

前 言

根据原能源部 1993~1995 年高等学校教材编审出版计划, 由葛洲坝水电工程学院、华北电力学院和长春水利电力高等专科学校负责为起重运输与工程机械专业、机械设计与制造专业和金属结构与焊接专业编写《金属结构设计》教材。

本教材分两篇编写。第一篇为设计基础, 按 GBJ 17—88《钢结构设计规范》, 采用一次二阶矩极限状态的基本理论, 介绍基本构件的设计计算方法。为了便于学习和掌握课程内容, 在第二、三、四、五、六章还编入了一定数量的例题和习题。第二篇为起重机典型结构, 按 GB 3811—83《起重机设计规范》, 采用许用应力设计方法。学生通过本课程的学习, 能够初步掌握钢结构基本构件和起重机典型结构的设计计算方法。

本教材由葛洲坝水电工程学院杨达夫教授主编。参加编写的有: 华北电力学院唐歆熙副教授(第一、二、三章); 长春水利电力高等专科学校张政高级讲师(第四、五、六章); 葛洲坝水电工程学院杨达夫教授(绪论、第七、八、九、十、十一章)。全书由河海大学常州机械学院金雅鹤教授主审。

由于编者水平所限, 书中难免存在缺点和错误, 敬请读者批评指正。

编 者

1994.5

内 容 提 要

本教材分两篇,共十一章。第一篇为设计基础,介绍钢材的性能和选用,连接方法及其计算,按极限状态设计法阐述基本构件的设计理论和计算方法;第二篇为起重机典型结构,介绍起重机载荷及其组合,按许用应力法介绍结构设计准则,起重机典型结构(桥架、门架、臂架等)的构造及设计计算方法。

本教材适用于高等学校起重运输与工程机械专业、机械设计与制造专业、金属结构与焊接专业,也可供有关生产、科研和设计单位的技术人员参考。

高等学校教材

金 属 结 构 设 计

葛洲坝水电工程学院 杨达夫 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地质矿产局印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 24.25印张 549千字

1995年11月第一版 1995年11月北京第一次印刷

印数 0001—2560册

ISBN 7-120-02411-6/TK·359

定价18.60元

目 录

前 言	
绪 论	1

第一篇 设计基础

第一章 金属结构材料和性能	11
第一节 钢材的性能	11
第二节 钢材的疲劳	15
第三节 钢材的种类及选用	19
第二章 金属结构的连接	31
第一节 连接的类型	31
第二节 焊缝连接	31
第三节 螺栓连接	52
第三章 轴心受力构件	72
第一节 概述	72
第二节 轴心受压构件的强度和刚度	73
第三节 实腹式轴心受压构件的整体稳定	77
第四节 实腹式轴心受压构件的局部稳定	86
第五节 实腹式轴心受压构件的截面设计	91
第六节 格构式轴心受压构件的整体稳定	98
第七节 格构式轴心受压构件的截面设计	102
第八节 轴心受压柱的柱头和柱脚	109
第四章 梁	115
第一节 梁的种类和截面形式	115
第二节 梁的强度计算	115
第三节 梁的刚度计算	120
第四节 梁的整体稳定性	120
第五节 型钢梁的设计	130
第六节 组合梁的截面设计	134
第七节 梁的局部稳定和腹板加劲肋设计	141
第八节 梁的支座和梁的连接	160
第九节 吊车梁设计要点	162
第五章 拉弯和压弯构件	170
第一节 概述	170
第二节 拉弯和压弯构件的强度计算	170
第三节 实腹式压弯构件的整体稳定	174
第四节 压弯构件的计算长度	181

第五节	实腹式压弯构件的局部稳定	184
第六节	实腹式压弯构件的截面选择	187
第七节	格构式压弯构件的截面设计	192
第八节	偏心受压柱的柱头和柱脚	198
第六章	桁架	209
第一节	概述	209
第二节	桁架的外形、腹杆体系及主要参数	209
第三节	桁架杆件的计算长度和容许长细比	212
第四节	桁架杆件内力的计算	215
第五节	桁架杆件的截面设计	218
第六节	桁架的节点设计	223
第七节	桁架的静刚度和设计拱度	232
第八节	桁架施工图的绘制	235
第九节	桁架设计举例	236

第二篇 起重机典型结构

第七章	起重机金属结构的载荷和设计计算原理	252
第一节	载荷及其组合	252
第二节	强度设计准则及许用应力	262
第三节	结构的工作级别	270
第四节	刚度设计准则	272
第五节	结构稳定计算准则	274
第八章	桥架	281
第一节	桥架结构型式和应用	281
第二节	计算载荷及其组合	283
第三节	单梁桥架设计	285
第四节	中轨箱形双梁桥架	291
第五节	四桁架式桥架	300
第九章	门式启闭机结构	303
第一节	门式启闭机的型式	303
第二节	载荷及其组合	305
第三节	门架结构设计计算	307
第四节	门架结构的连接	320
第十章	装卸桥结构	323
第一节	结构型式和主要尺寸	323
第二节	计算载荷及载荷组合	327
第三节	Π形截面桁架式装卸桥	330
第四节	带附加拉杆的偏轨箱形装卸桥结构	335
第十一章	臂架	345
第一节	概述	345

