

可靠性及维修性 工程手册

(上册)

曹天翔 主编

杨先振 王维翰 副主编

国防工业出版社

436015

可靠性及维修性工程手册

(上 册)

主 编 曾天翔
副主编 杨先振 王维翰

國防工業出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

可靠性及维修性工程手册 上册/曾天翔编. —北京:国防工业出版社, 1994

ISBN 7-118-01132-0

I. 可…

I. 曾…

Ⅱ. 可靠性工程-手册

N. TB114. 3-62

可靠性及维修性工程手册

(上册)

主 编 曾天翔

副主编 杨先振 王维翰

*

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 100044)

新华书店经售

北京市王史山胶印厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 53 1232 千字

1994 年 9 月第 1 版 1994 年 9 月北京第 1 次印刷 印数 1—1500 册

ISBN 7-118-01132-0/TB·48 定价:47.90 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

建社四十周年献礼图书

主 编	曾天翔	
主 审	顾振中	
副主编	杨先振	王维翰
副主审	李沛琼	张增模

上册编写组成员(按姓氏笔划为序):

毛黎明	王 欣	孙晓丹	吴仲根
张红春	罗学刚	林典伦	胡晓义
夏可倚	章引平	曾天翔	魏子山

147.17.01

前 言

科学技术的迅速发展,特别是计算机和微电子技术的突飞猛进,促进了可靠性及维修性工程的发展;同时,高性能战斗机、航天飞机等各种大型复杂系统的发展,对可靠性及维修性工程提出了更高的要求。近40年来,可靠性及维修性工程已从军事应用向民用领域,从电子工业向机械等其他工业部门,从硬件向软件方面发展,成为降低产品寿命周期费用、提高武器系统战斗力的一种有效工具。

近20年来,随着各种大型复杂系统的发展,系统的使用及保障费用剧增,如F/A-18一类战斗机,其使用及保障费用约占寿命周期费用的一半。为改善这些复杂系统的保障性,提高战备完好性,在可靠性及维修性工程范畴里,又出现了可用性、测试性等新的特性,进一步扩大和深化了可靠性及维修性工程的内涵,提高了它在现代系统设计中的地位。美国空军在1985年发布的《美国空军2000年可靠性及维修性行动计划》中,把可靠性及维修性作为与武器性能同等重要的要求来看待。它力图把改善可靠性及维修性作为提高航空武器系统的战斗力、增强生存力、减少运输要求、节省人力和降低费用的主要途径。

可靠性及维修性工程是一项综合性强、涉及面广的通用基础技术,同时也是各专业工程技术与管理人员必须了解和掌握的一门通用保证技术和管理学科。它与型号设计、试验、生产管理、质量控制、订货、维修及后勤保障等部门密切相关;它涉及到设计和试验技术、材料与工艺技术、概率与数理统计方法、物理与化学等各种学科。因此,加强可靠性及维修性管理是可靠性及维修性工程发展的基本保证。特别是高层领导的重视和支持,是可靠性及维修性工作获得成功的关键。各级领导在进行决策时,必须转变单纯追求技术性能而轻视可靠性及维修性的观念,树立可靠性及维修性与性能同等重要的观念;必须转变只考虑设计、研制及生产的问题而忽视使用、维修和保障问题,树立寿命周期的观念。

高的可靠性及好的维修性无疑是人们所希望的。然而,可靠性及维修性并非越高越好,在产品设计中,必须对产品性能、费用与可靠性及维修性等进行权衡分析,以获得最佳的效果,并把最优化的可靠性及维修性要求设计到产品中。

本手册按产品寿命周期中的各项活动为顺序,全面地论述可靠性及维修性要求、分析、设计、试验及管理的各种技术及方法,为从事产品设计、试验、管理、使用及维修人员提供参考。它参考了美国70年代后期以来出版的各种可靠性及维修性标准、手册、技术报告和论文,吸取了我国航空、航天、机电等部门近十年来在可靠性及维修性领域的某些研究成果和经验,编入了非电子产品、非工作状态和软件可靠性以及电子产品测试性等新技术,反映了80年代的水平。它结合我国国情,从工程实用的观点出发,选取各种模型、技术及方法并给出应用示例和各种图表及数据。希望它能成为工程技术和管理人员贯彻各种可靠性及维修性标准的主要工具书。为便于读者使用,个别重要公式在不同的章节可能重复出现。

本手册由航空航天部 301 所、628 所和 611 所等单位联合编写。在手册的编写及出版过程中,航空科学技术研究院标准计量处、航空机载设备总公司等有关部门的领导给了大力支持和帮助,在此表示感谢。

