

悬索结构设计

沈世钊 徐崇宝 赵 臣 著

中国建筑工业出版社

前 言

大跨度建筑及相应的大跨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 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,应用的结构形式趋向多样化,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作出一点贡献。

基于这一宗旨,作者坚持以便于实用作为编写本书的指导方针。为此本书努力做到下面几点:

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,使读者对丰富多采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,避免把本书写成以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。在有限元方法和计算机使用十分普遍的今天,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,并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、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。作者们热诚欢迎同行专家和广大读者给我们提出意见。

作者

1996 年 4 月于哈尔滨建筑大学

(京)新登字 035 号

图书在版编目(CIP)数据

悬索结构设计/沈世钊等著.-北京:中国建筑工业出版社,
1997
ISBN 7-112-03248-2

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 (97) 第 05101 号

本书系统而简明地叙述了悬索结构的设计计算和构造方法,也涉及施工问题及对悬索施加预应力的问题。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。全书包括的结构形式有: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、横向加劲单层索系与索拱体系;组合式悬索结构;悬挂薄壳与薄膜结构;混合悬挂体系。书中内容按设计实用要求编写,可供房屋设计工程技术人员及工民建专业大专院校师生应用参考。

悬 索 结 构 设 计

沈世钊 徐崇宝 赵 臣 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

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:15¼ 字数:374 千字

1997 年 8 月第一版 1997 年 8 月第一次印刷

印数:1-2500 册 定价:20.00 元

ISBN 7-112-03248-2
TU·2497(8391)

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)

目 录

前言	
绪论	1
第一章 悬索结构的形式和工程应用	6
第一节 单层悬索体系	6
第二节 预应力双层悬索体系	17
第三节 预应力鞍形索网	28
第四节 劲性索、横向加劲单层索系与索拱体系	41
第五节 组合悬索结构	50
第六节 悬挂薄壳与薄膜结构	56
第七节 混合悬挂体系	60
第二章 悬索结构的解析计算方法	67
第一节 单索计算理论	67
第二节 双层索系的计算	81
第三节 鞍形索网的计算	99
第四节 横向加劲单层索系的实用分析	119
第五节 劲性悬索的计算	124
第六节 索拱体系的计算	131
第三章 悬索结构的有限元分析	141
第一节 节点位移法的基本方程	141
第二节 基本方程的迭代解法	146
第三节 计算实例	149
第四章 悬索结构自振特性及地震反应分析	159
第一节 悬索结构自振频率与振型	159
第二节 悬索结构自振频率的简化计算	168
第三节 悬索结构地震反应分析的反应谱法	175
第四节 悬索结构非线性地震反应的时程分析法	176
第五章 悬索结构风振反应分析	184
第一节 风荷载	184
第二节 悬索屋盖结构风振反应的随机振动分析法	194
第三节 悬索结构体系非线性风振反应分析的时域法	198
第四节 具有空间相关性风场的计算机模拟	201
第五节 悬索结构风振反应参数分析	204
第六节 悬索结构风振系数	208
第六章 悬索屋盖结构设计和施工要点	211
第一节 钢索	211
第二节 钢索的锚固——锚具及锚固节点构造	214

第三节 悬索结构的其他节点构造 222

第四节 悬索屋盖设计中的几个问题 230

第五节 悬索结构的施工要点 233

参考文献 236

绪 论

悬索结构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。

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 年对已建成的近二十个悬挂屋盖所作的统计,当跨度不超过 150m 时,每 m^2 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,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这种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。

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,并且从本世纪初以来取得了可观的发展。但在房屋建筑方面,只是近 40 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达 160m。

中国现代悬索结构的发展始于 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 94m,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上较先进水平的。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,它的直径为 61m 的圆形屋

盖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 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。因而十余年来,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。

近年来,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)斜拉式屋盖。
- 7)索拱体系。

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,山东省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,因而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,安徽体育馆等工程所采用的设置横向加劲梁(或桁架),并通过下压梁端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”。

十年来,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”的中央支撑结构组成。这种由两条悬索和两个钢拱组成的索拱体系本身是一种混合结构,其概念很具有创新意义。

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。鉴于混合式悬挂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。

