考虑河道输水损失的大型泵站系统运行优化

冯晓莉，仇宝云※
（扬州大学水利与能源动力工程学院，扬州 225127）

摘　要：大型泵站前池水位变化频繁且变化幅度较大时，机组经常偏离高效区运行，造成能源浪费。泵站系统中除了主机组、辅助设备和输变电设施消耗能量外，河道的输水水量损失和水力损失也综合成泵站所抽提水体的水能损失，进而影响泵站的运行性能。根据水源水位变化，在调水目的地水位一定的情况下，考虑河道输水水力损失与水量损失，首先分别确定调水目的地需要流量与泵站抽水扬程、抽水流量之间的关系，避免了优化计算过程中水位的重复迭代，极大减小了计算量与计算时间。以长江三江营最大潮差、平均潮差、最小潮差 3 个典型日为例，在南水北调东线淮安站站下水位及需要流量一定的情况下，以系统日运行费用最少为优化目标，建立优化模型，并采用模拟退火-粒子群算法（SA-PSO，simulated annealing- particle swarm optimization）求解，计算结果表明，与水泵设计角度运行方案相比，泵站系统实施变角优化运行，其运行费用可分别节约 0.62%～2.26%、0.33%～3.26%和 0.22%～0.83%。

关键词：水；损失；优化；大型泵站系统；运行；输水
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.005
中图分类号：TV675　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1002-6819(2015)-17-0035-07
冯晓莉，仇宝云. 考虑河道输水损失的大型泵站系统运行优化[J]. 农业工程学报，2015，31(17)：35－41.
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.005　　http://www.tcsae.org
Feng Xiaoli, Qiu Baoyun. Optimal operation for large pumping station system based on water transferring losses of river[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 35－41. (in Chinese with English abstract)　　doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.005　　http://www.tcsae.org

0　引　言

大型泵站运行时消耗大量的能源，尤其对于前池水位变化频繁且幅度较大的泵站，机组经常偏离高效区运行，导致能源浪费。对于大型泵站（群）优化运行问题，现有研究主要是根据给定的泵站上、下游水位或扬程，采用各种优化算法确定机组运行方案。冯晓莉等[1]采用退火遗传算法研究了并联泵站主机组运行优化方案。袁尧等[2-3] 采用蚁群算法分别确定了泵站单机组与多机组运行优化方案。Bagirov 等[4]以水泵运行费用最低为目标，采用 Hooke-Jeeves 直接搜索算法确定输水系统水泵运行调度方案。Puleo 等[5]将流量作为决策变量，采用线性规划法确定水泵日运行方案，同时采用混合离散动态变维搜索进行验证。Ghaddar 等[6]提出混合整数非线性规划法研究系统中水泵运行控制问题，采用拉格朗日分解法求解，节能效果显著。Zhang Zijun 等[7]、Behandish 等[8]采用神经网络法建立水泵优化模型，分别采用粒子群算法和遗传算法求解。Tang Yulin 等[9]采用粒子群算法研究了泵站机组开机组合切换与运行时间优化问题。

考虑河道输水的梯级泵站运行优化问题已有相关研究[10-11]。梁兴等[12]以流量平衡为基础，建立以梯级泵站耗电电费最小为目标的优化调度模型，采用基于免疫思想的粒子群算法求解。龚懿等[13]考虑级间输水河道特点，采用大系统二级分解－动态规划聚合与河网非恒定流模拟相结合的逐次逼近选优策略，研究梯级泵站群整体优化运行下的级间输水河道水位优化。桑国庆等[14]研究了梯级泵站输水系统运行效率优化模型，提出了梯级间水力损失对运行效率的影响不可忽视。Zhang Rui 等[15]提出了多精英粒子群优化算法以及处理等式约束、不等式约束的新方法，求解了多级水电站的运行优化。文献[16]采用退火遗传算法研究了双线输水并联泵站优化运行问题，但考虑因素不够全面，同时由于直接将水位迭代放入优化算法寻优过程中，程序运行时间较长。

