

文章编号: 1000-4750(2011)10-0124-09

# 预应力双层柱面网壳的风振响应与整体风振系数研究

\*周 臻<sup>1,2</sup>, 孟少平<sup>1,2</sup>, 吴 京<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏, 南京 210096; 2. 东南大学城市工程科学国际研究中心, 江苏, 南京 210096)

**摘 要:** 基于时域分析方法对预应力双层柱面网壳结构的风振响应进行研究, 采用 Welch 谱分析法对谐波叠加法与线性滤波技术(AR 法)模拟得到的脉动风速时程进行功率谱精度评价; 分析了预应力双层柱面网壳的矢跨比、跨度、厚度、长宽比、支座弹性刚度、预应力取值等结构参数对结构风振响应的影响, 结果表明: 网壳的矢跨比、跨度、长宽比是影响预应力双层柱面网壳结构风振响应的主要因素; 预应力拉索有效地减小了结构的脉动风响应, 但由于平均风响应同时也大幅减小, 其位移风振系数仍较普通网壳结构大。基于包络的概念, 采用以最大动响应和最大平均风响应为控制指标的整体风振系数计算方法, 研究了常见设计参数情况的预应力双层柱面网壳结构整体风振系数, 可为预应力双层柱面网壳的抗风设计提供实用方法。

**关键词:** 双层柱面网壳; 风振响应; 时域分析; 风振系数; 预应力

**中图分类号:** TU312.1; TU394 **文献标志码:** A

## THE WIND-INDUCED RESPONSE AND GLOBAL WIND VIBRATION COEFFICIENT OF PRESTRESSED DOUBLE-LAYER CYLINDRICAL RETICULATED SHELLS

\*ZHOU Zhen<sup>1,2</sup>, MENG Shao-ping<sup>1,2</sup>, WU Jing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Concrete &amp; Prestressed Concrete Structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. International Institute for Urban Systems Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** The wind-induced response of prestressed double-layer cylindrical reticulated shells is researched based on the time-domain analytical method. The Welch spectrum analysis method is presented to evaluate the power spectrum accuracy of the fluctuating wind speed time-history simulated by the harmony superposition method and linear filter technique (AR method). The influence of structural design parameters on the wind-induced response is investigated, including rise-span-ratio, span, thickness, length-width-ratio and the elastic support stiffness of the structure. Results show that the rise-span-ratio, span and length-width-ratio are the main factors influencing the structural wind-induced response. The existing of prestressed cable efficiently reduces the fluctuating wind induced response of the structure, while the displacement wind vibration coefficient is still greater than that of common non-prestressed reticulated shells since the average wind induced response is also reduced greatly. The global wind vibration coefficient method is introduced based on the envelope concept, which takes the maximum structural vibration response and maximum average wind induced response as controlled indexes. In the end, the global wind vibration coefficients of prestressed double-layer cylindrical reticulated shells

收稿日期: 2010-01-26; 修改日期: 2010-04-27

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK2010428); 教育部博士点新教师基金项目(20090092120017)

作者简介: \*周 臻(1981—), 男, 江西萍乡人, 副教授, 博士, 主要从事大跨空间结构方面的研究(E-mail: seuhj@163.com);

孟少平(1960—), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士, 主要从事结构工程方面的研究(E-mail: cardoso\_meng@sina.com)

吴 京(1971—), 男, 浙江东阳人, 副教授, 博士, 主要从事结构工程方面的研究(E-mail: wujing@vip.sina.com)

under various design parameters are calculated.

**Key words:** double-layer cylindrical reticulated shells; wind-induced response; time-domain analysis; wind vibration coefficient; prestressing

预应力网壳结构是将现代预应力技术引入空间网壳结构形成的空间结构体系。通过在网壳结构中增设拉索并施加预应力，能够改善空间网壳结构的受力状态，降低结构内力峰值，增大结构刚度，减小结构挠度<sup>[1-2]</sup>。其中，预应力双层柱面网壳结构是一种常用的结构形式，广泛应用于会展中心、候车厅、体育馆等公共建筑。近年来，国内对该类结构体系开展了较多的研究，其研究涉及到结构的计算分析方法、优化设计理论等，但针对预应力柱面网壳结构的风致振动方面的研究却相对比较薄弱。罗尧治、张浩<sup>[3]</sup>通过风洞试验，对一例弦弓式预应力柱面网壳结构进行了风致效应研究，但其研究仅针对具体工程实例进行。

目前，大跨空间结构的风振响应分析方法可分为频域分析方法和时域分析方法两大类。频域法物理概念清晰，计算效率高，但存在模态截断的问题，其精度受到一定影响，而时域法则能考虑结构的几何非线性与材料非线性的影响，且不存在模态截断的问题<sup>[4-5]</sup>。本文基于时域分析方法对预应力双层柱面网壳结构的风振响应进行研究，采用 Welch 谱分析法对谐波叠加法与线性滤波技术(AR 法)模拟得到的风速时程进行功率谱精度评价。基于模拟的风速时程，对不同设计参数的预应力双层柱面网壳结构进行风振响应分析，在总结其规律的基础上，研究了预应力双层柱面网壳结构整体风振系数的计算方法及其有效性，给出了常见设计参数情况的整体风振系数，可为实际工程结构的抗风设计提供实用方法。

## 1 结构分析模型与风振响应分析方法

### 1.1 预应力双层柱面网壳分析模型

图 1 给出了典型的正放四角锥型预应力双层柱面网壳，纵向支座间设置横向预应力水平拉索，水平风荷载沿  $x$  轴方向作用，为使预应力发挥作用，两纵边  $x$  向为弹性约束( $k$ )，其余两个方向为固定链杆，横向两端不约束。为便于分析对照，选取一个基本算例模型，然后依次变更相应的设计参数，获得一系列的数值计算模型，以进行大规模的风振响应数值分析。

