

高等学校土木工程专业系列教材

# 钢结构设计原理

彭伟 主编  
彭伟 张杰 荣国能 李力 葛宇东 编



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高等学校土木工程专业系列教材

# 钢 结 构 设 计 原 理

彭 伟 主编

彭伟 张杰 荣国能 李力 葛宇东 编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·



## 内 容 简 介

本书按照建筑结构荷载规范 (GB50009—2001)、建筑结构可靠度设计统一标准 (GB50068—2001)、钢结构设计规范 (GB50017—2003) 等新规范编写。

全书系统阐述了钢结构构件设计的基本原理; 对钢结构使用的材料, 连接方式, 轴心受拉、受压构件, 受弯构件, 拉弯、压弯构件等基本构件进行了详细的介绍。理论与设计并重, 全书安排了一些例题和适量习题。

本书可作为土木工程专业本科生的教材, 也可供结构设计、施工及研究人员参考。

### 图书在版编目 (C I P) 数据

钢结构设计原理 / 彭伟主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2004.10  
ISBN 7-81057-982-7

I. 钢... II. 彭... III. 钢结构—结构设计  
IV. TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 097438 号

## 钢 结 构 设 计 原 理

彭 伟 主 编

|      |                                                                |
|------|----------------------------------------------------------------|
| 责任编辑 | 张 波                                                            |
| 封面设计 | 何东琳设计工作室                                                       |
| 出版发行 | 西南交通大学出版社<br>成都二环路北一段 111 号<br>028-87600533 87600564<br>610031 |
| 邮 编  | http://press.swjtu.edu.cn                                      |
| 网 址  | cbsxx@swjtu.edu.cn                                             |
| 电子邮箱 | 四川森林印务有限责任公司                                                   |
| 印 刷  | 787 mm × 1 092 mm 1/16                                         |
| 开 本  | 17.5                                                           |
| 印 张  | 421 千字                                                         |
| 字 数  | 1—3 000 册                                                      |
| 印 数  | 2004 年 10 月第 1 版                                               |
| 版 次  | 2004 年 10 月第 1 次印刷                                             |
| 印 次  | ISBN 7-81057-982-7/TU · 360                                    |
| 书 号  | 25.00 元                                                        |
| 定 价  |                                                                |

图书如有印装问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: (028) 87600562

# 前 言

为适应教育部颁布、实施的新《普通高等学校本科专业目录》对土木工程类人才的培养要求,按土木工程专业大类教学计划的构建要求,特编写本书,以适应教学需要。该书曾作为讲义,在西南交通大学进行了几年的讲授,现在原讲义的基础上修订而成。

编写本书的指导思想是在内容上既有理论又注重实用,在文字叙述上力求简明扼要,说理清楚,又要突出重点,并适当考虑了《国家一级注册结构工程师考试大纲》对土木类专业人才知识结构的要求。

在教学应用方面,由于该书是一门技术性很强的专业课教材,编写上强调理论与实际、科学与技术相结合的原则,并提出运用科学理论解决实际问题的方法。

世纪之交,在我国广阔的土地上正进行着世界上最大规模的基本建设,钢结构的主要优点是材料强度高、结构自重轻、有良好的延性、抗震性能好、工业化程度高等,能满足建筑上大跨度、大空间以及多用途的各种要求,同时施工速度快。因此它不仅是世界早期建筑中最先使用的结构类型之一,即使在高强混凝土等新型建筑材料已出现的今天,钢结构仍不失为超高层建筑,特别是地震区高层建筑的一种经济有效的结构类型,而且今后也将成为土木工程中具有广阔发展前景的结构类型。随着我国钢产量跃居世界前列,发展钢结构建筑已成为工程建设的一项基本政策。这些都给钢结构事业的发展带来了莫大的机遇,对从事钢结构研究、设计和施工的技术人员来说也是莫大的幸事,施展我们才能的时机已经到来,我们一定要紧紧地把握住。目前,我国钢建筑的发展更是有如雨后春笋,日新月异,是过去所不可比拟的,这为钢结构工程学科的发展提供了最好的发展机遇。因此,本书在编写过程中注意适当地介绍一些本学科的新发展和新成果。

