

DAXING ZHANGXIANLIANG JIEGOU
DE SHEJI YU SHIGONG

大型张弦梁结构 的设计与施工



黄明鑫 主编



山东科学技术出版社
www.lkj.com.cn

大型张弦梁结构 的设计与施工

DAXING ZHANGXIANLIANG JIEGOU
DE SHEJI YU SHIGONG



黄明鑫 主编



山东科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

大型张弦梁结构的设计与施工/黄明鑫主编. —济南:
山东科学技术出版社, 2005. 3

ISBN 7-5331-3833-3

I. 大... II. 黄... III. ①钢结构:大跨度结构—
建筑设计②钢结构:大跨度结构—建筑物—工程施工
IV. TU393.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 098790 号

大型张弦梁结构的设计与施工

黄明鑫 主编

出版者:山东科学技术出版社

地址:济南市玉函路 16 号

邮编:250002 电话:(0531)2098088

网址:www.lkj.com.cn

电子邮件:sdkj@sdpress.com.cn

发行者:山东科学技术出版社

地址:济南市玉函路 16 号

邮编:250002 电话:(0531)2098071

印刷者:山东新华印刷厂

地址:济南市胜利大街 56 号

邮编:250001 电话:(0531)2079112

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:19.25

彩插:8

字数:420 千字

版次:2005 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

印数:1-4000

ISBN 7-5331-3833-3

TU·181

定价:38.00 元

名誉主编：方朝阳 李成栋

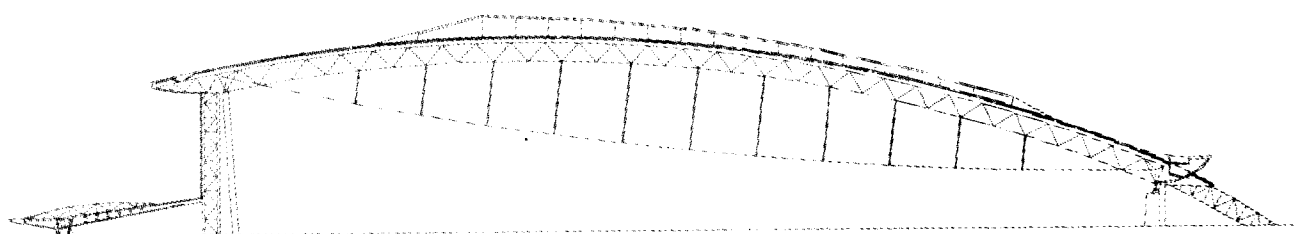
主 编：黄明鑫

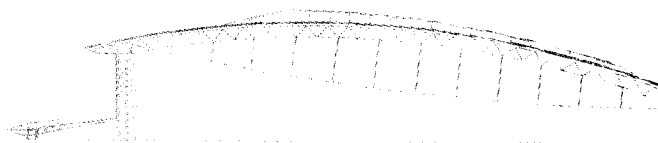
副主编：范 峰 张 莉 钱卫军 康 慨

参编人员：黄明鑫 范 峰 张 莉 钱卫军 王玉涛

韩 萍 邢承强 汤浩军 刘中华 王凤荣

朱邵宁 陈焕军 汤显衡 张丽莉





前言 FOREWORD

随着经济的不断发展和人民生活水平的日益提高,近年来我国各地大力开展基础设施建设,建成了一批具有国际先进水平的机场、会议展览中心、体育场馆等大跨度、大空间民用公共建筑。为了满足现代建筑美学的发展和建筑使用功能的要求,钢结构以其自重轻、易表达建筑造型、施工速度快、工期短等优点被广泛用于大跨度空间结构中,推动了我国空间钢结构设计和施工水平的提高。

哈尔滨国际会议展览体育中心是第一个由国内设计单位独立完成设计的大型展览类建设项目,也是全国惟一将会展与体育产业功能合二为一、体现经济功能的大型场馆。为了满足建筑的大空间要求,哈尔滨国际会议展览体育中心工程采用一端简支于混凝土柱、一端简支于人字形摇摆柱的大跨度张弦桁架(跨度128 m),是目前国内张弦桁架结构项目中跨度最大的一个。

