



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GANGJIEGOU

# 钢结构

(第三版)

曹平周 朱召泉 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一·五”  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYI

TU391/1=2

2008

GANGJIEGOU  
**钢结构**

(第三版)

编 著 曹平周 朱召泉  
主 审 石永久 童根树



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

Steel  
Structure





## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分九章，主要内容为概论，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，单层房屋钢结构，平面钢闸门，钢结构的制作、防护与安装等。书中包括了土木工程中的钢结构与水利水电工程中的水工钢结构方面的内容，列举了较多的计算例题、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、农业水利工程等专业的本科教材，并作为我国“注册土木工程师（港口与航道工程）专业考试大纲”中钢结构方面的参考书，还可作为有关设计和施工技术人员的技术参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构 / 曹平周, 朱召泉编著. —3 版. —北京: 中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-6698-2

I. 钢… II. ①曹…②朱… III. 钢结构—高等学校—教材 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 011036 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

1999 年 10 月第一版

2008 年 2 月第三版 2008 年 2 月北京第五次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.5 印张 599 千字 1 插页

定价 38.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

为了适应钢结构领域的新发展和社会对钢结构教学的新要求,吸取读者对原书第二版的珍贵意见,并聆取一些专家教授的中肯建议,编写了《钢结构》(第三版)。本次编写着重论述钢结构的基本性能 and 设计原理,强化基本理论和设计方法,将设计原理与最新的科研成果和新颁发的规范相结合,也介绍了有关钢结构工程设计的基本知识和方法。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,对钢结构的制作、防护与安装作了介绍。本书以现行《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—1992)、《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)、《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—1998)、《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》(CECS 102:2002)、《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—1995)、《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)、《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205—2001)等为依据编写。

全书共分九章,主要内容为概论,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,单层房屋钢结构,平面钢闸门,钢结构的制作、防护与安装等。书中包括了土木工程中的钢结构与水利水电工程中的水工钢结构方面的内容,列举了较多的计算例题、思考题和习题,可供读者学习和参考。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、九章及附录由曹平周教授编写,第三、八章由朱召泉教授编写。全书由清华大学石永久教授、浙江大学童根树教授主审。

本书可作为土木工程、水利水电工程、港口航道及海岸工程、农业水利工程、工程力学等专业的本科教材,并作为我国“注册土木工程师(港口与航道工程)专业考试大纲”中钢结构方面的参考书,还可作为有关设计和施工技术人员的技术参考书。编者希望经过这次修订后,本书能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。