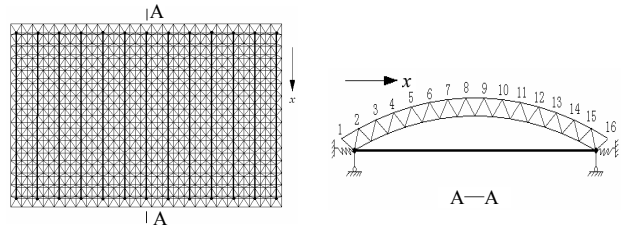


图 1 预应力双层柱面网壳分析模型

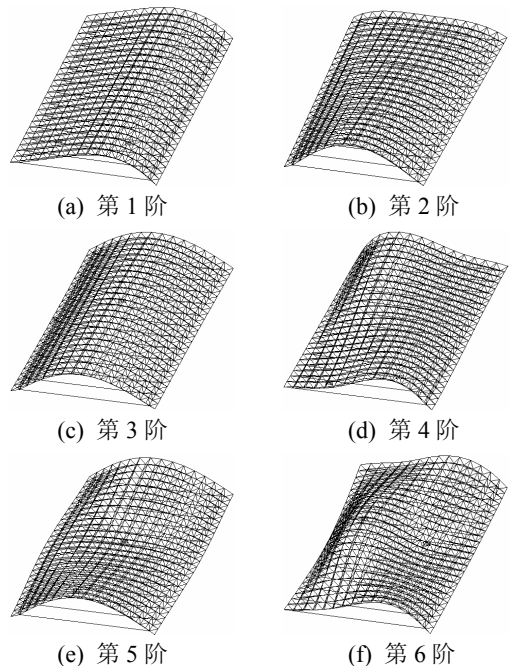
Fig.1 Model of prestressed double-layer cylindrical shells

基本算例参数取值如下：跨度( $L$ )取为 50m，矢跨比( $f/L$ )为 1/6，矢高 8.3m，网壳厚度( $t$ )取为 1.7m，长宽比( $b/L$ )取为 1.5，长度( $b$ )为 75m，杆件截面采用满应力设计法确定，结构阻尼比为 0.02，屋面附加均布荷载为  $0.5\text{kN/mm}^2$ ，所有节点均假设为铰接，拉索截面积为  $687\text{mm}^2$ ，并施加 400kN 的预应力，支座弹簧刚度( $k$ )设为  $2000\text{kN/m}$ ，支座高度为 10m，结构处于 B 类场地，10m 高程基本风速为  $30\text{m/s}$ ，假定结构的风振响应满足准定常理论，风荷载体型系数则参照我国《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001)确定<sup>[6]</sup>。表 1 和图 2 分别给出了基本算例模型的前 10 阶自振频率和模态。

表 1 基本算例前 10 阶自振频率 /Hz

Table 1 The first 10 frequencies of basic example

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率	1.840	2.716	2.727	3.352	3.572	3.837	3.988	4.509	4.649	4.857



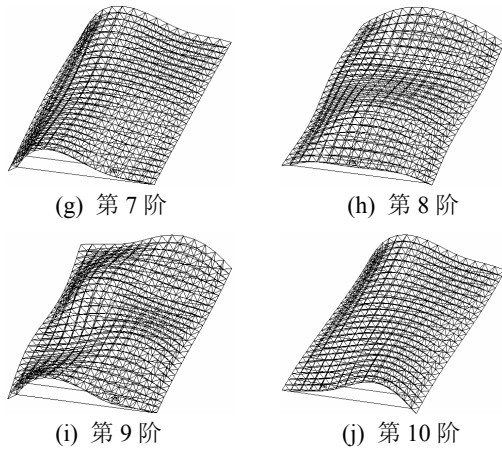


图2 基本算例模型的前10阶模态  
Fig.2 The first 10 modes of basic example

## 1.2 风振响应分析方法

对于具有  $n$  个自由度的理想预应力网壳结构, 在进行风振响应分析时, 其结构动力有限元基本方程一般可表示为:

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t) + C\dot{\mathbf{u}}(t) + K\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式中:  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别是结构的总体质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, 均为  $n \times n$  阶正定方阵;  $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{u}}(t)$ 、 $\mathbf{u}(t)$  分别是结构节点的加速度、速度和位移向量( $n \times 1$  阶);  $\mathbf{F}(t)$  则是作用在结构上的脉动风荷载向量( $n \times 1$  阶), 由下式求得:

$$F_i(t) = \bar{F}_i + \tilde{F}_i(t) \quad (2)$$

式中:  $\bar{F}_i$  为  $i$  节点处的平均风荷载, 且  $\bar{F}_i = \mu_{zi}\mu_{si}A_iw_0$ ;  $\tilde{F}_i(t)$  为  $i$  节点处的脉动风荷载, 且  $\tilde{F}_i(t) = 2\bar{F}_i\tilde{v}_i(t)/\bar{v}_i$ 。 $\mu_{zi}$  为节点  $i$  所在位置的风压高度变化系数;  $w_0$  为基本风压; 平均风速  $\bar{v}_i$  可根据指数律求得; 脉动风速  $\tilde{v}_i(t)$  是一个随机过程, 可采用随机过程模拟技术得到满足特定频谱要求和空间相关性要求的时间序列。

