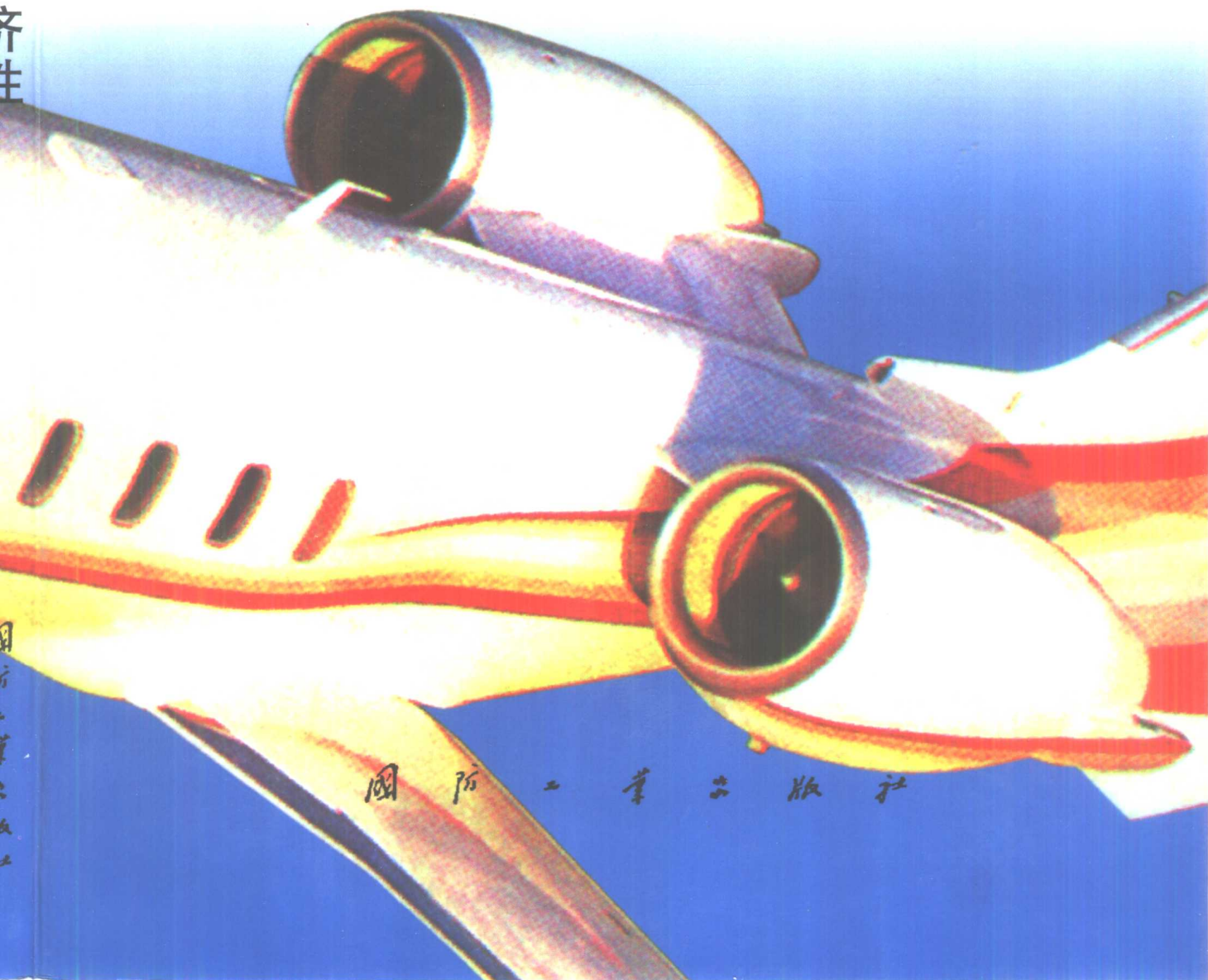


航空发动机可靠性和经济性

HANGKONG FADONGJI
KEKAOXING HE JINGJIXING

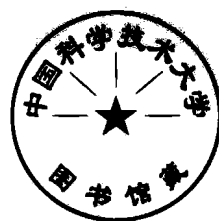
张宝诚 刘孝安 编著 杨世杰 主审



国防工业出版社

航空发动机可靠性和经济性

张宝诚 刘孝安 编著
杨世杰 主审



机械工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机可靠性和经济性/张宝诚,刘孝安编著. —北京:国防工业出版社,1998.4

