

机场跑道临时关闭警示灯光强计算方法研究

侯启真, 刘衍帆, 薛荣荣

中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

摘要 机场跑道临时关闭警示灯光强分布对飞机的引导至关重要。考虑到警示灯构型、布局等因素的影响,提出了基于单灯光强分布模型的警示灯的整体光强分布算法。实验结果表明,该方法得到的光强分布与实测的吻合度在 98% 以上,与单灯叠加方法相比,其准确性提高了 6% 以上。

关键词 光学设计; 警示灯; 助航灯光; 光强; 分布模型

中图分类号 TN253; O432.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.012201

Method to Calculate Light Intensity of Warning Light for Temporary Closure of Airport Runway

Hou Qizhen, Liu Yanfan, Xue Rongrong

College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract The light intensity distribution of warning light for the temporary closure of airport runway is critical to the guide of aircraft. In view of the effects of configuration, layout, and other factors of warning lights, one algorithm for calculating the whole luminous distribution of warning light is proposed based on the light intensity distribution model of single lamp. The experimental results indicate that the fitting degree between light intensity distribution obtained by this method and that from the practical measurement is larger than 98%, and the accuracy here is improved by more than 6% compared and with that from the superposition method of single lamp.

Key words optical design; warning light; airfield ground light; light intensity; distribution model

OCIS codes 220.4840; 120.5240; 230.3670

1 引言

机场跑道临时关闭警示灯可以起到警示飞行员的作用,保证飞机安全。根据国际民航公约附件 14 和机场设计手册要求^[1-2],警示灯在不同出射角度下的光强都要控制在一定范围内,避免对正在相邻跑道上起降的飞机造成影响。因此对警示灯整体光强分布的精准计算显得尤为重要。

对于发光面积小的单光源光强分布,可直接使用光强测试仪器测量。而对于警示灯这种由多个单灯组合而成的大尺寸发光装置,因为测试空间较大、测试距离较长,且受照面积小、能量小,所以准确测量的难度较大。Kang 等^[3-6]在距灯光远处设置大口径望远镜,将远处灯的图像成像在电荷耦合器件(CCD)上,计算机处理后得到灯的光强分布曲线,但该方法易受外界干扰,且操作复杂。Vinh 等^[7-8]提出在距离待测灯较远处,通过阵列 CCD 采样数据、曲面拟合以及计算机图像处理得到光强分布,但得到的数据离散,测量时间冗长。

本文提出了一种多发光点大尺寸组合光源的光强分布计算方法,基于单灯光强分布模型,通过对接收面照度的计算反演推导获得组合光源的光强分布曲线。

收稿日期: 2016-08-29; **收到修改稿日期:** 2016-09-13; **网络出版日期:** 2016-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0502401)、民航局安全能力建设基金(FDSA0715)

作者简介: 侯启真(1966—),女,硕士,副教授,硕士生导师,主要从事机场目视助航设施方面的研究。

E-mail: qzhhoucauc@sina.com

2 LED 光强空间分布模型

对单个发光二极管(LED)光强分布及配光曲线研究发现^[9-11],一般 LED 的发光强度在光轴方向上最大,随着光与光轴夹角的增大,光强逐渐减小,在半视角方向上的发光强度为光轴方向的 1/2,如图 1 所示,其中 θ_h 为观察方向与光轴的水平方向夹角, w_h 为 LED 的水平视角, θ_v 为观察方向与光轴的垂直方向夹角, w_v 为 LED 的垂直视角。

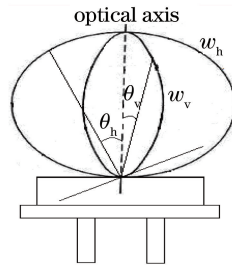


图 1 LED 发光强度空间分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spatial distribution of LED luminous intensity

根据 LED 配光曲线特点,得到 LED 的水平配光曲线函数

$$I(\theta_h) = (\cos \theta_h)^x, \quad (1)$$

式中 x 为 LED 水平配光曲线函数的固定参数,与 LED 的水平视角 w_h 有关。LED 的发光强度在半视角方向为光轴方向上的 1/2:

$$I(w_h/2) = [\cos(w_h/2)]^x = \frac{1}{2}, \quad (2)$$

从而得到

$$x = -\frac{\ln 2}{\ln [\cos(w_h/2)]}. \quad (3)$$

由(1)式和(3)式,得到 LED 的水平配光曲线函数^[12-13]为

$$I(\theta_h) = (\cos \theta_h)^{-\frac{\ln 2}{\ln [\cos(w_h/2)]}}. \quad (4)$$

同理得 LED 的垂直配光曲线函数为

$$I(\theta_v) = (\cos \theta_v)^{-\frac{\ln 2}{\ln [\cos(w_v/2)]}}. \quad (5)$$

根据(4)、(5)式,可得到 LED 发光强度空间分布模型为

$$I(\theta_h, \theta_v) = (\cos \theta_h)^{-\frac{\ln 2}{\ln [\cos(w_h/2)]}} \times (\cos \theta_v)^{-\frac{\ln 2}{\ln [\cos(w_v/2)]}}, \quad (6)$$

