

# 第 1 章 概 述

大跨建筑结构的水平是一个国家建筑业水平的重要衡量标准,也是一个国家综合国力的体现。从结构受力形式来讲,可分为平面结构和空间结构。

平面结构是指具有二维受力性质的结构形式,优点是传力明确。而空间结构是指结构的形态是三维状态,在荷载作用下具有三维受力性质并呈现空间工作的结构,是大跨度建筑结构最具有竞争性的结构类型。

空间结构与平面结构相比,具有独特的优点,如空间受力、重量轻、造价低、抗震性能好等,因此在国内外广泛应用。特别是近年来,随着人们生活水平的不断提高,工业生产及文化、体育事业不断推进,更大大增加了社会对空间结构尤其是大跨度高性能空间结构的需求,同时计算理论的日益完善以及计算机技术的飞速发展,使得对任何复杂三维结构的分析与设计成为可能。

## 1.1 大跨建筑结构的的发展及应用

### 1.1.1 大跨建筑结构的的发展

#### 1.古代空间结构

在人类早期的建筑中已经出现了空间结构的痕迹,北美印第安人从他们始祖继承下来的棚屋,其以枝条搭成的穹顶与现代网壳结构有惊人的类似,如图 1-1 所示。古代的人类通过详细观察,发现自然界中存在大量受力特性良好、形式简洁美观的天然空间结构,如蛋壳、蜂窝、鸟类的头颅和山洞等,他们利用仿生原理加以利用,不仅改善了生活条件,还更好地理解并发展了空间结构。



图 1-1 印第安人棚屋

其后,空间结构同其他科学技术一样,在人类历史上的发展是缓慢的,直至欧洲文艺复兴时代所出现的教堂建筑,虽然以砖石构成的穹顶又厚又重,但仍具有重要的意义,可认为此时是空间结构发展的重要阶段。古罗马人利用石料或砖建造了大量圆形或圆柱形穹顶,

用作宗教活动场所，这些穹顶的跨度都不大，一般为 30~40m，穹顶的厚度与跨度之比为十分之一左右，因此早期的穹顶自重很大。如图 1-2 所示的圣彼得大教堂砖石穹顶自重达到  $6400\text{kg/m}^2$ 。建于公元 120~124 年的罗马万神庙（Pantheon）是早期穹顶的典型代表，该穹顶跨度达到 44m，基面为圆形（见图 1-3）。



图 1-2 圣彼得大教堂



(a) 外景图

(b) 内景图

图 1-3 罗马万神庙

## 2. 薄壳结构的出现和发展

现代空间结构的出现，应该从 20 世纪初期兴建的钢筋混凝土薄壳算起，这主要归功于先进建筑材料——钢铁与混凝土的诞生。与此同时，第二次世界大战带来的巨大创伤使得世界大部分地区处于百废待兴的状态，这给空间结构的蓬勃发展提供了良好的契机。

钢筋混凝土薄壳结构为曲面的薄壁结构，按曲面生成的形式分为筒壳、圆顶薄壳、双曲扁壳和双曲抛物面壳等。壳体能充分利用材料强度，同时又能将承重与围护两种功能融合为一，因其容易制作、稳定性好、易适应建筑功能和造型需要而得到广泛的应用。我国 1959

年建成的北京火车站屋面也采用了薄壳结构，表面几何形状为一双曲抛物面，如图 1-4 所示。

1964 年建成的高雄圣保罗教堂，采用反曲薄壳屋顶，如图 1-5 所示。



图 1-4 北京火车站



(a) 外景图

(b) 内景图

图 1-5 高雄圣保罗教堂

随着力学的发展，薄壳结构在技术水平和结构形式上取得了很大进展。美国在 20 世纪 40 年代建造的兰伯特圣路易市航空港候机室，由三组厚 11.5cm 的现浇钢筋混凝土壳体组成，每组是两个圆柱形曲面壳体正交，并切割成八角形平面状，相接处设置采光带。两个圆柱形曲面相交线做成突出于曲面上的交叉拱，既增加了壳体强度，又把荷载传至支座。其支座为铰接点，加厚并带加劲肋的壳体边缘向上卷起，使壳体交叉拱的建筑造型简洁别致。20 世纪 40 年代末，奈尔维 (Nervi) 设计了连续拱形薄壳结构，1950 年建造的都灵展览馆的波形装配式薄壳屋顶建筑便是其杰作 (见图 1-6)。另外 1957 年罗马为举办奥林匹克运动会而建成的罗马小体育馆在现代建筑史上占有重要地位，其屋顶直径达到 59.13m，采用钢筋混凝土肋形球壳 (见图 1-7)。而我国 1957 年建成的北京天文馆，屋顶球壳直径为 25m，厚度只有 6cm (见图 1-8)。



