

王松岩 焦红 编著

钢结构



设计与应用实例

GANGJIEGOU
SHEJI YU
YINGYONG SHILI

中国建筑工业出版社

钢结构设计与应用实例

王松岩 焦 红 编著
周学军 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构设计与应用实例/王松岩, 焦红编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2007

ISBN 978-7-112-09249-9

I. 钢… II. ①王…②焦… III. 钢结构—结构设计 IV. TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 055435 号

本书是参照现行钢结构专业的设计规范、规程编写而成。本书全面、系统地阐述了各种钢结构设计的基本原理及设计案例, 力求反映当前先进成熟的钢结构设计理念。全书共 9 章, 第 1 章介绍钢结构设计的基本概念; 第 2 章钢结构设计中关于钢材选用的有关知识; 第 3 章讲述钢结构的连接; 第 4 章重点介绍钢结构的防护设计; 第 5 章关于钢结构工程的制图; 第 6 章门式刚架的设计与案例; 第 7 章钢框架的设计与案例; 第 8 章网架工程的设计与案例; 第 9 章空间钢结构的设计与案例。

本书可供设计人员、钢结构相关技术人员使用, 也可作为各高等院校钢结构设计的参考教材或相关人员的培训教材。

* * *

责任编辑: 岳建光

责任设计: 董建平

责任校对: 陈晶晶 刘 钰

钢结构设计与应用实例

王松岩 焦 红 编著

周学军 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京密云红光制版公司制版

北京市书林印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 25½ 字数: 618 千字

2007 年 6 月第一版 2007 年 6 月第一次印刷

印数: 1—3500 册 定价: 42.00 元

ISBN 978-7-112-09249-9

(15913)

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)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

钢材以其优越的材料特性，成为建造摩天大楼、大跨及超大跨公共建筑和工业建筑的重要建筑材料，钢结构亦成为首选的结构形式。世界发达国家都非常重视发展钢结构，可以说，钢结构建筑发展水平往往是衡量一个国家或地区经济发展的重要标志。改革开放以来，我国的钢产量可以说是突飞猛进，成为世界第一钢材生产大国。同时，我国不断调整产业结构，钢材的品种、规格日渐增多，为钢结构在我国的发展打下了坚实的物质基础。钢结构事业目前我国方兴未艾，发展前景非常广阔，被称为建筑行业的“朝阳产业”。

我国政府非常重视钢结构建筑的发展。为了进一步规范建筑市场和适应钢结构发展的需求，各种专业规范、规程相继出台或修订，如《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102: 2002、《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99—1998、《钢结构设计规范》GB 50017—2003、《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001、《建筑设计防火规范》GB 50016—2006 等等，标志着我国钢结构技术的进一步成熟。

从 20 世纪 80 年代以来，以门式刚架为主要受力结构的单层轻钢房屋和网架结构在我国得到了极为广泛的应用。通过多年的实践，单层轻钢厂房和网架大体上已形成了自己的技术体系，技术规程、相应的教材、相关的技术手册和构造图集等一应俱全，也就是说，它应该具有的设计要素差不多已经齐全。当前多层钢框架结构还处于起步阶段，空间钢结构的设计水平也还需要进一步的提高。与国外的先进技术水平相比，一个突出的问题是维护体系的质量较差，维护体系的外形设计尤其是细部设计粗糙，欠美观，影响整个建筑的品位和形象。目前钢结构工程设计中，遇到的问题很多，如由于钢结构工程设计人员年轻化而反映出的工程经验不足、设计钢结构施工图深度不够、建筑配套技术不很完善等。本书不讲钢结构设计的基本原理，主要想通过具体的工程实例，表达一项钢结构工程完整的施工图组成及它应具有的设计深度。希望从事钢结构设计的技术人员能从中得到点滴的启示，为钢结构设计水平的提高作出一些贡献。

编者常年从事钢结构的设计与施工工作，接触了大量的钢结构工程技术人员和设计单位的工程师，他们往往因为对钢结构技术的了解过程较短，所设计的工程图纸存在着深度不足的问题，或者在钢结构设计中还存在着对结构形式、结构布置、结构计算、软件应用、构造要求等方面比较模糊的现象。因此，感到有必要抛砖引玉，写一本理论深度较浅、实用性较强的书。

本书的编者都是从事钢结构工程设计、教学、科研、工程应用多年的专业教师或工程师，既有一定的理论水平，同时又有丰富的钢结构工程设计和施工经验。本书主编山

东建筑大学王松岩，副主编山东建筑大学焦红，主审山东建筑大学周学军。第1章、第2章、第3章、第4章、第5章由焦红编写，第6章、第7章、第8章、第9章由王松岩编写；全书由王松岩统稿，山东新概念钢结构工程有限公司曹丽、魏永才、蔡喜笑、于静等作了大量的文字编辑和插图工作。

