

高等学校教材

王云球 主编

席与耀 主审

# 港口水工 建筑物

## ·(II)

(港口航道与海岸工程专业)

GANGKOU SHUIGONG JIANZHUYU



人民交通出版社

中国水利水电出版社  
CHINA WATER & ELECTRICITY PRESS  
100044 Beijing, P. R. China  
Tel: 010-88389208 Fax: 010-88389207  
http://www.cwep.com.cn

# 港口水工 建筑物

·(11)



高等学校教材

Gangkou Shuigong Jianzhuwu

# 港口水工建筑物

(II)

[港口航道与海岸工程专业]

王云球 主 编  
席与耀 主 审

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书是《港口水工建筑物(I)》的扩充和提高,内容包括:港口工程结构可靠度设计,码头工程技术的新发展,开敞式码头,防波堤工程技术的新发展,修造船水工建筑物的结构计算,港口水工建筑物抗震,计算机在港口工程中的应用等。

本书是港口与航道工程专业本科专业的必修教材,也可作为从事港口工程的技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

港口水工建筑物. II/王云球主编. —北京:人民交通出版社, 2000. 8

ISBN 7-114-03688-4

I. 港… II. 王… III. 港口建设-水工建筑物  
IV. U656

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第62974号

高等学校教材

港口水工建筑物(II)

[港口航道与海岸工程专业]

王云球 主编

席与耀 主审

版式设计:王秋红 责任校对:张捷 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100011 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京交通印务实业公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:357千

2001年1月 第1版

2007年1月 第3次印刷

印数:4001—5000册 定价:24.00元

ISBN 7-114-03688-4

U·02668

# 前 言

高等学校港口与航道工程教学指导委员会根据通过的“面向 21 世纪教学内容、课程体系改革研究”中关于专业课程模块化建设的方案,将《港口工程学》设置为《港口规划与布置》、《港口水工建筑物(I)》和《港口水工建筑物(II)》三门课,每门课的教学时数为 40 学时。前两门课程既是本专业本科学生必修专业课,又是其他相近专业拓宽口径的专业方向选修课,为扩大专业方向课程互选创造条件,内容为本专业内容的第一层次,不求深透,只勾划专业的主要轮廓。《港口水工建筑物(II)》是本专业学生的必选专业方向课,内容为《港口水工建筑物(I)》的扩充与提高,即反映本专业深化内容的第二层次,还通过了《港口水工建筑物(II)》的课程教学大纲和教材的编写大纲。委员会确定河海大学王云球教授为主编,席与耀教授为主审。邀请天津大学王元战教授、大连理工大学李玉成教授、河海大学鲁子爱教授为编写组成员。

经过全体编写组人员近 2 年的努力,完成了委员会交给的任务。本书的内容力求避免与《港口水工建筑物(I)》重复,并在有限的篇幅内,尽可能反映我国港口工程建设的实际和成就,体现我国最新颁布实施的港口工程技术规范,以及港口工程结构中的新理论、新结构、新方法和新技术。全书内容包括:港口工程结构可靠度设计、码头工程技术的新发展、开敞式码头、防波堤工程技术的新发展、修造船水工建筑物的结构计算、港口水工建筑物抗震和计算机在港口工程中的应用共 7 章。

本书编写分工如下:

王云球教授编写第三、五、六章和第二章 3、4 节合写;

王元战教授编写第一章,第二章 1、2 节,第二章 3、4 节合写;

李玉成教授编写第四章;

鲁子爱教授编写第七章。

席与耀教授主审了全部书稿,并提出了许多宝贵意见,使本书内容有较大改进,特此致谢。由于我们水平有限,难免有不妥之处,尚希读者批评指正。

编 者

2000.1

# 目 录

第一章 港口工程结构可靠度设计	1
第一节 概述	1
第二节 结构可靠度计算方法	4
第三节 作用及作用效应组合	12
第四节 港工结构概率极限状态设计	22
思考题	32
参考文献	32
第二章 码头工程技术的新发展	34
第一节 大直径圆筒码头	34
第二节 格形钢板桩码头	49
第三节 大直径预应力混凝土管桩码头	64
第四节 地下连续墙与斜拉桩板桩码头	72
思考题	85
参考文献	86
第三章 开敞式码头	89
第一节 概述	89
第二节 引桥(或引堤)栈桥式码头与孤立墩式码头	91
第三节 高桩墩台	97
第四节 单点系泊码头	102
思考题	112
参考文献	113
第四章 防波堤工程技术的新发展	114
第一节 概述	114
第二节 直立式(包括混合堤)结构的新形式	114
第三节 直立堤不规则波波浪力的计算方法	120
第四节 直立堤下部基床稳定块重的计算	129
第五节 宽肩台斜坡式防波堤	130
第六节 计算斜坡堤护面块重的新方法	136
第七节 斜向波对斜坡堤的作用	139
第八节 土工织物在防浪结构中的应用	140
第九节 防波堤软土地基加固新方法	144
思考题	145
参考文献	146
第五章 修造船水工建筑物的结构计算	147
第一节 弹性地基梁板的计算理论与方法	147

