

复杂系统

可靠性与可用性仿真

Simulation Methods for Reliability
and Availability of Complex Systems

[西] Javier Faulin, Angel A. Juan, Sebastián Martorell

编著

[美] José-Emmanuel Ramírez-Márquez

曹军海 申莹 杜海东 译

复杂系统可靠性与可用性仿真

Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems

[西] Javier Faulin, Angel A. Juan, Sebastián Martorell

[美] José-Emmanuel Ramírez-Márquez

编著

曹军海 申 莹 杜海东 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

现代人类社会已经离不开大量互联互通的复杂系统,而这些复杂系统在运行中的可靠性和可用性问题,直接关系到人们的日常生活、经济活动、人身安全甚至社会稳定。复杂系统可靠性和可用性的分析与研究一直是各个行业领域专家们关注的热点问题。传统的解析计算模型和方法越来越难于满足人们对复杂系统研究的需求,而仿真技术在复杂系统的分析方面却体现出越来越大的优势。

本书由西班牙纳瓦拉公立大学的 Javier Faulin 教授等人联合编著。本书内容主要分为三部分:第一部分介绍了系统可靠性、可用性仿真的基本方法;第二部分主要关注于仿真方法在解决系统可靠性问题中的应用;第三部分则重点介绍了仿真方法在分析复杂系统的可用性和维修问题方面的有关应用。

本书内容既包含了基本理论和方法,也汇集了大量不同行业领域的应用案例,具有非常好的理论性和示范性,为从事复杂系统可靠性和可用性领域研究的学者们提供了非常有价值的参考。

Translation from the English language edition:

Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems

By Javier Faulin, Angel A. Juan, Sebastián Martorell, José-Emmanuel Ramírez-Márquez

Copyright © Springer-Verlag London Limited 2010

Springer-Verlag London Limited is a part of Springer Science+Business Media All Rights Reserved

本书简体中文专有翻译出版权由 Springer Science+Business Media 授予电子工业出版社。专有出版权受法律保护。

版权贸易合同登记号 图字:01-2016-4608

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统可靠性与可用性仿真/(西)哈维尔·福林(Javier Faulin)等编著;曹军海,申莹,杜海东译. —北京:电子工业出版社,2016.9

书名原文:Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems

ISBN 978-7-121-29161-6

I. ①复… II. ①哈… ②曹… ③申… ④杜… III. ①系统可靠性-仿真算法 ②系统工程-可用性-仿真算法 IV. ①N945.17

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第141791号

策划编辑:张迪

责任编辑:刘真平

印刷:北京京科印刷有限公司

装订:北京京科印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 印张:15 字数:384千字

版次:2016年9月第1版

印次:2016年9月第1次印刷

印数:2000册 定价:68.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254469。

序

为了满足能源、通信、运输等社会需求，需要建立复杂的互联网络和系统，并且随着技术的发展与进步持续、快速地改进。而且，消费者需要越来越高的可靠性和性能。同时，这些系统也日益复杂。鉴于这些复杂性及发展态势，一些传统的可靠性模型和方法因其不能及时提供结果，或是其要求的数据和假设不再适应当前的复杂系统，而使其使用与适用性日益呈现出局限性。系统性能和可靠性仿真，作为显式解析和严谨的可靠性预计数学模型的替代方法，已经存在了很长时间。然而，随着系统的日益复杂，仿真建模的吸引力、广泛适用性日益凸显。此外，新的仿真模型和方法正在不断发展，为用于研究复杂系统可靠性和可用性行为的仿真建模方法提供了创新性和更有效的支撑。新的、更先进的仿真模型能够更快速地用于分析新系统，尽可能地减少假设等约束限制。因此，更实际的建模方法可被用于解决多种多样的分析问题。