图 1-6 意大利都灵展览馆



图 1-7 罗马小体育馆



图 1-8 北京天文馆

薄壳结构不但可以减轻自重，节约钢材、水泥，而且造型新颖流畅。但是，曲面壳体的显著缺点是：模板制作复杂，不能重复利用，耗费木材，大跨度结构在高空进行浇筑和吊装也耗工费时。美国根赛特等人的分析表明薄壳结构造价的 60% 耗费在施工成本上，因而影响了薄壳结构的广泛应用。于是，用平面模板代替曲面模板，用折线代替曲线，由薄平板以一定角度相互整体联结而成的折板结构应运而生。

折板结构可认为是薄壳结构的一种，它是由若干狭长的薄板以一定角度相交连成折线形的空间薄壁体系。其跨度不宜超过 30m，适于长条形平面的屋盖，两端应有通长的墙或圈梁作为折板的支点。常用有 V 形、梯形、H 形和 Z 形等型式。我国常用预应力混凝土 V 形折板结构，其具有制作简单、安装方便与节省材料等优点，最大跨度可达 24m。折板结构的折线形状横截面，大大增加了空间结构刚度，既能作为梁构件承受弯矩，又能作为拱构件承受压力，且便于预制，因而得到广泛的应用。近年来在园林建筑中很多用 V 形折板拼成多功能且造型活泼的屋顶或小品，如亭、榭、餐厅等。折板结构亦可用作车间、仓库、车站、商店、住宅、体育看台等工业与民用建筑的屋盖，例如福州长乐国际机场候机楼屋盖就采用了折板结构（见图 1-9）。



图 1-9 福州长乐国际机场候机楼折板结构

### 3.空间网格结构的兴起

钢筋混凝土薄壳结构尽管有诸多优点，但经过若干年工程实践之后，工程技术人员逐渐发现这种结构的缺点：钢筋混凝土薄壳施工时需要架设大量模板、工程量很大、施工速度较慢以及工程造价较高。因而人们逐渐对之丧失兴趣，开始寻求新的结构体系形式。随着铁、钢材、铝合金等轻质高强材料出现及应用，富有想象力的工程师开始着力于穹顶结构各种杆件形式的发展。公认的“穹顶结构之父”——德国工程师施威德勒（Schwedler）对穹顶网壳的诞生与发展起了关键性的作用。他在薄壳穹顶的基础上提出了一种新的构造形式，即把穹顶壳面划分为经向的肋和纬向的水平环线，并用杆件连接在一起，而且在每个梯形网格内再用斜杆分成两个或四个三角形。这样穹顶表面的内力分布会更加均匀，结构自身重量也会进一步降低，从而可跨越更大的空间。这样的穹顶结构实际上已经是真正的网壳结构，即沿某种曲面有规律的布置大概相同的网格或尺寸较小的单元，从而组成空间杆系结构。

在 20 世纪 50 年代后期以杆件组成的空间网格结构崭露头角。空间网格结构是按一定规律布置的杆件、构件通过节点连接而构成的空间结构，包括网架、曲面型网壳以及立体桁架等。其中，按一定规律布置的杆件通过节点连接而形成的平板型或微曲面型空间杆系结构，主要承受弯曲内力；按一定规律布置的杆件通过节点连接而形成的曲面状空间杆系或梁系结构，主要承受薄膜内力。例如图 1-10、图 1-11 所示分别为我国采用网架结构的首都机场四机位机库和采用双层球面网壳结构的天津体育中心体育馆，它们是空间网格结构的典型代表。网架结构的出现晚于网壳结构。第一个平板网架是 1940 年在德国建造的，而此时传统的肋环型穹顶已有 100 多年的历史。



图 1-10 首都机场四机位机库

图 1-11 天津体育中心体育馆

在众多形式的空间结构中，网架结构是近半个世纪以来在国内外得到推广和应用最多的一种形式。网架是以多根杆件按照一定规律组合而形成的网格状高次超静定结构，杆可以由多种材料制成，如钢、木、铝、塑料等，尤以钢制管材和型材为主。20 世纪 60 年代，计算机技术的发展和运用解决了网架力学分析的难题，使得网架结构迅速发展起来。

