

结构机构可靠性 及可靠性灵敏度分析

吕震宙 宋述芳 李洪双 袁修开 © 著



科学出版社
www.sciencep.com

101

结构机构可靠性 及可靠性灵敏度分析

吕震宙 宋述芳 李洪双 袁修开 著

9

12

L901

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细介绍了结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析的理论方法及工程应用。理论方法部分主要针对结构机构单个失效模式和系统多个失效模式的可靠性问题,介绍了经典的近似解析方法和数字模拟方法的基本原理及适用范围;工程应用部分则主要介绍复杂结构机构可靠性分析与可靠性灵敏度分析的工程实现方法,包括作者所编的复杂结构机构可靠性和可靠性灵敏度分析软件系统、典型的工程算例,以及作者所编软件与世界上主流结构机构可靠性分析软件的对照;最后对结构机构可靠性未来的理论工作作了简单的展望。

本书可供从事结构机构可靠性工作的科研人员、大专院校的教师、研究生以及高年级的本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析/吕震宙等著.北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025640-9

I. 结… II. 吕… III. ①机构运动分析-可靠性②机构运动分析-灵敏度 IV. TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 169927 号

责任编辑:刘宝莉 汤 枫 / 责任校对:刘小梅

责任印制:赵 博 / 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

*

2009 年 9 月 第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2009 年 9 月 第一次印刷 印张:21 1/4

印数:1—2 500 字数:413 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

结构机构可靠性对于保障结构机构产品的安全是至关重要的,它是在电子元器件可靠性基础上发展起来的,但相对于电子元器件的可靠性,结构机构可靠性的发展则较为落后。这主要表现为两个方面:其一是结构机构可靠性分析所需要的数据较为缺乏,这与结构机构的非标准化程度较高有很大关系;其二是结构机构的可靠性分析与设计理论方法的发展较为落后,尤其是针对复杂结构机构系统的可靠性分析与设计问题,复杂结构机构的可靠性分析与设计依赖于力学、运动学和动力学分析,而力学、运动学和动力学分析方法的不完善将在一定程度上制约复杂结构机构的可靠性分析与设计方法的发展。随着现代有限元技术和运动仿真技术的发展,结构机构可靠性分析的基础得到了极大的完善。本书着重解决结构机构的可靠性和可靠性灵敏度分析理论与工程应用问题,旨在为大专院校的教师、研究生以及相关的工程技术人员提供一套可借鉴的结构机构可靠性理论体系和工程实现方法。目前结构机构可靠性方面的专著较少,尤其是建立在有限元和运动仿真分析手段基础上的可靠性和可靠性灵敏度分析理论方法,因此本书将具有一定的理论价值和工程应用价值。

与国内外同类书籍相比,本书的特点包括以下几个方面:

(1) 在学术思想方面,明确指出复杂结构机构可靠性分析的过程,实际上就是随机不确定性从输入变量传递到输出变量的过程,并明确指出各种可靠性分析方法都是这一基本思想在不同的具体问题中的不同实现方法。

(2) 本书主要针对复杂结构机构可靠性问题,介绍了经典可靠性分析的近似解析方法和数字模拟方法,对于已有的分析方法,本书着重介绍了这些方法的适用范围和在结构机构可靠性中的实现过程。除了已有的经典方法外,本书还包含针对高维问题的线抽样可靠性分析方法和子集模拟可靠性分析方法,这些新的方法在目前已出版的书籍中还未见到,另外本书对于正态相关情况下可靠性分析的数字模拟方法也作了较为深入的探讨。

(3) 本书主要针对复杂结构机构可靠性灵敏度分析问题,介绍了其相应的近似解析方法和数字模拟方法。可靠性灵敏度分析是在可靠性分析基础上发展起来的,目前国内已出版的可靠性书籍中只有非常少的相关介绍,国外已出版的书籍中也只有两三种可靠性灵敏度分析方法,而且讨论的问题极为有限。本书基于作者多年的可靠性灵敏度方面的研究工作和国际专业杂志上公开发表的文章,就可靠性灵敏度的理论体系进行了较为深入的探讨。

