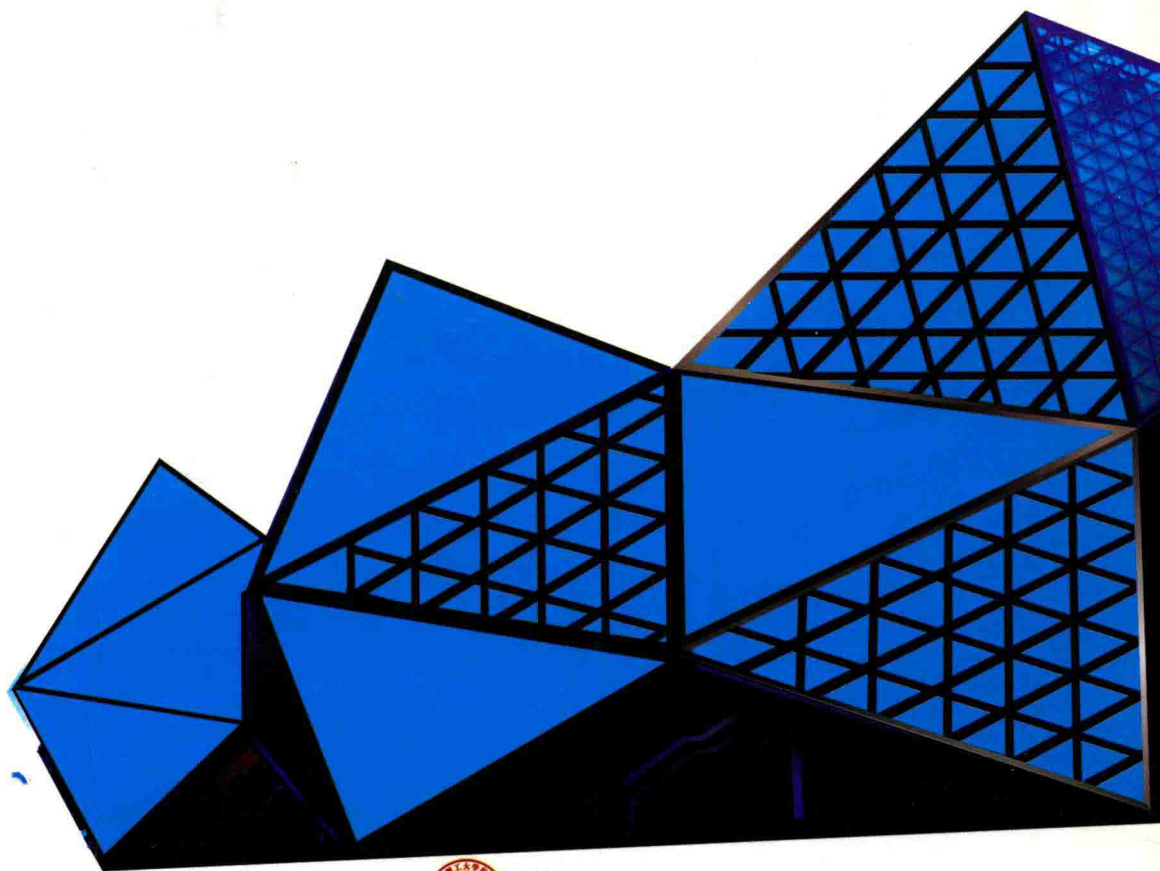


普通高等教育土建类“十二五”规划教材

钢结构设计原理

GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

李凤臣 主编



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

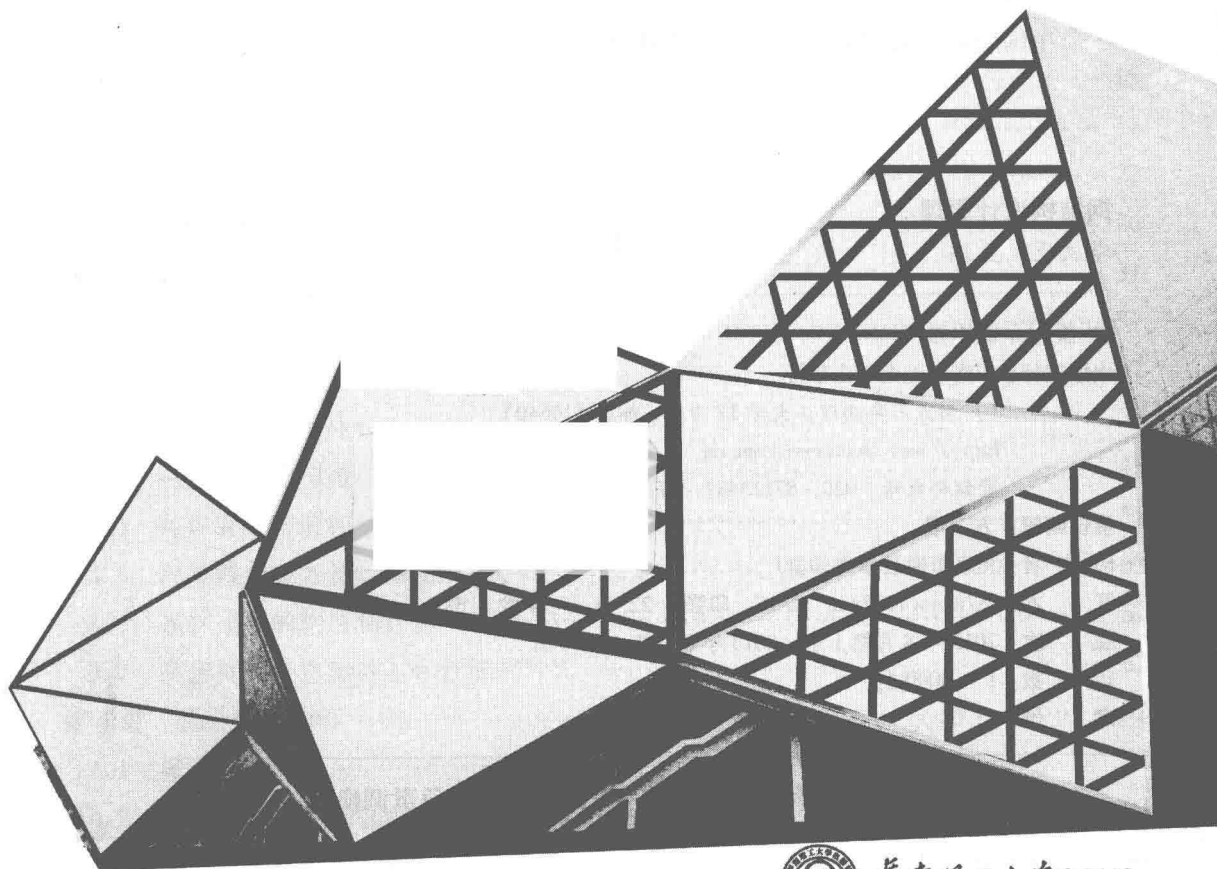
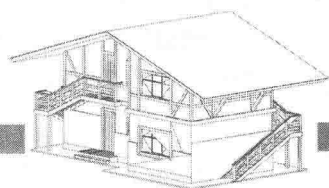
普通高等教育土建类“十二五”规划教材

钢结构设计原理

主 编 李凤臣

副主编 于海丰 张振宁 王 瑾

参 编 张丽娜 杨 鸥



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

·广州·

内 容 简 介

本书是为适应土木工程及相关专业“钢结构设计原理”课程的教学而编写的。本书共分六章,内容依次为:绪论、钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件。本书除了阐述钢结构基本原理及设计的基本内容外,还精选了贴近现实的典型例题,并对例题进行了详细解答。同时,根据教学的需要,设计了课后习题。书后编排了“附录”,供学生学习参考。

本书既可以作为普通高等院校土木工程本科专业及高等职业技术相关专业的基础课教材,也可作为注册结构工程师复习考试用书及钢结构技术工作者和土建施工人员的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计原理/李凤臣主编. —广州:华南理工大学出版社, 2013. 8

(普通高等教育土建类“十二五”规划教材)

ISBN 978 - 7 - 5623 - 4012 - 6

I. ①钢… II. ①李… III. ①钢结构-结构设计-高等学校-教材 IV. ①TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 176503 号

