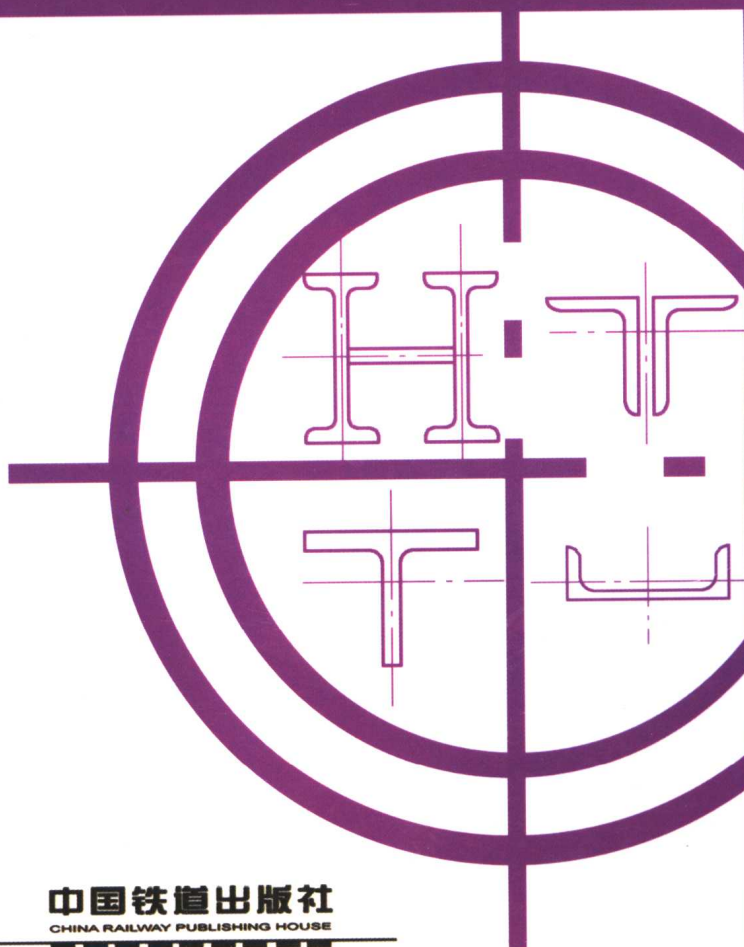




普通高等学校土木工程专业新编系列教材

钢结构

赵占彪 主编 朱 华 副主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等学校土木工程专业新编系列教材

钢 结 构

赵占彪	主 编
朱 华	副主编
申向东	主 审

中 国 铁 道 出 版 社

2006年·北 京

内 容 简 介

本书根据建设部、水利部土建类与水利类各专业钢结构课程(基本原理)的教学基本要求,以现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003),《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)和《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—95)为依据编写而成。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、螺栓和铆钉连接),轴心受力构件,受弯构件以及拉弯和压弯构件和焊接钢屋架设计等基本内容。章后有思考题与习题,书末有附录。

内容注重工程实际,力求反映钢结构的最新发展,可作为普通高等学校本科土建类和水利类专业 46~60 学时钢结构课程的教材,也可供其他专业和广大工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构/赵占彪主编. —北京:中国铁道出版社,2006.8

(普通高等学校土木工程专业新编系列教材)

ISBN 7-113-07321-2

I. 钢… II. 赵… III. 钢结构—高等学校—教材

IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 081651 号

书 名:钢结构

作 者:赵占彪 主编 朱 华 副主编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:刘红梅

封面设计:薛小卉

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×960 1/16 印张:16 字数:396 千

版 本:2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3 000 册

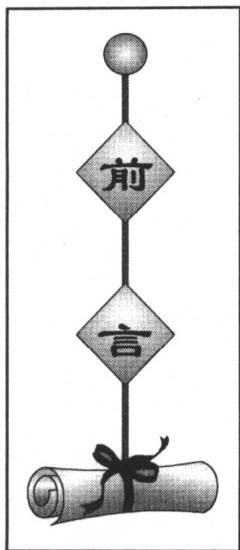
书 号:ISBN 7-113-07321-2/TU·849

定 价:28.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话 010-51873134 发行部电话 010-51873124



为了更好地适应新世纪普通高等学校土建类和水利类各专业对钢结构课程的教学需要,按照有关部委的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建类和水利类各专业的教学特点,总结多年来教学经验的基础上编写了这本《钢结构》教材。

本书共7章,包括:绪论(钢结构的特点、应用、发展和计算方法);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,拉弯和压弯构件)的计算方法、设计步骤和工作性能;焊接钢屋架设计和附录等内容。这些内容均符合土木工程专业和农业水利工程专业基础课的要求。“建筑钢结构设计”和“平面钢闸门设计”作为相应专业的专业选修课,各专业可根据本校的具体情况,使用时应另加专业课的内容。

在编写过程中紧紧围绕现行的《钢结构设计规范》(GB 50017—2003),《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)和《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—95)编写。

