



“十二五”国家重点图书出版规划项目
陕西出版资金资助项目

新兴微纳电子技术丛书

航空微电子

Aeronautic Microelectronic

樊晓桢 安建峰 王少熙 编著 ●



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

西安电子科技大学



“十二五”国家重点图书出版规划项目
陕西出版资金资助项目

新兴微纳电子技术丛书

航空微电子

Aeronautic Microelectronics

樊晓桢 安建峰 王少熙 编著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

微电子技术的进步是现代科技、经济和社会发展的重要推动力。在航空领域也是如此。微电子对航空产品的技术水平、质量的影响如此之大,对航空技术的应用普及影响如此之广,在近几十年得到了充分的体现。因而航空微电子技术历来是各发达国家发展的重中之重,也是保密的重中之重。

本书尝试在航空微电子技术方面做必要的梳理性的介绍。其基本思想是从航空器需求的视角看微电子技术的应用。全书共七章,第1章为航空微电子系统概述;第2章为航空微电子内嵌可靠性理论;第3章为航空通用核心处理器;第4章为航空专用加速器及异构处理器;第5章为航空存储器;第6章为航空机载专用总线;第7章为航空微电子健康管理理论。

本书可作为高等学校电子科学与技术、微电子学与固体电子学、航空工程等相应专业选修课教材或研究生教材,也可供从事航空航天微电子技术相关研究的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空微电子/樊晓桢,安建峰,王少熙编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.6

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4495 - 0

I. ①航… II. ①樊… ②安… ③王… III. ①航空电气设备—微电子技术
IV. ①V242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 090820 号

策划编辑 李惠萍

责任编辑 李惠萍

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2017年6月第1版 2017年6月第1次印刷

开 本 787毫米×960毫米 1/16 印张 19

字 数 390字

印 数 1~2000册

定 价 37.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4495 - 0/V

XDUP 4787001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

“十二五”国家重点图书出版规划项目

陕西出版资金资助项目

新兴微纳电子技术丛书

编写委员会名单

编委会主任 庄奕琪

编委会成员 樊晓桢 梁继民 田文超 胡 英

杨 刚 张春福 张进成 马晓华

郭金刚 靳 钊 娄利飞 何 亮

张茂林 冯 倩 安建峰 王少熙

前 言

随着我国航空事业的迅速发展,微电子技术对航空工程的影响日益深远,航空工程对微电子技术的的需求不断增加,航空技术水平要求不断提高。本书作者试图为读者尽可能全面、系统地介绍航空工程中有关微电子技术的的基础理论知识和应用技术。

本书主要研究航空工程电子系统所需要的微电子技术知识,要求读者具有航空工程、集成电路设计、微电子可靠性等方面的基础知识。作者从航空微电子内嵌可靠性理论、核心处理器、专用协处理器、存储器、航空总线、健康管理等若干方面介绍了对航空微电子特有的一些考虑和相关知识,有助于读者在航空技术和微电子技术之间建立起知识贯通的基本框架,为航空微电子复合型高端人才培养提供理论基础。

本书共分七章,第1章阐述航空微电子系统的的基本概念;第2章阐述航空微电子内嵌可靠性理论;第3章阐述航空通用核心处理器;第4章阐述航空专用加速器及异构处理器;第5章阐述航空存储器;第6章给出航空机载专用总线的基本知识;第7章简单介绍了航空微电子健康管理理论。

本书系《新兴微纳电子技术丛书》中的一册,这套丛书也是“十二五”国家重点图书出版规划项目,是在陕西出版资金资助项目的大力支持下出版的。

承担本书编著任务的西北工业大学嵌入式系统集成教育部工程研究中心是经国家教育部批准立项建设的工程中心,以国家中长期科学与技术发展规划为指导,结合学校学科整体规划,面向国家高新技术发展方向和国家经济建设、社会进步、国家安全的发展战略,将具有重要市场价值的科技成果进行工程化研究和系统集成,转化为适合规模生产所需要的工程化共性、关键技术或具有市场竞争力的技术产品。

研究中心的工作主要涉及微处理器微体系结构、可重构计算、专用微处理器结构研究和系统芯片、数字系统可靠性及可测性设计技术等方向,建成了一套微处理器体系结构、可重构计算的研究、设计与评估平台,设计了多款高性能微处理器和面向工控领域的系统芯片。所有这些工作为本书的编写奠定了基础。

