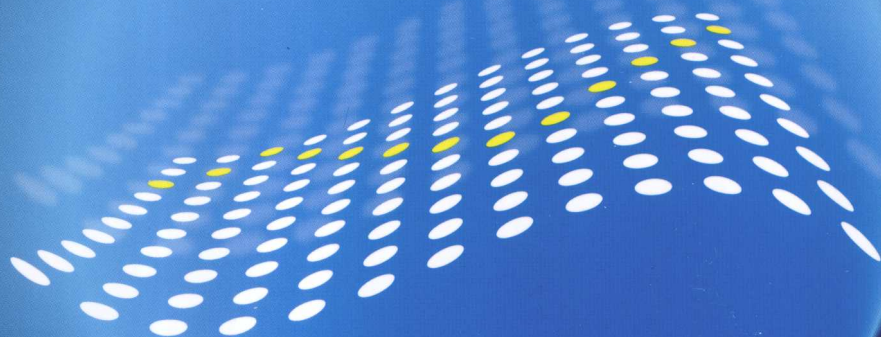


*Complex systems
Reliability Analysis and Assessment*

复杂系统可靠性 分析与评估

王华伟 高 军 著



科学出版社

013028242

N945.17

13

内 容 简 介

复杂系统可靠性分析与评估

王华伟 高 军 著

图 书 在 册 号 (CIP)

国家自然科学基金与中国民航局联合资助项目(60879001)

江苏省自然科学基金项目(BK2009378)

江苏省青蓝工程优秀青年骨干教师项目



科学出版社

北京



北航

C1634780

N945.17

13

013058545

内 容 简 介

本书是关于复杂系统可靠性工程的一本专著,主要汇集了作者近年来从信息融合和数据驱动角度探索复杂系统可靠性分析与评估的研究成果。全书共6章,主要内容包括绪论、复杂系统可靠性数据分析、复杂系统设计可靠性评估与决策、复杂系统运行可靠性评估与预测、复杂系统可靠性分析和复杂系统可靠性分析与评估系统开发。

本书可作为可靠性工程专业研究生和高等院校相关教师的参考资料,同时对从事可靠性分析与评估理论及应用技术研究的科技人员也具有一定的参考价值。

著 高 军 王 华 伟

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统可靠性分析与评估/王华伟,高军著. —北京:科学出版社,2013.3

ISBN 978-7-03-037060-0

I. ①复… II. ①王… ②高 III. ①系统可靠性-系统分析 IV. ①N945.17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 047471 号

责任编辑:贾瑞娜 张丽花 / 责任校对:朱光兰

责任印制:闫 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年3月第一版 开本:720×1000 B5

2013年3月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:261 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着科学技术进步和人类社会的发展,复杂系统作为一类重要的系统形态逐步成为当前和今后研究的热点。由于复杂系统具有状态非线性和多失效模式的特点,采用传统的可靠性工程技术与方法进行研究,显然遇到了很大难度。关注整体、关系和信息的系统思维已成为解决这类问题的必然选择。

可靠性分析与评估技术作为可靠性工程中的核心内容之一,近十几年来,国内外已针对这一领域进行了广泛而深入的理论与方法研究,并取得了一系列进展,主要表现在:深入研究了基于小样本数据甚至是无失效数据的复杂系统可靠性分析与评估;采用人工智能方法提取和挖掘数据,描述复杂系统的状态、行为和可靠性问题;拓展了复杂系统可靠性分析与评估的外延,逐渐形成了分析、评估、预测和决策的一体化研究体系。可以说,复杂系统可靠性分析与评估是一个多角度、多层次、多技术的复杂问题。

近年来作者在国家自然科学基金与中国民航局联合资助项目(60879001)、江苏省自然科学基金项目(BK2009378)和江苏省青蓝工程优秀青年骨干教师项目的资助下,从信息融合和数据驱动的角度,开展了复杂系统可靠性分析与评估的研究,讨论了如何将可靠性数据转化为可靠性信息,如何综合利用可靠性信息描述系统状态和可靠性,如何采用统计方法分析与评估可靠性。这些问题的解决对工程实践具有重要价值,也是本书研究的初衷。

本书共分6章,各章节主要内容如下:

第1章 绪论。介绍复杂系统可靠性分析与评估的相关概念,综述国内外复杂系统可靠性分析与评估的研究现状,讨论复杂系统可靠性分析与评估的前沿研究方向。

第2章 复杂系统可靠性数据分析。研究复杂系统可靠性数据采集、可靠性数据处理及可靠性模型的相关技术和方法,提出复杂系统集成可靠性数据分析框架结构。

第3章 复杂系统设计可靠性评估与决策。以信息融合为主线,研究静态复杂系统可靠性评估、复杂系统可靠性增长评估和可靠性决策方法。

第4章 复杂系统运行可靠性评估与预测。以数据驱动为主线,研究基于状态监测信息的复杂系统性能退化评估,复杂系统性能可靠性评估,基于小样本故

障数据的复杂系统可靠性评估,复杂系统竞争失效可靠性分析与评估和复杂系统剩余寿命预测。

第5章 复杂系统可靠性分析。将 Bayes 网络方法引入复杂系统可靠性分析,研究基于 Bayes 网络的 FMEA 方法,基于故障树和 Bayes 网络的可靠性分析,基于 Bayes 网络的故障原因分析。

第6章 复杂系统可靠性分析与评估系统开发。实现复杂系统运行阶段的可靠性管理和设计阶段可靠性评估与验证的功能。

本书的研究内容是我们在这—领域十多年的所思所想,也是理论学习到实践应用,再到理论分析与升华的结果。通过系统梳理与研读复杂系统可靠性分析与评估现状,对各种失败与成功的经验进行总结和提炼,深刻理解与把握这一领域在过去几十年的不断重新自我构筑过程,对增强处理现实可靠性问题的复杂性和多变性具有重要作用。

本书由王华伟、高军协力完成,王华伟撰写了第1~6章的主体内容,高军参加撰写了第1章部分内容并负责全书统稿,硕士生赵飞参加了第4章部分内容的撰写工作,硕士生王岩峰参加了第5章部分内容的撰写工作,硕士生孙绍辉、陈福立参加了第6章部分内容的撰写工作,钟静、施志坚参加了全书校对工作。

本书的研究虽然是作者思考创新的结果,但如果没有前人大量的研究积淀,也就不会有本书的研究理念、研究体系、研究重点和技术路线的选择与确立,当然也谈不上内容创新的比较性。这里我们对所读过的众多文献和著作的作者、译者表示深深感谢。尽管本书中的某些观点和见解还不十分成熟,有些提法也有待进一步商榷,但我们还是愿意把它展现给同行,以期引起更为广泛的讨论与关注。

著 者

2012年12月30日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 基本概念	3
1.1.1 可靠性	3
1.1.2 可靠性分析与评估	4
1.1.3 复杂系统可靠性分析与评估	6
1.2 复杂系统可靠性分析与评估方法论	7
1.2.1 复杂系统可靠性分析与评估研究角度	8
1.2.2 复杂系统可靠性分析与评估研究思路	10
1.3 复杂系统设计可靠性分析与评估	11
1.3.1 基于复杂系统结构的可靠性分析与评估	11
1.3.2 复杂系统可靠性增长分析与评估	12
1.3.3 基于信息融合的复杂系统可靠性分析与评估	12
1.4 复杂系统运行可靠性分析与评估	15
1.4.1 运行数据的分析与处理	15
1.4.2 可靠性分析	16
1.4.3 剩余寿命预测	18
1.5 基于复杂系统特点的可靠性分析与评估方法	20
1.5.1 多态系统可靠性问题	20
1.5.2 多失效模式可靠性问题	23
1.5.3 竞争失效可靠性问题	27
1.6 本书研究内容与结构	31
第 2 章 复杂系统可靠性数据分析	33
2.1 可靠性数据分析概述	33
2.1.1 可靠性数据分析难点	33
2.1.2 可靠性数据分析流程	35
2.1.3 可靠性数据主要类型	35
2.2 可靠性数据的采集	40
2.2.1 可靠性数据采集要求	40

