

DESIGN OF MEMBRANE
STRUCTURE ENGINEERING

膜结构 工程设计

陈务军 编著

中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

膜结构工程设计

陈务军 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

膜结构工程设计/陈务军编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2004

ISBN 7-112-07059-7

I. 膜... II. 陈... III. 膜结构工程设计

IV. TU330.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 126727 号

膜结构工程设计

陈务军 编著

*

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: 787×960 毫米 1/16 印张: 15½ 字数: 310 千字

2005 年 2 月第一版 2005 年 2 月第一次印刷

印数: 1—3500 册 定价: 25.00 元

ISBN 7-112-07059-7

TU·6293 (13013)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书内容包括8章正文和附录A~F。第1章,膜结构发展简史和概述。第2章,膜材的构成,纤维、涂层类型与性能,膜材类型与特征,建筑物理特性、单向、双向力学特点等。第3章,膜建筑的建筑物理特征,膜建筑形式与膜构造单元,膜建筑采光、热环境、声学设计,膜建筑设计要素,应用领域与特点。第4章,膜结构体系及其特征,支承结构体系与特点,结构设计内容与方法。第5章,气承式充气膜的体系、设计分析、节点、维护与使用等,气囊膜形式与特点,飞艇设计与分析、结构特性。第6章,膜设计分析基本理论,包括找形、荷载分析、裁剪分析的主要理论和方法。第7章,钢索形式、构造、力学特点,锚具形式、特点,设计方法,悬索解析。第8章,膜结构的节点形式、构造及其特点,节点设计。附录A~F给出了膜结构设计常用的一些材料参数,包括常见膜材参数、钢索参数、锚栓设计参数、钢管尺寸表、蒲福风级与风压、单位换算表,便于设计查询。

本书可作为设计院建筑师和结构工程师参考用书,同时可供安装、制作单位相关工程技术人员,科研院所研究人员以及高等学校有关专业师生参考。

* * *

作者简介

陈务军(1969.2-),男,博士,副教授,重庆云阳人。1992.7本科毕业于兰州铁道学院结构工程系,1995.7硕士研究生毕业于西南交通大学桥梁工程系,1998.10博士毕业于浙江大学结构工程,获博士学位,浙江省、浙江大学优秀博士论文,2000.12上海交通大学博士后研究出站,并留空间结构研究中心工作,2003.9德国斯图加特大学高级访问学者。现在主要从事空间可展结构分析理论研究,网壳稳定理论与结构特性研究,新型膜结构分析理论、设计应用技术研究与开发。

* * *

责任编辑 赵梦梅

责任设计 郑秋菊

责任校对 刘梅 王金咪

序

膜结构是轻型空间结构的一个重要分支,除丰富多彩的造型外,还有优异的建筑特性、结构特性和适宜的经济性,因此,从膜结构的诞生,就迅速在世界各地发展起来。

Frei Otto 教授是举世公认的现代膜结构的先驱,他的贡献使德国的膜结构技术一直处于世界先进水平,精于技术探索与创新。日本、美国等亦经过了 30 多年膜结构的发展,普通膜结构设计技术已趋于成熟。先进国家的建筑师、工程师能充分理解、开发、应用膜结构,并形成了有效的生产合作机制,促进了膜结构的推广与发展。

现代膜结构在我国起步于上海八万人体育场,仅有七年历史,但是,由于我国是一个庞大的高速发展的经济实体,具有较大的市场需求,因此,膜结构发展迅猛、日新月异。但目前我国膜结构技术与国外先进水平相比尚存在较大差距,除了加工制作、安装、工程管理水平外,其中最重要、最大的差距就是设计技术。

我国膜结构发展之初,设计施工几乎是国外的。虽然近三年来,随国内膜结构厂商的涌现,膜结构设计施工队伍不断壮大,设计和施工技术水平有所提高。但对膜材特性的认识、结构体系与受力特征的理解、各类膜结构节点细部的了解,设计施工团队合作协调,仍十分迫切有待进一步提高。

少量已有的关于膜结构工程的著作,大多以纯理论或工程实际案例的图集的形式编写,目前国内外尚缺乏一本主要针对膜结构工程设计技术的专著。

陈务军博士(博士后)近 10 年从事大跨与空间结构、特别是近 5 年主要从事膜结构分析理论与方法的研究、设计应用技术研发,负责完成多项大型膜结构工程设计。并作为高级访问学者,在现代张拉膜结构发源地、著名的德国斯图加特大学,研究学习轻型空间结构、膜结构一年。他注重理论与实际相结合,付出巨大努力与辛劳,历时近两年,完成了这一本关于膜结构工程设计的专著。这本著作的主要特点有:

