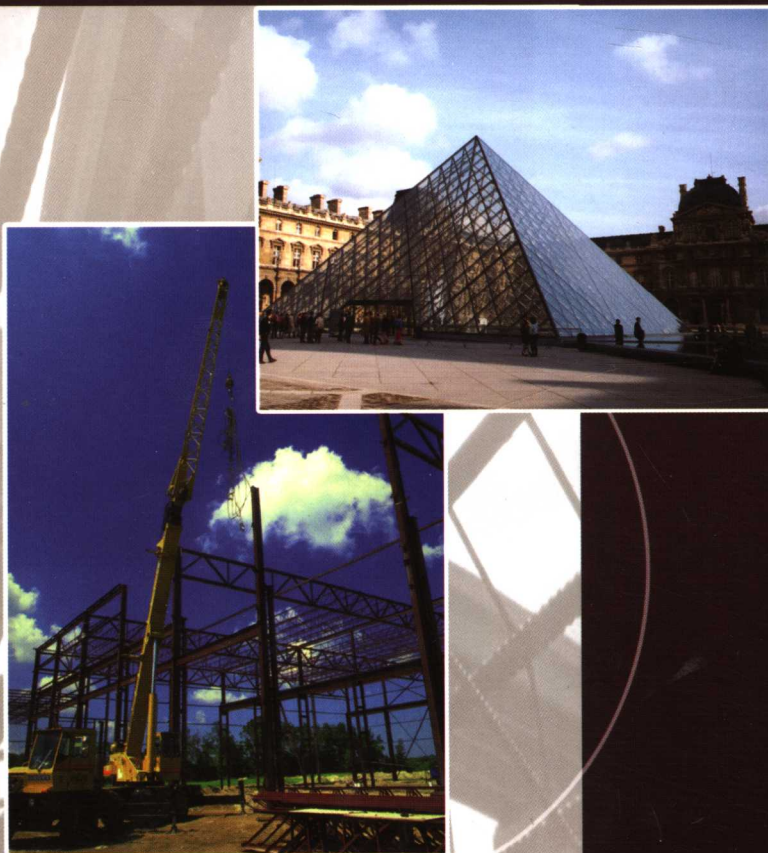




普通高等学校土木工程专业新编系列教材

钢结构设计原理

苏彦江 赵建昌 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等学校土木工程专业新编系列教材

钢结构设计原理

苏彦江 赵建昌 主编



中国铁道出版社

2007年·北京

内 容 简 介

本书是为土木工程专业本科“钢结构设计原理”课程教学需要而编写的教材。以目前最新的《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)为依据,主要阐述钢结构设计的基本概念与原理。全书共分六章,介绍了钢结构的特点、应用和 design 方法、钢材性能、钢结构的连接方法及其计算原则以及钢结构基本构件(轴心拉杆和压杆、受弯构件、拉弯和压弯构件)的设计方法。这些内容都是设计各类土木工程钢结构的基础,符合土木工程专业基础课的要求。

本书可作为建筑工程、岩土工程、桥梁工程、道路工程、水工结构等专业的钢结构本科教材用书,也可作为相关专业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计原理/苏彦江主编. —北京:中国铁道出版社,2007. 1
(普通高等学校土木工程专业新编系列教材)
ISBN 978-7-113-07723-5

I. 钢... II. 苏... III. 钢结构-结构设计-高等学校-教材
IV. TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 160159 号

书 名:钢结构设计原理

作 者:苏彦江 赵建昌 主编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑:李丽娟

责任编辑:李丽娟 刘红梅

封面设计:薛小卉

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:787×1 092 1/16 印张:13.75 字数:343 千

版 本:2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-07723-5/TU·821

定 价:23.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话:010-51873133 发行部电话 010-51873124

前言

本书是为土木工程专业“钢结构设计原理”课程教学需要而编写的教材。目前的土木工程专业覆盖面很广,有建筑工程、岩土工程、桥梁工程、道路工程、水工结构等专门化方向。“钢结构设计原理”为本专业各方向的技术基础课,根据大土木专业的教学计划,分配给本门课程的教学时数往往偏少(约40学时),在这样的情况下,要想在“钢结构设计原理”的教学中全面涉及本专业各方向的各种问题将是十分困难的,也会使初学者感到头绪繁多,不易掌握和记忆。为此,我们在本书的编写中,主要以阐述钢结构设计的基本概念与原理为主,这是每个专门化方向都普遍适用的。作为设计原理的应用,本书以目前最为先进的《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)为依据,介绍钢结构基本构件和连接的设计方法,而不涉及其他方向的行业规范(如《铁路桥梁钢结构设计规范》和《公路桥梁钢结构设计规范》等)。相信读者在熟练掌握钢结构设计的基本概念与原理后,很快适应从事各专门化方向的工程设计。

本书共分6章,分别介绍了钢结构的特点、应用和设计方法、钢材性能、钢结构的连接方法及其计算原则以及钢结构基本构件(轴心拉杆和压杆、受弯构件、拉弯和压弯构件等)的设计方法。这些内容都是设计各类土木工程钢结构的基础,符合土木工程专业技术基础课的要求。

