

引用格式: 周贵荣, 徐见源, 马少博, 等. 大型客机航电系统综合集成关键技术综述[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 529956. ZHOU G R, XU J Y, MA S B, et al. Review of key technologies for avionics systems integration on large passenger aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45 (5): 529956 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2024.29956

# 大型客机航电系统综合集成关键技术综述

周贵荣\*, 徐见源, 马少博, 宗军耀, 沈金清, 朱海杰

中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 201210

综述

**摘要:** 面对未来航空运输系统的需求,为了进一步提升大型客机安全性和空域运行效能,在系统综合控制、相关方信息共享、空地协同决策与管理、所需通导监视性能、基于航迹运行等方面对大型客机航电系统提出了新的需求,结合现代综合化航电系统的技术发展特点,总结了先进的航电系统架构、主要的功能特征、安全性设计流程等方面的内容。根据国产大型客机综合化航电系统研制和集成工作的工程实践,结合国内相关院所的研究成果,分析了航电系统综合集成、驾驶舱显示与控制、综合模块化航电、飞行管理、无线电导航、综合监视、机载数据链、大气惯导与机载信息等领域的技术现状、发展趋势和关键技术。并对下一代大型客机航电系统的应用需求、技术特征、研究方向等方面进行了展望。

**关键词:** 大型客机; 运行环境; 系统集成; 航电系统; 综合模块化航电

中图分类号: V241.0

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2024)05-529956-43

大型客机一般指150座以上的干线客机。航空电子系统是指由相互联系和相互作用的不同电子设备组成的能够实现特定飞机功能的系统,是现代化飞机的一个重要组成部分,是形成高效运行的大型客机的重要基础。与军用飞机、小型客机和通航飞机相比,大型客机的航电系统在功能、构成、性能和安全性等方面具有不同的要求和特征。在满足适航标准所规定的最低要求的前提下,大型客机追求的目标为更安全、更经济、更环保、更舒适,在这一目标的牵引及电子技术、计算机技术、信息技术、网络技术等各类技术进步的推动下,航电系统技术不断发展,其中综合化水平是航空电子技术发展的核心和评价飞机先进性的关键指标之一。

航电系统综合是指通过自顶向下的设计,将若干分离的航电功能有效的集中到一起并保证各构成部分能够高效协同运行的过程。航电功能主

要包括通信、导航、监视、指示与记录、机载维护与健康管理等。大型客机航电系统综合的关键技术不仅涉及与系统实现直接相关的技术,如:系统架构、计算机及数据网络、传感器、驾驶舱显示与控制、无线电传输、人机交互等方面,同时鉴于航电系统的复杂性,航电系统的综合还涉及为系统实现而采取的方法和过程管理等方面的关键技术,对于高度复杂的综合航电系统,现代的飞机制造商都采用过程保证的方法,将设计错误发生的概率控制到可接受的预期水平。这些过程包括需求捕获与定义、架构设计、系统开发、安全性评估、确认和验证、构型管理、过程控制及质量保证、合格审定等方面。

大型客机航电系统是航空公司用户关注度最高的系统之一。先进高效的航电系统有利于航空公司管理使用和维护机队,降低运营成本。也有利于空域扩容,提高航空运输系统的效率,提升航空

收稿日期: 2023-12-09; 退修日期: 2024-01-03; 录用日期: 2024-01-24; 网络出版时间: 2024-02-21 12:27

网络出版地址: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2024/V45/I5/529956>

基金项目: 国家级项目

\* 通信作者. E-mail: zhouguirong@comac.cc

529956-1

安全水平。

## 1 大型客机航电系统综合集成设计技术

### 1.1 大型客机航电系统研制流程

根据工业规范定义,航电系统属于高度综合和复杂系统,现代化航电系统很大的提高了整机的安全性、经济性、舒适性和维护性能,但从工程设计研制角度来看伴随先进技术和功能的应用带来了很大的挑战,审查方也高度关注,对其开发和审定过程提出了严格的要求,通过相应的严苛度管控研制过程,把系统开发过程中人为差错引起的概率控制到可接受的水平。民用飞机和系统的开发指南 SAE ARP4754 通过规范的过程控制减少开发错误,在飞机和系统的开发过程中同步开展安全性评估。

开发过程的确认、验证、构型管理、过程保证等过程也使得开发过程更为规范,从不同方面减少了开发错误。RTCA DO-297 针对综合模块化航电系统、RTCA DO-178C 针对软件、RTCA DO-254 针对硬件给出了相应研制保证的指南,并通过咨询通告的形式将其作为可接受的符合性方法,要求飞机及系统研制方建立一套完整的研制保证体系,而这套保证体系要包含完整的过程、可行的方法、可靠的工具以及责任明确的组织及人员,相对于具体的系统实现的技术,这套保证体系甚至更为复杂和关键。在飞机级和系统级及软硬件层级同样都要建立相应的保证体系。相关工业规范及指南文件关系见图 1。

研制保证体系中的过程包括开发过程以及用于约束或规范开发过程的对应过程,开发过程包括需求捕获和定义、架构设计与权衡、需求分解与分配、接口定义、软硬件的实现、系统的集成等,对应过程包括安全性分析与评估、需求确认、实现的验证、构型管理、过程保证等,每一个过程要定义具体的活动以及为实施这些活动所需要的使能条件,如具有独立性的组织、用于开发或验证的工具,要明确约束条件,如相关的法律、规章、技术限制等。当不同的过程作用于不同的系统时,可能产生不同的技术要求,有些可能成为制约系统开发的关键要素或关键技术,如用于综

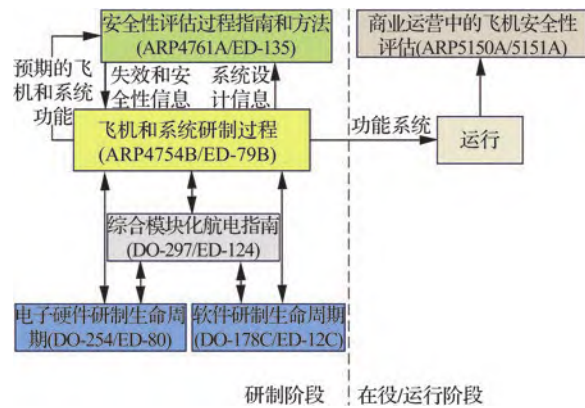


图 1 涉及研制和在役/运营阶段的指南文件

Fig. 1 Guideline documents covering development and in-service/operational phases

合模块化航电 (Integrated Modular Avionics, IMA) 平台资源分配的工具链、用于 IMA 系统适航认证的增量式认可方法、用于平视显示系统验证的方法、基于 IMA 架构的综合显控的安全性评估方法等。系统开发的制约因素也可能来源于底层软硬件的特性和能力,底层设备的功能、接口、可靠性指标等都可能关联到系统的架构形式。安全性评估和开发过程之间的交互活动见图 2。

### 1.2 大型客机航电系统顶层功能需求

航电系统是保障飞机运行、实现飞行员与飞机交互的主要人机接口,实现飞机与地面通信、飞机状态探测与显示、各系统间数据交互调度及综合处理等重要功能,航电系统的各项技术支撑大型客机实现安全、经济、环保、舒适等目标。

通过航电系统的功能提升飞机安全性,包括防止可控飞行撞地 (Controlled Flight into Terrain, CFIT)、空中相撞、机场地面意外相撞等事故的发生。实现飞机健康状态的监控和管理能力、飞机周围环境监测、气象雷达探测和预报、空中交通状态监视和防撞、近地告警、网络安全防护等功能。

提升飞机经济性,包括通过小型化和系统综合,减轻成本和重量,采用开放式模块化架构降低费用,采用先进的飞行管理技术减少排放和燃油消耗、降低噪声、延长发动机寿命,通过自动化能力提升减少机组人员。采用先进的控制技术及娱乐功能,提升客户乘坐体验。

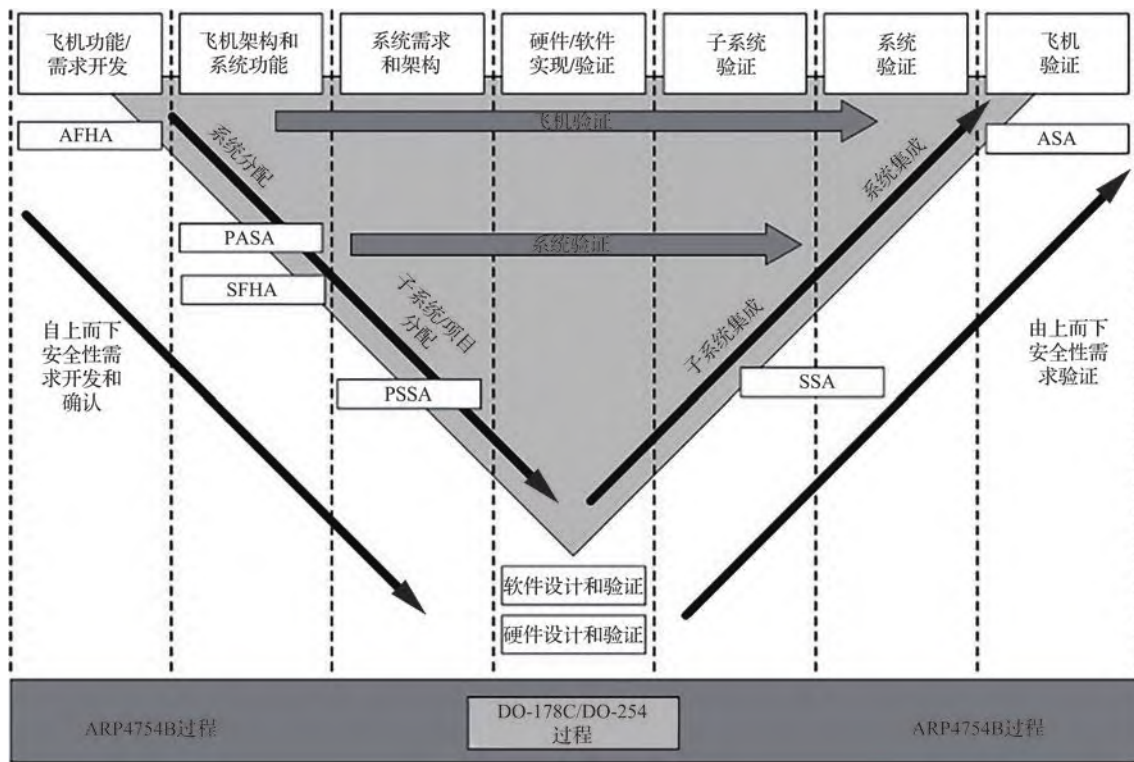


图 2 安全性评估和开发过程之间的交互活动

Fig. 2 Interaction between safety assessment and development processes

### 1.3 航电系统安全性设计及评估

航电系统的安全性评估活动伴随着系统开发过程开展。SAE ARP4761A 给出了飞机和系统进行安全性评估的过程和方法,在系统层面通用的安全性评估过程要执行的安全性评估活动包括系统功能危险性评估(System Functional Hazard Assessment, SFHA)、初步系统安全性评估(Preliminary System Safety Assessment, PSSA)和系统安全性评估(System Safety Assessment, SSA),可采用的安全性评估方法包括故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)、基于模型的安全性分析(Model-Based Safety Analysis, MBSA)、故障模式和影响分析(Failure Modes and Effects Analysis, FMEA)以及故障模式与影响总结(Failure Modes and Effects Summary, FMES)、级联影响分析(Cascading Effects Analysis, CEA)、区域安全性分析(Zonal Safety Analysis, ZSA)、特殊风险分析(Particular Risk Analysis, PRA)、共模分析(Common Mode Analysis, CMA)等,见图3。

其中CEA是新的分析方法,它是一种定性的、自下而上的分析,CEA对初始状态(如失效状态、失效模式或其组合)进行评估,分析人员要评估根因对飞机总的影响。由于系统的相关性,CEA应反复迭代确认由根因的传播导致的对其他直接或间接连接的系统的影响。CEA可用于支持分析特定根因对飞机级或多系统的影响,例如,CEA可用于判定FMEA中的失效模式对系统或飞机的影响,或液压、电源、IMA等资源系统中SFHA中的失效状态对飞机的影响。

虽然安全性评估的过程和方法是明确的,但面对高度综合和复杂的航电系统而言,要全面有效的完成安全性评估涉及很多关键技术的挑战,在评估过程中,要特别关注组合失效、共模失效、失效传播等问题。这是完成系统自顶向下设计过程和确保全机安全性的基础。

### 1.4 航电系统架构开发与权衡

航电系统的发展经历了一个快速升级迭代和发展的过程,第1代民机航电产品主要为最基



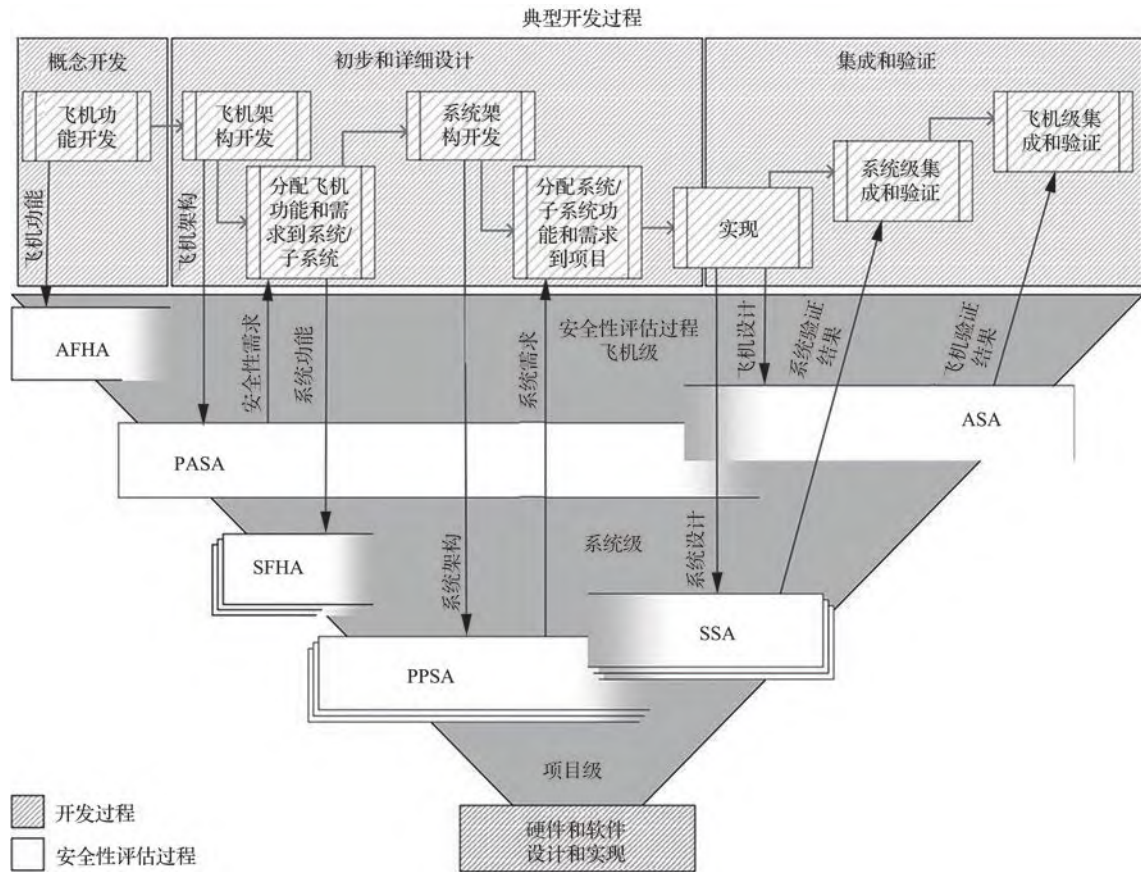


图3 系统研制过程中的安全性评估工作

Fig. 3 Safety assessment in system development

本的分立仪表。第2代航电为最初各子系统分散独立的分立式架构,相互交联少,综合化程度低,体积和重量大。第3代航电为联合式系统,开始采用系统综合的概念,采用处理,采用ARINC 429实现系统间数据共享和传输,采用综合控制显示器,主要技术特征为集中控制、分布处理。第4代航电为采用综合式系统架构,采用ARINC 664数据总线、综合IMA机柜、通用处理模块(General Processing Module, GPM)、内置及外置交换机、采用符合ARINC 653标准的分区操作系统,满足航空电子对高可靠性、高可用性以及高服务性的要求。支持外场模块级维护和更换,减少了全机复杂电子硬件的件号,大幅度的提升了签派可靠度、运营的经济性和维护等性能。

随着综合化航电系统功能不断增强、交互行为及逻辑复杂、接口及信息量大、系统耦合关联复杂、功能实现的链条长,随着综合化程度的提高,需实现机载数据信息的综合、飞机数据网络

的综合、显示控制的综合、公共资源的综合、功能的多样性和硬件软件化发展等方面的技术。通过对复杂系统的综合化设计,提升了整机的综合性能,同时综合化过程对于系统安全性影响分析和设计过程带来了很多新的挑战,也提出了新的要求。

航电系统的架构由构成系统的各个组成部分及其组织形式决定,组织形式要考虑功能、安全性(包括可用性和完整性)、可靠性、维修性等因素。架构定义是系统的高级别决策过程,架构的确定为后续开发过程奠定基础。大型客机所追求的更经济的目标要求航电系统要减轻重量、缩小体积、降低功耗、简化布线等,而这些措施也是促使航电系统架构不断演化的重要因素。

当前的航电系统架构主要有2种形式:一是传统的航电设备以航线可更换单元(Line Replaceable Unit, LRU)为基本系统单元的联合式架构,如图4(a)所示。LRU具有实现某种功能的能力,

是完成这种特定功能的软硬件综合独立体。它拥有标准的形式、功能、外观尺寸和安装接口。从20世纪60年代的模拟式航电设备到90年代的先进数字航电系统均采用这种架构;另一种架构是20世纪90年代发展起来的IMA架构,即以航线可更换模块(Line Replaceable Module, LRM)为基本系统单元的综合航电系统,实现了系统高度的物理综合和功能综合,如图4(b)所示。

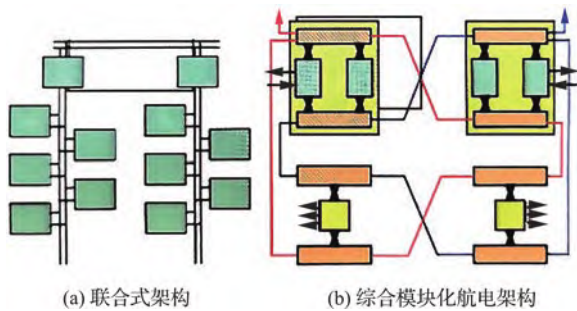


图4 航电系统架构

Fig. 4 Avionics system architecture

对于联合式架构,子系统功能保持相对独立性,系统间以数据总线进行互联,实现信息的统一调度,提高系统性能,集中控制、分布处理。而基于IMA架构的综合化系统,将飞机独立分系统的应用功能综合到通用模块组件(GPM)中,通过

高速的机载互联总线、共享计算资源和分布式接口形成综合应用平台,主要特点是分区应用、模块化管理、资源共享,可扩展性好、可靠性高、便于维护。未来民机的航电综合化也将由综合数据处理向综合信号处理、射频综合方向发展,与之相适应的高速总线、高速通用信号处理、射频孔径综合等也相应的随之发展。

#### 1) 飞机数据总线和网络架构

从最初的分立式航电到目前的先进综合式航空电子系统,机载网络作为飞机和航空电子系统架构代际进化的重要标志,从最初分立式航电系统中采用的点对点ARINC 429通信,到联合式航空电子系统采用的集中控制通信1553B总线,发展到综合式航空电子系统使用的光纤分布式控制数据接口(Fiber Distributed Data Interface, FDDI)和线性令牌传递总线(Linear Token Passing Bus, LTPB),以及目前先进综合式航空电子系统所采用的航电全双工交换式以太网(Avionics Full Duplex Switched Ethernet, AFDX)和FC(Fibre Channel)等,如表1所示<sup>[1]</sup>,可以看出:每一次机载网络的变革都更好的满足了航空电子系统对数据通信在带宽、实时性、可靠性等方面的提升要求。从数据交换的角度可分为2个大类:①总线式互连,采用共享介质进行通信,没有交换特征;②交

表1 机载数据总线对比<sup>[1]</sup>

Table 1 Comparison of onboard data bus<sup>[1]</sup>

特征	协议						
	ARINC664	ARINC825	TTEthernet	TTP/C	Flexray	TTCAN	ARINC629
最大传输速度/Mbps	100	1	100	25	10	1	2
时间触发机制	否	否	是	是	是	是	否
事件触发机制	是	是	否	否	是	是	是
来源	Etherent (IEEE802.3)	CAN	Etherent (IEEE802.3)	None	Byteflight, TTP/C	CAN	ARINC429
总线仲裁机制	CSMA/CA	CSMA/CA	TDMA	TDMA	时间触发	CSMA/CA	时间触发
拓扑结构	星型	总线型、星型、点对点	分组交换网络	总线型、星型	点对点、星型	总线型、星型、点对点	点对点、总线型
时钟同步	软件和硬件结合	软件层面	软件层面	硬件层面	硬件层面	硬件层面	软件层面
故障检测	硬件层面	软件层面	硬件层面	硬件层面	硬件层面	软件层面	软件层面
支持的数据传输类型	异步	异步	同步	同步	同步,异步	异步	异步

换式互连,具有空分交换结构,支持数据交换。不同机载数据总线间的特征对比见表1。

在通用以太网基础上,采用交换技术与单网段全双工传输方式之后,可以克服共享介质以太网(Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection, CSMA/CD)机制固有的介质访问时间不确定性的问题。然而,单纯的交换式网络和有限的优先级,仍无法满足复杂的航空电子系统通信任务在实时性和可靠性方面的严格需求;并且,通信任务之间缺乏流量的管理与隔离,无法支撑实时通信任务发布与调度的设计。空客在A380工程上首先推出了AFDX技术,对交换式网络进行严格实时性和冗余配置改造,以适用于大型客机的航空电子系统。2000年前后,ARINC公司发布了ARINC 664 part7规范草案,对这种“确定性网络”进行了定义,并于2005年6月公布正式标准。ARINC 664网络主要在大型客机上得到应用,包括空客A380、A350和波音B787,中国的C919采用了ARINC 664组网技术。

ARINC 664的物理层服从ARINC 664 part2规范中对于飞机数据网络(Aircraft DataNetwork, ADN)物理层的定义,后者考虑到飞机上以太网应用的适用性,对商业货架产品(Commercial off the Shelf, COTS)以太网协议的物理层进行选择,对部分参数进行定制,并规定计算链路预算的方法。根据该规范的定义,ARINC 664网络可以选用的电信号接口包括10Base-T和100Base-TX,光信号接口包括100Base-FX和1000Base-SX。

