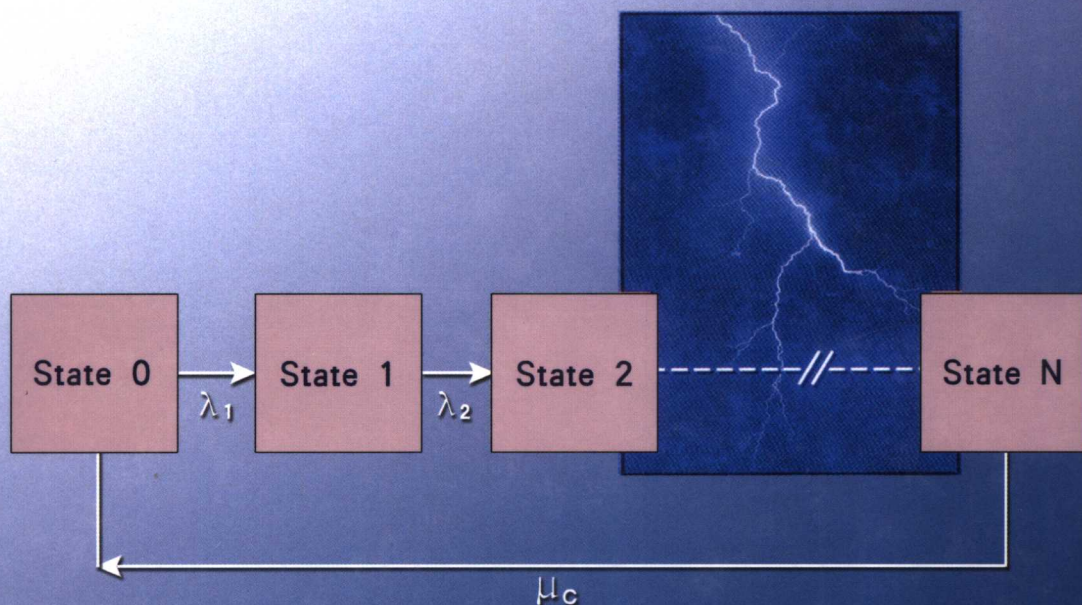


电力系统风险评估 模型、方法和应用

〔加〕李文沅 著

周家启 卢继平 胡小正 颜伟 谢开贵 译



科学出版社
www.sciencep.com

电力系统风险评估 模型、方法和应用

[加]李文沅 著

周家启 卢继平 胡小正 颜 伟 谢开贵 译

科学出版社

北 京

图字:01-2005-2026

RISK ASSESSMENT OF POWER SYSTEMS

Models, Methods, and Applications

By Wenyan Li

Copyright © 2005 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

图书在版编目(CIP)数据

电力系统风险评估:模型、方法和应用/[加]李文沅(Li Wenyan)著;周家启等译. —北京:科学出版社, 2006

ISBN 7-03-016731-7

I. 电… II. ①李…②周… III. 电力系统-风险分析 IV. TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 158794 号

责任编辑:鄢德平 耽建业 / 责任校对:包志虹

责任印制:安春生 / 封面设计:王 浩

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年10月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006年10月第一次印刷 印张:19

印数:1—2 000 字数:342 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

作者简介

李文沅博士 (Dr. Wenyuan Li), 加拿大 BCTC 公司 (British Columbia Transmission Corporation) 首席工程师, 美国 IEEE Fellow, 中国重庆大学顾问教授。他早年毕业于清华大学; 后来获重庆大学电气工程硕士和博士学位; 曾以访问学者身份在法国电力公司研究开发部工作; 而后在加拿大 Saskatchewan 大学做博士后研究。李文沅博士已在电力系统经济运行、最优化技术, 系统规划以及可靠性评估领域发表专著 4 部, 并在美国、英国、法国和加拿大的一流杂志发表了大量科技论文。在任职于加拿大 BC 电力局和 BC 电网公司期间, 致力于电力系统风险评估理论及其工程应用研究, 提交了 50 余份立足于工程实用的研究报告; 开发的若干计算机应用程序, 多年来已为许多电力公司创造了大量经济效益。李文沅博士积极参与学术活动, 经常参加 IEEE 及其他国际学术会议, 是 IEEE 多个技术委员会成员并长期参与论文评审等工作; 目前还是美国 Electric Power Components and Systems 杂志编委和 “Probabilistic Methods Applied to Power Systems” 国际学会及会议技术咨询委员会成员; 他经常在 IEEE 及各种不同国际学术会议和工业应用研讨会上提供指导课程和讲座, 也向世界许多国家电力工业界的专业人士提供技术咨询和专业发展课程。鉴于在电力系统可靠性和概率规划领域的突出贡献, 1996 年李文沅博士被授予全加拿大唯一的 IEEE “杰出工程师” 奖。由于其取得的丰硕成果其以 “卓越的专业成就” 为名而入选《世界 5000 名人录》(第二版)。

