

# 淮安-淮阴段梯级泵站群运行优化

龚 懿<sup>1</sup>, 程吉林<sup>1\*</sup>, 张仁田<sup>1,2</sup>

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225009;  
2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 扬州 225009)

**摘要:** 为了探索大型跨流域调水工程优化运行方法, 充分挖掘梯级系统优化运行效益, 针对梯级泵站群优化运行数学模型, 引入并联泵站群日优化运行模型和一维明渠非恒定流模型, 分别采用大系统二级分解-动态规划聚合方法和追赶法求解, 考虑区间用水户用水过程, 进行各级并联泵站群日均扬程优化, 以淮安—淮阴梯级泵站群为例, 采用淮安站群日均扬程 4.15 m、80%负荷, 淮阴站群日均扬程 3.9 m、100%负荷, 且淮阴站群推迟 2 h 的优化运行过程作为淮安-淮阴梯级泵站群优化运行方案。该方案下淮安站群、淮阴站群单位提水费用分别为 79.33 元/万 m<sup>3</sup>、84.60 元/万 m<sup>3</sup>, 较各站群定角恒速运行单位提水费用分别节省 25.06%、7.3%, 初步获得了梯级泵站群优化运行方案。该研究可为跨流域梯级调水系统优化调度特别是级间输水系统水位优化提供参考。

**关键词:** 优化, 动态规划, 运行管理, 泵站, 非恒定流

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.22.007

中图分类号: TV675

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-22-0059-09

龚 懿, 程吉林, 张仁田. 淮安-淮阴段梯级泵站群运行优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 59-67.

Gong Yi, Cheng Jilin, Zhang Rentian. Operation optimization of Huai'an-Huaiyin multistage pumping stations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(22): 59-67. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

在梯级提水系统中, 各级泵站之间水力联系密切, 站间流量、水位互相影响, 制约整个提水系统运行。多级泵站的优化运行, 既要考虑到各级泵站内的机组优化运行, 还要考虑到站与站之间水力要素的优化组合。以往的研究中, 常用动态规划进行级间流量、扬程的合理调配, 站内机组的优化较多采用动态规划法, 较少同时对级间和站内进行优化。在多级泵站的优化调度中, 级间的合理调配是与站内的机组优化相互联系和影响的, 系统优化必须同时考虑这两方面的因素<sup>[1]</sup>。

目前, 国内外对泵站(群)优化运行已有不少研究, 针对模型构建, 有以泵站运行费用和能量消耗最小为目标<sup>[2]</sup>, 有以泵站年运行费用和折旧费用最少为目标<sup>[3]</sup>; 针对模型求解方法, 有采用等功率微增率法<sup>[4]</sup>、遗传算法<sup>[3,5-7]</sup>、动态规划法<sup>[8-11]</sup>、大系

统分解协调法<sup>[12]</sup>、混沌算法<sup>[13]</sup>、粒子群优化算法<sup>[14]</sup>、自动化模拟技术<sup>[15]</sup>、以及其他一些非线性求解方法<sup>[16-21]</sup>。本文在泵站(群)优化运行方法与级间输水系统数值模拟研究<sup>[22-27]</sup>基础上, 开展梯级泵站群优化运行研究, 其核心是梯级泵站群的扬程优化。通过采用一维明渠非恒定流模拟, 考查不同并联泵站群优化运行方案时的级间水位变幅, 通过模拟计算上下级不同开机响应时间对扬程的影响、对应提水任务下梯级泵站群提水费用、运行期间的水位变幅、输水河道水位要求等, 对方案进行综合评价、选优。

## 1 梯级泵站群优化运行数学模型

对于  $TJ$  级泵站群, 以日提水费用最小为目标函数, 1 日划分的若干时段为阶段变量, 各级泵站群各水泵机组各时段叶片安放角及机组转速为决策变量, 规定时段内的各级泵站群提水总量及各机组电机配套功率为约束条件, 构建梯级泵站群日优化运行数学模型。

目标函数

$$R = \min \sum_{l=1}^{TJ} M_l$$
$$= \min \sum_{l=1}^{TJ} \sum_{k=1}^{BZ} \sum_{j=1}^{JZ} \sum_{i=1}^{SN} \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji}) \cdot H_{lkji}}{\eta_{z,lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji}) \cdot \eta_{mot,lkj} \cdot \eta_{int,lkj} \cdot \eta_{f,lkj}} \cdot \Delta T_i \cdot P_i$$

(1)

收稿日期: 2013-03-08 修订日期: 2013-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(60974099); 江苏省自然科学基金-青年基金项目(BK20130446); 2012 年度扬州大学科技创新培育基金(2012CXJ040)

作者简介: 龚 懿(1983-), 男, 江苏常熟人, 讲师, 博士, 主要从事水利水电工程管理决策理论及应用研究。扬州 扬州大学水利科学与工程学院, 225009。Email: gongyi\_8@163.com

\*通信作者: 程吉林(1963-), 男, 江苏常熟人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水利规划优化理论与应用研究。扬州 扬州大学水利科学与工程学院, 225009。Email: jlcheng@yzu.edu.cn

第  $l$  级并联泵站总水量约束

$$\sum_{k=1}^{BZ} \sum_{j=1}^{JZ} \sum_{i=1}^{SN} Q_{lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji}) \Delta T_i \geq W_{e,l} \quad (2)$$

功率约束

$$N_{lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji}) \leq N_{lkj0} \quad (3)$$

