

张拉索—膜结构 分析与设计

ANALYSIS AND DESIGN **OF**
TENSIONED CABLE-MEMBRANE
STRUCTURES

杨庆山 姜忆南 著



科学出版社
www.sciencep.com

张拉索-膜结构分析与设计

杨庆山 姜忆南 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对张拉索-膜结构的分析与设计进行了介绍。在第一章绪论中介绍了工程结构的演化进程和薄-膜结构的发展历程。第二章以薄壳理论为基础介绍了张拉索-膜结构的受力特点及其与结构形式间的关系。第三章和第四章为张拉索-膜结构分析所需的基础知识和理论,包括钢索及膜材的物理、力学性能,固体力学的大位移理论和有限元分析方法。第五章到第八章分别介绍张拉索-膜结构的形态分析、裁剪分析、荷载分析和节点设计。第九章介绍张拉索-膜结构分析设计软件CAFA的基本功能和使用方法。以张拉索-膜结构设计中的建筑构思作为本书的第十章,以体现索-膜结构设计中建筑设计与结构设计间异常紧密的结合。

本书可供土木工程专业结构工程师、建筑师、施工技术人员和相关专业的大专院校师生以及结构工程专业的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

张拉索-膜结构分析与设计/杨庆山、姜忆南 著.
北京:一科学出版社,2004.1
ISBN 7-03-012520-7

I.张… II.①杨…②姜… III.①悬索结构-结构设计
②膜型扁壳-结构设计 IV.TU35

中国版本图书馆CIP数据核字 (2003) 第106125号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:包志虹
责任印制:刘士平 / 封面设计:王友江

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2004年1月第一次印刷 印张:13

印数:1-3 000 字数:247 000

定价:45.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换\科印\)

序

膜结构造型丰富多彩,极富现代气息,这几年发展很快,成为了空间结构大家族中生气勃勃的新成员。我国虽然尚属发展中国家,但国大人多,且正处于快速发展阶段,对空间结构的需求量很大,膜结构的发展恰恰碰上了这一大好机遇。

膜结构是一种非传统的全新结构形式。充满张力且富于变化的曲面,自由灵活的大空间,半透明膜材所形成的明亮而又柔和的室内环境,桅杆、拉索、精致的金属节点等所体现的富有现代气息的构造技术等等,使膜结构为人们提供了有别于传统结构的全新视觉感受,为建筑设计(包括建筑环境设计)提供了前所未有的广阔空间和许多新的可能性。

现代膜结构技术在德国、美国、日本等发达国家经历了三十多年的发展,现在已趋于成熟。建筑师们充分开发和利用了这种新结构技术所提供的可能性,建造了许多具有典型意义的大型膜结构建筑,这些建筑高度体现了建筑与结构的和谐统一、技术和艺术的完美结合。有许多膜结构建筑成为当地有代表性的人文景观。

膜结构的设计也迥异于传统结构。柔性的膜材仅当赋予适当预张力时才具有确定的形状和抵抗外荷载的刚度,才真正成为“结构”,因此初始形态分析在膜结构设计中具有重要的基本意义。裁剪分析是膜结构设计中又一个特殊问题:膜结构的曲面形状一般来说是不可展的,裁剪分析就是要求在平面膜材上合理放样,以尽可能精确地拟合空间曲面上的相应条块。需要指出的是,膜结构的初始形态分析和裁剪分析不只是单纯的力学问题或技术问题,因为其初始形态分析与建筑造型密不可分,而膜材拼缝构成的图案经常是重要的室内装饰手段和表现内部空间的有力工具,所以膜结构的设计从一开始就要求建筑师与结构工程师紧密配合、相互协作。事实上,这种新颖体系的建筑方案和结构方案是统一的整体,应当是结合在一起同时进行并完成的。膜结构的计算分析也有其特殊性,例如:这种柔性结构体系位移很大,在计算中必须考虑其几何非线性;风是膜结构设计中起决定性作用的外荷载,膜结构对风的动力作用十分敏感,在设计计算中必须予以考虑,有时甚至还应当进一步考虑气流与结构的相互耦合作用,即所谓的气弹动力响应问题。这些特点在一定程度上增加了膜结构的设计难度。

