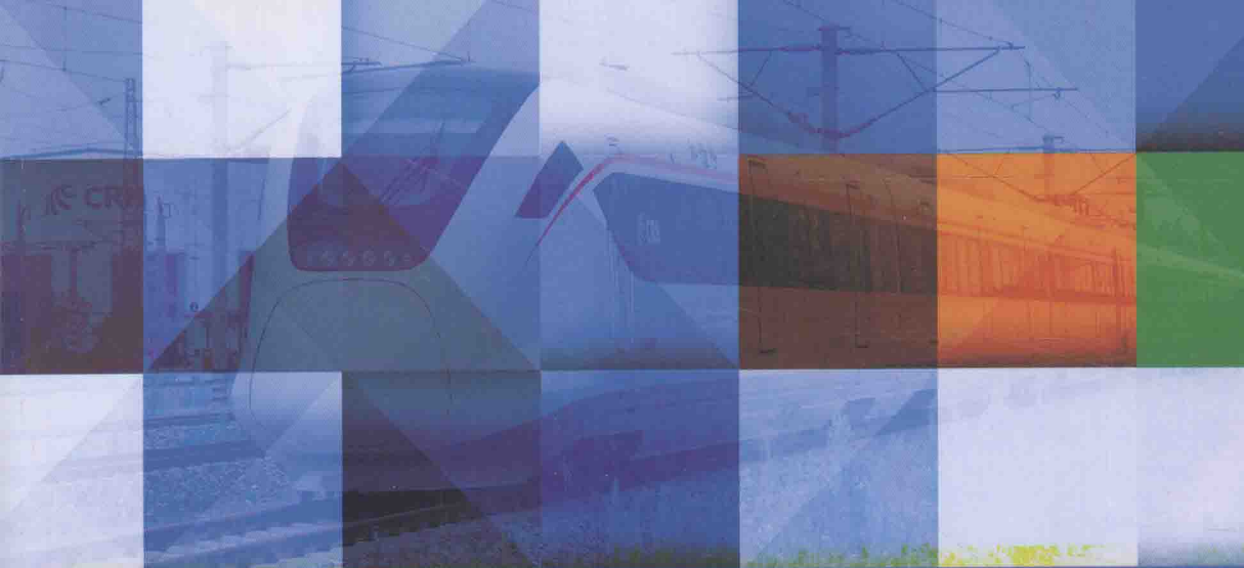




Complex System Reliability
Analysis and Application in Rail Transit
Power Supply System

复杂系统可靠性分析 在轨道交通供电系统中的应用

何正友 著



科学出版社

复杂系统可靠性分析在轨道交通供电系统中的应用

Complex System Reliability Analysis and Application
in Rail Transit Power Supply System

何正友 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

轨道交通供电系统结构复杂、规模庞大,是典型的复杂系统。为提高轨道交通供电复杂系统的可靠性建模分析技术,本书作者提炼多年研究成果,总结并著成本书。

全书共 13 章,主要内容包括复杂系统可靠性分析模型的建立和方法的选择,地铁牵引供电系统、磁浮牵引供电系统、地铁综合监控系统、高速铁路“四电系统”等的可靠性分析,以及高速铁路系统的健康风险评估。全书体系完善、内容新颖,既有理论方法知识,又有工程实践案例,对复杂系统可靠性分析技术在轨道交通供电系统中的应用和发展具有重要价值。

本书可作为高等院校电气工程、系统工程相关专业师生的参考书,亦可供从事复杂系统设计、轨道交通运营的技术人员和管理人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统可靠性分析在轨道交通供电系统中的应用 = Complex System Reliability Analysis and Application in Rail Transit Power Supply System / 何正友著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-043408-1

I. ①复… II. ①何… III. ①系统可靠性-分析方法-应用-城市轨道交通-轨道交通-研究 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 031343 号

责任编辑:范运年 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:无极书装

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>

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

*

2015 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:336 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

