

我国内地膜结构的工程应用与发展前景

严 慧 夏 循

浙江大学 空间结构研究中心

摘要： 本文重点介绍了国内近年建成的一些具有代表性的膜结构工程实例。展现了自 1997 年通过引进国外技术建成上海八万人体育场膜结构挑蓬以来，国内膜结构发展的良好态势及其广阔的应用前景。

文中分析了国内膜结构应用与发展的有利条件、制约因素及所面临的机遇与挑战。并针对当前膜材供应与设计软件现状，提出必须采取有效措施加大对新型膜材、先进计算软件、结构体系创新等的研究开发力度；尽快出台《膜结构技术规程》及相关技术标准；健全膜结构行业组织。加强对膜结构设计技术交流、培训，重视设备更新、加快工艺改革，以期适应膜结构进一步发展的需要，推动膜结构的健康发展。

关键字： 膜结构 ， 计算技术， 结构体系

The application and the development of membrane structures in china

Yan Hui Xia Xun

(spatial structure research center zhejiang university 310027)

Abstract： This article introduces some typical projects of membrane structures, which are constructed in recent years. It shows the rapid development and the broad utility of membrane structures in china since the building up of Shanghai Eighty Thousands People' Stadium.

This article outlines the advantages, the limitations, the opportunities and the challenges that we have to confront in the development of membrane structures in china; proposes that much more research should be done in the fields of developing new membrane materials, designing advanced calculating software, creating new structure systems. it also suggests that we should issue the technical regulations for membrane structure industry and perfect the organism in this field.

Key words: membrane structure calculating method structure system

1. 我国内地膜结构工程应用的新进展

随着世界工业的发展与计算技术的进步，膜结构也从临时建筑迈入永久性建筑行列，并成为当代充满活力的一种新型大跨空间结构体系。在许多国家举办奥运会、世博会的场馆建设中，膜结构以其绚丽的色彩和丰富的造型赢得了人们关注、认同。我国内地自上世纪 70 年代以来，一些科研、设计单位与高等学校便开始对膜结构进行研究。一些关键设计技术如膜结构的找形分析、荷载分析、裁剪分析等的研究也获得了一定进展，为我国膜结构的开发、应用建立了一定的技术储备。1995 年建成的北京房山游泳馆（跨度 33m, 1100m²）与鞍山农委游泳馆（跨度 30m, 1000m²）是我国第一次正式应用于工程的空气支承膜结构，标志着我国内地开始启动了膜结构的工程建设。自 1997 年通过引进国外膜结构技术建成上海八万人体育场看台挑棚后，经过广大工程技术人员努力，相继建成了青岛颐中体育场挑棚膜结构、杭州游泳馆、网球馆双层膜结构等二百余项膜结构工程，年增长率达 20%^[1]。随着膜结构应用的日趋广泛，专业膜结构企业及相关配套产品的厂商也大量涌现，目前实力强劲的日本太阳工业集团和德国的 Skyspan 公司等已加入到我国内地膜结构市场，台商膜结构

企业也相当活跃，这些对于促进我国内地膜结构的发展都起到了积极作用。

在已建的众多膜结构工程中以半敞开的体育场看台挑棚较多，许多不同造型的膜结构已成为当地具有特色的标志工程。其中规模较大的有上海八万人体育场、青岛颐中体育场、义乌体育场、烟台市体育中心体育场、芜湖市体育场、威海市体育中心体育场、嘉峪关市体育场等的看台挑蓬膜结构。表 1 列出了这些大型体育场挑蓬的外观、结构模型及其几何特点。

