

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.06.005

应用 GA-DE 组合算法的污泥输送管道设计参数优化

陆 海^{1,2}, 尹 军¹, 袁一星¹, 林英姿², 王建辉¹, 刘 伟²

(1.哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨; 2.松辽流域水环境教育部重点实验室(吉林建筑大学), 130118 长春)

摘 要:为使污泥输送管道的建设与运行经济合理,降低其建设与运行的总费用,构建了污泥输送管道的年折算总费用模型,分析了模型中污泥质量分数 w_w 和输送速度 v 对年折算总费用 W 的影响,并将此二设计参数选定为待优化变量。鉴于该模型的复杂非线性,利用 GA-DE 组合算法的全局并行寻优能力对上述模型进行求解。结果表明,该组合算法对于优化污泥输送管道的设计参数是有效的。以长春市某污水处理厂污泥输送工程为例,分析了污泥流量 $Q = 0.226 \sim 0.045 \text{ m}^3/\text{s}$ (污泥质量分数 $w_w = 0.8\% \sim 4.0\%$),输送距离 $L = 4.5 \times 10^3 \text{ m}$ 条件下的最优设计参数为:污泥质量分数 $w_w = 2.32\%$,输送流速 $v = 1.10 \text{ m/s}$,管径 $D = 300 \text{ mm}$,年折算总费用 $W = 52.83 \text{ 万元}$ 。

关键词:污泥;输送管道;GA-DE 组合算法;参数优化;费用模型

中图分类号: TU990.3 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2015)06-0027-06

Optimization of design parameters for slurries transportation pipeline based on combined GA-DE algorithm

LU Hai^{1,2}, YIN Jun¹, YUAN Yixing¹, Lin Yingzi², WANG Jianhui¹, LIU Wei²

(1.School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2.Key Laboratory of Songliao Aquatic Environment(Jilin Jianzhu University), Ministry of Education, 130118 Changchun, China)

Abstract: To insure the construction and running of slurries transportation pipeline be economical, the annualized conversion total cost model of slurries transportation pipeline was set up. Considering the impact of slurries concentration and slurries convey velocity on total cost of slurries transportation pipeline, these two parameters were chosen to be variables for optimizing. In view of the complex nonlinear of the model, the parallel global search ability of combined GA-DE (genetic algorithm-differential evolution) algorithm was utilized to optimize the design parameters of slurries transportation pipeline, the result of which was proved effective. Then this method was applied to a sludge treatment plant for final disposal in Changchun City. The optimization results showed that the optimum slurries concentration was 2.32%, the transportation velocity was 1.10 m/s, the diameter of the pipeline was 300 mm, and the annualized conversion total cost was 528.3 thousand Yuan RMB under the condition of flow rate of 0.226–0.045 m³/s (slurries concentration varying from 0.8% to 4.0%) and the transportation distance of 4.5 kilometers.

Keywords: slurries; transportation pipeline; combined GA-DE algorithm; parameters optimization; cost model

活性污泥法因其高效、低耗的优点成为城市污水处理的首选,但由此产生的大量污泥为污水处理厂增加了极大负担^[1]。由于污泥中富集了大

量重金属、有机成分及无机杂质等污染物质,若不经妥善处置,将对土壤、水体及大气造成严重污染。因此,污水处理厂污泥须运至污泥厂进行集中的处理处置^[2-3]。目前,污泥的输送方式主要有卡车运输、驳船运输和管道输送等。污泥的管道输送具有输送效率高、清洁卫生及可自动化控制程度高等优点,在工程界应用更为广泛,荷兰、美国、日本等均有成功的应用实例^[4-6]。

由于污泥中含有大量沉积性固体物质,其在

收稿日期: 2014-05-10。
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07021001-01)。
作者简介: 陆 海(1981—),男,讲师,博士;
尹 军(1954—),男,教授,博士生导师;
袁一星(1957—),男,教授,博士生导师。
通信作者: 尹 军, hitjunyin@163.com。

