

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.01.007

民机光触媒净化装置的光学设计

Optical Design of Photocatalytic Decontamination Device for Civil Aircraft

张絮涵 汪光文 史乔升 曹 玮 / ZHANG Xuhan WANG Guangwen SHI Qiaosheng CAO Yi

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

为有效去除民用飞机座舱中的挥发性有机化合物(volatile organic compounds, 简称 VOCs), 对一种新型飞机管路式光触媒净化装置中的光学部件进行了设计、仿真与优化。该光学部件是将置于导光板端面的紫外发光二极管(ultraviolet light-emitting diode, 简称 UV-LED)点光源转换为导光板面光源, 以获得净化装置中均匀的光照。受限于净化装置的构型, 导光板需设计为两端入光的窄长型结构, 而如何获得均匀的面光源出光性能成为一大难题。为了解决这一难题, 对该光学部件进行了合理的光学设计, 并予以仿真。进而根据仿真结果对导光板上的网点分布作出优化, 并获得了较好的面光源出光性能。

关键词:挥发性有机化合物(VOCs); 光触媒; UV-LED; 导光板; 光学仿真

中图分类号:V242.6

文献标识码:A

[Abstract] In order to remove the VOCs (volatile organic compounds) in civil aircraft cabin efficiently, the optical component in a new aircraft pipe line photocatalytic decontamination device is designed, simulated and optimized in this paper. In this optical component, the UV-LED (ultraviolet light-emitting diode) point light sources which located at both ends of the light guide plate are transformed into an area light source for uniform illumination in the decontamination device. Limited by the configuration of the device, the light guide plate must be narrow and long, so it is a problem to have uniform optical performance. To solve this problem, reasonable optical design and simulation are conducted in this paper. In addition, dot distribution on the light guide plate is optimized according to the simulation results for better optical performance.

[Keywords] VOCs; photocatalytic; UV-LED; light guide plate; optical simulation

0 引言

光触媒(或光催化法)是指将 TiO₂ 等光催化剂以一定形式负载至吸附剂基材上, 制得的固定化 TiO₂ 复合体在一定波长光线照射下降解气相或液相污染物的方法^[1]。光催化反应降解室内 VOCs 的本质是在光电转换中进行氧化还原反应, 只有波长小于 380 nm 的紫外光才能激发 TiO₂ 产生导带电子和价带空穴, 导致 VOCs 的氧化分解^[2]。故而在光触媒净化装置中, 发射紫外光的光学部件是必不可少的部件之一。在自主研发的一种新型飞机管路式光触媒净化装置中, 考虑利用 UV-LED 与导光板

配合以获得均匀有效的紫外光面光源。之所以采用这样的形式, 是由于其具有耗电量低、发热量低、体积小、坚固耐用等诸多优点。

LED 导光板式面光源广泛应用于平板显示、日用照明、广告装饰等诸多领域, 其中导光板的网点排布、形状及材料组成决定了导光板的表面照度、均匀性及出光效率^[3]。目前对于该类面光源的研究主要集中在某种特定用途的导光板(如 LED 平板灯、LED 背光模组等)的光学设计与网点排布等领域^[4-8], 其尺寸以长宽比 < 2 的方形为主, 其点光源入射方式以单侧入光为主。由于飞机管路式光触媒净化装置的特殊构型, 不得不将导光板设计成窄

长型(长宽比 ≥ 4)、两端入光的形式,且点光源为波长小于 380 nm 的紫外光 LED(即 UV-LED)。现有资料中并没有对这种形式光学部件进行光学设计的研究。本文针对这一问题,对窄长型、两端入光的导光板进行合理的光学设计,并对导光板上的网点分布进行了优化,以期获得较好的出光性能。

1 光学部件的原理及结构

1.1 导光板光学原理

导光板能够合理引导光线方向,使点光源或线光源通过导光板的疏导变成面光源。其基本光学原理如图 1 所示:当点光源或线光源的光线从侧面入射导光板内后,基于全反射原理,光线会在导光板内部向前传播,并不能从导光板的上表面出射。但是在导光板下表面设置具有一定排布规律的散射网点或微结构后,散射网点或微结构的散射作用会破坏光线在导光板内部的全反射,使得光线能够从导光板上表面出射,从而将点光源或线光源转化为面光源^[9]。

