

# 钢 结 构 设 计 原 理

王 肇 民      宗 听 聪      编 著  
宣 国 梅      沈 德 洪

同 济 大 学 出 版 社

# 钢结构设计原理

王肇民 宗听聪 编著  
宣国梅 沈德洪

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

常熟市华顺印刷有限公司印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 27 字数: 691 千字

1991 年 6 月第 1 版 2006 年 1 月第 9 次印刷

印数: 28 001 - 31 100 定价: 31.00 元

ISBN 7 - 5608 - 0768 - 2/TU · 95

# 序

本书是同济大学结构工程学院为工业与民用建筑专业编写的结构系列教材之一，其他系列教材为砌体结构设计原理、钢筋混凝土结构设计原理、抗震结构设计原理。

1989年，根据当时的教学情况，考虑加深基本理论的学习，加强按规范设计方法的指导，参照最近出版的《钢结构设计规范》GBJ 17-86(送审稿)，编写了本书。

本书共有八章，分成两部分。前四章为一部分，阐述钢结构计算原理、钢材特性、构件稳定、连接计算等基本理论；后四章为第二部分，介绍平台结构，屋盖结构、框架结构、厂房结构等按规范设计方法。这种编排方式使本书与传统的钢结构教材有较大区别，大多数教材内容是以工业厂房的布置、计算和构造为轴线，梁、柱、桁架和连接为重点，以此阐述钢结构的设计方法。稳定理论分别穿插在构件设计之中。本书尝试一种新的编写方式，把基本理论集中在一起讲解，然后再对几种具体结构进行按规范设计方法介绍，使前面学到的理论融会贯通到后面实际工程设计中。本教材的前面部分与前置课程“材料力学”和“结构力学”相衔接，后面部分对即将进行的毕业设计起指导作用。

本书参考了近几年新建钢结构工程和国内外有关文献，包括了不少新的内容，使读者掌握更多信息和知识。在介绍各种结构工程设计中，增加了钢管结构和组合结构的计算和构造，与钢结构设计规范新增加的部分相配合。为了使读者理解和掌握钢结构计算与按规范的设计方法，本书还附有较多的例题，一个钢屋架设计和一个习题集以及部分题解。参加本书编写的有王肇民、宗听聪、宣国梅、沈德洪同志。所有例题、设计均由张笑微、赵晓阳同志完成。本书由王肇民教授主编，欧阳可庆教授主审。

朱伯龙

1989年8月

# 目 录

## 序

<b>第一章 钢结构特点与计算方法</b> .....	1
第一节 钢结构的应用范围 .....	1
第二节 钢结构的特点 .....	2
第三节 钢结构设计的基本要求 .....	3
第四节 钢结构的计算方法 .....	3
第五节 钢结构设计的规范 .....	7
第六节 钢结构研究工作展望 .....	9
<b>第二章 钢材的基本性能</b> .....	11
第一节 钢材的机械(力学)性能 .....	11
第二节 钢材冶炼和加工 .....	14
第三节 钢材的应力集中现象 .....	20
第四节 钢材的复杂应力 .....	22
第五节 钢材的疲劳强度 .....	23
第六节 钢材的选用和规格 .....	25
<b>第三章 构件的强度和稳定</b> .....	27
第一节 轴压构件的强度和稳定 .....	27
第二节 受弯构件的强度和稳定 .....	35
第三节 压弯构件的强度和稳定 .....	45
第四节 梁和柱的局部稳定 .....	54
<b>第四章 连接的构造和计算</b> .....	71
第一节 钢结构的连接方法 .....	71
第二节 焊接结构的特性 .....	72
第三节 对接焊缝的构造和计算 .....	79
第四节 角焊缝的构造和计算 .....	87
第五节 普通螺栓的构造和计算 .....	99
第六节 高强度螺栓的构造和计算 .....	112
<b>第五章 平台钢结构</b> .....	116
第一节 平台结构布置 .....	116
第二节 平台铺板 .....	116
第三节 平台梁 .....	119
第四节 柱和柱间支撑 .....	141
第五节 楼梯与栏杆 .....	162
<b>第六章 屋盖钢结构</b> .....	163

第一节	屋盖结构布置 .....	163
第二节	屋盖支撑体系 .....	164
第三节	檩条 .....	168
第四节	普通钢屋架 .....	175
第五节	轻型钢屋架 .....	187
第六节	钢管钢屋架 .....	190
第七节	实腹梁和框架梁屋架 .....	196
第八节	天窗结构 .....	198
第九节	托梁和托架 .....	201
<b>第七章</b>	<b>框架钢结构</b> .....	<b>220</b>
第一节	框架结构体系 .....	220
第二节	框架平面布置 .....	222
第三节	实腹式框架 .....	224
第四节	格构式框架 .....	233
第五节	悬挂式框架 .....	235
第六节	多层框架 .....	240
第七节	框架柱脚 .....	251
<b>第八章</b>	<b>厂房钢结构</b> .....	<b>261</b>
第一节	厂房结构体系 .....	261
第二节	横向框架 .....	262
第三节	纵向框架 .....	266
第四节	柱网布置 .....	268
第五节	支撑体系 .....	271
第六节	墙架体系 .....	272
第七节	吊车梁 .....	273
第八节	厂房柱 .....	290
<b>习题及部分习题题解</b>	.....	<b>297</b>
一、习题	.....	297
第一章	钢结构特点与计算方法习题 .....	297
第二章	钢材的基本性能习题 .....	299
第三章	构件的强度和稳定习题 .....	301
第四章	连接的构造和计算习题 .....	308
第五章	平台钢结构习题 .....	320
第六章	屋盖钢结构习题 .....	322
第七章	框架钢结构习题 .....	331
第八章	厂房钢结构习题 .....	333
二、部分习题题解	.....	339
<b>附录</b>	.....	<b>351</b>
附录一	钢结构的设计方法 .....	351