(1) 对各类织物膜材纤维基布、涂层的构成、建筑与结构受力特点、工程应用进行了详实、系统、全面的介绍,并简要介绍了非织物热塑性薄膜。

(2) 全面阐述了膜建筑物理技术、建筑设计要素、膜建筑造型,并结合工程实例概要说明了膜建筑应用。

(3) 系统介绍了膜结构体系、支承构件和结构体系, 结构设计要素, 膜结构的选型、分析、设计与研究。

(4) 详细介绍了气承膜结构的设计、分析、使用与维护, 气囊膜结构设计分析与应用, 以及飞艇与空间可展膜结构等特殊的气囊膜结构。

(5) 精炼地介绍了膜结构的主要计算分析理论与方法, 重点阐述其原理、概念, 论述各种计算理论的完备性、系统性和相关性。

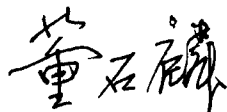
(6) 全面叙述了钢索的类型、结构特点和强度设计准则, 锚具的形式、锚固方法及其受力特点与设计。

(7) 详细说明了各类膜结构的节点设计, 给出众多类型具有实际应用意义的节点详图, 简要阐明了膜预张力导入机制和节点设计的相关性。

(8) 叙述了膜结构各类构件的制作、安装、使用与维护。

(9) 为方便工程应用, 在附录中给出了常见膜材、钢索、锚栓的设计参数, 风速、风压与风级对照表, 常用单位换算。

这本著作着重于膜结构工程设计的系统性、完整性和实用性, 清晰地阐明了膜结构工程设计的原理、方法和步骤, 深入浅出。因此, 这是一本难能可贵的著作, 它的出版问世, 相信对我国膜结构发展和推广应用将会起到显著的作用。



2004 年 10 月 14 日

前 言

膜结构是现代空间结构体系的一个重要分支，是柔性张拉膜和其他轻型空间结构体系的有机结合，具有丰富的建筑造型、优异的结构受力特性。

在工业发达国家膜结构已有近 60 年历史，一般膜结构设计技术比较成熟。我国膜结构发展还处于初步阶段。虽然在膜结构与工程技术方面取得了较大进步，但还有许多急待提高的地方。

世界膜结构正呈现更专业化的发展趋势，组建有专业化的设计队伍、专业化的制作厂家以及专业化的项目管理公司。大而全、小而全不是膜结构发展的一种理想模式，应走专业化、分工协作之路，追求个性化设计，注重品质和技术创新。膜结构工程设计是膜结构发展的重要技术环节之一，是膜结构专业化发展的重要领域。

我从 1998 年开始学习膜结构基本知识，并进行结构分析基本理论研究，从 2001 年初开始接触膜结构工程设计，近 3 年负责完成了 50 余项各种规模的膜结构工程设计，始终感觉到膜结构知识十分零散，国内外缺乏膜结构设计的专业书籍，不利于人们系统学习膜结构基础知识，以及设计、制作、安装等专业知识，也不利于膜结构专业化的发展。

2002 年底，我计划并开始写这本关于膜结构工程设计的著作。膜结构工程设计不是单纯的膜设计，应从工程的全局性、系统性考虑，主要包括：膜的构成、力学特点与设计、膜建筑物理技术特征、结构选型与结构特性、基本的分析理论与方法、主要结构构件与节点细部设计、制作和安装等因素。据此我拟定了初步内容提纲，虽然开始觉得工作量非常大，但我并未放弃，经过近两年坚持不懈的努力，近期完成了书稿。

