



国家开放大学

THE OPEN UNIVERSITY

钢结构设计原理

杨 娜 主 编

刘智敏 副主编



中央广播电视大学出版社



国家开放大学
THE OPEN UNIVERSITY OF CHINA

钢结构设计原理

杨 娜 主 编
刘智敏 副主编

中央广播电视大学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构设计原理 / 杨娜主编. — 北京: 中央广播电视大学出版社, 2016. 7

ISBN 978 - 7 - 304 - 07919 - 2

I. ①钢… II. ①杨… III. ①钢结构—结构设计—开放教育—教材 IV. ①TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 164693 号

版权所有, 翻印必究。

钢结构设计原理

GANGJIEGOU SHEJI YUANLI

杨 娜 主 编

刘智敏 副主编

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 营销中心 010 - 66490011

总编室 010 - 68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号 邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

策划编辑: 邹伯夏

版式设计: 赵 洋

责任编辑: 申 敏

责任校对: 宋亦芳

责任印制: 赵连生

印刷: 北京市平谷早立印刷厂

印数: 0001~7000

版本: 2016 年 7 月第 1 版

2016 年 7 月第 1 次印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16

印张: 17.25 字数: 378 千字

书号: ISBN 978 - 7 - 304 - 07919 - 2

定价: 29.00 元

(如有缺页或倒装, 本社负责退换)

钢结构是国家开放大学工学科土建类土木工程专业的一门统设课程，是介绍钢结构工作性能及设计原理的一门工程技术型课程。本课程的主要任务是研究钢结构材料、钢结构连接方法、钢结构的承载力计算等相关知识和理论。要求学生能正确地认识钢材性能、合理选用钢材；熟练掌握焊缝连接和螺栓连接的构造和计算；理解钢结构稳定概念，掌握钢结构稳定计算原理与计算方法；掌握钢结构基本构件的设计方法与设计步骤。本书根据国家开放大学对土木工程专业学生的基本要求和审定的教学大纲编写。全书共分为 6 章，包括绪论、钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件。各章开头有内容概要、学习重点和学习难点，各章末附有习题，便于教学使用。

本书根据《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)编写,内容符合国家开放大学土建类土木工程专业教学大纲的要求。

钢结构课程主要讲述钢结构基本构件的受力性能和设计计算方法,是土木工程专业的重要基础课。本教材的主要内容包括钢结构的材料物理力学性能、钢结构的设计方法、钢结构的连接以及基本构件即轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件的受力性能分析、设计计算。通过学习,学生可掌握钢结构的基本理论和基本设计方法,为学习后续专业课程、毕业设计,以及毕业后从事土木工程领域相关工作打下基础。

教材在叙述方法上,由浅入深,循序渐进,力求对基本概念论述清楚,使读者能较容易地掌握钢结构构件和连接的力学性能及理论分析方法;教材突出课程实践性应用,有明确的计算方法和设计步骤。教材中有一定数量的计算例题,有利于理解和掌握钢结构设计原理。为了便于自学,每章均有习题等内容。另外,本书为了使有一定工作经验的学生能够学以致用,增加了工程实践学习内容,主要是解决相关知识点的实际工程应用,便于学生理论联系实践。

本书编写人员及分工如下:北京交通大学杨娜教授,负责编写第1章、第2章;北京交通大学刘智敏副教授,负责编写第3章;北京交通大学姜兰潮副教授,负责编写第4章;北京交通大学陈爱国副教授,负责编写第5章、第6章。全书由杨娜任主编,刘智敏任副主编。

鉴于作者水平有限,书中难免有错误及不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2016年3月

第1章 绪 论	1
1.1 钢结构的发展概况	1
1.2 钢结构的特点与应用	6
1.3 钢结构设计方法	9
1.4 钢结构设计的基本要求	12
1.5 钢结构的发展趋势	13
1.6 钢结构的深化设计	14
第2章 钢结构的材料	16
2.1 钢材的主要力学性能	16
2.2 影响钢材力学性能的因素	21
2.3 钢材的两种破坏形式	25
2.4 应力集中对钢材性能的影响	25
2.5 钢材的疲劳破坏及疲劳计算	28
2.6 钢的种类、代号与技术标准	32
2.7 钢材的选用原则	35
2.8 钢材的规格	36
2.9 工程实践学习内容	37
第3章 钢结构的连接	39
3.1 钢结构的连接方法	39
3.2 钢结构的焊接方法和焊缝连接形式	46
3.3 对接焊缝的构造和计算	53
3.4 角焊缝的构造和计算	62
3.5 焊接残余应力与焊接残余变形	79
3.6 普通螺栓连接的构造和计算	82
3.7 高强度螺栓连接的性能和计算	91

