

深圳市水资源系统优化调度模型研究

钟平安¹, 王会容¹, 刘静楠¹, 陈筱云², 陈 凯²

(1. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 深圳市水利规划设计院, 广东 深圳 518001)

摘要: 介绍了深圳市供水水源网络系统的特点和结构, 并以深圳市水资源系统优化调度为背景, 提出了一种大系统多目标背景分解方法, 建立了水库群优化调度、水资源优化分配等数学模型, 并根据各层次数学模型的不同特点给出不同的求解方法, 探索了反应用户重要性差异的多用户聚集与解集方法, 利用建立的模型系统, 进行深圳市水资源系统优化配置研究, 取得合理的计算结果。

关键词: 城市水资源; 优化配置; 模型系统; 优化调度; 大系统分解

中图分类号: TV21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2003)06-0616-05

深圳市是我国典型的资源型和水质型混合缺水城市之一, 仅有 5 条集雨面积大于 100 km² 的小河, 无一例外地受到严重污染。为了保障城市社会经济的可持续发展, 必须大量使用境外引水, 全市正在形成以东部引水工程为主脉, 集东深引水工程、境内中型水库与各供水水厂, 形成相互连通覆盖全市的供水水源网络系统。本文以该系统为对象, 研究多水源、多用户、多目标水资源系统优化调度模型与方法, 为深圳市供水工程布局、规模选择、水源系统的联合运用、水资源优化分配等提供依据。

1 深圳市水资源网络系统

水源子系统包含松子坑、清林径、赤坳、梅林、西沥、铁岗、石岩、罗田 8 座中型水库, 东部引水工程、东深引水工程两个境外引水工程, 共 10 个工程。其中清林径、赤坳、罗田 3 座水库具有相对独立的供水范围; 其余水源分别通过提水或自流方式相互关联形成“长藤结瓜”式水利系统(图 1)。

需水子系统包含与水源网络相关联的 29 座水厂。联网水厂分成引水工程直供与水库转供两种类型, 引水工程直供水厂是指直接从东深引水工程和东部引水工程干线提取原水的水厂, 水库转供水厂是指从水库获取原水的水厂。

输水子系统包括水源与水源之间的水量交换系统和水源与用户(水厂)之间的配水系统两部分。水源与水厂之间的配水系统已充分考虑用水需求, 具有足够的过水能力。水源与水源之间的水量交换系统考虑以下条件 (a) 东部引水干线的过水能力 (b) 东部引水提入松子坑水库、梅林水库的提水能力 (c) 东深引水提入东部引水干线的提水能力 (d) 西沥水库与铁岗水库之间连通隧洞过水能力 (e) 铁岗水库至石岩水库提水能力等。

2 水资源系统优化调度数学模型

2.1 系统概化

西沥水库位于东部引水工程的最末端(图 1), 同时作为东部引水到铁岗、石岩水库的通道, 西沥、铁岗、石岩三水库水量交换关系密切, 合并组成西铁石子系统, 该子系统负责东部引水量在西沥、铁岗、石岩水库之



图 1 水源系统概化

Fig.1 Sketch of water source system

间的分配;东部引水工程是深圳市供水系统的主干线,作为子协调层,负责境外引水量(包括东部引水工程的引水量和部分东深引水工程的引水量)在东部直供水厂、松子坑水库、梅林水库、西铁石子系统间的水量分配;东深引水工程给深圳市供水包含两部分,一部分直供水厂直接从东深引水干线(含深圳水库)取水,一部分根据需要通过泵站提水进入东部干线,向深圳西部供水,因此,将东深引水工程作为总协调层,负责协调东深引水工程协议供水量在东深直供水厂与东部提水量之间的分配;对于同一水源给几个水厂供水的情况,首先将相关的水厂概化成聚合水厂,然后采用适当的原则进行解耦;对于同一水厂向不同水源取水的情况,利用供水协议或调查的供水范围解耦.根据水源的相互关系和供水的先后次序,建立联网水源网络结构(图 2 中虚线框内).