本书已列入江苏省高等学校精品教材建设项目,在编写过程中得到了江苏省教育厅和河海大学的大力支持,在书中引用了有关单位的资料,在此深表感谢。

本书难免存在不妥之处,敬请读者和专家不吝指正。

曹平周 朱召泉

2007年12月于河海大学

# 目 录

## 前言

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <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 .....       | 3   |
| 第三节 钢结构的发展概况 .....       | 14  |
| 思考题 .....                | 15  |
| <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 .....          | 24  |
| 第五节 钢材的钢种、钢号及选择 .....    | 29  |
| 第六节 国外钢材品种和钢号简介 .....    | 33  |
| 思考题 .....                | 35  |
| 习题 .....                 | 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 .....   | 42  |
| 第四节 角焊缝连接的构造和计算 .....    | 46  |
| 第五节 焊接残余应力和焊接残余变形 .....  | 57  |
| 第六节 普通螺栓连接的构造和计算 .....   | 61  |
| 第七节 高强度螺栓连接的性能和计算 .....  | 71  |
| 思考题 .....                | 77  |
| 习题 .....                 | 78  |
| <b>第四章 轴心受力构件</b> .....  | 82  |
| 第一节 概述 .....             | 82  |
| 第二节 轴心受力构件的强度和刚度计算 ..... | 83  |
| 第三节 轴心受压构件的整体稳定 .....    | 86  |
| 第四节 轴心受压构件的局部稳定 .....    | 98  |
| 第五节 轴心受压构件的设计 .....      | 104 |
| 思考题 .....                | 118 |
| 习题 .....                 | 118 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| <b>第五章 梁</b>            | 120 |
| 第一节 概述                  | 120 |
| 第二节 梁的强度和刚度计算           | 121 |
| 第三节 梁的整体稳定              | 126 |
| 第四节 梁的局部稳定              | 132 |
| 第五节 组合梁考虑腹板屈曲后强度的计算     | 142 |
| 第六节 钢梁的设计               | 146 |
| 第七节 梁的拼接、连接和支座设计        | 159 |
| 思考题                     | 165 |
| 习题                      | 165 |
| <b>第六章 拉弯和压弯构件</b>      | 168 |
| 第一节 概述                  | 168 |
| 第二节 拉弯、压弯构件的强度和刚度计算     | 170 |
| 第三节 压弯构件的整体稳定性          | 172 |
| 第四节 实腹式压弯构件的局部稳定性       | 183 |
| 第五节 压弯构件的截面设计和构造要求      | 186 |
| 第六节 梁与柱的连接和构件的拼接        | 192 |
| 第七节 柱脚设计                | 196 |
| 思考题                     | 211 |
| 习题                      | 211 |
| <b>第七章 单层房屋钢结构</b>      | 214 |
| 第一节 概述                  | 214 |
| 第二节 重钢结构厂房结构设计          | 216 |
| 第三节 门式刚架轻型房屋钢结构设计       | 245 |
| 思考题                     | 266 |
| <b>第八章 平面钢闸门</b>        | 267 |
| 第一节 概述                  | 267 |
| 第二节 平面钢闸门的组成和结构布置       | 268 |
| 第三节 平面钢闸门的结构设计          | 274 |
| 第四节 平面钢闸门的零部件设计         | 285 |
| 第五节 平面钢闸门的埋设部件          | 294 |
| 第六节 设计例题——露顶式平面钢闸门设计    | 297 |
| 思考题                     | 312 |
| <b>第九章 钢结构的制作、防护与安装</b> | 313 |
| 第一节 钢结构的制作              | 313 |
| 第二节 钢结构的防护              | 318 |
| 第三节 钢结构的安装              | 326 |
| 思考题                     | 328 |
| <b>附录一 钢材的化学和机械性能</b>   | 330 |

|      |                      |     |
|------|----------------------|-----|
| 附录二  | 构件的稳定                | 333 |
| 附录三  | 型钢和螺栓规格及截面特性         | 338 |
| 附录四  | 矩形弹性薄板承受均载的弯应力系数 $k$ | 378 |
| 附录五  | 钢闸门自重估算公式            | 380 |
| 附录六  | 材料的摩擦系数              | 381 |
| 附录七  | 轴套的容许应力及混凝土的容许应力     | 382 |
| 参考文献 |                      | 383 |

## 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,通常由型钢、钢板、钢索等材料加工,采用焊接、螺栓等连接方式而形成不同的结构形式。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。钢结构与其它结构相比,具有下列特点:

(1) 可靠性高。钢结构的材料性能可靠性高,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;钢结构的设计计算结果可靠性高,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,计算结果可靠;钢结构制作与安装质量可靠,钢构件一般在专业工厂制作,成品精度高,采用现场安装,施工质量易于保证。

(2) 材料的强度高,钢结构自重轻。钢材与混凝土、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及强度与重力密度之比要高得多。在同样的受力条件下,钢结构构件的截面积要小得多,材料用量少。结构的自重轻,便于运输和安装;基础的负荷减小,可降低地基与基础部分的造价。

(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) 钢结构制作与安装工业化程度高,施工周期短。钢结构一般在专业工厂制作,易实现机械化,生产效率和产品精度高,是工程结构中工业化程度最高的结构。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,再行吊装。施工周期短,可尽快发挥投资的经济效益。钢结构由于连接的特性,使其易于加固、改建和拆迁。

(5) 钢结构密闭性好。钢结构采用焊接连接时可制成水密性和气密性较好的常压和高压容器结构和管道。

(6) 普通钢材的耐锈蚀性差。在没有腐蚀性介质的一般环境中,钢结构经除锈后再涂上合格的防锈涂料后,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。目前国内外正在开发各种高性能防腐涂料和抗锈蚀性能良好的耐大气腐蚀钢,并用于工程结构,较好地解决了钢结构耐锈蚀性差的问题。2005年10月建成通车的南京长江三桥采用的涂料能保证50年不生锈。

