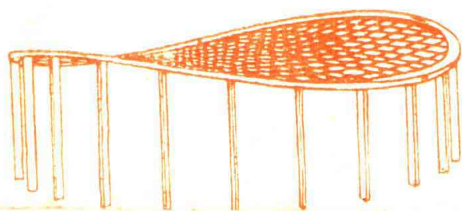
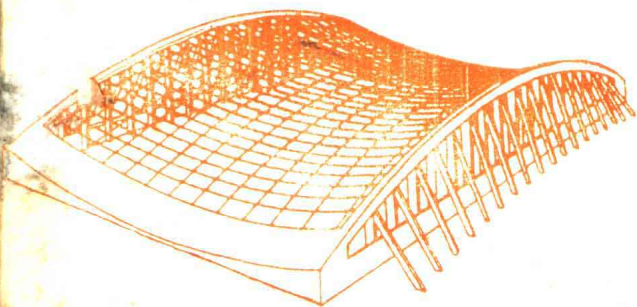
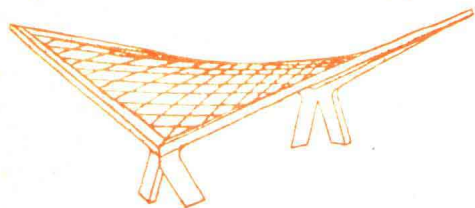
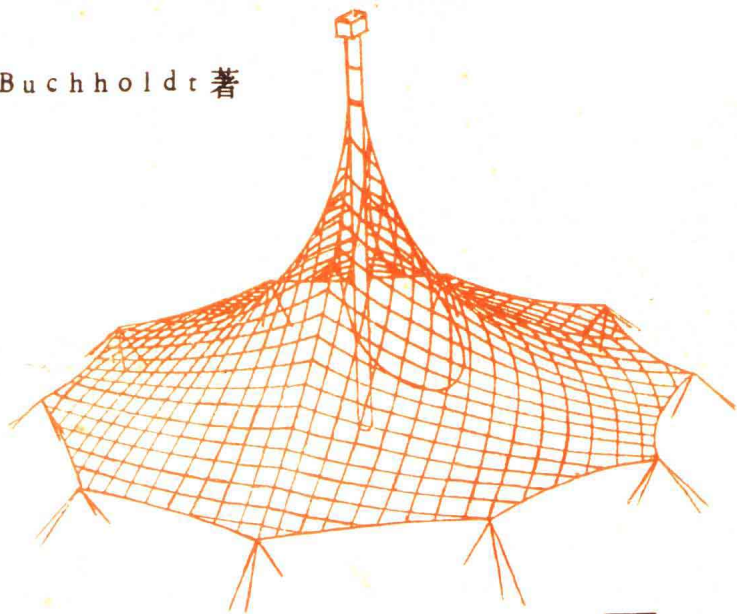


〔英〕H. A. Buchholdt 著

王克洪 译



悬索屋顶结构导论

武汉工业大学出版社

悬索屋顶结构导论

〔英〕 H·A·Buchholdt 著

王克洪 译

刘声扬 校审



武汉工业大学出版社

1990·武汉

内 容 提 要

本书列述了各种悬索屋顶结构体系及其静力和动力分析、风及地震荷载的特性、钢索和端头的制造和防护以及拉锚链的设计和施工等，对索梁、索梁网格与索网屋顶结构的设计和计算方法均作了详细介绍并列有实例。

本书可供土建专业设计、施工人员使用，也可供大专院校土建专业师生作为教材或教学参考书。

[英]H.A.Buchholdt

An introduction to cable roof structures

Cambridge University press 1985

悬 索 屋 顶 结 构 导 论

[英] H.A.Buchholdt 著

王克洪 译

刘声扬 校审

*

武汉工业大学出版社出版发行

石首市第二印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：10 字数：225千字

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数1—1000 定价：3.60元

ISBN7—5629—0389—1/TJ·0025

序

建国以来，随着国民经济的蓬勃发展和人民物质文化水平的提高，我国修建了许多钢结构的大跨屋顶。尤其是在改革开放的近十年来，由于设计理论和电子计算技术的不断完善，全国各地陆续修建了数以百计的平板网架，其中除公共建筑外，亦不乏中、小型工业建筑。它标志着我国的房屋建筑由传统的平面结构体系向空间结构体系迈进了一大步。然而，在空间结构体系中仍有待开发，还有着很大潜力。