现代膜结构在我国已有七八年的发展历史,而且发展势头较猛。目前这一新结构技术与国外先进水平相比尚存在一定差距,除了加工技术与质量管理水

平有待进一步提高以外,主要表现在结构形式还比较拘谨和匠气,缺少大胆创新之作,说明新颖的建筑构思与先进的结构创造之间还没有很好地结合起来,这也许与当前的设计体制有一定关系。我们的设计部门对膜结构这一新技术还不够熟悉,不善于充分利用这种新结构体系所能提供的广泛可能性,一旦确定采用膜结构,在大致决定其形式以后,往往连设计在内的后续工作都交给膜结构施工企业去操作。而在正常情况下,建筑师是应当自始至终对整个设计保持控制的。

所以我经常感到,我国目前缺乏一本内容全面深入、概念清楚而文字表达又浅显易懂的膜结构著作。这样一本著作的内容应适当综合一点,不仅限于膜结构的计算分析,还应当较充分地介绍有关索、膜材料的知识,介绍膜结构的构造设计,讨论与建筑设计密切联系的有关内容,并收集较多的国内外优秀膜结构作品进行案例介绍和分析;关于膜结构的受力性能及其计算分析,要避免连篇累牍的力学推导,而应当把重点放在理论思路的提炼和概念性的叙述上。此外,这样一本著作的目标除了作为高等学校教学参考书外,还应当定位在可供广大设计人员学习之用上。我深信,出版这样一本著作将会对我国膜结构的进一步健康发展发挥重要作用。然而我也意识到,要真正写成这样一本书并不容易,需要有志者付出巨大的精力。

杨庆山教授七八年来一直致力于索膜张拉结构的研究,治学甚勤,最近给我看了他和合作者写的关于索膜结构设计的书稿,我感到欣喜。我发现,他们写这本书的指导思想同我以上说的那些想法是较为接近的。可以看出,为了使这本书符合实际设计人员和研究生们学习的需要,作者付出了巨大努力。虽不能说这本书已尽善尽美,但我相信,这本书的出版将为上述基本读者群提供一本较系统的且易学的教材。我也希望作者继续收集实际工程资料,并努力使索膜结构的设计理论更加简明易懂,不断改进和完善所提供的设计软件,以使今后本书修订再版时得到进一步的充实和完善。爰为之序。

沈世钊

2003年7月30日

于哈尔滨工业大学

前 言

薄膜结构就是以建筑膜材作为主要受力构件的结构, 20世纪五六十年代在国外开始应用, 后随着永久性膜材的出现, 应用日益广泛。工程实践表明薄膜结构重量轻, 施工速度快, 跨越能力强, 抗震性能好, 建筑造型丰富, 具有适度透光性, 外形简洁、轻盈舒展、富有动感, 可折叠, 具有拆装、运输方便和适于工业化生产等优点。其应用范围很广, 特别是那些需要自然采光的公共建筑以及敞开或半敞开的建筑, 如体育场、游泳馆等体育设施, 商场、购物中心等商业建筑, 健身娱乐设施, 候机厅、火(汽)车站、收费站等交通运输设施, 博览建筑设施等大型公共建筑, 工业与民用仓储设施, 以及可随时拆迁的遮阳篷等临时设施。

随着我国人民生活水平的提高和社会政治经济生活的需要, 20世纪80年代末膜结构已开始引起我国工程界的注意(姚家祁, 1988; 郭璐, 1988), 90年代后期我国出现了专门的制造、施工企业, 自此我国开始自己设计、建造薄膜结构, 目前其应用范围和规模正在以较快的速度增长(蓝天等, 2002)。

在薄膜结构的发展过程中, 张拉索-膜结构逐渐成为其主要形式, 但目前尚无关于张拉索-膜结构的国家标准和设计规范, 行业标准也尚在制订之中, 相关企业和广大工程设计人员迫切需要全面介绍张拉薄膜结构分析和设计的资料, 而可资利用的书籍却十分缺乏。随着市场的发展和对相关专业人员需求的日益增大, 在校大学生和研究生对张拉索-膜结构的学习兴趣也浓烈起来, 而实用的参考书目不多。同时, 虽然在薄膜结构的发展过程中, 高等院校和科研院所也进行了积极的研究和开发工作, 取得了很多研究成果, 但公诸于世者尚少。因此, 不揣冒昧将我们在研究薄膜结构过程中的学习心得和研究成果予以总结发表, 以为满足广大工程技术人员和学生的需要以及为促进张拉索-膜结构在我国的发展贡献微薄之力。