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 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,例如:推导了车辐式双层索系在屋面均匀荷载作用下计算公式;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的分析。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($18\text{m} \times 12\text{m}$)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。

80 年代初期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[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[49]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了出来,其功能一般包括体系预应力状态的计算、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;不少程序配有图形显示功能。近几年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,尤其是随着程序的商品化功能的加强以及随之而来的进一步普及,悬索结构的推广应用将会获得更加方便的手段。自然,这并不意味着否定各种解析方法的作用。事实上,以解析法为基础的各种实用计算方法,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,是由简单的手算来完成的。

近年来关于悬索结构研究的一个特点,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 60 年代,就作过车辐式双层索系、椭圆平面和菱形平面双曲抛物面索网的模型试验。近几年来,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等,也大都包括体系前几阶自振频率和振型的测定。

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,几年来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近几年也在逐步开展。这些研究相对集中于三个研究领域:1)张拉结构初始形状的确定;2)悬索结构的地震反应分析;3)悬索结构的风振反应分析。

柔性的张拉结构在没有施加预应力以前没有刚度,其形状是不确定的。必须通过施加适当预应力赋予一定的形状,才能成为能承受外荷的结构。在给定的边界条件下,所施加的预应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应力系统,就是张拉结构的“外形确定”或更确切地称之为“初始平衡状态的确定”这一命题要解决的任务。这是索网结构等张拉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,其初始状态一般需通过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拉结构,要确定出既具有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。这也许可从一个方面说明:为什么我们建造的悬索结构还很少具有像国外某些著名的张拉结构那样的在造型方面的大胆构思。近年来,国内研究者在探讨有效的确定张拉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工作。过去这方面的研究甚少,尤其是关于大跨柔性屋盖风振问题的研究,在国内外均基本上是空白的。近几年来,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的研究^[65],对索—梁(桁)体系还做了细致的动力模型试验^[73],使我们对这两种悬索体系的抗地震性能的了解大大前进了一步。文献^[74]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的分析。悬挂屋

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或发生颤振以致毁坏。国内一些研究者近年来开创了较系统的随机风振反应的研究,取得了可喜的成果^[52~56,59,60,66],文献[75]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。关于悬索结构的动力反应研究正方兴未艾。

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。而且,迄今国内所建造的许多悬索屋盖工程,从设计计算到材料、设备和施工全是由国内技术完成的。但另一方面也要看到,同网架和网壳结构近年来的发展相比,悬索结构的发展相对来说较为缓慢,工程实践的数量仍然不够多,远没有达到普遍应用的程度,尤其是特大跨度的或在造型上具有新颖构思的代表性作品不多。分析起来可能有几方面的原因:1)悬索结构的设计计算理论相对复杂一些,又缺少较完备的参考书籍和具有较高商品化程度的实用计算程序,必要的设计和施工规程也尚未制定出来,因而难于为一般设计单位普遍采用;2)尽管悬索结构的施工并不复杂,但一般施工单位对它不够熟悉,更没有形成专业的悬索结构施工队伍,这也影响建设单位和设计单位大胆采用这种结构形式。按照我们的看法,在我国悬索结构的工程实践和理论研究已经发展到当前水平的基础上,上述这些问题已有条件着手解决。目前,悬索结构技术规程在中国建筑科学研究院主持下已编制完成,即将审批颁行。我们编写出版这本书的目的,也是希望能为广大设计人员提供一本较系统和实用的参考资料。我们相信,随着各种条件逐步完备,我国悬索结构必将取得更快的发展。

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区分为: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,结构工作性能属于悬索结构的;形成薄壳之后则属于薄壳结构的工作性质。对此类具有两重形式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,悬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。

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、两跨以上的建筑(图 1-1)。

悬索两端可以等高,也可以不等高,依建筑造型和适用要求而定。索的两端等高或两端高差较小时,为解决屋面的排水,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 *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 1-8);覆盖面积最大的是美国约翰迪尔公司拖拉机站悬索屋盖(见表 1-1),其覆盖面积达 16700m²。

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 1-2*a*)。显然下凹的屋面不便于排水。当房屋中央容许设支柱时,可利用支柱升起为悬索提供中间支