在本书编写过程中,查阅了国内外有关学者的著作和文章,参考了课题组多年来

的研究成果，参阅了任向隆、彭和平、史莉雯、周昔平、孙华锦、屈文新、张骏、李瑛、段然、田杭沛、罗旻、荆元利、郑乔石、韩立敏等研究生的毕业论文，张盛兵、王党辉、张萌、黄小平、陈超等老师提出了诸多建议，李耀兰、历广绪、方新嘉、郑潇逸、任梦、蒋丹崴、李文想、马鑫、王明辛、周柏强、曹国欣等研究生参与了编写，在此一并表示衷心的感谢。特别感谢西安电子科技大学出版社的李惠萍编辑，她为本书提出了许多宝贵的修改意见，并为本书的出版付出了辛勤的劳动。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。我们的联系方式如下：

电子邮件：anjf@nwpu.edu.cn

联系电话：(029)88431557

联系地址：陕西省西安市长安区东祥路1号西北工业大学886信箱

邮政编码：710129

编者

2017年4月于西安

目 录

第 1 章 航空微电子系统概述	1
1.1 航空电子系统	1
1.1.1 航空电子系统的约束	2
1.1.2 航空电子系统的组成	3
1.1.3 航空电子系统结构的发展	7
1.2 航空微电子技术	8
1.3 航空航天微电子技术的特征	11
1.4 航空计算系统	14
1.4.1 航空计算系统的分类与特点	15
1.4.2 航空计算系统的发展趋势	17
第 2 章 航空微电子内嵌可靠性理论	20
2.1 引言	20
2.2 工序能力指数	21
2.2.1 工序能力指数的意义	22
2.2.2 工序能力及工序能力指数的概念	24
2.2.3 工序能力指数理论的发展	25
2.2.4 工序能力指数与成品率	26
2.3 非正态工序能力指数	33
2.3.1 工序能力分析中的皮尔逊分布拟合	33
2.3.2 常规非正态数据拟合方法	38
2.3.3 基于切比雪夫-埃尔米特多项式的工序能力指数模型	40
2.4 多变量工序能力指数	42
2.4.1 基于空间定义的多变量工序能力指数	42
2.4.2 基于成品率的多变量工序能力指数模型	46
2.4.3 基于权重系数的多变量工序能力指数模型	53
2.4.4 多变量应用建议	55
2.5 高精度正态分布	55
2.5.1 一维正态分布积分限与精度的提高	56
2.5.2 二维正态性检验	58

2.5.3	正态分布参数的拟合计算	61
2.5.4	二维正态分布函数高精度实现	65
2.6	样本容量	68
2.6.1	完整样本容量	69
2.6.2	非完整样本容量	74
第3章	航空通用核心处理器	78
3.1	引言	78
3.1.1	航空电子系统对处理器的要求	78
3.1.2	核心处理器分类	78
3.2	核心处理器的发展趋势	79
3.2.1	多核/众核处理器的产生背景	80
3.2.2	多核/众核处理器的理论基础	81
3.2.3	多核/众核处理器对航空电子系统的挑战和机遇	82
3.2.4	多核/众核处理器的研究现状	83
3.2.5	众核处理器的发展趋势	93
3.3	研究案例：基于航天及空间应用的单片多处理体系结构	99
3.3.1	概述	99
3.3.2	航天及空间应用微处理器的需求特点	99
3.3.3	SPARC V8 系统结构	100
3.3.4	基于 LEON 处理器的 FPU 和 CU 结构	106
3.3.5	可配置为并行与冗余结构的双核处理器	115
第4章	航空专用加速器及异构处理器	132
4.1	引言	132
4.2	使用墙问题和暗硅时代	132
4.3	适应暗硅的架构研究	137
4.4	CoDA 架构及能耗研究	142
4.4.1	CoDA 架构的定义	142
4.4.2	问题的提出	146
4.4.3	CoDA 架构设计	147
4.4.4	CoDA 能耗评估	151
第5章	航空存储器	164
5.1	综述	164
5.1.1	Cache	165
5.1.2	主存	165
5.1.3	辅助存储器	165
5.2	跨越“存储墙”的挑战	165