张弦桁架是由拉索、撑杆和压弯构件组合而成的新型自平衡体系,它充分利用高强索的强抗拉性能来改善结构整体的受力性能,成为受力合理、承载能力高、材料用量省、制造运输方便、施工简单、能跨越较大空间的自平衡体系,是具有良好的应用价值和前景的新型结构形式。张弦桁架结构在我国的研究和应用尚处于初级阶段,因此我国张弦桁架结构的设计和施工水平与国际先进水平还有一定的差距。本书主要针对哈尔滨国际会展体育中心大型张弦桁架结构的设计和施工实践,介绍大型张弦结构的设计与施工,为今后张弦结构的应用与发展提供可参考的资料,对我国的大型张弦结构的设计和施工水平的共同提高也大有裨益。

本书的编写要感谢黑龙江省建筑设计研究院、哈尔滨工业大学土木工程学院、浙江精工钢结构有限公司、同济大学、上海拜特钢结构

前言 FOREWORD

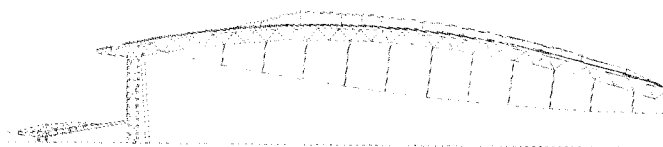
设计有限公司等单位的配合及专家指导。

哈尔滨工业大学土木工程学院徐崇宝教授、支旭东、钱宏亮、孙晓颖、王林安、荆估慧、赵振东、李方会、曹正罡、张亮泉、孙瑛、陈波和柳旭东等同志参加了本项目设计，他们的辛勤工作使得设计得以顺利完成。此外，还要对东南大学在拉索施工方法和施工验算方面所做的大量工作，以及上海同济宝冶建设机器人有限公司在滑移施工方面所做的工作表示感谢。感谢刘子祥高级工程师对本书施工部分内容的校审。

本书第一章、第五章由张莉、张丽莉撰写，第二章、第三章由范峰撰写，第四章由汤浩军、钱卫军、王玉涛、邢承强、康慨撰写，第六章由汤浩军、张莉、邢承强撰写，第七章由范峰、韩萍、刘中华、朱邵宁、陈焕军、汤显衡、王凤荣、张莉撰写。本书可供设计单位、施工单位技术人员及大专院校学生学习和参考之用。

由于编者水平有限，书中难免存在谬误或不妥之处，诚请广大读者批评指正。

编者



目 录 CONTENTS

第一章 工程概况	(1)
第一节 哈尔滨国际会议展览体育中心工程概况	(1)
第二节 哈尔滨国际会议展览体育中心主馆工程概况	(2)
第二章 张弦桁架结构设计	(4)
第一节 张弦结构的特点及工程应用	(4)
一、张弦结构概述	(4)
二、张弦结构的特点	(4)
三、张弦结构的工程应用	(5)
第二节 张弦结构的形式及分类	(7)
一、平面张弦梁结构	(7)
二、空间张弦梁结构	(8)
第三节 平面张弦梁结构的结构性能和一般设计原则	(9)
一、平面张弦梁结构的结构性能	(9)
二、张弦梁结构的形态定义和力学特性	(10)
三、张弦梁结构的预应力特性	(12)
四、平面张弦梁结构平面外稳定和屋面支撑系统设计	(12)
五、张弦梁结构的抗风和抗震设计	(13)
第四节 平面张弦梁结构的结构分析方法	(14)
一、平面张弦梁结构分析的一般原则	(14)
二、平面张弦梁结构预应力分析	(15)
三、平面张弦梁结构放样形状的分析	(15)

