

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.01.022

大型民用飞机 IMA 系统应用分析及发展建议^{*}

尤海峰^{**}, 刘 煜

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘 要:介绍了综合模块化航空电子(IMA)系统的基本概念、系统结构和特点。详细描述了 IMA 在 3 种典型大型民用飞机(波音 777、波音 787 和空客 A380)的航空电子系统中的应用情况,并对 3 种机型的 IMA 系统进行了对比分析。总结了大型民用飞机 IMA 系统的关键技术,并给出了发展建议,可为大型飞机 IMA 系统的研制提供一定的参考价值。

关键词:大型民用飞机;综合模块化航空电子;应用分析;关键技术;发展建议

中图分类号:V243 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)01-0110-07

Application Analysis of and Development Suggestion for IMA System on Large Civil Aircrafts

YOU Hai-feng, LIU Yu

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The concept, architecture and characteristics of Integrated Modular Avionics(IMA) system are introduced. Then IMA's application cases in the avionics system of three representative large civil aircrafts(Boeing 777, Boeing 787 and Airbus A380) are described in detail and their IMA systems are compared with each other. Finally, the key techniques for IMA system on large civil aircrafts are summarized and the development suggestions are given, which can provide reference for developing IMA system on large civil aircrafts.

Key words: large civil aircraft; integrated modular avionics; application analysis; key techniques; development suggestion

1 引 言

航空电子系统关系到飞机的安全性、可靠性、先进性和成本,是飞机上最重要的子系统之一。我国大型飞机的研制已经正式启动,在研发大型飞机航空电子系统的过程中,为了避免闭门造车和多走弯路,我们可以借鉴和参考国际上的主流大型民用飞机的航空电子系统,然后在此基础上进行创新,形成自己的特色。

随着微电子技术和软件技术的发展,航空电子系统结构已从传统的分立式、联合式向综合化、高度综合化发展。第一个应用综合模块化航空电子系统

(Integrated Modular Avionics, IMA)的大型民用飞机是波音公司于 1995 年正式推出的波音 777 飞机,该飞机采用飞机信息管理系统(Airplane Information Management System, AIMS)来综合多个航空电子子系统的功能^[1-2]。波音 787 飞机的航空电子系统在波音 777 的基础上综合程度进一步提升,不仅综合了传统的航电功能,而且将许多非传统航电功能也综合进来^[3]。空中客车公司最新推出的 A380 飞机采用了具有自身特色的综合模块化结构,与波音 777 和波音 787 的最大不同是, A380 没有以机柜(Cabinet)的形式形成一个中央处理系统,而是将处理模块以分布式的方式部署在机身的各个地方^[4]。

国内相关学者对大型民用飞机航空电子系统的

^{*} 收稿日期:2012-09-24;修回日期:2012-12-12 Received date:2012-09-24;Revised date:2012-12-12

^{**} 通讯作者:hf_you@163.com Corresponding author: hf_you@163.com

发展进行了跟踪,并对我国大型飞机航空电子系统的发展提出了有益的建议^[1,5-7]。但是,相关文献没有对典型大型民用飞机 IMA 系统的结构、功能和具体技术进行详细介绍和分析。本文将对 3 种典型的大型民用飞机(波音 777、波音 787 和空客 A380)中的 IMA 系统进行详细介绍和对比分析,在此基础上归纳总结出发展 IMA 系统的关键技术并给出大型民用飞机 IMA 系统的发展建议。

2 综合模块化航空电子系统

2.1 IMA 系统的基本概念

IMA 系统是指飞机上的一个分布式实时计算机网络,该网络包含若干个计算模块,且每个计算模块能够运行多个不同安全关键级别的应用程序。IMA 的核心理念是硬件共享,即多个应用程序共享同一个处理单元,这样就能减少处理器、配线、I/O 的成本,此外,还能减小航空电子系统的重量、体积、能耗等^[5]。

2.2 IMA 系统结构

一个 IMA 系统由 4 个部分构成:机柜(Cabinet)、全局数据总线、与全局数据总线兼容的设备和远端数据集中器(Remote Data Concentrator, RDC)^[8]。IMA 系统结构如图 1 所示。

