

WUTP

21世纪高等职业技术教育房屋建筑工程专业系列教材

*Gangjiegou Jiben Lilun yu Yingyong*

# 钢结构基本理论与应用

主 编 汪 菁

武汉理工大学出版社

TU391  
C20

21 世纪高等职业技术教育房屋建筑工程专业系列教材

# 钢结构基本理论与应用

主 编 汪 菁  
副主编 崔秀琴

武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

## 【内容简介】

本书是“21 世纪高等职业技术教育房屋建筑工程专业系列教材”,是根据目前高职高专院校建筑工程专业的教学基本要求,依据我国最新修订的相关规范、标准编写的。

全书共 10 章,内容包括:绪论、建筑钢材、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯构件和压弯构件、钢屋盖、钢-混凝土组合结构简介、大跨及高层钢结构简介、钢结构的制作和防护。

本书除可作为高等职业技术教育房屋建筑工程专业的教材外,还可作为土建类其他相关专业的教学用书,也可作为土建类专业一般工程技术人员的阅读参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

钢结构基本理论与应用/汪菁主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2004. 11  
ISBN 7-5629-2151-2

I. 钢…

II. 汪…

III. 钢结构

IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 005318 号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市珞狮路 122 号 邮政编码:430070)

<http://www.techbook.com.cn>

E-mail:tiandq@mail.whut.edu.cn

印 刷:武汉理工大印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:20.25

插 页:2

字 数:520 千字

版 次:2004 年 11 月第 1 版

印 次:2004 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

定 价:28.00 元

本社购书热线电话:(027)87394412 87397097

(本书如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。)

# 21 世纪高等职业技术教育房屋建筑工程专业系列教材

## 编审委员会名单

主任委员 张保善

副主任委员 吴大炜 蔡德民 苏 炜

编 委 (以姓氏笔画为序)

王付全 王雅红 代学灵 田道全

苏 炜 吴大炜 刘永坚 何世玲

汪 菁 李九宏 周建郑 张 玲

张兴昌 张保善 张建设 赵华玮

黄家骏 蔡德民

秘书长(总责任编辑) 田道全

# 前 言

本教材是根据高等职业技术教育房屋建筑工程专业钢结构课程的基本要求,依据我国最新修订的国家标准 GB50017—2003《钢结构设计规范》、GB50205—2001《钢结构工程施工质量验收规范》、GB50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》、GB50009—2001《建筑结构荷载规范》等新规范、新标准编写的教科书。

为适应高职高专教育改革,满足应用型人才培养的要求,根据专业课程改革的现状,本教材力求做到:

(1) 在满足基本理论必需、够用的基础上,紧密结合国家规范、标准及目前钢结构的工程应用情况,突出工程应用能力和技能的培养;

(2) 内容深入浅出,概念清楚,便于学生理解。针对目前钢结构的工程应用情况,本书在最后第 8、9、10 章分别安排了钢-混凝土组合结构简介、大跨及高层钢结构简介、钢结构的制作和防护等内容。

本书由汪菁担任主编,崔秀琴担任副主编。具体编写分工如下:汪菁编写第 1、2、6、10 章;浮海梅编写第 3、9 章;郭兵编写第 4、5 章;吴蓉编写第 7.1、7.2、7.3 节和第 8 章;崔秀琴编写第 7.4、7.5、7.6 节。全书由汪菁统稿。

本书在编写过程中参阅了部分公开出版的同类教材和有关文献,在此向原书作者表示衷心的感谢!并对为本书出版付出辛勤劳动的编辑同志表示衷心的感谢!

