

GANG JIE GOU


# 钢 结 构

(第二版)

曹平周

朱召泉

编著

 科学技术文献出版社

# 钢结构

(第二版)

曹平周 朱召泉 编著

科学技术文献出版社

Scientific and Technical Documents Publishing House

北京

**图书在版编目(CIP)数据**

钢结构/曹平周等编著.-2版.-北京:科学技术文献出版社,2002.11

ISBN 7-5023-3353-3

I. 钢 … II. 曹… III. 钢结构 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 069644 号

出 版 者:科学技术文献出版社

地 址:北京市复兴路 15 号(中央电视台西侧)/100038

图书编务部电话:(010)68514027,(010)68537104(传真)

图书发行部电话:(010)68514035(传真),(010)68514009

邮 购 部 电 话:(010)68515381,(010)68515544-2172

网 址:<http://www.stdph.com>

E-mail:stdph@istic.ac.cn;stdph@public.sti.ac.cn

策 划 编 辑:刘新荣

责 任 编 辑:刘新荣

责 任 校 对:唐 炜

责 任 出 版:刘金来

发 行 者:科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销

印 刷 者:北京国马印刷厂

版 ( 印 ) 次:2002 年 11 月第 2 版第 1 次印刷

开 本:787×1092 16 开

字 数:589 千

印 张:25

印 数:1~5000 册

定 价:38.00 元

© 版权所有 违法必究

购买本社图书,凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换。

(京)新登字 130 号

## 内 容 简 介

《钢结构》(第二版)根据《工程结构可靠度设计统一标准》(GB50153—92)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001)、《建筑结构荷载规范》(GB50009—2001)、《钢结构工程施工质量验收规范》(GB50205—2001)、《建筑结构制图标准》(GB/T50105—2001)、《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99—98)、《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL74—95)、《钢结构设计规范》(GB50017—)送审稿、《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ025—86)、《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS102:98)等和本学科领域的新发展而改写。书中主要描述了土木工程,水利水电工程中的钢结构;同时也阐述了桥涵钢结构。全书共9章:概论,钢结构的材料,钢结构的连接,轴心受力构件,梁,拉弯和压弯构件,钢桁架与门式刚架,平面钢闸门,钢结构的制作,防护与安装等。书中列举了大量的计算例题,章后均有思考题和习题,可供读者学习和参考。

本书可作为高等院校土木工程、水利水电工程、港口航道及海岸工程、农业水利工程等本科专业的钢结构教材,并被相关部门指定为注册工程师考试参考书,还可作为有关设计和施工技术人员的技术参考书。

---

我们所有的努力都是为了使您增长知识和才干

科学技术文献出版社是国家科学技术部所属的综合性出版机构,主要出版医药卫生、农业、教学辅导,以及科技政策、科技管理、信息科学、实用技术等各类图书。

# 前 言

(第二版)

自本书出版以来,钢结构学科又取得了不少新进展。近年来我国相继颁发了《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001)、《建筑结构荷载规范》(GB50009—2001)、《钢结构工程施工质量验收规范》(GB50205—2001)等一系列相关规范,《钢结构设计规范》(GB50017—)和《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB50018—)已基本完成修订工作,不久将会颁布执行。新的设计规范使钢结构的设计和施工等方面发生了很大变化。为了顺应这一形势的发展,我们对本书的原版进行了修订。

第二版吸取了读者对原版的宝贵意见,并聆听了一些专家教授的中肯建议。修订的重点放在内容的更新和充实上。强化基本理论和设计方法,设计原理与最新的科研成果和新颁发及即将要颁发的规范相结合。进一步拓宽了知识面,使其能适应建筑工程、水工结构工程、道路桥梁工程等领域对钢结构的要求。我国已加入 WTO,在钢结构工程中使用国外钢材将会逐年增多,因此在第二章增加了“国外钢材品种和钢号简介”一节。第三章主要结合新规范中新的设计方法作了修订。第四章结合新规范对轴心受力构件稳定计算的内容作了相应修改,并增加了受压薄板屈曲后强度的内容。第五章修改了局部稳定的计算方法,增加了考虑屈曲后强度时梁的承载力计算和支座设计。第六章增加了框架二阶分析理论及设计方法;充实了框架节点设计;增加了埋入式柱脚和外包式柱脚的设计。第七章充实了桁架节点板的设计分析;钢结构门式刚架近年来应用日趋广泛,已成为单层房屋的主要结构形式,因此增加了门式刚架的性能与设计。考虑钢结构企业正朝着集设计、制作与安装一体化的方向发展,增加了钢结构的制作、防护与安装,作为第九章;防腐和防火是钢结构的两大特殊问题,第九章在这两方面均作了较详细地介绍。附录中增加了一些新的钢材种类,如剖分 T 字钢、冷弯薄壁型钢等方面的内容。二版对例题和习题进行了修改和补充。

