

钢 结 构

曹平周
朱召泉
编著

科学出版社

钢 结 构

曹平周 朱召泉 编著

科学技术文献出版社

Scientific and Technical Documents Publishing House

北 京

图书在版编目(CIP)数据

钢结构/曹平周,朱召泉编著.-北京:科学技术文献出版社,1999.10
ISBN 7-5023-3353-3

I. 钢… II. ①曹… ②朱… III. 钢结构 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 45543 号

出 版 者:科学技术文献出版社

图 书 发 行 部:北京市复兴路 15 号(公主坟)中国科学技术信息研究所大楼 B 段/100038

图 书 编 务 部:北京市西苑南一院 8 号楼(颐和园西苑公汽站)/100091

邮 购 部 电 话:(010)68515544-2953

图书编务部电话:(010)62878310,(010)62877791,(010)62877789

图书发行部电话:(010)68515544-2945,(010)68514035,(010)68514009

门 市 部 电 话:(010)68515544-2172

图书发行部传真:(010)68514035

图书编务部传真:(010)62878317

E-mail:stdph@istic.ac.cn;stdph@public.sti.ac.cn

策 划 编 辑:刘新荣

责 任 编 辑:刘新荣

责 任 校 对:赵文珍

责 任 出 版:周永京

封 面 设 计:博 今

发 行 者:科学技术文献出版社发行 新华书店总店北京发行所经销

印 刷 者:三河市富华印刷包装有限公司

版 (印) 次:1999 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

开 本:787×1092 16 开

字 数:460 千

印 张:18

印 数:1~3000 册

定 价:30.00 元

© 版权所有 违法必究

购买本社图书,凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换。

(京)新登字 130 号

内 容 简 介

本书根据《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153-92)、《钢结构设计规范》(GBJ 17-88)、《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99-98)、《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74-95)和本学科领域的新发展而编写。内容包括:土木工程中的普通钢结构和水利水电工程中的水工钢结构。全书共 8 章:概论、钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件、梁、拉弯和压弯构件、钢桁架、平面钢闸门。书中还列举了许多计算例题,每章均有思考题和习题,可供有关人员学习和查用。

本书可作为高等院校土木工程、水利和水电工程类专业的教材,亦可作有关设计和施工技术人员的参考书。

3P54/17

科学技术文献出版社 向广大读者致意

科学技术文献出版社成立于 1973 年,国家科学技术部主管,主要出版科技政策、科技管理、信息科学、农业、医学、电子技术、实用技术、培训教材、教辅读物等图书。

我们的所有努力,都是为了使您增长知识和才干。

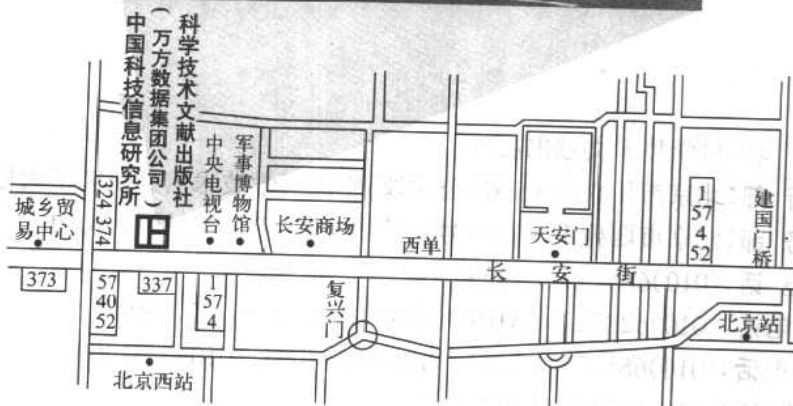
前 言

为了适应钢结构领域的新发展和高等教育拓宽专业面的需要,我们编写了这本钢结构教材。书中着重论述钢结构的基本性能 and 设计原理,也注意介绍有关钢结构实际设计的基本知识和方法。工程结构设计必须遵照有关设计规范,本书以《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153-92)、《钢结构设计规范》(GBJ 17-88)、《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99-98)、《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74-95)等为依据编写。

为了拓宽学生的专业面,书中论述了土木工程中的普通钢结构与水利和水电工程中的水工钢结构方面的内容。全书分为概论、钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件、梁、拉弯和压弯构件、钢桁架、平面钢闸门共八章。为了培养学生分析和解决问题的能力,书中较详尽地论述了各类构件和连接的设计方法,并编入了较多的例题、习题。鉴于目前各高等学校及不同专业的教学时数不统一,教学时可根据具体情况来选择教材内容。