“确定性网络”主要是指时间的确定性,即

“实时性”。664 part7规范定义了实时性的性能保证机制,同时包含固定路由和冗余数据包管理等内容。另外,在ARINC 664规范定义的协议族中,网络管理、简单网络管理协议(Simple Network Management Protocol, SNMP)字典服务、网络管理远程监视器的配置、网络综合与区分服务、保密性和简单文件传输协议等分别根据不同的商用或工业标准改造而成,并在ARINC 664的上层应用中使用。一个典型的ARINC 664网络由端系统(End System, ES)、交换机和链路组成。实时性能的保证机制主要由端系统实现,交换机具有流量的管制与过滤功能。ARINC 664的实时性主要体现在基于虚拟链路(Virtual Link, VL)的通信方式。

在协议层面,ARINC 664基于商业以太网标准,采用IEEE802.3/IP/UDP协议的大部分内容,并根据航空电子系统实际情况在实时性、可靠性等方面进行改造,是一个适用于航空电子系统的通信接口协议。按照开放式系统互联(Open Systems Interconnection, OSI)协议层次划分,ARINC 664协议可以分为传输层、网络层、链路层(Media Access Control, MAC)和物理层4层。在消息发送过程中,发送协议首先将信息发送到ARINC 664端口,用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)传输层负责添加UDP报头(包括合适的源和目的UDP端口号)。一般情况下,这些端口号都是通过系统配置确定,并固定映射于每个ARINC 664通信端口。ARINC 664消息格式,采用以太网帧格式进行帧定义,其帧结构如图5所示。

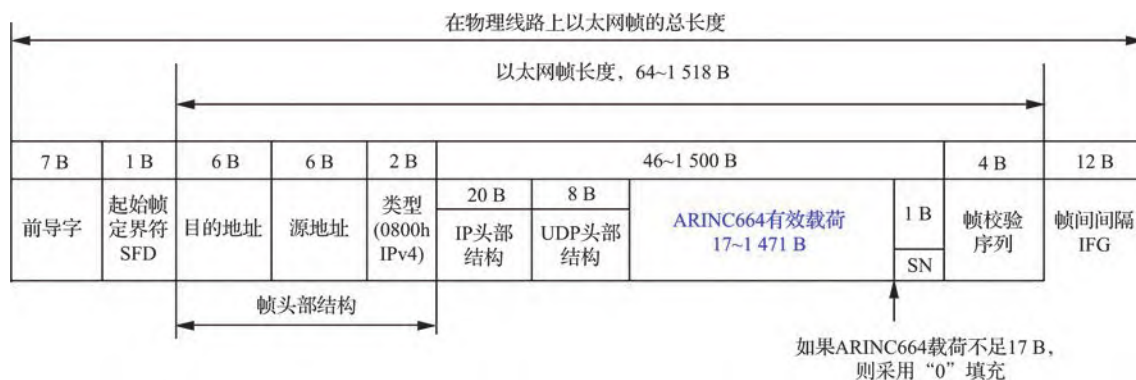


图5 ARINC 664帧结构定义  
Fig. 5 Structure definition of ARINC 664 frame



## 2) 航电分区操作系统及软件架构

模块化航电软件架构是航电综合软件设计的核心,为满足航电软件综合及快速升级的需求,航电软件需符合相应的要求,主要包括:良好的开放性、标准化、易于升级、易于维护等方面的要求。

SAE4893《通用开放结构(GOA)框架》标准是开放式系统结构标准的重要规范,美国及欧洲航空电子系统标准化技术委员会结构工作组作为结构评估的参照模型。主要包括结构分层和接口分类。GOA框架规定了软件、硬件和接口的结构,分为4个层次、9种接口,接口的标准化支持可移植性和升级。

采用IMA架构的大型客机航电系统,主要采用分区操作系统(其软件架构见图6),ARINC 653软件系统架构是专为航电应用而定义的软件标准接口。1997年1月ARINC发布了ARINC 653(航空电子应用软件标准接口),并于2003年7月发布ARINC 653 Supplement 1,对区间管理、区间通信及健康监测部分进行了补充说明,用以规范航空电子设备和系统的开发。分区(Partitioning)是ARINC 653中一个核心概念。

采用ARINC 653标准的操作系统设计原理将传统操作系统分为2级,一个是CoreOS,任务是区间化以及区间的管理和调度,CoreOS的上层就是分区操作系统POS(partitioned operation system),在POS的上层才是应用程序的执行,见图6。

分区操作系统用户可以配置空间和时间分区的调度信息,实现空间和时间调度的动态配置,通

过内存管理单元保证空间分区的隔离,通过时间周期轮转调度方法,完成时间分区调度,在分区内可以实现优先级调度或轮转调度策略。提供健康管理、分区管理、分区通信等功能。目前航空应用的符合实时性和安全性要求的实时操作系统有Green Hills Software公司的In-tegrity-178B、Wind River公司的VxWorks AE653和航空工业计算所的天脉2。在具有安全性的同时保证实时系统对实时性的要求。具有时间域与空间域的保护能力。具有存储器地址空间保护功能和各任务所需资源(包括中央处理器CPU时间资源和存储器空间资源)的保护功能。

## 3) 软件中间件技术

分布式架构在航电系统中的应用更加广泛,在系统节点间信息交换量持续增大,对时间延迟、时间抖动等数据交换和通信的质量要求提高。如何高效且实时的进行数据分发是目前分布式系统网络领域亟需解决的难题。

分布式应用的一个通用需求,就是为不同的线程分发数据并进行处理。这些线程可能存在于同一个处理器上,也可能分布在不同的节点上,还可能以混合的方式具有多个节点,且每个节点上存在多个线程。

中间件技术可以有效的降低项目开发难度与成本,提供服务质量策略即QoS的支持。使应用软件的研发与其运行平台隔离,增加应用软件的通用性,在应用软件与平台(包括硬件、操作系统等)中间,增加一层隔离,也即软件中间件。

面对传统的通信架构,如基于客户端/服务器模式的构架,其分布式应用软件基本上都是面向过程的,数据随整个事务的流程流动,比如通用对象请求代理架构(Common Object Request Broker Architecture, CORBA),远程方法调用(Remote Method Invocation, RMI)等都属于这种构架。类似这种构架的系统采用了远程过程调用协议(Remote Procedure Call)来完成各分布节点间的数据交换,进行传送的数据量相对较小,效率相对较低,同时会存在服务器的性能瓶颈和通信时的单点掉线等问题,不能满足未来航电系统中对嵌入式系统的实时性、通信可靠性以及系统健壮性要求较高的应用。

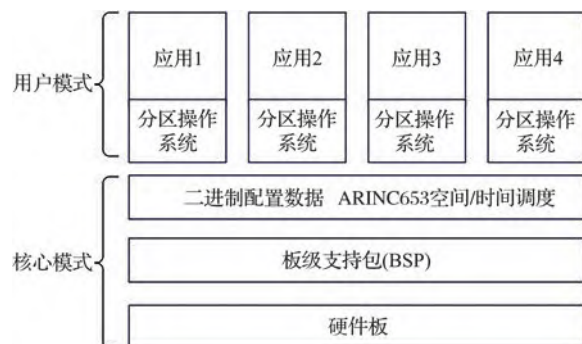


图6 分区操作系统的软件架构示意图

Fig. 6 Software architecture of partitioned operating system

支持出版/订阅设计思想的应用程序接口 DDS(Data Distribution Service),体现了以数据为中心进行结构设计的理论方法,分布式系统实时应用程序的网络中间件,它遵循对象管理组织(Object Management Group, OMG)中实时系统数据分发服务 DDS 的标准。和传统的开发方法相比较,DDS 中间件体系结构,对实时性要求提供更好的支持。提供低延迟、高吞吐量、对实时性能的控制级别等性能,满足模块化航电系统强实时性的要求。

AOXE 航电系统执行环境是由国内自主研发的航电中间件,可以支持国外风河操作系统及国内的天脉操作系统,还可支持 Windows 操作系统。采用系统通用管理与应用管理分离的思路,将系统软件管理功能从应用层中剥离出来,设计一个屏蔽底层操作系统,为系统功能级应用软件提供支撑和接口的运行平台,提高软件的扩展性和移植性,便于应用软件的开发与综合,应用的唯一接口就是执行框架。航电系统运行框架由系统软件管理、CPU 本地管理、软件运行框架服务三部分组成。AOXE 主要功能包括:操作系统隔离、节点管理、消息管理、系统通信控制管理、系统重构服务、数据存取管理、集成监控、健康管理服务等。

#### 4) 片上系统 SoC 等硬件集成技术的发展

随着集成电路技术的发展,把完成某个特定功能的嵌入式计算机系统(含软硬件)集成到一个芯片上,即单片系统或片上系统(System on Chip, SoC)。SoC 在单一硅片上集成数字和模拟混合电路,包括嵌入式核、存储器、专用功能模块、I/O 接口模块等多种功能模块,包括嵌入式软件(如嵌入式操作系统、网络协议栈和应用软件等),实现完整的嵌入式系统功能,这样把原来需要上百个集成电路(Integrated Circuit, IC)和电路元件组成的印制电路板集成到一个芯片上。

随着电子系统功能和性能、可靠性等指标的提高,同时减小系统重量与功耗。已有部分 SoC 项目在航空中得到应用。但在民用大型客机上的高安全等级系统中应用并适航取证和装机还在研究过程中。SoC 的规模大、功能复杂,设计及验证都面临着严重的挑战,设计风险很大。返

工费用高,开发周期长。为降低风险,加快设计周期,出现了基于可编程逻辑器件(Programmable Logic Device, PLD)的 SoC 设计方案—SoPC(System on a Programmable Chip),可编程片上系统。SoPC 是 SoC 技术和可编程逻辑技术结合的产物,是一种特殊的嵌入式系统。首先它是 SoC,即可以由单个芯片完成整个系统的主要逻辑功能。其次,它还是可编程系统,具有灵活的设计方式,可裁减、可扩充、可升级,并具备一定的系统可编程功能。SoPC 相对于采用专用集成电路(Application-Specific Integrated Circuit, ASIC)实现的 SoC,具有设计费用低、风险小、开发周期短、可以灵活地随时修改、方便升级等优点。SoPC 相对于 ASIC 实现的 SoC 不足之处在于 SoC 由现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Arrays, FPGA)器件厂商产品的结构来决定,缺乏选择的灵活性,性能等难以优化与提高;在大批量应用时,单片成本相对于 ASIC 高、功耗较大。图 7 为典型的 SoC 架构示意图。

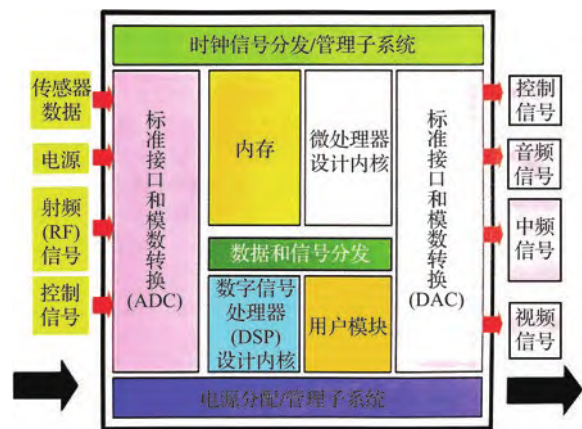


图 7 典型 SOC 架构示意图

Fig. 7 Typical SOC architecture

#### 5) 综合模块化航电系统增量式集成技术

IMA 是在资源共享的设计思想基础发展的航空电子系统架构技术,它通过航电功能的分解与重组,以标准化的硬件模块和软件模块为实现方式,通过对数据处理、数据传输等资源的综合和优化实现不同的航电及飞机系统功能,达到减重、减体积、减功耗、减件号、提升可靠性和维护性等目的。采用 IMA 架构技术构建而成的特定的模块化航电系统称为 IMA 系统,如图 8 所示,



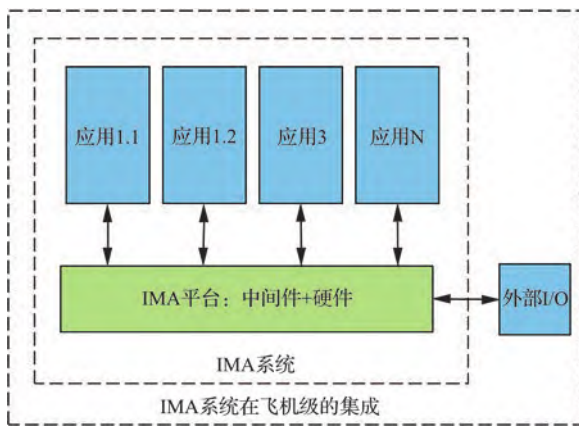


图8 IMA系统的层级结构

Fig. 8 IMA system hierarchy

IMA系统具有显著的层次性特点, IMA系统包含IMA平台和驻留在平台上的应用, 而IMA平台由能提供软件和硬件资源的一组模块构成的。IMA平台所提供的资源具有可配置、可协同运行、可重用和可共享的特性。可配置是指平台所提供的计算资源、存储资源、通信链路、接口资源等是可配置的; 可协同运行是指在一起工作的若干资源能够组合完成特定功能; 可重用是指对于已审查认可的系统硬件或软件及其设计保证数据, 可不受影响地应用于其他项目; 可共享是指平台所提供的资源可由多个应用共享使用。

IMA平台包含硬件层和软件层, 硬件层提供可被应用共享的资源; 而软件层, 包括“中间件”, 如操作系统、健康监控、各种不同的服务和硬件驱动, 通过中间件, 平台可以向软件应用提供服务、管理软件应用之间的接口、管理软件应用之间共享的内/外部资源、确保应用之间的隔离。

IMA系统的研制是一个复杂的过程, 必须按照结构化的方法进行开发, 文献[2-3]从不同侧面提出了对开发过程的要求。

RTCA DO-297给出了IMA开发的指南和合格审定过程中的注意事项, 结合ARP4754B和RTCA DO-254以及DO-178C的指导, 通过结构化的方法<sup>[4]</sup>, 控制系统开发、安全性评估、构型管理、确认、验证、过程保证、审定/适航等过程, 使得系统以适当的研制保证等级进行开发, 保证开发出的系统已经将错误限制在可以接受的程度。

如前述, IMA系统具有很强的层次性特点, IMA系统采用的是“自顶向下需求分解与设计开

发、由下而上增量集成”的研制过程。IMA系统研制过程按模块、单驻留应用与平台集成、多驻留应用在IMA平台上的集成、IMA系统在飞机上的集成等不同的阶段进行开发, 在开发、集成和适航认证过程中, 模块、平台、应用、IMA系统以及IMA系统在飞机级的集成, 处于不同的任务层级, 每一层级有对应的需求定义、架构定义、接口定义、实现或集成、验证等活动, 根据对应的任务确定开发目标、活动和结果。

### 1.5 机载软件开发研制管理

在现代航空电子系统中, 机载软件承担着越来越多的功能, 软件的种类和规模日益增长<sup>[5-8]</sup>。民机机载软件重要性和规模持续增长的主要原因: ① 系统新功能的大量增加, 导致相应的软件规模增加; ② 有大量高安全等级的系统功能, 通过软件实现, 导致软件的安全性等级要求提升; ③ 从重量、寿命、可靠性、功耗和维护成本角度考虑, 大量的硬件功能向软件化发展, 导致软件的进一步增长; ④ 通过智能化能力的提升减轻飞行员的负担。因此, 软件研制和审定工作的重要性及复杂度也大幅度增长。提出了软件适航审查相关的要求、方法和技术等方面的工作。相关软件研制过程主要包括:

1) 软件计划过程, 进入软件生命周期的首个过程。通过制定一系列的软件计划和软件标准, 指导后续的软件开发过程和软件综合过程, 并确保依相关计划和标准所研制的软件能满足相应级别的所有适航要求。根据DO-178B, 在软件计划过程中应该事先考虑到软件生命周期的各个方面, 包括软件开发过程和软件综合过程的各项活动; 活动之间的关系; 活动的输入输出; 活动的迁移准则; 活动的执行人、执行方式及执行工具; 软件需求、软件设计和软件编码活动的执行标准; 语言与编译器; 各项数据的控制类别; 数据的组织方式; 资源的约束; 研发的进度; 局方审查的介入以及多版本非相似软件、现场可加载软件、商用成品软件、先前开发的软件等其它方面的考虑。另外, 为确保将来根据这些软件计划和软件标准所研制的软件能够真正满足相应软件级别的所有适航要求, 通常还需要依据制定好的软件

计划和软件标准列出适航符合性矩阵。

2) 软件开发过程,包含了通用过程框架里的“建模”(即建立需求、设计和架构)、“构建”(即编写软件代码和目标代码)以及“部署”(即将软件目标代码加载到目标机环境)。是自顶向下、逐步求精、从无到有生产机载软件的活动集,也是将知识转换成软件产品的活动集。DO-178B标准中又将软件开发过程分解成软件需求过程、软件设计过程、软件编码过程以及集成过程等4个子过程。软件需求过程是将分配到软件的系统需求分解和细化成为高层需求、并建立高层需求与系统需求追踪关系的过程。不能直接追踪到系统需求的高层需求称为派生的高层需求。这些高层需求应反馈到系统生命周期。软件设计过程将高层需求经过多轮的迭代和细化、开发软件架构和低层需求、并建立低层需求与高层需求追踪关系的过程。不能直接追踪到高层需求的低层需求称为派生的低层需求。这些低层需求也应反馈到系统生命周期。软件编码过程是编写源代码以实现软件架构和软件低层需求、并建立源代码与低层需求追踪关系的过程。DO-178B不允许存在不能追踪到低层需求的源代码。集成过程是对源代码进行编译、链接成为可执行目标代码、并将可执行目标代码加载到目标机的过程。对应于A级软件,需建立目标代码与源代码的追踪关系,分析不能直接追踪到源代码的目标代码是否会带来安全隐患。

3) 软件综合过程,贯穿于软件计划过程和软件开发过程的始终,并与这两个过程并行执行。它又被分为软件验证过程、软件配置管理过程、软件质量保证过程以及审定联络过程。软件验证过程是对软件开发过程的产物进行核查、评审、分析或测试,以保证这些产物的可验证性、一致性、符合性、准确性、兼容性、健壮性、追踪性等特性。除了对软件开发过程的产出物进行验证以外,软件验证过程还需要保证验证工作本身已经达到足够严格的程度,即进行测试用例的需求覆盖分析与结构覆盖分析。

4) 软件验证过程,由于主要是验证软件开发过程的产出物,因此,软件验证人员需要独立于软件开发人员。软件级别越高,独立性要求也越

高。软件配置管理过程旨在标识、记录、存储并管理软件生命周期数据的整个变化历史,其中对软件生命周期数据的管理包括冻结(基线)、检索、重现、备份、追踪、统计、变更控制等。通过软件配置管理,整个软件生命周期的任何关键节点都是可以重现的,关键活动的工作基础是固定的,关键变更是受控的。DO-178B定义了软件配置管理活动,还定义了不同重要性的数据进行配置管理时不同严格程度的适航要求。

DO-178与ARP 4754结合,构成航电系统软件的开发标准,后者主要对应的系统生命周期开发要求,前者对应软件的生命周期开发要求。其信息交互关系如图9所示,流程关系如图10所示。

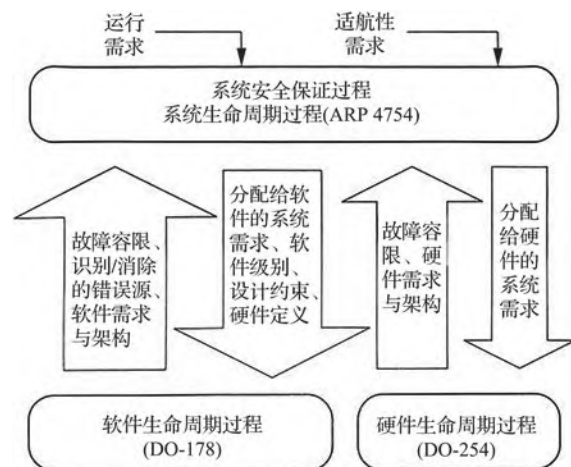


图9 DO-178与ARP4754信息交互关系示意图

Fig. 9 Schematic diagram of information interaction relationship between DO-178 and ARP4754

机载软件主要研制阶段对应适航活动,包括:

1) 软件计划阶段,它包含了所有的软件计划(软件合格审定计划 PSAC,软件开发计划 SDP,软件验证计划 SVP,软件配置管理计划 SCMP,软件质量保证计划 SQAP等)和软件标准(软件需求标准 SRS,软件设计标准 SDS,软件编码标准 SCS等)的策划、编写、协调、验证、配置管理、质量保证以及相关的审定联络等活动。本阶段的活动结束即达成一个新的里程碑。通常会进行 SOI#1 的审查。

2) 软件需求阶段,它包含了根据系统生命周期的输出来开发软件高层需求,以及对高层需求

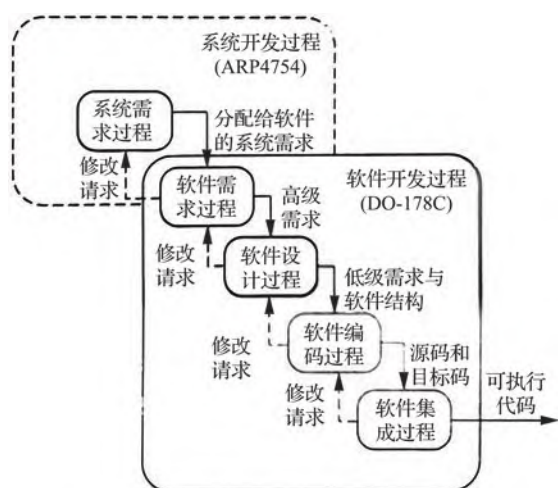


图 10 DO-178中系统需求和软件开发过程关系示意图

Fig. 10 Schematic diagram of relationship between system requirements and software development process in DO-178

进行验证、配置管理、质量保证和相关的审定联络等活动;本阶段的活动结束即达成一个新的里程碑。

3) 软件设计阶段,它包含了对高层需求进行细化,开发软件架构和低层需求,以及对软件构架和低层需求进行验证、配置管理、质量保证和相关的审定联络等活动;本阶段的活动结束即达成一个新的里程碑。

4) 软件编码阶段,它包含了根据软件架构和低层需求编写源代码,以及对源代码进行验证、配置管理、质量保证和相关的审定联络等活动;本阶段的活动结束即达成一个新的里程碑。通常会进行 SOI#2 审查。

5) 集成与测试阶段,它包含了对源代码、目标码进行编译、链接并加载到仿真机或目标机,以及对可执行目标码进行验证、配置管理、质量保证和相关的审定联络等活动;本阶段的活动结束即达成一个新的里程碑。通常会进行 SOI#3 和 SOI#4 审查。

软件研制和审查相关的数据项,主要包括:项目进度计划、问题报告、分配到软件的系统需求、评审检查单、软件等级、评审报告、项目估算数据、软件配置索引、项目软件生命周期、基线、项目管理计划、变更请求、软件合格审定计划、软件配置状态报告、软件开发计划、软件配置管