众所周知，采用轻质高强材料，减轻结构自重，对建筑具有显著的经济效益，这对主要承受横向荷载的受弯构件——屋顶结构——更是如此。悬索屋顶结构系将主要承重构件的受力形式转换为只受轴心拉力，因而能最充分有效地发挥钢材性能的特点。尤其是当采用高强度钢索时，用钢量很低，其经济效益更为明显。我国建造的北京工人体育馆、浙江人民体育馆、吉林市体育馆和成都城北体育馆均显示出这一优点，如浙江人民体育馆的用钢量仅 17.3kg/m^2 。国外有些资料统计的悬索屋顶结构的用钢量还要低，当跨度不大于 150m 时，一般只在 10kg/m^2 以下，比平板网架的约低 $60\sim 70\%$ 。

正如本书原作者在前言中所述，悬索屋顶结构目前在应用数量上还属一般（我国则屈指可数），其原因除了可能与建筑师和工程师们对悬索屋顶的设计还不太熟悉外，另外有可能是认为悬索结构只能应用于大跨度桥梁或大跨度公用建筑，以为这才是经济的选择。然而，有相当多的资料证明，

对较小跨度的建筑，与框架结构比较，悬索结构亦不失为是一个节省钢材的较佳选择。

悬索屋顶结构建筑造型美观，且能灵活适应各种平面图形和塑造外形轮廓，满足建筑功能和表达形式的各种要求。所以，它也是符合建筑师们的愿望，从而可以大展鸿图的开发领域。

悬索结构施工简便，难度不大，不需大型起重设备，也不需设置脚手架和模板，故可较大地降低施工费用。

英国 H.A.Buchholdt 著《悬索屋顶结构导论》一书，系一本论述悬索屋顶结构不可多得的书籍，其内容新颖，叙述清楚，且偏重实用。书中附有大量设计用表，可方便设计采用。同时还涉及许多施工知识，可指导安装操作。

王克洪同志长期从事建筑事业，深感开发新结构的重大意义，故不辞辛劳，精心翻译《悬索屋顶结构导论》一书，介绍给国内读者，这无疑将对我国发展悬索结构起到很大的作用。当然，悬索结构的开发我国还需要在高强度钢绞线，钢丝束等高效钢材的生产上作一些研制开发工作，增加产量，降低价格。但我们想，不会太久，在原材料得到充足供应，价格适当降低的情况下，悬索结构将会充分展现其强大的竞争力。

刘声扬
周祖勋 谨识

1990.4.1.

原 著 前 言

在60年代和70年代初,不少人意识到悬索屋顶结构的建筑和经济潜力将导致增加这类建筑的需求量。从而在世界范围内对其不同结构体系的特性展开了大量的研究工作。对悬索结构的关注也促使了增加对求解大规模非线性方程组的数值方法的应用和发展的关注,而高速电子计算机的出现亦使其成为可能。

然而,当初对悬索屋顶需求量的期望迄今并未实现,目前悬索屋顶的总数比较起来还属一般之列。这可能有几个原因。对大跨度结构的需求量比预计的要少。建筑师和工程师们对悬索屋顶的设计一般还不太熟悉,并有认为它们只对非常用建筑如体育馆、溜冰场和博览厅才适合的倾向。悬索屋顶的工业潜力及其在地震区域的应用还完全没有发挥。悬索需要的拉锚桩的费用相对较高的部分原因,考虑也是由于缺乏施工经验和缺少研究所致。

写作本书是为了促进悬索屋顶设计的应用并叙明悬索屋顶的多种实用结构形式,这些结构形式简单而且可用大家所熟悉的普通材料如预应力钢绞线、金属盖板、木材或混凝土廉价建造。本书不打算对悬索屋顶在建筑、结构和技术方面作详尽的探讨,而是象书名所表示的,对悬索屋顶的各种类型作一介绍。但是,可以期望书中包含的足够的资料,使拥有微机的感兴趣的工程师们可以不需任何外助而靠他们自己进行设计。

对轻型结构建筑方面特别感兴趣的读者可参考斯图加特

(Stuttgart) 大学的Frei Otto教授的著作, 他在这一领域耕耘了数十年之久。对分析方面更感兴趣的读者, 推荐参考H.Mollmann博士和H.Irvine博士的著作, 并可在诸多论述数学数值方法的书籍中任选一本。(见参考文献[3.1]、[4.15]和[4.19]。

撰写风和地震荷载一章的主要目的是向读者介绍生成风和地震曲线的方法, 这些曲线可结合第五章中的非线性理论一起应用。严格地讲, 生成曲线仅适用于线性结构, 如果采用近似假设, 也可以用于非线性结构。但是, 为了开展生成曲线理论直接用于非线性结构, 有必要作进一步的研究。