3.8	钢结构构件及连接设计的折减系数	106
3.9	工程实践学习内容	106
第4章	轴心受力构件	112
4.1	轴心受力构件的应用及截面形式	112
4.2	轴心受力构件的强度和刚度	115
4.3	轴心受压构件的整体稳定	117
4.4	轴心受压构件的局部稳定	126
4.5	轴心受拉构件的设计	129
4.6	实腹式轴心受压构件的设计	132
4.7	格构式轴心受压构件的设计	138
4.8	柱头与柱脚	148
4.9	工程实践学习内容	156
第5章	受弯构件	160
5.1	钢梁的应用和类型	161
5.2	钢梁的强度和刚度	166
5.3	钢梁的整体稳定	173
5.4	钢梁的局部稳定和腹板加劲肋设计	185
5.5	型钢梁的设计	197
5.6	焊接梁的设计	199
5.7	工程实践学习内容	210
第6章	拉弯和压弯构件	214
6.1	拉弯和压弯构件的分类、截面形式及破坏形式	214
6.2	拉弯和压弯构件的强度和刚度	216
6.3	实腹式压弯构件的整体稳定性	220
6.4	格构式压弯构件的设计	230
6.5	压弯构件的局部稳定	236
6.6	压弯构件（框架柱）的计算长度	240
6.7	框架的梁柱连接	243
6.8	工程实践学习内容	244

附录	248
附录 1 钢材和连接的强度设计值	248
附录 2 轴心受压构件的稳定系数	250
附录 3 结构或构件的变形容许值	252
附录 4 宽、中、窄翼缘 H 型钢截面尺寸、截面面积、理论质量和截面特性	252
附录 5 热轧普通工字钢的规格及截面特性	254
附录 6 热轧普通槽钢的规格及截面特性	256
附录 7 热轧等边角钢的截面特性	258
附录 8 热轧不等边角钢的截面特性	259
附录 9 冷弯薄壁方钢管及矩形钢管的规格及截面特性	261
参考文献	263

第1章 绪 论

内容概要

钢结构的特点和应用范围；钢结构的设计原理和方法及可靠性的含义，极限状态的概念，荷载标准值、荷载设计值强度标准值、强度设计值的含义；钢结构设计规范；钢结构发展概况及发展方向。

学习重点

钢结构的特点及应用范围；钢结构的计算方法；两种极限状态表达式的应用。

学习难点

钢结构的设计方法。

钢结构是土木工程结构的主要形式之一，广泛应用于各类工程结构中，包括桥梁和房屋建筑等。钢结构的广泛应用源自于钢材的优异性能、制作安装的高度工业化、结构形式的丰富多样以及对复杂结构的良好适应等特点。特别是 21 世纪以来，随着科学技术的迅速发展以及人们对物质文化生活要求的不断提高，钢结构面临飞速发展的机遇和挑战。新的结构形式、设计理念、计算分析理论和制作安装技术不断涌现，为钢结构的发展提供了前提和保障。

1.1 钢结构的发展概况

1.1.1 钢结构在我国的发展历史

最早的钢结构由铁结构发展而来。在公元前 60 年前后，我国就修建了铁链桥。1705 年，桥长 100 m 的四川泸定大渡河铁索桥的建设不仅在我国具有铁制结构的标志性意义，亦在世界上具有铁制结构的里程碑意义。改革开放后，我国钢结构的设计、制造和安装水平迅速提高，先后建成一大批规模较大、技术较为先进的钢结构项目，为我国钢结构的进一步发展奠定了坚实的技术基础。钢材产量和质量的不断提高，为工程建设中大量采用钢结构提供了物质保证。表 1-1~表 1-3、图 1-1~图 1-4 分别列出新中国成立以来我国部分有影响力的钢桥和建筑钢结构。

