

# 采用遗传算法对压力脉动过程中 气泡模型参数的辨识

蒋 丹<sup>†</sup> 李松晶 包 钢

(哈尔滨工业大学流体控制及自动化系, 哈尔滨 150001)

(2007 年 11 月 15 日收到; 2008 年 2 月 18 日收到修改稿)

流动液体中的压力变化会引起气泡和气穴的产生及破灭, 而气泡和气穴又会对液体的流动产生影响及压力变化. 为了合理预测流控系统瞬态压力脉动过程中气泡和气穴的体积变化及其对脉动传播过程的影响, 基于气泡溶解和析出的物理过程, 建立了压力脉动过程中气泡和气穴产生及破灭的数学模型, 并提出采用遗传算法对气泡模型中初始气泡体积、气体溶解和析出时间常数进行参数辨识. 以一段液压油管路为研究对象, 对管路中伴随气泡和气穴的瞬态压力脉动过程进行仿真及实验研究. 利用仿真及实验结果, 验证了采用遗传算法对气泡模型进行参数辨识的可行性.

关键词: 气泡, 气穴, 压力脉动, 参数辨识

PACC: 4755B, 4760

## 1. 引 言

在水利、液压以及微流控系统中, 都存在着由于压力变化而引起气泡和气穴的产生及破灭. 气泡和气穴的产生及破灭反过来又会影响流控系统的压力变化, 对系统中元件造成冲击及破坏, 使流控系统的工作性能下降. 建立流控系统中气泡和气穴数学模型, 合理地预测流控系统压力脉动过程中气泡和气穴的产生及破灭过程, 对流控系统的设计及使用具有重要意义<sup>[1, 2]</sup>.

压力脉动过程中气泡的溶解和析出量决定于液体中初始气泡体积、气体的溶解和析出时间常数. 对于不同的液体介质, 气体具有不同的溶解和析出时间常数. Schweitzer 等<sup>[3]</sup>对几种液体进行了测试, 给出了水、润滑油和航空煤油等液体中气体溶解和析出的“半生命周期”常数. Wylie 等<sup>[4, 5]</sup>假定气体析出过程为单向过程, 指出采用不同的气体析出率, 压力脉动的仿真结果将不同. Bergant 等<sup>[6]</sup>采用液柱分离模型来计算压力脉动过程中的气穴体积. 当气穴发生时, 液体部分的压力为饱和蒸汽压, 而体积弹性模量用常值来表示. Shu<sup>[7, 8]</sup>采用均匀两相流模型对管

路上游、中游和下游的气穴进行研究, 该模型中考虑了与频率相关的动态摩擦项.

许多国内学者也对压力脉动过程中气泡和气穴进行了研究. 刘海军等<sup>[9]</sup>通过数值计算给出了液体中气泡和气穴外围压强分布. 徐荣青等<sup>[10, 11]</sup>通过光偏转测试系统对黏性液体中气泡脉动特性进行了实验研究, 指出液体黏性影响气泡生存周期、气泡半径以及气泡壁的运动速度. 叶宏开等<sup>[12]</sup>提出了气体析出离散模型, 将自由气体和析出气体集中在每个计算截面上, 并采用特性线法进行计算.

本文以液压油流控系统为研究对象, 建立了流控系统管路中伴随气泡和气穴的压力脉动数学模型以及气泡和气穴的产生及破灭数学模型, 并提出采用遗传算法对液压油中初始气泡体积、气体溶解和析出时间常数进行辨识. 该方法不仅适用于液压油中气体溶解和析出时间常数的辨识, 也适用于水、血液、化学溶剂等其他各种液体.

## 2. 数学模型

### 2.1. 气泡模型

当压力下降到液体的空气分离压  $p_s$  时, 溶解在

<sup>†</sup> E-mail: jiangdan2002@hit.edu.cn

液体中的气体析出形成气泡,液体中气泡体积增加;当压力升高时,气泡又重新溶解于液体中,气泡体积减少.液体中气泡体积的变化会改变液体有效体积弹性模量,液体中声速也随之变化.因此,气泡体积变化会影响流控系统压力脉动瞬态过程.

假设在初始条件下,液体处于气体溶解和析出平衡状态,则  $t$  时刻液体中气泡体积  $V_b$  为

$$V_b = V_{ib} + V_{is} - V_{ts}, \quad (1)$$

式中  $V_{ib}$  为液体中初始气泡体积,  $V_{is}$  为初始状态下溶解于液体中的气体体积,  $V_{ts}$  为  $t$  时刻溶解于液体中的气体体积.

根据亨利定律,初始状态下溶解于液体中的气体体积  $V_{is}$  正比于液体的初始压力  $p_i$ ,即

$$V_{is} = S \frac{p_i}{p_0} V, \quad (2)$$

式中  $S$  为溶解度系数,  $p_0$  为大气压,  $V$  为液体体积.在常温常压下,水中通常含有 2% (体积分数) 的溶解气体,液压油中通常含有 10% 的溶解气体<sup>[4]</sup>.

