

JIYOU JIEGOU KEKAODU LILUN JI YINGYONG

既有结构可靠度 理论及应用

李 艺 著

教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-12-0107)

中央高校基本科研业务费项目 (N130401009)

既有结构可靠度理论及应用

李 艺 著



东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 李 艺 2015

图书在版编目 (CIP) 数据

既有结构可靠度理论及应用 / 李艺著. —沈阳: 东北大学出版社, 2015. 11
ISBN 978 - 7 - 5517 - 1141 - 8

I. ①既… II. ①李… III. ①结构可靠性—研究 IV. ①TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 267887 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024 - 83687331(市场部) 83680267(社务室)

传真: 024 - 83680180(市场部) 83680265(社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 240mm

印 张: 10.25

字 数: 212 千字

出版时间: 2015 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2015 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 孟 颖

封面设计: 刘江阳

责任校对: 子 敏

责任出版: 唐敏志

ISBN 978 - 7 - 5517 - 1141 - 8

定 价: 45.00 元

序

既有结构可靠性评估理论是在世界性的建筑维修改造业日益兴盛的背景条件下产生的。研究既有结构可靠度理论,不仅能够顺应建筑业迫切的理论需求,而且还有助于结构设计规范、可靠性鉴定标准的进一步合理修订,为服役结构的科学管理提供依据,具有重要的科学价值和广泛的工程应用前景。

针对我国结构设计规范中可靠性分析静态模型的缺陷,笔者考虑了服役结构荷载及抗力分布统计特征不同于拟建结构的固有特点,建立了全随机时变可靠性评估模型。为弥补以往仅仅局限于单因素作用及强度方面研究的不足,建立了环境、时效、内部作用等多因素影响机制下强度和刚度的可靠性评估模型。

鉴于现行的可靠性鉴定标准与结构设计标准不相协调,仅从定性的角度给出了结构构件和系统的可靠性要求,以始建于1958年的沈阳热电厂碎煤机室1#甲输煤栈桥为例,讨论了受损严重的钢筋混凝土受弯构件随拉区混凝土脱落高度的增加、钢筋与混凝土之间黏结性能不断劣化,构件承载力及变形的经时规律,并求得加固前后动态可靠指标,使得可靠性鉴定结果更具科学性。

在实际工程中,当服役结构需要扩大使用规模或改变使用功能、但受到资金或其他客观条件限制不能拆除重建时,对其进行增层处理是比较多见的。基于服役结构荷载效应和抗力水平的时变性,提出了建筑物增层可行性研究和设计时必须要考虑时间因素影响的观点。以阜新发电厂电除尘控制楼和主控楼为例,分别从强度和刚度两方面入手,应用自编程序首次对服役框架结构增层项目进行动态可靠性评估,给出了服役建筑物增加一至二层时,增层可行性的时变结论,并与框架空间程序TAT的计算结果进行对比,表明了书中方法的正确性。克服了设计者由于现今可靠性评估工作缺乏科学的定量结果,只得盲目增大安全储备而导致工程浪费的弊端。

目前既有桥梁净空不足问题日益突显,因此,桥梁顶升改造工程增多。但是以往的相关研究多集中于顶升设计、技术等方面,而桥梁顶升后在后续使用期内的承载力和剩余寿命预测却很少涉及。鉴于该领域理论研究滞后,以上海南浦大桥为例,考虑材料性能随时间退化的因素,给出桥梁顶升后承载力时变可靠度模型,对桥梁顶升后承载力可靠度予以分析,并预测其剩余寿命。提出桥梁顶升的

墩柱可靠性分析方法,求得墩柱的可靠指标。

在混凝土基材中掺入纤维有利于提高混凝土结构的抗弯承载力、抗变形和抗裂能力。以承受十年持续荷载作用简支梁为例,考虑混凝土强度、截面有效尺寸、纤维增强系数及构件承载力等影响因素,推导了纤维混凝土梁正截面抗弯承载力和基于挠度控制的可靠性分析模型,从强度和刚度两个方面求取了纤维混凝土梁抗弯可靠性指标和随机变量灵敏度。

本书关于既有结构可靠度理论的一系列有益探讨,对于充分发挥结构潜能、优化维修决策及结构维修加固机理等方面的研究进展具有重要的理论意义和工程价值。

在此,作者要衷心感谢教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0107)、中央高校基本科研业务费项目(N130401009)、辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LR2015024)和东北大学研究生教育科研计划项目的资助,使本书的研究成果得以完成并出版。对参与本书研究和写作工作的杨春晖硕士、董金霞硕士、吴晓安硕士和董晶晶硕士等深表谢意!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正!

