

机电系统的 总线综合管理

王占林 陈娟 著

JIDIAN XITONG DE
ZONGXIAN ZONGHE GUANLI



国防工业出版社

National Defense Industry Press

机电系统的总线综合管理

王占林 陈娟 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书对机电系统的总线综合管理进行了论述,主要包括总线综合管理的概念、发展概况及常用现场总线,基于 MIL-STD-1553B 总线控管的机载机电系统分布式实时仿真平台的软硬件拓扑结构,多处理机多任务的分配与调度及总线管理下的容错与冗余技术,机载机电电子系统的建模与控制,基于总线的分布式系统故障注入及故障诊断与监控,分布实时数据库结构与管理,基于总线的多机电系统控管仿真平台实验研究,PROFIBUS-DP 现场总线及其应用,CAN、SERCOS 现场总线及其应用,VXI 总线和 PXI 测控总线及其应用等。本书内容新颖,结合工程实际,介绍了多种常用总线,提供了基于总线的综合控制管理方法与管理策略,这些管理方法与策略具有一定的共性与工程实用参考价值。

本书可供从事机电系统控制,特别是多机电系统控制与管理的工程技术人员参考,也可作为高等学校相关专业的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

机电系统的总线综合管理/王占林,陈娟著. —北京:国防工业出版社,2010.6

ISBN 978-7-118-06717-0

I. ①机... II. ①王... ②陈... III. ①机电系统—总线—管理 IV. ①TH—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 053961 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 22½ 字数 560 千字

2010 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

现代控制系统经历了单元组合仪表模拟控制系统、集中控制系统、集散控制系统,以及 20 世纪 90 年代兴旺发展的现场总线控制系统。机载机电系统的总线综合管理就是 20 世纪 90 年代发展并逐渐成熟起来的新技术。运载体包括飞行器、船舶及车辆内部都有很多机电子系统也称公共设备系统,目前这些公共设备子系统的管理在我国基本上传统式的单独管理模式,从配置上看,这些子系统都独立分布于运载体的各个部位,并且每个单独子系统配一套管理控制器、外场可更换单元、显示板、开关、功率切换元件、连接器及大量复杂的导线连接和布线,不仅硬件利用率低也无法进行数据交换和共享,而且体积重量大增,可靠性、可维修性差;另外每个子系统需配备专用仪表和显示,这也会使得座舱拥挤杂乱,操作员负担过重。

为了改善传统的多机电公共设备系统庞杂的结构,有必要研究公共设备系统的整体化和综合化管理。即将整个多机电公共设备系统视为一个整体,采用数据总线、多处理机等技术实行统一管理,这样不仅能够降低系统重量,减少体积和连线的复杂性,节省成本,便于故障检测,提高可维修性,而且通过任务的分配与调度使系统在管理上具有余度、动态重构,提高可靠性与自修复等功能。这是机载设备管理的必然发展方向。

机载设备总线化的综合控制与管理会给飞机等运载体的体系结构带来革命性的变化。因此,此项技术是一项具有重要发展前景和有重大开拓实用价值的技术。另外,综合管理可含功能综合管理与能量的综合管理,如能耗的科学管理、分配与利用等。但功能综合管理是第一位的,因为机载机电系统是生存保障系统,直接关系到主机的生存,通过综合管理保障和提高其功能,可进一步提高可靠性和主机的整体性能,故本书着重论述功能综合管理。

本书主要是在“九五”以来作者负责的课题组所完成的国防重点课题任务“机载机电公共设备的综合管理”及其他现场总线应用课题的基础上总结出的成果及理论,故本书除以航空机载机电系统的总线管理进行重点论述外,作为机电系统的总线管理,也对其他常用的典型工业总线提供了综合控管的方法与策略。

本书共分为 10 章。

第 1 章介绍机电系统综合管理的基本概念、机载机电系统发展概况,概述了常用数据总线的特性及发展应用情况、本书的内容安排等。

第 2 章介绍了分布式混合实时仿真平台,由于被综合的各机电子系统差异很大,若实行综合管理难度较大,在研究开发阶段及研制过程的迭代设计上,都需要得力的仿真开发工具即机电系统分布式仿真平台。本章介绍了仿真平台的研究目标、功能需求仿真特性、仿真平台的拓扑结构、硬件结构、操作系统的选择、软件结构、MIL-STD-1553B 总线通信设计、1553B 总线通信时钟同步策略、可靠性分析等。

第 3 章介绍了分布式多处理机多任务系统的一个重要问题即任务调度问题,在分布式机电综合控制管理系统中,由多台综合处理机对多个子系统进行分布式综合管理,根据一定的调

度规则和调度策略,把组成并行程序的任务按照一定的时序分配到分布式系统的多个处理机节点上,以获得较好的执行性能,即通信开销最小、负载均衡、减少等待时间以及提高系统效率等,对于容错实时性系统,还应实现任务的冗余分布及满足系统实时性要求。本章较详细地论述了各种静态负载分配算法及动态任务调度算法。

第4章分析了综合管理对象的各机电电子系统的建模,以便对子系统的综合管理进行仿真研究。

第5章分析了分布式系统及机载机电设备的故障类型,介绍故障仿真的实现方法及分布式系统故障诊断算法,从而提供机载机电设备综合管理方案特别是冗余度、重构方案验证的实验框架。

第6章介绍了分布式数据库系统,包括分布式数据库的特点、组成、数据管理、仿真数据库设计实例及数据查询与性能优化等。

第7章对仿真平台进行联调测试。对机电各子系统在飞行过程各阶段工作情况包括起飞、巡航机动和降落进行仿真,目的是在整个飞行过程中测试机电各子系统运行情况,根据输入的仿真参数及故障的设置,考察静态任务调度结果及动态容错措施的执行情况。

