

引用格式:肖女娥,张博,阎芳,等.显示和机组告警系统适航审定方法研究[J].电光与控制,2020,27(2):55-59,84. XIAO N E, ZHANG B, YAN F, et al. On airworthiness certification of display and crew alerting system[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2):55-59, 84.

## 显示和机组告警系统适航审定方法研究

肖女娥<sup>1a,1b</sup>, 张博<sup>2</sup>, 阎芳<sup>1a,1b</sup>, 王鹏<sup>1a,1b</sup>

(1. 中国民航大学, a. 民航航空器适航审定技术重点实验室; b. 适航学院, 天津 300300;  
2. 中国商飞上海飞机设计研究院, 上海 201210)

**摘要:**与多个机载系统存在任务交联的特点以及平视显示系统等新技术的应用,给显示和机组告警系统的适航审定带来挑战。分析显示和机组告警系统的适航文件体系,给出审定基础、符合性方法确定原则,以及与其他系统的符合性验证交联关系,并从实际审查角度给出显示和机组告警系统的审定要素和评审要求。本研究可为民机机载显示和机组告警系统的适航审定与设计提供支持。

**关键词:**适航审定; 机载显示; 机组告警; 符合性验证

**中图分类号:** V243.6 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.02.012

## On Airworthiness Certification of Display and Crew Alerting System

XIAO Nyu'e<sup>1a,1b</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>, YAN Fang<sup>1a,1b</sup>, WANG Peng<sup>1a,1b</sup>

(1. Civil Aviation University of China, a. Tianjin Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance;  
b. College of Airworthiness, Tianjin 300300, China;  
2. COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** The airworthiness certification of display and crew alerting system faces challenges due to the characteristics of task crosslinking with other airborne systems and the application of new technologies such as head-up display system. In this paper, the airworthiness documentation and requirements of the display and crew alerting system are analyzed. The determination principle of certification basis and compliance methods, and the crosslinking relationship with other airborne systems on compliance verification are given. The certification elements and review requirements of display and crew alerting system are given from the perspective of actual certification. The study can provide support for airworthiness certification and development of airborne display and crew alerting system of civil aircraft.

**Key words:** airworthiness certification; airborne display; crew alerting; compliance verification

### 0 引言

民机机载显示和机组告警系统处理航空电子系统人机交互任务,是一个包括综合信息控制、处理与显示、信息感知等功能的回路系统<sup>[1]</sup>,它通过接收飞机各种传感器的飞行和导航数据,以文字、图形等形式显示给驾驶员,显示的信息包括姿态、航向、空速、高度和飞行指引等数据以及简图页、警告信息、维护诊断信息等。

在民机型号项目研制及适航验证过程中,显示与机组告警系统需要为其他系统提供显示和/或告警信息,与多个机载系统存在任务交联,同时,平视显示系统(HUD)、增强视景系统(EVS)、合成视景系统(SVS)、组合视景系统(CVS)和增强飞行视景系统(EFVS)等新技术的应用,给其适航符合性验证工作带来一定挑战。

国内针对机载显示系统的设计已进行了一些研究,例如:王永生等针对机载头盔瞄准显示系统的人机工效问题进行了研究<sup>[2]</sup>;袁大天等综合软件设计需求、软件测试方法和人机工程学等多方面因素,给出机载信息显示控制系统的飞行试验方法<sup>[3]</sup>;张鹏等提出虚拟仪表组件素材库的开发流程,研究驾驶舱虚拟综合显示系统的设计方法<sup>[4]</sup>;费益等针对平视显示系统,研

收稿日期:2019-04-10 修回日期:2019-09-10

基金项目:民航科技创新引导资金(MHRD20140208);国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合研究基金(U1533105)

作者简介:肖女娥(1984—),女,湖南郴州人,硕士,助理研究员,研究方向为航空器适航审定技术、民机系统安全性评估技术。

究其设计和安装准则及其在民机上的应用<sup>[5]</sup>;陆崑等进行驾驶舱显示界面脑力负荷的研究,为驾驶舱人为因素的适航审定提供支持<sup>[6]</sup>;李卫民基于粗糙集理论,提出适用于民机电子飞行仪表系统(EFIS)显示防差错设计的规则获取方法<sup>[7]</sup>。但是,现有文献并没有从整机及系统适航性设计和符合性验证角度出发,研究机载显示和机组告警系统的设计与适航符合性验证方法。

