



普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材

高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材
(按高等学校土木工程本科指导性专业规范编写)

工程荷载与可靠度 设计原理

白国良 薛建阳 吴涛 编著
童岳生 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程荷载与可靠度设计原理/白国良等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 3

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材. 高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材(按高等学校土木工程本科指导性专业规范编写)

ISBN 978-7-112-14135-7

I. ①工… II. ①白… III. ①工程结构-结构荷载-高等学校-教材
②工程结构-结构可靠性-高等学校-教材 IV. ①TU312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 042123 号

本书根据高等学校土木工程学科专业指导委员会编制的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的要求和荷载与结构设计方法课程教学大纲编写。全书共分为 9 章, 包括: 绪论、重力荷载、侧压力、风荷载、地震作用、其他作用、荷载统计分析、结构抗力统计分析、结构概率可靠度设计法。

本书可作为高等院校土木工程专业的本科教材或参考书, 亦可供土木工程技术人员参考使用。

为更好地支持本课程教学, 本书作者制作了多媒体教学课件, 有需要的教师请将个人基本信息发送至: jiangongkejian@163.com, 即可免费索取。

* * *

责任编辑: 王 跃 吉万旺

责任设计: 陈 旭

责任校对: 党 蕾 赵 颖

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材
(按高等学校土木工程本科指导性专业规范编写)

工程荷载与可靠度设计原理

白国良 薛建阳 吴 涛 编著

童岳生 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13 $\frac{3}{4}$ 字数: 343 千字

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-14135-7

(22183)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本系列教材编审委员会名单

主 任：李国强

常务副主任：何若全

副 主 任：沈元勤 高延伟

委 员：(按拼音排序)

白国良 房贞政 高延伟 顾祥林 何若全 黄 勇
李国强 李远富 刘 凡 刘伟庆 祁 皓 沈元勤
王 燕 王 跃 熊海贝 阎 石 张永兴 周新刚
朱彦鹏

组 织 单 位：高等学校土木工程学科专业指导委员会
中国建筑工业出版社

出版说明

从 2007 年开始高校土木工程学科专业教学指导委员会对全国土木工程专业的教学现状的调研结果显示, 2000 年至今, 全国的土木工程教育情况发生了很大变化, 主要表现在: 一是教学规模不断扩大。据统计, 目前我国有超过 300 余所院校开设了土木工程专业, 但是约有一半是 2000 年以后才开设此专业的, 大众化教育面临许多新的形势和任务; 二是学生的就业岗位发生了很大变化, 土木工程专业本科毕业生中 90% 以上在施工、监理、管理等部门就业, 在高等院校、研究设计单位工作的大学生越来越少; 三是由于用人单位性质不同、规模不同、毕业生岗位不同, 多样化人才的需求愈加明显。《高等学校土木工程本科指导性专业规范》(以下简称《规范》)就是在这种背景下开展研究制定的。

《规范》按照规范性与多样性相结合的原则、拓宽专业口径的原则、规范内容最小化的原则和核心内容最低标准的原则, 对专业基础课提出了明确要求。2009 年 12 月高校土木工程学科专业教学指导委员会和中国建筑工业出版社在厦门召开了《规范》研究及配套教材规划会议, 会上成立了以参与《规范》编制的专家为主要成员的系列教材编审委员会。此后, 通过在全国范围内开展的主编征集工作, 确定了 20 门专业基础课教材的主编, 主编均参与了《规范》的研制, 他们都是各自学校的学科带头人和教学负责人, 都具有丰富的教学经验和教材编写经历。2010 年 4 月又在烟台召开了系列规划教材编写工作会议, 进一步明确了本系列规划教材的定位和编写原则: 规划教材的内容满足建筑工程、道路桥梁工程、地下工程和铁道工程四个主要方向的需要; 满足应用型人才培养要求, 注重工程背景和工程案例的引入; 编写方式具有时代特征, 以学生为主体, 注意 90 后学生的思维习惯、学习方式和特点; 注意系列教材之间尽量不出现不必要的重复等编写原则。为保证教材质量, 系列教材编审委员会还邀请了本领域知名教授对每本教材进行审稿, 对教材是否符合《规范》思想, 定位是否准确, 是否采用新规范、新技术、新材料, 以及内容安排、文字叙述等是否合理进行全方位审读。

