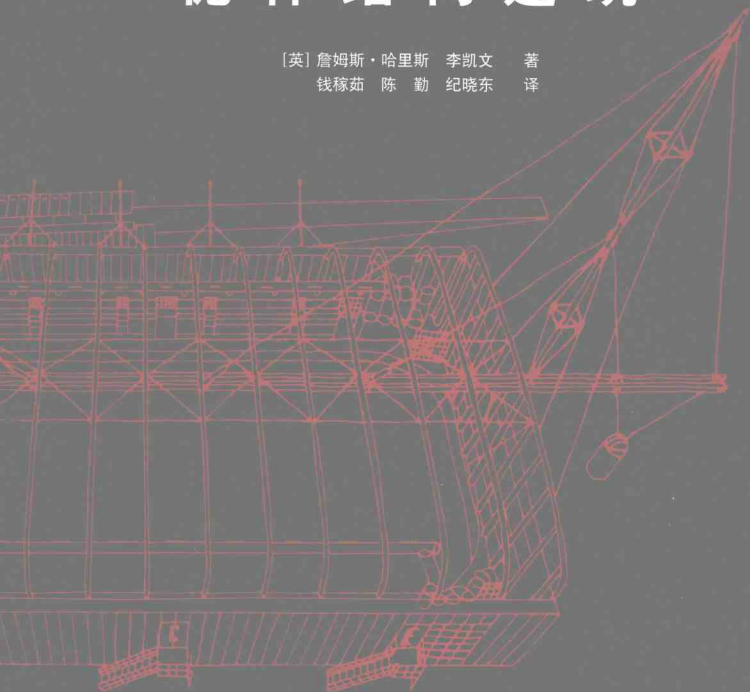


国外当代结构设计丛书

桅杆结构建筑

[英] 詹姆斯·哈里斯 李凯文 著
钱稼茹 陈 勤 纪晓东 译



中国建筑工业出版社

国外当代结构设计丛书

桅杆结构建筑

[英] 詹姆斯·哈里斯 李凯文 著
钱稼茹 陈 勤 纪晓东 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2003-1166 号

图书在版编目 (CIP) 数据

桅杆结构建筑 / (英) 哈里斯, 李凯文著; 钱稼茹, 陈勳, 纪晓东译.
北京: 中国建筑工业出版社, 2009
(国外当代结构设计丛书)
ISBN 978-7-112-10908-1

I. 桅… II. ①哈…②李…③钱…④陈…⑤纪… III. 桅杆—建筑结构
IV. TU793

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 055291 号

© Butterworth Architecture 1996
All rights reserved.

This edition of *Masted Structures in Architecture* by James Harris and Kevin Li is published by arrangement with Elsevier Science Ltd, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, OX5 1GB, England

本书由英国 Elsevier 出版社授权翻译出版

责任编辑: 王 跃 丁洪良 率 琦
责任设计: 董建平
责任校对: 李志立 孟 楠

国外当代结构设计丛书

桅杆结构建筑

[英] 詹姆斯·哈里斯 李凯文 著
钱稼茹 陈 勳 纪晓东 译

*
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
北京嘉泰利德公司制版
北京云浩印刷有限责任公司印刷

*
开本: 880×1230毫米 1/16 印张: 10 1/4 字数: 320千字
2009年7月第一版 2009年7月第一次印刷
定价: 36.00元
ISBN 978-7-112-10908-1

(18155)

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)

序

这本书源于几年前李凯文的论文，当时我是论文的评审人。即使在那时，他的论文已包含了我所知道的大部分桅杆结构建筑。现在，这篇论文已被扩充为这本内容丰富的书，本书是目前桅杆结构建筑方面惟一的权威著作，而且将来也一定会成为这方面标准的参考资料。

本书介绍了每一种桅杆建筑及其工程实例。全书分为两篇：第一篇回顾了桅杆建筑结构的原理和发展过程，包括一些早期建筑实例的有趣故事。第二篇根据桅杆的数目和“单元”的数目对各种桅杆结构进行了分类。作为特例，第二篇还讨论了桅杆膜结构和看台桅杆结构。

总体上讲，本书内容丰富，所以不一定要急于一口气读完它，可以把它作为一本参考书阅读。本书在两个方面非常出色：第一，对于结构的描述极为清晰确切；第二，对桅杆结构发展史上重要的人物和事件按年代进行了编排，这样不仅吸引读者，而且对读者具有极大的启发意义。

当然，和其他类型的书籍一样，本书遇到的问题也是如何跟上工程的最新发展，这也给作者和出版者提出了一项长期的任务。

我想，学生、建筑师和结构工程师都渴望拥有这本书，它也一定会成为大学图书馆中建筑和结构工程学科的必藏书。

作者完成了这本对结构工程和建筑专业都有极大价值的书籍，我想我与工程学和建筑学领域的同事们都会收藏这本书。我向读者强烈推荐本书，我也盼望着本书及其原始的学位论文一起早日出现在我的书架上。

托尼·亨特 (Tony Hunt)

安东尼·亨特联合事务所 (Anthony Hunt Associates)