本文结合 HUD 等新技术应用,研究显示和机组告警系统适航文件体系、设计要求、审定基础、符合性验证方法以及审定要素和评审要求等,为民机机载显示和机组告警系统的设计与验证提供支持。

## 1 适航文件体系

显示和机组告警系统包括下视显示及控制系统和飞行机组告警系统,并视情包括 HUD, EVS 和 SVS 等。图 1 所示为显示和机组告警系统相关的主要适航文件体系,这里介绍部分适航文件内容及要求。

	局方文件	工业方文件
电子飞行显示系统	TSO-C113b AC25-11B	SAE AS8034C SAE ARP4102 SAE ARP4256A
机组告警系统	AC25.1322-1	SAE ARP4033
HUD	TSO-C210	SAE AS8055A SAE ARP5288
EVS, SVS, CVS 和 EFVS	AC20-167A	DO-315

图 1 显示和机组告警系统适航文件体系

Fig. 1 Airworthiness certification documentation for display and crew alerting system

### 1.1 AC25-11B

咨询通告 AC25-11B 为安装于运输类飞机的驾驶舱电子显示器、部件和运输类飞机系统的设计、安装、集成与批准提供指导,适用于主机厂和航电系统制造人、改装人和运输类飞机运营人。该 AC 给出电子显示器的硬件要求、电子显示系统的安全性考虑、电子显示器信息的元素和特征、显示元素的组织、电子显示系统控制装置、符合性方法以及持续适航和维修等内容。

### 1.2 AC25.1322-1

该 AC 提供对 25.1322 条款要求的符合性方法,为现有综合视觉、听觉和触觉告警的告警系统提供了详细的符合性方法,包含告警定义的原则、告警的级别、颜色、不同级别告警采用的告警方式以及告警的完整性和虚警的考虑等方面。

### 1.3 AC20-167A

AC20-167A 提供了在航空器上安装增强和合成视觉系统的适航批准指南,为第 23、第 25 部飞机和第 27、

第 29 部旋翼类航空器上安装 EVS, SVS, CVS 和 EFVS 提供了一种符合规章要求的可接受的符合性方法。

该 AC 正文提供 EVS, SVS, CVS 和 EFVS 各系统的通用标准、专有标准、安装考虑和性能评估等内容。在附件中给出 EFVS 的审定基础及符合性方法、EFVS 进近系统和着陆系统的安全性指南、EFVS 的安全性标准、EFVS 进近系统和着陆系统试飞考虑的示例等内容。此外,附件还给出 STC 取证需要补充的 AFM 手册示例,在旋翼机上安装 EVS 和/或 SVS 系统的考虑,以及 23 部飞机仅用于情景告知时安装 EVS 和/或 SVS 系统的其他考虑等内容。

### 1.4 TSO-C113b 和 TSO-C210

TSO-C113b 规定了在第 23, 25, 27 和 29 部所有航空器的飞行驾驶舱内,提供给机组人员使用的各种类型的电子显示器(包括阴极射线管、液晶显示器)的技术标准规定,其最低性能标准通过 SAE AS8034C 确定。TSO-C210 适用于为 HUD 申请技术标准规定项目批准书的制造人,要求申请人满足 SAE AS8055A“机载平视显示器的最低工作性能标准”。

### 1.5 主要工业方文件

SAE AS8034C 指定了所有 CCAR23, 25, 27 和 29 部航空器的飞行员在驾驶舱中使用的各类电子显示器和电子显示系统的最低性能标准<sup>[8]</sup>。SAE AS8055A 给出了固定翼飞机机载双目 HUD 的最低性能标准<sup>[9]</sup>。SAE ARP5288 给出了运输类飞机安装 HUD 系统的设计、分析、试验和预期功能等推荐的审定标准,具体内容包括通用设计和安装考虑、显示功能严重程度和符合性考虑,以及设备安装、仪表显示特性、失效模式、信息显示和格式、特殊集成显示和模式以及系统验证等<sup>[10]</sup>。RTCA DO-315 给出了 EVS, SVS, CVS 和 EFVS 的最低性能标准。