ISBN 7-118-01837-6

I. 航… II. ①张… ②刘… III. ①航空发动机-可靠性-研究②航空发动机-经济效果-研究 IV. V231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 23454 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)

河北三河市腾飞胶印厂

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 22½ 519 千字

1998 年 4 月第 1 版 1998 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:33.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

提高推重比一直是发展航空发动机的主要关键。70年代中期F100发动机的推重比已达到8。推重比的提高是通过改善气动性能、采用高强度材料及降低构件许用工作应力裕度来实现的。但是,这些提高推重比的措施使航空发动机更容易发生结构故障。

提高材料强度或降低工作应力裕度,都会提高构件工作应力水平。而且当两条措施同时采用时,就有提高工作应力水平的综合效果。由于应力水平比过去高,使构件对设计误差、材质的内部缺陷、发动机使用条件的变化及制造公差更加敏感。因此,在发动机投入使用前,要求设计更完善、技术更先进,消除发生一切潜在事故的条件。此外,由于使用高叶尖速度、高温、高压来提高发动机性能,使现代发动机比以前发动机有更多的部件受到寿命的限制。因此,现代航空发动机的研究应该比过去的发动机研究更加注意结构完整性及寿命验证试验。这便是性能、可靠性、耐久性和维修性综合考虑的背景。

80年代初,我国开始了解和消化国外航空发动机可靠性及经济性的研究成果,逐步转变单纯追求性能和忽视可靠性的设计思想,逐步树立进行可靠性设计、质量控制和寿命管理的新观念,充分认识了高可靠性和高维修性对提高发动机效能和降低寿命期成本的重要作用。在国内、外市场上,发动机的可靠性和维修性水平已成为质量竞争的主要指标之一。在下一个世纪初期,航空发动机的推重比将要达到15~20,其应力水平继续向更高水平发展,因此,必须研究更完善的结构设计方法,有效地提高发动机可靠性、减少风险和降低寿命期成本。

作者根据多年从事发动机设计、试验和教学实践,试图通过本书反映国内、外在发动机可靠性设计方面的主要研究成果,供发动机研究、设计人员参考。本书编写立足于工程应用,突出材料新和论述简明,使读者能较清楚地掌握发动机可靠性和经济性的内涵。

本书重点地论述了可靠性基本概念;评定航空发动机可靠性的主要技术指标;发动机通用规范中对可靠性和维修性要求;较详细论述发动机可靠性研究的主要方法、结构可靠性设计的主要问题、断裂关键件定寿原理、损伤容限设计基本概念、主要部件寿命预测方法;在论述发动机可靠性试验中,引述了国外的新型试验设备和加速任务试车方法;从实用角度着重论述提高发动机可靠性、延长寿命的主要措施,还特别论述了状态监控和数字电子控制系统的应用;在论述发动机经济性中,概述了寿命期成本模型和研制成本的估算及寿命期成本计算在发动机设计中的应用;在本书的最后一章,概述了可靠性、管理的重要性、型号研制的可靠性、管理工作要点及寿命管理中的主要技术内容。

全书共八章。第一、二、三、四和六章由张宝诚编写;第五章由王达文编写;第七、八章由刘孝安、张皖南编写。全书由张宝诚主编。编写中得到了钱基善、周世恒、王庆春、张璐莉同志的帮助,沈阳航空学院刘玉华工程师描绘了全书的图稿。

全书由中国航空工业总公司沈阳航空发动机研究所副总设计师杨世杰教授主审,对本书提出了很多指导性意见,在此深致谢意。

中国航空工业总公司发动机局张景武、秦学兴、邬子仲高级工程师对编写和出版本书给予极大支持,在此衷心地表示感谢。

由于水平有限,书中定会有许多不当和错误之处,敬请同行专家批评指正。作者愿以此书奉献给同行,如从本书获得一些收益,作者将感到莫大安慰。

编著者

内 容 简 介

本书围绕着航空发动机的可靠性、经济性,概述了可靠性基本概念、评定航空发动机可靠性的主要技术指标;较详细论述发动机可靠性研究的主要方法、结构可靠性设计和寿命预测、可靠性试验及新设备;重点阐述提高发动机可靠性的主要措施。书中还概述了发动机寿命期成本模型、研制成本的计算、可靠性管理及型号管理工作要点等。本书综合了大量国内、外航空发动机可靠性研究的文献资料,涉及到发动机预研、工程设计、试验和分析预测、材料选择和验收试车等各个阶段及多方面技术问题。