由于作者经验不足及水平有限，错误和不足之处在所难免，恳请广大同行专家和读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 钢结构的发展现状及趋势	1
1.2 钢结构工程的特点	3
1.3 钢结构的主要结构体系	5
1.4 钢结构的设计原则和基本要求	10
第 2 章 钢结构的材料	16
2.1 钢材的主要机械性能	16
2.2 钢材的两种破坏形式	21
2.3 影响钢材性能的主要因素	22
2.4 建筑钢材的类别、规格及钢材的选用	26
第 3 章 钢结构的连接	34
3.1 钢材的连接方法	34
3.2 焊缝连接的特性	35
3.2.1 钢结构中常用的焊接方法	35
3.2.2 焊缝的连接形式	35
3.2.3 焊缝连接的质量检验	37
3.3 螺栓连接	38
3.3.1 普通螺栓连接	38
3.3.2 高强度螺栓连接	43
3.3.3 螺栓选用的原则	46
3.4 锚栓	47
第 4 章 钢结构的防腐防火设计	48
4.1 钢结构的防腐及防腐设计	48
4.1.1 钢结构的锈蚀原理	48
4.1.2 防锈法的种类和特点	49
4.1.3 钢结构的防腐蚀设计	51
4.2 钢结构的防火及防火设计	62
4.2.1 钢结构的火灾危险及防火保护的方法	62
4.2.2 钢结构耐火极限的要求及防火设计	65

第 5 章 钢结构工程施工图的内容及要求	70
5.1 钢结构工程制图的基本知识	70
5.2 建筑工程施工图的内容及要求	78
5.2.1 建筑施工图的内容及要求	78
5.2.2 结构施工图的内容及要求	84
第 6 章 门式刚架设计	94
6.1 门式刚架设计的一般规定	94
6.1.1 基本设计规定	94
6.1.2 结构形式和布置	98
6.1.3 作用效应与计算	100
6.1.4 门式刚架构件设计	103
6.1.5 连接和节点设计	123
6.1.6 门式刚架结构的一般经济指标规律	137
6.2 门式刚架设计案例	140
6.2.1 单跨门式刚架设计案例	140
6.2.2 带吊车门式刚架设计案例	160
第 7 章 钢框架设计	184
7.1 钢框架设计的一般规定	184
7.1.1 基本设计规定	184
7.1.2 结构形式和布置	187
7.1.3 作用效应与计算	194
7.1.4 构件设计	201
7.1.5 连接和节点设计	209
7.1.6 组合楼盖	220
7.2 钢框架设计案例	224
第 8 章 网架工程设计	270
8.1 网架工程设计的一般规定	271
8.1.1 网架基本设计规定	271
8.1.2 网壳结构设计的基本规定	272
8.1.3 结构形式和布置	273
8.1.4 结构挠度容许值	273
8.1.5 作用效应与计算	274
8.1.6 构件设计	279
8.1.7 连接和节点设计	280
8.2 网架工程设计案例	291
8.2.1 平板网架设计案例	291

8.2.2 网壳工程设计案例	291
第9章 空间钢结构工程设计	326
9.1 空间钢结构设计的一般规定	328
9.1.1 基本设计规定	328
9.1.2 结构形式和布置	332
9.1.3 构件设计与计算	332
9.1.4 连接和节点设计	341
9.2 空间钢结构工程设计案例	341
9.2.1 雨篷	341
9.2.2 屋面飘板	344
9.2.3 热力管道支架	353
9.2.4 圆管结构	354
附录1 型钢规格表	374
附录2 螺栓、锚栓及栓钉规格	395
参考文献	399

第 1 章 绪 论

1.1 钢结构的发展现状及趋势

我国是最早用铁建造结构的国家之一，比较著名的是铁链桥和一些纪念性建筑，比西方国家早数百年。但是在 18 世纪末的工业革命兴起后，西方国家的冶金技术和土木工程得到了快速发展，而此时的中国，由于封建制度下的生产力发展极其缓慢，特别是在解放前的百年历史中，钢结构发展几乎完全停滞。

20 世纪 50~60 年代，在前苏联的经济技术援助下，我国钢结构迎来了第一个初盛期，在工业厂房、桥梁、大型公共建筑和高耸构筑物等方面都取得了卓越的成就，如鞍钢、包钢、武钢、沈阳飞机制造厂、大连造船厂、北京体育馆（跨度 57m 的两铰拱）、人民大会堂（跨度 60.9m 的钢屋架）、武汉长江大桥（全长 1670m）等等，并且编制了我国第一部钢结构行业规范，缩小了与发达国家间的差距。

20 世纪 60 年代中后期至 70 年代，尽管我国冶金工业有了较大的发展，但各部门需要的钢材量也越来越多，受钢产量的制约，国家提出在建筑业节约钢材的政策，这就限制了钢结构的合理使用与发展，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，钢结构发展进入低潮。在这期间，影响较大的钢结构工程有：几个大型的钢铁联合企业，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；1975 年建成的上海体育馆采用三向网架，跨度达 110m；建成于 1962 年的北京工人体育馆采用圆形双层辐射式悬索结构，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；另外武汉和南京长江大桥都采用了铁路公路两用钢桁架桥；在塔桅结构方面，广州、上海等地都建造了高度超过 200m 的多边形空间桁架电视塔。1977 年北京建成的环境气象塔是高达 325m 的 5 层纤绳三角形杆身的钢桅杆结构。虽然钢结构工程发展低缓，但这一时期的行业规范有了实质性的进展，独立编制了《弯曲薄壁型钢结构技术规范（草案）》（1969）、《钢结构工程施工及验收规范》GBJ 18—66 修订本和《钢结构设计规范》TJ 17—74，标志着我国的钢结构设计技术已走上了独立发展的道路。

