

大型复杂结构 体系可靠度

秦 荣 著



科学出版社
www.sciencep.com

大型复杂结构体系可靠度

秦 荣 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍大型复杂结构体系可靠度分析的新理论、新方法,内容包括基本概念、结构分析的 QR 法、结构非线性分析的 QR 法、结构塑性极限荷载分析的新方法、结构可靠度分析的新方法、结构体系可靠度分析的新方法、结构抗震可靠度分析的新方法、结构抗风可靠度分析的新方法及其应用度。

本书可供土木、水利及建筑工程专业的科技人员和高校相关专业的师生、研究生、博士生、博士后等参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型复杂结构体系可靠度/秦荣著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-024594-6

I. 大… II. 秦… III. 结构体系-可靠性-分析 IV. TU311.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 075891 号

责任编辑:杨家福/ 责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/ 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 6 月第一次印刷 印张: 21 3/4

印数: 1—2 000 字数: 420 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137154(BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229 010-64034315; 13501151303

前 言

结构设计应保证结构可靠性,在用结构需要可靠性评估。结构可靠度是结构可靠性的概率度量,因此结构可靠度分析是结构设计及评估的一个重要问题。结构可靠度分析的理论及方法是 20 世纪 40 年代发展起来的,至今国内外已做了许多研究,获得了许多成果,并在设计规范中得到了应用。在结构可靠度理论中,基于构件层次的结构可靠度理论获得了重要进展,已基本成熟;考虑了荷载的不确定性 & 结构构件抗力的不确定性,但目前还存在许多问题,需要深入研究,例如:①缺乏设计变量的统计数据;②在结构可靠度理论中,考虑荷载及构件抗力的不确定性是与结构分析分开进行的;③结构体系的可靠度分析目前是一个相当困难的问题;④直接考虑非线性效应的结构可靠度理论尚未建立;⑤直接考虑结构体系不确定性的可靠度理论远未完善,离使用阶段很远;⑥结构体系可靠度理论尚难解决大型复杂结构体系可靠度的分析问题;⑦目前国内外还没有工程结构可靠度的精细化分析方法;⑧在用结构可靠性分析与评估亟待深入研究。由上述可知,结构可靠度理论与方法的研究目前面临一个严重的困境。发展工程结构可靠度的精细化分析方法 & 新理论新方法,是解决当前工程结构可靠度理论困境的出路。

目前,国内外对结构体系可靠度分析有两大途径:①失效模式法,也称失效机构法;②结构整体极限承载能力法,可称结构整塑性限荷载法。目前主要采用失效模式法,因此,结构体系可靠度分析存在两大难点:①寻找失效模式;②计算失效概率。国内外很多学者在这方面做过不少研究,提出了多种计算方法。这些方法对结构体系可靠度分析、研究 & 发展有很大贡献。但失效模式法还存在很多问题,需要深入研究。例如:①结构体系有很多失效模式,但很难确定全部失效模式,而且可能漏掉失效模式,对于大型复杂结构体系即使确定主要失效模式也很难;②各失效模式之间有相关性,如果考虑这些相关性的影响,则计算非常复杂;③不能考虑结构几何非线性的影响,会过高估计可靠度,影响结构可靠性。为了克服失效模式法存在的问题,国内外有的学者提出从结构整体极限承载能力出发来分析结构体系可靠度。本书作者在这方面做过许多研究,获得一些新成果,创立了大型复杂结构体系可靠度分析的新方法。

1992 年以来,作者致力于研究结构可靠度分析的新理论、新方法,创立了结构可靠度分析的 QR 法,获得了一些新成果:①提出了结构可靠度分析的验算点-QR 法,包括验算点-随机 QR 法、验算点-随机非线性 QR 法、验算点-随机模糊 QR 法

及实用计算方法;②提出了结构体系可靠度分析的 QR 法,包括主要失效机构-QR 法、最易失效机构-QR 法、塑性极限荷载-QR 法、弹性调整-QR 法,这些方法是从结构整体极限承载能力出发建立起来的,比失效模式法优越,避免了寻找结构体系失效模式带来的巨大困难及缺陷,简化了结构失效概率的计算工作,可以考虑结构几何非线性影响,突破了失效模式法,为大型复杂结构体系可靠度分析另辟一条新路;③提出了结构随机模糊可靠度分析的 QR 法,包括满足度-QR 法、等效功能函数-QR 法及随机模糊功能函数-QR 法;④提出了结构抗震、抗风可靠度分析的 QR 法,包括动力塑性极限荷载-QR 法、静力塑性极限荷载-QR 法及实用分析方法。这些新成果已公开发表,突破了现有成果的局限性,显示了优越性,为结构可靠度分析开辟了一条新途径。