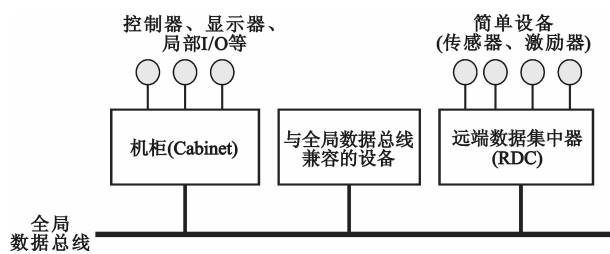


图 1 IMA 系统结构
Fig.1 IMA's system architecture

机柜用来提供计算资源,并为其中的应用程序提供必要的接口。机柜由 3 个部分构成:机柜框架、背板和功能模块^[8]。其中,机柜框架为机柜内部的功能模块提供了机械和电气环境。背板为功能模块和外部航电设备提供接口,背板分为 3 个区域:第一个区域是飞机配线和背板之间的接口;第二个区域为背板总线,用于功能模块之间的信息传递;第三个区域用于电能分配。IMA 系统中的功能模块应该被设计成外场可更换模块(Line Replaceable Module, LRM),按照功能可分为多种不同的类型,例如核心

处理器、标准 I/O、特殊 I/O、电能供给模块、总线桥、网关、块存储器等。

全局数据总线用于机柜、RDC 以及总线上的其他挂载设备之间的通信。ARINC Report 651 中指明 ARINC 629 为全局数据总线,实际上,IMA 系统中的全局数据总线不限于 ARINC 629 总线,例如,波音 787 和空客 A380 采用的全局数据总线是符合 ARINC 664 标准的航空电子全双工交换式以太网(Avionics Full Duplex Switched Ethernet, AFDX)。

机柜之外的设备,按照与全局数据总线是否兼容可分为两类。如果与全局数据总线兼容,则可以直接接入全局数据总线,与总线上挂载的机柜和其他设备通信。如果与全局数据总线不兼容,则需要先与 RDC 连接,然后通过 RDC 接入全局数据总线。RDC 可以为许多简单设备服务,其作为数据输入设备时,将数据从模拟、离散或者其他格式转换为与全局数据总线兼容的格式;当其作为一种输出设备时,将全局数据总线传输的数据转换为模拟、离散或者其他格式^[8]。RDC 还负责管理与之相连的简单设备的健康状态。

2.3 IMA 系统的特点

相对传统的独立式、联合式航空电子系统,IMA 系统具有以下特点:

- (1)对硬件设备进行综合,包括网络、模块和 I/O 设备;
- (2)采用分层体系结构,利用标准的编程接口使硬件与应用软件彼此独立;
- (3)采用分区操作系统来管理同一模块中的多个应用程序,操作系统必须采取保护机制来确保同一硬件模块中的多个应用程序之间不会相互影响,并且能以适当的调度策略对多个不同的应用程序进行调度;
- (4)模块上的应用程序能够进行静态重构(飞机未使用时)或动态重构(飞机处于飞行阶段时)。

3 大型民用飞机 IMA 系统典型应用

3.1 波音 777

1995 年,波音公司正式推出波音 777 飞机。Honeywell 公司为其提供了飞机信息管理系统(AIMS),该系统采用了综合模块化结构,是 IMA 系统在商用飞机中的第一个应用实例^[1]。AIMS 为飞机中的 7 个子系统提供数据处理能力,包括主显示

系统(PDS)、中央维护计算系统(CMCS)、飞机状态监控系统(ACMS)、飞行数据记录器系统(FDRS)、数据通信管理系统(DCMS)、飞行管理计算机系统(FM-CS)和推理管理计算机系统(TMCS),其余子系统仍然采用传统的联合式结构^[9]。