本书由苏彦江、赵建昌编写。其中第1~3章由赵建昌编写,第4~6章及附录由苏彦江编写。

在编写本书的过程中,参考了许多专家学者的著作及论文,在此表示感谢。

虽然编者想尽力将此书编写得系统和实用,但由于水平有限,必有取舍不当或叙述不到之处,恳切希望读者批评指正。

编 者
2006年10月

目 录

1 钢结构概述	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	3
1.3 钢结构的类型及组成	4
1.4 钢结构设计的基本要求和设计方法	5
本章小结	11
思考题	12
2 钢结构的材料	13
2.1 建筑钢材的主要工作性能	13
2.2 复杂应力状态下钢材的屈服条件	15
2.3 钢结构的脆性断裂	16
2.4 钢结构的疲劳	19
2.5 影响钢材性能的因素	22
2.6 钢材的种类和加工	25
2.7 钢材的规格和选用	26
本章小结	28
思考题	29
3 钢结构的连接	30
3.1 焊接连接	30
3.2 对接焊缝的构造与计算	34
3.3 角焊缝的构造与计算	38
3.4 焊接残余应力和焊接残余变形	47
3.5 普通螺栓连接	49
3.6 高强度螺栓连接	61
本章小结	66
思考题	67
习 题	67
4 轴心受力构件	71
4.1 轴心受力构件的特点和截面形式	71
4.2 轴心受力构件的强度和刚度	72

4.3 实腹式轴心受压构件的整体稳定	76
4.4 实腹式轴心受压构件的局部稳定	93
4.5 实腹式轴心受压杆件的设计	96
4.6 格构式轴心受压杆件	100
4.7 轴心受压柱与梁的连接形式和构造	109
4.8 柱脚设计	110
4.9 索的力学特性和分析方法简介	115
本章小结	120
思考题	121
习 题	122
5 受弯构件	123
5.1 概 述	123
5.2 梁的强度和刚度	124
5.3 梁的整体稳定	129
5.4 型钢梁的设计	134
5.5 组合梁的截面设计	137
5.6 组合梁的局部稳定和腹板加劲肋的设计	145
5.7 考虑腹板局部失稳后强度的设计	153
5.8 梁的拼接和主次梁的连接	156
本章小结	160
思考题	160
习 题	161
6 偏心受力构件	163
6.1 概 述	163
6.2 偏心受力构件的强度和刚度	164
6.3 实腹式压弯构件的整体稳定	167
6.4 实腹式压弯构件的局部稳定	173
6.5 框架柱的计算长度	174
6.6 实腹式压弯杆件的截面设计	177
6.7 格构式压弯构件	179
6.8 框架中梁与柱的连接	182
6.9 框架柱的柱脚	184
本章小结	185
思考题	186
习 题	186
附 录	188
参考文献	214

1.1 钢结构在我国的发展概况

钢结构在我国的应用历史非常悠久,在古代,我们的中华民族在金属冶炼技术上处于领先地位,建造了许多金属结构,如公元前 200 多年(秦始皇时代)就已经有了用铁建造的桥墩;公元前 206 年(秦末)在陕西褒城马道驿的寒溪上建造了一座铁链桥;公元 66 年(东汉明帝时代)在云南景东地区的澜沧江上修建了锻铁悬索桥;其后建造的铁链桥有十多座。其中最著名的有距今 400 多年前(明代)的云南沅江桥;300 多年前(清代)的贵州盘江桥;公元 1676 年(清康熙年间)修建的四川泸定大渡河铁索桥等。我国古代还建造过许多铁塔,以及“天枢”等大型纪念性结构,如洛阳的“天枢”(唐代),高 35 m,顶部是直径 11.3 m 的腾云承露盘;江苏镇江的甘露寺铁塔;湖北荆州的玉泉寺铁塔(1061 年,宋代);济宁铁塔寺铁塔等,都是古代钢结构建造方面的杰作。古代建造的金属结构大多为铸铁或锻铁结构,真正的钢结构是由生铁结构逐步发展起来的。

某一时代的钢结构建筑水平取决于这一时代的冶金和建筑技术水平,钢材的冶金质量直接决定着钢结构的发展。18 世纪以后,由于欧洲工业革命的兴起,使钢铁冶炼技术得到了发展,促进了钢结构在欧美等国的应用和发展。这一时期,国内由于受封建统治,生产力受到束缚,科学技术不发达,生产力水平低下,钢结构的发展非常缓慢,特别是 1840 年鸦片战争以后,我国沦为半殖民地半封建社会,我国的“建筑权”掌握在外国人的手里,虽然一些帝国主义国家在我国建造了一些钢结构,但数量上微不足道。即使如此,我国工程师仍有不少优秀设计和创造,如 1927 年建造的沈阳皇姑屯机车厂钢结构厂房;1928~1931 年建造的广州中山纪念堂钢圆屋顶;1934~1937 年建造的杭州钱塘江大桥(全长 1 072 m),为我国历史上自己设计和建造的第一座双层公、铁两用桥。

新中国成立以来,我国的冶金工业和钢结构设计、制造和安装水平有了很大的提高,建造了许多钢结构,特别是 1978 年改革开放以来,我国的钢结构在规模和技术上已达到世界先进水平。在钢结构厂房方面有:解放初期恢复和扩建的鞍山钢铁公司、武汉钢铁公司和大连造船厂等,新建的有太原重型机器制造厂、富拉尔基重型机器制造厂、长春汽车制造厂、哈尔滨以及四川的三大动力厂、洛阳拖拉机厂、武汉钢铁公司一米七轧钢厂、上海宝山钢铁总厂等。在高层建筑钢结构方面有:20 世纪 80 年代和 90 年代兴建的北京中国国贸中心(高 155.2 m)、京城大厦(高 182 m)、京广中心大厦(高 208 m)、上海国贸中心大厦(高 139 m)、深圳发展中心大厦(高 165 m)、深圳地王商业大厦(高 325 m,如图 1-1)、上海金茂大厦(高 420.5 m)等。在空间大跨度钢结构方面有:1959 年建成人民大会堂(钢屋架跨度达 60m)、1961 年建成北京工人体育馆(94m 直径的悬索结构)、1967 年建成首都体育馆(平板网架屋盖结构,跨度达 99m)、上海万人体育馆(圆形平板网架屋盖结构,直径达 110m),1988 年建成的上海国际体操中心主体育馆(如图 1-2 直径 68 m,最宽处直径 77.3 m,为穹顶网壳结构)。1990 年前建成亚运村,许多

