

高职高专建筑工程系列教材

钢 结 构



● 主 编 杜绍堂
副主编 朱旭焰

GANG JIEGOU

重庆大学出版社

钢 结 构

主 编 杜绍堂
副主编 朱旭焰

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书是重庆大学出版社高职高专系列规划教材之一,根据《钢结构设计规范》(GB50017—2003)编写。本书的基本内容是:绪论、钢结构用钢材、钢结构连接、钢结构基本构件设计、钢屋盖结构、钢结构施工。全书共6章。

本书可做为高职高专土建类专业的主干教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构/杜绍堂主编. —重庆:重庆大学出版社,2004.8

(高职高专建筑工程系列教材)

ISBN 7-5624-3149-3

I. 钢... II. 杜... III. 钢结构—高等学校:技术学校—教材 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 051276 号

钢 结 构

主 编 杜绍堂

副主编 朱旭焰

责任编辑:周 立 版式设计:周 立

责任校对:廖应碧 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 65107781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:txke@cqup.com.cn (市场部营销部)

全国新华书店经销

重庆科情印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:434千 插页:8开1页

2004年8月第1版 2004年8月第1次印刷

印数:1—4 000

ISBN 7-5624-3149-3/TU·136 定价:23.50元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

本书是根据《钢结构设计规范》(GB50017—2003)所编写,教材的基本内容是:绪论、钢结构用钢材、钢结构连接、钢结构基本构件设计、钢屋盖结构、钢结构施工。

如何做到理论够用为度、突出实用性特点,一直是高职高专教材建设的课题,本书力求在讲清基本概念、公式、设计思路的同时,加强了实例的训练,做到概念清晰,思路简捷,便于学生学习掌握。考虑到学生毕业后大部分从事工程施工工作,加强了钢结构施工的编写工作。

本书由昆明冶金高等专科学校杜绍堂任主编,昆明大学朱旭焰任副主编。第1章、2章由昆明大学朱旭焰编写,第3章由大同职业技术学院睢志玲编写,第4章由昆明冶金高等专科学校杜绍堂编写,第5章由昆明大学宋高丽编写,第6章由十四冶安装工程公司张中华和云南弘邓金属材料公司江国锋编写,全书由昆明冶金高等专科学校杜绍堂统稿。

恳请读者对本书存在的错误和缺点给予批评指正。

编 者
2004年3月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 钢结构的应用范围及发展	1
1.2 钢结构的组成及特点	4
1.3 钢结构的基本设计原理	7
1.4 钢结构的学习方法	12
本章小结	13
习题	13
第2章 钢结构用钢材	14
2.1 钢材的基本要求和主要性能	14
2.2 影响钢材性能的主要因素	18
2.3 钢材的种类、规格与选用	20
本章小结	26
习题	27
第3章 钢结构的连接	28
3.1 钢结构的连接方法和特点	28
3.2 焊缝连接和焊接结构的特性	29
3.3 对接焊缝的设计	37
3.4 角焊缝的设计	40
3.5 普通螺栓连接的设计	51
3.6 高强度螺栓连接的设计	62
本章小结	68
习题	69
第4章 钢结构的基本构件设计	71
4.1 受弯构件——钢梁	71
4.2 轴心受力构件	94
4.3 拉弯和压弯构件	117
本章小结	127
习题	129
第5章 钢屋盖结构	131
5.1 概述	131

5.2	屋架的形式和主要尺寸	134
5.3	钢屋盖支撑	136
5.4	钢檩条设计	140
5.5	钢屋架杆件设计	147
5.6	屋架节点设计	152
5.7	钢屋架施工图	159
5.8	普通钢屋架设计实例	160
5.9	网架结构	170
	本章小结	176
	习题	177
第6章	钢结构施工	178
6.1	钢结构制作的特点及流程	178
6.2	钢结构制作前的准备工作	180
6.3	钢结构制作	182
6.4	钢结构的安装	199
6.5	钢结构的施工质量验收	210
	本章小结	226
	习题	226
附录		227
附录1	设计指标	227
附录2	轴心受压构件的截面分类	230
附录3	截面塑性发展系数	232
附录4	结构或构件的变形容许值	234
附录5	轴心受压构件的稳定系数	236
附录6	柱的计算长度系数	240
附录7	疲劳计算的构件和连接分类	242
附录8	截面回转半径	245
附录9	热轧等效角钢	246
附录10	热轧不等边角钢	250
附录11	热轧普通工字钢	257
附录12	热轧普通槽钢	260
附录13	热轧宽翼缘 H 型钢截面特性(按 GB11263—89)	263
附录14	螺柱规格	267
附录15	螺栓的有效面积	268
参考文献		269

第 1 章

绪 论

钢结构是用钢板、型钢等轧制成的钢材或通过冷加工成形的薄壁型钢,通过焊接、铆接或螺栓连接等方式制造的结构。其基本构件有拉杆、压杆、梁、柱及桁架等,是建筑结构的主要承重形式。钢结构在土木工程中有着悠久的历史 and 广泛的应用,具有广阔的发展前景。