梯级提水总扬程约束

$$\sum_{l=1}^{TJ} H_{li} = HE \quad (4)$$

式中,  $l$ 、 $k$ 、 $j$ 、 $i$  分别表示梯级泵站级数序号、某梯级泵站座数序号、某座泵站机组台数序号、以及 1 日划分的时段序号;  $R$  为整个梯级泵站群 1 日最小提水费用, 元;  $M_l$  为第  $l$  级并联泵站群 1 日提水费用, 元;  $TJ$  为提水梯级数量, 级;  $BZ$  为并联泵站群的泵站座数, 座;  $JZ$  为单座泵站的机组台数, 台;  $SN$  为 1 日划分的时段数;  $\rho$  为水密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $Q_{lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji})$ 、 $N_{lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji})$  和  $H_{lkji}$  分别为第  $l$  个梯级中第  $k$  座泵站内第  $j$  台机组在第  $i$  时段对应于叶片安放角  $\theta_{lkji}$  和机组转速  $n_{lkji}$  的流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、电机实际功率 ( $\text{kW}$ ) 及机组时均扬程 ( $\text{m}$ );  $\Delta T_i$ 、 $P_i$  分别为第  $i$  时段的时段长 ( $\text{h}$ ) 及峰谷电价 ( $\text{元/kW}\cdot\text{h}$ )<sup>[28]</sup>;  $\eta_{z,lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji})$ 、 $\eta_{mot,lkj}$ 、 $\eta_{int,lkj}$  分别指第  $l$  级并联泵站群第  $k$  座泵站内第  $j$  台机组的水泵效率、电动机效率和传动效率,  $\eta_{z,lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji})$  与  $i$  时段流量、扬程有关; 在电机负荷大于 60% 时, 可以认为电动机效率  $\eta_{mot,lkj}$  基本不变, 大型电机的  $\eta_{mot,lkj}$  值在 94% 左右; 直联机组的传动效率  $\eta_{int,lkj}$  为 1;  $W_{e,l}$  为  $l$  级泵站群目标提水量,  $\text{m}^3$ ;  $N_{lkj0}$  为电动机配套功率,  $\text{kW}$ ;  $HE$  为整个调水工程提水总扬程,  $\text{m}$ 。

## 2 梯级泵站群优化运行模型求解方法

### 2.1 模型分解

以上模型 (1) — (4) 实际包含单级并联泵站群优化运行与级间输水河道水位优化衔接 2 部分, 即需要结合并联泵站群优化运行数学模型求解及级间输水河道一维非恒定流模拟, 因此对该模型作以下分解。

#### 2.1.1 并联泵站群日运行优化模型

以并联泵站群日提水费用最小为目标函数, 1 日划分的若干时段为阶段变量, 各泵站机组各时段叶片安放角及机组转速为决策变量, 规定时段内的并联泵站群抽水量及各机组电机配套功率为约束条件, 构建并联泵站群不同调节方式日运行优化数

学模型<sup>[29]</sup>。其中, 若某个泵站机组转速  $n$  固定为额定转速, 则该泵站为叶片全调节日优化运行; 若某个站叶片安放角  $\theta$  固定为设计叶片安放角, 则该泵站为变频变速日优化运行。

目标函数

$$\begin{aligned} M &= \min \sum_{k=1}^{BZ} G_k \\ &= \min \sum_{k=1}^{BZ} \sum_{j=1}^{JZ} \sum_{i=1}^{SN} \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji}) \cdot H_{lkji}}{\eta_{z,lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji}) \cdot \eta_{mot,lkj} \cdot \eta_{int,lkj} \cdot \eta_{f,lkj}} \\ &\quad \cdot \Delta T_i \cdot P_i \end{aligned} \quad (5)$$

总水量约束

$$\sum_{k=1}^{BZ} \sum_{j=1}^{JZ} \sum_{i=1}^{SN} Q_{lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji}) \cdot \Delta T_i \geq W_e \quad (6)$$

功率约束

$$N_{lkji}(\theta_{lkji}, n_{lkji}) \leq N_{lkj0} \quad (7)$$

式中,  $M$  为整个并联泵站群 1 日最小提水费用 (元);  $G_k$  为第  $k$  座泵站 1 日提水费用 (元);  $BZ$  为并联泵站群的泵站座数 (座); 其他变量含义按式 (1) — (4) 变量含义类推。

#### 2.1.2 一维明渠非恒定流模型

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial s} + \left[ gA - B \left( \frac{Q}{A} \right)^2 \right] \frac{\partial Z}{\partial s} = \left( \frac{Q}{A} \right)^2 \frac{\partial A}{\partial s} \Big|_Z - g \frac{Q|Q|}{AC^2R} \quad (9)$$

式中,  $Z$  为水位,  $\text{m}$ ;  $Q$  为流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $B$  为水面宽度,  $\text{m}$ ;  $A$  为过水断面面积,  $\text{m}^2$ ;  $R$  为水力半径,  $\text{m}$ ;  $C$  为谢才系数、 $q$  为单位长度河道的旁侧入流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $t$  和  $s$  分别是时间和空间坐标。

## 2.2 模型求解方法

### 2.2.1 不同日均扬程、提水负荷并联泵站群日优化运行模型求解

针对并联站群不同调节方式日优化运行数学模型, 可采用大系统二级分解-动态规划聚合法求解。该方法包含大系统一级分解、一级子系统二级分解、二级子系统优化及大系统动态规划聚合 4 个步骤, 求解方法参见文献[29], 模型求解示意如图 1 所示。