表 1 大型体育场看台挑棚膜结构工程

1、人 上 海 体 育 场 八 万		<p>平面尺寸 (m): 288.4×274.4; 覆盖面积 (m^2): 2.89 万; 膜材: PTFE; 用钢量 (kg/m^2): 3000t (总重); 建成时间: 1997 年。</p> <p>结构特点: 由 57 个伞状膜结构单元覆盖在沿径向、环向布置的立体桁架上, 径向桁架最大悬挑 72.5m。</p>
2、中 青 体 育 场 市 场 颐 ^[2]		<p>平面尺寸 (m): $86 + (2 \times 90 \times 180)$; 覆盖面积 ($\text{m}^2$): 3.0 万; 膜材: 法拉利 1302T; 用钢量 (kg/m^2): 90; 建成时间: 2000.8。</p> <p>结构特点: 60 个立柱支承的 60 个膜单元分布在内环索与外环钢桁架间, 由柱径向向内悬挑 37m, 向外悬挑 7m。</p>
3、体 义 育 场 市 ^[3]		<p>覆盖面积 (m^2): 1.61 万; 膜材: 法拉利 1302T; 用钢量 (kg/m^2): 62; 建成时间: 2001.10。</p> <p>结构特点: 挑蓬呈梭形树叶状, 两端设 60m 的钢桅杆, 顶端设 3 根锚索。中间 10 个脊谷索式膜单元支承于 11 根悬挑桁架, 两端为三棱锥形膜单元, 桁架最大悬挑 49m。</p>
4、中 威 心 海 体 育 场 体 育 ^[4]		<p>平面尺寸 (m): 236×205 椭圆形; 覆盖面积 (m^2): 1.53 万; 膜材: PVDF; 用钢量 (kg/m^2): 22; 建成时间: 2001.12。</p> <p>结构特点: 由 34 个连成一体, 形状渐变的单桅杆伞形膜单元组成。每一单元则由单桅杆谷索、脊索、翼索、边索及张力膜组成, 膜单元悬挑长度 17~30m。</p>
5、体 芜 育 场 市 ^[3]		<p>平面尺寸 (m): 254×225; 覆盖面积 (m^2): 2.07 万; 膜材: 米乐 FR-1000; 用钢量 (kg/m^2): 38; 建成时间: 2000.12。</p> <p>结构特点: 在由 46 个 V 形支架支撑的二个柱面网壳下吊 40 个大小不等的锥体膜单元。内环索呈空间曲线, 悬挑 30.4~44.9m。</p>

在这些体育场看台挑棚膜结构工程中，根据各自造型特点分别选用了在悬挑钢桁架的基础上加

设环向桁架，或设置与建筑方案协调的斜拉索、中间拱架等，或利用柔性索系与悬挑桁架的组合或利用空间钢构架等作为支承骨架。而置于其间的膜单元常用立柱、索系、撑杆等作为支撑体系。青岛市颐中体育场罩篷的膜单元是一种典型的膜单元布置形式：它由 60 个锥形膜单元组成的脊谷式张拉膜结构，每个单元由一个立柱支撑，前端与主内环索相连，通过脊索和谷索张拉膜体；再由立柱、上环梁、斜腹杆、下弦杆、下拉杆等组成的钢桁架体系传给下部钢筋混凝土看台，而上吊索和下拉索则主要用来承受活荷载和风荷载^[5]。

用于体育场看台挑篷的膜结构由于悬挑长度往往较大，屋面自重较轻，结构支承点较少，如何有效增强结构整体刚度是这类结构设计时应予关注的问题。同时如何恰当利用索、膜预应力也是亟为关键的问题。随着学校体育设施的完善，一些中大型看台挑棚膜结构往往是首先考虑采用的方案。

