

普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审定

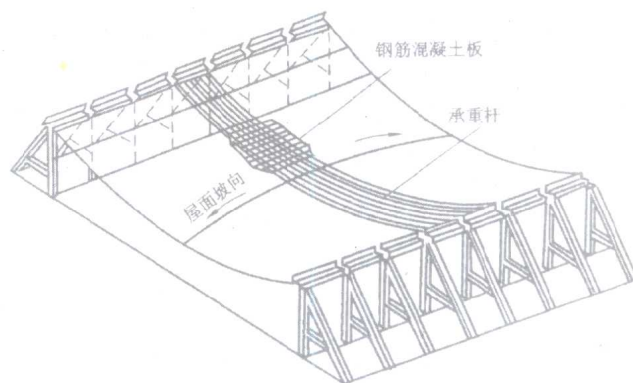
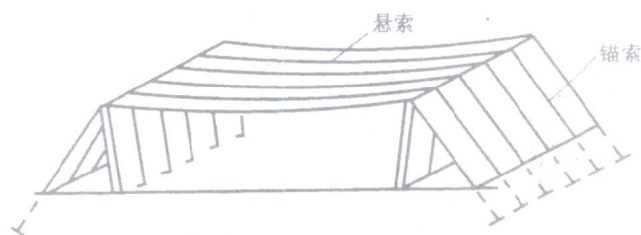
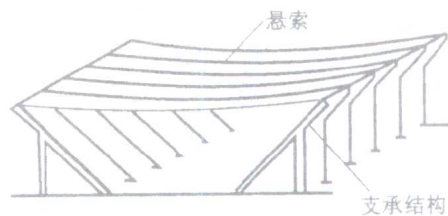
钢 结 构

G

J

G

魏明钟 主 编



WUTP

武汉工业大学出版社

普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审定

钢 结 构

主 编 魏明钟

武汉工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢结构/魏明钟主编. —武汉:武汉工业大学出版社,2001.6 重印
ISBN 7-5629-1549-0

I. 钢… II. 魏… III. 高等学校-教材-钢结构 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 11115 号

内容提要

本书是高等院校土木工程专业的教材,分为上、下篇。上篇“钢结构原理”,为土木工程专业的技术基础课,内容包括绪论(特点、概率极限状态设计方法等)、钢结构材料特性、钢结构的连接、钢构件的稳定理论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)的工作原理和设计方法;下篇“建筑钢结构设计”,为本专业建筑工程方向的专业必修课,也可作为其他专门化方向的选修课,内容包括单层厂房结构、大跨度房屋结构和多高层房屋结构。书末有附录,列出设计需用的各种数据和系数,供查用。各章还列举了必要的设计例题,以利有关基本理论和设计方法的学习和掌握。本书编写时间与新千年初进行的《建筑结构荷载规范》和《钢结构设计规范》等国家标准的修订工作同步,及时地反映了规范的修订内容。本书虽然针对土木工程专业本科编写,经过一定删节也可用作专科的教材,另外还可供有关工程技术人员参考、阅读。

出版者:武汉工业大学出版社(武汉市:武昌珞狮路 122 号)
印刷者:武汉工业大学出版社印刷厂印刷(邮政编码:430070)
发行者:各地新华书店
开 本:880×1230 1/16
印 张:22.5
字 数:745 千字
版 次:2000 年 8 月第 1 版
印 次:2001 年 6 月第 2 次印刷
书 号:7-5629-1549-0/TU·135
印 数:10001—15000 册
定 价:31.50 元
(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

普通高等学校土木工程专业新编系列教材

编 审 委 员 会

顾 问:成文山 滕智明 罗福午 魏明钟 李少甫

甘绍熺 施楚贤 白绍良 彭少民 范令惠

主 任:江见鲸 吕西林 高鸣涵

副主任:朱宏亮 辛克贵 袁海庆 吴培明 李世蓉

苏三庆 刘立新 赵明华 孙成林

委 员:(按姓氏笔画顺序排列)

