

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0062

张荣轩,雷晓辉,卢龙彬,等.基于遗传算法的串联梯级泵站扬程优化分配[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):590-597. ZHANG R X, LEI X H, LU L B, JING X, et al. Optimization of lift distribution of cascade pumping stations based on genetic algorithm[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3):590-597. (in Chinese)

基于遗传算法的串联梯级泵站扬程优化分配

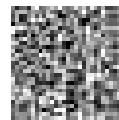
张荣轩^{1,2},雷晓辉²,卢龙彬¹,景象²,张召²,孔令仲³,刘小莲⁴,李月强⁵

(1. 济南大学水利与环境学院, 济南 250022; 2. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100038;
3. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 4. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024;
5. 河海大学水利水电工程学院, 南京 210098)

摘要:为实现引江济淮工程(安徽段)江水北送段的高效运行,以引江济淮工程江水北送段输水系统为研究对象,采用基于遗传算法构建的梯级泵站扬程优化分配模型,开展串联梯级泵站扬程优化分配研究。分别对设计和非设计工况下江水北送段输水系统的运行方案进行分析计算。计算结果表明:设计工况下优化后分配方案总效率较设计现状方案提高2.86%,说明模型优化后的方案可进一步提高梯级泵站的输水效率,为实现串联泵站输水系统科学、合理调度提供很好的科学支撑。

关键词:江水北送;串联梯级泵站;遗传算法;扬程优化分配;高效运行

中图分类号:TV675 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



随着我国工农业现代化的高速发展和居民生活水平的不提高,区域水资源的需求量也随之变大,串联梯级泵站工程在实现水资源的合理配置和调度中有着不可或缺的地位。由于梯级泵站工程具有沿线输水距离长、输水流量较大、扬程变化大和所需能耗大等多方面的特点,因此串联梯级泵站工程优化调度研究一直是水利系统优化领域普遍关注的一个重要问题^[1-3]。到目前为止,国内外多数相关研究通常采用线性规划、非线性规划、动态规划法、蚁群算法、粒子群算法、大系统分解等优化算法^[4-9]对梯级泵站相关河题进行研究,如:朱满林等^[10]建立了基于动态规划法的梯级泵站优化调度数学模型,通过改进泵站间的分配流量从而减少弃水,从而降低成本;刘德祥等^[11]通过大系统理论对梯级泵站优化调度进行了评价研究,把各级泵站当作子系统建立多级泵站;陈守伦

等^[12]采用动态规划方法并针对泵站运行的实际情况对不同时段和机组的流量过程进行优化;周龙才^[13]采用动态规划方法建立了梯级泵站优化扬程分配模型,并与非线性规划模型相结合来对问题进行求解优化调度的子系统模型;吴怡等^[14]通过研究怀柔到密云水库梯级泵站系统,以节约成本为目的,用大系统分解协调模型进行求解;吴辉明等^[15]通过动态规划法对不同梯级净扬程组合进行扬程优化分配研究;张召等^[16]在考虑渠道损失的基础上建立了日优化调度梯级泵站模型;Bortoni等^[17]构建了一种基于动态规划的优化算法框架改善对并联状态下水泵的自动控制,达到节能的目的;Ostfeld等^[18]运用蚁群算法研究了泵站优化调度;Staden等^[19]运用整数规划法研究了泵站优化运行的控制策略。传统优化算法在求解相对复杂的数学模型时各有各的优点,但同时也容易陷入

收稿日期:2020-07-02 修回日期:2020-11-17 网络出版时间:2021-04-23

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210423.1025.006.html

基金项目:国家自然科学基金(51779268)

作者简介:张荣轩(1997—),男,山东济南人,主要从事调水工程泵站优化研究。E-mail:903504822@qq.com

通信作者:雷晓辉(1974—),男,陕西渭南人,教授级高级工程师,博士,主要从事水文水资源、水库调度及水力控制等研究。E-mail:lxx@iwahr.com

“维数灾”问题,导致计算量巨大,不利于结果的生成^[20-21]。并且,目前梯级泵站群扬程优化分配研究多是基于设计工况或某种特定工况来进行的,很少关注非设计工况下泵站群系统的优化运行。受到用水负荷变化、来水过程波动、泵站机组调节等因素影响,梯级泵站群输水系统常处于非设计工况下运行。如何保证泵站在现有条件下经济且合理地运行,如何识别非设计工况下各级泵站的最优运行水位及最优扬程,是本文研究的重点。本文以引江济淮江水北送段为研究区域,采用基于遗传算法构建的串联梯级泵站扬程优化分配模型,开展串联梯级泵站扬程优化分配研究,分别对设计和非设计工况下江水北送段输水系统的运行方案进行分析计算,研究成果可为