对于式(1)的求解, 应分为两部分考虑。平均风荷载具有较长的周期, 相当于静力的作用, 故可根据静力有限元方法求解; 脉动风荷载则必须考虑为动力作用, 本文采用 Newmark 时程分析法进行结构风振响应的计算, 阻尼矩阵采用 Rayleigh 阻尼, 阻尼系数根据结构的前两阶频率确定<sup>[5]</sup>。需要指出的是, 本文计算结构位移时的参考构型为结构自重和预应力共同作用下的平衡状态, 即: 静风响应和脉动风响应均为扣除了平衡状态位移的数值。

目前对于结构风振响应特征的描述主要采用位移风振系数  $\beta_d$ , 在预应力网壳结构, 任意节点的位移风振系数  $\beta_{di}$  可用公式表示如下:

$$\beta_{di} = 1 + \mu \frac{\sigma_{di}}{|\bar{D}_i|} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{di}$  为第  $i$  节点的脉动位移均方差;  $\bar{D}_i$  为该节点的平均风静力位移响应;  $\mu$  为峰值保证因子, 依据我国荷载规范《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001)规定, 本文取为 2.2<sup>[6]</sup>。

## 2 风速时程的模拟与谱分析

常用的风速时程模拟方法包括 Shinozuka 的谐波叠加法与 Iwatani 多随机过程模拟的 AR 方法<sup>[7-9]</sup>。而在脉动风速模拟过程中, 为了评价模拟结果是否合理, 是否具有较高的精度, 需要运用功率谱估计的理论, 得到模拟功率谱, 并与目标功率谱进行比较。经典的谱估计法一般采用快速傅里叶变换 FFT 算法对样本数据进行傅里叶变换得到功率谱, 但存在谱曲线起伏大、或分辨率不高等缺点, 因此现代谱估计提出了相应的改进方法, 最具代表性的为 Bartlett 法和 Welch 法。

Bartlett 法是将  $N$  点的有限长序列  $x(n)$  分段求周期图再平均。设将  $x(n)$  分成  $L$  段, 每段有  $M$  个样本, 因而  $N=LM$ , 第  $i$  段样本序列可写成<sup>[10]</sup>:

$$x^i(n) = x(n + iM - M), \quad 0 \leq n \leq M - 1, \quad 1 \leq i \leq L \quad (4)$$

第  $i$  段的周期图为:

$$\hat{P}_{PER}^i(k) = \frac{1}{M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x^i(n) W_M^{-kn} \right|^2 \quad (5)$$

如果  $m > M$ ,  $\hat{R}_x(m)$  很小, 则可假定各段的周期图是相互独立的, 则谱估计可定义为  $L$  段周期图的平均, 即:

$$\hat{P}_{PER}(k) = \frac{1}{L} \sum \hat{P}_{PER}^i(k) \quad (6)$$

Welch 法对 Bartlett 法进行了两方面的修正, 一是选择适当的窗函数  $w(x)$ , 并在周期图计算前直接加进去, 这样得到的每一段的周期图为:

$$\hat{P}_{PER}^i(k) = \frac{1}{MU} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x^i(n) w(n) W_M^{-kn} \right|^2 \quad (7)$$

其中  $U = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w^2(n)$  为归一化因子。加窗的优点是

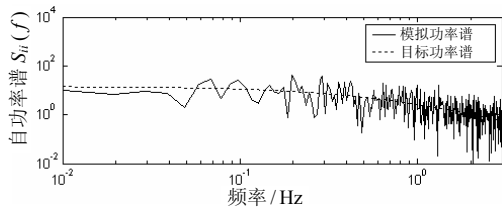
无论何种窗函数均可使谱估计非负; 二是在分段时, 可使各段间有重叠, 这样会使方差减小, 因此 Welch 法得到的功率谱曲线相比 Bartlett 法得到的曲线误差要小。

本文基于 Davenport 风速谱, 分别采用 AR 法与谐波叠加法对基本算例的脉动风速时程进行模

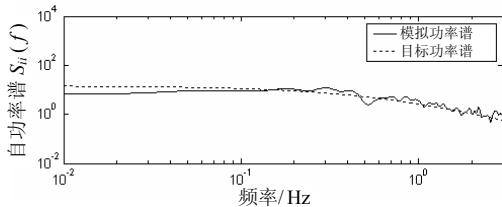
拟, 其中脉动风速空间相干函数采用下式计算:

$$coh(p_i, p_j, n) = \exp \left\{ \frac{-2n[C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2]}{\bar{v}_{pi} + \bar{v}_{pj}} \right\} \quad (8)$$

式中:  $n/\text{Hz}$  为脉动频率, 指数衰减系数  $C_x$ 、 $C_y$  和  $C_z$  需由试验确定, 一般可分别取为 16、8、10<sup>[1]</sup>。然后, 分别采用 Bartlett 法与 Welch 法进行了谱估计, 其相应的对比结果如图 3、图 4 所示。



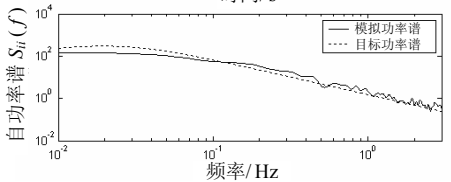
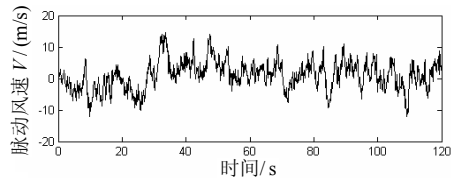
(a) 采用 Bartlett 法的谱分析



