基于遗传算法的柴油机喷油系统模型参数辨识

李汝宁 何勇灵

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 柴油机喷油系统中压力的变化会引起气泡的产生和溃灭,而气泡的变化会对燃油的流动和压力波的传播产生影响.为了更准确预测喷油系统中的初始含气率以及变化情况,提出了应用改进遗传算法对柴油机喷油系统模型中的柱塞腔、出油阀紧帽腔、高压油管和针阀腔初始含气率进行辨识的新方法.基于气泡模型,建立了气-液两相条件下的柴油机喷油系统模型,通过仿真数据和试验数据对比,构造了适应度函数,实现了对柴油机喷油系统模型的参数辨识,并得到了参数优化后的柴油机喷油系统模型.仿真结果与试验数据的比较验证了采用改进遗传算法对气-液两相条件下的柴油机喷油系统模型进行参数辨识的可行性.

关 键 词: 柴油机; 喷油系统; 气泡模型; 遗传算法; 参数辨识

中图分类号: TK 421^{+}.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)04-0464-04

Parameter identification of diesel fuel injection system model using genetic algorithms

Li Runing He Yongling

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The changing of pressure in the diesel injection system results in the growth and collapse of gas bubbles, which affects the diesel flowing and pressure. In order to predict the initial void fraction and changes in the diesel injection system, the method using improved genetic algorithms in parameter identification for the model of diesel injection system was presented, including the initial void fraction of plunger chamber, delivery valve chamber, high-pressure oil pipe and needle valve chamber. The model of diesel injection system under the condition of gas-liquid was established based on the gas model, fitness function was built by comparing with the simulation results and the experimental data, so the parameter optimization of the model of diesel injection system was realized, and the model of diesel injection system of parameter identification was carried out. Comparisons between simulation results and experimental data show that the improved genetic algorithms are capable of estimating unknown parameters in the model of diesel injection system.

Key words: diesel engine; fuel injection system; gas bubble; genetic algorithms; parameter identification

国内外大量的研究指出,在柴油机喷油系统中伴随着压力的急剧变化而引起的气泡的生成和溃灭,因此喷油系统的液力过程,是气-液两相的流动过程[1-2].气泡的存在,将极大的影响喷油系统的喷油特性,为此,建立气-液两相条件下的柴油机燃油喷射系统模型,通过对气-液两相条件下柴油机燃油喷射系统进行仿真研究,对提高柴油机经济性、降低有害排放有重要的现实意义.

一些学者在柴油机喷油系统方面进行了研究,Shin Matsuoka 结合实验测试流量系数、压力等参数后,建立了中速柴油机喷油系统模型;高宗英等通过引入当量燃油密度,并结合试验测得的

收稿日期: 2011-01-10; **网络出版时间**: 2012-04-20 09:20

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120420.0920.023.html

作者简介: 李汝宁(1981 -),男,山东德州人,博士生,liruning@foxmail.com.

流量系数等参数,建立了变声速变密度情况下的柴油机喷油系统模型;毛范海在对 AD 型喷油泵燃油喷射系统研究过程中,引入流量、压力和流动阻力修正系数建立了喷油系统模型[3-4].

本文以柴油机泵-管-嘴喷油系统为研究对象,基于气泡模型和有效体积弹性模量模型,建立了两相条件下的柴油机喷油系统模型. 同时提出采用改进遗传算法对柱塞腔、出油阀紧帽腔、高压油管和针阀腔初始含气率进行参数辨识.

1　两相条件下柴油喷油系统模型

1.1　喷油泵和喷油器端边界液力状态方程

建模过程中假设柱塞腔、出油阀紧帽腔和针阀腔为控制容积,根据控制容积内压力变化为连续方程,柱塞腔内液力状态方程为[4]

$$\alpha V_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=-\delta\mu_{\mathrm{s}}f_{\mathrm{s}}\sqrt{\frac{2}{\rho}\mid P_{\mathrm{p}}-P_{\mathrm{k}}\mid}-\gamma(\mu_{\mathrm{h}}f_{\mathrm{b}}+\mu_{\mathrm{o}}f_{\mathrm{o}})\sqrt{\frac{2}{\rho}\mid P_{\mathrm{p}}-P_{\mathrm{b}}\mid}+f_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}-\eta f_{\mathrm{k}}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\tag{1}$$

