

# 索结构 典型工程集

(下册)

张毅刚 主 编

秦 杰 郭正兴 副主编

徐瑞龙 王德勤

中国建筑工业出版社

# 索结构典型工程集

( 下册 )

张毅刚 主 编

秦 杰 郭正兴 副主编

徐瑞龙 王德勤

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

索结构典型工程集 (下册) / 张毅刚主编. — 北京: 中国  
建筑工业出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-112-15923-9

I. ①索… II. ①张… III. ①悬索结构—建筑工程—  
中国 IV. ①TU351

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 229063 号

责任编辑: 刘瑞霞 辛海丽

责任设计: 董建平

责任校对: 张颖 关健

## 索结构典型工程集

(下册)

张毅刚 主编

秦杰 郭正兴 徐瑞龙 王德勤 副主编

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京京点设计公司制版

北京画中画印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17 字数: 422 千字

2013 年 11 月第一版 2013 年 11 月第一次印刷

定价: 148.00 元

ISBN 978-7-112-15923-9

(24729)

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)

# 编委会

- 主 编** 张毅刚（北京工业大学）
- 副主编** 秦 杰（北京建工集团有限责任公司）  
郭正兴（东南大学）  
徐瑞龙（北京市建筑工程研究院有限责任公司）  
王德勤（北京德宏幕墙工程技术研究中心）
- 编 委**（按姓氏笔画排序）
- 王元清（清华大学）  
王双军（沈阳远大铝业工程有限公司）  
王秀丽（兰州理工大学）  
亢国雷（巨力索具股份有限公司）  
朱万旭（欧维姆机械股份有限公司）  
刘 枫（中国建筑科学研究院）  
刘 健（中国建筑科学研究院深圳分院）  
孙 坚（深圳三鑫幕墙工程有限公司）  
李亚明（上海建筑设计研究院有限公司）  
李海旺（太原理工大学）  
吴金志（北京工业大学）  
吴耀华（中冶建筑研究总院有限公司设计院）  
何志军（同济大学建筑设计研究院）  
陈志华（天津大学）  
罗 斌（东南大学）  
罗永峰（同济大学）  
罗尧治（浙江大学）  
周 岱（上海交通大学）  
赵 波（坚朗五金制品有限公司）  
袁行飞（浙江大学）  
钱英欣（北京市建筑工程研究院有限责任公司）  
黄拥军（北京江河幕墙股份有限公司）  
曹正罡（哈尔滨工业大学建筑设计研究院）  
梁存之（建研（北京）结构工程有限公司）

# 序

中国现代悬索结构的发展始于 20 世纪 50 年代后期，北京工人体育馆的圆形车辐式双层索系（直径 96m）和杭州浙江人民体育馆的双曲抛物面索网（80m×60m 椭圆平面）是当时的两个代表作。大家知道，世界上第一个现代悬索结构是美国于 1953 年建成的 Raleigh 体育馆，采用以两个斜放的抛物线拱为边缘的鞍形索网（平面尺度 91.5m×91.5m）。我国建造的上述两个悬索结构无论是从规模大小或技术水平来看，在当时都可以说是达到国际较先进水平的。但此后，我国悬索结构发展停顿了一段时期，一直到 20 世纪 80 年代初期，在改革开放的大局面下，蓬勃兴起的生产建设形势对包括悬索结构在内的各种新颖空间结构体系的发展起到了良好的刺激作用。单层悬索、双层索系、索网结构、索-梁体系、索拱体系、斜拉体系等各种悬索结构形式都得到了不同程度的研究、开发和工程应用，反映了我国科技人员对结构创新的热情和建设科技水平的提高。

我本人也是在那个时期加入到空间结构的研究行列中来的，而且参与的第一个工程就是悬索结构。1982 年建筑系的梅季魁教授承接了吉林滑冰馆的设计任务，找我配合做结构，希望在结构形式上有所创新。我们结合建筑方案特点决定采用一种新的预应力双层悬索系统，希望以此来促进悬索结构在我国的发展。我当时对悬索结构也不熟悉，硬着头皮对有关文献钻研了几个月，推导了预应力双层索系的全套解析理论，总算把这一设计任务顶了下来。以此为契机，三十年来与空间结构结下了不解之缘，但始终对悬索结构情有独钟。

