

基于单机组试验选优的并联泵站群组合 优化运行算法研究

龚 懿,程吉林,刘静森

(扬州大学 水利与能源动力工程学院,江苏 扬州 225009)

摘要:以并联泵站群日提水耗电费用最少为目标,构建包含各时段泵站运行数、站内水泵开机数、水泵叶片安放角及机组转速4个决策变量的并联泵站群变角变速组合日优化运行数学模型,提出基于二级子系统试验选优的大系统二级分解动态规划聚合算法。通过将原模型进行二次分解,获得以单机组日提水耗电费用最少为目标,各时段水泵叶片安放角及机组转速为决策变量的单机组变角变速组合日优化运行数学模型,采用大系统试验选优法求解。进而通过一系列二级子系统不同提水要求下的优化计算,获得单机组日提水量与提水费用的一一对应关系,原模型即可转化为以并联泵站群日提水费用最少为目标、各机组日提水量为决策变量的聚合模型,并采用动态规划方法求解。该方法可进一步完善组合工况调节方式下并联泵站群优化运行理论,较由站内单工况优化运行下获得的并联泵站群优化运行效益更为显著。以典型并联泵站群为计算实例,优化结果表明:各日均扬程下满负荷、80%负荷、60%负荷优化运行单位费用较定角恒速运行分别平均节约8.41%、23.07%、32.79%。

关键词: 并联泵站群;组合优化;运行;大系统;试验选优;二级分解动态规划聚合;变角变速

中图分类号: TV 675 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015)02-0314-06

Study on optimal operation method for parallel pumping stations with combinational working condition adjustments based on experimental optimization for single pump unit

GONG Yi, CHENG Ji lin, LIU Jing sen

(School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Taking the minimal daily electric cost of parallel pumping stations as the objective function, the mathematical model of daily optimal operation for parallel pumping stations with adjustable blades and variable speeds was constructed with four decision variables, including the operation number of pumping stations, operation number of units in a single pumping station, blade angle, and unit speed. The two stage decomposition dynamic programming aggregation method based on the experimental optimization for the second stage sub model was proposed to solve the mathematical model. Through the two stage decomposition of the original model, the mathematical model of daily optimal operation for the single pump unit with adjustable blades and variable speeds were obtained. The second stage sub model took the minimal daily electric cost of the single pump unit as the objective function, the blade angle and unit speed in each time period as the decision variables, and was solved by the experimental optimization. After a series of optimization of the sub model under different water pumping quantities, the relationship between each water pumping quantity and the corresponding water pumping cost was obtained. Then the original model was transformed into the aggregation model of daily optimal operation for the parallel pumping stations with adjustable blades and variable speeds, and was solved by the one dimensional dynamic programming method. The proposed method can further improve the optimal operation theory of parallel pumping stations with various operation modes, and the operation benefit was more significant compared with that obtained from the optimal operation with a single operation mode. A study case using the optimization method showed that the unit cost of optimal operation under 100%, 80%, and 60% loads within the average daily heads can be reduced by 8.41%, 23.07%, and 32.79% compared with the operation with the fixed blade angle and constant speed.

Key words: parallel pumping stations; combinational optimization; operation; large scale system; experimental optimization; two stage decomposition dynamic programming aggregation; adjustable blade and variable speed

收稿日期: 2014-07-10 修回日期: 2015-02-04 网络出版时间: 2014-03-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150318.1544.008.html>

基金项目: 江苏省自然科学基金-青年基金项目(BK20130446); 2014年度扬州大学科技创新培育基金(2014CXJ026)