本书的编者（Faulin、Juan、Martorell 和 Ramírez - Márquez 教授）成功地完成了一项卓越的挑战，在文中囊括了一些典型、有趣的、描述先进仿真方法用于评估复杂系统可靠性和可用性的章节和资料，而且涵盖许多不同的典型问题。因此，为读者提供了关于仿真领域的全新概况，包括离散事件仿真、蒙特卡洛仿真。本书的所有参编人员都表现出了对该领域的专长，包括如 Lawrence Leemis 博士、Enrico Zio 博士和其他相关人员，他们都是可靠性领域中非常受人敬重的、成绩卓越的专家。

本书所呈现出的仿真方法基于严密的理论基础。然而，也在许多实际问题上表现出实效性和示范性。因此，该书对于理论工作者、工业技术人员或是大学教学科研工作者都具有重要的参考价值。

David Coit

罗格斯，新泽西州立大学，美国

译者序

可靠性和可用性问题是困扰很多大型复杂系统使用效能和质量的难题，因此各个工程应用领域都极为重视。随着系统复杂性的提高，传统基于解析方法的系统可靠性、可用性分析与评估技术面临越来越大的困难，而仿真技术的灵活性、克服维度灾难的能力及其科学性等，使得仿真技术在解决不同工程技术领域的可靠性和可用性问题方面得到了越来越多的应用。

本书的主题是通过计算机仿真技术结合相关算法，解决复杂系统可靠性和可用性水平的分析、评估与优化问题，从而为复杂系统在设计或使用过程中的不断改进提供方法和技术。本书从能源、运输、通信、制造业等多个行业收集整理了大量的应用案例，力图为复杂系统可靠性与可用性建模与仿真技术的应用提供一本指南，为实际工程问题的解决提供参考。

本书是美国罗格斯大学 Hoang Pham 教授担任主编的“Springer 可靠性系列丛书”中的一本，由西班牙纳瓦拉公立大学的 Javier Faulin 教授主编，融汇了大量各领域专家的最新研究成果，对于复杂系统可靠性领域的研究生、研究人员、工程技术人员等具有非常好的参考意义。

本书分为三部分，共 13 章，其中第 1~6 章由曹军海翻译，第 7~10 章由申莹翻译，第 11~13 章由杜海东翻译，全书由陈守华、李春洋、徐丹、张波、刘福胜、刘维维审校。曹军海负责全书的翻译策划、统稿等工作。

本书在版权引进和出版过程中，得到了“十二五”国防预先研究项目“基于分析平台的装甲车辆保障性验证技术”（项目号：51319050302）的资助。

由于本书内容涉及多个不同行业、不同专业的应用，因此在翻译过程中难免有不专业、错误或不当之处，敬请读者批评指正。

译者

2016 年 1 月

前 言

复杂系统和人们的生活息息相关，广泛存在于通信网络、计算机、交通运输、海上设施、核电设施及电子电气设备之中。产品可靠性和可用性（R&A）对其他性能指标，如质量和安全性，有着重要影响，因此产品可靠性的设计及可用性的确定对于工程设计和管理人员都是一项十分重要的工作。除此之外，由于常用分析手段在处理实时系统时所表现出的复杂性、低效率及不适用性，使得这一问题的解决变得极其困难。

对于复杂系统而言，在其使用过程中的各个阶段，可靠度的精确计算可以使用不同的方法。但遗憾的是，对于高复杂性系统，在规定的时间内获得系统可靠度的精确值将变得十分困难，甚至是不可能完成的工作。同样的问题也存在于特定维修保障方案下的复杂系统可用度的精确计算。对于上述问题，本书作者认为仿真技术，如蒙特卡洛仿真（MCS）和离散事件仿真（DES）将是唯一可用于解决 R&A 指标确定问题的有效手段。

本书的主题是通过计算机仿真技术和算法来确定复杂系统可靠性和可用性水平，从而为其在设计和使用阶段的改进与提高提供技术支撑。

硬件或物理设备性能退化，不仅受其使用寿命的影响，而且与其使用强度和环境密切相关。上述硬件设备广泛应用于核电设施、通信网络、计算机系统、轮船和海上设施，以及航空航天等系统中，严酷工作环境所带来的机械强度、化学腐蚀及辐射的影响，将是对产品完整性、稳定性和功能发挥的极大挑战。系统性能的退化不仅存在于硬件系统，该过程也存在于无形系统，如计算软件中。以计算机网络为例，系统工作一段时间后需要定期停机维护，此时需要系统的重新安装，至少系统重启，在此时间段内，主机将暂停服务。最终，在此期间，若系统中任一产品单元（组件或系统、硬件或软件）出现故障，而且没有采取有效的维修策略，系统进程将被取消，系统将停止工作。