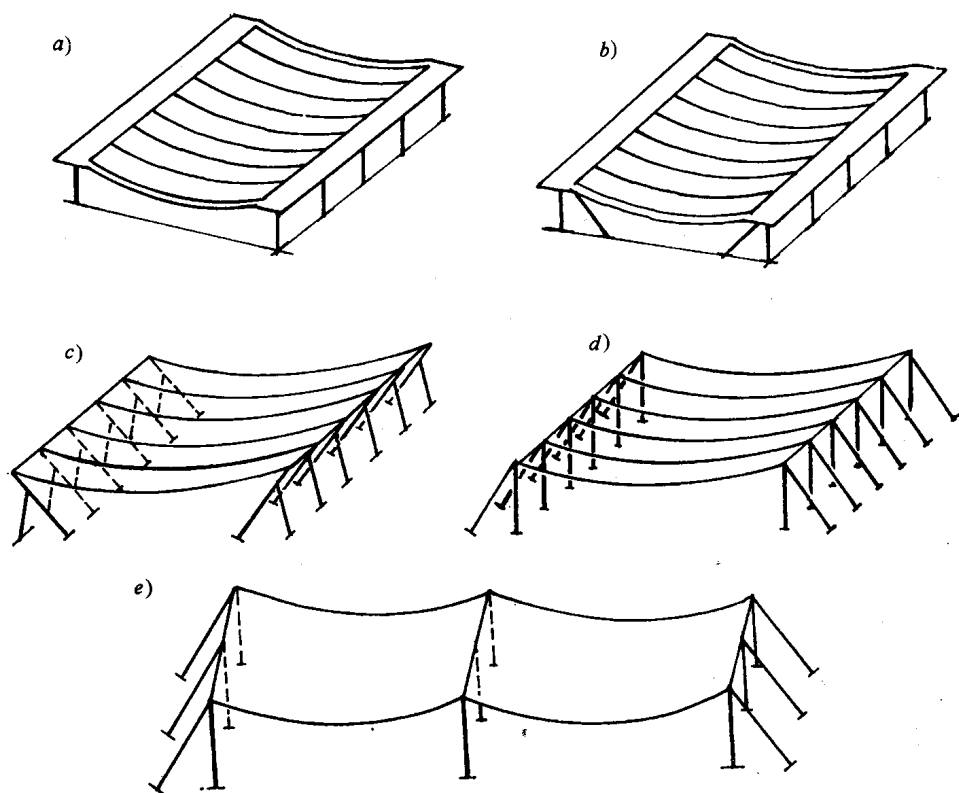


图 1-1 平行布置的单层悬索体系

承,做成伞形屋面(图 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。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,充分发挥钢材的

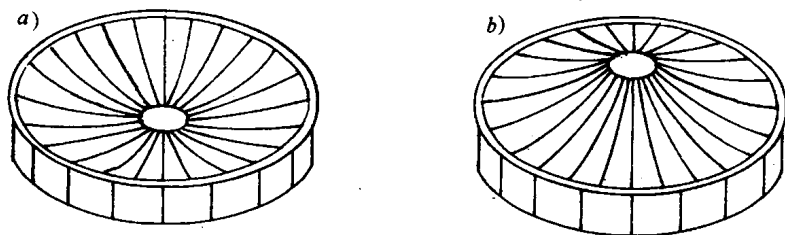


图 1-2 辐射式布置的单层索体系

抗拉强度;受压的外环一般采用钢筋混凝土结构,充分利用混凝土的抗压强度,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到较大跨度。当前最大的碟形悬索结构是美国的阿拉美达郡比赛馆屋盖(1967 年),跨径达 128m;最大的伞形悬索屋盖是前苏联的乌斯契—伊利姆斯克汽车库,跨径达 206m。