本书的宗旨是期望使读者能够较全面、系统地掌握膜结构的基本知识，进而理解膜结构工程设计的原理、方法和基本的设计手法，促进膜结构设计专业化与膜结构发展。

最后，对在本书撰写过程中给予帮助的个人和单位表示诚挚的感谢！书中部分工程实例、节点细部设计为立众精密结构（上海）有限公司提供，特此致谢！

限于知识水平和认识高度，书中难免有失误和不妥之处，恳请读者提出宝贵意见，批评指正，来函交流（cwj@sjtu.edu.cn）。

陈务军

2004 年 10 月 22 日

目 录

第1章 绪论	1
1.1 膜结构发展简史	1
1.1.1 膜材发展概况	1
1.1.2 膜结构体系发展概况	2
1.2 本书内容概要	5
参考文献	6
第2章 膜材及其特性	8
2.1 织物膜材构成	8
2.1.1 织物纤维	8
2.1.2 织物编织构造	10
2.1.3 涂层材料及其特征	12
2.2 织物膜材类型与特性	13
2.2.1 织物膜材类型	13
2.2.2 织物膜材基本特性	14
2.3 膜材线弹性模量与剪切模量	22
2.3.1 膜材线弹性模量	22
2.3.2 膜材剪切模量	26
2.4 膜材的徐变与松弛特性	28
2.5 建筑织物膜材基本参数	29
2.5.1 PVC/PES 膜基本参数	29
2.5.2 PTFE/GF 膜基本参数	29
2.6 非涂层织物膜材	29
2.6.1 棉质纤维膜	30
2.6.2 氟化物织物	30
2.6.3 金属织物	30
2.7 热塑性化合物薄膜	30
2.7.1 ETFE 薄膜	30
2.7.2 THV/FEP 薄膜	32
2.7.3 PVC 薄膜	32

参考文献	32
第3章 膜建筑设计与应用	34
3.1 概述	34
3.2 膜建筑设计使用年限	35
3.3 膜建筑造型	36
3.3.1 双曲抛物面膜单元	36
3.3.2 马鞍形双曲面膜单元	37
3.3.3 锥形双曲面膜单元	37
3.3.4 拱支承张拉膜	39
3.3.5 脊谷形张拉膜	40
3.3.6 整体张拉膜	40
3.3.7 充气膜建筑	43
3.4 膜建筑光环境	43
3.4.1 膜太阳光基本特性	43
3.4.2 采光设计计算	44
3.4.3 艺术光设计	45
3.5 膜建筑热环境	45
3.5.1 基本热物理特性	46
3.5.2 凝结结露	47
3.5.3 通风排气	48
3.6 膜建筑声学环境	48
3.6.1 内部回声	48
3.6.2 外部噪声隔离	49
3.7 膜建筑设计要素	50
3.7.1 排水	50
3.7.2 消防与防火	51
3.7.3 裁切线	51
3.7.4 避雷设计	52
3.7.5 防护与维护设计	52
3.7.6 节点设计	52
3.8 膜建筑特点与应用	53
3.8.1 膜建筑特点	53
3.8.2 膜建筑应用	53
参考文献	62
第4章 膜结构设计	64

4.1	概述	64
4.2	膜结构体系	65
4.2.1	张拉膜结构	65
4.2.2	骨架式膜结构	66
4.2.3	充气式膜结构	67
4.2.4	索桁架膜结构	69
4.2.5	张拉整体与索穹顶膜结构	70
4.3	膜结构设计分析	71
4.3.1	膜结构设计内容	71
4.3.2	找形分析	73
4.3.3	荷载、作用与荷载组合	75
4.3.4	结构与荷载分析	80
4.3.5	裁剪设计分析	83
4.4	支承桅杆构件与支承结构体系	87
4.4.1	支承桅杆构件	88
4.4.2	柔性索杆支承体系	88
4.4.3	刚性骨架支承体系	90
4.5	支承体系结构设计	102
4.5.1	结构分析模型与方法	103
4.5.2	结构与计算分析	106
4.5.3	节点设计与计算分析	110
4.5.4	结构分析研究	113
4.5.5	试验研究	114
	参考文献	114
第5章	充气膜结构设计	118
5.1	气承式膜体系	118
5.1.1	机械系统	118
5.1.2	控制与监测系统	120
5.1.3	电设计系统	120
5.1.4	防火系统	120
5.1.5	进出口系统	121
5.2	主要材料	122
5.2.1	膜材	122
5.2.2	索	122
5.3	结构设计	122