本书是在上述成果的基础上撰写成的,是作者近年来科研成果的总结,是一部科研成果专著。本书共十二章,内容包括基本概念、结构分析的 QR 法、结构非线性分析的 QR 法、结构塑性极限荷载分析的新方法、结构可靠度分析的验算点-QR 法、结构体系可靠度分析的新方法、结构随机模糊可靠度分析的新方法、结构抗震可靠度分析的新方法、结构抗风可靠度分析的新方法及其应用。本书内容丰富、新颖、富有创造性,因此对促进结构可靠度科学技术的研究、应用及发展有重要意义。

目前,国内外出版的结构可靠度书籍对构件层次的结构可靠度理论已有详细的介绍,本书不再重复,只适当引用,主要介绍大型复杂结构体系可靠度分析的新理论、新方法,重点介绍作者的新成果。

第 1 章主要介绍结构可靠度的一些基本概念,指出结构可靠度理论研究的现状及发展方向。

第 2 章主要介绍结构分析的新方法,重点介绍作者的 QR 法及其应用。此法是在有限元法及有限条法之间的另辟一条新路,集有限元法、有限条法及样条有限点法的优点于一体,不仅计算简便而且精度也很高,对大型复杂结构分析是一种经济有效的新方法。

第 3 章主要介绍结构非线性分析的新方法,重点介绍作者的 QR 法,包括结构材料非线性分析的 QR 法、结构几何非线性分析的 QR 法、结构双重非线性分析的 QR 法及结构极限承载能力分析的 QR 法。

第 4 章主要介绍结构塑性极限荷载分析的 QR 法,在简介基本概念的基础上,重点介绍作者的新成果,包括塑性铰模型-QR 法及弹性调整-QR 法。塑性铰模型-QR 法可分下列三类:①一阶塑性铰模型-QR 法,只考虑塑性的影响,不考虑几何非线性的影响;②二阶塑性铰模型-QR 法,不仅考虑塑性的影响,而且考虑几何非线性的影响,即同时考虑双重非线性的影响;③精化塑性铰模型-QR 法。弹性调整-QR 法可分下列两类:①一阶弹性调整-QR 法,只考虑塑性的影响,不考虑几何

非线性的影响;②二阶弹性调整-QR法,同时研究了塑性及几何非线性的影响,还考虑半刚性结点的钢框架分析方法。

第5章主要介绍不确定性分析的QR法,重点介绍作者的新成果,包括不确定性本构关系,结构不确定性非线性变分原理,结构不确定性分析的QR法。

第6章主要介绍结构可靠度分析的验算点-QR法,在简介基本概念的基础上,重点介绍作者的新成果,包括验算点-随机QR法、验算点-随机非线性QR法、验算点-随机模糊QR法、验算点-随机模糊非线性QR法及实用计算方法。

第7章主要介绍结构塑性极限荷载与结构可靠度的关系,重点介绍作者的新成果,利用机动法及一次二阶矩法证明了结构塑性极限荷载相应的失效模式与最小可靠指标相应失效模式是相同的。

第8章主要介绍大型复杂结构体系可靠度分析的QR法,在简介基本概念的基础上,重点介绍作者的新成果,包括主要失效机构-QR法、最易失效机构-QR法、塑性极限荷载-QR法、弹性调整-QR法。这些方法是从结构整体极限承载力出发建立起来的,因此可以同时考虑塑性的影响及几何非线性的影响。另外,最易失效机构-QR法、塑性极限荷载-QR法、弹性调整-QR法避免了寻找失效模式的困难及缺陷,简化了失效概率的计算工作,突破了失效模式法的局限性。

第9章主要介绍结构随机模糊可靠度分析的新方法,在简介基本概念的基础上,重点介绍作者的新成果,包括满足度-QR法、等效功能函数-QR法及随机模糊功能函数-QR法。

第10章主要介绍结构抗震可靠度分析的新方法,在简介基本概念的基础上,重点介绍作者的新成果,包括结构不确定性地震反应分析的QR法、结构动力极限承载力分析的QR法、结构不确定性抗震可靠度分析的QR法。

