

全息水资源动力模型的研究与探讨

李大鸣 李 潇 陈海舟 付庆军

(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要 通过对水资源循环系统的分析与研究, 提出建立全息水资源动力模型的设想, 将气象、水文、水动力和地理信息综合为一个整体, 模拟水循环过程的主要环节。全息水资源动力模型需要多学科、多部门联合组建, 各部门的协调和资料、资源共享是保证模型正常运转的必备条件。全息水资源动力模型的运行模拟是一个具有系统工程特色的研究和管理过程, 需要政府的政策规范和组织实施。全息水资源动力模型的技术组成需要多种部件构成, 部件的每一部分都是水资源存在形式、分布规律和运动过程的模拟和分析。

关键词 水资源 动力模型 全息系统 水资源循环系统

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-764X(2007)04-0006-05

Research and discussion on holographic dynamic modeling of water resources//LI Da-ming, LI Xiao, CHEN Hai-zhou, FU Qing-jun(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract : Based on the research on water resources circulation system, the thought for establishment of a holographic dynamic model of water resources was proposed, which integrated meteorologic, hydrological, hydrodynamic, and geographic information together to simulate the main steps of water circulation. However, the holographic dynamic model should be developed by the cooperation of multiple disciplines and departments, and the coordination and resource sharing among different departments are necessary to ensure the normal operation of the model. It is also pointed out that the operation of the holographic dynamic model is a process of research and management with engineering characteristics, and it needs for governments' policies and norms as well as their efforts for organization and implementation. Moreover, the model should be composed of multiple components and each part could reflect the simulated results of the existence form, the distribution regularities, and movement process of water resources.

Key words : water resources; dynamic model; holographic system; water resources circulation system

据有关资料统计, 全球以各种状态存在的总水量为 $13.86 \times 10^8 \text{ km}^3$, 参与河流、地表、大气和海洋中水体交换的淡水资源约占总水量的 2.5%, 这也是人们赖以生存的水资源^[1]。从总体上讲水资源的总量是一个不变量, 水体以降雨(雪)的形式向全球分配水资源, 由山溪、河流、江河、湖泊和海洋汇聚大量的水体, 最后通过日照蒸发形成雨云或热带风暴的强降雨过程, 完成了水资源再分配的循环, 这一循环过程周而复始, 往复无穷。

由于日照强度对蒸发量的影响, 水动力条件对江河汇流的影响, 人类活动对大气结构的影响和天气形势对雨云运动的影响, 使这一循环过程中的水量分布在时间和空间上分布很不均匀。一方面是某一地区的洪水肆虐, 同时另一方面是另一些地区旱情严重。模拟和预测水资源的分布信息和循环过程对防汛减灾、水环境治理乃至人工控制降雨过程都是十分必要的。

在水循环的每一环节中, 基本上围绕某一部门、某一学科的需要而独立开展研究和建设观测设施的, 尽管这些学科的研究都取得了一定的研究成果, 但观测内容和布局要纳入水循环系统的整体研究中还需要做进一步的研究工作。尤其在一些学科的研究已取得一定成果的基础上, 建立模拟和预测水资源循环系统的整体模型, 开发区域或全球性的数值模式已得到人们的关注和研究^[2]。

20 世纪 80 年代, 随着“全息”一词从经典物理学引入人体科学, 相继出现了全息生物学和宇宙统一论等新兴的交叉学科。目前, 全息理论已经在众多学科中被广泛应用, 并且越来越呈现发展壮大之势。而气象、水文、水动力的数值模式将取代独立的气象或水文或水动力的单一研究方式, 即建立全息水资源动力模型的时机也已经到来。从字面上理解, “全息”是全部的信息、全部的链接, 也就是信息的系统工程, 它不仅包括了全部的信息, 而且还包括

了透视、全位、睿智、前瞻和超前。全息作为信息的根本性质,使得任何一个信息本身都是全息基元,即物质的每一个局部都反映着整体特征,每一个微小的单元都有全息的特征^[3-5]。由此,本文所提出的“全息”具有3层含意,一是指信息的完整、全面,包含气象、水文、河流、海洋、地下水、生态水环境等参与水循环系统的信息资料较完备;二是指水资源动力模型的空间多维化程度,如同全息图像一般呈现出立体空间上的水循环运动模式;三是模型中的每个环节,或者是任意小尺度的模型都可以体现出整个水循环过程的特征。