1.1 钢结构的应用范围及发展

随着钢材数量和质量的提高,建筑钢材也得到更为广泛的应用,钢结构超高层建筑在不断刷新以往的记录。世界上最高的高层建筑已达 450 m;它是位于马来西亚吉隆坡的石油大厦(Petronas Tower),由美国著名建筑师 Cesar Pelli 和著名结构工程师 Thomton-Tomasetti 在 20 世纪 90 年代初设计(图 1.1)。这个高度很快又会被突破,一些国家正在兴建或酝酿着更高的建筑,如美国芝加哥已开始兴建 Miglin-Beiler 塔楼(125 层,594 m 高),见图 1.2。

1.1.1 钢结构的应用范围

钢结构的应用范围和钢材供应情况密切相关。我国 20 世纪 60~70 年代,钢材供应短缺,节约钢材、少用钢材成为当时的重要任务,使钢结构的应用范围受到很大限制。20 世纪 80 年代以来,钢产量逐年提高,钢材品种不断增加,钢结构应用范围不断扩大。目前,钢结构常用于大跨、超高、过重、振动、密闭、高耸、空间和轻型的工程结构中,其应用范围大致为:

1) 重型厂房结构。设有起重较大的中级和重级工作制桥式起重机的车间,如炼钢车间、轧钢车间、铸钢车间、水压车间、船体车间、热加工车间等重型厂房的承重骨架和桥式起重机组。

2) 大跨度结构。要求大空间的公共建筑和工业建筑,多需采用重量轻、强度高的的大跨度钢结构,如飞机制造厂的装配车间、飞机库、体育馆、大会堂、剧场、展览馆等,多采用钢网架、拱架、悬索以及框架等结构体系。

3) 高层和超高层建筑。多采用钢框架结构体系,以加快建设速度,提高抗震性能。

4) 高耸构筑物。主要是承受风荷载的高耸塔桅结构,如高压输电线塔架、石油化工排气塔架、电视塔、环境气象监测塔、无线电桅杆等多采用塔桅钢结构。

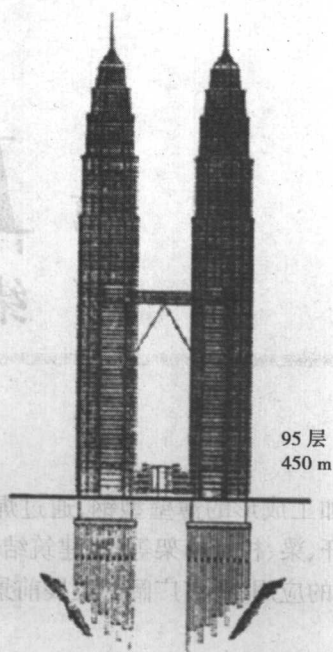


图 1.1 吉隆坡石油大厦

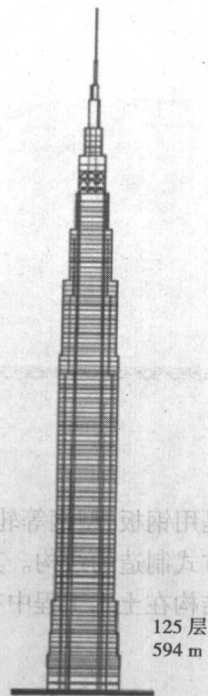


图 1.2 美国芝加哥 Miglin-Beiler 塔楼

5) 容器、储罐、管道。大型油库、气罐、囤仓、料斗和大直径煤气管、输油管等多采用板壳钢结构,以保证在压力作用下耐久与不渗漏。

6) 可拆装和搬迁的结构。如流动式展览馆、装配式活动房屋等多采用螺栓和扣件连接的轻钢结构。

7) 其他构筑物。如高炉、热风炉、锅炉骨架,大跨度铁路和公路桥梁、水工闸门、起重桅杆、运输通廊、管道支架和海洋采油平台等,一般多采用钢结构。

8) 钢与混凝土组合结构。充分利用钢与混凝土各自材料性能的优势,将它们组合成各种构件,可以取得较好的技术经济效益,如钢与混凝土组合梁、钢管混凝土柱等,这类结构在房屋及桥梁建筑中应用很广。

1.1.2 钢结构的发展

我国钢结构有悠久的历史,远在古代就有铁链悬桥、铁塔等建筑。20 世纪中期,先后建成许多钢桥、工业厂房、体育馆等。其中著名的如钱塘江大铁桥、武汉及南京长江大桥、北京工人体育馆、上海体育馆、北京人民大会堂、上海电视塔以及鞍钢、武钢、包钢等一大批重工业厂房都采用了钢结构。

我国钢结构真正突飞猛进地发展,则是在 1978 年国家实施以经济建设为中心的政策以后。这一时期我国钢产量从 1978 年年产三千万 t,到 1996 年突破年产亿万 t 而跃居世界首位,1999 年我国钢产量已达 1.22 亿 t。随着钢产量增加,我国建筑钢材不仅数量大幅增长,而且品种也大大增加。其中强度为 $200 \sim 360 \text{ N/mm}^2$ 的碳素结构钢和低合金高强度钢已基本满足建筑市场要求,同时还研制开发能成功抵抗大气腐蚀的耐候钢以及能抵抗层状撕裂的 Z 向

钢;另外 H 型钢、剖分 T 型钢、压型钢板均是近年开发投产的新品种,这些为钢结构发展提供了物质基础。长期以来由于钢材短缺而以“节约钢材”作为我国的基本国策,已经变为“积极、合理、快速地发展钢结构”的政策。

