

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220581

基于改进遗传算法与动态规划的输水泵站日优化调度

何彬浩¹, 傅志敏¹, 吴 巍^{2,3,4}, 赵泽锦⁵, 周 斌⁵, 王高旭^{2,3,4}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
江苏 南京 210098; 5. 红河州南源供水有限公司, 云南 红河 661000)

摘要: 针对我国泵站因不合理调度而导致经济效益不高的问题, 基于存在多管道系统的输水泵站, 考虑峰谷电价的影响, 以日运行费用最小为目标, 构建了泵站日经济优化模型, 并以蒙开个河库连通工程二级泵站为例, 基于组合变异的改进遗传算法、动态规划法, 对定速节流调节、变频调节两种调节方式进行泵站日优化调度。结果表明, 改进遗传算法适用于泵站优化调度问题; 同时发现当机组实际工况点偏离设计工况点较远时, 采用变频调节经济效益更高。

关键词: 改进遗传算法; 动态规划法; 泵站; 优化调度; 组合变异算子

中图分类号: TV675 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)02-0128-05

1 引言

泵站工程对保障区域供水安全、促进经济社会的稳定与发展具有重要意义。不合理的泵站调度会造成泵站内机组偏离高效运行区, 导致泵站的运行效率低, 造成极大的能耗浪费。因此, 研究泵站优化调度问题意义深远。郑和震等^[1]基于工程特点, 采用大系统分解协调法及动态规划法的理念构建并求解了梯级泵站日优化调度与经济运行模型, 取得了较好的效果; 王彤等^[2]研究了地表取水泵站优化调度问题, 并采用遗传算法求解调度模型; 赵平伟等^[3]采用改进遗传算法求解了水泵的并联运行方案; BRENTAN B M 等^[4]基于模拟器—优化器的思路, 研究了输水泵站的日优化模型问题, 同时采用粒子群算法作为优化器的主体。然而, 传统优化算法在求解高维数、非线性的数学模型时, 容易陷入“维数灾”问题, 需要庞大的计算量; 传统遗传算法存在效率低、求解结果为局部最优解的问题。同时, 目前泵站内的机组流量分配大多考虑的是一管一机的情况, 而对泵站一管多机的布置形式的研究较少。为此, 本文建立了多个管道系统并存的泵站日经济优化模型,

采用改进遗传算法和动态规划法进行求解, 最后结合实际工程, 验证改进遗传算法在泵站优化中的适用性, 并比较了定速节流调节、变频调节两种方式下的泵站运行情况, 结果可为同类型泵站的经济运行提供借鉴。

2 泵站日经济优化模型的建立及求解

基于大系统协调分解理论, 构建三层泵站日经济优化模型: ①第1层。日经济运行优化模型。将泵站日总提水量分配给各时间段, 分析不同流量分配下泵站日运行费用, 以得到运行费用最小值; ②第2层。泵站流量优化分配模型。确定泵站时段内提水量 Q 的前提下, 分析不同管道系统流量分配下泵站的耗能, 以确定时段内泵站的最小耗能 $F(Q)$; ③第3层。管道系统优化模型。确定在给定管道系统流量 Q_i 下最小耗能 $F(Q_i)$ 的运行方案。这三层决策相互联系和影响, 构成整个模型, 见图1。

2.1 管道系统模拟计算

本文着重研究管道系统中均为同型号的机组的情况。对于同型号的机组并联运行, 无论是定

收稿日期: 2022-03-25, **修回日期:** 2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779154); 中央级公益性科研院所基金科研业务费专项资金项目(Y721007); 广东省水利科技创新项目(Y718007)

作者简介: 何彬浩(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市防洪与排涝工程安全, E-mail: 949849467@qq.com

通讯作者: 傅志敏(1979-), 女, 副教授、硕导, 研究方向为城市防洪与排涝, E-mail: zimingfier@163.com

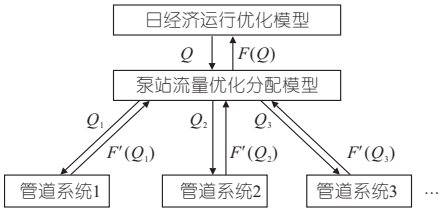


图 1 存在多管道系统的泵站日经济运行优化模型图

Fig. 1 Daily economic operation optimization model diagram of pump station with multiple piping systems

