

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.03.028

# 基于组件模型的地表水资源配置系统设计

徐斌<sup>1a</sup>, 何发智<sup>1a</sup>, 刘攀<sup>1b</sup>, 李立平<sup>1b</sup>, 肖义<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 a. 计算机学院; b. 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 湖南省水利厅, 长沙 410007)

**摘要:** 传统地表水资源配置系统往往针对特定的流域, 缺乏扩展性和灵活性。将流域、水库、需水点、输水连接等水利要素分别抽象为组件, 对河流采用 Horton 编码分级, 使用拓扑排序和河流同步的方式解决水系网络的水力联系, 以组件连接模式灵活地进行地表水资源模拟和优化配置, 通用性高, 扩展性强。新开发的系统可为水资源管理部门对生活用水、工业生产、农业灌溉、生态建设等规划、设计以及管理提供技术支撑。

**关键词:** 地表水资源配置; 组件化; Horton 编码; 拓扑排序

**中图分类号:** TP311.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0525-05

## Design of component based surface water resources allocation system

XU Bin<sup>1a</sup>, HE Fazhi<sup>1a</sup>, LIU Pan<sup>1b</sup>, LI Liping<sup>1b</sup>, XIAO Yi<sup>2</sup>

(1a. School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 1b. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Department of Water Resources of Hunan Province, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Traditional surface water resources allocation system is usually developed for a certain river basin, which lacks of expansibility and flexibility. In this paper, a component based surface water resources allocation system is presented. In the system, natural rivers, reservoirs, water use point, and water connections are considered as basic components. The system encodes rivers with Horton method, uses topology sorting and river synchronization to solve the hydraulic connections in river network. Therefore the river resources simulation and optimization allocation can be performed using the connecting components, which shows flexibility, versatility, and expansibility. The system can provide technical support for water resources management department to make plan and design of residential water use, industrial production, agricultural irrigation, and ecological development.

**Key words:** surface water resources allocation; component; Horton encode; topology sorting

近年来,水资源管理的信息化、现代化在国内外都得到了迅速的发展,在水资源的规划、管理方面发挥着日益重要的作用<sup>[1]</sup>。例如陈洁等<sup>[2]</sup>开发了适用于黄河治理业务的黄河水资源管理系统;王艳刚等<sup>[3]</sup>整合已有的水资源实时监控、污水监控等系统开发了覆盖承德市的水资源管理信息系统;刘玉娟<sup>[4]</sup>基于GIS设计和实现了闽江水资源管理信息系统;王俊等<sup>[5-6]</sup>以水资源模型为核心,开发了包含水资源信息查询与管理、水资源配置、水量调度和水质污染应急模拟的长江流域水资源管理与决策支持系统。但是,这些水资源管理系统普遍存在以下两个问题。

(1) 普适性较差。水资源配置软件系统有诸多的相似性,可以开发通用性较高的组件。但现有的系统往往只针对

某一特定流域的管理,使得我国各地的水资源管理系统繁多,开发过程缺乏统一的标准,难以在更大范围内进行系统整合和流域调度。

(2) 系统扩展性较差。早期的水资源配置系统不注重系统的后期维护和扩展,当现实中的水利工程或业务流程发生改变时,不能很好地适应,而往往需要重新开发新的系统,造成大量人力物力资源的浪费。

本文将流域、水库、需水点、输水连接等水利要素分别抽象为组件,以组件连接模式灵活地进行流域水资源模拟和配置,构建通用性高、扩展性强的水资源规划与配置软件系统。

收稿日期: 2014-06-30 修回日期: 2015-04-01 网络出版时间: 2015-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150514.0852.011.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61472289); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201051)