本书第一、二、四、五、六、七章由曹平周编写,第三、八章由朱召泉编写,并相互进行校阅,最后由曹平周总校。

限于编者的水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。



图书发行、经营处



图书编务处

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 钢结构的特点和应用	(1)
第二节 钢结构的设计方法	(3)
第三节 钢结构的发展概况	(11)
思考题	(13)
第二章 钢结构的材料	(14)
第一节 钢结构对所用材料的要求	(14)
第二节 钢材的主要机械性能	(15)
第三节 影响钢材性能的主要因素	(17)
第四节 钢材的疲劳	(21)
第五节 钢材的钢种、钢号及选择	(26)
思考题	(29)
第三章 钢结构的连接	(30)
第一节 钢结构的连接方法	(30)
第二节 焊接方法、焊缝类型和质量级别	(31)
第三节 对接焊缝连接的构造和计算	(36)
第四节 角焊缝连接的构造和计算	(40)
第五节 焊接残余应力和焊接残余变形	(51)
第六节 普通螺栓连接的构造和计算	(55)
第七节 高强度螺栓连接的性能和计算	(65)
思考题	(71)
习题	(72)
第四章 轴心受力构件	(75)
第一节 概述	(75)
第二节 轴心受力构件的强度和刚度计算	(76)
第三节 轴心受压构件的整体稳定	(77)
第四节 轴心受压构件的局部稳定	(86)
第五节 轴心受压构件的设计	(89)
思考题	(97)
习题	(98)
第五章 梁	(99)
第一节 概述	(99)
第二节 梁的强度和刚度计算	(100)
第三节 梁的整体稳定	(105)
第四节 梁的局部稳定	(110)

第五节 钢梁的设计	(121)
第六节 梁的拼接和连接	(132)
思考题	(135)
习题	(136)
第六章 拉弯和压弯构件	(138)
第一节 概述	(138)
第二节 拉弯、压弯构件的强度和刚度计算	(140)
第三节 压弯构件的整体稳定	(142)
第四节 实腹式压弯构件的局部稳定	(154)
第五节 压弯构件的截面设计和构造要求	(156)
第六节 框架梁与柱的连接和柱的拼接	(161)
第七节 柱脚设计	(164)
思考题	(173)
习题	(173)
第七章 钢桁架	(176)
第一节 概述	(176)
第二节 桁架支撑	(177)
第三节 桁架的杆件设计	(180)
第四节 桁架的节点设计	(186)
第五节 桁架的施工图	(194)
思考题	(195)
第八章 平面钢闸门	(196)
第一节 概述	(196)
第二节 平面钢闸门的组成和结构布置	(197)
第三节 平面钢闸门的结构设计	(203)
第四节 平面钢闸门的零部件设计	(214)
第五节 平面钢闸门的埋设部件	(223)
第六节 设计例题——露顶式平面钢闸门设计	(227)
思考题	(241)
附录一 材料的化学和机械性能	(242)
附录二 轴心受压构件的稳定系数	(246)
附录三 型钢和螺栓规格	(256)
附录四 矩形弹性薄板承受均载的弯应力系数 k	(276)
附录五 钢闸门自重估算公式	(277)
附录六 材料的摩擦系数	(278)
附录七 轴套的容许应力和混凝土的容许应力	(279)
参考文献	(280)

第一章 概 论

第一节 钢结构的特点和应用

一、钢结构的特点

钢结构是用钢材制造而成的工程结构。通常它采用型钢、钢板加工制造而成。但在有些钢结构中,采用了钢索来作为受拉构件。钢结构与钢筋混凝土结构、砌体结构等都属于按材料划分的工程结构的不同分支。钢结构与其他结构相比,具有下列特点:

1. 可靠性高 钢材在钢厂生产时,整个过程可严格控制,质量比较稳定。钢材组织均匀,接近于各向同性匀质体;钢材的物理力学特性与工程力学对材料性能所作的基本假定符合较好;钢结构的实际工作性能比较符合目前采用的理论计算结果。所以说钢结构的可靠性高。

2. 材料的强度高,钢结构自重轻 与混凝土、砖石材料相比,虽然钢材的重力密度大,但它的强度和弹性模量较高,而且强度与重力密度之比也高得多。在同样的受力条件下,钢结构构件的截面积要小得多,结构的自重轻。以常见的 24 m 跨度厂房屋架为例,当承受相同的荷载时,每榀钢屋架的重量为 2.1~2.7 t,而预应力钢筋混凝土屋架的重量为 6.4~11.3 t,后者为前者的 3~4 倍。若采用冷弯薄壁型钢屋架,其自重接近钢筋混凝土屋架的 1/10。钢结构自重轻,便于运输和安装。