悬索结构在 20 世纪 90 年代曾有一段时期的沉寂，我把它理解为我国新兴的索结构行业在成长过程中的休整并进一步积蓄力量的过程。果然，从 20 世纪末开始，随着我国经济的快速发展，悬索结构重新活跃起来，并且呈现出许多新的特点。例如，相对于传统的采用刚性屋面的悬索屋盖，由索和膜两种材料联合运用而形成的柔性张力结构，即所谓的索膜结构取得了快速发展；将索与刚性构件联合运用形成的轻型混合体系，例如各种张弦结构，在大跨度屋盖中获得了广泛应用；以各种形式索系为承重结构的玻璃幕墙和采光屋顶是近年来悬索结构广泛应用的一个新领域。这些特点说明，我国的悬索结构进入了一个欣欣向荣、丰富多彩的发展阶段。

---

2010年中国钢结构协会空间结构分会成立了张毅刚教授为主任的索结构专业委员会，聚集了国内热心索结构研究与工程应用的学者和工程技术人员。他们选择了亲身参与的近十年来100个索结构典型工程，包括了十类索结构体系，对它们的设计、构造和施工技术进行了详细介绍，汇集成这本书，做了一件非常有意义的事。这本书既是十年来我国索结构发展历程的记录，也充分反映了我国工程科技人员在索结构体系创新方面的探索。值得指出的是，由于不少施工企业的工程人员参与了本书的编写，书中充分关注了索结构的建造技术，包括预应力张拉控制、施工过程数值模拟和施工检测等方面的介绍。这也是十年来索结构技术发展中进步最快的方面，有了这方面经验的积累，我国索结构的发展必将更加迅速。实际上，我国十余年来索结构的健康快速发展也充分反映了企业逐渐成为科技创新的主体这一事实。

这类以工程案例为主的书还不多，相信这本书的出版，将为索结构的设计与施工单位提供非常宝贵的参考资料，为我国索结构的进一步发展作出贡献。爰为之序，与同仁们共勉。

张毅刚

于哈尔滨工业大学  
2013年10月10日

# 前言

索作为主要承重构件应用于建筑结构始于 20 世纪 50 年代，从诞生之日起，索结构就以其轻盈的体态、合理的受力与优美的造型吸引了建筑师与结构工程师们的关注，迅速发展成为建筑结构大家族中的一个分支。六十多年来，索结构的发展更是日新月异。从早年以索悬吊为主的单索发展到索网、索桁架、索穹顶，再到将柔性的索与刚性结构相结合创新出斜拉结构、张弦结构、拉索拱结构、弦支穹顶等各种索结构体系，充分展示了人类的聪明才智。

我国关于索结构的研究与工程实践与国际上索结构发展基本同步，一些 20 世纪 60 年代建成的著名工程，如北京工人体育馆悬索结构，至今仍然为人们津津乐道。20 世纪 80 年代末为承接北京亚运会建成的国家奥林匹克中心综合馆、游泳馆斜拉结构、北京朝阳体育馆索拱结构、吉林滑冰馆索桁架等工程充分展示了当年我国索结构的建造水平。尽管索结构的工程应用后来有过一段时间的沉寂，但是我国建筑科研人员与工程技术人员关于索结构的分析理论、建造技术以及索具制作的研究一直奋斗不止、厚积待发。

20 世纪末我国经济进入快速发展的轨道，大跨度大空间建筑需求日益增加，建筑功能和类型多样化要求日益强烈，索结构再次引起人们的关注。以 1999 年 9 月采用张弦结构的上海浦东国际机场（一期）航站楼竣工投入运营为标志，索结构的应用进入迅速发展的新阶段。尤其近十年来，各种类型的索结构已经发展成为大跨度大空间建筑的主角。

随着索结构的应用，人们越来越认识到预应力的施加及施工过程的仿真模拟是一个索结构工程能否成功建造的关键。然而关于索结构工程的报道散见在各种论文、刊物中，而且关于分析理论的报道居多，关于施工技术的报道显得不足。我们这些从事索结构研究与施工的学者与工程技术人员一直希望能够结合自己的体会，把亲手参与建成的那些索结构工程的特点、具体建造技术、施工模拟及监测技术系统地进行总结，并详尽地介绍给同行。