(4) 本书还介绍了复杂结构机构可靠性和可靠性灵敏度分析方法的工程实现过程,给出了编程思路和典型的工程实例。

本书的完成首先要感谢国家自然科学基金(59575040, 59775032, 10572117, 50875213)、航空基金、航天基金、863 计划(2007AA04Z401)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0868)等项目的资助,如果没有这些项目的资助,作者将无法开展可靠性和可靠性灵敏度分析的理论与应用研究工作。促成本书完成的一个最直接的原因是作者希望在工程中推广应用结构机构可靠性的分析与设计理论方法,工程技术人员需要一套完整且实用的可靠性分析与设计的理论体系和易操作的实现方法。在与工程设计单位科研人员的合作中,作者深刻地体会到他们的需求,抓住主要对象解决关键问题才是最重要的,他们的这些需求作者尽量融入本书的理论体系中。作者要感谢课题组所有的研究生,本书的很多内容来源于他们具体而艰辛的工作。感谢中航一集团第一飞机设计研究院的工程技术人员,他们直接的支持和有益的建议使得本书在工程应用方面得到了进一步的完善。同时也非常感谢对立意见者,他们善意的批评和建设性的意见使得作者时时反省自己的工作。

尽管作者慎之又慎,但由于水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2009 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 结构机构可靠性分析的定义	1
1.2 结构机构可靠性分析所涉及的基本概念	1
1.3 可靠性分析的方法	3
1.4 结构机构可靠性灵敏度的定义	6
1.5 可靠性灵敏度分析方法	6
1.6 本章结论	6
参考文献	7
第 2 章 可靠性和可靠性灵敏度分析的一次二阶矩方法	9
2.1 均值一次二阶矩可靠性分析方法	9
2.1.1 线性功能函数情况下可靠性分析的基本计算公式	10
2.1.2 非线性功能函数情况下可靠性分析的基本计算公式	10
2.2 均值一次二阶矩可靠性灵敏度分析方法	11
2.2.1 基本变量独立情况下的可靠性灵敏度最终解	12
2.2.2 基本变量相关情况下的可靠性灵敏度最终解	12
2.3 均值一次二阶矩可靠性及可靠性灵敏度分析方法的优缺点	13
2.4 改进一次二阶矩可靠性分析方法	13
2.4.1 AFOSM 的原理及计算公式	14
2.4.2 可靠度指标及设计点的几何意义	14
2.4.3 改进一次二阶矩迭代算法的具体计算步骤	16
2.4.4 基于混合遗传算法的改进一次二阶矩可靠性分析方法	16
2.5 改进一次二阶矩可靠性灵敏度分析方法	19
2.6 改进一次二阶矩方法的优缺点	21
2.7 针对非正态变量的 Rackwitz-Fiessler 方法	22
2.7.1 R-F 法的基本原理及计算公式	22
2.7.2 R-F 法的具体计算步骤	24
2.7.3 R-F 法的计算流程图	25
2.8 相关变量的独立变换	26
2.8.1 一般分布情况下相关变量向独立正态变量转换的 Rosenblatt 方法	26