理记录、软件验证计划、软件生命周期环境配置索引、软件配置管理计划、软件质量保证记录、软件质量保证计划、高层需求层次结构、软件需求标准、高层需求(条目化)、软件设计标准、软件需求数据(非条目化)、软件编码标准、高层需求与系统需求的追踪数据、核查检查单、软件架构(非条目化)、核查记录、低层需求层次结构、低层需求(条目化)、软件生命周期环境、软件设计说明(非条目化)、目标代码、低层需求与高层需求的追踪数据、可执行目标代码、源代码;编译、链接、加载日志;源代码与低层需求的追踪数据、测试结果、测试用例、测试结果与测试规程的追踪数据、测试用例与高层需求的追踪数据、测试结构覆盖数据、测试用例与低层需求的追踪数据、目标代码与源代码的追踪分析数据、高层需求测试覆盖数据、加载控制记录、低层需求测试覆盖数据、软件完成综述、测试规程、软件符合性评审报告、测试规程与测试用例的追踪数据等。

## 1.6 驾驶舱显示控制及人机交互设计

随着飞行环境复杂性的增加,座舱显示控制交互系统设计更加合理、操作和使用便利、分类和定义清晰,飞行员对于态势的感知和控制输入更加高效,显示信息精简明确、操作逻辑清晰。

主要设计包括:显示信息分类、座舱控制任务分类、符号画面设计、操作控制逻辑设计、人为因素检查、座舱布局及重要性分区、可达性设计、操纵装置布置、图形设计开发、先期仿真验证工具建立及仿真环境中的测试等方面。

人机交互系统设计,是驾驶舱和航电显示控制人机接口设计的重要组成部分,交互系统设计涉及从计算机科学到心理学与社会学等多学科领域,涵盖一系列方法、原则、原理和标准。包括可达性、活动理论、适应系统、美学、注意力、听觉界面、协同环境、设计语言、分布式认知、图形化用户接口(Graphical User Interface, GUI)、信息架构、交互模式、界面设计、多通道交互、综合评估等各个方面的技术和实验科学。人机交互系统相关的设计学科见图 11。

座舱航电显示控制布局功效设计,飞机在座



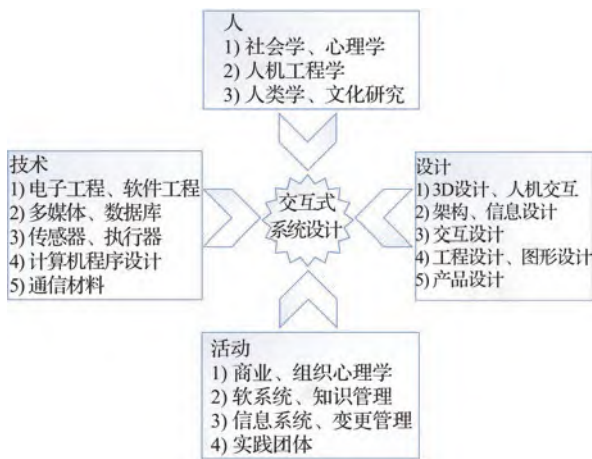


图 11 交互系统相关的设计学科

Fig. 11 Design disciplines related to interactive systems

舱内必须依靠舱外目视搜索、舱内信息显示以及自身感知等结合,综合获取各类飞行信息,通过座舱内的各类控制器来操纵和控制飞机。飞行员在不同的飞行阶段,面对不同的场景,从不同的显示器相应的页面获取所需信息,以完成对飞机的操纵控制。保障飞机在各种复杂场景下的飞行安全。

座舱显示控制布局的设计对于整个飞行员操作程序的设计和飞行员的有效使用极为重要。在整个座舱显示控制设计过程中,首先要确定座舱显示信息及控制布局,再根据显示器的大小和分布、控制开关及其位置来完成显示画面的设计。主要考虑飞行员人机适应性、飞行员可操作性及可达性以及座舱显示控制需求。

人机适应性考虑<sup>[8]</sup>,座舱显示器控制器的设

计应按不同飞行状态、执行飞行任务时使用的频度及其优先等级,来实现显示与操纵设备的有序布局。飞机座舱的工作空间分为配置显示器的感觉区及配置控制器的运动区。感觉区占仪表盘的大部分空间,分布于飞行员工作位置前部;运动区包括两侧操纵板、左右手之下及前方、飞机操纵装置(如脚蹬)的区域。这两个分区应保证仪表板合理配置,以使飞行员操作时感觉舒适和方便。要实现这些需求,应使配置与飞行员的视觉能力及测量数据相适合。根据视觉观察任务的不同,可把双眼的总视区分成若干个子区,如图 12 所示,用于配置不同重要度的显示信息和不同紧急度的控制参数。图 13 中所引用的人体尺寸参数与数据构成了仪表板的大小、安装高度及显示器配置的依据。飞行员操纵动作界限的设计需保证在基本工作姿态下操纵装置的可达性,并须考虑动态人体测量数据。

越靠近飞行员的区域并不便于观察,也不便于操作。操纵装置布置和配置方案必须有继承性并有统一的原则和模式,应根据飞行员注意力分配与转移的心理结构来建立信息模型。显示器应容易看清、紧凑、表意清晰、指示精确、读数盘与其他元素易于分辨、指示装置可靠、有极限指示信号、不同飞行情况及参数应容易辨认等。操纵器的通行编码方法是颜色、形状、标记符号与标注说明等。操纵装置的尺寸、形态以及力度大小要考虑飞行员肢体的解剖学、测量学与生物

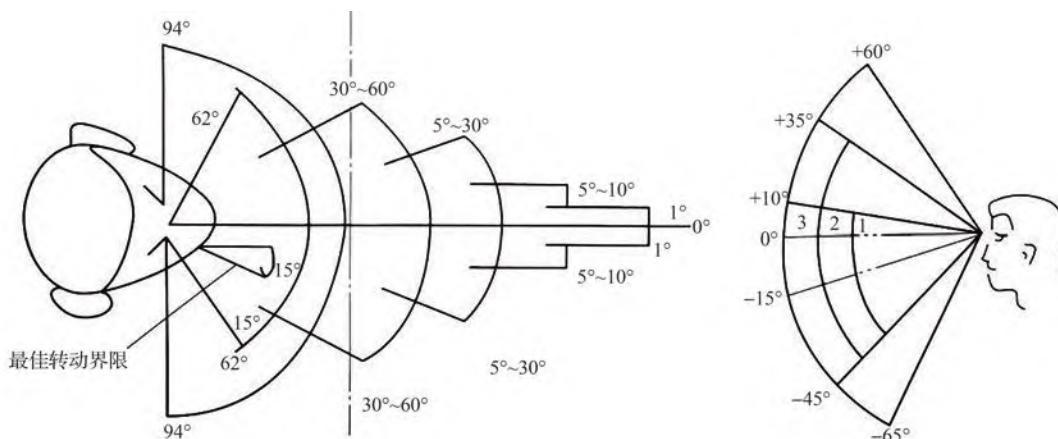


图 12 飞行员眼部视场范围

Fig. 12 Pilot's eye field of view

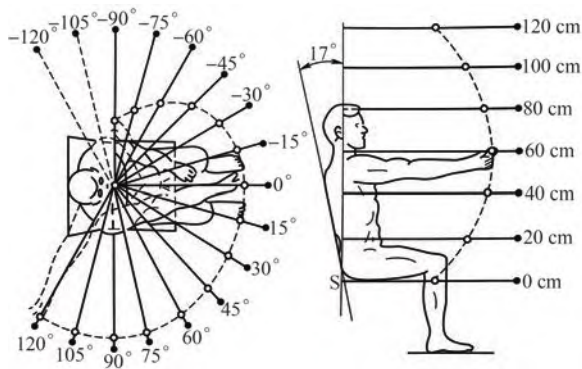


图13 飞行员特有的可达性数据

Fig. 13 Pilot-specific accessibility data

力学特性要求。使用操纵装置的最大用力、速度、精确度或运动范围等不能超过最弱飞行员的适应能力,并且移动操纵器要有适当阻力,以避免不必要的接通或断开。在移动操纵装置的过程中及终端位置上,飞行员须能感觉到位移,同时杆、柄、开关等启动时应有触觉反馈。

### 1.7 ARINC 661显示综合接口技术

采用ARINC 661开放式驾驶舱综合显示标准,规范了驾驶舱显示系统与用户系统的交互接口,使更多的系统可以通过ARINC 661标准接口共享显示系统的资源,并使显示系统与其它系统间开发过程相互不受影响的同步进行,其主要技术特征:

1) 实现接口标准化:在ARINC 661规范中将座舱显示接口相关的分为两部分:座舱显示系统(Cockpit Display System, CDS)和用户应用(User Application, UA),规范定义了两者之间的通讯接口,实现了人机接口画面显示前端和逻辑处理后端的解耦。

2) 多个用户界面设计之间及显示软件本身的独立性:ARINC 661座舱显示系统采用外部定义文件的形式来描述显示画面,形成开放式开发模式,界面设计人员不需要研究座舱显示系统的具体控制逻辑,由座舱显示系统内核软件进行管理。在用户界面需求发生更改时,只需变更用户自身对应的定义文件,就可实现相应显示功能的更新。

3) 开发流程运行阶段:ARINC 661标准将CDS的相关实现3个阶段:定义文件、数据加载、运行,定义的内容包括各类事件、消息及其传输格

式。简化了设计过程并保证了显示设计的开放性:不同的系统、可以用不同的设计工具、不同的显示界面均可以实现在同一显示系统内的集成。

4) 更新与优化支持:随着使用需求及航电技术进步,2017年发布的第六版的ARINC 661标准已经新增了滚轮、触控等最新交互接口,这些功能已在新研制的机型中应用,原有的接口可以较好的保持使用。

5) 通过标准化接口的定义:降低了研发和后续的升级维护成本,将画面显示与画面控制分离,设计任务划分清晰,避免了耦合更改和重复性的开发工作,降低了研发和维护成本。

### 1.8 机载信息网络安保技术

飞机系统信息安全和网络安保技术,包括飞机系统安保威胁分析、安保体系架构设计、安保防护技术、安保适航等方面。根据机载系统功能及信息架构确定安全需求和策略,建立相应层级和分区的网络安全域,保护关键资源免受未经授权的访问、恶意攻击和网络威胁的侵害。主要包括:

#### 1) 机载信息安保环境

随着民机信息化水平的提升,空地融合、信息共享、自动化交互等深度功能的发展,在带来巨大优势的同时,需要关注来自人为操作攻击的威胁,需防止非法访问、泄漏、破坏、篡改数据或数据接口等人为因素引起的风险。相关信息网络包括地面网络部分和飞机网络部分。由机场网络、航空公司网络、互联网络、机场无线子系统和航空公司数据加卸载子系统等地面网络提供基础的网络、信息和安全服务。

#### 2) 网络安保体系架构设计及防护技术

机载系统中潜在的安保脆弱性,在受到威胁源进行非授权电子交互攻击时,会使飞机产生不安全的状态,机载安保防护设计主要包括:

① 机载信息安保开发过程控制。机载信息安保体系定义在设计、开发、集成、运行和维护过程中的组织架构和管理模式,以确保研制过程符合规章和需求,避免在研制和运行过程中引入不安全因素。对信息系统风险评估相关信息安全策略、信息安全组织、资产管理、物理与环境安全、人员管理、通信安全、访问控制、系统开发维

护、符合性等方面进行管控。对风险识别、风险分析、风险评定、风险处置等基本要求及方法进行定义。

② 机载信息安保体系架构设计。根据综合业务及机载网络安保的需求,分析运营商、机场、飞机制造商、飞机设备供应商等研制和运营环节,根据适航及工业规范要求,通过分层分区控制、安全网关、安全加密等技术,设计形成相应的综合业务网络安保及互联架构。满足机载系统对外部网络环境风险、威胁和攻击防护的要求。

③ 机载信息安保防护技术。根据机载网络应用及威胁环境采用相应的防护设计,主要包括:访问控制,包括身份认证、自主访问控制、强制访问控制与授权机制等技术;安全加密,通过安全可靠的密钥和加密算法,使未授权的用户无法获得被加密的信息内容;虚拟专网,在公用网络基础上,部署相应的服务器和客户端,建立端到端的数据传输加密交换信息;建立入侵检测和入侵防御、病毒防护、介质防护、日志审计等防护技术,确保机载系统的安全。

### 3) 网络安保适航

安保过程适航:包括适航安保过程规范(DO-326A)中相关安保活动的详细过程,以及在每一个过程阶段安保的输入、输出和符合性目标要求。处理蓄意非授权电子行为对飞机安全性的威胁识别、评估和审定的要求,并与其他现有的指南、咨询材料一起作为安保适航过程的评估指南。建立飞机和系统可接受的适航安保风险评估。

安保风险评估:适航安保方法和考虑(DO-356)包括安保范围定义、安保风险评估、安保措施、安保日志及告警、安保有效性和安保保证等方面,在执行适航安保过程中采用的方法及工具,形成安保风险评估详细的输入、输出和结论。随着新特征的部署以及安保威胁的发展,适航安保将相应的持续发展和改进。

安保持续适航:持续适航的信息安保指南(DO-355)定义了飞机运行、支持、维护、管理过程,以及所涉及的组织对维护飞机信息安全的责任和规范要求。包括主软件、飞机组件、飞机网络访问点、地面支持设备、地面支持信息系统、数

字证书、飞机信息安全内部管理、操作飞机信息安全程序、操作者组织风险评估、操作者角色和职责、操作者培训等方面描述了在飞机运行和维护过程中的安保职责和规范等方面的要求。

## 1.9 航电系统及与飞机系统的综合试验验证

航空电子系统全系统综合试验,是按照系统设计的拓扑视图、逻辑视图和功能视图,自底向上,逐步将航空电子系统内部的所有子系统软硬件接入进来,完成接口检查、功能综合与任务综合,对综合中发现的问题进行修改完善和设计迭代,使整个系统满足所有设计要求。

系统硬件综合不是等所有的子系统设备交付到系统综合实验室一次性完成,而是伴随着全系统功能综合来进行。

航电全系统功能综合包括系统内部的功能测试以及航电系统与所有其他飞机系统的交联测试。首先按照系统的功能定义对系统的各项功能逐一进行综合测试,不仅要测试系统的功能、逻辑和接口的正逻辑,还要测试相关的负逻辑,测试功能之间的耦合性、独立性,以及功能的健壮性、相关的系统综合性能等。在系统功能测试时要考虑环境对系统的影响。在航空电子系统综合测试的基础上,进行航空电子系统与电源系统、飞控系统、燃油液压环控等机电系统的综合测试。

全系统综合采用“增量式”的综合方法,综合过程是一个循序渐进、迭代的过程,在核心系统完成运转后,真实子系统再一个一个地加入,其他相关的子系统由仿真器替代,综合的范围依次增大,对错误进行定位和修复,最终完成整个系统的综合。航电全系统综合试验验证过程见图14。

## 1.10 大型客机电磁环境效应防护

随着民用客机电子系统功能、性能及重要性和复杂度的提升,电磁环境效应防护设计成为民航运营安全性的重要方面,客机电磁环境效应主要包括:电磁兼容与电磁干扰、闪电间接效应、高强度辐射场、沉积静电、静电放电等方面,与其相关的包括闪电防护的CCAR-25.581条款、电搭



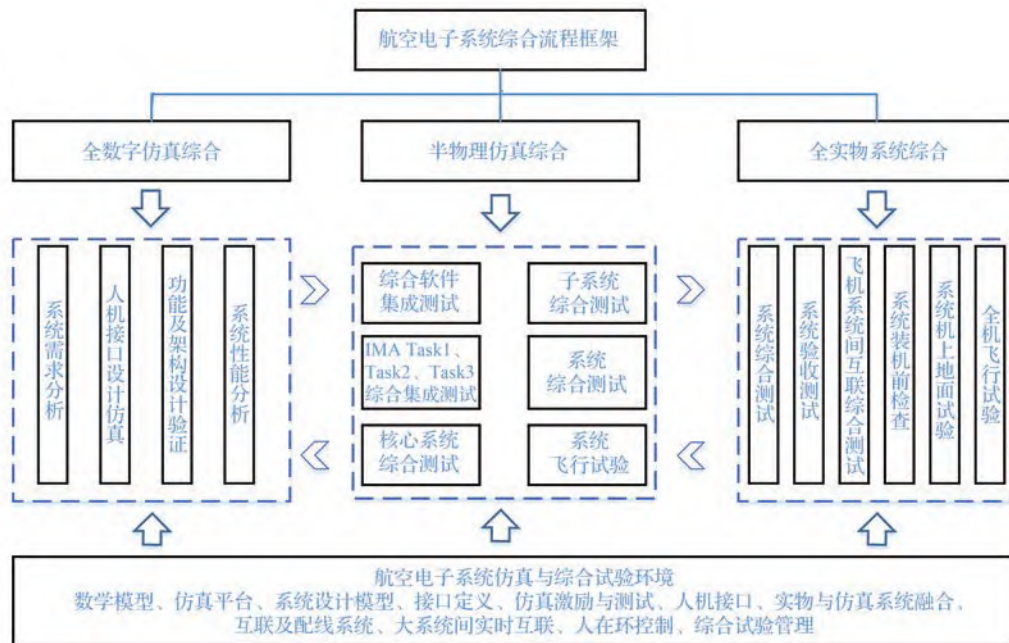


图 14 航电全系统综合试验验证过程

Fig. 14 Avionics full system comprehensive test verification process

接和防静电保护 CCAR-25.899 条款、系统闪电防护 CCAR-25.1316 条款、高强辐射场防护 CCAR-25.1317 条款、电气设备及安装 CCAR-25.1353(a) 条款、电子设备 CCAR-25.1431(c) (d) 条款和相关的专用条件。

按照系统工程的设计流程,开展电磁防护的设计与验证并进行过程的控制与管理,制定设备/部件、结构、电源特性、电搭接等设计与控制的防护要求。详细定义设计研发阶段、试验和取证阶段、生产阶段、运行阶段的工作及相关控制要求。进行相关的安全性分析、地面试验、飞行试验、符合性流程。相关的设备按照 RTCA/DO-160、HB6167 开展机载设备环境试验项目、等级要求及试验方法开展试验。

电磁兼容性预测分析,需建立干扰源模型、传输特性模型、敏感度阈值模型等是其中的主要关键技术。进行天线的布局设计,分析各天线的方向性图、隔离度、互锁及分时使用等需求,如图 15 所示<sup>[7]</sup>,线束分类及敷设、屏蔽接地、电搭接等方面的要求。包括便携式电子设备 (Portable Electronic Devices, PED) 的电磁兼容性设计分析及测试。

外部安装设备、结构需考虑闪电直接效应,燃油箱闪电防护与验证不在电子系统中考虑。电子系统研制主要考虑闪电间接效应,对应于 CCAR25.1316 条款,按 SAE ARP5414 的要求,根据飞机在遭遇闪电环境时机身表面的电磁分布确定飞机的闪电分区,如图 16 所示。闪电防护参考 SAE ARP5415 和 SAE ARP5416、SAE ARP5412 确定飞机试验的瞬态电平、试验波形等开展试验及分析。

高强度辐射场 (High Intensity Radiated Fields, HIRF) 主要面对地面及空中的雷达等电子设备产生的辐射,同时飞机关键系统的电子设备易受高强度辐射场的影响,对应 CCAR-25.1317 的条款,按照 SAE ARP5583 等要求,对 10 kHz~40 GHz 的电磁环境进行安全性评估及防护,通过电搭接、屏蔽、滤波、架构设计、硬件及软件设计、布局等措施,设备通过相应的测试及验证,保障飞机安全。

静电防护设计,空气中的粒子和飞机表面在接触分离的过程中会发生电荷转移,从而使飞机表面产生沉积静电,在飞行中容易产生静电放电现象,影响飞行安全,其频谱范围 0.1~3 000 MHz,对应

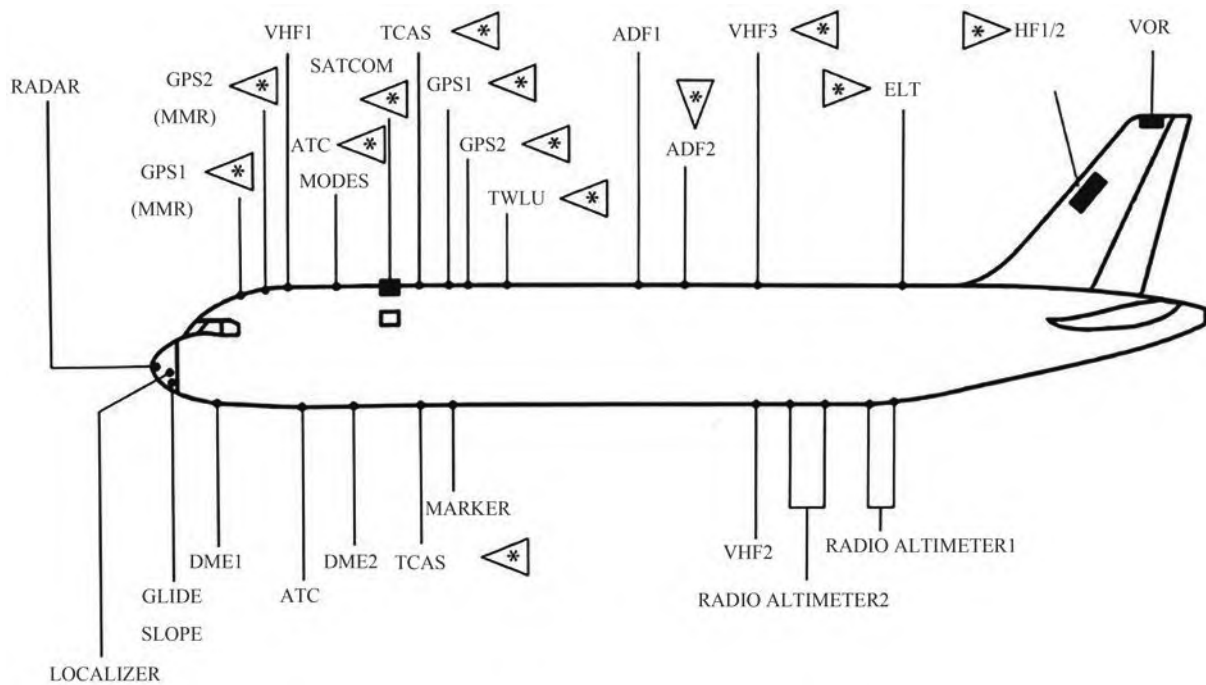

 图 15 A320天线布局图<sup>[7]</sup>

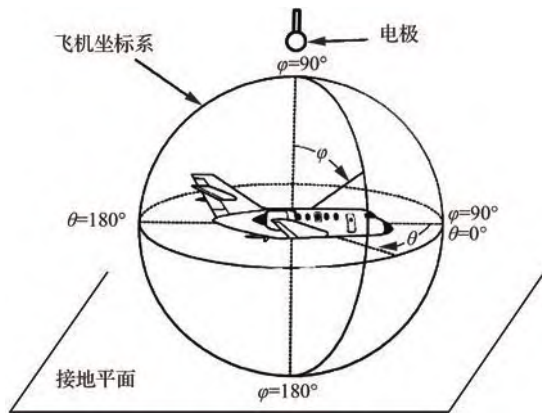
 Fig. 15 A320 antenna layout<sup>[7]</sup>


图 16 棒电极试验示意图

Fig. 16 Schematic diagram of rod electrode test

的CCAR-25.899条款,按照SAE ARP 5672的相关要求,通过搭接、加装静电放电器,进行静电防护设计及地面试验和飞行试验,使飞机满足安全要求。

大气中子单粒子效应,其能量分布从0.025 eV的热中子到100 MeV以上的高能中子。高能中子诱发集成电路、半导体分立器件产生单粒子翻转(Single-Event Upsets, SEU)、单粒子瞬态(Single Event Transients, SET)等现象,会导致电子设备发生不明原因、无法复现的故障。

