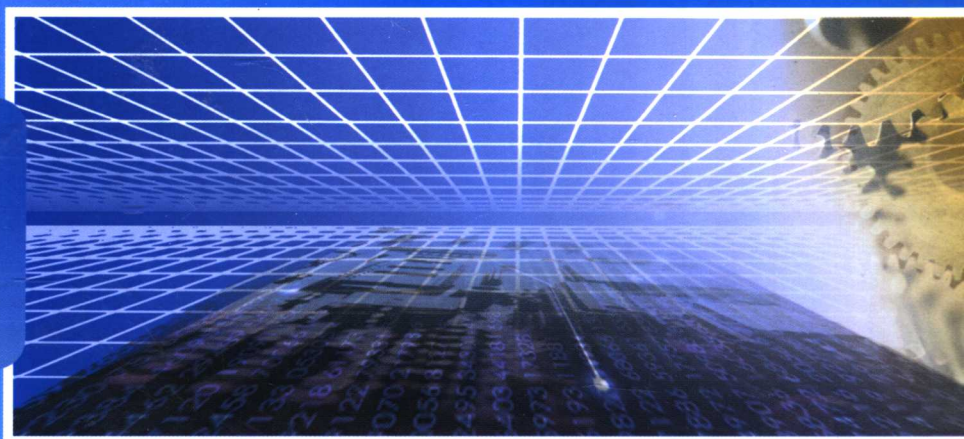


D-K-YT030-0D

空军航空机务系统教材

可靠性与维修性工程

陈云翔 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

D-K-YT030-0D

空军航空机务系统教材

可靠性与维修性工程

陈云翔 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是“空军航空机务系统教材”系列之一。全面系统地介绍了可靠性、维修性的基本概念、基本理论及其工程应用,强调基本理论的系统性与工程实用性相结合,全书共分为13章。在阐述现代系统可靠性维修设计思想的基础上,针对航空装备分别阐述了可靠性、维修性要求的确定与分配,可靠性、维修性预计以及试验与验证等理论,介绍了故障模式影响及危害性分析、故障树分析等可靠性、维修性设计与分析方法,介绍了可靠性与维修性管理的基本内容。

本书可作为军事装备院校研究生、本科生教材,也可供装备机关人员、部队装备管理人员以及从事装备研制、生产的工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性与维修性工程 / 陈云翔主编. —北京: 国防工业出版社, 2007. 11

空军航空机务系统教材

ISBN 978-7-118-05288-6

I. 可... II. 陈... III. ①航空器-可靠性工程-教材
②航空器-维修-教材 IV. V26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 108506 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 100044)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18½ 字数 440 千字

2007 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 47.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

总 序

发生在世纪之交的几场局部战争表明,脱胎于20世纪工业文明的机械化战争正在被迅猛发展的信息文明催生的信息化战争所取代。信息化战争的一个显著特点,就是知识和技术密集,战争的成败越来越取决于各类高技术、高层次人才的质量和数量,以及人与武器的最佳配合。因此,作为人才培养基础工作的教材建设,就显得格外重要和十分紧迫。为了加快推进中国特色军事变革,贯彻执行军队人才战略工程规划,培养造就高素质新型航空机务人才,空军从2003年开始实施了航空机务系统教材体系工程。

实施航空机务系统教材体系工程是空军航空装备事业继往开来的大事,它是空军装备建设的一个重要组成部分,是航空装备保障人才培养的一个重要方面,也是体现空军航空装备技术保障水平的一个重要标志。两年来,空军航空机务系统近千名专家、教授和广大干部、教员积极参与教材编修工作,付出了艰辛的劳动,部分教材已经印发使用,效果显著。实践证明,实施教材体系工程,对于提高空军航空机务人才的现代科学文化水平和综合素质,进而提升航空机务保障力和战斗力,必将发挥重要作用和产生深远影响,是一项具有战略意义的工程。