5.3	片上多核存储系统研究的关键问题	168
5.3.1	时延	168
5.3.2	存储器带宽	171
5.4	片上多核处理器存储系统的现状	173
5.4.1	学术界	173
5.4.2	工业界	176
5.5	实例：“龙腾”R2 微处理器存储系统设计	178
5.5.1	“龙腾”R2 处理器结构	179
5.5.2	存储管理单元的设计	180
5.5.3	一级 Cache 的设计	188
5.5.4	二级 Cache 的设计	199
第 6 章	航空机载专用总线	204
6.1	引言	204
6.2	1553B 总线	204
6.2.1	总线简介	204
6.2.2	总线的链路层介绍	205
6.2.3	总线的物理层介绍	209
6.2.4	相关接口芯片	212
6.3	ARINC429 总线	213
6.4	ARINC659 总线	214
6.4.1	总线简介	214
6.4.2	总线的链路层介绍	214
6.4.3	ARINC659 总线活动	216
6.4.4	ARINC659 接口实现	222
6.5	AFDX 总线	223
6.5.1	总线简介	223
6.5.2	总线的链路层介绍	227
6.5.3	总线的物理层介绍	234
6.6	ROBUS 总线	234
6.6.1	总线简介	234
6.6.2	总线的链路层介绍	235
6.6.3	总线的物理层介绍	240
6.6.4	总线应用情况	249
6.7	FC-AE-1553B 总线	251
6.7.1	总线简介	251
6.7.2	总线的链路层介绍	251
6.7.3	总线的物理层介绍	255

6.7.4	国内外对该总线的研究情况	255
6.8	TTE 时间触发以太网	256
6.8.1	国内外研究现状	256
6.8.2	基本概念	258
6.8.3	网络拓扑结构	258
6.8.4	AS6802 协议介绍	259
6.8.5	主要功能函数	261
6.8.6	时间同步原理	266
6.8.7	同步主节点整体结构	270
第 7 章	航空微电子健康管理理论	272
7.1	引言	272
7.2	函数、非标称、因果关系	273
7.3	复杂性和知识局限性	276
7.4	SHM 缓解策略	277
7.5	可操作失效管理功能	278
7.5.1	监测函数和模型调整	280
7.5.2	故障诊断	281
7.5.3	失效预测	282
7.5.4	失效反应判定	282
7.5.5	失效反应	283
7.5.6	故障包含度和失效包含域	284
7.6	机制	285
7.6.1	故障容限	285
7.6.2	冗余	285
7.7	规则总结	287
7.8	系统健康管理的实现	288
7.9	启示	289
7.9.1	探测不可预知的非常态状态	289
7.9.2	独立条件下完整知识的不可能性	290
7.9.3	管理体制的必要性和不足	290
7.9.4	接口“干净”	291
7.9.5	需求、模型和正规表述	291
7.10	总结	292
参考文献	293

第1章 航空微电子系统概述

1.1 航空电子系统

航空电子系统的主要任务是支持仪表飞行程序,辅助目视飞行程序,保障飞行的安全性。航空电子系统具体是指飞机上所有电子系统的总和。一个最基本的航空电子系统由通信、导航和显示管理等多个系统构成。航空电子设备种类繁多,针对不同用途,这些设备从最简单的警用直升机上的探照灯到复杂的控制系统如空中预警平台,可谓无所不包。航空电子系统所涉及的技术领域包括:机载雷达、航空通信系统、导航系统、自动飞行系统、自动油门系统、敌我识别系统以及电子自卫系统等。

航空电子研究正以惊人的速度改变着航空航天技术。起初,航空电子设备只是一架飞机的附属系统;而如今,许多飞机存在的唯一目的即为搭载这些设备。军用飞机正日益成为一种集成了各种强大而敏感的传感器的战斗平台。

在20世纪70年代之前,航空电子(Avionics)这个词还没有出现。那时,航空仪表、无线电、雷达、燃油系统、引擎控制以及无线电导航都是独立的,并且大部分时候属于机械系统。

航空电子诞生于20世纪70年代,伴随着电子工业走向一体化,航空电子市场也蓬勃发展起来。在20世纪70年代早期,全世界90%以上的半导体产品应用在军用飞机上。到了20世纪90年代,这个比例已不足1%。从70年代末开始,航空电子已逐渐成为飞机设计中的一个独立板块。

推动航电技术发展的主要动力来源于冷战时期的军事需要而非民用领域。数量庞大的飞机变成了会飞的传感器平台,如何使如此众多的传感器协同工作也成为一个新的难题。时至今日,航空电子系统已成为军机研发预算中比重最大的部分。粗略地估计一下,F-15E、F-14有80%的预算花在了航空电子系统上。