可靠性的通常定义是系统或单元在规定条件下和规定时间内无故障地完成规定功能的概率。那么，可用性可定义为系统或单元在一定时间内，在一定维修保障策略和使用条件下完成规定功能的概率。近几十年内，大量与系统维修策略制定和实施相关的工作得到了开展，并且得到了实际应用。当系统某一部件发生故障或将要发生故障，而该部件故障不会对系统故障和状态产生任何影响时，此部件仍将会被维修或者被替换。对于系统管理和设计人员而言，上述维修策略可有效用于短期、中期及长期时效系统可用度的预测，并可用于维修策略改进、单个部件可靠性提高或系统结构发生调整时对系统可用性水平的影响分析。上述过程所获取的信息可确保数据的完整性和安全性，产品的保质期、使用寿命甚至是人的健康预测。总之，上述方法和软件工具的研究具有重要意义，主要表现在：用于支撑系统在某一特定时间内可用状态的预测；为系统可用性的改进和提高提供数据和信息支持。

有不少学者指出，在处理真正的复杂系统时，只有仿真技术，比如 MCS，特别是 DES，可以用于预测系统的 R&A 指标。实际上，仿真已经成为解决许多工程难题的强大工具。相对于解析分析而言，仿真方法更为简单。更为重要的是，仿真能够对真实系统活动的细节进

行建模描述。此外,仿真能够准确反映系统内部活动和某一特定部件在此期间表现出的可靠性或可用性水平。但该方法也存在一定的不足,由仿真获得的评估结果是由大量数据统计分析得到的,不是精确值。同时,仿真技术还可用于多阶段系统、部件相关性、非完美维修、部件动态活动的系统 R&A 建模分析。同时,基于仿真的复杂系统可用性研究已经开展。实际上,近年来一些用于复杂系统 R&A 分析的商业仿真工具已经完成了开发。

任一系统将随着使用期限的增加变得不可靠,而当其不能完成规定功能任务时就被认为系统失效。而致命性的故障将导致严重的经济损失,对人类和环境带来破坏性的影响。因此,系统故障的准确预测被认为是对复杂系统 R&A 研究最大的挑战。不管是从重要性还是难度上来看,仿真技术都是独立于传统精确 R&A 分析方法之外的有效工具,对于复杂系统分析手段的扩展具有十分重要的意义。

因此,本书涉及了复杂系统的仿真与 R&A,这两个主题通常不会放到一起研究。本书可分为三部分。

第一部分:可靠性和可用性的仿真基本原理。

第二部分:可靠性中的仿真应用。

第三部分:可用性和维修中的仿真应用。

每一部分都包括了不同内容,体现了以下意图:

第一部分:在与 R&A 相关的不同理论平台上具体描述一些运行仿真的方法。

第二部分:展示仿真在研究和可靠性决策有关的不同情景中的一些有意义的应用。

第三部分:讨论仿真在研究和可用性决策有关的不同案例中的一些有趣应用。

第一部分提出了一些基于 R&A 仿真原理的新应用理论成果,这一部分由四章组成。第 1 章由 Zio 和 Pedroni 撰写,描述一些有趣的使用 MCS 进行可靠性精确估计的应用。第 2 章由 K. Durga Rao 等撰写,通过仿真建立动态决策诊断树,同时给出了实例。Cancela 等在第 3 章改进了基于路径的蒙特卡洛可靠性评估法。第 4 章由 Leemis 撰写,介绍了几类生成变量的仿真方法。这一部分是全书的核心部分,让读者对基于 R&A 的仿真有一个全面的认识。