著者

2015年11月

目 录

第1章	绪 论	1
1.1	研究既有结构可靠性评估理论的意义	1
1.2	可靠性评估理论国内外发展现状	3
1.2.1	可靠性评估方法概述	4
1.2.2	结构时变可靠度	9
1.2.3	系统可靠度	12
1.3	结构剩余寿命的预测方法	13
1.3.1	混凝土碳化寿命理论	13
1.3.2	构件开裂寿命理论	13
1.3.3	钢筋锈蚀寿命理论	14
1.3.4	断裂力学理论预测剩余寿命	14
1.3.5	限定可靠指标预测剩余寿命	14
1.3.6	基于可靠性与经济优化相结合的剩余寿命评估准则	15
第2章	工程结构可靠性原理	21
2.1	基本概念	21
2.2	基本假定	22
2.3	拟建结构与服役结构	22
2.3.1	规定时间	22
2.3.2	规定条件	22
2.3.3	预定功能	23
2.4	不同阶段的结构可靠度	23
2.4.1	设计阶段结构可靠度	23
2.4.2	施工阶段结构可靠度	23
2.4.3	正常使用期结构可靠度	24
2.4.4	老化期结构可靠度	25

2.5	数学模型的建立	26
2.5.1	荷载作用	27
2.5.2	环境作用	27
2.5.3	可靠性评估要素	27
2.6	服役结构荷载概率模型	27
2.6.1	恒 载	28
2.6.2	活 载	28
2.6.3	验证荷载	28
2.6.4	荷载效应	29
2.6.5	荷载概率模型的参数	29
2.6.6	荷载分布的后验性	29
2.6.7	荷载最大值	29
2.7	服役结构抗力概率模型	30
2.7.1	抗力的劣化	30
2.7.2	抗力的随机性	30
2.7.3	抗力计算模型	30
2.7.4	抗力影响机制	31
2.8	服役结构动态可靠度	36
2.8.1	功能函数的全随机过程	37
2.8.2	动态可靠指标	37
2.8.3	当量正态化处理	37

第3章	既有受弯构件的可靠度	40
------------	-------------------------	-----------

3.1	服役结构强度经时分析	41
3.1.1	服役钢筋混凝土构件强度经时分析	41
3.1.2	T型截面受弯构件经时计算抗力公式	41
3.2	既有构件抗力统计参数	42
3.2.1	钢筋经时屈服拉力	42
3.2.2	钢筋截面损失率	42
3.2.3	钢筋锈蚀率的影响	43
3.2.4	混凝土碳化系数	44
3.2.5	混凝土经时抗压强度	44
3.3	既有构件荷载效应计算	44
3.4	动态可靠度计算	45

3.5	服役结构刚度经时分析	45
3.5.1	刚度经时模型	46
3.5.2	变形经时模型	46
3.6	工程实例	47
3.6.1	工程概况及评级标准	47
3.6.2	常规设计方法	48
3.6.3	经时可靠性分析	49

第4章	既有框架结构增层工程的可靠度	54
------------	-----------------------------	-----------

4.1	引 言	54
4.2	工程概况与结构检测	55
4.2.1	建筑物增层前的调查分析	55
4.2.2	结构检测	56
4.3	增层改造可行性研究	58
4.3.1	设计要求	58
4.3.2	设计流程	58
4.3.3	增层方法选择	59
4.3.4	结构内力分析	60
4.3.5	增层控制条件	60
4.3.6	基础验算	62
4.4	既有框架结构增层时变可靠性分析	64
4.4.1	框架柱时变抗力的影响机制	65
4.4.2	框架柱时变抗力模型	68
4.4.3	时变可靠性分析	74
4.5.4	计算结果比较	74
4.6	本章小结	81