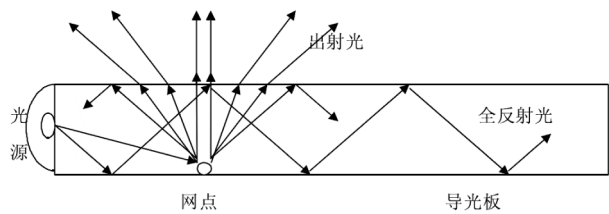


图 1 导光板的光学原理

导光板通常采用透光性能极优、可塑性能好、强度较高的工程材料,主要包括聚碳酸酯 PC(Poly Carbonate)和聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA(Poly Methyl Meth Acrylate)。通常大尺寸导光板使用 PMMA,而小尺寸导光板(如手机用导光板)使用 PC。

1.2 UV-LED 概述

LED(Light Emitting Diode,简称 LED)是一种半导体发光二极管,可以把电能转化为光能。当正向导通的电压加在半导体材料的 p-n 结上时,会导致 p 区和 n 区的交界处电子和空穴发生复合,复合过程中能量会以光的形式发射出来。LED 被称为第四代光源,广泛地应用于各种照明领域,具备电光转化效率高(接近 60%)、节能环保、寿命长(可达 10^5 h)、工作电压低(3 V 左右)、发热量少、体积小、结构牢固、亮度高、光束集中稳定、启动无延时等诸多优点。

UV-LED 是指发光中心波长在 400 nm 以下的

LED,一般发光波长大于 380 nm 时称为近紫外 LED,而小于 300 nm 时称为深紫外 LED。考虑到飞机管路式光触媒净化装置中,紫外光波长需要与光触媒涂层材料匹配,故选择波长为 365 nm 的贴片式 UV-LED。

1.3 光学部件结构

根据飞机管路式光触媒净化装置的构型,光学部件的设计结构如图 2 所示。导光板尺寸为 210 mm \times 49.5 mm \times 3.5 mm(长 \times 宽 \times 高)。为达到导光板出光面的光强设计要求,在导光板两端各安装三盏电功率为 1 W 的 UV-LED。UV-LED 焊接在铝基电路板上,电路板与底座密封,防止端面漏光。

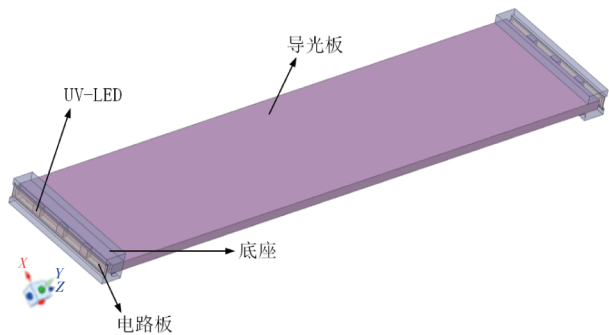


图 2 光学部件设计结构示意图

2 光学仿真及分析

本文基于蒙特卡洛算法,采用“普适光线追迹”技术对该光学部件进行光学模拟。模拟时将光线引入模型,每个界面相交处的个体光线遵从吸收、反射、折射、衍射和散射定律;并跟踪每条光线的光通量,计算光的吸收、镜面反射及折射、衍射和散射能量。

2.1 UV-LED 光学模型

根据选型 UV-LED 的产品参数建立点光源的模块化光学模型,其光通量 700 mW,波长 365 nm,模拟时按单盏灯 35 000 条光线(6 盏灯共 210 000 条光线)追迹。UV-LED 随角度的发光场型如表 1 所示。

表 1 UV-LED 的发光场型

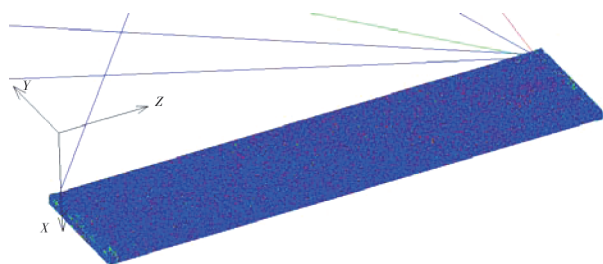
波长/nm	入射角/(°)	吸收率	镜面反射率	镜面透射率
365	0	1.00	0	0.00
365	15	0.97	0	0.03
365	30	0.88	0	0.12
365	45	0.73	0	0.27
365	60	0.50	0	0.50
365	75	0.27	0	0.73
365	90	0.06	0	0.94

