

南水北调中线需求侧供水负荷管理调度初探

董延军, 蒋云钟, 王 浩, 韩亦方, 鲁 帆

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044)

摘 要 需求侧供水负荷的管理调度(DSM)技术对供水负荷调峰、减少供需差和有效利用水资源方面具有重要意义。结合南水北调中线调度运行初步研究, 提出供水负荷的定义, 通过供水负荷的调查研究, 提出各种负荷的分类原则和标准。在分析南水北调中线调度运行特点的基础上, 提出了基于中线相关调度准则下负荷管理的调度模型理论和多目标分层最优化的计算方法。

关键词 需求侧管理; 供水负荷; 错峰调度; 分层多目标; 南水北调中线

中图分类号: TV 68 文献标识码: B 文章编号: 1000-0860(2007)03-0065-04

Discussion on demand side management of water supply load for Mid-route of South-to-North Water Transfer Project

DONG Yan-jun, JIANG Yun-zhong, WANG Hao, HAN Yi-fang, LU Fan

(Department of Water Resources, China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract The technique of demand side management(DSM) for water supply load has a great significance for the peak-clipping of the water supply load to reduce the difference between the water supply and demand and make an effective utilization of the water resources. Combined with a preliminary study on the dispatching operation of the Mid-route of South-to-North Water Transfer Project, the definition of the water supply load is put forward and then various principles and criteria are given through the investigation and analysis made on the water supply concerned. Based on the analysis of the characteristics of the operation of the Mid-route, the theory of the dispatching model for the load management and the calculation method for the lexico-graphically stratified programming concerned under the related operation criteria of the Mid-route are given herein as well.

Key words demand side management(DSM); water supply load; peak-alternation regulation; lexico-graphically stratified programming(LSP); Mid-route of South-to-North Water Transfer Project

1 引 言

负荷的概念广泛用于电力行业, 比如夏季用电高峰期, 由于用电负荷太大、太集中, 电力系统就会被迫拉闸限电, 给一些行业造成一定的经济损失。为了解决这种“电荒”现象, 电力部门已经从传统的调整用电负荷曲线多发电的管理, 向最小成本调荷节电的需求侧管理发展, 将电力供应侧和需求侧作为一个完整的系统工程进行研究, 比如保证重点用户用电、进行峰谷分时收费等。需求侧管理(Demand Side Management)是一种能源管理模式, 通过行政、经济手段和技术措施等有效的激励措施, 引导用户改变能源的使用方式, 使供、需两个侧面达到最优组合的一种集

计划、执行和监督于一身的管理模式, 它包括费用最小和费用最有效原则以及综合资源规划(RP)^[1,2]。

南水北调中线总干渠沿线受水区分水口门达 88 个, 用水户众多, 在用水高峰季节或汉江枯水期容易出现“争水”现象, 因此也有必要引入供水负荷需求侧管理的理念, 通过对用水户合理的调度, 保证供水方和需求方的经济利益最大化。供水负荷管理调度有多种手段, 如保证重点用户、错峰、使用调蓄水库等。其中错峰用水被认为是一种比较好的方法, 因为它不改变总的用水量但可以降低供水负荷高峰, 减小

收稿日期: 2006-09-10

作者简介: 董延军(1972—), 男, 山西原平人, 博士研究生。

峰谷差, 避免供需差过大, 从而有效地提高水资源利用效率和充分发挥工程效益。结合南水北调中线的特点, 本文基于需求侧管理调度的原理, 提出中线供水负荷的概念和内涵, 在此基础上提出供水负荷管理的优化调度模型。

2 供水负荷的内涵与分析

2.1 供水负荷的定义

南水北调中线供水的一个显著特点, 就是几乎没有在线调节水库, 供水与需水是同时进行的。在任何时间内, 供水系统的供水过程和供水量必须与用水户的需水过程和需水量相适应。结合中线调度运行的特点, 我们把从需求侧方向提出的供水要求, 称之为供水负荷。根据用户的要求和在供水过程中所承担的位置, 将供水负荷划分为基荷、腰荷和峰荷。把不同时间内的三种负荷叠加起来, 就会形成供水负荷分布图, 图 1 为某月三个旬的供水负荷分布变化图。

