

高等学校水利类专业教学指导委员会等 共同组织编审

全国水利行业规划教材

Gangkou Hangdao yu Hai'an Gongcheng Jiegou Kekaodu

港口航道与海岸工程结构可靠度

【港口航道与海岸工程专业】

董 胜 陶山山◎主编
贡金鑫◎主审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书为全国水利行业规划教材。全书系统地阐述了结构可靠度的基本原理及其在港口航道与海岸工程中的应用,共分六章,内容包括工程结构可靠度的基本概念和发展历程,概率论与数理统计的基础知识,工程结构可靠度的计算方法,结构体系可靠度的计算方法,工程作用和抗力的统计与分项系数设计,港口航道与海岸工程可靠度实例等。

本书为高等院校港口航道与海岸工程专业本科生的选修课教材,也可作为土建类、水利类和海洋工程类本科生选学港口航道与海岸工程方向的主选教材及从事港口航道与海岸建设的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

港口航道与海岸工程结构可靠度/董胜,陶山山主编. —北京:人民交通出版社股份有限公司, 2019.6
ISBN 978-7-114-15658-8

I. ①港… II. ①董…②陶… III. ①港口工程—工程结构—结构可靠性—高等学校—教材②海岸工程—工程结构—结构可靠性—高等学校—教材 IV. ①U65②P753

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 128434 号

全国水利行业规划教材

书 名: 港口航道与海岸工程结构可靠度

著 者: 董 胜 陶山山

责任编辑: 黄兴娜

责任校对: 孙国靖 魏佳宁

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.chinasybook.com>

销售电话: (010)64981400, 59757915

总 经 销: 北京交实文化发展有限公司

印 刷: 北京虎彩文化传播有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 15.5

字 数: 362 千

版 次: 2019 年 8 月 第 1 版

印 次: 2019 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-15658-8

印 数: 0001—1000 册

定 价: 50.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

港口航道与海岸工程专业建设指导组 教材编审分委员会名单

组 长：郑金海(河海大学)

副组长：宋向群(大连理工大学)

周世良(重庆交通大学)

王元战(天津大学)

赵利平(长沙理工大学)

成 员:(按姓氏笔画排序)

王二平(华北水利水电大学)

王志东(江苏科技大学)

刘月琴(华南理工大学)

刘文白(上海海事大学)

刘曙光(同济大学)

孙志林(浙江大学)

何文社(兰州交通大学)

余锡平(清华大学)

邹欣庆(南京大学)

张小峰(武汉大学)

张 华(华北电力大学)

张洪雨(哈尔滨工程大学)

陈一梅(东南大学)

陈子燊(中山大学)

陈 刚(西安理工大学)

拾 兵(中国海洋大学)

桂劲松(大连海洋大学)

郭红民(三峡大学)

黄才安(扬州大学)

董志勇(浙江工业大学)

喻国良(上海交通大学)

秘 书：张 蔚(河海大学)

序

随着全球经济发展和国家战略深化,近年来港口航道与海岸工程领域的重点逐渐向内河水运开发、远岸岛礁建设、绿色低碳建养、修复加固技术等方向发展,并积极拓展近海可再生能源利用工程方向,这对港口航道与海岸工程专业的学生培养也提出了新的要求。同时,在教育部高教司和中国工程教育认证协会的领导与组织下,从2012年到2015年,教育部高等学校水利类专业教学指导委员会港口航道与海岸工程专业建设指导组先后对港口航道与海岸工程专业的核心知识领域、专业认证补充标准、教学质量国家标准等进行了修订。

为了便于在新形势下各相关高校组织教学,教育部高等学校水利类专业教学指导委员会组织编写出版港口航道与海岸工程专业“全国水利行业规划教材”。为了保证教材质量,我们通过多次专业建设指导组会议讨论,专家咨询组审议、遴选,相关院、系认定等步骤,对教材的选题及其主编、主审和教材编写大纲进行了严格把关。为了把本套教材组织好、编著好、出版好、使用好,我们还成立了教材编审委员会,对教材编纂与使用的全过程进行组织、把关和监督。

许多人为本套教材建设做出了许多努力,付出了许多心血。但是,由于参照新的教学质量国家标准组织教学还需要通过实践不断总结提高,加之一些教材是第一次编写,因此这套教材一定会有各种不足与缺点,恳请使用这套教材的师生提出宝贵意见。本套教材还将出版配套的多媒体教材,以利于教、便于学,更希望师生们对此提出建议和积极参与。

教育部高等学校水利类专业教学指导委员会
港口航道与海岸工程专业建设指导组
2015年9月

前 言

本书是高等学校水利学科教学指导委员会港口航道与海岸工程专业指导分委员会组织编审的全国港口航道与海岸工程本科专业课程教材之一,书名为《港口航道与海岸工程结构可靠度》。

本书介绍了结构可靠度理论及其在港口航道与海岸工程中的应用。通过教学,旨在帮助本科生掌握结构可靠度理论的基础知识,理解港口航道与海岸工程本专业工程中相关规范的制订背景,掌握可靠度的基本计算方法。全书共分六章:工程结构可靠度的基本概念和发展历程,概率论与数理统计基础知识,工程结构可靠度的计算方法,结构体系可靠度的计算方法,工程作用和抗力的统计与分项系数设计,以及港口航道与海岸工程可靠度实例。

本书由中国海洋大学董胜教授编写第一、四、六章,第三章的第一、六~八节,陶山山副教授编写第二、五章,第三章的第二~五节及习题。全书由董胜统稿。

本书由大连理工大学贡金鑫教授主审,提出了很多宝贵意见。另外,应作者所邀,天津大学王元战教授仔细阅读了全书,并提出了许多建议,使本教材得到不少改进。

翟金金、林逸凡、焦春硕、姜逢源、赵玉良、崔俊男、廖振焜、王浩天和巩艺杰等研究生协助完成了本书部分插图的绘制和例题的计算工作。

在成书过程中,作者参阅了其他学者的论著,已列入书后的“参考文献”,在此对这些作者一并表示感谢。

随着结构可靠度理论的发展,新的计算方法不断产生。由于作者从事该领域研究的时间短、水平有限,书中难免存在不足甚至不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者
2019年5月

目 录

第一章 工程结构可靠度的基本概念和发展历程	1
第一节 结构设计方法的演变	1
第二节 结构可靠度研究概况	3
第三节 结构可靠度研究进展	17
第四节 港口航道与海岸工程可靠度发展概况	23
第二章 概率论与数理统计基础知识	28
第一节 概率的基本概念	28
第二节 随机变量的分布和数字特征	29
第三节 大数定律和中心极限定理	38
第四节 统计量及其分布	39
第五节 参数估计和假设检验	42
第六节 随机过程	46
第三章 工程结构可靠度的计算方法	49
第一节 结构可靠度计算概论	50
第二节 基于可靠指标的结构可靠度计算特例	52
第三节 一次二阶矩法	56
第四节 二次二阶矩法	80
第五节 二次四阶矩法	86
第六节 Monte Carlo 法	90
第七节 直接积分法	105
第八节 功能函数为隐式的结构可靠度计算	114
第四章 结构体系可靠度的计算方法	120
第一节 结构体系可靠度基本概念	120
第二节 简化结构体系可靠度	121
第三节 串并联系统可靠度计算	123
第四节 结构系统可靠性分析方法	125
第五章 工程作用和抗力的统计与分项系数设计	140
第一节 抗力的统计分析	140
第二节 作用的统计分析	151
第三节 作用组合效应	161
第四节 分项系数设计方法	167

第六章 港口航道与海岸工程可靠度实例	176
第一节 直立式防波堤可靠度	176
第二节 海堤越浪量可靠性分析	179
第三节 重力式沉箱码头可靠度	183
第四节 板桩码头可靠度	186
第五节 高桩码头可靠度	192
第六节 开敞式码头靠船墩可靠度	197
习题	205
附表	211
附表 1 标准正态分布表	211
附表 2 t 分布表	213
附表 3 χ^2 分布表	215
附表 4 F 分布表	217
附表 5 参数已知的 K-S 检验临界值 $D_n(\alpha)$ 表	226
附表 6 参数未知的 K-S 检验临界值 $D_n(\alpha)$ 表	227
参考文献	228

第一章 工程结构可靠度的基本概念和发展历程

第一节 结构设计方法的演变

早期工程结构设计的方法是容许应力法。该法假设材料为均质弹性体,用结构力学及材料力学的方法分析结构或构件在使用荷载作用下的应力,根据经验及统计资料确定材料的容许应力,设计时保证结构最大应力不超过其使用材料的容许应力,即

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1-1)$$

考虑到各种不确定因素,将材料的容许应力乘以安全系数,得出结构强度,进而确定结构的规格尺寸。设计时,作用于结构上的荷载以及结构的承载能力,均采用定值,若有动荷载作用于结构上时,将动荷载换算成静荷载进行计算。

