

文章编号: 1674-8190(2025)04-200-08

民用飞机天空光环境模拟系统设计与验证

郭玮宏^{1,2}, 谢姝鸽^{1,2}, 王鸿鑫^{1,2}, 李涛^{1,2}, 原晓峰^{1,2}

(1. 中国商用飞机有限责任公司 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: 外界光环境对飞行员舒适性和飞机操纵安全性具有显著影响, 进而影响驾驶舱光环境设计。为解决民用飞机复杂动态光环境地面实验环境条件缺乏问题, 提出一种先进的民用飞机天空光环境模拟系统的设计方法。分析天空光环境模拟系统的设计要求和功能架构; 着重介绍光学模拟系统中基础天空光环境模拟系统、日月模拟系统、特殊光环境模拟系统的功能和技术指标, 并简要介绍天空光环境模拟系统的运行支持系统; 通过设计实验, 对天空光环境模拟系统发光的均匀性和稳定性进行验证。结果表明: 本文提出的设计方法能够提供更为丰富的模拟场景, 具有较高的集成性、智能性, 可以用于驾驶舱整体光环境评估、显示器自动调光评定等多类型型号验证和技术研究。

关键词: 天空光; 环境; 模拟; 民用飞机; 实验验证

中图分类号: V216.8

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2025.04.21

Design and verification of skylight environment simulation system for civil aircraft

GUO Weihong^{1,2}, XIE Shuge^{1,2}, WANG Hongxin^{1,2}, LI Tao^{1,2}, YUAN Xiaofeng^{1,2}

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Commercial Aircraft

Corporation of China, Ltd., Shanghai 201210, China)

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

Abstract: The external light environment has high impact on pilot comfort and aircraft control safety, which can affect the design of the cockpit light environment. An advanced design method for civil aircraft skylight environment simulation system is introduced to solve the issue of the lack of ground experimental conditions for complex dynamic light environments for civil aircraft. The technical requirement and function architecture of the skylight environment simulation system are analyzed. The function and technique indicators of the system are emphasized, including basic sky light environment simulation system, sun and moon simulation system, and specific extreme light environment simulation system. The operational support system of the skylight environment simulation system is briefly introduced. The uniformity and stability of the luminance of this skylight environment simulation system are verified through experiment. The results show that the proposed design method can provide more diverse simulation scenarios, and the system has high integration and intelligence. It can be used for various types of model verification and technical research such as overall light environment assessment of the cockpit or automatic dimming assessment of the display and other optical research.

Key words: skylight; environment; simulation; civil aircraft; test verification

收稿日期: 2024-10-09; 修回日期: 2024-12-25

基金项目: 工信部民机专项科研项目(GX2021014)

通信作者: 郭玮宏(1991—), 男, 博士, 高级工程师。E-mail: whguo10@fudan.edu.cn

引用格式: 郭玮宏, 谢姝鸽, 王鸿鑫, 等. 民用飞机天空光环境模拟系统设计与验证[J]. 航空工程进展, 2025, 16(4): 200-207.

GUO Weihong, XIE Shuge, WANG Hongxin, et al. Design and verification of skylight environment simulation system for civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(4): 200-207. (in Chinese)

0 引言

飞机在不同的飞行阶段,可能遭遇各种不同的天空光环境场景。典型的天空光环境场景包括晴天、阴天、穿云、朝阳、夜航、雷暴等,典型的飞行阶段包括起飞、爬升、巡航、进近、降落等。

天空光环境的亮度、色温等在飞行阶段中产生变化,会对驾驶员的操纵性、注意力、注视区域、反应时间等产生影响^[1],进而对飞行安全造成不利影响,使得人为差错率升高^[2]。例如,飞行员穿云至云上的瞬间,外界光环境短时间亮度增加数倍,即形成了一次对飞行员光刺激阶跃信号,会导致飞行员的反应变慢^[3]。

同时,天空光环境的亮度、色温变化,对飞机驾驶舱、客舱各类光学或显示设备的性能都会提出相应要求^[4]。不合理的照明设计,或者不合适的舱内空间布局,将会导致各种有害光的出现^[5]。例如,驾驶舱显示器亮度应随着外界光环境的亮度变化而变化,既不应过暗导致飞行员观察困难,也不应过亮导致飞行员产生视觉疲劳,影响飞行员工作效率和驾驶安全^[6]。

为了消除光环境对飞行员造成的视觉障碍,降低飞行操作负担,提升驾驶员操作飞机的便捷性、准确性,需要从照明灯具设计、光空间分布、光照模式、显示系统兼容性等方面出发,进行视觉工效设计效果验证及工效学评价^[7]。