## 2 显示和机组告警系统适航符合性验证方法

### 2.1 系统设计要求

在满足飞机总体技术规范及系统相关需求的同时,显示和机组告警系统的设计和安装应满足相关适航条款、运行规章的要求,为飞行机组提供与任务和使用场景相适应的信息显示,并在预期的环境包线内完成既定功能,主要包括:1) 为飞行机组提供必要的信息显示;2) 信息显示按规章的要求进行布局,设备按规章要求进行安装;3) 安装后,在预期的工作环境剖面内系统功能正常;4) 满足安全性需求;5) 满足持续适航要求。

显示和机组告警系统设备的设计和安装应符合 AC25-11B 和 TSO-C113b 的要求,还应满足 SAE AS8034C 规定的最低性能标准和 DO-160 定义的环境试验标准。HUD 设计和安装应满足 TSO-C210, SAE AS8055A 和 SAE

ARP5288 的要求。EVS, SVS, CVS 和 EFVS 的设计和安装应满足 AC20-167A 和 DO-315 的要求。

## 2.2 审定基础确定原则

根据先前相似机型经验,结合当前实际审查型号所实现的功能确定审定基础。重点关注显示和机组告警系统实现了哪些系统参数的显示功能、告警功能,确保审定基础覆盖了参数显示对应的条款,驾驶舱的布置、布局、操纵和维修的可达性,安装后在预期工作环境剖面内功能正常,仪表标记标牌,持续适航及人为因素和最小机组等要素。

针对 HUD, EVS 及综合视觉、听觉和触觉告警等新颖独特的设计,可考虑通过专用条件的形式明确审定要求。

## 2.3 符合性方法确定原则

制定的符合性方法应确保验证工作完整、充分,接口系统间验证分工界面清晰,验证任务输入输出明确,并尽早与局方沟通协调,获得局方批准。可使用系统描述、安装图、线路图等表明符合性的,可采用 MC1;需要进行安全性评估进行分析说明的,可采用 MC3;需要在设备装机后进行功能验证的活动,可采用 MC5;必须在飞行过程中才能验证的活动,可采用 MC6;需要在飞机上检查确认设备可达性、设备标牌、设备安装限制的,可采用 MC7;需要检验设备合格性的,可采用 MC9。为降低取证周期和验证成本,可不采用 MC5 和 MC6 的一些验证活动,而考虑采用 MC4 或 MC8,包括一些高风险项目。关于 MC1 ~ MC9 的定义参见表 1。

表 1 显示和机组告警系统与其他系统/专题的符合性验证交联关系  
Table 1 The cross-linking relationship between display and crew alerting system with other airborne systems/specialties on compliance verification

