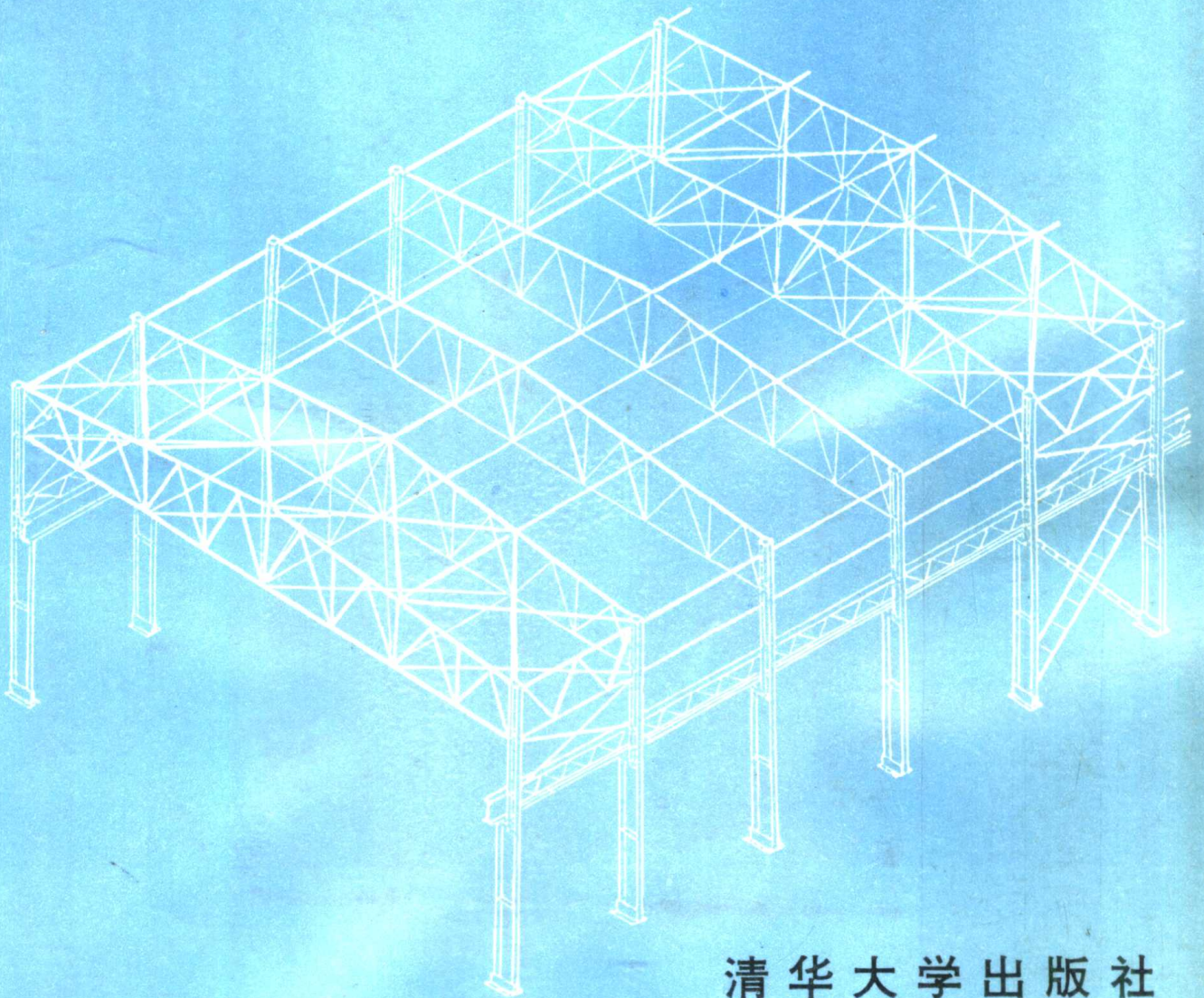


钢 结 构

— 原理与设计 —

王国周 瞿履谦 主编



清华大学出版社

钢 结 构

——原理与设计——

王国周 瞿履谦 主编

清华大学出版社

内 容 简 介

本书按照高等学校土建类专业钢结构课程和课程设计教学大纲要求编写,可作为工业与民用建筑、建筑结构工程等专业这两门课程的教材。全书包括:绪论、钢结构材料、钢结构设计方法、钢结构连接、轴心受拉和受压构件、受弯构件、拉弯和压弯构件、钢桁架、单层工业厂房等,共九章。本书按我国新颁布的钢结构设计规范编写,理论和设计并重,附有较多的例题和习题以及有关设计资料。本书也可供从事土建工程设计、施工、教学、科研等方面的技术人员参考。

(京)新登字 158 号

钢 结 构

——原理与设计——

王国周 瞿履谦 主编

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

清华大学印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 32.75 字数: 776 千字

1993 年 11 月第 1 版 1993 年 11 月第 1 次印刷

印数: 0001—8000

ISBN 7-302-01250-4/TU·79

定价: 16.50 元

前 言

1. 钢结构这门课程是综合性很强的专业课,它涉及到工程力学、材料学、机械学、结构设计理论、结构体系和结构构件设计以及结构制造和工程施工等,教材处理不好就显得杂乱无章。所以,首先必须理顺章节次序,使之成为一本有系统的、理论与实践并重的课程教材。本书以讲述钢结构基本构件为主,包括受弯构件、轴心受力构件、拉弯和压弯构件、桁架以及材料、设计原理和连接等;并包括了课程设计(钢屋盖)的所有内容。为了使学生对整体结构有所了解,最后增加了有代表性的钢结构房屋——单层厂房一章,如学时少不一定讲授,但可供毕业设计和选修课程使用。其它有关钢结构教学内容留作选修课程另编教材。