本系列规划教材是贯彻《规范》精神、延续教学改革成果的最好实践, 具有很好的社会效益和影响, 住房和城乡建设部已经确定本系列规划教材为《普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材》。在本系列规划教材的编写过程中得到了住房和城乡建设部人事司及主编所在学校和学院的大力支持, 在此一并表示感谢。希望使用本系列规划教材的广大读者提出宝贵意见和建议, 以便我们在重印再版及规划和出版专业课教材时得以改进和完善。

高等学校土木工程学科专业指导委员会
中国建筑工业出版社
2011 年 6 月

前 言

工程结构设计主要包含两方面内容：一是确定工程结构在其服役期间可能出现的各种荷载和作用；二是为保证可靠使用，对各类结构在荷载作用下基于某种设计方法进行设计计算，目前，一般采用概率可靠度设计法。

为使学生以宽口径土木工程专业的视角了解荷载与结构设计方法，本书介绍了建筑工程、交通土建工程、水利工程等专业领域的荷载与结构设计方法，从知识单元和知识点的联系上，力求较全面、系统地介绍工程领域各类荷载及作用的概念、原理与计算方法，以及可靠度计算原理和概率可靠度设计法。

本书根据全国高等学校土木工程专业指导委员会对土木工程专业的培养要求和荷载与结构设计方法课程教学大纲编写。编写内容完全符合国家现行结构设计规范、规程和标准要求。全书共分为9章，包括：绪论、重力荷载、侧压力、风荷载、地震作用、其他作用、荷载统计分析、结构抗力统计分析、结构概率可靠度设计法。

本书第1章、第5章、第7章和第9章由白国良编写，第2章、第6章和第8章由薛建阳编写，第3章和第4章由吴涛编写。全书由白国良统稿，由资深教授童岳生先生主审。博士生王博为本书的资料收集、数据核实、例题试算做了大量工作，硕士生王超群、李贞、余青为本书绘制了插图和试算了部分例题。

希望本书能为读者的学习提供帮助。限于作者水平，书中会存在不足、甚或错误，欢迎读者和使用本教材的教师批评指正。

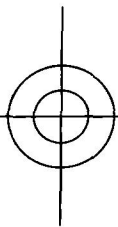
2012年2月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.7.1 公路桥梁人群荷载	29
本章知识点	1	2.7.2 城市桥梁人群荷载	29
1.1 荷载与作用	1	2.7.3 铁路桥梁人行道荷载	30
1.1.1 作用及其分类	1	小结及学习指导	30
1.1.2 土木工程不同领域中的 荷载类型	2	思考题	31
1.2 荷载的随机性及其取值	3	习题	31
1.2.1 荷载的随机性	3	第 3 章 侧压力	33
1.2.2 荷载的取值	3	本章知识点	33
1.3 荷载与结构设计的关系	4	3.1 土的侧压力	33
1.3.1 效应与抗力	4	3.1.1 土侧压力分类	33
1.3.2 结构设计中的几个重要概念	4	3.1.2 土侧压力的计算	34
1.3.3 结构设计方法的演进	7	3.2 静水压力及动水压力	42
小结及学习指导	8	3.2.1 静水压力	42
思考题	9	3.2.2 动水压力	43
第 2 章 重力荷载	10	3.3 波浪荷载	44
本章知识点	10	3.3.1 波浪的分类	44
2.1 结构自重	10	3.3.2 波浪荷载的计算	45
2.2 土的自重应力	11	3.4 冻胀力	49
2.3 楼、屋面活荷载	12	3.4.1 冻土的概念、性质及与结构物 的关系	49
2.3.1 楼面活荷载	12	3.4.2 土的冻胀原理	50
2.3.2 屋面活荷载	15	3.4.3 冻胀力的分类与计算	50
2.4 雪荷载	17	3.5 冰压力	53
2.4.1 基本雪压	17	3.5.1 冰压力概念及分类	53
2.4.2 屋面雪荷载的计算	20	3.5.2 冰压力的计算	54
2.5 吊车荷载	22	小结及学习指导	56
2.5.1 吊车工作制等级与工作级别	22	思考题	56
2.5.2 吊车竖向荷载与水平荷载	23	习题	56
2.6 车辆荷载	25	第 4 章 风荷载	58
2.6.1 公路汽车荷载	25	本章知识点	58
2.6.2 城市桥梁汽车荷载	28	4.1 风的基本知识	58
2.6.3 列车荷载	29	4.1.1 风的形成	58
2.7 人群荷载	29	4.1.2 两类性质的大风	59