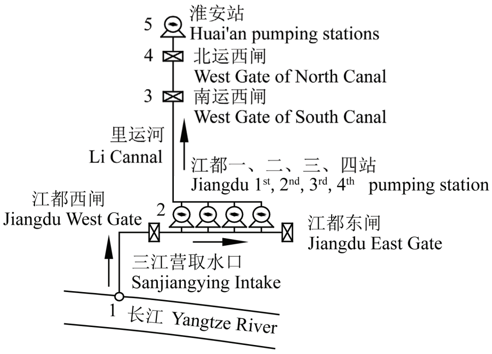
大型泵站系统优化范围与考虑的因素越全面，节能与节约电费效果越显著[17]。因此，需要将输水设施纳入泵站系统范围内，根据水源水位变化，推求泵站下游水位，同时根据可控制调节的目的地水位确定泵站上游水位，进而得出泵站运行扬程，再以此确定泵站机组的运行方案。本文以南水北调东线长江至淮安站站下的泵站系统为研究对象，综合考虑泵站主机组、辅助设备、输变电设施以及输水河道等设施的能耗，采用模拟退火－粒子群算法（SA-PSO，simulated annealing- particle swarm optimization）求解确定系统优化运行方案。

1　工程概况

南水北调东线长江至淮安站段输水系统，从长江三江

收稿日期：2015-05-11　　修订日期：2015-08-03
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51079125)；江苏省自然科学基金资助项目（BK20130448）；江苏省高校自然科学基金项目（13KJB570004）
作者简介：冯晓莉，女，江苏仪征人，副教授，博士，硕士生导师，主要从事泵站系统运行优化研究。扬州　扬州大学水利与能源动力工程学院，225127。Email：fxlyzdx821@sina.com
※通信作者：仇宝云，男，江苏扬州人，教授，博士，博士生导师，主要从事泵站可靠性与系统运行优化研究。扬州　扬州大学水利与能源动力工程学院，225127。Email：yzdxqby@sohu.com

营引水，经夹江、芒稻河至江都西闸，江都站抽水入里运河北送至淮安站下，如图 1 所示。系统主要由江都 4 座并联泵站群、输变电设施、输水河道及相关的水闸等组成。



注：→表示水流方向；数字 1、2、3、4、5 为计算节点，分别表示三江营取水口、江都站、南运西闸、北运西闸和淮安站。

Note: →represents water flow direction; the number 1, 2, 3, 4, 5 are computational nodes, which represent Sanjiangying intake, Jiangdu pumping stations, West Gate of South Canal, West Gate of North Canal and Huai'an pumping station.

图 1　大型泵站系统输水示意图

Fig. 1　Water transfer diagram of large pumping stations

江都 4 座并联泵站共安装立式全调节水泵机组 33 台套，装机流量 508.2 m^3/s，装机容量 55 800 kW，开机运行方案需要根据泵站上、下游水位与需要流量来确定。各座泵站主水泵型号及相关参数如表 1 所示。

表 1　江都站泵型及相关参数

Table 1　Pump types and parameters for Jiangdu pumping stations

泵站名称 Station name	泵型 Pump type	设计流量 Design discharge $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	设计扬程 Design head H_z/m	装机台数 Installing number
一站 1st station	1.75ZLQ-7	10.2	6.0	8
二站 2nd station	1.75ZLQ-7	10.2	6.0	8
三站 3rd station	2000ZLQ13.5-8	13.5	7.8	10
四站 4th station	2900ZLQ30-7.8	30.0	7.8	7

各段输水河道输水损失计算相关参数如表 2 所示，其中，河道水面蒸发量与气温、空气相对湿度、风速等时空分布有关，表中蒸发量数据为根据工程沿线区域多年月平均统计资料得出的春季平均蒸发量。

表 2　输水河道相关参数

Table 2　Parameters of water line

节点 Nodes	河段长度 Length of river L/km	河道底宽 Bottom width of river b/m	河底高程 Bottom elevation of river h/m	边坡系数 Slope factor m	糙率 Roughness n	土壤透水性 Soil permeability C	蒸发量 Evaporation capacity q_z/mm
节点 1-2 Node 1-2	22.40	60	-7.0	3	0.0225	0.0014	210.3
节点 2-3 Node 2-3	75.00	100	1.0	3	0.0225	0.0014	214.6
节点 3-4 Node 3-4	33.15	70	2.0	3	0.0225	0.0014	219.5
节点 4-5 Node 4-5	18.70	70	2.0	3	0.0225	0.0014	223.0

一站、二站、三站共用 1 台 40 000 kVA 主变压器，四站单独设置 1 台 31 500 kVA 主变压器。主变压器高压侧输电架空电缆长度约为 7 km，低压侧至一、二、三、四站输电电缆长度约为 231、251、220 和 462 m。各站均设置供水泵、排水泵、通风机、压力油泵、真空泵、励磁以及照明等辅助设备。