目 录 CONTENTS

第五节 索拱体系的解析分析方法	(17)
一、施加预应力阶段的计算	(18)
二、加载阶段的计算	(19)
第三章 哈尔滨国际会展体育中心屋盖张弦桁架结构设计	(24)
第一节 主馆结构形式介绍	(24)
一、整体结构形式简介	(24)
二、单榀张弦桁架及其支座	(25)
第二节 张弦桁架结构分析与设计	(26)
一、张弦桁架结构参数	(26)
二、荷载设计参数选用	(27)
三、荷载工况	(28)
四、静力分析结果	(28)
五、地震作用分析	(30)
六、预应力的施加及结构放样形状的确定	(32)
七、哈尔滨国际会展体育中心工程设计体会	(32)
第四章 大型张弦梁结构的施工方法	(34)
第一节 施工方法概述	(34)
一、拼装施工法	(34)
二、滑移施工法	(35)
三、整体吊装法	(38)
四、整体提升法	(38)
五、整体顶升法	(39)
第二节 哈尔滨会展主馆张弦桁架拼装施工技术	(39)
一、拼装施工概述	(39)
二、散件拼装	(39)
三、整体拼装	(47)
第三节 哈尔滨会展主馆张弦桁架吊装施工技术	(52)

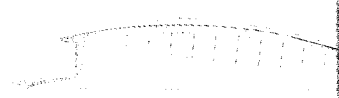
目 录 CONTENTS

一、吊装施工概述	(52)
二、吊装设备的选择	(53)
三、吊点的选择	(53)
四、索具的选择	(53)
五、人字柱的安装	(53)
六、桁架的吊装	(54)
第四节 哈尔滨会展主馆张弦桁架滑移施工技术	(56)
一、滑移施工概述	(56)
二、滑移安装工艺流程	(57)
三、滑移分段	(57)
四、张弦桁架支座就位	(60)
五、滑道和牵引设施设计	(60)
第五节 哈尔滨会展主馆张弦桁架拉索施工技术	(69)
一、拉索施工概述	(69)
二、拉索防护	(69)
三、拉索施工的总体程序	(70)
四、张拉质量控制标准	(79)
五、稳定拉索施工工艺	(79)
第六节 哈尔滨会展主馆工程施工计算	(81)
一、哈尔滨会展主馆工程张弦桁架施工阶段吊装过程分析	(81)
二、哈尔滨会展主馆工程张弦桁架施工过程模拟	(82)
三、哈尔滨会展主馆工程张弦桁架施工阶段临时稳定方案分析	(84)
四、施工各阶段索力和变形计算结果	(85)
第五章 大型张弦梁结构金属屋面系统的设计	(88)
第一节 金属屋面围护系统的设计	(88)
一、金属屋面围护板材的设计	(88)
二、金属屋面围护系统骨架的设计	(96)

目录

CONTENTS

第二节 金属屋面功能系统的设计	(100)
一、金属屋面排水系统设计	(100)
二、金属屋面保温、隔热设计	(103)
三、金属屋面吸音、隔声设计	(108)
四、金属屋面防雷系统设计	(111)
五、金属屋面采光系统设计	(113)
六、金属屋面通风系统设计	(116)
第三节 哈尔滨国际会展体育中心金属屋面系统设计	(120)
一、金属屋面系统工程概况	(120)
二、哈尔滨1号国际会展体育中心屋面系统设计	(121)
第六章 大型金属屋面系统施工	(132)
第一节 大型金属屋面系统施工方法	(132)
一、屋面系统安装前的准备	(132)
二、屋面系统安装的施工组织设计	(135)
三、材料堆放	(136)
四、金属屋面系统的安装	(136)
第二节 哈尔滨国际会展体育中心金属屋面系统施工	(137)
一、哈尔滨国际会展体育中心金属屋面板施工概述	(137)
二、哈尔滨国际会展体育中心屋面系统施工流程	(137)
三、哈尔滨国际会展体育中心屋面系统各部分的施工顺序	(138)
四、哈尔滨国际会展体育中心屋面系统各部分的施工要点及要求	(143)
第七章 大型张弦结构的节点设计	(146)
第一节 法兰节点的设计与计算	(146)
一、刚性法兰	(146)
二、柔性法兰	(150)
第二节 销轴节点的设计	(152)