本书较适用于从事航空发动机研制、设计、生产、维护和管理等工程技术人员使用,也可供从事飞机、航天飞行器、地面燃气轮机、火箭发动机工程技术人员、高等学校发动机专业教师和高年级学生、研究生参考。

目 录

第一章 可靠性的基本概念	1
§ 1-1 可靠性的定义和实质	1
§ 1-2 质量、可靠性和安全性的相互关系	4
§ 1-3 常用术语	5
一、客体的分类	5
二、状态和事件	6
三、产品的性质	8
§ 1-4 可靠性分析中常用的概率分布	9
§ 1-5 可靠性的数量指标	13
一、用时间计量的指标	13
二、用概率计量的指标	14
三、用单位时间比率计量的参数	16
四、耐久性的常用数量指标	18
§ 1-6 可靠性统计及参数估计	19
一、可靠性统计	19
二、参数估计	21
第二章 航空发动机的可靠性	27
§ 2-1 航空发动机的现状与发展	27
一、航空发动机的现状及发展趋势	27
二、通用技术的发展	33
三、结构强度学科的应用	35
§ 2-2 航空发动机结构完整性	37
一、提出背景	37
二、结构完整性大纲的内容	38
三、结构完整性大纲的特点	39
四、实施结构完整性大纲的效果	40
§ 2-3 航空发动机的可靠性指标	41
一、确定可靠性指标的原则	41
二、可靠性目标值的确定	42
三、主要评定指标	44
四、典型发动机可靠性指标实例	45
§ 2-4 航空发动机可靠性参数分析	47
一、优先参数选择	47
二、参数的相关性分析	48
§ 2-5 计算和分析可靠性的基本方法	50

一、概述	50
二、结构图示法	51
三、逻辑图示法	58
四、复杂多功能系统可靠性计算	62
§ 2-6 航空发动机通用规范中有关可靠性和维修性的论述	65
一、概述	65
二、通用规范中对可靠性和维修性的论述	66
第三章 航空发动机可靠性研究的主要方法	69
§ 3-1 可靠性研究的必要性	69
§ 3-2 制定发动机可靠性研究计划	70
一、可靠性计划的任务	70
二、任务说明	71
三、计划中强调可靠性设计到产品	77
§ 3-3 采用置信度下限评估程序分析发动机可靠性	78
一、可靠性置信下限(LCL)方法说明	78
二、NALDA(海军航空后勤数据分析)	79
三、置信度下限计算程序说明	81
四、LOTUS 数据的整理与分析	83
五、数据分析	85
六、结论	87
§ 3-4 研究和确定航空发动机的设计用法	91
一、设计使用寿命和设计用法的简要说明	91
二、航空发动机设计任务循环演变分析	91
三、研究和确定航空发动机的设计用法	94
四、外部作用力与国内外设计任务循环统计	96
§ 3-5 FADEC 的研究和进展	97
一、改善发动机控制可靠性的解析冗余技术(ARTERI)	97
二、FADEC 的技术进展	108
第四章 航空发动机结构可靠性设计及寿命预测	115
§ 4-1 航空发动机结构可靠性设计的主要问题	115
一、结构可靠性设计的指导文件	115
二、设计准则	116
三、主要设计工作	118
四、主要设计理论	119
§ 4-2 航空发动机断裂关键件定寿原理	122
一、定寿原理	122
二、影响安全定寿方法安全性的附加因素	127
三、损伤算法和任务换算法	128
§ 4-3 损伤容限设计方法	130
一、基本概念	131
二、失效准则	132
三、分析方法	133

