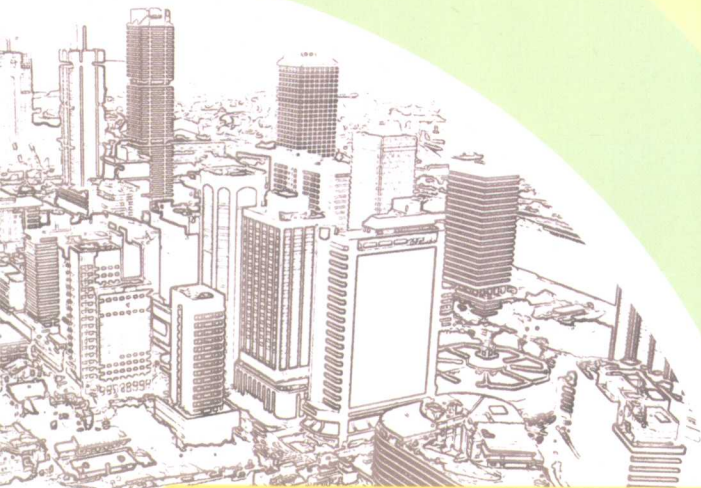


21  
CENTURY

21世纪土木工程实用技术丛书



# 大跨度空间钢结构分析与概念设计

*Analysis and Concept Design of Large Span Spatial Structure*

王秀丽 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



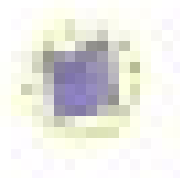


21世纪土木工程造价师执业丛书



# 大跨度空间钢结构分析与 概念设计

王传明 编著



中国铁道出版社

21 世纪土木工程实用技术丛书

Analysis and Concept Design of Large Span Spatial Structure

# 大跨度空间钢结构 分析与概念设计

王秀丽 编著



机械工业出版社

本书从概念设计的角度出发,利用概念设计的基本原理,结合工程实践,着重介绍了大跨度空间钢结构体系的分类及特点,系统地阐述了各类结构的主要分析理论及设计方法,强调了结构中的概念设计与结构选型的重要性,便于工程设计和研究人员在实际工作中参考;同时为了启发读者自身的创新思维,书中尽量增加了一些工程信息,对部分实际工程设计与分析进行介绍,并对部分工程进行点评,在供同行专家参考的同时也欢迎读者对此进行探讨。

本书内容主要结合实际工程中最常见的空间结构形式进行阐述,力求做到系统性、完整性和实用性,在叙述上尽可能简洁,便于阅读。对于一些新型的结构体系,本书仅就基本的概念进行了简单介绍,供读者在进行方案设计时参考。

本书可供建筑空间结构工程设计、科研、施工和管理人员使用,也可作为高等学校建筑与土木类相关专业教材或参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

大跨度空间钢结构分析与概念设计/王秀丽编著. —北京:机械工业出版社, 2008.9

(21世纪土木工程实用技术丛书)

ISBN 978-7-111-24677-0

I. 大… II. 王… III. 大跨度结构:空间结构:钢结构  
IV. TU393.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第108198号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:薛俊高 版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:张静 责任印制:杨曦

三河市国英印务有限公司印刷

2008年9月第1版第1次印刷

148mm×210mm·12.375印张·365千字

标准书号:ISBN 978-7-111-24677-0

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379776

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

大跨度空间结构以其合理的受力及优美的造型越来越广泛地在工程中得到应用，相关的内容十分丰富，而大跨度空间结构往往是衡量一个国家建筑科技水平的重要标志之一，也是国民经济、文化及文明发展的象征，因此空间结构的研究分析与设计得到越来越多的重视。概念设计是空间结构重要的设计与研究内容之一。本书从概念设计的角度出发，结合概念设计的基本原理，重点介绍大跨度空间钢结构体系的分类及特点，强调结构选型的重要性，阐述了各类结构的主要分析理论与设计方法，并强调概念设计中的构造设计，便于同类工程设计和研究人员分析与设计时参考。同时为了启发读者自身的创新思维，本书在编写中，结合工程实例，对部分工程进行了点评，并对部分作者参与的实际工程设计与分析进行介绍，欢迎读者对此共同探讨。