第8章对 PROFIBUS-DP 现场总线做了介绍,它是一个应用广泛的现场总线。对 PROFIBUS-DP 现场总线在工程机械液压底盘模拟试验台上应用中的一些问题的解决进行探讨,如测试系统的体系结构问题、传输时延问题等。

第9章对 CAN、SERCOS 总线及其应用做了介绍,包括它们的特性与规范,介绍了在机器人、飞行仿真平台及舰艇姿态模拟系统中的应用实例。由于 CAN 总线具有应用于航空领域的倾向,本章最后将 1553B 总线与 CAN 总线进行了比较分析。

第10章指出测试仪器已由传统的独立工作发展成为以总线为基础的联网模式,介绍了利用计算机软硬件资源的虚拟仪器系统,介绍了两种最具典型的测试总线 VXI、PXI。介绍了 VXI 总线测试系统硬件平台设计、软件平台设计,基于 VXI 总线的液压测试系统实例,基于 PXI 总线的虚拟仪器测试系统实例等。

本书参考了科研总结报告及参加课题的博士生的博士论文,其中有李杨、赵海鹰、陈显锋、陈娟、马保海、刘巧珍、温肇东、刘亭、唐志勇、陶军、王岩等。参与具体的编排、录入的博士生有刘亭(第1章、第2章)、邵云滨(第5章)、刘俊(第6章)、温肇东(第7章),他们做了大量工作,文稿曾请多位老师及学生校核,特别是裘丽华教授作了主审,在此一并表示感谢。由于作者的水平与时间有限,疏漏之处在所难免,望读者批评指正。

王占林

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机载机电综合管理系统	1
1.2 国外机载机电综合管理 系统的发展简况	2
1.3 国内机载机电综合管理系统的 发展	4
1.4 总线技术发展概况	5
1.4.1 ARINC429	5
1.4.2 ARINC629	6
1.4.3 光纤总线	7
1.4.4 SCI 总线	8
1.4.5 AFDX(ARINC664)	9
1.4.6 1553B 总线	10
1.4.7 1773B 总线	10
1.4.8 高速数据总线 HSDB	11
1.4.9 CAN 总线	11
1.4.10 快速以太网	12
1.4.11 VXI 和 PXI 总线	15
1.4.12 PROFIBUS 总线	16
1.4.13 SERCOS 总线	16
1.4.14 航空电子统一网络	17
1.5 本书内容安排	18
参考文献	19

第 2 章 分布式混合实时仿真平台	20
2.1 仿真系统的研究目标	20
2.2 分布式实时仿真系统 的仿真特性	21
2.3 仿真平台的拓扑结构	21
2.4 仿真平台的硬件结构	23
2.5 实时操作系统的选择	24

2.5.1 Windows NT+	
RTX 的形式	24
2.5.2 Linux+RTLinux 的形式	25
2.5.3 多线程模型	26
2.5.4 基于 POSIX 的多线程 实现方法	28
2.6 仿真平台的软件结构	31
2.7 1553B 总线通信设计	32
2.7.1 1553B 总线概述	32
2.7.2 总线控制器(BC) 软件设计	37
2.7.3 远程终端(RT) 软件设计	40
2.7.4 1553B 消息传输方式	43
2.7.5 1553B 通信实例设计	45
2.8 1553B 总线通信时钟同步 策略	50
2.8.1 1553B 总线的技术 指标分析	50
2.8.2 机电综合仿真平台的 容错时钟同步策略	53
2.9 可靠性分析	56
2.9.1 全透明结构可靠性 模型	56
2.9.2 综合管理系统可靠性 计算	58
参考文献	58

第 3 章 多处理机多任务的分配 与调度	60
3.1 机电系统综合控制管理 任务	60

3.1.1	机电系统综合控制 管理任务特点	61	3.6.2	流体动力学负载 平衡方法	109
3.1.2	实时任务执行关系	62	3.6.3	收敛特性分析	111
3.1.3	总线管理下的容错与 重构机制及其实现	62	3.6.4	动态任务调度算法 的实现	116
3.2	静态负载分配算法的研究	65	3.7	动态容错算法研究	117
3.2.1	基于图论的调度算法	65	3.7.1	轮转容错方法研究	118
3.2.2	整数规划方法	66	3.7.2	轮转容错方法可靠性 分析	119
3.2.3	分枝限界法	66	3.7.3	多余度轮转容错 方法设计	121
3.2.4	启发式算法	66	3.8	任务模型、任务调度算法 模型、双层任务调度算法	122
3.2.5	仿真平台任务分配 算法	67	3.8.1	任务调度途径选择	122
3.2.6	算法稳定性及性能 分析	71	3.8.2	任务调度方法确定	123
3.2.7	邻域搜索遗传算 法(ADGA)	72	3.8.3	任务调度算法模型 分析	124
3.2.8	基于蚁群算法的静态 任务调度算法的设计	80	3.8.4	外层任务调度算法	128
3.3	仿真平台动态任务调度 研究	90	3.8.5	内层任务调度算法	133
3.3.1	动态任务调度基本 概念	90	参考文献		136
3.3.2	仿真平台动态任务调度 算法(任务转移)	91	第4章	机电子系统建模与控制	141
3.3.3	动态唤醒(系统重构)	92	4.1	一般伺服系统的建模	141
3.4	基于MAS的动态任务 调度算法	93	4.2	防滑刹车子系统	142
3.4.1	Multi-Agent System (MAS)的组织结构分析	93	4.3	起落架收放系统仿真	146
3.4.2	基于招标机制的动态 任务调度策略	94	4.3.1	起落架简化图	147
3.4.3	算法分析	97	4.3.2	起落架运动学和 动力学模型	147
3.5	动态反馈自适应任务调度	99	4.3.3	起落架收放系统 的仿真系统	151
3.5.1	方案设计	99	4.4	前轮转弯系统	152
3.5.2	调度算法	101	4.4.1	飞机地面运动的运动学 和动力学模型	153
3.6	流体动力学负载平衡 方法与实现	108	4.4.2	飞机地面运动的限制	156
3.6.1	问题的形成	108	4.4.3	前轮转弯运动的仿真 模型	157
			4.5	电源系统的建模与仿真	159
			4.5.1	电源系统的工作原理	159