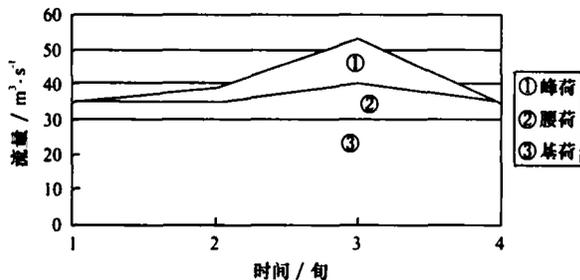


图 1 供水负荷分布

基荷、腰荷和峰荷位置的确定, 要根据当地水源条件、经济条件、社会发展水平等综合因素, 并通过大量调研, 为广大用水户认可的供水指标。

基荷: 任何时间都需要供给, 并且较为固定的负荷, 也就是以中线为主要水源的用户, 保证率要求较高。

腰荷: 基本每个时段都需要供给, 但有些时段的负荷较高, 有的时段较低。这些是有当地水源或可供调节的水库、地下水等用户。

峰荷: 中线一期工程的供水目标是以沿线受水区城市生活、工业用水为主, 兼顾生态和农业用水。若仅考虑城市生活和工业用水, 其负荷较为平稳; 若同时满足生态和农业用水, 其负荷峰谷差较大, 工程规模也会加大。为此, 将兼顾生态和农业的用水作为峰荷考虑, 其供水保证率较低。

2.2 供水负荷的调查与分析

开展需求侧管理调度研究, 首先必须了解负荷的

特性, 以便挖掘调荷潜力, 负荷的调查和分析是必不可少的, 也是制定中线调度运行计划的基础。每类供水负荷的确定, 需要通过调查分析, 最后由供需双方签约明确。

2.2.1 基荷的调查分析

基荷一般有两种使用对象。第一种用户对象是以中线外调水作为惟一供水源, 如北京市规划当中的某些水厂^[3], 这类水厂可能是中线供水的固定用户, 用水量稳定, 保证率要求高。若无特殊原因, 中线必须保证任何时间满足这些水厂的供水要求, 用户也必须任何时候都接受中线供水。买卖双方以合同的形式保证双方交易顺利进行, 若一方违约, 违约一方向另一方支付违约金。此类用户的供水价格相对高于平均水价。

基荷的第二种用户对象应是政府强制性的用水户。在地下水生态破坏严重的地方, 政府必须介入, 以强制性的手段让这些用水户使用中线水。与第一种用户对象一样, 也必须以合同形式来保证水量供应, 但由于特殊原因, 可以考虑比第一种用户的水价略低一些, 以鼓励用水。

基荷面向的对象是生活、重要工业的用水和少部分生态破坏严重地区的补水, 供水保证率要求高, 在供水调度中应优先得到满足。对中线供水公司来说, 这类水是企业维持生存和运行管理的最重要的支撑。

2.2.2 腰荷的调查分析

腰荷的使用对象为当地水源和生态环境相对较好的用户, 这些用户将中线供水作为其重要的补充水源。由于当地有可调节性能较好的水库作为供水水源, 因此对腰荷要求的保证率可相对低一些, 可调节时间较长, 水价相对于平均水价也低一些。如果以合同的方式保证交易, 违约金额应比基荷少一些。

2.2.3 峰荷的调查分析

峰荷是属于相机补水性质。当丹江口水源较为丰富时, 在干渠供水能力允许的条件下, 利用汛期弃水或剩余水量向受水区相机补水。此类水主要用于环境保护、充蓄当地水库和恢复地下水。

以上几类负荷相关特性可用表 1 来概括。

表 1 供水负荷特性

负荷类别	用户对象	保证率要求 / %	可调节	水价	签约否
基荷	以中线供水为惟一水源	≥ 90	低	高	必须签约
腰荷	以中线供水为补充水源	≥ 75	较低	较高	视情况而定
峰荷	生态环境	不限	不限	较低	不签

3 供水负荷错峰优化调度原理

供水负荷的错峰优化调度, 实质上是将有限的水资源恰当地分配给若干个用水户, 而使目标函数为最优。根据调度尺度的不同, 供水负荷的错峰运用又分为年调度、月调度和周调度。中短期调度都是以长期调度的成果为依据, 同时可以根据实时变化的情况进行修正, 保证调度精度。调度的过程是一个滚动决策的动态过程, 从年、到月、到旬甚至到日, 依次进行。这类调度方法目前在流域水资源调度领域运用普遍, 概括为“宏观总控、长短相嵌、前向卷动、滚动修正”^[4]。国内也有些学者把它称之为自适应控制过程^[5]。无论年调度、月调度还是旬调度, 都存在着不同尺度的负荷错峰运用问题。本文重点阐述负荷错峰年调度运用的基本原理和模型。