目前的验证手段主要是试飞验证,但试飞成本高、代价大,飞行环境难以复现,不便于试飞问题的解决^[8]。同时,现有环境鉴定试验主要针对气候、机械、电气、电磁和特殊试验环境等^[9],缺乏光学环境相关试验要求。因此,对驾驶舱光环境整体设计评估和相关设备光学性能测定,缺乏标准的实验环境和实验方法。

为了对各类照明装备及光学系统在各种自然界光环境进行量化研究,各国的研究机构相继开发了不同的仿天空自然光环境系统,使研究不受天气的影响,实现量化、可重复的实验环境。英国宇航公司、意大利 Alenia 公司等通过建设天空环境光仿真实验室对飞机光电设备的视觉工效设计性能进行系统的检测和验证^[10];航空工业洛阳电光设备研究所的天空仿真系统属于国内第一个航空类天空仿真系统^[11],该系统可为座舱显示瞄准系

统的人机工效、夜视兼容、显示瞄准实验等提供各种外界光环境仿真,有效节约设计时间与样机成本。截至2020年,见于资料可查的天空仿真系统,主要采用灯光直投内表面扩散形式和镜面反射形式,模拟的光照环境亮度较低,模式单一,缺乏动态光环境场景模拟能力,对民用大型飞机开展研究的适应性能力低,上述问题都需要作为天空光环境模拟系统的设计约束进行考虑。

因此,在国内外光环境模拟系统技术的基础上,通过分析天空光环境模拟系统的设计要求和功能架构,本文提出一种民用飞机天空光环境模拟系统的设计方法,并对系统的均匀性和稳定性进行验证。

1 系统总体设计概述

根据天空光环境模拟系统试验需求分析,天空光环境模拟系统需能够满足模拟典型光环境(晴天、阴天、夜航)、极端光环境(阳光直射、穿云、闪电、水面反射),具备动态时序仿真能力。天空光环境模拟系统功能识别与定义如表1所示。

表1 天空光环境模拟系统功能识别与定义
Table 1 Function identification and definition of sky light environment simulation system

序号	场景名称	功能识别	功能定义
1	标准晴天场景	模拟CIE 15种晴天天空的亮度和色温分布 ^[12]	模拟天空亮度 模拟天空色温
2	标准阴天场景	模拟CIE 3种阴天天空的亮度和色温分布 ^[13]	模拟天空亮度 模拟天空色温
3	穿云、闪电场景	模拟云层对驾驶舱风挡外光照效果,模拟闪电持续闪光效果	模拟云雾 模拟闪电
4	水面反射场景	模拟从驾驶舱下方形成的高亮度面光	模拟水面 反射光
5	朝阳及夕阳场景	模拟太阳的亮度及色温变化	模拟太阳亮度 模拟太阳色温 模拟太阳运行
6	夜航场景	模拟月亮的亮度及月相变化	模拟月亮亮度 模拟月相 模拟月亮运行
7	自设场景	实现自定义光环境场景	配置光环境 参数
8	动态变化场景	实现动态场景时序变化	导入多个场景, 连续播放

基于上述功能设计要求,天空光环境模拟系统的核心功能是实现对各类光环境场景的模拟,以满足使用需求。同时,考虑到工程实现的需要,该系统设计过程中需要考虑必要的运行支持系统,例如需要主体支撑结构用于支撑整个穹顶、提供操作空间,需要供电系统提供电力配给,需要综合控制系统提供整体设备管理和应用管理,提供综合检测能力便于使用等。天空光环境模拟系统功能架构如图 1 所示。

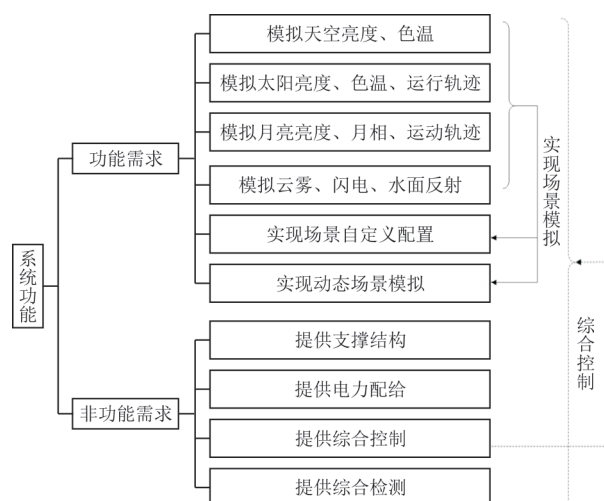


图 1 天空光环境模拟系统功能架构
Fig. 1 Functional architecture of sky light environment simulation system