本书的设计公式主要是结合《钢结构设计规范》(GB50017—)送审稿和《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—95)编写的,因为成稿时《钢结构设计规范》(GB50017—)尚未正式颁布,若书中内容若有不妥之处,以正式颁布的《钢结构设计规范》(GB50017—)为准。

几年来,本书作为土木工程、水利水电工程、港口航道及海岸工程、农业水利工程等本科专业的钢结构教材,得到了广大读者的认可,并有幸被指定为我国注册工程师(港口与航道工程)考试大纲中钢结构方面的考试参考书。

我们希望经过此次修订,能使本书更好地满足钢结构教学的要求,并为从事钢结构工作的广大工程技术人员提供有益的参考。

本书第一、二、四、五、六、七、九章由曹平周教授编写,第三、八章由朱召泉教授编写。在编写过程中,引用了有关单位的资料,在此表示真诚的感谢。

本书的修订难免存在新的不足和谬误,敬请读者批评指正。

曹平周 朱召泉

2002年6月

于河海大学

# 前 言

(第一版)

为了适应钢结构领域的新发展和高等教育拓宽专业面的需要,我们编写了这本钢结构教材。本书着重论述钢结构的基本性能 and 设计原理,也注意介绍有关钢结构实际设计的基本知识和方法。工程结构设计必须遵照有关设计规范,本书以《工程结构可靠度设计统一标准》(GB50153—92)、《钢结构设计规范》(GBJ17—88)、《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99—98)、《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—95)等为依据编写。

为了拓宽学生的专业面,书中论述了土木工程中的普通钢结构和水利水电工程中的水工钢结构方面的内容。全书分为概论、钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件、梁、拉弯和压弯构件、钢桁架、平面钢闸门共八章。为了培养学生分析和解决问题的能力,本书较详尽地论述了各类构件和连接的设计方法,并编入了较多的例题、习题。鉴于目前各高等学校及不同专业的教学时数不统一,教学时可根据具体情况来选择教材内容。

本书第一、二、四、五、六、七章由曹平周编写,第三、八章由朱召泉编写,并相互进行校阅,最后由曹平周总校。

限于编者的水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

曹平周 朱召泉

1998年5月

于河海大学



# 目 录



<b>第一章 概论</b> .....	( 1 )
第一节 钢结构的特点和应用 .....	( 1 )
第二节 钢结构的设计方法 .....	( 4 )
第三节 钢结构的发展概况 .....	( 14 )
思考题 .....	( 16 )
<b>第二章 钢结构的材料</b> .....	( 17 )
第一节 钢结构对所用材料的要求 .....	( 17 )
第二节 钢材的主要机械性能 .....	( 18 )
第三节 影响钢材性能的主要因素 .....	( 20 )
第四节 钢材的疲劳 .....	( 25 )
第五节 钢材的钢种、钢号及选择 .....	( 30 )
第六节 国外钢材品种和钢号简介 .....	( 33 )
思考题 .....	( 35 )
<b>第三章 钢结构的连接</b> .....	( 37 )
第一节 钢结构的连接方法 .....	( 37 )
第二节 焊接方法、焊缝类型和质量级别 .....	( 38 )
第三节 对接焊缝连接的构造和计算 .....	( 43 )
第四节 角焊缝连接的构造和计算 .....	( 47 )
第五节 焊接残余应力和焊接残余变形 .....	( 59 )
第六节 普通螺栓连接的构造和计算 .....	( 63 )
第七节 高强度螺栓连接的性能和计算 .....	( 74 )
思考题 .....	( 80 )
习题 .....	( 81 )
<b>第四章 轴心受力构件</b> .....	( 85 )
第一节 概述 .....	( 85 )
第二节 轴心受力构件的强度和刚度计算 .....	( 86 )