第二部分和第三部分是紧密联系的,这两部分展现了仿真在本书两大主题领域(可靠性和可用性)中的应用。第二部分是关于可靠性的仿真应用,第三部分是关于可用性和维修仿真的一些其他应用。但是,这种分类并不是绝对的,因为这两个方面本来就联系紧密。

第二部分由 5 章组成,包括一些可靠性仿真的实用案例。因此,第 5 章给出了系统可靠性和预防性维修仿真的基本框架。在接下来的章节中,Marotta 等讨论了数据集成系统中的可靠性模型,对前几章的观点进行了总结归纳。第 6 章与第 7 章分别利用解析法和仿真法对电力分配系统可靠性进行了研究,并对结果进行了对比分析。这是本书中最具有创新意义的应用尝试。第 8 章介绍了用 reliasoft 软件分析工业制造的过程。第 9 章主要介绍了使用离散事件仿真和模糊决策方法研究建筑和民用工程领域中的系统可靠性。

第三部分包括 4 章。第 10 章介绍了维修保障人员仿真建模方法,相对于某些常规仿真工具描述的维修问题而言将是一个好的应用研究。Kwang Chang 等在第 11 章中给出了一个关于海上设施可用性评估案例应用。Zille 等在第 12 章中阐述了仿真在研究多部件系统维护中的应用。最后,Farukh Nadeem 和 Erich Leitgeb 在第 13 章中描述了一个可以用来研究光学无线通信可用性的仿真模型。

本书适用于工业工程实践人员（系统工程师和管理人员），以及 R&A 领域的研究人员。此外，本书还适用于 R&A 研究方向的研究生。

在这里，我们要感谢各个章节的作者，正是他们的齐心协力和对我们咨询的快速回应，才使得这本手册按期完成。我们衷心感谢 Springer 出版社编辑 Anthony Doyle 先生的帮助和鼓励。同时，也要感谢包括 Claire Protherough 先生在内的所有为这本书的出版做出贡献的员工。

Javier Faulin

纳瓦拉公立大学，潘普洛纳，西班牙

Angel A. Juau

加泰罗尼亚开放大学，巴塞罗那，西班牙

Sebastián Martorell

巴伦西亚理工大学，巴伦西亚，西班牙

Jose – Emmanuel Ramírez – Márquez

史蒂文斯理工大学，霍博肯，新泽西州，美国

目 录

第一部分 可靠性和可用性的仿真基本原理

第 1 章 基于蒙特卡洛仿真的可用性评估	3
1.1 引言	3
1.2 仿真方法在研究中的应用	5
1.2.1 子集模拟法	5
1.2.2 线性抽样法	7
1.3 仿真方法比较	10
1.3.1 重要度抽样	10
1.3.2 降维法	10
1.3.3 正交轴线法	11
1.4 应用案例 1: 断裂面模型	12
1.4.1 力学模型	12
1.4.2 结构可靠性模型	13
1.4.3 案例分析	13
1.4.4 结果分析	14
1.5 应用案例 2: 热疲劳裂纹增长模型	16
1.5.1 力学模型	16
1.5.2 结构可靠性模型	18
1.5.3 案例分析	18
1.5.4 结果分析	18
1.6 结论和方法的不足	20
附件 1 马尔科夫链蒙特卡洛仿真	22
附件 2 线性抽样算法	23
参考文献	25
第 2 章 动态故障树分析: 仿真方法	27
2.1 故障树分析: 静态与动态	27
2.2 动态故障树门	28
2.3 静态门向动态门的转换	30
2.4 动态故障树的处理方法	30
2.5 动态故障树模型	31
2.6 数值分析方法	32
2.6.1 PAND 门	32