目 录 CONTENTS

一、销轴节点概述	(152)
二、销轴节点的形式	(153)
三、销轴节点的承载力计算	(153)
第三节 空心球节点的设计与计算	(154)
一、焊接空心球节点简介	(155)
二、空心球节点设计的基本要求	(156)
三、空心球体承载力计算	(160)
第四节 索节点	(162)
一、锚固节点	(162)
二、限位节点	(166)
第五节 铸钢节点	(167)
一、铸钢节点的造型	(167)
二、铸钢节点的材料	(170)
三、铸钢节点的设计	(171)
四、哈尔滨国际会展体育中心铸钢节点足尺试验和有限元分析	(172)
五、哈尔滨国际会展体育中心铸钢节点的生产加工	(181)
第六节 支座节点	(183)
一、平板支座	(184)
二、弧形支座和滚轴支座	(185)
三、铰轴式支座	(186)
四、橡胶支座	(186)
五、万向球铰支座	(188)
六、铸钢支座	(189)
第七节 哈尔滨国际会展体育中心张弦桁架节点设计及材料要求	(189)
一、张弦桁架节点设计	(189)
二、材料要求	(191)

目 录

CONTENTS

附 录	(192)
一、热轧无缝钢管的规格及截面特性	(192)
二、焊接直缝钢管的规格及截面特性	(245)
三、螺旋焊钢管的规格及截面特性	(259)
四、焊接矩形管的规格及截面特性	(265)
五、常见锚具的结构与规格	(285)
参考文献	(295)



第一章 工程概况

第一节 哈尔滨国际会议展览体育中心工程概况

哈尔滨市是中国沿边地带最大的经济中心城市,也是东北地区最大的城市。随着改革开放的不断深入,哈尔滨市的经济得到迅速发展,但是同其他城市的发展一样,老的城区布局过度稠密,投资成本日益增高,发展空间日益狭促,远远达不到现代竞争所要求的规模和容量,城市发展迫切需要一个新的发展空间。其次,哈尔滨市作为东北亚重要经贸城市,每年有吸引千余东北亚经贸客商的“哈尔滨经济贸易洽谈会”在此举行,一直以来“哈洽会”未能在一个大型的场地举办,来体现黑龙江、哈尔滨经贸活动的兴盛。此外,黑龙江省作为积极开展冬季运动的大省,体育赛事繁多。因此,哈尔滨市亟需开辟一个新的区域,并建设与经济发展相适应的集展览、体育、文化、餐饮、娱乐、购物、旅游商务等多种功能为一体的新城市中心。作为黑龙江省政府多年的一个夙愿,经过反复论证决定,在哈尔滨经济开发区建设哈尔滨国际会展体育中心。

哈尔滨国际会议展览体育中心工程位于黑龙江省哈尔滨市南岗区红旗大街 301 号——哈尔滨市最具现代城市魅力的经济开发区内,与城市二环快速干道相连,总用地面积 63 万 m^2 。哈尔滨国际会议展览体育中心工程从总体上分为三大独立建筑单元,由国际会议展览体育中心(主馆)、五万人体育场、国际会议中心(酒店)组成,整体建筑呈 U 形(图 1-1-1),各单元间建筑功能和结构组成均相互独立,外部公共设施有通道、广场、停车场、公园等。

哈尔滨国际会议展览体育中心总建筑面积 44 万 m^2 ,是全国惟一将会展与体育产业功能合二为一、体现经济功能的大型国际级场馆,是国内在建和已建成展览类建筑中规模较大的一个,也是迄今为止第一个由国内设计单位独立完成设计的大型展览类建设项目。建成的哈尔滨国际会议展览体育中心已成为集国际大型博览展示、体育盛会、高规格会议、经贸洽谈、商品交易、信息交流、电子商务及娱乐休闲购物为一体的大型场馆,对于强化哈尔滨市成为东北地区中心城市地位,促进哈尔滨对外贸易及推动哈尔滨会展业、旅游业的发展发挥了积极作用,并成为 21 世纪哈尔滨城市标志性建筑和旅游观光景点之一。

