

坝库系统流固耦合数值分析方法简述

王国辉¹ ,柴军瑞^{2,3} ,杜成伟²

(1. 中国水电工程顾问集团公司中南勘测设计研究院 湖南 长沙 410014 ;
2. 西安理工大学水利水电学院 陕西 西安 710048 ; 3. 三峡大学土木水电学院 湖北 宜昌 443002)

摘要 :从水体的研究角度出发 ,介绍有限差分法、有限体积法、有限元法、边界元法等分析方法以及 Lagrange 坐标系、Euler 坐标系和 ALE 等描述方式在坝库系统相互作用中的选取与应用。通过对比分析可知 :各种方式都有优点及局限性 ,应具体问题具体分析 ;ALE 描述方式具有其独特优势 ,被较多应用在流固耦合分析领域。最后指出 ,对于流固耦合问题 ,需要在数学模型、接触边界相容条件的处理等方面进行深入研究。

关键词 :流固耦合 ;坝库相互作用 ;边界元 ;有限体积法 ;Euler 坐标系 ;ALE

中图分类号 :TV62 ;O35 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)04-0089-06

Review of numerical analysis method for fluid-solid interaction of dam-reservoir system //WANG Guo-hui¹ , CHAI Jun-rui^{2,3} , DU Cheng-wei² 1. Mid-South Design and Research Institute , CHECC , Changsha 410014 , China ; 2. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering , Xi 'an University of Technology , Xi 'an 710048 , China ; 3. College of Civil & Hydroelectric Engineering , China Three Gorges University , Yichang 443002 , China)

Abstract : The selection and application of analysis methods used in water research , such as the finite difference method (FDM) , finite volume method (FVM) , finite element method (FEM) , and boundary element method (BEM) , and methods of description such as the Lagrange coordinate system , Euler coordinate system , and arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) system , which are applied in dam-reservoir interaction research , are introduced. Through comparison and analysis , it is found that any method has advantages and limitations , and it must be capable of analyzing concrete conditions. Because of its unique advantages , the ALE description method has been more often used in the field of fluid-solid coupling. Finally , it is pointed out that further study should be conducted on the mathematical model , the contact boundary conditions , and so on.

Key words : fluid-solid coupling ; dam-reservoir interaction ; boundary element method (BEM) ; finite volume method (FVM) ; Euler coordinate system ; arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)

在海洋、船舶、航空、水利、化工和核动力等工程领域中 ,都会遇到流体和结构的相互作用问题 ,简称流固耦合问题。例如海洋结构在波浪等作用下的动态分析、充液容器的晃动和管道振动等。坝库相互作用问题即是一种典型的流固耦合问题 ,它涉及固体力学、振动力学和流体力学 ,是典型的多学科综合问题。其重要的力学特征是坝体和库水之间的相互作用 :当受到地震等外部激励时 ,坝体在水体荷载作用下产生变形或运动 ,而变形或运动反过来又影响流场的流动 ,从而改变水体荷载的分布和大小^[1]。反映到其耦合方程中表现为 :未知变量含有描述水体的变量和含有描述坝体的变量 ,方程的定义域同时有水体域与坝体域。一般而言 ,其方程具有以下

2 个特征 :①水体与坝体均不可单独地求解 ;②无法显式地削去描述水体运动的独立变量及描述坝体振动的独立变量。

从总体上来看 ,坝库相互作用问题可以分成重叠型与接触型 2 类。重叠型问题是指坝体和水体部分或全部相互重叠在一起 ,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 ,如图 1 所示的渗流问题。仵彦卿^[2-3]、柴军瑞^[4-5]等对渗流场与应力场耦合计算做了大量研究 ,但在分析计算中往往先进行渗流场分析 ,然后将结果代入进行应力场分析 ,这种方法没有客观地反映渗流场与应力场之间的相互作用、相互影响的机理^[6-8]。接触型问题是指坝体和水