空军航空机务系统教材体系工程,以邓小平理论和“三个代表”的重要思想为指导,以新时期军事战备方针为依据,以培养高素质新型航空机务人才为目标,着眼空军向攻防兼备型转变和航空装备发展需要,按照整体对应、系统配套、紧贴实际、适应发展,突出重点,解决急需的思路构建了一个较为完整的教材体系。教材体系的结构由部队、院校、训练机构教育训练教材三部分组成,分为航空机务军官教育训练教材和航空机务士兵教育训练教材两个系列十六个类别的教材组成。规划教材按照新编、修编、再版等不同方式组织编修。新编和修编的教材,充实了新技术、新装备的内容,吸收了近年来航空维修理论研究的新成果,对高技术战争条件下航空机务保障的特点和规律进行了有益探索,院校的专业训练教材与国家人才培养规格接轨并具有鲜明的军事特色,部队训练教材与总参颁布的《空军军事训练与考核大纲》配套,能够适应不同层次、不同专业航空机务人员的教育训练需要,教材的系统性、先进性、科学性、针对性和实践性与原有教材相比有了明显提高。

此次大规模教材编修工作,系统整理总结了空军航空机务事业创业50多年来的宝贵经验,将诸多专家、教授、骨干的学识见解和实践经验总结继承下来,优化了航空机务保障教材体系,为装备保障人员提供了一套系统、全面的教科书,满足了人才培养对教材的急需。全航空机务系统一定要认真学习新教材,使其真正发挥对航空机务工作的指导作用。

同时,教材建设又是一项学术性很强的工作,教材反映的学术理论内容是随实践的发展而发展的。当前我军建设正处在一个跨越式发展的历史关键时期,航空装备的飞速发展和空军作战样式的深刻变化,使航空机务人才培养呈现出许多新特点,给航空机务系统教材建设带来许多新问题。因此,必须十分关注航空装备的发展和航空机务教育训练的改革创新,不断发展和完善具有时代特征和我军特色的航空机务系统教材体系,为航空机务人才建设提供知识信息和开发智力资源。

魏 钢

二〇〇五年十二月

空军航空机务系统教材体系工程编委会

主 任 魏 钢

副主任 周 迈 毕雁翎 王凤银 袁 强 韩云涛

吴辉建 王洪国 王晓朝 常 远 蔡凤震

李绍敏 李瑞迁 张凤鸣 张建华 许志良

委 员 刘千里 陆阿坤 李 明 郦 卫 沙云松

关相春 吴 鸿 朱小军 许家闻 夏利民

陈 涛 谢 军 严利华 高 俊 戴震球

王力军 曾庆阳 王培森 杜元海

空军航空机务系统教材体系工程总编审组

组 长 刘桂茂

副组长 刘千里 郦 卫 张凤鸣

成 员 孙海涛 陈廷楠 周志刚 杨 军 陈德煌

韩跃敏 谢先觉 高 虹 彭家荣 富 强

郭汉堂 呼万丰 童止戈 张 弘

空军航空机务系统教材体系工程 管理专业编审组

组 长 韩跃敏

成 员 王端民 崔全会 张星魁 郭宏刚 李异平
白晓峰 朱 飞

前 言

可靠性、维修性理论是以装备的寿命特征和维修问题作为主要研究对象的一门新兴学科。世界发达国家高度重视可靠性、维修性理论及其技术研究与应用,已在电子、机械、自动化、航空、航天等领域产生了巨大的效益。可靠性、维修性是影响军事装备作战效能的决定因素,是装备质量的重要内涵。实践证明,可靠性、维修性理论对于促进军事装备的发展与建设具有十分重要的作用。

本教材是为拓宽机务人员的知识领域、培养高素质的装备人才和提升机务人员的任职能力而编写的,指导和解决装备全寿命过程中的可靠性、维修性工作。本书着重介绍可靠性与维修性的基本理论、基本技术和基本方法,重点研究装备可靠性与维修性的内涵、体系、内容及其在装备全寿命过程中的应用,注重理论与实践相结合,在贴近装备工作实际的基础上,突出可靠性、维修性理论体系的建立,突出军事装备应用特色,结构安排上力求完整、简明,内容编排上力求科学、适用。

本教材由陈云翔担任主编。编写组成员有陈云翔、张净敏、张执国、董蕙茹等。全书共分13章,其中第1章、第7章、第13章由陈云翔编写,第4章、第10章、第12章由张净敏编写,第2章、第3章、第6章、第9章、第11章由张执国编写,第5章、第8章由董蕙茹编写。

本教材是在我们多年来可靠性、维修性教学实践和研究成果的基础上编写完成的,同时借鉴了近年来国内外可靠性、维修性的相关研究成果。本教材在编写过程中得到了许多专家、教授的指导,特别是陈学楚教授在百忙中审定了全部书稿,在此表示衷心的感谢。