第5章	既有桥梁顶升工程的可靠度	84
------------	---------------------------	-----------

5.1	引 言	84
5.2	工程背景	84
5.3	桥梁结构抗力衰减主要影响因素	86
5.3.1	混凝土抗压强度时变参数	86
5.3.2	锈蚀钢筋屈服强度的时变参数统计	87
5.3.3	锈蚀钢筋与混凝土协同工作系数计算模型	88
5.3.4	构件截面几何特征	89

5.3.5	其他影响因素	89
5.4	抗力衰减时变模型	90
5.4.1	结构抗力时变衰减基本模型	90
5.4.2	服役抗力时变衰减模型	90
5.4.3	桥梁结构抗力计算	92
5.5	荷载效应计算	94
5.5.1	恒载效应	94
5.5.2	可变荷载效应	95
5.6	抗弯承载力动态可靠性分析	95
5.6.1	动态可靠度评估方法	95
5.6.2	抗弯承载力动态可靠度计算	97
5.6.3	抗弯可靠度评估及寿命预测	98
5.7	桥梁顶升工程的墩柱可靠性分析	99
5.7.1	分析模型	100
5.7.2	双孔荷载下墩柱轴心受压可靠性分析	101
5.7.3	单孔荷载下桥墩偏心受压可靠性分析	104
5.8	本章小结	108

第6章	既有钢筋钢纤维混凝土梁的可靠度	111
------------	------------------------	------------

6.1	引言	111
6.2	既有构件抗力统计参数	111
6.2.1	材料强度	111
6.2.2	钢筋有效截面面积	112
6.2.3	钢筋与混凝土的黏结力	113
6.2.4	计算模式不定性系数	114
6.3	构件时变荷载效应	114
6.3.1	基于正截面抗弯承载力的荷载效应	114
6.3.2	基于裂缝宽度控制的荷载效应	115
6.3.3	基于挠度控制的荷载效应	116
6.4	动态可靠指标计算	117
6.5	正截面抗弯承载力时变可靠性分析	117
6.5.1	钢筋钢纤维混凝土梁正截面抗弯承载力	117
6.5.2	钢筋钢纤维混凝土梁正截面时变抗弯承载力	119
6.5.3	极限状态方程的建立	119

6.6	基于裂缝宽度控制的时变可靠度模型	120
6.6.1	极限状态方程	120
6.6.2	时变极限状态方程	122
6.7	基于挠度控制的时变可靠度模型	122
6.7.1	极限状态方程	122
6.7.2	时变极限状态方程	124
6.8	试验简介	125
6.9	抗力影响因素统计参数	127
6.9.1	钢筋锈蚀时间	127
6.9.2	钢筋时变截面面积的平均值和标准差	128
6.9.3	混凝土时变抗压强度的平均值和标准差	129
6.9.4	混凝土时变抗拉强度的平均值和标准差	130
6.9.5	钢纤维含量特征值的均值和标准差	131
6.9.6	钢筋与混凝土黏结系数	131
6.9.7	其他随机变量统计参数	131
6.10	荷载效应的计算	132
6.11	正截面抗弯承载力时变可靠指标与时变灵敏度	133
6.11.1	时变可靠指标结果及分析	133
6.11.2	时变灵敏度结果及分析	135
6.12	基于裂缝宽度控制的时变可靠指标与时变灵敏度	139
6.12.1	时变可靠指标结果及分析	139
6.12.2	裂缝宽度的时变灵敏度结果及分析	140
6.13	基于挠度控制的时变可靠指标与时变灵敏度	144
6.13.1	时变可靠指标结果及分析	144
6.13.2	时变灵敏度结果及分析	146
6.14	本章小结	150

第1章 绪 论

1.1 研究既有结构可靠性评估理论的意义

作为一门新兴学科,既有结构可靠性评估理论是在世界性的建筑维修改造业日益兴盛的背景条件下产生的。由于受到理论分析、实验条件、数据采集与统计等因素的制约,探求适合实际应用的既有结构可靠性评估的理论和方法,一直是建筑物维修改造工作中急需首要解决而迄今为止尚未能很好解决的重要课题。