网状布置的单层索系形成下凹的双曲率曲面,两个方向的索一般呈正交布置,可用于圆形、矩形等各种平

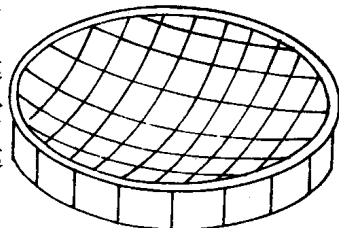


图 1-3 网状布置的单层索体系

面。用于圆形平面时,省去了中心拉环(图 1-3)。网状布置的单层索系屋面板规格统一;但边缘构件的弯矩大于辐射式布置。山东淄博市化纤厂餐厅的单层悬索屋盖(见表 1-2)也采用了这种网状布置,其平面形状为正方形,面积 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 。沿该屋盖两对角线还布置了两根主索,同时抬高正方形的四个角点和压低四条边的中点,较好地解决了屋面的排水问题(图 1-4)^[7]。

单层悬索体系的工作与单根悬索相似,其形状稳定性不好。所谓形状稳定性不好,有相互联系的两层含义:(1)悬索是一种可变体系,其平衡形式随荷载分布方式而变。例如,在均布恒荷载作用下,悬索呈悬链线形式(也可近似地视为抛物线形式);此时如再施加某种不对称的活荷载或局部荷载,原来的悬链线或抛物线形式即不再能保持平衡,悬索将产生相当大的位移,形成与新的荷载分布相应的新的平衡形式。这种位移是由平衡形式的改变引起的,称为机构性位移,以与一般的由弹性变形引起的位移相区别。悬索抵抗机构性位移的能力就是索的形状稳定性;它与索的张紧程度(即索内初始拉力的大小)有关。索内拉力愈大,其抵抗局部荷载引起的机构性位移的能力也愈大,即形状稳定性愈好。(2)抗风能力差。作用在悬挂屋盖上的风力,主要是吸力,而且分布不均匀,会引起较大的机构性位移。同时,在风吸力作用下,由于悬索内的拉力下降,抵抗机构性位移的能力进一步降低。当屋面较轻时,甚至可被风力掀起。

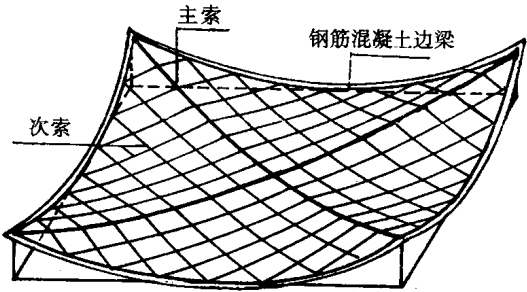


图 1-4 淄博市化纤厂的悬索屋盖

为使单层悬索体系具有必要的形状稳定性,一般有如下几种做法:

(1)采用重屋面,如装配式钢筋混凝土屋面板等。利用较大的均布恒荷载使悬索始终保持较大的张紧力,以加强维持其原始形状的能力,既提高了抵抗机构变形的能力,同时较大的恒荷载又能较好地克服风力的卸载作用。但与此同时,重屋面使悬索截面增大,支承结构的受力也相应增大,从而影响经济效果。

(2)采用预应力钢筋混凝土悬挂薄壳。为了进一步加强这种屋盖的稳定性和改善它的工作性能,往往对钢筋混凝土屋面施加预应力。通常的施工方法为:在钢索上安放预制屋面板后,在板上加额外的临时荷载,使索进一步伸长而板缝增大,然后进行灌缝。待混凝土硬结达到预定强度后,卸去临时荷载,在屋面板内便产生了预应力,从而整个屋面形成一个预应力混凝土薄壳。使用膨胀混凝土灌缝,也能达到同样的效果。对于平行布置的单层悬索组成的单曲屋面,尚须在与索垂直的方向施加预应力,以避免在局部荷载下产生顺索方向的裂缝。这种做法的好处是:1)在雪荷、风荷等活载的作用下,整个屋面如同壳体一样工作,形状稳定性大为提高;2)由于存在预应力,索和混凝土共同抵抗外荷载作用,提高了屋盖的刚度,弹性变形引起的屋面挠度大为减小;3)在使用期间屋面产生裂缝的可能性大为减小。