四、损伤容限控制计划和试验要求	139
五、损伤容限设计法的现实意义	140
§ 4-4 损伤容限设计中的影响参数	142
一、主要影响因素和参数	142
二、温度与应力分析的作用	145
§ 4-5 航空发动机热端部件材料的疲劳寿命预测模型	149
一、各向同性材料的模型	150
二、各向异性材料的模型	156
§ 4-6 热疲劳和蠕变条件下裂纹起始的预测	158
一、概述	158
二、试验方法	159
三、本构方程和寿命预测	160
§ 4-7 发动机隔热涂层的寿命预测	162
一、涂层失效机理	163
二、寿命预估模型	163
三、设计用寿命模型	164
§ 4-8 轮盘寿命预测	166
一、轮盘寿命分析	166
二、影响因素	167
§ 4-9 视情损伤容限方法	169
一、视情损伤容限方法的导出	169
二、叶片设计	171
三、故障分析	172
四、调查研究结果	173
§ 4-10 燃烧室的结构分析技术	175
一、结构分析模型	175
二、寿命预测	178
三、火焰筒壁温的计算	179
第五章 航空发动机可靠性试验	185
§ 5-1 可靠性试验概述	185
§ 5-2 结构完整性大纲中的试验	185
§ 5-3 典型的可靠性试验	188
一、飞行前规定试验	188
二、低循环疲劳试验	191
三、发动机环境和吞咽试验	194
四、发动机振动测量	197
五、地坑式轮盘旋转试验器	203
六、机匣静强度试验	205
七、主轴的疲劳试验及典型试验器	209
八、叶片静频和动频的测量	213
九、发动机机动载荷模拟器	215
§ 5-4 发动机加速任务试验	217

一、基本概念及由来	217
二、加速任务试车循环的确定	219
三、典型加速任务试验循环的制订和举例	222
四、提高加速任务试车可靠性的途径	225
第六章 提高航空发动机可靠性和寿命的主要措施	228
§ 6-1 影响航空发动机可靠性和寿命的主要因素	228
一、概述	228
二、应用“指数项”或“非计划换发率”分析发动机的可靠性	228
三、分析故障模式确定影响寿命的因素	232
四、影响寿命、可靠性的固有因素	234
五、影响发动机寿命和可靠性的外界因素	239
§ 6-2 提高航空发动机可靠性的综合措施	247
一、一体化研制发展方法	247
二、采用先进分析技术,提高设计水平	250
三、充分地结构完整性试验	251
四、强化影响发动机可靠性的关键部件的研究和控制	254
§ 6-3 通过状态监控和故障诊断延长发动机寿命	256
一、状态监控和故障诊断的作用	256
二、监控和诊断系统的组成	258
§ 6-4 通过材料的改进延长发动机寿命	267
一、航空发动机材料发展现状	267
二、适应于高性能发动机的新材料	272
§ 6-5 提高航空发动机耐久性的新结构设计	275
一、采用先进的冷却技术	275
二、采用热障涂层延长寿命	281
三、采用先进结构提高耐久性	282
§ 6-6 数字式电子控制系统的应用	285
一、电子控制系统分类	285
二、典型数字式电子控制系统	286
三、控制系统的改进与发展	289
§ 6-7 提高轴承寿命的技术措施	291
一、影响轴承寿命的主要因素	291
二、提高轴承寿命的主要技术措施	293
第七章 航空发动机经济性分析	300
§ 7-1 航空发动机寿命期成本模型	300
一、概述	300
二、发动机寿命期成本分析的应用	302
三、系统决策寿命期成本分析模型	303
四、TOA 模型用于发动机各项成本单元估算	306
§ 7-2 航空发动机研制成本的估算	312
一、研制成本	312
二、发动机研制经费估算方法	312

三、发动机研制经费占飞机总研制经费百分比计算法	315
§ 7-3 寿命期成本计算在发动机设计中的应用	316
一、使用和支援成本分析程序——OSCAP	316
二、有限寿命部件及其分析	318
三、材料和几何形状改变对 LCC 的影响	321
第八章 发动机可靠性和寿命管理	326
§ 8-1 发动机可靠性和寿命管理的主要内容	326
一、可靠性管理的主要任务	326
二、可靠性大纲管理	327
§ 8-2 型号研制的可靠性管理工作要点	329
一、设计观念的转变	329
二、可靠性设计准备工作	330
三、可靠性设计进展	333
四、进行可靠性设计评审	334
五、建立反馈系统	335
§ 8-3 发动机寿命管理	337
一、寿命管理内容	337
二、寿命管理计划	338
三、影响寿命管理的因素	342
§ 8-4 国外航空发动机核心机和验证机管理的发展	343
一、核心机发展管理的改革	343
二、验证机发展管理的改革	344
参考文献	347

第一章 可靠性的基本概念

§ 1-1 可靠性的定义和实质

可靠性是产品在规定时间内,表征特性的所有参数在规定范围内,在规定的使用、技术设备、维修、存储和运输条件下,完成规定功能的能力。

可靠性是产品的复杂性质,它与产品的用途、使用条件有关。它是由无故障性、耐久性、维修性和保持性综合组成的。

可靠性同时还是一门重要和独立的科学分支。现今,在具体的产品制造、试验和使用条件下,已经提出了一系列保证和估算某一产品可靠性的实用方法,并且日臻完善。可靠性理论作为一门科学主要是研究结构、工艺和试验等因素对产品可靠性水平的影响。对于某一具体产品和其试验条件,其可靠性具有某种相对意义。然而,无故障性和耐久性是这些性质中最重要的,因此,在许多情况下,如不专门说明,产品的无故障性和耐久性即是指可靠性。