全息水资源动力模型应具备以下特点:①具有大尺度的空间和时间水量分布的预报和模拟模式;②具有中尺度流域产汇流水文模拟系统;③具有中小尺度洪水演进模拟和城市暴雨沥涝模拟模式;④模型应具有较全面的地理、大气、海洋、水文和冰雪等信息;⑤统计规律计算、数值分布计算、总量控制计算与动力计算相结合的模拟方法相互补充,以动力模拟为主要手段;⑥生态环境对水循环系统的每一环节都具有一定影响,理性考察人类社会经济发展和动植物繁衍对水循环系统的作用,将使水动力模型更具实际价值。

建立全息水资源模型的意义在于模拟局部区域乃至全球的水资源循环系统的拟序运动过程,有效地估测水资源的再分配及形成灾害性区域的时空可能性,为人工影响天气的时机和空间定位提供可靠的信息,对人工影响天气的效果进行预测和评估。同时为防汛抗旱提供决策信息,对水库蓄水、长距离输水进行调控^[6]。

1 全息水资源动力模型的构成

全息水资源动力模型是由多部门、多学科、多信息源汇集而成的复杂的模型系统,模型构成如图1所示。

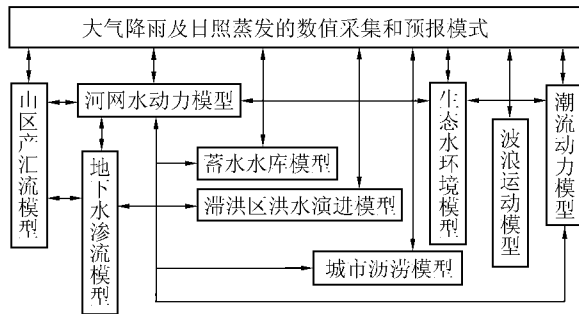


图1 全息水资源动力模型模式

1.1 天气预报模式和数据采集系统

目前许多发达国家已建立起了以数值分析为基础的、天气、气候的预警、预报、预测和预估系统,体现

为建立了以卫星、飞机、雷达等高科技手段为主的探测体系,可比较全面地获取气象、气候系统各类信息,在一定程度上弥补了观测空间分布的不均匀,并可以为大气、陆地、海洋的科学研究提供长期、稳定的空间数据^[7]。全息水资源模型可以借助于气象科学的成果提供雨云分布资料、运动路径等,为模型上边界条件,同时建立日照与蒸发,特别是海洋上蒸发与强对流系统热带风暴所形成的强降水过程之间的关系。在气象科学研究中,中尺度系统的三维动力学、热力学结构,特别是中尺度系统所产生的强降水过程仍然是数值天气预报中的难题,但面雨量分布的计算研究已取得了显著的成果,特别是依赖面雨量分布预测灾害性降雨和有效利用雨洪资源得到了长足的发展。目前计算面雨量的方法主要有泰森方法和二次曲面函数计算方法^[8]。

1.2 山区地形的产汇流模型

山区是河流发源或形成的地域,暴雨倾泻在山区会形成湍急的水流。一般山区地形陡峭,产流系数大于平原地区,汇流效果也十分明显,正确地建立山区地形条件下的产汇流模型对研究下游来水量、水量持续时间至关重要。在模型中陡峭山体的水流交换已不能直接采用浅水缓变地形去模拟,需要对模型的阻力项作出相应修正,否则会出现虚假流量增量。经国家气象局批准,由天津市气象局和天津大学合作研究的城市暴雨沥涝仿真系统,在山区城市中对山地流计算采用了修正的阻力公式,取得了较好的计算效果。

1.3 地下孔隙渗流模型

地下孔隙渗流是水循环系统的重要组成部分,同时也是较难建立和验证的模型,地质构造的多样性和各向异性的随机性决定了模型的近似程度。点阵数学模型是将孔隙渗流理想化的模型,使空间的每一点都是孔隙介质与运动流体所共有,用有序孔隙流代替无序孔隙流。

经模拟发现^[9],对内部球心低渗透率外部周边为高渗透率的流动,球心内部和周边流动都是较为规则平稳的,而对于内部球心高渗透率外部周边为低渗透率的流动,则球心和周边流动都呈现出较为不规则的波动,因此可以看出低渗透率的流动是以不规则波动来描述孔隙间的渗流的。