2.2 UV-LED& 无网点导光板光学模型

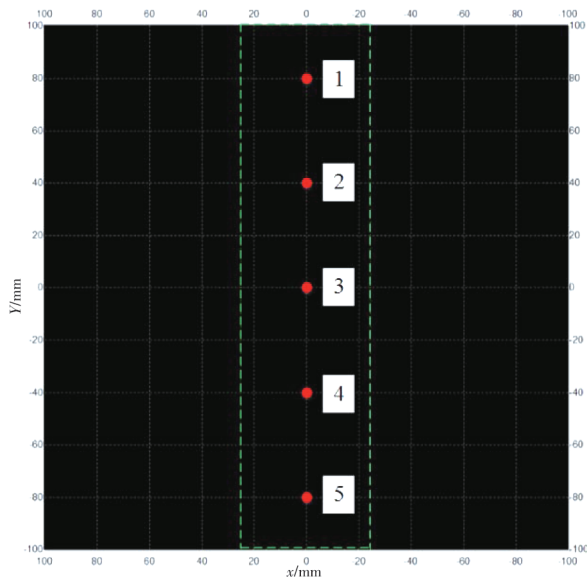
按光学部件设计结构建立光学模型,其中点光源直接导入上述 UV-LED 光学模型。导光板材料为 PMMA,除出光面以外的其他表面的面属性均设置为 Perfect Mirror (完美镜面),用于表征其全反射作用。

为了观察导光板出光面的光强分布,在导光板上方设置一块完全吸收的观察板,其下表面距离导光板出光面 0.5 mm,面属性为 Perfect Absorber (完美吸收面)。首先对无网点导光板的光学模型进行试算,以检验模型正确性。

光学模拟结果如图 3 所示,包括光线追迹示意图和观察板上的光强分布。可以看到导光板上无网点时,出光面并没有光线出射,仅在导光板两端有若干光线飘逸,认为是模型缝隙所致,可以忽略。同时,观察板的入光面也没有光强分布结果。认为模拟结果符合全反射原理,故认为模拟有效。



a) 光线追迹结果



b) 观察板上的光强分布

图 3 未设置网点时光学模拟结果

2.3 UV-LED& 均匀网点导光板光学模型

初步设计时网点按均匀化矩阵布点方式,即将导光板划分为矩阵形式的若干网格,每个网格中心布有一颗网点,网点密度为网点与网格的面积之比。设计网点为凸起的半球形网点,其半径为 0.5 mm。网点密度取 30%,即砖格边长为 1.6 mm。网点阵列如图 4 所示。

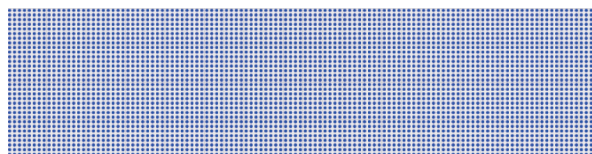


图 4 均匀化网点阵列

观察板上的光强分布如图 5 所示。其中最大值为 617.72 W/m^2 ,平均值为 275.25 W/m^2 ,总光通量 2.725 W 。可以看到,观察板上的光强分布并不均匀,且导光板的两端入光区光强最大,远离导光板两端的光强急剧衰减,导光板中段的光强很低。

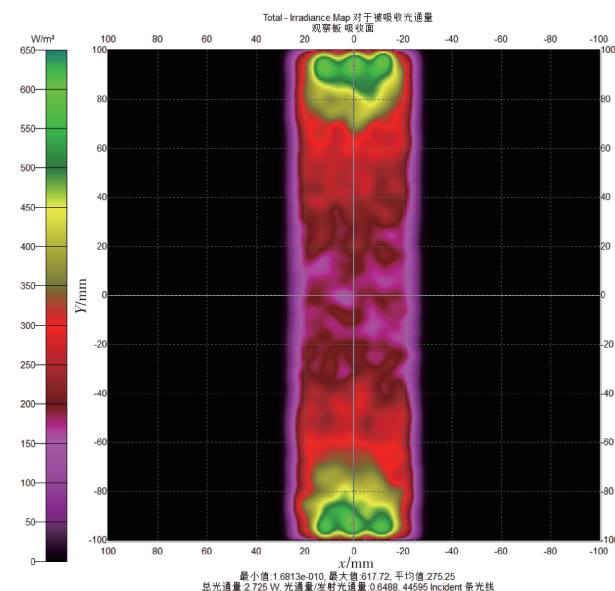


图 5 UV-LED& 均匀网点导光板光强分布结果

为了量化均匀度,在导光板中轴线上设置 5 个测点并取值 (如图 3b) 所示,计算其均匀度,计算公式如下:

$$\text{均匀度} = \frac{\text{光强最小值}}{\text{光强最大值}} \times 100\% \quad (1)$$

如表 2 所示,经计算,均匀网点的出光均匀度极低,仅为 39.2%。造成这种结果的关键原因在于网点设计不合理,均匀的网点布置无法使光线导向导

光板中段,出光性能极差。故而这种两端入光且形状窄长的导管板,必须关注其网点的非均匀布置与优化。

表 2 均匀网点导光板的 5 测点光强值

测点	光强值/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
测点 1	429.56
测点 2	260.75
测点 3	168.38
测点 4	244.78
测点 5	398.91

