

文章编号:0559-9350(2012)02-0225-07

通用水资源调配模型 WROOM I: 理论

雷晓辉, 王旭, 蒋云钟, 王浩

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 本文首先结合国内外水资源调配模型的研究现状, 分析比较了几种模型的特点和差异; 然后针对国内水资源调配模型存在的模型通用性差、软件化程度低、不能同时支持调度与配置等问题, 开发了具有自主知识产权的通用水资源优化调配模型 WROOM (Water Resources Optimal Operation Model)。具体从系统网络概化、模型结构、目标函数及结果统计等4个方面介绍了 WROOM 模型的理论方法, 在此基础上还介绍了 WROOM 模型的建模工具、开发的模型软件体系以及模型求解的基本方法等。

关键词: 水资源调配; 优化; 水资源

中图分类号: TV213

文献标识码: A

1 研究背景

水资源系统模拟是水资源配置和调度中的一个重要环节, 主要研究水资源系统内各种水利工程、用水户和渠道/河道, 在某种给定决策偏好和调度规则等条件下的运行情况。水资源系统模拟的核心是水资源供需平衡, 也称为水资源供需平衡分析。由于水资源系统模拟服务的目标是水资源调配, 也称为水资源调配模型, 在水资源学研究中, 一直是研究的热点及重点^[1-4]。

按照水资源系统模拟模型的构建及求解方法, 可以把水资源系统模拟模型分为3类: (1) 基于纯模拟技术的水资源系统模拟模型, 采用逐时段的方式对水资源系统进行仿真计算, 对水资源系统规则描述详细复杂, 如: WRAP 模型^[2]和 ROWAS 模型^[3-4]等; (2) 基于纯优化技术的模拟模型, 采用全时段或多时段优化, 对水资源系统规则描述简单, 如: HEC-ResSim^[5]和 WASYS^[3]等; (3) 优化与模拟技术相结合的水资源系统模型, 采用逐时段优化, 时段间采用模拟模型方式连接, 对水资源系统规则描述全面, 如: MODSIM^[6]等。

由于实际水资源系统的高度复杂性, 现实中存在大量复杂、非结构化的调度方式, 因此很难用优化模型来精细地描述水资源系统。而纯模拟模型可通过合理设计复杂的规则来实现对水资源系统的抽象概化, 具有很强的灵活性。但是, 纯模拟模型只能按照既定的规则进行模拟, 给出水资源系统对该规则的响应, 如果要寻找某一给定范围内的最优水资源分配过程, 需要进行反复的调参模拟, 逐步逼近优化结果。随着对结果精度要求的提高, 模拟的次数将可能呈现指数级增长。优化模型则是将复杂的系统规则概化为简单的模型控制参数, 给定模型优化范围, 通过追求既定的目标, 以优化算法为手段, 直接找到最优的水资源分配过程。另外, 纯模拟模型要再现实际的水资源系统, 其中有大量的针对某个具体应用的规则和参数等。当某个较成熟的纯模拟模型应用于其它区域或流域时将会受到极大的限制, 这与模拟模型对资料要求过多密切相关。

在求解时段上, 有些优化模型对所有时段, 或者多个时段进行建模, 其基本前提是假设这些时

收稿日期: 2010-04-27

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(50721006); “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAB04A07; 2008BAB29B08)

作者简介: 雷晓辉(1974-), 男, 陕西澄城人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: lxh@iwhr.com

段的来水、需水是完全已知的。以目前的预报水平来看,该假设过于理想。因此,通常情况下多时段或全时段优化模型多为确定型模型,即采用历史资料实现现有水资源系统水平下的优化配置,在水资源规划配置中具有实际意义。但是,就实际应用来说,尤其是在水资源调度中,逐时段模拟思想有较高的实用价值。

优化模拟相结合的模型则从很大程度上集成了上述这两种方法的长处,既可以实现对水资源系统的详细描述,也可以实现在模拟的同时追求某种目标最优。但是,由于这种模型本身的基础是优化,因此,在描述实际水资源系统的复杂规则时,较纯模拟模型来说还略有不足。优化模拟相结合的模型的优势使其在实际中应用越来越广泛。如何开发一个通用性强、可对模拟/优化进行灵活控制、系统规则描述更加详细的优化模拟相结合的模型,将成为目前该领域研究的重点。

