

基于DIALux的机坪泛光照明仿真与能耗分析

李岳¹, 彭梦凯¹, 蔡靖¹, 郑美春¹, 张炳福², 张涛²

(1. 中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 太原国际机场有限责任公司, 太原 030032)

摘要: 为改进机坪泛光控制方式与节能效果, 本文采用DIALux软件建立前列式多机位机坪照明仿真分析模型。首先, 对比两基高杆灯组合照明与单侧照明效果差异, 引入照度达标率作为照明评价补充依据; 其次, 应用控制变量法对高杆灯照射俯仰角 θ_r 、指向角 θ_0 和灯具数量开展参数分析, 通过实际案例阐明泛光照明节能设计基本流程。研究结果表明, 仅靠单基高杆灯无法满足C类停机位照度要求, 采用两基高杆灯组合照明可兼顾照度、均匀度与照度达标率需要, $\theta_r \geq 45^\circ$ 且 θ_0 不宜过大。依据无航班服务时段机坪最低照度10 lx的规定, 针对不同机坪运行状态, 给出多基高杆灯组合照明方案, 推导泛光照明节能率一般表达式与量化结果, 可为新建机场机坪泛光照明组合设计提供理论指导与规划建议, 提高机坪泛光照明节能水平。

关键词: 泛光照明; 机坪; 高杆灯; 能耗分析; 照度模拟; DIALux

中图分类号: V351.32

文献标志码: A

文章编号: 1674-5590(2026)02-0060-06

Simulation and energy consumption analysis of apron floodlighting based on DIALux

LI Yue¹, PENG Mengkai¹, CAI Jing¹, ZHENG Meichun¹, ZHANG Bingfu², ZHANG Tao²

(1. College of Transportation Science and Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China;

2. Taiyuan International Airport Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: To improve the control methods and energy-saving effect of apron floodlighting, DIALux software is used to establish a front-type multi-position apron illumination simulation analysis model in this paper. Firstly, by comparing the differences in lighting effects between combinations of two high-mast lights and single-sided lighting, the illuminance compliance rate is introduced as a supplementary basis for lighting evaluation. Then, the control variable method is applied to analyze the parameters of the high-mast light's elevation angle θ_r , pointing angle θ_0 and number of lights. The basic process of energy-saving design for floodlighting is illustrated through practical cases. The research results indicate that relying solely on a single high-mast light cannot meet the illumination requirements of Class C parking positions. Using a combination of two high-mast lights for illumination can balance the needs of illumination, uniformity, and illumination compliance rate. The θ_r should be $\geq 45^\circ$ and the θ_0 should not be too large. According to the regulation of a minimum illumination of 10 lx at the apron during non-flight service hours, a multi-base high-mast light combination lighting scheme is proposed for different apron operating states. The general expression and quantitative results of the energy-saving rate of floodlighting are derived, which can provide theoretical guidance and planning suggestions for the design of apron floodlighting combinations at new airports and improve the energy-saving level of apron floodlighting.

Key words: floodlighting; apron; high-mast light; energy consumption analysis; illumination simulation; DIALux

面对建设四型机场的要求, 实施绿色节能的机坪泛光照明设计与管理已成为机场发展的共识, 符合“碳达峰”与“碳中和”的发展理念。广州白云国际机场(简称广州白云机场)、德国慕尼黑机场等国内外机场

的机坪高杆灯均已替换为发光二极管(LED, light emitting diode)灯。相关研究结果表明, 同等照度条件下, LED机坪泛光照明能耗下降50%~60%, 可显著降低机场运行维护成本^[1-2]。但采用定时开关控制机坪全部