5.3.1 荷载、作用与结构效应组合	122
5.3.2 结构分析与设计	125
5.3.3 构件设计强度	126
5.3.4 锚固与基础	127
5.3.5 主要节点设计	127
5.4 安装、使用与维护	130
5.4.1 安装与充气	130
5.4.2 使用与维护	130
5.5 气囊膜结构设计	131
5.5.1 建筑结构形式	131
5.5.2 结构设计	134
5.6 飞艇膜结构设计	134
5.6.1 结构形式	134
5.6.2 气体静力学	136
5.6.3 膜材	138
5.6.4 结构设计与分析	139
5.7 其他充气膜结构	141
参考文献	142
第6章 膜结构设计分析理论与方法	144
6.1 找形分析力密度法	144
6.1.1 膜面模拟	144
6.1.2 力密度与膜面几何特性	145
6.1.3 T -单元列式	147
6.2 找形分析动力松弛法	148
6.2.1 基本原理	148
6.2.2 索网格模型找形分析	150
6.2.3 三角形单元网格模型找形分析	151
6.3 找形分析几何非线性有限元法	152
6.3.1 索网格模型找形分析	152
6.3.2 三角形单元网格模型找形分析	153
6.4 荷载分析理论与方法	154
6.4.1 理论与方法一致性	155
6.4.2 理论与方法完整性	156
6.5 膜裁剪分析理论与方法	157
6.5.1 裁剪方法	157

6.5.2 平衡模拟技术·····	157
6.5.3 等效板单元有限元法·····	158
参考文献·····	160
第7章 钢索的特性与设计 ·····	163
7.1 钢索术语·····	163
7.2 钢索形式与特点·····	165
7.2.1 钢丝·····	165
7.2.2 钢丝绳·····	166
7.2.3 螺旋钢丝绳·····	170
7.2.4 平行钢丝绳·····	170
7.2.5 锁芯钢索·····	171
7.2.6 其他形式·····	171
7.3 钢索防腐·····	171
7.3.1 镀锌·····	171
7.3.2 挤塑索套·····	172
7.3.3 喷塑·····	172
7.3.4 油漆·····	172
7.4 钢索锚具、锚固与连接·····	172
7.4.1 索头基本形式·····	172
7.4.2 锚固方法与特性·····	175
7.4.3 连接构造·····	176
7.5 钢索强度设计·····	177
7.6 自由悬索解析·····	178
7.6.1 抛物线·····	179
7.6.2 悬链线·····	182
参考文献·····	182
第8章 节点细部设计 ·····	184
8.1 一般设计原则·····	184
8.2 膜节点·····	185
8.2.1 缝合膜节点·····	185
8.2.2 焊合膜节点·····	186
8.2.3 组合膜节点·····	187
8.2.4 粘合膜节点·····	187
8.2.5 螺栓压板连接·····	188
8.2.6 其他膜节点·····	188

8.2.7 膜加劲与修补节点	188
8.3 膜柔性边界节点	189
8.3.1 膜套节点	189
8.3.2 U形件夹板节点	190
8.3.3 束带节点	191
8.3.4 导水构造	192
8.4 膜刚性边界节点	193
8.4.1 混凝土边界节点	193
8.4.2 钢构边界节点	193
8.5 膜角隅节点	195
8.5.1 柔性膜角点	195
8.5.2 刚性膜角点	202
8.5.3 刚-柔性膜角点	202
8.6 膜脊谷节点	203
8.6.1 柔性膜脊	204
8.6.2 柔性膜谷	205
8.6.3 刚性膜脊	206
8.6.4 刚性膜谷	208
8.6.5 防水与二次膜	209
8.7 膜顶节点	209
8.7.1 高点膜顶节点	209
8.7.2 低点膜顶节点	213
8.8 基座节点	214
8.9 膜面张力导入机制	215
8.9.1 锥形膜面张力导入机制	215
8.9.2 马鞍双曲面张力导入机制	216
8.9.3 其他膜面张力导入机制	217
参考文献	218
附录 (Appendix)	219
附录 A 常用膜材技术参数	219
A.1 C类膜材 (PVC/PES)	219
A.2 A类膜材 (PTFE/GF)	221
A.3 A类膜材 (Silicone/GF)	224
附录 B 常用钢索技术参数	225
B.1 $\phi 5$ 平行钢丝索 (PWS)	225

B.2	$\phi 7$ 平行钢丝索 (PWS)	226
B.3	$6 \times 19 + \text{IWRC/FC}$ 钢丝绳	227
B.4	$6 \times 37 + \text{IWRC/FC}$ 钢丝绳	228
附录 C	钢锚栓设计参数	229
C.1	Q235 钢锚栓	229
C.2	Q345 钢锚栓	230
附录 D	无缝热轧 (热扩) 钢管规格 (GB 8162—99)	232
附录 E	蒲福风级与风压对照表	233
附录 F	常用单位换算对照表 (ASTM E-380)	234