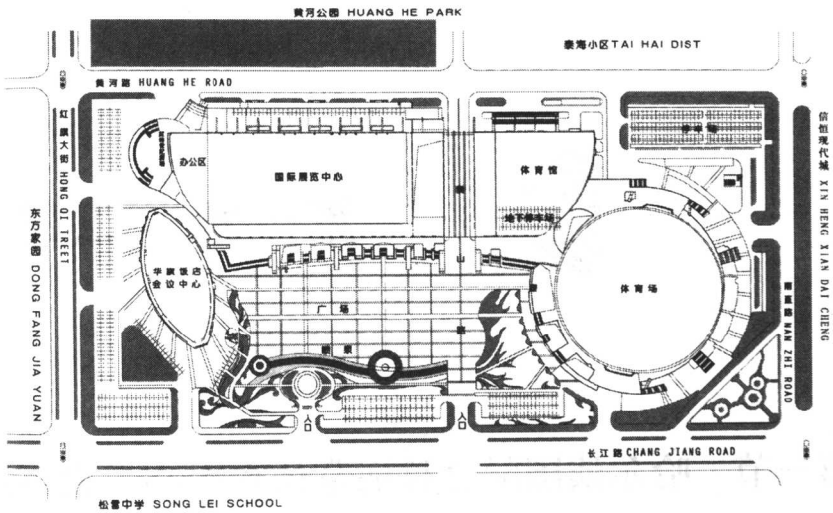


图 1-1-1 哈尔滨国际会议展览体育中心总平面图

第二节 哈尔滨国际会议展览体育中心主馆工程概况

哈尔滨国际会议展览体育中心主馆(以下简称“哈尔滨会展主馆”)总建筑面积约为 22 万 m^2 , 由国际展览中心、综合训练馆及体育馆组成。

哈尔滨会展主馆外形呈长方形(图 1-2-1), 南北长 151 m[包括跨度为 128 m 的大厅及附属玻璃长廊(图 1-2-2)], 东西前长 510 m, 后长 618 m。哈尔滨会展主馆东西两端为附属功能用房, 下部为混凝土结构, 上部屋盖结构为两片曲面网架。哈尔滨会展主馆中

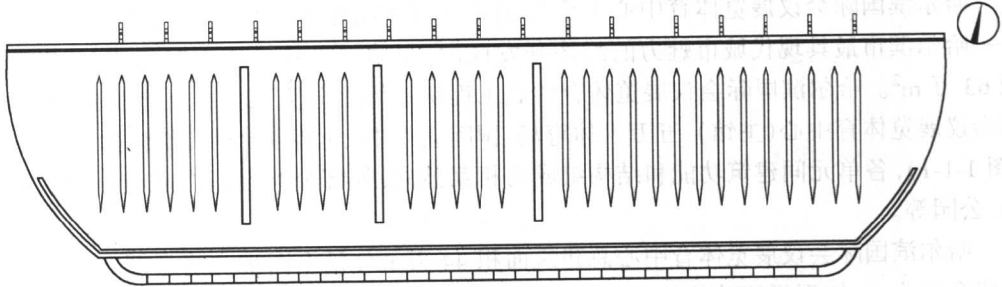


图 1-2-1 哈尔滨会展主馆屋顶平面图

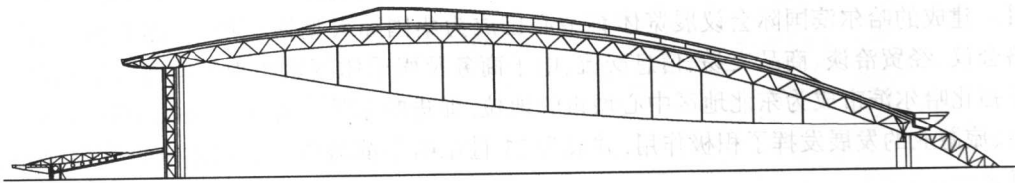


图 1-2-2 哈尔滨会展主馆剖面图

部全长 510 m, 由相同的 35 榀张弦桁架(跨度 128 m)覆盖, 桁架间距为 15 m, 共分成 5 个矩形空间(图 1-2-3), 每个矩形空间分别由 7 榀、6 榀、7 榀、9 榀、6 榀张弦桁架及其支撑桁架构成独立的受力单元, 左边 3 个矩形空间为具有 2 000 个国际标准展位的单层展览大厅, 第 4 与第 5 个矩形空间分别为综合训练馆和体育馆。训练馆和体育馆内部为 2 层结构, 内部的楼层为独立的混凝土结构, 在传力上与屋盖主体结构不发生关系。这 5 个矩形空间由前端的 20 m 宽玻璃长廊连接交通, 该玻璃长廊为轻型钢结构体系, 整个主馆建筑四周均由玻璃幕墙围合。