1964 年，我国建成了国内第一个平板网架——上海师范学院球类房正放四角锥网架，其跨度为 31.5m×40.5m。1967 年建成的首都体育馆，采用正交斜放网架，其矩形平面尺寸为 99m×112m，厚 6m，采用型钢构件，高强螺栓连接，用钢指标 65kg/m<sup>2</sup>，如图 1-12 所示。1973 年建成的上海万人体育馆采用圆形平面的三向网架，净跨达到 110m，厚 6m，采用圆钢管构件和焊接空心球节点，用钢指标 47kg/m<sup>2</sup>，如图 1-13 所示。这些网架是早期成功采用平板网架结构的杰出代表。此后陆续建成的南京五台山体育馆、上海体育馆、福州市体育馆等，也都采用了网架结构。20 世纪 80 年代后期北京为迎接 1990 亚运会兴建的一批体育建筑中，多数仍采用平板网架结构。



图 1-12 首都体育馆正交斜放网架

图 1-13 上海万人体育馆圆形平面的三向网架

目前，我国网架结构的发展规模在全世界位居前列。网架结构在我国从 20 世纪 60 年代开始出现，80 年代初开始发展，90 年代开始普及。据统计，从 20 世纪 90 年代至今，我国网架结构每年约有 1000 余座工程，覆盖面积约 150 万平方米以上，而且目前仍然朝气蓬勃、经久不衰，健康发展。

网壳结构在第二次世界大战结束后开始重新流行并获得飞速发展。美国科学家——“全能设计师”巴克斯特·富勒（Fuller）起了极大的推动作用，另外列德雷尔（Durrell）、莱特（Wright）及其他几位卓越的设计师对网壳结构的发展也做了很大的贡献。随着科学技术的快速发展和人们不懈的发明与创造，网壳结构无论在结构型式，还是在构造材料和计算方法上都取得了很大的发展。

在最初阶段，网壳结构形式多为半球型，这是因为半球型网壳为同向曲率，易于设计、制造和施工，而且半球型网壳可以封闭且不需要支柱，尤其是从造型看起来雄伟、高大和

美观。随后出现了肋环形和施威德勒型球面网壳。后来又出现了联方型球面网壳，这种网壳的网格是由两向斜交杆系构成的，它的基本单元是菱形。三向格子型球面网壳是在球面上用三个大圆构成网格，形成比较均匀的三角型格子。其优点是结构的受力性能好，且易于标准化加工，可在工厂中大批量生产，具有优越的经济性，产生了许多优美的大跨度穹顶网壳。凯威特型球面网壳，又称平行联方型网壳。这种网壳综合了施威德勒型网壳、联方型网壳和三角形格子网壳分割的优点，其结构受力性能良好，尤其是在强烈风荷载和地震荷载作用下的受力性能更好，因此常用于大跨度结构。这种网壳在美国和日本广为流行，1973年7月建成的美国新奥尔良体育馆就是此种网壳的典型代表，其净跨为213m，矢高32m，可容纳观众72000人左右。富勒利用短程线的概念发明了短程线型网壳。“短程线”这个术语来自地球测量语，即连接球面任意两点的最短距离。他认为这种网壳将是最轻的、强度最高的，同时又是最经济的结构。工程实践证明，短程线型网壳的网格划分规整均匀，杆件和节点的种类在各种球面网壳中是最少的，其杆件受力非常均匀，最适合在工厂中大批量生产，造价也最经济。

除了上述球面形状的网壳外，如果建筑平面是正方形或者矩形，特别是狭长平面时，常常会选用柱面网壳。有时也会把柱面网壳放在中间，在两端用两个半球面网壳进行封闭，构成一个组合网壳。后来又出现了双曲抛物面型网壳，这种网壳结构形态优美。近年来，还有综合了钢筋混凝土折板、网格结构和壳体的一些优点而发展起来的新型折板网壳越来越受到人们的重视。这些网壳结构的形式和特点可详见本书第二章网壳部分。