于书翰 丰定国 毛鹤琴 甘绍熺 白绍良

白晓红 包世华 田道全 成文山 江见鲸

吕西林 刘立新 刘长滨 刘永坚 刘伟庆

朱宏亮 朱彦鹏 孙家齐 孙成林 过静君

李少甫 李世蓉 李必瑜 吴培明 吴炎海

辛克贵 苏三庆 何铭新 汤康民 陈志源

罗福午 周 云 赵明华 赵均海 尚守平

施楚贤 柳炳康 姚甫昌 胡敏良 俞 晓

桂国庆 顾敏煜 徐茂波 袁海庆 高鸣涵

蒋沧如 谢用九 彭少民 覃仁辉 蔡德明

燕柳斌 魏明钟

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘 书 长:蔡德明

出版说明

1998年7月,教育部颁布了新的普通高等学校本科专业目录,1999年全国高等学校都已按新的专业目录招生。新的土木工程专业专业面大大拓宽,相应的专业业务培养目标、业务培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。原有的教材已经不能适应新专业的培养目标和教学要求,组织一套新的土木工程专业系列教材成为众多院校的翘首之盼。武汉工业大学出版社在中国土木工程学会教育工作委员会的指导和支持下,经过大量的调研,组织国内29所大学的土木工程学科的教授共同编写了这套系列教材。

本套教材的主、参编人员及编委会顾问遵照1998年1月建设部全国土木建筑工程专业教学指导委员会昆明会议和1998年5月上海的全国土木工程专业系主任会议的精神,经过充分研讨,决定首批编写出版29种主干课程的教材,以尽快满足全国众多院校的教学需要,以后再根据专业方向的需要逐步增补。中国土木工程学会教育工作委员会组织专家审查了本套教材的编写大纲,决定将其作为“中国土木工程学会教育工作委员会审定教材”出版。作为一套全新的系列教材,本套教材的“新”体现在以下几点:

体系新——本套教材从“大土木”的专业要求出发,从整体上考虑专业的课程设置和各门课程的内容安排,按照教学改革方向要求的学时统一协调与整合,组成一套完整的、各门课程有机联系的系列。整套教材的编写除正文外,大多增加了本章提要、本章重点、例题详解、思考题、习题等,以使教材既适合教学需要,又便于学生自学。

内容新——本套教材中各门课程教材的主、参编人员特别注意了教材内容的更新和吸收各校教学改革的阶段性成果,以适应21世纪土木工程人才的培育要求。

规范新——本套教材中凡涉及土木工程规范的全部采用国家颁布的最新规范。

本套教材是新专业目录颁布实施后的第一套土木工程专业系列教材,是面向新世纪、适应新专业的一套全新的教材。能为新世纪土木工程专业的教材建设贡献微薄之力,自是我们应尽的责任和义务,我们感到十分欣慰。然而,正因其为第一套教材,尽管我们的编审者、编辑出版者夙兴夜寐、尽心竭力,不敢稍有懈怠,它仍然还会存在缺点和不足。嚶其鸣矣,求其友声,我们诚恳地希望选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提意见和建议,以便我们不断修改、完善全套教材,共同为教育事业的发展作出贡献。

武汉工业大学出版社

2000.2

前 言

土木工程专业有建筑工程、岩土工程、桥梁工程、道路工程、水工结构等专门化方向。根据教学计划“钢结构原理”为本专业各专门化方向的技术基础课;“建筑钢结构设计”为建筑工程方向的专业必修课。本书将上述两门课合并为上、下篇,主要供建筑工程方向使用,对其他专门化方向,使用时应另加专业课的内容(如桥梁工程方向另加“钢桥”内容)。

本书上篇计七章,介绍了钢结构特点、应用和计算方法、钢材和连接材料特性、钢构件的稳定理论、钢结构的连接方法及其计算构造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)的工作性能和设计方法。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。

下篇计三章,在单层厂房结构一章中,介绍了普通钢结构单层厂房的承重框架、屋盖结构、吊车梁系统以及墙架体系等的设计方法,也介绍了我国近年来发展迅速的轻型门式刚架的设计特点,其中“屋盖结构”一节中编有简支屋架的设计例题,便于建筑工程方向学生完成课程设计,章末建议的课程设计题,可供4个小班使用,使每个学生的屋架形式、跨度或荷载有不同之处,便于他们独立完成设计任务。当然,各校可根据各自具体情况,采用其他结构诸如门式刚架、平台结构等作为课程设计题。在大跨度房屋结构一章中,介绍了梁式、框架式和拱式等平面大跨度结构的设计特点,并介绍了我国近年来使用较多的空间网架结构。在多、高层房屋结构一章中,介绍了多、高层结构的体系、形式以及组合楼盖、抗剪结构和梁、柱等构件的设计特点,其中,钢梁和混凝土楼板共同工作的组合结构,不仅用于高层建筑,也常用于其他建筑的屋盖、楼盖或平台结构。

本书在上篇中取消了以前教材都有的桁架一章,将这部分的主要内容放在下篇单层厂房结构的屋盖结构一节中,以便配合建筑工程方向的屋架课程设计。

本书编写时间与新千年初完成的《建筑结构可靠度设计统一标准》、《建筑结构荷载规范》和《钢结构设计规范》的修订工作同步,而且本书的主、参编人员也正是这些标准、规范修订组的成员,能及时将修订内容反映于教材中。