由于编者理论水平和实践经验有限,教材中难免存在不足之处,恳请各位专家、学者和广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 可靠性、维修性的地位和作用	1
1.1.1 可靠性、维修性的地位	1
1.1.2 可靠性、维修性的作用	2
1.2 可靠性工程及其发展	3
1.2.1 基本概念	3
1.2.2 可靠性工程的发展	4
1.3 维修性工程及其发展	6
1.3.1 基本概念	6
1.3.2 维修性工程的发展	7
1.4 可靠性、维修性工程与相关学科的关系	8
1.4.1 可靠性工程与质量管理	8
1.4.2 可靠性、维修性工程与维修工程	9
1.4.3 维修性工程与综合保障工程	10
习题	10
第 2 章 可靠性的基本概念及其度量	11
2.1 可靠性的概念	11
2.1.1 可靠性的定义	11
2.1.2 可靠性的分类	12
2.2 寿命剖面和任务剖面	13
2.2.1 寿命剖面	13
2.2.2 任务剖面	13
2.3 可靠性函数	15
2.3.1 可靠度函数	15
2.3.2 故障分布函数	16
2.4 可靠性寿命特征	19
2.4.1 平均寿命	20
2.4.2 可靠寿命、中位寿命与特征寿命	21
2.5 产品的故障规律	21
2.5.1 典型故障率曲线	21
2.5.2 一般设备故障率曲线的基本形式	24
2.5.3 复杂设备故障率曲线	24

习题	26
第3章 系统可靠性分析	27
3.1 系统可靠性模型的建立	27
3.1.1 系统和状态	27
3.1.2 可靠性框图	27
3.2 串联系统	28
3.3 并联系统	29
3.4 $k/n(G)$ 表决系统	31
3.4.1 $2/3(G)$ 系统	31
3.4.2 $k/n(G)$ 系统	32
3.5 储备系统可靠性模型	33
3.5.1 冷储备系统	34
3.5.2 热储备系统	36
3.6 网络系统可靠性分析	38
3.6.1 网络系统的基本概念	38
3.6.2 真值表法	39
3.6.3 全概率分解法	41
3.6.4 最小路法	42
3.6.5 网络可靠度计算	44
3.7 三态系统的可靠性	46
3.7.1 串联系统	46
3.7.2 并联系统	47
3.7.3 串联—并联系统	47
3.7.4 并联—串联系统	48
习题	49
第4章 系统可靠性分配与预计	51
4.1 可靠性要求及确定	51
4.1.1 可靠性要求	51
4.1.2 可靠性要求的确定	54
4.2 系统可靠性分配	57
4.2.1 可靠性分配的目的和用途	57
4.2.2 可靠性分配的原理和准则	58
4.2.3 可靠性分配的一般方法	58
4.2.4 不同研制阶段可靠性分配方法的选择	66
4.2.5 进行可靠性分配时的注意事项	66
4.3 系统可靠性预计	66
4.3.1 可靠性预计的目的和用途	67
4.3.2 可靠性预计的分类	67
4.3.3 系统可靠性预计方法	67

4.3.4 不同研制阶段可靠性预计方法的选取	78
4.3.5 进行可靠性预计时的注意事项	78
习题	79
第5章 故障模式、影响及危害性分析	81
5.1 故障模式影响分析	81
5.1.1 概述	81
5.1.2 FMEA 分析方法	81
5.1.3 FMEA 分析步骤	82
5.1.4 FMEA 表格	83
5.2 危害性分析	84
5.2.1 分析目的	84
5.2.2 分析方法	84
5.2.3 分析步骤	85
5.2.4 危害性矩阵	86
5.3 损坏模式及影响分析(DMEA)	86
5.3.1 分析目的	86
5.3.2 分析方法	87
5.3.3 分析步骤	87
5.3.4 DMEA 表格	87
5.4 FMECA 示例——航空发动机 FMECA	88
5.4.1 故障模式、影响分析(FMEA)	88
5.4.2 危害性分析(CA)	92
习题	94
第6章 故障树分析	95
6.1 概述	95
6.2 建造故障树	95
6.2.1 基本概念及符号	95
6.2.2 故障树建造的步骤和注意事项	98
6.3 故障树定性分析	99
6.3.1 割集与路集	99
6.3.2 求最小割集的方法	100
6.3.3 最小割集的定性分析	102
6.4 故障树的定量计算	102
6.4.1 故障树的数学描述	102
6.4.2 单调关联系统	105
6.4.3 通过底事件发生概率直接求顶事件发生概率	105
6.4.4 通过最小割集求顶事件发生的概率	107
6.4.5 故障树的简化	110
6.4.6 重要度分析	112