钢结构设计原理

李凤臣 主编

出 版 人: 韩中伟

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

http://www.scutpress.com.cn E-mail:scutc13@scut.edu.cn

营销部电话: 020-87113487 87111048 (传真)

责任编辑: 方 琅

印 刷 者: 北京市通县华龙印刷厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 22.75 字数: 582 千

版 次: 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000 册

定 价: 45.00 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

目 录

第1章 绪论	1
1.1 钢结构发展简史	1
1.2 钢结构的特点及应用	2
1.3 钢结构的设计方法	5
1.4 有关钢结构的规范、规程及标准简介	10
1.5 钢结构的新发展	11
1.6 钢结构课程的任务、特点及学习方法	13
第2章 钢结构的材料	15
2.1 概述	15
2.2 钢材的生产	15
2.3 钢材的主要性能	17
2.4 各种因素对钢材性能的影响	22
2.5 钢材的疲劳	26
2.6 建筑用钢的种类、规格及选用	31
第3章 钢结构的连接	37
3.1 钢结构连接概述	37
3.2 焊接连接的特性	38
3.3 对接焊缝的构造和计算	45
3.4 角焊缝的构造和计算	51
3.5 焊接残余应力和焊接变形	63
3.6 螺栓连接的构造和计算	67
3.7 高强度螺栓连接的工作性能和计算	82
第4章 轴心受力构件	92
4.1 概述	92
4.2 轴心受力构件的强度	93
4.3 轴心受力构件的刚度	97