根据天空光环境模拟系统功能架构,通过设计相应子系统满足各功能需求和非功能性需求。天空光环境模拟系统架构如图 2 所示。

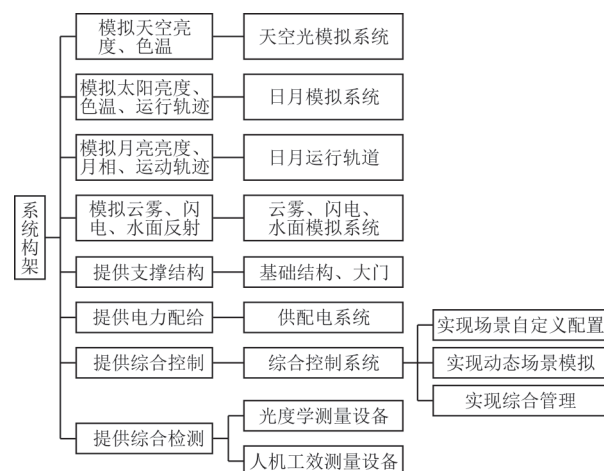


图 2 天空光环境模拟系统架构
Fig. 2 Architecture of sky light environment simulation system

天空光环境模拟系统是一个复杂的穹顶建筑式实验装置,主要由天空光模拟系统、日月模拟系统、日月轨道系统、云雾闪电水面模拟系统、综合检测系统、综合控制系统、主体结构等^[14-16]组成。天空光环境模拟系统结构示意图如图 3 所示。

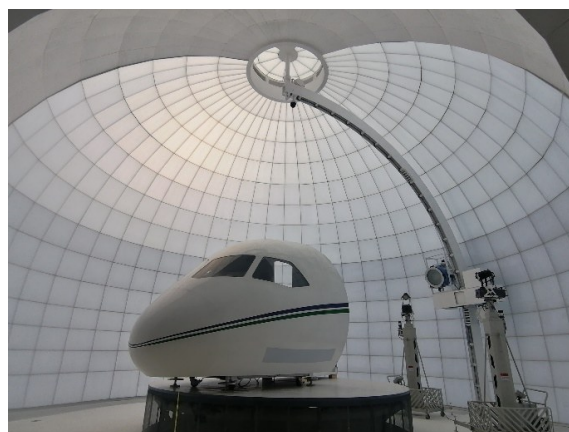


图 3 天空光环境模拟系统结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the structure of the sky light environment simulation system

2 光环境模拟系统

为实现模拟各种天空光环境场景,光学模拟系统分为 3 个部分,基础天空光环境模拟系统、日月模拟系统、特殊光环境模拟系统。

2.1 基础天空光环境模拟系统

根据试飞过程中采集的天空光亮度及色温测试数据,天空的基础亮度最高可达 $30\,000\text{ cd/m}^2$,天空色温范围约为 $2\,500\sim 13\,000\text{ K}$,其中朝霞天空光色温约 $3\,000\text{ K}$,晴朗天空光色温 $4\,000\sim 5\,000\text{ K}$,阴天天空光色温 $6\,400\sim 7\,000\text{ K}$,云雾天空光色温 $7\,500\sim 8\,500\text{ K}$,厚云天空光色温 $13\,000\text{ K}$ 。

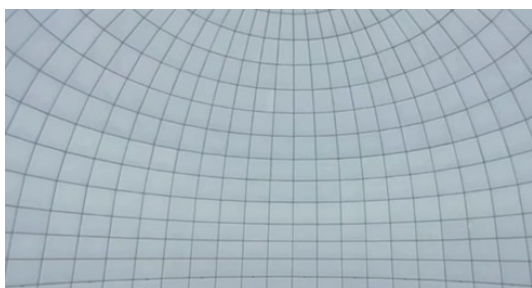
基于民用飞机适航取证验证试验环境条件要求,以及建造天空光环境模拟系统的经济性综合考虑,基础天空光环境模拟系统由 498 块高亮度高均匀性大尺寸灯板光源组成,其驾驶舱视界对应的外部灯板区域为高亮区,高亮区上方及下方为低亮区^[17-18]。与通过照明光源投光至涂有漫反射涂料的穹顶表面形成均匀反射体的方式相比,采用灯板发光的方式可以在保证发光均匀性大于 85% 的基础上,使发光最高亮度提升 5~7 倍。