第二节 臂架的载荷及其组合.....	347
第三节 桁架压杆式臂架的设计.....	348
第四节 桁架式水平臂架.....	355
附录一 钢材的性能.....	363
附录二 型钢规格和截面特性.....	365
附录三 疲劳计算的构件和连接分类.....	371
附录四 轴心受压构件的稳定系数.....	376
参考文献.....	379

绪 论

一、金属结构的特点和应用

由型钢和钢板作为基本构件,按照一定规则用焊接、栓接或铆接等方法连接起来,能承受荷载并满足一定使用要求的工程结构,称为钢结构。

在机械工程中,结构作为机器的一部分,能随之运动,并承受静载荷和动载荷的作用,习惯上称机械的结构为金属结构。

19世纪后期,由于钢铁工业的发展,机器制造业的进一步完善,特别是20世纪初开始采用焊接技术后,在金属结构领域里引起了重要变革。长期的使用实践表明,金属结构具有以下特点:

(1) 强度高、重量轻:钢材密度大,其强度和弹性模量高,所设计构件的截面小,自重轻,便于运输和装拆。

(2) 材质均匀、工作可靠:钢材内部组织均匀,各个方向的物理力学性能接近,是理想的弹塑性材料,用一般工程力学方法计算结果与结构的实际受力状况较符合,工作可靠。

(3) 塑性和韧性好,抗冲击和抗振动能力强:由于塑性好,一般情况下不会因偶然超载或局部载荷而发生断裂破坏;由于韧性好,对动力载荷的适应性强。

(4) 制作工业化程度高,施工周期短:结构件在专业化工厂(或车间)生产,质量易保证,现场拼装方便。

基于以上优点,金属结构在国民经济各部门中得到了广泛的应用。例如,建筑部门的工业厂房建筑结构和跨度大、多层或高层民用建筑结构;交通运输部门的车辆、船舶和桥梁结构;化工部门的容器;水利电力部门的水工闸门、压力钢管和输电铁塔;机械部门的重型机械、工程机械和起重机械的结构等,都采用金属结构。

但是,金属结构由于焊接残余应力和其他缺陷的影响,在低温(-20°C 以下)或直接承受较大动力载荷时可能发生脆断。另外,如防护不好,容易锈蚀。钢材在高温(超过 300°C)时会产生蠕滑变形而失去承载能力。这些问题,设计者应予以足够重视。

起重机金属结构是起重机的重要组成部分。它是整台起重机的骨架,用以装置各个机构、电器设备,支持被起吊的重物,承受和传递作用在起重机上的各种载荷,形成起重机一定的作业空间。如水利电力部门自行设计和制造了浇筑大坝混凝土用的SDTQ1800型高架门座起重机;火电厂建筑安装用的DBQ3000型塔式起重机等大型起重机械,其金属结构的重量约占整台起重机重量的65%~85%。

二、金属结构设计的基本要求

钢材是国民经济和国防建设中的重要材料,其耗量大、价格较贵。对金属结构的设计,要求做到技术先进,经济合理,安全适用,确保质量。要从实际出发,合理选用材料,合

理选用的结构型式和结构布置，采用先进的设计理论和计算方法以及构造措施，尽量采用定型的和标准化的构件，以达到降低造价的目的。

起重机械和工程机械的工作十分繁重，载荷复杂，工作环境差，大多属于移动机械，为保证其正常使用，对金属结构设计应提出如下要求。

- (1) 安全可靠、耐用。结构必须保证有足够的强度、刚度和稳定。
- (2) 结构合理，经济，自重轻。
- (3) 制造方便，成本低。
- (4) 便于装拆、运输和维修。
- (5) 外形美观。

重型机械的金属结构自重大，制造成本约占机械总成本的三分之一以上。因此，在满足性能要求的前提下，充分利用材料，减轻自重，降低成本是金属结构设计制造中的主要目标。近几十年来，国内外对金属结构进行了大量的研究工作，出现了许多新的结构形式，采用了新的设计理论和设计方法，创造了先进的制造工艺，使金属结构的设计和制造取得了很大成绩。在此基础上我国于1983年颁布了GB3811—83《起重机设计规范》，它是起重机金属结构设计的法规。1988年颁布了GBJ 17—88《钢结构设计规范》，作为建筑钢结构的设计法规。