3. 钢材的塑性和韧性好 钢材的塑性好,钢结构在一般条件下不会因超载等而突然断裂。破坏前一般都会产生显著的变形,易于被发现,可及时采取补救措施,避免重大事故发生。钢材的韧性好,钢结构对动力荷载的适应性强,具有良好的吸能能力,抗震性能优越。

4. 钢结构制造简便,施工工期短 钢结构一般在专业工厂制造,易实现机械化,生产效率和产品精度高,质量易于保证,是工程结构中工业化程度最高的一种结构。构件制造完成后,运至施工现场拼装成结构。拼装可采用安装方便的螺栓连接,有时还可在地面拼装成较大的单元,再进行吊装。施工工期短,可尽快发挥投资的经济效益。我国已建成的某 240 m × 315 m 全钢结构厂房,建筑面积达 7.6 万 m²,其结构安装仅用了 98 天。由于钢结构具有连接的特性,故易于加固、改建和拆迁。

5. 钢结构密闭性好 钢结构采用焊接连接可制成水密性和气密性较好的常压和高压容器结构和管道。

6. 钢材的耐锈蚀性差 在没有腐蚀性介质的一般环境中,钢结构经除锈后再涂上合格的防锈涂料,锈蚀问题并不严重。但在潮湿和有腐蚀性介质的环境中,钢结构容易锈蚀,需定期维护,增加了维护费用。我国已研究生产出抗锈蚀性能良好的耐大气腐蚀钢,并用于工程结构。

7. 钢结构耐热但不耐火 当钢材受热温度在 200℃ 以内时,其主要性能变化很小,具有较好的耐热性能。但是,当温度在 600℃ 以上时,其承载力几乎完全丧失。所以说钢材不耐

火。当温度在 250℃ 左右时,钢材的塑性和韧性降低,破坏时常呈脆性断裂。考虑一定的安全储备,当结构表面长期受辐射热的温度大于 150℃ 时,需加隔热防护层。当有防火要求时,要采取防火措施。

8. 钢材在低温时脆性增大。

二、钢结构的应用范围

根据钢结构的特点,应注意扬长避短,合理使用钢结构。在建筑工程和水利水电工程中,钢结构的主要应用范围如下:

1. 大跨度结构 随着结构跨度增大,结构自重在全荷载中所占的比重也就越大,减轻自重可获得明显的经济效益。对于大跨度结构,钢结构重量轻的优点显得特别突出。我国上海的可容纳 8 万人体育馆是一平面为椭圆形的建筑,采用了由径向悬挑桁架和环向桁架组成的空间钢屋盖结构。长轴为 288.4 m,短轴为 274.4 m,屋盖最大悬挑跨度达 73.5 m。水利枢纽工程中的垂直升船机的行车大梁,不仅跨度大,而且承受荷载也大,通常采用钢结构。

2. 高层建筑 高层建筑已成为现代化城市的一个标志。钢材强度高和钢结构重量轻的特点对高层建筑具有重要意义。强度高则构件截面尺寸小,可提高有效使用面积。重量轻可大大减轻构件、基础和地基所承受的荷载,降低基础工程等的造价。当今世界上最高的 50 幢建筑中,钢结构和钢-混凝土混合结构占 80% 以上。1974 年建成的纽约西尔斯大厦,共 110 层,总高度达 443 m,为全钢结构建筑。1996 年建成的吉隆坡石油大厦有 88 层,总高度达 450 m,采用的是钢-混凝土混合结构。近年来,我国的高层建筑钢结构如雨后春笋般拔地而起。1997 建成的上海金茂大厦,为 88 层,总高度为 420.5 m;同年 8 月在上海浦东开工兴建的海上环球金融中心,为 98 层,总高度为 460 m;大连的远洋大厦,共 56 层,总高度为 201 m,设计、制造、安装和材料全部由国内承担和供应。这表明完全由我国自己来建造超高层钢结构是可以做到的。

3. 工业建筑 当工业建筑的跨度和柱距较大,或者设有大吨位吊车,结构需承受大的动力荷载时,往往部分或全部采用钢结构。为了缩短施工工期,尽快发挥投资效益,近年来我国的普通工业建筑也大量采用了钢结构。