从第二次世界大战至今,国际上发达国家的基本建设大体分三个阶段,即战后恢复的大规模新建阶段,新建与维修并重阶段以及目前强调的维修与现代化改造为主的阶段。例如,瑞典1983年建筑业总投资的50%是用在了维修改造方面;美国自20世纪70年代起建筑业中新建建筑开始不景气,而维修改造业却日益兴旺;英国1978年维修改造业的投资是1965年的3.8倍;前苏联第九和第十个五年计划中维修改造业的投资占工业建筑总投资的65%。从国外有关机构公布的统计数字来看,许多发达国家维修改造的工程量一直处于上升的态势。

我国建筑业发展的基本状况是这样的,“一五”期间新建建筑投资占基建总投资的95.8%,而“六五”期间只占45%,说明我国已开始由新建与维修并重阶段逐渐步入维修改造为主的阶段^[1]。长期以来,国有企业一直延续着“重新建、轻改造”的倾向,尽管从1991年下半年以来这种局面有所改变,但与几十年来积累的尚需改造投入的巨额资金基数相比,仍显力度不够。而从“重新建”的效果来看,却远远没有达到预期的目的。据国家统计局对我国20世纪90年代末新建投产的48个大中型重点项目的统计,约有1/3的项目处于亏损状态,1/3的项目处于保本状态;另据对某省投产的68个新建项目的统计,其投资利税率只有0.07%,而改造项目的投资利税率一般可以达到20%左右^[2]。改造较新建可节省投资约40%,缩短工期约50%,投入产出比提高1倍以上^[1]。因此,与低效、无效的投资浪费状况相比,在我国经济技术发展水平还比较落后,以及现有的大量老旧建筑的使用功能不能适应当前经济发展要求的现状下,迫切要求我们加快已有建筑物的维修改造进程。

据统计,全球大量现存建筑物的服役状况令人担忧,急需维修加固处理。据美国联邦公路总局(FHWA)统计,美国桥梁总数约为 57.5 万座,其中约 20 万座被划为不符合要求,12.5 万座被列为具有结构缺陷,每年需替换的桥梁数量在 5000~8000 座左右, FHWA 规划的桥梁修复与替换方案估计耗资 900 亿美元^[3]。再以钢质导管架海洋平台为例,这种石油钢结构工作条件比一般建筑结构所处条件还要恶劣,经过多年使用造成的损伤引起结构整体抗力衰减,可靠度水平降低。截至 2010 年,世界上已有 1/3 的海洋平台进入服役后期,对于役龄超过 30 年的固定式海洋平台,其结构体系失效风险高达 25%~45%^[4]。有关统计显示,英国大陆架和挪威大陆架上相当数量的海洋平台已经服役了 20 多年,有的甚至超过 30 年^[5]。我国目前已建成海洋平台 200 余座,其中很多已进入服役后期^[6]。

我国的结构设计规范取定的安全度标准在世界上是偏低的,中西方混凝土结构规范安全储备比较见表 1.1^[2],表中 K 为安全系数。

表 1.1 中西方混凝土结构规范安全储备比较

国家 \ K		梁				柱		板	基础		
		抗弯	抗剪			抗扭	大偏压	小偏压	抗冲切	抗弯	抗冲切
			均布荷载 仅配箍筋	集中荷载 仅配箍筋	均布荷载 仅配弯筋						
中国		1.47	1.67	2.03	2.02	2.03	1.59	1.75	2.06	1.16	2.14
美国		1.80	2.41	2.43	2.41	2.43	2.34	2.50	1.54	1.75	4.79
英国		1.72	1.99	1.84	1.99	2.11	1.75	2.12	1.69	1.66	11.24