附录二	钢材的基本性能 .....	354
附录三	构件的强度与稳定 .....	386
附录四	钢结构的连接 .....	400
附录五	平台钢结构 .....	406
附录六	厂房钢结构 .....	409
<b>参考文献</b>	.....	<b>417</b>

# 第一章 钢结构特点与计算方法

## 第一节 钢结构的应用范围

在工程结构中,钢结构是应用比较广泛的一种建筑结构。一些高度或跨度较大的结构、荷载或吊车起重量很大的结构、有较大振动的结构、高温车间的结构、密封要求很高的结构、要求能活动或经常装拆的结构等等,采用其他建筑材料,目前尚有困难或不很经济,则可考虑采用钢结构。属于这类性质的结构大致有:

### 1、单层厂房结构

钢结构一般用于重型车间的承重骨架,例如冶金工厂的平炉车间、初轧车间、混铁炉车间;重型机器厂的铸钢车间、水压机车间、锻压车间;造船厂的船台车间;飞机制造厂的装配车间,以及其他工厂跨度较大车间的屋架、吊车梁等等。我国鞍钢、武钢、包钢和上海宝钢等几个著名的冶金联合企业的许多车间都采用了各种规模的钢结构厂房,上海重型机器厂水压机车间、上海江南造船厂中都有高大的钢结构厂房。

### 2、大跨结构

主要用于飞机库、汽车库、火车站、大会堂、体育馆、展览馆、影剧院等,其结构体系主要采用框架结构、拱架结构、网架结构、悬索结构、悬挂结构、预应力钢结构等。我国最早建成的广州中山纪念堂(1928—1931年)圆屋顶就是钢结构,规模宏大的北京人民大会堂为钢屋架,首都体育馆、上海体育馆、上海文化广场等采用了大跨度网架结构,西安秦始皇陵兵马俑陈列馆采用了跨度为70m的三铰拱钢结构,北京工人体育馆、浙江杭州体育馆采用圆形和马鞍形的悬索结构。1990年在北京召开的第十一届亚洲运动会,建成了几座包括有首次采用大跨度悬挂式结构的大型体育馆。

### 3、多层、高层结构

用于旅馆、饭店、公寓等多层及高层楼房。采用钢结构的高层建筑现在越来越多,如北京京伦饭店、上海锦江宾馆等都是钢结构,广州、深圳等地也有高层钢结构建筑,目前,高层钢结构还在蓬勃地发展着。

### 4、塔桅结构

用于高度较大的无线电桅杆、微波塔、电视塔、高压输电线路塔、化工排气塔、石油钻井架、大气监测塔、旅游瞭望塔、火箭发射塔等。我国在60—70年代建成的大型塔桅结构有200m广州电视塔、210m上海电视塔、194m南京跨越长江输电线路塔、325m北京环境气象桅杆。1990年落成的212m汕头电视塔、260m大庆电视塔等都是钢结构。

### 5、板壳结构

用于要求密闭的容器,如大型储液库、煤气库,炉壳要求能承受很大内力并有温度急剧变化的高炉结构,大直径高压输油管和煤气管道等。上海在1958年就建成容积为54000m<sup>3</sup>的湿式贮气柜。上海金山、吴泾等石油、化工基地有众多的容气结构,同时,一些容器、管道、锅炉、油罐等支架也都采用钢结构。

## 6、桥梁结构

由于钢桥建造简便、迅速，易于修复，因此钢结构广泛用于中等跨度和大跨度桥梁。我国著名的杭州钱塘江大桥（1934—1937年）是最早自己设计的钢桥，此后，武汉长江大桥（1957年）、南京长江大桥（1968年）均为钢结构桥梁，其规模和难度都举世闻名，标志着我国桥梁事业已进入世界先进的技术行列。正在兴建的上海市政建设重大工程之一的黄浦江大桥也是采用钢结构。

## 7、移动结构

用于装配式活动房屋、水工闸门、升船机、桥式吊车和各种塔式起重机、龙门起重机、缆索起重机等。这类结构随处可见，这几年，高层建筑的发展，也促使塔式起重机像雨后春笋般地矗立在街头。我国已制订了各种起重机系列，促进了建筑机械的大发展。

## 8、轻钢结构

用于中小型房屋建筑中，有弯曲薄壁型钢结构、圆钢结构、钢管结构，多数用在轻型屋盖中。此外，还有用薄钢板做成折板结构，把屋面结构和屋盖主要承重结构结合起来，成为一体的轻钢屋盖结构体系。

