

基于 MAS 的流域实时防洪智能调度系统架构设计

钟平安^{a,b}, 陈娟^a, 徐斌^a, 万新宇^a, 贾本有^a

(河海大学 a. 水文水资源学院; b. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098)

摘要: 针对传统的流域防洪调度决策支持系统“智能性”不足问题, 基于 Multi Agent System (MAS) 理论与技术, 建立了流域实时防洪智能调度系统架构。具体来说, 按照流域防洪系统多 Agent 分解模式, 将流域防洪系统分解成相对独立、有限联系的若干智能体, 提出了单体功能 Agent 的组成与设计方法, 建立了多 Agent 系统的组织与运行机制, 以及不同层级 Agent 之间的通信方式等。这一体系架构为实现流域防洪调度“智能化”开辟了一条新的途径。

关键词: 流域防洪; 多 Agent 系统; 智能调度; 实时调度

中图分类号: TP31; TV87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0132-04

Intelligent Operation System Framework of Real-time River Basin Flood Control Based on MAS

ZHONG Ping-an^{a,b}, CHEN Juan^a, XU Bin^a, WAN Xin-yu^a, JIA Ben-you^a

(a. College of Hydrology and Water Resources; b. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to solve the problems of "intelligence" deficiency in the traditional decision support system of river basin flood control, the intelligent operation system framework of the real-time river basin flood control is established based on Multi Agent System (MAS). The Multi Agent decomposition model of river basin flood control system is proposed, which is divided into several agents with relative independence and limited contact. The composition and design methods of single functional agents are presented, and the organization and operation mechanisms of the Multi Agent System are also developed, as well as the communication method between different agents. The proposed system framework can provide a new solution to realize the "intellectualization" of the operation of river basin flood control.

Key words: river basin flood control; Multi Agent System; intelligent operation; real-time operation

流域防洪工程的联合调度作为一项十分重要的非工程防洪措施, 是充分发挥流域综合防洪效益的关键技术。流域防洪调度决策支持系统(DSS)是现行流域防洪联合调度的基本实现手段之一, 近年来一直是国内外研究的热点^[1-3]。研究者们针对系统中的许多关键技术进行了积极的探索, 并且取得了丰硕的研究成果^[4-5]。目前, 防洪调度 DSS 已形成了包含数据库、模型库、方法库和知识库的典型框架结构^[6], 从而构成了以计算机、网络通讯、遥感等技术为基础, 通过对防汛信息的自动采集、实时传输、综合分析和智能处理, 为防洪调度提供有效信息支撑的服务体系。但是, 随着流域防洪工程体系的不断扩大, 防洪调度决策支持系统越来越显示出局限性: 首先是“灵活性”不足, 现行 DSS 大多追求系统的整体模拟, 在防洪情势时空变化的情况下不能灵活实现动态建模; 其次, 人机交互任务繁重, 当防洪节点较多时, 决策者往

往难以从纷繁的决策支持信息中抓住“重点”, 给决策造成很大困难; 再次, 流域防洪 DSS 对降水、洪水、工程的不确定性识别和风险动态评价研究薄弱。因此, 建立具有“智能性”的流域防洪 DSS, 使之具备感知信息和决策环境变化的能力, 并能自主地协调处理由于变化带来的一系列关联问题, 无论在理论还是在实践上都极具意义。

Agent 是一种在分布式系统或者协作系统中, 能够持续自主地发挥作用的计算实体, 通常称为智能体^[7]。多 Agent 系统(Multi Agent System, MAS)理论与技术是分布式人工智能的一个研究热点, 是目前解决复杂系统的方法和技术前沿^[8-10], 其自主性、交互性、反应性等特点为解决防洪调度 DSS 存在的“智能性”不足问题提供了一条可行途径。其基本思路是将复杂的问题化为多个解决简单小问题的 Agent, 通过这些 Agents 的协作, 解决超出单一 Agent 能力的复杂

