



住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材

通高等教育本科国家级规划教材

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
(经典精品系列教材)

钢结构基本原理

(第三版)

同济大学 沈祖炎 陈以一 陈扬骥 赵宪忠 编著

中国建筑工业出版社

住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
(经典精品系列教材)

钢结构基本原理

(第三版)

同济大学 沈祖炎 陈以一 陈扬骥 赵宪忠 编著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构基本原理/沈祖炎等编著. —3 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 9

住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 高校土木
工程专业指导委员会规划推荐教材 (经典精品系列教材)

ISBN 978-7-112-22549-1

I. ①钢… II. ①沈… III. ①钢结构-高等学校-教材
IV. ①TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 183821 号

本书主要根据新颁布的《钢结构设计标准》GB 50017—2017 以及作者近年来的钢结构教学实践对上一版教材进行修订而成。本书主要介绍土木工程建设项目的房屋建筑、地下建筑、桥梁、矿井工程等遇到的钢结构的基本原理。从钢结构的特点、应用现状及发展趋势入手, 对钢结构使用的材料, 连接方式, 轴心受拉、受压构件, 受弯构件, 拉弯、压弯构件, 索, 组合构件以及桁架、钢架、拱等基本构件和结构形式进行了说明, 介绍了其破坏形式、计算原理和一般计算方法, 并介绍了构件与节点的抗震性能。

本书可作为大学本科土木工程专业的专业基础课教材, 也可作为从事钢结构设计、制作和施工工程技术人员的参考书籍。

本教材为国家级精品课程配套教材, 有需要课件的任课老师可以发送邮件至 jiangongkejian@163.com 免费索取。

责任编辑: 吉万旺 朱首明

责任校对: 张 颖

住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

(经典精品系列教材)

钢结构基本原理

(第三版)

同济大学 沈祖炎 陈以一 陈扬骥 赵宪忠 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

河北鹏润印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 22 $\frac{1}{4}$ 字数: 566 千字

2018 年 6 月第三版 2018 年 6 月第三十二次印刷

定价: 49.00 元 (赠课件)

ISBN 978-7-112-22549-1

(32626)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

出版说明

为规范我国土木工程专业教学，指导各学校土木工程专业人才培养，高等学校土木工程学科专业指导委员会组织我国土木工程专业教育领域的优秀专家编写了《高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材》。本系列教材自 2002 年起陆续出版，共 40 余册，十余年来多次修订，在土木工程专业教学中起到了积极的指导作用。

本系列教材从宽口径、大土木的概念出发，根据教育部有关高等教育土木工程专业课程设置的教學要求编写，经过多年的建设和发展，逐步形成了自己的特色。本系列教材曾被教育部评为面向 21 世纪课程教材，其中大多数曾被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和普通高等教育土建学科专业“十五”、“十一五”、“十二五”规划教材，并有 11 种入选教育部普通高等教育精品教材。2012 年，本系列教材全部入选第一批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

2011 年，高等学校土木工程学科专业指导委员会根据国家教育行政主管部门的要求以及我国土木工程专业教学现状，编制了《高等学校土木工程本科指导性专业规范》。在此基础上，高等学校土木工程学科专业指导委员会及时规划出版了高等学校土木工程本科指导性专业规范配套教材。为区分两套教材，特在原系列教材丛书名《高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材》后加上经典精品系列教材。2016 年，本套教材整体被评为《住房城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材》，请各位主编及有关单位根据《住房城乡建设部关于印发高等教育 职业教育土建类学科专业“十三五”规划教材选题的通知》要求，高度重视土建类学科专业教材建设工作，做好规划教材的编写、出版和使用，为提高土建类高等教育教学质量和人才培养质量做出贡献。

高等学校土木工程学科专业指导委员会
中国建筑工业出版社

第三版前言

2000年,为顺应土木工程专业宽口径人才培养的教学体系改革,沈祖炎先生主持编写了以建立基本概念、阐释基本原理为重点的原理与设计分开的《钢结构基本原理》教材,开创了此类教材编写体例的先河;2005年,根据原理课程教学实践的反馈,对教材进行了再版修订。2012年,考虑到国内外钢结构理论、技术与实践均发生了诸多变化,在第一编著人沈祖炎先生的组织下,开始着手第三版的修订,并拟定了修编要点。但其时,我国2003版《钢结构设计规范》的修订工作已进行数年,本书编著者们考虑教材的工程计算公式宜与规范条文一致,因此,将教材重版一事暂时搁置下来了。

2017年底,新版《钢结构设计规范》更名为《钢结构设计标准》,并由中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局联合颁布。令人悲痛的是,本教材第一编著人沈祖炎先生已于此前的两个月驾鹤仙去。沈先生长期从事钢结构的研究、教学和工程建设指导,跨时60余载,呕心沥血,贡献卓著;虽未能亲见他倾注了满腔热忱和巨大智慧的新版《钢结构设计标准》和新版《钢结构基本原理》双双竣工,但先生高屋建瓴的大家风范和求实创新的治学精神激励着晚辈将先生未竟之事业继续下去。