适航要求	关联系统或专题	MC	验证时的技术交联
可达性	EWIS	1,7	EWIS 专业提供安装符合性说明,开展全机 EWIS 制造符合性检查,证明 EWIS 的安装满足维修任务要求
功能和安装	需要提供信号显示和/或告警信息的系统	1,5,6	说明各系统告警方案和/或简图页显示方案;证明各系统告警功能和/或简图页显示功能正常
飞行和导航仪表	导航系统	1,5,6	说明备用磁罗盘、备用仪表设计方案,提供设计符合性说明;证明备用磁罗盘、备用仪表功能正常
动力装置仪表	动力装置系统	1,5,6	说明显示方案;证明发动机参数指示正常
设备、系统和安装	需要进行信号显示和/或提供告警信息的系统	1,3,5,6	说明系统告警方案;通过初步系统安全性评估(PSSA)过程为显示和告警系统分配安全性需求,通过系统安全性评估(SSA)过程证明分配的安全性需求已满足;证明系统告警功能正常
	四性	3	根据飞机级功能进行飞机级功能危险性评估,并据此开展飞机初步安全性评估,为飞机各系统分配安全性需求。四性专业负责制定区域安全性分析、共模分析和特定风险分析的要求。汇总全机各系统的安全性分析报告,完成飞机级的安全性评估、区域安全性分析报告和特定风险分析报告
	EWIS	3	证明满足显示和机组告警系统分配的安全性需求
系统闪电防护	E3	1,3,4,9	进行航电系统级闪电间接效应试验,证明显示和机组告警系统设备 A 级功能不会受到不利影响;进行全机闪电间接效应试验,证明显示和机组告警系统设备 A 级功能不会受到不利影响,B,C 级功能受到影响后可及时恢复
高强辐射场(HIRF)防护	E3	1,3,5,9	进行全机 HIRF 试验,证明显示和机组告警系统设备 A 级功能不会受到不利影响,B,C 级功能受到影响后可及时恢复
警告灯、戒备灯和提示灯	需要进行信号显示和/或提供告警信息的系统	1,5	说明系统的告警方案。完成告警符合性检查与评估报告;证明系统告警功能正常
使用能源的仪表	电源系统	1,5	说明设备的供电方案,供电不足时的设备工作方式和仪表失效后的显示方案。通过地面试验,验证电源系统的失效转换不会影响重要仪表的指示功能,且仪表失效后能清晰告知机组,防止其使用错误数据
仪表系统	导航系统	1,3	说明正驾驶侧的姿态、空速、高度、垂速、侧滑、航向的数据测量独立。开展姿态、空速、高度、垂速、侧滑、航向显示的功能危害性评估,证明系统设计满足既定的安全性需求,通过共因分析检查系统的设计、安装不会因为单个故障导致灾难性的后果
动力装置仪表	动力装置和辅助动力系统	3,6	开展可燃液体系统特殊风险评估和区域安全性分析,确保可燃液体的溢出不会造成危险。证明发动机参数指示功能正常
电气设备及安装	E3	5	进行全机电磁兼容试验,证明显示和机组告警系统在地面状态下工作时,不受其他同时工作的设备干扰,同时也不会干扰其他设备工作
仪表灯	照明系统	6	开展飞行试验,证明包含显示系统控制板在内的区域调光功能正常

续表 1

适航要求	关联系统或专题	MC	验证时的技术交联
电子设备	E3	5	进行全机电磁兼容试验,证明显示和机组告警系统在地面状态下工作时,不受其他同时工作的设备干扰,同时也不会干扰其他设备工作
持续适航文件	持续适航	1	按适航要求,根据全机各系统反馈的信息,发布飞行手册、维修计划文件、飞机维修手册、故障隔离手册、飞机图解零件目录、图解工具和设备手册、飞机线路手册、原理图手册,并通过 AEG 评审
总则和使用程序	持续适航	1	按适航要求,根据全机各系统反馈的信息,发布飞行手册,并通过 AEG 评审
EWIS	EWIS	3,4,5,7	证明显示系统满足 EWIS 功能和安装、系统和功能、系统分离、系统安全以及电路保护等要求

注:MC1~MC9 为型号合格审定过程中的符合性方法。其中:MC1 为说明性文件,MC2 为分析/计算,MC3 为安全评估,MC4 为试验室试验,MC5 为地面试验,MC6 为飞行试验,MC7 为机上检查,MC8 为模拟器试验,MC9 为设备合格鉴定。

## 2.4 符合性验证交联关系

明确与显示和机组告警系统有功能或任务交联的系统/专题,在此基础上研究其符合性验证交联关系。

### 2.4.1 功能或任务交联关系

与显示和机组告警系统有功能或任务交联的系统/专题如图 2 所示。

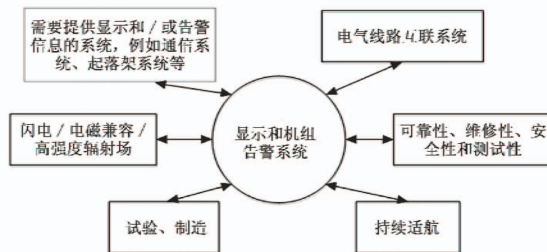


Fig. 2 System or specialty crosslinked to display and crew alerting system

显示和机组告警系统与需要提供显示信息和/或告警信息的系统,例如空气管理系统、通信系统、电源系统、防火系统、飞控系统、燃油系统、液压系统、飞行数据记录系统、起落架刹车系统、照明系统、导航系统、氧气系统、中央维护系统、辅助动力系统、动力装置系统等之间有功能和验证任务交联,同时与上述系统之间存在安全性需求的传递、确认和验证任务交联。