自 20 世纪 60 年代,我开始从事铁道供电系统远动监控和综合自动化的理论研究和技术研发工作,面对的技术问题之一是,如何分析和提高通信系统、控制中心系统和 RTU 等的可靠性。我深感,在系统的规划、设计和运营中,对复杂系统的可靠性分析是极具挑战性的。

复杂系统普遍具有工况繁多、因素繁杂、信息繁巨和计算繁琐等特点,其可靠性分析需综合考虑多样的故障失效模式、多变的动态工况、不确定的系统特性、庞大的状态空间等因素。因此,根据不同复杂系统的应用特点,研究可靠性建模分析理论与方法,对准确评估系统可靠度及提高复杂系统的运行可靠性都具有重要意义。

轨道交通系统是国家重要的基础设施,在经济社会发展中起着中流砥柱的作用,轨道交通供电系统是列车的动力源泉,也正因此,轨道交通供电系统的故障(失效)将在经济和安全等方面产生严重的影响和后果。从系统的观点来看,轨道交通供电系统是涵盖一次、二次,包含软件和硬件,是一个开放的复杂系统,涉及季节环境、监控运营等多种因素,各子系统之间的关系较为复杂,系统间以及系统与外界交互频繁。可以预见,随着轨道交通供电系统的智能化,其复杂化程度还将加剧,这迫使研究人员不得不站在复杂系统的角度考查其可靠性。

该书作者何正友教授作为电力系统及其自动化领域的专家,多年来一直从事供电系统故障诊断与可靠性分析及其在轨道交通中的应用研究工作,培养了一批的博士和硕士研究生,获得多项科研和教学奖励。他带领团队取得的成果涵盖了地铁及磁悬浮牵引供电系统、地铁综合监控系统、高速铁路“四电系统”等复杂系统的可靠性建模分析,以及高速铁路复杂系统健康评估与风险评估,《复杂系统可靠性分析在轨道交通供电系统中的应用》一书正是对这些成果的总结与提炼。

该书内容涉及复杂系统可靠性基本理论、复杂系统可靠性分析模型的建立、轨道交通中多个典型复杂系统的可靠性分析,以及轨道交通复杂系统的健康风险评估。从模型和方法上看,该书包括了模糊理论、Kronecker 代数、Markov 链、动态故障树、高级 Petri 网、层次随机回报网等,讨论了它们在不同轨道交通系统的适用性,具有一定的指导性。同时,为便于理解,书中还给出了来源于工程实践的算例。

该书集中反映了轨道交通复杂系统可靠性分析的新技术,全书理论体系完善、分析方法精准、应用实例丰富,蕴含了复杂系统可靠性分析在轨道交通复杂系统应

用的系列学术思想。相信该书的读者——高等院校教师、研究生以及从事相关领域的科技人员,能通过阅读该书了解与掌握轨道交通复杂系统可靠性分析的重要方面,例如:如何考虑系统失效的模糊性;如何根据不同系统的特点定义合适的可靠性指标;如何选择适应性强的可靠性分析方法;如何将复杂的轨道交通系统划分为多个子系统进行分析;如何利用不同时间尺度的信息对系统进行健康评估;如何计及环境因素进行系统的风险评估等。

复杂系统的可靠性分析和风险评估可以从概率的角度评价系统的运行状态,并发现系统的薄弱环节。面对实际工程中的复杂系统,我们可以采用基于概率模型的可靠性分析或风险评估方法,辅助系统规划、设计和运营,保证在较低的成本下提供较高的可靠性。期待在不远的将来,可靠性分析和风险评估技术能够在复杂系统中发挥更大的作用。

是以为序。



中国工程院院士

西南交通大学教授、博士生导师

国家轨道交通电气化与自动化工程技术研究中心主任

前 言

随着社会经济和科技的发展,各类系统在结构、功能等方面日趋复杂,系统对可靠性的要求越来越高,从而对系统可靠性建模分析的准确性提出了更高的要求。复杂系统的可靠性分析,已成为可靠性发展的必然结果。