三、金属结构的计算方法

结构计算是按照拟定的结构方案和构造(包括结构形式、主要尺寸和连接方式等)，根据所承受的载荷进行内力计算，然后选用材料对构件或各杆件进行截面设计，再根据内力和材料特性对整个结构、构件和连接进行计算。通过计算既保证结构安全可靠、不因产生太大的变形而影响使用，又经济合理、自重轻。

需要指出：在结构设计中所采用的计算载荷和实际作用的载荷之间；计算出的应力值和实际应力值之间；钢材所取的力学性能指标和实际材料力学性能之间；计算所取截面尺寸和构件实际尺寸之间等都有一定的差异。就是说，在设计中所采用的载荷、材料性能、截面特性、施工质量等方面都不是定值，而是随机变量。设计中如何考虑这些因素的差异性，根据金属结构使用场合及其所承受载荷的变动特性，制订了各部门相应的设计规范，并采用不同的计算方法。下面介绍两种计算方法。

(一) 许用应力设计法

金属结构需要进行强度、稳定性和使用寿命(疲劳强度)等三方面的计算。为了保证结构和构件的安全可靠，在计算中用一个安全系数来综合考虑上述诸因素的差异性，即把材料可以利用的极限应力除以安全系数作为结构计算时材料容许达到的最大应力——许用应力。材料的极限应力分别指材料的屈服强度 σ_s (或用符号 f_s)、构件的临界屈曲应力 σ_{cr} 和疲劳极限 σ_r ，相应的许用应力为 $[\sigma]$ 、 $[\sigma_{cr}]$ 和 $[\sigma_r]$ 。结构计算的原则是：结构在组合载荷 ΣF_i 作用下所求得的构件或连接的计算应力 σ 不得大于相应的许用应力，即

$$\sigma \leq \frac{\sigma_s}{n} = [\sigma] \text{ 或 } \frac{\sigma_{cr}}{n} = [\sigma_{cr}] \text{ 或 } \frac{\sigma_r}{n} = [\sigma_r] \tag{0-1}$$

许用应力设计法是结构设计的一个传统方法，现仍保留其简单而明了的形式，并赋予

新的内容，概念明确，使用方便，多年来国内外的实际证明是一个比较简单易行的计算方法。目前，国内钢桥设计、起重机设计均采用许用应力法。

这种计算方法的缺点是：由于各种载荷的变异性不同，各种构件受载情况和工作条件也不完全相同，构件截面的几何尺寸的变异性也不完全一致。从结构或构件的可靠性观点而言，采用定值的安全系数，计算结果可能使有些结构或构件过分安全，个别结构或构件则可能不够安全，而整个结构的失效往往起源于局部的或个别的构件。因此难以达到既安全又经济的要求。

在结构设计时，除了必须保证结构或构件的承载能力满足要求外，为了结构的正常使用，还必须对结构或构件的变形有所限制，避免因变形过大而丧失承载能力及产生振动，甚至在运输和制造过程中受到破坏。因此，还应验算结构或构件的变形和长细比，即

$$Y_l \leq [Y_l] \quad (0-2)$$

$$\lambda \leq [\lambda] \quad (0-3)$$

式中 Y_l ——结构或构件在载荷作用下的最大挠度值；

$[Y_l]$ ——规范规定的容许挠度值；

λ ——构件的长细比；

$[\lambda]$ ——规范规定的容许长细比。

(二) 极限状态设计法

结构设计的目的是要保证结构满足各项预定的功能要求，这些功能主要包括：

(1) 安全性：指结构应能承受在正常使用时可能出现的各种作用。

(2) 适用性：指结构在正常使用条件下不产生过大的变形。

(3) 耐久性：指结构在正常使用条件下不致疲劳破坏。

按照GBJ 68—84《建筑结构设计统一标准》规定，各种建筑结构均应采用“以概率理论为基础的极限状态设计法”。极限状态的定义为：结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足某一规定功能的要求，此特定状态称为该功能的极限状态。各种承重结构均应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。

承载能力极限状态为结构或构件达到最大承载能力，或者达到不适于继续承载的变形的极限状态。例如，结构、构件或连接因超过材料强度而破坏，或产生过大的塑性变形；结构或构件丧失了稳定；在重复载荷作用下构件发生了疲劳破坏。

正常使用极限状态为结构或构件达到正常使用某项规定限值的极限状态。例如，当结构或构件出现影响正常使用的变形；出现影响正常使用的局部破坏(包括裂缝)；出现影响正常使用的振动等，即认为超过了正常使用的极限状态。