由于科技发展,钢构件趋薄壁轻型化,受力后的稳定问题相当突出,所以本书将“钢构件稳定”独立为一章,介绍了构件的弯曲失稳、扭转屈曲、弯扭屈曲以及薄板的屈曲,以便学生系统地掌握这方面的内容。当然,教师授课时,可根据学生对先修课程的掌握情况予以取舍。

我国现已成为世界第一产钢大国,钢结构的应用必然有较大发展趋势,因此,本书适当扩展了某些内容。当然,由于时间仓促,也有取舍不当或叙述不到之处,使用本书时,可根据具体情况对内容进行增删。

参加本书编写的有夏正中(第1、2章)、徐伟良(第3章)、魏明钟(第4、6章)、崔佳(第5、7、10章)、龙莉萍(第8章大部分)、戴国欣(第8章8.5节、第9章)、周淑容(附录),全书由魏明钟主编。

本书的完成得到了本校土木工程学院有关领导的鼓励和支持,以及武汉工业大学出版社领导和有关人员的指导,另外,教研室同仁熊刚、聂诗东以及研究生韦松、程睿、林强等协助原稿的电脑打印、制图、校对等,在此都衷心予以感谢。

编 者
2000年8月

目 录

上篇 钢结构原理

1 绪论	(1)
1.1 钢结构的特点	(1)
1.2 钢结构的设计方法	(2)
1.2.1 概述	(2)
1.2.2 概率极限状态设计方法	(3)
1.2.3 设计表达式	(5)
1.3 钢结构的应用和发展	(7)
1.3.1 钢结构的应用	(7)
1.3.2 钢结构的发展	(8)
2 钢结构的材料	(9)
2.1 钢结构对材料的要求	(9)
2.2 钢材的破坏形式	(9)
2.3 钢材的主要性能	(9)
2.3.1 受拉、受压及受剪时的性能	(9)
2.3.2 冷弯性能	(11)
2.3.3 冲击韧性	(11)
2.4 各种因素对钢材主要性能的影响	(11)
2.4.1 化学成分	(11)
2.4.2 冶金缺陷	(12)
2.4.3 钢材硬化	(12)
2.4.4 温度影响	(12)
2.4.5 应力集中	(13)
2.4.6 反复荷载作用	(14)
2.5 复杂应力作用下钢材的屈服条件	(15)
2.6 钢材的疲劳	(15)
2.6.1 常幅疲劳	(15)
2.6.2 变幅疲劳和吊车梁的欠载效应系数	(18)
2.7 钢的种类和钢材规格	(19)
2.7.1 钢的种类	(19)
2.7.2 钢材的选择	(20)
2.7.3 钢材的规格	(21)
3 钢结构的连接	(22)
3.1 钢结构的连接方法	(22)
3.1.1 焊缝连接	(22)
3.1.2 铆钉连接	(22)
3.1.3 螺栓连接	(22)
3.2 焊接方法和焊缝连接形式	(23)
3.2.1 钢结构常用焊接方法	(23)
3.2.2 焊缝连接形式及焊缝形式	(24)

3.2.3	焊缝缺陷及焊缝质量检验	(25)
3.2.4	焊缝代号、螺栓及其孔眼图例	(26)
3.3	角焊缝的构造与计算	(27)
3.3.1	角焊缝的形式和强度	(27)
3.3.2	角焊缝的构造要求	(28)
3.3.3	直角角焊缝强度计算的基本公式	(29)
3.3.4	各种受力状态下直角角焊缝连接的计算	(31)
3.3.5	斜角角焊缝的计算	(40)
3.4	对接焊缝的构造与计算	(41)
3.4.1	对接焊缝的构造	(41)
3.4.2	对接焊缝的计算	(42)
3.5	焊接应力和焊接变形	(45)
3.5.1	焊接应力的分类和产生的原因	(45)
3.5.2	焊接应力对结构性能的影响	(46)
3.5.3	焊接变形	(47)
3.5.4	减少焊接应力和焊接变形的措施	(47)
3.6	螺栓连接的构造	(48)
3.6.1	螺栓的排列	(48)
3.6.2	螺栓连接的构造要求	(50)
3.7	普通螺栓连接的工作性能和计算	(50)
3.7.1	普通螺栓的抗剪连接	(50)
3.7.2	普通螺栓的抗拉连接	(54)
3.7.3	普通螺栓受剪力和拉力的联合作用	(58)
3.8	高强度螺栓连接的工作性能和计算	(60)
3.8.1	高强度螺栓连接的工作性能	(60)
3.8.2	高强度螺栓群的抗剪计算	(64)
3.8.3	高强度螺栓群的抗拉计算	(65)
3.9	混合连接	(68)
4	钢构件的稳定	(71)
4.1	受压构件的弯曲失稳	(71)
4.1.1	理想轴心受压构件的弯曲屈曲	(71)
4.1.2	初始缺陷对压杆稳定的影响	(75)
4.1.3	实际轴心压杆的极限承载力和多柱子曲线	(81)
4.1.4	压弯构件弯矩作用平面内的稳定	(83)
4.1.5	杆端约束对压杆稳定的影响——计算长度	(86)
4.2	构件的扭转应力	(87)
4.2.1	概述	(87)
4.2.2	等截面构件的自由扭转	(89)
4.2.3	构件的约束扭转	(90)
4.3	构件的弯扭屈曲	(95)
4.3.1	受弯构件(梁)的侧向弯扭屈曲	(95)
4.3.2	轴心压杆的扭转屈曲和弯扭屈曲	(97)
4.3.3	双轴对称截面偏心压杆的弯扭屈曲	(102)
4.4	矩形薄板的屈曲	(103)
4.4.1	薄板屈曲的平衡方程	(103)