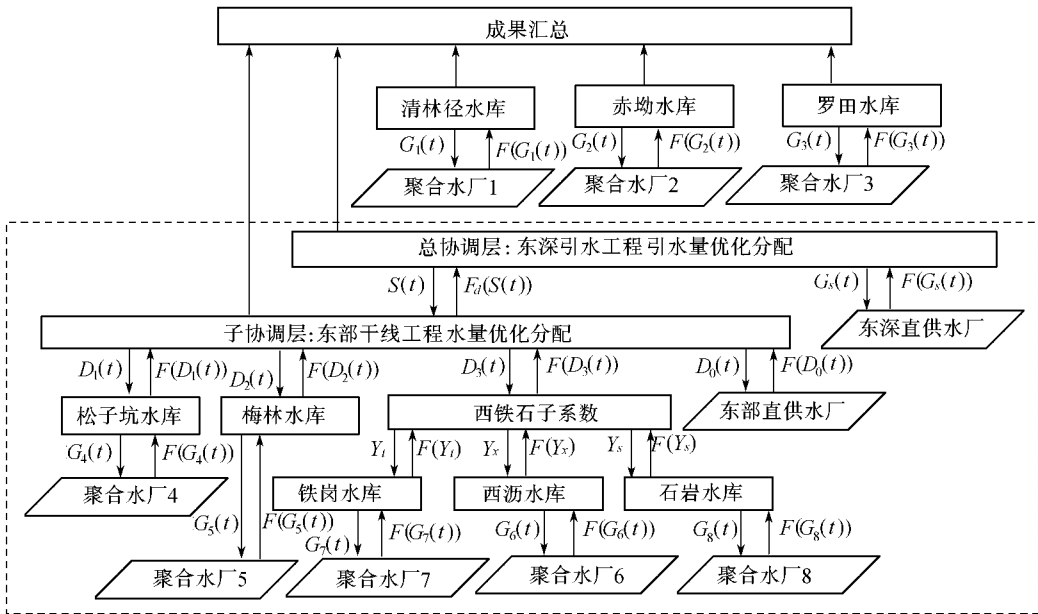


图 2 深圳市水资源系统网络结构

Fig.2 Network structure of water resources system of Shenzhen City

2.2 目标选择

在优化调度与水量合理分配过程中,主要考虑 3 个因素 (a)社会经济因素.水厂供水范围内特区、龙岗区、宝安区经济状况有别,在龙岗区、宝安区中又有中心镇与一般村镇之分,因此,重要性程度差别较大.(b)供水系统成本因素.境外引水的费用与当地水资源的利用费用存在较大差异.(c)水资源利用率因素.考虑蓄水工程与境外引水工程相互协调关系,避免产生无益弃水.

以重要性权系数体现不同水厂社会效益的地域或时域差异,重要性权系数 α_{ii} 通过水厂间二元比较方法获得,其物理意义为两个水厂单位供水量可产生的社会经济综合效益的比值,取最小值为 1.0 进行规范化,将各水厂的实际需水量 $X_i(t)$ 乘以 α_{ii} 后作为虚拟需水过程参加水量优化分配, α_{ii} 可根据实际分水结果的时空分布情况调整.采用编制水源供水次序的方法反应系统供水成本,优先使用当地水资源,其次使用费用相对较低、水质较好的东部引水,最后使用费用高的东深引水.

模型最终采用的优化目标为系统含权相对缺水深度最小.

2.3 水库调度数学模型

水库子系统主要负责在协调层给定境外引水分配方案的前提下(非联网水库分配水量取零),依据聚合水厂的虚拟需水过程进行水库的优化调度,并将供水过程解耦到各实际水厂中,最后向子协调层反馈目标函数值.

a. 目标函数

$$\min F_i = \sum_{i=1}^m \left(\frac{G_i(t) - \sum_{j=1}^n \alpha_{ji} X_j(t)}{\sum_{j=1}^n \alpha_{ji} X_j(t)} \right)^2 \tag{1}$$

