

基于改进型多目标遗传算法的含气水锤防护方案优化研究

杨祖强¹, 罗希¹, 王文文²

(1. 中工武大设计研究有限公司, 武汉 430072; 2. 海市青浦区水务局, 上海 201715)

摘要: 阐述了气液两相长距离输水系统停泵水力过渡过程的特点, 对水锤防护效果影响因素进行分析, 采用反问题分析法, 以惯性飞轮转动惯量、进排气阀口径、单向调压塔参数及出口阀的关闭程序参数作为决策变量, 以特征线法为基础, 以最大水锤压力值最小和工程投资最低作为目标函数, 建立数学优化模型, 并采用改进型多目标遗传算法(MOGAs)对优化模型求解。工程应用表明: 本数值模拟方法能得出最经济、可靠的水锤防护方案, 为长距离输水系统水锤防护方案确定提供了一种新的思路。

关键词: 泵站; 停泵水力过渡过程; 改进型多目标遗传算法; 水锤防护

中图分类号: TU991.39; TV136.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)01-0200-05

Research on program optimization of gas-containing water hammer protection based on genetic algorithm of improved multi-objective

YANG Zuqiang¹, LUO Xi¹, WANG Wenwen²

(1. Camce WHU Design & Research Co., Ltd, Wuhan 430072, China;

2. Water Bureau of Shanghai Qingpu District, Shanghai 201715, China)

Abstract: The paper expounded the characteristics of the pump-stopping hydraulic transient of a long-distance water supply system of gas-liquid two-phase flow and analyzed the main influence factors of the water hammer protection. By using an analysis method of inverse problem, taking the inertia flywheel rotational inertia, the inlet and exhaust valve diameter, one-way pressure regulating tower parameters and closing procedure parameters as decision variables, taking a characteristic line method as the basis, and taking the minimum of maximum water hammer pressure value and the lowest project investment as objective functions, the paper established a mathematical optimization model. The improved multi-objective genetic algorithm (MOGAs) was used to solve the optimization model. The application of a specific project shows that the most economical and reliable program of water hammer protection is acquired by using the numerical simulation method, which can offer a new idea for the determination of water hammer protection program of long-distance water supply system.

Key words: pumping station; process hydraulic transient of pump-stopping; multi-objective genetic algorithm of improved type; water hammer protection

长距离高扬程输水管道需要进行水锤分析计算, 从而指导工程设计, 否则容易导致严重的水锤事故。因此, 如何准确地计算分析水锤过程, 预测其可能产生的最大及最小水锤压力, 以及如何进行水锤的控制和防护, 降低水锤防护设备占工程总投资量, 确保泵系统的安全运行, 成为一个十分重要的技术问题。

本文基于改进型多目标遗传算法(MOGAs), 对含气水锤防护方案及工程投资量进行优化研究, 充分考

虑含气水锤防护特点, 采用特征线电算法, 在确保水锤防护要求的前提下, 降低工程投资, 实现最优化设计。

1 水锤防护原理及计算模型

1.1 含气水锤波速计算

由于自由气体的孔隙率、压力及水锤波传播速度之间有着密切联系, 当水体中含有空气后, 其体积弹性模量 K 值将减小。假设长直管道中的自由气体均匀地

分布在管道中,则水锤波速可按式计算^[1-2]:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma - (\gamma - \gamma')}{g} \frac{W'}{W} \left[1 + \left(\frac{K}{K'} - 1 \right) \frac{W'}{W} + \frac{D}{Ee} \right]}} \quad (1)$$

式中: γ 为水的容重, N/m^3 ; γ' 为空气的容重, N/m^3 ; $\frac{W'}{W}$ 为空气的容积掺入率, %; W 为混合液的体积, m^3 ; W' 为混合液中气泡的体积, m^3 ; K 为水的体积弹性模量, N/m^2 ; K' 为空气的体积弹性模量, N/m^2 。