参加本书编写的有彭伟(第一、二章)、张杰(第五章)、荣国能(第四章)、李力(第三章)、葛宇东(第六章)。

编写本书时,参考、引用了一些公开发表的文献和资料,谨向这些作者表示深深的谢意。

本书可作为土木工程专业的教学用书,也可供从事土木工程设计和施工的技术人员参考。由于编者水平有限,加上时间仓促,不当之处敬请批评指正。

编 者

2004年7月

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第一章 概 述 .....               | 1   |
| 第一节 钢结构的特点及应用 .....         | 1   |
| 第二节 钢结构的设计方法 .....          | 6   |
| 第三节 钢结构的设计要求 .....          | 9   |
| 第四节 钢结构的发展方向 .....          | 9   |
| 第五节 本课程的主要内容、特点和学习方法 .....  | 11  |
| 思考题 .....                   | 12  |
| 第二章 钢结构的材料 .....            | 13  |
| 第一节 钢结构对钢材性能的要求 .....       | 13  |
| 第二节 金属的晶体结构及其对金属性能的影响 ..... | 14  |
| 第三节 结构钢材的主要力学性能 .....       | 18  |
| 第四节 影响结构钢材力学性能的主要因素 .....   | 24  |
| 第五节 复杂应力作用下结构钢材的屈服条件 .....  | 29  |
| 第六节 钢材的破坏形式 .....           | 31  |
| 第七节 结构钢材的种类、规格及其选用 .....    | 36  |
| 第八节 钢结构的连接材料 .....          | 42  |
| 思考题 .....                   | 46  |
| 第三章 钢结构的连接 .....            | 47  |
| 第一节 连接分类及特点 .....           | 47  |
| 第二节 对接焊缝连接设计 .....          | 53  |
| 第三节 角焊缝连接设计 .....           | 60  |
| 第四节 焊接残余应力和焊接残余变形 .....     | 78  |
| 第五节 普通螺栓连接设计 .....          | 83  |
| 第六节 高强度螺栓连接设计 .....         | 98  |
| 习 题 .....                   | 106 |
| 第四章 轴心受力构件 .....            | 109 |
| 第一节 概 述 .....               | 109 |
| 第二节 轴心受拉构件 .....            | 110 |
| 第三节 实腹式轴心受压构件 .....         | 112 |
| 第四节 格构式轴心受压构件 .....         | 128 |
| 第五节 柱头和柱脚设计 .....           | 141 |
| 习 题 .....                   | 155 |
| 第五章 受弯构件——梁 .....           | 157 |
| 第一节 概 述 .....               | 157 |

|             |                       |            |
|-------------|-----------------------|------------|
| 第二节         | 梁的强度和刚度 .....         | 161        |
| 第三节         | 梁的扭转 .....            | 167        |
| 第四节         | 梁的整体稳定 .....          | 173        |
| 第五节         | 梁的局部稳定和加劲肋设计 .....    | 182        |
| 第六节         | 考虑腹板屈曲后强度梁的设计 .....   | 198        |
| 第七节         | 钢梁的设计 .....           | 205        |
| 思考题         | .....                 | 215        |
| 习 题         | .....                 | 216        |
| <b>第六章</b>  | <b>拉弯和压弯构件 .....</b>  | <b>218</b> |
| 第一节         | 概 述 .....             | 218        |
| 第二节         | 拉弯、压弯构件的强度和刚度计算 ..... | 219        |
| 第三节         | 实腹式压弯构件的整体稳定 .....    | 222        |
| 第四节         | 实腹式压弯构件的局部稳定 .....    | 232        |
| 第五节         | 格构式压弯构件 .....         | 236        |
| 第六节         | 压弯构件和框架柱的计算长度 .....   | 242        |
| 习 题         | .....                 | 246        |
| <b>附 录</b>  | .....                 | <b>248</b> |
| 附录 1        | 钢材和连接的强度设计值 .....     | 248        |
| 附录 2        | 受弯构件的容许挠度 .....       | 251        |
| 附录 3        | 截面塑性发展系数 .....        | 252        |
| 附录 4        | 轴心受压构件的稳定系数 .....     | 253        |
| 附录 5        | 柱的计算长度系数 .....        | 255        |
| 附录 6        | 疲劳计算的构件和连接分类 .....    | 257        |
| 附录 7        | 型钢表 .....             | 259        |
| 附录 8        | 螺栓和锚栓规格 .....         | 271        |
| 附录 9        | 各种截面回转半径的近似值 .....    | 272        |
| <b>参考文献</b> | .....                 | <b>273</b> |

# 第一章 概 述

钢结构是世界早期工程结构中最先使用的结构类型之一。由于钢结构具有强度高、自重轻、施工速度快、抗震性能好等优点，一直是被广泛采用的一种结构，近百年来得到了快速的发展。尤其是在 20 世纪下半叶，随着世界钢产量的大幅度增加，钢结构也极大地扩展了应用领域。随着我国城市化的快速发展以及我国钢产量跃居世界前列，建筑钢结构在综合经济效益方面和抗震能力上的优点，正逐渐获得普遍的共识，发展钢结构建筑已成为工程建设的一项基本政策，这些给钢结构事业的发展带来了莫大的机遇。为了抗风、抗震，减小结构占用面积，降低基础费用，缩短建筑工期，钢结构将成为工程结构中优先考虑使用的结构类型。

## 第一节 钢结构的特点及应用

### 一、钢结构的特点

钢结构是以钢材（钢板和型钢等）制作的结构，在工程中钢结构得到广泛应用和发展，是由于钢结构与其他结构相比具有下列特点。

#### 1. 材料强度高、重量轻

钢的密度虽然较大，但强度却高得更多，与其他建筑材料相比，钢材的密度与屈服点的比值最小。在相同的荷载和约束条件下，采用钢结构时，结构的自重通常较小。当跨度和荷载相同时，钢屋架的重量只有钢筋混凝土屋架重量的  $1/4 \sim 1/3$ ，若用薄壁型钢屋架或空间结构则更轻。由于重量较轻，便于运输和安装，因此钢结构特别适用于跨度大、高度高、荷载大的结构，也最适用于可移动、有装拆要求的结构，且可减轻下部结构和基础的负担。

