

坝体—库水相互作用的流固耦合分析

陈 江 张少杰 闵兴鑫

(四川大学水电学院 四川成都 610065)

摘要: 采用 Ansys 中的声学流体单元模拟库水, 进行了某重力坝与库水的流固耦合分析。考虑了库底吸收系数对坝库耦合系统动力响应的影响, 计算结果表明: 库底吸收性显著降低了动水压力, 吸收系数越大, 效果越明显; 位移反应也有所减小。比较了 Ansys 与 Adina 的计算结果及效率, 结果表明: 两者的计算结果基本一致, Adina 的计算效率高于 Ansys, 但 Ansys 的前后处理较 Adina 高效。

关键词: 流固耦合 动水压力 地震反应 混凝土坝

中图分类号: TV642 O353.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-8755(2009)01-0013-07

Fluid-solid Coupling Analysis for Dam-reservoir Interaction

CHEN Jiang ZHANG Shao-jie MIN Xing-xin

(College of Hydraulic & Hydroelectric Engineering, Sichuan University,
Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract Fluid-solid coupling analysis was carried out for a gravity dam and reservoir; the reservoir was simulated by acoustic fluid element in Ansys. The influence of reservoir-bottom absorption coefficient to dynamic response of dam-reservoir coupling system was considered. The results show that the absorption capability reduces the hydrodynamic pressure significantly. The bigger the absorption coefficient, the more obvious the effect is, and the displacement response also decreases slightly. The computational results and efficiency were compared between Ansys and Adina. They both have accordant computational results. The computational efficiency of Adina is higher than Ansys, but Ansys has higher efficiency in pre-processing and post-processing.

Key words Fluid-solid coupling; Hydrodynamic pressure; Seismic response; Concrete dam

坝—库系统在地震时的相互作用是水工抗震设计的重要课题。自韦斯特伽特(H. M. Westergaard)发表其著名论文《地震时作用于坝面上的动水压力》^[1]以来,已经过去了 70 多年,由于这个问题在实际工程中的重要性,长期以来受到世界各国学者的关注。

早期,由于计算条件的限制,研究工作以寻求问题的解析解为主,计算模型通常采用许多简化手段,得到的解答只具有理论上的意义。随着计算机技术的发展及各种数值计算方法的涌现,坝—库流固耦合问题可以采用更接近实际的计算模型并考虑复杂的边界条件。用于求解流固耦合问题的数值计算方法主要有:有限元法^[2-9]、边界元法^[10-11]、无网格法^[12]、混合型方法^[13-14]。

在有限元法中,根据不同的目标函数,可以归纳为两大类^[15]:拉格朗日法^[2-6](流体采用位移模式)和欧拉法^[7](流体采用压力等标量函数)。拉格朗日法是一种位移—位移求解模式,即流体和固体均采用固体力

收稿日期: 2008-10-05

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90715026)。

作者简介: 陈江(1982-),男,博士生,研究方向: 计算机方法及工程检测。E-mail: dxjife@126.com。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

学中的拉格朗日坐标系。其好处是可以把结构分析的通用程序直接应用到流体域中,且自动满足流固耦合边界上的变形协调条件。文献[2-5]等采用该方法进行了流固耦合分析,计算中把流体的剪切刚度设为 0 因此固体与流体之间只满足正交位移连续性。Akkas 等^[3]发现,由于把剪切刚度设为 0 导致流体矩阵奇异,为了消除这一病态,Wilson 等^[4]提出在计算中引入一个惩罚项,并对流体进行无旋运动限制,通过改变惩罚项的参数来解决这一困难。欧拉法对固体和流体分别使用不同的坐标系,固体采用拉格朗日坐标系下的位移为场变量,流体采用欧拉坐标系下的标量函数为场变量。这是一种混合型格式,可以是位移-压力场^[7]、位移-速度势^[8]。在这种方法中,由于流体的场变量已经满足流体运动的无旋条件,不会出现流体矩阵奇异的问题,同时由于在流体单元中每个节点上仅有一个自由度(拉格朗日法为 2~3 个自由度),缩小了方程阶数,提高了计算效率。