本书分十章。第一章绪论, 介绍了工程结构的演化进程和索-膜结构的发展历程, 由杨庆山、姜忆南撰写。第二章以薄壳理论为基础介绍了张拉索-膜结构的受力特点及其与结构形式间的关系, 由杨庆山完成。第三章和第四章为张拉索-膜结构分析所需的基础知识和理论, 包括钢索及膜材的物理、力学性能, 固体力学的大位移理论和有限元分析方法。第五章到第八章分别介绍张拉索-膜结构的形态分析、裁剪分析、荷载分析和节点设计。第九章介绍张拉索-膜结构分析设计软件CAFA的基本功能和使用方法。第三章至第九章由杨庆山根据北京交通大学张拉索-膜结构研究组的张力结构系列研究报告及其他参考资料完成。姜

忆南应杨庆山之邀撰写了张拉索-膜结构设计中的建筑构思作为本书的第十章，以体现索-膜结构设计中建筑设计与结构设计间异常紧密的结合。在本书的撰写期间，王基盛、饶正清、谭锋完成了大量的查漏补缺、文字整理和编辑性工作。

在撰写过程中，特别注重了基础理论与工程设计的结合以及建筑设计与结构设计的融合，深入浅出是我们追求的目标。所谓“深入”是指我们对张拉索-膜结构分析的理论基础进行了详细阐述，目的在于使有志从事该方面工作的研究人员能够深入了解索-膜结构受力特点和力学性能，同时我们也认为索-膜结构设计不可能简化到只依靠标准图集和设计手册就可以进行，工程技术人员了解一定的基础理论也是必要的。所谓“浅出”是指本书并未仅仅局限于结构的力学分析，而更延伸至工程设计人员感兴趣的设计领域，包含索-膜结构的形态设计、裁剪下料方法和节点连接设计等多个方面。特别是第九章中介绍了可供实际应用的分析设计软件 [可向作者 (qshyang6620@sina.com) 免费索取]，第十章介绍了索-膜结构设计时如何全面协调建筑功能与结构性能间的关系，使建筑与结构的融合成为本书的一个特点。

“浅出”的另一方面也突出地表现在索-膜结构分析理论基础的阐述过程中。索膜结构分析的理论基础实际上就是固体力学的大位移理论，相关方面的著作已出版很多；但我们在学习过程中深切地感到这些著作大多具有严密的理论体系，适合于具有工程力学专业基础的读者，而对工程结构专业的读者，似严谨有余，而浅显不足。因此，在本书中，我们从工程结构的角度对这部分内容进行了重新阐释，以减少具有工程结构专业背景的研究人员在利用这些理论基础时所耗费的时间。同时我们对索-膜结构设计中的某些特定问题如薄膜曲面的两种基本形式、裁剪下料的技术细节等进行了“深入”地分析。总之，我们欲以“浅出”的语言“深入”地探讨张拉索-膜结构分析和设计的各个方面，以便能够同时满足相关领域的研究人员和工程技术人员的要求。

如前所述，本书是几年来我们在张拉索-膜结构研究方面所取得成果的总结。由于张拉索-膜结构采用的膜材和索均为柔性材料，只有对其施加预张力才能得到结构承载所必须的刚度和形状，故其受力过程包括预应力零态、预应力成形态和受荷状态。其分析过程需从形态分析开始，所谓形态分析 (Shape-state Analysis) 就是寻求满足建筑造型和功能要求、并与某种自平衡预应力分布状态 (State) 相对应的结构几何形状 (Shape)。这部分工作是吕佐超于1998~2000年攻读硕士学位期间完成的。经形态分析得到的张拉索-膜结构一般为不可展连续折曲面，而施工所用膜材为平面卷材，故需将薄膜曲面进行合理剖分并展开到平面状态，以便在平面膜材上下料，此即为膜曲面的裁剪分析。这部分的基础性工作是由赵杰于1999~2001年间完成的，随后谭锋又做了进一步的精细化处理，使之能适用于复杂曲面的分析。裁剪分析后可将得到的膜片和索组装成真实结构的力学模型，以此为基础进行荷载分析，并校核结构的安全性。这部分工作也

是由吕佐超完成的。由于索-膜结构的分析与设计均比较复杂,只有借助计算机程序才能有效完成;但数值分析程序较为复杂,不易为一般工程技术人员所掌握,故分析程序软件化是促进索-膜结构应用的一个有效途径,因此在上述理论成果基础上,贾文颖、谭锋以AutoCAD2000为开发平台,以ObjectARX2000为开发工具,完成了张拉索-膜结构分析设计软件CAFA。上述工作形成了我们所在研究组的张力结构系列研究报告(吕佐超等,2001;贾文颖等,2001;赵杰等,2002)。节点连接是张拉索-膜结构设计的另外一项重要内容,2001~2002年郭玉娟将目前常用的节点及连接方式进行了总结和分析,随后杨庆山和谭锋又对其做了进一步的条理化工作。这些构成了本书主体内容的基础。