4.5.2 飞机交流电源系统的 数学模型	160	5.2.2 通信链路故障诊断	200
4.5.3 交流电源系统控制 模型	163	5.3 环境控制系统控制通道的 故障诊断	201
4.5.4 电源系统仿真	164	5.3.1 系统的故障分析	201
4.6 环控系统的建模与分析	165	5.3.2 座舱供气控制系统的 故障诊断方案	202
4.6.1 环控系统的工作原理	165	5.3.3 基于特征结构配置的 作动器的故障诊断方法	202
4.6.2 环控系统数学模型 的建立	166	5.3.4 基于特征结构配置方法的 环控系统作动器的故障 诊断	207
4.6.3 环控系统的仿真结果	171	5.3.5 环控系统作动器故障 诊断仿真研究	208
4.7 燃油系统的建模与仿真	172	5.3.6 基于卡尔曼滤波的 传感器的故障诊断 研究	209
4.7.1 燃油系统的工作原理	172	5.3.7 环控系统的故障检测 方法研究	213
4.7.2 燃油系统的数学模型	173	5.3.8 专家系统的引入	216
4.8 液压系统的建模和仿真	175	5.4 刹车防滑控制系统的 故障诊断研究	222
4.8.1 液压能源系统的工作 原理	175	5.4.1 人工神经网络原理 及其 BP 算法	223
4.8.2 微机控制液压泵恒压 控制的数学模型	176	5.4.2 模糊神经网络及其 故障诊断方法	226
4.8.3 恒压变量泵仿真结果	178	5.4.3 基于基本 MLP 与模糊 神经网络的刹车系统的 故障诊断研究	228
4.9 子系统控制性能的分析与 方法设计	179	5.4.4 刹车系统故障诊断 的总体方案	229
4.9.1 网络控制时滞环节对 系统性能的影响	179	5.4.5 模糊量化	230
4.9.2 分布式网络控制时滞 控制器的设计	181	5.4.6 刹车系统故障诊断 的仿真研究	231
4.9.3 时滞环节的辨识设计	186	参考文献	232
参考文献	189		
第 5 章 故障注入系统及故障诊断 与监控	191		
5.1 故障注入系统设计	191	第 6 章 分布式数据库系统研究 及仿真应用	233
5.1.1 故障模型库	192	6.1 分布式数据库系统	233
5.1.2 故障注入器设计	193	6.1.1 发展趋势	233
5.1.3 仿真实例合成器	195		
5.1.4 故障处理器	196		
5.1.5 执行过程	196		
5.2 分布式系统级故障诊断	197		
5.2.1 处理机故障诊断	197		

6.1.2	定义及特点	235	8.1.3	PROFIBUS-DP 数据链路层	271
6.1.3	数据分片及分布	236	8.1.4	PROFIBUS-DP 用户层	278
6.1.4	体系结构	237	8.2	PROFIBUS-DP 现场总线在工程机械液压底盘模拟试验台上的应用	281
6.1.5	设计流程	238	8.2.1	试验台的总体方案概述	281
6.2	分布式仿真数据库系统	240	8.2.2	测控系统的体系结构	283
6.2.1	仿真技术概述	240	8.3	PROFIBUS-DP 网络控制系统时延分析	288
6.2.2	分布式仿真数据	241	8.3.1	PROFIBUS-DP 网络控制信息传输的时延分析	288
6.2.3	分布式实时数据库系统	245	8.3.2	PROFIBUS-DP 网络时延分析及最大时延的估算	290
6.2.4	分布式仿真数据库设计实例	246	8.3.3	PROFIBUS-DP 网络时延的简化	299
参考文献		254	8.4	网络时延导致系统性能下降的补偿方法	300
第7章	系统仿真平台试验研究	255	参考文献		302
7.1	仿真平台试验设备	255	第9章	CAN、SERCOS 总线及其应用	303
7.1.1	试验平台组成	255	9.1	CAN 现场总线	303
7.1.2	初始参数	255	9.1.1	概述	303
7.2	仿真实例合成	257	9.1.2	CAN 总线的发展	303
7.3	传递时间预估	258	9.1.3	CAN 总线工作过程	303
7.3.1	任务执行时间预估	258	9.1.4	CAN 总线的主要特性	304
7.3.2	消息传输时间预估	258	9.1.5	CAN 总线的数值特性	304
7.4	1553B 总线传输时延测试	260	9.1.6	CAN 总线的传输距离	305
7.4.1	传输时延测试方法一	260	9.1.7	CAN 总线的技术规范	305
7.4.2	传输时延测试方法二	260	9.1.8	CAN 展望	307
7.5	系统综合试验	262	9.2	CAN 总线在液压关节机器人上的应用	307
7.6	任务调度与容错结果分析	264	9.2.1	液压关节机器人	307
7.6.1	静态调度结果分析	264			
7.6.2	动态容错结果分析	265			
7.6.3	处理机故障时动态任务调度	265			
参考文献		267			
第8章	PROFIBUS-DP 现场总线及应用	268			
8.1	PROFIBUS 现场总线	268			
8.1.1	概述	268			
8.1.2	PROFIBUS-DP 的物理层	269			