2. 为了在学习这门课程的开头就使学生对钢结构有比较全面的认识,在第一章里较多地介绍了国内外钢结构的发展概况,希望对未来的工程师们起到鼓舞作用,增强学习钢结构的热情。

3. 有关钢材的国家标准,近二、三年来多有变动,并且变动是在钢结构设计规范 GBJ 17-88 颁布之后。因此在第二章里,钢结构钢材牌号以及化学成分和机械性能均以 GB 700-88(碳素结构钢)和 GB 1591-88(低合金结构钢)为主,相应地也提到变动前的情况。因为新旧标准不完全一致,在选材方面不能完全根据钢结构设计规范 GBJ 17-88 讲述,有些是按编者对新标准的理解讲述的。

4. 在设计方法一章里,主要根据建筑设计统一标准 GBJ 68-84(试行),介绍以概率理论为基础、用分项系数表达的极限状态设计方法,以及钢结构采用这一方法的表达特点。在讲述方式上力求以阐明基本概念为主,附以必要的公式和图表。最后以一简单例题说明这一设计方法的合理性。

5. 在连接一章里,重点讲述焊缝连接、普通螺栓连接和高强度螺栓连接。对直角角焊缝连接的计算作了比较详细的分析,以适用于各种受力情况。对承受剪力和弯矩时的摩擦型高强度螺栓连接的计算,采用了两种计算方法进行对比,因为按全部受拉螺栓计算比按最大受拉螺栓计算不仅合理而且节省螺栓。

6. 鉴于近年来有关力学课程对结构稳定理论的讲述日趋减少,在第五、六、七各章中都介绍了必要的杆件和板件的稳定理论知识,着重于基本概念及其在钢结构中的应用。讲授时可根据具体情况有所选择。

7. 工程结构课程总是要与本国的结构设计规范密切结合的。本书各章内容大都是先讲述一般理论,然后归结到我国钢结构设计规范 GBJ 17-88 设计计算公式。对规范规定都作了详尽阐述,使学生不仅知其然而且知其所以然。GBJ 17-88 增加了塑性设计和钢-混凝土组合梁等条款,本书第六章也编入了这些内容,以便学生对这部分能有初步的了解,也可供毕业设计和选修课使用。

8. 构造问题是钢结构设计的重要内容,初学者容易忽视。在第四至第九各章中都给

出工程实践中常用的构造图和实例。教师可结合示例讲述其原理,学生可以自学。

9. 限于篇幅,本书未能详述冷弯薄壁型钢结构,仅在有关章节以对比形式谈到其特点。

10. 为了作为课程设计的教材,在第八章对钢屋盖的布置、钢屋架的设计计算和施工图的绘制叙述比较详细。

11. 本书附以必要的例题和习题(带参考答案)。

12. 在适当章节以对比形式对国外情况作了一些介绍。

13. 书中小字排印的节段(例题除外)是建议可不必讲授的内容。

14. 本书为建筑结构工程专业、工业与民用建筑专业本科学生学习钢结构课程,进行钢结构课程设计的教材,也可供同类专业大专学生选用;还可供土建类设计、制造、施工、管理和研究等方面的工程技术人员参考。

15. 本书由王国周编写第一、三章和第六章第十二节,赵文蔚、王国周编写第五、七章,李少甫编写第二章,王珊、瞿履谦编写第四章,瞿履谦编写第六、八、九章。全书由王国周、瞿履谦主编定稿。

16. 对在编写过程中提供过资料、信息的同志们以及我们引用和参考过的文献作者们在此一并致谢。

17. 书中存在的缺点和错误,请读者批评指正。

王国周 瞿履谦

1992年7月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 钢结构的特点	1
第二节 钢结构的应用范围	2
第三节 钢结构的发展概况	2
第四节 钢结构体系及其组成的构件	13
第二章 钢结构的材料	17
第一节 钢材的主要机械性能	17
第二节 决定和影响钢材性能的因素	22
第三节 钢材在复杂应力状态下的工作	28
第四节 钢材的疲劳和疲劳计算	30
第五节 钢材的脆性断裂与防止	36
第六节 钢的种类、牌号、代号、技术标准和钢材选用	37
第七节 常用钢材规格	42
习 题	44
第三章 钢结构设计方法	46
第一节 概率极限状态设计法的基本概念	46
第二节 钢结构设计方法的发展	49
第三节 一次二阶矩概率极限状态设计法	52
第四节 钢材和连接的强度设计值	66
第四章 钢结构的连接	71
第一节 钢结构的连接方法	71
第二节 焊缝连接	74
第三节 对接焊缝连接	79
第四节 角焊缝连接的型式和构造	83
第五节 角焊缝连接的计算	89
第六节 焊接残余应力和焊接残余变形	101
第七节 螺栓连接的构造	108
第八节 普通螺栓连接的计算	111
第九节 高强度螺栓连接	123
习 题	136
第五章 轴心受力构件	140
第一节 概述	140
第二节 轴心受力构件的强度和刚度	142
第三节 轴心受压构件的整体稳定	144
第四节 轴心受压构件的局部稳定	167
第五节 实腹式轴心受压构件的截面设计和构造要求	175

