

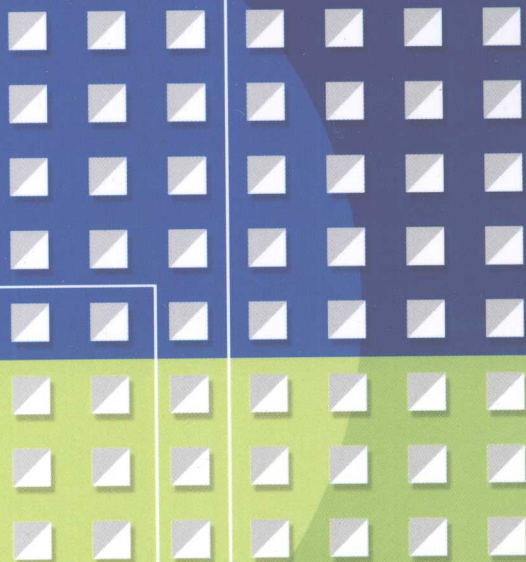


高等学校“十一五”精品规划教材

钢 结 构

主 编 赵占彪 段绪胜

GAANG JIE GOU



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校“十一五”精品规划教材

钢 结 构

主 编 赵占彪 段绪胜

副主编 高宗章 刘丽霞 张济梅

主 审 申向东



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书根据教育部大土木类钢结构课程（基本原理）教学基本要求编写。主要内容有：钢结构的特点、应用、发展和计算方法；钢结构的材料；钢结构的连接（焊接、螺栓和铆接连接），轴心受力构件，受弯构件以及拉弯和压弯构件和钢屋架设计等基本内容。章后附有思考题与习题，书末有附录。本书在基本概念、基本理论的论述上准确严谨，以现行《钢结构设计规范》（GB50017—2003）、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》（GB50018—2002）为依据而编写的。内容注重工程实际，力求反映钢结构的最新发展。

本书是普通高等学校本科土木工程专业和建筑工程专业钢结构课程的教材，也可供其他专业和广大工程技术人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

钢结构/赵占彪，段绪胜主编. —北京：中国水利水电出版社，2009
高等学校“十一五”精品规划教材
ISBN 978 - 7 - 5084 - 6251 - 6

I. 钢… II. ①赵…②段… III. 钢结构-高等学校-教材 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 010763 号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 钢结构
作 者	主编 赵占彪 段绪胜
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 20 印张 474 千字 1 插页
版 次	2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	36.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

为了更好地适应新世纪普通高等学校大土木类专业对钢结构课程的教学需要,按照教育部大土木类专业教学指导委员会制定的钢结构课程(设计基本原理)教学基本要求,我们在综合各普通高等学校土木工程专业的教学特点,总结多年来教学经验的基础上编写了这本《钢结构》。本书为高等学校“十一五”精品规划教材之一。

本书共7章,包括:绪论(钢结构的特点、应用、发展和设计方法等);钢结构的材料(钢结构对材料的要求,钢材的主要性能和破坏形式以及钢材的种类和规格);钢结构的连接(钢结构的连接方法,焊缝形式,直角角焊缝,对接焊缝的构造与计算,普通螺栓和高强度螺栓连接的计算);钢结构基本构件(轴心受力构件,受弯构件,拉弯压弯构件)的计算方法、设计步骤和工作性能;钢屋架设计和附录等基本内容。这些内容均符合土木工程专业技术基础课的要求。

在编写过程中紧紧围绕现行的《钢结构设计规范》(GB50017—2003)、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB50018—2002)而编写的。

参加本书编写的人员有:内蒙古农业大学赵占彪(第1章、第2章和附录),河北农业大学高宗章(第3章),王蕾、李艳霞(绘制第3章的图),甘肃农业大学刘丽霞(第4章),山东农业大学段绪胜(第5章),云南农业大学蒋正跃(第6章),呼伦贝尔学院张济梅(第7章)。全书由赵占彪、段绪胜担任主编,由内蒙古农业大学申向东教授担任主审,由赵占彪统稿。

