

水资源系统模拟模型研究进展

游进军^{1,2}, 王 浩², 甘 泓²

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044)

摘要: 回顾了国内外水资源系统模拟模型的研究历程, 结合当前水资源领域发展方向, 介绍了目前的研究现状。分析了以集成方式研究水资源系统模拟技术的必要性, 评述了几类当前比较有影响的水资源系统模拟方法以及相应软件。阐述了面向对象技术(OOT)以及地理信息系统(GIS)等在流域水资源模拟中的应用。指出以计算机技术为先导, 考虑不同的流域实际状况进行系统分析是构造通用水资源模拟模型的必要条件和发展方向。

关键词: 水资源系统; 模拟技术; 地理信息系统; 面向对象技术

中图分类号: TV87; G353. 11 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2006)03-0425-05

水资源系统规模庞大、结构复杂、影响因素众多, 而系统中的不同方面构成了各种水资源相关的研究分支。而目前水资源开发利用和人类活动结合日趋紧密, 从而在水资源时空分布、生产和生态用水需求产生了众多矛盾, 而对这些问题的有效解决方案必须建立在流域或区域基础之上, 甚至必须考虑和相关流域或区域的关系, 这使得将水文水资源系统作为一个整体进行模拟具有实际意义。以集成方式进行系统模拟是达到这一要求的必然途径。未来发展需要缩短目前宏观和微观层次研究的差距, 以包括地表水、地下水在内的整个水资源系统为对象进行模拟, 最终为决策者提供清晰、全面的分析成果, 包括完成水量水质同步模拟并动态分析水与生态关系, 以适用于水资源的综合管理规划。

目前国内应用的微观水资源模拟均是以某方面需求为导向的专业化模型, 难以综合描述整个区域或流域的各项水量转化, 而宏观性模型又缺乏水动力机理, 不能准确反应水资源时空分布过程。单一的专业模型以预定边界条件考虑其他相关模块, 相互独立, 割裂了水资源系统中存在的内在联系, 不能准确模拟实际。所以能反映宏观物理过程并满足实际需求的模拟技术是研究水资源系统的必然发展趋势。而日新月异的计算机技术为这样的研究提供了有效工具。本文在讨论现有的水资源系统模拟技术基础上, 概括了这些方法所具有的一些共性, 并对未来的发展方向作了展望。

1 国内研究现状

水资源系统模拟研究源自水资源规划工作的需求, 国内学者在 20 世纪 60 年代就开始了以水库优化调度为手段的水资源分配研究, 水库运行的模拟计算是早期实现水资源系统模拟的主要手段。

20 世纪 80 年代起, 系统模拟方法在灌区供水排涝系统分析设计中得到了广泛应用, 并逐渐引入了递阶分析、分解协调等大系统优化模拟理论方法^[1,2]。以水利部南京水文水资源研究所为首的研究小组对北京地区的水资源利用以系统工程方法进行了研究, 建立了地下水和地表水联合优化调度的系统模拟模型^[3]。冯尚友以系统理论为基础结合水资源系统所具有的自然和社会两重属性, 提出了水资源系统工程理论, 并给出了防洪、发电、灌溉、供水以及流域规划等水资源系统所涉及的不同方面数学优化模型的建立和分析求解方法^[4]。刘健民等采用大系统递阶分析方法建立了模拟和优化相结合的三层递阶水资源系统模拟模型, 并对京津唐地区的供水

收稿日期: 2004-10-13; 修订日期: 2005-10-20

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(50239050)

作者简介: 游进军(1977-), 男, 四川成都人, 清华大学博士后, 主要从事水文学及水资源方面研究。

规划和优化调度进行了应用研究^[5]。华北水资源研究中心以华北地区为实例研制了包括由宏观经济分析、水资源系统模拟以及多目标分析在内的水资源优化配置模型,由数据库驱动实现了各模型间的连接与信息交换,对水资源系统模拟与经济分析的整体性研究作了尝试^[6]。这一阶段各种水资源系统模拟方法在水库优化调度、供水以及灌溉系统运行和防洪除涝系统设计方面得到了广泛应用^[7],为解决区域性水资源规划问题奠定了基础。

