

文章编号:1673-2049(2006)01-0001-09

膜结构风振响应中的流固耦合效应研究进展

沈世钊¹, 武岳^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:对膜结构风振响应中的流固耦合效应进行了探讨, 介绍了解决该问题的两种思路: 简化气弹模型方法和计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值模拟方法。简化气弹模型方法是先将流固耦合效应用附加质量和气动阻尼的形式来表达, 再通过某些近似解析理论和气弹模型风洞试验来确定附加质量和气动阻尼的大小。计算流体力学数值模拟方法则是将计算流体力学技术和计算结构力学技术整合在一个有限元程序中, 通过数值模拟得到结构流固耦合响应的全过程信息。基于这两种方法, 开展了相应的理论推导、风洞试验和数值模拟工作, 获得了关于风与膜结构相互作用机理的一些初步认识。最后提出了一种具有操作性的简化数值分析方法并给出了算例。研究表明: 流固耦合效应对结构风振响应的影响在多数情况下是有利的, 即考虑流固耦合效应的风振响应分析结果要比不考虑流固耦合时小 30% 左右, 但也不排除在某些特殊情况下因出现气弹失稳而导致结构异常破坏的可能性。

关键词:张力结构; 风振响应; 流固耦合; 风洞试验; CFD 数值模拟

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A

Research Progress on Fluid-Solid Interaction Effect of Wind-Induced Vibration Response of Membrane Structure

SHEN Shi-zhao¹, WU Yue^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Researches on fluid-solid interaction effect of wind-induced vibration response and membrane structure were discussed. The two methodologies for solving this problem were introduced firstly. The first was a simplified aeroelastic model method. In this method, these additional aerodynamic feedback terms were described as added mass and aerodynamic damping, which could be studied by potential flow theory or wind tunnel test. The second was computational fluid dynamics simulation method. In this method, the computational fluid dynamics codes and computational structural dynamics codes were integrated into one program. Using this program, the process of wind-structure interaction can be simulated in time domain. Based on these two methods, corresponding works were done by means of theoretical derivation, wind tunnel test and numerical simulation. According to these works, some preliminary understandings of the mechanism of wind and membrane structures interaction were gotten. Finally, a simplified numerical simulation method was proposed. It is proved that this method is

收稿日期: 2006-01-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50338010)

作者简介: 沈世钊(1933-), 男, 浙江嘉兴人, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, E-mail: szshen@hit.edu.cn。

easier to handle than those above mentioned methods. It can be concluded that the couple effects are favourable for wind-induced vibration response under most conditions, which mean the results from wind-structure interaction analysis are about 30% smaller than those analysis methods without consideration of the couple effects. Meanwhile, it can not be excluded that there maybe exist some special cases that membrane structures can be destroyed by aeroelastic instability.

Key words: tension structure; wind-induced vibration response; fluid-solid interaction; wind tunnel test; computational fluid dynamics numerical simulation

0 引言

膜结构是近十余年来得到广泛应用的一种新型大跨度空间结构形式,其基本力学特点是“轻”和“柔”。“轻”意味着该类结构对地震力有良好的适应性,而对脉动风的作用十分敏感,风荷载是该类结构设计中的主要控制荷载;“柔”则意味着膜结构在风荷载的作用下会产生较大的变形和振动(通常可达到结构跨度的 1/50,甚至更大),这种大幅的变形和振动反过来也会影响到结构表面的风压分布情况(因为风压分布是与结构的几何形状密切相关的),即形成所谓的“流固耦合”效应,因此要对膜结构的风荷载以及风振响应做出准确估算,就必须考虑流固耦合的影响。

虽然对于“流固耦合”这一物理现象,许多学者都曾开展过研究,并且针对机翼和桥梁颤振问题提出了一些解决办法^[1],但是由于膜结构自身力学性能的复杂性,使得膜结构的流固耦合研究要比前面提到的两个问题复杂得多,这种复杂性主要表现为:①作为多自由度的复杂三维体系,膜结构的自振频率分布密集,且振型相互耦合;②结构的几何非线性特征明显。这两点决定了在膜结构的流固耦合研究中无法直接套用那些已有的经典解析公式,而且一些传统的基于频域的随机振动分析方法也将受到限制,因此可以说,膜结构的流固耦合问题是一个全新的理论研究课题。其基本解决途径就是把传统的研究手段与一些现代的高科技结合起来。这些高科技包括高精度的风洞测试及识别技术和高速度的数字模拟技术等。

基于上述考虑,笔者所领导的课题组提出了两种不同的研究思路:

(1)理论与试验相结合的简化气弹模型方法^[2]。该方法的基本思路是,从工程实用角度出发,对结构运动方程中的气动力项进行分解,从而将其中包含的由结构运动引起的流体反馈作用以附加气动力项的形式表达出来,再借助风洞试验(或某些近似解析

理论)确定附加气动力项中的某些物理参数,从而使方程可以封闭求解。

(2)CFD 数值模拟方法^[3]。该方法的基本思路是,综合运用计算流体力学(CFD)技术和计算结构力学(CSD)技术,建立适用于膜结构流固耦合风振分析的数值风洞模型,借助计算机有限元技术实现对结构及其周围流场运动过程的实时模拟。

以下将详细介绍这两种方法,以及由此开展的相关研究工作。

1 简化气弹模型

1.1 简化气弹模型的建立

结构在风激励下的运动方程可以表示为

$$M_s \ddot{x}(t) + C_s \dot{x}(t) + K_s x(t) = F[t, x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)] \quad (1)$$

