

基于梁刚体元模型的圆柱风致响应耦合分析

李 刚^{*1,2}, 曹文斌^{1,2}

(1. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于梁刚体元方法提出了圆柱风致响应分析的近似模型, 通过计算流体动力学 (CFD) 求解器 FLUENT 及其动网格方法求解流体方程, 实现了结构与流体的流固弱耦合分析, 并利用精细积分法提高了结构的动力分析效率. 针对梁刚体元近似模型、刚性模型与弹性模型, 比较了不同风速下三维圆柱结构的顶部位移与加速度响应. 结果表明, 随着风速的增大, 结构横向振动幅值呈非线性增加; 不考虑耦合作用的刚性模型计算结果误差较大.

关键词: 梁刚体元; 流固弱耦合; 精细积分; 动网格; 风致响应

中图分类号: TU311.3; TU311.4 **文献标志码:** A

0 引言

随着工程结构越来越复杂, 功能要求越来越高, 在涉及流体荷载相互作用的时候, 简单的单物理场叠加已不能满足设计和计算精度要求. 1903 年 Langley 单翼机因气动弹性引起的静力发散而导致机翼断裂坠毁, 引起了人们的高度重视, 人们开始了对气动弹性问题的研究^[1]; 1940 年美国 Tacoma 吊桥因为风激振动而倒塌; 1965 年英国 Ferrybridge 电厂 8 座冷却塔群中的 3 座, 在不太高的风速下发生破坏. 这些工程事故使人们开始认识到结构与流体耦合作用的重要性^[2].

流固耦合多物理场分析具有较好的分析精度和适应性, 已经成为目前的研究热点之一^[3]. 主要有试验方法^[4,5]、解析方法和数值模拟方法 3 种研究方法. 由于试验方法一般采用刚性模型, 对于研究流固耦合问题有局限性, 弹性模型的风洞试验正在发展中. 解析方法由于对流体模型的简化, 应用也有较大限制. 从本质上讲, 流固耦合问题的求解应该根据统一的耦合方程, 在每个时间步内对流体域和固体域中所有的未知量同时求解, 即所谓强耦合. 但由于目前的计算机能力和问题的求解精度不同, 可以采用弱耦合或单向耦合求解策

略. 弱耦合求解方式能充分利用现有的流体求解器与结构求解器解决流固耦合问题, 实现分区计算.

对于强耦合分析相关理论方面, Tallec 等^[6]采用任意的拉格朗日-欧拉方法 (arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE) 研究流固耦合的大变形问题; Yang 等^[7]采用 embedded-boundary 法研究强流固耦合问题; 徐刚等^[8]运用 Arnoldi 法研究了储液容器的流固耦合问题; 岳宝增等^[9]利用 ALE 分布有限元数值方法研究非线性流固耦合问题; 刘云贺等^[10]应用有限元与变分原理对流固耦合动力作用机理进行了系统分析并提出了相应的数值方法; 张立翔等^[11]对管道系统的流固耦合基础理论和应用做了系统的研究. 在商用耦合分析软件方面, Bathe 采用 ALE 法开发的 ADINA 软件系统能提供强耦合 (直接) 和弱耦合 (迭代) 方法. 总体上看, 强耦合计算方法精度较好, 适合计算分析规模不大的问题.

对于弱耦合 (单向或者迭代) 分析, 由于能将结构和流体进行分别计算, 便于集成现有的软件平台, 适合规模大的问题分析, 因此该方法运用较广. 如美国 ANSYS 公司利用有限元求解器与流

收稿日期: 2010-04-08; 修回日期: 2012-03-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90815023); “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (2006BAB03A07-02).

作者简介: 李 刚* (1966-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: ligang@dlut.edu.cn.

