

何 锋 著

He Feng

航空电子系统 综合调度理论与方法

Theory and Approach to
Avionics System Integrated Scheduling



清华大学出版社

航空电子系统 综合调度理论与方法

**Theory and Approach to
Avionics System Integrated Scheduling**

何 锋 著

He Feng

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

为了构建先进的航空电子系统,当前的航空电子系统更加强调开放式架构、商用货架技术和统一网络,由此综合模块化航空电子系统(IMA)概念应运而生。为了实现任务关键和安全关键的航空电子系统,综合调度技术广泛应用于航空电子体系结构中,并成为 IMA 架构优势使能的关键技术。

本书立足于当前航空电子系统研究现状,跟踪体系架构的最新发展趋势和技术难点,讨论航电系统综合调度模型及其设计方法,并结合交换式网络组网特征,深入讨论 IMA 架构的系统综合调度方案和实时性评价方法。

本书的读者对象为从事航空电子系统以及其他综合电子系统设计的研究人员和工程技术人员,也可作为高等院校信息与通信工程、计算机等专业师生从事实时系统、实时网络研究的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

航空电子系统综合调度理论与方法/何锋著. —北京:清华大学出版社,2017
ISBN 978-7-302-45367-3

I. ①航… II. ①何… III. ①航空设备—电子设备—调度—研究 IV. ①V355

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 260829 号

责任编辑:曾 珊

封面设计:常雪影

责任校对:梁 毅

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:14.5

字 数:319 千字

版 次:2017 年 1 月第 1 版

印 次:2017 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~1200

定 价:49.00 元

产品编号:072404-01



“航空电子”的英文 Avionics 来源于 Aviation 和 Electronics 两个词,表示航空和电子学两个学科领域的结合。航空电子的范畴包括支持飞机完成其任务的所有与电子学相关的系统和设备。航空电子系统是现代飞机系统的一个重要组成部分,是飞机装备信息化的核心。其性能和技术水平直接决定和影响着飞机的整体性能和作战能力。没有高性能和高技术水平的航空电子系统就不可能有真正现代化意义的飞机。

迄今为止,航空电子系统经历了四代典型技术发展,区别于已有的其他实时系统(如车载控制系统),航空电子系统更加强调对任务关键和安全关键等关键属性的保障能力,并集中体现在航空电子综合核心处理系统和航空电子统一网络两方面。

为了构建先进的航电系统,当前的航电系统更加强调开放式架构、商用货架技术和统一网络,由此综合模块化航空电子系统(Integrated Modular Avionics, IMA)概念应运而生。在 IMA 概念下,将分布的资源通过若干可配置的通用功能模块集成在一起,从而极大地提高了系统的可用性和完成任务的能力。而这种能力的实现很大程度上取决于软件技术的发展,许多原有的独立系统被综合在一起,通过在综合核心处理器上运行相应的应用软件,完成具体的系统功能。现代航空电子系统已由电子机械密集型向软件密集型过渡,航空电子软件在航空机载系统和设备中所占的比重逐步上升,并且成为实现飞机使命任务的关键因素之一。

面对未来信息化战场作战和空-天-地“系统之系统”信息融合的需求,分布式综合化航空电子系统(Distributed IMA, DIMA)的概念近年浮出水面,并在航空和航天领域得到了极大关注和重视。DIMA 航电系统涉及多个子功能区域的分布式集成,更加强调任务关键和安全关键等性能保障机制在系统集成过程中的一致性。

针对新一代航空电子系统架构,为了构建任务关键和综合安全关键系统,需要采用综合调度方案,针对任务系统的分区管理是其在核心处理系统实施的具体体现,同时分区管理也是随着航空电子软件大量应用于航电系统而促成的。分区管理作为一种设计技术,将航空电子系统中不同的功能应用限制在其活动范围内,从而不对其他功能应用产生影响。分区实际上是系统设计概念中最小耦合的另外一种说法,组件之间耦合越小,系统遭遇不可预料的风险也越小。分区管理通过层次化的分区调度实现任务