限于编者水平,书中难免存在不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2004 年 8 月

# 目 录

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 1 绪论 .....                    | (1)  |
| 本章提要 .....                    | (1)  |
| 1.1 钢结构的特点和应用 .....           | (1)  |
| 1.1.1 钢结构的特点 .....            | (1)  |
| 1.1.2 钢结构的应用范围 .....          | (2)  |
| 1.2 钢结构的设计原理和计算方法 .....       | (3)  |
| 1.2.1 结构的功能要求 .....           | (3)  |
| 1.2.2 结构的可靠度 .....            | (3)  |
| 1.2.3 概率极限状态设计法 .....         | (3)  |
| 1.3 钢结构的发展 .....              | (5)  |
| 1.4 钢结构课程的任务和学习要求 .....       | (9)  |
| 1.4.1 钢结构课程的任务 .....          | (9)  |
| 1.4.2 钢结构课程学习的基本要求 .....      | (9)  |
| 本章小结 .....                    | (9)  |
| 思考题 .....                     | (10) |
| 2 建筑钢材 .....                  | (11) |
| 本章提要 .....                    | (11) |
| 2.1 建筑钢材的基本要求 .....           | (11) |
| 2.2 钢材的破坏形式 .....             | (11) |
| 2.3 钢材的机械性能 .....             | (12) |
| 2.3.1 强度和塑性 .....             | (12) |
| 2.3.2 冷弯性能 .....              | (14) |
| 2.3.3 韧性 .....                | (14) |
| 2.4 影响钢材机械性能的因素 .....         | (15) |
| 2.4.1 化学成分的影响 .....           | (15) |
| 2.4.2 冶炼、浇注和轧制的影响 .....       | (16) |
| 2.4.3 钢材硬化的影响 .....           | (17) |
| 2.4.4 温度的影响 .....             | (18) |
| 2.4.5 复杂应力、应力集中及残余应力的影响 ..... | (19) |
| 2.4.6 钢材的疲劳 .....             | (21) |
| 2.5 钢材的种类、规格及选用 .....         | (26) |
| 2.5.1 钢材的种类 .....             | (26) |
| 2.5.2 钢材的规格 .....             | (28) |
| 2.5.3 钢材的选用 .....             | (30) |

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 本章小结 .....                     | (32) |
| 思考题 .....                      | (32) |
| <b>3 钢结构的连接</b> .....          | (33) |
| 本章提要 .....                     | (33) |
| 3.1 钢结构连接的种类及其特点 .....         | (33) |
| 3.1.1 焊缝连接 .....               | (34) |
| 3.1.2 螺栓连接 .....               | (34) |
| 3.1.3 铆钉连接 .....               | (35) |
| 3.2 焊缝连接的方法、形式和质量级别 .....      | (35) |
| 3.2.1 焊接方法 .....               | (35) |
| 3.2.2 焊缝连接的形式 .....            | (36) |
| 3.2.3 焊缝质量级别 .....             | (38) |
| 3.2.4 焊缝符号及标注方法 .....          | (38) |
| 3.3 对接焊缝的构造和计算 .....           | (41) |
| 3.3.1 对接焊缝的形式和构造 .....         | (42) |
| 3.3.2 对接焊缝的计算 .....            | (43) |
| 3.4 角焊缝的构造和计算 .....            | (46) |
| 3.4.1 角焊缝的形式和构造 .....          | (46) |
| 3.4.2 角焊缝的计算 .....             | (49) |
| 3.5 焊接残余应力和残余变形 .....          | (58) |
| 3.5.1 焊接残余应力和残余变形产生的原因 .....   | (58) |
| 3.5.2 焊接残余应力和残余变形的危害 .....     | (60) |
| 3.5.3 减少焊接残余应力和残余变形的措施 .....   | (60) |
| 3.6 普通螺栓连接的构造和计算 .....         | (61) |
| 3.6.1 普通螺栓连接的构造 .....          | (61) |
| 3.6.2 普通螺栓连接的受力性能和计算 .....     | (64) |
| 3.7 高强度螺栓连接的构造和计算 .....        | (75) |
| 3.7.1 高强度螺栓的材料和性能等级 .....      | (75) |
| 3.7.2 高强度螺栓的预拉力和紧固方法 .....     | (75) |
| 3.7.3 摩擦型高强度螺栓连接的受力性能和计算 ..... | (77) |
| 3.7.4 承压型高强度螺栓连接的计算要点 .....    | (82) |
| 本章小结 .....                     | (83) |
| 思考题 .....                      | (83) |
| 习题 .....                       | (84) |
| <b>4 轴心受力构件</b> .....          | (87) |
| 本章提要 .....                     | (87) |
| 4.1 轴心受力构件的类型 .....            | (87) |
| 4.1.1 轴心受力构件的种类 .....          | (87) |
| 4.1.2 轴心受力构件的截面形式 .....        | (87) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 4.2 轴心受力构件正常工作的基本要求     | (88)  |
| 4.2.1 轴心受力构件的强度         | (88)  |
| 4.2.2 轴心受力构件的刚度         | (88)  |
| 4.2.3 轴心受压构件的整体稳定       | (90)  |
| 4.2.4 实腹式轴心受压构件的局部稳定    | (101) |
| 4.3 实腹式轴心受压构件的截面设计      | (104) |
| 4.3.1 选择截面形式            | (104) |
| 4.3.2 选择截面尺寸            | (105) |
| 4.3.3 截面验算              | (105) |
| 4.3.4 构造要求              | (106) |
| 4.4 格构式轴心受压构件的设计        | (108) |
| 4.4.1 格构式轴心受压构件的组成      | (108) |
| 4.4.2 格构式轴心受压构件的整体稳定承载力 | (108) |
| 4.4.3 格构式轴心受压构件的设计      | (112) |
| 4.5 轴心受压柱的柱头与柱脚         | (117) |
| 4.5.1 柱头的形式和构造          | (117) |
| 4.5.2 柱脚的构造和计算          | (119) |
| 本章小结                    | (124) |
| 思考题                     | (125) |
| 习题                      | (125) |
| 5 受弯构件                  | (126) |
| 本章提要                    | (126) |
| 5.1 梁的类型                | (126) |
| 5.1.1 梁的种类              | (126) |
| 5.1.2 梁的截面形式            | (126) |
| 5.2 梁的强度、刚度和整体稳定性       | (127) |
| 5.2.1 梁的强度              | (127) |
| 5.2.2 梁的刚度              | (132) |
| 5.2.3 梁的整体稳定性           | (132) |
| 5.3 型钢梁设计               | (139) |
| 5.3.1 单向受弯型钢梁           | (139) |
| 5.3.2 双向受弯型钢梁           | (141) |
| 5.4 钢板组合梁设计             | (141) |
| 5.4.1 截面选择              | (141) |
| 5.4.2 截面验算              | (143) |
| 5.4.3 梁截面沿长度的改变         | (143) |
| 5.4.4 翼缘与腹板连接焊缝的计算      | (143) |
| 5.4.5 组合梁的局部稳定和腹板加劲肋设计  | (148) |
| 5.5 梁的拼接与连接             | (161) |