在模型软件开发方面,水资源系统模拟模型在国外有很多成熟的模型软件,例如:MODSIM^[9]、WRAP^[5]和HEC-ResSim^[8]等。但是在国内还没有相对成熟、通用的水资源调配模型软件。对比国外的这些成功的水资源系统模拟模型,国内的水资源模拟模型还存在如下问题:(1)模型通用性差;(2)软件化程度低;(3)不能同时支持调度与配置等不同需求;(4)模型在实际水资源调度中应用较少等。

针对上述问题及需求,作者开发了具有自主知识产权的通用水资源优化调配模型WROOM(Water Resources Optimal Operation Model)。该模型采用数学规划的思想,把水资源系统中的各种对象、关系和规则等都用约束方程的方式进行描述,同时在目标函数里面体现水资源调度需要考虑的各个目标,从而构造出一个大规模的(非)线性规划问题。然后通过对该(非)线性规划问题的求解,得到调度期内的水资源系统的供需平衡结果。

2 WROOM模型理论方法

WROOM模型是集成了模拟模型基本思想的通用水资源优化调配模型,其基础是优化技术,可同时对多时段或单时段进行优化。WROOM模型作为优化与模拟技术相接合的通用模型,主要体现在引入模拟模型的建模思想。模型对水资源系统进行逐时段模拟,在时段内部则采用优化方法求解,时段间以滚动更新初始值的方式进行连接。同时,WROOM模型增加了一些描述水资源系统调度规则的约束条件,以实现更加详细的描述水资源系统运行方式。WROOM模型还能根据需求定制任意的优化时段和约束规则,既可以采用纯优化方法建模,也可以选择优化与模拟相结合的方式建模,增强了WROOM模型的适用性。但需要指出的是,规则的合理性决定了优化结果的合理性,建模方式灵活性的加强则可能带来模型操控性难度的增加。本节从网络概化、模型结构等方面对WROOM模型的理论方法进行介绍。

2.1 WROOM模型对水资源系统网络概化 WROOM模型采用数学规划来描述水资源系统,把水资源系统概化为3大部分:(1)水源系统,由地表水、地下水、外调水和其他水源组成;(2)传输系统,由供水渠道、调水渠道、退水渠道、河道和管网等组成;(3)利用系统,由城市生活、农村生活、工业、农业、城市生态和农村生态等用户组成。利用系统的水经过污水处理后,可再利用成为水源系统中的一部分(见图1)。

2.1.1 用户划分 WROOM模型把用水户划分为6类:①城市生活;②农村生活;③工业;④农业;⑤城市生态;⑥农村生态。由于WROOM模型是一个供需平衡模型,因此这6类用户分别代表6类需水。

用户的用水优先次序为首要保障人类生存的基本需水量,其次是保留基本的生态用水,最后再配置给其他经济部门。

2.1.2 水源划分 WROOM模型把水源共划分为4类:①地表水;②地下水;③外调水;④其他水源。其中地表水又进一步划分为:当地地表水直接利用,当地地表河网供水,当地地表水库供水和上游单元退水供水三类;地下水又进一步划分为:浅层地下水,深层地下水;其他水源又进一步划