4.4 实腹式轴心受压构件的整体稳定	99
4.5 实腹式轴心受压构件的局部稳定	113
4.6 实腹式轴心受压构件的截面设计	117
4.7 格构式轴心受压构件	120
第5章 受弯构件	133
5.1 受弯构件的分类和梁格布置	133
5.2 受弯构件的强度和刚度	137
5.3 受弯构件的整体稳定	145
5.4 弯扭构件强度及整体稳定	156
5.5 受弯构件的局部稳定	162
5.6 考虑腹板屈曲后强度的梁的设计	177
5.7 受弯构件的设计	182
5.8 梁的拼接、连接和支座	217
第6章 拉弯和压弯构件	224
6.1 概述	224
6.2 拉弯和压弯构件的强度	225
6.3 实腹式压弯构件的整体稳定	231
6.4 实腹式压弯构件的局部稳定	240
6.5 压弯构件的计算长度	244
6.6 实腹式压弯构件的截面设计	249
6.7 格构式压弯构件的计算	251
附录	259
附录1 钢材和连接的强度设计值	259
附录2 结构或构件的变形容许值	265
附录3 简支梁、悬臂梁及框架梁的弹性屈曲临界弯矩	269
附录4 轴心受压构件的稳定系数	273
附录5 各种截面回转半径的近似值	278
附录6 柱的计算长度系数	279
附录7 疲劳计算的构件和连接分类	291
附录8 常用型钢规格及截面特性	298
附录9 锚栓和螺栓规格	348
附录10 型钢螺栓线距表	351
附录11 钢材的化学成分和力学性能	354

目 录

第1章 绪论	1
1.1 钢结构发展简史	1
1.2 钢结构的特点及应用	2
1.3 钢结构的设计方法	5
1.4 有关钢结构的规范、规程及标准简介	10
1.5 钢结构的新发展	11
1.6 钢结构课程的任务、特点及学习方法	13
第2章 钢结构的材料	15
2.1 概述	15
2.2 钢材的生产	15
2.3 钢材的主要性能	17
2.4 各种因素对钢材性能的影响	22
2.5 钢材的疲劳	26
2.6 建筑用钢的种类、规格及选用	31
第3章 钢结构的连接	37
3.1 钢结构连接概述	37
3.2 焊接连接的特性	38
3.3 对接焊缝的构造和计算	45
3.4 角焊缝的构造和计算	51
3.5 焊接残余应力和焊接变形	63
3.6 螺栓连接的构造和计算	67
3.7 高强度螺栓连接的工作性能和计算	82
第4章 轴心受力构件	92
4.1 概述	92
4.2 轴心受力构件的强度	93
4.3 轴心受力构件的刚度	97

4.4 实腹式轴心受压构件的整体稳定	99
4.5 实腹式轴心受压构件的局部稳定	113
4.6 实腹式轴心受压构件的截面设计	117
4.7 格构式轴心受压构件	120
第5章 受弯构件	133
5.1 受弯构件的分类和梁格布置	133
5.2 受弯构件的强度和刚度	137
5.3 受弯构件的整体稳定	145
5.4 弯扭构件强度及整体稳定	156
5.5 受弯构件的局部稳定	162
5.6 考虑腹板屈曲后强度的梁的设计	177
5.7 受弯构件的设计	182
5.8 梁的拼接、连接和支座	217
第6章 拉弯和压弯构件	224
6.1 概述	224
6.2 拉弯和压弯构件的强度	225
6.3 实腹式压弯构件的整体稳定	231
6.4 实腹式压弯构件的局部稳定	240
6.5 压弯构件的计算长度	244
6.6 实腹式压弯构件的截面设计	249
6.7 格构式压弯构件的计算	251
附录	259
附录1 钢材和连接的强度设计值	259
附录2 结构或构件的变形容许值	265
附录3 简支梁、悬臂梁及框架梁的弹性屈曲临界弯矩	269
附录4 轴心受压构件的稳定系数	273
附录5 各种截面回转半径的近似值	278
附录6 柱的计算长度系数	279
附录7 疲劳计算的构件和连接分类	291
附录8 常用型钢规格及截面特性	298
附录9 锚栓和螺栓规格	348
附录10 型钢螺栓线距表	351
附录11 钢材的化学成分和力学性能	354

(6) 钢材耐热但不耐火。钢材长期经受 100°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°C 时, 会出现蓝脆现象; 当温度达 600°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, 它的维护费用比砖石和钢筋混凝土结构高。不过在没有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 ~ 图 1.2.7)。



图 1.2.1 澳门东亚运动会体育馆



图 1.2.2 上海环球金融中心

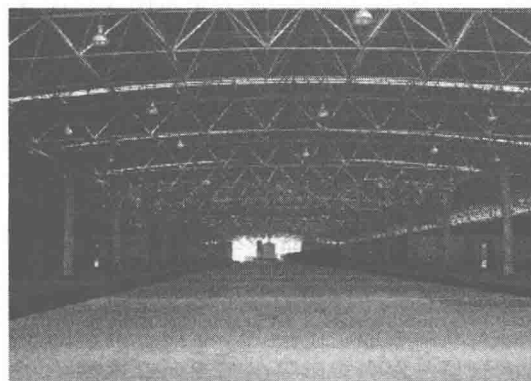


图 1.2.3 钢结构厂房

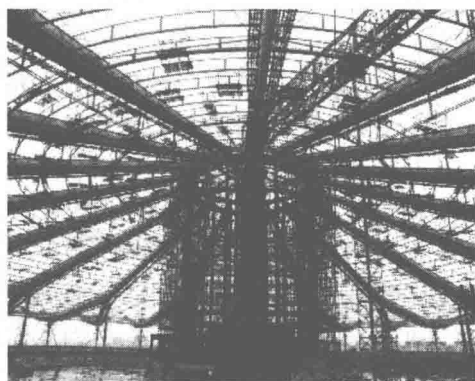


图 1.2.4 上海南站钢结构圆屋顶(D265m)