体的耦合作用仅发生在交界面上,坝体和水体有各自的描述方法和力学性能特征,其联系在于两相耦合面,如图2所示。由于此问题的复杂性,无论在理论分析还是数值计算方面还存在着很多假设,各种因素对动水压力的影响一直是个有争议的问题,例如:是否考虑库水可压缩性及影响大小^[9-10]、库水自由表面波^[11-12]以及库底吸收边界条件对动水压力的影响^[13-14]等。本文主要对接触型坝库相互作用问题进行探讨。

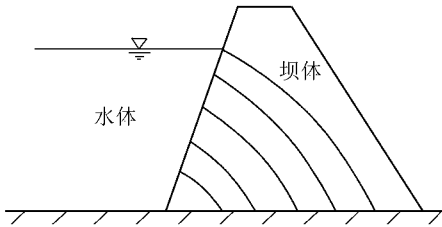


图1 重叠型问题

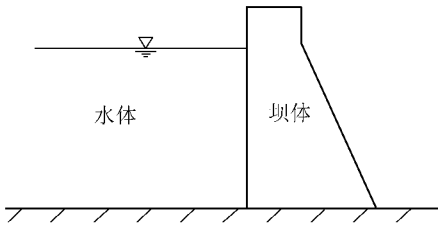


图2 接触型问题

接触型坝库系统相互作用问题与其他流固耦合问题相比,主要区别在于它不是全域耦合而是界面耦合,即耦合作用仅发生在两相交界面上,两者在方程上的耦合由两相耦合面上的平衡及协调条件引入。这类耦合系统的耦合关系表现在不同区域之间的界面上,通过所施加的边界条件给出。通常这些不同区域用以描述不同的物理状态,但也要考虑具有物理相似区域之间的耦合,耦合界面两侧不同区域可以用不同的离散方式进行处理。

1 坝库系统相互作用的控制方程

1.1 库水运动方程

假设水体无黏、可压缩和小扰动,库水自由液面小波动情况下,水体的控制方程为^[15]

$$p_{,iii} - \frac{1}{c^2} \ddot{p} = 0 \quad (1)$$

式中: p 为水体压力; c_0 为水体中的声速。

1.2 坝体和库水接触面的协调条件

a. 运动学条件。坝-水交界面上法向速度保持连续,即

$$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}_f} + \rho_f \ddot{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{n}_f = 0 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为固体位移向量; ρ_f 为水体质量密度; $\mathbf{n}_f$ 为

水体边界单位外法线向量。

b. 动力学条件。坝-水交界面上法向力保持连续,即

$$\sigma_{ij} \mathbf{n}_{sj} = p \mathbf{n}_{si} \quad (3)$$

式中: σ_{ij} 为固体应力分量; $\mathbf{n}_{sj}$ 、 $\mathbf{n}_{si}$ 为固体边界单位外法线向量分量。

2 坝库相互作用数值分析方法

坝库系统相互作用的分析方法大致可以分为4类:解析法^[16-17]、数值计算、将解析法和数值计算相结合的混合法^[18]以及试验研究^[19]。其中,数值计算最适合工程实际,应用相对较多。由于库水是带有自由面的水体,其研究在数学上涉及求解 Navier-Stokes 方程等初边值问题。由于此方程呈非线性,其对流项是非对称的,而且自由表面的位置未知,其边界条件是复杂的非线性方程,因此这个问题的有关数值求解相当困难。鉴于以上原因,库水分析是坝库相互作用分析的关键之处,故笔者主要从库水的分析方法入手,对当前坝库相互作用分析方法进行总结。

2.1 水体分析方法

利用有限差分法对流体运动微分方程进行空间离散时,要求离散网格线是正交的,所以对求解区域边界比较规则的问题,采用有限差分法较方便,但在处理不规则边界时,有限差分法常用线性插值近似来表示边界条件,需要在求解区域外增加虚拟网格点,导致结果不精确,并且影响差分格式迭代的收敛性。鉴于有限差分法存在网格划分不灵活、难以适应复杂边界等缺点,近年来国内外学者引进贴体坐标技术来解决这个问题^[20]。在大部分文献中,MAC法和VOF法均主要以有限差分法来实现方程的空间域离散。

