

苏州奥林匹克体育中心 索网结构分析与施工

ANALYSIS AND CONSTRUCTION OF CABLE NET STRUCTURE OF
SUZHOU OLYMPIC SPORTS CENTER

朱明亮 罗 斌 郭正兴◎著

中国建筑工业出版社

苏州奥林匹克体育中心 索网结构分析与施工

朱明亮 罗 斌 郭正兴 著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

苏州奥林匹克体育中心索网结构分析与施工/朱明亮, 罗斌,
郭正兴著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 9
ISBN 978-7-112-22563-7

I. ①苏… II. ①朱… ②罗… ③郭… III. ①体育中心—悬索
结构—结构分析—苏州②体育中心—悬索结构—工程施工—苏州
IV. ①TU245

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 186593 号

本书在对索网结构特征和研究现状总结和概括的基础上, 以苏州奥林匹克体育中心体育场及游泳馆为工程实例, 对这种马鞍形索网结构分析、施工关键技术进行了详细的阐述。全书共分为上下两篇 13 章, 分别介绍了苏州奥林匹克体育中心体育场和游泳馆索网结构的分析与施工关键技术。上篇共 7 章, 详细介绍了体育场轮辐式马鞍形单层索网结构的分析与施工关键技术, 下篇共 6 章, 详细介绍了游泳馆马鞍形正交单层索网结构的分析与施工关键技术。

本书可供土木工程领域科研、设计和施工相关科技人员使用, 也可作为类似工程项目设计施工的参考书。

责任编辑: 李天虹
责任设计: 李志立
责任校对: 姜小莲

苏州奥林匹克体育中心索网结构分析与施工

朱明亮 罗斌 郭正兴 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
北京建筑工业出版社制版
北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14³/₄ 字数: 365 千字
2018 年 8 月第一版 2018 年 8 月第一次印刷
定价: 50.00 元

ISBN 978-7-112-22563-7
(32636)

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)

前 言

对于要求跨度大、重量轻的空间结构来说,拉索作为建筑材料相对于传统钢材和混凝土材料而言具有明显的优势。张力结构正是通过高强度的拉索创造出带有紧张感、力动感的大型内部空间,已成为建筑技术特别是体育场馆等大跨度空间结构技术进步的象征。索网结构是张力结构的一种重要形式,常应用在大跨度空间结构中,除了受力合理、能够充分利用材料强度、用钢量少等特点外,其建筑外形美观、新颖、轻巧。

苏州奥林匹克体育中心包含一场两馆,即体育场、体育馆和游泳馆,其中体育场和游泳馆均采用了索网结构。其中,体育场结构尺寸为 $260\text{m} \times 230\text{m}$,外环马鞍形高差为 25m ,整个挑篷结构的展开面积达到 31600m^2 ,是国内首座采用轮辐式单层索网结构的工程。主要由外压环梁、径向索以及内拉环索组成,这种结构体系具有全张力结构的受力特点,整个结构属于自平衡受力体系。外圈的倾斜 V 形柱在空间上形成了一个圆锥形空间壳体结构,从而形成刚性良好的屋盖支承结构,直接支撑顶部的外侧受压环。游泳馆采用马鞍形正交单层索网结构,由 V 形结构立柱、马鞍形环梁、承重索和稳定索、刚性屋面及幕墙构成,环梁投影为直径 106m 的圆形,拉索采用定长双索。

本书在对索网结构特征和研究现状总结和概括的基础上,以苏州奥林匹克体育中心体育场及游泳馆为工程实例,对这种马鞍形索网结构分析、施工关键技术进行了详细的阐述。

本书是由东南大学土木工程学院土木工程施工研究所长期从事预应力空间结构教学、科研和工程实践的科技工作者,根据苏州奥林匹克体育中心体育场及游泳馆工程实践过程中形成的科研成果及施工经验精心撰写的一本专著。详细论述了苏州奥林匹克体育中心体育场及游泳馆的设计与施工中的基础理论和技术问题。

本书共分为上下两篇 13 章,分别介绍了苏州奥林匹克体育中心体育场和游泳馆索网结构的分析与施工关键技术。上篇共 7 章,详细介绍体育场轮辐式马鞍形单层索网结构的分析与施工关键技术,下篇共 6 章,详细介绍了游泳馆马鞍形正交单层索网结构的分析与施工关键技术。

本书可供土木工程领域科研、设计和施工相关科技人员使用,也可作为类似工程项目设计施工的参考书。

本书由东南大学土木工程学院朱明亮副教授、罗斌教授、郭正兴教授撰写,最后由郭正兴教授审定。撰写过程中,东南大学土木工程学院硕士研究生夏晨、魏程峰、孙岩等参与了有关章节的素材收集与绘图制表工作,谨在此表示衷心的感谢。同时对本书中所参考和引用过的文献资料的作者也一并表示感谢。