4.1.3 我国风气候总况	60	5.4.3 振型分解反应谱法	101
4.1.4 风级	60	5.4.4 底部剪力法	104
4.2 风压	61	5.5 桥梁的地震作用计算	106
4.2.1 风压与风速的关系	61	5.5.1 铁路桥梁的地震作用	106
4.2.2 基本风压	63	5.5.2 公路桥梁的地震作用	108
4.2.3 非标准条件下的风速或风压 的换算	66	5.6 水工建筑物的地震作用 计算	110
4.3 结构抗风计算的几个重要 概念	68	5.6.1 拟静力法	111
4.3.1 结构的风力与风效应	68	5.6.2 动力分析法	112
4.3.2 顺风向平均风与脉动风	69	5.6.3 地震动土压力	112
4.3.3 横风向风振	69	小结及学习指导	113
4.4 顺风向结构风效应	71	思考题	113
4.4.1 顺风向平均风效应	71	习题	114
4.4.2 顺风向脉动风效应	75	第6章 其他作用	115
4.4.3 顺风向总风效应	78	本章知识点	115
4.5 横风向结构风效应	80	6.1 温度作用	115
4.5.1 作用于物体的风力	80	6.1.1 基本概念及原理	115
4.5.2 结构横风向风力	81	6.1.2 温度应力和变形的计算	116
4.5.3 结构横风向风效应	82	6.2 变形作用	118
4.5.4 结构总风效应	83	6.3 爆炸作用	122
小结及学习指导	83	6.3.1 爆炸的概念及分类	122
思考题	84	6.3.2 爆炸的破坏作用	122
习题	84	6.3.3 爆炸作用的原理与荷载 计算	122
第5章 地震作用	85	6.4 浮力作用	127
本章知识点	85	6.5 预加力	128
5.1 概述	85	6.5.1 预加应力的概念	128
5.2 地震基本知识	85	6.5.2 预加应力的方法	128
5.2.1 地震的类型和成因	85	6.6 制动力	131
5.2.2 地震分布	87	6.6.1 汽车制动力	131
5.2.3 震级与地震烈度	89	6.6.2 吊车制动力	132
5.2.4 地震波	91	6.7 冲击力和撞击力	132
5.3 地震作用及工程结构抗震 设防	92	6.7.1 汽车冲击力	132
5.3.1 地震作用的概念	92	6.7.2 汽车撞击力	133
5.3.2 抗震设防目标与标准	94	6.7.3 船只或漂流物的撞击力	133
5.4 建筑结构的抗震作用计算	96	6.8 离心力	134
5.4.1 简述	96	小结及学习指导	135
5.4.2 反应谱	97	思考题	136
		习题	136

第7章 荷载统计分析	138	8.4.1 材料强度的标准值	156
本章知识点	138	8.4.2 材料强度的设计值	157
7.1 概述	138	小结及学习指导	160
7.2 荷载的概率模型及其应用	139	思考题	160
7.2.1 荷载的概率模型	139	习题	160
7.2.2 设计基准期最大荷载的概率 分布函数	139	第9章 结构概率可靠度设计法	162
7.3 常遇荷载的统计分析	140	本章知识点	162
7.3.1 永久荷载	140	9.1 概述	162
7.3.2 民用建筑楼面活荷载	141	9.2 可靠指标	163
7.3.3 风荷载	144	9.2.1 结构的功能函数	163
7.3.4 雪荷载	144	9.2.2 可靠指标的概念	164
7.4 荷载代表值	144	9.3 可靠度计算的基本方法	164
7.4.1 标准值	144	9.3.1 中心点法	164
7.4.2 频遇值	145	9.3.2 验算点法	167
7.4.3 准永久值	145	9.3.3 相关随机变量的可靠度 分析	177
7.4.4 组合值	146	9.4 结构体系的可靠度计算	182
7.5 荷载效应组合的规则	146	9.4.1 结构构件的失效性质	182
7.5.1 Turkstra 组合规则	146	9.4.2 结构体系的基本模型	182
7.5.2 JCSS 组合规则	146	9.4.3 结构体系可靠度计算的区间 估计法	184
小结及学习指导	147	9.5 结构构件的目标可靠指标	185
思考题	147	9.5.1 目标可靠指标的确定方法	185
第8章 结构抗力统计分析	149	9.5.2 结构构件设计的目标可靠 指标	186
本章知识点	149	9.6 概率极限状态设计法	187
8.1 概述	149	9.6.1 直接概率设计法	187
8.2 结构抗力的不定性	150	9.6.2 基于分项系数表达的 概率极限状态设计法	189
8.2.1 材料性能的不定性	150	小结及学习指导	204
8.2.2 几何参数的不定性	151	思考题	205
8.2.3 计算模式的不定性	152	习题	205
8.3 结构抗力的统计特征	153	附录 常用材料和构件的重度	207
8.3.1 抗力的统计参数	153	参考文献	211
8.3.2 抗力的概率分布	155		
8.4 材料的标准强度及其设计 取值	156		