9.2.2 控制系统的总体结构	308	参考文献.....	324
9.2.3 控制系统上位机设计	309	第 10 章 测试总线	325
9.2.4 控制系统下位机设计	311	10.1 测控总线的概述.....	325
9.3 CAN 总线在飞控仿真		10.2 VXI 总线测试系统	326
平台上的应用	316	10.2.1 VXI 总线技术的	
9.3.1 硬件结构.....	316	产生与发展	326
9.3.2 软件结构.....	317	10.2.2 VXI 总线测试系统	
9.4 1553B 总线与 CAN		设计	326
总线比较分析	318	10.2.3 VXI 总线技术在	
9.4.1 协议上的比较	318	液压测试系统中的	
9.4.2 传输性能上的比较	319	应用	332
9.5 SERCOS 总线及其在姿态		10.3 PXI 现场总线及应用.....	339
模拟系统中的应用	322	10.3.1 虚拟仪器	339
9.5.1 SERCOS 总线	322	10.3.2 PXI 总线测试系统	342
9.5.2 舰艇姿态模拟系统		参考文献.....	349
的控制系统	323		

第1章 绪 论

1.1 机载机电综合管理系统

本章将以飞机机载设备的机载机电系统的综合管理为例介绍综合管理的基本概念。如航天运载器、航空器、轮船、现代化汽车等诸多机载系统都包括多个机电子系统,这些子系统也称公共设备子系统,比如航空器公共设备系统通常包括:防滑刹车、前轮转弯、起落架收放、环境控制、电源管理、液压和航空器燃油子系统。它们是飞行控制系统、火控系统、航空电子系统、显示系统、机载武器投放系统的安全保障系统。

从配置上看,这些子系统都独立分布于运载体的各个部位,并且每个单独子系统配一套管理控制器、外场可更换单元、显示板、开关、功率切换元件、连接器及大量复杂的导线连接和布线,不仅硬件利用率低也无法进行数据交换和共享,而且体积重量大增,可靠性、可维修性差;另外每个子系统需配备专用仪表和显示,这也会使得座舱拥挤杂乱,操作员负担过重。

为了改善传统的公共设备系统庞杂的结构,有必要研究公共设备系统的整体化和综合化管理。即将整个公共设备系统视为一个整体而不是各子系统的简单聚合体,采用数据总线、多处理机等技术实行统一管理,这样能够降低重量,减少体积和连线的复杂性,节省成本,提高可维修性,并具有余度、故障检测、动态重构、容错能力和高可靠性与自修复等功能。这是机载设备综合管理的必然发展方向。

20 世纪 80 年代英国试验飞机计划(EAP)中的公共设备(Utility Systems)是指负责飞机持续、安全飞行的那些系统,不包括完成关键任务所不可缺的航空电子系统或者与飞行控制和发动机控制有关的那些系统。如上面提到的燃油系统、液压系统、起落架系统、刹车系统、环境控制系统、二次能源系统、电源系统、紧急能源系统等,这些系统的综合化管理通常用 UMS 表示^[1]。

根据飞机整体化系统的成功经验(如 EAP 的公共设备管理系统以及 AH-64 攻击直升机整体化的电子电源系统、波音 777 使用 A629 数据总线的整体化的航空电子、飞行控制和飞机系统等),西方国家开展了飞行器管理系统(Vehicle Management System, VMS)的研究。公共设备系统、通用设备系统(General Systems)和飞行器系统(Vehicle Systems)的综合化思想是很相似的,所以,当今有些人认为这些系统具有相同的内涵。但 VMS 比 UMS 含有更多的内容与更多的子系统,如飞行控制与推进控制,故一般人把公共设备系统看作是飞行器系统的一个子集。

VMS 把飞行控制和推进控制与公共设备控制管理结合起来,这些系统不像典型的航空电子系统那样引人注目,然而对飞机运行是必不可少的,因为没有它们飞机不会离开地面,它们与飞行控制、发动机控制和公共设备各子系统的控制联系在一起,最近几年为了提高系统的控制和诊断能力,这些系统越来越多地采用电子学技术,因此这些系统的管理本质上也是“航空电子的”。

飞行器管理系统使用数字计算机和数据总线使公共设备系统能相互通信并能与其余的飞机系统通信,获得控制的高准确性、更好的执行特性和改进的监测和故障探测能力^[2]。

飞行器管理系统是执行起飞、滑行、飞行、着陆和停机所需要的功能的系统,如图 1-1 所示,而不是众多单独机动系统的简单聚集体,如图 1-2 所示。物理上通过共享传感器、处理器和通信资源,取消专用的点到点连线,以数字式计算机、航空数据总线取代,功能上采用基于软件的控制单元提供整体化的处理和通信系统,与系统元件提供接口,执行机内测试,执行控制功能,为执行器和操纵装置提供电源需求,与座舱显示通信,这样能够降低重量、体积和连线的复杂性,节省成本,提高可维修性。使各个子系统在不同的飞行阶段选择不同的优化模式,并具有故障检测、动态重构、容错能力和高可靠性。