对于大型调水工程, “级点” 并联泵站群的特点是各站进出水往往为共同, 各站提水扬程也基本相同。因此, 运用并联泵站群日优化运行数学模型, 采用大系统二级分解-动态规划聚合方法, 分别求解在不同日均扬程、不同提水负荷下站群优化运行结果。以此作为河网数值模拟的边界条件供一维明渠非恒定流模型选择调用。

2.2.2 区间用水户概化及用水户水量确定

梯级泵站引水示意图如图 2 所示。

由图 2 可知，第 1 级泵站群的提水负荷  $W_{e,1}$  为第 2 级泵站群提水负荷  $W_{e,2}$  与第 1、2 级泵站级间受水区 11 及受水区 12 的区间用水  $W_{11}'$ 、 $W_{12}'$  3

部分之和，以此类推。河道用水户通常概化为农业用水户、工业用水户、生活用水户、生态环境用水户及船闸用水户五大类。针对每类用水户统计取水口个数，确定每个取水口用水规模。

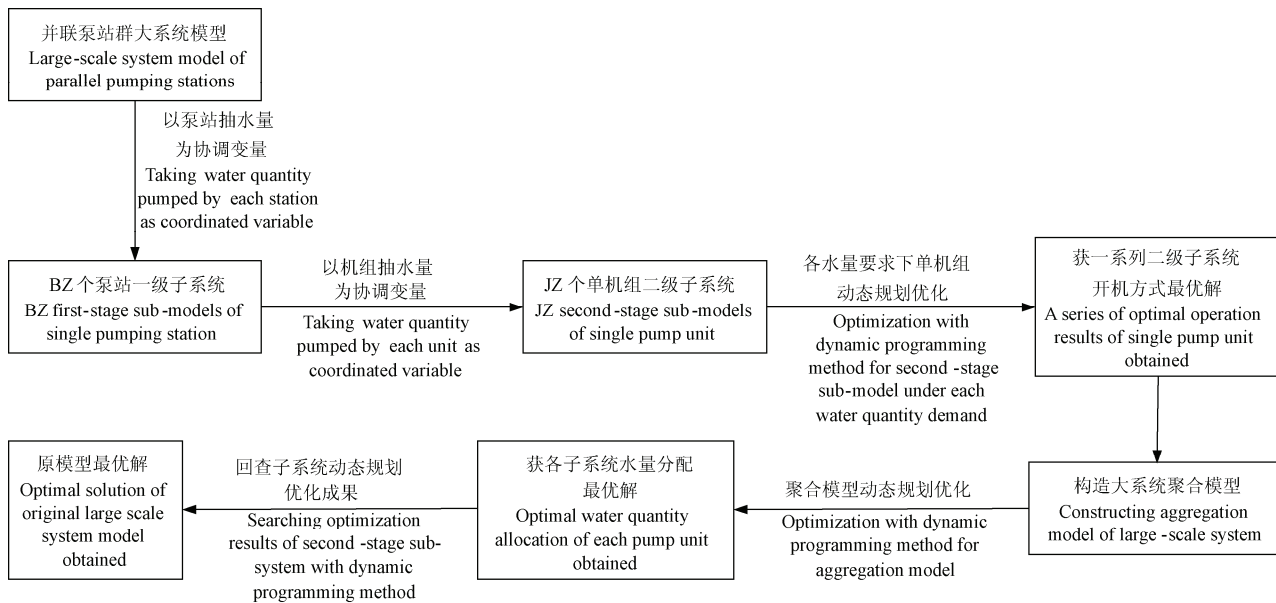
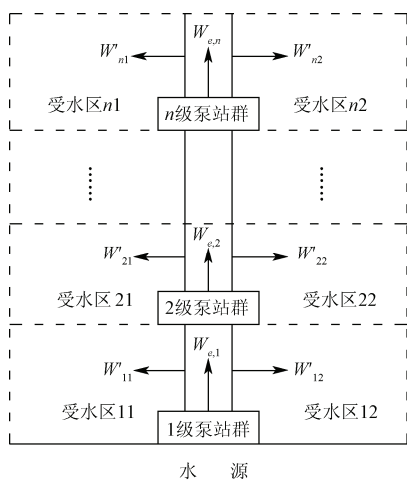


图 1 大系统二级分解-动态规划求解方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of two-stage decomposition-dynamic programming aggregation method



注：  $W'_{n1}$ 、 $W'_{n2}$  分别为受水区  $n1$  和  $n2$  的各类用水户用水总量。  
 Note:  $W'_{n1}$ 、 $W'_{n2}$  represent total water consumption of area  $n1$  and  $n2$ .

图 2 梯级泵站群提水示意图

Fig.2 Schematic diagram of water pumping for multistage pumping stations

2.2.3 各级泵站群提水负荷确定

并联泵站群满负荷、80%负荷、60%负荷工作定义为：并联泵站群各水泵机组定角恒速运行方式时，1 天 24 h 提水总量即为满负荷工作。80%、60% 负荷：即对应于定角恒速运行方式时满负荷工作提水总量的 80%、60%。

在第 2 级泵站群提水负荷确定情况下，计入区间用水量，确定第 1 级站的提水负荷。由于之前已获得并联泵站群不同日均扬程、不同提水负荷（100%负荷、80%负荷、60%负荷、……）下的日优化运行结果。因此，可从中选取最接近的提水负荷组合，作为第 1 级站群和第 2 级站群的运行负荷。