为此，我们在直接参与施工或咨询的工程中，挑选了近十年建成的、具有不同特点的 100 个工程，以图文并茂的方式写成这本典型工程集，展

现给读者。每个工程包括：概况、设计特点、施工特点和工程图片，并选择其中部分工程介绍施工模拟分析和施工过程监测。本书希望成为一部纪录片，向读者忠实展现近十年索结构建造技术的发展历程，留下宝贵的资料与读者交流。同时，也希望夯实索结构发展基础，以期推动索结构发展百尺竿头、更进一步。

全书涵盖十种类型索结构工程，分为上下两册，上册包括：单向张弦结构、双向张弦结构、空间张弦结构、弦支穹顶结构和管内索结构共五章；下册包括：悬索结构、索穹顶结构、拉索拱结构、斜拉结构和幕墙索结构共五章。每章分类型按照工程主体结构完成时间的先后顺序编排，从中也能看出各类索结构建造技术的发展。

本书编委会由中国钢结构协会空间结构分会索结构委员会全体委员和参与组织资料并编写的有关人员组成。编委会集体讨论了编写大纲，具体由参与索结构工程施工或咨询的编委会成员组织并撰写，尽可能列出工程的设计、总包、钢结构和索结构施工、索具生产等单位，全书由张毅刚、秦杰进行统稿。限于掌握的资料有限，肯定还有优秀的索结构工程没能包括在内，敬请同行们谅解。

由于编撰时间相对仓促，加之水平有限，疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。值此书稿完成之际，还要由衷地感谢巨力索具股份有限公司为本书出版提供的大力支持。

谨以此书祝贺中国钢结构协会空间结构分会成立二十周年，与热心我国索结构发展的同行们共勉。

编委会

2013年9月



# 目 录

## 下 册

第 6 章 悬索结构	1
6.1 引言	1
6.2 双层内拉环辐射索系	5
6.2.1 中关村软件园软件广场	5
6.2.2 广州中洲中心	9
6.2.3 成都金沙遗址博物馆采光顶	13
6.2.4 天津慈海桥摩天轮	17
6.2.5 深圳市宝安体育场	21
6.2.6 佛山（国际）家居博览城	28
6.3 单层内拉环辐射索系	31
6.3.1 佛山市体育中心世纪莲体育场	31
6.3.2 乐清市体育中心体育场	36
6.3.3 盘锦市体育中心体育场	43
6.4 索网	49
6.4.1 天津一汽丰田成品车存放场	49
6.5 索桁架	54
6.5.1 扬州游泳跳水馆	54
6.5.2 良乡污水处理厂	58
6.6 劲性索	63
6.6.1 北京南站	63
第 7 章 索穹顶结构	67
7.1 引言	67
7.2 无锡太湖新区科技交流中心	70
7.3 鄂尔多斯市伊旗全民健身中心	75
7.4 中国（太原）煤炭交易中心展览中心	82

---

第 8 章	拉索拱结构	88
8.1	引言	88
8.2	北京海关总署办公楼改造工程	90
8.3	郑州新郑国际机场航站楼改扩建工程	93
8.4	天津米立方	98
8.5	青岛北站	101
第 9 章	斜拉结构	107
9.1	引言	107
9.2	单支承斜拉结构	109
9.2.1	郑州国际会展中心会议中心	109
9.2.2	南京市江宁体育中心体育馆	114
9.2.3	鄂尔多斯东胜体育场	120
9.3	多支承斜拉结构	127
9.3.1	南京市江宁体育中心体育场	127
9.3.2	广州大学城中心区体育场	133
9.3.3	北京工人体育场灯架工程	137
9.3.4	营口体育场	141
9.3.5	天津海滨国际会展中心(二期)	146
9.3.6	北京首都机场南线收费站大棚	150
9.3.7	浙江大学紫金港校区体育馆	154
9.3.8	连云港市体育中心体育场	161
9.4	后背斜拉结构	166
9.4.1	国家奥林匹克体育中心体育场	166
9.4.2	安徽大学新校区体育场	170

第 10 章 幕墙索结构	174
10.1 引言	174
10.2 索桁架幕墙	176
10.2.1 广州新白云国际机场	176
10.2.2 广州国际会议展览中心	180
10.3 单索幕墙	184
10.3.1 北京联想园区 C 座	184
10.3.2 天津天城大厦	188
10.3.3 中国国际贸易中心三期	194
10.4 平面索网幕墙	197
10.4.1 新保利大厦	197
10.4.2 中国石油大厦	203
10.4.3 重庆江北国际机场 T2A 航站楼	207
10.4.4 昆明新机场航站楼	211
10.4.5 嘉铭中心	217
10.4.6 武汉保利文化广场	220
10.4.7 国家开发银行	224
10.4.8 国家电网公司生产调度中心 (南京)	230
10.5 曲面索网幕墙	237
10.5.1 北京长安中心	237
10.5.2 中国航海博物馆	242
10.5.3 东莞篮球中心主体育馆	246
10.5.4 人民日报社报刊综合业务楼	254