1.4 河网水动力数值模拟

采用三级联解的一维断面式河网模型,可以解决多支流、复杂的网状河道计算问题,形成整体计算模式,反映河道分流和沿程水面线变化。断面式河网如图2所示。对滞洪区的行洪河道可以采用无结构有限体积法构造一维网格和二维网格,河道网格

上可以考虑堰、水闸、泵等给排水设施 ,用于描述干涸河道洪水演进和分洪、破坝等工程情况^[10]。图 3 为无结构网格的河网模型。

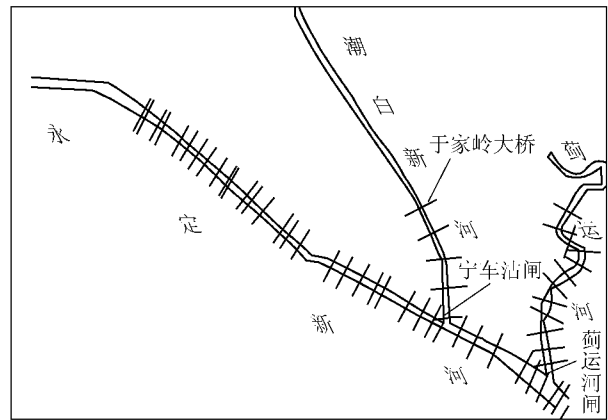


图 2 永定新河一维断面式河网模型

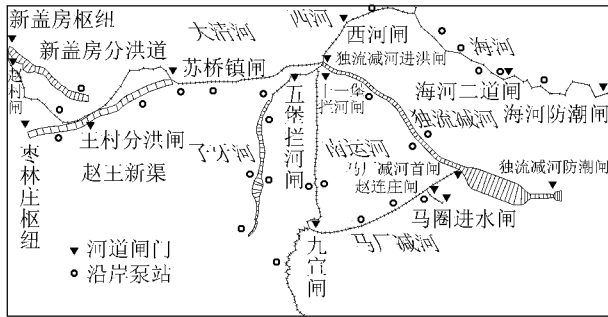


图 3 大清水系无结构网格河网模型

1.5 滞洪区洪水演进模型

滞洪区洪水演进模型采用多边形无结构网格 ,模拟地面流、地面渗流、堰流、桥涵、公路、铁路、大坝、村庄等地形地物 ,研究洪水演进、分洪时机、淹没范围、退水路径、退水历时等滞洪、蓄洪方案。滞洪区模型常与无结构网格河网模型联合使用 ,采用一、二维平面多点衔接模式 ,研究河道与滞洪区间扒口、堤防漫流等滞洪区与河网的水量交换问题。图 4 为天津市滞洪区五洼与河网的洪水演进一、二维平面多点衔接计算模型。

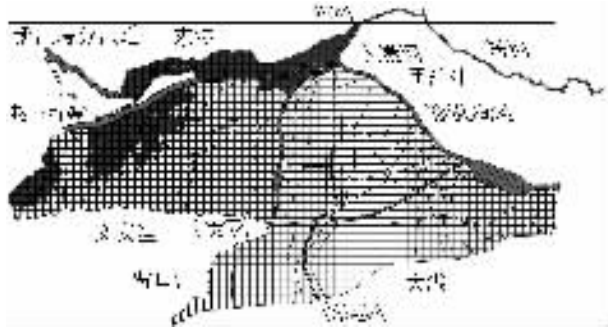


图 4 天津市滞洪区五洼洪水河网演进模型

1.6 水库蓄水、湖荡、风吹流模型

水库是储存生活用水、调蓄洪水的重要工程措施 ,采用考虑风应力作用的二维浅水环流方程 ,可以

计算水库区的风吹流和湖荡现象 ,对水域宽阔的湖面日照的蒸发作用也较明显。同时水库模型往往与河网模型联合使用 ,形成一、二维纵向衔接模式。

1.7 城市暴雨沥涝数学模型^[11]

应用有限体积法思想采用无结构不规则网格技术 ,用二维非恒定流控制方程模拟城市产汇流现象 ,对地表径流、河道汇流、排水渠道、地下管网、明满过渡流、堰流和井口排壅水进行计算模拟 ,建立城市暴雨沥涝数学模型。图 5 为天津市暴雨沥涝模型网格和部分积水网格。

