

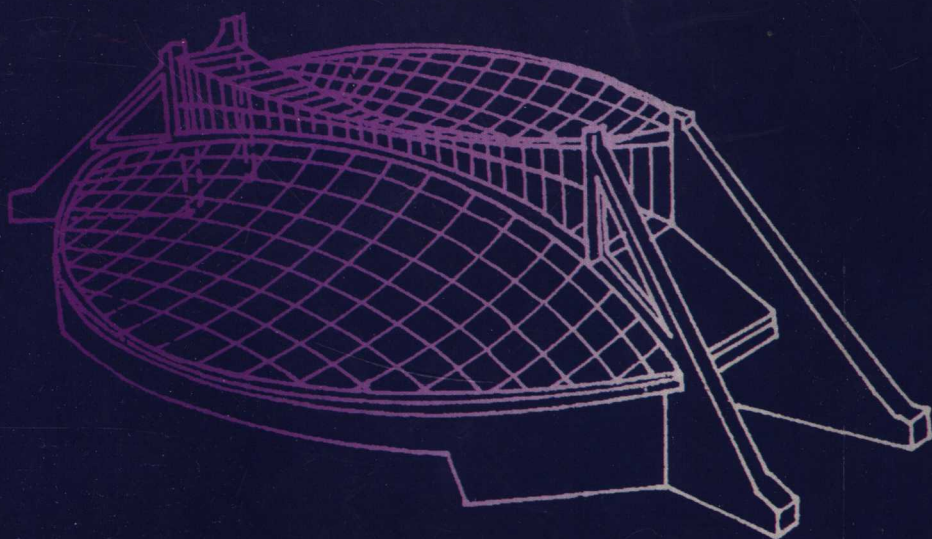
悬索结构设计

Design of Cable Structures

(第二版)

(2nd Edition)

沈世钊 徐崇宝 赵 臣 武 岳 著



中国建筑工业出版社

悬索结构设计

Design of Cable Structures

(第二版)

(2nd Edition)

沈世钊 徐崇宝 赵臣 武岳 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

悬索结构设计/沈世钊等著. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2005

ISBN 7-112-07754-0

I. 悬... II. 沈... III. 悬索结构-结构设计
IV. TU351. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 102768 号

悬 索 结 构 设 计
Design of Cable Structures
(第二版)

(2nd Edition)

沈世钊 徐崇宝 赵臣 武岳 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京密云红光排版厂制版

北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19¼ 字数: 455 千字

2006 年 1 月第二版 2006 年 1 月第二次印刷

印数: 2501—6000 册 定价: 32.00 元

ISBN 7-112-07754-0
(13708)

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)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书系统而简明地叙述了悬索结构的体系、设计计算和构造方法，也涉及对悬索体系施加预张力等施工问题。书中首先介绍目前常用的悬索结构形式及其选用原则；其次分别介绍其解析计算方法及有限元分析；进而阐述其地震反应分析和风振反应分析；最后介绍悬索结构的构造和施工要点。包括的结构形式有：单层悬索体系、预应力双层悬索体系、预应力鞍形索网、劲性索及横向加劲单层索系、索拱体系及张弦体系、组合式悬索结构、悬挂薄壳与薄膜结构、悬挂式与斜拉式混合结构；还介绍了悬索结构在玻璃幕墙及玻璃采光顶中的应用情况。书中内容按实用要求编写，可供房屋设计工程技术人员及结构工程专业高等院校师生应用参考。

* * *

责任编辑：黎 钟

责任设计：赵 力

责任校对：李志瑛 张 虹

第二版前言

本书第一版于1997年出版,距今已有8年;如果从20世纪90年代初期陆续收集资料编写书稿算起,则已经有十余年了。十余年来,悬索结构或者,更一般性地说,张力结构取得了进一步的发展,且呈现出许多新的特点。在这一领域的研究工作也取得了不少新成果。在本书再版的时候就需要把这些新发展、新成果好好总结一下,对书稿进行必要的修订和补充,使这本书能始终跟上所涉领域的发展形势,为广大设计人员和研究生们提供真正有用的参考资料。

从张力结构近十余年的发展来看,传统的采用刚性屋面的悬索屋盖发展并不快,取而代之的是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;将单层索系、双层索系、索网等各种张力体系作为大面积玻璃幕墙和采光屋顶的支承结构,是近年来悬索结构一个新的应用领域,且发展十分迅速;将索与刚性构件联合运用形成的轻型混合结构则在大跨度屋盖中获得快速发展,例如,最近几年来所谓的张弦桁架结构在会展中心和航站楼等建筑中获得了广泛应用。在本书再版修订过程中,用了较多篇幅来反映上述这些新的发展,并补充了国内外近几年建成的一些具有典型意义的大型工程实例。应当说明的是,索膜结构是张力结构中的一种重要类型,其中索与膜的作用密不可分。近几年国内出版了几部以膜结构或者索膜结构命名的专著,对这种张力结构类型介绍得比较全面。所以本书再版时仍然坚持以索结构为重点的方针,以保持本书特色,并与以膜结构为重点的著作起到相辅相成的作用。但为了保持结构类型的完整性,本书第一章中仍然保留对索膜结构的一般性介绍,内容则偏重于大型张拉式索膜结构和索穹顶等那些索构件在其中起重要或主要作用的体系。

对索结构的动力分析,尤其是抗风设计部分补充了较多内容,以反映这方面新的研究成果。近几年在索结构的构造方面有许多新的资料,在设计、施工方面也积累了不少经验,因此对本书第六章作了扩充,补充了较多新内容。

