

# 单级泵站不同机组流量分配的优化研究

李智, 刘波波, 王新民, 刘蒙泰, 窦玉颖

(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

**摘要:** 调水工程中泵站建成后, 在不同的时期承担不同的调水任务, 为了完成各种调水任务, 往往使水泵在不同的工况点运行。基于离散的单级泵站运行工况点, 对泵站的流量分配进行了优化研究; 在满足水泵流量、扬程和各种水力学条件的约束下, 以泵站整体效率最高为目标函数, 基于一些工况进行了不同机组流量分配的对比研究, 建立了流量优化分配数学模型, 得出了各个工况点下泵站内机组流量分配的最优组合。

**关键词:** 单级泵站; 离散工况点; 流量优化分配; 不同机组对比

**中图分类号:** TV 675 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015) 04-0691-04

## Optimization of flow distribution of different units in a single stage pumping station

LI Zhi, LIU Bo bo, WANG Xin min, LIU Meng tai, DOU Yu ying

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** After the pumping station of the water transfer project is built, it may carry on different water transfer tasks at different times. In order to finish water transfer tasks, the pumping station operates under different working conditions. Based on the discrete working points of a single stage pumping station, flow distribution of the pump station was optimized. To achieve the maximum efficiency of the pumping station system, we established the flow distribution optimization model under the constraints of pump flow, pump assembly head, and number of operating units. Flow distributions of different units were compared under several working conditions, and the optimal combination of flow distribution of different units in a single stage pumping station was obtained.

**Key words:** single stage pump station; discrete working point; optimal flow distribution; comparison of different units

## 1 研究背景

随着国民经济的发展, 水资源短缺和分布不合理的现象越来越严重。近年来, 为促进水资源优化配置, 国内兴建了许多大、中型跨流域调水工程和一般供水工程<sup>[1-4]</sup>。如南水北调东线一期工程、东深供水工程、山西万家寨引黄工程等。泵站在流域内或流域间调水, 能够有效地解决水资源时空分布不均的问题。同时, 这些泵站为了满足不同时段调水量和水压的要求, 往往由不同型号的多台机组组成(包括备用机组)。不同型号的水泵存在着性能差异, 即使同型号的水泵在实际运行中, 特性曲线也会存在一定的差异。因此, 在确定投入运行机组的同时, 还需要针对不同性能的机组, 合理分配每台机组运行时的流量。流量分配的原则是在满足调水量要求的前提下, 使泵站整体效率最高, 确定泵站最优运行方式, 使泵站经济运行<sup>[5-6]</sup>。

随着泵站工程规模的扩大和水泵技术的提高, 泵站的运行调度管理也越来越显现出它的重要性。多年来泵站实际运行多根据主观经验进行, 致使许多泵站机组没有在最优工况下运行, 造成能耗和运行费用的增加。因此研究泵站的优化调度具有很重要的意义。泵站的优化调度有多种方式, 主要思想是按照一定的优化原则, 在满足各种约束条件的前提下, 使泵站运行的目标函数达到最大或最小<sup>[7-9]</sup>。对泵站的优化调度问题, 许多学者都进行了探索和研究。江安南等<sup>[10]</sup>以大型轴流泵站运行费用最小为目标, 构建了数学模型, 并采用动态规划法进行了求解; 刘家春等<sup>[11]</sup>提出了根据取水泵站不同季节流量变化大, 水位变化大的特点, 给出了确定单台调速泵和并联调速泵转速的数解法及调速泵台数的确定方法, 此法使取水泵站与水厂运行及送水泵站流量协调一致, 在满足用户用水量要求的前提下达到耗能少、经济运行的目的; 杨鹏等<sup>[12]</sup>利用遗传算法求解给定日平均流

收稿日期: 2014-09-25 修回日期: 2015-01-15 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.1124.008.html>

基金项目: 北京市科学技术委员会项目“密云水库调蓄工程梯级泵站实施调度模型算法开发与应用”(Z141100006014049)