随着结构分析方法的发展,进一步考虑材料的非弹性及几何的非线性,以及考虑时间因素,内力分析日趋完善。1938年起,苏联钢筋混凝土结构设计规范,首先采用所谓“破坏阶段”的设计方法,与容许应力法的主要区别是在考虑材料的塑性性质的基础上,计算截面或构件甚至整个结构的承载能力。设计时,要求作用在截面上的弯矩不大于截面的抵抗弯矩(考虑安全系数),即

$$KM \leq M_p \quad (1-2)$$

容许应力法与破坏阶段法在设计时所使用的荷载及材料性能等数据,均取它们的平均值,未考虑它们的概率分布,而是引入一个大于1的安全系数,因此,也可统称为安全系数法;安全系数的确定大多根据经验确定,具有不确定性和盲目性,尤其是设计中引用了新材料或者进行新的结构设计时;增大安全系数也不一定能按相应比例增加结构的安全性,过分增大安全系数则会导致材料的浪费,结构重量增加,却并不能有效防止结构失效,因此利用安全系数法进行结构的设计不够科学。

20世纪40~50年代,Freudenthal(1947,1956)讨论了结构设计中的各种不确定因素,同时又从这些不确定性的相互作用观点,论述了荷载和强度的随机性。奠定了结构可靠度的理论基础;Cornell(1969)提出了均值一次二阶矩法和可靠指标 β , β 又被称为康奈尔指标,其定义为功能函数的均值与标准差的比值;Lind(1971)提出了分项系数的概念,对Cornell的二阶模式采用分离函数方式,将可靠指标表达成分项系数形式;Ditlevsen(1973)发现均值一次二阶矩法的缺陷,即对于同一构件不同表达形式的功能函数会得到不相同的可靠指标 β ;Hasofer和Lind(1974)从几何意义上定义了可靠指标,将其表示为标准正态空间坐标原点到极限状态曲面的最小距离;Rackwitz和Fiessler(1978)提出了当量正态化方法,在验算点处让非正态随机变量的概率分布函数与当量正态化随机变量的概率分布函数值相等。由于此方法易于实现,国际“结构安全度联合委员会”(JCSS)推荐了该方法,称之为JC法。该方法适



用于结构功能函数为显式且非线性程度不高的情况。为了克服功能函数在设计点附近非线性程度较高时,一次二阶矩法计算结果误差较大的缺陷,学者们提出了二次二阶矩法、三阶矩法、四阶矩法。为了能够求解功能函数为隐式的情况,学者们提出了响应面法和随机响应面法等方法。

此外,国内外学者还提出了计算可靠度的其他方法,如原始空间的结构可靠度分析方法、基于遗传算法的可靠性分析方法、概率密度演化法和降维法等。考虑到结构抗力和遭受的荷载是与时间有关的随机变量,为了求解时变可靠度,提出了时间离散-综合法和首次超越概率法。

随着结构可靠度理论及其计算方法的发展,结构可靠度理论逐步进入实用阶段。自 20 世纪 80 年代开始,许多国家开始尝试将结构可靠度理论用于结构设计标准中。1984 年,我国颁布了《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—84)。为了协调统一我国不同工程结构领域的设计方法和原则,1985 年原国家计委下达了编制《工程结构可靠度设计统一标准》的任务。通过大量研究,并借鉴当时国际标准《结构可靠性总原则》(ISO 2394:1986),1992 年正式颁布了适用于各种工程结构设计的基础性标准《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—92)。标志着我国工程结构由定值设计法转向概率设计法。

20 世纪 90 年代,依据《工程结构可靠度设计统一标准》,我国相继完成了港口、公路、铁路和水利水电工程结构可靠性设计统一标准的编制工作,形成了以可靠度理论为基础的概率极限状态设计标准的三级层次体系。其中,《工程结构可靠度设计统一标准》属于第一层次,据此标准制定的建筑、公路、铁路、港口、水利水电工程结构的可靠性设计标准属于第二层次,五大领域进一步制定的专业设计规范属于第三层次。迄今,我国概率极限状态设计标准的 3 级层次如图 1-1 所示。

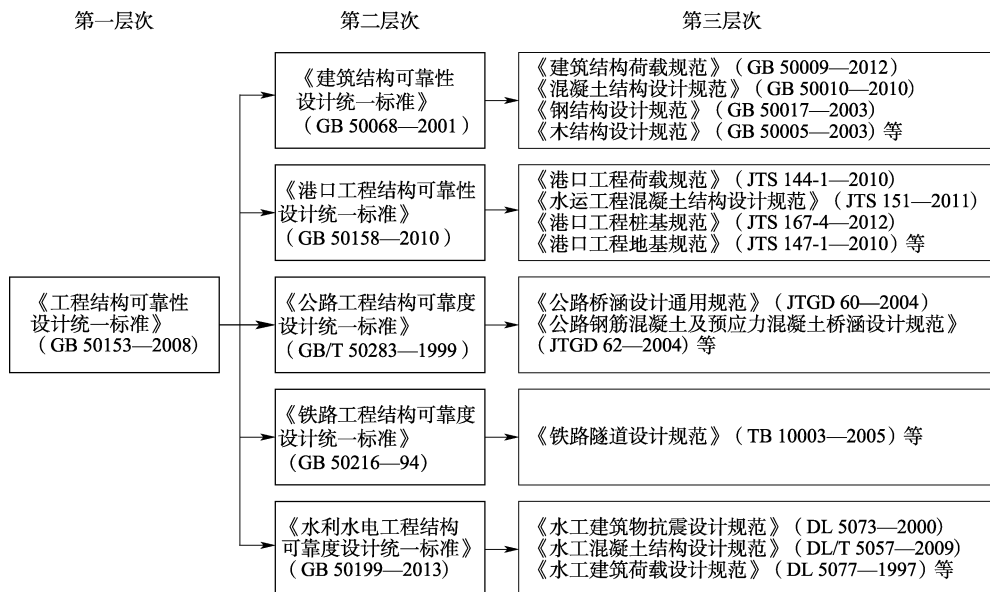


图 1-1 我国工程结构设计规范的三层体系

20 世纪末,随着结构可靠度理论研究和工程实践的发展,建筑工程领域率先完成了《建



筑结构设计统一标准》(GBJ 68—84)的修订工作,并将其更名为《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)。该标准根据 ISO 2394:1998 给出了不同类型建筑结构的设计使用年限,并对正常使用极限状态的目标可靠指标做出了规定。随后,基于我国大量的工程实践经验的积累,借鉴国际标准《结构可靠性总原则》(ISO 2394:1998)和欧洲规范《结构设计基础》(EN 1990:2002),重新对《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—92)进行了修订,修订后的《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)比原标准在内容上有所扩展,涵盖了工程结构设计基础的基本内容。同时,基于 GB 50153—2008,我国港口、公路、铁路和水利水电等领域相继开展了各自第二层次的可靠性设计统一标准的修订工作,其中《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158—2010)已经颁布实施。

第二节 结构可靠度研究概况

一、结构可靠度的基本概念

结构通常指为满足某一目的而设计,能够在给定的环境条件下承受和传递可能发生的荷载作用的工程构造。设计时,结构都要确定可正常使用的年限,即设计基准期。在设计基准期内,结构能够经济合理地满足一定的安全性、适用性及耐久性要求,具体表现为:①能承受在施工和使用期内可能出现的各种作用;②在正常使用时具有良好的工作性能;③具有足够的耐久性;④在偶然事件发生时及发生后,能保持整体稳定。

第①和④项与结构和人身的安全有关,属于结构的安全性;第②项关系到结构的适用性;第③项关系到结构的耐久性,结构的可靠性涵盖了以上四个要求,比安全性更能准确地反映结构的可靠程度。

结构可靠度是在概率意义下求解出来的数值,表征了结构可靠性能的大小。可靠度的计算涉及到结构本身的抗力与荷载的作用,这两个方面互相牵制,决定了结构的可靠性能。当抗力与荷载作用出现某种均衡的时候,结构物就会达到一定的极限状态。最常用的极限状态包括正常使用极限状态和承载能力极限状态,前者对应于结构或构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值的状态,后者指结构或构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形的状态。

二、结构可靠度的基本内容

1. 结构可靠性分析

结构可靠性分析将结构分析中涉及的参数视为随机变量,从概率和统计的角度研究结构在规定时间内,规定条件下完成预定功能的能力。图 1-2 给出了结构可靠性分析过程的三个阶段:

(1)搜集结构随机变量的观测资料或试验资料,进行统计分析,求出随机变量的分布规律和有关的统计量,为可靠度的计算提供依据。

(2)用力学的方法计算结构的荷载效应,通过实验与统计获得结构的抗力,从而建立结构的破坏标准。荷载的效应指的是荷载作用下的结构中的内力、应力、位移、变形等量值,它



们可以用力学的方法求解。结构抗力指的是结构抵抗破坏或变形的能力,如屈服极限、强度极限、容许变形和位移等,它们可以由实验或资料统计获得。结构的破坏标准完全由规范规定。不同类型结构有不同的标准,结构的设计目前一般用极限状态设计,因此破坏标准用极限状态表示。破坏标准联合了结构抗力与荷载效应,它组成了结构可靠度计算的极限状态方程。

