

分散复杂多水源原水系统一级优化调度

陶 涛, 夏 禹, 信昆仑, 刘遂庆

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 珠海市汛期降雨充沛, 水库集雨面积大, 且各水库均是自流供水, 合理分配各水库供水量, 有效地利用降雨大这一有利条件是珠海水司汛期调度的一大重点. 针对珠海市分散复杂多水源原水系统库库并存、库库连通和汛期多雨水的特性, 建立了以取水泵站能耗最小、水库运行末水位偏离水库控制水位最小为目标的一级优化调度模型. 通过遗传算法对模型进行求解, 结果显示优化后的调度方案在满足实际调度需求的前提下, 节能优势明显, 而此模型的建立, 也为分散复杂多水源原水系统的一级优化调度提供了一种新的思路.

关键词: 多水源; 优化调度; 遗传算法

中图分类号: TU 991.31

文献标识码: A

First-class Optimization Operation of Distributed Complex Multi-source Raw Water System

TAO Tao, XIA Yu, XIN Kunlun, LIU Suiqing

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Because of large rainfall and rainwater harvesting area of Zhuhai in flood season, a reasonable distribution of the reservoir water supply and an effective use of rainfall are key in raw water system operation. According to the coexistence of the river and reservoirs, and the connectivity of reservoirs in distributed complex multi-source raw water system, a mathematical model, which aims to minimize energy consumption for water pumping stations and diminish water level difference between reservoir operation level and control level, was built and solved by the genetic algorithm. The results show that with the optimized scheduling scheme, the actual scheduling results are realized, and the energy consumption decreases.

Key words: multi-source raw water system; optimization

operation; genetic algorithm

近年来, 由于水环境恶化, 许多城市都在加强开发多水源供水系统从而保障城市供水. 我国很多沿海城市取水在枯水期常会受到咸潮上溯的影响, 给城市的安全供水构成了很大威胁; 开发多个水库, 在汛期补满水库用于咸期调度能有效地削弱咸潮对城市供水的影响.

目前, 在多水源供水系统中, 对配水管网的优化调度研究比较多, 其研究的方向多集中在配水系统的两级优化调度^[1], 以系统总的运行费用最低建立目标函数; 在多水源方面, 对多水源的优化配置研究较多^[2-3], 以水资源调配的费用最低或产生综合效益最大构成目标函数; 此外在水源的管理上近年来也有较好的研究, 如 Hagen Koch^[4], A Lucas^[5], H Zhu 等^[6] 利用建立水量水质模拟模型来实现水源的科学管理. 然而在分散复杂多水源原水系统的优化调度方面的研究很少, 而对沿海城市多水库、多取水泵站建立单纯地以运行费用最低(或产生综合效益最高)的优化调度模型已不能解决整个系统运行最优的问题. 因此本文针对珠海市多水源原水系统的供水特点和汛期多降雨的气候特点, 在综合考虑取水泵站的运行费用和水库运行最优的条件下, 建立原水系统的一级优化调度模型, 优化了汛期珠海市原水系统调度, 并为这一类沿海城市的多水源原水系统的一级调度提供理论支持.

1 模型建立

1.1 目标函数

在对多水源供水系统的研究中, 其优化目标多以整个供水系统的运行费用最低(或产生综合效益最大), 主要考虑了系统的经济条件. 然而在多水库

收稿日期: 2010-03-30

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA06A413)

作者简介: 陶 涛(1974—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为城市水资源管理. E-mail: taotao@tongji.edu.cn

参与供水的原水系统中, 当水库在汛期有大量自产水基本没有经济成本时, 如何合理利用水库的自产水建立整个系统的优化调度模型是一个关键问题. 本文针对珠海多水源原水系统的特点, 一方面考虑原水系统取水泵站运行费用最低, 另一方面也考虑了多水库的联合优化运行, 以调度周期末水库水位与水库控制水位的偏离值最小为目标, 综合考虑以上两种因素, 建立多水源原水系统的优化调度目标函数如下:

$$\min F = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N \frac{\alpha Q_{ij} H_{ij}}{\eta_j} + \sum_{m=1}^M \beta \delta(h)_m \quad (1)$$