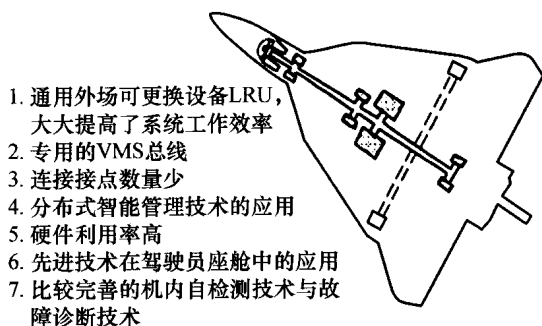


图 1-1 综合化后系统控制与管理模式

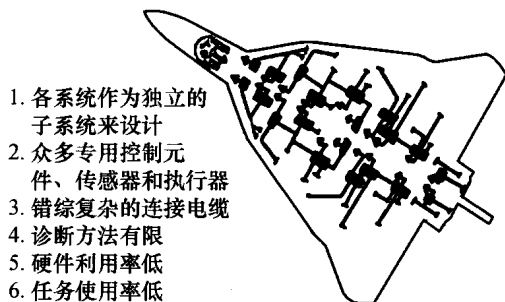


图 1-2 综合化前系统控制与管理模式

从图 1-1 与图 1-2 中的文字注释不难看出,综合化后具有综合化前无可比拟的优越性,特别是机载的体系结构发生了重大改变。

1.2 国外机载机电综合管理系统的发展简况

机载公共设备系统和机载飞行器系统(包括对公共设备、飞行控制和推进控制系统的管理)的综合化是一种必然趋势。20 世纪 70 年代,F-15、F-16 飞机上采用了整体化的飞行控制和推进系统。20 世纪 80 年代,英国试验飞机计划(EAP)使用 1553B 实现飞机公共设备管理系统(UMS)。UMS 由封装了电源转换设备的 4 个现场可更换单元(LRU)(即系统管理处理机)组成,这 4 个单元由一系列通常的模块和构造模块组成,替代了原来传统系统中使用的 20 个~25 个专用控制器和 6 个电源转换继电器单元,系统实现的几个新的特性有:发动机控制和显示;燃油管理和燃油测定显示;液压系统的控制和显示、起落架的显示、监测刹车装置;环境控制系统、舱内温度控制和后来的机载氧气产生系统;二次能源系统;液氧部分、供电和电池监测、探针加热、紧急能源单元。图 1-3 示出了 EAP 中的公共设备管理系统结构。

该系统在欧洲战斗机和“猎迷”MRA4 上成功应用。20 世纪 80 年代中期美国提出了“宝石柱(Pave Pillar)”计划,提出了按功能区进行划分的概念,探索了多处理机、多任务和实时重构的硬件和软件,实现了 VMS,其中 UMS 是整个飞机系统管理 VMS 的一个子集。“宝石柱”计划的预研成果为新一代军用飞机提供了航空电子系统及公共设备系统的通用结构,有力地支持了综合核心处理技术、传感器融合技术、综合座舱技术和综合外挂管理技术,为系统资源共享、容错与重构,减少体积、重量、成本,提高系统可靠性、可维护性建立坚实的技术基础。目前,美国首次把“宝石柱”计划应用在第四代战斗机上。在 F-22“猛禽”战斗机上,机载机电系统的综合控制与管理使总体的安装重量和使用费用下降 50% 以上,利用率提高 7 倍,并且减轻了驾驶员负担。20 世纪 90 年代,美国国防部提出了“宝石台(Pave Pace)”计划,在“宝石