式中: F_i ——第 i 水库的目标函数值; m ——第 i 水库调度时段数; n ——第 i 水库相关的水厂数; $X_j(t)$ ——第

j 水厂第 t 时段的实际需水量; $G_i(t)$ ——第 i 水库第 t 时段的供水量; $\sum_{j=1}^n \alpha_{jt} X_j(t)$ ——第 i 水库虚拟需水过程.

b. 约束条件

水量平衡约束
$$V_i(t) = V_i(t-1) + Y_i(t) + D_i(t) - G_i(t) - \Delta_i(t) \tag{2}$$

式中: $V_i(t)$, $V_i(t-1)$ ——第 i 水库第 t 时段末、初水库的蓄水量; $Y_i(t)$ ——第 i 水库第 t 时段的当地来水量; $\Delta_i(t)$ ——第 i 水库第 t 时段的水量损失; $D_i(t)$ ——第 i 水库第 t 时段系统上一层分配水量,该变量为协调变量.

需水量约束
$$G_i(t) \leq \sum_{j=1}^n X_j(t) \tag{3}$$

该约束条件,保证供水量不超过实际需水量.虚拟需水量比实际需水量大,且地域和时段愈重要,偏大愈多.

水库蓄水量约束

$$V_{i\max}(t) \geq V_i(t) \geq V_{i\min}(t) \tag{4}$$

式中 $V_{i\min}(t)$, $V_{i\max}(t)$ 为第 i 水库第 t 时段末允许的下限与上限蓄水量.

2.4 东部干线(子协调层)数学模型

东部干线子协调层负责境外引水量(包括东部引水工程的引水量和部分东深引水工程的引水量)在东部直供水厂、松子坑水库、梅林水库、西铁石系统之间的分配.东部直供水厂先聚合成虚拟水厂,在得到分配总水量后再将供水过程解耦到各实际水厂中.

a. 目标函数

$$\min F_d = \sum_{i=1}^3 F_i(D_i(t)) + \sum_{t=1}^m \left(\frac{D_d(t) - \sum_{j \in \Omega} \alpha_{jt} X_j(t)}{\sum_{j \in \Omega} \alpha_{jt} X_j(t)} \right)^2 \tag{5}$$

式中: F_d ——子协调层的目标函数值; $D_i(t)$, $D_d(t)$ ——分配给第 i 子系统(依次为松子坑水库、梅林水库、西铁石子系统)的水量和东部直供水厂的水量,为决策变量; $F_i(D_i(t))$ ——第 i 子系统在获得 $D_i(t)$ 水量后反馈的目标函数值(由水库调度模型反馈); $\sum_{j \in \Omega} \alpha_{jt} X_j(t)$ ——东部直供水厂的虚拟需水过程; Ω ——东部引水工程直供水厂的集合.

b. 约束条件

水量平衡约束

东深汇入点上游
$$\sum_{j=1}^i D_j(t) \leq Y_d(t)$$

东深汇入点下游
$$\sum_{j=1}^i D_j(t) \leq Y_d(t) + S(t)$$

$$\sum_{t=1}^m Y_d(t) \leq Y_m \quad \sum_{t=1}^m S(t) \leq S_m$$

式中: $D_j(t)$ ——第 j 子系统第 t 时段的配水量(决策变量); $Y_d(t)$ ——第 t 时段东部引水工程引水量; Y_m ——东部引水工程年允许引水总量; $S(t)$ ——第 t 时段东深引水工程提入东部干线的水量,该量为协调变量,由总协调层提供; S_m ——东深引水工程协议允许提水量.

需水量约束
$$D_i(t) \leq \sum_{j=1}^n X_j(t)$$

式中 $\sum_{j=1}^n X_j(t)$ 为第 i 子系统的实际需水量.

输水能力约束
$$D_i(t) \leq U_i$$

式中 U_i 为第 i 子系统的输水能力.