管道中的流动状态极为复杂^[7-8],因此,目前对污泥输送管道的设计和控制均以人工经验为主,缺乏科学依据,这在很大程度上造成了建设成本和运行成本的浪费.例如,在现行的设计中,污泥质量分数的选取往往不合理.由于污水厂产生的污泥含水率极高,污泥质量分数的细小差别将导致污泥量的巨大变化,进而影响到污泥输送成本.另外,污泥输送速度的选取也常常未经过仔细分析.若流速选取过小,则对应的输泥管道直径过大,会造成建设费用的剧增.反之,若流速选取过大,则相应的水头损失过大,从而导致运行费用的剧增.综上,目前对于污泥输送管道的分析和设计,只满足了基本的技术要求和一般的经济要求,未必是最优的^[9-11].因此,分析各设计参数对污泥输送管道费用的影响并加以优化,有助于提高污泥输送管道的管理水平,同时对节省输送总成本具有重要意义.

1 污泥输送管道总费用影响因素分析

污泥输送管道的总费用由建设费用和运行费用构成.前者是输送管道前期的建设费用和后期折旧大修费用之和,受当地材料、人工价格等因素制约,具体评价时以投资偿还期内年折算建设费用的形式体现,且在特定地区内具有确定性;后者是投资偿还期内维持输泥管道正常运行所需的电费,主要受污泥质量分数、输送流速两个因素的影响.因此,总体而言,输泥管道总费用的影响因素为污泥质量分数和输送流速.

1.1 污泥质量分数对污泥输送管道总费用的影响

污泥的管道输送是以水为介质运载污泥固体颗粒的过程,污泥质量分数的大小将直接影响输送管道的总费用,其原因在于污泥质量分数对污泥体积和污泥黏性的影响.一般而言,若输送的污泥质量分数高,则污泥中所含的固体颗粒物质较多而水分较少,污泥的体积减小.同时,由于大量细小固体污泥颗粒的介入,会导致颗粒间的流动水减少,污泥黏性增加;反之,若污泥质量分数低,则污泥中所含的固体颗粒物质较少而水分较多,污泥的体积增加.同时,由于污泥颗粒较少,颗粒间可流动的水量增多,污泥的黏性降低^[12-13].

由此,污泥质量分数对污泥输送管道总费用的影响表现在,若污泥质量分数高,则对应的污泥体积较小,虽能减小输送量,但由于高浓度污泥黏性较大,易形成宾汉流体^[14],即

$$\frac{8v}{D} = \frac{\tau_w}{\mu_B} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_w} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4 \right]. \quad (1)$$

式中: v 为平均流速, m/s ; D 为管道内径, m ; τ_w 为管壁处剪应力, Pa ; μ_B 为刚度系数或动力黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; τ_0 为污泥的屈服应力, Pa . 须首先克服较大的屈服应力才能产生流动,无疑将增加污泥输送管道运行时的电能消耗.

反之,若输送污泥质量分数低,虽能减小污泥的黏性进而减小流动阻力,然而由于增加了污泥体积同时考虑不使流动阻力增加过大,必然选择较大的管径,造成管道建设费用的升高.同时,由于污泥黏性减小又将节省单位体积污泥量的输送电耗.污泥质量分数、污泥流量、运行电耗间关系为

$$S = \frac{1}{Q_p} \cdot \frac{M_0}{w_w \cdot \rho} \cdot \frac{P}{\eta}. \quad (2)$$

式中: S 为污泥泵电能消耗, kWh ; M_0 为固体污泥质量, kg ; Q_p 为污泥泵流量, m^3/h ; w_w 为污泥质量分数, %; ρ 为污泥密度, kg/m^3 ; P 为污泥泵功率, kW ; η 为污泥泵效率, %.

因此,污泥质量分数是影响污泥输送管道总费用的一个关键因素,需经过优化计算方能确定最佳值.