借此机会谨向十余年来不断给予谆谆教诲和指导并详细审阅本书的沈世钊老师致以由衷谢忱,并以此书恭祝恩师七十华诞。同时向对第四章提出具体修改意见的史守峡博士和几年来为我们的研究工作提供帮助的业界人士王平先生、向阳先生、李中立先生、凌宝山先生、殷淑芳女士致以由衷谢意。在此还要向空间结构领域的前辈蓝天老师、刘锡良老师顺致敬意。

特别感谢教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划和国家自然科学基金的资助。

杨庆山

2003年5月15日

于北京交通大学

目 录

序

前言

第一章 绪论	(1)
1.1 工程结构的演化	(1)
1.2 薄膜结构的发展历程	(6)
第二章 张拉索-膜结构的选型与设计	(15)
2.1 柔性壳体的基本力学性能	(16)
2.1.1 旋转面壳体 and 滑移面壳体	(16)
2.1.2 曲面曲率与Gauss曲面	(18)
2.1.3 柔壳结构的基本方程	(19)
2.2 张拉索-膜结构的基本单元及组合	(21)
2.3 结构的支承体系	(23)
2.4 膜材的剪裁与连接	(26)
第三章 钢索、膜材的物理、力学性能	(29)
3.1 钢索的产品规格及性能指标	(29)
3.2 建筑膜材	(30)
3.3 膜材的本构模型	(32)
3.4 弹性主轴方向上的本构关系	(34)
3.5 非弹性主轴上的本构关系	(36)
3.5.1 主偏轴间应力转换关系	(37)
3.5.2 主偏轴间应变转换关系	(37)
3.5.3 主偏轴间本构矩阵的转换关系	(38)
3.6 建筑膜材的力学性能参数	(39)
3.6.1 弹性模量	(40)
3.6.2 Poisson比	(41)
3.6.3 剪切模量	(42)
3.7 膜材强度指标	(43)
第四章 张拉索-膜结构分析的理论基础和有限元方法	(45)
4.1 几何非线性分析	(45)
4.1.1 变形描述及几何方程	(45)
4.1.2 应力的度量与物理方程	(52)

4.1.3	平衡方程	(54)
4.2	有限元方法	(56)
4.2.1	膜单元	(56)
4.2.2	索单元	(65)
4.2.3	结构平衡方程	(69)
第五章	张拉索-膜结构的形态分析	(70)
5.1	形态分析的程序实现	(71)
5.1.1	形态分析时的平衡方程	(71)
5.1.2	数值分析的Newton-Raphson方法	(72)
5.1.3	程序流程图	(73)
5.2	数值分析的精确性检验	(75)
5.2.1	等应力负Gauss曲率滑移面	(75)
5.2.2	等应力负Gauss曲率旋转面	(78)
5.2.3	任意曲面形式	(82)
5.3	形态分析示例	(83)
5.3.1	悬链面的选取	(83)
5.3.2	算例分析	(86)
5.4	工程算例	(89)
第六章	膜曲面的裁剪分析	(92)
6.1	裁剪线的确定	(92)
6.1.1	生成测地线的改进几何法	(92)
6.1.2	数值分析的细节处理	(93)
6.2	膜片的展开	(95)
6.2.1	展开基准线	(95)
6.2.2	二次测地线法	(96)
6.2.3	数值分析的技术处理	(98)
6.3	裁剪条元的下料尺寸	(99)
6.4	精确性验证	(100)
6.4.1	测地线的验证	(100)
6.4.2	曲面展开的验证	(104)
6.5	裁剪分析示例	(106)
6.6	工程算例	(109)
第七章	张拉索-膜结构的受力分析	(115)
7.1	单元应力及局部松弛和破坏	(116)
7.1.1	单元应力增量的计算	(116)
7.1.2	膜、索松弛与破坏的判断和计算处理	(116)