第 1 章 绪 论

1.1 膜结构发展简史

据考证,帐篷是远古时代人类最早的居所,开始完全用天然材料构筑,如用兽皮、树皮等作帷幕,用石材、树干等作支承,逐渐发展为天然合成材料,如棉纱、毛纺、帆布等。现代膜结构则发展为使用钢材、铝合金、木材等作结构件,用精细化工织物膜或氟化物薄膜作为覆盖帷幕。

膜结构发展可概括为两个方面:膜材发展和膜结构体系发展,两者相互依存、互为促进。膜材发展推动膜结构的发展与广泛应用,并促进新的结构体系诞生;反过来,新的膜结构体系和技术发展,促进新型膜材技术的发展与应用。

1.1.1 膜 材 发 展 概 况

膜材主要是随现代精细化工科技的进步而不断发展。早期的膜材,以聚氯乙烯为表面涂层、聚酯纤维为基布的膜材为主,现称 C 类膜 (PVC/PES),建筑与结构受力性能不理想。同时,以玻璃纤维为基布氯丁橡胶为涂层膜和棉纱天然纤维膜亦有较少应用。

1960 年代,玻璃纤维织物膜技术得到发展,并在较大范围应用,但表面涂层材料仍为聚乙烯基类(现称为 B 类膜)。膜材强度较高、模量大、徐变小,但建筑自洁性、耐久性仍不理想。同期, C 类膜材制造技术不断进步,结构与建筑特性逐渐改善。

1970 年代初,具有优异建筑性能的聚四氟乙烯(化学名 PTFE,商品名 Teflon[®], 1938)表面涂层材料由 NASA 研制成功,同时 B 纱、DE 纱玻璃纤维织物膜技术日趋成熟,使得以玻璃纤维为基布 PTFE 为涂层的现代织物膜材问世,现称 A 类膜,并开始工程应用^[2]。新型聚酯类纤维(Kevlar[®] 等)不断被研制,氟化物涂层逐渐应用在 C 类膜。

1980 年代,由于航天科技发展与需求,精细化工技术发展,氟化物纤维 (PTFE、FEP、PFA 等)、碳纤维 (CF)、聚酯纤维 (PBO、PET 等)等织物膜相继研制问世,这些膜材具有高强、高比强、高模量、耐强辐射、耐原子氧化、性态稳定,但目前主要应用于航空航天、半导体电子工业等特殊领域,很少应用在

建筑工程领域。

A类膜材发展趋势：提高柔韧性、改善制成工艺、使用环保材料、增加性价比。C类膜材发展趋势：研制新型高性能合成纤维、改善基布编织工艺、提高受力稳定性，研制新型环保涂层材料，提高建筑自洁性、耐久性。

新型膜材及其应用技术研究是膜结构发展的基石。氟化物热塑性薄膜（ETFE、THV、FEP等）、相应织物膜材问世和应用技术的解决，促进了新的膜结构技术的发展^[9,11]。

虽然目前有众多膜材应用于膜建筑，但以玻璃纤维（B、DE 纱）为基布 PTFE 为涂层的 A 类膜材和以聚酯纤维为基布聚乙烯基类为涂层（PVC 类，主要为 PVDF/PVF/Acrylic）的 C 类膜材仍然被认为是标准的建筑膜材。

1.1.2 膜结构体系发展概况

随建筑制作安装技术、计算机、设计数值分析理论与方法的发展，膜结构体系不断演变进化，包括充气膜、张拉膜、以及新型膜结构体系。

(1) 气承式充气膜

1917 年，英国人 W. Lanchester 发明了一种充气膜作为野外医院建筑屋面，这是一种安装便捷、造价经济的屋面体系，但他本人并未建成^[2]。

1946 年，美国人 Walter Bird 建成第一个现代充气膜结构，多谱勒雷达穹顶（Doppler Radome），直径 15m，矢高 18.3m，采用以玻璃纤维为基布氯丁二烯橡胶为涂层的膜材。1950~1970 年间，相继在美国、德国等地建造大量类似穹顶，最大直径达到 60m^[2,4]。

1970 年，日本大阪世博会（EXPO'70）为膜结构发展提供了契机。因日本多地震，且展馆多位于软土地基，因此，展馆宜采用轻结构体系。由 David Geiger 完成结构设计的美馆，首次建成了大跨低轮廓（小矢高）气承式膜，平面为 139m×78m 椭圆，B 类膜。