航空电子技术在民用市场也正在获得巨大的发展。飞行控制系统(线传飞控)苛刻的空域条件带来的新导航需求也促使开发成本相应上涨。随着越来越多的人将飞机作为自己出行的首选交通工具,人们也不断开发出更为精细的控制技术来保证飞机在有限的空域环境下的安全性。同时,民机天然地要求将所有的航电系统都限制在驾驶舱内,从而使民机在预算和开发方面第一次影响到军事领域。

1.1.1 航空电子系统的约束

飞机上的任何设备都必须满足一系列苛刻的设计约束。因为飞机所面临的电子环境是独特的，有时甚至是高度复杂的。制造任何飞机都面临许多昂贵、耗时、麻烦和困难的方面，适航性认证就是其中之一。随着飞机及机组人员愈来愈依赖于航电系统，这些系统的健壮性便变得非常重要了。建造航空电子系统的一个必要因素就是要求飞行控制系统在任何时候都不能失效。因此，飞机上任何一种系统都对健壮性有一定程度的要求。

1. 集成度

从航空电子工业的发轫时期开始，如何将极其众多的电子系统连接起来、密切有效地使用各种信息就是一个令人头疼的问题。当初如何在离散数据线上传递开关变量的简单问题，而今已演化为如何协调光线数据总线上传递的飞行控制数据的繁杂问题。空前复杂的软件也被用以应付空前苛刻的航空标准。在今天，系统集成已成为飞机工程师们所面临的最大问题。无论一架飞机如何小，一定程度的系统集成也是必不可少的（例如电力供应）。大型飞机项目（像军用及民用）经常需要数百名工程师来集成这些复杂的系统。

2. 物理环境

飞行环境不同，系统用途各异，某些系统需要比其他系统更为健壮，今天所有的航空电子系统都需要通过特定水平的环境测试才可使用，所以鲁棒性设计日益重要。

测试的形式多种多样，许多飞机生产商会预先规定如何测试。随着航电设备的广泛应用，各种适航认证（如英国的 CAA 或美国的 FAA）制定了这些设备必须满足的性能标准。制造商们则在此基础上制定了这些设备必须满足的环境标准。

这些标准规定了航电制造商所必须遵循的飞机零件测试方法及等级，例如盐水喷射、防水性、模具成长，以及外部污渍之类的测试。目前提供给制造商的这类航电标准有 BS 3G 100、MIL-STD-810、DEF STAN 00-35 等。在进行每一项单独测试前，我们首先得评估其是否适用。例如，盐水喷射测试对装在密封架内的设备就没有什么必要。制造商们通过交叉引用这些标准，维护测试等级，经常会生成更为通用的需求。这些需求并不规定性能，而是对设备的操作环境的一种描述。

3. 电磁兼容性

众所周知，EEE、电磁兼容性(EMC)是一项评估电力电子系统相互影响的活动。在飞机世界里，电磁兼容性可导致各种各样的问题。飞机及其设备一般使用测试范围更广的特定标准，如 DEF Stan 59-41、MIL-STD-464 等。

4. 振动

即使是最平稳的飞机（如民航干线飞机），飞机振动也是一个非常严重的问题，对可靠

性影响很大,更不用说像直升机那样颠簸的飞机。振动已成为设计中最主要的驱动因素之一。虽然有一些针对振动问题的飞机标准,但许多设计者们并没有意识到它们。共振问题对于每一架出厂的飞机都不尽相同,更不用说对不同型号的飞机了。

5. 系统安全性

飞机上的所有零部件都要定期接受系统安全性分析。在航电领域,这项工作主要是由各个国家的适航认证部门来执行的。对于民机,总是由 FAA 或者 EASA(JAA)来认证其安全性的。对于军机,虽然也有一些世界标准,但大部分军机买方认证执行的是当地标准(如 DEF Stan 00-56)。

