

高等学校教材

# 水工钢结构

武汉水利电力学院 大连工学院 华东水利学院 合编

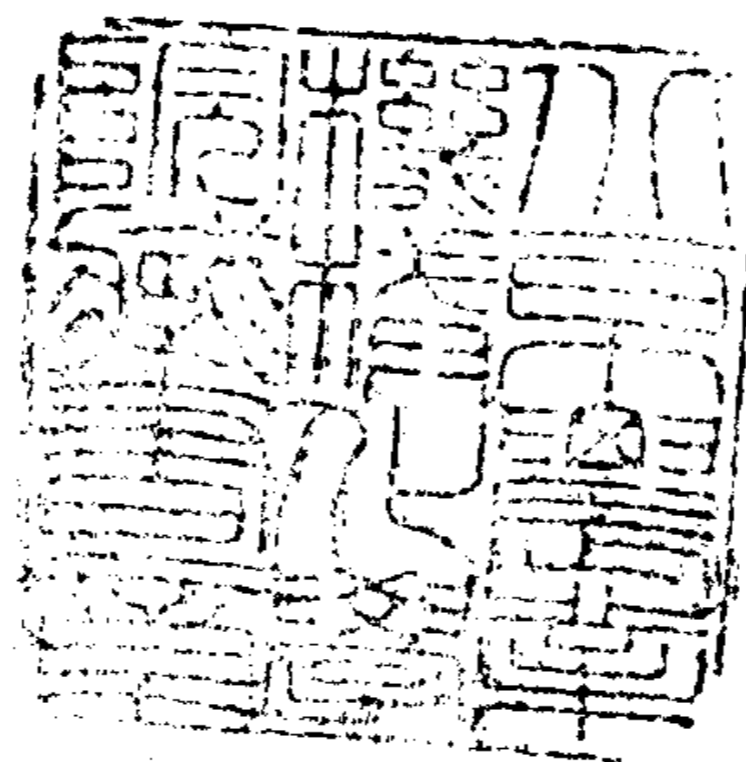
水利出版社

高等学校教材

---

# 水工钢结构

武汉水利电力学院 大连工学院 华东水利学院 合编



水利出版社

## 内 容 提 要

本书是高等学校水利类专业教材。全书共分九章及十二个附录。第一章至第五章主要介绍钢结构的材料、连接，讲述钢梁、钢柱、钢压杆以及桁架的设计，第六章至第九章主要讲述平面钢闸门、弧形钢闸门、人字钢闸门和钢引桥的设计，书中并附有适量的设计例题。本书除作为教材外，尚可供水利技术人员参考。

高等学校教材

### 水 工 钢 结 构

武汉水利电力学院 大连工学院 华东水利学院 合编

\*

水利出版社出版发行

(北京德胜门外六铺炕)

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 22印张 498千字

1980年6月第一版 1982年6月北京第二次印刷

印数 14121—24160册 定价 2.85元

书号 15047·4040

# 前 言

本教材是根据水电部1978~1981年教材出版规划组织编写的。主要适用于水利水电工程建筑专业、农田水利工程专业以及港口与航道工程专业，同时兼顾水利水电工程施工等水利类其他专业和海洋石油建筑工程专业的使用。本书内容在讲授时可根据各专业的教学大纲及教学实际情况予以取舍。

本书共分九章和十二个附录，主要分为两大部分：基本部分为钢结构设计的基本知识、设计基本理论、基本构件和连接的计算与构造设计；专业结构物设计部分包括有平面钢闸门、弧形钢闸门、人字钢闸门以及钢引桥的结构设计。为了加深对设计原理、计算方法和构造处理的理解及应用，书中编写了适量的设计例题，并附有施工图，可供课程设计参考。此外，针对海洋石油建筑专业的教学需要，在第五章的第六节还编入了“管节点设计”。

本教材中采用的基本符号、计算的基本规定、各种构件和连接的计算与构造要求等，主要依据全国通用设计规范《钢结构设计规范TJ17-74(试行)》以及水电部的《水利水电工程钢闸门设计规范SDJ13-78(试行)》，并参考了我国其他有关规范。

本书插图中的长度单位若未加说明，则均为毫米。

本书由武汉水利电力学院、大连工学院和华东水利学院三校合编。参加编写的有：武汉水利电力学院范崇仁(绪论、第六章)、周世植(第四章、第七章)；大连工学院陈继祖(第二章、第五章)、陆文发(第九章)；华东水利学院俞良正(第一章、第三章)、陶碧霞(第一章、第八章)。本书由范崇仁担任主编，由天津大学王象箴担任主审。

在编写本书过程中得到各兄弟院校和工程单位的大力协助和热情支持。插图承各校的同志积极协助描绘，顺此一并致谢。对于书中存在的错误和缺点，希读者批评指正。

编 者

1979年7月

# 目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 钢结构的材料	8
第一节 建筑钢的种类和性能	8
第二节 钢的组织 and 化学成分等对钢材性能的影响	10
第三节 影响钢材脆性断裂的主要因素	13
第四节 钢材的钢号及选用	18
第五节 轧成钢材的规格及用途	21
第六节 钢结构的计算方法	22
第二章 钢结构的连接	26
第一节 连接的类型	26
第二节 焊接方法	26
第三节 焊接连接型式、焊缝类型和焊接强度	30
第四节 对接焊缝连接的构造和计算	32
第五节 贴角焊缝连接的构造和计算	36
第六节 焊接应力和焊接变形	50
第七节 螺栓连接	53
第三章 钢梁	66
第一节 钢梁与梁格的型式及应用	66
第二节 钢梁的弯曲强度及其计算	67
第三节 钢梁的整体稳定性	72
第四节 轧成梁的设计	77
第五节 焊接组合梁的截面选择和截面改变	79
第六节 焊接组合梁的翼缘焊缝和梁的拼接	86
第七节 薄板的稳定性和组合梁腹板的加劲	88
第八节 梁的支承	99
第四章 钢柱与钢压杆	108
第一节 钢柱与钢压杆的类型和应用	108
第二节 轴心受压实腹式构件的稳定性	108
第三节 轴心受压实腹柱设计	111
第四节 轴心受压格构式构件的稳定性	114
第五节 轴心受压格构柱设计	117
第六节 偏心受压实腹式构件的承载能力	122
第七节 偏心受压实腹柱设计	125
第八节 梁和柱的连接	127