第六节	格构式轴心受压构件	178
第七节	梁与轴心受压柱的连接	191
第八节	轴心受压柱柱脚	193
	习 题	199
第六章	梁	200
第一节	梁的应用和型式	200
第二节	梁的强度和挠度	203
第三节	梁的剪应力和剪切中心	211
第四节	梁的扭转	215
第五节	梁的整体稳定	222
第六节	型钢梁的设计	236
第七节	组合梁的设计	240
第八节	梁的局部稳定	248
第九节	梁腹板加劲肋的设计	255
第十节	梁的拼接和连接	266
第十一节	钢与混凝土组合梁	271
第十二节	梁的塑性设计	278
	习 题	285
第七章	拉弯构件和压弯构件	287
第一节	概述	287
第二节	拉弯构件和压弯构件的强度计算	288
第三节	实腹式单向压弯构件在弯矩作用平面内的稳定计算	293
第四节	实腹式单向压弯构件在弯矩作用平面外的稳定计算	301
第五节	实腹式双向压弯构件的稳定计算	306
第六节	实腹式压弯构件的局部稳定	308
第七节	压弯构件和框架柱的计算长度	311
第八节	实腹式压弯构件的截面设计和构造要求	318
第九节	格构式压弯构件	321
第十节	框架梁柱的连接和柱的拼接	327
第十一节	框架柱柱脚	330
	习 题	334
第八章	桁架	336
第一节	钢桁架概述	336
第二节	屋盖结构的布置和体系	339
第三节	桁架间的支撑	342
第四节	桁架的荷载和杆件内力计算	350
第五节	桁架杆件的截面选择	355
第六节	桁架的节点设计	366
第七节	钢屋架结构施工图	374
第八节	钢屋架设计例题	376
第九节	轻型钢屋架设计特点	385
	习题和设计题	397

第九章 单层厂房钢结构	399
第一节 单层厂房钢结构的组成	399
第二节 柱网和变形缝的布置	402
第三节 厂房结构的横向框架	404
第四节 厂房屋盖结构	411
第五节 柱间支撑和墙架	421
第六节 吊车梁	425
第七节 横向框架的计算原理	441
第八节 柱	454
习 题	458
附录	459
附录一 材料的性能	459
附录二 计量单位的换算关系	468
附录三 型钢表	469
附录四 各种截面回转半径的近似值	495
附录五 轴心受压构件的稳定系数	496
附录六 柱的计算长度系数	502
附录七 疲劳计算的构件和连接分类	506
习题参考答案	508
主要参考文献	511

第一章 绪 论

第一节 钢结构的特点

钢结构是钢材制成的工程结构,通常由型钢和钢板等制成的梁、桁架、柱、板等构件组成,各部分之间用焊缝、螺栓或铆钉连接,有些钢结构还部分采用钢丝绳或钢丝束。

钢结构与钢筋混凝土结构、木结构和砖石等砌体结构都是工程结构的不同分支。它们之间有许多共同性,例如在结构体系、内力分析和设计程序等方面大体是相同的;但由于材料性质的不同、原材料和构件截面形状的不同,也有其特殊性,例如在结构型式、构件计算方法、构件连接方法和构造处理方法等方面都有显著的差别。学习钢结构应注意它的特殊点。

钢结构具有下列优缺点:

(1) 材质均匀,可靠性高 钢材组织均匀,接近于各向同性匀质体。钢材由钢厂生产,控制严格,质量比较稳定。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,所以钢结构可靠性较高。

(2) 强度高,重量轻 钢材强度较高,弹性模量亦高,因而钢结构构件小而轻。当今有多种强度等级的钢材,即使强度较低的钢材,其密度与强度的比值一般也小于混凝土和木材,从而在同样受力情况下钢结构自重小,可以做成跨度较大的结构。由于杆件小,所占空间少,亦便于运输和安装。

(3) 塑性和韧性好 钢结构的抗拉和抗压强度相同,塑性和韧性均好,适于承受冲击和动力荷载,有较好的抗震性能。

(4) 便于机械化制造 钢结构由轧制型材和钢板在工厂制成,便于机械化制造,生产效率高,速度快,成品精确度较高,质量易于保证,是工程结构中工业化程度最高的一种结构。

(5) 安装方便,施工期限短 钢结构安装方便,施工期限短,可尽快地发挥投资的经济效益。

(6) 密封性好 钢结构的密封性较好,容易做成密不漏水 and 密不漏气的常压和高压容器结构和大直径管道。

(7) 耐热性较好 结构表面温度在 200℃以内时,钢材强度变化很小,因而钢结构适用于热车间。但结构表面长期受辐射热达 150℃时,应采用隔热板加以防护。

(8) 耐火性差 钢结构耐火性较差,钢材表面温度达 300~400℃以后,其强度和弹性模量显著下降,600℃时几乎降到零。当耐火要求较高时,需要采取保护措施,如在钢结构外面包混凝土或其他防火板材,或在构件表面喷涂一层含隔热材料和化学助剂等的防火涂料,以提高耐火等级。

(9) 耐锈性差 钢结构耐锈性较差,特别在潮湿和有腐蚀性介质的环境中,容易

锈蚀,需要定期维护,增加了维护费用。

第二节 钢结构的应用范围

由于钢材和钢结构有上述特点,钢结构常用于各种工程结构中。在我国目前钢材需要量大而产量还不够多的情况下,钢结构的合理应用范围大体如下:

(1) 重型工业厂房的承重骨架和吊车梁 例如冶金企业的炼钢、轧钢车间,重型机械厂的铸钢、水压机、锻压、总装配车间等等,这些车间高度和跨度一般都比较,有的柱距也比较宽,有重级工作制大吨位吊车(有超重吨位达 440t 的),或是设备振动厉害,或是热加工车间,结构表面温度较高。