在结构设计中，影响结构工作性能有若干基本变量，它们包括：

(1) 引起结构作用效应 S (轴向力、剪力、弯矩等) 的各种作用，如永久载荷、可变载荷、温度变化、地震等。

(2) 构成结构抗力 R 的各种因素，如材料性能(强度、弹性模量等)、几何特征(尺寸、截面面积、抵抗矩、惯性矩等)等。

这些基本变量都是非确定的量，叫做随机变量。若结构设计时需要考虑结构可靠性的

上述随机变量有 n 个, 即 $X_1, X_2, X_3 \cdots X_n$, 则这 n 个随机变量通常可建立函数关系

$$Z = g(X_1, X_2, X_3 \cdots X_n) \quad (0-4)$$

此函数称为结构的功能函数。

为了简化起见, 也可采用作用效应 S 和结构抗力 R 作为两个综合的基本变量来表达结构的功能函数, 则功能函数为

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (0-5)$$

由于 R 和 S 都是随机变量, 所以 Z 也是随机变量。在实际结构中可能出现三种情况:

$$\begin{aligned} Z = R - S > 0 & \quad \text{结构可靠} \\ Z = R - S = 0 & \quad \text{结构处于临界状态} \\ Z = R - S < 0 & \quad \text{结构失效} \end{aligned}$$

结构的极限状态就是结构由可靠转变为失效的临界状态, 所以结构的极限状态方程为

$$Z = R - S = 0 \quad (0-6)$$

结构的可靠度为结构可靠性(包括安全性、适用性和耐久性)的概率度量。若以 p_s 表示结构的可靠度, 则

$$p_s = p\{Z = R - S \geq 0\} \quad (0-7)$$

结构处于失效状态的概率称为失效概率, 以 p_f 表示, 则

$$p_f = p\{Z = R - S < 0\} \quad (0-8)$$

因可靠($Z \geq 0$)和失效($Z < 0$)这两个事件是对立的, 故 $p_s = 1 - p_f$ 。

因此, 结构可靠度 p_s 的计算可以转化为失效概率 p_f 的计算。只要结构的失效概率 p_f 小到预定的可以接受的程度, 就认为此结构是安全可靠的。

要计算 $Z = R - S \geq 0$ 的概率(可靠度)或 $Z = R - S < 0$ 的概率(失效概率)必须先求得结构抗力 R 和载荷效应 S 两个综合变量的函数分布, 从而推求 Z 的函数分布。但从目前情况来看, 这是较困难的。因此国际“结构安全度联合委员会”(JCSS)推荐采用一次二阶矩概率法(简称二阶矩法)。

一次二阶矩概率法可避开 Z 的全分布的要求, 只利用两个特征值, 即平均值 Z_m (一次矩)和方差 σ_z^2 (二阶矩)。只要经过测试取得足够的数据, 便可用统计方法求得 R 和 S 的平均值 R_m 和 S_m , 方差 σ_R^2 和 σ_S^2 , 从而求得 Z 的平均值 Z_m 和方差 σ_z^2 。

当 R 和 S 为统计独立时, 可根据其性质得

$$Z_m = R_m - S_m \quad (0-9)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \quad (0-10)$$

σ_z 称为功能函数 Z 的标准差(或称均方差)。如用 σ_z 去度量平均值 Z_m 可得

$$Z_m = \beta \sigma_z \quad (0-11)$$

$$\beta = \frac{Z_m}{\sigma_z} = \frac{R_m - S_m}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (0-12)$$

式中 β 为可靠性指标。

假设 Z 的概率密度为正态分布(图0-1), 因 $Z = 0$ 为极限状态, 所以由 $Z = -\infty$ 到 0 的阴影面积即表示 $Z < 0$ 的失效概率 p_f , 由 $Z = 0$ 到平均值 Z_m 的距离等于 $\beta \sigma_z$, 即 $Z_m = \beta \sigma_z$ 。只

要分布一定，失效概率 p_f 与可靠性指标 β 就有一一对应关系。 β 愈大， p_f 就愈小；反之， β 愈小， p_f 就会愈大。这说明 β 值可作为衡量结构可靠度的一个数量指标。表 0-1 列出了几个 β 与 p_f 的对应值。

表 0-1 正态分布随机函数的可靠性指标与失效概率的对应值										
β	4.5	4.2	4.0	3.7	3.5	3.2	3.0	2.7	2.5	2.0
p_f	3.5×10^{-5}	1.34×10^{-5}	3.07×10^{-4}	1.08×10^{-4}	2.33×10^{-4}	6.37×10^{-4}	1.35×10^{-3}	3.47×10^{-3}	6.21×10^{-3}	2.28×10^{-2}