作者简介: 徐斌(1990),男,浙江苍南人,主要从事计算机在水利水电行业中的应用技术研究。E-mail: knightfate@163.com

作者简介: 何发智(1968),男,湖北武汉人,教授,博士,主要从事计算机应用技术研究。E-mail: fhze@whu.edu.cn

# 1 组件式模型

## 1.1 组件模型及其逻辑关联

组件的划分以周期序贯模型为基础<sup>[7]</sup>, 需水量的 4 个组成部分具有以年为周期的分布规律, 其中农业用水尤为显著。由于需水的周期性规律对水资源优化配置模型的准确性影响较大, 为了反映需水和来水的年周期分布规律, 系统以月作为水资源优化配置的最小单位, 对当前月进行优化配置, 更新数据作为下个月优化配置的输入, 逐月进行水量演算。

### 1.1.1 基于组件的水资源模型

本文采用组件模型来构建水资源模型, 以面向对象方法对组件的属性和行为进行封装, 以消息驱动机制处理组件间的交互行为, 使得组件具备高度的灵活性和扩展性, 能够在地图任意位置按需放置、拖动、删除, 检测其他组件类型自动连接成统一整体, 其良好的人机交互体验亦能提高操作人员的工作效率, 其逻辑关联部分的 UML 描述见图 1。

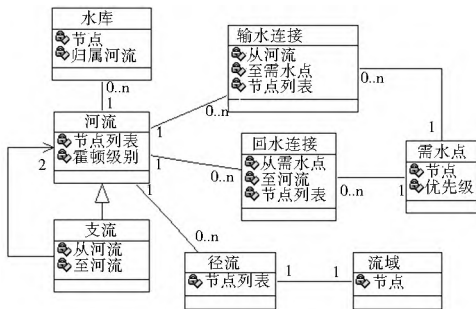


图 1 组件模型关联 UML

Fig. 1 UML map of linkage between components

### 1.1.2 河流与支流组件

流域内的河流, 可分为河流 (River 类) 与支流 (Distributary 类) 两种, 构成河系网络的主体。河流由有序的一系列节点 nodeList 组成, 表示河流从源头到尽头的各段区域, 使用蓝色折线表示, 在河流的末节点使用箭头标记河流的流向。河流总体维护其河流 Horton 级别和源头水量信息, 各个节点则存储其位置信息和各自与时间相关的水量信息。当前节点的水量信息依赖于其前序节点, 是水量演算中的一种依赖关系。支流是河流的一种特殊形式, 代表从河流某一点分流出向另一条河流的河段。支流本身也是河流, 所以继承了所有对河流的相关操作和处理。支流使用淡黄色折线表示, 以与普通河流区分。

### 1.1.3 水库组件

水库 (Reservoir 类) 位于某条河流上, 与该河流为从属关系。水库等人工水利工程的行为是可以人为控制的, 比如蓄洪、泄洪等, 因此用户可以控制这类组件产生不同的行为, 从而进行模拟调度。水库可以设置各项参数指标、水位-库容曲线、水位-流量关系、用于满足下游生态用水量、保证水电站工作等的最小下泄量以及汛限水位等<sup>[8]</sup>。水库的水位-库容曲线, 为一系列的点集, 可以通过线性插值对水位和水量进行换算, 水库的各项参数会在水量演算中生效。水库使用绿色三角形表示。水库必须在河流 (支流) 的某一节点上建立, 具有调蓄能力, 流经水库的水量通过水库设置的参数进

行蓄水或泄水操作后, 作为河流下一节点的水量。

### 1.1.4 需水点、输水连接与回水连接组件

需水点 (Demand 类) 是水量演算中的重要组成部分, 通常为各个城市。需水点除了其位置信息, 还包含由居民用水、经济用水、农业用水与生态用水四部分组成的需水量及供水优先级。输水连接 (TransmissionLink 类) 从河流指向需水点, 表示从河流到需水点的供水线, 存储了与时间相关的实际供水量, 用绿色折线表示。回水连接 (ReturnFlow 类) 从需水点指向河流, 表示需水点污水处理后的重新汇入河流的水量, 用棕色折线表示。各个需水点及其输水连接、回水连接包含了一系列节点依赖关系, 是水量演算中依赖关系的主要组成部分。需水点通过输水连接组件与河流 (支流) 或者水库连接获得供水, 再通过回水连接注入河流 (支流)。