2.6.2	SEQ 门	33
2.6.3	SPARE 门	33
2.7	动态故障树的蒙特卡洛仿真方法	33
2.7.1	PAND 门	34
2.7.2	SPARE 门	35
2.7.3	FDEP 门	36
2.7.4	SEQ 门	36
2.8	应用案例 1: 典型核电站简易电力 (交流) 供应系统	37
2.8.1	解析分析方法	37
2.8.2	蒙特卡洛方法	38
2.9	应用案例 2: NPP 中的反应调节系统	40
2.10	总结	41
	参考文献	42
第 3 章	静态模型蒙特卡洛可靠性评估路径法的分析与改进	44
3.1	概述	44
3.2	传统蒙特卡洛可靠性的仿真评估	45
3.3	路径法	47
3.4	算法鲁棒性分析	48
3.5	方法改进	50
3.6	随机拟蒙特卡洛加速方法	51
3.6.1	拟蒙特卡洛仿真方法	52
3.6.2	随机拟蒙特卡洛方法	53
3.6.3	静态可靠性问题的方法应用	53
3.6.4	数据结果分析	54
3.7	结论	56
	参考文献	56
第 4 章	可靠性中的变量生成	58
4.1	随机寿命的生成	58
4.1.1	基于密度算法	59
4.1.2	基于风险分析的方法	61
4.2	随机过程的生成	62
4.2.1	计数过程	62
4.2.2	泊松过程	62
4.2.3	更新过程	63
4.2.4	交替更新过程	63
4.2.5	非齐次泊松过程	64
4.2.6	马尔科夫模型	64
4.2.7	其他转换	65
4.2.8	随机过程生成	65

4.3 协变量生存模型	67
4.3.1 加速寿命模型	68
4.3.2 比例风险模型	68
4.3.3 随机寿命生成	68
4.4 结论和进一步阅读文献	69
参考文献	69

第二部分 可靠性中的仿真应用

第5章 基于仿真的公共基础设施可靠性与预防性维修研究方法	75
5.1 简介	75
5.2 仿真的力量	76
5.3 案例分析	77
5.3.1 突发事件响应	77
5.3.2 桥梁的预防性维修	80
5.4 结论	83
参考文献	84
第6章 数据集成系统的可靠性模型	86
6.1 简介	86
6.2 数据质量概念	88
6.2.1 新鲜度和精确度定义	88
6.2.2 数据集成系统	89
6.2.3 数据集成系统质量评估	90
6.3 数据集成系统质量管理的可靠性评估	91
6.3.1 数据集成系统中的单一状态质量评估	93
6.3.2 基于可靠性的质量行为模型	93
6.4 用于评估数据集成系统可靠性的蒙特卡洛仿真	97
6.5 总结	99
参考文献	100
第7章 使用解析性可靠性网络等效技术与时间序列仿真方法的电力分配系统	
可靠性评估	102
7.1 简介	102
7.2 基本的配电系统可靠性指标	103
7.2.1 基本的负荷点指标	103
7.2.2 基本的系统指标	103
7.3 解析性可靠性网络等效技术	104
7.3.1 通用供电器的定义	105
7.3.2 通用供电器的基本方程	105
7.3.3 网络可靠性等效	106
7.3.4 评估程序	108

