

膜结构——成就、问题与展望

蓝天

摘要 本文首先以展览建筑、体育建筑与交通建筑为例介绍了近年来膜结构的成就,文中讨论了当前膜结构存在的一些问题,即不定的形状及其确定,从帐篷到永久性建筑与膜的支承——空气、索或骨架。最后对膜结构今后的发展提出了一些看法。

关键词 膜结构 建筑织物 形状确定

一、前言

回顾 20 世纪,在空间结构的发展历程中,膜结构的出现及其发展壮大确引人注目。由于采用了先进的复合材料,空间结构材料发生了重大的变革。这种专门为膜结构开发的建筑织物,不但具有较高的强度,而且也具有较好的耐久性、耐火性、透明性与自洁性。以织物制成的膜结构,其突出的优点是重量极轻,与传统结构相比有着数量级的差别。因此越来越多的体育建筑、展览建筑纷纷采用膜结构。为了迎接新世纪的到来,英国建造了“千年穹顶”,直径 320m 的圆形屋顶采用了张力膜结构,集中体现了 20 世纪建筑技术的精华。近几年,中国在发展膜结构方面也取得了可喜的成就,建成了一批跨度不等的工程,也使设计、科研和施工队伍锻炼成长。在此时回顾一下过去的成就,探讨发展中的一些问题,对于今后膜结构的发展也许是有益的。

二、成就

一种工程结构是否能得到推广应用,是否能得到认可,首先要看建了多少工程,技术水平多高。在这方面,膜结构近年来取得了相当大的成就,下面分别就展览建筑、体育建筑和交通建筑的一些典型工程来说明。

1. 展览建筑

随着人类交流的不断扩大,这几年世界上几乎每一个大城市都在兴建集会议与展览于一体的会议展览中心,其面积往往达上万平方米,其中的

展览场地就要求一个大跨度的空间,中间不设柱子;即使有柱子,柱网也要在 25m 以上。此外,对展览来说,最好有自然采光以提供足够的光线。这样,膜结构就是适宜的选型。

位于伦敦泰晤士河畔的千年穹顶(Millennium Dome),就是英国政府为迎接 21 世纪而兴建的总造价达 12.5 亿美元的大型综合性展览馆,包括一系列展示与演出的场地,以及购物商场、餐厅、酒吧等(图 1)。

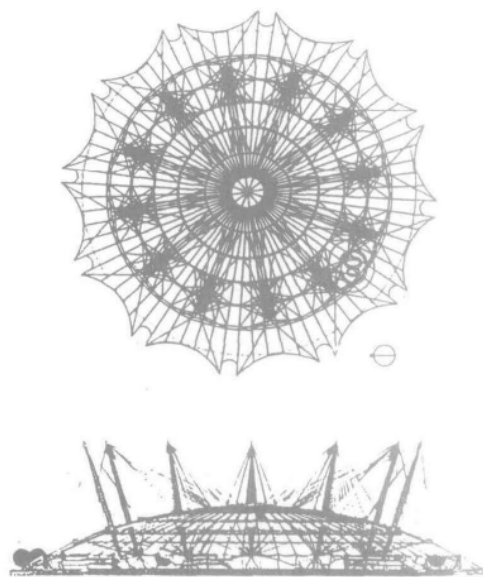


图 1 英国伦敦千年穹顶

穹顶直径 320m, 周圈大于 1000m, 有 12 根穿出屋面高达 100m 的桅杆, 屋盖采用圆球形的张力膜结构。膜面支承在 72 根辐射状的钢索上, 其

截面为 $2 \times \Phi 32$, 这些钢索则通过间距 25m 的斜拉吊索与系索为桅杆所支撑, 吊索与系索同时对桅杆起稳定作用。另外还设有四圈索桁架将钢索联成网状。膜结构屋面设计中的一个关键问题是要避免雨雪所形成的坑洼, 千年穹顶的大部分屋面都比较平坦, 因此膜面的支承结构必须清除这些难点。幅向索在周围与悬链索相连并固定在 24 个锚固点上, 顶部则与 12 根 $\Phi 48$ 钢索组成的拉环连接, 拉环直径为 30m, 中设天窗供穹顶通风用。桅杆为梭形, 由纵向的圆钢管与横向的方钢管相贯焊接成格构状, 桅杆沿直径 200m 的圆周设置, 支承在由四根杆组成的四角锥形底座上。膜材用涂聚四氟乙烯的玻璃纤维织物(美国 Chemfab 产的 Sheerfill, 厚 1.2mm)。为了防止结露, 又增加了能隔音、隔热的内层(美国产 Fabrasob)。