速节流调节或变频调节,均可通过模拟计算得到在管道流量限制范围内的运行结果。

(1)定速节流调节下的泵机组计算。当同型号机组以一管多机的形式布置时,每台工作机组的工作扬程及流量均相等。在管道总流量确定的前提下,采用如下方式进行计算:先确定不同运行台数情况下的流量限制,在满足流量限制及单泵流量约束的前提下确定运行机组台数,最后采用牛顿迭代法计算单台水泵的工作扬程与管道系统的扬程 H_1 相等时的流量,继而计算管道系统的耗能。

(2)变频调节下的泵机组计算。当同型号变频机组以一管多机的形式布置时,根据单台变频水泵的水力平衡方程及水泵并联运行特点可知,每台工作泵的扬程相等,管道系统流量等于工作泵的流量和。根据变速工况下 n 台水泵运行的水力平衡方程表达式及泵的轴功率表达式,可得变速工况下的总轴功率:

$$P = 9.81(H_{st} + \mu Q_0^2) \cdot \left(\frac{Q_1}{b_0 + b_1 Q_1/S_1 + b_2 Q_1/S_2 + b_3 Q_1/S_3} + \frac{Q_2}{b_0 + b_1 Q_2/S_1 + b_2 Q_2/S_2 + b_3 Q_2/S_3} + \dots \right) \quad (1)$$

式中, P 为管道系统的总轴功率, kW; H_{st} 为泵站的进水池与出水池的高程差, 即泵站净扬程, m; μ 为管道特性曲线系数; Q_0 为管道系统的总流量, m^3/s ; Q_k 为第 k 台水泵输水流量, $k=1, 2, \dots, n$, m^3/s ; S_k 为第 k 台机组转速比, 即实际运行转速与额定转速的比值, 一般不高于 1; b_0, b_1, b_2, b_3 分别为额定转速下流量—效率拟合曲线的系数。

根据式(1), n 台同型号变频水泵运行时, 当 $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$ 、 $S_1 = S_2 = \dots = S_n$ 时, 管道系统的总轴功率最小^[5]。

2.2 泵站流量优化分配模型

在泵站流量和工作水头一定的工况下, 对管道系统的流量进行分配, 寻求最小耗能方案。由于管道系统可在模型优化前先进行模拟计算, 继

而建立管道系统不同扬程、不同流量下的运行耗能数据集, 且此问题的本质是流量负荷在多个管道系统之间分配的最优化问题, 通过对泵站内的管道系统按顺序编号, 将每条管道作为一个阶段, 从而将问题变成一个多阶段决策过程的最优化问题, 因此采用动态规划法进行求解。模型如下。

(1)目标函数。模型考虑机组的总耗能最小, 其目标函数的表达式为:

$$\min F = \sum_{i=1}^m N(q_i) \quad (2)$$

$$N(q_i) = \sum_{k=1}^{n_i} \frac{9.81 Q_{ik} H_{ik}}{\eta_{ik}} \quad (3)$$

式中, m 为管道系统数; $N(q_i)$ 为管道系统在流量 q_i 下的耗能, kW; q_i 为管道系统的单位流量, m^3/s ; n_i 为第 i 个管道系统的泵机组数目; Q_{ik} 为第 i 个管道系统第 k 台机组的单位流量, m^3/s ; H_{ik} 为第 i 个管道系统第 k 台机组的扬程, m; η_{ik} 为第 i 个管道系统第 k 台机组的水泵效率。