(7) 普通钢材耐热但不耐火。普通钢材受热温度在 $200^{\circ}\text{C}$ 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 $200^{\circ}\text{C}$ 时,材料性能变化较大,强度随温度升



高而下降;当温度达 $600^{\circ}\text{C}$ 时屈服强度不足常温时的 $1/3$ ;温度继续升高时,钢材的承载力几乎完全丧失,所以钢材不耐火。当温度在 $250^{\circ}\text{C}$ 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温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ 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。我国生产的有机钛耐高温漆,耐高温 $600^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 可达24h。采用耐火钢也是解决钢结构不耐火的一种方法,我国武汉钢铁集团生产出的高性能耐火耐候钢,在 $1080^{\circ}\text{C}$ 高温下2.5h仍然保持较高强度。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

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

### 1. 大跨度结构

对于大跨度结构,随着结构跨度增大,结构自重在全荷载中所占比重也就越大,减轻自重可获得明显的经济效益。钢结构重量轻,已成为大跨度结构的主要结构形式。我国的上海体育馆可容纳8万人,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马鞍型钢屋盖结构。长轴为288.4m,短轴为274.4m,屋盖最大悬挑跨度达73.5m。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。

越来越多的大跨度桥梁采用钢结构,2005年10月建成通车的南京长江三桥是国内第一座钢塔(高215m)钢箱梁桥面斜拉桥,主桥跨径648m,也是世界上第一座弧线形斜拉桥。2005年4月通车的润扬大桥的钢箱梁桥面悬索桥跨径1490m,为中国跨度第一的悬索桥。2007年6月18日主跨长1080m的钢箱梁桥面斜拉桥——苏通长江大桥合龙,为当今世界跨度第一的斜拉桥。

### 2. 高层建筑

高层建筑已成为现代化城市的一个标志。钢结构重量轻和抗震性能好的特点对高层建筑具有重要意义。钢材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。目前世界第一高楼为508m高的台北101大楼(其中天线60m),地上101层,采用巨型钢框架结构。我国大陆第一高楼为1997年建成的上海金茂大厦,为88层,总高420.5m。与它毗邻在建的上海环球金融中心101层492m高。重建的美国纽约世贸中心高度达541m。

### 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。为了尽快发挥投资效益,要求缩短厂房建设周期,近年来我国的普通工业建筑大量采用了钢结构。

### 4. 轻型结构

自重是使用荷载较小或跨度不大结构的主要荷载,常采用冷弯薄壁型钢或轻型钢制成轻型钢结构。主要包括轻型门式刚架房屋钢结构、冷弯薄壁型钢结构、钢管结构和拱形波纹屋盖结构。轻型钢结构已广泛用于仓库、办公楼、工业厂房、住宅、体育馆

等公共设施。

#### 5. 高耸结构

高耸结构主要有塔架和桅杆等，它们的高度大，横截面尺寸较小，风荷载和地震作用常起主要作用，自重对结构的影响较大，常采用钢结构。上海东方明珠电视塔高度达 468m。在建的广州新电视塔高 450m，若加上 160m 的天线，总高度达 610m，将超越目前世界第一高的加拿大国家电视塔（553m），成为世界第一高塔。

#### 6. 活动式结构

如水利钢闸门、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。三峡水利枢纽工程的永久船闸设计采用双线五级连续梯级船闸，闸门口净宽 34m，门高近 40m，共采用 24 扇门，每扇门重达 820 多吨。无论是面积还是重量，在世界上都堪称“天下第一门”。三峡工程的升船机承船厢轮廓尺寸为  $132.0\text{m} \times 23.4\text{m} \times 10.0\text{m}$ ，一次可通过一条 3000t 级客货轮或一条 1200 马力推轮顶推的 1500t 级驳船，最大提升重量为 11800t，提升高度为 113m。

