

文章编号:1673-2049(2013)02-0070-06

基于 CIBC 迭代耦合技术的矩形柱扭转驰振分析

马 晋,周 岱,何 涛

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240)

摘要:针对流固耦合分区求解算法存在的时间滞后效应,提出了一种改进型结合界面边界方法(改进型 CIBC 方法),同时避免了原始结合界面方法(CIBC 方法)必须调用未经修正的结构拖曳力。在此基础上构建了隐式耦合算法和半隐式耦合算法,并采用固定点迭代技术结合 Aitken 加速策略实现迭代过程。采用本文方法对一矩形柱的流致自由扭转驰振进行了分析,并与已有文献结果进行了对比。结果表明:本文计算结果与已有文献数据吻合良好,验证了本文方法的有效性;隐式耦合算法和半隐式耦合算法均成功地揭示了扭转驰振现象,且具有较高的计算效率。

关键词:有限元方法;流固耦合;分区迭代算法;结合界面边界方法;特征线分离算法

中图分类号:TU311.3

文献标志码:A

Analysis of Rotationally Oscillating Rectangular Cylinder Based on CIBC Iterative Coupling Technique

MA Jin, ZHOU Dai, HE Tao

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China)

Abstract: Partitioned solution approach for fluid-structure interaction was born with the time lag effect. In order to alleviate the adverse effect, a new formulation of the combined interface boundary condition (CIBC) method was developed. Meanwhile, authors modified the CIBC method to repair the inconvenience that the original CIBC method had to invoke the uncorrected traction when forming the structural traction correction. Then two partitioned algorithms including the implicit coupling strategy and semi-implicit coupling strategy were presented based on the modified CIBC method. Both iterative loops were actualized by the fixed-point iteration algorithm and the Aitken acceleration method. A rotationally oscillating rectangular cylinder was analyzed using the proposed method, and comparisons of the calculation results in the paper and documented data were carried out. The results show that the obtained results in the paper agree well with the documented data. The well-known flow phenomena, rotational galloping have been exposed successfully, and the partitioned algorithm has high computation efficiency.

Key words: finite element method; fluid-structure interaction; partitioned iterative algorithm; combined interface boundary condition method; characteristic-based split method

收稿日期:2013-02-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51078230,11172174)

作者简介:马 晋(1989-),男,山东滕州人,工学博士研究生,E-mail:mj5678316@163.com。

0 引 言

在流固耦合理论和工程实践中,研究分区迭代算法具有重要意义。Jaiman 等^[1]提出了基于结合界面边界方法(Combined Interface Boundary Condition Method, CIBC 方法)的分区算法来求解流固耦合问题。该方法在 2 个连续时间步上构造界面处的速度与拖曳力的修正项,以缓解流固耦合计算中弱耦合分区算法的时间滞后效应,其修正效果主要通过耦合参数 ω 来调整。然而, CIBC 方法必须调用未经修正的结构拖曳力,因此本文中笔者提出一种改进型结合界面边界方法(改进型 CIBC 方法),采用新耦合参数 $\omega/\Delta t$ 调整流体-结构界面处的修正效果, Δt 为时间步长。鉴于改进型 CIBC 方法已有成功应用实例,并揭示了一些重要流动现象^[2-3],本文中构建了 2 种基于改进型 CIBC 方法的分区迭代耦合算法,即隐式耦合算法和半隐式耦合算法(它们属于弱耦合算法范畴),并将其用于求解钝体结构的流固耦合问题。

1 流体动力学及结构动力学

对于一般性的流体运动,其控制方程可用任意拉格朗日-欧拉(ALE)描述下的 Navier-Stokes 方程予以刻画,现假定流体具有粘性和不可压缩性,则量纲一化的 Navier-Stokes 方程表示为

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{c} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla p - \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} - \mathbf{f} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = -p\mathbf{I} + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (3)$$

式中: ∇ 为梯度算子; \mathbf{u} , p 分别为流体速度和压力; \mathbf{c} 为对流速度; $\boldsymbol{\tau}$ 为应变率张量; 时间步长 $\Delta t = t^{n+1} - t^n$, t 为时间, t^n , t^{n+1} 分别为第 n 时刻和第 $n+1$ 时刻的时间; Re 为雷诺数, $Re = \rho UL/\mu$, U , L 分别为特征速度和特征长度, μ 为流体粘度系数; ρ 为流体密度; \mathbf{f} 为流体体力; \mathbf{I} 为单位矩阵。