第三节	轴心受压构件的整体稳定 .....	(88)
第四节	轴心受压构件的局部稳定 .....	(102)
第五节	轴心受压构件的设计 .....	(107)
思考题	.....	(119)
习题	.....	(120)
<b>第五章</b>	<b>梁</b> .....	(122)
第一节	概述 .....	(122)
第二节	梁的强度和刚度计算 .....	(124)
第三节	梁的整体稳定 .....	(129)
第四节	梁的局部稳定 .....	(135)
第五节	考虑屈曲后强度时梁的承载力 .....	(144)
第六节	钢梁的设计 .....	(148)
第七节	梁的拼接、连接和支座设计 .....	(161)
思考题	.....	(166)
习题	.....	(167)
<b>第六章</b>	<b>拉弯和压弯构件</b> .....	(169)
第一节	概述 .....	(169)
第二节	拉弯、压弯构件的强度和刚度计算 .....	(172)
第三节	压弯构件的整体稳定 .....	(175)
第四节	实腹式压弯构件的局部稳定 .....	(190)
第五节	压弯构件的截面设计和构造要求 .....	(193)
第六节	框架梁与柱的连接和柱的拼接 .....	(201)
第七节	柱脚设计 .....	(205)
思考题	.....	(219)
习题	.....	(219)
<b>第七章</b>	<b>钢桁架与门式刚架</b> .....	(223)
第一节	概述 .....	(223)
第二节	支撑设计 .....	(228)
第三节	桁架设计 .....	(232)
第四节	门式刚架设计 .....	(251)
思考题	.....	(262)
<b>第八章</b>	<b>平面钢闸门</b> .....	(263)
第一节	概述 .....	(263)

---

第二节 平面钢闸门的组成和结构布置·····	(264)
第三节 平面钢闸门的结构设计·····	(271)
第四节 平面钢闸门的零部件设计·····	(283)
第五节 平面钢闸门的埋设部件·····	(292)
第六节 设计例题——露顶式平面钢闸门设计·····	(296)
思考题·····	(310)
<b>第九章 钢结构的制作、防护与安装</b> ·····	<b>(312)</b>
第一节 钢结构的制作·····	(312)
第二节 钢结构的防护·····	(318)
第三节 钢结构的安装·····	(328)
思考题·····	(330)
附录一 材料的化学和机械性能·····	(332)
附录二 构件的稳定·····	(336)
附录三 型钢和螺栓规格及截面特性·····	(341)
附录四 矩形弹性薄板承受均载的弯应力系数 $k$ ·····	(380)
附录五 钢闸门自重估算公式·····	(382)
附录六 材料的摩擦系数·····	(383)
附录七 轴套的容许应力和混凝土的容许应力·····	(384)
参考文献·····	(385)

# 第一章 概 论

## 第一节 钢结构的特点和应用

### 一、钢结构的特点

钢结构是用钢材制造而成的工程结构。通常它采用型钢、钢板加工制造而成。但在有些钢结构中,采用了钢索来作为受拉构件。钢结构是土木工程的主要结构形式之一。钢结构与钢筋混凝土结构、砌体结构等都属于按材料划分的工程结构的不同分支。钢结构与其他结构相比,具有下列特点:

#### 1. 可靠性高

钢材在钢厂生产时,整个过程可严格控制,质量比较稳定,性能可靠。钢材组织均匀,接近于各向同性匀质体;钢材的物理力学特性与工程力学对材料性能所作的基本假定符合较好;钢结构的实际工作性能比较符合目前采用的理论计算结果,计算结果较可靠。所以说钢结构的可靠性高。