3 网点优化设计

网点密度决定了导光板出光面的整体亮度和均匀性。有研究结果表示,网点密度变化区间范围在 10% ~ 40% 之间较为合适 (即 $r/a = 17.8\% \sim 35.7\%$),建议最佳网点密度设置在 25% ~ 35% 之间 (即 $r/a = 28.2\% \sim 33.4\%$)^[10]。经光学推导,获得网点密度的设置函数为:

$$\frac{r(x,y)}{a} = \sqrt{\frac{B}{\pi k k_1 E(x,y)}} \quad (2)$$

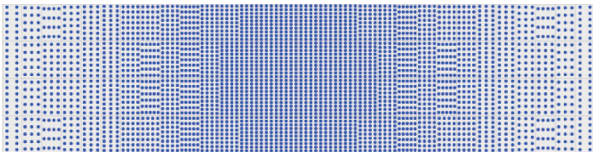
式中, r 为网点半径; a 为网格边长; B 为导光板表面出光亮度,其值恒定 (需求值); k, k_1 为比例系数 (自定义); E 为光源在点 (x, y) 处的照度。

分析式(2)可以看出,导光板表面的出光亮度和网点密度呈正比。但在实际情况中,会对导光板表面出光亮度有要求值,且一般为恒定值,此时网点密度与光源在某点处的照度值呈反比。换句话说,靠近光源的点位照度值偏大,故网点密度应偏小 (网点稀疏),即网点半径小或网格边长大;远离光源的点位照度值偏小,故网点密度应偏大 (网点密集),即网点半径大或网格边长小。考虑到导光板网点的制造工艺,一般采用固定网点半径,变动网格边长的方法。

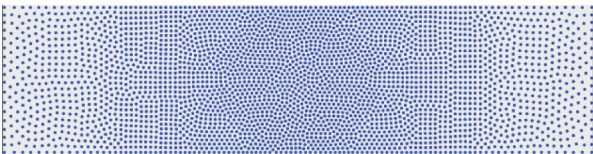
为直观便捷地布置网点,本文采用网点优化设计模块进行网点的非均匀布点。其采用分块式布点方式,将导光板分为合理的块区域,在块区域中设置网点密度,并予以优化。

为获得合理的网点阵列,经多次尝试,将导光板分为 4 行 30 列的矩阵。根据网点密度范围建议

值,取 10% ~ 40%,且导光板中段网点密集,两端网点稀疏。按高斯方程非均匀化每个块区域的网点密度,得到网点阵列如图 6a) 所示。之后,需将网点阵列平滑化,得到优化后的网点阵列如图 6b) 所示。



a) 非均匀分块网点阵列



b) 平滑化网点阵列

图 6 网点阵列优化设计过程

将优化后的网点阵列导入 UV-LED& 导光板光学模型中,光线追迹后,观察板上的光强分布如图 7 所示。其中,最大值为 340.43 W/m^2 ,平均值为 277.21 W/m^2 ,总光通量 2.74 W 。

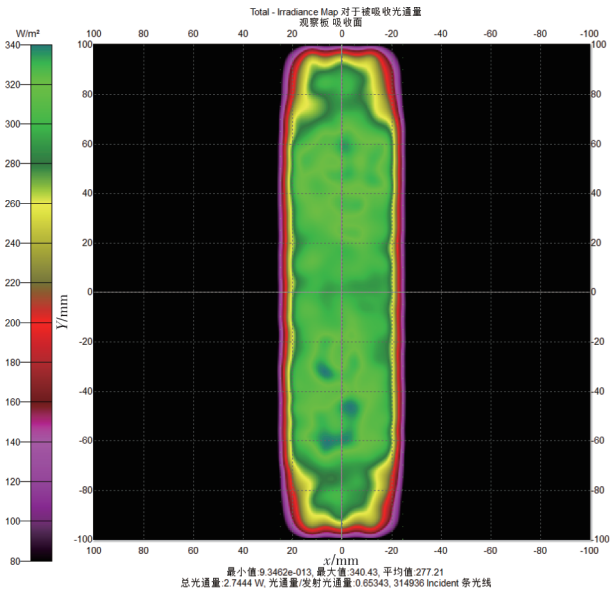


图 7 UV-LED& 非均匀网点导光板光强分布结果

同样地,用图 3b) 的五点取值法计算该网点布置时的光强值如表 3 所示,根据式(1)计算得出此时出光均匀度为 91.3%。可以看到,经优化后的导光板出光均匀度大大改善,从均匀网点的 39.2% 提升到 91.3%,且维持了原有的光通量。故认为该网