本手册(上册)编写执笔者:第一、三章曾天翔,第二章罗学刚,第四、五章曾天翔、毛黎明、吴仲根,第六章 6.1、6.8、6.12 曾天翔、6.2 王欣、胡晓义、6.3 夏可倚、6.4~6.7 魏子山、6.9 林典伦、6.10 张红春、6.11 章引平,第七章 7.1 曾天翔、7.2 夏可倚、7.3 孙晓丹、7.4~7.10 魏子山。

内 容 简 介

本手册是一套实用性强的工程手册,分上下两册。上册共七章。它简要回顾可靠性及维修性工程的发展,系统地介绍可靠性及维修性的基本理论和常用的数学模型,深入讨论可靠性及维修性参数的选择、指标的规定、分配和预计的方法,详细论述目前常用的可靠性及维修性分析与设计技术及方法。

下册共七章,它详细讨论产品的可靠性研制和增长试验、环境应力筛选试验、可靠性鉴定和验收试验、维修性验证等的试验方案、方法及技术,系统地介绍软件可靠性、测试性和机内测试、非工作状态的可靠性及维修性等的分析、设计和验证技术,讨论了以可靠性为中心的维修理论和方法,以及维修大纲的编制原则及方法,最后还全面论述可靠性及维修性的管理特点及管理程序。

本手册介绍的技术及方法可用于电子、机电和机械等各类产品。它可作为从事航空、航天、造船、核能、电子、电力、机械和兵器等工业部门的工程技术人员、管理人员、使用及维修人员的参考工具书,可供高等院校的师生参考,经过适当剪裁也可作为各种培训班的教材。

目 录

第一章 概 论

1.1 引言	(1)
1.2 可靠性及维修性工程的发展	(3)
1.2.1 萌芽阶段(40年代)	(3)
1.2.2 创建阶段(50年代)	(3)
1.2.3 全面发展阶段(60年代)	(4)
1.2.4 进入成熟阶段(70年代)	(7)
1.2.5 深入发展阶段(80年代以来)	(10)
1.2.6 我国可靠性及维修性工程的发展	(12)
1.3 可靠性及维修性工程与其他相关学科	(13)
1.3.1 可靠性、维修性工程与维修工程	(13)
1.3.2 质量保证与可靠性工程	(15)
1.3.3 测试性及保障性与可靠性及维修性	(16)
1.4 系统与系统工程	(18)
1.4.1 系统的基本要素及结构层次	(18)
1.4.2 系统的基本参数及其定义	(20)
1.4.2.1 系统效能	(22)
1.4.2.2 可用度和战备完好率	(23)
1.4.2.3 可信度(任务良好度)	(23)
1.4.2.4 可靠性和任务可靠性	(24)
1.4.2.5 修理度	(24)
1.4.2.6 维修性	(24)
1.4.2.7 易修性	(24)
1.4.2.8 设计良好度	(25)
1.4.3 系统寿命周期费用	(25)
1.4.3.1 寿命周期费用的概念	(25)
1.4.3.2 影响寿命周期费用的要素	(27)
1.4.3.3 寿命周期费用的管理	(29)

1.4.4 系统工程过程	(31)
1.5 时间概念的定义	(34)
参考文献	(35)

第二章 可靠性及维修性的基本理论

2.1 引言	(37)
2.2 可靠性及维修性的基本概念	(37)
2.2.1 故障时间 t 和维修时间 t	(37)
2.2.2 可靠度函数 $R(t)$ 和维修度函数 $M(t)$	(38)
2.2.3 故障率函数 $\lambda(t)$ 和修复率函数 $\mu(t)$	(38)
2.2.4 平均故障前时间 MTTF 与平均修复时间 MTTR	(39)
2.2.5 可靠性特征曲线(浴盆曲线)	(39)
2.2.5.1 早期故障期	(39)
2.2.5.2 偶然故障期	(39)
2.2.5.3 耗损故障期	(39)
2.3 可靠性及维修性中常用的统计分布	(40)
2.3.1 概述	(40)
2.3.2 指数分布	(40)
2.3.3 威布尔分布	(40)
2.3.4 正态分布	(41)
2.3.5 对数正态分布	(42)
2.3.6 极值分布	(42)
2.3.6.1 极大值分布	(43)
2.3.6.2 极小值分布	(43)
2.3.7 伽马(Γ)分布	(43)
2.3.8 二项分布	(44)
2.3.9 泊松分布	(45)
2.4 可靠性及维修性数据分析	(45)
2.4.1 概述	(45)
2.4.2 评估方法	(46)