7.1.3 受力分析程序流程图	(119)
7.2 受力分析程序的有效性检验	(120)
7.3 张拉索-膜结构的受力性能分析	(122)
7.4 工程结构荷载验算	(127)
第八章 张拉索-膜结构的连接与节点	(134)
8.1 膜材与膜材的连接	(134)
8.2 索与膜的连接	(138)
8.2.1 膜材与边索	(138)
8.2.2 膜与脊索、谷索的连接	(141)
8.3 膜材与刚性边界的连接	(142)
8.4 索节点	(144)
8.5 柱节点	(146)
8.6 索膜节点	(148)
第九章 张拉索-膜结构分析设计软件CAFA	(151)
9.1 CAFA的组成	(151)
9.2 模型建立	(152)
9.3 形态分析	(156)
9.4 裁剪分析	(156)
9.5 荷载分析	(162)
9.6 数据查询	(164)
第十章 张拉索-膜结构设计的建筑构思	(165)
10.1 环境因素与总体构思	(166)
10.1.1 社会文化及气候环境	(166)
10.1.2 基地周边环境	(169)
10.2 空间要素与结构选型	(172)
10.2.1 空间组合	(172)
10.2.2 空间形式	(178)
10.3 形式要素与视觉造型	(182)
10.3.1 整体形态	(182)
10.3.2 构造连接	(184)
附录 I 曲面理论的基本概念	(189)
附录 II 测地曲率与测地线	(192)
附录 III 悬链面的表面积公式	(193)
参考文献	(194)

第一章 绪 论

工程活动是人类致力于自然能源和资源的合理利用以满足生活需要和提高生活水平的活动。现代工程活动涉及人力、资金、材料、机械和能源等，其与科学的区别在于工程活动所关心的是如何利用科学家已经发现并条理化了的正确理论，使自然能源和资源得以经济、有效地使用。工程需要人类充分发挥想像力并创造性地使用自然能源和资源，墨守成规地使用现有方法和设施则无法达到此目的。寻求合理利用自然能源和资源以提高人类生活水平并把人们从辛苦劳作中解脱出来的更新、更好的方法是工程活动所追求的永恒主题。

工程从传统意义上可分成两类，即军事工程 (Military Engineering) 和土木工程 (Civil Engineering, 意即民用工程)。随着人们对自然界认识的不断深入，科学知识在民用领域的应用越来越多，它也变得越来越广泛和复杂，促进了土木工程的专业分化，如机械工程 (业) (Mechanical Engineering) 逐步从土木工程中分离出来，成为专门研究结构运动的学科；后来又逐步分离出来矿业 (Mining Engineering)、冶金工业 (Metallurgical Engineering)、电力工业 (Electrical Engineering)、化学工业 (Chemical Engineering) 等，而土木工程本身则专指坝、桥、房屋建筑等固定结构。现代土木工程包括工业、民用、商用的房屋建筑，水利系统，人员及货物运输的交通系统，维护和提高人们生活质量的环境控制系统等的构思、规划、设计、施工和管理等各个环节 (McGraw-Hill Press, 1996)。

结构工程是指上述系统实现其功能的支撑体系，除承担其自重外，还必须承担系统在运行过程中可能受到的荷载，包括冰、雪、雨、地震、风等自然荷载和房屋建筑的人群荷载、运输系统的车辆荷载等功能载荷。

1.1 工程结构的演化

结构的基本功能是承载，其承载能力的大小和有效性取决于采用的建筑材料和结构形式，而且两者是相互关联的。起初人类可采用的建筑材料只有天然的石材和木材，且由于木材易受潮腐烂，为得到具有恒久使用功能的结构如金字塔，石材几乎成为惟一的选择。当石材不易获取或获取的成本太高时，晒干的土坯和烧制砖便成为其替代品。然而石材、砖等砌块的尺寸都比较小，要得到能承担荷载的基本构件如墙体、屋顶、柱、墩等，必须把他们粘结起来，经常采用的粘结材料有灰泥、砂浆等。由砌块和粘结材料两种组分制成的构件称

为砌体，直到19世纪中叶它一直是最重要的结构构件。

由于砌块和粘结料的抗拉强度较抗压强度小得多，故在其施工过程中工匠们的主要任务就是防止砌体中出现拉应力，至少也应将其降低到不致危害结构安全的水平。为此一般采用厚墙、拱、穹顶等形式，千百年来这类结构已形成了一套经验性作法。

由于这类结构中主要存在的是压应力，灰泥、砂浆及后来的铸铁辅助连接构件等构造措施是工匠们惟一需要特别注意的细节，因此古代的工程杰作仅凭直觉及前人留下的经验而无需详细的结构分析即可完成。实践证明这些经验作法是成功的，有些上古的工程杰作不仅历经了千百年的日月沧桑，还经受了多次地震、强风的考验而风采依然，例如1500年前建造的 Hagia Sophia教堂（图1.1.1）不仅具有令人震撼的外形，也创造了使人屏气凝神的内部空间。直到工业革命前，这种工匠式的集设计与施工于一体的工程作法持续了6000余年。