全书共分为6章，第1章为概述，重点介绍空间结构的演变与发展的历程，结合基本传力理论探讨空间结构构成的概念，此外结合实际工程实例说明空间结构概念设计的重要性，并对材料选用及相关内容进行了介绍，以便于读者全面了解空间结构的演变与发展的相关性。第2章、第3章着重介绍工程中最常用的网架和网壳结构，以满足常规工程设计

的需求；第4章介绍了以悬索结构为主要特征的工程设计要点；第5章介绍了目前应用很多的钢管立体桁架体系，对这类结构较为特殊的节点构造，在概念设计中加以强调与总结，并对相贯节点的设计内容结合规范要求进行了论述；第6章对各类组合结构进行了介绍，并对具有发展潜力的各种新型结构体系，包括索穹顶结构、弦支穹顶结构、玻璃幕墙体系进行了介绍。

本书内容大量参考了国内外空间结构著名专家学者的专著、研究论文以及工程实例，在此对相关的作者表示衷心的感谢。特别需要说明的是，本书所列举的有关研究工作及工程项目得到国家自然科学基金项目(50678078)、甘肃省自然科学基金、甘肃省建设厅、教育厅项目的资助，同时甘肃省建筑勘察设计院，中国市政西北设计研究院有限公司等工程单位也为研究工作提供了大量的工程背景和研究平台，殷占忠、李晓东、陈明、李庆福、苏成江、王本科、虞崇钢、王磊、高森等分别参加了相关的研究工作；在本书的编著过程中，胡静、常文兵、李琼、徐英雷、殷占忠、陈明、韩雯等参加了部分内容的编写和文字处理工作，在此一并表示诚挚地感谢。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中难免有大量的不足和疏漏，恳请读者批评指正。

编者

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 建筑空间与大跨度空间结构 .....	1
1.2 轻型结构与空间结构 .....	6
1.3 建筑材料的发展与空间结构 .....	10
1.4 大跨空间钢结构的应用及发展 .....	13
1.5 空间结构的概念设计含义 .....	18
<b>第 2 章 网架结构分析及概念设计</b> .....	20
2.1 网架结构形式与选择 .....	20
2.2 网架结构基本尺寸的确定 .....	38
2.3 网架结构的内力分析方法 .....	41
2.4 网架结构构造设计 .....	51
2.5 网架结构概念设计及实例点评 .....	73
<b>第 3 章 网壳结构分析及概念设计</b> .....	80
3.1 网壳结构工程的应用及特点 .....	80
3.2 网壳结构形式、分类及选型 .....	87
3.3 网壳结构一般设计原则 .....	106
3.4 网壳结构的内力分析方法 .....	113
3.5 网壳结构的抗震概念设计 .....	132
3.6 网壳结构的稳定性及其概念设计 .....	141
3.7 网壳结构的杆件设计与节点构造 .....	158

3.8	网壳结构实例 .....	164
3.9	网壳结构新型减震体系的研究 .....	175
<b>第4章</b>	<b>悬索结构分析与概念设计 .....</b>	<b>185</b>
4.1	悬索结构的概念 .....	185
4.2	悬索结构的受力与变形特点 .....	187
4.3	悬索结构的形式 .....	189
4.4	悬索结构分析 .....	198
4.5	悬索结构的稳定分析与构造 .....	204
4.6	悬索结构的动力特性及抗震抗风分析 .....	207
4.7	悬索结构的强度和刚度的校核 .....	213
4.8	悬索结构的节点构造 .....	215
4.9	工程实例简介 .....	219
<b>第5章</b>	<b>管桁架结构 .....</b>	<b>223</b>
5.1	管桁架结构的概念 .....	223
5.2	管桁架结构选型 .....	225
5.3	基本尺寸的确定 .....	228
5.4	管桁架结构内力分析 .....	230
5.5	钢管桁架节点构造 .....	233
5.6	钢管桁架结构工程实例及点评 .....	253
<b>第6章</b>	<b>组合空间结构及新型结构体系 .....</b>	<b>258</b>
6.1	概述 .....	258
6.2	组合网架结构 .....	261
6.3	斜拉结构 .....	274
6.4	膜结构 .....	284
6.5	张弦结构 .....	317
6.6	索穹顶结构 .....	341
6.7	点连接式玻璃幕墙支承结构 .....	359
6.8	本章内容综述 .....	376
	<b>参考文献 .....</b>	<b>381</b>