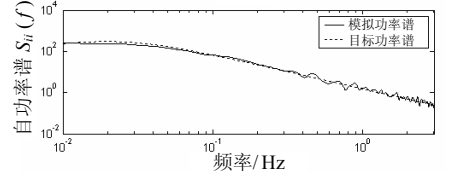
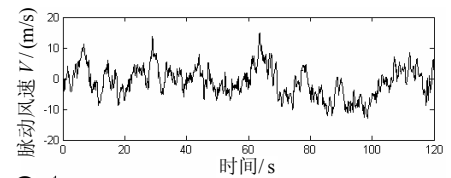
(b) 采用 Welch 法的谱分析

图 3 Bartlett 法与 Welch 法的精度比较

Fig.3 Accuracy comparison of Bartlett and Welch methods



(a) AR 法



(b) 谐波叠加法

图 4 AR 法与谐波叠加法的精度比较

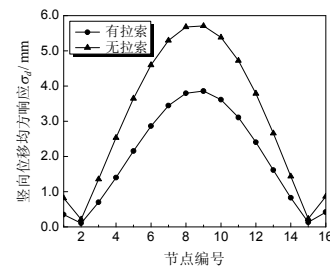
Fig.4 Accuracy comparison of AR and harmony superposition

采用 Welch 法得到的模拟功率谱曲线较 Bartlett 具有更高的精度与稳定性, 因此更适合用于脉动风速时程的谱分析。而从 AR 法与谐波叠加法的模拟结果对比来看, 谐波叠加法精度很高, AR 法精度则相对差一些, 但 AR 法在求解效率上远远高于谐波叠加法。实际上, 采用 AR 法可以大大节省模拟时间, 虽然其精度相对较低, 但事实上用于模拟脉动风速的目标功率谱函数本身就有一定的不确定性, 故从精度上讲, 采用 AR 法模拟也完全可以满足工程要求<sup>[11]</sup>。综合来看, AR 法更适于进行节点数量众多的大规模风速时程模拟计算。因此, 本文在后续数值计算中均采用 AR 法进行风速时程模拟。

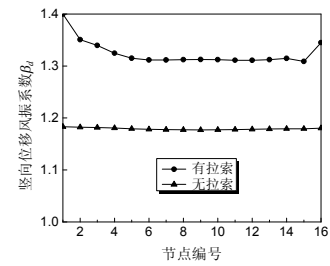
### 3 预应力双层柱面网壳的风振响应分析

#### 3.1 有无拉索对结构风振响应的影响

图 5 给出了有无拉索时 A-A 剖面上弦节点的竖向位移均方响应  $\sigma_d$  及竖向位移风振系数  $\beta_d$ 。由分析结果可看出: 设置拉索后竖向位移均方响应大大减小, 在跨中甚至减小了 30%左右, 这说明预应力水平拉索的设置有效减小了脉动风的响应; 设置拉索后各节点风振系数值均大于设置拉索前对应各节点的风振系数值, 设置拉索前均在 1.18 左右, 而设置拉索后, 大部分节点的风振系数增大到 1.31 左右, 表明设置拉索的预应力网壳结构的平



(a)



(b)

图 5 有无拉索时 A-A 剖面上弦节点  $\sigma_d$  及  $\beta_d$

Fig.5  $\sigma_d$  and  $\beta_d$  of top chord joints in A-A section with/without cables

均风位移响应  $\bar{D}$  较同等约束条件下的双层柱面网壳更小。

### 3.2 预应力大小的影响分析

图 6 给出了预应力大小分别为 200kN、400kN 和 600kN 时上弦节点的竖向位移均方响应  $\sigma_d$  及竖向位移风振系数  $\beta_d$ 。从图 6 中可看出, 预应力大小对结构的风振响应几乎没有影响。这与文献[8]基于频域法得出的结论是一致的。事实上, 参照文献[8]的观点, 预应力双层柱面网壳的几何非线性一般较弱, 与其内力(包括预应力)相关的几何刚度对结构整体刚度的影响非常小, 从而使得预应力大小的影响很小。

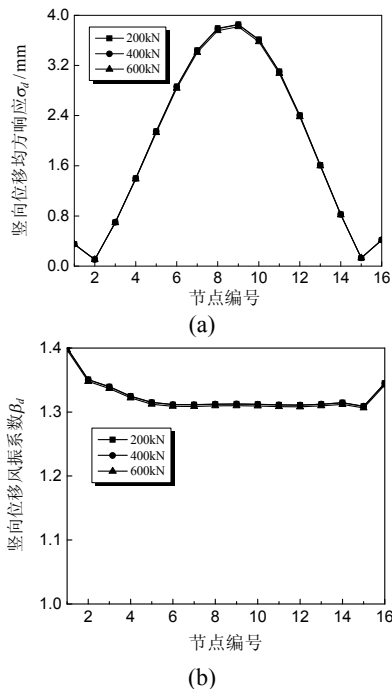


图 6 不同预应力下 A-A 剖面上弦节点  $\sigma_d$  及  $\beta_d$   
Fig.6  $\sigma_d$  and  $\beta_d$  of top chord joints in A-A section with different prestress value