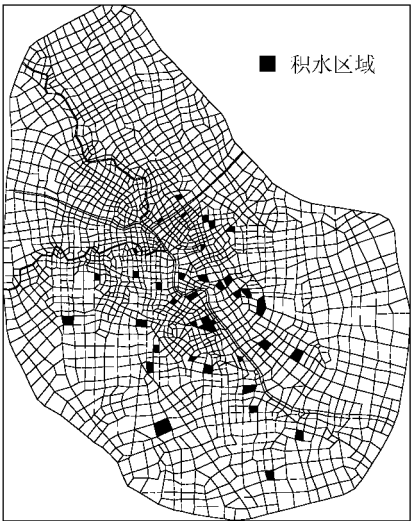


图 5 天津市暴雨沥涝模型

1.8 海区潮流模型

海区潮流模型一般采用显隐交替的 ADI 有限差分法 ,或有限元集中质量法和浅水环流方程。模拟潮波流动方向、大小和潮位 ,海区深水边界可采用海洋水文中的调和常数和分潮叠加法 ,或假想潮型调试验证法确定。用有限元三角形单元划分的网格如图 6 所示。

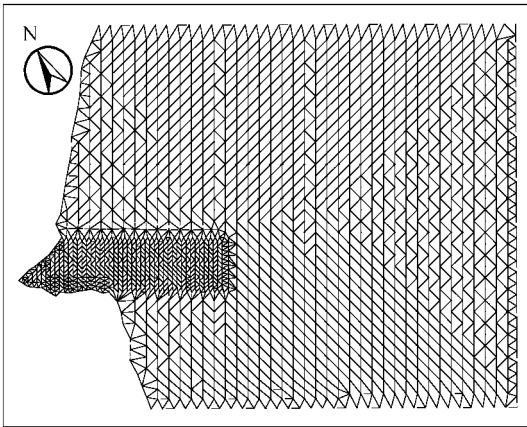


图 6 永定新河口潮流模型

1.9 波浪传播数学模型

宽阔海区波浪传播模型采用能量传播计算模式^[12] ,波浪受地形地物折、绕射影响 ,以能量波形式

推进,可以模拟能量波的推进过程。折绕射波浪场见图 7^[11]。

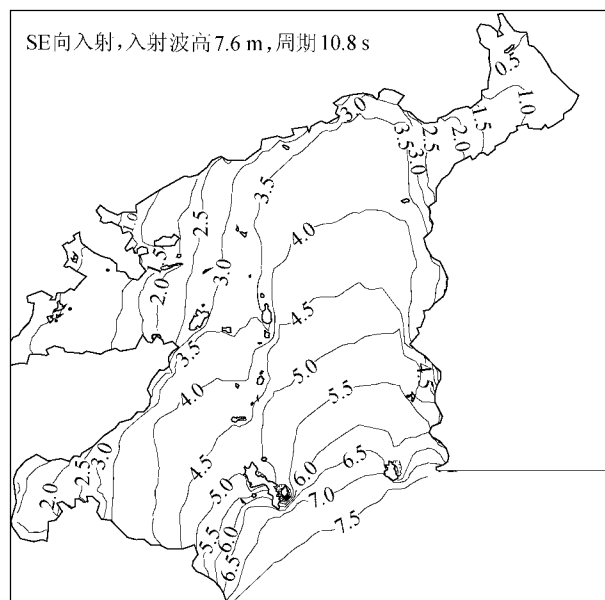


图 7 大亚湾波浪传播模型(单位:m)

2 全息水资源模型的运行理论

为更好地说明全息水资源模型的运行理论并考虑到该模型所具有的中小尺度的特点,可以考虑一个包括山区、水库、平原、河流、城市及海洋的中尺度区域模型,模型各构件地理位置由西向东依次分布(见图 8)。