作者简介: 龚懿(1983-),男,江苏常熟人,讲师,主要从事水利水电工程管理决策理论及应用研究。E-mail: gongyi_8@163.com

并联泵站群作为跨流域梯级调水工程的“级点”，不仅承担向下级站群供水和级间水量分配任务，而且其运行过程也对级间输水河道水位变化产生影响，进而一定程度上影响上下级并联泵站群的提水扬程，制约梯级泵站群系统整体运行能耗。目前，国内外学者针对单站^[16]、梯级泵站群系统^[7-8]，构建了不同类型优化运行模型，采用适宜的优化算法求解，成果已相当丰富。笔者前期对并联泵站群多工况调节优化运行问题开展过初步研究^[9]，但其中的多工况仅指站群内各泵站间的不同工况，对单个泵站而言仍是单工况运行，即站内叶片全调节或站内变频变速优化运行，而目前关于单个泵站内叶片全调节与变频变速组合优化运行的并联泵站群优化运行问题鲜有成果。

本文在之前开展的单站变角^[10]、单站变速^[11]、单站变角变速组合优化运行^[12]、站内单工况调节方式下的并联泵站群优化运行^[9,13]方法研究的基础上，探索站内组合工况调节方式下的并联泵站群变角变速组合优化运行模型构建及求解方法研究，系统分析给定提水任务下获得的各泵站间水量优化分配关系，确定并联泵站群优化运行时机组优先开机原则，研究成果对进一步提高长距离跨流域梯级调水系统运行效益，降低输水系统运行能耗，具有重要的理论和现实意义。

1 并联泵站日优化模型与求解方法

首先做以下定义。

(1) 运行方式。在运行过程中，各阶段根据运行工况同时调节水泵叶片角度与机组转速，使之运行费用最低，称为叶片全调节与变频变速组合优化运行。定角恒速运行定义参见文献^[9]。

(2) 100% 负荷、80% 负荷、60% 负荷工作^[9]。

(3) 开机时刻与时段长度、峰谷电价组合^[14]。

1.1 并联泵站群变角变速组合优化运行数学模型

以并联泵站群日开机运行总耗电费用最少为目标函数，各时段泵站运行数、站内水泵开机数、水泵叶片安放角和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轴功率为约束条件，构建如下并联泵站群多机组日运行优化数学模型^[9]（以下称为原模型）。

目标函数：

$$F = \min \sum_{k=1}^{L_1} F_k = \min \left(\sum_{k=1}^{L_1} \sum_{j=1}^{L_2} \sum_{i=1}^{L_3} \rho g Q_{kji}(\theta_{kji}, n_{kji}) H_{kji} \Delta t_{ki} C_{ki} \right) \quad (1)$$

总水量约束：

$$\sum_{k=1}^{L_1} \sum_{j=1}^{L_2} \sum_{i=1}^{L_3} Q_{kji}(\theta_{kji}, n_{kji}) \Delta t_{ki} \geq V_e \quad (2)$$

功率约束：

$$P_{kji}(\theta_{kji}, n_{kji}) \leq P_{kj0} \quad (3)$$

式中： F 为并联泵站群日运行最少耗电费用，元； F_k 为第 k 座泵站日运行耗电费用，元； L_1 为并联泵站群的泵站座数； L_2 为单座泵站的机组台数，台； L_3 为 1 日划分的时段数； ρ 为水密度， kg/m^3 ； g 为重力加速度， m/s^2 ； $Q_{kji}(\theta_{kji}, n_{kji})$ 为第 k 座泵站内第 j 台机组、第 i 时段，对应于叶片安放角 θ_{kji} 及机组转速 n_{kji} 的流量， m^3/s ； H_{kji} 为第 k 座泵站内第 j 台机组、第 i 时段的时均扬程， m ； Δt_{ki} 为第 k 座泵站第 i 时段的时段长， h ； C_{ki} 为第 k 座泵站第 i 时段的峰谷电价，元/（ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ）； η_{kji} ，

$\eta_{m\alpha, kj}$ ， $\eta_{m\alpha, kj}$ ， $\eta_{f, kj}$ 分别为第 k 座泵站内第 j 台机组的水泵效率、电动机效率、传动效率和变频装置效率，具体说明参见文献^[9, 15]； V_e 为上级管理部门下达的日提水总量， m^3 ； P_{kji} （ θ_{kji} ， n_{kji} ）为第 k 座泵站内第 j 台机组、第 i 时段对应叶片安放角 θ_{kji} 及机组转速 n_{kji} 的实际功率， kW ，应小于电动机额定功率 P_{kj0} 。

