

# 大跨空间结构理论研究和工程实践

沈世钊

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150090)

**[摘要]** 结构形式的创新和有力的理论研究支持, 是大跨空间结构健康发展的两个关键因素。文章结合笔者参与的若干大型工程, 从一个侧面反映我国十余年来在空间结构形式创新方面所进行的努力。简要介绍了笔者在悬索体系解析计算理论、单层网壳结构稳定性、网壳抗震性能和振动控制、悬索和薄膜结构的风致动力响应等理论研究领域取得的一些进展。

**[关键词]** 大跨空间结构; 网壳结构; 悬索结构; 膜结构; 结构稳定性; 结构抗震; 结构风振

## 1 一个富有生命力的结构领域

近30年来, 各种类型的大跨空间结构在美、日、欧、澳等发达国家发展很快。建筑物的跨度和规模越来越大, 采用了许多新材料和新技术, 创造了丰富的空间结构形式。许多宏伟而富有特色的大跨度建筑已成为当地的象征性标志和著名人文景观。从今天来看, 大跨度和超大跨度建筑物及作为其核心的空间结构技术已成为代表一个国家建筑科技发展水平的重要标志之一。

由于经济和文化发展的需要, 人们还在不断追求覆盖更大的空间。例如, 有人设想将整个街区、整个广场、甚至整个山谷覆盖起来, 形成一个可人工控制气候的人聚环境或休闲环境; 为了发掘和保护古代陵墓和重要古迹, 也有人设想采用超大跨度结构物将其覆盖起来形成封闭的环境。目前, 某些发达国家正在进行尺度为300 m以上的超大跨度空间结构的设计方案探讨。

各发达国家为大跨度空间结构的发展投入了大量研究经费。例如, 早在20年前, 美国土木工程学会曾组织了为期10年的空间结构研究计划, 投入经费1550万美元。同一时期, 西德由斯图加特大学主持组织了一个“大跨空间结构综合研究计

划”, 每年研究经费100万马克以上。这些研究工作为各国大跨度建筑的蓬勃发展奠定了坚实的理论基础和技术条件。国际壳体和空间结构学会(I-ASS)每年定期举行年会和各种学术交流活动, 是目前最受欢迎的著名学术团体之一。

我国大跨空间结构的基础原来比较薄弱, 但随着国家经济实力的增强和社会发展的需要, 近十余年来也取得了迅猛的发展。工程实践的数量较多, 空间结构的形式趋向多样化, 相应的理论研究和设计技术也逐步完善。以北京亚运会(1990)、哈尔滨冬季亚运会(1996)和上海八运会(1997)等的许多体育建筑为代表的一系列大跨空间结构——作为我国建筑科技进步的某种象征——在国内外都取得了一定影响。

我国虽然是一个发展中国家, 但随着国力的不断增强, 要建造更多更大的体育、休闲、展览、航空港、机库等大空间和超大空间建筑物以满足需求, 而且这种需求在一定程度上可能超过许多发达国家。这是我国空间结构领域面临的巨大机遇。事实也是如此, 20世纪80年代以后, 我国各种类型的大跨空间结构进入协调的发展阶段, 工程项目逐年增长, 结构形式趋向多样化, 出现了越来越多的创新设计, 理论研究也逐渐配套, 形势相当喜人。

**[收稿日期]** 2000-07-17

**[作者简介]** 沈世钊(1933-), 男, 浙江嘉兴市人, 中国工程院院士, 哈尔滨工业大学教授

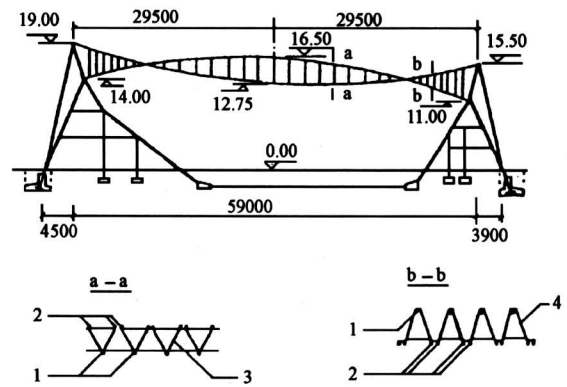
大跨空间结构的形式十分丰富多彩，习惯上分为如下这些类型：(a) 钢筋砼薄壳结构；(b) 平板网架结构；(c) 网壳结构；(d) 悬索结构；(e) 膜结构和索-膜结构（近年来国外用得较多的“索穹顶”（Cable Dome）实际上也是一种特殊形式的索-膜结构）；(f) 混合结构（hybrid structure）——通常是柔性索和刚性构件的联合应用。