2.2.4 区间河道非恒定流模拟

1) 区间河道非恒定流模拟的目的

由于泵站扬程同站上下游水位相关，而水位过程又受制于泵站出流过程，双方相互制约。因此，进行区间河道非恒定流模拟的目的是要使 2 级站群在延时开机后使各级泵站群初始扬程同运行过程中的日均扬程相匹配，该问题需由一维明渠非恒定流模拟来实现。将满足输水渠道水位的生态、灌溉、通航、防洪等水位要求，以及初始假设水位与调度运行时水位变幅差距要求下各并联站群的优化运行方案及 2 级站群延时运行时长作为整个梯级泵站群的优化运行方案。

2) 明渠一维非恒定流模型求解方法

采用 Preissmann 隐格式建立差分方程。对于划有  $N$  个断面的河道，有  $N-1$  个河段，共可写出  $2(N-1)$  个代数方程，加上上游、下游边界条件，形成阶数为  $2N$  的代数方程组，可以解出  $N$  个断面处的水位  $Z$  和流量  $Q$ 。此方程组常用追赶法求解<sup>[30]</sup>。

### 2.3 梯级泵站群优化运行思路

梯级泵站群阶级多,每一级泵站通常又包含多个并联泵站群,规模庞大。因此,以二级提水泵站群为研究对象,既包含2个“级点”,又纳入级间输水河道,可看作梯级泵站群的一个输水单元,优化结果即可推广到多级泵站群。以二级泵站群优化运行为例,梯级泵站群优化运行思路如下:

1) 以每一级并联站群为对象,考虑日均扬程不变,采用大系统二级分解-动态规划聚合方法分别进行不同日均扬程、不同提水负荷下的并联泵站群日优化运行计算,获得两并联站群各自的一整套优化运行方案,即对应于抽水负荷与提水扬程的一整套优化运行方案(各时段、各泵站的开机台数、开机水泵的叶片角与机组转速,对应的泵站群最小提水费用)。

2) 当调水任务已定,即第 $l$ 级站群( $l=2$ )抽水量给定( $W_e, l$ ),假设开机时刻扬程为第2级并联站群的日均扬程(即:已知站上水位,假设站下水位),则可由步骤1)获第2级并联站群优化运行方案与对应的提水费用,及其对应的1日提水流量过程。

3) 已知第2级并联站群初始优化运行方案对应的1日提水流量过程,若给定1日输水渠道沿线用水户引提水过程,由此可推算站群1的提水量;假设站群1日均扬程(即假设日均站上水位),则由非恒定流模型模拟第1级并联站群不同开机时刻(考虑6种方案,即:站群2提前2、1h,与站群1同时开机,推迟1、2、3h;记为:-2、-1、0、1、2、3h)的站上及站群2站下24h水位过程,由此计算第1级并联站群站上与第2级并联泵站群站下平均水位;由步骤1)获得并联站群1的对应6种开机时

刻的优化运行方案及其对应提水费用。若一维非恒定流模拟的1日提水过程中各时段的第1级并联泵站群站上及第2级并联泵站群站下平均水位与假设不符,应重新假定并模拟计算,使之基本一致。

4) 以输水渠道典型断面24h水位变化情况(日均水位变幅情况,是否影响输水渠道水位的生态、灌溉、通航、防洪等水位要求,以及初始假设水位与调度运行时水位变幅差距)、并联站群初始假定条件(第2级并联站群初始假定的日均扬程)是否合理,及其对应6种运行方案(站群2开机后,站群2提前2、1h,与站群1同时开机,推迟1、2、3h开机)的提水费用进行综合比较、优选。

5) 调整初始假设条件(假设第2级并联站群运行初始时刻扬程为站群2日均扬程),重复上述步骤,采用步骤4)对方案进行综合比选。由此获得一定调水任务下的梯级泵站群优化运行方案。

### 2.4 淮安-淮阴梯级泵站群优化运行实例分析

由于淮安一站、二站、四站并排布置,考虑到站间上下游水位相差不大,以此作为第1级泵站群;同样,以淮阴一、三站作为第2级泵站群。站间输水河道为苏北灌溉总渠(考虑级间用水户用水)。

#### 2.4.1 梯级泵站群水泵性能曲线方程确定

淮安一、二、四站水泵机组性能参数[31],淮阴一、三站水泵机组性能参数参见文献[29]。

#### 2.4.2 并联泵站群日运行负荷确定

根据淮安一、二四站及淮阴一、三站水泵性能曲线,按照泵站满负荷、80%负荷、60%负荷定义,分别确定各站在不同日均扬程下的运行负荷。

#### 2.4.3 级间输水河道概化

淮安一、二、四站~淮阴一、三站级间输水河道数值模拟涉及主要河道13条。概况如表1所示。

表1 一维非恒定流模拟涉及河道概况

Table 1 General situation of rivers involved with simulation for one-dimensional unsteady flow

序号 River number	河道名称 River name	河道长度 Length of river/m	河底宽 Width of river bottom/m	河底高程 Elevation of river bottom/m	边坡 Slope coefficient
1	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal	38 100	150	3.0~5.0	2.5
2	砚台船闸输水河道 Water transferring canal of Yantai ship lock	500	20	5.0	2.5
3	淮阴一站站上引河 Diversion canal upstream No.1 Huaiyin station	650	20	4.5	2.5
4	淮阴三站站上引河 Diversion canal upstream No.3 Huaiyin station	630	20	4.5	2.5
5	淮安四站站下河道 Diversion canal downstream No.4 Huai'an station	303	20	3.2	2.5
6	运西电站站下河道 Diversion canal downstream Yunxi power station	800	20	3.2	2.5
7	淮安一站站下河道 Diversion canal downstream No.1 Huai'an station	350	20	3.2	2.5
8	淮安二站站下河道 Diversion canal downstream No.2 Huai'an station	300	20	3.2	2.5
9	里运河 Liyun river	27 925	65	3.0~5.0	2.5
10	京杭运河 Beijing-Hangzhou grand canal	1 500	80	3.0	2.5
11	运东船闸输水河道 Water transferring canal of Yundong ship lock	250	20	3.0	2.5
12	京杭运河两淮段 Beijing-Hangzhou grand canal from Huai'an to Huaiyin	22 100	80	3.0~5.0	2.5
13	头河 Tou river	2375	50	5.0	2.5