第11章主要介绍结构抗风可靠度分析的QR法,在简介基本概念的基础上,重点介绍作者的新成果,包括结构风振反应分析的QR法、结构不确定性抗风可靠度分析的新方法。

第12章主要介绍大跨度桥梁结构可靠度分析的新方法,在简介基本概念的基础上,重点介绍作者的新成果。

2000年以来,上述内容对作者的研究生及博士生讲授过,反应很好,有关内容已写成博士生讲义,本书是在广西大学博士生讲义的基础上修改写成的。为了读者方便,有些章正文后还设有附录,从有关文献中引入一些参考资料供读者参考。

1978年以来,作者研究过许多项目。这些项目分别获得国家自然科学基金项目、广西自然科学基金项目、广西科学研究与技术开发项目(桂科攻0592005-1C, 0574005, 06138005, 0861001-12)的资助,本书包括这些项目的许多获奖成果,现借此机会向有关单位和个人表示衷心的感谢!

在本书的写作过程中,得到国内许多同行的热情关怀及大力支持,我的许多博士生及硕士生利用这些新理论、新方法编程算过许多例题,分析过一些工程实例,特此对他们表示感谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 基本概念	1
1.1 结构的功能要求	1
1.2 结构功能函数	1
1.3 结构极限状态	2
1.4 结构可靠度	3
1.5 结构可靠度指标	4
1.6 求可靠度指标 β 的方法	5
1.7 结构不确定性可靠度	6
1.8 结构体系可靠度	9
1.8.1 结构体系可靠度分析模型	9
1.8.2 静定结构体系可靠度	10
1.8.3 超静定结构体系可靠度	11
1.9 结构可靠度理论研究的方向	12
1.9.1 目前结构可靠度研究的主要问题	12
1.9.2 结构可靠度理论研究的发展方向	13
1.10 大型复杂结构体系	13
1.11 附录	14
1.11.1 概率的基本概念	14
1.11.2 随机变量统计量	16
1.11.3 可靠指标的几何意义	17
1.11.4 计算可靠指标 β 的常用公式	18
1.11.5 求雅可比矩阵	21
参考文献	21
第 2 章 大型复杂结构分析的 QR 法	23
2.1 计算原理	23
2.2 高层框架结构分析的 QR 法	26
2.3 剪力墙结构分析的 QR 法	28
2.4 框-剪结构分析的 QR 法	30
2.5 筒体结构分析的 QR 法	31

2.6	高层建筑复杂结构体系分析的 QR 法	34
2.7	计算例题	34
2.8	附录	38
2.8.1	B 样条函数构造方法	38
2.8.2	B 样条函数性质	39
2.8.3	B 样条函数的数值方法	39
2.8.4	样条基函数	40
2.8.5	样条函数值	43
2.8.6	样条离散化	44
2.8.7	梁单元	46
2.8.8	非节点荷载作用下的梁单元	50
2.8.9	平板壳单元	51
2.8.10	QR 变换的简化方法	52
	参考文献	55
第 3 章	大型复杂结构非线性分析的 QR 法	57
3.1	弹塑性本构关系	57
3.1.1	流动法则理论	57
3.1.2	材料非线性应变理论	74
3.2	结构弹塑性分析的 QR 法	80
3.2.1	平面框架弹塑性分析的 QR 法	80
3.2.2	空间框架弹塑性分析的 QR 法	83
3.2.3	结构材料非线性分析的算法	85
3.2.4	弹塑性梁单元	87
3.3	结构几何非线性分析的 QR 法	91
3.3.1	结构几何非线性理论	91
3.3.2	建立结构几何非线性分析的新模型	96
3.3.3	结构几何非线性分析的算法	104
3.4	结构双重非线性分析的 QR 法	107
3.4.1	基本理论	107
3.4.2	初应力理论与几何非线性结合的格式	108
3.4.3	变刚度理论与几何非线性结合的格式	111
3.4.4	大型复杂结构双重非线性分析的 QR 法	114
3.5	结构极限承载能力分析的 QR 法	120
3.6	计算例题	121
3.7	附录	123