哈尔滨会展主馆主体部分结构轴测图如图 1-2-4 所示。

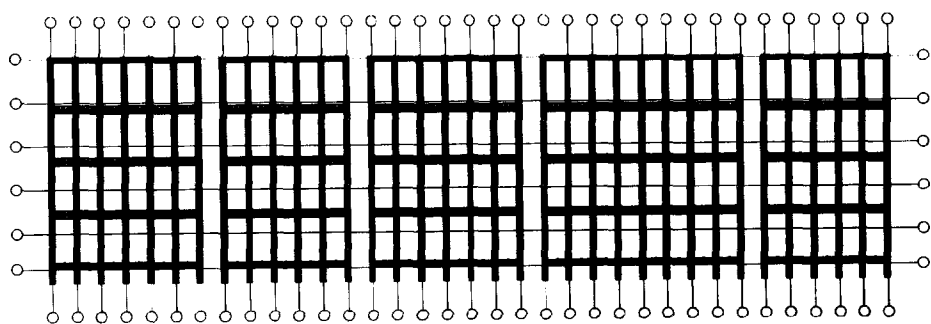


图 1-2-3 哈尔滨会展主馆主体部分结构平面布置图

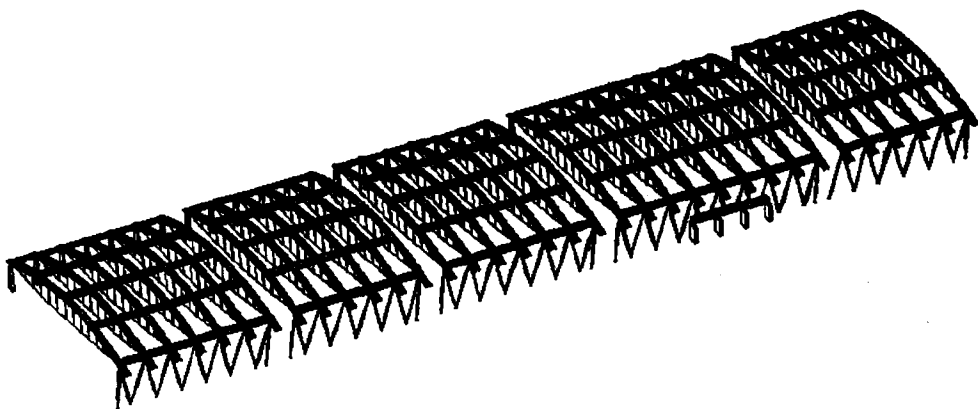


图 1-2-4 哈尔滨会展主馆主体部分结构轴测图



第二章 张弦桁架结构设计

第一节 张弦结构的特点及工程应用

一、张弦结构概述

张弦结构是将上弦刚性受压构件通过撑杆与下弦拉索组合在一起形成自平衡的受力体系,是一种大跨度预应力空间结构体系,也是混合结构体系发展中一个成功的创造。

张弦结构上弦刚性构件可以是实腹式梁,也可以是格构式桁架,据此对不同的张弦结构可称作张弦梁或张弦桁架。当梁或桁架的轴线为曲线并且支座可以提供水平约束时,又可称之为索拱体系。目前此类索拱体系的工程应用发展较为快速。

二、张弦结构的特点

张弦结构具有如下特点:

(1) 张弦结构在保证充分发挥索的抗拉性能的同时,由于引进了具有抗压和抗弯能力的桁架或梁而使体系的刚度和稳定性大为增强。

(2) 桁架或梁与张紧的索构成的受力体系,实际上不存在整体失稳的可能性,因而其强度可以得到充分利用,而不似单独工作的桁架或梁那样需要有特别大的截面。所以,柔性索与刚性桁架或梁的结合不仅充分发挥了各自的优点,而且相互限制了彼此的弱点,相得益彰。