近 10 余年来,随着商品化通用有限元软件的推广,为大型坝-库流固耦合问题的分析提供了更加方便、快捷的手段。在大家熟悉的通用有限元软件中,Ansys 和 Adina 都能进行坝-库相互作用的流固耦合分析,它们采用的格式各不相同。Ansys 提供两种格式:拉格朗日法中的位移-位移格式(对应 fluid 79 和 fluid 80 单元)和欧拉法中的位移-压力场格式(对应 fluid 29 和 fluid 30 单元);Adina 提供两种格式:拉格朗日法中的位移-位移格式(位移格式的流体单元)和欧拉法中的位移-速度势格式(势流单元)。本文重点研究 Ansys 中的位移-压力场格式,辅以 Adina 中的位移-速度势格式进行了比较。

1 坝-库相互作用问题的特征

坝-库相互作用问题是典型的流固耦合问题,它是研究变形坝体在库水作用下的行为以及坝体变形对库水影响的一门学科,涉及固体力学、振动力学和流体力学,是一个典型的多学科综合问题^[16]。

坝-库相互作用问题最重要的力学特征是坝体和库水之间的相互作用——可变形的坝体在库水作用下产生变形和运动,而这个变形和运动又反过来影响库水的状态,导致库水荷载的分布和大小发生改变^[16]。一般说来,这类问题中用来描述不同介质状态的主要变量和它们应该满足的控制微分方程是不同的,而且通常不能简单地用一类变量消去另一类变量,即问题是耦合的。

坝-库相互作用问题可分为重叠型耦合和接触型耦合。重叠型耦合是指坝体和库水部分或全部重叠在一起,难以明显地分开,使得描述其物理性质的方程,尤其是本构方程需要针对具体的物理现象才能建立起来,如渗流场、温度场、应力场之间的耦合。接触型耦合是指坝体和库水的相互作用仅发生在交界面上,坝体和库水有各自的描述方法和力学性能特征,其联系在于耦合面上的力学平衡及运动协调。

2 坝-库相互作用的流固耦合数学模型^[17]

2.1 库水的动力平衡方程

在一般情况下,流体应满足连续方程(质量守恒)、动量方程(动量守恒)、能量方程(能量守恒)。直接对上述方程进行处理是相当复杂的,在实际工程应用中,对于某些特殊问题,可引入一些假定而使问题得到简化。

如图 1 所示坝-库流固耦合系统,对库水作如下假定:(1)流体是无旋、无粘的且无热交换;(2)流体可压缩;(3)流体是均质的;(4)小变形,流速远小于流体中的声速。

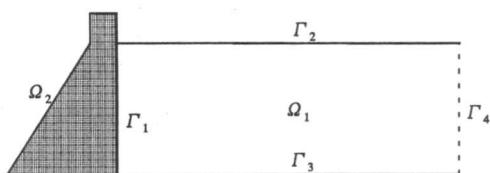


图 1 坝-库流固耦合系统

Fig.1 Dam-reservoir fluid-solid coupling system

在以上假定下,可得到以压力 P 为目标函数的波动方程:

$$\frac{1}{c^2} \ddot{P} - \nabla^2 P = 0 \quad (1)$$

式中: $c = \sqrt{k/\rho}$ 为流体中的声速; k 为流体的体积模量; ρ 为流体的密度。

需要满足的边界条件为:

(1) 在坝与库水的交界面 Γ_1 上:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_n \quad (2)$$

式中: n 为坝库交界面的法线方向; $\ddot{u}_n$ 为法向加速度。

(2) 在库水自由表面 Γ_2 上:

忽略库水面波作用时:

$$p = 0 \quad (3a)$$

考虑库水面波作用时:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{1}{g} \ddot{P} \quad (3b)$$

式中: r 为库水自由面的法线方向; g 为重力加速度。

(3) 在库水底面 Γ_3 上:

$$\frac{\partial p}{\partial m} = -\frac{\beta}{c} \dot{P} \quad (4)$$

式中: m 为库水底面的法线方向; $0 \leq \beta \leq 1$ 为库底吸收系数, $\beta = 0$ 表示全反射, $\beta = 1$ 表示全吸收。

(4) 在库尾无限远处, 可按照无反射条件, 令 $\beta = 1$, 即:

$$\frac{\partial p}{\partial l} = -\frac{1}{c} \dot{P} \quad (5)$$

式中: l 为库尾无限远处的法线方向。

采用 Galerkin 法离散上述方程, 可得库水的动力平衡方程为:

$$[M_P] \{\ddot{P}^e\} + [C_P] \{\dot{P}^e\} + [K_P] \{P^e\} + \rho [R_P] \{\ddot{u}\} = 0 \quad (6)$$