这一时期,在工业厂房中有代表性的是上海宝山钢铁总厂一、二期工程建设,包括炼钢、连铸、热轧、冷轧、无缝钢管厂、自备电厂等厂房,全部采用钢结构,屋面和墙面均采用了压型钢板或铝合金板,总计使用钢结构 30 万 t,钢结构厂房面积 105 万 m^2 。这在国内是少有的,在国际上也举世瞩目。与此同时各地还建成许多高层及超高层钢结构建筑,如深圳地王大厦,标准层 68 层,楼顶面高 325 m,楼顶塔尖处高 384 m,于 1995 年建成,其总高度当时居亚洲第一,世界第四;上海金茂大厦,高达 420 m,1997 年建成时为世界第三高楼。

空间大跨度钢结构发展也相当迅速。例如 1990 年北京第十届亚运会的十几个体育场馆大多采用了网架和网壳结构,有的用了斜拉索体系,并采用压型钢板作屋面。其中最大跨度是 $168 \text{ m} \times 72 \text{ m}$ 。这些体育场馆结构新颖,具有民族风格,受到了好评。1999 年建成的长春体育馆,在国内首次采用大截面方钢管组成网壳屋盖,最大方钢管截面为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,网壳屋脊拱架跨度长向 192 m,径向拱架跨度短向 146 m,拱架中心落地矢高 41 m,建成时是亚洲最大的方钢管轻钢网壳。该结构总体布置合理,用钢量为 80 kg/m^2 ,用钢量及造价较省,技术经济效果好。钢网架建筑在 20 世纪 90 年代发展极快,据不完全统计,这期间每年建造的钢网架建筑约 100 万 m^2 。当时仅徐州就有网架生产制造厂 20 多家,有“网架之乡”美称。轻钢建筑发展也很快,至 1996 年全国已建成轻钢建筑达 320 万 m^2 。目前跨度最大的轻钢结构是大连某国家粮仓储备库,其跨度已达到 72 m,其用钢量为 49.7 kg/m^2 。

上述情况表明,我国建筑工程领域在这一时期已经出现产品结构调整,长期以来由于缺乏钢材而形成的混凝土和砌体结构一统天下的局面已经发生变化。钢结构以其自身的优越性得到广泛的、合理的应用,但是和工业发达国家相比,我国还有很大差距。工业发达国家在其建筑业增长时期基本建设用钢量一般占钢材总产量的 30% 以上,而我国目前建筑用钢量(包括建机、门窗、车辆和混凝土结构用钢)只达到 22% ~ 26%,这一差距主要在于我国房屋结构用钢量还比较少。为了让建筑业发展能带动建材、冶金、化工、机械等相关产业发展,促进国民经济增长和结构调整,使建筑业成为名副其实的国民经济支柱产业,今后以较快速度发展钢结构是一个很重要的方面。由此可见钢结构在国民经济中的地位将大大提高。建设部在 1997 年 11 月发布了新的《中国建筑技术政策》(1996—2010 年),具体地提出了发展钢结构的要求,指明了钢结构的发展方向。在这个政策中,有关钢结构的主要内容是:

1) 发展建筑钢材。关于钢结构用钢,要增加 345 兆帕级高韧、可焊、耐腐蚀新钢种,积极发展 H 型钢、T 型钢、薄壁型钢、闭型钢和管材。“九五”期间先提供 445 兆帕级新钢种和焊接 H 型、T 型钢,以后 10 年提供 735 兆帕级多功能钢板和热轧 H 型、T 型及其他型钢,逐步取代普通工字钢、槽钢、角钢,并建立达到国际标准的轻型薄壁钢材标准系列。重点发展镀锌钢板和耐大气腐蚀涂层薄板的冷弯薄壁型钢和压型钢板,优先发展屋面、墙面(包括保温复合板)用的新产品,并结合轻钢结构、组合结构的发展,建立冷弯、压型产品标准系列。

2) 发展建筑钢结构。重点发展钢和混凝土的混合结构体系,积极发展钢结构体系。超高层建筑结构、大跨度空间结构、大跨重载工业厂房,可采用钢结构;努力改进单层房屋建筑传统的板、梁、柱体系,积极发展各种新型建筑结构体系,适当发展大柱网灵活厂房,加速推广定型化的轻型房屋钢结构体系。大跨度屋盖采用钢结构和钢与混凝土组合结构;大跨度公共建筑

要推广应用网架、网壳、悬索、压型钢板结构等空间结构体系。

3) 发展钢结构施工工艺。积极开发钢结构制造和现场施工中的计算机放样、自动切割、计算机打(钻)孔技术。发展药芯焊丝自保护焊、惰性气体保护焊、埋弧焊、多头焊床等焊接技术;积极采用自动、或半自动焊接设备,提高厚板和薄板的焊接技术。积极发展轻钢结构、大跨度空间结构的施工成套技术;大力发展与钢结构相配套的楼盖与轻质围护结构和构件。开发具有我国特色的结构安装技术、新工艺和简易有效的施工机具,采用高强螺栓电动扳手和先进的激光检测装置,提高安装技术水平。