鉴于作者的水平有限,面广量大,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

前 言

上 篇 苏州奥林匹克体育中心体育场轮辐式马鞍形单层索网结构分析与施工

第 1 章 轮辐式索网结构概述	3
1.1 轮辐式索网结构形式及分类	3
1.1.1 轮辐式索网结构形式	3
1.1.2 轮辐式索网结构分类	5
1.2 轮辐式索网结构工程应用	7
1.2.1 国外工程实践	7
1.2.2 国内工程实践	9
1.3 国内外研究现状	10
1.3.1 索网结构的找形分析研究	11
1.3.2 轮辐式索网结构的性能研究与设计	12
1.4 苏州奥林匹克体育中心体育场工程简介	15
第 2 章 体育场轮辐式索网结构设计和施工方案简介	18
2.1 设计方案简介	18
2.1.1 结构几何尺寸	18
2.1.2 构件材料和规格	18
2.1.3 结构关键节点	20
2.1.4 设计荷载条件	25
2.2 施工方案简介	27
2.2.1 整体结构施工顺序	28
2.2.2 索网结构施工方案	28
2.2.3 施工难点及对策	29
第 3 章 体育场轮辐式索网结构形态研究	34
3.1 零状态找形理论	35
3.1.1 全结构零状态找形分析	36
3.1.2 索杆结构找力分析	37
3.2 体育场轮辐式索网结构零状态找形分析	38
3.2.1 分析模型参数	38
3.2.2 分析结果	43

第 4 章 轮辐式索网结构静力性能参数化分析 47

4.1 引言 47

4.2 简化八索模型的刚度影响因素 48

4.3 索网结构形状对静力性能影响 52

4.3.1 内环平面投影形状的影响 53

4.3.2 内环平面投影面积的影响 62

4.3.3 外环马鞍形曲面高差的影响 68

4.3.4 小结 78

4.4 拉索预应力和截面积对静力性能的影响 78

4.4.1 拉索初始预应力的影响 78

4.4.2 拉索截面积的影响 83

4.4.3 小结 88

第 5 章 体育场轮辐式索网结构分析 89

5.1 结构分析模型 89

5.1.1 分析软件及单元类型 89

5.1.2 材料特性 89

5.1.3 分析荷载工况 89

5.2 柱脚滑动机制研究及侧向刚度影响分析 91

5.2.1 柱脚支座滑动机制对结构性能的影响 91

5.2.2 整体结构侧向刚度的影响因素研究 97

5.3 外环梁刚度对结构的影响分析 101

5.3.1 受压外环梁刚度分析 101

5.3.2 外环梁刚度对静力性能影响 102

5.3.3 小结 106

5.4 结构自振特性研究 106

5.4.1 自振特性求解的基本理论 106

5.4.2 体育场整体结构自振特性分析 107

5.4.3 屋盖周边支承体系对自振特性影响 109

5.4.4 小结 111

第 6 章 体育场轮辐式索网结构施工全过程分析 112

6.1 引言 112

6.2 基于非线性动力有限元的索杆系静力平衡态找形分析理论 113

6.2.1 分析方法 113

6.2.2 关键技术措施 115

6.3 体育场轮辐式索网结构施工全过程分析 117

6.3.1 分析模型 117

6.3.2 分析参数 117

6.3.3 施工全过程索网位形变化 118

6.3.4 施工全过程索力变化 123

6.3.5	施工全过程钢结构应力变化	126
6.3.6	施工全过程钢环梁变形分析	129
6.3.7	施工全过程支撑胎架受力分析	137
第7章	体育场索长和外联节点坐标随机误差组合影响分析	139
7.1	索长和外联节点坐标随机误差影响分析方法	139
7.1.1	误差分布模型	141
7.1.2	误差组合	142
7.2	体育场轮辐式索网结构误差影响分析结果	144
7.2.1	不同分布模型下索长误差影响对比分析	144
7.2.2	径向索和环索索长误差影响对比分析	145
7.2.3	索长和外联节点坐标组合随机误差影响分析	146