2.4.2.1 指数分布	(47)	3.2.5 可维修系统的可靠性模型	(196)
2.4.2.2 威布尔分布	(48)	3.2.5.1 基本概念、假设及计算步骤	(196)
2.4.2.3 正态分布	(68)	3.2.5.2 两个相同设备并联的系统	(197)
2.4.2.4 对数正态分布	(72)	3.2.5.3 两个相同设备旁联的系统	(202)
2.4.2.5 极值分布	(73)	3.2.5.4 两个不同设备旁联的系统	(205)
2.4.3 检验方法	(76)	3.2.5.5 两个不同设备组成的通用化系统	(207)
2.4.3.1 概述	(76)	3.2.5.6 两个设备并联及负载均分系统	(208)
2.4.3.2 $K-S$ 检验	(77)	3.2.5.7 三个相同设备多个修理的并联系统	(210)
2.4.3.3 χ^2 检验	(80)	3.2.5.8 系统可靠性模型比较	(217)
2.4.3.4 $K-S$ 检验和 χ^2 检验	(83)	3.2.5.9 系统的首次故障前平均工作时间 (MTTF _s)	(217)
2.5 可用度的基本概念	(83)	3.2.6 可靠性分析用的贝叶斯统计法	(217)
2.5.1 概述	(83)	3.2.6.1 引言	(217)
2.5.2 可用度与马尔可夫过程	(84)	3.2.6.2 贝叶斯定理	(218)
2.5.2.1 引言	(84)	3.3 维修性模型	(221)
2.5.2.2 单台设备的可用度分析	(85)	3.3.1 维修性模型的种类	(221)
参考文献	(88)	3.3.2 维修性参数选择	(221)
附录 $F2$ 统计表	(89)	3.3.3 MTTR 的精确模型	(222)
		3.3.3.1 MTTR 的定义	(222)
		3.3.3.2 MTTR 的时间要素	(222)
		3.3.3.3 MTTR 的通用模型	(224)
		3.3.3.4 MTTR 的专用模型	(224)
		3.3.4 MTTR 的早期模型	(225)
		3.3.4.1 模型的基础	(226)
		3.3.4.2 模型建立	(226)
		3.3.4.3 维修活动的模型	(227)
		3.3.4.4 MTTR 的计算	(234)
		3.3.4.5 模型的总结	(234)
		3.3.5 具有定期调整的 MTTR 模型	(235)
		3.3.6 最大修复时间 $M_{\max}(\Phi)$ 模型	(236)
		3.3.7 平均预防性维修时间 (MPMT)	(237)
		3.3.8 每次修理的平均维修工时 (MMH/ R_c)	(238)
		3.3.9 每项维修活动的平均维修工时 (MMH/MA)	(238)
		3.3.10 每工作小时的平均维修工时 (MMH/OH)	(239)
		3.3.11 故障隔离率 (FIR)	(240)
		参考文献	(240)

第三章 可靠性及维修性模型

3.1 引言	(150)
3.2 可靠性模型	(150)
3.2.1 可靠性模型的组成	(150)
3.2.2 基本可靠性模型与任务可靠性模型	(150)
3.2.3 建立可靠性模型	(152)
3.2.3.1 建立可靠性模型的目的及程序	(152)
3.2.3.2 普通概率法	(160)
3.2.3.3 布尔真值表法	(163)
3.2.3.4 逻辑图法	(166)
3.2.3.5 蒙特卡罗仿真法	(169)
3.2.3.6 应用示例	(171)
3.2.4 不维修系统的可靠性模型	(173)
3.2.4.1 串联模型	(173)
3.2.4.2 并联模型	(174)
3.2.4.3 混联模型	(175)
3.2.4.4 n 中取 k 模型	(176)
3.2.4.5 多数表决模型	(178)
3.2.4.6 旁联可靠性模型	(179)
3.2.4.7 循环工作的可靠性模型	(181)
3.2.4.8 多种应力级的系统可靠性模型	(182)
3.2.4.9 多模式的系统可靠性模型	(182)
3.2.4.10 负载均分可靠性模型	(185)
3.2.4.11 静态开关可靠性模型	(187)
3.2.4.12 循环开关可靠性模型	(191)

