

光环境模拟中的云雾闪电模拟系统设计

张波*

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘要:在正常天气环境下,民机驾驶员在驾驶舱内进行视觉作业(如观察判读仪表、显示器等)处在一个较为舒适的光环境中,但在恶劣天气环境下,驾驶舱内突然出现的强眩光源会造成飞行员视觉、生理以及空间方向感的损害,使飞行员的反应时间受到限制,直接威胁到飞行安全。在光环境模拟中的云雾闪电模拟系统设计,针对云层、闪电这两种自然现象的不同模拟指标,采用云雾模拟系统和闪电模拟系统分别在地面进行云雾闪电模拟,实现了在地面模拟恶劣天气环境,如雷暴雨、穿云层等,能为驾驶舱的光学集成设计、视觉工效设计、验证试验、人因工程研究等提供多功能、可复现的光学验证条件。

关键词:云雾模拟;闪电模拟;光环境模拟;雷暴雨;穿云层

中图分类号: V223⁺.1

文献标识码: A

OSID:



0 引言

近年来,大量有关航空事故的调查和统计显示,人为因素占到飞行事故致因因素的75%左右^[1]。如何确保飞行安全一直以来都是航空业的关注重点,有大量的数据表明飞行安全事故大多是由人为失误所导致的^[2]。民机的飞行时间较长造成驾驶员长时间进行驾驶舱内的视觉作业,因此民机驾驶舱的光环境与飞行安全是紧密关联的^[3]。民机驾驶舱作为飞行员执行飞行任务的工作空间,其光环境的突然变化对驾驶员视觉的影响是非常不利的^[4]。舒适的光环境能保证飞行员状态良好、工作热情增强,工作效率提高。而由于光环境恶劣所导致的飞行员情景意识和决策能力的下降,对飞行安全构成了严重威胁。关于民机驾驶舱光环境的研究,主要研究内容是驾驶舱的光环境变化和驾驶员的视觉生理功能变化^[5]。通过对驾驶舱光环境优化设计的研究,能够有效提升驾驶舱人机工效和飞机安全可靠,对驾驶员的视觉和心理都有积极引导作用^[6]。

民机常常在较为复杂的天气条件下飞行,而

驾驶舱光环境的变化会直接影响到驾驶员是否能正常观察仪表,是影响飞行安全的重要因素之一^[7-8]。在恶劣气候条件下(如夜间)飞行时,驾驶舱内的光线过亮,会导致驾驶员看不清楚驾驶舱外面的东西,从而丧失对飞机进行定位的能力^[9]。雷暴雨是一种恶劣天气,对民机飞行安全构成了严重的威胁,是导致飞机失事的一大因素,对驾驶员视觉功能造成威胁,严重时甚至会暂时性失明。民机在运营过程中的每一次起飞和降落都需要穿越云层,在此过程中,驾驶员往往间接或者直接遭遇太阳光照射导致的高强度眩光源。当飞机在高空飞行时,由于大气中空气稀薄、水蒸气和尘埃较少,太阳光没有受到太多的漫反射,因此天空显得较为昏暗,太阳光线直射到的地方又显得格外明亮。如果驾驶员突然从山峰的阴影中飞出,或者从云层下面飞到非常明亮的光环境中,都会造成暂时性失明。当驾驶员的眼睛暴露在非常明亮的光环境中,瞳孔就会收缩,这种眩光会造成视觉上的不舒适,导致驾驶员视野中观察对象的能见度降低,使人精神涣散、情绪烦躁、注意力下降,从而造成驾驶员视觉

* 通信作者. E-mail: zhangbo6@comac.cc

引用格式:张波.光环境模拟中的云雾闪电模拟系统设计[J].民用飞机设计与研究,2023(2):114-118. ZHANG B. Design of cloud and lightning simulation system in light environment simulation[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(2): 114-118(in Chinese).