#### 7. 可拆卸或移动的结构

钢结构可采用便于拆装的螺栓连接，一些临时建筑和钢栈桥、流动式展览馆、移动式平台等采用钢结构，可发挥钢结构重量轻、便于运输以及安装与拆卸方便的优点。加拿大已建成 120 多万吨重，可容纳 5000 多人工作的海上采油平台。

#### 8. 容器和大直径管道

利用钢结构密闭性好的特点，可制成贮罐、输油（气、原料）管道、水力压力管道、石油化工塔等。三峡水利枢纽工程中的发电机组采用的压力钢管内径达 12.4m，钢管壁厚达 60mm。

#### 9. 抗震要求高的结构

钢结构自重轻，受到地震作用较小，钢材塑性和韧性好，是国内外历次地震中损坏最轻的结构形式，在抗震设防区特别是强震区宜优先选用钢结构。

#### 10. 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。

#### 11. 特种结构

特种结构主要有纪念性建筑（如北京的世纪坛）、城市大型雕塑、钢水塔、钢烟囱等。

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。钢材已被认为是可持续发展的材料，随着我国经济建设的发展需要和钢产量的提高，钢结构将会发挥日益重要的作用，具有广阔的应用发展前景。

## 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，以及在偶然事件

发生时和发生后,仍保持必要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。结构设计的目的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使用过程中,做到技术先进、安全适用、经济合理,并确保质量。要实现这一目的,必须借助合理的设计方法。

# 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、地震等对结构和结构构件作用引起的结构或构件的内力、变形等。以  $R$  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,即

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

式中,  $Z$  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,因此也称为极限状态。

影响  $S$  的主要因素是各种荷载的取值,而各种作用并非都是确定值,大多是随机变量,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,结构的尺寸也存在误差;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,采用概率理论来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—1992)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:

第一种为承载能力极限状态。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,就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性(如压屈等);⑤地基丧失承载能力而破坏(如失稳等)。

第二种为正常使用极限状态。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,就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影响正常使用的其他特定状态。

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“结构在规定的设计使用年限内,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。超过了设计使用年限,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

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

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,于是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可以接受的程度,就认为该结构是安全可靠的,即可靠性满足要求。

表 1-1 设计使用年限分类

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

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

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

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。

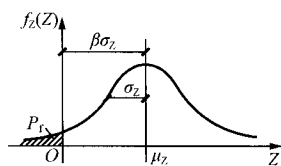


图 1-1  $Z$  的概率密度曲线

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  $\varphi(\cdot)$  表示标准正态分布函数, 则有

$$P_f = \varphi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right)$$

即

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

由式(1-7)可见, 已知  $\beta$  后即可由标准正态分布函数值的表中查得  $P_f$ 。确定  $\beta$  并不要求知道  $S$  和  $R$  的分布, 只要知道它们的平均值和标准差, 就可由式(1-5)和式(1-4)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。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。但实际上这些因素现还难以找到合理的定量分析方法。因此, 目前一般是通过对照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, 《建筑结构可靠度设计统一标准》(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 中提到的结构安全等级, 是根据结构破坏可能产生后果(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, 划分为一级、二级或三级。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它预兆的破坏类型, 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它预兆的破坏类型。



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

| 构件类型 | 安 全 等 级                       |                               |                               |
|------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|      | 一 级                           | 二 级                           | 三 级                           |
| 延性破坏 | 3.7 ( $1.08 \times 10^{-4}$ ) | 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 ( $1.08 \times 10^{-4}$ ) | 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。

钢结构连接是以破坏强度而不是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。《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—1992) 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—2003) 中对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, 碳素结构钢 Q235 钢做成的构件, 取  $\gamma_R=1.087$ ; 低合金高强度结构钢 Q345、Q390、Q420 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

$$\gamma_0(\gamma_G\sigma_{GK} + \gamma_{Q1}\sigma_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci}\gamma_{Qi}\sigma_{QiK}) \leqslant f \quad (1-8)$$

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

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; 二级或设计使用年限为 50 年的结构, 不应小于 1.0; 设计使用年限为 25 年的结构, 可取 0.95; 三级或设计使用年限为 5 年的结构, 不应小于 0.9。