# 第 6 章 悬索结构

## 6.1 引言

人类很早就认识到拉住只能承受拉力的绳索两端，形成悬垂状，可以承受竖向荷载，我国人民两千年前就开始使用悬挂的概念建造桥梁，如公元前 285 年，四川灌县跨越岷江的悬挂竹索桥——安澜桥，1703 年用铁链悬挂的横跨大渡河的泸定桥。随着钢材的应用，现代化的大跨度悬索桥开始出现，近年已经超过千米跨度。从 20 世纪 50 年代起，悬挂理念开始应用到房屋建筑中。以一系列受拉的由高强钢丝组成的钢绞线、钢丝束或高强钢拉杆作为主要承重构件，按一定规律组成各种不同形式的体系，并悬挂在相应的支承结构上，就形成了悬索结构体系。1953 年美国建成了世界上第一个悬索屋盖 Raleigh 体育馆，采用两个斜放的抛物线拱为支承的鞍形索网，此后悬索结构取得了迅速的进步。近年来已经发展形成平行布置单层索系（图 6.1.1）、鞍形索网（图 6.1.2）、索桁架（图 6.1.3）和辐射布置双层索系（图 6.1.4）等各种形式。

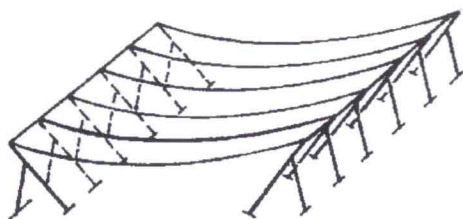


图 6.1.1 平行布置单层索系

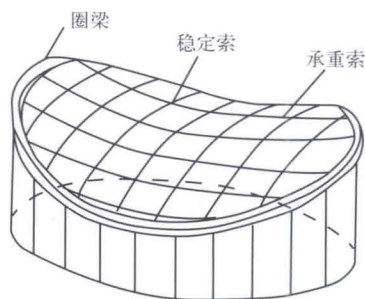


图 6.1.2 鞍形索网

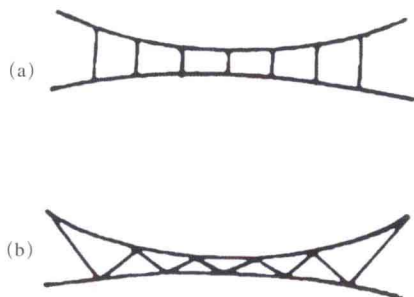


图 6.1.3 索桁架

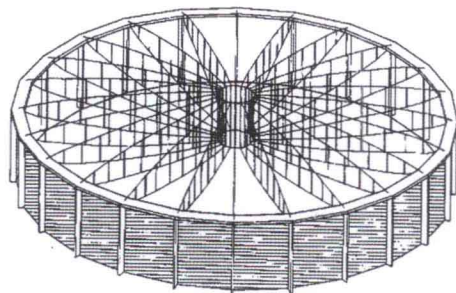


图 6.1.4 辐射布置双层索系

我国自 20 世纪 60 年代开始就成功建造了悬索结构。

1961 年建成的北京工人体育馆屋盖采用辐射布置双层索系（图 6.1.5），96m 跨，截面  $2\text{m} \times 2\text{m}$  的钢筋混凝土外环梁支承在 48 根圆柱上；钢内环直径 16m，高 11m，由上下弦与 24 根钢柱组成；辐射布置上下索各 144 根，中间用系杆相连。

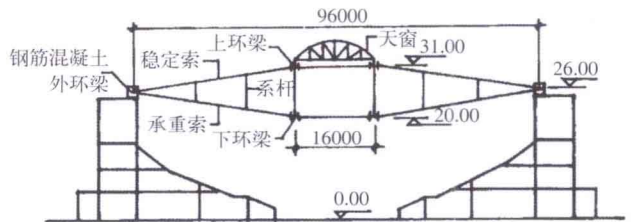


图 6.1.5 北京工人体育馆

1968 年建成的浙江人民体育馆屋盖采用双曲抛物面索网（图 6.1.6），椭圆平面长轴 80m，短轴 60m，横向的钢筋混凝土环形闭合曲梁  $2.0\text{m} \times 0.8\text{m}$  作为支承结构。索体采用  $6\phi 12$  钢绞线，承重索平行长轴布置，间距 1.0m，中央索垂度 4.4m，稳定索沿短轴布置，间距 1.5m，中央索拱度 2.6m。

