

内 容 提 要

中国航空学会可靠性工程专业委员会为配合中国航空学会开展纪念航空百年活动, 以及总结我国航空“可靠性、保障性(RMS)工程”的发展情况, 决定组织“航空百年学术论坛可靠性工程分论坛暨可靠性工程专业委员会第九届学术年会”。

本书收集了航空百年学术论坛的综合性学术报告 9 篇, 可靠性工程专业委员会第九届学术年会论文 72 篇。

图书在版编目(CIP)数据

航空可靠性工程进展 / 焦景堂主编. —北京: 航空工业出版社,
2003.8

ISBN 7-80183-194-2

I.航… II.焦… III.航空航天工业—可靠性工程—进展 IV.V1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 062748 号

责任编辑: 李铁柏 封面设计: 麦醒媛

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2003 年 8 月第 1 版

2003 年 8 月第 1 次印刷

开本: 787×1092

1/16

印张: 32

字数: 772 千字

印数: 1~500

定价: 120.00 元

ISBN 7-80183-194-2

V • 024

前 言

今年是人类动力飞行 100 周年。人类自从发明了飞机，尤其是有了喷气式飞机，世界发生了翻天覆地的变化。

我们纪念世界航空百年，就是要放眼世界，立足本国，加强航空建设，振兴和发展我国的航空事业，缩短与发达国家的航空水平差距，这是纪念“人类动力飞行 100 周年”的目的所在。

航空可靠性、维修性、保障性（RMS）工程是伴随着我国航空工业的发展，经历了萌芽和形成、成长、全面发展的阶段。经历了从可靠性—维修性—测试性—保障性的研究和应用，从硬件 RMS 工程到软件可靠性工程的研究和应用。

中国航空学会可靠性工程专业委员会成立于 1987 年，是我国航空 RMS 工程发展的必然结果。十几年来，可靠性工程专业委员会配合我国航空工业的发展，曾组织和参与了五届国际可靠性和维修性年会、七次可靠性年会，为加强国际和国内学术交流，推进航空 RMS 工程的发展作出了应有的贡献。

为配合中国航空学会开展纪念航空百年活动，以及总结我国航空 RMS 工程的发展情况，可靠性工程专业委员会于 2002 年 1 月发出了征文通知，并决定于 2003 年 8 月 18 日组织“航空百年学术论坛可靠性分论坛暨可靠性工程专业委员会第九届学术年会”。这本论文集收集了航空百年学术论坛的综合性学术报告 9 篇，可靠性工程专业委员会第九届学术年会论文 72 篇。

在我国航空工业如何不断深入开展 RMS 工程，这将会是航空工业发展中的永恒话题，我们相信我国航空 RMS 工程领域，在已经取得的管理、工程、研究和基础建设等方面成绩的基础上，必定会有更深入的发展，为提高我国航空装备的战备完好性和任务成功性，以及良好的机动性和快速出动能力作出更大的贡献。

在这本文集出版之际，我们向支持这本文集出版的论文作者、审稿专家，以及他们所在单位和航空工业出版社表示感谢。由于时间仓促，加之水平有限，书中疏漏之处敬请读者指正。

中国航空学会
可靠性工程专业委员会
2003 年 8 月·井冈山

目 录

中国航空学会航空百年学术论坛可靠性工程分论坛

航空可靠性工程 50 年	曾天翔 (3)
中国航空装备可靠性维修性保障性工程发展现状与展望	康 锐, 屠庆慈, 焦景堂 (17)
空军武器装备研制阶段的可靠性管理工作	李 凡 (30)
我军航空装备综合保障现状及发展趋势	陈 新, 虞健飞, 卢 珊 (35)
xx 工程研制中可靠性工程技术的应用	吕松堂, 吕刚德 (39)
航空装备测试性技术现状及发展趋势	田 仲 (50)
软件可靠性工程发展评述	阮 铤, 陆民燕 (57)
并行工程技术的应用和发展	倪先平, 彭海鑫, 王文飞, 赵廷弟, 谢文秀 (66)
试论当前航空发动机可靠性的形势和对策	杨 锐 (77)

中国航空学会可靠性工程专业委员会第 9 届学术年会

信息性、安全性设计与分析

信息技术在航空装备保障中的应用	张宝珍 (87)
可靠性工程与环境工程的有机融合是未来技术发展趋势	李晓钢, 许秋满, 王德言 (94)
智能 FMEA 的系统建模方法及推理机制	苏铁军, 赵廷弟, 何 肖 (101)
整机可靠性指标确定的模型研究	张执国, 韩峰岩, 阵云翔 (107)
基于产品应力故障模式的可靠性表示方法	徐 明 (112)
某导弹与适配器分离动作可靠性分析计算	王云飞, 张建国, 陈登高 (120)
基于预计的电子设备可靠性优化方法研究	任 羿, 杨多明, 曾声奎 (127)
系统可靠性建模技术综述	刘 隽, 曾声奎 (132)
对歼 x 型飞机液压系统安全余度的再认识	张 华 (142)
民机系统安全性设计与分析方法及其在 Y12IV 型机上的应用	刘宝成 (148)
FMECA 工程实践中问题的探讨	马海峰 (155)
基于 UML 的基本及任务可靠性分配软件工具设计与实现	孙 博, 任小锋, 曾声奎 (160)
多任务剖面可靠性分配方法研究	文 学, 扈延光 (168)
x 型飞机任务效能模型研究	孙宇锋 (173)
通信车执行任务能力的分析	刘 军 (175)