幸好沈祖炎先生于2012年即已规划了本教材第三版的修订方案,也幸好本教材从编著伊始,先生就已确定了原理为重、《标准》为用的原则,使得本版修订仍能基于先生策划的布局和精髓去完成文字工作。虽然新版《钢结构设计标准》的一些变化,短时期内也不一定为修编人完全掌握,但作为一本突出原理的教材,还是能够把钢结构的基本理论准确地呈现给读者。

本版保留了前版的基本框架,适当增加了近年来的一些研究和工程进展;参照2017年版《钢结构设计标准》和相关规范、标准的最新版本,修订了工程用设计公式和设计规定。本版修订第3、5~7、9~11章由陈以一教授执笔,第1、2、4、8章由赵宪忠教授执笔。修订人在此感谢沈祖炎先生和年事渐高的陈扬骥先生在本教材前两版打下的基础。

本教材修订过程中难免会有不足之处,敬请读者不吝提出批评和改进意见。

同济大学土木工程学院

2018年6月

第 二 版 前 言

2000 年以来,本教材已用于同济大学和一些兄弟院校的宽口径土木工程专业本科教学中。《钢结构基本原理》作为一本专业基础课程教材,为使土木工程师的培养能够满足从事多种工程领域中结构设计的普遍要求,改变了拘泥于某一特定技术规范编写方法;具备这一特点的教材,对讲授钢结构课程的教师也是一种挑战。经过这几年的教学实践,本教材的编写思路已逐渐被接受,为宽口径土木工程专业的专业课程学习提供了一个比较合适的平台。

本版修订主要基于如下考虑:依据四年多来教学实践的反馈,对相关内容进行局部增删或调整;依据近年来国内钢结构理论和技术的研究成果和工程实践进展积累的新知识,作若干补充。期待使用本教材的师生将发现的问题和不足及时告知作者,以使这部教材能更加完善。

同济大学土木工程学院

2005 年 1 月

第一版前言

1998年，教育部颁布了新的普通高等学校本科专业目录，将原建筑工程、交通土建工程等8个专业合并为土木工程专业，其专业范围覆盖房屋建筑、地下建筑、隧道、道路、桥梁、矿井等工程。由于土木工程专业覆盖面广，在课程设置上，土木工程专业教学指导委员会采纳了教育部“面向21世纪土建类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”课题组的建议，将原来的钢结构课程分为原理和设计两大部分，原理部分作为专业基础教学内容，设计部分作为专业教学内容。本教材即为原理部分的教学内容。

本教材的编写宗旨以建立基本概念、阐述基本理论为重点，使学生学完后能够在钢结构设计专业课学习中主动深入地掌握各种工程结构的钢结构设计规范、设计原理和方法。因此本教材的内容将不涉及设计规范的各种具体规定，讲述的对象将是房屋建筑、地下建筑、桥梁和矿井工程中经常遇到的钢结构的材料、连接和受拉构件、轴心受压构件、受弯构件、压弯构件、索、组合构件、桁架、刚架和拱等基本构件以及构件与节点的抗震性能等。有关各种工程结构的形式、体系、构造及其分析计算和设计等则不在本教材的内容中，将由钢结构设计专业课讲述。

本书可作为土木工程专业本科的专业基础课教材和函授学生的教材，也可作为从事钢结构设计、制作和施工工程技术人员学习的参考书籍。

本书由沈祖炎教授主编，第1、3、5章由沈祖炎教授编写，第2、4、8章由陈扬骥教授编写，第6、7、9、10、11章由陈以一教授编写。全书由主编修改定稿。

在编写过程中，引用了有关单位的资料，谨致谢意。

本书难免会有不足之处，敬请读者批评指正。

同济大学土木工程学院

2000年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 钢结构的特点及应用	1
1.2 我国钢结构发展现状及趋势	2
1.3 钢结构的主要结构形式及组成杆件的分类	6
1.4 钢结构的连接方法及分类	12
第 2 章 钢结构材料	13
2.1 钢材在单向均匀受拉时的工作性能	13
2.2 钢材在单轴反复应力作用下的工作性能	18
2.3 钢材在复杂应力作用下的工作性能	19
2.4 钢材抗冲击的性能及冷弯性能	21
2.5 钢材的可焊性	22
2.6 钢材的抗腐蚀性能	23
2.7 钢材的延性破坏、损伤累积破坏、脆性破坏和疲劳破坏	23
2.8 影响钢材性能的一般因素	30
2.9 钢结构用钢材的分类	37
2.10 钢材的规格	43
习题	46
第 3 章 钢结构的可能破坏形式	48
3.1 结构的整体失稳破坏	48
3.2 结构和构件的局部失稳、截面的分类	51
3.3 结构的塑性破坏、应（内）力塑性重分布	53
3.4 结构的疲劳破坏	56
3.5 结构的损伤累积破坏	61
3.6 结构的脆性断裂破坏	62
3.7 防止钢结构各种破坏的总体思路	65
第 4 章 受拉构件及索	66
4.1 轴心受拉构件	66
4.2 索的力学特性和分析方法	70
习题	75
第 5 章 轴心受压构件	77
5.1 轴心受压构件的可能破坏形式	77
5.2 轴心受压构件的强度	78
5.3 轴心受压实腹构件的整体稳定	78
5.4 轴心受压格构式构件的整体稳定	88