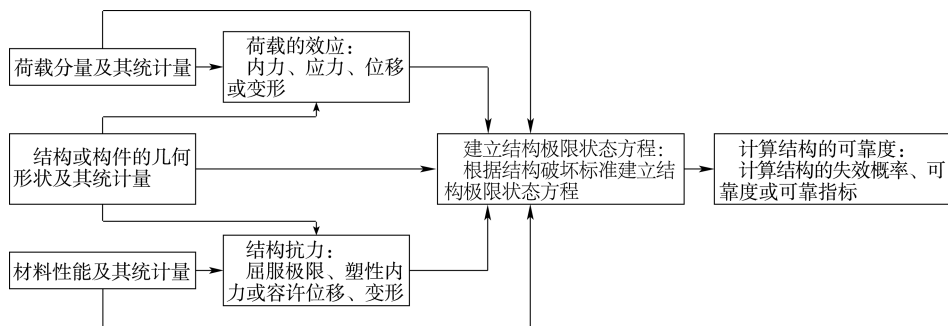


图 1-2 结构可靠性分析过程

(3)用概率论理论计算结构的可靠度。根据结构的随机变量及破坏标准,即可用可靠度计算方法算出结构的可靠度。工程上目前一般直接用反映结构可靠度的可靠指标进行分析。

2. 结构可靠性设计

工程结构的设计理论从力学分析理论的发展历程来看,经历了容许应力设计法、破损阶段设计法和极限状态设计法;从概率理论的应用过程来看,经历了定值设计法(经验法)、半概率设计法及近似概率设计法。国际上的结构设计理论的发展趋势是概率极限状态设计法,图 1-3 给出的可靠性设计方法的分类如下:

- (1) 已知结构的尺寸、荷载、材料特性以及目标可靠指标,校核结构的可靠度;
- (2) 校核现行规范,给出规范中有关系数所对应的安全水准;
- (3) 在给定目标可靠指标下,计算现行规范设计式中的系数(即分项系数),得出具有新的分项系数下的设计表达式,以供设计使用。

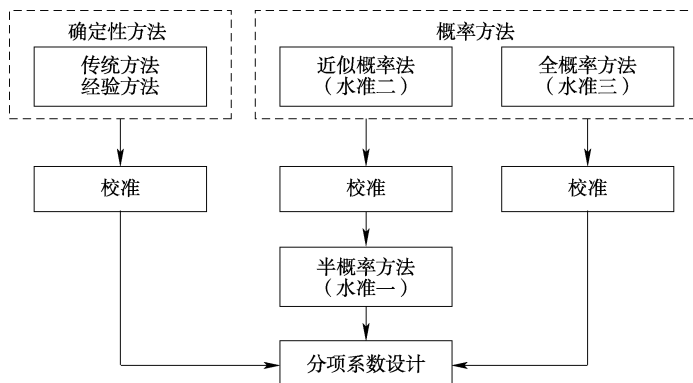


图 1-3 可靠性设计方法概况

结构的随机力学模型一般包括以下几个方面的不确定性:计算模型的不确定性、材料特



性的不确定性、结构承受作用的不确定性和几何尺寸的不确定性等等。考虑到结构各方面的不确定性,当把结构的破坏或损伤和寿命等耐久性作为研究对象时,在结构可靠性中应考虑的内容如下:

(1)把研究对象看成是具有统计性质的,参考过去数据所遵从的概率模型,根据理论和经验设定一个更为合理的概率模型;

(2)对将来要发生的现象,认为它的发生是遵从此模型的,并进行概率统计处理,采用工程判断或意向决定方法。

根据上述情况,对确保结构可靠性的要点包括:①将过去的的安全系数设计方法改变为以概率统计为基础的结构可靠性设计方法;②在结构可靠性中所应用的概率统计基础知识以及各种分布函数式和特征值;③对于可修复的结构物,防止固有可靠性降低的有效方法,以及维持或恢复到可使用水平的维修问题。结构可靠性设计过程框图如图 1-4 所示。

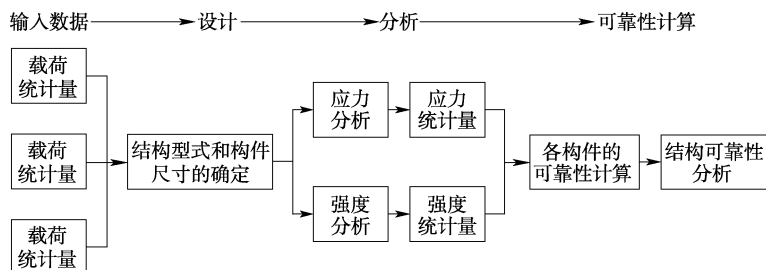


图 1-4 结构可靠性设计过程框图

3. 结构可靠性优化

基于可靠性的结构优化设计,也称可靠性优化,较传统的优化设计更为合理,更能反映结构物的真实工作状况。它是结构优化设计领域的一个新的分支,它考虑结构参数及荷载的随机性,以结构的可靠性作为约束,对于大量连续或离散型变量进行组合优化。在此类设计中,工程技术人员总是在追求可靠的最佳设计,从数学角度来说,可靠性优化问题就是以可靠指标为约束函数的极值问题。

可靠性优化将结构作为一个整体考虑,研究它在未来工作期间表现的随机性,即需要将结构元件面积、长度、弹性模量、结构强度和外加荷载模拟为随机变量。在基于可靠性的结构优化设计中,把结构的可靠指标作为优化问题的约束,使结构的重量或费用最小。对于结构物来说,最主要的要求是既安全可靠又经济合理,这种优化可以明显地提高设计质量和获得良好的经济效益。

基于可靠性的结构优化设计是将结构的可靠指标放到约束条件当中,根据某种目标对结构进行优化设计。由于可靠性涉及的是不确定性或随机性问题,所以基于可靠性的结构优化设计属于不确定性规划或随机规划。从另一方面来说,可靠性约束一般是非线性的。因此,基于可靠性的结构优化设计问题一般是非线性规划问题。

基于可靠性的结构优化设计问题的求解方法和传统的结构优化设计一样,通常采用数值方法而不是解析方法。而这种方法目前又有两种求解的途径,一种是数学规划方法。它是运筹学的一个分支,是结构优化设计中的一种有效的工具。其提供设计自动形成的逻辑过程,这类方法没有假定最优点的位置而是致力于直接的数值搜索。根据目标函数和约



束条件特性的不同,数学规划可以分为:线性规划,非线性规划,动态规划,几何规划,整数规划,多目标规划,目标规划及不确定规划等。另一类是准则方法,这种方法不直接求解上述的各类数学问题,而是推导出先验的最佳性准则和给出设计算法,其中充分应用了约束的特性。几个主要的准则优化法如下:同时破坏准则,各种破坏同时发生准则,满应力准则和应变能均匀分布准则。和传统的结构优化一样,用数学规划方法求解各类基于可靠性的结构优化问题在理论上比较完善,且更具有适用性。但是,这些算法往往有操作复杂、计算速度慢、不收敛或是得出局部最优解的可能。一些学者研究指出,基于随机有限元的结构可靠性分析与遗传算法相结合的优化算法是一种比较有效的处理结构基于可靠性的优化设计问题的方法。

基于可靠性的优化设计与常规的优化相比,有三个明显的优越之处:

(1)常规优化方法中,采用的是确定性的结构分析方法,无法反映作用载荷与结构参数的随机性,而在可靠性优化中是以结构的概率分析为基础,可以充分考虑荷载和参数等的随机性。

(2)常规优化方法的结果往往不能确保结构有足够的安全裕度,从工程实际的观点来看,这些结果是不能接受的。而基于概率的优化设计能够获得满足可靠度要求的结构最佳设计方案,或在满足其他条件下使结构可靠度极大化。

(3)在常规优化中,结构的安全只能通过各单元的强度约束来保证。然而从系统的观点来看,单元功能的满足并不能确保整个结构系统功能的可靠。而在可靠性优化中,可以将结构系统的可靠性作为约束条件,以获得满足系统功能要求的最佳设计方案。

从以上三点可见,基于概率的优化设计模型和方法是更为理想的模型和方法,能够更好地符合工程实际,较之常规的结构优化设计更为合理,有更好的适用性。

4. 在役结构的可靠性评估及维修加固

在役结构可靠性是指在役结构在正常使用条件下和预定的使用期限内满足结构规定的功能要求。在役结构可靠性的评价是由在役结构的可靠度来衡量的。在役结构的可靠度是指在役结构在正常使用条件下和预定的使用期限内完成预定功能的概率。一个建筑物从施工建造到投入使用,再到使用若干年后,性能逐渐退化,进入老年期,经历了一个类似人的生命历程,那就是幼年期、中年期和老年期。在施工建造期(幼年期),失效的风险率大;到使用期(中年期或壮年期),失效风险率降低;到老化期(老年期),失效风险率又逐渐提高,如果经过维修加固等措施,失效风险率又会有所下降。结构失效概率与时间过程的关系如图 1-5 所示,因其形似浴盆,称之为“浴盆曲线”。