2.4.4 级间输水河道用水户水量概化

淮安—淮阴级间苏北灌溉总渠沿线用水户概化成果如表 2 所示。其中，将南风元明粉工业取水口概化流量为 2.0 m<sup>3</sup>/s；银珠化工工业区雨水口概

化流量为 1.0 m<sup>3</sup>/s；中电洪泽热电工业取水口概化流量为 5.0 m<sup>3</sup>/s，概化后级间河道用水户日用水量总量 643.5 万 m<sup>3</sup>。同时，关闭淮安站至淮阴二站和淮阴船闸间里运河及大运河两淮段沿线用水户口门。

表 2 淮安—淮阴级间苏北灌溉总渠沿线用水户概化

Table 2 Generalization of water users along North Jiangsu Irrigation Canal between Huaian and Huaiyin parallel pumping stations

名称 Name	类型 Type	取水河道 Water intake river	取水规模 Annual water consumption scale		备注 Remarks
			流量 Flow/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	年用水量 Annual water consumption/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	
黄集洞取水口 Water intake of Huangji culvert	农业用水户 Agricultural water users	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal	18.0		周桥灌区 Zhouqiao irrigation district
薛桥洞取水口 Water intake of Xueqiao culvert	农业用水户 Agricultural water users	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal	5.0		周桥灌区 Zhouqiao irrigation district
永济北洞取水口 Water intake of northern yongji culvert	农业用水户 Agricultural water users	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal	5.0		顺河洞灌区 Shunhe culvert irrigation district
永济南洞取水口 Water intake of southern yongji culvert	农业用水户 Agricultural water users	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal	8.23		运西灌区 Yunxi irrigation district
张码洞取水口 Water intake of Zhangma culvert	农业用水户 Agricultural water users	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal	4.92		运西灌区 Yunxi irrigation district
新河洞取水口 Water intake of Xinhe culvert	农业用水户 Agricultural water users	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal	24.9		运西灌区 Yunxi irrigation district
南风元明粉工业取水口 Industrial water intake of Nanfeng sodium sulfate Co., Ltd.	工业用水户 Industrial water users	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal		480	
银珠化工工业取水口 Industrial water intake of Yinzhu chemical industry	工业用水户 Industrial water users	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal		400	
中电洪泽热电工业取水口 Industrial water intake of Hongze thermoelectricity Co., Ltd.	工业用水户 Industrial water users	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal		3 000	
砚台船闸取水口 Water intake of Yantai ship lock	船闸用水户 Water users of ship lock	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal	0.214		
运东船闸取水口 Water intake of Yundong ship lock	船闸用水户 Water users of ship lock	苏北灌溉总渠 Northern Jiangsu main irrigation canal	0.214		

注：摘自江苏省水利勘测设计研究院有限公司编《江苏省南水北调配套工程规划之用水户概化》，2009年6月

Note: Excerpt from 《Water users generalization of matching project programming in South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province》 compiled by Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd.

2.4.5 梯级优化方案综合比选

通过对淮阴站群延后-2、-1、0、1、2、3 h 优化开机，获得 6 种方案下优化结果，以及对应每种方案的淮安站群站上、淮阴站群站下水位过程。

通过方案比较可知，当淮阴站群延后 2 h 开机时，整个输水过程中河道最低水位 9.23 m，最高水位 9.62 m，满足河道生态、灌溉、通航、防洪的水位要求，且淮安站群站上、淮阴站群站下水位变幅较其他方案变化最小，不超过±23 cm，日均扬程变化同初始扬程基本匹配，无需重新假定淮安泵站

群站上初始水位，因而采用淮安站群日均扬程 4.15 m、80%负荷，淮阴站群日均扬程 3.9 m、100%负荷，且淮阴站群推迟 2 h 的优化运行过程作为淮安-淮阴梯级泵站群优化运行方案。该方案下淮安站群单位提水费用为 79.33 元/万 m<sup>3</sup>，较定角恒速运行单位提水费用（105.86 元/万 m<sup>3</sup>）节省幅度为 25.06%；淮阴站群单位提水费用为 84.60 元/万 m<sup>3</sup>，较定角恒速运行单位提水费用（91.26 元/万 m<sup>3</sup>）节省幅度为 7.3%。从 8:00 开始计时，各泵站机组运行过程如表 3—表 4 所示。

表3 淮安泵站群日均扬程4.15 m、80%负荷各机组优化开机过程

Table 3 Optimal operation schemes of 80% load under daily average lift of 4.15 m for Huaian parallel pumping stations