# 第二节 钢结构的特点

钢结构在工程中得到广泛应用和发展，是由于钢结构与其他结构比较有下列特点：

### 1、材料强度高

钢的容重虽然较大，但强度却高得更多，与其他建筑材料相比，钢材的容重与屈服点的比值最小。在相同的载荷条件下，采用钢结构时，结构的自重常较小。当跨度和荷载相同时，钢屋架的重量只有钢筋混凝土屋架重量的  $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ ，若用薄壁型钢屋架则更轻。由于重量较轻，便于运输和安装，因此，特别适用于跨度大、高度高、承载大的结构，也适用于可移动、易装拆的结构。

### 2、安全可靠

钢材质地均匀，各向同性，弹性模量大，有良好的塑性和韧性，为理想的弹性-塑性体，较为符合作为计算基础的各向同性体的概念。因此，钢结构计算准确、可靠性较高，适宜于有特殊重要意义的建筑物。

### 3、工业化生产程度高

钢结构的制造虽需较复杂的机械设备和严格的工艺要求，但与其他建筑结构比较，钢结构工业化生产程度最高，能成批大量生产，制造精确度高，采用工厂制造、工地安装的施工方法，可缩短周期，降低造价，提高经济效益。

### 4、密闭性较好

由于焊接结构可做到完全密封，一些要求气密性和水密性好的高压容器、大型油库、煤气罐、管道等板壳结构都适宜采用钢结构。

### 5、具有一定的耐热性

温度在  $250^{\circ}\text{C}$  以内，钢的性质变化很小，温度达到  $300^{\circ}\text{C}$  以后，强度逐渐下降，达到  $450 \sim 650^{\circ}\text{C}$  时，强度为零。因此，钢结构的防火性较钢筋混凝土为差，一般用于温度不高于

250°C 的场合。有特殊防火要求的建筑中，钢结构必须用耐火材料予以围护。特别对于高层钢结构，应根据建筑物重要性等级和防火规范加以特别处理。

但是，钢结构最大缺点是易于锈蚀。新建造的钢结构一般都需仔细除锈、镀锌或刷涂料（油漆），以后隔一定时间又要重新维修，这种经常性除锈、油漆和维护的费用较高。现在有一种喷涂新工艺，即在严格清洗、除锈的基础上喷铝或锌，其防锈寿命可长达 20~30 年。

钢结构是国民经济中的贵重材料，价格比较昂贵，虽然优点甚多、用途广泛，但在设计中也要尽量节约钢材，降低工程造价。

### 第三节 钢结构设计的基本要求

钢结构设计时应满足下列基本要求：

- 1、结构必须有足够的强度、刚度和稳定性，整个结构必须安全可靠；
- 2、要符合建筑物的使用要求，要有良好的耐久性；
- 3、尽可能节约钢材，减轻钢结构重量；
- 4、尽可能缩短制造、安装时间，节约劳动工日；
- 5、结构要便于运输、便于维护；
- 6、可能条件下，尽量注意美观，特别是外露结构，有一定建筑美学要求。

根据以上各项要求，钢结构设计应该重视、贯彻和研究节约钢材、降低造价的各种措施。做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。

节约钢材的主要措施有：

- 1、尽量在规划结构时采用尺寸模数化、构件标准化、构造简洁化，以便于钢结构制造、运输和安装；
- 2、尽量采用新的结构体系，例如用空间结构体系代替平面结构体系。结构形式要简化、明确、合理；
- 3、尽量采用新的计算理论和设计方法，推广运用电算，研究薄壁结构理论和结构稳定理论；
- 4、尽量采用焊缝和高强螺栓连接，研究和推广新型钢结构连接方式；
- 5、尽量采用具有较好经济指标的优质钢材、合金钢或其他轻金属，使用薄壁型钢；
- 6、尽量采用组合结构，例如钢与钢筋混凝土组合梁，钢管混凝土构件等；

钢结构设计要因地制宜、量材使用，切忌生搬硬套。上述措施不是在任何场合都行得通的，应结合具体条件进行方案比较，采用技术经济指标都好的方案。此外，还要总结、创造和推广先进的制造工艺和安装技术，任何脱离施工的设计都不是成功的设计。

### 第四节 钢结构的计算方法

结构计算的目的是保证结构构件在使用荷载作用下能安全可靠地工作，既要满足使用要求，又要符合经济要求。结构计算是根据拟定的结构方案和构造，按所承受的荷载进行内力计算，确定出各杆件的内力，再根据所用材料的特性，对整个结构和构件及其连接进行核

算,看其是否符合经济、安全、适用等方面的要求。但从一些现场记录、调查数据和试验资料看来,计算中所采用的标准荷载和结构实际承受的荷载之间、钢材力学性能的取值和材料实际数值之间、计算截面和钢材实际尺寸之间、计算所得的应力值和实际应力数值之间,以及估计的施工质量与实际质量之间,都存在着一定的差异,所以,计算的结果不一定很安全可靠。为了保证安全,结构设计时的计算就必须留有余地,也就是要具有一定的安全度。建筑结构的安全度是保证房屋或构筑物在一定使用条件下,连续正常工作的安全储备。有了这个储备,才能保证结构在各种不利条件下的正常使用。

