

大跨空间建筑工程结构的发展（二）注册建筑师考试 PDF 转换可能丢失图片或格式，建议阅读原文

https://www.100test.com/kao_ti2020/554/2021_2022__E5_A4_A7_E8_B7_A8_E7_A9_BA_E9_c57_554403.htm

二、空间网格结构

网壳结构的出现早于平板网架结构。在国外，传统的肋环型穹顶已有一百多年历史，而第一个平板网架是1940年在德国建造的（采用Mero体系）。中国第一批具有现代意义的网壳是在50和60年代建造的，但数量不多。当时柱面网壳大多采用菱形“联方”网格体系，1956年建成的天津体育馆钢网壳（跨度52m）和1961年同济大学建成的钢筋混凝土网壳（跨度40m）可作为典型代表。球面网壳则主要采用肋环型体系，1954年建成的重庆人民礼堂半球形穹顶（跨度46.32m）和1967年建成的郑州体育馆圆形钢屋盖（跨度64m）是仅有的两个规模较大的球面网壳。自此以后直到80年代初期，网壳结构在我国没有得到进一步的发展。相对而言自第一个平板网架（上海师范学院球类房，31.5m×40.5m）于1964年建成以来，网架结构一直保持较好发展势头。1967年建成的首都体育馆采用斜放正交网架，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每平方米（1kg每平方米 9.8pa）。1973年建成的上海万人体育馆采用圆形平面的三向网架净架110m，厚6m，采用圆钢管构件和焊接空心球结点，用钢指标47kg每平方米。当时平板网架在国内还是全新的结构形式，这两个网架规模都比较大，即使从今天来看仍然具有代表性，因而对工程界产生了很大影响。在当时体育馆建设需求的激励下，国内各高校、研究机构和设计部门对这种新结构投入了许多力量，专业的制作和安装企业

也逐渐成长，为这种结构的进一步发展打下了较坚实的基础。改革开放以来的十多年里是我国空间结构快速发展的黄金时期而平板网架结构就自然地处于捷足先登的优先地位。甚至80年代后期北京为迎接1990年亚运会兴建的一批体育建筑中，多数仍采用平板网架结构。在这一时期，网架结构的设计已普遍采用计算机，生产技术也获得很大进步，开始广泛采用装配式的螺栓球结点，大大加快了网架的安装。但事物总是存在两个方面。在平板网架结构一枝独秀地加快发展的同时，随着经济和文化建设需求的扩大和人们对建筑欣赏品位的提高，在设计日益增多的各式各样大跨度建筑时，设计者越来越感觉到结构形式的选择余地有限，无法满足日益发展的对建筑功能和建筑造型多样化的要求。这种现实需求对网壳结构、悬索结构等多种空间结构形式的发展起了良好的刺激作用。由于网壳结构与网架结构的生产条件相同，国内已具备现成的基础，因而从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，以及上述各种网壳的组合形式均得到了应用；还开发了预应力网壳、斜拉网壳（用斜拉索加强网壳）等新的结构体系。近几年来建造了一些规模相当宏大的网壳结构。例如1994年建成的天津体育馆采用肋环斜杆型（Schwedler型）双层球面网壳，其圆形平面净跨108m，周边伸出13.5m，网壳厚度3m，采用圆钢管构件和焊接空心球结点，用钢指标55kg每平米。1995年建成的黑龙江省速滑馆用以覆盖400m速滑跑道，其巨大的双层网壳结构由中央柱面壳

部分和两端半球壳部分组成，轮廓尺寸86.2m×191.2m，覆盖面积达15000平方米，网壳厚度2.1m，采用圆钢管构件和螺栓球结点，用钢指标50kg每平米。1997年刚建成的长春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，体型巨大，如果将外伸支腿计算在内，轮廓尺寸达146m×191.7m，网壳厚度2.8m，其桁架式“网片”的上、下弦和腹杆一律采用方（矩形）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由国内完成。在网壳结构的应用日益扩大的同时，平板网架结构并未停止其自身的发展。这种目前来看已比较简单的结构有它自己广泛的使用范围，跨度不拘大小；而已近几年在一些重要领域扩大了应用范围。例如在机场维修机库方面，广州白云机场80m机库（199年）、成都机场140m机库（1995年）、首都机场2Zm×150m机库（1996年）等大型机库都采用平板网架结构。这些三边支承的平板网架规模巨大，且需承受较重的悬挂荷载，常采用较重型焊接型钢（或钢管）结构，有时需采用三层网架；其单位面积用钢指标可达到一般公用建筑所用网架的一倍或更多。单层工业厂房也是近几年来平板网架获得迅速发展的重要领域。为便于灵活安排生产工艺，厂房的柱网尺寸有日益扩大的趋向，这时平板网架结构就成为十分经济适用的理想结构方案。1991年建成的第一汽车制造厂高尔夫轿车安装车间面积近8万平方米（189.2m×421.6m），柱网21m×12m，采用焊接球结点网架，用钢指标31kg每平米。该厂房是目前世界上面积最大的平板网架结构。1992年建成的天津无缝钢管厂加工车间面积为6万平方米（108m×564m），柱网36m×18m，采用螺