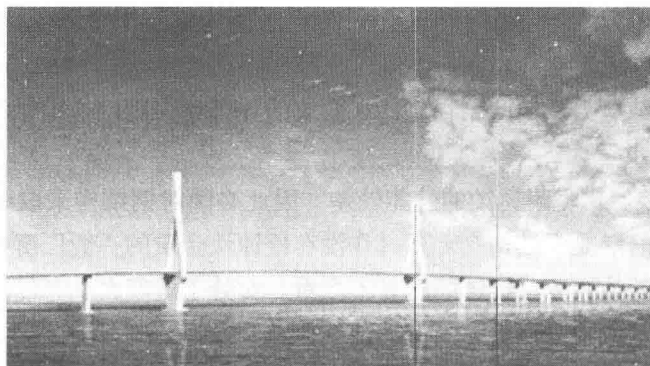


图 1.2.5 东海大桥



图 1.2.6 巴黎铁塔



图 1.2.7 立式油罐

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。钢材强度高结构质量轻的优势正好适用于大跨结构，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。

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. 高耸结构和高层建筑

高耸结构包括塔架和桅杆结构。如高压输电线路的塔架、广播和电视发射用的塔架和桅杆等。上海的东方明珠电视塔高度达 468m; 1977 年建成的北京环境气象塔高 325m, 是五层拉线的桅杆结构。高层建筑的骨架,也是钢结构应用范围的一个方面,目前国内最高的是上海环球金融中心,高度为 492 m。

5. 可拆卸的结构

钢结构不仅质量轻,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。

6. 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。

7. 轻型钢结构

钢结构质量轻不仅对大跨结构有利,对屋面活荷载特别小的小跨结构也有优越性。因为当屋面活荷载特别小时,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。

8. 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

结构设计必须足够可靠、经济合理。可靠是指结构必须满足下列各项功能要求:

- (1)能承受在正常施工和正常使用时可能出现的各种作用;
- (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能;
- (3)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。

上述4项功能可以概括为结构应具有安全性、适用性、耐久性,或统称为结构的可靠性。用什么指标来衡量结构的可靠性是结构设计方法的重要课题。

最早我国钢结构采用容许应力设计法。其设计准则是:结构构件由标准荷载按弹性方法计算的应力 σ ,不得超过规定的材料容许应力 $[\sigma]$ 。对于钢结构, $[\sigma]$ 取钢结构屈服点 f_y 除以一个大于1的安全系数 K 。这种方法形式简单,应用方便。但是对于不同结构类

型、不同荷载情况，均采用一个笼统单一并且是按经验确定的安全系数 K ，来考虑各种可能发生的不利因素，以保证结构可靠，显然是不够合理的。

实际上，影响结构可靠性的各种因素存在着不确定性。例如，结构所承受的各种作用（荷载、温度变化、基础沉降、地震等）是变化的，决定结构承载力的材料强度、截面尺寸等也是变化的，它们的计算取值常常与结构实际情况有一定出入。此外计算模型不完善，制造安装质量有差异等，这些因素都具有随机性。因此，容许应力设计法采用单一的安全系数 K 来衡量结构的可靠性是不科学的，较为科学的方法是近年采用的概率分析方法。

多年来，在用概率分析来评价结构可靠性的研究方面，已经做了大量的工作。随着这项研究的逐步深入，我国的钢结构规范也在不断改进。从最初 1954 年采用容许应力设计法，到 1957 年改为多系数极限状态设计法，然后到 1974 年又改为多系数分析、单一安全系数（容许应力）表达的极限状态设计法，直到 1988 年颁布的 GBJ 17—1988《钢结构设计规范》采用了以概率理论为基础用分项系数表达的极限状态设计法。后者虽然仍是一种近似概率分析法，但是，它和前述 1957 年和 1974 年采用的极限状态设计法，在概率分析方面又有了很大的发展。我国现行规范是对 1988 年的规范进行修订后于 2003 年颁布的 GB 50017—2003《钢结构设计规范》，它仍旧采用以概率理论为基础、用分项系数表达的极限状态设计法。下面简单介绍现行规范的设计方法。

GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》（以下简称《统一标准》）规定：结构在规定时间内（指设计基准期，一般建筑结构取 50 年），在规定条件（正常设计、正常施工、正常使用、正常维护）下，完成预定功能的概率，称为结构的可靠度，或称为可靠概率 p_s 。反之，结构不能完成预定功能的概率就称为失效概率 p_f 。显然 $p_s + p_f = 1$ ， p_s 和 p_f 均可用来度量结构的可靠性，但习惯上常常是控制结构的失效概率小到一定数值来保证结构的可靠性。

《统一标准》还规定，结构的可靠度应采用以概率理论为基础的极限状态设计方法分析确定。通常情况下，结构所处的状态可以用结构所受作用（荷载、温度变化、基础沉降、地震等）产生的效应（称为作用效应 S ），和结构的抗力 R 之间的关系来描述，即