4.4.2	荷载作用于中面的薄板临界荷载	(104)
4.4.3	各种边缘荷载共同作用下的薄板临界状态	(107)
4.4.4	薄板的屈曲后强度	(109)
5	轴心受力构件	(116)
5.1	概述	(116)
5.2	轴心受力构件的强度和刚度	(117)
5.2.1	强度计算	(117)
5.2.2	刚度计算	(119)
5.2.3	轴心拉杆的设计	(120)
5.3	轴心受压构件的稳定	(120)
5.3.1	整体稳定的计算	(120)
5.3.2	局部稳定	(125)
5.4	轴心受压柱的设计	(127)
5.4.1	实腹柱设计	(127)
5.4.2	格构柱设计	(131)
5.4.3	柱的横隔	(137)
5.5	柱头和柱脚	(139)
5.5.1	梁与柱的连接	(139)
5.5.2	柱脚	(139)
6	受弯构件	(145)
6.1	受弯构件的形式和应用	(145)
6.1.1	实腹式受弯构件——梁	(145)
6.1.2	格构式受弯构件——桁架	(146)
6.2	梁的强度和刚度	(147)
6.2.1	梁的强度	(147)
6.2.2	梁的刚度	(151)
6.3	梁的整体稳定和支撑	(151)
6.3.1	梁整体稳定的概念	(151)
6.3.2	梁整体稳定的保证	(152)
6.3.3	梁整体稳定的计算方法	(153)
6.4	梁的局部稳定和腹板加劲肋设计	(155)
6.4.1	受压翼缘的局部稳定	(156)
6.4.2	腹板的局部稳定	(157)
6.4.3	腹板加劲肋的配置	(160)
6.4.4	$\sigma_c=0$ 的梁和简支吊车梁腹板加劲肋间距的计算	(160)
6.4.5	加劲肋的构造和截面尺寸	(163)
6.4.6	支承加劲肋的计算	(163)
6.5	考虑腹板屈曲后强度的梁设计特点	(164)
6.5.1	腹板屈曲后的抗剪承载力 V_u	(164)
6.5.2	腹板屈曲后的抗弯承载力 M_{cu}	(165)
6.5.3	考虑腹板屈曲后强度的梁的计算式	(165)
6.5.4	考虑腹板屈曲后强度的梁的加劲肋设计特点	(165)
6.6	型钢梁的设计	(166)
6.6.1	单向弯曲型钢梁	(166)
6.6.2	双向弯曲型钢梁	(166)