高杆灯的粗放式泛光照明管理方式, 易导致泛光灯夜间满负荷常亮, 因此, 机坪泛光照明设计与管理具备节能改进空间。

在泛光照明设计与管理领域, 广州白云机场将灯光控制系统与航班信息联动, 采用窄带物联网方式远程控制 and 调整高杆灯亮度, 实现了分区分时精细化管理^[1]。文献[3]设计了一种基于物联网的智能照明泛光灯系统, 通过监测飞机停靠状态减少无效照明时长, 解决了空闲停机位照明浪费的问题。北京大兴国际机场运用先进的地面运动指导与控制系统获取航空器运行态势及停机位使用状态, 从而对单基高杆灯下达控制指令, 实现基于航空器入位状态的泛光照明节能运行^[4]。青岛胶东国际机场预设了 4 种高杆灯照明模式, 依据机位使用频次动态调整照明模式, 以达到节能减排目标^[5]。在泛光照明与节能分析方面, DIALux 等仿真分析软件在此领域得到广泛应用。文献[6]对比了照度模拟与试验实测结果的差异, 认为 DIALux 软件的仿真精度可满足灯具试装和照度评估需要。文献[7]通过照明仿真研究了灯杆数量和灯具组合对机坪照明阴影形成的影响, 可为泛光照明设计方案的经济性比选提供参考。文献[8]以国内某机场停机坪为例, 采用 DIALux 软件建立仿真模型, 探讨了通过调整灯具安装位置和照射角度实现照明节能用电的可行性。综合来看, 以往研究有以下不足: ①以单个停机位作为基本分析对象, 对组合多机位照度仿真的讨论不足; ②以单基高杆灯作为最小控制单位, 以满足最低照度及整体均匀度要求为分析目标, 限制了节能运行模式的适用范围; ③对机坪照明节能分析讨论不足, 主要针对特定高杆灯布局进行对比, 尚未得出一般性分析规律。

基于此, 本文采用 DIALux 软件建立多机位机坪泛光照明分析模型, 以前列式机坪为典型场景, 对比两基高杆灯组合与单侧照明效果差异, 引入照度达标率作为照明评价补充依据, 应用控制变量法分析 LED 灯投射参数影响规律, 并通过实际案例阐明泛光照明节能设计流程。

1 机坪泛光照明设计标准

机坪泛光照明设计标准根据使用功能和机场旅客年吞吐量确定, 通过照度值进行量化。照度定义为单位面积上的通光量, 可通过计算机仿真或现场照度计测量获得。根据《民用机场机坪泛光照明技术要求》

(MH/T 6108—2014)(简称《照明技术要求》), 三、四类机场停机位的水平照度 E_h 和垂直照度 E_v 应大于 20 lx, 均匀度 U 应大于 0.25^[9]。具体地, E_h 量化了停机坪整体安全照明环境; E_v 量化了飞机进出停机位滑行时距地面 2 m 的垂直面照度, 可以降低直接或间接眩光对飞行员的影响; U 可以避免过暗或过亮情况的出现, 三者共同作为高杆灯布置与灯光调节控制标准。 U 的计算公式可表示为

$$U = E_{h,\min}/E_{h,\text{ave}} \quad (1)$$

式中: $E_{h,\min}$ 为水平最小照度; $E_{h,\text{ave}}$ 为水平平均照度。

泛光照明范围由停机位规格与排列方式共同决定, 典型前列式停机位集结型式如图 1 所示。

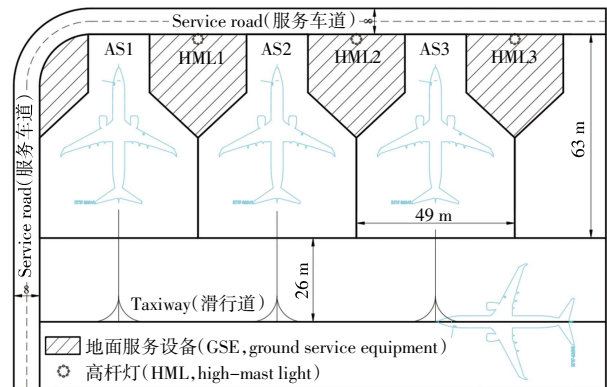


图 1 机坪泛光照明分析范围

Fig.1 Analysis scope of apron floodlighting

图 1 中 3 组停机位并行排列, 依次编号为 AS1—AS3, C 类停机位基本尺寸为 36 m × 47 m。为使停放飞机与邻近飞机、服务车道满足最小净距要求^[8], 实际停机位为八边形样式, 外轮廓尺寸为 49 m × 63 m, 依照《民用机场飞行区技术标准》(MH 5001—2021)规范要求, 飞机距地面物体的净距不小于 3 m, 相邻停机位间为设备停放区, 高杆灯设置于停机位边线延长线与服务车道边线交叉处, 下方平行滑行道中线至停机位边线距离为 26 m^[10]。图中, AS2 和 AS3 停机位通过两侧高杆灯获得泛光照明, 以减少眩光和提高照明均匀度^[11]; AS1 停机位作为对照用以表征单侧照明效果。