栓球结点网架，用钢指标32kg每平方米，与传统的平面钢桁架方案比较，节省了47%。鉴于这类厂房的巨大圆积，它们确实为平板网架结构的发展提供了广阔的新领域。十分明显，包括网架和网壳在内的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。我国网架企业的蓬勃发展也为这类结构提供了方便的生产条件。据估计，近几年我国每年建造的网架和网壳结构达800万平方米建筑面积，相应钢材用量约20万t。这么大的数字是任何其它国家无法比拟的，无愧于“网架王国”这一称号，难怪国外有关企业对这一巨大市场垂涎欲滴。如此大的发展势头自然也会带采一些问题。与国际水平相比，我国目前网架生产的工艺水平和质量管理水平尚有一定距离。尤其是在市场需求带动下，大量小型网架企业雨后春笋般成立起来，难免良莠不齐，设计也非总由有经验人士担任。因而大力加强行业管理，切实把握住设计制作和安装质量，是促进我国空间结构进一步健康发展的重要课题。

三、张力结构 中国现代悬索结构的发展始于50年代后期和60年代，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，其圆形屋盖采用车辐式双层悬索体系，直径达94m。浙江人民体育馆建成于1967年，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。世界上最早的现代悬索屋盖是美国于1953年建成的Raleigh体育馆，采用以两个斜放的抛物线拱为边缘构件的鞍形正交索网。我国建造的上述两个悬索结构无论从规模大小或技术水平来看在当时都可以说是达到国际

上较先进水平的。但此后我国悬索结构的发展停顿了较长一段时间，一直到80年代，由于大跨度建筑的发展而提出的对空间结构形式多样化的要求，这种形式丰富的轻型结构重新引起了人们的热情，工程实践的数量有较大增长，应用形式趋于多样化理论研究也相应地开展起来形势相当喜人。柔性的悬索在自然状态下不仅没有刚度，其形状也是不确定的。必须采用敷设重屋面或施加预应力等措施，才能赋予一定的形状，成为在外荷作用下具有必要刚度和形状稳定性的结构。值得称道的是，我国的科技人员在学习和吸收国外先进经验的同时，在结合工程具体条件创造更加符合中国国情的结构应用形式方面做了不少尝试和创新。例如，山东省淄博等地把悬索结构应用于中小型屋盖结构中，颇具特色。他们主要采用单层平行索系或伞形辐射索系加钢筋混凝土屋面板的构造方式。施工时先将屋面板挂在索上（使索正好位于板缝中），在板上临时加载使索伸长，然后在板缝中浇灌细石混凝土，待达到一定强度后卸去临时荷载，即形成具有一定预应力的“悬挂薄壳”。这种构造和施工方法不需要复杂的技术和设备，造价也比较低。为了提高单层悬索的形状稳定性，在单层平行索系上设置横向加劲梁（或桁架）的办法也是十分有效的。横向加劲构件的作用有二：一是传递可能的集中荷载和局部荷载使之更均匀地分配到各根平行的索上；二是通过下压横向加劲构件的两端到预定位置或通过对索进行张拉使整个体系建立预应力，从而提高屋盖的刚度。从安徽体育馆等几个工程的实践来看这种混合结构体系施工方便，用料经济，是一种成功的创造。由一系列承重索和曲率相反的稳定索组成的预应力双层索系，是解决悬索结构形状稳定