中文版序

能够用我的母语来写这个中译版序感到很兴奋。非常感谢重庆大学周家启教授、卢继平博士、颜伟博士、谢开贵博士和中国电力可靠性管理中心胡小正高工，把 IEEE Press 和 Wiley & Sons 联合于 2005 年在美国和加拿大同时出版的本书翻译成中文。尤其高兴的是我也有机会参加了其中一章的翻译和全书译稿的校核修订工作。1994 年，我与电力系统可靠性权威 R. Billinton 教授合作，在美国出版了我的第一本英文专著。从那时起，我就想把我的书译成中文出版，以便大陆的同行分享我们的研究成果，同时也表达我对祖国的眷恋感激之情。虽然也有过机会，但因种种原因，一直未能实现。这次我的新书能如此快地译成中文出版，了却了我长久以来的心愿。

正如在英文版前言中指出的，本书是我多年来在该领域的研究和应用成果的一个总结。虽然书中也包括一些新的概念和模型，但更重要而有意义的是它在实际工业应用方面的内容。这是本书区别于现有电力系统理论专著的最为显著的特点。从这个角度，它不仅适用于大学和科研单位，而且为工业界关心电力系统风险评估的人士提供了实用而有价值的参考。我真心希望它能够在中国电力事业的发展过程中起到一点作用。

我也借此机会，向科学出版社对本书的重视，向重庆大学和中国电力可靠性管理中心对本书出版的支持致以由衷的谢意。

李文沅

2005 年 10 月于温哥华

译者前言

随着全球经济的持续增长,大电网向着远距离、超高压甚至特高压方向发展,网络规模日益庞大,结构日益复杂。在电力系统取得巨大联网效益的同时,也不得不承受着更大的潜在风险。尤其是随着电力市场化改革的推进,管理机构的更迭和新的成员参与市场,人们所难以控制的不确定因素及其对电网的影响更为深广,使得电力系统的规划、运行、维修和资产管理工 作都面临着极大的挑战。20 世纪 60 年代以来,全球范围内重大电网停电事故时有发生,尤其是新世纪之初,2003 年 8 月 14 日的美加大停电给了人们一个历史性的启示:以确定性准则为依据的,大电网的传统规划和运行控制模型和方法,已日益捉襟见肘,需要考虑大电网事件随机性质和计及各种不确定性影响的新思路与新方法来补充改进和完善现有的工具。

尽管 20 世纪 70 年代以来,学术界和工程界已在电力系统可靠性概率模型和应用研究领域进行了大量工作,取得了丰富的理论和应用成果,但是,由于电力系统随机行为的复杂性,使得这一领域的研究进展,在工程实际应用方面仍然十分局限,尤其是在维修、管理和安全性方面的概率风险分析应用,更存在着大量空白。

2005 新年伊始,看到李文沅博士的《Risk Assessment of Power Systems》一书,耳目为之一新。正如该书出版社 IEEE and Wiley-Interscience 的原书简介所述:

“本书填补了电力系统风险理论和实际应用之间长期留下的空白。作为 15 年来在电力系统风险评估研究方面的领先权威,作者以他的大量论文和五十多份技术报告为基础,形成了该领域的首创性著作。当你理解了作者在书中提供的经过其亲自实践而发展的模型和方法以后,你就会知道怎样进行电力系统规划、设计、运行以及维修领域的风险评估,以使风险保持在目标水平。”

