



新世纪土木工程系列教材

钢结构设计原理

张耀春 主 编 周绪红 副主编



高等教育出版社

新世纪土木工程系列教材

钢结构设计原理

张耀春 主 编

周绪红 副主编



高等教育出版社

内 容 提 要

本书着重讲述钢结构的基本原理,包括钢结构材性、连接和各种基本构件的设计,单层厂房钢结构的设计与应用,钢结构塑性设计和抗震设计方法等内容。书内附有适当的例题和习题。为了适应不同学时和不同读者对象的要求,书内编入了一部分比较深入的内容,供自由选读。

本书为高等教育出版社出版的新世纪土木工程系列教材之一,内容丰富、系统、理论联系实际。可作为土木工程专业本科生教学用书,也可作为有关科研人员和工程设计人员的参考书。

图 书 在 版 编 目 (CIP) 数 据

钢结构设计原理 / 张耀春主编. —北京: 高等教育出版社, 2004.7

ISBN 7-04-014489-1

I. 钢... II. 张... 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 (2004) 第 054105 号

策划编辑 赵湘慧 责任编辑 赵湘慧 封面设计 于 涛 责任绘图 朱 静
版式设计 张 岚 责任校对 胡晓琪 责任印制 杨 明

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 29.5
字 数 720 000

版 次 2004 年 7 月第 1 版
印 次 2004 年 8 月第 2 次印刷
定 价 33.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

教育部高等教育出版社土建类系列教材

编辑委员会委员名单

主任委员：沈蒲生(湖南大学)

副主任委员：(按姓氏笔画排序)

白国良(西安建筑科技大学)

邹超英(哈尔滨工业大学)

周绪红(长安大学)

强士中(西南交通大学)

委 员：(按姓氏笔画排序)

卫 军 (华中科技大学)

王 健 (北京建筑工程学院)

王清湘 (大连理工大学)

叶志明 (上海大学)

江见鲸 (清华大学)

关宝树 (西南交通大学)

刘 明 (沈阳建筑工程学院)

朱彦鹏 (甘肃工业大学)

张印阁 (东北林业大学)

张家良 (辽宁工学院)

吴胜兴 (河海大学)

杨和礼 (武汉大学)

尚守平 (湖南大学)

周 云 (广州大学)

胡长顺 (长安大学)

赵明华 (湖南大学)

梁兴文 (西安建筑科技大学)

黄醒春 (上海交通大学)

焦兆平 (广州大学)

廖红建 (西安交通大学)

霍 达 (北京工业大学)

出版者的话

新世纪土木工程系列教材是我社组织编写出版的“大土木”范畴的专业系列教材。1998年教育部颁布了新修订的《普通高等学校本科专业目录和专业介绍》，新专业目录中土建类土木工程专业覆盖了原来建筑工程和交通土建工程等8个专业。1999年各高校已按新的专业目录招生。开设土木工程专业的各院校把近年来在教育思想与教学观念、教学内容与课程体系、教学方法与教学手段等方面取得的改革成果固化到教学计划和人才培养过程中，设计了从教学思想到教学模式等一系列教学改革方案。大家在教学实践中体会到：专业、课程教学改革必然引起相应的教材改革。我社从1999年开始进行土木工程专业系列教材的策划工作，并于2000年成立了“教育部高等教育出版社土建类系列教材编委会”。

我们编辑出版土木工程系列教材的指导思想是：

1. 紧密结合人才培养模式改革，根据拓宽专业基础、提高综合素质、增强创新能力的要求，调整学生的知识结构。

2. 从各院校调整土建类各专业教学计划出发，加强基础课程到专业课程的有机沟通，用系统的观点和方法建立新的课程体系结构，包括对课程的整合与集成，组织和建设专业核心课程，成套成系列地推出土木工程系列教材。

3. 各门课程教材要具有与本门学科发展相适应的学科水平，以科技进步和社会发展的最新成果充实、更新教材内容，贯彻理论联系实际的原则。

4. 要正确处理继承、借鉴和创新的关系，不能简单地以传统和现代划线，决定取舍，而应根据教学要求进行取舍。继承、借鉴历史和国外的经验，注意研究结合我国的现实情况，择善而从，消化创新。