目 录

第二节 船台滑道基础结构的计算 ..... 156

第三节 干船坞结构的计算 ..... 158

思考题 ..... 167

参考文献 ..... 167

**第六章 港口水工建筑物抗震** ..... 169

第一节 概述 ..... 169

第二节 结构的地震反应及设计反应谱 ..... 174

第三节 地基和岸坡的抗震 ..... 180

第四节 地震作用 ..... 185

第五节 港口码头结构抗震设计要点 ..... 193

思考题 ..... 200

参考文献 ..... 201

**第七章 计算机在港口工程中的应用** ..... 203

第一节 概述 ..... 203

第二节 结构内力计算程序设计 ..... 205

第三节 建筑物稳定性计算程序设计 ..... 212

第四节 港口服务系统仿真 ..... 215

思考题 ..... 222

参考文献 ..... 223

89 ..... 第四卷第 三 章

88 ..... 第一卷

91 ..... 第四卷第 二 章

79 ..... 合 编 附 录

101 ..... 第四卷第 四 章

111 ..... 思考题

113 ..... 参考文献

111 ..... 第四卷第 四 章

114 ..... 第一卷

111 ..... 第四卷第 二 章

121 ..... 第三卷

121 ..... 第四卷

130 ..... 第五卷

131 ..... 第六卷

131 ..... 第七卷

141 ..... 第八卷

144 ..... 第九卷

141 ..... 思考题

141 ..... 参考文献

141 ..... 第五卷

141 ..... 第一卷

# 第一章 港口工程结构可靠度设计

## 第一节 概 述

工程结构设计的主要目的是以最经济的途径来满足结构的安全和使用要求。在结构设计中主要考虑两个方面的内容:

(1) 对结构在各种因素作用下的内在的变化规律应有充分的认识,明确结构为满足各种功能要求所必须的条件。为此,设计者不仅要掌握结构材料的各种力学性能,而且要根据力学原理对结构在各种因素作用下进行结构分析。

(2) 任何结构系统的正常工作都存在着可靠度问题。若所设计的结构在正常作用过程中有相当部分丧失功能而不能使用,则该结构的可靠度是不够的;若在设计上采取保守的措施,盲目增大结构构件的截面,增加结构的可靠度,但从经济上来评价也是不合理的。

结构设计在上述两方面的发展使结构设计方法不断改进。我国港口工程的传统设计已有一套比较齐全的技术规范,如荷载、地质勘察、海港水文、重力式码头、高桩码头、防波堤、地基、桩基、混凝土和钢筋混凝土设计、水运工程水工建筑物抗震设计等,结构的设计基本上是采用以破损阶段概念为特征的定值极限状态法,而钢结构又采用允许应力法。定值极限状态设计法中的安全系数  $K$  和允许应力法中的允许应力  $[R]$  主要都是根据经验确定。而对不同结构,往往有不尽相同的经验,以致各册规范之间、不同结构之间,没有度量可靠度或安全度的统一标准,也难以进行比较。继 1984 年《建筑工程结构设计统一标准》颁布后,1985 年原国家计委同时下达了包括港工标准在内的 5 本工程结构设计统一标准的编制任务。《港口工程结构可靠度设计统一标准》(简称“统一标准”)已于 1992 年颁布,之后又完成了有关港口工程结构设计和施工规范的编写,包括:《港口工程荷载规范》(简称“荷载规范”)、《海港水文规范》、《港口工程混凝土结构设计规范》、《重力式码头设计与施工规范》、《高桩码头设计与施工规范》、《板桩码头设计与施工规范》、《防波堤设计与施工规范》、《港口工程桩基规范》、《地基规范》和《水运工程抗震设计规范》等。基于可靠度理论的新的港口工程结构设计规范已于 1999 年 6 月 1 日开始实施。

### 一、工程结构可靠度概念

#### (1-1) (一) 设计基准期

与传统设计相比,结构可靠度设计强调了设计基准期的概念。作用在结构上的各种荷载是随时间而变动的随机过程,结构的材料性能也随时间发生着变化,因此应该规定结构的使用寿命。设计基准期是按结构预期使用寿命规定的时间参数。《统一标准》规定港工结构设计基准期为 50 年。

应当指出,规定设计基准期是为了明确计算失效概率所必须的时间参数,它与结构的实际使用寿命有一定的联系,但不能将两者等同起来。当结构的使用年限超过设计基准期后,结构



的失效概率将会较设计时的预期值增大,但并不等于结构丧失功能或报废。

## (二) 港口工程结构的功能

工程结构设计的基本目的是使结构在预期的使用期限内能满足设计所预期的各种功能要求。一般来说,港口工程结构必须满足下列四项功能要求:

- (1)能安全承受在使用期和施工期可能出现的各种作用;
- (2)在正常使用和维护下具有合适的工作性能;
- (3)在正常使用和维护下具有足够的耐久性;
- (4)在发生偶然事件情况下,结构仍能保持必须的整体稳定性。