90 年代在美国西海岸的圣迭戈, 建造了一座总面积达 16 万 m^2 的会议中心。整个建筑包括了地下停车场, 露天剧院和展览馆。对于这样一个位于海滨的城市, 在展览大厅屋顶上采用象帆一样的膜结构是一个理所当然的选择。91.5m \times 91.5m 的敞开式展览馆由 5 个帐篷式膜结构组成, 其上盖以特氟隆涂层玻璃纤维膜材。横跨大厅上空的主索悬挂在两端间距 18.3m 的钢筋混凝土扶壁上, 主索支承着一对高 18m 的钢管立柱, 这样可依次形成屋盖的脊索和谷索, 膜材就敷设在这些索上。为了自然通风, 膜结构顶部开孔以便排出热空气, 孔上另设置防雨的膜材板。

2. 体育建筑

体育建筑一向是膜结构广泛应用的领域, 这几年膜结构仍以迅猛的势头向前发展, 不论是大、中、小跨度的体育馆、游泳馆、溜冰馆、足球场、训练馆、健身房……都可见到膜结构的踪影, 在技术上也有所创新。

以空气支承的膜结构可分为气承式和胀式两种, 1997 年日本建造的熊本公园体育场, 没有象东京后乐园那样采用全封闭的气承式空气膜结构, 而是在主屋盖部分采用了杂交索加强双层气胀式空气膜结构(图 2)。体育场的空间构成分为两部分。在直径为 125m 的中心部位是可以进行各种体育比赛和各式活动的主场地。在其周围, 根据功能需要设置了不定形的附属设施。在主场地上部双层空气膜和环状桁架构成其屋盖结构, 该

结构有 8 处由 3 根一组的柱子支承。环绕主场地的不定形附属部分的屋盖则采用了单层网壳的骨架支承膜结构。

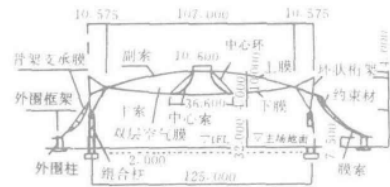


图 2 日本熊本公园体育场

双层空气膜结构直径为 107m, 为了保持其中心部分的形状, 设置了上部直径为 10.6m, 下部直径为 36.6m, 高 14m 的圆台式钢结构中心环。在中心环和环状桁架之间由上下各 48 根钢索连结, 然后覆盖特氟隆膜材, 并向双层空气膜中输入空气, 以保持其设计形状。该结构是由传统的索加强空气膜结构和车轮型索结构复合而成的。钢索不仅是作为膜的加强材料, 也是作为主要承重结构。该结构是一种融合了两种结构特色的杂交结构, 具有以下特点: (1) 屋盖曲面可采用任意的垂度与拱度; (2) 中心环可以悬挂重物体以适应建筑物使用要求; (3) 双层膜屋盖下的空间不需加压, 可以随便打开; (4) 屋盖上敞开的中心环可有效地改进内部环境的采光、通风与音响; (5) 由于只在双层膜之间充气, 且气密性更好, 整个系统的充气量要小于一般的气承式空气膜; (6) 一旦漏气, 屋盖重量可由钢索支承, 不会倒塌。

索穹顶(Cable Dome)是美国工程师盖格尔(D. Geiger)首先提出并在 1986 年用于韩国汉城奥运会的体操馆与击剑馆。当初索穹顶的直径不过在 100 米左右, 其后跨度不断增加, 如美国伊利诺斯州立大学红鸟体育馆, 其平面是 91m \times 77m 的椭圆形, 台湾桃园体育馆的直径有 136m, 跨度最大的是美国佛罗里达州的太阳海岸穹顶, 由于直径达 210m, 设置了四道受拉环索。为了满足棒球比赛的要求, 屋盖倾斜了 6° , 最高点离地面 68m, 使空间符合习球的射线。美国工程师李维(M. Levy)采用了类似的构想, 提出“双曲抛物面一张拉整体穹顶”, 并用于 1996 年美国亚特兰大奥运会主馆—佐治亚穹顶, 拟椭圆形的平面尺寸为 240m \times 192m。以后这种穹顶又用于阿根廷的拉普拉达体育场, 其平面由两个重叠的圆组成, 圆