轨道交通系统作为典型的复杂系统,其结构复杂、规模庞大,各子系统功能需要由复杂的硬件系统和软件系统集成协同完成。因此,轨道交通复杂系统的可靠性建模分析成为复杂系统研究中的代表性难题。

传统可靠性分析方法在系统多故障模式、系统动态变化、状态空间较大、系统特性不确定等情况下,建模分析存在局限和困难,难以满足实际应用的要求。因此,针对轨道交通这一复杂系统的可靠性分析,应根据供电系统、监控系统等子系统侧重点的不同而采用不同的可靠性模型和分析方法。

以轨道交通复杂系统的可靠性建模分析为重点,近年来,作者在国家自然科学基金资助项目(50878188)、国家自然科学基金高铁联合基金重点项目(U1234203)、铁道部科技研究开发计划项目(2013J010-A)子课题、中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2014J009-A)等项目的资助下,从模型建立和方法选择的角度,开展轨道交通复杂系统可靠性分析的研究,具体研究了地铁牵引供电系统、磁浮牵引供电系统、地铁综合监控系统、高速铁路“四电系统”等的可靠性分析,以及高速铁路系统的健康风险评估。这些具体系统中可靠性分析问题的研究,对于理论方法的验证和工程实践的指导都具有重要的价值。

全书共 13 章。

第 1 章概述可靠性及可靠性分析的定义、可靠性的研究进展和可靠性建模分析方法的研究现状,是对可靠性分析研究的宏观解读。

第 2 章概述复杂系统可靠性分析的背景与基础,包括复杂系统及可靠性的定义特点、建模分析方法,以及复杂系统可靠性分析的重点、热点、难点问题,是复杂系统可靠性分析研究的基础知识。

第 3~8 章阐述常用的复杂系统可靠性分析方法,包括动态故障树、高级 Petri 网、层次随机回报网、Markov 链、Kronecker 代数等的原理和具体步骤、模糊理论,是对可靠性分析具体方法的介绍。

第 9~11 章详述城市轨道交通牵引供电系统、地铁综合监控系统、高速铁路“四电系统”等具体系统的可靠性建模分析实例,是复杂系统可靠性分析的典型应用。

第 12 章详述中短时间尺度下的高速铁路牵引供电系统健康评估模型和方法,包括多因素评价模型的建立和因素权重的确定方法,同时给出了具体实例,是复杂系统可靠性分析在不同时间尺度上的拓展应用。

第 13 章详述外部环境因素作用下的高速铁路牵引供电系统风险状态评估模型和方法,包括气象关联模型的建立和雷击灾害风险评估方法,同时给出了具体实例,是复杂系统可靠性分析在计及外部环境因素作用下的拓展应用。

本书由何正友著,部分章节参照总结了博士研究生于敏、程宏波及其硕士生曾德蓉等的相关研究成果,符玲、杨健维、于敏、臧天磊、唐进和王玘等参与了本书的整理工作。在本书的撰写过程中,参考和引用了哈尔滨理工大学张国志教授、南京航空航天大学王华伟副教授、太原工业学院原菊梅副教授等国内外学者的研究成果和文献资料。同时,本书得到了科学出版社和西南交通大学电气工程学院的大力支持,以及西南交通大学钱清泉院士的悉心指导。在此一并谨表衷心谢忱!