(2) 大跨度建筑的屋盖结构 例如公共建筑中的体育馆、大会堂、影剧院等,工业建筑中的飞机装配车间、大型飞机检修库等。

(3) 大跨度桥梁 跨度较大的铁路和公路桥梁多采用钢结构。

(4) 多层和高层建筑的骨架 例如工业建筑中的多层框架、民用建筑中跨度较大的多层框架和高层框架。四、五十层的钢结构高层建筑已在我国建成多幢。固定式采油平台也多用多层钢框架。

(5) 塔桅结构 如输电线路塔架、无线电广播发射桅杆、电视播映发射塔、环境气象塔、排气塔、卫星或火箭发射塔等高耸结构常采用钢结构。

(6) 容器和大直径管道等壳体结构 如储液罐、储气罐、大直径输油(气)和输煤浆管道、水工压力管道、围仓以及炉体结构等。

(7) 移动式结构 如水工闸门、各种起重机、射电望远镜、移动式采油平台等。

(8) 可拆卸、搬移的结构 如装配式活动房屋、流动式展览馆、军用桥梁等,采用钢结构特别合适。

(9) 轻型结构 跨度不大,屋面轻的工业和商业房屋常采用冷弯薄壁型钢结构或小角钢、圆钢组成的轻型钢结构。

(10) 在地区抗震要求高的工程结构。

第三节 钢结构的发展概况

中国是最早用铁建造结构的国家之一。比较著名的是铁链桥,它是从竹索桥演变来的。现存的最早铁链桥之一为云南省永平与保山之间跨越澜沧江的霁虹桥(图 1-1),始建于明朝成化年间(1465~1487 年),几经重修。桥总长 113.4m,两岸桥台伸入江中,净跨 57.3m,宽 3.7m,底部承重铁链 16 根(现存 14 根),栏杆铁链左右各一根。著名的中国红军长征经过的四川省泸定大渡河上的泸定桥(图 1-2),建成于 1706 年(清朝康熙 45 年),净跨 100m,宽 2.7m,共有铁链 13 根,每根重约 1.6t 多。在当时条件下在水流急湍的河道上架起这样长的铁链桥,工程是艰巨的。它表明了我国劳动人民的聪明才智和创造力。

中国古代的钢铁结构除铁链桥外,尚有许多纪念性建筑,如目前仍然存在的、建于 967 年(五代南汉)的广州光孝寺东铁塔,共 7 层,塔身高 6.35m,以及建于 963 年的西铁

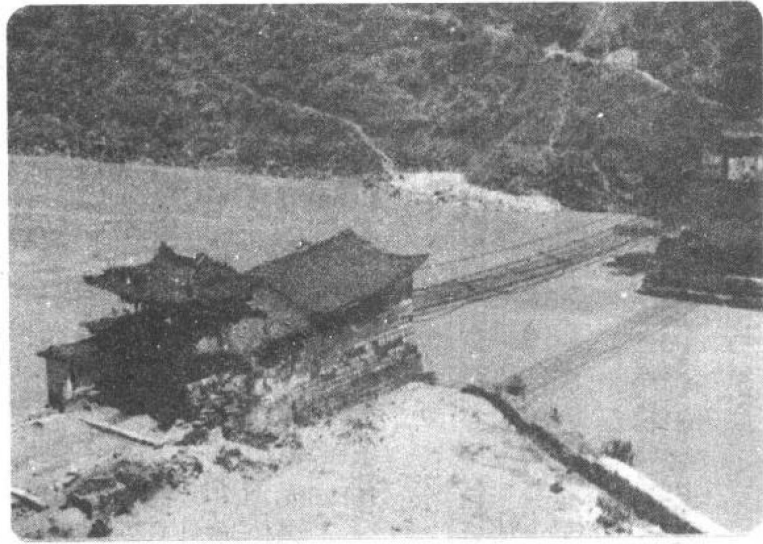


图 1-1 霁虹桥全景

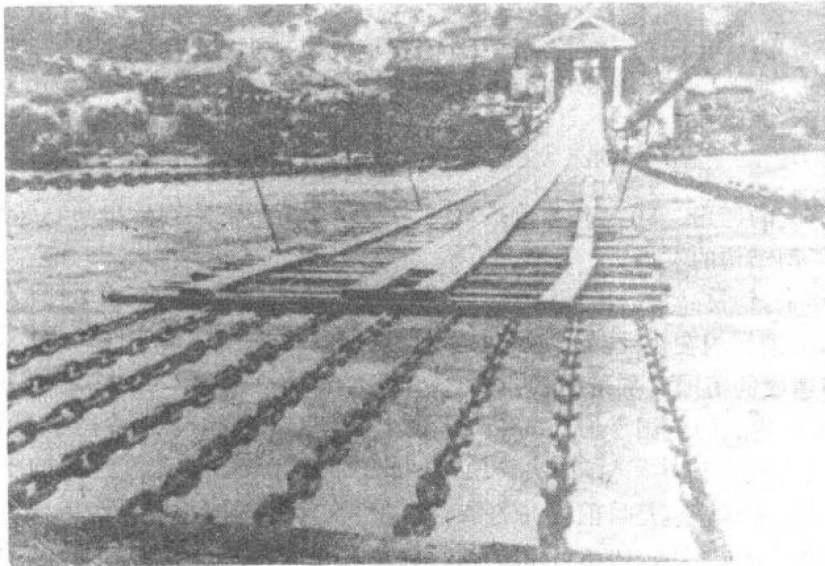


图 1-2 大渡河泸定桥

塔, 现仅存 3 层; 1061 年(宋)在湖北当阳玉泉寺建造的 13 层铁塔, 塔身高 17.9m(图 1-3), 塔由生铁铸成, 每层分别浇铸, 留榫槽, 逐层彼此连接而成为整体。