由于长期以来片面强调节约原材料,而忽视了耐久性,在我国的现有建筑物中,安全性严重低于规范要求的建筑物多,建筑倒塌事故多;缺乏科学管理,任意增加结构荷载,改变结构功能,破坏了结构的正常使用状态。据初步调查,我国 30%~50% 以上的建筑已出现安全性失效或进入功能退化期,并且以混凝土结构和砌体结构为主^[7]。相关数据显示,我国城镇现有住宅中有约 10 亿 m^2 因使用年限超过 20 年而进入大修高峰时期,另有 2707 万 m^2 危险住房急需改造^[8]。工业建筑中,以水库大坝及桥梁为例,截至 2003 年,我国平均水库大坝垮坝失事率达 4.09%,远高于世界平均水平^[9]。随着服役期的增长,桥梁老化日益严重,截至 2012 年底,我国已有的 70 余万座公路桥梁中,约 13% 的桥梁存在严重问题,如结构性缺陷、功能性失效隐患等。另外据不完全统计,近 5 年来我国 37 座桥梁事故中,24 座是在役桥梁,平均每年有 7.4 座桥梁发生事故^[10]。

确定既有结构是维修还是拆除,合理选择最佳维修改造方案,都需要分析结构的服役状态,以结构可靠度为控制参数,对其进行可靠性评估。但是,由既有结构本身存在着大量与结构的几何特征、材料特性、环境条件、失效准则等因素

有关的不确定性信息,很难给出一种统一的评估模式;现今检测技术的发展水平又明显滞后于工程的迫切需求,很多数据无法由实测获得;现行的可靠性鉴定标准与设计标准不相协调,仅从定性的角度给出了结构构件和系统的可靠性要求,致使既有结构可靠性评估理论的实用性研究仍处于艰难的探索阶段,至今尚未形成体系。对既有结构进行综合评估、健康诊断,需要丰富的工程经验以及深入的多学科理论知识及数学手段。因此,研究既有结构可靠性评估的理论和方法,不仅能够顺应主流建筑业迅猛发展迫切的理论需求,而且还有助于结构设计规范、可靠性鉴定规范的进一步合理修订,为既有结构的科学管理提供依据,具有重要的科学价值、广泛的工程应用前景、重大的社会效益和经济效益。

1.2 可靠性评估理论国内外发展现状

可靠性的设想及可靠性工程学的发展,以第二次世界大战为转折点,以真空管为中心的各种产品中的零件和德国的 V_1 、 V_2 火箭的制造和管理为开端,再通过美国的阿波罗计划,获得了显著的发展。日本于 20 世纪 50 年代中期引进了可靠性技术,和美国一样,首先是从电子技术部门开始的。我国在第一个五年计划期间打下了可靠性和环境适应性的试验研究基础,也是首先重视电子产品的可靠性工作。在第二、第三个五年计划期间,还对产品的失效机理进行了分析研究,并采取了相应的措施,提高了电子产品的可靠性水平^[11]。在土木建筑工程领域进行可靠性研究,是从 20 世纪 40 年代末到 50 年代初开始的。在初创时期,苏联学者斯特列律茨基、尔然尼采和美国弗罗依登彻尔等作出了较大贡献。弗罗依登彻尔教授的影响特别大,他创议的首次国际结构安全性和可靠性会议于 1969 年在美国华盛顿召开。

对既有结构可靠性评估的理论研究始于 20 世纪 70 年代,当时的研究内容主要集中于既有结构的损伤评估、模式识别和可靠性分析评价。美国的姚志平对既有结构的安全性和可靠性进行了较全面的研究,并在 80 年代初期对当时的研究成果作了系统的总结。前苏联对既有结构可靠性问题也开展了积极的研究,对荷载、抗力的分布的确定提出了明确的原则,认为既有结构的可靠度计算值与检测和计算精度有着很大关系,指出既有结构的可靠性分析更需考虑时间因素,并利用越界理论、蒙特卡罗模拟和马尔科夫过程三种方法考虑时间因素对既有结构可靠度的影响^[12]。E. Garavaglia 以及 A. Anzani 等^[13]定义了随机变量易损性指标,建立了预测既有砌体损害的数学模型。V. Dimitri^[14]分析了钢筋锈蚀对构件的抗弯和抗剪承载力的影响,并考虑了一般性腐蚀和特殊环境下的腐蚀两种情况。通过试验研究,考虑材料、几何、荷载和腐蚀模型的不确定性,采用蒙特卡洛法计算了其失效概率。B. Radhika 等^[15]研究了既有结构在受到平稳随机动态激励下的

