

UV-LED 辐射模式对表面消毒辐射场均匀度的影响

姚森^{1,2} 江怡清^{2,3} 张莲茜² 张连峰² 童张法¹

¹(广西大学化学化工学院 南宁 530004)

²(深圳清华大学研究院生态与环境保护实验室 深圳 518057)

³(南昌航空大学环境与化学工程学院 南昌 330063)

摘要 在使用紫外发光二极管(Ultraviolet light-emitting diodes, UV-LED)进行表面消毒时,物体表面会出现部分区域消毒剂量超出必要,部分区域消毒剂量不足的现象。理想的辐射场是物体表面各点的辐射照度相同。为了优化辐射场,建立了辐射场的通用公式,编写VBA程序,实现了对辐射场的数学模拟、分析和优化。对9种UV-LED辐射模式的辐射场进行了实际模拟分析。结果显示:对于由多颗UV-LED组成的光源板,辐射距离与UV-LED间距的比以及UV-LED的辐射模式是辐射场均匀性的决定因素。由于边缘效应,在光源板正下方投影的边长的80%范围内才有可能实现辐射场均匀。当辐射距离和UV-LED间距之比在3~15的范围内时,均匀性良好(最小和最大值的比 $\geq 81.8\%$)。较小的最大发光角的辐射模式在照射距离和UV-LED间距比例偏大的情况下更为适用,反之亦然。

关键词 辐射模式,紫外发光二极管,不均匀度,辐射场,表面消毒

中图分类号 O434.2

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0096

引用该文:

姚森,江怡清,张莲茜,等. UV-LED辐射模式对表面消毒辐射场均匀度的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42(2): 020802. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0096.

YAO Sen, JIANG Yiqing, ZHANG Lianxi, *et al.* Effects of radiation patterns from ultraviolet light-emitting diodes on the uniformity of the radiation field in surface disinfection[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(2): 020802. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0096.



Effects of radiation patterns from ultraviolet light-emitting diodes on the uniformity of the radiation field in surface disinfection

YAO Sen^{1,2} JIANG Yiqing^{2,3} ZHANG Lianxi² ZHANG Lianfeng² TONG Zhangfa¹

¹(School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

²(Laboratory of Ecology and Environmental Protection, Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China)

³(College of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

基金资助: 深圳市科技计划项目(JCYJ20180306170551939)

第一作者: 姚森,男,1997年12月出生,2021年于北京化工大学获得学士学位,现为深圳清华大学研究院实习生,广西大学材料与化工专业在读研究生,研究方向为紫外线在净化环境方面应用

通信作者: 张连峰,博士,教授级高级工程师, E-mail: tyou6@hotmail.com

收稿日期: 初稿 2023-10-24; 修回 2023-12-27

Supported by the Science and Technology Planning Project of Shenzhen Municipal City (JCYJ20180306170551939)

First author: YAO Sen (male) was born in December 1997, and obtained his bachelor's degree from Beijing University of Chemical Technology in 2021. Now he is both a trainee in Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen and a graduate student in Guangxi University, majoring in the purification of environment in ultraviolet

Corresponding author: ZHANG Lianfeng, doctoral degree, professorate senior engineer, E-mail: tyou6@hotmail.com

Received 24 October 2023; accepted 27 December 2023

ABSTRACT When ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) are used for surface disinfection, the UV dose in some areas may exceed the required level but be insufficient in other areas. The most ideal radiation field is that with the same irradiance level at each point. In this study, a universal formula for determining the radiation field was derived, and a corresponding VBA program was coded for the mathematical simulation, analysis, and optimization of the radiation field. The radiation fields of nine UV-LED radiation patterns were simulated and analyzed. The results indicate that for a board with multiple UV-LEDs, the ratio of the radiation distance to the UV-LED spacing and the radiation patterns of the UV-LEDs are the key factors that influence the uniformity of the radiation field. Because of edge effects, a uniform radiation field can be reached only within 80% of the edge length projected directly below the UV-LED board. When the ratio of the radiation distance to the UV-LED spacing is within the range of 3 to 15, the uniformity is good (the ratio of the minimum to maximum values $\geq 81.8\%$). The radiation pattern with a smaller maximum emission angle is good for a relatively higher ratio of the irradiation distance to UV-LED spacing, and vice versa.