1.2 输送流速对污泥输送管道总费用的影响

对于上述某一特定污泥质量分数,污泥体积虽为确定值,但输送流速的选取同样会造成输送管道总费用的改变.若选取较小的输送流速,虽能减小流动阻力进而减小管道运行费用,但由管径表达式 $D = \sqrt{4Q/\pi v}$ 可知,小流速对应的管径较大,会引起管道建设费用的升高;相反,较大的输送流速虽能减小管径并节省建设费用,却会增加污泥的流动阻力,进而增加后期运行费用.年折算总费用与输送流速的关系见图 1^[15],其中 W_1 为年折算建设费用, W_2 为年运行费用, W 为年折算总费用.由此可见,污泥输送管道运行过程中存在最优经济流速 v_e ,可使总费用最经济.因此,输送流速是影响污泥输送管道总费用的另一关键因素,需经优化分析确定.

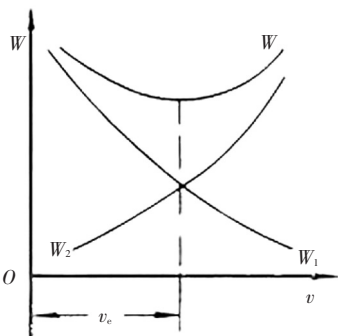


图 1 年折算总费用与输送流速的关系^[15]

综上,污泥质量分数与输送流速是决定污泥

输送管道总费用的制约性因素,为使污泥输送管道在最经济条件下运行,须确定两者同时满足的最优值.因此,上述污泥输送管道总费用优化问题,是建立污泥输送管道总费用数学模型,并采用一定的数学优化算法求解最优设计参数的过程.

2 污泥输送管道费用模型的建立及求解

2.1 污泥输送管道费用模型的建立

2.1.1 目标函数

建立如下的污泥输送管道年折算总费用模型:

$$W = \left(\frac{p}{100} + \frac{1}{t} \right) \sum (a + bD_{ij}^\alpha) l_{ij} + 0.01 \times 8.76\beta E\rho g \frac{Q(H_0 + \sum h_{ij})}{\eta}.$$
 (3)

式中: 右边第一项为污泥输送管道的年费用折算值和折旧大修费用之和;第二项为输送动力费用; W 为年折算总费用,元; a, b, α 为单位长度输泥管线造价公式中的系数和指数; D_{ij} 为管径, m; p 为每年扣除的折旧和大修费,以输送管道造价的百分数计; l_{ij} 为管道长度, m; t 为投资偿还期, a; E 为电费, 分/kWh; Q 为输送流量, L/s; η 为泵站效率; β 为管道工作时间变化系数; ρ 为污泥的密度, kg/L; g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; H_0 为污泥泵静扬程, m; $\sum h_{ij}$ 为输泥管线总水头损失, m.

上述目标函数中输送动力费用取决于输送过程中的流动阻力.鉴于污泥流动过程的复杂性,学者们提出了 R.Durand, I.Zandi and G.Govatos, H.A.Babclck, D.M.Newitt 等经验或半经验流动阻力公式,但均形式复杂不便于应用^[16]. Hazen-Williams 公式因形式简单且精度高而广泛用于污泥流动阻力的计算,本文即采用此公式:

$$h_f = 6.82 \left(\frac{L}{D^{1.17}} \right) \left(\frac{v}{C_H} \right)^{1.85}.$$
 (4)

式中: h_f 为输泥管道沿程水头损失, m; L 为管道长度, m; D 为管径, m; v 为污泥输送流速, m/s; C_H 为 Hazen-Williams 系数,其值取决于污泥质量分数,适用于各种类型的污泥.为安全起见,各类污泥在应用 Hazen-Williams 公式计算出沿程水头损失后均乘以水头损失系数 K , 见表 1.

2.1.2 约束条件

1) 污泥质量分数的约束条件. 城市污水处理厂浓缩池中污泥质量浓度通常为 $8.0 \times 10^3 \sim 4.0 \times 10^4 \text{ mg/L}$, 则污泥质量分数 w_w 的约束条件为 $0.8\% \leq w_w \leq 4.0\%$.