最初写索梁和索梁网格这一章时, 曾打算包含许多设计用的无量纲曲线。但是很快就明瞭, 所需的曲线数量太多以致不可能办到。所以当中只登出了适当数量经作者分析出的结构受力和变位的无量纲图表, 它们将帮助读者掌握一些有关悬索屋顶结构特性设计参数变化影响的感性认识。

作者在写作过程中得到许多人士的帮助和鼓励。英国钢索有限公司的M.J.Tawse对写作论述钢缆索的制造和特性的章节给予了协助。P.Spinelli博士和D.Kag先生分别提供了风和地震荷载的原始图稿。R.Dixon先生为设计考虑事项一章撰文。作者谨向他们特别感谢。作者还要向J.Armishaw先生致谢, 他帮助修改了作者早先与N.Vadgama先生合写的有关拉锚桩的论文, 该篇论文的内容构成了拉锚桩一章。

P.Regan博士、P.Krishna教授和H.Tottenham教授审查了原稿并提出了许多有用的建议, S.Moosavinejed博士和H.Tabar-Heydar博士在计算机分析方面给予了帮助, D.Mutlow先生绘制了大部分插图, 他的夫人R.Buchholdt女士打印了表格、曲线图、图表和原稿, 作者也一并致以谢忱。

最后，作者要向多年支持悬索屋顶分析研究工作的科学与工程研究院和White Young及其合伙人的公司，以及给作者的研究工作提供了方便的同事们表示谢意。另外，本书除其他用处外，大部分内容是按大学教学任务编写的。

H.A.Buchhodt

1984

目 录

序言

原著前言

第一章 结构体系	(1)
§ 1—1 引言	(1)
§ 1—2 简单悬索结构	(3)
§ 1—3 预张拉悬索梁结构	(5)
§ 1—4 预张拉悬索网结构	(9)
§ 1—5 预张拉索梁网格结构	(13)
§ 1—6 一般结构特性	(14)
参考文献	(15)
第二章 风和地震荷载	(17)
§ 2—1 风—引言	(17)
§ 2—2 风的特性	(18)
§ 2—3 平均风速的特性	(20)
§ 2—4 阵风速度矢量的特性	(22)
§ 2—5 用频率域分析结构反应	(27)
§ 2—6 时间域分析风曲线的生成	(27)
§ 2—7 数例	(33)
§ 2—8 压力系数	(34)
§ 2—9 地震—引言	(40)
§ 2—10 地面运动表示法	(43)
§ 2—11 时间域分析模拟加速度曲线图的生成	(46)
参考文献	(50)
第三章 自由悬索	(53)
§ 3—1 引言	(53)
§ 3—2 自由悬索的控制方程	(54)

§3-3 假设分布荷载 w_x 沿跨度分布的悬索·····	(55)
参考文献·····	(63)
第四章 悬索结构静力分析 ·····	(65)
§4-1 序言·····	(65)
§4-2 只有集中荷载的结构·····	(68)
§4-3 受横向荷载的悬索构件·····	(80)
§4-4 松弛的悬索构件·····	(81)
§4-5 悬索破裂·····	(82)
§4-6 具有非线性应力—应变关系的悬索构件·····	(82)
§4-7 撑杆构件的压曲·····	(84)
§4-8 温度变化·····	(84)
§4-9 数值上的难点和变换·····	(85)
§4-10 收敛标准·····	(86)
§4-11 迭代过程摘要·····	(87)
参考文献·····	(100)
第五章 悬索结构动力分析 ·····	(103)
§5-1 动力分析的重要性及范围·····	(103)
§5-2 悬索屋顶的频率分析·····	(104)
§5-3 时间相关动力荷载的分力·····	(107)
§5-4 阻尼·····	(108)
§5-5 时间域动力分析·····	(116)
参考文献·····	(130)
第六章 钢索和端头 ·····	(134)
§6-1 钢索·····	(134)
§6-2 钢材·····	(137)
§6-3 钢索的制造·····	(137)
§6-4 影响钢索的环境因素·····	(139)
§6-5 防护外膜·····	(143)
§6-6 钢索特性·····	(144)