的“分时”和“分片”运行,需要系统地研究不同调度策略组合下的分区可调度性判定,并完成分区关键参数设计,从而指导分区管理技术在工程上的具体实现。

当在综合模块化航空电子架构中具体实施系统综合调度时,考虑到任务关键和安全关键等特征在航空电子系统层面的一致性保障,还需要结合典型组网特征,建立航电系统分区综合模型,实现分区管理技术在航电统一网络上的延伸,继承其在综合核心处理系统构建的时间完整性保障能力。

本书由国家自然科学基金项目“面向故障封闭的航空电子分区综合模型完整性理论”(61301086)资助,以系统综合调度设计为主线,同时融合了当前航空电子系统最新技术发展,主要研究内容分为以下两部分。对于处理系统的基本分区设计,将系统地讨论上层调度器采用轮转调度、固定优先级调度和动态优先级调度策略下的分区设计方法,并对不同调度模型的调度能力和设计能力进行评估。对于架构层面的综合调度,结合航电最新发展趋势,讨论混合关键性概念下的分区综合设计方法,并结合航空电子全双工以太网(AFDX)和时间触发以太网(TTE)等典型组网方案,讨论基于分区管理的综合模块化航电系统整体调度方案和实时性评价方法。

全书分为11章。第1、2章,介绍航空电子系统体系架构、分区管理概念、国内外研究现状,并给出本文研究模型的基本定义。第3~5章,分别从轮转调度、固定优先级调度和动态优先级调度等方面具体讨论分区设计方法。第6章给出基本分区模型在可调度性和可设计性方面的评价。第7章讨论混合关键性概念下的分区调度模型,以及分区参数设计方法。第8、9章结合IMA架构和AFDX组网技术,讨论航电资源的统一分配和IMA端到端延迟分布计算方法。第10章结合DIMA架构和TTE组网技术,讨论分区综合模型和调度时刻表生成方法。第11章给出全文的结论和研究展望。

熊华钢教授对本书的结构和内容提出了许多宝贵的意见,王彤、李峭、陈俊延老师阅读了本书,并提出了宝贵的修改意见。项目组成员对本书的构成也作出了相关贡献:李新颖博士关于分区可调度性判定研究补充了第3章,陈瑶博士关于混合关键性的研究构成了第7章,周天然博士关于AFDX互连的系统实时性研究构成了本书第8、9章,韩煜硕士关于TTE互连的分区综合设计研究构成了本书第10章,作者在此一并表示诚挚的谢意。

对航空电子分区综合设计展开系统研究是一项理论性和实践性都很强的挑战,由于时间和作者水平的限制,难免有欠妥和遗漏之处,希望读者不吝指正。

何 锋

2016年7月

第 1 章 绪论	1
1.1 航空电子系统及其发展历程	2
1.1.1 航空电子系统层次结构	2
1.1.2 航空电子系统发展历程	3
1.1.3 航空电子系统设计特点	5
1.2 航空电子系统发展挑战	7
1.2.1 网络中心战的挑战	7
1.2.2 从 IMA 到 DIMA	9
1.2.3 混合关键性发展	11
1.3 航空电子分区管理模型	13
1.3.1 分区管理概念	13
1.3.2 分区管理模型	16
1.4 分区管理研究现状	18
1.4.1 基本概念	18
1.4.2 可调度性	20
1.4.3 分区设计	26
1.4.4 混合关键性	29
1.5 研究工作和结构安排	31
1.5.1 研究内容与贡献	31
1.5.2 全文结构安排	34
1.6 本章小结	35
第 2 章 航空电子系统结构及分区管理	36
2.1 航空电子系统结构	37
2.1.1 开放式系统	37
2.1.2 模块化航空电子系统	38
2.1.3 核心处理系统	39
2.1.4 航空电子系统软件模型	41
2.1.5 蓝印系统	43
2.1.6 通用功能模块加载软件映射	44