1.2 二级分解 动态规划聚合方法

1.2.1 大系统二级分解

根据大系统模型二级分解方法^[9]，原模型可分解为 $L_1 \times L_2$ 个单机组变角变速组合优化运行数学模型，即式（4）-（6），以下称为分解模型，该二级子系统以单机组日提水耗电费用最少为目标，各时段水泵叶片安放角和机组转速为决策变量。

目标函数：

$$F_j = \min \sum_{i=1}^{L_3} F_{ji} = \sum_{i=1}^{L_3} \frac{\rho g Q_{ji}(\theta_{ji}, n_{ji}) H_{ji} \Delta t_i C_i}{\eta_{m\alpha, j} \eta_{f, j}} \quad (4)$$

总水量约束：

$$\sum_{i=1}^{L_3} Q_{ji}(\theta_{ji}, n_{ji}) \Delta t_i \geq V_j \quad (5)$$

功率约束：

$$P_{ji}(\theta_{ji}, n_{ji}) \leq P_{j0} \quad (6)$$

1.2.2 二级子系统动试验选优优化

与文献^[9]不同的是，分解模型包含 2 个决策变量：叶片安放角 θ_i 和机组转速 n_i ，可采用各时段叶片安放角试验选优、机组转速动态规划优化的大系统试验选优法^[16]求解，获得给定目标提水量 V_j 的最小提水费用 F_j ，以及对应的单机组日优化运行方案。

考虑站内机组型号相同且无性能差异，而站间不同，因此每座泵站各有一组水泵性能曲线^[9]；进而对该泵站内的单个机组 1 日最大提水能力（即各时段最大流量运行时的提水总量） $V_{j\max}$ 按一定步长进行离散，采用上述二级子系统试验选优法分别计算单机组对应不同提水量 V_{jm} （ $m = 1, 2, \dots, \max$ ）下的最少提水费用 F_{jm} ，并保存对应的单机组日优化运行方案。同一泵站只需进行一组单机组变角变速组合日优化运行模型求解，从而整个并联泵站群只需进行 L_1 组单机组变角变速组合日优化运行模型求解。

1.2.3 大系统动态规划聚合

通过上述不同目标提水量下的二级子系统优化，可得一系列 $V_{jm} - F_{jm}$ （ V_{jm} ）关系（ $k = 1, 2, \dots, L_1; j = 1, 2, \dots, L_2; m = 1, 2, \dots, \max$ ），则原模型可转化为如下聚合模型^[9]：

目标函数：

$$F = \min \sum_{k=1}^{L_1} \sum_{j=1}^{L_2} F_{kj}(V_{kj}) \quad (7)$$

水量约束：

$$\sum_{k=1}^{L_1} \sum_{j=1}^{L_2} V_{kj} \geq V_e \quad (8)$$

功率约束：

$$P_{kji}(\theta_{kji}, n_{kji}) \leq P_{kj0} \quad (9)$$

考虑到并联泵站群各泵站进出水河道往往相同，故日均提水扬程可考虑基本相同，可将 L_1 座泵站看做一个安装 L_4 台机组的虚拟泵站（ $L_4 = L_2 \times L_1$ ），则该聚合模型是以各机组

日提水量 $V_n (n= 1, 2, \dots, L_4)$ 为决策变量, 机组编号 n 为阶段变量, 前 n 台机组提水总量 λ_n 为状态变量的一维动态规划模型, 其中决策变量的离散范围即为二级子系统优化时的目标水量离散范围 $V_{ijm} (m= 1, 2, \dots, \max)$ 。采用动态规划法求解该模型^[7], 可获得满足原模型目标提水总量 V_e 的最小提水费用 F , 以及对应于 F 的各泵站内各机组最优提水水量组合 $V_n^* (n= 1, 2, \dots, L_4)$ 。

