

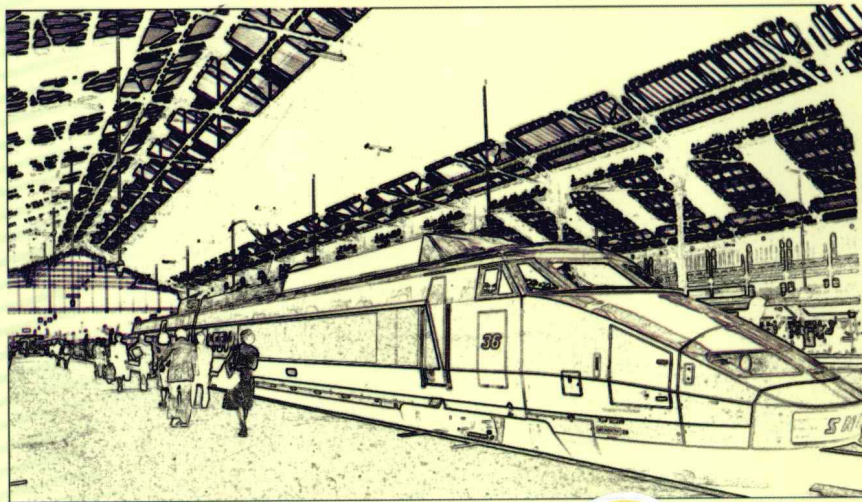
普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

# 钢结构

## 设计原理

● 赵根田 赵东拂 主编

EDUCATION



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

# 钢结构设计原理

主 编 赵根田 赵东拂  
参 编 王 姗 陈 明 张艳霞  
付成喜 万 馨



机械工业出版社

本书以“概念准确、基础扎实、突出应用、淡化过程”为基本原则,是专为培养工程应用型和技术管理型人才的高等院校土木工程专业编写的教材,主要介绍钢结构的特点、应用、钢结构材料性能、钢结构的连接设计方法以及钢结构(冷弯薄壁型钢)基本构件(轴心受拉和受压构件、受弯构件、拉弯和压弯构件、钢与混凝土组合梁)的工作原理和设计方法。书末附录列出了供设计查用的各种数据。各章还列举了必要的设计例题和习题,以利于有关基本理论和设计方法的学习和掌握。鉴于本书工程应用和工程实践特点突出,还可供有关工程技术人员参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计原理/赵根田,赵东拂主编. —北京:机械工业出版社, 2011. 12

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

ISBN 978-7-111-36430-6

I. ①钢… II. ①赵… ②赵… III. ①钢结构—结构设计—高等学校—教材 IV. ①TU391.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第230578号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 林 辉

版式设计:霍永明 责任校对:刘志文

封面设计:张 静 责任印制:李 妍

北京富生印刷厂印刷

2012年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18印张·441千字

标准书号:ISBN 978-7-111-36430-6

定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

# 普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材 编审委员会

- 主任委员：姜忻良 天津大学 教授、博导
- 副主任委员：张向东 辽宁工程技术大学 教授、博导
- 李自林 天津城市建设学院 教授、博导
- 委员：李 珠 太原理工大学 教授、博导
- 魏连雨 河北工业大学 教授、博导
- 王成华 天津大学 教授
- 李 斌 内蒙古科技大学 教授
- 赵根田 内蒙古科技大学 教授
- 胡启平 河北工程技术大学 教授
- 张瑞云 石家庄铁道大学 教授
- 段树金 石家庄铁道大学 教授
- 段敬民 天津城市建设学院 教授
- 张敏江 沈阳建筑大学 教授
- 徐世法 北京建筑工程学院 教授
- 曹启坤 辽宁工程技术大学 教授
- 张泽平 太原理工大学 教授

# 前 言

根据高等学校土木工程专业指导委员会制订的教学计划，钢结构设计原理为土木工程专业的技术基础课，本书按 GB 50017—2003《钢结构设计规范》和 GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》等现行国家标准编写，以“概念准确、基础扎实、突出应用、淡化过程”为基本原则，是专为培养工程应用型和技术管理型人才的高等院校土木工程专业编写的教材。

全书共分7章，第1章主要介绍钢结构的特点、应用和钢结构采用的设计方法；第2章介绍钢结构所用的材料及其性能；第3章介绍钢结构连接的工作原理和设计方法；第4~6章分别介绍了轴心受拉和受压构件、受弯构件、拉弯和压弯构件的工作原理和设计方法，冷弯薄壁型钢构件的相关设计原理和设计方法；第7章介绍钢与混凝土组合梁的工作原理和设计方法。

参加本书编写的有赵根田（第1、2章、附录），赵东拂、王姗（第3章），陈明（第4章），张艳霞（第5章），付成喜（第6章），万馨（第7章）。全书由赵根田、赵东拂主编。

