

GANG YU ZUHE JIEGOU SHEJI

建设工程资助教材

建设项目资助教材

钢与组合

结构设计

郭 震 张风杰 常 虹 编著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

建设工程资助教材
土木工程品牌专业建设项目资助教材

钢与组合结构设计

郭 震 张风杰 常 虹 编 著



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本教材是在编者多年的教学实践上,按照中华人民共和国住房和城乡建设部高校土木工程专业评估精神及工程教育认证标准编写而成,编写主旨为衔接土木工程专业基础课与钢结构工程设计等专业课,并增加了组合结构设计原理教学内容,使钢结构工程方向的教学体系更加完整。

本教材共设置7章内容,分别是绪论、单层厂房钢结构设计、钢与混凝土组合楼盖结构、型钢混凝土组合结构、钢管混凝土组合结构、多高层建筑钢结构设计与大空间钢结构体系,其中第3、4、5章为组合结构设计原理内容。

本教材涵括了高等院校土木工程专业钢与组合结构设计课程教学过程中的主要内容和知识点,在保证教学基本要求的前提下,又注重科学研究内容的深入,因此还可为土木工程专业学生本科毕业设计提供参考,并为学生继续深造提供先导知识。

图书在版编目(CIP)数据

钢与组合结构设计/郭震,张风杰,常虹编著. —

徐州:中国矿业大学出版社,2017.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3667 - 8

I. ①钢… II. ①郭… ②张… ③常… III. ①钢结构
—结构设计—教材 IV. ①TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 203590 号

书 名 钢与组合结构设计

编 著 郭 震 张风杰 常 虹

责任编辑 陈 慧

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 18.25 字数 456 千字

版次印次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

截至 2015 年上半年,我国钢产量已达 4.1 亿吨。中国钢铁产量连续 12 年保持世界第一,并且遥遥领先于其他国家。2016 年起,为保障国民经济平稳发展,中央经济工作会议决定将钢铁等产业的“去库存”纳入五大经济任务之一,这为钢铁产业带来新的挑战,但是也给建筑行业的钢结构建筑发展带来新的机遇。大力发展建筑钢结构,既可以消耗大量钢材,亦可以避免钢铁产业因“去库存”而产生的资金和人才的流失。

建筑钢结构的发展需要大量的专业科研、设计人员,涉及各建筑类型,如大跨结构、重型结构、特种结构及其他工业与民用建筑。这就需要各大院校的结构工程专业着重培养一批能够胜任钢结构设计的专业技术人才。钢结构设计包括两个方面的内容:钢结构设计原理和建筑钢结构设计。设计原理涉及连接、梁、柱与节点的设计,建筑钢结构设计则侧重具体结构形式的选型、抗力设计、抗震设计与施工等方面。

本书以建筑钢结构设计为主,涵盖了结构工程领域各类工业与民用建筑结构形式,如单层钢结构工业厂房、多高层钢结构、大跨空间钢结构等;同时,为适应现代工程特征,本书还设置了组合结构设计内容,如组合梁、组合板、型钢混凝土结构和钢管混凝土结构。在保证教学基本要求的前提下,本书还注重科学研究内容的深入,可为本科生毕业设计提供参考、为学生继续深造提供先导知识,实用性较强。

本书在编写过程中得到了课题组教师的许多帮助,卢楠、单宇、罗吉席等在资料采编、图表绘制等工作上给予了大力协助,书中也参考了许多专家学者著作,在此一并表示感谢。

由于时间仓促,书中错误及不妥之处难免,恳请读者批评指正并提出宝贵意见,以便及时更正。

作 者

2017 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 钢结构应用范围	2
1.2 钢结构的优缺点	5
1.3 钢结构设计方法	6
1.4 钢结构的发展	15
第 2 章 单层厂房钢结构设计	18
2.1 厂房结构形式和结构布置	18
2.2 横向框架计算	30
2.3 框架柱的设计	40
2.4 钢屋架设计	56
2.5 轻型门式钢刚架设计	71
思考题	98
第 3 章 钢与混凝土组合楼盖结构	99
3.1 组合结构基本原理	99
3.2 压型钢板与混凝土组合楼板设计	100
3.3 钢与混凝土组合梁的设计	105
3.4 组合梁施工阶段计算	110
3.5 组合梁的承载力	110
3.6 抗剪连接件设计	116
3.7 组合梁的变形计算	121
3.8 部分抗剪连接组合梁	125
3.9 连续组合梁	126
思考题	131