### 1.1.5 流域与径流组件

流域 (Catchment 类) 表示由分水线划分的各个集水区。径流 (Runoff 类) 从流域指向河流, 表示降雨和冰雪消融的增加的水量进入河流的过程。流域和径流分别使用绿色圆形和绿色虚线折线表示。

## 1.2 模型实现

采用面向对象方法对组件进行封装, 当用户绘制流域图时, 各组件通过绘图函数在屏幕上绘制出来, 用户可以自由拖动, 并随时进行操作。模型的实现主要包含 3 个部分: 流域模拟、水资源预测与水资源配置, 见图 2。

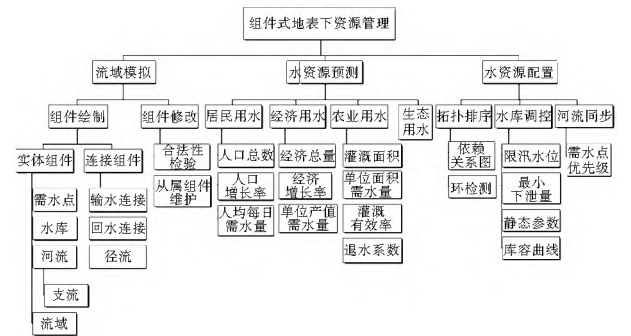


图 2 组件式地表水资源配置实现

Fig. 2 Implementation of component based surface water resources allocation

(1) 流域模拟。流域图主要结合地理信息进行绘图元素组件的绘制与连接, 并以适当的形式展示给用户。在绘制时维护相关状态信息, 并对组件绘制的合法性进行判断检验。

(2) 水资源预测。需水预测包含需水点 4 个方面的用水: 生活用水、工业用水、农业用水与生态用水。需水组成部分由各自的参数分别计算得到, 并可通过插值和给定增长率两种方式, 在已知年份数据的基础上对规划年份的需水量进行预测。

(3) 水资源配置。水资源配置以水资源供需为核心, 以预测的各单元需水量和已建设的水利工程供水能力为依据, 进行水资源配置方案的分析决策<sup>[9]</sup>。在完成流域模拟和水资源预测的基础上, 根据水量平衡方程计算河流中各个节点的水量<sup>[10-11]</sup>。根据水库的设计参数和调度规则对流经水库的水量进行演算, 在给定的优先级等条件下为各个需水点分配水量<sup>[12]</sup>。

## 2 水资源配置相关算法

### 2.1 拓扑排序

因为水系网络结构的复杂性,节点水量的计算存在许许多多的依赖关系,需要严格处理好河流节点的先后计算顺序,这种包含计算任务优先约束关系的节点网络称为 AOV 网(Activity On Vertices network)<sup>[13]</sup>。AOV 网是一个有向图,若存在一条从顶点  $u$  到顶点  $v$  的路径,则称  $u$  是  $v$  的前驱, $v$  是  $u$  的后继。水系 AOV 网中的顶点包含需水点、水库、河流中的节点等,有向边由输水连接、回水连接、径流等组成。对 AOV 网进行拓扑排序即构造一个满足网络中所有前驱后继关系的序列。本文拓扑排序算法采用基于广度优先的 Kahn 算法<sup>[14-15]</sup>,Kahn 算法不仅能够快速得出正确的拓扑顺序,还能对图中的环进行检测,从而避免在绘制流域图的过程中产生死锁。

Kahn 算法伪代码如下:

将水域网络中存在依赖关系的节点组成有向图  $G$ 。

$L$  为最终序列链表, $S$  为所有无前置条件(入度为 0)的节点集合  
while  $S$  非空

{  
从  $S$  中取出一个节点  $a$  放入  $L$  的末端

for each 存在来自节点  $a$  的有向边的节点  $b$

从图  $G$  中移除该有向边

if 节点  $b$  没有其他前置条件

把节点  $b$  插入集合  $S$

}

如果图  $G$  中仍存在边未被移除,说明图中含有环,其节点的计算存在死锁。

### 2.2 Horton 河流分级与水量演算

水系网络的基本结构是分支和汇合,其特征具有一定的规律性。1945 年,Horton 在研究自然水系的发育时提出河流水系结构 Horton 定律<sup>[16]</sup>,依据河流分级方案,对河流的形态特征做出总结与预测。采用 Horton 法对河流进行分级可以综合利用河流的地理特征信息简化水量演算的计算过程。