其中:

$$[M_P] = \frac{1}{c} \int_{\Omega_1} \{N\} \{N\}^T d\Omega_1 + \frac{1}{g} \int_{\Gamma_2} \{N\} \{N\}^T d\Gamma_2 \quad (7)$$

$$[C_P] = \frac{\beta}{c} \int_{\Gamma_3} \{N\} \{N\}^T d\Gamma_3 + \frac{1}{c} \int_{\Gamma_4} \{N\} \{N\}^T d\Gamma_4 \quad (8)$$

$$[K_P] = \int_{\Omega_1} \{B\} \{B\}^T d\Omega_1 \quad (9)$$

$$[R_P] = \int_{\Gamma_1} \{N\} \{N_s\}^T [\Lambda] d\Gamma_1 \quad (10)$$

$$[B] = \{L\} \{N\}^T \quad (11)$$

$$[L]^T = \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z} \right] \quad (12)$$

式中: $[M_P]$ 、 $[C_P]$ 和 $[K_P]$ 分别为库水的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $[R_P]$ 为坝—库交界面上的耦合矩阵; $\{N\}$ 为压力的插值形函数向量; $\{P^e\}$ 为节点压力向量; $\{N_s\}$ 为位移的插值形函数向量; $\{\ddot{u}\}$ 为节点加速度向量。

2.2 坝体的动力平衡方程

将坝—库交界面上的压力荷载向量加入大家熟知的结构动力平衡方程中, 可得到坝—库耦合作用时

坝体的动力平衡方程:

$$[M_s]\ddot{\{u\}} + [C_s]\dot{\{u\}} + [K_s]\{u\} = \{f\} + \{f_p\} \quad (13)$$

式中: $[M_s]$ 、 $[C_s]$ 和 $[K_s]$ 分别为坝体的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{f_p\}$ 为坝—库交界面上的荷载向量; $\{f\}$ 为 $\{f_p\}$ 以外的其他外界激励。

$\{f_p\}$ 由压力在坝—库交界面上的积分得到, 如下式:

$$\{f_p\} = \iint_{\Gamma_1} \Lambda^T \{N_s\} \{N\}^T d\Gamma_1 \{P^e\} \quad (14)$$

比较式 (14) 和式 (10) 可得:

$$\{f_p\} = [R_p]^T \{P^e\} \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (13) 得:

$$[M_s]\ddot{\{u\}} + [C_s]\dot{\{u\}} + [K_s]\{u\} - [R_p]^T \{P^e\} = \{f\} \quad (16)$$

2.3 坝—库相互作用的流固耦合方程

将库水和坝体的动力平衡方程合在一起写成分块矩阵的形式, 如下:

$$\begin{bmatrix} [M_s] & [0] \\ \rho[R_p] & [M_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\{u\}} \\ \ddot{\{P^e\}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & [0] \\ [0] & [C_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\{u\}} \\ \dot{\{P^e\}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & -[R_p]^T \\ [0] & [K_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{P^e\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{f\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

此即坝—库相互作用的流固耦合方程。

3 算例及比较

Ansys 中的 fluid 29 和 fluid 30 分别是二维和三维声学流体单元, 可模拟流体中声波的传播及流固界面的相互作用。用 Ansys 分析了库底吸收性对坝库耦合系统动力响应的影响, 并对 Ansys 和 Adina 进行了比较。

3.1 库底吸收性对坝库系统动力响应的影响

某电站拦河大坝最大坝高 190.5 m, 正常蓄水位时的坝前库水深度 185.0 m, 坝体动弹模为 26 GPa, 泊松比为 0.163, 坝体密度为 2400 kg/m³, 水的密度 1000 kg/m³, 水中声速 1430 m/s。坝型参见图 2, 计算模型取库水长度为 1000 m。计算了正常蓄水位时, 坝库耦合系统在 El Centro 水平地震波 (图 3) 作用下的动力响应, 计算时长 30 s, 时间步长 0.02 s。