2　数学模型建立与求解

2.1　数学模型建立

在水源长江三江营水位 z_0、调水目的地淮安站站下水位 z_1 以及抽水流量 Q_1 一定的情况下，以系统总运行费用 F 最少为目标，建立如下数学模型：

目标函数：

$$F=\min\sum_{i=1}^{4}\left(\frac{\rho\cdot g\cdot Q_i\cdot H_z\cdot n_i}{1000\ \eta_{zi}\cdot\eta_{\mathrm{dr}i}\cdot\eta_{\mathrm{mot}i}}+P_{\mathrm{zn}i}+\Delta P_{\mathrm{te}i}+\Delta P_{\mathrm{b}i}\right)\cdot p\cdot\Delta T \tag{1}$$

约束条件：水源水位 z_0、目的地水位 z_1 及抽水流量 Q_1 约束、输水河道不同断面的水位 $z(x)$和流量约束 $Q(x)$，泵站单机流量及开机台数约束，即

$$\begin{cases} z_0=\text{给定值} \\ z_1=\text{给定值；}\ Q_1=\text{给定值} \\ \sum_{i=1}^{4}Q_i\cdot n_i-q_{\mathrm{s}}-q_{\mathrm{z}}=Q_1 \\ z(x)\leqslant z_{\max}(x)\ ;\ Q(x)\leqslant Q_{\max}(x) \\ Q_{i,\min}\leqslant Q_i\leqslant Q_{i,\max} \\ n_i\leqslant M_i \end{cases} \tag{2}$$

式中：i 为泵站编号，i=1，2，3，4，分别表示江都一、二、三、四站；ρ 为水体密度，kg/m^3；g 为重力加速度，m/s^2；Q_i 为 i 泵站单机抽水流量，m^3/s；H_z 为泵装置扬程，m；n_i 为 i 泵站开机台数；η_{zi} 为 i 泵站泵装置效率；$\eta_{\mathrm{dr}i}$ 为 i 泵站机组传动效率；$\eta_{\mathrm{mot}i}$ 为 i 泵站电动机效率；$P_{\mathrm{zn}i}$ 为 i 泵站站用电能耗，kW，其值与泵站辅助设备设置与运行情况有关；$\Delta P_{\mathrm{te}i}$ 为 i 泵站输电能耗，kW，其值与泵站运行情况和总功率有关；$\Delta P_{\mathrm{b}i}$ 为 i 泵站变压器能耗，kW，其值与泵站运行情况和总功率有关；p 为电价，元/(kW·h)；ΔT 为时段长，h；q_{s} 为河道输水渗漏流量，m^3/s；q_{z} 为河道输水蒸发流量，m^3/s；$Q_{\max}(x)$为输水河道允许最大流量，m^3/s；$z_{\max}(x)$为输水河道允许最高水位，m；$Q_{i,\min}$、$Q_{i,\max}$ 为 i 泵站允许的最小、最大单机抽水流量，m^3/s；M_i 为 i 泵站装机台数。

2.2 模型求解

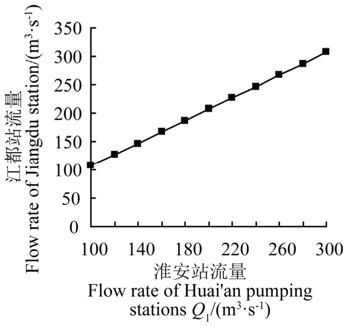
2.2.1 泵站流量、扬程与需要流量的关系确定

在泵站系统运行优化计算中，需要考虑输水河道的水量损失和水力损失，从而确定河道始、末端水位和流量。根据流体力学中的能量守恒方程，若已知河道末端水位和流量、河道参数情况，可求得河道始端水位和流量；或者若已知河道始端水位、末端流量和河道参数情况，可求得河道始端流量和末端水位。因此，当淮安站下（调水目的地）水位及流量一定（已知）时，以淮安站站下为终点，计算输水河道的水量损失和水力损失，可逆向推算得到江都站站上水位及流量；再根据一定（已知）的长江三江营（水源地）水位和前面已经得出的江都站流量，可计算得到江都站站下水位及三江营引水流量。由此，在考虑河道输水损失的泵站系统运行优化计算中，任意三江营水位条件下，可分别确定江都站扬程、江都站流量与淮安站流量之间的关系，避免优化算法寻优过程中水面线重复迭代计算，计算工作量大大简化。例如，当三江营水位 2.47 m、淮安站下水位 6 m、需要流量分别为 100、120、140、…、300 m^3/s 时，江都站流量、扬程与淮安站需要流量的关系分别如图 2 所示，可以看出，曲线近似呈线性变化，结果符合输水流量越大，输水水力损失越大，泵站扬程越高的规律。