大气中子中的热中子与半导体材料中的硼同位素( $^{10}\text{B}$ )发生核反应,可产生1.4 MeV的阿尔法粒子,诱发半导体器件发生单粒子效应。随着半导体工艺集成度的提高,热中子诱发的单粒子效应对航空电子设备影响增大。按照GB/T34956、IEC TR 62396、SAE AIR 6219的相关要求,开展相关的电子设备防护设计、分析、试验、防护优化、影响评估等方面的设计研究工作。4架飞机在不同地区测得的大气中子谱如图17所示。

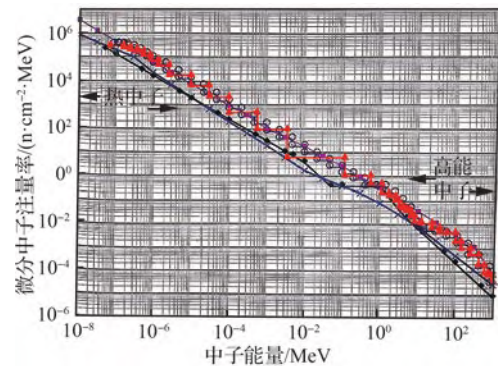


图 17 4架飞机在不同的地区测得的大气中子谱

Fig. 17 Atmospheric neutron spectra measured by four aircrafts in different areas

### 1.11 航电系统集成研制架构组织及分包界面

根据国产大型客机的研制实践,进行了型号系统研制工作的组织,由航电全系统向下分解为工作包、分系统、设备及相关成品件不同的层级,主要包括:①根据航电系统的功能逻辑及交互关系,分为若干个工作包,由包级供应商承担相关包级的工作;②工作包内分为相应的ATA分系统及相应的设备,对应相应的分系统及设备级需求及规范;③供应商完成设备需求向组件及软硬需求的设计分解;④综合集成阶段实现由底向上集成,进行包级的相初步测试工作;⑤最后完成航电系统级集成及全机级集成。由试验室试验、到机上地面试验、研发试飞、取证试飞等相关工作。

在分包及选择过程中,综合集成架构的先进性、产品的先进性水平、供应商能力、商务评估、责任界面、研制进度、后期支援、售后服务等各方面综合因素进行决策和取舍。工作包中包括了不同层级的局部集成工作。商务评估中包括了研发成本与后续批产及运营成本的综合权衡。

### 1.12 大型客机综合航电系统先进功能发展趋势

驾驶舱人机接口采用触控、声控技术,高清大屏,通用性控制理念设计、图形化显示控制风格、智能化设计、增强视景/合成视景等新型的态势展示。

IMA采用开放式架构,高性能处理、高度集成化、高速网络、分布式(Distributed-IMA, DIMA)处理架构的进化;高可用性、高完整性提升。IMA系统与飞机系统架构综合更加密切。

客舱系统提供高速接入,飞机信息系统为全机提供先进的健康管理功能,提升飞机的可靠性和维护性能。

无纸化运行技术的优化,电子飞行包技术增强、电子化文件、手册、图表资料查询、电子航图、图形气象、电子检查单、飞行性能计算、电子化飞行日志、电子化视频监控等。

非飞行关键领域人工智能(Artificial Intelligence, AI)辅助智能化的先期应用,包括语音及图像识别等技术。

## 2 航电各分系统功能技术发展状态与趋势

### 2.1 驾驶舱显示与控制技术

在“玻璃化驾驶舱(Glass Cockpit)”<sup>[9]</sup>的设计理念下,以面向飞行任务管理为目标,具有相关的自动化并逐步向智能化处理能力进化的驾驶舱显示与机组告警系统,能够显著简化飞行机组操作任务,引导和帮助飞行员根据任务场景合理分配注意力,管理操作任务,实现更人性化的人机职责分配,以此提升驾驶舱内的工作效率,减少人为差错<sup>[10]</sup>。在“玻璃化驾驶舱”内涵的基础上,工业界对驾驶舱显示与机组告警系统逐渐形成共识,即它是实现“玻璃化驾驶舱”时为飞行机组提供的人机交互平台。伴随着新型人机交互系统的出现,人与机器的分工关系发生了彻底变革<sup>[11]</sup>。

在A380飞机上,空客公司首次实现了虚拟控制技术在商用飞机驾驶舱的大范围应用,如图18所示。其摒弃了20世纪70年代发展来的多功能控制和显示组件(Multi-function Control and Display Unit, MCDU)这种不够直观的人机交互技术,CDS被打造成近乎整个驾驶舱的人机交互平台,并进一步形成了ARINC 661<sup>[12-13]</sup>作为驾驶舱显示系统(Cockpit Display System, CDS)的系统架构和实现技术标准。此后,为了进一步提高显示信息的集成度,空客公司还在A350XWB上首次采用了大尺寸液晶显示器,进一步增强了操作任务管理的灵活性。

在B787飞机上,波音公司采用了“抬头操作”(Looking Forward Forever)设计理念,突出了CDS作为人机交互平台的地位,相较于前序



图18 A380飞机驾驶舱显示系统人机接口

Fig. 18 Human-machine interface of CDS on A380 aircraft



机型大幅度地扩展了虚拟控制技术的使用范围,功能集成度和交互灵活性较前序机型显著提升。同时,作为波音系列飞机里实现了虚拟控制在驾驶舱内的大范围应用的机型,在B787飞机上,波音公司将CDS作为整个驾驶舱飞行、导航、通信、系统管理相关信息的人机交互平台。五块相同尺寸的大尺寸液晶显示器几乎充满了飞行员的前向视野,使所有信息都可以显示在飞行机组前向视场内。由于显示面积的扩大,B787飞机注重信息内容的集成和布局优化,使简化驾驶舱的信息组织结构和机组操作流向成为可能<sup>[14]</sup>,见图19。



图19 B787飞机的CDS布局

Fig. 19 CDS layout on B787 Aircraft

从帮助飞行员管理操作任务,提升人机工效,降低工作负荷,主动管理人为差错等多个角度开展驾驶舱显示与控制设计,以大尺寸液晶显示器及ARINC 661标准实现信息集成和管理,通过虚拟控制技术的应用实现功能的灵活扩展,建立以CDS为中心的航电系统人机交互平台等这些典型的先进设计特征,国内在大型客机CDS的设计和集成技术领域已基本达到了国际主流技术水平。

## 2.2 驾驶舱触控和视景增强技术应用及发展趋势

显示触控技术已成为未来显控集成技术的发展趋势<sup>[15]</sup>。特别是B777X飞机(两点电阻屏触控技术),B737MAX-10飞机(单点电阻屏触控技术),A350-1000飞机(两点电容屏手势触控技术),G500/600/700飞机(单点电阻屏手势触控

技术和顶控板触控化)等最新机型对显示触控技术的应用,表明这种技术在未来航电系统产品上将越来越普遍。

由于触控技术本质上仍属于虚拟控制技术的一种,它可将实时性要求低和不直接影响飞行安全的操作全部纳入适用于分时交互的虚拟控制界面中。一方面,这些显示界面可以比传统的指示灯、标识、物理器件提供更加直观和丰富的外观;另一方面,即使是单点按压触控操作,也可以根据按压的时间、力度、外观反馈以及配合通用物理控件(例如,多层旋钮)等途径,扩展飞行员的操作方法,实现更加自然的交互行为<sup>[16-17]</sup>。与此同时,在物理控制和传统的虚拟控制之外,扩展出的独立的触控交互通道,将进一步提高飞机的签派灵活性和可靠性。

增强型飞行视景系统(Enhanced Flight Vision System, EFVS)在夜航及恶劣天气等低能见度条件下,将结合安装于机头附近传感器的输入,通过采用多个红外波段传感器和低可见光摄像头的图像数据融合,把图像显示在平视显示器(Head Up Display, HUD)或下视显示器(Head Down Display, HDD)上,可以帮助机组在裸眼无法看到的情况下,及时建立光学目视参考,清楚的识别跑道和周边环境,提高情景意识。提高低能见运行的安全性。经特别批准后的EFVS运行,可以在天气条件恶劣的机场起降,减少对地面导航设施的依赖,减少飞机在空中的滞留时间和航班延误,有助于飞机节能减排,见图20。

## 2.3 驾驶舱显示与控制设计关键技术

驾驶舱显示系统的功能设计,首先应当满足航空运行环境的要求,提供满足运行要求所必需的重要功能和性能参数的显示、运算以及逻辑处理功能。显示信息的综合设计首先要考虑如何根据操作任务的特性(如时间、空间、逻辑、操作程序等)合理组织信息,同时还需考虑如何根据飞行机组的职责分配和人机工程学要求,划定显示格式和布局,以及飞行员在不同操作场景下调阅/切换信息的需要。随着系统集成度的提高,在发生局部失效时,容易导致集成显示信息的共模失效,信息布局对管理操作任务的性能有着重



图 20 目视可见光和EFVS图像对比

Fig. 20 Comparison of visual flight and EFVS images

要影响,如果诱发工作负荷的增加,在特定场景下会导致飞行机组丧失必要的任务情景意识<sup>[18-20]</sup>。信息重构技术是应对此类问题的重要手段。结合大型客机飞行机组的职责分配和人机工程学设计的特点,在主仪表板布置4块15英寸正屏显示器的布局,以正常操作流向保持、压缩格式、重构操作、职责分配一致性等方面衡量信息重构性能时具有比较优势<sup>[21-24]</sup>。先进驾驶舱显示系统应具备以下特点:

1) 显示信息集成度很高,显示信息的管理须简单、灵活,有利于优化信息的组织和操作任务流向,有利于减轻飞行机组的工作负荷。

2) 采用了虚拟控制技术,在显示与控制功能融为一体后,使得交互过程更加直观,并与传统的物理控制形成互为备份的交互通道。

3) 围绕显示与控制所提供的交互框架及其灵活的资源配置能力,构建航电交互平台,方便扩展其它系统的人机交互功能。

4) 显示信息管理结合控制功能的冗余设计使飞机具备灵活的签派放行能力。

对于驾驶舱显示系统可以分为交互平台和应用2个层次开展设计。交互平台设计中包括:

- 1) 显示管理。
- 2) 基于ARINC 661标准的GUI。
- 3) 物理控制。
- 4) 基于ARINC 661标准的系统架构和接口。
- 5) 非ARINC 661标准的系统架构和接口。

由于大型客机的功能更复杂,对集成度的要求更高,而飞机上的网络资源有限,因此,在驾驶舱显示系统领域发展出了基于ARINC 661标准的系统架构和接口设计技术。这种技术的核心

理念是采用轻量化的用户端/服务器(Client and Server, C/S)系统架构,可极大地减少对视频数据的传输需求,提高交互过程的实时性。以ARINC 661规范为基础,驾驶舱显示系统具备提供更为灵活的窗口管理能力,即安装在驾驶舱内的每个显示器具备同样的软硬件构型,显示的信息由显示器以外的显示管理模块负责调度。

基于ARINC 661标准的GUI需要定义通用的按键、菜单、对话框等控件,它们是构成结构化信息表达的交互界面的基础,并且要确保对所有使用了驾驶舱显示系统资源的用户系统之间具有一致性。

对于通过任务场景分析,识别出的快速操作功能,如气压基准调定、导航显示(Navigation Display, ND)的距离圈选择等,首先要考虑以物理控制形式实现。虚拟控制还需配套相应的物理控制装置(如键盘、光标控制器等)。

在交互应用层次,典型的包括主飞行显示(Primary Flight Display, PFD)、发动机显示(Engine Display, ED)、ND、电子检查单(Electronic Checklist, ECL)等具体实现飞行、导航、通信、系统管理4个主要飞行机组的职责,是飞行机组完成相关操作任务而依赖的具体功能。

PFD集成了众多短周期、动态性强的飞行信息(包括:空速、姿态、自动飞行模式通告、交通与地形规避导引等),这些信息在起飞、进近、着陆等高任务负荷的飞行阶段上直接影响飞机的操纵安全性。因此,应方便飞行机组能以最快捷的方式获取。除高实时性要求的传统信息外,为降低飞行机组在终端区内工作负荷,PFD还可扩展水平状态指示(Horizontal Situation Indication,

HSI),在临近PFD的区域增加航班号、通信频率、ATC数据链消息等信息。这些信息内容的集成能有效减少飞行员视线扫描的距离,方便飞行员把注意力集中在前向最优视场内<sup>[25-28]</sup>。

ED中的发动机推力和气动构型与“飞行”职责密切相关。在加速、起飞和爬升等需要快速获得速度、净空和捕获高度的飞行阶段上,推力以及维系推力的发动机工作状态是决定飞行安全的重要信息<sup>[29]</sup>。此外,集中化的机组告警信息与“系统管理”相关,在机载系统发生故障、使用、运行状态达到某种边界条件时,触发的告警信息需要飞行机组立即知晓。从“飞行”和“系统管理”职责所对应的任务要求上讲,ED中的信息既有实时性要求,又需要方便飞行机组成员们同时观察和讨论,促进他们对系统状态理解的一致性,从而也有利于机长做出合理决策<sup>[30]</sup>。

ND集成了飞行计划、导航数据库、空中交通态势、气象和地形等与飞行轨迹相关的信息,是“导航”任务的首要信息来源。“导航”任务是一个计划性很强的连续稳定过程,相对于PFD和ED在动态实时性和飞行安全方面的严格程度,ND具备分时显示的条件。尤其在采用大尺寸显示器将小范围的导航信息与PFD集成的情况下更是如此<sup>[31]</sup>。

ECL应主要按飞行阶段展开的正常场景,以及为应对系统故障的处置程序,辅助飞行员管理和检查飞机和系统状态。ECL的检查项应具备自动感知飞行员操作状态的能力。此外,结合告警系统的逻辑设计,ECL还需一定程度上为飞行员的处置动作提供建议,当飞行员处置完成后,还应评估出对后续飞行任务影响并反馈给飞行员。

交互应用的核心设计原则是与特定场景和任务需要相关的信息应根据操作逻辑尽可能地整合在一起,这样才能更直观地使飞行员快速、准确地掌握飞行态势,减少飞行员的工作负荷。

## 2.4 综合模块化航电技术状态

IMA是当前航空电子系统架构发展的最新成果,作为现阶段大型客机的典型代表,采用IMA架构的机型包括波音B777X/787和空客A380/350以及中国商飞的C919等机型。虽然这些飞机都采用了IMA架构,但是它们的实现方

式却不尽相同,差异性主要体现在数据处理资源的组织形式和物理布局上,IMA架构可分为2大类,即集中式和分布式。波音的飞机多采用分布采集、集中处理的方式,图21给出了B787飞机的航电顶层架构<sup>[32]</sup>,该架构使用了两个公共计算资源机柜(Common Computing Resource, CCR),以及通过远程数据集中器服务实现的分布式I/O接口。每个CCR包含多个独立的GPM和两个ARINC 664 P7交换机。GPM的核心软件为驻留应用程序提供了健壮的分区环境和基础结构,包括基于ARINC 653标准的I/O服务、健康监控和非易失性文件存储。计算资源的时间窗口、周期、内存分配和I/O需求通过配置文件传输给核心软件,所有这些配置通过分区机制强制执行。

空客多采用分布式架构,图22给出了A350飞机的顶层架构,该架构由2类22个核心处理和输入输出模块(Core Processing Input/Output Modules, CPIOM)、2类29个公共远程数据集中器(common Remote Data Concentrator, cRDC)和14个交换机构成,按飞机系统功能配置专用CPIOM并就近部署。

虽然波音和空客采用了不同的IMA架构,但是支持该架构的核心网络都是通过ARINC 664 P7 AFDX协议规范网络互联而成的,该网络由以太网通过增加确定性、冗余机制等定制而来,定义了实时性的性能保证机制,具有高带宽、高可靠性、低延迟和良好的扩展性等特点<sup>[33]</sup>。

对比上述2种架构:B787的处理资源与I/O资源实现了物理隔离,处理器资源相对集中安放并便于重点保护,但也会因机柜体积较大对安装和散热等要求带来挑战;而A350的处理资源在物理上分散布局于全机各处,具有分布的灵活性和故障传播抑制特性,但需要多种类型的CPIOM支持。2种架构的相似之处在于它们都实现了I/O接口处理向远程传感器和作动器或接口设备靠近,可以减少I/O数据在传输过程中受到干扰和错误影响,也可降低连接线缆的数量并减少布线的复杂度。

## 2.5 综合模块化航电技术研究及发展趋势

IMA技术的研究涉及自底向上的各个层级。



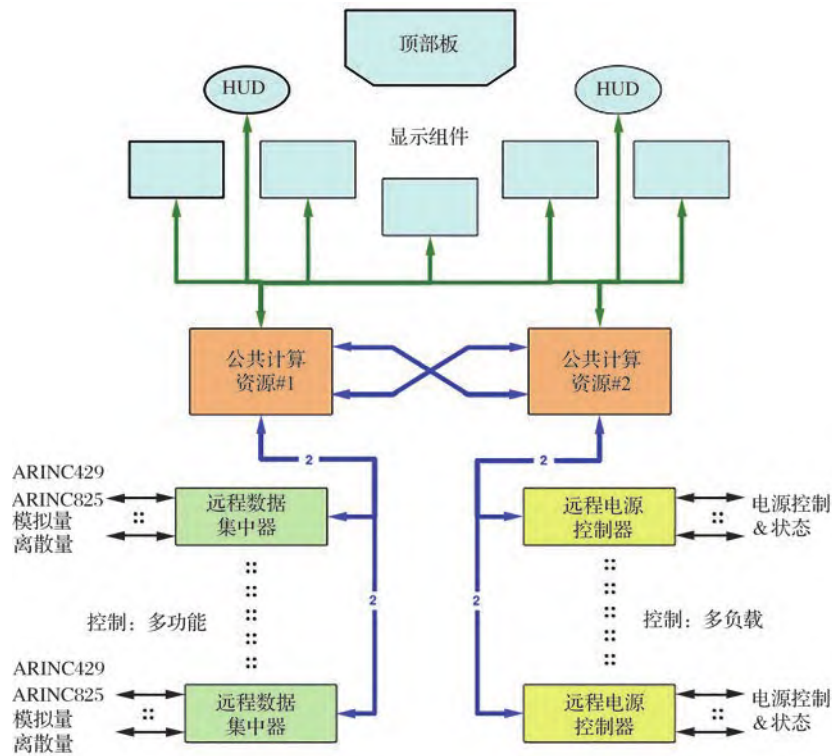


图 21 B787 航电 IMA 架构

Fig. 21 B787 IMA architecture

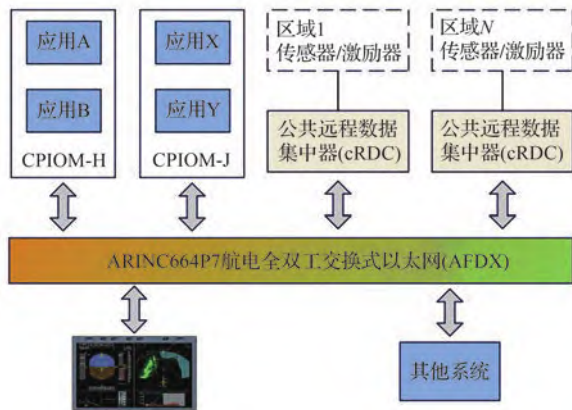


图 22 A350 IMA 顶层架构

Fig. 22 A350 top-level IMA architecture

在 IMA 系统层,需研究系统架构定义和确认的方法;在 IMA 平台层,涉及操作系统的开发和相应的计算机硬件环境,这是整个 IMA 系统得以高效运行的基础。目前,满足 ARINC 653 规范的操作系统及运行的处理机硬件和满足 ARINC 664P7 规范的机载网络已在当前先进的大型客机航电系统上使用,更新的计算机和网络技术也在

不断的研制过程中。新技术研究主要涉及智能化、多核处理、单片系统或片上系统(System on and Chip, SoC)、微内核操作系统等方面。针对智能化,智能决策的安全性、稳健性、可信性和实时性都是研究的重点;多核处理器在航电系统应用的挑战,除面临存储墙、并行算法执行、核间互操作与通信等嵌入式开发常见问题外,还要解决机载计算机系统对实时性、安全性的需求;集成电路技术的发展使得完成某个功能的嵌入式计算机系统集成到一个芯片,即使 SoC 成为可能,片上系统在航空项目上已有应用,工业界正研究在大型客机高安全等级中应用的可行性;随着对机载操作系统功能 and 安全性要求的提高,内核形式化验证成为一个重要方向。其支持多核处理器,具备支持多级安全等众多机载要求,与虚拟化相结合的微内核是当前机载操作系统研究的热点。

IMA 平台的另一个研究方向是机载数据网络传输,需要解决在资源约束的条件下实现在确定时间内的最大传输的技术难度和挑战,而时间

触发协议(Time-Triggered Protocol, TTP)、时间触发以太网(Time-Triggered Ethernet, TTE)技术可有效解决这一问题。TTP是当前所有基于时间触发的确定性网络通信技术中首个被美国汽车工程师协会(Society of Automotive Engineers, SAE)进行标准化的通信协议(SAE AS6003),开展的基于1553B(AS6003/1)物理层和基于RS485(AS6003/2)物理层的TTP协议实现的研究,将有利于推动TTP总线在机载总线中的应用。

除了前述介绍的2个代表性机型的两类IMA架构之外,还有一类称为分布式复杂IMA系统的架构,如图23所示,这种架构可认为是多个IMA子系统互联而成。将不同的IMA子系统分散布置于机身各处,该架构对全局总线通信系统的确定性、可靠性和容错能力提出了更高的要求,而且更加强调可重用技术、系统重配置机制、高性能多核处理、增量升级和认证等,可认为该类IMA系统是新一代航空电子系统一个新的发展方向<sup>[34]</sup>。

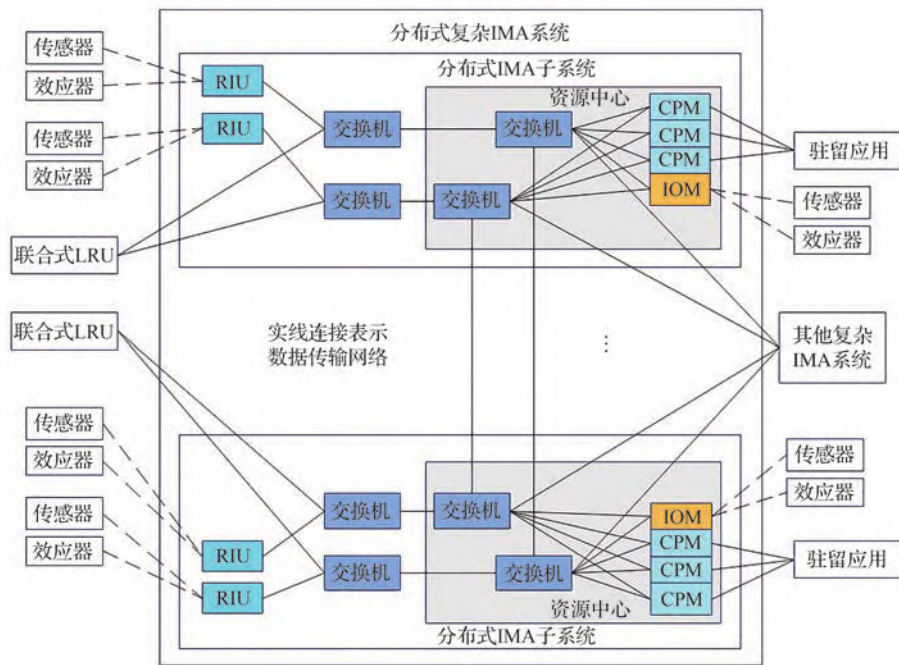


图 23 分布式复杂 IMA 系统

Fig. 23 Distributed complex IMA system

## 2.6 综合模块化航电集成关键技术

由于 IMA 架构的资源共享属性,使得 IMA 系统的开发需解决相应的关键技术和挑战<sup>[35-36]</sup>:

- 1) IMA 平台失效或故障会导致多个功能的异常、丧失或部分丧失。
- 2) 某些失效可能传播和衍生出多个失效状态。
- 3) 资源的设计缺乏独立性(例如,同样的芯片、近似的安装位置等),导致相同的几个模块易受共模失效或设计错误的影响。
- 4) 平台集成各独立开发的驻留应用后,可能

存在与各自预期行为不符的情况。

5) 资源管理缺陷导致潜在的存取冲突和确定性的缺乏,导致非预期的系统行为。

6) 隔离机制或配置缺陷导致无法保证关键功能之间的分区隔离。

这些问题对系统的安全性评估提出了新的要求,需要特别关注共模故障、级联故障和组合故障对飞机安全性的影响,工业界采用 ARP4761 A 所推荐的安全性分析过程和方法进行详细的分析和评估。更重要的是在设计时就要考虑这些可能的问题,尽可能地从设计源头就避免这些问题产生的根源。从安全性分析的角度看,驻留在

IMA平台的飞机功能之间的隔离等级和独立性等同于在联合式架构中的实现。而功能隔离主要依赖于3大关键技术:

1) 资源分配技术:通过对共享资源的合理和正确分配,阻止驻留应用之间的不利干扰。由于IMA系统涉及的数据量特别巨大,对资源的分配一般都通过专用的工具执行,用于装机软件相关的专用工具需要进行专门的鉴定。

2) 鲁棒分区技术:通过鲁棒分区,确保分区冲突得以隔离、探测或缓解。通过分区架构技术,为功能或应用提供必要的隔离和独立性以确保仅有预期的耦合发生。分区技术通过时间和空间上的隔离将多个应用程序限制在属于该应用自身有限的处理器时间和空间资源中,避免相互之间的干扰。而鲁棒分区则是确保使用共享资源的飞机功能和驻留应用在所有环境中(包括硬件失效、硬件和软件设计错误、或异常行为)预期的隔离得以实现的途径。

3) 故障抑制技术:通过建立合理的故障抑制机制,阻止驻留应用之间的故障传播。

IMA架构相对于传统的联合式架构具有许多特殊性,这些特殊性是由IMA平台资源的共享性导致的。审查方接受由SAE/ARP4754A或SAE/ARP4754B<sup>[37]</sup>以及RTCA/DO-297所定义的过程保证方法作为符合性方法,用于指导IMA系统的开发。针对IMA系统的适航取证,根据RTCA/DO-297提出的要求,有文献也进行了较为深入的研究,如基于IMA多方协同下的适航认证工作策划考虑<sup>[38]</sup>、IMA增量式认可与技术标准规定(Technical Standard Order, TSO)取证的研究<sup>[39]</sup>等。

审查方审定过程和申请人取证的过程是同一项任务的两个方面,对于IMA系统的审定过程,审查方推荐采用DO-297所提出的增量式认可的方式开展<sup>[40]</sup>。认可意味着审查方对申请人提交的数据、证据和等效声明满足适用的指导或要求,而增量式认可是审查方给予申请人信任的一种渐进的且逐渐增强的过程,这一过程要通过认可模块、应用和装机前的IMA系统符合特定的要求,最终实现整个系统的适航认证。增量式认可是在既有IMA系统中提供集成新应用或新模块的能力,且

无需重复认可既有的IMA系统。在较低层级任务的认可工作没有完成之前,不会递进到较高层级任务的认可工作。图24说明了IMA系统分解结构与DO-297的审定任务之间的对应关系。新研飞机需考虑四层级开发和审定任务:

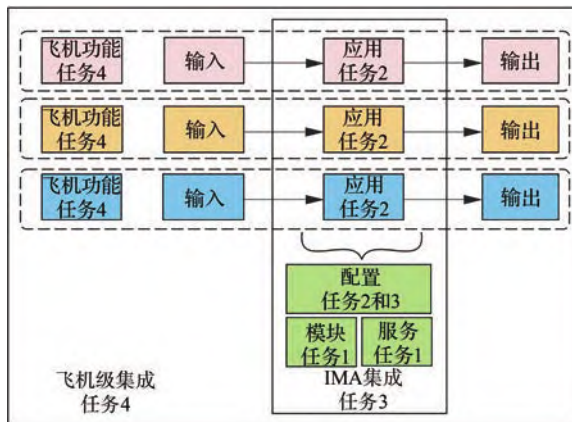


图24 IMA系统分解结构与DO-297的审定任务之间的对应关系

Fig. 24 Corresponding relationship between IMA system breakdown structure and DO-297 certification tasks

**任务1** 需要开发由应用共享的资源/服务以及适当的关联机制(分区、健康监控等),并需要为IMA平台用户记录这些资源、服务和机制。

**任务2** 需要从资源的使用情况和执行约束方面对应用进行特性描述,并需要验证应用是否满足平台的使用范围要求。

**任务3** 需要验证驻留的整个应用集是否符合平台使用范围的要求,以及是否正确实现了应用的资源分配和平台配置请求。

**任务4** 与非IMA系统的主要过程相似。

对于IMA系统的研制,除了资源分配、鲁棒分区、故障抑制、增量式认可等关键技术外,在确定IMA平台资源能力之前要进行资源需求的捕获与收集工作,确定全机系统对IMA平台的资源总需求,以确定IMA平台资源能力的设计目标,资源需求的确定需要较长的时间,并有多次的迭代和更改。另外,操作系统的选择或开发、处理器的选择或开发、高完整性端系统的选择或开发都是IMA系统开发过程中的关键,应作为重点关注并持续跟踪其状态。



## 2.7 飞行管理技术状态

飞行管理系统是大型客机航电系统的重要组成部分。现代大型客机的飞行管理系统(Flight Management System, FMS)可以覆盖从起飞、爬升、巡航、下降、进近和复飞等各阶段,提供基于数据库和传感器数据的水平和垂直飞行计划、综合引导、航迹预测和性能管理等多种功能。因此,FMS

成为大型客机运行能力的决定性要素<sup>[41]</sup>。

FMS在交联协同自动飞行、数据链、导航等系统及设备的过程中处于核心节点,是飞行员的重要人机接口之一。FMS与驾驶舱显示系统、自动飞行系统交联,协同实现基于性能的导航(Performance Based Navigation, PBN),提高飞机的运行能力和效率,并在此过程中显著降低飞行员的工作负荷<sup>[42]</sup>,见图 25。

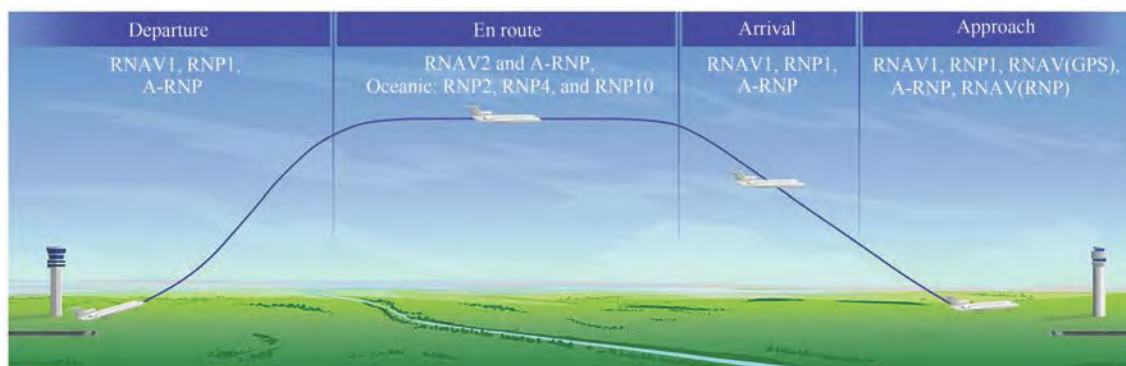


图 25 各种 PBN 程序在每个飞行阶段的应用<sup>[42]</sup>

Fig. 25 Application of various PBN procedures in each phase of flight<sup>[42]</sup>

FMS作为体现飞机运行能力的“大脑”,其功能的升级对飞机适应未来航行体系有着至关重要的作用。为了满足日益增长的航空客运市场,扩充空域交通容量、提升运营效率,以及节能减排等方面的需求,随着空管与空域运行技术的发展,空域运行将由传统的空中交通管制(Air Traffic Control, ATC)体系逐步演化为通信导航监视的空中交通管理(Communication Navigation Surveillance/Air Traffic Management, CNS/ATM)新航行体系。为了适应这一体系的进一步发展,尤其是空域扩容和运行效率提升的实际需要,美国和欧洲根据自身的空域条件和基础设施特点,分别提出了“下一代空中运输系统”(Next Generation Air Transportation System, NextGen)和“欧洲单一天空”(Single European Sky, SES)两大面向新航行体系的计划,计划中都明确提出了机载系统配合空中交通管理体系升级的要求。中国民航于2009年10月发布了《中国民航PBN路线图》,将PBN实施分为3个阶段,近期(2009—2012)实现PBN重点应用,中期(2013—2016)实现PBN全面应用,远期

(2017—2025)实现PBN与CNS/ATM系统整合,成为中国发展“新一代航空运输系统”的重要基石<sup>[43-44]</sup>。在国际民航组织的框架下,结合国内的实际情况,制定了“航空系统组块升级”(Aviation System Block Update, ASBU)计划。它将基于空地信息管理和协同,对空域管理、流量管理、基于轨迹的运行(Trajectory Based Operations, TBO)、多模式间隔以及基于性能的运行和服务方面制定新的运行概念和技术标准,未来建成现代化的民航空中交通管理系统,这将为下一代FMS的设计引入新的使用场景和更丰富的功能要求。

## 2.8 飞行管理技术发展趋势

性能优化、信息共享、协同决策等是未来FMS功能优化的主要方向。从短期看,在逐步推进的新航行体系下,未来的FMS将会随着机载系统功能优化和航空运行机制优化而相应的持续改进;从长远看,FMS将会在智能与互联方面不断的增强,空地信息融合和互通能力会进一步的提升。

进行机载系统功能及性能的优化,通过飞机气动性能、发动机性能计算及飞管与自动飞行等机载系统的数据综合,提高飞机航迹跟踪精度、优化垂直飞行剖面。功能优化趋势包括:

1) 连续慢车下降,即通过构建完美匹配飞机性能的下降剖面,减少下降过程中的减速板使用,以降低油耗。

2) FMS/发动机控制综合,即通过在FMS与发动机之间共享数据,提升发动机性能估计的准确性,使发动机始终在最优状态下工作。

在新航行体系下,机载端与地面端、机载端系统之间的交互与协同将显著地改善管制员和飞行员的交通态势感知,一些全新的运行机制能够得以应用,从而达到缩小运行间隔、提高管制自动化水平、减少管制人工干预、提高运行效率和安全性的目的。典型的运行机制优化趋势包括:

1) TBO,即在ATM、航空公司和飞机(尤其是FMS)等空域运行要素之间充分共享信息的基础上,采用先进的通信导航监视(Communication Navigation Surveillance, CNS)技术,保证飞机运行轨迹的可预测性、可重复性、可控制性和最优性,在传统三维空间的基础上,增加时间维度,从而以四维航迹的方式管理空中交通流量,提升整个民航运输系统的运行效率,实现基于四维航迹的空域规划、流量管理、冲突探测与规避和自由路径选择等<sup>[45-47]</sup>。

2) 机载间隔管理,即通过集成广播式自动相关监视ADS-B OUT/IN功能,飞行员和机载设备的交通态势感知能力得到进一步提升,根据间隔管理策略,使用FMS提供速度引导、转弯坡度引导、目标跟踪轨迹引导等功能协助机组控制飞机,实现与周围飞机之间自动的安全间隔控制,提升飞机的运行品质和安全水平,见图26。

3) 空地互联,即随着机载高速空地无线通信技术的快速发展,大型客机也进入了互联时代。因此“互联式飞机”的概念也随之推出。现阶段,霍尼韦尔、通用电气和柯林斯等公司先后开展了关于互联式飞机的研究,并提出了互联式FMS等应用技术的概念。互联式FMS实现了其与移动式电子飞行包(Electronic Flight Bag, EFB)的

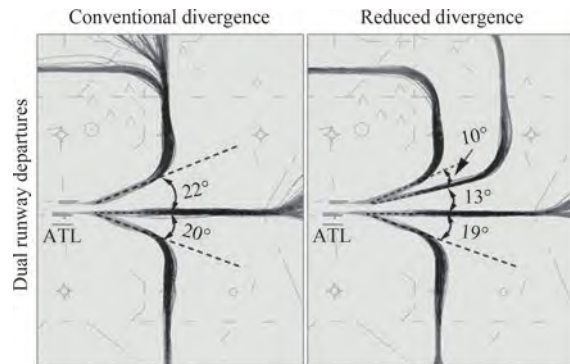


图26 2011年亚特兰大实施ELSO(Equivalent Lateral Spacing Operations)减少交通拥堵隔离要求从 $15^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 以便能放行更多航班

Fig. 26 In 2011, implementation of ELSO in Atlanta allowing more dispatch of flights by reducing minimum divergence from  $15^{\circ}$  to  $10^{\circ}$

互联,飞行计划等数据可由原来飞行员在驾驶舱里手动输入到FMS,转变为由EFB同步到FMS,这使得飞行员可以根据航空公司运控的协调结果,在进入驾驶舱前的航前准备阶段,及早完成FMS飞行计划的初始化。可减轻飞行员的工作负荷,缩短飞机的过站时间,增加航空公司和机场的运营效率。

## 2.9 飞行管理系统设计关键技术

在对FMS进行设计时,依据ARINC 702-5规范<sup>[48]</sup>,可将FMS划分为3大主要功能模块:综合导航模块、飞行计划管理模块和轨迹导引模块。

1) 综合导航模块,负责通过对多传感器数据的融合计算当前的飞行状态,主要包含多源导航传感器信息融合与导航、无线电导航自动调谐、导航模式管理、传感器管理与组合策略等。

2) 飞行计划管理模块,产生的四维航迹与飞机飞行过程中的实时导航数据、性能数据等作为轨迹导引模块的输入,计算出飞机飞行的横滚角、俯仰角、发动机推力等并以导引指令形式发送给自动飞行系统和驾驶舱显示系统<sup>[49]</sup>。飞行计划管理模块在机载导航数据库和飞机性能数据库的基础上,通过驾驶舱显示系统提供的人机交互平台,以图形化的方式编辑和管理飞行任务剖面、时间约束、高度速度约束、燃油使用策略等要素,并通过航迹优化、航迹预测等功能,实现四

维航迹合成、优化和管理,以提高飞行的自动化和智能化水平,并降低飞行成本<sup>[50]</sup>,见图 27。

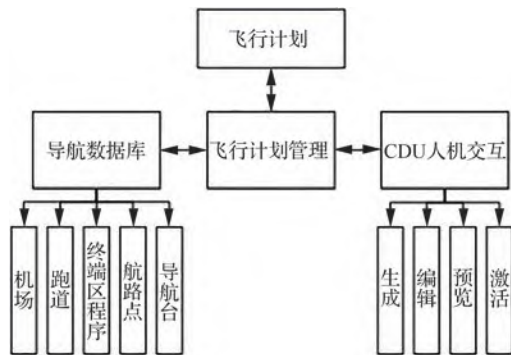


图 27 飞行计划管理模块

Fig. 27 Flight plan management module

3) 轨迹导引模块,通过计算横滚角、俯仰角等控制指令引导飞机的自动飞行系统按照预测的水平和垂直航迹飞行,并将导引指令显示在驾驶舱显示器上,实现飞行员对导航和导引信息的监控,完成人机闭环,见图 28。

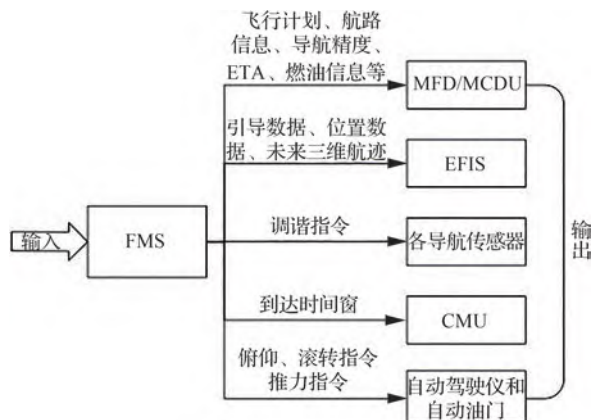


图 28 轨迹导引模块

Fig. 28 Trajectory guidance module

4) 冗余配置,为了满足所需导航性能(Required Navigation Performance, RNP)运行的性能要求,支线、干线飞机的FMS系统架构采用双套系统配置,在远程宽体飞机上会采用3套系统配置<sup>[51]</sup>。

5) 冗余架构与协同策略,在双套系统配置构型下,一侧为主用FMS,执行所有的计算,并为自动飞行系统提供导引信息,为本侧飞行员提供飞行计划显示信息;另一侧为从FMS,主要对对侧

FMS的导航定位信息进行交叉监视,并可为另一侧飞行员提供计划显示。两侧FMS分别响应同侧飞行员的操作。根据不同的系统工作/失效模式,双套FMS在系统上电后可以自动默认运行于同步模式(Synchronized),2套FMS可经内部协调后,分别自动设置为主FMS和从FMS。在一定的判定规则下(如,交叉通信丢失等),两者将运行于独立模式(Independent),在有一侧FMS失效时,另一侧运行于单机模式(Single)。在独立模式下,虽然主从FMS仍可以分别响应同侧飞行员的操作,但不再同步计划和性能等参数。在单机模式下,FMS将分别响应每位飞行员的操作。自动化水平较高的FMS能够做到在模式切换过程中,无需飞行员的特殊干预,仍可保持管理的主要飞行状态的稳定,见图 29。

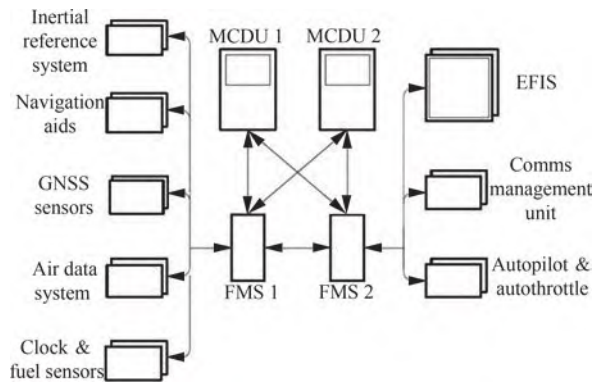


图 29 双套系统配置构型

Fig. 29 Dual flight management system configuration

为进一步提高系统可用性和签派率,远程宽体飞机通常采用3套系统配置。3套系统配置是在双套系统配置的基础上再增加1套备份系统。正常情况下仍是采用双机同步工作模式,第3套处于备份状态。当一套FMS出现故障时,处于备份状态的那套FMS将接替失效的FMS,使整个FMS系统继续保持双机同步工作模式。在遇到某些特殊风险导致的失效条件下,当2套FMS失效时,则进入单机工作模式<sup>[52-54]</sup>。在3套FMS系统架构中,为了与自动飞行更好的耦合,通常由一套主控FMS提供导引指令;在和显示系统交联过程中可以根据驾驶舱理念由一套主控FMS向两侧提供数据,或者主控和热备份FMS分别提供显示数据。3套FMS可以大大提高飞



机的 RNP AR (Authorization Required) 运行能力,与 2 套相比,3 套 FMS 架构即使在一套 FMS 丧失功能时仍可以实现 RNP AR 能力。

6) 性能优化, FMS 功能需要通过精确计算飞机气动性能、发动机性能,并与自动飞行、无线电导航传感器等信息进行综合,提高飞机航迹跟踪精度、优化垂直飞行剖面,实现飞机与发动机运行状态的优化、降低油耗并提高运营效率。

## 2.10 无线电导航状态

无线电导航系统通过无线电信号与地面导航系统设备的交互,测量并确定飞机自身的位置等信息。

传统的无线电导航系统主要包括甚高频全向信标 (Very High Frequency Omnidirectional Range, VOR)、测距器 (Distance Measuring Equipment, DME)、自动定向仪 (Automatic Direction Finder, ADF) 可用于航路导航和非精密进近,仪表着陆系统 (Instrument Landing System, ILS)、无线电高度表 (Radio Altimeter, RA) 用于精密进近。

随着微电子技术和信号处理技术的发展,无线电导航的接收和显示设备逐步采用数字信号处理和自动化程序,在减小了设备的体积和重量的同时提高了设备的测量精度和可靠性。

无线电导航系统由陆基逐步发展到空基,全球卫星导航系统已经可以为用户提供全球、全天候、实时连续的高精度定位和授时信息。但卫星导航系统自身存在信号易受干扰和欺骗的缺点,因此大型客机上将惯性导航、基于地面台站的无线电导航和卫星导航进行融合,提高导航系统的精度与可靠性。

## 2.11 无线电导航技术发展趋势

卫星导航 (Satellite Navigation): 可实现地面、海洋、空中和空间用户进行定位导航,主要由导航卫星、地面用户台和用户定位设备组成。目前,全球卫星导航系统主要有美国的全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)、中国的北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、俄罗斯的全球卫星导航系统 (GLO-

balnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema in Russian, GLONASS)、欧洲航天局的伽利略卫星导航系统 (Galileo), 以及两个区域性的导航系统: 印度的区域导航系统 (Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS) 和日本的准天顶卫星系统 (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)。

卫星导航信息增强服务: 通过地面监测站计算高精度误差修正数据和完好性信息,并将这些数据播发给用户,由用户接收后辅助提升定位精度和服务完好性。该类服务模式中导航定位仍然依赖于现有的全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的卫星导航信号,仅通过卫星通信链路播发增强信息,即系统仅提供辅助和补充能力,无法脱离 GNSS 单独提供服务<sup>[55-56]</sup>。为了提高卫星导航系统的性能,尤其是提高导航系统的精度并兼顾完好性。卫星增强系统包括机载增强系统、星基增强系统和地基增强系统。