2 泛光照明仿真与参数分析

2.1 建模参数与网格划分

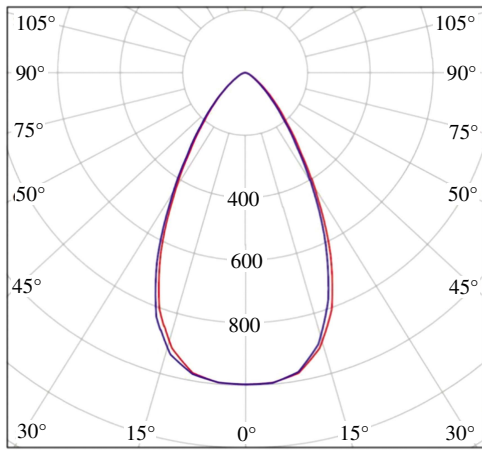
按照图 1 采用 DIALux 软件建立多机位机坪泛光照明仿真分析模型。高杆灯设计高度为 25 m, 顶部设有圆形灯盘, 灯具性能参数如表 1 所示, 配光曲线及排列方式如图 2 所示。其中: C0·C180 表示与光源方

向垂直的光强分布曲线;C90·C270 表示顺光源方向的光强分布曲线。

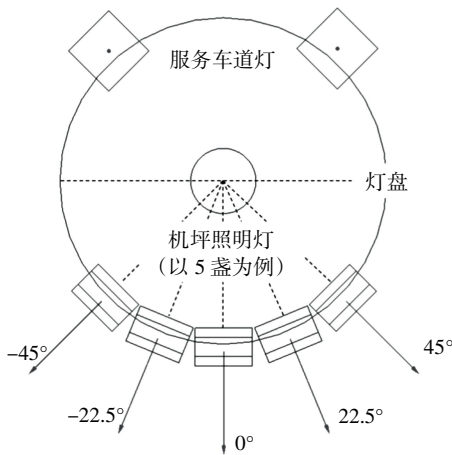
表 1 LED 灯性能参数

Tab.1 Performance parameters of LED light

指标	数值	指标	数值
功率/W	400	色温/K	3 000
灯具光通量/lm	55 033	显色指数	>60
光束角/(°)	25	维护系数	0.70



(a)配光曲线



(b)灯盘排列

图 2 配光曲线与灯盘排列示意图

Fig.2 Diagram of light distribution curve and lamp panel arrangement

《照明技术要求》建议采用边长 5~10 m 的正方形网格划分机坪泛光照明区域,以网格中心点为测点获取照度评价指标特征值^[9]。国外早期规定测点间距不应大于 2 m^[2],后逐步放宽至 5 m 或灯盘高度的 0.3 倍^[13]。为兼顾计算效率与仿真精度,本文采用 3 m × 3 m 的照度评价网格,如图 3 所示,水平与垂直照度评价范

围测点总数为 256 个。

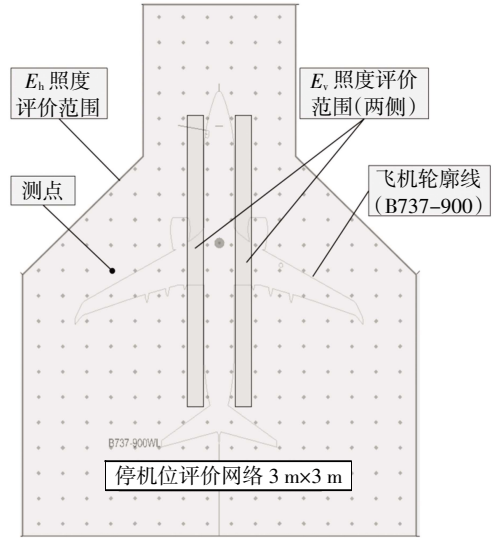


图 3 机坪泛光照明评价网格及照度评价范围

Fig.3 Evaluation grid and illumination evaluation range for apron floodlighting

2.2 控制变量与分析流程

当安装高度一定时,决定 LED 灯照射方向的变量有俯仰角(tilt angle) θ_T 和指向角(orientation angle) θ_o 。其中, θ_T 表征 LED 灯在垂直面内的投射方向, θ_o 表征 LED 灯在水平面内的投射方向。