复杂系统可靠性分析及应用领域的研究成果浩如烟海,囿于作者水平,书中难免会有不妥之处,敬请读者批评指正,以便在修订时加以完善。

作 者

2014 年于西南交通大学

目 录

序

前言

第 1 章 可靠性分析概论	1
1.1 可靠性定义及可靠性分析	1
1.2 可靠性发展及我国研究进展	2
1.2.1 可靠性发展	2
1.2.2 我国可靠性研究进展	3
1.3 可靠性建模和分析方法的研究现状	4
1.4 本章小结	11
1.5 本书整体结构	11
参考文献	12
第 2 章 复杂系统可靠性分析的背景与基础	15
2.1 大规模重要系统可靠性研究的意义	15
2.2 复杂系统可靠性概述	16
2.2.1 复杂系统的定义和特点	16
2.2.2 复杂系统可靠性分析的定义	16
2.2.3 复杂系统可靠性分析的特点	17
2.2.4 复杂系统可靠性的建模分析	18
2.3 复杂系统可靠性研究的重点和热点问题	20
2.3.1 复杂系统可靠性分析的数据基础	20
2.3.2 复杂系统可靠性信息的融合处理	25
2.3.3 复杂系统可靠性建模分析	28
2.4 复杂系统可靠性分析面临的主要问题	33
2.5 本章小结	33
参考文献	33
第 3 章 基于动态故障树的可靠性分析方法	38
3.1 故障树分析法	38
3.1.1 故障树的结构函数	38
3.1.2 结构重要度和概率重要度	39
3.1.3 传统故障树的其他指标	40

3.1.4	传统故障树方法的不足	40
3.2	动态故障树分析法	40
3.2.1	动态故障树建模基本理论	40
3.2.2	动态故障树可靠性模型的求解方法及局限	41
3.3	基于 Monte Carlo 模拟的动态故障树仿真	42
3.3.1	仿真过程描述	42
3.3.2	底事件的状态数组	43
3.3.3	逻辑门的 Monte Carlo 模拟	44
3.3.4	动态故障树可靠性指标的计算	47
3.3.5	方法可行性验证	48
3.4	算例分析	50
3.4.1	静态故障树最小割集的生成	50
3.4.2	动态故障树最小顺序割集的生成	51
3.4.3	实例分析	52
3.5	本章小结	53
	参考文献	54
第4章	基于高级 Petri 网的可靠性分析方法	55
4.1	Petri 网基础理论	55
4.1.1	Petri 网的定义	55
4.1.2	Petri 网的推理	56
4.1.3	Petri 网在可靠性分析中的应用	57
4.2	基于模糊 Petri 网的可靠性分析	58
4.2.1	模糊 Petri 网定义	58
4.2.2	可靠性模糊产生式规则表示	58
4.3	基于自适应模糊 Petri 网的可靠性分析	59
4.3.1	AFPN 的表示方法	59
4.3.2	AFPN 的模糊推理	61
4.3.3	AFPN 的自适应训练方法	61
4.4	基于粗糙 Petri 网的可靠性建模分析	63
4.4.1	粗糙 Petri 网定义	63
4.4.2	粗糙集理论相关的重要定义	63
4.4.3	粗糙 Petri 网在可靠性分析中的应用	66
4.5	基于随机 Petri 网的可靠性建模分析	66
4.5.1	随机 Petri 网的定义	67
4.5.2	随机 Petri 网在可靠性分析中的应用	67

