

# 民用飞机典型天空光环境模拟算法及应用

王艳艳<sup>1,2\*</sup> 郭玮宏<sup>1,2</sup> 李涛<sup>1,2</sup>

(1. 上海飞机设计研究院,上海 201210;2. 大型客机集成技术与模拟飞机全国重点实验室,上海 201210)

**摘要:**通过研究CIE定义的15种典型天空光分布类型,提出了一种基于亮度与色温的民用飞机典型天空光环境模拟算法。天空光环境模拟算法体系综合了太阳位置模拟算法、天空光亮度分布模拟算法、天空光色温分布模拟算法、天空光绝对天顶亮度模拟算法。典型天空光模拟算法体系的必要输入包括天空光模式选择、当地经纬度、当地时间,输出为天空光亮度分布和天空光色温分布,为天空光环境模拟系统装置提供天空光灯板亮度、天空光灯板色温、太阳模拟器亮度的输入。

**关键词:**亮度;色温;天空光环境;模拟;算法

中图分类号: V219

文献标识码: A

OSID: 

## 0 引言

民用飞机驾驶舱是飞行员获取重要飞行信息进行人机交互的直接环境。随着驾驶舱设备集成度和复杂度不断提升,呈现给飞行员的重要信息量急剧增加,实际人机交互过程中,需要驾驶舱照明环境为飞行员执行任务提供最佳视觉工效<sup>[1-2]</sup>。驾驶舱照明环境一方面受驾驶舱顶灯、顶部板泛光灯、仪表板泛光灯、中央操纵台泛光灯、左右操纵台泛光灯等内部照明影响,另一方面受飞行过程中天空自然光变化或者是穿云、大雾、强太阳光等产生的外部眩光影响。在驾驶舱设计过程中需要综合评估驾驶舱内部和外部产生的眩光影响是否可接受,包括太阳照射到显示器上产生的眩光,夜间环境下风挡上产生的眩光,天花板、顶部控制板、遮光罩、操纵台上照明灯产生的眩光,显示器产生的反射眩光等。如果驾驶舱光环境设计不合理,容易使飞行员产生视觉疲劳,无法集中注意力,极易发生信息识别错误,引起误操作。为减少驾驶舱眩光的产生,可通过各种措施,如设计可自动和手动结合调节亮度的导光板和显示器,以及设计亮度和色温可手动调节的照明灯,减少驾驶舱光环境的突变,

使飞行员快速适应,准确识别飞行状态,保证飞行安全<sup>[3-6]</sup>。

对于驾驶舱光环境影响因素的识别,视觉工效的评价方法,以及极端光环境模拟,许多研究人员对其进行了研究。张泉清等<sup>[7]</sup>以飞机主显示器为研究对象,通过光学仿真与人机工效试验相结合的方式,开展极端光环境下的显示设备多维度综合评价研究。曹元喆<sup>[8]</sup>通过试验研究色温、照度对视觉工效的影响,整理归纳出最佳视觉工效下光环境色温与照度的取值范围,可以为后续驾驶舱光环境优化改良设计提供参考。李健等<sup>[9]</sup>通过相关分析与线性模型,考察了复杂光环境变量与不舒适眩光评价之间的关系,并比较了不同眩光指标在非均匀、非规则眩光源条件下预测不舒适眩光评价的准确性。林燕丹等<sup>[10]</sup>将恶劣光环境对视觉刺激的影响过程抽象表达为有规律的亮度变化,如雷暴雨环境下的光刺激为脉冲型,穿云层环境中的光刺激为阶跃型。在仿真座舱环境中,设置不同类型光环境,将视锐度、判读准确率和反应时间作为受影响指标进行相关视觉工效研究。郑国庆等<sup>[11]</sup>通过对光源模组发光机理与照度叠加原理研究,建立了大面积LED环境光照系统光照数学模型,通过测试计算和

\* 通信作者. E-mail: wangyanyan@comac.cc

引用格式: 王艳艳,郭玮宏,李涛. 民用飞机典型天空光环境模拟算法及应用[J]. 民用飞机设计与研究,2024(4):8-13. WANG Y Y, GUO W H, LI T. Simulation algorithm and application of typical sky light environment for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(4):8-13(in Chinese).