作者简介: 李智(1966), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 主要从事水文水资源、项目管理方面的研究。E-mail: Zli1220@126.com

通讯作者: 刘波波(1989), 男, 山西晋城人, 主要从事水力学方面的研究。E-mail: 18001093305@126.com

量下的机组的优化组合,使泵站运行费用为最小;龙新平等<sup>[13]</sup>基于曲面拟合构造了水泵装置效率、叶片角度与装置扬程和流量的连续函数关系,利用动态规划法建立了泵站优化调度模型,可用于考虑时间因素、具有多种型号水泵且能调角或调速运行的泵站优化调度。上述研究从不同角度对泵站的优化调度进行了研究,但基本都是针对设计工况,进行机组间流量的优化,而实际运行中泵站往往会在不同的工况点运行;另一方面,对同一工况下不同机组进行流量分配也没有进行深入的对比研究。

本文所进行的泵站优化研究,不仅考虑了泵站在设计工况点下运行时的最优机组流量分配,而且通过离散单台水泵运行时的扬程、流量区间,得出了泵站在实际运行过程中可能达到的所有工况点,并得出了所有工况点下泵站运行的最优机组流量分配。同时,针对某些工况点下,可以实现不同机组流量分配的情况,也进行了对比研究。以南水北调来水调入密云水库调蓄工程第 6 级西台上泵站为研究对象,泵站整体效率最高为优化目标,确定泵站优化运行方案。

南水北调来水调入密云水库调蓄工程是为了有效利用南水北调来水而兴建的调蓄工程,通过 9 级泵站加压将水输送至密云水库,将密云水库作为南水北调中线工程的在线调蓄水库进行年际、年内调节,提高供水保证率,同时扩大南水北调供水范围,最大程度地发挥南水北调来水效益。本文研究的是第 6 级西台上泵站,也是怀柔水库前最后一级泵站,泵站基本参数见表 1。

表 1 西台上泵站基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the Xitaihang pump station

泵型	工备台数	单机流量 /(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	最大扬程 /m	设计扬程 /m	最小扬程 /m
立式混流泵	3 工 1 备	6.67	8.2	6.2	4.3

## 2 优化数学模型的建立与求解

### 2.1 数学模型的建立

#### 2.1.1 泵站系统效率

泵站系统效率是反映泵站运行状态的综合指标<sup>[14]</sup>。在单台水泵效率计算的基础上,综合泵站内各水泵的效率,给出泵站系统效率的定义和表达式。

水泵单机效率表达式如下:

$$\eta_{\text{pump}} = \frac{N_{\text{效}}}{N} \times 100\% = \frac{\sum Q_i H_i}{1000 N_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $i(i=1, 2, 3)$ 为泵站内水泵机组编号; $\eta_{\text{pump}}$ 为单台水泵效率; $\gamma$ 为水的重度, $\gamma = \rho g = 9.8 \text{ kN/m}^3$ ;  $Q_i$ 为单机流量(m<sup>3</sup>/s);  $H_i$ 为水泵扬程(m);  $N_i$ 为单机总功率(kW)。

泵站系统效率表达式如下:

$$\eta_{\text{pumpstation}} = \frac{\gamma Q H}{\sum_{i=1}^n \frac{\gamma Q_i H_i}{\eta_i}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $n(n=1, 2, 3)$ 为投入运行的水泵机组数量; $\eta_{\text{pumpstation}}$ 为泵站系统效率; $\eta_i$ 为水泵单机效率; $Q$ 为泵站系统总流量(m<sup>3</sup>/s);  $H$ 为泵站系统扬程(m);其余各符号含义同式(1)。