有限体积法得出的离散方程,要求因变量的积分守恒对任意一组控制体积都得到满足,因此对整个计算区域,自然也得到满足。即使在粗网格情况下,有限体积法也显示出准确的积分守恒。而其他一些离散方法,例如有限差分法,仅当网格极其细密时,离散方程才满足积分守恒。因此,有限体积法被广泛地应用到流体力学各研究领域,蒋莉等^[21]成功采用ALE有限体积法求解了流体与结构物相互作用问题。

有限元法在计算流体力学领域也得到广泛的应用,但由于 Navier-Stokes 方程中存在非线性对流项,为了获得稳定的数值解人们设计出多种迎风有限元格式,目前公认精度较高的有 SUPG(streamline upwind/ petrov-galerkin)格式^[22]和 T- α Taylor-Galerkin)格式^[23]

等。另外,在以非常 Navier-Stokes 方程为对象研究流体力学问题时,如果采用常规的有限元法直接对其进行空间离散,插值函数的类型与求解的精度有密切的关系。计算表明,若速度的插值函数和压力的插值函数采取同一阶次,虽然可获得较精确的速度解,但压力解将产生较大的误差而出现伪振荡现象。因此,学者提出了分步有限元的思想。Hayashi 等在文献[24]中提出了3种具有代表性的分步格式,详细讨论了有限元积分方程所对应的自然、本质条件的适用性。

边界元法只需将边界面离散,因此适宜研究接触型相互作用问题,对于渗流、势流等无限域问题,边界元法基本解满足无穷远处边界条件,无需确定外边界,只需在区域内边界上进行离散。边界元法对自由表面边界条件可以完全模拟,所以对波浪场等自由表面问题具有很好的适用性。但这种方法只适用求解势流问题,对于黏性流动问题尚未在数学上找到合理的格林函数建立边界积分方程^[20]。各种数值分析方法的比较见表1。

2.2 坝库相互作用中分析方法的选取

随着数值计算方法和计算机技术的发展,学者多采用有限元、边界元及其混合法等进行坝库系统的研究。对于坝体多采用有限元法进行计算分析,对水体可采用有限元、边界元、无穷元等方法进行分析。有限元法^[25-26]把坝体和库水按有限元法离散化,优势在于能够处理复杂的近域边界形状和不均匀介质构造以及非线性影响等问题,但是有限元模型难以反映无限域介质的辐射,边界元法^[27]可以将所分析问题降低一维,提高计算效率,但在时域分析中不能够显示其效率,需要大量的存储空间和计算时间;有限元法和边界元法的混合方法(有限元-边界元混合法)^[28-29]集合了有限元法和边界元法的优点,对坝体和水体分别采用有限元法和边界元法离散,充分发挥有限元法和边界元法的优点,但在时

域分析中也存在上述问题^[30]。
整体求解法和交错迭代法是坝-库系统有限元数值求解的2种基本方法。整体求解法将位移和压力作为基本未知量对耦合方程同时进行求解;交错迭代求解法则是充分利用了水体和坝体的相互作用是发生在流固耦合面上的事实,将坝体方程和水体方程分开处理,而通过耦合矩阵在流固耦合面上进行迭代求解。但是,交错迭代求解法对水体、坝体的耦合分析并不是同步的(图3),因此,这种方法并不是流体-固体真正意义上的耦合,整体求解法将库水和坝体有机地联系成一个整体,使水体与坝体的瞬态动力响应从同一方程中求解,实现了流体-固体瞬态动力耦合,真正地反映了坝库相互作用的内在机理。