通常, 采用动态规划法求解模型时, 状态变量 λ 的离散步长越小, 模型求解精度越高, 但状态变量个数也就越多, 导致模型求解时间较长。聚合模型的状态变量 λ 指前 n 台机组提水总量, 由于决策变量(即各单机组日提水量 V_n^*)已在

其最大提水日能力下离散, 是确定值, 故状态变量的离散步长大小已无实际意义, 可直接离散为各机组提水量离散值的所有组合值, 既节约了模型计算时间, 又不影响模型求解精度, 此为对一维动态规划模型求解方法的一定改进。

在获得各机组最优提水量组合 $V_n^* (j= 1, 2, \dots, L_4)$ 后, 根据二级子系统优化成果, 回查可得到各水泵机组的 1 日最优开机方式, 亦可获得各站间水量的优化分配结果。

2 实例分析

2.1 计算实例基本情况

某并联泵站群由 2 座泵站构成, 各站基本情况见表 1。

表 1 典型并联泵站群各泵站机组基本参数

Tab. 1 Basic information of No. 1 and No. 2 pumping stations

泵站编号	水泵数/台套	叶轮直径 D/mm	额定转速 n $/(r \cdot \text{min}^{-1})$	额定叶片角 β $/(^{\circ})$	配套功率 N_0 $/\text{kW}$	调节范围	
						$\theta(^{\circ})$	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$
1 号	4(其中 1 台备用)	2 900	150	0	3 500	(- 4, + 4)	(130, 160)
2 号	8(其中 1 台备用)	1 640	250	0	1 500	(- 4, + 4)	(190, 270)

考虑 1 号站和 2 号站分别在额定转速 150 r/min 及 250 r/min 下, 各自离散 - 4、- 2、0、+ 2、+ 4 五种叶片安放角, 对应的水泵装置性能曲线拟合公式如表 2、表 3 所示。

表 2 转速 150 r/min 时 1 号泵站不同叶片安放角水泵性能方程

Tab. 2 Performance equations of No. 1 pumping station under different blade angles with the constant speed of 150 r/min

$\theta(^{\circ})$	性能曲线名称	性能曲线方程
- 4	$H \sim Q$ 曲线	$H = - 0.0098Q^2 + 0.2091Q + 6.3404$
	$\eta \sim Q$ 曲线	$\eta = - 0.0104Q^3 + 0.4722Q^2 - 2.8754Q + 10.82$
- 2	$H \sim Q$ 曲线	$H = - 0.0136Q^2 + 0.4761Q + 2.8099$
	$\eta \sim Q$ 曲线	$\eta = - 0.0136Q^3 + 0.8549Q^2 - 14.548Q + 108.08$
0	$H \sim Q$ 曲线	$H = - 0.0107Q^2 + 0.36Q + 4.2028$
	$\eta \sim Q$ 曲线	$\eta = - 0.0122Q^3 + 0.8193Q^2 - 14.765Q + 107.83$
+ 2	$H \sim Q$ 曲线	$H = - 0.0119Q^2 + 0.5079Q + 1.4554$
	$\eta \sim Q$ 曲线	$\eta = - 0.0154Q^3 + 1.216Q^2 - 28.84Q + 254.57$
+ 4	$H \sim Q$ 曲线	$H = - 0.0132Q^2 + 0.6449Q - 1.0705$
	$\eta \sim Q$ 曲线	$\eta = - 0.0179Q^3 + 1.5546Q^2 - 41.962Q + 404.11$

表 3 转速 250 r/min 时 2 号泵站不同叶片安放角水泵性能方程

Tab. 3 Performance equations of No. 2 pumping station under different blade angles with the constant speed of 250 r/min