Horton 方法对河流分级情况见图 3。

(1) 直接发自河流源地的河流为一级河流。

(2) 直接接纳  $i$  级河流的河流为  $i+1$  级河流。

(3) 直接接纳  $i$  级河流与  $j$  级河流的河流为  $\max(i, j)+1$  级河流。

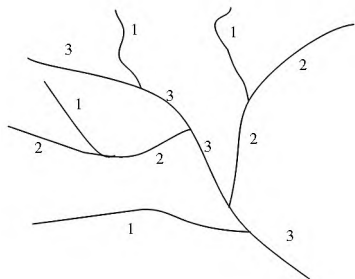


图 3 Horton 河流分级示例

Fig. 3 Classification of Horton river levels

河流水量演算中需要考虑到水库的蓄水泄水,而水库的泄水蓄水又受制于需水点和水电站发电等要求。由于水文

数据涉及的时空范围较大因而数据量较大,若使用传统的多次计算反馈修正方法会显著延长计算时间,为了使系统能够在一次遍历中得到最终的结果,本文结合拓扑排序和多河流同步的方式进行处理。

这样基于拓扑排序和多河流同步的水量演算计算过程如下。

(1) 将水系网络中的河流根据 Horton 法赋予不同的级别值,在系统对流域图进行动态修改时维护河流链表,使其按级别值升序排列。

(2) 对河流存在依赖关系的节点进行拓扑排序和死锁检测。

(3) 维护存放各条河流的计算进度的链表,用于河流间计算同步。

(4) 遍历河流列表,逐个节点计算水量。

(5) 若当前节点需要其它河流上的某个节点水量信息,递归调用计算  $b$  河流至指定节点后返回,更新河流同步链表。

### 2.3 水库调度方法

水库调度模块主要体现在对天然径流的调蓄作用,水库主要承担供水任务,在汛期不超过汛限水位、非汛期不超过正常蓄水位条件下,使用简化运行策略(SOP)和水量平衡方程即可满足供水计算。水库调度根据当前时刻的水位和入流等已知信息,在满足给定最小下泄量和调度规则条件下,推算下一时刻的水库状态。再以下一时刻的信息作为已知条件,如此继续推算下去<sup>[17-18]</sup>。可根据水量平衡方程进行简化近似处理<sup>[19-20]</sup>:

$$\frac{Q_{in1} + Q_{in2}}{2} - \frac{Q_{out1} + Q_{out2}}{2} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

式中: $Q_{in1}$ 、 $Q_{in2}$  为水库分别在时段初、末的入流量; $Q_{out1}$ 、 $Q_{out2}$  为水库分别在时段初、末出流量; $\Delta V$  代表水库在初、末时刻的水量变化; $\Delta t$  为时间间隔。

水库的水位可以直接通过水位-库容曲线线性插值求得。

### 2.4 水资源配置原则

(1) 优先保障生活和生态用水。

(2) 水量不足时,工业和农业用水采用公平分配原则,即:

$$W_{工业} = W_{工业需水} \cdot W_{可供水量} / (W_{工业需水} + W_{农业需水}) \quad (1)$$

$$W_{农业} = W_{农业需水} \cdot W_{可供水量} / (W_{工业需水} + W_{农业需水}) \quad (2)$$

式中: $W_{工业}$  为时段工业分配水量; $W_{农业}$  为时段农业分配水量; $W_{工业需水}$  为时段工业需水总量; $W_{农业需水}$  为时段农业需水总量; $W_{可供水量}$  为满足生活和生态需水后的可供水量。

