

北京民族学院图书馆
藏书

钢 结 构

钢 结 构

钢 结 构

瞿履谦 李少甫 编著

责任编辑：何寿欢

责任校对：耿 艳

地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路9号

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 13.75印张 1插页 348千字

1991年2月第一版 1991年2月第一次印刷

印数 0001—7000

ISBN 7-5028-0313-0/TU·15

(702)定价：6.80元

清华大学土木工程系《按新规范编写专业用书》

编 委 会

主 编 王国周 龙驭球 沈聚敏 陈肇元 崔京浩

编 委 (以姓氏笔画为序)

支秉琛 邝守仁 刘元鹤 江见鲸 杨德骈

郑金床 袁宗濂

特约编辑 陈金凤

编 委 的 话

新规范已陆续颁布执行，工民建专业在教学、设计方面迫切需要这方面的专业参考书。为此，清华大学土木工程系组织教师编写了这套《按新规范编写专业用书》。主要读者对象是：大专院校、广播电视大学、职工业余大学、继续进修学院工民建专业的师生，土建专业工程设计、施工技术人员以及准备高等教育自学考试的青年。

根据我们多年的教学经验，编写中遵循“内容充实，取材新颖，注重实用，便于自学”的原则，努力做到不仅包括学科的基本内容，而且反映科学技术的最新成果；既重视理论概念的阐述，也注意实际专题和工程实例的讲解。此外，为了减少自学的困难，对于个别内容较深的章节和习题标以注解和提示，绝大多数习题列有答案。以上是我们的主观意愿，问题和缺点一定不少，希望得到同行和读者指教。

在内容的编排上，除了参照清华大学土木工程系有关教学大纲之外，还参考了全国高等教育自学考试土建类自学大纲（草案），以及电视大学、建设部职工高等专科学校等单位所制订的工民建专业的部分教学大纲，使这套专业用书具有较广泛的适用范围，便于有关部门选为教材或教学参考书。

这套书的出版，得到了地震出版社的大力支持，在此谨致谢意。

清华大学土木工程系
《按新规范编写专业用书》编委会
1990年1月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 钢结构的特点	(1)
§ 1-2 钢结构的应用范围	(2)
§ 1-3 钢结构的组成	(2)
§ 1-4 钢结构的设计计算原理和方法	(4)
第二章 钢结构的材料	(12)
§ 2-1 钢材的主要机械性能	(12)
§ 2-2 钢材在复杂应力作用下的工作	(15)
§ 2-3 钢材的疲劳强度与计算	(17)
§ 2-4 影响钢材性能的一些因素	(20)
§ 2-5 钢的种类和选用	(25)
§ 2-6 型钢	(28)
第三章 钢结构的连接	(31)
§ 3-1 概述	(31)
§ 3-2 焊缝连接	(34)
§ 3-3 普通螺栓连接	(49)
§ 3-4 高强度螺栓连接	(58)
习题	(63)
第四章 轴心受拉构件和轴心受压构件	(65)
§ 4-1 概述	(65)
§ 4-2 轴心受拉和轴心受压构件的强度和刚度	(68)
§ 4-3 实腹式轴心受压构件的整体稳定	(71)
§ 4-4 实腹式轴心受压构件的局部稳定和构造	(80)
§ 4-5 实腹式轴心受压构件的截面设计	(84)
§ 4-6 格构式轴心受压构件	(86)
§ 4-7 轴心受压柱的柱脚	(95)
习题	(101)
第五章 梁	(102)
§ 5-1 概述	(102)
§ 5-2 梁的强度	(106)
§ 5-3 梁的整体稳定	(111)
§ 5-4 型钢梁的设计	(120)
§ 5-5 组合梁的设计	(122)
§ 5-6 梁腹板的局部稳定	(128)

§ 5-7 梁的拼接和连接	(138)
习题	(142)
第六章 拉弯构件和压弯构件	(144)
§ 6-1 概述	(144)
§ 6-2 拉弯构件和压弯构件的强度	(147)
§ 6-3 实腹式压弯构件的整体稳定	(149)
§ 6-4 压弯构件板件的局部稳定	(154)
§ 6-5 压弯构件的计算长度和实腹截面设计	(155)
§ 6-6 格构式拉弯构件和压弯构件	(159)
§ 6-7 承受压弯作用柱的柱脚	(163)
习题	(167)
第七章 桁架	(169)
§ 7-1 概述	(169)
§ 7-2 屋盖结构体系和屋盖支撑	(171)
§ 7-3 桁架荷载和杆件内力计算	(176)
§ 7-4 桁架杆件的截面选择	(179)
§ 7-5 桁架的节点设计	(186)
§ 7-6 钢屋架结构施工图	(193)
§ 7-7 钢屋架设计例题	(194)
习题答案	(201)
附录	(202)

第一章 绪 论

§ 1-1 钢结构的特点

钢结构是钢材制成的结构。钢结构通常由型钢和钢板等制成的拉杆、压杆、梁、柱、桁架等构件组成，各构件或部件间采用焊缝、螺栓或铆钉连接。钢结构与钢筋混凝土、木、砖石等结构相比有以下特点：

(1) 材质均匀，工作可靠性高 钢材在钢厂生产，检验控制较严格，质量较稳定。而且钢材组织均匀，各向的物理力学性质接近，比较符合结构理论计算中通常采用的材料为均匀和各向同性体的假定。因而钢结构的实际受力情况与理论计算结果比较符合，工作可靠性高。

(2) 强度高，重量轻 钢材的密度虽比其它建筑材料大，但其强度和弹性模量高得多，而且抗拉和抗压强度相同并都较高；故钢材重力密度与设计强度的比值比混凝土或砖、石的比值小得多，比木材的比值也小；因而钢结构的自重轻。例如，当荷载和跨度相同时，钢屋架结构自重约为钢筋混凝土屋架的30~45%；在轻型钢屋架中，甚至可仅为20%以下。