致 谢

如果没有许多建筑师和结构工程师们的贡献，没有相关领域的个人和团体所做的工作，本书是不可能完成的。在此，作者向他们致以衷心的感谢。

我们得到了英国几家最大的事务所的帮助。我们曾得到阿鲁普及其合伙人公司 (Ove Arup and Partners) 的重要帮助，初期我们曾和约翰·桑顿 (John Thornton) 先生进行讨论，后来又得到了帕特里克·莫利 (Patrick Morreau) 的大力帮助。我们还得到了以下公司和个人的无法估价的帮助：诺曼·福斯特及其合伙公司 (the officers of Sir Norman Foster and Partners) 的凯戴·哈里斯 (Katy Harris)、尼古拉斯·格里姆肖 (Nicholas Grimshaw) 及其合伙公司的萨拉·霍金斯 (Sarah Hawkins)，还有迈克尔·霍普金斯及其合伙人公司 (Michael Hopkins and Partners)。感谢安东尼娅·韦德、克莱尔·恩迪科特和理查德·罗杰斯合伙公司 (Antonia Wade and Clare Endicott and the Richard Rogers Partnerships) 的哈里雅特·沃森 (Harriet Watson)。

GMW 合伙公司的 A.E. Ozveren 先生和安东尼·亨特联合事务所 (Anthony Hunt Associates) 的艾伦·琼斯 (Alan C. Jones) 非常重视我们的请求。同样，洛伦佐·阿皮塞拉 (Lorenzo Apicella) 和锡德里克·普赖斯 (Cedric Price) 以及第一工作室 (Atelier One) 的尼尔·托马斯先生 (Neil Thomas) 也非常重视我们的请求。托尼·亨特为本书作序，我们深感荣幸。

另外一些基本的桅杆结构的设计信息来源于 Brookes Stacey Randall Fursden 建筑事务所的 Nick Randall、Aukett 联合事务所的保罗·纽曼 (Paul K. Newman) 以及韦斯顿·威廉姆森有限公司 (Weston Williamson Ltd)、伊恩·里奇 (Ian Ritchie) 建筑事务所还专门开会讨论了鹰房 (Eagle House) 的设计。克里斯·威尔金森建筑事务所 (Chris Wilkinson Architects) 的克里斯·威尔金森和保罗·贝克 (Paul Baker) 对我们后期的研究提供了很有益的建议；最后，英格兰铁路委员会建筑部的 N.C. 德比希尔 (N.C. Derbyshire) 先生和 G. 泰尔博特 (G. Talbot) 小姐为我们提供了参观的机会，而且还为我们提供了普尔车站的图纸。

除去在伦敦我们得到的帮助外，在研究工作的早期，K.P. 谢里 (K.P. Sherry) 先生，即当时的泰晤士下城行政区 (the Borough of Thamesdown) 总建筑师，对我们的咨询给予了非常积极的答复。更远的，如泰恩河畔纽卡斯尔基灵沃思 (Killingworth) 地区的福克纳·布朗 (Faulkner Browns) 先生、纽卡斯尔的纳珀·科勒顿 (Napper Collerton) 合伙公司的埃里克·布朗 (Eric Brown) 先生，他们为我们提供了图纸。通过德里克·沃克 (Derek Walker) 先生，我们还得到了巴斯镇的 Feilden Clegg 设计所、哈利法克斯市的格伦迪宁·汉森 (Glendinning Hanson) 合伙公司以及米尔顿凯恩斯地区 (Milton Keynes) 的德里克·沃克联合事务所 (Derek Walker Associates) 提供的图纸。

我们也通过以下机构得到来自英国以外的很好的图纸和照片，它们是荷兰阿默斯福特市的 B V Articon 公司、荷兰代尔夫特市和比利时安特卫普市的 Cepezed B V 公司、德国斯图加特市的 Kaag+Schwarz 建筑事务所 (Kaag+Schwarz Architekten BDA)。许多非常宝贵的来自日本的资料是由东京的矶崎荒户 (Arato Isozaki) 及其联合事务所的 Yoshiko Amaya 和福岡市的 Shioe Yoh+ 建筑事务所提供的。

还有一些很好的图片材料来自于荷兰布莱达市的 Sybolt Voeten Architectuurfotografie，更早期的来源于菲利普·考克斯 (Philip Cox) 教授和迈克尔·雷纳 (Michael Rayner) 教授。后来通过珍妮特·罗德里克 (Janet Roderick)，我们从悉尼的菲利普·考克斯、理查德森、泰勒 (Philip Cox, Richardson, Taylor) 及其合伙人有限公司的澳大利亚事务所得到的资料。我们也从澳大利亚布里斯班市诺埃尔·鲁滨逊建筑事务所 (Noel Robinson Architects) 的诺埃尔·鲁滨逊 (Noel Robinson) 先生那里获得资料。东京 Shiagawa-ku 区矶崎荒户及其联合事务所的摄影师 Yasuhiro Ishimoto 也允许我们使用很精美的作品。

德国的汉斯·毛雷尔 (Hans Maurer) 和芬兰的阿尔诺·鲁苏武奥里 (Aarno Ruusvuori) 将他们设计的建筑的黑白图册送给我。在研究初期, 美国华盛顿大学设计与建造研究所的建筑师 Don Rothe 先生和芝加哥 SOM 公司的 Kaki Strause 给我们提供了非常有用的建筑实例。