6.4.7 故障树分析法的优缺点及应注意的问题	114
习题	115
第7章 可靠性试验	118
7.1 可靠性试验的基本概念	118
7.1.1 可靠性试验的目的	118
7.1.2 可靠性试验的分类	118
7.1.3 可靠性试验考虑的主要因素	119
7.2 可靠性试验的实施过程	120
7.2.1 试验场所的选取原则	120
7.2.2 可靠性试验前应具备的条件	121
7.2.3 可靠性试验中的实施要求	125
7.2.4 可靠性试验后的工作内容	128
7.3 可靠性验证试验	129
7.3.1 可靠性鉴定试验	129
7.3.2 可靠性验收试验	132
7.4 可靠性增长试验	134
7.4.1 可靠性增长与可靠性增长试验	134
7.4.2 可靠性增长模型	138
习题	142
第8章 可靠性的统计分析	143
8.1 可靠性统计分析的基本概念和方法	143
8.1.1 可靠性数据	143
8.1.2 产品常见的寿命分布	144
8.1.3 数据分析的直方图法	147
8.2 产品可靠性的经验分析	148
8.2.1 完整试验的经验分析	148
8.2.2 截尾试验的经验分析	150
8.2.3 随机截尾试验的经验分析	152
8.3 可靠性分布参数的估计	154
8.3.1 分布参数的点估计	154
8.3.2 分布参数的区间估计	158
8.4 故障分布检验	162
8.4.1 皮尔逊的 χ^2 检验法	162
8.4.2 K-S检验	162
8.4.3 典型分布检验	164
8.5 概率纸法	166
8.5.1 正态分布概率纸法	166
8.5.2 对数正态分布的图估计法	170
8.5.3 威布尔分布的图估计法	170

习题	176
第9章 维修性和可用性	178
9.1 维修性定性要求	178
9.2 维修性函数	179
9.2.1 维修度	179
9.2.2 维修时间密度函数	180
9.2.3 修复率	180
9.3 维修性参数	181
9.3.1 维修时间参数	181
9.3.2 维修工时参数	184
9.3.3 维修费用参数	184
9.4 维修性建模	184
9.4.1 维修性建模的目的和程序	184
9.4.2 维修性物理模型	185
9.4.3 维修性数学模型	188
9.5 可用性	191
9.5.1 时间的分解	191
9.5.2 瞬时可用性	192
9.5.3 稳态可用度	193
9.6 可修系统和马尔可夫过程	197
9.6.1 马尔可夫过程(Markov Process)	197
9.6.2 单部件可用度建模	198
9.6.3 串联可修系统可用度建模	200
9.6.4 并联可修系统可用度建模	202
习题	204
第10章 维修性要求的确定及分配与预计	206
10.1 维修性要求及其确定	206
10.1.1 维修性定性要求及确定	206
10.1.2 维修性定量要求及确定	206
10.2 维修性分配	210
10.2.1 概述	210
10.2.2 维修性分配的程序	212
10.2.3 维修性分配的方法	214
10.2.4 保证正确分配的要素	217
10.3 维修性预计	218
10.3.1 维修性预计的目的与时机	218
10.3.2 维修性预计的主要依据及条件	219
10.3.3 维修性预计的程序	219
10.3.4 维修性预计的方法	220

