

# 珠江三角洲网河数学模型的研究进展

霍 光, 郑金海

(河海大学海岸及海洋工程研究所, 江苏 南京, 210098)

**摘要** 基于近年来珠江三角洲网河数学模型的研究成果, 介绍建立水流模型、泥沙模型和水质模型的方法以及模型求解的基本思路及主要特点. 对珠江三角洲网河地区的数学模型中常用的节点-河道模型和人工神经网络模型作了概要说明, 并分析了各自的优缺点, 在此基础上讨论了珠江三角洲网河数学模型发展中有待研究的问题.

**关键词** 珠江三角洲; 网河; 数学模型

**中图分类号** :TV82

**文献标识码** :A

**文章编号** :1006-764X(2004)07-0115-05

珠江是我国南方最大的河流, 珠江水系由西江、北江、东江及三角洲诸河组成, 流域面积  $453\,690\text{ km}^2$ . 西江和北江在广东省三水市思贤相汇后进入西北江三角洲网河区, 东江在广东省东莞市石龙进入东江三角洲网河区. 珠江三角洲网河区河汉纵横, 网河密布, 流域面积  $26\,820\text{ km}^2$ . 珠江流入三角洲后经八大口门出海, 形成“三江诸河汇流, 八口出海”的特色. 由于珠江网河径流量大, 河道泥沙冲淤严重和洪水、潮汐的综合影响, 使得珠江三角洲网河水文条件复杂多变, 对防洪、航运十分不利. 随着城市人口的增多、经济的发展, 各种工业废水和生活污水大量排入网河, 水环境质量日益恶化, 成为经济可持续发展的一个主要问题. 所有这些对珠江三角洲网河提出了一系列新的研究课题.

由于网河模拟区域范围很大, 大多数情况下只能采用数值方法进行模拟, 其核心问题是网河数学模型的建立及求解. 经过对珠江三角洲网河长期的观测、研究, 已经积累了大量的实测资料并对珠江网河有了一定的认识, 在数值模拟方面建立了水流模型、泥沙模型和水质模型等.

## 1 水流数学模型

水流模型是泥沙模型和水质模型的基础, 网河水流数学模型<sup>[1,2]</sup>大体可分为节点-河道模型、单元划分模型、混合模型及人工神经网络模型. 在珠江三角洲网河常用的主要有节点-河道模型<sup>[3~5]</sup>和人工神经网络模型<sup>[6,7]</sup>.

### 1.1 节点-河道模型

这种数学模型的基本思想是: 将网河中的每一河道视为单一河道, 其控制方程均为一维圣维南方程组. 河道连接处称为节点(汉点), 每个节点处均应满足质量守恒条件和能量守恒条件. 求解由边界条件、圣维南方程组和节点衔接方程联立闭合方程组, 即可得到各河段内部断面的未知水力要素.

节点-河道模型的求解方法较多, 主要有特征线法、有限差分法、直接解法、分级解法(分级解法又可分为二级解法、三级解法、四级解法、汉点分组解法等)、矩阵标识法、非线性方法和有限体积法. 在计算珠江三角洲网河时最常用的是三级联合求解法<sup>[8]</sup>.

三级联合求解思路清晰、效率高、编程简易, 现已被广泛应用于珠江三角洲网河节点-河道模型水流、泥沙、水质数值模拟中. 目前, 珠江三角洲网河水流模型仍然以圣维南方程组离散求解为主. 随着计算机软硬件技术的飞速发展, 存储空间和 CPU 运行速度将不再成为限制网河数值模拟计算的瓶颈, 从而允许采用完整的圣维南方程组作为控制方程, 而不必舍弃某些项(如惯性项等), 这对于提高计算精度来说, 比采用较为复杂的高阶算法更为有效. 随着可视化程序的开发, 使得数学模型的界面更加人性化, 为数学模型的广泛应用提供了基础<sup>[9]</sup>.

### 1.2 人工神经网络模型

人工神经网络与网河在结构上有许多相似之处, 两者都是由各个内部单元通过并联或串联形成一个相互制约的整体网络结构, 通过调节系统内部

各个“神经元”之间的相互作用可以达到系统输入变量与输出变量之间的最优化或平衡.模型具有生物神经网络的某些特征,具有学习能力,易于应用于不同类型的水文系统,尤其是在网河与水道不断变化的情况下,模型具有不断学习和自动调节的能力.能有效地模拟本质为非线性的河口网河地区的实际水文过程.