仿真设计分析设计了大面积、高均匀性、快速可调的全天候光环境照明系统。郭旭等<sup>[12]</sup>依据最优化方法的线性规划理论,以调光系数之和最小为目标函数,建立了协作调光照明的数学模型。虽然基于大量技术研究,对驾驶舱光环境的设计体系、考虑要素及评价方法已经建立,但是对驾驶舱外真实天空光环境的模拟方法以及实际应用研究还有待探索。

本文通过研究 CIE 定义的 15 种典型天空光分布类型,提出了一种基于亮度与色温的民用飞机典型天空光环境模拟算法。天空光环境模拟算法的先进性对于提高天空光环境场景模拟的真实度具有重要意义。

## 1 天空光环境模拟系统装置

天空光环境模拟系统装置主要包含天空光模拟器、太阳模拟器、云雾闪电模拟器、样机旋转台等,如图 1 所示。

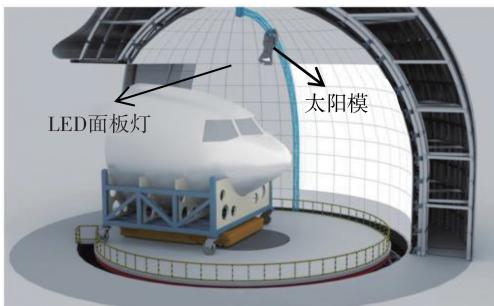


图 1 天空光环境模拟系统装置

天空光模拟器采用 LED 灯具模块化方案,构建天空光环境的物理设施,然后通过控制系统的调度控制来实现天空各类场景下光环境的模拟,构建天空基础背景光环境和天空云层反射光等。天空光模拟的计算推导是把天空设定为一个半球形的穹顶,通过研究找到理论的 CIE 天空光模型与穹顶内每块 LED 面板灯的对应关系,通过控制系统发布控制指令到每块 LED 面板灯,具体表征参数为:穹顶每块 LED 灯板的出光亮度、出光色温。通过 LED 面板实现不同的色温和出光亮度,从而耦合出不同的 CIE 天空模型下的天空能量分布。

太阳模拟器是安装在穹顶内的运动轨道上的装置,用于模拟太阳在天空中发出的光,具体表征参数为太阳方位角以及太阳灯的出光照度和出光

色温。

天空光环境模拟系统装置所形成的光环境可满足 CIE 一般天空的亮度分布标准,并可根据试验需求,通过控制系统设置各种典型及定制场景。控制软件支持对 LED 环境光灯组的亮度、色温值进行设定,同时支持对太阳模拟器的照度值、色温值进行设定。

## 2 天空光环境标准场景模拟算法

### 2.1 天空光亮度分布模拟算法

影响天然光形成的因素多而复杂,除了天空漫反射产生的光、太阳直射产生的光,还包括地面反射产生的光。实际上天空的亮度分布是在多种因素综合影响下形成的,且动态变化的。为了便于深入探索研究,众多研究者用天空光亮度分布模型来描述自然光的动态分布和变化趋势。最终,国际照明委员会提出了国际通用的采光设计模型,共 15 种 CIE 标准的天空亮度分布数学模型<sup>[13]</sup>,于 2004 年作为全球标准,我国在 2006 年将其纳入国家标准提供给相关学者研究采纳<sup>[14]</sup>。