作业效率的下降^[10]。

在雷暴雨和穿云层这两种照明场景中,驾驶员会遭遇闪电和太阳带来的强光照射,整个驾驶舱内照明光环境快速变化,这种突如其来的刺激对飞行员的视觉功能和心理都会产生不利的影响,并对飞行安全构成了直接威胁。如果能模拟出雷暴雨、穿云层等恶劣的气象环境,能为驾驶舱人机工效研究创造出有效的地面研究环境,为驾驶舱的光学集成设计、视觉工效设计、验证试验、人因工程研究等提供多功能、可复现的光学验证条件。

1 云雾模拟系统设计

气象学上,云是一种气溶胶,由微小液滴、冻结的晶体或其他悬浮在行星体或类似空间的大气中的颗粒组成。对于视觉来说,无论在空中还是陆地上,我们看到的云雾是可见光在云雾中散射颗粒中不断散射的集成效果(如图1所示)。云雾中颗粒的平均尺寸接近可见光的波长,所以可以认为云雾中发生的主要是米散射(Mie Scattering)。在模拟的时候,人工制造相同大小的液滴颗粒可以达到同样的散射效果。



图1 云雾对飞行员的视效

云雾在近红外至可见光波段(波长0.2~1.2 μm)的吸收很小,因此可以认为在这个波段云层是一个黑体。云的颜色在视觉上呈现的是灰度色,当云层较薄时呈现出白色,当云层变得太厚或者是太浓密,阳光都不能通过时,那云层看起来是灰色或黑色的。对应的云层厚度范围为100~8 000 m。在光学上,云层的透视函数由大气光学厚度(Optical Depth)定义。假设云层的实际厚度为1 m,表示光学厚度τ的公示如下:

$$\tau = \int_0^l \sigma n(z) dz$$

其中,σ代表衰减截面,n(z)是物质的颗粒密度。根据公式,可以得出结论:光学厚度与雾气团内的颗粒密度成正比。本方案使用的水基烟油的密度与冰水混合物接近,令雾化速度达到蒸发速度的10 000倍,就能在0.8 m的厚度模拟最厚的积雨云的视效。取50%湿度条件下1.62 mm/s的蒸发速率计算,在舷窗不超过2 m²的动态范围内(参考波音727 NG的驾驶舱舷窗面积)云雾喷射器的喷射速率约为1 030 m³/min,对应的单机喷射速率应达到约350 m³/min。对于下限的估算方法同上,图2显示了由卡利普索卫星、云探测卫星、谷神星卫星于2007年4月白天在热带海洋上空探测的单云的云厚度频率,卡利普索卫星(图中黑色线)数据表明,最常见的云厚度为550 m^[11],对应的单机喷射速率在22 m³/min以上。

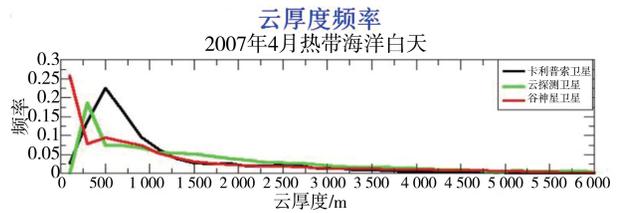


图2 2007年4月白天在热带海洋上空的单云的云厚度频率

在上述的理论基础上可以构建云雾穿透照度与喷射速率的关系曲线,典型云雾特征和喷射速率的对应关系在表1列出。实际使用时,根据场地实测的结果对曲线进行修正,并将其写入控制软件中对试验操作提供参考。

表1 典型云雾特征与单机喷射速率对应关系

云雾特征名称	平均云层厚度 /m	单机喷射速率 / (m ³ · min ⁻¹)
卷云	550	22
卷积云	1 100	44
高积云	1 650	66
高层云	2 750	110
积雨云	8 750	350

云雾模拟系统主要由电动升降系统、云雾喷射系统和控制系统三部分组成。电动升降系统可升降云雾喷射系统高度,可模拟飞机在云雾下、云雾中、云雾上飞行的状况,云雾喷射系统可喷出云雾,控制系统可实现电动升降系统和云雾喷射系统的

控制。

电动升降系统主要由铝合金架、减速升降系统、导轨装置以及相应的驱动控制设备等组成。移动式的电动升降架的底盘固定到活动支撑架上,使得可根据需要由人工移动电动升降系统至指定位置,通过减速升降系统实现两级电动升降,实现电动升降云雾喷射系统,可模拟飞机在云雾下、云雾中、云雾上飞行的状况,适应不同高度机头样机,如图 3~图 5 所示。