其中

$$\delta(h) = (h_T - h_c)^2 \quad (2)$$

$$h_T = \Phi \left(V_0 + \sum_{i=1}^T (q_{li} - q_{oi}) + Q_R - Q_E \right) \quad (3)$$

式(1)~(3)中: T 为调度周期所划分的总时段数; N 为取水泵站的总数; α 为转换系数; β 为放大系数(考虑水库每次运行后水位变化会很小); Q_{ij} 为第 j 个取水站在第 i 个时段的取水量; H_{ij} 为第 j 个取水站在第 i 个时段时的平均出口压力; η_j 为第 j 个取水泵站的工作效率; h_T 为调度周期结束时水库的水位; h_c 为水库的运行控制水位; Φ 为水位库容函数; q_{li} 为第 i 时段内的入库流量; Q_R 为整个运行周期内水库降雨量; Q_E 为整个调度周期内水库的蒸发量; q_{oi} 为第 i 时段内的出库流量; V_0 为水库初始库容.

考虑到水库在短期水库蒸发水量对水位影响很小, 因此忽略水库水量蒸发 Q_E 的影响, 则原目标函数可写成如下形式:

$$\min F = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N \frac{\alpha Q_{ij} H_{ij}}{\eta_j} + \sum_{m=1}^M \beta \left[\Phi_m \left(V_0 + \sum_{i=1}^T (q_{li} - q_{oi}) + Q_R \right) - H_{cm} \right]^2 \quad (4)$$

其中: Φ_m 为第 m 个水库水位库容函数; H_{cm} 为第 m 个水库的运行控制水位.

1.2 约束条件

(1) 水库水量平衡约束

$$\Delta Q = Q_T - Q_0 = Q_R + Q_I - Q_E - Q_O \quad (5)$$

式中: ΔQ 为调度周期内水库的库容变化量; Q_T 为水库调度周期末库容; Q_0 为水库初始库容; Q_R 为调度周期内水库的降雨量; Q_I 为调度周期内水库的入库量; Q_E 为调度周期内水库的蒸发量; Q_O 为调度周期内水库的出库量.

(2) 原水系统水量平衡约束

$$\sum_{i=1}^M Q_{Sit} = \sum_{j=1}^N Q_{Djt} \quad (6)$$

式中: Q_{Sit} 为第 i 个水源在 t 时段的供应原水量; Q_{Djt} 为第 j 个流量节点在 t 时段的需水量; M, N 分别为水源点总数、流量节点总数.

(3) 水库水位库容约束

$$\begin{aligned} h_{\min} &\leq h_i \leq h_{\max} \\ V_{\min} &\leq V_i \leq V_{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $h_{\min}, h_{\max}$ 分别为水库水位的下、上限; $V_{\min}, V_{\max}$ 分别为水库库容的下、上限.

(4) 原水取水泵站取水能力约束

$$Q_{j\min} \leq Q_j \leq Q_{j\max} \quad (8)$$

式中 $Q_{j\max}, Q_{j\min}$ 分别为第 j 个泵站取水能力的上、下限.

(5) 原水管道最大过流能力约束

$$0 \leq q_k \leq q_{k\max} \quad (9)$$

式中, $q_{k\max}$ 为第 k 个原水管的最大过流能力.

(6) 节点自由水头约束

$$H_{k\min} \leq H_k \leq H_{k\max} \quad (10)$$

式中, $H_{k\max}, H_{k\min}$ 分别为第 k 个节点服务水头的上、下限.

1.3 求解方法

遗传算法(genetic algorithm, GA), 是一种结合了 Darwin 的进化论及 Mendel 的群体遗传学机理而提出的一种全局意义上的自适应搜索技术, 它的正式诞生以 Holland 著作的出版为标准^[7]. 遗传算法对所求问题的可行解进行编码, 并且表示成“染色体”, 利用随机方法产生的一群“染色体”组成初始种群, 通过适应度大小来构成优胜劣汰, 适者生存的自然环境, 种群通过遗传、交换、突变等不断演化, 产生出新的更加优良的种群. 这样经过若干代的进化, 最终求得适合问题的最优解.