下 篇 苏州奥林匹克体育中心游泳馆马鞍形正交单层索网结构设计
与施工

第8章	正交单层索网结构概述	151
8.1	正交单层索网结构形式及工程应用	151
8.1.1	正交单层索网结构形式	151
8.1.2	正交单层索网结构工程应用	152
8.2	国内外研究现状	154
8.2.1	索网结构找形研究	154
8.2.2	索网结构静动力性能研究	155
8.3	苏州奥林匹克体育中心游泳馆工程简介	156
8.3.1	工程概况	156
8.3.2	结构特点	157
第9章	游泳馆正交单层索网结构设计施工方案简介	158
9.1	设计方案简介	158
9.1.1	结构构成与几何尺寸	158
9.1.2	构件材料与规格	159
9.1.3	构件连接	160
9.1.4	荷载条件	162
9.1.5	特殊设计要求	163
9.2	施工方案简介	164
9.2.1	游泳馆总体施工方案	164
9.2.2	正交单层索网结构施工的整体提升法	165
9.2.3	正交单层索网结构施工的高空组合法	170
9.2.4	施工方案对比	172
第10章	游泳馆正交单层索网结构零状态找形分析	174
10.1	索网结构零状态找形方法	175
10.1.1	全结构零状态找形分析	175

10.1.2 索杆系子结构零状态找形分析 175

10.2 索网结构找力方法 176

10.2.1 拉索等效预张力找力分析 176

10.2.2 找力分析实施步骤 177

10.3 游泳馆正交单层索网结构零状态找形分析 178

10.3.1 分析模型参数 179

10.3.2 正交单层索网结构零状态找形分析结果 179

第 11 章 游泳馆正交单层索网结构施工过程模拟分析 182

11.1 整体牵引提升施工过程模拟 182

11.2 索网高空组装施工过程模拟 193

第 12 章 游泳馆正交单层索网结构索长误差影响分析 195

12.1 误差分析方法 195

12.2 游泳馆索长误差影响分析 197

12.2.1 误差模拟 197

12.2.2 误差条件 198

12.2.3 误差分析 198

12.2.4 小结 202

第 13 章 游泳馆正交单层索网结构设计优化分析 203

13.1 马鞍形索网 V 形钢结构柱研究 203

13.1.1 V 形柱激活批次分析研究 203

13.1.2 V 形柱倾角分析 211

13.2 环梁刚度对比分析 217

13.2.1 工况设置及对比 217

13.2.2 小结 222

参考文献 223

上 篇

苏州奥林匹克体育中心体育场 轮辐式马鞍形单层索网结构与施工

第 1 章 轮辐式索网结构概述

随着社会和经济的发展，人们对大跨度和具有更高结构效率的空间建筑的需求在逐步增大。近年来，大跨度空间结构在体育场馆、会展中心、候车（机）大厅以及其他需要大空间的公共建筑中得到了广泛的应用和发展。作为空间结构体系的一种，轮辐式索网结构体系对结构设计提出了更高的要求，对该类结构的施工分析和成形方法研究具有重要的意义。

1.1 轮辐式索网结构形式及分类

1.1.1 轮辐式索网结构形式

大跨度空间结构的种类丰富，大致可以根据构成要素的不同分为三类：第一类是以刚性构件（梁、桁架、杆件等）组成的，如国家体育场以 24 榀门式刚架旋转布置形成屋盖主体，如图 1-1 所示；第二类是以柔性拉索为主、配以少量受压刚性构件形成的，或者完全由拉索构成的，如索穹顶结构（亚特兰大佐治亚穹顶、无锡太湖新区科技交流中心索穹顶，如图 1-2 所示）、索网结构（深圳宝安体育场、伦敦奥运会自行车馆，如图 1-3 所示）；第三类是刚性构件和拉索杂交形成，二者对结构受力的作用不可分割，如张弦梁结构（南京河西会展中心，如图 1-4 所示）和弦支穹顶结构（北京工业大学体育馆，如图 1-5 所示。）

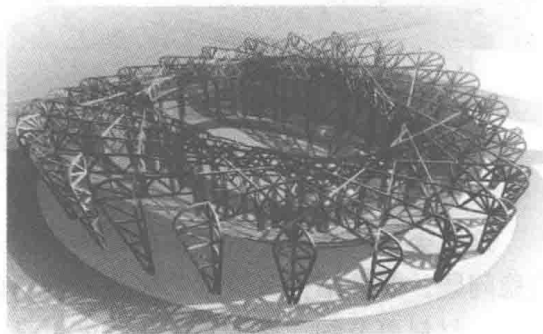
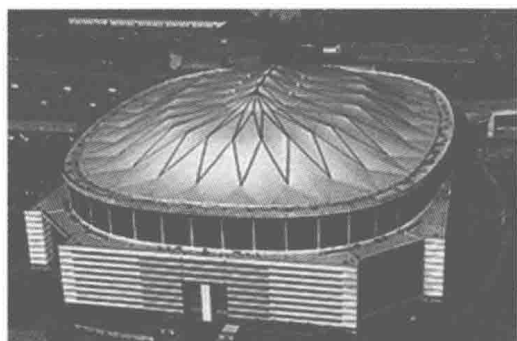
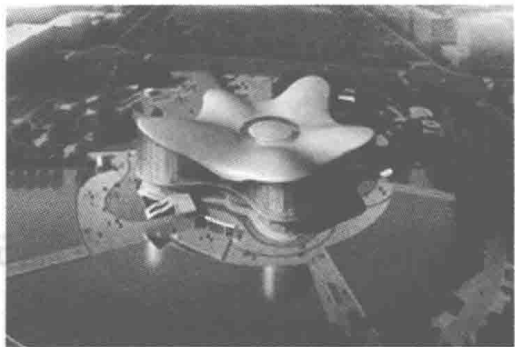