$\gamma_G$ ——永久荷载分项系数, 当永久荷载效应对结构构件的承载能力不利时, 对式 (1-8) 和式 (1-9) 应分别取 1.2 和 1.35, 当永久荷载效应对结构构件的承载能力有利时, 不应大于 1.0。

$\gamma_{Q1}$ ,  $\gamma_{Qi}$ ——第 1 个和第  $i$  个可变荷载的分项系数, 当可变荷载效应对结构构件的承载能力不利时, 取 1.4; 当可变荷载效应对结构构件的承载能力有利时, 应取 0。

$\sigma_{GK}$ ——永久荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力。

$\sigma_{Q1K}, \sigma_{QjK}$ ——在基本组合中起控制作用的一个可变荷载和第  $i$  个可变荷载的标准值在结构构件截面或连接中产生的应力。

$\psi_{ci}$ ——第  $i$  个可变荷载的组合系数,取值见荷载规范。

2) 对于排架、框架结构,式(1-8)可采用下列简化承载能力极限状态设计表达式

$$\gamma_0(\gamma_G\sigma_{GK} + \psi\sum_{i=1}^n\gamma_{Qi}\sigma_{QiK}) \leq f \quad (1-10)$$

式中  $\psi$ ——简化设计表达式中采用的荷载组合系数,当只有一个可变荷载时,取 1.0,其他情况取 0.9。

(2) 偶然组合。偶然组合的极限状态设计表达式宜按下列原则确定:偶然作用的代表值不乘以分项系数;与偶然作用同时出现的可变荷载,应根据观测资料和工程经验采用适当的代表值。具体的设计表达式和各种系数,应符合专门规范的规定。

钢材的强度设计值见表 1-3;焊缝的强度设计值见表 1-4;螺栓连接的强度设计值见表 1-5。当为表 1-6 中所列情况时,上述表中的强度设计值应乘以表 1-6 中的折减系数。

表 1-3 钢材的强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)

| 钢 材    |                 | 抗拉、抗压和抗弯 | 抗 剪   | 端面承压(刨平顶紧) |
|--------|-----------------|----------|-------|------------|
| 钢 号    | 厚度或直径 (mm)      | $f$      | $f_v$ | $f_{ce}$   |
| Q235 钢 | $\leq 16$       | 215      | 125   | 325        |
|        | $> 16 \sim 40$  | 205      | 120   |            |
|        | $> 40 \sim 60$  | 200      | 115   |            |
|        | $> 60 \sim 100$ | 190      | 110   |            |
| Q345 钢 | $\leq 16$       | 310      | 180   | 400        |
|        | $> 16 \sim 35$  | 295      | 170   |            |
|        | $> 35 \sim 50$  | 265      | 155   |            |
|        | $> 50 \sim 100$ | 250      | 145   |            |
| Q390 钢 | $\leq 16$       | 350      | 205   | 415        |
|        | $> 16 \sim 35$  | 335      | 190   |            |
|        | $> 35 \sim 50$  | 315      | 180   |            |
|        | $> 50 \sim 100$ | 295      | 170   |            |
| Q420 钢 | $\leq 16$       | 380      | 220   | 440        |
|        | $> 16 \sim 35$  | 360      | 210   |            |
|        | $> 35 \sim 50$  | 340      | 195   |            |
|        | $> 50 \sim 100$ | 325      | 185   |            |

注 表中的厚度系指计算点的钢材厚度,对于轴心受力构件系指截面中较厚板件的厚度。

表 1-4

焊缝的强度设计值 ( $\text{N/mm}^2$ )