AIMS 安装于两个机柜之中,并通过 ARINC 629 总线、ARINC 429 总线以及离散 I/O 通道与飞机其他系统相连接。每个机柜内安插了 8 个外场可更换模块(LRM),包括 4 个核心处理模块(Core Processor Module, CPM)和 4 个输入输出模块(Input Output Module, IOM),此外,考虑到未来功能扩展的需要,还预留了 1 个 CPM 和 2 个 IOM 的插槽^[2]。CPM 负责 AIMS 中各种功能的运算,共有 4 种类型:CPM/COMM(中央处理/通信模块)、CPM/ACMF(中央处理/飞行状态监控功能模块)、CPM/BASIC(中央处理/基本模块)和 CPM/GG(中央处理/图像产生器模块)^[10]。所有 IOM 具有相同的硬件和软件,它们负责传送 CPM 中的数据到其他机载系统,并从其他机载系统接收传送至 CPM 的数据。在机柜内部,模块之间的信息传递由高速背板总线 SAFEbus 提供,这种总线标准之后被发展为 ARINC 659 标准^[11]。AIMS 机柜的结构如图 2 所示^[12]。

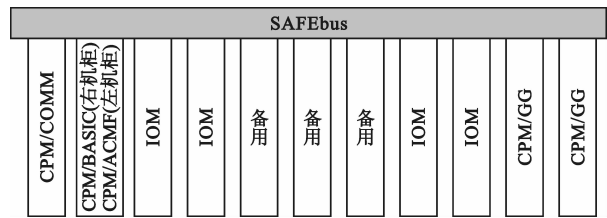


图 2 AIMS 机柜结构
Fig.2 Architecture of the AIMS cabinets

每个 CPM 中均部署了多个不同关键级别应用程序,如表 1 所示^[9]。为了能够对不同关键级别的应用程序进行独立的认证,并且使不同的应用程序之间不相互破坏数据,Honeywell 公司开发了 Apex 操作系统,这种操作系统成为了 ARINC 653 操作系统的基础^[11]。Apex 操作系统采用了“健壮分区(Robust Partitioning)”的方法来对运行在同一处理器中的不同应用程序进行隔离。这种隔离措施要求不仅在空间上,而且在时间上对不同的应用程序进行划分。应用程序的存储器空间在运行之前就被分配好,每个应用程序均不能破坏其他应用程序存储空间内的数据,对于任意的存储页面,最多只有一个应

用分区对其进行写访问。应用程序的处理器资源调度通过一组调度规则表来控制,调度规则表在运行前确定,并可以加载至模块中。每个应用程序在分配的处理时间占用处理器资源,其他应用程序在此时间段内不能抢占。

表 1 波音 777 中的 CPM 包含的功能		
Table 1 Functions allocated in CPMs of Boeing 777		
模块类型	包含功能	所属系统
CPM/COMM	数据转换网关功能	AIMS
	中央维护计算功能	CMCS
	数据通信管理功能	DCMS
	驾驶舱通信功能	ACMS
	快速存储记录器功能	FDRS
	数字飞行数据采集功能	FDRS
CPM/ACMF	数据转换网关功能	AIMS
	飞行管理计算功能	FMCS
	推力管理计算功能	TMCS
	飞机状态监控功能	ACMS
CPM/BASIC	数据转换网关功能	AIMS
	飞行管理计算功能	FMCS
	推力管理计算功能	TMCS
CPM/GG	数据转换网关功能	AIMS
	主显示功能	PDS

随着航空电子技术的进步,Honeywell 公司后来又对波音 777 的航空电子设备进行了升级,在每个机柜中安装的模块数增加至 10 个,但其重量却比原来的 AIMS 减轻 14.5 kg,功耗减少 39%^[10]。

3.2 波音 787

波音 787 的航空电子系统主要由通用核心系统(Common Core System, CCS)组成。CCS 由 Smiths 公司(已被 GE 收购)提供,它被称为波音 787 的中央神经系统。CCS 不但综合了传统意义的航空电子系统功能,还综合了燃油系统、电源系统、液压系统、环控系统、防冰系统、防火系统、起落架系统、舱门系统等非传统航电系统的处理和 控制功能^[3]。波音 787 的航空电子系统在波音 777 的基础上进一步综合化而来,波音 777 飞机采用了近 80 个独立的计算机系统来满足约 100 种不同设备的应用需求,而波音 787 飞机的计算机系统则减少至 30 部^[13]。波音 777 与波音 787 航空电子系统的关系如图 3 所示^[14]。

CCS 由公共计算资源(Common Computing Resource, CCR)、公共数据网络(Common Data Network, CDN)和远端数据集中器(RDC)三部分组成。CCR