星基增强系统: 利用在大范围内布设监测站,对导航系统进行实时监测,得到轨道和卫星钟修正数据以及完好性参数,再通过地球静止轨道卫星 (Geosynchronous Earth Orbit, GEO) 向覆盖区域的用户广播,以此提高区域内用户的定位精度和完好性监测。国际上已经建成并开始服务的星基增强系统有美国的广域增强系统 (Wide Area Augmentation System, WAAS)、欧洲地球同步卫星导航增强服务系统 (European Geostationary Navigation Overlay Service, EGNOS)、日本的基于多功能运输卫星的增强系统 (Multi-Functional Satellite Augmentation System, MSAS)、印度的 GPS 辅助型静止轨道增强导航系统 (GPS-aided GEO augmented navigation, GAGAN)、俄罗斯的差分修正监测系统 (System for Differential Corrections and Monitoring, SDCM) 和韩国增强卫星系统 (Korean Augmentation Satellite System, KASS)<sup>[57]</sup>。

地基增强系统 (Ground Based Augmentation System: GBAS) 的基本原理是参考基站通过对卫星信号的接收得出参考基站自身的位置信息,然后与已知精确测量的基站位置信息进行差分运算,得到此时的差分校正值,并对卫星数

据的完好性等性能指标进行监测,然后通过数据链路将差分校正值和完好性信息发送给用户。用户根据接收到的导航卫星数据计算自身位置信息,再通过接收来自参考基站的差分修正信息,对自身位置信息进行修正,从而减少定位过程中存在的误差,达到增强定位精度的效果。

除了地基增强系统和星基增强系统,低轨卫星(Low Earth Orbit, LEO)以其星座和信号的独特优势,有望成为新一代卫星导航系统发展的新扩展。低轨卫星可以增强卫星导航信号,作为GNSS的增强与补充;也可以通过通信系统和导航系统融合,形成独立的备份定位导航能力。目前,美国铱星系统与GPS系统共同研发推出新型卫星授时与定位服务(Satellites Time and Location, STL),作对GPS系统的备份和增强;欧洲

Galileo系统也在进行开普勒系统研究,通过4~6颗低轨卫星构成的小规模星座,通过激光星间链路实现导航卫星的高精度同步,提高Galileo星座的精度,可减少地面运控测量通信设施。国内多家单位在开展低轨卫星增强的相关研究和在轨卫星验证,并提出了相应的星座计划。

## 2.12 无线电导航架构方案

目前大型客机上采用的无线电导航系统包含VOR、DME、指点信标(Marker Beacon, MB)、ADF、GNSS、ILS、卫星着陆系统(Ground-based augmentation systems Landing System, GLS)、RA,其主要通过ARINC 429数据总线和相关交互设备及接口转换部件与航电主网络系统互联。典型的无线电导航系统数据交互架构如图30所示。

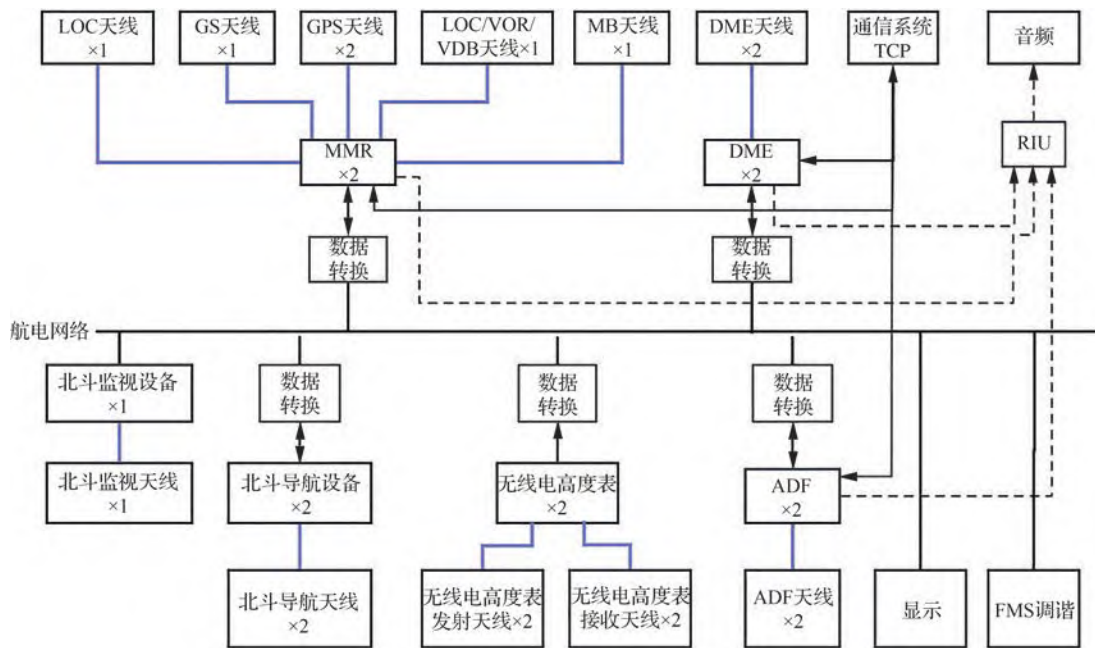


图 30 典型无线电导航系统架构

Fig. 30 Typical radio navigation system architecture

传统的无线电导航系统设备大部分已比较成熟,无线电导航系统的综合化设计体现在把多种导航功能逐步综合到一个设备中,例如国产大型客机采用的甚高频导航设备,集成了VOR、MB、ADF和ILS功能。多模接收机(Multi-Mode Receiver, MMR)集成了GNSS、ILS和GLS功能。一些主流无线电导航系统设备厂商具备集成GNSS、VOR、MB、ILS、GLS功能的多

模接收机能力。

国内在国产北斗导航系统在民航飞机上的应用开展了大量的技术研究、产品开发和试验试飞等工作。利用北斗卫星导航系统的定位与短报文能力,实现对民用航空器的定位追踪,有多个研制单位的设备已完成CTSO取证并装机应用。后续通过GPS和北斗导航系统数据融合等方式,提高卫星导航系统的可用性和完整性等指标。

## 2.13 综合监视系统状态

随着航空运输业务的高速发展,空中交通密度日益增大,同时复杂的空中气象环境等因素也给飞行安全带来重大的安全隐患。根据波音公司公布的1987—1996年全球民用航空重大事故统计,CFIT事故共发生36起,占全部重大事故的26.5%,造成的伤亡人数为各类事故之首;空中相撞事故在各类事故中列第五位;风切变是造成全球飞机致命事故的第七大原因。

为提高运营的安全性,飞机制造商采用辅助环境监视告警设备来保障飞机飞行安全。美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)在1974年规定大型客机上装载近地警告系统(Ground Proximity Warning System, GPWS),防止可控飞行撞地,1987年规定大型客机上须安装交通防撞和告警系统(Traffic and Collision Avoidance System, TCAS),1994年规定大型客机必须安装前视风切变气象雷达(Weather Radar, WXR),2020年要求在北美地区普遍实施集成广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)运行<sup>[58]</sup>。

目前民用飞机上配备了WXR、TCAS以及地形提示和告警系统(Terrain Awareness and Warning System, TAWS)预防运行环境威胁。服役较早机型(例如B737和A320等)上普遍采用分立式的监视系统,存在系统间交互性差、告警提示不完善且分散等问题,影响飞行员的注意、判断及态势感知能力。最新研制的机型(例如B787和A350等)采用IMA架构,实现飞机环境监视功能的信息综合、数据综合、功能综合和物理综合。

ARINC在2006年发布了ARINC 768标准《综合监视系统》,统一规定飞机环境综合监视系统的相关技术要求<sup>[59]</sup>。Honeywell、Collins、ACSS等主要航电供应商为主流民用飞机提供综合监视系统产品。国内也开展了综合监视系统技术的研究,提升飞机的环境监视能力。

## 2.14 综合监视系统技术发展趋势

综合监视系统提供了交通监视功能(S模式

应答机、TCAS和ADS-B)、气象监视功能(气象雷达)和TAWS。

### 1) 交通监视

TCAS符合RTCA DO-385A标准,符合该标准的交通防撞系统称为ACAS X(Airborne Collision Avoidance System X)。相比当前符合RTCA DO-185B的TCAS,ACAS X优化了防撞算法,减少了不必要交通防撞告警,并且在交通防撞告警中采用了ADS-B监视数据。

ADS-B OUT应用将由当前符合RTCA DO-260B发展到符合RTCA DO-260C。相较B版标准,C版中增加了通过ADS-B OUT数据链广播本机气象雷达探测数据的功能,增强了空域中其他飞机的环境气象感知能力。

为提高空域利用率,增强飞行机组对空中和机场场面的态势感知,包含驾驶舱交通信息显示(Cockpit Display of Traffic Information, CDTI)辅助的目视间隔(CDTI Assisted Visual Separation, CAVS)、带指示和告警的场面态势感知(Surface Situation Awareness with Indication and Alert, SURF IA)和驾驶舱间隔管理(Flight deck Interval Management, FIM)等在内的ADS-B IN应用将得到进一步发展与应用。

### 2) 气象监视

机载气象雷达将在本机气象探测结果中融合地空和空空数据链传输的气象信息,提升飞行机组对飞机前方气象的态势感知能力。此外,气象雷达将提供闪电、冰雹等危险气象的探测能力。

### 3) 地形监视

地形监视功能中将新增符合EUROCAE ED-250的跑道冲出提示和告警功能,在进近着陆阶段增强飞行机组对潜在冲出跑道情况的态势感知能力,并在需要复飞或增加额外减速操作时提供相关告警。

## 2.15 综合监视系统架构方案及关键技术

ARINC 768标准可以保证ISS可通过灵活地改变配置,分别实现多种监视功能的综合,又能保持最大通用性。考虑到不同飞机因空域类型、安全要求、重量要求及成本要求的差异性,ARINC 768标准定义了4种不同的参考构型,分别对TCAS、



应答机(Transponder, XPDR)、WXR、TAWS进行了不同的组合,具体配置见表2<sup>[60-61]</sup>。

表 2 综合监视系统构型<sup>[60-61]</sup>  
Table 2 ISS configuration<sup>[60-61]</sup>

构型	TCAS	应答机	WXR/ PWS	TAWS/ RWS	ADS-B OUT	ADS-B IN
A	×	×	×	×	×	×
B	×	×			×	×
C	×			×		×
D	×	×		×	×	×

目前大型客机上采用的典型综合监视系统符合 ARINC 768 中构型 A(如图 31 所示),即包含 WXR、TAWS、S 模式应答机、TCAS、ADS-B OUT 和 ADS-B IN。

综合监视系统研制涉及的关键技术主要包括:

1) TCAS 包括交通监视、防撞跟踪、威胁探测、威胁决断、通信与协调功能。TCAS 询问周围飞机,通过周围飞机应答机回答信号计算其飞

行轨迹,估是否有潜在威胁,若存在相撞威胁时,向机组提供对应的目视和音响告警。研制涉及算法研究与设计、航迹融合技术、系统监视功能设计与实现、系统测试与验证及空中试飞等方面的技术。

2) 气象雷达的气象探测功能,向机组提供准确的指示,主要包括气象探测、紊流探测、预测型风切变探测和地图功能。研制涉及天线设计、信号处理、数据处理及风切变检测算法、真实风切变环境数据试飞提取、数据库建立及模拟技术、验证试飞等关键技术,确保探测和告警功能的可靠性和准确性。

3) TAWS 中包括 GPWS 功能、前视地形告警(Forward Looking Terrain Alerting, FLTA)、地形显示(Terrain Display, TD)和过早下降告警(Premature Descent Alert, PDA)功能的研制。TAWS 中反应型风切变告警(Reactive Windshear Warning System, RWS)、地形数据库等涉及相应的技术。

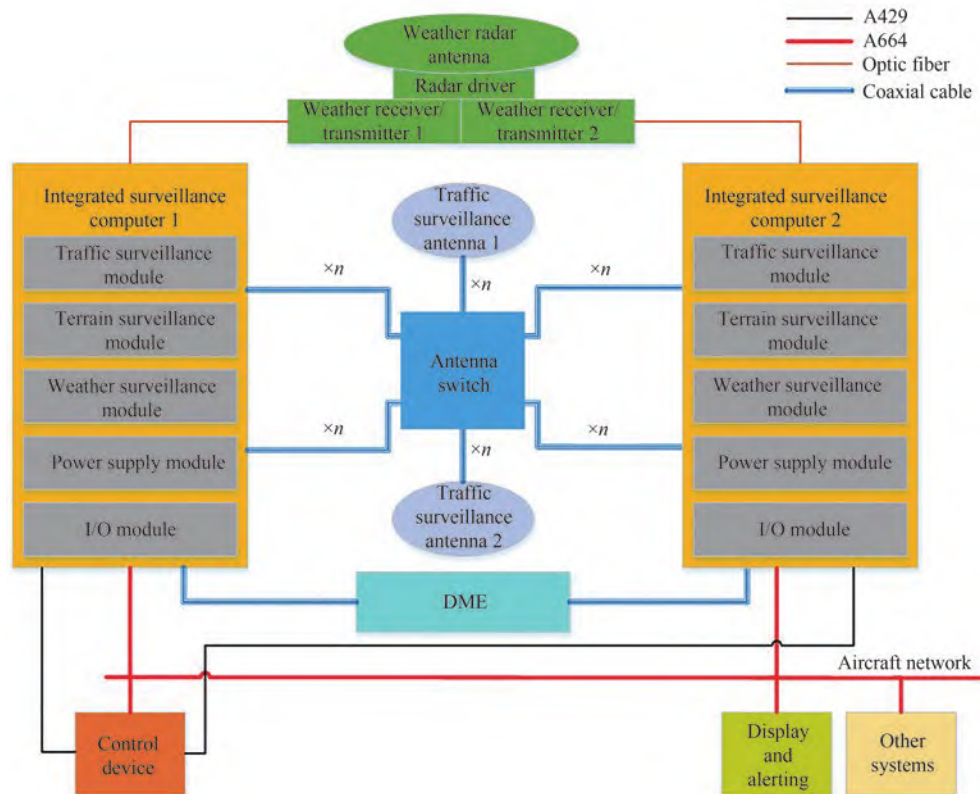


图 31 典型综合监视系统架构(ARINC 768 构型 A)

Fig. 31 Typical ISS architecture (ARINC 768-A)

综合监视涉及相关的视觉和听觉告警信息与驾驶舱显示系统、机组告警系统集成,提供飞机周围交通态势显示,需与驾驶舱设计理念和显示集成规则相协调。

其中 TAWS 和气象雷达涉及解决降低 TAWS 的 GPWS 虚警率、准确验证 TAWS 反应型风切变和气象雷达的预测型风切变等技术问题。大型客机通过飞行试验和模拟器试验,验证反应型风切变告警功能正常,飞行中不出现骚扰性反应型风切变告警。通过地面试验和飞行试验对气象雷达预测型风切变功能进行验证。通过地面试验验证预测型风切变的显示和告警是否正常。在飞行试验中,选取符合要求的机场,验证在起飞和着陆阶段不出现骚扰性预测型风切变告警。需解决试验试飞及环境等相关技术问题。

## 2.16 机载数据链状态

数据链系统为飞机与地面管制终端及航空公司之间提供高效的空地双向数据通信功能。作为传统语音通信的数字化提升,数据链系统的应用可大幅改善管制频率资源紧缺与拥堵的问题,提高空中交通管理效率,提升航空公司飞机监控及运营效率,已成为民航中大型客机普遍使用的标准配置<sup>[62]</sup>。

大型客机数据链系统主要数据链路由、数据链应用与无线电台组成。目前机载数据链主要支持甚高频、高频和卫星通信三种子网络。数据链路由为数据链系统的核心,用于提供数据链协议栈功能,可驻留在单独的设备(以通信管理单元的形式)实现,也可驻留在 IMA 中(以通信管理功能软件的形式)实现,实现形式为整机航电系统架构设计与权衡的结果<sup>[63-65]</sup>。数据链应用通常可分为航空公司运行控制(Airlines Operational Control, AOC)、ARINC 623 空中交通服务(Air Traffic Services, ATS)和 ATC<sup>[66]</sup>。AOC 应用于飞机与航空公司之间的通信,典型的 AOC 报文包括:与通信相关的 OOOI(OUT-OFF-ON-IN)报、位置报、自由文本报等,与 FMS 相关的飞行计划请求报、航路和风温上传报等,与机载健康监控相关的发动机性能报、实时

故障报等。ARINC 623 ATS 应用于飞机与地面终端管制之间进行通信,包括自动终端信息服务报告、离场放行报告等。ATC 应用于航路管制,其中包含的管制员-飞行员数据链通信(Controller Pilot Data Link Communications, CPDLC)服务可提供飞行高度变更等数字管制服务,还提供将上行报文中的参数加载到 FMS 的功能;通过 ADS-C 可自动向地面发送经纬度、高度、时间和位置精度等信息,ATC 数据链使得空中交通管制更自动、智能和高效<sup>[67-68]</sup>。

北斗短报文在航空领域逐步推广应用。北斗短报文具有双向通信、保密性好、覆盖范围和兼容导航等优点<sup>[69]</sup>。目前,北斗跟踪监视系统和北斗地面数据系统之间通过短报文进行双向通信,传送位置、油量、地速、高度等信息,并可根据应用需求对报文数据进行定制化发送,可进一步扩大北斗短报文的应用范围。

## 2.17 机载数据链发展趋势

美国新一代空中交通系统和欧洲单一天空计划的核心技术之一是采用面向四维航迹的空域运行,为满足面向四维航迹的运行要求,除具备传统 AOC、ATS、基于 FANS 1/A(+)和航空电信网(Aeronautical Telecommunications Network, ATN) Baseline1 的 ATC 数据链功能外,现有的 ATC 应用需对应升级。面向四维航迹运行的 ATC 应用基于 ATN baseline 2,其中 CPDLC 应用在 ATN baseline1 的基础上增加了初始化四维航迹数据链功能、增加了支持四维航迹运行的消息集、增加了动态所需性能导航(Dynamic-RNP, DRNP)和间隔管理等功能;合约式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance Contract, ADS-C)应用增加了基于扩展投影剖面信息的信息交换与报告等功能,EPP 包含航路点的水平约束、速度约束、所需到达时间等信息,以实现更高效的航迹协商与管理。

数据链路方面,为满足新一代空中交通管理系统空/地高速数据链通信的要求,国际民航组织发布的第 6 版全球空中航行计划提出了 ASBU 以及未来航空通信技术的路线图包含航空移动机场通信系统(Aeronautical Mobile Airport

Communications System, Aero MACS)、航路L波段数字航空通信系统(L-band Digital Aeronautical Communication System, L-DACS)以及海事卫星等下一代卫星通信等宽带通信新技术,且提出L-DACS将逐渐取代现有的甚高频(Very High Frequency, VHF)飞机通信寻址与报告系统(Aircraft Communication, Addressing and Reporting System, ACARS)和甚高频数据链(VHF Datalink, VDL) Mode 2。L-DACS系统工作在960-975 MHz以及985.5-1008.5 MHz频段,采用正交频分复用多载波传输技术,符合先进ATN网络协议(ATN/IPS),能充分利用现有频谱资源,具有传输容量大和抗干扰性能强等优点。EUROCONTROL和FAA联合规划未来在陆地空域采用L-DACS,以支持地空链路更大传输数据量<sup>[70-71]</sup>。现有数据链ACARS和ATN/OSI协议栈也将向支持多样化链路的ATN/IPS协议栈升级,以满足未来航空通信技术发展需求<sup>[72-73]</sup>。此外,ATG(Air to Ground)利用成熟的陆地移动通信技术,针对航空高速移动、广覆盖等特性进行定制化开发,在地面建设能够覆盖天空的专用基站,构建一张地空立体覆盖的专用网络,可有效解决高空立体覆盖问题,实现地空高速数据传送<sup>[74]</sup>。目前,ATG主要用于客舱服务场景,未来将考虑在满足安全管理要求的前提下,通过互联接入,提高前舱数据的实时性:如快速存取记录器(Quick Access Recorder, QAR)、EFB、ACARS数据的动态实时获取,可实时解析译码平台,同时可实时预警分析<sup>[75]</sup>。

传统数据链系统的人机交互界面基于ARINC 739的MCDU实现,由于MCDU屏幕小,限制了可显示的行数和每行的字数,且需要配合行选键选择菜单,使得数据链系统在MCDU上的实现需要非常繁琐的操作,导致机组记忆路径也较长。先进的民用飞机已经开始淘汰基于MCDU架构的显控系统,而用基于ARINC 661的多功能显示器进行替代,如A350、A380、B787机型的数据链系统已经基于ARINC 661实现了图形化设计,通过更加人性化的人机界面提高飞机机组操作效率和驾驶舱综合化水平。

为支持基于TBO的下一代空管系统运行,

数据链系统设计的关键为:具备完备数据链应用,兼容多种数据链路,结合A661显控及各数据链应用协议进行架构综合设计<sup>[76]</sup>。

## 2.18 机载数据链关键技术

数据链系统设计需具备完备数据链应用,具备多链路兼容能力,在架构设计与集成时综合全链路的多通信协议,并与先进驾驶舱信息显示有效综合:

1) 完备数据链应用设计:需具备多协议、多链路兼容能力的数据链路由,具备航空公司运行控制和机载健康监控所需AOC应用,具备支持数字化管制的ARINC 623空中交通服务应用和ATC应用,其中ATC应用中的CPDLC和ADS-C应用需要升级成基于ATN baseline 2的应用,以支持四维航迹运行。

2) 多链路兼容能力设计:为适应LDACS、AeroMACS、下一代卫星通信等新一代航空宽带通信技术的发展,机载数据链系统需具备多链路兼容能力。基于地面网络的部署情况,机载数据链路由需能够在多种可用的空地数据链路间(VHF、SATCOM、HF、L-DACS子网络等)无缝切换,以适配不同的数据链通信场景。对于数据链协议栈向ATN/IPS协议栈发展的趋势,数据链架构需兼容ACARS协议栈与ATN/IPS协议栈,既兼容基于传统ACARS网络的数据链应用,又支持基于ATN/IPS网络的数据链应用。

3) 数据链综合架构设计:数据链ATC软件与FMS软件交联紧密、接口复杂,数据链系统需根据ATC软件与FMS软件的综合程度确定使用联合式架构或综合式架构。联合式架构以通信管理单元作为端系统,由通信管理单元提供ATC软件和数据链路由功能,由于与FMS软件分离,需解决ATC软件与FMS软件复杂接口问题,目前接口协议尚不成熟;综合式架构以CMU作为路由,ATC软件集成在FMS软件中,因接口属于软件内部接口,可降低ATC与FMS交联的接口复杂度。随着ARINC 661图形化技术在新机型上广泛应用,两种架构的数据链系统设计还需适配基于ARINC 661标准的图形化驾驶舱显示系统,特别是部分功能与驾驶舱显示系统的融