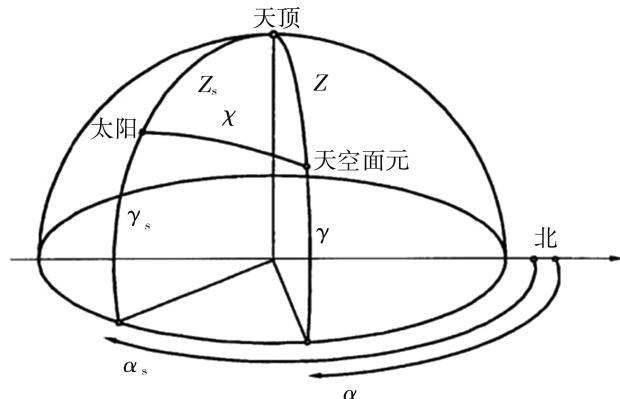


图 2 CIE 标准一般天空的抽象模型

图 2 为 CIE 标准的一般天空亮度分布的抽象模型及其相关空间参数定义<sup>[13]</sup>。此外,定义  $L_\alpha, L_z$  为该模型相关的亮度参数。基于该抽象模型,对相关参数定义如下:

$\alpha$  定义为某一目标面元在水平面上的投影与正北向的夹角,即目标面元方位角,规定顺时针方向为北向;

$\alpha_s$  定义为太阳光线在地平面上投影与当地经线的夹角,即太阳方位角;

$\gamma$  定义为地平面上方某目标面元与地面之间的夹角,即目标面元高度角;

$\gamma_s$  定义为太阳光线与地平面的夹角,即太阳高

度角;

$\chi$  定义为目标面元与太阳光线之间的夹角最小值;

$Z$  定义为目标面元与天球极轴之间的夹角;

$Z_s$  定义为太阳光线与天顶点之间的夹角;

$L_a$  定义为目标面元在某一特定波长范围内的辐射亮度值,即目标面元亮度值;

$L_z$  定义为天顶亮度,是描述天空亮度的参数。

某天空目标面元的位置由  $\alpha$ 、 $\alpha_s$ 、 $Z$  这三个参数确定。若假设已知固定太阳位置,即太阳与天顶之间的角距离  $Z_s$  已知,目标面元与太阳的最短角距离  $\chi$  为:

$$\begin{aligned} \chi &= \arccos(\cos Z_s \cdot \cos Z \\ &\quad + \sin Z_s \cdot \sin Z \cdot \cos |\alpha - \alpha_s|) \end{aligned} \quad (1)$$

公式(1)中面元距天顶之间的角距离均与相应的高度角为互余关系:

$$Z = \frac{\pi}{2} - \gamma \quad (2)$$

$$Z_s = \frac{\pi}{2} - \gamma_s \quad (3)$$

根据图 2 中的天空亮度分布抽象模型,天顶亮度  $L_z$  与某目标面元的亮度值  $L_a$  之间的关系为:

$$\frac{L_a}{L_z} = \frac{f(\chi) \cdot \varphi(Z)}{f(Z_s) \cdot \varphi(0)} \quad (4)$$