安装在两个机柜中,机柜之间通过 CDN(AFDX 数据总线)连接。与 AFDX 数据总线兼容的 LRU 通过 AFDX 交换机直接接入 CDN。此外,对于拥有模拟信号输出或者 ARINC 429 信号输出的 LRU,必须先将其与 RDC 连接,然后接入 CDN。

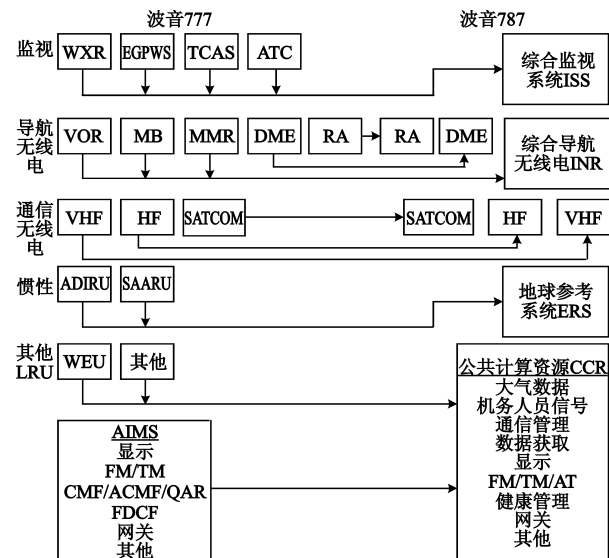


图3 波音777与波音787航空电子系统的关系

Fig.3 Relationship between Boeing 777 and 787's avionics system

CCR 为波音 787 飞机提供了计算资源,从图 3 中可以看出,与波音 777 飞机的 AIMS 相比,CCR 综合了更多的功能。两个 CCR 机柜中共装载了 16 个 LRM,有 5 种不同的类型,分别是 8 个通用处理模块 (General Processing Module, GPM)、2 个能源控制模块、2 个网络转换器、2 个光纤转换模块和 2 个图像产生器模块^[2]。每个 GPM 都使用 Wind River 公司的 VxWorks 653 分区操作系统,该操作系统除了为应用程序提供必需的服务外,还提供了健壮的分區机制用以支持不同安全关键级别的软件在同一个处理器上运行。

CDN 是 CCS 的数据通信网络,提供了铜介质接口和光纤接口。CDN 由 Rockwell Collins 公司提供。采用的是符合 ARINC 664 标准的 AFDX 网络,能支持 10~100 Mb/s 的传输速率,并且有增长至 1 Gb/s 的潜力,是商用飞机通信带宽的巨大飞跃。AFDX 是在标准因特网和 IEEE 802.3 协议的基础上改进而来,其最大的特点是“确定性”和“可靠性”。CDN 中的核心节点是 AFDX 交换机,每个交换机具有 24 个全双工端口。这些交换机沿机身的左右两侧布置,每一侧都采用双冗余备份连接。单个交换机故

波音 787 的 CCS 中共有 21 个 RDC。RDC 被用来替换传统的专用信号配线,将来自远端传感器和受动器的模拟和数字信号集中起来并传输至 CDN 中。RDC 可以通过配置文件进行配置,配置文件中可以指定特定 I/O 连接类型的处理模块,还能指定更新速率和网络数据格式。

3.3 空客 A380

空客 A380 的航空电子系统采用了开放式 IMA 技术,其 IMA 系统包含两个主要组成部分:AFDX 数据通信网络和 IMA 模块。与波音 777 和波音 787 的综合航空电子系统不同,A380 的航空电子系统没有采用机柜的形式来组成类似 AIMS 或者 CCR 的中央处理系统,而是将处理模块分散放置于机身各处,并且通过 AFDX 交换机接入通信网络^[4]。A380 的 IMA 系统的结构如图 4 所示(只列出了 AFDX 网络和 IMA 模块的布局情况,以分立设备的形式存在的系统未在图中列出)^[15-16]。