KEYWORDS Radiation pattern, UV-LED, Non-uniformity, Radiation field, Surface disinfection

CLC O434.2

紫外发光二极管(Ultraviolet light-emitting diodes, UV-LED)光是从半导体芯片的P-N结发出,所以可能的最大辐射空间是 2π 立体角,即发光点出光方向的半个球。由于芯片的封装有各种工艺(包括特意地控制最终出光的发射方式,即辐射模式(Radiation pattern)),从P-N结发出的光经过封装材料的折射、反射,会有不同的辐射模式。对于这些辐射模式的数学表达,称为辐射模型(Radiation model)^[1]。作为无汞的新型紫外线光源,UV-LED已经进入消毒领域^[2-4]。目前UV-LED辐射场的研究主要在水消毒领域^[5-7],针对表面消毒辐射场的研究很少。在应用UV-LED进行表面消毒时,如果面上的辐射场不均匀,会导致部分区域消毒剂量超出必要,部分区域消毒剂量不足,既浪费能量又影响消毒效果。因此,最理想的辐射场是辐射照度分布均匀。单颗UV-LED的辐射功率有限,需多颗UV-LED构成辐射光源板。在应用LED或UV-LED光源板辐射表面时,通过调整LED或UV-LED之间相对位置可优化辐射场^[8-10]。UV-LED的辐射特性是影响辐射场的本质因素,需要根据UV-LED的辐射模式进行UV-LED灯珠之间的相对位置和辐射距离的布置进行优化。针对多灯LED或UV-LED辐射场均匀性的研究有一些报告^[11-13],主要针对心型辐射模型和近似朗伯光源的理想辐射模型。而真实的辐射模式繁多,需要建立必要的数学模型进行数学模拟。

本研究建立了表面消毒辐射场的通用数学公式,将辐射模式用角度的函数表达。对一些实测的辐射模式进行了数学回归。数学推导了理想化

辐射模型,即Diffuse和Specular辐射模型。然后,编写VBA(Visual basic for applications)程序,计算模拟了各种辐射模式的辐射场。以优化UV-LED辐射场为目标,定量地分析了辐射模式、UV-LED之间的相对位置和辐射距离对辐射场的影响。

1 辐射模式的数学表达

UV-LED有两个特点:光源面积小,可假设为点光源;向UV-LED所处面的上方半球辐射,即辐射的立体角在 $0\sim 2\pi$ 的范围。图1所示是辐射场几何关系图,在二维面上的发光角 θ 在 $0\sim \pi/2$ 的范围。如图1所示,UV-LED对被照射点(微小面积 dA)照射的剂量率见式(1)。

$$F(\theta) = F(0)f(\theta) \quad (1)$$

式中: θ 是光源到被照射点(dA)的紫外线与过发光面中心的垂线之间的夹角,即为发光角,rad; $F(\theta)$ 是 θ 方向上球冠上被照射点的剂量率, W/m^2 ; $F(0)$ 为发光面中心的法线方向球冠上被照射点的剂量率, W/m^2 ; $f(\theta)$ 是球冠表面在 θ 方向上的被照射点的剂量率与球冠表面发光角为0的被照射点的剂量率之间的数学函数,无量纲, $f(0)$ 定义为1.0。从UV-LED发出的辐射功率,经过图中虚线上方的球冠的部分见式(2)。

$$Q(\theta_1) = \int_0^{\theta_1} 2\pi r R \times F(\theta) d\theta \quad (2)$$

式中: R 为球冠半径,是光源到被照射点之间的距离, m; θ_1 是点光源到被照射点(dA)的发光角,

rad; $Q(\theta_1)$ 是经过球冠的UV功率, W ; r 是被照射点到发光面中心法线的距离, m 。由图1可知, $r=R\sin(\theta)$ 。由于被芯片封装结构阻挡, 辐射模式最大发光角度 $\theta_{\max}$ 可能小于 90° 。最大发光角度是指在此发光角度区域以外, 辐射能量为0。由图1可见, $\theta_{\max}$ 是 θ 的最大值。这和以光的能量的阈值进行划分的LED领域常用的光束角、发散角的物理含义是不同的^[14-15]。当 $\theta_1=\theta_{\max}$ 时, “经过球冠的能量” 就是UV-LED的总UV功率, $\Psi=Q(\theta_{\max})$, 将公式(1)代入公式(2), 得式(3)。

$$\Psi = 2\pi F(0) R^2 \int_0^{\theta_{\max}} f(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (3)$$

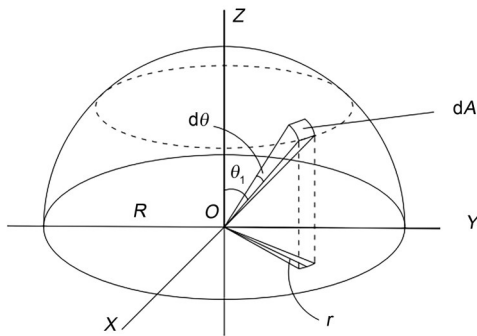


图1 UV-LED处于原点向上方照射时的几何关系图
Fig.1 Geometric diagram of UV-LED irradiating upwards from the origin