5. 随着高新技术、特别是数字化和网络化技术的发展，在土木工程系列教材建设中，要充分考虑文字教材与音像、电子、网络教材的综合发展，发挥综合媒体在教学中的优势，提高教学效率。在开发研制教学软件的同时，要注意使文字教材与先进的软件接轨，明确不同形式教材之间的关系是相辅相成、相互补充的。

6. 坚持质量第一。图书是特殊的商品，教材是特殊的图书。教材质量的优劣直接影响教学质量和教学秩序，最终影响学校人才培养的质量。教材不仅具有传播知识、服务教育、积累文化的功能，也是沟通作者、编辑、读者的桥梁，一定程度上还代表着国家学术文化或学校教学、科研水平。因此，遴选作者、审订教材、贯彻国家标准和规范等方面需严格把关。

为了实现本套教材的指导思想，我们组建了由有丰富的教学经验、有较高的学术水平和学术声望的教师组成的编委会，由编委会研究提出土木工程系列教材的选题及其基本内容与编审原则，并推荐作者。

我们出版本系列教材，旨在为新世纪的土木工程专业学生提供一套经过整合优化的比较系

统的专业系列教材,以期为我国的土木工程专业教材建设贡献自己的一份力量。

本系列教材的编写大纲和初稿都经过了编委会的审阅,以求教材质量更臻完善。如有疏漏之处,请读者批评指正!

2002年12月

前 言

本书为新世纪土木工程系列教材之一,是为适应“大土木”专业覆盖面广的需要而编写的。

本书以阐述钢结构的基本设计原理为重点,结合新版 GB 50017—2003《钢结构设计规范》和 GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢技术规范》的修订内容,着重讲述了钢材的性能、连接和各种基本构件的设计原理,各类节点的构造和设计;同时以单层厂房钢结构为例,介绍了整体房屋钢结构的设计方法;书中还介绍了钢结构的塑性设计方法和抗震设计特点。

考虑到近年来轻钢结构快速发展的需要,书中适当安排了冷弯薄壁型钢结构设计原理的部分内容,教学时可不作为基本内容要求。

本书可作为土木工程专业本科生的专业基础课教材,也可作为钢结构技术工作者和土建人员的学习参考用书。

参加本书编写的人员有:哈尔滨工业大学张耀春(主编,第1、2、10章)、武振宇(第4、5章)、张连一(第8章)、张文元(附录),汕头大学王湛(第3章),长安大学周绪红(副主编,第6章)、刘永健(第7章),湖南大学舒兴平(第9章)。全书由张耀春统稿,由哈尔滨工业大学钟善桐教授主审。

在本书编写过程中得到了编委会和高等教育出版社的大力支持和帮助,对此表示衷心的感谢。另外,哈尔滨工业大学研究生王春刚同志协助主编整理了部分书稿,在此深表谢意。

限于编者水平,错误和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者
2004年5月

目 录

第 1 章 绪论	1	§ 5.1 梁的类型和梁格布置	141
§ 1.1 钢结构发展简史	1	§ 5.2 梁的设计	144
§ 1.2 钢结构的特点及应用	2	§ 5.3 腹板加劲肋的布置和设计	150
§ 1.3 钢结构的设计方法	5	§ 5.4 实腹梁的构造设计	153
§ 1.4 钢结构的新发展	13	§ 5.5 吊车梁的设计特点	165
第 2 章 钢结构的材料	17	§ 5.6 冷弯型钢檩条和墙梁的设计特点	169
§ 2.1 概述	17	习题	172
§ 2.2 钢材的生产	17	第 6 章 轴心受力构件	173
§ 2.3 钢材的主要性能	22	§ 6.1 轴心受力构件的应用和截面形式	173
§ 2.4 各种因素对钢材性能的影响	26	§ 6.2 轴心受力构件的强度和刚度	175
§ 2.5 钢材的疲劳	34	§ 6.3 轴心受压构件的整体稳定	178
§ 2.6 建筑用钢的种类、规格和选用	41	§ 6.4 实际轴心受压构件整体稳定的计算	188
习题	50	§ 6.5 轴心受压构件的局部稳定	195
第 3 章 连接	51	§ 6.6 实腹式轴心受压构件的截面设计	198
§ 3.1 钢结构的连接	51	§ 6.7 格构式轴心受压构件	203
§ 3.2 对接焊缝的构造和计算	59	§ 6.8 冷弯薄壁型钢轴心受压构件的设计特点	212
§ 3.3 角焊缝的构造和计算	62	习题	217
§ 3.4 焊接残余应力和焊接变形	80	第 7 章 拉弯、压弯构件	219
§ 3.5 普通螺栓的构造和计算	85	§ 7.1 拉弯、压弯构件的应用和截面形式	219
§ 3.6 高强度螺栓连接的构造和计算	95	§ 7.2 拉弯、压弯构件的强度	221
§ 3.7 轻钢结构紧固件连接的构造和计算	104	§ 7.3 实腹式压弯构件在弯矩作用平面内的稳定计算	225
习题	106	§ 7.4 实腹式压弯构件在弯矩作用平面外的稳定计算	229
第 4 章 受弯构件的计算原理	109	§ 7.5 实腹式压弯构件的局部稳定	233
§ 4.1 概述	109	§ 7.6 实腹式压弯构件的截面设计	235
§ 4.2 受弯构件的强度和刚度	109	§ 7.7 格构式压弯构件的计算	241
§ 4.3 梁的扭转	114	§ 7.8 冷弯薄壁型钢拉弯和压弯构件的设计特点	246
§ 4.4 梁的整体稳定	116	习题	248
§ 4.5 梁板件的局部稳定	123		
§ 4.6 梁腹板的屈曲后强度	135		
习题	140		
第 5 章 梁的设计	141		