高亮区亮度调节范围为 $0\sim 35\,000\text{ cd/m}^2$,低亮区亮度调节范围为 $0\sim 15\,000\text{ cd/m}^2$,所有灯板的色温调节范围均为 $2\,700\sim 6\,500\text{ K}$ 。其亮度调节范围足以覆盖真实天空光亮度参数,色温调节范围内能够覆盖一般晴天、阴天的真实天空光色温参数,进一步通过搭配云雾模拟设备实现有云天空的模拟效果。

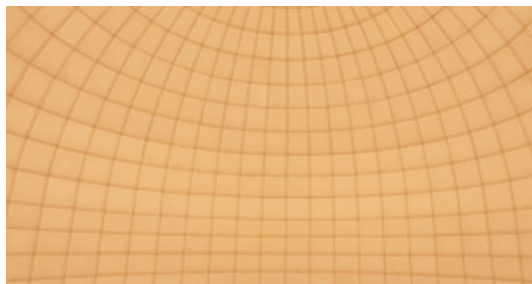
不同高度层的灯板外形设计不同,覆盖了半球结构的内表面,水平范围达到 240° ,垂直方向则达到 $-15^\circ\sim 90^\circ$ 。由此,当驾驶舱正前方正对灯板区域中心位置时,左、右各 120° 的范围可以完全覆盖驾驶舱视界,给予飞行员置身于天空之中的视觉体验。

除发光灯板外的其余 120° 半球结构内表面以及地面,则喷涂了标准反射涂料,实现任意位置光泽度均在 $90\sim 100$ 之间,确保整个半球结构内部均为标准可控的光学表面。

不同色温状态下的基础天空光环境模拟系统如图4所示。



(a) 高色温光模拟



(b) 低色温光模拟

图4 基础天空光环境模拟系统

Fig. 4 Basic sky light environment simulation system

2.2 日月模拟系统

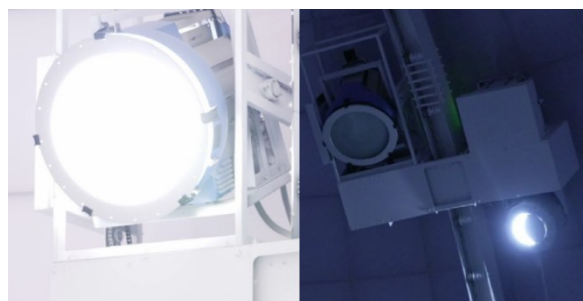
日月模拟系统由太阳模拟器和月亮模拟器构成,两台模拟器共用一套机械结构。

太阳模拟器采用了一台超高亮度气体放电光源,可模拟真实太阳的亮度,约为 $100\,000\text{ cd/m}^2$ ^[19]。该光源重新设计了内部机械结构,通过驱动调光结合机械调光,最终可实现 $30\%\sim 100\%$ 宽范围调光,超过了一般气体放电光源 $70\%\sim 100\%$ 的调光范围^[20]。该光源最高表面亮度可达 $130\,000\text{ cd/m}^2$,以实现在受照面达到 $150\,000\text{ lx}$ 的超高照度。并且该设备前表面安装了磨砂玻璃,在亮度和视觉两个方面都能够模拟真实的太阳。

在应用过程中,如某一场景需模拟的太阳光亮度不足 $35\,000\text{ cd/m}^2$,则优先使用灯板模拟太阳发光;在需要模拟的太阳光亮度超过 $35\,000\text{ cd/m}^2$ 时,则采用太阳模拟器。由此, $30\%\sim 100\%$ 调光范围的太阳模拟器与天空光灯板,共同形成 $0\sim 130\,000\text{ cd/m}^2$ 连续的太阳光亮度模拟。

月亮模拟器采用LED光源模拟月亮的亮度变化,亮度变化范围 $0.01\sim 10.00\text{ lx}$ ^[21]。月亮模拟器还配有特制的月相板,能够模拟出各种月相变化。

日月模拟系统如图5所示。



(a) 太阳发光模拟

(b) 月亮发光模拟

图5 日月模拟系统

Fig. 5 Sun and moon simulation system

2.3 特殊光环境模拟系统

特殊光环境模拟系统包括云雾模拟器、闪电模拟器和水面反射模拟器。

云雾模拟器用于模拟飞机穿云飞行场景,用来模拟不同浓度的云对天空光照度的影响。闪电模拟器用于模拟闪电的亮度和闪烁频率,亮度调节范围为 $0\sim 100\,000\text{ cd/m}^2$,闪烁频率调节范围 $0.1\sim 20.0\text{ Hz}$ 。水面反射模拟器用于反射水面(包括路面)形成的对驾驶舱的强烈反射光照。