第 4 章 型钢混凝土组合结构	132
4.1 一般要求和结构的整体作用	132
4.2 型钢混凝土框架	137
4.3 型钢混凝土框架柱	153
4.4 框架梁柱节点	167
4.5 连接构造	174
思考题	176
第 5 章 钢管混凝土组合结构	177
5.1 钢管混凝土构件及其一般规定	177
5.2 受压承载力	181
5.3 变形计算	189
5.4 连接构造	189
思考题	195
第 6 章 多高层建筑钢结构设计	196
6.1 概述	196
6.2 多高层钢结构体系	200
6.3 多高层钢结构的设计	213
6.4 多高层钢结构建筑的节点设计	221
6.5 钢结构抗震设计	234
思考题	248
第 7 章 大空间钢结构体系	249
7.1 大跨空间结构的发展	249
7.2 网架结构	251
7.3 网壳结构	263
7.4 悬索结构	271
7.5 新型大跨结构	276
思考题	282
参考文献	283

第1章 绪 论

钢是铁碳合金,人类采用钢结构的历史与炼铁、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 年—公元前 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作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、140、140、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如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,《钢结构设计规范》(GB 50017)和《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018)相继发布实施,为钢结构在我国快速发展创造了条件。

1.1 钢结构应用范围

钢结构是各类工程结构中应用比较广泛的一种建筑结构,一些高度或跨度较大的结构,荷载或吊车起重量较大的结构,有较大振动或较高温度的厂房结构,要求能活动或经常装拆的结构,在地震多发区的房屋结构,以及采用其他建筑材料有困难或不经济的结构,则可考虑采用钢结构。

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:

(1) 大跨结构

结构跨度越大,自重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。应用例子可见图 1-1、图 1-2 和图 1-3。



图 1-1 京广高铁广州终点站集散大厅(中央跨度 64 m)

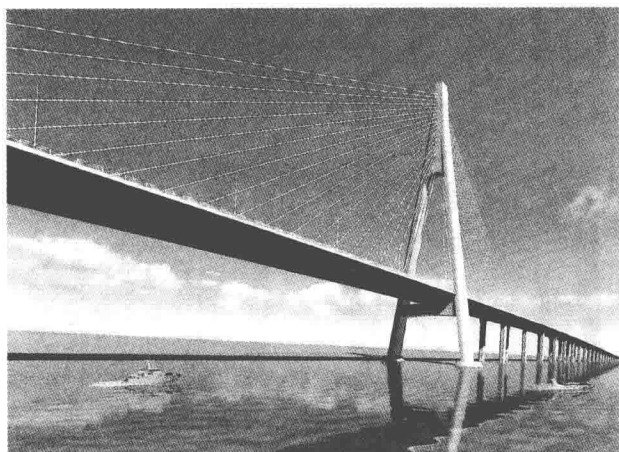


图 1-2 独塔斜拉桥——杭州湾大桥



图 1-3 南京航空港直接焊接管结构

(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阶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,例如图 1-4。

(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,例如图 1-5。

(5) 高耸结构



图 1-4 轻钢工业厂房门式刚架

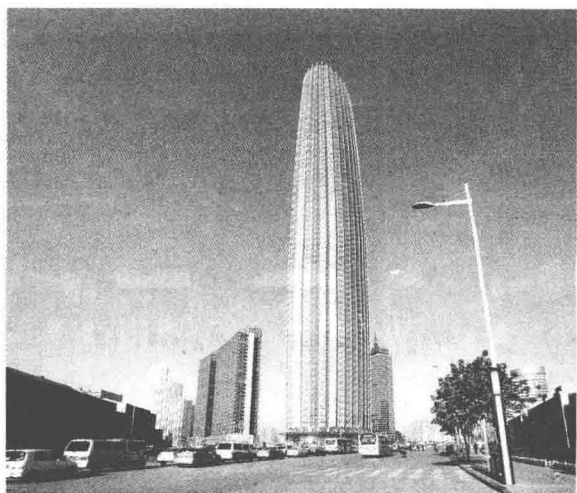


图 1-5 天津津塔 (336.9 m)

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,例如图 1-6。



图 1-6 郑州电视塔——中原福塔 (388 m)