工程产品的质量是复杂的综合性质,它取决于功能、生产工艺、使用、人类工程学、经济学、美学和其他一些由定量指标估计的性质。可靠性是产品质量的组成部分。在质量的诸性质中,可靠性占有特殊的地位,并与产品的损坏和故障出现的可能性有关。产品性质的总和被认为是质量。

无故障性、耐久性可用数量指标表示,即可靠性可用数量指标表示。但是,可靠性水平高低不能脱离时间因素和使用条件来研究。随着使用时间或连续工作时间的增加,产品无故障性水平降低,耐久性的储备量减少,在这种情况下,表示产品用途的适用性质量指标也随时间改变。

航空产品的可靠性水平由技术要求确定。这些要求的实现由一系列结构设计、制造来保证。符合规定要求的产品要进行专门的试验和定期的检验来证实产品是否符合技术要求。因此,设计、制造和试验是实现所规定的可靠性水平的重要保证。此外还要注意航空产品的安全性、工程服务的适应性及飞行器试验的经济性。

航空产品的可靠性是航空科学的一个分支,它主要研究可靠性的基本原理、方法和保证可靠性的技术措施。概率论、数理统计、强度理论、加载规律、材料学和工艺学是可靠性这门科学的理论基础;工程设计方法、构造、试验、制造和运行是航空产品可靠性的实用基础。

航空工业产品可靠性科学主要研究故障的物理原理、产生和扩展的规律性,产品运行的内部结构破坏与外部相互作用对产品工作能力的影响。它建立了各种类型产品可靠性计算的科学基础,预测故障发生的概率、详细分析故障产生原因。研究故障产生和显示其物理数学规律性,并研究产品设计、制造、试验和使用情况下保证可靠性的通用方法,以实

现所需要水平的产品可靠性的一门科学称为可靠性理论。

具体产品的可靠性水平以一系列数量指标表示。最常用的数量指标是无故障工作概率 $P(t)$ 。对整个产品、对产品的单个构件均可应用这项指标来估算产品的可靠性。

相应于产品的单个构件和部件,有时应用带故障工作时间表示产品的可靠性水平。这时,对许多产品,特别是处于故障下的复杂部件或零件,必须保持整个产品的工作能力。然而,在这种情况下,产品的经济性和精确度却被降低了。

为了方便地分析产品的可靠性水平,通常把产品分为简单产品和复杂产品。简单产品是指这些产品的所有零件和部件的功能能够形成一条连续的“链”,并且在任意零件产生故障情况下整个产品也产生故障。复杂产品是指为完成规定的功能具有一些并行的功能组件、部件和系统。在某一组件、部件或系统发生故障时,相应的并行系统仍能工作,从而保证了整个产品的工作能力不变。因此,也可称这种系统为具有变结构的系统。

简单产品和复杂产品的概念也与可靠性的物理保证和线路保证的概念有关。物理保证法特别适用于单个零件、组件和简单产品,并称之为物理可靠性法。它的应用取决于零件材料的物理化学性质、工作条件、作用载荷以及材料性能的稳定性和生产过程。

复杂产品可靠性的线路保证取决于实际条件下飞行过程中单个零件和组件存在故障情况下完成规定功能的能力,并称之为线路可靠性法。该法最适合于复杂产品设计分析阶段,用于备用方案的选择、论证。

物理可靠性法通常在复杂产品单个零件设计分析中应用,或者在简单产品制造情况下应用。复杂产品可靠性的实际水平取决于该产品的单个零件物理可靠性水平和部件、系统结构中的合理引入。换句话说,复杂产品的可靠性取决于零件、部件的物理可靠性和线路可靠性的相互匹配。

航空发动机的许多系统,如燃料供给系统、控制操纵系统、调节系统、滑油系统、空气供给系统、排气系统都是复杂产品。它们是由大量流体的、电动的和机械构件、部件组成的。如泵、开关、调节器、电磁继电器、转换开关和其它部件等。它们的可靠性水平不总是符合规定的整个系统可靠性水平。飞行中,在发动机无故障工作时间内,应保证不间断地供给燃油、空气和滑油,发动机工作参数也应该保持在规定范围。为了解决这一问题,考虑系统中的各个组件、零件的物理可靠性时,应把产品设计成在单个构件发生故障时能继续保持产品的功能。