§ 6—7 钢索端头	(146)
§ 6—8 钢索的绷直—预应力	(150)
§ 6—9 徐变	(153)
§ 6—10 疲劳	(153)
§ 6—11 钢索的柔性	(155)
参考文献	(156)
第七章 拉锚桩	(157)
§ 7—1 引言	(157)
§ 7—2 拉锚桩的类型及其适用性	(158)
§ 7—3 重力锚桩	(161)
§ 7—4 平板锚桩、蘑菇形锚桩及其他锚桩	(161)
§ 7—5 受拉桩	(167)
§ 7—6 土壤锚桩	(171)
§ 7—7 岩石锚桩	(177)
§ 7—8 结语	(179)
参考文献	(179)
第八章 索梁和索梁网格	(182)
§ 8—1 引言	(182)
§ 8—2 结构性能	(182)
§ 8—3 索梁和索梁网格的初步设计分析	(191)
§ 8—4 设计和施工	(197)
§ 8—5 覆盖层和覆盖材料	(204)
§ 8—6 索梁安装	(204)
§ 8—7 边缘构件几何形状对边缘构件的受力影响	(205)
§ 8—8 初步设计举例	(211)
参考文献	(248)
第九章 索网屋顶	(250)
§ 9—1 引言	(250)
§ 9—2 形状选择	(254)
§ 9—3 静力和动力性能	(257)

§ 9—4 荷载	(268)
§ 9—5 索网结构的静力和动力模拟试验	(268)
§ 9—6 设计和设计详图	(270)
§ 9—7 安装方法	(274)
§ 9—8 覆盖层和覆盖材料	(275)
参考文献	(305)

第一章 结构体系

§1-1 引言

高强钢索的发展使人们相对地有可能用较低的费用传递巨大的轴心拉力。跨度日益增大的优美的现代悬索桥和索拉桥是用受拉构件承受巨大荷载的经济方法的最明显例子。

在大跨度屋顶设计中应用钢索，比较而言只是较近期才为建筑师们和工程师们所关注。可以确切地说，他们第一次发挥创造力的悬索屋顶结构是美国北卡罗莱纳州Raleigh的商品交易市场建筑。该市场建成于1953年。这座建筑物的主结构系由两个交叉混凝土拱支撑悬索网所组成，每个拱与水平线近似成 21° 的倾角(图1.1)。通过悬索的曲度和预张拉使屋顶

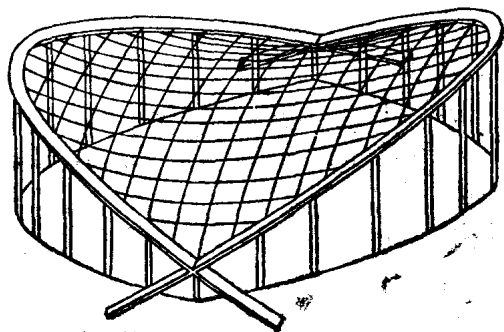


图1.1 美国北卡罗莱纳州Raleigh商品交易市场简图。

具有刚性。图1.2所示为悬索中的拉力由拱中的压力平衡的示意图。自从Raleigh市场建成以后，在世界各地已研究、发展和建造了不同结构型式的钢悬索屋顶。

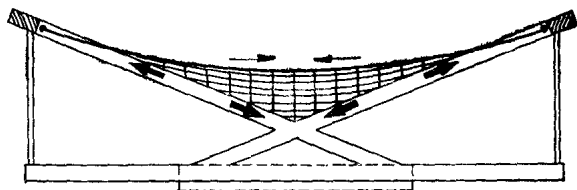


图1.2 美国Raleigh市场主结构平衡力作用示意图

悬索屋顶有着广泛的用途，可用于覆盖诸如运动场、体育馆、游泳池和蓄水池、音乐厅、剧场、冷却塔、飞机库、仓库和工厂等各种建筑物。经验表明，悬索屋顶结构具有显著的建筑、结构和经济潜力。悬索屋顶建筑形象引人注目，加之由于大部分主要承载构件承受拉力，结构稳定有效，故使其常被采用。

以往，悬索屋顶结构主要考虑应用于需要大面积自由柱的建筑。当其用于大跨度桥梁时，其理由之一就是普遍无疑义地认为这是经济的方案。但是，有相当多的资料表明，悬索结构也可作为较小跨度结构的竞选方案。随着钢材价格的连续上涨，相对于门架和空间框架等常用结构，悬索结构始终是一个更具吸引力的经济方案。

无论被支承的屋顶覆盖层的结构方式如何，张拉屋顶可根据下述分类：

- (a) 简单悬索；
- (b) 预张拉索梁；
- (c) 预张拉悬索网；

(d)预张拉索梁网格。

它们的整体结构可以是自平衡的或者是非自平衡的。在自平衡结构中支承悬索的结构几何形体可使悬索中的力在内部平衡。而在非自平衡结构中如果没有周围锚桩的帮助,其支承屋顶的几何形体不能够抵抗悬索力。