同理,流控系统某处液体压力为  $p$  时,在气体溶解和析出趋于平衡状态下,溶解的气体体积  $V_\infty$  表示为

$$V_\infty = V_{is} \frac{p}{p_i}. \quad (3)$$

当压力下降到液体的空气分离压  $p_s$  以下时,在  $t$  时刻溶解于液体中的气体体积  $V_{ts}$  满足如下关系<sup>[3]</sup>:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{V_{ts}}{V} \right) = \frac{V_\infty - V_{ts}}{V\tau_{out}} \quad (p < p_s), \quad (4)$$

式中  $\tau_{out}$  为气体析出时间常数.当压力升高时,  $V_{ts}$  可表示为

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{V_{ts}}{V} \right) = \frac{V_\infty - V_{ts}}{V\tau_{in}} \quad (p \geq p_s), \quad (5)$$

式中  $\tau_{in}$  为气体溶解时间常数.对(4)(5)式积分后

$$V_{ts} = \begin{cases} (V_{is} - V_\infty) \exp(-t/\tau_{out}) + V_\infty & (p < p_s), \\ (V_{is} - V_\infty) \exp(-t/\tau_{in}) + V_\infty & (p \geq p_s). \end{cases} \quad (6)$$

## 2.2. 气穴模型

当流控系统某处压力低于液体的饱和蒸汽压时,该处液相和气相分离,产生气穴现象.气穴体积比单个气泡体积大,但存在时间很短,约为毫秒级<sup>[3]</sup>.液体的密度随着气穴体积的变化而变化,液体

中声速也随之变化.

McCloy<sup>[13]</sup>首次提出了简化气穴模型计算液压泵中气穴体积变化的方法.Wylie等<sup>[4]</sup>也应用该简化气穴模型仿真计算在长液压油管路中气穴的生长和破灭过程.根据流量连续性方程和液柱分离模型,简化气穴模型中气穴的体积  $V_{cav}$  可表示为

$$\frac{dV_{cav}}{dt} = q_{out} - q_{in}, \quad (7)$$

式中  $q_{out}$  为流出液体控制体的流量,  $q_{in}$  为流入液体控制体的流量.

## 2.3. 管路瞬态模型

利用质量守恒定律和动量守恒定律,用连续性方程和运动方程来描述伴随气泡和气穴的水平管路中压力脉动过程<sup>[4]</sup>.在建立管路瞬态数学模型时,作如下假设(1)管内流动为一维可压缩非定常流动;(2)忽略气相和液相之间的速度滑移(3)忽略外力和热交换影响.

在以上三个假设基础上,可以得到如下气相和液相的连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g \alpha Av) = \Gamma A, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_l(1-\alpha)A] + \frac{\partial}{\partial x}[\rho_l(1-\alpha)Av] = -\Gamma A \quad (9)$$

式中  $\rho_l$  和  $\rho_g$  分别为液相和气相的密度,  $\alpha$  为气相体积与油液体积之比,  $A$  为管路横截面积,  $v$  为液体流速,  $x$  为空间变量,  $\Gamma$  为流函数,即液相与气相之间质量交换率.将(8)(9)两式相加可得

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_g \alpha + \rho_l(1-\alpha)] A \} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \{ [\rho_g \alpha + \rho_l(1-\alpha)] Av \} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

同理,可以得到运动方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_g \alpha + \rho_l(1-\alpha)] Av \} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \{ [\rho_g \alpha + \rho_l(1-\alpha)] Av^2 \} \\ & + A \frac{\partial p}{\partial x} + F(q) = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $q$  为管路某处液体流量,  $F(q)$  为摩擦阻力项.

定义气液两相介质密度  $\rho_m$  为

$$\rho_m = (1-\alpha)\rho_l + \alpha\rho_g, \quad (12)$$

可将(10)式整理为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_m Av) = 0, \quad (13)$$

可将(11)式整理为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m Av) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_m Av^2) + A \frac{\partial p}{\partial x} + F(q) = 0. \quad (14)$$

## 2.4. 摩擦阻力项

在(11)式中,摩擦阻力项  $F(q)$  可表示为

$$F(q) = F_0 + \frac{A}{2} \sum_{i=1}^4 Y_i. \quad (15)$$

(15)式等号右边第一项  $F_0$  为稳态摩擦项,可表示为

$$F_0 = \frac{8\mu q}{r_0^2}, \quad (16)$$

式中  $r_0$  为管内半径,  $\mu$  为管路中液体的动力黏度。(15)式等号右边第二项为与频率相关的动态摩擦项,对应的约束方程为

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = -\frac{n_i \mu}{\rho_m r_0^2} Y_i + m_i \frac{\partial F_0}{\partial t}, \quad (17)$$

$$Y_i(0) = 0.$$

计算中系数  $n_i$  和  $m_i$  的取值见文献[14],  $i = 1, 2, 3, 4$ .

## 3. 研究对象仿真

本文以一段水平液压油管路为研究对象,利用上述数学模型,采用 Matlab/Simulink 对管路中伴随气泡和气穴的压力脉动过程进行仿真. 液压油路系统如图1所示,管路的一端连接油箱,以提供恒定压力;另一端连接阀门,通过阀门的突然关闭来产生瞬态压力脉动. 将管路等分为  $n$  ( $n$  可取大于10的整数<sup>[15]</sup>)个计算单元,阀门处为第1个单元. 仿真计算时相关参数的取值列于表1.