除应用于体育场外，在体育馆及各种博览会展场的建设中膜结构也有较多应用。如深圳欢乐谷中心表演场（图 1），其结构布置平面呈圆形，膜水平面投影为 5800 m^2 。它由 15 个锥形膜单元组成，每个锥形膜单元的顶点由一根钢柱支撑，从而形成脊谷式膜单元布置，通过预应力的脊索和谷索形成支撑体系，传递风荷载和活(雪)荷载。又如长沙世界之窗剧场（图 2），其建筑平面近似为扇形，最大跨度 86.58 m ，总长 54 m ，膜覆盖面积为 6100 m^2 。剧场整个膜结构由 5 个跨度不等，高度不等的双伞状单元组成，膜后端与已有的建筑物山墙连接，膜单元由两根内排柱顶起，两顶点间布置脊索；膜单元间相互连接，其上压以谷索，谷索两端与外排柱相连，再通过外拉索引向锚座。此外，一些大型体育馆建筑，如杭州游泳馆、网球馆^[6]、秦皇岛市体育馆、惠州市体育馆、浙江大学新校区风雨操场、浙江省体育中心室内田径馆等均采用了具有独特风采的膜结构。

云南世界园艺博览园艺术广场观众席采用了动态膜结构顶篷（图 3）。它的投影面积为 2270 m^2 ，由 5 个可开启的梯形单元体（长 37.7 m ）组成。单元之间上下重叠 0.5 m ，每一单元下设两个立柱及机械装置，以液压千斤顶为其传动系统的动力源，单元体在液压千斤顶的作用下以两柱顶轴承连线为轴转动开启。这是我国应用开合式膜结构的前兆，可以预期今后将会涌现出一些大型开合式膜结构。对此，天津大学，浙江大学进行了专题研究并取得了一定的成绩，作好了相关的技术准备。



图 1 深圳欢乐谷中心表演场及结构模型



图 2 长沙世界之窗剧场及结构模型

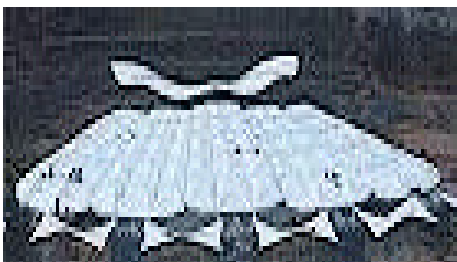


图 3 昆明世博园艺术广场动态膜结构

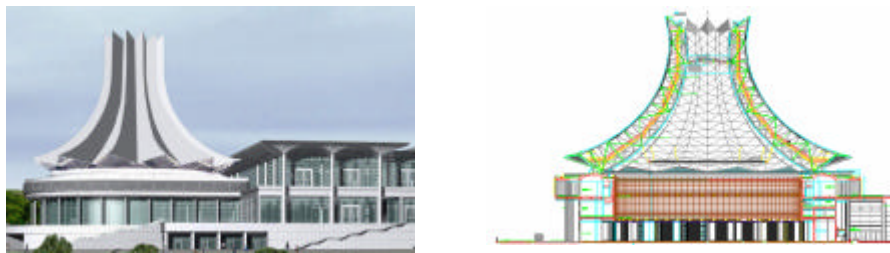


图 4 南宁会展中心

南宁会展中心（图 4）主厅采用了旋转双曲抛物面的双层膜结构，是我国沿竖向空间采用膜结构的第一例工程实践。其高度为 48m，底部直径为 65.5m，结构顶部由膜片与伸展的单层钢构架构成，形似盛开的鲜花——南宁市花朱槿花。

在交通建筑中，膜结构也获得了广泛应用。分布在各地高速公路的收费站、候车廊、加油站以及机场航站楼、轮船码头等多有不同造型的膜结构应用。如最近已安装完成的广州新白云机场航站楼主楼屋面采光带（ $325\text{m} \times 20 \sim 50\text{m}$ ）、门厅以及连接楼屋面等部分采用的膜结构，总面积达 5 万 m^2 。600m 长的葫芦岛站台膜结构（ 3600m^2 ）以张弦梁为挑梁与膜结构配合，其造型与自然环境相协调，为膜结构在铁路站台的应用提供了较好的范例。