由于编者水平有限,本书疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2009年4月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 钢结构课程的性质和任务	1
1.2 钢结构的特点	1
1.3 钢结构的设计方法	3
1.4 钢结构的分类和应用	9
1.5 钢结构的发展	13
思考题与习题	14
第2章 钢结构的材料	15
2.1 钢结构对材料的要求	15
2.2 钢材的主要力学性能	16
2.3 钢材的可焊性、抗蚀性和防腐蚀措施	20
2.4 影响钢材力学性能的因素	21
2.5 钢的种类和钢材规格	25
思考题与习题	29
第3章 钢结构的连接	30
3.1 钢结构的连接方法	30
3.2 焊接方法和焊缝连接的形式	31
3.3 角焊缝的构造与计算	36
3.4 对接焊缝的构造与计算	52
3.5 螺栓连接	57
3.6 普通螺栓连接的工作性能和计算	59
3.7 高强度螺栓连接的工作性能和计算	71
思考题与习题	78
第4章 轴心受力构件	81
4.1 轴心受力构件的应用和截面形式	81
4.2 轴心受力构件的强度和刚度	82
4.3 轴心受压构件的整体稳定	85
4.4 轴心受压构件的局部稳定	94

4.5 实腹式轴心受压构件的截面设计	96
4.6 格构式轴心受压构件	103
4.7 柱脚	114
思考题与习题	119
第5章 受弯构件	121
5.1 受弯构件的应用及类型	121
5.2 受弯构件的强度和刚度计算	122
5.3 梁的整体稳定性	128
5.4 焊接组合钢梁的局部稳定性	134
5.5 梁腹板加劲肋的设计	144
5.6 工字形组合梁腹板考虑屈曲后强度的设计	151
5.7 型钢梁的截面设计	160
5.8 实腹式檩条的设计	163
5.9 组合钢梁的截面设计	169
5.10 组合钢梁截面沿跨度方向的改变	175
5.11 焊接组合钢梁的翼缘板与腹板的连接	180
5.12 梁的拼接、次梁与主梁连接和梁的支座	181
5.13 吊车梁	193
思考题与习题	209
第6章 拉弯压弯构件	211
6.1 拉弯、压弯构件的应用和截面形式	211
6.2 拉弯、压弯构件的强度和刚度	212
6.3 实腹式压弯构件的整体稳定	216
6.4 实腹式压弯构件的局部稳定	222
6.5 压弯构件的计算长度	224
6.6 实腹式压弯构件的截面设计	230
6.7 格构式压弯构件的设计	234
思考题与习题	237
第7章 单层厂房结构	239
7.1 厂房结构的形式和布置	239
7.2 屋盖结构	248
课程设计任务书	282
附录	284
附录1 钢材和连接的强度设计值	284
附录2 受弯构件的容许挠度	286
附录3 梁的整体稳定系数	287

附录 4 轴心受压构件的整体稳定系数.....	290
附录 5 柱的计算长度系数	292
附录 6 型钢表	295
附录 7 螺栓和锚栓规格	309
参考文献	311

第 1 章 绪 论

1.1 钢结构课程的性质和任务

钢结构是把各种型钢或钢板通过焊接 (welding) 或螺栓 (strength bolts) 连接等方法组成基本构件, 根据使用要求按照一定的规律制造而成的工程结构。钢结构在工程建设中应用较广, 如高层建筑、大跨度空间结构、轻钢结构、工业厂房; 道路工程中的钢桥; 水工建筑中的钢闸门、加油站的钢顶棚等。钢结构是结构工程中按使用材料划分出来的一门专业课程。

本课程的性质是在建筑材料、理论力学、材料力学、结构力学及工程实践知识的基础上, 按照工程结构使用的目的, 研究与计算在预计各种荷载的作用下, 在预定的使用期间内, 不致使结构失效的一门学科。因此, 在进行钢结构设计时, 必须考虑具体的材料性能, 综合运用上述的力学知识, 研究结构在使用环境中各种荷载作用下的工作状况, 才能设计出既安全适用, 又经济合理的结构。

本课程的任务是论述常用结构钢材的工作性能、钢结构连接方式的设计、钢结构各类基本构件的设计原理和方法。通过对本课程的学习, 具备钢结构的基本知识, 掌握正确的设计原理和方法, 能够对构件的连接、轴心受力构件、受弯构件、偏心受力构件等基本构件进行设计。并为设计其他类型的钢结构打下基础。