式中:等号左边各项分别为结构自身的惯性力、阻尼力和弹性力;等号右边为气动力,它是时间 t 、结构位移 x 以及 x 导数的函数。由式(1)可以看出:作用于结构上的风压不但与来流自身的脉动特性有关,还会受到结构运动的影响,产生附加气动力,也称自激力。

对于那些刚度很大的结构,如砖石结构和钢筋混凝土结构,这种附加气动力效应很弱,可以忽略,此时式(1)可表示为

$$M_s \ddot{x}(t) + C_s \dot{x}(t) + K_s x(t) = F(t) \quad (2)$$

式(2)就是一般的结构动力方程,可以采用各种常规的结构动力学方法来求解。

对于类似膜结构的柔性结构,由于结构在风荷载作用下会产生较大的振动,自激力的影响不容忽视,某些情况下甚至可能对结构运动起控制作用,因此必须通过式(1)来求解。由于式(1)等号两边均包含了结构运动项,因此该方程本身是不封闭的,需要考虑采取某些简化手段,对其右边的气动力项解耦,为此引入如下两个假定。

(1)拟定常假定。虽然膜结构的风振响应比其他结构类型显著得多,但就正常工作状态下的膜结构而言,其响应振幅仍然要比结构特征尺寸(如跨

度)小得多,此时的气动力作用近似满足拟定常假定。拟定常假定认为,作用在结构上的气动力只与结构此刻的刚体位形和相对速度有关,而与以前时刻的运动无关。这一假定相当于认为结构运动只对其此刻的表面风压作用产生影响,而不会影响到来流自身的脉动特性。于是可对式(1)右边的气动力项进行分解,将其近似表示为

$$F[t, x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)] = p(t) + f[x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)] \quad (3)$$

式中: $p(t)$ 为由流体自身的脉动所引起的气动力作用,相当于式(2)中的 $F(t)$,可通过刚性模型风洞试验测得; $f[x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)]$ 为由结构运动引起的附加气动力作用。

(2)强相关假定。根据附加气动力与结构运动之间的相位关系,可将 $f[x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)]$ 在频域上划分为与结构的振动卓越频率较近和较远两部分,前者受结构运动的影响较为显著,可以用相关系数来表示;后者受结构运动的影响较小,可以忽略不计。由此对 $f[x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)]$ 进行解耦并忽略高阶项的影响,则可得到式(3)的一次近似式为

$$F[t, x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)] = p(t) + \rho_{\ddot{x}} p(t) \ddot{x}(t) + \rho_{\dot{x}} p(t) \dot{x}(t) + \rho_x p(t) x(t) \quad (4)$$

式中: $\rho_{\ddot{x}}$ 、 $\rho_{\dot{x}}$ 、 ρ_x 为气动力与加速度、速度和结构位移之间的相关系数。从式(4)可以看出,该假定的实质是忽略了结构振动对脉动风压中那些与结构主频相距较远的谐波分量的影响。从工程应用的角度来看,这种近似是可以接受的。

根据上述两个假定,将式(4)代入式(1),合并与结构动力特性相关的项,即可得到简化气弹模型的表达式为

$$(M_s + M_a) \ddot{x}(t) + (C_s + C_a) \dot{x}(t) + (K_s + K_a) x(t) = p(t) \quad (5)$$

式中: M_a 为附加质量,代表气动力中与结构加速度相关的部分,其物理意义可解释为随结构一起运动的那部分空气质量; C_a 为气动阻尼,代表气动力中与结构速度相关的部分,其物理意义可解释为结构周围空气与结构运动之间的能量转换; K_a 为气动刚度,代表气动力中与结构位移相关的部分,其物理意义可解释为由于结构瞬间移动在其上下(内外)表面形成的局部气压差,相当于使结构受到的空气支承作用。 M_a 、 C_a 、 K_a 的物理意义如图1所示。

该简化气弹模型的特点是不考虑具体的流场结构,而是将流体和结构视为一个整体系统,并且通过适当的数学模型将气动力与结构运动参数联系起

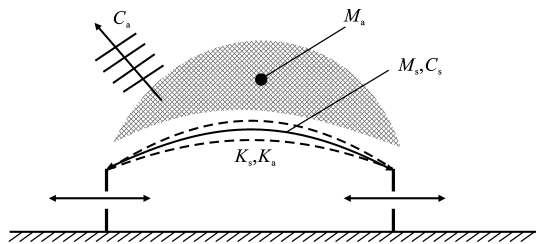


图 1 附加气动力

Fig. 1 Additional Aerodynamic

来。这样做有以下优点:

(1)直接测定结构表面的附加气动力作用,就目前而言还是相当困难的,而通过对结构在风荷载作用下的动力响应过程进行观测,进而对结构运动参数进行识别,以获取附加气动力项,则要相对容易得多,因此这种方法更具有可操作性。

(2)从工程应用的角度来看,笔者关注的是那些能够显著影响结构振动特性的附加气动力作用,而这种方法恰恰相当于对附加气动力进行了1次滤波,去掉了那些对结构振动影响较小的气动力分量,从而使问题得到简化。

(3)一旦确定了附加气动力项,即可将风与结构的相互作用问题转化为一般的随机振动分析问题,因而便于利用现有的随机振动研究成果,而且在具体操作时也保证了设计方法的统一,即当附加气动力项为零时,式(5)就是通常意义上的结构抗风计算公式。