在进行可靠性分析、维修性分析、安全性和测试性分析时,与可靠性、维修性、安全性和测试性专业之间有交联。在进行计划维修任务分析(MSG-3)、飞行任务分析、飞行手册分析,编制正常操作程序、非正常操作程序、原理图手册、线路图手册、故障隔离程序、图解零件目录、工具手册、适航限制等文件时,与持续适航之间有交联。在进行电搭接设计、接地设计、电磁兼容设计、静电防护设计和高强度辐射场(HIRF)、闪电直接/间接效应符合性验证时,与闪电/电磁兼容/高强度辐射场(E3)专业之间有交联。在飞机总装制造、系统机上功能试验实施、机上检查实施和飞机制造符合性

检查等方面与试验和制造之间有交联。

### 2.4.2 符合性验证交联关系

符合性验证交联指在表明符合性产生证据的过程中,与其他系统/专题之间的交联。表 1 给出了与其他系统的符合性验证交联关系。

## 3 显示和机组告警系统审定要素和评审要求

显示和机组告警系统的审定应重点关注以下要素:1) 显示页面设计、布局及设备的安装;2) 系统安装后功能正常;3) 设备的合格性;4) 系统设计应防止/降低非预期的功能;5) 系统安全性评估;6) 闪电/电磁兼容/HIRF 防护;7) 系统的持续适航;8) 系统的人为因素设计考虑。

### 3.1 显示页面设计、布局和设备安装

页面设计和布局应满足运输类飞机适航标准中关于飞行和导航仪表、动力装置仪表、布局和能见度、动力装置和辅助动力装置仪表的要求,并尽量符合 AC25-11B 和 SAE ARP4102 的要求,如主飞行显示器基本的 T 字形布局,所有告警信息显示在特定的区域并按优先级排序显示,故障时故障旗应替代原有参数显示,参数的显示位置应与实际安装位置保持一致(如左右发动机、飞控舵面等),各符号设计满足 SAE ARP4102 等。设备的安装应根据显示信息的重要性、机组使用频次、使用场景等因素进行布置,重要性高且使用频繁的设备应尽量安装在机组设计眼位的顺航向前方,并处在最佳视野范围内。应通过系统说明、分析、试验等验证方法证明显示页面设计、布局 and 安装满足适航条款要求。

### 3.2 系统安装后功能正常

应通过试验证明系统在机上安装后功能正常,试验应覆盖各种可预期的运行条件,如环境温度条件、高度条件、各种气象条件、飞行包线、实施应急或非正常操作程序、特殊运行(例如双发延程)等。若采用试验室试验或模拟器试验进行验证,应重点审查试验设施构型,确保试验结果能正确反映真实装机后的状态。

### 3.3 系统设备的合格性

应通过取得相应的技术标准规定批准书,或完成相应的环境鉴定试验,提供证据证明设备满足最低性能标准(如显示器满足 AS8034C 的要求),按 DO-178B 完成相应的软件合格审定,按 DO-254 完成相应的硬件合格审定的思路来证明设备自身的合格性。

### 3.4 系统设计应防止/降低非预期功能

非预期功能主要通过系统架构设计、设计保证体系、供应商管理、供应商的设计保证体系等确保。应重点审查针对防止/降低非预期功能开展的需求的确认和验证、相似性分析、安全性分析、架构设计及试验验证工作,并对申请人的设计保证体系、供应商管理方法进行评价。申请人应批准并认可其供应商的设计保证体系,并监督实际项目研发按已批准的设计保证体系开展。