基于 PSPICE 的电路故障建模及故障注入技术研究	吴 跃, 赵广燕 (179)
装备研制可靠性工作周期的风险分析	任小锋, 王 维 (185)
基于规则的动态故障树与 Markov 链的自动转化	张海燕, 曾声奎 (191)

维修性、保障性设计与分析、维修与综合保障

关于 BIT 虚警问题的探讨	田 仲 (197)
军用飞机机载设备日历寿命控制研究	张建华, 侯志刚 (204)
某新型教练机结构维修性设计	王敏芹 (209)
直 11 型机维修性设计技术的工程实践	陈圣斌, 宋永磊 (214)
武器装备系统级 MTTR 指标验证的一种工程方法	张绍伟, 龚庆祥 (224)
应用相关性模型的测试性设计分析	刘 艳, 赵廷弟 (231)
按可用度要求选择和确定备件保障概率	杨秉喜, 张义芳, 苑利军 (237)
美军混编联队维修体制效能评价模型剖析	徐吉辉, 端木京顺, 徐小慧, 田井远 (241)
试论无人机维修保障系统的建立	胥喜忠, 党荣军 (245)
基于 PSPICE 单机维护保障人力系统维护能力评估模型初探	苏 畅, 董彦非, 陈东林 (250)
航空维修优化的决策分析	刘 醉, 郑东良, 刘雨陇 (254)
基于危害性的装备维修模型研究	郑东良, 杜永军, 杜 纯 (261)
军用航空发动机使用寿命的可靠性监控研究	冯 伟 (267)
新支线飞机产品支援仿真系统的建立方案	郭霖瀚, 章文晋, 康 锐 (272)

可靠性试验、验证与评估

环境应力筛选标准 (GJB1032) 的应用和分析	祝耀昌, 王建刚 (279)
环境应力筛选加速系数	周玉芬, 高锡俊, 李建华, 范卫军 (283)
碳机轮刹车系统可靠性试验分析	乔建军 (288)
利用定量筛选进行电子产品可靠性验收的可行性	任占勇, 王 欣, 汪启华 (295)
设计可靠性验证试验的综合方法	金碧辉, 王 奎, 王正良 (305)
同步可靠性评估方法	王正良 (311)
复杂系统可靠性验证方法研究	冯广斌, 钱林方 (315)
冲击试验加速度波形补偿的优化方法	李传日, 张 雷 (322)
可靠性强化试验振动特性分析	袁宏杰, 姜同敏, 吴 颀, 田 焯 (328)
一种基于遗传算法的时间环境折合系数确定方法	杜振华, 赵 宇, 黄 敏, 傅 博 (333)
xx 导弹可靠性试验剖面研究	李晓钢, 姜同敏, 尤彦艳, 金 玫 (340)
网络系统可靠度综合评估中的计算方法	王玉明, 金碧辉 (346)
利用设备变母体变环境数据的系统可靠性综合评估	刘智洋, 黄 敏, 赵 宇 (350)
引入位置参数的三参数 Weibull 过程及其点估计方法	肖良华, 赵 宇, 黄 敏 (356)

导弹定型及批检试验中的故障判别准则	刘新爱, 王如根 (362)
单轴多点可靠性随机振动试验的解耦控制原理及方法	邓 阳, 李传日 (366)
航空装备可靠性维修性保障性验证技术发展综述	龚庆祥 (371)
装备研制中的软件质量管理	王 昱 (378)

软件可靠性、元器件可靠性、质量、信息、综合

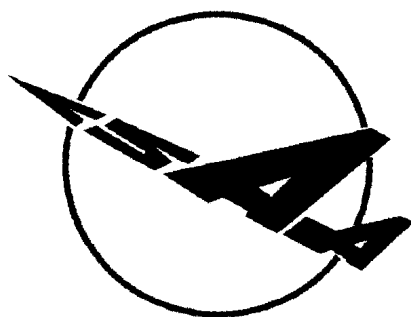
必须认真研究和处理 DPA 不合格的母体	赵和义, 郑鹏洲 (385)
模型驱动的实时嵌入式软件仿真测试方法研究	刘 斌, 艾 骏, 阮 铤 (389)
软件可靠性验证测试技术与工具开发	鲍晓红, 曹 禹, 陆民燕 (394)
计算机辅助 PPL 制定及符合性检查研究	任 羿 (400)
飞机误飞千次率预测方法初步探讨	林 明, 孙文胜 (406)
电连接器失效率的研究	赵越超 (411)
电子元器件失效机理验证试验	马 璇 (416)
软件可靠性测试及其评价	刘 斌, 李铁航 (421)
大型复杂系统 Bayes 可靠性自动评估的设计与实现	柏仲干, 谢红卫, 张湘平, 李鹏波 (425)
飞机大系统及机载设备可靠性外场验证分析	何钟武, 姜同敏 (431)
并行工程环境下应用 PDM 的质量管理模型研究	田 瑾, 赵廷弟 (436)
可靠性综合评估系统 (IRES) 软件框架研究	宫 健, 黄 敏, 张叔农, 赵 宇 (441)