时变可靠度。

我国对既有结构可靠性理论的研究起始于 20 世纪 80 年代。原冶金部建筑研究总院建筑技术情报室在这一方面开展了卓有成效的工作,该机构从 1980 年开始从事“老厂改造中建筑技术情报”课题的研究,总结和介绍了国内外大量的情报和成果,形成了一套我国最早的、比较完整的工业建筑检查、鉴定、维修和改造的技术资料,为发展我国已有建筑物的检测鉴定方法和技术发挥了重要作用。1987 年,赵国藩和李云贵讨论了既有结构荷载效应和抗力的特点,给出既有结构可靠性分析的方法和程序。1990 年,王光远提出了结构服役过程中的动态可靠度概念,讨论了动态可靠性分析的特点^[16]。同年,李继华对有关既有结构可靠性评估的两种观点之争进行了介绍和评述^[17]。原国家科委 1994 年批准了重大基础性研究(攀登计划)“重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究”,大连理工大学承担了第 6.1 子题“重大土木与水利工程安全性与耐久性的基础研究”,之后又获得了自然科学基金“工程结构生命全过程可靠度研究”的资助,根据工程需要,在结构可靠度基本方法和理论、钢筋混凝土结构施工期和老化期可靠性分析等方面作了有益探讨。对于破坏程度较大或服役年限较长的构件,要在其非线性范围内获取具有足够精度的、表达整体构件可靠性能的表达式非常困难,甚至是不可能的。针对这种情况,利用层次分析法建立了钢筋混凝土构件可靠性的模糊评估模型,运用模糊评判理论,为实际工程中构件的综合评判提供了一套切实可行的方法,为既有结构可靠性理论的发展起到了推动作用^[18]。2006 年,张耀华、王铁成等^[19]建立了新的既有结构抗力衰减模型,在此基础上提出了考虑抗力随时间衰减的既有结构可靠性分析与计算方法。2008 年,陆锦标、顾祥林^[20]总结既有建筑结构检测和鉴定规范制定的历史和现状,提出其中存在的问题,分析了既有建筑结构检测和鉴定规范的发展趋势,提出既有建筑结构可靠性的评估应与现今的设计规范相协调,且应该在既有建筑结构的可靠性分析中考虑结构的时变性能、损伤累积以及结构的耐久性等问题,并将其体现在检测和鉴定规范中。同年,李涛、蒋小青^[21]研究了活荷载取值、抗力衰减与抗力后验分布这三个因素共同影响下的既有结构可靠度评估方法,并针对算例编制 MATLAB 程序进行计算,为既有结构可靠度提供了新的计算方法。2013 年,姚继涛、解耀魁^[22]提出可变作用频遇序位值和准永久序位值的概念,建立以作用序位值表达的随机过程组合方法和可靠性分析模型。

1.2.1 可靠性评估方法概述

1.2.1.1 传统经验法

由有经验的工程技术人员进行现场检测,辅以简单核算,凭借其掌握的知识 and 直觉对结构做出评判,给出处理意见,这就是曾长期沿用的“传统经验

法”^[23]。这种方法的鉴定程序：确定目的与范围→开展调查→调查项目的评价→综合鉴定→提出鉴定报告。它具有程序少、费用低等优点，但由于这种方法所采用的调查手段及其判断准则，完全由鉴定者自行确定，故在较复杂问题的鉴定中，不仅其结果会因人而异，并且在处理上，也往往为了避免个人承担风险，而显得过于保守。