4. 轻型结构 称使用荷载较小或跨度不大的结构为轻型结构。自重是这类结构的主要荷载,常采用冷弯薄壁型钢或小型钢制成的轻型钢结构。

5. 高耸结构 如塔架和桅杆等,它们的高度大,构件的横截面尺寸较小,风荷载和地震常常起主要作用,自重对结构的影响较大,常采用钢结构。

6. 活动式结构 如水工钢闸门、升船机等,可充分发挥钢结构重量轻的特点,降低启闭设备的造价和运转所耗费的动力。我国已建成的葛洲坝水利工程中的 2 号船闸为单级,采用了人字钢闸门,闸门孔口净宽 34 m,水头高 27 m,门高 32.6 m,每扇门宽 20.34 m,重量达 500 t。它是我国目前已建成的最大的人字钢闸门,也是当今世界上大型船闸闸门之一。我国正在兴建的三峡水利枢纽工程的永久船闸设计采用双线五级连续梯级船闸,闸门孔口净宽 34 m,第一级至第五级均采用人字钢闸门,第一、四、五级门高 37.5 m,第二、三级门高 38.5 m,总水级差 113 m。闸门的规格等将大大超过葛洲坝船闸。

7. 可拆卸或移动的结构 如施工用的建筑和钢栈桥、流动式展览馆、移动式平台等,可发挥钢结构重量轻,便于运输和安装方便的优点。

8. 容器和大直径管道 如贮液(气)罐、输(油、气、原料)管道、水工压力管道等。三峡水

利枢纽工程中的发电机组采用的压力钢管内径达 12.4 m, 钢管壁厚达 60 mm。

9. 抗震要求高的结构。

10. 急需早日交付使用的工程或运输条件差的工程。可发挥钢结构施工工期短和重量轻便于运输的特点。

综上所述, 钢结构是在各种工程中广泛应用的一种重要的结构形式。随着我国经济建设的发展和钢产量的提高, 钢结构将会发挥日益重要的作用。

第二节 钢结构的设计方法

一、结构设计的目的

任何结构都是为了完成所要求的某些功能而设计的。工程结构必须具备下列功能:

(1) 安全性 结构在正常施工和正常使用条件下, 承受可能出现的各种作用的能力, 以及在偶然事件发生时和发生后, 仍保持必要的整体稳定性的能力。

(2) 适用性 结构在正常使用条件下, 满足预定使用要求的能力。

(3) 耐久性 结构在正常维护条件下, 随时间变化而仍能满足预定功能要求的能力。结构的安全性、适用性、耐久性总称为结构的可靠性。结构设计(计算)的目的是在满足各种预定功能的前提下, 做到技术先进、安全适用、经济合理和确保质量。要实现这一目的, 必须借助于合理的设计方法。

二、设计方法

1. 影响结构可靠性的因素

以 S 表示荷载效应, 指荷载作用引起的结构或构件的内力、变形等。 R 表示结构的抗力, 指结构或构件承受荷载效应的能力, 如承载力、刚度等。对于一般的工程结构, 影响结构可靠性的因素可以归纳为荷载效应和结构抗力两个基本变量。那么

$$Z = R - S \quad (1-1)$$

Z 为表示结构完成预定功能状态的函数, 简称功能函数。当 $Z > 0$ 时, 结构能满足预定功能的要求, 处于可靠状态; 当 $Z < 0$ 时, 结构不能实现预定功能, 处于失效状态; 当 $Z = 0$ 时, 结构处于可靠与失效的临界状态, 一旦超过这一状态, 结构将不再能满足设计要求。因此也称之为极限状态。影响 S 的主要因素是各种荷载的取值, 而荷载的取值常有变异, 是一随机变量, 有的还是与时间有关的随机过程。影响 R 的主要因素有结构材料的力学性能、结构的几何参数和抗力的计算模式等, 它们也都是随机变量。例如, 钢厂提供的材料, 其性能不可能没有差异; 在制作和安装中, 结构的尺寸不可能没有误差; 计算抗力所采用的基本假设和方法也不可能完全精确。随机性因素的量值是不确定的, 但却服从概率和统计规律, 采用概率理论处理随机变量是最适宜的方法。在我国的国家标准《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153-92) 中, 明确指出“工程结构设计宜采用分项系数表达的以概率理论为基础的极限状态设计方法”。简称概率极限状态设计法。

2. 概率极限状态设计法

结构设计应考虑下列两种极限状态:

(1) 承载能力极限状态 结构或构件达到最大承载能力, 或达到不适于继续承载的变形

的极限状态。如限制受弯构件截面上塑性区的发展不能超过某一限值,就是考虑使其不致产生不适于继续承载变形的一个例子。

(2) 正常使用极限状态 结构或构件达到使用功能上允许的某一限值的极限状态。

为了定量地描述结构的可靠性,需引入可靠度的概念。结构可靠度定义为“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”。规定的时间称为设计基准期,在我国的设计标准中一般结构取为 50 年。即在 50 年内可以保证结构具有规定的可靠概率,超过 50 年,结构虽仍然可能继续使用,但其可靠概率将有所减小。规定的条件是指结构必须满足正常的设计、正常施工、正常使用和正常维护条件。以 P_f 和 P_r 分别表示结构的可靠度和失效概率,则有

$$\left. \begin{aligned} P_f &= P(Z < 0) \\ P_r &= P(Z \geq 0) = 1 - P_f \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