在《中国建筑技术政策》发布后的几年里,国家各有关部门又多次就发展建筑钢结构发布文件,要求扩大钢结构住宅的市场占有率。提出在“十五”期间的发展目标是争取达到每年建筑钢结构用钢材占全国钢材总产量的3%,2015年争取达到6%;并指出要建立现代化住宅产业工业体系,重点进行轻钢结构体系、住宅节能体系和新型建筑材料的开发。这些文件还多次提出:要求各地积极推广应用H型钢,将钢结构技术作为推广新技术的一个方面,其中包括高层钢结构技术、空间钢结构技术、轻钢结构技术、钢-混凝土组合结构技术、高强度螺栓连接和焊接技术、钢结构的防护技术。

综合上述情况,我国现在已具备了发展钢结构的物质基础和技术基础,同时又有国家政策大力支持,目前钢结构已处于建国以来发展最好的时期,可以预计21世纪我国钢结构会得到更快的发展。

1.2 钢结构的组成及特点

1.2.1 钢结构的组成

钢结构在建筑工程中有着广泛的应用。由于使用功能及结构组成方式不同,钢结构种类繁多,形式各异。所有这些钢结构尽管用途、形式各不相同,但它们都是由钢板和型钢经过加工,制成各种基本构件,如拉杆(有时还包括钢索)、压杆、梁、柱及桁架等,然后将这些基本构件按一定方式通过焊接和螺栓连接组成结构。

下面通过一些示例对如何按一定方式将基本构件组成能满足各种使用功能要求的钢结构作简要说明。

图1.3是一个单层房屋钢结构组成的示意图。单层房屋承受重力荷载、水平荷载(风力及吊车制动力等)。图中屋盖桁架和柱组成一系列的平面承重结构(图1.3(a)),主要承受重力荷载和横向水平荷载。这些平面承重结构又用纵向构件和各种支撑(如图中所示的上弦横向支撑、垂直支撑及柱间支撑等)联成一个空间整体(图1.3(b)),保证整个结构在空间各个方向都成为一个几何不变体系。除此之外还可以由实腹的梁和柱组成框架或拱,框架和拱可以做成三铰、二铰或无铰,跨度大的还可以用桁架拱。

上述结构均属于平面结构体系。其特点是结构由承重体系及附加构件两部分组成,其中承重体系是一系列相互平行的平面结构,结构平面内的垂直和横向水平荷载由它承担,并在该结构平面内传递到基础。附加构件(纵向构件及支撑)的作用是将各个平面结构连成整体,同时也承受结构平面外的纵向水平力。当建筑物的长度和宽度尺寸接近,或平面呈圆形时,如果

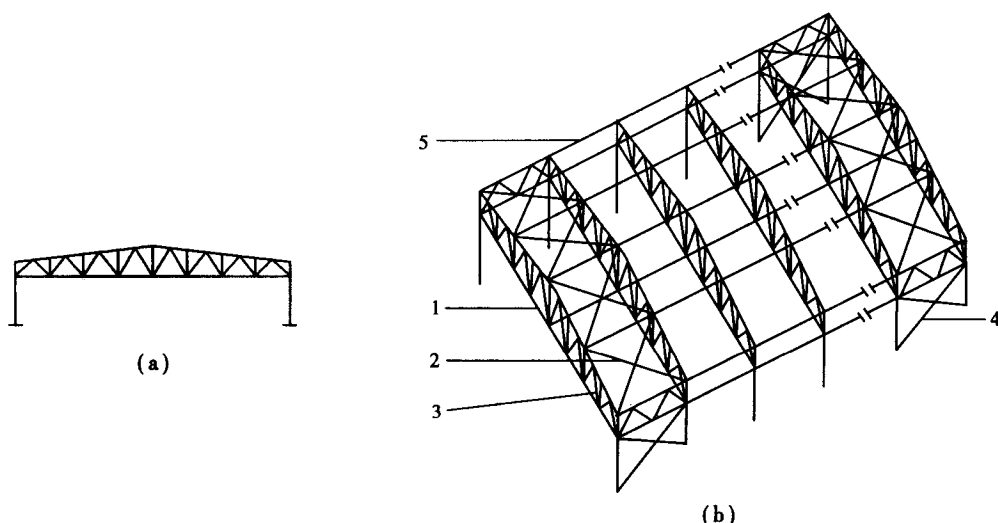


图 1.3 单层房屋钢结构组成示例

1—屋架;2—上弦横向支撑;3—垂直支撑;4—柱间支撑;5—纵向构件

将各个承重构件自身组成为空间几何不变体系省去附加构件,受力就更为合理。如图 1.4 所示平板网架屋盖结构。它由倒置的四角锥体组成,锥底的四边为网架的上弦杆,锥棱为腹杆,连接各锥顶的杆件为下弦杆。屋架的荷载沿两个方向传到四边的柱上,再传至基础,形成一种空间传力体系,因此这种结构也称为空间结构体系。这个平板网架中,所有的构件都是主要承重体系的部件,没有附加构件,因此,内力分布合理,能节省钢材。