#### 2.1.2 目标函数

西台上泵站是南水北调来水调入密云水库调蓄工程的

第 6 级泵站,泵站设计为叶片全调节立式混流泵。设计流量为 20 m<sup>3</sup>/s,设计扬程为 6.2 m。泵站共配备 4 台同型号的水泵,3 工 1 备,不同数量的机组投入运行时,流量、扬程不同,泵站系统运行的工况不同。因此,在满足一定的约束条件下,以泵站系统效率最高为目标函数,建立数学模型,并且得出泵站系统效率最高时,泵站内机组之间的流量分配。

由式(2),约去  $\gamma$ ,得:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{QH_j}{\sum_{i=1}^n \frac{QH_i}{\eta_{ij}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $n=1, 2, 3$ ,意味着泵站运行时可以单泵运行,也可以 2 泵并联或 3 泵并联工作; $Q_i$ 为将单泵可运行的流量范围进行离散后,得到的一组离散值(m<sup>3</sup>/s);  $H_j$ 为将泵站的扬程范围进行离散后,得到的一组离散值(m),因为泵站内水泵型号相同,所以几台泵并联工作时,扬程也相同。

### 2.1.3 约束条件

扬程约束,即:  $H_{\text{min}} \leq H_j \leq H_{\text{max}}$ 。

流量约束,包括单机流量约束:  $Q_{\text{min}} \leq Q_i \leq Q_{\text{max}}$ ;总流量

约束:  $Q = \sum_{i=1}^n Q_i$ ;

扬程、流量之间关系的互相约束:  $H_i = aQ_i^2 + bQ_i + c$ 。

式中: $H_{\text{min}}$ 、 $H_{\text{max}}$ 为泵站的最低、最高扬程(m);  $Q_{\text{min}}$ 、 $Q_{\text{max}}$ 为单台水泵在扬程约束下,可以运行的最小、最大流量(m<sup>3</sup>/s);  $H_i$ 为扬程和流量之间的特性关系,一般情况下二次函数关系就可以满足精度要求。因为水泵为叶片全调节,所以不同的角度下对应有多个曲线。

## 2.2 数学模型的求解

根据以上数学模型,可以按下列步骤进行求解。

(1) 根据西台上泵站水泵装置模型试验得到的数据,通过叶片泵的相似特性,换算得到原型泵抽水装置综合特性曲线,见图 1。

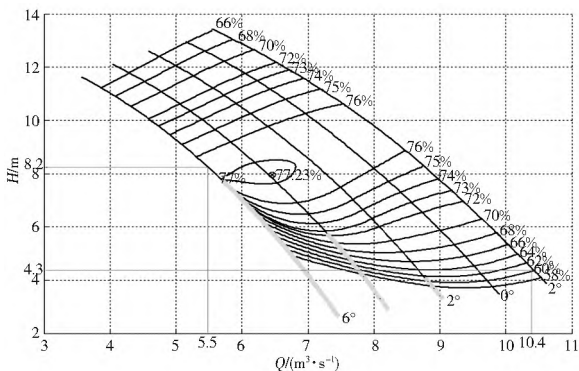


图 1 西台上泵站抽水装置综合特性曲线

( $n = 297 \text{ r/min}$ ,  $D = 1.46 \text{ m}$ )

Fig. 1 The comprehensive characteristic curve of the Xitaihang pump station ( $n = 297 \text{ r/min}$ ,  $D = 1.46 \text{ m}$ )

(2) 由泵站的扬程范围(4.3~8.2 m),通过水泵装置特性曲线,确定单泵运行的流量范围(10.4~5.5 m<sup>3</sup>/s)。并据此得到 2 泵并联运行和 3 泵并联运行时的流量范围,分别为(20~11 m<sup>3</sup>/s)和(20~16.5 m<sup>3</sup>/s),此处考虑泵站设计流量为 20 m<sup>3</sup>/s,故把流量范围的上限确定为 20 m<sup>3</sup>/s。把上述的扬程范围和流量区间都离散为间隔 0.1 的值。