此外，因为膜结构具有造型新颖时尚、艺术表现力强、安装快捷方便的特点，也为众多的景点建筑小品所采用。

2、膜结构材料与计算技术应用的现状

2.1 膜材的应用现状

目前膜结构工程所用膜材一般由基层、涂层、面层组成。常用的基层主要有玻璃纤维织物（由 3 微米纤维丝编织而成）与聚酯纤维织物。常用的涂层则有聚四氟乙烯（PTFE）与聚氯乙烯（PVC）。基层主要为膜材提供力学性能，涂层、面层则为膜材提供抗老化、防幅射、增强自洁性等特理性能。一般将以玻璃纤维织物为基层，以聚四氟乙烯为涂层的膜材简称 PTFE 膜材；而以聚酯纤维为基层，以聚氯乙烯为涂层的膜材称之为 PVC 膜材。为改善 PVC 膜材的性能，常在其表面再涂以面层如聚二氟乙烯（PVDF）、聚氟乙烯（PVF）、聚偏氟乙烯（TEDLAR）、丙烯酸脂（ACRYLIC）等。近年推出的全透明和半透明的 ETFE 膜材，不设基层，是需要透光的工程和内膜的理想膜材。

目前所用膜材基本来自国外，PTFE 膜材主要来自美国、德国、日本等地，PVC 膜材主要来自法国（FERRARI）、德国（MEHLER、DURASKIN）、美国（SEAMEN）以及韩国的秀博公司等。国内生产的膜材或因物理性能欠佳，或因力学性能不足，尚难满足大型工程及我国膜结构发展的需要。2002 年上海企业从德国引进了全套可进行 PVDF 表面处理的 PVC 聚酯纤维膜材生产线，膜材幅宽 4.05m。也有的企业正策划投资生产 PTFE 涂层玻璃纤维膜材，但目前国产玻璃纤维最细只有 6 微米，短期内将制约 PTFE 膜材的国产化，但这类问题终将解决，摆脱膜材依赖进口的局面已为时不远。

2.2 膜结构的设计要点与计算技术

由于膜材的基层材料是由纤维按经纬方向编织而成，材料属正交异性，膜材受力时表现出明显的非线性，这些力学特性的存在也就决定了膜结构设计的复杂性。

膜结构的设计是在确定结构平面形状、尺寸，进行三维造型、确定净空体量与各控制点座标，选定结构形式与膜材类型的基础上进行找形分析（即找出膜面的合理形状，使之既能满足建筑给定的边界约束条件，又能承受外荷载作用），荷载分析（确定结构内力与变形，确定索、膜初始预张力）与裁剪分析（即将二维材料恰当裁剪通过张拉形成所需要的三维空间曲面）。

找形分析时可通过几何分析法（适用于简单外形）、物理模型法（皂膜比拟法）与数值分析法（动力松弛法、力密度法、最小曲面法等）确定结构初始平衡形状。

荷载分析时可按几何非线性分析结构在不同工况下的内力与变形。在确定索膜初始预张力时,应保证在最不利荷载工况下膜中不出现零应力,以避免膜材出现皱褶。同时初始应力值也不宜过高,否则膜材徐变加大、易老化、强度储备减少。

裁剪分析时可采用物理模型方法,几何模型方法以及平衡模型方法(如力密度法、动力松弛法、离散超限变换投影法等),将膜结构中的膜材从预应力状态还原为无应力状态,并应考虑初始预应力造成膜材经纬方向伸长差异对裁剪下料的影响。

显然这些分析过程是比较复杂的,需采用按上述方法编制的程序^[7],通过电脑分析计算。国际上膜结构分析软件主要有美国 Birdair 公司的 MCM 软件与美国电脑设计公司的 ACP 软件(均适用于找形分析与荷载分析),以及美国 Autometrix 公司的 PS 软件(适用于裁剪分析)。而德国 Technet 公司的 EASY 软件既可用于找形分析、荷载分析,又可用于裁剪分析,具有较强的功能。目前已为国内不少单位使用。