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| 5.5.1 梁的拼接 .....         | (161)        |
| 5.2.2 主次梁的连接 .....       | (162)        |
| 本章小结 .....               | (164)        |
| 思考题 .....                | (165)        |
| 习题 .....                 | (165)        |
| <b>6 拉弯构件和压弯构件 .....</b> | <b>(167)</b> |
| 本章提要 .....               | (167)        |
| 6.1 拉弯和压弯构件的类型 .....     | (167)        |
| 6.1.1 拉弯、压弯构件的种类 .....   | (167)        |
| 6.1.2 拉弯、压弯构件的截面形式 ..... | (168)        |
| 6.2 拉弯、压弯构件的强度和刚度 .....  | (169)        |
| 6.2.1 拉弯、压弯构件的强度 .....   | (169)        |
| 6.2.2 拉弯、压弯构件的刚度 .....   | (170)        |
| 6.3 实腹式压弯构件的稳定性 .....    | (171)        |
| 6.3.1 实腹式压弯构件的整体稳定 ..... | (171)        |
| 6.3.2 实腹式压弯构件的局部稳定 ..... | (176)        |
| 6.4 压弯构件的计算长度 .....      | (178)        |
| 6.4.1 单根压弯构件的计算长度 .....  | (178)        |
| 6.4.2 框架柱的计算长度 .....     | (178)        |
| 6.5 实腹式压弯构件的截面设计 .....   | (180)        |
| 6.5.1 选择截面 .....         | (180)        |
| 6.5.2 截面验算 .....         | (181)        |
| 6.6 压弯构件的柱头与柱脚 .....     | (183)        |
| 6.6.1 柱头 .....           | (183)        |
| 6.6.2 柱脚 .....           | (183)        |
| 本章小结 .....               | (186)        |
| 思考题 .....                | (186)        |
| 习题 .....                 | (186)        |
| <b>7 屋盖结构 .....</b>      | <b>(188)</b> |
| 本章提要 .....               | (188)        |
| 7.1 屋盖结构的组成和形式 .....     | (188)        |
| 7.2 屋盖支撑 .....           | (189)        |
| 7.2.1 屋盖支撑的作用 .....      | (190)        |
| 7.2.2 屋盖支撑的布置 .....      | (190)        |
| 7.2.3 支撑的截面选择和连接构造 ..... | (193)        |
| 7.3 钢檩条 .....            | (195)        |
| 7.3.1 檩条的形式 .....        | (195)        |
| 7.3.2 檩条的计算 .....        | (195)        |
| 7.3.3 檩条的连接与构造 .....     | (197)        |