(3) 塑性和韧性好，抗冲击和振动的能力强 钢材不仅强度高、材质接近均匀等向，而且一般具有良好的塑性和韧性；故钢结构在一般条件下不会因偶然或局部超载而突然断裂破坏，对冲击和振动荷载的作用有较强的耐受能力。

(4) 适于机械加工，工业化生产程度高 钢结构通常在机械化程度较高的工厂制造，因而生产效率高、速度快，制造精确度高、质量好，是工业化生产程度最高的一种结构。

(5) 运输、安装方便，建造速度快 钢结构自重轻并耐冲击和振动，因而便于运输和安装。此外，由于结构构件制造精确且可采用螺栓连接，使现场的拼接和安装容易，建造期短。

(6) 材质密实，易于制成不漏气、不漏水等的密闭性结构 这个特点使钢结构特别适宜于制造压力容器和大直径输送管道等。

(7) 耐热性较好 钢材在常温至200℃温度范围内的强度和弹性模量变化很小，因而钢结构有较好的耐一定高温而正常工作的能力。但是，当结构表面长期受150℃以上的辐射热，或在短时间内受更高温度作用时，通常须采取隔热防护措施。

(8) 耐火性差 钢材温度超过300~400℃时，强度和弹性模量急剧降低；达到600℃以上时将完全失去承载能力。此外，由于钢材导热性好，局部和表面遭受火灾作用时，极易迅速引起整个构件或结构温度的急剧升高，致使结构降低或完全丧失承载能力；因而钢结构是一种不耐火的结构。对可能遭受大火突然袭击的钢结构，需采取防火保护措施，使在着火后一定时间内能正常承受荷载；例如可在结构或其构件外面包以石棉、混凝土，或在构件表面喷涂一层含蛭石、石棉等的水泥浆或其它防火涂料。

(9) 易于锈蚀，维护费用较高 一般钢材不耐锈，因而钢结构、特别是在潮湿和有侵蚀

性介质中的钢结构易于锈蚀。所以,钢结构不但在初建时需要采取除锈、刷漆或镀锌等防锈措施,而且一般要求定期检修,因而维护费用较高。

§ 1-2 钢结构的应用范围

按照钢结构的特点,它可适用于许多工程结构。但其应用还受到国家钢材生产和供应情况的制约。目前,钢结构常用于跨度大、高度大、或者荷载或动力作用大的各种工程结构,也常用于需要经常装拆或搬迁的结构;轻型钢结构则因其布置灵巧和制造安装方便而常用于小跨度轻屋面的各类房屋。钢结构在建筑工程中的应用范围大致是:

(1) 重型工业厂房重型车间的承重骨架和吊车梁结构 例如冶金工厂的炼钢、轧钢等车间和重型机器制造厂的铸钢、水压机、锻压、总装配等车间。由于生产工艺的需要,这些车间的高度和跨度大,通常设有大吨位的中级或重级工作制吊车;有些车间并有较宽的柱间距,或有较强的设备振动作用(锻压车间等),或结构表面经常受到高温辐射作用(热加工车间等)。因此,这些重型车间的承重骨架和吊车梁常采用钢结构。

(2) 大跨度房屋建筑的屋盖结构 体育馆、影剧院、大会堂等公共建筑以及飞机装配车间或检修库等工业建筑要求有较大的内部自由空间,故屋盖结构的跨度常很大,减轻屋盖结构的自重成为结构设计的突出问题;因而常需采用材料强度高而重量轻的钢结构。

(3) 多层和高层建筑的骨架 工业建筑中多层框架和民用建筑中高层建筑的骨架结构,常因所受荷载和高度尺寸较大,或为提高抗地震性能,或为加快建设速度,或为固定和安装工艺设备的方便等原因而采用钢结构。

(4) 塔桅结构 如高压输电线路塔架、石油化工排气塔架、环境气象塔架和桅杆,以及无线电(广播、电视等)塔架和桅杆等高耸结构。常采用钢结构。这类结构的特点是高度大和主要承受风荷载,采用钢结构可以减轻自重、方便架设和安装,并因构件截面小而使风荷载大大减小。

(5) 可装拆和搬迁的结构 如流动式展览馆、移动式混凝土搅拌站、装配式活动房屋结构等,由于有便于装拆和运输的要求而常采用钢结构。

(6) 容器和大直径管道 如储液库、储气库、囤仓、料斗等容器以及大直径输气和输油管道等常需采用钢结构(主要用钢板制成),以保证其在所需压力作用下不渗漏和耐久。

(7) 轻型结构 跨度小、屋面轻的工业、民用和商业房屋常采用小角钢、圆钢或冷弯薄壁型钢组成的轻型钢屋盖结构。对于这种荷载和尺寸很小的结构和构件,采用自重很小的轻型钢结构特别有利,因为只要很小型钢或圆钢截面就能满足承重要求;如果采用钢筋混凝土结构,则结构自重将占荷载主要部分而使受力不利。轻型钢结构还使结构布置灵活,制造、安装和运输方便。

除上述工业与民用建筑结构工程外,钢结构还常在大跨度铁路和公路桥梁、水工闸门、起重机械结构和海洋采油平台结构等工程中采用。

§ 1-3 钢结构的组成

钢结构通常由型钢和钢板等经加工、组合和连接制成拉杆、压杆、梁、柱、桁架等构

件，再由各构件经总拼装和连接组成整体钢结构，以满足使用要求。常用钢结构的类型有：梁式、桁架式、框架式和拱式等。此外还有以钢丝绳(或钢绞线)为主要受力部件组成的悬索体系结构；以及主要由钢板加工制成的容器或大直径管道等的板壳类型的结构等。不同类型钢结构的组成方法和受力情况各有特点，举例简单说明如下。