出油阀紧帽腔内液力状态方程为

$$\alpha V_{\mathrm{k}}\frac{\mathrm{d}P_{k}}{\mathrm{d}t}=\delta\mu_{\mathrm{s}}f_{\mathrm{s}}\sqrt{\frac{2}{\rho}\mid P_{\mathrm{p}}-P_{\mathrm{k}}\mid}+\eta f_{\mathrm{k}}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}-f_{\mathrm{T}}u_{\mathrm{o}}\tag{2}$$

针阀腔内液力状态方程为

$$\alpha V_{\mathrm{n}}\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{n}}}{\mathrm{d}t}=-\xi\mu_{\mathrm{c}}f_{\mathrm{c}}\sqrt{\frac{2}{\rho}\mid P_{\mathrm{n}}-P_{\mathrm{z}}\mid}-\beta f_{\mathrm{n}}\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}+f_{\mathrm{T}}u_{\mathrm{L}}\tag{3}$$

式中,V_{p},V_{k} 和 V_{n} 分别为柱塞腔、出油阀紧帽腔和针阀腔容积;P_{b},P_{p},P_{k},P_{n} 和 P_{z} 分别为供油泵、柱塞腔、出油阀紧帽腔、针阀腔和气缸压力;f_{p},f_{k},f_{n} 和 f_{T} 分别为柱塞、出油阀、针阀和高压油管内横截面积;ρ 为燃油的密度;$\mu_{\mathrm{s}}f_{\mathrm{s}}$,$(\mu_{\mathrm{h}}f_{\mathrm{b}}+\mu_{\mathrm{o}}f_{\mathrm{o}})$和$\mu_{\mathrm{o}}f_{\mathrm{c}}$ 分别为出油阀座面、柱塞腔进回油孔和喷油器喷孔当量有效流通面积;δ,γ 和 ξ 表示各腔体之间燃油流动方向;η 和 β 分别表示出油阀和针阀的运动状态;h,y 和 z 分别表示柱塞、出油阀和针阀的升程.

根据牛顿第二定律,出油阀运动方程为

$$M_{\mathrm{k}}\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}=f_{\mathrm{k}}(P_{\mathrm{p}}-P_{\mathrm{k}})-C_{\mathrm{k}}(y+y_{\mathrm{o}})\tag{4}$$

针阀运动方程:

$$M_{\mathrm{n}}\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}=f_{\mathrm{n}}P_{\mathrm{n}}-C_{\mathrm{n}}(z+z_{\mathrm{o}})\tag{5}$$

式中,M_{k} 和 M_{n} 分别为出油阀和针阀的质量;C_{k} 和 C_{n} 分别表示出油阀弹簧和针阀弹簧的强度;y_0 和 z_0 分别表示出油阀弹簧和针阀弹簧的初始压缩量.

式(1)、式(2)、式(4)组成了高压油管喷油泵端边界液力状态方程,式(3)、式(5)组成了高压油管喷油器端的边界液力状态方程.

1.2　高压油管内燃油流动波动方程

高压油管中燃油的流动假设为一维有摩擦不稳定流动,因此根据一维不稳定流动方程,高压油管内燃油流动波动方程为[3]

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial x}+\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\rho f&=0\\ \frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{a^2\rho}\cdot\frac{\partial P}{\partial t}&=0\end{aligned}\right\}\tag{6}$$

其中,u 为燃油流动速度;ρ 为燃油密度;p 为燃油压力;f 为单位质量流体阻力;a 为压力波传播速度.

高压油管内燃油流动波动方程为偏微分方程,该偏微分方程的初始条件和边界条件分别为

$$\left.\begin{aligned}P(x,0)&=P_{\mathrm{r}}\\ u(x,0)&=0\end{aligned}\right\}\tag{7}$$

$$\left.\begin{aligned}P(0,t)&=P_{\mathrm{k}}\\ P(L,t)&=P_{\mathrm{n}}\end{aligned}\right\}\tag{8}$$

其中,P_{r} 为喷油系统的残压.