2.2.2 系统运行方案确定方法

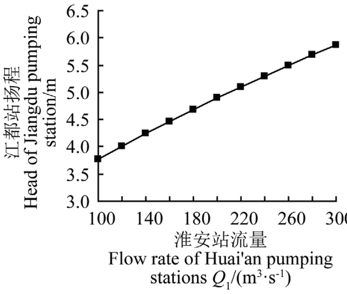
模拟退火－粒子群算法融合粒子群算法（PSO, particle swarm optimization）与模拟退火算法（SA, simulated annealing），使得算法具有较好的全局搜索能力与局部搜索能力[17-19]。根据作者研究成果[20]，本文拟采用 SA-PSO 算法求解数学模型。

对于同型号机组，认为其装置性能相同。选择水泵叶片角度 α 和开机台数 n 为变量，则变量数为 8，将变量定义为[α_1，α_2，α_3，α_4，n_1，n_2，n_3，n_4]。若将水泵固定于叶片设计角度运行，则只有开机台数 n 为变量，变量数为 4，将变量定义为[n_1，n_2，n_3，n_4]。选择目标函数 F 为适应度函数，计算步骤如下：1）根据 2.2.1 节方法计算确定泵装置扬程；2）根据泵装置扬程与泵装置性能曲线（Q～H_z 与 Q～η_z），计算已知叶片角度下水泵流量与泵装置效率；3）插值或拟合得出任意叶片角度下水泵流量与泵装置效率计算表达式，根据式（1）得出系统日运行费用函数表达式。算法相关参数设置见文献[17]。



a. 江都站流量

a. Flow rate of Jiangdu pumping station



b. 江都站扬程

b. Head of Jiangdu pumping station

注：三江营和淮安站下水位分别为 2.47 和 6 m。

Note: Water levels of Sanjiangying and downstream of Huai'an pumping station are 2.47 and 6 m respectively.

图 2　江都站流量、扬程与淮安站流量的关系

Fig. 2　Relationships between flow rate, head of Jiangdu pumping station and flow rate of Huai'an pumping station

3 计算结果与分析

三江营水位受到潮汐的影响而时刻变化，本文选取某年长江三江营最大潮差、平均潮差以及最小潮差时典型水位（如表 3）。

表 3　三江营最大潮差、平均潮差、最小潮差时江都站水位、流量

Table 3　Water level and flow rate of Jiangdu pumping stations at maximum, mean, and minimum tidal level difference of Sanjiangying

三江营潮差 Tidal level difference of Sanjiangying	三江营 Sanjiangying		江都站 Jiangdu pumping stations			
	水位 Water level z_0/m	流量 Flow rate Q_0/($m^3·s^{-1}$)	站下水位 Downstream water level Z_d/m	站上水位 Upstream water level Z_u/m	扬程 Head H_2/m	流量 Flow rate Q_2/($m^3·s^{-1}$)
最大 Maximum	1.24	308.320	0.970	8.255	7.285	307.128
	0.67	308.255	0.321	8.255	7.934	
	1.74	308.377	1.520	8.255	6.735	
	2.47	308.461	2.303	8.255	5.952	
平均 Mean	0.52	308.238	0.147	8.255	8.108	307.128
	0.93	308.285	0.622	8.255	7.633	
	1.34	308.331	1.082	8.255	7.173	
	1.83	308.387	1.618	8.255	6.637	
最小 Minimum	1.40	308.338	1.149	8.255	7.106	307.128
	1.67	308.369	1.444	8.255	6.811	
	1.88	308.393	1.672	8.255	6.583	
	2.07	308.415	1.877	8.255	6.378	

注：淮安站站下水位、流量分别为 6 m 和 300 $m^3·s^{-1}$。

Note: Downstream water level is 6 m and flow rate is 300 $m^3·s^{-1}$ for Huai’an pumping station.

分别研究 3 种情况下系统优化运行方案。江都站内安装的水泵均为叶片全调节水泵，根据水源水位变化时刻调节水泵叶片角度与开机组合是不可行的，否则会降低机组运行的可靠性。设一天内的最高、最低水位分别为 z_{max}、z_{min}，则最大潮差 $\Delta z_{max}=z_{max}-z_{min}$，将水位平均分成4个区间[$z_{min}$，$z_{min}+\Delta z_{max}/4$]、（$z_{min}+\Delta z_{max}/4$，$z_{min}+\Delta z_{max}/2$]、（$z_{min}+\Delta z_{max}/2$，$z_{min}+3\Delta z_{max}/4$]、（$z_{min}+3\Delta z_{max}/4$，$z_{max}$]，落在各个区间的水位取平均值作为计算该时段内泵站运行方案的水位值。