图 1-1 刚性结构（国家体育场）

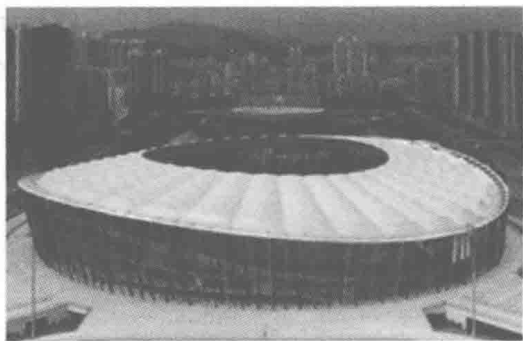


(a) 亚特兰大佐治亚穹顶

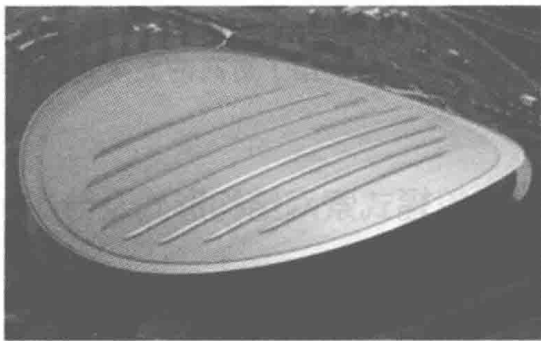


(b) 无锡太湖新区科技交流中心索穹顶

图 1-2 索穹顶结构



(a) 深圳宝安体育场



(b) 伦敦奥运会自行车馆

图 1-3 索网结构



图 1-4 南京河西会展中心



图 1-5 北京工业大学体育馆

这三类结构相比，柔性结构是构件受力效率最高的，拉索全截面受拉，不存在构件的失稳问题。柔性结构又被称为张力结构，此类结构的自重轻，受力效率高，具有适应跨度更大、材料更节约、现场装配化程度更高、施工速度更快和施工环境更加环保等优点。

作为一种典型的张力结构，轮辐式索网结构是从自行车轮辐的受力机理演化而来的（如图 1-6 所示），其构成特点是：有一个刚度较大的受压外环，通过沿径向布置的拉索或

索桁架连到中心受拉内环索，拉索或索桁架的张拉力与外环的压力平衡，整个结构属于自平衡受力体系。

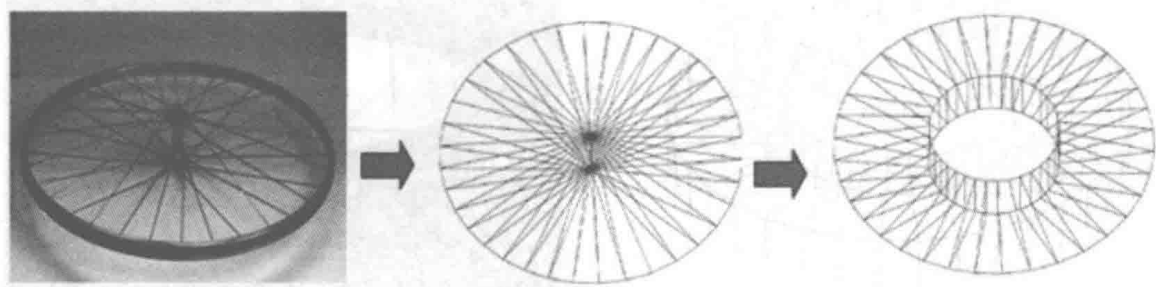


图 1-6 轮辐式索网结构演变过程

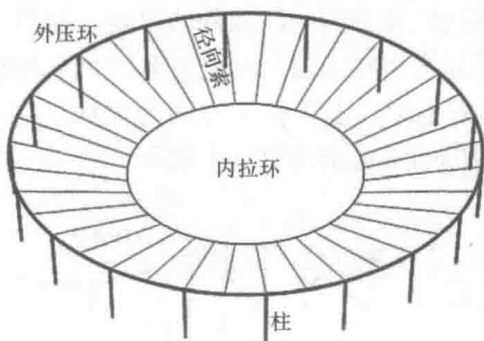
为明确轮辐式索网结构的范畴，总结其特征如下：1) 结构呈闭合的环形布置，可以是圆形、椭圆形甚至方形；2) 主承重结构为张力结构，包含外压环、内拉环以及连系两者的拉索，平面内自平衡，拉索不需要额外的基础锚固；3) 外压环与内拉环之间的拉索形成网格，方便覆盖膜面或其他材料。