2.2.2	可靠性数据采集程序	41
2.2.3	民机可靠性数据采集	41
2.3	可靠性数据处理	44
2.3.1	数据处理流程	44
2.3.2	异常可靠性数据处理	44
2.3.3	缺失可靠性数据处理	47
2.4	可靠性参数估计	49
2.4.1	定量指标	50
2.4.2	寿命分布函数	51
2.4.3	随机过程模型	55
2.4.4	协变量模型	59
2.5	可靠性数据集成分析	61
2.5.1	可靠性数据集成分析框架	61
2.5.2	可靠性数据集成分析步骤	61
第3章	复杂系统设计可靠性评估与决策	66
3.1	可靠性信息融合技术特点及方法	67
3.1.1	可靠性信息融合技术的特点	67
3.1.2	可靠性信息融合的主要方法	67
3.2	同一阶段同源可靠性信息融合	68
3.2.1	基于D-S证据推理的专家信息融合	68
3.2.2	单元、分系统与系统的信息融合	71
3.3	同一阶段多源可靠性信息融合	76
3.3.1	专家信息与试验数据的融合	76
3.3.2	同一阶段多源先验信息融合	77
3.4	可靠性增长信息融合	84
3.4.1	可靠性增长信息融合建模	84
3.4.2	可靠性增长信息融合应用	91
3.5	可靠性决策的信息融合	91
3.5.1	Bayes 风险决策的基本原理	92
3.5.2	同一阶段的可靠性决策	95
3.5.3	基于最优信息量的可靠性决策	99
3.5.4	可靠性增长试验后验决策	102
第4章	复杂系统运行可靠性评估与预测	104
4.1	基于状态监测信息的系统性能退化评估	104

4.1.1	基于 Bayes 线性模型的状态监测信息融合	105
4.1.2	基于支持向量机的状态监测信息融合	108
4.2	复杂系统性能可靠性评估	110
4.2.1	基于 Gamma 过程的可靠性评估	110
4.2.2	基于 Wiener 过程的可靠性评估	112
4.2.3	基于 HMM 的可靠性评估	113
4.3	基于小样本故障数据的复杂系统可靠性评估	117
4.4	复杂系统竞争失效可靠性分析与评估	124
4.4.1	基于竞争失效的复杂系统可靠性分析	124
4.4.2	基于竞争失效的复杂系统可靠性评估	127
4.5	复杂系统剩余寿命预测	131
4.5.1	基于潜在故障期的剩余寿命预测	132
4.5.2	基于 HMM 的系统剩余寿命预测	135
4.5.3	基于竞争失效的系统剩余寿命预测	140
第 5 章	复杂系统可靠性分析	145
5.1	复杂系统可靠性分析建模方法	145
5.1.1	Bayes 网络方法的特点	145
5.1.2	Bayes 网络的数学描述	147
5.1.3	Bayes 网络的推理形式	148
5.1.4	Bayes 网络的建模步骤	149
5.2	基于 Bayes 网络的 FMEA 建模	150
5.2.1	基于 Bayes 网络的 FMEA 方法	150
5.2.2	FMEA 的 Bayes 网络定性建模	152
5.2.3	FMEA 的 Bayes 网络定量建模	156
5.2.4	基于动态 Bayes 网络的 FMEA 建模	161
5.3	基于故障树和 Bayes 网络的可靠性分析	163
5.3.1	故障树分析与 Bayes 网络	163
5.3.2	故障树与 Bayes 网络转换	164
5.3.3	区间 Bayes 网络建模	166
5.4	基于 Bayes 网络的故障原因分析	167
5.4.1	故障原因分析建模	167
5.4.2	D-Separation 方法	168
5.5	Bayes 网络模型的灵敏度分析	172
5.5.1	Bayes 网络灵敏度分析方法	172

5.5.2 灵敏度分析的符号概率推断	173
第6章 复杂系统可靠性分析与评估系统开发	178
6.1 可靠性分析与评估系统需求分析	178
6.2 可靠性分析与评估系统设计框架	178
6.2.1 系统设计原则	178
6.2.2 系统设计技术	179
6.2.3 系统组成框架	181
6.3 可靠性分析与评估系统环境配置	182
6.3.1 系统环境配置过程	182
6.3.2 配置中的常见问题	183
6.4 航空发动机可靠性分析与评估系统	183
6.4.1 系统基本功能	183
6.4.2 数据采集体系	184
6.4.3 主要功能模块	184
6.4.4 系统运行逻辑	187
6.4.5 系统部分界面	188
参考文献	191
后记	206