在修订工作中继续坚持以实用为主的编写方针,重点加强结构选型、受力概念、构造设计等方面的内容,并结合国内外有代表性的典型工程实例进行介绍;在理论分析方面力求避免连篇累牍的公式推导,把重点放在基本概念的阐述上。

乘再版之机,对全书进行了大量文字上的修改,并纠正了一些印刷上的错误。

本书修订工作由武岳执笔,沈世钊定稿。作者热忱欢迎同行专家和广大读者提出宝贵意见。

沈世钊

2005年3月于哈尔滨工业大学

第一版前言

大跨度建筑及相应的大跨度空间结构的发展状况是代表一个国家建筑科学技术水平的重要标志之一。悬索结构具有节省材料、施工快捷、适应多样化的建筑造型等特点，特别适用于各类大跨度建筑，国外应用十分广泛，且不乏规模宏大、构思新颖的代表性作品。我国悬索结构在 20 世纪 50 年代就开始应用；近十余年来取得了进一步的发展，工程实践的数量有较大增长，应用的结构形式趋于多样化，理论研究也逐渐完善；但与网架、网壳等其他空间结构形式相比，悬索结构的发展相对缓慢。原因可能是多方面的，而缺乏一本较实用的设计参考资料，则是重要因素之一。作者编写出版本书的目的就是希望在这方面做出一点贡献。

基于这一宗旨，作者坚持以便于实用为编写指导方针，努力做到以下几点：

1. 重点加强结构选型和构造方面的内容，并广泛搜集国内外典型工程实例进行较系统的介绍，使读者对丰富多彩的各种悬索结构形式能有较为形象化的了解。

2. 在力求保持理论的完整和统一的同时，避免把本书写成冗长理论推导为主的力学专著。作为一本完整的设计参考资料，对各类悬索结构的计算方法进行系统介绍是完全必要的，而且，只有保证理论的完整和深度，才能在真正意义上做到为实用服务的目的；但是在叙述方法上力求做到深入浅出，强调基本概念的阐发，并以尽可能浅显的方式进行必要的理论推导。

3. 重视实用解析方法的介绍。在有限元法和计算机使用十分普及的今天，以解析法为基础的各种实用方法仍然具有重要意义，它们不仅使用方便，而且往往能提供更为清晰的受力概念。因此，本书第二章对各种悬索体系实用分析方法进行了完整、系统的归纳。

4. 本书在各有关章节列入了大量计算例题，包括对一些大型工程实例的分析，以帮助读者更好地掌握理论方法的应用和更形象地了解各种悬索体系的工作性状。

5. 本书与即将颁发的国家标准“悬索结构技术规程”在基本内容上保持一致和协调。

本书在编写过程中尽量吸收已较成熟的国内外最新研究成果。本书在引用这些资料时均注明有关文献，以示负责，并便于读者进一步参考。本书部分内容，如平面双层索系的计算理论，以抛物线拱为边缘构件的非双曲抛物面索网的实用计算方法、劲性索计算理论、索拱体系的概念及其计算理论、从平面位置起始的索网成形计算方法、索网的风振响应分析和抗风设计等内容，都是作者们及其研究生们近十余年来的研究成果。

本书分工：沈世钊拟定全书内容和制定编写方针，并具体编写绪论、第二章、第三章；徐崇宝负责编写第一、第六章；赵臣负责编写第四、第五章。作者热忱欢迎同行专家和广大读者给我们提出意见。

沈世钊

1996 年 4 月于哈尔滨建筑大学

目 录

第二版前言

第一版前言

绪论	1
参考文献	6
第一章 悬索结构的形式和工程应用	8
第一节 单层悬索体系	8
第二节 预应力双层悬索体系	19
第三节 预应力鞍形索网	29
第四节 劲性索系与横向加劲单层索系	40
第五节 索拱体系与张弦体系	47
第六节 组合悬索结构	54
第七节 悬挂薄壳与悬挂钢膜	58
第八节 索-膜结构	61
第九节 悬挂式与斜拉式混合结构	69
第十节 索在玻璃结构中的应用	78
参考文献	86
第二章 悬索结构的解析计算方法	89
第一节 单索计算理论	89
第二节 双层索系的计算	102
第三节 鞍形索网的计算	119
第四节 横向加劲单层索系的实用分析	138
第五节 劲性悬索的计算	143
第六节 索拱体系的计算	150
参考文献	158
第三章 悬索结构的有限元分析	159
第一节 节点位移法的基本方程	159
第二节 基本方程的迭代解法	163
第三节 初始形态分析	166
第四节 计算实例	170
参考文献	175
第四章 悬索结构自振特性及地震反应分析	177
第一节 悬索结构的自振频率与振型	178
第二节 悬索结构自振频率的简化计算	183

第三节	悬索结构地震反应分析的振型叠加法	191
第四节	悬索结构地震反应分析的振型分解反应谱法	196
第五节	悬索结构多维地震反应分析的虚拟激励法	199
第六节	悬索结构非线性地震反应分析的直接积分法	202
	参考文献	209
第五章	悬索结构风振反应分析	211
第一节	风荷载	212
第二节	悬索结构风振反应的随机振动频域分析法	222
第三节	悬索结构风振反应的随机振动离散分析法	226
第四节	悬索结构非线性风振反应的随机模拟时程分析法	230
第五节	具有空间相关性风场的计算机模拟	234
第六节	悬索结构风振反应参数分析	238
第七节	悬索结构风振系数	240
	参考文献	244
第六章	悬索屋盖结构设计和施工要点	247
第一节	钢索	247
第二节	钢索的锚固——锚具及锚固节点构造	254
第三节	悬索结构的连接节点构造	264
第四节	悬索结构的方案设计	272
第五节	悬索屋盖的结构设计要点	275
第六节	悬索结构的施工要点	285
	参考文献	291
附录 A	常用钢丝绳截面规格	293
附录 B	塑料护套半平行钢丝索截面规格	296
附录 C	建筑用钢拉杆截面规格	298
附录 D	点式玻璃幕墙用不锈钢拉杆与不锈钢索截面规格	299