体求解器联合交替求解结构和流体问题,来求解流固耦合分析系统.在国内武岳等采用分区迭代算法建立了一种适用于大跨度张拉结构风振分析的弱迭代数值风洞方法^[12,13];徐枫等^[14]采用动网格技术对不同截面的柱体(简化为2自由度刚体)在低雷诺数下进行了二维运动分析;Felippa等^[15,16]对弱耦合计算策略进行了深入研究;Yellapragada等^[17]运用弱耦合方法对SPE固相外延进行流固耦合分析.另外弱耦合分析方法已经运用到各类其他工程中,如输流管道、索结构等^[18,19].

由于流固耦合计算涉及流体计算和结构动力计算,计算量很大,本文基于弱耦合思想提出结构流固耦合分析的近似模型,对三维弹性圆柱体结构进行流固耦合动力分析,考察结构在流体荷载作用下的响应特点.流固耦合分析中采用刚体元^[20,21]方法对原结构模型进行近似;采用精细积分^[22]进行动力计算;同时结合FLUENT动网格技术与大涡模拟技术求解不可压缩黏性流体的N-S方程,构造基于CFD技术的流固耦合近似分析方法.

1 流固耦合近似模型分析方法

1.1 基于梁刚体元方法的结构近似模型

许多结构进行模态分析时会呈现局部运动的同步性,因此可以利用这种同步性将局部刚体化,即将该局部的自由度凝聚到一点,这点往往是该局部的质心,如对于高层建筑,质心就可以取楼板位置.如图1所示,每个刚体元内任意点 j 的运动可以用该刚体元内的质心的运动表示:

$$\mathbf{u}_j = \mathbf{R}_j \mathbf{q}_j \quad (1)$$

其展开形式为

$$\begin{pmatrix} u_{jx} \\ u_{jy} \\ u_{jz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_{cj} & -y_{cj} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{cj} & 0 & x_{cj} \\ 0 & 0 & 1 & y_{cj} & -x_{cj} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{jx} \\ q_{jy} \\ q_{jz} \\ q_{j\theta x} \\ q_{j\theta y} \\ q_{j\theta z} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}_j$ 表示该区域中第 j 点的位移向量, $\mathbf{q}_j$ 表示该区域的刚体3个平动及3个转动量, $\mathbf{R}_j$ 表示6个刚体位移变换矩阵, x_{cj} 、 y_{cj} 、 z_{cj} 表示该区域中任

一点 j 的相应坐标与该区域质心相应坐标的差.

如图1所示,在动力分析中,刚体元只有动能而无弹性势能,因此6自由度的虚拟梁弹簧为柔性连接元,只有弹性势能而无动能.由质心 i 到质心 $i+1$ 这部分结构可以等效为一段梁,并且把该梁的刚度作为两质心间虚拟梁弹簧的刚度,而梁的刚度阵在经典有限元里很容易得到.因此对于虚拟梁弹簧 i 的刚度阵 $\mathbf{k}_{ei}$ 就用该段梁的刚度阵表示.同理得到其他虚拟梁弹簧的刚度,然后再组装成整体刚度阵 $\mathbf{K}$.另外,将外荷载全部都等效到相对应的刚体元的质心上.因此原结构的动力学方程

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_0 \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_0 \mathbf{u} = \mathbf{F}_0 \quad (3)$$

经过近似模型处理后转化为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{F} \quad (4)$$

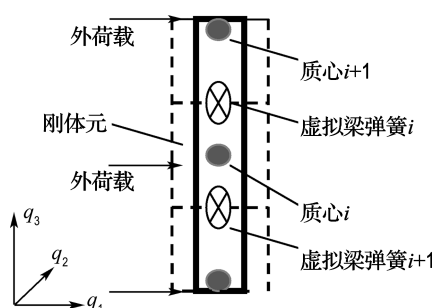


图1 结构刚体元模型

Fig.1 The rigid element model of structure

1.2 流固耦合分析模型的边界更新

流固耦合近似模型(FSI近似模型)是由于结构在外力(如流体压力)的驱动下产生变形,从而带动流体与结构接触面位置和形状的更新,特别是流体界面的更新,如图2所示.