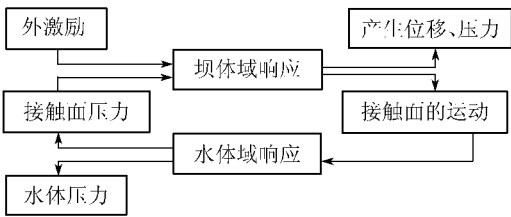


图3 交错迭代求解法反馈

有限元法和边界元法在分析复杂几何形状连续介质的力学问题时各有优点和缺点,需根据具体问题对有限元法和边界元法进行选择。对于复杂的坝库耦合系统,理想的方案是:将有限元法和边界元法两者结合起来,近域采用有限元法,远域采用边界元法,另外一种研究思路就是用近似的方法代替边界元法来反映无限域的能量辐射效应,如透射人工边界、旁轴近似、黏性边界、无穷元等方法^[31]。除无穷元法外,上述其他的近似方法都在边界上是局部解耦的。因此,其计算工作量较边界元法要小得多,而且由于其局部解耦特征可方便地在时域进行计算,与显式有限元法结合后,适合于处理非线性问题。例如,杜修力等^[32-33]和李小军等^[34]提出的时域显式

表1 水体数值分析方法比较

水体数值分析方法		优点	缺点
有限差分法	MAC 法 (标记子与单元法)	灵活性高,在模拟具有多自由表面的流动时概念简单	①难以引入作用于自由表面的不同压力;②不宜三维问题计算;③计算存储量大
	VOF 法	①适宜三维问题的计算;②存储量小	易失去液面位置的准确性
有限元法	迎风有限元格式	①广泛的实用性,适合处理复杂区域;②具有丰富的数学结构,可以达到非常高的计算精度	①对流效应较强时,由于网格划分的不恰当易造成数值解的失真振荡;②压力解易产生较大误差而出现伪振荡现象
	分步有限元格式	①广泛的实用性,适合处理复杂区域;②具有丰富的数学结构,可以达到非常高的计算精度	①对流效应较强时,由于网格划分的不恰当易造成数值解的失真振荡;②压力解易产生较大误差而出现伪振荡现象
边界元法		①对自由表面问题具有很好的适用性;②将所求解问题空间降低一维,有效降低问题的复杂程度;③计算精度一般高于有限元法	①只适用求解势流问题;②系统矩阵满元、奇异积分处理等
有限体积法		①适于流体计算,物理概念清晰;②可以应用于不规则网格,适于并行;③计算效率高	精度较低

有限元法与透射人工边界法相结合用于求解拱坝-地基非线性系统地震波动反应问题。

由于纯数值技术本身的缺陷,一般而言,有限元法、边界元法和有限元-边界元混合法只能分析低频或中低频激励下的结构响应。为提高计算精度,近年来发展起来了半数值半解析分析手段。在数值方法中引入解析表达式,可提高计算精度,适用于较高频和高频的响应问题。各种数值分析方法的比较见表 2。

表 2 坝库耦合系统数值分析方法比较

坝库耦合系统数值分析方法	优 点	缺 点
整体求解法	①适当选择时间积分格式和参数,可保证解的无条件稳定和收敛;②全耦合算法,充分体现耦合效应	增大了方程求解规模,存在系数矩阵不对称的问题
有限元法	①坝体和库水分别采用不同的数值积分格式,总自由度数少;②程序上易于实现	①每一时间步计算需进行迭代,计算工作量大;②稳定性和收敛性问题没有很好的解决
交错迭代法	①自动满足远场辐射条件,计算量少;②适宜解决接触型相互作用问题;③适合模拟无限或半无限区域	需要大量的存储空间和计算时间
边界元法	①耦合方程组阶数显著降低,计算精度高;②利用 B. Friedman 算子函数理论构造势流问题在无限长带形域中的 Green 函数,可提高计算效率 ^[28]	①在边界上是时空耦合,计算工作量巨大;②求解非线性问题存在困难;③求解变水深坝库耦合系统要对变水深部分流场进行域离散
有限元-边界元混合法		