6.7 组合梁的设计	(170)
6.7.1 试选截面	(170)
6.7.2 截面验算	(171)
6.7.3 组合梁截面沿长度的改变	(171)
6.7.4 焊接组合梁翼缘焊缝的计算	(172)
6.8 梁的拼接、连接和支座	(173)
6.8.1 梁的拼接	(173)
6.8.2 次梁与主梁的连接	(174)
6.8.3 梁的支座	(175)
6.9 其他类型的梁	(179)
6.9.1 蜂窝梁	(179)
6.9.2 异种钢组合梁	(179)
6.9.3 预应力钢梁	(180)
6.9.4 钢与混凝土组合梁	(180)
7 拉弯和压弯构件	(183)
7.1 概述	(183)
7.2 拉弯和压弯构件的强度	(184)
7.3 压弯构件的稳定	(185)
7.3.1 弯矩作用平面内的稳定	(185)
7.3.2 弯矩作用平面外的稳定	(187)
7.3.3 双向弯曲实腹式压弯构件的整体稳定	(188)
7.3.4 压弯构件的局部稳定	(189)
7.4 压弯构件(框架柱)的设计	(190)
7.4.1 框架柱的计算长度	(190)
7.4.2 实腹式压弯构件的设计	(193)
7.4.3 格构式压弯构件的设计	(197)
7.5 框架中梁与柱的连接	(201)
7.6 框架柱的柱脚	(201)
7.6.1 整体式刚接柱脚	(203)
7.6.2 分离式柱脚	(205)
7.6.3 插入式柱脚	(205)

下篇 建筑钢结构设计

8 单层厂房结构	(207)
8.1 厂房结构的形式和布置	(207)
8.1.1 厂房结构的组成	(207)
8.1.2 厂房结构的设计步骤	(208)
8.1.3 柱网和温度伸缩缝的布置	(208)
8.2 厂房结构的框架形式	(209)
8.2.1 横向框架主要尺寸和计算简图	(209)
8.2.2 横向框架的荷载和内力	(211)
8.2.3 框架柱的类型	(212)
8.2.4 纵向框架的柱间支撑	(212)
8.3 屋盖结构	(214)
8.3.1 屋盖结构的形式	(214)
8.3.2 屋盖支撑	(218)

8.3.3	简支屋架设计	(222)
8.3.4	刚接屋架(框架横梁)设计特点	(248)
8.4	框架柱设计特点	(249)
8.4.1	柱的计算长度	(249)
8.4.2	柱的截面验算	(251)
8.4.3	肩梁的构造和计算	(251)
8.4.4	托架与柱的连接	(253)
8.5	轻型门式刚架结构	(253)
8.5.1	结构形式和布置	(254)
8.5.2	作用效应计算	(255)
8.5.3	构件设计特点	(257)
8.5.4	连接和节点设计特点	(260)
8.6	吊车梁设计特点	(262)
8.6.1	吊车梁系统结构的组成	(262)
8.6.2	吊车梁的荷载	(263)
8.6.3	吊车梁的内力计算	(264)
8.6.4	吊车梁的截面验算	(264)
8.6.5	吊车梁与柱的连接	(267)
8.6.6	吊车梁设计例题	(267)
8.7	墙架体系	(273)
8.7.1	墙体类型	(273)
8.7.2	墙架结构的布置	(274)
9	大跨度房屋结构	(277)
9.1	平面承重的大跨屋盖结构	(279)
9.1.1	梁式大跨结构	(279)
9.1.2	框架结构	(280)
9.1.3	拱式结构	(282)
9.2	空间网架屋盖结构	(285)
9.2.1	空间结构的特性	(285)
9.2.2	平板式空间网架的形式	(285)
9.2.3	网架结构的设计特点	(290)
9.3	悬挂式屋盖简介	(294)
10	多、高层房屋结构	(297)
10.1	概述	(297)
10.1.1	多、高层钢结构的特点	(297)
10.1.2	高层建筑钢结构的结构体系	(298)
10.2	高层钢结构的计算特点	(300)
10.2.1	结构荷载	(300)
10.2.2	结构设计	(304)
10.3	压型钢板组合楼(屋)盖结构	(306)
10.3.1	组合楼板的设计要求	(306)
10.3.2	组合梁的设计要求	(308)
10.4	构件及连接的设计特点	(313)
10.4.1	梁的设计	(313)
10.4.2	柱的设计	(314)

10.4.3 抗侧力结构的设计.....	(314)
10.4.4 连接节点的设计.....	(318)
附录 1 钢材和连接的强度设计值	(322)
附录 2 受弯构件的容许挠度	(324)
附录 3 梁的整体稳定系数	(325)
附录 4 轴心受压构件的稳定系数	(328)
附录 5 柱的计算长度系数	(330)
附录 6 疲劳计算的构件和连接分类	(332)
附录 7 型钢表	(334)
附录 8 螺栓和锚栓规格	(346)
参考文献.....	(347)

1 绪 论

1.1 钢结构的特点

钢结构和其他材料的结构相比有如下特点:

(1) 建筑钢材强度高, 塑性韧性好

强度高, 适用于建造跨度大、高度高、承载重的结构。但由于强度高, 一般构件截面小而壁薄, 在受压时容易为稳定计算和刚度计算所控制, 强度难以得到充分的利用。

塑性好, 结构在一般条件下不会因超载而突然断裂, 只增大变形, 故易于被发现。此外, 尚能将局部高峰应力重分配, 使应力变化趋于平缓。

韧性好, 适宜在动力荷载下工作, 因此在地震区采用钢结构较为有利。

(2) 钢结构的重量轻

钢材容重大, 强度高, 做成的结构却比较轻。结构的轻质性可以用材料的质量密度 ρ 和强度 f 的比值 α 来衡量, α 值越小, 结构相对越轻。建筑钢材的 α 值等于 $1.7 \sim 3.7 \times 10^{-4}/\text{m}$; 木材为 $5.4 \times 10^{-4}/\text{m}$; 钢筋混凝土约为 $18 \times 10^{-4}/\text{m}$ 。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。

(3) 材质均匀和力学计算的假定比较符合

钢材由于冶炼和轧制过程的科学控制, 其组织比较均匀, 接近各向同性, 为理想的弹性-塑性体, 其弹性模量和韧性模量皆较大, 因此, 钢结构实际受力情况和工程力学计算结果比较符合, 在计算中采用的经验公式不多, 从而计算上的不定性较小, 计算结果比较可靠。

(4) 钢结构制作简便, 施工工期短

钢结构构件一般是在金属结构厂制作, 施工机械化, 准确度和精密度皆较高。钢结构所有材料皆已轧制成各种型材, 加工简易而迅速。钢构件较轻, 连接简单, 安装方便, 施工周期短。小量钢结构和轻型钢结构尚可在现场制作, 简易吊装。钢结构由于连接的特性, 易于加固、改建和拆迁。

(5) 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, 适宜于做要求密闭的板壳结构, 如高压容器、油库、气柜、管道等。

(6) 钢结构耐腐蚀性差

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, 处于较强腐蚀性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。在设计中应避免使结构受潮、漏雨, 构造上应尽量避免存在难于检查、维修的死角。

(7) 钢材耐热但不耐火

钢材受热, 当温度在 200°C 以内时, 其主要性能(屈服点和弹性模量)下降不多。温度超过 200°C 后, 材质变化较大, 不仅强度总趋势逐步降低, 还有兰脆和徐变现象。达 600°C 时, 钢材进入塑性状态已不能承载。因此, 设计规定钢材表面温度超过 150°C 后即需加以隔热防护, 对有防火要求者, 更需按相应规定采取隔热保护措施。

(8) 钢结构在低温和其他条件下, 可能发生脆性断裂

这点应引起设计者的特别注意。

1.2 钢结构的设计方法

1.2.1 概述

结构计算的目的在于保证所设计的结构和结构构件在施工和工作过程中能满足预期的安全性和使用性要求。因此,结构设计准则应当这样来陈述:结构由各种荷载所产生的效应(内力和变形)不大于结构(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。假如影响结构功能的各种因素,如荷载大小、材料强度的高低、截面尺寸、计算模式、施工质量等等都是确定性的,则按上述准则进行结构计算,应该说是非常容易的。但是,不幸的是上述影响结构功能的诸因素都具有不定性,是随机变量(或随机过程),因此,荷载效应可能大于设计抗力,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。在设计中如何对待上述问题就出现了不同的设计方法。

如果将影响结构设计的诸因素取为定值,而用一个凭经验判定的安全系数来考虑设计诸因素变异的影响,衡量结构的安全度。这种方法称为定值法,它包括容许应力法和最大荷载法。钢结构采用容许应力法,其设计式为

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1.1)$$

式中 σ ——由标准荷载(荷载规范所规定的荷载值)与构件截面公称尺寸(设计尺寸)所计算的应力;

$[\sigma]$ ——容许应力, $[\sigma] = f_k / K$;

f_k ——材料的标准强度,对钢材为屈服点;

K ——大于1的安全系数,用以考虑各种不定性,凭工程经验取值。

容许应力法计算简单,但不能从定量上度量结构的可靠度,更不能使各类结构的安全度达到同一水准。一些设计人员往往从定值概念出发,将结构的安全度与安全系数等同起来。常常误认为采用了某一给定的安全系数,结构就能百分之百的可靠;或认为安全系数大结构安全度就高,没有与抗力及作用力的变异性联系起来。例如砖石结构的安全系数最大,但不能说明砖石结构比其他结构更安全。所以定值法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。

随着工程技术的发展,建筑结构设计方法也开始由长期采用的定值法转向概率设计法。在概率设计法的研究进程中,首先考虑荷载和材料强度的不定性,用概率方法确定它们的取值。根据经验确定分项安全系数,仍然没有将结构可靠度与概率联系起来,故称为半概率法。钢结构1957年前采用苏联的钢结构设计规范(ННТУ121—55)和我国1974年修订的钢结构设计规范(TJ17—74)采用的设计方法都是半概率法。