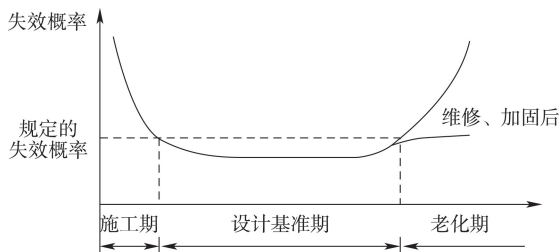


图 1-5 结构使用期与失效概率的关系



在役结构可靠性鉴定是在建筑物建成并投入使用后,根据对结构上的作用、结构抗力及其相互关系的实际调查,评估其实际的结构可靠性,使结构持续正常地满足各项预定功能。在役结构可靠性评估即研究结构使用期的结构可靠性。

如何对在役建筑物的可靠性进行评估?这一直是建筑物维修改造工作中需要首先解决而迄今为止尚未完全解决的课题。长期以来,在役建筑物的可靠性评估,一直是依赖有工程经验的技术人员或一批由专家组成的鉴定小组,在进行现场目测和必要的仪器测试基础上,选择一些认为重要的构件或截面,进行承载能力和正常使用极限状态的验算,然后凭借专家所拥有的知识和经验,对结构的可靠性进行评价,此即所谓的“专家经验法”。随后的结构维修与加固更是依赖结构工程专家的经验 and 水平进行决策。显然,这种做法缺乏决策的科学性与合理性。特别是对较复杂的结构体系(如多层及高层建筑结构)的可靠性评估,不但可能出现以偏概全的错判,而且往往会出现评估结果因不同的鉴定人而产生很大的差异,最后自然是为了避免个人承担风险而使鉴定结果偏于保守。造成这种局面的原因不在从事结构可靠性鉴定的工程师们,因为现行的结构可靠性鉴定标准中没有明确给出求得在役结构的系统可靠度或可靠指标的计算公式和方法。因而,对在役结构进行科学的、定量的、系统的可靠性鉴定方法研究势在必行。

既有结构可靠性评定的本质是对未来的预测和判断,其主要评定方法是根据结构和环境自身的信息,如混凝土强度、钢筋锈蚀情况,来推断结构的实际性能(剩余承载力、剩余使用寿命等)以及未来可能发生的变化,推断结构在未来时间是否继续使用或是需要维护、加固。在役结构可靠性评估研究的主要内容是如何将整体结构划分为不同层次的子结构,以及如何将从最低层次的子结构获得的信息,合理、准确地反映到最高层次的整体结构,以供决策使用。

此外,在役结构在下列情况下也必须进行可靠性评估:

(1) 结构受到灾害作用,如地震、火灾、台风、地质灾害等,或意外事故(如爆炸、碰撞等)影响后,结构内部损伤或破坏,可能影响结构的正常使用,因而需要对其进行可靠性评估,甚至维修加固。

(2) 由于设计、施工或使用等原因,结构出现严重缺陷(如不均匀沉降、建筑材料不满足设计要求、过大变形或裂缝等),在对其进行补强、加固等措施之前,需要先进行可靠性评估。

(3) 勘查事故原因,为结构的法律仲裁、理赔提供依据,以及对在役结构进行质量鉴定为保险投保提供必要证据。

三、结构可靠度的基本指标

1. 结构的极限状态

在结构的施工和使用过程中,结构是以可靠(安全、耐久、适用)和失效(不安全、不耐久、不适用)两种状态存在的,而在结构可靠度分析和设计中,为了正确描述结构的工作状态,就必须明确规定结构可靠和失效的界限,这样的界限称为结构的极限状态。我国《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)对结构极限状态的定义是:当结构或结构的某一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求时,此特定状态为该功能的极限状态。极限状态是区分结构工作状态为可靠或失效的标志,当结构能够完成预定的



功能时,称结构处于可靠状态,不能完成预定的功能时,称结构处于失效状态。

结构的极限状态一般可分为以下三类:

(1)承载能力极限状态。承载能力极限状态是结构或结构构件达到最大承载能力,或达到不适于继续承载的变形,相应于结构的安全性。如受弯的钢筋混凝土梁的受弯承载力,当不满足承载能力极限状态要求时,结构就会倒塌、破坏,产生灾难性的后果。

我国《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)中认为当出现下列状态之一时,即认为结构超过了承载能力极限状态:

①整个结构或某一部分作为刚体失去平衡。这是结构失效较为常见的一种形式,如图 1-6 所示。

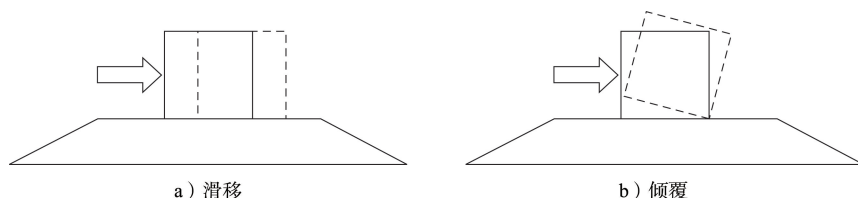


图 1-6 结构作为刚体失去平衡和滑移

②结构构件或连接因超过材料强度而破坏,或因过度变形而不适于继续承载。结构构件或连接的材料强度是确定结构承载力的最基本参数。如钢-混凝土组合结构的承载力决定于钢的强度、混凝土的强度以及钢与混凝土的结合情况。因过度变形而不适于继续承载的情况比较常见,如钢筋混凝土的塑性设计中,要控制构件截面的变形不能太大,以使构件有足够的变形能力。

③结构转变为机动体系。结构变为机动后,不能再承受更大的荷载,而变形却继续增大,就会导致结构破坏。

④结构或结构构件丧失稳定。结构失稳是细长构件和薄壁构件常见的一种失效形式,包括整体失稳和局部失稳。

结构整体失稳破坏是指结构所承受的外荷载尚未达到按强度计算得到的结构强度破坏荷载时,结构已不承担并产生较大的变形,整个结构偏离原来的平衡位置而倒塌。在失稳过程中,变形是迅速持续增长的,结构将在很短的时间内破坏甚至倒塌。失稳破坏主要分为:欧拉屈曲、极值型失稳、屈曲后极值型失稳、有限干扰型屈曲和跳跃型失稳五类。

结构和构件的局部失稳是指结构和构件在保持整体稳定的条件下,结构中的局部构件或构件中板件已不能承受外荷载的作用而失去稳定。这些局部构件可以是受压的柱和受弯的梁;在构件中可以是受压的翼缘板和受压的腹板。

⑤地基丧失承载能力而破坏。地基是支撑结构保持稳定不可缺少的部分。地基破坏通常分为整体剪切破坏、局部剪切破坏和冲切破坏三种形式。不同的地基破坏形式,会导致不同形式的结构破坏,严重时会导致整个结构倒塌。

⑥结构或结构构件的疲劳破坏。疲劳破坏是承受反复荷载作用且应力变幅(最大应力与最小应力之差)较大的一种破坏形式。在工程结构中,可能会发生低周疲劳破坏和高周疲劳破坏两种形式的疲劳破坏。当应力(或应变)很大(一般超过构件材料屈服强度)时,反复几十次甚至几次结构或结构构件就发生破坏,这种破坏称为低周疲劳破坏,如结构在大地震



作用下的破坏;当应力变幅不是很大(不超过构件材料屈服强度)时,结构或结构构件要经历 10^6 次或更多次的反复作用才会破坏,这种破坏称为高周疲劳破坏,如海洋采油平台在波浪作用下的破坏。

随着人们认识水平的提高,极限状态的概念也在不断发展,新国际标准在承载能力极限状态表现中增加了一条:假定的结构体系突然改变为新的体系(如突然折断)。此外,新国际标准还提出了可逆和不可逆极限状态的概念,进一步明确了结构在极限状态的性状。

(2)正常使用极限状态。正常使用极限状态对应于结构或构件达到正常使用和耐久性的各项规定限值。

结构的正常使用极限状态也包括很多形式,我国《工程结构可靠性设计统一标准》中认为当出现下列状态之一时,即认为结构超过了正常使用极限状态:

①影响正常使用或外观的变形。当结构或结构构件的变形过大时,可能会影响结构的观瞻或正常使用。为保证荷载作用下结构或结构构件变形不致过大,结构设计规范对结构或结构构件的容许变形作了规定。

②影响正常使用或耐久性能的局部破坏(包括裂缝)。结构发生局部损坏同样会影响结构的外观或正常使用,同时还会涉及结构的耐久性。在很多情况下,结构的耐久性和局部损坏是互为因果和相互促进的。