#### 2. 钢材材质均匀、可靠性高

钢材的内部组织均匀，非常接近匀质体，其各个方向的物理力学性能基本相同，接近各向同性体；且在一定的应力范围内，处于理想弹性工作状态，符合工程力学所采用的基本假定。因此，钢结构的计算方法可根据力学原理进行，计算结果较准确、可靠。

#### 3. 钢材的塑性和韧性好

钢材质地均匀，有良好的塑性和韧性。由于钢材的塑性好，钢结构在一般情况下不会因偶然超载或局部超载而突然断裂破坏；钢材的韧性好，则使钢结构对动荷载的适应性较强。

良好的吸能能力和延性还使钢结构具有优越的抗震性能。钢材的这些性能对钢结构的安全可靠提供了充分的保证。

#### 4. 工业化程度高

钢结构构件在工厂制成,能成批大量生产,便于机械化制造,生产效率高,速度快,成品精确度较高,质量易于保证,是工程结构中工业化程度最高的一种结构。采用工厂制造、工地安装的施工方法,可缩短建设周期、降低造价、提高经济效益。

#### 5. 钢材具有可焊接性

由于建筑用钢材具有可焊接性,使钢结构的连接大为简化,可满足制造各种复杂结构形状的需要。但焊接时产生很高的温度,温度分布很不均匀,结构各部位的冷却速度也不同;因此,不但在高温区(焊缝附近)材料性质有变差的可能,而且还产生较高的焊接残余应力,使结构中的应力状态复杂化。

#### 6. 密封性好

钢材的不渗漏性适用于密闭结构。钢材本身因组织非常致密,当采用焊接连接,甚至铆钉或螺栓连接时,都易做到紧密不渗漏。因此钢材是制造容器,特别是高压容器、大型油库、气柜、输油管道的良好材料。

#### 7. 耐热性较好、耐火性差

实验证明,钢材从常温到  $250^{\circ}\text{C}$  时,性能变化不大;温度达到  $300^{\circ}\text{C}$  以后,强度逐渐下降;达到  $450^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$  时,强度几乎降为 0,完全失去承载能力。因此,钢结构的耐火性较钢筋混凝土差。当耐火要求较高时,需要采取保护措施,如在钢结构外面包混凝土或其他防火板材,或在构件表面喷涂一层含隔热材料和化学助剂等的防火涂料,以提高耐火等级。但这样处理既提高了造价,又增加了结构所占的空间。

#### 8. 耐锈性差

钢材易于锈蚀,应采取防护措施。钢材在潮湿环境中,特别是处于有腐蚀性介质的环境中容易锈蚀,必须用油漆或镀锌加以保护,而且在使用期间还应定期维护。这就使钢结构的维护费用比钢筋混凝土结构高。

## 二、钢结构的应用

根据上述钢结构的特点,其合理应用范围如下:

### 1. 重型工业厂房的承重骨架和吊车梁(见图 1.1)

重型工业厂房的特点是荷载大、房屋高,有的还受温度作用或设备的振动作用及大承载吨位吊车作用(有的达  $440\text{t}$ )。

### 2. 大跨度建筑的屋盖结构(见图 1.2、图 1.3)

钢材轻质高强,可以跨越很大的跨度。结构跨度越大,自重在全荷载中所占比重也就越大,减轻自重可以获得明显的经济效益。因此,钢结构强度高而质量轻的优点对于大跨度建筑结构特