1.2 水锤计算的特征线法

水锤基本方程是由运动方程和连续性方程组成的双曲型偏微分方程组。为了实现计算机的编程计算,需采用特征线方法将该偏微分方程组离散化,为此,先沿特征线方向将其转换为水锤全微分方程:

$$C^+ : \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dV}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V + a \end{cases} \quad (2)$$

$$C^- : \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dV}{dt} + \frac{dV}{dt} - \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V - a \end{cases} \quad (3)$$

经计算,可得适宜于编入计算机程序的相容性方程为:

$$\begin{aligned} H_p &= \frac{C_p + C_M}{2} \\ Q_p &= \frac{C_p - C_M}{2B} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_p &= H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1} | Q_{i-1} | \\ C_M &= H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1} | Q_{i+1} | \\ R &= \frac{f\Delta x}{2gDA^2}, B = \frac{a}{gA} \end{aligned} \quad (5)$$

2 水锤防护效果的影响因素

2.1 水泵出口阀门关闭水锤防护效果的影响因素

消除停泵水锤危害的问题包括以下两个方面:一是降低管路内的最高水锤压力;二是降低泵的反向逸转速度。无阀管路的压力波动一般并不大,但反转速度很大。有普通止回阀的管路可避免机组反转,但可能引起相当大的管路水锤压力。缓闭阀的动作设计必须恰当,否则可能造成比普通止回阀更为不利的压力波动,因此合理设置阀门关闭时间和关闭角度,可明显降低管路内的升压,又可有效地减小机组的反转速度。

2.2 进排气阀水锤防护效果的影响因素

在管路中可能发生负压的断面处,设置自动进气装置是破坏真空消除负压有害作用的一种简易有效的措施。当该处压强开始降到大气压以下时,外界空气通过注气阀自动进气,从而维持该断面为大气压;当水锤波再次袭向该断面时,空气可通过通气阀自动排出,在空气排完之后,又可按连续水柱的情况计算该断面处的压强,在这种顺利排气情况下,空气对水锤没有缓冲作用,所以断流弥合水锤升压很高。因此在负压严重断面区域常常选用“快进慢排”的进排气阀,合理选取进排气阀口径。

2.3 单向调压塔水锤防护效果的影响因素

单向调压塔是一种只允许单向流动的调压塔,主要用于防止管道中产生负压。采用单向调压塔进行水锤防护时,影响其防护效果的参数主要有 4 个:单向调压塔的安装位置、单向调压塔塔体直径、塔内初始有效水头和补水管的直径。单向调压塔一般应安装在最容易发生水柱分离的部位,其位置可依据管线纵剖面布置确定。对于其他 3 个参数,首先调压塔必须有足够的容积,以满足主管道内产生负压及气穴空腔时所需的补水量,确保塔内水体不被泄空;其次,塔内初始水压必须满足要求,能够满足重力作用向管内补水速度,确保能够及时补水;再次,补水管直径需要满足要求,满足过流能力。综上所述,以上 3 个参数对单向调压塔的水锤防护效果及工程造价起到决定性作用,在一定范围内,单向调压塔容积越大,水锤压力显著减小。

2.4 惯性飞轮水锤防护效果的影响因素

随着铸造工艺及水泵电机型号的改进,水泵机组的转动惯量 J 显著减小。因此当发生事故断电停泵时,水泵机组转速下降很快,供水量急速减少,致使整个泵管系统中水压普遍下降,从而水力过渡过程更加恶化,因此适当增加惯性飞轮,提高水泵机组惯量 J ,能有效减小水锤压力。

3 优化模型及求解方法

通过对进排气阀、调压塔尺寸、转动惯量大小和泵出口阀的关闭参数以及不同方案的造价影响因素同时进行优化,利用改进型多目标遗传算法,确定最优防护方案。

3.1 决策变量

选取惯性飞轮转动惯量 J_w 、进排气阀口径 D_q 、单向调压塔参数(直径 D_t 、初始有效水头 H_t 、补水管直径 D_b)及出口阀的关闭程序参数(快关时间 T_1 、快关角度