第1章 绪 论

可靠性在工程技术系统中的应用已经有近百年历史,其最早应用在军事领域,在武器装备、导弹系统的可靠性控制中发挥了重大作用。20世纪40年代是可靠性研究萌芽时期,为解决电子设备可靠性影响武器装备系统效能的问题,通过采用新材料和新工艺,发展质量控制及检验统计技术提高了电子管的可靠性。20世纪50年代是可靠性研究兴起和形成的时代,为解决军用电子设备和复杂导弹系统的可靠性问题,1952年美国国防部成立了一个由军方、工业部门和学术界组成的电子设备可靠性咨询组(AGREE),1957年AGREE发表了《军用电子设备可靠性》研究报告,该报告是可靠性发展的奠基性文件,标志着可靠性研究已经成为一门独立的学科,是可靠性研究发展的重要里程碑。20世纪60年代是可靠性研究快速发展的时期,可靠性研究对象从电子设备扩大到各种军用设备,制定出MIL-HDBK-217、MIL-HDBK-781和MIL-HDBK-785等军用标准,将可靠性正式列为军用产品质量指标。国际上首个可靠性工程专业学术杂志 *IEEE Transaction on Reliability* 于1963年问世,大量的可靠性专业书籍在20世纪60年代出版发行^[1],美国、法国、日本及苏联陆续开展了可靠性研究。20世纪70年代可靠性研究进入成熟阶段,洲际导弹、航空航天系统、原子能系统、电力系统、交通运输系统和武器装备系统的出现及性能提升,都对可靠性提出了更高的要求,基于全寿命周期的可靠性设计、可靠性试验、可靠性分析、可靠性评估及可靠性控制的理念逐步形成,并提出了有效的对策和措施。20世纪80年代以后,软件的可靠性研究日益得到重视,可靠性研究向着更深更广的方向发展,将可靠性与性能、费用和时间看成同等重要的参数,逐渐在可靠性管理和可靠性技术方面各自突破、协同发展,取得了良好的效果。

进入21世纪以来,可靠性研究的特点更加明显,主要体现在集成化、协同化、系统化和精确化等多方面。首先,从系统本身来讲,全寿命周期的可靠性管理本身就是对可靠性工程研究领域和内容的高度集成化和系统化;其次,可靠性研究涉及的相关领域,如状态监测、维修决策和综合保障等环节,必须通过协同化才能实现预防事故发生和减少损失;最后,由于研制费用、研制周期和运行成本等多方面因素的共同作用,对高度复杂的武器装备系统、航空航天系统和核电站系统等,更需要精确的评估和控制可靠性水平,实现可靠性和经济性的协同优化。

在我国,可靠性研究和应用可以追溯到新中国成立(1949年)后的第一个五年计划时期,以电子工业部门设立的产品可靠性试验研究基地为标志。20世纪60年代,钱学森先生曾对可靠性统计提出“变动统计学”、“小子样统计推断”和“系统可靠性综合”等3个重要研究方向,对我国可靠性的深入研究与发展影响巨大。目前,随着国家经济建设的发展,复杂系统可靠性相关技术研究对我国开发和研制重大产品过程提供有效支持的迫切性和重要性已十分明显。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》的先进制造技术领域在“重大产品和重大设施预测技术专题”中就指出,要研究“重大产品、复杂系统和重大设施的可靠性、安全性和寿命预测技术”。国家高技术研究发展计划(863计划)在先进制造技术领域设立的“重大产品和重大设施寿命预测技术专题”中也指出,通过寿命预测和可靠性共性理论与前沿技术的研究,为提高我国重大装备、设施、工程的安全可靠运行能力,预防重大事故,增强高技术产业的国际竞争力,提供寿命预测与可靠性分析的关键技术、方法和手段。此外,国家自然科学基金作为最重要的面向全国支持基础性研究的项目,也分别在数理科学部、信息科学部和管理科学部设立了相关研究方向,包括数理科学部的可靠性理论(代码A011204)、疲劳与可靠性(代码A020303),信息科学部的系统可靠性理论(F030213)和管理科学部的系统可靠性与管理(代码G0111)。这些支持项目既表明了可靠性理论与技术研究的重要性,也体现了可靠性研究本身的多学科交叉的特征。可以说,我国成功爆炸的原子弹、氢弹,精确发射的人造卫星和运载火箭,载人航天事业的发展,具有自主知识产权的ARJ21飞机和正在研制中的大型客机C919、大型运输机和大型发动机,安全运行的核电站系统和电力系统,百万公里事故率跃居全球第二的民航系统,高速铁路的建设和运营,现役和正在研制中的武器装备系统,都是可靠性研究及相关工作在我国得到成功应用的具体体现。