在对各构件的物理可靠性提出偏高要求下,可以保证产品处于规定的可靠性水平。这必然导致采用复杂工装设备制造零件和带来造价高的后果,有时还要求采用专门材料和新的工艺过程。

当物理可靠性水平低时,只采用线路可靠性保证规定的可靠性水平,产品的造价就会昂贵,在产品使用中会频繁地出现零件故障。排除故障就需要消耗大量的时间和必要的备件。

在研制新航空产品中,为了提高整个产品的可靠性,应该仔细研究保证规定的可靠性水平的方法。因此,应该仔细研究已制造的零件、组件和部件所达到的物理可靠性水平、所要求的可靠性分布以及单个零件的作用载荷。在新产品设计中,要作出结构上综合考虑的方案。然后,运用计算方法确定各零件及产品的结构方案的物理可靠性及所期望的产品可靠性水平。特别是应该详细研究保证规定可靠性的结构方案及相应的备用方案,并行工作

零件或部件在单个零件发生故障时,除了能保证部件和系统的功能外,通过减少并行工作作用在它们上的载荷来建立有利的工作条件。

因此,在估算和分析复杂产品的可靠性水平时,必须识别产品自身的可靠性和产品单个零件的物理可靠性。在规定单个零件物理可靠性水平下,线路可靠性水平取决于产品线路结构组合,其最佳方案根据计算分析结果进行选择。设计师通过所采用的材料和与工艺过程有关的结构来确定零件的物理可靠性水平,并按照大量零件的试验结果和使用状态来估算产品的可靠性水平。

提高零件和部件可靠性的研究表明,通过保证材料特性的稳定性和生产过程的稳定性能够提高简单产品和复杂产品的可靠性。因此,研究零件与部件的物理可靠性、探讨保证可靠性的有效方法,对于解决实际工程装置的可靠性问题具有很大意义。

在价格低、使用性能良好情况下,具有规定可靠性的产品结构简单性是保证任意产品规定可靠性水平和零件物理可靠性与产品线路可靠性合理匹配的恰当解决问题的准则。设计师应选择最合理的方法保证整个产品达到规定的可靠性水平。一种通用方法是把产品分为若干个系统、子系统、部件、组件块,并仔细估算它们的可靠性,研究保证它们达到规定可靠性的方法。

对于产品及其复杂系统,应分析采用线路可靠性法的合理性。例如,根据必要的储备度来保证单个部件和系统能达到最佳工作状态的方法。对于简单构件及组合,应主要研究保证物理可靠性法,其中包括选择物理化学性能稳定的材料。

在应用物理可靠性方法时,发动机作为一个产品是单一链形式,它依序连接各个构件和部件。当该链的任一构件发生故障时,整个产品的工作能力完全破坏,其无故障工作概率为所有构件无故障工作概率的乘积。因此,整个产品可靠性水平永远低于其各零件中最低的可靠性水平。

作为一个例子,仔细研究推力喷管的操纵系统,其系统由三块组成(见图 1-1):

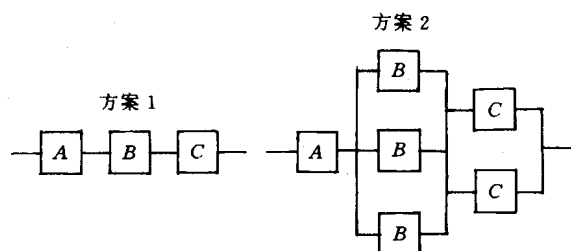


图 1-1 调节系统的不同方案

- (1) 系统发送器——A 块,调节元件位置和发动机工作状态不平衡产生工作信号;
- (2) 编程装置——B 块,按规定的算法,对比变换器信号量同相应于发动机标准工作状态的信号量;
- (3) 执行装置——C 块,调节元件控制转移。