当结构处于可靠状态时， $R > S$ 或 $Z = R - S > 0$ ；

当结构处于失效状态时， $R < S$ 或 $Z = R - S < 0$ ；

当结构处于极限状态时， $R = S$ 或 $Z = R - S = 0$ 。

由于多数结构承受的作用主要是荷载，本节以下将按承受荷载的结构进行讨论。

从上述关系可以看出，从函数 Z 可以判断结构所处的状态，因此 Z 称为结构的功能函数或状态函数。 $Z = R - S = 0$ 是结构的极限状态方程。失效概率 p_f 就是 $Z = R - S < 0$ 这一事件的概率，即

$$p_f = P(Z = R - S < 0) \quad (1.3.1)$$

设 S 、 R 这两个随机变量相互独立，且均为正态分布，根据概率理论， Z 也将是正态分布的随机变量。如图 1.3.1 所示为 Z 的概率密

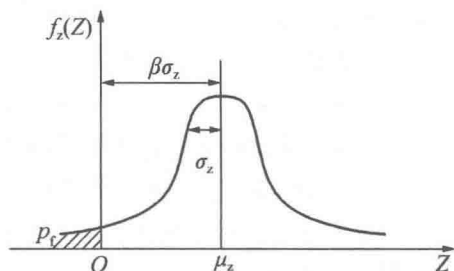


图 1.3.1 概率密度函数 $f_z(Z)$

度函数 $f_z(Z)$ 。图中阴影部分的面积即可代表失效概率 p_f 的大小， μ_z 是平均值， σ_z 是标准差，如取 $\mu_z = \beta\sigma_z$ ，即 $\beta = \mu_z/\sigma_z$ 。对于正态分布函数， p_f 和 β 有一一对应关系，如表1.3.1所示。已知 β 即可确定 p_f ， β 值愈大， p_f 值就愈小，结构愈可靠，故 β 值称为结构可靠指标。实际计算中，以可靠指标 β 代替 p_f 来衡量结构的可靠性。这样只要已知随机变量 R 、 S 的平均值 μ_R 、 μ_S 及标准差 σ_R 、 σ_S ，则由概率理论可知： $\mu_z = \mu_R - \mu_S$ ， $\sigma_z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ 。由此得出 $\beta = \mu_z/\sigma_z = (\mu_R - \mu_S)/\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ 。

表 1.3.1 β 与 p_f 的对应关系

β	p_f	β	p_f
1.0	1.59×10^{-1}	3.0	1.35×10^{-3}
1.5	6.68×10^{-2}	3.5	2.33×10^{-4}
2.0	2.28×10^{-2}	4.0	3.17×10^{-5}
2.5	6.21×10^{-3}	4.5	3.40×10^{-6}

以上结论是按 R 、 S 为正态分布求得的。实际结构的各种作用效应 S 及抗力 R 多数都不是正态分布，对于这些非正态分布的随机变量，可以将它们转换成当量正态分布函数，然后按当量正态分布的平均值及标准差计算即可。

1.3.1 建筑结构的极限状态

《统一标准》规定，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，这种特定状态就称为该功能的极限状态。根据结构的安全性、适用性和耐久性功能要求，极限状态可分为以下两类。

1. 承载力极限状态

这种极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载力或不适于继续承载的最大塑性变形的情况。

当结构或结构构件出现下列状态之一时，即认为超过了承载力极限状态。

- (1)整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡(如倾覆等)；
- (2)结构构件或连接因材料强度被超过而破坏(包括疲劳破坏)，或因过度的塑性变形而不适于继续承载；
- (3)结构转变为机动体系；
- (4)结构或结构构件丧失稳定(如压屈等)；
- (5)地基丧失承载力而破坏(如失稳等)。

2. 正常使用极限状态

这种极限状态对应于结构和结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值的情况。

当结构或结构构件出现下列状态之一时，即认为超过了正常使用极限状态。

- (1)影响正常使用或外观的变形；
- (2)影响正常使用或耐久性能的局部损坏(包括裂缝)；

(3) 影响正常使用的振动;

(4) 影响正常使用的其他特定状态。

针对上述两种极限状态,对其失效概率 p_f 或可靠指标 β 合理取值,才认为能保证结构设计足够可靠和经济合理。由于 Z 是随机变量,要求失效概率 $p_f = 0$,即结构绝对安全是不可能的。同时,若 p_f 取值过小,结构可靠度虽然增加,但结构造价会增加,不经济。因此,合理取值应该是要求结构的失效概率 p_f 足够小,小到人们可以接受的程度即可。《统一标准》对承载力极限状态的 p_f 和 β 取值的规定如表 1.3.2 所示。表中数值是对按原有规范设计的现有各类结构进行反算求得其可靠度,然后加以综合调整确定的。这说明《统一标准》所规定的结构可靠度实际上是根据与原有规范的结构总体可靠度水平相近的原则确定的。

