

2002年全国大学版协优秀畅销书

21世纪

高等学校

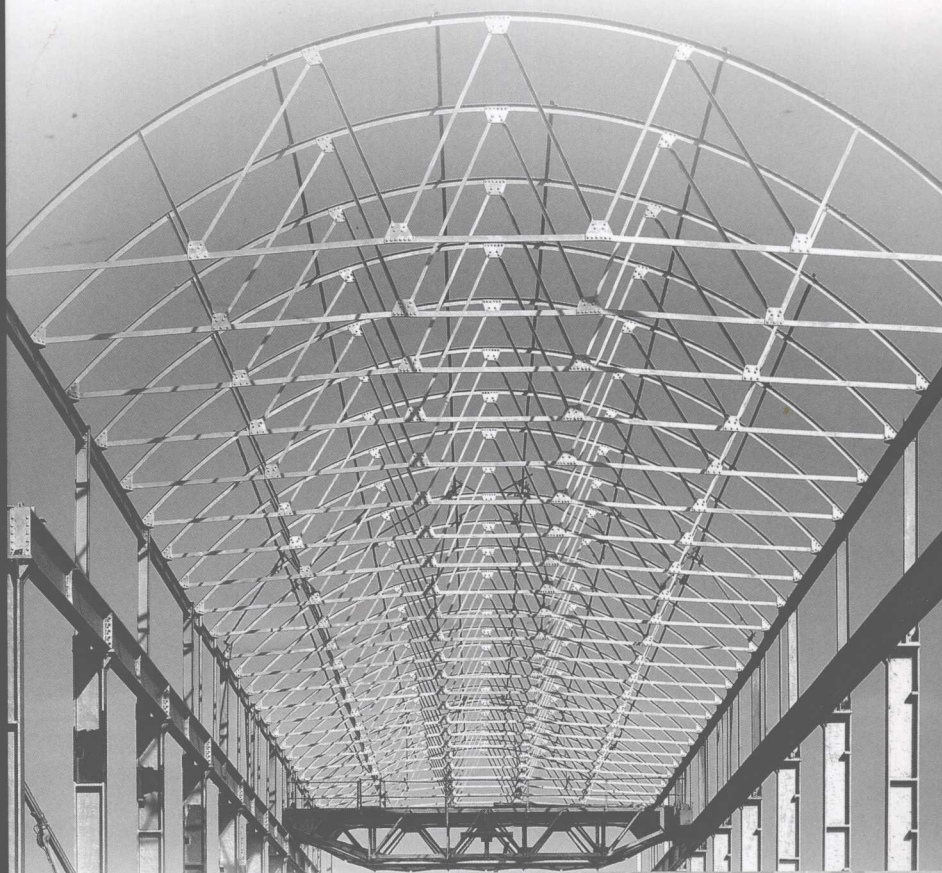
本科系列教材

钢结构基本原理

(第二版)

Gangjiegou Jiben Yuanli

黄呈伟 主编



重庆大学出版社

2005

钢结构基本原理

钢结构基本原理

(第二版)

黄呈伟 主编

重庆大学出版社

内容简介

本书是高等院校土木工程专业的钢结构教材,分为《钢结构基本原理》和《钢结构设计》两册。《钢结构基本原理》为土木工程专业的基础课,主要介绍钢结构的设计原理,内容包括钢材的机械性能,钢结构的连接,轴心受力构件(含钢索),受弯构件,拉弯与压弯构件。《钢结构设计》为土木工程专业建筑工程方向的专业必修课,内容包括单层厂房钢结构,轻钢结构,网架结构,多高层钢框架,空间结构简介,钢结构的制造与防护,钢结构设计软件介绍,钢结构在桥梁中的应用等。

本书可作为高等院校土木工程及相关专业本科和专科学生的教材,也可供从事土木工程设计、施工、科研的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构基本原理/黄呈伟主编. —2版. —重庆:重庆大学出版社,2005.8

(土木工程专业本科系列教材)

ISBN 7-5624-2395-4

I. 钢... II. 黄... III. 钢结构—高等学校—教材 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 025901 号

钢结构基本原理

(第二版)

黄呈伟 主编

责任编辑:谭 敏 版式设计:谭 敏

责任校对:邹 忌 责任印制:秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆铜梁正兴印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.75 字数:443 千

2002 年 2 月第 1 版 2005 年 8 月第 2 版第 3 次印刷

印数:9 001—13 000

ISBN 7-5624-2395-4

定价:25.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究。

第二版前言

随着钢结构在我国的迅速发展,高等院校土木工程专业的钢结构课程作了较大的调整和加强。根据现行钢结构教学大纲的要求,原《钢结构》课程分为《钢结构基本原理》和《钢结构设计》两部分,同时,新的钢结构设计规范(GB 50017—2003)已公布实施。为此,第二版按新规范将相关的内容进行了修改、调整和充实,并将结构设计部分放到《钢结构设计》一书中。