(1) 梁式结构 梁是以承受弯曲为主的结构构件。梁常用于房屋的楼盖和屋盖以及车间的工作平台结构。通常采用许多平行放置的梁，其上铺放面板承受荷载；也可采用主次梁组成的梁格体系(参见图 5-1)；也可以单独放置受力，如吊车梁、手动或电动葫芦的轨道梁等；桥梁和桥式吊车桥架则常采用成对放置的梁。

(2) 桁架式结构 桁架是由杆件相互交接组成的格构式结构。桁架整体通常是以承受弯曲为主，其受力和应用情况与梁相仿，一般用在跨度和高度较大时。但是，当桁架仅在节点处受荷载时，桁架各杆件基本上只承受轴心力(拉力或压力)。

图 1-1 是由平行放置的梯形钢桁架(屋架)组成的钢屋盖结构；支承于墙或柱的钢屋架上布置檩条，檩条上铺放屋面板承受屋面荷载；各榀屋架间用支撑或系杆互相联系成为空间整体，以保证屋盖结构的空间刚度和稳定性。

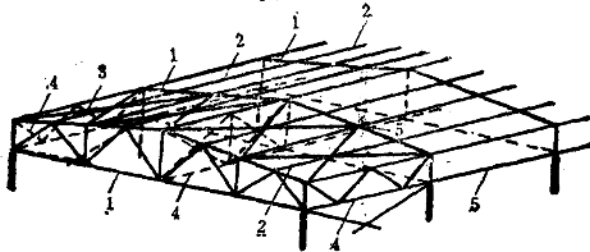


图 1-1 平面桁架式钢屋盖结构

1. 屋架；2. 檩条；3. 屋架水平支撑；4. 屋架垂直支撑；5. 系杆

塔架结构通常由三面或更多面的平面桁架所组成；当为四面以上时应每隔一定高度设置水平横隔以保证其空间刚度。网架结构是目前常用于较大跨度屋盖结构的一种空间桁架结构，在节点力作用下各杆主要也是受轴心力。由于空间多方向传力常比平面桁架结构体系节省钢材。

(3) 框架式结构 框架是由梁和柱等构件相互连接组成的结构。其中梁一般是以受弯为主并受少量拉力或压力；柱则通常是压弯构件。框架可为单跨的或多跨的；单层的或多层的；平面的或空间的。梁和柱的连接可为刚接的(常称为刚架)、铰接的、或只能承受一定弯矩的柔性连接的。

框架常用于单层厂房和大跨度房屋结构(图 1-2)，一般采用平行布置的平面框架，侧向用支撑系统、系杆和檩条等保证其刚度和稳定。柱和梁可以做成等截面或变截面、实腹式或格构式(图 1-2)。为了提高框架的刚度，单层框架常做成刚架，即梁和柱、柱和基础都做成刚接(图 1-2 a、c)；但也可做成两铰或三铰框架(图 1-2 b)。

框架也常用作多层和高层房屋的承重骨架。一般做成空间刚架(图 1-3 a)，也可在两个方向或一个方向部分做成铰接框架而在相应方向的一定部位设置支撑系统(图 1-3 b)或剪力墙

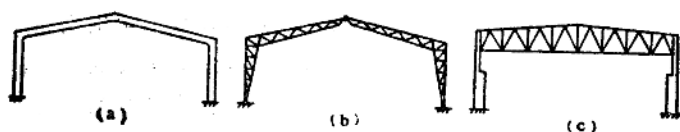


图 1-2 单层房屋框架结构
(a) 实腹式; (b) 格构式; (c) 混合式

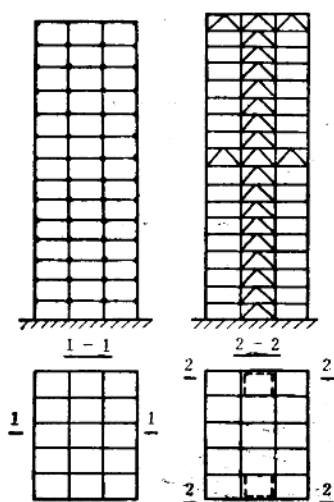


图 1-3 多层房屋框架结构
(a) 无支撑刚架; (b) 有支撑框架

等, 以保证空间刚度和稳定性。

(4) 拱式结构 拱式结构的杆轴线呈曲线形, 在房屋中常用于大跨度体育馆、展览馆、飞机库等的承重骨架; 通常是平行放置的实腹式或格构式(桁架式)拱, 各拱间用支撑系统、系杆和檩条等联系, 以保证侧向刚度和稳定。拱可以做成无铰拱、两铰拱、三铰拱等。在荷载作用下, 拱支座处有水平推力, 故拱截面内力一般是较大的轴心压力, 而弯矩和剪力较小, 因而常能较多地节省钢材。

由上述可知, 钢结构虽然有不同的体系和用途, 但其组成, 除容器和大直径管道等板壳型结构外, 都是由一些基本构件——主要包括受弯构件(梁)、轴心受拉和轴心受压构件、拉弯(同时受拉和受弯)和压弯(同时受压和受弯)构件、以及桁架等通过焊缝、螺栓或铆钉连接组成的。因而在钢结构