第(1)、(4)项是指承载能力而言,第(2)、(3)项是指正常使用而言。

## (三) 结构的可靠性和可靠度

工程结构四项功能中的(1)、(4)项是指结构的强度、稳定,即所谓的安全性;第(2)项是指结构的适用性;第(3)项是指结构的耐久性。结构的安全性、适用性和耐久性总称为结构的可靠性。

度量结构可靠性的数量指标称为结构可靠度,其定义为: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。

## (四) 极限状态和极限状态方程

目前对极限状态的一般定义是: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。极限状态实质上是结构可靠和失效的界线。

港工《统一标准》将极限状态分为两类:承载能力极限状态和正常使用极限状态。

### 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出现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,即认为超过了承载能力极限状态:

- (1)结构或结构的一部分作为刚体失去平衡;
- (2)结构构件或其连接部位因材料的强度极限被超过而破坏,或因过度的塑性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)。

### 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种规定限值。当结构或结构构件出现下列状态之一时,即认为超过了正常使用极限状态:

- (1)影响正常使用或外观的过大变形;
- (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)影响正常使用或影响耐久性的其它特定状态。

### 3. 极限状态方程

结构的极限状态可用下列极限状态方程来描述

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

式中:  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ——基本变量,通常是指结构上的各种作用、材料性能、几何参数等,均应作为随机变量考虑。

$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ——结构的功能函数。

对于承载能力极限状态,若令  $R$  为结构的抗力,  $S$  为作用综合效应,则结构的功能函数可写成

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1-2)$$

当  $Z = R - S > 0$  时,结构处于可靠状态;

当  $Z = R - S = 0$  时,结构处于极限状态;

当  $Z = R - S < 0$  时,结构处于失效状态。

由于  $R$ 、 $S$  均为随机变量,  $Z$  也为随机变量,“ $Z > 0$ ”、“ $Z = 0$ ”和“ $Z < 0$ ”都是随机事件。结构可靠度的数量指标可由各种状态出现的概率求得。

### (五) 结构可靠度设计的三个水准

70 年代以来,国际上在工程结构设计方法方面的趋向是采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,简称“概率设计法”。国际上将概率设计法按发展阶段和精确程度不同分成三个水准。

水准 I:半概率法。对荷载效应和结构抗力的基本变量部分地进行数理统计分析,并与工程经验相结合引入某些经验系数。我国在工程结构可靠度设计统一标准颁布实施前,结构设计规范基本上属半概率法。

水准 II:近似概率法。以结构的失效概率或可靠指标来度量结构可靠度,并建立了结构可靠度与结构极限状态方程之间的关系。在计算可靠指标时考虑了基本变量的概率分布类型和采用了线性化的近似手段,在截面设计时一般采用分项系数的实用设计表达式。

目前,近似概率法已进入实用阶段,正逐步进入许多国家制订标准规范的基础。我国新颁布的《统一标准》是以近似概率法为基础的。

水准 III:全概率法。对结构各种基本变量分别采用随机变量或随机过程描述,要求对整个结构采用精确的概率分析,求其失效概率。但由于目前对结构的基本变量缺乏足够的统计资料,不论在理论上还是实际应用上,采用全概率法还存在一定的困难,目前尚处于研究阶段。

## 二、“港工规范”的特点

基于可靠度理论的新的港工规范具有以下几个方面的特点。

### 1. 概率极限状态设计

新的港工结构设计规范采用极限状态设计法,但极限状态设计并不是新事物,传统港工结构也是极限状态设计。基于可靠度理论的极限状态设计是概率极限状态设计,而传统设计方法的极限状态设计是定值极限状态设计。可靠度也作为工程结构设计安全度的统一标准,只有概率极限状态设计法才能给出结构的可靠度。因此,定值极限状态不是真正的设计极限状态,概率极限状态才能达到真正的设计极限状态。

新的港工设计规范考虑两种设计极限状态:承载能力极限状态和正常使用极限状态。

### 2. 分项系数设计表达式

结构的概率设计法,严格来说应对结构和荷载等各种基本变量分别采用随机变量或随机过程描述,通过精确的概率分析计算整个结构的可靠度或失效概率。但是,由于目前对结构设计中的基本变量缺乏足够的统计资料,不论在理论上还是实际应用上,精确的可靠度计算还存在一定的困难。新颁布的基于可靠度理论的港工结构规范采用的是近似概率设计法。为与传统设计方法相近,易于为设计人员所接受,采用以分项系数表达的实用设计表达式。分项系数的取值是以概率分析为基础经优化后确定的,本质上体现了可靠度设计的基本精神。

### 3. 作用(或作用效应)组合

在新颁布的港工结构设计规范中,承载能力极限状态有三种作用(或作用效应)组合,即持久组合、短暂组合和偶然组合。传统设计规范也有三种组合,即设计组合、校核组合和特殊组

合。两者间的异同点见本章第二节。

#### 4. 基本变量的取值

在基于可靠度理论的新的港工结构规范中,设计表达式中的基本变量根据不同情况采用不同代表值。作用的主要代表值是标准值,标准值是根据结构不利状态选取在设计基准期内作用最大值的某一分位值,当作用增加,对结构不利时,取较高的分位值,反之取较低分位值。新的港工规范的荷载标准值基本取用以前规范给定的荷载数值。