近年来,国内学者结合当前需求进一步发展了水资源系统模拟技术方法的研究,同时在理论上也有所突破。甘泓等以水资源配置模型为基础,考虑了水系统范围大、要素多的特点,研制出了可适用于巨型水资源系统的智能型模拟模型^[8]。王忠静等根据可持续发展理论,提出一种交互式宏观多目标优化与方案动态模拟相结合的决策支持型规划思想和方法,用分段静态长系列模拟水资源系统的动态特性,开发出相应的规划决策支持系统^[9]。赵建世等应用复杂适应系统理论和方法开发了水资源系统整体分析模型,将水量过程和经济机制的模拟结合为整体进行分析,并采用了嵌套遗传算法实现了模型的求解^[10]。在理论方面,王浩等提出了水资源“三次平衡分析”思想,阐述了基于流域的水资源系统分析方法,指出了协调国民经济用水和生态用水矛盾是水资源模拟模型需要解决的重要目标^[11]。

由于我国水资源问题日益成为社会关注焦点,对水资源系统模拟的研究也成为了本领域的一大热点。但由于研究范围和投入力量的限制,国内研究多是以具体实例为研究对象,以实际问题的分析和解决为导向,应用范围较小,所采用的方法和开发的模型还不具备通用性。与发达国家相比,还缺乏成熟可靠的系统模拟模型以及相应软件,也制约了研究成果向应用的转化和推广。

2 国外主要模拟软件

相对而言,国外在水资源模拟的软件产品上具有较大优势,所开发的模型具有较强的实用性,并充分利用计算机技术完成了系统化集成。

2.1 RIVERWARE

RIVERWARE^[12]是由美国科罗拉多大学水与环境决策支持研究中心(CADSWES)研制的通用型流域系统模拟软件。软件采用了面向对象(OOI)和“数据中心”(Data-Centered)风格的软件设计方法,提供包括供水、航运、发电、防洪等水库群多目标分析计算方法,同时也包含随机水文分析、河道水力学计算、水质分析、地表水地下水转化分析等功能。对于水库群联合调度该软件提供了完全模拟(pure simulation)、基于规则的模拟(rulebased simulation)和优化调度(optimization)三种计算方式,可以用于短期调度运行管理和中长期的调度方案制定。由于采用了先进和系统的软件设计思路和技术,RIVERWARE具有良好的可控性和适应性,用户可以根据需求和经验定制模型,实现从模型构建到计算方法选择的完整控制。该软件在美国垦务局(USBR)和田纳西流域管理局(TVA)得到了应用。

2.2 MIKEBASIN

MIKEBASIN^[13]是由丹麦水利研究所(DHI)开发的水资源规划管理软件。该软件基于GIS开发和应用,以ArcView为平台引导用户自主建立模型,提供不同时空尺度的水资源系统模拟计算以及强大的结果分析展示、数据交互及等功能。MIKEBASIN充分利用了GIS平台的优势,灵活集成了各类功能,能以河流水系为主干,以工程、用水户以及分汇水点等为节点和相应水力连线构建流域系统图,并可方便定义各类对象的属性,由用户自主建立模拟系统并实现动态模拟。模型的水量分配计算中考虑了地表水和地下水的联合调度,提供了库群联合调度算法,并对系统中的农业灌区、水电站及污水处理厂设置了相关计算。水量分配计算的优先序可以按规则进行调整。该软件具有较强可移植性和可扩展性,可以根据需要和资料条件嵌入其他功能模块,如降雨径流分析、水质模拟模块等,为不同需求的用户提供了选择余地。

2.3 EMS(GMS/WMS/SMS)

EMS^[14]是由美国杨百翰大学与陆军工程兵团共同开发的软件系统,由WMS、GMS、SMS三个子系统软件组成,可分别用于流域、地下水及地表水系统的综合模拟与分析。EMS以GIS平台为基础,用户可以针对不同流