绪 论

悬索结构（或索结构）是一种张力结构，它以一系列受拉的索作为主要承重构件，这些索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。索一般采用由高强度钢丝组成的钢绞线、钢丝绳或钢丝束，但也可采用圆钢筋或带状的薄钢板。

一、悬索结构的特点

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。当采用高强度材料时，更可大大减轻结构自重。因而悬索结构可以较经济地跨越很大的跨度，目前已成为大跨建筑的主要结构形式之一。根据英国 A.W. Butler 于 1972 年对已建成的近 20 个悬挂屋盖所作的统计结果，当跨度不超过 150m 时，每平米屋盖的钢索用量一般在 10kg 以下。但也应指出，悬索体系的支承结构往往需要耗费较多的材料；不论它们设计为钢筋混凝土的或钢的，其用钢量均超过钢索部分。

悬挂屋盖的另一特点是施工比较方便。由于钢索自重很小，屋面结构一般也较轻，因此安装屋盖时不需要大型起重设备。施工时不需要脚手架，也不需要模板。因而与其他结构形式比较，悬挂屋盖的施工费用相对较低。

另外值得一提的是，悬索结构便于建筑造型，可适应多种多样的平面图形和外形轮廓，因而能较自由地满足各种建筑功能和表达形式的要求。这也是建筑师们乐于采用悬索结构形式的重要原因之一。

上面这些特点使悬索结构在大跨房屋建筑中获得日益广泛的应用。

二、悬索结构的发展

以悬索体系作为承重结构有着悠久的历史。古代的帐篷式住屋就是悬挂屋盖的雏形。我国人民早在一千多年以前已经用竹索或铁链建成跨越河谷的悬索桥。随着钢材的利用，现代化的大跨悬索桥开始出现，并且从上世纪初以来取得了可观的发展。但在房屋建筑方面，只是近 50 年来，即从 20 世纪 50 年代开始，悬索结构才取得较大进展。这一方面是由于日益增长的建造大跨房屋的实际需要，另一方面也是由于建筑材料、计算方法、建造技术等方面的问题不断获得解决，经验不断积累的结果。目前，在美国、欧洲、日本、前苏联等国家和地区已建造了不少有代表性的悬挂屋盖，主要用于飞机库、体育馆、展览馆、会堂、车站、商场等大跨建筑中和某些厂房建筑中。已建成的悬挂屋盖跨度最大已达 200m 以上。

中国现代悬索结构的发展始于 20 世纪 50 年代后期和 60 年代。北京的工人体育馆和杭州的浙江人民体育馆是当时的两个代表作。北京工人体育馆建成于 1961 年，其屋盖为圆形平面，直径 96m，采用车辐式双层悬索体系，由钢筋混凝土圈梁、中央钢环以及辐射布置的 72 根上索和 72 根下索组成。浙江人民体育馆建成于 1967 年，其屋盖为椭圆平面，

长径 80m, 短径 60m, 采用双曲抛物面正交索网结构。

大家知道, 世界上第一个现代悬索屋盖是美国于 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正交索网。我国建造的上述两个悬索结构无论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的发展停顿了较长一段时间, 一直到 1980 年建成成都城北体育馆, 它的圆形屋盖 (直径 61m) 也是采用车辐式双层悬索结构, 但在构造上做了一些改进。

尽管存在如上面介绍的几个杰出工程, 现在来回顾 20 世纪 80 年代初期我国悬索结构的发展情况, 必须承认当时的总体水平仍然是比较落后的。工程实践既有限、理论储备也不足, 同国际发展水平相比差距较大。这种状态同当时蓬勃兴起的新的建设形势形成了明显的反差。在设计日益增多的如体育馆等一些大型公共建筑时, 普遍感到结构形式的选择余地很有限, 无法满足日益发展的对建筑功能和建筑选型多样化的要求。这种生产要求对我国悬索结构以及其他空间结构类型的发展起到了良好的刺激作用。因而自 20 世纪 80 年代中期起, 悬索结构进入了一种较好的协调发展状态。工程实践的数量有较大增长, 结构的应用形式趋向多样化, 理论研究也逐渐配套, 形势是比较喜人的。

在这一段时期内, 我国工程实践中所采用的悬索结构形式十分丰富, 包括:

- 1) 各种单层索系;
- 2) 各种双层索系;
- 3) 横向加劲单层索系——索-梁 (桁) 体系;
- 4) 各种鞍形索网;
- 5) 各种组合式悬挂屋盖;
- 6) 斜拉体系、索拱体系等混合结构形式。

可以说, 几乎对各种悬索结构形式都进行了探索。尤其值得称道的是, 我国的工程技术人员在学习和吸收国外先进经验的同时, 在结合工程具体条件创造更加符合中国国情的结构应用形式方面做了不少尝试和创新。