表 1-1 国内部分钢桥

工程名称	结构形式及主要技术指标	建成时间/年	用途
武汉长江大桥	连续梁桥，9×128 m	1957	公路、铁路
九江长江大桥	系杆拱桥，主跨 216 m	1993	公路、铁路
上海杨浦大桥	斜拉桥，跨度 602 m	1993	公路
江阴长江大桥	悬索桥，主跨 1 386 m	1999	公路
南京长江第二大桥（见图 1-1）	斜拉桥，跨度 628 m，钢箱梁	2001	公路
宜昌长江大桥（见图 1-2）	悬索桥，主跨 960 m	2001	公路
卢浦大桥	中承式系杆拱桥，主跨 550 m	2003	公路
润扬大桥	悬索桥，主跨 1 490 m	2005	公路
苏通大桥	斜拉桥，主跨 1 088 m，钢箱梁	2008	公路
武汉天兴洲大桥	斜拉桥，主跨 504 m	2009	公路、铁路

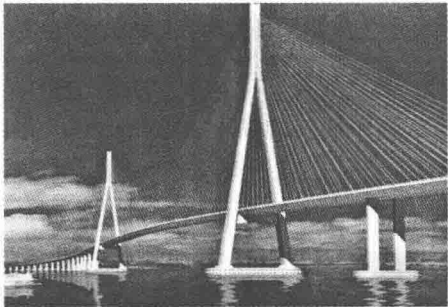


图 1-1 南京长江第二大桥

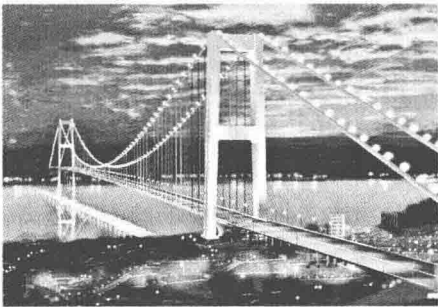


图 1-2 宜昌长江大桥

表 1-2 国内部分高层建筑钢结构

工程名称	城市	总建筑面积/($\times 10^4$) m^2	层数	高度/m	建成时间/年
中环广场大厦	香港	13	78	374	1993
中信广场大厦	广州	29	80	391.1	1997
中央电视台总部大楼（见图 1-3）	北京	55	45	234	2009
上海中心大厦（见图 1-4）	上海	43.9	118	632	2016
金贸大厦（见图 1-4）	上海	28.9	88	420.5	1998
香港中国银行大厦	香港	12.9	70	367.4	1990
国际金融中心二期	香港	20	90	415.8	2003
101 大厦	台北	19.3	101	508	2004
国贸三期	北京	54	80	330	2007



图 1-3 中央电视台总部大楼



图 1-4 上海中心大厦、金贸大厦

表 1-3 国内部分大跨度建筑钢结构

工程名称	总建筑面积/ ($\times 10^4$) m^2	结构形式及主要技术指标	建成时间/年
北京工人体育馆	8	车辐式双层索结构, 直径 94 m	1961
首都四机位机库	3.5	网架, 跨度 153 m	1996
国家大剧院	16.5	椭球形网壳, 东西长轴长度为 212.20 m, 南北方向短轴长度为 143.64 m	2007
国家体育馆	8.09	双向张弦钢屋架结构, 南北跨度 144 m, 东西跨度 114 m	2007
国家体育场 (鸟巢) (见图 1-5)	25.8	格构式门式刚架, 长轴 340 m, 短轴 292 m	2008
北京工业大学羽毛球馆 (见图 1-6)	2.8	弦支穹顶结构, 跨度 93 m	2008
国家游泳中心 (水立方)	6.5~8	网架, 跨度 177 m	2008
首都 A380 飞机维修机库	7	网架, 跨度 350.8 m	2008
首都机场三期	30	网壳, 长 950 m, 宽 750 m	2008



图 1-5 国家体育场 (鸟巢)



图 1-6 北京工业大学羽毛球馆

1.1.2 钢结构在国外的的发展历史

1779 年，英国在英格兰中部西米德兰兹郡建成了世界第一座铸铁拱桥——雪纹（Coalbrookdale）桥，如图 1-7 所示，其跨度为 30.7 m，自此，国外的钢结构建设步入快速发展时期。1890 年，英国在爱丁堡城北福兹河（Firth of Forth）上建成了福兹桥（Forth Bridge），主跨达 519 m，是英国人引以为豪的工程杰作，如图 1-8 所示。20 世纪 30 年代，美国进入钢铁产业的迅猛发展时期，钢铁产量和质量提高带动了钢结构迅速发展，在纽约、芝加哥等城市建设了大量高层钢结构。表 1-4 ~ 表 1-6 列出国外经典钢结构工程，图 1-9 ~ 图 1-12 为国外部分经典钢结构工程。