2) 输送流速的约束条件. 污泥中含有的大量固体颗粒使其流变特性不同于清水,主要表现为污泥黏性随污泥质量分数增大而增加.若输送流速过小,则易形成层流而导致很大的流动阻力.因此,应保证污泥输送管道在紊流态下运行^[16-17], 输送流速不低于污泥的下临界流速 v_c ($v_c = 1.10 \text{ m/s}$).

3) 管径的约束条件. 为防止污泥管道堵塞,应对污泥输送管道的最小管径加以限定.参照污泥重力管道输送的最小管径 200 mm 及市政污水重力排放的最小管径 200 mm^[16], 确定污泥有压管道输送的最小管径为 150 mm; 同时,根据标准管径及污泥量的约束,以 mm 计,管径的约束条件为 $D \in \{150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1\,000\}$.

表 1 污泥质量分数、 C_H 及 K 值

序号	$w_w / \%$	C_H	K	
			生污泥及浓缩污泥	消化污泥
1	0	100	1.0	1.0
2	2.0	81	1.5	1.1
3	4.0	61	2.5	1.3
4	6.0	45	4.3	1.6
5	8.5	32	7.0	2.3
6	10.1	25	9.2	3.3

2.2 基于 GA-DE 组合算法的污泥输送管道费用模型求解

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是 John. H. Holland 教授根据自然选择和基因遗传学原理提出的随机优化搜索算法,具有适应性强、并行计算及全局优化等优点,尤其适用于离散变量的优化问题^[18-20]. 差分进化 (differential evolution, DE) 算法是由 Storn R 和 Price K 提出的一种随机并行直接搜索算法,可对非线性不可微连续空间函数进行最小化,具有易用性、稳健性和强大的全局寻优能力^[21-23]. 鉴于上述两种算法各自的优点, GA-DE 组合算法具有更高效的搜索能力.

基于 GA-DE 组合算法的污泥输送管道的优化设计,是将输送管道的年折算总费用作为目标函数,同时将该优化问题的水力计算模块与组合算法模块连接,对输入数据进行编译,执行选择、交叉及变异计算,通过父代优良基因进化出下一代个体,并利用水力计算及费用模块和适应度函数模块进行评价.按上述过程,经往复进化后得到最优个体,并输出最优污泥质量分数、输送流速、年折算建设费用、年运行费用及年折算总费用等结果. GA-DE 组合算法优化参数过程如图 2.

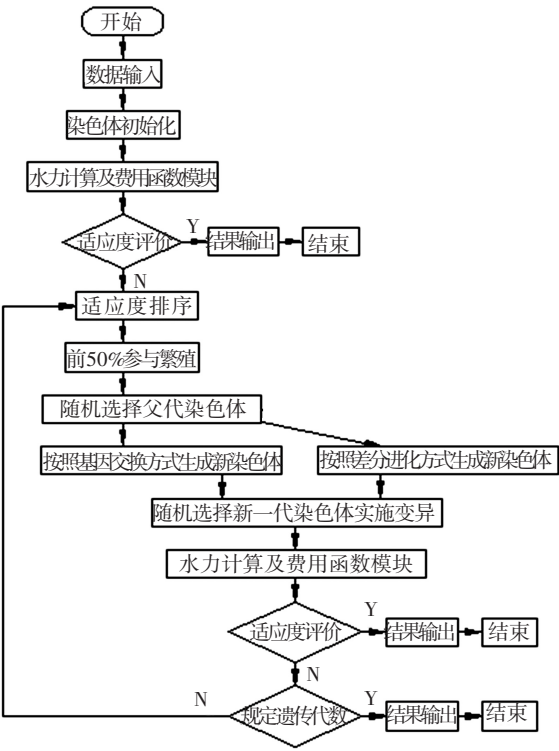


图2 GA-DE 组合算法优化参数过程

由于遗传算法和差分进化中都存在随机的交叉、变异操作,产生的新个体必然不能均满足污泥质量分数、输送流速以及管径的约束,须强制降低其适应度以弱化其竞争力,即采用罚函数的方式对约束条件进行处理^[18]。