以上建立的目标函数为一多目标非线性函数, 使用传统的算法容易使目标函数陷入局部最优, 本文采用遗传算法进行求解, 求解的流程如图 1 所示.

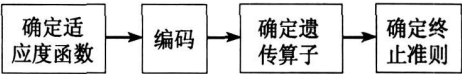


图 1 遗传算法求解流程图

Fig. 1 Genetic algorithm process

2 实例研究

2.1 珠海市原水系统概括

珠海市位于珠江流域末梢, 由于靠近出海口, 每年的冬春季节均受到每月两次的咸潮影响. 特殊的地理条件决定了珠海的供水系统为多取水点、多水

库的水源特点, 7 座主力取水泵站、11 座主调蓄水库以及连接他们的原水管道构成了该市分散、复杂的原水系统. 这种水源系统不仅担负着本市原水供应,

还通过洪湾取水泵站向澳门每天提供 20 万 m³ 原水, 保障澳门特区的饮用水供给, 因此供水形势非常重要. 各水库、泵站和水厂的分布情况如图 2 所示.

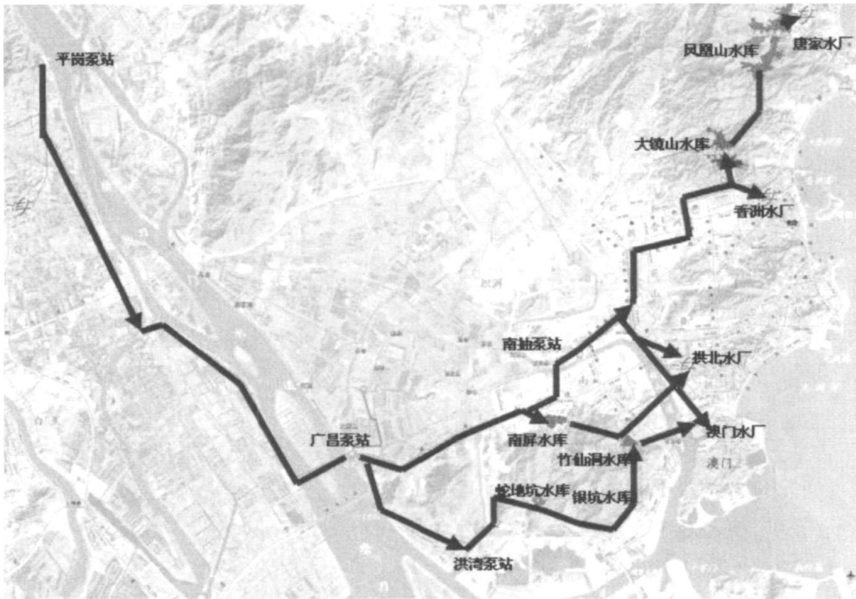


图 2 珠海市主城区原水系统图
Fig.2 Raw water system of main city in Zhuhai

2.2 原水系统的水力模型建立

Epanet 2.0 是美国环保局开发的一个用于进行管网水力和水质模拟计算的软件. Epanet 2.0 可跟踪管道水流、节点压力、水池水位及延时阶段整个管网中化学物质的浓度, 除了模拟延时节点的化学物质, 也可模拟水龄和进行源头跟踪. Epanet 2.0 开发的目的是为了改善对配水系统中物质迁移转化规律的理解. 它可实现许多不同类型的配水系统分析, 包括对管网运行现状分析, 管网优化调度分析, 及管网未来规划分析, 同样 Epanet 2.0 软件还提供了动态链接库, 便于通过别的程序对其进行调用. 本文针对该市原水系统建立原水系统的水力模型, 通过对模型的调用实现目标函数中变量的约束条件处理.

2.3 求解

(1) 确立适应度函数

由于该目标函数为最小化函数, 而遗传算法中适应度函数是最大化, 因此需对以上一级优化调度模型建立的目标函数进行处理. 本文建立的适应度函数形式如下:

max f = M / F (11)

式中, M 为根据已知数据设定的足够大的数, 本例中通过反复试算, 最终选取 M = 5 × 10⁷.