我国钢结构计算方法,在建国以来的40年中曾经有过4次变化,即:建国初期到1957年,采用总安全系数的容许应力算法;1957年到1974年,采用三个系数的极限状态计算方法;1974年到1988年,采用以结构的极限状态为依据,进行多系数分析,用单一安全系数的容许应力算法;目前新的钢结构设计规范,采用以概率论为基础的一次二阶矩极限状态设计法。下面分别加以阐述。

### 1、总安全系数的容许应力算法

考虑到各种不利因素影响,用一个总安全系数 $K$ 来解决,即将钢材可以使用的最大强度(如屈服强度)除以一个笼统的安全系数,作为结构计算时容许达到的最大应力——容许应力。这种计算方法称为容许应力算法,表达式为:

$$\sigma = \frac{N}{S} \leq \frac{\sigma_s}{K} \quad (1-1)$$

式中  $N$ ——构件的内力;  
 $S$ ——构件的几何特性;  
 $\sigma_s$ ——钢材的屈服强度  
 $K$ ——总安全系数;  
 $\sigma$ ——构件的计算应力。

这种总安全系数的容许应力算法的缺点是:由于笼统地采用了一个安全系数,将使各构件的安全度各不相同,而整个结构的安全度一般取决于安全度最小的构件。其优点是表达式简单、概念明确、应用方便。

### 2、三个系数的极限状态计算方法

根据结构使用上的要求,在结构中规定两种极限状态,即承载能力极限状态和变形极限状态。同时引入三个系数,即:以荷载系数考虑荷载可能的变动,以匀质系数考虑钢材性质的不一致,以工作条件系数考虑结构及构件的工作特点,以及某些假定的计算图式与实际情况不完全相同等因素。这种方法比按容许应力算法考虑得细致一些,但某些系数(如工作条件系数)的确定还缺乏客观依据和科学方法,同时,它的表达式较为繁琐,其表达式为:

$$\Sigma K'_1 N_i \leq K'_2 K'_3 \sigma_s \cdot S \quad (1-2)$$

式中  $K'_1$ ——超载系数;  
 $K'_2$ ——匀质系数;  
 $K'_3$ ——工作条件系数;  
 $N_i$ ——荷载引起的内力;  
 $S$ ——构件几何特性;  
 $\sigma_s$ ——钢材的屈服强度。

### 3、以结构极限状态为依据,多系数分析后用单一安全系数的容许应力计算法

1974年我国正式编制了《钢结构设计规范》(TJ17-74),规范中所采用的表达式仍是容许应力计算法,但在确定安全度方面与早期容许应力计算法有所不同。它是以结构的极限状态(强度、稳定、疲劳、变形等)为依据,对影响结构安全度的诸因素以数理统计的方法,并结合我国建国后20余年来的工程实践经验进行多系数分析,求出单一的设计安全系数,以简单的容许应力形式表达,实质上是半概率半经验的极限状态计算法。其按承载力计算的一般表达式为:

$$\Sigma N_i \leq \frac{\sigma_s \cdot S}{K_1 K_2 K_3} = \frac{\sigma_s \cdot S}{K} \quad (1-3)$$

式中  $N_i$ ——根据标准荷载求得的内力;

$\sigma_s$ ——钢材屈服强度;

$S$ ——构件几何特性;

$K_1$ ——荷载系数;

$K_2$ ——材料系数;

$K_3$ ——调整系数,一般结构  $K_3 = 1$ 。

荷载系数  $K_1$  是用以考虑实际荷载可能有变动而给结构物留有一定的安全储备的系数。根据对钢屋架、吊车梁的设计资料,按荷载规范(规结1-58)经统计分析后得出的加权平均荷载系数,其变动范围在1.145—1.305之间,为简化起见,采用  $K_1 = 1.23$ 。

材料系数  $K_2$  是用以考虑钢材强度变异的系数。国家标准(GB)规定3号钢(第1组)的屈服强度是  $2400 \text{ kg/cm}^2$  (相当于  $235 \text{ N/mm}^2$ ),低于此值者即为废品,在结构计算中即取此废品限值作为3号钢的标准强度。但是,钢铁厂产品质量是不均匀的,厂与厂之间,甚至在同一厂内,产品质量也存在差异,同时,各厂对产品的验收又是采取抽样检验的方式,这就不可避免地会有屈服强度低于  $2400 \text{ kg/cm}^2$  的钢材混杂其间,作为正式产品供应。根据对全国大、中、小有代表性的钢铁厂的钢材强度统计分析结果,并考虑到过去设计经验而定出的钢材强度系数是:对于3号钢,  $K_2 = 1.143$ , 对于16锰钢和16锰桥钢,  $K_2 = 1.175$ 。

在设计计算中,仅考虑单一的平均荷载系数和材料强度系数还是不够完备的。例如,对活荷载所占比重较大的构件,或施工条件较差的连接构造等都与一般条件等同看待,其安全度就显得偏低。调整系数  $K_3$  就是用以考虑这些特殊的变异因素(荷载的特殊变异、结构受力状况和工作条件等)的系数。其数值主要是根据实践经验确定的,对于3号钢和16锰钢,一般取  $K_3 = 1$ , 对于重级工作的吊车梁,则取  $K_3 = 1.05$ 。