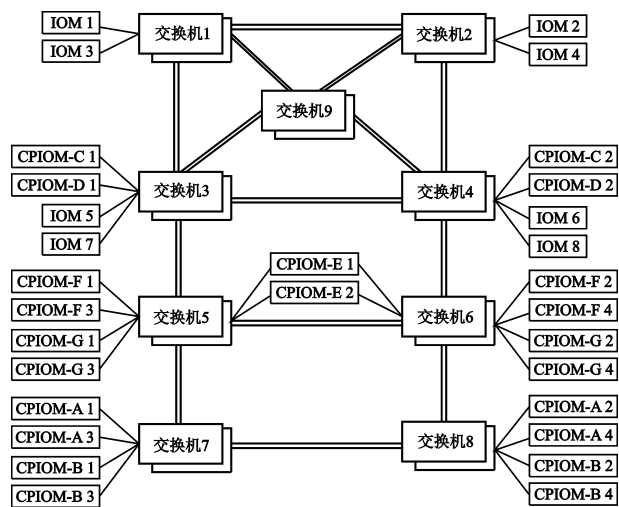


图 4 A380 IMA 系统结构

Fig.4 Architecture of A380's IMA system

A380 的航空电子系统中共有 30 个 LRM,所有模块均符合 ARINC 600 规范,尺寸为 3 MCU,重量约为 4.2 kg。这些 LRM 可分为 8 种不同的类型,包括 7 种核心处理输入/输出模块(Core Processing & IO Module, CPIOM)和 1 种输入/输出模块(Input/Output Module, IOM)^[4]。7 种 CPIOM 中部署了 22 种不同功能,共计 70 种应用软件,这些应用软件由 11 个不同的供应商提供^[4]。表 2 列出了每种 LRM 的数量以及模块中部署的应用。

表 2 A380 中的 LRM
Table 2 LRMs in A380

模块类型	数量	应用部署
CPIOM-A	4	客舱功能
CPIOM-B	4	空气管理
CPIOM-C	2	飞行控制及通信告警
CPIOM-D	2 + 1(可选)	数据链功能
CPIOM-E	2	电气系统
CPIOM-F	4	燃油管理
CPIOM-G	4	起落架装置
IOM	8	输入/输出

IMA 硬件模块由 Thales 公司和空中客车公司提供,两者提供的硬件模块采用不同的硬件实现。Thales 公司提供了其中的 18 个 IMA 模块:4 个用于起落架装置,4 个用于燃油管理系统,4 个用于客舱功能,4 个用于空气管理,2 个用于电气系统。空中客车公司提供的 IMA 模块则用于输入/输出、飞行告警、ATC 通信功能和航空电子通信路由^[17-18]。但是,并非所有的航空电子功能都被综合为 IMA 模块,一些飞行关键系统,例如飞机环境监视系统、飞行管理系统和大气数据参考系统仍然以分立设备的形式存在^[17-18]。IMA 模块中的操作系统也由 Thales 公司开发,该操作系统提供基于 ARINC 653 规范的标准应用程序接口,能够在不同的应用程序之间提供分区支持。标准的应用程序接口使得硬件能够在不影响应用软件的前提下更新,也允许系统供应商开发独立于硬件的应用软件。

由于 A380 航空电子系统中的数据通信交换机和 IMA 模块都是根据通用的 ARINC 标准来设计,因此 A380 的航空电子系统对于潜在的航空电子制造商来说是开放的^[16]。开放式 IMA 技术带来的好处是飞机制造商可以通过第三方航空电子供应商获取模块和通信设备,从而为开放式 IMA 标准培育一个市场,并通过竞争来控制成本。

3.4 三种机型 IMA 系统对比分析

下面从功能、结构、数据总线和操作系统等四个方面对上述 3 种机型的 IMA 系统进行对比分析。

(1)功能

波音 777 飞机的 AIMS 中包含的 7 个子系统均属于航空电子系统功能,而波音 787 和空客 A380 的 IMA 系统中不仅综合了传统意义的航空电子系统功能,还综合若干非传统航电系统的处理和 控制功能。一般而言,IMA 系统综合的功能越多,则系统的综合

化程度越高。

(2)系统结构

上述 3 种机型的 IMA 系统均采用了分布式结构。波音 777 和 787 的 IMA 系统中采用了机柜来安装 LRM,机柜内不同 LRM 之间通过背板总线进行通信。采用机柜来集中安装 LRM 可以在 LRM 之间共享硬件资源,如背板总线、供电模块、I/O 模块等。空客 A380 的 IMA 系统没有采用机柜,而是将 LRM 分散放置于机身各处,通过全局数据总线 AFDX 网络进行通信。采用这种结构可以简化系统设计,既不用设计机柜和背板总线,也能减轻由于模块集中而带来的散热压力。