实现串联梯级泵站输水科学、合理调度提供基础数据支撑。

1 研究区域

江水北送段串联梯级泵站输水系统是引江济淮工程(安徽段)的重要组成部分,承担着向淮河以北皖豫两省输水任务。工程主要利用沙颍河、西淝河、涡河等现有河道和在建的淮水北调形成多条输水通道,其中列入主体工程的西淝河输水线路总长223.8 km,部分河段需局部疏浚,新设4座梯级翻水站。运用的优化分配模型在单级泵站和渠道的基础信息上进行计算,从而得出研究成果。江水北送段纵剖面图和泵站的基础信息见图1、表1,渠道基础参数信息见表2。

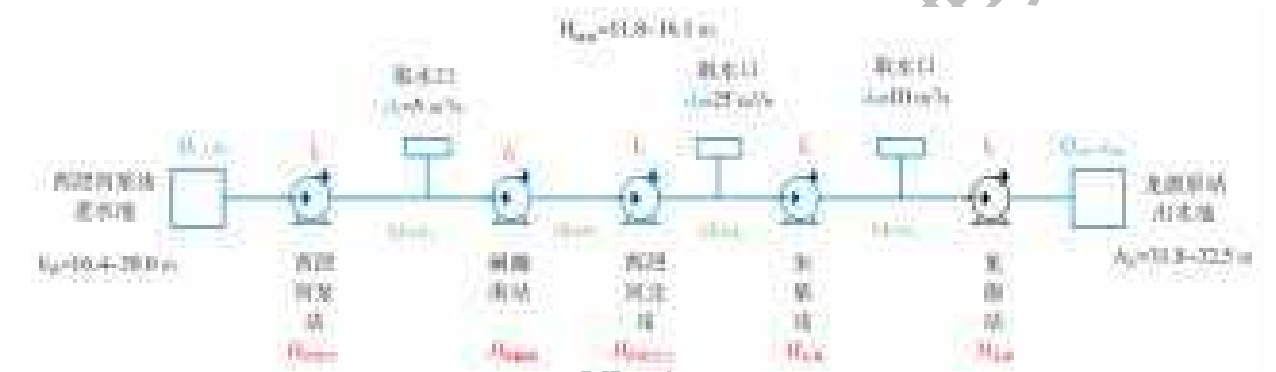


图1 江水北送段纵剖面

Fig. 1 Longitudinal section of the river to the north

表1 泵站基础信息

Tab. 1 Basic information table of pump station

泵站名称	泵站类型	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)			净扬程/m			进水侧水位/m			出水侧水位/m		
		最大	设计	最小	最高	设计	最低	低水位	设计水位	高水位	低水位	设计水位	高水位
西淝河泵站	立式轴流泵	130.50	85.00	28.00	2.70	1.70	0	16.40	17.40	20.00	17.40	19.10	19.10
阚疃南泵站	立式轴流泵	119.40	80.00	24.20	5.50	3.60	1.00	17.00	18.40	20.00	21.00	22.00	22.50
西淝河北泵站	立式轴流泵	118.50	80.00	24.10	3.07	5.47	1.47	20.40	21.80	22.40	23.87	24.87	25.87
朱集泵站	立式轴流泵	87.30	55.00	15.20	4.60	3.18	1.58	23.40	24.67	25.77	27.35	27.85	28.00
龙德泵站	立式轴流泵	62.10	45.00	14.60	5.70	4.95	4.20	26.80	27.35	27.60	31.80	32.30	32.50

表2 渠道基础参数信息

Tab. 2 Information table of basic channel parameters

河段	桩号	设计输水水位/m	设计流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	河道糙率
入海口—西淝河站	0+000~1+400	19.00~18.64	85.00	0.03
西淝河站—阚疃南站	1+400~50+343	18.64~18.40	85.00~80.00	0.03(30+281前)
				0.02(30+281后)
阚疃南站—西淝河北站	50+343~73+703	22.00~21.80	80.00	0.03(61+143前)
				0.02(61+143后)
西淝河北站—朱集站	73+703~112+715	24.87~24.67	80.00~55.00	0.03
朱集站—龙德站	112+715~155+519	27.85~27.35	55.00~45.00	0.03
龙德站—省界	155+519~185+592	32.30~30.90	45.00	0.02