(3) 根据得到的西台上泵站抽水装置性能曲线, 构造出装置扬程、流量和抽水装置效率、叶片角度之间的关系, 并结合单泵运行的流量、扬程范围, 利用插值算法, 获得单泵运行时, 在任意扬程、流量工况点下所对应的抽水装置效率值和水泵叶片角度<sup>[19]</sup>。分别见表 2 和表 3。

表 2 西台上泵站扬程-流量-效率关系

Tab. 2 Relationship between pump head, flow, and efficiency s of the Xitaihang pump station (%)

扬程 /m	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )									
	10.4	10.3	10.2	10.1	10.0	...	5.8	5.7	5.6	5.5
8.2	0	0	0	0	0	...	77.0	76.9	76.7	76.6
8.1	0	0	0	0	0	...	77.0	77.0	76.8	0
8.0	0	0	0	0	0	...	77.1	77.0	0	0
7.9	0	0	0	0	0	...	77.1	77.0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4.6	0	62.1	62.1	62.2	62.4	...	0	0	0	0
4.6	0	61.4	61.6	61.9	62.2	...	0	0	0	0
4.4	60.4	60.6	60.9	61.1	61.4	...	0	0	0	0
4.3	59.5	59.8	60.0	60.3	60.7	...	0	0	0	0

表 3 西台上泵站扬程-流量-叶片角度关系

Tab. 3 Relationship between pump head, flow, and blade angle of the Xitaihang pump station (°)

扬程 /m	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )									
	10.4	10.3	10.2	10.1	10.0	...	5.8	5.7	5.6	5.5
8.2	0	0	0	0	0	...	-5.27	-5.52	-5.76	-6.00
8.1	0	0	0	0	0	...	-5.43	-5.68	-5.92	0
8.0	0	0	0	0	0	...	-5.52	-5.76	0	0
7.9	0	0	0	0	0	...	-5.60	-5.84	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4.6	0	1.92	1.68	1.43	1.19	...	0	0	0	0
4.6	0	1.84	1.60	1.35	1.11	...	0	0	0	0
4.4	1.92	1.68	1.43	1.27	1.03	...	0	0	0	0
4.3	1.84	1.60	1.35	1.11	0.87	...	0	0	0	0

(4) 以 3 泵并联运行工况为例说明流量优化分配的求解过程: 首先将 3 泵并联运行流量范围进行离散, 同样离散为间隔 0.1 的值, 分别计算对应每一个扬程、流量工况点下泵站系统的最高效率以及此时 3 台水泵的流量分配情况, 具体计算流程见图 2。

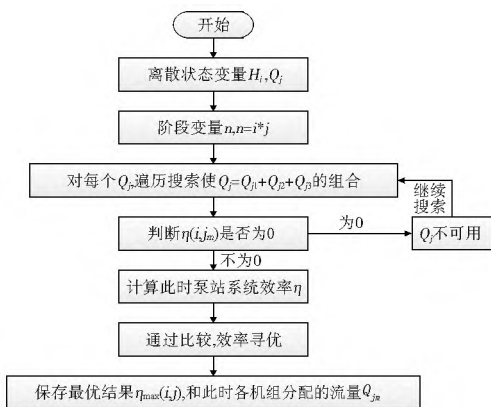


图 2 流量优化分配计算流程

Fig. 2 Flowchart of optimal flow allocation

### 3 计算结果和分析

#### 3.1 设计工况点下流量优化分配的结果

西台上泵站设计流量为 20 m<sup>3</sup>/s, 设计扬程为 6.2 m。在设计工况点下, 流量在 3 台机组间平均分配时, 泵站系统效率最高, 为 72.33%。

通过查表 2 和表 3 得到每台水泵在对应的扬程、流量下的单泵效率和角度, 见表 4。运行时通过调节叶片角度实现对工况点的调节。

表 4 设计工况点下流量优化分配结果

Tab. 4 The optimal flow allocation results under the design working conditions

名称	流量分配/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )		
	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>
西台上泵站	6.7	6.7	6.6
单泵效率(%)	72.61	72.61	71.76
叶片角度(°)	-5.03	-5.03	-5.27