目前应用的神经网络模型主要有 Perceptron 网络、Adaline 网络、Kohonen 网络、模糊神经网络、反传网络 BP 等,其中在珠江三角洲网河计算中常用的是 BP 人工神经网络模型.

神经网络模型是“黑箱”模型,反映网络内部节点之间关系参数的物理意义模糊,隐层结构难以确定,同时要求神经网络模型要有足够长的学习样本,否则将影响计算精度.人工神经网络模型缺乏水文机理的概括,局限于参与训练的经验性样本所表现出的水文过程,当预测事件超越经验范围时,如非常高水位和非常低水位,模型会出现困惑与失误现象,而且人工神经网络模型的 BP 算法收敛较慢.文献[10]从水沙运动的连续方程和槽蓄方程出发,考虑河床变化对河道水流运动的影响,将神经网络模型与水动力模型相结合,建立了内部节点参数物理意义清楚,能反映河道水情变化过程的非线性动力学模型,并将汉点分组,以节省计算时间.对于计算域超出经验性样本范围时,可考虑通过实时校正对方法作出修改,进行外延.珠江三角洲网河地区的人工神经网络模型主要应用在水流、泥沙模型中,而且范围较小,对于水质模型和珠江三角洲网河地区大范围的神经网络模型尚未建立.

## 2 泥沙数学模型

珠江属于少沙河流,含沙量小.但由于径流量大,每年仍有大量泥沙进入河口区,使得河口淤积、滩涂发育、拦门沙扩展,严重影响了泄洪纳潮及通航.建立珠江三角洲大流域网河泥沙数学模型,是珠江三角洲网河数学模型的重要组成部分.

### 2.1 节点含沙量控制法<sup>[3]</sup>

由于网河水流“节点水位控制法”思路清晰,效率高,编程简易,所以一维泥沙数学模型将“节点水位控制法”移植于求解大流域网河泥沙数学模型.其求解思路与网河水流数学模型的求解一样,也可以简要地概括为“河道—节点—河道”法,即首先求出网河各分汉口节点处含沙量,然后再求解各河道断面含沙量,故一维网河泥沙数学模型也称之为“节点含沙量控制法”.其计算流程可以参照水流模型的

“三级联合求解法”.

### 2.2 二维泥沙数学模型<sup>①</sup>

在较开阔的河口、港湾及海岸地区,一般采用常规的矩形网格贴合曲折边界便可获得满意的模拟效果.但对于河道水流的计算,由于河宽、河段长度以及河道弯曲和河中沙洲的存在,用矩形进行网格剖分会受到各种限制.因此,必须建立顺应河道走势,适应河势发展的正交曲线坐标系,生成贴体的正交曲线网格,以获取满意的水流计算结果,进而实现泥沙模拟和河床冲淤演变计算.

### 2.3 人工神经网络模型

由于人工神经网络模型具有生物神经网络的一些特性,具有学习能力,尤其在网河和河道不断变化的情况下,模型可以不断学习和自动调整其参数以适应新的变化,在预报精度上较线性模型有明显的优越性.对于珠江三角洲网河地区的泥沙运动也有用神经网络模型进行模拟的,并得到了较好效果.

西江和北江干流于珠江三角洲网河顶点的思贤第一次相汇后,思贤就成为西北江三角洲网河区两江泥沙联系的纽带.文献[7]对西北江网河区顶点思贤的分水分沙变化进行了探讨,并引入神经网络模型,对珠江三角洲网河区顶点的分水分沙进行建模,进而对未来的分水分沙变化进行多步预测.由于神经网络模型是“黑箱”模型,泥沙人工神经网络模型与水流人工神经网络模型差别不大,只是水流人工神经网络模型的输入值、输出值是流量(或水位),而泥沙人工神经网络模型的输入值、输出值是输沙率.

## 3 水质数学模型

珠江三角洲地区经济高速发展、人口不断增加,大量工业废水和生活污水排入网河,污染程度呈急剧上升趋势,对整体的生态环境和人民生活、经济建设构成很大威胁,水质型缺水问题日益突出.北江现状水质尚好,基本满足饮用水源的要求,但从多年资料分析,污染有加重的趋势,并且该河段从上游至下游沿程接纳的废污水量超过了河流的自净能力.珠江三角洲网河水环境的恶化,阻碍了珠江三角洲地区的可持续发展,加强水环境监测,加大水环境保护已势在必行.