轮辐式索网结构体系具有全张力结构的受力特点，同时克服了一般全张力结构体系复杂、传力不直接的缺点，这种结构通常屋面表面覆盖膜材，自重轻，结构轻巧美观，主要用于大型体育场馆等建筑。

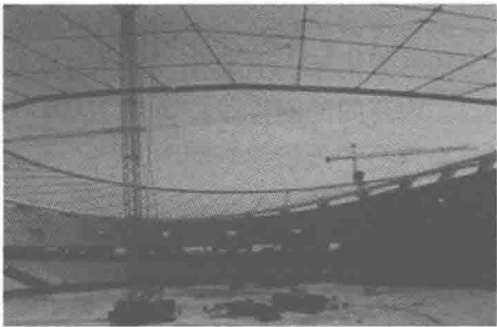
1.1.2 轮辐式索网结构分类

轮辐式索网结构按照径向索的层数划分，可分为单层和双层两类。

单层轮辐式张拉结构，一般其外压环高低起伏，从而形成了马鞍形的空间曲面造型，马鞍形形状的屋盖可以为单层轮辐式索网结构提供较大的竖向刚度。中间的圆环是为了体育场功能的需要而设置的，其作用是将径向索连系起来，形成封闭的传力途径。如果屋盖是完全轴对称的，则索系与外压环形成的结构体系是完全自平衡的。这种类型的结构摆脱了以往对重屋面的依赖，可以和膜材相配合，使屋面轻盈通透，如图 1-7 所示。



(a) 结构简图

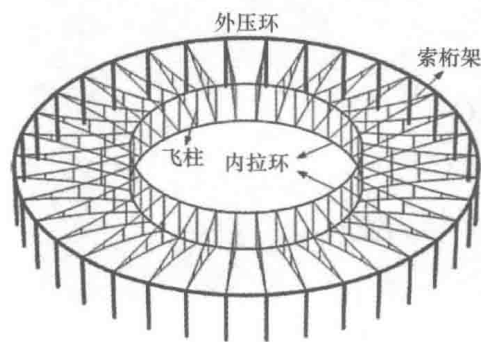


(b) 工程应用现场图

图 1-7 单层轮辐式索网结构

双层轮辐式张拉结构，实质上就是辐射状布置的索桁架结构，其基本结构包括内拉环、外压环、索桁架：内拉环可以是柔性拉索，也可以是刚性环；外压环受压弯作用，常

见的构件形式都可以采用，如钢筋混凝土梁、钢箱梁、钢桁架等，如图 1-8 所示。



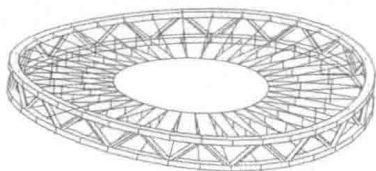
(a) 结构简图



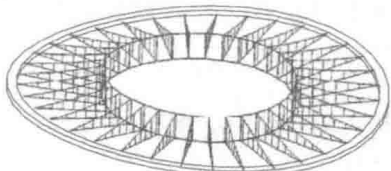
(b) 工程应用现场图

图 1-8 双层轮辐式索网结构

双层轮辐式索网结构的造型比单层轮辐式索网结构更加丰富，两种常见的双层轮辐式索网结构形式（图 1-9）：一种是双层外压环和单层内拉环，如佛山世纪莲体育场；另一种则是单层外压环和双层内拉环，如深圳宝安体育场。