20 世纪 80 年代，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采用钢结构。深圳发展中心大厦高 165m，是我国第一幢超过 100m 的钢结构高层建筑。上海金贸大厦地上 88 层，地下 3 层，高 365m，标志着我国的超高层钢结构已进入世界前列。在大跨度和单层工业厂房中，网架、网壳等结构的广泛应用，已受到世界各国的瞩目。1994 年建成的天津新体育馆，采用圆

形平面球面双层网壳，直径已达 108m。1996 年建成的嘉兴电厂干煤棚，采用矩形平面三心圆柱网壳，跨度为 103.5m。1998 年建成的长春体育馆，采用错边蚌型网壳结构，平面为 120m × 160m。这些网壳的建成，使我国长期以来网壳结构跨度未突破 100m 大关的历史成为过去。在大跨度空间结构中，上海体育场马鞍环形大悬挑空间钢结构屋盖和上海浦东国际机场航站楼张弦梁屋盖钢结构的建成，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。1994 年建成的铁路、公路两用的双层九江大桥，其中主联跨 (180 + 216 + 180) m，并采用柔性拱加劲。1995 年建成的上海市杨浦大桥，采用双塔双索面斜拉桥，主跨跨长 602m。1999 年建成的江阴长江大桥，主跨采用悬索桥，跨长 1385m。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。

自 20 世纪 90 年代至今，我国钢材产量持续多年世界第一，2004 年的产量达到 2 亿多吨。钢材的质量和钢材的规格已能满足建筑钢结构的要求，国家也相继出台了多项鼓励建筑用钢政策，1997 年由建设部颁发的《中国建筑技术政策》(1996 ~ 2010 年) 中，就明确提出了发展钢结构的要求，这使得钢结构行业步入快速发展期。钢材是一种高强度、高性能的绿色环保材料，具有很高的再循环利用价值。钢结构的选用可以解决上述环保问题，成为绿色环保建筑的佼佼者。目前钢结构的发展日新月异，规模更大，技术更新，呈现出数百年来未曾有过的兴旺景象，被称为建筑行业的“朝阳产业”。当前，钢结构的建筑发展水平已成为衡量一个国家或地区的经济发展水平的重要标志。现在，我们迎来了钢结构发展又一次高峰。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 (图 1-1、图 1-2)、高层和超高层建筑、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、需拆卸及移动的结构等等。

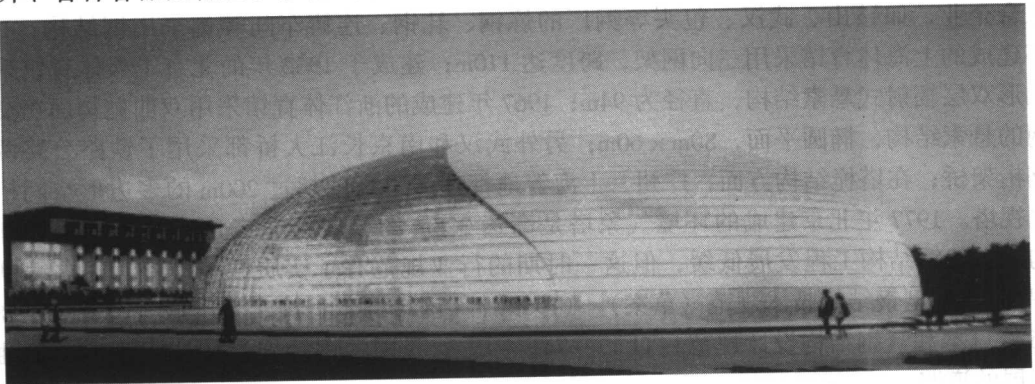


图 1-1 国家大戏院 (2007 年 7 月竣工)

尽管我国钢结构发展迅猛，但主要集中应用于工业厂房、大跨度或超高层建筑中，钢结构建筑在全部建筑中的应用比例还非常低，不到 1%，而美国、瑞典、日本等国的钢结构房屋面积已达到总建筑面积的 40% 左右。我国建筑用钢在钢材总产量中的比例也很低，为 20% ~ 30%，低于发达国家的 45% ~ 55%，而且我国绝大多数建筑用钢是用于钢筋混凝土结构和砌体结构中的钢筋，钢结构用钢 (板材、型材等) 还不到建筑用钢的 2%。因此，我国钢结构还是一个很年轻的行业，总体水平与西方发达国家相比，仍有较大的