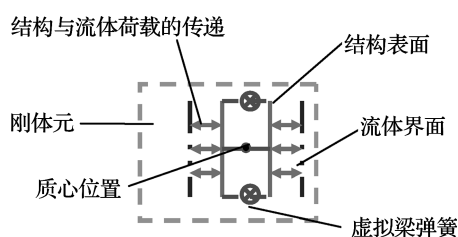


图2 刚体元的流固耦合计算模型

Fig.2 FSI model of the rigid element

与方程(2)等价的矢量表达式为

$$(\bar{\mathbf{r}}_s)^{t+\Delta t} = (\bar{\mathbf{r}})^t + \bar{\boldsymbol{\Omega}} \times (\bar{\mathbf{r}})^t \quad (5)$$

其中 $(\bar{\mathbf{r}}_s)^{t+\Delta t}$ 为刚体元 s 外表面任意一点在 $t + \Delta t$ 时刻位移矢量, $(\bar{\mathbf{r}})^t$ 为刚体元 s 的质心在 t 时刻的

线位移, Δt 为迭代时间步长, $\bar{\Omega}$ 为 t 时刻刚体元 s 质心的角位移。

可以根据方程(5) 更新刚体元表面任意一点的位移. 为了避免刚体元之间交界处产生网格畸形, 刚体元质心间的位移按线性插值或者拉格朗日插值函数插值, 从而方程(5) 变为

$$(\bar{\mathbf{r}}_s)^{t+\Delta t}(x, y, z) = (\bar{\mathbf{r}})^t(x, y, z) + \bar{\Omega}(x, y, z) \times (\bar{\mathbf{r}})^t(x, y, z) \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} (\bar{\mathbf{r}})^t(x, y, z) &= \sum_{i=0}^n (\bar{\mathbf{r}}_{0i} \cdot l_i) \\ \bar{\Omega}(x, y, z) &= \sum_{i=0}^n (\bar{\Omega}_{0i} \cdot l_i^s) \end{aligned}$$

其中 l_i 与 l_i^s 为拉格朗日插值多项式, $\bar{\mathbf{r}}_{0i}$ 、 $\bar{\Omega}_{0i}$ 分别为第 i 个刚体元质心的线位移与角位移. 刚体元 i 质心的位移向量可以表示为

$$\mathbf{d}_{0i}^T = (\bar{\mathbf{r}}_{0i}^T \quad \bar{\Omega}_{0i}^T) \quad (7)$$

1.3 流固耦合控制方程的求解

本文采用精细积分法求解方程(4), 具体求解形式如下:

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{H}\mathbf{v} + \mathbf{f}_s(t) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \mathbf{v}^T = (\mathbf{R}^T & \dot{\mathbf{R}}^T) \\ \mathbf{R}^T = (\mathbf{d}_{00}^T & \mathbf{d}_{01}^T & \cdots & \mathbf{d}_{0n}^T) \\ \mathbf{f}_s(t) = (\mathbf{0}^T & \mathbf{F}^T \mathbf{M}^{-1}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{B} & \mathbf{G} \end{bmatrix}$, 其中 $\mathbf{B} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$, $\mathbf{G} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}$.

假定 t_k 到 t_{k+1} 之间 $\mathbf{f}_s$ 采用线性插值:

$$\mathbf{f}_s(t + \epsilon) \approx \mathbf{f}_0 + \mathbf{f}_1 \epsilon;$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{k+1} &= \mathbf{T}(\mathbf{v}_k + \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{f}_0 + \mathbf{H}^{-1}\mathbf{f}_1)) - \\ &\quad \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{f}_0 + \mathbf{H}^{-1}\mathbf{f}_1 + \Delta t \cdot \mathbf{f}_1) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\mathbf{T}$ 为一个和步长有关的矩阵. 因此在知道结构荷载 $\mathbf{f}_s$ 的情况下, 方程(8) 就可以利用式(10) 进行迭代求解.