### 3.3 矢跨比对结构风振响应的影响

图 7 给出了矢跨比分别为 1/4、1/5、1/6、1/7 时上弦节点竖向位移风振响应比较。随着矢跨比的变化, 脉动风作用下节点的竖向位移均方响应变化

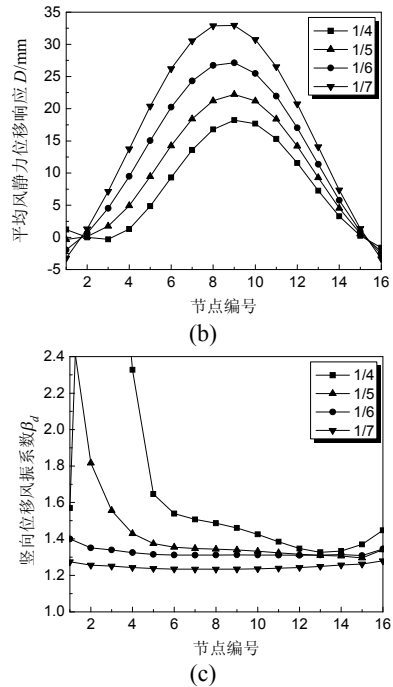
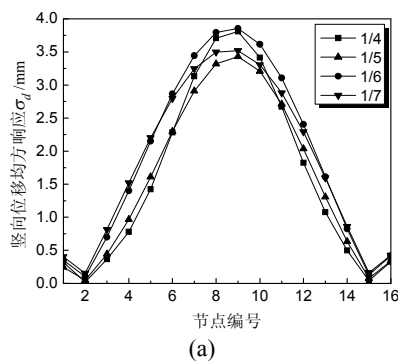
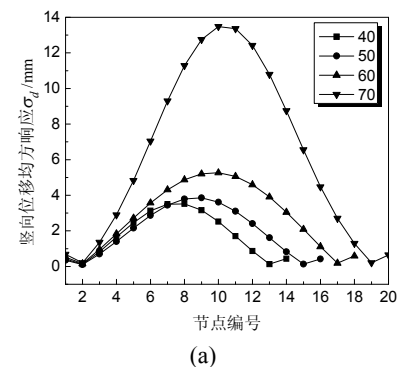


图 7 不同矢跨比时的结构竖向位移风振响应  
Fig.7 Vertical displacement response of structures with different vector-span ratio

规律不明显, 有增有减, 但幅度都不大。而在矢跨比为 1/4 和 1/5 的情况下, 迎风面出现了较多的位移风振系数奇点, 其原因主要在于风压系数分布的不均匀性, 使得结构节点位移曲面为多波曲面, 平均风荷载作用时一些节点的位移值接近于零, 从而导致在这些节点上风振系数特别大, 但由于在这些位置节点的位移值很小, 对结构的振动并不起控制作用。总体来看, 位移风振系数随矢跨比的减小而减小。

### 3.4 跨度对结构风振响应的影响

图 8 给出了跨度分别为 40m、50m、60m、70m 时的上弦节点竖向位移风振响应比较(由于长跨比均为 1.5, 故 4 个算例网壳长度各不相同)。从数值上来看, 40m 跨竖向位移风振系数大部分在 1.4~1.5 之间, 50m 跨时大部分在 1.3~1.4 之间, 60m 跨时大部分在 1.2~1.3 之间, 而在 70m 跨时, 由于在迎风面一侧出现了较多的奇点, 风振系数离散性较大



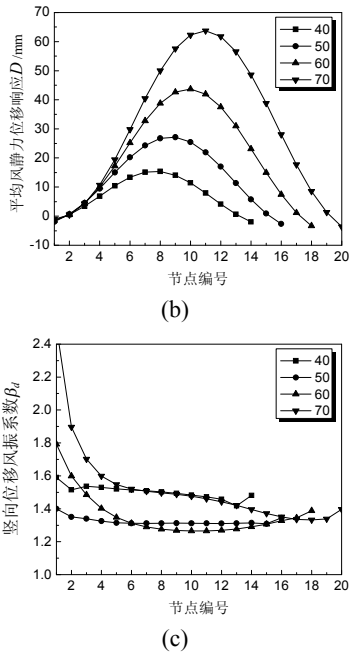


图8 不同跨度时的结构竖向位移风振响应  
Fig.8 Vertical displacement response of structures with different spans

则分布较凌乱，主要是由于此时结构在脉动风作用下的竖向位移均方响应增加较多，表明70m跨时结构的刚度降低的幅度较大。

3.5 网壳厚度对结构风振响应的影响

图9给出了网壳厚度分别为1.5m、1.7m、2.0m与2.2m时的上弦节点竖向位移风振响应比较。随着网壳厚度的增加，结构刚度随之增加，脉动风作用下的竖向位移均方响应值和平均风作用下的竖向位移响应均同步减小，减小的幅度在迎风面和背

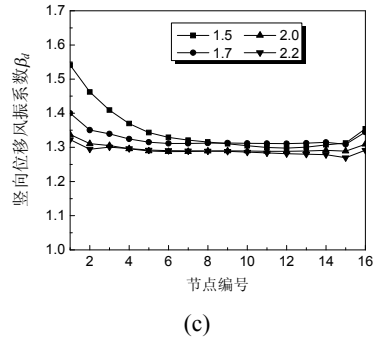
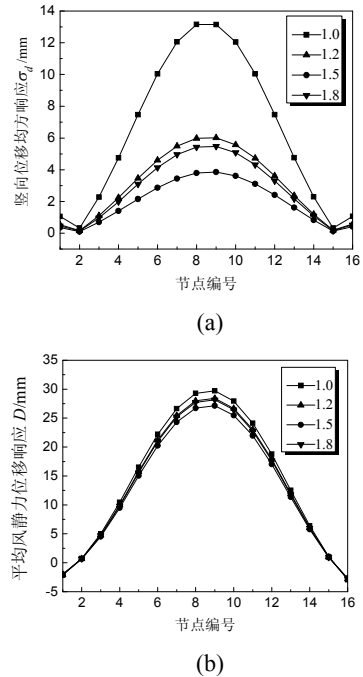
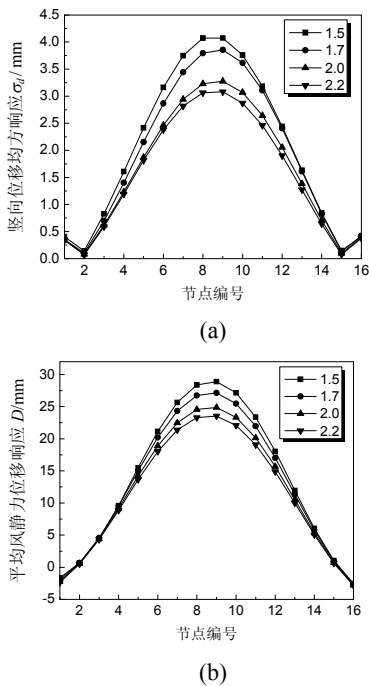