2 串联梯级泵站扬程优化分配模型

2.1 模型的建立

2.1.1 目标函数

研究区域设定在江水北送段,从起点西淝河泵站到终点龙德泵站为 5 级串联提水。由于在工程实际运行过程中,梯级泵站输水系统不可能一直在给定工况下运行,必须考虑到其他情况,所以建立模型的目标是在满足各种等式、不等式约束的同时,实现梯级泵站间扬程最优化分配。以梯级泵站总效率最大化作为目标函数,5 级梯级泵站的目标函数为

$$\eta_{\text{cascade_pumpstation_max}_k} = \frac{Q_{\text{total}_k} H_{\text{total}}}{\sum_{j=1}^5 \frac{Q_{\text{total}_k} H_j}{\eta_{\text{pumpstation_max}_j}}} \quad (1)$$

式中: $\eta_{\text{cascade_pumpstation_max}_k}$ 为第 k 时段梯级泵站在流量为 Q_{total_k} 、总扬程为 H_{total} 情况下的总效率; H_{total} 为梯级泵站的总扬程; $\eta_{\text{pumpstation_max}_j}$ 是第 j 级泵站的效率。

2.1.2 决策变量

首先把梯级泵站中各级泵站的进水池水位以及出水池水位设定为决策变量,并对决策变量进行离散。

选取设计工况。第 1 级(西淝河)泵站进水池水位为 17.4 m,第 5 级(龙德)泵站出水池水位为 32.3 m,末级泵站(龙德)的出水池水位减去首级泵站(西淝河)的进水池水位可以得到梯级的净扬程。根据历史资料可知,西淝河泵站设计输水流量为 $85 \text{ m}^3/\text{s}$,阚疃南泵站设计输水流量为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$,西淝河北泵站设计输水流量为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$,朱集泵站设计输水流量为 $55 \text{ m}^3/\text{s}$,龙德泵站设计输水流量为 $45 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

其次选取非设计工况。江水北送段梯级泵站输水系统的非设计工况下运行以整个梯级净扬程(即西淝河泵站进水侧控制水位和龙德泵站出水侧控制水位差值)为约束条件,输水系统中共有 6 处取水口,取水总量为 $61 \text{ m}^3/\text{s}$,在计算中分别将各个取水口绑定到对应的河段上,计算河道水量损失和水头损失的同时计算取水口带来的水量损失,在此基础上分别优化西淝河、阚疃南、西淝河北、朱集和龙德泵站的扬程分配。首先将西淝河泵站进水池水位 WS0(16.4~20.0 m)以 0.1 m 为步长进行离散,然后将龙德泵站出水池水位 WS5(31.8~32.4 m)以 0.1 m 为步长进行离散,组合成 $37 \times 23 = 851$ 个

级净扬程工况点,再结合不同机组分配流量的 6 个工况点,对 5 106 个工况点进行计算。

2.1.3 约束条件

约束条件包括梯级总扬程约束,单机泵站扬程约束,各级泵站进、出水侧水位控制区间约束^[22],数学表示分别见式(2)~(6)。

$$H_{\text{total}} = Z_{\text{out}_m} - Z_{\text{in}_1} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^5 H_j = H_{\text{total}} + \sum_{j=1}^4 h_{j,j+1} \quad (3)$$

$$H_{j_{\min}} \leq H_j \leq H_{j_{\max}} \quad (4)$$

$$Z_{\text{in}_j, \min} \leq Z_{\text{in}_j} \leq Z_{\text{in}_j, \max} \quad (5)$$

$$Z_{\text{out}_j, \min} \leq Z_{\text{out}_j} \leq Z_{\text{out}_j, \max} \quad (6)$$

式中: $h_{j,j+1}$ 为第 j 级泵站与第 $j+1$ 级泵站间渠道的水头损失,由引入的一维水力模型计算所得; Z_{out_m} , Z_{in_1} 分别为最后一级泵站出水池水位与第一级泵站进水池水位; $Z_{j_{\min}}$, $Z_{j_{\max}}$ 分别为第 j 级泵站最小、最大扬程; $Z_{\text{in}_j, \min}$, $Z_{\text{in}_j, \max}$ 分别为第 j 级泵站进水池最小、最大水位; $Z_{\text{out}_j, \min}$, $Z_{\text{out}_j, \max}$ 分别为第 j 级泵站出水池最小、最大水位。