例如, 山东淄博等地把悬索结构应用于一些中小型层盖结构中, 颇具特色。他们主要采用在单层平行索系或伞形辐射索系上加钢筋混凝土屋面板的构造方式。为了增加索系的形状稳定性, 施工时先将屋面板挂在索上 (使索正好位于板缝中), 在板上临时加载使索伸长, 然后在板缝中浇灌细石混凝土, 待达到一定强度后卸去荷载, 即形成具有一定预应力的“悬挂薄壳”。这种构造和施工方法不需要复杂的技术和设备, 造价也比较低, 很符合各地区建造中、小型建筑的需要。

为了提高单层悬索的形状稳定性, 除了做成悬挂薄壳的办法外, 安徽体育馆等工程采用的设置横向加劲梁 (或桁架) 并通过下压梁端就位给体系施加预应力的办法也是十分有效的。从文献记载上看, 这种预应力索-梁 (桁) 体系在国外尚未见用于工程实践。

由一系列承重索和反向的稳定索组成的预应力双层索系, 是解决悬索结构形状稳定性的另一种较有效的结构形式。瑞典工程师贾维斯 (Jawerth) 首先在斯德哥尔摩滑冰馆采用由一对承重索和稳定索组成被称为“索桁架”的专利体系, 其后这种平面双层索系在各国获得相当广泛的应用。我国无锡体育馆也采用了这种体系。作为对这种体系的发展, 吉林滑冰馆结合具体工程条件, 创造了一种新型的空间双层索系; 它的承重索与稳定索不在同一竖平面内, 而是错开半个柱距, 从而创造了新颖的建筑造型, 而且很好地解决了矩形平

面悬索屋盖通常遇到的屋面排水问题。这一新颖结构参加了 1987 年在美国举行的“国际先进结构展览”。

我国悬索结构发展的另一个特点是在许多工程中运用了各种组合手段。主要的方式是将两个以上的索网或其他悬索体系组合起来，并设置强大的拱或刚架等结构作为中间支承，形成各种形式的组合屋盖结构。例如，四川省体育馆和青岛市体育馆的屋盖是由两片索网和作为中间支承的一对钢筋混凝土拱组合起来的，丹东体育馆是由强大的钢筋混凝土中央刚架和两片单层平行索系组合而成。北京朝阳体育馆由两片索网和被称为“索拱体系”的中央支承结构组成；该索拱体系由两条悬索和两个钢拱组成，本身是一种混合结构，其概念也具有创新意义。

采用各种组合式屋盖不仅进一步增加了建筑造型的多样性，而且往往能更好地满足某些建筑功能上的要求。例如，通过设置中央支承结构适当地抬高了体育馆比赛场地上方的净空，而两侧下垂的悬索屋面又恰好与看台的斜度配合一致；所以这种元宝形的屋盖形状给体育馆建筑提供了“最优”的内部空间。

采用组合式屋盖结构往往并非由于单纯技术经济方面的理由。从技术经济角度，单片索网或其他悬索体系可以经济地跨越很大的跨度，本非必须采用中间支承结构。事实上，对于一般中等跨度的建筑物，采用单片的悬索体系常可能获得简单经济的设计。所以，采用组合式屋盖结构在许多场合毋宁说主要是出于丰富建筑造型和更好地满足建筑物使用功能方面的考虑。从我国这几年的实践效果来看，它在这方面是起到了预期作用的。

斜拉体系也被引用到屋盖结构中来，形成一系列混合结构形式。这种体系利用由塔柱顶端伸出的斜拉索为屋盖的横跨结构（主梁、桁架、平板网架等）提供了一系列中间弹性支承，使这些横跨结构不需靠增大结构高度和构件截面即能跨越很大的跨度，从而达到节省材料的目的。但与此同时，建造塔柱本身以及可能需要的边缘锚杆和受拉基础等又要增加造价。所以，设计时要设法减小各拉索施于塔顶的总水平力。

自 20 世纪 90 年代开始，索结构或者，更一般地说，张力结构的发展呈现出一些新的特点，传统的采用刚性屋面的悬索结构逐渐少用，把索与膜结合起来形成的柔性张力结构，即所谓的索膜结构，以及把索与刚性构件联合运用而形成的各种轻型混合结构则获得了快速发展。这是国内外张力结构领域的共同发展趋势。

索膜结构的形式十分丰富，其中有一类以双层空间索系作为主要承重体系而辅以柔性的膜屋面，即所谓的“索穹顶”结构，在国外已有若干著名的工程实例，在我国尚停留在理论探索阶段；另一类以索和膜共同构成承重体系，形成各种形式的张拉式索膜结构，则在我国取得快速发展，并积累了相当的设计和施工经验。值得一提的是，在这一发展过程中，一批有资质的拥有专业设计和施工队伍的膜结构和索结构企业已逐步形成，为今后包括悬索结构在内的各种形式张力结构的进一步发展提供了良好的生产条件。

混合结构则在大跨度屋盖中获得快速发展。例如，一种由拱形上弦（实体式或格构式）和拉索下弦组成，二者之间由竖向撑杆相互连系，宏观上呈鱼腹式桁架形状的轻型混合结构，即所谓的张弦桁架，在航站楼、会议展览中心等建筑中获得广泛应用。在竖向荷载作用下，这种体系的上弦发挥拱的作用，而下弦起悬索作用，二者共同抵抗外荷；在支座处，上弦拱的水平推力与下弦悬索的水平拉力相互平衡，即在水平方向起到相互支承的作用。所以，从受力方面看，这种结构实际上是一种特殊形式的索拱体系，其区别仅在于