编 者
2005 年 2 月

第一版前言

近年来,钢结构在我国发挥着日益重要的作用,并得到了迅速发展,被广泛应用于各类厂房、库房、体育馆、展览馆、候车大厅、飞机库、高层建筑和桥梁等工程。我国现行的建筑技术政策也已明确规定,要大力推广运用建筑钢结构,迎接 21 世纪知识经济对我国建筑业的挑战。随着国民经济的增长和科学技术的进步,一个发展建筑钢结构行业和市场的势头正在我国出现。

为了适应钢结构的发展和“面向 21 世纪教学内容和课程体系改革”的要求,在本教材的编写过程中,我们努力体现“宽口径、厚基础、强能力、高素质”的培养目标,将钢结构的基本原理与新技术的发展紧密结合,按照土木工程专业本科生对钢结构课程的基本要求,主要介绍钢结构的基本原理和基本构件的设计方法。并针对目前钢结构发展的趋势,增加了钢索的力学性能与分析方法、网架结构、钢结构的防护、钢结构在桥梁中的应用等内容,使学生在掌握基本原理的基础上,较全面地了解钢结构技术的发展动态,拓展学生的知识结构。

本教材是由重庆大学出版社组织编写的土木工程系列教材,因此,在内容安排上,为避免重复,将部分与其他课程重复的内容统一放到了相关的教材中,而在本书中仅作过渡性的简要介绍,体现了系列教材的优点。

如果受钢结构课程学时的限制,教师可根据具体情况对教材内容作相应的取舍。例如,单层厂房、空间网架结构等可另设选修课,或在毕业设计中选用。

本书由昆明理工大学,甘肃工业大学,新疆工学院,攀枝花大学共同编写。昆明理工大学黄呈伟编写:第 1 章,第 4 章(第 8 节),第 8 章,第 9 章(第 3 节);甘肃工业大学孙玉萍编写:第 2 章,第 5 章及相应附表;新疆工学院于江编写:第 3 章,第 6 章及相应附表;攀枝花大学陈代秉编写:第 4 章,第 9 章及相应附表;昆明理工大学罗小青编写:第 7 章及相应附表、附图;昆明理工大学宁晓骏编写第 10 章。

编者
2001年7月

目 录

第1章 概 述	1
1.1 钢结构在我国的发展概况	1
1.2 钢结构的特点和合理应用范围	4
1.3 设计方法简介	6
1.4 钢结构的发展	13
复习思考题	14
第2章 钢结构的材料	16
2.1 钢材的主要机械性能	16
2.2 影响钢材性能的因素	19
2.3 复杂应力下的性能	22
2.4 钢材的疲劳和疲劳计算	23
2.5 钢材的种类和选用	25
2.6 钢材的规格	27
复习思考题	29
第3章 钢结构的连接	30
3.1 连接方法及形式	30
3.2 焊缝及其形式	31
3.3 角焊缝的构造和计算	37
3.4 对接焊缝的构造和计算	48
3.5 焊接残余应力和焊接残余变形	52
3.6 普通螺栓(铆栓)连接的构造与计算	55
3.7 高强度螺栓连接的计算	66
复习思考题	72
习 题	74
第4章 轴心受力构件	76
4.1 轴心受力构件的应用及截面形式	76
4.2 轴心受力构件的强度和刚度	77
4.3 轴心受压构件的整体稳定	79
4.4 实腹式轴心受压构件的局部稳定	94
4.5 实腹式轴心受压构件设计	98

4.6	格构式轴心受压构件设计	102
4.7	轴心受压柱柱头和柱脚的构造与计算	111
*4.8	钢索的力学性能和分析方法	117
	复习思考题	130
	习题	131
第5章	受弯构件	132
5.1	钢梁的类型和截面形式	132
5.2	梁的强度和刚度	134
5.3	梁的整体稳定计算	139
5.4	梁的局部稳定和腹板加劲肋设计	150
5.5	考虑腹板屈曲后强度的梁设计	161
5.6	型钢梁设计	168
5.7	组合梁设计	174
5.8	钢梁的连接构造	186
	复习思考题	189
	习题	190
第6章	拉弯和压弯构件	191
6.1	拉弯、压弯构件的应用及截面形式	191
6.2	拉弯、压弯构件的强度和计算	192
6.3	实腹式压弯构件的整体稳定	196
6.4	实腹式压弯构件的局部稳定	203
6.5	压弯构件的设计	207
6.6	拉弯构件的计算	219
6.7	双向压弯构件的计算	221
6.8	偏心受压柱柱头和柱脚的构造与计算	221
	复习思考题	231
	习题	232
附录		234
附录1	钢材和连接的设计强度值	234
附录2	轴心受压构件的稳定系数	237
附录3	型钢表	241
附录4	各种截面回转半径的近似值	267
附录5	截面塑性发展系数 γ_x 、 γ_y	268
附录6	疲劳计算的构件和连接分类表	269
附录7	柱的计算长度系数	272
	主要参考文献	274

