

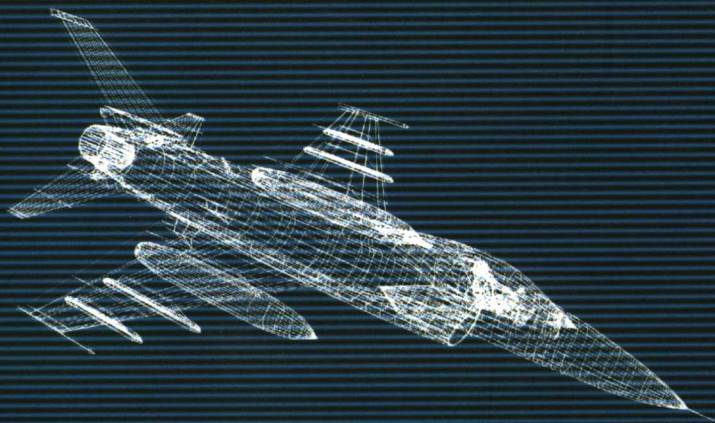
航空宇航科学与技术



国
防
科
工
委
『
十
五
』
规
划
教
材

飞行器可靠性工程

● 宋笔锋 等编著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·航空宇航科学与技术

飞行器可靠性工程

宋笔锋 冯蕴雯 刘晓东 编著
戚燕杰 吉国明



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书是编者在大量的教学与科研实践中不断摸索、总结编写而成的。全书共分10章,内容包括可靠性、维修性与保障性的基本概念,可靠性分析的定性化方法,可靠性建模、预计与分配,复杂系统可靠性分析的失效树方法,可靠性与维修性分析的数字仿真方法,维修性建模、分配与预计,以可靠性为中心的维修理论简介,保障性基础与应用,可靠性增长原理与应用,结构可靠性分析基础。

本书可作为高等学校航空飞行器设计专业本科生的教材,也可供该专业研究生和从事飞行器设计工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞行器可靠性工程/宋笔锋等编著. —西安:西北工业大学出版社,2006.11
国防科工委“十五”规划教材·航空宇航科学与技术
ISBN 7-5612-2157-6

I. 飞… II. 宋… III. 飞行器—可靠性工程—高等学校—教材 IV. V417

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 135586 号

飞行器可靠性工程

宋笔锋,冯蕴雯,刘晓东,戚燕杰,吉国明 编著

责任编辑 张近乐 雷 军

责任校对 曹 锦

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

发行部电话:029-88493844 88491757

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:15.25 插页:1 字数:325 千字

2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

ISBN 7-5612-2157-6

定价:24.00 元(平装) 39.00 元(精装)

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技



新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提



升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

可靠性分析与设计方法是飞行器设计的现代方法之一,同时,可靠性、维修性与保障性又是密不可分、互为补充的,是提高飞行器适用性和有效性的有力手段。

在现代飞行器设计中,随着可靠性、维修性与保障性越来越受到重视,这方面的技术人才,特别是在飞行器设计原理基础上的可靠性、维修性与保障性领域内的专门人才愈来愈缺乏。因此,许多高校在本科生和研究生中开设了专门的课程,而编制一本基础性的教材就显得极为迫切。

本教材的编写有以下几个特点:①强调原理和方法,目的是让学生掌握该方面的基本概念和基础知识,以便使他们在工作中能够掌握并灵活应用。②在充分重视传统内容和知识的基础上,注意吸收已成熟的新的理论和方法。例如第四章中的“失效树分析的矩阵化方法”一节,第五章、第七章、第九章中的“改进的简单指数模型”一节及第十章的部分内容等。③注意在教学中的连贯性。在目前设有航空宇航学科的高等学校中,除少数学校培养专门的可靠性、维修性与保障性方面的管理和技术人才外,一般都是在相应的专业或者学科基础上开设可靠性课程。这样做的好处是在相关专业学习的基础上掌握可靠性、维修性与保障性的基本理论和方法,便于学生在以后的工作和研究中结合具体对象,易于深入。因此,虽然培养的基本方式是在本科生和研究生中均开设该课程,但内容和要求不一样。本教材的编写正是考虑到了这一点。在本科生教学中可选用该教材中较为基础的内容,而在研究生教学中可选用深入一些的内容。