经试算,本优化设计程序中 GA-DE 组合算法运行参数确定如下:采用符号编码方法;群体规模 n 设定为 50;交叉概率 P_c 设定为 0.9;变异概率 P_m 设定为 0.015;终止代数 M 设定为 800 代。

3 长春市某污水处理厂污泥输送管道费用分析

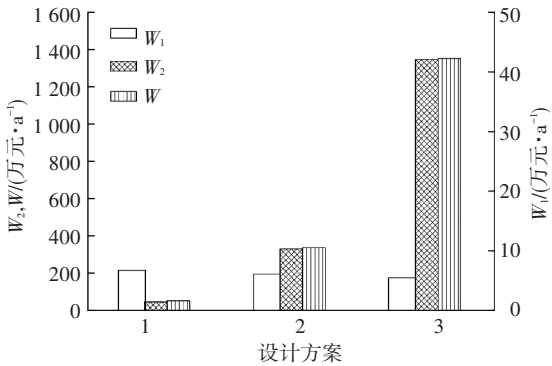
3.1 工程概况

长春市某污水处理厂位于长春市周边,污水处理能力 $39\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,污水再利用 $10^5\text{ m}^3/\text{d}$,产生的污泥为初沉污泥、剩余污泥及化学污泥的混合体。污泥流量 $Q=0.226\sim0.045\text{ m}^3/\text{s}$ (污泥质量分数 $w_w=0.8\%\sim4.0\%$),拟输送至 $4.5\times10^3\text{ m}$ 外的污泥处理厂集中处置。管材选用球墨铸铁管。

3.2 优化结果分析

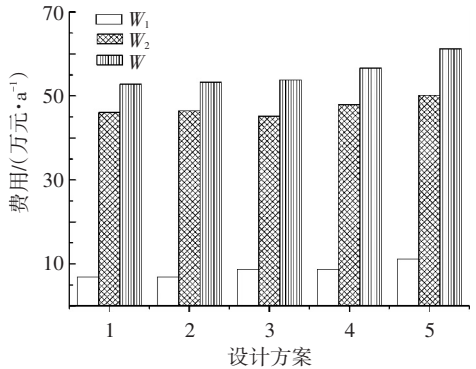
对该污泥管道输送工程建立了输送费用模型,并应用 GA-DE 组合算法对该模型进行了求解,经遗传进化计算,确定最优污泥质量分数 $w_w=2.32\%$,输送流速 $v_e=1.10\text{ m/s}$,管径 $D=300\text{ mm}$,年折算建设费用 $W_1=6.81$ 万元,年运行

费用 $W_2=46.02$ 万元,年折算总费用 $W=52.83$ 万元,最优方案与其他方案比较见图 3~5。



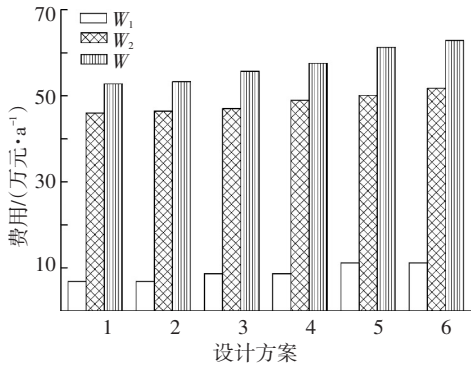
* 方案 1: $w_w=2.32\%$, $v=1.10\text{ m/s}$, $D=300\text{ mm}$; (* 为最优方案)
方案 2: $w_w=2.31\%$, $v=2.48\text{ m/s}$, $D=200\text{ mm}$;
方案 3: $w_w=2.31\%$, $v=4.41\text{ m/s}$, $D=150\text{ mm}$ 。