(3) 对于同一供水点,水量大的河流先供水。

## 3 实际案例应用

本文以洞庭湖湖区为例,模拟水资源管理调度过程。

洞庭湖水系流域面积约为 26.28 万  $\text{km}^2$ ,容积 167 亿  $\text{m}^3$ ,是全国第二大淡水湖、长江流域最重要的调蓄湖泊。洞庭湖水系复杂,主要有湘江、资水、沅江、澧水汇入,平均年径流量约占长江流域地表水资源的 21%。湖区主要城市为岳阳、常德、益阳、长沙、湘潭、株洲和荆州。2008 年,洞庭湖区域城镇化平均水平为 52.12%,高于全国平均水平。洞庭湖区水资源相对比较丰富,但由于水资源时空分布不均,流域水利工程调控能力不足,近年湖区呈现洪涝灾害和水资源短缺并存的局面。特别是 2003 年三峡工程运行后,通过长江四

口入洞庭湖的水量不断减少,同时出口流速加快,同流量情况下水位下降,导致洞庭湖枯期提前、水位偏低,湖区水资源形势面临严重挑战。

通过把元素区的组件拖拽到右侧绘图区域来绘制相应的组件,组件左侧的多选框可以决定是否隐藏该类型组件。在绘图区域可以按住鼠标右键来移动查看区域,并通过滚轮进行放大缩小。对于绘制完成的组件可以进行增加新节点,移动、删除等操作。绘制完成的洞庭湖流域图见图 4。

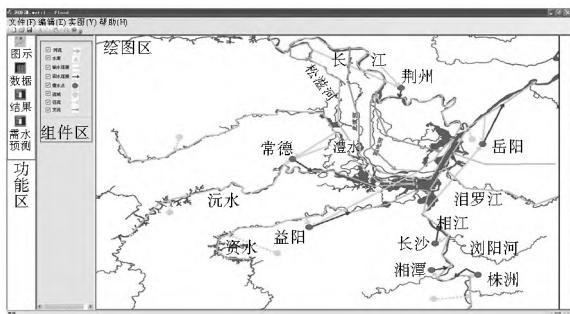


图 4 洞庭湖流域图

Fig. 4 The Dongting Lake Basin

不同的水资源配置模型是通过改变输入参数实现,通过这些改变这些参数进行组合,可以得到满足实际要求的水资源配置模型。数据界面可以通过在流域图的特定组件上右键打开属性菜单跳转,也可通过左侧索引列表进入相应的数据界面。数据可以直接通过上方表格输入也可通过 Excel 文件批量导入。不同类型组件的数据界面设定参数也有所不同。需水点与水库部分数据界面见图 5 和图 6。



图 5 需水点数据界面

Fig. 5 Water use point data interface

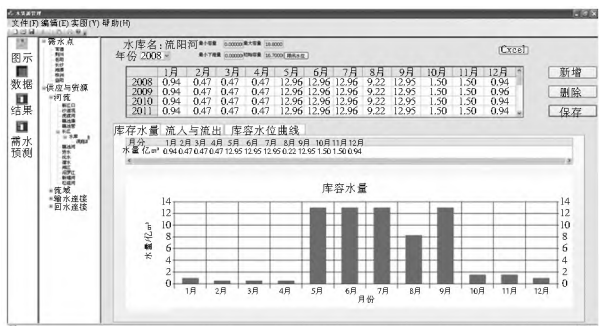


图 6 水库数据界面

Fig. 6 Reservoir data interface

结果界面可以根据现有的流域图、水文数据和设定的参数对水量进行演算,并以图表的方式直观地展示用户感兴趣

部分的数据(图 7)。

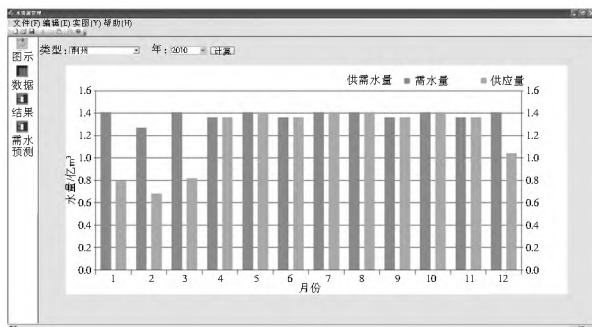


图 7 系统结果界面

Fig. 7 System result interface

可以通过两种方式对规划年的需水量进行预测:一是根据当前年和规划目标对中间预测年份的各项参数进行线性插值;二是根据设定的增长率参数(如人口增长率、经济增长率)计算预测年份的参数。