10.3.5 保证正确预计的要素	224
习题	225
第 11 章 维修性试验与评定	226
11.1 概述	226
11.1.1 维修性试验与评定的目的与作用	226
11.1.2 维修性试验与评定的时机和种类	226
11.1.3 维修性试验与评定的内容	227
11.2 维修性试验与评定的一般程序	228
11.2.1 准备阶段工作程序	228
11.2.2 实施阶段工作程序	230
11.3 维修性指标的验证方法	238
11.3.1 维修时间平均值和最大修复时间的检验	239
11.3.2 维修工时率的检验	241
11.3.3 预防性维修时间的专门试验	243
11.4 维修性参数值的估计	244
11.4.1 维修时间平均值和方差的估计	245
11.4.2 规定百分位的最大维修时间的估计	246
11.5 保证试验与评定正确的要素	248
习题	249
第 12 章 测试性与机内自检测技术	250
12.1 测试性基本概念	250
12.1.1 测试、测试技术和测试性	250
12.1.2 诊断、诊断技术、诊断能力和综合诊断	252
12.1.3 机内测试、机内测试设备和自动测试设备	252
12.2 测试性与测试要求	253
12.2.1 测试性要求	253
12.2.2 测试方案	255
12.2.3 测试性设计要求	256
12.2.4 测试性工作	259
12.3 测试性分配与预计	259
12.3.1 测试性分配方法	259
12.3.2 测试性预计方法	263
12.4 测试性验证	266
12.4.1 目的	266
12.4.2 验证程序及管理	266
12.4.3 测试性设计与验证的若干关键问题	267
习题	267
第 13 章 可靠性与维修性管理	269
13.1 可靠性与维修性管理的作用意义	269

13.2 寿命周期中的可靠性与维修性管理.....	271
13.2.1 论证阶段.....	271
13.2.2 方案阶段.....	271
13.2.3 工程研制阶段(含设计定型)	272
13.2.4 生产阶段.....	272
13.2.5 使用阶段.....	272
13.3 可靠性与维修性信息管理.....	272
13.3.1 可靠性与维修性信息的重要性.....	272
13.3.2 可靠性与维修性信息的分类.....	273
13.3.3 可靠性与维修性信息管理的内容.....	274
13.3.4 可靠性与维修性信息管理的方法.....	275
13.3.5 可靠性与维修性信息的闭环管理.....	277
13.4 常用的可靠性维修性国家军用标准.....	278
13.4.1 重要的国家军用可靠性、维修性标准主要内容	278
13.4.2 常用的可靠性、维修性国家军用标准	280
习题.....	281
参考文献.....	282

第1章 概述

1.1 可靠性、维修性的地位和作用

1.1.1 可靠性、维修性的地位

可靠性是要求装备在长期反复使用过程中不出或少出故障,处于可用的时间长;维修性是要求装备易于预防故障,即使出了故障,也能较快地修复或排除,处于不可用的时间短。因而,可靠性与维修性的组合,能使装备有较长的时间执行任务,出勤率较高。实践证明,可靠性、维修性(简称 R&M)对装备作战能力、生存力、维修人力和使用保障费用等有着重要的作用和影响,因此,在装备战技指标中,R&M 指标与性能指标同等重要;在系统工程管理中,R&M 工作是其重要的组成部分。

(1) 可靠性、维修性是反映产品质量的重要特性。产品质量是由顾客的需求决定,由设计产生,经生产形成,在使用中实现。传统的质量观念强调产品“符合规定的要求”,即“符合性”。产品只要符合生产图纸和工艺规定的要求,就是好的。当代质量观念既重视产品的符合性要求,更强调产品的“适用性”要求,也就是说,产品只有在使用时能成功地适合用户需要才是高质量的。用户的需要是多方面的,因此,产品质量是产品满足规定或潜在需要的特性的总和。这些特性包括性能、可靠性、维修性、安全性、保障性、经济性等。一个好的装备不仅要具备所需要的性能(固有能力),而且能长期保持这种性能,使用中无故障或少故障;发生故障则好修理,使功能迅速得到恢复,还要使用安全、易于保障等。

由于历史的原因,在相当长的一段时间内,我们只注重装备的性能,而忽视了 R&M。树立当代质量观念就必须把 R&M 视为与性能同等重要的特性,在设计、研制装备时,必须提出这方面的定性、定量要求,并把这些要求和性能一样纳入装备的战术技术指标之中。

(2) 可靠性、维修性是制约装备费效比的重要因素。近 40 年来,人们由重视性能转变为重视效能,由重视一次性的采购费用转变为重视寿命周期费用,注重寿命周期费用分析和费用—效能分析。