有了结构的失效概率或可靠性指标作为结构的可靠度的定量尺度后，就可以真正从数量上对结构可靠度进行对比分析，这是结构设计方法上的突破。

要把概率极限状态方法用于工程设计，首先需要规定可靠指标 β 的取值。确定 β 的一个可能途径是根据构件的重要性、破坏性质（脆性或延性）和失效后果等因素，以优化方法分析确定容许的失效概率。但是，由于上述因素还难以找到合理的定量分析方法。现在各国都采用“校准法”来确定 β 值。所谓校准，就是按原有使用多年的规范设计的各类构件反算其隐含的可靠性指标，确认和这些可靠性指标相对应的失效概率在可以接受的范围内，从而确定一个适当的 β 值。对各类钢结构主要构件校准的结果， β 一般在 3.0~3.3 之间，故钢结构构件 β 一般取为 3.2。钢结构连接经常发生脆性破坏，其可靠性指标应比塑性破坏的构件为高，一般推荐用 4.5。

由公式 (0-12)，可得

$$R_m - S_m = \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2} = \frac{\beta \sigma_R^2}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}} + \frac{\beta \sigma_s^2}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}}$$

即

$$S_m + \frac{\sigma_s}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}} \times \beta \sigma_s = R_m - \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}} \times \beta \sigma_R$$

令

$$a_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}}, \quad a_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}}$$

并引入不等式，得

$$S_m + a_s \beta \sigma_s \leq R_m - a_R \beta \sigma_R \tag{0-13}$$

又令 $\delta_s = \sigma_s / S_m$ ， $\delta_R = \sigma_R / R_m$ ，即标准差与平均值之比，称为变异系数，则式 (0-13) 为

$$S_m (1 + a_s \beta \delta_s) \leq R_m (1 - a_R \beta \delta_R) \tag{0-14}$$

式 (0-13) 或式 (0-14) 就是一次二阶矩法的设计表达式。它的主要优点是：可根据结构的重要性和破坏特征直接采用合适的可靠指标，只要掌握各随机变量的平均值和标准差就可进行设计。但此表达式不易被设计人员所接受。

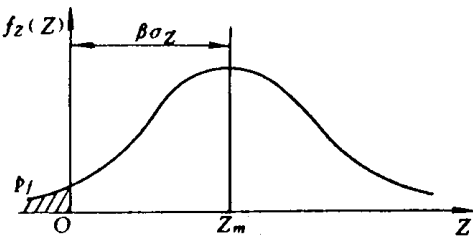


图 0-1 功能函数 Z 的概率分布曲线

在以往的设计中, 无论载荷或材料强度都不用平均值而用标准值。由建筑结构载荷规范GBJ 9—87规定各种载荷的标准值, 即结构在正常使用条件下可能出现的最大载荷值, 按此计算所得的载荷效应也是标准值 S_k 。因载荷效应标准值 S_k 一般大于其平均值 S_m , 而抗力标准值 R_k 则小于抗力的平均值 R_m , 因此令

$$S_k = S_m + a_1 \sigma_s \quad (0-15)$$

$$R_k = R_m - a_2 \sigma_R \quad (0-16)$$

引入变异系数 $\delta_s = \sigma_s / S_m$ 和 $\delta_R = \sigma_R / R_m$, 得

$$S_k = S_m (1 + a_1 \delta_s) \quad (0-17)$$

$$R_k = R_m (1 - a_2 \delta_R) \quad (0-18)$$

由此得

$$S_m = \frac{S_k}{1 + a_1 \delta_s} \quad (0-19)$$

$$R_m = \frac{R_k}{1 - a_2 \delta_R} \quad (0-20)$$

将式(0-19)、式(0-20)代入式(0-14)中, 可得

$$\frac{1 + a_s \beta \delta_s}{1 + a_1 \delta_s} \times S_k \leq \frac{1 - a_R \beta \delta_R}{1 - a_2 \delta_R} \times R_k \quad (0-21)$$

令

$$\gamma_s = \frac{1 + a_s \beta \delta_s}{1 + a_1 \delta_s}, \quad \gamma_R = \frac{1 - a_2 \delta_R}{1 - a_R \beta \delta_R}$$

得到采用标准值的设计表达式, 即分项系数表达式

$$\gamma_s S_k \leq R_k / \gamma_R \quad (0-22)$$

式中 γ_s ——载荷分项系数;

γ_R ——抗力分项系数。

GBJ 17—88采用以概率理论为基础的极限状态设计方法(疲劳计算除外), 用分项系数的设计表达式进行计算。这种设计法的设计准则是: 按各种载荷的设计值(标准载荷乘以载荷分项系数)算得的结构内力总和 S 应不超过按材料设计强度(标准强度除以抗力分项系数)算得的结构设计抗力 R 。这些分项系数包括永久载荷和可变载荷的分项系数 γ_G 和 γ_Q , 以及结构或构件抗力的分项系数 γ_R 。载荷分项系数在GBJ 68—84中以可靠性指标 β 为准, 用优化的方法定出, 并予以明确规定。如 $\gamma_G = 1.2$ (当永久载荷对结构有利时取 $\gamma_G = 1.0$; 验算倾覆时 $\gamma_G = 0.9$); $\gamma_Q = 1.4$ (工业楼面活载荷大于 4 kN/m^2 时取 $\gamma_Q = 1.3$)。