5.5	轴心受压构件的整体稳定计算	91
5.6	轴心受压实腹构件的局部稳定	96
5.7	轴心受压格构式构件的局部稳定	107
5.8	轴心受压构件的刚度	113
	习题	113
第6章	受弯构件	115
6.1	受弯构件的类型与截面	115
6.2	受弯构件的主要破坏形式	116
6.3	构件受弯时的截面强度	118
6.4	构件扭转	130
6.5	受弯构件整体失稳的弯扭平衡方程及其临界弯矩	135
6.6	受弯构件中板件的局部稳定	140
6.7	受弯构件的变形和变形能力	152
	习题	153
第7章	拉弯和压弯构件	155
7.1	拉弯和压弯构件的类型与截面形式	155
7.2	拉弯和压弯构件的破坏形式	156
7.3	拉弯和压弯构件的截面强度	157
7.4	压弯构件的整体稳定	163
7.5	格构式压弯构件	175
7.6	压弯构件的局部稳定	178
7.7	拉弯和压弯构件的刚度	182
	习题	182
第8章	钢结构的连接	184
8.1	钢结构的连接方式	184
8.2	焊接连接的特性	185
8.3	对接焊缝的构造和计算	188
8.4	角焊缝的构造和计算	195
8.5	焊接应力和焊接变形	210
8.6	普通螺栓连接的构造和计算	214
8.7	高强度螺栓连接的构造和计算	226
	习题	233
第9章	桁架、单层刚架与拱	239
9.1	桁架	239
9.2	单层刚架	246
9.3	拱	253
第10章	组合构件	258
10.1	组合构件的分类	258
10.2	组合板的强度	260

10.3	组合梁的强度	262
10.4	钢管混凝土柱的强度和稳定性	267
第 11 章	钢结构构件及节点的抗震性能	272
11.1	荷载性质与构件性能	272
11.2	轴心受力构件的滞回性能	272
11.3	受弯构件的滞回性能	275
11.4	压弯构件的滞回性能	276
11.5	节点的滞回性能	277
附录 1	钢结构用主要钢材牌号的化学成分和机械性能	279
附录 2	焊接材料特性以及钢材、焊缝和螺栓连接的强度设计值	286
附录 3	常用钢材及型钢截面特性表	295
附录 4	轴心受压构件的稳定系数	340
附录 5	柱的计算长度系数	345
附录 6	计算图表	346
参考文献		350

第1章 绪 论

1.1 钢结构的特点及应用

钢结构是土木工程的主要结构种类之一，它在房屋建筑、地下建筑、桥梁、塔桅、海洋平台、港口建筑、矿山建筑、水工建筑、囤仓囤斗、气柜油罐和容器管道中都得到广泛采用；这是由于钢结构与用其他材料建造的结构相比，具有许多优点：

(1) 强度高，质量轻。钢与混凝土、木材相比，虽然密度较大，但其强度较混凝土和木材要高得多，其密度与强度的比值一般比混凝土和木材小，因此在同样受力的情况下，钢结构与钢筋混凝土结构和木结构相比，构件截面面积较小，质量较轻。

(2) 材性好，可靠性高。钢材由钢厂生产，质量控制严格，材质均匀性好，且有良好的塑性和韧性，比较符合理想的各向同性弹塑性材料，因此目前采用的计算理论能够较好地反映钢结构的实际工作性能，可靠性高。

(3) 工业化程度高，工期短。钢结构都为工厂制作，具备成批大件生产和成品精度高等特点；采用工厂制造、工地安装的施工方法，有效地缩短工期，为降低造价、发挥投资的经济效益创造条件。

(4) 密封性好。钢结构采用焊接连接后可以做到安全密封，能够满足一些气密性和水密性要求高的高压容器、大型油库、气柜油罐和管道等的要求。

(5) 抗震性能好。钢结构由于自重轻和结构体系相对较柔，受到的地震作用较小，钢材又具有较高的抗拉和抗压强度以及较好的塑性和韧性，因此在国内外的历次地震中，钢结构是损坏最轻的结构，已公认为是抗震设防地区特别是强震区的最合适结构。

(6) 耐热性较好。温度在 250°C 以内，钢材性质变化很小，钢结构可用于温度不高于 250°C 的场合。当温度达到 300°C 以上时，强度逐渐下降， 600°C 时，强度降至不到三分之一，在这种场合，对钢结构必须采取防护措施。

钢结构的下列缺点有时会影响钢结构的应用：

(1) 钢材价格相对较贵。采用钢结构后结构造价会略有增加，往往影响业主的选择。其实上部结构造价占工程总投资的比例是很小的，采用钢结构与采用钢筋混凝土结构间的结构费用差价占工程总投资的比例就更小。以高层建筑为例，前者约为 10%，后者则不到 2%。显然，结构造价单一因素不应作为决定采用何种材料的主要依据。如果综合考虑各种因素，尤其是工期优势，则钢结构将日益受到重视。