3.7.1 几何非线性单元切线刚度矩阵	123
3.7.2 建立几何非线性单元切线刚度矩阵的一般方法	125
3.7.3 大变形几何非线性问题	126
3.7.4 两种增量格式比较	131
3.7.5 结构双重非线性问题	131
3.7.6 大变形弹塑性问题	132
参考文献	133
第4章 大型复杂结构极限承载能力分析的新方法	134
4.1 基本概念	134
4.1.1 基本理论	134
4.1.2 塑性极限理论	134
4.1.3 塑性铰模型	136
4.2 结构塑性极限分析的塑性铰模型-QR法	137
4.2.1 一阶塑性铰模型-QR法	137
4.2.2 二阶塑性铰模型-QR法	138
4.3 结构塑性极限分析的精化塑性铰模型-QR法	146
4.3.1 几何非线性梁柱单元	146
4.3.2 精化塑性铰模型	148
4.3.3 残余应力的影响	149
4.3.4 考虑截面逐渐屈服的影响	150
4.3.5 带塑性铰的梁柱单元	151
4.3.6 精化塑性铰模型-QR法	153
4.4 结构塑性极限分析的弹性调整-QR法	153
4.4.1 一阶弹性调整-QR法	153
4.4.2 二阶弹性调整-QR法	157
4.5 半刚性钢框架非线性分析的QR法	158
4.6 计算例题	158
参考文献	163
第5章 结构不确定性分析的新方法	165
5.1 不确定性变量	165
5.2 不确定性本构关系	166
5.3 结构不确定性非线性变分原理	167
5.4 结构不确定性分析的新方法	169
5.4.1 样条离散化	169
5.4.2 建立样条刚度方程	169

5.4.3 计算不确定性量	170
5.5 小结	170
参考文献	171
第6章 结构可靠度分析的验算点-QR法	172
6.1 基本原理	172
6.2 验算点-随机QR法	173
6.3 验算点-随机非线性QR法	177
6.4 验算点-随机模糊非线性QR法	180
6.5 验算点-随机模糊QR法	182
6.6 结构可靠度分析的实用计算方法	182
6.6.1 结构时变可靠指标	182
6.6.2 验算点法	183
6.6.3 QR法对应的梯度公式	187
6.6.4 验算点-QR法	190
6.7 程序设计流程	192
6.8 计算例题	193
6.9 附录	196
6.9.1 不确定性单元的向量及矩阵	196
6.9.2 确定性的非线性递推方程组	196
6.9.3 考虑结构几何形状不确定性的影响	198
参考文献	201
第7章 结构体系可靠度与塑性极限荷载的关系	202
7.1 失效机构	202
7.2 求结构塑性极限荷载的机构法	204
7.3 结构塑性极限荷载与结构体系可靠度的关系	205
7.4 列结构功能函数的方法	209
7.5 计算例题	210
参考文献	215
第8章 大型复杂结构体系可靠度分析的新方法	216
8.1 基本概念	216
8.2 主要失效机构-QR法	217
8.3 最易失效机构-QR法	218
8.4 塑性极限荷载-QR法	219
8.5 弹性调整-QR法	220
8.6 程序设计框图	221

8.7 计算例题	222
8.8 附录	225
8.8.1 结构体系功能函数的相关性	225
8.8.2 已知塑性极限荷载求结构体系可靠度	227
8.8.3 已知最易失效机构求结构体系可靠度	228
8.8.4 复杂结构体系可靠度分析的 Monte-Carlo-QR 法	228
8.8.5 随机变量抽样	229
8.8.6 可靠指标与安全系数的关系	232
8.8.7 可靠指标与分项系数的关系	234
8.8.8 标准正态分布	237
8.8.9 补充标准正态分布	237
参考文献	246
第 9 章 结构随机模糊可靠度分析的新方法	247
9.1 基本概念	247
9.2 满足度-QR 法	251
9.3 等效功能函数-QR 法	252
9.4 随机模糊功能函数-QR 法	254
9.5 计算例题	255
参考文献	257
第 10 章 大型复杂结构抗震可靠度分析的新方法	258
10.1 基本概念	258
10.1.1 抗震的基本对策	258
10.1.2 地震对桥梁结构的影响	258
10.1.3 桥梁结构的地震破坏形式	259
10.1.4 地震作用理论	260
10.1.5 抗震设计	261
10.1.6 桥梁抗震设计方法	261
10.1.7 结构地震反应分析法	262
10.2 恢复力模型	263
10.3 结构非线性地震反应分析的新方法	264
10.3.1 建模	264
10.3.2 算法	265
10.4 结构不确定性地震反应分析的新方法	268
10.4.1 结构随机非线性地震反应分析的新方法	268
10.4.2 结构随机模糊非线性地震反应分析的新方法	269