收稿日期: 2012-11-11 修回日期: 2012-11-24 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1131.022.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51179044); 全球变化研究国家重大科学研究计划(973计划)(2010CB951102)

作者简介: 钟平安(1962-), 男, 安徽无为, 教授, 博士, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: zhongpa@yahoo.cn

问题。MAS 特别适宜于那些能根据空间、时间或功能划分的应用问题。流域水系统管理与调度问题,就具有这样时空可划分的特点,国内外已有部分学者涉足了 MAS 在跨流域调水管理与仿真^[1]、流域洪水预报^[2]、水库调度^[3]、水资源配置^[4]等方面的应用,对 MAS 在该领域的适用性以及应用进行了有益的探索,并取得了一定的成果。但是,现有的相关研究大多仅局限于信息的组织与利用上,尚未涉及到智能建模和智能决策的层面。

本文拟以流域防洪工程体系联合调度为研究对象,构建基于 MAS 理论的流域实时防洪智能调度系统框架,探讨防洪系统的分解和“智能”调度系统总体架构的设计,功能性单体 Agent 的设计,多 Agent 系统的组织与运行机制,以及不同层级 Agent 之间的通信模式等关键问题。

1 系统总体架构设计

基于 MAS 的流域实时防洪智能调度系统分为三层:接口层、应用层和支持层(见图 1)。系统的每一层由多个相互独立,又并行处理的 Agent 组成,这些 Agent 通过相互通信、协作,共同完成本层的系统的任务。

接口层是整个调度系统的外层,用户提出的任务需要经过本层转为相应的系统命令而进入应用层。接口层负责为

用户提供一系列分布并行处理的外部服务:键盘解释命令、语言编译器、文件目录以及与用户有关的系统应用服务,以及负责提供系统与外界环境的接口,将外界环境的实时变化信息(如水库水位、河道水位、各控制节点流量、降雨量等)传送到系统内部。因此本层主要包括负责人机交互的界面 Agent,以及负责信息分析、处理和发布的实时信息 Agent。

应用层是调度系统的核心部分,由一组具有特定功能的模块组成。各模块通过通信完成各自的任务,或通过协作共同完成系统特定的任务。该层主要任务包括:不同单元的实时洪水预报、不同类型的工程调度、河道洪水演进、调度方案风险评估以及调度方案管理等。主要防洪工程分水库群、蓄滞洪区群和河系堤防等三大类,每一类又由若干单体(或分支)组成。因此根据防洪系统的调度需求,该层分别建立洪水预报 Agent、水库调度 Agent、河段洪水演进 Agent、蓄滞洪区调度 Agent、风险分析 Agent、调度方案管理 Agent 等,各功能 Agent 从控制 Agent 处接受任务,并通过自身的功能完成相应的分配任务,并将结果反馈给控制 Agent。

支持层由数据库、模型库和知识库以及相应的管理模块组成,为系统提供一系列的数据支持、模型支持以及知识查找等服务,主要包括数据访问 Agent、模型 Agent 和知识 Agent 等。