2.5 东深引水(总协调层)数学模型

总协调层负责东深引水工程协议供水量在东深直供水厂与东部干线之间的分配.

a. 目标函数

$$\min F = F_d(S(t)) + \sum_{t=1}^m \left(\frac{G_s(t) - \sum_{j \in \Omega} \alpha_{jt} X_j(t)}{\sum_{j \in \Omega} \alpha_{jt} X_j(t)} \right)^2 \tag{6}$$

式中： $S(t)$ ——分配给东部干线的水量，为协调变量； $G_s(t)$ ——东深直供水厂的分配水量； Ω ——东深引水工程直供水厂集合； $\sum_{j \in \Omega} \alpha_{jt} X_j(t)$ ——东深引水工程直供水厂的虚拟需水量； $F_d(S(t))$ 由子协调层反馈。

b. 约束条件

$$S(t) + G_s(t) = Y_s(t) \tag{7}$$

式中 $Y_s(t)$ 为第 t 时段东深引水工程协议供水量。

2.6 西铁石子系统数学模型

该模型负责西铁石子系统境外引水量在西沥、铁岗、石岩 3 水库之间的分配。设 R_x, R_t, R_s 分别为西沥水库、铁岗水库、石岩水库的当地来水量； R_y 为西铁石子系统境外引水量， Y_x, Y_t, Y_s 分别为西沥水库、铁岗水库、石岩水库分配的境外引水量； X_x, X_t, X_s 分别为西沥水库、铁岗水库、石岩水库聚合水厂的虚拟需水量， Y_x, Y_t, Y_s 根据空间公平性原则，按下式进行计算：

$$\frac{Y_x + R_x}{X_x} = \frac{Y_t + R_t}{X_t} = \frac{Y_s + R_s}{X_s} = \frac{W}{X_x + X_t + X_s} \tag{8}$$

$$W = R_x + R_t + R_s + R_y$$

$$Y_t = \frac{WX_t}{X_x + X_t + X_s} - R_t \quad Y_s = \frac{WX_s}{X_x + X_t + X_s} - R_s \quad Y_x = R_y - Y_t - Y_s \tag{9}$$

2.7 聚合水厂的解耦模型

聚合水厂按空间相对公平原则进行解集。设某聚合虚拟水厂包含有 m 个水厂，第 i 个水厂的实际需水过程为 $X_i(t)$ ，供水重要性权系数为 α_{it} ，已知聚合虚拟水厂得到的供水过程为 $G(t)$ ，则第 i 水厂的供水过程：

$$G_i(t) = \min \left(\frac{\alpha_{it} X_i(t)}{\sum_{j=1}^m \alpha_{jt} X_j(t)} G(t), X_i(t) \right) \tag{10}$$

3 模型求解

所建立的水资源系统优化调度模型，是一个多层次大系统模型，根据各层次模型的特点，分别采用不同的求解方法。具体步骤如下：

a. 总协调层数学模型在式(7)约束下，实际上为单变量优化问题，以 $S(t)$ 的上下限为区间，采用 0.618 法求解，确定东部干线提水的数量 $S(t)$ 和东深直供水厂供水量 $G_s(t)$ 。

b. 利用逐次优化方法(POA)求解东部干线(子协调层)数学模型，确定松子坑水库、梅林水库、西铁石子系统和东部直供水厂的分配水量，过程按分配水量的比例确定。

c. 根据式(9)计算西沥、铁岗、石岩三库的境外引水量。

d. 采用增量动态规划方法(IDP)求解松子坑、梅林、西沥、铁岗、石岩、清林径、赤坳、罗田等水库的优化调度模型，确定各库的最优运行策略，并反馈目标函数值。

e. 利用式(10)计算各水厂的供水过程。

在整个系统的求解过程中，以上 5 步体现了控制与反馈的互逆过程，上步为下步提供方案(协调变量值)，下步为上步反馈目标值，作为上步进一步调整方案(寻优)的依据。

4 计算成果

利用本文的原理，编制了深圳市水资源系统优化调度计算机仿真模拟软件，并进行了不同典型年东部引水工程的年引水量及时程分配模拟分析、东部引水工程与东深引水工程的检修期和检修工况选择、不同输水方案比较、境外引水与本地来水联合优化调度、系统供水量的优化分配等一系列计算，取得大量的计算成果。限于篇幅，不能一一列举。图 3 为不同典型年西沥水库使用境外引水过程，图 4 为相应的水库蓄水量过程线，模型计算条件为 5 月份安排东部引水工程检修(20d)，12 月份安排东深引水工程检修(15d)，从图 4 中可