θ_1 、慢关时间 T_2 、慢关角度 θ_2), 共 9 个决策变量。

3.2 目标函数

停泵水锤常规防护方案有优化泵出口阀门关闭程序、增加机组转动惯量、布置进排气阀及布置调压塔 4 种。不同方案对水锤防护均有一定的作用, 因此针对不同类型的水锤防护效果及工程投资进行优化, 希望最大水锤压力越小越好, 工程投资越小越好。因此存在两个目标函数, F_1 为各节点水锤压差的平均值, F_2 为工程造价指标, 目标函数为:

$$\begin{aligned} \min F_1(J, D_q, D_t, H_t, D_b, T_1, \theta_1, t_2, \theta_2) \\ = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \{H_{\max}(i) - H_{\max}(i')\} \\ \min F_2(J, D_q, D_t, H_t, D_b, T_1, \theta_1, t_2, \theta_2) \\ = \sum_{I=1}^{n_s} k_I f_I \quad (6) \\ = k_1 \frac{N_1 W_1}{W_z} + k_2 \frac{N_2 W_2}{W_z} + k_3 \frac{N_3 W_3}{W_z} + k_4 \frac{N_4 W_4}{W_z} \end{aligned}$$

式中: i 为节点编号, $i = 1, 2, \dots, n_s$; $H_{\max}(i)$ 为各节点出现的最大水锤压力; $H_{\max}(i')$ 为各节点的管道允许最大压力。 F_2 为各子目标被赋予权重后线性叠加的经济性指标; I 为防护类型, $I = 1, 2, 3, 4$, 分别代表惯性飞轮、泵出口阀、排气阀、调压塔防护。 k_i 为各防护类型子目标的权重, 且 $\sum_{I=1}^n K_I = 1$; f_I 表示第 I 个子目标归一化后的值; $n = 4$, 表示子目标的数量; N_I 为所对应防护类型所用设备的数量, W_I 为对应防护类型所用设备的单价, W_z 为管线工程总投资。

3.3 约束条件

约束条件包括系统约束、水泵倒转转速和倒转时间约束、最大水锤升压约束、关阀时间约束、决策变量上下限约束。

(1) 系统约束。瞬变流的基本方程、系统上游边界条件、阀门的边界条件、调压塔边界条件、水泵端边界条件、系统下游边界条件、液柱分离模型等^[3]。

(2) 离心泵倒转转速和倒转时间约束。满足《泵站设计规范 GB/T 50265 - 2010》要求的“离心泵最高反转速不应超过额定转速的 1.2 倍, 超过额定转速的持续时间不应超过 2 min”, 即

$$[n_{ra}]_{\max}/n_r \geq -1.2$$

$$t_{ra} < 120 \text{ s}$$

式中: $[n_{ra}]_{\max}$ 为水泵最大倒转速; n_r 为水泵额定转速; t_{ra} 为超过额定转速的持续时间。

(3) 最大水锤升压约束。满足《泵站设计规范

GB/T 50265 - 2010》及《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程 CECS193:2005》要求的“最高压力不应超过水泵出口额定压力的 1.3 ~ 1.5 倍”, 即

$$H_{\max}(i) < (1.3 \sim 1.5) H_{ra, out}$$

$$H_{\max}(i) - H_{\max}(i') < 0$$

式中: $H_{\max}(i)$ 为各节点出现的最大水锤压力; $H_{\max}(i')$ 为各节点的管道允许最大压力; $H_{ra, out}$ 为水泵出口额定压力。

(4) 关阀时间和角度约束。关阀总时间不应超过允许的最长时间 $[T]_{\max}$, 本研究取 60 s。快关速度要大于慢关速度, 即

$$T_1 + T_2 < [T]_{\max} = 60 \text{ s}$$

$$\theta_1/T_1 > \theta_2/T_2$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$$

(5) 决策变量上下限约束。各决策变量的取值必须在规定的范围内, 即

$$0 < T_1 < [T]_{\max}, 0 < T_2 < [T]_{\max}, 0 < \theta_1 < 90^\circ$$

$$D_{tmin} < D_t < D_{tmax}, H_{tmin} < H_t < H_{tmax}, D_{bmin} < D_b < D_{bmax}$$