点设计方法有效。

表 3 非均匀网点导光板的 5 测点光强值

测点	光强值/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
测点 1	299.19
测点 2	316.94
测点 3	296.52
测点 4	321.55
测点 5	293.72

4 结论

本文对自主研发的一种新型飞机管路式光触媒净化装置中的光学部件进行了设计、仿真与优化。利用导光板的光学原理,将 UV-LED 与导光板相结合,设计出两端入光的窄长型光学部件,将置于导光板端面的 UV-LED 点光源转换为导光板面光源。为了获得均匀的面光源出光性能,本文对该光学部件进行了光学仿真,逐步分析导光板无网点、均匀网点、非均匀网点布置时的出光光强分布。得到结论如下:

1) 导光板未设置网点时,其出光面无光线出射,符合导光板的全反射原理,验证了光学仿真有效。

2) 导光板设置均匀网点时,网点会破坏光线在导光板内部的全反射,使得导光板另一侧成为出光面,且出光面法线方向的 $-70^\circ \sim 70^\circ$ 范围内光线能量较高。但是,均匀网点的出光性能极差,以两端入光区的出光光强最大,中段出光光强很低。故认为均匀的网点布置无法使光线导向导光板中段,不符合设计要求。

3) 导光板设置非均匀网点时,在维持了原有光通量的同时大大改善了导光板的出光均匀度。合理的设计能使得出光均匀度在 91.3%。故认为对于两端入光的窄长型导光板,其合理的网点设计方法为,在网点密度 10% ~ 40% 的范围内将网点按高斯方程分布,并保证导光板中段设置较大密度的网

点,两端设置较小密度的网点。

参考文献:

- [1] 方选政,张兴惠,张兴芳. 吸附-光催化法用于降解室内 VOC 的研究进展[J]. 化工进展,2016,35(7): 2215-2221.
- [2] 唐峰. 光催化降解室内 VOCs 相关性研究[D]. 北京:清华大学,2010: 3-4.
- [3] 智佳军,梁铭泉,陈俄振,车玉彩,庄其仁. LED 单边侧入式导光板的网点设计[J]. 照明工程学报,2012,23(3): 60-63.
- [4] 刘金鑫. LED 平板灯发光性能的改进方法与技术研究[D]. 天津:河北工业大学,2014: 15-22.
- [5] 曹保柱,王晓蕊. LCD 导光板自由曲面微型槽结构设计与优化[J]. 液晶与显示,2010,25(6): 817-821.
- [6] 张军,郭丹,陈哲,蔡昌. 手机侧背光照明导光板设计模拟[J]. 应用光学,2011,32(4): 607-612.
- [7] 李秀真. 超薄液晶电视用 LED 背光模组的设计[J]. 现代显示,2010,119(12): 40-49.
- [8] 周英初,郭康贤,肖波. 一种圆环 LED 侧入式背光模组设计[J]. 应用光学,2016,37(3): 447-451.
- [9] 李晓建. 导光板的设计及制作方法研究[D]. 苏州:苏州大学,2009: 14-16.
- [10] 徐胜,徐玉珍,陈恩果,郭太良. 背光源导光结构仿真模型及其光学特性研究[J]. 光电工程,2016,43(9): 78-83.

作者简介

张絮涵 女,博士,工程师。主要研究方向:座舱光环境仿真分析,座舱空气品质及全机热舒适性研究;E-mail: zhangxuhan@comac.cc

汪光文 男,博士,高级工程师。主要研究方向:民机通风系统、座舱空气品质及全机热舒适性研究;E-mail: wangguangwen@comac.cc

史乔升 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:民机通风系统、座舱空气品质及全机热舒适性研究;E-mail: shiqiaosheng@comac.cc

曹 祎 女,硕士,助理工程师。主要研究方向:民机通风系统、座舱空气品质及全机热舒适性研究;E-mail: caoyil@comac.cc