西方国家第一个完全用生铁建造的肋拱桥, 1779 年出现在英国科尔布鲁克代尔 (Coalbrookdale), 跨长约 30.5m。18 世纪末期工业革命兴起, 冶金技术和土木工程随之发展。18 世纪 80 年代有了商业生产的熟铁型材, 促使熟铁结构和生熟铁组合结构的出现。19 世纪 30 年代开始用轧制方法制造铁轨。19 世纪 20~30 年代出现了铆钉连接, 之后出

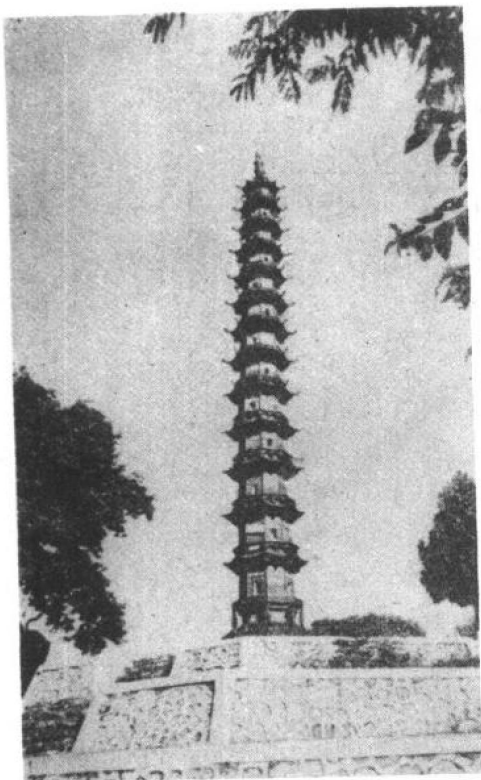


图 1-3 玉泉寺铁塔

现铆接熟铁结构,使桥梁和其他建筑的跨度得以增大。较早且较大的工程是1850年在英国威尔士建成的跨麦奈海峡(Menai Straits)的 $70+140+140+70$ (m)四跨连续的箱管截面铁路桥梁。1889年建成的高300m(现总高321m)的巴黎埃菲尔(Eiffel)铁塔也是用熟铁制造的(本世纪80年代进行了全面维修)。1856年和1867年相继发明转炉和平炉冶炼工艺,出现了软钢时代。从19世纪60年代和70年代起有了全钢制造的桥梁,如跨越美国密西西比河的圣路易斯拱桥,1874年建成,中央跨长158.5m,两边跨各为153m。

与钢铁材料平行发展的是材料试验技术、工程力学和结构理论的发展,使钢铁材料的性能可以得到比较精确的测定,各种结构形式和计算方法不断出现。在此基础上,结构规范也得到发展,20世纪初开始有了铁路桥梁规范。

早在19世纪后半叶就出现的焊缝连接从20世纪20年代起,开始在工程结构

上得到比较广泛的应用。30年代末到50年代初,在钢结构上开始采用高强度螺栓连接。这些都促进了钢结构的发展。

近几十年来,钢材品种的增加、制造方法的改善、新结构形式的采用、计算方法和设计理论的发展,使钢结构在工业与民用房屋、桥梁以及其他工程结构中得到更广泛的应用。例如1974年建成的美国芝加哥的西尔斯(Sears)大厦,110层、高443m,是目前最高的高层房屋;1981年建成的英国亨伯(Humber)吊桥,主跨长1410m,是至今跨度最大的钢桥;正在建造的日本明石海峡吊桥,中央跨长1990m;1974年在波兰华沙建成的一座长波用桅杆,5层纤绳,高645m,是目前最高的结构物;1973年建成的苏联基辅电视塔高392m,是当今最高的自立式钢塔;1975年在美国新奥尔良建成的超级穹顶,直径207m,是世界最大穹顶之一;80年代初建成的新加坡章宜机场跨度为218m的飞机库是世界上最大的飞机库之一。

中国古代在钢铁结构方面虽有所创建,但在封建制度下,生产力发展极其缓慢,在解放前的半封建半殖民地的百年历史中,中国也曾建造过一些钢桥和钢结构高层建筑,但绝大多数是外国人设计的。

新中国成立以后,随着经济建设的发展,钢结构在桥梁、较大跨度的重型厂房、大型公共建筑和高耸结构物等方面得到较多的应用。例如在桥梁方面,自1957年武汉长江大桥建成以后,相继在长江上建起包括九江长江大桥在内的5座钢桥。1968年建成的南京长