方程式(1)~(3)由半隐式特征线分离算法(CBS)来求解^[4],其主要步骤为:

(1)求解中间速度场 $\tilde{\mathbf{u}}$

$$\tilde{\mathbf{u}} - \mathbf{u}^n = \Delta t \{ -\mathbf{c} \cdot \nabla \mathbf{u} + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{c} \cdot \nabla (\mathbf{c} \cdot \nabla \mathbf{u})] \}^n \quad (4)$$

(2)更新压力场

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} \quad (5)$$

(3)修正速度场

$$\mathbf{u}^{n+1} - \tilde{\mathbf{u}} = -\Delta t \{ \nabla p^{n+1} + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{c} \cdot \nabla (\nabla p)]^n \} \quad (6)$$

式中: \mathbf{u}^n , \mathbf{u}^{n+1} 分别为第 n 时刻和第 $n+1$ 时刻的流体速度。

其中,流体体力 \mathbf{f} 和三阶项均略去。采用标准 Galerkin 有限元进行空间离散,单元选取三节点三角形单元(T3 单元)。为节省计算时间,采用集中质量矩阵。

钝体结构可以看作刚体,其运动控制方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (7)$$

式中: \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} 分别为结构刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵; $\ddot{\mathbf{X}}$, $\dot{\mathbf{X}}$, \mathbf{X} 分别为结构加速度矩阵、速度矩阵和位移矩阵; \mathbf{F} 为流体力矩阵。

结构运动方程采用量纲一化求解,具体表达式及相关换算系数参见文献[3],时间积分方案采用 Newmark- β 法。

2 动网格更新

在流固耦合问题中,网格更新技术是一个关键问题。本文中采用子块移动技术(MSA)来更新动网格^[5]。该方法具有高效、易于操作、无需特殊光滑处理等优点,其核心思想是将一组粗网格(称作子块)覆盖在流体网格上,然后根据子块移动按给定插值公式来确定每个子块内的流体网格节点位移。MSA 技术的主要思路是:①提取流体网格和子块网格的信息;②找出所有系统节点相对应的子块;③计算子块内系统节点的插值系数;④根据界面条件推进子块运动;⑤根据插值系数更新流体网格。

应当指出:子块仅适用于三角形单元;前 3 步只需在计算开始前执行一次;第 4 步既可用结构的绝对位移,也可用结构的相对位移;对于外形复杂的结构,可用密封胶囊盒把结构置于规则盒子中;若存在内部子块节点,还需要结合弹簧近似法等其他技术^[6]。

3 几何守恒律

在流体动网格问题中会遇到几何守恒律问题。一般认为,满足几何守恒律有助于改善整体耦合方案的精度和能量守恒。为满足几何守恒律,本文中在 CBS 算法的更新压力场中引入质量源项^[7]

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 p^{n+1} &= \frac{1}{\Delta t} \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} + S_{\text{mst}} \\ S_{\text{mst}} &= \frac{1}{2A_e} \begin{vmatrix} w_1^2 - w_1^1 & w_2^2 - w_2^1 \\ w_3^2 - w_3^1 & w_2^3 - w_2^1 \end{vmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: S_{mst} 为质量源项; w_i^j 流体质量随体积变化的变化率; A_e 为单元 e 的面积; i 为单元 e 节点, $i=1, 2, 3$; j 表示坐标方向, $j=1, 2$ 。

引入质量源项后, 采用分步算法的流体求解方法, 可以避免繁杂地构造界面处的网格速度差分格式, 然而, 其仅能用于 T3 单元。

4 改进型 CIBC 方法

CIBC 方法用以补偿弱耦合分区求解时因时间滞后而忽略流体-结构界面 Γ_{fs} 处的“某些物理效应”, 它由以下 2 个计算公式组成。基于 CIBC 方法的速度增量 $\delta \mathbf{u}_*^n$ 和拖曳力增量 $\delta \boldsymbol{\sigma}_*^{n+1}$ 分别表示为