别突出。例如，公共建筑中的体育馆、大会堂、影剧院等，工业建筑中的飞机装配车间等。

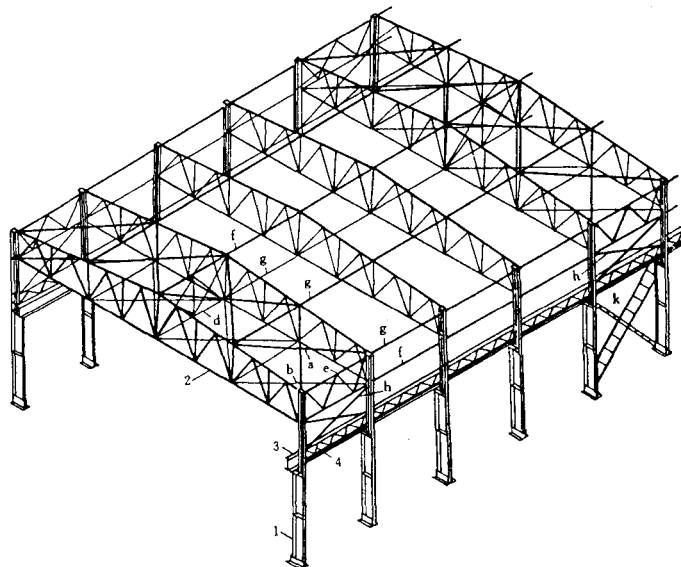


图 1.1 单层单跨厂房骨架

1—柱；2—屋架；3—吊车梁；4—吊车制动桁架；a~g—屋架支撑；h、k—柱间支撑

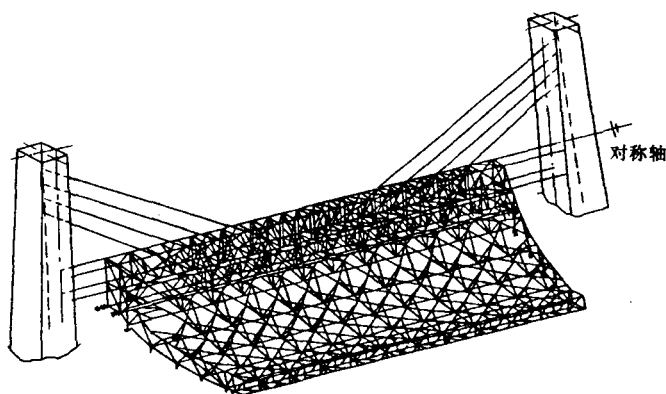


图 1.2 北京奥林匹克体育中心综合馆屋盖结构

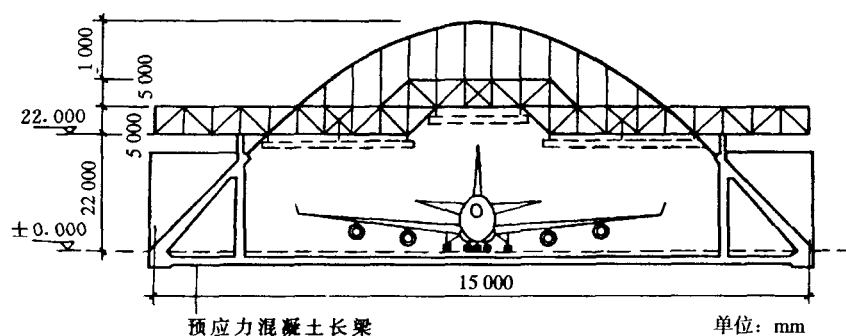


图 1.3 海南美兰机场机库

### 3. 高耸结构 (见图 1.4)

钢结构常用于高度较大的无线电桅杆、微波塔、广播和电视发射塔架、火箭发射塔等。由于钢结构制造、施工方便,特别是其构件截面小,可大大减少风荷载;自重轻,可大大降低基础工程造价,取得更大的经济效益。

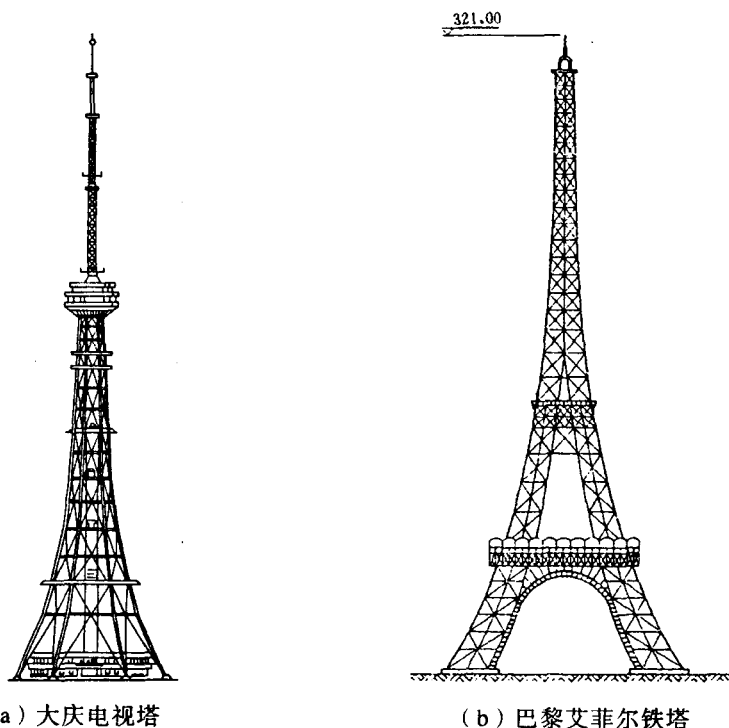


图 1.4 高耸结构

### 4. 多、高层建筑结构 (见图 1.5)

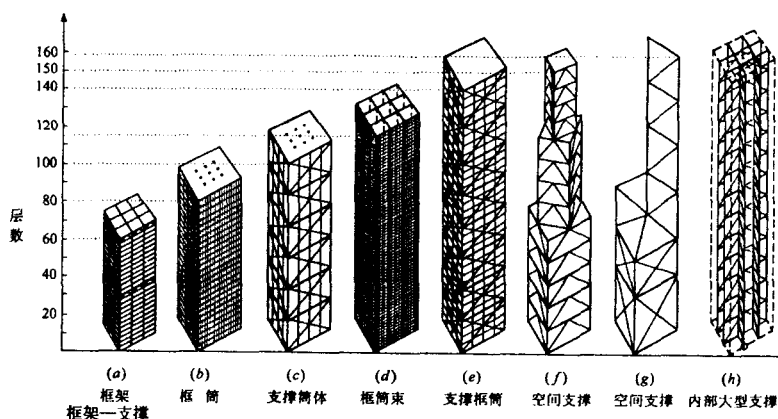


图 1.5 几种常用多、高层钢结构体系

高层建筑采用钢结构与采用混凝土结构相比具有下列优越性:

(1) 钢结构自重轻。高层钢结构自重一般为高层钢筋混凝土结构自重的  $1/2 \sim 3/5$ 。

(2) 钢结构材料强度高。与钢筋混凝土结构相比, 钢结构柱截面面积小, 从而可增加建筑有效使用面积。

(3) 钢结构施工速度快。一般高层钢结构平均每 4 天完成 1 层。而高层钢筋混凝土结构平均每 6 天完成 1 层, 即钢结构的施工速度约为混凝土结构施工速度的 1.5 倍。

(4) 在梁高相同的情况下, 钢结构的开间可比钢筋混凝土结构的开间大 50%, 从而使建筑布置更灵活。

(5) 钢结构的延性比混凝土结构的延性好得多, 从而使钢结构的抗震性能比钢筋混凝土结构好。

目前我国高层钢结构的应用正在蓬勃地发展。

### 5. 大跨度桥梁结构 (见图 1.6)

跨度较大、重载的铁路和公路桥多采用钢结构。1968 年建成的南京长江大桥, 为铁路公路两用双层桥, 钢梁共 10 孔, 其中有 9 孔为  $3\text{ m} \times 160\text{ m}$  多跨连续桁架, 采用了 16 Mnq 低合金钢。1991 年建成的跨越黄浦江的上海市南浦大桥, 总长 8 346 m, 主桥为双塔双索面斜拉桥, 全长 846 m, 采用钢梁与钢筋混凝土板相结合的组合梁结构, 中跨跨长 423 m, 是我国已建跨度最大的斜拉桥。

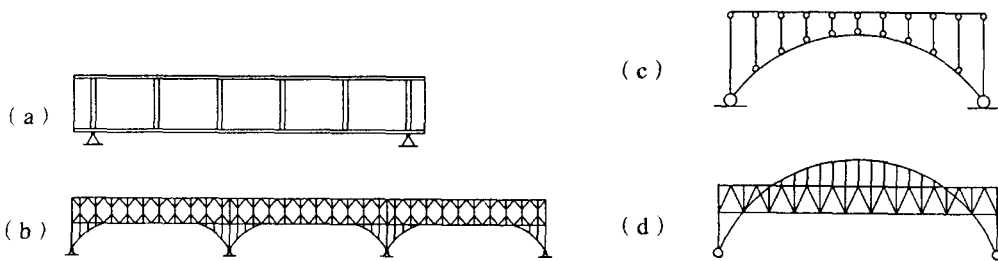


图 1.6 桥梁的主要结构形式

### 6. 大型容器和大直径管道

用于要求密闭的容器, 如大型储液库、煤气库等板壳; 要求能承受很大内力, 另外温度急剧变化的高炉结构、大直径高压输油管和煤气管道等均采用钢结构。

### 7. 移动式结构

如水工闸门、各种起重机、移动式采油平台。

### 8. 可拆卸、搬移的结构

如流动式展览馆、军用桥梁等常用钢结构。

### 9. 轻型钢结构

采用薄壁型钢, 具有自重小、建造快、省钢材的优点, 近年来发展较快。耗钢量比普通钢房屋节约钢材 25%~50%, 自重减轻 20%~50%, 其用钢量与钢筋混凝土结构接近, 而自重较钢筋混凝土结构减少 70%~80%。

### 10. 其他建筑物

钢结构也常用于运输栈桥、各种管道支架、城市立交桥等。

## 第二节 钢结构的设计方法

### 一、概 述

钢结构设计的基本目的,是以最经济的手段使结构在预定的使用期限内具备预定的各种功能。钢结构设计的基本原则是要做到技术先进、经济合理、安全适用和确保质量。任何工程结构在规定的設計基准期(一般为50年)内都应该具备必要的安全性、适用性和耐久性,三者总称为结构的可靠性。

结构计算是根据拟订的结构方案和构造,按所承受的荷载进行内力计算,确定出各杆件的内力,再根据所用材料的特性,对整个结构和构件及其连接进行核算,看其是否符合经济、安全、适用等方面的要求。但是,在设计中所采用的荷载、材料性能、截面特性、计算模型、施工质量等实际上并非固定不变,而大多是随机变量,所以设计结果和实际结构的真实情况存在一定差异。为了在设计中恰当地考虑各种因素的变化,使计算结果与实际情况尽量相符,以达到预期要求,人们进行了长期的多方面的努力。我国钢结构计算方法,在建国以来的40年中就曾经有过4次变化,即:建国初期到1957年,采用总安全系数的容许应力算法;1957—1974年,采用3个系数的极限状态计算方法;1974—1988年,采用以结构的极限状态为依据,进行多系数分析,用单一安全系数表达的容许应力算法;新的钢结构设计规范,采用以概率论为基础的一次二阶矩极限状态设计法。

钢结构目前有两种设计方法,即容许应力方法和极限状态方法。

#### 1. 容许应力设计法

容许应力设计法是一种传统的设计方法,这种方法是把影响结构的各种因素都当作不变的定值,将材料可以使用的最大强度除以一个笼统的安全系数作为容许达到的最大应力——容许应力。其表达式为

$$\sigma \leq \frac{f_y}{K} = [\sigma] \quad (1.1)$$

式中  $f_y$ ——钢材的屈服强度;