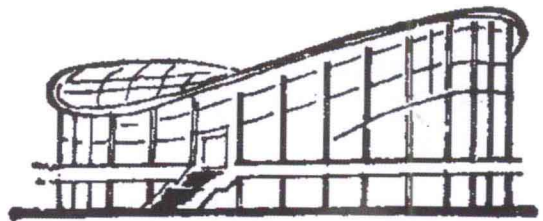


图 6.1.6 浙江人民体育馆

1985 年建成的淄博市体育馆采用平行布置单层索系（图 6.1.7），跨度  $58\text{m} \times 38\text{m}$ ，两端支点高差 3m，最大垂度 4m，支承端为钢筋混凝土横向受弯大梁。索体为  $5 \times 54$  高强钢丝束，共 35 束，横向布置了 39 根  $\phi 18$  圆钢起稳定作用。屋面板为钢筋混凝土预制槽板挂在承重索上，施加预应力后用 C40 混凝土灌缝，使屋面形成整体。与同承载力的其他结构形式相比，可节省钢材 30%，节省造价 15% ~ 20%。

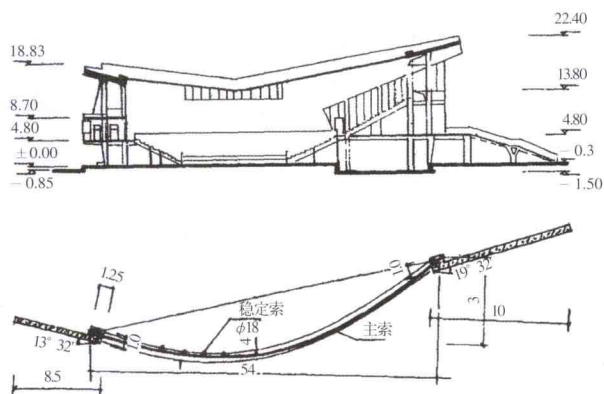
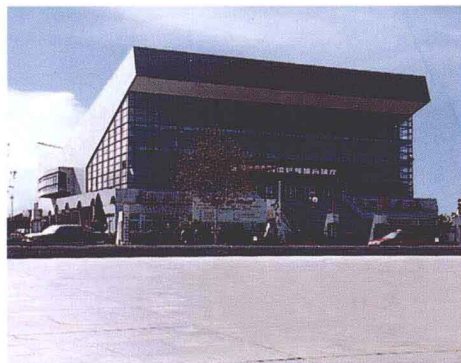


图 6.1.7 淄博市体育馆

1986年建成的吉林冰上运动中心滑冰馆采用索桁架(图6.1.8),平面投影 $59.0\text{m} \times 76.8\text{m}$ ,承重索与稳定索相互错开半个间距的布置,其间设置横向桁架式檩条形成空间工作。在两端稳定索低于承重索处,用斜拉杆与索连接形成波形屋面,妥善地解决了排水。两边的支承结构与波形屋面结合形成空间框架,与建筑造型有机配合。承重索由18根 $\phi 15$ 的高强钢绞线组成。

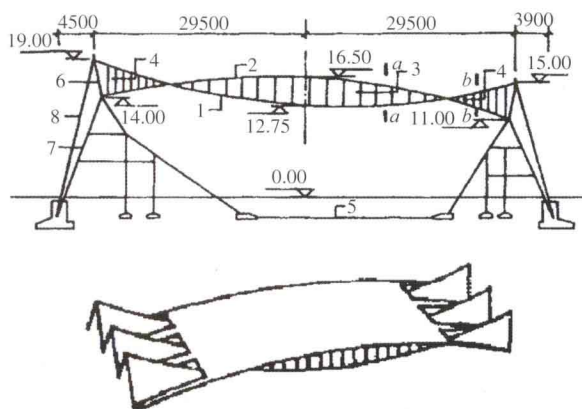


图 6.1.8 吉林冰上运动中心滑冰馆

这几个早期建成的著名的悬索结构工程代表了我国当时的研究与工程技术水平,可以说我国悬索结构的建造几乎与国外是同时起步的。然而20世纪90年代以后,悬索结构的应用出现了一段时间沉寂,直至2000年前后,又重新开始发展,而且迅速成为大跨度结构的应用热点,研究、设计与建造技术水平有了明显的飞跃,近10年尤为突出。