通过计算，淮安站站下水位为设计值 6 m，流量为设计值 300 m^3/s 时，三江营最大潮差、平均潮差、最小潮差时江都站水位、扬程及抽水流量如表 3 所示。根据表 3 计算得出的江都站扬程与流量，代入式（1）～式（2）中，考虑分时电价，采用模拟退火-粒子群算法（SA-PSO）求解模型，确定淮安站不同抽水流量、三江营不同潮差时江都站机组运行工况、开机台数和日运行费用，结果如表 4 所示，运行方案计算时间约需 2 min。

表 4　三江营最大潮差、平均潮差、最小潮差时江都站优化运行方案

Table 4　Optimal schemes of Jiangdu pumping stations at maximum, mean, and minimum tidal level difference of Sanjiangying

三江营潮差 Tidal level difference of Sanjiangying	时段 Time interval	泵站扬程 Pumping station head H_z/m	电价 Price p/ (元·(kW·h)$^{-1}$)	一站 1st station		二站 The 2nd station		三站 3rd station		四站 4th station		运行费用 Operation cost F/万元
				叶片角度 Blade angles α/(°)	开机台数 Number of running pumps	叶片角度 Blade angles α/(°)	开机台数 Number of running pumps	叶片角度 Blade angles α/(°)	开机台数 Number of running pumps	叶片角度 Blade angles α/(°)	开机台数 Number of running pumps	
最大 Maximum	00:00—02:00	7.285	0.356	0.13	3	0.18	2	—	0	1.14	7	2.138
	02:00—06:00	7.934	0.356	—	0	3.57	4	—	0	3.49	7	4.678
	06:00—07:00	7.285	0.356	0.13	3	0.18	2	—	0	1.14	7	1.069
	07:00—08:00	6.735	0.356	—	0	-1.28	7	—	0	-2.08	7	0.993
	08:00—09:00	6.735	1.382	—	0	-1.28	7	—	0	-2.08	7	3.854
	09:00—11:00	7.285	1.382	0.13	3	0.18	2	—	0	1.14	7	8.300
	11:00—12:00	7.285	0.829	0.13	3	0.18	2	—	0	1.14	7	2.489
	12:00—17:00	7.934	0.829	—	0	3.57	4	—	0	3.49	7	13.616
	17:00—18:00	6.735	1.382	—	0	-1.28	7	—	0	-2.08	7	3.854
	18:00—22:00	5.952	1.382	-2.36	7	-2.53	4	—	0	-4.00	6	13.772
	22:00—24:00	6.735	0.829	—	0	-1.28	7	—	0	-2.08	7	4.624
	合计 Total											59.387
平均 Mean	00:00—01:00	8.108	0.356	2.04	5	—	0	—	0	3.31	7	1.202
	01:00—02:00	7.633	0.356	—	0	1.91	4	—	0	2.88	7	1.120
	02:00—04:00	7.173	0.356	-0.38	5	—	0	—	0	0.93	7	2.107
	04:00—07:00	7.633	0.356	—	0	1.91	4	—	0	2.88	7	3.360
	07:00—08:00	8.108	0.356	2.04	5	—	0	—	0	3.31	7	1.202
	08:00—11:00	8.108	1.382	2.04	5	—	0	—	0	3.31	7	14.000
	11:00—13:00	8.108	0.829	2.04	5	—	0	—	0	3.31	7	5.599
	13:00—14:00	7.633	0.829	—	0	1.91	4	—	0	2.88	7	2.609
	14:00—15:00	7.173	0.829	-0.38	5	—	0	—	0	0.93	7	2.453
	15:00—17:00	6.637	0.829	-1.04	7	—	0	—	0	-2.39	7	4.560
	17:00—18:00	6.637	1.382	-1.04	7	—	0	—	0	-2.39	7	3.801
	18:00—20:00	7.173	1.382	-0.38	5	—	0	—	0	0.93	7	8.178
	20:00—22:00	7.633	1.382	—	0	1.91	4	—	0	2.88	7	8.697
	22:00—24:00	8.108	0.829	2.04	5	—	0	—	0	3.31	7	5.599
	合计 Total											64.487
最小 Minimum	00:00—08:00	7.106	0.356	0.19	5	—	0	—	0	0.64	7	8.351
	08:00—10:00	7.106	1.382	0.19	5	—	0	—	0	0.64	7	8.105
	10:00—11:00	6.811	1.382	-0.87	7	—	0	—	0	-1.98	7	3.894
	11:00—12:00	6.811	0.829	-0.87	7	—	0	—	0	-1.98	7	2.336
	12:00—13:00	6.583	0.829	-1.79	7	0.20	1	—	0	-3.38	7	2.263
	13:00—17:00	6.378	0.829	-1.00	8	—	0	—	0	-4.00	7	8.781
	17:00—19:00	6.583	1.382	-1.79	7	0.20	1	—	0	-3.38	7	7.545
	19:00—21:00	6.811	1.382	-0.87	7	—	0	—	0	-1.98	7	7.788
	21:00—22:00	7.106	1.382	0.19	5	—	0	—	0	0.64	7	4.052
	22:00—24:00	7.106	0.829	0.19	5	—	0	—	0	0.64	7	4.862
	合计 Total											57.977