附录 F3 修理时间为对数正态分布的最大 修复时间 $M_{\max}(\Phi)$ 的估计值	(241)
---	-------

第四章 可靠性及维修性的要求及分配

4.1 引言	(268)
4.2 可靠性及维修性要求	(268)
4.2.1 可靠性及维修性参数	(268)
4.2.2 可靠性及维修性参数的选择	(271)
4.2.3 可靠性及维修性要求的规定	(275)
4.2.3.1 可靠性及维修性指标的规定	(275)
4.2.3.2 寿命剖面及任务剖面的规定	(278)
4.2.3.3 故障判据的规定	(281)
4.2.3.4 验证要求以及接收和拒收判据的 规定	(282)
4.2.3.5 维修及保障方案的规定	(282)
4.2.3.6 可靠性要求规定示例	(283)
4.2.3.7 维修性要求规定示例	(284)
4.3 可靠性分配	(284)
4.3.1 概述	(284)
4.3.1.1 分配的概念	(284)
4.3.1.2 分配准则	(285)
4.3.1.3 分配步骤及方法	(286)
4.3.2 等分配法	(287)
4.3.3 AGREE 分配法	(289)
4.3.4 ARINC 分配法和等改进法	(290)
4.3.4.1 ARINC 分配法	(290)
4.3.4.2 等改进法	(291)
4.3.5 目标可行性法	(296)
4.3.6 最少工作量法	(298)
4.3.7 动态规划法	(300)
4.4 维修性分配	(306)
4.4.1 概述	(306)
4.4.2 分配步骤及方法	(307)
4.4.2.1 分配步骤	(307)
4.4.2.2 分配方法	(308)
4.4.2.3 分配示例	(312)
参考文献	(323)

第五章 可靠性及维修性预计

5.1 引言	(324)
5.2 可靠性预计	(324)
5.2.1 概述	(324)

5.2.2 相似设备法	(325)
5.2.3 相似复杂性法	(328)
5.2.4 功能预计法	(330)
5.2.4.1 军用飞机的预计模型	(330)
5.2.4.2 雷达的预计模型	(333)
5.2.5 元器件计数法	(335)
5.2.6 应力分析法	(337)
5.2.7 对非指数分布的修正	(340)
5.2.8 对非工作故障率的修正	(341)
5.2.9 可靠性预计及分配的一般程序	(342)
5.3 非电子设备的可靠性预计	(351)
5.3.1 概述	(351)
5.3.2 可靠性预计图估法	(352)
5.3.3 一般干涉理论	(353)
5.3.4 干涉理论在可靠性预计中的应用	(355)
5.3.4.1 目的	(355)
5.3.4.2 方法说明	(355)
5.3.4.3 干涉理论在正态分布强度和正态 分布应力中的应用	(355)
5.3.4.4 应用示例	(356)
5.3.5 平均故障率法在油脂润滑滚动 轴承的应用	(359)
5.3.5.1 目的	(359)
5.3.5.2 方法说明	(359)
5.3.5.3 应用示例	(359)
5.3.6 滑油润滑滚动轴承的可靠性预 计方法	(361)
5.3.6.1 目的	(361)
5.3.6.2 方法说明	(361)
5.3.7 正齿轮系统的可靠性预计法	(362)
5.3.7.1 目的	(362)
5.3.7.2 方法说明和举例	(362)
5.3.8 在最少信息下的可靠性预计法	(370)
5.4 维修性预计	(372)
5.4.1 概述	(372)
5.4.1.1 原理及假设	(372)
5.4.1.2 应用场合	(373)
5.4.1.3 基本度量参数	(373)
5.4.1.4 信息要求	(374)
5.4.2 早期预计方法	(374)
5.4.2.1 确定预计要求	(374)