2.2	分区管理	46
2.2.1	分区属性	46
2.2.2	分区操作模式转换	47
2.2.3	分区调度	48
2.2.4	分区控制	48
2.3	进程管理	48
2.3.1	进程属性	48
2.3.2	进程状态切换	49
2.3.3	进程控制	50
2.3.4	进程调度	50
2.4	分区调度基本模型	51
2.4.1	分区和实时任务	51
2.4.2	调度策略和理论	53
2.5	机载互连网络	58
2.5.1	机载网络发展历程	58
2.5.2	网络分区	60
2.5.3	AFDX 组网技术	61
2.5.4	TTE 组网技术	62
2.6	本章小结	64
第 3 章	基于轮转调度策略分区设计	65
3.1	轮转调度模型	65
3.2	下层调度器采用固定优先级策略	66
3.2.1	可调度性分析	66
3.2.2	分区设计	68
3.3	下层调度器采用动态优先级策略	71
3.3.1	可调度性分析	71
3.3.2	分区设计	74
3.4	实例分析	76
3.5	本章小结	81
第 4 章	基于固定优先级调度策略分区设计	82
4.1	固定优先级调度模型	83
4.2	下层调度器采用固定优先级策略	83
4.2.1	可调度性分析	83
4.2.2	分区设计	86
4.3	下层调度器采用动态优先级策略	90

4.3.1	可调度性分析	90
4.3.2	分区设计	94
4.4	实例分析	96
4.5	本章小结	102
第5章	基于动态优先级调度策略分区设计	103
5.1	动态优先级调度模型	104
5.2	M. Spuri+的算法	104
5.3	下层调度器采用固定优先级策略	108
5.3.1	可调度性分析	108
5.3.2	分区设计	109
5.4	下层调度器采用动态优先级策略	111
5.4.1	可调度性分析	111
5.4.2	分区设计	113
5.5	本章小结	114
第6章	航空电子分区设计综合评价	115
6.1	可设计性评价	115
6.1.1	评价模型	115
6.1.2	评价结果	116
6.2	G. Lipari 及 G. Lipari+模型	118
6.2.1	G. Lipari 模型	118
6.2.2	G. Lipari+模型	119
6.3	分区设计最优解	121
6.4	分区设计参数评价	122
6.4.1	评价模型	122
6.4.2	评价结果	123
6.5	本章小结	131
第7章	混合关键性分区综合设计	132
7.1	混合关键性系统分层调度架构	132
7.1.1	混合关键性任务模型	132
7.1.2	混合关键性分区模型	133
7.1.3	分区资源重配置机制	134
7.2	调度策略及可调度性分析基础	135
7.2.1	任务时间需求函数	135
7.2.2	资源供给界限函数	136

7.2.3	混合关键性可调度判定	138
7.3	高效可调度性分析	139
7.3.1	待考查区间边界	139
7.3.2	可调度判定问题等效转化	141
7.3.3	快速收敛分析 QPA	145
7.4	虚拟相对截止期限分配及分区参数设计	146
7.4.1	问题分析与形式化描述	147
7.4.2	基于禁忌搜索的虚拟相对截止期限分配算法	148
7.4.3	分区参数设计	151
7.5	实例分析	151
7.6	实验仿真与结果分析	153
7.6.1	随机任务集生成方法	153
7.6.2	分区可调度性分析	153
7.6.3	虚拟相对截止期限分配	156
7.7	本章小结	157
第 8 章	分布式任务分配与分区设计	158
8.1	核心处理系统模型与分析	158
8.1.1	平台模型	158
8.1.2	任务与消息模型	159
8.1.3	实时性分析	160
8.2	多层资源分配构架	162
8.3	平台层任务分配算法	164
8.3.1	任务分配问题的形式化分析	164
8.3.2	遗传模拟退火算法	165
8.3.3	基于 GSA 的核心处理系统任务分配算法	166
8.4	节点层分区参数优化	170
8.5	实验与分析	172
8.5.1	实例分析	172
8.5.2	性能对比	174
8.6	本章小结	174
第 9 章	基于 IMA 系统的任务序列实时性分析	175
9.1	基于 AFDX 网络的 IMA 系统模型	176
9.1.1	任务模型	176
9.1.2	消息模型	177
9.1.3	AFDX 网络模型	178