由于网壳结构与网架结构的生产条件相同，因此随着网架结构的迅速发展，网壳结构也具备了现成的基础，因而从20世纪80年代后半期起，当相应的理论储备和设计软件等条件初步完备，网壳结构就开始了在新的条件下的快速发展。建造数量逐年增加，各种形式的网壳，包括球面网壳、柱面网壳、鞍形网壳（或扭网壳）、双曲扁网壳和各种异形网壳相继被用于实际工程中。20世纪90年代中期建造了一些规模相当宏大的网壳结构。1994年建成的天津体育中心体育馆采用肋环斜杆型双层球面网壳（见图1-11），其直径为108m，四周悬挑13.5m，整个球壳的直径为135m，矢高为35m，网壳厚度为3m，采用圆钢管构件和焊接空心球结点，结构耗钢量为 $42\text{kg}/\text{m}^2$ 。

20世纪90年代中后期兴建的一批有标志性的体育建筑中，多数采用了网壳结构。例如，1997年建成的长春五环万人体育馆平面呈桃核形，由肋环型球面网壳切去中央条形部分再拼合而成，体形巨大，如果将外伸支腿计算在内，轮廓尺寸达 $146\text{m}\times 191.7\text{m}$ ，网壳厚度2.8m，其桁架式网片的上、下弦和腹杆一律采用方钢管焊接连接，是我国第一个方钢管网壳。这一网壳结构的设计方案是由国外提出的，施工图设计和制作安装均由国内完成（见图1-14）。



图 1-14 长春五环万人体育馆

空间网格结构是我国近十余年来发展最快、应用最广的空间结构类型。这类结构体系整体刚度好，技术经济指标优越，可提供丰富的建筑造型，因而受到建设者和设计者的喜爱。近几年我国每年建造的网架和网壳结构建筑面积达 800 万平方米，相应钢材用量约 20 万吨。无论是建筑面积还是用钢量是其他国家无法比拟的，无愧于“网架王国”这一称号。

#### 4. 悬索结构的发展

在网架、网壳结构快速发展的同时，还有一类大跨建筑结构也得到了较快的发展，那就是悬索结构。

悬索结构有着悠久的历史。它最早应用于桥梁工程中，我国人民早在一千多年以前已经用竹索或铁链建造悬索桥，如建于公元 1696~1705 年间的四川泸定桥，为跨越大渡河的铁索桥，单孔净跨 100m，宽 2.8m，如图 1-15 所示。



图 1-15 四川泸定桥

现代大跨度悬索结构在屋盖中的应用只有半个多世纪的历史。世界上最早的现代悬索屋盖是美国于 1953 年建成的雷里（Raleigh）体育馆，采用以两个斜置的抛物线拱为边缘构件的鞍形正交索网（见图 1-16）。这一空间结构形式的出现极大地推动了悬索结构的发展，随后各种形式的悬索屋盖在世界各地争相竞艳。

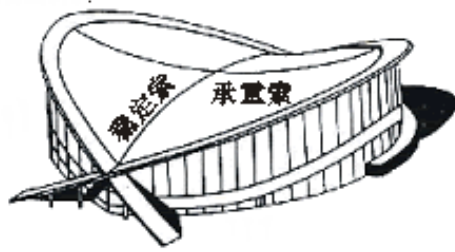
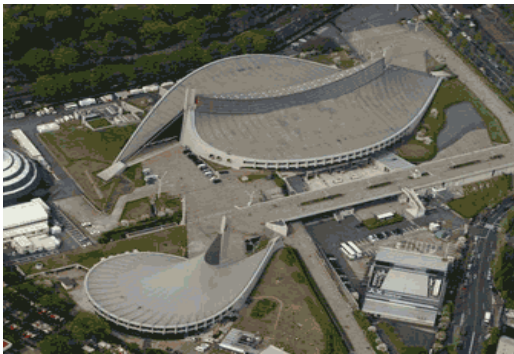


图 1-16 美国雷里 (Raleigh) 体育馆

日本建于 20 世纪 60 年代的代代木体育馆采用柔性悬索结构，它脱离了传统的结构和造型，被认为是技术进步的象征（见图 1-17）。1983 年建成的加拿大卡尔加里体育馆采用双曲抛物面索网屋盖，其圆形平面直径 135m，它是为 1988 年冬季奥运会修建的，外形极为美观，迄今仍是世界上最大的索网结构，如图 1-18 所示。