第1章

绪 论

本章知识点

【知识点】

作用及其分类，荷载的随机性，荷载与结构设计的关系。

【重点】

了解作用的分类及土木工程不同领域中的荷载类型，掌握可靠性、极限状态、设计使用年限和结构安全等级的概念，熟悉我国工程结构设计方法所经历的阶段。

【难点】

理解荷载与结构设计的关系，掌握基于分项系数表达的概率极限状态设计法的一般思路。

1.1 荷载与作用

1.1.1 作用及其分类

工程结构的一个重要功能是承受和抵御结构服役过程中可能出现的各种环境作用(这里“环境作用”一词是广义的，包括结构所受的各种作用)。即能使结构产生效应(结构或构件的内力、应力、位移、应变、裂缝等)的各种因素的总称。对结构承受的各种作用可按下列原则分类：

1. 按作用形式分类

(1) 直接作用。它直接以力的不同集结形式作用于结构，包括结构的自重、行人及车辆的重量、各种物品及设备自重、风压力、土压力、雪压力、水压力、冻胀力、积灰荷载等，这一类作用通常也称为荷载。

(2) 间接作用。它不是直接以力的某种集结形式出现，而是引起结构的振动、约束变形或外加变形(包括裂缝)，但也能使结构产生内力或变形等效应，它包括温度变化、材料的收缩和膨胀变形、地基不均匀沉降、地震、焊接等。

在国际上，目前有不少国家对“荷载”和“作用”未加严格区分。在我国，作用有直接作用和间接作用，是结构所受作用的通称，而荷载专指直接作用。在工程中，为了使用和交流的方便，常用“荷载”统指各种作用。

2. 按随时间的变异分类

(1) 永久作用。在设计基准期内作用值不随时间变化,或其变化与平均值相比可以忽略不计的作用,如结构自重、土压力、水位不变的水压力、预加压力、地基变形、钢材焊接、混凝土收缩变形等。

(2) 可变作用。在设计基准期内作用值随时间变化,且其变化与平均值相比不可忽略的作用。如结构施工过程中的人员和物件重力、车辆重力、吊车荷载、服役结构中的人员和设备重力、风荷载、雪荷载、冰荷载、波浪荷载、水位变化的水压力、温度变化等。

(3) 偶然作用。在设计基准期内不一定出现,而一旦出现其量值很大且持续时间很短的作用。如地震、爆炸、撞击、火灾、龙卷风等。

结构上的作用按随时间的变异分类是对作用的基本分类。永久作用的特点是其统计规律与时间参数无关,故采用随机变量概率模型来进行描述;而可变作用的统计规律与时间参数有关,必须采用随机过程概率模型来描述。永久作用、可变作用、偶然作用的出现概率和其出现的持续时间长短不同,可靠度水准也不同。

3. 按随空间位置的变异分类

(1) 固定作用。在结构空间位置上具有固定的分布,但其量值可能具有随机性的作用,如结构自重、固定的设备荷载等。

(2) 自由作用。在结构空间位置上的一定范围内可以任意分布,出现的位置及量值可能具有随机性的作用,如楼面上的人群和家具荷载、厂房中的吊车荷载、桥梁上的车辆荷载等。

由于自由作用在结构空间上可以任意分布,设计时必须考虑它在结构上引起最不利效应的分布位置和大小。

4. 按结构的反应特点分类

(1) 静态作用。对结构或结构构件不产生动力效应,或其产生的动力效应与静态效应相比可以忽略不计的作用,如结构自重、雪荷载、土压力、建筑的楼面活荷载、温度变化等。

(2) 动态作用。对结构或结构构件产生不可忽略的动力效应的作用,如地震作用、风荷载、大型设备振动、爆炸和冲击荷载等。

结构在动态作用下的分析,一般按结构动力学的方法进行。当然,根据作用的性质和变化,动态作用下的结构分析,可能是数定的或非数定的。对非数定的情况,在统计和概率意义上予以分析;对有些动态作用,可转换成等效静态作用,按静力学方法进行结构分析。