书面交流

Weibull 分布逐步增加的 II 型截尾步进应力加速寿命试验的统计分析

.....	徐晓岭, 王蓉华 (446)
基于模糊评判的航空装备系统安全评价	张执国, 陈云翔, 张诤敏 (454)
搞好老龄飞机的工作评估变劣势为优势	姚钰生 (459)
可靠性信息在直 11 型机功能—可靠性适航审定中的应用	陈圣斌, 宋永磊 (462)
创立军品质量的新理念——过程双向主观质量	毛景立, 李 鸣, 梁工谦 (468)
某型弹射座椅救生包开包可靠性设计和评估	雷华金, 崔文明, 徐正忠 (479)
一种基于过程控制及系统安全原理的安全监察管理方法	张叔农, 张 坚 (483)
弹用涡喷发动机可靠性参数的选择和评定方法	韩庆田, 杨兴根 (491)
直接维修工时的一种统计方法	何钟武, 姜同敏 (496)
一种改进的系统维修性功能层次框图模型	陈代林, 陈东林 (500)

中国航空学会航空百年学术论坛
可靠性工程分论坛



中国航空学会可靠性工程专业委员会
2003 年 8 月 · 井冈山

航空可靠性工程 50 年

曾天翔

(中国航空工业发展研究中心, 北京 100029)

摘 要 首先简要地回顾了航空可靠性工程 50 年来的发展历程, 接着讨论了航空可靠性工程(可靠性、维修性与保障性, RMS)面临的挑战, 包括信息技术的互用性与保障性、软件 RMS、网络系统 RMS、微型器件 RMS、过时淘汰和老龄化飞机等; 并分析了当前 RMS 发展出现的良好机遇, 各种先进信息技术大量涌现并在 RMS 领域得到广泛应用, 为提高航空装备的 RMS 和经济承受性提供捷径; 最后阐述了从“伊拉克自由行动”等局部高技术战争中得到的教训与启示以及我们应如何积极迎接挑战, 抓住机遇, 采取有效对策, 全面提高我国航空装备的 RMS 水平。

关键词 航空; 可靠性; 维修性; 测试性; 保障性; 安全性

1 引 言

从莱特兄弟发明飞机至今已整整 100 年了, 飞机不仅已成为现代社会的一种先进的交通工具, 而且成为现代高技术战争的一种先进武器, 推动了社会的发展, 给人类带来了巨大的经济和军事效益。可靠性源于航空, 早在 20 世纪 30 年代, 在计算多发飞机一台发动机故障的概率时就引入了可靠性的概念, 并提出了飞机事故率的要求。可靠性工程(包括可靠性、维修性与保障性, RMS)从 50 年代初期诞生于美国, 至今已有半个世纪了, 为提高军、民用飞机的可靠性和安全性作出了显著的贡献。

在现代高技术局部战争中, 为了赢得战争的胜利, 必须发展先进战斗机等高新技术航空装备, 这些航空装备不仅必须具有精确打击能力和威慑能力, 还必须具有良好的战备完好性和任务成功性, 以及良好的机动性和快速出动能力。从 90 年代初期发生的“沙漠风暴”行动到 2003 年初的“伊拉克自由行动”等多次高技术局部战争的战例分析表明: 可靠性工程(RMS)是提高航空装备战备完好性和出动强度的基础; 是降低航空装备使用和保障费用的有力保证; 是提高航空装备战斗力的倍增器。

今天, 在纪念人类有动力飞行 100 周年的同时, 让我们一起回顾航空可靠性工程半个世纪的发展历程, 展望 21 世纪的发展趋势。

2 半个世纪的回顾^[1]

回顾航空可靠性工程 50 年来的发展, 大致经历如下几个阶段。

20 世纪 50 年代是可靠性工程兴起的年代, 由于美军的导弹及军用电子设备出现的严重可靠性问题, 使军方开始有计划、有组织地开展可靠性研究, 美军 1952 年成立了“军

用电子设备可靠性咨询组”、制定可靠性研究与发展计划。1957 年发布的“军用电子设备可靠性”报告，提出了武器装备可靠性设计分析与试验评价的方法与程序，成为可靠性奠基性文件，标志了可靠性成为一门独立的学科。50 年代开始研制的 F-4、F-104 等第二代战斗机和波音 707、DC-8 等民用飞机，几乎没有开展有计划的 R&M 工作，主要靠传统的工程设计方法和质量控制技术来获得 R&M，其 R&M 水平低，战备完好性和出勤率低，使用和保障费用高，参见表 1。

表 1 美国战斗机 RMS 的发展

机种	F-4	F-15	F-16	F-22	F-35
开始研制（年）	1956	1969	1972	1986	1996
投入使用（年）	1963	1975 1979（改型）	1978 1986（改型）	计划 2005	计划 2010
单机价格 （万美元） （年币值）	264 （1984 年）	4280 （1995 年）	2310 （1995 年）	12390 （1995 年）	2800~3500 （1996 年）
MFHBF （h）	0.8（使用值）	3.5（指标值） 2.6（使用值）	2.9（指标值） 4.0（使用值）	5.0（指标值）	
MMH/FH	46（使用值）	11.3（指标值） 11.8（使用值）	15（指标值） 6.0（使用值）	4.6（指标值）	0.3（指标值）
MCR（%）	50（使用值）	80（指标值） 86（使用值）	90（指标值） 88（使用值）	93（指标值）	
维修人员/架	18（使用值）	16.6（使用值）	7~12（使用值）	8.5（指标值）	5.0（指标值）
O&S 费用（亿美元）	16（使用值） 20 年 24 架	17（使用值） 20 年 24 架	13（使用值） 20 年 24 架	12（指标值） 20 年 24 架	8（指标值） 20 年 24 架
部署运输量 C-141 （架）		18（使用值）	6~8（使用值）	7.8（指标值）	
软件功能（%）及 数量（代码行数）	8 （2000）	35	45	80 （1960000）	（6000000）
火控雷达 MTBF （h）	APQ-72（模拟式） 6（使用值）	APG-63（数字式） 60（目标值）	APG-66（数字式） 100（目标值）	APG-77（相控阵） 2500（目标值）	
技术特征	质量控制技术； 常规工程方法	开展 R&M 分析、 设计和试验； 利用 BIT 和 R&M 验证试验	开展较严格 RMS 分析、设计和试 验； 采用先进 BIT 和 可靠性增长试验	采用机载综合诊断 系统； 进行可靠性强化试 验； 强调保障性要求； 推行并行工程	采用自主式保障 系统； 采用故障预测和 状态监控系统； 进行维修性虚拟 设计； 强调经济承受性