其中,  $\varphi(Z)$  表示亮度色调函数,函数分布图如图 3 所示;  $f(\chi)$  表示散射特征函数,函数分布图如图 4 所示。

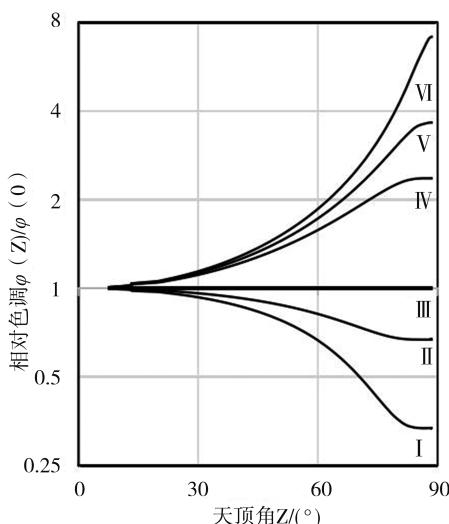


图 3 亮度色调函数示意

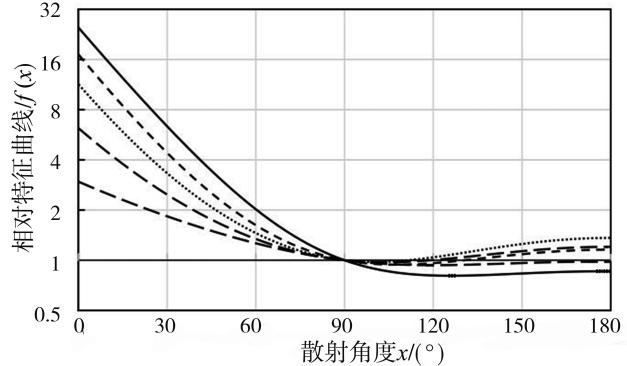


图 4 散射特征函数示意

亮度色调函数  $\varphi(Z)$ 、散射特征函数  $f(\chi)$  与一些控制参数有关。CIE 标准的一般天空亮度分布的数学模型共有两种类型参数,其中亮度色调参数,包含  $a, b$  两个参数;散射指标参数,包含  $c, d, e$  三个参数。

亮度色调函数  $\varphi(Z)$  的表达式为:

$$\varphi(Z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \quad (5)$$

因此,可知:

$$\varphi(0) = 1 + a \cdot \exp(b) \quad (6)$$

散射特征函数  $f(\chi)$  的表达式为:

$$\begin{aligned} f(\chi) &= 1 + c \cdot \left[ \exp(d \cdot \chi) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] \\ &\quad + e \cdot \cos^2 \chi \end{aligned} \quad (7)$$

因此,可知:

$$\begin{aligned} f(Z_s) &= 1 + c \cdot \left[ \exp(d \cdot Z_s) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] \\ &\quad + e \cdot \cos^2 Z_s \end{aligned} \quad (8)$$

由此,综合式(4)至式(8),可得任意目标面元的天空亮度  $L_a$ 。

$$\begin{aligned} L_a &= \frac{f(\chi) \cdot \varphi(Z)}{f(Z_s) \cdot \varphi(0)} \cdot L_z \\ &= \frac{\left[ 1 + c \cdot \left[ \exp(d \cdot \chi) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \chi \right] \cdot \left[ 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \right]}{\left[ 1 + c \cdot \left[ \exp(d \cdot Z_s) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s \right] \cdot [1 + a \cdot \exp(b)]} \cdot L_z \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)即为计算任意天空面元亮度的公式,由式(9)可知,任意目标面元的天空亮度仅与天空光亮度分布和绝对天顶亮度的乘积有关。

## 2.2 太阳位置模拟算法

太阳位置与太阳运行的绝对时间、观察者所处地球的地理位置相关。因此,将对太阳位置的模拟

引入天空光环境亮度与色温标准场景模拟,将得到更为本质的、贴近真实场景的天空光分布。

假设有:

太阳方位角  $V$ ;

太阳高度角  $H$ ;

观察地点 M 的纬度、经度  $\alpha_m, \lambda_m$ ;

太阳直射点 D 的纬度、经度  $\alpha_D, \lambda_D$ 。

首先,假设一天当中太阳直射点的纬度恒定,则  $\alpha_D$  的近似算法为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{aligned} \alpha_D = & 0.3723 + 23.2567\sin\beta + 0.1149\sin2\beta \\ & - 0.1712\sin3\beta - 0.785\cos\beta + 0.3656\cos2\beta \quad (10) \\ & + 0.0201\cos3\beta \end{aligned}$$

其中:

$$\beta = 2\pi \frac{(n - 1 - n_0)}{365.2422} \quad (11)$$

$$n_0 = 78.801 + 0.242(year - 1969) - f_{loop}[0.25(year - 1969)] \quad (12)$$

式中,  $n$  为从元旦起的第  $n$  天, 元旦当天,  $n$  取值为 1;  $f_{loop}[\cdot]$  对括号内的数舍去小数部分保留整数;  $year$  为年份。