1.1.2 土木工程不同领域中的荷载类型

土木工程专业领域较多,主要包括:建筑结构、桥梁结构、水工结构、港口工程、海岸与海洋工程等。任何结构都因地球引力而受重力的影响,同时也受使用荷载和由自然环境因素引起的各种荷载或力的作用。因结构形式和所处环境的差异,不同专业领域中的结构所受到的荷载类型也有所

不同。

建筑结构中常遇的荷载和作用主要有：结构自重、楼面与屋面活荷载、雪荷载、风荷载、地震作用、吊车荷载和吊车制动力(工业建筑中)、温度作用、地基变形、混凝土收缩徐变、预应力等。除结构自重、风荷载、地震作用等常见荷载或作用外，桥梁结构中典型的荷载类型主要有：车辆荷载、人群荷载、冲击力、撞击力、制动力、离心力等；水工结构、港口工程、海岸与海洋工程中典型的荷载类型主要有：水压力、波浪荷载、浮力作用等。

永久荷载也可称为恒载，可变荷载也可称为活载。此外，同一种类型的荷载对不同结构的重要性也不尽相同，其计算方法也存在一定差异。例如，虽同是地震作用和风荷载，但是在建筑结构、桥梁结构和水工结构中，其计算方法却不尽相同。

1.2 荷载的随机性及其取值

1.2.1 荷载的随机性

结构材料的重度、几何参数(高度、形状等)以及外部环境情况的变异性必然导致荷载具有随机特性。

不同类型的荷载具有不同性质的变异性，不仅随地而异，而且随时而异。例如，处于震区的某一城市，在未来一定时期内可能发生地震，但是地震发生的具体时间以及震级与烈度的大小则是无法准确预定的；在某一地区，在未来某一时刻风压的有无及强弱是不确定的；积雪的厚薄也会随着地域及时间的不同而呈现出不确定性；即使是恒载也有一定程度的变异性，由于材料差异和尺寸误差，即使是某种同类结构的材料自重，实际上也存在着某种程度的变异。

1.2.2 荷载的取值

基于荷载的随机性，对其描述与分析处理应采用概率论和数理统计的方法。如果在设计中直接引用反映荷载变异性的各种统计参数，通过复杂的概率运算进行具体设计，将会给设计带来许多困难。因此，在设计时对荷载应规定具体的量值，这些确定的荷载值称为荷载的代表值。根据《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)和《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)等国家标准的规定，工程结构设计时采用的荷载代表值分别为：对永久荷载的代表值为标准值；对可变荷载的代表值则有标准值、频遇值、准永久值和组合值四类，根据不同设计要求应分别选用。

荷载标准值是荷载的基本代表值，是工程结构设计时采用的主要代表值，其他代表值都可在标准值的基础上乘以相应的系数后得出。

由于荷载在时间分布上具有随机性，在进行荷载统计分析时需要明确设计

基准期。所谓设计基准期,是为确定可变作用及与时间有关的材料性能取值而选用的时间参数。按国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)总则的有关规定,我国的建筑结构、结构构件及地基基础的设计规范、规程所采用的设计基准期为50年。关于荷载的统计分析方法及荷载代表值的取值将在第7章中详细介绍。

1.3 荷载与结构设计的关系

1.3.1 效应与抗力

工程结构设计的目的就是要保证结构具有足够的抵抗环境中各种作用的能力,满足预定的功能要求。这就需要确定出荷载的大小,并计算其产生的结构效应,再按照一定的组合规则进行组合,然后,通过设计使得结构或构件的抗力不小于可能产生的效应而具有必要的可靠度。

由于结构在设计基准期内,可能承受两种或两种以上的可变荷载,且荷载具有随机特性,因此需要在分析各种荷载同时出现的几率基础上,对各种荷载效应进行组合以确定出最不利的组合进行结构设计。关于荷载效应组合的原则和具体的组合表达式将在第7章和第9章中详细介绍。