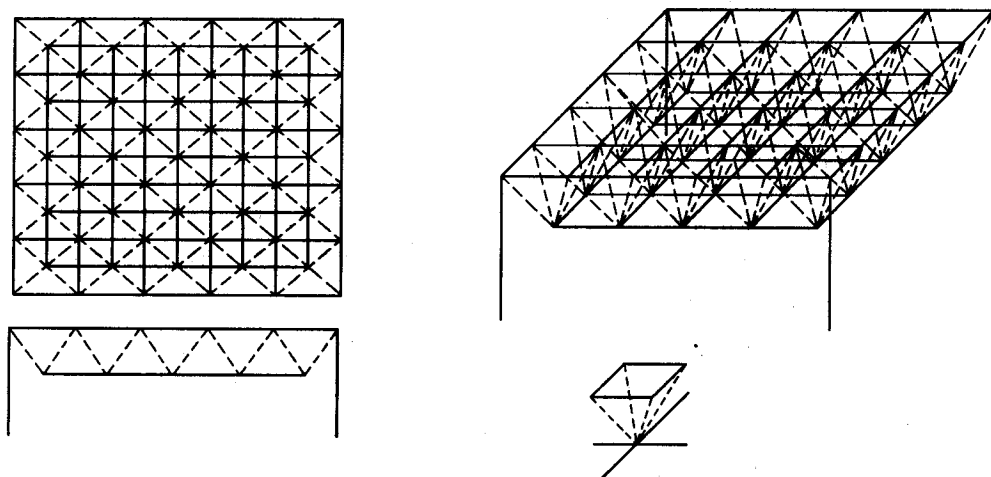


图 1.4 平板网架屋盖

—上弦杆;---下弦杆;...腹杆

多层房屋结构的特点是随着房屋高度增加,水平风荷载(以及地震荷载)越来越起重要作用。提高结构抵抗水平荷载的能力,以及控制水平位移不要过大,是这类房屋组成的主要问题。一般多层钢结构房屋组成的体系主要有:框架体系,即由梁和柱组成的多层多跨框架,如

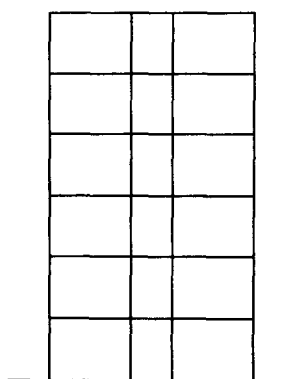


图 1.5 框架结构

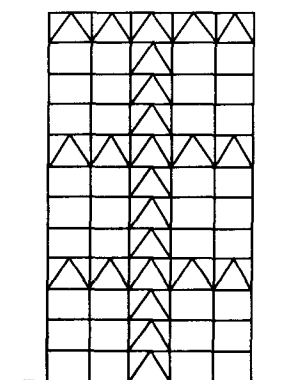


图 1.6 带刚性加强层结构

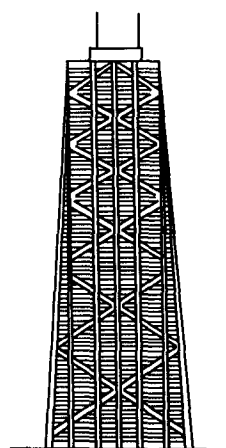


图 1.7 钢支撑筒结构

图 1.5 所示；带刚性加强层结构，即在两列柱之间设置斜撑，形成竖向悬臂桁架，以便承受更大的水平荷载，如图 1.6 所示；筒式结构体系，即沿框架四周用密集排列的柱形成空间刚架式的筒体，它能更有效地抵抗水平荷载。如果不用密集排列的柱，也可以在建筑表面附加斜支撑，斜撑与梁、柱组成桁架，这样房屋四周就形成了刚度很大的空间桁架——支撑筒，这也是一种筒式结构体系，如图 1.7 所示。

综上所述，钢结构的组成应满足结构使用功能的要求，结构应形成空间整体（几何不变体系）才能有效而经济地承受荷载，同时还要考虑材料供应条件及施工方便等因素。

本节仅对单层及多层房屋的钢结构组成作了一些简单介绍，但是其他结构如桥梁、塔架等同样也应遵循这些原则。同时，我们还应看到，随着工程技术不断发展，以及对结构组成规律不断深入的研究，将会创造和开发出更多的新型结构体系。

1.2.2 钢结构的特点

在土木建筑工程中，除钢结构外，还有钢筋混凝土结构、砖石结构、木结构等。做工程规划时，要根据各类结构的特点，结合工程的具体情况来确定选用结构的类型，以便使工程设计经济合理。与其他结构相比，钢结构有如下特点：

1) 强度高、重量轻。钢材的容重虽然比钢筋混凝土、砖石及木材大，但因其强度更高，因此在承载力相同的条件下，钢结构的自重比其他结构要小。如使用 H 型钢制作的钢结构与混凝土结构比较，自重可减轻 20% ~ 30%。由于结构自重小，就可以承担更多的外加荷载，或具有更大的跨度。自重小也便于运输和吊装，例如，交通不便、取材困难的边远山区，修建公路或输电工程时，常常考虑运输方便而选用钢桥或钢制输电线塔架。

2) 塑性、韧性好。钢材破坏前要经受很大的塑性变形，能吸收和消耗很大的能量，因此，一般情况下不会因偶然局部超载而突然脆性破坏，对动力荷载的适应性强，抗震性能好。国内外大量的调查表明，地震后，各类结构中钢结构所受的损害最小。