新规范中采用频遇值和准永久值作为计算正常使用极限状态时的代表值。在以前规范中取荷载的标准值进行变形、裂缝计算,给出的变形、裂缝值偏大。

港口工程结构从定值设计向概率设计过渡,曾经过长期的酝酿,并做了大量的工作。但是,港口工程结构设计的影响因素十分复杂,仅荷载就有数十种之多。根据轻重缓急、区别对待、分期解决的原则,新的规范首先解决了对可靠度影响大、目前又有条件解决的问题,如码头面堆货荷载、门座起重机轮压、波压力和土压力等的统计特性和计算参数。还存在很多问题需开展进一步的工作。

新规范设计方法并不是通过概率分析直接计算结构的失效概率或可靠指标,而是采用以分项系数极限状态设计。其原因,一是为与传统设计方法相近,易于为设计人员所接受;二是目前还不具备进行直接概率极限状态设计的基础。随着统计资料的充实、理论的完善,概率极限状态方法会得到进一步提高。

## 第二节 结构可靠度计算方法

### 一、结构可靠度计算的基本概念

如前所述,概率设计方法按发展阶段和精确程度不同分为三个水准,水准 I 实际上是用随机变量的一阶矩(均值)加以概括,其可靠度分析基本上是基于估计或者说是工程经验判断。水准 II 是用随机变量的前二阶矩(均值和方差)来描述它们的分布特性,估算失效概率或可靠指标,并在运算时采用了线性化的近似手段,所以称为“一次二阶矩法”。水准 III 则是以掌握设计变量的真实分布为依据,精确计算失效概率。本节主要介绍目前国际上已进入实用阶段的水准 II 采用的方法——一次二阶矩法。

#### 1. 失效概率和可靠度

结构的功能函数小于零( $Z < 0$ )的概率称为该结构的失效概率,用  $P_f$  表示。失效概率  $P_f$  原则上可通过多维积分求得

$$P_f = \int_{Z < 0} \cdots \int f_x(x_1, x_2, \cdots, x_n) dx_1, dx_2, \cdots, dx_n \quad (1-3)$$

式中:  $f_x(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ ——随机变量  $x_1, x_2, \cdots, x_n$  的联合概率密度函数。

对于仅包括荷载效应  $S$  和结构抗力  $R$  两个随机变量的情况,则结构承载能力的功能函数为  $Z = R - S$ 。一般情况下,  $R$  和  $S$  为统计独立的随机变量,用  $f_R(r)$  和  $f_S(s)$  分别表示  $R$  和  $S$  的概率密度函数,其分布见图 1-1。图中两曲线的重叠区内,如果  $R < S$ ,则结构失效,用公式表示为  $P_f = P(R < S)$ 。

若已知  $R$  和  $S$  的累积概率分布函数为

$$F_R(r) = \int_{-\infty}^r f_R(r) dr \quad F_S(s) = \int_{-\infty}^s f_S(s) ds$$

则失效概率可用以下公式计算

$$F_f = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(r) f_s(s) ds \quad (1-4)$$

或 
$$F_f = \int_{-\infty}^{\infty} [1 - F_s(S)] f_R(r) dr \quad (1-5)$$

由概率论知  $P(Z < 0) + P(Z \geq 0) = 1$

由此可得失效概率  $P_f$  和可靠度  $P_r$  的互补关系  $P_f + P_r = 1$ 。

如果  $S$  和  $R$  均为正态分布,其均值和标准差分别为  $\mu_S, \mu_R$  和  $\sigma_S, \sigma_R$ ,那么功能函数  $Z$  也是正态随机变量,其均值为  $\mu_z = \mu_R - \mu_S$ ,标准差  $\sigma_z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ 。  $Z$  的概率密度函数为

$$f_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - \mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (1-6)$$

其分布如图 1-2 所示。

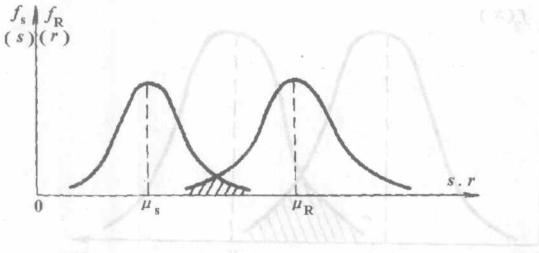


图 1-1

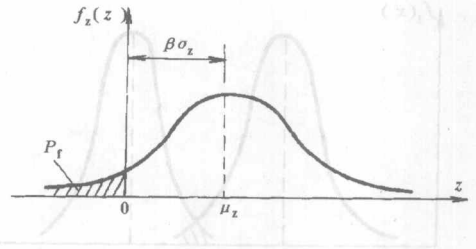


图 1-2

结构的失效概率  $P_f$  就是图中的阴影面积,而非阴影面积即为结构的可靠度  $P_r$ 。

## 2. 可靠指标

如果各设计变量的理论概率分布为已知,失效概率  $P_f$  可由前面给出的公式积分求得。但在实际工程结构中,很难给出设计变量的理论概率分布,通过设计变量概率密度函数积分求失效概率的方法,目前还很难实现。利用概率分布的数学特征:一阶原点矩(均值)和二阶中心矩(方差)近似描述随机变量的分布特征,用简化的概率方法进行结构可靠度计算是个有效途径。该法通过随机变量的均值和标准差求得可靠指标  $\beta$ ,用  $\beta$  来表征结构的可靠度或失效概率。