注：淮安站站下水位、流量分别为 6 m 和 300 $m^3 \cdot s^{-1}$。

Note: Downstream water level is 6 m and flow rate is 300 $m^3 \cdot s^{-1}$ for Huai'an pumping stations.

同理，可以计算出淮安站需要流量 200、100 m^3/s，三江营不同潮差时江都站变角优化运行方案与 3 种需要流量时机组在设计角度（－2°）运行方案的各方案运行费用，如表 5。从表 5 中可以看出，三江营最大潮差时、平均潮差、最小潮差时变角优化运行方案较设计角度运行方案节约运行费用 0.62%～2.26%、0.33%～3.26%和 0.22%～0.83%。以淮安站需要流量 300 m^3/s 为例，最小潮差时泵站系统变角优化运行方案节约费用最少（为 0.22%），这主要是因为，为了满足抽水流量和扬程，此时最优叶片角度与设计叶片角度平均相差约 1.5°（如表 4），相对来说相差不大，泵站系统效率提高不明显；平均潮差时泵站系统变角优化运行方案节约费用最多（为 3.26%），这主要是因为，此时江都四站最优叶片角度与设计叶片角度平均相差约 4°，江都一、二站最优叶片角度与设计叶片角度平均相差约 2.5°，泵站系统效率提高较为明显。同样地，最大、平均、最小潮差时，泵站系统最优叶片角度与设计角度相差较小的情况发生在淮安站需要流量分别为 100、200 和 300 m^3/s 工况。由于篇幅所限，文中未列出淮安站需要流量 200、100 m^3/s，三江营不同潮差时江都站变角优化运行方案与 3 种需要流量时机组在设计角度（－2°）运行方案。

表 5 不同运行方案时江都站系统运行费用比较

Table 5 Cost comparison of different schemes for Jiangdu pumping stations

需要流量 Demanding flow rate Q_1/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	运行费用 Operation cost/万元						费用比较 Cost comparison/%		
	变角 Adjusting blade angles			设计角度 At design blade angles					
	最大潮差 Maximum tidal level difference F_1	平均潮差 Mean tidal level difference F_2	最小潮差 Minimum tidal level difference F_3	最大潮差 Maximum tidal level difference F_4	平均潮差 Mean tidal level difference F_5	最小潮差 Minimum tidal level difference F_6	$(F_4-F_1)/F_4$	$(F_5-F_2)/F_5$	$(F_6-F_3)/F_6$
300	59.387	64.487	57.977	60.363	66.659	58.103	1.62	3.26	0.22
200	34.584	37.317	33.776	35.383	37.442	34.060	2.26	0.33	0.83
100	15.415	16.704	15.101	15.511	16.797	15.194	0.62	0.55	0.61

当三江营水位日变幅小（即最小潮差）时，系统运行费用低，主要因为此时三江营水位较高，江都站运行扬程低；当三江营水位日变幅较大（即平均潮差）时，系统运行费用高，主要因为此时三江营水位低，江都站运行扬程高；当三江营水位日变幅大（即最大潮差）时，系统运行费用较低，主要因为此时三江营水位高，江都站运行扬程较低。如果要求泵站日抽水量（抽水体积）一定，则泵站应该在高扬程时多抽水，低扬程时少抽水或不抽水。因此，泵站应根据水源水位的变化调节机组运行方案，从而达到节约能源与运行费用的目的。

比较本文与文献[1]中的优化模型，文献[1]是给定泵站抽水流量（或抽水体积）要求，本文是给定调水目的地需要流量要求。由于不同流量时，河道输水损失不同，因而泵站扬程也不同，本文将优化范围扩大至水位不受抽引流量影响的水源地和调水目的地，优化模型考虑的因素更加全面，供水目标更加直接、明确，结果更加合理。此外，本文与文献[16]建立的优化模型中都考虑了河道输水损失，本文模型求解方法计算某一调水目的地水位及需要流量时系统日优化运行方案约需 2 min，而文献[16]中直接将水位、流量迭代放入优化算法计算过程中，求解一个方案约需 30 h。因此，本文提出的计算方法更加简便，结果更加可靠。