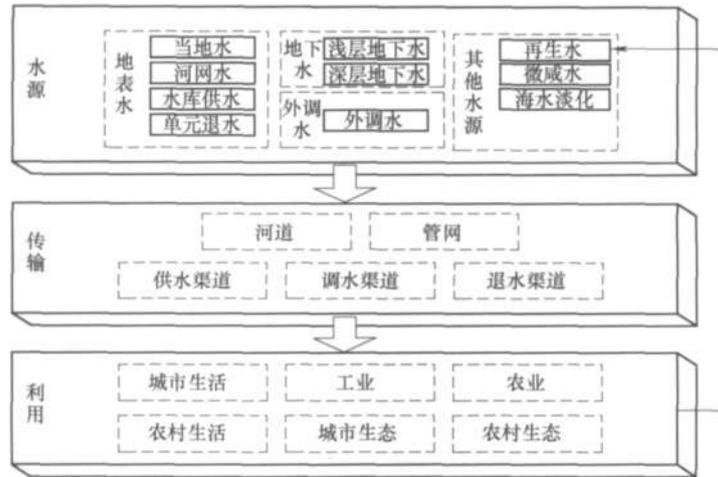


图1 WROOM模型对水资源系统的概化

分为：再生水，微咸水，海水淡化(见图1)。划分水源的重要目的和意义在于可以对划分好的每个水源进行单独的控制，真实模拟实际的水资源调度过程。WROOM模型在追求供水量最大目标函数中，通过对不同水源给予不同的权重，来控制不同水源的供水优先级。

2.2 WROOM 模型结构 WROOM模型以水量平衡和相关政策、工程调度规则为约束，以水源供水量最大、缺水量最小和弃水量最小为目标，如图2所示。

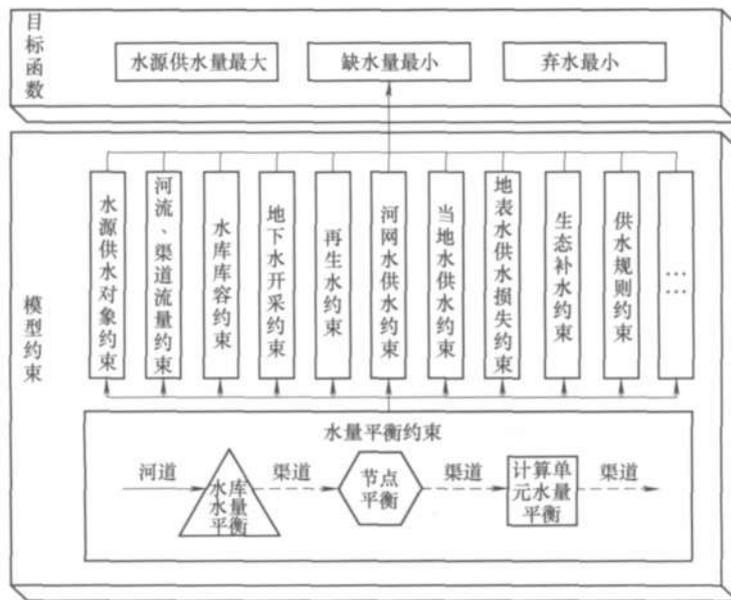


图2 WROOM模型结构

其中，水量平衡可以概括为3类：①水库水量平衡相关约束；②节点水量平衡相关约束；③计算单元水量平衡相关约束。在这3个水量平衡的基础上，增加其他一些相关约束，这些约束大致可以分为2类：①工程约束，例如：水库库容约束，河道、渠道过流能力约束，地下水开采能力约束等；②调度规则约束，例如：水源供水对象约束，供水规则约束等。

2.2.1 水库相关约束 水库是水资源调配最重要的水源之一，水资源调配模型要追求目标最优的水库调度方式，即水库的蓄放水方式。水库约束分为三大类，当地水库相关约束、外调水库相关约束和节点水库相关约束。其中节点水库是为了考虑不参与调度的规划水库。

水库相关的约束包括4个约束群：①水库水量平衡；②水库库容上下限；③水库渗漏；④水库蒸发。与水库相关的变量与参数具体详见图3。

2.2.2 节点相关约束 节点可以进一步细分为地表水供水节点，外调水供水节点两类。节点水量平衡描述了节点的上游来水及下游供水之间的水量平衡关系，详见图4。

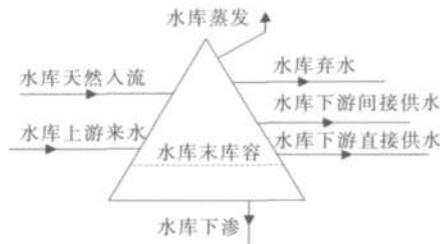


图3 水库水量平衡概化



图4 节点水量平衡概化

2.2.3 计算单元相关约束 计算单元相关约束包括：(1)计算单元河网水相关约束；(2)计算单元供需平衡相关约束；(3)计算单元地表水渠道、外调水渠道和地下水渠道供水约束；(4)计算单元退水相关约束。