由于 $\mathbf{f}_s$ 是流体传递给结构的荷载, 必须通过求解流体方程 N-S 方程来获得该荷载. 大涡模拟 LES 的控制方程是对 N-S 方程在波数空间或者物理空间进行过滤得到的, 即去掉比过滤宽度或给定物理宽度小的涡旋, 从而得到大涡旋的控制方程为^[23]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \\ &\quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (12)$$

其中 τ_{ij} 为亚网格应力, $\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j$. 方程(8) ~ (12) 构成了流固耦合近似模型.

本文的流固耦合计算过程中, 结构分析要比流体分析滞后, 因此时间步长要足够小, 当然流体网格也需要适当地小, 但是过小的步长和网格带来巨大的计算成本, 而且过小的网格, 在更新结构与流体的耦合面的位置时, 也容易引起网格畸形, 因此网格和步长需要综合考虑, 计算流程如图 3 所示.

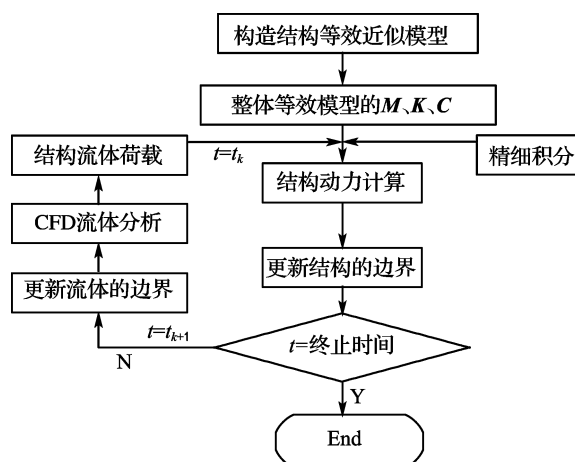


图 3 流固耦合计算流程图

Fig. 3 The fluid-structure interaction calculation flow chart

2 三维圆柱结构流固耦合分析

2.1 结构模型

如图 4 所示三维圆柱结构, 底部固定, 总高 $H = 1.597$ m, 密度 $4\,093$ kg/m³, 内径 $d = 0.19$ m, 外径 $D = 0.2$ m, 弹性模量 8.803×10^8 Pa, 质量阻尼 0.3258 , 刚度阻尼 0.0001 , 采用结构近似模型的方法, 将结构分成 10 个刚体元, 其高度为总高的 $1/10$, 将每个刚体元的自由度都凝聚到该刚体元所对应的质心上. 结构近似模型的自振频率为 7.2 Hz, ANSYS 三维实体模型的频率为 7.0 Hz, 相对误差不到 3% , 因此刚体元近似模型精度较好. 流体模型与结构模型构成的整体计算模型如图 5 所示. 流体计算采用 LES 方法, 具体计算参数如表 1 所示.

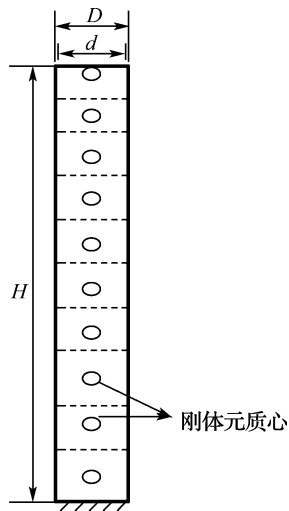


图 4 三维圆柱结构等效近似模型

Fig. 4 The equivalent approximate model of 3-D cylindrical structure

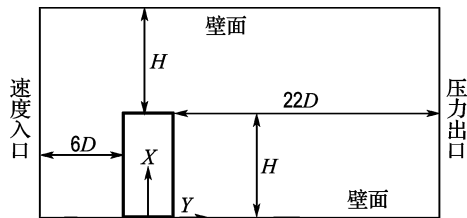


图 5 流体域计算模型

Fig. 5 The fluid domain computational model

2.2 结果分析

为了考察流体与结构相互作用的影响,除了

本文提出的流固耦合近似模型(FSI 近似模型)外,还研究了刚体模型与弹性模型(FSI 弹性模型).刚体模型,在进行流体荷载计算时假设结构是刚体,把得到的不同时刻的结构表面荷载作用到结构近似模型,进行结构动力计算. FSI 弹性模型,采用 ANSYS 多物理场模块结合 CFX 流体求解器进行耦合计算. 基于 3 种不同的计算模型,考察在不同的风速情况下结构顶部位移、加速度的响应.