特殊光环境模拟系统如图6所示。



图6 特殊光环境模拟系统

Fig. 6 Specific extreme light environment simulation system

3 运行支持系统

为保障天空光环境模拟的功能实现和正确运行,运行支持系统主要包括支撑结构、供电系统、空调暖通系统、综合控制系统、综合检测系统等。

为支撑天空光环境模拟灯板,天空光环境模拟系统内部为半球形钢架结构,内部空间内径 15 m,顶部高度 10.5 m,包括 3 m 直壁段。

运行支持系统还包括日月轨道系统和升降转台系统,以实现日月模拟器与实验样机之间的相对运动。太阳模拟器和月亮模拟器共用一套移动轨道,可以实现水平方向 360° 旋转,垂直方向 $-5^\circ \sim 85^\circ$,升降转台的最大负载可达 10 t,升降范围 0~3 m。

此外,运行支持系统中的综合检测系统,包括一套适配于民用飞机驾驶舱光环境测量的分布式照度测量仪,如图 7 所示。该测量仪包括 16 个无线照度测量探头,可实现实时在线测量能力,用于天空光环境发光参数自校准检测以及测量驾驶舱内光照度分布。



图7 分布式照度计

Fig. 7 Distributed illuminance meter

4 实验验证及结果

为验证天空光环境模拟系统的光学性能,设计亮环境和暗环境模拟实验。亮环境模拟实验将全部灯板设置为 $1\,000 \sim 30\,000 \text{ cd/m}^2$,色温设置为 6 000 K,测量驾驶舱被照面照度,实验结果如图 8 所示。需注意,当高亮区设置值大于 $15\,000 \text{ cd/m}^2$ 时,低亮区保持 $15\,000 \text{ cd/m}^2$ 。

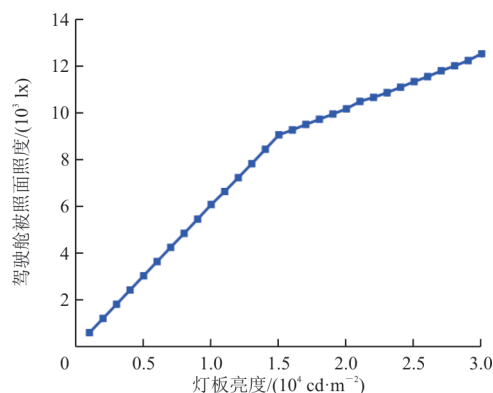


图8 亮环境模拟被照面照度与灯板亮度关系图

Fig. 8 Diagram of the relationship between illuminance of illuminated surface and luminance of lamp panels in a bright environment

暗环境模拟实验将月亮模拟器亮度设置为 $1\,000 \sim 10\,000 \text{ cd/m}^2$,色温设置为 6 000 K,测量驾驶舱被照面照度,实验结果如图 9 所示。

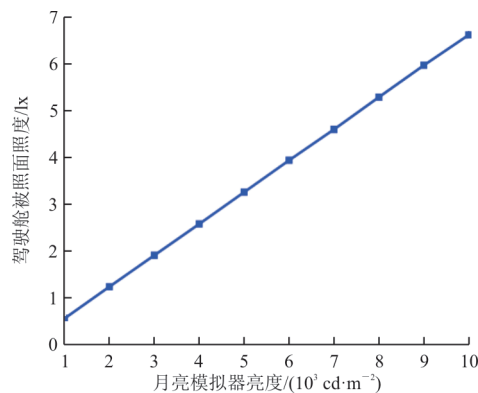


图9 暗环境模拟被照面照度与月亮模拟器亮度关系图

Fig. 9 Diagram of the relationship between illuminance of illuminated surface and luminance of moon simulator in a dark environment

通过亮环境模拟和暗环境模拟实验,说明天空光环境模拟系统可以实现从 $0.05 \sim 13\,000.00 \text{ lx}$ 的连续驾驶舱照度变化,满足一般光环境模拟实