(a) 远景图



(b) 近景图

图 1-17 日本代代木体育馆



图 1-18 加拿大卡尔加里体育馆

目前，在欧美、日本、前苏联等国家和地区已建造了不少有代表性的悬索屋盖，主要用于飞机库、体育馆、展览馆、杂技场等大跨公共建筑和大跨工业厂房中。

中国现代悬索结构的发展始于 20 世纪 50 年代后期。北京的工人体育馆和杭州的浙江

人民体育馆是当时的两个代表作。北京工人体育馆建成于 1961 年，其屋盖为圆形平面，直径 94m，采用车辐式双层悬索体系，由截面为  $2\text{m}\times 2\text{m}$  的钢筋混凝土圈梁、中央钢环，以及辐射布置的两端分别锚定于圈梁和中央钢环的上索和下索组成。中央钢环直径 16m，高 11m，由钢板和型钢焊成，承受由于索力作用而产生的环向拉力，并在上、下索之间起撑杆的作用，如图 1-19 所示。建于 1967 年的浙江人民体育馆，其屋盖为椭圆平面，长径 80m，短径 60m，采用双曲抛物面正交索网结构，如图 1-20 所示。



(a) 外景图

(b) 内景图

图 1-19 北京工人体育馆



图 1-20 浙江人民体育馆

我国建造的上述两个悬索结构无论从规模大小还是从技术水平来看，在当时都可以说是达到了国际上较先进的水平。在此后我国悬索结构的发展停滞了较长一段时间，直到 1980 年才建成成都城北体育馆（见图 1-21）。成都城北体育馆屋盖为圆形，直径 61m，仍采用车辐式双层悬索结构。成都城北体育馆屋盖的所有索在中央环处不切断，而是沿环的切线穿越过去，铺在圈梁的对侧位置上。这样不仅节省了一半悬索锚具，而且其中央环不再承受环向拉力，而仅起上、下索之间撑杆的作用，从而节省了相当数量的钢材。此后所建成吉林滑冰馆、安徽省体育馆、丹东体育馆、亚运会朝阳体育馆等建筑中，均采用了各种形式的悬索屋盖结构。

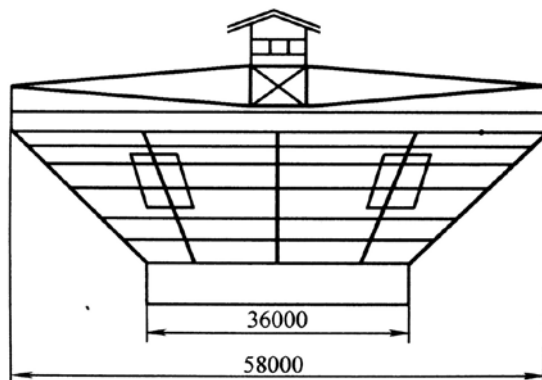


图 1-21 成都城北体育馆剖面图

悬索结构一般都需引入预应力，这时除了将悬索直接连于支座外，通常采用刚性构件与悬索结构一起组合而成混合结构的方式，如刚架-索混合结构、拱-悬索混合结构（见图 1-22、1-23）、悬索-拱-交叉索网混合结构等（见图 1-24）。这种做法的优点是充分利用某种结构类型的长处来避免或抵消与之组合的另一种结构类型的短处，从而改进整个结构的受力性能。



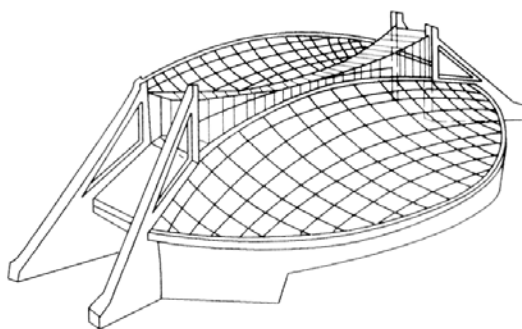
图 1-22 耶鲁大学冰球馆图



图 1-23 四川省体育馆



(a) 景观图



(b) 建筑图

图 1-24 朝阳体育馆

尽管十余年来悬索结构取得了可喜的发展，但与网架和网壳结构比较而言，其发展相对

较慢，分析起来可能有两方面的原因：①悬索结构的设计计算理论相对复杂，同时缺乏具有较高商品化程度的实用计算程序，因而难于被设计单位普遍采用；②虽然悬索结构的施工并不复杂，但一般施工单位对其并不熟悉，更没有形成专业的悬索结构施工队伍，这也影响建设单位和设计单位大胆采用这种结构形式。