参加本书编写的人员有:内蒙古农业大学姚连胜(第1、2章),李昊(第3章),赵占彪(第4章和部分附录内容);内蒙古建筑职业技术学院张园(第5章);盐城工学院朱华(第6章)和内蒙古河套大学彭芳(第7章和部分附录内容)。本书由赵占彪担任主编,朱华担任副主编,内蒙古农业大学申向东教授担任主审。

在本书编写过程中得到了内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院和教务处各级领导的大力支持和帮助,在此深感谢意。

限于编者水平,本教材难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2006年5月

目 录

1 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 钢结构的应用	11
1.5 钢结构的发展	12
思考题与习题	14
2 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	22
2.5 钢的种类和钢材规格	26
思考题与习题	31
3 钢结构的连接	32
3.1 钢结构的连接方法	32
3.2 焊接方法和焊缝连接形式	34
3.3 角焊缝的构造与计算	39
3.4 对接焊缝的构造与计算	57
3.5 螺栓连接	62
3.6 普通螺栓连接的工作性能和计算	64
3.7 高强度螺栓连接的工作性能和计算	77
思考题与习题	88
4 轴心受力构件	91
4.1 概 述	91
4.2 轴心受力构件的强度和刚度	94
4.3 轴心受压构件的稳定	97
4.4 轴心受压实腹构件的局部稳定	105
4.5 轴心受压实腹柱的截面设计	109
4.6 轴心受压格构式构件	115
4.7 柱头和柱脚	126

思考题与习题	135
5 受弯构件	137
5.1 受弯构件的形式和应用	137
5.2 受弯构件的强度和刚度的计算	140
5.3 梁的稳定设计	149
5.4 梁的局部稳定和腹板加劲肋设计	153
5.5 考虑腹板屈曲后强度的梁设计	162
5.6 型钢梁与组合梁的设计	166
思考题与习题	173
6 拉弯和压弯构件	176
6.1 拉弯和压弯构件的应用及其破坏形式	176
6.2 拉弯和压弯构件的强度计算	177
6.3 压弯构件平面内、外的稳定计算	179
6.4 压弯构件的计算长度	187
6.5 实腹式压弯构件的局部稳定计算	190
6.6 格构式压弯构件的计算	192
6.7 单层和多层框架的梁柱连接	195
6.8 偏心受压柱的柱脚设计	200
思考题与习题	204
7 课程设计例题——焊接钢屋架设计	206
7.1 设计资料	206
7.2 荷载计算	206
7.3 内力计算	207
7.4 杆件截面选择	208
7.5 节点设计	211
思考题与习题	218
附 录	219
附录 1 钢材和连接的强度设计值	219
附录 2 受弯构件的容许挠度	222
附录 3 梁的整体稳定系数	223
附录 4 轴心受压构件的稳定系数	226
附录 5 柱的计算长度系数	230
附录 6 型钢表	232
附录 7 螺栓和锚栓规格	247
参考文献	248

绪 论

1.1 钢结构课程的性质和任务

钢结构是用型钢或钢板制成基本构件,根据使用要求,通过焊接或螺栓连接等方法,按照一定的规律组成的承载结构。钢结构在工程建设中应用较广,如工业厂房中的钢屋顶、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。

本课程的性质属于技术基础课,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,按照结构物使用的目的,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,不致使结构失效的用型钢或钢板制成基本构件的结构构造形式的一门学科。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各种荷载作用下工作状况,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的结构钢材的工作性能、钢结构的连接方式的设计、钢结构各类基本构件的设计原理,工程建设中各类钢结构以及水利工程的平面钢闸门或弧形钢闸门的设计原理和方法。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、钢桁架及钢屋架等基本构件以及水利工程的平面闸门进行设计。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:

特点1: 钢结构自重较轻

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,构件所需的截面积较小,故结构比较轻。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 $1.7 \times 10^{-4} \sim 3.7 \times 10^{-4} \text{ m}$; 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

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。

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。

3. 钢材的强度高、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, 抗振性和抗冲击性较高, 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。

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—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。

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。

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。

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。

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,结构设计准则应满足: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。在设计中如何解决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,其值为

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

其中 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,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还处于以经验为基础的定性分析阶段。

随着工程技术的发展,建筑结构的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,但仍然没有将结构可靠与概率联系起来,故称为半概率法。1957年我国采用的前苏联的《钢结构设计规范》(HHTY 121—55)和我国1974年修订的《钢结构设计规范》(TJ 17—74)中钢结构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， $\alpha = 3$ 。

半概率的设计表达式仍可采用容许应力法的设计式，我国《钢结构设计规范》(TJ 17—74)的设计式就是这样规定的，但安全系数由多系数分析决定，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 20 世纪 60 年代末期有了重大突破，这使得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。

1.3.2 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。即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。即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:

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

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 3 种情况:

$Z > 0$ 时,结构处于可靠状态;

$Z = 0$ 时,结构达到临界状态,即极限状态;