(a) 双层外压环和单层内拉环

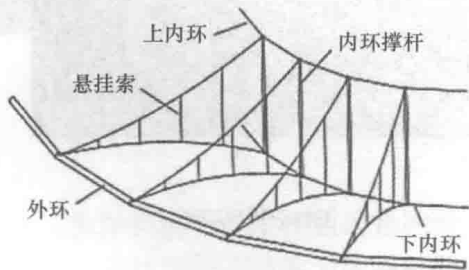


(b) 单层外压环和双层内拉环

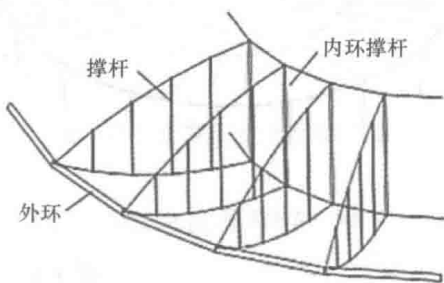
图 1-9 双层轮辐式张拉结构分类

双层轮辐式索网结构中，由外向内向下倾斜的径向索是承重索，由外向内向上倾斜的径向索是稳定索。因此，与单层轮辐式索网结构不同，双层轮辐式索网结构的造型不一定要做成马鞍形曲面。当然，由于这种结构多用于体育场馆的屋盖，体育建筑功能上的要求一般会将其做成马鞍形曲面，但并不是受力原理上的要求。

根据索桁架的布置形式，可以将双层轮辐式索网结构分为内凹和外凸两类，如图 1-10 所示。内凹形索桁架，上下弦索之间由悬挂索连系起来，在双层内环或外环之间有刚性压杆（在双层内环间的刚性压杆称为飞柱）。外凸形索桁架，上下弦索之间为撑杆。这两者的区别是，外凸的索桁架有侧向失稳的可能，而内凹的索桁架没有这个问题。



(a) 内凹形



(b) 外凸形

图 1-10 双层轮辐式张拉结构索桁架布置形式

1.2 轮辐式索网结构工程应用

截至目前，国内外已经建成了多座轮辐式索网结构建筑，这些建筑主要应用在举行大型体育赛事的体育场建筑中，主要分布在美国、日本、韩国等经济发达国家和地区，近年来，随着中国社会和经济的快速发展，目前也建成了若干座轮辐式索网结构。这些国内外工程中，除贾比尔·艾哈迈德体育场和苏州奥林匹克体育中心体育场为单层轮辐式索网结构，其余均为双层轮辐式索网结构，如表 1-1 所示。

国内外主要轮辐式索网结构工程 表 1-1

工程名称	建成年份	索系层数	屋面形式	国家/地区
北京工人体育馆	1961	双层	膜面	中国
戈特利布·戴姆勒体育场	1993	双层	膜面	德国
马来西亚科隆坡室外体育场	1998	双层	膜面	马来西亚
韩国釜山体育场	2002	双层	膜面	韩国
佛山世纪莲体育场	2006	双层	膜面	中国
贾比尔·艾哈迈德体育场	2009	单层	膜面	科威特
深圳宝安体育场	2010	双层	膜面	中国
浙江乐清体育场	2012	双层	膜面	中国
盘锦红海滩体育场	2013	双层	膜面	中国
苏州奥林匹克体育中心体育场	2018	单层	膜面	中国

1.2.1 国外工程实践

马来西亚科隆坡室外体育场建成于 1998 年（图 1-11），其平面为椭圆形，长轴 286m，短轴 225.6m，罩篷宽 66.5m。体育场采用环形索膜结构，从而创造出 38000m²的无柱有顶空间。

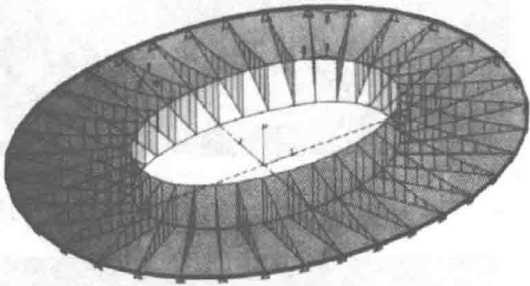


图 1-11 科隆坡室外体育场（双层）

应用于 2002 年足球世界杯的韩国釜山体育场（图 1-12），屋盖结构的总体形状为一个直径 228m 的圆，中间椭圆形开口尺寸为 180m×152m，屋盖的内部结构是由上下环向拉索和 48 榀径向索桁架构成，这些径向索桁架用于连接上、下环向拉索和斜钢柱。

此外还有科威特的贾比尔·艾哈迈德体育场（图 1-13）、德国斯图加特的戈特利布·戴姆勒体育场（图 1-14）、应用于 2012 年的欧洲杯足球赛的波兰华沙国家体育场（图 1-