2.8.2	分布信息不全时相关变量向独立变量转换的 Nataf 方法	26
2.8.3	正态分布情况下相关变量独立化转换的正交变换方法	27
2.8.4	三种独立化变换方法的比较	28
2.9	算例及结果分析	28
2.10	本章结论	33
	参考文献	33
第3章	可靠性和可靠性灵敏度分析的点估计方法	37
3.1	计算功能函数各阶矩的点估计方法	37
3.1.1	功能函数概率矩的定义	38
3.1.2	Rosenblueth 方法	38
3.1.3	Gorman 和 Seo 的三点估计方法	40
3.1.4	Zhou 和 Nowak 的点估计方法	41
3.1.5	Zhao 和 Ono 的点估计方法	44
3.2	基于概率矩的概率密度函数逼近的经典方法	46
3.2.1	多项式逼近变量的概率密度函数	46
3.2.2	正交多项式逼近变量的概率密度函数	48
3.2.3	概率密度函数逼近算例	49
3.3	基于功能函数概率矩的失效概率近似方法	50
3.3.1	二阶矩方法	51
3.3.2	三阶矩方法	51
3.3.3	四阶矩方法	52
3.4	系统可靠性分析的点估计方法	54
3.5	点估计可靠性分析方法的适用范围讨论	55
3.6	分布信息不完全时基于 Nataf 变换的点估计方法	56
3.6.1	Nataf 变换	57
3.6.2	等效相关系数 ρ_{0ij} 的求解	58
3.6.3	基于 Nataf 变换的点估计法	60
3.6.4	算例分析	62
3.7	变量相关情况下变换次序影响分析及最佳变换次序的确定	63
3.7.1	变换次序影响的定性和定量分析	63
3.7.2	最佳变换次序	68
3.7.3	变量相关情况下的两阶段点估计法	69
3.7.4	算例分析	70
3.8	基于点估计的可靠性灵敏度分析方法	76
3.8.1	单模式可靠性灵敏度分析的点估计方法	77

3.8.2	多模式可靠性灵敏度分析的点估计方法	80
3.8.3	变量相关时可靠性灵敏度分析的点估计方法	80
3.8.4	点估计可靠性灵敏度分析的适用范围分析	85
3.9	点估计可靠性灵敏度分析方法的算例	85
3.10	本章结论	89
	参考文献	89
第4章	可靠性和可靠性灵敏度分析的 Monte Carlo 数字模拟法	91
4.1	随机数发生器和随机变量的抽样原理	91
4.1.1	随机数发生器	91
4.1.2	随机数的检验	93
4.1.3	随机变量的抽样原理	95
4.2	Monte Carlo 可靠性分析方法	98
4.2.1	Monte Carlo 模拟的理论基础	98
4.2.2	Monte Carlo 可靠性分析的原理和计算公式	99
4.2.3	多个失效模式情况下可靠性分析的 Monte Carlo 法	101
4.2.4	Monte Carlo 可靠性分析方法的计算步骤	103
4.2.5	Monte Carlo 可靠性分析方法小结	104
4.3	Monte Carlo 可靠性灵敏度分析的基本原理和计算公式	104
4.4	正态相关变量情况下的可靠性及可靠性灵敏度分析的 Monte Carlo 法	107
4.4.1	相关正态变量情况下可靠性及可靠性灵敏度分析的 Monte Carlo 直接法	108
4.4.2	相关正态变量情况下可靠性及可靠性灵敏度分析的 Monte Carlo 转换法	110
4.4.3	Monte Carlo 直接法和 Monte Carlo 转换法的比较	114
4.5	Monte Carlo 可靠性及可靠性灵敏度分析方法的算例验证	114
4.6	本章结论	119
	参考文献	120
第5章	可靠性和可靠性灵敏度分析的重要抽样法	122
5.1	可靠性及可靠性灵敏度分析的重要抽样法	122
5.1.1	重要抽样可靠性分析方法	122
5.1.2	基于重要抽样密度函数的可靠性灵敏度分析	126
5.2	混合重要抽样方法	128
5.2.1	混合重要抽样密度函数的构造	128
5.2.2	基于混合重要抽样的失效概率估计及可靠性灵敏度估计	129