9.2	释放抖动影响分析	178
9.3	网络演算理论	179
9.3.1	网络演算基本概念	179
9.3.2	网络演算端到端延迟计算	181
9.3.3	网络演算紧性方法	185
9.4	消息端到端延迟分析	186
9.4.1	端到端延迟分解	186
9.4.2	AFDX 端系统排队延迟	187
9.4.3	端到端延迟求解	187
9.5	任务序列响应时间上界	188
9.6	实例分析	189
9.7	本章小结	191
第 10 章	时间触发系统分区综合设计	192
10.1	网络分区综合模型	193
10.1.1	分区隔离机制	193
10.1.2	TTE 时钟同步过程	194
10.1.3	时间触发架构同步方法	195
10.1.4	分区综合模型	195
10.2	网络分区综合模型调度设计	197
10.2.1	核心处理系统分区调度	197
10.2.2	统一网络调度	198
10.2.3	DIMA 系统时刻调度	199
10.3	实验与分析	202
10.3.1	算例说明	202
10.3.2	调度结果分析	203
10.4	本章小结	205
第 11 章	结论与展望	206
11.1	主要结论	206
11.2	研究展望	208
参考文献		210
术语索引		220



航空电子学(Avionics)结合了航空(Aviation)和电子学(Electronics)两个学科领域,它是在航空技术和电子技术发展过程中逐渐形成的^[1]。航空电子的范畴涵盖飞机中实现导航、通信、探测、识别、飞行和火力控制等功能的与电子学领域有关的全体系统和设备,是飞机任务、功能和性能实现的平台。随着飞机性能的高速发展和飞行环境的日益复杂,飞机对机载电子设备的依赖性越来越大,航空电子系统的发展已经成为当代飞机性能不断提高的重要增长点,其技术水平的高低也被认为是评价飞机先进与否的关键指标之一。

随着航空技术的发展和成熟,现代飞机承载的功能和任务所涉及的范围不断扩大,机载电子系统设备的种类和数量日益增多,不同系统设备间的交联关系也日趋复杂,这些都导致系统设计与综合的实现越来越难,软件规模和复杂性呈现爆发性增长态势。同时,在未来以网络为中心的全域信息化战场环境,先进飞机将作为空天地信息体系下的一个交互节点存在,需要具备多平台互连互操作能力,支持全域信息的一体化操作和利用。面对新生作战任务需求和航空电子技术本身的发展推动,飞机中关键的航空电子系统将更加强调开放式架构、信息化和综合化技术,兼具经济成本、体积和重量效益。

为了构建先进的航电系统,综合模块化航空电子系统(Integrated Modular Avionics, IMA)的概念应运而生。在 IMA 概念下,将分布的资源,通过若干可配置的通用功能模块集成在一起,从而极大地提高了系统的可用性和完成任务的能力。而这种能力的实现在很大程度上取决于软件技术的发展。许多原有的独立系统被综合在一起,通过在综合核心处理器上运行相应的应用软件从而完成具体的系统功能。这些应用软件共享底层硬件资源、通信网络、电源等,为了避免这些应用软件的相互影响,通过一定的分组策略(例如,不同安全级别)将它们封装在单独的分区之中,这也是组建模块化航空电子系统的基本手段。这种分组策略逐渐发展成航空电子分区管理技术,分区管理的概念大大加强了系统的容错能力,分区管理通过分区调度实现任务的“分时”和“分片”执行。

为了实现任务关键(mission critical)和安全关键(safety critical)的航

空电子系统,分区管理广泛运用于航空电子体系结构中,但它也为航空电子系统设计者提出了新的难题和挑战。如何在资源高度共享的综合化环境中,通过合理的资源配置和调度管理,实现分区的综合设计成为研究者需要进一步探讨的问题,因此亟须对分区管理技术进行系统研究和综合评估。

本章首先简要综述航空电子系统结构、发展历程以及新时期航电体系架构的挑战,然后介绍航空电子分区管理模型,并对分区管理技术的国内外研究现状进行综述,最后对本书的研究内容进行归纳,并给出全文的组织结构安排。

1.1 航空电子系统及其发展历程

1.1.1 航空电子系统层次结构

一个大型系统通常由若干子系统组成,这些子系统又可以进一步细分为更小的子系统或部件,依此类推,直到元器件和程序代码,因此一个大型系统可以由若干层组成。对于航空电子系统来说,同样可以按照这种层次划分的思想分为若干层。图 1-1 给出了一个综合作战系统的总体分层体系模型,在这个模型中,处于最高层的,是由海、陆、空、天所有战斗单元和平台通过信息网络组成的全局系统,也被称为“系统之系统”(system of system);处于第 2 层的是各个战斗单元和平台,在航空方面则是指各种飞机;第 3 层是飞机平台中的航空电子系统;第 4 层则是航空电子系统的功能区;第 5 层表示组成功能区的软硬件模块和设备;第 6 层,也是最底层,是实现电子功能的硬件器件和软件代码。其中第 1~3 层为功能层,完成具体的系统功能;第 4~6 层为物理层,是组成功能层的组件。