在和UV-LED发光面平行的被照射面上, 辐射照度为见式(4)^[1]。

$$E(\theta) = F(0) f(\theta) \cos(\beta) \quad (4)$$

式中: $E(\theta)$ 为被照射点的辐射照度, W/m^2 ; β 是被照射面法线与紫外线射线之间的夹角。对于只照射上(出光方向)半球的点光源, 有Diffuse(发散)和Specular(镜型)两种理性化的辐射模型^[16]。

Diffuse(发散)辐射模型见式(5)。

$$f(\theta) = \cos(\theta) \quad (\theta \leq \theta_{\max})$$

$$f(\theta) = 0 \quad (\theta > \theta_{\max}) \quad (5)$$

式中: $\theta_{\max}$ 是有紫外线能量和无紫外线能量区域的边界角度。

Specular(镜型)辐射模型见式(6)。

$$f(\theta) = 1 \quad (\theta \leq \theta_{\max})$$

$$f(\theta) = 0 \quad (\theta > \theta_{\max}) \quad (6)$$

在各种UV-LED的规格书中, 实际上, 辐射覆盖 2π 立体角的Specular辐射模型并没有出现过。本文出于理论分析的目的, 对两种理想化辐射模型都进行了分析。对于理想化的辐射模型, 可以进行数学推导, 推导出简化的剂量率的计算公式。根据公式(3), 包括通用辐射模型在内的各种辐射模型的数学表达见表1。

表1 辐射模型(剂量率计算公式)总汇
Table 1 Summary of radiation models (the calculation formulas of fluence rate)

模型 Radiation model	$\theta_{\max} < \frac{\pi}{2}$	$\theta_{\max} = \frac{\pi}{2}$
通用 Universal	$F(\theta) = F(0) f(\theta) = \frac{\Psi f(\theta)}{2\pi R^2 \int_0^{\theta_{\max}} f(\theta) \sin(\theta) d\theta}$	$F(\theta) = F(0) f(\theta) = \frac{\Psi f(\theta)}{2\pi R^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta) \sin(\theta) d\theta}$
镜型 Specular	$F(\theta) = F(0) = \frac{\Psi}{2\pi R^2 (1 - \cos(\theta_{\max}))}$	$F(\theta) = F(0) = \frac{\Psi}{2\pi R^2}$
发散 Diffuse	$F(\theta) = F(0) \cos(\theta) = \frac{2\Psi \cos(\theta)}{\pi R^2 (1 - \cos(2\theta_{\max}))}$	$F(\theta) = F(0) \cos(\theta) = \frac{\Psi \cos(\theta)}{\pi R^2}$

2 各种实际的辐射模式

图2是两种理想化模式和一些实例的辐射模式。在数学上, 对于非理想辐射模型, 可以将复杂的辐射模型分解成若干段, 进行纯数学拟合,

得到的分段多项式函数公式, 然后应用编写VBA, 就可实现对通用公式进行积分、计算。例如, 图2中的模式1的配光曲线, 可以分成4段, 分别进行拟合, 结果见表2。

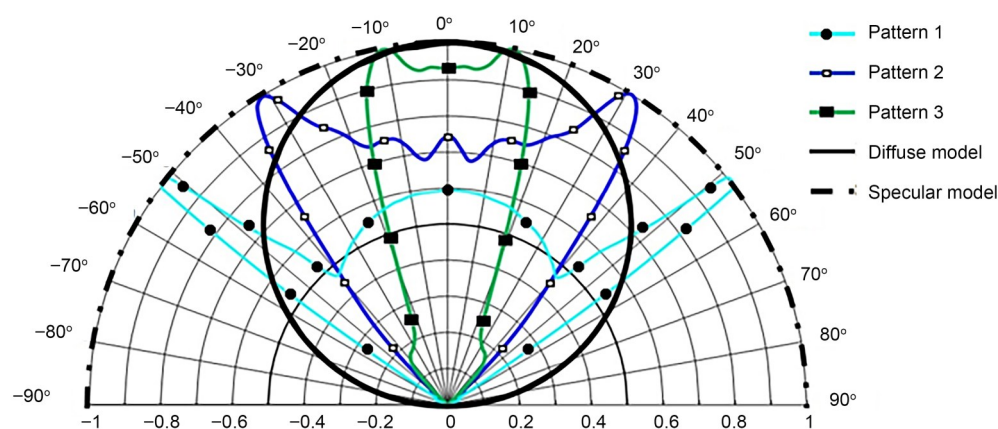


图2 各种UV-LED的辐射模式
Fig.2 Various UV-LED radiation patterns

表2 辐射模式“模式1”的拟合曲线
Table 2 Fitted curve of radiation pattern "Pattern 1"