图3 最优方案与相同污泥质量分数方案比较



* 方案 1: $w_w=2.32\%$, $v=1.10\text{ m/s}$, $D=300\text{ mm}$;
方案 2: $w_w=2.31\%$, $v=1.11\text{ m/s}$, $D=300\text{ mm}$;
方案 3: $w_w=1.31\%$, $v=1.10\text{ m/s}$, $D=400\text{ mm}$;
方案 4: $w_w=1.29\%$, $v=1.11\text{ m/s}$, $D=400\text{ mm}$;
方案 5: $w_w=0.84\%$, $v=1.10\text{ m/s}$, $D=500\text{ mm}$ 。

图4 最优方案与相同输送流速方案比较



* 方案 1: $w_w=2.32\%$, $v=1.10\text{ m/s}$, $D=300\text{ mm}$;
方案 2: $w_w=2.31\%$, $v=1.11\text{ m/s}$, $D=300\text{ mm}$;
方案 3: $w_w=1.30\%$, $v=1.11\text{ m/s}$, $D=400\text{ mm}$;
方案 4: $w_w=1.28\%$, $v=1.12\text{ m/s}$, $D=400\text{ mm}$;
方案 5: $w_w=0.84\%$, $v=1.10\text{ m/s}$, $D=500\text{ mm}$;
方案 6: $w_w=0.83\%$, $v=1.11\text{ m/s}$, $D=500\text{ mm}$ 。

图5 最优方案与经济较优方案比较

由图 3 可以看出,相同污泥质量分数下,最优输送流速为 $v_c = 1.10 \text{ m/s}$,对应管径 $D = 300 \text{ mm}$,此时年折算建设费用 W_1 虽高于第 2 及第 3 方案,年运行费用 W_2 却远低于后两个方案.原因在于随管径减小污泥输送速度增长很快,导致流动阻力迅速增加并使年运行费用过大.另外从 3 种方案中均可看出,年折算建设费用 W_1 均小于相应的年运行费用 W_2 ,表明污泥输送管道总费用中管道运行费用占较大比例.由图 4 中方案 3 与方案 2 的比较发现,为尽量维持较小的输送流速,进而减小沿程水头损失及后续运行成本,可在降低污泥质量分数的同时适当放大污泥管道管径,从而使得运行成本适当降低,然而同时引起建造费用上升.因此,运行成本的降低能否大于或抵消建造费用的上升,须经过详细比较后确定.从图 5 可看出,污泥质量分数 $w_w = 2.32\%$ 为经济较优方案的最大极限值,即若污泥质量分数大于此极限值,将有两类运行工况出现:一是在不改变管径的条件下,由于污泥流量减小而使输送流速小于污泥的下临界流速 v_c ($v_c = 1.10 \text{ m/s}$),此时不满足对于输送流速的约束条件,即在输送技术上不可行;二是为使流速不低于 v_c ,将输泥管管径缩小一级,此时输泥成本则会因沿程阻力的迅速增加而增长较快,经济上不合理(图 3 中方案 2 与方案 3).

工程实践指出,鉴于污水处理厂储泥池污泥质量分数精确控制的复杂性及其他实际限制因素的影响,污泥输送管道很难甚至不可能在上述最优条件下运行.因此,为进一步提高上述 GA-DE 组合算法的实用性,须以污泥输送管道运行工况相似为前提将污泥质量分数分为若干个区域,并在实际污泥质量分数所处区域内筛选优化方案.

在本实例设计中:① $w_w = 0.80\% \sim 1.49\%$ 范围内可选用 150, 200, 300 和 400 mm 4 种管径;② $w_w = 1.50\% \sim 2.39\%$ 范围内可选用 150, 200 和 300 mm 3 种管径;③ $w_w = 2.40\% \sim 4.00\%$ 范围内可选用 150 和 200 mm 两种管径.故将上述污泥质量分数分为 3 个区域.

第 I 质量分数分区: $w_w = 0.80\% \sim 1.49\%$;第 II 质量分数分区: $w_w = 1.50\% \sim 2.39\%$;第 III 质量分数分区: $w_w = 2.40\% \sim 4.00\%$.