$$\delta \mathbf{u}_*^n = \frac{\Delta t}{\rho_f} \left[\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_f^n}{\partial n_i} - \omega \left(\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_f^n}{\partial t} - \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_s^n}{\partial t} \right) \right] \quad (9)$$

$$\delta \boldsymbol{\sigma}_*^{n+1} = \Delta t \left[-\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_s^{n+1}}{\partial t} + \frac{1}{\omega} \left(\rho_f \frac{\partial \mathbf{u}_s^{n+1}}{\partial t} - \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_f^{n+1}}{\partial n_i} \right) \right] \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}_f^n, \boldsymbol{\sigma}_f^{n+1}$ 分别为第 n 时刻和第 $n+1$ 时刻的流体拖曳力; $\boldsymbol{\sigma}_s^n, \boldsymbol{\sigma}_s^{n+1}$ 分别为第 n 时刻和第 $n+1$ 时刻界面处的拖曳力。

此时, 界面处的速度 \mathbf{u}_f^{n+1} 和拖曳力 $\boldsymbol{\sigma}_s^{n+1}$ 可以修正为

$$\mathbf{u}_f^{n+1} = \mathbf{u}_s^{n+1} + \delta \mathbf{u}_*^n \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_s^{n+1} = \boldsymbol{\sigma}_f^{n+1} + \delta \boldsymbol{\sigma}_*^{n+1} \quad (12)$$

改进型 CIBC 方法的计算公式中, 量纲一化的速度增量 $\delta \mathbf{u}_*^n$ 和拖曳力增量 $\delta \boldsymbol{\sigma}_*^{n+1}$ 的表达式分别为

$$\delta \mathbf{u}_*^n = \Delta t \left[\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_f^n}{\partial n_i} + \omega \frac{\partial (\delta \boldsymbol{\sigma}_*^n)}{\partial t} \right] \quad (13)$$

$$\delta \boldsymbol{\sigma}_*^{n+1} = \frac{\Delta t}{2\omega} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_s^{n+1}}{\partial t} - \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}_f^{n+1}}{\partial n_i} \right) \quad (14)$$

由于速度具有连续性, 因此, 在界面处尚必须保持位移连续性, 即

$$d\mathbf{X}_f^{n+1} = d\mathbf{X}_s^{n+1} + (\delta \mathbf{u}_*^n - \delta \mathbf{u}_*^{n-1}) \Delta t \quad (15)$$

5 分区迭代算法

基于上述改进型 CIBC 方法, 现给出 2 种分区迭代耦合算法, 即隐式耦合算法和半隐式耦合算法。隐式耦合算法的主要步骤为:

- (1) 初始化所有变量。
- (2) 确定 n 时刻的结构变量和网格位置。
- (3) 利用二阶精度结构预测步骤预测流固耦合界面位移 $\mathbf{X}_{\Gamma, p}^{n+1}$ [8]

$$\mathbf{X}_{\Gamma, p}^{n+1} = \mathbf{X}_{\Gamma}^n + \left(\frac{3}{2} \dot{\mathbf{X}}_{\Gamma}^n - \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}_{\Gamma}^{n-1} \right) \Delta t \quad (16)$$

式中: \mathbf{X}_{Γ}^n 为第 n 时刻的界面位移; $\mathbf{X}_{\Gamma, p}^n$ 为第 n 时刻的预测界面位移。

(4) 更新流固耦合界面坐标。

(5) 利用 MSA 技术更新 ALE 网格, 并计算网格移动速度。

(6) 引入质量源项满足几何守恒律。

(7) 必要时求得流固耦合界面处法线向量。

(8) 求解式(4), (6), (8) 来确定新的流体变量, 并计算流体力。

(9) 利用式(14)计算拖曳力增量, 并根据式(12)修正结构拖曳力。

(10) 将拖曳力施加给结构, 求解式(7), 确定新的结构响应变量。

(11) 利用式(13)获得速度增量, 并根据式(11)修正流体速度。

(12) 利用式(15)满足界面上的位移连续性。

(13) 计算界面残差 $\mathbf{g}_{\Gamma}^{n+1}$

$$\mathbf{g}_{\Gamma}^{n+1} = \mathbf{X}_{\Gamma}^{n+1} - \mathbf{X}_{\Gamma, p}^{n+1} \quad (17)$$