第九节 柱脚的设计 .....	129
第五章 钢桁架 .....	132
第一节 概述 .....	132
第二节 桁架的外形、尺寸和腹杆布置 .....	132
第三节 桁架间的联结系和压杆的计算长度 .....	135
第四节 桁架的杆件设计 .....	138
第五节 普通桁架节点设计和桁架施工图绘制 .....	143
设计例题 焊接钢屋架设计 .....	148
第六节 管节点设计 .....	156
第六章 平面钢闸门 .....	167
第一节 概述 .....	167
第二节 平面钢闸门的结构组成和结构布置 .....	168
第三节 面板和次梁的设计 .....	174
第四节 主梁设计 .....	182
第五节 横向联结系和纵向联结系 .....	185
第六节 边梁设计 .....	188
第七节 行走支承 .....	190
第八节 止水、启闭力和吊耳、埋固构件 .....	196
设计例题 露顶式平面钢闸门设计 .....	205
第七章 弧形钢闸门 .....	217
第一节 弧形钢闸门的结构型式和布置 .....	217
第二节 弧形钢闸门的荷载计算 .....	220
第三节 主横梁式弧形钢闸门主框架的设计 .....	222
第四节 弧形钢闸门的支铰设计 .....	226
第八章 人字钢闸门 .....	233
第一节 人字闸门的优缺点和应用范围 .....	233
第二节 人字闸门的组成部分和基本尺寸 .....	234
第三节 荷载及其组合情况 .....	237
第四节 门扇的梁格布置 .....	239
第五节 主梁设计特点 .....	244
第六节 门扇的联结系 .....	247
第七节 斜接柱和门轴柱 .....	250
第八节 支垫座和枕垫座 .....	252
第九节 顶枢和底枢 .....	255
第十节 止水和启闭力 .....	263
设计例题 人字钢闸门设计 .....	265
第九章 钢引桥设计 .....	280
第一节 概述 .....	280
第二节 钢引桥的基本尺寸和结构布置 .....	284
第三节 桥面系设计 .....	287

第四节	主梁设计要点 .....	292
第五节	钢引桥支座的型式和计算 .....	295
	设计例题 30米半穿式桁架钢引桥设计 .....	297
附录一	钢材性能 .....	316
附录二	型钢规格和截面特性 .....	318
附录三	型钢的螺栓(铆钉)准线表 .....	328
附录四	梁的整体稳定系数 .....	329
附录五	轴心受压构件的稳定系数 .....	330
附录六	偏心受压构件的稳定系数 .....	331
附录七	矩形弹性薄板弯矩系数 .....	336
附录八	组合截面回转半径近似值 .....	340
附录九	轴套材料及混凝土承压容许应力 .....	341
附录十	钢闸门自重(G)估算公式 .....	341
附录十一	钢引桥自重参考表 .....	342
附录十二	材料的摩擦系数 .....	343
主要参考书目	.....	343

# 绪 论

## 一、水工钢结构课程的性质和任务

钢结构在各项工程建设中应用极为广泛。我们所遇到的各种类型的钢结构，如钢桥、钢厂房、钢闸门、钢塔结构等等，大都是由钢厂轧制的型钢或钢板通过焊接或螺栓等连接所组成。而梁、板、柱或桁架等又是组成这些结构物的基本构件。由此可见，钢结构是工程结构中按材料划分出来的一门学科。这门学科主要是建立在建筑材料、材料力学、结构力学和其他有关的变形固体力学以及工程实践知识的基础上，所以本课程有时是直接引用上述课程的计算方法和公式，有时则是通过恰当的近似假定，把某些复杂公式的数学运算转化成实用性较强的简化计算。然而，必须指出，钢结构这门学科的特点，决不仅仅是力学的分析和运算，因为要获得一个结构物的优秀设计，还必须掌握材料的特性，善于选用材料，也必须具备丰富的工程实践知识，能够进行全面规划，作出合理的总体布置和结构的选型，然后才能设计构件，进行构造处理，并确定必要的制造工艺要求等。

水利工程中常用的钢结构很多，诸如水利枢纽中的各种钢闸门、压力钢管、拦污栅等；通航建筑物中的船闸闸门、升船机等；港口工程中的钢引桥；海洋工程中的钻井、采油平台钢结构、输油管等。水利工作者自然会经常遇到有关的水工钢结构的设计、制造和安装工作。

本课程的主要任务，就是结合水利专业的要求阐述钢结构的基本理论以及专业结构物的设计原理和方法。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设计方法，使能够根据有关的规范和资料，按照专业需要分别初步掌握设计钢闸门、船闸闸门、钢引桥等的能力，并为设计其他类型的钢结构打下基础。

## 二、钢结构的优缺点及其在水工中的应用

### (一) 钢结构的优缺点

钢结构在建筑工程中的应用之所以极为广泛，主要是因为钢结构与其他材料的结构（钢筋混凝土结构、木结构和砖石结构）相比，具有下列优点：

1. 钢结构较轻 虽然钢的容重很大( $\gamma = 7.85$ 吨/米<sup>3</sup>)，但由于钢的强度很高，故构件所需要的截面很小。因此，在以材料容重与容许应力的比值( $C = \gamma / [\sigma]$ )作为衡量结构轻重的指标时，因为钢材的 $C = 5 \times 10^{-4}$ 1/米，木材的 $C = 6 \times 10^{-4}$ 1/米，混凝土的 $C = 40 \times 10^{-4}$ 1/米，所以钢结构与其他结构相比是自重较轻的结构，因而也便于运输和安装。

2. 钢结构工作的可靠性较高 由于钢的组织均匀，最接近于各向同性体，而且弹性模量很大( $E = 2.1 \times 10^6$ 公斤/厘米<sup>2</sup>)，具有较大的抵抗变形的能力，又是一种理想的弹塑性材料，最符合一般变形固体力学对材料性能所作的基本假定，因而理论计算的结果比较准确可靠。

3. 钢结构制造的工业化程度较高 由于钢结构必须采用机械加工，这样就具有能够成批生产、制作精确度较高等优点。



4. 钢结构可准确、快速地装配 随着焊接技术的发展和近年来高强度螺栓连接的研制和推广使用,更有效地提高了钢结构的装配速度。

5. 钢材容易做成密不漏水 and 密不漏气的结构 如管道和贮液库、贮气库等。

6. 钢材的抗振性比混凝土和砖石要好 因为前者是材料组织均匀、机械性能高的弹塑性材料,而后者是材料组织不均匀、机械性能低的脆性材料。

但是,钢结构也有如下的缺点:

1. 容易腐蚀 尤其是对于水工钢结构,这是一个很大的缺点。为了防腐蚀,可采用涂油漆、喷涂塑料薄膜或利用电化效应如阴极保护法等,但增加了经常的维护费用。

2. 钢结构的耐火性差 当温度高于 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 时,钢的弹性模量会显著下降,强度减小,使钢材失去工作能力,因而接近高温的结构需要增加隔热措施。

## (二) 钢结构在水利工程中的应用

根据钢结构的上述优缺点,并综合考虑到建筑物的特点和使用要求,钢结构在水工中的合理应用范围大致如下:

1. 活动式结构 例如水工中大量采用的钢闸门、阀门、拦污栅,船闸闸门、升船机的承船厢和钢引桥等。对于这一类需要移动或转动的结构来说,可以充分发挥钢结构自重较轻的优点,从而能大大降低启闭设备的造价和运转所需要的动力。同时也发挥了钢材抗振性能较好的优点,因为活动式结构不可避免要承受一定的动力荷载。图0-1是正在拼装中的我国长江上第一个大型水利工程——葛洲坝水利工程用的弧形钢闸门,其跨度为12米,高度为12米,水头为27米,每扇闸门承受总水压力达4200吨。