5.2.3	基于混合重要抽样密度函数的失效概率估计的抽样步骤	130
5.2.4	各模式变量不全相同时重要抽样密度函数的扩展	130
5.3	基于核密度估计的自适应重要抽样方法	132
5.3.1	基本思想	132
5.3.2	基于马尔可夫链的初始样本的模拟	132
5.3.3	核密度函数的构建	133
5.3.4	基于核密度估计自适应重要抽样的可靠性和可靠性灵敏度的求解步骤	134
5.3.5	算例分析	135
5.4	基于模拟退火的自适应重要抽样方法	137
5.4.1	多模式情况下混合加权重要抽样函数的构造	137
5.4.2	基本变量不完全相同时的扩展方法	138
5.4.3	基于模拟退火的自适应重要抽样方法	139
5.4.4	算例分析	141
5.5	截断抽样和截断重要抽样可靠性分析方法	144
5.5.1	n 维标准正态空间的概率分布特性与 β 球的概率	144
5.5.2	失效概率估计的截断抽样法	145
5.5.3	失效概率估计的截断重要抽样法	149
5.5.4	截断抽样和截断重要抽样可靠性灵敏度分析方法	151
5.5.5	算例分析	153
5.6	相关正态变量情况下自适应截断抽样方法	155
5.6.1	确定超球半径的自适应策略	156
5.6.2	相关正态变量情况下可靠性灵敏度分析的基于超球抽样的直接法	158
5.6.3	相关正态变量情况下可靠性灵敏度分析的基于超球抽样的转换法	158
5.6.4	算例分析	159
5.6.5	小结	165
5.7	本章结论	166
	参考文献	166
第 6 章	可靠性和可靠性灵敏度分析的子集模拟方法	168
6.1	子集模拟可靠性分析的基本原理	168
6.1.1	中间失效事件的引入和失效概率的条件概率表达式	168
6.1.2	条件失效概率的估计与条件样本点的模拟方法	169
6.1.3	条件样本点 $x_j^{(i)}$ 的 MCMC 模拟和条件失效概率 $P\{F_i F_{i-1}\}$ 的估计	170
6.1.4	子集模拟可靠性分析方法的中间失效事件的选择	171

6.2	子集模拟重要抽样可靠性分析方法	173
6.2.1	子集模拟重要抽样可靠性分析思想和过程	173
6.2.2	子集模拟重要抽样失效概率估计值的方差分析	175
6.3	MCMC 子集模拟可靠性灵敏度分析	178
6.4	子集模拟重要抽样可靠性灵敏度分析	179
6.4.1	基于子集模拟重要抽样可靠性灵敏度估计	179
6.4.2	可靠性灵敏度的方差分析	180
6.5	MCMC 子集模拟和子集模拟重要抽样方法算例分析	182
6.6	失效概率估计的快速马尔可夫链模拟方法	186
6.6.1	马尔可夫链模拟失效域内的样本	187
6.6.2	基本原理	187
6.6.3	线性极限状态方程失效概率 $P_{F_L} = P\{F_L\}$ 与特征因子的求解	188
6.6.4	算例验证	189
6.6.5	小结	192
6.7	本章结论	192
	参考文献	193
第 7 章	可靠性和可靠性灵敏度分析的线抽样方法	194
7.1	线抽样可靠性分析方法的基本原理及计算公式	194
7.1.1	单个失效模式情况下线抽样方法的重要方向	194
7.1.2	单个失效模式情况下线抽样方法的失效概率估计	194
7.1.3	重要方向 e_0 的选取方法	196
7.1.4	单个失效模式可靠性分析线抽样方法的计算步骤和流程图	196
7.1.5	改进的线抽样方法	197
7.2	多模式系统可靠性分析的线抽样方法	199
7.2.1	多个失效模式的失效域互不重叠时的可靠性分析	200
7.2.2	多个失效模式的失效域互相重叠时的可靠性分析	200
7.3	单个失效模式可靠性灵敏度分析的线抽样方法	203
7.3.1	单模式可靠性灵敏度分析的原理	203
7.3.2	单模式可靠性灵敏度估计值的方差分析	204
7.4	多个失效模式系统可靠性灵敏度分析的线抽样方法	205
7.4.1	多模式可靠性灵敏度分析的基本公式	205
7.4.2	多模式系统可靠性灵敏度估计值的方差分析	206
7.5	线抽样可靠性分析和可靠性灵敏度分析的算例验证	207
7.6	正态相关变量情况下可靠性分析的线抽样方法	209
7.6.1	正态相关变量向独立标准正态变量的转换	209