在上述各种空间结构类型中，钢筋砼薄壳结构在 20 世纪 50 年代后期及 60 年代前期在我国有所发展，但目前应用较少，主要原因是施工比较费时费事。平板网架和网壳结构，包括一些未能单独归类的特殊形式，如折板式网架结构、多平面型网架结构、多层多跨框架式网格结构等，总称为空间网格结构。这类结构在我国发展很快，且持续不衰。悬索结构、膜结构和索-膜结构等柔性体系，均以张力来抵抗外荷载的作用，总称为张力结构。这类结构重量轻，安装方便，富有发展前景。许多迹象表明，各种形式的张力结构在我国正方兴未艾。

## 2 结构形式的创新

大跨空间结构的特点之一是形式十分丰富多彩，而且其受力性能与结构形体之间存在紧密的内在联系。因而结构形式的不断创新是大跨空间结构发展过程中的一个主要特征。这一结构领域也赋予具有创新精神的工程师以充分驰骋的广阔空间。下面结合笔者参与的一些典型工程实例，从一个侧面反映我国在大跨空间结构形式创新方面所进行的努力。

80 年代以前，悬索结构在我国仅有少量工程应用，工程界对它也比较生疏。1983 年在设计吉林滑冰馆时就考虑采用某种形式的悬索体系。由于柔性的悬索在自然状态下没有刚度，其形状也不确定，要采取适当措施才能赋予悬索体系一定的形状和刚度。由两组相反曲率的索（“承重索”和“张紧索”）相互拉紧组成的预应力双层索系，是使悬索体系具有稳定形状的一种有效形式。吉林滑冰馆采用了一种新型的空间双层索系方案（图 1）<sup>[1]</sup>；它的“承重索”与“张紧索”不设在同一竖平面内，而是相互错开半个柱距，二者之间通过桁架式檩条和波形拉杆相互连系，从而提供了新颖的建筑设计造型，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。这一新颖结构于 1986 年建成，并被推荐参加了 1987 年在美国举行的“国际先进结构展览”。



1—承重索；2—稳定索；3—桁架式檩条；4—波形檩条；

图 1 吉林滑冰馆预应力双层索系简图

Fig.1 The pre-stressed double-layer cable system for Jilin Ice-skating Rink

在设计为 1990 年北京亚运会修建的石景山体育馆和朝阳体育馆时，为了促进结构形式多样化，两个馆分别采用了组合网壳结构方案和组合索网结构方案。

石景山体育馆的平面是边长为 99.7 m 的等边三角形<sup>[2]</sup>。屋盖结构由三片四边形的双层鞍形网壳组成，各网壳支承于中央的三叉形刚架和外缘的钢筋混凝土边梁上。每片网壳的曲面是以给定的四条直边为周界的双曲抛物面，由两族相互斜交的直线构成基本网格。由图 2 看到：所采用的结构形式提供了明快的建筑造型，其内部空间也正好符合体育馆功能上的需要；沿中央三叉刚架还设置了中央采光带，使室内显得明快宜人；屋面荷载通过各网壳传给中央三叉刚架和边缘构件，其主要部分最后通过三叉刚架的支点传给基础。