本教材也是编者在大量的教学实践中不断摸索、总结编写出来的,有一定的针对性。

参加本教材编写工作的人员有:宋笔锋(第一章的大部分、第五章、第



九章和第四章的部分内容)、冯蕴雯(第十章)、刘晓东及戚燕杰(第六、七、八章)、吉国明(第二、三章和第一、四章中的部分内容)。全书由宋笔锋主编。

本教材除可作为本科生和研究生的教材外,还可供从事该方面研究的工程技术人员参考。

由于编者水平有限,错误之处在所难免,望读者批评指正。

编著者

2006年3月

目 录

第一章 可靠性、维修性与保障性的基本概念	1
1.1 国内外发展现状及趋势	1
1.2 可靠性、维修性和保障性与产品的有效性	2
1.3 基本术语及定义	7
1.4 产品固有可用度及使用可用度的数学描述	21
1.5 可靠性及维修性中常用的统计分布	22
习题与思考题	28
第二章 可靠性分析的定性化方法	30
2.1 概述	30
2.2 故障模式影响及危害性分析(FMECA)	30
习题与思考题	47
第三章 可靠性建模、预计与分配	49
3.1 概述	49
3.2 可靠性模型的种类	49
3.3 建立可靠性模型的程序	54
3.4 可靠性预计	63
3.5 可靠性分配	69
习题与思考题	75
第四章 复杂系统可靠性分析的失效树方法	77
4.1 概述	77
4.2 建立失效树的基本过程	77
4.3 失效树的定性分析	83
4.4 失效树的定量分析	88
4.5 失效树分析的矩阵化方法	93
习题与思考题	97
第五章 可靠性与维修性分析的数字仿真方法	98
5.1 概述	98
5.2 基于可靠性框图的数字仿真方法的基本模型	98
5.3 伪随机数及随机变量产生原理	101
5.4 可靠性与维修性指标计算方法	106
5.5 一种可靠性与维修性分析的数字仿真软件系统介绍	107



习题与思考题	112
第六章 维修性建模、分配与预计	113
6.1 概述	113
6.2 维修性模型分类	113
6.3 维修性分配	120
6.4 维修性预计	129
习题与思考题	137
第七章 以可靠性为中心的维修(RCM)理论简介	139
7.1 RCM 的基本概念、目的和发展	139
7.2 RCM 的基本原理	142
7.3 RCM 分析的一般步骤与方法	158
习题与思考题	161
第八章 保障性基础与应用	162
8.1 概述	162
8.2 保障性要求的确定	164
8.3 保障性分析	166
8.4 装备的保障性设计	170
8.5 保障系统设计	172
8.6 保障性评估	178
习题与思考题	179
第九章 可靠性增长原理与应用	180
9.1 概述	180
9.2 可靠性增长的趋势检验	181
9.3 时间函数模型原理	183
9.4 改进的简单指数模型	190
9.5 算例与分析	195
习题与思考题	197
第十章 结构、机构可靠性分析基础	199
10.1 概述	199
10.2 结构可靠性分析方法概述	200
10.3 机构可靠性分析方法	228
习题与思考题	230
参考文献	231

第一章 可靠性、维修性与保障性的基本概念

1.1 国内外发展现状及趋势

一、初期发展阶段(20世纪30~40年代)

可靠性问题首先是从军用航空电子设备开始的。第二次世界大战期间,由于使用了雷达、飞航式导弹等较复杂的新式武器,而这些武器的核心——电子设备则屡出故障,严重影响了部队的战斗力,从而引起了军方和舆论界对武器装备可靠性的重视。例如:美国空军由于飞行故障事故而损失的飞机达21 000架,比被敌方击落的多1.5倍;运往远东的机载电子设备中有60%在运输中失效;海军舰艇电子设备有70%因“意外”事故而失效。

可靠性问题最早由美国军用航空部门提出。1939年,美国航空委员会出版的《适航性统计学注释》一书中,首次提出飞机故障率不应超过0.000 01次/h,相当于一小时内飞机的可靠度 $R_s = 0.999\ 99$,可以认为这是最早的飞机安全性和可靠性定量指标。

