的变化规律;郝剑等^[20]提出了一种阵列型模组的匀光照明系统优化设计方法,先对单模组进行光学设计,然后通过仿真模拟优化模组阵列间距,实现均匀照明设计。但是,所提出的偏微分计算方法较复杂,较难适用于多颗LED阵列模组排布的场合。因此,为了满足不同照度均匀性、模组结构、紫外LED光源要求,优化设计LED阵列排布方式得到合理阵列间距是本研究的关键和核心。

2 均匀照度优化设计要求及理论计算

2.1 优化设计要求

所选紫外光净化系统结构如图1所示。该系统由风道、过滤器、紫外LED阵列模组及净化反应层等关键部分组成。风道主要用于促进空气的循环流动。首先,当空气流过过滤器时,过滤器将空气中的固体污染物过滤掉。然后,在LED阵列模组发出的紫外光照射条件下,剩余有害气体在净化反应层发生裂解反应,达到灭菌效果。

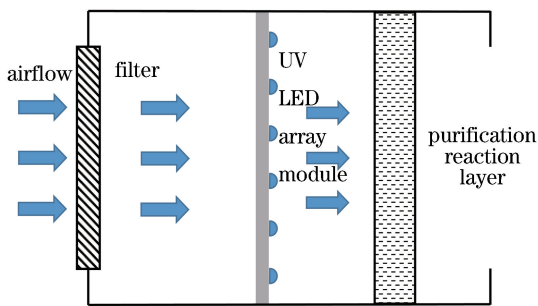


图1 紫外光净化系统结构图

Fig. 1 UV light purification system structure

如图2所示,该系统的核心器件紫外LED阵列模组由多颗紫外LED灯珠、电路板及散热器组成。为了提高系统的净化效率,所设计的紫外LED阵列模组结构要求其通风面积占模组整体面积的50%以上,因此设计成格栅形式,其结构设计如图2(a)所示。为了提高紫外LED阵列模组的光利用效率,使其达到最佳净化效果,针对阵列模组的结构设计提出以下三个优化要求:1)LED光源的选择。光源的光学性能和可靠性直接决定了整个净化系统的净

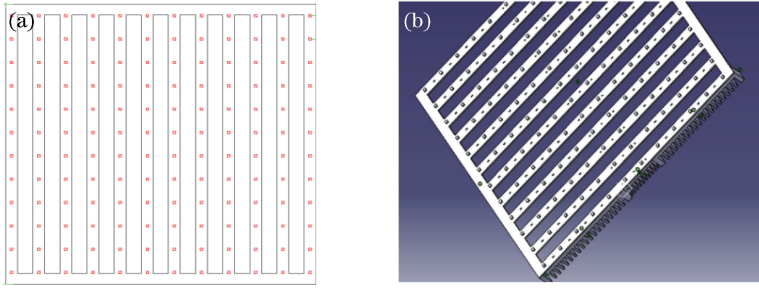


图2 紫外LED阵列模组结构图。(a)二维结构;(b)三维结构

Fig. 2 Structural diagram of UV LED array module. (a) 2D structure; (b) 3D structure

化效率和稳定性。2) 模组的光分布优化。紫外LED灯珠在线路板上的排列方式和距离净化层间距直接关系到净化层接收紫外光照的强度和均匀性,故需对LED阵列进行优化排布设计。3) 模组散热优化。合理利用气体流动来实现主动散热,这样不仅能够提高模组的散热效率,而且可以增强有害气体向净化层表面的扩散,提高净化效果。考虑到紫外模组的光分布优化要求,对LED阵列模组进行优化排布设计,以提高紫外LED阵列模组的光利用效率和净化效果。

2.2 理论计算

2.2.1 单颗光源光强分布

通常,LED发光器件的光强度分布为朗伯型分布^[21-22],其光强分布函数可以表示为

$$I_{\theta} = I_0 \cos \theta, \quad (1)$$

式中: I_0 为发光强度, θ 为发光角度。当 $I_{\theta} = I_0/2$ 时,记发光角度 $\theta = \theta_{1/2}$ 。通常来说,LED器件的光束角以 $2\theta_{1/2}$ 来表示,即朗伯光的光束角 $2\theta_{1/2} = 120^\circ$ 。

为了更加便于光能量的集中利用,也有LED光强度不呈朗伯光分布的,光强分布函数可以表示为

$$I_{\theta} = I_0 \cos^m \theta, \quad (2)$$

式中: m 为近朗伯光系数。这种类似于朗伯光的光强度分布光源为近朗伯光光源,一般而言,光源的发光角度越小,光效越低,但是对于整个光学系统来说,光的能量越集中。

由(2)式可以推算得到

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})}. \quad (3)$$

通过计算可得:当 $2\theta_{1/2} = 120^\circ$ 时, $m = 1$;当 $2\theta_{1/2} = 90^\circ$ 时, $m = 2$;当 $2\theta_{1/2} = 60^\circ$ 时, $m = 4.82$;由此可得,发光角度为 60° 、 90° 和 120° 的发光强度分布如图3所示。