(3)全局数据总线

波音 777 采用 ARINC 629 全局总线,该数据总线为波音公司针对波音 777 项目开发的技术,它是一种双向总线,可支持最多 120 个数据终端以及高达 2 Mb/s 的数据率。由于该技术需要定制硬件支持,并且没有得到其他飞机制造厂商的认可,因此会增加生产成本。波音 787 和空客 A380 采用符合 ARINC664 规范的 AFDX 网络作为其全局数据总线。AFDX 网络由工业标准的以太网通信协议经过适应性改进而来,具有相对更高的可靠性、适应性和实时性,传输速率可达 10 ~ 100 Mb/s。

(4)操作系统

波音 777 采用 Honeywell 公司开发的 Apex 操作系统,ARINC 653 规范即在该操作系统的基础上发展而来。波音 787 和空客 A380 的 IMA 系统分别采用了 Wind River 和 Thales 公司开发的操作系统,两种操作系统均提供基于 ARINC 653 规范的标准应用程序接口。可见,ARINC 653 规范已经成为大型民用飞机 IMA 系统中使用的主流标准。

4 关键技术及发展建议

4.1 关键技术

与传统的联合式航空电子系统相比,采用 IMA 技术能够减轻重量、减小体积、降低维护成本等诸多优势。波音 777、波音 787 和空客 A380 等新一代大型民用飞机的航空电子系统均采用了 IMA 技术,因此 IMA 技术的应用是大型民用飞机航空电子系统发展的主流趋势。为了使大型民用飞机的航空电子系统实现从传统联合式向 IMA 的转变,需要突破以下多项关键技术:

(1)系统级关键技术,包括 IMA 系统总体设计与综合技术、高可靠性设计与评估技术、适航认证等;

(2)硬件技术,包括结构工艺设计、模块化设计、小型化电路设计、全局数据总线、背板总线等;

(3)软件技术,包括支持多分区应用的操作系统、多分区环境下的应用程序开发及测试技术等。

4.2 发展建议

通过分析大型民用飞机 IMA 系统的典型应用并梳理其关键技术,对大型民用飞机 IMA 系统的研制给出以下几点建议。

(1)逐步提升综合化程度

目前,大型民用飞机航空电子系统的综合主要体现在座舱综合显示控制、综合数据处理、综合导航引导、综合监视与告警等方面^[6]。综合化设计能压缩航空电子系统的体积和重量,减轻飞行员的工作负担,提高系统的可靠性,降低飞机的全寿命周期费用。但是,从传统的联合式航空电子向 IMA 过渡是一个连续的过程,需要多方面的经验与技术的积累,不能一味追求最大程度的综合化,应该在各方面条件成熟的前提下推进系统的综合化。

(2)采用通用化、模块化硬件

集成电路和软件技术的高速发展使得将多个不同的功能集中于一个标准电子模块中成为可能。通用化、模块化的硬件是实现系统结构简化和综合化的基础。应该尽量采用通用的、标准的 LRM 来实现航空电子系统的各种功能,避免或者尽量减少专用 LRM 在系统中的使用。

(3)采用开放式系统结构

一个开放式系统可以定义为:将符合标准接口规范的不同部件连接在一起而构成的系统^[19]。实现开放式系统结构的关键是要制定和贯彻各种标准接口,使不同的产品研制、生产单位都遵循相同的标准和规范。对于硬件而言,应采用标准模块机械接口、标准电气特性、标准化的数据总线接口、标准并行/底板总线特性、标准模拟和离散信号接口等;对于软件而言,需要对软件按层次划分,各层次之间采用标准接口。采用开放式系统结构使得能够独立地对系统中的各个部件进行研发、维护和改进升级,而不用担心影响到系统中的其他部件,因此能大大降低航空电子系统的研发和维护成本。