同时,以各质量分数分区的中值质量分数对应的比年折算总费用 W'_0 为基准,按式(5)、(6)建立比年折算总费用偏离率曲线,即

$$W' = \frac{10^6 \times W}{3\,600 \times 24 \times 365 \times Q \times L} \quad (5)$$

式中: W' 为比年折算总费用,分 $\cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$; W

为年折算总费用,分; Q 为污泥流量, m^3/s ; L 为输送距离, m .

$$\lambda = \frac{W' - W'_0}{W'_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: λ 为比年折算总费用偏离率,%; W' 为比年折算总费用,分 $\cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$; W'_0 为比年折算总费用基准值,分 $\cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$.结果见图 6~8.

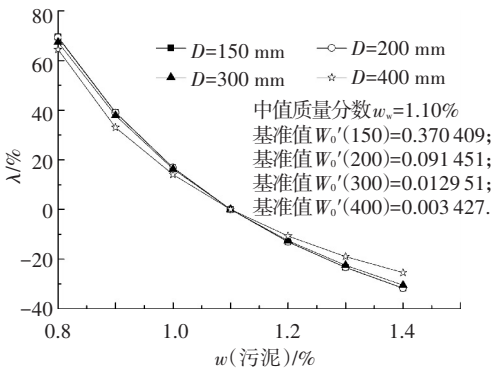


图 6 第 I 质量分数分区比年折算总费用偏离率

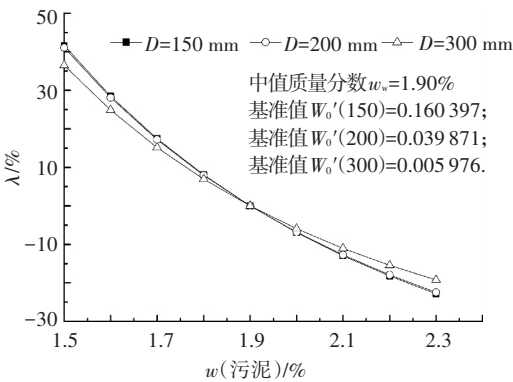


图 7 第 II 质量分数分区比年折算总费用偏离率

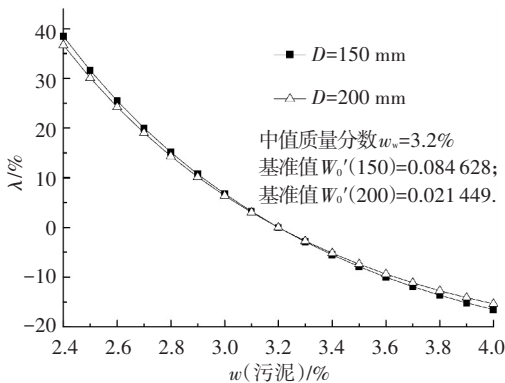


图 8 第 III 质量分数分区比年折算总费用偏离率

由图 7 可以看出,在第 II 质量分数分区内,基准值 $W'_0(300) = 0.005\,976$,远低于 $W'_0(200)$ 及 $W'_0(150)$,且在 $w_w = 2.32\%$ 时偏离率达到最小值,故此设计方案年折算总费用最低.此方案即为上述分析过程中的最优设计方案 ($w_w = 2.32\%$, $D = 300 \text{ mm}$, $v = 1.10 \text{ m/s}$).以此类推,可对其他设计方案比较筛选,并确定优化设计参数.

4 结 论

1) 污泥输送管道年折算总费用由年折算建设费用和年运行费用构成,且总费用模型为非线性不可微连续空间函数.GA-DE 组合算法因具有稳健性、并行计算及全局优化等优点而适用于对上述污泥输送管道年折算总费用模型的求解。

2) 长春市某污泥输送工程参数优化结果表明,在污泥流量 $Q = 0.226 \sim 0.045 \text{ m}^3/\text{s}$ (污泥质量分数 $w_w = 0.8\% \sim 4.0\%$)、输送距离 $4.5 \times 10^3 \text{ m}$ 条件下的最优设计参数为:污泥质量分数 2.32%, 输送流速 1.10 m/s, 管径 300 mm, 年折算总费用 $W = 52.83$ 万元。