验需求。从测量结果也可以看出,对光环境亮度的控制具备良好的线性关系。

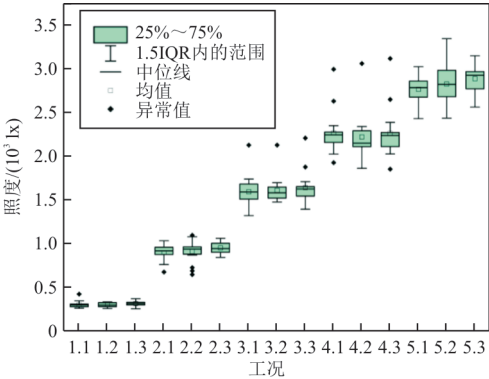
为了验证天空光环境模拟系统的稳定性和均匀性,设计一组验证实验,通过将分布式照度探头安装在某型飞机模拟驾驶舱的不同位置,对不同区域照度进行测量,包括左、右仪表板灯,左、右操纵台灯,中央操纵台灯和驾驶舱顶灯。实验条件是将天空光设置为一系列亮度和色温,如表 2 所示。将所有工况作为一组进行测试,不同组别、相同工况的测量照度取平均值后进行数据分析。

表 2 实验工况

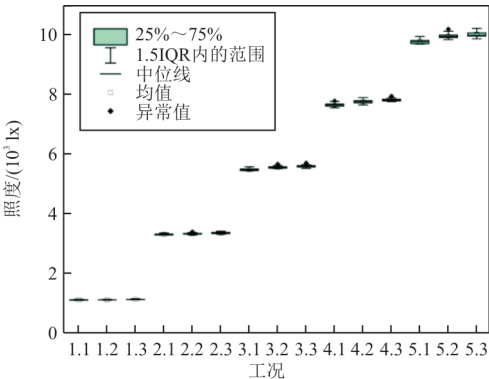
Table 2 Experimental Conditions

色温/ K	工况				
	1 000 cd/m ²	3 000 cd/m ²	5 000 cd/m ²	7 000 cd/m ²	9 000 cd/m ²
3 000	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1
4 500	1.2	2.2	3.2	4.2	5.2
6 000	1.3	2.3	3.3	4.3	5.3

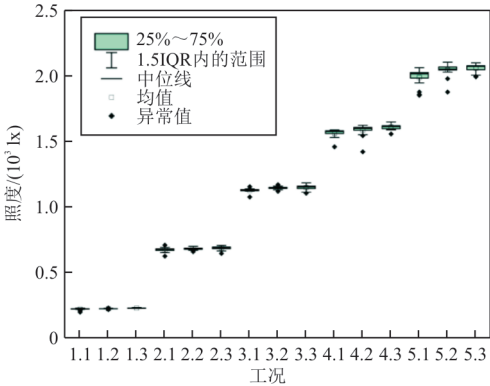
根据实验结果,在相同色温、不同环境亮度的工况下,同一测量位置的照度差异非常小,表明光环境的亮度模拟非常稳定,如图 10 所示。



(a) 驾驶舱顶灯区域



(b) 右操纵台灯区域

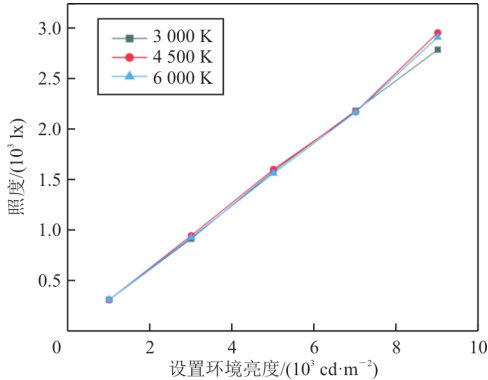


(c) 右仪表板灯区域

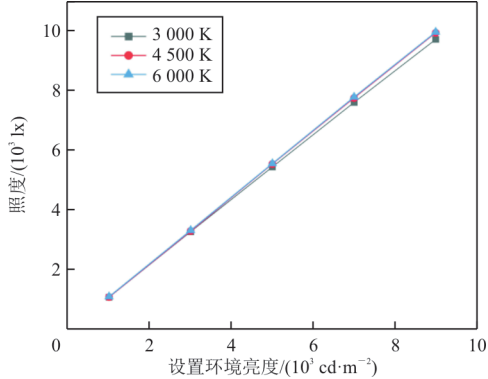
图 10 相同色温、不同环境亮度的工况下不同测量区域照度的箱形图

Fig. 10 Box plot of illuminance of different measurement areas under the same color temperature but different background luminance

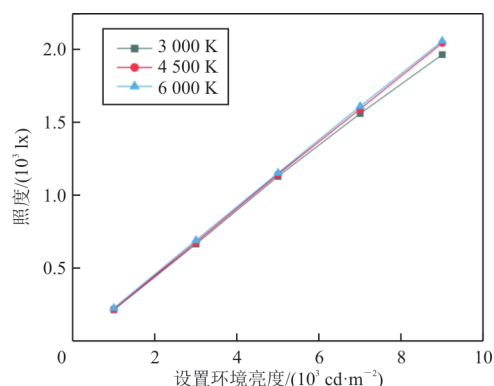
从图 10 可以看出:每个测量位置的照度与外部环境亮度之间存在很高的线性相关性($R^2>0.99$),说明外部环境亮度的实际表现和设置值的误差是比较小的,验证了环境亮度的稳定性。不同色温条件下不同测量区域照度与环境亮度关系图,如图 11 所示。