1.2 钢结构的特点

钢结构与钢筋混凝土结构、木质结构和砖石结构以及混合结构相比具有如下特点。

1.2.1 钢材的强度高、钢结构自重轻

虽然钢的容重很大 ($\gamma=76.93\text{kN/m}^3$ 或 $\gamma=7.85\text{t/m}^3$), 但由于强度高, 构件所需的截面面积较小, 故做成的结构比较轻。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 $18\times 10^{-4}/\text{m}$ 。同跨度同荷载, 钢屋架的重量约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 $1/10$ 。

钢结构自重轻, 可减轻基础负荷, 降低基础造价, 同时便于运输和吊装。特别适用于大跨度和高耸结构, 也更适用于活动结构, 以减少驱动力, 如水利工程中的钢闸门。

1.2.2 钢结构连接、装配速度快，工期短

大型钢结构建筑的构件一般由工厂加工制作，加工精度较高，单件质量轻，易起吊，施工组装速度快；小量钢结构和轻型钢结构可以在现场下料制作，用螺栓或焊接安装迅速，施工工期短。部件便于更换，并且易于加固、改建和拆除。

1.2.3 钢材的塑性、韧性好

强度高、塑性和韧性好是钢材的特有性能，也是钢结构的主要特性，符合轻型结构和现代工业化建筑的发展趋势。强度高，适用于大跨度、高度高和承载重的建筑结构，如工业厂房、桥梁等大型重型建筑物。塑性好，结构在超载后发生的变形易于被发现，不会突然断裂。有一点微小的变形，受力重新分配，使应力变化趋于平缓。韧性好，抗震性和抗冲击性较高，再加上自重轻，引起的振动惯性也小，适用于在动荷载作用下工作，抗地震能力较强。

1.2.4 材料均质，各向力学性能相同

钢材的内部结构组织均匀，物理力学性质接近各向同性，弹性模量较大（ $E=206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ），具有较大的抵抗变形的能力，是理想的弹性—塑性体。符合力学计算中的基本假设，钢结构的实际受力情况与计算结果比较符合工程实际，所以计算结果比较可靠，结构的安全程度比较明确。

1.2.5 钢结构的密封性能较好

钢材通过焊接后，焊缝密实，水密性和气密性较好。可用钢板做成管道、油箱、水箱和气罐等。

1.2.6 钢结构耐腐蚀性差

钢材很容易锈蚀，为了防止生锈，通常采用涂油漆或镀锌措施。特别是薄壁构件或长期处于潮湿条件下的钢结构更要特别注意，油漆质量和涂层厚度要符合要求。尤其是水工钢结构，一定要定期检查维护。处于较强腐蚀性介质内的建筑物不易采用钢结构。

1.2.7 钢结构的耐火性差

钢材在 200°C 以内屈服点和弹性模量下降较小，强度变化不大。当温度高于 300°C 时，不仅强度明显下降，而且出现徐变现象。当温度达到 500°C 以上时，钢材进入塑性状态，失去承载能力。因此，设计规定钢材表面温度超过 150°C 后要加以隔热保护措施。如在构件外面包石棉、混凝土等。对有防火要求的结构，更需按相应规范采取隔热保护措施。

1.2.8 钢材在低温下显脆性

钢结构在极端低温下显现脆性，在没有预兆的情况下可能发生脆性断裂，这一点要特别注意。

1.3 钢结构的设计方法

1.3.1 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:

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

$$[\sigma] = f_k / K$$

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;

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性,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(degree of reliability)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与概率联系起来,故称为半概率法。1957年我国的钢结构采用苏联的钢结构设计规范,1974年我国修订的《钢结构设计规范》(TJ17—74)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， $\alpha_f = \alpha_Q = 1.645$ ；当保证率为 97.7% 时， $\alpha_f = \alpha_Q = 2$ ；当保证率为 99.9% 时， $\alpha_f = \alpha_Q = 3$ 。

半概率的设计表达式仍可采用容许应力法的设计式，TJ17—74 中的设计式也是这样决定的；但安全系数是多系数分析决定的，如下式：

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

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 20 世纪 60 年代末期有了重大突破，即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和数理统计为基础的定量分析阶段，这将使概率设计法应用于规范成为可能。

一次二阶矩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础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。

1.3.2 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如下函数关系：

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

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:

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

式 (1.6) 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所闻。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 表示结构的可靠性,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 所示 Z 的概率密度 $f_z(Z)$ 曲线,图中纵坐标处 $Z=0$,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