60 年代开始了维修性研究，可靠性和维修性（R&M）成为姐妹学科得到全面和迅速发展，并逐步进入工程应用。美军在《军用电子设备可靠性》报告的基础上，经过几年的研究与应用，制定并发布了 MIL-STD-785《系统与设备的可靠性大纲要求》和 MIL-STD-470《维修性大纲要求》等一系列 R&M 军用标准，并在 F-14A、F-15A 等第三代战斗机研制中得到应用。这些飞机开始规定了 R&M 要求，开展 R&M 分析、设计和试验。波音 747、DC-10 和 A300 等民用飞机研制中也开展 R&M 设计分析和试验工作，使这些飞机的 R&M 水平和战备完好性和出勤率水平显著提高，使用和保障费用有所降低，参见表 1。

70 年代提出测试性概念, 测试性成为维修性的重要组成部分, 并。由于第三代战斗机在使用中暴露了不少严重的 R&M 问题, 可靠性管理引起美军高层领导的重视。为加强武器装备 R&M 管理, 美国国防部建立了统一的 R&M 管理机构, 成立直属三军联合后勤司令领导的可靠性、可用性与维修性联合技术协调组; 建立全国统一的数据交换网——政府与工业界数据交换网 (GIDEP); 同时, 强调在武器装备研制中, 采用可靠性研制与增长试验、环境应力筛选、综合环境试验、机内测试技术 (BIT)、以可靠性为中心的维修 (RCM) 理论。此外, 机械产品的可靠性问题、软件可靠性问题等引起了人们的重视。F-16A、F/A-18A 的研制以及 F-15C/D 的改型等更加严格和全面开展 R&M 设计分析、试验和管理工作, 并采用上述先进的 R&M 设计分析与试验技术, 使这些飞机的 R&M 水平大大提高, 参见表 1。

80 年代中, 保障性引起军方重视, 由于第三代战斗机存在严重的保障问题, 使飞机的战备完好性降低 (40%~50%), 使用和保障费用提高 (占全寿命费用的 60% 以上)。1980 年, 美国国防部颁发第一个可靠性维修性条例 DoDD5000.40《可靠性及维修性》, 规定了国防部武器装备采办的 R&M 政策和各个部门的职责, 并强调从武器装备研制开始就应开展 RMS 工作。1986 年美国空军颁发了《R&M2000》行动计划, 从管理入手, 大大地推动 R&M 技术的发展, 使 R&M 的管理走向制度化, 使 RMS 成为航空武器装备战斗力的组成部分。美国 F-22 战斗机、欧洲战斗机 EF-2000 和法国战斗机“阵风”等第四代战斗机的研制突出保障性要求, 全面提出了 RMS 的指标要求, 特别是进行严格的保障性设计分析, 进行了保障性试验与评价。RMS 成为武器装备战斗力的重要组成要素, 并全面推行并行工程和 CAD 化, 确保 RMS 指标的实现。

90 年代以来强调经济承受性, 在 F-35 新一代战斗机和波音 7E7 民用飞机的研制中, 美军和波音公司都把 RMS 作为降低全寿命费用的重要工具, 美军推行费用作为独立变量的方针, 重视 RMS 综合化、自动化、智能化和军民两用化, 广泛采用建模与仿真技术、虚拟现实技术、网络技术、人工智能技术、微观分析技术和可靠性强化试验技术, 确保这些飞机的 R&M&S 水平得到全面提高, 大大降低飞机的研制费用、使用和保障费用以及全寿命费用, 参见表 1。

半个世纪来, 航空可靠性工程得到了快速的发展, 取得了巨大的成功, 大大提高了军用飞机的安全性、可靠性、维修性和战备完好性, 降低了维修人力以及使用和保障费用。50 年代初 (1953 年), 美国空军飞机的灾难性事故率为 24 次/ 10^5 飞行小时, 年损失飞机 945 架, 世界民航飞机灾难性事故率为 3.6 次/ 10^6 飞行小时; 50 年代中期开始研制的 F-4 战斗机的平均故障间隔飞行小时 MFHBF=1.0h, 每飞行小时的维修工时 MMH/FH=36 人时/FH, 能执行任务率 MCR=50%, 每架飞机需要的维修人员为 18 人, 20 年的使用和保障费用与单机价格之比为 3.3。到 21 世纪初 (2001~2002 年) 美国空军飞机的灾难性事故率降到 1.16~1.52 次/ 10^5 飞行小时, 年损失飞机 19 架, 世界民航飞机灾难性事故率降为 1.0 次/ 10^6 飞行小时。80 年代中期开始研制的 F-22 战斗机 MFHBF=5.0h, MMH/FH=4.6 人时/飞行小时, MCR=93%, 每架飞机需要的维修人员为 8.5 人, 20 年的使用和保障费用 (O&SC) 与单机出厂价格相比为 0.5。

3 面临的挑战^[2]