$Z < 0$ 时,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,说明作用在结构上的荷载潜伏着出现高值的可能,材料性能也潜伏着出现低值的可能;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,结构的可靠度可定义为: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:

$$P_s + P_f = 1 \quad (1.9)$$

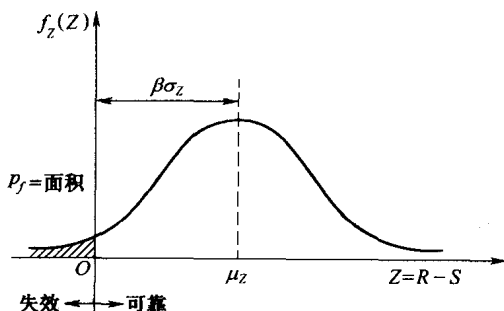
或

$$P_s = 1 - P_f \quad (1.10)$$

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 $P_f = 0$) 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:



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

图 1.1 Z 的概率密度 $f_Z(Z)$ 曲线

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。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 的标准差 σ_Z 来度量, 得出值 β , 有:

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

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

式中, β 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 的对应关系如表 1.1 所示。

表 1.1 正态分布时 β 与 P_f 的对应值

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 P_f	3.4×10^{-6}	1.34×10^{-5}	3.17×10^{-5}	1.08×10^{-4}	2.33×10^{-4}	6.87×10^{-4}	1.35×10^{-3}	3.47×10^{-3}	6.21×10^{-3}	2.28×10^{-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:

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

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

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:

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

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

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

式中, μ_{x_i} 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。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, 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不同的 β 值。钢结构的各种构件,按钢结构设计规范(GB 50017—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,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(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》经过计算和分析,规定在一般情况下荷载分项系数:永久荷载 $\gamma_G = 1.2$,可变荷载 $\gamma_Q = 1.4$ 。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:

$$\text{可变荷载效应控制的组合: } \gamma_0(\gamma_G \sigma_{GK} + \gamma_{Q1} \sigma_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} \sigma_{QiK}) \leq f \quad (1.29)$$

$$\text{永久荷载效应控制的组合: } \gamma_0(\gamma_G \sigma_{GK} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} \sigma_{QiK}) \leq f \quad (1.30)$$

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 4.0 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。

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(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)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:

$$\gamma_0(\gamma_G \sigma_{GK} + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \sigma_{QiK}) \leq f \quad (1.31)$$

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,根据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。

1.3.4 水工钢结构按容许应力法计算

水工钢结构根据其不同的用途,设计时必须遵守各类专业规范。水电部 1995 年《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—95)和交通部《船闸设计规范》与《船坞设计规范》分别适用于水利水电工程钢闸门、船闸闸门和船坞闸门工程。

水工钢结构设计,由于所受荷载涉及水文、泥沙、波浪等自然条件比较复杂,统计资料不足。同时,经常处于水位变动或盐雾潮湿等容易腐蚀的环境,在计算中如何反映实际问题尚待解决。因此,水工钢结构的水下钢结构和结构构件目前还不具备采用概率极限状态法计算条件。在上述各专门规范中规定水工钢结构仍采用容许应力算法。

即

$$\sum N_i \leq \frac{f_y S}{K_1 K_2 K_3} = \frac{f_y S}{K}$$

$$\sigma = \frac{\sum N_i}{S} \leq \frac{f_y}{K} = [\sigma]$$

式中 N_i ——根据标准荷载求得的内力;

f_y ——钢材的屈服点;

K_1 ——荷载安全系数;

K_2 ——钢材强度安全系数;

K_3 ——调整系数,用以考虑结构的重要性,荷载的特殊变异和受力复杂等因素;

S ——构件的几何特性;

$[\sigma]$ ——钢材的容许应力(可查表求得)。

1.4 钢结构的应用

过去由于受钢材生产量的限制,钢结构在我国应用范围不大,近年来我国钢产量有了很大的发展,截止到2005年底我国钢产量达3.4亿t,居世界首位。加之钢结构形式的改进,钢结构的应用也有了很大的发展。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。而且钢结构具有自重轻、强度高、塑性好和施工速度快等优点,应用范围较广。

1.4.1 钢结构在工业与民用建筑中的应用

目前我国钢结构在工业与民用建筑的应用范围大致如下:

1. 工业厂房

天车作业的工业厂房和操作加工车间,大多采用钢骨架。如冶金厂房的平炉、轧铁车间、铸钢车间、金工车间、锻造车间、石材加工车间和现代化温室等。

2. 大跨度结构

一些跨度较大的建筑物顶棚大都采用网架、拱架和框架钢结构。如大型机械装配车间、大煤库、大会堂、体育馆、展览馆和贸易货站等。

3. 高耸结构

塔架和桅杆全部采用钢结构制成。如电视塔、输电线塔、钻井架、地理坐标标志塔、起吊机塔架、广播、电视发射桅杆和无线电天线桅杆等。

4. 板壳结构

如油库、油罐、油箱、煤气库、高炉、烟囱、水塔箱和各种管道等。

5. 轻型钢结构

如管式桁架、温室大棚骨架、马路天桥、加油站顶棚、栅式大门和大门的门顶,这些结构用于荷载较轻或跨度较小的建筑。

6. 方便拆卸或可移动的结构

一些临时和移动设施大都采用钢结构形式。如建筑工地的附属用房,临时展览展销市场、临时剧院、这些结构是可拆迁的。移动结构如塔式起重机、天车、龙门起重机等。