第 1 章

概 述

1.1 钢结构在我国的发展概况

由钢板、热轧型钢、冷加工成型的薄壁型钢以及钢索制成的工程结构称之为钢结构。

钢结构的发展,与这个国家的钢铁产量和钢铁冶炼技术有着密切的关系。我国古代钢铁冶炼技术在世界处于领先地位,因此,我国是最早用钢铁建造桥梁等承重结构的少数几个国家之一。早在公元前 200 多年(秦始皇时代),就用铁建造桥墩,公元 60 年前后(汉明帝时代),开始在我国西南地区的深山峡谷上建造铁链悬桥。其中以 400 多年前(明代)云南的沅江桥、300 多年前(清代)贵州的盘江桥及四川泸定的大渡河桥最为著名。这些都是举世公认的世界最古老的铁桥。除铁链悬桥外,我国古代还建造了许多纪念性建筑,如建于公元 1061 年(宋代)湖北荆州的 13 层玉泉寺铁塔,山东济宁的铁塔寺铁塔和江苏镇江的甘露寺铁塔等。

18 世纪欧洲工业革命以后,由于钢铁工业的发展,钢结构在欧洲各国的应用逐渐增多,范围也不断扩大,而我国由于长期受封建主义社会制度的束缚,生产得不到发展,特别是 1840 年鸦片战争以后,被沦为半殖民地半封建的国家,经济停滞不前,钢结构发展非常缓慢,与欧美各国差距拉大。在这段时期,建造了一些钢结构厂房、桥梁等工程,如 1927 年建成的沈阳皇姑屯机车厂钢结构厂房,1931 年建成的广州中山纪念堂圆屋顶钢结构,1937 年建成的杭州钱塘江大桥等,均是由我国自己设计和建造的代表性工程。

1949 年新中国成立以后,随着社会主义事业的蓬勃发展,钢结构在建设中的应用也得到了空前的发展,钢结构的设计、制造和安装水平有了很大的提高,建造了大量的钢结构工程,有些工程在规模上和技术难度上都达到了世界先进水平,钢结构的设计理论和学术水平有了很大的提高,并培养了大批从事钢结构设计、研究的人才。

在建国初期和第一个、第二个五年计划期间,在钢铁冶金工业和机电工业中建造了大量的钢结构厂房,例如,鞍钢、武钢等大型冶金联合企业,上海、大连等地造船厂,太原、富拉尔基重型机器制造厂,长春第一汽车制造厂以及洛阳拖拉机厂等,均建造了大批钢结构厂房。在民用建筑中,主要用于体育馆等大跨度建筑,如 1961 年建成的北京工人体育馆,能容纳 15 000 名观众,比赛大厅屋盖采用平置车轮形双层悬索结构,每层的径向拉索有 144 根,直径为 94 mm,

由拉索、外环(混凝土矩形截面 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$)和内环(钢构件,直径 16 m ,高 11 m)三部分组成,建筑高度 36.5 m ,见图 1.1。



图 1.1 北京工人体育馆(悬索结构)

20 世纪 60 年代至 70 年代,由于十年动乱,经济发展缓慢,但在当时极端困难的情况下,钢结构也取得了不小进展,如对薄壁型钢结构的设计研究取得了显著成绩,在这一时期的中、小跨度单层厂房屋盖设计中,采用了不少薄壁型钢屋架和檩条,并于 1975 年制订了我国第一部薄壁型钢结构技术规范(TJIS—75)。此外,在这段时间内平板网架结构也取得了迅速发展,1967 年 9 月建成了我国第一座大跨度平板网架结构——北京首都体育馆屋盖结构,该结构平面形状为矩形,尺寸为 $99\text{ m}\times 112.2\text{ m}$,结构形式为两向正交斜放网架,杆件为角钢,采用板节点,并用高强度螺栓连接。1970 年 9 月建成的上海文化广场屋盖结构为三向平板网架,平面形状为扇形,这是我国第一座采用空心球节点和钢管杆件的大跨度网架结构。1973 年 10 月建成的上海体育馆圆形屋盖,平面直径 $D=110\text{ m}$,周边向外悬挑 7.5 m ,为三向平板网架结构。这些大型网架结构的建成,标志着我国网架结构在设计、制造和安装方面跨上了一个新的台阶,为以后的发展和推广工作打下了一个良好的基础。此外,在这一时期还建成了一些电视塔、桥梁和煤气柜等钢结构工程如著名的南京长江大桥工程等。