图 3 电动升降系统模拟飞机在云雾下示意图



图 4 电动升降系统模拟飞机在云雾中示意图



图 5 电动升降系统模拟飞机在云雾上示意图

云雾喷射系统采用 3 台可移动的云雾喷射器通过控制软件联机实现,云雾喷射器安装在电动升降

系统的固定平台上,平台下设置一个角度旋转电机,由控制系统调整云雾喷射器的旋转角度,云雾喷射系统放置在驾驶舱风挡玻璃前,工作时可将驾驶舱风挡玻璃完全遮蔽,云雾喷射器最大输出量为 $566 \text{ m}^3/\text{min}$,以满足云层浓度足够大,保证真实效果。

控制系统按照用户输入指令驱动电动升降架工作将云雾喷射器送到指定高度,云雾喷射器同时开始加热,云雾喷射器根据设定模拟的情景(云雾输出时间和输出量)开始工作;将烟雾液压入高温喷射系统,液体迅速汽化形成雾状颗粒,喷射在驾驶舱指定部位,形成云雾环绕的效果,系统工作流程如图 6 所示。

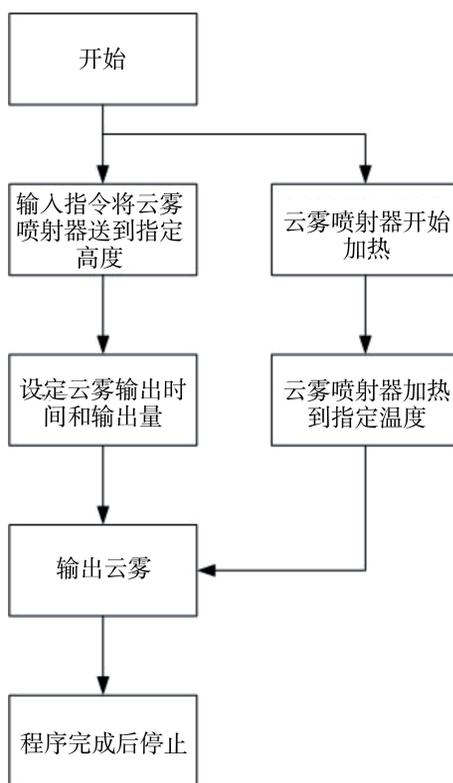


图 6 云雾模拟系统工作流程

2 闪电模拟系统设计

闪电模拟系统采用多个大功率频闪光源联机实现。闪电模拟系统用于模拟飞行过程中遭遇的闪电场景。本设计中的闪电模拟系统采用 3 个闪电模拟器,进行时钟同步控制实现。同时,每台闪电模拟器可与云雾喷射器共用电动升降架,可快速接线,便于根据试验需要收纳或拆卸。闪电模

拟器的频闪光源使用 LED 光源和散热一体化设计,集成在同一个结构内。结构上设有与电动升降架兼容的安装孔位,安装好以后除了上升旋转外,还可以根据需求在一定范围内调节模拟器的俯仰角度。

闪电模拟器最大闪光亮度不低于 $60\,000\text{ cd/m}^2$,亮度 $0\% \sim 100\%$ 可调,采用 LED COB 为光源的技术方案,即直接封装在电路上的 LED 芯片,相比于 SMD 封装和 DIP 封装,COB 芯片的二极管排布更密,能实现较大的面发射和更好的发光效率,同时能耗更低。

闪电模拟器光学系统主要由 LED COB 光源、光学透镜组成,如图 7 所示。选择满足光通量要求的 LED COB 光源,光学透镜部分实现光束的整合和出光面积的控制,适应于固定的光束角要求,保证闪电模拟器具有较宽的出光角(全角 $>60^\circ$),飞行员视野范围内均具有较好的闪电模拟效果。本设计可实现 LED COB 的最快闪烁频率为每秒 20 次,即 20 Hz。



图 7 单台闪电模拟器光学系统组成结构示意图

3 终端控制软件设计

终端控制软件由三个模拟器的控制模块组成,集成在一个操作面板内,可对所有相关参数进行调节,并提供 API 接口,用户可根据需要进行场景化编程。

每个模拟器控制模块的架构由三部分组成:前端交互、设备通信和后台存储,如图 8 所示,根据设备种类和控制需求的不同,可分为有线通信和无线通信。其中有有线通信使用以太网和 PLC 控制机械结构的升降和旋转,无线通信使用 DMX 协议与云雾喷射器和频闪光源通信。