其次, 观察地点的经度  $\lambda_m$  与太阳直射点的经度  $\lambda_D$  之差计算式为:

$$\lambda_m - \lambda_D = 15^\circ(t + e - 12) + (\lambda_m - \lambda_s) \quad (13)$$

其中:

$$e = \frac{0.0028 - 1.9857\sin\beta + 9.9059\sin2\beta - 7.0924\cos\beta + 0.6882\cos2\beta}{60} \quad (14)$$

式中,  $t$  表示当地时间, 按照太阳在天空中的位置来计算;  $e$  表示平均时差;  $\lambda_s$  表示所在地的基准经度<sup>[15]</sup>。

由此, 太阳在天空中相对于正午位置的角度, 即时角的近似算法为:

$$\Omega = \begin{cases} \lambda_m - \lambda_D - 360^\circ & \lambda_m - \lambda_D > 180^\circ \\ \lambda_m - \lambda_D & -180^\circ \leq \lambda_m - \lambda_D \leq 180^\circ \\ \lambda_m - \lambda_D + 360^\circ & \lambda_m - \lambda_D < -180^\circ \end{cases} \quad (15)$$

即凌晨到正午时角范围  $-180^\circ \sim 0^\circ$ , 正午时时角为  $0^\circ$ , 正午到午夜时角范围  $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

由此, 推导计算太阳方位角  $V$ 、高度角  $H$  为:

$$\begin{cases} H = \arcsin(\cos\alpha_m \cos\alpha_D \cos\Omega + \sin\alpha_m \sin\alpha_D) \\ V = \frac{\sin\Omega \arccos(\sin H \sin\alpha_m - \sin\alpha_D)}{\cos H \cos\alpha_m} \end{cases} \quad (16)$$

式(10)至式(16), 即为太阳位置模拟算法。其输入为观察地点的经纬度、具体的某个时刻,

输出为输入的时间、地点条件下的太阳高度角、方位角。

### 2.3 天空光色温分布模拟算法

天空光色温分布模拟算法应在天空光亮度分布模拟算法的基础上进行延展。

对天空色温分布来源进行分析, 可知天空色温的变化主要是太阳光亮度的色温与不同天空模式本身色温之间综合作用的结果, 因此, 首先需要将太阳色温与天空的基础色温计算出来, 然后根据天空光亮度分布模拟算法中的散射特征函数  $f(\chi)$  来计算天空光色温分布。

计算太阳的色温  $CCT_{sun}$ , 太阳本身距离天顶越远, 则色温越高。设定太阳高度角  $\gamma_s$  取值为  $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ , 则:

$$CCT_{sun} = \exp\left(\frac{4 \cdot \gamma_s}{\pi}\right) \cdot 64 + 3000 \quad (17)$$

计算天空的基础色温  $CCT_{sky}$ , 假定与太阳位置空间角度为  $90^\circ$  处的天空色温为基础色温, 此处色温应是受到太阳色温影响最小的位置。基础色温与当地时间  $t$  相关, 则:

$$CCT_{sky} = \cos\left[\left(\frac{t}{6} - 2\right) \cdot \frac{\pi}{2}\right] \cdot 3500 + 3000 \quad (18)$$

计算天空光的色温分布模拟, 目标面元与太阳的最短角距离为  $\chi$ , 根据式(7)散射特征函数  $f(\chi)$  可知:

$$f(0) = 1 + c \cdot \left[1 - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right] + e \quad (19)$$

$$f\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (20)$$

求解天空光色温分布  $CCT(\chi)$ , 相当于已知  $(f(0), CCT_{sun})$ ,  $\left(f\left(\frac{\pi}{2}\right), CCT_{sky}\right)$ , 即  $(1, CCT_{sky})$ , 求  $(f(\chi), CCT(\chi))$ 。将天空光色温分布定义为线性关系, 则比例系数为:

$$k = \frac{CCT_{sun} - CCT_{sky}}{f(0) - f\left(\frac{\pi}{2}\right)} = \frac{CCT_{sun} - CCT_{sky}}{f(0) - 1} \quad (21)$$