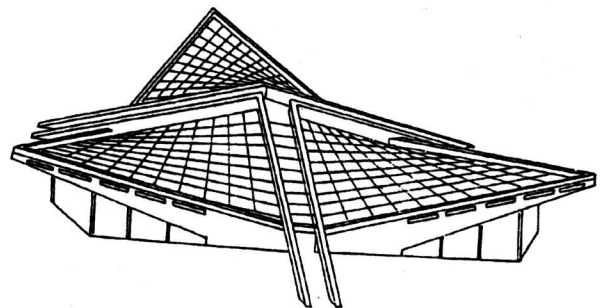


图 2 石景山体育馆结构方案示意

Fig.2 Structural scheme of Shijingshan Gymnasium

朝阳体育馆屋盖结构由两片预应力索网组成<sup>[3]</sup>。两片索网悬挂在中央“索拱结构”和外侧的边缘构件之间(图3)。中央索拱结构是由两条悬索和两个格构式钢拱组成的,呈桥梁形式的立体预应力体系。索和拱的两端支承在四片三角形钢筋混凝土剪力墙上。索拱体系本身是一种混合结构,其概念也具有创新意义:具有抗弯刚度的拱弥补了索的形状稳定性不足的缺陷,而张紧的索消除了拱整体失稳的可能性,两种构件起到很好的互补作用。预应力则用来调整二者之间的内力分配关系。屋面荷载通过索网传给中央索拱体系和边缘构件,其主要部分最后通过三角形剪力墙传给基础。所采用的屋盖结构形式十分符合体育馆内部空间的需要。中央索拱结构还提供了理想的中央采光带的位置。

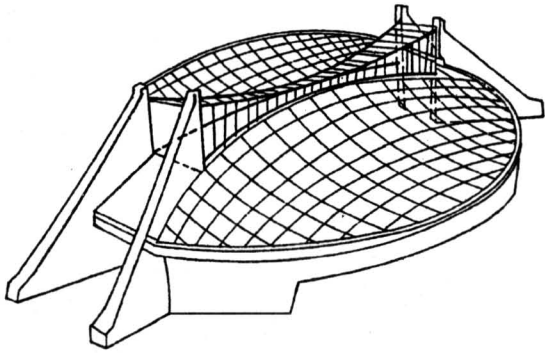


图3 朝阳体育馆结构方案示意

Fig.3 Structural scheme of Chaoyang Gymnasium

值得指出的是,单纯从技术经济角度,单片索网或网壳可以经济地跨越很大的跨度,并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。从上述两个体育馆和国内外其它一些例子的实践效果来看,这一设计思路是起到了预期作用的。

为1996年哈尔滨冬季亚运会修建的黑龙江省速滑馆,用以覆盖400m速滑跑道,主体结构采用由中央圆柱面壳和两端半球壳组成的双层网壳方案(图4)。其轮廓尺寸达86.2m×191.2m,迄今是国内覆盖面积最大的网壳结构<sup>[4]</sup>。该巨大网壳用钢量仅为50kg/m<sup>2</sup>,安装时间只有115d。

以上介绍的几个空间结构创作均代表当时的先进技术和结构形式上的新颖构思。对它们的结构性能和受力特点,也都经过了一个摸索和优化的过

程。对于某些结构形式(例如吉林滑冰馆的预应力双层索系)还专门进行了计算理论的推导。因此,工程建成以后都得到了工程界的正面评价。但应该指出,结构形式的创新决不是追求外形上的新奇。它应当符合几个基本要求:a.新颖的结构形式与建筑功能要求的和谐统一;b.优美的结构形体与合理的受力性能之间的协调一致;c.与建筑技术(包括构造、材料、施工安装技术等)的发展方向一致。符合这些基本要求的工程创造才具有生命力,才能在大跨空间结构的发展过程中起到某种典型作用。

膜结构是一种富有生命力的轻型张力结构,自80年代以来在发达国家获得极大发展。在我国,膜结构长期处于艰难起步阶段,但近三四年逐渐呈现出活泼的势头。为促进这一发展进程,在威海体育场看台挑篷的设计中采用了全张拉式的膜结构方案(图5)。整个挑篷由连成一体的34个伞形单元组成,每个单元由中央桅杆撑起,外缘固定在看台梁的后端,内缘则张紧在巨大的内环上。这一膜结构工程预计在2001年安装完成,建成以后将是我国第一个全张拉式的膜结构。