(4)采用高安全性、高可靠性设计

民用飞机对安全性和可靠性有很高的要求,民用飞机航空电子系统的研制过程必须严格遵循适航

认证标准,在系统或设备中采用容错设计,并且对重要的功能进行多重冗余备份。

(5)采用商用货架产品技术

美国国防部把商用货架产品技术(Commercial off the Shelf, COTS)定义为在市场上销售的产品,并在制造商的产品目录中以确定的价格出现,而且可以直接从制造商或通过制造商的销售网供应给任何公司或个人使用^[20]。采用 COTS 技术可以减少航空电子系统中专用元器件和专用软件的数量,从而降低研发成本,而且 COTS 产品具有良好的技术支持,便于扩充和升级。

(6)采用高速数据总线

机载高速数据总线是新一代综合航空电子系统的关键技术之一,它直接决定了综合航空电子系统集成化程度的高低。传统的机载总线架构面临着布线复杂、重量过重、维护及改型困难等缺点。AFDX 的出现克服了这些缺点,成为目前主流大型民用飞机航空电子网络的互连基础,在大型民用飞机 IMA 系统的研制时可以参考或直接选用之。

5 结束语

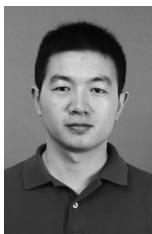
波音 777、波音 787 和空客 A380 均属于新一代的大型民用飞机,它们的航空电子系统均采用了 IMA 技术,因此 IMA 技术代表了大型民用飞机航空电子系统的发展方向。本文对上述 3 种典型大型民用飞机的 IMA 系统进行了详细介绍和对比分析。在此基础上,归纳总结了大型民用飞机 IMA 系统的关键技术,并对大型民用飞机 IMA 系统的发展给出了若干建议,希望能为我国大型飞机 IMA 系统的研制提供一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 唐建华. 民机综合航空电子系统今昔谈[J]. 国际航空, 2007(6): 28-30.
TANG Jian-hua. Integrated Avionics for Commercial Aircraft [J]. International Aviation, 2007(6): 28-30. (in Chinese)
- [2] 孙晓哲, 宋晗, 陈宗基. 民机航空电子系统及虚拟样机技术研究[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会论文集. 深圳: 中国航空学会, 2007.
SUN Xiao-zhe, SONG Han, CHEN Zong-ji. Research on Avionics System on Civil Aircrafts and Virtual Prototype Techniques [C]//Proceedings of the Senior Forum on Key Techniques of Large Aircrafts and the 2007 Academic Annual Conference of China Aviation Institute. Shenzhen: China Aviation Institute, 2007. (in Chinese)
- [3] 孙欢庆. 民用飞机综合航电系统技术发展研究[J]. 航空科学技术, 2010(3): 6-8.