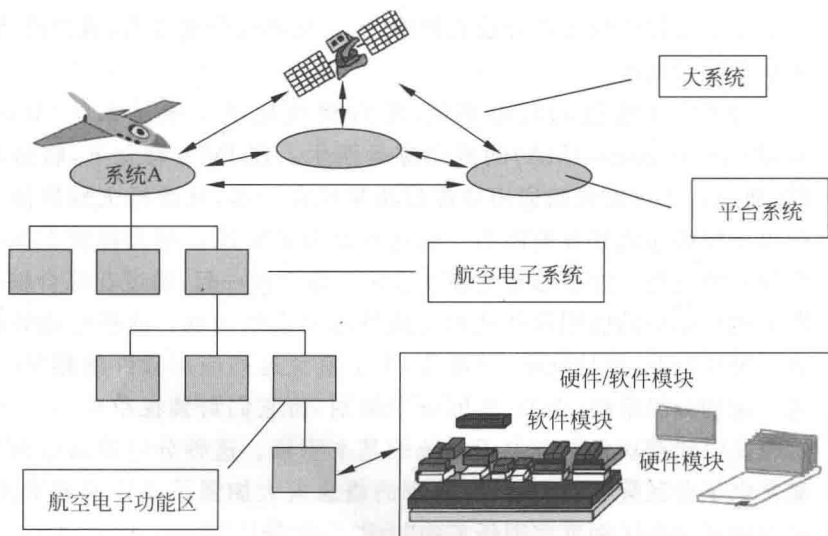


图 1-1 综合作战系统的总体分层体系模型

从图 1-1 可以看出,航空电子系统位于这个综合作战系统中的第 3 层。综合作战系统由海、陆、空、天各种探测、通信、指挥、攻击等系统联网构成体系,面向体系对体系的对抗任务。航空武器系统平台为多机协同层,在空中指挥系统或长机指挥下进行多机协同空中作战,在机间数据链和信息融合等关键技术支持下,多机之间形成分布式传感器网络和武器网络,完成协同探测、协同交战决策和协同作战。协同作战可以利用本机数据进行交战,也可以用其他平台或合成数据进行交战。平台内部的航空电子系统通过互连网络和系统软件实现各个功能区的综合,解决多目标信息实时获取、信息融合、信号及数据综合处理等,以实现目标探测、飞行控制、火控解算、通信导航识别、数据融合、电子战等功能,具有适应多个平台、模块化、智能化、高度综合化等特点。在航空电子系统内,按照功能进行分区划分,进行各功能更深层次的综合,包括传感器综合(射频综合、光电综合),数据/信号综合,座舱综合显示与控制等功能。在每个功能分区下,按照不同功能和性能要求,利用模块化设计方法,采用通用的软硬件模块,通过灵活配置和动态重构,实现系统和子系统的任务功能,并支持系统的可变规模和模块化结构。位于最低层的硬件器件/软件代码,采用先进的 EDA 设计技术和片上系统设计技术,以及超高速集成电路实现模块中的具体功能(信号处理器、数据处理器、大容量存储器,接口等),从而实现各模块的高度综合化和小型化。

1.1.2 航空电子系统发展历程

迄今为止,航空电子系统已经历了分立式、联合式、综合式和先进综合式四类典型结构的发展阶段^[2],其演变历程如图 1-2 所示。航空电子系统的发展过程也充分反映了航空电子综合技术的演进历程。在这个航空电子综合化过程中,采用系统工程的方法,以优化理论、信息论、控制理论以及先进的微电子与计算机组网技术为基础,在飞机物理结构空间中将探测、通信、导航、识别、电子战、任务管理、飞行和火力控制等功能及相应的电子设备,通过机载网络和软件等技术组合成为一个有机的整体,达到系统资源的高度共享和最佳的整体效能,使得系统作战性能、可用性和寿命期成本相互平衡。