基于当前国际形势发展的趋势,进入 21 世纪之后的相当长时间内,世界仍将处于多元化的格局,小规模局部战争也将不断发生。在 21 世纪中,航空装备仍将强调全寿命、全系统和全费用管理,以信息技术为龙头的高新技术将突飞猛进地发展,特别是计算机技术、通信与网络技术、人工智能技术、微电子技术、微机电技术等现代信息技术的飞速发展,对 RMS 技术的发展正在产生深刻的影响。复杂软件系统和软件密集系统、复杂网络系统、微型器件等的 RMS 问题、信息系统的保障性、安全性和互用性问题等信息时代背景下出现的新问题又给人们提出新的挑战。航空军民用市场的需求对进入 21 世纪的可靠性工程将提出新的挑战。

3.1 信息技术的保障性和互用性

信息技术指的是(由国防部各部门)在数据或信息自动采集、储存、处理、管理、控制显示、传送、转换、互换、发送或接收中使用的任何设备、互联系统或分系统,包括计算机、辅助设备、软件、固件和相似的程序服务和相关资源。信息技术的应用不仅有助于提高航空装备的战备完好性和任务成功性,还将影响到装备全寿命费用,推动航空装备产生革命性变革。信息技术的保障性指的是某一项具体信息技术外部的系统或基础设施为保障该信息技术的设计、研制、试验、训练和运行达到规定要求所具有的能力。信息技术的互用性指的是各种系统、军事单位或武装部队向其他系统、军事单位或武装部队提供数据、信息、装备和服务或接收来自其他系统、军事单位或武装部队的信息、装备和服务,并利用这种交换的数据、信息、装备和服务,使他们有效地协同工作的能力。信息技术设计、研制、试验、训练和运行中,如何规定信息技术的保障性和互用性(S&I)要求,如何通过设计达到规定的 S&I 要求,是对信息技术工程师与 RMS 工程师提出的挑战。

3.2 软件的 RMS

随着航空装备性能的提高,航空装备大量采用各种先进计算机来完成各种功能,软件成为决定航空装备性能的主导因素。例如 50 年代研制的 F-4 战斗机机载软件为 2000 行源代码,执行的功能占全机功能的 8%,2005 年将服役的 F-22 战斗机机载软件达 196 万行源代码,执行全机 80% 的功能,F-35 战斗机的机载软件长达 600 万行源代码。软件的可靠性问题已成为影响现代航空装备战备完好性和任务成功性的首要问题,例如,F/A-18 战斗机的机载计算机在首飞前的 2 万小时试验中,软件发生故障 301 次,为硬件故障(271 次)的 1.14 倍。此外,软件的维护和保障费用也快速增长,美国调查报告表明,1992 年美国公司花费 300 亿美元用于软件维护及保障,占各公司软件预算的 60%~80%;美国国防部在 1997 年大约花费 200 亿美元用于嵌入式软件的保障。造成软件保障费用升高的主要原因之一是,由于人们对软件保障缺乏全面和正确的理解,在软件开发时没有充分考虑保障性问题。我国新研制的航空装备已大量采用计算机,这些新装备研制中以及投入使用后,都将会面临软件可靠性与保障性提出的挑战。因此,为保证我国新一代航空装备能尽快形成战斗力,并降低装备的使用和保障费用,迫切需要深入开展软件可靠性与保障性的研究。

3.3 复杂网络系统的 RMS

现代信息战争的需求和信息技术的发展促进了复杂网络系统的发展。美军和北约正在

大力发展“网络中心战”，不仅要把前线的地面、空中和海上部队联系在一起，还把遍布在世界各地的作战支援机构联系在一起。它将融合多军种的情报、作战和后勤支援数据，并可以提供武器系统使用的信息。网络中心战（NCW，简称网络战）自 1996 年美国参谋长联席会议办公室首次提出以来，已获得长足的发展。这种大范围的网络，使基层士兵、水兵和飞行员们立即可获取关键信息的概念，将成为未来信息战的重要组成部分。NCW 中所牵涉的网络将融合多军种的情报、作战和后勤数据，并可以提供武器系统使用的信息。

网络中心战依赖一个遍布全球各地（包括海洋和陆地）功能强劲的网络为所有结点提供近实时的数据流。对于这样一个巨大的、动态的网络，其中必然存在大量的结构和安全问题。最突出的问题之一是复杂性，因为网络的威力与网络中结点数量的平方成正比，结点数量的增加将增加网络的复性，对系统运行和管理提出了更多的要求。复杂网络系统的 RMS 所面临的挑战主要涉及：通信网、计算机网、输电网、交通网、互联网、供应网络以及 C³I, C⁴I 等复杂网络系统的可靠性、维修性、保障性、可用性、互用性和可运行性等特性的建模分析及设计技术。

3.4 微型器件的 RMS

随着纳米技术、微机电技术和计算机技术的飞速发展，微型器件将会不断涌现并在航空领域获得应用。1970 年出现的第一个计算机基片由几千个晶体管构成，运行速度为 60000 条指令/s；2000 年的计算机基片由 5.5 百万个晶体管构成，运行速度为 3 亿条指令/s；预计到 2030 年，计算机基片将由 10 亿个晶体管构成，运行速度可能达到 100 亿条指令/s。设计师和 RMS 工程师所面临的挑战是：超大规模集成电路的可靠性及测试性设计分析与验证技术；微型器件的失效机理及失效模式，可靠性、维修性及测试性设计分析和故障预测等技术；以故障物理为基础的可靠性分析、预计和设计技术（替代 MIL-HDBK-217）。