表 1.3.2 中所提到的安全等级,是根据结构破坏可能产生的后果(危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等)的严重性来划分的。一般情况下,重要的工业与民用建筑物(如影剧院、体育馆、高层建筑等)划为一级,一般的工业与民用建筑物划为二级,次要的建筑物则划为三级。

表 1.3.2 结构构件承载力极限状态设计时采用的可靠指标 β 值和失效概率 p_f 值

安全等级 破坏类型	一级		二级		三级	
	β	p_f	β	p_f	β	p_f
延性破坏	3.7	1.08×10^{-4}	3.2	6.87×10^{-4}	2.7	3.47×10^{-3}
脆性破坏	4.2	1.33×10^{-5}	3.7	1.08×10^{-4}	3.2	6.87×10^{-4}

由于结构脆性破坏要比延性破坏更危险,因此表 1.3.2 中脆性破坏的可靠指标 β ,要比延性破坏提高 0.5。另外,安全等级愈高的结构,其可靠指标 β 要求也愈高。

一般钢结构按安全等级为二级,构件按延性破坏考虑,取 $\beta = 3.2$ 。对于钢结构的连接,《统一标准》未作具体规定,考虑到钢结构的连接是以破坏强度作为极限状态, β 值应取得高一些,一般可取为 4.5。

对于正常使用极限状态,构件的可靠指标 β 根据其可逆程度宜取 0 ~ 1.5。

1.3.2 建筑钢结构设计

进行结构设计就是要保证实际结构的可靠指标 β 值等于或大于规定的限值(表 1.3.2)。但是直接计算 β 值十分麻烦,同时其中有些与设计有关的统计参数还不容易求得。为使计算简便,《统一标准》规定的设计方法是将对 β 值的控制等效地转化为以分项系数表达的设计表达式。建筑钢结构设计采用承载能力和正常使用两种极限状态下的分项系数表达式,它们分别是:

1.3.2.1 承载能力极限状态

承载能力极限状态按荷载效应的基本组合和偶然组合两种情况分别计算。其中基本组合应按下列两个设计表达式中最不利值计算。

$$\gamma_0(\gamma_c S_{G_k} + \gamma_{Q1} S_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Q_{ik}}) \leq R(\gamma_R, f_k, \alpha_k, \dots) \quad (1.3.2a)$$

$$\gamma_0(\gamma_G S_{G_k} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} \psi_{ci} S_{Q_{ik}}) \leq R(\gamma_R f_k, \alpha_k, \dots) \quad (1.3.2b)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数，安全等级为一级时， $\gamma_0 \geq 1.1$ ；二级时， $\gamma_0 \geq 1.0$ ；三级时， $\gamma_0 \geq 0.9$ ；

γ_G ——永久荷载分项系数，一般情况下，对式(1.3.2a)取 1.2，对式(1.3.2b)取 1.35，但是当永久荷载效应对承载能力有利时，不应大于 1.0；

γ_{Q_1} 、 γ_{Q_i} ——第一个和其第 i 个可变荷载的分项系数，一般情况下采用 1.4，但是当可变荷载效应对承载能力有利时，应取为 0。各项可变荷载中，在结构构件或连接中产生应力最大者为第一个可变荷载；

S_{G_k} ——永久荷载标准值的效应；

$S_{Q_{1k}}$ ——在基本组合中起控制作用的一个可变荷载标准值的效应；

$S_{Q_{ik}}$ ——第 i 个可变荷载标准值的效应；

ψ_{ci} ——第 i 个可变荷载的组合值系数，其值不应大于 1，按荷载规范的规定采用；

$R(\gamma_R, f_k, \alpha_k, \dots)$ ——结构构件的抗力函数；

f_k ——材料性能标准值；

γ_R ——材料抗力分项系数。钢结构设计中，对于 Q235 钢， $\gamma_R = 1.087$ ；对于 Q345、Q390 及 Q420 钢， $\gamma_R = 1.111$ ；

α_k ——几何参数的标准值。

对于一般排架、框架结构，式(1.3.2a)可采用下列简化极限状态设计表达式

$$\gamma_0(\gamma_G S_{G_k} + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} S_{Q_{ik}}) \leq R(\gamma_R f_k, \alpha_k, \dots) \quad (1.3.3)$$

式中， ψ 为简化设计表达式中采用的荷载组合系数，一般情况下取 $\psi = 0.9$ ；当只有一个可变荷载时取 $\psi = 1.0$ 。

直接承受动力荷载的结构，按式(1.3.2a)、式(1.3.2b)和式(1.3.3)计算时，还应按有关规定乘以动力系数。计算疲劳时，应采用标准荷载。

式(1.3.2a)、式(1.3.2b)和式(1.3.3)适用于荷载的基本组合情况。对于荷载的偶然组合，应按有关专门规范计算。

1.3.2.2 正常使用极限状态

对于正常使用极限状态，钢结构设计主要是控制变形和挠度，如梁的挠度、柱顶的水平位移、高层建筑层间相对水平位移等。按正常使用极限状态计算时，应根据不同情况按标准组合、频遇组合及准永久组合进行计算。计算时采用荷载标准值，不乘荷载分项系数，对于动力荷载也不乘动力系数。

按标准组合计算时设计表达式为

$$v = v_{G_k} + v_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} v_{Q_{ik}} \leq [v] \quad (1.3.4)$$