课程的学习中, 必需首先掌握钢结构的材料性质、连接以及各种基本构件的设计计算方法和相应构造型式, 才能进一步掌握整个钢结构的设计。

§ 1-4 钢结构的设计计算原理和方法

一、结构设计计算原理概述

结构的主要任务或功能是承受作用于结构上的各种“作用”, 即各种荷载和荷载以外的其它各种“作用”(如温度变化、支座沉陷等)。荷载是“作用”的最主要部分。

结构的荷载有恒荷载(永久荷载)、活荷载(可变荷载)和偶然荷载。活荷载可以是静力荷载或动力荷载(间接或直接作用于构件)。结构承受荷载等各种作用时, 将相应引起结构的内力(轴心力、剪力、弯矩、扭矩等)、变形(挠度、转角等)、应力和应变(拉、压、剪切应力和应变等)等, 这些统称为“荷载效应”或“作用效应”。通常的结构在弹性阶段(比例极限以内)工作时, 效应与作用成线性正比例关系并可引用叠加原理。当结构的一部分进入塑性阶段后, 线性关系将不再适用或不完全适用。

多数结构所承受的作用主要是荷载, 故本节讨论设计方法和原则时将着重讨论荷载和荷载效应, 并介绍《建筑结构设计统一标准 GBJ 68-84 (试行)》对现行设计原则和方法的规

定。

结构设计的目的是使所设计的结构满足各项预定的功能要求。这些功能包括：

a. 安全性：结构应能承受在正常施工和正常使用时可能出现的各种作用；在偶然事件发生时和发生后仍能保持必需的整体稳定性，不致倒塌。

b. 适用性：结构在正常使用时具有良好的工作性能，例如在正常使用荷载作用下不产生影响正常使用的过大变形等。

c. 耐久性：结构在正常维护下具有足够的耐久性能，使其始终能满足规定的功能要求，例如不发生严重锈蚀而影响结构的使用寿命等。

上述功能，即安全性、适用性和耐久性，可概括称为可靠性。亦即，结构的可靠性是指结构在规定的时间内（设计基准期 T ，对建筑结构一般规定为 50 年）内，在规定的条件（正常使用和正常维护，设计时按正常设计和正常施工考虑）下，完成预定功能的能力。

用来度量结构可靠性的指标称为可靠度，它是可靠性的定量描述。用来度量安全性的指标称为安全度。可靠度比安全度的含义更广泛，但安全度是可靠度最重要的内容。度量可靠度比较科学的方法是用概率表示。结构能够完成预定功能的概率称为可靠概率（ p_s ）；反之，结构不能完成预定功能的概率称为失效概率（ p_f ）；二者互补，即 $p_s + p_f = 1$ 。可靠度是指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。它是结构可靠性的概率度量。

需要指出，在实际结构中，使用荷载可能超过预定值，材料强度和构件截面尺寸等可能低于预定值，设计计算图形和方法可能与实际情况不尽符合，施工和安装质量可能比预计情况差，还可能发生超过预期的偶然荷载和其它不利情况，因而不存在绝对可靠（ $p_s = 1$ 或 $p_f = 0$ ）的结构，而只能要求结构的可靠概率达到一定的合理要求（例如 99.9%~99.99%）。在结构设计中，除了满足可靠性要求外，还应考虑经济性，力求以比较经济的途径使所设计的结构具有适当的可靠度，以满足各种预定的功能要求。

在长期的设计实践中，建筑结构设计原理和方法日益发展和完善。从力学计算来分，结构设计方法可分为弹性设计法和塑性设计法。目前钢结构设计中主要采用弹性和允许截面部分发展塑性的设计法。从可靠度观点看，结构设计方法基本上可分为以经验为基础的安全系数设计法和以概率理论为基础的极限状态设计法。在概率极限状态设计法中又可分为三种水准，即半经验半概率极限状态设计法、近似概率极限状态设计法和完全概率极限状态设计法。GBJ 68-84 设计统一标准规定目前建筑结构设计采用以一次二阶矩概率理论为基础并用分项系数表达的近似概率设计法在后面将再作介绍。

结构设计在采用概率理论设计的同时还采用极限状态设计法，即对结构的每项功能要求规定明确的极限状态标志和限值，作为结构设计的依据。结构或构件某一项功能的极限状态，是指结构或构件能够满足设计规定的该功能要求的临界状态。当整个结构或构件或其一部分超过这个临界状态，就不能满足设计规定的该功能要求。针对结构的安全性、适用性和耐久性功能要求，极限状态可分为下列两类：

(1) 承载能力极限状态 这种极限状态对应于结构或构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形。当结构或构件（包括连接）出现不适于继续承载的强度破坏（包括疲劳破坏）或过度的塑性变形、丧失稳定（如压杆屈曲等）、转变为机动体系或整个结构或其一部分作为刚体失去平衡（如倾覆等）等情况时，即认为超过了承载能力极限状态。

(2) 正常使用极限状态 这种极限状态对应于结构或构件达到正常使用或耐久性能的某

项规定限值。当结构或构件出现影响正常使用或外观的变形、影响正常使用或耐久性能的局部破坏(包括裂缝)、影响正常使用的振动或其它特定状态等情况时,即认为超过了正常使用极限状态。

通常是按承载力极限状态设计结构构件(包括连接),再按正常使用极限状态进行校核。

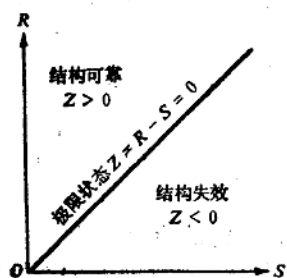


图 1-4 结构所处的状态

结构的极限状态通常可用荷载效应 S 和结构抗力 R 的关系来描述。荷载效应是指荷载引起的结构内力(轴心力、剪力、弯矩、扭矩等)或变形(挠度、转角等)等;而结构抗力则是指结构承受这些荷载效应(即内力或变形等)的能力(即结构的承载力或刚度等)。例如,当计算梁的抗弯强度时,荷载效应指荷载引起的弯矩;结构抗力则指抗弯承载力即净截面抵抗矩与钢材抗弯强度的乘积。比较 S 和 R , 可将结构所处的各种状态概括为(图 1-4),

$$Z = R - S \begin{matrix} > \\ = \\ < \end{matrix} 0 \quad (1-1)$$

显然, $Z > 0$ 表示结构处于可靠状态; $Z < 0$ 表示结构处于失效状态;而 $Z = 0$ 则表示结构处于极限状态。可见, Z 是反映或判别结构完成功能状态的函数,因而称为结构的功能函数。