(1)刚体模型、FSI 近似模型与 FSI 弹性模型
的比较

图 6 和 7 分别为不同风速下的结构顶部顺风向和横风向位移. 对于顺风向位移响应,从 ANSYS 的 FSI 弹性模型结果和 FSI 近似模型耦合分析结果看,结构的初始响应差别较大,随着时间的推移,两者的响应逐渐接近. 刚体模型与另外的两种模型差别较大. 对于横风向位移响应,3 种模型都没有明显的规律,在相对较低的风速 3 m/s 下,3 种模型的横风向位移极值接近. 另外对于 FSI 近似模型在 7 m/s 的风速下,横风向位移峰值约为顺风向位移峰值的 10%. 而在 5 m/s 的风速下约为 5%, 3 m/s 时约为 3%,呈现出非线性特性.

FSI 近似模型与 ANSYS 计算的 FSI 弹性模型误差来源主要体现在流体求解器的差别,本文采用的是 FLUENT 求解器,而 ANSYS 采用的是 CFX 求解器,在这方面需要进一步研究.

表 1 计算参数表

Tab. 1 The computational parameter table

流体计算参数				结构计算参数			
湍流模型	时间步长/s	网格个数/ 10^4	结构表面网格尺寸/m	结构基频/Hz	时间步长/s	刚体元数	动力计算方法
LES	0.002	34	0.005	7.2	0.002	10	精细积分