4.6 本章小结.....	69
参考文献	69
第5章 基于层次随机回报网的可靠性分析方法	70
5.1 随机回报网理论基础.....	70
5.2 层次随机回报网.....	72
5.2.1 层次随机回报网的建模	72
5.2.2 层次随机回报网的度量	72
5.2.3 层次随机回报网的等效变换	73
5.2.4 层次随机回报网的模型求解	75
5.3 基于层次随机回报网的复杂系统可靠性建模分析.....	76
5.3.1 子系统可靠性建模分析	77
5.3.2 系统可靠性建模分析	81
5.4 本章小结.....	83
参考文献	83
第6章 基于 Markov 链的可靠性分析方法	84
6.1 Markov 过程基本理论	84
6.2 基于 Markov 链的可靠性分析方法	86
6.2.1 齐次 Markov 可修系统可靠性特征量的计算	86
6.2.2 可修复串并联系统的可靠性建模分析	90
6.2.3 Markov 状态图法	92
6.2.4 动态 Markov 过程	93
6.3 基于 Markov 链的可靠性分析算例	94
6.3.1 动态故障树的 Markov 模型	94
6.3.2 动态 Markov 过程在可靠性分析中的应用	96
6.3.3 基于 Markov 模型的硬件式容错计算机系统可靠性建模分析	97
6.4 本章小结	101
参考文献.....	101
第7章 基于 Kronecker 代数的系统可靠性分析方法	102
7.1 基于 Kronecker 代数的系统可靠性模型	102
7.1.1 独立组件可靠性模型	103
7.1.2 考虑状态相依的可靠性建模	103
7.1.3 考虑功能相依的可靠性建模	104
7.1.4 可靠性模型求解	105
7.2 基于 Kronecker 代数两组件系统可靠性分析示例	106
7.2.1 组件 1 状态相依于组件 2 时的可靠性分析	106

7.2.2 两组件串联系统可靠性分析	108
7.2.3 两组件并联系统可靠性分析	112
7.3 本章小结	114
参考文献	114
第8章 基于模糊理论的可靠性分析方法	116
8.1 基于模糊理论的可靠性建模分析	116
8.1.1 基于模糊状态的模糊可靠性模型	116
8.1.2 基于仿射算法的模糊可靠性分析	118
8.2 基于模糊可靠性分析的工作站可靠性分析算例	123
8.3 本章小结	125
参考文献	125
第9章 城市轨道交通牵引供电系统的可靠性分析应用	127
9.1 城市轨道交通牵引供电系统及其可靠性分析	127
9.1.1 城市轨道交通供电系统基本结构	127
9.1.2 城市轨道交通牵引供电系统可靠性分析特点及流程	128
9.1.3 城市轨道交通牵引供电系统可靠性分析指标	129
9.2 磁浮牵引供电系统可靠性建模分析	133
9.2.1 磁浮牵引供电系统概述	133
9.2.2 磁浮牵引供电系统可靠性分析	134
9.2.3 结论	148
9.3 地铁牵引供电系统可靠性建模分析	149
9.3.1 地铁牵引供电系统概述	149
9.3.2 地铁牵引变电所可靠性分析	151
9.3.3 结论	158
9.4 本章小结	158
参考文献	158
第10章 地铁综合监控系统的可靠性分析应用	159
10.1 地铁综合监控系统概述	159
10.1.1 地铁综合监控系统的系统结构	160
10.1.2 地铁综合监控系统的系统功能	161
10.2 地铁综合监控系统可靠性分析概述	162
10.3 地铁综合监控系统可靠性建模分析实例	165
10.3.1 基于 HSRN 模型的地铁综合监控系统可靠性分析实例	165
10.3.2 基于故障树混合法的地铁综合监控系统可靠性分析实例	169

10.3.3 基于 Kronecker 代数的地铁综合监控系统可靠性分析实例	174
10.3.4 基于模糊可靠性法的地铁综合监控系统可靠性分析实例	181
10.4 本章小结	185
参考文献	185
第 11 章 高速铁路“四电系统”可靠性分析应用	187
11.1 “四电系统”的体系概述	188
11.1.1 “四电系统”的构成	188
11.1.2 “四电系统”的接口	189
11.1.3 “四电系统”子系统作用关系	190
11.2 “四电系统”可靠性分析	191
11.2.1 “四电系统”可靠性分析评定准则	192
11.2.2 “四电系统”可靠性分析方法	193
11.3 海南东环线“四电系统”可靠性分析实例	194
11.3.1 海南东环线概述	194
11.3.2 基于动态故障树的海南东环线“四电系统”可靠性分析	195
11.4 本章小结	223
参考文献	223
第 12 章 高速铁路牵引供电系统健康状态评估及应用	224
12.1 高速铁路牵引供电系统健康评估方法	225
12.1.1 牵引供电系统健康状态划分	226
12.1.2 牵引供电系统健康状态的模糊综合评估	227
12.2 高速铁路牵引供电系统健康评估实例	233
12.2.1 牵引变电所的健康状态评估	233
12.2.2 接触网的健康状态评估	237
12.2.3 牵引供电系统的健康状态评估	242
12.3 本章小结	243
参考文献	244
第 13 章 高速铁路牵引供电系统风险状态评估	245
13.1 牵引供电系统故障的气象关联建模方法及实例	245
13.1.1 牵引供电系统故障规律分析	245
13.1.2 牵引供电系统气象规律统计	248
13.1.3 牵引供电系统故障的气象关联建模	251
13.1.4 牵引供电系统故障气象关联模型应用实例	253
13.2 牵引供电系统雷击灾害风险评估方法及实例	254