最后需要说明的是:气动刚度作用多存在于充气膜结构中,而对于一般的张拉式膜结构,该项的影响很小,可以忽略,故本文中仅讨论附加质量和气动阻尼的确定方法。

1.2 附加气动力的试验测定

式(5)所反映的仅仅是根据一些现象所提炼出的物理概念,要使之真正可以求解,还必须确定其中的附加气动力项的大小。目前最为有效的办法就是借助气弹模型风洞试验来获取相关信息,该方法的具体步骤为:①根据一定的相似准则,进行气弹模型风洞试验,得到模型上各测点的风振响应时程;②利用某种随机信号识别技术(如随机减量技术或小波变换技术)^[4]对测点风振响应时程进行模态参数识别,得到结构的特征衰减曲线,并由此确定振动系统的总质量和总阻尼;③用此总质量和总阻尼分别减去结构自身的质量和阻尼,即可得到相应的附加质量和气动阻尼。

依据上述方法,文献[5]中完成了菱形平面鞍形索网结构和膜结构的刚性模型与气弹模型风洞试验研究(图2)。鉴于该试验的探索性质,共设计了4个

相对独立的子试验,目的是希望通过这一系列试验,来逐步揭示风与膜结构的相互作用规律,具体包括:

(1)静风耦合试验。目的是确定结构自身的基频和阻尼比,同时可研究振动结构与静止空气间的相互作用。

(2)刚性模型和弹性模型风洞测压试验。目的是通过对比考察结构振动对表面风压分布规律和频谱特性的影响。

(3)弹性模型风洞测振试验。目的是研究结构响应随风速、风向等参数的变化规律,并利用随机减量技术对气动阻尼和附加质量进行识别,从而考察了流固耦合作用影响的大小。

(4)弹性模型同步测振测压试验。目的是研究模型响应与脉动风压的相位关系,并利用气弹参数分析技术求解气动阻尼和附加质量,与式(3)相互印证。

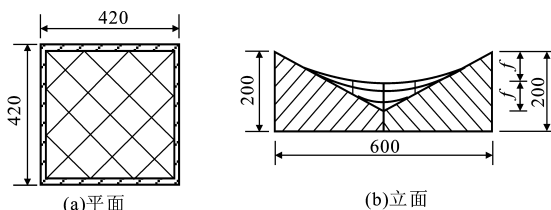


图2 试验模型的平面和立面(单位:mm)

Fig. 2 Plan and Elevation of Test Model (Unit:mm)

试验取得了预期效果,不但成功测出了简化气弹模型中的两个重要参数,即附加质量和气动阻尼,而且对膜结构的风振机理问题有了更深刻的认识。试验结果表明:结构在脉动风作用下的振动是一个宽带过程,其振动形态与风荷载的空间分布具有一定的相关性,表现出明显的受迫振动特征;气动阻尼和附加质量均为风速的减函数,其中,气动阻尼对结构振动的影响较为显著,特别是对于结构的低阶模态,气动阻尼比可达到15%~20%左右,相当于结构阻尼的5~10倍(图3);相比之下,附加质量对结构振动的影响较小,其量级仅为结构质量的1倍左右(图4);另外,试验过程中未发现结构出现整体气弹失稳现象,但在某些工况下,在结构局部测点处出现了气动负阻尼。

1.3 附加气动力的近似解析求解

作为一种纯理论方面的探讨,亦可考虑采用某些近似解析理论得到附加质量和气动阻尼的近似解析表达^[6],其基本思路是,首先假设来流为均匀的不可压缩理想势流,当遇到结构阻塞时,气流将发生分离产生旋涡扰动层,此时该扰动层可用无限薄的连续旋涡层来模拟,则结构周围的风场可看作是均匀

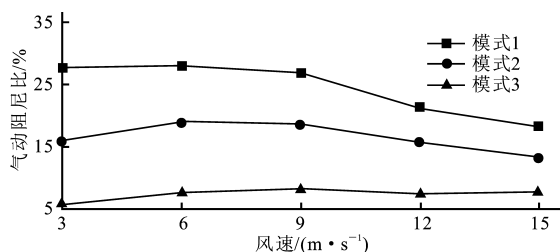


图3 气动阻尼比随风速的变化1

Fig. 3 Variation 1 of Aerodynamic Damping Ratio vs Wind Velocity

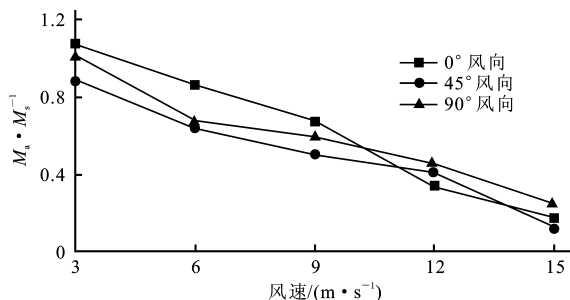


图4 附加质量比随风速的变化1

Fig. 4 Variation 1 of Added Mass Ratio vs Wind Velocity

来流与连续旋涡层的叠加,近似用薄翼理论来确定作用在结构表面的气动力;然后根据气动力项与结构运动之间的关系,采用能量守恒原理推导出附加质量和气动阻尼的近似解析表达。

1.3.1 气动力的确定

对于 y 方向为有限展长的膜结构,其三维绕流可以看成是一簇连续布置的马蹄涡,如图5所示。每个马蹄涡可以看成是宽度为 dy 、 x 方向长度为 $l(y)$ 的二维基元,设面元 $dx dy$ 上的旋涡密度为 $\gamma_m(x, y, t)$,则二维基元上附着涡的总环量为

$$\Gamma(y, t) = \int_{x_v(y)}^{x_h(y)} \gamma_m(x, y, t) dx \quad (6)$$

根据式(6)可得到结构表面的扰动速度和扰动速度势,将之代入 Bernoulli 方程,可得到作用在结构表面的总压强差为

$$\begin{aligned} \Delta p = p_1 - p_2 = \rho V \gamma_m(x, y, t) + \rho \left(\frac{\partial Z_s}{\partial t} + \right. \\ \left. V \frac{\partial Z_s}{\partial x} \right) \left[\frac{\partial Z_s}{\partial x} \gamma_m(x, y, t) + \frac{\partial Z_s}{\partial y} \cdot \right. \\ \left. \int_{x_v(y)}^{x_h(y)} \gamma_m(x, y, t) dx \right] + \rho \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^x \gamma_m(x, y, t) dx + \right. \\ \left. \int_0^y \int_{x_v(y)}^{x_h(y)} \gamma_m(x, y, t) dx dy \right] \quad (7) \end{aligned}$$