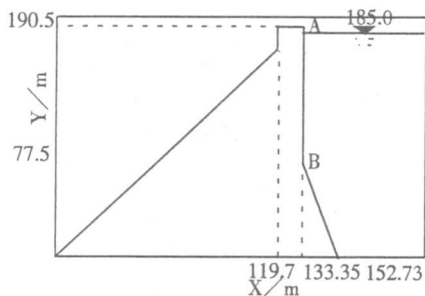


图 2 某大坝示意图

Fig.2 Sketch map of a dam

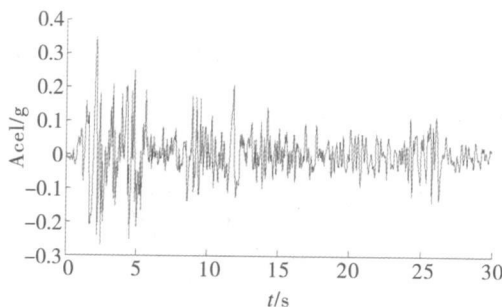


图 3 El Centro 地震波波

Fig.3 Waveform of El Centro seismic wave

在实际工程中, 库底基岩并非绝对刚性, 因此库底并不满足全反射条件, 库底吸收系数与库底淤积层的厚度、材料性质等有关, 其确定方法可参见文献 [17]。为了分析库底吸收系数对坝库耦合系统动力响应的影响, 分别计算以下 3 种工况: 库底全反射; 库底吸收系数为 0.2; 库底吸收系数为 0.4。

上游坝面最大动水压力分布如图 4, 上游坝面水平位移包络图如图 5。可以看出库底吸收性显著降低了动水压力, 库底吸收系数越大, 效果越明显; 位移反应也有所减小, 但不明显。说明库底存在一定厚度的软弱淤积层对坝库耦合系统的抗震性能是有利的。

3 2 Ansys与 Adina的比较

Ansys提供的声学流体单元 fluid 29和 fluid 30不能考虑自由面的面波效应, Adina中的势流体单元可以考虑该效应,但不能考虑库底的吸收性边界条件,两种软件的边界处理功能如表 1。

Adina中势流体单元的基本方程^[18]为:

$$\dot{\rho} + \dot{\gamma} \cdot (\rho \dot{\gamma} \Phi) = 0$$
 (18)

$$\{v\} = \dot{\gamma} \Phi$$
 (19)

$$h = \Omega(\{x\}) - \Omega \cdot + \frac{1}{2} \dot{\gamma} \Phi \cdot \dot{\gamma} \Phi$$
 (20)

$$h = \oint \frac{p}{\rho}$$
 (21)

式中: ρ为流体密度; Φ为速度势; {v} 为速度矢量; h为比焓; p 为压力; Ω({x}) 为{x}处的体积力加速度势; {x} = [x₁ x₂ x₃]^T。

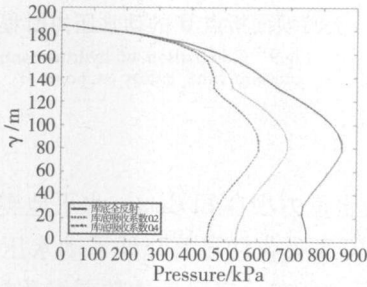


图 4 库底吸收系数对最大动水压力分布的影响

Fig.4 Influence of reservoir bottom absorption coefficient to distribution of maximum hydrodynamic pressure

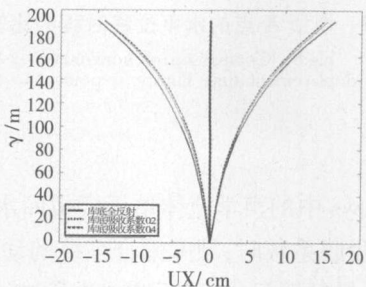


图 5 库底吸收系数对水平位移包络图的影响

Fig.5 Influence of reservoir bottom absorption coefficient to distribution of maximum horizontal displacement

采用 3 1中的算例, 分别用 Adina和 Ansys进行了计算。首先用 Adina计算了考虑与不考虑面波效应对计算结果的影响, 结果表明: 自由表面面波效应对结果影响不大, 这与文献 [17] 的结论一致, 于是该算例不考虑面波效应, 同时由于 Adina不能考虑库底的吸收边界, 将库底设为全反射边界。两者计算效率的比较如表 2(主机配置: 内存 1GB Pentium(R) 4 CPU 2 40GH z)。可以看出在单元、节点总数相当的情况下, Adina具有更高的计算效率, 但 Ansys的前后处理较 Adina高效, 尤其是后处理, 需要提取大量的数据, 其特有的 APDL 语言使繁琐的数据处理工作变得方便、快捷。