4 结论与讨论

以南水北调东线长江至淮安站下泵站系统为研究对象，以水源地最大潮差、平均潮差、最小潮差 3 种典型日为例，在调水目的地水位及需要流量一定的情况下，泵站系统水泵变角优化运行方案较水泵设计角度运行方案可分别节约运行费用 0.62%～2.26%、0.33%～3.26%和 0.22%～0.83%。泵站应根据水源水位的变化调节机组运行方案，节约能源与运行费用。

研究大型泵站系统优化运行过程中，需要考虑河道输水水力损失与水量损失（包括蒸发损失与渗漏损失）的影响，确定泵站抽水流量与抽水扬程。当水源水位、调水目的地水位与需要流量一定的情况下，泵站抽水流量、扬程与需要流量之间基本呈线性变化规律。将此规律应用于系统运行方案寻优计算过程中，可避免重复迭代，减小计算量与计算时间。本文计算方法可应用于其他考虑河道输水损失的泵站系统优化运行问题中。对于考虑河道输水损失的泵站系统优化运行，还应完善多级泵站的运行优化方法。

[参 考 文 献]

[1] 冯晓莉，仇宝云，黄海田，等. 南水北调东线江都排灌站优化运行研究[J]. 水力发电学报，2008，27(4)：130－134.
Feng Xiaoli, Qiu Baoyun, Huang Haitian, et al. Study on optimal operation of Jiangdu pump stations in Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 130－134. (in Chinese with English abstract)

[2] 袁尧，刘超. 蚁群算法在泵站单机组优化运行中的应用[J]. 水力发电学报，2013，32(1)：263－268.
Yuan Yao, Liu Chao. Application of ant colony algorithm to optimal operation of single pump unit at pumping stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 263－268. (in Chinese with English abstract)

[3] 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 with English abstract)

[4] Bagirov A M, Barton A F, Mala-Jetmarova H, et al. An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling[J]. Mathematical and Computer Modeling, 2013，57(3/4): 873－886.

[5] Puleo V, Morley M, Freni G, et al. Multi-stage linear programming optimization for pump scheduling[J]. Procedia Engineering, 2014, 70: 1378－1385.

[6] Ghaddar B, Naoum-Sawaya J, Kishimoto A, et al. A Lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 241(2): 490－501.

[7] Zhang Zijun, Zeng Yaohui, Kusiak A. Minimizing pump energy in a wastewater processing plant[J]. Energy, 2012, 47(1): 505－514.

[8] Behandish M, Wu Z Y. Concurrent pump scheduling and storage level optimization using meta-models and evolutionary algorithms[J]. Procedia Engineering, 2014, 70: 103－112.

[9] Tang Yuling, Zheng Guilin, Zhang Shirong. Optimal control approaches of pumping stations to achieve energy efficiency and load shifting[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 55(2): 572－580.

[10] 朱劲木，龙新平，刘梅清，等. 东深供水工程梯级泵站的优化调度[J]. 水力发电学报，2005，24(3)：123－127.
Zhu Jinmu, Long Xinping, Liu Meiqing, et al. Optimal dispatch of multi-stage pumping stations in Donshen water supply project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(3): 123－127. (in Chinese with English abstract)

[11] Charles T J, Bauer K. Transient control for a multiple booster pumping station and transmission pipeline system-design, testing, adjustment, and operation[C]. Proceedings of Pipelines Congress 2008- Pipeline Asset Management: Maximizing Performance of Our Pipeline Infrastructure, Atlanta, United States, 2008: 1－10.

[12] 梁兴，刘梅清，刘志勇，等. 基于混合粒子群算法的梯级泵站优化调度[J]. 武汉大学学报：工学版，2013，46(4)：536－539.
Liang Xing, Liu Meiqing, Liu Zhiyong, et al. Optimum dispatching of multistage pumping station based on mixed particle swarm optimization[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(4)：536－539. (in Chinese with English abstract)

[13] 龚懿，程吉林，刘静森. 扬程-水位逐次逼近策略优化梯级泵站群级间河道水位[J]. 农业工程学报，2014，30(22)：120－129.
Gong Yi, Cheng Jilin, Liu Jingsen. Water level optimization of water transferring channel in multi-stage pumping stations based on head-water level successive approximation optimization method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(22): 120－129. (in Chinese with English abstract)

[14] 桑国庆，曹升乐，郭瑞，等. 梯级泵站输水系统运行效率优化模型[J]. 系统工程理论与实践，2014，34(8)：2179－2185.
Sang Guoqing, Cao Shengle, Guo Rui, et al. Research on optimization of whole efficiency of cascade pumping station water-delivery system[J]. System Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(8): 2179－2185. (in Chinese with English abstract)

[15] Zhang Rui, Zhou Jianzhong, Ouyang Shuo, et al. Optimal operation of multi-reservoir system by multi-elite guide particle swarm optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 48(6): 58－68.