$f(\theta) = a\theta^6 + b\theta^5 + c\theta^4 + d\theta^3 + e\theta^2 + f\theta + g$					
范围 Range	$0^\circ \leq \theta < 40.06^\circ$	$40.06^\circ < \theta \leq 51.75^\circ$	$51.75^\circ < \theta \leq 52.66^\circ$	$52.66^\circ < \theta \leq 56.99^\circ$	$56.99^\circ < \theta \leq 90^\circ$
a	32.303	-668 654.675	0	-90 816 590.457	0
b	-69.709	3 172 487.047	0	516 816 194.286	0
c	57.338	-6 261 161.312	0	-1 225 105 982.846	0
d	-22.500	6 579 306.217	0	1 548 418 305.657	0
e	3.784	-3 882 407.411	-43.069	-1 100 536 209.871	0
f	-0.301	1 219 820.833	77.581	417 059 957.195	0
g	0.995	-159 424.721	-33.264	-65 835 673.898	0

3 各种辐射模型下的辐射场优化

对于消毒,辐射场的优化是指使被消毒面的辐射照度均匀。对于具体的UV-LED,辐射模式已经确定,优化是指设计最佳的灯珠间隔与辐射距离的比。辐射照度分布的均匀性由LED的配置和LED到目标平面的距离决定^[17]。均匀性用不均匀度表达^[18-19]见式(7)。

$$\delta = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \quad (7)$$

式中: $E_{\max}$ 为目标平面上辐射照度最大值; $E_{\min}$ 为目标平面上辐射照度最小值。当 $\delta=0.05$ 时, $E_{\min}$ 仅为 $E_{\max}$ 的 90.5%; 当 $\delta=0.1$ 时, $E_{\min}$ 为 $E_{\max}$ 的 81.8%。因此,本文建议,当 $\delta \leq 0.05$ 时,则说明表面消毒的辐射场十分均匀,若 $0.05 < \delta \leq 0.1$,则说明表面消毒的辐射场相对均匀。如果 $\delta > 0.1$,那么说明辐射场均匀程度较差。

3.1 UV-LED直线排列的辐射场

以 100 颗 UV-LED 间隔 10 mm 直线排列为例。发光面朝下,且与下方被照射平面平行。UV-LED 和被照射面的照射距离为 50 mm,即照射距离与 UV-LED 的灯珠间距之比为 5 ($D/L=5$)。UV-LED 正下方被照射面上对应直线各点的辐射照度可根据表 1 的数学函数进行计算,并对所有 UV-LED 的辐射进行累加,直线上各辐射模式的辐射照度分布见图 3。

在图 3 中,Diffuse60°是指 UV-LED 的辐射模式为最大发光角度为 60°的 Diffuse 辐射模型,其余类推。显然,在线的两端,辐射照度明显下降,称为边缘效应。因此,在连线范围内(假设为 100%)不均都是必然的。辐射场的均匀性应在两个端点以内的一个范围(<100%)讨论。较小的最大发光角光线集中,能量损失少,在正下方具有较高的辐射照度,但是辐射照度在“辐射照度平台”(辐射场中部的平台,见图 3)区域呈现出明显的振荡

波动性, 不均匀度受到影响(Diffuse45°、Specular45°及模型3)。各辐射模式的“辐射照度平台”范围内的不均匀度只与辐射照度在平台上的波动有关。图3中各曲线, 计算时给模拟程序输入的紫外线输出量相同, 均为22 mW。这并不是实际情况, 例如, 由于几何阻挡的原因导致的最大发光角减小, 实际上紫外线输出量也减少了。例如, 假设 $\theta_{\max}$ 为90°的紫外线输出量为22 mW, 根据表1的计算公式, 可以计算出, 因受到阻挡改变最大发光角时, 紫外线输出量会发生变化。 $\theta_{\max}$ 为60°时的紫外线输出量为16.50 mW (Diffuse)和

14.67 mW (Specular)。因此, 图3中“辐射照度平台”高度不代表最大发光角对辐射场辐射的绝对值的影响。例如, Diffuse60°的辐射照度真实值应为图3(a)中的75% (16.50 mW/22 mW), Specular60°的辐射照度真实值应为图3(b)中的66.7% (14.67 mW/22 mW), 但图3是按22 mW输出功率计算的结果。如按真实值作图, 因为UV-LED的最大发光角度越小, 被照射面上各点受到辐射的灯珠数量越少, 所以和图3中各曲线峰值的排序相反。