本书的完成得到了机械工业出版社领导和有关人员的指导，也得到了内蒙古科技大学教材建设基金的资助，在此予以衷心的感谢。

书中不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第1章 绪论               | 1  |
| 1.1 钢结构的特点           | 1  |
| 1.2 钢结构的应用范围         | 4  |
| 1.3 钢结构设计原则          | 5  |
| 1.4 钢结构简史与发展趋势       | 10 |
| 思考题                  | 13 |
| 第2章 钢结构的材料           | 14 |
| 2.1 钢材的破坏形式          | 14 |
| 2.2 钢材的强度和变形性能       | 14 |
| 2.3 冷弯性能             | 16 |
| 2.4 冲击韧性             | 16 |
| 2.5 影响钢材性能的主要因素      | 17 |
| 2.6 钢材的疲劳            | 19 |
| 2.7 建筑钢材的规格和选用       | 24 |
| 思考题                  | 29 |
| 第3章 钢结构的连接           | 30 |
| 3.1 钢结构的连接简介         | 30 |
| 3.2 焊接方法和焊接连接形式      | 31 |
| 3.3 角焊缝的构造和计算        | 35 |
| 3.4 对接焊缝的构造和计算       | 47 |
| 3.5 焊接残余应力和焊接残余变形    | 52 |
| 3.6 螺栓连接的构造          | 56 |
| 3.7 C级普通螺栓连接的工作性能和计算 | 58 |
| 3.8 高强度螺栓连接的工作性能和计算  | 67 |
| 3.9 轻型钢结构紧固件的构造和计算   | 73 |
| 思考题                  | 77 |
| 习题                   | 77 |
| 第4章 轴心受力构件           | 79 |
| 4.1 轴心受力构件简介         | 79 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 4.2 轴心受力构件的强度和刚度      | 80  |
| 4.3 轴心受压构件的整体稳定       | 83  |
| 4.4 轴心受压构件的局部稳定       | 94  |
| 4.5 实腹式轴心受压柱的设计       | 99  |
| 4.6 格构式轴心受压柱的设计       | 103 |
| 4.7 轴心受压柱的柱头和柱脚       | 109 |
| 4.8 冷弯薄壁型钢轴心受力构件的设计   | 117 |
| 思考题                   | 124 |
| 习题                    | 124 |
| 第5章 受弯构件              | 126 |
| 5.1 梁的类型              | 126 |
| 5.2 梁的强度和刚度计算         | 128 |
| 5.3 梁的整体稳定            | 132 |
| 5.4 梁的局部稳定和腹板加劲肋      | 136 |
| 5.5 型钢梁的设计            | 142 |
| 5.6 组合梁的设计            | 144 |
| 5.7 梁的拼接、连接和支座        | 154 |
| 5.8 冷弯薄壁型钢檩条和墙梁       | 159 |
| 思考题                   | 166 |
| 习题                    | 167 |
| 第6章 拉弯和压弯构件           | 169 |
| 6.1 拉弯和压弯构件简介         | 169 |
| 6.2 拉弯和压弯构件的强度和刚度计算   | 170 |
| 6.3 压弯构件在弯矩作用平面内的稳定计算 | 173 |
| 6.4 压弯构件在弯矩作用平面外的稳定计算 | 180 |
| 6.5 压弯构件的计算长度         | 185 |
| 6.6 压弯构件的板件稳定         | 191 |
| 6.7 实腹式压弯构件的设计        | 194 |
| 6.8 格构式压弯构件的设计        | 198 |
| 6.9 柱脚设计              | 206 |

|                              |     |                                                                 |     |
|------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 6.10 冷弯薄壁型钢压弯构件·····         | 211 | 附录3 梁的整体稳定系数·····                                               | 251 |
| 思考题·····                     | 214 | 附录4 轴心受压构件的稳定<br>系数·····                                        | 254 |
| 习题·····                      | 214 | 附录5 柱的计算长度系数·····                                               | 257 |
| 第7章 钢与混凝土组合梁·····            | 218 | 附录6 疲劳计算的构件和连接<br>分类·····                                       | 259 |
| 7.1 钢与混凝土组合梁的应用·····         | 218 | 附录7 型钢表·····                                                    | 262 |
| 7.2 钢与混凝土组合梁的设计及<br>构造·····  | 220 | 附录8 螺栓和锚栓规格·····                                                | 276 |
| 7.3 钢与混凝土组合楼板的设计<br>及构造····· | 229 | 附录9 各种截面回转半径的近<br>似值·····                                       | 277 |
| 7.4 钢与混凝土组合楼盖例题·····         | 237 | 附录10 两端及跨间侧向均为简<br>支的受弯构件的 $\xi_1$ 、 $\xi_2$<br>和 $\mu_b$ ····· | 278 |
| 思考题·····                     | 247 | 参考文献·····                                                       | 279 |
| 习题·····                      | 247 |                                                                 |     |
| 附录·····                      | 248 |                                                                 |     |
| 附录1 钢材和连接的强度设计值·····         | 248 |                                                                 |     |
| 附录2 受弯构件的挠度允许值·····          | 250 |                                                                 |     |

# 第1章 绪 论

钢结构在我国现代化建设中的地位日益突出,在国民经济的各个领域都得到了大量应用。随着我国钢产量的持续增长,今后钢结构的发展前景和应用范围将更加宽广。本章主要介绍钢结构的特点及应用情况,概率极限状态设计方法。通过本章学习,要求了解钢结构的发展方向,掌握钢结构的特点及应用范围;掌握钢结构的极限状态;了解概率极限状态设计方法,了解承载能力极限状态效应基本组合和正常使用极限状态效应标准组合的设计表达式。

## 1.1 钢结构的特点

钢结构是用钢板、角钢、工字钢、槽钢、H型钢、钢管和圆钢等热轧钢材或冷加工成型的薄壁型钢制造而成的结构。它和其他材料的结构相比有如下特点:

(1) 建筑钢材强度高,钢结构的重量轻 由于钢材具有较高的强度,一般钢结构构件截面小而壁薄,在受压时有时不能充分发挥钢材强度高的特点,需要满足稳定性要求。

钢材虽然密度大,但强度高,在同样受力情况下钢结构自重小,做成的结构比较轻,适用于建造跨度大、高度高、承载重的构件或结构。结构的轻质性可以用材料的强度 $f$ 和质量密度 $\rho$ 的比值来衡量,比值越大,结构相对越轻。显然,建筑钢材的比值要比钢筋混凝土大的多。以同样跨度承受同样的荷载,钢屋架的重量最多不过为钢筋混凝土屋架的 $1/3 \sim 1/4$ ,冷弯薄壁型钢屋架甚至接近 $1/10$ 。

重量轻,可减轻基础的负荷,降低地基、基础部分的造价,同时还方便运输和吊装。轻质的屋盖结构可减小地震响应,但对可变荷载的变化比较敏感,如风吸力可造成钢屋架的拉、压杆应力反号。

轻质钢结构可以做成跨度较大、高度较高的结构以及灵活的结构形体。因此,钢结构可以满足建筑超高度和超跨度的要求。南京奥体中心体育场建筑面积约 $13.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,观众席位62000个。体育场的上空两条跨度超过360m的大拱,像两条高挂的彩虹,每个大拱约14MN的重量及 $45^\circ$ 的倾角使施工的复杂性和难度为世界所罕见(见图1-1)。深圳地王大厦共69层,总高度383.95m,建成时是亚洲第一高楼,也是全国第一

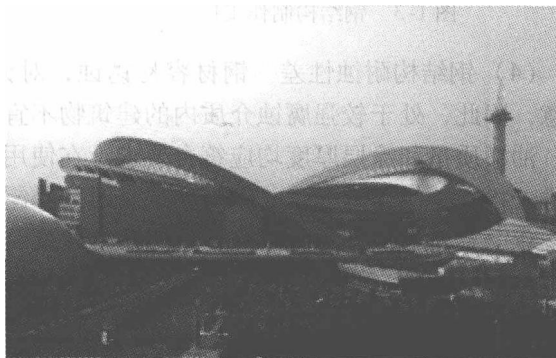


图1-1 南京奥体中心体育场

例钢结构高层建筑,目前位居世界十大高层建筑之列。上海环球金融中心大楼101层,高度492m,从而超越421m高的金茂大厦(见图1-2)。



(2) 钢材材质均匀, 与力学计算的假定比较符合, 具有良好的塑性和韧性 钢材由于冶炼和轧制过程的科学控制, 材质比较稳定, 其内部组织比较均匀, 接近各向同性, 为理想的弹性-塑性体, 因此, 钢结构实际受力情况和工程力学计算结果比较符合。良好的塑性, 可使结构或构件破坏前变形比较明显且易于被发现, 在一般条件下不会因超载而突然断裂。此外, 良好的塑性可调整结构或构件局部的高峰应力, 使应力变化趋于平缓。韧性好, 结构或构件在动荷载作用下破坏时要吸收比较多的能量, 良好的吸能能力和延性使钢结构具有优越的抗震、抗风性能, 适宜在动力荷载下工作。

(3) 钢结构具有良好的加工性能和焊接性能, 制造简便, 施工工期短 钢结构或构件所用材料单一且为轧制成的各种型材, 一般是在金属结构厂制作, 加工简易而迅速, 准确度和精度较高, 提高了建筑预工程化 (见图 1-3)。钢构件较轻, 连接简单, 安装方便, 钢结构建筑的预工程化使材料加工和安装一体化, 大大降低了建设成本; 并且加快了施工速度, 使工期能够缩短 40% 以上, 使建筑能更早投入使用 (见图 1-4)。小量钢结构和轻型钢结构还可在现场制作, 简易吊装。钢结构由于连接的特性, 易于加固、改建和拆迁。



图 1-2 上海环球金融中心和金茂大厦

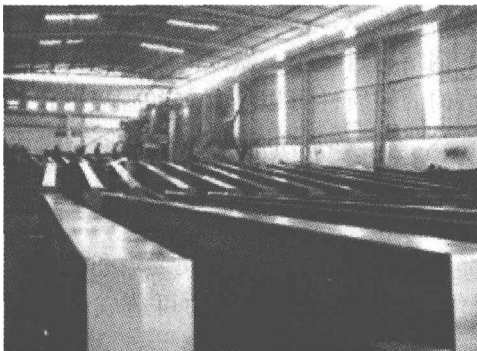


图 1-3 钢结构制作工厂

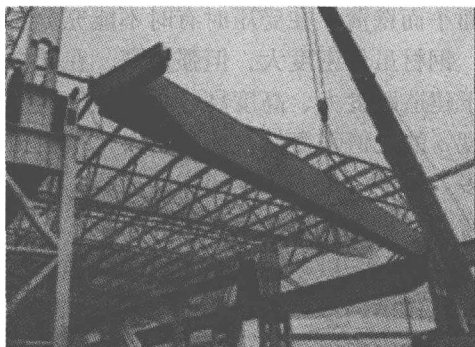


图 1-4 钢结构吊装

(4) 钢结构耐蚀性差 钢材容易锈蚀, 对钢结构必须注意防护, 特别是薄壁构件更要注意, 因此, 处于较强腐蚀介质内的建筑物不宜采用钢结构。钢结构在涂油漆以前应彻底除锈, 油漆质量和涂层厚度均应符合要求。在使用中应避免使结构受潮, 设计上应尽量避免出现难于检查、维修的死角。钢材如果长时间暴露在室外受到风雨等自然力的侵蚀, 必然会生锈老化, 其自身承载力会下降, 也会影响建筑美观。因此, 防腐问题是钢结构建筑设计需要解决的常见问题, 目前的做法主要是采用新型防腐和构造材料。