第 8 章 节点设计原理	251	§ 9.9 轻型门式刚架结构的设计特点	353
§ 8.1 节点设计的原则	251	习题	358
§ 8.2 次梁与主梁的连接节点	251	第 10 章 钢结构的塑性设计和抗震	
§ 8.3 梁与柱的连接节点	253	设计	359
§ 8.4 桁架与柱的连接节点	259	§ 10.1 塑性设计的基本概念	359
§ 8.5 变截面柱的节点构造	263	§ 10.2 塑性设计的必要条件	364
§ 8.6 柱脚节点	265	§ 10.3 塑性设计的构件计算	367
§ 8.7 支座节点	277	§ 10.4 钢结构抗震设计特点	371
§ 8.8 直接焊接管节点	280	习题	379
习题	285	附录	381
第 9 章 单层厂房钢结构	286	附录 1 钢材和连接的强度设计值	381
§ 9.1 单层厂房钢结构的组成及布置		附录 2 结构或构件的变形容许值	384
原则	286	附录 3 梁的整体稳定系数	385
§ 9.2 横向框架的结构类型及		附录 4 轴心受压构件的稳定系数	390
主要尺寸	288	附录 5 各种截面回转半径的近似值	394
§ 9.3 结构的纵向传力系统	290	附录 6 柱的计算长度系数	395
§ 9.4 屋盖结构体系	296	附录 7 疲劳计算的构件和连接分类	407
§ 9.5 檩条及压型钢板的設計	302	附录 8 常用型钢规格及截面特性	410
§ 9.6 桁架的形式和截面设计	311	附录 9 锚栓和螺栓规格	453
§ 9.7 桁架的节点设计	322	附录 10 型钢螺栓线距表	455
§ 9.8 有吊车的单层工业厂房的设计		参考文献	458
特点	345		

第 1 章

绪 论

§ 1.1 钢结构发展简史

钢(steel)是铁碳合金,人类采用钢结构的历史和炼铁、炼钢技术的发展是密不可分的。早在公元前 2000 年左右,在人类古代文明的发祥地之一的美索不达米亚平原(位于现代伊拉克境内的幼发拉底河和底格里斯河之间)就出现了早期的炼铁术。

我国也是较早发明炼铁技术的国家之一,在河南辉县等地出土的大批战国时代(公元前 475 ~ 前 221 年)的铁制生产工具说明,早在战国时期,我国的炼铁技术已很盛行了。公元 65 年(汉明帝时代),已成功地用锻铁(wrought iron)为环,相扣成链,建成了世界上最早的铁链悬桥——兰津桥。此后,为了便利交通,跨越深谷,曾陆续建造了数十座铁链桥。其中跨度最大的为 1705 年(清康熙四十四年)建成的四川泸定大渡河桥,桥宽 2.8 m,跨长 100 m,由 9 根桥面铁链和 4 根桥栏铁链构成,两端系于直径 20 cm、长 4 m 的生铁铸成的锚桩上。该桥比美洲 1801 年才建造的跨长 23 m 的铁索桥早近百年,比号称世界最早的英格兰 30 m 跨铸铁(cast iron)拱桥也早 74 年。