| 焊接方法和<br>焊条型号           | 构件钢材   |                   | 对接焊缝          |                            |     |               | 角焊缝                     |
|-------------------------|--------|-------------------|---------------|----------------------------|-----|---------------|-------------------------|
|                         | 钢号     | 厚度或<br>直径<br>(mm) | 抗压<br>$f_c^w$ | 焊缝质量为下列<br>等级时, 抗拉 $f_t^w$ |     | 抗剪<br>$f_v^w$ | 抗拉、抗压和<br>抗剪<br>$f_f^w$ |
|                         |        |                   |               | 一、二级                       | 三级  |               |                         |
| 自动焊、半自动焊、<br>E43 型焊条手工焊 | Q235 钢 | $\leq 16$         | 215           | 215                        | 185 | 125           | 160                     |
|                         |        | $> 16 \sim 40$    | 205           | 205                        | 175 | 120           |                         |
|                         |        | $> 40 \sim 60$    | 200           | 200                        | 170 | 115           |                         |
|                         |        | $> 60 \sim 100$   | 190           | 190                        | 160 | 110           |                         |
| 自动焊、半自动焊、<br>E50 型焊条手工焊 | Q345 钢 | $\leq 16$         | 310           | 310                        | 265 | 180           | 200                     |
|                         |        | $> 16 \sim 35$    | 295           | 295                        | 250 | 170           |                         |
|                         |        | $> 35 \sim 50$    | 265           | 265                        | 225 | 155           |                         |
|                         |        | $> 50 \sim 100$   | 250           | 250                        | 210 | 145           |                         |
| 自动焊、半自动焊、<br>E55 型焊条手工焊 | Q390 钢 | $\leq 16$         | 350           | 350                        | 300 | 205           | 220                     |
|                         |        | $> 16 \sim 35$    | 335           | 335                        | 285 | 190           |                         |
|                         |        | $> 35 \sim 50$    | 315           | 315                        | 270 | 180           |                         |
|                         |        | $> 50 \sim 100$   | 295           | 295                        | 250 | 170           |                         |
|                         | Q420 钢 | $\leq 16$         | 380           | 380                        | 320 | 220           | 220                     |
|                         |        | $> 16 \sim 35$    | 360           | 360                        | 305 | 210           |                         |
|                         |        | $> 35 \sim 50$    | 340           | 340                        | 290 | 195           |                         |
|                         |        | $> 50 \sim 100$   | 325           | 325                        | 275 | 185           |                         |

注 1. 自动焊和半自动焊所采用的焊丝和焊剂, 应保证其熔敷金属的力学性能不低于现行国家标准《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》(GB/T 5293) 和《埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂》(GB/T 12470) 中相关的规定。

2. 焊缝质量等级应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205) 中的规定。厚度小于 8mm 钢材的对接焊缝, 不应采用超声波探伤确定焊缝质量等级。

3. 对接焊缝在受压区的抗弯强度设计值取  $f_c^w$ , 在受拉区的抗弯强度设计值取  $f_t^w$ 。

4. 表中厚度系指计算点的钢材厚度, 对于轴心受力构件系指截面中较厚板件的厚度。

表 1-5

螺栓连接的强度设计值 ( $\text{N/mm}^2$ )

| 螺栓的性能等级、<br>锚栓和构件钢材的牌号 |          | 普 通 螺 栓       |               |               |               |               |               | 锚栓  | 承压型连接高强度螺栓 |     |    |    |
|------------------------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----|------------|-----|----|----|
|                        |          | C级螺栓          |               |               | A级、B级螺栓       |               |               |     | 抗拉         | 抗拉  | 抗剪 | 承压 |
|                        |          | 抗拉<br>$f_t^b$ | 抗剪<br>$f_v^b$ | 承压<br>$f_c^b$ | 抗拉<br>$f_t^b$ | 抗剪<br>$f_v^b$ | 承压<br>$f_c^b$ |     |            |     |    |    |
| 普通螺栓                   | 4.6、4.8级 | 170           | 140           | —             | —             | —             | —             | —   | —          | —   | —  |    |
|                        | 5.6级     | —             | —             | —             | 210           | 190           | —             | —   | —          | —   | —  |    |
|                        | 8.8级     | —             | —             | —             | 400           | 320           | —             | —   | —          | —   | —  |    |
| 锚栓                     | Q235钢    | —             | —             | —             | —             | —             | —             | 140 | —          | —   | —  |    |
|                        | Q345钢    | —             | —             | —             | —             | —             | —             | 180 | —          | —   | —  |    |
| 承压型连接<br>高强度螺栓         | 8.8级     | —             | —             | —             | —             | —             | —             | —   | 400        | 250 | —  |    |
|                        | 10.9级    | —             | —             | —             | —             | —             | —             | —   | 500        | 310 | —  |    |