### 3.5 系统安全性评估

系统安全性评估应重点关注系统间的功能接口,各系统应按定义好的功能接口开展相关的安全性分析工作。安全性评估产生的安全性需求应正确地传递给接口系统,并最终反映在系统架构设计中。应考虑全机层面的组合失效,并通过试验、分析、评估等手段确认失效影响,指导系统设计。定量分析应考虑 EWIS, EWIS 的失效率应有类似的统计数据或分析方法支撑。

### 3.6 闪电/电磁兼容/HIRF 防护

应重点关注试验规划是否完整,针对新研设备,应至少规划设备级环境鉴定试验、系统级闪电/HIRF 试验室试验、HIRF 机上地面试验和 EMC 电磁兼容飞行试验,证明显示和机组告警系统的 A 级功能不会因闪电/HIRF 环境导致不利影响,允许 B 级和 C 级功能在闪电/HIRF 期间失效,但在之后应能及时恢复。

### 3.7 系统的持续适航

应根据 MSG-3 分析和 CMR 分析确定维修任务,发布相应维修程序。系统设备应具备良好的可维护性,如安装合理、方便可达、设计自检测功能探测设备故障、设备便于拆卸等。

### 3.8 系统的人为因素设计考虑

应重点检查系统设计对驾驶舱设计理念的符合性,完成驾驶舱的静态评估、基于任务的人为因素评估、基于功能的人为因素评估、基于设备的人为因素评估和基于差错管理的人为因素评估,确保系统设计满足驾驶舱理念和用户需求,并证明系统人机交互设计的正确性。

## 4 示例

根据上述研究,对某型显示和机组告警系统的安

全性评估工作进行适航审查,发现问题如下。

#### 1) 安全性需求捕获不完整。

显示和机组告警系统与各交联系统安全性分析界面不清晰,导致失效状态识别得不完整、组合失效分析缺失等问题,例如,缺失部分参数显示功能丧失或错误的失效状态,缺失告警和系统的组合失效分析等。安全性需求捕获不完整将导致显示和机组告警系统存在项目后期设计变更可能,导致部分系统级和软硬件级的审查工作需重新开展等问题。

#### 2) 失效状态影响等级的定义缺少支持材料。

直接引用咨询通告或工业指导材料如 AC25-11B 和 SAE ARP5288 等,或者通过简单的工程评估来定义失效状态影响等级,缺乏支持材料。不同的机型设计,其失效状态的影响等级可能不同,不可以仅通过简单的工程评估确认失效影响,应规划合理的飞行试验、模拟器试验来确认失效影响等级定义是否合理。

#### 3) 系统底事件暴露时间缺少分析证据。

各底事件的暴露时间直接影响故障树定量分析结果。针对各底事件的暴露时间,均应结合各功能的使用场景提供相应的分析材料证明其合理性。在实际审查过程中,发现该分析材料缺失,且缺少对隐蔽故障的考虑。

#### 4) EWIS 部件的失效率数据来源无支撑。

按照 CCAR25.1709 条要求,对系统灾难性和危险的失效状态进行故障树分析时,应考虑导线和连接器等 EWIS 部件的失效。目前的故障树分析中,缺少不同环境下机载导线的失效率数据。机载导线的失效与多个影响因素有关,目前行业内缺乏不同环境情况下的导线失效运营统计数据,主要采用建立相应的失效率数据预计模型的方法来解决多环境变量下的导线失效率数据。

## 5 结论

本文首先分析了显示和机组告警系统的适航文件体系,给出了主要适航文件要求。在此基础上,分析系统设计要求和审定基础和符合性方法确定原则,针对系统与其他系统交联的特点,重点研究其符合性验证交联关系。最后从实际审查角度,给出显示和机组告警系统的审定要素和评审要求。本文的研究可为我国工业方和局方开展民机机载显示和机组告警系统的设计和适航审查工作提供一定技术支持。

### 参考文献

- [1] 金德琨.民用飞机航空电子系统[M].上海:上海交通大学出版社,2011.