(2) 编码

编码的方式有很多种, 本文采用二进制编码

(0/1), 在本文的一级优化调度模型中, 是为了确定泵站的出水量、出口压力(事实上泵站的出口压力与出水量存在一定的关系)和水库的进出水量, 因此这是要对多个连续的数值型变量进行编码, 根据各个变量的上下限对其进行编码, 规则如下: 假设变量的取值区间为[x_{min}, x_{max}]中的所有实数, 此时先确定构造的字符串长度 N, 然后在[x_{min}, x_{max}]上等间距插入 2^N 个点, 每相邻两点的距离为

δ = (x_{max} - x_{min}) / (2^N - 1) (12)

则在[x_{min}, x_{max}]上选取了 2^N 个点, 它们分别为 x_{min}, x_{min} + δ, x_{min} + 2δ, ..., x_{min} + (2^N - 1)δ, x_{max}, 这 2^N 个点分别用 N 位二进制数表示, 这样就相当于将 [x_{min}, x_{max}] 离散化了, 其中 δ 为求解精度的要求, 本文将其设为 10, 即计算结果小数点后保留一位.

(3) 遗传算子

通过轮盘选择法对群体进行选择. 然后对个体进行交叉, 此算例选取单点交叉法, 选取的交叉概率为 0.7. 最后对群体进行突变, 选取的突变概率为 0.001.

(4) 终止法则

对遗传算法的终止有很多种法则, 一是预先假设一个最优值, 一旦出现该值其最优解即为所求的调度方式; 其次是通过迭代后相邻两代之间最优解

的逼近程度来确定最优解; 最后还有通过设定最高迭代次数来确定最优解. 本文的一级优化调度问题, 通过反复迭代难免会造成计算时间过长, 因此采用设定最高迭代次数来确定最优解, 本文最高迭代次数设为 1 000 次.

本文通过 VB 进行编程求解该一级优化调度模型, 并且对 Epanet 2. 0. dll 进行调用来处理变量的约束条件. 整个算法的求解流程如图 3 所示.

2.4 结果分析

为了验证此一级优化调度模型是否能用于珠海主城区原水系统的调度, 以 2009 年 6 月 18 日至 2009 年 6 月 24 日实际调度数据为基础, 对此模型进行验证. 程序的初始输入数据见表 1.

表 1 程序输入数据
Tab.1 Program input data

日期	香洲原水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	拱北原水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	原水量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)			大镜山 水位/m	南屏水 位/m	竹仙洞 水位/m
			澳门 1	澳门 2	澳门 3			
2009 年 6 月 18 日	2 848. 7	15 633. 8	2 913. 2	2 913. 2	2 908. 2	17. 06	19. 70	18. 35
2009 年 6 月 19 日	2 626. 2	15 414. 6	3 016. 4	3 016. 4	2 888. 0	17. 05	19. 80	18. 45
2009 年 6 月 20 日	2 637. 8	15 303. 1	3 040. 5	3 040. 5	2 933. 7	17. 04	19. 88	18. 50
2009 年 6 月 21 日	2 800. 0	15 288. 3	3 010. 8	3 010. 8	2 932. 0	17. 03	19. 84	18. 53
2009 年 6 月 22 日	2 645. 4	15 297. 9	3 089. 7	3 089. 7	3 020. 5	17. 01	19. 87	18. 55
2009 年 6 月 23 日	2 639. 7	15 387. 1	3 051. 7	3 051. 7	2 905. 4	16. 99	19. 72	17. 87
2009 年 6 月 24 日	2 717. 5	15 093. 7	3 046. 3	3 046. 3	2 930. 5	16. 99	19. 72	18. 49
2009 年 6 月 25 日						16. 61	19. 80	18. 53

为了验证模型的可行性, 控制水位均选为水库实际运行末的水位, 各水库对应的控制水位见表 2.