域定制模型, 并提供各种直观结果。整个软件重视水文学和水动力学机理, 可以在宏观和微观两个层次同时反映流域水资源演变状况。WMS 是对流域模拟分析的综合性模型系统, 以通用的数据接口支撑多达十余种的水文模型和水力学模型, 并提供多种相关的扩展功能模块供用户选用, 也可以进行水质变化和泥沙传输沉积的模拟, 并提供随机模拟计算以及对各类参数的不确定性分析。WMS 内嵌了完整的 GIS 工具, 可以实现流域描绘和各种结果分析, 同时也可以结合其它 GIS 工具进行各种分析计算。GMS 为地下水模拟模型, 可以建立以 GIS 为支撑框架的概念化地下水模型, 模拟地下水流及传输、溶解物传输等多种地下水过程, 并提供风险分析模型对地下水污染程度进行量化评价。SMS 是地表水模拟模型, 能够完成包括一维、二维、三维等不同条件下的地表水运动过程的模拟, 并可以直接调用其他水文模型完成为模型的径流输入, 另外可以模拟污染物的迁移、水盐运动、泥沙运移等过程。

2.4 Waterware

Waterware^[15] 是奥地利开发的流域综合管理软件, 具有流域规划、水量分配模拟、污染控制以及环境影响评价等功能。软件中集成了 GIS 分析工具、模拟模型和专家系统, 以面向对象数据库为支持, 结合 GIS 直观显示分析结果。Waterware 可以从社会经济、环境和技术三个方面分析流域水资源问题, 社会经济包括经济效益分析、经济结构以及管理手段, 环境方面包括水质模拟和污染物排放分配, 技术方面包括用水效率和各类约束条件等的分析。模型以流域内的水利工程、用水节点(城市、工业区、农业灌区等)、控制性站点、河道网络为系统的主要分析对象, 以水质控制约束下的经济及环境用水分配的效益最大化为目标, 实现整个系统的水量计算。作为流域规划管理的整体性分析工具, Waterware 在包括长江在内的多个流域得到了应用。

2.5 IQQM

水量水质综合模拟模型(Integrated Quantity and Quality Model, IQQM)^[16] 是由澳大利亚开发的用于水资源评价以及规划管理的模拟软件。IQQM 对系统水量和水质进行同步模拟, 可调用外部水文模型进行计算, 将河道水量演进、水库调度计算、灌溉用水模拟、经济用水及耗排水计算、湿地及环境需水计算等模型集成组合到一起, 从而实现水资源循环过程的完整水量模拟。IQQM 提供了以导水率为依据的简单计算和直接应用地下水模拟模型 MODFLOW 两种使用方式进行地下水模拟。IQQM 是以组件方式开发的集成软件包, 具有较强灵活性和可扩展性。但由于其考虑的因素较多, 模拟尺度较为精细, 因而对资料要求也比较高, 对于资料缺乏地区的应用有一定难度。

2.6 其他软件

Aquarius 是由美国农业部(USDA) 为主开发的水资源模拟模型^[17]。该模型以概化水资源系统网络为基础, 采用各类用水边际效益大致均衡为经济准则进行水源的优化配置, 并以非线性规划技术寻求最优解。该模型以面向对象技术构架系统, 系统网络图中的各类概化后的元素均以面向对象编程技术中的类表达, 并将其设计为符合软件标准的 COM 组件。模型以流域系统内相关的客观实体为建模对象, 可对水库、水电站、灌区、市政以及工业用水户、各类分汇水节点以及生态景观及娱乐用水要求进行概化反映, 并将其有机耦合在一个整体框架之中。ICMS(Interactive Component Modeling System) 是澳大利亚研制的水资源系统管理模型^[18]。ICMS 由一系列功能组件构成, 包括模型创建组件(ICMSBuilder)、模型库(Model libraries, MDL)、方案生成(Project)、结果显示(ICMS Views) 四部分。其主要特点是强大的交互性和方案生成的灵活性, 通过组件式开发实现由用户选择系统模拟方法。其中 ICMSBuilder 是系统支撑平台并提供系统网络图创建功能; MDL 是各专业模块的组合, 可以由用户选择嵌入系统中使用; Project 模块在已建立的系统图和选定的计算模型方法基础上, 自动生成计算方案并进行模拟计算; ICMS Views 以图表形式直观展示计算结果。