2.2.2 照度理论计算推导

紫外光净化系统中净化层上任意一点的照度通

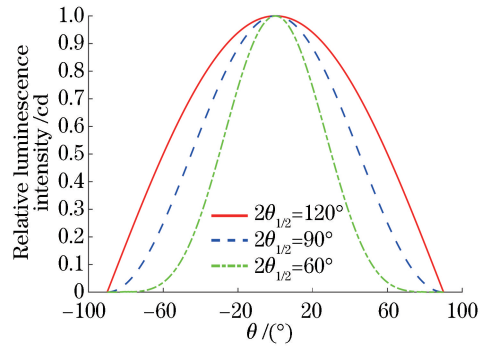


图3 三种发光角度下的发光强度分布

Fig. 3 Luminescence intensity distribution with three illumination angles

常是由紫外LED阵列上所有LED共同贡献的。为了方便计算,以 3×3 矩阵中9颗LED为例,其示意图如图4所示,其中位于LED 2正上方的A点的照度值最大,记该点的照度值为 E_{\max} ($E_{\max} = E_A$),位于4颗LED中心的B点照度值最小,记该点的照度值为 E_{\min} ($E_{\min} = E_B$)。故本文将照度均匀性 u 定义为^[23]

$$u = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \times 100\%. \quad (4)$$

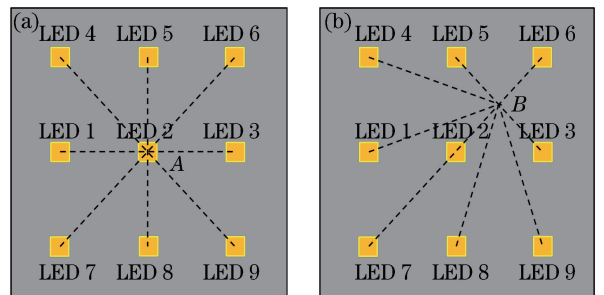


图4 LED阵列对A、B两点照度值的影响。

(a) A点;(b) B点

Fig. 4 Influence of LED array on illumination at points A and B. (a) Point A; (b) point B

对于A点来说,所有LED对A点照度的贡献

值呈中心对称,其中 LED 1、LED 3、LED 5、LED 8 对 A 点照度贡献值相同,LED 4、LED 6、LED 7、LED 9 对 A 点照度贡献值也相同。因此,首先取 LED 1~3 对 A 点的照度进行分析,其示意图如图 5 所示。其中, h 为模组到净化层的距离, α_{1A} 和 α_{3A} 分别为 LED 1 和 LED 3 与 A 点连线与竖直方向所成夹角, r_{1A} 、 r_{2A} 和 r_{3A} 分别为 LED 1、LED 2 和 LED 3 到 A 点的距离, d 为 LED 的间距。

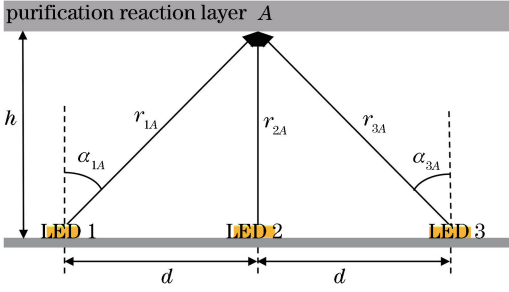


图 5 LED 1~3 对 A 点的照度分析示意图

Fig. 5 Illumination of LED 1-3 at point A

从图 5 中可得到以下几何关系式:

$$\tan \alpha_{1A} = d/h, \quad (5)$$

$$r_{1A} = \sqrt{d^2 + h^2}. \quad (6)$$

照度 E 可以用距离平方反比定律计算得到^[24],即

$$E = \frac{I(\alpha)}{r^2} \cos \alpha, \quad (7)$$

式中: α 为照度计算点和 LED 灯珠连线与竖直方向所成夹角; $I(\alpha)$ 为该 LED 灯珠在 α 角度下的光强; r 为照度计算点到 LED 灯珠的距离。结合(2)~(3)式和(5)~(7)式,能够得到 LED 1~3 对 A 点贡献的照度值:

$$E_{1 \text{ to } A} = E_{3 \text{ to } A} = \frac{I(\alpha_{1A})}{r_{1A}^2} \cos \alpha_{1A} = \frac{I_0}{d^2 + h^2} \cos^{m+1} [\arctan(d/h)], \quad (8)$$

$$E_{2 \text{ to } A} = \frac{I_0}{h^2}. \quad (9)$$

根据对称性可以得到

$$E_{1 \text{ to } A} = E_{3 \text{ to } A} = E_{5 \text{ to } A} = E_{8 \text{ to } A}. \quad (10)$$

同理,LED 4、LED 6、LED 7、LED 9 对 A 点照度贡献值也能够推算出:

$$E_{4 \text{ to } A} = \frac{I_0}{2d^2 + h^2} \cos^{m+1} [\arctan(\sqrt{2}d/h)], \quad (11)$$

$$E_{4 \text{ to } A} = E_{6 \text{ to } A} = E_{7 \text{ to } A} = E_{9 \text{ to } A}. \quad (12)$$