仍以功能函数  $Z = R - S$  的两个正态变量  $R$  和  $S$  为例,失效概率(见图 1-3)

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_z(z) dz = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z - \mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right] dz \quad (1-7)$$

现把  $Z$  的正态分布  $N(\mu_z, \sigma_z)$  转换为标准正态分布  $N(0, 1)$ ,令  $t = (Z - \mu_z)/\sigma_z$  则有  $d_z = \sigma_z dt$ ,以及  $Z \rightarrow -\infty$  时,  $t \rightarrow -\infty$ ;  $Z = 0$  时,  $t = -\mu_z/\sigma_z$  代入式(1-7),得

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\mu_z/\sigma_z} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \quad (1-8)$$

可见换元后的随机变量  $t$  是一标准正态变量。

$$P_f = \Phi(-\mu_z/\sigma_z) \quad (1-9)$$

其中,  $\Phi(\cdot)$  为标准正态分布变量的概率分布函数。

$$\text{令 } \beta = \mu_z/\sigma_z \quad (1-10)$$

$$\text{则 } P_f = \Phi(-\beta) \quad (1-11)$$

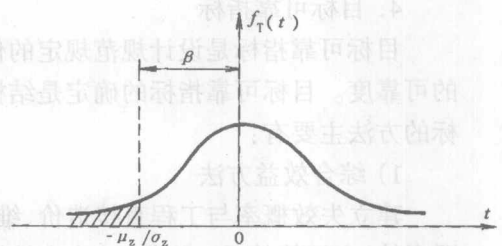


图 1-3

$\beta$  称为可靠性指标,为一无因次系数。可知:

(1)  $\beta$  是失效概率或可靠度的度量。由式(1-11)可知,  $\beta$  越大失效概率  $P_f$  越小。

(2) 由图 1-2 可知,  $\beta$  是从均值点  $\mu_z$  到原点的以标准差  $\sigma_z$  为度量单位的距离。如果  $\sigma_z$  保持为常值,则  $\mu_z$  的正向移动使概率密度曲线向右移,从而减小了尾部面积。可见  $\beta$  增大失效概率减小。由以上分析可知,  $\beta$  可以作为衡量结构可靠度的指标。

### 3. 可靠指标与安全系数的关系

传统设计方法的安全度是用安全系数来反应。设结构抗力和荷载效应用其均值  $\mu_R$  和  $\mu_S$  表示,安全系数  $K$  为  $K = \mu_R / \mu_S$ ,安全系数  $K$  只与  $R$  和  $S$  的均值有关,不能准确反应结构的安全度。例如在图 1-4a)、b) 的概率密度分布曲线中,如果均值  $\mu_{R1} = \mu_{R2}$ ,  $\mu_{S1} = \mu_{S2}$ , 则  $K_1 = \mu_{R1} / \mu_{S1} = K_2 = \mu_{R2} / \mu_{S2}$ , 表明它们的安全度一样。但实际上它们的失效概率(与图中阴影部分的面积有关)却相差很多。图 1-4a) 的失效概率远小于图 1-4b) 的失效概率。

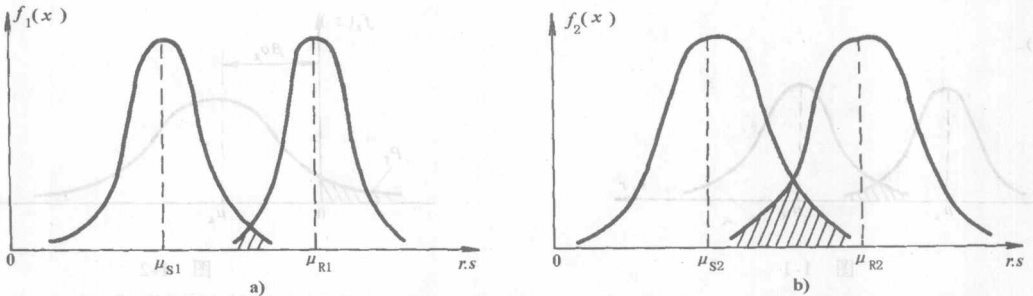


图 1-4

由图 1-4 可知,失效概率  $P_f$  不仅与  $f_R(r)$  和  $f_S(S)$  图形面积中心位置(用各自均值  $\mu_R$  和  $\mu_S$  表示)有关,而且还与它们面积图形的离散程度(可用标准差  $\sigma_R$ 、 $\sigma_S$  或变异系数  $V_R$ 、 $V_S$  表示)有关。安全系数  $K$  没有反应这一特征,而可靠指标  $\beta$  就解决了这个问题。