(5) 钢材耐热但耐火性能差 钢材长期经受  $100^{\circ}\text{C}$  以内的辐射热时, 其主要性能 (屈服强度和弹性模量) 几乎没有变化, 具有一定的耐热性。火灾是对钢结构建筑的最大危害, 钢材虽为非燃烧材料, 但耐火性差, 温度为  $400^{\circ}\text{C}$  时, 钢材的屈服强度将降至室温下强度的一半, 温度达到  $600^{\circ}\text{C}$  时, 钢材基本损失全部强度和刚度。因此, 当建筑采用无防火保护措施的钢结构时, 一旦发生火灾, 很容易使建筑损坏, 如美国世贸中心大楼外墙是排列很密的

钢柱，外包以银色铝板，在“9.11事件”中两个塔楼分别受飞机撞击后所产生的大火使钢材软化，最终导致大楼倒塌（见图1-5、图1-6）。因此，设计规定钢材表面温度超过 $150^{\circ}\text{C}$ 后需加以隔热防护，对有防火要求者，更需按相应规定采取隔热保护措施。

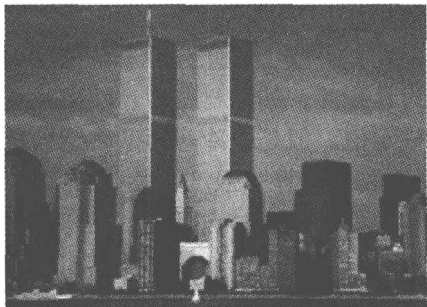


图 1-5 美国世贸中心双子塔

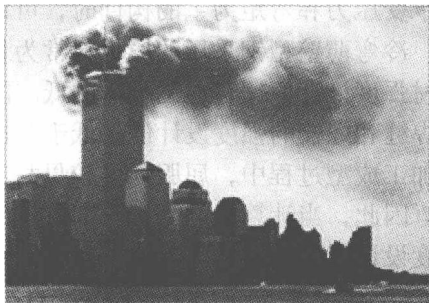


图 1-6 飞机撞击起火后的世贸中心

（6）钢结构密闭性较好 钢结构的钢材和连接（如焊接）的水密性和气密性较好，适宜用作要求密闭的板壳结构，如高压容器、油库、气柜、管道等。

（7）原材料可以循环使用，有助于环保和可持续发展 我国是世界上最大的砖砌体建筑与混凝土建筑大国。钢材是一种高强度、高效能的材料，钢结构在加工制造过程中产生的余料及废旧钢材经重新冶炼后具有很高的再循环价值，也可重复使用。目前，国际上引人瞩目的新型住宅产品——轻型钢结构住宅已引入我国，该类型住宅采用全封闭式保温隔热防潮系统，温度变化小，热损失低，不论冬夏，都具有舒适的居住环境（见图1-7）。室外 $0^{\circ}\text{C}$ 时，室内仍可以保持 $17^{\circ}\text{C}$ 以上；在室外温度达到 $30^{\circ}\text{C}$ 的情况下，室内温度仅为 $21^{\circ}\text{C}$ 左右。与砖混结构住宅相比，可节能60%以上，冬夏季空调设备可节约耗电30%以上，结构的废旧利用为100%。因此，钢材被称为绿色建筑材料或可持续发展的材料。

（8）钢结构建筑与结构的设计与功能一体化，使建筑更富有表现力 在钢结构建筑中，结构成为形象构成的重要因素，结构的形体、构件、节点在很大程度上制约着建筑的形象。建筑与结构的设计与功能只有做到一体化，才能使建筑更富有表现力，创造出技术与艺术融为一体的钢结构建筑。钢结构建筑设计的复杂化与精度要求越高，对细部设计的要求也越高。在现代钢结构建筑中，各种金属结构杆件、连接金属杆件的节点细部常常暴露在外，使建筑带有强烈的科技感。如建于1977年法国的巴黎蓬皮杜文化艺术中心，它的钢柱、钢梁、桁架等结构构件都裸露在外，从中不仅体现出技术美，而且体现出了人类的智慧和能力（见图1-8）。



图 1-7 轻型钢结构住宅

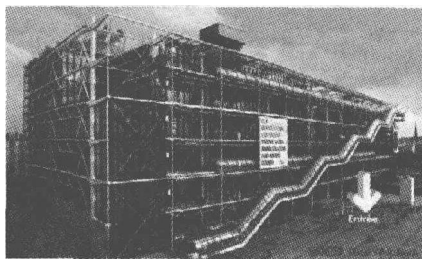


图 1-8 巴黎蓬皮杜文化艺术中心

(9) 冷弯薄壁型钢结构的特点 冷弯薄壁型钢由带钢或钢板辊轧、模压冷弯或冷拔成型, 承重构件的壁厚一般为  $2 \sim 6\text{mm}$ 。由于冷弯薄壁型钢构件的壁薄和截面开展, 与普通型材相比, 材料 (或截面积) 相同时, 截面二次矩和回转半径更大。因此, 冷弯薄壁型钢用作承受压力和弯矩为主的构件时, 可以获得很好的经济效益。