13.2.1 牵引供电系统的雷击风险	254
13.2.2 雷击灾害风险评估方法	257
13.2.3 雷击灾害风险评估实例	260
13.3 本章小结	263
参考文献	263

第 1 章 可靠性分析概论

可靠性分析是伴随航空工业和军事技术的应用而发展起来的,随着人类社会经济和科技的发展,可靠性技术指标作为产品质量最重要的指标之一,早已受到世界各国的高度重视。任何产品和技术都是以可靠性为基础的,因为科学技术的发展要求高可靠性,现代工业生产过程需要贯穿可靠性,维修使用阶段依赖可靠性。系统的不可靠会造成经济和人员的重大损失,也可能对国家的军事、政治声誉产生严重后果。因此,目前现代可靠性分析技术已经逐步渗透社会生产和生活的多个领域,除了在家用电器、汽车工业等发生故障不会造成很大社会经济影响的领域中得到了应用,还在核工业、电力工业、大型重工业等发生故障后会带来严重社会经济影响的领域中得到了广泛应用。

随着科学技术的进步,各类系统的结构日趋复杂、功能日臻完善,对可靠性的要求也越来越高,但达到高可靠性的难度却大大增加。同时,大规模重要系统的大量涌现,以及运行环境的多样化等现状决定了迫切需要从系统的角度研究可靠性,这是可靠性发展的必然结果,也是从经验教训中总结出的规律。钱学森教授曾明确指出:不论是技术领域或经济领域,若研究一个大而复杂的系统,就不能不考虑它的可靠性,不仅要研究其各个组成部分的可靠性,更要研究系统整体的可靠性。可见,系统可靠性已成为不可忽视的重要问题。

1.1 可靠性定义及可靠性分析

可靠性是指产品或系统在规定的条件下、规定的时间内,完成规定功能的能力。其中,产品可以泛指任何系统、设备和元器件。规定条件、规定时间和规定功能构成产品可靠性定义的三个要素。

规定条件包括使用时的环境条件和工作条件。例如,同一型号的列车在不同地区和不同季节条件下行驶,其可靠性的表现就有所不同,要谈论产品可靠性就必须指明其规定的条件。

规定时间是指产品规定的任务时间。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不同的。随着产品任务时间的增加,产品出现故障的概率将增加,而产品的可靠性将下降。例如,一台机车用了 10 年后和刚刚出厂时相比,它发生故障的概率显然会大很多。因此,谈论产品的可靠性离不开规定的任务时间。

规定功能是指产品规定的必须具备的功能及其技术指标。要求产品功能的多少和其技术指标的高低,直接影响产品可靠性指标的高低。例如,轨道交通系统的主要功能有加大运输力量、提升运输速度和缓解交通拥堵,那么规定的功能是三者都要,还是仅需要列车能够载运乘客就行,得出的可靠性指标是完全不同的。