19 世纪建筑结构的资料主要来源于巴黎的法国建筑师学会 (Institut Francais d' Architecture) 首席馆员苏珊·黛 (Susan Day) 女士和巴黎 Pavillon de l' Arsenal 的马蒂娜·彼塔利耶 (Martine Pitallier)。

我们也得到了许多个人的热情帮助, 如佛罗伦萨的西尼奥拉·弗洛拉·萨维奥利 (Signora Flora Savioli) 夫人、法国蒙鲁日市 (Montrouge) 的莫里斯·卡奇 (M. Maurice Bianchi) 以及法国尼姆市的让·皮埃尔·杜瓦尔 (M. Jean-Pierre Duval)。爱丁堡植物温室复杂的构造由爱丁堡 TBV 咨询公司的约翰·威尔逊 (John Wilson) 和安格斯·格林斯莱德 (Angus Greenslade) 以及皇家植物园地产公司的 Lan Lawrie 提供。埃迪·哈斯尔德 (Eddie Hasselder) 先生帮助我们翻译了一些荷兰的文章。

我们非常高兴得到了以下结构工程师的建议和意见, 他们分别是曼彻斯特大学建筑学院的迈克尔·麦丹斯 (Michael Maidens) 先生、曼彻斯特 UMIST 的阿德里安·贝尔 (Adrian Bell) 博士和克罗伊登 (Croydon) 的莫特·麦克唐纳 (Mott MacDonald) 有限公司桥梁部的哈特 (J.J. Hart) 先生。曼彻斯特大学建筑学院

的约翰·阿彻 (John Archer) 先生给我们工作的各方面都提出了很好的建议, 弗兰克·布朗 (Frank E. Brown) 博士在整个工作的计划上给我们以很大的启发。在我们的工作遇到困难时, 彼得·多维尔 (Peter Dovell) 教授和学院的图书管理员瓦尔·吉尔德 (Val Gildea) 夫人不仅不断地鼓励我们, 而且还给我们提供了很多有用的信息。

我们也非常高兴得到了英格兰玻尔通 W. and J. Leigh 公司的格雷厄姆·沃勒尔 (Graham S. Worrall) 先生关于油漆保护和防腐方法的很有价值的意见和建议。

最后, 特别要提到的是, 桅杆结构的基本研究早期是李凯文 (Kevin Li) 1987 年在伦敦建筑协会的安东尼·波特 (Anthony Pott) 纪念基金奖学金的资助下进行的。就此而言, 我们非常感谢 Edouard le Maistre 先生的帮助。

文章的录入和排版工作是由曼彻斯特大学学术秘书办公室的伊丽莎白·布罗迪 (Elizabeth Brodie) 女士完成的。后来的增补和修改是由拉德洛的特里·柯托伊斯 (Terry Curthoys) 先生完成的。

作者非常感谢上面提到的所有人为本书所作的贡献, 没有你们的帮助, 这本书就不会完成。如果由于我们的疏忽遗漏了某个人或某公司, 我们将致以深深的歉意, 并且会在以后的版本中加以补充。当然我们对材料的解释和使用负责。

目 录

序	v	5.2 1940~1959年的桅杆结构	28
致谢	vi	5.3 1960~1969年的桅杆结构	31
		5.4 1970~1979年的桅杆结构	34
第一篇 原理和发展回顾		5.5 1980~1989年的桅杆结构	34
		5.6 1990~1995年的桅杆结构	36
第1章 张拉结构建筑	3	5.7 建筑师和工程师在英国的合作	38
1.1 悬索屋盖	3	5.8 战后桅杆结构发展的主要原因	39
1.2 拱形悬索屋盖	3		
1.3 预应力索网和膜结构	4	第二篇 桅杆结构的分类	
1.4 外露桅杆结构	5		
1.5 斜拉悬臂梁结构	5	第6章 单桅杆结构和单桅杆单元的组合	43
1.6 车轮索结构	5	6.1 单桅杆单元	43
1.7 悬挂结构	7	6.2 单桅杆单元单方向复制	49
1.8 充气结构	7	6.3 单桅杆单元双向复制	54
第2章 结构基本原理	9	第7章 双桅杆结构和双桅杆单元的组合	58
2.1 结构的定义、功能和标准	9	7.1 桅杆位于两长边中点的双桅杆结构	58
2.2 平衡和力	9	7.2 两端设置桅杆的双桅杆结构	64
2.3 拉力和压力	9	7.3 在相邻角点设置桅杆的双桅杆结构	71
2.4 弯矩和剪力	9	7.4 一些设置内桅杆和纵向复制的结构	72
2.5 跨度	10		
2.6 高度	10	第8章 四桅杆结构及四桅杆和八桅杆单元的组合	76
2.7 荷载	10	8.1 在基本空间的角部设置桅杆的四桅杆结构	76
		8.2 设置中间桅杆的四桅杆单元	85
第3章 历史溯源：桥和帐篷	11	8.3 设置“脊”桅杆的四桅杆单元	88
3.1 绳索桥和斜拉桥	11	8.4 设置边桅杆的四桅杆和八桅杆单元	94
3.2 地方帐篷和它们的现代副本	15		
		第9章 桅杆膜结构	99
第4章 19世纪的悬索结构建筑	20	9.1 由桅杆直接支承的膜	99
4.1 结合悬索桥的建筑	20	9.2 由绳索网支承的膜	100
4.2 悬挂链索和拉索屋顶	21	9.3 与外部构架相连的膜	107
4.3 楼板结构中的双向绳索网格	22		
4.4 19世纪的桅杆结构	22	第10章 看台桅杆结构	108
		10.1 仅覆盖部分观众席的遮篷	108
第5章 20世纪的桅杆结构	27	10.2 采用膜屋顶的遮篷	109
5.1 1900~1939年的房屋建筑和工程	27	10.3 环绕整个体育场的遮篷	114