冷弯薄壁型钢采用的原材料常为带钢, 质量比普通钢材差一些, 因此, 冷弯薄壁型钢的钢材强度设计值比普通钢结构的低。同理, 其他的强度设计指标, 如钢材抗剪、端面承压以及焊缝和螺栓的强度设计值都低于普通钢结构中的相应规定值。但是, 冷弯薄壁型钢构件在冷加工成型过程中, 屈服强度较母材有较大的提高, 按全截面计算, 强度平均提高  $15\%$  左右。因此, 当计算截面面积全部有效的受拉、受压或受弯构件的强度时, 可考虑提高钢材的强度设计值。

## 1.2 钢结构的应用范围

钢结构的合理应用范围不仅取决于钢结构本身的特性, 还受到钢材品种、产量和经济水平的制约。过去由于我国钢产量不能满足国民经济各部门的需要, 钢结构的应用受到一定的限制。近年来我国钢材产量大幅增加, 新型结构形式不断推出, 使得钢结构得到了很大的发展。

根据实践经验和技术要求, 钢结构的合理应用范围大致如下。

(1) 工业厂房 钢铁企业和重型机械制造企业中, 起重机起重量较大或其工作较繁重的车间多采用钢骨架 (见图 1-9)。如冶金厂房的转炉炼钢车间、混铁炉车间、连铸连轧车间; 重型机械厂的铸钢车间、水压机车间、锻压车间等。

(2) 大跨结构 大跨结构最能体现钢结构强度高而重量轻的特点, 如飞机装配车间、飞机库、大会堂、体育 (场) 馆 (见图 1-10)、展览馆、大跨桥梁等, 其结构体系可为平板网架、网壳、空间桁架、斜拉、悬索和拱架等。

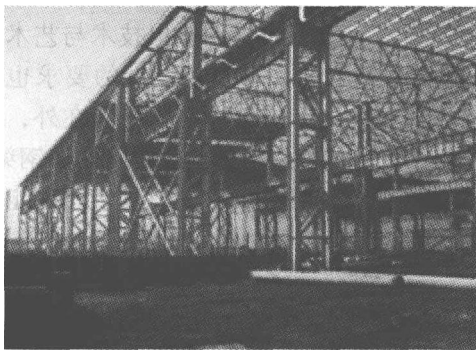


图 1-9 钢结构厂房

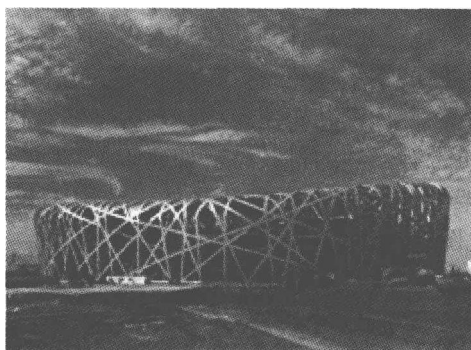


图 1-10 国家体育场

(3) 高耸结构 包括塔架和桅杆结构, 如广播或电视的发射塔 (见图 1-11)、发射桅杆、高压输电线塔 (见图 1-12)、环境大气监测塔等。

(4) 多层和高层建筑 由于钢结构具有优越的抗震抗风性能, 多层和高层建筑的骨架可采用钢结构或钢和混凝土组合成的组合结构, 如刚架—支撑结构、筒体结构、钢管混凝土结构、型钢混凝土组合结构等。



图 1-11 东方明珠电视塔

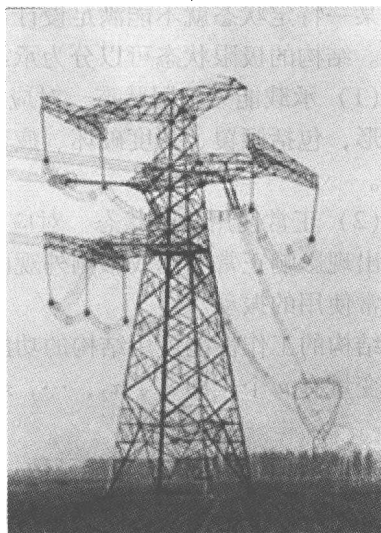


图 1-12 输电线塔架

(5) 承受振动荷载影响及地震作用的结构 钢材具有良好的韧性, 设有较大锻锤的车间, 其骨架直接承受的动力尽管不大, 但间接的振动却极为强烈, 所以, 对于承受振动荷载影响及抵抗地震作用要求高的结构宜采用钢结构。

(6) 板壳结构 如油罐、煤气柜、高炉炉壳、热风炉、漏斗、烟囱、水塔以及各种管道等。

(7) 其他特种结构 如栈桥、管道支架、井架和海上采油平台等。

(8) 可拆卸或移动的结构 建筑工地的生产、生活附属用房、临时展览馆等, 这些结构是可拆迁的。移动结构如塔式起重机、履带式起重机的吊臂、龙门起重机等。

(9) 轻型钢结构 包括轻型门式刚架房屋钢结构, 冷弯薄壁型钢结构以及钢管结构。这些结构可用于使用荷载较轻或跨度较小的建筑。

### 1.3 钢结构设计原则

结构设计的目的是既要保证所设计的结构和构件在施工和使用过程中能满足预期的安全性和使用性要求, 还要保证其经济的合理性。因此, 钢结构的设计原则要求做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。为确保安全适用, 结构由各种作用所产生的效应(内力和变形)不应大于结构(包括连接)由材料性能和几何因素等所决定的抗力或规定限值。然而, 影响结构功能的各种因素(如作用、材料性能、几何尺寸、计算模式、施工质量等)都具有不确定性, 既有随机变量, 也有随机过程, 作用和抗力的变异可能使作用效应大于结构抗力, 结构不可能百分之百的可靠, 而只能对其作出一定的概率保证。这种以概率论和数理统计为基础, 对作用和抗力进行定量分析的方法称为概率极限状态设计法。