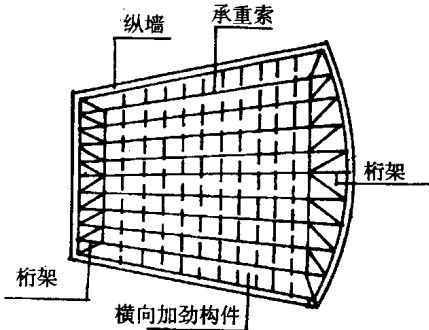


图 1-5 德国某音乐厅的横向加劲单层索系

(3)采用横向加劲构件。改善单层悬索体系

工作性能的另一办法是设置横向加劲梁或加劲桁架,形成所谓的索梁体系或索桁体系,如德国的某音乐厅即采用这种加强做法(图 1-5)^[9]。横向加劲构件具有一定的抗弯刚度,其两端与山墙处的结构相连,并与各悬索在相交处互相连接。这些构件使原来单独工作的悬索连接成整体,与索共同承受外荷载。尤其是在集中力和不均匀荷载作用下,梁能对局部荷载起分配作用,让更多的索参加工作,从而改善了整个屋面的受力性能。安徽省体育馆屋盖更进一步地采用了预应力索桁体系,即以强迫下压桁架两端的支座,使其产生位移的方法,在索桁体系中建立起预应力。理论研究和实验证明,预应力索桁体系能更有效地改善单层索系的形状稳定性和提高刚度,详细情况还将在第四节介绍。