# 第1章 概述

## 1.1 建筑空间与大跨度空间结构

### 1.1.1 空间结构的概念

“空间结构”(Space Structure 或者 Spatial Structure)基本定义是“创造宏大的内部空间的产物”，主要特点是利用空间形态或者三维形态来抵抗外力，空间结构不仅要考虑结构的内部空间，也要顾及对结构外部空间的影响；不仅要表达力学理念，也要通过规模、形态来展示建筑意图。因此空间结构的发展与进步同时反映了建筑材料、结构体系以及建筑技术综合发展的过程。

空间结构的创建中，材料、形态、体系和结构表现深深地交织在一起，展示了建筑造型与合理结构体系间的高度和谐(图1-1、图1-2)，使

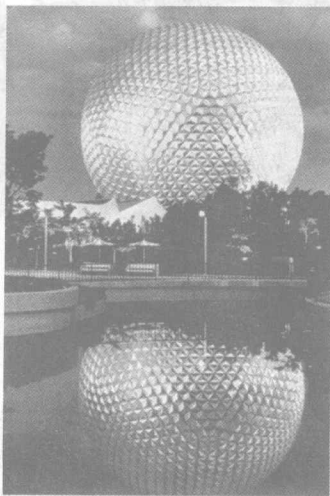


图 1-1 大连友谊广场

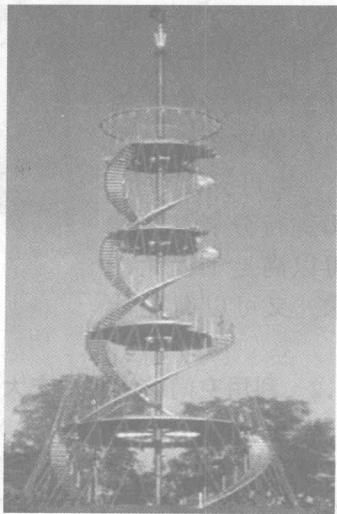


图 1-2 斯图加特观光塔

得建筑师和结构工程师不可或缺，同时空间结构的施工技术也得到相应地发展，因此良好的空间结构是建筑艺术与科学技术工程的协调统一的结果。

从结构受力分析与空间构成的角度出发，无法简化为平面体系的结构均为空间结构。实际上每个单体造型都具有长、宽、高的意义，每个结构都应该是三维的，而对于某些工程可采用简化的平面体系分析即可满足其主要受力特性。图 1-3 为兰州中山桥，该桥位于城北白塔山下的黄河上，是

兰州境内历史最为悠久的古桥，有“天下黄河第一桥”之称。1954 年，兰州市人民政府整修加固了铁桥，又增加了五座弧形钢架拱梁，使铁桥显得更加坚固耐用，气势雄浑。其中弧形钢架拱梁可以按照平面结构进行分析与设计。此外，目前大量采用的门式刚架体系（图 1-4），均可采用平面结构进行分析，这种既可以满足工程设计要求，又可以简化计算。



图 1-3 兰州中山桥外景



图 1-4 典型的门式刚架结构

### 1.1.2 利用空间结构实现宏大的内部空间

随着现代工业化的发展，对大跨度结构的功能要求也就越来越高，空间结构由于其造型丰富多样，构成灵活机动，已成为建筑师和结构工程师共同寻求结构整体空间问题解决的同一途径，因此合理协调建筑空间效果与寻求最佳受力的结构体系是空间结构发展的新方