#### 1.3.1 概率极限状态设计方法

概率极限状态设计方法的前提是必须明确结构或构件的极限状态。当结构或其组成部分

超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求时,此特定状态就称为该功能的极限状态。结构的极限状态可以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 对应于结构或构件达到最大承载能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。

(2) 正常使用极限状态 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,出现影响正常使用或耐久性能的局部损坏以及影响正常使用的振动。

结构的工作性能可用结构的功能函数来描述。若结构设计时需要考虑影响结构可靠度的随机变量有  $n$  个,即  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,则在这  $n$  个随机变量间通常可建立函数关系

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

式(1-1)即称为结构的功能函数。

结构的可靠度通常受荷载、材料性能、几何参数和计算公式精确性等因素的影响。这些具有随机性的因素称为“基本变量”。对于一般建筑结构,可以归并为两个基本变量,即荷载效应  $S$  和结构抗力  $R$ ,并设这两者都服从正态分布。因此,结构的功能函数为

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

函数  $Z$  也是一个随机变量,并服从正态分布。在实际工程中,可能出现下列三种情况: $Z > 0$ ,结构处于可靠状态; $Z = 0$ ,结构达到临界状态,即极限状态; $Z < 0$ ,结构处于失效状态。

由于基本变量具有不定性,作用于结构的荷载存在出现高值的可能,材料性能也存在出现低值的可能,即使设计者采用了相当保守的设计方案,但在结构投入使用后,谁也不能保证它绝对可靠,因而对所设计的结构的功能只能作出一定概率的保证。这和进行其他有风险的工作一样,只要可靠的概率足够大,或者说,失效概率足够小,便可认为所设计的结构是安全的。

按照概率极限状态设计方法,结构的可靠度定义为: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。这里所说“完成预定功能”就是对于规定的某种功能来说结构不会失效( $Z \geq 0$ )。这样若以  $p_s$  表示结构的可靠度,则上述定义可表达为

$$p_s = P(Z \geq 0) \quad (1-3)$$

结构的失效概率以  $p_f$  表示,则

$$p_f = P(Z < 0) \quad (1-4)$$

由于事件( $Z < 0$ )与事件( $Z \geq 0$ )是对立的,所以结构可靠度  $p_s$  与结构的失效概率  $p_f$  符合下式

$$p_s = 1 - p_f \quad (1-5)$$

因此,结构可靠度的计算可以转换为结构失效概率的计算。可靠的结构设计指的是使失效概率小到人们可以接受的程度。

为了计算结构的失效概率  $p_f$ ,最好是求得功能函数  $Z$  的分布。图 1-13 中  $f_Z(Z)$  为功能函数  $Z$  的概率密度曲线,图中横坐标  $Z = 0$  处,结构处于极限状态;纵坐标以左  $Z < 0$ ,结构处于失效状态;纵坐标以右  $Z > 0$ ,结构处于可靠状态。图中阴影面积表示事件( $Z < 0$ )的概率,就是失效概率,可积分求得

$$p_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_Z(Z) dZ \quad (1-6)$$

但一般来说,  $Z$  的分布很难求出。因此, 失效概率的计算仅仅在理论上可以解决, 实际上很难求出, 这使得概率设计法一直不能付诸实用。20 世纪 60 年代末期, 美国学者康奈尔提出比较系统的一次二阶矩的设计方法, 才使得概率设计法进入了实用阶段。

一次二阶矩法不直接计算结构的失效概率  $p_f$ , 以  $\mu$  代表平均值, 以  $\sigma$  代表标准差, 将图 1-13 中  $Z$  的平均值  $\mu_Z$  用  $Z$  的标准差  $\sigma_Z$  来度量, 根据平均值和标准差的性质可知

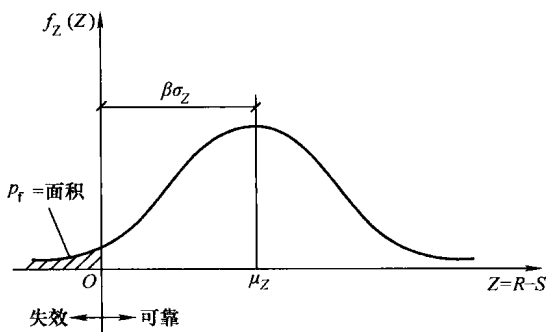


图 1-13  $Z$  的概率密度  $f_Z(z)$  曲线

$$\left. \begin{aligned} \mu_Z &= \mu_R - \mu_S \\ \sigma_Z^2 &= \sigma_R^2 - \sigma_S^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

由于标准差都取正值, 式 (1-4) 可改写成

$$p_f = P\left(\frac{Z}{\sigma_Z} < 0\right)$$

和

$$p_f = P\left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} < \frac{-\mu_Z}{\sigma_Z}\right)$$