时刻 Time	各机组叶片安放角 Blade angle of each pump unit/(°)												
	淮安一站 No.1 Huai'an Pumping station						淮安二站 No.2 Huai'an Pumping station			淮安四站 No.4 Huai'an Pumping station			
8:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	+2	停机	停机	停机	停机
9:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	+2	停机	停机	停机	停机
10:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	+2	停机	停机	停机	停机
11:00	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	+4	+4	+1	+2	+2	+2
12:00	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	+4	+4	+1	+2	+2	+2
13:00	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	+4	+4	+1	+2	+2	+2
14:00	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	+4	+4	+2	+2	+2	+2
15:00	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	+4	+4	+2	+2	+2	+2
16:00	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	+4	+4	+2	+2	+2	+2
17:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	+2	停机	停机	停机	停机
18:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	+2	停机	停机	停机	停机
19:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	+2	停机	停机	停机	停机
20:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	+2	停机	停机	停机	停机
21:00	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5	+4	+4	+1	+4	+4	+4
22:00	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5	+4	+4	+1	+4	+4	+4
23:00	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+4	+4	+4	+4	+4	+4
0:00	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+4	+4	+4	+4	+4	+4
1:00	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+4	+4	+4	+4	+4	+4
2:00	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+4	+4	+4	+4	+4	+4
3:00	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+4	+4	+4	+4	+4	+4
4:00	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+4	+4	+4	+4	+4	+4
5:00	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+4	+4	+4	+4	+4	+4
6:00	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+4	+4	+4	+4	+4	+4
7:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	+2	停机	停机	停机	停机
8:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机
9:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机

表4 淮阴泵站群日均扬程3.9 m、100%负荷各机组优化开机过程

Table 4 Optimal operation schemes of 100% load under daily average lift of 3.9 m for Huaiyin parallel pumping stations

时刻	淮阴一站机组叶片安放角 Blade angle of each unit in No.1 Huaiyin pumping station/(°)			淮阴三站机组转速 Rotational speed of each unit in No.3 Huaiyin pumping station/(r·min <sup>-1</sup> )			
8:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机
9:00	停机	停机	停机	停机	停机	停机	停机
10:00	停机	0	+1.5	120	120	120	120
11:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
12:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
13:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
14:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
15:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
16:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
17:00	-1	-1	停机	停机	停机	停机	停机
18:00	-1	-1	停机	停机	停机	停机	停机
19:00	0	0	+1.5	125	120	120	120
20:00	0	0	+1.5	125	120	120	120
21:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
22:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
23:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
0:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
1:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
2:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
3:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
4:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
5:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
6:00	+1.5	+1.5	+1.5	135	135	135	135
7:00	停机	-1	+1.5	120	120	120	120
8:00	停机	-1	+1.5	120	120	120	120
9:00	停机	0	+1.5	120	120	120	120

在永济北洞与张码洞取水口间苏北灌溉总渠上取一典型断面，其在上述优选方案下的 26 h 水位变化过程如图 3 所示。由图可知前 2 h 内由于淮安并联泵站提前供水，而淮阴并联泵站无取水，故水位在短时间内呈上升趋势；典型断面在整个水位变化过程中呈现 2 次较大上升及 2 次较大下降过程。其中较大的上升趋势出现在低电价（0.276 元/kW·h）及部分平电价（0.587 元/kW·h）时段内，是由于并联泵站优化运行方案下低电价（及部分平电价）时段内尽可能增加提水流量以节省电费，且淮安站群作为 1 级供水泵站群，其供水流量大于该典型断面与淮安站群间的用水户用水量；反之，下降趋势出现在高电价（0.978 元/kW·h）时段内，也是这个原理。此外，在 26 h 的水位变化过程中，断面水位出现不同幅度的波动，是受级间输水河道沿线的用水户用水量及不同类型用水户工作制度等影响。

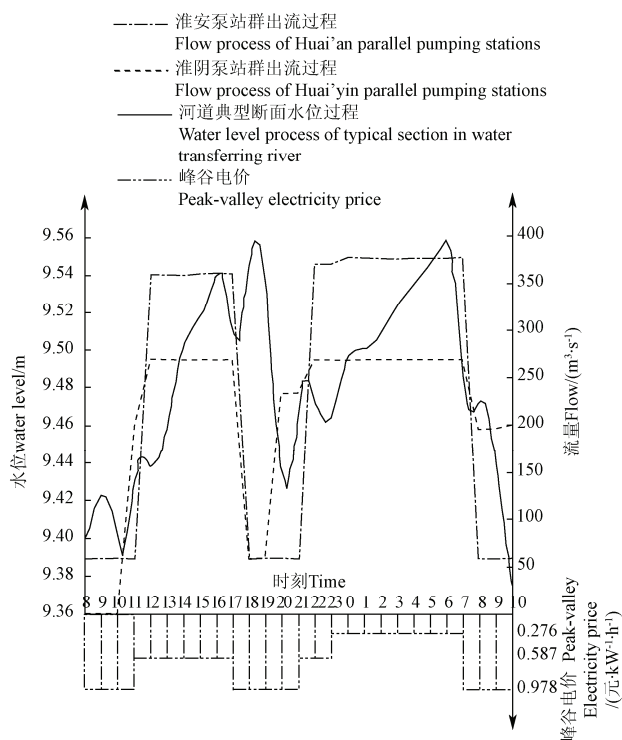


图 3 输水河道典型断面水位过程分析

Fig.3 Analysis of water level process for typical section in water transfer canal

### 3 结论与讨论

将梯级泵站群优化运行数学模型分解为并联泵站群日优化运行模型和一维明渠非恒定流模型，通过大系统理论与非恒定流数值模拟相结合的方法，采用 2 级站群提前（或延后）的开机方式，对梯级泵站群优化运行研究开展了有效尝试，初步提出了梯级泵站群优化运行方法。以淮安—淮阴梯级