材料强度和荷载的概率取值用下列公式计算

$$f_k = \mu_f - \alpha_f \sigma_f \quad (1.2)$$

$$Q_k = \mu_Q + \alpha_Q \sigma_Q \quad (1.3)$$

式中 f_k, Q_k ——材料强度和荷载的标准值;

μ_f, μ_Q ——材料强度和荷载的平均值;

σ_f, σ_Q ——材料强度和荷载的标准差;

α_f, α_Q ——材料强度和荷载取值的保证系数,当保证率为95%时, $\alpha = 1.645$;当保证率为97.7%时, $\alpha = 2$;当保证率为99.9%时, $\alpha = 3$ 。

半概率法的设计表达式仍可采用容许应力法的设计式,我国(TJ17—74)钢结构设计规范的设计式就是这样决定的;但安全系数是多系数分析决定的,如下式所示:

$$\sigma \leq \frac{f_{yk}}{K_1 K_2 K_3} = \frac{f_{yk}}{K} = [\sigma] \quad (1.4)$$

式中 f_{yk} ——钢材屈服点的标准值;

K_1 ——荷载系数;

K_2 ——材料系数;

K_3 ——调整系数。

概率设计法的研究,在 60 年代末期有了重大突破,这将使概率设计法应用于规范成为可能。这个重大突破就是提出了一次二阶矩法,该法既有确定的极限状态,又可给出不超过该极限状态的概率(可靠度),因而是一种较为完善的概率极限状态设计方法,把结构可靠度的研究由以经验为基础的定性分析阶段推进到以概率论和数理统计为基础的定量分析阶段。

一次二阶矩法虽然已经是一种概率设计法,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,确定基本变量的分布时有一定的近似性,且为了简化计算而将一些复杂关系进行了线性化,所以还只能算是一种近似的概率设计法。完全的、真正的全概率法,有待今后继续深入和完善,还将经历一个较长的发展过程。

1.2.2 概率极限状态设计方法

按极限状态进行结构设计时,首先应明确极限状态的概念。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下列两类:

(1)承载能力极限状态 对应于结构或结构构件达到最大承载能力或是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 对应于结构或结构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性的随机变量有 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

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.5)$$

即称为结构的功能函数。

为了简化起见,只以结构构件的荷载效应 S 和抗力 R 这两个基本随机变量来表达结构的功能函数,则

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1.6)$$

上式中 R 和 S 是随机变量,其函数 Z 也是一个随机变量。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。

定值设计法认为 R 和 S 都是确定性的,结构只要按 $Z \geq 0$ 设计,并赋予一定的安全系数,结构就是绝对安全的。事实并不是这样,结构失效的事例仍时有发生。这是由于基本变量的不定性,说明作用在结构的荷载潜在着出现高值的可能,材料性能也潜在着出现低值的可能;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

$$p_s = P(Z \geq 0) \quad (1.7)$$

结构的失效概率以 p_f 表示,则

$$p_f = P(Z < 0) \quad (1.8)$$

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

$$p_s + p_f = 1 \quad (1.9)$$

或

$$p_s = 1 - p_f \quad (1.10)$$

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。绝对可靠的结构, $p_s = 1$ 即失效概率 $p_f = 0$ 的结构是没有的。

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 1.1 示出 Z 的概率密度 $f_Z(Z)$ 曲线,图

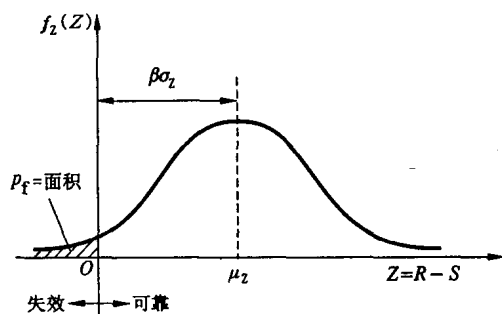


图 1.1 Z 的概率密度 $f_z(Z)$ 曲线

中纵坐标处 $Z=0$, 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, 可用积分求得

$$p_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_z(Z) dZ \quad (1.11)$$

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。60 年代末期, 美国学者康奈尔 (Cornell, C. A) 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 , 而是将图 1.1 中 Z 的平均值 μ_z 用 Z 的标准差 σ_z 来度量, 得值 β , 则有

$$\mu_z = \beta \sigma_z \quad (1.12)$$

由此得

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (1.13)$$

式中 β 称为可靠指标或安全指标, 显然, 只要分布一定, β 与 p_f 就有一一对应的关系, 而且, β 增大, p_f 减小; β 减小, p_f 增大。

如 Z 的分布为正态, 则 β 与 p_f 的关系式为

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - p_f) \quad (1.14)$$

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (1.15)$$

式中 $\Phi(\cdot)$ —— 标准正态分布函数;