所讨论的“张弦桁架”通常设计成简支，一般情况下其支座会产生一定的水平位移，通过这一水平位移调整拱和悬索的水平支反力，使二者达到平衡。仅当上弦拱和下弦悬索的拱度（矢高）和截面选择适当，使二者在固定铰支条件下的水平反力正好相等时，整个体系的支座才不会产生水平位移。这是设计这种混合体系时需要关注的要点之一。鉴于各种轻型混合体系在受力性能方面的潜在优势和在应用形式方面的多样性，可以预期今后将会获得更多的发展。

近年来，索作为支承结构被广泛应用于大面积玻璃幕墙和玻璃采光顶中，这是索结构发展中的另一个新特点。索的纤细截面恰好符合人们对玻璃结构通透性的追求。玻璃幕墙的索支承结构可分为双层索系和单层索系两大类。双层索系的结构形式类似于普通的索桁架体系，可用于较大跨度。面积较小的玻璃幕墙则可采用单层平行索系或单层平面索网，其索可布置在玻璃分缝处，从而最大限度地降低了支承结构对视觉的干扰，因而倍受设计师的青睐。但是由于单层索的刚度较差，在风荷载作用下易产生较大位移，因而必须对该类结构的抗风设计给予足够重视。我国关于索支承玻璃幕墙的设计和施工技术都已达到了较高水平。玻璃采光顶的支承结构大都采用轻型混合结构或鞍形索网，目前实际工程还有有限，但是可以预见其发展是大势所趋。

最后需要强调的是，一种结构类型的发展在于其结构形式的不断创新，悬索结构也是如此。本书介绍的多种悬索结构形式及其典型工程应用只是为了帮助读者了解悬索结构根据不同工程需要所可能采用的一些工作形态和不同处理手段。它们不是一成不变的，而应当随着条件的变化和技术进步而不断发展。因此，只有深入理解悬索结构的力学特点，不断开发其应用潜力，并进行创造性的工程实践，才能够使这种结构类型具有更加持久的生命力。

三、悬索结构的理论研究

工程应用促进了理论和实验研究的进展。悬索结构在荷载作用下要产生较大的位移，因而计算中必须考虑几何非线性问题；这一因素形成了悬索结构计算理论的特点，也增加了分析的难度。我国关于悬索结构的第一批较系统的研究是在 20 世纪 50 年代末和 60 年代前期进行的。当时主要研究悬索结构分析的解析方法^[0-4]，例如：推导了车辐式双层索系在屋面均匀荷载作用下的计算公式；在连续化理论的基础上，应用能量变分原理对椭圆平面和菱形平面的双曲抛物面索网在均布荷载和任意集中荷载作用下的内力和位移进行了细致分析。这些工作为当时建造的几个大型悬索结构的设计提供了理论依据。当时还建造了几个小型的试验性建筑物，包括一个直径为 15m 的车辐式双层索系屋盖和一个平面近似椭圆（18m×12m）以一对斜拱作为边缘构件的鞍形索网屋盖。建造这些试验性建筑的目的，不仅仅是为了进行结构试验，而且还在于取得建造悬索结构的施工经验。

20 世纪 80 年代起恢复了对悬索结构的广泛研究。初期仍然着重于各种形式悬索体系的解析计算方法和以解析法为基础的各种近似方法的探讨。文献[0-1]系统地归纳了各种形式悬索体系的解析计算方法和相应公式，并且补充推导了平面双层索系的整套实用计算方法。文献[0-20]系统地研究了横向加劲单层平行索系的受力性能和计算方法。随着计算机的普及，悬索结构的离散化分析方法，尤其是以离散化理论为基础的节点位移法和相应的各种迭代解法取得了迅速发展。相应的计算机程序也陆续编制出来，其功能一般包括体

系预张力状态的计算、任意荷载作用下的内力和位移计算、施工过程的验算、温度变化等因素的影响；一般均包含空间索单元和空间梁单元两种基本单元，因而可将柔性的索系和劲性的支承构件或边缘构件一起进行计算，自动地考虑它们之间的相互作用，也可以用来计算诸如索-梁体系、斜拉体系等各种混合悬挂结构。

20 世纪 80 年代后期以来建成的重要悬索结构工程大都是由计算机进行分析的。随着计算机程序及其功能的进一步发展，尤其是近几年来国外一些大型通用程序的普遍应用，悬索结构的发展将会获得更加方便的分析手段。自然，这并不意味着否定各种解析方法的作用。事实上，以解析法为基础的一些实用计算方法使用方便，并且往往能提供比较清晰的受力概念，因而在进行方案探讨和初步计算时，仍然具有重要意义。此外，对于像双层索等比较简单的体系，解析方法已完全可以提供符合设计需要的准确而完整的计算结果。例如，吉林滑冰馆的大型悬索屋盖的设计，就是由简单的手算来完成的。

这一时期关于悬索结构研究的另一个特点是做了大量的试验工作。这是我国结构研究方面的一个优良传统。早在 20 世纪 60 年代，就做过车辐式双层索系、椭圆平面和菱形平面双曲抛物面索网的模型试验。80 年代以来，则几乎每一个重要的悬索结构工程，都做过模型试验或现场实测，内容包括预应力状态的测定，不同荷载作用下的内力和位移测量，以及体系前几阶自振频率和振型的测定等。

这些试验研究同理论分析工作一起，以及它们之间的相互印证，使我们对各种形式悬索结构性能的了解大大前进了一步。可以说，我们在设计这类结构时，无论从结构选型的角度，还是从设计计算的手段方面，已经逐步积累起比较丰富的理论储备。