2.2 模型求解

本文采用遗传算法进行求解,建模首先通过确定目标函数、决策变量以及约束条件,再对流量运行区间、离散步长进行前期的处理,从而确定泵站可运行工况点的集合,通过编码随机生成流量个体来进行下一步的求解。模型求解具体步骤如下:

(1)先确定泵站的可行运行工况的集合(群体 $Q(t)$)并对其编码,随机生成一系列的流量组合(个体)。

(2)个体评价。通过渠道损失值推算各级扬程并判断各约束条件是否在范围内,之后通过上述目标函数也就是适应度函数计算群体中各个个体的适应度。

(3)选择运算。将选择算子作用于群体。其目的是把优化后的个体遗传到下一代或者交叉配对来产生新的个体再遗传到下一代。

(4)交叉运算。将交叉算子作用于群体;将上一代的部分结构通过替换和重组进而生成新的个体。

(5)变异运算。将变异算子作用于群体。对群体中所有个体预设的变异概率进行进一步的判断,从而得出是否变异,对需要进行变异的个体随机选择变异位进行变异。最终通过选择、交叉、变异得到下一代群体 $Q(t+1)$ 。

(6)终止条件。通过不断的迭代运算得到梯级泵站整体效率最高的扬程分配组合,同时计算当前

情况下梯级泵站系统整体的优化效率判断是否能够达到停止的条件,如果能够达到则算法终止,得到梯级扬程最优分配^[23-25]。

3 串联梯级泵站扬程优化分配计算实例

3.1 设计工况下高效运行方案

在模型进行运算前,首先要把第1级西淝河泵站进水池水位和第5级龙德泵站出水池水位进行离散,不仅可以得到离散后的所有工况点,而且也可以得到不同输水流量和净扬程下梯级泵站系统最高运行效率和梯级泵站的优化运行方案。

在设计工况下,西淝河泵站进水池水位为17.4 m,龙德泵站出水池水位为32.3 m,设计输水流量为85 m³/s。设计方案与优化方案见表3和表4。

表3 设计方案计算结果

Tab. 3 Design calculation results

泵站名称	优化扬程/m	优化水位/m	梯级水力损失/m	单级泵站效率/%	梯级总体效率/%
西淝河泵站	1.70	前池 17.40	0.70	43.12	
		出水池 19.10			
阚疃南泵站	3.60	前池 18.40	0.20	72.16	
		出水池 22.00			
西淝河北站	3.07	前池 21.80	0.20	71.13	59.68
		出水池 24.87			
朱集泵站	3.18	前池 24.67	0.50	58.22	
		出水池 27.85			
龙德泵站	4.95	前池 27.35	0.50	71.35	
		出水池 32.30			

表4 优化方案计算结果

Tab. 4 Calculation result of optimization plan

泵站名称	优化扬程/m	优化水位/m	梯级水力损失/m	单级泵站效率/%	梯级总体效率/%
西淝河泵站	1.70	前池 17.40	0.70	43.12	
		出水池 19.10			
阚疃南泵站	4.20	前池 18.40	0.20	73.64	
		出水池 22.60			
西淝河北站	3.50	前池 22.40	0.20	80.17	62.54
		出水池 26.00			
朱集泵站	2.30	前池 25.80	0.50	67.64	
		出水池 28.20			
龙德泵站	5.10	前池 27.70	0.50	69.43	
		出水池 32.30			

计算结果表明,在西淝河泵站进水池水位和龙德泵站出水池水位均为设计水位条件(即西淝

河泵站—龙德泵站段输水系统总扬程一定)下,优化方案比设计现状方案效率高2.86%。各级泵站分配的扬程虽有变化,但是变化并不明显,总体来看优化后的方案起到了一定的节能效果。分析其原因主要有以下两点:(1)由于该工况是设计工况,而工程在最初由设计人员设计时已经考虑了大部分因素以及原则,不论是渠道之间的水位配合还是泵站之间的水位配合,全部已达到最佳状态,因此优化的效果不够明显;(2)由于西淝河、阚疃南、西淝河北、朱集和龙德泵站亦均为低扬程、大流量机组,本身高效运行空间有限,所以优化效果并不明显。

3.2 全工况下高效运行方案

根据在实际工程中大量积累的实践经验可知,无一例外,在任何工程实际运行过程中,梯级泵站系统上游来水量、梯级泵站系统内各级泵站的进水池和出水池水位等都有一定概率发生不同的变化,使得工程在实际运行当中往往会在非设计工况条件下运行,此时就需要模拟出全工况下的高效运行方案,为合理调度提供基础数据支撑。