式中， v 代表挠度及变形， $[v]$ 为容许挠度或变形，其值按有关规范和使用要求确定。其余符号与式(1.3.2a)、式(1.3.2b)同。

按频遇组合和准永久组合计算的设计表达式可参见规范。

以上各式中所提到的永久荷载是指设计基准期(结构使用期)内，不随时间变化或其

变化与平均值相比很小的荷载。可变荷载是指设计基准期内其值随时间变化,且其变化与平均值相比较大的荷载。荷载标准值是指正常情况下可能出现的最大荷载值,按设计基准期内最大荷载的概率分布的某一分位值确定。结构如同时承受多个可变荷载作用,各个可变荷载同时达到各自最大值的可能性很小,因此用组合系数 ψ_0 进行折减。材料强度标准值 f_k 是材料强度概率分布0.05分位值(其含义是材料强度低于标准强度值的概率为5%)。

前面已经提到分项系数设计表达式是按规定的可靠指标 β 经等效转化得到的。在进行等效转化时,对各种荷载分项系数 γ_G 、 γ_Q 及材料抗力分项系数 γ_R 进行调整,使其按分项系数设计表达式设计出来的各种结构构件的实际 β 值与规定的 β 值在总体上误差最小,由此来确定各个分项系数值。以上各式中的分项系数值就是经过优化找出的最佳匹配值。

在分项系数设计表达式中虽然没有可靠指标 β ,但并不等于没按规定的可靠指标 β 设计,分项系数设计表达式的各种系数实质上起着可靠指标 β 的作用。因此,满足分项系数设计表达式即等效于结构可靠指标 β (或失效概率 p_f)达到或接近的预定要求。

1.4 有关钢结构的规范、规程及标准简介

建筑结构有关设计施工的规范、规程及标准等是技术性法律文件,是工程建设应遵守的原则。我国的建筑结构和施工有一套完整的规范体系,它们对工程建设的质量、效益起着重要的保证作用。随着我国基本建设事业的迅猛发展、建筑结构理论研究的不断深入和应用技术的不断进步,这套规范体系也在不断地改进和完善。每隔数年,这些规范、规程、标准会进行一次修订,或者有一些新的规范、规程、标准颁布实施。因此,从事建筑结构和施工的技术人员必须了解和掌握有关的现行规范、规程、标准等,以便在工作中准确执行和贯彻它们。本节列出一部分与钢结构有关的现行规范、规程、标准及其代号,并简要说明它们在我国建筑结构规范体系中的地位。

我国涉及钢结构的规范、规程、标准等从总体上可分为5个层次,属于第1层次的有:

- (1) GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》;
- (2) GBJ 83—1985《建筑结构设计通用符号、计量单位和基本术语》;
- (3) GBJ 105—1987《建筑结构设计制图标准》。

在第1层次中 GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》是最高层次的标准,它是制定下属各层次规范、规程等应遵守的原则。其主要内容已在1.3节中简要介绍。

属于第2层次的是 GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》。它依据第1层次的标准制定,并为第3层次的设计规范、规程等提供荷载代表值及其组合方式。

第3层次为各种结构设计规范,它们均依据第1层次的标准制定,并与上述荷载规范配套使用。属于第3层次的有:

- (1) GB 50017《钢结构设计规范》;
- (2) GB 50018《冷弯薄壁型钢结构设计规范》;
- (3) JGJ 7—1991《网架结构设计与施工规程》;
- (4) JGJ 99—1998《高层民用建筑钢结构技术规程》;
- (5) CECS 102: 2002《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》。

第4层次为与施工有关的并与相应设计规范、规程配套的规范、规程、标准。同样它们也是依据第1层次的标准制定,属于这一层次的有:

- (1) GB 50205《钢结构工程施工质量验收规范》;
- (2) GB 50221《钢结构工程质量检验评定标准》;
- (3) JGJ 81—1991《建筑钢结构焊接技术规程》;
- (4) JGJ 82—1991《钢结构高强螺栓连接的设计施工及验收规程》;
- (5) JGJ 78—1991《网架结构工程质量检验评定标准》;
- (6) JGJ 75.1—1991《螺栓球节点网架》;
- (7) JGJ 75.2—1991《焊接球节点网架》。

第5层次是与上述设计和施工规范、规程配套的钢材、焊条、型钢、钢板、紧固件等的标准。这些标准既是制定各种钢结构规范的依据,又是施工现场材料检验的标准。

其他还有与建筑抗震、防火、防腐有关的规范,它们分别是建筑抗震设防、防火设计及防腐设计和施工的依据。

按照适用范围,我国的工程建设标准可分为国家标准、行业标准、地方标准和企业标准;按执行效力,可分为强制性标准和推荐性标准。上述规范、规程、标准名称前面的内容是其代号,GB和GBJ表示国家标准,JGJ表示建设部制定的行业标准,CECS表示由工程建设标准化协会制定的工程建设推荐性标准。推荐性标准不具备强制性,当事人可自愿采用。上述除CECS外的其他规范、规程、标准均为强制性标准。