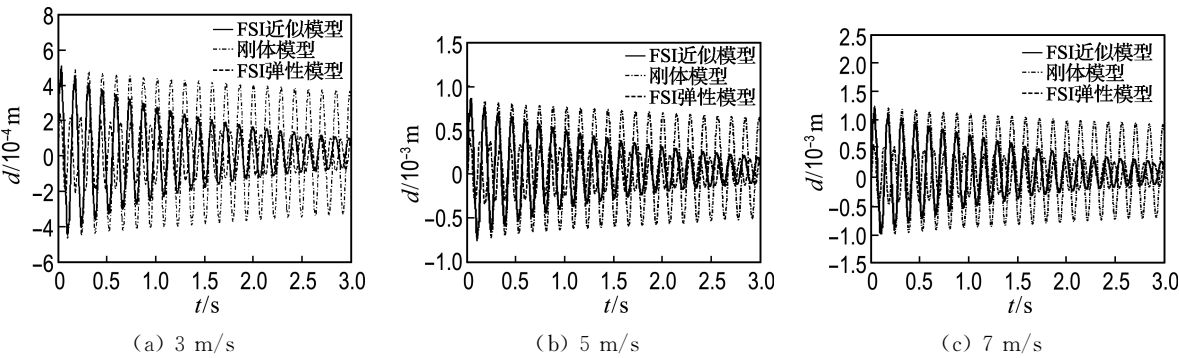


图 6 不同风速下顺风向位移变化

Fig. 6 Variation of downwind displacement with various wind speeds

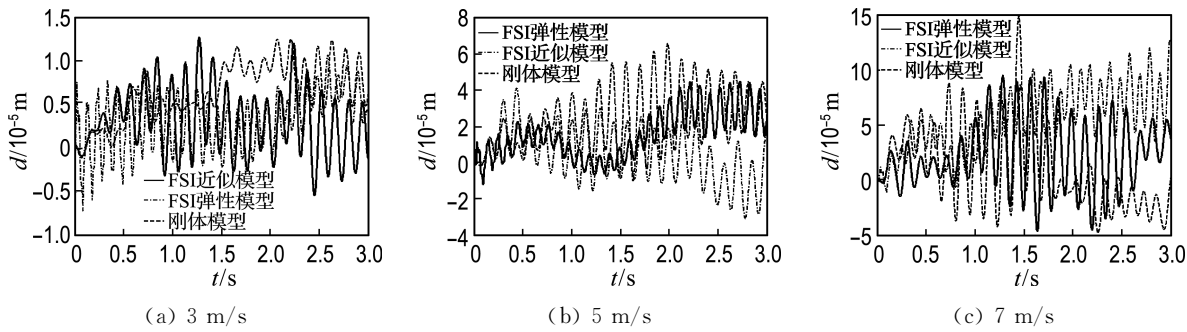


图7 不同风速下的横风向位移变化

Fig. 7 Variation of across-wind displacement with various wind speeds

(2)不同风速下 FSI 近似模型的结构顶部响应

由图 8 可以看出风速越大结构位移峰值也越大,同时衰减的趋势也越大.对于顺风向位移响应,风速 3、5、7 m/s 的极值分别为 4.92×10^{-4} 、 8.53×10^{-4} 、 12.16×10^{-4} m,它们之间的差值约为 3.55×10^{-4} m,因此对于该结构,横风向极值响应与风速近似符合线性关系.但是由图 9 可以看出,结构的横风向振动表现出明显的随机性,相对较低风速下的结构横风向振动响应表现相对稳定.横风向位移极值分别为 14.8×10^{-5} 、 $4.0 \times$

10^{-5} 、 1.2×10^{-5} m,因此横风向位移响应极值与风速表现为非线性关系.图 10 的幅频曲线也表明类似的结果,风速与结构横风向振动呈非线性关系,风速较低,结构横风向振动也相对平稳,顺风向峰值响应对应的频率略大于横风向结构峰值响应对应的频率,其分别为 7.3 与 6.8 Hz.

(3)流场分析

图 11、12 为风速 7 m/s 结构附近涡旋的演变过程,显示了较复杂的湍流现象.这是单独结构分析或者单独流体分析所不能得到的.

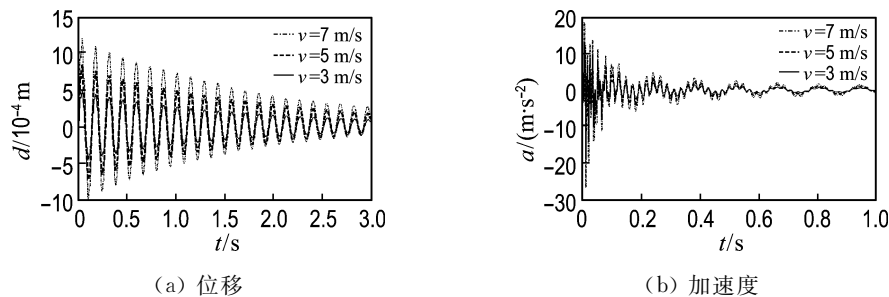


图8 不同风速下顺风向位移和加速度响应变化

Fig. 8 Variation of downwind displacement and acceleration response with various wind speeds