可见结构可靠度的计算可以转换为结构失效概率的计算。由于结构失效概率的计算涉及的基本变量具有不定性,作用在结构上的荷载潜在着出现高值的可能性,材料性能也潜在着出现低值的可能性,也就无法保证所设计的结构绝对可靠(失效概率为零)。当结构的失效概率小到某一公认的、大家可以接受的程度,则认为该结构是安全可靠的,即可靠性满足要求。

图 1-1 所示功能函数 Z 的概率密度 $f(Z)$ 曲线,失效概率可用图中的阴影区面积来表示,计算公式为

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f(Z) dZ \quad (1-3)$$

由于目前尚难求出 Z 的理论概率分布,难以用积分法求得结构的失效概率,因此,必须采用简化方法。由图 1-1 可见阴影区的面积与 Z 的平均值 μ_Z 和标准差 σ_Z 的大小有关。增大 μ_Z , 曲线右移,阴影区的面积将减小;减小 σ_Z , 曲线将变高变窄,阴影区的面积也将减小。现将曲线的对称轴至纵轴的距离表示成 σ_Z 的倍数,即令

$$\beta = \mu_Z / \sigma_Z \quad (1-4)$$

β 大,则失效概率就小。故 β 和失效概率一样,可作为衡量结构可靠度的一个指标,称为可靠指标。

设 S 和 R 服从正态分布,则 Z 也服从正态分布。可知

$$\left. \begin{aligned} \mu_Z &= \mu_R - \mu_S \\ \sigma_Z &= \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 μ_R, σ_R —— R 的平均值和标准差;

μ_S, σ_S —— S 的平均值和标准差。

由于 σ_Z 为正值,失效概率可写为

$$P_f = P(Z < 0) = P\left(\frac{Z}{\sigma_Z} < 0\right) = P\left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} < -\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (1-6)$$

因为 $\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}$ 服从标准正态分布,用 $\phi(\cdot)$ 表示标准正态分布函数,则有

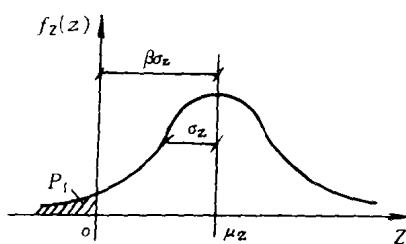


图 1-1 Z 的概率密度曲线

$$P_f = \phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right)$$

$$\text{即} \quad P_f = \phi(-\beta) \quad (1-7)$$

可见 β 和 P_f 具有数值上的一一对应关系。已知 β 后即可由标准正态分布函数值表中查得 P_f 。确定 β 并不要求知道 S 和 R 得分布,只要知道它们的平均值和标准差,就可由式(1-5)和式(1-4)式算得 β 值。

当 S 和 R 不服从正态分布时,可作当量正态变换,求出其当量正态分布的平均值和标准差后,就可按正态随机变量一样对待。

由于上述的 β 值计算避开了 Z 的全分布推求,只采用分布的特征值一阶原点矩(平均值) μ_Z 和二阶中心矩(方差) σ_Z 来表示,其中最高阶为二;且把影响结构满足功能要求的各个随机变量归纳和简化为两个基本变量 S 和 R ,并遵循线性关系(一次式),所以称这种方法为考虑基本变量概率分布类型的一次二阶矩极限状态设计方法。这种方法在结构可靠度分析中还存在一定近似性,故也称为近似概率极限状态设计法。

结构设计应依一预先规定的可靠指标作为依据,称其为目标可靠指标,也称为设计可靠指标。因为设计可靠指标的选择直接与结构造价、维修费用以及失效后果等有关,失效后果不仅涉及生命财产的损失,有时还会产生严重的社会影响,所以是制定设计规范的一个重要问题。从理论上说应根据结构构件的重要性、破坏性质及失效后果,以优化方法确定。但实际上这些因素目前还难以找到合理的定量分析方法。因此,一般是通过对原有规范作反演计算,找出隐含在现有工程结构中相应的可靠指标,经过综合分析后,确定今后设计结构时采用的目标可靠指标。这种方法的实质是从整体上继承现有的可靠度水准,是一种稳妥可行的方法,这种方法称为校准法。不同的工程结构,如建筑结构与港口工程结构,具有不同的目标可靠指标。对于承载能力极限状态,《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68-84)规定的结构构件的可靠指标 β 值及与 β 值相应的失效概率 P_f 见表 1-1。