见境内境外水联合运用的效益,西沥水库在保障自身水厂供水的条件下,在两个检修期的前期利用了境外引水蓄水.在枯水年,西沥水库不仅在检修月份不直接使用境外引水,而且将库存水量转供(图 3 中的负值)铁岗和石岩水库,体现了联合调度的优越性,同时佐证的软件系统的有效性.

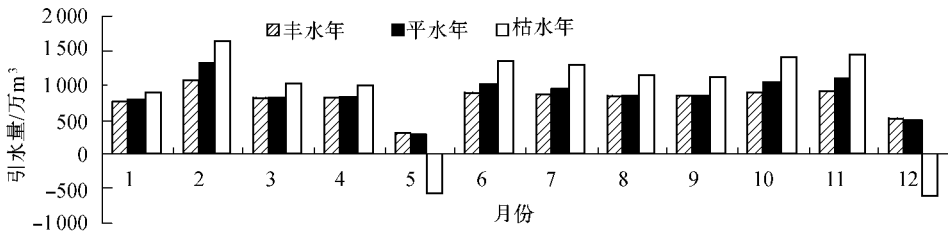


图 3 西沥水库引水量过程线

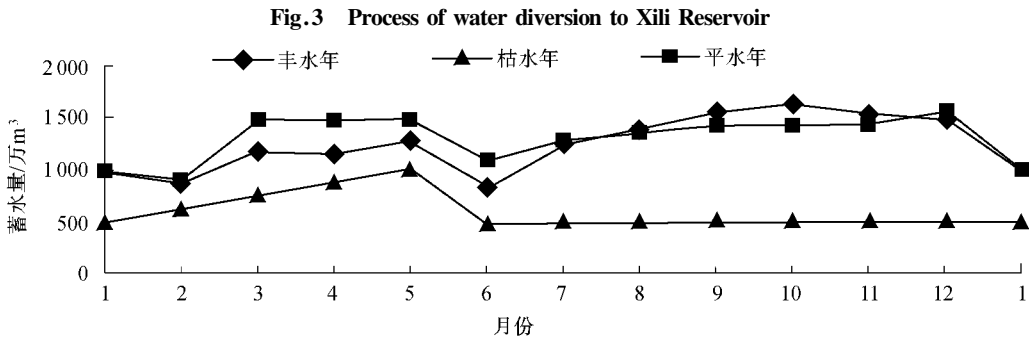


图 4 西沥水库蓄水量过程线

Fig.4 Water storage process of Xili Reservoir

参考文献：

[1] 叶秉如.水资源系统优化规划和调度[M].北京 水利水电出版社 2001.272—292.
[2] 中国水利水电科学研究院水资源研究所.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 , 1995.1—110.

Optimal dispatching model for Shenzhen water resources system

ZHONG Ping-an¹ , WANG Hui-rong¹ , LIU Jing-nan¹ , CHEN Xiao-yun² , CHEN Kai²
(1. College of Water Resources and Environment , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;
2. Water Resources Planning and Design Institute , Shenzhen 518001 , China)

Abstract :The characteristics and structure of the network system of water supply sources of Shenzhen City are introduced. For the optimal dispatching of the water resources system of Shenzhen City , a large-system and multi-objective coordination-decomposition hierarchical model is developed , and mathematical models are also established for optimal dispatching of reservoir system and allocation of water resources. According to the characteristics of the mathematical models at different levels , different solutions are given. Moreover , a decomposition-aggregation method is discussed to reflect the difference in importance between various users. The present model is applied to the study of the optimal allocation of the water resources system for Shenzhen City , and the calculated results are reasonable.

Key words urban water resources ; optimal allocation ; model system ; optimal dispatching ; large system decomposition