(a) 驾驶舱顶灯区域



(b) 右操纵台灯区域

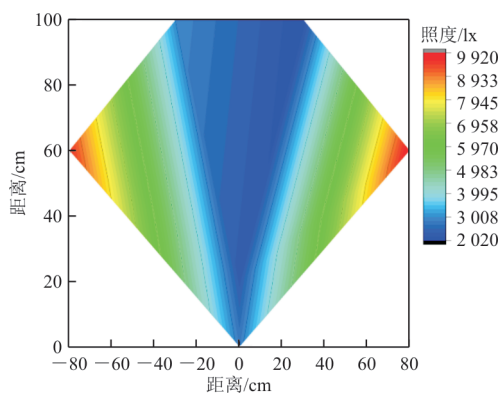


(c) 右仪表板灯区域

图11 不同色温条件下不同测量区域照度与环境亮度关系图

Fig. 11 Diagram of the relationship between illuminance and background luminance in different measurement areas under different color temperature conditions

所有灯具照度水平空间分布图如图12所示,可以看出:驾驶舱内部各测量位置的照度分布高度对称,表明天空光环境的模拟效果非常均匀。

图12 所有灯具照度水平空间分布图
(环境亮度设置为9000 cd/m²)Fig. 12 Spatial distribution map of illumination levels for all lamps (environmental luminance setting at 9000 cd/m²)

5 结 论

1) 本文提出的天空光环境模拟系统建设方法,在一般光度、色度模拟基础上,结合云雾及闪电等特殊光环境模拟系统、机械运动系统等,在综合控制系统统一操控下,能够形成视觉体验更真实、变量要素更丰富的光环境模拟场景,扩充了光环境模拟技术领域的应用范围。

2) 本文提出的天空光模拟架构,通过天空光模拟灯板、太阳模拟器等单一器件的性能优化,结合整体系统结构、应用策略上的统筹设计,与原有

同类模拟系统相比,天空光模拟最高亮度提升3~5倍,太阳光模拟最高亮度提升8~10倍,太阳光模拟范围扩充近1倍并实现超宽范围连续调节,由此可实现极端光环境场景模拟,扩展了研究场景的参数边界。

3) 实验结果表明,天空光环境系统具备较好的照明均匀性和稳定性,具备作为标准化实验设备开展相关研究工作的能力,可实现由实验室环境模拟实验替代真实飞行试验。

天空光环境模拟系统已在民用飞机多个型号的显示器可视性评估、显示器调光曲线测定及优化等实验研究中得到了应用。应用该系统,多项技术课题已开展研究工作,例如:超高亮度条件下驾驶舱内各显示期间自动调光曲线设计,基于舒适性评估的客舱情景照明模式库及舱内外光环境联动方案,高原型飞机防有害光辐射风挡设计及护眼眼镜设计,超高亮度条件下投射式HUD可视性优化等。此外,在汽车、轨道交通或eVTOL等飞行器的光环境优化、光环境适应性领域也有所应用。

同时也应注意到,受限于现有器件技术能力约束,本文提出的天空光环境模拟系统能够满足天空光模拟光度学实验需求,但难以满足人眼视觉工效研究实验需求。人眼视觉对不同光谱的响应是不同的,但本文提出的方法中天空光模拟灯板不具备色彩模拟能力,太阳模拟器不具备色温调节能力,因此难以提供多样化的天空光模拟光谱,即难以满足人因实验需求。在后续工作中,应进一步实现天空光色彩模拟,实现具备视景能力的天空光模拟场景,全面提升天空模拟的真实度、精细度和场景复杂度。

参 考 文 献

- [1] NGUYEN F. Factors affecting efficiency and output of LEDs used in display-backlighting applications for aircraft cockpits[J]. Information Display, 2009, 25(2): 10-14.
- [2] 李倩. 民用飞机导光板自适应调光控制系统设计[J]. 航空工程进展, 2015, 6(2): 195-200.
LI Qian. Design of self-adjusting dimming control system for lightplate of civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(2): 195-200. (in Chinese)
- [3] 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.