(1)计算单元河网水相关约束。在对水资源系统进行概化过程中，重要的水利工程(主要是大中型水库等)通常都单独进行调节计算，这部分水库的调蓄作用占到整个水资源系统的80%~90%，是水资源调配模型研究的重点。但是还有一部分小型的水库、塘坝等也起着一定的调蓄作用，为了模型简化起见，把这些小型调蓄工程都概化为计算单元内部的一个河网水库中，这部分水资源统称为河网水。

计算单元河网水相关约束如图5所示。包括5个约束群：①计算单元当地河网水水量平衡；②计算单元当地径流直接利用供水；③上游单元退水供水；④计算单元河网水供水；⑤计算单元再生水供水。

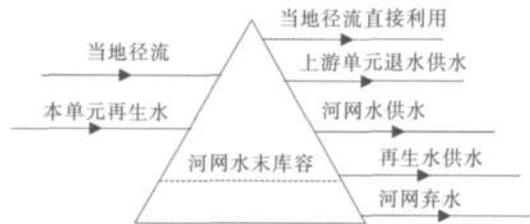


图5 计算单元当地河网水水量平衡概化

(2)计算单元供需平衡相关约束。计算单元的需水可以由多个水源的供水来满足，包括：当地径流直接利用、上游单元退水、河网水、再生水、浅层地下水、深层地下水、当地地表水库水和外调水，不能满足的部分就是缺水。各类用户的可利用水源类型根据自身的特点有所不同。

(3)计算单元地表水、外调水和地下水渠道供水约束。计算单元当地径流直接利用、地下水、回用水的供水都来自于计算单元的内部，因此这些决策变量都是针对计算单元来定义的。而地表水渠道供水及外调水渠道供水的决策变量是针对渠道来定义的，为使模型结构更加清楚，增加两类统计决策变量，分别描述计算单元内的地表水渠道对各个行业的总供水，及外调水渠道对各个行业的总供水。

(4)计算单元退水相关约束。计算单元的退水包括了河网水弃水及各个行业排放的污水。

2.2.4 WROOM 模型目标函数 WROOM 模型从本质上讲是一个水资源供需平衡模型，其求解的目标通常包括：水源供水量最大、缺水量最小和弃水量最小，如图2所示。

每个目标函数内部又包含第二层的目标函数，详见表1。由于WROOM模型是以水量为单位，各个目标函数都是以水量为单位，目标之间是可以公度的，各目标函数权重只需要反映出各自优先级即可，其绝对值对模型求解结果并不影响。所以WROOM模型中尽管通过权重来把多目标问题转化为单目标问题，但实际上只是各个目标函数的优先级起作用。

表1 WROOM模型目标函数

优先级	水源供水量最大	缺水量最小	弃水量最小
1	外调水	城市生活	水库
2	当地水库	农村生活	河网水
3	地下水	工业	节点
4	单元退水供水	城市生态	
5	当地河网水	农业	
6	再生水	农村生态	