除铁链悬桥外,我国古代还建有许多铁建筑物,如公元 694 年(周武氏十一年)在洛阳建成的“天枢”,高 35 m,直径 4 m,顶有直径为 11.3 m 的“腾云承露盘”,底部有直径约 16.7 m 用来保持天枢稳定的“铁山”,相当符合力学原理。又如公元 1061 年(宋代)在湖北荆州玉泉寺建成的 13 层铁塔,目前依然存在。所有这些都表明,我们中华民族对铁结构的应用,曾经居于世界领先地位。

欧美等国家中最早将铁做为建筑材料的当属英国,但直到 1840 年以前,还只采用铸铁来建造拱桥。1840 年以后,随着铆钉(rivets)连接和锻铁技术的发展,铸铁结构逐渐被锻铁结构取代,1846—1850 年间在英国威尔士修建的布里塔尼亚桥(Britannia Bridge)是这方面的典型代表。该桥共有 4 跨,跨长分别为 70 m、140 m、140 m、70 m,每跨均为箱型梁式桥,由锻铁型板和角铁经铆钉连接而成。随着 1855 年英国人发明贝氏转炉炼钢法和 1865 年法国人发明平炉炼钢法,以及 1870 年成功轧制出工字钢之后,形成了工业化大批量生产钢材(steel products)的能力,强度高且韧性好的钢材才开始在建筑领域逐渐取代锻铁材料,自 1890 年以后成为金属结构的主要材料。20 世纪初焊接(welding)技术的出现,以及 1934 年高强度螺栓(high-strength bolts)连接的出现,极大地促进了钢结构的发展。除西欧、北美之外,钢结构在前苏联和日本等国家也获得了广泛的应用,逐渐发展成为全世界所接受的重要结构体系。

由于我国长期处于封建主义统治之下,束缚了生产力的发展,1840 年鸦片战争以后,更沦为

半封建半殖民地国家,经济凋敝,工业落后,古代在铁结构方面的技术优势早已丧失殆尽。我国在 1907 年才建成了汉阳钢铁厂,年产钢只有 0.85 万吨。日本帝国主义侵略中国期间,曾在东北的鞍山、本溪建设了几个钢铁企业,疯狂掠夺我国的宝贵资源。1943 年是我国历史上钢铁产量最高的一年,生产生铁 180 万吨,钢 90 万吨,绝大部分是在东北生产的。这些钢铁很少用于建设,大部分被日本帝国主义用于反动的侵略战争。

新中国成立后,随着经济建设的发展,钢结构曾起过重要作用,如第一个五年计划期间,建设了一大批钢结构厂房、桥梁。但由于受到钢产量的制约,在其后的很长一段时间内,钢结构被限制使用在其他结构不能代替的重大工程项目中,在一定程度上,影响了钢结构的发展。

自 1978 年我国实行改革开放政策以来,经济建设获得了飞速的发展,钢产量逐年增加。自 1996 年超过 1 亿吨以来,一直位列世界钢产量的首位,2003 年更达到创纪录的 2.2 亿吨,逐步改变着钢材供不应求的局面。我国的钢结构技术政策,也从“限制使用”改为积极合理地推广应用。近年来,随着市场经济的不断完善,钢结构制作和安装企业像雨后春笋般在全国各地涌现,外国著名钢结构厂商也纷纷打入中国市场。在多年工程实践和科学研究的基础之上,我国新的 GB 50017—2003《钢结构设计规范》(以下简称 GB 50017 或《规范》)和 GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(以下简称 GB 50018)也已发布实施。所有这些,为钢结构在我国的快速发展创造了条件。

§ 1.2 钢结构的特点及应用

1.2.1 钢结构的特点

与其他材料的结构相比,钢结构具有如下特点:

(1) 钢材强度高,结构重量轻。钢与砖石和混凝土相比,虽然密度较大,但强度更高,故其密度与强度的比值较小,承受同样荷载时,钢结构要比其他结构轻。例如,当跨度和荷载均相同时,钢屋架的重量仅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 $1/10$ 。为运输和吊装提供了方便。由于钢构件常较柔细,因此稳定问题比较突出,应给予充分注意。