图9 不同网壳厚度时的结构竖向位移风振响应  
Fig.9 Vertical displacement response of structures with different shell thickness

风面较小，但在结构中部则较大，这主要是由于在同一矢跨比下，结构中部风荷载体型系数较大，承担的风荷载较多，因此对结构刚度的改变更敏感。而从风振系数的角度来看，由于在网壳厚度发生改变时，脉动风作用下的竖向位移均方响应值和平均风作用下的竖向位移响应均同步变化，因此表现在结构竖向位移风振系数上，则变化较小。

3.6 长宽比对结构风振响应的影响

图10给出了长宽比为1.0、1.2、1.5、1.8时的上弦节点竖向位移风振响应比较。随着长宽比的增大，脉动风作用下的节点位移均方响应与平均风作用下的节点位移响应变化规律相似，均是先减小，后增加，但脉动风作用下的位移均方响应变化幅度更大，结构中部的竖向位移风振系数亦表现出随长宽比增加而先减小后增加的规律，长宽比为1.5时最小。究其原因，柱面网壳在两端约束情况下的静



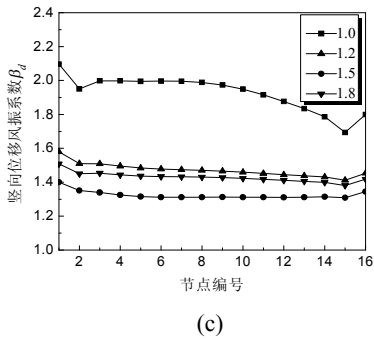


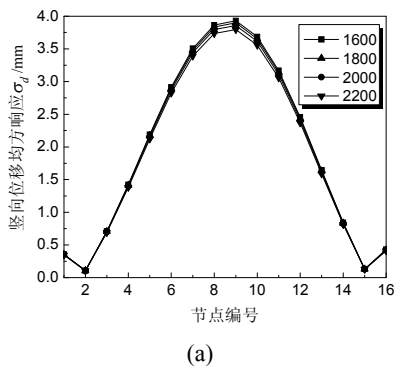
图 10 不同长宽比时的结构竖向位移风振响应

Fig.10 Vertical displacement response of structures with different length-width-ratio

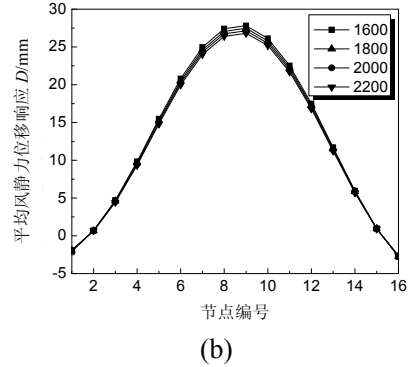
力工作性能接近沿跨度方向的单向受力体系，因此长宽比对平均风静位移响应影响较小；但由于长宽比的增加对脉动风荷载的空间相关性影响较大，同时也对结构的高阶振型存在较大影响，两者叠加使得其对脉动风节点位移均方响应的影响要比平均风大得多。

3.7 支座弹性约束刚度对结构风振响应的影响

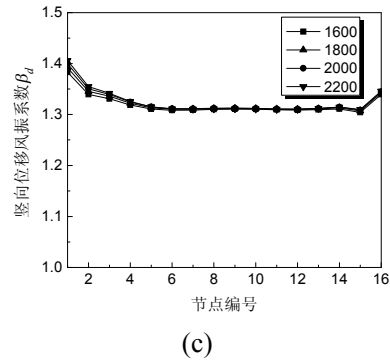
图 11 给出了弹性约束刚度  $k$  分别为 1600kN/m、1800kN/m、2000kN/m 和 2500kN/m 时的上弦节点竖向位移风振响应比较。4 种情况下脉动风作用下的竖向位移均方响应和平均风作用下的竖向位移响应及竖向位移风振系数都改变很小，这也使竖向位移风振系数分布规律非常一致，数值上也相差无几，表明弹簧约束刚度的变化对结构的风振性能影响很小。这主要是由于预应力拉索的存在，释放了大量的支座水平推力，同时弹性约束刚度的数值相对预应力拉索自身刚度的数值要小得多，因此弹性约束刚度的改变对平均风作用下的竖向位移响应影响非常小。同时，由于预应力双层柱面网壳结构自身的水平刚度较强，弹性约束刚度的数值则相对很小，因此水平方向弹性约束刚度的改变对于结构的动力特性影响很小，从而使结构在脉动风作用下的竖向位移均方响应影响也很小。



(a)



(b)



(c)