|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| 7.4 普通钢屋架(桁架)设计 .....      | (200)        |
| 7.4.1 屋架的形式和主要尺寸 .....     | (200)        |
| 7.4.2 屋架的荷载和内力计算 .....     | (203)        |
| 7.4.3 屋架杆件的计算长度 .....      | (204)        |
| 7.4.4 屋架杆件的截面选择和计算 .....   | (207)        |
| 7.4.5 屋架的节点设计 .....        | (210)        |
| 7.4.6 屋架施工图的绘制 .....       | (216)        |
| 7.5 普通钢屋架设计实例 .....        | (217)        |
| 7.5.1 设计资料 .....           | (217)        |
| 7.5.2 屋架形式及几何尺寸 .....      | (217)        |
| 7.5.3 檩条和支撑的布置 .....       | (218)        |
| 7.5.4 檩条设计 .....           | (218)        |
| 7.5.5 屋架节点荷载计算 .....       | (220)        |
| 7.5.6 屋架杆件内力计算 .....       | (220)        |
| 7.5.7 杆件设计 .....           | (221)        |
| 7.5.8 节点设计 .....           | (224)        |
| 7.5.9 屋架施工图 .....          | (229)        |
| 7.6 轻型钢屋架设计特点 .....        | (230)        |
| 7.6.1 轻型钢屋架的形式 .....       | (230)        |
| 7.6.2 轻型钢屋架的计算特点 .....     | (231)        |
| 7.6.3 轻型钢屋架的节点构造 .....     | (231)        |
| 本章小结.....                  | (233)        |
| 思考题.....                   | (233)        |
| <b>8 钢-混凝土组合结构简介 .....</b> | <b>(235)</b> |
| 本章提要.....                  | (235)        |
| 8.1 钢-混凝土组合结构发展简介 .....    | (235)        |
| 8.1.1 钢-混凝土组合结构的特点 .....   | (235)        |
| 8.1.2 钢-混凝土组合结构的发展 .....   | (236)        |
| 8.2 钢-混凝土组合梁 .....         | (238)        |
| 8.2.1 钢-混凝土组合梁的工作原理 .....  | (238)        |
| 8.2.2 钢-混凝土组合梁的类型 .....    | (239)        |
| 8.3 钢-混凝土组合柱 .....         | (240)        |
| 8.3.1 钢-混凝土组合柱的工作原理 .....  | (240)        |
| 8.3.2 钢-混凝土组合柱的类型 .....    | (241)        |
| 本章小结.....                  | (241)        |
| 思考题.....                   | (241)        |
| <b>9 大跨及高层钢结构简介 .....</b>  | <b>(242)</b> |
| 本章提要.....                  | (242)        |
| 9.1 大跨度房屋钢结构 .....         | (242)        |

|           |                               |              |
|-----------|-------------------------------|--------------|
| 9.1.1     | 平面结构 .....                    | (245)        |
| 9.1.2     | 网架结构 .....                    | (249)        |
| 9.1.3     | 悬索结构 .....                    | (260)        |
| 9.2       | 高层房屋钢结构 .....                 | (263)        |
| 9.2.1     | 高层钢结构的发展概况 .....              | (263)        |
| 9.2.2     | 高层钢结构体系的分类及应用 .....           | (266)        |
|           | 本章小结 .....                    | (270)        |
|           | 思考题 .....                     | (271)        |
| <b>10</b> | <b>钢结构的制作和防护 .....</b>        | <b>(272)</b> |
|           | 本章提要 .....                    | (272)        |
| 10.1      | 钢结构的制作 .....                  | (272)        |
| 10.1.1    | 钢结构制作的主要工序 .....              | (272)        |
| 10.1.2    | 钢结构安装要点 .....                 | (279)        |
| 10.1.3    | 钢结构制作对设计的要求 .....             | (280)        |
| 10.2      | 钢结构的防护 .....                  | (280)        |
| 10.2.1    | 钢结构的防锈 .....                  | (280)        |
| 10.2.2    | 钢结构的防火 .....                  | (283)        |
|           | 本章小结 .....                    | (286)        |
|           | 思考题 .....                     | (286)        |
|           | 附录 .....                      | (287)        |
| 附表 1      | 钢材和连接的强度设计值 .....             | (287)        |
| 附表 2      | 轴心受压构件的稳定系数 .....             | (290)        |
| 附表 3      | 柱的计算长度系数 .....                | (292)        |
| 附表 4      | 各种截面回转半径的近似值 .....            | (293)        |
| 附表 5      | 热轧等边角钢的规格及截面特性 .....          | (294)        |
| 附表 6      | 热轧不等边角钢 .....                 | (298)        |
| 附表 7      | 热轧普通工字钢的规格及截面特性 .....         | (305)        |
| 附表 8      | 热轧普通槽钢的规格及截面特性 .....          | (307)        |
| 附表 9      | 热轧 H 型钢和剖分 T 型钢的规格及截面特性 ..... | (309)        |
| 附表 10     | 锚栓规格 .....                    | (311)        |
| 附表 11     | 螺栓的有效面积 .....                 | (312)        |
|           | 参考文献 .....                    | (313)        |