抗力主要受结构材料性能和结构构件的几何参数影响。由于材料性能与制作工艺和加载环境等因素相关,制作及加载时的不确定性必然导致抗力具有不定性;同时,结构构件的几何参数,诸如高度、宽度、面积、惯性矩、抵抗矩、混凝土保护层厚度等也会因制作尺寸偏差和安装误差等使得抗力具有不定性。此外,在计算抗力时,基本假定的近似性和计算公式的不精确性则会造成对结构构件抗力估计的不定性。基于此,也必须对结构抗力进行统计分析,以确定出具体的抗力取值原则,供设计时使用。关于结构抗力的统计分析将在第8章中详细介绍。

1.3.2 结构设计中的几个重要概念

1. 可靠性

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)将结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力称为可靠性。可靠性是对结构可靠性的概率度量,即结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率。

所谓“规定条件”是指结构的正常设计、正常施工、正常使用的条件(人为过失不在可靠度的考虑范围)。“规定时间”一般是指结构的设计基准期,是指分析结构可靠度时确定各项基本变量取值而选用的时间参数。“预定功能”是指结构的安全性、适用性和耐久性。

传统的安全度概念主要是针对结构的承载能力(特别是强度)而言的,其定义为在正常设计、正常施工和正常使用的情况下,结构物对抵抗各种影响

安全的不利因素所必须具备的安全储备大小。这个定义指出了结构所处的条件必须是“正常的”，这里的各种不利因素，事实上是对不定性的承认，但最后规定一个定值的安全储备。这种定值的安全储备方法，往往给人们以一种错觉，似乎只要在设计中采用了某一给定的安全系数，结构就百分之百地可靠了。实际上，与结构安全度有关的各种荷载效应与承载能力等参数，都不是定值的。按定值法规定的定值安全系数，只不过是从工程经验上对安全度的解释，而不是从定量的角度去规定或计算结构安全度。

由此可见，《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)对建筑结构的可靠性和可靠度的定义是从统计数学观点出发的比较科学的定义。因为在各种随机因素的影响下，结构完成预定功能的能力只能用概率来度量。但是由于采用可靠概率或失效概率来度量结构可靠度比较复杂，因此常采用可靠指标来衡量。关于可靠指标的概念、计算方法以及目标可靠指标的确定将在第9章中详细介绍。

2. 极限状态

整个结构或结构的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，此特定状态称为该功能的极限状态。工程设计中，结构的各种极限状态是指结构由可靠转为失效的临界状态。

极限状态设计法以结构的某种荷载效应，如内力、变形、裂缝等，超过相应规定的标志为依据进行设计。极限状态可分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。

(1) 承载能力极限状态

这种极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形。

当结构或结构构件出现下列状态之一时，应认为超过了承载能力极限状态：

- 1) 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡(如倾覆等)；
- 2) 结构构件或连接因超过材料强度而破坏(包括疲劳破坏)，或因过度变形而不适于继续承载；
- 3) 结构转变为机动体系；
- 4) 结构或结构构件丧失稳定(如压屈等)；
- 5) 地基丧失承载能力而破坏(如失稳等)。

承载能力极限状态可理解为结构或构件发挥允许的最大承载功能的状态。结构构件由于塑性变形而使其几何形状发生改变，虽未达到最大承载力，但已彻底不能使用，也属于达到这种极限状态。

(2) 正常使用极限状态

这种极限状态对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值。

当结构或结构构件出现下列状态之一时，应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坏(包括裂缝);
- 3) 影响正常使用的振动;
- 4) 影响正常的其他特定状态。

正常使用极限状态可理解为结构或结构构件达到使用功能上允许的某个限值状态。例如,某些构件必须控制变形、裂缝才能满足使用要求。因为过大的变形会造成房屋内粉刷层剥落、填充墙和隔断墙开裂及屋面积水等后果;过大的变形会影响结构的耐久性;过大的变形、裂缝也会造成用户心理上的不安全感等。

3. 结构的安全等级

工程结构安全等级是根据结构破坏造成的后果,即危害人的生命、造成经济损失、产生不良社会影响的严重程度划分的。《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)将建筑结构安全等级划分为三级。建筑结构安全等级的划分见表 1-1。而《高耸结构设计规范》(GB 50135—2006)将高耸结构安全等级划分为两级,见表 1-2。