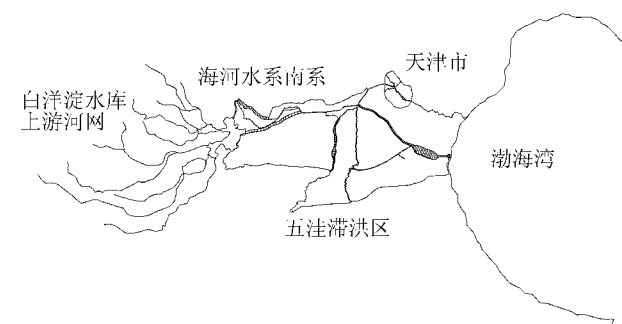


图 8 海河水系局部流域全息水资源模型示意图

2.1 模型建立方法

全息水资源模型一般采用一维、二维或三维模型构件来建立,网格采用无结构多边形,增加模型适应边界和任意排列的能力。通常采用 3 层计算网格,即高空雨量分布层面、地表流、河道、水库、洼淀、海流层面、地下流、城市管网和底床层面。根据各种模型的控制方程及其离散方程建立网点、网格和通道间的数据联系,得到模型构件间的衔接条件。模型的数据库化将为模型构件和模型整体的运行提供有力的支持。模型将对常用参数进行调试,并采用实测资料进行验证,最终确定模型在模拟实际问题中的可靠性。

2.2 模型运行过程

模型的运行是一个整体过程,要求所有计算构件同步运算,所需的信息量和运算量相当庞大,运算过程简述如下:

首先模型必须获得气象预报的支持,以得到大尺度的水量分布信息。给定模型区域内的降雨量及降雨过程,为进一步计算模拟提供条件,同时气象中的大气信息也会受到下垫面及其水情条件的影响。

其次,结合并运用水文信息和水文知识,考虑渗流、地面植被等因素对产汇流的影响,得到地表流和地下流的流量等信息。

在确定产汇流信息之后,考虑整个模型区域内的水动力过程。对于山区,采用山区地形的产汇流模型,计算得到山区的水位与水量等数据;对于平原,一般可采用滞洪区洪水演进模型,即可得到平原地区的水位与水量等数据;对于水库、湖泊及河流,则可分别采用水库蓄水、湖荡、风吹流模型与河网水动力数值模型进行数值模拟;对于城市,可以采用城市暴雨沥涝数学模型,该模型可提供降雨后市内道路的积水深度及市内河流的水位、流量等信息;对于海洋,具体包括潮流和波浪两部分,分别可采用海区潮流模型和波浪传播数学模型进行计算。至此,运行了模型区域内所有的基本构件。

接下去的工作是对上述构件进行合成。从山区来的水会进入水库,接着会进入平原、河流,再接着可能会进入城市,或者直接流入海洋并进入深海。考虑到整个水流运动过程,可以将采用山区地形的产汇流模型所得到的水位与水量等数据作为入流条件提供给水库蓄水、湖荡、风吹流模型或河网水动力数值模型,再将水库、湖泊或河流的来水作为入流条件提供给滞洪区洪水演进模型,可以得到平原地区的水流运动情况。如果上游的来水进入了城市,则可结合城市暴雨沥涝数学模型对市区内的水流情况做出模拟。最后,结合考虑海区潮流模型和波浪传播数学模型,可模拟陆地的水流与海洋潮流、波浪相互作用和影响的运动过程。

全息水资源模型的运行是一个整体过程,水流可能是从上游(比如山区)向下游(平原、河流或城市)流动的,也可能经河流直接汇入海洋。模型各构件的运行往往是交叉和无序的,模型各构件衔接所提供的相互间的边界条件是将所有构件整合成一个整体的关键,同时各个构件的计算时间是同步增长的,相互直接的影响也是实时的,这样才能得到整个计算区域的整体模拟结果。

如果在计算区域内还需要考虑其他的情况,可以采用增加相应构件的方法加以解决。当然也可以

采用修改已有构件的方法,比如平原地区增加了铁路,可以修改滞洪区洪水演进模型;河口海岸新修了大堤,则可修改海区潮流模型。具体采用何种方法,可视问题的需要和复杂程度而定。

综上所述,全息水资源模型的运行不但需要气象、水文的支持,还需要运用水动力的数值模拟方法对整个模拟区域进行整体同步计算,是一个包括气象、水文及水动力的统一的数值模拟模式。

3 模型运行的必备条件

综合了气象、水文、水动力数值模型的全息水资源动力模型,由于是多学科的汇集,涉及的信息量较大,工作计算的复杂性相对单一学科的数值模型将大为增加,模型运行必须依托多种条件。

3.1 信息的共享

模型所涉及的各个构件在其领域中已有相当的研究成果,但若要使各个独立的构件组成完整的具有系统意义的全息模型,则研究资料和研究成果的信息共享是前提条件。从长远意义上来讲,信息的共享质量也是至关重要的。如何增强各个独立构件所提供的信息之间的兼容性,将会大大影响到建立全息模型的整体效率和质量。