1.3　气泡模型

根据亨利定律[5],基于气泡溶解和析出的物理过程,假设当系统压力为 p_{i},燃油中的气体位于溶解和析出的平衡状态,且燃油中气泡体积和溶解的空气体积分别为 V_{ib} 和 V_{is},那么当系统压力转变为 p,在 t 时刻燃油中气泡体积 V_{tb} 为[6-9]

$$V_{\mathrm{tb}}=V_{\mathrm{ib}}+V_{\mathrm{is}}-V_{\mathrm{ts}}\tag{9}$$

其中,V_{ts} 为 t 时刻溶解于柴油中的气体体积,其表达式为

$$\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{ts}}}{\mathrm{d}t}=\frac{V_{\infty\mathrm{s}}-V_{\mathrm{ts}}}{\tau}\tag{10}$$

τ 为气体析出或溶解时间常数,当压力 p 大于 p_{i} 时,为溶解时间常数,反之为析出时间常数;$V_{\infty\mathrm{s}}$ 为系统压力为 p,燃油中气体析出和溶解达到平衡时,溶解的气体体积,其计算公式为

$$V_{\infty\mathrm{s}}=p\frac{V_{\mathrm{is}}}{p_{\mathrm{i}}}\tag{11}$$

假设在气-液两相条件下,燃油的含气率为 c,那么燃油中密度 ρ 公式[6]为

$$\rho=c\rho_{\mathrm{gas}}+(1-c)\rho_{\mathrm{liquid}}\tag{12}$$

其中,ρ_{gas},ρ_{liquid} 分别为气体和燃油的密度.

弹性模量 E 的公式为

$$E = \frac{E_{\text{gas}}E_{\text{liquid}}}{cE_{\text{liquid}} + E_{\text{gas}}} \tag{13}$$

其中,E_{gas},E_{liquid}分别为气体和燃油的弹性模量.

声速 a 的公式为

$$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{14}$$

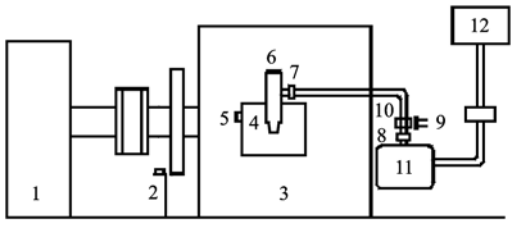
2 遗传算法参数辨识

根据式(12)、式(13)可知,气-液两相条件下的柴油机喷油系统模型中,柱塞腔初始含气率 C_{p}、出油阀紧帽腔初始含气率 C_{k}、针阀腔初始含气率 C_{n}和高压油管初始含气率 C_{h}的大小,将影响燃油的密度以及弹性模量的大小,根据式(14),上述变化会导致音速变化,从而对喷油系统压力脉动瞬态过程产生影响.

本文采用改进遗传算法[10]对 C_{p},C_{k},C_{n}和 C_{h} 4 个未知参数进行辨识. 采用二进制的编码方式,通过仿真数据和试验数据的对比建立适应度函数,同时为了提高遗传算法辨识的准确度和缩短辨识时间,针对基本遗传算法的缺点,提出采用“最优保存策略 + 比例选择”,同时最优基因不参加变异和交叉操作的办法,对遗传算法进行了改进.

柴油机台架试验如图 1 所示,通过透明高压油管 10,可以观测到柴油机喷油系统中气泡是否存在,通过安装在高压油管两端的压力传感器 7,8 可以获得高压油管两端的压力信号[2]. 本文通过遗传算法辨识的柴油机工况如表 1 所示.

高压油管的初始含气率 C_{h}的辨识流程如图 2 所示. 设定进化代数为 40,子群个数为 1,子群长度为 30,交叉率为 0.8,变异率为 0.06,适应度函数为式(15).



1—水力测功机;2—磁电式传感器;3—柴油机;4—喷油器;5—气缸压力传感器;6—针阀升程传感器;7、8—压力传感器;9—微型摄像机;10—透明高压油管;11—喷油泵;12—油箱

图 1 柴油机台架试验测试原理简图

$$F = \frac{1}{(a_{\text{sim}} - a_{\text{ex}})^2} \tag{15}$$

其中,a_{sim}为高压油管燃油音速仿真结果;a_{ex}为高压油管燃油音速实验测得结果.