表 2 各水库的控制水位输入
Tab.2 Control level of reservoirs input

日期	大镜山控制 水位/m	南屏控制 水位/m	竹仙洞控 制水位/m
2009 年 6 月 18 日	17. 05	19. 80	18. 45
2009 年 6 月 19 日	17. 04	19. 88	18. 50
2009 年 6 月 20 日	17. 03	19. 84	18. 53
2009 年 6 月 21 日	17. 01	19. 87	18. 55
2009 年 6 月 22 日	16. 99	19. 72	17. 87
2009 年 6 月 23 日	16. 99	19. 72	18. 49
2009 年 6 月 24 日	16. 61	19. 80	18. 53

表 3 水库运行结果对比

Tab.3 Comparison of reservoirs operation results

日期	大镜山水库		南屏水库		竹仙洞水库	
	控制(运行) 后水位/m	绝对(相对) 误差/%	控制(运行) 后水位/m	绝对(相对) 误差/%	控制(运行) 后水位/m	绝对(相对) 误差/%
2009 年 6 月 18 日	17. 05 (17. 01)	0. 04 (0. 23)	19. 80 (19. 80)	0 (0)	18. 45 (18. 45)	0 (0)
2009 年 6 月 19 日	17. 04 (17. 01)	0. 03 (0. 18)	19. 88 (19. 88)	0 (0)	18. 50 (18. 50)	0 (0)
2009 年 6 月 20 日	17. 03 (17. 01)	0. 02 (0. 12)	19. 84 (19. 84)	0 (0)	18. 53 (18. 53)	0 (0)
2009 年 6 月 21 日	17. 01 (17. 01)	0 (0)	19. 87 (19. 87)	0 (0)	18. 55 (18. 55)	0 (0)
2009 年 6 月 22 日	16. 99 (17. 01)	- 0. 02 (- 0. 18)	19. 72 (19. 72)	0 (0)	17. 87 (17. 87)	0 (0)
2009 年 6 月 23 日	16. 99 (17. 01)	- 0. 02 (- 0. 18)	19. 72 (19. 72)	0 (0)	18. 49 (18. 49)	0 (0)
2009 年 6 月 24 日	16. 61 (17. 01)	- 0. 4(- 2. 3)	19. 80 (19. 80)	0 (0)	18. 45 (18. 45)	0 (0)

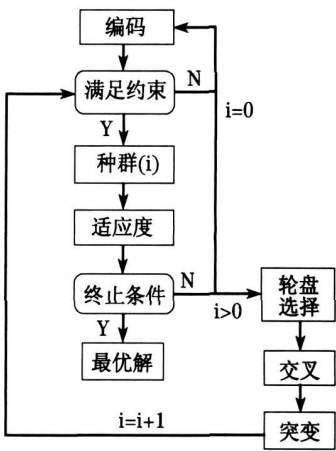


图 3 算法求解流程
Fig.3 Algorithm flow

大镜山水库水位控制出现误差, 但通过表 3 可看出这种误差较小, 水位控制的目标可通过该模型实现.

利用广昌泵站和洪湾泵站汛期平均千方水电耗可以算出从 2009 年 6 月 18 日至 2009 年 6 月 24 日实际运行电耗和优化调度运行后电耗, 将二者进行对比分析, 分析结果见表 5 和图 4.

从以上分析可以看出, 利用该优化调度模型的求解结果对水库进出口阀门进行合理的调节, 不仅可以达到同样的调度效果(即满足水厂用水, 控制了水库运行末水位), 而且经过优化调度后的泵站电耗比实际运行电耗有所减少, 平均日节省电耗3 197. 6

Kwh, 平均节省率达到 4. 71% .

表 4 泵站运行结果
Tab. 4 Pumping station running results

日期	广昌运行后取水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	洪湾运行后取水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
2009 年 6 月 18 日	15 037. 2	11 088. 0
2009 年 6 月 19 日	15 004. 8	10 713. 6
2009 年 6 月 20 日	14 050. 8	10 666. 8
2009 年 6 月 21 日	14 493. 6	10 544. 4
2009 年 6 月 22 日	13 939. 2	4 003. 2
2009 年 6 月 23 日	14 720. 4	15 091. 2
2009 年 6 月 24 日	14 623. 2	10 875. 6