图 1.1.1 Hagia Sophia 教堂

随着铸铁产量的大幅提高，特别是炼钢工艺的日渐成熟，建筑一改千百年来的传统形式。同时由于19世纪钢铁价格还十分昂贵，合理高效利用材料成为必需，优化的概念开始诞生，它促使建筑学科转变成为一门应用科学。工匠中的一些人逐步转变为工程师，即开始自觉地遵循力学原理进行结构设计，以满足结构的安全性及经济性等要求。自此结构工程师的职业化时代开始了。

19世纪后期人们能够花费不大的代价便可显著改善铸铁性能而得到钢材，使得结构工程及相关技术得到了前所未有的发展，人们在材料科学和力学方面的研究热情因此而被引燃，可以说结构工程始发于钢铁工业，至今已有百余年的历史。

由此可以看出，钢材作为建筑材料的使用是结构工程发展的里程碑。钢材在结构工程中之所以具有如此重要的地位在于其具有与抗压强度相同的抗拉强度，弹性模量较砌体结构更高，而且具有砌体材料不具有的延性性能。钢材的高强和高弹性模量可以显著降低构件的截面尺寸，而不显著增加构件的变形。

19世纪出现的另外一种新型建筑材料就是混凝土，但混凝土本身如果不与钢材相结合，那它作为结构材料几乎没有任何意义，与钢筋结合后混凝土成为整个20世纪具有统治地位的建筑材料而应用于各种结构形式；另一方面，混凝土开启了二维结构，如板、壳等之门，使得建筑师和结构工程师从厚墙、拱券、穹顶等传统的结构束缚中解脱出来或赋予它们新的内涵。

随着建筑材料的不断发展，尤其是进入钢铁时代后，材料科学和力学得到长足发展，结构形式也随之发生变化。从几何角度可将结构分成三类：单向尺度远大于其他两个方向的尺度的桥梁、塔体等一维结构；结构的第二种类型就是在某两个方向的尺度远大于另外一个方向的尺度（称为厚度），如板、壳、膜等，称为二维结构；另外一种就是三个方向的尺寸均属于同一量级，如金字塔、核反应堆、体育场馆等，称为三维结构。实际上古代先民已利用天然材料建造了几乎所有的上述结构形式，例如古代游牧民族的帐篷（图1.1.2），模仿风帆的古罗马斗兽场看台挑篷（图1.1.3）可以看做是当今世界上流行的薄膜结构的原型。但只有在结构设计理论指导下，规模宏大而又经济的现代结构方案才能得以提出和实施。从埃及石材金字塔（图1.1.4）到巴黎卢浮宫前的玻璃金字塔（图1.1.5）表征了5000年来建筑材料和建筑形式的发展历程（Mungan, 2001）。

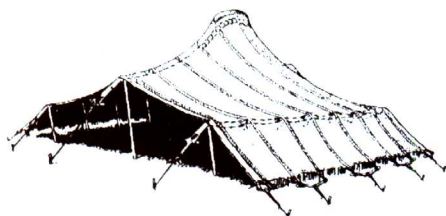


图1.1.2 帐篷

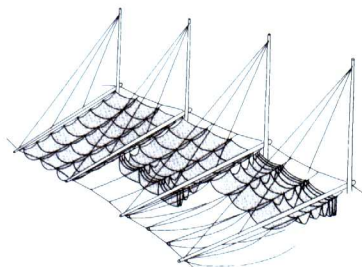


图1.1.3 斗兽场挑篷



图1.1.4 金字塔

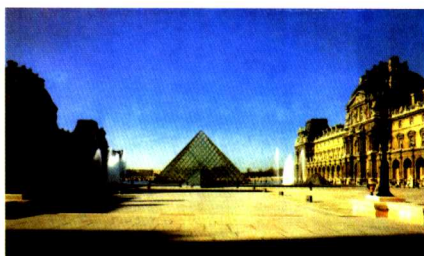


图1.1.5 卢浮宫金字塔

如前所述，结构的目的是为了承担自重荷载及功能荷载即活荷载，而自重对于结构本身来说却是一个无法去除的幽灵和累赘，因此尽量降低自重是结构设计追求的永恒主题之一。结构设计时需考虑的一个常识性概念就是减少应力分布不均匀的受弯构件，以免自重过大而不经济。例如受弯构件仅承自重时，内力与跨度平方成正比，欲达到相同的应力水平，其高度亦需与其跨度的平方成正比，即当梁的跨度变为其原长的10倍时，其高度应为原高度的100倍，自重要达到原来的1000倍。因此结构设计时宜减少受弯构件而尽量采用拉压构件，这就是利用仅含有拉、压杆件的桁架代替受弯梁的理论依据。在拉压构件之间