(2) 耐锈蚀性差。新建造的钢结构一般隔一定时间都要重新刷涂料，维护费用较高。目前国内外正在发展各种高性能的涂料和不易锈蚀的耐候钢，钢结构耐锈蚀性差的问题有望得到解决。

(3) 耐火性差。钢结构耐火性较差，在火灾中，未加防护的钢结构一般只能维持 20 分钟左右。因此需要防火时，应采取防火措施，如在钢结构外面包混凝土或其他防火材料，或在构件表面喷涂防火涂料等。目前国内外正在研制耐火性能好的耐火钢，以降低防

火措施的费用。

现在钢材已经被认为是可持续发展的材料,因此从长远发展的观点,钢结构将有很好的应用发展前景。

1.2 我国钢结构发展现状及趋势

我国自1949年新中国成立以后,随着经济建设的发展,钢结构得到一定程度的发展。由于受到钢产量的制约,钢结构仅在重型厂房、大跨度公共建筑、铁路桥梁以及塔桅结构中采用。几个大型钢铁联合企业如鞍山、武汉、包头等钢厂的炼钢、轧钢、连铸车间等都采用钢结构。在公共建筑中以平板型网架用得最多,1975年建成的上海体育馆采用三向网架,跨度已达110m。此外,北京工人体育馆采用圆形双层辐射式悬索结构,建成于1962年,直径为94m。1967年建成的浙江体育馆采用双曲抛物面正交索网的悬索结构,椭圆平面,80m×60m。武汉和南京长江大桥都采用了铁路公路两用双层钢桁架桥。在塔桅结构方面,广州、上海等地都建造了高度超过200m的多边形空间桁架钢电视塔。1977年北京建成的环境气象塔是一高达325m的5层纤绳三角形杆身的钢桅杆结构。

1978年以后,我国实行改革开放政策,经济建设有了突飞猛进的发展,钢结构也有了前所未有的发展,应用的领域有了较大的扩展。高层和超高层房屋、多层房屋、单层轻

型房屋、体育场馆、大跨度会展中心、大型客机检修库、自动化高架仓库、城市桥梁和大跨度公路桥梁、粮仓以及海上采油平台等都已采用钢结构。目前,我国已建和在建的200m以上的超高层钢结构或钢筋混凝土结构达600余幢,其中由高420m的上海金茂大厦、高492m的上海环球金融中心、高632m的上海中心组成的“品”字形超高层建筑群(图1-1)的建成,标志着我国的超高层钢结构已进入世界前列。在大跨度建筑和单层工业厂房中,网架结构、网壳结构、张弦结构等的广泛应用,已受到世界各国的瞩目。1996年建成的嘉兴电厂干煤棚(图1-2)采用矩形平面三心圆柱面网壳,跨度为103.5m。1998年建成的长春体育馆(图1-3)采用错边蚌型网壳结构,平面为120m×160m。这些网壳结构的建成,使我国长期以来网壳结构跨度未突破100m大关的历史已成过去。在大跨空间结构中,上海体育场马鞍形环形大悬挑空间钢结构屋盖(图1-4)、上海浦东