表 1 柴油机工况

参数	数值
曲轴转速/(r·min^{-1})	2000
功率/kW	11
燃油消耗率/(g·(kW·h)$^{-1}$)	222.1
针阀开启压力/MPa	19.0

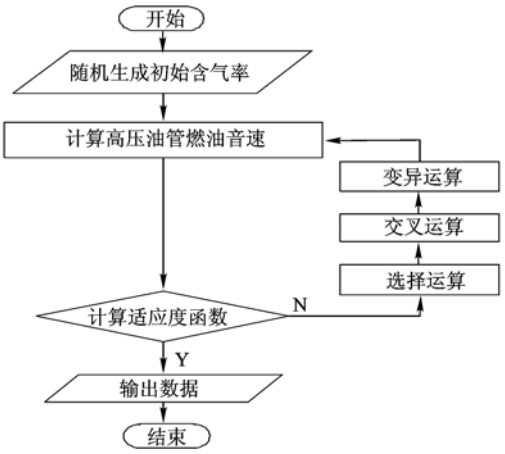


图 2 高压油管初始含气率辨识流程图

柱塞腔初始含气率 C_{p}、出油阀紧帽腔初始含气率 C_{k}和针阀腔初始含气率 C_{n}的辨识流程如图 3 所示. 设定进化代数为 100,子群个数为 3,子群长度为 30,交叉率为 0.8,变异率为 0.06,适应度函数为式(16).

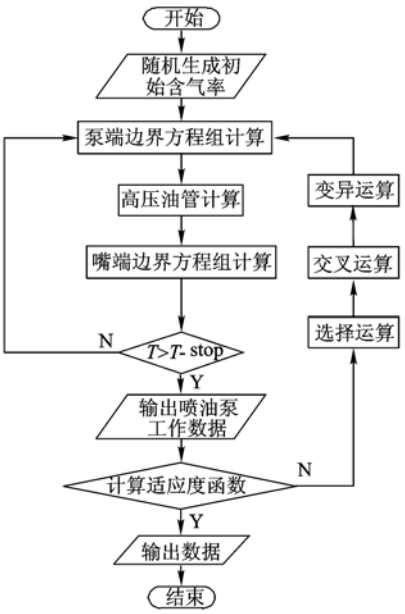


图 3 喷油泵其他腔体初始含气率辨识流程图

$$\left.\begin{aligned} F &= 10^5 / \sqrt{(F_1 + F_2)} \\ F_1 &= \sum_i^n (P_{\text{ksim}}(i) - P_{\text{kex}}(i))^2 \\ F_2 &= \sum_i^n (P_{\text{nsim}}(i) - P_{\text{nex}}(i))^2 \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

其中,$P_{ksim}(i)$ 和 $P_{nsim}(i)$ 分别为 i 时刻高压油管喷油泵端和喷油器端压力仿真结果;

$P_{kex}(i)$ 和 $P_{nex}(i)$ 分别为 i 时刻高压油管喷油泵端和喷油器端试验测得压力结果.

3　辨识结果

图 4 和图 5 分别给出了高压油管初始含气率和其他腔体初始含气率辨识平均适应度和最优适应度随进化代数的变化情况. 从图 4 和图 5 中可以看出,遗传算法得到很好的收敛,平均适应度分别达到 486 和 5 280. 并得到 4 个辨识参数的辨识结果,如表 2 所示.

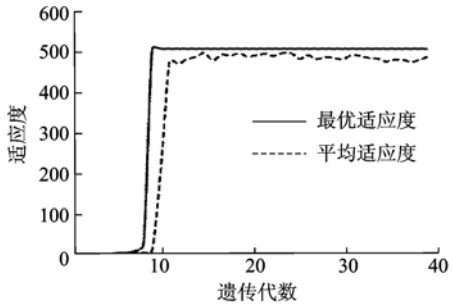


图 4　适应度随遗传代数变化曲线(高压油管)

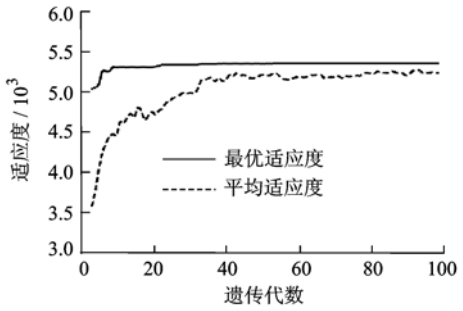


图 5　适应度随遗传代数变化曲线(其他腔体)

表 2　模型参数辨识结果

参数	C_p	C_k	C_n	C_h
辨识后的值	0.034	0.009 5	0.035	0.02

图 6 为喷油系统高压油管喷油泵端试验数据和仿真数据的对比,图 7 为喷油系统高压油管喷油器端试验数据和仿真数据的对比.