图4 黑龙江省速滑馆大跨网壳结构概貌

Fig.4 Overall view of the latticed shell for Harbin Speed-skating Rink

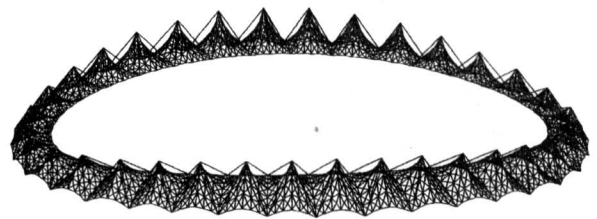


图5 威海体育场看台挑篷膜结构概貌

Fig.5 Overall view of the membrane structure for Weihai Stadium

最近,国内某投资企业拟在哈尔滨建造一个室内海滨浴场,规模相当宏大,其平面尺度可能达到300 m。对于这一“世界级”的大跨空间结构,采用超大跨度椭球体网壳配以半透明薄膜屋面的结构方案(图6),使其内部空间浩远宽广,外形简洁大方,浑然一体,且国内外并无先例,建成以后有标志性意义;并为其试取名为“北国明珠”。目前,这一工程项目还处于初期论证阶段,本文在这里提到它,仅仅是为了说明技术创新在大跨空间结构领域的巨大可能性。显然,要完成这一创造性的工程项目,有许多理论问题和实践问题还需要深入研究、解决。

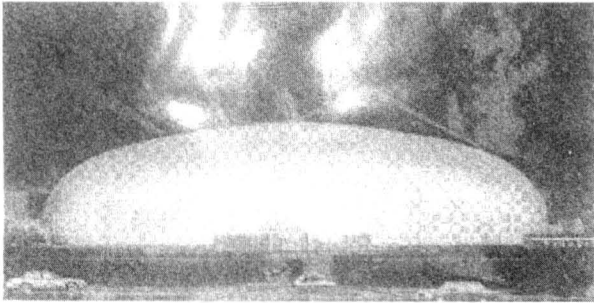


图6 超大跨度空间结构“北国明珠”示意

Fig.6 Overall view of a designed huge spatial structure

### 3 关键理论问题研究

#### 3.1 悬索体系的解析理论

空间结构的应用是同相应的理论研究同步发展的。早期的理论研究工作偏重于以连续化理论为基础的各种解析方法的研究。在计算机广泛应用于结构计算以前,各种解析分析方法曾对空间结构的发展起着重要作用。其实,解析方法较之计算机方法能更为直观地反映结构的受力概念,而且对某些形式的悬索体系来说,解析方法已完全可以提供较完整而准确的计算结果。例如,吉林滑冰馆双层索系的分析是按解析公式由手算完成的。所以,这类解析方法即使在今天仍然有意义。

笔者在探索各种悬索结构形式时,也致力于它们的解析分析方法的研究,涉及预应力双层索系、劲性悬索、预应力索拱体系,以抛物线拱为边缘构件的预应力索网等多种悬索体系(图7)。这些悬索体系的分析方法有一定共性,即在建立平衡方程

时均需考虑大位移,按几何非线性问题求解,而在建立变形协调方程时均需考虑杆件的拉伸变形。下面以预应力索拱体系为例,列出其基本微分方程(参看图7c):

$$H_1 \frac{d^2(z_1 + w)}{dx^2} + H_2 \frac{d^2(z_2 + w)}{dx^2} + \frac{d^2 M}{dx^2} + q(x) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{M - M_0}{E_2 I}, \quad (2)$$

$$\frac{H_1 - H_{10}}{E_1 A_1} l = \int_l \left[ \frac{dz_1}{dx} \cdot \frac{dw}{dx} + \frac{1}{2} \left( \frac{dw}{dx} \right)^2 \right] dx + u_{1r} - u_{1l} - a \Delta t \cdot l, \quad (3)$$

$$\frac{H_2 - H_{20}}{E_2 A_2} l = \int_l \left[ \frac{dz_2}{dx} \cdot \frac{dw}{dx} + \frac{1}{2} \left( \frac{dw}{dx} \right)^2 \right] dx + u_{2r} - u_{2l} - a \Delta t \cdot l \quad (4)$$