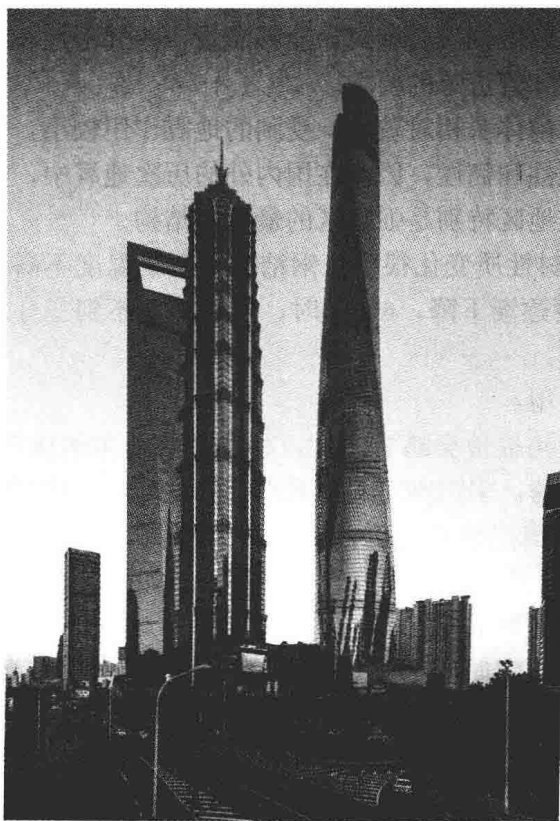


图1-1 上海金茂大厦、上海环球金融中心、上海中心组成的超高层建筑群

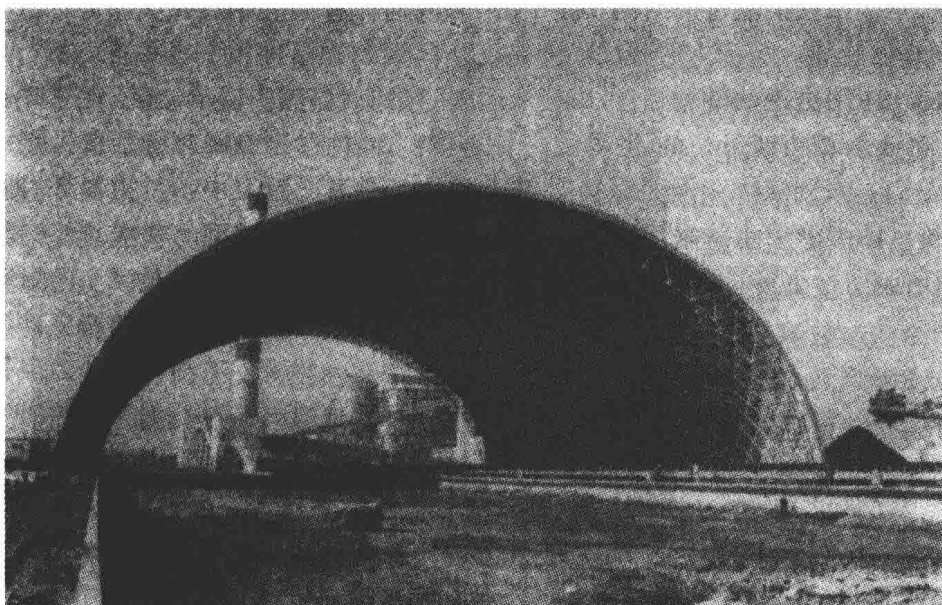


图 1-2 嘉兴电厂干煤棚

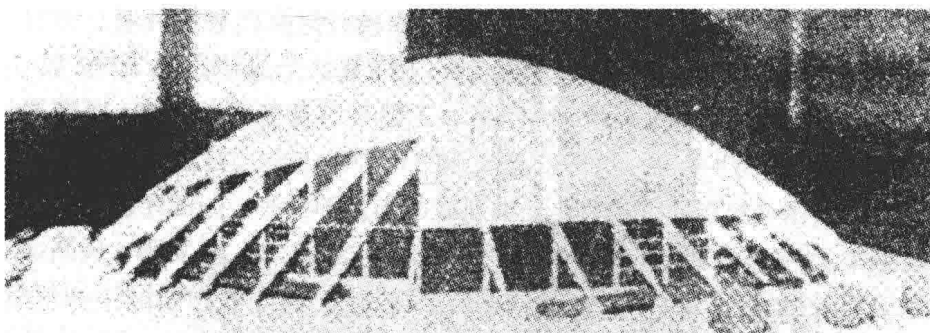


图 1-3 长春体育馆

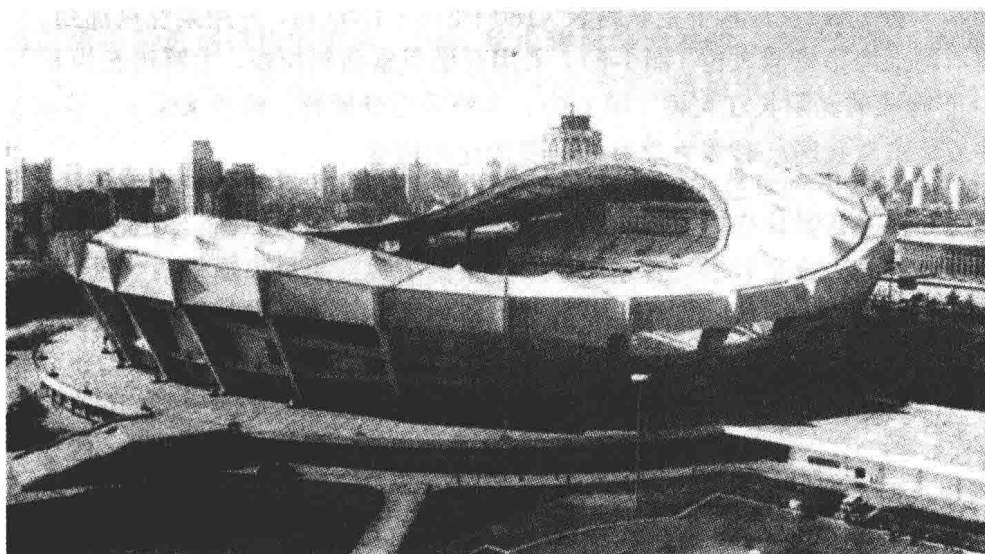


图 1-4 上海体育场

国际机场航站楼张弦梁屋盖钢结构（图 1-5）和南通体育会展中心超大型开闭式屋盖钢结构（图 1-6）的建成，更标志着我国的大跨度空间钢结构已进入世界先进行列。在桥梁方面，钢结构的应用更是举世瞩目。2009 年建成的重庆朝天门长江大桥（图 1-7），其中主联跨长 $(190+552+190)\text{m}$ ，是世界上最长跨度的钢拱桥。2008 年建成的苏通长江公路大桥（图 1-8），采用双塔双索面钢箱梁斜拉桥，主跨跨长为 1088m 。2009 年建成的舟山西堠门大桥（图 1-9），主跨采用悬索桥，跨长 1650m 。这些桥梁的建成标志着我国已有能力建造任何现代化的桥梁。