除此国内高校、科研单位与企业也相继开发出一些膜结构设计软件。如天津麦卡特膜结构科技发展有限公司叶小兵开发的 MEDE 软件,同济大学张其林等开发的 3D3S 膜结构设计软件、北京光显空间膜技术工程有限公司向阳开发的 MCAD 软件等,另外还有一些相关软件也正在开发中。这些软件虽各有特点,可以进行膜结构的分析与设计,但膜结构的发展还期盼研究部门早日推出功能强大、介面友好、易于操作的高质量商品化软件。

3、 不断创新、推出精品工程,促进膜结构健康发展

膜结构的诸多优势已为国内外的大量工程实践所证实。根据建筑师的创意膜结构可以塑造出传统建筑难以实现的许多优美的曲面造型,可以经济合理地覆盖大跨度空间,同时在照明、声学、防火、保温、节能与自洁等方面也具有许多优点。特别是 2008 年北京奥运会,2010 年上海世博会和各地举办的大型体育活动、商展活动以及群众性体育活动的普及等都将为膜结构的腾飞创造机遇。

近年来膜结构在我国内地已获较多应用,但仍属起步阶段,与国外先进水平相比还存在着明显差距。当前中国大地正面临着膜结构的春天,因此必须充分重视新型膜材的研制、先进设计软件的开发、结构体系的创新,同时应重视设备更新与工艺改革、健全膜结构行业组织,以适应膜结构进一步发展的需要:

3.1. 加大新型膜材、先进设计软件研究开发的力度

膜材是膜结构应用与发展的基础。目前所用的 PTFE 膜材可褶性较差,将为膜单元的搬运增加难度,同时费用较高。而由 PVC 膜材经表面处理而成的 PVDF 膜材,由于焊缝处的涂层需经打磨,既增大了工作量又易导致焊接强度的不稳定。在此基础上德国米乐公司在 1998 年开发了双面 PVDF 自洁涂层技术,并选用了更高质量的细纱聚脂纤维。成为 PVDF 新一代产品。其综合性能较顶层涂敷 PVDF,底层为丙烯酸酯的第一代产品有了较大提高^[8]。近年来日本还利用 TiO₂ 光媒体的表面处理技术开发出了一种新型的自洁性膜材(二氧化钛膜材)^[9]。有的还在利用纸基替代现有的基材。这说明对膜材品位的改善、新型膜材的研发仍具有较大的空间。面对我国膜结构兴兴向荣的发展前景和膜结构建筑市场竞争的日趋激烈,更需组织力量加大投入力度,从基材、涂层与面层材料的改进入手开发出性能安定、品位较高、价格低廉的新一代“绿色”膜材。

设计软件是膜结构应用与发展的重要手段。由于膜结构设计较为复杂,设计技术还未能为广大设计人员所掌握。目前的现状是膜结构公司在取得工程项目后或自行设计,或委托一些高校设计,膜结构的设计往往与土建设计分离,从而可能造成结构设计的不合理。如某工程膜结构支承于下部多层框架上,由于两者设计分离,土建设计单位只提出柱顶水平力的限值,因而该工程膜结构支承体系的用钢量大增,如果设计时能综合考虑,即可避免出现类似问题。虽然目前可以进行膜结构设计的软件已有不少,但开发出一套符合我国相关规范、规程、标准的智能型商品化软件仍属必要。

3.2. 创造先进合理的结构体系

除了空气支承膜结构之外，张拉整体式膜结构、骨架支承膜结构与索系支承膜结构都是由索、杆、梁等单元构件组合成的各种支承结构体系。许多高校对此已进行了大量研究也取得一定成果，然而尚未显现出类似美国在空气支承膜结构冷落后提出“索穹顶”结构时的创造性。日本在总结空气支承膜结构失败教训的基础上，从不同方面继续研究开发新型空气膜结构^[10]的求索精神，也是值得我们学习的。