因为  $\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}$  服从标准正态分布, 所以又可写成

$$p_f = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (1-8)$$

$\Phi(\cdot)$  为标准正态分布函数。

令  $\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}$  并用式 (1-7) 的值代入, 则有

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_S^2}} \quad (1-9)$$

式 (1-8) 成为

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (1-10)$$

因为是正态分布, 所以

$$p_s = 1 - p_f = \Phi(\beta) \quad (1-11)$$

由式 (1-10)、式 (1-11) 可见,  $\beta$  和  $p_f$  (或  $p_s$ ) 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的表中查得  $p_f$ 。图 1-13 和表 1-1 都给出了  $\beta$  和  $p_f$  之间的对应关系。图 1-13 中  $f_Z(Z)$  是  $Z$  的概率密度函数, 阴影面积的大小就是  $p_f$ 。由于  $\beta$  越大  $p_f$  就越小, 结构也就越可靠, 所以称  $\beta$  为可靠指标。

表 1-1 正态分布时  $\beta$  与  $p_f$  的对应值

| 可靠指标 $\beta$ | 4.5                     | 4.2                      | 4.0                      | 3.7                      | 3.5                      | 3.2                      | 3.0                      | 2.7                      | 2.5                      | 2.0                      |
|--------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 失效概率 $p_f$   | 3.4<br>$\times 10^{-6}$ | 1.34<br>$\times 10^{-5}$ | 3.17<br>$\times 10^{-5}$ | 1.08<br>$\times 10^{-4}$ | 2.33<br>$\times 10^{-4}$ | 6.87<br>$\times 10^{-4}$ | 1.35<br>$\times 10^{-3}$ | 3.47<br>$\times 10^{-3}$ | 6.21<br>$\times 10^{-3}$ | 2.28<br>$\times 10^{-2}$ |

以上推算曾假定  $R$  和  $S$  都服从正态分布。实际上结构的荷载效应多数不服从正态分布,结构的抗力一般也不服从正态分布。然而对于非正态的随机变量可以作当量正态变换,找出它的当量正态分布的平均值和标准差,然后就可以按照正态随机变量一样对待。

为了使不同结构能够具有相同的可靠度,GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》规定出了各类构件按承载力极限状态设计时的可靠指标,即目标可靠指标(见表 1-2)。目标可靠指标的取值从理论上说应根据各种结构构件的重要性、破坏性质及失效后果,以优化方法确定。但是,实际上这些因素还难以找到合理的定量分析方法。因此,目前各个国家在确定目标可靠指标时都采用“校准法”,通过对原有规范作反演算,找出隐含在现有工程结构中相应的可靠指标值,经过综合分析后确定设计规范中相应的可靠指标值。这种方法的实质是从整体上继承原有的可靠度水准,是一种稳妥可行的办法。对钢结构各类主要构件校准的结果, $\beta$  一般为 3.16~3.62。一般的工业与民用建筑的安全等级属于二级。钢结构的强度破坏和大多数失稳破坏都具有延性破坏性质,所以,钢结构构件设计的目标可靠指标一般为 3.2。但是也有少数情况,主要是某些壳体结构和圆管压杆及一部分方管压杆失稳时具有脆性破坏特征,对这些构件,可靠指标按表 1-2 应取 3.7。疲劳破坏也具有脆性特征,但我国现行设计规范对疲劳计算仍然采用允许应力法。钢结构连接的承载力极限状态经常是强度破坏而不是屈服,可靠指标应比构件为高,一般推荐用 4.5。

表 1-2 目标可靠指标

| 破坏类型 | 安全等级 |     |     |
|------|------|-----|-----|
|      | 一级   | 二级  | 三级  |
| 延性破坏 | 3.7  | 3.2 | 2.7 |
| 脆性破坏 | 4.2  | 3.7 | 3.2 |

### 1.3.2 设计表达式

GB 50017—2003《钢结构设计规范》规定,除疲劳计算外,采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,用分项系数的设计表达式进行计算。这是考虑到用概率法的设计式,广大设计人员不熟悉也不习惯,同时许多基本统计参数还不完善,不能列出,因此,GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》建议采用广大设计人员所熟悉的分项系数设计表达式

$$\frac{R_k}{\gamma_R} \geq \gamma_G S_{Gk} + \gamma_Q S_{Qk} \quad (1-12)$$

式中  $R_k$ ——抗力标准值(由材料强度标准值和截面公称尺寸计算而得);

$S_{Gk}$ ——按标准值计算的永久荷载( $G$ )效应值;

$S_{Qk}$ ——按标准值计算的可变荷载( $Q$ )效应值;

$\gamma_R$ 、 $\gamma_G$ 、 $\gamma_Q$ ——抗力分项系数、永久荷载分项系数和可变荷载分项系数。

三个分项系数都与目标可靠指标 $\beta$ 有关,而可靠度又和所有的基本变量有关。为了方便设计,《建筑结构可靠度设计统一标准》经过计算和分析,规定出一般情况下荷载分项系数 $\gamma_G=1.2$ , $\gamma_Q=1.4$ ;当永久荷载效应与可变荷载效应异号时,这时永久荷载对设计是有利的(如屋盖构件设计中,当风吸力作用使屋盖掀起时),应取 $\gamma_G=1.0$ , $\gamma_Q=1.4$ 。

在荷载分项系数统一规定的条件下,现行钢结构设计规范对钢结构构件抗力分项系数进行分析,使所设计的结构构件的实际 $\beta$ 值与预期的 $\beta$ 值差值甚小,并结合工程经验规定出Q235钢的 $\gamma_R=1.087$ ;对Q345、Q390和Q420钢的 $\gamma_R=1.111$ 。