除了直接服务于设计的理论分析和试验研究工作外，一些更为基础性的理论研究也在逐步开展。这些研究相对集中于三个研究领域：

- 1) 悬索结构的初始形状确定；
- 2) 悬索结构的地震反应分析；
- 3) 悬索结构的风振反应分析。

悬索结构在没有施加预张力以前没有刚度，其形状是不确定的；必须通过施加适当预张力赋予一定的形状，才能成为能承受外荷载的结构。在给定的边界条件下，所施加的预张力系统的分布和大小（这是一套自平衡的内应力系统）同所形成的结构初始形状之间是相互联系的。如何最合理地确定这一初始形状和相应的自平衡预张力系统，就是张力结构的“找形”或更确切地称之为“初始平衡状态的确定”或“初始形态分析”这一命题要解决的任务。这是索结构等张力结构设计中的一个关键问题。对于双曲抛物面索网系统，这一问题不难解决，因为双曲抛物面对应于均匀的预应力状态；但对于其他类型的曲面，其初始形态一般需通过考虑几何非线性的有限元分析来确定。对于一些边界条件较特殊的张力结构，要确定出既符合建筑造型要求的外形，又具有合理预应力分布的初始状态，并非易事。一些大型通用程序尽管分析能力很强，但关于这一问题往往缺乏针对性很强的功能。近年来，国内研究者在探讨有效地确定张力结构初始状态的非线性有限元分析方法方面做了很多努力，取得了可喜的成果，并编制了相应的实用程序；有些程序能适应较大的位移变化，因而能进行大幅度的外形调整。

关于对悬索结构动力性能的研究，尤其是在地震和风激作用下的反应分析，是更全面地了解这类结构的工作性能，进一步提高设计水平的重要基础性工作。过去这方面的研究

较少,尤其是关于大跨柔性屋盖在风作用下的气弹性能的研究,在国内外基本上是空白。这些年来,对索网体系、索-梁(桁)体系在地震作用下的反应,用时程法和振型分解反应谱法进行了系统研究^[0-21],对索-梁(桁)体系还做了细致的动力模型试验^[0-22],使我们对这两种悬索体系的抗震性能的了解大大前进了一步。文献[0-23]则应用随机振动理论对吉林滑冰馆预应力双层索系在竖向地震作用下以及在竖向、水平地震联合作用下的反应进行了仔细分析。悬索屋盖结构大都重量轻、刚度小、自振频率低,在风激作用下易产生较大的振动,甚至可能发生气弹失稳。国内一些研究者近年来开创了较系统的关于风振反应的研究,取得了可喜的成果^[0-24~0-31],文献[0-32]还针对菱形平面和椭圆平面索网体系的风振反应进行了风洞试验研究,积累了较系统的资料。自20世纪90年代起,膜结构在我国取得快速发展;膜结构与索结构同属柔性张力体系,所以从那时起,关于它们的初始形态问题和风激振动问题的研究往往是结合起来进行的,而且取得了较丰硕的成果^[0-33~0-43]。目前关于这些基本理论问题的研究仍方兴未艾。

如上所述,近年来我们在悬索结构方面所积累的工程经验以及理论和试验研究成果,可以说是相当丰富的;所采用的结构形式丰富多彩,进行的理论研究也是全方位的。这为今后悬索结构及各种形式张力结构的进一步发展奠定了坚实的基础。

参 考 文 献

- [0-1] 哈尔滨建筑工程学院(钟善桐,沈世钊).大跨房屋钢结构.北京:中国建筑工业出版社,1993
- [0-2] 蓝天.国内外悬索屋盖结构的发展.全国索结构学术交流会论文集.无锡,1991
- [0-3] 沈世钊.十年来中国悬索结构的发展.第六届空间结构学术会议论文集.北京:地震出版社,1992
- [0-4] 沈世钊.中国悬索结构的发展.工业建筑.1994(6)
- [0-5] 沈世钊.膜结构——发展迅速的新型空间结构.哈尔滨建筑大学学报.1999(2):11-15
- [0-6] 沈世钊.大跨空间结构理论研究与工程实践.中国工程科学.2001(3)
- [0-7] Shen, S. Z. and Lan, T. T. A Review of The Development of Spatial Structures in China. Int. J. Space Structures, 2001, 16(3): 157-172
- [0-8] 董石麟.预应力大跨度空间钢结构的应用与展望.空间结构,2001,7(4):3-14
- [0-9] 严慧.悬索结构的形式和设计选型.钢结构.1994(1)
- [0-10] 严慧.“杂交”结构体系的应用和发展.工业建筑.1994(6)
- [0-11] 陆赐麟,叶于琉.现代大型建筑物的新结构体系及其建筑造型.工业建筑,1996,26(6,7)
- [0-12] 陆赐麟,尹思明.预应力钢结构空间结构体系.钢结构,2000,15(4):61-65
- [0-13] Otto, F. Tensile Structures. MIT Press: Vol. 1, 1967; Vol. 2, 1969
- [0-14] Krishna, P. Cable-Suspended Roofs. McGraw, New York, 1978
- [0-15] Irvine, H. M. Cable Structures, Dover Publications, New York, 1992
- [0-16] Berger, H. Light Structures-Structures of Light: the Art and Engineering of Tensile Architecture. Birkhauser, Basel, 1996
- [0-17] Harris, J. Li, K. Masted Structures in Srchitecture, Butterworth Architecture, 1996
- [0-18] Buchholdt, H. Introduction to Cable Roof Structures, Thomas Telford, 1998
- [0-19] 中国建筑科学研究院.大跨度悬挂式屋盖结构.北京:中国工业出版社,1962
- [0-20] 季天健,蓝侗恩.横向加劲单曲悬索屋盖的简化分析与合理设计.建筑结构学报,1987(6)