合,联合式架构的 ATC 数据链人机界面需突破 ARINC 739 格式显示的限制,实现全图形化设计。此外,数据链系统架构设计与集成需要综合源端到目的端全链路的通信协议。数据链系统链路长、通信协议多,端系统众多(包括飞行管理系统、机载维护系统、记录器、打印机等),从端系统应用到数据链路由、再到电台、空地子网络传输,数据链路由需具备足够的能力支持基于不同通信协议的多个端系统和子网络,通信协议包括 ARINC 429 定义的面向位的传输协议(Bit-Oriented protocol, BOP)、ARINC 619 定义的面向字符的传输协议、ARINC 744、ARINC 750、ARINC 753、ARINC 741、ARINC 618 等协议。例如,进行 ATC 数据链功能设计与集成时,考虑 ATC 软件采用 ARINC 661 显示、数据链路由通过 ARINC 429 总线与其他系统交互,则 ATC 与数据链路由之间使用 ARINC 429 BOP V1 以及 ARINC 619 协议,如经过航电核心网络还涉及 ARINC 664 协议,数据链路由基于 ARINC 429 BOP V3 以及 ARINC 619 协议将数据链报文传输至记录器,基于 ARINC 618 协议等将报文传输至空地子网络,在设计与集成时,为实现端到端的信息完整传输需综合各中间链路的多通信协议。

## 2.19 大气数据与惯性基准系统状态

大气数据和惯性基准系统是飞机导航和飞行控制等功能的重要组成部分。大气数据系统通过高精度的传感器测量飞机飞行时的动压和静压、温度等参数,通过大气数据计算机或驻留的应用软件计算得到飞机的空速、气压高度、温度等参数,提供准确的大气数据给航电飞行显示、飞行控制等系统。当前主流的惯性基准系统采用捷联激光陀螺、加速度计等传感器,通过感受机体轴的角速率和轴向线性加速度等信息,通过处理计算后,提供姿态、航向、角速率、加速度和即时地理位置等信息。与飞行管理系统、全球卫星定位等系统交联,提供多传感器的高精度组合导航功能。

当前,大型客机的大气数据和惯性基准系统研究重点主要集中在以下 2 个方面:

1) 系统测量精度和可靠性提升:研究重点为提高系统参数测量的准确性和稳定性,通过优化传感器的探测技术和系统处理算法,以确保飞机在不同气候条件、复杂飞行环境下的飞行性能和安全。

2) 系统的综合集成:通过系统集成设计提高性能、降低重量,提升可靠性,提升飞行控制和导航系统的情能和可靠性水平。如国产大型客机的大气数据和惯性基准系统中采用了新颖独特的传感器源端综合表决架构,提供高可靠性和高完整性的大气数据和惯性基准参数供飞行机组和其他机上重要用户系统使用,可以降低机组工作负担和提高飞机自动化控制水平。该技术在国内外相关的技术积累较少,尚未相关成熟型号经验可供借鉴,国外目前仅有少数几个先进机型使用。系统的高度集成化综合化是民用飞机航电系统的发展方向。

## 2.20 大气数据与惯性基准系统技术发展趋势

在大型客机应用领域,为提高系统精度、可靠性和安全性,以满足复杂应用的需求,发展出基于激光分子测量原理的大气数据系统,该系统利用激光技术进行大气数据探测和解算。这种探测方式的核心测量原理是激光多普勒测速。激光发生器发射特定波长的激光,该激光通过透镜照射到机外的大气中,与机体外特定区域内的空气中的微小颗粒/大气分子作用,发生散射现象,其中部分散射激光进入接收光路,并经过光电转换元件转化为电信号,通过对电信号的分析,可以获得散射光相对于出射激光的频率、波长、相位等特征参数的变化量<sup>[77]</sup>。这些散射光的特征量与散射区域的大气温度、大气密度、该区域大气与激光收发器的相对运动速度等因素有关,通过研究和建立散射光的特征量及影响特征量的各因素之间的模型关系,可获得基于激光多普勒测速,以及基于激光原理的大气参数探测方法<sup>[78]</sup>,进而获得飞机大气数据参数,如图 32 所示。

针对传统大气数据系统基于压力探测原理所带来的固有缺陷,将激光探测技术应用到飞行中大气参数的探测解算上,实现飞行大气参数的探测,相对于传统空速管、迎角传感器等外伸式

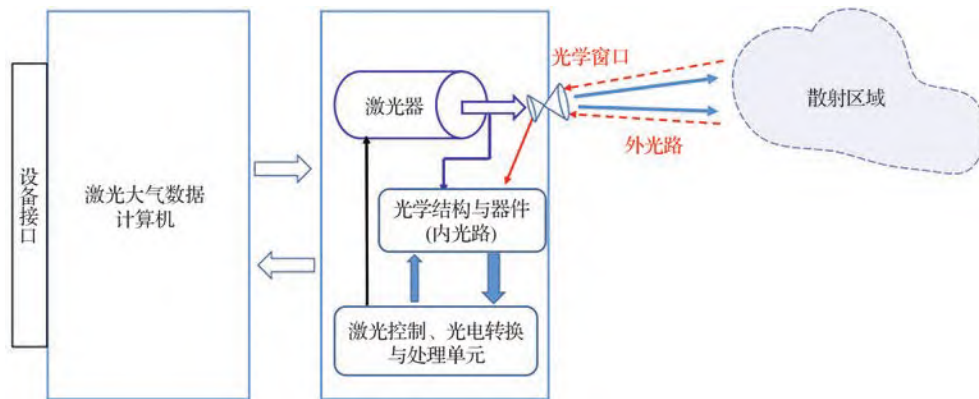


图 32 基于激光分子测量原理的大气数据探测技术

Fig. 32 Atmospheric data detection technology based on laser molecular measurement principles

探头,激光探测技术提供了独立非相似的大气数据源,可解决大气数据传感器由于结冰、堵塞等原因导致的失效问题,提高大气数据系统的安全性和可靠性。

此外,随着信息融合技术的发展,新的研究方向是基于多源信息融合对大气数据进行估计的思路,所获得的大气参数作为传统大气数据系统在特殊条件下的备份信息和余度管理与容错的信息源。该方法利用飞行器的结构气动参数和飞行过程中航电系统获取的测量信息,通过设计信息融合算法(如卡尔曼滤波、互补滤波、神经网络等方法),实现对大气数据的实时估计。该方法可以在不增加系统硬件设备的基础上,有效利用机载系统的输出参数对大气数据进行间接测量,通过计算手段为飞机增加一套虚拟的大气数据测量系统。该系统提供的大气数据可与传统系统测量的大气数据结合起来,利用故障检测方法来分析实际传统系统的运行状态。同时,该系统可以作为传统系统的备份,在传统系统故障时提供可用的备份大气数据。

大型客机惯性基准系统的发展趋势是向更轻量化、更紧凑、更高精度、更低功耗的系统方向发展,同时结合全球卫星导航系统和其他传感器技术,提供更可靠、更精确的导航解决方案,以提升飞行安全性和效率。目前主流的传感器为激光陀螺仪,通过利用激光的干涉效应来测量飞行器的旋转角速度,从而实现对飞行器姿态的测量和跟踪。通过与加速度计等其他惯性传感器结合使用,激光陀螺仪可以实现对飞行器的三维姿

态的精确测量和位置计算等功能。惯性基准系统数据主要用于飞行器姿态测量、姿态控制、导航和航迹测量与控制等方面。

随着激光陀螺仪、光纤陀螺仪、微机电系统(Micro-Electromechanical Systems, MEMS)等新型固态陀螺仪的逐渐成熟,以及计算机性能的提升,捷联惯性导航系统在大型客机上已广泛应用。如果要进一步显著提高陀螺的灵敏度,光波已经无法满足要求。在这种情况下,研究人员开始考虑利用原子波做波源。原子激光具有噪声小、波长短、频率高等优势,可获得极高的灵敏度。因此,原子陀螺及其测量方法在惯性基准系统方面的应用具有极大的技术潜力。

## 2.21 大气数据与惯性基准系统关键技术

大型客机的大气数据系统通常采用多余度的独立、分布式架构,安装在飞机外部的大气数据传感器测量得到的压力,通过全/静压管路传递到大气数据计算模块或大气数据计算机中,并由大气数据软件解算相关飞行参数供全机用户系统使用。主要关键技术包括:

1) 大气数据防除冰技术研究,随着民用飞机电传飞控系统对空速等大气数据参数的依赖程度增高,大气数据传感器结冰对飞行安全的威胁越来越大,已经发生了多起因大气数据传感器结冰导致的飞行事故。欧洲航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)和FAA陆续通过修正案颁布了新的结冰适航条款,要求大气数据系统在过冷大水滴、冰晶、混合相和大

雨条件下正常工作。因此,基于新结冰适航条款的大气数据系统防除冰设计和验证技术是保证飞行安全的关键技术。目前,国外已有满足新结冰适航条款的大气数据系统设计和大气数据传感器,国内也在逐步形成大气数据系统和大气数据传感器的防除冰设计和试验验证方法,提升技术水平,增加市场潜力。

2) 惯性基准与卫星定位系统的组合及原子陀螺等新技术的研究,目前主要采用的是惯性导航系统,通过使用惯性传感器测量飞机的加速度和角速度,计算出飞机的位置、速度和姿态信息。惯性导航系统具有高精度和高稳定性的优点,能够提供可靠的导航信息,但其缺点是随时间的推移会产生累积误差。主要解决途径为采用惯性导航系统/全球卫星定位系统组合导航的技术。通过GPS卫星提供的位置和速度信息来校正惯性导航系统的累积误差,从而提高导航的准确性和可靠性。另一个方面就是原子陀螺等新技术途径的研究和应用。

## 2.22 机载信息系统技术状态

国内外最新研制的大型客机均新增了机载信息系统,使飞机运行数据采集及诊断能力大幅提升,飞机上产生的数据量大量增加,这些记录数据记载了飞机各系统及各个系统之间进行大量实时交互的信息,包括飞机与地面、飞机与人员、机组之间、机上与地面之间进行的交互。相比传统意义上通过飞机通信系统与塔台及地面的语音交互不同,这些交互的数据量急剧增加,信息收集、处理、传输能力的提升和数据间的强相关性和实时性成为航空运输系统实现信息化、智能化技术升级和提升使用维护性能的重要方向。

## 2.23 机载信息系统技术发展趋势

机载信息系统作为国内外最先进机型的标准配置。美国波音公司最早开始机载信息系统的研究,制定了特定的E化战略,并在B787飞机上装机使用。空客公司也在A350飞机上实现了类似的功能和相应的信息化战略。通过飞机信息化能力的提升,改善飞机的飞行、运营、维护等业务性能,减少了飞行员负担、降低了维修和运营成本,

提升了乘客满意度和飞机的商业竞争能力。

国内民用飞机信息系统的研究随着C919飞机的研制而发展起来。中航工业计算所等单位开展了民用飞机信息系统等发展现状与趋势的研究,分析了信息技术对飞行的改变<sup>[79]</sup>。上海飞机设计研究院对机载信息系统等技术现状进行研究<sup>[80]</sup>,并提出了主流设计方案以及发展趋势和研制建议。同时还对民用飞机网络安全相关技术开展研究,进行了民用飞机网络安全相关问题的分析、方法和策略<sup>[81-82]</sup>。中国民航大学等单位提出了民机航电系统功能等信息安全一体化分析方法<sup>[83]</sup>。中电科航空电子有限公司等单位研究了面向互联飞机的空天地网络一体化融合技术,提出了多种通信链路和网络体系特点的一体化空天地无线通信链路的融合架构<sup>[84]</sup>。

机载信息系统由最初的探索性支持功能,正在发展成为使用维护性能和自动化质量提升的新的重要手段。

## 2.24 机载信息系统关键技术

大型客机的信息域主要按“飞机控制域”“航空公司信息服务域”“乘客信息与娱乐服务域”“开放域”4个层级配置。

“飞机控制域”包括了对安保环境要求较高的机载系统,“航空公司信息服务域”和“乘客信息与娱乐服务域”的系统是“飞机控制域”内机载系统的延伸,主要用于满足航空公司、机务人员以及旅客的需求<sup>[85]</sup>。

机载信息系统设备主要分布在“航空公司信息服务域”中,为飞行员、乘务、机务提供多种支持与服务。机载信息系统为用户提供更丰富的飞机状态信息。机载信息系统通过对数据的组织管理,帮助用户方便快捷的获取所需数据,为航空公司提供性能优化方案,为机务人员提供智能化的维护工具,方便获取并更新数据,缩短维修时间,为优化客舱服务提供支持<sup>[86-87]</sup>。

机载信息系统为飞行员提供包括电子飞行日志、电子地图、电子飞行手册等在内的电子飞行包功能<sup>[88]</sup>,为飞行管理系统、机载数据链系统、机载维护系统、EFB等提供网络打印功能;为机组和其他机上人员提供飞机内、机外的监控视



频,提供机载网络与地面公共网络的数据通道,提供安全网关功能并确保机载系统网络环境的安全,为地勤人员的维护作业提供宽带无线通道。信息系统还可提供模块化通用计算平台的第三方功能应用程序的驻留能力,支持不同航空公司的个性化运营规则和体系,提高飞机的产品竞争力。机载信息系统与网络安全综合设计需要重点关注<sup>[89]</sup>的方面,攻克相应的关键技术:

1) 信息系统中航电域、信息域、客舱域、开放域等总体架构进行分析和规划。

2) 进行电子飞行包与通用信息平台架构的协同配合与权衡研究,达到安全性、经济性、升级灵活性及运行性能等要素的平衡<sup>[90]</sup>。

3) 根据不同区域网络的安保要求,开展多级安全网关的综合设计,进行航电网关、安全路由、信息网关等安保措施在不同的协议层上综合防护的策略研究。

4) 进行模块化集成设计,确保故障隔离、系统扩展、系统安全及应用开发。

5) 对关联密切的机载维护系统、记录系统、通信系统、IMA 系统、客舱系统等与信息系统进行综合设计,确保功能实现及性能优化。

6) 地面支持系统及运行环境设计研究,形成规划、设计、部署规范,确保机载信息系统和地面系统的相互适配,提高飞机运营的效率<sup>[91]</sup>。

机载信息系统是随着信息化技术以及电子软、硬件技术发展而来的新兴系统,代表着飞机

新的应用需求。随着空地无线宽带通讯技术在机载信息系统的应用,传统的空管及运营维护模式也在不断提升并与机载信息系统深度融合,对民航运营、维护能力的提升和发展产生积极的影响。

## 2.25 机载维护与健康管理系统状态

机载维护与健康管理系统功能对于民用飞机运营维护至关重要,借助相应的功能可以实现民用飞机在高安全性和经济性之间的平衡,形成优化的维修决策,提升飞机运营效率、降低运营成本,为改进产品设计提供准确的数据支持。作为跨系统、大规模复杂功能,机载维护与健康管理系统是体现主制造商的全机与系统集成技术水平,也是体现设备供应商的产品设计完善程度的综合性技术。

波音 747-400 机型为首次装机的中央维护计算机,随着航空电子、系统集成、计算机、通信等信息技术的发展,逐渐发展形成机载维护系统和机载健康管理系统。目前已成为世界主流机型不可或缺的重要组成部分。其组成架构如图 33 所示。

国外经过多年的发展与迭代,已形成体系化的飞机级、平台级、设备级、组件级等不同层级技术,并且通过大量实际使用,形成了在复杂环境实际运行过程中积累的海量数据,因而国外系统相对成熟,其故障机理清晰、故障检测准确性高,

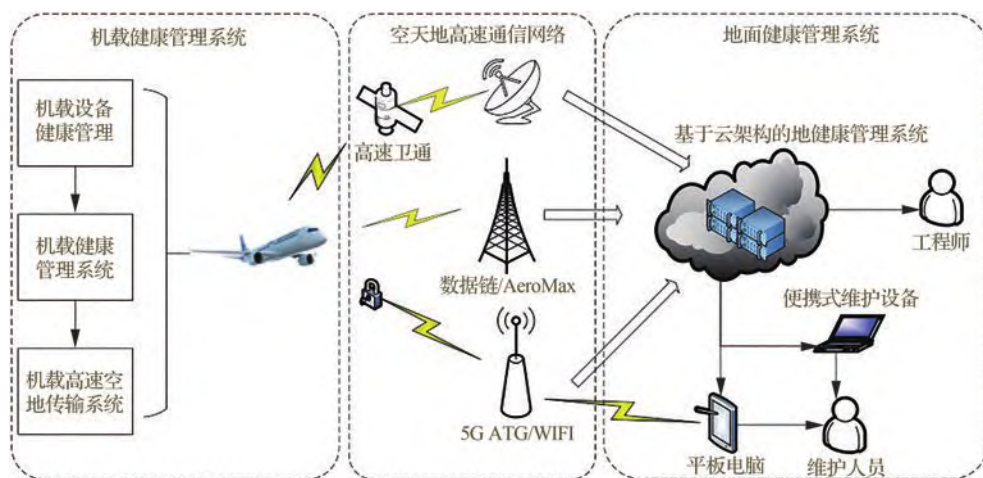


图 33 机载维护与健康管理系统组成架构图

Fig. 33 Architecture of onboard maintenance and health management system

有相关典型飞机产品的性能退化规律,产品设计与集成技术体系完整。

国内起步相对较晚,部分院所开展过典型设备故障模式的相关技术研究,但产品缺少实际运营数据的积累,还未形成成系列产品故障特性与性能退化规律的规模数据,技术体系正在建立。

经过ARJ21和C919这2个飞机型号的使用积累,国内相关技术与产品在功能与性能上达到了相当的水平,但在飞机级级联故障,发动机健康监测等关键技术领域及在设备和飞机级集成方面还在持续提升。

## 2.26 机载维护与健康管理技术发展趋势

经过多年发展与技术迭代,逐渐形成了以机载维护系统为核心,向健康管理发展的技术路径。国内随着C919飞机运营数据的积累,研制技术正在发展完善。主要发展趋势如下:

1) 应用场景与功能提升,集成与综合化程度正在提高。初代机载维护与健康管理系统的基础是自检测设备(Built-in Test Equipment, BITE),主要面向飞机维修场景。正逐步应用于飞机运营监控、维修决策、签派支持等航司运营场景。

在飞机总装制造与试验试飞过程中,用于故障定位、一体化测试、软件升级等生产场景。另外,相关数据分析结论用于产品设计改进、飞机持续优化。包括系统本身的改进迭代。

2) 智能化技术的应用,随着大数据处理及数据挖掘技术的发展,实现预测性维修、智能维修是健康管理技术的第2项发展趋势。现代飞机电子设备基本采用视情维修(Condition Based Maintenance, CBM)。飞机上大量机械系统部件、结构部件等时寿件,目前并不能根据设备的工作与运行状态进行提前预测或延长使用寿命。其突发故障会造成航班取消/延误,影响客户体验,增加航司运营成本等问题。通过对维修大数据的智能化处理方法,分析提取蕴含的健康变化和寿命预测方法,形成有效的预测模型,提高预测精度,实现使用维护模式的重大改进与创新。

3) 无线传输及远程监控技术,随着C919型号投入运营,将产生大量机载维护与健康管理系统数据,随着通信技术的发展,高速空地无线通信应用成为可能,将机载数据传输至地面,通过地面实现远程监控飞机的状态,最终实现全机队的健康管理。飞机机载维护与健康管理系统数据与物联网等技术结合,优化产品备件与生产效率。为更好的研究产品的退化规律,研究产品在不同的运营环境对产品寿命的影响,可以利用先进的无线传感器,在减少加装传感器对飞机影响的情况下,收集准确的环境数据等基础数据。

## 2.27 机载维护与健康管理系统关键技术

机载维护与健康管理系统技术涉及到从设备到飞机各个层级的关键技术,主要包括:

### 1) 飞机级故障诊断技术

飞机级故障诊断技术通过正向设计过程,结合飞机实际运营与签派要求,将故障数据进行设计以及合理分级,对飞机等不同层级的故障诊断需求进行分析与分配,在相应层级对其故障诊断进行合理规划,并结合实际应用场景对健康数据进行处理,保证系统设计的最优。在系统集成、飞机集成过程中,对故障数据进行分析 and 集成,消除级联影响,形成准确根因定位信息。

主要挑战:现代民用飞机系统集成程度不断提高,交联关系复杂、耦合紧密,在研究飞机各种交联关系的基础上,需对飞机的物理耦合、能量流和数据流及正常和异常场景等进行分析解耦。各类交互数据接近百万数量级,传统的研究与分析方法很难满足研制需要,因此需研究形成梳理各系统交联关系的方法,并通过自动化的辅助工具,梳理抽象飞机系统的交互关系,在仿真与试验环境中确认设计的正确性,通过流程保证和设计迭代不断完善设计和产品。

### 2) 健康管理数据收集与处理技术

健康管理数据收集与处理技术包括:机上数据采集、机载数据处理与压缩、先进无线传感器传输、高带宽空地数据安全传输、智能大数据处理等技术。

主要挑战:机载维护与健康管理系统数据量巨大,主要需在不明显增加机上数据传输与系统复

杂性的前提下,进行采集点及数据分析,完成数据采集、压缩、存储并传输到地面。需要对机载计算与存储资源进行权衡分析、压缩算法设计等,进行空地链路传输研究,确保数据的稳定、高效传输。开展先进传感器与数据的智能识别、处理研究,分析相应的异常情况。

### 3) 飞机关键部件及发动机健康预测技术

对飞机关键部件,包括结构件和机械系统时寿件,以及发动机相关部件开展精确建模,挖掘民机系统设备运维大数据蕴含的性能退化规律,通过运行数据迭代优化数字模型及相关的部分试验,逐步完善工程化寿命预测模型。

主要挑战:需通过系统运行与故障机理研究建立相应产品的精确数字孪生模型。收集运行数据以及环境数据,如何建立数字模型参数与运行反馈参数间的精确关系是一个需解决的难点,在此基础上,通过智能算法分析运行数据之间及与模型的关联性,逐步完成算法的校验。

## 3 航电系统主要发展趋势及总结

大型客机航电系统综合设计需要考虑包括最新的适航要求、工业标准规范,全机对航电各系统的需求,系统设计和架构权衡,安全性、可靠性和维护性要求,系统安装及最少布线重量优化,良好的人机接口以减轻飞行员负荷和防止人为差错的发生,通信、导航、监视要求和规则,符合民航市场和技术发展趋势的适用技术及成本优化,易于产品和功能升级的设计特征以满足新规则和新技术的更新要求,同步发展匹配的系统集成和综合的工具集等多方面要素。

1) 新一代大型客机航电系统集成仍将以IMA架构为主导,且集中式处理和分布式2种架构并存发展,分布式复杂IMA系统是研究的一个热点,同时,不同层级系统的综合化、网络性能的提升和架构的优化是系统综合研究的重点。

2) 基于操作任务和飞行机组的使用等场景需求,高度集成的信息显示、灵活的信息组织、直观的交互仍是驾驶舱显示系统的发展重点。显示器硬件的更新、触控等虚拟控制技术的发展,也将持续推动驾驶舱显示与控制技术发展。

3) 考虑到未来航空业的高速发展趋势,现有

的运行技术将会限制未来民用航空效率的进一步提升。因此在新航行体系下,机载、地面间的多端交互和协同能力的提升是后续飞行管理的发展研究方向。

4) 无线电导航系统国内后续将利用以北斗导航为主的多星座导航数据进行融合应用,进一步提升卫星导航数据的精度、可用性和完整性。

5) 下一代综合监视系统将进一步研究相互抑制的L波段功能(TCAS、应答机和测距器等)在同一设备中的集成,进一步提升系统的融合性能和综合化程度,并且将应用更多ADS-B In应用,提升飞机运行效率和安全性。

6) 新一代数据互联技术的应用及现有的数据链应用、数据链协议栈以及数据链链路传输技术的进一步升级,以适应新一代空中交通管理系统对高速、高实时性、高可用性、高完整性等要求。