欣喜之余,为了让我国广大读者能够尽快共享这一珍贵的资源,我们立即与作者、电力可靠性管理中心以及科学出版社等联系,合作进行本书的中译版事宜。

李文沅博士(Dr. Wenyuan Li),加拿大 BCTC 公司(British Columbia Transmission Corporation)首席工程师,美国 IEEE Fellow,重庆大学顾问教授。他早年毕业于清华大学电机工程系;后来又相继获重庆大学电气工程硕士和博士学位;曾以访问学者身份在法国电力公司研究开发部工作;而后在加拿大

Saskatchewan 大学作博士后研究。李文沅博士已在电力系统经济运行、最优化技术、系统规划和可靠性评估领域发表专著 4 部, 以及百余篇科技论文和工程研究报告。在深厚的学术积淀和丰富的工程经验基础上, 李博士又以本书开篇于新的世纪, 其活跃的创新思想和巧妙的算法构思, 将艰深的命题化解为工程界易于掌握和处理的工程方法, 可说是别开生面, 称得上电力可靠性领域具有里程碑意义的一部传世之作。希望本书的出版能为推动我国电力可靠性概率方法的工程应用和管理工作提供一定的借鉴。

本书说理透彻, 条理清晰, 深入浅出。既有理论深度, 又特别注重于实际应用, 所举实例均来自工程实施项目, 是一本电力工程技术人员、管理干部以及科研工作者不可多得的参考书籍; 也适合大专院校教师、研究生、高年级学生以及相关研讨班作参考教材。

本书翻译, 周家启第 1、5 章; 胡小正第 2、4 章; 谢开贵第 3 章和全部附录; 卢继平第 6~9 章; 颜伟第 10~12 章; 原书作者李文沅第 13 章; 最后由周家启译出原书前言等其余部分, 并会同李文沅对全书译稿进行修改统校整理。由于水平所限, 译文中错误在所难免, 敬请读者批评指正。

为了使本书译文尽量准确, 并能尽快面世, 原书作者亲自参与翻译和审校; 电力可靠性管理中心给予了大力支持, 并由胡小正主任亲自参与译文工作; 科学出版社鄢德平编辑热情组稿和筹划出版事宜; 在此谨对他们致以衷心感谢。本书的翻译过程中, 董百强等多位研究生(不一一提名)为书稿的文字图表做了大量校订工作, 也在这里对他们表示由衷的谢意。

周家启

2005 年 10 月于重庆

原 书 前 言

电力系统风险评估的应用研究,尤其是在近几年世界范围内发生多起重大停电事件以来,已受到电力界日益增长的关注。由于电力系统行为本质上的概率特征,系统风险无法完全避免。但是,可以通过规划、设计、运行以及维修的风险管理和评估工作将系统风险控制到可接受的水平。

本书源自我在电力系统风险分析领域的潜心研究,包括开发模型和方法及其实际的工程应用。十多年来本人先后工作所在的 BC(不列颠哥伦比亚)电力局和 BC 输电公司为我提供了良好的工作环境,使许多有关系统风险分析的项目得以实施。解除一体化管制的电力市场的形成和工程中的实际问题对系统风险分析提出了新的挑战。在迎接这种挑战的过程中,促使我写出大量论文和工程研究报告,从而形成了本书面世的基础。本人从大学环境到工业部门的学术生涯和专业经历使我深知电力系统风险理论和实际工程应用之间还存在着一段空隙,本书旨在填补这一尚未有人涉足的空白。

工程人员面临的困难在于,如何确定反映真实情况的元件停运模型,如何处理统计数据的不确定性,如何针对具体实例选择合适的风险评估方法,尤其是如何将基础理论和评估方法应用到不同的具体工程问题之中。对工程实际缺乏了解的大学毕业生,即使他们已具有良好的风险理论知识和数学基础,也常常会在工业课题面前感到无所适从。本书旨在有助于解决这些困惑和相关问题。书中虽然也提出了一些新的模型和概念,但重点主要放在各种应用问题上。阐释工程应用的大多数例子都是来自已经实施的实际项目,这是本书最显著的特点。本书适用于正在或将要从事电力系统风险评估和管理的工程人员、研究生和高年级学生。