江水北送段梯级泵站输水系统的全工况运行以整个梯级净扬程(即西淝河泵站进水侧控制水位和龙德泵站出水侧控制水位差值)为约束条件,输水系统中共有取水口6处,取水量共计61 m³/s,在计算中分别将各个取水口绑定到对应的河段上,计算河道水量损失和水头损失的同时计算取水口带来的水量损失,在此基础上分别优化西淝河、阚疃南、西淝河北、朱集和龙德泵站的扬程分配。由于篇幅所限,这里仅对流量 $Q=102.8$ m³/s, $WS_0=16.40\sim 17.20$ m(西淝河进水侧水位), $WS_5=31.80\sim 32.20$ m(龙德出水侧水位)时的运算结果进行说明。梯级泵站系统优化效率见表5,各级泵站扬程优化结果见表6。

在表5中,横坐标值是西淝河泵站进水池水位 $WS_0(16.40\sim 17.20$ m)以0.1 m为步长进行离散,纵坐标值是龙德泵站出水池水位 $WS_5(31.8\sim 32.2$ m)以0.1 m为步长进行离散,表中数据是各个工况点下梯级泵站系统效率;在表6中,为了便于展示,横坐标为离散的第1级西淝河泵站进水池水位值,纵坐标为离散的第5级龙德泵站出水池水位值,表中数据为各个泵站优化分配的扬程。在进行梯级泵站优化运算时,已经在前期考虑了渠道间的水力损失,只要在运算过程中直接代入对应的数值,就可以得出所有工况点下的水面线分布,为实际工程调度提供技术和数据支撑。

表 5 梯级泵站系统优化效率

Tab. 5 Optimization efficiency of cascade pumping station system

单位: %

出口水位/m	入口水位/m								
	16.40	16.50	16.60	16.70	16.80	16.90	17.00	17.10	17.20
31.80	57.21	56.96	56.08	56.03	55.38	54.67	54.66	54.67	57.21
31.90	57.07	57.21	56.08	56.08	55.33	54.57	54.53	54.57	57.07
32.00	57.20	57.14	56.13	56.08	55.71	54.62	54.55	54.62	52.79
32.10	57.33	57.07	56.18	56.08	56.08	54.67	54.57	54.67	57.33
32.20	57.28	57.27	56.18	56.28	56.08	54.67	54.78	54.57	57.28

表 6 各级泵站扬程优化结果

Tab. 6 Optimal distribution results of pump heads at all levels

单位: m

出口水位/m	入口水位/m									扬程对应泵站
	16.40	16.50	16.60	16.70	16.80	16.90	17.00	17.10	17.20	
31.80	2.53	2.54	2.26	2.21	2.22	2.00	2.02	1.92	1.60	西淝河
	3.42	3.13	3.42	3.16	2.90	3.49	3.11	3.42	3.48	阚疃南
	3.18	2.86	3.32	3.47	4.13	3.15	3.20	3.13	3.19	西淝河北
	2.86	3.50	2.81	2.86	2.60	2.92	2.83	2.81	2.92	朱集
	3.51	3.37	3.40	3.50	3.25	3.34	3.74	3.52	3.40	龙德
31.90	2.53	2.59	2.24	2.22	2.29	1.99	2.01	1.99	1.83	西淝河
	3.59	3.42	3.50	3.50	2.60	3.44	3.65	2.96	2.96	阚疃南
	2.92	3.11	3.24	3.20	4.32	2.80	3.14	3.44	3.36	西淝河北
	2.95	2.98	2.82	2.85	2.57	3.53	2.94	2.82	3.04	朱集
	3.61	3.40	3.60	3.53	3.42	3.34	3.27	3.69	3.62	龙德
32.00	2.60	2.54	2.40	2.30	2.27	1.92	1.92	1.99	1.64	西淝河
	3.25	2.95	3.54	3.14	2.84	3.18	3.19	3.29	3.23	阚疃南
	4.15	3.84	4.09	3.93	3.95	3.71	4.00	3.94	3.73	西淝河北
	2.89	3.35	2.86	3.06	3.10	2.86	2.81	3.28	2.84	朱集
	4.15	3.84	4.09	3.93	3.95	3.71	4.00	3.94	3.73	龙德
32.10	2.54	2.54	2.33	2.31	2.23	2.10	2.09	1.90	1.61	西淝河
	3.46	3.68	3.52	3.48	3.54	3.41	3.47	3.48	3.53	阚疃南
	3.20	3.08	3.18	3.13	3.21	3.28	2.83	3.17	3.32	西淝河北
	2.86	2.90	2.82	2.90	2.93	2.88	3.15	2.94	2.92	朱集
	3.65	3.39	3.65	3.58	3.38	3.52	3.55	3.52	3.53	龙德
32.20	2.51	2.55	2.22	2.21	2.22	2.07	1.96	1.90	1.62	西淝河
	3.14	3.41	3.49	3.45	3.46	3.42	3.62	2.81	3.74	阚疃南
	3.64	2.93	3.35	3.13	3.23	2.80	3.14	3.65	3.17	西淝河北
	2.90	2.91	2.87	2.82	3.06	3.34	2.87	3.02	2.91	朱集
	3.72	4.01	3.69	4.00	3.43	3.76	3.71	3.72	3.66	龙德