悬索的垂度与跨度之比是影响单层悬索体系工作的重要几何参数。相同跨度、荷载条件下,垂跨比小时,悬索体系曲面扁平,其形状稳定性和刚度均差,索中拉力也大;垂跨比大

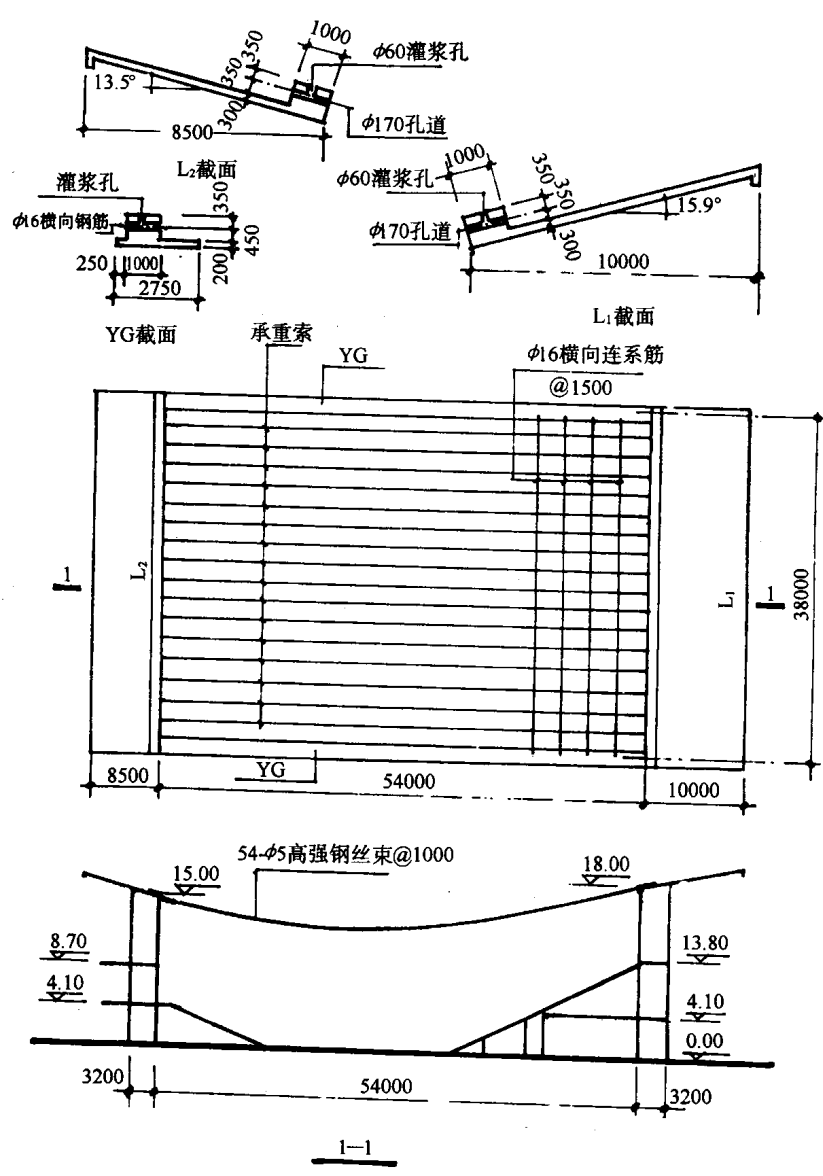


图 1-6 淄博市体育馆的主要结构

时,索系的稳定性和刚度随之得到改善,索中拉力减小。当然,垂跨比的加大使结构所占空间增加,以致可能影响综合的经济性。单层悬索体系垂跨比的一般经验取值为 $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{10}$ 。

单层悬索体系是现代悬索结构发展早期应用较多的一种形式。我国于 80 年代采用单层索系相继建成了一些中、小跨度的悬索结构工程,包括平行布置、辐射式布置和网状布置等各种单层索系形式。1986 年建成的淄博市体育馆的主要结构示于图 1-6。国外从 50 年代起直到 70 年代修建了大量单层悬索体系的工程,其中最早的是 1956 年建成的德国乌柏特市游泳馆。表 1-1 和表 1-2 选入了国内外一些具有代表性的典型工程,并尽量根据现有资料介绍了它们的结构特点。