表 1-1 结构构件承载能力极限状态设计时采用的 β (及 P_f) 值

构件类型	安 全 等 级		
	一 级	二 级	三 级
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(1.34×10^{-5})	3.7(1.08×10^{-4})	3.2(6.87×10^{-4})

表 1-1 中提到的结构安全等级,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。依破坏后果很严重、严重或不严重,划分为一、二或三级。重要的工业与民用建筑为一级,如影剧院、体育馆及高层建筑;一般的工业与民用建筑为二级;次要的建筑物为三级。延性破坏指结构或构件在破坏前有明显变形或其他预兆的破坏类型,也称为塑性破坏;脆性破坏指结构或构件在破坏前无明显变形或其他预兆的破坏类型。

钢结构的连接是以破坏强度而不是以屈服作为承载能力的极限状态,其可靠指标 β 值应比构件高,一般可取 4.5。对于正常使用极限状态设计时采用的 β 值,应根据构件的特点和工程经验确定,一般可取 $\beta = 1.0 \sim 2.0$ 。

直接使用给定的可靠指标进行结构设计,由于某些与设计有关的统计参数还不容易求得,且计算繁复,不便于设计应用。《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153-92)指出,采用将

一次二阶矩设计方法公式等效地转化为以“分项系数表达的概率极限状态设计表达式”。分项系数是按照目标可靠指标 β 并考虑工程经验确定的,因而计算结果能满足可靠度的要求。采用的设计表达式使结构设计仍可按传统的方式进行,符合设计人员的习惯,使用比较方便。

《钢结构设计规范》(GBJ 17-88)对于承载能力极限状态采用应力表达式。抗力采用钢材的强度设计值 f ,其值为钢材的屈服强度标准值 f_y 除以抗力分项系数 γ_R 。为了计算简便,取 γ_R 为定值,应使得所设计的构件的实际 β 值与目标可靠指标的偏差最小。经分析,对于 Q235 钢,取 $\gamma_R=1.087$;对于 Q345(16Mn)钢和 Q390(15MnV)钢及 Q420(15MnVN)钢,取 $\gamma_R=1.111$ 。考虑荷载效应的基本组合,采用的一般表达式为

$$\gamma_0(\gamma_G\sigma_{GK} + \gamma_{Q1}\sigma_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci}\gamma_{Qi}\sigma_{QiK}) \leq f \quad (1-8)$$

式中, γ_0 为结构重要性系数,对于安全等级为一、二和三级的结构,可分别取 1.1, 1.0 和 0.9; σ_{GK} 为永久(恒)荷载的标准值在结构构件截面或连接中产生的应力; σ_{Q1K} 和 σ_{QiK} 分别为第一个和第 i 个可变(活)荷载的标准值在结构构件截面或连接中产生的应力,产生应力最大的可变荷载为第一个; γ_G 为永久荷载分项系数,一般情况取 1.2,当 σ_{GK} 与 σ_{QK} 异号时,取 1.0; γ_{Q1} 和 γ_{Qi} 分别为第一个和第 i 个可变荷载的分项系数,一般取 1.4; ψ_{ci} 为第 i 个可变荷载的组合系数,当风荷载与其他可变荷载组合时,可均采用 0.6,当没有风荷载参与组合时,取 1.0。钢材强度设计值见表 1-2;焊缝的强度设计值见表 1-3;螺栓连接的强度设计值见表 1-4。当为表 1-5 中所列情况时,上述附表中的强度设计值应乘以表 1-5 中的折减系数。

表 1-2 钢材的强度设计值(N/mm²)

钢 材	厚度或直径 (mm)	抗拉、抗压和抗弯 f	抗 剪 f_v	端面承压(刨平顶紧) f_{ce}
Q235 钢	≤ 16	215	125	320
	$> 16 \sim 40$	205	120	320
	$> 40 \sim 60$	200	115	320
	$> 60 \sim 100$	190	110	320
Q345 钢	≤ 16	315	185	410
	$> 16 \sim 35$	300	175	410
	$> 35 \sim 50$	270	155	410
	$> 50 \sim 100$	250	145	410
Q390 钢	≤ 16	350	205	415
	$> 16 \sim 35$	335	190	415
	$> 35 \sim 50$	315	180	415
	$> 50 \sim 100$	295	170	415
Q420 钢	≤ 16	380	220	440
	$> 16 \sim 35$	360	210	440
	$> 35 \sim 50$	340	195	440
	$> 50 \sim 100$	325	185	440

注:1. Q235 镇静钢钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值,可按表中数值增加 5%;