水质数学模型主要有以下几种:

a. 一、二、三维水流与水质数学模型,及一、二、三维水环境模型之间的相互衔接<sup>[1]</sup>.一、二维共轭水质模型,它是一种显式的对流-扩散输移的共轭水

①严以新,诸裕良,等.珠江三角洲航道网水沙数学模型研究.河海大学海岸及海洋工程研究所,广东省航道局,2001.

质模型.应用该模型可根据接受水体,如湖泊、河流、海岸等水域的水环境承载能力或水质保护目标区(或敏感区)的水质标准,选择、确定污水源的排放域.此模型在模拟污水源可排放域一类的问题上具有明显优势,应用本模型不需经过试错方法求解,效率高,不受主观因素影响,可解决多个污水源的排放域问题.该模型可应用于一、二维情形以及单个和多个污水源排放域的确定.

b. 有限元法水质模型.采用有限元法对区域进行离散,联合使用三角形和四边形等参数单元,对不规则边界拟合得更好,数据前处理发展快,可以灵活划分网格,可以对局部区域加密;采用 Newton-Raphson 方法化非线性方程组为线性方程组,采用改进的高斯消元回代法求解线性方程组,提高求解精度、减少迭代次数和放宽时间步长.

c. 污染物输移水力学模型.此种模型建立在已有的水动力学模型基础上,采用质点跟踪法研究污染物的迁移过程.此方法思路清晰、易于理解、编程容易、适用性广,在大型网河已有应用.

珠江三角洲地区水质模型起步较晚,直接针对珠江三角洲网河所建立的水质模型尚不多见.文献[12]在网河区非稳态水量数学模型的基础上,利用1985~1995年的珠江东四口门实测水质资料( $COD_M$ ,  $BOD_5$ , 无机氮,水溶性磷酸盐,石油类等),采用季节性肯达尔检验法对计算出的1985~1995年间陆源污染物通量值进行趋势分析,得出了各口门各污染物通量的一些变化趋势特征.由于在节点上水量值的微小不平衡会引起计算结果不合理,甚至整个过程的崩溃,对此问题,可采用文献[4]的方法予以解决.

## 4 尚待研究的问题

对珠江三角洲网河已经进行了长期的观测研究,并建立了一定数量的水文测站,积累了大量的实测资料和研究成果,并针对珠江三角洲网河地区建立了相应的数学模型,这些都为以后的研究工作打下了基础.但已建立的珠江三角洲网河数学模型方法较为单一,解法也基本集中在三级联合求解法上,人工神经网络模型虽在预测上有其自身优势,但还未在大流域建模.为了更好地对珠江三角洲网河的水流、泥沙和水质进行模拟,还须在前人的基础上作进一步的研究.

### 4.1 耦合数学模型的研究

已有的珠江三角洲网河数值模拟都是以水流模型为基础,在水动力的基础上建立泥沙模型和水质模型(见图1),即先解水流方程式,求出有关水力要

素后,再解泥沙方程式推求河床冲淤变化和水质污染物通量变化情况,是一种非耦合解.随着珠江三角洲地区水环境的日益恶化,水体中污染物通量对泥沙絮凝沉降的影响越来越大,在建立泥沙模型时只考虑水流因素而不考虑污染物通量的影响显然是不合理的.由于上游的乱砍滥伐,使得珠江三角洲来水的含沙量明显增加,再加上河道中的不合理采沙,使得河床变形、网河节点的分流比发生改变,对防洪、排涝十分不利.所以建立水流泥沙数学模型的耦合解,即将水流和泥沙方程式直接联立求解,同时解出水力要素和河床变形,并考虑水体中污染物通量对泥沙的影响,是一个十分值得探讨的问题.

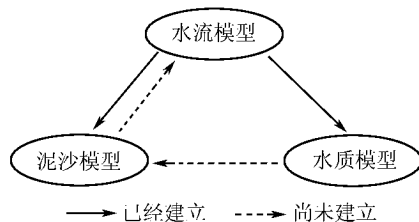


图1 耦合数学模型

### 4.2 不同数值算法在数学模型中的应用研究

目前应用在珠江三角洲网河地区的数学模型和数值算法较为单一,数学模型主要集中在基于圣维南方程组的水力学方法和人工神经网络模型,数值算法也主要是三级联合求解.目前常用的数值计算方法有特征线法、有限差分法、有限分析法、有限体积法和有限元法,每种方法各有其优势.文献[13]对各种算法作了深入系统的说明,介绍了各算法求解的基本思路、离散形式及其优缺点.应针对珠江三角洲网河地区,应用不同的数值算法建立不同的数学模型,对各数学模型进行验证、对比,从中选出计算精度高、计算速度快、更加适合珠江三角洲网河地区的数学模型.人工神经网络模型在珠江三角洲网河地区的水流、泥沙模型中虽已有应用,但应用范围较小,一般只是针对某一分水点或某一较小区域进行验证,对于珠江三角洲网河地区大范围的神经网络模型尚未建立.此外,人工神经网络模型主要应用在水流、泥沙模型中,在水质模型中还是一个空白.