场馆采用网架与斜拉索混合结构,1999 年建成长春体育馆(大截面方钢管网壳屋盖结构,最大跨度达 192m)等。

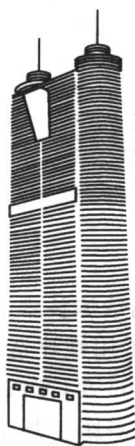


图 1-1 深圳地王大厦

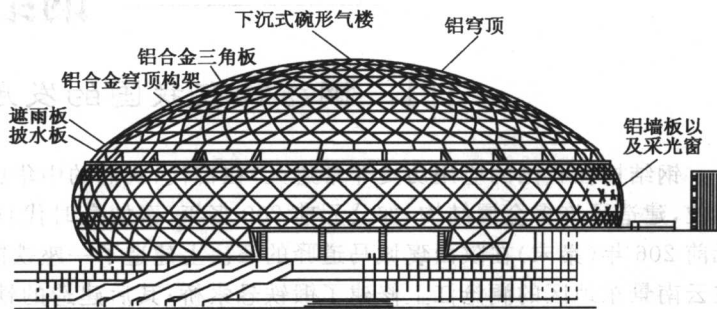


图 1-2 上海国际体操中心主体育馆

在塔桅结构方面有:广州电视塔(高 200 m,如图 1-3)、上海电视塔(高 210.55 m)、北京环境气象桅杆(高 325 m)等。在板壳结构方面有:1958 年上海建成的湿式储气柜(54 000 m³)及其他石油库等。在桥梁钢结构方面有:1957 年建成的武汉长江大桥(公、铁两用,主桥钢梁全长 1 156 m,A3 钢。)、1968 年建成的南京长江大桥(公、铁两用,主桥钢梁全长 1 576 m,16Mnq 钢)、1993 年建成的九江长江大桥(公、铁两用,主桥钢梁全长 1 806 m,15MnVnq 钢)、2000 年建成的芜湖长江大桥(公、铁两用,主桥钢梁全长 2 193 m,14MnNbq 钢,图 1-4)以及各种大跨度公路钢桥。

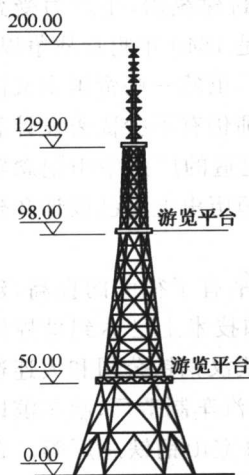


图 1-3 广州电视塔

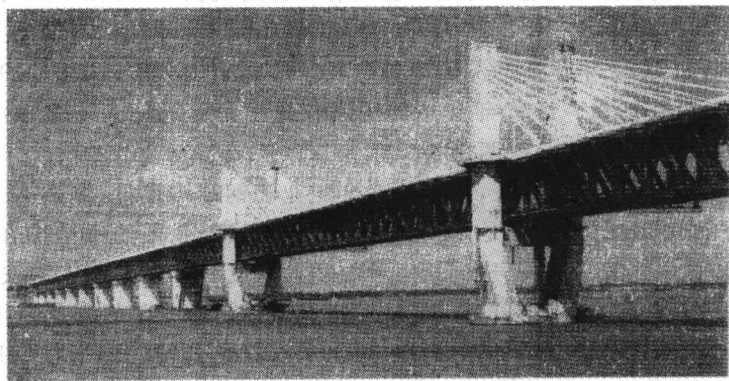


图 1-4 芜湖长江大桥

建国 50 多年,我国的钢结构在各个方面都取得了巨大成就,已建成的许多钢结构工程都标志着我国在这些方面具有高超的科学研究、设计和施工水平。展望将来钢结构的发展,首先取决于钢产量的增长,我国年钢产量在 1996 年已突破 1 亿 t,以后逐年增长,在 2003 年已达到 2.0 亿 t。在提高钢产量的同时,还应在以下几方面进一步发展:

(1) 进一步发展建筑钢材。目前,钢结构所用的钢材按强度级别有 Q235、Q345、Q390 和

Q420 四种,今后除继续发展更高强度级别的钢材外,还要发展高韧性、可焊性、耐腐蚀性等新型钢材,并积极发展 H 形钢、T 形钢、薄壁型钢、闭合型钢和管材,重点发展冷弯薄壁型钢和压型钢板。

(2)发展新型的建筑结构体系,如悬索结构、网架结构等大跨度空间结构,超高层建筑结构,钢与混凝土混合结构体系以及各种轻型钢结构技术。

(3)进一步改进钢结构设计方法,积极探索基于结构体系的可靠度设计方法,研究适用于结构疲劳可靠性的设计方法。

(4)结构设计逐步考虑优化理论,积极发展利用计算机进行辅助设计、施工放样、自动切割及钻孔技术。进一步发展厚板及薄板的焊接技术及高强度螺栓连接及检测技术,提高钢结构的安装技术水平。