结构的极限状态可用下列极限状态方程来表达:

$$Z = R - S = 0 \quad (1-2)$$

影响荷载效应 S 和结构抗力 R 的各个因素,例如各种荷载、材料性能、几何参数、计算公式精确性等,都将影响结构的功能函数 Z 。故在作更深入的分析时,可将 Z 表达为以上述各个因素作为基本变量($X_1, X_2, \dots, X_n$)的函数 g , 则结构的极限状态方程为:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (1-3)$$

结构极限状态方程的具体应用将在下文叙述。

结构设计时,由《建筑结构荷载规范(GBJ 9-87)》规定各种荷载的标准值(标准荷载),即结构在正常使用条件下可能出现的最大荷载值,按此计算所得的荷载效应(内力等)也是标准值(标准荷载效应)。

计算结构抗力时,钢结构设计中一般取钢材屈服强度作为受力的极限,这是因为钢材应力到达屈服强度后将产生较大的塑性变形,影响结构继续承载和正常使用。《钢结构设计规范(GBJ 17-88)》中规定钢材屈服强度标准值(标准屈服强度) f_y 取国家规定的出厂标准最低值(或称废品极限),例如 3 号钢 $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$,由此计算所得的结构抗力也是标准值(标准抗力)。

二、钢结构中曾采用的几种设计方法

(1) 传统的容许应力设计法 结构设计曾长期采用传统的容许应力设计法,是安全系数设计法中应用最早并最广泛的一种。我国钢结构设计在 1957 年以前一直采用这个方法。其设计准则是:结构构件按标准荷载计算的应力 σ 应不超过设计规范规定的容许应力 $[\sigma]$,对钢结构其值取钢材的标准屈服强度 f_y 除以一个大于 1 的安全系数 K 。设计表达式为,

$$\sigma = \Sigma N / a \leq [\sigma] = f_y / K \quad (1-4)$$

式中 ΣN 为各种荷载(按标准值)引起的内力的总和; a 为截面几何参数(例如截面面积 A 、截面抵抗矩 W 等)。

安全系数 K 综合和笼统地考虑了各种可能发生的不利因素,通常由经验确定。例如我国1954年钢结构设计规范对一般3号钢($f_y = 235 \text{ N/mm}^2$)结构采用 $[\sigma] = 157 \text{ N/mm}^2$,即 $K = 1.5$ 。此法形式简单,应用方便;但其 K 值主要由经验确定且单一(即对不同类型、荷载和情况的结构都采用同一个 K 值),应力分析都按弹性理论;从可靠度观点看不够合理准确,不能保证所设计的各种结构具有比较一致的可靠度水平。

(2) 多系数极限状态设计法 在50年代中期,苏联多种结构设计规范采用三系数极限状态设计法。我国1957~1974年也采用这种设计法。这种设计法一方面明确提出极限状态的概念,包括承载能力(强度、稳定、疲劳强度)、变形和裂缝扩展三种极限状态;另一方面在承载能力极限状态中,对不同种类的荷载和材料强度分别进行统计分析,从而引入各自的荷载系数 $n(>1)$,对恒荷载 $n_g = 1.1 \sim 1.2$,对活荷载 $n_q = 1.2 \sim 1.4$ 和材料强度系数 $k(<1)$,对钢材 $k \approx 0.87$)。设计时对每种荷载均采用计算荷载=标准荷载 $\times$ 荷载系数 n ,对材料强度采用计算强度=标准强度 $\times$ 材料强度系数 k 。

确定上述荷载系数和材料强度系数时,是将荷载或材料强度作为随机变量进行数理统计,并要求分别达到规定的保证概率。除此二系数外,还引入工作条件系数 m ,以考虑少数构件的工作条件(施工制造条件、计算图形准确性等)偏于不利(取 $m < 1$)或有利(取 $m > 1$)等影响。对多数构件取 $m = 1$ 。三系数设计法采用三个系数代替单一的安全系数 K 并对荷载和材料强度分别引入统计概率分析,因而从可靠度观点看是前进了一步。但这种设计法还没有涉及到结构构件的总体有效概率或可靠度,而且对工作条件系数和某些统计资料不足的参数(如某些荷载系数),很多仍然要结合以往工程和设计由经验确定;所以这种设计法还属于半经验半概率设计法。

(3) 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 我国1974~1988年施行的《钢结构设计规范 TJ 17-74(试行)》中采用这种容许应力设计法。从设计准则和表达式的形式上看,和传统的容许应力设计法相同,仍为式(1-4)。但在确定安全系数时,则是仿照了多系数设计法。不同之处在于:多系数设计法对不同荷载取不同荷载系数,因而各种结构的平均荷载系数各不相同;本设计法则根据我国建筑结构情况的统计分析归并,采用统一的加权平均荷载系数 $\bar{n} = 1.23$,与材料强度系数 k 综合后即得统一的安全系数 K 。例如我国1974年钢结构设计规范对一般3号钢结构规定 $K = 1.23/0.87 = 1.41$, $[\sigma] = 235/1.41 = 167 \text{ N/mm}^2$ 。