性的另一种有效形式。其工作机理与预应力索网有类似之处。1966年瑞典工程师Jawerth首先在斯德哥尔摩滑冰馆采用由一对承重索和稳定索组成被称为“索桁架”的专利体系，其后这种平面双层索系在各国获得相当广泛应用。我国无锡体育馆也采用了这种体系。作为对这种体系的改进，吉林滑冰馆采用了一种新型的空间双层索系，它的承重索与稳定索在不同一平面内，而是错开半个柱距，从而创造了新颖的建筑造型，而且很好地解决了矩形平面悬索屋盖通常遇到的屋面排水问题。这一新颖结构参加了1987年在美国举行的国际先进结构展览。我国悬索结构发展的另一个特点是在许多工程中运用了各种组合手段。主要的方式是将两个以上预应力索网或其它悬索体系组合起来，并设置强大的拱或刚架等结构作为中间支承，形成各种形式的组合屋盖结构。例如四川省体育馆和青岛市体育馆的屋盖是由两片索网和作为中间支承的一对钢筋混凝土拱组合起来的。北京朝阳体育馆由两片索网和被称为“索拱体系”的中央支承结构组成。中央索拱体系由两条悬索和两个钢拱组成，本身是一种混合结构，其概念也具有创新意义。采用各种组合式屋盖不仅进一步丰富了建筑造型，而且往往能更好地满足某些建筑功能上的要求，例如为体育馆建筑提供了“最优”的内部空间。单纯从技术经济角度，单片索网或其它悬索体系可以经济地跨越很大的跨度，本非必须采用中间支承结构。所以，采用组合式屋盖在很多场合毋宁说主要是出于建筑造型和使用功能方面的考虑。从我国这几年的实践效果来看，它在这方面是起到了预期作用的。将斜拉体系引用到屋盖结构中来，可形成一系列混合结构形式。这种体系利用由塔柱顶端伸出的斜拉索为

屋盖的横跨结构（主梁、桁架、平板网架等）提供了一系列中间弹性支承，使这些横跨结构不需靠增大结构高度和构件截面即能跨越很大的跨度。前面提到的斜拉网壳也属于这类混合结构。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一些，又缺少具有较高商品化程度的实用计算程序，因而难于为一般设计单位普遍采用；（2）尽管悬索结构的施工并不复杂，但一般施工单位对它不够熟悉，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。与此同时，同属于张力结构体系、在国外应用很广的膜结构或索-膜结构在我国则处于艰难起步阶段。除了设计理论储备和生产条件方面的原因外，缺少符合建筑要求的国产膜材是一个主要的制约因素。从国外情况看，1970年大阪万国博览会上的美国馆采用气承式膜结构（俗称充气结构），首次使用以聚氯乙烯（PVC）为涂层的玻璃纤维织物，受到广泛注意，其准椭圆平面的轴线尺寸达140m x 835m，一般认为是第一个现代意义的大跨度膜结构。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下瘪甚至事故。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。但如前面所提，日本在1988年建成的东京后乐园棒球馆仍然采用气承式索-膜结构，不过应用了极为先进的自动控制技术，而且采用双层膜结构，中间可通热空气融雪；中央计算机自动监测风速、雪压、室内气压、膜和索的变形及内力，并自动选择最佳方法来控制室内气压和消除积雪。张拉式膜（或索-膜）结构自80年代以来在发达国家获得极大发展。这种体系与索网结构类似，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，通过张拉建立预应力，并获得确定形状。1985年建成的沙特阿拉伯利雅得体育场外径288m，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，内缘则蹦紧在直径为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平面尺寸305m×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。这两个工程是比较典型的大型张拉式膜结构的例子。另外还有一类骨架支承式膜结构。例如日本秋田县的“天穹”（Sky dome）是一个切去两边的球面穹顶（ $D=130\text{m}$ ），其主要承重结构是一系列平行的格构式钢拱架，蒙以膜材后，用设在两拱中间的钢索向下拉紧，并在屋面上形成V形排水（雪）沟槽。这种骨架是支承式膜结构的例子也是很多的。然而由美国工程师Geiger根据Fuller的张拉集合体（Tensegrity）概念发展起来的所谓“索穹顶”（Cable Dome）

，也许是近10年来最为脍炙人口的一种新颖张拉体系。Tensegrity原是指由连续的拉杆与分散的压杆组成的自平衡体系，其指导思想是充分发挥杆件的受拉作用。然而严格意义上的Tensegrity体系未能在工程中实现。Geiger进行了适当改造，提出了支承在圆形刚件周边构件上的预应力拉索-压杆体系，索沿辐射方向布置，并利用膜材作为屋面，他称之为“索穹顶”，并首先用于1988年汉城奥运会的两个体育馆工程。美国的Levy进一步发展这种体系，改用联方形拉索网格，使屋面膜单元呈菱形的双曲抛物面形状，并用于1996年亚特兰大奥运会体育馆，其平面呈准椭圆形，尺寸达241m×192m。这类张拉式索-压杆-膜体系，重量极轻，安装方便，在大跨度和超大跨度建筑中极具应用前景。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。几年来在理论研究方面做了不少工作，应该说已建立起一定的理论储备。在膜结构应用方面近年来也开始呈现比较活泼的势头。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36100平方米，是我国首次在大型建筑上采用膜结构；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，他们已兴建了几个较小型的膜结构。国产膜材的质量也正在改进。各种迹象表明，膜结构这一族富有潜力的大跨空间结构新成员在我国的发展已露出桅尖。

把建筑师站点加入收藏夹 100Test 下载频道开通，各类考试题目直接下载。详细请访问 www.100test.com