7.6.2	正态相关变量情况下单个失效模式的线抽样可靠性分析方法	210
7.6.3	正态相关变量情况下多个失效模式的线抽样可靠性分析方法	211
7.7	正态相关变量情况下可靠性灵敏度分析的线抽样方法	212
7.7.1	正态相关变量情况下单个失效模式可靠性灵敏度分析的线抽样方法	213
7.7.2	正态相关变量情况下多个失效模式可靠性灵敏度分析的线抽样方法	217
7.7.3	算例验证	220
7.7.4	小结	227
7.8	非正态变量可靠性分析的鞍点线抽样方法	227
7.8.1	鞍点概率分布估计	228
7.8.2	鞍点线抽样可靠性分析方法	230
7.8.3	标准正态变量空间中鞍点估计线抽样与传统线抽样方法的一致性	232
7.8.4	算例验证	233
7.8.5	小结	236
7.9	本章结论	236
	参考文献	236
第8章	可靠性和可靠性灵敏度分析的方向抽样法	238
8.1	方向抽样可靠性分析方法	238
8.1.1	单模式情况下的方向抽样法的基本原理及实现步骤	238
8.1.2	多模式情况下失效概率估计的方向抽样法	241
8.1.3	均匀分布单位方向向量样本的产生方法	242
8.2	方向重要抽样可靠性分析方法	243
8.2.1	方向重要抽样法的原理和计算公式	244
8.2.2	多模式情况下的方向重要抽样法	248
8.3	方向抽样及方向重要抽样可靠性灵敏度分析	249
8.3.1	方向抽样及方向重要抽样可靠性灵敏度分析计算公式	249
8.3.2	可靠性灵敏度估计的方差分析	252
8.3.3	算例验证	253
8.4	变量相关情况下可靠性灵敏度分析的方向抽样方法	256
8.4.1	相关正态变量 X 空间转换得到的独立标准正态变量 U 空间的方向抽样可靠性灵敏度分析	256
8.4.2	相关变量情况下的方向抽样可靠性灵敏度分析	259
8.4.3	算例验证	259
8.5	变量相关情况多设计点/多模式可靠性灵敏度分析的方向抽样法	262

8.5.1	独立标准正态 U 空间中方向抽样可靠性灵敏度分析方法二的改进	263
8.5.2	算例验证	265
8.6	本章结论	269
	参考文献	269
第 9 章	响应面法	270
9.1	线性加权响应面法	270
9.1.1	响应面法的一些关键问题	271
9.1.2	加权回归方法在极限状态方程近似中的运用	272
9.1.3	算例验证	274
9.1.4	小结	277
9.2	加权非线性响应面法	278
9.2.1	非线性响应面函数的选取	278
9.2.2	实验点的选取策略	278
9.2.3	实验点权数的构造	278
9.2.4	可靠性分析加权非线性响应面法的步骤	279
9.2.5	算例验证	281
9.3	结构可靠性分析的高精度响应面法	284
9.3.1	经典响应面法	284
9.3.2	基于连续插值的高精度响应面法	285
9.3.3	算例验证	288
9.3.4	小结	291
9.3.5	关于实验中心点选取的插值公式(9.5)的简单讨论	292
9.4	高阶响应面法的探讨	294
9.4.1	Gavin 与 Yau 提出的高阶响应面法及存在的问题	294
9.4.2	基于 Hermite 多项式的高阶响应面法	295
9.4.3	算例验证	300
9.4.4	小结	305
9.5	本章结论	306
	参考文献	306
第 10 章	结构机构可靠性和可靠性灵敏度分析的展望	309
	参考文献	311
第 11 章	结构机构可靠性和可靠性灵敏度分析的软件实现	314
11.1	结构机构可靠性软件及其应用情况的对比分析	314
11.1.1	概述	314
11.1.2	编制通用结构机构可靠性分析软件所涉及的问题	316