3.5 过时淘汰问题

目前，过时淘汰已成为世界各国军方、国防及民用工业界和有关服务领域关注的一个严重问题。过时淘汰指的是元器件、零部件、产品、器材、技术或软件，由于原有的制造厂已关闭、或制造厂可能不再生产或不希望生产、或由于技术的进展已被淘汰、或国外进口渠道中断等原因，不再能从原有的供应源得到。

现代电子元器件更新周期（技术寿命）一般为 18 个月，这意味着电子设备采用的新型电子元器件平均使用一年半之后就会过时淘汰；然而，对大型耐用的航空装备而言，不仅其研制周期长而且其使用寿命长，经常通过改进改型延长其使用寿命。例如，美国空军的 F-22 隐身战斗机，从立项开始到投入外场使用，经历了 20 多年之久；B-52 轰炸机从 50 年代投入使用到现在已服役了 50 年；“欧洲战斗机”的设计寿命为 60 年。正是由于大型复杂航空装备的长研制周期及长使用寿命与电子元器件等的短技术寿命问题，造成了大型复杂航空装备在研制、生产及使用和保障过程中遇到了过时淘汰的严重挑战。例如，F-22 先进隐身战斗机在研制阶段后期，大量的软件版本必须更新，而且每年要花费 5 千万美元来解决电子元器件的过时淘汰问题；在科索沃战争中，美军的 F-15 战斗机等复杂装备由于元器件过时淘汰问题，造成不少航空电子缺少备件无法维修而使飞机停止飞行。

过时淘汰不仅是各种电子元器件、后勤保障和采购的问题，它将影响所有设备、模块、软件、工具、机械部件、过程、器材、保障设备、标准和规范等，它还影响产品寿命周期各阶段和各个领域，涉及到设计、研制、生产、采购、使用和保障等各个方面的问题，需

要由各个部门协同解决，从装备立项开始就应考虑过时淘汰问题。

3.6 军用飞机老龄化

军用飞机老龄化是世界各军事大国共同面临的难题，成为影响部队战斗力以及使用和保障费用的重要因素。以美国为例，在整个 90 年代中，美军的军事行动加剧，在世界范围内部署部队达 40 多次，几乎为前 30 年的 4 倍，然而其飞机采购量减少了近 70%，因此飞机老龄化严重。美国空军 6000 多架飞机平均寿命达 22 年，大大超过其设计寿命，最老的 B-52 飞机寿命达 50 多年；美国海军 4000 多架飞机平均寿命达 18 年多，飞机的平均寿命第一次超过军舰的寿命，而海军陆战队直升机寿命达 25 年多。老龄化飞机的 RMS 水平下降，使用和保障费用升高，战备完好性水平下降。例如，美国空军在 1996~2001 年期间，飞机每飞行小时的使用和维修费用每年增加 10%，备件费用增加 50%，战斗机战备完好率下降 7%。从 1991 年到 2001 年的 10 年中，美国空军由于机队老龄化使机队的能执行任务率下降了 10%（从 1991 年的 83.4% 下降到 2001 年的 73.3%）。

3.7 人为因素成为军、民用飞机飞行安全的大敌

近 50 年来，随着各种分析、设计、试验和制造技术的不断发展，特别是近 20 年来，微电子器件和计算机等高新技术的广泛应用，促使航空航天飞行器的安全性水平不断提高。然而，尽管人为因素造成的飞行事故的绝对数量减少，但人为因素造成的事故的相对比例却显著提高。美国民用飞机飞行事故原因的比例，1940 年人为因素造成飞行事故的比例为 35%，1990 年提高到 65%。因此，人为因素仍然是当前飞行安全的大敌，是造成各种飞行事故的主要因素。美国总审计局对 1994 和 1995 年美国三军飞机事故报告进行分析表明，三军飞机的灾难性事故中，人为因素造成的事故占 73%，其中空军 71%、陆军 76%、海军及海军陆战队为 80%（1990~1994 年）。英国皇家空军飞机人为因素造成事故的比例大于 60%。世界民航因人为因素造成民航飞行事故在 1959~1992 年期间的统计数为 73.6%。

人为因素涉及到人、机器和环境三个要素。在这三个要素中，人的可靠性最低，因此人为差错成为导致飞行事故的直接因素。造成人为差错的主要因素包括驾驶员负担过重、设计缺陷、训练不足、疲劳及疾病、错误的操作规程以及缺乏经验和知识等。为了减少飞行事故，改善飞行安全，我们应加强对人为差错的研究，采取各种有效途径来消除或减少各种造成人为差错的原因。因此，人的可靠性问题是军、民用飞机安全性面临的严重挑战。

4 当前出现的机遇

在当今信息时代里，随着现代信息技术的飞速发展，特别是在过去的十多年中，软件技术得到了革命性的发展，面向对象的程序设计、客户机服务器软件、开放式体系结构、综合数据环境、平台独立软件、互联网与内联网通信以及可视编程等技术的出现及应用。据估计在今后十年中，大多数的军用软件将利用这些技术成就进行改进，各种先进信息技术将大量涌现并在 RMS 领域得到广泛应用，进一步推动 RMS 设计分析、试验与管理技术以及后勤保障技术、工具和系统不断革新和发展，并将为提高航空装备的效能和经济承受性提供捷径，为航空装备 RMS 的发展提供了良好的机遇。

4.1 信息化的 RMS 分析设计技术

信息技术在 RMS 分析设计领域的应用不仅可缩短分析设计时间、提高工作效率还可减少人为差错,提高分析设计精度,特别是建模与仿真技术、虚拟现实技术等第四代战斗机设计中得到广泛应用。