根据数学模型求解第(2)步的结论可知, 当流量为 20 m<sup>3</sup>/s 时, 也可以由 2 台水泵机组分配流量, 但此时必有一台机组承担的流量大于或等于 10 m<sup>3</sup>/s, 而此时通过图 1 可知, 这台机组并不能满足 6.2 m 的设计扬程, 也即在扬程为 6.2 m, 流量为 20 m<sup>3</sup>/s 的设计工况点下必有至少一台水泵机组不满足约束条件。因此在设计工况下, 2 台水泵机组分配流量不可行, 只能由 3 台水泵进行流量分配。

#### 3.2 所有工况点下流量优化分配的结果

由数学模型求解第二步的结论可知, 3 泵并联运行时泵站流量范围为(20~ 16.5 m<sup>3</sup>/s), 2 泵并联运行时泵站流量的范围为(20~ 11 m<sup>3</sup>/s), 泵站的扬程范围为(4.3~ 8.2 m), 将这 3 个区间都离散为间隔 0.1 的值, 则 3 台水泵机组流量分配共有 40×36=1440 个工况点, 2 台水泵机组流量分配共有 40×91=3640 个工况点。可见当多台水泵机组并联工作时, 共有 3640 个工况点。计算得出在每个工况点下由几台机组分配流量可使泵站系统效率最高, 并给出对应的流量分配, 效率计算结果见图 3。

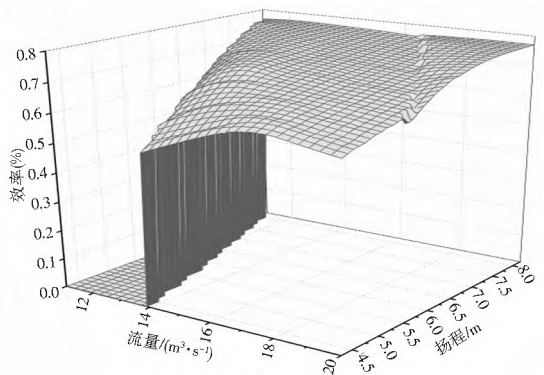


图 3 所有工况点下最优泵站系统效率

Fig. 3 Optimal efficiency of pump station system

under all working conditions

在图 3 中, 可以明显看到一段类似山谷的区域, 这个区域是 3 台水泵机组分配流量和 2 台水泵机组分配流量的分

界区,在这个区域的右侧,即扬程 8.2~5.5 m,流量 20~16.5 m<sup>3</sup>/s 围成的近似三角形区域内,3 台水泵机组分配流量效率较高,效率最低点出现在工况点(5.5 m, 19.9 m<sup>3</sup>/s)处,为 64.21%;效率最高点出现在工况点(7.8 m, 18.6 m<sup>3</sup>/s)处,为 77.25%。对应各工况点的流量分配基本都为平均分配,故不再赘述。因为在这个区域内,对应较高扬程时,机组平均分配到的流量较小,符合水泵  $Q \sim H$  曲线的规律,能使泵站内各水泵机组在较高效率下运行。如果在此区域内用 2 台水泵机组分配流量,则满足不了扬程的需求,故当泵站在此工况区域内运行时,应选用 3 台水泵机组分配流量更为高效。

相应于 3 台水泵机组分配流量的高效区,2 台水泵分配流量的高效区更广,除极小一块区域,泵站系统效率较低,在 52%~64% 之外,剩下大部分区域效率高达 64%~77%,流量分配也基本都为平均分配。这是因为当流量较大(如 20~19 m<sup>3</sup>/s 范围内),而扬程较低时(如 6~4.3 m 范围内),2 台机组平均分配的流量也较大,符合水泵  $Q \sim H$  曲线的规律,只要单泵工况点在高效区内,就可以保证水泵系统效率也较高;同理也可以解释流量较小而扬程较大时的情况;而当流量不大(15~13 m<sup>3</sup>/s),扬程也较小时(5.5~4.3 m),由于 2 台水泵机组平均分配的流量也小,扬程也低,偏离了水泵运行的高效区,导致泵站系统效率也偏低。从图 3 中还可以看出,对于流量更小,扬程更低的工况点,效率已经全部变为 0,因为此时单机组的工况点已经超出了各自正常运行的范围。这些工况点和效率较低的工况点认为是 2 台水泵机组进行流量分配时的不利工况点,泵站运行时应尽量避免在这些工况点运行。