#### 2. 材料的强度高,钢结构自重轻

与混凝土、砖石材料相比,虽然钢材的重力密度大,但它的强度和弹性模量较高,而且强度与重力密度之比也高得多。在同样的受力条件下,钢结构构件的截面积要小得多,结构的自重轻。以常见的 24 m 跨度厂房屋架为例,当承受相同的荷载时每榀钢屋架的重量为 2.1~2.7 t,而预应力钢筋混凝土屋架的重量为 6.4~11.3 t,后者为前者的 3~4 倍。若采用冷弯薄壁型钢屋架,其自重接近钢筋混凝土屋架的 1/10。钢结构自重轻,便于运输和安装;可减轻基础的负荷,降低地基和基础部分的造价。

#### 3. 钢材的塑性和韧性好

钢材的塑性好,钢结构在一般条件下不会因超载等而突然断裂。破坏前一般都会产生显著的变形,易于被发现,可及时采取补救措施,避免重大事故发生。钢材的韧性好,钢结构对动力荷载的适应性强,具有良好的吸能能力,抗震性能优越。

#### 4. 钢结构制造简便,施工工期短

钢结构一般在专业工厂制造,易实现机械化,生产效率和产品精度高,质量易于保证,是工程结构中工业化程度最高的一种结构。构件制造完成后,运至施工现场拼装成结构。拼装可采用安装方便的螺栓连接,有时还可在地面拼装成较大的单元,再进行吊装。施工工期短,可尽快发挥投资的经济效益。我国已建成的某 240 m×315 m 全钢结构厂房,建筑面积达 7.6 万平方米,其结构安装仅用了 98 天。由于钢结构具有连接的特性,故易于加固、改建和拆迁。

### 5. 钢结构密闭性好

钢结构采用焊接连接可制成水密性和气密性较好的常压和高压容器结构、管道等。

### 6. 钢材的耐锈蚀性差

在没有腐蚀性介质的一般环境中,普通钢材制成的钢结构经除锈后再涂上合格的防锈涂料,锈蚀问题并不严重。但在潮湿和有腐蚀性介质的环境中,钢结构容易锈蚀,需定期维护,增加了维护费用。目前国内外正在发展各种高性能的涂料和抗锈蚀性能良好的耐大气腐蚀钢,并用于工程结构,钢结构耐锈蚀性差的问题有望得到解决。

### 7. 钢结构耐热但不耐火

当钢材受热温度在 200℃ 以内时,其主要性能变化很小,具有较好的耐热性能。但是,当温度超过 200℃ 后,材料性能变化较大,强度随温度升高而下降,温度达 600℃ 以上时,其承载力几乎完全丧失。所以说钢材不耐火。当温度在 250℃ 左右时,钢材的塑性和韧性降低,破坏时常呈脆性断裂。考虑一定的安全储备,当结构表面长期受辐射热的温度大于 150℃ 时,需加隔热防护层。当有防火要求时,要采取防火措施,如在钢结构外面包混凝土或其它防火材料,或在构件表面喷涂防火涂料。我国已生产一种有机钛耐高温漆,耐高温 600℃ ± 10℃ 达 24 h 之久。我国武汉钢铁集团已生产出高性能耐火耐候钢,在 1080℃ 高温下 2.5 h,仍保持高强度。钢结构耐火性能差的问题,正在加速改进中。

### 8. 钢材在低温时脆性增大。

## 二、钢结构的应用范围

根据钢结构的特点,应注意扬长避短,合理使用钢结构。在土木工程和水利水电工程及桥涵工程等中,钢结构的主要应用范围如下:

### 1. 大跨度结构

随着结构跨度增大,结构自重在全荷载中所占的比重也就越大,减轻自重可获得明显的经济效益。对于大跨度结构,钢结构重量轻的优点显得特别突出。我国上海的可容纳 8 万人体育馆是一平面为椭圆形的建筑,采用了由径向悬挑桁架和环向桁架组成的空间钢屋盖结构。长轴为 288.4 m,短轴为 274.4 m,屋盖最大悬挑跨度达 73.5 m。水利枢纽工程中的垂直升船机的行车大梁,不仅跨度大,而且承受荷载也大,通常采用钢结构。