复杂系统的可靠性定量方法出现略晚,但也可以追溯到20世纪50年代,经过半个多世纪的发展,其研究体系更加全面,研究内容更加深入。可靠性分析与评估是复杂系统可靠性研究领域的重要核心内容之一,也是整个复杂系统可靠性研究的精髓内容体现。传统的可靠性分析与评估是建立在大样本数据基础之上,随着系统的复杂性增强及运行环境的复杂化,对复杂系统的可靠性分析与评估则提出了更高的要求。本书的相关研究内容来源于作者承担航天、航空及武器装备系统可靠性分析、评估、验证及管理技术研究过程中的所思所想,力图能够提炼出关于复杂系统及重大设备可靠性研究的共性理论问题,将传统的可靠性理论注入新的内涵^[2],探索基于多学科交叉方法的复杂系统可靠性分析与评估方法。期间先后受到国家自然科学基金与中国民航局联合资助项目

《民用飞机可靠性分析、评估与风险管理研究》(60879001)、江苏省自然科学基金《复杂系统安全监测与预警技术研究》(BK2009378)和江苏省青蓝工程优秀青年骨干教师项目的资助。本书内容界定在复杂系统可靠性分析与评估的关键与前沿技术。

1.1 基本概念

1.1.1 可靠性

随着人们对可靠性问题认识的逐步深入,针对可靠性的定义,本身就处于不断发展变化之中。

1957年,美国电子设备可靠性咨询组发表的报告中将可靠性定义为“在规定的的时间和给定的条件下,无故障完成规定功能的概率,即可靠度。”

我国国军标CJB451A《可靠性维修性保障性术语》,把可靠性定义为“产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力”。^[3]

进入20世纪90年代,可靠性的定义有了新的发展,1991年美国国防部指令以DI5000.2《国防采办管理政策和程序》把可靠性定义为“系统及其组成部分在无故障、无退化或不要求保障系统的情况下执行其功能的能力”。^[4]

可靠性包括固有可靠性和使用可靠性^[3]。其中,固有可靠性是衡量产品设计和制造的可靠性水平,GJB451A将固有可靠性定义为“设计和制造赋予产品的,并在理想的使用和保障条件下所具有的可靠性”。使用可靠性可认为是综合考虑了产品设计、制造、安全、环境、使用和维护等环节中的所有可能影响因素,用来

衡量产品在预期环境中使用的可靠性水平,GJB451A将使用可靠性定义为“产品在实际的环境中使用时所呈现的可靠性,它反映设计、制造、使用、维修等因素的综合影响”。固有可靠性与使用可靠性之间的关系如图1-1所示。

从产品寿命周期来看,使用可靠性覆盖了产品的全寿命周期,而固有可靠性只涉及设计和制造两个环节;从固有可靠性和使用可靠性的比较来看,固有可靠性比使用可靠性更高,主要是使用可靠性涉及的因素更多,使用阶段的维修和维护只能作为维持和保持可靠性的一种手段,无法实现可靠性增长。以民用飞机为例,民用飞机的可靠性和安全性受适航规章约束,飞机要想真正投入运营,必须满