结合以上推算,可得到 A 点的照度 E_A 为

$$E_A = E_{1 \text{ to } A} + E_{2 \text{ to } A} + E_{3 \text{ to } A} + E_{4 \text{ to } A} + E_{5 \text{ to } A} + E_{6 \text{ to } A} + E_{7 \text{ to } A} + E_{8 \text{ to } A} + E_{9 \text{ to } A} = \frac{I_0}{h^2} + 4 \frac{I_0}{d^2 + h^2} \cos^{m+1} [\arctan(d/h)] + 4 \frac{I_0}{2d^2 + h^2} \cos^{m+1} [\arctan(\sqrt{2}d/h)]. \quad (13)$$

B 点照度计算同 A 点照度计算方法类似,同样地取 LED 1~3 对 B 点的照度进行分析,其示意图如图 6 所示。 α_{1B} 、 α_{2B} 和 α_{3B} 分别为 LED 1、LED 2 和 LED 3 与 B 点连线与竖直方向所成夹角, r_{1B} 、 r_{2B} 和 r_{3B} 分别为 LED 1、LED 2 和 LED 3 到 B 点的距离。

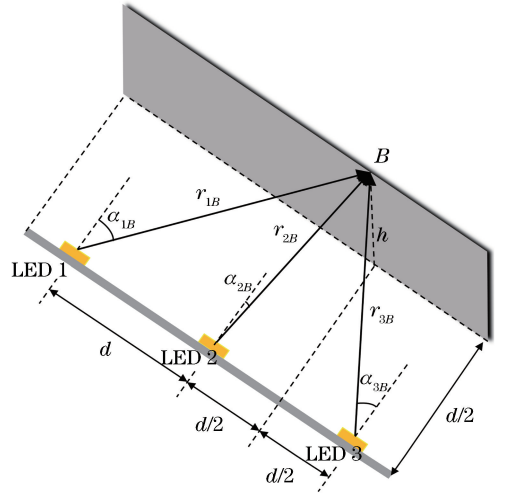


图 6 LED 1~3 对 B 点的照度分析示意图

Fig. 6 Illumination of LED 1-3 at point B

根据对称性,可以推算出 LED 1~LED 9 对 B 点照度的影响:

$$E_{2 \text{ to } B} = E_{3 \text{ to } B} = E_{5 \text{ to } B} = E_{6 \text{ to } B} = \frac{I_0}{2 \left(\frac{1}{2}d\right)^2 + h^2} \cos^{m+1} \left\{ \arctan \left[\sqrt{2 \left(\frac{1}{2}d\right)^2} / h \right] \right\}, \quad (14)$$

$$E_{1 \text{ to } B} = E_{4 \text{ to } B} = E_{8 \text{ to } B} = E_{9 \text{ to } B} =$$

$$\frac{I_0}{\left(\frac{3}{2}d\right)^2 + \left(\frac{1}{2}d\right)^2 + h^2} \cdot \cos^{m+1} \left\{ \arctan \left[\sqrt{\left(\frac{3}{2}d\right)^2 + \left(\frac{1}{2}d\right)^2} / h \right] \right\}, \quad (15)$$

$$E_{7 \text{ to } B} = \frac{I_0}{\left(\frac{3}{2}d\right)^2 + \left(\frac{3}{2}d\right)^2 + h^2} \cdot \cos^{m+1} \left\{ \arctan \left[\sqrt{\left(\frac{3}{2}d\right)^2 + \left(\frac{3}{2}d\right)^2} / h \right] \right\}. \quad (16)$$

由(14)~(16)式可以得到 B 点的照度 E_B 为

$$E_B = E_{1 \text{ to } B} + E_{2 \text{ to } B} + E_{3 \text{ to } B} + E_{4 \text{ to } B} + E_{5 \text{ to } B} + E_{6 \text{ to } B} + E_{7 \text{ to } B} + E_{8 \text{ to } B} + E_{9 \text{ to } B} = \frac{4I_0}{d^2 + h^2} \cos^{m+1} \left(\arctan \frac{d}{\sqrt{2}h} \right) + \frac{4I_0}{5d^2 + h^2} \cos^{m+1} \left(\arctan \frac{\sqrt{5}d}{\sqrt{2}h} \right) + \frac{I_0}{9d^2 + h^2} \cos^{m+1} \left(\arctan \frac{3d}{\sqrt{2}h} \right) \quad (17)$$

所以在 3×3 LED 阵列模组中, A 点照度值最大, $E_{\max} = E_A$, B 点照度值最小, $E_{\min} = E_B$ 。净化层上最小照度与最大照度之比 E_{\min}/E_{\max} 即均匀性 u 越接近 1, 则净化层面上的照度分布越均匀。