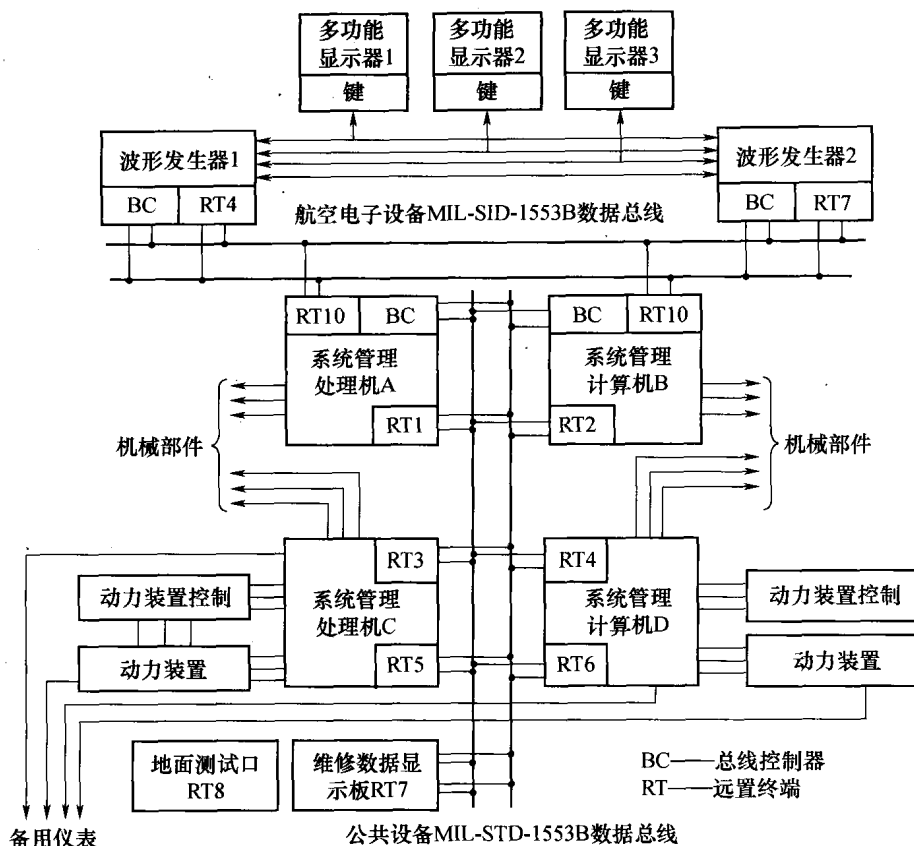


图 1-3 EAP 中的公共设备管理系统结构

柱”的基础上进一步改进了系统结构,扩大功能和传感器融合范围,提高处理能力,使用人工智能和专家系统,使用并行网络,更智能化、更综合化。21 世纪,美国国防部高级研究计划局、美国空军和波音公司联合开发的 X-45A 无人战斗机上也成功应用了飞行器管理系统(VMS),其中 VMS 是双冗余的结构,提供所有飞机子系统的控制;联合攻击机战斗机(JSF) F-35 采用了“宝石台”航空电子体系结构,综合程度比 F-22 更高,传感器的功能更多,传感器数据融合水平也更高,其中装备的公共设备管理系统 UMS 是控制和管理液压、机轮刹车、配电、飞机燃油、灭火、第二动力、环境控制和着陆拦阻等 8 个机载公共设备系统。与此同时,综合管理也带动了法国的“阵风”战斗机、欧洲多国的“台风”EF2000 的发展。欧洲的法国、德国和英国等国家相继拥有了各自独特的系统,但各国在系统开发的概念方面沿用的技术路线大致相同。虽然机载公共设备综合管理系统和飞行器管理系统目前的发展离功能、能量、控制和物理方面的完全综合与统一管理还有一定距离,但其发展是肯定的,始终会以坚定的步伐向前迈进,必将为飞机的可靠性、故障容错、可维修性及执行性能的提高和成本的降低带来巨大的军事与经济效益^[2]。

在民用机设计方面,空客 A330 采用分布式计算机系统,实现了机电系统的综合管理,通过 ARINC429 总线将该系统接入电子飞行仪表系统,实现与飞行员的接口。1995 年霍尼韦尔公司研制成功了具有冗余的分布式多处理机飞机信息管理系统,并首次将其研究成果成功地应用于波音 777 飞机;1997 年末,波音和洛克希德·马丁公司开始执行验证计划,并且波音 777 飞机通过三余度 ARINC629 总线,将飞机控制系统、电源管理系统以及燃油指示系统等进行综合,从而大大降低了设计费用。

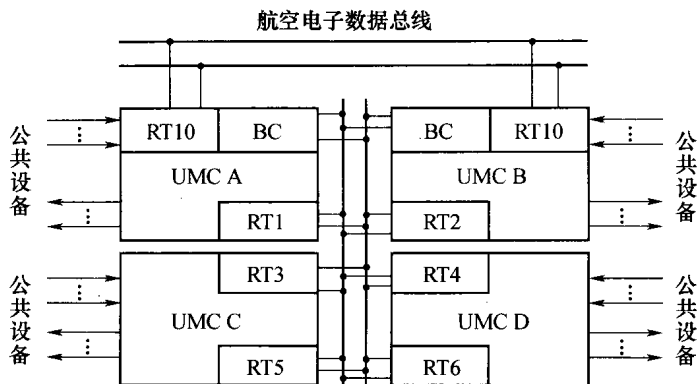
近几年正向健康管理和能源管理的方向发展。

1.3 国内机载机电综合管理系统的发展

我国飞机公共设备系统的综合管理技术还没有应用在现役的型号中。虽然有的实现了发动机控制系统、燃油系统、液压系统、刹车系统、前轮操纵系统等在非航空电子管理与控制分系统(NAMP)中的故障监测与故障告警,其中,刹车系统实现了双余度数字化防滑设计。但是,公共设备系统的大多子系统通过驾驶员座舱中的开关进行独立控制,未实现与 MIL - STD - 1553B 总线连接的控制和数据传输。

我国目前机载设备的每个子系统是独立管理的,并且大多数采用模拟计算机控制,设备多由大量分离的元件和少数集成电路元件组装而成,座舱的仪表为常规的圆盘式机电仪表,各个元器件之间大量采用了焊线的方式保持元件的连通,该种结构形式不仅不利于减轻飞机重量,而且还增加了飞机的故障点,从而降低了飞机的可靠性。

在我国,针对图 1-4 所示的系统拓扑结构对公管系统进行了研究,包括软硬件设计、接口设计等。“九五”期间,北京航空航天大学以以太网仿真 1553B 总线为研究手段,以 5 个公共设备系统(包括液压系统、机轮刹车系统、环境控制系统、飞机燃油系统、电源系统)为对象,开展了公共设备综合管理的研究,建立了以太网仿真平台,并完成了原理样机,这表明我国这方面的研究已经起步。“九五”研究的积累为我国机载公共设备系统进一步综合化管理提供了坚实的技术储备。但“九五”只初步实现了通过调度实现资源共享,余度与重构的功能和整个机载公共设备综合化的结构。“十五”期间,北京航空航天大学又通过快速以太网及 1553B 总线进行了机载公共设备系统综合管理系统的研究,实现了环控、燃油、液压、刹车防滑、起落架收放以及电源等 6 个子系统的数字化控制及各控制机的网络互联,研究了多种静态任务的分配与调度、分布式数据库及故障的注入等技术。然而,与国外的发展现状相比,我国的研究还处于技术验证阶段,离应用阶段还有一段距离,还需要加大研究的力度。近些年来重点放在以 1553B 总线和功能卡为硬件依托的半物理仿真研究与虚拟现实仿真研究上,为新一代战斗机的综合化实现奠定坚实的基础。虽然迄今为止,国内不少单位对公共设备管理系统做了大量的研究,但公开发表的资料很少,可以肯定尚未形成通用和完全集成的软硬件系统,与国外发展现状相比还有相当的距离,基本上处于技术验证阶段。因此,有必要进一步加强对 UMS 及 VMS 的研究力度。