### 4 结论

本文基于水文学理论和模型,研发了一个基于组件的地表水资源配置系统。首先,为解决传统系统只能适用于单一特定流域的缺点,将河流等自然水域和水库人工水利设施等封装为组件,而且不同的组件间可以动态地建立逻辑联系,形成某一个符合当地实际情况的整体流域图,从而具备良好的普适性与扩展性;其次,在用户交互方面,注重用户操作体验,能够直接拖拽可视化组件进行自动连接,并能自由查看流域图中感兴趣的区域,辅助水利管理部门人员进行配置决策;最后,系统在流域图的基础上,可以结合各地的水情监测站的数据进行水量演算,预测需水点的需水量与实际供应量,为水利部门进行规划管理提供参考依据。

### 参考文献 (References):

- [1] 简明凯,徐振辞. 澳大利亚北澳区域水资源开发利用和管理措施[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 153-156. (JIAN Ming kai, XU Zhen ci. Utilization and management measures of water resources in the Northern Territory, Australia[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 153-156. (in Chinese))
- [2] 陈洁. 黄河水资源管理信息系统的分析与设计[D]. 济南: 山东大学, 2012. (CHEN Jie. Analysis and design of the water resources management information system of the Yellow River [D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese))
- [3] 王艳刚. 承德市水资源管理信息系统设计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012. (WANG Yan gang. Chengde City water resource management information system design and research practice[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese))
- [4] 刘玉娟. 闽江水资源信息管理系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013. (LIU Yu juan. Design and implementation of river water resources of Minjiang information management system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese))
- [5] 熊莹,陈力,黄艳. 长江流域水资源管理与决策支持系统研究[J]. 水资源研究, 2013, 34(1): 5-8. (XIONG Ying, CHEN Li,