式(1)为体系的平衡方程,式(3)为索的变形协调方程,式(2)和(4)分别为拱的曲率和长度的变形协调方程。下标1,2分别指索和拱,下标0指预应力状态。由上述4个方程可解出 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $w(x)$ 和 $M(x)$ 4个未知量。

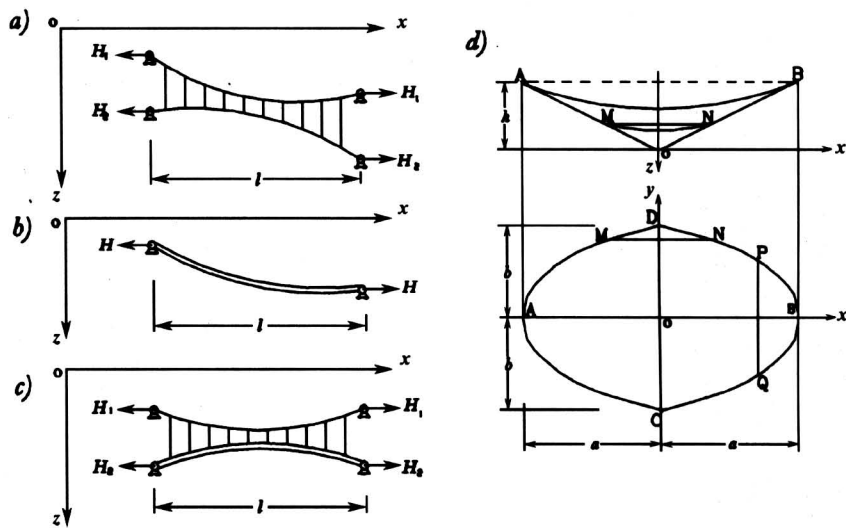
对其它悬索体系也可列出类似的微分方程组。

针对不同的悬索体系,结合具体荷载条件和边界条件求解相应的联立方程组,可得到各悬索体系的内力和位移的解析算式。具体求解过程可参阅文献[5]。最后导出的解析算式不复杂,可进行手算,或编制小程序由计算机计算,均无困难。

#### 3.2 单层网壳的稳定性

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。网壳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。当考察初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(图8)。

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并非易事。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



a—预应力双层索系 b—弹性悬索 c—预应力索拱体系 d—以抛物线拱为边缘的预应力索网

图7 各种悬索体系的计算简图

Fig.7 Calculation schemes for different cable systems

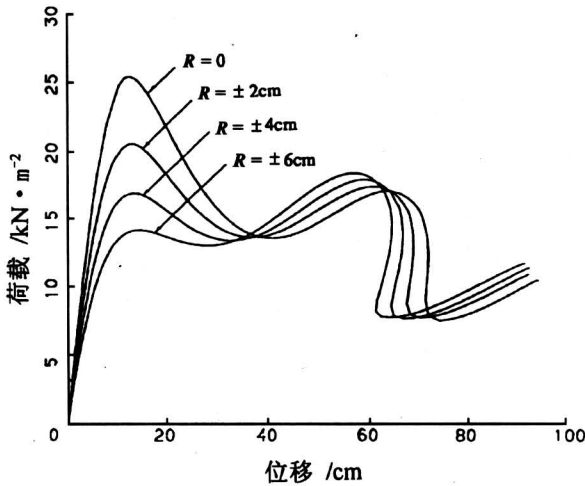


图8 球面网壳的荷载-位移全过程曲线

Fig.8 Load-displacement curves for a latticed dome

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，并与可能的计算结果相互印证。

随着计算机的广泛应用，非线性有限元分析方法逐渐成为结构稳定性分析的有力工具。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。笔者的研究梯队在总结国外已取得成果的基础上，在理论表达式的精确化、平衡路径跟踪计算方法的合理选择、以及灵活的迭代策略等方面进行了仔细探索，使具有大量自由度的复杂结构体系的全过程分析顺利实现；同时，提出用“一致缺陷模态法”（即认为初始缺陷按最低阶屈曲模态分布时可能具有最不利影响）研究初始缺陷对网壳稳定性的影响。

在上述理论成果的基础上，采用大规模参数分析的方法，进行了网壳稳定性实用分析方法的研究。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，对所得结果进行分析、统计和归纳，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。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。这些公式已列入即将颁发的“网壳结构技术规程”。