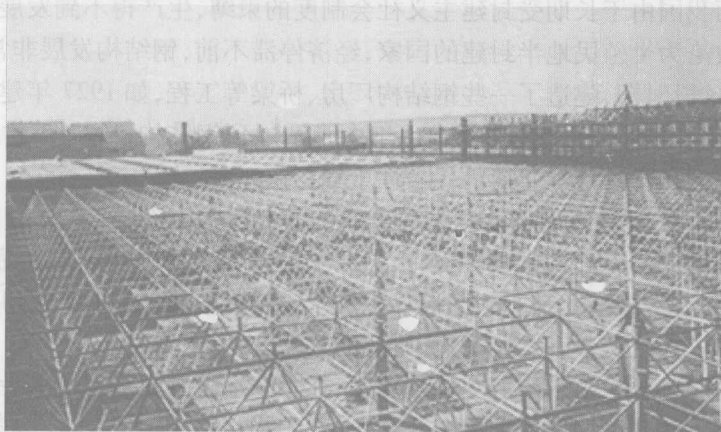


图 1.2 网架结构

改革开放以来,全国以经济建设为中心,国民经济得到了空前的发展,每年以 10% 左右的速度持续增长,1996 年我国钢产量首次突破 1 亿吨,跃居世界第一位,为我国钢结构的发展奠

定了物质基础。最近20年时间里,我国钢结构事业与全国其他行业一样,得到了前所未有的繁荣和发展,具体表现在下列几个方面。

1)在设计方法方面,以概率论为基础的一次二阶矩极限状态设计法(钢结构设计规范 GBJ17—88 的设计法)代替了半经验、半概率的极限状态设计法(钢结构设计规范 TJ 17—74)。现行的新规范(GB 50017—2003)仍然采用一次二阶矩极限状态设计法,该方法虽然是一种近似概率设计法,但比以前已前进了一大步。完整的全概率法还有待今后的深入和完善。

2)高强度低合金钢的产量和品种有较大的发展,在钢结构中的应用,有明显的提高。

3)在高层建筑、特别是在超高层建筑中,钢结构得到了较多的应用。最近几年在上海、北京、广州、深圳、香港等大城市建造了不少钢结构超高层建筑,如高420.5 m的上海浦东金茂大厦,地下3层,地上88层,为我国第一,世界第三高楼,主楼采用了混凝土芯筒与钢框架结构。

4)平板网架结构在工业与民用建筑中得到了广泛采用,技术已非常成熟。与此同时,网壳等其他空间钢结构也取得了迅速发展,如上海体育场屋盖结构,采用马鞍形大悬挑钢管空间结构,长轴为288.4 m,短轴为274.4 m,中间敞开椭圆孔的长轴为213 m,短轴为150 m,屋盖面积为36 100 m²。64榀悬挑主桁架的一端分别固定在32根钢筋混凝土柱上,最大悬挑跨度达73.5 m,为世界同类型建筑中悬挑跨度最大的屋盖结构。

5)冷弯薄壁型钢构件在工业与民用建筑中的应用(如檩条、墙梁、屋面板、墙板等)日益普遍。门式刚架轻型房屋钢结构在吊车起重量较小($Q \leq 20$ t)和无吊车的厂房、仓库及需要大空间的民用建筑中的应用迅速推广,并在继续发展。

6)钢与混凝土组合梁、板结构、钢管混凝土结构及预应力钢结构等,都得到了不同程度的应用和发展。

7)高强度螺栓在钢结构连接中得到了广泛的应用。

8)在桥梁结构、煤气柜、储液库等板结构以及起重运输机械金属结构等非房屋类钢结构方面,也取得了非常大的成就。如我国的斜拉桥技术在世界处于领先水平,现在全国各地建成了不少大跨度斜拉桥和悬索桥。