11.2 UNIPASS 可靠性分析软件	318
11.3 NESSUS 可靠性分析软件	319
11.4 作者编制的结构机构可靠性软件.....	323
11.5 本章结论.....	327
参考文献.....	327

第 1 章 绪 论

1.1 结构机构可靠性分析的定义

结构机构可靠性的定义为^[1~13]:在规定的时间内和规定的条件下,结构机构完成规定功能的能力。结构机构可靠度为:在规定的时间内和规定的条件下,结构机构完成规定功能的概率。结构机构完成其规定的功能可以看做是其行为满足规定要求,也即在规定的时间内和规定的条件下其响应量满足规定的要求,因此,可靠性分析就是系统行为或者说系统的响应量满足规定要求的概率分析。响应量满足规定要求的概率可以看做是响应量完整统计规律的一个特征值,完整的统计规律将包含响应量更多的有用信息。目前大多数可靠性分析方法都是针对可靠度(或失效概率)进行研究的,本书将在主要介绍可靠度(或失效概率)分析方法的同时,兼顾响应量完整统计规律的分析方法。

1.2 结构机构可靠性分析所涉及的基本概念

基本变量(basic variables) $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$:在结构机构可靠性分析中,将影响系统行为(或响应量)的不确定性因素称为基本变量,基本变量的随机不确定性决定了响应量的随机不确定性。基本变量的随机不确定性是由概率密度函数 $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_{\mathbf{x}})$ (其中 $\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{x}}$ 为基本变量的分布参数)来描述的。在一般的结构机构可靠性分析中,基本变量包括几何构成、材料性能和载荷等,这些基本变量的统计规律在可靠性分析之前必须是已知的。如果不了解基本变量的统计规律,作为基本变量函数的响应量的统计规律则是不可能得到的。

响应量(response variables) $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_m)$:在结构机构可靠性分析中,响应量是用来描述系统行为特性的,它可以包括位移、应力、寿命、振动特征量、运动学特征量等,它是基本变量的函数,即 $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{x})$,基本变量与响应量之间的函数关系是由自然律确定的。可靠性分析的目的就是要得到响应量的统计规律,并且响应量的统计规律是由基本变量的统计规律以及基本变量-响应量之间的自然律确定的。

极限状态函数(limit state function) $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = (g_1(\mathbf{x}), g_2(\mathbf{x}), \dots, g_m(\mathbf{x}))$:极限状态函数也称功能函数(performance function),它是用来描述系统状态的函数,

一般定义极限状态函数为响应量与其阈值 $r^* = (r_1^*, r_2^*, \dots, r_m^*)$ 的差, 也即 $g(x) = r(x) - r^*$ 。目前针对具有解析表达式极限状态方程的可靠性分析方法已较为成熟。但是对于复杂的结构机构系统来说, 极限状态方程一般都没有解析表达式, 即极限状态函数是隐式的, 隐式极限状态函数的可靠性分析是目前可靠性分析的难点。

极限状态方程(limit state equation): 极限状态函数等于零的方程, 也即 $g(x) = r(x) - r^* = 0$, 它是失效状态与安全状态的分界面。

失效域 F (failure domain) 和安全域 S (safe domain): 若系统不能完成规定的功能, 则系统处在失效域内。根据系统的功能要求, 失效域 F 一般是由系统的响应量满足一定的阈值要求来定义的, 安全域 S 为失效域 F 的补集, 当定义 $F = \{x: g(x) = r(x) - r^* \leq 0\}$ 为失效域时, 则 $S = \{x: g(x) = r(x) - r^* > 0\}$ 对应的就是安全域。

失效概率(failure probability)和可靠度(reliability): 系统失效的概率称为失效概率 P_f , 在数学上失效概率可表达为下列积分形式:

$$\begin{aligned} P_f &= P\{F\} = P\{g(x) = r(x) - r^* \leq 0\} \\ &= \int_F f_X(x, \theta_x) dx = \int_{g(x) \leq 0} f_X(x, \theta_x) dx \end{aligned}$$