$K$ ——安全系数。

这种方法的优点是表达简洁、计算比较简单,曾长期被采用。但容许应力法的缺点是,由于笼统地采用了一个安全系数,将使各构件的安全度各不相同,从而使整个结构的安全度一般取决于安全度最小的构件。

容许应力的方法目前还被许多国家采用。我国的铁路和桥梁规范也采用这种方法。建筑钢结构中不能按极限平衡或弹塑性分析的结构也仍然采用该方法,如对钢构件或连接的疲劳强度计算。

#### 2. 极限状态设计法

极限状态方法是将影响结构可靠性的各种参数作为随机变量,用概率论和数理统计方法进行分析,采用可靠度理论,求出结构在使用期间应满足要求的概率。

结构的极限状态是指整个结构或结构的某一部分达到某一特定状态, 超过此特定状态就不能满足设计规定的某一功能的要求。结构的极限状态可以分为以下两类:

(1) 承载能力极限状态。对应于结构或构件达到最大承载力或出现不适于继续承载的变形, 包括倾覆、强度破坏、疲劳破坏、丧失稳定、结构变为机动体系或出现过度的塑性变形。

由于钢结构构件的材料强度高而截面面积小, 稳定的问题非常突出。压杆的截面尺寸一般由稳定的要求而非强度来确定, 不仅构件可能失稳, 而且整体结构和组成构件的板件也可能失稳, 不过板件的局部失稳并不总是达到承载力的极限状态。

(2) 正常使用的极限状态。对应于结构或构件达到正常使用或耐久性能的某项规定的限值, 包括出现影响正常使用或影响外观的变形, 出现影响正常使用的振动以及影响正常使用或耐久性的局部破坏。

### 3. 结构的极限状态方程

结构必须满足设计规定的各项功能。这些功能可用功能函数描述。若结构设计时需要考虑的影响结构可靠性的随机变量有  $n$  个, 即  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 则通常可建立函数关系

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.2)$$

此函数称为功能函数。

在简单的设计场合, 仅以结构抗力  $R$  和荷载效应  $S$  两个基本随机变量来表达功能函数。

$$Z = R - S \quad (1.3)$$

式中  $R$ ——结构抗力,  $R$  是指结构或构件承受内力和变形的能力, 如构件的承载能力、刚度等。结构抗力是结构或构件的材料性能、几何参数和计算模式的函数。

$S$ ——作用效应,  $S$  是指结构上的作用引起的结构或其构件的内力和变形, 如弯矩、剪力、轴力、扭矩和应力以及挠度、转角和应变等。当作用为荷载时, 其效应称为荷载效应。

由于影响结构抗力  $R$  和作用效应  $S$  的各种因素都是独立的随机变量, 所以结构抗力和作用效应也是随机变量。结构或构件的极限状态可以用功能函数  $Z = R - S$  来描述:

当  $Z < 0$ , 即  $R < S$  时, 结构或构件处于失效状态;

当  $Z > 0$ , 即  $R > S$  时, 结构或构件处于可靠状态;

当  $Z = 0$ , 即  $R = S$  时, 结构或构件处于极限状态。

$Z = R - S = 0$  称为结构的极限状态方程。

## 二、概率极限状态设计法

### 1. 结构或构件的失效概率与可靠指标

结构或构件的失效概率, 可以用下列公式表示

$$P_f = P(Z = R - S < 0) \quad (1.4)$$

只要使通过上式计算出的结构或构件的失效概率  $P_f$  小到人们可以接受的程度, 就可以认为结构设计是可靠的。

但直接应用结构可靠度或失效概率的方法进行计算比较复杂,因此,目前各个国家在确定可靠性指标时都采用“校准法”,通过对原有的规范作反演,找出隐含在现有工程中相应的可靠指标值。对钢结构各类主要构件校准的结果,可靠指标 $\beta$ 一般在3.16~3.62之间。

《建筑结构设计统一标准》规定的可靠性指标 $\beta$ 见下表。

可靠性指标 $\beta$ 和相应的失效概率 $P_f$

| 破坏类型 | 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 ( $6.87 \times 10^{-4}$ ) |

钢结构连接的承载力极限状态经常是强度破坏,可靠性指标比构件为高,推荐取4.5。

## 2. 概率极限状态法设计表达式

为应用方便并符合人们长期以来的习惯,规范给出了概率极限状态为基础的实用设计表达式。

(1) 承载力极限状态表达式。对承载力极限状态,应考虑荷载效应的基本组合和在偶然情况下荷载效应的必要组合。钢结构设计用应力表达,采用钢材强度设计值,按荷载效应的基本组合进行,强度和稳定设计时,有如下极限状态表达式。

### ① 可变荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0 \left( \gamma_G \sigma_{Gk} + \gamma_{Q1} \sigma_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} \gamma_{Qi} \sigma_{Qik} \right) \leq \frac{f_y}{\gamma_R} = f \quad (1.5a)$$

### ② 永久荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0 \left( \gamma_G \sigma_{Gk} + \sum_{i=1}^n \psi_{ci} \gamma_{Qi} \sigma_{Qik} \right) \leq \frac{f_y}{\gamma_R} = f \quad (1.5b)$$