第11章 旋转结构

- 11.1 桅杆位于建筑物轮廓线内
- 11.2 围绕建筑物周边的多桅杆

第12章 结构案例分析:

史云顿雷诺汽车零件配送中心

- 12.1 开端
- 12.2 设计方法
- 12.3 功能要求
- 12.4 结构概念和结构分析
- 12.5 结构形式
- 12.6 连接
- 12.7 建筑物外轮廓及设施
- 12.8 施工顺序
- 12.9 评价

116

116

117

121

121

122

122

122

124

124

124

125

125

第13章 总结与结论

- 13.1 发展模式
- 13.2 建筑形式和结构表达
- 13.3 结构性能
- 13.4 施工注意事项
- 13.5 经济方面
- 13.6 视觉美学
- 13.7 利与弊

127

127

128

131

134

138

139

140

工程索引

142

参考文献

152

第一篇 原理和发展回顾

第二次世界大战结束后，建筑中出现了一类新型结构形式：桅杆结构。这种建筑结构的屋盖体系采用张拉结构形式，利用由高耸桅杆顶部垂下的悬索或拉杆为屋盖提供跨中支撑。屋盖自身可以是主刚性构架和次梁共同支撑屋面的结构体系，也可以是柔性的膜结构体系或索网结构体系。

这些桅杆建筑形状各异，大小不一，就是材料和色彩也各不相同，应用范围从小型的办公室和车站到大型的超市和仓库。它们有的小巧可爱，有的蔚为壮观，总是能引人注目。尽管大多数有代表性的桅杆建筑出现在欧洲，但“桅杆建筑”一词确实已经成为现代建筑语言中一个世界性的新词汇了。

如果真的将桅杆建筑比作一门新语言，这门语言的基本元素应该是结构的，即，桅杆的数量和桅杆的布置；屋盖的外形和样式；受拉构件的构造、连接件以及锚固。这么说来，一门新的建筑语言的语法和句法已经形成，研究其中实用元素的新语文学也出现了。

单就结构而言，桅杆结构在理论上无疑很高效的。因为桅杆能直接有效承受压力，而拉索和拉杆直接传递拉力，并且对屋盖提供很多张拉点，从而减小了跨度，也就减小了屋面支撑构件的弯曲应力。但扩大一下考察的范围，桅杆结构的经济性就变得相当复杂，它包括很多特有的环境影响，比如：建筑的场地、建筑需要的空间布置，还包括更难以量化的因素，比如：与周围环境的和谐性，以及一个引人注目的建筑所带来的无形广告效应的价值。

战后桅杆建筑的发展有两个主要的历史来源。其中最为普遍的便是受到土著帐篷的启发。开始时帐篷由游牧民族用简单的帆布和撑杆搭成，到中世纪发展成复杂的装饰精良的宫廷宿营地，现在则发展成了到处流动的马戏团的大营地。另外就是由费雷·奥托（Frei Otto）和他的合作者设计的非常壮观的波浪式帐篷结构。

桅杆结构的另一个起源是19世纪出现的悬索桥的索悬挂结构形式。随着钢铁成为最主要的一种建筑材料，结构形式不再局限于拱结构和框架结构，悬索桥便出现了。悬索结构是迄今最为坚固和耐久的一种结构形式，它采用吊索和辐射索的样式。由于索悬挂结构的推动，使得以后建筑空间的分割更少。张拉结构建筑的成功建造，使得人们继古罗马时代用绳索和遮阳帆布遮盖体育场之后，再次开始使用桅杆和张拉索结构。

然而，桅杆结构得以发展的决定性技术力量是在20世纪后半叶才形成的。直到这个时候，张拉结构的动力响应才可以通过计算机仿真来模拟，新材料和施工技术方面的问题才可以通过试验来研究。最初，建造好的桅杆结构数量很少，而且也仅限于几种类型。但是，从1970年开始，桅杆结构设计和建造的数量开始迅速增加，形式和建筑功能的范围也大大扩充，而且在建筑和结构方面的水平也日益提高。以致到了20世纪80年代，桅杆结构开始引起人们实质性的关注，各种桅杆建筑结构的单体工程融合在一起，形成了一股内容丰富的新建筑流派。