由于悬索结构通过索的轴向拉伸来抵抗外荷作用,可以最充分地利用钢材的强度,大大减轻了结构自重。而且其施工时不需脚手架,也不需大型起重设备,施工费用相对较低。因而,悬索结构可以较经济地跨越很大的跨度,逐渐成为大跨建筑的主要结构形式之一。在设计与建造悬索结构时,须注意其以下特性:

- 1) 属于柔性的张力结构体系，施加预张力以后才有刚度；
- 2) 结构形状取决于荷载分布与预张力大小，需要采取措施保持形状的稳定；
- 3) 为保证索力的传递，需要建立稳固强劲的支承体系；
- 4) 具有明显的非线性特征，需要准确地分析施工阶段和承载阶段的受力状况。

由于对柔性索组成的悬索体系都要采取一定措施使其具有必要的结构刚度和保持形状稳定，以满足结构的各种功能要求。出现了另一种以具有一定抗弯和抗压刚度的曲线形实腹或格构式构件来代替柔索的结构，称劲性索结构体系。一个典型的例子是图 6.1.9 所示的第 22 届奥运会游泳馆，126m×104m，劲性索短向平行悬挂于两个斜置 120m 钢筋混凝土拱上。

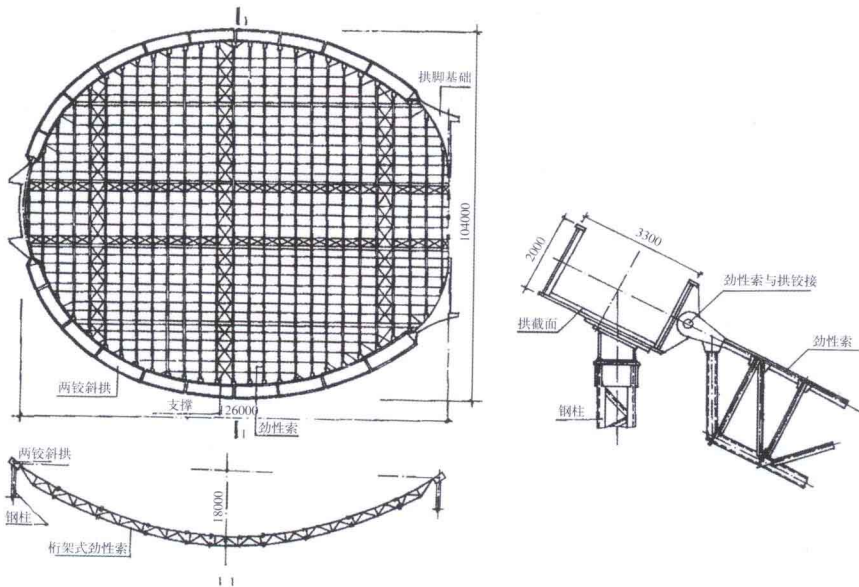


图 6.1.9 第 22 届奥运会游泳馆屋盖劲性索

在全跨荷载作用下，悬挂的劲性索仍以受拉为主，因而钢材的强度可充分得到利用。由于劲性索具有一定抗弯刚度，它在全跨或局部荷载作用下的变形要比柔索小得多。在风吸作用下，它的行为又类似拱，即抗风性能好于柔索。劲性索结构无需施加预应力即有良好的承载性能，同时还可减小对支承结构的作用，施工方便。劲性索是一种值得关注的结构体系，我国已经有了应用尝试，如需利用其反拱抗风吸，需注意做好分析。