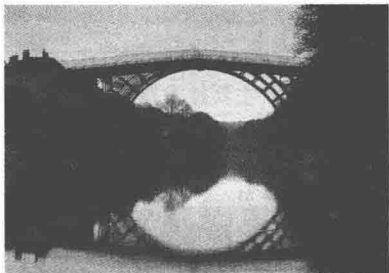


图 1-7 雪纹桥



图 1-8 福兹桥

表 1-4 国外部分桥梁钢结构工程

工程名称	结构形式及主要技术指标	地点	建成时间/年	用途
不列丹尼桥	锻铁箱形梁桥，71.9 m + 140 m + 140 m + 71.9 m	英国	1850	铁路
福兹桥	伸臂梁桥，206 m + 46 m + 519 m + 82 m + 519 m + 46 m + 206 m	英国	1889	铁路
金门大桥	悬索桥，跨径 1 280 m	美国	1937	公路
青津海峡桥	悬索桥，主跨 1 780 m	日本	1980	公路
诺曼底桥	斜拉桥，856 m	法国	1995	公路
大伯尔特桥	悬索桥，主跨 1 624 m	丹麦	1996	公路
明石海峡大桥	悬索桥，主跨 1 991 m	日本	1998	公路
多多罗大桥	钢混组合梁斜拉桥，跨径 890 m	日本	1999	公路
墨西拿海峡大桥	悬索桥，主跨 3 300 m	意大利	2011	公路、铁路

表 1-5 国外部分大跨度钢结构工程

工程名称	城市	结构形式及主要技术指标	建成时间/年
新奥尔良体育馆	新奥尔良市	双层网壳，直径 207.3 m	1976
多伦多天空穹顶	多伦多	开合钢结构屋顶，跨度 208 m	1989
太阳海岸穹顶	圣彼得堡	索穹顶，直径 210 m	1989

续表

工程名称	城市	结构形式及主要技术指标	建成时间/年
福冈体育馆（见图 1-9）	福冈	开合钢结构屋顶，跨度 222 m	1993
佐治亚穹顶	亚特兰大	索穹顶，241 m × 193 m	1996
千年穹顶（见图 1-10）	伦敦	索穹顶，直径 320 m	1999
澳大利亚主体育场	悉尼	双曲抛物面网壳，跨度 220 m	2000



图 1-9 福冈体育馆

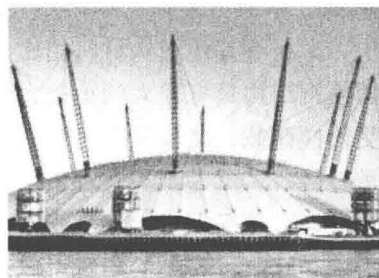


图 1-10 千年穹顶

表 1-6 国外经典的高层钢结构工程

工程名称	城市	层数	高度/m	建成时间/年
帝国大厦	纽约	102	381	1931
约翰·汉考克大厦	芝加哥	100	344	1969
西尔斯大厦	芝加哥	108	443	1974
佩特纳斯大厦	吉隆坡	88	452	1996
国油双峰塔（见图 1-11）	吉隆坡	95	452	1997
哈利法塔（见图 1-12）	迪拜	162	828	2010



图 1-11 国油双峰塔



图 1-12 哈利法塔

1.2 钢结构的特点与应用

1.2.1 钢结构的特点

钢结构是用钢板、热轧型钢或冷加工型钢制造而成的。与其他材料的结构相比，钢结构具有如下特点：

1. 轻质高强，承载力大

与混凝土、木材等其他结构材料相比，钢材的密度虽然较大，但其强度较其他结构材料高得多，从而使钢结构具有较大的承载力。钢材的强度与密度的比值远大于混凝土和木材。因此，在承受同样荷载，尤其是拉力时，与混凝土结构和木结构相比，钢结构构件的截面面积较小、自重较轻。

2. 钢材材性好，可靠性高

钢材在冶炼和轧制过程中的质量可以得到严格控制，材质波动范围小。钢材质地均匀、各向同性，弹性模量大，具有良好的塑性和韧性，可近似看作理想弹塑性体，符合目前采用结构计算方法的基本概念和假定，从而使钢结构的分析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

钢材具有良好的冷、热加工性能，便于首先在专业化工厂进行生产和机械加工，再运输到现场安装。钢结构工厂制造、现场安装的施工方法既能保证加工和施工精度，又能有效缩短施工周期。钢结构的工业化生产也为降低工程造价、提高经济效应创造了有利条件。