2. 轧制工字钢和轧制槽钢的厚度建议采用其翼缘的厚度

表 1-3 焊缝的强度设计值(N/mm²)

焊接方法和 焊条型号	构 件 钢 材		对 接 焊 缝			角焊缝	
	钢号	厚度或	抗压 f_c^w	抗拉和弯曲抗拉 f_t^w		抗拉、抗 压和抗剪 f_t^w	
		直径 (mm)		当焊缝质量级别为 一、二级 三级	抗剪 f_v^w		
自动焊、半自动焊 和 E43××型焊条 手工焊	Q235 钢	≤16	215	215	185	125	160
		>16~40	205	205	175	120	160
		>40~60	200	200	170	115	160
		>60~100	190	190	160	110	160
自动焊、半自动焊 和 E50××型焊条 手工焊	Q345 钢	≤16	315	315	270	185	200
		>16~35	300	300	255	175	200
		>35~50	270	270	230	155	200
		>50~100	250	250	210	145	200
自动焊、半自动焊 和 E55××型焊条 手工焊	Q390 钢	≤16	350	350	300	205	220
		>16~35	335	335	285	190	220
		>35~50	315	315	270	180	220
		>50~100	295	295	250	170	220
自动焊、半自动焊 和 E55××型焊条 手工焊	Q420 钢	≤16	380	380	320	220	220
		>16~35	360	360	305	210	220
		>35~50	340	340	290	195	220
		>50~100	325	325	275	185	220

注：(1) 自动焊和半自动焊所采用的焊丝和焊剂，应保证其熔敷金属抗拉强度不低于相应手工焊焊条的数值；

(2) 焊缝质量等级应符合现行《钢结构工程施工及验收规范》的规定；

(3) 对接焊缝抗弯受压区强度设计值取 f_c^w ，抗弯受拉区强度设计值取 f_t^w 。

表 1-4 螺栓连接的强度设计值(N/mm²)

螺(锚)栓钢材的等级 和构件的钢材牌号		普 通 螺 栓						锚 栓	承压型高强度螺栓		
		C 级螺栓			A 级、B 级螺栓				抗拉	抗剪	承压
		抗拉 f_t^b	抗剪 f_v^b	承压 f_c^b	抗拉 f_t^b	抗剪 f_v^b	承压 f_c^b				
普通螺栓	4.6 级、4.8 级	170	130	—	—	—	—	—	—	—	
	8.8 级	—	—	—	350	250	—	—	—	—	
锚 栓	Q235 钢	—	—	—	—	—	—	140	—	—	
	Q345 钢	—	—	—	—	—	—	180	—	—	
承压型高 强度螺栓	8.8 级	—	—	—	—	—	—	—	250	—	
	10.9 级	—	—	—	—	—	—	—	310	—	
构 件	Q235 钢	—	—	305	—	—	400	—	—	465	
	Q345 钢	—	—	385	—	—	510	—	—	590	
	Q390 钢	—	—	400	—	—	530	—	—	615	
	Q420 钢	—	—	425	—	—	560	—	—	655	

表 1-5 结构构件或连接的强度设计值的折减系数

序号	情 况	折减系数
1	单面连接的单角钢	
	(1)按轴心受力计算强度和连接	0.85
	(2)按轴心受压计算稳定性	
	等边角钢	$0.6 + 0.0015 \lambda \leq 1.0$
	短边相连的不等边角钢	$0.5 + 0.0025 \lambda \leq 1.0$
	长边相连的不等边角钢	0.7
2	进行塑性设计时	0.90
3	圆钢、小角钢的轻型结构	
	(1)拱的双圆钢拉杆及其连接	0.85
	(2)平面桁架式檩条和三角拱斜梁,其端部主要受压腹杆	0.85
	(3)其他杆件和连接	0.95
4	施工条件较差的高空安装焊缝和铆钉连接	0.90
5	沉头和半沉头铆钉连接	0.80

注:①当几种情况同时存在时,其折减系数应连乘;

② λ 为长细比,对中间无联系的单角钢压杆,应按最小回转半径计算,当 $\lambda < 20$ 时,取 $\lambda = 20$

对于正常使用极限状态,钢结构设计只考虑荷载的短期效应组合,其设计表达式为

$$w = w_{GK} + w_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} w_{QiK} \leq [w] \quad (1-9)$$

式中, w 为结构或构件产生的变形值; w_{GK} 为永久荷载的标准值在结构或构件产生的变形值; w_{Q1K} 和 w_{QiK} 分别为第1个和第*i*个可变荷载的标准值在结构或构件产生的变形值; $[w]$ 为结构或构件的容许变形值。