(2) 材质均匀,且塑性韧性好。与砖石和混凝土相比,钢材属单一材料,由于生产过程质量控制严格,因此组织构造比较均匀,且接近各向同性,钢材的弹性模量很高,在正常使用情况下具有良好的延性,可简化为理想弹塑性体,最符合一般工程力学的基本假定,计算结果比较可靠。由于重量轻和韧性好,钢结构的抗震性能也好于其他结构。

(3) 良好的加工性能和焊接性能。钢材具有良好的冷热加工性能和焊接性能,便于在专业化的金属结构厂大批量生产出精度较高的构件,然后运至现场,进行工地拼接和吊装,既可保证质量,又可缩短施工周期。

(4) 密封性好。采用焊接连接的钢板结构,具有较好的水密性和气密性,可用来制作压力容器、管道,甚至载人太空结构。

(5) 钢材的可重复使用性。钢结构加工制造过程中产生的余料和碎屑,以及废弃和破坏了的结构或构件,均可回炉重新冶炼成钢材重复使用。因此钢材被称为绿色建筑材料或可持续发展的材料。

(6) 钢材耐热但不耐火。钢材长期经受 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 辐射热时,性能变化不大,具有一定的耐热性能。但当温度超过 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,会出现兰脆现象,当温度达 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钢材进入热塑性状态,将丧失承载能力。因此在有防火要求的建筑中采用钢结构时,必须采用耐火材料加以保护。

(7) 耐腐蚀性差。钢材耐锈蚀的性能较差,因此必须对钢结构采取防护措施,使它的维护费用较砖石和钢筋混凝土结构为高。不过在无侵蚀性介质的一般厂房中,钢构件经过彻底除锈并涂上合格的油漆后,锈蚀问题并不严重。对处于湿度大,有侵蚀性介质环境中的结构,可采用耐候钢或不锈钢提高其抗锈蚀性能。

(8) 钢结构的低温冷脆倾向。由厚钢板焊接而成的承受拉力和弯矩的构件及其连接节点,在低温下有脆性破坏的倾向,应引起足够的重视。

1.2.2 钢结构的应用

随着我国国民经济的不断发展和科学技术的进步,钢结构在我国的应用范围也在不断扩大。目前钢结构应用范围大致如下(图 1.2.1~1.2.8):

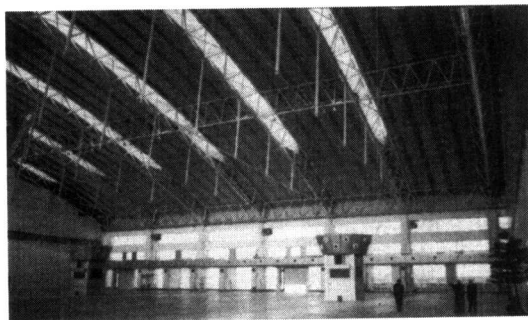


图 1.2.1 哈尔滨会展中心屋盖(128 m 跨)



图 1.2.2 独塔斜拉桥——海河大桥

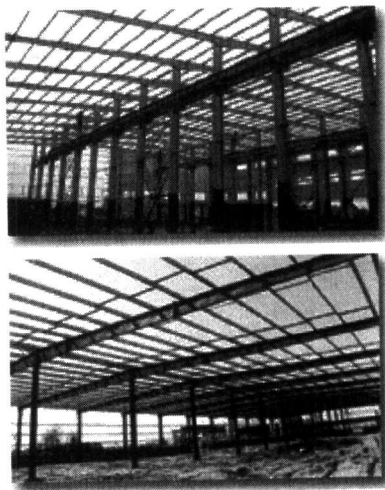


图 1.2.3 轻钢工业厂房门式刚架

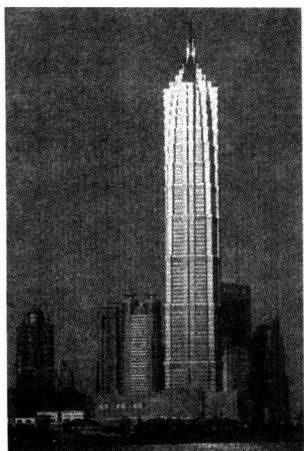


图 1.2.4 上海金茂大厦

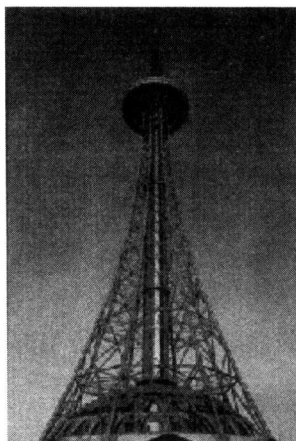


图 1.2.5 黑龙江电视塔(336 m)