如果没有 IEEE 和电力界的许多朋友、同事、教授和工程师们的关心和帮助,要写成本书是不可能的。特别要感谢 Roy Billinton, Yakout Mansour, Ebrahim Vaahedi 和 Jerry Korczynski 四位同仁,书中部分材料取自我与他们合作发表的论文,而且我一直得到他们的支持和鼓励。也要感谢 Gerry Garnett, Don Gillespie, Steven Pai, Narayan Rau, Murty Bhavaraju, Lalit Goel, Bin Shi, Jiaqi Zhou(周家启)和 Lichun Shu(舒立春)等人的支持和帮助。还要感谢书中所引用参考文献的各位作者。

我对 IEEE Press 和 John Wiley & Sons Inc. 的合作和协助,特别是对 Anthony VenGraitis 先生和 Lisa Van Horn 小姐,致以谢意。

最后,我要把最深切的谢意献给我的妻子 Jun Sun(孙军),她为本书的写

作不但做出了不少的牺牲，而且保持着足够的耐心，尤其是安排了一个十分妥帖的生活环境，使我能在许多晚间和周末潜心伏案工作。

李文沅

2004年8月于加拿大温哥华

目 录

中文版序

译者前言

原书前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力系统中的风险	1
1.2 电力系统风险评估的基本概念	3
1.2.1 系统风险评估	3
1.2.2 风险评估的数据	4
1.2.3 单位停电损失	6
1.3 本书梗概	6
第 2 章 系统元件的停运模型	10
2.1 引言	10
2.2 独立停运模型	10
2.2.1 可修复强迫失效	11
2.2.2 老化失效	12
2.2.2.1 发生老化失效的概率	13
2.2.2.2 老化失效引起的不可用率	14
2.2.2.3 公式(2.10)的显式表达	16
2.2.3 不可修复偶然失效	17
2.2.4 计划停运	17
2.2.5 半强迫停运	19
2.2.6 部分失效模式	21
2.2.7 多重停运模式	22
2.3 相关停运模型	23
2.3.1 共因停运	23
2.3.1.1 组合模型	23
2.3.1.2 分离模型	24
2.3.1.3 组合模型和分离模型的比较	25
2.3.2 元件组停运	27
2.3.3 电站相关停运	29

2.3.4 连锁停运	30
2.3.5 环境相依失效	31
2.4 结论	33
第3章 停运模型中的参数估计	35
3.1 引言	35
3.2 失效数据均值和方差的点估计	35
3.2.1 样本均值	36
3.2.2 样本方差	37
3.3 失效数据均值和方差的区间估计	38
3.3.1 置信区间的一般概念	38
3.3.2 均值的置信区间	39
3.3.3 方差的置信区间	41
3.4 估计单个元件的失效频率	42
3.4.1 点估计	42
3.4.2 区间估计	43
3.5 估计服从二项分布的概率	44
3.6 失效数据的经验分布及其统计检验	45
3.6.1 失效数据的经验分布	46
3.6.2 经验分布的统计检验	47
3.7 估计老化失效模型中的参数	48
3.7.1 正态分布模型中的平均寿命及标准差	49
3.7.2 韦布尔模型中的形状和尺度参数	50
3.7.3 算例	53
3.8 结论	56
第4章 风险评估方法基础	58
4.1 引言	58
4.2 用于简单系统的方法	58
4.2.1 概率卷积	59
4.2.2 串联和并联网络法	60
4.2.2.1 串联网络	60
4.2.2.2 并联网络	61
4.2.3 马尔可夫方程	62
4.2.4 频率-持续时间法	64
4.2.4.1 进入每个状态的频率	64
4.2.4.2 两状态间的转移频率	65