4 结 论

针对现有的梯级泵站扬程优化分配模型不够完善的问题,以高效经济为目标,通过构建基于遗传算法的串联梯级泵站扬程优化分配模型,研究得出了设计工况和全工况下优化方案,其主要结论如下:

(1)基于西淝河、阚疃南、西淝河北、朱集和龙德单级泵站优化效率和西淝河—龙德泵站段五级间水

力计算结果,构建了串联梯级泵站扬程优化分配模型,然后对江水北送段输水系统在设计工况、不同梯级净扬程条件下各站内的最优扬程分配情况进行了计算。结果表明经优化模型计算后,梯级泵站总效率提高了 2.86%。

(2)计算了非设计工况对应不同输水流量条件下任意净扬程在各级泵站对应的最优扬程分配方案、梯级间最优水位组合以及输水系统最优效率。

综合分析优化计算结果,可以为不同工况下梯级泵站调水系统的运行提供依据。

本文基于遗传算法构建了串联梯级泵站扬程优化分配模型,应用到了引江济淮江水北送段的经济运行当中,达到了高效运行的目的,具有较高的应用价值,因此对中大型梯级泵站工程的经济运行研究具有借鉴意义,且以效率最大化为目标,可以将成果应用到分时电费的优化研究当中,使整个系统获得最佳的综合效益。

参考文献(References):

- [1] 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, 2003(4): 101-106. (CAO M, YAO Q Y. Progress of studies on optimization operation for multi-stage pumping station[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2003(4): 101-106. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-0747. 2003. 04. 025.
- [2] 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), 2005(6): 96-99, 2. (JIA R F, JIN M Y, WANG H, 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), 2005(6): 96-99, 2. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-6871. 2005. 06. 027.
- [3] 郝文军. 基于优化调度的梯级泵站节能降耗策略浅析[J]. 地下水, 2019, 44(4): 202-203, 213. (XI W J. Analysis of energy-saving and consumption-reducing strategy of cascade pumping station based on optimized dispatch[J]. Ground Water, 2019, 44(4): 202-203, 213. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2019. 04. 082.
- [4] YAZDI J, CHOI H S, KIM J H. A methodology for optimal operation of pumping stations in urban drainage systems[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2015, 11: 101-112. DOI: 10. 1016/j. jher. 2015. 09. 001.
- [5] 吴帮,陶志勇. 基于混合粒子群算法的梯级泵站优化调度[J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(1): 93-97. (WU B, TAO Z Y. Optimal operation of cascade pumping stations based on hybrid particle swarm optimization [J]. Computer and digital engineering, 2020, 48(1): 93-97. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-9722. 2020. 01. 018.
- [6] BAGIROA 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 & Computer Modelling, 2013, 57(3/4): 873-886. DOI: 10. 1016/j. mcm. 2012. 09. 015.
- [7] OLSZEWAKI P. Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps[J]. Applied Energy, 2016, 178: 527-539. DOI: 10. 1016/j. apenergy. 2016. 06. 084.
- [8] 吴月秋,纪昌明,王丽萍,等. 基于混沌粒子群算法的水电站水库优化调度[J]. 人民黄河, 2008(11): 96-97, 112. (WU Y Q, JI C M, WANG L, P, et al. Optimal operation of hydropower station reservoirs based on chaotic particle swarm optimization [J]. Yellow River, 2008(11): 96-97, 112. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2008. 11. 044.
- [9] BRION L D, MAYS L W. Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 117(11): 1551-1569. DOI: 10. 1061/(ASCE) 0733-9429 (1991) 117:11(1551).
- [10] 朱满林,杨晓东,张言禾. 梯级泵站优化调度研究[J]. 西安理工大学学报, 1999(1): 69-72. (ZHU M L, YANG X D, ZHANG Y H. Study on optimization operation for multi-stage pumping station[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1999(1): 69-72. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-4710. 1999. 01. 016.
- [11] 刘德祥,何忠人,郑玉春,等. 大岗坡-石台寺多级泵站群代化调度模型研究[J]. 水电能源科学, 1995(4): 236-239, 234, 240-241. (LIU D X, HE Z R, ZHENG Y C, et al. Research on the group generation scheduling model of Dagangpo-Shitaisi multistage pumping station [J]. Water Resources and Power, 1995(4): 236-239, 234, 240-241. (in Chinese))
- [12] 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): 82-86. (CHEN S L, RUI J, XU Q, et al. Daily optimal operation for pumping stations[J]. Water Resources and Power, 2003, 21(3): 82-86. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7709. 2003. 03. 026.
- [13] 周龙才. 长渠道梯级供水泵站变频调速最优匹配[J]. 武汉大学学报:工学版, 2010(5): 576-580. (ZHOU L C. Optimal matching of cascade water supply pumping stations with long channels by variable frequency speed control[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010(5): 576-580. (in Chinese))
- [14] 吴怡,李智,王京晶,等. 梯级泵站输水系统旬优化调度及经济运行研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(5): 144-147, 152. (WU Y, LI Z, WANG J J, et al. Study on the 10-day optimized dispatching and economic operation of cascade pumping stations in water conveyance system[J]. Yellow River, 2018, 40(5): 144-147, 152. (in

- Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2018. 05. 031.
- [15] 吴辉明, 田雨, 廖卫红, 等. 多级串联梯级泵站扬程优化分配研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(5): 75-79. (WU H M, TIAN Y, LIAO W H, et al. Study on optimized distribution of pumping-head for multistage cascade pumping stations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(5): 75-79. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2016. 05. 018.
- [16] 张召, 雷晓辉, 田雨, 等. 考虑渠道水力损失的梯级泵站日优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 196-201. (ZHANG Z, LEI X H, TIAN Y, et al. Daily optimal operation of multistage pumping stations considering hydraulic loss in channels[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(9): 196-201. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2017. 09. 042.
- [17] BORTONI C E, ALMEIDA R A, VIANA A N C. Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation[J]. Energy Efficiency, 2008, 1(3): 167-173. DOI: 10. 1007/s12053-008-9010-1.
- [18] OSTFELD A, TUBALTZEV A. Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134(2): 107-118. DOI: 10. 1061/(ASCE) 0733-9496 (2008) 134: 2 (107).
- [19] STADEN A J, ZHANG J F, XIA X H. A model predictive control strategy for load shifting in a water pumping scheme with maximum demand changes[J]. Applied Energy, 2011, 88(12): 4785-4794. DOI: 10. 1016/j. apenergy. 2011. 06. 054.
- [20] 赵志鹏, 廖胜利, 程春田, 等. 梯级水电站群中长期优化调度的离散梯度逐步优化算法[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1243-1253. (ZHAO Z P, LIAO S L, CHENG C T, et al. Discrete gradient progressive optimality algorithm for mid-long-term optimal operation of multi-reservoir system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(10): 1243-1253. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20180442.
- [21] 纪昌明, 马皓宇, 吴嘉杰, 等. 梯级水库短期优化调度模型的精细化与 GPU 并行实现[J]. 水利学报, 2019, 50(5): 535-546. (JI C M, MA H Y, WU J J, et al. Refinement of short-term optimal dispatch model of cascade reservoirs and parallel implementation of GPU[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(5): 535-546. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20190132.
- [22] 王彤, 李春桐, 刘文睿. 基于遗传算法的地表水取水泵站优化调度[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 89-91, 107. (WANG T, LI C T, LIU W R. Optimal scheduling of surface water pumping station based on genetic algorithm[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(6): 89-91, 107. (in Chinese))
- [23] 魏良良, 丁祥, 蔡甜, 等. 基于 BP 神经网络与改进遗传算法的泵站优化调度[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 168-171. (WEI L L, DING X, CAI T, et al. Optimal scheduling of pumping stations based on BP neural network and improved genetic algorithm[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(5): 168-171. (in Chinese))
- [24] 方国华, 曹蓉, 刘芹, 等. 改进遗传算法及其在泵站优化运行中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 142-147. (FANG G H, CAO R, LIU Q, et al. Improved genetic algorithm and its application in the optimal operation for pumping station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(2): 142-147. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 02. 025.
- [25] 杨建文, 李志鹏, 喻哲欣. 基于改进遗传算法的泵站优化运行[J]. 中国水利, 2015(8): 33-35. (YANG J W, LI Z P, YU Z X. Optimized operation of pumping stations based on improved genetic algorithm[J]. China Water Resources, 2015(8): 33-35. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1123. 2015. 08. 012.
- [26] 陶建科. 利用改进的遗传算法求解供水优化调度研究[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(1): 6-9. (TAO J K. Study on solving the water supply optimal dispatch problems with an improved genetic algorithm[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2012, 18(1): 6-9. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-7175. 2012. 01. 004.