### 4.3 模糊数学原理在网河区数学模型糙率确定中的应用研究

数值计算中参数准确度的好坏,直接影响着计算精度,甚至决定着数学模型的成败,如糙率的调整.糙率与诸多因素有关,是物理模型中一个十分重要的相似量,探求糙率的变化规律一直是水力学中的重要课题,常规方法是通过试算的方法对河道糙率进行分段复核.目前许多学者在理论和实验方面做了大量工作,得到了一些糙率计算公式和方法,

如反演算法<sup>[14]</sup>、分级处理<sup>[15]</sup>、水位拟合<sup>[16]</sup>、阻力最小化原理<sup>[17]</sup>和应用实测流量推求糙率<sup>[18]</sup>等方法。但由于糙率涉及因素较多,不同河道又有其不同的特性,再加上网河地区河道纵横交错、相互影响,为糙率的调整增加了更大的难度,至今为止还没有一个较为通用的、便于应用的方法。模糊数学是运用数学方法研究和处理模糊性现象的一门数学新分支,它以“模糊集合”理论为基础,是描述人脑思维处理模糊信息的有力工具,现已被广泛应用于各学科之中,在水利工程中也有应用,但尚未见到应用于糙率确定中。将模糊数学的理论和方法引入到河道糙率计算中,通过确定糙率模糊集的隶属函数及隶属度,确定出糙率在某一较小区间范围内,以减小网河计算时调试糙率的工作量。以珠江网河马口—甘竹上游河段为研究对象,应用三相模糊统计法通过水力半径对河道糙率进行单因素模糊评价,计算结果与实际糙率吻合,至于多因素多河道网河糙率率定有待进一步研究。

#### 4.4 东江水系数学模型的研究

现在珠江三角洲网河研究主要集中在西北江三角洲网河区,而对东江三角洲网河区的研究尚不多见。东江水量丰富、含沙量低、水质较好,是广东省的重要饮用水源和重点水质保护区。东深供水工程是东江上重大的跨流域引水工程,向香港、深圳供水,并解决沿途地区用水问题。东江水系直接汇入狮子洋,对广州航道起着决定性的影响。东江三角洲网河与西北江三角洲网河在狮子洋处连接,形成完整、统一的珠江三角洲网河体系。可以独立建立东江三角洲网河数学模型后再与西北江三角洲网河数学模型进行连接,也可以直接针对珠江三角洲网河建立整个珠江三角洲网河地区的数学模型。在建立东江网河数学模型时,可以借鉴西北江网河数学模型,并需要考虑以下两个方面的影响:①河道采沙严重,尤其是博罗—石龙段,由于大量采沙使得河床变化剧烈,在选取实测水文资料时一定要选取近期资料;②东江的水文资料较少,尤其是含沙量资料,为计算、验证带来一定的困难;③由于东深引水工程需从东岸抽水  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ,在建模时需考虑抽水的影响,水流一维非恒定流基本方程中  $\frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q$  ( $q$  为旁侧入流流量),可以通过调节  $q$ ,解决东江网河数学模型中抽水的影响。