不同的气体溶解时间常数  $\tau_{in}$  和气体析出时间常数  $\tau_{out}$  对管路中气泡体积、气穴体积和压力脉动产生不同的影响. 假定单元体内初始气泡体积为  $0.5\% V_{ele}$  ( $V_{ele}$  为单元体体积),气体溶解和析出时间

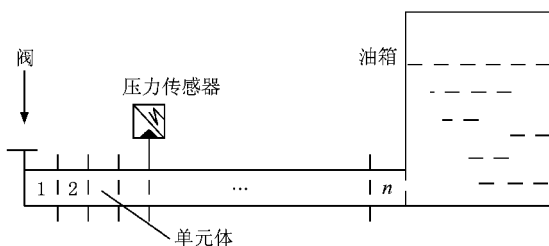


图1 液压油路系统示意图

表1 仿真计算时相关参数的取值

参 量	取 值
管路长度 $l/m$	3.856
管内半径 $r_0/m$	0.0051
管内初始流量 $q_0/m^3 \cdot s^{-1}$	$8.7 \times 10^{-5}$
油箱中油液高度 $h/m$	0.3

常数见表2所列出的三组参数<sup>[3]</sup>,通过仿真得到第1个单元中气泡体积、气穴体积和压力脉动变化曲线,分别如图2、图3和图4所示. 由图2可以看出,每组初始气泡体积都相同,但是由于第1组参数中气体析出时间常数很小(小于1s),瞬态过程结束时液压油中存在的气泡体积(约为  $3 \times 10^{-7} m^3$ )比第2组和第3组(约为  $8 \times 10^{-8} m^3$ )大. 从图3和图4可以看出,第1组参数对应的气穴体积和压力脉动相比后两种情况有明显的滞后,尤其在0.06—0.11s范围内,这说明气泡对气穴的产生和压力的升高有一定的抑制作用. 而且第1组和第2组参数对应的气泡体积、气穴体积和压力脉动仿真结果的差别比第2组和第3组之间的差别大,说明当气体析出时间常数小于1s时,模型对参数的变化更敏感.

表2 气体析出和溶解时间常数

	第1组	第2组	第3组
$\tau_{out}/s$	0.43	5.13	65
$\tau_{in}/s$	4.44	8.86	557

## 4. 遗传算法辨识

气体溶解时间常数  $\tau_{in}$  和气体析出时间常数  $\tau_{out}$  都对管路瞬态过程中气泡体积、气穴体积和压力脉动过程产生影响. 虽然液压油中初始气泡体积  $V_{ib}$  可利用第1个压力脉动峰值进行计算(见(26)(27)式),但计算结果为近似值,因而本文把初始气泡体积  $V_{ib}$  也作为一个辨识参数.

采用遗传算法对模型中  $V_{ib}$ ,  $\tau_{out}$  及  $\tau_{in}$  三个未知参数进行辨识. 设定进化代数  $G = 80$ ,子群个数  $Q = 3$ ,子群长度  $L = 20$ ,决策变量个数  $N = 3$ . 首先随机产生初始种群  $g_{in}$  规模如下:

$$g_{in}(i) = \text{rand}(\cdot) \quad (i = 1, \dots, Q \times L \times N). \quad (18)$$