人们显然希望更多使用受拉杆件，这是由于受拉构件只有达到抗拉强度后才会破坏，而细长受压杆件会在达到抗压强度之前发生屈曲失稳。降低结构自重的另外一个有效方法就是施加预应力，从而将不利的压应力转化成拉应力，该方法被广泛应用于建筑结构和桥梁结构中 (Schlaich, 2001)。

除改进结构构件的形式外，降低结构自重的另一个有效方法是采用合理的结构体系。若结构承担的外荷载作用相同，采用那种能将承担的荷载向各个方向扩散，使整个结构的构件共同工作达到等强（可靠度）设计的结构的自重必然最小。具有这种受力特点的结构就是空间结构。

薄壳是最早采用的现代空间结构形式。由于薄壳结构的厚度小，当受到外荷载时，壳体的面外弯曲应力和扭转应力相对较小，其主要应力是面内应力（亦称薄膜应力）。面内应力的流向成立体状，传力途径简捷，使得混凝土薄壳成为20世纪六七十年代最主要的空间结构形式。

如前所述，人们在充分认识了实腹梁的受力特性后，逐步将其部分腹部材料掏空，形成了平面桁架；为了提高桁架的刚度和承载力，人们又将平面桁架双向布置，形成空间桁架，进而发展成为（平板）网架。与此相似，为了降低钢筋混凝土薄壳的自重，发挥钢材这种轻质高强材料的特点，将壳体中部分钢筋混凝土材料掏空，用钢构件代替剩余的钢筋混凝土，形成钢网壳。一般将网架和网壳统称为空间网格结构。

在外荷载作用下，空间网格结构中部分构件受拉，部分构件受压。对于受拉构件，其截面尺寸由强度和刚度控制，而受压构件的截面尺寸由稳定承载力控制；同时，为了方便工厂加工及现场安装，必须减少构件种类，这样就造成只有部分构件是满应力的，而其他构件则处于“强度过剩”状态，使材料的高强性能得不到充分发挥。

悬索结构或许是弥补这一缺陷的另一种结构形式，它以受拉的高强钢索作为主要承重构件，代替空间网格结构的刚性构件，形成柔性网格结构，此时结构内基本上不存在构件的稳定问题，可最大限度地利用钢材的高强性能。

需要注意的是，在从连续壳体结构向网格结构发展过程中发生了受力结构与屋面围护结构的分离。对于连续壳体结构，壳体既是受力结构又是覆盖性围护结构；而对于网格结构，必须在受力网格上附加围护结构才能将各种活荷载传递到受力网格上，并满足建筑功能要求。网格结构的围护构件一般采用各种形式的板材，此时虽然板的跨度只是单个网格的尺寸，较整个结构的跨度降低了很多，但它不再具有壳体的空间受力特性，与壳体相比，其厚度并没有随着跨度的降低而等比例减小，因此网格屋盖结构（含覆盖层时）的单位面积自重并不一定较钢筋混凝土壳体的自重有较大幅度的降低，只是由于采用了高强度材料才使网格结构的跨度得以提高。这样可以看出，如果能开发出一种具有一定强度，可起到传递荷载作用的轻质覆盖材料，将对降低结构自重做出很大的

贡献，在此基础上，人们会设计出能跨越更大距离且形式更加新颖的结构，20世纪中期开发应用的建筑膜材正好适应了这种需求（杨庆山等，2000）。

同时，20世纪五六十年代欧美的社会政治经济状况使建筑舞台上出现了历史性的转变。建筑师们坚决抛开了传统的建筑风格和样式的束缚，开始重视建筑的实用功能并关心相关的社会与经济问题，主张在建筑设计和艺术创作中突出现代材料的结构特性，借鉴现代造型艺术和技术美学的成就来创造工业时代的现代建筑新风格。受Fuller“少费多用”思想影响的一大批工程师也在不断探索新材料、新技术在结构中的应用，探索着在大跨度建筑中充分发挥材料自身特性的设计，追求着用最少的物质材料建造最大容积建筑的理想（Lavani，1996）。薄膜结构的产生与发展也是深受这一思想影响的结果。