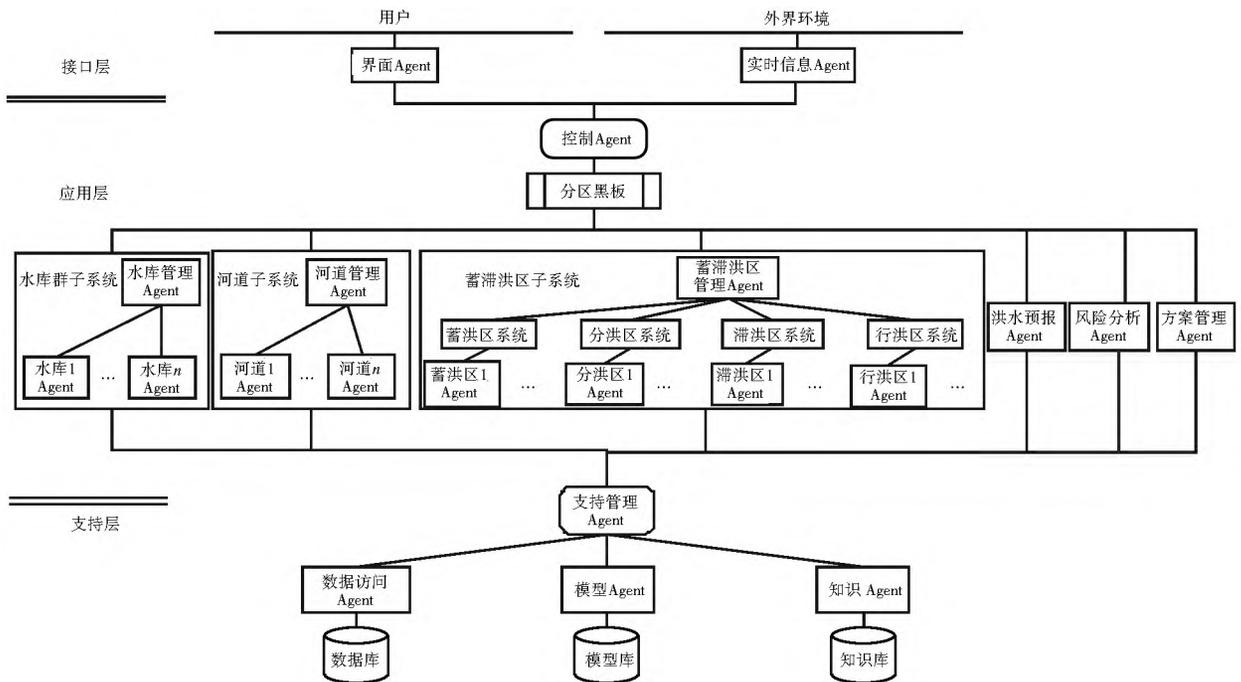


图 1 基于 MAS 的流域实时防洪智能调度系统结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the intelligent operation system framework of realtime river basin flood control based on MAS

2 功能 Agent 设计

2.1 界面 Agent

界面 Agent 是用户和系统进行交流和联系的桥梁。一方面用户通过界面 Agent 输入要求系统完成的任务,并向系统提供必要的运行数据等信息;另一方面系统将完成任务的结果和情况通过界面 Agent 传递给用户。因此,界面 Agent 主要实现用户登录、验证和管理、流域实时防洪调度任务输入、系统调度结果接收显示等功能。

2.2 实时信息 Agent

实时信息 Agent,负责实现实时水雨情、防洪形势和防洪工程运行等信息的自动获取和管理,实时侦测系统外界环境的变化,并将其传输到系统内部。以流域实际或预报降水量、工程状况与实时运行状态等监控信息,作为 Agent 所处环境的感知元。当这些感知元感应到外界的环境发生变化时,则实时信息 Agent 的状态被激活转为工作状态,启动连接外部自动化信息获取装置,将实时的外界信息转入系统相应的数据库中。并通知控制 Agent 在分区黑板上发布消息,

激活相关的 Agent 完成相应任务。

2.3 洪水预报 Agent

洪水预报 Agent 主要根据实时雨、水情信息及对未来一定时段内雨、水情变化趋势的预测,进行防洪形势分析,以及水库入库洪水与区间洪水过程的预报。洪水预报的方法很多,可采用不同方法构建洪水预报模型库。

2.4 水库 Agent

将水库群中每个水库(闸坝、湖泊等都作水库处理)封装为一个 Agent,负责管理和控制水库的运行,进行调洪演算、水库调度方案制定等。根据水库入流信息和防洪形势选择一定的防洪调度模式,如补偿控制模式、水位控制模式、出库控制模式等,各种调度模式形成水库防洪调度模型库。水库 Agent 从分区黑板上获得相关联信息后激活,完成调度方案的调整,并将调整的结果反馈给控制 Agent。