表 5 泵站运行电耗分析
Tab. 5 Analysis of energy consumption of pump stations

日期	广昌实际 电耗/ Kwh	洪湾实际 电耗/ Kwh	泵站实际总 电耗/ Kwh	广昌运行 电耗/ Kwh	洪湾运行 电耗/ Kwh	泵站运行总 电耗/ Kwh
2009 年 6 月 18 日	45 926. 7	23 316. 9	69 243. 6	42 260. 5	25 360. 5	67 621. 0
2009 年 6 月 19 日	45 786. 2	23 503. 5	69 289. 7	42 169. 5	24 504. 1	66 673. 6
2009 年 6 月 20 日	45 767. 4	23 407. 4	69 174. 8	39 488. 4	24 397. 1	63 885. 5
2009 年 6 月 21 日	45 728. 6	23 467. 4	69 196. 0	40 732. 8	24 117. 2	64 850. 0
2009 年 6 月 22 日	45 391. 3	4 915. 7	50 307. 0	39 174. 7	9 156. 1	48 330. 8
2009 年 6 月 23 日	45 490. 0	29 864. 4	75 354. 4	41 370. 2	34 516. 6	75 886. 8
2009 年 6 月 24 日	45 740. 4	27 296. 6	73 037. 0	41 097. 0	24 874. 7	65 971. 7

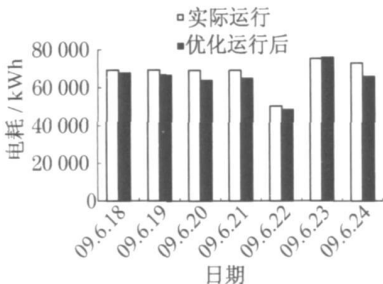


图 4 取水泵站运行电耗对比

Fig. 4 Comparison of energy consumption of pump stations

3 结论

本文对有多个水库参与供水的原水系统以取水泵站的运行费用和水库运行偏离控制水位最小构造目标函数, 建立了此类分散复杂原水系统的一级优化调度模型, 并利用遗传算法对模型进行了求解, 成功解决了两方面问题. 一是对原水系统的各个水源的供水量进行了合理的分配, 提高了水量分配的合理性, 克服了以经验进行分配的种种弊端; 二是优化了水库的运行, 解决了水库在汛期自流供水很难用费用衡量的问题, 有效地利用了汛期多雨水的有利条件, 节约了整个原水系统的运行成本. 本文的研究解决了珠海市原水系统汛期各水源水量分配问题, 同时也为分散复杂原水系统的一级优化调度提供一种新的思路.

参考文献:

[1] 赵新华, 李霞. 多水源输配水系统的二级优化调度模型研究[J]. 中国给水排水, 2004, 20(8) : 17.
ZHAO Xinhua, LI Xia. Study on model for second-level optimized dispatching of multi-source water transmission and distribution system [J]. China Water & Waste Water, 2004, 20(8) : 17.

[2] 刘安青. 城市多水源供水系统优化配置的研究[D]. 天津: 天津大学环境科学与工程学院, 2006.
LIU Anqing. The study on optimal allocation of urban multi-water resources supply system [D]. Tianjin: Tianjin University. College of Environmental Science and Engineering, 2006.

[3] 黄强, 王增发, 畅建霞, 等. 城市供水水源联合优化调度研究[J]. 水利学报, 1999, 5: 57.
HUANG Qiang, WANG Zengfa, CHANG Jianxia, et al. Study on joint optimal operation of municipal water supply[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 5: 57.

[4] Koch Hagen, Grünewald Uwe. A comparison of modeling systems for the development and revision of water resources management plans[J]. Water Resource Manage, 2009, 23: 1403.

[5] Lucas A, Mylopoulos N, Vasiliades L. A modeling system for the evaluation of water resources management strategies in Thessaly, Greece[J]. Water Resource Manage, 2007, 21: 1673.

[6] Zhu H, Huang G H, Guo P, et al. A fuzzy robust nonlinear programming model for stream water quality management [J]. Water Resource Manage, 2009, 23: 2913.

[7] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning [M]. New Jersey: Addison-Wesley Professional, 1989. 1- 25.