在明确上述参数条件后,可按以下步骤开展照度仿真分析:①导入机坪平面图,定义表面材质,划分单个停机位计算范围与评价网格;②导入选定的 LED 灯具 IES(infrastructure enabling system)文件,对照配光曲线满足一致性条件,根据当前工作环境定义维护系数;③逐一定义 LED 灯安装高度及照射方向,提取照度分析结果并绘制等值线,处理后得到均匀度;④优化 LED 灯瞄准点位置,获得最优照明组合方案。

2.3 照度影响参数分析

为便于不同工况间进行比较,本文定义照度达标率指标 R_q ,其计算式可表示为

$$R_q = \frac{S_{\text{qualified}}}{S_{\text{all}}} \quad (2)$$

式中: $S_{\text{qualified}}$ 为高于规定照度的围合区域面积; S_{all} 为停机位总面积。

表 2 列举了 θ_T 分别为 30°、45°、60°、65°, θ_o 取值 ±75° 时 AS1 和 AS2 机位的照度指标结果。图 4 为不同 θ_T 时相邻两停机位 AS1 和 AS2 的 20 lx 照度等值线分布, R_q 和等值线图可共同表征当前照度分布情况。

对于 AS2 停机位,当 θ_T 小于 45° 时, R_q 明显偏低,

表 2 不同俯仰角下 AS1 和 AS2 机位照度结果

Tab.2 Illuminance results of AS1 and AS2 aircraft stands under different tilt angles

机位	$\theta_r/(^\circ)$	E_h/lx	E_v/lx	U	$R_q/\%$
AS2	30	48.8	40.2	0.120	61
	45	61.4	53.1	0.190	81
	60	59.2	51.6	0.290	97
	65	55.1	47.9	0.330	98
AS1	30	25.0	21.3	0.067	38
	45	32.1	29.4	0.120	53
	60	32.1	30.7	0.210	62
	65	30.3	29.3	0.240	65

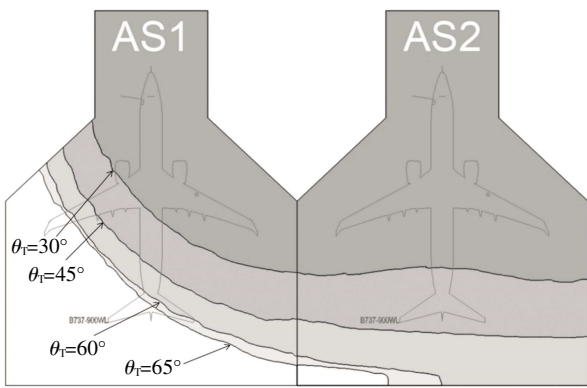


图 4 不同俯仰角下 20 lx 照度等值线

Fig.4 Contour lines of 20 lx illuminance under different tilt angles

飞行员进行航前外部检查时在机尾区域存在照度不足情况,且 U 不能满足要求;当 θ_r 大于 60° 时,照度达标率逐步接近 100%,且均匀度有明显改善,照度最小值为 47.9 lx,达到规定值的 2 倍以上,存在过度照明情况,可对 LED 灯数量及照射角度进行节能优化。对比 AS1 停机位,仅有单侧照明条件下,各工况 R_q 均低于 66%。虽然 E_h 和 E_v 满足最低 20 lx 要求,但 U 最大值仅为 0.240,无法实现充分均匀照明。

以 AS2 机位为例,表 3 给出了 θ_0 分别为 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$,LED 灯数量由 3 盏逐步增加至 5 盏, θ_r 取值 60° 时的照度指标结果。不同指向角下 20 lx 照度等值线分布如图 5 所示。

从表 3 和图 5 可以看出,当 LED 灯数量为 3 盏时,其照度在 20~30 lx 之间(除个别情况), U 满足大于 0.25 的条件;但 $\theta_0 = \pm 45^\circ$ 时,照度达标率仅 66%,后随指向角度增加而降低, $\theta_0 = \pm 75^\circ$ 时等值线在中心区域明显“内凹”,对飞机轮廓覆盖程度降低。当 LED 灯数量为 4 盏时, E_h 和 E_v 大多高于 30 lx(除个别情况),已达到一、二类机场照度标准; $\theta_0 = \pm 45^\circ$ 时,飞机轮廓线位于 20 lx 等值线包围范围内且 R_q 达到 83%; $|\theta_0| > 60^\circ$ 时,