(3) 对张弦结构中的索施加一定的预拉力,这既可使索具有适当的初始绷紧度,也可对索与桁架或梁之间的受力比例进行必要调整;既充分发挥了索的抗拉能力,又调整了桁架或梁的内力分布(使桁架或梁中的内力分布趋于均匀)。

(4) 张弦结构与预应力双索体系(由承重索、相反曲率的稳定索及两者之间的联系杆共同组成的平面预应力体系)比较,张弦结构所需的预拉力要小得多,因而使支承结构的受力大为减小。如果在施工过程中适当分级施加预拉力和分级加载,将有可能使张弦结构施于支承结构的作用力减到最小限度。

对张弦结构的受力特点从不同的角度可理解为:

① 理解一:张弦结构是在双层悬索体系中的索桁架基础上,将上弦索替换成刚性构

件而产生的。这样处理的好处是上弦刚性构件可以承受弯矩和压力,一方面可以提高桁架的刚度,另一方面结构中构件内力可以在其内部平衡(自平衡体系),而不再需要支承系统的反力来维持。

② 理解二:张弦结构是用拉索替换常规平面桁架结构的受拉下弦而形成的结构体系,这种替换的优点是不仅桁架的下弦拉力可以由高强度拉索来承担,更为重要的是可以通过张拉拉索在结构中产生预应力,从而达到改善结构受力性能的目的。

③ 理解三:张弦结构是体外布索的预应力梁或桁架,通过预应力来改善结构的受力性能。

三、张弦结构的工程应用

在 19 世纪便有张弦结构在桥梁结构中应用的报道,如英国 1859 年建造的 Royal Albert 桥(图 2-1-1)。但张弦结构在大跨度建筑结构中的应用是从 20 世纪 80 年代开始的,该时期代表性的工程有:

(1) 日本某幼儿园的健身房,其屋盖采用的是平行布置的单榀张弦梁,平面尺寸为 $26\text{ m} \times 36\text{ m}$,上弦拱的矢高为 1.6 m ,下弦索的垂度为 0.4 m 。

(2) 日本大学体育馆,采用的是平行布置的微斜人字形张弦梁,其纵向间距为 5 m ,平面尺寸为 $58\text{ m} \times 85\text{ m}$ 。

(3) 1994 年建成的南斯拉夫贝尔格莱德体育馆(图 2-1-2),采用的是双向张弦梁结构,体育馆的纵向和横向分别布置 3 榀和 4 榀平面张弦梁,上弦梁采用钢筋混凝土梁,下弦为 8 束预应力筋,在纵横向张弦梁的交叉点处设置倒四角锥撑架。

(4) 日本的前桥绿色穹顶(图 2-1-3),平面为 $122\text{ m} \times 167\text{ m}$ 的椭圆,采用的是辐射状布置的张弦桁架结构(共 34 个平面张弦桁架),其上弦刚性受压构件采用 H 形钢桁架,下弦为钢缆。

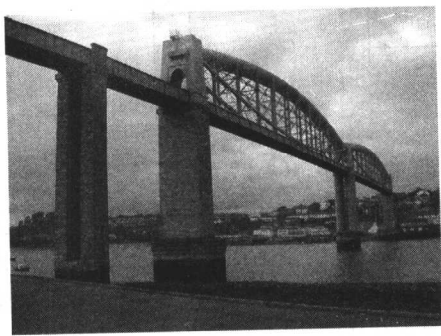


图 2-1-1 Royal Albert 桥

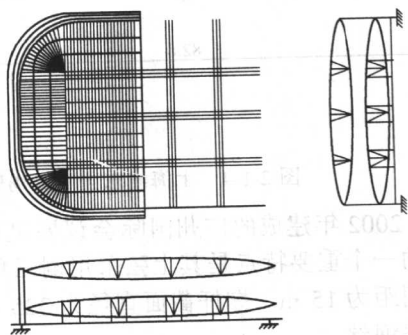


图 2-1-2 南斯拉夫贝尔格莱德体育馆部分结构形式