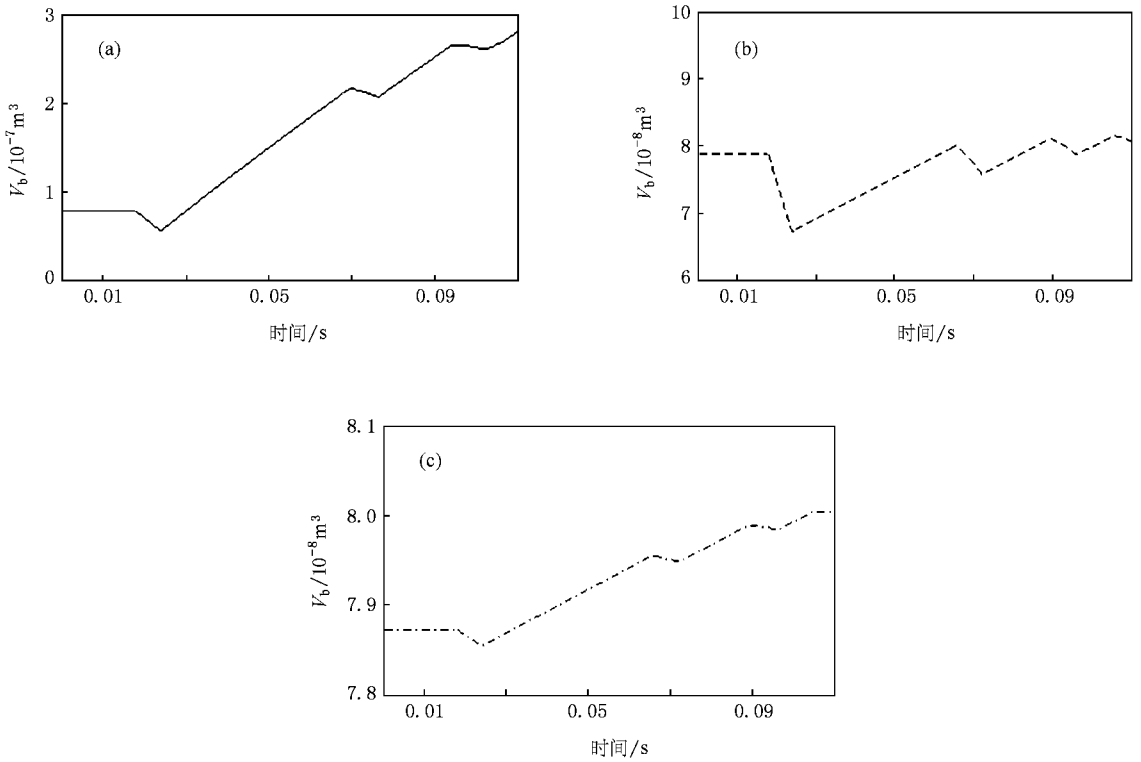


图 2 不同气体析出和溶解时间常数的管路瞬态过程中气泡体积的变化 (a)第 1 组 (b)第 2 组 (c)第 3 组

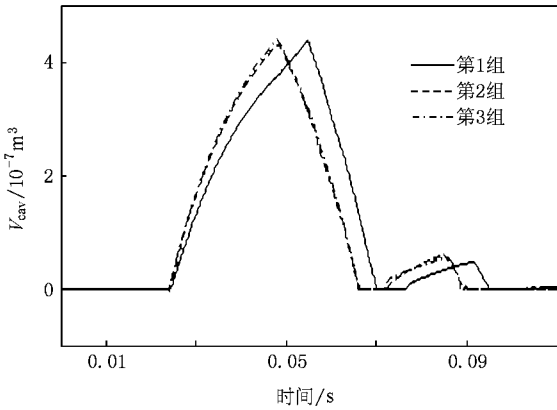


图 3 不同气体析出和溶解时间常数的管路瞬态过程中气穴体积的变化

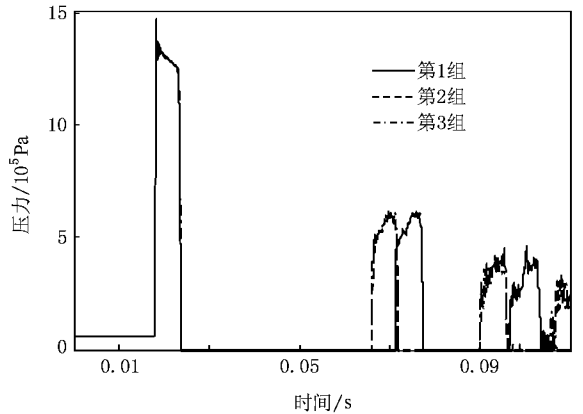


图 4 不同气体析出和溶解时间常数的管路瞬态过程中压力脉动曲线

设定  $V_{ib} \in [0.0001\% V_{ele}, 50\% V_{ele}]$ ,  $\tau_{out} \in [0.001 \text{ s}, 100 \text{ s}]$ ,  $\tau_{in} \in [0.001 \text{ s}, 100 \text{ s}]$  将其译码成模型参数得  $V_{ib}(j) = (50\% V_{ele} - 0.0001\% V_{ele}) g_{in}((j - 1) \times N + 1) + 0.0001\% V_{ele}$ ,  $\tau_{out}(j) = (100 - 0.001) g_{in}((j - 1) \times N + 2) + 0.001$ ,  $\tau_{in}(j) = (100 - 0.001) g_{in}((j - 1) \times N + 3) + 0.001$ , ( $j = 1 \dots, Q \times L$ ). (19)

为了使仿真结果与实验数据相符,根据实验结果选取各压力波峰来设计个体  $i$  的适应度  $f_i$ ,即

$$f_i = 10^8 / \sqrt{\sum_{j=1}^w \sum_{t_j = t_{jmin}}^{t_{jmax}} (p_{sim}(t_j) - p_{ex}(t_j))^2} \quad (0 \leq t_{jmin} < t_{jmax} \leq 0.11 \text{ s}), \quad (20)$$

式中  $w$  为实验数据中压力波峰数,  $t_{jmin}$  和  $t_{jmax}$  为第  $j$  个压力波峰对应的开始和结束时刻,  $p_{sim}(t_j)$  和  $p_{ex}(t_j)$  分别为  $t_j$  时刻压力脉动的仿真结果和实验结果.

实验通过从油箱释放的小球撞击阀座来模拟阀

的突然关闭,以产生管路瞬态压力脉动,实验装置如图5所示.阀座前端直接连接液压泵的入口,后端连接一段透明的有机玻璃管,因此可以通过高速摄影机拍摄到小球撞击阀座后气泡和气穴产生及破灭的过程.压电式压力传感器安装在管路上(图1),并以0.1 ms的时间间隔记录压力脉动实验数据.采用遗传算法进行参数辨识时,将此实验数据代入(20)式中计算个体适应度值.