钢结构设计用应力表达,采用钢材强度设计值,强度设计值(用 $f$ 表示)是钢材的屈服强度( $f_y$ )除以抗力分项系数 $\gamma_R$ 的商,如Q235钢抗拉强度设计值为 $f=f_y/1.087$ ;对于端面承压和连接则为极限强度( $f_u$ )除以抗力分项系数 $\gamma_{Ru}$ ,即 $f=f_u/\gamma_{Ru}=f_u/1.538$ 。

施加在结构上的可变荷载往往不止一种,这些荷载不可能同时达到各自的最大值。因此,还要根据组合荷载效应的概率分布来确定荷载的组合系数,对于承载能力极限状态,荷载效应的基本组合按下式确定

$$\gamma_0(\gamma_G\sigma_{Gk} + \gamma_{Q1}\sigma_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi}\psi_{ci}\sigma_{Qik}) \leq f \quad (1-13)$$

式中  $\gamma_0$ ——结构重要性系数,对安全等级为一级或设计使用年限为100年以上的结构构件,不应小于1.1,对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1.0,对安全等级为三级或设计使用年限为5年的结构构件,不应小于0.9;

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

$\sigma_{Q1k}$ ——起控制作用的第一个可变荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力(该值使计算结果为最大);

$\sigma_{Qik}$ ——其他第 $i$ 个可变荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力;

$\gamma_G$ ——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,由可变荷载效应控制的组合取1.2,但遇到以永久荷载为主的结构时则取1.35,当永久荷载效应对结构构件的承载能力有利时取1.0,验算结构倾覆、滑移或漂浮时取0.9;

$\gamma_{Q1}$ 、 $\gamma_{Qi}$ ——第1个和其他第 $i$ 个可变荷载分项系数,当可变荷载效应对结构构件的承载能力不利时,取1.4(当楼面活荷载大于 $4.0\text{kN/m}^2$ 时,取1.3);有利时,取为0;

$\psi_{ci}$ ——第 $i$ 个可变荷载的组合值系数,可按GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》的规定采用。

对于一般排架、框架结构,可采用简化式计算,对由可变荷载效应控制的组合,设计式为

$$\gamma_0(\gamma_G\sigma_{Gk} + \psi_c \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi}\sigma_{Qik}) \leq f \quad (1-14)$$

式中  $\psi_c$ ——简化式中采用的荷载组合值系数,一般情况下可采用0.9,当只有1个可变荷载时,取为1.0。

对于偶然组合,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，具体的设计表达式及各种系数，应符合专门规范的规定。

对于正常使用极限状态，按《建筑结构可靠度设计统一标准》的规定要求分别采用荷载的标准组合、频遇组合和准永久组合进行设计，并使变形等设计值不超过相应的规定限值。

钢结构只考虑荷载的标准组合，其设计式为

$$v_{Gk} + v_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} v_{Qik} \leq [v] \quad (1-15)$$

式中  $v_{Gk}$ ——永久荷载的标准值在结构或构件中产生的变形值；

$v_{Q1k}$ ——起控制作用的第一个可变荷载的标准值在结构或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构件中产生的变形值；

$[v]$ ——结构或构件的容许变形值。

## 1.4 钢结构简史与发展趋势

### 1.4.1 钢结构简史

大约在公元前 2000 年，位于伊拉克境内的幼发拉底河和底格里斯河之间（史称两河流域）的美索不达米亚平原就出现了早期的炼铁术。

我国是最早发明炼铁技术的国家之一，早在战国时期（公元前 475—前 221 年），我国的炼铁技术已很盛行。公元 65 年（汉明帝时代），在云南永平县澜沧江的兰津古渡上修建起了一座竹木软桥。约公元 1476 年，兰津桥再次修葺，由竹木软桥更新为铁索吊桥，并改名为“霁虹桥”。桥全长 113.4m，宽 3.7m，净跨 57.3m，由 18 根铁索组成，铁索两端固定在澜沧江两岸的峭壁上，桥的两端建有一亭和两座关楼。霁虹桥在我国的桥梁建筑史上有着极其重要的地位，它是我国最早的铁索吊桥。此后，为了便利交通，跨越深谷，曾陆续建造了数十座铁链桥。其中跨度最大的为 1705 年（清康熙四十四年）建成的四川泸定大渡河桥，桥宽 2.8m，跨长 100m，由 9 根桥面铁链和 4 根桥栏铁链构成，两端系于直径 20cm、长 4m 的生铁铸成的锚桩上。

欧美等国家中最早将铁作为建筑材料的当属英国。1779 年，英国工程师 Abraham Darby 在塞文河上设计建造了第一座跨度 30.65m 的铸铁拱桥——Coalbrookdale 桥。英国工业革命后，随着近代炼铁技术的诞生，19 世纪便成为铁路和钢桥的时代。1846—1850 年间在英国威尔士修建的布里塔尼亚桥（Brittania Bridge）是这方面的典型代表。该桥共有 4 跨，跨长分别为 70m、140m、140m、70m，每跨均为箱形梁式桥，由锻铁型板和角铁经铆钉连接而成。随着 1855 年英国人发明贝氏转炉炼钢法和 1864 年法国人发明平炉炼钢法，以及 1870 年成功轧制出工字钢之后，强度高且韧性好的钢材开始在建筑领域逐渐取代锻铁材料，自 1890 年以后成为金属结构的主要材料。20 世纪初焊接（welding）技术出现，1934 年高强度螺栓（high-strength bolts）连接问世，极大地促进了钢结构的发展。除西欧、北美之外，钢结构在前苏联和日本等国家也获得了广泛的应用，逐渐发展成为全世界所接受的重要结构