式中  $\gamma_0$ ——结构重要性系数,当安全等级为一、二、三级时分别取为1.1、1.0、0.9;

$\gamma_G$ ——永久荷载分项系数,对式(1.5a)一般取1.2,对式(1.5b)一般取1.35;当荷载效应对结构有利时,取1.0,对抗倾覆和滑移有利时取0.9;

$\gamma_{Q1}$ 、 $\gamma_{Qi}$ ——第1个和第*i*个可变荷载的分项系数,一般情况下取1.4,当楼面活荷载大于4 kN/m<sup>2</sup>时取1.3;

$\sigma_{Q1k}$ 、 $\sigma_{Qik}$ ——第1个和第*i*个可变荷载标准值计算的可变荷载效应值;

$\sigma_{Gk}$ ——按永久荷载标准值计算的永久荷载效应值;

$\psi_{ci}$ ——第*i*个可变荷载的组合系数,一般情况下,当无风荷载参与组合时取1.0,有风荷载参与组合时取0.6;

$\gamma_R$ ——结构抗力分项系数。

(2) 正常使用极限状态设计表达式。对正常使用极限状态,钢结构或构件仅考虑荷载效应标准组合。其表达式为



$$v_{Gk} + v_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} v_{Qik} \leq [v] \quad (1.6)$$

式中  $v_{Gk}$  ——永久荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值；  
 $v_{Q1k}$  ——起控制作用的第 1 个可变荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值(该值使计算结果为最大)；  
 $v_{Qik}$  ——其他第  $i$  个可变荷载标准值在结构或结构构件中产生的变形值；  
 $[v]$  ——结构或结构构件的容许变形值。

对于轴心受力和偏心受力构件，正常使用极限状态用构件的长细比  $\lambda$  来保证，以免构件过细，易于弯曲和颤动，对构件和连接的工作不利。验算公式为

$$\lambda = l_0 / i \leq [\lambda] \quad (1.7)$$

式中  $[\lambda]$  ——构件的容许长细比，按规范规定采用；  
 $l_0$  ——构件的计算长度；  
 $i = \sqrt{I/A}$  ——构件的截面回转半径，其中  $I$  和  $A$  分别是截面惯性矩和截面面积。

### 第三节 钢结构的设计要求

钢结构设计时应满足下列基本要求：

(1) 钢结构及其构件应安全可靠，即能安全地承受预期的各种有关荷载，因而必须具有足够的承载力和稳定性。钢构件一般壁薄且较细长，稳定问题特别突出。

(2) 要满足使用要求和耐久性。使用要求包括变形和振幅的限制；耐久性主要应注意抗腐蚀和防火。

(3) 要满足经济要求。最优的设计除安全适用外，应做成成本最低、重量最轻、制作和安装劳动力最省、工期最短、维护方便的结构。

为了实现上述设计要求，应掌握各种荷载的特性和量值以及它们应有的组合，具备合理选择钢材和连接材料的能力，能选用最优结构方案和最先进的设计方法，使钢结构设计做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。此外，还要总结、创造和推广先进的制造工艺和安装技术，任何脱离施工的设计都不是成功的设计。

### 第四节 钢结构的发展方向

随着我国现代化建设的加速发展和钢产量的持续增加，钢结构的应用将会有很大发展，钢结构工程的科学技术水平也应该迅速提高。为此，要在下列几个方面做好工作。

### 1. 高效能钢材的研制和应用

高效能钢材的含义包括两个方面：一是研制出强度较高而性能又好的钢材；二是采用各种有效措施，提高钢材的有效承载力，更好地发挥钢材的使用效果，从而节约钢材，如改进截面形式等。

我国目前已较普遍采用 Q345 钢，北京首都体育馆的网架、上海电视塔的塔柱钢管就采用了这种材料，由于 Q345 钢强度高（屈服强度为 345 MPa），可节约大量钢材。南京长江大桥采用此种钢比用碳素钢节省钢材 15%，现在更高强度的 15 锰钒钢和 15 锰钛钢（屈服强度为 390 MPa）已开始应用。用于连接材料的高强度钢也广泛用于各种工程。

国外高强度钢发展很快，日本、美国、原苏联等都已把屈服点为 700 MPa 以上的钢列入了规范，如何开发研制高强度钢并合理应用是一个重要课题。

普通钢材的耐腐蚀性差，需要油漆防腐，这是钢结构尤其是薄壁钢结构的弱点。近年来，国外研制出一种耐腐蚀钢，价格虽比普通钢材高 20%~40%，但抗腐蚀性强，不需油漆保护。日本和美国都已将其大量用于沿海工程中。我国也已研制并生产出耐腐蚀钢，用于铁路货车车厢，使车厢由过去 5~7 年需更换的大修期提高到 12 年以上，为国家节约了大量钢材。今后在提高钢材强度，增加抗腐蚀性方面，应继续开展研制工作，并将它用于建筑钢结构。