# 1 绪 论

## 本章提要

本章讲述钢结构的特点和应用范围;介绍现行《钢结构设计规范》的设计原理和计算方法及当前钢结构的发展方向;讨论钢结构课程的学习任务和要求。

## 1.1 钢结构的特点和应用

### 1.1.1 钢结构的特点

钢结构是由钢板、热轧型钢及冷加工成型的薄壁型钢等制成的。与钢筋混凝土结构、砖石结构、木结构等其他结构相比,钢结构有如下特点。

#### (1) 钢材强度高,结构重量轻

钢材与钢筋混凝土、砖石及木材相比,虽然容重大,但由于其强度很高,因此在承载力相同的条件下,钢结构的重量比其他结构要轻。例如,当跨度和荷载相同时,普通钢屋架的重量仅为钢筋混凝土屋架重量的  $1/3 \sim 1/4$ 。钢结构特别适用于跨度大、高度高和荷载大的结构。钢结构由于重量轻,运输和安装较方便,也适用于建造重量轻、连接简便的可拆迁结构。

#### (2) 材质均匀,可靠性高

钢材在冶炼和轧制过程中,质量受到严格控制,因此其内部组织比较接近于均质和各向同性体,且弹性工作范围大,与工程力学计算假定较符合,计算结果可靠性高。

#### (3) 塑性、韧性好

钢材破坏前有明显的塑性变形,需消耗很大的能量,因此一般情况下不发生脆性破坏,能很好地承受动力荷载,有较好的抗震性能。大量资料表明,地震后钢结构所受的损坏程度最小。

#### (4) 工业化程度高

钢构件一般是在专业化的金属结构加工厂制造,然后运到工地安装,因此加工精度、生产效率均较高。由于施工现场工程量最小,所以施工周期最短。

#### (5) 密封性好

钢材经焊接连接可制成要求水密性和气密性好的容器。如高压容器、大型油库等。

#### (6) 耐热性能好,耐火性能差

钢材在  $200^{\circ}\text{C}$  以下的温度范围内,其性能变化不大,但超过  $200^{\circ}\text{C}$  后,钢材的强度、刚度大大降低,到  $600^{\circ}\text{C}$  时便完全失去承载能力。当钢结构表面长期受  $150^{\circ}\text{C}$  以上的高温辐射时,应采取隔热保护措施,如用耐火材料做成隔热层等。

### (7) 易锈蚀

易于锈蚀是钢材的最大缺点,因此钢结构必须彻底除锈,涂刷防锈油漆或镀锌加以保护。在构造中应尽量避免出现难以检查、清刷、油漆之处,以及易积留湿气或大量灰尘的死角或凹槽。此外,钢结构应常处于干净、干燥的环境中,并需定期维护。

## 1.1.2 钢结构的应用范围

钢结构的应用范围应根据钢结构特点和钢材供应情况合理选择。随着我国钢材年产量的提高和钢材品种的不断增多,其应用范围越来越广,目前钢结构在我国土木工程中的应用范围大致如下。

### (1) 重型工业厂房

重型工业厂房中的吊车起重量较大,有时作业较繁重,受动力荷载影响明显,这类厂房的承重骨架和吊车梁多采用钢结构。如冶金工厂的炼钢、轧钢车间,造船厂的船体车间以及飞机制造厂的装配车间等。另外,有较大锻锤或其他动力设备的厂房及对抗震要求高的结构也宜采用钢结构。

### (2) 大跨度结构

结构跨度越大,自重占全部荷载的比例越大,减轻结构自重是非常重要的。钢结构具有强度高、自重轻的优点,因此特别适用于大跨度结构。如体育场馆、飞机库房和影剧院等结构。另外,桥梁结构一般跨度较大且受震动荷载影响,因此钢结构在中大跨度的桥梁结构中也得到广泛的应用。

### (3) 高层建筑

钢结构由于强度高、自重轻、构件体积小和工业化程度高、施工工期短等优点,对高层建筑特别有利。因此对高层建筑,特别是超高层建筑宜采用钢结构。

### (4) 高耸结构

高耸结构一般包括塔架、桅杆等结构,这类结构高度大,主要承受风荷载作用。由于钢结构强度高、自重轻及运输、安装方便,并且所需构件截面尺寸小,能减少风荷载作用,被广泛应用于高耸结构中。例如 1972 年建成的上海电视塔、1977 年建成的北京环境气象塔均为钢结构,高度分别达到 210m 和 325m。