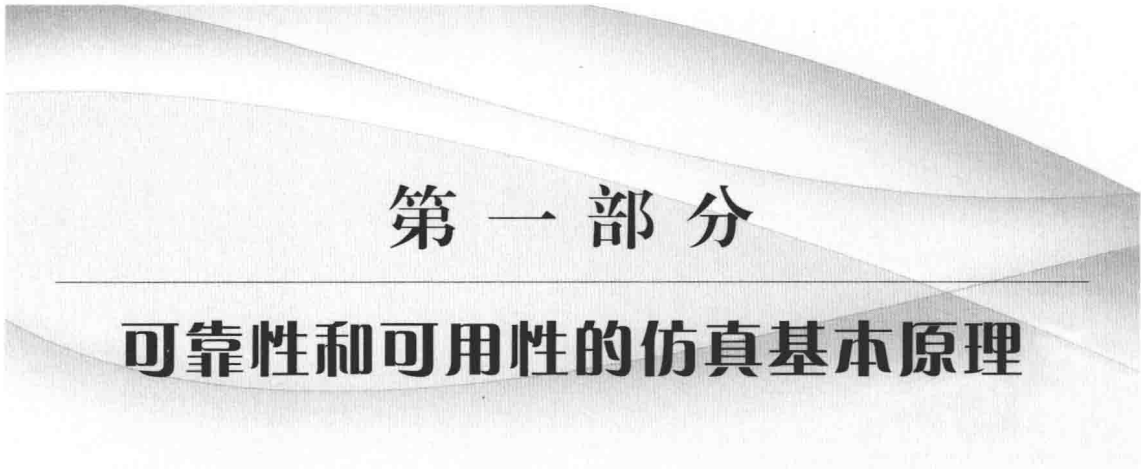
7.3.5 举例	108
7.4 时间序列仿真技术	111
7.4.1 元素模型和参数	111
7.4.2 元素参数的概率分布	111
7.4.3 随机数的生成	112
7.4.4 故障负荷点的确定	113
7.4.5 对重叠时间的考虑	114
7.4.6 可靠性指标及其分布	114
7.4.7 仿真程序	115
7.4.8 停止规则	115
7.4.9 举例	115
7.4.10 负荷点与系统指标	115
7.4.11 负荷点指标的概率分布	116
7.4.12 系统指标的概率分布	118
7.5 总结	119
参考文献	119
第8章 流程工业可靠性、可用性和维修性仿真的应用：案例分析	122
8.1 简介	122
8.2 可靠性、可用性和维修性分析	122
8.3 流程工业中的可靠性工程	123
8.4 流程工业 RAM 分析的适用性	123
8.5 当前工作的特点及使用的软件	124
8.6 案例分析	124
8.6.1 天然气处理厂可靠性框图建模	125
8.6.2 故障与修理数据	129
8.6.3 阶段图和可变流量	130
8.6.4 隐蔽与降级故障建模	131
8.6.5 维修建模	132
8.6.6 人员与备件资源	133
8.6.7 结果	134
8.6.8 “坏分子”确定	135
8.6.9 费用分析	136
8.6.10 灵敏度分析	137
8.7 结论	138
参考文献	138
第9章 离散事件仿真与基于模糊规则的系统在结构可靠性与可用性中的潜在应用	140
9.1 简介	140
9.2 结构可靠性的基本概念	141
9.3 元件级与结构级可靠性	141

9.4 基于概率方法的贡献	142
9.5 解析法与基于仿真的方法	142
9.6 仿真在结构可靠性中的应用	142
9.7 对结构可靠性问题我们所采用的方法	143
9.8 数值示例 1: 结构可靠性	144
9.9 数值示例 2: 结构可用性	147
9.10 未来工作: 增加基于模糊规则的系统	148
9.11 结论	149
参考文献	150

第三部分 可用性和维修中的仿真应用

第 10 章 维修人力建模: 一个人力系统集成师用于估计人力、人员和培训需求的工具	155
10.1 简介	155
10.2 IMPRINT 人力系统集成和 MANPRINT 工具	156
10.3 了解维修模块	156
10.3.1 系统数据	156
10.3.2 想定数据	158
10.4 维修建模体系结构	159
10.4.1 静态模型——这一切背后的大脑	160
10.4.2 一个简单示例——汇总	163
10.5 结果	163
10.6 更多的强大功能	164
10.6.1 系统数据导入功能	164
10.6.2 性能调节对修复时间的影响	164
10.6.3 可视化功能	164
10.7 总结	165
参考文献	165
第 11 章 蒙特卡洛仿真在海上设施的生产可用性分析中的应用	167
11.1 简介	167
11.1.1 海上设施	167
11.1.2 海上设施的可靠性工程特性	168
11.1.3 海上设施的生产可用性	168
11.2 基于蒙特卡洛仿真的可用性估计	169
11.3 案例研究: 生产可用性估计	172
11.3.1 系统功能性描述	173
11.3.2 部件故障与修复率	174
11.3.3 生产重新配置	174
11.3.4 维修策略	175