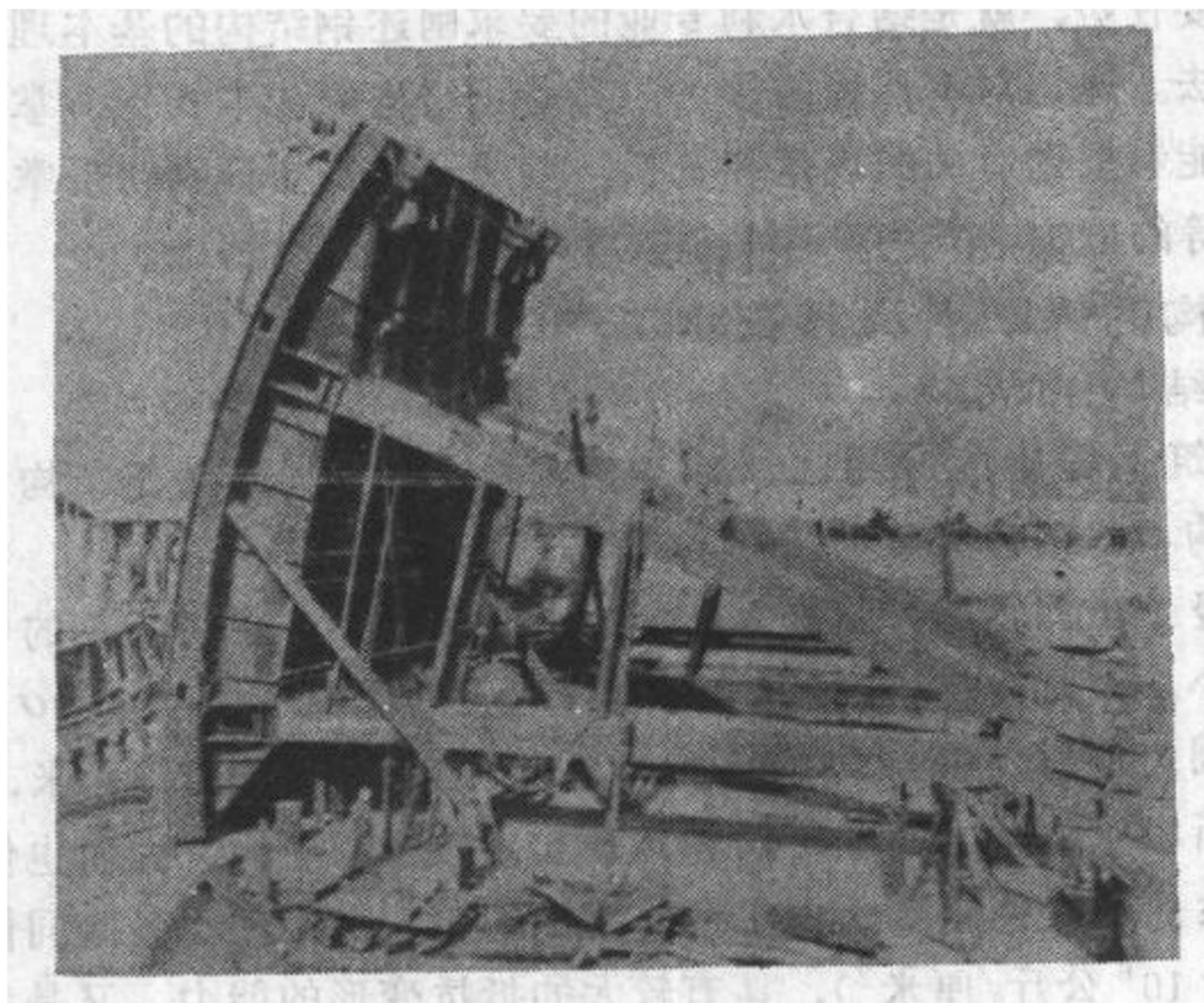


图 0-1 葛洲坝水利工程用弧形钢闸门

2. 装拆式结构 在水利工程上经常会遇到需要搬迁和周转使用的结构。例如施工用钢栈桥、钢模板、装配式的混凝土搅拌楼、砂石骨料的输送架,以及其他装拆式的临时建筑

物等。这类结构充分发挥了自重较轻，便于运输和安装的优点。

3. 板结构 例如压力钢管、囤斗、储液罐、储气罐等。用钢板制作的这类结构，密封性好，不易漏油、水或气体。

4. 高耸结构 如输电线路塔架、导航塔等。

5. 海工钢结构 海洋工程中的钻井、采油平台结构，如图0-2为我国渤海湾内某平台，它是由采油平台、生活平台和烽火台所组成，中间由轻便的栈桥连接起来。生活平台上设置有多层生活楼、直升飞机场和通讯用微波塔。采油平台上有大容量的原油贮罐等。这类结构要承受平台上各种装置及机械设备的荷载以及风、浪、冰等动力荷载作用，这就充分发挥了钢材强度高、抗振性能好以及便于海上安装等优点。