表 1 Ansys与 Adina的边界处理功能

Table 1 Boundary processing function of Ansys and Adina

软 件	流 固 耦 合	库 底 吸 收 性	库 尾 无 限 边 界	面 波 效 应
Ansys	支持	支持	支持	不支持
Adina	支持	不支持	支持	支持

表 2 Ansys与 Adina计算效率的比较

Table 2 Comparison of computational efficiency between Ansys and Adina

软 件	单元总数	节点总数	计算时间
Ansys	702	761	9' 19"
Adina	658	740	2' 43"

上游坝面最大动水压力分布如图 6 上游坝面位移包络图如图 7, 坝顶 A 点的水平位移时程如图 8 上游坝面折点 B 的动水压力时程如图 9。上游坝面最大动水压力分布在靠近库底时有些差异, 其他地方分布一致; 上游坝面的位移包络图、坝顶 A 点水平向位移时程和上游坝面折点 B 的动水压力时程都一致。

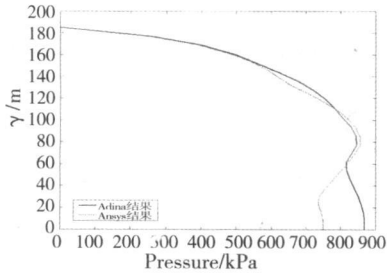


图 6 最大动水压力分布的比较

Fig.6 Comparison of maximum hydrodynamic pressure distribution

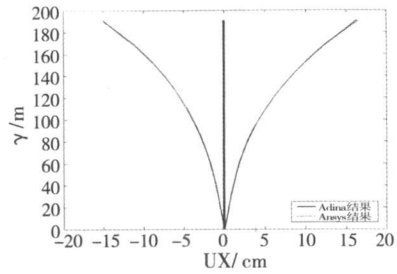


图 7 水平位移包络图的比较

Fig.7 Comparison of maximum horizontal displacement distribution

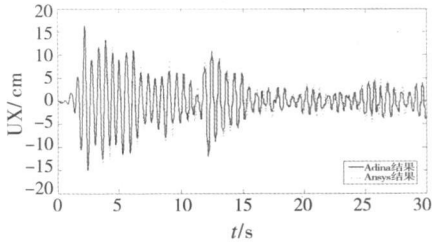


图 8 坝顶 A 点的水平位移时程的比较

Fig.8 Comparison of horizontal displacement time history at point A

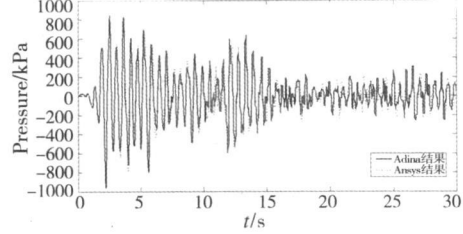


图 9 上游坝面折点 B 的动水压力时程的比较

Fig.9 Comparison of hydrodynamic pressure time history at point B

4 结论

利用 Ansys 中的声学流体单元模拟库水, 计算了某碾压混凝土重力坝在 El Centro 水平地震波作用下, 采用不同库底吸收系数时, 坝库耦合系统的动力响应。结果表明: 库底吸收性显著降低了动水压力, 库底吸收系数越大, 效果越明显; 位移反应也有所减小, 但不明显。说明库底存在一定厚度的软弱淤积层对坝库耦合系统的抗震性能是有利的。

比较了 Ansys 与 Adina 在计算同一个算例时的结果及效率, 结果表明: 两者的计算结果基本一致, Adina 的计算效率高于 Ansys, 但 Ansys 的前后处理较 Adina 高效, 尤其是后处理, 需要提取大量的数据, 其特有的 APDL 语言使繁琐的数据处理工作变得方便、快捷。