$\theta(^{\circ})$	性能曲线名称	性能曲线方程
- 4	$H \sim Q$ 曲线	$H = - 0.0748Q^2 + 0.221Q + 11.361$
	$\eta \sim Q$ 曲线	$\eta = - 0.2628Q^4 + 9.6621Q^3 - 133.2Q^2 + 816.75Q - 1812.8$
- 2	$H \sim Q$ 曲线	$H = - 0.0739Q^2 + 0.3732Q + 10.486$
	$\eta \sim Q$ 曲线	$\eta = - 0.2687Q^4 + 10.247Q^3 - 146.17Q^2 + 926.05Q - 2133.9$
0	$H \sim Q$ 曲线	$H = - 0.1095Q^2 + 1.353Q + 4.8545$
	$\eta \sim Q$ 曲线	$\eta = - 0.0785Q^4 + 2.9199Q^3 - 41.085Q^2 + 262.59Q - 585.08$
+ 2	$H \sim Q$ 曲线	$H = - 0.117Q^2 + 1.716Q + 2.4009$
	$\eta \sim Q$ 曲线	$\eta = - 0.0961Q^4 + 3.9453Q^3 - 61.158Q^2 + 427.06Q - 1073.6$
+ 4	$H \sim Q$ 曲线	$H = - 0.1183Q^2 + 2.0006Q - 0.1317$
	$\eta \sim Q$ 曲线	$\eta = 0.0302Q^4 - 1.6587Q^3 + 31.949Q^2 - 257.81Q + 800.44$

扬程 H_m 变幅较小, 可认为其基本不变。假定最小日提水扬程 3.13 m, 最大日提水扬程 4.53 m, 并以 0.2 m 步长离散成

依据相似定律, 假定效率不变, 分别对 1 号站转速 150 r/min 和 2 号站转速 250 r/min 时各叶片安放角度下水泵性能曲线方程进行相似性换算, 可获得不同转速下对应的水泵性能曲线方程。以叶片安放角度 θ 为例, 根据相似律 $H_1 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 H_2$ 和 $Q_1 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) Q_2$, 则有:

1 号站: [130, 160]

$$H(n) = - 0.0107Q^2 + 0.36\left(\frac{n}{150}\right)Q + 4.2028\left(\frac{n}{150}\right)^2$$

$$\eta(n) = - 0.0122\left(\frac{150}{n}\right)^3 Q^3 + 0.8193\left(\frac{150}{n}\right)^2 Q^2 -$$

$$14.765\left(\frac{150}{n}\right)Q + 107.83$$

2 号站: [190, 270]

$$H(n) = - 0.0195Q^2 + 1.353\left(\frac{n}{250}\right)Q + 4.8545\left(\frac{n}{250}\right)^2$$

$$\eta(n) = - 0.0785\left(\frac{250}{n}\right)^4 Q^4 + 2.9199\left(\frac{250}{n}\right)^3 Q^3 -$$

$$41.085\left(\frac{250}{n}\right)^2 Q^2 + 262.59\left(\frac{250}{n}\right)Q - 585.08$$

考虑泵站群上、下游输水河道均有足够大容积, 故日均

8种日均扬程。在各日均扬程下,分别考虑定角恒速运行时的满负荷、80%负荷及60%负荷水量作为优化目标水量,采用基于二级子系统试验选优的大系统二级分解动态规划聚合方法求解原模型,分别计算各日均扬程、不同水量约束下并联泵站群变角变速组合日优化运行最小提水费用及对应的单位提水费用。

2.2 组合日优化运行结果

由上述方法可得不同日均扬程 H_m (3.13~4.53 m)、不同提水负荷(100%、80%、60%)、不同峰谷电价时,1号、2号并联泵站群多机组组合工况优化运行不同负荷下的单位提水费用 f (图1),以及对应各方案较定角恒速运行单位费用节省幅度 σ (图2)。