### (5) 容器、闸门和管道

由于钢材可制成水密性、气密性较好的密闭结构,因此钢结构广泛应用于大型储油罐、储气罐、煤气管道和水工结构中的挡水闸门等。

### (6) 可拆卸的结构

由于钢结构可利用螺栓连接,拆卸方便,常被应用于需拆迁、移动的结构。如建筑施工中的塔架、施工临时用房及流动展览馆等。

### (7) 轻型钢结构

轻型钢结构是由薄壁型钢、小角钢或圆钢等组成的结构,其屋面和墙体采用轻型材料,如压型钢板等。这类结构的优点是重量轻、用钢量省、建设速度快和外形美观。轻型钢结构适用于吊车吨位不大( $\leq 20\text{t}$ )的中小跨度厂房、仓库及中小型体育馆等。

## 1.2 钢结构的设计原理和计算方法

### 1.2.1 结构的功能要求

任何结构均应充分满足各种预定的功能要求,做到安全适用、经济合理。结构在规定的计使用年限内应满足的功能要求主要体现在以下几个方面。

- (1) 安全性:能承受在正常施工和正常使用时可能出现的各种作用;在偶然事件发生时和发生以后,能保持必要的整体稳定性,不至于倒塌。
- (2) 适用性:在正常使用时具有良好的工作性能。
- (3) 耐久性:在正常维护下,具有足够的耐久性能。

### 1.2.2 结构的可靠度

结构的安全性、适用性和耐久性统称为结构的可靠性。度量结构可靠性的指标是可靠度。我国《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001)规定,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,称为结构的可靠度。可靠度是对结构可靠性的概率度量,可称为结构的可靠概率  $p_s$ ;反之,不能完成预定功能的概率为失效概率  $p_f$ 。可靠概率  $p_s$  与失效概率  $p_f$  显然满足:  $p_s + p_f = 1$ 。通常是利用结构的失效概率  $p_f$  足够小来保证结构的可靠性。

### 1.2.3 概率极限状态设计法

#### 1) 基本原理

结构的概率极限状态是指结构或构件满足设计规定的某一功能要求的临界状态。结构的极限状态可分为两类。第一类是承载能力极限状态,指结构或构件达到了最大承载能力或达到了不适于继续承载的过大变形,如果继续承载可能会发生强度破坏、疲劳破坏、丧失稳定或由于过大变形而使结构的几何形状发生改变。第二类是正常使用极限状态,指结构或构件达到了正常使用的某些规定限值,如结构或构件发生影响正常使用的过大变形或过大的振动等。

概率极限状态设计法是将概率理论引入到结构极限状态设计中,认为绝对安全的设计是不存在的,只要保证失效概率足够小,便可认为设计的结构是安全的。设结构或构件的抗力用  $R$  表示,它受材料性能和构件截面几何特性等因素影响。如果结构所受作用(荷载、温度变化等)产生的效应,用作用效应  $S$  表示,则  $Z=R-S$  就是结构的功能函数。

当  $Z=R-S>0$  时,结构处于可靠状态;

当  $Z=R-S<0$  时,结构处于失效状态;

当  $Z=R-S=0$  时,结构处于极限状态。

抗力  $R$  和作用效应  $S$  以及影响它们的因素都是随机变量,应该用概率理论进行分析。结构设计的过程是进行  $R$  和  $S$  的概率运算。

$Z=R-S=0$  是结构的极限状态方程,结构的可靠度即结构的可靠概率  $p_s$  为:

$$p_s = p(Z = R - S > 0) \quad (1.1)$$

结构的失效概率  $p_f$  为:

$$p_f = p(Z = R - S \leq 0) \quad (1.2)$$

当失效概率  $p_f$  小到可以接受的程度,就认为结构设计是可靠的。

## 2) 规范公式

直接运用式(1.1)或式(1.2)进行概率运算比较复杂。为了方便工程设计应用,我国钢结构设计规范以概率设计法为基础,按照规定的失效概率,校准了各随机变量的分项系数,给出了用分项系数表达的极限状态设计公式,分别为承载能力极限状态和正常使用极限状态分项系数表达式。

### (1) 承载能力极限状态

进行承载能力极限状态设计时,应考虑作用效应的基本组合,必要时还要考虑作用效应的偶然机会。对基本组合应按下列极限状态设计表达式中最不利值确定:

#### ① 由可变荷载效应控制的组合

$$\gamma_0(\gamma_G S_{G_k} + \gamma_{Q_1} S_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Q_i} \psi_{ci} S_{Q_{ik}}) \leq R(\gamma_R, f_k, \alpha_k \cdots) \quad (1.3)$$

#### ② 由永久荷载效应控制的组合

$$\gamma_0(\gamma_G S_{G_k} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} \psi_{ci} S_{Q_{ik}}) \leq R(\gamma_R, f_k, \alpha_k \cdots) \quad (1.4)$$