建筑结构安全等级

表 1-1

安全等级	破坏后果	建筑物类型
一级	很严重	重要建筑
二级	严重	一般工业与民用建筑
三级	不严重	次要建筑物

高耸结构的安全等级

表 1-2

安全等级	高耸结构类型	结构破坏后果
一级	重要的高耸结构	很严重
二级	一般的高耸结构	严重

注: 1. 对特殊的高耸结构,其安全等级可根据具体情况另行确定;

2. 结构构件的安全等级宜采用与整个结构相应的安全等级,对部分构件可按具体情况调整其安全等级。

一般而言,结构的安全等级越高,结构设计时需达到的目标可靠指标值越大,目前结构设计时主要是通过结构重要性系数来体现的。

4. 设计使用年限

设计使用年限为设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按其预定目的使用的时期。它代表在正常设计、正常施工、正常使用和维护下所应达到的使用年限,如达不到这个年限则意味着在设计、施工、使用与维护的某一环节上出现了非正常情况,应查找原因。“正常维护”包括必要的检测、防护及维修。设计使用年限也是房屋建筑的地基基础工程和主体结构工程“合理使用年限”的具体化。

结构可靠度与结构的使用年限长短有关,当结构的使用年限超过设计使用年限后,结构失效概率可能较设计预期值增大。

1.3.3 结构设计方法的演进

我国工程结构的设计方法经历了容许应力法、破损阶段法、极限状态设计法和概率极限状态设计法四个阶段。

容许应力法是建立在弹性理论基础上的设计方法，在使用荷载作用下，它规定结构构件各截面上的最大计算应力不超过材料的容许应力。容许应力法没有考虑材料的非线性性能，忽视了结构实际承载能力与按弹性方法计算结果的差异，对荷载和材料容许应力的取值也都凭经验确定，缺乏科学依据。

破损阶段法是考虑结构在材料破坏阶段的工作状态进行结构设计的方法。使考虑塑性应力分布后的结构构件截面承载力不小于外荷载产生的内力。破损阶段法以构件破坏时的受力状况为依据，并且考虑了材料的塑性性能，在表达式中引入了一个安全系数，使构件有了总安全度的概念。因此，与容许应力法相比，破损阶段法有了进步。但缺点是，安全系数仍须凭经验确定，且只考虑了承载力问题，没有考虑构件在正常使用情况下的变形和裂缝问题。

极限状态设计法明确地将结构的极限状态分成承载力极限状态和正常使用极限状态：承载力极限状态要求结构构件可能的最小承载力不小于可能的最大外荷载所产生的截面内力；正常使用极限状态是指对构件的变形及裂缝的形成或开展宽度的限制。在安全度的表达上，有单一系数和多系数形式，考虑了荷载的变异、材料性能的变异及工作条件的不同。在部分荷载和材料性能的取值上，引入了概率统计的方法加以确定。因此，它比容许应力法、破损阶段法考虑的问题更全面，安全系数的取值更合理。

容许应力法、破损阶段法和极限状态设计法存在的共同问题是：没有把影响结构可靠性的各类参数都视为随机变量，而是看成定值；在确定各系数取值时，不是用概率的方法，而是用经验或半经验、半统计的方法，因此都属于“定值设计法”。

概率极限状态设计法是以概率理论为基础，视作用效应和影响结构抗力（结构或结构构件承受作用效应的能力，如承载能力、刚度、抗裂能力等）的主要因素为随机变量，根据统计分析确定可靠概率（或可靠指标）来度量结构可靠性的结构设计方法。其特点是有明确的、用概率尺度表达的结构可靠度的定义，通过预先规定的可靠指标 β 值，使结构各构件间以及不同材料组成的结构之间有较为一致的可靠度水准。

理论上，可以直接按目标可靠指标进行结构的设计，但考虑到计算上的繁琐和设计应用上的习惯，目前我国采用“基于分项系数表达的以概率理论为基础的极限状态设计方法”。简言之，概率极限状态设计法用可靠指标 β 度量结构可靠度，用分项系数的设计表达式进行设计，其中各分项系数的取值是根据目标可靠指标及基本变量的统计参数用概率方法确定的，其一般思路如图 1-1 所示。