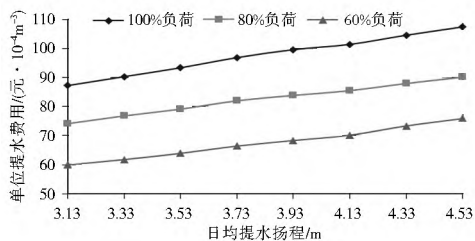


图1 1号、2号并联泵站日优化运行单位提水费用

Fig.1 Unit cost of water pumping with the optimal daily operation for No.1 and No.2 parallel pumping stations

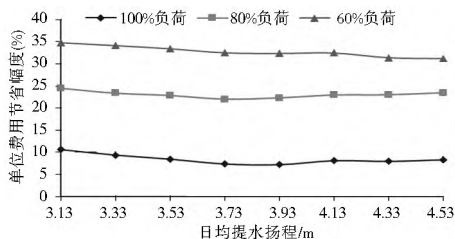


图2 1号、2号并联泵站日优化运行较定角恒速运行单位费用节省幅度

Fig.2 Cost saving percentage of optimal daily operation compared with that with the fixed blade angle and constant speed for No.1 and No.2 parallel pumping stations

选取3种典型日均扬程及提水负荷组合:日均扬程3.53 m、100%负荷,日均扬程4.13 m、80%负荷,日均扬程4.53 m、60%负荷,各机组日优化提水量分配见图3,并联泵站各泵站机组日优化运行方案见表4。

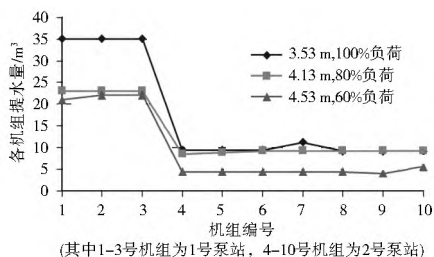


图3 典型扬程及负荷下1号、2号并联泵站日运行各机组水量优化分配

Fig.3 Optimal allocation of water quantity of each pump unit for No.1 and No.2 parallel pumping stations under the typical average daily head and operation load

计算结果表明,满负荷、80%负荷、60%负荷下,各日均扬程下1号、2号并联泵站群日优化运行平均单位提水费用分别为97.57元/10⁴ m³、82.44元/10⁴ m³、67.49元/10⁴ m³,较定角恒速运行分别平均节约8.41%、23.07%、32.79%。

由图3可以看出,1号泵站机组单机设计流量较高,虽然水泵机组安装台数较2号站少,但在并联泵站中承担了50%以上的提水量;同时,1号泵站站内各机组间水量分配较2号泵站更为均衡,1号站内各机组水量分配差不超过5%。

由表4可以看出,在不同提水扬程及提水负荷下,机组各时段转速绝大多数均处于满足配套功率要求下的最大转速,而水泵叶片安放角是主要基于峰谷电价下的调节。可见,并联泵站群多机组变角变速组合优化运行时,可优先考虑调节机组转速。此外,3种典型扬程与负荷组合下,1号泵站站内各机组在同一时段的优化叶片安放角和机组转速组合基本一致(仅在4.53 m、60%负荷时机组1有3个时段与其他机组不同);2号泵站站内各机组同一时段提水流量差异有所增加,但机组同时段流量差异个数不超过总数的8%。总体来讲,1号、2号泵站站内各机组同一时段内提水流量都较为均衡。

3 结论

针对站内采用叶片全调节和变频编组组合运行的并联泵站群系统,提出基于二级子系统试验选优的大系统二级分解动态规划聚合方法,用于求解并联泵站群变角变速组合日优化运行数学模型,可获得较站内单工况调节的并联泵站群优化运行更好的优化效益,进一步完善了并联泵站群优化运行理论方法。该方法也适用于求解相同类型具有4个决策变量且阶段明显的复杂非线性数学模型。

本文在对聚合模型进行动态规划聚合求解时,状态变量直接离散为决策变量的所有组合值,避免因状态变量离散步长过小导致模型求解耗时较长的问题,又不影响模型求解精度,提高了模型求解的可操作性。