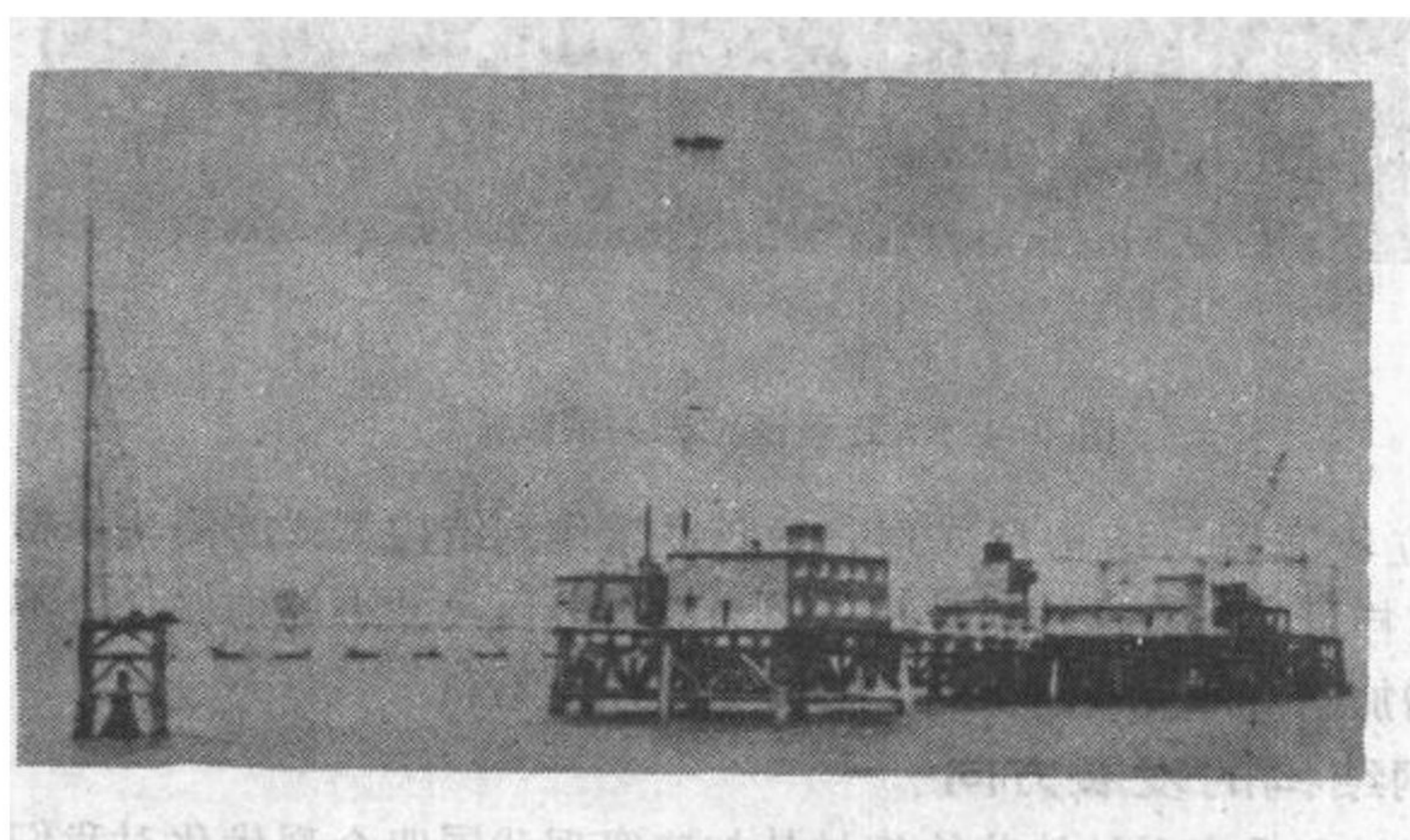


图 0-2 我国某海上采油固定式钢平台

6. 重型结构和大跨度结构 如垂直升船机的行车大梁，它虽然与工厂的吊车梁类似，但具有跨度大和荷重大的特点。例如国内目前已建成的丹江口水利枢纽工程中的垂直升船机（图0-3）的行车大梁，其跨度达30.5米、提升力达450吨。要建设这样大跨度的结构，就更需要发挥钢结构自重较轻、便于架设和安装的优点。图0-4是我国新建成的大连新港油码头用的空腹桁架式钢栈桥，共九跨每跨100米。

诸如上述可知，钢结构在水工中的应用是很广泛的。

### 三、对钢结构设计的要求

由于钢是国民经济和国防建设中的主要材

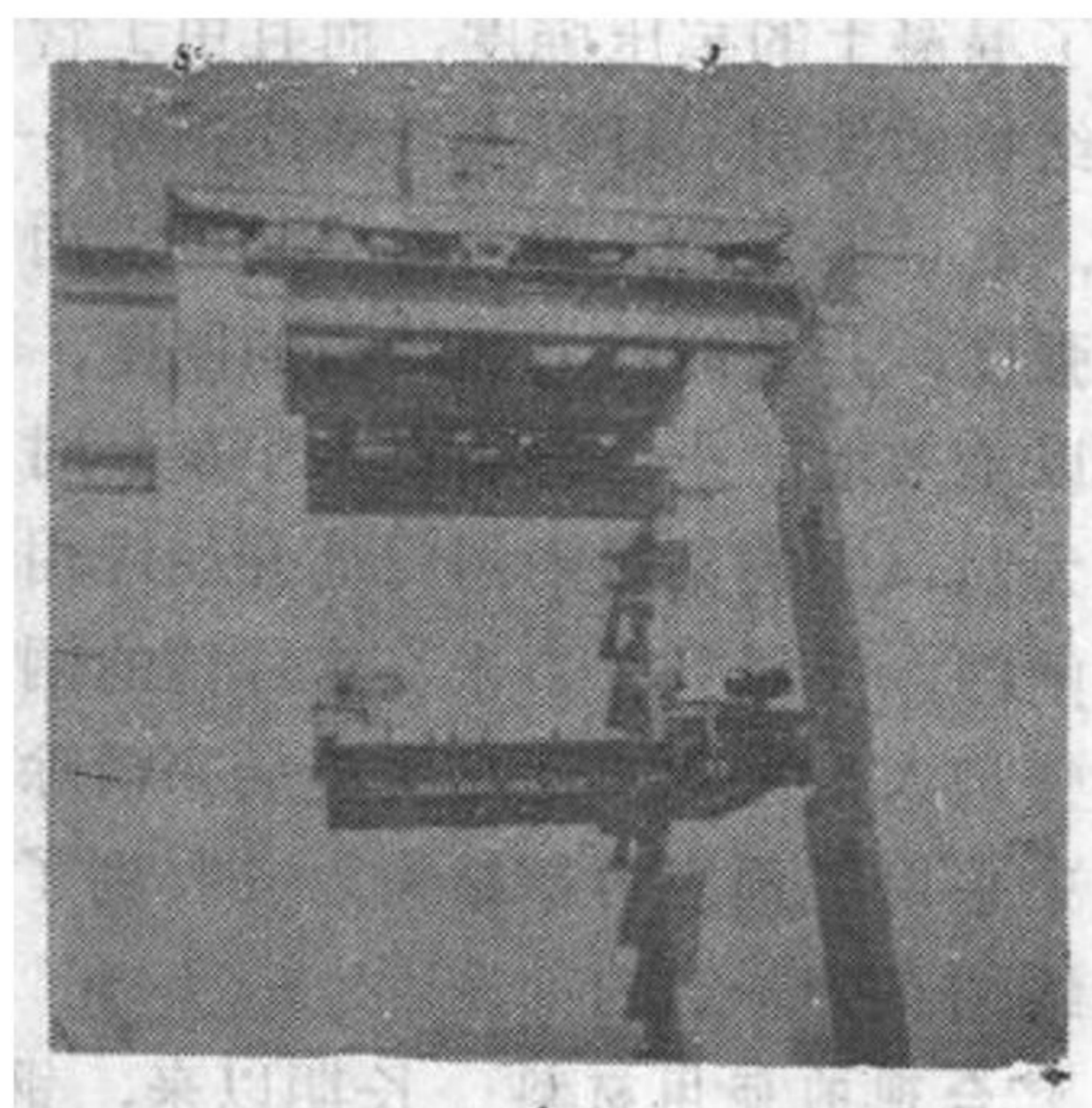


图 0 3 丹江口水利枢纽升船机

料，所以仅当不适合采用其它材料的结构时才采用钢结构，对钢结构设计的要求和对其他结构设计要求一样，要做到：①安全可靠；②满足使用要求和具有良好的耐久性；③尽可能节约钢材；④便于制造和安装；⑤适当地照顾美观。要做到这几项，设计工作者应该重视采用先进的设计理论和计算方法，注意贯彻和研究节约钢材和降低造价的各种措施。诸如合理的结构选型和结构布置，即可达到充分发挥材料的作用，使结构型式具有抗腐蚀的耐久性(例如使结构减少缝隙，没有个别突出单薄的受力构件)。又如尽量使构件型式和规格标准化和统一化，从而减轻设计、制造和安装工作量，以达到降低造价的目的。