- LIN Yandan, AI Jianliang, YANG Biao, et al. A study on the visual ergonomics of pilots in civil aircraft cockpit under adverse light environment [J]. Technology Information, 2016, 14(13): 175-176. (in Chinese)
- [4] 潘玲玲. 飞机座舱光环境对视觉工效的影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- PAN Lingling. Research on the impact of aircraft cockpit light environment on visual ergonomics[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [5] 邓金萍, 李闻俞, 金海. 基于视觉仿真的飞机座舱风挡眩光分布影响研究[J]. 航空工程进展, 2012, 3(3): 284-288.
- DENG Jinping, LI Wenyu, JIN Hai. The effects of center pedestal control display unit (CDU) on resultant windshield glare analyze[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(3): 284-288. (in Chinese)
- [6] 余涛. 光环境对飞机座舱显示工效的影响机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- YU Tao. A study on the mechanism of the influence of light environment on the display efficiency of aircraft cockpit[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [7] 姚其. 民机驾驶舱LED照明工效研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- YAO Qi. Study on the efficiency of LED lighting in civil aircraft cockpits[D]. Shanghai: Fudan University, 2013. (in Chinese)
- [8] 谭柯. 基于扩展天空模型的客舱空间光环境分析与优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- TAN Ke. Analysis and optimization of cabin space light environment based on extended sky model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [9] 王春卉, 翟来娟. 民用飞机机载设备的环境鉴定试验研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 101-107.
- WANG Chunhui, ZHAI Laijuan. Research on civil airborne equipment environmental qualification test[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 101-107. (in Chinese)
- [10] AGHEMO C, RUSSO A, ALENIA A T I. A skylight simulator for assessing cockpit display and ambient visibility for day time and night time conditions[C]// 2007 International Commission on Illumination Session. US: IEEE, 2007: 1-7.
- [11] 唐朝. LED人工天穹模拟测量系统的标定与误差分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- TANG Chao. Calibration and error analysis of LED artificial sky simulation measurement system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [12] Commission International Eclairage. Spatial distribution of daylight-CIE standard general sky[S]. Vienna: CIE, 2003.
- [13] RICHARD K. A new generation of sky standards[J]. Lux Europa, 1997, 25: 359-373.
- [14] 郭玮宏, 蒋旋, 原晓峰, 等. 多模式组合调光的光学系统和调节光学系统照度的方法: CN115218140A[P]. 2022-10-21.
- GUO Weihong, JIANG Xuan, YUAN Xiaofeng, et al. Optical system with multi-mode combination dimming and method for adjusting the illumination of the optical system: CN115218140A[P]. 2022-10-21. (in Chinese)
- [15] 郭玮宏, 李涛, 原晓峰, 等. 天空光环境模拟系统: CN115223422A[P]. 2022-10-21.
- GUO Weihong, LI Tao, YUAN Xiaofeng, et al. Sky light environment simulation system: CN115223422A[P]. 2022-10-21. (in Chinese)
- [16] 郭玮宏, 吴春泽, 原晓峰, 等. 一体双模超宽光输出调节范围LED光源及一体双模机构: CN114135819A[P]. 2022-03-04.
- GUO Weihong, WU Chunze, YUAN Xiaofeng, et al. Integrated dual-mode ultra wide light output adjustment range led light source and integrated dual-mode mechanism: CN114135819A[P]. 2022-03-04. (in Chinese)
- [17] 于彤, 张天擎. 昼光和夜天空光的测量方法[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(7): 37-39.
- YU Tong, ZHANG Tianqing. Measurement methods for daytime and nighttime sky light [J]. Laboratory Research and Exploration, 2016, 35(7): 37-39. (in Chinese)
- [18] 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, 2019.
- GAO Yuan. Design and research of LED artificial dome system based on CIE general standard sky model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 储银枝, 徐高敏, 张婷, 等. 太阳模拟器的光源校准影响分析[J]. 集成电路应用, 2022, 39(10): 9-11.
- CHU Yinzi, XU Gaomin, ZHANG Ting, et al. Analysis of the influence of light source calibration on solar simulators [J]. Integrated Circuit Applications, 2022, 39(10): 9-11. (in Chinese)
- [20] 明杉炽, 孙高飞, 张国玉, 等. 太阳模拟器宽范围辐照连续可调节系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 176-184.
- MING Shanchi, SUN Gaofei, ZHANG Guoyu, et al. Design of a wide range radiation continuous adjustable system for solar simulator[J]. Journal of Optics, 2021, 41(16): 176-184. (in Chinese)
- [21] 徐亮. 月亮模拟器光学系统设计与辐照度均匀性分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- XU Liang. Design of optical system for moon simulator and analysis of irradiance uniformity [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2009. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)