3.2 多部门的协作

全息模型涉及研究领域的广泛、研究地域的广大使得多部门、多地区甚至多国家的协作成为必须。协作主要包括两个含义:①已有海洋、气象、水文、河流、冰雪、植被、土壤等信息在各部门间流通的共享协作;②在理论和技术上的协作,发挥各自所长,保证各构件部分模型的准确性、高效性。

3.3 理论不断完善

全息水资源动力模型的研究还处于不成熟的阶段,其基础是各个组成部分的理论,在此之上形成系统,但各个理论间的联合应用及模型耦合依然存在。例如部分间的非线性耦合及部分内部的非线性仍是给实际运行带来问题的一个重要方面。水文系统、水动力系统和气象系统等内部都极大地存在着非线性特性,当各个模型耦合为一个整体时,非线性对整个系统模拟结果的影响就可能会被放大,从而导致结果失真,因此不容忽视。此外,模型结构的设计、模型参数的选取和测量以及所采用的数值计算方法等等也直接影响到模型的准确性和效率。因此加强理论的完善性,建立完备的全息水资源动力理论是解决实际模型模拟效果的根本途径。

3.4 计算机技术水平的发展

全息水资源动力模型是数学模型,是通过数值模拟来实现的,因此计算机的应用也是必备条件之

一。就目前来讲,微型计算机及工作站的计算能力基本能够满足模型的计算需求。随着模型的不断精细化,更多的偏微分方程将会用于模型中描述实际情况,考虑的因素越来越多,使得模型计算的需求越来越大,计算机硬件和数值计算软件的发展水平对模型运行的影响不容忽视。

3.5 国家和政府的支持

全息水资源动力模型的运行模拟是一个具有系统工程特色的研究和管理过程,需要政府在资金和技术上的支持,以及在政策上的规范和组织实施。

4 和谐的水资源循环系统

由于水资源分布的不均匀,水循环系统在局部区域上呈不协调的循环过程。这种不协调反映在频繁出现的灾害性天气上,如干旱、洪涝、雹灾、大雾等天气严重影响国民经济的发展和人民生活水平的提高。

全球性升温是引发水资源循环失调和诱发灾害性天气的重要原因,加剧了降水的波动性,我国在长江流域出现过3次特大水灾,即1931年,1954年和1998年,而1965年开始华北进入干旱期,虽有局部降雨但未能改变旱情的大趋势。

目前我国人均水资源 2300 m^3 。在2030年人口达到16亿时,人均水资源仅为 1700 m^3 ,人均占有量仅为世界人均水平的 $1/4$,已接近影响经济社会发展的临界值。

水资源污染也是水资源循环系统中耗散项,据2003年在日本举行的世界水论坛会议上联合国水资源世界评估报告提供的资料,全世界每天约有200万吨垃圾倒进河流、湖泊和小溪, 1 m^3 废水可以污染 8 m^3 饮用水,流经城市的河流几乎都不同程度地被污染。

自然、社会 and 人类活动的影响都应当在水资源循环系统中作为一个影响因子被考虑,灾害性天气、温室效应、人口增加和水资源污染作为一个负面的影响因子被考虑,而土壤、植被、动物过滤水、蒸腾、蒸发水、地下水、稀释自净水参与水循环系统都作为正面影响因子被考虑,其次水电站雾化,空中云水资源的开发利用也应纳入水资源循环系统的模拟范畴。

建立区域或全球性的水资源循环综合模型,可以利用水文示踪、雷达探测、卫星遥感等技术手段收集大气、水文、陆地资料,研究全息式的水循环物理过程。提出大气、河流、海洋及其相互作用的动力系统耦合模式,可以提供和谐的水资源循环信息,对气候系统、河流、海洋动力系统、生态系统、社会经济发展 and 人类活动做出科学评估。

(下转第14页)