机尾照度不足。当 LED 灯数量为 5 盏时,20 lx 等值线充分覆盖飞机轮廓且 $R_q \geq 78\%$,整体照度略有提高, θ_0 取值范围优于 LED 灯数量为 4 盏的工况。通过图 5(d) 可发现,AS1 停机位在 LED 灯数量为 4 盏, $\theta_0 = \pm 45^\circ$ 时,其 $R_q = 40\%$,较 LED 灯数量为 5 盏, $\theta_0 = \pm 75^\circ$ 时低 6%,因此可通过调节 θ_0 在使用较少 LED 灯的前提下,改善照度达标率且达到更好的节能效果,过大的 θ_0 取值不利于机尾远端照明。

表 3 不同指向角下 AS2 机位照度结果

Tab.3 Illuminance results of AS2 aircraft stand under different orientation angles

LED 数量	$\theta_0/(^\circ)$	E_h/lx	E_v/lx	U	$R_q/\%$
3	± 45	29.8	25.2	0.30	66
	± 60	27.8	23.8	0.27	57
	± 75	24.5	19.2	0.25	46
4	± 45	38.7	32.5	0.34	83
	± 60	36.9	31.9	0.31	73
	± 75	33.7	28.3	0.27	64
5	± 45	47.5	39.7	0.36	96
	± 60	45.7	39.5	0.31	86
	± 75	42.3	36.0	0.27	78

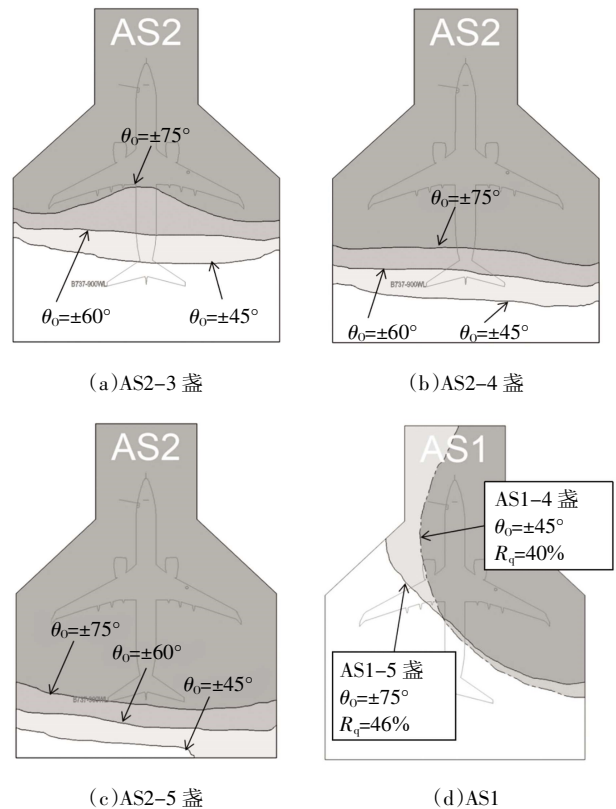


图 5 不同指向角下 20 lx 照度等值线

Fig.5 Contour lines of 20 lx illuminance under different orientation angles

3 机坪泛光照明节能设计案例

为在保证安全前提下根据运行要求实现照明分级控制,降低照度以利节能^[9]。本文在上述泛光照明设计参数一般规律的基础上,依据飞机进出港情况及停机位实时运行状态开展照明节能设计。以图 1 中 HML1~HML3 高杆灯为研究对象,假定繁忙时段 AS2 及 AS3 停机位同时占用且开启全部灯光,可作为节能设计参照。表 4 列举了非繁忙时段 3 个停机位的运行状态,其中 AS1 停机位因照度不足保持为空闲。每基高杆灯顶部均设有 5 盏 LED 灯,按 $\theta_0 = \pm 45^\circ$ 均匀分布,从左向右依次编号为 L1~L5, $\theta_T = 60^\circ$ 。