系数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  综合确定后的安全表达式为:

$$\sigma = \frac{\Sigma N_i}{S} \leq \frac{\sigma_s}{K} = [\sigma] \quad (1-4)$$

式中  $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$ 。

上式即为规范(TJ17-74)采用的容许应力设计法的表达式。例如,3号钢的  $\sigma_s = 2400 \text{ kg/cm}^2$ ,  $K_1 = 1.23$ ,  $K_2 = 1.143$ ,  $K_3 = 1.0$ , 则  $K = 1.23 \times 1.143 \times 1.0 = 1.41$ ,  $\sigma_s$  和  $K$  相除后得到的容许应力  $[\sigma] = 1700 \text{ kg/cm}^2$ ; 16锰钢的  $\sigma_s = 3500 \text{ kg/cm}^2$ ,  $K_1 = 1.23$ ,  $K_2 = 1.175$ ,  $K_3 = 1.0$ , 则  $K = 1.23 \times 1.175 \times 1.0 = 1.45$ ,  $\sigma_s$  和  $K$  相除后得到的容许应力  $[\sigma] = 2400 \text{ kg/cm}^2$ 。

对钢结构这种单一材料组成的结构,采用容许应力法,不但可以减少计算工作量,同时也因为疲劳强度的验算又只能用容许应力进行,这样可以使整个结构设计在计算方法上得到协调统一。

容许应力计算法是结构设计的一个传统方法,现在保留其简单而明瞭的形式,并赋予新的内容,概念明确,使用方便,多年来国内外的实践证明是一个比较简单易行的计算方法。目前国内钢桥设计、起重机设计均仍采用容许应力方法进行。

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,为了结构或构件的正常使用,还必须对结构或构件的变形有所限制,避免因变形过大,或因过于柔细而易下垂、振动,甚至在运输和施工过程中受到损坏。因此,还应验算结构或构件的变形和长细比,即:

$$w \leq [w] \quad (1-5)$$

$$\lambda \leq [\lambda] \quad (1-6)$$

式中  $w$ ——结构或构件在标准荷载作用下产生的最大挠度;

$[w]$ ——规范规定的容许挠度;

$\lambda$ ——构件的长细比;

$[\lambda]$ ——规范规定的容许长细比。

这种计算方法虽然简单方便,但也存在着一些缺点。因为各种荷载的变异性并不相同,各种构件承受荷载的情况也不一定相同,不同构件的几何尺寸的变异性也不完全一致,采用统一的安全系数,显然不可能获得相同的安全度。有的结构或构件会过分安全,个别结构或构件则可能不够安全。

#### 4、以概率论为基础的一次二阶矩极限状态设计法

极限状态的概率设计法是把各种参数(荷载效应,材料抗力等)作为随机变量,运用概率分析法并考虑其变异性来确定设计采用值。这种把概率分析引入结构设计的方法显然比容许应力设计法先进,故近年来世界各国逐渐采用此法。

设结构或构件的承载力为  $R$ ,  $R$  取决于材料的抗力和构件的几何特性(面积或抵抗矩等)。这些参数都是独立的随机变量,应该根据它们各自的统计数值运用概率法来确定它们的设计值。设计值确定后,承载力  $R$  也就确定了。

荷载效应是指各种荷载、温度变化和地震等对结构或构件作用产生的效应,亦即同时作用于结构或构件的若干种荷载分别在结构或构件中产生的内力,这些内力的总和也就是荷载效应,用  $S$  表示。各种荷载也都是独立的随机变量。根据它们各自的统计数值,用概率法确定其设计值。这些荷载的设计值确定后,总的荷载效应  $S$  也就确定了。

当  $R > S$  时为可靠,  $R < S$  时为不可靠,  $R = S$  时是结构或构件承载能力的极限状态。设计时应使  $R = S$  的概率可靠度不低于某一特定数值,这就是极限状态概率设计法。

在结构设计中,常用到安全系数和安全度的术语,但其含义不够确切。长期以来所说的结构安全性(以安全度为度量)是指结构对使用结构的人来说是否安全。目前,国际上都普遍采用“结构可靠性”这一术语,而结构可靠度则为结构可靠性的概率度量。结构可靠性包括结构的安全性、适用性和耐久性。

在结构设计中采用概率设计法时,从结构的整体性出发,运用概率论的观点,对结构的可靠度提出了明确的科学定义,即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,称为结构可靠度。

建筑结构应以适当的可靠度满足4项基本功能的要求,这4项基本功能为:

- (1) 能承受在正常使用和施工时可能出现的各种作用;
- (2) 在正常使用时具有良好的工作性能;
- (3) 具有足够的耐久性;
- (4) 在偶然事件发生时及发生后,能保持必需的整体稳定性。

第(1)、(4)两项是结构的安全性要求,第(2)项是结构适用性的要求,第(3)项是结构耐久性的要求。结构可靠性就是上述4项基本功能所满足结构安全、适用、耐久的总称。