3) 材质均匀，工作可靠性高。钢材在冶炼和轧制过程中，质量受到严格的检验控制，因而材质比较均匀，质量比较稳定。钢材各向同性，弹性工作范围大，因此它的实际工作情况与一

般结构力学计算中采用的材料为匀质各向同性体的假定较为符合,工作可靠性高。

4)适于机械化加工,工业化生产程度高。组成钢结构的各个部件一般是在专业化的金属结构加工厂制造,然后运至现场,用焊接或螺栓进行拼接和吊装,因此加工精细,生产效率高,是工业化生产程度最高的一种结构。同时钢结构也是施工现场工程量最小的一种结构,因而施工周期也最短。此外钢结构工程主要是干作业,能改善施工环境,有利于文明施工。

5)采用钢结构可大大减少砂、石、灰的用量,减轻对不可再生资源的破坏。钢结构拆除后可回炉再生循环利用,有的还可以搬迁复用,可大大减少灰色建筑垃圾。因此采用钢结构有利于保护环境、节约资源,被认为是环保产品。

6)与混凝土结构相比钢结构是环保型、可再次利用的,也是易于产业化的结构,同时还有较好的综合经济指标。例如,因自重小,其地基基础费用相对较省;因构件截面相对较小,可增加有效使用面积;与混凝土结构相比,采用热轧H型钢的钢结构有效使用面积可增加4%~6%;因施工快工期短,可节省贷款利息并提前发挥使用效益;工程资料表明,一吨钢结构可减少7吨混凝土用量,这样又可以节约能源。

7)能制成不渗漏的密闭结构。

8)耐热性能好,但耐火性能差。钢材在常温至200℃以内性能变化不大,但超过200℃,钢材的强度及弹性模量将随温度升高而大大降低,到600℃时就完全失去承载能力。另外钢材导热性很好,局部受热(如发生火灾)也会迅速引起整个结构升温,危及结构安全。一般认为,当钢结构表面长期受高温辐射达150℃以上,或短时间内可能受到火焰作用,或可能受到炽热熔化金属喷溅,以及可能遭受火灾袭击时,就应采取有效的防护措施,如用耐火材料做成隔热层等。

9)易锈蚀。这是钢材的最大弱点。据有关资料估算,约有10%~12%的钢材损耗是属于锈蚀损耗。低合金钢的抗锈能力比低碳钢好,其锈蚀速度比低碳钢慢。耐候钢(见第2章)抗锈最好,其抗锈能力高出一般钢材2~4倍。

钢材锈蚀严重时会影响结构的使用寿命,因此钢结构必须采取防锈措施,彻底除锈并涂以油漆和镀锌等。此外,还应注意使结构经常处于清洁和干燥的环境中,保持通风良好,及时排除侵蚀性气体和湿气;选用结构构件截面的形式及构造方式应有利于防锈;尽量避免出现难于检查、清刷和油漆之处,以及能积留湿气和大量灰尘的死角和凹槽,闭口截面应沿全长和端部焊接封闭;平时应加强维护,及时进行清灰、清污工作,视涂装情况,每隔数年应重新油漆一次;必要时可采用耐候钢,如桥梁等露天结构。

1.3 钢结构的基本设计原理

1.3.1 钢结构的设计方法

为加深理解,应注意掌握以下几点:

(1) 结构设计的目的

结构设计的目的使所设计的结构满足各种预定的功能要求。这预定的功能是指:

① 安全性

结构能承受正常施工和正常使用时可能出现的各种作用,包括荷载、温度变化、基础不均匀沉降以及地震作用等;在偶然事件发生时及发生后仍能保持必需的整体稳定性,不致倒塌。

②适用性

结构在正常使用时,应具有良好的工作性能,满足预定的使用要求,如不发生影响正常使用的过大变形、振动等。

③耐久性

结构在正常维护下,随时间变化仍能满足预定功能要求,如不发生严重锈蚀而影响结构的使用寿命等。

上述三方面的功能要求又可概括称为结构的可靠性。结构的可靠性与结构的经济性是经常相互矛盾的,科学的设计方法是在结构的可靠与经济之间选择一种合理的平衡,力求以最经济的途径,适当的可靠度达到结构设计的目的。

(2) 结构设计的主要内容

①研究结构的受力体系,确定结构的力学模型和计算简图。

②研究外界对结构的作用及作用效应分析。

“作用”是指使结构产生内力、变形、应变的所有原因。“直接作用”是指施加在结构上的荷载,如自重、风荷载、雪荷载及活动荷载;“间接作用”指引起结构变形和约束变形从而产生内力的其他作用,如地震、基础沉降、温度变化、焊接等。“作用效应”是指结构上作用引起的结构或其构件内力和变形(如弯矩、轴力、剪力、扭矩、挠度、转角等)。因为结构上的作用是不确定的随机变量,所以作用效应一般也是随机变量。

③根据外界作用及结构抗力对结构或构件及其连接等进行强度、稳定和变形验算。

“结构抗力”是指结构或构件承受作用效应的能力(如构件的承载能力、刚度等)。结构抗力是构件材料性能、几何参数及计算模式的函数,由于材料性能的变异性,构件几何特征的不定性和计算模式的不定性,结构或构件抗力也是随机变量。