5.4.2.2 确定更换方案	(375)	6.2.4.3 FMECA 维修性信息报告	(458)
5.4.2.3 确定预计所需的数据	(375)	6.2.5 矩阵 FMEA	(458)
5.4.2.4 选择合适的模型	(377)	6.2.6 FMECA 应用示例	(461)
5.4.2.5 计算 MTTR	(378)	6.2.6.1 示例 1	(461)
5.4.3 精确预计方法	(380)	6.2.6.2 示例 2	(466)
5.4.3.1 确定预计要求	(381)	6.3 故障树分析	(474)
5.4.3.2 确定更换方案	(381)	6.3.1 概述	(474)
5.4.3.3 确定故障检测和隔离输出	(381)	6.3.2 符号说明	(474)
5.4.3.4 确定故障检测和隔离输出与硬件 特性的关系	(381)	6.3.3 故障树建树步骤	(477)
5.4.3.5 确定可更换单元与故障检测和隔 离输出的关系	(383)	6.3.4 故障树规范化和模块分解	(479)
5.4.3.6 绘制维修流程图	(385)	6.3.5 故障树定性分析及其应用	(481)
5.4.3.7 时间分析	(387)	6.3.6 故障树定量分析	(482)
5.4.3.8 计算维修性参数	(388)	6.3.7 示例	(484)
5.4.4 早期预计示例	(388)	6.3.7.1 压力罐系统建树过程	(484)
5.4.4.1 示例 1	(389)	6.3.7.2 压力罐系统的故障树规范化和模块 分解	(489)
5.4.4.2 示例 2	(394)	6.3.7.3 压力罐系统故障树定性分析及其 应用	(490)
5.4.5 精确预计示例	(402)	6.3.7.4 压力罐系统的故障树定量分析	(494)
5.4.5.1 确定预计要求及更换方案	(402)	6.4 潜在状态分析	(495)
5.4.5.2 确定故障隔离输出	(402)	6.4.1 概述	(495)
5.4.5.3 故障检测和隔离输出与 RU 的 关系	(403)	6.4.2 潜在状态分类	(495)
5.4.5.4 绘制维修流程图	(415)	6.4.3 潜在状态分析实施方法	(496)
5.4.5.5 计算维修性参数	(430)	6.4.3.1 潜在电路分析方法	(496)
参考文献	(431)	6.4.3.2 潜在电路分析示例	(497)
附录 F5 时间标准	(431)	6.4.3.3 软件潜在状态分析	(498)
		6.4.3.4 软件潜在状态分析示例	(500)
		6.4.3.5 硬件与软件综合分析	(501)
		6.4.4 潜在状态分析的有效性分析	(502)
		6.4.5 潜在状态分析的技术要求	(503)
		6.4.6 潜在状态分析与其他可靠性 分析的比较	(505)
		6.4.7 潜在状态分析应用指南	(508)
		6.4.7.1 潜在状态分析需注意的几个问题	(508)
		6.4.7.2 决定适用的系统	(508)
		6.4.7.3 计算计划费用及项目预算分配	(509)
		6.4.7.4 进度要求	(509)
		6.4.7.5 使用方监控指南	(509)
		6.5 共因故障分析	(510)
		6.5.1 概述	(510)
		6.5.2 定义	(510)
		6.5.3 共因故障分析	(510)
		6.5.3.1 共因故障分类	(510)
		6.5.3.2 各种共因故障的比例	(512)

第六章 可靠性及维修性分析

6.1 引言	(447)
6.2 故障模式、影响及危害性 分析	(447)
6.2.1 概述	(447)
6.2.2 FMECA 的一般要求	(447)
6.2.2.1 制定 FMECA 计划	(447)
6.2.2.2 获得原始信息	(448)
6.2.2.3 确定 FMECA 的分析方法	(449)
6.2.2.4 实施 FMECA	(450)
6.2.2.5 编写 FMECA 报告	(451)
6.2.3 FMECA 的实施程序	(451)
6.2.3.1 FMEA 程序	(451)
6.2.3.2 CA 程序	(454)
6.2.4 FMECA 维修性信息分析	(457)
6.2.4.1 概述	(457)
6.2.4.2 FMECA 维修性信息表格	(457)