图 0-4 大连新港油码头钢栈桥

在研究和创立较完善的结构型式时，应该尽量作到结构型式的简化和材料集中使用(即扩大构件)，这样可以减少构件的数量，因为数量多而尺寸小的构件一般不能充分发挥材料的强度，且增加制造和安装的工时，对防止腐蚀也不利。

#### 四、水工钢结构的发展方向

有效地使用钢材和千方百计地节约钢材是加速实现我国四个现代化对我们提出的一项要求。因此，水工钢结构发展的方向主要有以下几个方面：

1. 不断创造新的合理的结构型式 这是节约钢材的有效途径，例如采用钢管混凝土作承压构件(即在承受压力的钢管内填入密实的混凝土)，不仅由于钢管对混凝土的约束大大提高了混凝土的抗压强度，而且由于管内的混凝土也提高了钢管抗压的稳定性。又如预应力钢结构的使用，可以大量节约钢材(一般可节省钢材20~40%)。因为在钢结构中采用预应力，既可调整结构的内力，又可采用高强度的钢索，这样就不但能够充分地发挥钢材应有的强度，并且能够增加结构的刚度，例如在船闸人字门上，采用了预应力的门背斜拉杆，就可以有效地防止当门扇在水中旋转时产生过度的挠曲和扭转变形。美国于1942年在闸室宽度为24.4米的某船闸闸门上开始应用这种方法，使每扇高度为17米、宽度为13.7米的人字钢闸门，门厚只有1米。这样薄的闸门在所有情况下旋转而没有显著变形，甚至在冬季船闸管理人员还常常用它的旋转来清除航道中的浮冰。我国从五十年代以来，已经在某些工程中采用了预应力钢结构，并收到了节约钢材、降低造价等一定的效果。所以发展预应力钢结构有着一定的前途。

2. 合理的使用材料 长期以来，钢结构传统使用的是普通碳素结构钢，随着现代工业技术的发展，对钢的强度和其他性能提出了更高的要求。现在，在原来的碳素结构钢里加

入少量的合金元素，就可以得到强度高、综合机械性能以及焊接性能和加工工艺性能良好的普通低合金钢(合金元素总含量多为1~2%，一般不超过5%)。这类钢有时还具有某些特殊的性能，如抗蚀性、耐磨性及耐低温性等。对于屈服强度为35公斤/毫米<sup>2</sup>的16锰钢已列入钢结构规范(TJ17-74)推广使用。

采用高强度低合金钢可以大大节约钢材(一般可省钢15~30%)，提高使用寿命，同时由于结构断面的减薄，还可以简化制造工艺，节约工时，有利于运输和安装。如著名的南京长江大桥，就是采用16锰钢建造的，节约钢材在15%以上。丹江口水利枢纽中的钢闸门和升船机以及在即将建成的葛洲坝水利工程中所用的钢闸门也都采用了16锰钢。

为了合理地使用材料，对于由稳定控制的构件宜采用价格较低的普通碳素钢，对于由强度控制的构件则宜采用高强度的低合金钢。同样，对于受弯构件，翼缘可采用强度高的低合金钢而腹板宜采用普通碳素钢。这种由几种不同钢材制造的构件称为异种钢构件。

**3. 更新设计理论和计算方法** 例如对于钢闸门的结构计算，通常是将这样一个空间结构简化为若干个平面结构(如梁、柱、桁架、刚架等)来计算。这种计算方法没有考虑结构的整体性和构件之间的共同工作，结果有些构件常有较大的强度富裕。我国从五十年代以来，对钢闸门已开始采用按空间结构计算的方法，它是将整个闸门当作一个薄壁梁来考虑，这样不仅可以计入面板和水平次梁在闸门的整体弯曲中所起的抗弯作用，较真实地反映闸门的工作情况，而且还可以节约钢材。根据实践经验，对于大跨度的露顶钢闸门，一般可省钢10~15%，然而，由于按这种方法计算的过程比较繁杂，所以采用并不普遍。但是随着电子计算机的发展已为钢闸门按空间结构计算提供了前景。

另外，水工钢结构一直沿用的是按容许应力的计算方法，这种方法是用单一的安全系数来表征安全度，没有考虑影响结构安全度的某些因素是随机变量，对结构的安全度缺乏全面的数理统计分析。因此，按容许应力的计算方法有待进一步改进。

当然，一个好的设计要能使所设计的结构安全可靠，经济合理和便于使用。为了满足这样的要求，随着电子计算技术的发展，今后可以对结构进行最优化设计。所谓最优化就是选定设计变量的一组值，这组值能使结构以最小的重量去完成它所担负的功用。因为结构的重量是在几何约束、应力约束和位移约束的条件下随着设计变量(如构件大小、布置情况等)而变化的，从而重量函数为这一最优化设计的目标函数，即使这一函数取得最小值。目前，在发展结构的最优化的计算机程序时，注意力主要地着眼于构件的大小。

随着钢结构和焊接技术的发展以及高强度材料的应用，人们对低应力脆断的问题就愈加重视，于是在六十年代发展了“断裂力学”，它是研究带裂纹材料强度的一门科学，这门科学也在我国得到了迅速发展。