[16] 冯晓莉，仇宝云，黄海田，等. 南水北调东线一期源头泵站优化运行研究[J]. 水力发电学报，2008，27(4)：48－53.
Feng Xiaoli, Qiu Baoyun, Huang Haitian, et al. Study on source pump station optimal operation of first-stage Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 48－53. (in Chinese with English abstract)

[17] 冯晓莉，仇宝云. 大型泵站系统运行优化模型与节能效果比较[J]. 农业工程学报，2012，28(23)：46－51.
Feng Xiaoli, Qiu Baoyun. Optimal operation models and comparison of their energy-saving effects for large pumping station system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(23): 46－51. (in Chinese with English abstract)

[18] Eberhart R C, Shi Yuhui. Comparing inertia weigths and constriction factors in particle swarm optimization[C]. Proceedings of the 2000 IEEE Congress on Evolutionary Computation, La Jolla, United States, 2000, 1: 84－88.

[19] Sun Chaoli, Zeng Jianchao, Pan Jeng-shyang. An improved vector particle swarm optimization for constrained optimization problems[J]. Information Sciences, 2011, 181(6): 1153－1163.

[20] 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 Xiaoli, Qiu Baoyun, Yang Xingli, 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 with English abstract)

Optimal operation for large pumping station system based on water transferring losses of river

Feng Xiaoli, Qiu Baoyun※

(*School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou* 225127, *China*)

Abstract: A large amount of energy is consumed during the pumping station operation, especially for the pumping station that water level of the forebay varied frequently in a wide range, pump units often run deviating from the high efficient area of pump, this results in energy waste. In order to lift water, some energy dissipation devices and flow facilities are used such as main pump unit, inlet and outlet passages, forebay and outlet sump, auxiliary equipments, power transmission and substation facilities, etc. Usually, the source water should be transported in a certain distance by the river or channel to the destination. Hydraulic loss and water loss of the river are integrated into power losses of the water. Further more, the operation performance of the pumping station is influenced. In this paper, hydraulic loss, evaporation loss and leakage loss were all considered. Based on variations of source water level, under certain water level of water transfer destination, the unknown water level, flow rate and river parameters could be obtained by the given parameter data based on energy conservation equation in fluid mechanics. Then, the relationships were determined respectively between demanding discharge of destination and pumping head, and between demanding discharge of destination and pumping discharge. The results showed that the relationships were nearly linear. Applying the linear relationships to the later optimization process in the algorithm, the repeated water level iteration was avoided. Also, the calculating amount and calculating time were reduced greatly. Taking three typical tidal level differences of maximum, mean, and minimum at Sanjisngying Intake of Yangtze River as a case, under certain water level and demanding discharge of Huai'an pumping station downstream, the model was built based on the system concluding main pump units, auxiliary equipments, power transmission and substation facilities, and water transferring facilities. The optimizing goal was the least daily operation cost, and the constraints included source water level, water level and flow rate of destination and each cross section of the river, single machine flow rate, the number of running pumps, and the balance of hydraulic loss and water loss. Also, the model was solved by Simulated Annealing-Particle Swarm Optimization Algorithm (SA-PSO), which had better global and local searching ability. Pump blade angles and the number of running pumps were defined as variables, and the objective function was chosen as the fitness function in the algorithm. The pump assembly performance at some blade angles could be got by fitting or interpolation. The results indicated that when the daily varied range of Sangjiangying water level was small, the operation cost was low because of high Sangjiangying water level and low head of Jiangdu pumping stations. When the daily varied range of Sangjiangying water level was large, it turned out the opposite. The cost could be saved by 0.62%~2.26%, 0.33%~3.26% and 0.22%~0.83%, respectively by adjusting pump blade angles than that of design blade angles. If the water-conveyance performance was considered, the optimal operation schemes were more reasonable. The methods could be applied in optimal operation for other pumping station system.

Key words: water; losses; optimization; large pumping station system; operation; water transfer