江大桥为铁路公路两用双层桥,正桥长 1576m(图 1-4),钢梁共 10 孔,其中有 9 孔为 $3 \times$

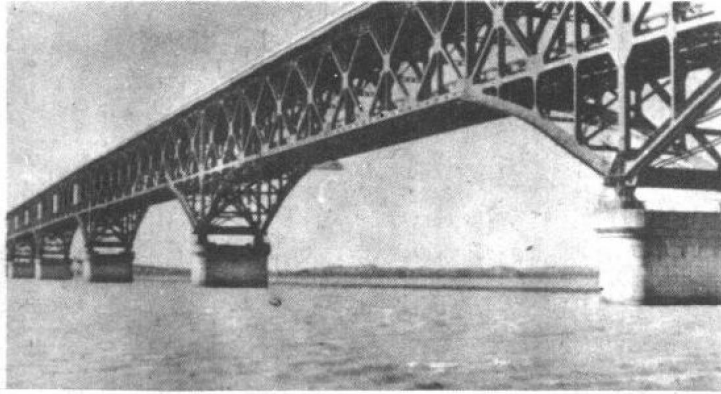


图 1-4 南京长江大桥

160m 三跨连续桁架,采用了 16Mnq 低合金钢。公路部分已通车的九江长江大桥也是铁路公路两用的双层桥,正桥全长 1808.6m,其中主联跨长(180+216+180)m,用柔性拱加劲,采用的钢材为 15MnVNq 钢,见图 1-5。由于在钢结构连接方法方面,焊接和高强度螺

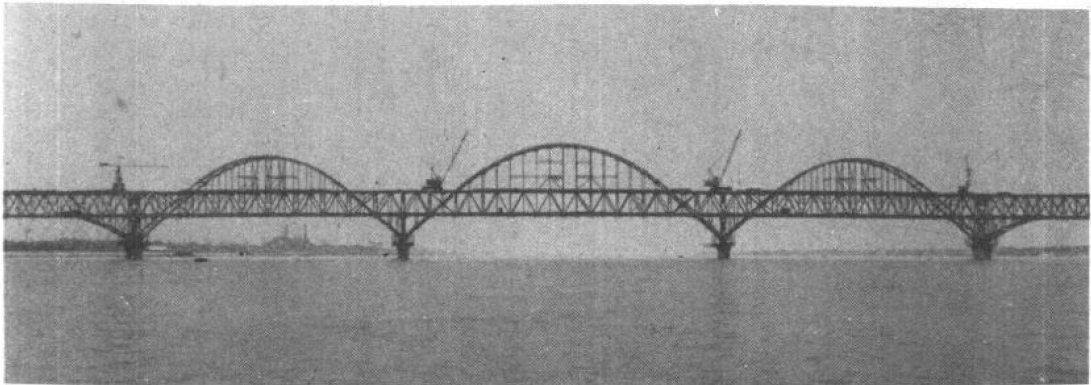


图 1-5 九江长江大桥用柔性拱加劲的主联(三跨)合拢情景

栓连接逐渐代替铆钉连接,自 1961 年建造了中国第一座高强度螺栓连接的铁路钢桥之后,建造了不少栓焊钢桁架桥,即杆件在工厂焊接制成,再将杆件在现场用高强度螺栓安装连接组成整体桥梁,现在已成为较大跨度钢桥的主要型式之一。近年来还开始采用箱形梁等新型桥跨结构,图 1-6 为 1982 年建成的在陕西安康跨越汉江的一座斜腿刚架铁路桥,主跨为 305m 连续箱形梁,二斜腿铰间跨度为 176m。图 1-7 为 1991 年建成的跨越黄浦江的上海市南浦大桥,总长 8346m,主桥为双塔双索面斜拉桥,全长 846m,采用钢梁与钢筋混凝土板相结合的组合梁结构,中跨跨长 423m,是我国已建跨度最大的斜拉桥,桥塔高 150m,为折线 H 型钢筋混凝土结构,每座桥塔两侧各以 22 对钢索连接主梁,索面呈扇形。正在建造的同类型的上海市杨浦大桥,中跨跨长 602m。1984 年底建成的在拉萨市达孜县跨越拉萨河的达孜悬索桥是我国已建最大跨度的吊桥,主索跨长 500m,桥面实长 415m,