15)、乌克兰奥林匹克体育场（图 1-16）都为轮辐式索网结构。

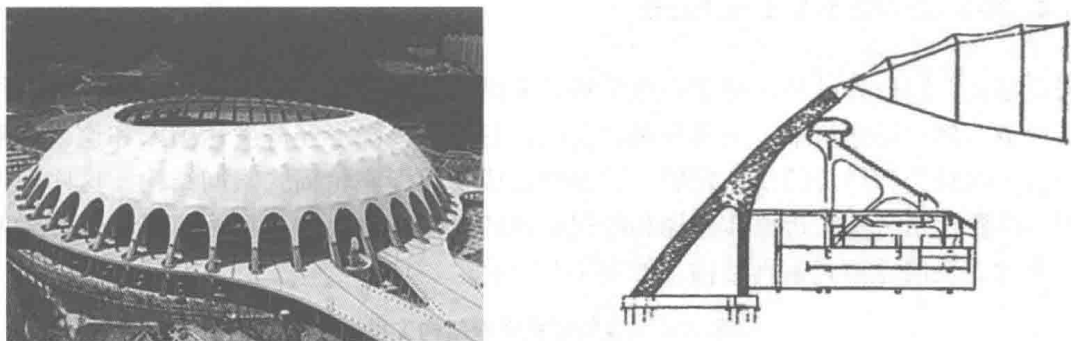


图 1-12 釜山体育场（双层）

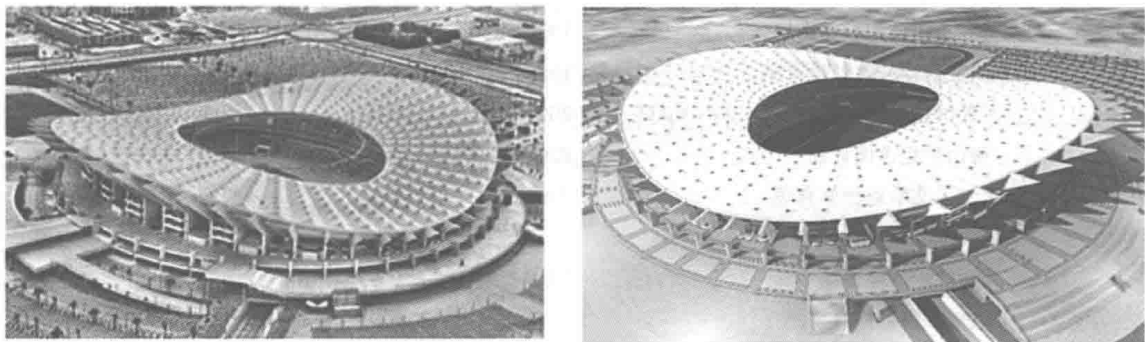


图 1-13 贾比尔·艾哈迈德体育场（单层）

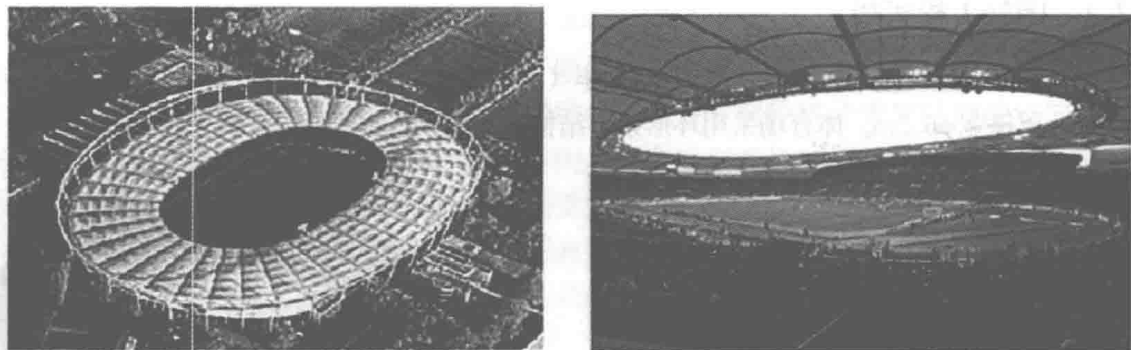


图 1-14 戈特利布·戴姆勒体育场（双层）

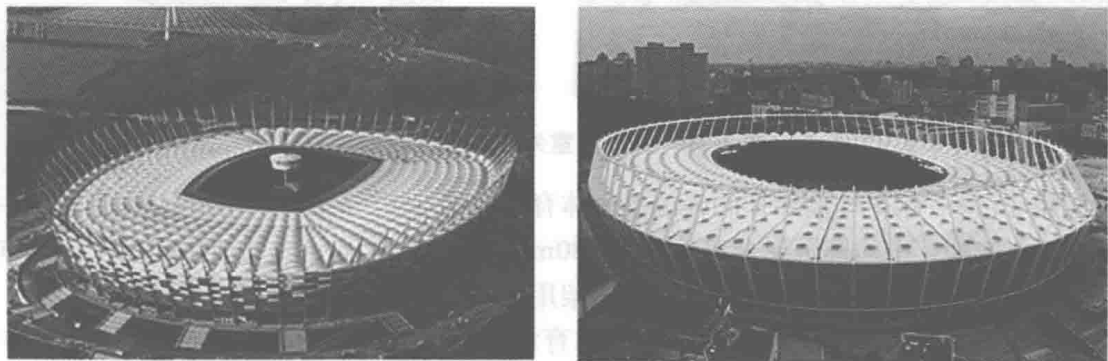


图 1-15 华沙国家体育场（双层）

图 1-16 乌克兰奥林匹克体育场（双层）

1.2.2 国内工程实践

北京工人体育馆是我国最早的轮辐式索网结构（图 1-17），建于 1961 年。屋盖结构平面投影为圆形，直径 94m，在空间上呈中心对称的圆锥面。中央是一个直径 16m、高 11m 的刚性内环，由钢板和钢筋制成；外环为混凝土环梁，截面为 $2\text{m} \times 2\text{m}$ ，与下部混凝土支撑柱刚接。上下径向索各为 144 根平行钢丝束，上径向索规格为 $72\phi 5$ ，下径向索规格为 $40\phi 5$ 。施工时，采用搭设胎架安装内环，分批张拉径向索的施工方法。