可见, 以上比较成熟的水资源系统模拟软件均是在有良好科研基础上结合大量实际经验逐渐积累发展而成, 具有专业覆盖面宽、综合性强、可操作性好等特点, 同时也潜移默化的影响其用户对水资源问题的认识和分析方法。相比而言, 国内研究在部分领域具有一定深度并取得了研究成果, 但对不同专业模块的综合和集成还存在困难, 仍处于分散独立分析解决问题的阶段, 在向实用性工具的转化上还存在不足。目前国外水资源方

面专业软件已逐渐进入并占领国内市场和内市场, 专业化模型的集成和技术转化的工作应当引起我们的足够重视。

3 水资源系统模拟发展展望

从国内外水资源系统模拟模型的研究现状可以看出, 本领域研究具有以下一些发展趋势:

(1) 系统模拟范畴扩大 目前成熟的水资源系统模拟软件均突破了以往单纯考虑水资源供需平衡分析、工程调度计算的范畴, 而是扩展到将整个流域或区域水资源系统作为整体, 研究天然以及人类活动影响下的水量运动、相互影响。同时对于研究区域的社会经济状况和发展指标、需水预测、节水状况和潜力、水资源保护等与相关的问题也需要作不同程度的分析考虑。

(2) 指导性功能提高 以往流域水资源模型以模拟水资源系统本身为主线, 按照 Rogers 和 Fiering 的观点^[19], 水资源系统分析应当考虑系统已经存在以及未来可能会出现的问题并提供各种可能的解决方案, 而不是仅仅停留于对系统已有状况的模拟。以这种思路为指导, 流域模拟的研究应当充分考虑到水资源利用的发展, 如一些潜在的用水需求和水资源利用的新方向, 从而能在变化情况下得出有效合理的水资源开发利用, 提高模拟模型的通用性。

(3) 软件工程技术的引入和系统集成性的加强 由于所考虑的问题领域扩大, 水资源系统模拟需要包含多个具有相对独立性但相互关联的专业模块, 从而形成一个复杂的模型系统。有机结合各类功能模块并实现有效合理的交互, 对软件集成提出了更高的要求, 超越了以往单纯编制程序完成实现单一专业功能模块的范畴。这就需要全局统筹各专业模块及其间相互关系的设计, 同时以软件工程技术完成整个系统框架体系的构建、以软件技术标准规范设计系统内各专业功能块的层次和关系, 这也是新一代的面向对象方法的程序设计在水资源系统模拟中得到广泛应用的原因。

(4) GIS 技术的引入 由于水资源系统模拟分析总是基于流域或区域范围, 所涉及的流域及行政区划、水系等各种系统元素与 GIS 的“点线面”等基本空间概念和相应属性数据库结构具有良好的一致性。而 GIS 直观地分析和展现数据的能力为水资源系统模拟分析提供了高效的手段, 所以引入 GIS 作为水资源系统模拟分析的平台是一个必然趋势, 同时也对数据基础提出了更高的要求。

(5) 软件实用性和可操作性的提高 由于流域系统的复杂性, 同一问题考虑深度和处理方式不同, 对资料等各方面支撑条件提出的要求也就不同。这就要求软件对同一类问题能承载不同的分析方式, 具有一定普适性。水资源系统模拟决策的用户一般是专业技术人员, 要使其能完成从资料准备、运行和结果分析等过程, 模型必须有较强可操作性, 简捷实用的人机交互方式必不可少。

从国内外发展看, 国内研究应在模型软件化方面投入更多的力量。与单纯的研究不同, 专业软件开发是一项系统的工作, 一方面需要有完整系统的专业框架作支撑, 同时必须充分考虑用户需求和资料的可获取性。另一方面, 开发通用性专业软件需要相应的软件开发人员参与。计算机软硬件技术的发展为更大规模的研究提供了基础, 也对开发人员从宏观系统框架和微观方法技术上提出了更高要求。这两方面的发展必将共同推动水资源领域应用软件的综合性和系统性和实用性。

随着社会的进一步发展, 水资源领域所需要考虑的问题必将会更多更复杂, 而各类数据收集分析的水平也会相应逐步提高, 以往由于资料等限制而不能研究的问题也可以进一步分析, 使得专业问题分析考虑的尺度更细。通过对水资源模拟理论和方法的研究, 可以为相关工作提供基础, 并且提高流域管理和决策人员对水资源各方面状况的整体性认识。

参考文献:

[1] 马文正, 袁宏源. 水资源系统模拟技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987. 56-82

[2] 白宪台, 郭元裕, 关庆滔, 等. 平原湖区除涝系统优化调度的大系统模拟模型[J]. 水利学报, 1987(5): 14-27.