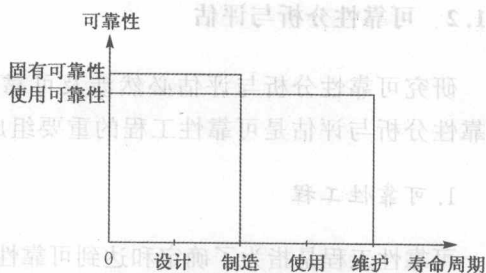


图 1-1 固有可靠性与使用可靠性关系

是飞机运营所在国适航标准的相关规定。适航标准包括初始适航标准和持续适航标准,初始适航标准对应的就是设计和制造阶段的可靠性,也就是固有可靠性;持续适航标准则对应于使用可靠性,当然还受到维修和使用因素的制约。因此民机的可靠性指标体系除了固有可靠性指标外,还包括表征其使用可靠性的签派可靠度和出勤可靠度。签派可靠度是指没有因技术原因的延误或撤销航班而运营离站的百分数,技术性延误是指由于机载设备和部件工作异常而进行检查和必要的修理使飞机最后离站的时间延迟(若超过预定离站时间 15min,则可认为发生了技术性延误)。签派可靠度是民机使用最为广泛的参数性指标,该指标与飞机的固有可靠性、运营环境和航空公司的维修保障水平(包括技术能力和维修资源情况)都有关系。通常情况下,飞机的可靠性好,故障率低,签派可靠度就高;航空公司人员培训好,用于排故和维修的资料齐全且方便,维修工作花费时间就短,飞机的签派可靠度也就高。出勤可靠度是用于表示飞机正常运营离站的概率,它是描述飞机及地面支援系统能力的参数,而不是用于描述飞机的系统或分系统的参数,不仅包括了可靠性的影响,同时也与维修性、地面支援系统水平密切相关。可以看出,相对于固有可靠性,使用可靠性的影响因素更多,更加难以控制。这也可用于解释波音公司和空客公司都是基于同样固有可靠性的产品,但全球机队在不同国家运营的签派可靠度和出勤可靠度却有较大差别的现象。

1.1.2 可靠性分析与评估

研究可靠性分析与评估必然涉及可靠性工程,两者具有紧密联系。实际上,可靠性分析与评估是可靠性工程的重要组成部分,也是开展其他项目的基础。

1. 可靠性工程

可靠性工程是指为了确定和达到可靠性要求所进行的一系列技术与管理活动。可靠性工程的基本任务就是确定产品可靠性和获得产品的可靠性。实际上,这两个基本任务是交织在一起的。确定产品可靠性就是通过各种途径,如可靠性设计、试验、系统可靠性分析等来确定产品的失效(故障)机理、失效模式以及各种可靠性特征量的全部数值或范围等。获得产品的可靠性是通过产品寿命周期中的一系列技术与管理措施来得到并提高产品可靠性,从而实现产品可靠性的最优化^[5]。为了实现产品的高可靠性,系统科学、统计学和故障物理构成了可靠性工程的基础^[6]。

根据 GJB450A《装备可靠性工作通用要求》,可靠性工程的内容可以分为以下 3 部分。

(1) 可靠性设计与分析。可靠性设计与分析就是通过可靠性预计、分配、分析和改进等一系列可靠性工程技术活动,把可靠性定量要求转化为产品设计,从而

形成产品固有的可靠性,包括建立系统可靠性模型、进行可靠性预计、可靠性分配和各种可靠性分析等。

(2)可靠性试验。可靠性试验是对产品的可靠性进行分析和评价的工程活动。其作用是通过统计分析和失效分析,评估产品的可靠性,找出可靠性的薄弱环节,提出改进建议,实现产品可靠性增长。GJB450A 规定的可靠性试验包括环境应力筛选、可靠性研制试验、可靠性增长试验、可靠性鉴定试验、可靠性验收试验、寿命试验和加速寿命试验、耐久性试验、可靠性强化试验和高加速应力试验等。

(3)可靠性管理。可靠性管理是为确定和满足可靠性要求而必须进行的一系列组织、计划、协调和监督等工作。可靠性管理在可靠性工程中的地位越来越重要,包括建立质量保证体系、制定可靠性计划、对供应方的监督和控制、可靠性评审、可靠性增长管理和制定可靠性标准等。