2.2.3 基于二分法计算 LED 阵列间距

给定函数 $f(d) = E_B/E_A - p$, 其中 E_B/E_A 为净化层上最小照度与最大照度之比, p 为净化层可接受的均匀性要求。函数 $f(d)$ 的零点即为完全满足净化层均匀性要求 p 的 LED 阵列间距值, 通过不断把函数 $f(d)$ 的零点所在连续区间一分为二, 使区间的两个端点逐步逼近零点, 进而得到零点近似值的方法叫“二分法”。每次等分区间都能减少一半的数据量, 只在符合条件的区间中查找, 计算效率非常高, 且能满足任意精度要求。故本文采用二分法计算紫外 LED 灯珠的间距, 假设条件如下所示: 1) 紫外 LED 灯珠为等间距排布的阵列; 2) 紫外 LED 阵列模组的尺寸为 $330 \text{ mm} \times 330 \text{ mm}$; 3) 阵列模组与净化层的距离固定为 $h = 20 \text{ mm}$; 4) LED 灯珠的发光角度 $2\theta = 120^\circ, 90^\circ, 60^\circ$; 5) 净化层可接受的三种最小照度与最大照度之比 E_B/E_A 为 $0.6, 0.75, 0.9$, 即 $p_i = 0.6, 0.75, 0.9 (i=1, 2, 3)$ 。当给定净化层的 E_B/E_A 时, 可以利用二分法求解 LED 的间距 d , 具体流程如图 7 所示, 其中 e 为精确度。

基于二分法流程采用 MATLAB 编程计算出紫外 LED 灯珠间距结果, 可获得 LED 阵列排布方式, 计算结果如表 1 所示。最后可以得到紫外 LED 灯珠的总颗粒数, 由此可以决定所设计阵列模组的总功率。

2.3 基于 TracePro 的照度分布仿真结果与分析

根据上述 LED 间距的计算结果, 可以确定以上

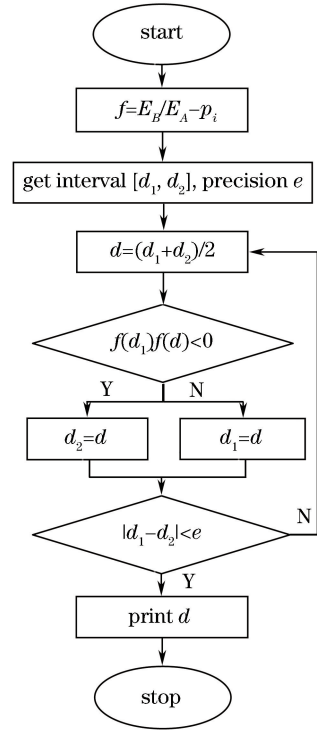


图 7 二分法求解 LED 间距的流程图

Fig. 7 Flowchart for calculating LED distance by the dichotomy method

9 种情况下紫外 LED 阵列排布方式, 从而建立相应的紫外 LED 阵列三维模型。然后采用 TracePro 仿真软件对紫外 LED 阵列模组的照度分布进行仿真模拟。为了方便观察 A, B 点照度, 需要将模型旋转 45° 。图 8 所示为当 LED 发光角度为 120° , 且净化层上可接受的最小照度与最大照度之比为 0.6 时的照度分布仿真结果, 图中用色度条表示归一化后的照度值。根据图 8 照度分布仿真结果, TracePro 计算出该发光角度为 120° 、均匀性要求为 0.6 的紫外 LED 阵列模组净化层的接收照度与 LED 的发射照度之比约为 0.84 , 即光利用率为 0.84 。同样, 得出其他 8 种条件下不同阵列排布的紫外 LED 模组的光利用率, 9 种 LED 阵列排布方式的仿真结果汇总见表 2。

由表 2 的仿真结果可以得到: 1) 在相同照度均匀性要求下, 单颗 LED 灯珠的发光角度越大, 模组所需的 LED 颗粒数越少, 但是光利用率也越低, 这是由更多大角度的光射出了净化层造成的; 2) 实际情况下, 紫外 LED 阵列发出的光在风道腔体内不断反射, 光利用率会提高, 也有利于净化层接收面得到更均匀的光照度。

表 1 基于二分法计算的 LED 间距

Table 1 LED distances calculated by the dichotomy method

h / mm	$2\theta_{1/2} / (^\circ)$	E_B/E_A	d / mm	Arrangement of LEDs	Total number of LEDs
				(LED module size: 330 mm×330 mm)	
20	120	0.6	31.88	11×11	121
		0.75	26.32	13×13	169
		0.9	17.33	19×19	361
	90	0.6	27.41	12×12	144
		0.75	23.06	14×14	196
		0.9	15.77	21×21	441
60	60	0.6	20.79	16×16	256
		0.75	18.00	18×18	324
		0.9	13.33	24×24	576

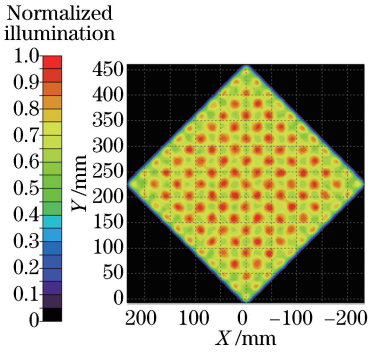


图 8 当光源发光角度为 120° ，净化层照度比为 0.6 时紫外 LED 阵列模组的照度仿真分布图

Fig. 8 Simulated illumination distribution of UV LED array module when the irradiation angle is 120° and illumination ratio of purification layer is 0.6