③影响正常使用的振动。指的是结构使用过程中或外界环境产生的振动,不包括地震或冲击产生的振动。振动不仅可以让人感到不舒服,而且还会干扰结构上精密仪器的正常使用。

④影响正常使用的其他特定状态。除了上述三个影响结构正常使用的状态外,还有其他的状态存在,这就取决于结构的使用功能和用户的要求。

以上两种极限状态(承载能力极限状态和正常使用极限状态)在结构设计中均应加以考虑。设计时必须使结构在各种设计状况下均不超越有关的极限状态。设计状况是指代表一定时段内的一组物理条件,分三种:持久状况:是结构使用的正常条件,通常与结构的设计工作期(寿命期)有关;短暂状况:是结构使用或暴露的暂时条件,代表与设计工作期相比的一个很短的时期;偶然状况:是结构使用或暴露的异常条件,代表更短的一个时期。

(3)逐渐破坏极限状态。逐渐破坏极限状态是指偶然作用后产生的次生灾害限度,即结构因偶然作用造成局部破坏后,其余部分不致发生联系破坏的状态。偶然作用包括超过设计烈度的地震、爆炸、车辆撞击及地基塌陷等。

承载能力极限状态和正常使用极限状态在我国现行建筑设计中已经被采用,国际上也通常采用这两类极限状态。对于逐渐破坏极限状态国内外目前都正在研究。

上述的极限状态是以我国《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)和国际标准《结构可靠性总原则》(ISO 2394:1998)为基础分类的,不同国家的设计方法不同,对结构极限状态的分类也不同。极限状态的分类没有固定的规则,主要以设计需要为依据。例如在日本,地震是经常发生的,灾后恢复非常重要,所以日本《建筑及公共设施结构设计基础》给出了可恢复极限状态(表 1-1)。可恢复极限状态是处在正常使用极限状态和承载能力极限状态之间的一种极限状态,用来规定与公共设施中功能恢复以及与建筑结构中财产保护相应的条件。对结构短时间内进行修复以临时使用、最后仍需要重建的情况,不属于可恢复极限状态。



日本《建筑及公共设施结构设计基础》对极限状态的分类

表 1-1

承载能力极限状态 (安全性)	可预见作用使结构出现破坏或大的变形,不再保持整体稳定性,甚至会威胁到建筑物内外人生命安全的状态	
	规定设计条件下的 极限状态	疲劳极限状态(反复可变作用导致疲劳产生的)
		耐久极限状态(环境影响造成的)
超过这一状态后,在预定作用下结构不能完成预定功能		耐火极限状态(火灾造成的)
正常使用极限状态 (适用性)	规定设计条件下的 极限状态	疲劳极限状态(反复作用导致的疲劳产生的)
		耐久极限状态(环境影响造成的)
		耐火极限状态(火灾造成的)
可恢复极限状态 (可恢复性)	超过这一状态后,在允许的费用和时间下,不能通过技术手段对结构进行修复来使其恢复应有功能的状态	

2. 结构的极限状态方程

在结构可靠度分析中,结构的极限状态一般由功能函数描述。若结构或结构构件的可靠度受到 n 个基本随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 影响时,此结构的功能函数可表示为

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-3)$$

式中, x_i 表示结构上的作用效应、结构构件性能等基本变量。

由极限状态的定义可知:①当 $Z > 0$ 时,结构未达到极限状态,表示结构处于可靠状态;②当 $Z = 0$ 时,表示结构达到极限状态;③当 $Z < 0$ 时,结构已超出极限状态,表示结构处于失效状态。其中方程

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1-4)$$

称为结构或结构构件的极限状态方程,它是结构可靠度分析的重要依据。

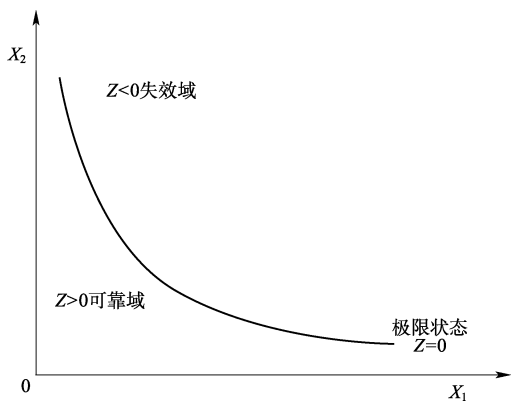


图 1-7 二维定义域和极限状态

在 n 维空间中,根据极限状态方程得到 $n-1$ 维曲面,即为极限状态面。图 1-7 中为 $n=2$ 时的示意图。由图可看到极限状态曲面将二维空间分为可靠域与失效域两部分,结构失效即是结构处于失效域内,反之,若结构处于可靠域内,则结构可靠。

3. 结构可靠度与失效概率

结构可靠或安全与否是用可靠度来进行衡量的。我国相关规范中给出结构可靠度的定义是:结构或结构的某一构件在规定时间内、规定的条件下,完成预定功能的概率,表示为 P_s 。如果结构或结构的某一构件不能完成预定的功能,相应的概率就称为结构的失效概率,用 P_f 表示。结构的可靠域集合与失效域集合是互不相容的,所以结构的可靠度 P_s 与失效概率 P_f 是互补的,即

$$P_s + P_f = 1 \quad (1-5)$$

假设随机向量 $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ 的联合密度函数为 $f_{\vec{X}}(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_{\vec{X}}(\vec{x})$, 由此



随机向量表示的结构的功能函数为 $Z = g(\vec{X})$, 则结构的失效概率可通过积分表示为

$$P_s = P\{Z < 0\} = \int \cdots \int_{F = \{\vec{x} | g(\vec{x}) < 0\}} f_{\vec{X}}(\vec{x}) d\vec{x} \quad (1-6)$$

式中, $F = \{\vec{x} | g(\vec{x}) < 0\}$ 是结构或结构构件的失效域。

积分方法原则上是可行的, 但是当功能函数中有多个基本随机变量, 或函数为非线性时, 积分法就变得十分复杂。因此, 在实际应用中一般不采用这种直接积分的解法, 而是采用比较简便的近似方法求解。

设有两个相互独立的基本随机变量 R 和 S , 它们对应的概率密度函数分别为 $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$, 其相应的概率分布函数分别为 $F_R(r)$ 和 $F_S(s)$, 假设由这两个基本随机变量表示结构的功能函数为

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1-7)$$

其对应的极限状态方程为

$$Z = R - S = 0 \quad (1-8)$$

随机变量 R 和 S 的概率密度曲线如图 1-8 所示, 在图中两曲线的重叠区内, 如果 $R < S$, 则结构失效, 因此失效概率与重叠区的大小有关, 可表示为

$$P_f = P(Z < 0) = P[(R - S) < 0] \quad (1-9)$$

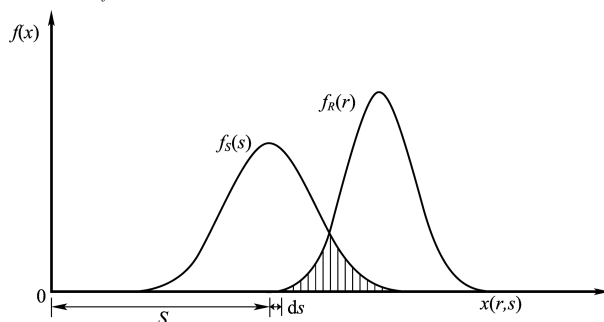


图 1-8 失效区域示意图

计算 S 落在 ds 间隔的概率为

$$P\left(s - \frac{ds}{2} \leq S \leq s + \frac{ds}{2}\right) = f_S(s) ds \quad (1-10)$$

R 大于 s 的概率为

$$P(R > s) = \int_s^{\infty} f_R(r) dr \quad (1-11)$$

由于 R 和 S 是两个相互独立的随机变量, 则它们在区域 ds 内同时发生的概率是上述两种概率的积, 即

$$f_S(s) ds \int_s^{\infty} f_R(r) dr \quad (1-12)$$

结构的可靠度 P_s 是 R 大于 S 的概率, 可用下式表示:

$$P_s = \int_{-\infty}^{\infty} f_S(s) \left[\int_s^{\infty} f_R(r) dr \right] ds \quad (1-13)$$

同理, 结构可靠度 P_s 也可以定义为 S 小于 R 的概率, R 落在 dr 区间内的概率为:



$$P\left(r - \frac{dr}{2} \leq R \leq r + \frac{dr}{2}\right) = f_R(r) dr \quad (1-14)$$

S 小于 r 的概率为

$$P(S < r) = \int_{-\infty}^r f_S(s) ds \quad (1-15)$$

由于假定的两个变量是相互独立的,它们同时发生的概率是它们的积,即

$$f_R(r) dr \int_{-\infty}^r f_S(s) ds \quad (1-16)$$

对所有 r 求积分得到可靠度 P_s :

$$P_s = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) \left[\int_{-\infty}^r f_S(s) ds \right] dr \quad (1-17)$$

以上给出了两种计算可靠度的一般公式,当已知两个变量之一的概率密度函数和另一个变量的累积概率分布函数时,失效概率的计算表达式为

$$\begin{aligned} P_f &= 1 - P_r = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_S(s) \left[\int_s^{\infty} f_R(r) dr \right] ds \\ &= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_S(s) [1 - F_R(r)] ds \\ &= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_S(s) ds + \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \end{aligned} \quad (1-18)$$