(14) 检查收敛性, 若收敛, 则进入下一个时刻。

(15) 若式(14)中检查不收敛, 求解 Aitken 松弛系数 λ , 参见文献[9]。

(16) 预测新的流固耦合界面位置, 即

$$\mathbf{X}_{\Gamma, p, \text{new}}^{n+1} = \lambda \mathbf{X}_{\Gamma}^{n+1} + (1 - \lambda) \mathbf{X}_{\Gamma, p}^{n+1} \quad (18)$$

(17) 返回第 4 步。

半隐式耦合算法是在 CBS 流体求解器的基础上发展而来, 其主要步骤为:

- (1) 初始化所有变量。
- (2) 确定 n 时刻的结构变量和网格位置。
- (3) 利用式(16)外推流固耦合界面坐标。
- (4) 利用 MSA 技术更新 ALE 下的网格, 并计算网格速度。

(5) 利用式(4)求解中间速度。

(6) 引入质量源项满足几何守恒律。

(7) 求解式(6), (8) 来确定新的流体变量, 并计算流体力。

(8) 根据式(14)求得拖曳力增量, 并利用式(12)修正结构拖曳力。

(9) 将拖曳力施加给结构, 求解式(7), 确定新的结构响应变量。

(10) 利用式(13)获得速度增量, 并根据式(11)修正流体速度。

(11) 利用式(15)满足流固耦合界面上的位移连续性。

(12) 根据式(17)分析流固耦合界面残差。

(13) 检查收敛性, 若收敛, 则进入下一个时刻。

(14) 若式(13)中检查不收敛, 分析 Aitken 松弛

系数 λ , 参见文献[9]。

(15) 根据式(18)预测新的流固耦合界面位置。

(16) 计算网格移动速度作为流体边界条件。

(17) 返回第 6 步。

6 算例分析

钝体结构的流致振动具有很强的工程应用背景,如土木工程中桥梁结构的驰振、颤振等气动弹性失稳现象,因而受到关注。现数值计算不可压缩粘性流体作用下矩形柱的自由扭转,揭示其扭转驰振现象。几何模型和边界条件如图 1 所示,子块网格划分如图 2 所示,矩形柱的长宽比 $B/D=4$, B, D 分别为矩形柱的长度和宽度。其他物理参数设置为:质量比 400, 阻尼比 0.25, 换算频率 0.025 Hz, 雷诺数 $Re=250$ 。图 1 中, A1 为欧拉域, A1 内的所有节点保持固定不动; A2 为 ALE 域, A2 内的所有节点运动都由 MSA 技术确定。边界条件设置: u_1, u_2 均为入口速度; 出口压力 $p=0$; 上下水平边界处为自由边界条件。

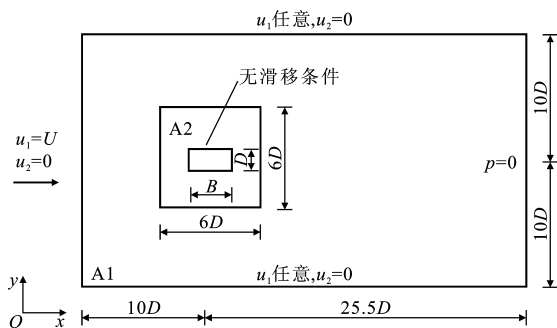


图 1 几何模型和边界条件

Fig. 1 Geometric Model and Boundary Conditions

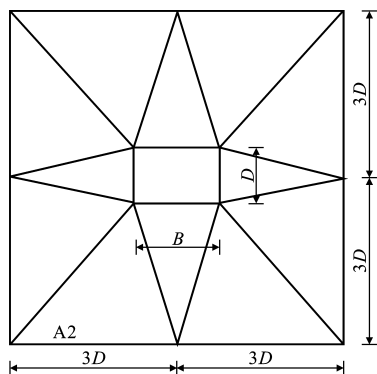


图 2 子块网格划分

Fig. 2 Mesh for Substructure

为进行网格无关性测试,本文中 choice 3 种不同的网格划分方案,即 M1(4 579 个节点和 8 992 个 T3 单元)、M2(8 596 个节点和 16 998 个 T3 单元)和 M3(16 007 个节点和 31 792 个 T3 单元)。计算