从 20 世纪初载人飞行和无线电技术几乎同时萌芽,直至 70 年代航空和电子学发展到相当成熟的程度,航空电子系统一直处于分立式系统结构,这时期的分立式航空电子系统也被认为是第一代航空电子系统。在这种系统架构下,每个负责不同功能的航空电子子系统都自成一体,拥有一套独立和完整的系统功能设备,包括了传感器、信号采集、数据处理、信息显示和飞行控制等部件。飞行员需要不断通过子系统的显示设备分别获得各个子系统的状态信息,从而对飞机的各个部件和外界环境保持了解,然后通过各个子系统的控制部件分别对它们进行操作。这种烦琐的显示和控制方式给飞行员造成了极大的负担,导致飞行员几乎无法有效地操纵飞机。

联合式航空电子系统以 20 世纪 70 年代初美国空军莱特实验室提出的“数字航

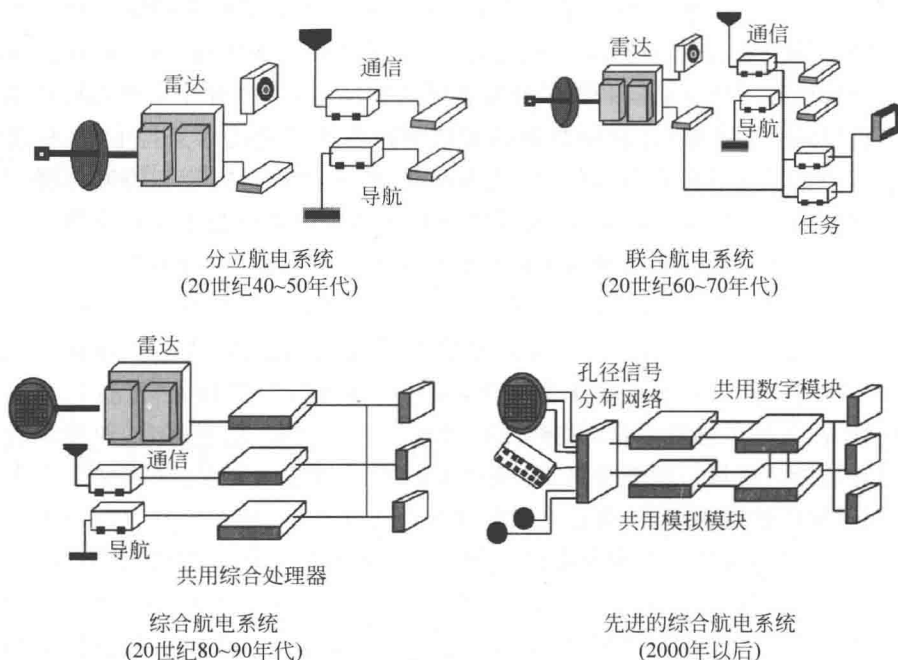


图 1-2 航空电子系统发展历程

空电子信息系统”(Digital Avionics Information System, DAIS)计划为基础,以数据总线和综合显示控制为标志,开创了航空电子系统综合的新时代。联合式航空电子系统采用了标准多路传输数据总线(MIL-STD-1553)、标准机载计算机(MIL-STD-1750A)、标准计算机高级语言(MIL-STD-1589JOVIAL)和标准外挂物管理接口(MIL-STD-1760)四大核心技术。机载电子子系统通过 MIL-STD-1553 多路数据传输总线实现设备间信息共享,极大地简化了设备互连关系。系统中的显示信息和控制命令经数据总线在子系统间交换,实现显示与控制综合,同时也保留了子系统的相对独立性。

第三代航空电子系统结构以“宝石柱”(Pave Pillar)^[3]等航空电子发展计划和美军 F-22 猛禽战机航电系统为代表,系统综合化水平进一步提高。综合式航空电子系统的特点是以超高速集成电路和标准模块为基础,采用通用的信号和数据处理器组成航空电子核心处理系统。核心处理系统包含支持各种不同用途的计算模块,整合了多个子系统的的功能,从而大大减少了系统整体的机载处理资源,提高了效能费用比。此外,综合式航空电子结构改变了基于数据总线联网的综合方式,而是按照功能划分提出了功能区的概念,打破了传统各子系统的物理界限。通用标准模块在航空电子系统中的应用有利于实现系统容错和系统重构,支持二级维护体制,提高了系统可用性和可靠性,大大降低了飞机生命周期成本。