式中, $F_R(r) = \int_{-\infty}^r f_R(r) dr$ 为 R 的累积概率分布函数。

同理,若已知 S 的累积概率分布函数,则可得到另一种失效概率的表达式:

$$\begin{aligned} P_f &= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) \left[\int_{-\infty}^r f_S(s) ds \right] dr \\ &= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) F_S(r) dr \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} [1 - F_S(r)] f_R(r) dr \end{aligned} \quad (1-19)$$

在结构可靠性分析中,结构的抗力效应(结构抵抗破坏或变形的能力,如极限内力、极限强度、刚度以及抗滑力、抗倾力矩等)一般用 R 表示,作用在构件或结构构件上的荷载效应(荷载引起结构构件的内力、位移等)一般用 S 表示。结构或结构构件抗力效应 R 和作用在结构或者结构构件上的荷载效应 S 可以包含一个随机变量,也可以包含多个基本随机变量。

4. 结构可靠度与可靠指标

由于结构可靠指标与可靠度 P_s 及失效概率 P_f 有关,因此可通过研究失效概率 P_f 来研究可靠指标。

假设两个基本随机变量 R 和 S 都服从正态分布模型,则功能函数 $Z = R - S$ 也服从正态分布,假设基本随机变量 R 和 S 的平均值和标准差分别是 μ_R, μ_S 和 σ_R, σ_S ,则功能函数 Z 的平均值和标准差分别为 $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$ 和 $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ 。如图 1-9 所示的是 Z 为正态分布的



情形,失效概率(图中阴影部分面积)为 $P_f = P(Z < 0)$ 。从图 1-9 中可以看出,原点 O 到随机变量 Z 的平均值 μ_z 的距离可以用标准差的倍数去表示,也就是 $\mu_z = \beta\sigma_z$ 。还可以看出, β 与失效概率 P_f 之间存在相对应的关系,即:当 β 大时,失效概率 P_f 就小,当 β 小时,失效概率 P_f 就大。 β 和失效概率 P_f 一样,也是衡量结构可靠性的一个重要指标,通常称 β 为结构的可靠指标。

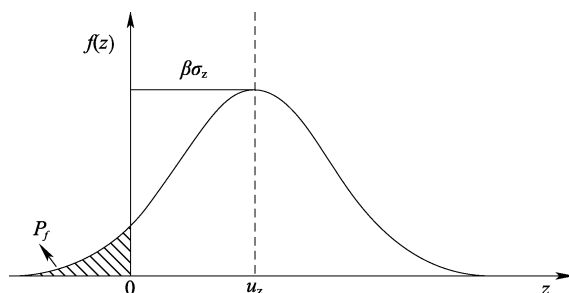


图 1-9 正态函数概率密度曲线

此时,失效概率 P_f 为

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_z(z) dz = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z - \mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right] dz \quad (1-20)$$

为了将 Z 转换成标准正态分布的形式,引入标准化变量 T ,满足 $\mu_T = 0$ 和 $\sigma_T = 1$,即变量 $T \sim N(0,1)$,且

$$T = \frac{Z - \mu_z}{\sigma_z} \quad (1-21)$$

同时有 $dz = \sigma_z dt$,当 $Z \rightarrow -\infty$ 时, $T \rightarrow -\infty$; $Z = 0$ 时, $T = -\mu_z/\sigma_z$ 。式(1-20)可变为

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_z}{\sigma_z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \Phi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = \Phi(-\beta) \quad (1-22)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。其中

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (1-23)$$

称为结构可靠指标,它与结构的失效概率具有式(1-22)表示的对应关系,求得了可靠指标,也就求得了结构的失效概率或可靠度。此外,式(1-22)是在功能函数 Z 服从正态分布的条件下建立的。如果功能函数不服从正态分布,则需要将功能函数 Z 等效或者近似成正态分布的随机变量,但这时求得的可靠指标与失效概率之间不再具有式(1-22)表示的精确关系。表 1-2 给出了 β 与 P_f 的对应关系。

可靠指标与失效概率的对应关系

表 1-2

β	0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
P_f	0.5	1.5866×10^{-1}	2.2750×10^{-2}	1.3499×10^{-3}	3.1671×10^{-5}	2.8665×10^{-7}

对于随机变量 R 和 S 为独立的正态分布变量,极限状态函数为线性的情况,可靠指标为



$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (1-24)$$

若 R 与 S 的标准差 σ 相等, 均值分别为 μ_R 与 μ_S , 则结构功能函数 Z 的标准差为

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} = \sqrt{2}\sigma \quad (1-25)$$

可靠指标为

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_Z}{\sqrt{2}\sigma} \quad (1-26)$$

引入直角坐标系 SOR , 作失效边界位置如图 1-10 所示, 则均值点到失效边界上的最短距离为

$$\overline{MP}^* = \overline{MN} \cos 45^\circ = \frac{\mu_Z}{\sqrt{2}} = \sigma\beta \quad (1-27)$$

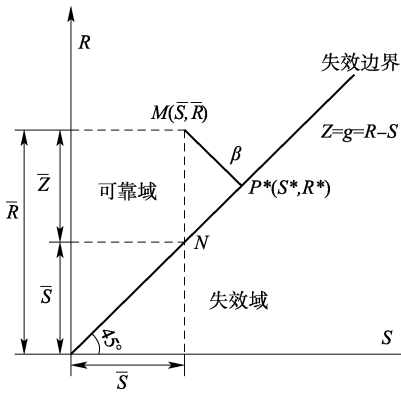


图 1-10 可靠指标计算图

由此可知, 若用 σ 作为测量单位, 均值点 $M: (\bar{S}, \bar{R}) = (\mu_S, \mu_R)$ 到失效边界上的最短距离就是 β 。图中的 M 点由 R 和 S 的均值确定, 是设计规定值的对应点; P^* 称为设计验算点, 是失效边界上与结构最大可能失效概率对应的点, 即与概率运算中可能出现的变量组合值相对应的点, 用作校核。

如果 R 和 S 都服从对数正态分布模型, 则结构功能函数表示为 $Z = \ln R - \ln S$, 由于 $\ln R$ 和 $\ln S$ 服从正态分布, Z 也服从正态分布, 则功能函数 Z 平均值和标准差分别为

$$\mu_Z = \mu_{\ln R} - \mu_{\ln S} \quad \text{和} \quad \sigma_Z = \sqrt{\sigma_{\ln R}^2 + \sigma_{\ln S}^2}, \quad \text{则可靠指标为}$$

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_{\ln R} - \mu_{\ln S}}{\sqrt{\sigma_{\ln R}^2 + \sigma_{\ln S}^2}} = \frac{\ln\left(\frac{\mu_R}{\mu_S} \sqrt{\frac{1 + \delta_S^2}{1 + \delta_R^2}}\right)}{\sqrt{\ln[(1 + \delta_S^2)(1 + \delta_R^2)]}} \quad (1-28)$$

式中, δ_R 和 δ_S 为变异系数。

可靠指标 β 的引入本身虽不能精确反映结构的可靠性程度, 但是它避免了用 P_f 这种用小数描述结构安全度的方法。

5. 结构可靠指标与安全系数

结构可靠度设计之前是用安全系数来衡量结构或结构构件的安全性的。用结构抗力和荷载效应的平均值表达的单一的安全系数 K 称为结构中心安全系数。中心安全系数可以定义为

$$K = \frac{\mu_R}{\mu_S} \quad (1-29)$$

相应的设计表达式为

$$\mu_R \geq K\mu_S \quad (1-30)$$

假设 R, S 均服从正态分布, 相应的变异系数为 δ_R 和 δ_S , 假设结构的功能函数为 $Z = R - S$ 。根据可靠指标 β 和安全系数 K 的定义, 可以导出二者的关系:



$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{\frac{\mu_R}{\mu_S} - 1}{\sqrt{\left(\frac{\mu_R}{\mu_S}\right)^2 \delta_R^2 + \delta_S^2}} = \frac{K - 1}{\sqrt{K^2 \delta_R^2 + \delta_S^2}} \quad (1-31)$$

或者

$$K = \frac{1 + \beta \sqrt{\delta_R^2 + \delta_S^2} - \beta^2 \delta_R^2 \delta_S^2}{1 - \beta^2 \delta_R^2} \quad (1-32)$$

从式(1-32)中可以看出,结构的可靠指标 β 和结构的中心安全系数 K 可以通过随机变量的变异系数建立关系方程。由式(1-29)可看出,中心安全系数只与 R 、 S 的均值有关,而没有考虑其标准差,也没有考虑其随机性。在结构可靠性设计中,中心安全系数法只是考虑了随机变量的一阶矩(平均值),没有考虑随机变量的二阶矩(变异系数),也就是说中心安全系数法没考虑到随机变量的离散程度。安全系数的不合理性在于相同的中心安全系数可因为变异系数的不同得出不通的可靠指标 β 。还有就是安全系数没有明确的概率上的含义,不能准确地反映结构的可靠度。可靠指标在安全系数的基础上又加入了变异系数,考虑的更为全面,这正是可靠度方法比安全系数法的改进之处。