若规定系统无故障工作概率 $P_N \geq 0.97$ 。根据产品调节系统模拟工作分析结果,若三个块的无故障工作概率值分别为

$$P_A = 0.99, \quad P_B = 0.80, \quad P_C = 0.90$$

于是根据图 1-1 所示的两种系统调节方案,其方案 1 串联系统的无故障工作概率 $P_{\text{系统}}$ 计

算为

$$P_{\text{系统1}} = P_A P_B P_C = 0.99 \times 0.80 \times 0.90 = 0.7128$$

该值低于规定值 0.97。为了提高系统可靠性,必须提高 B 块和 C 块无故障工作的水平。按方案 2 计算系统无故障工作的概率为(见第二章式(2-9)、式(2-10))

$$\begin{aligned} P_{\text{系统2}} &= P_A(3P_B - 3P_B^2 + P_B^3)(2P_C - P_C^2) = P_A P'_B P'_C \\ &= 0.99(3 \times 0.80 - 3 \times 0.80^2 + 0.80^3)(2 \times 0.9 - 0.9^2) \\ &= 0.99 \times 0.992 \times 0.99 \\ &= 0.9723 \end{aligned}$$

所得到的无故障工作概率满足规定要求。因此,系统图的方案 2 是可以采用的。

按故障概率 P_F 进行系统两种方案可靠性的估算

$$P_{F\text{系统1}} = 1 - P_{\text{系统1}} = 1 - 0.7128 = 0.2872$$

$$P_{F\text{系统2}} = 1 - P_{\text{系统2}} = 1 - 0.9723 = 0.0277$$

$$\frac{P_{F\text{系统1}}}{P_{F\text{系统2}}} = \frac{0.2872}{0.0277} = 10.35$$

上述简单计算表明:按方案 2 的系统可靠性为按方案 1 的 10.35 倍,说明方案 2 可靠于方案 1。

§ 1-2 质量、可靠性和安全性的相互关系

飞机应该在规定的距离内飞行,并以一定速度运输人和货物;发动机应该在规定的燃料消耗量下保证规定的推力;点火器应该在规定的电压下产生一定强度的放电。所有产品都具有相应的质量特性,表达其功能、生产、使用、经济、美学和一系列确定可靠性的某些综合匹配特征。

对现代飞行器发展导致必须建立航空综合体系统。为了保证现代干线客机的飞行,从飞机起飞到机场的各种功用设备,都在这种综合体中,主要有地面操纵系统、飞行驾驶地面保证系统、气象服务设施、无线电雷达系统和其它设备。机场上良好及时运送旅客任务不仅仅取决于飞机可靠性,而且还取决于为保证飞行的所有工作系统和装置的可靠性、飞机机组人员的工作质量及地面操作设备人员的技术素质。

航空综合体的质量由许多因素的相互综合确定。工作可靠性、可利用性、操纵性、飞行效率均包括在这些因素之中。其产品的技术完整性由下列定量指标表示:

- (1)基本参数和功能特性的水平;
- (2)型式、结构和强度合理;
- (3)工艺性(制造和试验)及美学性;
- (4)按用途使用的适用性。

航空发动机单位容积质量、单位燃料消耗量、单位空气量下的单位推力以及实际推力值、燃料消耗量、质量和发动机尺寸大小均为基本参数和特性参数。

现代航空发动机由压气机和涡轮的级数、涡轮导向叶片和工作叶片的冷却系统的机械结构完整性、加力推力喷管、发动机调节系统和其它的设计方案及结构措施决定其总体型式和结构合理性。

产品的生产和使用工艺性由产品制造的劳力消耗、采用标准化和规范化的水平、零部件的互换程度、部件安装拆卸和维护的方便性来决定。此外,产品优劣的评价还与产品外形的完美性、内外表面加工的精确性、着漆质量有关。

飞行安全性和系统可用性,作为一综合性指标由一系列单独性质及其组合确定。诸如表示产品质量和人操作水平的一些指标,直接影响飞行事故的预防水平。

通常,把航空综合体或飞机能够应付应急形势能力,并在出现机构部分故障、机组人员错误、地面设备故障以及不允许的外部作用情况下,能保证完整无误救出乘客的综合性能力,称为飞行安全性。

安全性水平由一系列定量指标评定。诸如特种状态(应急或发生事故状态)出现概率、安全飞行概率、每次飞行事故的飞行小时数或每 100000 飞行小时的飞行事故数等。

与飞行器飞行使用有关的事故称为飞行事故。它包括飞机局部或整体破坏;由于局部或整个飞行器破坏造成的人员伤亡。

安全性水平取决于航空产品的无故障性、工程技术人员的专业技能水平、准确执行任务的程度和运用技术文件的质量。

航空飞行和地勤人员的技能取决于人的许多因素。有些是共同的,有些是职业特点决定的。在身体和心理健康方面相同情况下,要求航空工作人员应具有承受大的交变负荷的适应性、迅速反应能力和良好的专业知识。