由两个正态变量导出的可靠指标式(1-10)得

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{\mu_R / \mu_S - 1}{\sqrt{(\mu_R / \mu_S)^2 V_R^2 + V_S^2}} = \frac{K - 1}{\sqrt{K^2 V_R^2 + V_S^2}} \quad (1-12)$$

或

$$K = \frac{1 + \beta \sqrt{V_R^2 + V_S^2 - \beta^2 V_R^2 V_S^2}}{1 - \beta^2 V_R^2} \quad (1-13)$$

### 4. 目标可靠指标

目标可靠指标是设计规范规定的作为设计依据的可靠指标,它表示结构设计所预期达到的可靠度。目标可靠指标的确定是结构可靠度设计需解决的主要问题之一。确定目标可靠指标的方法主要有:

#### 1) 综合效益方法

建立失效概率与工程直接造价、维修费用和投资风险(包括生命财产损失及结构的重要性因素等)之间的关系。显然,减小失效概率,将提高结构的直接造价,而维修费用和投资风险都将降低;增加失效概率,会使结构的直接造价降低,但维修费用和投资风险都将提高。因此,目标可靠指标需经过优化分析确定。

但限于统计资料的缺乏,有些项目的效益指标难以定量给出,目前该方法并未得到实际应用。

## 2) 类比法

参照人们在日常生活中所经历的各种风险(危险率),确定一个为公众所能接受的失效概率,即可靠指标。比如每人每年遇到灾难性事故的可能性为1‰,这是断然不能接受的;如果降到0.1‰,人们仍需加强警惕,避免出现这种风险;如果降至十万分之一,人们仍会予以注意,但关心的程度就不那么大了;如果降至百万分之一,就不怎么为人们所注意了。通过对各种风险水平的统计分析,有人建议结构的年失效概率为 $1.0 \times 10^{-5}$ ,这大致相当于在设计基准期为50年的失效概率为 $5.0 \times 10^{-4}$ ,可靠指标 $\beta = 3.29$ 。

由于对风险水平的接受程度往往因人而异,所以用类比法确定目标可靠指标不宜为人们所接受。

## 3) 校准法

通过对现行设计规范安全度的校核(反演计算)找出隐含于现有结构中相应的可靠指标值,经综合分析和调整,制定今后设计采用的目标可靠指标。这实质上是充分注意到了现行工程建设长期积累的实践经验,继承现行设计规范结构设计安全度水准,认为它在总体上是合理的、可以接受的。

在现阶段,这是一种比较切实可行的确定目标可靠指标的方法,加拿大、美国、欧洲等一些国家和我国均采用此法。

## 二、一次二阶矩方法

通常情况下我们很难准确确定随机变量的概率分布,而随机变量的一阶矩(均值)和二阶矩(方差)较容易得到。因此,只有用一阶矩和二阶矩去求解结构的可靠度。此外,在功能函数 $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为非线性函数的情况下,将其在某点用泰勒级数展开,使之线性化,这种将功能函数线性化,用随机变量的一阶矩和二阶矩计算结构可靠度的方法,称为一次二阶矩方法。

### 1. 可靠指标 $\beta$ 的几何意义

设功能函数 $Z$ 为线性函数

$$Z = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (1-14)$$

式中: $a_0, a_i (i=1, 2, \dots, n)$ ——已知常数。

假设所有基本变量之间都是统计独立的,则 $Z$ 的均值和标准差为

$$\mu_z = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_{x_i} \quad \sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \sigma_{x_i})^2} \quad (1-15)$$

若 $Z$ 的分布为正态分布,则可靠指标 $\beta$ 为

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_{x_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \sigma_{x_i})^2}} \quad (1-16)$$

### 2. 中心点法

设结构的功能函数为  $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$  (1-17)

极限状态方程为  $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$  (1-18)

将功能函数在某点 $x_{0i} (i=1, 2, \dots, n)$ 用泰勒级数展开。为了得到线性方程,近似地只取到一次项,得

$$Z = g(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}) + \sum_{i=1}^n (x_i - x_{0i}) \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i = x_{0i}} \quad (1-19)$$

式中:  $x_{0i} (i=1, 2, \dots, n)$ ——线性化点, 是  $n$  个确定的值。

因此, 式(1-19)表示的功能函数是关于  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  的线性函数。

若将线性化点  $x_{0i}$  取在中心点或均值点  $\mu_{xi}$ , 则功能函数为

$$Z = g(\mu_{x1}, \mu_{x2}, \dots, \mu_{xn}) + \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_{xi}) \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i = \mu_{xi}} \quad (1-20)$$

$Z$  的均值为

$$m_z = g(\mu_{x1}, \mu_{x2}, \dots, \mu_{xn}) \quad (1-21)$$

标准差为

$$\sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i = \mu_{xi}} \cdot \sigma_{xi} \right)^2} \quad (1-22)$$

将  $\mu_z, \sigma_z$  代入式(1-10)即可得可靠指标  $\beta$ 。

上述将功能函数线性化, 线性化点取在中心点或均值点的方法, 称为中心点法, 或称均值一次二阶矩法。中心点法的最大优点是计算简便, 但它存在以下问题:

(1) 该方法没有考虑有关基本变量的分布类型的信息, 而实际上变量的分布类型对结构的可靠性是有影响的;

(2) 对非线性功能函数, 计算误差将随着线性化点  $x_{0i}$  到失效边界的距离的增加而增大, 而中心点法所选的线性化点(均值点)一般在可靠区而不在失效边界上, 往往带来很大误差;

(3) 选择不同的极限状态方程(如以应力和内力表示的方程), 不能得到相同的可靠指标。

### 3. 验算点法或称 JC 法

验算点法是作为国际结构安全度联合委员会(JCSS)的文件附录推荐给土木工程界, 故也称 JC 法。我国《港口工程结构可靠度设计统一标准》以该法作为可靠性校核的基础, 作为对中心点法的改进, 验算点法主要有两个特点。

(1) 当功能函数  $Z$  为非线性时, 不以通过中心点(均值点)的超切平面作为线性近似, 而以通过  $Z=0$  上的某一点  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  的超切平面作为线性近似, 以减少中心点法的误差。

(2) 当基本变量  $x_i$  具有分布类型的信息时, 通过  $x_i$  在  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  处的累积概率分布函数值和概率密度函数值与正态分布相等的条件, 将  $x_i$  变换为当量正态分布随机变量  $x'_i$ , 从而在  $\beta$  中合理反映分布类型的影响。

这个特定点  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  称为验算点。

设功能函数  $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 通过  $U_i = (x_i - \mu_{xi}) / \sigma_{xi}$ , 将  $X$  空间变换到  $U$  空间, 得  $Z = g_1(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 。可靠指标  $\beta$  在几何上就是  $U$  空间内从原点  $M$  (即中心点) 到极限状态超曲面  $Z=0$  的最短距离。在  $Z=0$  上离原点最近的点  $P^*(u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$  即为验算点。

在超曲面  $Z=0$  上通过验算点  $P^*$  的超切平面的方程为

$$Z' = g_1(u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g_1}{\partial u_i} \Big|_{u_i = u_i^*} (u_i - u_i^*)$$

由于  $g_1(u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*) = 0$ , 则以上方程变为  $Z' = \sum_{i=1}^n \frac{\partial g_1}{\partial u_i} \Big|_{u_i = u_i^*} (u_i - u_i^*)$

从原点  $M$  到该超切平面的距离就是可靠指标  $\beta$

$$\beta = \frac{-\sum_{i=1}^n \frac{\partial g_1}{\partial u_i} \Big|_{u_i=u_i^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g_1}{\partial u_i} \Big|_{u_i=u_i^*} \right)^2}} \quad (1-23)$$

$$\alpha_i = \frac{-\frac{\partial g_1}{\partial u_i} \Big|_{u_i=u_i^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g_1}{\partial u_i} \Big|_{u_i=u_i^*} \right)^2}} \quad (1-24)$$

$$\beta = \sum_{i=1}^n \alpha_i u_i^* \quad (1-25)$$

显然,  $\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 = 1$ 。因此,  $\alpha_i$  就是  $\overline{MP^*}$  的方向余弦, 从而可得  $u_i^* = \alpha_i \beta$

将  $U$  空间变换回  $X$  空间, 得

$$x_i^* = \mu_{xi} + \alpha_i \beta \sigma_{xi} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1-26)$$

因为  $\frac{\partial g_1}{\partial u_i} \Big|_{u_i=u_i^*} = \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i=x_i^*} \sigma_{xi}$

所以由式(1-24)得

$$\alpha_i = -\frac{\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i=x_i^*} \sigma_{xi}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i=x_i^*} \sigma_{xi} \right)^2}} \quad (1-27)$$

$\alpha_i$  表示第  $i$  个随机变量对整个标准差的相对影响, 因此称为灵敏系数。

在式(1-26)中, 共有  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  和  $\beta$  即  $n+1$  个未知数,  $n$  个方程, 因此联立求解未知数有困难, 一般采用迭代算法, 其步骤如下:

- (1) 假设一个  $\beta$  值;
- (2) 选取验算点的初值:  $x_i^* = \mu_{xi}, i=1, 2, \dots, n$ ;
- (3) 计算  $\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x_i=x_i^*}$  值;
- (4) 由式(1-27)计算  $\alpha_i$  值;
- (5) 由式(1-26)计算  $x_i^*$  值;
- (6) 重复(3)~(5)步, 直到  $x_i^*$  前后两次差值在允许范围为止;
- (7) 将  $x_i^*$  代入极限状态方程  $g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ , 计算  $g$  值;
- (8) 检验  $g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0$  的条件是否满足, 如不满足, 则由  $\beta_{k+1} = \beta_k - g_k \Delta \beta / \Delta g$  估算新的  $\beta$  值, 重复步骤(3)~(7)的计算, 直到  $g=0$  为止;
- (9) 由  $P_f = \Phi(-\beta)$  计算失效概率。