3 坝库相互作用的描述方式

目前研究者对坝体多采用 Lagrange 坐标系进行描述,对水体可采用 Lagrange 坐标系、Euler 坐标系和 ALE 等多种描述方式。因此笔者从水体的描述方式入手,对坝库相互作用描述方式的选取进行总结。

3.1 水体运动描述方式

采用 Lagrange 坐标系描述(简称 Lagrange 描述)着眼于流体质点,把流体质点的物理量表示为 Lagrange 坐标和时间的函数。在这一类运动学描述中,网格点和物质点重合,具有很高的精度。但是, Lagrange 描述只适合于描述流体发生小变形的问题并且需要不断地更新网格。

采用 Euler 坐标系描述(简称 Euler 描述)着眼于空间点,认为流体的物理量随空间点及时间而变化。在以 Euler 描述为基础的数值方法中,网格结点在参

考坐标架下保持固定不动,而流体流经单元。从数学分析可知, Euler 描述了物理量的场,如速度场、压强场等。 Euler 描述的这个特点给研究流体力学中许多实际问题带来方便。因此,在流体力学领域研究者多采用 Euler 坐标系^[35-36]。2 种描述的比较见表 3。

表 3 水体运动描述方式比较

描述方式	优 点	缺 点
Lagrange 描述	①能够精确跟踪、描绘物质界面,如自由表面;②由表面的边界条件得到简化,由非线性方程转变为线性方程;③能较好地处理任意形状的固壁边界	①网格单元易产生扭曲畸变而导致计算无法进行;②不能很好地解决导致网格缠绕的漩涡问题
Euler 描述	①可以解决漩涡等 Lagrange 描述所无法解决的问题;②场变量的引入,减少了未知量	①由于流体质点与网格结点间的相对运动而引起对流问题,导致流体相关方程的非线性,给数值求解带来麻烦;②为了跟踪自由表面,需要求解复杂的非线性方程,导致计算不准确;③很难达到局部区域的精确描述

采用 ALE(arbitrary lagrangian-eulerian)描述(简称 ALE 描述),其概念首先出现在数值模拟流体动力学问题的有限差分法中,当时是由 Noh^[37]以混合 Euler-Lagrange 描述的名称提出的。ALE 方法综合了 Euler 坐标系和 Lagrange 坐标系的优点,克服了两者的缺点,得到迅速发展。在这种方法中,计算网格不再确定,也不依附于流体质点,它可以相对于坐标架做任意运动,以实现网格的不断更新而不致发生畸变。由于这种方法既包含了 Lagrange 观点,可应用于带自由表面的流动,又保留了 Euler 观点,克服了纯 Lagrange 方法常见的网格畸变等不足,因此已逐渐成为连续介质力学中运动描述的流行方法。自 20 世纪 80 年代中期以来 ALE 描述方式已被广泛地用来研究带自由表面的流动问题^[38-39]。

3.2 坝库相互作用中关于描述方式的选取

研究者对坝体一般采用 Lagrange 描述,而对水体坐标系的选取可视具体问题而定:水体小变形时宜用 Lagrange 描述,变形剧烈时采用 Euler 描述较为合适。因此,在坝库相互作用问题的描述上主要有 2 种方式:拉格朗日法和欧拉法。2 种方式的比较见表 4。通过两者的比较可以得出,混合模式在描述流固耦合问题上更具有优势。因此,实际应用中较少采用以位移为基本变量的流体力学方程。

流固耦合问题所遇到的最大困难在于:两相坐标系的统一和两相界面的协调。对于小运动问题,由于上述运动描述的不同而引起的问题并不突出,但对于大运动非线性问题情况就开始变得复杂:两相界面的位形事先未知,一开始重合的结点以后随着固体、流体的运动可能要分离。因此,如何协调好