(3) 结构的两种极限状态

①承载能力极限状态

这种极限状态对应于结构或构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形。这里有两个极限准则:一个是最大承载力,另一个是不适于继续承载的变形。对于钢结构来说,两个极限准则都采用,且第二个准则主要应用于钢结构。如图 1.8 桁架结构中的拉杆,截面无孔削弱,按承载能力、极限状态进行计算时,需进行拉杆的强度计算和端部连接焊缝计算。

强度计算是以毛截面屈服作为极限状态,即:

$$N \leq N_y = A \cdot f_y$$

然而截面中的应力达到 f_y 时,此拉杆并没有被拉断,也就是没有达到最大承载能力。但是,从钢材的应力—应变曲线(图 1.9)可看到,应力达到 f_y 后应变可以达到 2.5% 左右,也就是材料每米伸长 25 mm,如果此杆件长为 5 m,则伸长可达 125 mm。拉杆发生这样大的变形,将会使整体桁架下塌,受力体系改变,影响整个桁架的工作。因此,此拉杆的强度计算即属于第二极限准则。

对于端部连接焊接的计算,是以焊缝破坏作为极限状态的,即属于第一准则。

应注意结合以后各章节的学习,加深理解。

②正常使用极限状态

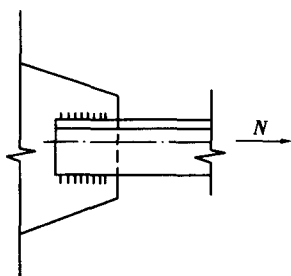


图 1.8

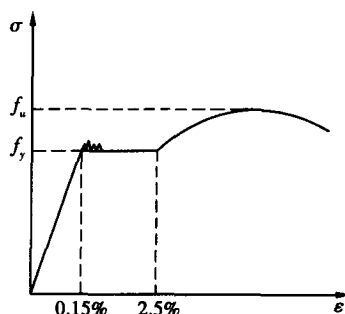


图 1.9 Q235 钢应力—应变曲线

这种极限状态对于结构或构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值。对钢结构来说,主要是控制构件的刚度,避免出现影响正常使用的过大变形或在动力作用下的较大振动。

(4) 钢结构的计算方法

①容许应力计算法

钢结构的计算是以极限状态为准则进行的。设荷载效应的标准值为 S , 构件抗力的标准值为 R , 一般情况下, 荷载的标准值即荷载的最大值, 抗力的标准值即抗力的最小值, 则计算式应当写成:

$$S \leq R \quad (1.1)$$

由于 S 和 R 都是确定值, 这种计算方法是一种确定性方法。钢结构的容许应力计算法就是在此基础上的一种确定性的方法。将式(1.1)两边各除以构件截面几何特征, 可得其计算表达式为:

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1.2)$$

式中 σ ——荷载标准值作用下的构件应力;

$[\sigma]$ ——容许应力, 等于钢材强度 f_y 除以安全系数 K , K 由工程经验确定。

此方法以安全系数 K 来考虑作用效应和结构抗力的变异, 即可能荷载超过其标准值, 抗力小于其标准值的情况。计算简单方便, 缺点是安全系数 K 笼统取为定值。实际上作用效应和结构抗力的变异并不具有比例关系, 取为定值势必带来各种情况与实际隐含的可靠度不一致。

②概率极限状态设计法

如前所述, 作用效应 S 和构件抗力 R 实际为随机变量, 它们两者之间的关系存在 3 种情况:

$$\left. \begin{array}{l} S > R \\ S = R \\ S < R \end{array} \right\} \quad (1.3)$$

即有可能出现 $S > R$ (结构失效), 也就是说结构设计存在风险, 不能保证绝对安全。但是, 只要存在的风险很小, 或者说 $S > R$ 的概率 (失效概率) 很小, 小到人们可以接受的程度, 就说这一结构是应当认可的。因此, 对结构的安全保证, 只能是一定概率的保证, 而这概率当然不是百分之百, 在此基础上的计算方法叫做概率法。因此, 概率法的实质是考虑“ $Z = R - S < 0$ ”这一事件的概率。

根据实际结构的统计资料,可假定 Z 的统计频率(概率密度)分布曲线如图 1.10 所示,即绝大多数的 Z 值都大于 0,也有少数的 Z 值小于 0。

图中阴影部分面积占全部面积的百分率即表示 $Z < 0$ 的失效概率 p_f ,实际计算失效概率 p_f 比较困难。由图 1.10 可见, Z 的标准差 σ_z 和平均值 μ_z 之间存在下列关系:

$$\mu_z = \beta \sigma_z \quad (1.4)$$

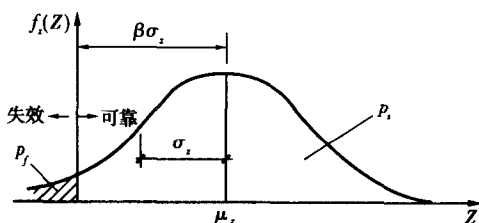


图 1.10 Z 的概率分布曲线

即由 $Z=0$ 到平均值 μ_z 的距离等于 $\beta \cdot \sigma_z$ 。只要分布一定, p_f 与 β 就是一一对应关系。 β 愈大, p_f 就愈小;反之, β 愈小, p_f 就会愈大,这就说明 β 值完全可以作为衡量结构可靠度的一个数量指标。有了结构的失效概率 p_f 或可靠指标 β 作为结构的可靠度的定量尺度后,就可以真正从数量上对结构可靠度进行对比分析。但是如何选择—个结构最