的速率最终减小为零时闸前渠段中出现的水流漫溢现象,所得主要结论如下:

a. 渠道中节制闸关闭时,漫溢首先出现的位置在关闭节制闸的前端,漫溢出现的快慢与节制闸出流量减小的速率有关,节制闸关闭越快,或出流量减小得越快,漫溢出现的时间也越短。

b. 节制闸出流量的减小会导致闸前水位直线上涨,水位上涨速度与闸下出流量变化速率呈直线关系,闸门完全关闭后模拟计算得到须水河闸前水位上涨速度为 0.35 m/h 左右。

c. 得到了须水河节制闸不同流量变化速率下不同时间的影响范围,且流量变化速率越大,对上游的影响距离也越远,漫溢时刻,计算结果显示流量变化速率小的其影响距离反而大,主要是流量变化速率小的工况最终达到渠顶漫溢所需的时间长所致。

d. 在水流溢出之前,同一时刻节制闸下的流量变化速率越大,则断面流量受到影响的渠段范围也越远,各断面的流量变化幅度也越大。

显然,为尽量避免渠道出现漫溢事故,因各种原因需要关闭某一节制闸时,应尽量缓慢关闭闸门,延长渠道出现漫溢的时间,以留出更多的反应时间去启动退水闸或其他分水设施。总之,在闸门出流量

减小或关闭的情况下,必须将多余的流量在渠道漫溢发生前分流,否则会导致渠道出现溢流事故。

参考文献:

- [1] 章晋雄,牛争鸣.南水北调中线输水渠道系统的仿真研究[J].系统仿真学报,2002,14(12):1588-1590.
- [2] 丁志良,谈广鸣,陈立,等.输水渠道中闸门调节速度与水面线变化研究[J].南水北调与水利科技,2005,3(6):46-50.
- [3] 吴泽宇,蒋为群.南水北调中线工程输水渠道桥梁水头损失影响分析[J].水利水电快报,1997,18(15):1-4.
- [4] 黄国兵,王才欢.南水北调中线工程穿黄隧洞水力学试验研究[J].人民长江,1998,29(5):3-5.
- [5] 魏文礼,王德意.计算水力学理论及应用[M].西安:陕西科学技术出版社,2001.
- [6] 槐文信,赵明登,童汉毅.河道及近海水流的数值模拟[M].北京:科学出版社,2005.
- [7] 管光华.大型渠道自动控制建模及鲁棒控制研究[D].武汉:武汉大学,2006.
- [8] SWAMEE P K. Sluice-gate discharge equation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineerin, 1992, 118(1):56-60.
- [9] HENRY H R. Discussion of diffusion of submerged jets[J]. Transaction of ASCE, 1950, 115:687-694.

(收稿日期 2006-10-11 编辑 熊水斌)

(上接第 10 页)

5 结 语

本文提出了构建全息水资源动力模型的设想,分析了建立全息水资源动力模型的必要性和可能性,说明了全息水资源动力模型的主要构件,并对已有的一些研究工作做了简单介绍,阐述了全息水资源模型的运行理论、模型运行的必备条件和建立和谐水资源循环系统的概念。

参考文献:

- [1] 杨树清.21 世纪中国和世界水危机及对策[M].天津:天津大学出版社,2004:32-46.
- [2] 杜国志.新中国防洪 50 年[J].防汛与抗旱,1999(3):2-12.
- [3] 丁桑岚.环境评价概论[M].北京:化学工业出版社,2001:98-134.
- [4] BEVEN K J. How far can we go in distributed hydrological modeling? [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2001, 5(1):1-12.
- [5] ROSS M A, TARA P D. Integrated hydrologic modeling with geographic information system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1993, 119:129-139.
- [6] 王书功,康尔泗,李新.分布式水文模型的进展及展望

- [J].冰川冻土,2004,26(1):61-65.
- [7] 周秀骥,吴国雄.中国气象事业发展战略研究:重大科学技术问题卷[M].北京:气象出版社,2004:57-73.
- [8] 姚学祥,徐晶.2003 年淮河流域大水期间体积降水量的研究[J].气象学报,2004,62(6):803-813.
- [9] 李大鸣,张红萍,李冰绯,等.多孔介质内部流动模型及数学模拟[J].天津大学学报,2002,35(6):699-704.
- [10] 芮孝芳,冯平.多支流河道洪水演算方法的探讨[J].水利学报,1990(2):26-32.
- [11] LI Da-ming, ZHANG Hong-ping, LI Bing-fei, et al. Basic theory and mathematical modeling of urban rainstorm water logging[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B, 2004, 16(1):17-27.
- [12] HAIDVOGEL D B, BECKMANN A. Numerical ocean circulation modeling [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1999:110-178.

(收稿日期 2006-04-10 编辑 熊水斌)