10.5	结构动力极限承载能力分析的 QR 法	270
10.6	结构不确定性动力可靠度分析的新方法	271
10.7	结构不确定性抗震可靠度分析的新方法	276
10.7.1	结构失效准则	276
10.7.2	结构抗震可靠度分析的新方法	278
10.7.3	结构抗震的条件可靠度公式	279
10.7.4	结构体系抗震可靠度计算步骤	280
10.7.5	动力塑性极限荷载-QR 法	281
10.7.6	静力塑性极限荷载-QR 法	282
10.8	计算例题	283
10.9	附录	283
10.9.1	确定恢复力向量	283
10.9.2	材料本构关系	284
10.9.3	多自由度结构体系的时变动力可靠度	285
10.9.4	结构抗震性能分析的 Pushover 法	286
10.9.5	结构抗震性能分析的 Pushover-QR 法	288
	参考文献	290
第 11 章	高层结构抗风可靠度分析的新方法	292
11.1	基本概念	292
11.1.1	风荷载	292
11.1.2	抗风设计要求	293
11.1.3	风振控制	294
11.1.4	结构抗风分析的理论基础	294
11.2	结构风振反应分析的新方法	294
11.2.1	结构体系	294
11.2.2	建模	294
11.2.3	算法	296
11.3	结构不确定性风振反应分析的新方法	296
11.3.1	结构随机非线性风振反应分析的新方法	296
11.3.2	结构不确定性非线性风振反应分析的新方法	297
11.4	结构不确定性抗风可靠度分析的新方法	298
11.4.1	基本概念	298
11.4.2	结构抗风时变可靠度的计算方法	300
11.4.3	结构抗风时变可靠度分析的新方法	301
11.5	高耸结构抗风可靠度计算方法	301

11.6 结构空气动力失稳.....	303
11.7 计算例题.....	303
参考文献.....	304
第 12 章 大跨度桥梁结构可靠度分析的新方法	305
12.1 基本概念.....	305
12.1.1 拟建结构与在用结构	305
12.1.2 荷载的概率模型及统计分析	305
12.1.3 结构及结构构件的抗力	306
12.1.4 桥梁结构可靠性降低的原因	306
12.2 桥梁结构分析的 QR 法.....	306
12.2.1 大跨度连续刚构桥分析的 QR 法	306
12.2.2 大跨度钢管混凝土桁架拱桥分析的 QR 法	314
12.2.3 大跨度斜拉桥分析的 QR 法	320
12.3 桥梁结构不确定性可靠度分析的 QR 法.....	328
12.4 桥梁结构不确定性动力可靠度分析的 QR 法.....	328
12.5 桥梁结构体系可靠度分析的新方法.....	329
12.6 在用桥梁结构可靠度分析的新方法.....	329
12.6.1 在用桥梁结构体系可靠性模型	329
12.6.2 在用桥梁结构荷载的随机性	329
12.6.3 在用桥梁体系抗力的随机性	330
12.6.4 在用桥梁结构可靠度分析的新方法	331
12.7 计算例题.....	331
参考文献.....	333

第1章 基本概念

结构设计应保证结构可靠性,结构可靠度是结构可靠性的概率度量。因此,结构可靠度分析是结构设计的一个重要问题。目前,国内外对结构可靠度的研究已做了许多工作,获得了不少成果^[1~9]。在结构可靠度理论中,基于构件层次的结构可靠度理论获得了重要进展,基本上成熟,考虑了荷载的不确定性及结构构件抗力的不确定性,但还存在许多问题,需要深入研究。例如:①缺乏设计变量的统计数据;②在结构可靠度理论中,考虑荷载及构件抗力的不确定性是与结构分析分开进行的;③结构体系的可靠度分析目前是一个相当困难的问题;④直接考虑非线性效应的结构可靠度理论尚未建立;⑤直接考虑结构体系不确定性的可靠度理论远未完善,离使用阶段很远;⑥结构体系可靠度理论尚难解决大型复杂结构的分析问题;⑦目前国内外没有工程结构可靠度的精细化分析方法。由上述可知,结构可靠度理论与方法的研究目前面临一个严重的困境。发展工程结构可靠度的精细化分析方法,是解决当前工程结构可靠度理论困境的出路。本章主要介绍结构可靠度基本概念。

1.1 结构的功能要求

各种工程结构必须满足下列功能要求:

- 1) 正常施工和使用时,结构能承受可能出现的各种作用。
- 2) 在正常使用时,结构具有良好的工作性能。
- 3) 在正常维护下,结构具有足够的耐久性。
- 4) 在设计规定的偶然事件发生时和发生后,结构能够保持必须的整体稳定性。