**4. 研究和推行水工钢结构的标准化和定型化。**

**5. 研究和推行钢结构的新型连接方法** 如推广使用高强螺栓和二氧化碳气体保护焊。

## **五、钢结构的设计程序和设计规范**

如图0-5所示，钢结构的设计程序和其他结构的设计程序类似，分别说明如下：

**1. 勘察规划** 了解结构的使用条件、材料供应和结构制造条件、建造的地理环境条件和它的重要性以及今后发展的远景规划，从而决定结构物的设计标准和规模。

**2. 结构型式的确定** 根据以上勘察规划的资料，按照前述的设计要求，选定合理的结

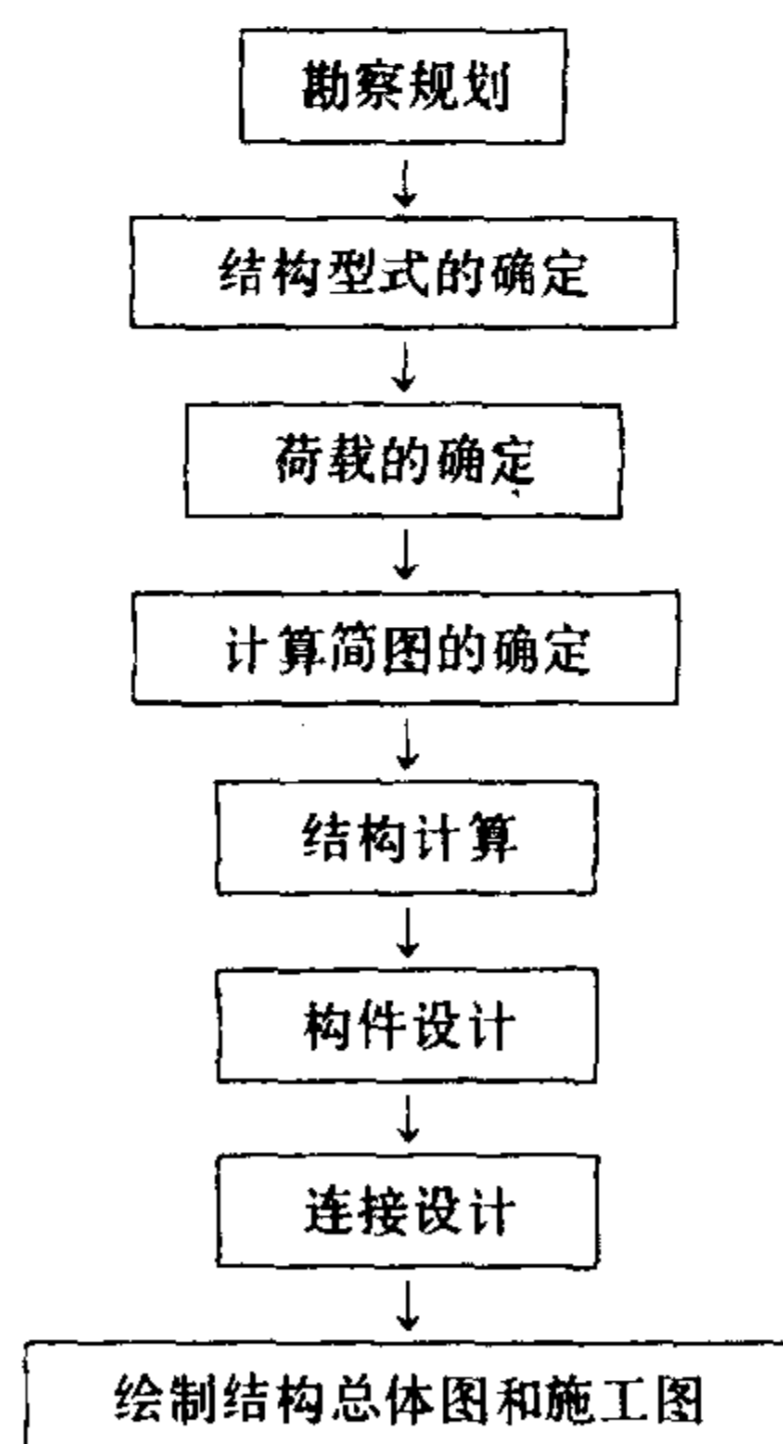


图 0-5 钢结构设计程序示意图

构型式。

**3. 荷载的确定** 荷载的确定关系到结构的安全性和耐久性，是结构设计的重要依据。一般可按照结构物的相应规范来确定，例如对房屋用钢结构可采用《工业与民用建筑结构荷载规范》(TJ9-74)。对于钢引桥应采用《港口工程技术规范》荷载篇，对于特别重要的大型结构，应按具体情况来确定它的荷载。

**4. 计算简图的确定** 为了抵抗各个方向可能出现的荷载，实际结构往往是一个比较复杂的空间结构，对这样的结构要作出十分严谨的力学分析往往是比较困难的，因此，常把实际结构抽象为简单的力学分析模型，即所谓的“计算简图”。计算简图既要反映结构的实际工作状况，又要忽略结构中的次要因素使计算工作得以简化，所以，选定合理的计算简图必须以熟悉结构的实际工作性能为基础。选定计算简图的过程，也是对结构的实际布置、连接构造以及受力状态进行分析和简化的过程，它们是相辅相成的。

**5. 结构计算** 在各种可能出现的最不利的荷载组合下，进行结构内力计算和位移计算，计算方法的选择与结构型式、设计者所熟悉的方法以及与所使用的计算工具有关。过去以手算为基础，建立了许多简化的计算方法，从本世纪五十年代开始，电子数字计算机在结构工程中得到了应用，以往所采用的许多简化方法的重要性已有所降低，而相应地要求通用性规格化的计算方法。

**6. 构件设计** 根据杆件的内力、支承情况和有关的几何尺寸(如跨度等)，选择构件的截面型式和需要的截面尺寸，并对其强度、刚度和稳定性进行验算。

**7. 连接设计** 一个结构物往往是由许多构件组成的，因此构件与构件之间、结构与地面之间均需要按预计的支承情况进行连接设计，以保证连接处有足够的可靠度并符合预计的工作性能。

**8. 绘制结构总体图和施工图** 以上的理论分析和全部计算，最终都要反映到结构总体图和施工图上。在总体图上除要注明结构的总体布局及尺寸以外，尚须注明所用材料的规格和数量等。在施工图上需要注明部件的详细尺寸以及必需说明的加工方法等。

一个钢结构设计到此大体上是完成了。但要把钢结构建造起来，还必须按照设计图纸进行加工制造、运输和安装等工作。

在设计过程中，应根据设计对象依照有关的设计规范进行设计。例如对普通钢结构设计，应依照1974年的《钢结构设计规范 TJ17-74(试行)》；对钢闸门设计，应依照1978年的《水利水电工程钢闸门设计规范 SDJ13-78(试行)》；对钢引桥设计应依照 1975 年的《港口工程技术规范第四篇第三册斜坡码头和浮码头》来进行设计。

# 第一章 钢结构的材料

## 第一节 建筑钢的种类和性能

### 一、建筑钢的种类

钢结构的材料一般都采用建筑钢。只有结构的支承部件或起重的零部件须酌情采用铸钢、锻钢（优质碳素钢）或铸铁。建筑钢因其强度高、兼有良好的弹性与塑性，且易于加工和焊接，故为钢结构的主要材料。铸铁因其抗拉强度低，性质较脆，在承重结构中很少采用。

建筑钢按其化学成分可分为：

（1）普通碳素钢 主要成分为铁与少量的碳。在钢结构中常采用含碳量低于0.22%的低碳钢，其中又以3号钢为最常用。

（2）普通低合金钢 除主要含铁与碳外，尚含有少量的合金元素如锰、钛、硅等。其合金元素总含量一般不超过3%，故称为低合金钢。其中以16锰钢为最常用。

此外，尚有更适于承受动力荷载的桥梁钢，如16锰桥钢等。

建筑钢按照冶炼方法可分为平炉钢、侧吹碱性转炉钢以及近年来在我国发展较快的顶吹氧气转炉钢。按照浇注（铸锭）方法又可分为沸腾钢、镇静钢和半镇静钢。

### 二、建筑钢的主要机械性能

建筑钢在常温、单向一次均匀受拉时的机械性能可由单向拉伸试验测得的应力应变曲线（图1-1）来表示。随着荷载与应力的增加，钢的工作大致可划分为：弹性、塑性（屈服）、自强和破坏（颈缩）四个阶段。其中的屈服点 $\sigma_s$ 、极限强度（抗拉强度） $\sigma_b$ 和伸长率 $\delta_b$ 以及由带缺口试件进行冲击试验所测定的冲击韧性（冲击值） $a_K$ 是用来衡量建筑钢的强度、塑性和韧性等机械性能的主要指标（见附录一表1）。

