

大跨空间建筑工程结构的发展（三）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_554404.htm

四、理论研究（1）

空间结构的应用是同相应的理论研究同步发展的。应该说我们在空间结构理论研究大面做了许多工作。主要研究内容偏重于静力作用下的结构性状和分析方法，以满足一般设计工作的要求为主要目标。这些研究为我国空间结构的发展提供了基本的理论支持。早期的工作偏重于以连续化理论为基础的各种解析方法的研究，例如平板网架的拟板解法、网壳的拟壳解法；悬索结构在荷载作用下要产生较大位移，因而计算中应考虑几何非线性，当时发展了一系列适用于不同形式悬索结构的考虑大位移的解析方法。在一段时期内，当计算机尚未广泛运用于结构计算以前，各种解析方法曾对空间结构的发展起过重要作用，但解析方法终究有其局限性，它们具有不同程度的近似性，而且往往仅适用于某些特定的结构形式。计算机的普及和有限元分析方法的广泛运用为空间结构的加速发展创造了真正的条件。许多大型的和特殊形式的新颖空间结构只能用计算机程序进行分析。我国从80年代开始陆续编制出适用于不同空间结构的各种计算机分析程序和CAD软件，且功能日益完备。现在我们设计空间结构几乎全部依靠计算机。事实上，当设计由成千杆件和结点组成的大型空间网格结构，尤其是当采用螺栓球结点时，离开适用的CAD软件是无法想象的。但也应当指出，对某些形式的悬索结构来说，简单实用的解析方法仍然有意义；对于像双层索系等比较简单的体系，解析力法已完全可以提供准确而完

整的计算结果。例如，吉林滑冰馆的大型悬索屋盖设计是由简单的手筹来完成的。十余年来关于空间结构研究的一个特点是做了大量的试验。这是我国结构研究领域的一个优良传统。80年代乃至90年代初期建造的几乎每一个有代表性的大型空间结构，都作过模型试验或现场实测。这些试验研究同理论分析工作一起，以及它们之间的相互印证，使我们对原来可能比较生疏的各种新颖空间结构的基本性能了解得越来越全面，为设计这些结构积累起比较丰富的理论储备。（2）

除了关于各种类型空间结构的基本性状和计算方法的研究以外，一些更为基础性的理论研究也受到了重视，例如关于网壳稳定性的研究已取得许多重要成果。稳定性是网壳结构、尤其是单层网壳结构设计中的关键问题，也是国内外十多年来的热点研究领域。结构的稳定性能可以从其荷载-位移全过程曲线中得到完整的概念；这种全过程曲线要由较精确的非线性分析得出。从非线性分析的角度来考察，结构的稳定问题和强度问题是相互联系在一起的。结构的荷载-位移全过程曲线可以把结构的强度、稳定性以至于刚度的整个变化历程表示得清清楚楚。当考察创始缺陷和荷载分布方式等因素对实际网壳结构稳定性能的影响时，也均可从全过程曲线的规律性变化中进行研究。但是当利用计算机对具有大量自由度的复杂体系进行有效的非线性有限元分析尚未能充分实现的时候，要进行网壳结构的全过程分析是十分困难的。在较长一段时期内，人们不得不求助于连续化理论（“拟壳法”）将网壳转化为连续壳体结构，然后通过某些近似的非线性解析方法来求出壳体结构的稳定性承载力。这种方法显然有较大局限性：连续化壳体稳定性理论本身并未完善，事实上

仅对少数特定的壳体（例如球面壳）才能得出较实用的公式；此外，所讨论的壳体一般是等厚度的和各向同性的，无法反映实际网壳结构的不均匀构造和各向异性的特点。因此，在许多重要场合还必须依靠细致的模型试验来测定稳定性承载力，讲与可能的计算结果相互印证。随着计算机的发展和广泛应用，非线性有限元分析方法兴起，并逐渐成为结构稳定性分析中的有力工具。我国从80年代后期开始也积极开展以非线性全过程分析为基础的网壳稳定性研究。在总结国外已取得成果的基础上，在理论表达式的精确化、合理选用平衡路径跟踪的计算方法、灵活的迭代策略等方面进行了深入细致的探索，使具有大量自由度的复杂结构体系的全过程分析成为可能；并编制出相应的分析程序。此外，在研究初始缺陷对网壳稳定性的影响时，对所提出的“一致缺陷模态法”（即认为初始缺陷按最低屈曲模态分布时可能具有最不利影响）的合理性和有效性进行了仔细论证，并使之规范化。在上述理论成果的基础上，采用大规模参数分析的方法，进行了网壳稳定性分析实用方法的研究。即结合不同类型的网壳结构，在其基本参数（几何参数、构造参数、荷载参数等）的常用变化范围内，进行大规模的实际结构全过程分析，对所得结果进行统计分析和归纳，考察网壳稳定性的变化规律，最后通过回归分析提出网壳稳定性验算的实用公式。近几年来，共计对2800余例各种形式的实际尺寸网壳结构进行了全过程分析，得到了相当规律性的结果。所提出的实用公式用起来比较简便，然而是在建立在精确分析方法的基础之上的。这一工作很受广大设计部门欢迎。这些公式已列入正在编制的“网壳结构技术规程”（征求意见稿）。应该说，我