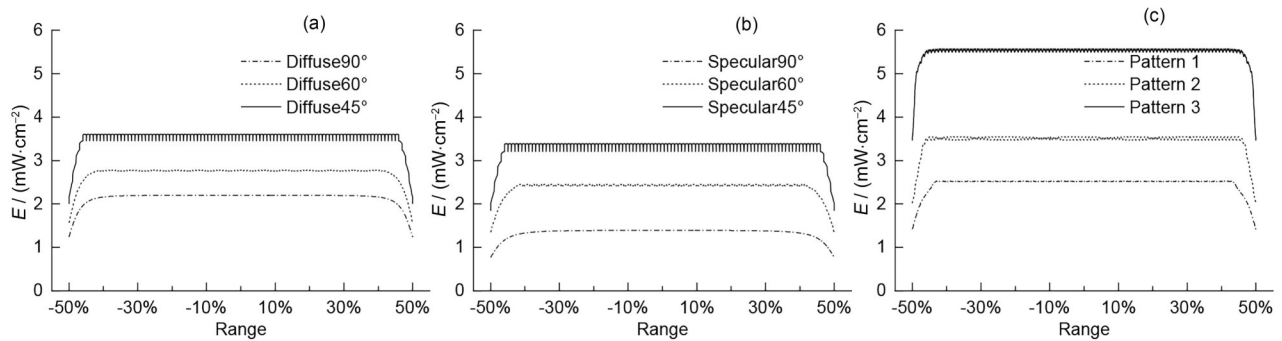


图3 多灯照射下 $D/L=5$ 的辐射照度分布: (a) Diffuse模式; (b) Specular模式; (c) 实际模式
Fig.3 Irradiance distribution of $D/L=5$ under the radiation of multiple UV-LEDs:
(a) Diffuse patterns; (b) Specular patterns; (c) Actual patterns

3.2 不均匀度分析

100颗UV-LED直线排列的发光板, 其正下方平行被照射面上直线的辐射照度的均匀性与照射距离有关。改变UV-LED与被照射面的照射距离, 根据公式(5)和(6), 计算各个辐射模式随 D/L 变化的不均匀度, 见图4。Diffuse模型和Specular模型的UV-LED在70%、80%和90%辐射区域内(由多颗UV-LED组成的发光板的正下方视为100%)辐射照度的不均匀度的变化如图4(a)~(f)所示。 D/L 小于1时, 不同最大发光角都显示不均匀度很高, 并快速衰减; D/L 大于1时, $\theta_{\max}$ 为90°和60°的不均匀度偏低, 并趋于平稳。但当 $\theta_{\max}$ 为45°时, 不均匀度偏高。这是因为最大发光角偏小的单个UV-LED辐射不能覆盖到整个被照射区域, 这导致在多灯排布下被照射区域内各点受到辐射的灯珠数量不同且呈现波动式变化, 因此不同区段辐射照度形成了落差。这说明小的最大放光角度不利于“辐射照度平台”的均匀。

3种不同实际辐射模式的UV-LED在50%~90%

辐射区域内辐射照度的不均匀度变化如图4(g)~(i)所示。由图4(g)~(i)可知, 3种实际辐射模式在80%照射区域范围内, 随着 D/L 的增大, 不均匀度趋势呈波动式衰减, 当 $D/L>3$ 时, 各个不均匀度偏低。在70%~80%范围内的不均匀度曲线基本重合。在50%~70%范围内的不均匀度曲线完全重合。实测的辐射模式的发光角度较小, 说明小的最大发光角有利于较大 D/L 值的辐射场的均匀。

考察图3和图4可以发现, 在小于80%的范围内, 当 $D/L>1$ 时, 不均匀度在一定范围内比较平稳。马祯元等^[20]发现辐照均匀性随着LED阵列 D/L 的增大而减少。Qin等^[17]发现, 不同UV-LED辐射模式下被照射平面的辐射照度均匀性并不随着 D/L 的增大而单调递减, 这和本文模拟结果相一致。

分析图4(a)、(b)、(d)、(e)、(g), 对于90%的范围, 不均匀度随着 D/L 的增大先衰减, 达到一定数值后反而会逐渐提高。这是由于辐射照度的平台会随着照射距离的增大而缩窄, 随着 D/L 的增