在上述功能要求中,第1)、4)两项关系到人身安全,因此称之为结构的安全性;第2)项为结构的适用性要求;第3)项为结构的耐久性要求。如果结构同时满足安全性、适用性及耐久性要求,则称此结构可靠。由此可知,结构的可靠性是结构安全性、适用性及耐久性的总称。

1.2 结构功能函数

结构可靠性受很多因素的影响,但这些因素可归纳为两个综合量,即 R 、 S 。由

此可得

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1.1)$$

式中 R 为结构或构件的抗力, S 为结构或构件的荷载效应, 它们都是随机变量。由此可知, Z 也是一个随机变量。它们可能出现下列三种情况:

当 $Z > 0$ 时, 结构处于可靠状态。

当 $Z < 0$ 时, 结构处于失效或破坏状态。

当 $Z = 0$ 时, 结构处于极限状态。

由此可知, 根据 Z 值的大小可以判断结构是否满足预定的功能要求。故式(1.1)称为结构功能函数, 下列方程称为结构极限状态方程, 即

$$Z = R - S = 0 \quad (1.2)$$

因为影响 R 及 S 有很多的基本随机变量(例如, 材料性能、截面几何特性、结构尺寸、计算模型等), 因此结构可靠度分析及设计时应该考虑这些基本随机变量。如果设这些基本随机变量为 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 则结构功能函数可由基本随机变量来描述, 即

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1.3)$$

1.3 结构极限状态

结构是否可靠, 决定于结构所处的状态, 结构极限状态是结构由可靠变为失效的临界状态。结构极限状态可分为承载能力极限状态及正常使用极限状态。

(1) 承载能力极限状态

结构承载能力极限状态是结构达到极限承载力的状态。如果结构或结构构件未达到承载能力极限状态, 则结构可靠; 如果结构或结构构件超过承载能力极限状态, 则结构失效。当结构或结构构件出现下列状态之一时, 则认为超过了承载能力极限状态:

1) 结构构件或连接因超过材料强度而破坏, 或因为过度变形而不适于继续承载。

2) 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡(如倾覆等)。

3) 结构变为机动体系。

4) 结构或结构构件丧失稳定。

5) 地基丧失承载能力而破坏。

6) 结构或结构构件的疲劳破坏。

(2) 正常使用极限状态

正常使用极限状态是结构达到影响正常使用的状态。如果结构未达到正常使用极限状态, 则结构可靠; 如果结构超过正常使用极限状态, 则结构失效。当结构

或结构构件出现下列状态之一时,则认为超过了正常使用极限状态:

- 1) 影响正常使用或外观的变形。
- 2) 影响正常使用或耐久性能的局部损伤(包括裂缝)。
- 3) 影响正常使用的振动。
- 4) 影响正常使用的其他特定状态。

(3) 破坏—安全极限状态

超过这种极限状态导致的破坏,是指容许结构物可以发生的局部破坏,而对已发生局部破坏结构的其余部分应该具有适当的可靠度,能继续承受降低了的设计荷载。

1.4 结构可靠度

结构可靠度是结构可靠性的概率度量,定义为结构在规定时间内,在规定条件下完成预定功能的概率。

如果已知结构功能函数 Z 的概率密度分布函数 $f_Z(z)$, 则结构的可靠度 P_s 为

$$P_s = P(Z > 0) = \int_0^{\infty} f_Z(z) dz \quad (1.4)$$

如果结构失效概率为结构处于失效状态的概率,则结构失效概率 P_f 为

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_Z(z) dz \quad (1.5)$$

如果已知结构荷载效应 S 和抗力 R 的概率分布密度分别为 $f_S(s)$ 及 $f_R(r)$, 且 S 与 R 相互独立,则

$$f_Z(z) = f_Z(r, s) = f_R(r) f_S(s) \quad (1.6)$$

由上述可得结构可靠度为

$$P_s = P(R - S > 0) = \iint_{R-S>0} f_R(r) f_S(s) dr ds \quad (1.7)$$

结构失效概率为

$$P_f = P(R - S < 0) = \iint_{R-S<0} f_R(r) f_S(s) dr ds \quad (1.8)$$

因为结构的可靠及失效是两个对立的事件,因此由概率论可知,失效概率与可靠概率互补,即

$$P_s + P_f = 1 \quad (1.9)$$

由此可得

$$P_s = 1 - P_f \quad (1.10)$$

由式(1.10)可知,由结构失效概率 P_f 可以确定结构的可靠概率 P_s 。工程结构可靠度分析常计算结构失效概率。

如先对 R 积分再对 S 积分,则式(1.8)可变为