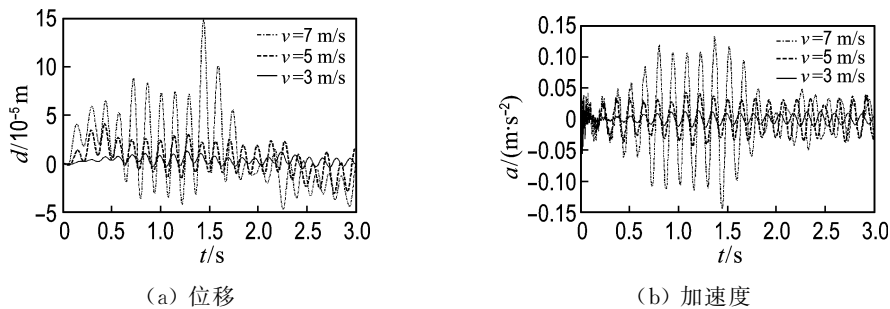
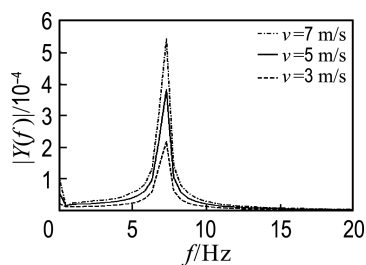
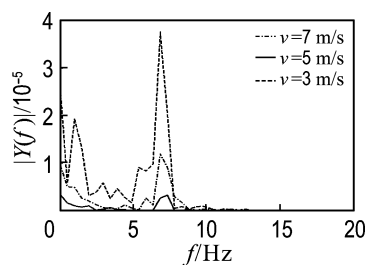


图9 不同风速下横风向位移和加速度响应变化

Fig. 9 Variation of across-wind displacement and acceleration response with various wind speeds



(a) 顺风向位移幅频曲线



(b) 横风向位移幅频曲线

图 10 不同方向的位移幅频曲线

Fig. 10 The amplitude frequency curves of different directions displacement

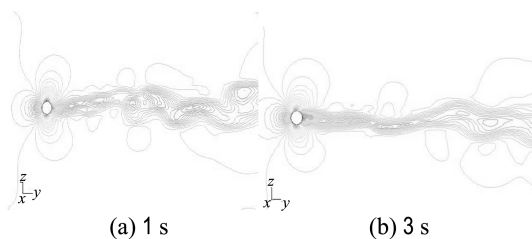


图 11 1 m 高度处风速云图

Fig. 11 Nephograph of wind speed at 1 m

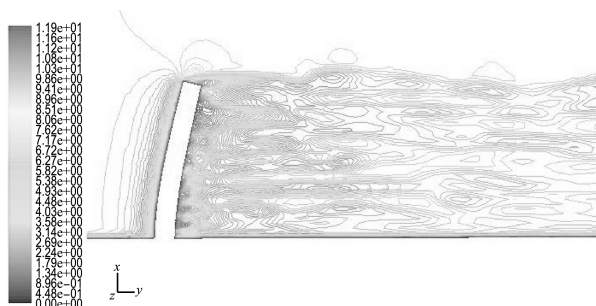


图 12 第 3 s 顺风向风场速度分布

Fig. 12 Velocity distribution of airflow for the downwind direction at 3rd second

3 结 论

(1) 不考虑耦合作用结构顶部位移响应误差较大, 因此对于细长结构应考虑流体与结构的耦合影响。

(2) 本文提出的 FSI 近似模型与 ANSYS 计算的 FSI 弹性模型的结构响应有一致性, 但也存在一定差别; 流体求解器不同所造成的误差还需要进一步分析。

(3) 从结构的响应特点可以看出, 横向振动位移随着风速的降低相对稳定; 顶部横风向位移峰值随着风速增加而呈非线性增大。

参考文献:

- [1] THEODORSEN T. General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter [R] // **NACA TR496**. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, 1934
- [2] 崔尔杰. 流固耦合力学研究与应用进展[C] // 钱学森科学贡献暨学术思想研讨会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2001:144-145
- [3] 邢景棠, 周 盛, 崔尔杰. 流固耦合力学概述[J]. 力学进展, 1997, **27**(1):19-38
- [4] KHALA K A, WILLIAMSON C H K. Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping [J]. **Journal of Fluid and Structures**, 1999, **13**(7-8):813-851
- [5] WEI R, SEKINE A, SHINURA M. Numerical analysis of 2D vortex-induced oscillation of a circular cylinder [J]. **International Journal for Numerical Method in Fluids**, 1995, **21**(10):993-1005
- [6] TALLEC P L, MOURO J. Fluid structure interaction with large structural displacements [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2001, **190**(24-25):3039-3067
- [7] YANG J, PREIDIKMAN S, BALARAS E. A strongly coupled, embedded-boundary method for fluid-structure interactions of elastically mounted rigid bodies [J]. **Journal of Fluids and Structures**, 2008, **24**(2):167-182
- [8] 徐 刚, 任文敏, 张 维, 等. 储液容器的三维流固耦合动力特征分析[J]. 力学学报, 2004, **36**(3), 328-335
- [9] 岳宝增, 刘延柱, 王照林. 非线性流固耦合问题的 ALE 分布有限元数值方法[J]. 力学季刊, 2001, **22**(1):34-39