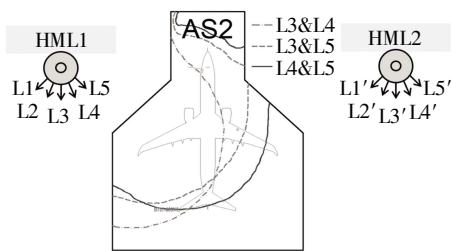
表 4 非繁忙时段停机位运行状态

Tab.4 Operating status of aircraft stands during non-peak hours

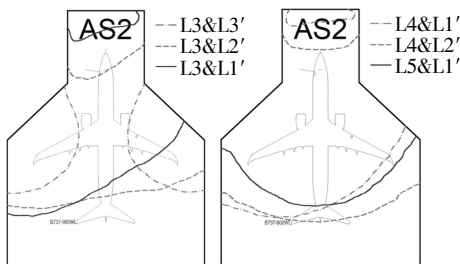
工况	AS1	AS2	AS3
1	空闲	空闲	空闲
2	空闲	占用	空闲
3	空闲	空闲	占用

假定当前无飞机停放(即工况 1),理论上可关闭机坪范围内全部高杆灯。《照明技术要求》规定,机位安全照明照度值不应低于 10 lx,符合国际民航组织关于无航班服务时机坪最低照度规定。经前期试算得知,单盏 LED 灯无法满足上述要求,因而在图 6 中给出两盏 LED 灯组合时,AS2 停机位 10 lx 照度等值线分布,泛光照明量化结果如表 5 所示。

如图 6(a)所示,仅开启单侧高杆灯(HML1)时,



(a)单基高杆灯组合(位置非等比例绘制)



(b)双基高杆灯组合

图 6 两盏 LED 灯组合时 10 lx 照度等值线

Fig.6 Contour lines of 10 lx illuminance under the combination of two LED lights

表 5 两盏 LED 灯组合时泛光照明量化结果

Tab.5 Quantitative results of floodlighting under the combination of two LED lights

灯具组合	E_h/lx	U	$R_q/\%$
L3&L4	10.7	0.08	39
L3&L5	11.6	0.22	45
L4&L5	14.3	0.26	57
L3&L3'	8.3	0.06	27
L3&L2'	10.9	0.14	52
L3&L1'	11.5	0.13	52
L4&L1'	13.7	0.18	60
L4&L2'	14.2	0.24	64
L5&L1'	15.1	0.19	58

L4&L5 组合照度等值线基本覆盖机身轮廓线, R_q 高于同组的其他组合, E_h 和 U 指标均已达到要求,可适用于 AS1 空闲状态照明(按位置镜像后应为 L1&L2 组合)。图 6(b)中,双侧高杆灯(HML1 和 HML2)均已开启,除 L3&L3'组合外,其他方案均满足 $E_h > 10 lx$,参考另外两项指标结果,L4&L2'组合在照度达标率与均匀度方面更优,适用于 AS2 及 AS3 空闲状态照明。

节能率 y 可表示为

$$y = [53.3\% \cdot E + 26.7\% \cdot (1 - E)](1 - B) \quad (3)$$

式中: E 为非繁忙时段在机坪泛光照明总时长中占比; B 为繁忙时段在机坪泛光照明总时长中占比。

不同工况下机坪节能照明方案如表 6 所示,对于工况 1,仅需 7 盏 LED 灯组合即可满足机坪无航班服务时最低照度需要,与以往满负荷运行模式相比,节能率达到 53.3%;对于工况 2 和 3,二者虽然节能率相同,但灯具组合方式略有差异。

表 6 不同工况下机坪照明节能方案

Tab.6 Energy-saving solutions for apron lighting under different working conditions

工况	灯具组合	开灯数量	节能率 $y/\%$
1	HML1-L1/L2/L4	7	53.3
	HML2-L2/L4		
	HML3-L2/L4		
2	HML1-L1/L2/L3/L4/L5	11	26.7
	HML2-L1/L2/L3/L4		
	HML3-L2/L4		
3	HML1-L1/L2/L4	11	26.7
	HML2-L2/L3/L4/L5		
	HML3-L1/L2/L3/L4		