的直径为 85m, 圆心相距 48m, 具有双峰的外形, 两个索穹顶支承在看台中周边三角形桁架和中间的钢拱架上。值得注意的是: 索穹顶工程都是由美国工程师设计和指导施工的, 即使在美国本土之外也不例外, 日本当初对索穹顶也很感兴趣, 并想引进盖格尔的专利, 也进行过一些模型试验, 但始终未见实施于工程。近年来, 日本大量建造了各种形式的穹顶, 膜结构仍是以骨架支承的为多。

在体育建筑中, 敞开式的体育场看台挑篷采用膜结构是最合适的了。近代体育场屋顶的悬挑跨度越来越大, 覆盖的范围也发展到了全部看台, 其中世界杯足球赛起了很大的促进作用, 因为每次比赛都要在承办国若干个城市新建或改建足球场, 膜结构所占的比例也不断增加。例如 1990 年世界杯赛在意大利举行, 罗马奥运会体育场的改建和巴里足球与田径场的新建都采用了膜结构。1998 年法国里昂的热郎体育场为世界杯足球赛而扩建的看台, 也采用了膜材复盖。2002 年世界杯足球赛将在韩国和日本举行, 他们将分别兴建 10 个体育场, 其中有一半以上是形式各异的膜结构。

覆盖汉城体育场看台上的膜结构展现了韩国传统盾形风筝和帆船的优美姿态。该体育场可容纳观众 6.4 万人, 屋顶由 14 根桅杆支承的放射状钢管桁架组成, 在屋顶外和前部还设计有两组环状桁架, 以保证屋顶结构的整体性。桅杆由 $\Phi 1200-1800$ 钢管制成, 支座可以转动。屋顶挑篷由三角形空间桁架组成, 由桁架上弦与谷索形成了波状起伏的屋面, 膜材面板采用了涂 PTFE 的玻璃纤维织物。挑篷由桅杆及斜拉索支承, 后部的斜拉索在屋顶底部与主框架相连, 并与屋顶共同抵抗侧向力。前部还有斜拉索被设计成为受拉构件, 以抵抗风吸力(图 3)。

这几年, 中国的膜结构取得了不少进展, 其中体育场具有举足轻重的影响。1997 年上海第八届全国全运会的八万人体育场, 其挑篷采用了以径向悬挑钢桁架和环向桁架组成的大跨度空间结构, 上覆以伞形膜结构, 这是中国首次将膜结构应用到大面积的永久性建筑上。随后, 上海虹口体育场采用了鞍形大悬挑空间索桁架支承的膜结构。这两个体育场采用的是进口的玻璃纤维织物, 施工安装也主要依靠外国公司。这不但传播了国外的先

进经验, 还激励了中国人用自己的力量修建膜结构。继上海体育场之后, 最大的膜结构工程当属青岛颐中体育场的看台屋盖。面积有 30000m^2 , 挑篷由 70 个膜锥单元组成, 每个单元由一根钢柱支承, 通过谷索、脊索、外边索的张拉成形, 使屋盖呈现波浪形。其他如武汉体育场, 面积也有 3000m^2 , 由上下外环梁和内环索支承着波形膜屋盖, 浙江义乌体育会展中心的看台挑篷采用了两片沿主看台对称布置的梭状膜结构, 挑篷前沿由斜拉索悬吊在四根桅杆上。正在规划或设计中的威海、烟台、南宁等地的体育场, 也都考虑了膜结构方案。

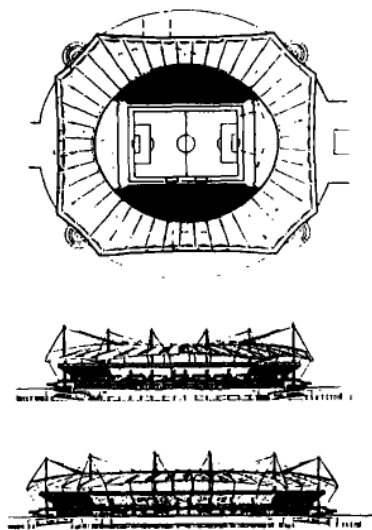


图 3 韩国汉城体育场

3. 交通建筑

交通建筑指的是为火车、长途汽车、轮船和飞机等交通工具而配置的建筑, 主要包括旅客和货物集散的运输总站以及车站站台、停车场、收费站与室外通道的顶盖。以运输总站而言, 70 年代沙特阿拉伯吉大机场候机大厅的悬挂伞形膜结构, 总面积达 $42\text{万}\text{m}^2$, 堪称为膜结构的大手笔。前几年美国丹佛国际机场候机大厅, 长 274m , 宽 67m , 以 17 个帐篷形膜结构组成, 为在大跨度交通建筑上应用膜结构树立了典范。其他如英国在英法海峡海底隧道一端的车站, 以及法国里昂的车站, 虽然面积不大, 仍然显示了膜结构的优点。因此, 膜结构不仅适用于大跨度建筑, 小跨度乃至小品建筑也有膜结构充分驰骋的天地, 从下面的一个收费站的实例也可看出。