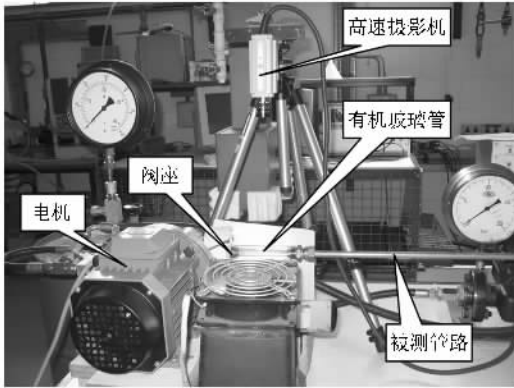


图5 实验装置照片

遗传算法的实施步骤包括选择、更新种群、交叉、变异和个体迁移.首先,使用轮盘赌法选择子群中个体  $i$ ,

$$P_i = f_i / \sum_{j=1}^L f_j = f_i / f_{\text{sum}}, \quad (21)$$

式中  $P_i$  为个体  $i$  的选择概率,  $f_{\text{sum}}$  为单个子群的总适应度.其次,将适应度按从小到大的顺序排列,对初始种群  $g_{\text{in}}$  中对应的位置标记  $D_i$  ( $D_i = k + 1, \dots, L$ , 其中  $k \in [0, L - 1]$ ) 的个体进行重新繁殖如下:

$$\begin{aligned} & T((n-1) \times N + m) \\ & = g_{\text{in}}((D_i - 1) \times N + m) \\ & \quad (n = 1, \dots, L - k; m = 1, \dots, N) \end{aligned} \quad (22)$$

式中  $T$  为暂存变量.将适应度大的个体代替适应度小的个体,得到更新后的种群为

$$\begin{aligned} & g_{\text{in}}((n-1) \times N + m) \\ & = T((n-1) \times N + m) \\ & \quad (n = 1, \dots, L - k; m = 1, \dots, N). \end{aligned} \quad (23)$$

之后对个体进行交叉和变异操作.令  $p_{\text{c-rand}} = \text{rand}(\cdot)$ , 当交叉概率  $p_c > p_{\text{c-rand}}$  时<sup>[16, 17]</sup>,

$$\begin{aligned} u_i &= \beta u_{i+1} + (1 - \beta) u_i, \\ u_{i+1} &= \beta u_i + (1 - \beta) u_{i+1}, \end{aligned} \quad (24)$$

式中  $u_i$  和  $u_{i+1}$  分别为第  $i$  个和第  $i + 1$  个个体对应

的变量值,  $\beta$  为随机数.令  $p_{\text{m-rand}} = \text{rand}(\cdot)$ , 当变异概率  $p_m > p_{\text{m-rand}}$  时,

$$u_i = \bar{u} + (u_{\text{max}} - u_{\text{min}}) (\beta - 0.5), \quad (25)$$

式中  $u_{\text{max}}$ ,  $u_{\text{min}}$  和  $\bar{u}$  分别为子群中个体变量的最大值、最小值和平均值.最后,子群将最优个体发送给其他子群,其他子群中适应度小的个体将被迁移来的适应度大的个体所取代.迁移策略<sup>[18]</sup>可以加快较优个体在子群中的传播,提高收敛速度.

重复以上进化过程,当满足终止条件时,可以得到最大适应度值  $f_{\text{max}}$  对应的最优三个模型参数.

## 5. 辨识结果

图6给出了平均适应度和最优适应度随进化代数的变化情况.从图6可以看出,遗传算法得到了较好的收敛,平均适应度达到了最大值37.8,并得到了三个模型参数的辨识结果,如表3所列.

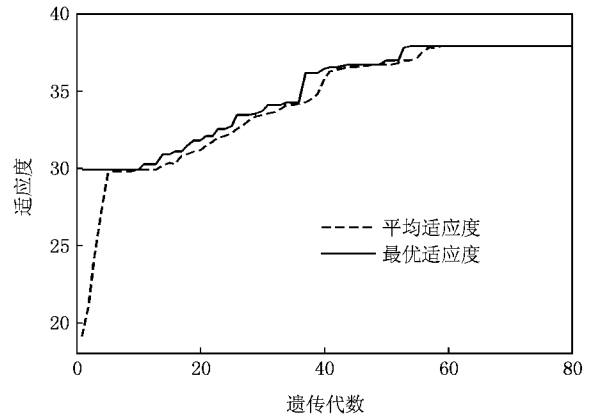


图6 适应度随遗传代数变化曲线

表3 模型参数辨识结果

参 数	$V_{\text{ib}}/\text{m}^3$	$\tau_{\text{out}}/\text{s}$	$\tau_{\text{in}}/\text{s}$
辨识后的值	0.13% $V_{\text{ele}}$	2.95	8.86

辨识后压力传感器所在单元的压力脉动仿真结果与实验数据的比较如图7所示.从图7可以看出,通过仿真得到的压力峰值结果以及波峰之间的间隔时间与对应的实验数据基本符合,尤其在第1个压力波峰和第3个压力波峰处.在0.018 s时,最大压力峰值为  $14 \times 10^5$  Pa.之后压力下降引起气泡和气穴的产生,液压油中波速下降,第1个压力峰值和第2个压力峰值之间的时间间隔最大.由于管路摩擦力的存在,压力峰值逐渐降低,压力波峰之间的时间