## 6.2 双层内拉环辐射索系

### 6.2.1 中关村软件园软件广场

设计单位：中元国际工程设计研究院

总包单位：北京城建集团有限责任公司

钢结构安装单位：首钢建设集团

索结构施工单位：中国建筑科学研究院建研科技股份有限公司

索具类型：瑞士布鲁克·高钒镀层全封闭索

主体完成时间：2004年

#### 1. 概况

中关村软件园软件广场光盘结构位于北京市海淀区上地信息产业基地，是软件广场的入口标志性建筑，其造型独特美观，设计思想大胆而富有创意（图 6.2.1）。光盘结构直径约 85m，其结构形式采用车辐式双层索系。外环、内环均采用钢结构环形盘，内外环之间间距约 20m，采用 240 根双层分布的径向索将内外环相连。盘面为玻璃采光顶，内外环之间的径向索作为玻璃采光顶的支撑构件。光盘结构的固定方式非常独特，整个光盘结构由四根桅杆通过 24 根斜拉索吊起在空中，为抵抗风吸力的作用，光盘结构下还增设了 24 根缆风索。



图 6.2.1 中关村软件园软件广场光盘结构



## 2. 设计特点

该结构平面如图 6.2.2 所示，为典型的辐式双层索系，外环梁受压，内环梁受拉，结构受力清晰明确。外环梁和内环梁截面如图 6.2.3 所示，桅杆高约 35m，根部截面  $\phi 3000 \times 50$ 。该结构共有 48 根斜拉索和缆风索，以及 240 根径向悬索，均采用镀铝锌钢索，各类索的具体情况如表 6.2.1 所示。其中，径向索分上、下两层设置，为了保证上下两层径向索的共同工作，两层径向索之间设置了一道撑杆，撑杆采用  $\phi 43 \times 4$  钢管。

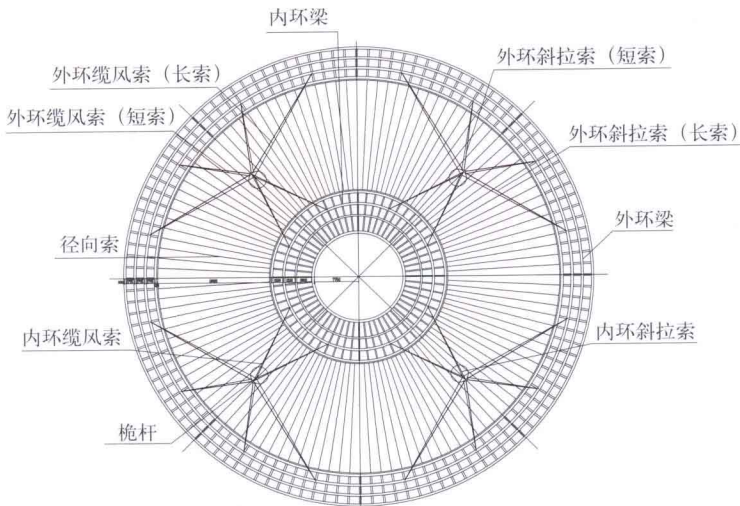


图 6.2.2 平面图

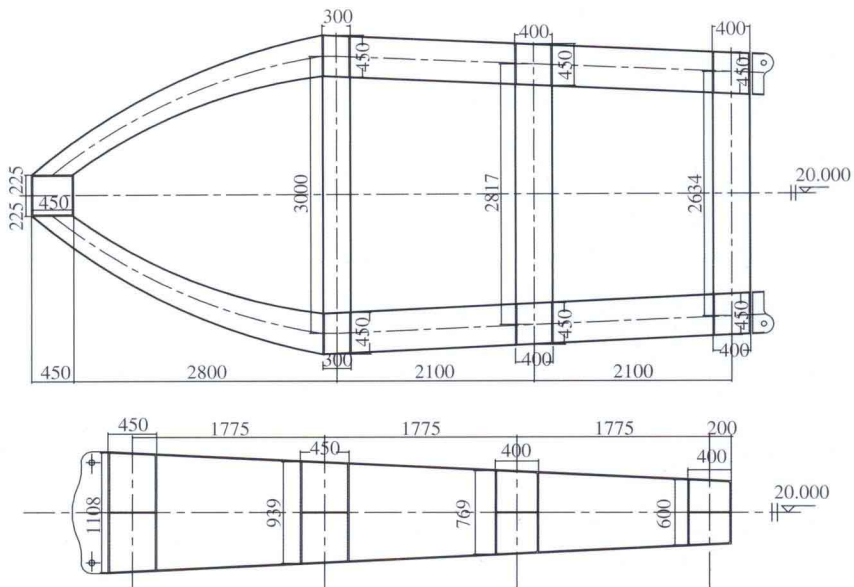


图 6.2.3 内外环钢梁截面图