1972~1984 年，由 David Geiger 设计，Birdair 公司在美国建成银色穹顶（Silver Dome，220m×159m）等 7 座大型气承式膜结构，但多数膜穹顶被证明难以有效抵抗恶劣气候条件而维持正常使用。1985 年，银色穹顶因强风和暴雪几乎完全毁坏。

1988 年，日本建成东京穹顶（Toyko Dome）。虽然气承式膜结构技术达到了一个新的台阶，但之后世界各地再也没建造大型气承式公共膜建筑^[2,4,10]。

气承式膜结构在索穹顶体系出现之前，创造了一段大跨建筑的辉煌发展史。

(2) 气囊式充气膜

与气承式充气膜在大跨建筑取得的成就相比，气囊式充气膜对膜建筑发展以及对大跨建筑的贡献显得“渺小”。EXPO'70 日本富士馆为气囊拱构成屋面，并

有不少景观气囊膜,但之后并无多少大型经典气囊膜建成。1992年巴塞罗那世界博览会(EXPO'92),德国馆屋顶为气囊式膜结构,是一个屋顶咖啡厅,具备遮阳与建筑标识造型^[2]。

于2000年以前,单纯气囊膜在大跨建筑体系较少应用,但气囊膜在人类航空史上却写下了骄人的一页。于1895年,德国人Zeppelin伯爵发明了“Airtrain”飞艇,于1900年建成Zeppelin单体刚性飞艇(LZ-1),试飞成功。1929年8月15日飞艇LZ-127从菲特勒港(Friedrichshafen)开始其首次环球航行,跨越欧亚大陆,最后到达旧金山,以及跨越大西洋,并在欧洲、美洲作为日常客货航运。二战后由于喷气推进技术应用,飞机在飞行速度、安全性、舒适性等方面超越了飞艇,并使后者逐渐退出了航空大舞台^[8,9,13]。

由于建筑技术的进步,近年来气囊膜似乎又被建筑师、工程师重新审视和应用。EXPO'2002瑞士在苏黎世建造了3个直径约100m的气囊膜展馆,以及瑞士Aigle(2002)自行车竞技场,屋面为椭圆形气囊膜,平面为90.8m×66.83m。这些气囊膜仍应用传统气囊膜设计思想,并采用经典气囊膜形式。

ETFE膜用于建筑,拓展了气囊膜的设计思想、形式与应用领域,已经成功用于屋面、体育场罩棚等。气囊小化、网格化、独立或局部并列、低轮廓(浅矢高),与其他结构体系有机结合,如刚性(骨架)、柔性(索网)、半刚性(悬挂)体系等,这是气囊膜发展应用趋势。在气承式膜淡出视野之际,气囊膜似乎将迎来发展。

(3) 张拉膜

现代张拉膜始于Frei Otto在德国Kassel(1955)园艺展设计建成的帐篷,经典马鞍型双曲抛物面,如图1.1.1,采用棉纱纤维膜,由 $\phi 10$ 平行钢丝嵌套膜加劲,边索 $\phi 16$,桅杆5m。1957年在Cologne建成一个较复杂张拉膜,展览场舞厅,如图1.1.2,高低点相间隔,对称各6个点,高点桅杆10.4m,低点拉索锚固,跨度约33m,膜张力1.2kN/m,1mm厚棉纱纤维膜^[1,3]。按现在的技术来看,这是两个十分简单的膜结构,但它标志张拉膜的开始。Frei Otto代表作有:EXPO'67德国帐篷,斯图加特大学轻结构所(ILK,1968),曼海姆园艺展馆(1970),慕尼黑奥林匹克公园(1972)。Frei Otto无疑是对世界张拉膜结构影响最深远的先驱^[1,2]。

加州La Verne学院学生活动中心为首次采用PTFE/GF的膜结构。随PTFE/GF膜、高性能PVC/PES膜应用,在随后近40年发展中,高点张拉锥形膜、脊谷形膜应用于各领域,包括大中型体育场馆、机场、文化娱乐设施、展览馆、交通枢纽等,小型景观作品等,如由210个45m×45m锥形膜构成的世界最大膜建筑沙特Haj机场(1981)、24个一致的悬挑张拉单元构成直径288m的沙特利雅得法赫德王体育场(1985)、314m×220m意大利罗马奥林匹克体育场(1990)等。