2.5 河道 Agent

将流域中干支流河道,按水利工程节点和防洪控制断面分段,并单独地封装为各个 Agent,建立水文学与水力学相结合的河道洪水演算方法,负责防洪工程系统水力联系的模拟任务,根据下游河道安全泄量等指标控制河道的安全管理,并给控制 Agent 提供反馈信息。

2.6 蓄滞洪区 Agent

流域中的蓄滞洪区分为四种:蓄洪区、滞洪区、分洪区以及行洪区。以蓄滞洪区进洪闸口流量或者水位为感知元,当其超过一定的数值时则启用蓄滞洪区进行分洪调度。

2.7 风险分析 Agent

流域实时防洪调度存在了诸多的不确定性因素,比如实时预报误差、遥测系统误差以及后续降雨预报误差等,因此采用防洪风险分析是非常有必要的。风险分析 Agent 主要负责实现水库调洪风险分析和水库下游河道防洪风险分析。

2.8 方案管理 Agent

方案管理 Agent 主要负责流域实时防洪调度的方案生成、方案评价以及方案选择等任务。根据流域各水库调度模型和调度规则以及有关蓄滞洪区的运用,自动生成流域调度方案集,供用户进行选择。建立调度方案评价指标体系,采用多指标综合评价方法,为方案选择提供依据。为了提高流域防洪调度方案选择的实时性,简化调度方案评价时复杂且耗时的权重分析,本系统中建立了专家评分知识库,事先将各指标的权重知识录入到数据库中,并且通过 Agent 的自主学习能力和改进知识库中的信息。

2.9 数据访问 Agent、模型 Agent 和知识 Agent

数据访问 Agent、模型 Agent 和知识 Agent 分别控制数据库、模型库和知识库,为流域实时防洪智能调度系统提供相应的支持。其中,数据库中包含实时的水雨情信息、水文历史数据、地图空间数据、防洪工程、社会经济以及水文预报(雨、水、灾情)、水库调度等信息;模型库中包含了水文模型、调度模型和方法,以及各类防洪工程的运行模式等描述;知识库中存储了流域概况,流域暴雨洪水特性与防洪形势,防洪要求和目标,规划方案,专家知识,调度规则等信息。

3 多 Agent 系统的组织与运行机制

根据洪水传播的时延性、不同防洪对象的要求以及防洪工程间的关联性,建立多 Agent 之间的组织模式和层次结构,增设控制 Agent 和管理 Agent 处理多个 Agent 组成部分之间的相互联系与主从关系。

控制 Agent 是整个系统的控制中心,主要功能是接受系统的任务,并对任务进行解释和划分;给相应的功能 Agent 分配任务,并协调多个 Agent 之间的冲突和矛盾;接收功能 Agent 的任务完成结果,并对其进行分析;确定整个系统的任务完成情况并将结果信息传递给界面 Agent。例如,当实时信息 Agent 接收到某水库有较大洪水入库后,控制 Agent 会将信息发布于分区黑板,并通知该水库 Agent 完成调度方案制定;该水库 Agent 收到消息后,激活水库模型 Agent,生成调度方案、分析、选择调度方案,并将结果反馈给控制 Agent,同时在分区黑板上发布变更信息;水库下游河道 Agent 从分区黑板接收信息后,激活河道洪水演进 Agent,得到各断面的流量和水位,将结果反馈给控制 Agent,并在分区黑板上发布变更信息;分滞洪区检索分区黑板信息,确定是否激活分滞洪区调度 Agent,并将结论反馈给控制 Agent。各相关 Agent 完成自主性工作后,控制 Agent 进行汇总,并将整体结果显示于界面 Agent 中(图或表)。