§1-2 简单悬索结构

屋顶覆盖的平面图为矩形或梯形时可由悬挂于垂直面内的一组简单悬索支承(图1.3)。对平面图为圆形或椭圆形的屋顶,悬索则径向悬挂,连接在屋顶外周边的压力环和中央部

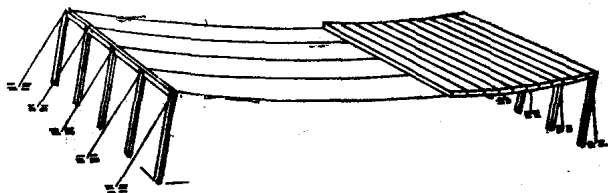


图1.3 钢索悬挂于平行平面内的简单悬索屋顶

位的拉力环上(图1.4)。对平面图为椭圆形或类似形状的屋顶,悬挂可采用两种以上的几何模式组合。如图1.5所示,制作两个半圆拉力环并用两根水平索将它们连接起来即可做到。结果形成一个伸长的拉力环,在屋顶中间部分悬索按平行平面悬挂,而在屋顶两端按径向平面悬挂。

以上所述均为篮形屋顶,须采用中央排水。此类结构体系缺乏刚性。为了减少因某些形式的外荷载引起的位移,屋顶

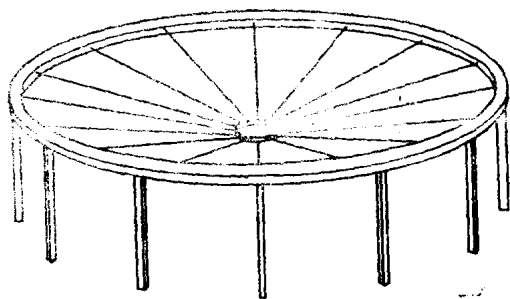


图1.4 钢索悬挂于内拉力环和外压力环之间径向平面内的简单悬索屋顶

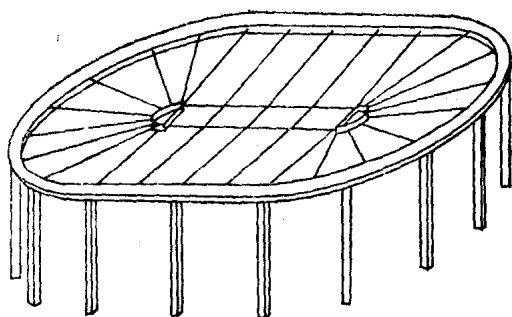


图1.5 中部钢索悬挂于平行平面内、端部钢索悬挂在内拼合拉力环和外曲梁之间的简单悬索屋顶

覆盖层必须很重或者具有壳体作用。显然，对简单悬索屋顶而言，混凝土是最合适的屋顶材料。混凝土可以采用预制板安装或是工地现浇。两种方法都可以应用。如果混凝土采用工地现浇，那么固定在悬索下面的胶合板或保温板可当模板。

两种情况都要考虑对悬索施加一定大小的预张力,以加强结构在施工期间的刚性和防止施工结束时屋面出现裂缝。当为圆形结构时,可用千斤顶将中心拉力环向下顶以获得预应力,待混凝土施工完后再予以放松。当采用预制板时,可在预制板灌缝之前于屋顶上放置超载,灌缝完后将超载移去,也可防止裂缝发生。

§1-3 预张拉悬索梁结构

倘若设置第二道反弯的钢索与悬索联结则可得到比前述更轻更强的结构体系,图1.6(a)、(b)和(c)。如果预张力足够大,能保证两根钢索在任意荷载组合下维持受拉,那么组合结构体系或称索梁将有强劲的刚度。为方便起见我们从梁谈起,图1.6(a)、(b)、(c)和图1.8^①所示分别为凸形梁、凹形梁和凸凹形梁。其中,第一根梁的连杆为压杆,第二根梁的为拉杆,第三根梁的外边两根杆件为拉杆,其余的为压杆。

图1.7^②所示为瑞典工程师David Jawerth研究的悬索桁架,桁架中的拉杆倾斜设置,同预张拉悬索相互联结,构成预张拉三角格体系。这样,在预张拉后,该桁架形成了与图1.6所示的梁不同的一种结构机构。其预张拉程度通常这样确定,即仅在恒荷载作用下使拉杆保持受拉状态。而在增加活荷载时,虽然会使一部分斜杆松弛,但仍要保持一半斜杆受拉。当一根或多根拉杆进入松弛阶段,桁架即转化成结构机构。Jawerth桁架已成功地应用于跨度为15~100米的许多建筑中。

对平面图为矩形、梯形、圆形或椭圆形的屋顶,索梁布

①原文误为图1.7。

②原文误为图1.8。