1.2 钢结构的特点和合理应用范围

1.2.1 钢结构的特点

钢材是一种优良的建筑材料,因而,钢结构具有以下优点:

(1)强度高、重量轻。虽然钢材的容重较大,但由于强度高,强度与容重之比较大,因而钢结构在同等承载能力下反而比其他材料的同等结构重量轻,这给运输、安装带来很大方便,适用于建造承受大荷载的结构和大空间(跨度)的结构。

(2)稳妥可靠。由于钢材具有良好的塑性和韧性,塑性好,则结构不因偶然超载而发生破坏,韧性好,则可适应动载要求,适用于建造受动载的结构(如吊车梁、铁路桥梁等)以及地震地区的建筑。另外,由于钢材组织比较均匀,接近各向同性,符合力学的基本假定,计算结果精度高,因而钢结构较为稳妥可靠。

(3)钢材具有可焊性。随着焊接技术的发展,钢结构大都是焊接结构。焊接技术的应用使钢结构的连接大为简化,可满足制造各种复杂结构的需要。

(4)钢结构制作工业化程度高。钢结构构件最适用于工厂制造,不受季节影响,自动化程度高,制造质量较易控制。由于重量轻,因而施工方便,装配性好,工期短。

(5)密闭性好。适宜做贮气罐,贮油罐等。

(6)钢结构有利于环保、节约资源。由于钢材可回炉再生循环利用,采用钢结构可大大减少对不可再生资源的破坏。钢结构容易加固维修、拆卸或改建。

由于钢材易锈蚀,因而钢结构有维护费用高的缺点;另外,钢结构还有防火性能差、低温下易脆断、动载作用下噪声大及价格昂贵等缺点。

1.2.2 钢结构的合理应用范围

钢材是一种优良的建筑材料,随着我国钢产量的提高和钢材品种的增加,钢结构的应用范围越来越广。过去,由于钢材短缺而以“节约钢材”作为我国的经济技术政策,目前已经转变为“积极、合理、快速地发展钢结构”的政策。钢结构在我国的应用范围有如下几个方面:

(1)重型工业厂房。如冶金工业的炼钢、轧钢车间,重型机器制造厂的铸钢、锻压、水压机,总装配车间等,吊车起重量大且操作频繁,动载影响大,这类厂房的主要承重骨架及吊车梁大

多采用钢结构。

(2)大跨结构。如大型公共建筑物(体育馆、展览馆、影剧院、大会堂等)、大型工业厂房、飞机库等,为了减轻自重,提高经济效益,常采用钢结构。

(3)高层建筑。高层建筑采用钢结构,是由于钢材强度高,构件面积小,可以获得较大的建筑空间,同时抗震性能好。

(4)轻型钢结构。轻型钢结构由于其自重轻、造价低,生产制作工业化程度高,现场安装工作量小、速度快,且外形美观,内部空旷空间利用率高,因而极具竞争力。近年来已广泛应用于工业厂房、体育设施、仓库等,并向住宅发展。

(5)桥梁结构。由于钢自重轻、强度高,跨越能力大,因而经常用于大跨度、特大跨度的桥梁中。

(6)高耸结构。高耸结构如电视塔、微波塔、输电线塔、钻井塔、环境大气监测塔、广播发射桅杆等,由于其高度大,采用钢结构,自重轻、易安装,同时还因材料强度高,所需构件面积小,可以有效减小风荷载,能取得较好的经济效益。

(7)可拆卸或移动的结构。建筑业中的生产生活附属用房、临时展览馆等可拆卸结构,以及塔式起重机、龙门起重机、军用便梁、开启桥、水工闸门等可移动的结构常采用钢结构,便于拆卸和移动。

(8)其他特种结构。如油库、油罐、煤气库高炉、热风炉、漏斗、烟囱、水塔、各种管道以及海上采油平台、井架、栈桥等。

(9)钢与混凝土结合结构及其他构筑物。如房屋和桥梁建筑中广泛应用的钢与混凝土结合梁、钢管混凝土拱、钢管混凝土柱等。将钢与混凝土结合,充分利用各自材料的优势,可以取得较好的经济效益。

1.3 钢结构的类型及组成

钢结构按使用功能可分为如下几种:

(1)房屋钢结构。包括各种重型、轻型钢结构厂房,高层商用、住宅钢结构建筑,大跨度钢结构建筑等。

(2)桥梁钢结构。包括各种大跨度、特大跨度的铁路、公路以及公铁两用钢桥。

(3)水工钢结构。

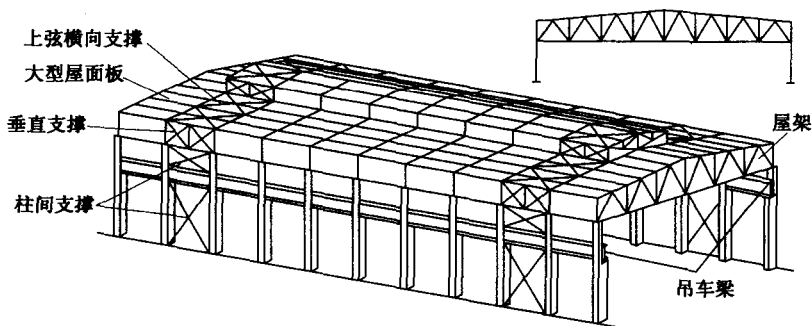
(4)平台钢结构。

(5)塔架钢结构。包括输电线塔、电视塔、钻井塔、卫星发射塔等高耸结构。

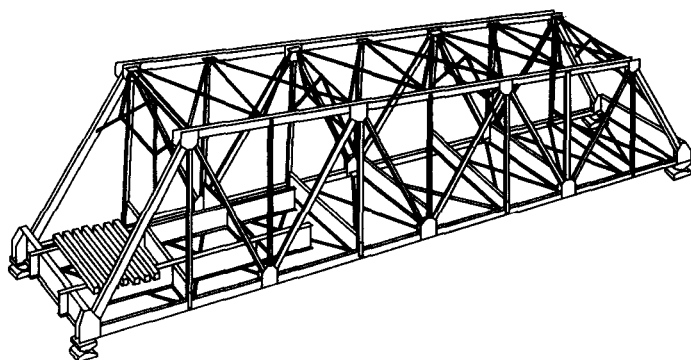
(6)其他特种钢结构。包括各种管道、油罐、高炉等。

钢结构的组成通常可划分为基本结构和附属结构(如图1-5),其中基本结构一般是平面承重结构,如屋盖桁架(屋架)、柱、主桁架等,附属结构包括纵向构件及各种支撑(上弦横向支撑、垂直支撑、柱间支撑)、联结点等。随着大跨度空间结构体系的发展,钢结构的基本结构逐渐发展为空间承重结构(如图1-6),附属结构越来越少,结构受力更趋合理,同时也节约钢材。

另外,钢结构也可看成是由基本构件(如拉杆、压杆、梁、柱、桁架、拉索等)通过焊接或螺栓连接而成的。

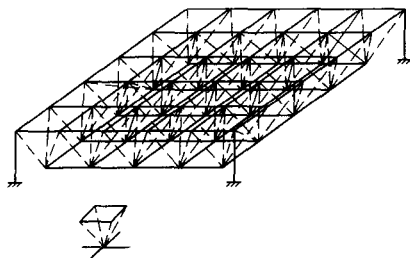


(a) 钢结构厂房

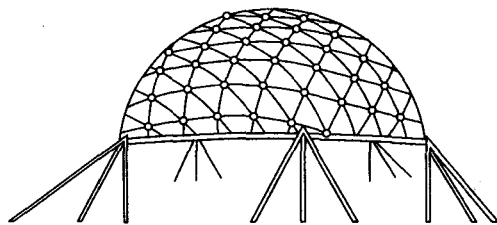


(b) 铁路钢桁梁桥

图 1-5 钢结构的组成



(a) 平面网架结构



(b) 空间网壳结构

图 1-6 空间承重钢结构

1.4 钢结构设计的基本要求和设计方法

1.4.1 钢结构设计的基本要求

钢结构设计的基本要求是安全可靠、经济合理、技术先进。钢结构及其构件首先应能安全地承受预期的各种有关荷载,因而必须具有足够的强度和稳定性,其中稳定性问题在薄壁或较长构件中尤为突出;还要满足使用要求,使用要求包括对变形和振幅的限制;同时还具有一定

的耐久性,注意防锈蚀、防火。钢结构应做成成本最低,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。另外,还应采用技术先进的概率设计法,即进行结构的可靠性设计。

为了实现上述设计要求,应注意:①选用最优结构方案,结构形式简洁,尽量采用空间结构体系;②充分掌握各种荷载的特性和量值,以及它们应有的组合;③选择合理的钢材及连接材料和连接形式;④构件尽可能标准化、模数化。当然,设计人员还应熟悉现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)及其他技术规程等方面的内容,并了解其来源和规范制订背景,以便针对各种实际工程情况灵活应用。

1.4.2 钢结构设计计算方法的发展

钢结构设计的基本要求是在充分满足使用功能的基础上做到安全可靠、经济合理、技术先进、确保质量。要达到此基本要求,则必须按一定的设计准则(或设计方法)进行设计。由于人们对事物认识上的发展,设计准则也是不断地向更加科学、更加先进和合理的方向发展。特别是由于材料力学、结构力学等学科的兴起和发展,对结构和构件的受力情况和材料性能有了深刻地了解,使得结构的设计和计算有了科学依据并日臻完善。我国在建国后 50 余年中,钢结构的设计计算方法先后使用了容许应力法和概率极限状态法。

1. 容许应力法(建国初期~1974 年)

考虑到设计变量的各种不利影响,引入一个笼统的安全系数 K ,将钢材可以使用的最大强度(如屈服点)除以这个安全系数 K ,得到结构设计时所需要的容许应力 $[\sigma] = \sigma_s / K$,这样,设计表达式为

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq [\sigma] \quad (1-1)$$

式中 N ——构件内力;

A ——构件几何特性。

这种方法的优点是表达式简单,概念明确,应用方便,因而应用时间较长。但随着可靠性理论的发展,人们逐渐认识到容许应力法存在一些缺点和不足,主要表现为:①容许应力法把各种参数都视为定值,没有分析参数的随机分布对结构可靠度的影响,因而使结构的安全程度具有不确定性;②安全系数的确定没有经过理论分析,只是根据经验确定,难免有较大的主观随意性,安全系数不能代表结构的可靠程度,所以,结构的可靠度不明确;③由于引入一个笼统的安全系数 K ,将使各构件的可靠度各不相同,而整个结构的可靠度取决于可靠度最小的构件。因而,容许应力法既不能保证所设计的结构绝对安全,又不能给出结构的可靠度,难以做到先进合理、安全可靠。

2. 半概率极限状态设计法(水准一)(1974 年~1988 年)