压力上下限约束要求管道系统中个点的最大、最小水锤压力在允许范围内, 即

$$H_{\max}(i) - H_{\max}(i') < 0, H_{\min}(i) - H_{\min}(i') < 0$$

进排气阀口径在《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程 CECS193:2005》推荐范围以内, 即

$$1/8 D_{pipe} < D_q < 1/5 D_{pipe}$$

式中: D_q 为排气阀直径; D_{pipe} 为排气阀安装位置对应输水管直径。

新增飞轮转动惯量约束应满足水泵与增装飞轮两者惯量之和 $(J_1 + J_w)$ 应小于电动机样本 $(Y$ 系列) 技术数据表中所给的 $J_{\text{负载}}$ 项的数值^[1], 即:

$$J_1 + J_w < J_{\text{负载}}$$

水锤防护设备投资不超过管线工程总投资的 30%, 即

$$N_1 W_1 + N_2 W_2 + N_3 W_3 + N_4 W_4 < 0.3 W_z$$

3.4 求解方法

目标是水锤防护方案的参数 $J, D_q, D_t, H_t, D_b, T_1, \theta_1, t_2, \theta_2$ 的值, 使得工程安全性能指标 F_1 及工程造价指标 F_2 最小, 由于此问题是个离散化的问题, pareto 点和小环境难以形成, 因此采用改进的 MO-GAs 就可以选择相邻的两个 pareto 点作为父本, 使他们的领域内产生新的 pareto 点, 采用适应度共享机制和交叉限制等策略, 这样可以保证父代的优异性能大部分传递到子代中, 同时大大减少计算量, 从而使整个算法最终收敛于 pareto 解集。

4 工程应用

4.1 工程概况

某污水输送供水工程,输水管道采用压力管道输水,管道纵剖面高程见图 1。管线总长 5 150 m,采用钢塑复合管,管径为 500 mm,属于高扬程,较平坦输水工程。共设有 3 台离心泵(2 用 1 备),水泵型号为 S200-500 单级双吸离心泵,额定流量 $0.104\text{ m}^3/\text{s}$,设计净扬程 137.75 m,额定转速 2 960 r/min,机组转动惯量 $47.2\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。管道输送的水质为工业污水及浓盐水,水中含有一定溶解气体,如 0.25% 游离氨、0.05% 二氧化碳、0.04% 甲烷等。

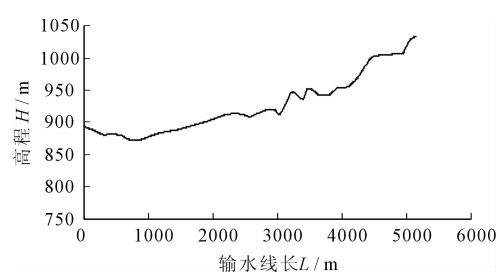


图 1 管线纵剖面高程图

4.2 无防护措施时的水锤

以最不利运行工况即机组因意外停电而发生事故停泵的工况进行分析(主要包括发生意外停泵、泵出口阀不关闭条件下的水泵特征量变化过程、凸起点净压力水头变化过程和管线压力包络线)^[4]。在发生事故停泵后的 2.7 s,水泵开始倒流,最大倒泄流量为额定流量的 1.103 倍;在发生事故停泵后的 4.31 s 水泵开始倒转,水泵的最大到转速达到额定转速的 1.39 倍,超过《泵站设计规范 GB/T 50265-2010》要求的 1.2 倍,因此必须确保停泵后泵出口阀的可靠关闭。在发生事故停泵后泵出口阀的可靠关闭。在发生事故停泵后的 0.5 s 时,凸起点处的压力首先降至气化压力,并向下游传播,管线中大部分管段的压力均降至气化压力;同时,由于在倒流阶段出现弥合水锤压力,各点压力均远高于正常运行压力,管线中的最大水锤压力达到 316.4 m 水柱,部分管段的水锤压力高于其设计承压能力 2.5 MPa。