泵站群为例，获得的各级泵站群优化运行方案较相同提水扬程及提水负荷下定角恒速运行节能效益明显。需要指出的是，不同初始日均扬程、级间输水河道沿线用水户不同用水量及工作制度、以及不同提水匹配负荷情况下，对 2 级并联泵站群的最优延时时刻确定可能有一定影响；同时，该方法是假定各级并联泵站群日均扬程不变情况下，通过非恒定流模拟进行上下游水位衔接，实际情况下由于泵站工况调节过程必然影响泵站群上下游水位变化，如何根据各级并联泵站群实时的上下游水位变化及时调整泵站运行工况，提高泵站优化运行效益，仍需开展进一步研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] 刘正祥, 蒋丽娟, 张平燕. 动态规划、模拟技术在多级泵站优化调度中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2000, 19(2): 62—64, 68.  
Liu Zhengxiang, Jiang Lijuan, Zhang Pingyan. Application of dynamic programming and modeling technique to optimal operation of multi stage pumping stations[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2000, 19(2): 62—64, 68. (in Chinese with English abstract)
- [2] Pulido-Calvol, J Roldán, R López-Luque, et al. Water delivery system planning considering irrigation simultaneity[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(4): 247—255.
- [3] Rodin S I. Use of genetic algorithms for optimal control of bulk water supply[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(5): 357—365.
- [4] 刘超, 耿卫明. 泵站经济运行的数值解法[J]. 排灌机械, 2004, 23(3): 14—17.  
Liu Chao, Geng Weiming. Numerical solution on economical operation for pump station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2004, 23(3): 14—17. (in Chinese with English abstract)
- [5] 朱劲木, 李强, 龙新平, 等. 梯级泵站优化运行的遗传算法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2008, 41(1): 108—111.  
Zhu Jinmu, Li Qiang, Long Xinping, et al. Optimizing operation of cascade pumping stations by genetic algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(1): 108—111. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王宏江, 陆桂华. 遗传算法在尔王庄枢纽泵站优化调度中的应用[J]. 水利水电技术, 2003, 34(3): 50—53.  
Wang Hongjiang, Lu Guihua. Application of genetic algorithm in optimal operation of pumping stations of erwangzhuang hydro system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(3): 50—53. (in Chinese with English abstract)
- [7] Solmaz Rasoulzadeh-Gharibdousti, Omid Bozorg Haddad, Miguel A Mariño. Optimal design and operation

- of pumping stations using NLP-GA[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management, 2011, 164(4): 163—171.
- [8] 程吉林, 张礼华, 张仁田, 等. 叶片可调单机组日运行优化方法研究[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 499—504. Cheng Jilin, Zhang Lihua, Zhang Rentian, et al. Study on optimal day-operation of single adjustable-blade pump unit in pumping station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 499—504. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈守伦, 芮钧, 徐青, 等. 泵站日优化运行调度研究[J]. 水电能源科学, 2003, 21(3): 82—83. Chen Shoulun, Rui Jun, Xu Qing, et al. Daily optimal operation for pumping stations[J]. Hydroelectric Energy, 2003, 21(3): 82—83. (in Chinese with English abstract)
- [10] Edson da Costa Bortoni, Roberto Alves de Almeida, Augusto Nelson Carvalho Viana. Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation[J]. Energy Efficiency, 2008, 1(3): 167—173.
- [11] 龙新平, 朱劲木, 刘梅清, 等. 基于性能曲面拟合的泵站优化调度分析[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 27—31. Long Xinping, Zhu Jinmu, Liu Meiqing, et al. Optimized dispatch of pumping stations based on performance curve surface fitting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 27—31. (in Chinese with English abstract)
- [12] 程芳, 陈守伦. 泵站优化调度的分解协调模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(2): 136—139. Cheng Fang, Chen Shoulun. Decomposition-coordination model for optimal operation of pumping stations[J]. Journal of Hehai University: Natural Sciences, 2003, 31(2): 136—139. (in Chinese with English abstract)
- [13] 鄢碧鹏, 刘超. 混沌优化算法在泵站经济运行中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2004(3): 38—40. Yan Bipeng, Liu Chao. Application of chaos optimization technology in pump station[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004(3): 38—40. (in Chinese with English abstract)
- [14] Chad Wegley, Muzaffar Eusuff, Kevin Lansley. Determining pump operations using particle swarm optimization[C]//Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000, Minneapolis, July 30-August 2, 2000: 1—6.
- [15] 冯平. 引滦入津引供水枢纽泵站机组的优化调度[J]. 水力发电学报, 2001, 20(4): 90—95. Feng Ping. Optimization operation of the pump station system in the project of transfer water from Luanhe river into Tianjin city[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001, 20(4): 90—95. (in Chinese with English abstract)
- [16] 熊晓明, 刘光福. 梯级泵站的实时优化调度研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 81—83, 70. Xiong Xiaoming, Liu Guangfu. Study on real-time optimum dispatch of multi-stage pump station[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(12): 81—83, 70. (in Chinese with English abstract)
- [17] 戴振伟, 朱兆通, 储训, 等. 多级泵站优化调度研究[J]. 排灌机械工程学报, 1997(3): 37—41. Dai Zhengwei, Zhu Zhaotong, Chu Xun, et al. Study on dispatching optimization of multi-stage pumping station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1997(3): 37—41. (in Chinese with English abstract)
- [18] Borzi A, Cutore P, Gueli R. A methodology for the evaluation of optimal pumping system operation through synthetic indices[C]//Proceedings of the 10<sup>th</sup> Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA2008: 532—542.
- [19] Mouatasim, A. El, Ellaia, R., Al-Hossain, A. A continuous approach to combinatorial optimization: Application of water system pump operations[J]. Optimization Letters, 2012, 6(1): 177—198.
- [20] Abdelsalam N M, Aziz M S, Zobaa A F, et al. Optimizing operation at the Mubarak pumping station in Egypt[J]. International Journal on Hydropower and Dams, 2010, 17(6): 87—91.
- [21] Mahdi Moradi-Jalal. Optimal design and operation of irrigation pumping station[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(3): 149—154.
- [22] 车奇星. 梯级引水工程水位优化调度模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(1): 41—43. Che Qixing. Study on optimal water level models of large-scale delivery water project[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(1): 41—43. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张文渊. 梯级泵站的流量调和水位(扬程)优化[J]. 水电站设计, 2001, 17(1): 18—21. Zhang Wenyuan. Adjustment of flow and water level (head) optimization of multi-stage pump station[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2001, 17(1): 18—21. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李世芳, 马树元. 梯级泵站扬程优化调度算法[J]. 水利水电工程设计, 2002, 21(2): 45—46. Li Shifang, Ma Shuyuan. Optimization scheduling algorithm of head in multi-stage pump station[J]. Design of Water Resources and Hydroelectric Engineering, 2002, 21(2): 45—46. (in Chinese with English abstract)
- [25] 金明宇, 徐青, 陈守伦. 大型引水工程梯级水位优化模型研究[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28(1): 67—69. Jin Mingyu, Xu Qing, Chen Shoulun. Study on optimal water level models of large water division projects[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2004, 28(1): 67—69. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘广忠, 黄琳娜, 缴锡云. 基于 MapX 的河道输水动态模拟系统的研究与实现[J]. 计算机应用与软件, 2008,