通过回顾与解释桅杆结构如何产生、产生的原因，以及讨论桅杆结构的优点和缺点，本书提出了我们在设计桅杆结构、合理应用桅杆结构时从各个方面必须注意的问题。

在对各种建筑实例进行常规分析时，我们发现了一个令人吃惊的特征，那就是，各种形式的桅杆、索、屋盖等建筑中的“深层结构”表面上看组合混乱，但本质上却是按一定规则联系在一起的。通过这个特征，我们能够分析各种桅杆建筑的联系、区别、共性、差异，从而能够更好地理解这些建筑结构。

上面两个主题就是本书两大篇的主要内容。第一篇回顾了桅杆结构的原理和发展。其中第1章将桅杆结构作为建筑张拉结构的一种。第2章概括了基本的结构力学原理，解释了如何将这些原理应用到桅杆结构中。第3章回顾了桅杆结构的两个主要来源：索斜拉桥和土著帐篷，包括一些现代的帐篷式结构。第4、

5章按时间顺序讲述了桅杆建筑在19世纪和20世纪的发展,第5章又具体分为不同的时间段来讲述,反映了随着时间推移出现了越来越多的桅杆建筑。

第二篇按照桅杆结构的分类简要地讲述了一系列的桅杆建筑实例。先介绍分类的基本方法,然后依次介绍了主要的桅杆结构类型,如:单桅杆、双桅杆、四桅杆和八桅杆结构。接下来的三章分别介绍了膜屋盖结构、看台结构和旋转结构,这些结构具有特殊性。最后两章具体研究了一个桅杆结构的实例,总结概括了前面各章的内容,并进行了整体分析,得出结论。

这本书引用了大量的材料,这些材料的出处列在本书的附录中。附录对引用的资料进行了完整和详细的描述,有些资料是从多种角度进行概括描述的,有些也许过于简略,而参考书目则列举了更为广泛的信息来源。

我们希望这本书能激发读者的兴趣,使人增长知识,最重要的是,能让阅读的人受到启发。桅杆结构原来只限于相对很小的领域,近年来其领域不断扩大,并且已经成为富有创造性和想像力、令人激动的结构类型。通过阅读这本书,我们将能够理解桅杆结构的不同形式。我们也希望,通过对于基本的原理和实例的讲述,能够给桅杆结构的进一步发展和设计提供一个新的动力。

另外,读者如果对于下一版有何建议,认为需要增加什么内容,也可以通过出版单位转达给我们,我们将非常高兴,并致以感谢。当然,书中难免有错误和遗漏,敬请读者原谅,给予指正。

詹姆斯·B·哈里斯 (James B. Harris) 英国拉德洛
李凯文 (Kevin Pui-Ki Li) 香港

第1章 张拉结构建筑

“张拉结构”是一个很广义的概念，它包含了多种不同的结构形式。直到20世纪50年代，随着一些工程的建成，下面将介绍的张拉结构类型才逐渐突显出来。当时建成的张拉建筑与建筑的总量比起来非常之少。对各种张拉结构而言，受拉构件无疑是非常重要的结构组成部分，但是不同类型张拉结构的基本结构概念以及相关的建筑形式却各不相同。在这里总结张拉结构，目的是从建筑的角度理解桅杆结构与各种类型张拉结构的关系。

1.1 悬索屋盖

这种建筑的屋盖有平行的索支承屋面板和防风雨层。其中最小的建筑，也是最能反映这种建筑初期状态的代表作品是佛罗里达州保罗·鲁道夫 (Paul Rudolph) 的小休别墅，建于1954年，钢屋面跨度只有6.7m，所以并不会遇到大跨结构比较敏感的防风的问题。早期张拉结构的典范作品还有1958年罗宾·博伊德 (Robin Boyd) 设计的墨尔本小屋，规模大得多的沙里宁 (Saarinen)

设计的杜勒斯机场候机楼 (图1.1)，以及奈尔维 (P.L.Nervi) 设计的意大利曼图亚 (Mantua) 的布尔戈 (Burgo) 造纸厂，它实际上是用悬索桥的结构悬挂了一个250m跨的开敞的钢桁架屋盖 (图1.2)。这种结构的基本特点是屋盖为单向弯曲。

1.2 拱形悬索屋盖

同一般的悬索屋盖相比，这种屋盖是双向弯曲的，这样能够增强结构稳定性。

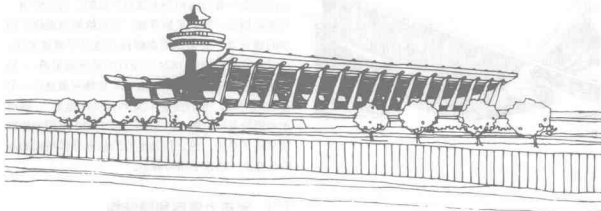


图1.1
悬索屋盖结构：
埃罗·沙里宁设计，
美国华盛顿特区
尚蒂利-杜勒斯
机场航站楼，1964
年

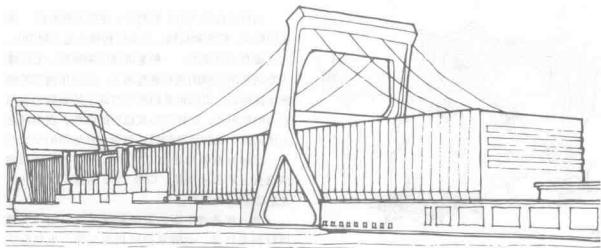


图1.2
悬索桥式的建筑，
奈尔维 (Pier Luigi
Nervi) 设计，意
大利曼图亚的布
尔戈造纸厂 (Burgo
Paper Mill)，1961
年