可靠性分析包括定性的可靠性分析和定量的可靠性分析。定性的可靠性分析包括故障模式影响危害性分析法(Failure Mode、Effect and Criticality Analysis, FMECA)、故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)、事件树分析法(Event Tree Analysis, ETA)和可靠性框图法(Reliability Block Diagrams, RBD);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。

可靠性分析指标可使用概率指标或时间指标,具体包括可靠度、失效率、平均无故障工作时间、平均失效前时间、有效度等。例如,典型的失效率曲线是浴盆曲线,分为三个阶段:早期失效期、偶然失效期和耗损失效期。早期失效期的失效率为递减形式,即新产品失效率很高,但经过磨合期,失效率会迅速下降;偶然失效期的失效率为一个平稳值,意味着产品进入了一个稳定的使用期;耗损失效期的失效率为递增形式,即产品进入老年期,失效率呈递增状态,产品需要更新。

可靠性分析研究的基础是可靠性数据。通过可靠性数据分析技术,从可靠性数据中有效挖掘出关于产品可靠性的多层面和多角度的状态信息。可靠性数据分析是一种既包含数学理论又包含工程实际的分析方法,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,给出系统可靠性指标的定性和定量估计。

1.2 可靠性发展及我国研究进展

1.2.1 可靠性发展

可靠性的提出至今已有 60 余年,其发展可分为以下三个阶段。

(1) 第一阶段,20 世纪 30~40 年代,可靠性研究初期发展阶段。这一时期经历了两次世界大战,战争中运输工具和武器装备的大比例因意外事故而失效,使得人们注意到并开始研究这些意外事故发生规律,这就是可靠性问题的提出。到第二次世界大战末期,德国火箭专家 Lussen 首次把 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%,标志着对系统可靠性研究的开始。

(2) 第二阶段,20 世纪 50~60 年代,可靠性技术发展形成阶段。这一时期世界上不少发达国家都注意到产品可靠性问题,并对可靠性问题进行了深入的研究,大体上确定了可靠性研究的理论基础和研究方向。

1952年,美国军事部门、工业部门和有关学术部门联合成立了“电子设备可靠性咨询组”(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment, AGREE); 1975年提出了《军用电子设备可靠性报告》,该报告首次比较完整地阐述了可靠性理论及研究方向,从此可靠性研究的方向大体被确定下来。1954年,美国召开了第一次可靠性和管理学术会议。1962年,召开了第一届可靠性与可维修性学术会议及第一届设备故障物理学术会议,将对可靠性的研究发展到对可维修性的研究,进而深入产品故障机理方面的研究。20世纪60年代以后美国大约40%的大学开设了可靠性工程课程。

日本是在1956年从美国引进可靠性技术的。1958年日本科技联盟(Japanese Union of Scientists and Engineers, JUSE)成立了可靠性研究委员会,1971年日本召开了第一届可靠性学术会议。日本虽然开展可靠性工作较晚,但其注意到将可靠性技术推广运用到民用工业部门,取得了很大的成功,大大提高了其产品的可靠性,使其高可靠性产品(如汽车、彩电、冰箱、收录机、照相机等)畅销全世界,也正是日本人率先预见了今后产品竞争在于可靠性的竞争。

1962年英国出版了《可靠性与微电子学》杂志。同时法国国立通信研究所也成立了“可靠性中心”,进行可靠性数据的收集与分析,并于1963年出版了《可靠性杂志》。

苏联从1950年开始注意到可靠性问题,并开始对可靠性理论及其运用进行研究。20世纪60年代初开始从技术、组织上采取措施,提高产品可靠性,促进了可靠性技术的发展。

(3) 第三阶段,20世纪70年代以后,可靠性进一步发展的国际化时代。可靠性引起国际的高度重视,1977年国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)设立了可靠性与可维修性技术委员会,负责协调各国的可靠性用语及定义、可靠性管理、数据的收集等。可靠性研究已经由电子、航空、宇航、核能等尖端工业部门扩展到电机与电力系统、机械、动力、土木等一般产业部门,扩展到工业产品的各个领域。如今,提高产品的可靠性已经成为提高产品质量的关键。在全球化的趋势下,只有那些高可靠性的产品才能在日趋激烈的市场竞争中生存下来。不仅如此,现在国外还把对可靠性的研究工作提高到节约资源和能源的高度来认识,力求通过可靠性研究来延长使用期,通过有效的可靠性分析设计达到有效利用材料、减少工时和产品轻便化。