(2)约束条件。总流量约束为:

$$\sum_{i=1}^m q_i = Q_t \quad (4)$$

管道系统流量约束为:

$$q_{\min} \leq q_i \leq q_{\max} \quad (5)$$

机组流量约束为:

$$Q_{\min} \leq Q_{ik} \leq Q_{\max} \quad (6)$$

管道特性曲线系数约束为:

$$\mu_i \geq \mu_{\min} \quad (7)$$

变频泵的约束为:

$$S_{\min} \leq S_{ik} \leq S_{\max} \quad (8)$$

式中, Q_t 为泵站日提水总量, m^3/s ; q_{\min} 、 q_{\max} 分别为单级泵站单位时段的最小、最大流量, m^3/s ; Q_{\min} 、 Q_{\max} 分别为单台泵单位时段的最小、最大流量, m^3/s ; μ_i 为第 i 个管道系统特性曲线系数; μ_{\min} 为管道系统最小特性曲线系数; S_{ik} 为第 i 个管道系统第 k 台变频泵的调速比; S_{\min} 、 S_{\max} 分别为变频泵的最小、最大调速比。

(3)阶段变量。每个管道系统均作为一个阶段。

(4)状态变量。选取第 i 阶段至最末阶段的管道累计流量作为状态变量, 则:

$$L_i = \sum_{x=i}^m q_x \quad (9)$$

式中, L_i 为第 i 个管道系统~第 m 个管道系统的累计流量; q_x 为第 x 阶段的流量。

(5)决策变量。采用每个管道系统的流量 q_i 作为决策变量。

(6)状态转移方程。表示泵站中第 $i+1$ 阶段

的状态变量 L_{i+1} 与第 i 阶段的状态变量 L_i 和决策变量 q_i 之间的关系,即:

$$L_{i+1} = L_i - q_i \quad (10)$$

式中, $L_1 = Q_i$ 、 $L_{m+1} = 0$ (Q_i 为泵站的时段单位流量)。

(7)求解采用逆序递推法。递推方程为:

$$F_i^*(L_i) = \min\{N_i(L_i, q_i) + F_{i+1}^*(L_{i+1})\} \quad (11)$$

式中, $F_i^*(L_i)$ 、 $N_i(L_i, q_i)$ 分别为第 i 阶段的最小耗能函数、耗能函数。

2.3 日经济运行优化模型

2.3.1 模型的建立

(1)目标函数及决策变量。综合考虑到工程实际操作及峰谷电价等因素,将一天划分为 N 个时段,每个时段的泵站单位流量作为决策变量,以泵站日运行费用 V_d 最低为目标函数,即:

$$\min V_d = \min \sum_{j=1}^N 9.81k_j N_{\min}(Q_j) \Delta t_j \quad (12)$$

式中, k_j 为时段 j 的电费单价,元/(kW·h); $N_{\min}(Q_j)$ 为经动态规划法计算得到泵站流量为 Q_j 时的 1 h 的最小耗能, kW; Δt_j 为时段 j 的小时数, h。

(2)约束条件。总流量约束为:

$$W_d = \sum_{j=1}^N Q_j \Delta t_j \quad (13)$$

式中, W_d 为 1 d 的总流量, m^3 。

泵站时段流量约束为:

$$Q_{\min} \leq Q_j \leq Q_{\max} \quad (14)$$

2.3.2 模型的求解

(1)约束条件处理。对于约束条件的处理一般有 4 种:①保留解决方法的可行性;②区分可行和不可行的解决方案;③惩罚函数法;④混合方法^[6]。而对于等式约束,一般采用的是惩罚函数法。因此,本文采用惩罚函数法处理日总流量约束。

(2)组合变异算子。传统的遗传算法易出现求解结果为局部最优解的问题,为了有效缓解这个问题,本文采用组合变异算子^[7]。具体做法为根据当前代数除以 3 的余数不同选择不同的变异算子,当余数为 1 时,采用均匀变异算子;当余数为 2 时,采用 BGA 算法变异算子;当余数为 3 时,采用高斯变异算子。其中,均匀变异算子具有一定的全局搜索及局部搜索能力;BGA 算法变异算子当压缩率及梯级划分取值适合时,全局搜索能力较强;高斯变异算子具有较强的局部搜索能力。在迭代计算过程中,组合变异算子既能保持应有的全局搜索能力,又能兼顾局部搜索能力。