结果如表 1 所示,其中, θ_{\max} 为最大扭转位移, f_v 为涡脱落频率, f_0 为柱振动频率, f_n 为基本频率, $C_{d, \text{mean}}$ 为流体阻力系数平均值, $C_{l, \text{rms}}$ 为升力系数均方根值, $C_{m, \text{max}}$ 为流体冲量矩系数最大值, $C_{m, \text{rms}}$ 为流体冲量矩系数均方根值, St 为斯托鲁哈尔数, $f_v/f_n, f_0/f_n$ 分别为涡脱落频率和柱振动频率与基本频率之比,选取耦合参数 $\omega/\Delta t=100$ 。由表 1 可以看出,基于不同网格划分的计算结果十分接近;在相同的网格划分下,隐式耦合算法和半隐式耦合算法计算结果几乎无差别。综合考虑计算效率和计算精度等因素,本文中的网格划分选用方案 M1。

在数值计算中,合理选取时间步长的重要性不言而喻。为了考虑时间步对矩形柱流致转动的影响,本文中考虑了 3 个不同的时间步长,即 $\Delta t=0.01, 0.02, 0.04$ 。所有计算均基于 M1 网格,计算结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,所选时间步长对计算结果影响非常小,且 2 种耦合迭代算法的计算结果亦十分接近。考虑到计算成本因素,本文中选取 $\Delta t=0.04$ 。

综上所述,表 3 中对比了本文计算结果与文献[10],[11]中的结果。从表 3 可以看出,本文中计算的扭转位移、涡脱落频率和振动频率均稍大于已有文献结果。涡脱落频率为高频,柱振动频率为低频,此时柱子运动由高频控制,根据文献[12]中给出的定义,本文中的 2 种耦合迭代算法均成功地揭示了扭转驰振现象。

图 3 中给出了 2 种耦合迭代算法所得的扭转角 θ 的位移时程。从图 3 可以看出,矩形柱在流体流动作用下产生了稳定、规律的自由扭转;隐式耦合算法所得到的位移时程曲线稍优于半隐式耦合算法。图 4 为 $Re=250$ 时的矩形柱自由振动涡量场。由图 4 可见,涡脱落模式表现较混乱,与圆柱情形不同,难以用传统的 2S 或 C(2S)(卡门涡街)解释^[13]。

7 结 语

针对钝体结构的流固耦合问题,笔者给出了一种改进型结合界面边界方法,并基于此提出了隐式耦合算法和半隐式耦合算法这 2 种耦合迭代算法。采用固定点迭代技术并配以 Aitken 加速策略实现迭代过程,基于流体 CBS 方法提出了实现半隐式耦合算法的步骤,其与隐式耦合算法相比,可有效地缩减计算时间。与 CIBC 方法不同,本文中改进型结合界面边界方法运用新耦合参数 $\omega/\Delta t$ 来调整流固界面处的速度和拖曳力修正,可维持界面处位移连

表 1 不同网格划分方案的计算结果

Tab. 1 Calculation Results of Different Mesh Schemes

网格划分方案	耦合算法	θ_{\max}/rad	$C_{d,\text{mean}}$	$C_{l,\text{rms}}$	$C_{m,\text{max}}$	$C_{m,\text{rms}}$	St	$f_v f_n^{-1}$	$f_0 f_n^{-1}$
M1	隐式	0.312	3.058 4	6.728 9	4.391 0	2.569 7	0.140 9	5.636 4	0.805 2
	半隐式	0.310	2.949 7	6.519 2	4.341 5	2.477 4	0.141 2	5.648 8	0.805 2
M2	隐式	0.304	2.952 0	6.705 9	4.318 1	2.517 6	0.141 2	5.636 4	0.805 2
	半隐式	0.303	2.904 0	6.595 9	4.268 5	2.444 3	0.141 5	5.660 8	0.805 2
M3	隐式	0.316	2.975 7	7.030 3	4.651 5	2.789 6	0.139 1	5.562 0	0.792 8
	半隐式	0.315	2.958 4	6.986 0	4.631 1	2.769 6	0.139 4	5.574 4	0.792 8