第二次世界大战末期,德国火箭专家首先把V—II火箭诱导装置作为串联系统,利用概率乘法,求出其可靠度为75%,这是第一次定量计算一个复杂系统的可靠度。

二、中期发展阶段(20世纪50~60年代)

第二次世界大战结束后,工程技术人员和数学家们运用概率论与数理统计知识对产品的可靠性问题进行了大量的定性和定量研究。美国先后研制出F—111A和F—15A战斗机、M1坦克、“民兵”导弹、“水星”和“阿波罗”宇宙飞船等装备,这些新一代装备对可靠性提出了严格要求。

日本于1952年从美国引进可靠性技术,1958年成立了可靠性研究委员会。日本的可靠性工作虽然开展较晚,但主要注重民用产品的可靠性研究,强调实用,从而促进了机电产品可靠性水平的提高,带来了巨大的经济效益和社会效益。所以,日本的汽车、工程机械、发电设备、彩电、复印机、电冰箱、照相机等产品才会风靡全球。

我国从20世纪60年代起,首先在电子工业和国防部门开始进行可靠性研究和普及工作,继而在机械工业等其他部门也逐渐推广应用。现在,已建立了相应的可靠性组织。

进入20世纪60年代后,在工业发达国家,由于产品的复杂化和工作环境的严酷化,对产品的可靠性要求越来越高。可靠性研究工作从电子产品扩展到结构、机构等机械产品。可靠性



工程技术和管埋不仅在航空、航天、尖端武器和电子等行业得到广泛的应用,而且逐步推广到许多工业部门,如核工业、机械、电气、冶金、化工、铁道、船舶、电站设备、建筑、食品加工、通信、医疗设备、石油平台等。

三、发展国际化阶段(20世纪70年代以后)

1965年,国际电子技术委员会(IEC)可靠性技术委员会(TC—56)的成立标志着可靠性工程成为一门国际化技术。在这一阶段,可靠性理论研究从数理基础发展到失效机理研究;形成了可靠性试验方法及数据处理方法;重视机械系统的研究及维修性的研究;建立了可靠性管理机构,颁布了一批可靠性标准。在我国,1987年5月,国务院、中央军委颁发了《军工产品质量管理条例》,明确了在军工产品研制中要运用可靠性技术;1987年12月和1988年3月先后颁发的国家军用标准《装备维修性通用规范》(GJB368—87)和《装备研制与生产的可靠性通用大纲》(GJB450—88),可以说是目前我国军工产品可靠性技术具有代表性的基础标准。

1980年以后,可靠性工程向着更深、更广的方向发展。从元件的可靠性研究发展到了系统的可靠性研究,形成了以FMEA,FMEDA,FTA和框图法等为标志的一套较完整的系统可靠性分析与设计理论和方法,并且有大型的工具软件,如Relisoft和Blocksim等。同时,人们开始研究大型机电产品的可靠性分析与增长理论和方法、软件可靠性与维修性分析与设计理论和方法等深层次的问题。

进入21世纪以后,与产品可靠性相关的产品维修性、测试性和综合保障技术也越来越受到重视并得到发展。出现了以可靠性为核心的维修理论(RCM);可分别对飞行器电气系统和非电系统进行状态监控和检测的BIT及HAMP系统;以保证战斗力、降低成本和提高营运效益为目标的军(民)用飞行器的综合保障技术、飞行器的远程健康监控技术等。

由于提高产品的可靠性和降低产品的使用成本是人类永恒的追求,因此,有理由相信,飞行器的可靠性、维修性与保障性将会不断得到新的发展。

1.2 可靠性、维修性和保障性与产品的有效性

现代飞机设计中所涉及的主要概念及关系如图1-1所示。

一、飞机的可用性(Availability)

可靠性(Reliability):指系统在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。它是系统的设计特性,主要考虑在平时的自然环境下可能出现的故障的影响,用于度量系统无须保障的工作能力,其概率度量为可靠度。常用的可靠性指标有平均无故障工作时间(MTBF或MTTF),即指在规定的条件与时间内,系统的寿命单位总数与故障总次数之比。对于飞机系统还可用平均故障间隔飞行小时(MFHF)来表示。