续表

| 螺栓的性能等级、<br>锚栓和构件钢材的牌号 |        | 普 通 螺 栓       |               |               |               |               |               | 锚栓            | 承压型连接高强度螺栓    |               |               |  |
|------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
|                        |        | C级螺栓          |               |               | A级、B级螺栓       |               |               |               |               |               |               |  |
|                        |        | 抗拉<br>$f_t^b$ | 抗剪<br>$f_v^b$ | 承压<br>$f_c^b$ | 抗拉<br>$f_t^b$ | 抗剪<br>$f_v^b$ | 承压<br>$f_c^b$ | 抗拉<br>$f_t^a$ | 抗拉<br>$f_t^b$ | 抗剪<br>$f_v^b$ | 承压<br>$f_c^b$ |  |
| 构件                     | Q235 钢 | —             | —             | 305           | —             | —             | 405           | —             | —             | —             | 470           |  |
|                        | Q345 钢 | —             | —             | 385           | —             | —             | 510           | —             | —             | —             | 590           |  |
|                        | Q390 钢 | —             | —             | 400           | —             | —             | 530           | —             | —             | —             | 615           |  |
|                        | Q420 钢 | —             | —             | 425           | —             | —             | 560           | —             | —             | —             | 655           |  |

注 1. A级螺栓用于  $d \leq 24\text{mm}$  和  $l \leq 10d$  或  $l \leq 150\text{mm}$  (按较小值) 的螺栓; B级螺栓用于  $d > 24\text{mm}$  和  $l > 10d$  或  $l > 150\text{mm}$  (按较小值) 的螺栓。 $d$  为公称直径,  $l$  为螺杆公称长度。

2. A、B级螺栓孔的精度和孔壁表面粗糙度, C级螺栓孔的允许偏差和孔壁表面粗糙度, 均应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205—2001) 中的要求。

表 1-6

结构构件或连接的强度设计值的折减系数

| 序号 | 情 况                | 折减系数                           |
|----|--------------------|--------------------------------|
| 1  | 单面连接的单角钢           |                                |
|    | (1) 按轴心受力计算强度和连接   | 0.85                           |
|    | (2) 按轴心受压计算稳定性     |                                |
|    | 等边角钢               | $0.6 + 0.0015\lambda \leq 1.0$ |
|    | 短边相连的不等边角钢         | $0.5 + 0.0025\lambda \leq 1.0$ |
|    | 长边相连的不等边角钢         | 0.7                            |
| 2  | 无垫板的单面施焊对接焊缝       | 0.85                           |
| 3  | 施工条件较差的高空安装焊缝和铆钉连接 | 0.90                           |
| 4  | 沉头和半沉头铆钉连接         | 0.80                           |

注 1. 当几种情况同时存在时, 其折减系数应连乘。

2.  $\lambda$  为长细比, 对中间无连接的单角钢压杆, 应按最小回转半径计算, 当  $\lambda < 20$  时, 取  $\lambda = 20$ 。

对于正常使用极限状态, 钢结构设计只考虑荷载的短期效应组合, 其设计表达式为

$$w = w_{GK} + w_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} w_{QiK} \leq [w] \quad (1-11)$$

式中  $w$ ——结构或构件产生的变形值;

$w_{GK}$ ——永久荷载的标准值在结构或构件产生的变形值;

$w_{Q1K}$ ,  $w_{QiK}$ ——第 1 个和第  $i$  个可变荷载的标准值在结构或构件中产生的变形值;

$[w]$ ——结构或构件的容许变形值。

上述设计方法是《钢结构设计规范》(GB 50017—2003) 中采用的方法。对于直接承受动力荷载的结构, 在计算强度和稳定性时, 动力荷载设计值应乘动力系数; 在计算疲劳和变形时, 动力荷载标准值不应乘动力系数。它不仅适用于房屋和一般构筑物钢结构的设计, 而且也适用于水工建筑物的水上部分钢结构的设计。

(3) 现行水工钢结构专门规范的设计方法。水利水电工程中的水工钢结构种类较多, 主要有钢闸门、压力钢管、启闭机和拦污栅等。设计时必须遵守相应的各专门设计规范。根据