对各种材料的结构构件, 当采用可靠指标 $\beta = 3.2$ (安全等级二级)时, 经分析应采用的抗力分项系数为:

对3号钢、16Mn钢构件 $\gamma_R = 1.087$;

对15MnV钢构件 $\gamma_R = 1.111$ 。

当结构上有两种或两种以上可变载荷作用时, 由于这些载荷都同时以其标准值(正常情况最大值)出现的概率较小, 应对有关标准值进行折减, 即乘以小于1.0的组合系数 φ_{ci} 。这样, 结构构件承载能力的一般表达式应为

$$\gamma_0 \left(\gamma_G S_{GK} + \gamma_{Q1} S_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{QiK} \right) \leq P_K / \gamma_R \quad (0-23)$$

式中 S_{Q1K} 为第一个可变荷载标准值的效应，即影响设计结果最大者； ψ_{ci} 为其他第 i 个可变荷载的组合系数：当有两种或两种以上可变荷载且其中包括风荷载时，取 $\psi_{ci} = 0.6$ ；其他情况 $\psi_{ci} = 1.0$ 。对于高耸房屋和高耸构筑物的荷载组合系数，应按专门规定取用。一般对风荷载取 $\psi_{ci} = 1.0$ 。 γ_0 为结构重要性系数，与结构安全等级有关，即一级为1.1，二级为1.0，三级为0.9。

对于一般的排架、框架结构，由于确定设计结果最大的荷载效应（轴向力 N 和弯矩 M ）较为复杂，为简便计，采用下列简化的设计表达式

$$\gamma_0 \left(\gamma_G S_{GK} + \psi \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} S_{QiK} \right) \leq R_K / \gamma_R \quad (0-24)$$

式中 ψ 为简化设计表达式采用的荷载组合系数。当参与组合的可变荷载有两种或两种以上并有风荷载时，取 $\psi = 0.85$ ；其他情况 $\psi = 1.0$ 。

考虑到设计人员的习惯，将式(0-22)改为应力表达式，即

$$\gamma_0 \left(\sigma_{Gd} + \sigma_{Q1d} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} \sigma_{Qid} \right) \leq f \quad (0-25)$$

或
$$\gamma_0 \left(\sigma_{Gd} + \psi \sum_{i=1}^n \sigma_{Qid} \right) \leq f \quad (0-26)$$

式中 σ_{Gd} ——永久荷载的设计值 $\gamma_G S_{GK}$ ，在构件截面或连接中产生的应力；
 σ_{Q1d} ——第一个可变荷载的设计值 $\gamma_{Q1} S_{Q1K}$ ，在构件截面或连接中产生的应力（该应力大于其他任意第 i 个可变荷载设计值产生的应力）；
 σ_{Qid} ——其他第 i 个可变荷载设计值 $\gamma_{Qi} S_{QiK}$ ，在构件截面或连接中产生的应力；
 $f = \frac{f_K}{\gamma_R}$ ——构件和连接的设计强度，其中 f_K 为钢材强度的标准值（计算稳定时，还需考虑稳定系数 φ ，即 φf ）。例如钢材的抗拉抗压和抗弯强度设计值 f 、钢材的抗剪强度设计值 f_v 、角焊缝的抗拉、抗压和抗剪强度设计值 f_t^w 、 f_c^w 和 f_v^w 等，见表0-2至表0-5。

对于正常使用的极限状态，计算结构或构件的变形时均用荷载的标准值（不乘以荷载分项系数），其计算公式为

$$v = v_{GK} + v_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{Qi} v_{QiK} \leq [v] \quad (0-27)$$

式中 v ——结构或构件的变形；
 $[v]$ ——结构或构件的容许变形，根据规范和使用要求而定；
 v_{GK} ——永久荷载标准值在结构或构件中产生的变形值；
 v_{Q1K} ——第一个可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值（其值大于任意第 i 个可变荷载标准值产生的变形值）；
 v_{Qik} ——第 i 个可变荷载标准值在结构或构件中产生的变形值。

计算结构或构件的强度、稳定性以及连接强度时，应采用荷载设计值；计算正常使用状态的变形和疲劳时，应采用荷载标准值。

对于直接承受动力载荷的结构，计算强度和稳定时，动力载荷应乘以动力系数；计算变形和疲劳时，不乘动力系数。

综上所述，极限状态设计法较之许用应力设计法能更好地反映结构各构件或连接的实际安全度，因而能更好地保证所设计结构的可靠性，易于达到合理和经济的要求。但是，这一设计方法只考虑结构的一个部件、一个截面或者一个局部区域的可靠度，还没有考虑整个结构体系的可靠度。而且还有若干有关结构可靠度理论问题，例如重复载荷作用下的结构疲劳、结构抗震、结构动力响应、正常使用极限状态的概率设计方法和钢结构的可靠度等等，都有待进一步研究。