管理 Agent 是各个功能 Agent 子系统的控制中心,它负责管理和控制子系统中其他 Agent 的通信和协作。管理 Agent 获得本子系统需要完成的任务,并对任务进行分析,如果此任务不在功能 Agent 的能力范围内,则拒绝接收任务分配,并将分析结果传回上一层;如果任务在功能 Agent 的能力范围内,则对任务进行分解,并分配给各子 Agent,各子 Agent 通过自身功能完成任务。例如,当预报某防洪控制断面出现超标洪水,控制 Agent 指示启用上游相关水库群进行拦蓄,则水库群管理 Agent,分析所辖水库的防洪形势,确定承担任务的水库,并激活相关水库调度 Agent 制定调度方案;水库群管理 Agent 还要对各单库 Agent 的结果进行汇总,将任务完成情况反馈给上级管理(或控制)Agent,以达到防洪系统整体适应的效果。

基于 MAS 的流域防洪调度系统不同于传统 DSS 的模块化和分布式控制,系统模块化只要求每个系统模块具有常规的计算及控制能力,分布式控制强调将功能分散,但每个部分不具有相互通讯和协调功能。基于 MAS 的流域防洪调度系统强调自主性、智能性、通讯协调性。通过控制 Agent 的控制中心,系统能够在无外界直接操纵的情况下,控制和管理防洪系统的行为和状态。系统中每个 Agent 都是一个独立的软件实体,每一个 Agent 设置了相应的感知元,当感知元感应到相关的信息或者元素发生变化时,则根据 Agent 的规则进行启用,对外界的信息变化做出实时的反应,并给出处理结果。例如当控制水位、实际与预报流量、实际与预报降雨、工程状况与实时运行状态等监控信息发生改变时,控制 Agent 激活相应的功能 Agent。因此,系统能自动感知外界运行环境和条件变化,并通过各 Agent 的通信和相互协作机制做出实时的反应,给出当前状态防洪系统的防洪能力和最优调度方案。各 Agent 的运行是并行的,在同一时刻,

- China Plain [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(01): 17-25. (in Chinese)
- [10] Changming Liu, Xiying Zhang, Yongqiang Zhang. Determination of Daily Evaporation and Evapotranspiration of Winter Wheat and Maize by Large scale Weighing Lysimeter and Micro lysimeter [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 109-120.
- [11] 孙宏勇, 刘昌明, 王振华, 等. 太行山前平原近 40 年降水的变化趋势及其对作物生产的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(06): 18-21. (SUN Hongyong, LIU Changming, WANG Zhenhua, et al. Changing Trend of Precipitation and Its effects on Crop Productivity in the Piedmont of Taihang Mountain [J]. *Chinese Journal of Eco Agriculture*, 2007, 15(06): 18-21. (in Chinese)
- [12] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. (HUANG Changyong. *Soil Science* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [13] 张利, 张彩英, 彭春香. 沧州地区土壤水资源研究 [J]. *自然资源学报*, 1990, 5(03): 230-236. (ZHANG Li, ZHANG Caiying, PENG Chunxiang. A Study on the Soil Water in Cangzhou Prefecture [J]. *Journal of Natural Resources*, 1990, 5(03): 230-236. (in Chinese)
- [14] 顾慰祖. 同位素水文学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. (GU Weizhu. *Isotope Hydrology* [M]. Beijing: Sciences Press, 2011. (in Chinese)
- [15] GB Allison, MW Hughes. The Use of Environmental Chloride and Tritium to Estimate Total Recharge to an Unconfined Aquifer [J]. *Soil Research*, 1978, 16(2): 181-195.
- [16] 王文焰, 张建丰. 黄土的粒度组成与水分运动参数的相关性 [J]. *水利学报*, 1991, 1(1): 13-17. (WANG Wenyang, ZHANG Jianfeng. Correlation between the Consist of Loess Granularity and the Parameter of Moisture Movement [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991, 1(1): 13-17. (in Chinese)
- [17] 来剑斌, 王永平, 蒋庆华, 等. 土壤质地对潜水蒸发的影响 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2003, 31(06): 153-157. (LAI Jianbin, WANG Yongping, JIANG Qinghua, et al. Study on Phreatic Evaporation under Different Soil Textures [J]. *Journal of Northwest SciTech University of Agricultural and Forest (Natural Science Edition)*, 2003, 31(06): 153-157. (in Chinese)
- [18] 杨泉, 罗浩. 不同土壤质地的土壤含水率的空间变异性 [J]. *吉林水利*, 2010, (11): 30-32. (YANG Quan, LUO Hao. Spatial Variability of Soil Water Contents in Different Soil Texture [J]. *Jilin Water Resources*, 2010, (11): 30-32. (in Chinese)
- [19] 沈振荣, 张瑜芳, 杨诗秀, 等. 水资源科学实验与研究: 大气水, 地表水, 土壤水, 地下水相互转化关系 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. (SHEN Zhenrong, ZHANG Yufang, YANG Shixiu, et al. *Water Resources Scientific Experiment and Research atmospheric, Surface, Soil and Groundwater Interactions* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1992. (in Chinese)
- [20] EA Colman, GB Bodman. Moisture and Energy Conditions during Downward Entry of Water into Moist and Layered soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1945, 9(C): 3-11.