4.3 基于改进型多目标遗传算法的方案优化

由上述分析可知,由于管线中因地形限制存在明显的凸起点,因此,发生意外停泵后将出现水柱分离及其再弥合现象,导致巨大的弥合水锤压力。停泵后,泵出口阀的关闭可以减小机组倒转转速和倒转时间。保护机组安全,但将加剧初始阶段的压力降低和水柱分离,导致更大的水锤压力。因此,仅仅

依靠调节泵出口阀的关闭程序,显然无法消除管线中出现的水柱分离及其再弥合现象。因此需要布置其他的水锤防护措施,从而满足水锤防护要求,同时使工程造价最低。

采用改进的多目标遗传算法对式(6)计算,进行最优保存策略的选择操作和自适应的交叉、变异操作,当种群中相同个体的数量达到一定比例时,重新初始化种群,编制计算程序进行优化计算,从而得到防护方案的 pareto 最优解集^[5-6]。种群规模设为 200,交叉概率取 0.9,变异概率取 0.01,经过 500 代进化后得其目标域中的 pareto 解集。将目标域中的 pareto 解集导入 Matlab,可以得出 pareto 解集分布图,见图 2。

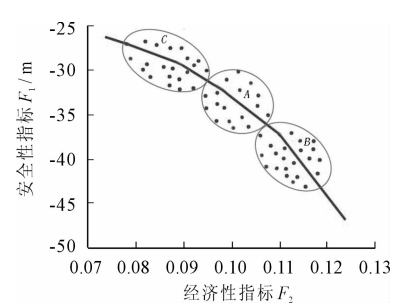


图 2 目标域中的 pareto 解集

原则上工程最优解可以是图 2 中 pareto 曲线上的任意点。A 区以调压塔为主,辅助空气阀及泵出口阀分阶段关闭防护方案;B 区以惯性飞轮为主,辅助空气阀、泵出口阀分阶段关闭防护方案;C 区以空气阀为主,辅助泵出口阀分阶段关闭防护方案。基于偏好决策则可大致分为 3 种情况:

- (1)若对方案选择无特殊偏好,则工程最优解应在 A 区选择,即最大水锤压力值较小,且工程投资较小;
- (2)若工程安全性能要求较高,则工程最优解可在 B 区选择,即最大水锤压力值较小,而工程投资相对较大,但仍在允许范围以内;
- (3)若工程投资有一定限制,则应在 C 区选择工程最优解,即工程投资较小,而最大水锤压力值较大,但仍然在允许范围以内。

三个区域中的典型解分别用 A、B、C 代表,见表 1。针对本工程,上述 3 个防护方案均能满足设计要求,由于厂区尺寸限制,不适合安装惯性飞轮,因此选用类型 A 水锤防护方案进行详细设计。

4.4 水锤防护方案确定

根据输水系统布置的特点,考虑一定的安全系数,为在系统启动过程中排除压力管道内的空气,同

表 1 不同优化模式对比

类型		防护方案		最大倒 转转速	最大水 锤压力	有无 汽化	安全性 指标 F_1	经济性 指标 F_2
A	单向调压塔	空气阀	泵出口阀快关 4s/70°,慢关 28s/20°	1.02	205.1	无	-33.7	0.102
B	惯性飞轮	空气阀	泵出口阀快关 4s/70°,慢关 28s/20°	0.95	197.4	无	-41.2	0.115
C		空气阀	泵出口阀快关 4s/70°,慢关 28s/20°	1.15	216.2	无	-27.1	0.084

注:安全性指标越小,安全性能越好;经济性指标越小,经济性能越高。

时防止在机组停机时可能产生的负压对压力管道的损坏,消除断流弥合水锤,拟对泵出口阀进行分阶段关闭,并在输水管线沿线装空气阀及调压塔,其装设位置及调压塔结构尺寸见表 2、3。