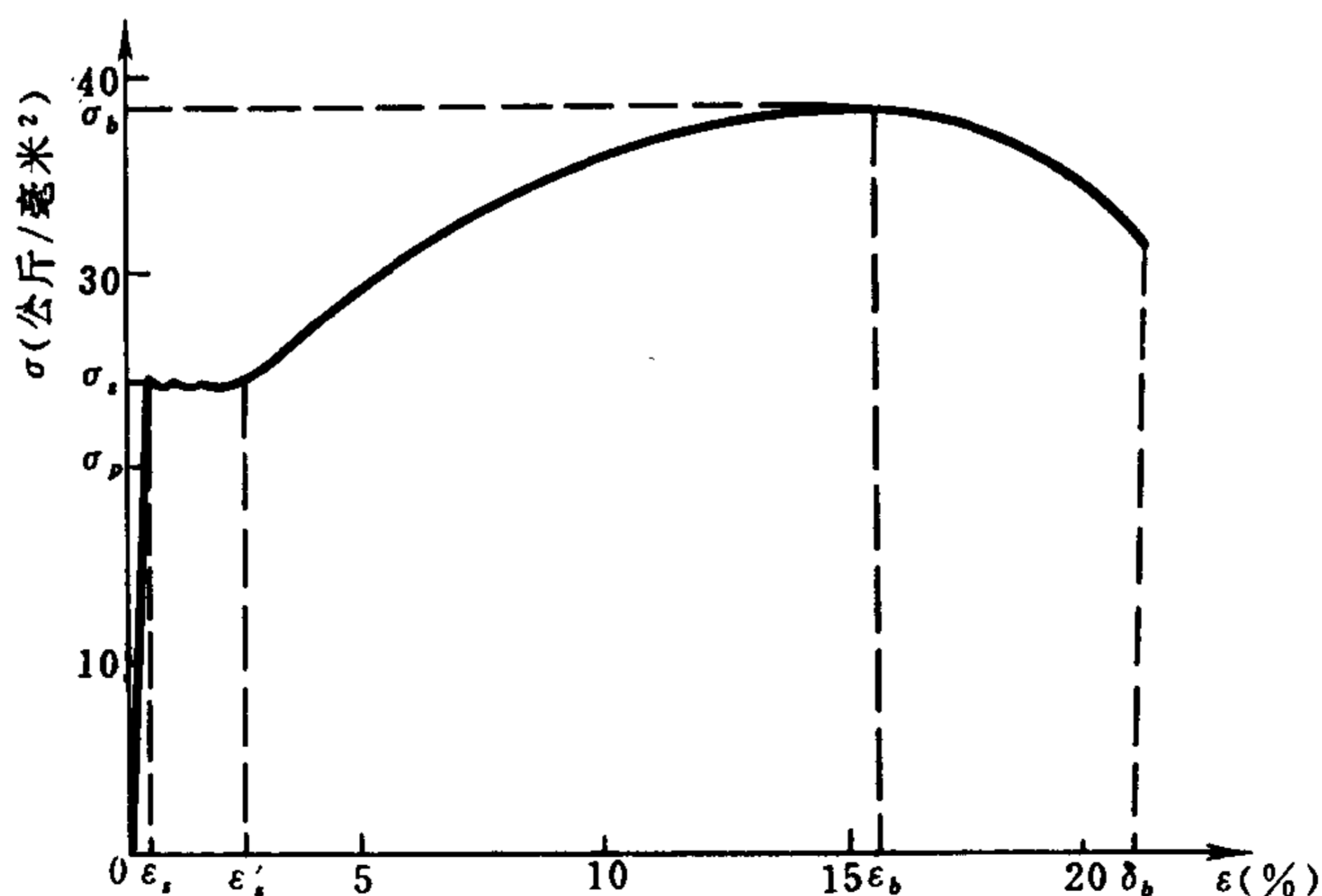


图 1-1 3号钢单向拉伸时的应力应变曲线

从钢材的拉伸试验曲线，可得下述几点重要结论：

(1) 屈服点  $\sigma_s$  是钢材的强度指标。当应力达到屈服点时，钢的承载能力暂时耗尽，应力暂不增加，而应变却继续增大，出现了屈服台阶，或称流幅（自  $\varepsilon_s = 0.15\%$  起至  $\varepsilon'_s = 2.5\%$  止）。这时结构将因残余（塑性）变形过大而不能继续使用。故设计时常取屈服点  $\sigma_s$  作为计算应力的极限。

(2) 极限强度  $\sigma_b$  也是衡量钢材强度的一个指标。当应变超过屈服台阶，进入自强阶段，最终达到极限强度  $\sigma_b$  后，试件才发生局部颈缩而被拉断。由于这时塑性变形太大（ $\varepsilon_b \approx 16\%$ ），故不能取极限强度作为计算的依据，只能当作一种强度储备。对于没有明显屈服台阶的钢材，有时可近似地取  $0.6\sigma_b$  作为屈服点。

(3) 钢材的塑性通常用伸长率  $\delta_b$  来表示。钢材的塑性表示钢材经受巨大变形后尚不致破坏的能力。钢在常温和静力荷载作用下，破坏前将产生很大的塑性变形，约比弹性变形大200倍以上。这说明钢结构在发生塑性断裂之前有十分明显的预兆，来得及防止事故的发生，从而提高了钢结构的安全可靠性。实际上钢结构极少发生这种塑性破坏。

(4) 建筑钢兼有良好的弹性与塑性。钢的应力在比例极限  $\sigma_p$  之前，应力与应变呈直线关系，符合虎克定律。由于屈服点与比例极限如此接近，在屈服点之前的应变又很小（例如3号钢的  $\sigma_p \approx 2000$  公斤/厘米<sup>2</sup>， $\varepsilon_p \approx 0.1\%$ ； $\sigma_s \approx 2400$  公斤/厘米<sup>2</sup>， $\varepsilon_s \approx 0.15\%$ ），故在计算钢结构的强度时，可近似地将钢的弹性工作阶段提高到屈服点。同时，由于低碳钢的流幅相当长，当应力达到屈服点而出现塑性流动时，钢即由理想的弹性体转变为近乎理想的塑性体，因此，低碳钢最接近于理想的弹性塑性体（图1-2）。这就是钢结构正在发展中的塑性设计理论的依据。