考虑峰谷分时电价的影响,通过典型泵站的计算分析,可建立一套不同日均扬程及提水负荷要求下的并联泵站群多机组变角变速组合日运行优化调度方案,供泵站管理部门借鉴与参考,也为开展梯级泵站群级间优化运行研究提供支持。

参考文献(References):

[1] 袁尧,刘超.基于蚁群算法的泵站运行优化及投影寻踪选优策略[J].农业机械学报,2013,44(3):38-44. (YUAN Yao, LIU Chao. Pump operation optimization and projection pursuit evaluation strategy based on ant colony optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 38-44. (in Chinese))

[2] Moutasim 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.

[3] I Sele, J G Bene, C Hos. Optimal (short term) pump schedule detection for water distribution systems by neutral evolutionary search[J]. Applied Soft Computing Journal, 2012, 12(8): 2336-

表 4 考虑峰谷电价、典型扬程及提水负荷时并联泵站群日优化运行方案

Tab. 4 Optimal operation schemes under the typical daily average head and operation load considering the peak valley electricity prices for the parallel pumping stations

典型方案	泵站编号	机组编号	调节参数	时段编号								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9
日均扬程 3.53 m, 100% 负荷	1 号	机组 1	$\theta(^{\circ})$	0	0	0	+ 4	+ 4	0	0	0	0
			$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	160	160	160	160	160	160	160	160	160
		机组 2	$\theta(^{\circ})$	0	0	0	+ 4	+ 4	0	0	0	0
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$		160	160	160	160	160	160	160	160	160	
	机组 3	$\theta(^{\circ})$	0	0	0	+ 4	+ 4	0	0	0	0	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	160	160	160	160	160	160	160	160	160	
	2 号	机组 4	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	+ 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	+ 4
			$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270			270	270
		机组 5	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	+ 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	+ 4
			$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270			270	270
机组 6		$\theta(^{\circ})$	停机	停机	+ 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	+ 4	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270			270	270	
机组 7		$\theta(^{\circ})$	停机	- 4	+ 4	+ 4	+ 4	停机	- 4	+ 4	+ 4	
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$		270	270	270	270		270	270	270		
	机组 8	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	- 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	+ 4	
$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$				270	270	270			270	270		
机组 9	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	- 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	+ 4		
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270			270	270		
机组 10	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	- 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	+ 4		
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270			270	270		
日均扬程 4.13 m, 80% 负荷	1 号	机组 1	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	0	+ 4	+ 4	停机	停机	0	0
			$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			160	160	160			160	160
		机组 2	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	0	+ 4	+ 4	停机	停机	0	0
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$				160	160	160			160	160	
	机组 3	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	0	+ 4	+ 4	停机	停机	0	0	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			160	160	160			160	160	
	机组 4	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	- 4	+ 4	+ 4	停机	停机	- 4	+ 4	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			250	270	270			270	270	
	机组 5	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	+ 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	- 4	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270			270	270	
机组 6	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	+ 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	+ 4		
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270			270	270		
2 号	机组 7	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	+ 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	+ 4	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270			270	270	
	机组 8	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	+ 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	+ 4	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270			270	270	
机组 9	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	+ 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	+ 4		
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270			270	270		
机组 10	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	+ 4	+ 4	+ 4	停机	停机	+ 4	+ 4		
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270			270	270		
日均扬程 4.53 m, 60% 负荷	1 号	机组 1	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	0	0	0	停机	停机	0	0
			$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			160	160	160			160	160
		机组 2	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	- 2	+ 4	+ 2	停机	停机	0	0
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$				160	160	160			160	160	
	机组 3	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	- 2	+ 4	+ 2	停机	停机	0	0	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			160	160	160			160	160	
	机组 4	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	停机	+ 4	+ 2	停机	停机	停机	停机	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$				270	270					
	机组 5	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	停机	+ 4	+ 2	停机	停机	停机	停机	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$				270	270					
机组 6	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	停机	+ 4	+ 2	停机	停机	停机	停机		
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$				270	270						
2 号	机组 7	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	停机	+ 4	+ 2	停机	停机	停机	停机	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$				270	270					
	机组 8	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	停机	+ 4	+ 2	停机	停机	停机	停机	
		$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$				270	270					
机组 9	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	停机	+ 4	- 4	停机	停机	停机	停机		
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$				270	270						
机组 10	$\theta(^{\circ})$	停机	停机	0	+ 4	+ 4	停机	停机	停机	停机		
	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$			270	270	270						