若以  $P_s$  表示结构可靠度,则

$$P_s = P\{(R - S) \geq 0\} \quad (1-7)$$

结构处于失效状态  $\{(R - S) < 0\}$  的概率称为失效概率,以  $P_f$  表示,则

$$P_f = P\{(R - S) < 0\} \quad (1-8)$$

由于事件  $\{(R - S) < 0\}$  与事件  $\{(R - S) \geq 0\}$  是对立的,所以结构可靠度  $P_s$  与结构失效概率  $P_f$  符合下式:

$$P_s = 1 - P_f \quad (1-9)$$

因此,结构可靠度的计算可以转化为结构失效概率的计算。用概率的观点看结构设计是否可靠,就是说结构可靠度是否足够大或其失效概率是否小到可以接受的预定程度。绝对可靠的结构,即  $P_s = 1$  或  $P_f = 0$  的结构是不存在的。

按照上述原理的设计过程是进行  $R$  和  $S$  的概率运算,得出结构或构件的失效概率  $P_f$ ,确定是否小到可以接受的预定程度。但是,运用公式(1-8)进行概率运算非常复杂,一般是在上述方法的基础上进行分析、推导、简化,采用可靠指标  $\beta$  作为衡量结构可靠度的统一尺度,并在表达式中引入简便易行的分项系数以供设计应用。我国最新的《钢结构设计规范》GBJ 17-88 以近似概率法为基础,按照规定的失效概率要求,校准了各随机变量的分项系数,提供了用分项系数表达的极限状态设计公式。

## 第五节 钢结构设计的规定

现行钢结构设计规范采用以概率理论为基础的极限状态设计方法(疲劳强度除外),用分项系数的表达式进行计算。结构可靠度用可靠指标  $\beta$  度量,并已在分项系数中考虑。

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达到不适于继续承载的变形的极限状态;正常使用极限状态为结构或结构构件达到正常使用(变形或耐久性能)的某项规定限值的极限状态。

建筑结构设计时,应根据可能产生的后果(危及人的生命、造成经济损失,产生社会影响等),采用不同的安全等级。民用建筑钢结构的安全等级可按现行《民用建筑等级标准》划分。工业建筑钢结构的安全等级一般为二级。对于特殊的建筑物,其安全等级可根据具体情况另行确定。当按抗震要求设计时,建筑结构的的安全等级应符合《建筑抗震设计规范》GBJ 11-98 的规定。

### 1、承载能力极限状态

对于承载能力极限状态,应考虑荷载效应的基本组合,必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合。按荷载效应基本组合时,进行强度和稳定性设计时采用下列极限状态设计表达式:

$$\gamma_0(\sigma_{Ga} + \sigma_{Q1a} + \psi_c \sum_{i=2}^n \sigma_{Qia}) \leq f \quad (1-10)$$

式中  $\gamma_0$ ——结构重要性系数;

安全等级为一级  $\gamma_0 = 1.1$

安全等级为二级  $\gamma_0 = 1.0$

安全等级为三级  $\gamma_0 = 0.9$

$\sigma_{Ga}$ ——永久荷载的设计值  $G_a$  在结构构件截面或连接中产生的应力,  $G_a = \gamma_G \cdot G_K$ ;

$G_K$ ——永久荷载的标准值,

$\gamma_G$ ——永久荷载分项系数,一般采用 1.2,当永久荷载效应对结构构件的承载能力有利时采用 1.0;

$\sigma_{Q1a}$ ——第一个可变荷载的设计值  $Q_{1a}$  在结构构件截面或连接中产生的应力,  $Q_{1a} = \gamma_{Q1} \cdot Q_{1K}$ ;

$\sigma_{Qia}$ ——其他第  $i$  个可变荷载的设计值  $Q_{ia}$  在结构构件截面或连接中产生的应力,  $Q_{ia} = \gamma_{Qi} \cdot Q_{iK}$ ;

$\gamma_{Q1}, \gamma_{Qi}$ ——第一个和其他第  $i$  个可变荷载的分项系数,一般情况下可采用 1.4;

$Q_{1K}, Q_{iK}$ ——第一个和其他第  $i$  个可变荷载的标准值;

$\psi_c$ ——可变荷载的组合系数;

一般情况下,当有风荷载参加组合时  $\psi_c = 0.6$ ;当无风荷载时  $\psi_c = 1.0$ ;

$f$ ——结构构件和连接的强度设计值,  $f = \frac{f_K}{\gamma_R}$ ,

$f_K$ ——材料(焊缝指熔敷金属)强度的标准值;

$\gamma_R$ ——抗力分项系数。

式(1-10)中所谓第一个可变荷载是指该荷载所在结构构件或连接中产生的应力大于其他任意第  $i$  个可变荷载。

对于一般排架、框架结构,可采用下列简化设计表达式:

$$\gamma_0 \left( \sigma_{Ga} + \psi \sum_{i=1}^n \sigma_{Qia} \right) \leq f \quad (1-11)$$

式中  $\psi$ ——荷载组合系数,当参与组合的可变荷载有两个或两个以上时取 0.85,其他情况取 1.0。

对于荷载的偶然组合,应按现行有关专门规范进行确定。

## 2、正常使用的极限状态

对于正常使用的极限状态,结构或构件应按荷载的短期效应组合,用下式进行计算:

$$w = w_{GK} + w_{Q1K} + \psi_c \sum_{i=2}^n w_{QiK} \leq [w] \quad (1-12)$$

式中  $w$ ——结构或结构构件中产生的变形值;