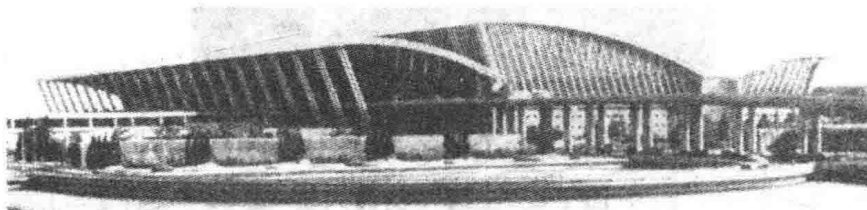


图 1-5 上海浦东国际机场航站楼



图 1-6 南通体育会展中心开闭式屋盖

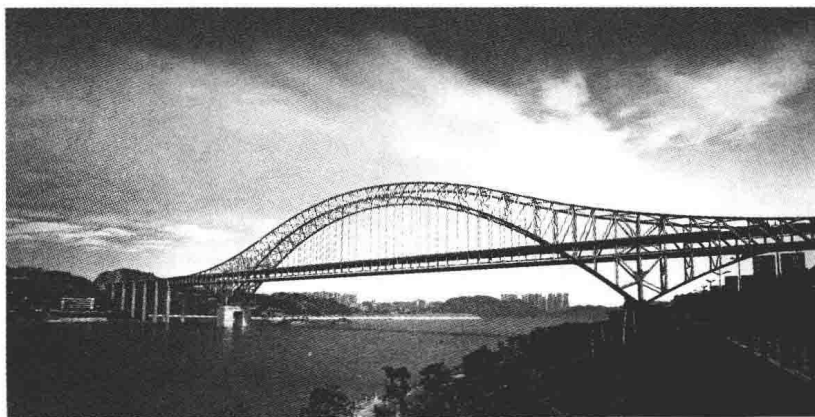


图 1-7 重庆朝天门长江大桥

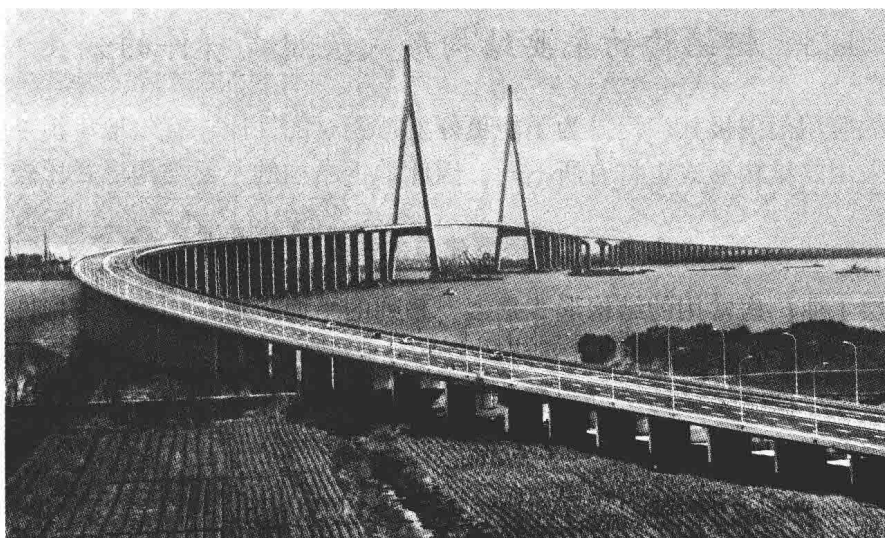


图 1-8 苏通长江公路大桥

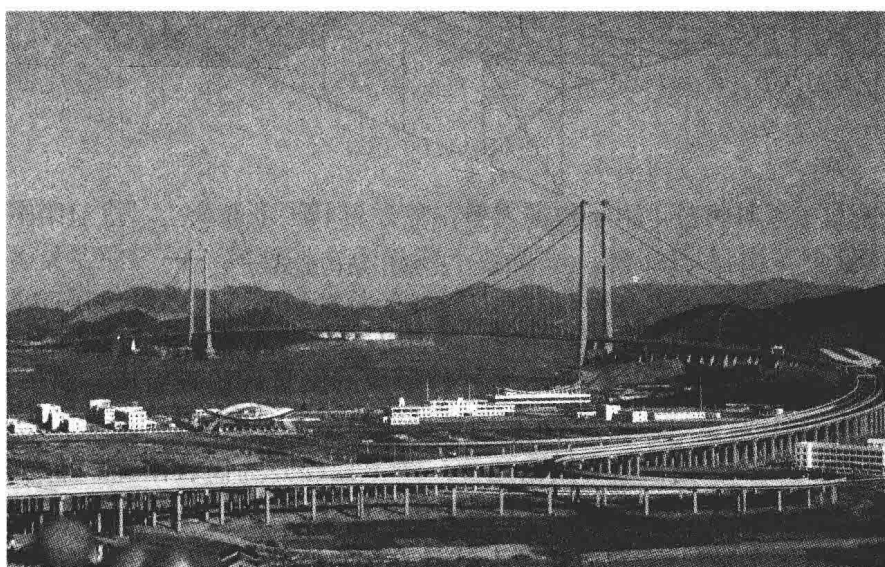


图 1-9 舟山西堠门大桥

1996 年我国钢产量已是世界第一，年产量超过 1 亿吨，到 2017 年已达 8.3 亿吨。钢材质量及钢材规格也已能满足建筑钢结构的要求。1999 年由建设部颁布的《国家建筑钢结构产业“十五”计划和 2010 年发展规划纲要》中已明确指出，将易于工业化和再次利用的钢结构作为发展重点。市场经济的发展与绿色低碳的可持续发展需求更为钢结构的发展创造了条件。因此，我国钢结构正处于迅速发展的过程中。可以预期，我国钢结构发展的主要方向为：单层轻、中型厂房及仓库、单层重型厂房、大跨度公共建筑、高层及超高层建筑、多层工业厂房、办公楼及住宅、铁路桥梁、大跨度公路及城市桥梁、城市高架路、塔桅结构、海洋平台、矿井、各种容器及管道、移动式结构、需拆卸及搬移的结构等等。