7) 惯性基准系统将向高精度、高可靠性、高完整性和轻量小型化、低成本方向发展,第四代原子陀螺惯性技术及其系统具有极大的技术潜力,随着新型传感器技术成熟度的提高,将逐步投入应用。

8) 面向未来的信息系统需求,通过信息获取、吞吐量及处理能力的进一步提升,提高网络安全、信息融合、智能处理等方面的能力,进一步提升飞机的使用维护性能和整机安全性。

9) 未来可重点关注飞机级故障诊断、典型系统的故障机理、产品性能退化规律、数字孪生模型、智能算法等机载维护 and 健康管理未来技术,通过短期、中期、长期战略分步实施。

## 参 考 文 献

- [1] 赵万里, 郭迎清, 徐柯杰, 等. 航空发动机多电分布式控制系统故障诊断与容错关键技术综述[J]. 航空学报, 2023, 44(10): 027519.  
ZHAO W L, GUO Y Q, XU K J, et al. Review of key technologies for fault diagnosis and accommodation for multi-electric distributed engine control system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44 (10): 027519 (in Chinese).
- [2] 王羽, 洪沛, 王震. IMA系统软件集成过程的相关考虑[J]. 航空电子技术, 2021, 52(3): 37-42.  
WANG Y, HONG P, WANG Z. Considerations for soft-



- ware integration process in IMA systems[J]. *Avionics Technology*, 2021, 52(3): 37-42 (in Chinese).
- [3] 张旻, 武君胜, 吴芳. 基于角色的IMA平台应用软件开发与集成技术[J]. *航空计算技术*, 2021, 51(6): 88-91, 95. ZHANG M, WU J S, WU F. Application software development and integration technology of role-based IMA platform[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2021, 51(6): 88-91, 95 (in Chinese).
- [4] SPITZER C R, FERRER U, FERRER T, 等. 数字航空电子技术(上、下册)[M]. 肖刚, 程宇峰, 译. 北京: 航空工业出版社, 2010. SPITZER C R, FERRER U, FERRER T, et al. Digital avionics[M]. XIAO G, CHENG Y F, translated. Beijing: Aviation Industry Press, 2010 (in Chinese).
- [5] 熊华钢, 王中华. 先进航空电子综合技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. XIONG H G, WANG Z H. Advanced avionics integration techniques[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009 (in Chinese).
- [6] 何锋. 机载网络技术基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018. HE F. Fundamentals of airborne network[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018 (in Chinese).
- [7] 金德琨, 敬忠良, 王国庆, 等. 民用飞机航空电子系统[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011. JIN D K, JIANG Z L, WANG G Q, et al. Civil aircraft avionics systems[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2011 (in Chinese).
- [8] 蒲小勃. 现代航空电子系统与综合[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013. PU X B. Modern avionics system and integration[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013 (in Chinese).
- [9] 房玮. 浅谈民航飞机驾驶舱显示器的演变[J]. *科技资讯*, 2016, 14(20): 55-56. FANG W. On the evolution of cockpit display of civil aviation aircraft[J]. *Science & Technology Information*, 2016, 14(20): 55-56 (in Chinese).
- [10] 江卓远, 孙瑞山. 民机飞行安全中的人为因素影响机理研究[J]. *科技创新导报*, 2016, 13(15): 181. JIANG Z Y, SUN R S. Annual report of human factor influencing mechanism on civil aircraft flight safety[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2016, 13(15): 181 (in Chinese).
- [11] 周贵荣. 民用飞机驾驶舱显示系统[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019: 15-22. ZHOU G R. Civil aircraft cockpit display system[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2019: 15-22 (in Chinese).
- [12] LEFEBVRE Y. Mastering the ARINC 661 standard [C]// SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive. Warrendale: SAE International, 2011.
- [13] AECC. ARINC 661-6 Cockpit display system interfaces to user systems: ARINC 661 [S]. Annapolis City: ARINC, 2016.
- [14] 许健, 吴磊, 褚江萍, 等. 民用飞机信息重构技术性能分析[J]. *航空学报*, 2019, 40(2): 522442. XU J, WU L, CHU J P, et al. Performance analysis of information reconfiguration technology on civil aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(2): 522442 (in Chinese).
- [15] YANG W, SUN Q, GAO X L, et al. Human interface research of civil aircraft cockpit based on touch control technology[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 608(1): 012018.
- [16] Committee S-7. Touch interactive display systems: Human factors considerations, system design and performance guidelines: SAE ARP 60494 [S]. Warrendale: SAE International, 2019.
- [17] YE H M, SWIDER C, JO Y J, et al. Human factors considerations in the design and evaluation of flight deck displays and controls: Version 2.0[R]. Cambridge: John A. Volpe National Transportation Systems Center (US), 2016.
- [18] LOUKIA D L, KEY D, IMMANUEL B. Cockpit interruptions and distractions: A line observation study[C]// 11th International Symposium on Aviation Psychology. Columbus: The Human Systems Integration Division at NASA Ames Research Center, 2001.
- [19] HUTCHINS E. The cognitive consequences of patterns of information flow[J]. *Intellectica Revue De L'Association Pour La Recherche Cognitive*, 2000, 30(1): 53-74.
- [20] PAUL C S, ANNA C T. Flight crew task management in non-normal situations[EB/OL]. (2004-11-04)[2023-11-01]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020040110.pdf>.
- [21] Committee S-7. SAE ARP4102-7 Appendix A Electronic display symbology for EADI/PFD [S]. Warrendale: SAE International, 1999.
- [22] Committee S-7. SAE ARP4102 Flight deck display panels, controls, and displays[S]. Warrendale, PA: SAE International, 2007.
- [23] FUNK K, BRAUNE R. The AgendaManager: A knowledge-based system to facilitate the management of flight deck activities[C]// SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive. Warrendale: SAE International, 1999: 922-936.
- [24] Committee S-7. SAE ARP5056 Flight crew interface considerations in the flight deck design process for Part

- 25 aircraft[S]. Warrendale: SAE International, 2006.
- [25] FAA. AC120-28D Criteria for approval of category III weather minima for takeoff, landing, and rollout: AFS-400 [S]. Washington, D.C.: FAA, 1999.
- [26] FAA. AC120-29A Criteria for approval of category III weather minima for takeoff, landing, and rollout: AFS-400 [S]. Washington, D.C.: FAA, 1999.
- [27] AFS-400. AC120-29A Criteria for approval of category I and category II weather minima for approach [S]. Washington, D.C.: FAA, 2002.
- [28] AFS-400. AC90-101A Approval guidance for required navigation performance (RNP) procedures with authorization required (AR) [S]. Washington, D.C.: FAA, 2011.
- [29] Committee S-7. SAE ARP4102-7 Appendix C Electronic display symbology for engine displays[S]. Warrendale: SAE International, 1999.
- [30] ANM-11. AC25-11B Electronic flight displays [S]. Washington, D.C.: FAA, 2014.
- [31] Committee S-7. SAE ARP4102-7 Appendix B Electronic display symbology for EHSI/ND[S]. Warrendale: SAE International, 1999.
- [32] MOIR I, SEABRIDGE A, JUKES M. Civil avionics systems[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2013: 88-109.
- [33] 李航, 叶宝玉. 典型民航飞机通信系统[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2016: 20-42.
- LI H, YE B Y. Typical civil aviation aircraft communication system[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2016: 20-42 (in Chinese).
- [34] 何锋. 航空电子系统综合调度理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 30-50.
- HE F. Theory and approach to avionics system integrated scheduling [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 30-50. (in Chinese).
- [35] EASA. ED decision 2018/008/R[S]. Cologne: EASA, 2018.
- [36] EASA. Integrated modular avionics (IMA): AMC 20-170[S]. Cologne: EASA, 2017.
- [37] Committee S-7. Guidelines for development of civil aircraft and system: SAE ARP 4754A [S]. Warrendale: SAE International, 2010.
- [38] 马朝军, 黄世杰, 付玉堂, 等. 基于综合模块化航电多方协同开发下的适航认证工作策划考虑[J]. 航空标准化与质量, 2023(2): 21-26.
- MA C J, HUANG S J, FU Y T, et al. Planning and consideration of airworthiness certification based on integrated modular avionics multi-party collaborative development[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2023 (2): 21-26 (in Chinese).
- [39] 韩嫚莉, 周广飞. IMA 增量式认可与 TSO 取证的研究[J]. 航空计算技术, 2022, 52(2): 125-129.
- HAN M L, ZHOU G F. Research on incremental acceptance and TSO authorization of integrated modular avionics system [J]. Aeronautical Computing Technique, 2022, 52(2): 125-129 (in Chinese).
- [40] RTCA. Integrated modular avionics (IMA) design guidance and certification considerations: DO-297[S]. Washington, D.C.: RTCA, Inc, 2005.
- [41] 吴佳驹, 杨俊, 韩艳龙, 等. 飞机管理系统的研究现状与发展趋势[C]//第九届中国航空学会青年科技论坛论文集. 北京: 中国航空学会, 2020: 893-901.
- WU J J, YANG J, HAN Y L, et al. Research Status and Development Trend of Aircraft Management System[C]// Proceedings of the Ninth Aviation Society of China Youth Science and Technology Forum. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2020: 893-901 (in Chinese).
- [42] FAA. Performance based navigation strategy 2016(PBN NAS)[R]. Washington, D.C.: FAA, 2016.
- [43] 中国民用航空局. 中国民航基于性能的导航路线图[S]. 北京: 中国民用航空局, 2009: 10.
- CAAC. Roadmap for performance based navigation in China[S]. Beijing: CAAC, 2009: 10 (in Chinese).
- [44] 吕小平. RNP/RNAV 技术应用的效益分析[J]. 中国民用航空, 2008(4): 42-44.
- LV X P. Benefit analysis of RNP/RNAV application[J]. China Civil Aviation, 2008(4): 42-44 (in Chinese).
- [45] LEE P U, IDRIS H, HELTON D, et al. Integrated trajectory-based operations for traffic flow management in an increasingly diverse future air traffic operations [C] // 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-9.
- [46] LIU Z A, XIAO G, HONG J, et al. A collaborative trajectory management framework in case of single pilot operation disability: considering the overall safety of air traffic system[C]// 2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [47] MONDOLONI S. Trajectory-based operations—robust planning under trajectory uncertainty [C] // 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-10.
- [48] ARINC. Advanced flight management computer system: ARINC 702-5[S]. Annapolis City: ARINC, 2018.
- [49] LU X D, MORIOKA K, KANADA N, et al. 4D trajectory negotiation to achieve situational and operational awareness for air traffic management [C] // 2023 IEEE 15th International Symposium on Autonomous Decentral-

- ized System (ISADS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [50] 卢奕羽. 初始飞行计划4D航迹生成及仿真系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- LU Y Y. Research on the initial flight Plan4D trajectory generating and simulation system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014 (in Chinese).
- [51] RTCA. Minimum aviation system performance standards; required navigation performance for area navigation; DO-236[S]. Washington, D.C.: RTCA, 2013.
- [52] 任仲贤. 大型民机飞行管理系统仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- REN Z X. Simulation research of flight management system of large civil aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018 (in Chinese).
- [53] 张泽栋. 面向程序训练器设计的飞行管理系统仿真技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.
- ZHANG Z D. Research on flight management system simulation technology for program trainer design [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022 (in Chinese).
- [54] 高健博. 民航飞机与飞行管理系统设计[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(3): 113-115.
- GAO J B. Design of civil aviation aircraft and flight management system[J]. Computer Knowledge and Technology, 2018, 14(3): 113-115 (in Chinese).
- [55] 王悦, 谷宇, 王成汗. 民用航空导航技术浅析[C]//中国航空学会, 中国航空研究院. 2018(第七届)民用飞机航电国际论坛论文集. 2018: 193-195.
- WANG Y, GU Y, WANG C H. Brief analysis of civil aviation navigation technology [C]//Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, AVIC Manufacturing Technology Institute. Proceedings of the 2018 (7th) Civil Aircraft Avionics International Forum. 2018: 193-195 (in Chinese).
- [56] 田润, 崔志颖, 张爽娜, 等. 基于低轨通信星座的导航增强技术发展概述[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(1): 66-81.
- TIAN R, CUI Z Y, ZHANG S N, et al. Overview of navigation augmentation technology based on LEO [J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(1): 66-81 (in Chinese).
- [57] 王贺, 尹玉昂. 卫星导航星基增强系统概述[J]. 中国无线电, 2022(11): 33-35, 39.
- WANG H, YIN Y A. Overview of satellite-based augmentation system for satellite navigation [J]. China Radio, 2022(11): 33-35, 39 (in Chinese).
- [58] 钱君, 于超鹏, 刘睿. 民用飞机环境综合监视系统的发展及设计考虑[C]//第九届长三角科技论坛——航空航天科技创新与长三角经济转型发展分论坛论文集. 2012: 15-20.
- QIAN J, YU C P, LIU R. Development and design considerations of civil aircraft integrated surveillance system [C]//9th Yangtze River Delta Science and Technology Forum - Aerospace Science and Technology Innovation and Economic Transformation and Development Sub-forum. 2012:15-20 (in Chinese).
- [59] ARINC. Integrated surveillance system (ISS): ARINC 768[S]. Annapolis City: ARINC, 2005.
- [60] 何进. 民用飞机机载监视系统发展综述[J]. 电讯技术, 2014, 54(7): 1025-1030.
- HE J. Development summarization of airborne surveillance system for civil aircraft[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(7): 1025-1030 (in Chinese).
- [61] 谢梦涛. 机载综合监视系统概论[J]. 科技创新导报, 2011, 8(32): 86-87.
- XIE M T. Introduction to airborne integrated surveillance system [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011, 8(32): 86-87 (in Chinese).
- [62] 中国民用航空局飞行标准司. 航空承运人使用地空数据通信系统的标准与指南: AC-121-FS-2018-016R3[S]. 北京: 中国民用航空局, 2018.
- CAAC Flight Standard Division. Standards and guidelines of aviation operators to use the air-ground data communication system: AC-121-FS-2018-016R3 [S]. Beijing: CAAC, 2018 (in Chinese).
- [63] 丁汀. 机载数据链通信系统综合调研、分析与设计考虑[J]. 民用飞机设计与研究, 2016(2): 69-74.
- DING T. Comprehensive investigation, analysis and design consideration of the onboard datalink communication system[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2016(2): 69-74 (in Chinese).
- [64] 宋金泽, 解丽荣. 民机数据链系统的设计考虑[J]. 科技创新导报, 2015, 12(22): 88-89.
- SONG J Z, XIE L R. Design considerations of civil aircraft data link system[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(22): 88-89 (in Chinese).
- [65] 袁树德, 陆晓刚. 民用飞机数据链端系统通信协议分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2016(2): 58-60.
- YUAN S D, LU X G. Analysis of communication protocol for datalink end system for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2016(2): 58-60 (in Chinese).
- [66] 陆晓刚. 民用航空空地通信应用和发展[J]. 中国新通信, 2016, 18(5): 22-23.
- LU X G. Application and development of civil aviation air-ground communication[J]. China New Telecommunications, 2016, 18(5): 22-23 (in Chinese).



- [67] 张军, 张彦仲. 空管航空电子技术新进展: 2011高技术发展报告[R]. 北京: 科学出版社, 2011.  
ZHANG J, ZHANG Y Z. New progress in air traffic control avionics technology: 2011 High Technology Development Report [R]. Beijing: Science Press, 2011.
- [68] 张军. 现代空中交通管理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.  
ZHANG J. Modern air traffic management[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2005 (in Chinese).
- [69] 张舒黎, 石元兵, 王雍. 北斗短报文通信安全研究[J]. 通信技术, 2019, 52(11): 2776-2780.  
ZHANG S L, SHI Y B, WANG Y. Communication security of Beidou short messages [J]. Communications Technology, 2019, 52(11): 2776-2780 (in Chinese).
- [70] SESAR. EWA04-1-T2-D1: Updated LDACS1 system specifications[S]. Belgium: SESAR, 2011: 111-112.
- [71] 朱永文, 喻兰辰晖. L波段数字航空通信系统研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(4): 700-714.  
ZHU Y W, YU L C H. Overview of L-band digital aeronautical communication system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(4): 700-714 (in Chinese).
- [72] 刘天华, 王丽, 林静, 等. 支持四维航迹运行的新一代民机数据链技术综述[J]. 电讯技术, 2023, 63(1): 145-150.  
LIU T H, WANG L, LIN J, et al. Overview of new generation civil aviation datalink technology supporting 4D trajectory based operation [J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63(1): 145-150 (in Chinese).
- [73] ARINC. Internet protocol suite (IPS) for aeronautical safety services roadmap document[S]. Annapolis City: ARINC, 2017: 43-50.
- [74] 韩营. ATG地空互联网技术, 开启空中互联网时代[EB/OL]. (2021-01-27) [2023-09-26]. <https://www.zte.com.cn/china/about/magazine/zte-technologies/2021/1-cn/4/6.html>.  
HAN Y. ATG ground-to-air Internet technology opens the era of airborne Internet [EB/OL]. (2021-01-27) [2023-09-26]. <https://www.zte.com.cn/china/about/magazine/zte-technologies/2021/1-cn/4/6.html>.
- [75] 宿锐. 机载互连网络接入技术(ATG/SATCOM)[J]. 科学与技术, 2020(12).  
SU R. Onboard interconnection network access technology (ATG/SATCOM) [J]. Science and Technology, 2020(12)(in Chinese).
- [76] 邱艺煌, 卞启龙, 徐浚哲, 等. 面向四维航迹运行的空地数据链架构设计[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(29): 92-95.  
QIU Y H, BIAN Q L, XU J Z, et al. Design of air-ground data link architecture for four-dimensional track operation [J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(29): 92-95 (in Chinese).
- [77] 邓潘, 张天舒, 刘建国, 等. 532 nm 和 355 nm 瑞利激光雷达观测中层大气的数据对比分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(A02): 19-25.  
DENG P, ZHANG T S, LIU J G, et al. Comparative analysis of data from 532 nm and 355 nm Rayleigh lidar observations of the middle atmosphere [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(A02): 19-25 (in Chinese).
- [78] 岳亚洲, 李彬, 雷宏杰. 激光大气运动参数测量技术研究进展及展望(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(4): 0428001.  
YUE Y Z, LI B, LEI H J. Advances and prospects of laser measurement technology for air motion parameters(invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4): 0428001 (in Chinese).
- [79] 牛文生, 张军才. 信息技术改变飞行[N]. 中国航空报, 2012-11-20(T03版).  
NIU W S, ZHANG J C. Information technology changes flight[N]. China Aviation News, 2012-11-20(T03)(in Chinese).
- [80] 曹全新. 机载信息系统的应用研究及发展趋势初探[J]. 民用飞机设计与研究, 2014(1): 72-76.  
CAO Q X. Application research and trend preliminary prediction about on-board information system [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2014(1): 72-76 (in Chinese).
- [81] 曹全新, 杨融, 孙志强, 等. 民用飞机网络安全问题与策略探究[J]. 网络安全技术与应用, 2016(12): 150-151, 153.  
CAO Q X, YANG R, SUN Z Q, et al. Research on network security problems and strategies of civil aircraft [J]. Network Security Technology & Application, 2016(12): 150-151, 153 (in Chinese).
- [82] 孙志强, 曹全新. 民用飞机机载网络安保设计方法研究[J]. 装备制造技术, 2015(8): 158-160.  
SUN Z Q, CAO Q X. Network security technology for civil aircraft research [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(8): 158-160 (in Chinese).
- [83] 赵长啸, 汪克念, 张伟, 等. 民机航电系统功能-信息安全一体化分析方法[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(9): 49-56.  
ZHAO C X, WANG K N, ZHANG W, et al. Integrated analysis method of functional safety and cyber security of avionics system for civil aircraft [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(9): 49-56 (in Chinese).
- [84] 任振东, 杜稀晖. 面向互联飞机的空天地网络一体化融合研[J]. 民用飞机设计与研究, 2022(2): 137-143.  
REN Z D, DU X H. Research on the integration of air,

- space and ground networks for connected aircraft [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2022 (2): 137-143 (in Chinese).
- [85] AEEC. Commercial aircraft information security concepts of operation and process framework: ARINC 811 [S]. Washington, D.C.: RTCA, 2005.
- [86] 曹全新. 新一代民机航电系统初探[J]. 民用飞机设计与研究, 2010(1): 1-4, 9.
- CAO Q X. Preliminary study on the avionics system of a new generation of civil aircraft [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2010(1): 1-4, 9 (in Chinese).
- [87] 牛文生. 基于天地一体化信息网络的智能航空客运系统 [J]. 航空学报, 2019, 40(1): 522415.
- NIU W S. Intelligent air passenger transportation system utilizing integrated space-ground information network [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(1): 522415 (in Chinese).
- [88] 吕小平. 电子飞行包(EFB)系统介绍[J]. 中国民用航空, 2007(10): 47-50.
- LV X P. An introduction to EFB system [J]. China Civil Aviation, 2007(10): 47-50 (in Chinese).
- [89] 中国民用航空局. 中国民航新一代航空宽带通信技术路线图[S]. 北京: 中国民用航空局, 2021.
- CAAC. Roadmap for new generation aviation broadband communication technology of civil aviation in China [S]. Beijing: CAAC, 2021 (in Chinese).
- [90] 宫伟祥. 驾驶舱打印机数据传输研究 [J]. 飞机设计, 2017, 37(1): 76-80.
- GONG W X. Study on data transmission of cockpit printer [J]. Aircraft Design, 2017, 37(1): 76-80 (in Chinese).
- [91] 周贵荣, 曹全新. 民用飞机客舱与机载信息系统 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019: 28-30.
- ZHOU G R, CAO Q X. Cabin and onboard information system of civil aircraft [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2019: 28-30 (in Chinese).

(责任编辑: 范真真)

## Review of key technologies for avionics systems integration on large passenger aircraft

ZHOU Guirong\*, XU Jianyuan, MA Shaobo, ZONG Junyao, SHEN Jinqing, ZHU Haijie

Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd.,  
Shanghai 201210, China

**Abstract:** In order to further enhance the safety and efficiency of airspace operations in the future aviation transport system, the requirements for the avionics systems of large passenger aircraft in terms of system integrated control, information sharing among relevant parties, air-ground coordinated decision-making and management, required navigation surveillance performance, and trajectory-based operation are summarized, taking into account the technological development of modern integrated avionics systems. The advanced avionics system architecture, key functional features and safety design process are outlined. In the context of the development and integration of domestically produced integrated avionics systems for large passenger aircraft, the current status, development trends, and key technologies in areas such as avionics systems integration, cockpit displays and controls, integrated modular avionics, flight management, radio navigation, integrated surveillance, onboard data links, atmospheric inertial navigation, and onboard information are analyzed. Furthermore, the prominent technological features, research hotspots, priorities, and application requirements for the next generation avionics systems of large passenger aircraft are discussed.

**Keywords:** large passenger aircraft; operating environment; system integration; avionics system; integrated modular avionics

**Received:** 2023-12-09; **Revised:** 2024-01-03; **Accepted:** 2024-01-24; **Published online:** 2024-02-21 12:27

**URL:** <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2024/V45/I5/529956>

**Foundation item:** National Level Project

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