4.1.1 RMS 建模与仿真技术

近 10 年来,特别是美国防务采办改革以来,建模与仿真技术在 RMS 领域的应用也越发广泛。在制定航空装备的 RMS 要求过程中,建模与仿真是决定满足用户需求所必需的 RMS 水平和范围的一种有效的技术;利用建模与仿真技术还可以确定费用、进度与性能的要求,以及可靠性、维修性和保障性满足寿命周期费用条件下的优化组合参数;在 RMS 设计中,通过建模了解产品中各零部件、组件、设备和软件与整个产品的关系,并通过仿真来验证这种关系的正确性,分析产品可靠性设计的薄弱环节,改进设计、提高产品的可靠性。此外,建模与仿真技术也广泛用于航空装备的保障性分析,确定可靠性、维修性及各种保障资源对装备战备完好性及作战效能的影响,评价装备各种备件及维修人力要求,装备保障的人力和后勤计划等。美英等国在 80 年代就运用 CAD 建模与仿真技术对 F/A-18、F-16、F-22 和 EF-2000 等第三代和第四代战斗机进行可靠性、维修性、可用性和保障性分析与评价。此外,功能可靠性仿真将系统可靠性与性能在统一的环境和统一的模型下进行分析,有效地解决航空装备缺少数据的问题。

4.1.2 虚拟维修性设计技术

虚拟维修性设计技术是以虚拟现实技术为基础,以产品的维修性为对象的设计分析手段。借助这一手段,设计人员可以通过多种传感器与多维信息环境进行自然地交互,从定性和定量综合集成环境中得到对产品维修性设计的全面认识,从而帮助维修性设计人员深入了解设计中存在的各种问题,提出创新的设计思路。虚拟维修性设计与分析主要由生成虚拟环境的计算机、虚拟现实中常用的交互设备(头盔式显示器、数据手套、定位器、立体眼镜等)以及产品电子样机数据、基于产品数据管理的产品维修性信息模型、人体数据与动力学模型、常用工具和专用工具数据等组成。这种设计手段可以使维修性设计、分析和评估工作在并行环境中完成,从而大大地缩短维修性设计的周期。

近 10 年来,美国波音公司在波音 777 民用飞机、洛克希德·马丁公司在联合攻击战斗机(JSF)等第四代航空装备研制中,运用虚拟维修性设计分析技术,通过计算机仿真和专用的显示器或人机接口装置使人体模型置于虚拟的环境,也就是把 CAD 数据引入虚拟现实环境,使电子显示器上的人体模型与 CAD 几何图形交互作用,以模拟维修人员的维修活动,开展维修性设计与评价,大大提高设计精度、缩短设计时间,减少设计费用。波音公司改进的达索/IBM 计算机辅助三维交互应用系统(CATIA)把飞机的结构、系统、布线及管道铺设的数字式图像组合在一起,绘制飞机安装立体图(即数字化预装配),提供了一种有效的维修性设计工具,确定飞机各部件的可达性和各部件的物理接口;由波音公司的 FLYTHRU 软件产生的人体模型和 CATIA 软件配合,可以模拟维修人员的动作,检查执行维修作业的可达性和可操作性,验证飞机维修性设计。波音 777 民用飞机及 JSF 战斗机的研制均采用这种技术,与波音 767 飞机相比,波音 777 导线束铺设错误等设计错误和返工减少了 97%,大大缩短研制时间,减少研制费用。

4.2 信息技术在航空装备保障资源与系统中的应用^[3~8]

信息技术在航空装备保障资源与系统中,具有广泛的应用前景。目前,交互式电子技术手册(IETM)、手提式维修辅助装置(PMA)、预测与状态管理系统(PHM)、联合分布式信息系统(JDIS)、和自主式保障系统(ALS)等关键技术已在F-22、F-35等第四代战斗机得到应用,这些技术对提高现代战斗机的战备完好性和任务成功性,降低使用和保障费用具有重大作用。

4.2.1 交互式电子技术手册(IETM)

所谓交互式电子技术手册(IETM)是直接取自采用CAD/CAM技术的工程数据,或通过扫描转换等计算机技术,按照连续采办与寿命周期保障(CALS)技术标准,将手册和文档的信息数据数字化。把一套文档或手册的信息数据内容划分成许多信息对象,将其作为基本信息单元存储在数据库中,相互关联的信息数据按照一定的结构存储。阅读时,信息数据可以以文字、表格、图像、图样、声音、视频、动画等多种形式表现,用户可以与计算机交互作用。IETM用于美军参加伊拉克战争的F-16C空军战斗机、F/A-18E/F海军战斗机和“爱国者”导弹等装备以及研制中的先进战术战斗机F-22“猛禽”和F-35联合攻击战斗机。IETM在降低装备保障费用、提高维修效率、提高装备的战备完好性方面具有显著优势,因此它已成为当前航空装备维修与保障领域研究和应用的热点之一。美国空军将F-16战斗机750000页技术文档制作成39片CD-ROM光盘,大大地减少飞机部署的运输量。美国国防部要求所有的自1997年开始的重大采办项目均要采用IETM技术,并投入大量经费对原有系统进行IETM改造。陆军、海军等军兵种还制定了IETM战略计划,成立了IETM实施委员会,下设IETM工作组,全面负责IETM的应用。

4.2.2 手提式维修辅助装置(PMA)