四、结构可靠度的计算分类

1. 三种层次

工程结构设计的基本目的,是在结构的可靠性与经济性之间,选择一种最佳平衡,力求以最经济的途径,使结构在预定的使用期(设计工作期)内完成预定的各种功能。自1638年伽利略奠定现代建筑力学以来,工程结构设计方法经历了容许应力设计法、破损阶段设计法和极限状态设计法。

容许应力设计法由于计算简单在我国沿用了很长时间,目前仍在一些部门中应用,但也存在着明显的缺陷:如没有考虑工程材料的非线性塑性变形性能、不能充分发挥材料的潜力、凭经验确定安全系数缺乏严格的科学依据等。破损阶段设计法虽然考虑了材料的塑性变形性能,可以充分发挥材料的潜力,但是其安全系数的确定仍依赖经验,且是一个定值,无法对因采用了极限平衡理论荷载作用下结构的应力分布及位移变化作出适当的预计。

极限状态设计法是将结构置于各种可能的极限状态下来进行分析,并引入概率论数理统计和可靠性理论的设计方法。按概率理论应用的程度,分为:半经验半概率法(水准Ⅰ)、近似概率法(水准Ⅱ)、全概率法(水准Ⅲ)。极限状态发展分为两个阶段:多系数极限状态设计法和基于可靠性理论的概率极限状态设计法。

多系数极限状态设计法实际上已经具有近代可靠性理论的一些思想,安全系数的选取从纯经验性到部分地采用了概率统计值,比容许应力法和破损阶段法有了很大进步。从本质上讲,这是一种半经验半概率的方法(水准Ⅰ方法),总的说来还没有脱出经验设计法或定值计算法的框架。

半经验半概率的方法(水准一方法),在《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—92)颁布实施前,我国使用的基本都是这种半经验半概率法。它对影响结构可靠度的基本变量进行部分数理统计分析,然后结合工程经验引入某些经验系数。安全系数法就是水准Ⅰ



方法的一个例子。安全系数法要求在荷载作用下,结构或构件的截面应力 σ 不能大于材料容许应力 $[\sigma]$,即

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1-33)$$

$$[\sigma] = \frac{R}{K} \quad (1-34)$$

式中, R 为材料强度; K 为安全系数。

基于可靠性理论的概率极限状态设计法是将影响结构安全性的主要因素都作为随机变量,依据结构可靠性理论的分析方法来计算结构的失效概率或可靠指标,以此设计或校核结构。目前应用于国内外实际工程设计都是以近似概率法(水准Ⅱ方法)为基础的。

近似概率法(水准Ⅱ方法),规定了工程结构可靠度设计的基本原则和方法,以一次二阶矩法最为典型。它以结构的可靠指标 β 或失效概率 P_f 来度量结构的可靠度。近似概率法构建了结构极限状态方程和结构可靠度之间的相互关系。在计算可靠指标时,近似概率法采用线性化的近似手段处理极限状态方程,并且考虑了随机变量的概率分布模型,在进行截面设计时采用带有分项系数的实用设计表达式。目前,近似概率法应用已经非常广泛,是很多国家制订标准规范的理论基础,也是目前结构可靠性分析计算中采用较多的可靠度计算方法。我国于1992年正式颁布的《港口工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50158—92)就是以近似概率法为理论基础进行制定的。但它仍作了若干与实际情况不相符合的假设,且以构件的可靠性来评判结构体系的可靠性,也还有一些未加考虑的因素。

全概率法(水准Ⅲ方法)是对整个结构采用精确的概率分析,运用随机变量或随机过程的概率模型来描述所出现的各种基本变(向)量,用结构的失效概率直接度量结构的可靠度,而不必借助于安全系数或可靠指标。它是完全基于概率论的结构可靠度精确分析法。它对结构各种抗力效应和荷载效应全部采用随机变量或随机过程进行描述,并且对整个结构采用全概率分析,求得失效概率。由于目前对荷载和抗力的信息掌握都不充分,除少量特殊结构外,在一般工程结构设计中采用全概率法尚不现实。

2. 三种方法

在很多情况下,直接计算结构的可靠度是十分困难的,这是因为:

(1)直接计算结构可靠性需要知道各个随机变量的分布类型和概率密度函数,很多情况下缺乏这样的数据;

(2)通常的情况是功能函数是非线性的甚至是不能显式表达的隐式函数,这时就无法根据公式直接求解;

(3)即使能得到功能函数的显式表达式,通常其形式也是非常复杂的。不借助近似的数值计算方法是难以计算求解的。

由于上述原因,学者们发展了多种可靠度计算方法。从总体上来看,这些方法根据采用的原理可以分为三种方法:直接积分法、简化(近似)计算方法和数值模拟法。

(1)直接积分法。它是根据随机变量的概率分布函数直接使用积分计算可靠度的一种方法。它可以求出可靠度的精确值,但是必须已知随机变量的分布类型和概率密度函数。当随机变量为一般的分布时,可以用辛普森和高斯等数值积分方法,应用计算机求得;当精度要求不高时,也可以用图解法求可靠度。如果随机变量很多,相应的功能函数也较复杂



时,该方法的应用就十分有限了。

(2)简化(近似)计算方法。由于直接积分法求解的局限性,学者们又发展了很多简化(近似)的计算方法,近似概率设计方法目前已进入实用阶段。我国《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—84)、《铁路工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50216—94)和《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158—2010)就采用这种设计方法。近似概率计算方法用可靠指标 β 作为结构可靠性的度量尺度。其中,一次二阶矩法(包含改进一次二阶矩法(验算点法))就是最常用的方法。在可靠性设计初期,由于各个随机变量的分布规律难以确定,而这些变量的一阶矩(均值)和二阶矩(方差)则较容易得到。对于非线性的结构功能函数,在均值点进行泰勒展开并取其一次式,使得结构可靠性设计时计算简单,使用方便。这种方法不考虑各个随机变量的实际分布情况,只考虑它们的均值和方差,或者说,是将各个随机变量假定为正态分布或者对数正态分布进行计算的,但是均值一次二阶矩法对于非线性极限状态方程计算误差大。而改进的一次二阶矩法(验算点法)从根本上解决了均值一次二阶矩存在的问题,故其在可靠性分析和设计中得到了广泛的应用。

(3)数值模拟方法(Monte Carlo法)。它是通过随机变量的统计试验或随机模拟,求解问题的数值方法。由概率定义可知,某事件的发生概率可以用大量试验中该事件发生的频率来估算。因此在结构可靠性计算中,首先确定各个设计随机变量的分布规律情况,然后选用某种抽样方法进行大量的随机抽样,接着把这些抽样值一组一组地代入结构功能函数 $Z = g(\vec{X})$ 。根据计算得到的功能函数值进行统计分析,得到各项可靠指标。随着模拟次数的增加,数值模拟法的计算结果将逐渐趋于精确解。由于具有相对精确的特点,该方法除用于复杂情况的可靠度计算外,也常用于各种可靠度近似方法分析精度的校核。在结构可靠度的数值模拟中,该方法具有模拟的收敛速度与基本随机变量的维数无关,极限状态函数的复杂程度与模拟过程无关的优点,更无须将功能函数线性化和随机变量“当量正态化”,具有直接解决问题的能力;同时,数值模拟的误差也容易确定,从而确定模拟的次数和精度。

数值模拟法的缺点主要是计算量太大,特别是对机械结构这种高可靠性问题,要想得到精确的可靠概率,所需要计算的工作量往往是目前计算能力无法满足的,虽然随着计算机的发展和数值模拟方法的改进,这个问题有所缓解,但是仍未从根本上解决。另一方面,数值模拟需要大量抽样点通过人工提取是不现实的,往往借助于软件工具自动提取抽样点数据,并把这些数据自动代入模型进行模拟计算。要实现这一过程必须使用参数化的计算模型,这样才可以根据需要在原有模型的基础上改变参数值得到一系列的新模型用于求解。在实际操作中,有些结构形状复杂或需要对模型细节做严格控制,还有些问题结果后处理比较复杂,这时难以使用完全的参数化模型,因而进一步限制了数值模拟法的应用范围。

第三节 结构可靠度研究进展

一、时变可靠度

1. 背景及概况

在使用环境、自然环境和材料内部因素的作用下,结构的性能会随着时间逐步变化,结



构使用功能的改变、自然灾害和人为因素等具有很大的不确定性和不确知性。尤其是在海洋工程应用中,海上结构建筑要承受多种随时间变化和空间变化的随机荷载,包括波浪、海流、风、潮汐及海冰等引起的荷载的联合作用。现阶段的规范一般是主要针对结构正常使用阶段,而对结构平均风险及老化过程阶段的可靠度对策很少。因此,以结构生命周期全过程为研究对象的时变可靠性研究极为重要。

一般传统的可靠度理论中应力和强度都不随时间变化,在结构有效使用期内的某一未来时刻,应力和强度均为随机变量。然而,在实际工程中,有些变量不仅具有随机性,而且随机性与时间有关,比如:作用在结构上的可变荷载,结构本身的抗力等。这表明结构的受力状态随着时间在变化,只有当结构在设计基准内的每一刻都处于安全状态时,结构才能安全。