4.2.4.3 进入每个状态集合的频率	65
4.2.4.4 停留在每个状态的平均持续时间	66
4.2.4.5 停留在每个状态集合的平均持续时间	66
4.3 用于复杂系统的方法	66
4.3.1 状态枚举法	67
4.3.2 非序贯蒙特卡罗模拟法	69
4.3.3 序贯蒙特卡罗模拟法	71
4.4 结论	73
第5章 电力系统的风险评估方法	75
5.1 引言	75
5.2 发电-负荷需求系统的评估方法	75
5.2.1 卷积法	76
5.2.1.1 离散发电概率分布	76
5.2.1.2 离散负荷概率分布	77
5.2.1.3 指标计算	79
5.2.2 状态抽样法	79
5.2.3 状态持续时间抽样法	81
5.3 辐射型配电系统的评估方法	83
5.3.1 解析法	83
5.3.2 状态持续时间抽样法	85
5.4 变电站电气主接线的评估方法	87
5.4.1 失效模式和模型	87
5.4.2 连通性识别	89
5.4.3 分层状态枚举法	91
5.4.4 状态持续时间抽样法	94
5.5 发输电系统的评估方法	96
5.5.1 基本步骤	97
5.5.2 元件失效模型	97
5.5.3 负荷曲线模型	98
5.5.4 故障分析	99
5.5.4.1 基于交流潮流的灵敏度方法	99
5.5.4.2 基于直流潮流的故障分析	100
5.5.5 负荷削减的最优化模型	101
5.5.5.1 基于交流潮流的最优潮流模型	101
5.5.5.2 基于直流潮流的最优潮流模型	102

5.5.6 状态枚举法	103
5.5.7 状态抽样法	105
5.6 结论	106
第6章 风险评估在输电发展规划中的应用	108
6.1 引言	108
6.2 概率规划的概念	109
6.2.1 基本步骤	109
6.2.2 费用分析	110
6.2.3 现值	110
6.3 风险评估方法	111
6.3.1 风险评估步骤	111
6.3.2 风险费用模型	112
6.4 例1:选择最小费用规划方案	113
6.4.1 系统描述	113
6.4.2 规划方案	114
6.4.3 风险评估	115
6.4.4 综合经济分析	118
6.4.4.1 方法	118
6.4.4.2 数据	119
6.4.4.3 结果	119
6.4.5 小结	120
6.5 例2:应用不同的规划准则	120
6.5.1 系统和预选规划方案	121
6.5.2 研究条件和数据	122
6.5.2.1 研究条件	122
6.5.2.2 数据	122
6.5.3 风险和风险费用评估	124
6.5.4 综合经济分析	125
6.5.4.1 多阶段投资的资金流	126
6.5.4.2 基于系统可靠性能的费用有效性准则	126
6.5.4.3 单元件故障原则和费用有效性相结合的准则	127
6.5.5 小结	128
6.6 结论	129
第7章 风险评估在输电运行规划中的应用	130
7.1 引言	130

7.2 运行规划中风险评估的概念	131
7.3 风险评估方法	133
7.4 例 1:确定最低风险运行方式	135
7.4.1 系统和研究条件	135
7.4.2 评估负荷转移的影响	136
7.4.3 不同重构方案的比较	137
7.4.4 $N-2$ 条件下的运行方式选择	138
7.4.5 小结	140
7.5 例 2:手算的简单例子	140
7.5.1 基本概念	140
7.5.2 算例描述	141
7.5.3 研究条件和数据	142
7.5.4 风险评估	143
7.5.4.1 计算失效状态概率	143
7.5.4.2 假定 1 小时切换时间的期望缺供电量评估	144
7.5.4.3 假定 2 小时切换时间的期望缺供电量评估	145
7.5.5 小结	147
7.6 结论	147
第 8 章 风险评估在电源规划中的应用	148
8.1 引言	148
8.2 可靠性规划的步骤	148
8.3 发电成本和风险费用模拟	149
8.3.1 模拟方法	149
8.3.2 最小费用模型	150
8.3.3 期望发电成本和期望风险损失费用	151
8.4 例 1:选择独立发电厂的位置和容量	152
8.4.1 基本概念	152
8.4.2 系统和独立发电厂的备选方案	153
8.4.3 风险灵敏度分析	154
8.4.4 最大效益分析	157
8.4.5 小结	160
8.5 例 2:一个地区发电厂的退役决策	160
8.5.1 算例描述	160
8.5.2 风险评估	160
8.5.3 总费用分析	162