间隔也相应缩短。

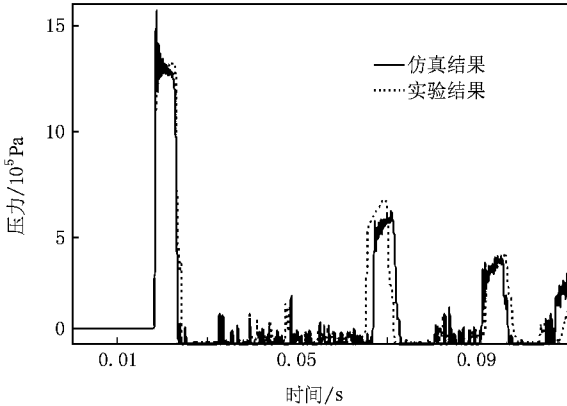


图7 压力传感器所在单元的压力脉动仿真结果和实验结果的比较

液压油中初始气泡体积可以通过传感器测得的第1个压力峰值  $\Delta p$  计算得到<sup>[41]</sup>,

$$\Delta p = \frac{\rho_{im} a_i q_0}{A} = \frac{\sqrt{\rho_{im} K_i} q_0}{A}. \quad (26)$$

这里  $\rho_{im}$  为初始时刻液压油密度,  $a_i$  为初始时刻液压油中的声速,  $q_0$  为管内初始流量,  $K_i$  为初始时刻液压油有效体积弹性模量, 可表示为

$$K_i = \frac{K_g K_l}{(V_{ib}/V_{ele})(K_l - K_g) + K_g}, \quad (27)$$

式中  $K_g$  和  $K_l$  分别为气相和液相的体积弹性模量. 通过(26)(27)式计算得到单元体中初始气泡体积为  $0.16\% V_{ele}$ , 与表3中初始气泡体积的辨识结果基本符合.

Schweitzer 等<sup>[31]</sup>通过实验测得了气体的析出“半生命周期”比溶解“半生命周期”短, 并指出液压油的析出“半生命周期”范围为3.6—7.6 s, 溶解“半生命周期”范围为6.14—10.22 s, 与本文辨识得到的气体析出和溶解时间常数也基本符合.

## 6. 实验验证

图8和图9分别给出了辨识后模型中第1个单元的气泡体积和气穴体积仿真结果. 由于气体析出时间常数比溶解时间常数小, 而且压力峰值的持续时间短, 当压力脉动过程结束时, 气泡体积比初始时刻体积大. 如图9所示, 整个瞬态过程中出现了三次气穴, 第1次气穴最大体积约为  $4 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ , 第2次约为  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ , 第3次约为  $1 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ .

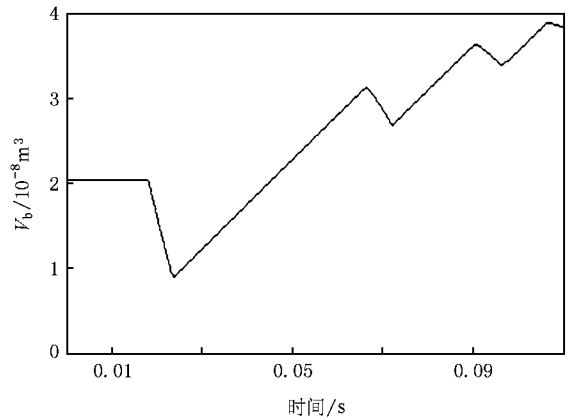


图8 第1个单元中气泡体积仿真结果

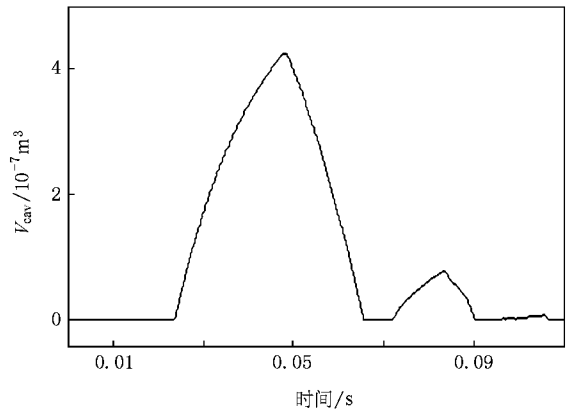


图9 第1个单元中气穴体积仿真结果

实验采用高速摄影机以每秒500帧记录了管路第1个单元中气泡和气穴产生和破灭过程, 如图10所示. 初始时刻, 从油箱释放的小球在液体的推动下向阀座移动, 如图10(a)所示. 在0.018 s时, 小球撞击阀座, 由于液压油具有初始流速其动能转化为压力能, 从而使小球所在单元中压力迅速升高, 如图10(b)所示. 当此正压波传到管路靠近油箱处单元时, 由于油箱处压力不变, 该单元压力恢复为起始值, 形成负压波. 此负压波从油箱处反射回阀座, 在0.048 s时, 气穴在小球表面迅速生成并膨胀至最大体积, 气泡数量和体积也在增大, 如图10(c)(d)所示. 在0.048—0.066 s, 气穴在第2个正压波的作用下破灭, 气泡数量减少, 如图10(d)–(f)所示. 之后第2个负压波从油箱处传来, 在0.082 s时, 气泡体积和数量第2次增大, 气穴也膨胀至较大体积, 如图10(g)(h)所示. 在0.082—0.090 s, 当第3个正压波到达时, 气穴消失, 气泡体积减小, 如图10(h)–(j)所示. 最后在0.090—0.108 s, 气穴和气泡经历了第3次产生和破灭过程, 如图10(j)–(l)所示.