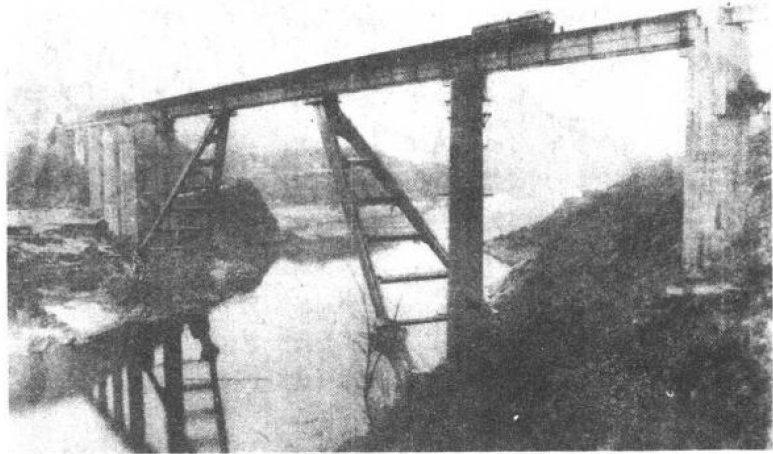


图 1-6 安康斜腿刚架桥

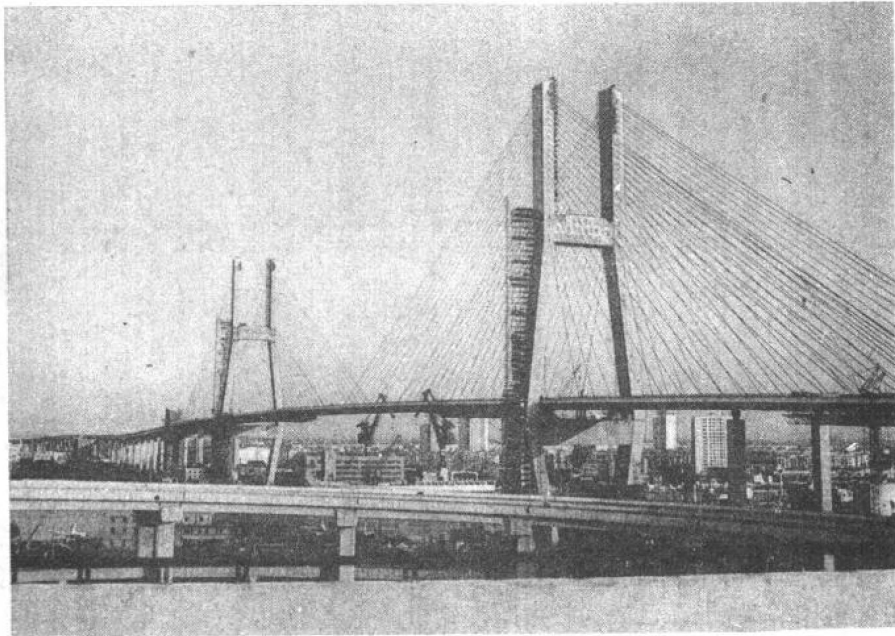


图 1-7 上海南浦大桥

有 85m 的空载段,桥面净宽 4.2m,桥面系为全焊钢结构,车道为正交异性板。

在工业建筑方面,几个大型钢铁联合企业(如鞍山、武汉、包头、攀枝花以及新建的宝山等钢铁联合企业)的炼钢、轧钢、连铸、无缝钢管等厂房的主体结构都是采用钢结构。重型机械厂、大型电机厂以及锅炉厂等的主要车间的主体结构也是钢结构。图 1-8 为 1977 年建成的上海锅炉厂的重型容器车间,主跨 36m,厂房高度为 40m,双层桥式吊车的上层



图 1-8 上海锅炉厂重型容器车间

为 2 台起重量 400/80t 吊车。在某些工业建筑中,特别是地震区,近年来常采用平板型钢网架结构,以代替钢屋架。图 1-9 为 1988 年建成的广州白云机场大型客机检修库,屋盖结

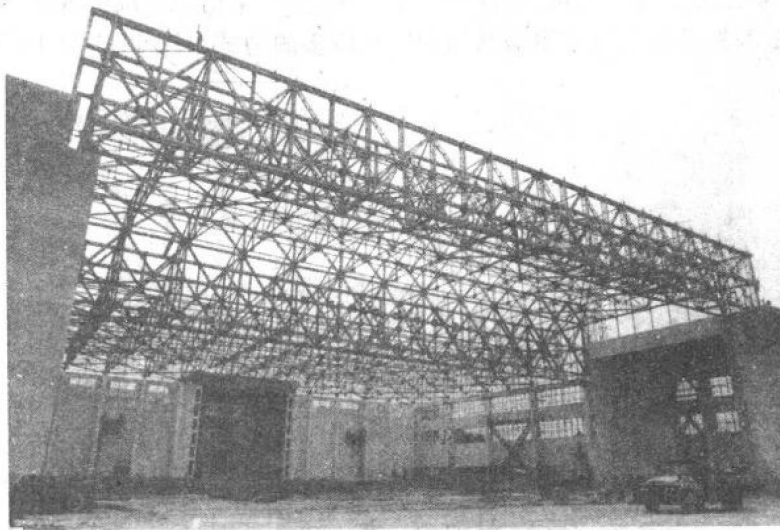


图 1-9 广州白云机场大型客机检修库

构采用跨度为 80m 高低整体式折线形网架,设有多支点悬挂吊车;网架沿大门一边设反梁;高低跨交界处设加强杆;使网架高度增大。在建的北京首都机场大型客机检修库屋盖为双跨 150m 钢网架结构。有些工业建筑采用冷弯薄壁型钢结构,如图 1-10 为北京汽车制造厂自动化高架仓库,净高 15m 的 13 层货盘架主要采用冷弯薄壁方管和槽钢,由高强

度螺栓连接而成,堆垛起重机由计算机操纵,在净宽 1.1m 的巷道内运行。

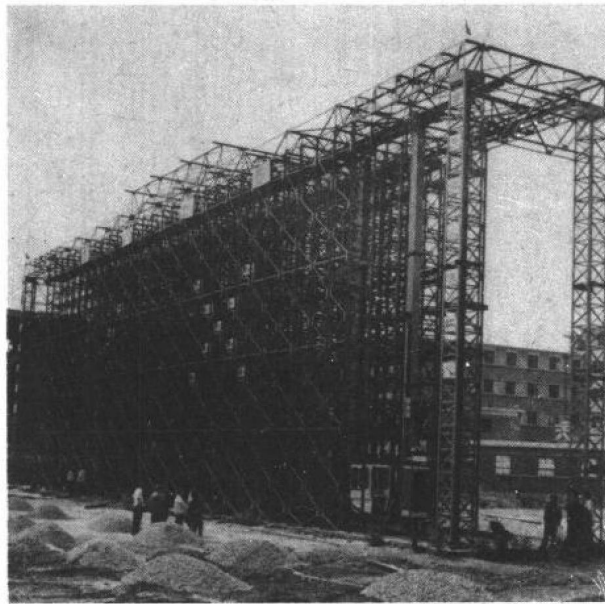


图 1-10 北京汽车厂自动化高架仓库

在公共建筑方面,各种结构型式,如平面桁架、拱、空间桁架、平板型网架、筒形网壳、圆屋顶、悬索屋盖等都有所采用。近一、二十年来,由交叉桁架组成的或由四角锥、三角锥组成的平板型网架是公共建筑屋盖结构中应用较多的型式。图 1-11 为 1975 年建成的上