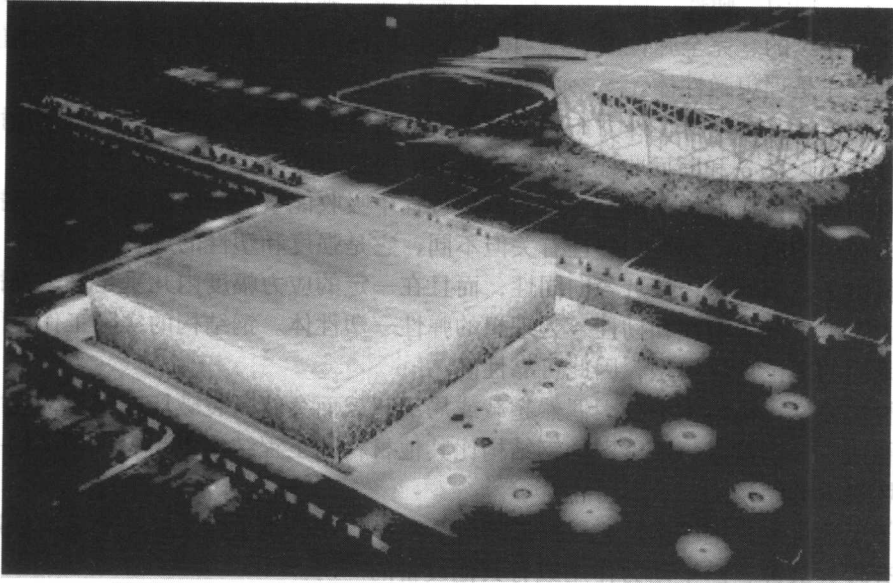


图 1-2 “水立方”和“鸟巢”效果图

差距。

总之，21 世纪将是钢结构的世纪。土木工程最初是土和木，而后是砖和混凝土，现在发展到钢筋混凝土结构、钢结构，这是科学技术发展的必然，也是土木工程本身的进步。就建筑结构来讲，确实要进入以金属结构为主的世纪了。

1.2 钢结构工程的特点

钢结构在工程中得到广泛的应用和迅速的发展，是由于钢结构与其他结构相比具有很多的优点。

1. 钢结构的优点

(1) 强度高，质量轻。钢材与其他建筑材料诸如混凝土、砖石和木材相比，强度要高得多，弹性模量也高（钢材的弹性模量 $E = 206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ）。如 Q235 钢抗拉、抗压和抗弯强度的设计值为 $f = 215 \text{ N/mm}^2$ （厚度或直径 $\leq 16 \text{ mm}$ ），而常用的 C20 混凝土弯曲抗压设计值为 $f = 11 \text{ N/mm}^2$ ，即使采用强度较低的钢材，其强度与密度的比值也比混凝土和木材大得多，从而在同样受力条件下，结构构件质量轻且截面小，特别适用于跨度大、荷载大的构件和结构。

结构的轻质性可以用材料的强度 f 和质量密度 ρ 的比值来衡量，比值越大，结构相对越轻，显然，建筑钢材的 f/ρ 值要比钢筋混凝土大的多。以同样跨度承受同样荷载，钢屋架的质量最多不过为钢筋混凝土屋架的 $1/3 \sim 1/4$ ，冷弯薄壁型钢屋架甚至接近 $1/10$ 。

结构自重的降低，可以减小地震作用，进而减小结构内力，还可以使基础的造价降低，这个优势在软土地区更加明显。此外，构件轻巧也便于运输和安装。

(2) 材料均匀, 塑性、韧性好, 抗震性能优越。弹性力学和材料力学的基本假定是: 假定物体是连续的、完全弹性的、均匀的、各向同性的, 凡是符合以上四个基本假定的物体, 就可看作是理想弹性体。

钢材的塑性: 指钢材在外力作用下产生永久变形时抵抗断裂的能力。衡量塑性好坏的主要指标是伸长率 δ 和断面收缩率 ψ , 分别表示钢材的抗拉能力和变形能力。

钢材的韧性: 指钢材在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力, 表示钢材抵抗冲击荷载和动力荷载的能力。韧性和塑性有关但不同, 它是强度和塑性的综合表现。

钢材由于组织均匀, 接近各向同性, 而且在一定的应力幅度内几乎是完全弹性的, 弹性模量大, 有良好的塑性和韧性, 为理想的弹性—塑性体。钢结构的实际工作性能比较符合目前采用的理论计算模型, 因此可靠性高。

钢材塑性好, 钢结构不会因偶然超载或局部超载而突然断裂破坏; 钢材韧性好, 使钢结构较能适应振动荷载, 地震区的钢结构比其他材料的工程结构更耐震, 钢结构一般是地震中损坏最少的结构。

鉴于上述优点, 钢结构适应于高层建筑、重型厂房的承重骨架和受动力荷载影响的结构, 如有较大锻锤、产生动力作用或有其他设备的厂房。

(3) 制造简单, 工业化程度高, 工期短。钢结构所用的材料单纯, 且多是成品或半成品材料, 加工比较简单, 并能够使用机械操作, 易于定型化、标准化, 工业化生产程度高。因此, 钢构件一般在专业化的金属结构加工厂制作而成, 精度高, 质量稳定, 劳动强度低。