6.5.4 共因故障的分析模型	(513)	6.7.6 燃油系统	(537)
6.5.4.1 模型假设	(513)	6.7.7 液压系统	(538)
6.5.4.2 串联系统	(513)	6.7.8 全静压系统	(538)
6.5.4.3 并联系统	(514)	6.7.9 氧气系统	(538)
6.5.4.4 几点说明	(514)	6.7.10 座舱内部设备	(538)
6.5.5 飞机上常见的共因故障及其 分析	(515)	6.7.11 系统的相互影响	(539)
6.5.5.1 发动机碎片	(515)	6.8 维修性分析	(539)
6.5.5.2 鸟撞	(516)	6.8.1 概述	(539)
6.5.5.3 其他环境因素	(518)	6.8.2 维修方案	(541)
6.5.5.4 错误装配及错误调整	(519)	6.8.2.1 维修等级	(542)
6.5.6 减少共因故障的方法	(520)	6.8.2.2 系统使用要求	(543)
6.5.6.1 设计管理	(520)	6.8.2.3 维修策略	(546)
6.5.6.2 设计技术	(520)	6.8.3 维修性分析的流程及步骤	(551)
6.5.6.3 质量控制	(520)	6.8.3.1 维修性分析流程	(551)
6.5.6.4 使用	(521)	6.8.3.2 维修性分析步骤	(554)
6.5.6.5 可靠性增长	(522)	6.9 机内测试的效能分析	(561)
6.6 初步危险分析	(522)	6.9.1 概述	(561)
6.6.1 目的	(522)	6.9.2 机内测试参数及分析	(561)
6.6.2 结果	(523)	6.9.3 BIT 对系统可靠性、维修性及寿命 周期费用的影响	(568)
6.6.3 方法	(524)	6.9.4 提高 BIT 效能的途径	(571)
6.6.3.1 基本方法	(524)	6.10 权衡分析	(572)
6.6.3.2 具体方法	(524)	6.10.1 概述	(572)
6.6.3.3 危险单元清单	(525)	6.10.2 可靠性权衡	(573)
6.6.3.4 技术	(527)	6.10.2.1 可靠度最优分配	(573)
6.6.3.5 分析时机	(529)	6.10.2.2 备件最优分配	(575)
6.6.3.6 所要求的资料	(529)	6.10.3 维修性权衡	(577)
6.6.4 分析示例	(529)	6.10.3.1 预防性维修与非预防性维修的 权衡	(577)
6.7 区域安全性分析	(533)	6.10.3.2 测试设备的权衡	(579)
6.7.1 概述	(533)	6.10.4 可靠性和维修性权衡	(586)
6.7.2 通用规则	(534)	6.10.4.1 权衡考虑的因素	(586)
6.7.2.1 导管、管道、软管、导线、电缆等	(534)	6.10.4.2 系统效能	(588)
6.7.2.2 部件拆卸和更换	(535)	6.10.4.3 系统效能的建模技术	(591)
6.7.2.3 维修及保养	(535)	6.11 可靠性及维修性数字仿真	(600)
6.7.2.4 排放	(536)	6.11.1 概述	(600)
6.7.2.5 材料一致性	(536)	6.11.2 随机数的产生	(601)
6.7.2.6 电气连接	(536)	6.11.3 随机变量的产生	(603)
6.7.3 空气的调节及分布	(536)	6.11.4 静态数字仿真技术	(605)
6.7.4 航空电气及电子系统	(536)	6.11.5 动态数字仿真技术	(607)
6.7.5 飞行操纵(机械部分)	(537)	6.11.6 通用计算机仿真语言简介	(609)
6.7.5.1 带销钉的紧固件	(537)	6.11.7 现有可靠性及维修性仿真软件 简介	(609)
6.7.5.2 具有一个或多个销钉的紧固件	(537)		
6.7.5.3 错误装配	(537)		
6.7.5.4 间隙和干扰	(537)		
6.7.5.5 防止卡住	(537)		