- [0-21] 胡瑞深, 张善余, 曹资. 索网结构地震反应规律及结构参数对其影响的研究. 全国索结构学术交流会论文集, 无锡, 1991
- [0-22] 曹资等. 索-桁(梁)结构动力特性和地震反应试验研究. 第四届空间结构学术交流会论文集, 成都, 1988
- [0-23] 郭骅, 张莉. 预应力双层索系随机地震反应分析. 第三届空间结构学术交流会论文集, 吉林, 1986
- [0-24] 赵臣, 陆钦年, 沈世钊. 双曲抛物面鞍形屋面风压分布的实验研究. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1991 (1)
- [0-25] 赵臣, 沈世钊. 双曲抛物面鞍形索网风振反应分析. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990 (2)
- [0-26] Shizhao Shen, Qingshan Yang, Wind-induced Response Analysis and Wind-resistant Design of Hyperbolic Paraboloid Cable Net Structures, J. Space Structures, 1999, 14 (1): 57-65.
- [0-27] 赵臣, 吕伟平, 沈世钊. 悬索屋盖结构风振反应的时域分析方法. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1995 (2)
- [0-28] 杨庆山, 沈世钊. 悬索结构抗风设计. 空间结构, 1996 (2, 3)
- [0-29] 杨庆山, 沈世钊. 悬索结构随机风振响应分析. 建筑结构学报. 1998, 19 (4): 29-39
- [0-30] 武岳, 沈世钊. 点支式幕墙索支承体系的动力性能研究. 第十届空间结构学术会议论文集. 北京: 中国建材工业出版社, 2002: 422-430
- [0-31] 武岳, 郭海山, 陈新礼, 沈世钊. 大跨度点支式幕墙支承结构风振性能分析. 建筑结构学报. 2002, 23 (5): 49-55
- [0-32] 赵臣, 沈世钊, 陆钦年. 悬索屋盖结构抗风动力性能的风洞实验研究. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1993 (5)
- [0-33] 郭璐, 蓝天. 膜结构的初始形状判定与静力分析及其模型试验研究. 第七届空间结构学术会议论文集. 山东-文登. 1994: 392 ~ 397
- [0-34] 胥传喜. 张力膜结构的全过程集成分析及其策略研究. 空间结构. 1998, 4 (4): 34 ~ 38
- [0-35] 向阳, 李君, 沈世钊. 薄膜结构的初始形态设计与分析, 空间结构. 1999, 5 (3): 19 ~ 27
- [0-36] 钱基宏, 宋涛. 张拉膜结构的找形分析与形态优化研究. 建筑结构学报, 2002, 23 (3): 84 ~ 88
- [0-37] 卫东, 沈世钊. 张拉薄膜结构的形态优化设计. 土木工程学报. 2004, 37 (2): 12 ~ 18
- [0-38] 向阳, 沈世钊, 赵臣. 张拉式薄膜结构的弹性模型风洞实验研究. 空间结构. 1998, 5 (3): 31 ~ 36
- [0-39] 向阳, 沈世钊, 李君. 薄膜结构的非线性风振响应分析. 建筑结构学报. 1999, 20 (6): 38 ~ 46
- [0-40] 武岳, 王基盛, 张亮泉, 杨庆山. 索膜结构气弹力学性能研究. 大型复杂结构体系的关键科学问题及设计理论研究论文集 (2001), 2002: 205 ~ 212
- [0-41] 杨庆山. 张拉薄膜结构与风环境的动力耦合作用. 第十届全国结构风工程学术会议论文集, 桂林, 2001, 369 ~ 374
- [0-42] 武岳, 沈世钊. 膜结构风振分析的数值风洞方法. 空间结构. 2003, 9 (2): 38 ~ 43
- [0-43] 武岳, 杨庆山, 张亮泉, 王基盛, 沈世钊. 索膜结构风致动力响应性能的风洞实验研究. 第十一届全国结构风工程学术会议论文集. 海南三亚, 2003

第一章 悬索结构的形式和工程应用

悬索结构形式极其丰富多彩,根据几何形状、组成方法、悬索材料以及受力特点等不同因素,可有多种不同的划分。本章按组成方法和受力特点将悬索结构分为:单层悬索体系、预应力双层悬索体系、预应力鞍形索网、劲性悬索、预应力横向加劲单层索系、预应力索拱体系、组合悬索结构、悬挂薄壳与悬挂薄膜,以及混合悬挂结构等形式。

需要说明的是,上述各种悬索结构中有的体系在形式上具有两重性,这是由它们的结构形成过程所决定的;例如,悬挂薄壳结构是在单层索系、双层索系或索网等悬索结构上形成的,在形成悬挂薄壳之前,结构工作性能是属于悬索结构的;形成薄壳之后则具有薄壳结构的工作性质。对此类形式上具有两重性的悬索结构工程实例,本章未对其进行严格划分,而是沿用大多数参考文献的习惯作法,将其归属到某种形式。

第一节 单层悬索体系

单层悬索体系由一系列按一定规律布置的单根悬索组成,索两端锚挂在稳固的支承结构上。在悬索结构中,单层索系的构造和计算都比较简单。

一、单层悬索体系的三种形式

单层索系有平行布置、辐射式布置和网状布置三种形式。

平行布置的单层索系形成下凹的单曲率曲面,适于矩形或多边形的建筑平面,可用于单跨建筑,也可用于两跨或两跨以上的建筑(图 1.1.1)。

悬索两端可以等高,也可以不等高,依建筑造型和使用要求而定。索的两端等高或两端高差较小时,为解决屋面排水,可对各根单索采用不同的垂跨比;或各索垂跨比不变,调整各索端的悬挂高度,以形成下凹的单曲率屋面的排水坡度。