表 2 基于 TracePro 的归一化照度分布仿真结果

Table 2 Simulation results of normalized illumination distributions using the TracePro

E_B/E_A	Normalized illumination on purification layer / LED emission illuminance		
	$2\theta_{1/2} = 120^\circ$	$2\theta_{1/2} = 90^\circ$	$2\theta_{1/2} = 60^\circ$
	0.6	0.84	0.93
0.75	0.86	0.95	0.98
0.9	0.89	0.92	0.98

3 照度均匀性仿真模拟与实验验证

3.1 照度均匀性实验及测量结果分析

为验证 TracePro 仿真模拟结果的准确性，本文还设计实验测量了一款紫外 LED 阵列模组的实际辐照度，并与 TracePro 仿真模拟结果进行对比。如图 9 所示，整个实验装置由 5 部分组成：①六通道紫外辐照计 (DLM-1000M, 北京奥博迪光电技术有限公司, 中国)，测量精度为 $\pm 8\%$ ；②黑箱；③直流电源 (DPS-305AF, 宏盛, 中国)，5 位显示，精度可达

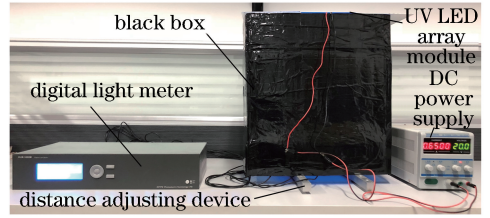


图 9 紫外 LED 阵列模组的辐照度测量装置
Fig. 9 Irradiance measurement setup for UV LED array module

$\pm 0.1 \text{ mA}$ ；④紫外 LED 阵列模组；⑤LED 模组距离调节装置。本文所选用的 6×8 紫外 LED 阵列模组如图 10(a) 所示。所用紫外 LED 灯珠型号为晶能光电 UXDO-Y 型，采用 3535 封装，其峰值波长为 372 nm ，其他参数特性详见表 3。

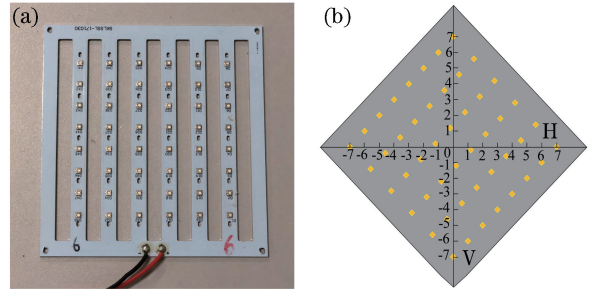


图 10 实验模组及测量点。(a)紫外 LED 阵列模组实物图；(b)紫外辐照度测量位置

Fig. 10 Experimental module and measuring points.
(a) Picture of UV LED array module; (b) UV irradiance measuring points

具体测量过程如下：首先，将紫外 LED 阵列模组平放在黑箱上端并点亮向下发光，将紫外辐照计置于黑箱中；其次，通过调节螺母以改变测量面的位置，测量紫外 LED 模组在不同距离平面上的辐射通量密度，紫外探头与紫外 LED 阵列模组的距离分别设定为 $20, 40, 60, 80, 100 \text{ mm}$ ；然后，在测量面的

表3 本文所选紫外LED灯珠样品参数

Table 3 Sample parameters of UV LED lamp bead used in this study

Package size / (mm×mm)	Peak wavelength /nm	Power (@0.35 A) /W	Optical power /W	Thermal resistance / (°C · W ⁻¹)	Beam angle /(°)
3.5×3.5	372	1.26	0.35	6	120

垂直(V)和水平(H)方向上分别均匀选取 15 个测量点测试其辐射通量密度,测量点位置如图 10(b)所示;最后,以 20 V 恒定电压点亮紫外 LED 阵列模组,测量结果如表 4 所示。在 V、H 两个方向选取 Point₋₄ ~ Point₄的范围内计算照度均匀性,并删除照度下降迅

速、参考价值小的外围数据,其中由于 h 为 40 mm 时测量取点的偏移,该距离下 H 方向选取 Point₅ ~ Point₃的数据进行计算。由表 5 可知,与紫外 LED 模组的距离为 20,40,60,80,100 mm 的目标面上照度的均匀性分别为 79.7%、77.5%、75.9%、74.8%、78.9%。

表4 不同距离下目标面的辐照度密度测量值

Table 4 Irradiance density measurement results of target surfaces at different distances