式(1.3)、式(1.4)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 年及以上的结构构件,  $\gamma_0 \geq 1.1$ ; 对安全等级为二级或设计使用年限为 50 年的结构构件,  $\gamma_0 \geq 1.0$ ; 对安全等级为三级或设计使用年限为 5 年的结构构件,  $\gamma_0 \geq 0.9$ ; 对设计使用年限为 25 年的结构构件,  $\gamma_0 \geq 0.95$ ; 安全等级的划分,详见表 1.1;

$\gamma_G$ ——永久荷载分项系数,一般情况下对式(1.3)取 1.2,对式(1.4)取 1.35; 当永久荷载效应对承载力有利时,一般取 1.0,对结构的倾覆、滑移验算取 0.9;

$\gamma_{Q_1}$ 、 $\gamma_{Q_i}$ ——第 1 和第  $i$  个可变荷载的分项系数,一般情况下采用 1.4,但是当可变荷载效应对承载力有利时,应取为 0。各项活荷载中,在结构构件或连接中产生应力最大者为第 1 个活荷载;

$S_{G_k}$ ——永久荷载标准值的效应;

$S_{Q_{1k}}$ ——在基本组合中起控制作用的第 1 个可变荷载标准值的效应;

$S_{Q_{ik}}$ ——第  $i$  个可变荷载标准值的效应;

$\psi_{ci}$ ——第  $i$  个可变荷载的组合系数,其值不应大于 1,按荷载规范的规定采用;

$R(\cdots)$ ——结构构件的抗力函数;

$f_k$ ——材料性能标准值;

$\gamma_R$ ——材料抗力分项系数。钢结构设计中,对 Q235 钢,  $\gamma_R = 1.087$ ; 对 Q345 钢、Q390 及 Q420 钢,  $\gamma_R = 1.111$ ;

$\alpha_k$ ——几何参数的标准值。

表 1.1 建筑结构的的安全等级

| 安全等级 | 破坏后果 | 建筑物类型 |
|------|------|-------|
| 一 级  | 很严重  | 重要的建筑 |
| 二 级  | 严 重  | 一般房屋  |
| 三 级  | 不严重  | 次要的房屋 |

对于排架、框架结构,式(1.3)可采用下列简化极限状态设计表达式:

$$\gamma_0(\gamma_G S_{G_k} + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} S_{Q_{ik}}) \leq R(\gamma_R, f_k, \alpha_k \dots) \quad (1.5)$$

式中  $\psi$ ——简化设计表达式中采用的荷载组合系数,一般情况下取  $\psi=0.9$ ;当只有一个可变荷载时,取  $\psi=1.0$ 。

对荷载效应的偶然组合应按有关专门规范计算。

## (2) 正常使用极限状态

对正常使用极限状态,钢结构设计主要是控制变形和挠度。如梁的挠度、柱顶的水平位移、高层建筑层间相对水平位移等。对钢结构,应考虑荷载效应的标准组合;对钢与混凝土组合结构,应考虑准永久组合。

钢结构设计表达式为:

$$v = v_{G_k} + v_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} v_{Q_{ik}} \leq [v] \quad (1.6)$$

钢与混凝土组合结构设计表达式为:

$$v = v_{G_k} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} v_{Q_{ik}} \leq [v] \quad (1.7)$$

式中  $v$ ——挠度及变形;

$[v]$ ——容许挠度或容许变形,其值按有关规定和使用要求确定;

$\psi_{qi}$ ——第  $i$  个可变荷载的准永久值系数,按荷载规范的规定采用。

计算结构或构件的强度、稳定性以及连接的强度时,用荷载设计值(荷载标准值乘以荷载分项系数);计算疲劳和变形时,采用荷载标准值。对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,动力荷载标准值不乘动力系数。

## 1.3 钢结构的发展

钢结构的发展与当时的钢铁冶炼技术和钢铁产量有着密切的关系。我国古代钢铁冶炼技术在世界处于领先地位,我国钢结构有着悠久的历史。公元前 200 多年的秦始皇时代就已用生铁建造桥墩;在汉朝时期建造了铁链悬桥;在宋朝建造了 13 层高的湖北荆州玉泉寺铁塔。

在 1686~1696 年俄国已能用生铁制作屋盖。

在 18 世纪西方兴起工业革命后,冶炼出了抗拉性能好于生铁的熟铁;在 19 世纪初发明了铆钉,出现了生熟铁的组合结构。螺栓连接是在铆钉出现前的主要连接件。1856 年转炉炼钢的出现,随后出现的电炉炼钢及 20 世纪 40 年代焊接连接方法的采用,为钢结构的应用与发展带来了巨大的变革。