式中: p_1 、 p_2 分别为膜结构下、上表面的动气压; ρ 为流体密度; V 为来流速度; Z_s 为在荷载作用下的膜结构曲面方程。

1.3.2 附加质量

假设流体原处于静止状态,由于结构运动才引发流体的运动,根据能量守恒定律,单位面积上膜结构周围的空气在 dt 时间内的动能增量 $-dE$ 等于膜结构上的总压强差 Δp 在 dt 时间内做的功 dW

$$dW = \int_0^y \int_0^{xl} \frac{\partial h(x, y, t)}{\partial t} \Delta p dx dy dt \quad (8)$$

$$dE = m_a \int_0^y \int_0^{xl} \frac{\partial h(x, y, t)}{\partial t} \frac{\partial^2 h(x, y, t)}{\partial t^2} dx dy dt \quad (9)$$

式中: $\frac{\partial h(x, y, t)}{\partial t}$ 为膜结构沿法线方向的速度; m_a 为膜结构单位面积上的附加质量。

联立式 (8)、(9) 可得附加质量为

$$m_a = - \left\{ \int_0^y \int_0^{xl} [\partial h(x, y, t) / \partial t] \Delta p dx dy \right\} \cdot \left\{ \int_0^y \int_0^{xl} [\partial h(x, y, t) / \partial t] \cdot [\partial^2 h(x, y, t) / \partial t^2] dx dy \right\}^{-1} \quad (10)$$

1.3.3 气动阻尼

从能量等效原则出发,假定膜结构上的总压强在一个振动周期所作的功 dW 与气动阻尼力在一个周期内消耗的能量 dE 相等,则

$$dW = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \int_0^y \int_0^{xl} \Delta p h(x, y, t) dx dy dt \quad (11)$$

$$dE = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \int_0^y \int_0^{xl} C_a \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)^2 dx dy dt \quad (12)$$

联立式 (11)、(12) 可得气动阻尼比为

$$\xi_a = \frac{C_a}{C_{cr}} = \frac{\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \int_0^y \int_0^{xl} \Delta p h(x, y, t) dx dy dt}{2(m_s + m_a) \omega \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \int_0^y \int_0^{xl} (\partial h / \partial t)^2 dx dy dt} \quad (13)$$

式中: C_a 为气动阻尼; C_{cr} 为临界阻尼; ω 为结构振动频率。

联立求解式 (7)、(10)、(13), 即可得到附加质量比和气动阻尼。图 6、7 为菱形平面鞍形膜结构的附加质量比和气动阻尼比随风速变化曲线。从图 6、7 中可以看出: 解析结果与试验结果相比, 两者在变化规律上基本一致, 即都是随风速的增加而减小, 但在具体数值上尚有误差, 特别是气动阻尼比。由于解析方法采用了过多的简化假设, 所取得的定量结果不具有可供实用的精度, 但从中提炼出来的一些概念或定性结论对于进一步完善简化气弹模型是有帮助的。

2 CFD 数值模拟方法

2.1 方法的提出

应用计算流体力学技术在计算机上模拟结构周

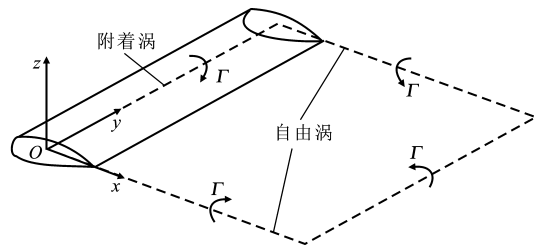


图 5 有限展长膜结构周围的马蹄涡

Fig. 5 Vortex Like Horse's Hoof around Roof

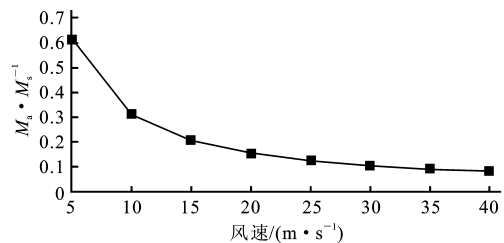


图 6 附加质量比随风速的变化 2

Fig. 6 Variation 2 of Added Mass Ratio vs Wind Velocity

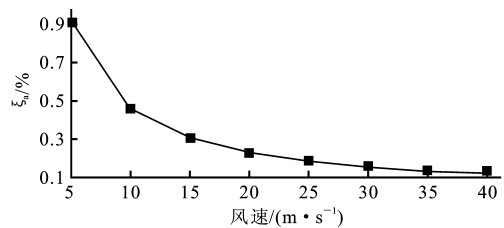


图 7 气动阻尼比随风速的变化 2

Fig. 7 Variation 2 of Aerodynamic Damping Ratio vs Wind Velocity

围风场的变化并求解结构表面的风荷载, 是近十几年发展起来的一种结构风工程研究方法, 并逐渐形成了一门新兴的结构风工程分支——计算风工程学。从目前的发展来看, 应用计算流体力学技术求解刚性模型表面的风压已较为成熟, 某些计算结果与试验结果十分吻合, 有些学者已试图用其解决实际工程问题^[7], 但是对于弹性模型, 由于其中涉及到十分复杂的流固耦合问题, 并且具有多学科交叉性质, 因此目前尚处于探索阶段。在进行流固耦合数值模拟时, 关键要处理好以下几个问题:

(1) 流固耦合交界面处不同运动描述方式的相互协调问题。通常在固体力学中习惯采用 Lagrangian 坐标系, 主要研究物质点的运动, 而在流体力学中更多的是使用 Euler 坐标系, 主要研究空间点的运动状态。这两种运动描述方式的差异, 对于小位移问题可不加区别, 但对于大位移非线性问题, 则有可能导致在两相交界面处原本重合的节点随结构移动而出现分离, 从而导致整个耦合系统的计算

失败。近年来, ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 方法的发展, 较好地解决了这一问题。在 ALE 描述中, 有限单元的剖分是针对独立于结构和流体运动的参考坐标系进行的, 网格点即为参考点, 它可以在空间以任意形式运动; 流体域和结构域的物理量可以通过 Jacobi 行列式映射到参考坐标系上, 从而实现运动描述方式的统一。

(2) 动态求解过程中, 不同求解方法的选择问题。通常对流固耦合的求解可采用整体求解和分区求解两种不同的求解方法。整体求解是指在每一时间步内对流体控制方程和结构控制方程联立求解, 而分区求解则是在每一时间步内对流体控制方程和结构控制方程分别独立求解。整体求解适合于求解稳定类的问题, 其计算速度较慢, 需要大量的内存, 因而一般用于求解规模较小的问题。分区求解可以占用较少的内存, 而且可以根据不同领域的求解问题采用不同的求解方法, 便于利用现有的软件成果, 因此在流固耦合数值模拟中的应用较广。

(3) 对适用于钝体绕流模拟的湍流计算模型的选择问题。土木工程结构多呈钝体形状, 其绕流不可避免地伴随着分离、再附、旋涡脱落等复杂的流动现象, 因而在结构风工程领域的 CFD 数值模拟中, 对湍流计算模型的选择就显得至关重要。目前在工程中较多采用的湍流计算模式有 $k-\epsilon$ 模型、RSM 模型和大涡模拟 (LES) 方法等^[8], 其中, LES 方法虽然在计算量上要大于 $k-s$ 、RSM 方法, 但是由于其具有明确的物理背景, 适用范围较广、准确程度较高, 因而被认为是最具发展前景的一种湍流模拟方法。

依据上述思想, 文献[3]中提出了一种适用于膜结构流固耦合风振分析的 CFD 数值模拟方法, 并编制了相应的有限元计算程序。程序计算采用分区求解算法, 包含流体域、结构域和网格域 3 个计算模块。流体域采用 Taylor-Galerkin 有限元法^[9]和大涡模拟技术^[10]求解不可压缩粘性流动; 结构域的计算采用 Update Lagrangian 有限元列式和 Newmark 逐步积分技术, 并考虑了几何非线性影响; 网格域采用拟弹性介质法来计算动态网格的更新。程序计算流程如图 8 所示, 即首先计算流体域模块, 得到作用在结构表面的瞬时压力场; 然后将此压力传递至结构域, 进行结构分析, 得到结构在瞬时风压作用下的位移; 再将结构位移作为网格域的位移边界条件, 重新对整个计算域进行网格划分; 最后根据网格节点的调整情况得到网格节点速度, 作为诱导速度传递给流体域, 重新进行流场分析, 至此完成一个时间

步的流固耦合分析。如此反复, 即可得到风与膜结构相互作用的全过程信息。该程序目前还仅能用于计算二维问题, 但这却是中国首次利用数值仿真技术再现风与膜结构的动力耦合全过程。

相对于风洞试验中不得不借助仪器设备来间接获取结构模型及其周围流场的信息而言, 这无疑是研究膜结构流固耦合问题的一大进步。

2.2 单向大跨度屋盖结构的流固耦合特性分析

应用上面提到的流固耦合计算程序, 文献[5]中对如图 9 所示的大跨度单向平屋盖结构模型进行了刚性模型和弹性模型的流固耦合参数分析 (图 10、11), 并探讨了来流风速、屋面质量和初始预张力等参数对结构流固耦合特性的影响。

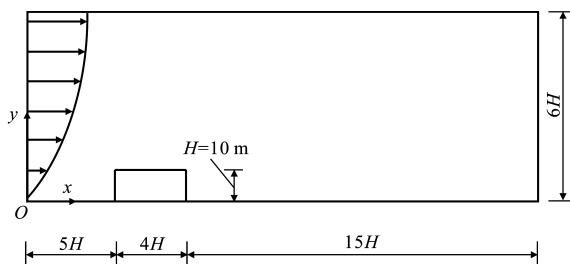


图 9 平屋盖绕流计算模型

Fig. 9 Computational Model for Flow around Flat Roof

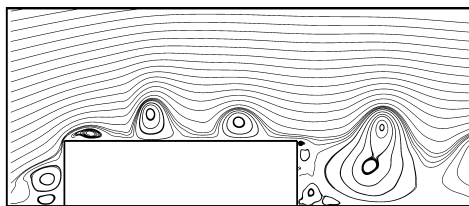


图 10 刚性模型绕流

Fig. 10 Stream Trace of Rigid Model

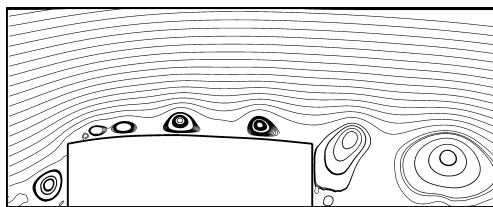


图 11 弹性模型绕流

Fig. 11 Stream Trace of Elastical Model

在以上工作的基础上, 关于膜结构的风振机理

问题得出了一些虽然是初步的,然而却是十分重要的概念:

(1)屋盖前缘周期脱落的大尺度旋涡是诱导结构振动的主要原因,随着大尺度涡沿屋面向下游移动,其动能逐渐转化为结构变形能,使结构振动形态呈现明显的涡激振动特征。在弹性模型状态下,由于结构运动阻碍了大旋涡的形成,因此其旋涡脱落频率明显高于刚性模型时的情况,而且旋涡脱落频率与结构振动频率较为接近,这充分证明了两者的相互影响。

(2)膜结构的流固耦合过程与桥梁和高层结构不同。桥梁和高层结构的惯性力和回复力通常较大,而且往往以单频振动为主,因此随着风速的增大,旋涡脱落频率加快,在理论上总是存在某一诱导结构出现气弹失稳的临界风速。对于膜结构,由于其刚度与位形有关,且振型频谱密集,因此当结构的某一阶振型被激起后,随着结构振幅的加大,结构刚度和振动模态也会随之发生变化,从而使结构从该共振频率中逃逸出来;对于具有负高斯曲率并且张紧的膜结构,在结构与风荷载的相互作用问题中,气弹响应问题是主要的,一般不存在气弹失稳问题,出现气弹失稳的前提是结构处于松弛状态下,而且质量较轻,跨度较大。

3 CFD 简化数值模拟方法

3.1 方法的提出

实际工程中的膜结构多为复杂曲面,显然利用第 1.3 节提到的二维流固耦合计算程序所能解决的工程问题十分有限。尽管在理论上,采用类似的方法完全可以实现程序由二维向三维的扩充,但在实际操作上还有一定的难度,特别是计算速度这一瓶颈很难在短时间内突破,因此有必要探讨某种求解三维流固耦合问题的简化算法。这里的“简化”是指利用尽可能少的 CFD 运算来模拟实际的流固耦合过程,同时辅以必要的结构分析手段对 CFD 简化分析结果进行修正,以满足工程精度的要求。

基于上述考虑,笔者提出一种简化数值模拟的基本理论框架:首先将结构响应分为平均响应 \bar{r} 、背景响应 \bar{r}_B 和共振响应 \bar{r}_R 三部分,如图 12 所示,其中,背景响应是由那些与结构自振频率相距较远的脉动风分量引起的,是一个慢变的、不规则的过程,其性质是拟静力的,基本不存在动力放大效应;共振响应是由接近结构自振频率的脉动风分量激发引起的,具有明显的动力放大效应。如果假定这 3 部分在结构总

响应中的比重是依次递减的,则可以针对这 3 种响应分量不同的性质,考虑采用不同的求解方法。

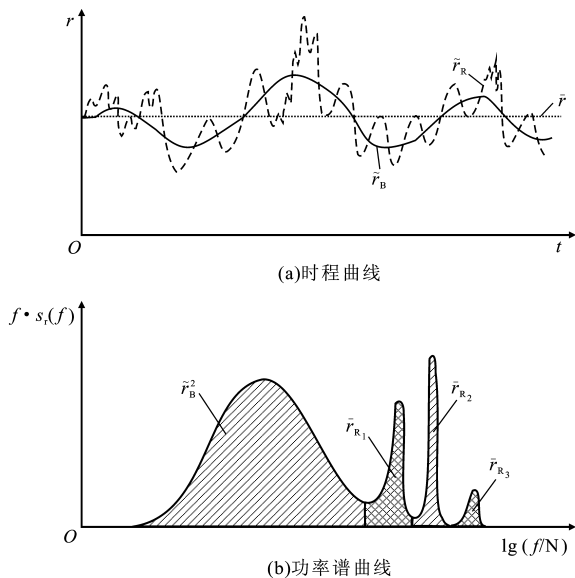


图 12 结构风振响应时程和功率谱

Fig. 12 Time-History and Power Spectrum of Structural Wind-Induced Vibration Response

在平均响应部分,主要应该考虑由于结构变形所导致的体形系数变化,这是一个静态过程,可以利用 CFD 软件直接求得;在背景响应部分,需要考虑脉动风的空间相关性对结构整体振动的影响,或者说是大尺度旋涡对结构振动的影响,这是一个拟静态过程,可以忽略荷载的动力放大效应,仅考虑结构可能出现最不利响应的几种变形模式;在共振响应部分,主要考虑脉动风中的较高频部分(在 1~10 Hz,也可能更高)与结构之间的动力耦合作用,这恰好是第 1 节提到的简化气弹模型考虑的范畴,由于此时的结构振幅较小,可以忽略几何非线性的影响。

根据第 2.1 节所述,可以将风与膜结构之间的流固耦合过程分为:稳态耦合和瞬态耦合两部分。其中,平均响应和背景响应均属于稳态耦合;共振响应属于瞬态耦合。对于稳态耦合,需要根据结构的具体形状和绕流特点作个别研究,最适宜的方法是 CFD 数值模拟方法;对于瞬态耦合部分,可以考虑利用简化气弹模型结合随机振动时程分析的方法来研究。

稳态耦合可采用式(14)表示

$$K_s x_1(t_i) = \bar{p}(I_{\text{geometry}}) + \hat{p}(I_{\text{pattern}}, t_i) \quad (14)$$