3) 优化方案中年运行费用均占绝大比例,且输送流速均等于或略大于下临界流速 v_c , 因此,控制输送流速略大于 v_c 有利于节省电耗并降低总费用。

4) 优化结果表明,污泥质量分数对输送管道费用影响显著,且存在极限浓度. 为保证运行方案的技术可行和经济合理,应保证污泥质量分数不高于此极限值. 另外,可利用比年折算总费用偏离率在实际污泥质量分数所处分区内进行方案优化筛选。

参考文献

- [1] WANG Zheng, WANG Lin, WANG Baozhen, et al. Experimental study on zero excess sludge production process with ozonation unit in MBR process [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42 (1): 46–50.
- [2] 李建政, 昌盛, 刘枫. 不同预处理方法对剩余污泥厌氧发酵产氢的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43 (6): 51–56.
- [3] 刘弦. 城市污水处理厂污泥管道输送阻力特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2007.
- [4] 姜泳文. 城市污水处理厂污泥的管道运输[J]. 冶金矿山设计与建设, 2000, 32(2): 32–36.
- [5] WANG Wuchang, FAN Shuanshi, LIANG Deqing, et al. Experimental study on flow characteristics of tetrahydrofuran hydrate slurry in pipelines [J]. Journal of Natural Gas Chemistry, 2010, 19(3): 318–322.
- [6] MATOUSEK V. Pressure drops and flow patterns in sand-mixture pipes [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(6): 693–702.
- [7] 孙志林, 邵凯, 许丹, 等. 浑水推移质分组输沙研究 [J]. 水利学报, 2012, 43(1): 99–105.

- [8] 秦毅, 李子文, 曹如轩, 等. 高含沙水流的整体停滞淤积及其影响[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1302–1307.
- [9] CHEN Liangyong, DUAN Yufeng, LIU Meng, et al. Slip flow of coal water slurries in pipelines [J]. Fuel, 2010, 89(5): 1119–1126.
- [10] WANG Wuchang, FAN Shuanshi, LIANG Deqing, et al. A model for estimating flow assurance of hydrate slurry in pipelines [J]. Journal of Natural Gas Chemistry, 2010, 19(4): 380–384.
- [11] KAUSHAL D R, KIMIHIKO S, TAKESHI T, et al. Effect of particle size distribution on pressure drop and concentration profile in pipeline flow of highly concentrated slurry [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(7): 809–823.
- [12] SCHAAN J, SUMNER R J, GILLIES R G, et al. The effect of particle shape on pipeline friction for Newtonian slurries of fine particles [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2000, 78: 717–725.
- [13] MATOUSEK V. Research developments in pipeline transport of settling slurries [J]. Powder Technology, 2005, 156: 437–51.
- [14] FANGARY Y S, ABDEL G A S, HAGGARD S M, et al. The effect of fine particles on slurry transport processes [J]. Minerals Engineering, 1997, 10(4): 427–439.
- [15] 赵洪宾, 严熙世. 给水管网系统理论与分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [16] 张自杰. 排水工程[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [17] 费祥俊. 浆体与颗粒物料输送水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [18] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [19] 白丹. 重力单水源环状管网优化设计的遗传—线性规划算法[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 378–382.
- [20] 吕谋, 董深, 王磊. 基于遗传算法的给水管网多工况优化设计[J]. 水利学报, 2007, 38(12): 1507–1511.
- [21] 范瑜, 金荣洪, 耿军平, 等. 基于差分进化算法和遗传算法的混合优化算法及其在阵列天线方向图综合中的应用[J]. 电子学报, 2004, 32(12): 1997–2000.
- [22] 刘淳安. 基于核分布估计的动态多目标优化进化算法[J]. 山东大学学报: 工学版, 2011, 41(1): 167–172.
- [23] 葛延峰, 金文静, 高立群, 等. 多种群并行的自适应差分进化算法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(4): 481–484.

(编辑 刘 彤)