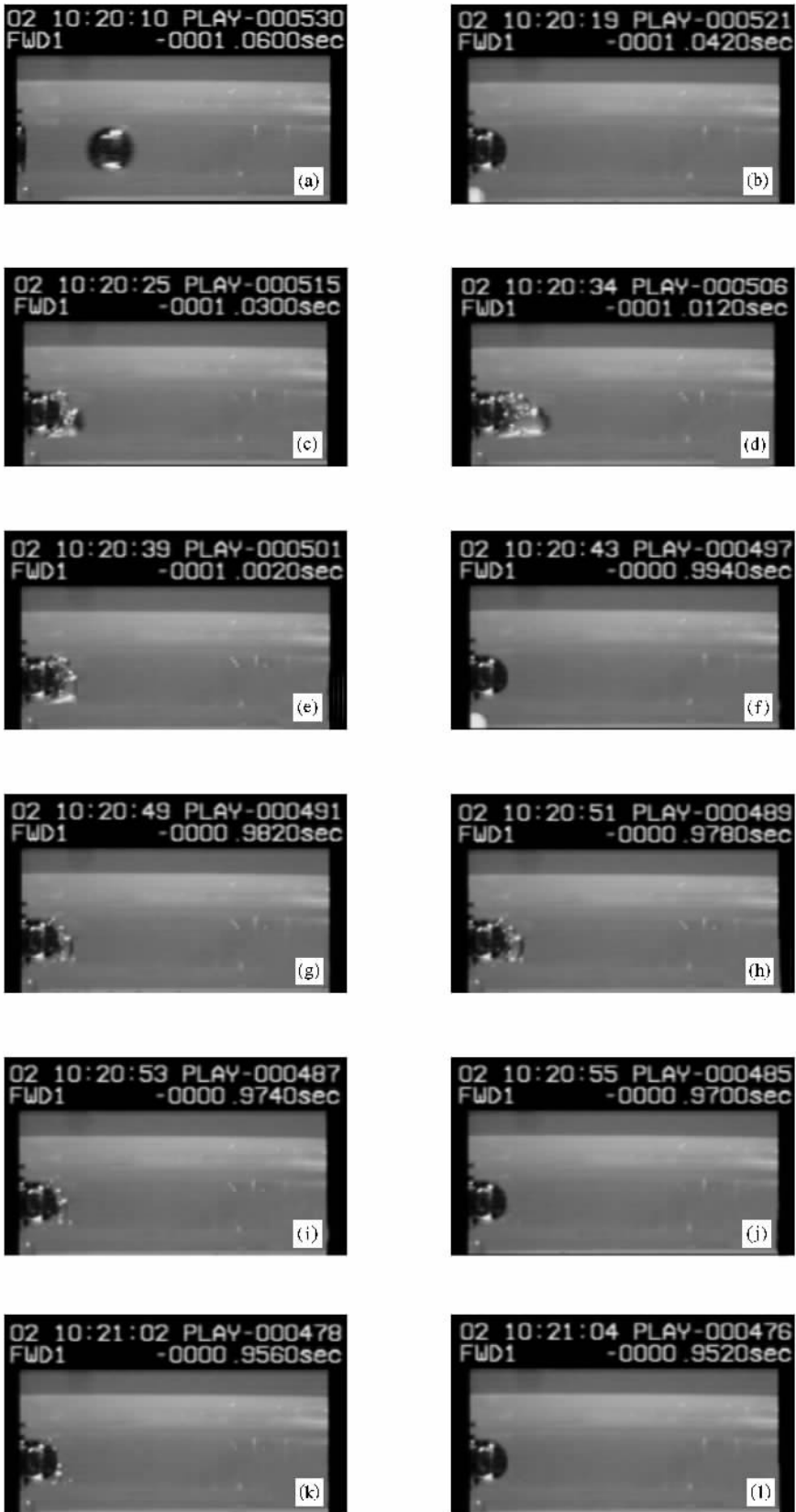


图 10 实验拍摄的气泡和气穴产生和破灭过程 (a)0s (b)0.018s (c)0.030s (d)0.048s (e)0.058s, (f)0.066s, (g)0.078s, (h)0.082s, (i)0.086s, (j)0.090s, (k)0.104s, (l)0.108s

为了验证遗传算法辨识后模型的可靠性,将第 1 个单元中气泡和气穴总体积的仿真结果与实验结果进行了比较,如图 11 所示。图 11 中的虚线为管路中第 1 个单元的气泡和气穴总体积的仿真结果,实线为根据实验拍摄估算压力瞬态过程中各时间点对应的气泡和气穴总体积。由图 11 可以看出:在 0.048 s 时,气泡和气穴体积膨胀至最大,近似于小球体积