Optimization of lift distribution of cascade pumping stations based on genetic algorithm

ZHANG Rongxuan^{1,2}, LEI Xiaohui², LU Longbin¹, JING Xiang², ZHANG Zhao², KONG Lingzhong³, LIU Xiaolian⁴, LI Yueqiang⁵

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Department of Water

Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

4. College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the rapid development of industry, agriculture, and the improvement of residents' living standards, the demand of regional water resources has also increased. The water delivery project of series cascade pumping stations has played a huge role in realizing the rational allocation and scientific dispatch of water resources in different regions. The research on the optimal dispatching of water delivery project of series cascade pumping station has always been a common concern in the field of water conservancy system optimization because it has the characteristics of long distance along the line, large water flows, large head change, and large energy consumption. Most researches at home and abroad usually use optimization algorithms such as linear-nonlinear programming, dynamic programming, ant colony algorithm, particle swarm optimization, and large-scale system decomposition. These traditional optimization algorithms are used in solving relatively complex mathematical models. Each has its advantages, but at the same time, it is easy to fall into the "dimensionality disaster", which leads to a huge amount of calculation and is not helpful to the generation of results.

At present, most researches on the head optimization distribution of cascade pumping stations are carried out based on design conditions or certain specific operating conditions, and little attention is paid to the optimal operation of the pumping station group systems under non-design conditions. The water delivery system of the cascade pumping station group is often operating under undesigned conditions, affected by factors such as changes in water load, fluctuations in the incoming water process, and adjustment of pumping station units. Taking the water transfer section from the north to the Huaijiang River as the research area, using a genetic algorithm-based model for the optimization of the head distribution of the series cascade pumping station, a study on the head optimization distribution of the water delivery system of the series cascade pumping station is carried out. The efficient operation plan of the water delivery system of the river water north section is analyzed and calculated. In this project, genetic algorithm is used to solve the problem. The modelling first determines the objective function, decision variables, and constraint conditions, and then performs pre-processing on the flow operation interval and discrete step length, to determine the set of operating conditions of the pumping station. The flow individuals are generated randomly by coding to solve the problem in the next step.

(1) Based on the optimized efficiency of the Xifeihe, Kantuanan, Xifeihebei, Zhuji, and Longde single-stage pumping stations and the hydraulic calculation results between the five stages of the Xifeihe-Longde pumping station section, the head optimization of the series cascade pumping station was constructed, and then the distribution model is calculated for the optimal head distribution in each station under the design conditions and different cascade net head conditions of the water delivery system of the river water north section. The result shows that the total efficiency of the cascade pumping station is increased by 2.86% after the calculation of the optimized model. (2) Simultaneously, the optimal head distribution scheme, the optimal water level combination between the cascades, and the optimal efficiency of the water conveyance system are calculated for any net head corresponding to different water conveyance flow conditions under the off-design condition. Comprehensive analysis and optimization of the calculation results can provide a basis for the operation of the water transfer system of the cascade pumping station under different working conditions.

This paper constructs a head optimization distribution model for series cascade pumping stations is constructed based on the genetic algorithm, which is applied to the economic operation of the water transfer section of the water diversion from the Yangtze River to the Huaijiang River to achieve the purpose of efficient operation and has high application value. Therefore, it is suitable for medium and large cascade pumping station projects. The study of the economic operation has an important significance, and this article is aimed at maximizing efficiency, and the results can be applied to the optimization research of time-of-use electricity rates so that the entire system can obtain the best comprehensive benefits.

Key words: river-to-north water delivery; cascade pumping stations in series; genetic algorithm; head optimal distribution; efficient operation