图 11 不同支座弹性约束刚度时的结构竖向位移风振响应

Fig.11 Vertical displacement response of structures with different support elastic stiffness

4 预应力双层柱面网壳的整体风振系数

从上述分析可知，对于预应力双层柱面网壳结构而言，每一个节点均有相应的位移风振系数，相应的每一根杆件也会有内力风振系数，若对每个节点和杆件均采用不同的风振系数值去设计，显然是不现实的，因此有必要将风振系数的计算结果进行综合，对整个结构选取一个控制的风振系数，在保证安全的前提下体现一定的经济性和方便性。

一个最直观的做法，是直接从计算得到的一系列响应风振系数中选择一个最大值作为结构的整体风振系数，即取整体风振系数。但由于风振系数反映的是一个比值的概念，最大风振系数点往往出现在结构位移(内力)较小处，即风振系数“奇点”，所以选择一个风振系数最大值点显得毫无意义，而要完全剔除这些风振系数奇异点，也往往难有一个标准，所以这种方法过于保守<sup>[12]</sup>。

本文基于文献[12]的整体风振系数概念，引入包络的思想，采用以最大动响应和最大平均风响应为控制指标的整体位移风振系数  $\beta_d^*$  的计算公式如下：

$$\beta_d^* = \frac{\{\beta_{di} \times |\bar{D}_i|\}_{\max}}{\{|\bar{D}_i|\}_{\max}} \quad (9)$$

式中： $\{|\bar{D}_i|\}_{\max}$  和  $\{\beta_{di} \times |\bar{D}_i|\}_{\max}$  分别为平均风荷载作用下的节点位移最大值和总风荷载作用下节点总位移最大值；既包含了节点及单元的最大动响应信息，又避免了对风振系数选取的过分保守，可以准确捕捉到结构的最大总响应，因而是比较合理的，尽管对结构某些部位来说， $\beta_d^*$  可能比实际计算的要小，但由于其相应的总响应和平均风响应较小，对结构的设计不起控制作用，因此并不影响整个结构的安全度<sup>[1]</sup>。

图 12 给出了本文基本算例的整体位移风振系数与节点位移风振系数的分布情况。按式(8)计算得到的结构整体位移风振系数为 1.452，由图 12 可看出，结构平均风位移响应较大的节点对应的位移风振系数绝大多数都在 1.452 附近或以下，既保证了结构的安全度，又避免了结构整体风振系数的盲目取大，在图 12 中也可以更直观地发现平均风作用下位移较小的点形成了一些风振系数奇点，显然这些点是对结构不起控制作用的；另外，通过结构整体风振系数的方法求得的结构位移响应在大部分情况下都较结构实际的位移响应要大，而实际结构的最大位移响应与采用整体风振系数的方法求得的位移响应则是相等的。

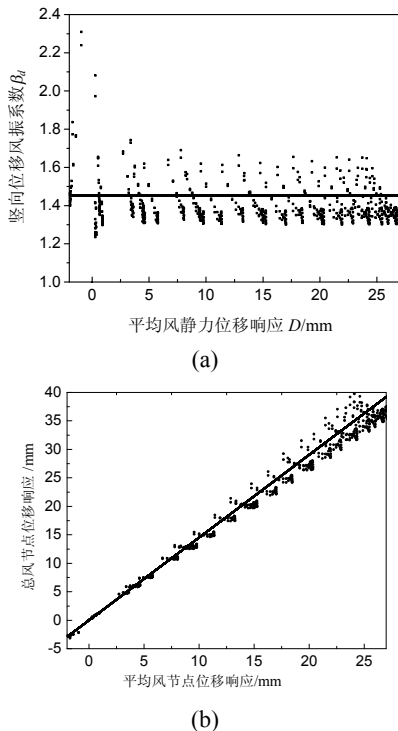


图 12 预应力双层柱面网壳整体位移风振系数(粗直线)  
Fig.12 Global wind vibration coefficient (Bold straight line)

现在取所求得的整体位移风振系数(1.452)，对结构的平均风荷载进行放大，获得结构的等效静风荷载，通过静力分析，即可获得等效静风荷载作用下的结构各单元的内力响应。图 13 给出了 A-A 剖面上弦及下弦单元(单元按从左至右重新进行编号)在两种方法计算下的轴向应力响应，由图 13 可以看出，按本文等效静风计算的总轴向应力响应与结构实际的轴向应力响应相比，在响应较大处相对偏大，在响应较小处则偏小，误差在 6%以内，由此可看出，本文的处理方法对预应力柱面网壳单元的内力而言，不仅具有较好的精度，而且还稍偏安全，证明了整体风振系数概念的合理性。

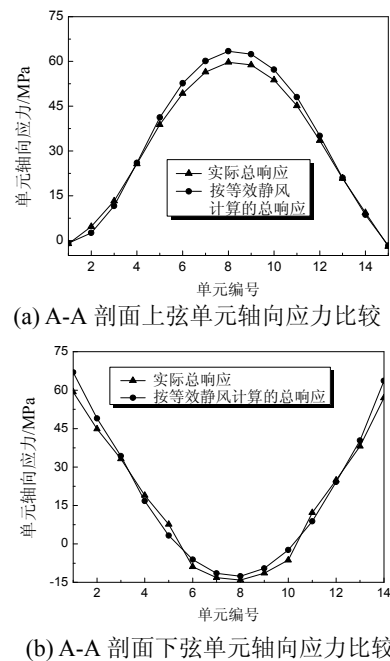


图 13 基本算例 A-A 剖面上下弦单元轴向应力比较  
Fig.13 Axial stress comparison of the top and bottom chord