向,也使得结构向超大跨度方向的发展成为趋势。

世界上许多著名设计师认为网壳结构是空间结构中覆盖最大跨度和空间的结构形式。凯威特从理论上分析认为联方形网壳的跨度可以达到 427m, 1959 年富勒曾提出建造一个直径达 3.22km 的短程线球面网壳, 覆盖纽约市第 23 ~ 59 号街区, 该网壳重约 80000t, 每个单元重 5t, 利用直升飞机可以在三个月安装完毕。日本的巴组铁工所认为 21 世纪将是人类创造舒适、清洁、节能的新型城市的时代, 因此曾经提出 500m 的全天候多功能体育、娱乐场所和跨度 1000m 的理想未来城市的穹顶空间。对于如此大的空间结构的可行性和实用性的研究是一个值得探讨的问题。

空间结构的发展是与经济水平及各种需求发展密切相关的。近年来有不少的工程利用空间结构实现楼中楼的体系, 例如国家大剧院工程, 见图 1-5, 就是采用了外围的一个大型空间网壳结构实现了歌剧院、戏剧院、音乐厅为一体的多功能结构。

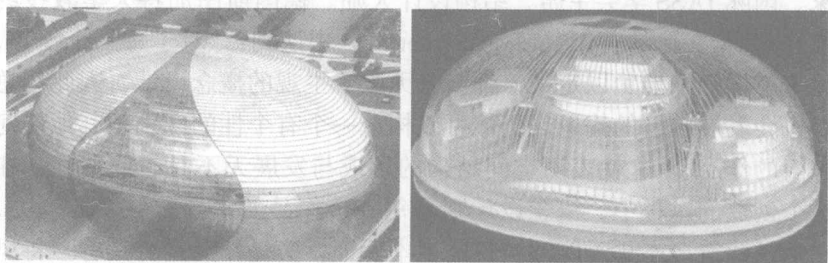


图 1-5 国家大剧院外形与内部空间结构

又如北京侨福花园工程(图 1-6)是基于现代环保设计的理念, 用一个环保罩将四栋建筑物覆盖在其中的空间结构, 该工程建筑面积 14.4 万  $\text{m}^2$ , 占地 3 万  $\text{m}^2$ , 地下三层, 地上共有四座塔楼, 其中 A、B 座为两栋完全相同的 19 层、总高为 78m 的高塔, C、D 为两栋完全相同的 11 层、总高为 41.7m 的低塔, 所有内部的四栋建筑均为钢筋混凝土框架—剪力墙结构。

环保顶罩为分别沿着东西和南北  $28^\circ$  角倾斜的多个三角形斜面组合而成, 环保罩顶罩由正交加斜交的交叉梁组成的空间结构体系构成, 上端铰接下端固定支承于塔楼屋顶的钢管柱上, 铰接处采用铸钢

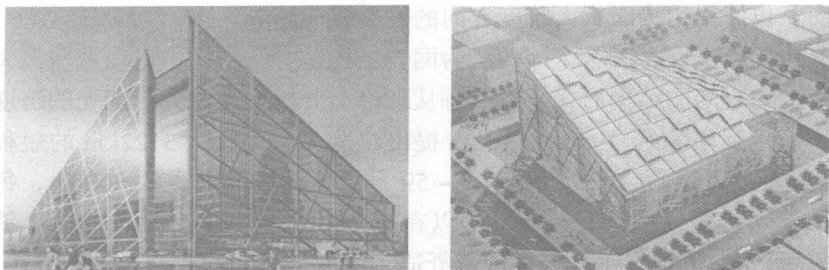


图 1-6 侨福花园工程

支座；环保罩的侧面为玻璃幕墙结构，靠内部的塔楼作为其平面外的侧向支撑，四片侧罩在角部设伸缩缝分开。

### 1.1.3 空间结构应用范围的拓展

作为空间结构的造型是由理性的思考而来的，所有结构体系的确定，相关条件的选择都具有多样性与创造性。世界著名空间结构专家、国际 IASS 学会主席、结构设计大师、德国斯图加特大学教授约格·施莱希在他的著作《Light Structure》中谈到：“对于每一个任务，无论怎样仔细地加以定义，都会有无数个主观的概念设计，因此你总有机会发展自己的构思，仍然可以构造一个有个性的区别于其他任何东西的作品”。这就表明空间结构的形成与发展无不具有创造性，在这个创造的过程中，概念设计则是每一个作品的指导方针及原动力，它既是建筑形态是否能够实现的基本保证，又是作品是否具有独特风格的思维体现。