中、大跨度桥梁采用钢结构越来越多。1999 年造成的江阴长江大桥采用钢箱梁悬索桥,主跨达 1385m。2001 年建成的南京长江二桥南汉主桥采用钢箱梁斜拉桥,主跨达 628m。

### 2. 高层建筑

高层建筑已成为现代化城市的一个标志。钢材强度高和钢结构重量轻的特点对高层建筑具有重要意义。强度高则构件截面尺寸小,可提高有效使用面积。重量轻可大大减轻构件、基础和地基所承受的荷载,降低基础工程等的造价。当今世界上最高的 50 幢建筑中,钢结构和钢-混凝土混合结构占 80% 以上。1974 年建成的纽约西尔斯大厦,共 110 层,总高度达 443 m,为全钢结构建筑。1996 年建成的吉隆坡石油大厦有 88 层,总高度达 450 m,采用的是钢-混凝土混合结构。近年来,我国的高层建筑钢结构如雨后春笋般拔地而起。1997 建成的上海金茂大厦,为 88 层,总高度为 420.5 m。

### 3. 工业建筑

当工业建筑的跨度和柱距较大,或者设有大吨位吊车,结构需承受大的动力荷载时,往往部分或全部采用钢结构。为了缩短施工工期,尽快发挥投资效益,近年来我国的普通工业建筑也大量采用了钢结构。

### 4. 轻型结构

称使用荷载较小或跨度不大的结构为轻型结构。自重是这类结构的主要荷载。包括轻型门式刚架房屋钢结构、冷弯薄壁型钢结构和钢管结构,还有薄钢板做成的折板结构和拱形波纹屋盖结构。后两种型式是把围护与承重结构合二为一的钢结构,成为一种新型的轻钢结构体系。轻型钢结构已广泛用于仓库、办公室、工业厂房及体育场馆等公共设施,并向住宅楼和别墅发展。

### 5. 高耸结构

如塔架、桅杆、烟囱等,它们的高度大,构件的横截面尺寸较小,风荷载和地震常常起主要作用,自重对结构的影响较大,常采用钢结构。336 m 高的黑龙江电视塔是我国目前最高的钢结构多功能电视塔。

### 6. 活动式结构

如水工钢闸门、升船机等,可充分发挥钢结构重量轻的特点,降低启闭设备的造价和运转所耗费的动力。我国已建成的葛洲坝水利工程中的 2 号船闸为单级,采用了人字钢闸门,闸门口净宽 34 m,水头高 27 m,门高 32.6 m,每扇门宽 20.34 m,重量达 500 t。我国正在兴建的三峡水利枢纽工程的永久船闸采用双线五级连续梯级船闸,共设有 12 道人字门,闸门口净宽 34 m,门高近 40 m,共采用 24 扇门,每扇门重达 820 多吨。无论是体积还是重量,在世界上都无先例,堪称“天下第一门”。闸门已于 2002 年 8 月完成安装。三峡工程的升船机承船厢有效尺寸为 120 m×18 m×3.5 m,通航净空 18 m,升降速度 0.2 m/s,运行加速度  $\pm 0.1 \text{ m/s}^2$ ,最大提升高度 113 m,最大提升重量达 11 800 t,设计采用钢结构。

### 7. 可拆卸或移动的结构

如施工用的临时建筑、钢栈桥、流动式展览馆、移动式平台等,可发挥钢结构重量轻,便于运输和安装方便的优点。加拿大已建成 120 多万吨重、可容纳 5 000 多人工作的海上采油平台。

### 8. 容器和大直径管道

如贮液(气)罐、输(油、气、原料)管道、水工压力管道等。三峡水利枢纽工程中的发电机组采用的压力钢管内径达 12.4 m,钢管壁厚达 60 mm。

### 9. 抗震要求高的结构。

### 10. 特种结构

主要有钢水塔、钢烟囱(如上海宝钢烧结厂钢烟囱高达 200 多米)、纪念性建筑(如北京的中华世纪坛)、城市大型雕塑等。

11. 急需早日交付使用的工程或运输条件差的工程。可发挥钢结构施工工期短和重量轻便于运输的特点。

综上所述,钢结构是在各种工程中广泛应用的一种重要的结构形式。钢材已经被认为是

可以可持续发展的材料,随着我国经济建设的发展和钢产量的提高,钢结构将会发挥日益重要的作用,有很好的应用发展前景。

## 第二节 钢结构的设计方法

### 一、结构设计的目的

任何结构都是为了完成所要求的某些功能而设计的。工程结构必须具备下列功能:

(1)安全性 结构在正常施工和正常使用条件下,承受可能出现的各种作用的能力,以及在设计规定的偶然事件发生时和发生后,仍保持必需的整体稳定性的能力。

(2)适用性 结构在正常使用条件下,满足预定使用要求的能力。

(3)耐久性 结构在正常维护条件下,随时间变化而仍能满足预定功能要求的能力。

结构的安全性、适用性、耐久性总称为结构的可靠性。结构设计(计算)的目的是在满足可靠性要求的前提下,保证所设计的结构和结构构件在施工和工作过程中,做到技术先进、经济合理、安全适用,并确保质量。要实现这一目的,必须借助于合理的设计方法。

### 二、设计方法

#### 1. 影响结构可靠性的因素

以  $S$  表示荷载效应,指荷载、温度变化、基础不均匀沉降、地震等对结构或构件作用引起的结构或构件的内力、变形等。 $R$  表示结构的抗力,指结构或构件承受荷载效应的能力,如承载力、刚度等。对于一般的工程结构,影响结构可靠性的因素可以归纳为荷载效应和结构抗力两个基本变量。那么

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

$Z$  为表示结构完成预定功能状态的函数,简称功能函数。当  $Z > 0$  时,结构能满足预定功能的要求,处于可靠状态;当  $Z < 0$  时,结构不能实现预定功能,处于失效状态;当  $Z = 0$  时,结构处于可靠与失效的临界状态,一旦超过这一状态,结构将不再能满足设计要求。因此也称之为极限状态。影响  $S$  的主要因素是各种作用的取值,而各种作用并非确定值,都是随机变量,有的还是与时间有关的随机过程。影响  $R$  的主要因素有结构材料的力学性能、结构的几何参数和抗力的计算模式等,它们也都是随机变量。例如,钢厂提供的材料,其性能不可能没有差异;在制作和安装中,结构的尺寸不可能没有误差;计算抗力所采用的基本假设和方法也不可能完全精确。随机性因素的量值是不确定的,但却服从概率和统计规律,采用概率理论处理随机变量是最适宜的方法。在我国的国家标准《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153)中,明确指出“工程结构设计宜采用分项系数表达的以概率理论为基础的极限状态设计方法”。简称概率极限状态设计法。

#### 2. 概率极限状态设计法

结构设计应考虑下列两种极限状态:

(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)。

(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。

为了定量地描述结构的可靠性,需引入可靠度的概念。结构可靠度定义为“结构在设计使用年限内,在规定的条件下,完成预定功能的概率”。设计使用年限是指“设计规定的结构和结构构件不需进行大修即可按其预定目的使用的时期。”设计使用年限应按表 1-1 采用。超过设计使用年限,结构虽仍然可能继续使用,但其可靠概率将有所减小。规定的条件是指结构必须满足正常的设计、正常施工、正常使用和正常维护条件。以  $P_r$  和  $P_f$  分别表示结构的可靠度和失效概率,则有

表 1-1 设计使用年限分类

类别	设计使用年限(年)	示 例
1	5	临时性结构
2	25	易于替换的结构构件
3	50	普通房屋和构筑物
4	100	纪念性建筑和特别重要的结构

$$\left. \begin{aligned} P_f &= P(Z < 0) \\ P_r &= P(Z \geq 0) = 1 - P_f \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

可见结构可靠度的计算可以转换为结构失效概率的计算。由于结构失效概率的计算涉及的基本变量具有不定性,作用在结构上的荷载潜在着出现高值的可能性,材料性能也潜在着出现低值的可能性,也就无法保证所设计的结构绝对可靠(失效概率为零)。当结构的失效概率小到某一公认的、大家可以接受的程度,则认为该结构是安全可靠的,即可靠性满足要求。