在可靠性工程中,相关的可靠性工作均有相关的标准进行控制^[7],如表 1-1 所示。

表 1-1 可靠性工作相关标准

可靠性工作的主要项目		相关标准代号及名称
可靠性管理	可靠性计划制定	GJB450A—2004 装备可靠性工作通用要求
	可靠性评审	GJ/T 7828—1987 可靠性设计评审
		GJB/Z 72—1995 可靠性维修性评审指南
	故障报告、分析和纠正措施系统建立并运行	GJB 841—1990 故障报告、分析和纠正系统
可靠性设计与分析	可靠性分配	GB 5084—1984 MTBF 与可靠性估计方法
		GB/T 7827—1987 可靠性预计程序
	可靠性预计	GJB 813—1990 可靠性模型的建立和可靠性预计
		GJB/Z 299B—1991 电子设备可靠性预计手册
	故障模式及影响分析	GB/T 7826—1987 系统可靠性分析技术——故障模式与影响分析(FMEA)程序
		GJB 139—1992 故障模式、影响及危害性分析程序
		HB 6359—1989 故障模式、影响及危害性分析程序
	故障树分析	GB/T 7829—1987 故障树分析程序
		GJB768A—1998 故障树分析指南
	可靠性设计准则	GJB/Z 102—1997 软件可靠性和安全性设计准则
	元器件、零部件、原材料的选择与控制	HB 6429—1990 零部件控制大纲
	其他	GJB/Z 27—1992 电子设备可靠性热设计手册

续表

可靠性工作的主要项目		相关标准代号及名称
可靠性试验与评价	环境应力筛选试验	GJB 1032—1990 电子产品环境应力筛选方法
	可靠性增长试验	GJB 1407—1992 可靠性增长试验
	可靠性鉴定试验	GB/T 5080—1986 设备可靠性试验
		GJB 899—1990 可靠性鉴定与验收试验
		HB 6139—1987 航空机载设备可靠性试验(鉴定和验收)
使用可靠性评估与改进	寿命试验	GB 12282—1990 寿命试验用表
	使用可靠性信息收集	GB 5081—1985 电子产品现场可靠性、有效性和维修性数据收集指南

2. 可靠性分析与评估

可靠性分析贯穿于产品的全寿命周期,在产品不同阶段进行可靠性分析的途径和方法是有所区别的。可靠性分析既包括定性的可靠性分析,又包括定量的可靠性分析。定性的可靠性分析包括故障模式及影响分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)、故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)、事件树分析(Event Tree Analysis, ETA)和可靠性框图,定量的可靠性分析包括可靠性模型和可靠性统计数据分析。相对于可靠性分析,可靠性评估(可靠性评定)是指根据产品的可靠性结构、寿命模型,利用试验数据和现场使用数据等,对产品的可靠性进行估计的过程。

无论是进行可靠性分析,还是进行可靠性评估,其基础都是可靠性数据。通过可靠性数据分析技术,从可靠性数据中能有效挖掘出对于产品可靠性的多层面和多角度的状态信息。可靠性数据分析是通过收集系统或者单元产品在研制、试验、生产和维修中产生的可靠性数据,并依据系统的功能或可靠性结构,利用概率统计方法,给出系统可靠性数量指标的定量估计。它是一种既包含数学和可靠性理论,又包含工程的分析方法^[8]。

1.1.3 复杂系统可靠性分析与评估

复杂系统是具有复杂性属性的系统,它拥有大量交互成分,内部关系复杂且不确定,行为具有非线性,不能由全部局部变量、局部属性来重构总体属性,也不能通过局部特性来形象或抽象描述整体系统的特性。一般来说,复杂系统具有以下特点:从定性上看,复杂系统具有开放性、多时性、非确定性、扰动性、非线性、自相似性、混沌现象与病态结构等特点;从定量上讲,具有高阶次、高维数、多输入/

输出、多回路与多层次性特点。所有这些都表现为复杂系统的非线性、演化性、适应性、涌现性、进化性和自治性,其中非线性与涌现性是复杂系统最本质的特点。非线性是指不能用数学的线性模型描述的系统特性,大部分乃至系统整体都存在着非线性,这也是产生系统复杂性的根本原因^[9]。涌现性是指复杂系统构成组分间存在的相互作用形成的复杂结构,在表现组分的特性同时传递着其作为整体而新生的特性。

任何系统都有可靠性分析与评估问题,复杂系统也不例外,但复杂系统较其他系统对可靠性要求较为苛刻,如航空、航天、电力和核电站系统等,这些系统一旦发生故障,将造成重大的经济损失,甚至是严重的社会影响。针对这类复杂系统的可靠性,提出的衡量指标必然是多样的和多层面的,可靠性分析与评估已成为这类系统中至关重要的突出问题。复杂系统的可靠性分析与评估具有以下特点。