在起重机行业，国际标准化组织草拟的ISO/TC 96/WG3 193文件《起重机载荷及其组合设计的一般计算原则》已将极限状态设计法与许用应力设计法作为并列的方法加以提出。但由于目前还缺乏适于起重机结构的载荷分项系数的可靠统计数据，因而包括我国在内的大多数国家的起重机设计规范现在仍采用许用应力计算法。本书第二篇起重机典型结构设计，以起重机设计规范为准，只介绍许用应力计算方法。此外，考虑到各类载荷组合所对应的发生概率和出现更恶劣工况的可能性，从可靠度的角度出发，用不同类别的载荷组合进行结构承载能力的计算时，应采用不同的安全系数。

表 0-2 3 号钢材分组尺寸 mm

组 别	圆钢、方钢和扁钢的直径或厚度	角钢、工字钢和槽钢的厚度	钢板的厚度
第 1 组	≤40	≤15	≤20
第 2 组	>40~100	>15~20	>20~40
第 3 组		>20	>40~50

注 工字钢和槽钢的厚度系指腹板的厚度。

表 0-3 钢材的强度设计值 N/mm²

钢 材			抗拉、抗压和抗弯 f	抗 剪 f_c	端面承压 (刨平顶紧) f_{ce}
钢 号	组 别	厚度或直径 (mm)			
3 号 钢	第 1 组	—	215	125	320
	第 2 组	—	200	115	320
	第 3 组	—	190	110	320
16Mn 钢、 16Mnq 钢	—	≤16	315	185	445
	—	17~25	300	175	425
	—	26~36	290	170	410
15MnV 钢、 15MnVq 钢	—	≤16	350	205	450
	—	17~25	335	195	435
	—	26~36	320	185	415

注 3 号镇静钢钢材的抗拉、抗压、抗弯和抗剪强度设计值，可按表中的数值增加 5%。

表 0-4		钢铸件的强度设计值		N/mm ²
钢 号		抗拉、抗压和抗弯 f	抗 剪 f_v	端面承压 (刨平顶紧) f_{ce}
ZG 200-400		155	90	260
ZG 230-450		180	105	290
ZG 270-500		210	120	325
ZG 310-570		240	140	370

表 0-5			强度设计值的换算关系		
材料和连接种类			应 力 种 类		换 算 关 系
钢 材			抗拉、抗压和 抗弯	3 号钢、16Mn 钢、16Mnq 钢	$f = 0.92f_y = \frac{f_y}{1.087}$
				15MnV 钢、15MnVq 钢	$f = 0.90f_y = \frac{f_y}{1.111}$
			抗	剪	$f_v = 0.58f$
			端面承压（刨 平顶紧）	3 号钢、16Mn 钢、16Mnq 钢	$f_{ce} = 0.87f_u = \frac{f_u}{1.149}$
				15MnV 钢、15MnVq 钢	$f_{ce} = 0.85f_u = \frac{f_u}{1.176}$
焊 缝	对 接 焊 缝	抗 压		$f_c^w = f$	
		抗 拉	焊缝质量为一 级	$f_t^w = f$	
			焊缝质量为二 级	$f_t^w = 0.85f$	
		抗 剪		$f_v^w = f_v$	
	角 焊 缝	抗拉、抗压和 抗剪	3 号钢	$f_f^w = 0.38f_u^w = \frac{f_u^w}{2.632}$	
			16Mn 钢、16Mnq 钢、 15MnV 钢、15MnVq 钢	$f_f^w = 0.41f_u^w = \frac{f_u^w}{2.439}$	
铆钉连接			抗 剪	I 类孔	$f_v^r = 0.56f_u^r = \frac{f_u^r}{1.786}$
				Ⅱ类孔	$f_v^r = 0.46f_u^r = \frac{f_u^r}{2.174}$
			承 压	I 类孔	$f_c^r = 1.20f_u$
				Ⅱ类孔	$f_c^r = 0.98f_u = \frac{f_u}{1.020}$
			抗 拉		$f_t^r = 0.36f_u^r = \frac{f_u^r}{2.778}$
螺 栓 连 接	普 通 螺 栓	C 级 螺 栓	抗 拉	$f_t^b = 0.46f_u^b = \frac{f_u^b}{2.174}$	
			抗 剪	$f_v^b = 0.35f_u^b = \frac{f_u^b}{2.857}$	