### 5.薄膜结构的发展

薄膜结构是以建筑膜材作为主要受力构件的结构。其雏形是游牧民族世代相传的帐篷，但其飞跃式的发展却是在高强轻质的膜材出现以后。薄膜结构以其材质轻薄透光、表面光洁亮丽、形状飘逸多变而备受人们欢迎。

现代意义上的膜结构起源于 20 世纪初。1917 年英国人罗彻斯特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 1956 年，该专利的第一个产品才正式问世，即沃尔特·伯德为美国军方设计制作的一个直径为 15m 的球形充气雷达罩，如图 1-25 所示。



图 1-25 充气雷达罩

膜结构大量展现在人们面前并开始风靡于世应从 1970 年大阪万国博览会上的美国馆（见图 1-26）采用了气承式膜结构开始。大阪万国博览会上的美国馆首次使用以聚氯乙烯（PVC）为涂层的玻璃纤维织物，受到了世人的广泛关注。其结构准椭圆平面的尺寸达到 140m×83.5m，被认为是第一个现代意义的大跨度膜结构。

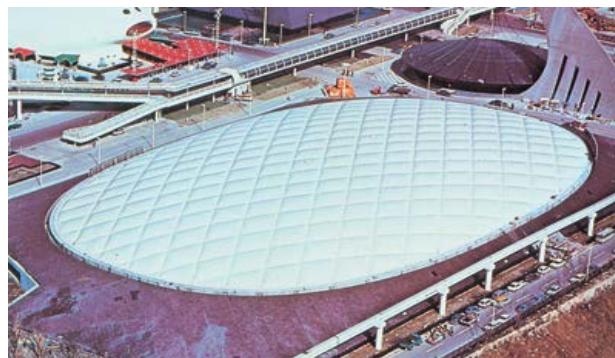
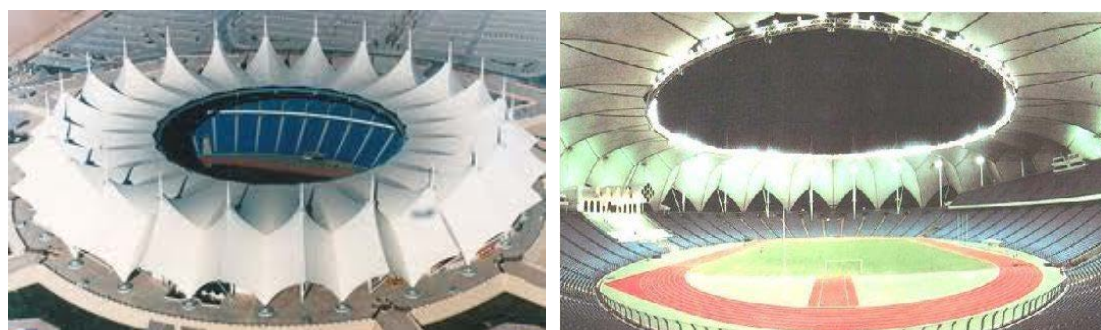


图 1-26 大阪万国博览会上的美国馆

20 世纪 70 年代初杜邦公司开发出以聚四氟乙烯（PTFE，商品名称 Teflon）为涂层的玻璃纤维织物。这种膜材强度高，耐火性、自洁性和耐久性均好，为膜结构的应用起到了积极推动作用。从那时起到 1984 年，美国建造了一批尺度为 138m~235m 的体育馆，均采用气承式索-膜结构，取得了极佳的技术经济效果。但这种结构体系也出现了一些问题，主要是由于意外漏气或气压控制系统不稳定而使屋面下瘪，或由于暴风雪天气在屋面形成局部雪兜而热空气融雪系统又效能不足导致屋面坍塌甚至事故。这些问题使人们对气承式膜结构的前途产生怀疑。美国自 1985 年以后在建造大型体育馆时没有再使用这种结构形式。人们把更多的注意力转到张拉式的膜结构或索-膜结构。