1974 年我国正式编制《钢结构设计规范》(TJ 17—74),规范在形式上采用的是容许应力法的表达式,但在确定安全系数(即安全度)方面与早期的容许应力法不同,它规定了结构的承载能力极限状态和正常使用极限状态,并以这两种极限状态为依据,结合我国 30 多年来的工程实际经验,对影响结构安全度的诸因素以数理统计的方法进行多系数分析,求出单一的设计安全系数,以简单的容许应力法形式表达。实质上是半概率半经验的极限状态设计法。

承载能力极限状态的设计表达式为

$$\sigma = \frac{\sum N_i}{A} \leq \frac{f_y}{K} = [\sigma] \quad (1-2)$$

式中 $K = K_1 K_2 K_3$ 。其中 K_1 为荷载系数,考虑实际荷载可能的变动而给结构物留有一定的安全储备; K_2 为材料系数(或均质系数),考虑钢材性质的变异性; K_3 为调整系数(或工作条件系数),考虑荷载的特殊变异,结构及构件的受力特点、施工条件、工作条件以及某些假定的计算图式与实际不完全一致等因素,其数值通常由实际经验确定; f_y 为材料的屈服强度。

对钢结构这种由单一材料组成的结构,采用以容许应力法形式表达的设计式,不但可以减少工作量,同时也因为疲劳强度的验算目前又只能用容许应力法进行,还可以使整个结构设计在设计方法上得到协调统一。容许应力法是结构设计的传统方法,保留其简单而明了的形式并赋予新的内容,多年来已被国内外的设计实践证明是一个简单易行的方法。目前,国内桥梁钢结构的设计、起重机等的设计仍采用容许应力法。

正常使用极限状态的设计表达式为

$$w \leq [w] \quad (1-3)$$

或

$$\lambda \leq [\lambda] \quad (1-4)$$

式中 w ——结构或构件在标准荷载作用下产生的最大挠度;

$[w]$ ——规范规定的容许挠度;

λ ——构件的长细比;

$[\lambda]$ ——规范规定的容许长细比。

该方法虽然简单,却存在不足:因为各种荷载的变异性不同,各种构件承受荷载的情况也不一定相同,不同构件的几何尺寸的变异性也不一定完全一致,采用统一的安全系数,显然不可能获得相同的安全度。

3. 近似概率极限状态设计法(水准二)(1988年至今)

该方法是把各种参数作为随机变量,运用概率分析的方法考虑其变异性来确定设计值。这种把概率分析引入结构设计中的方法显然比容许应力法先进合理,故近年来世界各国逐渐采用此法。1988年我国颁布的《钢结构设计规范》(GBJ 17—88)采用以概率论为基础的一次二阶矩极限状态设计法,虽然是一种概率设计法,但由于在分析中忽略或简化了基本变量随时间变化的关系,在确定基本变量的概率分布时有相当程度的近似性,且为了简化计算而将一些复杂关系进行了线性化,所以还只能是一种近似的概率设计法。我国现行的《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)又在 GBJ 17—88 的基础上作了很大的改进,但仍采用以近似概率法为基础的极限状态设计法(疲劳强度除外),按照目标可靠指标要求,用“校准法”给出了各随机变量的分项系数,提供了用分项系数表达的极限状态设计公式。完全的、真正的概率设计法(即水准三)还有待于继续发展。

1.4.3 钢结构的近似概率极限状态设计法

1. 结构的极限状态和极限状态方程

在结构设计中采用概率设计法时,从结构的整体性出发,运用概率论的观点对结构的可靠度提出了明确的科学定义,即:结构可靠度是结构在规定时间内,在规定的条件下完成预定功能的概率。

钢结构应以适当的可靠度满足 4 项基本功能的要求:

(1)能承受在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、基础不均匀沉降及地震等作用;

(2)在正常使用时具有良好的工作性能;

(3)在正常维护下具有足够的耐久性;

(4)在偶然事件发生时及发生后,仍能保持必需的整体稳定性。

其中(1)、(4)两项是对结构安全性的要求,第(2)项是对结构适用性的要求,第(3)项是对结构耐久性的要求。结构可靠性就是上述4项基本功能所满足结构安全、适用、耐久的总称。可靠度则是可靠性的一种度量。

若结构或结构的某一部分超过某一特定的状态就不能完成某项预定的功能,则此特定的状态就称为该功能的极限状态。

设结构或构件的抗力(承载力)为 R ,它取决于材料的强度、构件的临界力、构件的面积或惯性矩。可见它是这些基本随机变量的函数,故 R 也是随机变量。可表示为

$$R=R(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1-5)$$

R 的分布依赖于基本随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 的分布,但在实际设计时,根据这些基本随机变量的统计数值运用概率法确定它们的设计取值,从而确定 R 的设计值。

设施加于结构或构件上各种作用所引起的作用效应(即结构内力)为 S ,由于各种作用为随机变量,故 S 当然也是随机变量。根据各种作用的统计数值运用概率法确定设计取值,从而确定 S 的设计值。

有了抗力 R 和作用效应 S 后,则判断结构或构件的失效准则为:

$$\left. \begin{array}{l} R>S \text{ 时, 结构安全} \\ R<S \text{ 时, 结构失效} \end{array} \right\} \quad (1-6)$$