日经济运行优化模型采用基于组合变异的改进遗传算法进行求解,其中,选择算子采用锦标赛选择算子,交叉算子采用两点交叉算子,变异算子采用组合变异算子,模型的计算精度为 0.01 m^3/s 。该模型的计算流程见图 2。

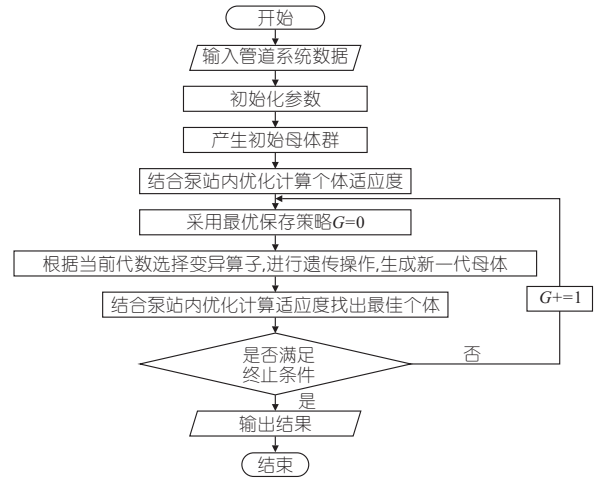


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow chart

3 实例应用

3.1 工程概况

蒙开个河库连通工程位于滇南地区,为滇南中心城市核心区水资源优化配置、统一调度的重点工程。其中南洞二级泵站承担着向下级泵站及水库输水的任务,在整个工程中具有典型性。南洞二级泵站安装有 6 台型号为 RDLO 400-880A2 的工作机组,采用一管三机,共两管的布置方式(图 3),同时考虑到输水的安全性,泵站每时段流量需不大于 6 m^3/s ,水泵参数见表 1。其中泵机组流量-扬程、流量-效率曲线根据出厂性能测试资料采用最小二乘法^[8]求解得到,流量范围根据高效区的定义来确定,即不小于机组最高效率的 90% 的流量范围。该泵站采用计划输水模式,以 1 d 为一个输水周期,根据峰谷电价的时段划分将 1 d 分为 5 个时段,其峰谷电价根据云南省发改委于 2020 年 11 月 30 日发布的《关于云南电网 2020~2022 年输配电价和销售电价有关事项的通知》中丰水期的峰谷电价所确定。

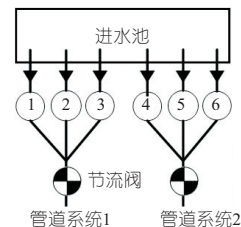


图 3 泵站布置图

Fig. 3 Layout of pumping station

表 1 水泵参数

Tab.1 Pump parameter

水泵参数	单位	参数值
设计泵扬程	m	215.5
单机流量范围	m ³ /s	0.62~1.16
转速	r/min	1 495
H-Q		$H=88.57Q^3-292.89Q^2+216.17Q+203.62$
η -Q		$\eta=5.08Q^3-61.05Q^2+103.34Q+40.1$

3.2 优化运行方案计算及结果分析

基于不同时段扬程和电价变化(表 2),根据日经济运行优化模型(图 1),选取该泵站日输水量为 30×10^4 、 35×10^4 、 40×10^4 m³ 内的典型工况,进行两组对比计算:①为了验证改进遗传算法的求解效果,比较传统遗传算法和基于组合变异算子的改进遗传算法求解当前泵站布置形式(即定速节流调节)的结果;②为了探讨不同调节方式对泵站运行费用的影响,采用改进遗传算法求解定速节流调节、机组加上变频器(即变频调节)两种情况下的泵站运行费用并进行比较,其中变频调节中转速比 S 的变化范围为 0.9~1.0,在模拟计算中离散精度为 0.01。

表 2 泵站时段划分、扬程和电价变化

Tab.2 Pump station time division, head and electricity price change

时段划分	时段长度/h	泵站净扬程/m	电价/(元·(kW·h) ⁻¹)
I(7:00~9:00)	2	208.5	0.348 6
II(9:00~12:00)	3	210.0	0.522 9
III(12:00~18:00)	6	212.0	0.348 6
IV(18:00~23:00)	5	215.0	0.522 9
V(23:00~7:00)	8	213.0	0.174 3