式中, dx 表示 $dx_1 dx_2 \dots dx_n$ 。系统安全的概率称为可靠度 P_r , 在数学上可靠度可表达为下列积分形式:

$$\begin{aligned} P_r &= P\{S\} = P\{g(x) = r(x) - r^* > 0\} \\ &= \int_S f_X(x, \theta_x) dx = \int_{g(x) > 0} f_X(x, \theta_x) dx \end{aligned}$$

且失效概率和可靠度之间存在以下关系:

$$P_f + P_r = 1$$

单失效模式(single failure mode)与多失效模式(multiple failure modes): 失效模式是与系统的极限状态方程相对应的, 当系统只有一个极限状态方程时, 则称系统具有单个失效模式。对于单失效模式问题, 单个极限状态函数的统计规律就是系统的统计规律, 单失效模式的失效概率就是系统的失效概率。当系统具有多个极限状态方程时, 则称系统具有多个失效模式。对于多失效模式问题, 系统的失效与模式的失效具有一定的逻辑关系, 如串联关系、并联关系或混联关系等, 如图 1.1 所示, 在确定了系统失效与各模式失效的关系以及各模式极限状态函数的统计规律后, 就可以确定系统的统计规律和系统的失效概率了。单失效模式的可靠性分析较简单, 多失效模式的可靠性分析方法是建立在单失效模式可靠性分析基础上的更为复杂的分析方法。

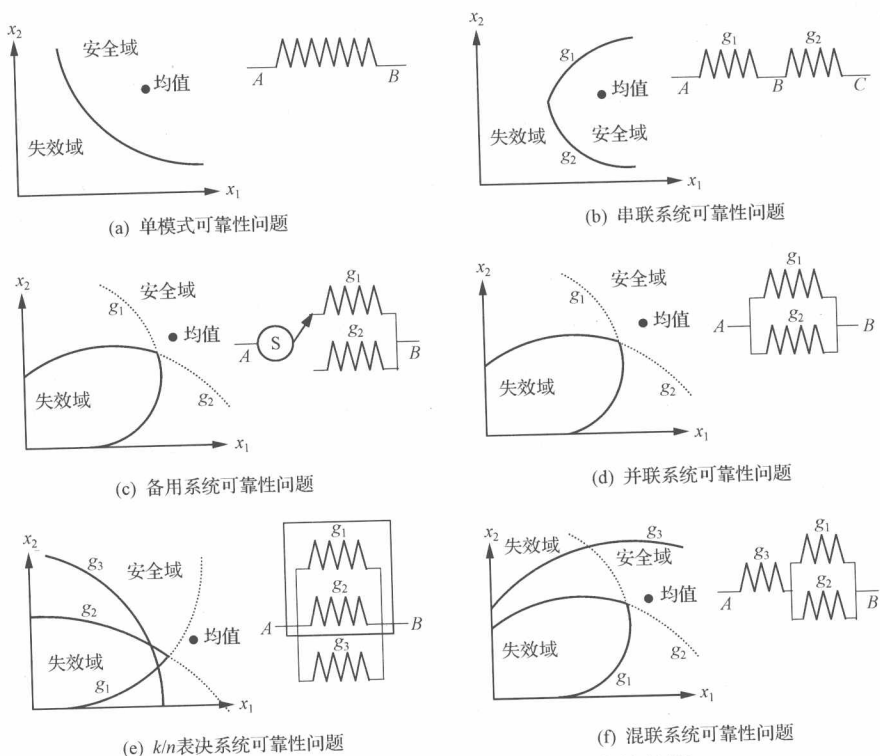


图 1.1 单失效模式和多失效模式可靠性问题

1.3 可靠性分析的方法

影响响应量的不确定性因素是多种多样的,在本书中将着重讨论随机不确定性因素对系统响应量的影响。目前预测随机不确定性因素影响下的系统行为的方法依据 UNIPASS 公司网站资料大致可以分为如下三种:

- (1) 确定论方法 (deterministic approach)。
- (2) 统计学方法 (statistical approach)。
- (3) 概率论方法 (probabilistic approach)。