$\Phi^{-1}(\cdot)$ —— 标准正态分布的反函数。

如为非正态分布, 可用当量正态化方法转化为正态。正态分布时, β 与 p_f 的对应关系如表 1.1 所示。

正态分布时 β 与 p_f 的对应值

表 1.1

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

β 的计算避开了 Z 的全分布的推求, 而只采用分布的特征值, 即一阶原点矩 (均值) μ_z 和二阶中心矩 (方差) σ_z^2 , 而这两者对于任何分布皆可按下式求得:

$$\mu_z = \mu_R - \mu_S \quad (1.16)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \quad (\text{设 } R \text{ 和 } S \text{ 是统计独立的}) \quad (1.17)$$

式中 μ_R, μ_S —— 抗力 R 和荷载效应 S 的平均值;

σ_R^2, σ_S^2 —— 抗力 R 和荷载效应 S 的方差。

只要经过测试取得足够的数据, 便可由统计分析求得 R 和 S 的均值 μ 和方差 σ^2 , 如果 Z 为非线性函数, 可将此函数展为泰勒级数而取其线性项, 由下式计算均值和方差:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.18)$$

$$\mu_z \approx g(\mu_{x1}, \mu_{x2}, \dots, \mu_{xn}) \quad (1.19)$$

$$\sigma_z^2 \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2 \mu_{xi}^2 \quad (1.20)$$

式中, μ_{xi} 为随机变量 x_i 的均值, $(\cdot |_{\mu})$ 表示计算偏导数时变量均用各自的平均值赋值。由此得

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{K_0 - 1}{\sqrt{K_0^2 \delta_R^2 + \delta_S^2}} \quad (1.21)$$

式中, $K_0 = \mu_R / \mu_S$ 为中心安全系数, 它对 β 值有影响, 但对 β 值起影响的还有变异系数 δ_R 和 δ_S 。当 K_0 随 μ_R 和 μ_S 的比值而一定时, δ 变动将使 β 增减, 故安全系数不能度量结构的安全度。

将式(1.21)稍加变换, 并写成设计式:

$$\mu_R = \mu_S + \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1.22)$$

由于

$$\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} = \frac{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

故得

$$\mu_R - \alpha_R \beta \sigma_R \geq \mu_S + \alpha_S \beta \sigma_S \quad (1.23)$$

式中

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \alpha_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1.24)$$

而式(1.23)左、右分别为 R 和 S 的设计验算点坐标 R^* 和 S^* ,

$$R^* \geq S^* \quad (1.25)$$

这就是概率法的设计式。由于这种设计不考虑 Z 的全分布只考虑至二阶矩, 对非线性函数用泰勒级数展开取线性项, 故此法称为一次二阶矩法。

式(1.23)中可靠指标的取值可用校准法求得。所谓“校准法”, 就是对现有结构构件进行反演计算和综合分析, 求得其平均可靠指标来确定今后设计时应采用的目标可靠指标。我国《建筑结构可靠度设计统一标准》按破坏类型(延性或脆性破坏)和安全等级(根据破坏后果和建筑物类型分为一、二、三级, 级数越高, 破坏后果越不严重)分别规定了结构构件按承载力极限状态设计时采用的不同的 β 值。钢结构的各种构件, 按钢结构设计规范(TJ17—74)设计, 经校准分析, 其 β 值在 3.2 左右, 即 $\beta = 3.2$, 属延性破坏, 安全等级为二级。

1.2.3 设计表达式

现行钢结构设计规范除疲劳计算外, 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, 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。但这与以往的设计方法不同, 分项系数不是凭经验确定, 而是以可靠指标 β 为基础用概率设计法求出, 也就是将式(1.23)或(1.25)转化为等效的以基本变量标准值和分项系数形式表达的极限状态设计式。

现以简单的荷载情况为例, 分项系数设计式可写成:

$$\frac{R_K}{\gamma_R} \geq \gamma_G S_{GK} + \gamma_Q S_{QK} \quad (1.26)$$

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;

γ ——分项系数。

相应地, 式(1.25)可写成:

$$R^* \geq S_G^* + S_Q^* \quad (1.27)$$

为使式(1.26)与式(1.27)等价, 必须有