构件在工地拼装时, 多采用简单方便的焊接或螺栓连接, 钢构件与其他材料构件的连接也比较方便。有时钢构件还可以在地面拼装成较大的单元后再进行吊装, 以降低高空作业量, 缩短施工工期。施工周期短, 使整个建筑更早投入使用, 不但可以缩短贷款建设的还贷时间, 减少贷款利息, 而且提前收到投资回报, 综合效益高。

(4) 构件截面小, 有效空间大。由于钢材的强度高, 构件截面小, 所占空间也就小。以相同受力条件的简支梁为例, 混凝土梁的高度通常是跨度的 $1/10 \sim 1/8$, 而钢梁约是 $1/16 \sim 1/12$, 如果钢梁有足够的侧向支承, 甚至可以达到 $1/20$, 有效增加了房屋的层间净高。在梁高相同的条件下, 钢结构的开间可以比混凝土结构的开间大 50% , 能更好地满足建筑上大开间、灵活分割的要求。柱的截面尺寸也类似, 避免了“粗柱笨梁”现象, 室内视觉开阔, 美观方便。

另外, 民用建筑中的管道很多, 如果采用钢结构, 可在梁腹板上开洞以穿越管道, 如果采用混凝土结构, 则不宜开洞, 管道一般从梁下通过, 从而要占用一定的空间。因此在楼层净高相同的条件下, 钢结构的楼层高度要比混凝土的小, 可以减小墙体高度, 并节约室内空调所需的能源, 减小房屋维护和使用费用。

(5) 节能、环保。与传统的砌体结构和混凝土结构相比, 钢结构属于绿色建筑结构体系。所谓绿色建筑, 是指有利于环境保护、节约能源的建筑。建筑不仅是为居住使用, 更应考虑为人创造舒适的、节约能源的建筑。美国、德国都在研究绿色建筑, 使金属结构建筑具有良好的空间感, 能够实现创新的规划和空间设计。例如德国的法兰克福商业银行大厦, 它是第一座采用自然通风的内部环境和可开启的幕墙形成一体的建筑, 整个空间环境由大楼的管理系统或该大楼本身的气象中心去调节, 把能源消耗降到了最低。

目前钢结构房屋的墙体多采用新型轻质复合墙板或轻质砌块，如高性能 NALC 板（即配筋加气混凝土板）、复合夹心墙板、幕墙等；楼（屋）面多采用复合楼板，如压型钢板—混凝土组合板、轻钢龙骨楼盖等，符合建筑节能和环保的要求。

此外，钢结构的施工方式为干式施工，可避免混凝土湿式施工所造成的环境污染。钢结构材料还可利用夜间交通流畅期间运送，不影响城市闹市区建筑物周围的日间交通，噪声也小。另外，对于已建成的钢结构也比较容易进行改建和加固，用螺栓连接的钢结构还可以根据需要进行拆迁，也有利于环境保护。采用钢结构可大大减少砂、石、灰的用量，减轻对不可再生资源的破坏；钢结构拆除后可回炉再生循环利用，可大大减少灰色建筑垃圾。

总之，钢结构有利于保护环境、节约资源，被视为环保产品。

2. 钢结构的不足之处

(1) 钢材耐热性好，但耐火性差。钢材耐热而不耐火，随着温度升高而强度降低。当钢结构长期受到 100℃ 辐射热时，钢材不会有质的变化，具有一定的耐热性。温度在 250℃ 以内，钢的性质变化很小，温度达到 300℃ 以后，强度逐渐下降，达到 450 ~ 650℃ 时，钢材强度急剧下降，强度为零，可能会全部瞬间崩溃。因此，钢结构的防火性比钢筋混凝土差，一般用于温度不高于 250℃ 的场所。当温度到 150℃ 以上时，需要隔热层加以保护。有特殊防火要求的建筑，钢结构更需要用耐火材料围护，对于钢结构住宅或高层建筑钢结构，应根据建筑物的重要性等级和防火规范加以特别处理。例如，利用蛭石板、蛭石喷涂层、石膏板或 NALC 板等加以防护。

(2) 钢材耐腐蚀性差，应采取防护措施。钢材在潮湿环境中易于锈蚀，处于有腐蚀性介质的环境中更易生锈，因此，钢结构必须进行防锈处理。尤其是暴露在大气中的结构、有腐蚀性介质的化工车间以及沿海建筑，更应特别注意防腐问题。

钢结构的防护可采用油漆、镀铝（锌）复合涂层。但这种防护并非一劳永逸，需相隔一段时间重新维修，因而其维护费用较高。目前国内外正发展不易锈蚀的耐候钢，此外，长效油漆的研究也取得进展，使用这种防护措施可延长钢结构寿命，节省维护费用。

虽然钢结构体系具有很多优点，但我国毕竟还处于发展的初期阶段，目前需要解决的问题还很多，比如钢结构技术及配套体系有待于进一步开发、研究和完善；需要妥善解决防腐、防火问题；工程造价也需要进一步降低。