在法国西南部沿大西洋岸边的 A837 公路上,有一座以膜结构为罩棚的收费站,象帆一样的深蓝色织物伸展在弧形的格构式框架上,收费站长 152m,最宽处为 32m,支承在中间的四根高 35m 的桅杆上,桅杆的截面为圆形,由三根圆管构成空腹桁架,上下两端截面逐渐变小。由横向曲梁与纵向空腹梁构成的框架通过吊杆悬挂在桅杆上,膜材采用的是法拉利公司生产的 Fluotop1202 聚酯织物。

三、问题

1. 不定的形状及其确定

膜结构的最大特点之一就是它形状的多样性,曲面存在着无限的可能性,问题就在于由谁来确定?

膜结构与一般结构的不同之处在于:首先它的变形要大一些,其次它的形状是在施工过程中逐步形成的,有一个形状确定的问题。首先要确定在初始荷载下结构的初始形状,即结构体系在膜自重(有时还有索)与预应力作用下的平衡位置。在初步设计阶段,先按建筑要求设定大致的几何外形,然后对膜面施加预应力使之承受张力,其形状也相应改变,经过不断调整预应力,最后就可得到理想的几何外形和应力分布状态。随着计算机技术的不断进步,膜结构的形状就更多地依靠计算机来确定。在结构设计理论中还出现了专门的研究课题——“找形”(Formfinding)。

膜结构打破了传统的“先建筑、后结构”的做法,要求建筑设计与结构的紧密结合。在设计过程中,建筑师和结构工程师要坐在一起确定建筑物的形状,并进行必要的计算分析。这时,所设计建筑物的平面形状、立面要求、支点设置、材料类型和预应力大小都将成为互相制约的因素,一个完美的设计也就是以上矛盾统一的结果。这个问题目前还没有为大多数设计人员理解,因此出现了这样的情况,即由建筑师决定外形,然后由结构工程师配上相应外形的骨架,再套上膜面,这样就完全失去了膜结构的特性。

2. 从帐篷到永久性建筑

过去人们总是习惯地把膜结构看作是个临时性建筑的帐篷,膜结构是否能做成永久性建筑呢?其中关键的问题就是材料。

当初采用的膜材的确只能用在象博览会上的临时展馆。70 年代美国所开发的玻璃纤维织物,涂覆的面层采用了聚四氟乙烯(PTFE,商品名称 Teflon—特氟隆),在强度和耐久性上有很大的改进。这种材料于 1973 年首次应用于美国加利福尼亚拉维恩学院一个学生活动中心的屋顶上。经过 20 多年的考验,材料还保持着 70—80% 的强度,仍然透光并且没有褪色。使用经验表明,这种织物不但有足够的强度承受张力,在使用功能上也能满足要求。从乐观的估计来说,它的使用年限将远不止如当初所预计的 25 年。与此同时,一种价格比较低、涂覆 PVC 的聚酯织物,由于增加了一层面层,提高了耐久性与自洁性,使其使用年限达到 15 年。

早期修建的膜结构大多是开敞式或于位气候温和的地区,还没有充分发挥膜材的围护能力,那么在寒冷和多雪地区,将是对膜结构作为永久性建筑的真正考验。1983 年在加拿大加尔格利建成的林赛公园体育中心,其折线形的膜材屋面,采用玻璃纤维织物,下设有纤维棉的保暖屋,屋顶不但能防寒,还能透过 4% 的光线,这就足以在白天不需人工采光。位于号称日本“雪国”的秋田县,最深积寒可达 150cm,1990 年建造的“天空穹顶”采用了正交的格构式空间拱系,沿长向采用空腹拱并设有钢索,在屋面将单层玻璃纤维织物张紧,形成槽沟以便于雪滑落。沿短向采用钢管拱,它被用作输送暖风的通道,既起到融雪的作用,也解决了膜面的结露问题。以上两个工程实践表明,膜结构已远不是那种帐篷式的大棚,而是登堂入室成为永久性建筑的一名成员。