由此可得, 以目标面元距太阳角距离为自变量的天空光色温分布  $CCT(\chi)$  为:

$$CCT(\chi) = k \cdot \left(f(\chi) - f\left(\frac{\pi}{2}\right)\right) + CCT_{sky}$$

$$= \frac{f(\chi) - 1}{f(0) - 1} \cdot (CCT_{\text{sun}} - CCT_{\text{sky}}) + CCT_{\text{sky}} \quad (22)$$

式(22)即为天空光色温分布模拟算法。

其中  $f(\chi)$  函数与天空光模式选择有关,  $\chi$ 、 $CCT_{\text{sun}}$  均与太阳位置有关, 太阳位置、 $CCT_{\text{sky}}$  与当地时间  $t$  相关, 因此天空光色温分布模拟算法  $CCT(\chi)$  本质上仅与天空光模式选择和时间  $t$  相关。

#### 2.4 天空光绝对天顶亮度模拟算法

由式(9)可知, 任意目标面元的天空亮度仅与天空光亮度分布和绝对天顶亮度的乘积有关。

分析天空光绝对天顶亮度的影响因素, 主要是天空光类型的选择和太阳所处位置, 由此, 考虑天空光绝对天顶亮度  $L_z$  计算方法为:

$$L_z = \frac{E_{vd}}{E_{voh}} \left[ B \cdot \frac{(\sin\gamma_s)^c}{(\cos\gamma_s)^d} + E \cdot \sin\gamma_s \right] \quad (23)$$

其中,  $\gamma_s$  为太阳高度角, 在式(23)中取值为  $[0, 70]$ , 太阳高度角在  $70^\circ$  以上时的绝对天顶亮度取太阳在  $70^\circ$  时的值。注意计算结果单位是  $\text{kcd}/\text{m}^2$ 。

其他参数  $\frac{E_{vd}}{E_{voh}}$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  是公式的一些经验数值, 均与天空光类型选择相关。

综上所述, 天空光绝对天顶亮度为:

$$L_z = \begin{cases} \frac{E_{vd}}{E_{voh}} \left[ B \cdot \frac{(\sin\gamma_s)^c}{(\cos\gamma_s)^d} + E \cdot \sin\gamma_s \right] & 0^\circ \leq \gamma_s \leq 70^\circ \\ \frac{E_{vd}}{E_{voh}} \left[ B \cdot \frac{(\sin70^\circ)^c}{(\cos70^\circ)^d} + E \cdot \sin70^\circ \right] & \gamma_s \geq 70^\circ \end{cases} \quad (24)$$

式(24)即为天空光绝对天顶亮度的模拟算法。

由式(24)可知, 天空光绝对天顶亮度仅与天空光模式选择、太阳位置有关, 太阳位置与当地时间有关, 因此天空光绝对天顶亮度模拟算法  $L_z$  本质上仅于天空光模式选择和时间  $t$  相关。

### 3 结论

根据前文所述, 天空光模拟算法与天空光模式选择和当地时间有关。因此, 天空光模式选择、当地经纬度、当地时间是天空光模拟综合算法的必选输入。

在天空光模拟系统应用中, 需要保留太阳位置、绝对天顶亮度、太阳色温、基础色温等参数作为自主输入选项。这些自选输入可替代天空光模拟算法体系内部的一些过程变量值, 能够在实际应用