国内外大量兴建的各类体育场馆均选择了空间结构作为主要承重体系，造型上日渐丰富。例如甘肃省庆阳体育馆采用了复杂造型的曲面网壳外加弧形大拱结构体系（图 1-7）。该工程位于甘肃省庆阳市西峰区世纪大道。建筑面积  $19505\text{m}^2$ ；建筑层数地上 4 层；建筑主体高度  $15.45\text{m}$ ；下部结构为框架；基础为柱下条形基础；屋面结构为钢结构，其中比赛馆屋盖平面尺寸为  $100.200\text{m} \times 108.00\text{m}$ ，屋顶高度  $17.8\text{m}$ ；训练馆屋盖平面投影尺寸为  $48.69\text{m} \times 65.4\text{m}$ ；顶点高度  $9\text{m}$ ；两个屋盖均采用双向交叉立体桁架构成的曲面钢网壳结构，焊接球节点与相贯节点配合使用。

此外，很多造型独特的工程结构均可采用空间结构的设计理念进行分析与设计，这使得其空间结构工程应用的范围日益增加，如高度46m的南海大佛雕塑骨架（图 1-8），各种塔桅结构（图 1-9），深圳世界之窗入口金字塔网架（图 1-10），贵州人行天桥网架（图 1-11）等。



图 1-7 甘肃省庆阳体育馆

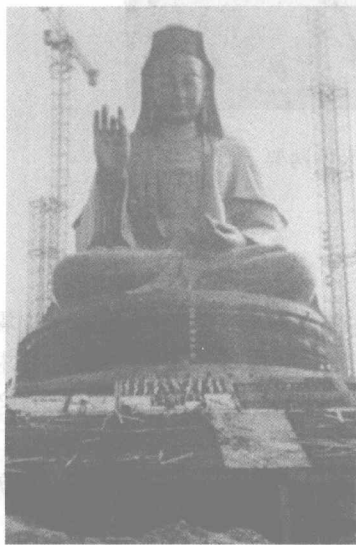


图 1-8 南海大佛雕塑骨架

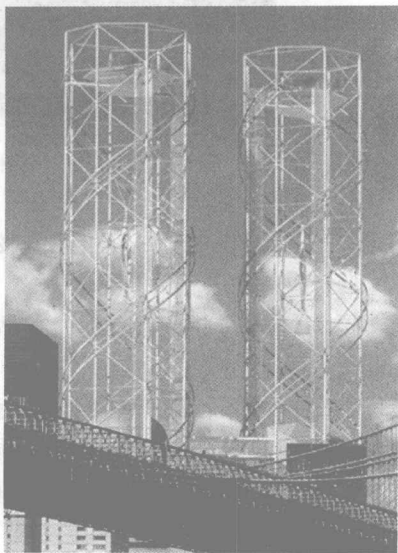


图 1-9 塔桅结构

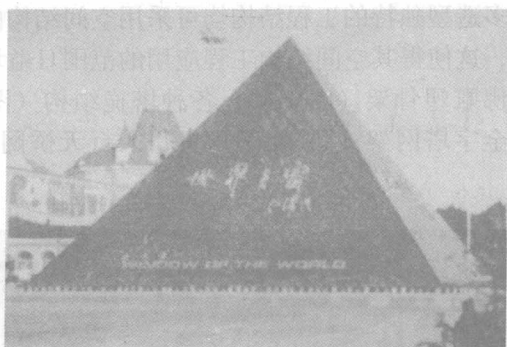


图 1-10 深圳世界之窗人口金字塔



图 1-11 贵州人行天桥网架

## 1.2 轻型结构与空间结构

空间结构具有受力合理，整体性和稳定性好，空间刚度大，抗震性能好，造型美观等优点。在土木工程的发展历程中人们一直在寻求最优的结构体系，而最优的结构通常被认为是艺术与结构融合的产物。从典型的钢筋混凝土薄壳结构、拱及桁架结构，以及网壳结构、索网结构、薄膜结构都是按照这一模式不断发展而来的，空间结构是实现轻结构的理想途径之一。