(1)复杂系统结构的复杂性增加了可靠性分析与评估的难度。由于复杂系统本身结构复杂,导致其故障机理复杂,尤其是在故障机理不清楚的情况下,即使在复杂系统可靠运行的情况下,仍可能存在多种不明形式的故障隐患,这些故障隐患在一定的触发条件下,就可能演化为故障,甚至重大故障,对系统的运行,甚至是安全产生重大影响。

(2)复杂系统可靠性分析与评估是典型的小样本问题。复杂系统可靠性分析与评估的小样本特点贯穿于其全寿命周期。在设计阶段,由于复杂系统本身结构的复杂性,导致其在设计阶段无法对所有的子系统做完整的可靠性验证试验,再加上受到研制成本和研制周期的影响,都决定了进行较大样本量的全系统试验耗费巨大,不具有可行性;而且复杂系统本身对可靠性要求很高甚至极高,决定了复杂系统很少能运行到故障,很难采集到充分的故障样本。

(3)复杂系统可靠性分析与评估的方法具有综合性。从全寿命周期角度来看,复杂系统在设计阶段和运行阶段运用的可靠性分析与评估方法各不相同,设计阶段重点体现的是对可靠性增长和可靠性验证的评估,可靠性增长评估体现的是如何在变母体中提取可靠性信息,可靠性验证评估则与验收和拒收的决策密切相关。在复杂系统运行阶段,往往由于采集不到故障数据,其研究的重点主要涉及如何将间接数据转化为支持可靠性分析与评估数据的问题,主要是通过随机过程描述可靠性或者性能的变化,而不是通过可靠性数据的寿命分布计算和评估可靠性。

1.2 复杂系统可靠性分析与评估方法论

针对复杂系统的认识可以是多角度和多层面的,相应地,复杂系统可靠性分析与评估的研究方法也应该从多角度和多层面展开。研究复杂系统可靠性分析

与评估的角度和层面不同,则相应的方法、技术和流程均会有所差别。通过探讨复杂系统可靠性分析与评估方法的立体研究维度,可以实现更全面、更深刻、更透彻地理解可靠性分析与评估问题。

1.2.1 复杂系统可靠性分析与评估研究角度

1. 基于寿命周期不同阶段的可靠性分析与评估

如果从系统的全寿命周期角度出发,可以从设计阶段和运行阶段进行可靠性研究,其分别对应着可靠性分类方法中的固有可靠性和使用可靠性,固有可靠性和使用可靠性涉及的相关内容如图 1-2 所示。

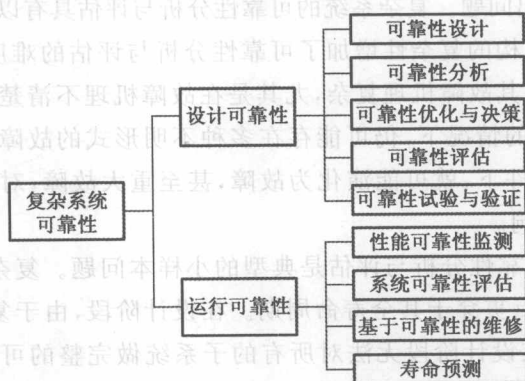


图 1-2 固有可靠性和使用可靠性涉及的相关内容

具体到可靠性分析与评估领域,针对固有可靠性的研究,体现在对设计可靠性的分析与评估;针对使用可靠性的研究,体现在对运行可靠性的分析与评估。设计可靠性分析与评估和运行可靠性分析与评估两者之间有明显的差别:两者处于产品的不同寿命周期,采集到的可靠性数据有明显区别,可靠性分析与评估的目的截然不同。设计可靠性分析与评估主要是在复杂系统研发过程中动态了解可靠性水平,并在研制结束时对可靠性水平进行鉴定与验证;运行可靠性分析与评估是指在复杂系统运行过程中,通过相关监测参数的采集,实时掌握性能变化趋势及整体可靠性水平,避免发生故障。

因此,从利用信息角度而言,复杂系统设计可靠性的分析与评估,是指利用产品研制过程中部件、分系统和系统整机试验的可靠性信息进行综合利用,实现对复杂系统可靠性水平的综合判断;而运行可靠性分析与评估,是通过状态监测信息的综合利用,建立监测参数、系统状态和系统可靠性之间的联系,实现对复杂系统可靠性水平的判断。