式中: $x_1(t_i)$ 为第 i 时刻的结构稳态变形; $\bar{p}(I_{\text{geometry}})$ 为与结构平均变形对应的平均风压; $\hat{p}(I_{\text{pattern}}, t_i)$ 为在平均风压基础上叠加的第 i 时刻的荷载分布模式,代表了脉动风压的低频部分。这里的 $\hat{p}(\cdot)$ 需要借助 CFD 数值模拟方法求得。

瞬态耦合可采用式(15)、(16)表示

$$M_s \ddot{x}_2(t) + C_s \dot{x}_2(t) + K_s x_2(t) = \tilde{p}[t, x_2(t), \dot{x}_2(t), \ddot{x}_2(t)] \quad (15)$$

$$\tilde{p}[t, x_2(t), \dot{x}_2(t), \ddot{x}_2(t)] = \tilde{p}(t) + f[x_2(t), \dot{x}_2(t), \ddot{x}_2(t)] \quad (16)$$

式中: $x_2(t)$ 为相对于稳态变形的结构瞬态位移; $\tilde{p}(\cdot)$ 为脉动风压中的高频部分, 其中包含了与结构动力耦合的分量, $\tilde{p}(\cdot)$ 又可以进一步分解为不考虑结构运动的分量 $\tilde{p}(t)$ 和由结构振动诱导的分量 $f(\cdot)$, $\tilde{p}(t)$ 可在结构稳态变形的基础上由 CFD 数值模拟结果提取高频成分来获得, $f(\cdot)$ 为附加气动力项, 可根据简化气弹模型理论进一步转化为附加质量和气动阻尼。

在得到 $x_1(i)$ 和 $x_2(t)$ 后, 结构的最不利响应可近似采用叠加原理获得

$$x_{\max} = \max[x_1(t_i)] + \max[x_2(t)] \quad (17)$$

3.2 具体实施步骤

基于上述理论, 拟定具体实施步骤如下, 相应的计算框架如图 13 所示。

步骤 1: 对于某一特定结构, 首先利用 CFD 软件计算结构初始形态对应的平均风压 \bar{p}_0 。

步骤 2: 利用膜结构的分析程序, 确定结构的平均变形 x_0 。

步骤 3: 在平均变形的基础上, 再次利用 CFD 软件计算结构表面的平均风压 \bar{p}_{01} 和脉动风压 $p_{01}(t)$; 如果 $\bar{p}_{01} \approx \bar{p}_0$ 则进行步骤 4, 否则重复步骤 1、2。

步骤 4: 利用膜结构计算程序, 计算与每一时间步对应的背景响应, 从中确定 m (m 远小于总时间步数) 个最大稳态变形模态和相应的 $x_1(t_m)$ 。

步骤 5: 以每个 t_m 时刻的结构稳态变形模态为基础, 再次利用 CFD 软件分别计算结构表面的脉动风压 $p_m(t)$; 对 $p_m(t)$ 滤波, 截取其高频部分信号作为式(16)中的 $\tilde{p}(t)$ 。

步骤 6: 利用简化气弹模型理论确定式(16)中的 $f(\cdot)$ 项。

步骤 7: 利用膜结构计算程序求解式(15), 得到结构在第 m 个稳态变形模态下的瞬态变形时程 $x_{2m}(t)$ 。

步骤 8: 根据式(17)可得到结构在每个 t_m 模态下的最大变形, 进而得到结构在考虑流固耦合效应下的最大响应。

依据步骤 1~8, 对一类似图 9 的单向张拉膜屋盖结构进行分析, 目的是与第 3.1 节提到的直接数值模拟方法相互印证。图 14、15 为在平均响应阶段, 经过 5 次的风压和响应循环计算后, 屋面平均风

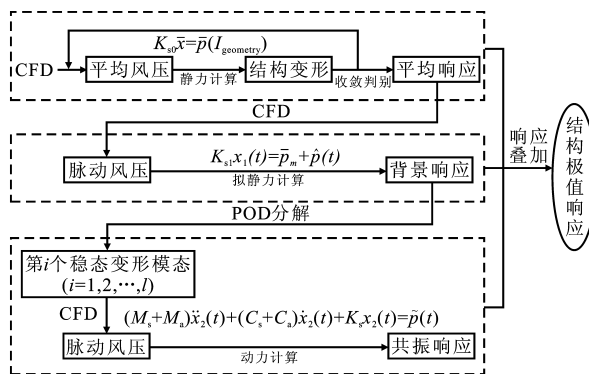


图 13 简化数值模拟方法计算框架

Fig. 13 Frame of Simplified Numerical Simulation Method

压系数分布和平均位移响应变化情况。从图 14、15 中可以看出: 由 0 状态至 1 状态的屋盖平均风压系数和平均位移变化最大, 其后基本趋于稳定, 说明本文方法的收敛速度很快。图 16 为根据结构背景响应时程分解得到的前 3 阶主导变形模态。从图 16