### 1.2.1 薄壳结构

薄壳结构是一种极富魅力的结构形式，它以强烈的轻质特性，使人感觉其如同打破了重力定律的框架漂浮于空中，充分表达了工程艺术的理想，以高效的承重实现了其结构的轻盈，实现了形式与承重的高度统一，其基本原理就在于薄壳结构具有良好的空间受力关系。遗憾的是，随着经济的发展，原材料越来越低而人工越来越贵，相应地模板工程造价昂贵，使得这种轻盈而令人兴奋的薄壳结构的使用越来越少。

混凝土薄壳结构中，典型的工程有法国巴黎国家工业与技术展览中心大厅（图 1-12），是当前世界上跨度最大的公共建筑。折算壳面总厚度只有 180mm，厚跨比为 1:1200，比鸡蛋蛋壳的厚长比 1:100 还小 12 倍。建筑造型新颖，充分展示了混凝土壳体结构的优越性。

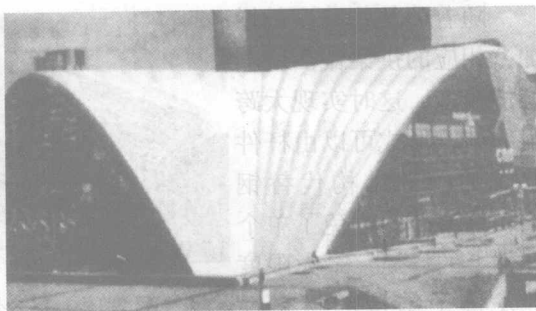


图 1-12 巴黎国家工业与技术展览中心大厅

此外，闻名于世的澳大利亚悉尼歌剧院（图 1-13），该工程外形由大平台上十个巨型壳片组成，三角形壳瓣是以 Y 形、T 形的钢筋混凝土肋骨拼结而成，各种房间隐藏在它的内部，这些壳片如同花瓣指向天空，构成奇异的造型，给人以美的联想。

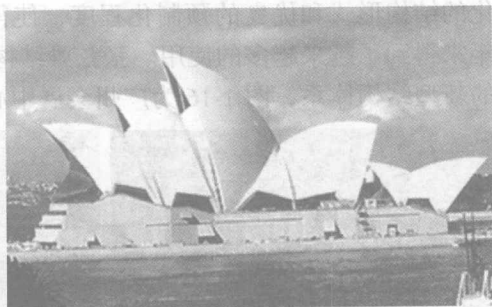


图 1-13 澳大利亚悉尼歌剧院

### 1.2.2 拱与拱桁架结构

拱是人类最早尝试建造大跨度的重要结构形式，设计中通常采用合理轴线或者通过适当的方法提高结构强度及抗弯刚度，预应力拉索方法来抵抗不均匀荷载。同时拱的曲线造型也符合人们的审美观点。图 1-14

就是采用典型的拱形结构实现了其轻巧优美的造型。但拱结构会产生较大的水平推力，若坐落在屋顶上势必会造成下部结构需要抵抗很大的水平力，因此增设拉索与撑杆解决这一技术问题，如图1-15。

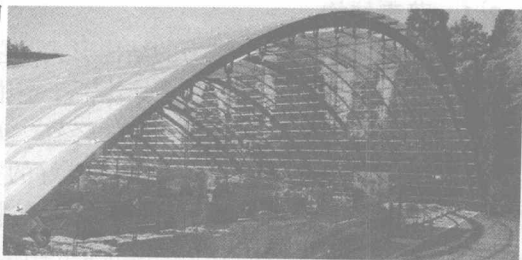


图 1-14 典型的拱形结构

随着建筑物跨度的增加，相应的拱梁截面就会增加较多，这时实现大跨度的结构形式可以由杆件组成的桁架结构代替钢梁，这种结构避免了单个杆件上的弯矩，最大限度地发挥了结构的材料性能，而桁架内部的三角形体系使得结构整体非常坚固，并且由于它单元化的结构形式和优良的预制化程度，使得这种结构非常经济实用，近年来得到了越来越多的使用。张弦梁结构就是基于这种概念发展起来的新型结构体系，图 1-16 为广州会展中心的大跨度张弦梁结构。