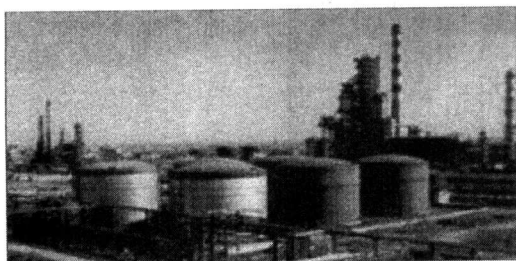


图 1.2.6 立式油罐



图 1.2.7 南京航空港直接焊接管结构

(1) 大跨结构

结构跨度越大,自重在荷载中所占的比例就越大,减轻结构的自重会带来明显的经济效益。钢材强度高结构重量轻的优势正好适合于大跨结构,因此钢结构在大跨空间结构和大跨桥梁结构中得到了广泛的应用。所采用的结构形式有空间桁架、网架、网壳、悬索(包括斜拉体系)、张弦梁、实腹或格构式拱架和框架等。

(2) 工业厂房

吊车起重量较大或者其工作较繁重的车间的主要承重骨架多采用钢结构。另外,有强烈辐射热的车间,也经常采用钢结构。结构形式多为由钢屋架和异形柱组成的门式刚架或排架,也有采用网架做屋盖的结构形式。

近年来,随着压型钢板等轻型屋面材料的采用,轻钢结构工业厂房得到了迅速的发展。其结构形式主要为实腹式变截面门式刚架。

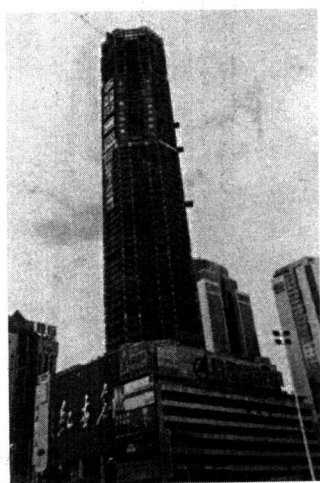


图 1.2.8 施工中的赛格广场高层建筑

(3) 受动力荷载影响的结构

由于钢材具有良好的韧性,设有较大锻锤或产生动力作用的其他设备的厂房,即使屋架跨度不大,也往往由钢制成。对于抗震能力要求高的结构,采用钢结构也是比较适宜的。

(4) 多层和高层建筑

由于钢结构的综合效益指标优良,近年来在多、高层民用建筑中也得到了广泛的应用。其结构形式主要有多层框架、框架-支撑结构、框筒、悬挂、巨型框架等。

(5) 高耸结构

高耸结构包括塔架和桅杆结构,如高压输电线路的塔架、广播、通信和电视发射用的塔架和桅杆、火箭(卫星)发射塔架等。

(6) 可拆卸的结构

钢结构不仅重量轻,还可以用螺栓或其他便于拆装的手段来连接,因此非常适用于需要搬迁的结构,如建筑工地、油田和需野外作业的生产和生活用房的骨架等。钢筋混凝土结构施工用的模板和支架,以及建筑施工用的脚手架等也大量采用钢材制作。

(7) 容器和其他构筑物

冶金、石油、化工企业中大量采用钢板做成的容器结构,包括油罐、煤气罐、高炉、热风炉等。此外,经常使用的还有皮带通廊栈桥、管道支架、锅炉支架等其他钢构筑物,海上采油平台也大都采用钢结构。

(8) 轻型钢结构

钢结构重量轻不仅对大跨结构有利,对屋面活荷载特别轻的小跨结构也有优越性。因为当屋面活荷载特别轻时,小跨结构的自重也成为一个重要因素。冷弯薄壁型钢屋架在一定条件下的用钢量可比钢筋混凝土屋架的用钢量还少。轻钢结构的结构形式有实腹变截面门式刚架、冷弯薄壁型钢结构(包括金属拱形波纹屋盖)以及钢管结构等。