1.3 钢结构的主要结构形式及组成杆件的分类

钢结构的应用范围极其广泛。为了能更好发挥钢材的性能，有效地承担外荷载，不同的工程结构采用的结构形式也将有所不同。因此，钢结构的主要结构形式比较多。

1.3.1 用于房屋建筑的主要结构形式

(1) 单层工业厂房常用的结构形式是由一系列的平面承重结构用支撑构件联成空间整体（图 1-10）。在这种结构形式中，外荷载主要由平面承重结构承担，纵向水平荷载由支撑承受和传递。平面承重结构又可有多种形式。最常见的为横梁与柱刚接的门式刚架和横梁（桁架）与柱铰接的排架。

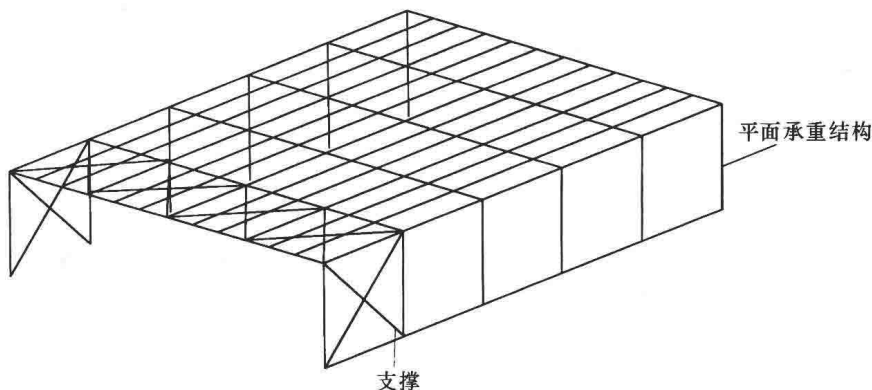


图 1-10 单层厂房常用结构形式

(2) 大跨度单层房屋的结构形式众多，常用的有以下几种：①平板网架。图 1-11 给出了两种双层平板网架，图 1-11(a) 为由杆件形成的倒置四角锥组成，图 1-11(b) 由三个方向交叉的桁架组成，这种结构形式目前也已在单层工业房屋中广泛应用；②网壳。网壳的形式比较多，图 1-12 给出了常用的几种。图 1-12(a) 为筒状网壳，也称筒壳，可以是单层或双层的。双层时一般由倒置四角锥组成。图 1-12(b)、(c) 为球状网壳，也称球壳，无论是单层（图 1-12b）或双层（图 1-12c），其网格都可以有多种分格方式；③空间