$w_{GK}$ ——永久荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值;

$w_{Q1K}$ ——第一个可变荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值 (该值大于其他任意第  $i$  个可变荷载标准值产生的变形值);

$w_{QiK}$ ——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;

$[w]$ ——结构或构件的容许变形值,如受弯构件可按其容许挠度采用,柱可按其容许变

形值采用。

计算结构构件的强度或稳定性和连接的强度时,应采用荷载的设计值(荷载标准值乘以荷载的分项系数),计算疲劳和变形时,应采用荷载的标准值。

直接承受动力荷载的结构,尚应按下列情况考虑动力系数;

(1) 计算强度和稳定时,动力荷载应乘以动力系数,

计算变形时不乘动力系数;

(2) 计算厂房中吊车梁及制动结构的疲劳时,按作用在跨间内起重量最大的一台吊车荷载的标准值进行计算,不乘动力系数。计算平炉车间的工作平台时,可按规范考虑。

钢结构构件和连接材料的强度设计值按附录中的附表1-2、附表1-3、附表1-4、附表1-5采用。3号钢钢材分组尺寸见附表1-1。

## 第六节 钢结构研究工作展望

随着工农业、国防和科学技术现代化的进展,我国钢结构的应用也相应地有很大发展,钢结构的科学技术水平应该迅速提高,为此,要在下列几个方面做好工作。

### 1、高强度钢材的研制和应用

我国目前已较普遍采用16锰钢,北京首都体育馆的网架、上海电视塔的塔柱钢管就采用了这种材料,由于16锰钢强度高(屈服强度为 $345\text{ N/mm}^2$ ),可节约大量钢材。现在更高强度的15锰钒钢和15锰钛钢(屈服强度为 $390\text{ N/mm}^2$ )已开始应用。其他高强度钢如30硅钛钢(屈服强度 $\geq 400\text{ N/mm}^2$ )、15锰钒氮钢(屈服强度为 $450\text{ N/mm}^2$ )也有应用,但未列入钢结构设计规范。国外高强度钢发展很快,1969年美国规范列入屈服强度为 $685\text{ N/mm}^2$ 的钢材,1975年苏联规范列入屈服强度为 $735\text{ N/mm}^2$ 的钢材。今后,随着冶金工业的发展,研究强度更高的钢材及其合理使用将是重要的课题。

用于连接材料的高强度钢已有45号钢和40硼钢,这种材料制成的高强度螺栓广泛用于各种工程,40硼钢屈服强度为 $635\text{ N/mm}^2$ ,抗拉强度为 $785\text{ N/mm}^2$ ,经热处理后屈服强度不低于 $970\text{ N/mm}^2$ ,抗拉强度 $1080\text{ N/mm}^2$ 。现推荐采用20锰钛硼钢,作为高强度螺栓专用钢材,其强度级别与40硼钢相同。

### 2、结构和构件计算的研究和改进

现在已广泛应用新的计算技术和测试技术,对结构和构件进行深入计算和测试,为了解结构和构件的实际性能提供了有利条件。计算和测试手段愈先进,就愈能反映结构和构件实际工作情况,从而合理使用材料,发挥其经济效益,并保证结构的安全。例如钢材塑性的充分利用问题、经过多年研究,已将成果反映于新编的钢结构设计规范中,其他如动力荷载作用下的结构反应问题,残余应力对压杆稳定的影响问题,板件屈曲后的承载能力问题等,都已用新计算技术和测试手段取得新的进展。

最近,在应用概率理论来考虑结构安全度方面也得到新的进展,新规范采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,用可靠指标度量结构的可靠度,以分项系数的设计表达式进行计算,也是改进计算方法的一个重要方面。

### 3、结构形式的革新和应用

新的结构形式有薄壁型钢结构、悬索结构、悬挂结构、网架结构和预应力钢结构等。这

些结构适用于轻型、大跨屋盖结构、高层建筑和高耸结构等，对减少耗钢量有重要意义。我国应用新结构逐年有所增长，特别是网架结构发展更快，平板网架结构经济效果很好。新近出现了一种网架与悬挂混合结构，并已用在1990年北京第十一届亚洲运动会的体育馆中。

#### 4. 钢和混凝土组合构件的应用

钢和混凝土组合构件是一种各取所长的结合，钢的强度高宜受拉，混凝土则宜受压，两种材料结合都能充分发挥各自的优势，是一种很合理的结构，例如钢筋混凝土板用抗剪键与钢梁连成一体而共同工作，由钢筋混凝土板作为受压翼缘与钢梁组合可节约钢材。这种组合梁已用在高层建筑楼层中。采用钢管里面灌混凝土作为柱或柱肢，也是组合构件的一种类型。钢管混凝土结构的塑性、抗震性都很好，最近已作了很多研究并取得了重要成果。新的钢结构设计规范还列入了组合结构的章节。

#### 5. 最优化原理的应用

结构最优化设计包括确定最优的结构形式和确定最优的截面尺寸。由于电算的普及，促使了最优化设计得到相应的发展。在钢吊车梁、网架结构、塔架结构等设计中已逐步推广应用优化设计的方法。