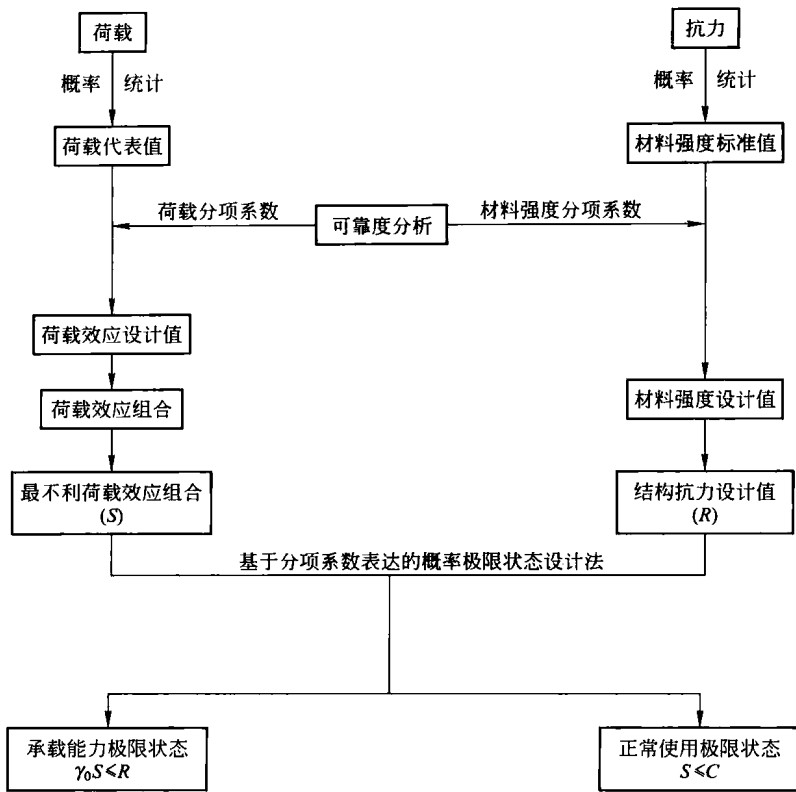


图 1-1 基于分项系数表达的极限状态设计法的一般思路

注： γ_0 ——结构重要性系数，根据安全等级与设计使用年限确定；

C ——结构或构件达到正常使用要求的规定限值，例如变形、裂缝、应力等的限值，按有关结构设计规范的规定采用。

小结及学习指导

1. 结构上的作用，即能使结构产生效应的各种因素的总称。可按作用形式、随时间的变异、随空间位置的变异、结构的反应特点进行分类。

2. 荷载具有随机特性，对其描述与分析处理应采用概率论和数理统计的方法。为便于设计，对荷载应规定具体的量值，即荷载代表值。永久荷载的代表值为标准值；可变荷载的代表值包括标准值、频遇值、准永久值和组合值四类，其中荷载标准值是荷载的基本代表值，其他代表值可在标准值的基础上乘以相应的系数得出。

3. 工程结构设计的目的就是要保证结构具有足够的抵抗环境中各种作用的能力，满足预定的功能要求。这就需要确定出荷载的大小，并计算其产生的结构效应，再按照一定的组合规则进行组合，然后，通过设计使得结构或构件的抗力不小于可能产生的效应而具有必要的可靠度。

4. 结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的能力称为可

靠性。可靠度是对结构可靠性的概率度量，结构设计中常通过可靠指标来衡量。

5. 结构的各种极限状态是指结构由可靠转为失效的临界状态。极限状态可分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。极限状态设计法以结构的某种荷载效应，如内力、变形、裂缝等超过相应规定的标志为依据进行设计。

6. 工程结构安全等级是根据结构破坏造成的后果，即危害人的生命、造成经济损失、产生不良社会影响的严重程度划分的。设计使用年限为设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按其预定目的使用的时期。

7. 我国工程结构的设计方法经历了容许应力法、破损阶段法、极限状态设计法和概率极限状态设计法四个阶段。目前我国采用“基于分项系数表达的以概率理论为基础的极限状态设计方法”。用可靠指标 β 度量结构可靠度，用分项系数的设计表达式进行设计，其中各分项系数的取值是根据目标可靠指标及基本变量的统计参数由概率方法确定。

思考题

- 1-1 简述作用的概念及其分类方法。
- 1-2 为什么荷载具有随机性？设计时该如何考虑？
- 1-3 为什么抗力具有不定性？设计时该如何考虑？
- 1-4 简述可靠性、极限状态、安全等级、设计使用年限的概念。
- 1-5 简述我国工程结构设计方法所经历的四个阶段。
- 1-6 简述基于分项系数表达的概率极限状态设计法的一般思路。