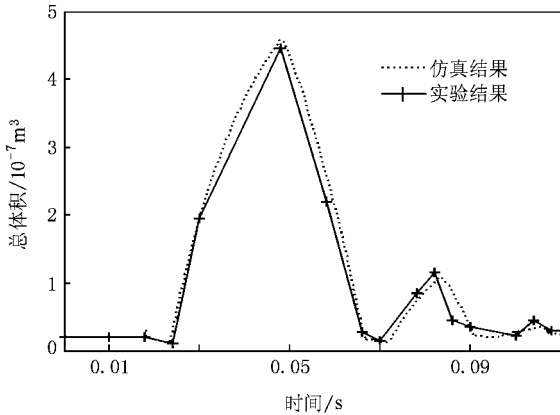


图 11 第 1 个单元中气泡和气穴总体积的仿真结果与实验结果的比较

( $5.23 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ ) 这与仿真得到的最大气泡和气穴产生的时间和体积相符。在 0.082 s 时,气泡和气穴第 2 次产生,但是此时最大体积比第 1 次小,约为第 1 次最大体积的 1/4,这与仿真计算得到的第 2 次最大体积也基本相符。当气泡和气穴第 3 次产生时,总体积比前两次小很多,这与仿真结果也基本相符。因此,实验过程记录的第 1 个单元中气泡和气穴体积变化与仿真得到的结果基本相符。由此可知,压力脉动过程中气泡和气穴数学模型是合理的,其参数辨识方法是可行的。

## 7. 结 论

以液压油管路中瞬态压力脉动过程为例,建立了流控系统压力脉动过程中气泡和气穴数学模型,利用遗传算法对初始气泡体积、气体溶解时间常数和析出时间常数进行了辨识。辨识后仿真结果与实验结果的比较表明,遗传算法用于压力脉动过程中气泡模型参数辨识是可行的,该方法也可作为一种液体中气体溶解和析出时间常数的测量方法。

[ 1 ] Shu J J, Burrows C R, Edge K A 1997 *Proc. Inst. Mech. Eng. : J. Syst. Control Eng.* **211** 229  
 [ 2 ] Tomita Y, Kodama T 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 2809  
 [ 3 ] Schweitzer P H, Szebehely V G 1950 *J. Appl. Phys.* **21** 1218  
 [ 4 ] Wylie E B, Streeter V L, Suo L S 1993 *Fluid Transients in System* ( Englewood Cliffs : Prentice-Hall )  
 [ 5 ] Simpson A R, Wylie E B 1991 *J. Hydraul. Eng.* **117** 1310  
 [ 6 ] Bergant A, Simpson A R 1999 *J. Hydraul. Eng.* **125** 835  
 [ 7 ] Shu J J 2003 *J. Fluids Eng.* **125** 194  
 [ 8 ] Shu J J 2003 *Int. J. Press. Vessels Pip.* **80** 187  
 [ 9 ] Liu H J, An Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1406 ( in Chinese ) [ 刘海军、安 宇 2004 物理学报 **53** 1406 ]  
 [ 10 ] Xu R Q, Chen X, Chen J P, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1413 ( in Chinese ) [ 徐荣青、陈 笑、陈建平、沈中华、陆 建、倪晓武 2004 物理学报 **53** 1413 ]  
 [ 11 ] Zhao R, Xu R Q, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2006 *Acta Phys.*

*Sin.* **55** 4783 ( in Chinese ) [ 赵 瑞、徐荣青、沈中华、陆 建、倪晓武 2006 物理学报 **55** 4783 ]  
 [ 12 ] Ye H K, He F, Chen G X 1993 *J. Tsinghua Univ. ( Science and Technology )* **33** 17 ( in Chinese ) [ 叶宏开、何 枫、陈国祥 1993 清华大学学报 ( 自然科学版 ) **33** 17 ]  
 [ 13 ] McCloy D 1972 *J. Dyn. Syst. Meas. Control* **94** 50  
 [ 14 ] Taylor S E M, Johnston D N, Longmore D K 1997 *Proc. Inst. Mech. Eng. : J. Syst. Control Eng.* **211** 447  
 [ 15 ] Jiang D, Li S J 2006 *ASME Joint U. S.-European Fluids Engineering Summer Meeting* ( Miami : ASME )  
 [ 16 ] Li S J, Bao W, Wang Y, Xu Y M 2001 *Chin. J. Mech. Eng.* **37** 79 ( in Chinese ) [ 李松晶、鲍 文、王 莹、许耀铭 2001 机械工程学报 **37** 79 ]  
 [ 17 ] Ng A W M, Perera B J C 2003 *Eng. Appl. Artif. Intell.* **16** 529  
 [ 18 ] Wang D F 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1495 ( in Chinese ) [ 王东风 2005 物理学报 **54** 1495 ]

# Parameter identification of gas bubble model in pressure pulsations using genetic algorithms

Jiang Dan<sup>†</sup> Li Song-Jing Bao Gang

( *Department of Fluid Control and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China* )

( Received 15 November 2007 ; revised manuscript received 18 February 2008 )

## Abstract

Pressure changes in the flowing fluid result in the growth and collapse of gas bubbles and cavitation, which affects the fluid flowing and pressure. In order to predict gas bubble and cavitation volume change during the pressure pulsations in fluid control system and their effects on the pulsations, a mathematical model of gas bubble and cavitation is studied based on gas bubble resolving and releasing physical processes. The method using genetic algorithms (GAs) in parameter identification for the gas bubble model is presented, including the parameters of initial gas bubble volume, gas resolving time constant and releasing time constant. An example of pressure transients accompanying gas bubble and cavitation inside the hydraulic pipeline is simulated and tested. According to the simulation and experimental results, the feasibility of parameter identification for gas bubble model using GAs is verified.

**Keywords** : gas bubble, cavitation, pressure pulsations, parameter identification

**PACC** : 4755B, 4760

---

<sup>†</sup> E-mail :jiangdan2002@hit.edu.cn