两相(流固)界面是解决非线性耦合问题的难点之一。由于 ALE 计算网格的选取可以独立于物体自身的运动,不用考虑流固接触的滑移和非滑移 2 种

表 4 坝库耦合系统描述方式比较

描述方式	特点	计算格式	优点	缺点
拉格朗日法	流体和固体共同采用拉格朗日坐标系	位移-位移	①可把结构分析的通用程序应用到流体域中; ②此模式有限元方程对称,并在流固耦合边界上自动满足位移协调条件	①由于流体刚度矩阵奇异,导致零能模态的出现; ②待求未知数多,计算效率低
欧拉法	坝体用拉格朗日坐标系下的位移为场变量,水体用欧拉坐标系下的标量为场变量	位移-压力场 位移-速度势 位移-位移势	①不会出现流体矩阵奇异的问题,克服了拉格朗日法中的零能模态; ②在流体单元中,每个单元结点上仅 1 个自由度,缩小了方程阶数,计算效率较高	有限元方程中的系数矩阵非对称,直接求解困难较大

状态,简化了流体-结构相互作用和摩擦接触等问题中界面的处理过程。因此 ALE 描述方式以其独特的优势被许多学者引入到流固耦合分析领域^[40-41]。

4 研究趋势

近几十年来国内外学者对坝库系统流固耦合的理论和计算方法开展了广泛研究,取得了一些成果。但是,由于流固耦合问题的复杂性,无论在理论分析还是数值计算方面都存在许多假设,例如假定流体小幅振动^[42-43]、液面无面波影响^[42-44]、流体固体接触界面无相对滑动^[26]等以及非真正耦合的迭代求解^[45-46],还远没有达到理论与实践的统一,有必要进行深入研究。

随着研究的深入和计算机处理技术的进步,坝库相互作用研究呈现出新的趋势:①由于流固耦合问题的非线性、复杂性,使求解方程的规模加大,有必要研究、借鉴有关计算机处理技术,例如有限元并行计算技术研究;②流固耦合问题是强非线性问题,非线性耦合系统的稳定性、分岔、混沌等问题的研究是值得关注的问题;③接触边界相容条件处理方法的研究,特别是对大幅晃动情况下数值模拟方法研究;④建立新的数学模型,更加直观地处理工程中的实际问题,将流固耦合研究理论提高到更高的水平。

参考文献:

[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):19-38.
[2] 仵彦卿,张倬元.岩体力学导论[M].成都:西南交通大学出版社,1995.
[3] 仵彦卿,张倬元.岩体系统渗流场与应力场耦合的广义

双重介质模型的应用研究[J].工程地质学报,1996,4(3):40-46.
[4] 柴军瑞,仵彦卿.均质土坝渗流场与应力场耦合分析的数学模型[J].陕西水力发电,1997,13(3):4-7.
[5] 柴军瑞.大坝工程渗流力学[M].拉萨:西藏人民出版社,2001.
[6] 陈平,张有天.裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析[J].岩石力学与工程学报,1994,13(4):299-308.
[7] 王媛,许志英,速宝玉.复杂裂隙岩体渗流与应力弹塑性全耦合分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(2):177-181.
[8] 柳厚祥,李宁,廖雪,等.考虑应力场与渗流场耦合的尾矿坝非稳定渗流分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(17):2870-2875.
[9] 傅作新,章青.水体压缩性对挡水结构自振特性的影响[J].河海大学学报:自然科学版,1994,23(6):1-7.
[10] 王忠.坝库相互作用及抗震技术研究[D].成都:四川大学,2001.
[11] 邢京堂.考虑自由面线性波的流固耦合动力分析的两个变分公式[J].航空学报,1988,9(11):568-571.
[12] 赵兰浩.考虑坝体-库水-地基相互作用的有横缝拱坝地震响应分析[D].南京:河海大学,2006.
[13] 杜修力,王进廷,张楚汉.淤积泥砂对垂直地运动作用时刚性坝面动压力的影响研究[J].水利学报,2003,19(2):66-72.
[14] 章青,傅作新.考虑库底吸收性作用时挡水坝的抗震分析[J].河海大学学报:自然科学版,1988(6):6-10.
[15] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003.
[16] 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,1995,11(1):27-34.
[17] 吴一红,李世琴,谢省宗.拱坝-库水-地基耦合系统坝身泄洪动力分析[J].水利学报,1996,12(11):6-12.
[18] 傅作新,王立新,章青.拱坝的动水压力和拱坝库水的相互作用分析[C]//中国地震学会地震工程专业委员会.第三届全国地震工程会议论文集(Ⅲ).大连:中国地震学会地震工程专业委员会,1990:1271-1276.
[19] 李德玉,张伯艳,王海波,等.重力坝坝体-库水相互作用的振动台试验研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2003,1(3):216-220.
[20] 华蕾娜.ALE 分步有限元法研究及其在自由表面水波问题中的应用[D].天津:天津大学,2005.
[21] 蒋莉,沈孟育.求解流体与结构相互作用问题的 ALE 有限体积方法[J].水动力学研究与进展:A 辑,2000,15(2):148-154.
[22] HUERT A,LIU W K. Viscous flow with large free surface motion[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1998,69:277-324.
[23] DONEA J. A taylor-galerkin method for convective transport problem[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,1984,20(1):101-119.
[24] HAYASHI M,HATANAKA K,KAWAHARA M. Lagrangian finite element method for free surface navier-stokes flow using fractional step method[J]. International Journal for Numerical