三、现行设计规范规定的极限状态设计法

现行《钢结构设计规范 GBJ 17-88》采用的是由《建筑结构设计统一标准 GBJ 68-84(试行)》规定的以一次二阶矩概率理论为基础并用分项系数表达(属于近似概率)的极限状态设计法。

1. 构件的可靠指标和一次二阶矩概率理论

式(1-3)已经表示结构的功能函数和极限状态方程,其中包括各种荷载、材料性能、几何参数、计算公式精确性等主要影响因素或基本变量。在结构设计中,这些基本变量都具有

随机性。

为了说明功能函数并推导结构构件的可靠指标，现先举最简单例子，即：结构的功能函数可综合成仅与结构的荷载效应 S 和结构抗力 R 两个正态分布的基本变量有关，且取极限状态方程为线性方程，即：

$$Z = R - S = 0 \tag{1-2}$$

当结构已经设计完毕，所有材料和截面尺寸都已确定，则荷载效应 S 是分布规律已知的随机变量(主要是由于使用过程中荷载大小的不定性)；结构抗力 R 也是分布规律已知的随机变量(主要是由于材料性能的不定性和制造安装偏差)。现假设为正态分布如图 1-5，其平均值、标准差分别为 μ_S 、 σ_S 和 μ_R 、 σ_R 。根据独立正态变量的减法原理，可求得结构功能函数 $Z = R - S$ 的分布规律如图 1-5，也是正态分布，其平均值和标准差为：

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S, \quad \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \tag{1-5}$$

于是便可求得结构的失效概率($Z < 0$ 的概率)，即为 Z 分布图中阴影线部分的面积(Z 分布图的右面部分面积为可靠概率 p_r ， Z 分布图与 Z 轴间总面积 $p_r + p_f = 1$)。用公式表达时为：

$$p_f = P(Z < 0), \quad p_r = P(Z \geq 0) = 1 - p_f \tag{1-6}$$

正态分布图中阴影线部分面积即概率 p_f 可根据阴影界线(即图中 f 轴)离平均值 μ_Z 的距离(以标准差 σ_Z 的倍数表示)来求。此倍数现为(图 1-5)：

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \tag{1-7}$$

p_f 与 β 呈正态分布规律的一一对应函数关系，见表 1-1。 p_f 直接表示结构的失效概率， $p_r = 1 - p_f$ 直接表示结构的可靠概率；而 β 则间接地标志 p_f 和 p_r 。 β 愈大，则 p_f 愈小而 p_r 愈大，即结构愈可靠(图 1-5)；因此 β 被称为结构的“可靠指标”。为了表达方便，习惯上常采用 β 代替 p_f 来标志结构的可靠度。

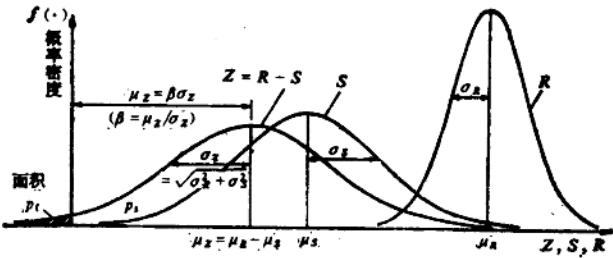


图 1-5 结构构件失效概率与可靠指标的关系

可靠指标 β 与失效概率 p_f 的对应关系 表 1-1

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

可以看出，同样的结构如增大截面尺寸，则结构抗力 R (随机变量)将增大，即其分布图(图 1-5)右移，功能函数 $Z = R - S$ 也将增大，其分布图右移，因而 β 增大和 p_f 减小，即可

靠度增大。

实际结构常承受多种分布规律的不同的荷载且多数不是正态分布；材料强度或结构抗力也不一定是正态分布；而且功能函数的基本变量如各种荷载、强度、尺寸参数等常不止两个且多是非线性的。这时求 p_r 和 β 需考虑基本变量概率分布的不同类型，采用正态化处理 and 线性化近似等手段，并用其一阶原点矩(即平均值) μ_z 和二阶中心矩(即标准差) σ_z 来表达 β 。因此，这种可靠度计算方法通常称为“考虑基本变量概率分布类型的一次二阶矩近似概率极限状态设计法”。

这种方法的可靠指标计算直接和各基本变量的平均值和标准差有关，基本概括了各有关变量的统计特性；同时可靠指标是从结构功能函数求解的，综合地考虑了结构上的荷载和结构本身抗力的变异性对结构可靠度的影响；故比前述半经验半概率设计法又前进了。

进行结构或构件的设计时，应根据具体工程情况合理选用适当的可靠指标值。这涉及到影响结构功能函数的诸多复杂变化的基本变量的统计分析等技术因素，而且与结构建造、投资、使用、维护以及如果失效或破坏所产生的经济、社会、人身安全影响等因素密切相关。因此，不能只从理论来研究确定可靠指标的应取数值。目前，一般都是根据长期的工程实践经验，通过对已有按原规范设计的结构作可靠度分析并推算出可靠指标 β 值，然后对众多 β 推算数据进行综合、统计、分析和调整，作为确定今后结构设计可靠指标控制值的参考依据。

我国《建筑结构设计统一标准 GBJ 68 84(试行)》规定：建筑结构设计时，应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，采用不同的安全等级。一般情况下一级相应于重要的工业与民用建筑物，其破坏后果很严重；二级相应于一般的工业与民用建筑物，其破坏后果严重；三级相应于次要的建筑物，其破坏后果不严重。建筑物中各类结构构件的安全等级宜与整个结构的安全等级相同，但对其中部分构件可作调整。统一标准并规定计算建筑结构可靠度采用的设计基准期 T 可取 50 年。结构构件设计时采用的可靠指标，可根据对正常设计与施工的建筑工程的可靠度分析，并考虑使用经验和经济等因素确定；对于承载能力极限状态，构件的可靠指标应按表 1-2 采用。