3. 膜的支承——空气、索或骨架

膜材屋面以什么支承,始终是膜结构设计中有待于探索的问题。也许当初是从气球或橡皮艇受到的启发,人们考虑以空气为支承,出现了气承式膜结构。它曾被用作 9 座大跨度体育馆的屋顶,但建成之后,由于在恶劣天气时维护不当曾出现过好几次事故,轻者屋面下瘪,重者膜材被撕裂,砸坏了下面的设施,这些事故虽然只造成一些财产损失,并没有人身伤亡,但在公共建筑中屋面出问题,还是引起了公众的关注,甚至对气承式结构是否安全也产生了疑问。1986 年以来,在美国建大型体育馆就没有采用过空气膜结构。对于有

些已建成的体育馆,其膜材将达到保证的使用年限,在改建时也没有考虑采用气承式膜结构。日本在东京后乐园也采用了气承式空气膜结构,设置了先进的自动控制,同时屋面膜材为双层,其间有循环的热空气以融化雪。后乐园建成之后,昂贵的运转与维持费用也使日本对气承式膜结构停步不前。然而,在中小跨度的健身房、网球馆、仓库等,由于其造价低廉、安装方便,气承式膜结构还是受欢迎的。

60年代,美国富勒(B. Fuller)提出了“张拉整体”(Tensegrity)的概念,即以连续的受拉钢索为主,以不连续的压杆为辅,组成一种结构体系,然而他的概念始终没有在工程中得以实现,其后盖格尔把这种概念运用到以索、膜与压杆组成的“索穹顶”上,成功地建造了直径自93m到210m的体育馆。美国李维也继承了“张拉整体”的概念,并采用富勒的三角形网格,设计与建造了佐治亚穹顶、阿根廷拉普拉达体育场等工程。主要依靠索来支承膜的索穹顶是膜结构体系的一大进展。

膜材也完全可以支承在平面或空间结构上,如拱、网壳等,象日本秋田天空穹顶采用了钢结构的拱系,而位于同一地区的大馆穹顶,以双向胶合木拱支承双层膜面。膜结构还可以采用桅杆作为支承,赋予建筑立面以新的变化。第一个采用涂覆PTFE玻璃纤维织物的拉维恩学生活动中心,屋顶由4个圆锥形的帐篷组成,每一个圆锥体有一倾斜15°的桅杆,支承膜材的钢索就由桅杆顶部辐射状地伸向周围的圈梁。英国千年穹顶的12根桅杆穿出了屋面,膜面支承在72根辐射状的钢索上,这些钢索则通过斜拉吊索与系索由桅杆所支撑。在这些建筑中,传统的承重结构与新颖的膜面形成了完美的结合。

四、展望

20世纪的工程实践表明,由于新材料、新形式的不断出现,膜结构具有强大的生命力,必将是下一个世纪建筑结构发展的主流。按照法兰克福

博览会提供的资料,全世纪建筑织物的销售量在1990年为21亿美元,10年内以年均增长率4.1%的速度增加,到2000年可达33.9亿美元,这在某种程度上反映了采用建筑织物的膜结构的发展速度。进入21世纪,估计膜结构仍会以略高于4%的增长率继续发展。中国目前每年大约有10万m²的膜结构工程,基数很小,因此年增长率也会更高一些,但是工程面积的绝对值与先进水平相比还是较低的。

每一种结构都有其适用的范围,对于膜结构来说,最适宜的就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。因此,除了已被推广采用的体育建筑和展览建筑外,膜结构将会更多地应用于机场、车站、码头的大厅,露天剧场、高层建筑的中庭等,在我国广大地区的农贸市场也可采用膜材覆盖。此外,开闭式的屋盖已逐渐兴起,膜结构由于其重量轻的优点,也会更多地被运用到这种特殊形式的屋盖上。

在结构形式上,今后将会更多地利用钢索,一种方式是以索、加上压杆组成类如索穹顶那样的杂交结构,另一种方式是通过斜拉索将膜以承在桅杆或立柱上。

膜结构所用的织物,已定位在涂覆PTFE的玻璃纤维织物与涂覆PVC聚酯上,后者需加涂一层面层。今后会研制出更新的涂层和面层来进一步提高织物的性能和可操作性。目前中国所用的膜材主要依靠进口,如能早日生产出符合要求的建筑织物就会降低造价,为大量推广膜结构创造条件。

目前世界上一些国家,如美国、日本、法国等,都已经或正在编制有关膜结构的技术规程,这必将促进膜结构的推广应用。对于象膜结构这样的对象,有一种看法认为对它的规定不必是强制性的,而更适宜采用推荐性的,因此有些规定是以指南或建议的方式出现。在中国,有关膜结构技术规程的编制也应该提到日程上了。