工业革命以后,钢结构在欧洲各国的应用逐渐增多,范围也不断扩大。例如 1883 年,美国在芝加哥建造的 11 层保险大楼,是世界上最先用铁框架(部分钢梁)承重的建筑物,有人认为这是高层建筑的开始。1889 年,法国在巴黎建成了高达 300m 的举世闻名的埃菲尔铁塔,用钢约 8000t。1893 年,俄国开始采用钢框架结构建造工业厂房,在工业厂房中应用了双曲网壳屋盖。1925~1933 年间欧美一些国家建成了跨度达 60m 的各种形式的悬索屋盖。

我国由于长期受封建主义社会制度的束缚,特别是 1840 年鸦片战争以后,沦为半殖民地半封建的国家,生产得不到发展,钢结构的发展非常缓慢。19 世纪末至 20 世纪 30 年代建造了为数有限的钢结构厂房、桥梁等工程。如 1889 年建成的唐山水泥厂钢结构厂房;1927 年黄姑屯机车厂厂房也采用了钢结构;1931 年广州建成了中山纪念堂,采用了我国自行设计的钢穹顶;1934 年上海建造的 24 层钢结构国际饭店;1937 年建成的杭州钱塘江大桥等,均是那个时代的代表性工程。

自新中国成立以来,钢结构在建设中的应用得到了空前的发展,在钢结构设计水平、制造工艺和安装技术等方面有了很大的提高,建造了大量的钢结构工程。如鞍钢、武钢等大型冶金联合企业,大连、上海等造船厂,洛阳拖拉机厂和长春第一汽车制造厂等,均建造了大批钢结构厂房。在民用建筑中,钢结构主要用于体育场馆等大跨度建筑。建于 1961 年的北京工人体育馆就是当时典型的钢结构建筑,如图 1.1 所示。该体育馆能容纳 15000 名观众,比赛大厅屋盖采用车辐式双层悬索结构,直径达 94m,由索网、边缘构件(外环)和内环三部分组成。这个时期我国一些钢结构工程在规模上和技术难度上已达到了世界先进水平。

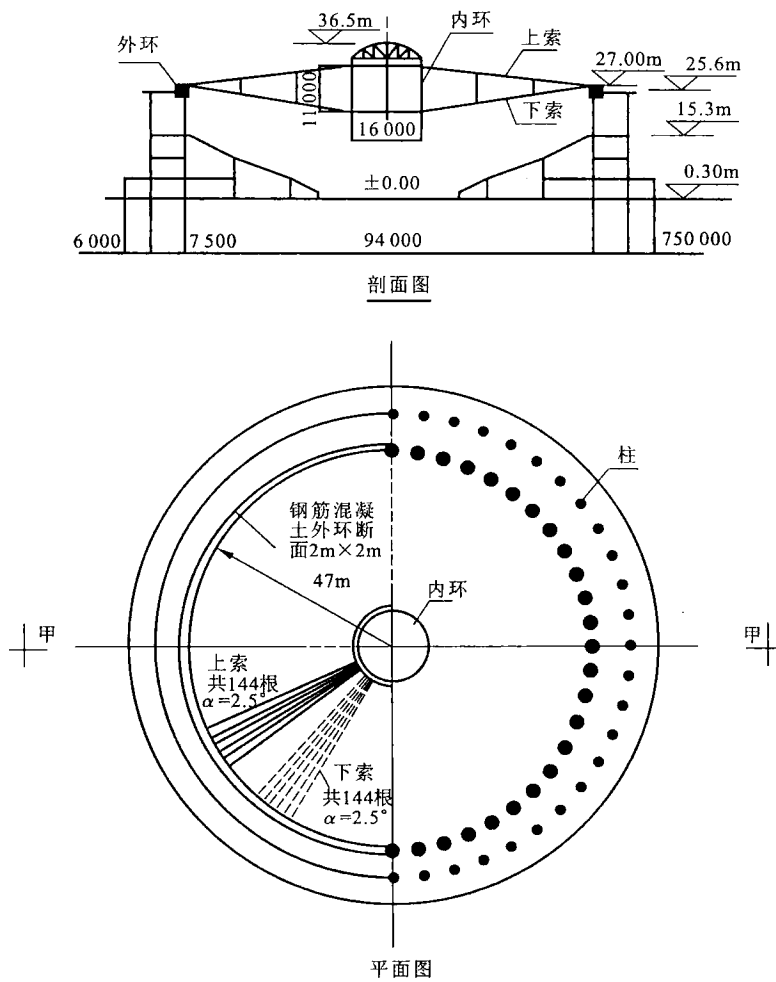


图 1.1 北京工人体育馆