式中 $I(\theta_h)$ 、 $I(\theta_v)$ 、 $I(\theta_h, \theta_v)$ 的值为归一化后的值。

3 警示灯光强分布计算

警示灯的三维模型如图 2 所示。警示灯的灯臂长为 4.8 m、宽为 0.127 m,两灯臂呈垂直“X”形放置。警示灯均匀分布在灯臂上,每两灯间距为 0.4 m。

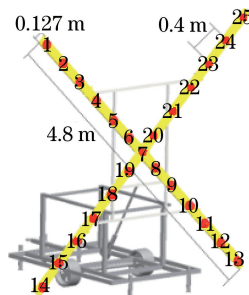


图 2 警示灯三维模型

Fig. 2 3D model of warning light

当光源的线尺寸小于它与被照面之间距离的 1/10 时,照度误差在 1% 以下的情况能按点光源处理^[14]。因为 I 类精密进近跑道决断高度最低为 60 m, 警示灯一般以垂直倾角 5° 放置于跑道两端, 所以至少应在 685.8 m 处能辨别“X”形。选取与警示灯水平距离为 $h=1000$ m 的平行面 H 作为受照面进行计算。灯臂长与 h 的比值远小于 1/10, 故可将警示灯视为点光源。对警示灯编号, 如图 2 所示。在平行面 H 上选取该警示灯出射角 α 方向上的曲线圆, 其半径为 r , 如图 3 所示。以 P 点为例, 计算警示灯在出射角 α 方向的光强值。灯 i 的坐标为 (x_i, y_i) , 如果灯 i 在 x 轴上, 则其坐标为 $(x_i, 0)$; 如果灯 i 在 y 轴上, 则其坐标为 $(0, y_i)$ 。

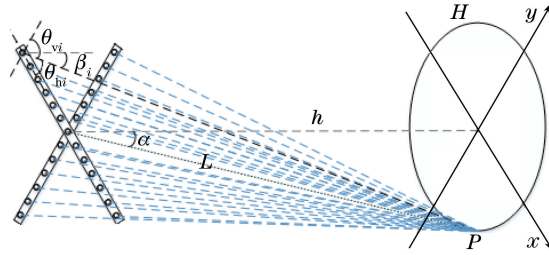


图 3 照度计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of illumination calculation

曲线圆半径

$$r = h \cdot \tan \alpha = \sqrt{x^2 + y^2}。 \quad (7)$$

灯 i 指向计算点 P 的方向与垂直方向的夹角 β_i 为

$$\beta_i = \arctan \left[\frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{h} \right], \quad (8)$$

灯 i 指向点 P 的方向与水平 x 轴方向角度 θ_{hi} 、与垂直 y 轴方向角度 θ_{vi} 分别为

$$\theta_{hi} = \arccos \left[\frac{x - x_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + h^2}} \right], \quad (9)$$

$$\theta_{vi} = \arccos \left[\frac{y - y_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + h^2}} \right]。 \quad (10)$$

灯 i 在计算点 P 处产生的直射照度由水平面照度公式^[15]可得

$$E_{hi} = \frac{I(\theta_{hi}, \theta_{vi})}{h^2} \cdot \cos^3 \beta_i, \quad (11)$$

同理, 计算警示灯在计算点 P 处产生的直射总照度为

$$E_h = \sum_{i=1}^{25} E_{hi} = \sum_{i=1}^{25} \frac{I(\theta_{hi}, \theta_{vi})}{h^2} \cos^3 \beta_i。 \quad (12)$$

警示灯光源在计算点 P 处产生的指向照度为

$$E_n = E_h / \cos \alpha, \quad (13)$$

警示灯出射角 α 方向的光强值为

$$I_\alpha = E_n \cdot L^2 = \sum_{i=1}^{25} \frac{I(\theta_{hi}, \theta_{vi}) \cdot \cos^3 \beta_i}{\cos^3 \alpha}, \quad (14)$$