在飞机设计中,安全性设计一般表述为可靠性及耐用性,这方面的考虑极大地影响着飞机的设计方法。任何应用于航电系统的软件都要接受严格的安全性审查。

6. 质量

航空电子设备的采购在全球范围内已被少数几大巨头所垄断。通过提供“盒装部件”,即所谓的 LRU(航线可更换组件),以及打包、测试和配置管理等活动,他们几乎垄断了整个航空电子产业。对于任何工业领域,质量控制都是一个非常重要的部分。而在航空领域,航电产品供货商则可能毁了整个方案(参看波音 Chinook 事件)。如今 ISO 9001 所颁布的质量标准虽然已被主要工业领域所采用,而主要的飞机制造商对于他们所交付的文档和硬件还有更为严格的标准。人们经常说飞机不是依靠燃油飞行,而是依靠文档来飞行,因为任何一个 LRU(一个无线电设备或仪器)都要产生大量的文档。

1.1.2 航空电子系统的组成

航空电子学是个庞大的学科,下面从飞机电子系统和战术任务系统两个角度阐述航空电子系统的基本组成。常规航空电子系统的组成可以用图 1-1 来表示,主要模块和系统如下所述。

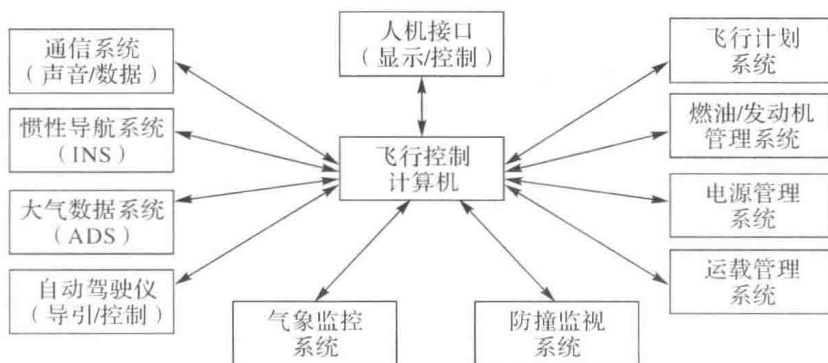


图 1-1 航空电子系统的组成

1. 飞机电子系统——航电系统

在任何飞机上，驾驶舱都处于航电系统中最显著的位置。这样的设计要求也是最困难和最有争议的问题。所有可以直接控制飞机安全飞行的系统都可以在驾驶舱中由飞行员直接控制。那些对飞机安全性很关键的系统也都指向航电系统。

1) 通信系统

通信系统是航电系统中最先出现的，飞机和地面的通信能力从一开始就是至关重要的。远程通信爆发式的增长意味着飞机(民机和军机)必须携带一大堆通信设备。其中一小部分提供了关乎乘客安全的空地通信系统。机载通信是由公共地址系统和飞机交互通信提供的。

2) 导航系统

本书所关注的导航其含义为如何确定地球表面以上的位置和方向。

在通信系统出现后不久，飞行能力就受限于上述通信系统的要求，功能扩展有限。从早期开始，为了飞行的安全性，人们就开发出导航传感器来帮助飞行员。除了通信设备，飞机上现在又安装了一大堆无线电导航设备。

3) 显示系统

航电系统的独立出现是紧随其功能的集成工作之后的。很早以前，生产商们就努力开发更可靠和更好的系统来显示关键的飞行信息。真正的玻璃驾驶舱是在最近几年才出现的。LCD 或者 CRT 经常会倒退回传统的仪表。

如今，LCD 显示的可靠性已足以让“玻璃”显示成为关键部分，但这只是表面因素。显示系统负责检查关键的传感器数据，这些数据能让飞机在严苛的环境里安全地飞行。显示软件是以与飞行控制软件一样的要求开发出来的，它们对飞行员而言同等重要。显示系统以多种方式确定高度和方位，并安全方便地将这些数据提供给机组人员。

4) 飞行控制系统

多年来，平直翼飞机和直升机的自动控制飞行方式是不同的。这些自动驾驶系统在大部分时间里(比如巡航或直升机悬停时)减少了飞行员的工作负荷和可能出现的失误。第一个简单的自动驾驶仪用于控制高度及方向，它可以有限地操控一些东西，如发动机推力和机翼舵面。在直升机上，自动稳定仪起同样的作用。直到最近，这些老系统仍自然而然地利用电子机械。

5) 防撞系统

为了增强空中交通管制，大型运输机和略小些的飞机多使用交通警告及防撞系统(Traffic Alert and Collision Avoidance System)，它可以检测出附近的其他飞机，并提供防止空中相撞的指令。小飞机也许会使用简单一些的空中警告系统，如 TPAS，它们以一种被