Methods in Fluids ,1991 ,13(7) :805-840.

[25] 刘云贺 ,俞茂宏 ,王克成 .流体-固体瞬态动力耦合有限元分析研究[J]. 水利学报 ,2002 ,18(2) :85-89.

[26] 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.

[27] 宋崇民 ,张楚汉 .水坝抗震分析的动力边界元方法[J]. 地震工程与工程振动 ,1988 ,8(4) :14-25.

[28] 黄玉盈 ,金涛 ,倪樵 ,等 .变水深坝-库系统耦振分析的边界元-有限元混合法[J]. 固体力学学报 ,1998 ,19(3) :245-51.

[29] TJHEN L S ,YU G Y. Application of BEM/FEM coupling procedure to dynamic fluid-structure interaction problem[J]. International Journal of Computational Engineering Science ,2002 ,3(4) :425-433.

[30] 杜修力 ,王进廷 .动水压力及其对坝体地震反应影响的研究进展[J]. 水利学报 ,2001 ,13(7) :13-21.

[31] 王进廷 .高混凝土坝-可压缩库水-淤砂-地基系统地震反应分析研究[D]. 北京 :中国水利水电科学研究院 ,2001.

[32] 杜修力 ,陈厚群 ,侯顺戟 .拱坝系统三维非线性地震波动分析[J]. 地震工程与工程振动 ,1996 ,16(3) :39-47.

[33] DU Xiu-li ,ZHANG Yan-hong ,ZHANG Bo-yan. Nonlinear seismic response analysis of arch dam-foundation systems-par I dam-foundation rock interaction[J]. Bulletin of Earthquake Engineering ,2007 ,5(1) :105-119.

[34] 李小军 ,廖振鹏 ,杜修力 .有阻尼体系动力问题的一种显式解法[J]. 地震工程与工程振动 ,1992 ,12(4) :74-79.

[35] 江春波 ,邢秀英 ,张庆海 .用分步有限元法求解三维不可压缩流动[J]. 清华大学学报 :自然科学版 ,2004 ,44(8) :110-113.

[36] 江春波 ,徐照明 ,李秀丽 .求解不可压缩流动的分步有限元格式[J]. 清华大学学报 :自然科学版 ,2002 ,42(2) :278-280.

[37] NOH C E L. A time-dependent two-space-dimension coupled Eulerian-Lagrangian code[J]. Methods in computational Physics ,1964 ,3 :123-144.

[38] 岳宝增 ,刘延柱 .带自由液面 Navier-Stokes 流动问题的 ALE 分步有限元方法[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 ,2003 ,18(4) :463-469.