表 2 不同时间步长的计算结果

Tab. 2 Calculation Results for Different Time Step Sizes

时间步长	耦合算法	θ_{\max}/rad	$C_{d,\text{mean}}$	$C_{l,\text{rms}}$	$C_{m,\text{max}}$	$C_{m,\text{rms}}$	St	$f_v f_n^{-1}$	$f_0 f_n^{-1}$
0.01	隐式	0.311	3.011 5	6.967 5	3.011 5	2.853 1	0.182 7	7.306 0	0.817 2
	半隐式	0.309	3.008 1	2.847 3	4.755 8	2.847 3	0.182 7	7.306 0	0.817 2
0.02	隐式	0.317	3.058 4	6.931 3	4.530 3	2.725 4	0.139 7	5.586 4	0.792 8
	半隐式	0.316	3.043 9	6.893 5	4.516 0	2.703 3	0.139 7	5.586 4	0.792 8
0.04	隐式	0.312	3.058 4	6.728 9	4.391 0	2.569 7	0.140 9	5.636 4	0.805 2
	半隐式	0.310	2.949 7	6.519 2	4.341 5	2.477 4	0.141 2	5.648 8	0.805 2

表 3 扭矩和频率计算结果比较

Tab. 3 Comparisons of Calculation Results
Between Torsion and Frequency

数据来源	θ_{\max}/rad	St	$f_v f_n^{-1}$	$f_0 f_n^{-1}$
文献[10]	0.262			0.762 0
文献[11]	0.267	0.130 0	5.200 0	0.800 0
本文隐式耦合算法	0.312	0.140 9	5.636 4	0.805 2
本文半隐式耦合算法	0.310	0.141 2	5.648 8	0.805 2

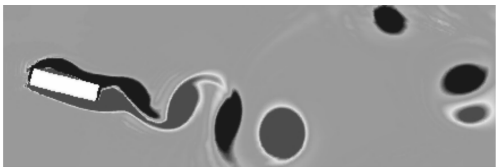


图 4 $Re=250$ 时的矩形柱自由振动涡量场
Fig. 4 Vorticity Field of Freely Oscillating
Rectangular Cylinder at $Re=250$

续性,不必调用未经修正的结构拖曳力。采用半隐式 CBS 流体有限元算法求解不可压缩 Navier-Stokes 方程;采用 Newmark- β 法求解结构的刚体运动方程;在动网格更新策略中,采用子块移动技术结合正交-半扭转弹簧近似法,且在压力泊松方程中引入质量源项,以保证几何守恒律。本文计算结果与已有文献数据吻合良好,揭示了扭转驰振现象,验证了本文数值方法的有效性。

参考文献:

References:

[1] JAIMAN R, GEUBELLE P, LOTH E, et al. Combined Interface Boundary Condition Method for Unsteady Fluid-structure Interaction [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011,200:27-39.

[2] 周 岱,何 涛,涂佳黄. 流固耦合分析的一种改进 CBS 有限元算法[J]. 力学学报, 2012, 44(3): 494-504.

ZHOU Dai, HE Tao, TU Jia-huang. A Modified CBS Finitie Element Approach for Fluid-structure Interac-