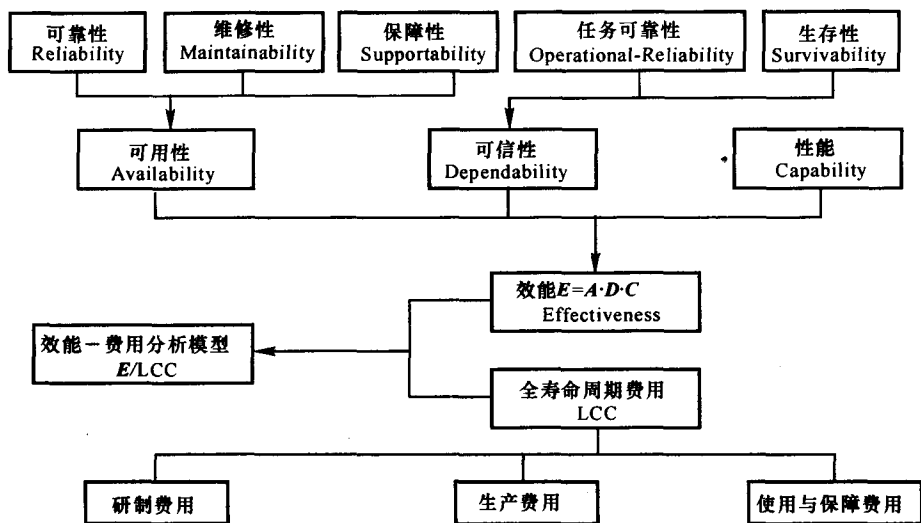


图 1-1 现代飞机设计所涉及的主要概念及关系图

维修性 (Maintainability):指系统在规定的条件下和规定的时间内,按规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复其规定状态的能力。维修性是可靠性的重要补充,指的是系统维修的难易程度,是设计决定的质量特性,其概率度量量为维修度。常用的维修性指标有平均修复时间 (MTTR),即使系统由故障状态修复到具有完成规定功能状态所需时间的平均值,以及每飞行小时维修工时 (MMH/FH) 和维修工时率 (M_1)。

保障性 (Supportability):指系统的设计特性和计划的保障资源满足平时和战时使用要求的能力。保障性包含了两个不同性质的内容,即设计特性和保障资源。这里的设计特性是指与保障有关的设计特性,如与可靠性和维修性等有关的,以及保障资源要求系统所具有的设计特性。而保障资源本身并非设计特性,它是保证系统平时和战时使用的人力和物力。因此,保障性可以说是可靠性、维修性和保障条件的函数。由于装备各不相同,保障性的度量比较复杂,主要有保障性资源参数、保障性设计参数和保障性综合参数三种。每种参数可用许多指标衡量,其中对飞机武器系统较常用的使用参数有再次出动准备时间 (TAT) 和平均后勤延误时间 (MLDT)。

可用性 (Availability):指系统在任一随机时刻需要和开始执行任务时,处于可工作或可使用状态的程度。它是将飞机系统 R&M&S (即可靠性、维修性、保障性) 特性变换成有效性时的一个综合参数。它表征了系统的这样一个特性,即在规定的条件下,需要的时候,系统是否可用,亦即系统在任一时刻投入战斗的能力,是影响系统作战能力的主要特征,其概率度量称为可用度。可用度可分为:瞬时可用度、平均可用度和稳态可用度。其中稳态可用度主要有以下几个:



固有可用度,计算式为

$$A_1 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1-1)$$

使用可用度,计算式为

$$A_0 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MLDT} \quad (1-2)$$

此外,常用的还有出动架次率(SGR)和任务成功率(MCR)等。

如果从飞机系统的整个服役期着眼,单纯可靠性设计是不完善的,必须同时考虑其维修特性和保障特性。维修性是可靠性必需的重要补充,而保障性则通过与可靠性、维修性的综合,保证了飞机系统的设计特性与现有的或要求的保障资源完美地结合起来。三者相辅相成,使飞机系统的可用性与战备完好性能达到最佳状态。从使用可用度的计算式(1-2)也不难看出,可用性是影响系统作战能力的主要特性,它把系统的可靠性、维修性和保障性综合起来了。它是确定系统R&M&S参数,并对这些参数进行权衡分析的重要依据。图1-2给出了TAT,MTTR,MTBF与SGR的关系曲线,从中不难看出,当提高了可靠性(MTBF升高)、维修性(MTTR的降低)和保障性(TAT的降低)时,飞机的出动架次率(SGR)显著提高。