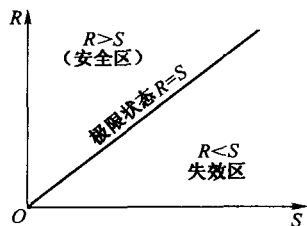


图 1-7 结构所处状态划分

图 1-7 表示了这种准则。

根据极限状态的定义,当结构或构件的抗力 R 等于各作用引起的作用效应 S 时,对应的临界状态即为结构或构件的极限状态。极限状态方程可写为

$$Z=g(R, S)=R-S=0 \quad (1-7)$$

2. 结构的可靠度和失效概率

因为 R 和 S 都是随机变量,所以 $R>S$ 只是随机事件,由式(1-6)可知,只有当随机事件 $\{R>S\}$ 发生时,结构才处于安全可靠状态。

根据可靠度的定义,结构的可靠度就是在规定时间内,在规定的条件下完成预定功能 $R>S$ 的概率,即可靠度 P_r 为

$$P_r = P\{R>S\} \quad (1-8)$$

$$\text{或} \quad P_r = P\{R-S>0\} \quad (1-8a)$$

$$\text{或} \quad P_r = P\{Z>0\} \quad (1-8b)$$

可见,可靠度就是随机事件 $\{R>S\}$ 发生的概率。反之,当随机事件 $\{R<S\}$ 发生时,结构则处于失效状态,因此,随机事件 $\{R<S\}$ 发生的概率即为结构的失效概率,以 P_f 表示,则有

$$P_f = P\{R<S\} \quad (1-9)$$

$$\text{或} \quad P_f = P\{R-S<0\} \quad (1-9a)$$

$$\text{或} \quad P_f = P\{Z<0\} \quad (1-9b)$$

由于事件 $\{R > S\}$ 和 $\{R < S\}$ 是对立的, 故有

$$P_t = 1 - P_r \quad (1-10)$$

3. 结构的可靠指标

如果已知随机变量 R 和 S 的概率密度函数 $f_R(R)$ 、 $f_S(S)$, 如图 1-8 所示, 则结构的可靠度为:

$$P_r = P\{R > S\} = \int_0^\infty f_S(S) \left[\int_S^\infty f_R(R) dR \right] dS \quad (1-11)$$

或

$$\begin{aligned} P_r &= P\{R > S\} = \int_0^\infty f_S(S) \left[1 - \int_0^S f_R(R) dR \right] dS \\ &= \int_0^\infty f_S(S) [1 - F_R(S)] dS = 1 - \int_0^\infty f_S(S) F_R(S) dS \end{aligned} \quad (1-12)$$

上述计算模型就是应力—强度干涉模型。

由于影响结构抗力 R 和作用效应 S 的因素极为复杂, 因此, 目前对结构抗力 R 和作用效应 S 的认识还很不够, 实际上难以得到 R 和 S 的概率密度函数 $f_R(R)$ 、 $f_S(S)$, 所以无法运用上述公式精确求解实际结构的可靠度。这一点正是由现在的近似概率设计法过渡到全概率设计法的主要研究课题之一。

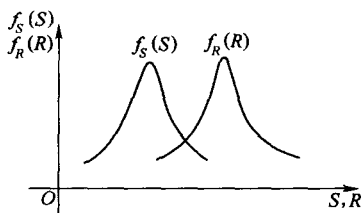


图 1-8 应力与强度的概率密度函数曲线

结构设计规范将结构抗力 R 和作用效应 S 视为正态分布的随机变量, 设其均值和标准差分别为 μ_R 、 μ_S 、 σ_R 、 σ_S , 这时 Z 也为正态分布的随机变量, 其均值和标准差分别为 μ_Z 、 σ_Z , 且有

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (1-13)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1-14)$$

当 R 和 S 的分布复杂时, 上式只是一个近似式。因此, 结构可靠度为

$$\begin{aligned} P_r &= P\{Z > 0\} = \int_0^\infty f_Z(Z) dZ = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-\mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2} dZ = \int_{-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}u^2} du \\ &= 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = 1 - \Phi(-\beta) \end{aligned} \quad (1-15)$$

这里, $\Phi(\cdot)$ 是标准正态函数。可见结构的可靠度取决于 β , 由图 1-9 可见, β 越大, 可靠度 P_r 越大, 且与可靠度之间存在一一对应的关系, 说明 β 可以作为衡量结构可靠度的一个数量指标。

在现行的结构设计中, 常常用 β 作为结构可靠度的统一尺度, 称为可靠指标。 β 的计算式为

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1-16)$$

将可靠度作为结构可靠性的定量尺度, 可以真正从数量上对结构可靠性进行对比, 这与以往的以经验为主确定安全系数的“定值法”相比是结构设计方法上的突破和飞跃。

采用可靠性方法进行结构设计时, 应注意以下

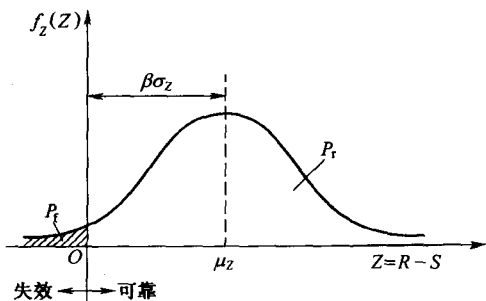


图 1-9 正态分布时 β 与 P_r 的关系

几点:

(1)当 R 和 S 不服从正态分布时,应首先将它们化为等效的当量正态分布再进行计算。

(2)由于 R 和 S 的实际分布相当复杂,计算中采用了典型的正态分布,因而所得的 β 值是近似的,故称为近似概率极限状态设计法,在推导 β 的计算公式时,只采用了 R 和 S 的二阶中心矩(即它们的方差),同时还做了线性化的近似处理,故又称为“一次二阶矩法”。

(3)用概率的观点看结构设计是否可靠,只能说结构可靠度是否足够大或其失效概率是否小到可以接受的预定程度,绝对可靠的结构(即 $P_f=1$ 或 $P_f=0$)是不存在的。