- 25(10): 166—168, 171.  
Liu Guangzhong, Huang Linna, Jiao Xiyun. Research and realization of dynamic simulation system based on MapX for river flow[J]. Computer Applications and Software, 2008, 25(10): 166—168, 171. (in Chinese with English abstract)
- [27] 黄跃飞, 王光谦, 魏加华. 大型调水工程干渠输水的水力优化分配[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(6): 47—50.  
Huang Yuefei, Wang Guangqian, Wei Jiahua. Optimization of water head allocation for large-scale water diversion project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2006, 4(6): 47—50. (in Chinese with English abstract)
- [28] 龚懿, 程吉林, 张仁田, 等. 淮阴三站变频变速优化运行的分解-动态规划聚合法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 79—83.  
Gong Yi, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Optimization on variable speed operation with VFD for No.3 Huaiyin pumping station based on decomposition-dynamic programming aggregation method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 79—83. (in Chinese with English abstract)
- [29] 龚懿, 程吉林, 张仁田, 等. 并联泵站群日优化运行方案算法[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(3): 230—235.  
Gong Yi, Cheng Jilin, Zhang Rentian, et al. Algorithm of daily operation scheme for parallel pumping stations[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(3): 230—235. (in Chinese with English abstract)
- [30] 郑邦民, 槐文信, 齐鄂荣. 洪水水力学[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000.  
Zheng Bangmin, Huai Wenxin, Qi Erong. Flood Hydraulics[M]. Wuhan: Hubei Science Press, 2000. (in Chinese)
- [31] Yi Gong, Jilin Cheng, Rentian Zhang, et al. Study of optimal operation for Huai'an parallel pumping stations with adjustable-blade units based on two stages decomposition-dynamic programming aggregation method[C]//The Fourth International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture, IFIP AICT 346, PART3: 554—562.

## Operation optimization of Huai'an-Huaiyin multistage pumping stations

Gong Yi<sup>1</sup>, Cheng Jilin<sup>1\*</sup>, Zhang Rentian<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** In order to explore the optimal operation method of large-scale inter-basin water transfer projects, and fully excavate optimal operation benefit of multistage system, the two-stage decomposition-dynamic programming aggregation method was introduced to solve the mathematical model of daily optimal operation for parallel pumping stations, by which a series of optimal operation schemes under different average daily lifts and water pumping quantities were obtained. Considering different types of water consumption along the water transferring canal between two-stage pumping stations, by means of taking different start up time of pumping stations in the second stage, the obtained optimal operation schemes of pumping stations were adopted as boundary conditions and then substituted into mathematical model of one-dimensional unsteady flow to carry out the numerical simulation of water transferring canal, by which the changing process of water level in water transferring canal was simulated. According to the multiple schemes comparison and selection, the effective connection of water level between two-stage pumping stations was obtained and the optimal operation method of multistage pumping stations was preliminary proposed. Taking the two-stage pumping stations from Huai'an parallel pumping stations to Huaiyin parallel pumping stations as a study case, the optimal operation scheme of the entire multistage pumping stations system was obtained as follows: taking 4.15 m as the average daily lift and 80% loads as water pumping quantity for Huai'an parallel pumping stations, and taking 3.9 m as the average daily lift and 100% loads as water pumping quantity for Huaiyin parallel pumping stations, the start-up time of Huaiyin stations was 2 hours later than Huai'an stations. Under the optimization scheme above, the unit cost of water pumping for Huai'an parallel pumping stations and Huaiyin parallel pumping stations was 79.33 and 84.60 Yuan/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> respectively, which had a respectively cost saving percentage of 25.06% and 7.3% compared with operation with fixed blade-angle and constant speed under the same average daily lift and water pumping quantities of each parallel pumping stations. The research can provide a reference for optimal operation of inter-basin water transfer system, especially for water level optimization of water transferring canals.

**Key words:** optimization, dynamic programming, operations research, pumping station, unsteady flow

(责任编辑: 信世强)