云雾模拟系统的控制软件实现云雾喷射浓度、高度调节,并在控制系统中保存并固化为预设场景。闪电模拟系统的控制软件实现闪光频率、亮度

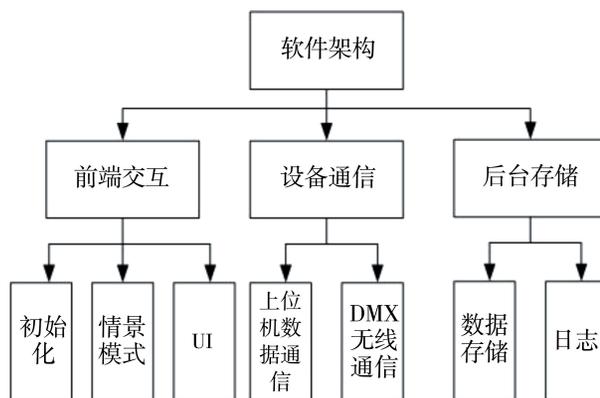


图 8 终端控制软件架构示意图

的调节,可保存固化场景。

4 结论

云雾闪电模拟系统,实现了云雾喷射器和闪电模拟器的一体化设计,该系统由云雾喷射系统、闪电模拟系统、电动升降系统和控制系统组成,主要功能是接收云雾喷射控制子系统的信号后驱动减速电机升降和电泵工作,将云雾喷射器送到指定高度,同时云雾喷射器加热,当烟雾液进入高温喷射系统时,液体迅速气化形成雾状颗粒,喷射在飞机模拟舱机头部位,形成云雾环绕的效果,同时闪电模拟器可模拟闪电雷暴的天气状况。该系统可在地面模拟出飞机穿云层及雷暴雨等恶劣光环境,为驾驶舱的光学集成设计、视觉工效设计、验证试验、人因工程研究等提供多功能、可复现的光学验证条件。

参考文献:

- [1] 钮松,孙有朝. 民机驾驶舱人机工效设计准则框架体系构建[J]. 飞机设计,2014,34(1):73-76.
- [2] 王黎静,王晓丽,何雪丽. 民航飞行员工作负荷影响因素体系研究[J]. 人类工效学,2016,22(3):45-48;57.
- [3] 舒秀丽,董文俊,董大勇. 基于人机工效的民机驾驶舱设计原理[J]. 航空工程进展,2015,6(2):222-227.
- [4] 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,2017.
- [5] 姚其. 民机驾驶舱 LED 照明工效研究[D]. 上海:复旦大学,2013.
- [6] 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.

- [7] 李倩 . LED 调光控制技术在飞机导光板照明中的应用[J]. 测控技术,2010,29(11) : 106-108;111.
- [8] 黄瑜,林燕丹,姚其,等 . LED 在民用飞机仪表盘泛光照明中的应用[J]. 照明工程学报,2011,22(2) : 50-53.
- [9] 王玮 . 民机驾驶舱综合视觉工效 CAD 实验系统的研发[D]. 上海:复旦大学,2015.
- [10] 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,2018.
- [11] SUN-MACK S, MINNIS P, CHEN Y. Integrated cloud-aerosol-radiation product using CERES,MODIS,C-ALIPSO and CloudSat data [C]. SPIE Europe Conference on the Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere, September 17-19,2007, Florence, Italy. [S. l. ; s. n.],2007.

作者简介

张 波 男,本科,工程师。主要研究方向:光环境模拟设计。E-mail: zhangbo6@comac. cc

Design of cloud and lightning simulation system in light environment simulation

ZHANG Bo *

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

Abstract: In normal weather conditions, civil aircraft pilots perform visual operations (such as observation and interpretation of instruments, monitors, etc.) in the cockpit in a relatively comfortable light environment, but in harsh weather conditions, the sudden appearance of strong glare sources in the cockpit will cause damage to the pilot's visual, physiology and spatial orientation, limit the pilot's response time, and directly threaten the flight safety. In the design of cloud and lightning simulation system in light environment simulation, aiming at the different simulation indicators of cloud and lightning, the cloud simulation and lightning simulation system are used to simulate cloud and lightning on the ground respectively, realizing the simulation of severe weather environment on the ground, such as thunderstorms, crossing the clouds etc., which can provide multi-function and reproducible optical verification conditions for the optical integration design, visual ergonomic design, verification test, human engineering research of the cockpit.

Keywords: cloud simulation; lightning simulation; light environment simulation; thunderstorms; crossing the clouds

* Corresponding author. E-mail: zhangbo6@comac. cc