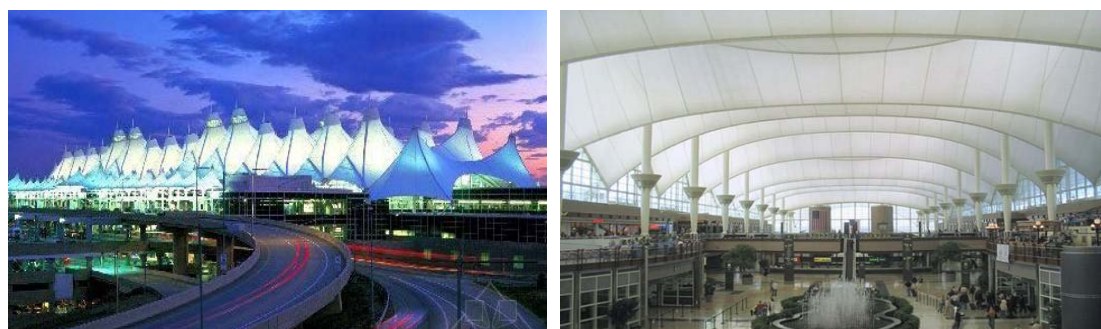
张拉式膜结构自 80 年代以来在发达国家获得极大发展。这种结构体系与索网结构类似，将膜张紧在刚性或柔性边缘构件上，或通过特殊构造支承在若干独立支点上，通过张拉施加预应力，并获得最终形状。1985 年建成的外径为 288m 的沙特阿拉伯利雅得体育场（见图 1-27），其看台挑篷由 24 个连在一起的形状相同的单支柱帐篷式膜结构单元组成。每个单元悬挂于中央支柱，外缘通过边缘索张紧在若干独立的锚固装置上，内缘则绷紧在直径为 133m 的中央环索上。1993 年建成的美国丹佛国际机场候机大厅采用完全封闭的张拉式膜结构，其平面尺寸 305×67m，由 17 个连成一排的双支柱帐篷式单元组成，每个长条形的单元由相距 45.7m 的两根支柱撑起（见图 1-28）。



(a) 外景图

(b) 内景图

图 1-27 沙特阿拉伯利雅得体育场



(a) 外景图

(b) 内景图

图 1-28 美国丹佛国际机场候机大厅

与张拉式膜结构同步发展的还有骨架支承式膜结构。例如中国香港大球场（见图 1-29），纵向跨度为 240m、顶部标高为 55m 的拱形骨架支撑屋顶的前沿。横向的三角形桥架断面 3.5m 高，连接屋顶前沿的拱架和后面的混凝土看台，跨度 40~55m。检修通道、放送设备及泛光灯照明都安放在这些桁架里。两个屋顶各外包 5 块（每块 1600m<sup>2</sup>，跨越 3 组桁架）涂敷聚四氟乙烯的玻璃纤维膜材，这些膜材四边都压紧，中间部分并没有机械地固定在桁架顶部，而是在桁架之间用一个直径为 80mm 的谷索压住，膜本身加有 5.1kN 的双向预张力。该作品因布局紧凑、与地形完美结合和简洁且富有表现力的优点而受到高度赞扬，并于 1995 年荣获美国建筑师协会奖。20 世纪 90 年代开始，世界各地建造的膜结构多数采用了骨架支承式膜结构。



图 1-29 中国香港大球场



图 1-30 上海体育场

与世界先进水平相比，中国在膜结构方面的差距是十分明显的。近年来，在理论研究方面做了很多工作，应该说已建立起一定的理论储备；而在膜结构应用方面也开始呈现比较活泼的势头。例如，上海为迎接八运会于 1997 年建成的体育场其看台挑篷采用钢骨架支承的膜结构，总覆盖面积 36100m<sup>2</sup>，是我国首次在大中型建筑上采用膜结构（见图 1-30），但所用膜材是进口的，施工安装也由外国公司进行，价格较昂贵。

值得指出的是，中国已出现了专门从事膜结构制作与安装的企业，国产膜材的质量也在不断改进。各种迹象表明，膜结构这一富有潜力的空间结构新成员在我国已有良好的发展趋势。如图 1-31 所示是中国为 2008 年奥运会修建的国家游泳中心，是国内首次采用膜结构建设的国际上面积最大、功能要求最复杂的膜结构系统。国家游泳中心采用了乙烯-四氟乙烯共聚物（ETFE）的膜材料，其具有质量轻、韧性好、抗拉强度高和耐候性强等特点。此外，ETFE 膜透光性好，可保证 90% 的自然光进入场馆，因此国家游泳中心建成后平均每天有近 10 个小时采用自然光照明，可大大节省能源，而且其保温、隔热功能是目前其他透光建筑材料难以比拟的。



图 1-31 国家游泳中心