大, 边缘效应范围增大, 不均匀度增加。结果说明, 对于图4(a)、(b)、(d)、(e)、(g)的辐射模式,

要使目标面的辐射照度分布均匀性较低, D/L 存在阈值上限, 因此需要考虑选取合适的 D/L 范围。

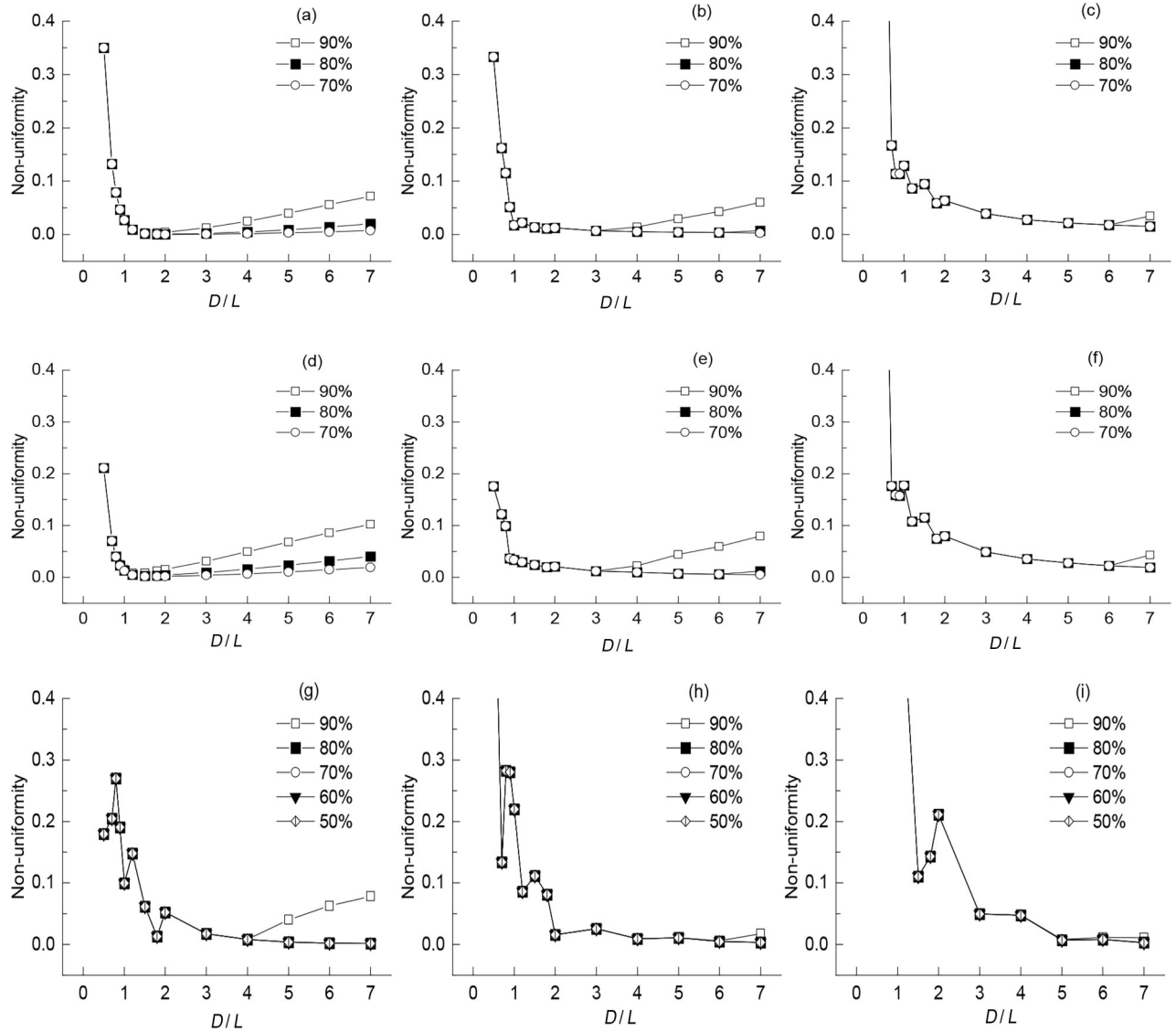


图4 多灯照射下辐射场不均匀度: (a)Diffuse90°; (b)Diffuse60°; (c)Diffuse45°; (d)Specular90°; (e)Specular60°; (f) Specular45°; (g)模式1; (h)模式2; (i)模式3

Fig.4 Non-uniformity of the radiation field under the radiation of multiple UV-LEDs: (a) Diffuse90°; (b) Diffuse60°; (c) Diffuse45°; (d) Specular90°; (e) Specular60°; (f) Specular45°; (g) pattern 1; (h) pattern 2; (i) pattern 3

图5是100颗直线排列的UV-LED正下方在直线80%被照射范围内不均匀度随 D/L 的变化。从图5可知, 当 $D/L > 5$ 后, 各个辐射模式下80%范围内的不均匀度逐渐提高, 这说明不同辐射模式下的 D/L 达到一定阈值后, 被照射范围内的辐射照度难以维持均匀。当 $D/L = 15$ 时, 除Specular90°这一理想模型, 其余辐射模式的不均匀度都小于0.1。当

$D/L = 20$, 大部分辐射模式的不均匀度超过1。结果表明, 要使实际应用中实现表面消毒的辐射场均匀, D/L 的设计应用范围应该处于3~15内。而最大发光角度偏小的Diffuse45°、Specular45°、模式1及模式2的UV-LED, 在 D/L 增大至20后, 仍可维持良好的均匀性。这说明最大发光角度偏小的辐射模式, 有利于在 D/L 数值更大的范围上应用。