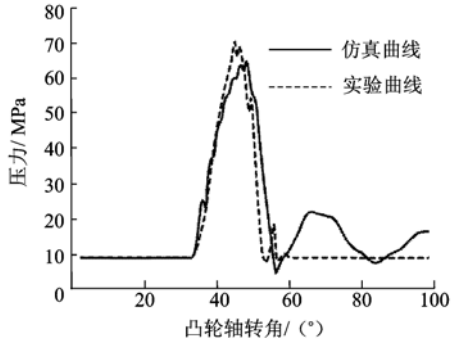


图 6　高压油管喷油泵端试验数据和仿真数据对比

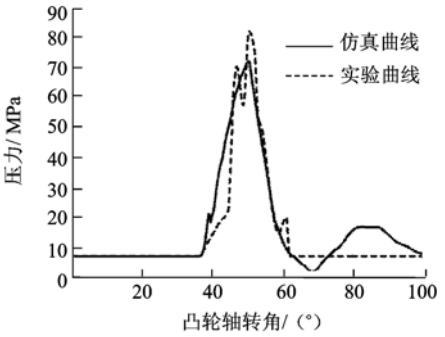


图 7　高压油管喷油器端试验数据和仿真数据对比

从图 6 和图 7 中可以看出,仿真曲线和试验曲线吻合程度良好. 因此采用改进遗传算法对柴油机喷油系统模型参数辨识的方法是可行的.

4　结　论

1) 本文以泵-管-嘴式柴油机喷油系统为研究对象,通过对喷油系统机构和工作原理分析,在气泡模型的基础上,建立了气-液两相条件下柴油机喷油系统模型.

2) 采用改进遗传算法,对两相条件下柴油机喷油系统模型进行未知参数辨识,为合理预测喷油系统中不同腔体的初始含气率提供了准确的参数值,解决了喷油系统模型参数优化的问题.

3) 通过改进遗传算法优化后柴油机喷油系统模型中参数值是在一种工况下适用的,但要找到不同工况下的未知参数通用公式,还需要做大量的工作.

参考文献 (References)

[1] 李旭林,何勇灵. 两相条件下柴油机喷油系统的数学模型[J]. 内燃机学报,2007,25(5):428 - 432
Li Xulin, He Yongling. A model for diesel injection system simulation under two-phase condition[J]. Transactions of CSICE, 2007,25(5):428 - 432 (in Chinese)

[2] 何勇灵,刘建民,李民,等. 农用柴油机喷油系统中液-气两相流动过程实验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(1):31 - 34
He Yongling, liu Jianxin, li Min, et al. An experiment investigation on process of two-phase flow in fuel injection system of agricultural diesel engine[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(1):31 - 34(in Chinese)

[3] 何勇灵,李汝宁. 气泡模型在喷油系统模型仿真中的应用[J]. 农业工程学报,2011,27(3):142 - 146
He Yongling, Li Runing. Application of gas bubble model to fuel injection system simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3):142 - 146(in Chinese)

(下转第 472 页)

材料开发与应用,2005,20(4):38-40
Zhao Jingang, Zhang Baowei, Wang Minglin. Development of high strength austenitic stainless steel[J]. Development and Application of Material, 2005, 20(4): 38-40(in Chinese)

[2] 从保强,齐铂金,周兴国. 超快变换高频变极性方波TIG电弧行为[J]. 焊接学报,2009,30(6):87-90
Cong Baoqiang, Qi Bojin, Zhou Xingguo. TIG arc behavior of ultra fast-convert high-frequency variable polarity square wave[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(6): 87-90(in Chinese)