图 1-1 所示功能函数  $Z$  的概率密度  $f(Z)$  曲线,失效概率可用图中的阴影区面积来表示,计算公式为

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f(Z) dZ \quad (1-3)$$

由于目前尚难求出  $Z$  的理论概率分布,难以用积分法求得结构的失效概率,因此,必须采用简化方法。由图 1-1 可见阴影区的面积与  $Z$  的平均值  $\mu_Z$  和标准差  $\sigma_Z$  的大小有关。增大  $\mu_Z$ , 曲线右移,阴影

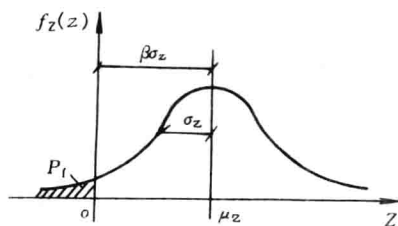


图 1-1  $Z$  的概率密度曲线



区的面积将减小;减小  $\sigma_Z$ , 曲线将变高变窄, 阴影区的面积也将减小。现将曲线的对称轴至纵轴的距离表示成  $\sigma_Z$  的倍数, 即令

$$\beta = \mu_Z / \sigma_Z \quad (1-4)$$

$\beta$  大, 则失效概率就小。故  $\beta$  和失效概率一样, 可作为衡量结构可靠度的一个指标, 称为可靠指标。

设  $S$  和  $R$  服从正态分布, 则  $Z$  也服从正态分布。可知

$$\left. \begin{aligned} \mu_Z &= \mu_R - \mu_S \\ \sigma_Z &= \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中  $\mu_R, \sigma_R$ —— $R$  的平均值和标准差;  
 $\mu_S, \sigma_S$ —— $S$  的平均值和标准差。

由于  $\sigma_Z$  为正值, 失效概率可写为

$$P_f = P(Z < 0) = P\left(\frac{Z}{\sigma_Z} < 0\right) = P\left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} < -\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (1-6)$$

因为  $\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}$  服从标准正态分布, 用  $\phi(\cdot)$  表示标准正态分布函数, 则有

$$P_f = \phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right)$$

即

$$P_f = \phi(-\beta) \quad (1-7)$$

可见  $\beta$  和  $P_f$  具有数值上的一一对应关系。已知  $\beta$  后即可由标准正态分布函数值表中查得  $P_f$ 。确定  $\beta$  并不要求知道  $S$  和  $R$  得分布, 只要知道它们的平均值和标准差, 就可由式(1-5)和式(1-4)式算得  $\beta$  值。

当  $S$  和  $R$  不服从正态分布时, 可作当量正态变换, 求出其当量正态分布的平均值和标准差后, 就可按正态随机变量一样对待。

由于上述的  $\beta$  值计算避开了  $Z$  的全分布推求, 只采用分布的特征值—一阶原点矩(平均值)  $\mu_Z$  和二阶中心矩(方差)  $\sigma_Z$  来表示, 其中最高阶为二; 且把影响结构满足功能要求的各个随机变量归纳和简化为两个基本变量  $S$  和  $R$ , 并遵循线性关系(一次式), 所以称这种方法为考虑基本变量概率分布类型的一次二阶矩极限状态设计方法。这种方法在结构可靠度分析中还存在一定近似性, 故也称为近似概率极限状态设计法。

结构设计应依一预先规定的可靠指标作为依据, 称其为目标可靠指标, 也称为设计可靠指标。因为设计可靠指标的选择直接与结构造价、维修费用以及失效后果等有关, 失效后果不仅涉及生命财产的损失, 有时还会产生严重的社会影响, 所以是制定设计规范的一个重要问题。从理论上说应根据结构构件的重要性、破坏性质及失效后果, 以优化方法确定。但实际上这些因素目前还难以找到合理的定量分析方法。因此, 一般是通过对原有规范作反演计算, 找出隐含在现有工程结构中相应的可靠指标, 经过综合分析后, 确定今后设计结构时采用的目标可靠指标。这种方法的实质是从整体上继承现有的可靠度水准, 是一种稳妥可行的方法, 这种方法称为校准法。不同的工程结构, 如建筑结构与港口工程结构, 具有不同的目标可靠指标。对于承载能力极限状态, 《建筑结构设计统一标准》(GB 50068—2001)规定的结构构件的可靠指标