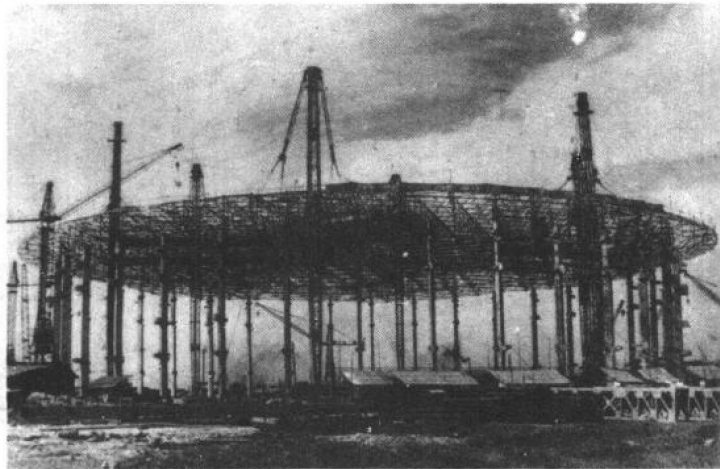


图 1-11 上海体育馆比赛馆网架

海体育馆比赛馆屋盖结构,采用直径为 110m(包括悬挑为 125m)的三向网架,支承在 36 根柱上,是目前中国跨度最大的房屋,网架杆件采用直径为 48~159mm 圆钢管,节点为焊接球节点,球直径多数为 400mm,图示为网架整体吊装的情景。在建的天津新体育馆屋

盖为钢网壳圆顶结构,直径 130m。1962 年建成的北京工人体育馆(图 1-12),屋盖采用圆形双层辐射式悬索结构,直径 94m,中央钢环直径 16m,高 11m,上下两层各有 144 束钢索,是目前中国跨度最大的悬索屋盖。

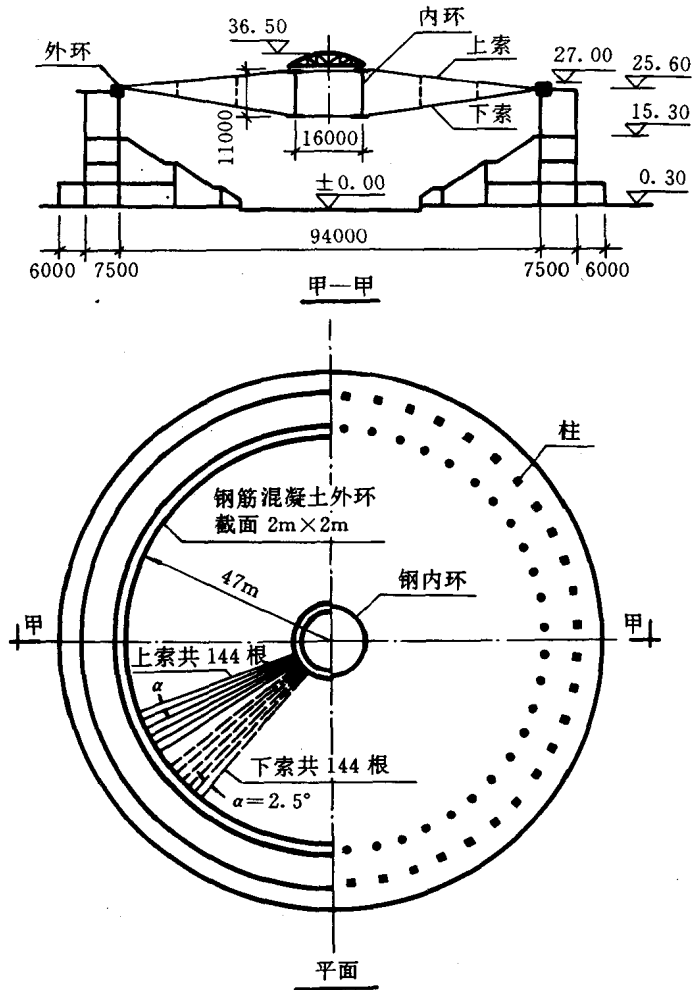


图 1-12 北京工人体育馆

为 1990 年在北京举行的第 11 届亚运会兴建的运动场馆中很多采用了型式新颖的钢结构屋盖。图 1-13 为北京国家奥林匹克体育中心游泳馆外景。屋盖结构采用斜拉索双坡曲面组合屋盖。沿屋脊处布置长 115.8m、截面为 1.8m×1.8m 的纵向箱形钢梁,钢梁两端支承于高度为 70m 和 60m 的西、东两个空心梯形钢筋混凝土塔筒,钢梁中部则由每个塔筒伸出 4 排(每排 3 根)平行斜拉索予以悬吊。两侧屋檐处各布置柱距 6.6m 的纵向钢筋混凝土框架,两侧框架柱轴线距离(即房屋跨度)为 70m。沿横向在屋脊钢梁和屋檐框架柱间布置间距为 6.6m 的折线形空心球节点的平面钢管桁架。折线形桁架靠近屋檐的约半跨为上下弦平行并呈 1:10 坡度,上下弦间距(即桁架高度)3.3m;靠近屋脊的约半跨为上下弦节点在同心圆上的圆弧形,弦杆坡度逐渐变陡并在屋脊处约达 80°,桁架高度仍为