[3] Ghosh P K, Dorn L, H bner M, et al. Arc characteristics and behavior of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 194: 163-175

[4] Onuki, Yoshisa Anazawa, Masayasu Nihei, et al. Development of a new high-frequency, high-peak current power source for high constricted arc formation[J]. Jpn J Appl Phys, 2002(41): 5821-5826

[5] 齐铂金,许海鹰,张伟. 0Cr18Ni9Ti超音频脉冲TIG焊接头组织与性能[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(2):132-133
Qi Bojin, Xu Haiying, Zhang Wei. Microstructure and property analysis of 0Cr18Ni9Ti joints welded by ultra-sonic pulse tungsten-inert-gas welding technology[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(2): 132-133(in Chinese)

[6] Amin M. Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding[J]. Metal Construction, 1983(15): 272-278

[7] Jerzy Nowacki, Pawel Pybicki. The influence of welding heat input on submerged arc welded duplex steel joints imperfections[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005: 1082-1088

[8] 赵家瑞,孙栋,胡绳荪,等. 高频脉冲TIG焊电弧的阳极行为[J]. 焊接学报,1992,13(1):59-66
Zhao Jiarui, Sun Dong, Hu Shengsun, et al. Arc behavior of high frequency pulse TIG welding arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1992, 13(1): 59-66(in Chinese)

[9] 安藤弘平,长谷川光雄. 焊接电弧现象[M]. 北京:机械工业出版社,1985:249-250
Ando K, Hasegawa M. Welding arcphenomena[M]. Beijing China Machine Press, 1985: 249-250(in Chinese)

[10] 贾昌申,肖克民,殷咸青. 焊接电弧的等离子流力研究[J]. 西安交通大学学报,1994,28(1):23-28
Jia Changshen, Xiao Kemin, Yin Xianqing. The plasmas flow force of welding arc[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1994, 28(1): 23-28(in Chinese)

[11] 孙清洁,杨春利,林三宝,等. 超声钨极氩弧复合焊金属熔化行为分析[J]. 焊接学报,2010,31(3):41-44
Sun Qingjie, Yang Chunli, Lin Sanbao, et al. Research on melting metal behavior of ultrasonic-tungsten inert gas welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(3): 41-44(in Chinese)

[12] Quan Y J, Chen Z H, Gong X S, et al. Effects of heat input on microstructure and tensile properties of laser welded magnesium alloy AZ31[J]. Materials Characterization, 2008(59): 1491-1497

(编 辑:文丽芳)

(上接第467页)

[4] 毛范海. AD型喷油泵燃油喷射系统计算机建模和仿真分析研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2003
Mao Fanhai. Modeling and simulation on fuel injection system of AD type pump by computer[D]. Dalian: School of Mechannical Engineering, Dalian University of Technology, 2003(in Chinese)

[5] Shu Jianjun. A finite element model and electronic analogue of pipeline pressure transients with frequency dependent friction[J]. Transactions of ASME, 2003, 25(1): 194-198

[6] 蒋丹. 存在气泡和气穴时无阀微泵动态特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电学院,2009
Jiang Dan. Study on dynamic characteristics of a valve-less micropump accompanying gas bubbles and cavitation[D]. Harbin: School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 2009(in Chinese)

[7] 李松晶,鲍文. 采用MATLAB Simulink的液压管路瞬态压力脉动分析[J]. 工程力学,2006,23(9):184-188
Li Songjing, Bao Wen. Analysis of transient hydraulic pressure pulsation in pipelines using MATLAB Simulink[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 184-188(in Chinese)

[8] Li Songjing, Yang Chifu, Jiang Dan. Modeling of hydraulic pipeline transients accompanied with cavitation and gas bubbles using parallel genetic algorithms[J]. Journal of Applied Mechanics, 2008, 75(4): 0410121-0410128

[9] Jensen M J. Numerical simulations of interface dynamics in microfluidics[D]. Copenhagen: Department of Micro and Nanotechnology, Technical University of Denmark, 2005

[10] 王小平,曹立明. 遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002:19-49
Wang Xiaoping, Cao Liming. Genetic algorithm-theory, application and implementation of software[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002: 19-49(in Chinese)

(编 辑:张 嵘)