这一工作的详细内容可参阅文献 [6]。下面仅提供给“规程”的关于各类单层网壳稳定性容许承

载力（标准值） $[n_{ks}]$  ( $\text{kN}/\text{m}^2$ ) 的计算公式作一简要归纳：

1) 单层球面网壳：

$$[n_{ks}] = 0.21 \frac{\sqrt{B_{\text{eqv}} D_{\text{eqv}}}}{r^2} \quad (5)$$

式中： $B_{\text{eqv}}$  为网壳的等效薄膜刚度 ( $\text{kN}/\text{m}$ )； $D_{\text{eqv}}$  为网壳的等效抗弯刚度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )； $r$  为球面的曲率半径 ( $\text{m}$ )。

2) 单层椭圆抛物面网壳，四边铰支在刚性横隔上：

$$[n_{ks}] = 0.24 \frac{\sqrt{B_{\text{eqv}} D_{\text{eqv}}}}{r_1 r_2} \quad (6)$$

式中： $r_1, r_2$  为椭圆抛物面网壳两个方向的主曲率半径 ( $\text{m}$ )。

3) 单层圆柱面网壳：

a. 当网壳为四边支承，即两纵边固定铰支（或固结），而两端铰支在刚性横隔上时，

$$[n_{ks}] = 14.4 \frac{D_{11}}{r^3 (L/B)^3} + 3.9 \times 10^{-5} \frac{B_{22}}{r(L/B)} + 15.0 \frac{D_{22}}{(r+3f)B^2} \quad (7)$$

式中： $D_{11}$ 、 $D_{22}$  为分别为圆柱面网壳纵向（零曲率方向）和横向（圆弧方向）的等效抗弯刚度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )； $B_{22}$  为圆柱面网壳横向等效薄膜刚度 ( $\text{kN}/\text{m}$ )； $L$ 、 $B$ 、 $f$ 、 $r$  为分别为圆柱面网壳的长度、宽度、矢高和曲率半径 ( $\text{m}$ )。

b. 当网壳仅沿两纵边支承时，

$$[n_{ks}] = 15.0 \frac{D_{22}}{(r+3f)B^2} \quad (8)$$

c. 当网壳为两端支承时，

$$[n_{ks}] = 0.013 \frac{\sqrt{B_{11} D_{11}}}{r^2 \sqrt{L/B}} + 0.028 \frac{\sqrt{B_{22} D_{22}}}{r^2 (L/B)} + 0.017 \frac{\sqrt{I_h I_v}}{r^2 \sqrt{Lr}} \quad (9)$$

$$\xi = 0.96 + 0.16(1.8 - L/B)^4.$$

式中： $B_{11}$  为圆柱面网壳纵向等效薄膜刚度； $I_h$ 、 $I_v$  为边梁水平方向和竖向的线刚度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )。

某些形式的网壳尚应考虑荷载不对称分布的影响，“规程”中将有具体规定，此处不详列。

### 3.3 网壳结构的抗震性能及振动控制

随着网壳尺度的增大，深入研究其抗地震性能可能具有重要意义。在抗震领域，国内外对多层、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响应有贡献，因而一般的振型分解法是否适用是一个值得探讨的问题；不同方向（包括竖向）的地震作用引起的响应往往是同量级的，因此考虑多维输入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的空间相关性；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？对于某些动力响应过大的网壳结构，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。

笔者的研究梯队从弹塑性时程分析入手研究网壳结构的抗震性能，并考虑了多维输入；进行了单层球面网壳模型的模拟地震振动台试验，以验证理论推导及所编制的有限元分析程序的正确性。在此基础上对各种类型网壳进行了大规模的参数分析，试图获取关于网壳抗震性能的某些规律性的认识。与此同时，也采用振型分解反应谱法进行平行的运算，与弹塑性时程分析的结果进行对照。

这项研究工作还在继续进行，其最终目的是试图对网壳结构的抗震设计提出一些切实有据的建议。

关于网壳结构振动控制的研究目前几乎是空白。网壳结构在一般情况下，尤其在静力条件下具有较大刚度，但当跨度增大时，在特定地震作用下可能产生过大响应，因而首次探讨了应用调频质量阻尼器（TMD）和粘滞阻尼器对网壳结构进行振动控制的可能性。