- [10] 刘云贺, 俞茂宏, 陈厚群. 流体固体动力耦合分析的有限元法[J]. 工程力学, 2005, **22**(6):1-6
- [11] 张立翔, 杨 柯. 流体结构互动理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [12] 武 岳. 考虑流固耦合作用的索膜结构风致响应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003
- [13] 沈世钊, 武 岳. 膜结构风振响应中的流固耦合效应研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, **23**(1):1-9
- [14] 徐 枫, 欧进萍. 低雷诺数下弹性圆柱体涡激振动及影响参数分析[J]. 计算力学学报, 2009, **26**(5): 613-619
- [15] FELIPPA C A, PARK K C, FARHAT C. Partitioned analysis of coupled mechanical systems [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2001, **190**(24-25):3247-3270
- [16] JAIMAN R, GEUDELE P, LOTH E, *et al.* Combined interface boundary condition method for unsteady fluid-structure interaction [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2011, **200**(23-24):27-39
- [17] YELLAPRAGADA L S, PHAN A V, KAPLAN T. A sequential fluid-solid weak coupling analysis of the SPE in stressed Si layers [J]. **Mechanics Research Communications**, 2007, **34**(7-8):545-552
- [18] 喻 萌. 基于 ANSYS 的输流管道流固耦合特性分析[J]. 中国舰船研究, 2007, **2**(5):54-57
- [19] 王春江, 李向民, 陈 锋. 长单索结构的多参数流固耦合分析[J]. 力学与实践, 2010, **32**(4):22-25
- [20] 郑淑飞, 丁 桦. 基于变形修正的局部刚体化动力模型简化方法[J]. 力学与实践, 2008, **30**(6):31-34
- [21] 程保荣, 郑兆昌. 三维梁系结构刚体元-柔性连接元动力分析模型[J]. 清华大学学报, 1996, **36**(3):12-17
- [22] 钟万勰. 结构动力方程的精细时程积分方法[J]. 大连理工大学学报, 1994, **34**(2):131-136
(ZHONG Wan-xie. On precise time-integration method for structural dynamics [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 1994, **34**(2):131-136)
- [23] FELTEN F, FAUTRELLE Y, TERRAIL Y D. Numerical modeling of electromagnetically-driven turbulent flows using LES methods [J]. **Applied Mathematical Modeling**, 2004, **28**(1):15-27

Coupling analysis of wind-induced responses of cylindrical structure based on beam-rigid element model

LI Gang^{*1,2}, CAO Wen-bin^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: An approximate model of wind-induced responses of the cylindrical structure is proposed based on the beam-rigid element method, and the weak fluid-structure interaction analysis is executed by using the FLUENT code of computational fluid dynamics (CFD) technology combined with dynamic meshing method, and the precise integration method is employed to improve the computational efficiency. The top displacement and acceleration of a 3-D cylindrical structure under different wind speeds are compared based on the proposed beam-rigid element approximate model, rigid model and elastic model. The experimental results show that the increment of wind speed nonlinearly increases the amplitude of across-wind vibration. For the rigid model, the neglect of coupling between fluid and structure may lead to bigger errors.

Key words: beam-rigid element; weak fluid-structure interaction; precise integration; dynamic mesh; wind-induced response