(9) 钢和混凝土的组合结构

钢构件和板件受压时必须满足稳定性要求,往往不能充分发挥它的强度高的作用,而混凝土则最宜于受压不适于受拉,将钢材和混凝土并用,使两种材料都充分发挥它的长处,是一种很合理的结构。近年来这种结构在我国获得了长足的发展,广泛应用于高层建筑(如深圳的赛格广场)、大跨桥梁、工业厂房和地铁站台柱等。主要构件形式有钢与混凝土组合梁和钢管混凝土柱等。

§ 1.3 钢结构的设计方法

1.3.1 概率极限状态设计法

1. 结构的功能要求

建筑结构要解决的基本问题是,力求以较为经济的手段,使所要建造的结构具有足够的可靠度(degree of reliability),以满足各种预定功能的要求。

结构在规定的设计使用年限内应满足的功能有:

(1) 在正常施工和正常使用时,能承受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) 在正常维护下具有足够的耐久性;
- (4) 在设计规定的偶然事件(如地震、火灾、爆炸、撞击等)发生时及发生后,仍能保持必需的整体稳定性。

上述“各种作用”是指凡使结构产生内力或变形的各种原因,如施加在结构上的集中荷载或分布荷载,以及引起结构外加变形或约束变形的原因,例如地震、地基沉降、温度变化等。

2. 结构的可靠度

结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力,称为结构的可靠性(reliability)。结构可靠度是对结构可靠性的定量描述,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。对结构可靠度的要求与结构的设计基准期长短有关,设计基准期长,可靠度要求就高,反之则低。一般建筑物的设计基准期为 50 年。

3. 结构的极限状态

整个结构或结构的一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,称此特定状态为该功能的极限状态。极限状态实质上是结构可靠与不可靠的界限,故也可称为“界限状态”。对于结构的各种极限状态,均应规定明确的标志或限值。

我国《规范》规定,承重结构应按下列两类极限状态进行设计:

- (1) 承载能力极限状态。包括:构件和连接的强度破坏、疲劳破坏和因过度变形而不适于继续承载,结构和构件丧失稳定,结构转变为机动体系和结构倾覆。
- (2) 正常使用极限状态。包括:影响结构、构件和非结构构件正常使用或耐久性能的局部损坏(包括组合结构中混凝土裂缝)。

承载能力极限状态与正常使用极限状态相比较,前者可能导致人身伤亡和大量财产损失,故其出现的概率应当很低,而后者对生命的危害较小,故允许出现的概率可高些,但仍应给予足够的重视。

4. 概率极限状态设计原理

设结构的极限状态采用下列极限状态方程描述:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1.3.1)$$

式中, $g(\cdot)$ 为结构的功能函数; $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为影响结构或构件可靠度的基本变量,系指结构上的各种作用和材料性能、几何参数等;进行结构可靠度分析时,也可采用作用效应和结构抗力作为综合的基本变量;基本变量均可考虑为相互独立的随机变量。

当仅有作用效应 S 和结构抗力 R 两个基本变量时,结构的功能函数可表示为:

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1.3.2)$$

由于 R 和 S 都是随机变量,其函数 Z 也是一个随机变量。功能函数 Z 存在三种可能状态:

$$Z = R - S \begin{cases} > 0 & \text{结构处于可靠状态} \\ = 0 & \text{结构达到极限状态} \\ < 0 & \text{结构处于失效状态} \end{cases}$$

定值设计法认为 R 和 S 都是确定性的变量,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。事实并非如此,由于 Z 的随机性,结构失效事故仍时有所闻。

结构或构件的失效概率可表示为:

$$P_f = p(z) < 0 \tag{1.3.3}$$

设 R 和 S 的概率统计值均服从正态分布,可分别算出它们的平均值 μ_R, μ_S 和标准差 σ_R, σ_S , 则功能函数 $Z = R - S$ 也服从正态分布,它的平均值和标准差分别为:

$$\mu_z = \mu_R - \mu_S \tag{1.3.4}$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \tag{1.3.5}$$