机坪不同运行状态下节能率分布如图 7 所示,假设因公共卫生原因导致机场短期航班量骤减,繁忙时段占比趋近于 0,则此时机坪泛光照明节能率在

26.7%~53.3%内变化,应尽量将航班停靠于中间机位并开启飞机侧泛光照明灯具。相同繁忙时段下, E 值越大则节能率越高。

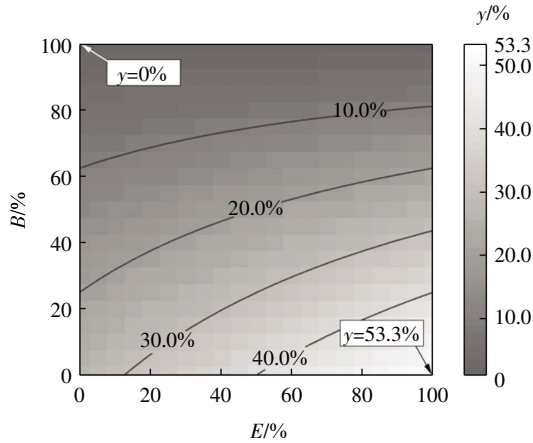


图7 不同运行状态下机坪照明节能率分布

Fig.7 Energy-saving ratio distribution of apron lighting under different operating states

4 结语

本文采用DIALux仿真分析软件对前列式多机位机坪开展泛光照明模拟,提出照度达标率指标作为照明评价的量化补充依据,对 θ_r 、 θ_o 和灯具数量等参数进行分析,并通过案例阐明泛光照明节能设计基本流程,可得到以下结论。

(1)仅靠单基高杆灯无法满足C类停机位照度要求,采用两基高杆灯组合照明可兼顾多种量化条件,同时 $\theta_r \geq 45^\circ$ 且 θ_o 不宜过大。

(2)根据无航班服务时段最低照度规定(10 lx)实施节能照明设计,对不同机坪运行状态给出多基高杆灯组合照明方案,获得机坪节能率一般表达式与量化结果,解决了以往泛光照明控制方式照度影响不足的问题。

考虑到指廊式、卫星式等停机位集结形式,实际机坪泛光照明节能设计影响因素更为复杂(如停机位规格、间距、夹角等),还需结合机场平面布局进一步完善节能分析流程。

参考文献:

- [1] 陈强. 机坪泛光照明高杆灯LED改造及智慧化控制建设探讨[J]. 光源与照明, 2020(11): 22-24.
- [2] SUPRIHARTINI Y. Flood light di apron selatan bandar udara internasional I Gusti ngurah rai bali[J]. Jurnal Ilmiah Aviasi, 2019, 12(2): 141-148.
- [3] ACHMAD P. Rancang bangun prototype smart flood light dengan pengaturan pencahayaan berbasis IoT[D]. Surabaya: Politeknik Penerbangan Surabaya, 2021.
- [4] 王欣,陈颖川. 大兴机场机坪泛光照明系统完成升级改造[N]. 中国航空报, 2022-07-26 (07).
- [5] 安志成,王玉龙. 青岛胶东国际机场机坪高杆灯照明系统节能减排方案[J]. 现代建筑电气, 2022, 13(5): 42-45.
- [6] 赵忠超,杨维菊. 建筑照明模拟软件Dialux的计算精度验证[J]. 建筑与文化, 2013(10): 63-64.
- [7] BARTSEV A. Apron lighting design including aircraft shadows[J]. Light & Engineering, 2002, 10(2): 47-52.
- [8] 孙佳,张皓驰. 基于DIALux软件的机场停机坪照明设计优化方案[C]//中国交通建设股份有限公司2016年技术交流会论文集. 2016: 1040-1044.
- [9] 中国民用航空局. 民用机场机坪泛光照明技术要求: MH/T 6108—2014[S]. 北京: 中国民航出版社, 2014.
- [10] 中国民用航空局. 民用机场飞行区技术标准: MH 5001—2021[S]. 北京: 中国民航出版社, 2021.
- [11] 郎凯,郑明. 机场停机坪泛光照明与电气[J]. 智能建筑与城市信息, 2009(5): 91-95.
- [12] COMMITTEE LG-009. Sports lighting general principles: AS 2560.1—2002[S]. Sydney: Standards Australia International Ltd., 2002.
- [13] JOINT TECHNICAL COMMITTEE LG-001. Interior and work-place lighting, outdoor workplace lighting: AS/NZS 1680.5—2012[S]. Sydney: SAI Global Ltd., 2012.

(责任编辑:刘雅婷)