(上接第 135 页)

- [5] Lautenbach S, Jrgen B, Graf N, et al., Scenario Analysis and Management Options for Sustainable River Basin Management: Application of the Elbe DSS [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(1): 26-43.
- [6] 钟平安, 陈金水, 陈惠惠, 等. 实时水库优化调度决策支持系统及其应用 [J]. *水利水电技术*, 1994, (12): 2-7. (ZHONG Pingan, CHEN Jinshui, CHEN Weihui, et al. Decision Support System for Optimal Reservoir Realtime Operation and Its Application [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1994, (12): 2-7. (in Chinese)
- [7] 何炎祥, 陈莘明. Agent 和 Agent 系统的设计与应用 [M]. 武汉大学出版社, 2001: 1-8. (HE Yanxiang, CHEN Shexing. *Design and Application of Agent and Agent Systems* [M]. Wuhan University Press, 2001: 1-8. (in Chinese)
- [8] 黎静华, 韦化, 夏小琴. 智能电网下节能发电调度多 Agent 系统的研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2010, (21): 96-103. (LI Jinghua, WEI Hua, XIA Xiaojin. Multi Agent Model and Method for Units Commitment in Energy-saving Generation Dispatching [J]. *Power System Protection and Control*, 2010, (21): 96-103. (in Chinese)
- [9] Logenthiran T, Srinivasan D, Khambadkone A M. Multi Agent System for Energy Resource Scheduling of Integrated Microgrids in a Distributed System [J]. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81(1): 138-148.
- [10] Chen Y M, Wang B. A Study on Modeling of Human Spatial Behavior Using Multiagent Technique [J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(3): 3048-3060.
- [11] 马贞立, 李臣明, 徐立中. 跨流域调水管理多 Agent 仿真环境模型 [J]. *水利学报*, 2007, (S1): 288-292. (MA Zhenli, LI Chenming, XU Lizhong. Multiagent Simulation Environment Model in Water Diversion across River Basins Management [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, (S1): 288-292. (in Chinese)
- [12] 赵建军, 李书琴. 基于多 Agent 的洪水预报系统研究 [J]. *微机计算机信息*, 2008, (9): 8-9. (ZHAO Jianjun, LI Shuqin. Research on the Flood Forecast System based on Multi Agent [J]. *Microcomputer Information*, 2008, (9): 8-9. (in Chinese)
- [13] Pieter R. van Oel, Maarten S. Krol, Arjen Y. Hoekstra. Application of Multi Agent Simulation to Evaluate the Influence of Reservoir Operation Strategies on the Distribution of Water Availability in the Semi-Arid Jaguaribe Basin, Brazil [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2011, 07: 051.
- [14] Farolfi S, Mller J, Bont B. An Iterative Construction of Multi Agent Models to Represent Water Supply and Demand Dynamics at the Catchment Level [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(10): 1130-1148.