1.5 钢结构的新发展

随着人类社会在经济和科学技术方面的不断发展和进步,在钢结构领域也取得了不少新的进展。

1.5.1 结构用钢的新发展

国内外在高性能钢材的应用方面取得不少新进展,其中包括高强度高性能钢、低屈服点钢和耐火钢的开发和应用等。

我国2003年修订的《钢结构设计规范》中增列了性能优良的Q420钢,该钢材(15MnVN)已成功地应用在九江长江大桥的建设中。另外,我国冶金部门制订了行业标准YB 4104—2000《高层建筑结构用钢板》,该钢板是专门供高层建筑和其他重要建(构)筑物用来生产厚板焊接截面构件的,其性能与日本建筑结构用钢材相近,而且质量上还有所改进。我国有些企业正在试生产屈服点达到 100 N/mm^2 ($1\text{ N/mm}^2 = 1\text{ MPa}$)的低屈服点钢材,相当于日本的LY100钢,可用于抗震结构的耗能部件。有的企业正在开发耐火钢,该钢即使加热到 600°C 也能保持常温时 $2/3$ 以上的强度。

日本在1994年制定了新的建筑结构专用钢材规格,即JISG 3136—1994《建筑结构用轧制钢材标准》。该钢材的质量等级已不再按夏比(Charpy)冲击试验分类,而是按使用部位、提示有关需要分类。如SN400A(相当于我国的Q235A)只能使用在次要构件处于弹性范围的、原则上非焊接的构件或部位;SN400B及SN490B(接近于我国Q345强度等级)是能保证塑性变形和焊接性能的钢材,使用在抗震结构构件和部位中;SN400C及SN490C

具有非常好的抗层状撕裂性能, 主要使用在如箱型柱的外部板材等需要板厚方向性能(Z 向性能)的构件和部位中。SN B、SN C 类钢材均对屈服点的上限值做出了规定, 以防构件需塑性变形耗能的部位不能进入塑性屈服; 并对碳当量及磷、硫的上限予以严格限制。其中, SN C 类钢材对硫的含量提出了更严格的限制, 并规定生产厂家有义务进行超声探伤试验, 以确保板厚方向的性能。目前日本国内建筑用厚钢板的 70% 为 SN 钢材。日本已开发出 LY225 钢、LY100 钢等低屈服点钢和耐火钢(FR 钢)。美国和欧洲等也在高强度高性能钢材的研制和应用等方面做出了不少贡献。如美国生产的经调质处理的合金钢板 A514, 其屈服点达 690 N/mm^2 , 并可用于焊接生产。

相对来说, 我国钢材的种类和质量均不及工业发达国家。如何研制开发新型高效钢材是摆在我国冶金战线科技工作者面前的一项重要任务。

1.5.2 新型结构体系的应用和发展

近年来, 在全国各地修建了大量的大跨空间结构, 网架和网壳结构形式已在全国普及, 张弦桁架、悬挂结构也有很多应用实例; 直接焊接钢管结构、变截面轻钢门式刚架、金属拱形波纹屋盖等轻钢结构也已遍地开花; 钢结构的高层建筑在不少城市拔地而起; 适合我国国情的钢-混凝土组合结构和混合结构也有了广泛应用; 目前好多地方都在建造索膜结构的罩棚和建筑小品……可以毫不夸张地说, 我国已成了各种钢结构体系的展览馆和试验场。

各种不同的结构体系各有所长, 但生命力较强的结构体系均具有如下特点:

(1) 必须是几何不可变的(除悬索、薄膜等张拉结构)空间整体, 在各类作用的效应之下能保持稳定性、必要的承载力和刚度;

(2) 应使结构材料的强度得到充分的利用, 使自重趋于最低;

(3) 能利用材料的长处, 避免或克服其短处;

(4) 能使结构空间和建筑空间互相协调、统一;

(5) 能适合本国情况, 制作、安装简便, 综合效益好。

目前我国正在进行大规模的基本建设, 涉及许多大型复杂的钢结构工程, 如 2008 年奥运场馆工程。应选择先进合理的结构体系, 使其既能满足建筑艺术需要, 又能做到技术先进、经济合理、安全适用、质量优良。目前有一种为追求建筑造型新奇、怪异, 而不惜浪费钢材采用最笨重的结构形式的倾向, 这种倾向是不可取的。

1.5.3 设计方法的新发展

目前, 我国采用的概率极限状态设计法的特点是用根据各种不定性分析所得到的失效概率(或可靠指标)去度量结构的可靠性, 并使所计算的结构构件的可靠度达到预期的一致性和可比性。该方法还有待发展, 因为它计算的可靠度还只是构件或某一截面的可靠度而不是结构体系的可靠度。此外, 该方法也不适合构件或连接的疲劳验算。

目前, 大多数国家(包括我国)采用计算长度法计算钢结构的稳定问题。该方法的步骤是: 采用一阶分析求解结构内力, 按各种荷载组合求出各杆件的最不利内力, 按第一类弹性稳定问题建立结构达临界状态时的特征方程, 确定各压杆的计算长度; 将各杆件隔离出来, 按单独的压弯构件进行稳定承载力验算, 验算中考虑了弹塑性、残余应力和几何缺