6.11.7.1 GRASP 软件	(609)	7.3.3.4 组装和固定	(669)
6.11.7.2 GRAMS 软件	(610)	7.3.3.5 导管、管路与连接器	(669)
6.11.8 可靠性和维修性数字仿真的一般 程序	(611)	7.3.3.6 维护、调整与校准	(670)
6.12 寿命周期费用分析	(612)	7.3.3.7 测试性要求和控制要求	(670)
6.12.1 概述	(612)	7.3.3.8 互换性和可达性	(671)
6.12.2 寿命周期费用分析模型	(612)	7.3.4 动力装置	(671)
6.12.2.1 常用的 LCC 模型	(612)	7.3.4.1 布局	(671)
6.12.2.2 费用计算模型	(613)	7.3.4.2 连接与安装拆卸	(671)
6.12.2.3 费用计算模型的应用	(623)	7.3.4.3 维护与调整	(671)
参考文献	(647)	7.3.4.4 故障诊断与监控	(672)
附录 F6.1 潜在状态分析应用历史 表(美国)	(648)	7.3.5 飞机结构	(672)
附录 F6.2 潜在状态分析费用估计 方法	(656)	7.3.5.1 布局与连接	(672)
		7.3.5.2 结构件、零部件	(672)
		7.3.5.3 舱门、口盖	(672)
		7.3.5.4 紧固件	(673)
		7.3.5.5 座舱及地板	(673)
第七章 可靠性及维修性设计		7.4 元器件的选择和控制	(674)
7.1 引言	(657)	7.4.1 概述	(674)
7.2 可靠性设计准则	(657)	7.4.2 元器件的选择及控制原则	(674)
7.2.1 总则	(657)	7.4.3 元器件的批准	(675)
7.2.2 电子产品	(659)	7.4.3.1 元器件的合理性	(675)
7.2.3 机械产品	(660)	7.4.3.2 元器件的应用	(675)
7.3 维修性设计准则	(662)	7.4.3.3 元器件的参数	(676)
7.3.1 总则	(662)	7.4.4 关键元器件	(676)
7.3.1.1 维修简便	(662)	7.4.5 元器件选择指南	(676)
7.3.1.2 维修停飞时间短	(662)	7.4.5.1 微型电路	(676)
7.3.1.3 维修费用低	(663)	7.4.5.2 分立式半导体器件	(678)
7.3.1.4 有防维修差错的措施	(663)	7.4.5.3 电阻器	(679)
7.3.1.5 满足与维修有关的人素要求	(663)	7.4.5.4 电容器	(681)
7.3.1.6 满足与维修有关的可靠性要求	(664)	7.4.5.5 磁性元件	(685)
7.3.1.7 满足与维修有关的安全性要求	(664)	7.4.5.6 继电器	(685)
7.3.1.8 尽量降低对维修人员的要求	(665)	7.4.5.7 开关	(688)
7.3.2 电子设备及电气设备	(665)	7.4.5.8 电连接器	(690)
7.3.2.1 布局	(665)	7.4.5.9 电子管	(692)
7.3.2.2 电子及电气设备的结构和安装	(665)	7.4.5.10 电缆	(692)
7.3.2.3 电子及电气设备的相互连接	(666)	7.4.5.11 电-光学或纤维光学	(693)
7.3.2.4 电路的装配	(666)	7.4.5.12 印制电路板	(693)
7.3.2.5 电子及电气设备的检查、调整及 校准	(667)	7.4.5.13 标准电子模块(SEM)	(693)
7.3.2.6 电子及电气设备的故障诊断	(667)	7.5 降额设计	(695)
7.3.3 机械产品	(668)	7.5.1 概述	(695)
7.3.3.1 布局	(668)	7.5.2 降额的一般要求	(695)
7.3.3.2 标记	(668)	7.5.2.1 降额的有关定义	(695)
7.3.3.3 部件选择及标准化	(668)	7.5.2.2 降额等级	(695)
		7.5.2.3 降额等级的选择	(696)
		7.5.2.4 降额等级的转换	(696)

7.5.2.5 设备的环境条件	(698)	7.6 热设计的原则	(758)
7.5.2.6 元器件的质量等级	(698)	7.6.6.1 冷却技术的限制	(758)
7.5.3 降额的具体要求	(698)	7.6.6.2 元器件布局	(759)
7.5.3.1 微电路	(698)	7.6.6.3 元器件的安装	(760)
7.5.3.2 晶体管	(701)	7.6.6.4 鼓风机的选择与安装	(762)
7.5.3.3 二极管	(707)	7.6.6.5 冷却剂流道设计	(763)
7.5.3.4 可控硅	(711)	7.6.7 改善热设计的方法及示例	(763)
7.5.3.5 光半导体器件	(713)	7.6.7.1 改进现有热设计的方法	(763)
7.5.3.6 电阻	(714)	7.6.7.2 利用上述方法成功改进的例子	(764)
7.5.3.7 电容	(715)	7.7 余度设计	(766)
7.5.3.8 电感	(715)	7.7.1 概述	(766)
7.5.3.9 继电器	(716)	7.7.2 余度的概率表示法	(766)
7.5.3.10 开关	(719)	7.7.3 余度的等级	(767)
7.5.3.11 电连接器	(720)	7.7.4 与时间有关的余度	(767)
7.5.3.12 旋转器件	(721)	7.7.5 余度的类型	(769)
7.5.3.13 灯泡	(723)	7.7.5.1 工作余度	(769)
7.5.3.14 断路器	(725)	7.7.5.2 表决余度	(776)
7.5.3.15 保险丝	(726)	7.7.5.3 备用余度	(776)
7.5.3.16 晶体	(726)	7.7.5.4 带修理的余度	(778)
7.5.3.17 电子管	(728)	7.7.5.5 余度的最佳分配	(780)
7.5.3.18 激光器	(728)	7.7.6 余度设计示例	(782)
7.5.3.19 振子	(729)	7.8 可靠电路设计	(791)
7.5.3.20 表面声波器件	(729)	7.8.1 概述	(791)
7.5.3.21 光纤部件	(729)	7.8.2 简化设计	(792)
7.5.3.22 机械零部件	(734)	7.8.3 采用标准部件和电路	(793)
7.6 热设计	(736)	7.8.4 瞬态和过应力保护	(794)
7.6.1 概述	(736)	7.8.5 参数降级和分析	(795)
7.6.2 产品研制中的热管理	(737)	7.8.6 减少设计失误的方法	(801)
7.6.2.1 战术技术指标论证阶段	(737)	7.8.7 主要的设计限制	(804)
7.6.2.2 方案论证及确认阶段	(739)	7.8.7.1 电压增益的限制	(804)
7.6.2.3 工程研制阶段	(740)	7.8.7.2 电流增益的限制	(806)
7.6.2.4 生产阶段	(740)	7.8.7.3 热因素	(807)
7.6.3 温度对可靠性的影响	(741)	7.9 环境设计	(807)
7.6.3.1 温度对故障率的影响	(741)	7.9.1 概述	(807)
7.6.3.2 热诱发的故障模式	(741)	7.9.2 温度保护	(808)
7.6.3.3 良好热设计的效益	(743)	7.9.3 冲击和振动保护	(808)
7.6.4 电子设备的热设计	(744)	7.9.4 防潮	(810)
7.6.4.1 热阻等级	(744)	7.9.5 砂尘保护	(811)
7.6.4.2 外部热通道	(745)	7.9.6 防爆	(811)
7.6.4.3 系统热通道	(748)	7.9.7 电磁辐射保护	(812)
7.6.4.4 制冷系统	(753)	7.9.8 核辐射保护	(813)
7.6.5 热分析	(754)	7.9.9 静电保护	(814)
7.6.5.1 热分析的任务	(754)	7.10 人为因素设计	(816)
7.6.5.2 热预计方法	(754)	7.10.1 概述	(816)
7.6.5.3 热分析等级	(756)		
7.6.5.4 计算机辅助热设计	(757)		