(4)解决了定量尺度以后,必须选择一个结构最优的可靠度(或失效概率或目标可靠指标)以达到结构可靠与经济上的最佳平衡。目标可靠指标的确定目前是一项待研究的课题,现在的规范是采用“校准法”(Calibration method)来确定结构的目标可靠指标。即通过对现存结构或以往设计规范隐含可靠度水平的反演分析,以确定结构设计时采用的目标可靠指标的方法。这种方法实际上是承认现行规范条件下结构可靠度在总体上是合理的,可以接受的,是一种比较稳妥可行的方法。目前,加拿大、美国和一些欧洲国家以及国内各工程结构可靠度设计标准、规范均采用这种方法确定目标可靠指标。

(5)结构的设计基准期。按照概率设计的观点,荷载和材料性能都是随时间而变动的随机函数。结构可靠度也应是时间的函数。因此需要明确结构的“设计基准期”,所谓结构的“设计基准期”只说明在这个时间内有关可靠性的分析结果有效,它与结构的寿命虽然有关但不相等,超过这一期限后,并不意味着结构完全不能使用,而是结构的失效概率将逐渐增大。

4. 钢结构的概率极限状态设计表达式及其规范说明

我国最新的《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)采用以近似概率法为基础的极限状态设计法,给出了用分项系数表达的极限状态设计公式。规范规定,各种承重结构均应按两种极限状态(即承载能力极限状态和正常使用极限状态)进行设计。

建筑结构设计时,应根据可能产生的后果(危及人的生命、造成经济损失、产生不利的社会影响等)采用不同的安全等级。在设计表达式中引入结构重要性系数 γ_0 ,见表 1-1。

表 1-1 结构重要性系数 γ_0

安全等级	产生的后果	建筑物类型	结构重要性系数 γ_0
一级	很严重	重要的工业与民用建筑	1.1
二级	严重	一般的工业与民用建筑	1.0
三级	不严重	次要的建筑物	0.9

特殊的建筑物,其安全等级可根据具体情况另行确定。

按抗震要求设计时,建筑结构的的安全等级应符合《抗震设计规范》(GBJ 11—89)的规定。

(1)按承载能力极限状态进行设计的表达式

对于承载能力极限状态,应考虑荷载效应的基本组合,必要时还应考虑荷载效应的偶然组合。

按荷载效应的基本组合进行强度和稳定性设计时,采用下列极限状态表达式:

$$\gamma_0 (\gamma_G C_G G_K + \gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1K} + \sum_{i=2}^n \Psi_{Ci} \gamma_{Qi} C_{Qi} Q_{iK}) \leqslant fA \quad (1-17)$$

$$f = f_y / \gamma_R$$

式中 f_y ——钢材的强度(屈服点)标准值;

γ_R ——钢材抗力分项系数;

γ_G ——永久荷载的分项系数,取 1.2;

C_G ——永久荷载的荷载效应系数,即单位荷载作用下构件的内力;

G_K ——永久荷载的标准值;

γ_{Q1} ——第 1 个可变荷载的分项系数,取 1.4;

C_{Q1} ——第 1 个可变荷载的荷载效应系数,即单位荷载作用下构件的内力;

Q_{1K} ——第 1 个可变荷载的标准值;

Ψ_{ci} ——第 i 个可变荷载的荷载效应组合系数;

γ_{Qi} 、 C_{Qi} 、 Q_{Ki} ——第 i 个可变荷载的分项系数、荷载效应系数、标准值;

A ——截面几何因素。

上述各系数应按荷载规范的规定采用。按荷载效应的偶然组合进行设计时,应按现行有关专门规范进行。

(2) 按正常使用极限状态进行设计的表达式

$$v = v_{GK} + \sum_{i=1}^n v_{QiK} \leq [v] \quad (1-18)$$

式中 v_{GK} ——永久荷载标准值引起结构或构件的变形值;

v_{QiK} ——第 i 个可变荷载标准值引起结构或构件的变形值;

$[v]$ ——结构的容许变形值。

只有一个可变荷载 Q_1 时,表达式可简化为

$$v = v_{GK} + v_{Q1K} \leq [v] \quad (1-19)$$

有时只需保证结构在可变荷载作用下的变形值能满足正常使用要求,这时公式中的 v_{GK} 不计入。

对于轴心或偏心受力构件,正常使用极限状态常用长细比 λ 来保证,以免构件过于纤细,易于弯曲和颤动,对构件工作不利。验算公式为

$$\lambda \leq [\lambda] \quad (1-20)$$

式中 λ ——长细比;

$[\lambda]$ ——容许长细比。

需要说明的是:计算结构的强度、稳定性及连接的强度时,应采用荷载的设计值(标准值乘以分项系数),计算疲劳和变形时,应采用荷载的标准值;对直接承受动力荷载的结构,尚应按下列情况考虑动力系数:

① 计算结构的强度及稳定性时,动力荷载应乘以动力系数,计算变形时不乘动力系数;

② 计算吊车梁或吊车桁架及其制动结构的疲劳时,按作用在跨间内起重量最大的一台吊车荷载的标准值进行计算,不乘动力系数。

本章小结

1. 钢结构的优点是:强度高,自重轻,工作可靠,工业化生产程度高,环保性能好,可重复利用。钢结构的缺点是:易锈蚀、耐火性能差、低温下易脆断。

2. 钢结构最适合于跨度大、高耸、重型、受动力荷载作用的结构,也适合建造轻型结构。随着钢产量的提高和钢结构技术的发展,钢结构的应用范围将不断扩大。