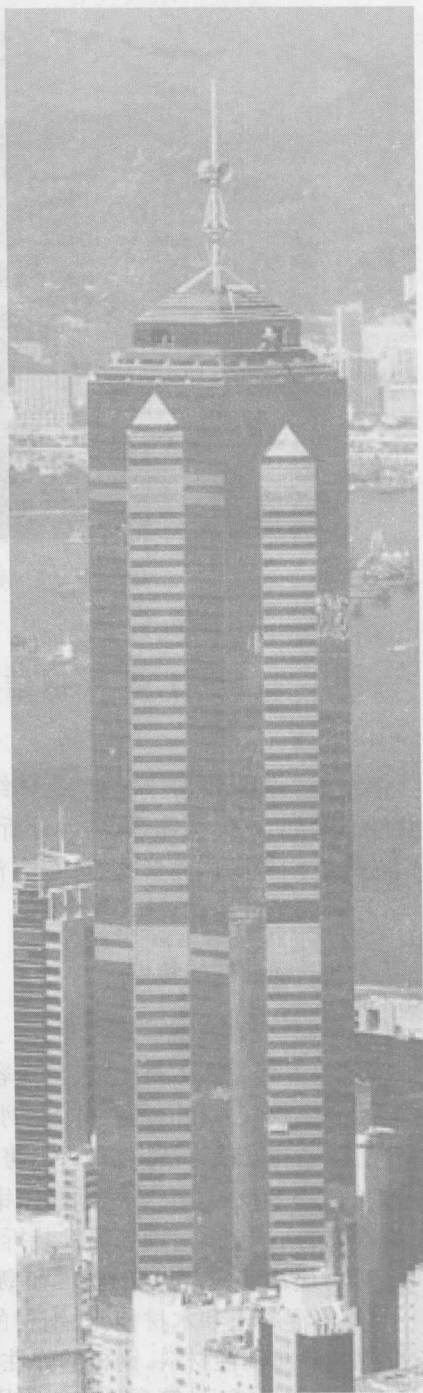


图 1.3 高层建筑



图 1.4 斜拉桥和悬索桥

1.2 钢结构的特点和合理应用范围

钢结构与钢筋混凝土结构、砌体结构和木结构都是工程结构的不同分支,它们之间具有许多共性。例如,在结构体系、内力分析和设计程序等方面基本相同。但由于材料性质不同,因而钢结构在构件的截面形式、计算方法、连接方法及构造处理等方面与其他结构有很大的差别,学习时应予以注意。

1.2.1 钢结构的特点

(1) 钢材强度高,结构重量轻

钢材与混凝土和木材比较,虽然容重较大,但由于强度很高,容重与屈服点的比值相对较低。因此,在承载力相同的条件下,钢结构与钢筋混凝土结构、木结构相比,构件体积小,结构重量轻,运输和安装方便。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 $1/3 \sim 1/4$ 。若采用薄壁型钢屋架则更轻。所以钢结构特别适用于跨度大、建筑物高、荷载重的结构,也适用于要求装拆和移动的结构。

(2) 材质均匀,有良好的塑性和韧性

与钢筋混凝土和木材相比,钢材的内部组织比较均匀,各个方向的物理力学性能基本相同,可视各向同性材料,钢材的弹性模量大($E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$),具有良好的塑性和韧性。这些物理力学性能,最符合目前所采用的计算方法和结构分析中的基本假定,所以钢结构的实际受力情况与结构分析结果最接近,在使用中最安全可靠。

(3) 安装方便,施工周期短

钢结构装配化程度高,一般均采用工厂制造后运至工地安装的施工方法,因此具有精确度

高和大件、批量生产的特点,现场装配速度很快,施工周期很短。例如,建筑面积为 $10\,000\text{ m}^2$ 左右的轻钢结构厂房,全部钢结构仅需一个月即可安装完毕,因此可以节省投资,降低造价,提高经济效益和资金周转率。

(4) 密闭性好

钢材具有不渗透性和可焊性,因此可以采用焊接制成完全密封的焊接密闭结构。例如,气密性和水密性要求较高的高压容器,大型油库、煤气柜、大型管道等板壳结构。

(5) 钢结构耐热,但不耐火

当钢材温度在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内时,物理力学性能变化很小,当在 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,钢材的抗拉强度提高而塑性降低,冲击韧性下降;当温度高于 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,屈服点和极限强度急剧下降;到达 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,强度接近于零。钢结构通常在温度 $450\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,失去承载能力,所以钢结构耐热($\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$),但不耐火。当钢结构长期经受 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的辐射热时,必须在局部区域采取隔热保护措施。此外,对于轻型钢结构,还应根据建筑物的耐火极限时间,对承重构件采取有效的防护措施,如涂刷防火涂料等,但费用较大。

(6) 钢结构易锈蚀,维护费用大

钢结构的最大缺点是容易锈蚀,新建的钢结构必须先除锈,然后刷防锈涂料或镀锌,且每隔一段时间要重复一次,维护费用较大。若采用不易锈蚀的耐候钢,则可节省大量劳动力和资金,但目前还较少采用。