3.1 中线供水特点

南水北调中线供水运行调度横跨四大流域, 干线没有调蓄工程设施, 只能通过节制闸调节来控制水量分配, 因此中线供水运行调度属于典型的封闭式控制过程。负荷的错峰调度必须根据中线调度运行的特点来进行。中线供水调度具有以下特点。

(1) 供水负荷满足的层次性不同。优先层次按照供水保证率来定。各类负荷的优先次序为

$$P_1 \gg P_2 \gg P_3 \quad (1)$$

$P_i (i=1, 2, 3)$ 分别表示基荷、腰荷和峰荷三类负荷的优先因子。

(2) 供水负荷要满足水力约束准则。各类供水负荷之和应满足干线渠道的输水能力, 相应数学模型表示为

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n q_{ij} + Q_N \leq Q_{\text{总}i} \quad (2)$$

式中, n 表示渠段内分水口门的个数; N 表示渠段个数; Q_N 表示渠段出流; q_{ij} 表示第 i 个渠段内第 j 个口门的分水量; $Q_{\text{总}i}$ 表示第 i 渠段的输水能力。

(3) 供水负荷要满足水量平衡。供水负荷的分配, 必须是在各个时段可供水量的基础上进行优化调度和分配。

3.2 多目标错峰调度的分层最优化模型 (LSP)

多目标分层最优化 (LSP) 的基本思想是在模型的可行域上对第一优先层次的目标函数进行极大 (小) 化, 然后在第一优先层次的最优解集上对第二优先层次的目标函数进行极大 (小) 化, 如此继续, 直到最后一层。若在某一中间优先层次得到惟一最优解, 其

以后的各优先层次的目标函数就无法起作用。为了避免出现这种情况, 可以将每一优先层次的解适当放宽, 从而使下一优先层次的可行域得到适度的放宽^[6]。

从前面各类供水负荷和中线供水特点的分析看, 每类负荷所体现的重要程度是不一样的, 因此分层最优化的方法应用于供水负荷错峰调度是合适的, 从实用的角度避免了对二者权重权衡的困难。从解的角度看, 这里所需要的分层最优化是一定供水保证率 (宽容量) 内追求的最优解, 其各层次的宽容量需要请决策者酌情提供, 或由分析者根据各目标的性态给出参考信息。

3.2.1 目标函数

目标函数的建立就是全年的各类供水负荷总量尽可能大, 因此多目标决策函数用下式表示

$$L - \max_{x \in R} F(x) \quad (3)$$

即在约束集 R 内求多目标问题 (向量) 最优, 其中 $F(x) = \{P_1(f_1(X)), P_2(f_2(X)), P_3(f_3(X))\}^T$ (4) 式中, P_1, P_2, P_3 如公式 (1) 所示, X 表示负荷向量。

目标向量具体表达形式为

$$\begin{aligned} \max f_1 &= \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^N w_{ij1} \\ \max f_2 &= \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^N w_{ij2} \\ \max f_3 &= \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^N w_{ij3} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $i=1, 2, \dots, 12$ 表示年内 12 个月份; $j=1, 2, \dots, N$ 表示不同受水区; w_{ij1} 表示第 i 个月份第 j 个受水区的基荷分配量; w_{ij2}, w_{ij3} 依次分别是腰荷、峰荷。

3.2.2 约束条件

(1) 各月各受水区的各类负荷应满足基本要求, 即

$$w_{ijk} \leq \Delta_{ijk} \quad (6)$$

式中, Δ_{ijk} 表示各月各受水区各类负荷须满足的基本量, 其他量含义同上。

(2) 满足渠道输水能力。在制定年配水计划时, 基荷和腰荷的月配水量之和一般应小于总干渠设计输水能力, 基荷、腰荷和峰荷的月配水量之和应小于总干渠加大输水能力, 水力约束一般从总干渠下游往水源方向逆向递推, 用下式表示为

$$\sum_{p=j}^N \sum_{k=1}^2 w_{ipk} \leq \bar{Q}_{\text{设}j} \cdot \Delta T$$

$$\sum_{p=j}^N \sum_{k=1}^3 w_{ipk} \leq \bar{Q}_{加j} \cdot \Delta T \quad (7)$$

式中, $\bar{Q}_{设j}$ 为第 j 个渠道平均设计输水能力; $\bar{Q}_{加j}$ 为第 j 个渠道平均加大输水能力; ΔT 为时段间隔; 其他变量同上。