4. 抗震性能好

钢材具有良好的塑性和韧性，钢结构自重轻且结构体系轻盈，受到的地震作用较小，因此在国内外的历次地震中，钢结构均是损坏最轻的结构。国际已公认，钢结构是抗震设防区特别是强震区最适宜的结构类型。

5. 气密、水密性好

钢材本身具有优良的气密、水密性，而钢构件之间的连接又可以实现完全封闭。钢结构在其使用周期内不易因温度等作用出现裂缝，具有较好的耐久性。因此，钢结构容易达到工程或工业所需的密闭性要求。

6. 易于锈蚀

铁元素易与氧及其他非金属元素发生氧化反应，致使钢结构在一般自然环境中极易锈蚀，需经常进行防腐养护，维护费用昂贵，这是钢结构的最大弱点。但是，在没有腐蚀性介质的一般建筑结构中，钢构件经过彻底除锈、喷涂防腐涂料后，锈蚀问题并不严重；对于湿度大或有侵蚀性介质环境中的钢结构，可采用耐候钢或不锈钢解决其易于腐蚀的问题。

7. 耐热性好、耐火性差

钢材耐热，但不耐火。当环境温度在 250 ℃ 以内时，钢材性质变化很小；当环境温度超

过 300 ℃ 后, 钢材的强度开始逐渐下降; 当环境温度升至 450 ~ 650 ℃ 时, 钢材强度下降为零, 因此, 钢结构适用于环境温度不大于 250 ℃ 的场合。在有防火要求的建筑中, 钢结构必须用防火材料予以防护。

8. 绿色环保、无污染

钢材是一种高强度、高效能的材料, 可以 100% 回收再利用, 没有资源损失, 具有很高的再循环价值, 其边角料也有价值, 不需要制模施工, 有助于环保和可持续发展, 具有“绿色”建材的优良属性。

钢结构的上述特点是确定其设计方法、合理进行工程应用的重要基础。

1.2.2 钢结构的适用范围

钢结构的适用范围很广, 根据其特点, 更适用于以下工程结构:

1. 承受大荷载、动力荷载或移动荷载的结构

钢材强度高, 适于承载重的结构; 钢材又具有良好的韧性和塑性, 常呈延性破坏。因此, 钢结构适宜在动力荷载下工作, 可满足抗震性能要求高的结构需求。

2. 大跨度、高层或高耸结构

钢材轻质高强的特性使钢结构在跨度、高度大时体现出良好的综合效益。因此, 近年来钢结构在大跨及高层、高耸结构中得以广泛应用。

3. 拼装式结构或需要移动的结构

钢结构不仅重量轻, 还可以机械化生产, 采用螺栓或其他便于拆装的方式进行连接, 因此, 钢结构拼装、运输方便, 适用于拼装式工程结构或需要移动的工程结构。临时性建筑、野外作业的生产和生活用房的骨架、过街天桥、管道支架及海洋平台等多采用钢结构。钢筋混凝土结构施工时所用的模板和支架、脚手架等也大量采用钢材制作。

4. 对密封性要求高的结构

钢结构具有良好的气密、水密性, 因此, 冶金、石油、化工企业中大量采用由钢板做成的容器结构, 包括油罐、燃气罐、管道、高炉、脱硫塔及各种船舶结构等。

5. 轻型结构

钢结构重量轻, 不仅在结构跨度大时有利, 而且在屋面活荷载比较小时也有优势。现代化工业厂房多采用钢结构。

6. 其他复杂造型结构

钢材具有良好的可塑性, 可以焊接、螺栓连接, 连接方法灵活、适用性强。因此, 复杂造型结构经常采用钢结构。

1.2.3 钢结构的主要形式

结合钢结构的特点和适用范畴, 钢结构的主要形式如下:

1. 大跨度结构

如大跨度桥梁、大跨度屋盖等结构，其结构体系可为网壳、网架、张弦、悬索、索膜、拱架、框架等。图 1-13 所示为北京老山自行车馆，为网壳结构形式。

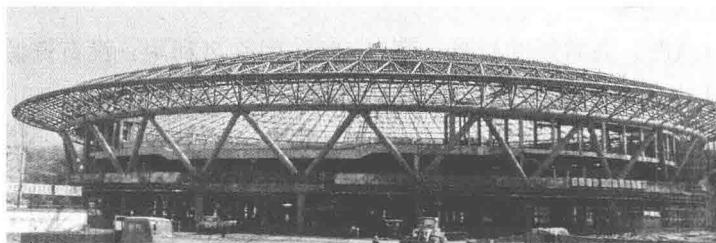


图 1-13 老山自行车馆

2. 重型结构

吊车起重量较大或其工作比较繁重的厂房车间多采用钢骨架，如冶金厂房与重型机械厂的重型厂房；起重量较大的起重机械也多采用钢骨架。图 1-14 所示为上海宝钢冶金车间。

3. 高耸结构与塔桅结构

高耸结构与塔桅结构通常采用钢结构，如电视台、微波塔、输电线塔、发射桅杆等。图 1-15 所示为巴黎埃菲尔铁塔。

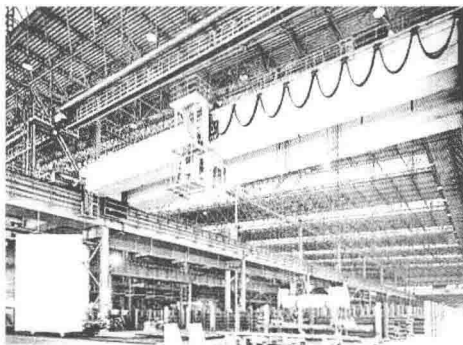


图 1-14 上海宝钢冶金车间



图 1-15 巴黎埃菲尔铁塔

4. 多层与高层结构

多层与高层建筑经常采用钢结构。近年来，钢结构在此领域的发展非常迅速。

5. 密封结构

如油罐、燃气罐、管道、高炉、除尘器及脱硫塔结构等。图 1-16 所示为上海宝钢集团宝山钢铁公司的除尘器。

6. 活动结构

如各种移动式起重机械，军用桥、栈桥、施工脚手架等拆装结构。图 1-17 所示为宝钢

一号高炉上料系统主皮带通廊结构。

7. 轻型结构

如轻型厂房、仓储、贸易市场等轻型钢结构，结构形式多为门式刚架、波纹拱板等。

图1-18所示为轻型钢结构厂房，图1-19所示为波纹拱板结构。

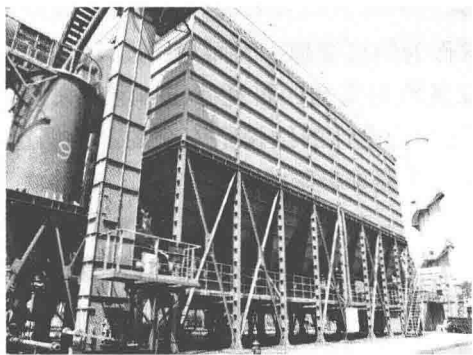


图1-16 上海宝钢集团宝山钢铁公司除尘器



图1-17 宝钢一号高炉上料系统主皮带通廊



图1-18 轻型钢结构厂房

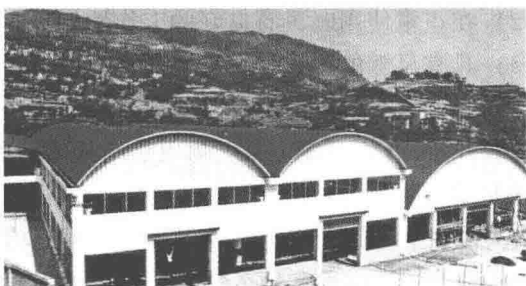


图1-19 波纹拱板结构

1.3 钢结构设计方法

1.3.1 钢结构设计方法的发展

钢结构设计的目的是保证结构和结构构件在充分满足功能要求的基础上安全可靠地工作。钢结构设计的本质在于使所建造的结构在可靠性与经济性之间选择一种合理的平衡，力求以最经济的途径与适当的可靠度满足各种预定的功能要求：安全性、适用性和耐久性。因此，钢结构设计准则为：由各种作用所产生的作用效应（内力或变形）不大于结构和连接的抗力或限值（由几何参数和材料性能等决定）。如果结构上的作用、材料性能、构件几何参数、施工质量、计算模式等各种影响结构功能的因素都是确定性的，按上述准则进行结构计算将比较简单。然而，前述各种影响结构功能的因素一般都是具有随机性的非确定值，因此，在设计中如何合理地考虑这些因素，使设计结果更接近于实际情况，是长期以来钢结构设计方法发展、演变所要达到的目的。