- HUANG Yan. Research on Yangtze River Basin water resources management and decision support system[J]. Journal of Water Resources Research, 2013, 34(1): 5-8. (in Chinese)
- [6] 王俊. 长江流域水资源综合管理决策支持系统研究[J]. 人民长江, 2012, 43(21): 6-10. (WANG Jun. Research on Yangtze River Basin integrated water resources management decision support system[J]. Yangtze River, 2012, 43(21): 6-10. (in Chinese))
- [7] 侯丽娜. 基于来水和需水的周期性及不确定性的水资源配置模型[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013. (HOU Li na. Study on water allocation model based on periodic and uncertainty of incoming water and water demand[D]. China Institute of Water Resources and Hydropower Reserch, 2013. (in Chinese))
- [8] 陆曼曼. 南宁市水库防汛气象监测预警系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013. (LU Man man. Design and implementation of Nanning flood control and weather monitoring and warning system of the reservoir[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese))
- [9] 陈辉, 宋全香, 焦君让. 河南省水资源动态配置研究[J]. 人民长江, 2013, 44(16): 86-89. (CHEN Hui, SONG Quan xiang, JIAO Jun rang. Research on water resources dynamic allocation in Henan [J]. Yangtze River, 2013, 44(16): 86-89. (in Chinese))
- [10] 左其亭. 论水资源承载能力与水资源优化配置之间的关系[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1286-1291. (ZUO Qi ting. Relationship between carrying capacity and optimal deployment of water resources[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11): 1286-1291. (in Chinese))
- [11] 雷晓辉, 王旭, 蒋云钟, 等. 通用水资源调配模型 WROOM I: 理论[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 225-231. (LEI Xiao hui, WANG Xu, JIANG Yun zhong, et al. General water resources distribution model WROOM I: Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 225-231. (in Chinese))
- [12] 雷晓辉, 王旭, 蒋云钟, 等. 通用水资源调配模型 WROOM I: 应用[J]. 水利学报, 2012, 43(3): 282-288. (LEI Xiao hui, WANG Xu, JIANG Yun zhong, et al. General water resources distribution model WROOM I: Application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(3): 282-288. (in Chinese))
- [13] 王桂平, 张帅. LAOV 网络及其拓扑排序算法[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(3): 170-175. (WANG Gui ping, ZHANG Shuai. The LAOV network and its topological sorting algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2012, 34(3): 170-175. (in Chinese))
- [14] 原慧琳, 汪定伟. 基于设计结构矩阵. 拓扑排序新方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2012, 33(6): 790-792. (YUAN Hui lin, WANG Ding wei. New topological sort based on the design structure matrix[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2012, 33(6): 790-792. (in Chinese))
- [15] 李军, 曹震, 杨晓光. 报表系统中公式依赖关系分析及计算性能优化[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(6): 2228-2234. (LI Jun, CAO Zhen, YANG Xiao guang. Formula dependency analysis and performance optimization of calculation in spreadsheet system[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(6): 2228-2234. (in Chinese))
- [16] 赵春燕. 水系河网的 Horton 编码与图形综合研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (ZHAO Chun yan. Research on Horton code and graphic generalization of catchment[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese))
- [17] 蔡治国, 王光谦, 魏加华. 黄河流域水量调度的自校正控制模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(12): 1660-1663. (CAI Zhi guo, WANG Guang qian, WEI Jia hua. Self tuning control model for the Yellow River water regulation system [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(12): 1660-1663. (in Chinese))
- [18] 刘荣华. 塔里木河流域水量统一调度模型研究及应用[D]. 北京: 清华大学, 2005. (LIU Rong hua. Research on water regulation model of Tarim River and its application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese))
- [19] 仲志余, 李文俊, 安有贵. 三峡水库库容研究及防洪能力分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(3): 36-38. (ZHONG Zhi yu, LI Wei jun, AN You gui. Research on dynamic capacity of flood control capacity of the three gorges reservoir [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(3): 36-38. (in Chinese))
- [20] 屈国栋. 区域水资源合理配置及方案综合效益评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (QU Guo dong. Study on regional water resources rational allocation and its program comprehensive benefits evaluation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))

(上接第 501 页)

- [15] 包飞. 风力机叶片几何设计与空气动力学仿真[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. (BAO Fei. Geometric design and aerodynamic simulation for the wind turbine blades[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [16] 翟旭军. FT-2.5 型风力提水机的分析研究与改进设计[D]. 南京: 南京农业大学, 2007. (DI Xu jun. Analysis design research and improvement of FT-2.5 wind pump [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. (in Chinese))
- [17] 郭进勇. 1.5MW 风力机风轮叶片气动性能数值模拟与分析[D]. 成都: 西华大学, 2010. (GUO Jing yong. Numerical simulation of aerodynamic performance and analysis of 1.5 MW wind turbine blades[D]. Chengdu: Xihua University, 2010. (in Chinese))
- [18] 盛立君, 郑源, 杨春霞, 等. 用于水厂微水头发电的灯泡贯流水轮机开发[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 255-259. (SHENG Li jun, ZHENG Yuan, YANG Chun xia, et al. Development of bulb tubular turbine used in micro water head hydropower generation in water plants [J]. South To North Water Transfers And Water Science & Technology, 2014, 12(6): 255-259. (in Chinese))
- [19] 丁琳, 郑源, 张福星. 基于流固耦合的垂直轴风机受力分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 84-88. (DING Ling, ZHENG Yuan, ZHANG Fu xing. Stress analysis of vertical axis wind turbine based on fluid structure coupling [J]. South To North Water Transfers And Water Science & Technology, 2013, 11(4): 84-88. (in Chinese))