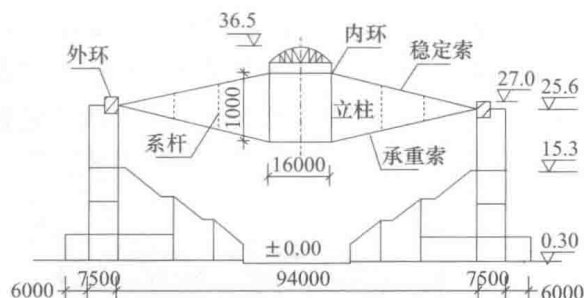


图 1-17 北京工人体育馆（双层）

2006 年建成的佛山世纪莲体育场（图 1-18），屋盖结构属于双外环、单内环的轮辐式索网结构，屋盖支承完全独立于看台结构。该屋盖平面投影为圆形，上外环直径 331m，下外环直径 276.15m，内环直径 80m。上下外环高差为 20m，由 V 字形撑杆连接。上下径向索之间的吊索由一榀索桁架的上径向索连向相邻索桁架的下径向索，形成波折屋面，正好为膜材的铺设及成形提供了条件。屋盖支承在倾斜的混凝土柱上，柱子与屋盖结构之间采用铰接。该屋盖结构在施工中采用整体张拉的施工方法：首先在胎架上搭设钢结构环梁，然后在场地内展开内环索和径向索；之后张拉上径向索，再张拉下径向索，最后安装膜面。

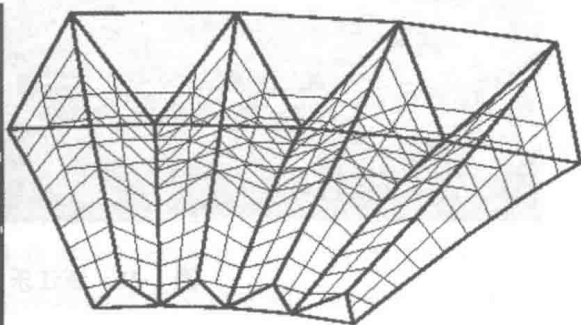
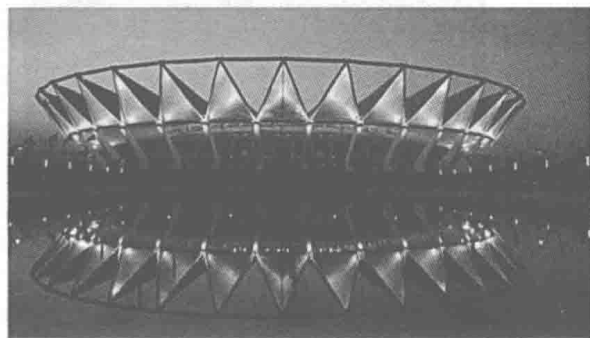


图 1-18 佛山世纪莲体育场（双层）

2010 年建成的深圳宝安体育场屋盖结构采用双内环、单外环的轮辐式索网结构（图 1-19）。整个体育场的平面为直径 245m 的圆形，主结构平面投影略显椭圆形（长轴 237m，短轴 230m，进深 54m）。该屋盖结构共有一个外部的压环，两个中央的拉环。外部的压环呈马鞍形，其高点和低点之间的高差为 9.65m。