动方式工作,不会主动询问其他飞机的异频雷达收发器信号,也不提供解决冲撞的建议。

为了防止和地面相撞,飞机上安装了诸如近地警告系统(Ground Proximity Warning System, GPWS),这种系统通常含有一个雷达测高计。新的系统使用GPS和地形以及障碍物数据库为轻型飞机提供同样的功能。

6) 气象雷达

气象系统如气象雷达(典型的如商用飞机上的ARINC708)和闪电探测器对于夜间飞行或者指令指挥飞行非常重要,因为此时飞行员无法看到前方的气象条件。暴雨(雷达可感知)或闪电都意味着强烈的对流和湍流,而气象系统则可以使飞行员绕过这些区域。

最近,驾驶舱气象系统有了三项最重要的改革。首先,这些设备(尤其是闪电探测器,如Stormscope或Strikefinder)已便宜了很多,甚至可以装备在小型飞机上。其次,除了传统雷达和闪电探测器,通过连接卫星数据,飞行员可以获得远超过机载系统本身能力的雷达气象图像。最后,现代显示系统可以将气象信息和移动地图、地形、交通等信息集成在一个屏幕上,大大方便了飞行。

7) 飞机管理系统

飞行管理系统出现在20世纪70年代,是在原有的自动导航及通信控制和其他电子系统的技术上发展起来的。柯林斯(Collins)和霍尼韦尔(Honeywell)公司分别在其参与研发的麦道和波音飞机上率先引入集成的飞行管理系统。随着技术的进步,飞行管理系统的重要性不断提高,成为飞机上最重要的人机交互接口,集成了飞行控制计算机、导航及性能计算等功能。中央计算机加上显示和飞行控制系统,这三个核心系统使飞机上的所有系统(不仅仅是航电系统)更易于维护,更易于飞行,也更加安全。

引擎的监控和管理很早就在飞机地面维护方面取得了一定进展。如今这种监控管理已经最终延伸到飞机上的所有系统,并且延长了这些系统和零部件的寿命(同时降低了成本)。集成了健康及使用状况监控系统(Health and Usage Monitor Systems, HUMS)后,飞机管理计算机就可以及时报告那些需要更换的零件。

有了飞机管理计算机或者飞行管理系统,机组人员就再也用不着看一张张地图和计算复杂的数学式子了,再加上数字飞行公文包,机组人员可以管理到飞机上小至每一个铆钉的任何方面。

虽然航电设备制造商提供了飞行管理系统,不过目前还是倾向于由飞机制造商提供飞机管理和健康及使用状况监控系统。因为这些软件系统的功能发挥依赖于它们装载在何种飞机上。

2. 战术任务系统

当前航空电子的主要发展方向已转向“驾驶舱背后”。军用飞机或者用来发射武器,或者变成其他武器系统的眼睛和耳朵。缘于战术需要,大堆的传感器装在军用飞机上。更大

的会飞的传感器平台(如 E-3D、JSTARS、ASTOR、Nimrod MRA4、Merlin、HM Mk 1)除了安装飞机管理系统外,还会安装任务管理系统。

随着精巧的军用传感器的广泛应用,它们已变得无所不在,甚至已流入军火黑市。警用飞机和电子侦察机如今则携带着更为精密的战术传感器。

1) 军用通信系统

民航通信系统为安全飞行提供了骨干支持,而军用通信系统则主要用于适应严酷的战场环境。军用极高频(UHF)、甚高频(VHF)(30~88 Mz)通信和使用 ECCM 方法的卫星通信,再加上密码学,一起构成了战场上安全的通信环境。数据链系统,如 Link 11、Link 16、Link 22、BOWMAN、JTRS 以及 TETRA,提供了数据(如图像、目标信息等)传输方法。

2) 雷达

空中雷达是主要的作战传感器之一。它和其地面基站一起,如今已发展得非常复杂。空中雷达最引人注目的一个变化就是可以在超远距离内提供高度信息。这类雷达包括早期的预警雷达(AEW)、反潜雷达(ASW),以及气象雷达(ARINC 708)和近地雷达。

军用雷达有时用来帮助高速喷气飞机低空飞行。虽然民用市场上的气象雷达偶尔也作此用,但都有严格的限制。

3) 声呐

声呐是紧随着雷达出现的。许多军用直升机上安装了探水声呐,它们可以保护舰队免遭来自潜艇和水面敌舰的攻击。水上支援飞机可以释放主动或被动式声呐浮标,也可以用于确定敌方潜水艇的位置。