[39] 陈大宏 ,李炜 .自由表面流动数值模拟方法的探讨[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 ,2001 ,16(2) :216-223.

[40] NOMURA T. ALE finite element computations of fluid-structure interaction problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering ,1994 ,112 :291-308.

[41] 岳宝增 ,刘延柱 ,王照林 .非线性流固耦合问题的 ALE 分步有限元数值方法[J]. 力学季刊 ,2001 ,22(1) :34-39.

[42] YANG R ,TSAI C S ,LEE G C. Procedure for time-domain seismic analysis of concrete dams[J]. Journal of the Engineering Mechanics ,ASCE ,1996 ,122(2) :116-122.

[43] BERMUDEZ A ,DURAN R ,RODRIGUEZ R. Finite element solution of incompressible fluid-structure vibration problems [J]. International Journal for Numerical Methods in

Engineering ,1997 ,40 :1435-1448.

[44] 王进廷 ,杜修力 ,张楚汉 .重力坝-库水-淤砂-地基系统动力分析的时域显示有限元模型[J]. 清华大学学报 :自然科学版 ,2003 ,43(8) :1112-1115.

[45] SORIA A , CASADEI F. Arbitrary Lagrangian-Eulerian multicomponent compressible flow with fluid-structure interaction[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids ,1997 ,25 :1263-1284.

[46] 张建海 ,陈大鹏 .考虑固体与几何非线性的固液耦合系统瞬态有限元分析[J]. 计算结构力学及其应用 ,1995 ,12(4) :451-461.

(收稿日期 2008-08-30 编辑 :方宇彤)

(上接第 72 页)

[6] 裴源生 ,李云玲 ,于福亮 .黄河置换水量的水权分配方法探讨[J]. 资源科学 ,2003 ,25(2) :32-37.

[7] 吴凤平 ,葛敏 .水权第一层次初始分配模型[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2005 ,33(2) :216-219.

[8] 葛敏 ,吴凤平 .水权第二层次初始分配模型[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2005 ,33(5) :592-594.

[9] 王学风 ,赵建世 ,王忠静 ,等 .水资源使用权分配模型研究[J]. 水科学进展 ,2007 ,18(2) :241-245.

[10] 苏青 ,施国庆 ,吴湘婷 .流域内区域间取水权初始分配模型初探[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2003 ,31(3) :347-350.

[11] 邱苑华 .管理决策与应用熵学[M]. 北京 :机械工业出版社 ,2001 :95-98.

[12] 陈守煜 .工程模糊集理论及应用[M]. 北京 :国防工业出版社 ,1998 :64-69.

[13] 唐恒 ,杜发兴 .基于熵权的模糊物元水资源承载力评价模型[J]. 中国农村水利水电 ,2006(12) :33-39.

(收稿日期 2008-09-25 编辑 :骆超)

· 简讯 ·

2009 水资源与可持续发展高层论坛将在 武汉大学国际学术交流中心举行

由中国工程院和中华人民共和国水利部共同主办的“ 2009 水资源与可持续发展高层论坛 ”将于 2009-09-22 至 2009-09-24 在湖北武汉大学国际学术交流中心举行。会议主题为水资源与可持续发展。会议议题如下 :①水资源时空变异及其配置。包括分布式水文模型 ,气候变化及人类活动影响下的水资源变化 ,水资源配置与可持续发展 3 个方面。②农业水资源高效可持续利用。包括农业用水效率 ,控制排水、湿地及其环境效应 ,参与式灌溉管理体制 3 个方面。③流域管理与河流健康。包括水土保持与泥沙治理 ,水体营养负荷与富营养化 ,经济发展与河流健康 3 个方面。④水能资源开发与环境保护。包括大坝的环境及生态效应 ,水能资源的可持续开发 ,多目标水库的平衡利用 3 个方面。会议网站 : <http://www.ches.org.cn/huiyi/y20090217-1.doc>。(本刊编辑部供稿)