(3) 水量约束

$$\sum_{k=1}^3 w_{ik1} + \sum_{k=1}^3 w_{ik2} + \dots + \sum_{k=1}^3 w_{ikN} = \bar{W}_i \quad (8)$$

(第 i 个月的可供水量)

(4) 非负约束

$$w_{ijk} \geq 0 \quad (9)$$

3.2.3 模型求解

求解分层多目标最优化模型 (LSP), 原则上只要按模型所要求的优先层次逐层地进行求解, 最后便可获得一定意义下的解。但对于某些特殊的情形, 比如当基荷满足程度 100%、腰荷的满足程度才 30% 时, 为了减小供需差突出问题, 可以对基荷的约束作出适当的宽容, 即适当向腰荷转移部分量, 转移的原则是按不小于基荷的供水保证率要求转移。因此对公式 (6) 中基荷的基本约束作一适当修正, 即

$$w_{ij1} \leq \Delta_{j1} \cdot \delta \quad (10)$$

式中, δ 为基荷的供水保证率。

从上面的目标函数和约束条件分析, 属于多目标线性优化模型。模型决策变量总共有 $12 \times N \times 3$, 约束条件共有 $(12 \times N \times 5 + 12)$, 属于高维决策优化模型, 需要编制通用的线性优化计算机程序来求解, 也可以借助于求解线性规划的商业计算机程序

来完成。

4 结 语

本文引入供水负荷的概念, 从需求侧方面考虑供水调度的问题。南水北调中线供水调度是一个极其复杂的问题, 不仅仅是一个技术层面的问题, 涉及到社会、经济、环境、政治等众多复杂因素。中线供水是沿线广大受水区的重要补充水源, 为了保障供水方和需水方的利益, 从需求侧方提出供水负荷的概念, 便于中线运行调度的操作。本文探讨的问题实际是从微观机制角度考虑的水量分配问题, 更宏观上的水量分配还需借助准市场运行机制来进行。为此, 对各类用水户进行深入细致的调研, 确定其承担负荷的位置, 这对中线运行调度有非常重要的意义, 这也是今后亟待要开展的工作。

参考文献:

- [1] 刘健, 王双虎, 明正峰. 需求侧负荷管理中最优错峰计划的生成 [J]. 电力系统自动化, 2006, 4(30).
- [2] 刘俊良, 杨印胜. 需求侧管理模式对城市节约用水的作用 [J]. 中国给水排水, 2000, 2(16).
- [3] 北京市水利规划设计研究院. 南水北调中线京石段应急供水工程(北京段)总干渠可行性研究报告 [R]. 2003.
- [4] 赵勇, 裴源生, 于福亮. 黑河流域水资源实时调度系统 [J]. 水利学报, 2006, 1(37).
- [5] 魏加华, 王光谦, 翁文斌, 等. 流域水量调度自适应模型研究 [J]. 中国科学 E 辑技术科学, 2004, 34(增刊).
- [6] 胡毓达. 实用多目标最优化 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.

(责任编辑 林雁庆)

(上接第 64 页)

在一定问题, 但其总体安全运行评定结果为优, 可以保证输水工作的正常进行。

4 结 语

通过对输水隧洞这个典型输水建筑物的评价, 可知融合监测系统和日常运行管理系统的评价体系, 使定量计算和定性判断有机地结合起来, 完善了输水建筑物的安全评价, 提高了输水建筑物的安全度。而且本文所采用的多层次模糊综合评价法即保证了定性判断的科学性和定量计算的精确性, 又保证了定性和定量两类指标综合评价的统一性, 从而使输水建筑物安全运行的模糊综合评价更具客观性。该评价体系采用的过程中, 必将对运行管理人员的业务水平、输水建

筑物的管理设施与设备、运行管理机制提出更高的要求, 以保证该系统充分发挥作用。但由于模糊评判法、评定安全影响因素的选定都存在一定的局限性, 所以该评价体系还需要进一步的完善和改进。

参考文献:

- [1] 徐元明. 国外跨流域调水工程建设与管理综述 [J]. 人民长江, 1997, 28(3): 11-13.
- [2] 引水工程管理标准 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] SL 75-94 水闸技术管理规程 [S].
- [4] 陆为民, 韩文秀. 基于层次分析法与模糊评价的公务员绩效评估 [J]. 天津大学学报, 2005, 7(3): 192-195.
- [5] 蒋泽军. 模糊数学教程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [6] SL 214-98 水闸安全鉴定规定 [S].

(责任编辑 陈小敏)