1.2.2 钢结构的合理应用范围

随着我国钢材年产量的提高和钢材市场供应的改善,钢结构在工程中的应用已有很大发展,但按人均计算,我国的钢产量仍然很低。另外,由于国民经济各部门都需要用钢材,因此,钢材在我国仍是一种贵重的建筑材料,必须合理应用。在房屋建筑中,以下情况宜采用钢结构。

(1) 重型厂房结构

重型厂房是指设有起重量很大(100 t 以上)或运行非常频繁(重级工作制)的吊车的厂房以及直接承受很大振动荷载或受振动荷载影响很大的厂房。例如,冶炼厂的平炉车间、热轧车间、混铁炉车间;重型机械厂的铸钢车间、锻压车间、水压车间;造船厂的船体车间;飞机制造厂的装配车间等。

(2) 大跨度房屋的屋盖结构

结构的跨度越大,自重在全荷载中所占的比例越大。由于钢结构具有强度高、自重轻的优点,最适用于大跨度结构。如飞机库、体育馆、展览厅、影剧院、大型交易市场等屋盖结构。

(3) 高层及多层建筑

钢结构由于结构自重轻、构件体积小、装配化程度高,对高层建筑特别有利。因此,在高层建筑,特别是超高层建筑中,宜采用钢结构或钢结构框架与钢筋混凝土筒体相结合的组合结构。此外,钢结构还适用于多层工业厂房,如炼油工业中的多层多跨框架等。

(4) 轻型钢结构

轻型钢结构是由弯曲薄壁型钢、薄壁钢管或小角钢、圆钢等组成的结构。屋面和墙体常用压型钢板等轻质材料。由于轻型钢结构具有建造速度快,用钢量省、综合经济效益好等优点,适用于吊车吨位不大于 20 t 的中、小跨度厂房、仓库以及中、小型体育馆等大空间民用建筑。

此外,由于轻型钢结构装拆方便,宜用于需要拆迁的结构。

除房屋结构以外,钢结构还可用于下列结构。

1) 塔桅结构

塔桅结构包括电视塔、微波塔、无线电桅杆、高压输电塔、石油钻井塔、化工排气塔、导航塔及火箭发射塔等,一般均宜采用钢结构。

2) 板壳结构

板壳结构包括大型储气柜、储液库等要求密闭的容器以及大直径高压输油管、输气管等。另外,还有高炉的炉壳、轮船的船体等均应采用钢结构。

3) 桥梁结构

钢结构一般用于跨度大于 40 m 的各种形式的大、中跨度桥梁。

4) 移动式结构

移动式结构包括桥式起重机、塔式起重机、龙门式起重机、缆式起重机、装卸桥等起重运输机械以及水工闸门、升船机等金属结构。

1.3 设计方法简介

1.3.1 钢结构设计的基本要求

钢结构设计要贯彻技术先进、经济合理、安全适用、确保质量的基本原则,具体应满足下列几项基本要求:

1) 所设计的结构必须安全可靠,保证结构在运输、安装和使用过程中具有足够的强度、刚度、整体稳定和局部稳定。

2) 必须满足建筑物的使用要求,合理选用钢材,精心设计,保证结构有良好的耐久性。

3) 在设计中尽可能地采用先进的设计理论,新型的结构形式和连接方式,优先选用高强度低合金钢等优质钢材,以便减轻结构自重和节省钢材。

4) 设计时尽量使结构构造简单,制造、运输、安装方便,从而缩短建筑物施工周期,降低造价。

5) 采取有效措施,提高钢结构的防锈蚀能力和满足钢结构的防火要求。

6) 钢结构的外形,在可能条件下,应满足简洁美观的要求。

1.3.2 钢结构的设计方法

很久以来,钢结构与其他结构一样,采取容许应力计算法,即把钢材可以使用的最大强度,除以一个安全系数,作为结构计算时容许达到的最大应力——容许应力。设计应力必须小于或等于容许应力,表达式为:

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

式中 σ ——构件的设计应力。

$[\sigma]$ ——钢材的容许应力。

$\sum N_i$ ——根据标准荷载求得的内力组合值。

S ——构件的几何特性。

f_y ——钢材的屈服点。

K ——安全系数。

这个方法的缺点是采用一个定值的安全系数,但被设计的结构和各个构件的可靠度各不相同,而整个结构的可靠度往往由可靠度最小的构件来确定。

20世纪50年代出现了极限状态设计法。这种方法的特点是根据结构或构件能否满足功能要求来确定它们的极限状态,在结构中规定两种极限状态,第一种为结构或构件的承载能力极限状态;第二种为结构或构件的变形极限状态,或称正常使用极限状态。同时引入三个系数,荷载系数——考虑荷载可能的变动;匀质系数——考虑材料性质的不一致性;工作条件系数——考虑结构或构件的工作特点,结构的计算图式假定与实际的结构不完全相符等因素。极限状态设计法比容许应力设计法合理和先进。在荷载和材料强度取值上分别部分地考虑了概率问题。与容许应力法比较,极限状态设计法的缺点是表达式较为复杂。

1974年我国编制了《钢结构设计规范》(TJ 17—74),该规范采用了容许应力表达式,但它与前面所讲的容许应力法不同,它是以结构的强度、稳定、变形的极限状态为依据,对影响结构可靠度的各种因素,以数理统计的方法,并结合我国几十年来所积累的工程实践经验和各种资料,进行多系数分析,求出单一的安全系数,以容许应力法的形式表达,承载能力的一般表达式为:

$$\sigma = \frac{\sum N_i}{S} \leq \frac{f_y}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3} = \frac{f_y}{K} \leq [\sigma] \quad (1.2)$$

式中 K_1 ——荷载系数

K_2 ——材料系数

K_3 ——调整系数

其他符号同前。

这个设计方法的特点是吸取了前面两种设计方法的优点,达到了取长补短的目的,并结合了我国的工程实践经验,但它与第二种设计方法比较,没有本质的区别。

设计结构的最终目的是要保证结构或构件在使用荷载作用下能安全可靠地工作,并同时满足使用要求和经济要求,也就是说要处理好结构的可靠性和经济性的关系。上述三种方法在处理这个关系时,后一种比前一种都有所改进,容许应力法没有考虑到荷载和材料性能的随机变异性,而把它们视为固定不变的定值。为了保证结构的可靠性,引入了一个定值的安全系数,故称为定值法。定值的安全系数只能直观地常识性地给结构以某种解释,不能真正地定量地度量结构的可靠度,所以定值理论对结构可靠度的研究,是处于以经验为基础的定性分析阶段。在实际工程中,各种荷载所引起的结构内力(称为荷载效应 S)与结构的承载能力和抵抗变形的能力(称为结构抗力 R)均受各种偶然因素影响,都是随时间或空间变动的随机变量,在结构设计中应考虑上述变量的随机性。随着科学技术的发展,概率论在建筑结构中的应用日益广泛,现在不仅应用于结构试验的数据的统计分析,而且在结构可靠度概率设计理论方面也日趋成熟。钢结构的设计方法逐渐由定值法过渡到概率法,把结构可靠度的研究,由以经验为基础的定性分析阶段,提高到以概率论、数理统计为基础的定量分析阶段。

根据应用概率分析的程度,可将概率分析法分为三种水准,即半概率极限状态设计法、近似概率极限状态设计法和全概率极限状态设计法。20 世纪 50 年代我国所采用的极限状态设计法和 1974 年我国试行的《钢结构设计规范》(TJ1 7—74)的设计方法,由于只有少数设计参数,如风荷载、雪荷载及钢材屈服点采用概率分析,大多数荷载和其他参数,由于缺乏统计资料,仍采用经验值。同时,结构构件的抗力和作用效应之间,没有进行综合的概率分析,因此所设计的结构和各构件,可靠度仍各不相同。只能称之为半概率极限状态设计法。

从 1989 年实施的钢结构设计规范(GBJ 7—88)开始,我国采用以概率论为基础的一次二阶矩极限状态设计法。该方法简化了基本变量随时间变化的关系,同时,将一些复杂的关系进行了线性化,故称之为近似概率极限状态设计法。完全的极限状态设计法,即全概率设计法,目前尚不具备条件。随着分析理论的发展和各种技术资料的丰富与积累,我国还将不断地完善钢结构的设计方法,最终必将采用全概率设计法。

1.3.3 结构概率极限状态设计法

(1) 结构的极限状态

当结构或构件超过某个特定的状态,就不能满足设计规定的某一功能要求时,则此特定状态称为该功能的极限状态。

实际结构必须满足下列功能要求:

- 1) 能承受正常使用和施工时可能出现的各种作用。
- 2) 在正常使用时具有良好的工作性能。
- 3) 在正常使用和维护下,具有足够的耐久性。
- 4) 在偶然事件发生时及发生后,能保持必需的整体稳定性。

结构的工作性能可用结构的功能函数来描述,设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为 n 个随机变量,则:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.3)$$