参考文献

- [1] Westergaard H. M. Water Pressures on Dams during Earthquakes[J]. Transactions ASCE, 1933, 98: 418~472.
- [2] Bathe K. J., W. F. Hahn. On Transient Analysis of Fluid-structure Systems[J]. Computers & Structures, 1979, 10: 383~391.
- [3] Akkas N., H. U. Akay C. Yilmaz. Applicability of General Purpose Finite Element Programs in Solid-fluid Interaction Problems[J]. Computers & Structures, 1979, 10: 773~783.
- [4] Wilson E. L., M. Khalvati. Finite Elements for Dynamic Analysis of Fluid-solid Systems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1983, 19: 1657~1668.
- [5] LIU W. K., CHANG H. G. A Method for Computation for Fluid Structure Interaction[J]. Computers & Structures, 1985, 20: 311~320.
- [6] Akkose Mehmet et al. Elastoplastic Earthquake Response of Arch Dams Including Fluid-structure Interaction by the Lagrangian Approach[J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32: 2396~2412.
- [7] Zienkiewicz O. C., P. Bettess. Fluid-structure Dynamic Interaction and Wave Forces: An Introduction to Numerical Treatment[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1978, 13: 1~16.
- [8] 吴一红, 谢省宗. 水工结构流固耦合动力特性分析[J]. 水利学报, 1995, (1): 27~34.

- WU Yi-hong XIE Sheng-zong Dynamic Characteristic Analysis of Interaction of Fluid and Hydraulic Structures[J]. Journal of Hydraulic Engineering 1995, (1): 27~34 (in Chinese)
- [9] 王 忠, 晏启祥, 刘浩吾. 库底反射性边界条件与地震动水压力分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(1): 36~39
- WANG Zhong YAN Qixing LIU Haowu Reflectional Boundary Condition on Reservoir Bottom and Analysis of Hydrodynamics[J]. Journal of Sichuan University (Engineering science edition), 2002, 34(1): 36~39 (in Chinese)
- [10] 王 冰, 叶天麒. 刚体撞水非线性响应的边界元分析[J]. 固体力学学报, 1999, 20(2): 182~186
- WANG Bing YE Tianqi A Boundary Element Method for Nonlinear Slamming Analysis[J]. Acta Mechanica Solida Sinica 1999, 20(2): 182~186 (in Chinese)
- [11] Azná rez J J, O. Maesq J Domí nguez BE Analysis of Bottom Sediments in Dynamic Fluid-Structure Interaction Problems[J]. 2006, 30 124~136
- [12] 楚锡华, 李锡夔. 含液颗粒材料液固耦合分析的离散颗粒模型及特征线 SH 法[J]. 计算力学学报, 2007, 24(6): 719~726
- CHU Xi-hua LIX i-kui A Discrete Particle Model and Characteristic Based SPH Method for Fluid-solid Interaction of Granular Materials Filled with Liquids[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics 2007, 24(6): 719~726 (in Chinese)
- [13] 张丹才, 章 艺, 童宗鹏, 等. 舵翼结构对水下航行器尾部振动声辐射的影响[J]. 振动与冲击, 2006, 25(5): 102~106
- ZHANG Dan-cai ZHANG Yi TONG Zong-peng et al Research on the Sound Radiation of the Stem of Submarine with Rudder and Vane[J]. Journal of Vibration and Shock 2006, 25(5): 102~106 (in Chinese)
- [14] 纪 刚, 张纬康, 周其斗. 有限元 边界元法求解多连通域声辐射问题[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2003, 18(4): 408~413
- JIGang ZHANG Wei-kang ZHOU Qidou Analysis of Acoustic Radiation in Multiply Connected Domain by FEM /BEM[J]. Journal of Hydrodynamics Ser A, 2003, 18(4): 408~413 (in Chinese)
- [15] 杜庆华, 吴有生, 冯振兴. 流固耦合振动问题的某些工程处理方法[J]. 固体力学学报, 1988, 9(1): 49~61
- DU Qing-hua WU You-sheng FENG Zhen-xing Some Engineering Approaches to the Fluid-structure Dynamic Interaction Problems[J]. Acta Mechanica Solida Sinica 1988, 9(1): 49~61 (in Chinese)
- [16] 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
- XING Jing-tang ZHOU Sheng CUI Er-jie A Survey on the Fluid-solid Interaction Mechanics[J]. Advances in Mechanics 1997, 27(1): 19~38 (in Chinese)
- [17] 王 忠. 坝库相互作用及抗震技术研究[D]. 四川: 四川大学, 2005
- WANG Zhong Research of Dam-reservoir Interaction and Dam Isolations[D]. Sichuan: Sichuan University, 2001 (in Chinese)
- [18] Theory and Modeling Guide Volume I ADINA Solids & Structures Report ARD 05-7, 2005[R]. USA: ADINA R & D, 2005