1.2.2 我国可靠性研究进展

我国对可靠性问题的研究起步较晚,20世纪60年代进行了有关可靠性研究的开拓性工作,但直到70年代末、80年代初可靠性研究才重新受到重视。特别是80年代初,伴随着全面质量管理的兴起和质量意识的深入,可靠性研究的重要性逐渐被人们所意识。同时,人们也认识到提高产品的可靠性必须从设计、制造等方

面开始,虽然会使产品的设计费用、元件成本和制造成本增加,但是因产品减少了维修、提高了使用寿命,总的经济效益将得到大幅度提高。可靠性研究在我国的发展主要表现在以下几个方面。

(1) 行业相继成立了可靠性学术组织。1979年,中国电子学会成立了可靠性与质量委员会。1981年,中国数学学会成立了可靠性专门委员会。1984年,中国汽车工程学会成立了汽车可靠性专门委员会。1987年,中国机械工程专业管理委员会成立了机械可靠性专门委员会。此外,还成立了“中国电子元器件质量认证委员会”和“电子电工产品可靠性与维修性标准化委员会”等机构。

(2) 制定和颁布了一批可靠性标准。1981年颁布了第一个可靠性和实验系列标准国标 GB 2689—81《寿命实验和加速寿命实验》,根据其编写的《可靠性实验及其统计分析》成为我国可靠性研究人员自行编制的具有较大影响的重要参考书目;1982年颁布了第一个可靠性标准国标 GB 3187—82《可靠性基本名词术语》。此外,还相继颁布了一系列国家标准,如 GB 4885—85《正态分布完全样本可靠度单侧置信下限》,GB 5085—86《设备可靠性实验有关标准》,GB/T 7289—1987《可靠性、维修性与有效性预计报告编写指南》,GB/T 3187—1994《可靠性、维修性术语》,DL/T 861—2004《电力可靠性基本名词术语》;以及一些可靠性的行业标准:DL/T 989—2005 直流输电系统可靠性评价规程;GB/T 21194—2007 通信设备用的光电子器件的可靠性通用要求;GB/T 21562—2008 轨道交通可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例;GB/T 7163—2008 核电厂安全系统的可靠性分析要求;GB/T 14394—2008 计算机软件可靠性和可维护性管理等。

(3) 召开可靠性相关会议。2000年,北京航空航天大学筹办了“第一届发动机可靠性学术讨论会”;2001年,湖南省召开了“线损、无功电压、可靠性会议”;2002年,召开了“第二届全国结构安全性与可靠性学术会议”;2002年10月,在大连召开了“全国可靠性学术交流会”;2009年7月,在成都召开了“第八届国际可靠性、维修性、安全性会议(ICRMS'2009)”;2014年8月,在广州召开了“第十届国际可靠性、维修性、安全性学术会议(ICRMS'2014)”;2014年11月,在上海召开了中国区首届“国际可靠性技术应用亚太区研讨会(ARS)”。此类学术交流会议主要集中在机械工程方面,可靠性分析的应用主要集中在航空、航天和军事方面。

从目前的可靠性研究现状来看,我国的可靠性研究发展较晚,在理论、实践和运用方面都有待于进一步深入研究探讨。

1.3 可靠性建模和分析方法的研究现状

系统可靠性研究是对目标系统的可靠性水平进行综合分析,为系统可靠性设计、分配和改进等提供理论依据。对于功能、层次、属性较少的系统,系统可靠性研