图 1.3
交叉压环悬索屋盖，马修·诺维斯基和弗雷德·塞韦鲁设计，美国北卡罗来纳州罗利家嘉文交易所，1952 年，平面图和侧视图

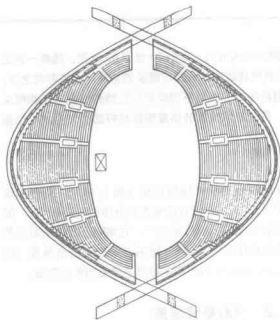


图 1.4
预应力索网结构，弗雷·奥托设计，德国慕尼黑奥林匹克体育场，1972 年，平面图和侧视图

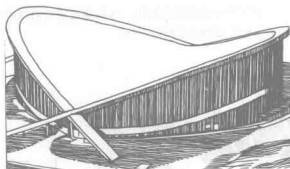


图 1.3

图 1.4

这类悬索屋盖结构又分为两种形式：最简单的是主跨为抛物线拱，屋面索由拱拉到四周，形成屋盖体系，例如 1960 年建成的耶鲁室内冰球馆。第二种形式出现得更早，同样非常引人注目，它有两个斜向相交的拱，索拉在这两个拱上，索相互交叉形成网状，这样就构成了一个曲率互反的或马鞍形的屋面。在地下，用拉杆连接剪刀状的拱腿末端，这样就只有竖向分力传向地面。这种形式最为著名的例子是由马修·诺维斯基 (Matthew Nowicki) 和弗雷德·塞韦鲁 (Fred Severud) 设计，于 1952 年建成的罗利交易所 (图 1.3)，它是最早的现代悬索屋盖建筑。另外一个建筑是柏林国会大厦，尽管它后来倒塌了，但仍非常有名。它由小休·斯塔宾斯 (Hugh Stubbins, Jr.) 设计，于 1957 年建成。

另一种悬索屋盖形式介于拱形悬索屋盖和以后要讲解的形式自由、变化复杂的帐篷式屋盖之间。其中的两个例子是日本东京的两座国家体育馆，它们由丹下健三 (Kenzo Tange) 设计，于 1964 年建成。其中较大的一个有两个塔形的“角”，它们是由各自的螺旋形看台结构向上延伸形成的。两个塔由一对铁索相连，形成了屋脊索，这也给索网提供了顶部的锚固点，许多屋面索焊接在这对屋脊铁索上。可以将这个结构和 1824 年设计的弗里德里希·施尼尔希 (Friedrich Schnirch) 剧场屋盖进行一个有趣的对比，我们会在下文对弗里德里希·施尼尔希剧场进行讲解 (图 4.4)。较小的东京国家体育馆只用了单塔，将之作为类似的鞍形悬索屋面的高的悬挂点，场馆平面为圆形。

1.3 预应力索网和膜结构

这种结构的产生主要归功于建筑大师弗雷·奥托的探索、研究和实践。这类结构很少是全封闭的，它主要有两种类型：一种是波状的钢索网，它的峰值处或是用外部的桅杆悬挂起来，或是用内部的桅杆支撑起来。索网也是由两个方向上的曲线形成预应力的鞍形面，这样可形成稳定的结构。在索网之上还铺设一层防风雨的膜，膜固定在索网的交叉点上。这种类型最为壮观的例子是 1967 年蒙特利尔博览会上的德国展馆，以及 1972 年慕尼黑奥林匹克运动场 (图 1.4)。

另一种是将上面的索网和覆盖膜只用一层轻质材料来代替，它既承担结构的功能，也起到防

风雨的维护作用。20世纪70年代,涂敷聚四氟乙烯的玻璃纤维膜开始应用,这种膜结构也就随之出现了。这种膜材重量轻、抗拉强度高,能够抵抗环境的作用和紫外线的辐射,在大多数气候条件下具有自清洁性。涂敷聚氯乙炔的聚酯应用更多,但是它只适用于荷载小的临时建筑中。著名的实例有建于1985年施伦贝格尔(Schlumberger)研究中心,它使用了涂敷聚四氟乙烯的玻璃纤维膜(图1.5和图9.10~9.12);还有1987年建于罗德板球场(Lords Cricket Ground)的蒙德(Mound)看台,它使用的是涂敷聚氯乙炔的聚酯膜(图10.5~10.7)。

1.4 外露桅杆结构

这种结构的特点是由高高的桅杆为拉索或拉杆体系提供高位锚固点。这种由拉索或者拉杆悬挂的屋面结构可以有多种形式,也可以使用多种材料。这些建筑可以根据基本单元的桅杆数目进行区分。更大的建筑则可以由基本单元沿着一个方向或两个方向进行平移复制得到。所有的这类建筑只要由桅杆是否存在就可以辨识(图1.6和图7.33)。