Point	Irradiance density / (10 ² μW · cm ⁻²)									
	h = 20 mm		h = 40 mm		h = 60 mm		h = 80 mm		h = 100 mm	
	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
Point ₋₇	126.52	173.87	113.96	112.62	69.51	73.08	65.13	64.73	41.69	46.85
Point ₋₆	179.02	209.76	148.36	144.85	80.24	88.69	78.56	75.15	54.62	58.31
Point ₋₅	215.79	239.5	181.06	168.42	94.84	102.36	88.39	85.66	63.92	68.54
Point ₋₄	241.6	247.2	194.87	194.27	110.19	115.82	98.35	95.71	70.03	74.23
Point ₋₃	242.1	244.2	211.33	204.61	123.11	126.68	105.62	103.61	75.67	79.94
Point ₋₂	245.4	243.5	217.57	206.87	131.21	133.15	111.59	107.55	79.61	83.83
Point ₋₁	240.7	237.2	217.92	207.37	137.93	135.02	114.45	109.72	81.89	85.59
Point ₀	232.9	230.7	214.02	202.12	139.18	134.69	114.51	108.56	82.87	85.54
Point ₁	226.8	231.2	207.57	194.34	137.03	130.16	111.26	104.97	80.42	82.95
Point ₂	222.1	217.9	198.69	182.14	131.48	119.56	106.07	98.02	77.53	79.30
Point ₃	212.7	200.8	181.14	163.76	121.27	111.21	98.44	90.57	72.78	74.37
Point ₄	207.8	184.47	165.52	146.68	108.46	99.67	88.32	79.48	66.97	65.83
Point ₅	196.9	156.24	140.83	125.17	95.78	86.06	78.39	69.42	60.43	59.08
Point ₆	169.02	129.14	114.52	102.40	82.83	70.02	66.20	59.16	53.83	51.57
Point ₇	139.74	—	—	—	70.24	64.52	54.78	50.79	38.91	39.13
Max	245.4	247.2	217.92	207.37	139.18	135.02	114.51	109.72	82.87	85.59
Min	207.8	184.47	165.52	163.76	108.46	99.67	88.32	79.48	66.97	65.83

表5 不同距离下目标面的辐照度均匀性计算结果

Table 5 Calculated results of irradiance uniformity of target surfaces at different distances

Distance	Uniformity /%	Average uniformity /%
h = 20 mm	V	84.70
	H	74.60
h = 40 mm	V	75.90
	H	79.00
h = 60 mm	V	77.90
	H	73.80
h = 80 mm	V	77.10
	H	72.40
h = 100 mm	V	80.80
	H	76.90

由于紫外辐照计的紫外探头尺寸太大,测量值是中心点周围近 1 cm² 范围的辐射功率密度,所以

设备本身对测量输出有一个平均的过程,故在距离较远、数值较小的情况下测量的均匀性会偏高。紫外 LED 模组的距离为 100 mm 的目标面上测量数值均低于 100,为获取更精确的照度均匀性,将数值选取范围扩大至 Point₋₅ ~ Point₅,按表 4 计算得到的平均均匀度为 71.0%。故与紫外 LED 模组的距离为 20,40,60,80,100 mm 的目标面上照度的均匀性分别为 79.7%、77.5%、75.9%、74.8%、71.0%,由此可见,随着紫外 LED 阵列模组到净化层的距离增加,净化层上照度均匀性不断下降。

3.2 基于 TracePro 的仿真模拟结果分析

本文还根据紫外 LED 阵列模组实物构建仿真模型,利用 TracePro 软件对模组进行光线追迹模拟,分别得到目标面距离该紫外 LED 阵列模组为

20,40,60,80,100 mm 时,其面上照度分布模拟结果,由此计算照度的均匀性。照度分布仿真模拟结果如图 11 所示。由图 11(a)~(e) 仿真结果可得到不同条件下的目标面照度均匀性计算结果,如表 6 所示,其中计算照度均匀性的方法与 3.1 节

一致,同样选取 V、H 两个方向距离中心点 -40~40 mm 的范围。由此可得到与实验测量相同的规律,即剔除外围数据,考虑中心区域的照度均匀性,随着模组到净化层的距离增加,净化层上照度均匀性下降。