3.2.1 定速节流调节下改进遗传算法与传统遗传算法的结果对比

泵站采用改进遗传算法和传统遗传算法的求解结果见表 3。由表 3 可看出,时段 V 的电费相较于其他时段要小,最优方案应为泵站的最大流量,而泵站的最大流量是由安全输水流量及泵机组系统的最大流量所决定,5.83 m³/s 即为时段 V 的泵站最大流量,改进遗传算法所求方案中,时

表 3 改进遗传算法和传统遗传算法的结果比较

Tab.3 Comparison of results between improved genetic algorithm and traditional genetic algorithm

时 段	总流量 /10 ⁴ m ³	传统遗传算法			改进遗传算法		
		流量分配	实际流量	总费用/元	流量分配	实际流量	总费用/元
I	30	5.73	29.999	59 358	1.37	30.002	54 186
II		0			1.74		
III		5.21			4.79		
IV		0.81			0		
V		4.57			5.83		
I	35	4.49	35.002	69 898	4.48	35.031	68 210
II		1.48			0		
III		4.92			5.51		
IV		1.53			1.73		
V		5.83			5.83		
I	40	3.26	40.003	85 748	6.00	39.999	82 220
II		4.72			5.93		
III		5.80			5.78		
IV		1.80			0		
V		5.83			5.83		

注:流量分配单位为 m³/s;实际流量单位为 10⁴m³。

段 V 均能达到该流量。而由于两种算法求得的实际流量与给定的总流量相差极小,近乎可忽略,说明所选择的约束函数较符合实际;同时,在不同的日总流量下,改进遗传算法的寻优结果均优于传统遗传算法,且优化效果较明显。

3.2.2 一定泵站日输水量下不同调节方式的结果对比

采用改进遗传算法求解不同调节方式下的泵站日输水量日运行费用,本文仅列出输水流量为 35×10^4 、 40×10^4 m³ 的结果,见表 4。由表 4 可知:①运行方案中低电价时段所分配流量较大,且所求得机组效率均大于 85%,说明算法的寻优效果较好;②当日总流量为 35×10^4 m³ 时,变频调节运行费用较节流调节低 2 059 元,运行费用降低了 3.1%,效果较显著,但当日总流量为 40×10^4 m³ 时,采用变频调节的运行费用只降低 791 元,节能效果不太明显。其原因在于当日总流量为 35×10^4 m³ 时,泵机组工况点偏离设计工况点较远,因而变频调节相较于节流调节会展现出更大的优势;而当日总流量为 40×10^4 m³ 时,泵机组工况点偏离设计工况点较近,此时变频调节的优势被弱化。

表 4 两种调节方式下的管道流量分配及总费用结果

Tab.4 Pipeline flow distribution and total cost results under two regulation modes

时段	总流量 /10 ⁴ m ³	节流调节			总费用/元	变频调节			总费用/元
		流量分配 / (m ³ ·s ⁻¹)	管道 1 流量 / (m ³ ·s ⁻¹)	管道 2 流量 / (m ³ ·s ⁻¹)		流量分配 / (m ³ ·s ⁻¹)	管道 1 流量 / (m ³ ·s ⁻¹)	管道 2 流量 / (m ³ ·s ⁻¹)	
I	35	4.48	1.48	3.00	68 210	4.48	1.84	2.64	66 151
II		0	0	0		0	0	0	
III		5.51	2.57	2.94		5.51	2.75	2.76	
IV		1.73	0.74	0.99		1.73	0.86	0.87	
V		5.83	2.90	2.92		5.82	2.91	2.91	
I	40	6.00	2.97	3.03	82 220	6.00	3.00	3.00	81 429
II		5.93	2.94	2.99		5.71	2.85	2.86	
III		5.78	2.84	2.94		5.89	2.94	2.95	
IV		0	0	0		0	0	0	
V		5.83	2.91	2.91		5.83	2.91	2.92	