优的失效概率或者可靠指标,以达到结构可靠度与经济的最佳平衡呢?由于找不到一种合理的定量分析方法,这是一个难题。目前很多国家都从实际出发,采用“校准法”,所谓“校准法”,就是对按原有使用多年的规范设计的结构反算其隐含的可靠指标,再考虑使用经验和经济等因素来确定新的可靠指标。因为它以长期工程实践为基础,所以能为人们所接受。

我国“统一标准”规定,对于承载能力极限状态,结构构件的可靠指标应根据结构构件的破坏类型和安全等级按表 1.1 选用。

表 1.1 结构构件承载力极限状态设计时的可靠指标 β 值

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

注:①对民用建筑的安全等级可按有关民用建筑等级标准的规定采用;工业建筑钢结构一般为二级。

②当有充分根据时,采用的 β 值,可对本表规定作不超过 ± 0.25 幅度的调整。

当 R 和 S 为统计独立时

$$\mu_z = \mu_R - \mu_S \quad (1.5)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \quad (1.6)$$

将式(1.6)、式(1.7)代入式(1.5)可得:

$$\mu_z - \mu_S = \beta \cdot \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1.7)$$

由式(1.5)、式(1.7)可得:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1.8)$$

令

$$\alpha_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad \alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad \delta_S = \sigma_S / \mu_S \quad \delta_R = \sigma_R / \mu_R$$

引入不等号,得

$$\mu_s(1 + \alpha_s \beta \delta_s) \leq \mu_R(1 - \alpha_R \beta \delta_R) \quad (1.9)$$

这就是概率法的设计式。因为这种设计不考虑 Z 的全分布,只考虑平均值(一次矩)和方差(二阶段),故叫做一次二阶矩概率设计法。其主要优点是:可根据结构的重要性和破坏特征直接采用合适的可靠指标,只要掌握各随机变量的平均值和标准差,就可以进行设计。但直接使用此法进行结构设计,目前还有困难,主要是因为有些统计参数不易求得,而且此表达式与设计人员以前习用的计算方法相差甚远,不易被人接受。解决的办法是一次二阶矩法等效地转化为分项系数表达式。

③分项系数表达式法

在简单的荷载情况下,采用标准值的分项系数设计表达式可写成:

$$\gamma_G S_{GK} + \gamma_Q S_{QK} \leq \frac{R_K}{\gamma_R} \quad (1.10)$$

式中 R_K ——构件的标准抗力;

S_{GK}, S_{QK} ——分别为按标准值计算的永久荷载效应值和可变荷载效应值;

γ_R ——构件抗力分项系数;

γ_G, γ_Q ——相应的永久和可变荷载分项系数。

一次二阶矩法的设计表达式(1.10)可写成:

$$S^* \leq R^* \quad (1.11)$$

对于简单荷载情况,上式可写成:

$$S_G^* + S_Q^* \leq R^* \quad (1.12)$$

为使一次二阶矩法和分项系数表达式法这两种设计法等价,必须有:

$$\gamma_R = R_K/R^* \quad \gamma_G = S_G^*/S_{GK} \quad \gamma_Q = S_Q^*/S_{QK}$$

带星号“*”各值不仅与 β 有关,且与各基本变量的统计参数有关,见式(1.10)。因此,在给定 β 的情况下, γ_Q 和 γ_G 将随荷载效应比值 S_{QK}/S_{GK} 变动而为一系列的值,这对于设计显然是不方便的,为此,采用优化的方法求得最佳的分项系数,从而使结构或构件实际的可靠指标与目标可靠指标的误差最小。

《建筑结构设计统一标准》(GBJ68—84)规定,在一般情况下,取 $\gamma_G = 1.2, \gamma_Q = 1.4$ 。当永久荷载效应与可变荷载效应反号时,永久荷载对设计是有利的,应取 $\gamma_G = 1.0, \gamma_Q = 1.4$ 。

在荷载分项系数决定后,根据所要求的目标 β 值,再确定最佳的 γ_R 值。《钢结构设计规范》(GBJ17—88)采用的目标可靠指标 $\beta = 3.2$ (安全等级为二级的结构物延性破坏时),经分析,得出 Q235 钢、Q345 钢的 $\gamma_R = 1.087$; Q390 钢的 $\gamma_R = 1.11$ 。

当结构上同时作用多种荷载时,由于这些荷载都同时以其标准值(正常情况最大值)出现的概率小,应对有关标准值进行折减,即乘以小于 1.0 的组合系数,这样才能使该构件所具有的可靠指标与仅有一种可变荷载情况有最佳的一致性。故用分项系数表达的极限状态设计表达式为:

$$\gamma_0 (\gamma_G S_{GK} + \gamma_{Q1} S_{Q1K} + \sum_{i=2}^m \gamma_{Qi} \psi_{Qi} S_{QiK}) \leq R_K / \gamma_R \quad (1.13)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数,与安全等级相对应,即一级为 1.1,二级为 1.0,三级为 0.9;