1.5 斜拉悬臂梁结构

这种结构和前面一种结构有一些相同的特征,但是并无前面一种结构必须有的桅杆,在所有的这类建筑实例中,都有一个悬臂梁体系,悬臂梁由斜拉索支承,拉索锚固在高处,但是并非必须有地面延伸到顶点的连续的桅杆。在屋面以上,可能是翅形墙,也可能是各种A字形构架,甚至是某种子结构形式的短柱。这样就形成了更大结构上的“混合”(图1.7)。

1.6 车轮索结构

现在的双辐预应力圆形车轮是于1874年由英格兰考文垂市的詹姆斯·斯塔利(James Starley)发明的。采用这种结构的圆形屋面框架的两套预应力索由一个受压的外环和一个受拉的内环或者称为“轮轴”组成。预应力使得两套索能够共同承担恒载和活载,这种体系在60~550m跨内都是较为经济的。第一个这种形式的建筑实例是建成于1960年的由工程师列夫·泽特琳(Lev Zetlin)为纽约州尤蒂卡市(Utica)设计的市政



图1.5
桅杆支撑的应力膜结构,迈克尔·霍普金斯及其合伙人公司(Michael Hopkins and Partners)设计,英国剑桥施伦贝格尔研究中心,1983年(参见图9.10~9.12)

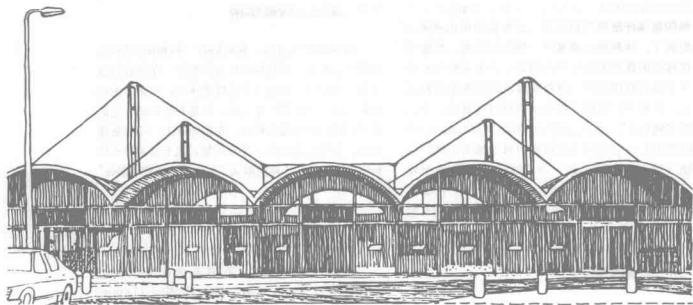


图 1.6 (上图)
外露桅杆结构, 英国多塞特地区普尔市 (Poole, Dorset, England) 普尔火车站, 1988 年

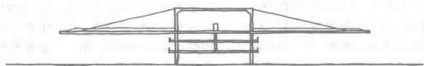
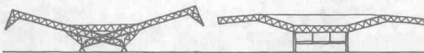
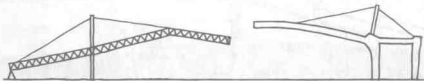
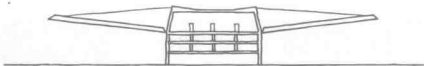


图 1.7 (右图)
战后典型的斜拉索管架结构



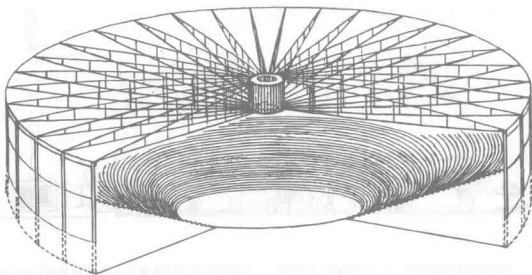


图 1.8
典型的车轮索结构；列夫·泽特
斯设计，纽约州尤
蒂卡市市政礼堂，
1960 年

礼堂（图 1.8）。这两套非等应力的索跨度为 73m，两套索由管状的内环分开。另一个同样有名的建筑实例是 1958 年由著名建筑师爱德华·D·斯通（Edward D.Stone）设计的布鲁塞博览会美国展馆，跨度 100m，内环为露天开敞。

1.7 悬挂结构

这种结构形式像塔，楼面在中心由核心筒支承，在周边用钢索悬挂在上面某一层的固定结构上。混凝土核心筒适合采用“滑模”方法施工。用细的索悬挂结构可以形成无柱的空间，这样就使采光和视觉的障碍最小化，并且首层可以完全开敞。最典型的例子是建于 1958 年的温哥华西海岸大厦和建于 1970 年的约翰内斯堡标准银行大楼（图 1.9）。

1.8 充气结构

这是完全不同于上述类型的一种结构：其膜的预应力不是通过表面张拉实现的，而是通过对封闭的空间内充气增加内压来实现。尽管这个想法早已在 1917 年由兰彻斯特（F.W.Lanchester）提出，但是从 20 世纪 30 年代在人造纤维，如尼龙和聚酯等发明后，人们才能生产合适的气密性好且耐久的编织膜材。充气结构可以采用简单的低压气球的形式，或者用一些刚性的周边夹具来保证膜材肋条或者是双层泡沫屋面内的气体不泄漏，以维持一定的

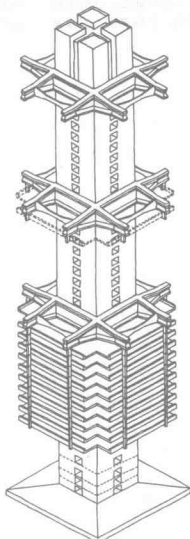
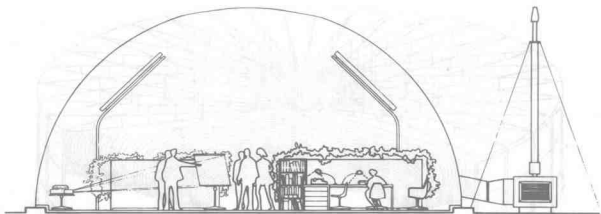