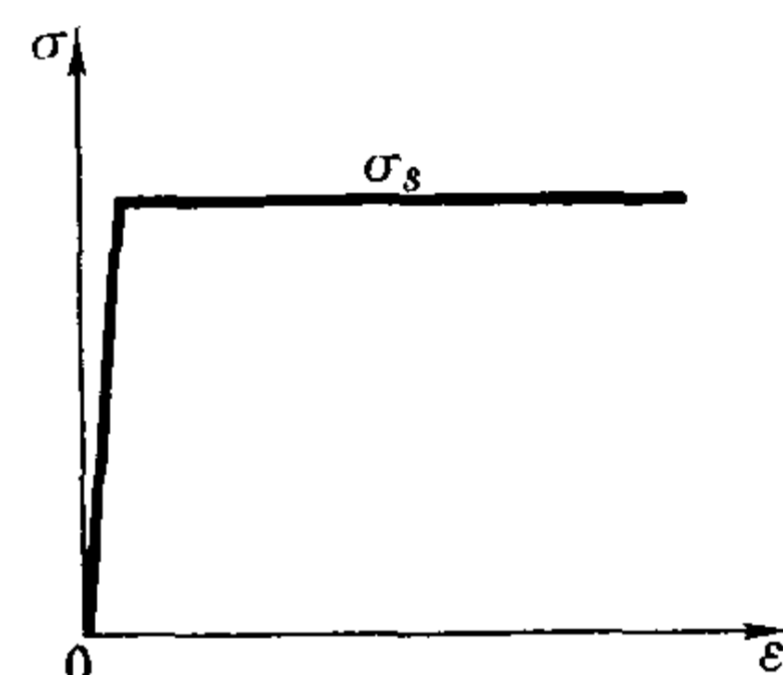


图 1-2 理想弹性塑性体的应力应变图

建筑钢受均匀压缩或受弯时也有类似上述受拉时的工作特性。虽然三者的破坏情况并不相同，但都具有相同的屈服点  $\sigma_s$ 、弹性模量  $E = 2.1 \times 10^6$  公斤/厘米<sup>2</sup> 和泊桑比  $\mu = 0.25 \sim 0.3$ 。钢材受剪时的强度要比受拉时强度低很多，且相应的弹性变形和塑性变形都比受拉时为大。一般取受剪时的屈服点  $\tau_s = 0.58\sigma_s$ ，剪切弹性模量  $G = 8.1 \times 10^5$  公斤/厘米<sup>2</sup>。

当钢材承受动力荷载（包括冲击荷载与振动荷载）或处于复杂应力、低温等情况下，常会发生低应力脆性断裂（简称脆断）。钢材发生脆断时的应力常小于屈服点，而且变形甚微，裂缝开展速度又极快（可达1800米/秒）。实践证明，这种突然性的脆断事故，对于钢结构的使用显得特别危险，必须引起设计者的高度重视。

钢材的脆断同其韧性有着密切关系，韧性差的钢材在低温或快速加载等不利条件下，容易发生脆断。钢材的韧性乃是钢材断裂前所吸收的能量和开展塑性变形的能力，我国目前常采用带缺口试件被摆锤击断处每单位截面积上所消耗的功，即冲击韧性  $a_K$ （公斤·米/厘米<sup>2</sup>）来衡量。由于冲击力常使钢材发生脆断，故冲击韧性可用来鉴定一般均匀连续体钢材的抗脆断性能以及钢在低温等不利条件下的变脆倾向。对于承受动力荷载的结构和处于低温情况下的结构，冲击韧性是保证结构安全的一个重要指标。



2000

此外，钢材的塑性和冷加工性能也可用冷弯试验来检验，以钢试件冷弯 $180^{\circ}$ 不出现裂纹为合格。对于重要的结构（例如钢闸门、钢桥和吊车梁等）以及弯曲成型的构件如压力钢管、钢桩等所用钢材还应保证冷弯试验合格。

### 三、建筑钢的可焊性、抗蚀性和防腐蚀措施

钢材的可焊性（又称焊接性能）是指在给定的构造型式和焊接工艺条件下获得符合质量要求的焊缝连接的性能。可焊性差的钢材在焊接的热影响区容易发生脆性裂缝（热裂缝或冷裂缝），不易保证焊接质量，除非采用特定的复杂焊接工艺，才能保证其质量。

焊接结构的失事，往往是由于钢材的可焊性不良，在低温或受动载时发生脆性断裂，故对于重要的承受动力荷载的焊接结构，应对所用钢材进行可焊性的鉴定。一般可用带试验焊缝的试件进行试验，以测定焊缝及其热影响区钢材的抗裂性<sup>①</sup>、塑性和冲击韧性等。钢的可焊性除了同钢的含碳量等化学成分密切相关外（详见下节），还同钢的塑性及冲击韧性有密切关系。因此，钢的可焊性还可间接地用钢材的冲击韧性 $a_K$ 来鉴定。冲击韧性合格的钢材，其焊接质量也容易保证。

钢的抗腐蚀性能，简称抗蚀性，也是钢结构特别是水工钢结构必须注意的问题。钢的抗蚀性一般可按试样或成品每年减损厚度的毫米数（毫米/年），或每单位面积每年减损重量的克数（克/米<sup>2</sup>·年）来衡量其平均腐蚀稳定性。我国冶金部门曾在我国各地作五年大气曝晒试验，结果表明，16锰钢比3号钢的抗腐蚀稳定性约提高20~38%。

钢铁的腐蚀主要是一种电化学腐蚀现象。钢内含碳和杂质愈多，或当钢构件表面存在凹槽和狭缝时，因易于使铁和碳等构成电位差不同的两极，故愈易锈蚀。若结构采用两种金属材料连接，则活动性较强即电位较低的金属容易被腐蚀。电位差愈大，腐蚀愈严重。生产实践证明，钢闸门中的螺栓连接，当螺栓单独镀锌时，要比不镀锌时更易腐蚀。实践还证明，钢材在应力状态下的腐蚀速度比无应力状态为快，这种现象称为应力腐蚀。

为了提高钢结构的耐久性，在设计和管理上必须十分注意钢的防腐蚀措施。一般常采用油漆或喷镀锌层，对于重要零件如闸门轮轴等可采用镀铬，将钢材表面同周围介质相隔绝。近年来正在试验推广外接直流电源或挂锌片的阴极保护法。

## 第二节 钢的组织 and 化学成分等对钢材性能的影响

### 一、组织构造的影响

钢的内部组织构造是直接影响钢材性能的主要内因。钢结构常用的低碳钢是含碳量低于0.22%的铁碳合金。低碳钢在常温（不超过 $700^{\circ}\text{C}$ ）时的组织构造主要是由铁素体和少量的珠光体所构成。铁素体是一种呈体心立方晶格（图1-3a）的纯铁晶体内溶有极微量碳的固溶体。它在结晶时形成许多形状、大小和方向都不相同的晶体，或称晶粒（图1-3b）。珠光体则是由渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}$ 和铁素体组成的不定形混合物，填充在各晶粒之间的晶界中，形成网状的间层或单独的夹杂体。图1-3c所示为钢的金相显微组织。其中，色泽光亮者为铁

<sup>①</sup> 抗裂性试验是指试件上的焊缝及其热影响区钢材在焊完后，经剖开检查是否有裂纹产生，用裂纹的长度及深度来衡量产生裂纹的倾向。