### 3.3 不同机组流量分配的比较

在图 3 所示的分界区内,有一些工况点,在这些工况点上,既可以用 3 台水泵进行流量分配,也可以用 2 台水泵进行流量分配。下面对其中的一些点进行分析,比较两种分配方式的优劣,为泵站运行时选择方案提供依据。

表 5 不同机组流量分配效率对比

Tab. 5 Comparison of flow distribution efficiency of different units (%)

扬程 /m	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )									
	17.7	17.6	17.5	17.4	17.3	17.2				
8	77.1	74.5	77.1	74.7	77.1	74.8	77.0	74.9	77.0	75.0
7.9	77.2	75.5	77.1	74.6	77.1	74.7	77.1	74.8	77.1	74.9
7.8	77.2	74.4	77.1	74.5	77.1	74.6	77.1	74.7	77.0	74.8
7.7	77.0	74.1	77.0	74.2	77.0	74.3	76.9	74.4		
7.6	76.7	74.0	76.6	74.1	76.6	74.2	76.5	74.3		

在表 5 中,每一个流量值下方都对应有 2 列数字,左边一列为 3 台水泵机组流量分配时泵站系统效率,右边一列为 2 台水泵机组流量分配时泵站系统效率,可以看出 3 台机组流量分配时泵站系统效率更高,比 2 台水泵机组分配能提高 2% 左右。这是因为同样的流量由 3 台水泵机组进行分配时,每台水泵机组分配的流量较小,从图 1 可以看出,这时单台水泵机组的工况点更靠近高效点,从而使得泵站系统效率也更高。

## 4 结论

(1) 基于离散的泵站运行的工况点,考虑单台水泵机组运行的流量、扬程约束,得出了所有工况点下水泵机组流量分配的最优组合,以及相应的最优泵站系统效率和流量分配方案。

(2) 得出所有工况点下最优流量分配都为平均分配,随着泵站投入运行时间的增长,各水泵机组性能会发生一定变化,到时可以采用同样的思路计算最优流量分配方案。

(3) 针对西台上泵站的运行工况,得出了在可以由不同数量水泵机组进行流量分配的工况下,采取较多台水泵进行流量分配的方案效率更高的结论;后续工作可以针对泵站内不同机组流量分配展开更深入的研究,比如考虑单泵运行的高效区间对结果的影响,以期能够得到更具代表性的结论。

(4) 本文是基于离散的工况点建立泵站流量优化分配数学模型,当泵站运行工况点较多时,计算速度降低,影响模型的时效性,因此还需寻求更快、更合适的求解方法以提高计算速率,此外,离散的精度问题也值得进一步探讨。

(5) 本文是基于单级泵站进行的不同机组流量分配的优化研究,可将成果应用到多级泵站并联或串联运行的优化研究中,进一步讨论单泵站内和多级泵站间联合优化运行的研究方法。