如果基本变量  $x_i$  为非正态分布, 其均值为  $\mu_{xi}$ , 标准差为  $\sigma_{xi}$ , 概率密度函数为  $f_{xi}(x)$ , 累积概率分布函数为  $F_{xi}(x)$ 。根据验算点处  $f_{xi}(x)$  和  $F_{xi}(x)$  等价条件, 将  $x_i$  变换为当量正态变量  $x'_i$ , 见图 1-5, 求  $x'_i$  的均值  $\mu'_{xi}$  和标准差  $\sigma'_{xi}$ 。

在  $x_i^*$  处,  $x_i$  的累积概率分布函数为  $P (x \leq x_i^*) = F_{xi}(x_i^*)$ 。

$x'_i$  的累积概率分布函数为

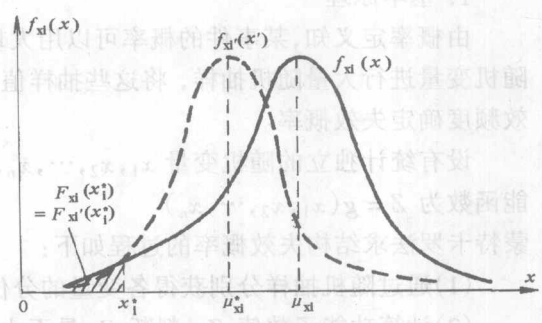


图 1-5



$$P(x' \leq x_i^*) = F_{x_i}(x_i^*) = \Phi\left(\frac{x_i^* - \mu_{x_i'}}{\sigma_{x_i'}}\right)$$

根据在  $x_i^*$  处  $x_i$  与  $x_i'$  的概率密度函数相等的条件,得

$$F_{x_i}(x_i^*) = \Phi\left(\frac{x_i^* - \mu_{x_i'}}{\sigma_{x_i'}}\right) \quad (1-28)$$

在  $x_i^*$  处,  $x_i$  的概率密度函数值为  $f_{x_i}(x_i^*)$ , 代替正态分布变量  $x_i'$  的概率密度函数值为

$$f_{x_i'}(x_i^*) = \frac{dF_{x_i'}(x_i^*)}{dx_i} = \frac{d\Phi\left(\frac{x_i^* - \mu_{x_i'}}{\sigma_{x_i'}}\right)}{dx_i} = \frac{1}{\sigma_{x_i'}} \phi\left(\frac{x_i^* - \mu_{x_i'}}{\sigma_{x_i'}}\right)$$

式中:  $\phi(\cdot)$ ——标准正态分布概率密度函数。

根据在  $x_i^*$  处  $x_i$  和  $x_i'$  的概率密度函数值相等的条件,得

$$f_{x_i}(x_i^*) = \frac{1}{\sigma_{x_i}} \phi\left(\frac{x_i^* - \mu_{x_i'}}{\sigma_{x_i'}}\right) \quad (1-29)$$

由式(1-28)得

$$\frac{x_i^* - \mu_{x_i'}}{\sigma_{x_i'}} = \Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i^*)] \quad (1-30)$$

将式(1-30)代入式(1-29),得

$$f_{x_i}(x_i^*) = \frac{1}{\sigma_{x_i}} \phi[\Phi^{-1}(F_{x_i}(x_i^*))] \quad (1-31)$$

由此可得当正态变量  $x_i'$  的标准差为

$$\sigma_{x_i'} = \frac{\phi[\Phi^{-1}(F_{x_i}(x_i^*))]}{f_{x_i}(x_i^*)} \quad (1-32)$$

由式(1-30)得

$$\mu_{x_i'} = x_i^* - \sigma_{x_i'} \Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i^*)] \quad (1-33)$$

式中:  $\Phi(\cdot)$  和  $\phi(\cdot)$ ——分别为标准正态分布下的累积概率分布函数和概率密度函数。

求出当量正态分布的均值  $\mu_{x_i'}$  和标准差  $\sigma_{x_i'}$  后,可按前述类似的求解步骤计算可靠指标  $\beta$ 。

### 三、蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法(Monte Carlo Method),又称随机抽样技巧法或统计试验法,在目前结构可靠度计算中,它被认为是一种相对精确的方法。随着计算机软硬件环境的不断发展和完善,蒙特卡罗模拟将会成为可用于工程设计的实用技术。

#### 1. 基本原理

由概率定义知,某事件的概率可以用大量试验中该事件发生的频率来估算。因此,对大量随机变量进行大量随机抽样,将这些抽样值一组一组地代入功能函数表达式,根据结构的失效频度确定失效概率。

设有统计独立的随机变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 其对应的概率密度函数分别为  $f_{x_1}, f_{x_2}, \dots, f_{x_n}$ , 功能函数为  $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$

蒙特卡罗法求结构失效概率的过程如下:

(1)通过随机抽样分别获得各变量的分位值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ;

(2)计算功能函数值  $Z_k$ , 判断  $Z_k$  是否小于或等于零;

(3)设抽样次数为  $N$ , 其中  $Z_k \leq 0$  的次数为  $M$ , 则在大量抽样后,结构的失效概率为  $P_f = M/N$ ;