#### 4.5 河口与网河联网计算数学模型的研究

河口由于受到潮汐的影响,使得径流和泥沙的运动拥有许多特性,尤其在枯水期潮流对网河的影响更为明显<sup>[19]</sup>。河口地区在盐淡水混合作用下,细

颗粒泥沙具有絮凝性质,陆相来沙至河口后,遇盐水产生絮凝沉降,以及风暴、疏浚的影响,时有浮泥出现。在涨潮时盐水上溯,对生态环境以及淡水取水口都有很大影响。影响珠江口悬浮物含量及其分部变化的主要因素依次是大陆径流、潮流和风力<sup>[20]</sup>。在河口地区由于水域面积较大、水深较深,常使用二、三维数学模型<sup>[21]</sup>加以研究,嵌套模型<sup>[22]</sup>可以将珠江三角洲网河及河口地区有机地结合起来,高维数学模型的边界条件可以由低维数学模型提供,在计算时减少了完全耦合解时必需的迭代次数,缩短了计算时间。已有的珠江三角洲嵌套模型主要集中在相互连接上,连接处多以矩形断面为主,此外还可考虑交错连接,即在连接处将二维网格渗透到一维网河内,这样经过多步拟合之后可为二维模型提供更加精确的边界条件,并在实际应用中得到了较好的效果。在二维模型计算区域内,当水深较深或根据工程需要需在局部进行三维计算时,将三维模型嵌入到二维模型中,既可以节省计算时间和三维的边界处理,又可以满足局部的精度要求。

#### 参考文献:

- [1] 卢士强,徐祖信.平原河网水流模型及求解方法探讨[J].水资源保护,2000(3):5~9.
- [2] 白玉川,万艳春,黄本胜,等.河网非恒定流数值模拟的研究进展[J].水利学报,2000(12):43~47.
- [3] 诸裕良,严以新,贾良文,等.一维网河非恒定流及悬沙数学模型的节点控制方法[J].水动力学研究与进展,2001,16(4):503~510.
- [4] 李毓湘,逢勇.珠江三角洲地区河网水动力学模型研究[J].水动力学与研究进展,2001,16(2):143~155.
- [5] 黄东,郑国栋,黄本胜,等.西、北江三角洲潮水位变化数值计算[A].周连第,邵维文,詹杰民,等.第十六届全国水动力学研讨会文集[C].北京:海洋出版社,2002.328~334.
- [6] 吴超羽,徐海亮.珠江河口网河区水位变化过程的神经网络模型[J].人民珠江,1997(1):15~19.
- [7] 杨清书,罗章仁,沈焕庭,等.珠江三角洲网河区顶点水分沙变化及神经网络模型预测[J].水利学报,2003(6):56~60.
- [8] 张二骏.河网非恒定流的三级联合解法[J].华东水利学院学报,1987(1):1~12.
- [9] 茅丽华,诸裕良,严以新.珠江三角洲航道网一维水沙数学模型的可视化研究[J].水利水运工程学报,2001,89(4):59~62.
- [10] 李荣,李义天.基于神经网络理论的河道水情预报模型[J].水动力学研究与进展,2002(2):238~244.
- [11] 曾凡棠,黄水祥.珠江三角洲潮汐河网水环境数学模型评述[J].海洋环境科学,2000,19(4):46~50.

- [12] 逢勇,李学灵.珠江三角洲河网入伶仃洋污染物通量计算研究[J].水利学报,2001(9):40~44.
- [13] 李义天,赵明登,曹志芳.河道平面二维水沙数学模型[J].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [14] 董文军,姜亨余,喻文唤.一维水流方程中曼宁糙率的参数辨识[J].天津大学学报,2001,34(2):201~204.
- [15] 韩龙喜,金忠青.三角联解法水力水质模型的糙率反演及面污染源计算[J].水利学报,1998(7):30~34.
- [16] 姜志群,王佩兰.河道洪水演进有限差分模型糙率系数的率定[J].水文,1996(6):56~58.
- [17] 许光详.汉道糙率计算中非封闭问题的处理方法[J].成都科技大学学报,1995(2):39~42.
- [18] 陈阿贵.受洪涨落率影响的河段糙率推求方法的探讨[J].水利科技,1997(2):3~6.
- [19] 欧素英,杨清书.珠江三角洲网河区径流潮流相互作用分析[J].海洋学报,2004,26(1):125~130.
- [20] 陈晓宏,陈永勤,赖国友.珠江口悬浮泥沙迁移数值模拟[J].海洋学报,2003,25(2):120~127.
- [21] 管卫兵,王丽娅,许东峰.珠江河口氮和磷循环及溶解氧的数值模拟[J].海洋学报,2003,25(1):53~68.
- [22] 诸裕良,严以新,李瑞杰,等.河网海湾水动力联网数学模型[J].水科学进展,2003,14(2):131~135.