装备的系统效能是系统在规定的条件下满足给定定量特征和服务要求的能力。效能是性能、R&M 等特性的函数。一方面,提高装备的 R&M 就可以提高装备的效能。装备的故障少了,即使出现故障又能尽快修复,又有较强的适应能力和好的保障条件,其固有能力就可以得到充分的发挥。另一方面,提高装备的 R&M 可以降低寿命周期费用。统计表明,在产品从论证、研制直到使用、报废的全过程中,由于质量缺陷带来的经济损失和消耗是以数量级的变化而增大的。缺乏 R&M 设计的产品,尽管其研制初期可能投入较少的费用,但是产品研制后期费用以至整个使用阶段的维修保障费用将大大增加。大量事实证明,由于可靠性及维修性差,会造成花费大量资金研制生产出来的装备交付部队后,其可用性低,维修保障费用高,甚至长期不能形成战斗力。

当然,随着高科技发展和装备日益复杂化,装备研制费用和寿命周期费用是逐步增加的。

采用 R&M 技术研制的装备一般来说需要有更大的早期经费投入,但是这种投入和由于装备复杂化引起的寿命周期费用的增长换来的是装备效能的更大增长,在总体上,仍然会促使装备费效比的提高。

应当看到,装备效能是装备性能、可靠性、维修性等特性的综合反映,而这些特性之间又常常相互渗透、相互关联。为了取得最佳的费效比,各种特性指标需要进行综合权衡,这里既包括性能、可靠性、维修性等特性要求之间的权衡,也包括各种特性与研制费用和时间进度之间的权衡。

(3) 可靠性、维修性是提高装备战斗力的重要途径。一手抓新型武器装备发展,一手抓现有武器装备管理,是提高装备战斗力的重要途径。装备的性能优异,只是具备了理论上的战斗力。这种优越性能要转化为现实战斗力,首先要求飞机能按要求出动、能按要求抵达战区、能按要求投入战斗,否则其优越性能只能是空谈。提高可靠性、维修性,可以提高战备完好率、任务成功率以及出动强度和持续出动能力,使装备优越性能最大限度地转化为现实战斗力。

国内外的装备发展实践也证明,对现役装备进行改造,是快速提高装备战斗力的有效方法。为了完成军委赋予空军的历史使命,空军高性能航空装备必须保持一定规模。而装备的实际规模——实际可用装备的数量与可靠性、维修性密切相关。通过提高可靠性、维修性来提高完好率,是扩大和保持装备实际规模的首要选择。比如,完成某战役,预计需要作战飞机 1200 架,考虑到飞机完好率只有 60%,则必须有 2000 架飞机的规模,如果完好率能提高到 90%,则只需要 1340 架飞机就足够了。

我国现役装备普遍可靠性水平低、寿命短、维修频繁、战备完好性差,难以形成战斗力,与国外有较大差距。在短期内不能实现更新换代的条件下,对现役装备进行 R&M 改进是提高战斗力和降低寿命周期费用的一种行之有效的捷径。

1.1.2 可靠性、维修性的作用

在现代装备的设计中,R&M 已成为与性能同等重要的设计要求,并对装备的作战能力、生存力、部署机动性、维修人力和使用保障费用产生重要的影响。装备良好的可靠性、维修性作用具体表现在以下几方面。

(1) 提高武器装备的作战能力。提高装备的可靠性可以减少装备发生故障的次数;提高装备的战备完好率或增加出动率,能保证装备连续出动的能力,同时还将提高装备持续作战和完成任务的能力,从而提高了装备的作战能力;改进维修性,减少装备在地面维护和修理的停机时间以及装备再次出动的时间,能提高装备的出动率,同时还可减少装备战场修理时间,提高装备再次投入作战的能力。例如,F-15A 战斗机由于可靠性差、维修困难而且缺少备件,其战备完好率长期保持在 50% 左右。经过改型的 F-15E 战斗机,由于显著地提高了可靠性、维修性及测试性,在海湾战争中的战备完好率高达 95.5%,其连续作战能力几乎提高近一倍。因此,故障多、维修困难的装备,其性能再好也是没有战斗力的。F-111 是美国高性能的战斗轰炸机,1986 年美国空袭利比亚时,24 架 F-111 战斗轰炸机从英国基地起飞,其中 6 架飞机因电连接器故障等原因而空中返航,到达目标后又有 5 架因火控系统故障而未能投弹轰炸,近一半飞机未能完成规定任务。

(2) 增强装备的生存力。采用先进的可靠性、维修性设计技术和减少对那些在战争中易受摧毁的地面固定设施的依赖是增强装备生存力的重要途径之一。采用冗余及容错、可达性、模块化及互换性等可靠性、维修性设计技术,采用对装备安全起关键作用的系统或设备在发生