图 1.3.1 所示功能函数 $Z = R - S$ 为正态分布的概率密度曲线。图中由 $-\infty$ 到 0 的阴影面积表示 $Z < 0$ 的概率,即失效概率 P_f ,需采用积分法求得。由图 1.3.1 中可见,在正态分布的概率密度曲线中存在着 Z 的平均值和标准差的下述关系:

$$\beta \sigma_z = \mu_z \tag{1.3.6}$$

令

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \tag{1.3.7}$$

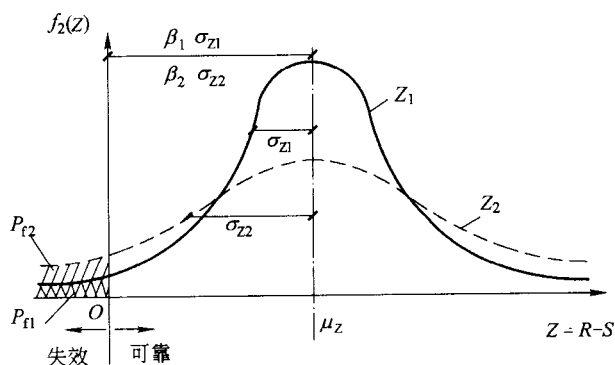


图 1.3.1 功能函数 Z 的概率密度曲线

由图中可以看出两个具有相同平均值,不同标准差的功能函数 Z_1 和 Z_2 的 β 间有如下关系 $\beta_1 > \beta_2$, 或 $-\beta_2 > -\beta_1$, 而 $P_{f2} > P_{f1}$, 说明 β 值与失效概率存在着对应关系:

$$P_f = \phi(-\beta) \tag{1.3.8}$$

式中, $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

式(1.3.8)说明,只要求出 β 就可获得对应的失效概率 P_f (而可靠度 $P_r = 1 - P_f$),故称 β 为结构构件的可靠度指标(reliability index)。 P_f 与可靠度指标 β 的对应关系见表 1.3.1。

表 1.3.1 失效概率与可靠指标的对应关系

β	2.5	2.7	3.2	3.7	4.2
P_f	5×10^{-3}	3.5×10^{-3}	6.9×10^{-4}	1.1×10^{-4}	1.3×10^{-5}

将式(1.3.4)和(1.3.5)代入式(1.3.7)有:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \tag{1.3.9}$$

当 R 和 S 的统计值不按正态分布时,结构构件的可靠指标应以它们的当量正态分布的平均值和标准差代入公式(1.3.9)来计算。当功能函数 Z 为非线性函数时,可将此函数展为泰勒级

数而取其线性项计算 β 。由于 β 的计算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,即标准差的平方) σ_z^2 ,对非线性函数只取线性项,而不考虑 Z 的全分布,故称此法为一次二阶矩法。

结构构件设计时采用的可靠指标,可根据对现有结构构件的可靠度分析(所谓校准法),并考虑使用经验和经济因素等确定。我国 GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》规定,结构构件承载能力极限状态的可靠指标,不应小于表 1.3.2 的规定。钢结构各种构件,按《规范》设计,经校准分析,其 β 值在 3.2 左右,钢结构一般情况下属延性破坏,故总体安全等级为二级。

表 1.3.2 结构构件承载能力极限状态的可靠指标

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

5. 设计表达式

(1) 承载能力极限状态表达式

为了应用简便并符合人们长期已熟悉的形式,可将公式(1.3.9)做如下变换:

$$\mu_S = \mu_R - \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$$

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

由于

故得:

$$\mu_S + \alpha_S \sigma_S \leq \mu_R - \alpha_R \beta \sigma_R \quad (1.3.10)$$

式中, $\alpha_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$; $\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$ 。

式(1.3.10)左、右分别为 S 和 R 的设计验算点坐标 S^* 和 R^* ,可写为:

$$S^* \leq R^* \quad (1.3.11)$$

GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》规定结构构件的极限状态设计表达式,应根据各种极限状态的设计要求,采用有关的荷载代表值、材料性能标准值、几何参数标准值以及各种分项系数等表达。

作用分项系数 γ_F (包括荷载分项系数 γ_G 、 γ_Q) 和结构构件抗力分项系数 γ_R 应根据结构功能函数中基本变量的统计参数和概率分布类型,以及表 1.3.2 规定的结构构件可靠指标,通过计算分析,并考虑工程经验确定。

考虑到施加在结构上的可变荷载往往不止一种,这些荷载不可能同时达到各自的最大值,因此,还要根据组合荷载效应分布来确定荷载的组合系数 ψ_{ci} 和 ψ 。结构重要性系数 γ_0 应按结构构件的安全等级、设计使用年限并考虑工程经验确定。

根据结构的功能要求,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,必要时尚应考虑作用效应的偶然组合(考虑如火灾、爆炸、撞击、地震等偶然事件的组合)。

① 基本组合