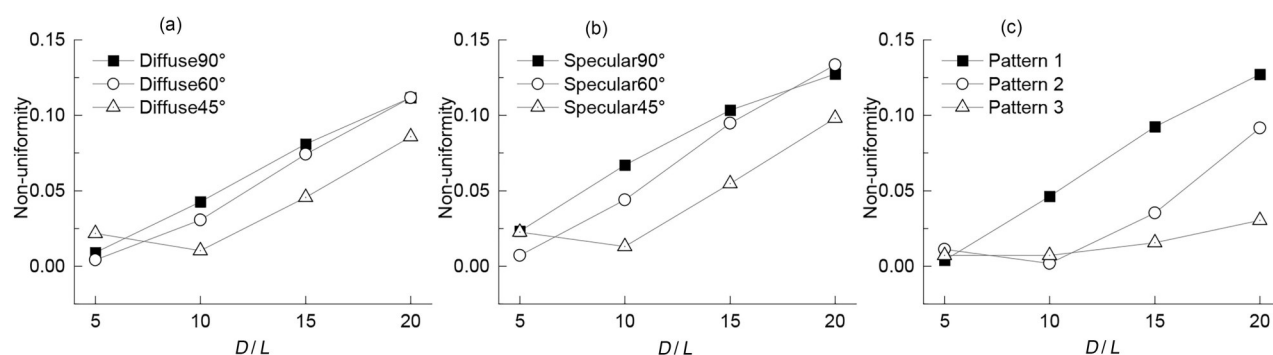


图5 多灯照射下80%范围内辐射场不均匀度:(a)Diffuse模式;(b)Specular模式;(c)实际模式
Fig.5 Non-uniformity of the radiation field within 80% range under the radiation of multiple UV-LEDs:
(a) Diffuse patterns; (b) Specular patterns; (c) Actual patterns

4 结论

本文建立了UV-LED辐射场的通用数学公式,推导出不同最大发光角的Specular和Diffuse模型,并利用分段多项式函数拟合得到不同实际规格UV-LED辐射场的数学公式,应用VBA程序模拟计算,分析了各种辐射模式的UV-LED表面消毒的辐射场优化的影响因素。结果表明:(1)良好的均匀性是在小于80%的范围(灯珠的连线的投影视为100%的范围);(2)根据实际工程的需要,为维持良好的辐射场的均匀性,各种辐射模式下照射距离和灯间距之比应在3~15范围内。这个范围较大,说明对于具体的辐射模式,需要进行针对性计算、模拟和设计;(3)最大发光角较小时,对较近照射距离辐射场的均匀性有负面影响,但有利于应用在照射距离和灯间距比较大的领域,且光线集中减少辐射线发散造成的能量浪费。

本研究基于辐射模式的辐射场均匀程度与UV-LED布置的变化规律探究为指导UV-LED的优化设计提供了定量的理论依据。利用通用数学公式推导出辐射模型,对UV-LED表面消毒辐射场优化设计,具有实际应用价值。

作者贡献声明 张连峰提出了研究思路,并与姚森完成了论文中计算程序的编写,数据的处理和分,文稿的撰写和修改;姚森、江怡清和张莲茜完成了数据的计算和整理;童张法对文稿进行了审查和修改。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

1 Zhang L F, Anderson W A. A finite model for the

prediction of the UV radiation field around a linear lamp [J]. Chemical Engineering Science, 2010, **65**(5): 1513-1521. DOI: 10.1016/j.ces.2009.10.013.

2 张连峰,宋叶叶,张金松,等.紫外LED应用于消毒领域的理论基础和潜力[J].照明工程学报,2020, **31**(2): 75-84. DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2020.02.016.

ZHANG Lianfeng, SONG Yeye, ZHANG Jinsong, *et al.* Theoretical basis and potential for the application of UV-LED in disinfection[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020, **31**(2): 75-84. DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2020.02.016.

3 Sharma P, Chen P, Han S Y, *et al.* Design considerations for a surface disinfection device using ultraviolet-C light-emitting diodes[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2021, **126**: 126045. DOI: 10.6028/jres.126.045.

4 江怡清,周钰,张连峰.手持式UV-LED消毒器辐射场的测量与分析[J].中国照明电器,2022(3): 23-27. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6150.2022.03.005.

JIANG Yiqing, ZHOU Yu, ZHANG Lianfeng. Measurement and analysis of the radiation field of A handheld UV-LED disinfectant[J]. China Light & Lighting, 2022(3): 23-27. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6150.2022.03.005.