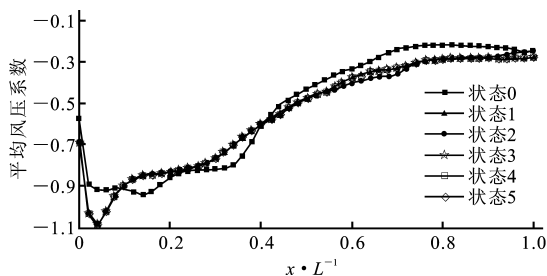


图 14 屋盖平均风压系数

Fig. 14 Mean Pressure Coefficient on Roof

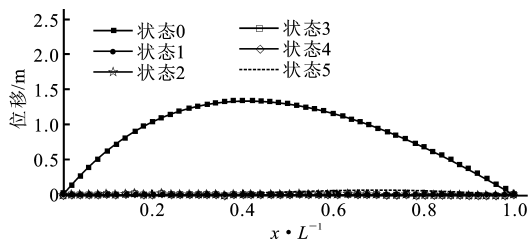


图 15 屋盖平均位移

Fig. 15 Mean Displacement on Roof

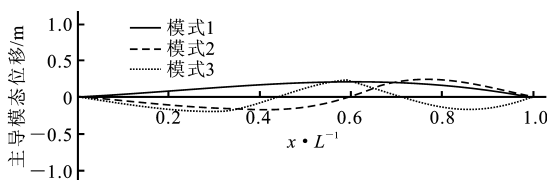


图 16 背景响应主导模态

Fig. 16 Dominant Modes of Background Response

中可以看出: 第一阶和第三阶模态呈对称分布, 第二阶模态呈反对称分布。图 17 为结构在考虑流固耦

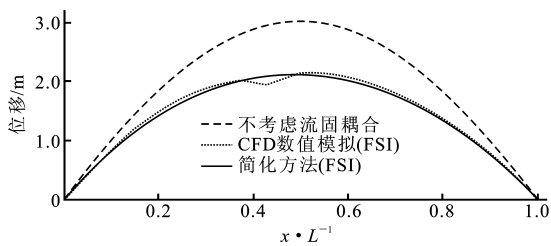


图 17 屋面各点的最大总位移

Fig. 17 Total Maximum Displacement of Roof Response

合效应下的最大总位移最终计算结果,并且将该方法与第 3.1 节提到的精确数值模拟方法以及不考虑流固耦合的方法进行了比较。从图 17 中可以看出:简化数值模拟方法与精确数值模拟方法的计算结果十分吻合,而不考虑流固耦合效应的风振分析所带来的结构响应计算误差可达到 30% 以上。

4 结 语

(1)关于膜结构风振机理的研究目前还处在开始阶段,尚未形成基本的理论框架,因此需要从多个方面、不同角度进行理论和试验研究,积累素材,提炼概念,逐步建立起较合理的能基本反映这种三维柔性体系流固耦合效应的气动力模型。

(2)CFD 数值模拟方法的优点是计算精确、可以得到流固耦合的全过程信息,但是由于其计算量十分巨大,就现阶段而言,尚不具有工程可行性,但可以用来校核其他简化算法。

(3)本文中提出的简化数值模拟方法的计算量大为降低,且完全可以满足工程精度要求;不仅如此,由于该方法引入了较先进的风振分析理念,因此其计算结果具有更加丰富的物理内涵,为进一步研究索、膜结构的风振机理提供了有效的途径。

(4)鉴于实际的膜结构多数属“弱耦合体系”,即流固耦合效应并不明显,因此已开发的非线性随机振动分析方法对计算结构风振响应仍然有重要的实际意义,应通过系统的算例分析来考察膜结构风振响应的数值规律,积累资料,必要时可提出供实际设计用的建议。

参考文献:

References:

[1] 邢景棠,周 盛,崔尔杰.流固耦合力学概述[J].力学进展,1997,27(1):19-31.
XING Jing-tang, ZHOU Sheng, CUI Er-jie. A Survey on the Fluid-Solid Interaction Mechanics [J]. Advances in Mechanics, 1997, 27(1): 19-31.

[2] 武 岳,王基胜,张亮泉,等.索膜结构气弹力学性能研究[C]//《大型复杂结构体系的关键科学问题及设计理论研究论文集》编辑委员会.大型复杂结构体系的关键科学问题及设计理论研究论文集.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002:205-212.
WU Yue, WANG Ji-sheng, ZHANG Liang-quan, et al. Research of Membrane Structure Aeroelastic Mechanical Performance[C]//Symposium of Key Science Problems and Design Theory of Large Complex Structure Edition Committee. Symposium of Key Science Problems and Design Theory of Large Complex Structure. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002: 205-212.

[3] 武 岳,沈世钊.膜结构风振分析的数值风洞方法[J].空间结构,2003,9(2):38-43.
WU Yue, SHEN Shi-zhao. Computational Simulation on Wind-Induced Vibration of Membrane Structures [J]. Spatial Structures, 2003, 9(2): 38-43.

[4] KAREEM A, GURLEY K. Damping in Structure: Its Evaluation and Treatment of Uncertainty[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 1995, 59(2): 131-157.

[5] 武 岳.考虑流固耦合作用的膜结构风致动力响应研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.
WU Yue. Research on Wind-Induced Vibration Analysis for Tension Structures with Consideration of Dynamic Fluid-Structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003.

[6] 沈世钊,武 岳.大跨度张拉结构风致动力响应研究进展[J].同济大学学报:自然科学版,2002,30(5):533-538.
SHEN Shi-zhao, WU Yue. Overview of Wind-Induced Response for Large-Span Tension Structures [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(5): 533-538.

[7] SUN Xiao-ying, WU Yue, SHEN Shi-zhao. Numerical Simulation of Flows Around Long-Span Flat Roof [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 12(4): 370-375.

[8] MURAKAMI S. Overview of Turbulence Models Applied in CWE-1997 [J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 1998, 74(6): 1-24.

[9] DONEA J. A Taylor-Galerkin Method for Convective Transport Problems[J]. Int J Numer Meths Engrg, 1984, 20(2): 101-119.

[10] CHEN G Q, TAO L, RAJAGOPAL K R. Remarks on Large-Eddy Simulation [J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simulation, 2000, 5(3): 85-90.