### 参考文献(References):

- [1] 黄海田,仇宝云,颜红勤,等.多级调水-供水-蓄水结合泵站-渠道-湖库系统效率计算[J].水利水运工程学报,2008(4): 21-26. (HUANG Hai tian, QIU Bao yun, YAN Hong qin, et al. Efficiency computation of multi stage pumping station canal lake reservoir system for water transfer supply storage [J]. Hydr Science and Engineering, 2008(4): 21-26. (in Chinese))
- [2] 曹鸣,姚青云.梯级泵站优化调度研究进展[J].宁夏农学院学报,2004,24(4): 101-106. (CAO Ming, YAO Qing yun. Progress of studies on optimization operation for multi stage pumping station [J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 2004, 24(4): 101-106. (in Chinese))
- [3] 程吉林,张礼华,张仁田,等.泵站叶片可调单机组日运行优化方法研究[J].水利学报,2010,41(4). (CHENG Ji lin, ZHANG Li hua, ZHANG Ren tian, et al. Study on optimal daily operation of single adjustable blade pump unit in pumping station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4). (in Chinese))
- [4] 黄海田,仇宝云,马倩,等.基于系统理念对东线江苏境内一期工程进行调水效率研究的设想[J].南水北调与水利科技,2007,5(2): 3-5. (HUANG Hai tian, QIU Bao yun, MA Qian, et al. Perview on water diversion efficiency research in the first phase of the eastern route of south to north water diversion project in Jiangsu province based on system conception [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(2): 3-5. (in Chinese))
- [5] 刘家春,吴鹰.能耗最小法确定泵站经济运行方案[J].水泵技术,2005(2): 39-41. (LIU Jia chun, WU Ying. The determination of economic operation plan of pump stations based on minimum energy consumption method [J]. Pump Technology, 2005 (2): 39-41. (in Chinese))

(下转第 707 页)