8.5.3.1	投资成本	162
8.5.3.2	运行成本	162
8.5.3.3	风险损失费用	162
8.5.4	小结	164
8.6	结论	164
第9章	变电站电气联结方式的选择	166
9.1	引言	166
9.2	负荷削减模型	166
9.3	风险评估方法	169
9.3.1	元件失效模型	169
9.3.2	风险评估步骤	169
9.3.3	经济分析方法	170
9.4	例1:选择变电站电气主接线	170
9.4.1	两种变电站接线方式	170
9.4.2	风险评估	171
9.4.2.1	研究条件和数据	171
9.4.2.2	计算结果	172
9.4.3	经济分析	174
9.4.4	小结	175
9.5	例2:选择与变电站相连的输电线路联结方式	175
9.5.1	两种方案的描述	175
9.5.2	风险评估和经济分析	176
9.5.2.1	研究条件和数据	176
9.5.2.2	计算结果	178
9.5.2.3	经济分析	179
9.5.3	小结	179
9.6	结论	179
第10章	可靠性为中心的维修	181
10.1	引言	181
10.2	可靠性为中心的设备维修的基本任务	181
10.2.1	设备维修方案的比较	182
10.2.2	最低风险维修日程计划	182
10.2.3	预防性维修与失效后维修	182
10.2.4	元件重要性排序	183
10.3	例1:输电设备维修日程计划	184

10.3.1 以可靠性为中心的输电设备维修步骤	184
10.3.2 系统和维修停运的描述	185
10.3.3 电缆的最低风险更换日程计划	186
10.3.4 小结	187
10.4 例 2:维修中的人力规划	188
10.4.1 问题描述	188
10.4.2 解算步骤	188
10.4.3 算例与结果	189
10.4.4 小结	190
10.5 例 3:手算的简单例子	191
10.5.1 算例描述	191
10.5.2 研究条件和数据	192
10.5.3 期望缺供电量(EENS)评估	192
10.5.4 小结	193
10.6 结论	194
第 11 章 设备备用概率分析	195
11.1 引言	195
11.2 基于可靠性准则的设备备用分析	195
11.2.1 元件的不可用率	196
11.2.1.1 可修复失效引起的不可用率	196
11.2.1.2 老化失效引起的不可用率	196
11.2.1.3 总的不可用率	197
11.2.2 设备组可靠性及其备用分析	197
11.3 使用概率费用方法的设备备用分析	198
11.3.1 失效损失费用模型	198
11.3.2 单位失效损失估计	199
11.3.3 年度投资成本模型	200
11.3.4 现值法	200
11.3.5 备用分析步骤	200
11.4 例 1:确定备用变压器的数量和年份	201
11.4.1 变压器组和数据	201
11.4.2 基于变压器组失效概率的备用分析	202
11.4.3 基于概率费用模型的变压器备用规划	203
11.4.3.1 计算备用变压器带来的失效损失减少量	203
11.4.3.2 效益/成本分析	203

11.4.4 小结	205
11.5 例 2:确定 500kV 电抗器的冗余度水平	205
11.5.1 问题的描述	205
11.5.2 研究条件和数据	207
11.5.3 冗余度分析	208
11.5.4 小结	210
11.6 结论	210
第 12 章 基于可靠性的输电服务价格	212
12.1 引言	212
12.2 基本概念	213
12.2.1 可靠性增量价值	213
12.2.2 用户对系统可靠性的影响	215
12.2.3 价格设计中的可靠性分量	215
12.3 计算方法	216
12.3.1 单位可靠性增量价值(UIRV)	216
12.3.2 发电用户因改善可靠性的应得补贴(GCRI)	217
12.3.3 负荷用户因降低可靠性的应支付费(LCRD)	217
12.3.4 支付发电用户补贴而造成的负荷用户付费率(LCRGC)	218
12.4 费率设计	218
12.4.1 过网用户的费率	218
12.4.2 网内用户的付费率	219
12.4.3 发电用户应得的补贴费用	219
12.5 应用举例	219
12.5.1 计算单位可靠性增量价值(UIRV)	220
12.5.2 计算发电用户因改善可靠性的应得补贴(GCRI)	220
12.5.3 计算负荷用户因降低可靠性的应支付费(LCRD)	221
12.5.4 计算支付发电用户补贴而造成的负荷用户付费率(LCRGC)	222
12.5.5 各种用户的费率计算	222
12.6 结论	223
第 13 章 暂态稳定概率评估	225
13.1 引言	225
13.2 概率模型和模拟方法	225
13.2.1 故障前系统状态的选择	225
13.2.2 故障模型	226
13.2.2.1 故障发生的概率	226