3 WROOM模型求解及软件体系

3.1 WROOM模型软件体系 图6给出了WROOM模型软件体系结构。整个体系可以划分为3层：①数据层；②模型层；③界面层。

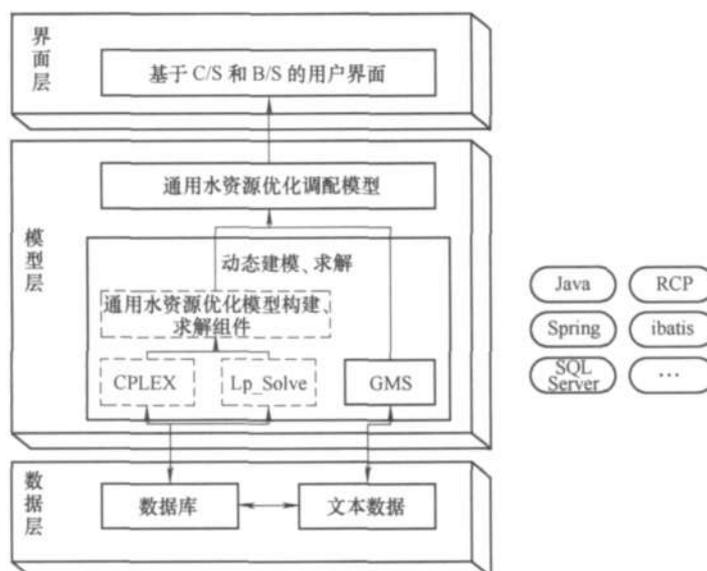


图6 WROOM模型软件体系

为同时支持GAMS^[7]、CPLEX^[8]和Lp_Solve^[9]，数据层中同时开发了基于文本数据和数据库的两种数据管理模块。

为方便WROOM模型的系统集成，开发了通用水资源优化模型构建和求解组件，该组件对CPLEX^[8]和Lp_Solve^[9]进行封装，对数学规划问题提供统一的建模和求解接口。

3.2 WROOM建模工具 WROOM模型研究的问题可分为两类，一类是研究性问题，例如水资源规划，中长期水资源供求分析等；另一类是实际应用问题，例如水资源调度，包括年调度和月调度等。第一种问题要求WROOM模型能够方便地进行扩展，第二种问题要求WROOM模型能够和实际业务系统集成形成完整的软件体系。

因此，在WROOM模型开发时，为了同时适应这两种需求，采用了两种建模方式：①用GAMS^[7]；②用Java调用CPLEX^[8]或者Lp_Solve^[9]。

为了方便建模及研究大规模问题，WROOM模型在数学上可以有两种形式：①线性规划模型；②二次规划模型。这两种形式的WROOM模型可以采用GAMS^[7]或者CPLEX^[8]进行高效求解。由于GAMS^[7]和CPLEX^[8]都是商业优化软件，为了降低最终业务应用系统的成本，作者还进一步开发了基于开源优化组件Lp_Solve^[9]的WROOM模型。相比较GAMS^[7]和CPLEX^[8]，这种方式的缺点在于其在求解大规模问题时效率较低，较适合求解中小规模问题。

3.3 WROOM模型求解方法 WROOM模型的一个重要应用领域是已知某个水平年的社会生产水平,通过长系列的水文系列调节,分析多年平均水资源供需情况及供水保证率等信息。

由于WROOM模型求解的系列较长,WROOM模型通常采用月为来水及需水信息的时间步长。空间单元通常根据研究特点进行合理的概化,水利工程通常要考虑大中型重点水库,计算单元通常既要考虑资料的可获取性,也要考虑研究关注的重点,水利工程与计算单元的渠道也会进行适当的概化。

在进行长系列水文系列连续调节时,有以下4种求解方法:①全时段法;②12时段法;③两时段法;④单时段法。

各个求解方法详细定义参考表2。

表2 WROOM模型求解方法

求解方法简称	定义
全时段法	对所有调度对象所有时段统一建模,并优化求解得到所有调度对象,所有时段的调度结果
12时段法	对所有调度对象逐年(12时段)建模,各年之间通过状态变量进行衔接,连续求解得到所有时段的调度结果
单时段法	对所有调度对象逐月建模,各月之间通过状态变量进行衔接,连续求解得到所有时段的调度结果。
两时段法	对所有调度对象,同时利用面临月份来水和需水及下一月多年平均来水、需水进行两时段建模,保留第一个月的求解结果,连续求解得到所有时段的调度结果