1.3 钢结构的主要结构体系

用于房屋建筑的结构体系有：

1. 平面承重结构体系

平面结构体系有承重体系和附加构件两部分组成，其中承重体系是由一系列相互平行平面结构组成，承担该结构平面内的竖向荷载和横向水平荷载，并传递到基础。附加构件由纵向构件及支撑组成，将各个平面结构连成整体，同时也承受结构平面外的纵向水平力。轻型门式刚架结构（图 1-3）是最近几年来广泛应用的平面承重结构体系，除厂房建

筑外，还有商业建筑（如超市等）、汽车展厅、体育馆等。常用的有两铰刚架、三铰刚架及无铰刚架，梁柱截面有等截面及变截面两种形式。

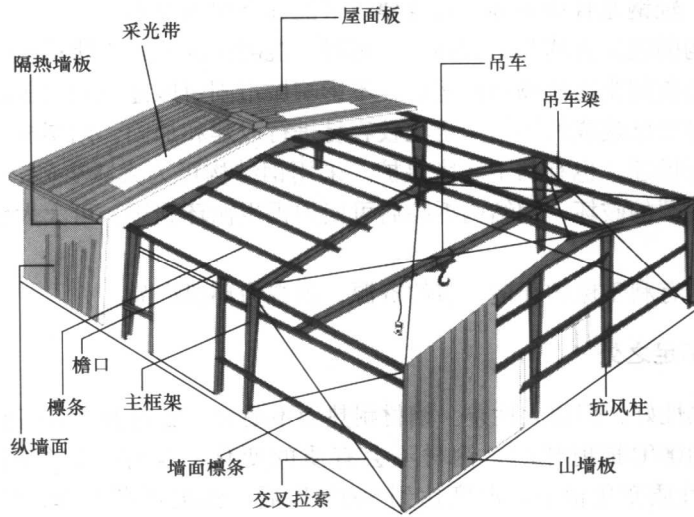


图 1-3 门式刚架房屋的组成示意图

2. 空间受力结构体系

空间受力结构体系分为刚性空间结构和柔性空间结构等。

(1) 刚性空间结构的网格结构有网架结构和网壳结构、桁架结构

网架结构（图 1-4）是空间网格结构的一种，它是以大致相同的格子或尺寸较小的单元组成。由于网架结构具有优越的结构性能，良好的经济性、安全性与适用性，在我国的应用也比较广泛，特别是在大型公共建筑和工业厂房屋盖中更为常见。

人们通常将平板型的空间网格结构称为网架，将曲面型的空间网格结构称为网壳。

网架一般是双层的，在某些情况下也可以做成三层。网架结构受力杆件通过节点有机的结合起来。节点一般设计成铰接，材料主要承受轴向力，杆件的截面相对较小。网架结构最大的特点是由于杆件之间的互相支撑作用，很多杆件从两个方向或多个方向有规律的组成高次超静定空间结构，它刚度大，整体性好，抗震能力强，而且能够承受由于地基不均匀沉降所带来的不利影响。即使在个别杆件受到损伤的情况下，也能自动调节杆件的内力，保持结构的安全。网架的杆件多为钢管，有时也采用其他型钢，材质为 Q235 或 Q345。网架结构能够适应不同的跨度、不同的支承条件的公共建筑和工业厂房的要求，也能适应不同建筑平面及其组合。

网壳结构属于曲面型网格结构，网壳只有单层和双层两种，是主要承受薄膜内力的壳体，具有杆系结构构造简单和薄壳结构受力合理的特点。因而是一类跨越能力大、刚度好、材料省、杆件单一、制作安装方便、有广阔应用和发展前景的大跨度和超大跨度的空间结构。

(2) 柔性空间结构有悬索结构、弦支结构及索膜结构

1) 悬索结构 悬索结构通过索的轴向拉伸来抵抗外荷载作用，是以一系列受拉钢索

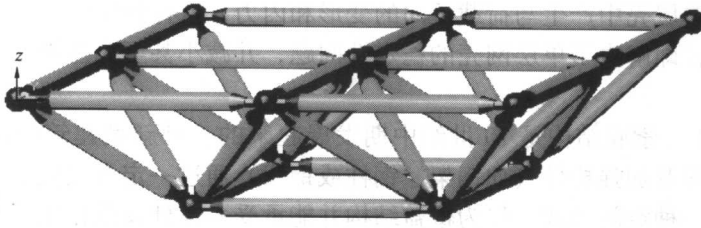


图 1-4 网架结构实体图

为主要承重构件，按照一定的规律布置，并悬挂在边缘构件或支承结构上而形成的一种空间结构。钢索的材料是由高强度钢丝组成的钢绞线、钢丝绳或钢丝束等，可以最充分的利用钢索的抗拉强度，大大减轻结构自重。边缘构件或支承结构用于锚固钢索，并承受悬索的拉力，可采用圈梁、拱、桁架、框架等，也可采用柔性拉索作为边缘构件。例如，北京工人体育馆，1961 年建成，该馆圆形平面，屋盖结构有双层索、中心钢环和周边钢筋混凝土外环梁三个部分组成，悬索屋盖直径 96m（图 1-5）。