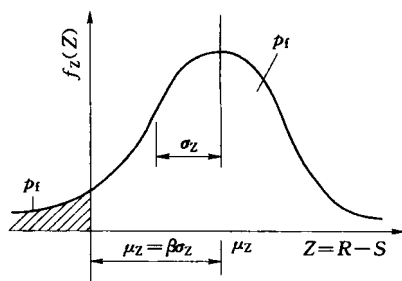


图 1.1 Z 的概率密度 $f_z(Z)$ 曲线

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。20世纪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 有标准差 σ_Z 来度量, 得值 β , 则有:

$$\mu_Z = \beta \sigma_Z \quad (1.12)$$

$$\text{由此得:} \quad \beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (1.13)$$

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 减少; β 减少, 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 的对应关系见表 1.1。

表 1.1 正态分布时 β 与 p_f 的对应值

可靠指标 β	4.2	3.7	3.2	2.7	2.5
失效概率 p_f	1.3×10^{-5}	1.1×10^{-4}	6.9×10^{-4}	3.5×10^{-3}	6.2×10^{-3}

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:

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

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \text{ (设 } R \text{ 和 } S \text{ 是独立的)} \quad (1.17)$$

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:

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

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

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

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 值起影响的还有变异系数 δ_R 和 δ_S 。当 K_0 随 δ_R

和 δ_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

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

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

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

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。《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001) 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不同的 β 值。钢结构的各种构件, 按《钢结构设计规范》(GB50017—2003) 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。

1.3.3 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, 而是以指标 β 为基础用概率设计法求出, 也就是将式 (1.23) 或式 (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:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_R &= R_K/R^* \\ \gamma_G &= S_G^*/S_{GK} \\ \gamma_Q &= S_Q^*/S_{QK} \end{aligned} \right\} \quad (1.28)$$

由式(1.23)可知, R^* 、 S_G^* 、 S_Q^* 不仅与可靠指标 β 有关, 而且与各基本变量的统计参数(平均值、标准值)有关。因此, 对每一种构件, 在给定 β 的情况下, γ 值将随荷载效应比值 $\rho = S_{QK}/S_{GK}$ 变动而为一系列的值, 这对于设计显然不方便; 如分别取 γ_G 、 γ_Q 为定值, γ_R 亦可按各种构件取不同的定值则所设计的结构构件的实际可靠指标就不可能与给定的可靠指标完全一致。为此, 可用优化法求最佳的分项系数值, 使两者 β 的差值最小, 并考虑工程经验确定。

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001) 经过计算和分析, 规定出在一般情况下荷载分项系数:

$$\gamma_G = 1.2; \quad \gamma_Q = 1.4$$

当永久荷载效应与可变荷载效应异号时, 这时永久荷载对设计是有利的(如屋盖当风的作用而掀起时), 应取:

$$\gamma_G = 1.0; \quad \gamma_Q = 1.4$$

在荷载分项系数统一规定的条件下, 现行钢结构设计规范对钢结构构件抗力分项系数进行分析, 使所设计的结构构件的实际 β 值与预期的 β 值差值甚小, 并结合工程经验规定出 Q235 钢的 $\gamma_R = 1.087$; 对 Q345、Q390 和 Q420 钢的 $\gamma_R = 1.111$ 。

钢结构设计用应力表达, 采用钢结构强度设计值, 所谓“强度设计值”(用 f 表示), 是钢的屈服点 (f_y) 除以抗力分项系数 γ_R 的商, 如 Q235 钢抗拉强度设计值为 $f = f_y/1.087$; 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 $f = f_u/\gamma_{Ru} = f_u/1.538$ 。

因此, 对于承载能力极限状态荷载效应的基本组合按下列设计表达式中最不利值确定:

可变荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0(\gamma_G \sigma_{GK} + \gamma_{Q1} \sigma_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} \sigma_{QiK}) \leq f \quad (1.29)$$

永久荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0(\gamma_G \sigma_{GK} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} \sigma_{QiK}) \leq f \quad (1.30)$$

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;

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 (1.30) 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、滑移和漂浮时取 0.9;

γ_{Q1} 、 γ_{Qi} ——第 1 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 4.0kN/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。

式 (1.29) 和式 (1.30), 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 (高炉附近的屋面积灰), 必然由式 (1.30) 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 (1.30) 控制设计。

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:

$$\gamma_G(\gamma_G\sigma_{GK} + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi}\sigma_{QiK}) \leq f \quad (1.31)$$