RT: 远程终端 BC: 总线控制器 UMC: 公共设备管理计算机

图 1-4 公共设备管理系统计算机系统结构

1.4 总线技术发展概况

从上节介绍机电系统总线综合管理概念中不难看出,数据总线是综合管理的最核心技术,为此在本节对总线的一般情况进行介绍。

总线技术的目的正是实现各个子系统之间、通用处理模块之间的资源共享,减轻互联介质的重量,降低复杂性,支持系统过程与状态的综合控制和管理。未来的航空电子与机电系统需要高带宽、高可靠性的数据通道,以满足机电系统的实时性和可靠性的要求。

机载高速数据总线技术实时性的需求必然要求互联链路具备以下技术特点:

- (1) 高带宽、低延迟特性。
- (2) 数据链路层协议能够保证消息传输延迟的确定性。
- (3) 数据包大小应在首先满足控制命令和状态等短消息的前提下,满足冗长消息的传输。

机载高速数据总线技术的可靠性需求要求互联链路具备以下特点:

- (1) 单一链路上的检错和纠错能力。
- (2) 链路的冗余连接。
- (3) 总线系统的故障节点识别、隔离和系统重构能力。

总线的上述特点将是选用总线的重要依据。下面概述常用总线。

ARINC429、ARINC629 是 20 世纪在大型民用客机领域最为重要的航电总线,曾经以其优异的性能在大型民用客机领域占据了统治地位。但是随着航空电子技术向智能化、模块化、标准化、综合化等方向发展,以光纤通道(Fiber Channel, FC)、可扩展一致性接口(Scalable Coherent Interface, SCI)、航空电子全双工交换以太网(Avionics Full Duplex Switched Ethernet, AFDX)为代表的新一代民用航空电子系统互连技术已经崛起,将最终取代 ARINC429、ARINC629 系列总线^[4]。

军用航空总线主要有 1553B 总线、1773B 总线、高速数据总线 HSDB。测试总线主要有 VXI 和 PXI 总线。工业实时总线网络主要有 CAN 总线、快速以太网、PROFIBUS 总线、SERCOS 总线等^[5,6]。

本书将以 1553B 航空总线作为重点,论述综合管理的方法与策略。本书对典型常用的工业总线、CAN、SERCOS、VXI 和 PXI 总线也有专门章节介绍,对于未进行专门章节介绍的总线,本节将对其主要特性概略介绍。

1.4.1 ARINC429

ARINC429 是美国各航空电子设备制造商、定期航班航空公司、飞机制造商以及其他一些国家的航空公司联合成立的航空无线电公司(ARINC)为统一航空电子设备的技术指标、电器性能、外形和接插件规范而制定的新型航空总线标准。成为 20 世纪在民航客机领域占统治地位的一种航空电子总线,它将飞机的各系统间或系统与设备间通过双绞线互连起来,构成了各系统间或系统与设备间数字信息传输的主要路径,组成了飞机的神经网络。

ARINC429 数据总线是一种单向传输总线,数据流只能从发送器向接收器传递,采用异步通信方式,可以有 20 个接收器。其通信的 3 个状态的多路信息流,采用带有奇偶校验的 32 位消息字。每个数据字分为 5 组,即:标志码(Label),第 1 位~8 位;源/目的标识码(SDI),第 9

位~10 位;数据区(Data),第 11 位~29 位;符号状态位(SSM),第 30 位~31 位;奇偶校验位(Parity),第 32 位。一个数据字传输一个参数,如经度、纬度等,两个数据字之间有 4 位间隔,这个间隔作为字同步。信号波形为双向归零码,其位宽取决于总线的工作速率。

ARINC429 规定数据高速传输的速率为 $100\text{Kb/s} \pm 1\%$,低传输的位速率为 $12.5\text{Kb/s} \pm 1\%$ 。低速时位宽约为 $70\mu\text{s} \sim 80\mu\text{s}$ 。它是一种单源多连接拓扑结构。低速总线用于一般用途的、非关键性的应用场合,高速总线则用于传输的数据量比较大或那些至关重要的飞行信息。

ARINC429 数字信息传输规范为在航空电子设备之间传输数字信息制定了标准。目前,大多数飞机上数字信息的传输采用了此标准,如全球定位系统 GPS(Global Positioning System)、惯性导航系统 INS(Inertial Navigation System)、电子式飞行仪表系统 EFIS(Electronic Flight Instrument System)等。

由于 ARINC429 具有接口方便、数据传输可靠的特点,很快成为商务运输航空领域应用最广泛的航空电子总线,空中客车公司的 A310/A320、A330/A340 飞机,波音公司的 727、737、747、757 和 767 飞机,麦道公司(1997 年与波音公司合并)的 MD-11 飞机等都采用了这种总线。另外 ARINC429 也在导弹、雷达等领域得到了应用。

但是随着超大规模集成电路技术、计算机技术的迅速发展,ARINC429 总线也暴露出其难以克服的缺点。为了使消息在总线上有序地传输而不致发生碰撞,ARINC429 总线只能使一个信源连接一条 ARINC429 总线,这就必然增加了电缆重量和连接器的数量,给航空电子系统进行更大规模的综合带来不可逾越的障碍。