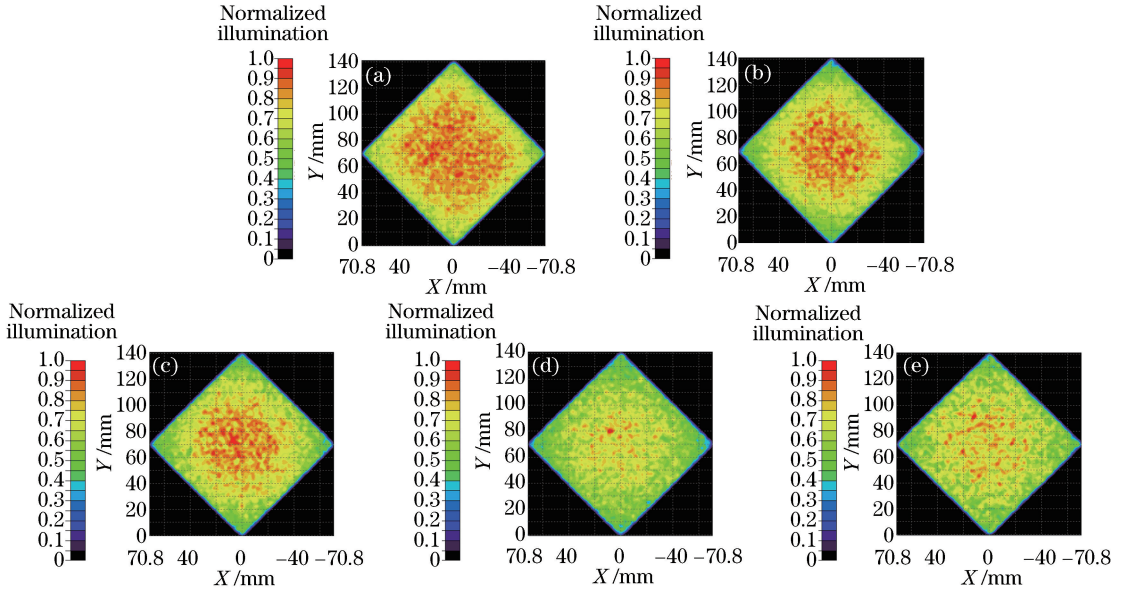


图 11 不同距离处紫外 LED 阵列模组的照度分布仿真结果。(a) 20 mm; (b) 40 mm; (c) 60 mm; (d) 80 mm; (e) 100 mm

Fig. 11 Simulated illumination distributions of UV LED array module at different distances.

(a) 20 mm; (b) 40 mm; (c) 60 mm; (d) 80 mm; (e) 100 mm

表 6 仿真模拟下不同距离目标面的照度均匀性计算结果

Table 6 Simulated illumination uniformity of target surfaces at different distances

Distance h /mm	Vertical uniformity	Horizontal uniformity	Average uniformity /%
20	0.71/0.91 \approx 0.78	0.74/0.95 \approx 0.78	78
40	0.70/0.92 \approx 0.76	0.74/0.96 \approx 0.77	77
60	0.66/0.90 \approx 0.73	0.71/0.92 \approx 0.77	75
80	0.61/0.85 \approx 0.72	0.59/0.79 \approx 0.75	73
100	0.64/0.86 \approx 0.74	0.59/0.92 \approx 0.64	69

图 12 对比了在不同间距条件下净化层照度均匀性的实验值和仿真值,两者揭示的规律是一致的,由此可验证基于 TracePro 仿真模拟结果的相对准确性。但照度均匀性实验测量绝对值普遍略高于仿真值,这可能是由设备精度、参数选择和实验误差等因素造成的,尤其是紫外辐照计输出过程中将某一点附近的平均辐射功率密度替代了该点的精确辐射功率密度用于计算。

4 结 论

为了满足紫外光净化系统不同照度均匀性设计要求,本文提出了基于二分法和 TracePro 仿真的紫外 LED 阵列模组最佳阵列间距和照度均匀性计算方法,通过仿真模拟得到在相同照度均匀性要求下,

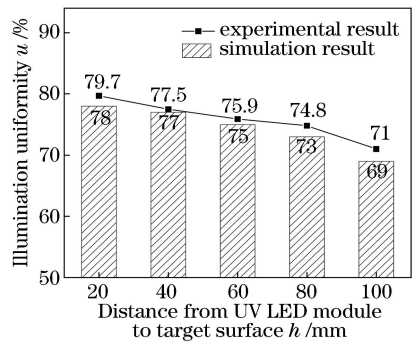


图 12 不同距离各目标面的照度均匀性实验值和仿真值对比

Fig. 12 Comparison of experimental and simulation results of illumination uniformity on each target surface at different distances

紫外 LED 灯珠发光角度越大,需要的紫外 LED 颗粒数越少,但光的利用率也越低;紫外 LED 阵列模组照度均匀性实验测量和仿真模拟均揭示了随着紫外 LED 阵列模组到净化层的距离增加,净化层上照度均匀性不断下降的规律,也验证了本文所提照度均匀性优化设计方法的准确性。由此可见,该方法能够通过考虑净化层照度均匀度、光源模组距离净化层间距、LED 的发光角度等因素,来设计满足不同要求的紫外 LED 光净化系统,便于提高开发效率,降低设计成本,对紫外 LED 光净化系统优化设计有重要指导意义。