$\beta$  值不应小于表 1-2 中的值,与  $\beta$  值相应的失效概率  $P_f$  也在表 1-2 中给出。

表 1-2 结构构件承载能力极限状态设计时采用的  $\beta$  (及  $P_f$ ) 值

构件类型	安 全 等 级		
	一 级	二 级	三 级
延性破坏	3.7( $1.08 \times 10^{-5}$ )	3.2( $6.87 \times 10^{-4}$ )	2.7( $3.47 \times 10^{-3}$ )
脆性破坏	4.2( $1.34 \times 10^{-5}$ )	3.7( $1.08 \times 10^{-5}$ )	3.2( $6.87 \times 10^{-4}$ )

注:当承受偶然作用时,结构构件的可靠指标应符合专门规范的规定

表 1-2 中提到的结构安全等级,是根据结构破坏可能产生的后果(危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等)的严重性来划分的。依破坏后果很严重、严重或不严重,划分为一、二或三级。重要的工业与民用建筑为一级,如影剧院、体育馆及高层建筑;一般的工业与民用建筑为二级;次要的建筑物为三级。对特殊的建筑物,其安全等级应见专门规定。建筑物中各类结构构件的安全等级,宜与整个结构的安全等级相同。对其中部分结构构件的安全等级可进行调整,但不得低于三级。延性破坏指结构或构件在破坏前有明显变形或其他预兆的破坏类型,也称为塑性破坏;脆性破坏指结构或构件在破坏前无明显变形或其他预兆的破坏类型。

钢结构的连接是以破坏强度而不是以屈服作为承载能力的极限状态,其可靠指标  $\beta$  值应比构件高,一般可取 4.5。对于正常使用极限状态设计时采用的  $\beta$  值,应根据构件的特点和工程经验确定,一般可取  $\beta = 1.0 \sim 2.0$ 。

直接使用给定的可靠指标进行结构设计,由于某些与设计有关的统计参数还不容易求得,且计算繁复,不便于设计应用。《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—92)指出,采用将一次二阶矩设计方法公式等效地转化为以“分项系数表达的概率极限状态设计表达式”。分项系数是按照目标可靠指标  $\beta$  并考虑工程经验确定的,因而计算结果能满足可靠度的要求。采用的设计表达式使结构设计仍可按传统的方式进行,符合设计人员的习惯,使用比较方便。

《钢结构设计规范》(GB 50017—)对于承载能力极限状态采用应力表达式。抗力采用钢材的强度设计值  $f$ ,其值为钢材的屈服强度标准值  $f_y$  除以抗力分项系数  $\gamma_R$ 。为了计算简便,取  $\gamma_R$  为定值,应使得所设计的构件的实际  $\beta$  值与目标可靠指标的偏差最小。经分析,对于 Q235 钢,取  $\gamma_R = 1.087$ ;对于 Q345(16Mn)钢和 Q390(15MnV)钢及 Q420(15Mn Vn)钢,取  $\gamma_R = 1.111$ 。按照承载能力极限状态设计钢结构时,应考虑荷载效应的基本组合(可变荷载为主的组合和永久荷载为主的组合),必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合。

### 1. 基本组合

(1)对于基本组合,应按下列极限状态设计表达式中最不利值确定

$$\gamma_0(\gamma_G \sigma_{Gk} + \gamma_{Q1} \sigma_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} \sigma_{Qik}) \leq f \quad (1-8)$$

$$\gamma_0(\gamma_G \sigma_{Gk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} \sigma_{Qik}) \leq f \quad (1-9)$$

式中  $\gamma_0$ ——结构重要性系数,对于安全等级为一级或设计使用年限为 100 年及以上者,不应小于 1.1;对于安全等级为二级或设计使用年限为 50 年的结构构件,不应小于