- SUN Huan-qing. Research on Integrated Avionics System of Civil Aircraft [J]. Aeronautical Science and Technology, 2010(3):6-8. (in Chinese)
- [4] Ramsey J W. Integrated Modular Avionics: Less is More[J/OL]. Avionics Magazine, 2007.
- [5] 杨云志, 罗通俊, 黄进武. 我国大型飞机航空电子系统的发展与思考[J]. 电讯技术, 2007, 47(4):1-5.
YANG Yun-zhi, LUO Tong-jun, HUANG Jin-wu. Some Ideas for Developing the Avionics System of Chinese Large Airplane [J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47(4):1-5. (in Chinese)
- [6] 谢振球, 吴铭望. 大型飞机机载设备及关键技术分析[J]. 航空制造技术, 2009(2):48-51.
XIE Zhen-qiu, WU Ming-wang. Analysis of Airborne Equipment and Its Key Technologies on Large Aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(2):48-51. (in Chinese)
- [7] 吴建民, 吴铭望, 李国经. 大型客机航空电子系统研发关键技术分析及建议[J]. 航空制造技术, 2008(16):46-49.
WU Jian-min, WU Ming-wang, LI Guo-jing. Proposals and Key Techniques Analysis for Developing Large Passenger Aircraft Avionics System [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(16):46-49. (in Chinese)
- [8] ARINC Report 651-1, Design Guidance for Integrated Modular Avionics [S].
- [9] 李红娟, 马存宝, 宋东, 等. 波音 777 飞机信息管理系统[J]. 民用飞机设计与研究, 2001(2):1-4.
LI Hong-juan, MA Cun-bao, SONG Dong, et al. Airplane Information Management System of Boeing 777[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2001(2):1-4. (in Chinese)
- [10] 非寒. 波音 777 综合航电系统的更新[J]. 国际航空, 2004(10):59-60.
FEI Han. Updated Boeing 777 Integrated Avionics System [J]. International Aviation, 2004(10):59-60. (in Chinese)
- [11] Peters M, Sorensen J. Multi-Modal Digital Avionics for Commercial Applications [R]. Cleveland, OH: NASA Glenn Research Center, 2004.
- [12] 任苏中, 刘小凤. 波音公司 B777 飞机综合模块化航空电子系统的结构设计[J]. 电子机械工程, 1998(6):1-7.
REN Su-zhong, LIU Xiao-feng. Structure Design of Integrated Modular Avionics System for Boeing B777[J]. Electro-mechanical Engineering, 1998(6):1-7. (in Chinese)
- [13] 杨云志. 综合模块化技术在机载 CNS 系统中的应用探讨[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会论文集. 深圳: 中国航空学会, 2007.
YANG Yun-zhi. Discussion on Application of Integrated Modular Techniques in Airborne's CNS system [C]//Proceedings of the Senior Forum on Key Techniques of Large Aircrafts and the 2007 Academic Annual Conference of China Aviation Institute. Shenzhen: China Aviation Institute, 2007. (in Chinese)
- [14] Tim Nelson. 787 Systems and Performance [EB/OL]. Boeing Commercial Airplanes. [2012-11-20]. <http://dibley.eu.com/documents/B787SystemsandPerf-GeorgeBeyle-31mar09.pdf>
- [15] 周强, 熊华钢. 新一代民机航空电子互连技术发展[J]. 电光与控制, 2009, 16(4):1-6.
ZHOU Qiang, XIONG Hua-gang. Development of the New Generation Civil Avionics Interconnection Technology [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(4):1-6. (in Chinese)
- [16] Butz H. The Airbus Approach to Open Integrated Modular Avionics (IMA): Technology, Methods, Processes and Future Road Map [C]//Proceedings of 2007 International Workshop on Aircraft System Technologies. Hamburg: IEEE, 2007:1-11.
- [17] Charlotte Adams. A380 Innovations: A Balancing Act [EB/OL]. [2012-11-20]. http://www.aviationtoday.com/av/commercial/A380-Innovations-A-Balancing-Act_756.html.
- [18] 张昕. A380 & B7E7 航空电子技术的创新[J]. 国际航空, 2004(8):20-22.
ZHANG Xin. Advancing Avionics in A380 and B7E7 [J]. International Aviation, 2004(8):20-22. (in Chinese)
- [19] Moir I, Seabridge A. 民用航空电子系统[M]. 范秋丽, 译. 北京: 航空工业出版社, 2009.
Moir I, Seabridge A. Civil Avionics Systems [M]. Translated by FAN Qiu-li. Beijing: Aeronautics Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [20] 江帆, 鞠建波, 邓小涛. 综合航空电子系统新技术研究[J]. 现代电子技术, 2003(20):32-34.
JIANG Fan, JU Jian-bo, DENG Xiao-tao. Research of Integrated Avionics System New Technologies [J]. Modern Electronic Technique, 2003(20):32-34. (in Chinese)

作者简介:



尤海峰(1984—),男,湖北枝江人,2011 年于中国科学技术大学获博士学位,现为工程师,主要研究方向为综合模块化航空电子系统;

YOU Hai-feng was born in Zhijiang, Hubei Province, in 1984. He received the Ph.D. degree from University of Science and Technology of China in 2011. He is now an engineer. His research concerns integrated modular avionics system.

Email: hf_you@163.com

刘煜(1976—),男,湖北阳新人,2002 年于重庆大学获硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为航空电子系统总体设计、嵌入式软件系统分析与架构设计、软件项目管理。

LIU Yu was born in Yangxin, Hubei Province, in 1976. He received the M.S. degree from Chongqing University in 2002. He is now a senior engineer. His research concerns avionics system design, system analysis and architecture design for embedded software, and software project management.

Email: liuyu_cqu@sina.com