手提式维修辅助装置(PMA)是在外场维修点使用的可移动的计算设备,通常包括一台小型计算机和显示器,可以为现场维修人员进行原位维修提供详细的维修信息,包括各种技术指令和工程信息、交互式电子技术手册(IETMs)信息、扩充的诊断方法和诊断过程,以及飞机的全部维修历史信息。PMA广泛用于美军参加伊拉克战争的第三代战斗机,例如,F-16、F/A-18E/F、F-117A和第四代战斗机F-22、F-35等。它可以通过接口装置从飞机上的诊断系统中获取信息,作为与飞机及其系统的基本维修接口。维修人员经常在维修点使用它来访问电子技术信息、维修文件和零部件可用性数据,使维修人员能够从工作地点实时输入修理数据,以便向多个用户提供对维修活动和设备状态的瞬时可视性,并借助它对复杂系统进行深入的诊断。此外,借助无线技术可以使外场维修人员与位于远方的中央数据库和技术专家联系,便于维修人员根据需要随时随地获取必要的数据和专家的帮助。PMA有多种尺寸和容量,从小型手提仪器到重达十多公斤的大容量设备。PMA最通用的功能包括:技术数据显示,故障隔离和修理指导,零部件查询和订购,维修文件编制和分析,完好状态(health)监控和故障预测,以及工作数据加载和下载。

4.2.3 故障预测和状态管理(PHM)技术

故障预测和状态管理(PHM),也称预测与健康管理,正在成为新一代的战斗机设计和使用中的一个重要组成部分。所谓故障预测,即预计性诊断部件或系统完成其功能的状态,包括确定部件的残余寿命或正常工作的时间长度;所谓状态管理,是根据诊断/预测信息、可用资源和使用需求对维修活动作出适当决策的能力。

F-35 战斗机上装备了先进的机载预测与状态管理 (PHM) 系统, 该系统采用先进的传感器, 并借助各种算法和智能模型来预测、监控和管理飞机的工作状态。预测与状态管理 (PHM) 系统是 F-35 自主式保障系统的关键技术之一, PHM 是新一代武器系统的维修和管理技术, 也是一种全面地故障检测、隔离和预测及状态管理技术。这种技术能够显著提高对复杂系统的工作状态的了解, 最大程度地利用传统的故障特征检测技术, 并综合先进的软件建模, 来获得虚警率几乎为零的精确的故障检测和隔离结果。

PHM 的主要功能有故障检测、故障隔离、先进的诊断、预计性故障预测、残余使用寿命 (useful life) 预计、部件寿命跟踪、性能降级趋势跟踪、保证期跟踪、故障选择性报告: 只通知立即需要驾驶员知道的信息, 将其余信息通报给维修人员、辅助决策和资源管理、容错、信息融合和推理机以及信息管理, 将准确的信息在准确的时间通报给准确的人员。

PHM 可以提供先进的机上诊断和测试性, 启动系统重构以提高任务可靠性, 实现视情维修; 启动自主式后勤保障功能, 提高安全性, 提高出动架次率, 降低寿命周期费用, 缩短后勤补给线。因此, PHM 被美国国防部认定为惟一的一项能够显著降低使用和保障费用, 同时提高飞行安全和飞机可用性的综合性技术。PHM 技术已被列入美国国防部防务威胁减少局 2000 年 7 月发表的一份《军用关键技术》报告中。

4.2.4 联合分布式信息系统 (JDIS)

联合分布式信息系统 (JDIS) 向用户提供使用和维修 F-35 所必需信息的一种电子化环境, 是 F-35 自主式保障系统的神经中枢。JDIS 引入先进的信息技术来提供决策支持工具并提供一种将飞机与后勤保障基础设施相衔接的有效通信网络, 旨在将来自 F-35 机上预测与状态管理 (PHM) 系统的飞机状态信息与来自部队数据库的人员配备和训练信息以及来自武装部队和联合后勤部门的后勤信息综合在一起, 并按照所要求的出动架次率 (SGR) 和任务用途将指挥员的意图考虑进入。这种信息融合方式使 JDIS 可以提出有关措施和建议, 而非仅仅是数据。JDIS 具有通信、数据库管理和维修管理三项主要功能, 它作为驾驶员、维修人员和其他 F-35 人员之间的信息通道, 使部队指挥员和维修主管可以充分利用信息来优化 JSF 的部署。

JDIS 向 F-35 使用单位的输出可能包括: 维修信息/知识、供应链管理信息、状态与使用情况信息、飞机可用性数据、预测资源最佳利用建议训练管理。此外, JDIS 可以实现“远程维修”功能, 便于经验丰富的维修人员或承包商技术代表协助远距离部署部队的维修人员。一旦收到维修要求提醒信号, JDIS 可以建议订购维修件, 完成订购文件, 确定和安排当地最合适的维修人员。JDIS 作为实时的信息通道, 使 F-35 在整个寿命周期内的维修、训练、供应, 甚至部件或飞机设计改进得以及时、顺利地实施。JDIS 可提供数据收集和分析程序来说明: 部件趋势、系统和分系统趋势、维修程序细化情况、使用与维修训练质量评估结果、实际使用相对于设计意图、对部件、分系统和系统的影响评估结果、材料适用性、设计缺陷以及使用与维修手册的充分性。

JDIS 的核心是提供进行决策支持和智能规划的先进的信息技术, 它通过飞机与后勤基础设施之间的规划、训练和保障系统网络的综合来实现。因此, JDIS 是全球作战保障系统 (GCSS) 的组成部分。GCSS 使战斗人员可以与其他军种系统接口, 以获取和提供有关整体军力状态的最新信息, 并使保障人员能够启动保持部队利用水平的各项活动。美