按用途使用的适用性是航空系统性质之一。除了飞机和发动机的使用工艺性之外,为了高效应用航空系统,用于飞机准备和保证有成效完成飞行的专用设施和装置具有很大意义。这些主要包括:必要完善的工艺装备、检测仪器和状态诊断设备;控制和保证飞行的地面设施及无线电通信设备;气象保证设施;应急设备和发生事故时的抢救装置;消耗材料及必要的备件等。

产品的性能参数、物理、工艺、经济和使用特性相应于科学技术最高水平并符合世界标准要求,这是产品技术完整性的主要指标之一。

§ 1-3 常用术语

根据可靠性理论和术语标准的习惯,在可靠性分析中常用下列四组术语(见表 1-1):

- (1)客体(产品);
- (2)状态;
- (3)事件;
- (4)性质。

一、客体的分类

在航空工程可靠性理论中,通常把飞机、直升机或其它型式的飞行器称为客体,而多半把航空发动机称为产品,或称对象。

对于产品,在所研究的情况下,在标准文件中事先规定了产品工作状态能恢复的,则称为可恢复产品。相应地,按标准技术和设计文件规定要进行修理的产品称为被修理产品。

表 1-1 常用的可靠性术语

名称	组 别			
产品	可修理,可恢复的			不可修理,不可恢复
状态	完好	非完好	能工作	不能工作 极限
事件	损坏	故障		缺陷
性质	无故障性	耐久性	维修性	保持性
性质 数量 指标	无故障工作概率 故障密度 故障持续时间	寿命(规定值、平均值) 服役期限(规定值、平均值)	能工作状态恢复概率 能工作状态恢复平均 时间	平均保持期 $\gamma\%$ 保持期

维修性也就是产品对于修理的适应性。在航空工业产品中,应该在设计阶段就考虑产品的维修性。大多数组件和组件块都具有可修性。零件在使用条件下具有最大的损坏概率,例如螺纹和密封件损坏,磨损增加等。易损件应该能够从机体或承力件上拆下。进出管道接头、调节器本体、动力源接通器和检测仪表都属于这类构件。

多数航空产品、系统和设备均属于可修理产品。对航空发动机,常常在使用条件下直接进行故障机件更换,如泵、调节器、起动机、加力燃烧室等。在这些情况下,发动机被认为是已修理过的产品。在许多情况下,被拆下的零组件转至修理厂并进行分类。在有些情况下,组件被注销时,该组件被称为不可修理组件。燃料喷嘴、点火电阻、活门、压力调节器和管道件等一般都属于装在航空发动机上的不可修产品。

在极少数情况下,由于压气机、涡轮和传动装置的主要承力件损坏或发生故障时,或者其它重要连结件损坏和故障时,必须把航空发动机从飞机上拆下。如果上述的发动机在修理厂翻修,则它们属于可修理产品。

二、状态和事件

应用产品的技术状态可以定质定量的表示产品的性质。通常把产品的状态分为五种:完好状态、能工作状态、非完好状态、不能工作状态和极限状态。

产品从一种高技术状态转变到低技术状态,通常是由于事件发生引起的,这些事件可为损伤或者故障。图 1-2 示出产品基本状态图、事件和产品从一种状态向其它状态的转变。由图看出:产品从一种状态向另一种状态过渡,并且新状态的出现是一定事件作用的结果。产品实际状态和产生使产品转变到新状态的事件两者的总和构成产品的生存循环。通常,每一事件的出现和发展特性取决于产品零件中所产生的内部过程、加载特性和外部条件的作用。揭示事件的物理原因和预测其发展规律是可靠性理论和实践的重要任务之一。

完好状态是产品的标准和自然状态。在该状态下,产品符合所有标准技术文件和检验文件的要求,完全满足规定的功能和所有定货的要求。完好状态是产品寿命最长的状态。

产品的状态不符合标准技术文件的要求,则称该状态为非完好状态或称失效。产品从完好状态转变到非完好状态是由于损坏造成的。通常把这种损坏称作事件。

能工作产品不同于完好产品,它仅应满足标准技术和设计文件的要求,并保证产品能完成规定的任务。完好性概念宽于能工作概念。完好产品一定能工作,能工作产品可以是