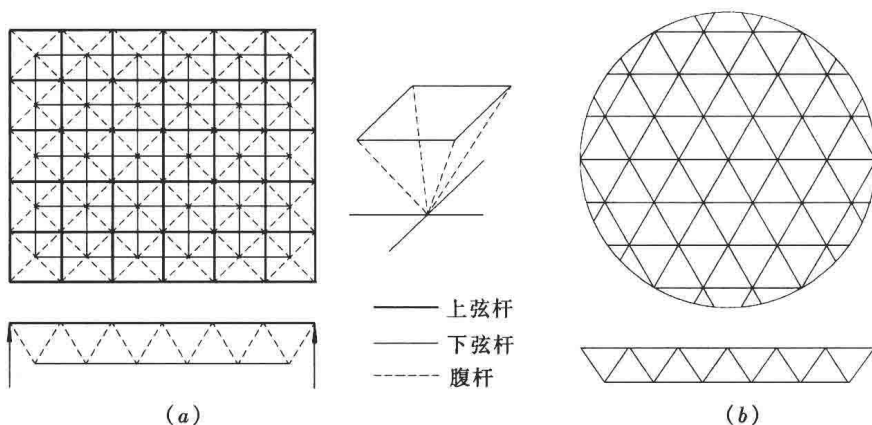


图 1-11 平板网架

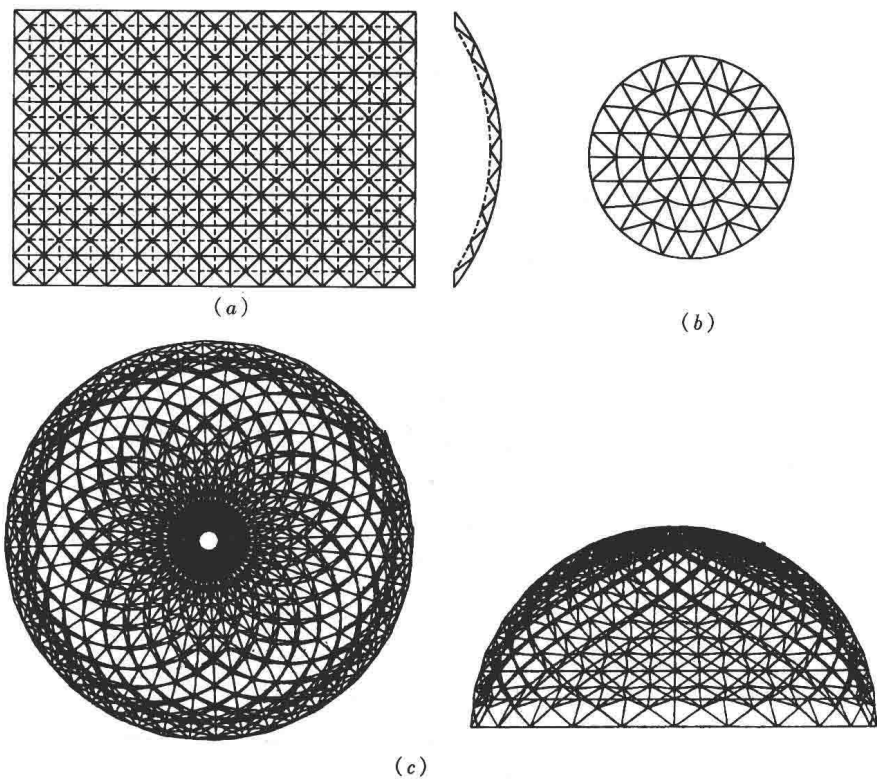


图 1-12 网壳

桁架或空间刚架体系。上海浦东国际机场航站楼的屋盖采用了这种体系；④悬索。悬索结构是一种极为灵活的结构，其形式之多可谓不胜枚举，图 1-13 给出了少量的常用形式。图 1-13(a) 和(b) 是预应力双层悬索体系，图 1-13(c) 和 (d) 是预应力鞍形索网体系；

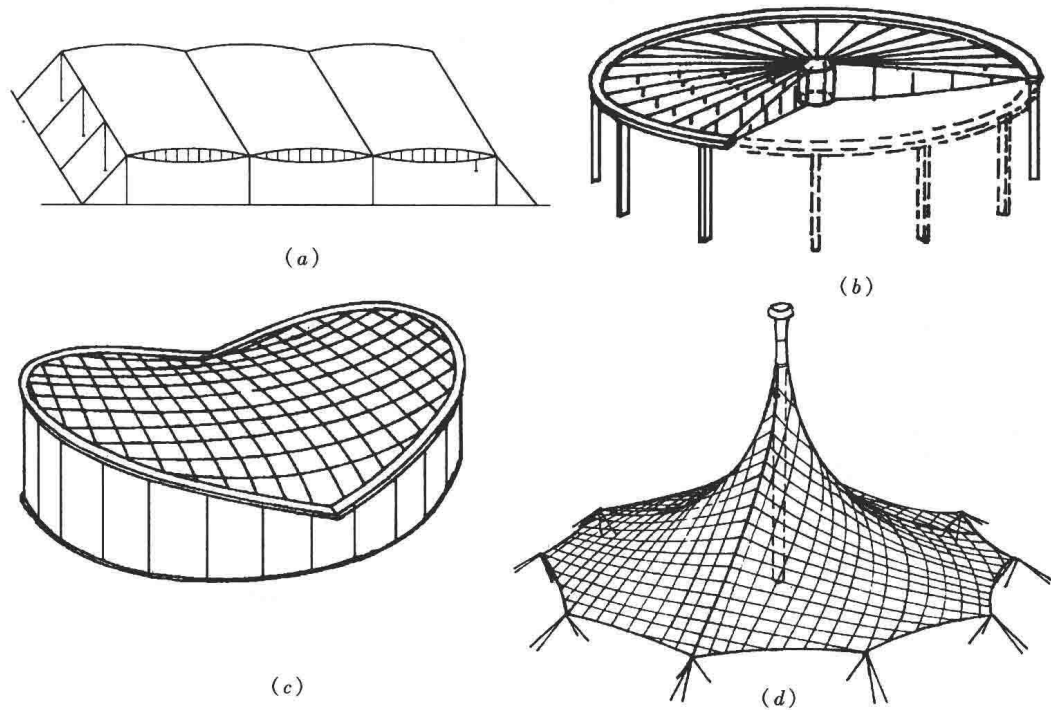


图 1-13 悬索结构