4) 光电系统

光电系统覆盖的设备范围很广,其中包括前视红外系统(Forward Looking Infrared)和被动式红外设备(Passive Infrared Devices, PIDS)。这些设备都可以给机组提供红外图像。这些图像可以获得更好的目标分辨率,从而用于一切搜救活动。

5) 电子预警

电子支援(Electronic Support Measure, ESM)以及防御支援(Defensive Aids, DAS)常用于搜集威胁物或潜在威胁物的信息。它们最终用于发射武器(有时是自动发射)直接攻击敌机,有时也用以确认威胁物的状态,甚至辨识它们。

6) 机载网络

不管是军用的、商用的,还是民用先进机型的电子系统,都是通过航空电子总线相互连接起来的。这些网络在功能上和家用电脑网络十分相似,然而在通信和电子协议上却区别很大。最常见的航空电子总线协议及其主要应用领域如下:

- Aircraft Data Network (ADN): 飞机数据网络;

- AFDX: 商用飞机上 ARINC664 的特定实现;
- ARINC429: 商用飞机;
- ARINC664: 同 ADN, 多用于飞机数据网络;
- ARINC629: 商用飞机(波音 777);
- ARINC708: 商用飞机上的气象雷达;
- ARINC717: 商用飞机上的飞行数据记录仪;
- MIL-STD-1553: 军用飞机。

1.1.3 航空电子系统结构的发展

航空电子综合系统结构不断改进,使航空电子综合系统的水平迅速提高,从而促进了战斗机水平的更新换代。在航空电子系统对飞机整体性能影响日益增大的同时,航空电子系统的硬件成本占飞机出厂总成本的比例也在直线上升:从 20 世纪 60 年代 F-4 的 10%,70 年代 F-15C 的 21%,80 年代中期 F-16C 的 30%,到 90 年代 EF2000 和 F-22 战斗机的 40%~50%。综合来看,航空电子技术发展至今基本上经历了分立、联合、综合到高度综合这 4 个阶段,航空电子系统结构亦是如此,同样经历了分立式、联合式、综合式和高度综合式 4 个阶段,如图 1-2 所示。

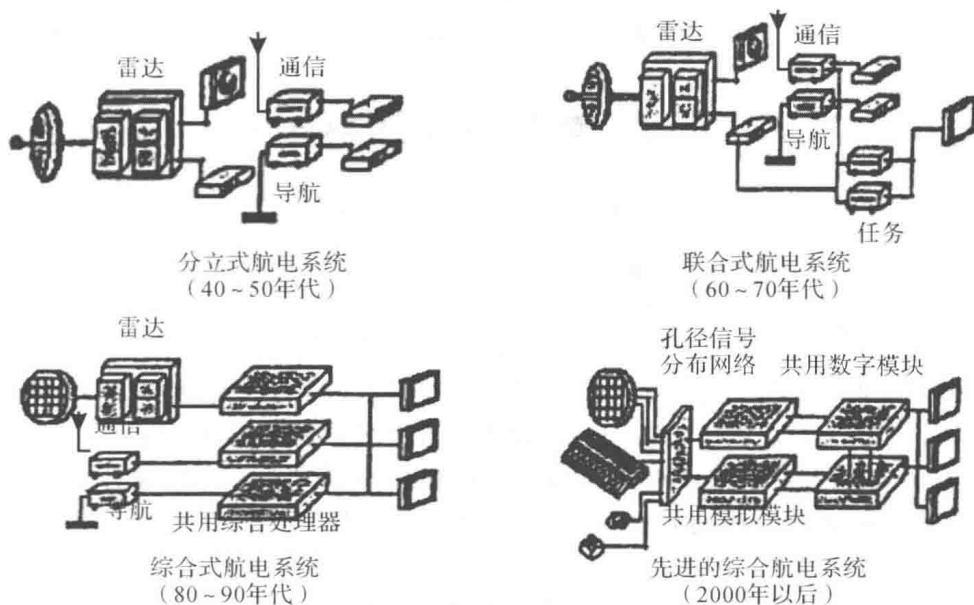


图 1-2 航空电子系统发展历程

第一代航空电子系统为分立式结构,20 世纪初到 20 世纪 50 年代是离散式结构阶段,雷达、通信、导航等设备各自均有专用且相互独立的天线、射频前端、处理器和显示器等,