[3] 张世法, 汪静萍. 模拟模型在北京市水资源系统规划中的应用[J]. 北京水利科技, 1988, 34(4): 1-15.

- [4] 冯尚友. 水资源系统工程[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1991.
- [5] 刘健民, 张世法, 刘恒. 京津唐水资源系统供水规划和调度优化的递阶模型[J]. 水科学进展, 1993, 4(2): 98-105.
- [6] Center for North China Water Resources Research, China Institute of Water Resources and Hydropower Research. United Nations Development Program (UNDP). Macroeconomics based water resources development in North China[R]. Final Report, Oct. 1996.
- [7] 叶永毅, 黄守信, 等. 水资源大系统优化规划与优化调度经验汇编[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [8] 杨小柳, 刘戈力, 甘泓, 等. 新疆经济发展与水资源合理配置及承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [9] 王忠静, 翁文斌, 马宏志. 干旱内陆区水资源可持续利用规划方法研究[J]. 清华大学学报, 1998, 57(1): 33-36.
- [10] 赵建世, 王忠静, 翁文斌. 水资源配置系统的复杂适应原理与模型[J]. 地理学报, 2002, 57(6): 639-647.
- [11] 王浩, 秦大庸, 王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报, 2002(8): 1-6.
- [12] Zagona, Edith A, Terrance J. Fulp, Richard Shane, Timothy Magee, and H. Morgan Goranflo (2001), RiverWare: A Generalized Tool for Complex Reservoir Systems Modeling, Journal of the American Water Resources Association, AWRA 37(4): 913-929.
- [13] Jha M K, Das Gupta A. Application of Mike Basin for Water Management Strategies in a Watershed[J]. Water International, 2003, 28(1): 27-35.
- [14] Fedra K. GIS and simulation models for Water Resources Management: A case study of the Kelantan River, Malaysia[J]. GIS Development, 2002(6): 39-43.
- [15] Nelson E J, Jones N L, et al. A Comprehensive Environment for Watershed Modeling and Hydrologic Analysis[A], Proceedings of International Conference on Water Resources Engineering, American Society of Civil Engineers[C]. San Antonio, Texas. 1995 Aug, 14-18.
- [16] Tahir H, Geoff P. Use of the IQQM simulation model for planning and management of a regulated river system. Integrated Water Resources Management[J]. IAHS Publ. no. 272, 2001: 83-89.
- [17] Thomas C B, Gustavo E D, Oli G B. Planning Water Allocation in River Basin, AQUARIUS: A System's Approach[A]. Proceedings of 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Subcommittee on Hydrology of the Advisory Committee on Water Information[C]. July 28-August 1, 2002, Las Vegas, NV.
- [18] Rahman J M, Cuddy S M, Watson F G R. Tarsier and ICMS: Two Approaches to Framework Development[A]. MODSIM 2001 International Congress on Modelling and Simulation[C]. Vol 4, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc, 2001: 1625-1630.
- [19] Rogers P, Fiering. Use of Systems Analysis in Water Management[J]. Water Resources Research, 1986, 22(9): 146-158.

Current status and prospect of study on simulation model of water resources system*

YOU Jin-jun^{1,2}, WANG Hao², GAN Hong²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: The recent research techniques of the simulation method for water resources system are improved rapidly due to the enhanced recognition of the system and the development of the related information technology. The development of the integrated simulation system is a trend for the management and planning of water resources. In this paper the current situation and new progress of the simulation techniques for water resources system are introduced briefly. The informatics and computational techniques play very important roles in facilitation of the water-related models. Combined with characteristics of water resources system, the standard conceptualization of a river makes it necessary to construct a general simulation model for the water resources system. Based on the comparison of the different methods and models of simulation, the common concerns of general water system model are summarized and the prospect of future research is put forward.

Key words: water resources system; simulation technique; GIS; object-oriented technique

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50239050).