上述设计方法是《钢结构设计规范》(GBJ17-88)采用的方法。对于直接承受动力荷载的结构:在计算强度和稳定性时,动力荷载设计值应乘动力系数;在计算疲劳和变形时,动力荷载标准值则不乘动力系数。它不仅适用于房屋和一般构筑物钢结构的设计,而且也适用于水工建筑物的水上部分钢结构的设计。

3. 现行水工钢结构专门规范的设计方法

水利、水电工程中的水工钢结构种类较多,主要有钢闸门、压力钢管、启闭机和拦污栅等。设计时必须遵守相应的各专门设计规范。根据《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153-92),这些结构也必须采用“以分项系数表达的概率极限状态设计法”。这是当前国际上结构设计的先进方法,亦是结构设计必须采用的设计方法。但要达到这一步,必须具备一定的条件——通过一系列大规模调查,获取统计资料,确定一系列分项系数。目前对于水工钢结构而言,由于所涉及的荷载效应和结构抗力的影响因素比较复杂,统计资料不足,还不具备采用以分项系数表达的概率极限状态设计法的条件。因此在现行水工钢结构的各项专门设计规范,如《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74-95)、《水电站压力钢管设计规范(试行)》(SD 144-85)、《水利水电工程启闭机设计规范》(SL 41-93)等,只好暂时保留按容许应力方法进行设计。待条件成熟后,再过度到采用以分项系数表达的概率极限状态设计法。下面介绍以《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74-95)设计方法为主的容许应力设计方法。

容许应力设计法是将影响结构设计的诸因素取为定值,而用一个凭经验确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。其设计表达式为

$$\sigma \leq f_k / K = [\sigma] \quad (1-10)$$

式中, σ 为按荷载的标准值与构件截面公称尺寸(设计尺寸)所计算的应力; f_k 为材料的标准强度,取为钢材的屈服强度标准值; K 为凭经验确定的安全系数; $[\sigma]$ 为容许应力。容许应力设计法形式简单,应用方便。但这种方法采用凭经验确定的、定值的单一安全系数,没有考虑各种结构具体情况的差异,因而不能保证所设计的结构具有比较一致的安全水平。称这种方法为传统的容许应力设计法。

为了改进定值的单一安全系数设计法的缺点,首先考虑荷载和材料强度的不定性,用概率分析方法分别确定荷载系数 k_1 和材料强度安全系数 k_2 。对于荷载特殊变异、结构受力状况和工作条件、施工制造条件等特殊情况下,根据实践经验引入调整系数 k_3 。然后把 3 个系数再综合成单一的安全系数,仍采用容许应力设计法的表达式,结构承载力极限状态的表达式可写成

$$\sigma \leq f_k / (k_1 k_2 k_3) = f_k / K = [\sigma] \quad (1-11)$$

这种方法称为多系数分析单一系数表达的容许应力设计法,是现行《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74-95)和其他水工专门钢结构采用的设计方法。从表达形式看,它与传统的容许应力设计法基本相同,但实质上属于半概率半经验的极限状态设计方法。这种方法除了某些系数仍需凭经验确定外,另一不足点是没有考虑荷载效应和材料抗力的联合概率分布和失效概率。一次二阶矩极限状态设计方法则弥补了这一不足。

《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74-95)给出的钢材的尺寸分组见表 1-6;钢材的容许应力见表 1-7;焊缝的容许应力见表 1-8;普通螺栓连接的容许应力见表 1-9;机械零件的容许应力见表 1-10。对于下列情况,表 1-6~表 1-10 的数值应乘以下列调整系数:

- (1) 大、中型工程的工作闸门及重要的事故闸门为 0.90~0.95;
- (2) 在较高水头下经常局部开启的大型闸门为 0.85~0.90;
- (3) 规模巨大且在高水头下操作而工作条件又特别复杂的工作闸门为 0.80~0.85。

上述调整系数不连乘。对于特殊情况,另行考虑。

表 1-6 钢材的尺寸分组

组 别	钢 材 尺 寸 (mm)		
	Q215、Q235		16Mn, 16Mnq (Q345)
	钢材厚度(直径)	型钢和异型钢的厚度	钢材厚度(直径)
第一组	≤ 16	≤ 15	≤ 16
第二组	$> 16 \sim 40$	$> 15 \sim 20$	$> 16 \sim 25$
第三组	$> 40 \sim 60$	> 20	$> 25 \sim 36$
第四组	$> 60 \sim 100$	—	$> 36 \sim 50$
第五组	$> 100 \sim 150$	—	$> 50 \sim 100$ 方、圆钢
第六组	> 150	—	—

注:① 型钢包括角钢、工字钢和槽钢;

② 工字钢和槽钢的厚度系指腹板厚度