由于悬索对两端支座有较大的水平力作用,因此合理可靠地解决水平力的传递成为悬索结构设计中的重要问题。图 1.1.1 (a) ~ (d) 表示了各种不同的悬索支承体系。其中 (a) 图表示索的支承结构为由水平梁与山墙顶部的压弯构件组成的闭合框架,水平梁在索的水平力作用下抗弯工作;顶在水平梁两端的压弯构件抗压承受水平梁端的反力,索的水平力在闭合框架内自相平衡。水平梁往往因有较大的索水平力作用需要较大的截面;为此可利用建筑物下部的框架结构为水平梁提供一系列弹性支座,以减轻其负担,如 (b) 图所示。(c) 图表示悬索直接锚挂在框架顶部,索的水平力由框架传至基础。(d) 图表示索的水平力由斜拉索拉向地锚,进行平衡。

国外最大的单跨、单层平行悬索结构是德国的多特蒙德展览大厅屋盖,跨度达 80m (图 1.1.9);最大的双跨、单层平行悬索结构是德国的法兰克福机场 5 号机库,其单跨跨度达 135m (图 1.1.7);覆盖面积最大的是美国约翰迪尔 (John Deere) 公司拖拉机站悬索

屋盖（见表 1.1.1），其覆盖面积达 16700m^2 。

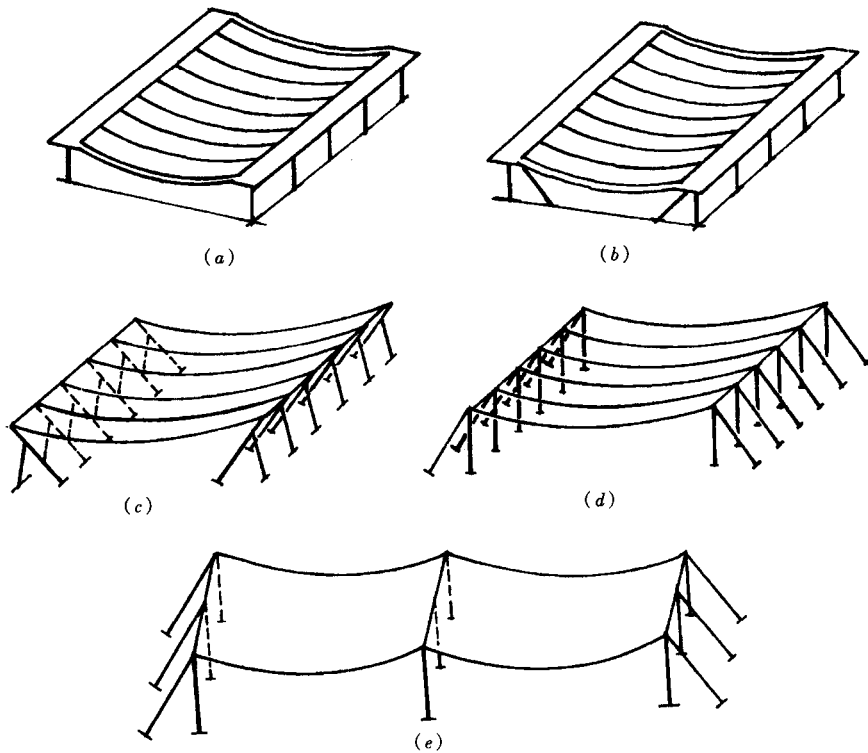


图 1.1.1 平行布置的单层悬索体系

单索辐射式布置形成下凹的双曲率碟形屋面，适用于圆形、椭圆形平面（图 1.1.2a）。显然下凹的屋面不便于排水。当房屋中央允许设支柱时，可利用支柱提供中间支承，做成伞形屋面（图 1.1.2b）。辐射式布置的单层索系中，要在圆形平面的中心设置中心拉环；在外围设置受压外环梁。索的一端锚在中心环上，另一端锚在外环梁上。在索中拉力的水平分量作用下，内环受拉，外环受压；内环、悬索、外环形成一自平衡体系。悬索拉力的竖向分力不大，由外环梁传到下部的支承柱。这一体系中，受拉内环采用钢制，受压的外环一般采用钢筋混凝土结构，从而充分利用了不同材料的特点，做到材尽其用、经济合理，因而辐射式布置的单层索系可比平行索系做得更大跨度。在均布荷载作用下，在圆形平面内呈辐射状布置的各根拉索内力相等，内力值随垂度的增加而减小；但在

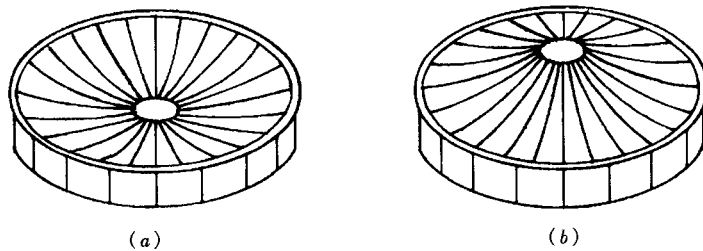


图 1.1.2 辐射式布置的单层悬索体系

(a) 碟形屋面；(b) 伞形屋面