二、飞机的可信性(Dependability)

1. 任务可靠性

任务可靠性(Operational Reliability)是指系统在规定的任务剖面内完成规定功能的能力。它反映了系统对任务成功性的要求,是在平时的自然环境中 and 战时的敌对环境中,不考虑人为敌对因素的情况下,系统完成任务的能力。它仅考虑能够导致任务失败的故障,其概率度量为任务可靠度(MR),常用的还有任务中断率(BR)等。

2. 生存性

生存性(Survivability)是指飞机系统避开或承受人为敌对环境的能力。具体地说,就是飞机在人为敌对环境下作战时能避免被敌方发现,或虽然被敌方发现但能避开其攻击,或虽然受到攻击并被击中但能承受这一打击并保持一定飞行状态的能力。生存性又包括敏感性和易损性两个主要概念,前者是系统不能避免被敌方发现或击中的可能性,后者是系统被击中后不能承受该击中而被杀伤的可能性。经常所说的隐身问题就是敏感性中的一个关键问题。相比较而言,目前对易损性的重视还不够。但要达到完全的隐身是非常困难的,代价也是非常大的,而对易损性的减缩同样能增强飞机系统的生存能

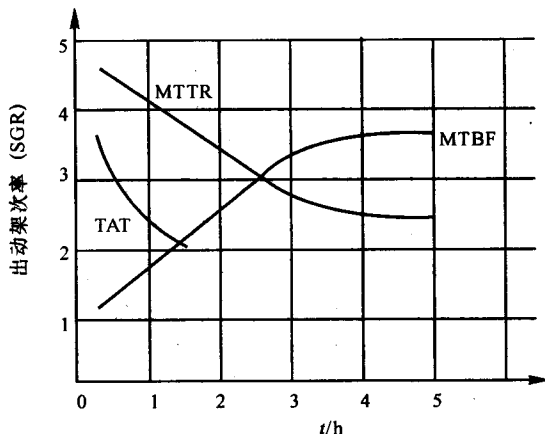


图 1-2 TAT,MTTR,MTBF 与 SGR 的关系曲线



力。在海湾战争中,美国空军飞机共出动了3 020架次,有38架战伤严重的飞机飞回基地,其中有4架F/A—18和3架A—10是直接被导弹命中的,这是单纯的敏感性减缩无法实现的。因此,应从生存性的角度对敏感性和易损性加以全面的综合考虑。生存性的概率度量称为生存力(P_s),常用的还有易损面积(A_v),等等。

3. 可信性

可信性(Dependability)是在整个任务期间,飞机系统持续工作的能力。它综合了飞机的生存性及任务可靠性,是反映系统实战能力的重要特性。前述飞机的可用性是指在纯自然环境中(无人敌对威胁)正常使用时,飞机处于可执行任务状态的能力,它评估的是系统的质量特性及设计特性。而可信性则是指系统在执行作战任务时,在自然环境并受到人为的敌对威胁时,其执行各项功能的能力。可信性好坏直接受到飞机生存性及其任务可靠性的影响,是两者的函数,其概率度量是可信度。

三、能力

能力(General Definition)是指在整个任务期间,如果设备正常工作,成功完成任务的能力。能力是指飞机在自然使用环境及敌对环境下均正常连续工作时,飞机能否完成任务(如摧毁目标),它给出的是理想任务状态下可能的结果,代表系统纯粹的作战能力,它受系统的机动性、武器的精度、作用距离、杀伤力及其他设备的性能影响。