在采用确定论方法预测不确定性因素影响下的系统响应量时,常常利用自然律计算得到响应量的确定值,然后再加 25% 的安全系数以考虑不确定性因素对系统行为的影响,但为什么使用 25% 的安全系数而不使用 10% 的安全系数是没有理论可以指导的。

采用统计学方法预测不确定性因素影响下的系统响应量,可以避免选择安全系数的困扰,通过收集具有统计意义的系统响应量的样本数据,并对收集的样本数据进行统计分析,就可得到响应量的概率密度函数,进而全面掌握系统响应量的随机统计规律。但收集数据费时昂贵,且数据量太小时不能够准确地反映响应量母

体的分布规律。更值得注意的是:在一定时间内和一定条件下,对响应量进行的数据收集和归纳总结不具有一般性,较难推广。

概率论预测方法则综合了确定论方法和统计学方法的优点,概率论方法利用自然律得到响应量与影响响应量的基本变量之间的关系,并利用统计学方法收集基本变量的样本数据得到基本变量的统计规律,然后采用演绎推理的方法,将基本变量的统计规律传递到响应量,得到响应量的统计规律后也就全面掌握了系统行为的统计规律。概率论预测方法避免了确定论方法与统计学方法的缺点,收集到的基本变量的统计资料具有推广价值,其所采用的演绎推理方法具有通用性,因此概率论方法是目前可靠性分析与设计中普遍应用的一种方法。

对于复杂的结构机构系统来说,影响系统行为的基本变量和描述系统行为的响应量之间的自然律主要是通过有限元、运动仿真等来定义的。可靠性分析的过程就是利用这种基本变量和系统行为响应量之间的自然律,采用概率分析的手段进行可靠性建模,将基本变量的统计规律传递到响应量,如图 1.2 所示^[8]。可靠性分析的概述框图如图 1.3 所示。

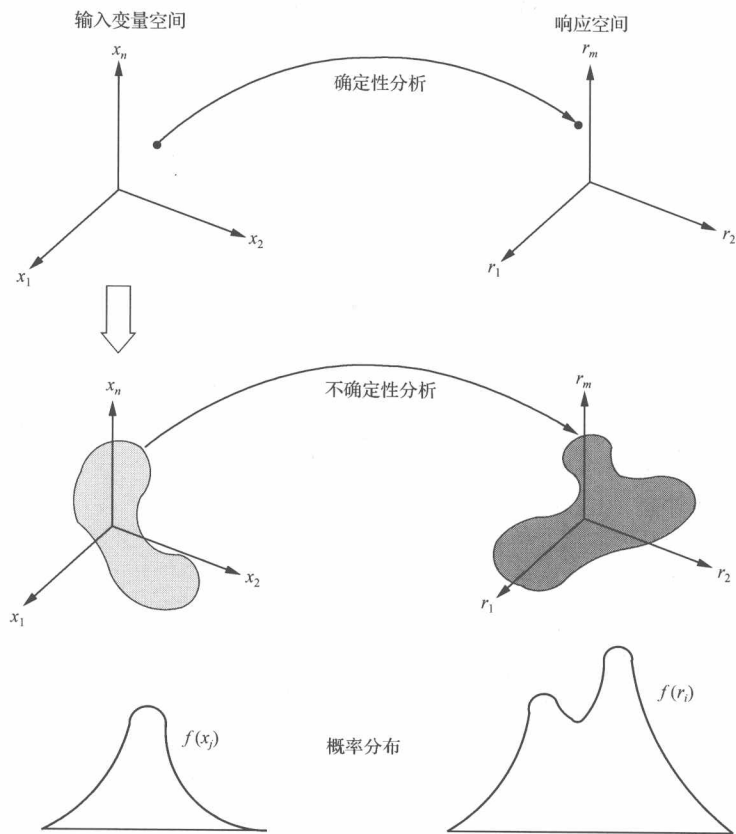


图 1.2 基本变量统计规律向响应量统计规律传递的示意图^[8]