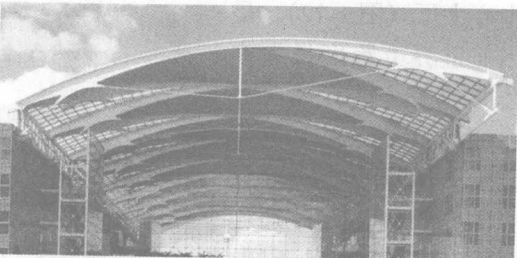


图 1-15 带拉索的拱结构

而桁架内部的三角形体系使得结构整体非常坚固，并且由于它单元化的结构形式和优良的预制化程度，使得这种结构非常经济实用，近年来得到了越来越多的使用。张弦梁结构就是基于这种概念发展起来的新型结构体系，图 1-16 为广州会展中心的大跨度张弦梁结构。

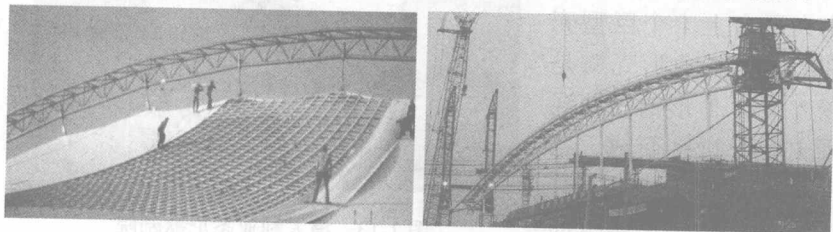


图 1-16 广州会展中心张弦梁结构

### 1.2.3 悬索结构及各种组合体系

悬索结构是非常合理的结构体系，但是它也存在着整体刚度较小的弱点，采用悬索结构与其他刚性结构组合的混合结构体系无疑是非常合理的结构设计。黑龙江国道收费站工程(图1-17)采用混合结



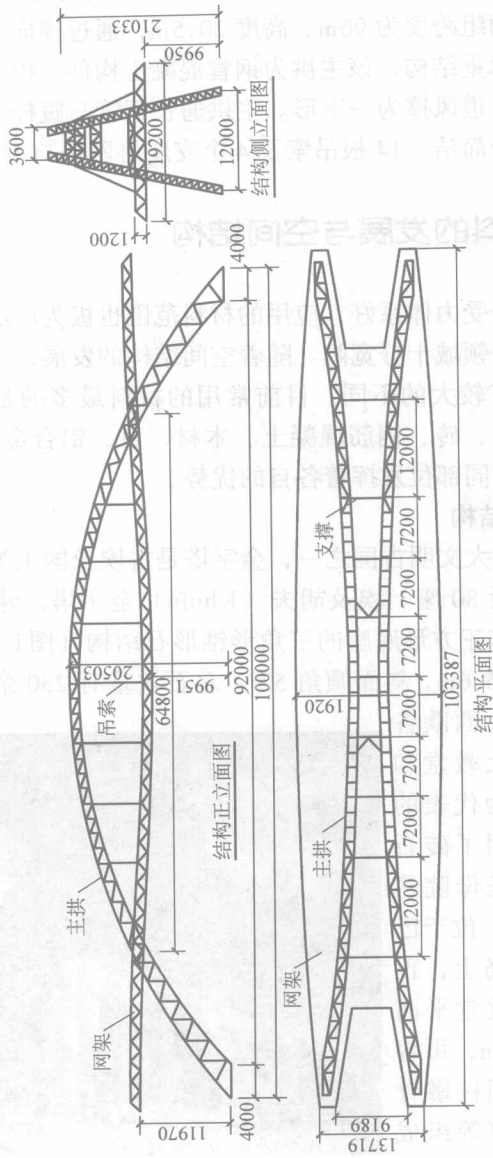


图 1-17 黑龙江国道收费站