合子系统在多速率 Kalman 滤波方法的处理下, UAV 自主导航方案对 UAV 姿态角、高度和水平面内的速度进行了校正。在仿真时间范围内, UAV 的姿态角估计误差收敛于零附近, 前侧向速度的估计误差都实现收敛, 趋近于零; 与此同时, UAV 的高度误差收敛于零, 满足 UAV 在进近阶段沿惯性坐标系  $F_e$  的  $Z_e$  方向的垂直位置估计误差不大于  $\pm 3$  m 的裕度要求; UAV 的纬度估计误差处于轻微发散状态, 满足 UAV 在进入着陆状态之前, 沿惯性坐标系  $F_e$  的  $Y_e$  方向的纵向位置估计误差不大于  $\pm 150$  m 的要求, UAV 的经度估计误差保持 4 m 左右, 满足 UAV 沿  $X_e$  方向的水平位置估计误差应不大于  $\pm 60$  m 的裕度要求。

综上所述, 通过两个仿真的验证, 本文设计的 UAV 着陆进近阶段组合导航方案可以满足 UAV 着陆进近阶段的导航精度要求, 保证 UAV 以足够的导航精度进入最终着陆阶段。

## 5 结束语

本文通过对组合导航中的 Kalman 滤波方法进行实际研究, 根据实际组合导航方案中传感器的选择, 确定了基于间接参数估计的多速率 Kalman 滤波方法, 对组合导航中所用传感器, 即激光测距仪、电子罗盘和高度表系统进行研究并建模, 并在 Matlab 搭建数学模型实现对 UAV 组合导航信息融合系统的仿真验证, 得出本文

方案可以满足 UAV 进近阶段的导航精度要求的结论, 可以保证 UAV 以足够的导航精度进入最终着陆阶段。

## 参考文献

- [1] 高九州. 无人机自主着陆控制[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
- [2] 柴洪林, 基于视觉的夜间无人机自主着陆导航[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [3] 尚伟. INS/GPS/EC 组合导航系统的设计分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [4] 秦永元. 惯性导航[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [5] 耿春萍, 程度, 张治. 激光脉冲测距的测距精度及误差分析[J]. 光电技术应用, 2007, 22(2): 28-31.
- [6] 胡堃. 基于机载 LIDAR 技术快速获取高精度 DEM 的研究[J]. 科技资讯, 2009(7): 19, 21.
- [7] 伊丕源, 童鹏, 张景发, 等. 机载激光雷达多脉冲探测模式在大高差地形测绘中的应用分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(8): 4-9.
- [8] 张爱军, 王昌明, 赵辉. 三轴电子罗盘的磁航向角误差补偿研究[J]. 传感器与微系统, 2008(8): 33-35.
- [9] KUANG L, PAN Y J, SHEN X F, et al. A new algorithm for long range FMCW radar altimeter[C]//IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing, 2013: 621-625.
- [10] 李卫民. 基于粗糙集 EFIS 显示防差错设计适航性的研究[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2009, 34(5): 97-103.
- [11] SAE Aerospace. SAE AS8034C Minimum performance standard for airborne multipurpose electronic displays [S]. [S. l.]: SAE International, 2018.
- [12] SAE Aerospace. SAE AS8055A Minimum performance standard for airborne Head Up Display (HUD) [S]. [S. l.]: SAE International, 2015.
- [13] SAE. SAE ARP5288 Transport category airplane Head Up Display (HUD) systems [S]. Warrendale: SAE International, 2001.

(上接第 59 页)

- [2] 王永生, 刘红漫. 机载头盔瞄准显示系统的人机工效综述[J]. 电光与控制, 2014, 21(7): 1-5.
- [3] 袁大天, 周媛媛. 机载信息显示控制系统的飞行试验方法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(9): 172-174.
- [4] 张鹏, 刘博, 段照斌. 新型民航客机虚拟综合显示系统设计[J]. 电光与控制, 2017, 24(6): 69-73, 78.
- [5] 费益, 季小琴, 程金陵. 平视显示系统在民用飞机上的应用[J]. 电光与控制, 2012, 19(3): 95-99.
- [6] 陆崑, 卫宗敏, 庄达民, 等. 飞机驾驶舱显示界面脑力负荷判别预测生理模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(4): 685-693.