另外，宽翼缘工字型钢（或称 H 型钢）、方钢管、压型钢板、冷弯薄壁型钢等都能较好地发挥钢材的效能，得到较好的经济效果，有着广阔的发展前景。

### 2. 计算理论的研究和完善

现在已广泛应用新的计算技术和测试技术，对结构和构件进行深入计算和测试，为了解结构和构件的实际性能提供了有利条件。计算和测试手段越先进，就越能反映结构和构件实际工作情况，从而合理使用材料，发挥其经济效益，并保证结构的安全。

我国现行《钢规》和正在修改中的《桥规》都采用了以概率论为基础的极限状态设计法，这是通过大量理论研究和试验分析取得的成果。从合理和经济的观点出发，采用以概率为基础的极限状态设计方法是先进的设计方法，但目前还属于近似概率设计法，应向采用更为先进合理的全概率极限状态设计法的方向努力。

稳定是钢结构设计中的突出问题，自从欧拉提出轴心受压柱的弹性稳定临界力的计算公式以来，已有 200 多年。在此期间，很多学者对各类构件都做了不少理论分析和实验研究工作，做出了很多贡献，但仍然还存在不少问题尚未解决或未很好解决，如压弯构件的弯扭屈曲、薄板屈曲后强度、各种刚架体系的稳定以及空间结构的稳定等，所有这些问题需要进一步研究和完善。

### 3. 结构形式的创新和应用

新的结构形式有薄壁型钢结构、悬索结构、悬挂结构、网架结构和预应力钢结构等。这些结构适用于轻型结构、大跨屋盖结构、高层建筑和高耸结构等，对减少耗钢量有重要意义。

钢和混凝土组合构件的应用是一个重要的发展方向。钢材抗拉和抗压的强度相同，但受压构件取决于稳定承载力，致使钢材强度得不到充分发挥。混凝土则只能抗压。如果把钢和混凝土组合起来，形成钢—混凝土组合结构，则可充分发挥两种材料的长处，又互相弥补对方的缺点，形成一种新的结构，如组合梁、钢管混凝土柱、型钢混凝土梁和型钢混凝土柱等（见图 1.7）。

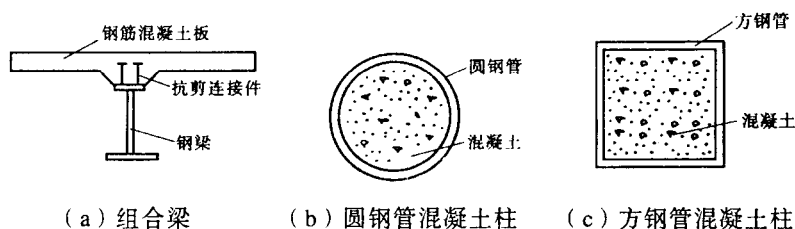


图 1.7 组合梁和柱

由钢筋混凝土板作为受压翼缘与钢梁组合可节约钢材。这种组合梁已用在高层建筑楼层中。

采用钢管里面灌混凝土作为柱或柱肢，也是组合构件的一种类型。这种构件的特点是：在压力作用下，钢管和混凝土之间产生相互作用的力，使混凝土处于三向受压的应力状态下工作，大大提高了它的抗压强度，还改善了它的塑性，提高抗震性能。对于薄钢管，因得到了混凝土的支持，提高了稳定性，使钢材强度得以充分发挥。这一结构已在国内推广应用。新的钢结构设计规范还列入了组合结构的章节。

预应力钢结构也是一种新型结构，它的主要形式是在一般钢结构中增加一些高强度钢构件并对结构施加预应力。它的实质是以高强度钢材代替部分普通钢材，从而达到节约钢材的目的。我国从 20 世纪 50 年代就开始对预应力钢结构进行了理论和试验研究，并在一些工程中采用。20 世纪 90 年代预应力钢结构又有了一个飞跃。

高层建筑钢结构的研究也是一个重要方面。近年来在北京、广州、深圳和上海等地，相继修建了一些高层和超高层钢结构建筑物。目前，随着上海金贸大厦等超高层钢结构建筑的建成，我国高层钢结构的技术水平已有了长足的进步。

#### 4. 最优化原理的应用

结构优化设计包括确定优化的结构形式和确定优化的截面尺寸。由于计算机的逐步普及，促使结构优化设计得到相应的发展。我国编制的钢吊车梁标准图集，就是根据耗钢量最小的条件写出目标函数，把强度、稳定、刚度等一系列设计要求作为约束条件，用计算机解得优化的截面尺寸，比过去的标准设计节省钢材 5%~10%。优化设计已逐步推广到塔桅结构、网架结构设计等各个方面。

此外，钢结构防锈对薄壁型钢和轻钢结构有重要意义，H 型钢和压型钢板的采用亦在钢结构中取得显著成效，近年来，这方面的研究工作已取得了一定的进展。

## 第五节 本课程的主要内容、特点和学习方法

### 1. 钢结构设计原理课程的主要内容

钢结构设计原理课程的主要内容包括材料、连接（包括构件之间的连接）、基本构件设计（受弯构件、轴心受力构件和拉弯、压弯构件）等部分。

### 2. 钢结构设计原理课程的地位与特点

钢结构设计原理课程是全国高等教育土木工程专业的核心课程之一，是为培养学生在土