11.3.5 运行信息	176
11.3.6 蒙特卡洛仿真模型	177
11.4 商业化工具	179
11.5 结论	180
参考文献	180
第 12 章 仿真用于可维修多组件系统可靠性评估	181
12.1 面向可用性评估的维修建模	181
12.2 一个模拟复杂维修系统的通用方法	183
12.3 Petri 网用于可维修系统建模	184
12.3.1 Petri 网基础	184
12.3.2 组件建模	184
12.3.3 系统建模	187
12.4 模型仿真与可靠性性能评估	189
12.5 涡轮增压润滑系统性能评估	190
12.5.1 案例研究的表达	190
12.5.2 可维修系统不可用性的评估	191
12.5.3 其他可靠性分析	193
12.6 结论	193
参考文献	194
第 13 章 基于仿真的光学无线通信可用性评估	196
13.1 简介	196
13.2 可用性	197
13.3 可用性估计	197
13.3.1 雾模型	197
13.3.2 雨模型	198
13.3.3 雪模型	199
13.3.4 链路预算	199
13.3.5 通过雾事件仿真进行测量设置和可用性估计	200
13.3.6 通过雨事件仿真进行测量设置和可用性估计	205
13.3.7 通过雪事件仿真进行可用性估计	207
13.3.8 混合网络可用度估计: 为了提高可用度	208
13.3.9 仿真效果分析	210
13.4 结论	211
参考文献	211
编辑简介	213
索引	219



第 一 部 分

可靠性和可用性的仿真基本原理

第1章 基于蒙特卡洛仿真的可用性评估

E. Zio 和 N. Pedroni

摘要 由于建模的灵活性，蒙特卡洛（MCS）仿真客观地反映了问题的类型和细节，从而成为评估系统可靠性的有力方法。仿真是对现实系统的重复抽样，然而，对于极少发生故障的系统而言，为了使仿真评估结果达到可接受的数据精度，必须通过大量仿真实验才能得以实现，如此巨大的数据计算量是可想而知的。基于此，为了有效降低数据处理规模，开展系统故障仿真抽样技术的研究是十分有意义的。

本章中，考虑利用成熟的子集模拟法（SS）和线性抽样（LS）技术提高蒙特卡洛仿真在系统故障率仿真的效率。其中，子集模拟法的基本原理是通过选取合适的中间事件，将产品故障概率表示成为一定规模的条件概率，进行故障数据样本数据量较小时产品可靠性的精确评估。线性抽样法利用线而不是随机点探测产品故障趋势域。通过定义“重要方向”，用于指向产品故障域，从而将产品可靠性多维度降低为单维度，便于问题的解决。

根据相关文献，上述两种方法分别应用于两种结构可靠性模型，即用于热疲劳裂纹扩散的断裂面模型和 Paris - Erdogan 模型，相对于其他统计仿真实验手段，如传统蒙特卡洛仿真，文献中从重要性抽样、降维，以及正交轴线等方面对方法的有效性进行了比较分析。

1.1 引言

可靠性的精确评估对于基于性能设计的现代工业系统而言至关重要，特别是民生、核能、航空航天、化学中对安全性要求较高的系统和装置，其设计和使用必须遵循一定的风险指向（Thunnissen 等，2007；Patalano 等，2008）。

可靠性评估要求系统组成部件结构和机械性能模型的准确构建，并能反映系统在工作周期内主要机构动作、负荷条件，以及性能退化和故障发生的特点（Schueller and Pradlwarter, 2007）。

实际上，并不是所有系统特性都能够通过建模进行描述。这是因为：（1）系统寿命周期内某些现象固有的随机性；（2）现象知识不完全性。因此，这种不确定性出现在假设模型（模型的不确定性）及参数取值中（参数的不确定性），这就导致模型输出的不确定性，因此必须通过系统的实际评估进行量化。

系统故障概率可用一个多重积分数学式表达为：

$$P(F) = P(\mathbf{x} \in F) = \int I_F(\mathbf{x}) q(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (1.1)$$

E. Zio 和 N. Pedroni

能源系，米兰理工大学，Via Ponzio 34/3，20133，米兰，意大利