4 结 论

a. 存在多管道系统的输水泵站优化问题是组合优化调度问题,其实质为一个多阶段决策过程,在管道系统可通过模拟计算得到运行情况的前提下,采用动态规划法既能保证计算结果的准确性,又能保证计算速度。

b. 通过算例检验基于组合变异算子的改进遗传算法的性能,发现改进遗传算法求得的最优值优于传统遗传算法的求解结果,适用于日经济优化调度模型,有效降低了泵站日运行费用。

c. 当泵机组经常偏离设计工况点较远运行时,采用变频调节能节省较多的运行电费。

参考文献:

[1] 郑和震,张召,吴辉明,等. 梯级泵站输水系统日优化调度及经济运行研究[J]. 水利学报, 2016, 47(12):1558-1565.

[2] 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.

[3] 赵平伟,王海明,张薇薇. 基于改进遗传算法的水泵组合运行优化研究[J]. 电气自动化, 2020, 42(6):92-94.

[4] BRENTAN B M, LUVIZOTTO E, RIBEIRO L. PSO applied to reduce the cost of energy in water supply networks[J]. Applied mechanics & materials, 2013, 409-410:703-706.

[5] 刘雨. 变频水泵在水厂取水系统中的优化运行研究[D]. 扬州:扬州大学, 2019.

[6] 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.

[7] 王吉权,程志文,张攀利,等. 求解有约束优化问题的实数遗传算法改进研究[J]. 控制与决策, 2019, 34(5):937-946.

[8] 王彤,刘嘉祥,韦彪,等. T市供水泵站优化运行调度[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8):120-123,132.

Daily Optimal Scheduling of Pump Station Based on Improved Genetic Algorithm and Dynamic Programming

HE Bin-hao¹, FU Zhi-min¹, WU Wei^{2,3,4}, ZHAO Ze-jin⁵, ZHOU Bin⁵, WANG Gao-xu^{2,3,4}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 5. Honghe Nanyuan Water Supply Co., Ltd., Honghe 661000, China)

Abstract: Aiming at the problem of low economic benefits of pump stations caused by unreasonable dispatching, this paper took the pump stations with multiple piping systems as the research object. Considering the impact of peak-valley electricity price, a pump station daily economic optimization model was established by taking the minimum daily operating cost as the goal. The secondary pump station of the connected river reservoir project was taken as a study case to compare constant speed throttling regulation and frequency conversion regulation, which bases on the improved genetic algorithm and dynamic programming method of combined variation. The results show that the improved genetic algorithm is suitable for optimal dispatching of pumping station. At the same time, it is found that when the actual operating points of the pump unit far from the design operating point, adopting frequency conversion regulation has higher economic benefit.

Key words: improved genetic algorithm; dynamic programming method; pumping station; optimal scheduling; combinatorial mutation operator

(上接第 127 页)

Influence of Intersection Forms of Pumping Station Outlet Pipes on Hydraulic Performance of Pipe

ZHANG Zi-chao¹, ZHANG Yong², GAO Chang-jing², GAO Zhi-kai¹

(1. College of Energy and Power Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Jinan Hydraulic Engineering Service Centre, Jinan 250400, China)

Abstract: For the intersection problem of the outlet pipe shared by adjacent units of pumping station, three schemes for the intersection of the outlet pipe of the adjacent units was proposed based on the original scheme of the pump station. The influence of different intersection forms of the outlet pipe on the hydraulic performance of the pump station pipe was investigated with numerical simulation. The results show that the hydraulic losses of plan 2 and 3 were reduced by about 50% compared to the original plan. The flow field distribution before the junction point of the outlet pipes was improved obviously by the three optimization schemes. In the middle flow surface, the pressure and streamline distribution characteristics of plan 3 were better. Compared with the original scheme, plan 1 and plan 2 can improve the flow field of unit 2 and the vortex and secondary flow were reduced before the intersection point. After the intersection point, the flow field distribution of plan 2 was smoother and the hydraulic performance was better. Both the hydraulic performance of each scheme and construction were considered, plan 3 was finally determined as the optimal scheme.

Key words: pump station; outlet pipe; intersection form; hydraulic performance