国关于网壳稳定性的研究是相当深入和细致的。（3）相对来说，国内外关于网壳结构在风和地震荷载作用下的反应研究得较少。作者个人认为，对网壳结构来说，风荷载的动力作用可能不是设计中的主要问题，但随着网壳尺度的增大，深入研究其抗地震性能则具有重要意义。在抗震领域，对高层和高耸结构研究得比较透彻；但网壳等大跨结构的动力性能具有不同特点，例如其频率分布比较密集，往往从最低阶算起前面数十个振型都可能对其地震反应有贡献，因而一般的振型分解法是否适用是一个值得探讨的问题，不同方法（包括竖向）的地震作用引起的反应往往是同量级的，因此考虑多维输入可能是一个相当重要的问题；国外已建的和我国今后将要建的一些超大跨度网壳尺度十分巨大，因而在计算中也许有必要考虑地震动力的空间相关性；此外，单层网壳结构在静力作用下的稳定性是设计中的重要因素，它们在地震作用下同样存在动力失稳问题，其严重性如何？对于某些动力反应过大的网壳结构，是否有必要采取适当的振动控制措施？诸如此类问题都是我国学术界正在深入思考或已着手进行研究的问题。（4）具有曲面形状的空间结构是最充分地利用形状来抵抗外力作用的结构形式，所以空间结构的形体设计（或从理论分析角度称作形态分析）具有十分重要的意义。对于钢筋混凝土薄壳和钢网壳等较刚性的体系，其形态分析主要涉及结构几何形状的优化。对索网、膜和索-膜等柔性结构体系，形态分析具有更基本的意义，因为在一定边界条件下，柔性体系仅当存在适当预应力时才具有确定的形状，且其几何形状是随支承条件和预应力分布形态而变化的；因而结构设计的首要内容就是所谓的“找形”（

Form-finding) , 借此来确定形状-预应力-支承条件这一综合系统与使用要求之间的优化组合。“找形”一般采用非线性有限元分析方法, 但理论上远未定型。英国Barnes等提出的动力松弛法和德国Linkwitz等提出的力密度法等近似方法也能成功地应用于一些特定类型问题。日本半谷近年来提出形态分析的概念试图使空间结构的形体设计理论进一步系统化, 很有意义。这一理论有待继续发展。我国在悬索结构和膜结构的“找形分析”或更确切地说“初始平衡状态分析”方面作过不少工作, 并编制了一些相应的软件。今后似应在下列两方面进行更系统的理论研究工作: 一方面是在总结现有分析方法的基础上, 建立起统一的形态分析理论, 与计算机图形学相结合, 系统跟踪柔性空间结构的成形受力全过程并形成相应的软件; 另一方面是在形态分析理论的基础上, 提出空间结构几何形状的优化准则和分析方法。(5) 膜结构和索-膜结构等柔性体系自振频率较低, 是风敏感性结构, 因而研究这类结构在风作用下的反应及其抗风设计方法十分重要。这一课题具有较大理论难度, 国内外研究尚少, 在许多方面基本上是空白, 因而开展这一研究尤其具有重要意义。我们对悬索结构的风振问题做过一定研究, 针对这种大跨柔性结构频域宽且频率分布密集的特点, 提出了适用的随机风振反应分析方法; 并且, 针对悬索结构这种非线性体系, 提出了广义风振系数的概念, 通过大规模参数分析, 为椭圆形及菱形平面的常用索网结构提出了简便的实用计算方法。还组织过相应的刚性模型和气弹模型的风洞实验。对于不同的结构体系, 其风振特性也有差别。采用传统屋面材料的悬索结构整体工作性能相对较好(局部变形较小), 结构的整体位移对气

流场的改变不大。这类结构在风作用下的振动一般属于限幅随机振动。膜和索-膜结构具有不同特点，膜既是受力构件又是覆面材料，且质轻面薄，结构的局部刚度很小，在风作用下，局部膜单元的加速度和速度反应较大，可能对周围的空气紊流速度产生影响，导致气弹反应和颤振。因此在研究膜结构和索-膜结构的风振问题时，应对可能的动力失稳问题进行深入的理论分析和风洞实验研究。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