1.2.1.2 实用鉴定法

为解决复杂情况下的可靠性评估问题，实用鉴定法是在传统经验法的基础上发展起来的。该方法应用各种检测手段对建筑物及其环境进行周密的调查、检查和测试，全面分析建筑物存在问题的原因，以现行标准、规范为基准，按照统一的鉴定程序和标准，从安全性、适用性多方面综合评定建筑物的可靠性水平^[24]。它克服了传统经验法的缺点，具有科学的鉴定程序。实用鉴定法工作顺序：初步调查→确定鉴定内容→成立鉴定小组→详细调查分析→逐项评价→综合评价→提出鉴定报告书。20世纪70年代，日本提出了通过2~3次调查进行综合评价的综合鉴定法。在同一水准上，美国提出了一种“安全性评估程序”法。采取0~9的数字表示风险率的高低，评判构件和结构的安全性。类似的方法还有1971年Yao提出的按专门制定的评分标准对既有结构进行分级的方法^[25]，以及1975年Culver提出的现场评估法。我国1989年原冶金部颁布的《钢铁工业建(构)筑物可靠性鉴定规程》^[26](YJB219—89)均属实用鉴定法，提出的“三层次四等级”法已为广大工程技术人员所接受。但此法与现行结构设计统一标准不相协调，没有达到近似概率法的水准。

1.2.1.3 灰色层次分析法

灰色层次分析法又分为灰色单层次评判模型^[27]和灰色多层次综合评判模型。层次分析法(AHP)^[28]是美国运筹学家A. H. Saaty于20世纪70年代初提出的，现已应用于许多领域。该方法能把复杂系统中的各种因素划分为相互联系的有序层次，形成一种多层次的的分析模型，把多层次多指标的权重赋值简化为指标重要性的两两比较，弥补了人脑很难在两维以上空间进行全方位扫描的弱点，便于对各层次、各指标进行科学、客观的赋值。

1.2.1.4 结构损伤识别

自1975年以来结构识别技术被用来探测结构参数的变化或监控结构的完整性。土木工程领域的学者们意识到对大型土木工程结构进行健康监测和安全性评估的重要性，为此开始研究各种有效的损伤识别技术，并在海洋石油平台的损伤识别和健康监测方面投入了巨额资金，开创了结构损伤识别技术在土木工程领域应用的先河^[29]。国外对健康监测及损伤识别的研究中较有代表性的是Los Alamos国家实验室和ASCE结构健康监测委员会，Farrar, Doebling和Sohn等对损伤识别的研究现状进行了综合回顾^[30]。Sozen认为，结构层间位移和永久变形是多层

建筑结构损伤的重要标志^[31]；Whiteman 为了评定各类建筑物的损伤而在其损伤矩阵中定义了几个损伤状态^[32]；Lee 对于既有结构由于火灾、水灾、风灾引起的结构风险性评定提出了一个系统的方法^[33]。现今损伤识别方法的热点研究主要集中在两个方面：一是考虑不确定性影响的统计识别方法；二是考虑环境因素影响的损伤识别方法^[30]。我国从 20 世纪 90 年代起，对桥梁和高层建筑结构方面进行健康监测研究^[34]。就目前的水平而言，应用结构损伤诊断还难以准确地确定损伤位置并使损伤定量化表达。

1.2.1.5 专家系统

专家系统的目的是模拟人们的思维活动能力，及建立起规则库，通过推理来判断、解决问题，实质上也可以认为专家系统是一种信息系统，因为它能够具备一定的专家归纳与演绎推理能力^[35]。一个专家系统体系结构主要有系统主控模块、知识库、综合数据库、计算模块、知识获取程序、解释程序、推理机七大部分组成，整个过程是一个循环往复的过程，直至得出最后结论为止^[36]。国外的 Yao^[37]、清华大学的刘西拉、秦权、夏长春^[38-40]等人将专家知识与计算机现代技术相结合，发展了既有结构可靠性评定的专家系统。随着 20 世纪 90 年代末神经网络研究的兴起，人工神经网络研究在 IT 智能领域得到了飞速发展。国外将人工神经网络运用到专家系统的开发与研究中，成果包括房屋破损评估专家系统、用三层 BP 网络对大桥桁架结构进行评估、充分考虑了不确定性及模糊性因素的影响，将神经网络与遗传算法集成开发的模糊专家系统^[41]。这些系统有的借鉴他人经验，有的自行推理，都自成体系，各有千秋。但是不论哪种专家系统都难以在短时间内进入实用阶段。