参 考 文 献

- [1] Zhang R J, Zhu M, Yu J W, *et al.* UV LED function enhanced air purifier: 201320590948.8[P]. 2014-03-19.
张汝京, 祝明, 余洁闻, 等. 紫外线 LED 功能加强型空气净化器: 201320590948.8[P]. 2014-03-19.
- [2] Li Z R, Dong X B, Zhao X Q, *et al.* Design and implementation of liftable pest control device with solar energy[J]. *Forest Engineering*, 2010, 26(1): 37-40.
李芝茹, 董希斌, 赵小强, 等. 可升降太阳能灭虫装置的设计与实现[J]. *森林工程*, 2010, 26(1): 37-40.
- [3] Obeid M, Panaretakis T, Joza N, *et al.* Calreticulin exposure is required for the immunogenicity of γ -irradiation and UVC light-induced apoptosis[J]. *Cell Death & Differentiation*, 2007, 14(10): 1848-1850.
- [4] Lee D, Lee J W, Jang J, *et al.* Improved performance of AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diodes with nano-patterned AlN/sapphire substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(19): 191103.
- [5] Yan J C, Sun L L, Wang J X, *et al.* Development status and prospect of UV light emitting diodes[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2017, 28(1): 2-4.
闫建昌, 孙莉莉, 王军喜, 等. 紫外发光二极管发展现状及展望[J]. *照明工程学报*, 2017, 28(1): 2-4.
- [6] Schneider M, Herbold C, Messerschmidt K, *et al.* High power UV-LED-clusters on ceramic substrates [C]// 2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), June 1-4, 2010, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE, 2010: 11375345.
- [7] Horng R H, Lin R C, Hu H L, *et al.* Diamond-added-copper heat spreader for UV LED applications [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2011, 14(11): H453-H456.
- [8] Yapici M K, Farhat I. UV-LED exposure system for low-cost photolithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9052: 90521T.
- [9] Han Q Y, Li S Q, Li M H, *et al.* High power-density UV-LED package modules and their application in curing [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2017, 28(1): 21-29.
韩秋漪, 李思琪, 李明昊, 等. 高功率密度紫外 LED 封装模组及其光固化应用[J]. *照明工程学报*, 2017, 28(1): 21-29.
- [10] Cai W T, Yin S Y, Xiang Y, *et al.* Fail-safe optimal design of uniform illumination for UV-LED array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(4): 0422042.
蔡文涛, 尹韶云, 向阳, 等. 紫外 LED 阵列匀光照明中失效安全设计[J]. *光子学报*, 2018, 47(4): 0422042.
- [11] Sun Y J, Bu W B. The study of allumination uniformity for LED [J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 2008, 24(3): 49-52.
孙英杰, 卜文斌. LED 照明的照度均匀性研究[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2008, 24(3): 49-52.
- [12] Li L, Wang G Z, Wang L L, *et al.* Lens design for uniform illumination with LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222002.
李林, 王光珍, 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.
- [13] Liang W Y, Li Y X, Long Y B, *et al.* Design of freeform surface lens with chip on board LED sources for uniform illumination[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 012202.
梁文跃, 李远兴, 龙拥兵, 等. 板上芯片型 LED 光源均匀照明自由曲面透镜设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 012202.
- [14] Xiang C M, Wen S S, Chen Y C, *et al.* Optical system design of LED area source for ultraviolet curing[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(12): 1507-1513.
向昌明, 文尚胜, 陈颖聪, 等. 紫外光 LED 固化面光源光学系统设计[J]. *发光学报*, 2016, 37(12): 1507-1513.
- [15] Zhang X T, Liu C J, Qi Y, *et al.* Design of lens coupler with uniform energy distribution based on LED source and polymer optical fiber bundle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0208001.

- 张晓婷, 刘楚嘉, 漆宇, 等. 基于 LED 光源与聚合物光纤束的能量均匀透镜耦合器设计[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0208001.
- [16] Wang J A, Che Y, Guo L Y, *et al.* LED layout optimization and performance analysis of indoor visible light communication system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0506002.
王加安, 车英, 郭林焯, 等. 室内可见光通信系统光源 LED 布局优化与性能分析[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0506002.
- [17] Que X Y, Wu G H. Designing LED array for uniform illumination distribution on curved surface object in machine vision measurement by optimization algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 072201.
阙笑语, 吴国华. 用于机器视觉测量曲面照明的 LED 阵列优化算法设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 072201.
- [18] Hua H, Mao X L, Tan J H, *et al.* Dynamic illumination design method based on LED array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 102202.
花卉, 毛祥龙, 谭家海, 等. 基于 LED 阵列的动态照明设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 102202.
- [19] Liu Q. Uniformity of illumination of large LED square array [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2018, 29(3): 72-77.
- 刘沁. 大型 LED 方形阵列的照度均匀性[J]. 照明工程学报, 2018, 29(3): 72-77.
- [20] Hao J, Jing L, Wang Y, *et al.* Design of uniform illumination for array LED[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022003.
郝剑, 荆雷, 王尧, 等. 阵列型紫外 LED 匀光照明系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022003.
- [21] Xia X L, Yu B H, Mai Z Q. Design on approximate Lambertian LED opto lens configuration[J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(1): 22-25, 37.
夏助力, 余彬海, 麦镇强. 近朗伯光型 LED 透镜的光学设计[J]. 光电技术应用, 2010, 25(1): 22-25, 37.
- [22] Endres L, Breit R, Jordan W, *et al.* UV radiation, irradiation, and dosimetry [M] // Hönigsmann H, Elmetts C, Krutmann J. Dermatological phototherapy and photodiagnostic methods. Berlin: Springer, 2009: 3-59.
- [23] Fruendt J, Jarczyński M, Mitra T. Simultaneous multiple uniform spot generation with micro optics [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7062: 70620S.
- [24] Bizjak T, Mitra T, Aschke L. Novel high-throughput micro-optical beam shapers reduce the complexity of macro-optics in hyper-NA illumination systems [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 65202X.