2351.

[4] Rasoulzadeh Ghanbdousti Solmaz, Haddad Omid Bozorg, Maril'o Miguel A. Optimal design and operation of pumping stations

sing NLP GA[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management, 2011, 164(4): 163-171.

[5] Chad Wegley, Muzaffar Eusuff, Kevin Lansey. Determining pump

- operations using particle swarm optimization[J]. Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management, 2004(104): 1-6.
- [6] D R Broad, H R Maier, G C Dandy. Optimal operation of complex water distribution systems using meta models[J]. Journal of water resources planning and management, 2010(7): 433-443.
- [7] 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 Guoqing, CAO Shengle, 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))
- [8] 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 Jiumu, 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))
- [9] 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 Ren Tian, 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))
- [10] 龚懿, 程吉林, 张仁田, 等. 泵站多机组叶片全调节优化运行分解-动态规划聚合方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 27-31. (GONG Yi, CHENG Jilin, ZHANG Ren Tian, et al. Study of optimal operation method on multiple pump units with adjustable blade for single pumping station based on decomposition dynamic programming aggregation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 27-31. (in Chinese))
- [11] 龚懿, 程吉林, 张仁田, 等. 淮阴三站变频变速优化运行的分解-动态规划聚合方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 79-83. (GONG Yi, CHENG Jilin, ZHANG Ren Tian, 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, 2011, 27(3): 79-83. (in Chinese))
- [12] 龚懿, 程吉林, 张仁田, 等. 泵站变角变速组合优化运行算法[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 496-500. (GONG Yi, CHENG Jilin, ZHANG Ren Tian, et al. Algorithm of optimal operation with adjustable blade and variable speed for pumping station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(6): 496-500. (in Chinese))
- [13] GONG Yi, CHENG Jilin, ZHANG Ren Tian, 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 & Computing Technologies in Agriculture, 2010. 10. 22-25, 554-562, 2011.
- [14] 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 Ren Tian, et al. Study on optimal day operation of single adjustable blade pump unit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 499-504. (in Chinese))
- [15] 程吉林, 张仁田, 邓东升, 等. 南水北调东线泵站变速运行模式的适应性[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 434-438. (CHENG Jilin, ZHANG Ren Tian, DENG Dongsheng, et al. Adaptability research of optimal operation mode with variable frequency drives for pumping stations in China's Eastern Route Project of S to N Water Diversion[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 434-438. (in Chinese))
- [16] 程吉林, 张礼华, 张仁田, 等. 泵站单机组叶片调节与变频变速组合日运行优化方法研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 217-222. (CHENG Jilin, ZHANG Lihua, ZHANG Ren Tian, et al. Study on optimal method of combination operation of adjustable blade with variable speed for single pump unit[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 217-222. (in Chinese))
- [17] Cooper L, Cooper M W. Introduction to Dynamic Programming[M]. New York: Pergamon Press, 1981.
- [18] 仇锦先, 程吉林, 张仁田, 等. 基于时空组合动态规划的分解协调模型在并联泵站群优化中的运用[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 183-188. (QIU Jinxian, CHENG Jilin, ZHANG Ren Tian, et al. Application of decomposition coordination model on dynamically programmed space-time combination to operation optimization of parallel pumping stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(6): 183-188. (in Chinese))