时为天空光模拟算法留有更多可调节的数据接口, 能够模拟更为丰富的非典型天空光环境, 能够针对试验需求调节天空光环境。

#### 参考文献:

- [1] WRIGHT S, O'HARE D. Can a glass cockpit display help (or hinder) performance of novices in simulated flight training? [J]. Applied Ergonomics, 2015, 47: 292-299.
- [2] HOWARD C E. Combat aircraft with advanced avionics [J]. Military and Aerospace Electronics, 2014 (2): 8-15.
- [3] FENG Q B, LV G Q, DONG D, et al. A global dimming algorithm for light emitting diode backlight in aircraft cockpit liquid crystal displays [J]. Advanced Science Letters, 2013, 19(3): 908-912.
- [4] WEI H Y, ZHUANG D M, SONG G L, et al. Evaluation of a cockpit by eye modeling based luminous environment simulation [C]//International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. [S. l.]: IEEE, 2010: 231-235.
- [5] 曾艺. 基于 LED 技术的自适应调光导光板照明及其关键技术 [J]. 科技视界, 2017 (6): 134-135. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2017.06.089.
- [6] 刘洪德, 许明鸣, 杜超超, 等. 基于模糊控制的飞机导光板自动调光方案 [C]//中国航空学会. 2019 年(第四届)中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中航出版传媒有限责任公司, 2019: 5.
- [7] 张泉清, 张燕雯. 极端光环境下飞机显示器多维度综合评价研究 [J]. 照明工程学报, 2022, 33 (5): 102-109.
- [8] 曹元喆. 飞机驾驶舱光环境对视觉工效的影响研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [9] 李健, 杨彪. 客机驾驶舱复杂光环境下不舒适眩光评价方法与预测模型 [J]. 照明工程学报, 2020, 31 (2): 63-67.
- [10] 林燕丹, 艾剑良, 杨彪, 等. 民机驾驶舱在恶劣光环境下的飞行员视觉工效研究 [J]. 科技资讯, 2016, 14(13): 175-176.
- [11] 郑国庆, 钟虎根, 汪雨晴, 等. 全天候高均匀性光环境照明系统设计 [J/OL]. 计量学报, 2023: 1-9 [2023-12-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1864.TB.20231123.1255.006.html>.
- [12] 郭旭, 董丽, 陈立峯, 等. 分布式照明系统的个性化调光方法 [J]. 大连工业大学学报, 2017, 36 (6): 455-458.

- [13] 高原. 基于 CIE 一般标准天空模型的 LED 人工天穹系统的设计研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [14] 肖辉, 王金光, 张毅, 等. 基于 CIE 标准一般天空的实际天空模型研究 [J]. 照明工程学报, 2008(1): 20-24.
- [15] 桂文胜, 李涛, 陆彦斌. 太阳位置公式的改进及应用 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 213-216.

**作者简介**

王艳艳 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 驾驶舱集成试验技术。E-mail: wangyanyan@ comac. cc

郭伟宏 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 光环境集成试验技术。E-mail: guowehong@ comac. cc

李 涛 男, 硕士, 研究员。主要研究方向: 民用飞机综合试验验证技术。E-mail: litao2@ comac. cc

## Simulation algorithm and application of typical sky light environment for civil aircraft

WANG Yanyan<sup>1,2 \*</sup> GUO Weihong<sup>1,2</sup> LI Tao<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

2. State Key Laboratory of Airliner Integration Technology and Flight Simulation, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** This paper studies 15 types of sky light distribution based on a typical sky light environment defined by CIE. The sky light environment simulation algorithm system integrates the solar position simulation algorithm, the sky brightness distribution simulation algorithm, the sky light color temperature distribution simulation algorithm, and the sky light absolute zenith brightness simulation algorithm. The necessary inputs of the typical sky light simulation algorithm system include sky light mode selection, local longitude and latitude, local time, the output is sky brightness distribution and sky light color temperature distribution, and provide the input of sky light board brightness, sky light board color temperature and solar simulator brightness for the sky light environment simulation system device.

**Keywords:** brightness; color temperature; sky light environment; simulation; algorithm

\* Corresponding author. E-mail: wangyanyan@ comac. cc