(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,例如图 1-7。



图 1-7 海上采油平台

(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们的长处,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。其主要构件形式有钢与混凝土组合梁和钢管混凝土柱等。

1.2 钢结构的优缺点

钢结构在工程中得到广泛的应用和发展,是由于钢结构与其他材料的结构相比,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) 材质均匀且塑性和韧性好

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,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) 可重复使用

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钢结构或构件,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,使得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) 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。

1.3 钢结构设计方法

1.3.1 基本要求

钢结构设计要贯彻执行国家的技术经济政策,做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。

钢结构设计时应满足下列基本要求:

- (1) 设计钢结构时,应从工程实际情况出发,合理选用材料、结构方案和构造措施。
- (2) 满足结构在运输、安装和使用过程中的强度、稳定和刚度要求。
- (3) 应优先采用定型的和标准化的结构和构件,减少制作和安装工作量。
- (4) 符合防火要求,注意结构的抗腐蚀性能。

(5) 尽可能注意美观,特别是外露结构,有一定建筑美学要求。

钢结构设计应当重视、贯彻和研究节约钢材、降低造价的各种措施:

(1) 实行结构尺寸模数化,构件标准化,构造简洁化。

(2) 采用新结构体系、空间结构或悬挂结构体系。

(3) 运用新的计算理论和设计方法。

(4) 采用高强度优质钢材或其他轻金属。

(5) 采用薄壁型钢、薄钢板结构。

(6) 采用钢与混凝土组合结构、钢管混凝土结构。

钢结构设计应因地制宜、量材而用,根据工程实际选择合适的结构方案,进行技术经济比较,同时还要总结、创造和推广先进的制造和安装技术。

1.3.2 钢结构的设计方法

1.3.2.1 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《钢结构设计规范》(以下简称 GB 50017—2003 规范或规范)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;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:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1-1)$$

式中 $Z = g(\cdot)$ ——结构的功能函数;

$x_i (i=1, 2, \dots, n)$ ——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:

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1-2)$$

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 存在以下三种可能状态:

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

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:

$$P_f = p(Z) < 0 \quad (1-3)$$

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

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (1-4)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1-5)$$

图 1-8 所示为功能函数 $Z = R - S$ 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 1-8 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:

$$\beta \sigma_Z = \mu_Z \quad (1-6)$$

令

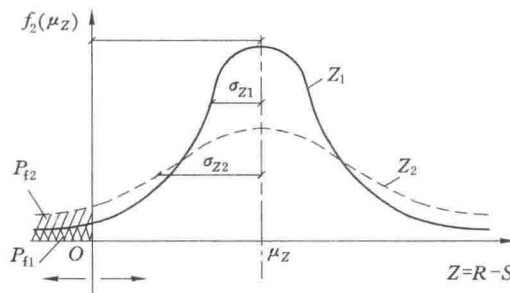
$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (1-7)$$

从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:

$$P_f = \varphi(-\beta) \quad (1-8)$$

式中 $\varphi(\cdot)$ ——标准正态分布函数。

式(1-8)说明,只要求出 β 就可获得对应的失效概率 P_f (而可靠度 $P_s = 1 - P_f$), 故称 β

图 1-8 功能函数 Z 的概率密度曲线

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 1-1。

表 1-1 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(1-4)和(1-5)代入式(1-7)有:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1-9)$$

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(1-9)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《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)规定,结构构件承载能力极限状态的可靠指标,不应小于表 1-2 的规定。钢结构各种构件,按钢结构设计规范设计,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 1-2 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(1-9)作如下变换:

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

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

$$\mu_S + \alpha_S \sigma_S \leq \mu_R - \alpha_R \beta \sigma_R \quad (1-10)$$

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

式(1-10)左式、右式分别为 S 和 R 的设计验算点坐标 S^* 和 R^* , 可写为:

$$S^* \leq R^* \quad (1-11)$$

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)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 1-2 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,进行承载力极限状态设计时,应考虑作用效应的基本组合,必要时还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

在荷载(作用)效应的基本组合条件下,式(1-11)可转化为等效的以基本变量标准值、分项系数和组合系数,并以应力形式表达的极限状态公式。其荷载效应的基本组合按下列设计表达式中的最不利值确定:

可变荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0 [\gamma_G \sigma_{GK} + \gamma_{Q1} \sigma_{Q1K} + \sum_{i=2}^n (\gamma_{Qi} \psi_{ci} \sigma_{QiK})] \leq f \quad (1-12)$$

永久荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0 [\gamma_G \sigma_{GK} + \sum_{i=1}^n (\gamma_{Qi} \psi_{ci} \sigma_{QiK})] \leq f \quad (1-13)$$

对于一般排架、框架结构,可采用简化式计算:

由可变荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0 [\gamma_G \sigma_{GK} + \psi \sum_{i=1}^n (\gamma_{Qi} \sigma_{QiK})] \leq f \quad (1-14)$$

由永久荷载效应控制的组合,仍按式(1-13)进行计算。

式中 γ_0 ——结构重要性系数,对安全等级为一级或设计使用年限为 100 年及以上的结构构件,不应小于 1.1;对安全等级为二级或设计使用年限为 50 年的结构构件,不应小于 1.0;对安全等级为三级或设计使用年限为 5 年的结构构件,不应小于 0.9;对使用年限为 25 年的结构构件, γ_0 不应小于 0.95。

σ_{GK} ——永久荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力。

σ_{Q1K} ——起控制作用的第一个可变荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力(该值使计算结果为最大)。

σ_{QiK} ——其他第 i 个可变荷载标准值在结构构件截面或连接中产生的应力。

γ_G ——永久荷载分项系数,当永久荷载效应对结构构件的承载能力不利时取 1.2,但对式(1-13)则取 1.35。当永久荷载效应对结构构件的承载能力有利时,取为 1.0;验算结构倾覆、滑移或漂浮时取 0.9。

γ_{Q1} 、 γ_{Qi} ——第一个和其他第 i 个可变荷载分项系数,当可变荷载效应对结构构件的承载能力不利时,取 1.4(当楼面活荷载大于 4.0 kN/m^2 时,取 1.3);有利时,取为 0。

ψ_{ci} ——第 i 个可变荷载的组合值系数,可按荷载规范的规定采用。

ψ ——简化式中采用的荷载组合值系数,一般情况下可采用 0.9;当只有一个可变荷载时,取为 1.0。

f ——钢材或连接的强度设计值,对钢材为屈服点(f_y)除以抗力分项系数 γ_R 的商。如 Q235 钢抗拉强度设计值 $f=f_y/1.087$;对于端面承压和连接则为极限强度(f_u)除以抗力分项系数 γ_{Ru} 即 $f=f_u/\gamma_{Ru}=f_u/1.538$ 。

式(1-12)和(1-13)中,除第一个可变荷载的组合值系数 $\psi_{c1}=1.0$ 的楼盖(例如仪器车间仓库、金工车间、轮胎厂准备车间、粮食加工车间等的楼盖)或屋盖(高炉附近易存在屋面积灰的屋盖),由式(1-13)控制设计取 $\gamma_G=1.35$ 外,其他只有大型混凝土屋面板的重型屋盖以及很特殊情况才有可能由式(1-13)控制设计。

② 偶然组合

对于偶然组合,极限状态设计表达式宜按下列原则确定:偶然作用的代表值不乘分项系数;与偶然作用同时出现的可变荷载,应根据观测资料和工程经验采用适当的代表值,具体的设计表达式及各种系数,应符合专门规范的规定。

(2) 正常使用极限状态表达式

对于正常使用极限状态,按建筑结构可靠度设计统一标准的规定要求分别采用荷载的标准组合、频遇组合和准永久组合进行设计,并使变形等设计不超过相应的规定限值。

钢结构只考虑荷载的标准组合,其设计式为:

$$v_{GK} + v_{Q1K} + \sum_{i=2}^n (\psi_{ci} v_{QiK}) \leq [v] \quad (1-15)$$

式中 v_{GK} ——永久荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值;

v_{Q1K} ——起控制作用的第一个可变荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值(该值使计算结果为最大);

v_{QiK} ——其他第 i 个可变荷载标准值在结构或结构构件中产生的变形值;

$[v]$ ——结构或结构构件的容许变形值。

1.3.2.2 结构内力的分析方法

1. 一阶弹性分析

建筑结构的内力一般按结构静力学的方法进行一阶弹性分析(first order elastic analysis)求得。分析时力的平衡条件按变形前的结构杆件轴线建立,即不考虑结构变形对内力