对网壳结构 TMD 振动控制进行了较系统的理论研究<sup>[7]</sup>。鉴于网壳结构的振型分布比较密集，而且有较多振型对结构响应产生影响，因而网壳结构更适宜采用 MTMD 系统。建立了多自由度体系 MTMD 减震系统的随机振动数值计算模型，采用传递函数算法及非线性数学规划方法确定其最优控制参数，并针对单层的球面网壳、柱面网壳和鞍形网壳进行了系统的算例分析。得出的主要结论是：网壳自重不大，采用 MTMD 系统时，单个 TMD 的质量不大，也易于安装；由于采用多个 TMD，系统的减振效果对调谐频率和阻尼的偏离不会过于敏感；对刚度较差的网壳 MTMD 的减振效果好

(25%~40%);对刚度好的网壳,MTMD系统不能起减振作用,有时甚至起放大作用;由于网壳结构振型密集和振型之间的耦合作用,MTMD参数优化的计算量十分浩大,应进行合理算法的研究。

对网壳结构-粘滞阻尼器减振系统则采用时程分析方法进行了较系统的理论研究,并针对球面网壳模型进行了振动台试验验证<sup>[8]</sup>。这些研究表明,粘滞阻尼器用于网壳结构减振比较有效,而且粘滞阻尼器的安装较简单,也不太影响网壳的外观。对模型试验结果的频谱响应分析表明,受控网壳结构的频率没有发生变化,说明粘滞阻尼器仅对结构提供阻尼,而不提供额外刚度,这与这种阻尼器的理论假设是一致的。

### 3.4 大跨柔性屋盖的风振响应

索结构、膜结构等柔性体系自振频率低,是风敏感性结构,因而研究这类结构在风作用下的动力响应具有重要意义。在膜结构设计中,风是起决定性作用的外荷载。

对于不同的柔性屋盖体系,其风振特性也有差别。采用传统刚性屋面的悬索结构具有较好的整体工作性能(局部变形较小),结构的整体位移对空气流场的影响不大。这类结构在脉动风作用下的振动一般属于限幅随机振动。针对这类结构体系自振频率密集和振型相互耦合的特点,提出了一种随机振动的数值分析方法<sup>[9]</sup>,并对椭圆形和菱形平面的索网结构进行了大规模的参数分析。进行了若干个气弹模型的风洞试验,与理论分析结果相互对照。从实用目的出发,提出了非线性体系的广义风振系数的概念,并根据参数分析结果给出了这些系数的设计值<sup>[9]</sup>。

与上述悬索结构比较,膜结构和索-膜结构的风振具有不同特点。膜既是受力构件又是覆面材料,质轻而薄,局部刚度很小,在风作用下局部膜单元的速度和加速度响应较大,可能对周围流场产生影响,导致较明显的气弹反应和可能的动力失稳现象。研究这一问题在理论上有较大难度,因而风洞试验一直被认为是主要的研究方法。我们曾进行过具有不同参数的鞍形和伞形膜结构共7个气弹模型的风洞试验。但风洞试验也有其局限性,在缩尺实验中某些相似参数的模拟和某些物理量的精确观测均非易事。也提出了一种以风速曲线的人工模拟为基础的非线性随机振动时域分析方法<sup>[10]</sup>,而且在运动方程中考虑了结构振动速度对风压的修正:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = p(t) \quad (10)$$