四、有效性

飞机系统的有效性(Effectiveness)是其可用性、可信性及性能的综合反映,它是系统实战能力的最终量度。飞机系统的有效性可写为

$$E = ADC$$

式中, E 为系统有效性; A 为系统可用度在任务开始时的矢量矩阵,且 $A = \{a_i, i = 1, 2, \dots, n\}$, a_i 为任务开始时系统处于 i 状态的概率, n 为系统可能的状态数; $D = \{d_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n\}$ 为系统可信度在某一时间间隔内的条件概率矩阵, d_{ij} 为系统在任务开始时处于 i 状态,在预期的时间间隔内处于 j 状态的概率; $C = \{c_j, j = 1, 2, \dots, n\}$ 为性能,即系统在给定的状态下完成任务要求的概率矩阵, c_j 为系统处于 j 状态时满足任务要求的概率。

如前所述,飞机的可用性、可信性及能力是在作战任务的不同环境及不同时期中起作用的,三者是互相依托的。若可用性不高,则在任务初期就只有很低的出动架次率,那么成功完成任务的可能性显然就很小。类似地,可用性高但可信性不高或者可用性、可信性均高而能力不高等都会对任务的完成有很大的影响。

1. 可用性对有效性的影响

可用性是影响系统有效性的主要因素。它保证了己方随时具备足够战斗力(飞机数),并在此基础上取得应有的战果。图1-2就有效地说明了这一点;图1-3更直接地从累积击毁目标数



与 TAT, MTTR, MTBF 的关系曲线反映出这一关系。由图 1-3 可见, 随可靠性、维修性及保障性的提高 (MTBF 升高, TAT 与 MTTR 降低), 累积击毁目标数显著提高。

2. 可信性对有效性的影响

飞机的可信性 (即生存性与任务可靠性) 也是影响系统效能的主要因素。因为飞机先于目标被击毁或中断任务, 不能完成战斗任务, 当然不会是有效的武器系统。而且, 如果飞机在完成任务后能安全返航, 从而直接或经修理后执行下一任务, 对战斗力的保持是很关键的。图 1-4 给出了在有无战伤修理和是否考虑生存性设计的情况下, 72 架飞机经 10 天战斗后的可作战飞机数。从图中也可以看出, 损失率由 2% 降到 1%, 可用飞机数将增加 1.3 倍。

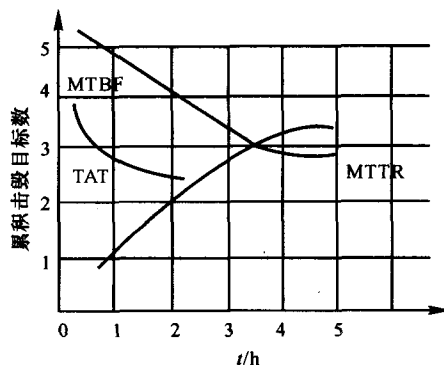


图 1-3 可用性与效能关系曲线

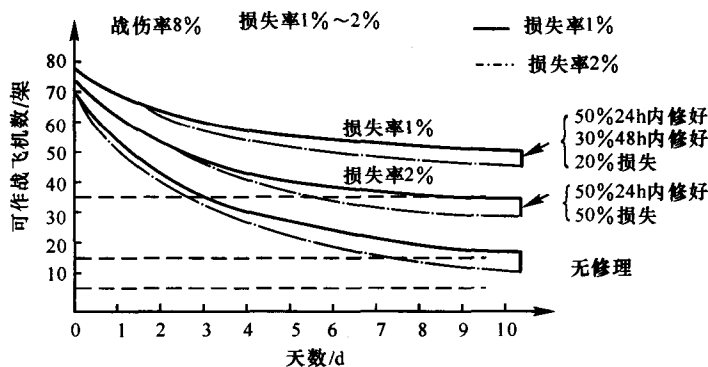


图 1-4 可信性与有效性关系曲线

3. 能力对有效性的影响

能力对有效性有最直接的影响。能力直接决定了能否完成作战任务, 如果可用性与可信性均较高但能力不好, 那么作战飞行无疑就成了战地旅游。

五、全寿命周期费用 (LCC)

费用问题是飞机设计的一个很重要的因素。随着设计技术与设计要求的提高, 各项费用均大幅度提高。费用或者说飞机系统的全寿命周期费用是指在系统的寿命周期内为系统的论证、研制、生产、使用与保障直到退役所付出的一切费用之和。由于论证与退役费用所占比例很小, 在效费分析时可以略去不计, 这里主要介绍研制费用、生产费用、使用与保障费用。