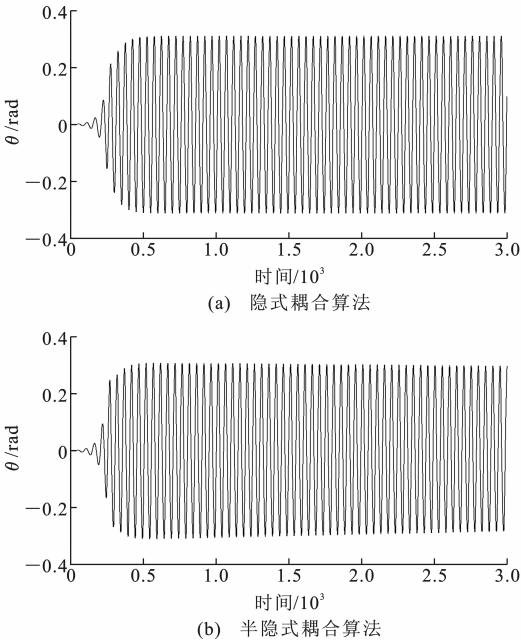


图 3 $Re=250$ 时的矩形柱位移时程

Fig. 3 Time Histories of Rectangular Cylinder
Displacement at $Re=250$

- tion[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(3): 494-504.
- [3] HE T, ZHOU D, BAO Y. Combined Interface Boundary Condition Method for Fluid-rigid Body Interaction[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 223/224: 81-102.
- [4] NITHIARASU P, CODINA R, ZIENKIEWICZ O C. The Characteristic-based Split (CBS) Scheme—A Unified Approach to Fluid Dynamics[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, 66(10): 1514-1546.
- [5] LEFRANCOIS E. A Simple Mesh Deformation Technique for Fluid-structure Interaction Based on a Sub-mesh Approach[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2008, 75(9): 1085-1101.
- [6] MARKOU G A, MOUROUTIS Z S, CHAMPIS D C, et al. The Ortho-semi-torsional (OST) Spring Analogy Method for 3D Mesh Moving Boundary Problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 196(4/5/6): 747-765.
- [7] JAN Y J, SHEU T W H. Finite Element Analysis of Vortex Shedding Oscillations from Cylinders in the Straight Channel [J]. Computational Mechancis, 2004, 33(2): 81-94.
- [8] PIPERNO S. Explicit/Implicit Fluid/Structure Staggered Procedures with a Structural Predictor and Fluid Subcycling for 2D Inviscid Aeroelastic Simulations[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1997, 25(10): 1207-1226.
- [9] KUTTLER U, WALL W. Fixed-point Fluid-structure Interaction Solvers with Dynamic Relaxation[J]. Computational Mechancis, 2008, 43(1): 61-72.
- [10] DETTMER W, PERIC D. A Computational Framework for Fluid-rigid Body Interaction: Finite Element Formulation and Applications[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(13): 1633-1666.
- [11] ROBERTSON I, LI L, SHERWIN S J, et al. A Numerical Study of Rotational and Transverse Galloping Rectangular Bodies[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 17(5): 681-699.
- [12] BLEVINS R D. Flow-induced Vibration[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Co. Inc., 1990.
- [13] WILLIAMSON C H K, ROSHKO A. Vortex Formation in the Wake of an Oscillating Cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures, 1988, 2(4): 355-381.

(上接第 54 页)

- Health Monitoring, 2004, 11(2): 91-124.
- [10] NAGAYAMA T. Structural Health Monitoring Using Smart Sensor[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.
- [11] 阎 石, 张 亮, 王 丹. 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的破坏模式分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2005, 21(3): 177-180.
- YAN Shi, ZHANG Liang, WANG Dan. Failure Mode Analysis for RC Slab Under Explosive Loads[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2005, 21(3): 177-180.
- [12] 张 舵, 卢芳云, 王瑞峰. 钢筋混凝土板在爆炸作用下的破坏研究[J]. 弹道学报, 2008, 20(2): 13-16.
- ZHANG Duo, LU Fang-yun, WANG Rui-feng. Study on Destruction of Reinforced Concrete Slab Under Blast Loading[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(2): 13-16.
- [13] JAMES G H, CARNE T G. The Natural Excitation Technique for Modal Parameter Extraction from Ambient Operating Structure[J]. The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1995, 10(4): 260-277.
- [14] KUNG S Y. A New Identification and Model Reduction Algorithm Via Singular Value Decomposition [C]//HSIEH C C. Proceedings of the 12th Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers. New York: IEEE, 1978: 705-714.
- [15] 吕志民, 张武军, 徐金梧. 基于奇异谱的降噪方法及其在故障诊断技术中的应用[J]. 机械工程学报, 1999, 35(3): 85-88.
- LU Zhi-min, ZHANG Wu-jun, XU Jin-wu. A Noise Reduction Method Based Singular Spectrum and Its Application in Machine Fault Diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(3): 85-88.
- [16] 李 睿, 于德介, 曾 威. 一种基于奇异谱熵和脉冲响应的结构损伤诊断方法[J]. 振动工程学报, 2006, 19(3): 331-335.
- LI Rui, YU De-jie, ZENG Wei. Damage Diagnosis of Structures Based on Singular Spectrum Entropy and Impulse Response[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(3): 331-335.
- [17] 杨文献, 任兴民, 姜节胜. 基于奇异熵的信号降噪技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19(3): 368-371.
- YANG Wen-xian, REN Xing-min, JIANG Jie-sheng. On Improving the Effectiveness of the New Noise Reduction Technique Based on Singularity Spectrum[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2001, 19(3): 368-371.