式中 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 1 个可变荷载时, 取为 1.0。

由永久荷载效应控制的组合, 仍按式 (1.30) 进行计算。

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。

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:

$$v_{GK} + v_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} v_{QiK} \leq [v] \quad (1.32)$$

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。

1.4 钢结构的分类和应用

过去由于受钢材生产量的限制, 钢结构应用范围不大, 近年来我国钢产量有了很大的发展, 截止到 2008 年底我国钢产量达 5.01 亿 t, 连续多年举世界第一。加之钢结构形式的改进, 钢结构的应用也有了很大的发展, 如: 西气东输、西电东输、南水北调、青藏铁路、2008 年北京奥运会场馆、2010 年上海世博会园区等重大工程建设, 其发展潜力和空间也很大, 钢结构行业面临良好的发展机遇。

钢结构制造工艺严格, 具备批量生产和高精度的特点, 是目前工业化程度最高的一种

结构。加之钢结构具有自重轻、强度高、塑性韧性好和施工速度快等优点,应用范围较广。

按不同的标准,钢结构有不同的分类方法,下面仅按其应用领域和结构体系进行分类说明。

1.4.1 按应用领域分类

(1) 民用建筑钢结构。建设部于1997年颁布的《1996—2010年建筑技术政策》首次提出了“发展钢结构、加速推广轻钢结构,研究推广组合结构的应用以及研究开发膜结构、张拉结构与空间结构体系”等技术措施,明确了我国建筑技术政策的导向,即由多年来的限制钢结构使用转变为发展、推广钢结构的应用。在这一政策的指导和支持下,从重大工程、标志性建筑使用开始,钢结构呈现出了从未有过的兴旺景象。我国钢结构行业迅速发展,产量、产值成倍增加的同时,工程质量不断提高,钢结构相关技术和管理水平也有了显著的进步,在诸如制作、安装、钢材供应等方面达到了国内外先进水平,为国民经济发展作出了贡献。

民用建筑钢结构以房屋钢结构为主要对象。按传统的耗钢量大小来区分,大致可分为普通钢结构、重型钢结构和轻型钢结构。其中重型钢结构指采用大截面和厚板的结构,如高层钢结构、重型厂房和某些公共建筑等;轻型钢结构指采用轻型屋面和墙面的门式刚架房屋、某些多层建筑、薄壁压型钢板拱壳屋盖等,网架、网壳等空间结构也可属于轻型钢结构范畴。除上述钢结构主要类型外,另外还有索膜结构、玻璃幕墙支承结构、组合和复合结构等。

我国在“十五”期间,建筑钢结构发展已取得巨大成就,“十一五”期间仍将继续坚持鼓励发展钢结构的相关政策措施,保持其连续性、稳定性。推广和扩大钢结构的应用,要加强科技导向的规划和措施指导作用,促使钢结构整体的持续发展。高层和超高层建筑优先采用合理的钢结构或钢—混凝土组合体系,大跨度建筑积极采用空间网格结构、立体桁架结构、索膜结构以及施加预应力的结构体系,结合市场需求,积极开发钢结构的住宅建筑体系,并逐步实现产业化。在今后相当长的一段时间内,钢结构的需求将保持持续增长的趋势。目前要加快钢结构住宅建设的研究开发和工程应用,使钢结构的住宅建筑更加完善配套,提高住宅建筑的工业化、产业化水平。

建筑钢结构与混凝土、木结构等相比,具有轻质、高强、受力均匀、易于工业化、能耗小、绿色环保、可循环使用、符合可持续发展等优点。同时,其造价较高,对设计、制造、安装的要求较高,需要相关的辅助材料与之配套(尤其是住宅房屋),其发展受多种因素影响。

按照中国钢结构协会的分类标准,民用建筑结构分为高层钢结构(如上海期货大厦)、大跨度空间钢结构,如:2008年北京奥运会主体育场——鸟巢、广州新体育馆,即为钢—混凝土组合结构、索膜钢结构、钢结构住宅、幕墙钢结构等。

(2) 一般工业钢结构。一般工业钢结构主要包括单层厂房、双层厂房、多层厂房等,用于重型车间的承重骨架,例如冶金工厂的平炉车间、出轧车间、混凝土炉车间,重型机械厂的铸钢车间、水压机车间、锻压车间,造船厂的船体车间,电厂的锅炉框架,飞机制