实际应用中时变可靠度的方法主要有两种:一是将考虑了结构抗力随时间变化(由环境因素引起)的可靠度称为时变可靠度;另一种把基于随机过程穿阈率理论的可靠度问题称为时变可靠度。两种没有严格界限,是相辅相成的,他们有共同的理论基础——随机过程。

在研究结构可靠度的过程中,不仅与荷载效应有关,最关键的要素之一就是结构的抗力,而且结构抗力是随着时间变化的,所以在研究时变可靠度时,研究结构抗力是十分必要的。

2. 结构抗力影响因素

1) 环境作用的影响

(1) 自然环境的影响。

①混凝土碳化。混凝土碳化是空气、土壤或地下水中的二氧化碳侵入到混凝土内部,与水泥石中的氢氧化钙等碱性物质发生反应的过程,又称作中性化。由于混凝土中的碱性被中和,使钢筋表面钝化膜遭到破坏,在有氧和水存在的情况下钢筋会被腐蚀,从而使结构构件的抗力下降。

②氯离子侵蚀。在沿海环境中,空气中存在着大量的氯离子,这些氯离子可以通过混凝土的孔隙进入内部,也会和混凝土中的氢氧化钙发生反应从而破坏钢筋的钝化膜,从而腐蚀了钢筋。

(2)使用环境的影响。使用环境的作用是指人类生活环境和工业环境对结构产生的不利作用,这些不利作用往往是由于人为因素引起的。使用环境对结构的不利影响以化学介质对结构的腐蚀最为普遍。

2) 荷载作用的影响

荷载对结构的作用方式有两种,一种是直接影响结构的安全,在结构设计基准期内,任一时点的荷载效应大于结构的抗力都会使结构失效;另一种是荷载对结构的累积损伤作用,其后果是使结构抗力下降,从而降低结构可靠度。

3) 材料内部作用的影响

在自然环境中,结构的材料会随着时间增长而逐渐老化,老化的结果使得材料的性能下降,强度降低。有时候随着时间的增加,一些结构的材料会发生化学反应,这种变化可能会导致结构发生破坏。



综上所述,在计算结构可靠度的时候,结构的性能都和时间有关,随着时间增加而发生了种种变化。因此,研究可靠度需要考虑时变情况。

3. 结构时变可靠度的基本分析方法

可靠度基本公式中应力和强度均为随机过程:应力随机过程用 $S(t), t \in T$ 表示;强度随机过程用 $R(t), t \in T$ 表示。这样结构的功能函数与时间有关,称为功能随机过程。

不失一般性,设功能函数为 $Z[\vec{X}(t)]$, 有

$$Z[\vec{X}(t)] = g[X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)] \quad (1-35)$$

根据功能函数的定义,当 $Z[\vec{X}(t)] < 0$ 时, $\vec{X}(t)$ 在 t 时刻失效。 $[0, T]$ 是人为规定的有效使用期,即为可靠度定义中规定的时间。在该时间段内的失效概率是

$$P_f = P\left\{ \min_{0 \leq t \leq T} g[\vec{X}(t)] < 0 \right\} = \int_{g[\vec{X}(t)]} f_{\vec{X}(t)}[\vec{X}(t)] d\vec{X}(t) \quad (1-36)$$

这是时变可靠度的基本公式。但是在实际计算时,使用积分会比较困难。当结构功能函数中只有结构抗力和荷载效应,且两者呈线性关系时,可得到结构功能函数

$$Z(t) = R(t) - S(t), t \in T \quad (1-37)$$

所以在设计基准期 $[0, T]$ 内的结构失效概率为

$$P_f = P\left\{ \min_{0 \leq t \leq T} [R(t) - S(t)] < 0 \right\} \quad (1-38)$$

在实际研究中,我们一般是采用时不变可靠度的研究方法作为分析基础,因此,无论采用哪种形式的理论公式,都需要将时变可靠度问题转变成时不变可靠度问题。

通常研究这类时变可靠度问题常用的基本计算方法有:时间综合法、时间离散法、首次超越概率法等。

4. 时间综合法

时间综合法是取整个结构的服役期或者整个评估基准期作为一个时间段,在该时间段里面来考虑结构抗力与荷载的变化。

在时间综合法里面,所有随机变量的统计参数都是以整个服役期来考虑的。对于抗力及荷载,我们取整个时间段内抗力概率分布的最小值,荷载取整个时间段内荷载概率分布的最大值。这样我们设结构失效概率计算式为

$$P_f(T) = P(R_{\min} \leq S_{\max}) \quad (1-39)$$

式(1-38)中, $R(t)$ 和 $S(t)$ 是时变函数,但是在该方法中我们将它们认为是定值,即为整个服役期的最小值 $R_{\min} = \min_{0 \leq t \leq T} R(t)$; 而 $S_{\max} = \max_{0 \leq t \leq T} S(t)$ 表示着整个服役期内的最大荷载效应。

通过以往一些观察的数据得到 $S(t)$ 的概率密度函数, S_{\max} 可以通过概率分布函数得到。一般用一些短期数据来分析出它的极值分布。通过荷载及抗力的分析,可以由一次可靠度方法来计算结构的可靠度。

5. 时间离散法

时间离散法是将结构的整个服役期分为若干段,通过对时间的离散,得到具体时间段的抗力及荷载,在每个时间段荷载、抗力分析的基础上得到评估期内离散后的荷载及抗力。这样,将时变可靠度问题转化成传统的时不变可靠度问题。



根据时间离散法原理,可以得到在结构整个服役期 $[0, T]$ 内,结构的累积失效概率为

$$P_f(T) = P\left\{g\left[\vec{X}(t)\right] < 0, \forall t \in [0, T]\right\} = P\left(\min_{0 \leq t \leq T} \left\{g\left[\vec{X}(t)\right]\right\} < 0\right) \quad (1-40)$$

将时间段 $[0, T]$ 离散为 N 个相等的时间段 $\Delta t = T/N$,于是式(1-40)可以近似为

$$P_f(T) = P\left\{\min_{0 \leq i \leq N} [g(x_i, t_i)] \leq 0\right\} \quad (1-41)$$

式中, $t_i = i \Delta t, i = 0, 1, \dots, N$ 。

可以将上式右端表达式理解成由 N 个 t_i 时刻的失效事件组成的串联系统的可靠度问题,又由于时间 t_i 是固定的,因此,上式中 t_i 时刻的失效概率以及相应的瞬时可靠指标为

$$P_f(t_i) \approx P\left\{g\left[\vec{X}(t_i)\right] < 0\right\} \quad (1-42a)$$

$$\beta(t_i) = \vec{\alpha}^T(t_i)u^*(t_i) = -\Phi^{-1}[P_f(t_i)] \quad (1-42b)$$

式中, $u^*(t_i)$ 为 t_i 时刻标准正态空间中的设计点, $\vec{\alpha}^T(t_i)$ 为相应的灵敏度向量。

6. 首次超越概率法

首次超越破坏概率法的依据是首次超越破坏准则,即假设结构在其时变响应值首次超越临界值或者安全界限时,结构就会发生破坏或者失效。采用首次超越破坏准则,结构的累积失效概率等价于结构响应首次超越临界值,采用下式进行上限估计

$$P_f(T) \leq \int_0^T \tau(t) dt \quad (1-43)$$

式中, $\tau(t)$ 为外穿率。

若假设外穿事件服从泊松分布,则 $P_f(T)$ 可近似计算如下

$$P_f(T) \approx 1 - \exp\left[-\int_0^T \tau(t) dt\right] \quad (1-44)$$

由上式可知,在求失效概率时,关键解决的是外穿率 $\tau(t)$ 的计算。近年来,国内外许多学者都提出过如何对外穿率进行近似计算的方法,一般来说,通常是采用时不变可靠度理论中系统可靠度的方法来进行计算的,计算常采用如下公式

$$\tau(t) \approx \frac{\Phi_2[\beta(t), -\beta(t + \Delta t), \rho(t, t + \Delta t)]}{\Delta t} \quad (1-45)$$

式中, $\Phi_2(\cdot)$ 表示二维正态随机向量的累积分布函数, $\beta(t), \beta(t + \Delta t)$ 分别表示 t 时刻和 $t + \Delta t$ 时刻的任意时点可靠指标, $\rho(t + \Delta t)$ 为 $X(t)$ 和 $X(t + \Delta t)$ 的相关系数。

以上简单介绍了时变可靠度的一些常用基本分析方法,都是将荷载、抗力作了关于时间的近似处理,将时变可靠度问题转化为传统可靠度问题,为以后的时变可靠度的进一步研究提供了思路和方法。但是它也存在一些不足,这些方法都是基于许多假设的,过程中也有取近似的情况,所以一些方法计算出来会有较大的误差。

二、系统可靠度

1. 定义及概况

系统可靠度是指系统在规定的条件下和规定的时间内完成预定功能的能力。

一个工程项目,不只是由一个个简单的结构构件组成的,它属于一个完整的结构系统。