式中 $L = h / \cos \alpha$ 。

4 实验验证

4.1 实验装置

为验证该方法的准确性, 采用等比例缩小的警示灯模型进行实验。因缩小比例的警示灯模型所占空间小、测量条件易于满足, 可使用光强测量仪器测量。等比例缩小的模型如图 4 所示, 该模型有 13 个 LED 灯, 每两灯间距为 0.036 m, 均匀分布在长 0.22 m 的灯臂上。采用上海航安机场设备有限公司生产的 PTS-200 精密灯具测试系统测量模型的光强。测光系统如图 5 所示。测试空间为暗室, 以避免背景光的干扰; 模型与传感器之间的距离为 4 m, 模型的光源可视为点光源, 模型、挡光板与传感器三者中心处于同一条直线上, 以

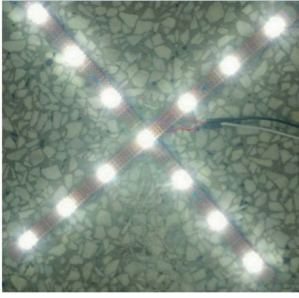


图4 灯具模型

Fig. 4 Lamp model

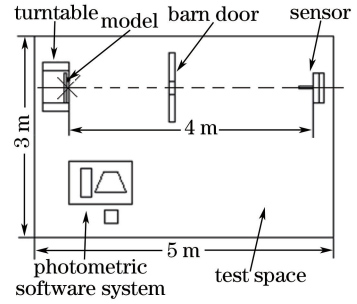


图5 助航灯具测光系统

Fig. 5 Light metering system for navigation aids

保证数据测量的准确性。

4.2 结果分析

根据单个灯的光强分布曲线特性,通过曲线拟合选择合适的LED灯水平视角和竖视角,从而得到光强分布模型。实验模型单灯的光强分布函数表达式为

$$I(\theta_h, \theta_v) = (\cos \theta_h)^{-\frac{\ln 2}{\ln \Gamma \cos(68/2) \Gamma}} \times (\cos \theta_v)^{-\frac{\ln 2}{\ln \Gamma \cos(69/2) \Gamma}}. \quad (15)$$

采用归一化互相关(NCC)标准 f_{NCC} 来评定单灯叠加方法与该方法计算得到的光强分布的准确性。 f_{NCC} 值越高,表明结果与实际越相符:

$$f_{NCC} = \frac{\sum_n [I(\theta_n)_e - \bar{I}_e] [I(\theta_n)_s - \bar{I}_s]}{\sqrt{\sum_n [I(\theta_n)_e - \bar{I}_e]^2 \cdot \sum_n [I(\theta_n)_s - \bar{I}_s]^2}}, \quad (16)$$

式中 $I(\theta_n)_e$ 和 $I(\theta_n)_s$ 分别为实测光强数据和计算得到的光强数据, θ_n 为发光角度, \bar{I}_e 和 \bar{I}_s 分别为实际测量光强数据的平均值和计算得到的光强数据的平均值。

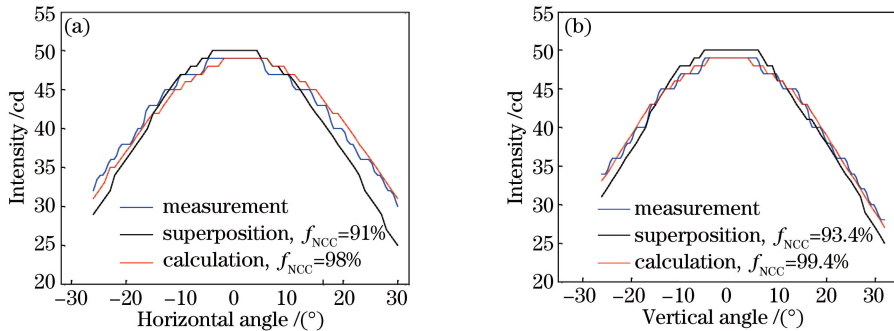


图6 单灯叠加和计算光强分布与实测光强分布对比。(a) 水平角度; (b) 竖直角

Fig. 6 Comparison of light intensity distributions among single-lamp superposition, calculation, and practical measurement. (a) Horizontal angle; (b) vertical angle

图6为单灯叠加与计算得到的光强分布曲线与实测光强分布曲线对比,并给出了两种方法的 f_{NCC} 值。由图6可知,单灯叠加、计算获得的光强分布曲线与实测的拟合度 f_{NCC} 值在水平方向上分别为91%和98%,在垂直方向上分别为93.4%和99.4%,精确度提高了6%以上。此外还可以看出,当水平和垂直角度大于 10° 或小于 -10° 时,叠加的光强值比实测值小,飞机在三边飞行时光强值太小无法起到警示作用,影响飞行安全;当水平和垂直角度为 0° 左右时,叠加光强值大于实测值,容易影响邻边跑道飞机的起降。本文计算方法避免了直接叠加出现的问题,计算结果与实测光强曲线大体一致。