这4种方法有不同的意义。其中全时段法是对所有调度对象所有时段统一建模并优化求解得到所有调度对象和所有时段的调度结果,其代表在对水资源系统所有时段的信息完全已知的情况下所能得到的最理想调度结果。12时段法是对所有调度对象逐年(12时段)建模,并用上一年末的水库、河网的末库容作为当前年份的初始库容,连续求解得到所有时段的调度结果。其代表对未来1年中12个月的所有信息都完全已知的情况下逐年进行优化所能得到的最优结果,其结果较全时段法劣。这两种方法都偏理想,在实际的水资源调度中是无法确知未来一年的来水和需水过程的,更无法确知未来几十年的来水和需水过程。

单时段法是对所有调度对象逐月建模,各月之间通过状态变量进行衔接,连续求解得到所有时段的调度结果。其结果为只考虑当前时段的来水和需水情况下的优化结果,结果较为可靠,但没有考虑“余留”时段的来水和需水,结果过于保守。两时段法是单时段法的发展,面向所有调度对象,同时利用当前月份来水和需水及下一月多年平均来水和需水进行两时段建模,保留第一个月的求解结果(状态信息),连续求解得到所有时段的调度结果。由于其引入了一个“余留”时段,其调度结果较单时段法更为可靠。

不同的优化策略适用于不同的来水预报水平,对于来水和需水完全已知的情况下,可以采用12时段法或者全时段优化法;而对于实时水资源调度中,来水和需水预报的不确定性,可以通过调用逐时段优化法或者两时段优化法,避免过度优化导致的高风险问题。前一种水资源调度策略是最理想策略,而后一种水资源调度策略是现实策略。单时段法其实就是水资源调度中的一种保守策略,它不考虑任何余留时段的预报信息,只针对当前时段进行水资源调度。

4 结论

WROOM模型有以下几个特点:(1)该模型同时支持优化与模拟两种求解方法,是一种优化与模拟相结合的水资源调配模型。WROOM模型实现了单时段、两时段、12时段连续求解,全时段求解等优化求解方法;(2)水资源调配问题是一个多水源、多用户、多时段的水资源分配问题,WROOM模型通过开发灵活的数据接口及模型结构,实现了长系列的水资源配置问题求解,以及面临调度期的水资源调度问题求解,调度时段可以任意设置;(3)模型结构化程度高,可扩展性更强。WROOM模型采用模块化编程思想,实现了模型与数据的分离,并把不同功能模块分开管理,实现了模型的高度结构化及可扩展性。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] Kuczera G, Diment G. General Water Supply System Simulation Model: WASP[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 1988, 114(4): 365-382.
- [3] 游进军. 水资源系统模拟理论与实践[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2005.
- [4] 游进军, 甘泓, 王浩, 等. 基于规则的水资源系统模拟[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1043-1049, 1056.
- [5] HEC-ResSim[CP/OL]. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ressim/>.
- [6] Labadie J W, Baldo M L, Larson R. MODSIM: Decision Support System for River Basin Management, Documentation and User Manual[Z]. Colorado State University, Fort Collins, USA, 2000.
- [7] Brooke T, Kendrick D, Meeraus A. GAMS: A User's Guide[Z]. The Scientific Press, Redwood City, California. 1988.
- [8] CPLEX[CP/OL]. <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>.
- [9] Lp_Solve[CP/OL]. http://tech.groups.yahoo.com/group/lp_solve/.
- [10] Lei X H, Jiang Y Z, Bai W, et al. General platform for water resources optimal operation: Lp-SolveJ[C]//Proceedings of the 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems, GCIS, 2009.

Water resources optimal operation Model WROOM I. Theory

LEI Xiao-hui, WANG Xu, JIANG Yun-zhong, WANG Hao

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: A review of current used water resources optimal operation models is given. It is pointed out that there are many problems exist in this topic pending for solving, such as poor commonality, low software level and inability to support operation and deployment simultaneously. A new model namely WROOM (Water Resources Optimal Operation Model) has been proposed. The theories of the model, including the generalization of water resources system network, model structure, objective function as well as the statistics results, are introduced in detail. Furthermore, the software model for developing the WROOM is also introduced including its software structure and model solver etc.

Key words: water resources optimal operation; operation; optimization; water resource

(责任编辑: 王成丽)