1.2.1.6 模糊评定

模糊可靠性分析和随机模糊可靠性分析是我国王光远等提出的一种结构可靠性分析方法^[42]，在随机可靠性分析基础上，提出了结构分析中应考虑另一种不确定性，即模糊性，并定义当只考虑模糊性时的结构可靠度称为模糊可靠度，同时考虑随机性和模糊性时的结构可靠度称为随机模糊可靠度^[43]；林少培等提出了运用模糊层次分析法对结构安全性进行评估的观点，该方法考虑了模糊信息，又利用了专家经验，但却未能很好地考虑随机性^[44]。李璐玮等^[45]针对同时存在随机基本变量和模糊基本变量的结构，提出了一种模糊可靠度隶属函数求解的迭代线抽样方法。该方法通过迭代过程保证功能函数最值对应的设计点收敛于可靠度最值对应的设计点，并通过线抽样方法来求解相应的可靠度，以保证算法具有较高精度。Mehmet Levent Koc 等^[46]利用以模糊蒙特卡洛模拟方法为基础的模糊随机变量理论分析抛石防波堤可靠性风险，研究表明，模糊随机变量理论可为联合处理随机性和模糊性的可靠度计算提供一个很好的工具，且在沿海的可靠性评估方面具有很大潜能，并且可以联合使用任意的计算模型对沿海结构的可靠性进

行数值模拟。目前,借助于模糊数学的方法来较为合理地处理结构设计变量,以及借助于专家经验的工程结构专家系统的帮助,使得设计变量间的相关性问题得到部分的缓解。但其中还是存在很多实际问题有待进一步研究解决。

1.2.1.7 概率方法

概率方法又称为可靠性鉴定法。在结构鉴定中引入可靠度理论和实用分析方法,用概率的概念对结构可靠度进行统计分析,综合评判其可靠性状况。我国颁布的《工业厂房可靠性鉴定标准》(GBJ144—90)、《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB50292—1999)引入分级标准及一系列经验性推理规则,是既有结构可靠性评估理论发展的良好开端。

在结构可靠度研究中主要考虑两类问题:一类是与时间变量无关(或称时不变性)的结构构件、体系的可靠度;另一类则是与时间变量有关(或称时变性)的结构构件、体系的可靠度^[47]。

(1) 不考虑抗力衰减的既有结构的可靠性评估

工程结构可靠性评估主要是处理荷载效应 S 和结构抗力 R 的关系。从统计数学的观点来看,各种荷载效应和结构抗力应采用随机过程模型描述:

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

式(1.1)称为全随机过程模型。

若不考虑抗力衰减,则既有结构的极限状态方程为

$$Z(t) = g[R, S(t)] = R - S(t) \quad (1.2)$$

式(1.2)称为半随机过程模型。

对于不考虑抗力衰减的既有结构的可靠性评估问题存在两种不同观点之争,在文献[48, 49]中陈述了其分歧。

一种观点认为,在整个服役期内结构保持相同的设计可靠度。对待评估采用现场检测,取得实测的结构分析参数。因为结构仍处于设计基准期,荷载取值应取设计基准期内的最大值分布。即

$$F_{Q_{T_1}}(x) = F_{Q_T}(x) \quad (1.3)$$

式中, $F_{Q_{T_1}}(x)$ 为既有结构使用期限 T_1 内最大荷载 Q_{T_1} 的概率分布函数; $F_{Q_T}(x)$ 为设计基准期 T 内最大荷载 Q_T 的概率分布函数。

另一种观点认为,既有结构已经经历了荷载的检验,荷载取值应取剩余服役期 $(0, T_1)$ 内的最大值分布。即

$$F_{Q_{T_1}}(x) = [F_{Q_T}(x)]^{m_{T_1}} \quad (1.4)$$

式中, $F_{Q_T}(x)$ 为任一时点荷载 Q 的概率分布函数; m_{T_1} 为 $(0, T_1)$ 内荷载 Q 的平均出现次数。

不考虑抗力衰减,其可靠度应随着时间的推移而提高。文献[50]对全国10个城市实测统计,得出活荷载最大值概率分布的平均值随服役时间的变化关系