(收稿日期 2004-03-04 编辑:熊水斌)

(上接第 114 页)

- [25] Koo C Y,Chern J C.Modification of the DDA method for rigid block problem[J].Int J of Rock Mech & Min Sci,1998,35(6):683~693.
- [26] 王书法,朱维申,郑少河.节理岩体热应力问题的非连续变形分析方法[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5):643~646.
- [27] 张勇慧.关于 DDA 中推导热应力问题公式的讨论[J].岩石力学与工程学报,2001,20(2):277~278.
- [28] 栾茂田,黎勇,杨庆.非连续变形计算力学模型基本原理及在边坡岩体稳定性分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):289~294.
- [29] 王书法,李树忱,李术才,等.节理岩质边坡变形的 DDA 模拟[J].岩土力学,2002,23(3):352~354.
- [30] 张国新,李广信,郭瑞平.不连续变形分析与土的应力应变关系[J].清华大学学报(自然科学版),2000,40(8):102~105.
- [31] 马钺,方祖烈,宫伟力.节理岩体大位移大变形动态分析理论及应用[J].有色金属,2000,52(2):11~14.
- [32] 孙钧.三峡永久船闸高边坡岩体长期变形与稳定研究[J].中国三峡建设,2002(8):4~7.
- [33] 孔宪京,刘君,韩国城.面板堆石坝模型动力破坏试验与数值仿真分析[J].岩土工程学报,2003,25(1):26~30.
- [34] 栾茂田,黎勇,林皋.非连续变形计算力学模型及其在有缝重力坝静力分析中的应用[J].水利学报,2001(4):40~46.
- [35] 刘君,陈健云,孔宪京,等.基于 DDA 和 FEM 耦合方法的碾压混凝土坝抗震安全性分析[J].大连理工大学学报,2003,43(6):793~798.
- [36] 张伯艳,陈厚群.用有限元和刚体极限平衡方法分析坝肩抗震稳定[J].岩石力学与工程学报,2001,20(5):665~670.
- [37] 张国新,金峰.重力坝抗滑稳定分析中 DDA 与有限元方法的比较[J].水力发电学报,2004,23(1):10~14.
- [38] 刘智敏,林文介.大坝变形监测自动化技术的最新发展[J].桂林工学院学报,2000,20(1):89~94.
- [39] 张国新,武晓峰.裂隙渗流对岩石边坡稳定的影响——渗流、变形耦合作用的 DDA 法[J].岩石力学与工程学报,2003,22(8):1269~1275.
- [40] 陈兵,江在森,王双绪,等.利用非连续变形数值方法研究块体运动及其应力场初探[J].地壳变形及地震,2000,20(1):38~42.
- [41] 王辉,张国民,吴云,等.中国大陆活动地块变形与地震活动的关系[J].中国地震,2003,19(3):243~254.
- [42] 敬少群,吴云,殷志山.中国大陆及其周边块体的现时运动、变形及其动力学解释[J].地壳形变与地震,2001,21(4):8~16.
- [43] 秦小军,周硕愚,赵齐乐,等.依据 GPS 数据研究伽师及帕米尔东北侧 1994~1998 年地壳水平运动及其与强震群的关系[J].地壳形变与地震,2001,21(4):1~7.
- [44] 吴云,申重阳,乔学军,等.现今地壳运动与地震前兆研究[J].大地测量与地球动力学,2002,22(1):22~28.
- [45] Yongen Cai,Tao He,Ren Wang.Numerical simulation of dynamic process of the tangshan earthquake by a new methed—LDDA[J].Pure Appl Geophys,2000,157:2083~2104.
- [46] 姚振汉,张锐.采用非连续变形分析对空气冲击湿砂造型过程的数值模拟[J].工程力学,2002,19(5):24~28.
- [47] Zhang Yunliang,Lin Gao,Li Zhijun et al.Application of DDA approach to simulation of ice breaking process and evaluation of ice force acting on a structure[J].China Ocean Engineering,2002,16(2):273~282.
- [48] 王建宙,于亚伦,唐春海.拆除爆破研究中数值分析方法的比较与选择[J].工程爆破,2002,8(1):8~11.
- [49] 胡文军,卢艳华.钢结构建筑爆破拆除计算机模拟初步研究[J].工程爆破,2002,8(4):11~15.
- [50] 朱传云,戴晨,姜清辉.DDA 方法在台阶爆破仿真模拟中的应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(增2):2461~2464.
- [51] 沈寿长.泥石流应力本构关系[J].水利学报,1998(12):16~22.
- [52] 罗元华.泥石流堆积运动特征分析[J].地球科学——中国地质大学学报,2003,28(5):533~536.

(收稿日期 2004-06-20 编辑:高建群)