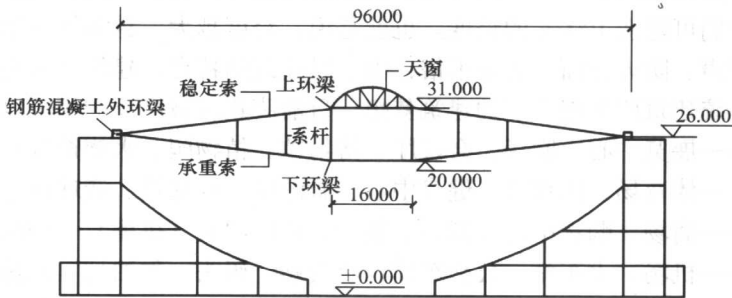


图 1-5 北京工人体育馆结构剖面图

2) 弦支结构 弦支结构（张弦梁和弦支穹顶）是由下弦索、上弦梁和竖腹杆组成的索杆、梁结构体系。通过对下弦的张拉，竖腹杆的轴向力使上弦梁产生与外荷载作用相反的内力和变位，起卸载作用。上海浦东机场航站楼是一项有代表性大跨度张弦梁结构，横向跨度（支点的水平投影）分别为进厅 49.3m、售票厅 82.6m、商场 44.4m、登机廊 54.3m；四大空间纵向总长：进厅、售票厅、商场为 402 m，登机廊为 1374m。张弦梁上弦由三根平行的方钢管并以短管相连而成，腹杆为圆钢管，下弦为高强冷拔镀锌钢丝束。张弦梁中的梁如采用空间桁架，则可能跨越更大的空间，如广州会展中心就是一个典型工程（图 1-6）。

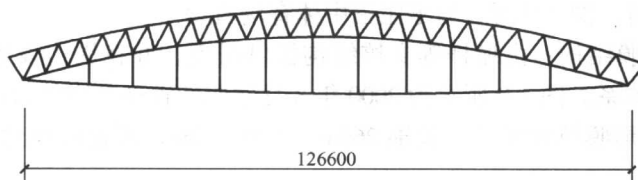


图 1-6 广州会展中心张弦立体桁架结构

弦支穹顶是日本法政大学川口卫教授 1993 年研制成功的，其特点是通过拉索施加

预应力，使上层单层壳中产生与荷载反向的变形和内力，这样较单纯单层网壳杆件内力及节点位移小得多，即解决了单层网壳的稳定性问题，并减小甚至完全消除了对下部结构产生的水平推力。

3) 索膜结构 索膜结构是 20 世纪中期发展起来的一种新型建筑结构形式，是由多种高强度薄膜材料及加强构件（如钢架、钢柱或钢索）通过一定方式使其内部产生一定的预张应力以形成一种空间形式，作为覆盖结构并能承受一定外荷载作用的空间结构。

膜结构目前被列入世界最轻的建筑结构之中。膜建筑屋面的重量仅为常规钢屋面的 1/30，这很显然降低了墙体与基础的造价；由于膜工程中所有的加工与制作均在工厂内完成，施工现场的安装施工工期几乎要比传统的建筑施工工期快一倍；膜建筑中所用的膜材，热传导性较低，单层膜的保温效果可与砖墙相比，优于玻璃，其半透明性在建筑内部产生均匀的自然漫散射光，减少了白天电力照明的时间，非常节能；膜材对紫外线有较高的过滤性，可过滤大部分的紫外线；同时膜材有很高的自洁性，通过雨水的冲刷，可保持外观的自洁，所以说膜建筑是 21 世纪的绿色环保建筑；由于膜建筑自重轻，可以不需要内部支撑而覆盖大面积的空间，人们可更自由地创造更大的建筑空间，从目前我们所掌握的技术来看，我们可建造 1000m 的跨度。也就是说，跨度越大，越能体现出膜建筑的经济性；膜建筑在吸声、防火方面也表现不俗；由于膜建筑的特点，建筑师可充分地展开想象的翅膀，实现传统建筑所实现不了的建筑梦想。目前膜建筑被广泛的用于以下各个领域：

文化设施——展览中心、剧场、会议厅、博物馆、植物园、水族馆等；

体育设施——体育场、体育馆、健身中心、游泳馆、网球馆、篮球馆等；

商业设施——商场、购物中心、酒店、餐厅、商店门头（挑檐）、商业街等；

交通设施——机场、火车站、公交车站、收费站、码头、加油站、天桥连廊等；

工业设施——工厂、仓库、科研中心、处理中心、温室、物流中心等；

景观设施——建筑入口、标志性小品、步行街、停车场等。

我国 2002 年由上海市建设工程标准定额管理总站编制的《膜结构技术规程》，在综合考虑了国内外的实践经验的基础上，根据造型需要和支撑条件等，将膜结构分为以下四种结构形式：