式中 Z ——结构的功能函数,也可用结构的荷载效应 S 和抗力 R 来表达,即

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1.4)$$

式中 R 和 S 为两个基本的随机变量, Z 是 R 和 S 的函数,因此也是一个随机变量。

当 $Z > 0$ 时,结构处于可靠状态;

当 $Z < 0$ 时,结构处于失效状态;

当 $Z = 0$ 时,结构处于极限状态。

由此可见,结构的极限状态是结构由可靠转变为失效的临界状态。

$$Z = g(R, S) = R - S = 0 \quad (1.5)$$

称为极限状态方程。

(2) 结构的可靠度

结构的可靠性包括结构的安全性、适用性和耐久性。而结构的可靠度则是结构可靠性的概率度量,即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。这里所讲的完成预定功能的概率,就是满足前述四项基本功能的事件($Z \geq 0$)的概率。若以 p_s 表示结构的可靠度,则有

$$p_s = p(Z \geq 0) \quad (1.6)$$

当结构处于失效状态($Z < 0$)时的概率,称为失效概率,以 p_f 表示,即

$$p_f = p(Z < 0) \quad (1.7)$$

由于可靠度与失效概率是两个相反的概率,两者的关系应满足下式:

$$p_s = 1 - p_f \quad (1.8)$$

由上式可知,结构可靠度的计算可以转化为结构失效概率的计算。用概率的观点来观察结构是否可靠,是指失效概率 p_f 是否已经达到可以接受的预定要求。在实际工程中绝对可靠的结构($p_s = 1$)即失效概率为零($p_f = 0$)的结构是没有的。

已知功能函数

$$Z = g(R, S) = R - S$$

设 $f_R(R)$ 和 $f_S(S)$ 分别是结构的抗力 R 和荷载效应 S 的概率密度函数, $f(R, S)$ 为 R 和 S 的联合概率密度函数, R 和 S 是相互独立的随机变量,则有

$$f(R, S) = f_R(R) \cdot f_S(S) \quad (1.9)$$

其失效概率为

$$\begin{aligned} p_f &= p(Z < 0) = p(R - S < 0) = \iint_{R-S < 0} f(R, S) dR dS \\ &= \iint_{R-S < 0} f_R(R) \cdot f_S(S) dR dS \end{aligned} \quad (1.10)$$

若已知随机变量 R 和 S 的概率密度函数 $f_R(R)$ 和 $f_S(S)$, 由上式可求得结构的失效概率 p_f , 但由于影响结构可靠度的因素很多, 且极为复杂, 求 R 和 S 的理论概率密度困难很大, 所以目前无法从上述理论公式直接求出结构的失效概率, 这就是目前我们还不能采用全概率设计法的原因之一。

(3) 可靠指标 β

在功能函数 $Z = R - S$ 中, R 和 S 是两个服从正态分布的随机变量, 可分别求出它们的平均值 μ_R 、 μ_S 和标准差 σ_R 、 σ_S , 则功能函数 Z 也服从正态分布, 它的平均值和标准差分别为

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S, \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1.11)$$

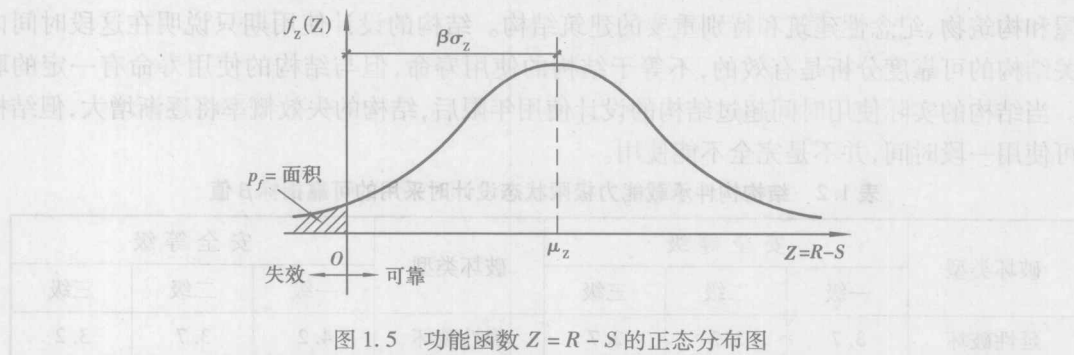


图 1.5 功能函数 $Z = R - S$ 的正态分布图

图 1.5 为功能函数 $Z = R - S$ 的正态分布图。图中由 $-\infty \sim 0$ 的阴影面积为失效概率, 其值为

$$p_f = p(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_Z(Z) dZ \quad (1.12)$$

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1.13)$$