续表

材料和连接种类			应 力 种 类	换 算 关 系
螺栓连接	普通螺栓	C 级 栓	承 压	$f_c^b = 0.82 f_u = \frac{f_u}{1.220}$
		A 级、B 级螺栓	抗 拉	$f_t^b = 0.46 f_u^b = \frac{f_u^b}{2.174}$
			抗 剪 (I 类孔)	$f_v^b = 0.46 f_u^b = \frac{f_u^b}{2.174}$
			承 压 (I 类孔)	$f_c^b = 1.08 f_u$
	锚 栓	抗 拉	$f_t^a = 0.38 f_u^b = \frac{f_u^b}{2.632}$	
	承压型高强度螺栓	抗 剪	$f_v^b = 0.30 f_u^b = \frac{f_u^b}{3.333}$	
		承 压	$f_c^b = 1.26 f_u$	
钢 铸 铁			抗拉、抗压和抗剪	$f = 0.78 f_y = \frac{f_y}{1.280}$
			抗 剪	$f_v = 0.58 f$
			端面承压 (刨平顶紧)	$f_{ce} = 0.65 f_u = \frac{f_u}{1.538}$

注 f_y 为钢材或钢铸件的屈服点； f_u 为钢材或钢铸件的抗拉强度； f_u^w 为熔敷金属的抗拉强度； f_u^d 为铆钉钢的抗拉强度； f_u^b 为螺栓的抗拉强度。

第一篇 设计基础

第一章 金属结构材料和性能

第一节 钢材的性能

一、钢材的主要力学性能

1. 钢材在拉伸时的性能

钢材中的低碳钢是工程中广泛应用的金属材料，其应力-应变曲线具有典型意义。图1-1所示为A3钢在常温、静载、单向一次拉伸时的应力-应变曲线。从图中可以看出，在整个拉伸过程中，钢材经历了线弹性（正比）阶段Ⅰ、弹塑性阶段Ⅱ、屈服（塑性）阶段Ⅲ、强化阶段Ⅳ和破坏（局部收缩）阶段Ⅴ。并存在三个特征点，其相应的应力依次为比例极限 f_p 、屈服极限 f_y 和强度极限 f_u 。A3钢的比例极限为 $f_p = 200 \text{ N/mm}^2$ ，屈服极限 $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$ ，强度极限 $f_u = 400 \text{ N/mm}^2$ 。在比例极限以前，钢材的工作是弹性的，应力和应变符合正比关系。超过比例极限之后，应力和应变之间不再保持正比关系。在应力达到屈服点B之后，应力几乎不变，而应变却急剧增长。经过屈服阶段之后，进入强化阶段，钢材强度有所提高，达到强度极限后，试件产生局部颈缩，继续拉伸载荷迅速减小，最后导致试件断裂。强度极限是材料所能承受的最大应力，这时的塑性变形很大（ $\varepsilon = 16\%$ ）。

低合金钢的应力-应变曲线与A3钢基本相同（图1-1），即都存在线弹性阶段，而且断裂时都具有较大的残余变形。不同的是，热处理低合金钢没有明显的屈服阶段。工程中一般取卸载后塑性应变为0.2%所对应的应力为条件屈服极限，并用 $f_{0.2}$ 表示（图1-2）。

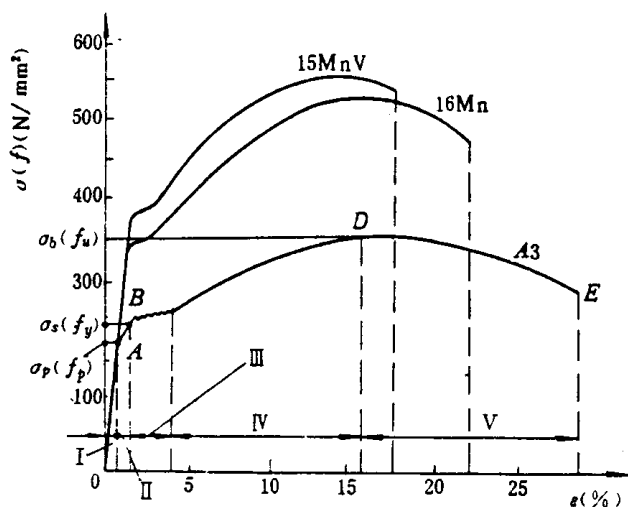


图 1-1 钢材受拉时的应力-应变曲线

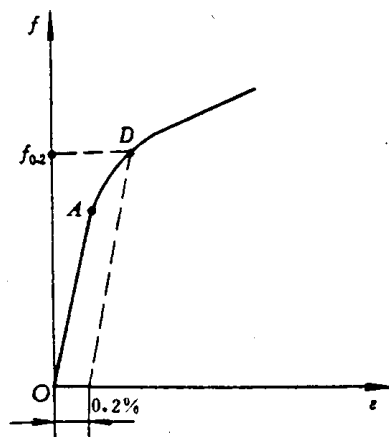


图 1-2 塑性材料的条件屈服极限