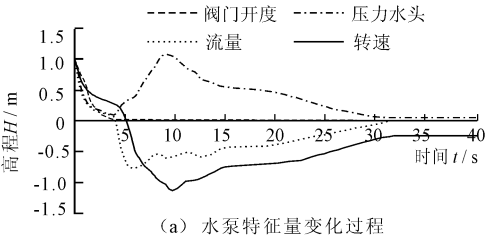
表 2 管线系统参数

类型	台数	预设位置(桩号)
普通	9	K0 + 140, K0 + 430, K1 + 100, K1 + 770, K2 + 304, K2 + 900, K3 + 950, K4 + 310, K4 + 800
复合式	2	K3 + 240, K3 + 520
调压塔	1	K4 + 500

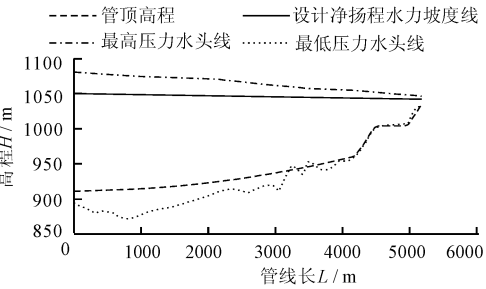
表 3 单向调压塔结构参数

塔体直径	初始水深	补水管直径	安装位置
2.0	3.5	0.25(2 根)	4 + 500

泵出口阀采用两阶段关闭,即快关 4s/70°,慢关 28s/20°。经计算,图 3 为管线中设置单向调压塔并布置空气阀、泵出口阀分阶段关闭条件下,事故停泵过渡过程中的水泵特征量的变化过程及管线压力包络线。其中:(a)为水泵特征量的变化过程;(b)为沿线压力包络线。



(a) 水泵特征量变化过程



(b) 管线压力包络线

图 3 设计净扬程事故停泵水力过渡过程

从图 3(a)中可以看出,水泵在停泵后的 4.08s 开始倒流,在停泵后的第 5.14s 开始倒转。水泵的最大倒转转速为其额定转速的 1.02 倍,最大倒泄流量为

额定流量的 0.78 倍。水泵的倒转转速满足《泵站设计规范 GB/T 50265 - 2010》规定的“离心泵最高反转速度不应超过额定转速的 1.2 倍”要求。

从图 3(b)中可以看出,水泵出口阀后点 K0 + 750 的最大水锤压力为 205.10 m 水柱,为管线中的最大水锤压力,且全线的最大水锤压力均控制在管道设计承压等级以下。

5 结 语

事故停泵后,水泵机组的倒转飞逸转速和管道中的水锤压力是长距离输水系统水力过渡过程中的主要问题。本文结合工程实例,建立了水锤防护方案及工程投资优化模型,并采用改进的多目标遗传算法(MOGAs)求解,获得多目标优化问题的 pareto 解集。通过对目标域 pareto 解集的最优选取,从而得到确保管道安全的前提下,能够减小工程投资的水锤防护方案,为水锤防护方案的确定提供了一种新的思路,具有较好的参考价值。

参考文献:

[1] 金 锥,姜乃昌,等. 停泵水锤及其防护[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.

[2] 刘光临,匡许衡. 考虑管道中水流气体释放的事故停泵水锤计算分析[J]. 武汉水利电力大学学报,1998,31(6):1-6.

[3] 林 琦,刘志勇,刘梅清,等. 长管直输水系统停泵水力过渡过程分析与防护[J]. 中国农村水利水电,2011:139-141.

[4] 刘梅清,刘志勇,蒋劲. 基于遗传算法的单向调压塔尺寸优化研究[J]. 中国给水排水,2008,24(23):56-60.

[5] Mohamed S Ghidaoui, Yeou - Koung Tung. Extension of the efficient quasi - 2D water hammer model to complex pipe system[C]//. Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering, Proceedings of 16th IAHR - APD Congress and 3rd Symposium of IAHR - ISHS, Nanjing, China,2008.

[6] Capelle A S, Fernandez - Maloigne C. Introduction of spatial information within the context of evidence theory[C]//. Proceedings. IEEE international Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, New York, England, 2003.