我国在空间结构领域取得了不少值得称贺的成果，拥有了较坚实的理论与技术储备以及力量较雄厚的技术队伍。随着研究工作的不断深入以及诸多大型膜结构工程实践的增加，广开思路，突破原有的思维模式，更新一些概念与观点，一定会开拓出具有原创性的理论研究新成果，创造出更为先进合理的结构体系。

3.3. 重视设备更新，加速工艺改革

随着我国膜结构市场的活跃，膜结构企业在数量上呈不断增加的趋势，其中不少已属具有一定规模的骨干企业。但也有些装备低劣、技术素质较低的企业混迹其间，他们常以低廉的价格，“灵活”的手段获取工程，以低价、低等级膜材替代设计要求的膜材，其结果只能是交出一个加工粗糙、留有缺陷的工程。不仅给这些企业造成损失，更重要的是还将殃及行业的整体形象。这种现象在网架行业也曾出现过，年轻的膜结构行业更需引以为鉴。

膜结构拥有较高的技术含量，面对市场的激烈竞争，膜结构企业更应摆脱粗放型的施工与管理，提高施工水平，重视设备更新，加快工艺改革的步调。一些有条件的骨干企业应争取拥有自控加工设备，实现由 CAD 向 CAM 转化。进一步改善、提高加工制作手段，全面提高技术水平，抓好质量管理，树立品牌形象，以产品质量竞争、服务质量竞争替代以价格为主要手段的低层面竞争。适应日趋激烈的国内、国际建筑市场竞争的需要。

3.4. 健全行业组织，促进膜结构的健康发展

当前我国膜结构正处于迅速发展时期，具有广阔的发展前景。为促进膜结构的健康发展，中国钢协空间结构分会膜结构专业委员会于 2002 年 12 月在北京成立。这是膜结构行业的一件盛事。

根据膜结构专业委员会工作条例，委员会将团结、联系会员单位，积极宣传推广膜结构，组织制定膜结构的技术措施，技术标准与技术规程，加强会员单位间的交流与沟通，促进膜结构行业友好竞争、共同发展。

目前正在编制的《膜结构技术规程》在广泛征求意见的基础上已完成报批稿，待规程批准颁发实施后应及时组织规程的宣讲、培训，并组织编写规程应用指南。使更多的设计人员了解膜结构、熟悉膜结构，不断提高设计水平，大胆创新，创作优秀的膜结构作品，推出精品工程。

相信膜结构将在我国辽阔的大地上在其最佳适用范围内充分展现出它的魅力。珍惜膜结构发展的大好春光，积极推动膜结构的健康发展，愿膜结构的明天更美好。

参 考 文 献

- [1] 蓝天,刘枫. 中国空间结构的二十年. 第十届空间结构学术会议论文集, 2002
- [2] 李中立,张文英等. 青岛体育场膜结构挑篷. 第九届空间结构学术会议论文集, 2000.9
- [3] 黄达达. 索膜结构在我国的工程应用实例. 钢结构与建筑业, 2001.2
- [4] 向阳,郭正兴. 威海市体育场看台挑篷. 钢结构与建筑业, 2002.4
- [5] 刘锡良. 现代空间结构. 天津: 天津大学出版社, 2003.6
- [6] 刘文光. 杭州游泳馆膜结构工程. 工业建筑, 1999.11
- [7] 聂世华、钱若军等, 膜结构技术评述, 空间结构, 1999.6
- [8] 黄玉英. 第二代 PVDF 建筑工程膜材的关键技术及工程实例. 钢结构与建筑业, 2002.6
- [9] 唐泽靖子. 用于膜结构建筑的膜材料. 世界建筑, 2002.3
- [10] Kazuo, I. . Membrane Designs and Structures in the World . Shinken-chiku-sha Co., Ltd., Tokyo, March 31, 1999