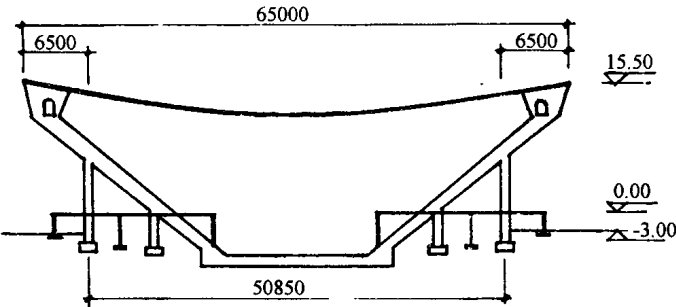


图 1-7 德国乌柏特市游泳馆结构剖面

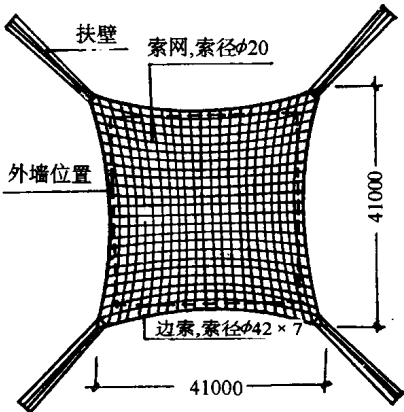


图 1-10 日本古川市民会馆
网状布置单层悬索屋盖

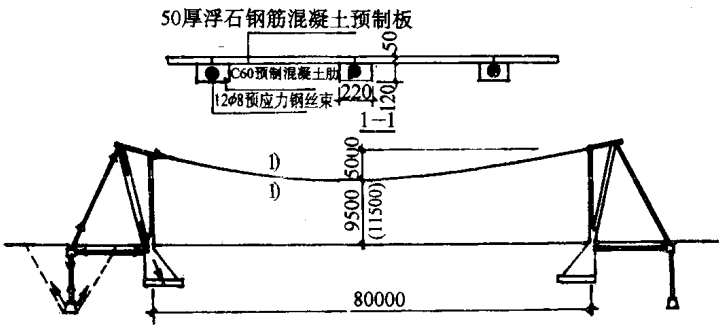


图 1-8 德国多特蒙特展览大厅结构剖面

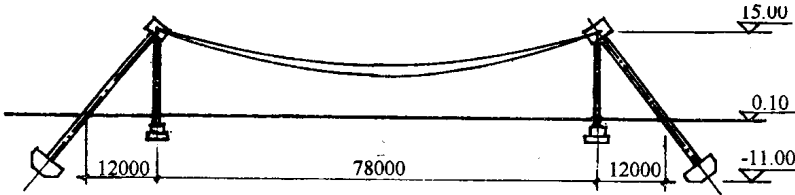


图 1-9 前苏联克达斯诺牙尔斯克车库结构剖面

单层平行布置悬索体系工程实例

表 1-1

序号	工程名称	结构简图	建成年份	平面形状 长×宽 (m×m)	垂跨比	主要结构情况	荷载 (kN/m ²)	材料指标	
								索耗钢 边缘构件 (kg/m ²)	混凝土 折算厚度 (cm/m ²)
1	淄博市体育馆	见图 1-6 基本同序号 1	1986	矩形 54×38	$\frac{1}{13.5}$	索采用 54φ5 高强度钢丝束,索距 1m,锚具为环销锚。高强度钢丝束设置在板缝的位置,便于安装预制混凝土屋面板,灌缝后,利于防腐蚀。挂索后,安装预制槽板,用堆砖方法加临时荷载 10kN/m ² ,以 C40 细石混凝土灌缝,达到强度后卸去临时荷载,形成预应力混凝土薄壳,在其上做保温、防水。索的边缘构件为水平大梁与压杆组成的闭合钢筋混凝土水平框架。框架承受大部分索力,两侧看台框架作为纵向梁的弹性支承分担部分索力	3.0	$\frac{5.0}{30}$	5.5
2	淄博毛纺厂职工俱乐部		1987	矩形 36×27				$\frac{5.0}{20}$	
3	淄博钻井公司体育馆		1988,	矩形 54×38				$\frac{5.0}{30}$	
4	新汶矿物局体育馆		1989						
5	德国乌柏特市游泳馆	见图 1-7	1956	矩形 65×44	$\frac{1}{21}$	索采用 St37φ24 圆钢,间距 200mm~240mm,外套灌满沥青的 φ30mm 钢管。挂索后索两端锚入重混凝土型边梁,边梁截面为 0.18~0.24m×6.5m。屋盖采用浮石轻质混凝土 60mm 厚,泡沫塑料保温卷材防水。属于重屋面做法。索的拉力靠间距 3.8m 的看台框架承受,看台斜梁一直伸到游泳池的混凝土底板处,索的水平力在池底平衡			

续表

序号	工程名称	结构简图	建成年份	平面形状 长×宽 (m×m)	垂跨比	主要结构情况	荷载 (kN/m ²)	材料指标	
								索耗钢 边缘构件 (kg/m ²)	混凝土 折算厚度 (cm/m ²)
6	德国多特蒙特展览大厅	见图 1-8	1956	矩形 118×80	$\frac{1}{16}$	索为 12 根 $\phi 8\text{mm}$ 的高强钢丝束, 间距 1.25m, 索被包在 120mm×240mm、C60 的预制钢筋混凝土土肋中, 预应力钢丝束锚在 5.5m 宽的边梁内。索的拉力靠三角形框架传至地基, 斜拉杆作成预应力的钢筋混凝土的, 斜杆拉力的竖向分力由锚于地面以下的梯形截面钢筋混凝土带平衡			
7	美国华盛顿杜勒斯机场候机楼		1957	矩形 195.2×51.5		悬索采用 $\phi 25\text{mm}$ 圆钢, 索沿短向布置, 悬索体系的稳定性采用序号 1 的、用临时荷载加预应力方法, 但其预制混凝土板为轻质混凝土的。索拉力由抗弯刚度很大的斜柱传递			
8	前苏联克达斯诺达尔斯克车库	见图 1-9		矩形 84×78	$\frac{1}{11.5}$ ~ $\frac{1}{8}$	索为 $\phi 40\text{mm}$ 圆钢, 25T2C 钢, 间距 1.5m, 沿短向布置, 预制带肋混凝土屋面板, 厚 25mm, 用砖加预应力形成悬挂混凝土薄壳。边梁截面为 I 字形, 高 2.2m。下部支承结构为 A 形钢筋混凝土支架, 间距 12m。直柱与斜柱截面 I 字形, 分别为 1.0×0.7m、0.7×0.7m		38.6 (包括下部 支承结构)	25.3 (同左)
9	澳大利亚布鲁斯体育馆			矩形 104×79		索采用上索与下索(均为下凹)形成 V 形空间拉索桁架, 因此其本身具有一定的抗弯刚度。屋面采用 50mm 厚钢筋混凝土板, 斜的锚拉杆拉力达 3500kN, 斜压柱压力达 8000kN			