一般钢结构按安全等级为二级、构件为延性破坏考虑，取 $\beta = 3.2$ ；但钢结构连接的情况和类型比较复杂，统计资料也较少，设计时采用的可靠指标另有规定，这里从略。对于正常使用极限状态，构件的可靠指标根据其特点和工程经验确定。

结构构件承载能力极限状态设计时采用的可靠指标 β 值(和相应的失效概率 p_f) 表 1-2

破坏类型 \ 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(1.33×10^{-5})	3.7(1.08×10^{-4})	3.2(6.87×10^{-4})

注：①延性破坏是指结构构件在破坏前有明显的变形或其它预兆；脆性破坏是指在破坏前无明显的预兆。

②当有充分根据时， β 值可按表值作不超过 ± 0.25 幅度的调整。

③当承受偶然作用时， β 值应符合专门规范的规定。

2. 规范规定的实用设计表达式

上面概要介绍了一次二阶矩近似概率极限状态设计法。但是，普遍直接按规定的可靠指

标 β 进行结构设计,目前还有一定困难。这是因为有些与设计有关的统计参数还不容易求得,而且计算过于麻烦。

因此,《建筑结构设计统一标准》规定的目前采用的设计方法,是将一次二阶矩法近似等效地转化为以分项系数形式表达的实用设计表达式。实用设计表达式采用荷载、结构抗力(承载能力)或材料强度、几何参数(截面面积或抵抗矩)的标准值,以及荷载、结构抗力或材料强度等的分项系数。各种荷载的标准值乘以各自分项系数(>1)后为相应的设计荷载(荷载设计值);结构抗力或材料强度的标准值除以各自分项系数(>1)后为结构设计抗力(结构抗力设计值)或材料设计强度(材料强度设计值)。这种设计法的设计准则是:按各种荷载设计值(标准荷载 $\times$ 分项系数)算得的结构设计内力总和 S ,应不超过按材料设计强度(标准强度/分项系数)算得的结构设计抗力 R 。下面具体叙述建筑钢结构设计中采用的承载能力和正常使用极限状态设计表达式。

(1) 承载能力极限状态设计表达式为:

$$\gamma_0(\gamma_0 S_{0k} + \gamma_{01} S_{01k} + \sum_{i=2}^n \psi_{0i} \gamma_{0i} S_{0ik}) \leq R_k / \gamma_R \quad (1-8)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数,对安全等级为一、二、三级的结构构件分别取 1.1、1.0、0.9。

γ_0 ——恒荷载分项系数,一般情况下取 1.2;当恒荷载对结构构件的承载能力有利时取 1。

γ_{01} 、 γ_{0i} ——第 1 个和第 i 个活荷载的分项系数,一般情况下取 1.4 (楼面活荷载 $> 4 \text{ kN/m}^2$ 时取 1.3);第 1 个活荷载指 $S_0 = \gamma_0 S_{0k}$ 值最大者。

S_{0k} 、 S_{01k} 、 S_{0ik} ——标准恒荷载和第 1 个、第 i 个标准活荷载引起的内力。

ψ_{0i} ——第 i 个活荷载的组合值系数:当有风荷载参与组合时取 0.6;当没有风荷载参与组合时取 1 (对高耸构筑物另行规定)。

R_k 、 γ_R ——按截面几何参数和材料强度标准值计算的结构构件抗力(标准值)系及其分项数。

对于一般排架和框架结构,也可采用下列简化的极限状态设计表达式:

$$\gamma_0(\gamma_0 S_{0k} + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{0i} S_{0ik}) \leq R_k / \gamma_R \quad (1-9)$$

式中 ψ 为简化设计表达式中采用的荷载组合系数。当有 ≥ 2 个活荷载参与组合且其中包括风荷载时取 0.85;其它情况取 1。

上两式中的内力可为拉力、压力、剪力、弯矩等,与此相应的抗力可为抗拉、抗压、抗剪、抗弯等承载能力。一些符号的下标 k 表示标准值。对安全等级为一、三级的结构构件,需要比二级构件提高或降低其可靠指标(表 1-2),故用结构重要性系数 $\gamma_0 = 1.1$ 、0.9 来加大或减小总内力值。组合系数 ψ_{0i} 或 ψ 是考虑风荷载与其它活荷载共同达到最大值的概率较小而对活荷载值所作的适当折减。

公式左方 S_{0k} 、 S_{0ik} 是构件的标准内力;乘以相应荷载分项系数后的 $\gamma_0 S_{0k} = S_0$ 、 $\gamma_{0i} S_{0ik} = S_{0i}$ 是设计内力。公式右方的 R_k 是构件的标准抗力(标准承载能力);除以抗力分项系数 γ_R 后的 R_k / γ_R 是设计抗力(设计承载能力)。钢结构设计中通常可表达为 $R_k = a_k f_k$ 、 R_k / γ_R

$=a_k f_k / \gamma_R$; 其中 a_k, f_k 为构件几何参数和材料强度的标准值。为了便于设计,《钢结构设计规范》中直接给出钢材和各种连接中各种应力状态的 $f_k / \gamma_R = f$ 值,称为设计强度 (f 是钢材的抗拉、抗压和抗弯设计强度,对其它设计强度应另加相应下标)。这样,如果直接用设计荷载求设计内力,直接用设计强度表达设计抗力,则式(1-8)可改写为(对式(1-9)可同样改写),

$$\gamma_0 (S_G + S_{Q1} + \sum_{i=2}^n \psi_{Qi} S_{Qi}) \leq a_k f \quad (1-8a)$$