表 2 给出了不同矢跨比、跨度、长宽比、网壳厚度、支座刚度等结构设计参数下的结构整体风振系数计算结果，可以看到，网壳厚度、支座刚度对

**表 2 结构参数对整体风振系数的影响**  
Table 2 Effect of structural parameters on global wind vibration coefficient

	矢跨比				跨度/m			
	1/4	1/5	1/6	1/7	40	50	60	70
整体风振系数	1.581	1.452	1.452	1.272	1.718	1.452	1.274	1.742
	长宽比				网壳厚度/m			
	1.0	1.2	1.5	1.8	1.5	1.7	2.0	2.2
整体风振系数	2.360	1.887	1.452	1.801	1.462	1.452	1.418	1.410
支座刚度/(kN/m)								
	1600		1800		2000		2200	
整体风振系数	1.458	1.456	1.452	1.448				



整体风振系数的影响很小, 矢跨比、跨度、长宽比则对整体风振系数的影响较大, 这与前面的风振响应分析的结果是一致的。

## 5 结论

(1) 在模拟风速时程的谱估计方法中, 在采用相同的窗函数下, 由于 Welch 法在分段时, 可使各段之间有重叠, 其谱分析曲线要比 Bartlett 法得到的曲线误差小, 更适合于脉动风速时程谱分析。

(2) 预应力双层柱面网壳结构的风振响应分析表明, 由于风压系数分布的不均匀性, 使得结构节点位移曲面为多波曲面, 平均风荷载作用时一些节点的位移值接近于零, 从而导致在这些节点上的位移风振系数出现“奇点”, 但由于在这些位置节点的位移值很小, 对结构的振动并不起控制作用。

(3) 在预应力双层柱面网壳的结构设计参数中, 网壳的矢跨比、跨度、长宽比对结构的风振响应具有较大影响, 而网壳厚度、支座弹性约束刚度对结构的风振响应则较小。另外, 与不设置拉索的普通双层柱面网壳结构相比, 预应力水平拉索有效减小了脉动风的响应, 但由于平均风响应同时也大幅度减小, 其风振系数仍较普通网壳结构大。

(4) 基于包络的概念, 采用以最大动响应和最大平均风响应为控制指标的结构整体风振系数, 能够滤除节点位移风振系数“奇点”的影响, 真实反映预应力双层柱面网壳结构位移风振响应的实际状况, 同时, 利用其求得的结构等效静风荷载进行静力分析, 得到的结构各单元内力响应与实际响应相比具有较高的精度, 且稍偏安全。

### 参考文献:

- [1] 邓华, 丁博涵. 拉索预应力球面网壳的风振性能研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(1): 20—26.  
Deng Hua, Ding Bohan. Study on wind-induced dynamic behaviours of pretensioned spherical latticed shells [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(1): 20—26. (in Chinese)
- [2] 周臻. 预应力空间网格结构的分析理论与优化设计[D]. 南京: 东南大学, 2006.  
Zhou Zhen. Analysis theory and optimization design of prestressed space grid structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [3] 罗尧治, 张浩. 弦弓式预应力柱面网壳结构风洞试验及风致效应研究[J]. 空间结构, 2005, 11(2): 3—8.  
Luo Yaozhi, Zhang Hao. Wind tunnel test and wind-induced response of string-bow prestressed cylindrical latticed shell [J]. Spatial Structures, 2005, 11(2): 3—8. (in Chinese)
- [4] 张建胜, 武岳, 沈世钊. 单层网壳结构风振响应的主要贡献模态识别[J]. 振动工程学报, 2006, 19(4): 452—458.  
Zhang Jiansheng, Wu Yue, Shen Shizhao. Identification of natural modes with significant contributions to wind-induced vibration of single-layer reticulated shell [J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(4): 452—458. (in Chinese)
- [5] 李杰, 倪振华, 谢壮宁. 单层球面网壳风振分析的时域法与频域法比较[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(2): 45—50.  
Li Jie, Ni Zhenhua, Xie Zhuangning. Comparison of wind-induced vibration analysis of single-layer spherical latticed shells between time domain method and frequency domain method [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(2): 45—50. (in Chinese)
- [6] GB 50009-2006, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.  
GB 50009-2006, Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2001. (in Chinese)
- [7] Uematsu Y, Kuribara O, Yamada M, Sasakic A, Hongo T. Wind-induced dynamic behavior and its load estimation of a single-layer latticed dome with a long span [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89: 1671—1687.
- [8] Owen J S. The application of auto-regressive time series modeling for the time-frequency analysis of civil engineering structures [J]. Engineering Structures, 2001, 23: 521—536.
- [9] Massimiliano Lazzari, Saeta Anna V, Vitaliani Renato V. Non-linear dynamic analysis of cable-suspended structures subjected to wind actions [J]. Computers and Structures, 2001, 79: 953—969.
- [10] 胡广书. 数字信号处理—理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
Hu Guangshu. Digital signal process: Theory, algorithm and realization [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [11] 李元齐, 董石麟. 大跨度空间结构风荷载模拟技术研究及程序编制[J]. 空间结构, 2001, 7(3): 3—11.  
Li Yuanqi, Dong Shilin. Random wind load simulation and computer program for large-span spatial structures [J]. Spatial Structures, 2001, 7(3): 3—11. (in Chinese)
- [12] 陈波, 武岳, 沈世钊. 张拉式膜结构抗风设计[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 65—71, 59.  
Chen Bo, Wu Yue, Shen Shizhao. Wind resistant design of tensile membrane structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(7): 65—71, 59. (in Chinese)