该方法通过曲线拟合得到单个灯的光强空间分布模型,尽管拟合程度很高,但还是有些微小差异,从而导致计算时的拟合误差。光在传播过程中,介质的散射、折射会导致光强发生衰减,而使用该方法计算时没有考虑此衰减的影响,从而导致了衰减误差的产生。这些误差的存在会影响计算的精度。

5 结 论

考虑警示灯构型和布局对整体光强分布的影响,提出了基于单个灯的光强分布模型的警示灯整体光强分布的算法,并详细给出了算法实现过程,通过实验对比了算法的准确性。结果表明,使用该方法计算得到的整体光强分布的准确性比单灯叠加方法得到的提高了6%以上,与实际测量数据的拟合度达98%以上。在误差允许的范围内,该方法能够较准确地计算出警示灯整体的光强分布,为警示灯的设计和布局提供了一定的参考依据。

参 考 文 献

- [1] International civil aviation organization. Annex 14 to the convention on international civil aviation: Aerodrome design and operations[M]. 6th edition. Montreal:[s.n.], 2013: 5-10.
- [2] International civil aviation organization. Aerodrome design manual: Visual aids[M]. 4th edition. Montreal:[s.n.], 2006: 43-50.
- [3] Kang J H, Kim H G, Ryu J H, *et al.* Enhancement of light output power in InGaN/GaN LEDs with nanoroughed hemispherical indium tin oxide transparent ohmic contacts[J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2010, 13(2): D1-D3.
- [4] Ge A, Wang J, Qiu P, *et al.* A new way to measure the luminous intensity distribution of LEDs based on Luneburg lens[J]. *Lighting Research & Technology*, 2015, 47(5): 613-619.
- [5] Mi Shuang. Research on the method to measure distant light[J]. *Applied Laser*, 2007, 27(2): 141-143.
宓 双. 远距离灯光强度测试方法研究[J]. *应用激光*, 2007, 27(2): 141-143.
- [6] Kang J H, Ryu J H, Kim H K, *et al.* Comparison of various surface textured layer in InGaN LEDs for high light extraction efficiency[J]. *Optics Express*, 2011, 19(4): 3637-3647.
- [7] Vinh Q T, Khanh T Q, Ganeev H, *et al.* Measurement and modeling of the LED light source[M]//Khanh T Q, Bodrogi P, Vinh Q T, *et al.* *Led lighting: Technology and perception*. New York: John Wiley & Sons, 2014: 133-232.
- [8] Wei Minchen, Ge Aiming. Method to measure the light intensity of LED-PAPI[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S1): 292-295.
魏敏晨, 葛爱明. LED-PAPI光强度测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S1): 292-295.
- [9] Liang Xiaoxia. Research on method of LED panel pictures quality assessment based on optical model[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
梁晓霞. 基于光学模型的LED显示屏图像质量评估方法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [10] Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2536-2540.
丁德强, 柯熙政. 一种通用白光LED数学发光模型研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2536-2540.
- [11] Chen Guolong, Yao Qi, Zhu Lihong, *et al.* Design of a temperature-controlled test system for luminous intensity spatial distribution characteristics of high power LED[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 031202.
陈国龙, 姚 琦, 朱丽虹, 等. 可控温大功率LED光强空间分布测试系统的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 031202.
- [12] Dong Jingjing, Guo Zhenning, Lin Jieben, *et al.* Quickly modeling of light emitting diode radiation pattern and certifying[J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2012, 33(2): 143-148.
董菁菁, 郭震宁, 林介本, 等. 发光二极管辐射模型的快速建立与验证[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(2): 143-148.
- [13] Wang Jiawen. Modeling equivalent LEDs source and designing lens for uniform illumination and color distribution[D]. Wuxi: Southern Yangtze University, 2014.
王加文. LED光源等效模型建立及均匀照度色度透镜设计[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [14] Lai Wei, Chen Weimin, Liu Xianming, *et al.* Nonlinear optimization of light intensity spatial distribution for LED road luminaires[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0122003.
赖 伟, 陈伟民, 刘显明, 等. 发光二极管路灯光强空间分布的非线性优化设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0122003.
- [15] Qu Enshi, Zhang Hengjin, Cao Jianzhong, *et al.* Discussion of luminance formula in optical design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1364-1368.
屈恩世, 张恒金, 曹剑中, 等. 对光学设计中照度计算公式的讨论[J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1364-1368.