钢结构设计中习惯于用应力计算,式(1-8a)通常可进一步改写为,

$$\sigma = \sum N / a_k = \left[\gamma_0 \left(S_G + S_{Q1} + \sum_{i=2}^n \psi_{Qi} S_{Qi} \right) \right] / a_k \leq f \quad (1-8b)$$

现以二级安全等级 ($\gamma_0 = 1$) 跨度为 l 的梁按弹性设计的抗弯强度为例。梁承受设计荷载,均布恒荷载 $g = g_k \times 1.2$, 均布使用活荷载 $q = q_k \times 1.4$, 跨度正中设备集中活荷载 $F = F_k \times 1.4$, 荷载组合系数均取 1, 构件净截面抵抗矩 W_n , 钢材设计强度 f , 则梁抗弯强度的设计计算式为,

$$\text{设计弯矩 } M = (g + q) l^2 / 8 + F l / 4$$

$$\text{设计应力 } \sigma = M / W_n \leq f$$

满足上式表示可靠度达到设计要求。

前已说明,实用表达式(1-8、9、8a、8b)等是从一次二阶矩法等效得到的。为使所设计结构具有预定的可靠指标,只需满足上列表达式;关键在于正确规定各分项系数 $\gamma_0, \gamma_Q, \psi, \gamma_R$ 的取值。对不同类型结构作可靠度分析时,可等效得到不同的配套系数值;但为便于实际结构设计,需要对所有结构采用一套统一适用的系数值。目前规定的全套系数值,是从对众多建筑结构作可靠度分析后用比较和优化方法确定的最佳匹配取值,它使所设计的各种结构都能达到预定的可靠指标,并且总体误差最小。

根据上述原则,钢结构按现行规范设计时,其标准荷载、荷载分项系数和设计荷载应按《工业与民用建筑结构荷载规范 GBJ 9-87》的规定采用。钢材和连接的标准强度、强度分项系数和设计强度将在以后各章叙述,对于钢材强度,符合预定可靠指标 $\beta = 3.2$ 分析所得的分项系数值大致在 1.1 左右。几何参数通常不分标准值和设计值,都按设计尺寸计算,不再考虑分项系数。

(2) 正常使用极限状态设计表达式 对于正常使用极限状态,钢结构设计中主要是考虑构件的变形和挠度,例如梁的挠度、柱顶水平位移、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,采用荷载标准值,不乘分项系数;对动力荷载也不乘动力系数。设计表达式为,

$$w = w_{Gk} + w_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{Qi} w_{Qik} \leq [w] \quad (1-10)$$

式中符号仿式(1-8),但 w 代表变形或挠度; $[w]$ 为容许变形或挠度,根据规范和使用要求确定。

第二章 钢结构的材料

钢材的种类多,性质、用途和价格各不相同,适用于钢结构的钢材只是其中的一小部分。由于钢结构常需要在各种环境条件和情况下承受荷载,其钢材应具有良好的机械性能(包括静力和动力机械性能)和加工工艺性能(包括冷加工、热加工和焊接性能);有些情况下还要求具有耐腐蚀或适应低温、高温环境下工作等的能力。本章将阐述钢结构对钢材的基本要求、钢材的主要性能和各项影响因素,以及建筑结构的常用钢材及其钢号和选用要求。

在不同钢结构中,钢材的受力情况和性能要求有差别。钢材在受力时的破坏通常伴随着很大变形的塑性破坏,但有些情况下也可能是没有明显变形征兆的突然发生的脆性破坏。研究和了解钢材的性能时,应结合钢结构的各种具体情况,着重考察其受力破坏特征和可能导致脆性破坏的原因和各种影响因素,以便按实际受力需要合理地选用钢材和设计结构。这对提高和保证钢结构的设计和建造质量,防止脆性破坏,以取得较好的使用和经济效果是必要的。

§ 2-1 钢材的主要机械性能

一、钢材在单向均匀拉力作用下的性能

钢材的单向均匀拉伸试验比压缩、剪切等试验简单易行,试件受力明确,对钢材缺陷的反应比较敏感。试验结果可得到机械(力学)性能的各项主要指标且对其它受力状态的性能也有代表性。因而,它是钢材机械性能试验的一种常用的有代表性的方法。

钢材的拉伸试验通常是用规定的标准试件在常温下按规定的速度逐渐施加荷载所进行的静力拉伸试验。其静力拉伸试验的机械性能可用拉伸曲线即应力-应变曲线来说明。图 2-1 是低碳结构钢静力拉伸试验的典型应力-应变曲线。图中纵坐标是横截面上的名义应力 $\sigma = F/A_0$ (F 为试件受拉时的荷载; A_0 为试件的原(初始)横截面面积);横坐标是应变 $\epsilon = \Delta l/l_0$ (l_0 为试件的原标距长度; Δl 为试件标距部分的伸长量)。该曲线所表明的钢材受力阶段和一些机械性能如下:

I. 弹性阶段 钢材拉伸试验时加、卸荷载的过程表明,当应力 σ 不超过某一应力值,即曲线上 B 点的应力时,随着试件应力 σ 的增加或减小,应变 ϵ 也随之增加或减小,当完全卸除荷载(即 $\sigma=0$)后,试件变形完全恢复(即 $\epsilon=0$),没有残余变形。钢材的这种性质称为弹性,对应于 B 点的应力 f_e 称为弹性极限。

应力-应变曲线的上述弹性阶段 OB 段又可分为倾斜直线 OA 段和曲线 AB 段。OA 段是一倾斜直线,即当 $\sigma < f_p$ (f_p 称为比例极限)时,应力与应变呈线性正比例关系,其斜率 $E = d\sigma/d\epsilon$ 称为钢材的弹性模量。钢结构设计中,钢材的弹性模量通常可对所有钢材统一取 $E = 206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 。