先进综合式航空电子源于“宝石台”(Pave Pace)计划^[4-7]和联合攻击战斗机(Joint Strike Fighter, JSF)计划,代表当前航空电子综合的最高水平。20 世纪 90 年

代初,美国空军莱特实验室着眼于2000年以后的航空电子系统需求推出的“宝石台”计划是对“宝石柱”计划的进一步延伸和发展,其采用综合核心处理系统(Integrated Core Processor, ICP)技术完善核心处理部分综合和模块化设计的同时,在传感器和天线领域也推行了综合化和模块化概念。美国军方在“宝石台”计划的基础上于1994年公布了被称为“先进综合式航空电子系统”的航空电子结构定义,这也就是所谓的第4代航空电子系统。除了传感器综合与天线综合以外,开放式系统结构、统一航空电子网络互连、商用货架技术也都被认为是先进综合航空电子系统的显著特征。

从以上各个阶段的发展可以看出,航空电子系统架构的发展历程是系统综合化程度不断深入的过程,航空电子系统已经从单功能子系统的松散组合发展到物理上和功能上都高度综合的信息密集之整体,功能的综合也不断从飞机的中心(座舱)向飞机的四周(蒙皮)发展。

1.1.3 航空电子系统设计特点

航空电子系统的综合要根据系统的战技指标要求,把所有航空电子部件作为一个整体进行系统集成,使各种系统资源有机地综合起来,协调工作,共同完成系统的使命任务,组成一个高度综合化的航空电子系统。随着综合水平的提高,系统将具有更强的功能、更高的容错能力和对各种不同需求的适应能力。

实现航空电子系统的高度综合化,需要从系统设计上加以保证,为了确保航空电子系统战术技术性能、提高系统可用性、降低系统生命周期费用,系统设计的特点和要求如下。

1. 开放式航空电子系统架构

开放式系统架构是一种按层次划分的系统结构,各层次之间采用标准的接口。开放式航空电子系统架构具有许多优点,便于不同系统部件之间的互连、互通和互操作,便于硬件和软件的移植和重用,也便于系统功能的增强和扩充。广泛采用开放式系统架构,不仅提高了系统的冗余和重构能力,而且可以用最低的生命周期费用达到所要求的任务性能和保障性,并为系统功能的扩展和性能的改进奠定基础。

开放式系统架构鼓励采用商用货架技术(Commercial Off-The-Shelf, COTS),而广泛采用COTS技术是降低航空电子系统的研制和生产费用的有效途径之一。在电子领域,民用技术的发展速度十分迅速,利用民用技术和商用货架产品开发和生产航空电子系统将显著减少专项科研经费的投入,采购途径容易得到保障,费用也相对低廉。采用COTS技术使得航空电子系统更加密切跟随技术发展潮流,技术先进性好。由于利用了COTS技术的通用、开放的技术标准,技术支持、产品维修和后勤保障较为方便,也便于系统扩充和升级。

2. 统一航空电子网络

航空电子系统各个功能区内部和功能区之间都存在着各种传输需求,不仅对带宽和传输延时的要求不同,对容错和可靠性的要求也不尽相同,造成系统软硬件开发的复杂性、开发周期和费用的上升,技术风险增加。为了提高飞机内部网络的可扩展性、适应性,降低开发维护成本,美国在开展 JSF 研制计划时,提出以一种网络覆盖机上互连的所有需求。为了满足机载电子系统的各种传输需求,统一网络应具有每秒千兆位带宽、低延迟时间、容错能力和可扩展规模的特性。

虽然在 F-35 战机上未能实现单一网络的目标,但确实显著减少了网络的种类,大大提高了机载网络的效费比。统一网络已经成为机载互连追求的目标和发展方向。

3. 标准通用模块

模块化是航空电子系统实现高度综合化的基础,离开了模块化,航空电子系统就不可能进行功能综合,不可能实现动态重构,也不可能实现二级维护体制。

联合式航空电子系统的基本构件是以黑箱形式出现的外场可更换单元(Line Replaceable Unit, LRU),是针对具体型号和功能需求而研制的专用设备,它使得系统按一定的功能相互隔离,并且由于黑箱内的部件或模块只能在内场拆卸,因此需要进行三级系统维护。