1.4.2 ARINC629

波音公司主持开发了 ARINC629 新型航空数据总线标准,又称“数字式自主终端存取通信”(DATAC)。这是 20 世纪 90 年代美国军用飞机上使用的一种新型双向高速数据总线,它也是用一条双绞式导线将飞机的各系统和计算机连接的。其主要性能特点为:各个终端皆以自主的形式工作,即任何连接到公用总线上的外场可更换部件(LRU)皆相互独立工作,各个用户终端均能自主、实时地传进数据而与其他终端无关。ARINC629 总线可使民机的所有航空电子设备连接成一个完整的系统,并有利于实现状态监视、故障报告以及中心软件的修改。

作为 ARINC429 的后继者,ARINC629 总线与现役军用航空数据总线 MIL-STD-1553B 之间有相似之处。每个字的字长为 20 位,其中数据占 16 位并有一个奇偶校验位。标号字有 3 个位时的高低同步波形,而数据字的同步波形是由低变高,也占 3 个位时。一个消息由 1 个~16 个字串组成。每个字串有一个标号字,每个字串最多可以包含 256 个数据字。ARINC629 总线能在 1553B 所用的任一种配置方式上工作,其总线速率为 2Mb/s 。ARINC629 总线值得一提的特点是,容易采用电感性耦合器与总线相连接,连接时不必割断导线,这是它对提高可靠性和降低电磁干扰的卓有成效的贡献。

ARINC629 数据传输速度 2Mb/s ,131 个终端,基于时间的冲突回避的载波检测多路存取(CSMA/CD)的工作协议,自校正曼彻斯特双极性码。多源多连接拓扑结构,总线上任何两个终端互相发送、接收数据。

ARINC629 总线最先应用于波音公司于 1995 年推出的波音 777 型客机。后来逐渐取代了直至 A320 型当代飞机上所使用的 ARINC429 广播通信式的总线系统。这大大简化了安装,减轻了飞机重量,同时通过减少导线和接头的数量提高了可靠性。根据波音公司提供的数

据,将 ARINC629 总线用于改装波音 757 型飞机,较之原先使用的 ARINC429 总线,可节省电缆重量达 472kg。

目前新一代航空电子系统从系统结构上发生了变化,机载系统资源的共享程度越来越高。在航空电子网络上传输的不仅仅是过去的命令和状态数据,而且还有大量的视频、音频信号以及中间结果数据。这要求航空电子通信网络具有更好的实时性、可靠性和可扩展性。原有的 ARINC429 的码速率仅为 10kHz~100kHz,ARINC629 的码速率也仅为 4MHz,已经远远不能满足新一代航电系统数据传输的要求。

为此,国内外研究机构对新一代航空总线标准展开了大量的研究。其中光纤通道(FC)与可扩展一致性接口(SCI)因其优异的性能已经引起了广泛关注,而航空电子全双工以太网(AFDX)则由空中客车公司主持开发,并已经在空客 A380 上得到应用,性能优异,大幅提升了其航电系统的数据吞吐量。

1.4.3 光纤总线

FC(Fiber Channel)协议标准的制定开始于 1988 年,由 ANSI X3T11 标准委员会负责开发和协调工作,目前已形成一个庞大的网络协议簇。有专门的分委员会(Fiber Channel,Avionic Environment,FC-AE)负责 FC 在航空电子环境的应用研究。在美国的新型战斗机 F-35 上,以及 B-1B、F/A-18 等飞机的改型上都开始采用 FC 作为机载网络系统。

FC 基于点到点链路和交换网络的传输机制,支持简单的编码和帧方案,进而支持一系列的通道与网络协议。提供一种通用而高效的传输能力,它可以通过端口对各种设备和应用提供支持(图 1-5)。

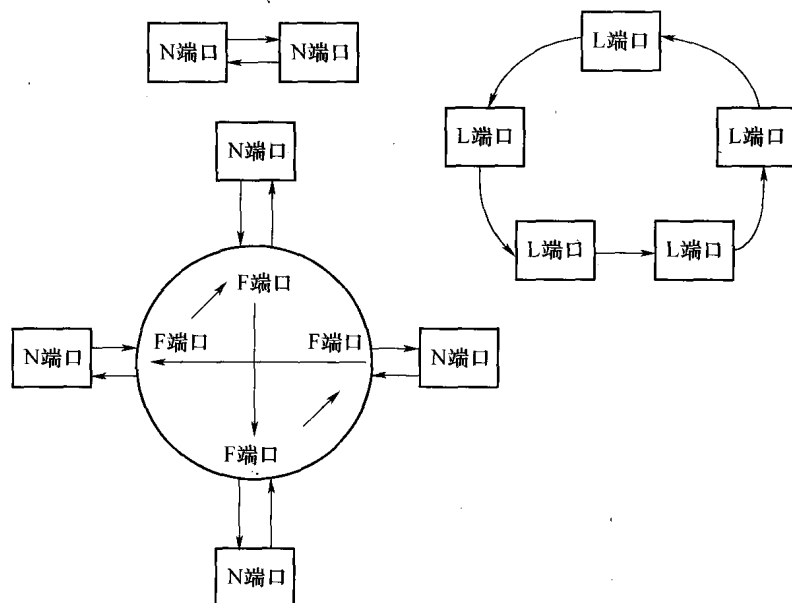


图 1-5 FC 网络拓扑结构(点到点、仲裁环、交换式)

FC 光纤通道标准最初是在研究用于工作站、主机、超级计算机、存储设备、显示器和其他外围设备之间数据交换的高性能连接时产生的,用交换式网络来解决设备互联和交换的复杂性问题,使得网络中节点数的增加不会减少单个节点的带宽,也不会增加延迟。FC 的扩展标准 FC-AE(Fiber Channel for Avionics Environment)专门应用于航空电子环境。