式中  $p(t)$  为作用在结构上的风压,由下式表示:

$$p(t) = \frac{1}{2} C_p \rho A [v(t) - \dot{u}(t)]^2 \quad (11)$$

式(11)右端方括号中用结构振动速度  $\dot{u}(t)$  来修正风速  $v(t)$ ,即风压  $p(t)$  是根据空气与结构之间的相对速度来计算的。这实际上是部分地考虑了风与结构的耦合作用。大量计算实例表明,上述计算方法能较好地反映薄膜结构的风致动力响应,与风洞试验的结果也比较吻合,但这类随机振动分析方法都是建立在来流已知的基础之上的,它们无法考虑由于结构振动引起的局部流场的变化,即实际上无法考虑真正的流固耦合作用。此外,薄膜结构的形状比较复杂,其周围流场变化多端,边界层分离后的尾端形成机理与研究得较多的平板型结构也有较大差异,一些关键参数无法通过理论分析或类比已有经验结果得到。因此,借鉴桥梁、飞机等其它学科领域的风振研究经验,认为发展相应的流体力学研究手段,开发适用于膜结构风工程领域的数值风洞,以便对结构响应与周围流场的变化作出更准确的描述,并对各种可能的气弹失稳现象进行探索,是一种有前途的研究方法并正在开展这方面的研究。

### 参考文献

- [1] 沈世钊,徐崇宝.吉林速滑馆预应力双层悬索屋盖[J].建筑结构学报,1986,7(6):1~12
- [2] 沈世钊,顾年生.亚运会石景山体育馆组合双曲抛物面网壳屋盖结构[J].建筑结构学报,1990,11(1):21~29
- [3] 沈世钊,蒋兆基.亚运会朝阳体育馆组合索网屋盖结构[J].建筑结构学报,1990,11(3):1~9
- [4] 沈世钊,徐崇宝,陈昕.哈尔滨速滑馆巨型网壳结构[J].建筑结构学报,1995,16(6):16~20
- [5] 沈世钊,徐崇宝,赵臣.悬索结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1997
- [6] 沈世钊,陈昕.网壳结构稳定性[M].北京:科学出版社,1999
- [7] 叶继红,沈世钊.TMD减振系统在网壳结构中的应用[J].哈尔滨建筑大学学报,2000,33(4)
- [8] 范峰,沈世钊.网壳结构的粘滞阻尼减振分析与实验研究[J].地震工程与工程振动.2000,20(1):105~111
- [9] Shen Shizhao, Yang Qingshan. Wind-induced response analysis and wind-resistant design of hyperbol-

ic paraboloid cadle net structures [J]. International J of Space Structures, 1999, 14 (1): 57~65

[10] 向阳, 沈世钊, 李君. 薄膜结构的风振响应分析 [J]. 建筑结构学报, 1999, 20 (6): 38~46

## Theoretical Study and Engineering Practice of Long-Span Spatial Structures

Shen Shizhao

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

[Abstract] The development of long-span spatial structures is characterized by the continual innovation of structural forms and the prompt support of theoretical studies. Several unconventional spatial structures designed by the author are introduced in this article as examples to demonstrate the efforts of Chinese engineers to create innovative structural forms in the recent two decades. Some theoretical studies by the author including the analytic theory of cable-suspended structures, the stability of reticulated shells, the seismic behavior and vibration control of reticulated shells, as well as the wind-induced response analysis of cable structures are also presented.

[Key words] spatial structures; reticulated shells; cable-suspended structures; membrane structures; structural stability; seismic response analysis; wind-induced response analysis

### 《中国工程科学》2001 年第 3 卷第 4 期要目预告

浦东国际机场东移与九段沙生态工程 ..... 陈吉余等

我国综采放顶煤技术及其展望 ..... 赵经彻

全球化与中国制造业 ..... 郭重庆

我国水利和水电可持续发展新途径 ..... 曹楚生

关于环境地质学若干基本问题探讨 ..... 刘广润

过程神经网络的训练及其应用 ..... 何新贵等

复杂并流多效蒸发系统的数学模型与矩阵解法 ... .. 阮奇等

黄淮海平原浅层地下水中 NO<sub>3</sub> - N 含量的空间变异与分布特征 ..... 李保国等

板带轧制工艺控制理论概要 ..... 张进之

扫描格式转换的自适应帧频提升算法及其 FPGA 实现 ..... 吴勇等

生物质快速热解液化技术 ..... 姚福生等

汽轮机间隙气流激振力分析 ..... 柴山等

油压极值比与极值比效率 ..... 齐茂林

大破碎比颚式破碎机及对破碎工艺流程的变革 ... .. 饶绮麟

砼非标准三点弯曲梁试件双 K 断裂参数 ..... 吴智敏等