7.10.2 人为因素理论	(817)	7.10.6 人为因素与可靠性之间的关系 ...	(822)
7.10.3 系统设计、生产、使用及维修中的 人为因素考虑	(817)	7.10.7 人机分配及可靠性	(822)
7.10.4 人类工程学	(819)	7.10.8 交互作用及权衡	(825)
7.10.5 人的动作可靠性	(819)	7.10.9 人为差错率预计技术 (THERP)	(825)
7.10.5.1 人的动作可靠性	(819)	参考文献	(825)
7.10.5.2 人的动作可靠性模型	(820)	英文缩略语	(827)

第一章 概 论

1.1 引 言

近半个世纪以来,科学技术出现了巨大的进步,特别是电子和计算机技术有了突飞猛进的发展。随之而来,各种系统及设备的性能大大提高,结构变得越来越复杂,采购及使用保障费用也越来越昂贵,尤其是各种先进的武器系统更是如此。以对现代军用飞机作战性能起重要影响的航空电子设备为例,40年代的B-29轰炸机上的电子设备只有2000个元件;50年代的B-47轰炸机为20000个元件;60年代的B-58轰炸机达90000个元件;70年代的F-14战斗机装有几十台电子设备,其中仅火控雷达就有28000个元件。

在过去的20多年中,虽然各种电子元器件的可靠性平均每年以15%~20%的速度增长。但是,由于航空电子系统复杂性迅速提高,系统的使用可靠性并没有提高多少,而维修人力及费用却不断增加。例如,美国F-15A战斗机航空电子设备每出动一次需要停飞维修大约15h,需要7.5个外场维修工时,F-15A全机15年中的使用及保障费用为其出厂价格的1.5倍。据美国统计分析^①表明,美国战斗机的费用平均每年增长12%(约每10年增加2倍);新一代航空电子设备费用大约每年增加18%(每10年增加约4倍)。如果考虑到连续通货膨胀,则费用的增长将更惊人。表1-1及表1-2分别给出美国空军战斗机的采购费用、复杂性、可靠性及维修性,以及它们的航空电子设备的维修要求。

表 1-1 战斗机的采购费用、复杂性、可靠性及维修性^①

机型	采购费(百万美元)	相对复杂性	MFHBF ^②	维修工时/出动架次
A-10A	5.5	低	1.2	18.4
A-7D	6.0	中	0.9	23.2
F-4E	6.5	中	0.4	38.0
F-15A	15.0	高	0.5	33.6
F-111F	23.0	高	0.3	74.7

① 表中的数据为70年代的外场统计数据。

② MFHBF为平均故障间隔飞行小时。

① 美国的可靠性水平居世界领先地位,飞机又是最早应用可靠性的武器系统,故本手册中较多地引用美国飞机的数据。