- [3] 毛野. 初论采砂对河床的影响及控制[J]. 河海大学学报, 2000(28): 92-96. (MAO Ye. A study on the effect of sand & gravel extraction on riverbed and its control[J]. Journal of Hohai University, 2000(28): 92-96. (in Chinese))
- [4] 毛野, 黄才安. 采砂对河床变形影响的试验研究[J]. 水利学报, 2004(5): 64-69. (MAO Ye, HUANG Cai an. Experimental study on effect of sand mining on riverbed deformation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(5): 64-69. (in Chinese))
- [5] 王国栋, 杨文俊. 河道采砂对河道及涉水建筑物的影响研究[J]. 人民长江, 2013, 44(15): 69-72 (WANG Guo dong, YANG Wen jun. Research review on impact of sand mining on river channel and water involved structures[J]. Yangtze River, 2013, 44(15): 69-72. (in Chinese))
- [6] 乔飞, 孟伟, 张万顺, 等. 人工采砂对东江干流局部河段河床冲淤的影响研究[J]. 泥沙研究, 2014(2): 64-69. (QIAO Fei, MENG Wei, ZHANG Wan shun et al. Study on the effect of sand excavation on the local riverbed variation in the Dongjiang River[J]. Journal of Sediment Research, 2014(2): 64-69. (in Chinese))
- [7] 贾良文, 陆永军, 莫思平. 大量采砂对东江下游及东江三角洲河道低水位的影响[J]. 水利水运工程学报, 2006(3): 1-8. (JIAN Liang wen, LU Yong jun, MO Si ping. Study on the effect of sand excavation on the local riverbed variation in the Dongjiang River[J]. Hydro Science and Engineering, 2006(3): 1-8. (in Chinese))
- [8] 韩龙喜, 计红, 陆永军, 等. 河道采砂对珠江三角洲水情及环境影响分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 685-690. (HAN Long xi, JI Hong, LU Yong jun, et al. Impact of sand excavation in Pearl River delta on hydrology and environment[J]. Advances In Water Science, 2005, 16(5): 685-690. (in Chinese))
- [9] 肖洋, 张九鼎, 雷鸣, 等. 矩形采砂坑形态对明渠水位降低的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(6): 702-707. (XIAO Yang, ZHANG Ji u ding, LEI Ming, et al. Effect of rectangular sandpit on drawdown of open channel flow[J]. Journal of Hohai University, 2011, 39(6): 702-707. (in Chinese))
- [10] 张强, 张小峰. 采砂深度对分汊河道影响分析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2009, 5(3): 127-135. (ZHANG Qiang, ZHANG Xiao feng. Research on the effect of the sand mining depth in a braided channel[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2009, 5(3): 127-135. (in Chinese))
- [11] 张强, 张小峰. 采砂区布置对分汊河道的影响分析[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42(2): 153-157. (ZHANG Qiang, ZHANG Xiao feng. Analysis of effect of sand mining areas on braided channel[J]. Wuhan University: Engineering Journal, 2009, 42(2): 153-157. (in Chinese))
- [12] 唐洪武. 赣江三湖至南昌河段河床演变对航道影响分析及对策研究[R]. 南京: 河海大学, 2013. (TANG Hong Wu. Analysis and Countermeasures on the influence on navigation of bed evolution of Ganjiang River from Sanhu to Nanchang[R]. Nanjing: Hohai University. 2013. (in Chinese))
- (上接第 694 页)
- [6] 程吉林, 张礼华, 张仁田, 等. 泵站单机组变速运行优化方法研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 72-76. (CHENG Ji lin, ZHANG Li hua, ZHANG Ren tian, et al. Optimal methodology of single unit variable speed operation in pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 72-76. (in Chinese))
- [7] 贾仁甫, 金明宇, 王红, 等. 国内泵站优化调度研究的发展现状[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2006, 26(6): 96-99. (JIA Ren fu, JIN Ming yu, WANG Hong, et al. Present situation and development of optimal operation study of pumping station in China[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2006, 26(6): 96-99. (in Chinese))
- [8] 冯晓莉, 仇宝云, 杨兴丽, 等. 大型泵站运行优化方法及其应用[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 127-132. (FENG Xiao li, QIU Bao yun, YANG Xing li, et al. Optimal methods and its application of large pumping station operation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 127-132. (in Chinese))
- [9] 贾仁甫, 王红, 金明宇, 等. 调水工程中梯级泵站的优化调度研究[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2006, 9(2): 69-73. (JIA Ren fu, WANG Hong, JIN Ming yu, et al. Study on the optimal operation for multi stage pumping station in water delivery project[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2006, 9(2): 69-73. (in Chinese))
- [10] 汪安南, 伍杰. 大型轴流泵站最优运行方式探讨[J]. 农田水利与小水电, 1993, 11: 36-38. (WANG An nan, WU Jie. The discussion on optimal operation mode of large axial flow pump stations[J]. China Rural Water and Hydropower, 1993, 11: 36-38. (in Chinese))
- [11] 刘家春, 莫金平. 取水泵站经济运行转速的确定[J]. 水泵技术, 2003(2): 41-43. (LIU Jia chun, MO Jin ping. The determination of economic operation speed of water pump station[J]. Pump Technology, 2003(2): 41-43. (in Chinese))
- [12] 杨鹏, 纪晓华, 史旺旺. 基于遗传算法的泵站优化调度[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2001, 4(3): 72-74. (YANG Peng, JI Xiao hua, SHI Wang wang. Genetic algorithm in optimal operation of pumping station[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2001, 4(3): 72-74. (in Chinese))
- [13] 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, 2005(11): 27-32. (LONG Xin ping, ZHU Jin mu, LIU Mei qing, et al. Optimized dispatch of pumping stations based on performance curve surface fitting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005(11): 27-32. (in Chinese))
- [14] 桑国庆, 曹升乐, 郭瑞, 等. 基于分时电价的梯级泵站输水系统日优化运行[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(8): 688-695. (SANG Guo qing, CAO Dong sheng, GUO Rui, et al. Optimization of cost per day of cascade pumping station water delivery system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(8): 688-695. (in Chinese))
- [15] 桑国庆, 张林, 董庆杰, 等. 叶片全调节泵站抽水装置性能计算[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 14-17. (SANG Guo qing, ZHANG Lin, Dong Qing jie, et al. Calculation and research on pumping equipment performance of blade adjustment pump station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 14-17. (in Chinese))