图 1.9
典型的悬挂结构，
约翰内斯堡标准银
行总部大楼，1970
年

图 1.10
充气结构，福斯特
联合事务所 (Foster
Associates) 设
计，位于赫默尔亨
普斯特德 (Hemel
Hempstead) 的计
算机技术有限公司的
临时办公室。1970
年



气压。一个最早的也是最简单的例子就是于1963年由诺曼·福斯特 (Norman Foster) 设计的临时办公所 (图 1.10)。

需要说明的是，我们不能一一列举各种张拉建筑结构：举例来说，只要基于“张拉”原则的

建筑就可以被认为是进一步发展的张拉结构类型。而且，许多非常独特的建筑本身就是一种类型。但就本书的主题桅杆结构而言，还可以进一步分为一些子类，我们会在本书中的第二篇详细分析这一内容。

第2章 结构基本原理

大量结构概念和要素的联合作用促进了桅杆建筑的发展。基本概念包括平衡、荷载及承载效应。重要的要素是指与特定结构单元有关的跨度、高度和荷载,以及荷载-跨度关系。理解这些结构的基本原理是从整体上评价桅杆结构和个别范例适用性的基础。

2.1 结构的定义、功能和标准

我们首先需要区别建筑物外壳和建筑物结构。可以进行区分的原因是:一个建筑物的构造能完成两个物理功能:首先是空间的包围,包括防风雨和隔热;其次是结构作用,包括荷载、跨度和支承。在传统的砖混建筑中,两个功能都同时由墙、楼盖和屋盖完成。但是对于框架结构,包括我们关心的大部分桅杆结构,它们代表两个不同的构造系统,也就是,空间包围和防风雨的建筑物构造,以及支撑它的特定结构框架。这两个系统必须在建造和视觉上组成整体,并且能或多或少地相互支持。

结构体系必须承担所有施加在结构上的恒载和活载,并以尽可能快和直接的方式将它们传递给地基。这些功能完成得越好,这个结构就越有效。它完成的好坏可以用四个标准来评价:安全、功能适当、经济和满足建筑要求。

2.2 平衡和力

在讨论结构的性能时,必须考虑“平衡”和“力”这两个基本概念。确保平衡是基础,设计人员在开始和结束计算时都必须遵循的基本原理是:结构的内力和周围的各种外力必须处于平衡状态。这样,结构在任何环境下都是稳定的。意外的结构变形往往会伴随着设计师计划外的法庭上的纠纷!

力的概念是所有结构原理的基础:它的经典定义为改变或趋于改变一个物体的静止状态或其直线匀速运动状态的事物。对于建筑物而言,它是作用在结构上的外力,包括导致结构构件内力的自身的重量。这些力以不同的大小和不同的方向作用在大或小的面积上。伊萨克·牛顿(Isaac Newton)指出:如果要保持平衡,所有的作用力必须由大小相等、方向相反的反作用力来承担。构件的内力可以有五种不同形式:拉力、压力、弯力、剪力和扭力。

2.3 拉力和压力

拉力和压力是从相反方向施加的彼此分开或压紧的轴向荷载。当作用在线性构件上的轴力通过构件中心线不产生任何弯矩时,它们就被称为拉力和压力。构件内承担这些轴力的包括材料的抗拉、抗压强度以及它们作用的横截面积,材料的抗拉、抗压强度往往不相等。

处于这种状态时,理论上,截面上的材料应该全都发挥作用。而实际上,只有受拉构件才这样。这些构件的破坏是由于拉力过大、材料达到了屈服点,而这对于结构来说则是高效的。另一方面,受压构件往往因压缩而破坏,也就是向一侧弯曲,处于大大低于材料的“压碎荷载”的应力水平。弯曲的趋势与构件的长细比有关,因此,初始笔直状态是非常重要的。构件越不直,压缩出现得越早。这种现象不会出现在荷载产生直线效应的受拉构件中,甚至不会发生在细长的受拉构件中。因此,最有效的受拉构件是最小体积的实体,而最有效的受压构件则是最大体积的空心截面。

2.4 弯矩和剪力

在不承受轴向荷载的横跨构件中,例如简支的矩形梁、工形钢梁和大梁,内力作用主要是弯矩和剪力。在承担弯矩引起的弯曲作用时,梁顶部和底部的外侧纤维承受的拉、压应力大于梁中和轴附近的应力,并且会伴随着由构件部分的滑动和相互剪切的趋势而产生的沿梁关键位置上的纵向应力。

这些较大的弯矩和剪应力需要附加材料来承担,因此受弯构件在材料方面的效率低于直接受拉或受压构件。在构件的承载效应层次中,直接受拉为第一,受压为第二,受弯和受剪构件为其次和最小。由于这个原因,结构设计中一个通常的目标是,为了有效性和经济性而避免弯矩和剪力,或至少将弯矩和剪力最小化。因此,桅杆结构在一些方面体