5 Song K, Mohseni M, Taghipour F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: a review[J]. Water Research, 2016, **94**: 341-349. DOI: 10.1016/j.watres.2016.03.003.

6 Lui G Y, Roser D, Corkish R, *et al.* Point-of-use water disinfection using ultraviolet and visible light-emitting diodes[J]. Science of the Total Environment, 2016, **553**: 626-635. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.039.

7 Chen J, Loeb S, Kim J H. LED revolution: fundamentals

- and prospects for UV disinfection applications[J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2017, **3**(2): 188-202. DOI: 10.1039/C6EW00241B.
- 8 Kheyrandish A, Taghipour F, Mohseni M. UV-LED radiation modeling and its applications in UV dose determination for water treatment[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2018, **352**: 113-121. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2017.10.047.
 - 9 经周, 樊嘉杰, 陈威, 等. 光净化用紫外LED阵列模组的均匀照度优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, **56**(19): 226-235.
JING Zhou, FAN Jiajie, CHEN Wei, *et al.* Optimized uniform illumination design of ultraviolet LED array module used in light purification[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, **56**(19): 226-235.
 - 10 赵太飞, 马壮, 李星善. 基于小发散角LED的光源优化布局[J]. 激光与光电子学进展, 2021, **58**(1): 134-144.
ZHAO Taifei, MA Zhuang, LI Xingshan. Optimal layout of light source based on LED with small divergence angle [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, **58**(1): 134-144.
 - 11 张玉宝, 董礼, 张国英. 不同发光半角的圆形LED阵列辐照特性[J]. 发光学报, 2019, **40**(3): 349-356. DOI: 10.3788/fgxb20194003.0349.
ZHANG Yubao, DONG Li, ZHANG Guoying. Radiation characteristics of circular LED arrays with different illuminant half angles[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, **40**(3): 349-356. DOI: 10.3788/fgxb20194003.0349.
 - 12 Keshavarzfathy M, Malayeri A H, Mohseni M, *et al.* UV-LED fluence determination by numerical method for microbial inactivation studies[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2020, **392**: 112406. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2020.112406.
 - 13 Thatcher C H, Adams B R. Impact of surface reflection on microbial inactivation in a UV LED treatment duct[J]. Chemical Engineering Science, 2021, **230**: 116204. DOI: 10.1016/j.ces.2020.116204.
 - 14 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 普通照明用LED产品和相关设备 术语和定义: GB/T 24826—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. General lighting—Light emitting diode (LED) products and related equipment—Terms and definitions: GB/T 24826—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
 - 15 徐芙珊. LED发光强度空间分布特性测试方法及系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
XU Fushan. Research on testing method and system of spatial distribution characteristics of LED luminous intensity[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
 - 16 陈钰, 张连峰, 刘淑杰, 等. 低压单波长紫外灯在水下时紫外线输出量的测量[J]. 中国给水排水, 2018, **34**(21): 47-52. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2018.21.009.
CHEN Yu, ZHANG Lianfeng, LIU Shujie, *et al.* Measurement of UV output of monochromatic (254 nm) low pressure UV lamp in water[J]. China Water & Wastewater, 2018, **34**(21): 47-52. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2018.21.009.
 - 17 Qin Z, Wang K, Chen F, *et al.* Analysis of condition for uniform lighting generated by array of light emitting diodes with large view angle[J]. Optics Express, 2010, **18**(16): 17460-17476. DOI: 10.1364/OE.18.017460.
 - 18 孙健刚, 李果华, 朱孔硕, 等. LED太阳模拟器光学系统设计与仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2013, **50**(10): 175-181. DOI: 10.3788/lop50.102204.
SUN Jiangang, LI Guohua, ZHU Kongshuo, *et al.* Design and simulation of the optical system of LED solar simulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, **50**(10): 175-181. DOI: 10.3788/lop50.102204.
 - 19 王基强, 苏拾, 张健, 等. 球面阵列LED太阳模拟器光学系统设计[J]. 应用光学, 2018, **39**(1): 117-123. DOI: 10.5768/JAO201839.0105002.
WANG Jiqiang, SU Shi, ZHANG Jian, *et al.* Design of optical system of spherical array led solar simulator[J]. Journal of Applied Optics, 2018, **39**(1): 117-123. DOI: 10.5768/JAO201839.0105002.
 - 20 马祯元, 景敏, 陈曼龙, 等. LED阵列诱导叶绿素荧光的均匀性研究[J]. 光学技术, 2021, **47**(2): 129-134. DOI: 10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2021.02.001.
MA Zhenyuan, JING Min, CHEN Manlong, *et al.* Uniformity study of LED array-induced chlorophyll fluorescence[J]. Optical Technique, 2021, **47**(2): 129-134. DOI: 10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2021.02.001.