进入20世纪80年代后，人们对自身生存环境的关注使人们对薄膜结构的发展前景有了新的认识。薄膜结构具有的充分利用阳光、空气以及与自然融合的特性，正好与高技派建筑的生态化倾向相一致，从而为高技生态建筑的发展提供了又一广阔空间，薄膜结构因此也受到世界各地绿色建筑运动倡导者们的青睐。生态建筑师杨经文设计的Guthrie高尔夫俱乐部的膜结构屋顶，利用膜材可任意张拉的特性给予建筑设计充分的自由度，那形状怪异的枕状两翼膜篷覆盖面积达2 700m²（图1.1.6），获得了良好的遮阳效果，加上其他技术构造措施，使这个建筑每年可以减少大约66 300kWh的能量消耗。尽管人们对它的造型褒贬不一，但它创造出的舒适的室内外环境得到了人们的普遍认可（Hamzah，et al.，2001）。

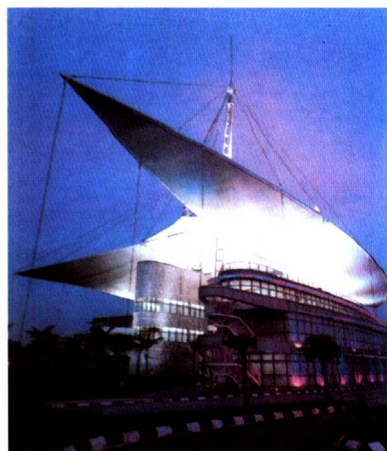


图 1.1.6 Guthrie 高尔夫俱乐部

提到膜结构常让人联想到各地游牧民族使用的帐篷（图1.1.2，1.1.7）。传统的帐篷使用地域极其广泛，北到寒冷的西伯利亚，南到炎热的撒哈拉沙漠。这种结构形式因其具有重量轻、方便易得、可折叠运输以及建造快捷等特点，被各民族普遍采用。尽管这些帐篷的形式各不相同，但其中的特性却与现代膜结构极为相似，例如至今仍在伊朗、阿富汗等地使用的“黑帐篷”（Black Tent，图1.1.2）。这种帐篷由立柱、短桩、绳索及软毛毯构成，全部材料用一头牲畜便可搬运，搭建也十分便捷。只要将穿有绳索的毯子在地上展开，并用锚具将两端固定在插入地面的短桩上，再将毯子中间用柱子撑起使毯子绷紧，一座帐篷便可以使用了。这种帐篷可以抵御沙漠中强热风，并将风荷载通过短桩直接传至地面，具有良好的稳定性。只是受所使用材料的限制，这些传统帐篷的规模

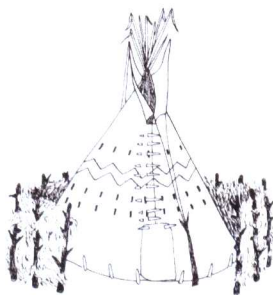


图1.1.7 古代帐篷

较小，耐久性差；涂层织物的出现为这种轻型结构形式的发展提供了必要的物质技术条件。

1.2 薄膜结构的发展历程

现代意义上的膜结构起源于20世纪初。1917年英国人W. Lanchester提出了用鼓风机吹胀膜布用作野战医院的设想，并申请了专利。但当时这个发明只是一种构想。直到1946年，该专利的第一个产品才正式问世，这就是Walter Bird为美国



图1.2.1 雷达罩

军方设计制作的一个直径15m的球形充气雷达罩（图1.2.1）。1957年他又将自家的游泳池罩在了一个充气膜结构中，并在美国的生活杂志上作了介绍，从此这种结构形式开始被世人知晓（Berger, 1996）。他的Birdair公司在20世纪60年代已能用当时的膜材建造跨度在60m以上的充气膜结构了。

20世纪50年代，德国建筑师Otto创立了预应力膜结构理论（Otto, 1971），并在帐篷制造公司的支持下完成了一系列张拉膜结构。Otto的第一个现代张拉膜结构是1955年为德国联邦园艺博览会设计的一个临时性音乐台。1957年他又为另一届联邦园艺博览会设计了更复杂的场馆入口挑篷及音乐台（图1.2.2）。随后，Otto将张拉索-膜结构技术又向前推进一步，把索网引入张拉膜结构中，1967年设计完成的加拿大Montreal博览会的德国馆就是其中一例（图1.2.3）。该结构平面变化极为自由，索网屋面或支或挂在11根布置灵活的桅杆上。那高耸的桅杆、变幻的曲面以及那富有机械技术表现力的节点形式给人以强烈的艺术感染力，使其成为20世纪最具影响的建筑之一；德国馆的成功也使建筑师Otto享誉世界。继德国馆之后，1972年他与Behnisch合作完成的Munich奥林匹克中心（图1.2.4）为其又一力作。该结构的形式与德国馆