综合航空电子系统强调采用外场可更换模块(Line Replaceable Module, LRM),它是根据航空电子系统共性要求而设计的模块系列,各种型号的飞机都可以用它构建成为需要的功能组合。用 LRM 取代 LRU 之后,不仅可以使系统成为一种适应更高功能需求的先进航空电子综合系统,还在标准化和通用化上得以大大提升,减少了硬件种类和数量,并且将系统三级维护简化成两级维护,使系统维护费用大大降低。美国 F-22 和 F-35 飞机的航空电子系统的模块化水平已经相当高了,但是在射频系统和光电探测系统的模块化方面,还有很大潜力,这将是模块化发展的一个重要方向。

4. 可重用软件

采用标准通用模块的综合航空电子系统,已经不能从硬件上区分具体的功能系统。系统的探测、通信、导航和任务管理等功能都由通用模块化硬件平台上的软件提供,没有软件,航空电子系统将无法运行。现代战斗机已经由电子机械密集型向软件密集型发展,机载软件的规模越来越庞大,F-22 的机载软件规模达到了 200 万行源代码,而 F-35 飞机的机载软件更是已达 500 万行源代码。原来许多由硬件完成的功能现在都由软件来实现,软件在综合航空电子系统中的地位和作用已日趋重要。

研制高达几百万行源代码的软件显然是一个极其复杂的系统工程,软件程序的

编写、调试、测试,以及后续的装机试飞都将花费极大的人力、物力。设计合理的软件层次结构,以模块化方法开发可重用软件系统显得尤为重要。

5. 信息安全保障

飞机平台通过航空电子系统成为现代战争信息网络系统中的一个节点,为了减轻飞行员的工作负担,综合航空电子系统在不断地提高其智能化程度,将飞行员从操纵飞机、系统监控、判读信息、态势掌握、武器投放等繁重的工作中解脱出来,使之能集中精力于高层次的战术决策。然而正是因为航空信息综合能力的增强,飞机平台和飞行员对航空电子综合系统及其信息交互的依赖也越来越强。作为战争信息网络系统中的一个节点,航空电子系统必然有其可能被攻击和破坏的脆弱性。

对于航空电子系统,系统的信息安全和保障是设计和实施中的一个关键。航空电子系统只有确保自身的信息安全,才能给整机的任务执行带来安全性和可靠性。系统的安全和保障需要从总体框架上考虑,在具体设计过程中,需要严格贯彻总体设计思想,严格采取安全措施,严格进行风险评估。

1.2 航空电子系统发展挑战

1.2.1 网络中心战的挑战

随着信息技术,军事技术的飞速发展,传统“以平台为中心”的作战概念正在被“以网络为中心”的作战概念而取代^[8],信息化成为了世界新军事变革的本质和核心,空战的作战模式正在由以平台为中心向以网络为中心的信息战方向发展,联合作战、协同作战和机动作战成为现代高科技战争的基本空战样式。因此,作战飞机不仅要利用本机传感器得到的信息,还要综合利用协同作战,包括无人机、预警机、电子侦察机等得到的目标及各种威胁信息,综合利用战场信息网提供的敌我信息,以获取全面战场态势感知,实施超视距和远距攻击^[9]。因此,随着网络中心战概念的进一步深入,传统航空电子系统结构面临着新的挑战,航空电子系统要有一个灵活的系统结构和合理的互连方式。航空电子系统结构必须要适应这种变化过程,一方面在以网络为中心的协同作战环境下,适应多种平台互连、互操作的要求;另一方面在平台内部,易于把新的技术引入系统,同时适应对系统不断增长的性能需求。

未来的航空电子平台作为“网络中心战”的重要组成部分,必须具备对战场信息的把握能力,即每架飞机都必须具备插入作战网络成为网络节点的能力;具备通过数据链信息技术获取其他飞机以及舰船、地面站、卫星的信息的能力;并可利用这些信息直接对机载武器进行制导和控制,从而为飞行员获取前所未有的战场态势感知能力和战术支援能力^[10]。

对航空电子平台而言,要实现网络中心战的信息优势,其技术基础是快速、精确