① 气承式膜结构：主要依靠膜曲面的气压差来维持膜曲面的形状。该结构要求有密闭的充气空间，并应设置维持内压的充气装置。

② 索系支承式膜结构：由空间索系作为主要的受力构件，在索系上布置按要求设计的张紧的膜材。图 1-7 所示为美国佛罗里达州的“太阳海岸穹顶”。

③ 骨架支承式膜结构：由钢构件或其他刚性结构作为承重骨架，在骨架上布置按设计要求的张紧的膜材。图 1-8 所示为枣庄三中体育场看台。

④ 整体张拉式膜结构：由桅杆等支撑结构提供吊点，并在周边设置锚固点，通过预张拉而形成的稳定体系。图 1-9 所示为 2000 年 8 月建成的青岛颐中体育场是整体张拉索膜结构，它由 60 个锥形膜单元组成，长轴 266m，短轴 180m，覆盖面积达 30000m²，可容纳观众 60000 人。

3. 多层、高层和超高层建筑结构体系

多层、高层和超高层建筑结构体系主要由框架、框架—支撑体系、框架—内筒体系、

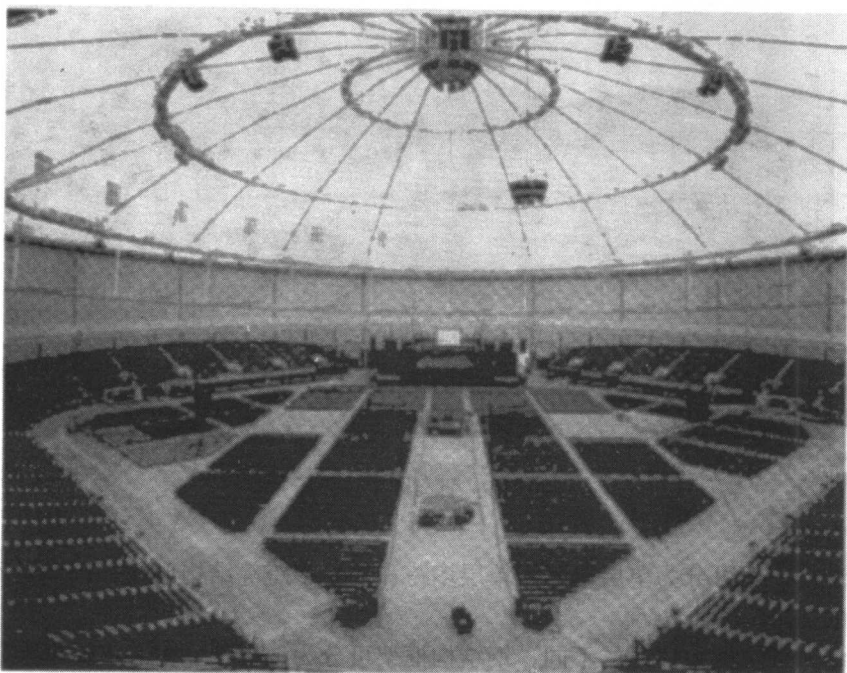


图 1-7 美国佛罗里达州的“太阳海岸穹顶”

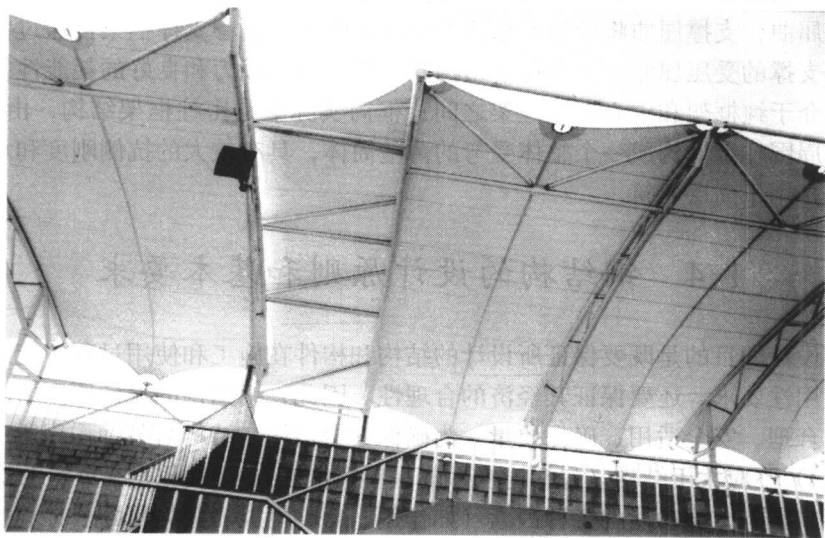


图 1-8 枣庄三中体育场看台

带伸臂桁架的框架—内筒体系、筒中筒及成束筒等结构体系。

框架钢结构是一种常用的钢结构形式，多用于大跨度公共建筑、工业厂房和一些对建筑空间、建筑体型、建筑功能有特殊要求的建筑物和构筑物中，如剧院、商场、体育馆、火车站、展览厅、造船厂、飞机厂、停车库、仓库、工业车间、电厂锅炉刚架等，并在高层和超高层建筑中有了越来越广泛的应用，如最近以来，钢结构框架住宅体系，越来越受