此外，钢结构防锈对薄壁型钢和轻钢结构有重要意义，H型钢和压型钢板的采用亦在钢结构中取得显著成效，近年来，在这几方面的研究工作已取得一定的进展。

# 第二章 钢材的基本性能

## 第一节 钢材的机械(力学)性能

钢材的机械(力学)性能是反映钢材在各种作用(荷载)下的工作性能。钢结构对钢材工作性能的要求当然是多方面的,不能偏重于某一项或少数几项指标。对各种指标的高低、好坏和利害得失要进行全面衡量,慎重地选择合适的钢材。

### 一、强度

钢材的强度有比例极限(与弹性极限接近) $f_p$ 、屈服强度(流限) $f_s$ 、抗拉强度(极限强度) $f_u$ 。其中屈服强度很重要,是设计时认为钢材可以到达的最大应力,在屈服强度以前,钢材服从弹性工作的计算假定,其变形很小。应力与应变成线性关系,钢材达到屈服强度以后,应变急剧增长,结构变形达到不能正常使用的情况。所以钢结构的设计强度一般以钢材的屈服强度作为依据确定。屈服强度高的钢材可减轻结构重量、节约材料和降低造价。

钢材在单向均匀受拉时的工作性能(图 2-1a)可表现为 4 个阶段:即弹性阶段、弹塑性阶段、屈服阶段和强化颈缩阶段。

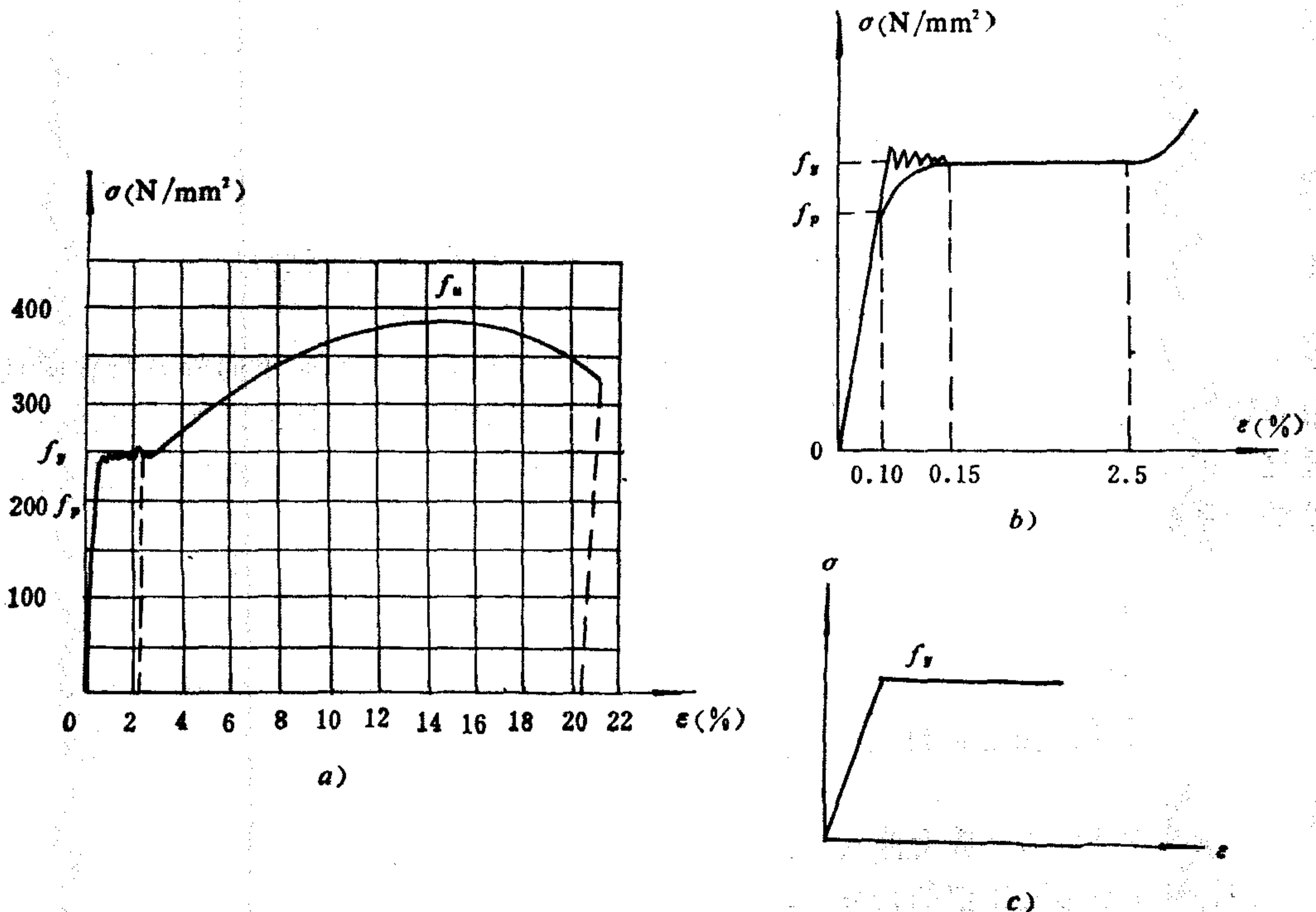


图 2-1 3号钢的实际工作图形