

文章编号: 1000-8055(2007)12-2062-06

伴随气泡和气穴低压管路瞬态的建模与分析

蒋 丹, 李松晶, 包 钢

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 在航空航天液压系统中, 为了合理地预测伴随气泡和气穴低压管路压力瞬态脉动, 给出了用来描述管路流动瞬态特性的数学模型. 采用有限差分法实现了偏微分方程中空间域的偏导, 并建立了计算有效体积弹性模量、摩擦阻力项、气泡和气穴体积的数学模型. 利用遗传算法对模型中三个参数即油中的初始气泡体积、气体析出时间常数和气体溶解时间常数进行参数辨识, 得到了参数辨识以后的低压管路压力瞬态脉动模型. 通过对仿真结果和实验结果的分析比较, 表明该低压管路瞬态模型用于计算伴随气泡和气穴的压力瞬态脉动是可行的.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 低压管路数学模型; 压力瞬态脉动; 气泡; 气穴

中图分类号: O351.2; V233

文献标识码: A

Modeling and analyzing of low pressure pipeline transients accompanying gas bubbles and cavitation

JIANG Dan, LI Songjing, BAO Gang

(School of Mechanical and Electrical Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to predict pressure transients accompanying gas bubbles and cavitation inside low pressure pipeline in hydraulic system of aerospace, pressure transient mathematical model was given to describe the flow behavior in the pipeline. By using finite difference method, partial differential terms of spatial dimension in differential equations can be calculated. Mathematic models were presented for calculation of effective bulk modulus, friction, gas bubble and cavitation volume during the transients. The model of low pressure pipeline transients involves three parameters, i. e. initial gas bubble volume in oil, gas releasing time constant and resolving time constant. By making use of genetic algorithms (GA), parameter identification for the mathematical model of pressure transients was performed. Thus the model with parameters identified from GA was obtained and simulated. Comparison between simulation results and experimental data shows that low pressure transient model is capable of predicting pressure pulsation accompanying gas bubbles and cavitation.

Key words: aerospace propulsion system; low pressure pipeline mathematical model; pressure transient pulsation; gas bubble; cavitation

在航空航天液压系统、空中加油或燃油供给系统中, 由于事故停泵或者阀门的突然关闭将出现管路中压力瞬态脉动. 由于这些管路中工作压

力往往接近或低于大气压力, 因而这些管路中的压力脉动常常伴随有气泡和气穴的产生和破灭, 这将使得泵和液压管路工作不稳定、产生噪声并

收稿日期: 2006-12-04; 修订日期: 2007-07-13

作者简介: 蒋丹(1980), 女, 四川遂宁人, 博士生, 主要研究方向为管路压力脉动.

影响其工作性能, 而且气泡和气穴的产生和破灭也会反过来影响整个压力脉动过程. 因此, 与高压管路中压力脉动过程相比, 低压管路中有气泡和气穴产生的压力脉动过程更难以预测. 合理地预测低压管路中压力瞬态脉动对工作性能要求很高的航空航天液压系统是十分重要的^[1-2]. 这些管路中的动态压力脉动过程也可通过动态控制阀门的开关来加以抑制和消除, 此时对管路中压力脉动过程的合理预测尤为重要.

过去对伴随气泡和气穴的低压管路的研究中, Wylie 和 Streeter^[3] 按照亨利定律假定了一个气体释放率, 但是没有解释气体释放率对管路中压力脉动的影响. Bergant^[4] 等采用液柱分离模型来模拟气穴的产生, 但该模型忽略了气体释放的影响. 很多国内学者也对管路压力瞬态脉动过程中的气泡和气穴现象进行了研究. 叶宏开^[5] 采用特性线法计算管路压力瞬态, 同时考虑了原有的自由气体和析出气体体积; 郑源、索丽生等^[6] 对有压输水管路系统的气体多方指数和含气水锤进行了研究. 以上的研究都没有给出准确的气体溶解时间常数、气体析出时间常数和初始气泡体积的值.

本文利用流体动力学原理, 建立伴随气泡和气穴产生的空间一维压力瞬态脉动数学模型, 给出有效体积弹性模量和摩擦阻力项的数学模型, 以及基于气泡和气穴体积计算的气泡和气穴产生及破灭数学模型. 采用遗传算法对模型中的参数进行辨识, 给出辨识后模型的仿真结果, 并与实验结果进行比较.

1 管路瞬态模型

低压管路瞬态数学模型是根据流体动力学基本方程、有效体积弹性模量、摩擦阻力项的计算公式建立的.

1.1 基本方程

利用流体动力学原理, 用空间一维连续方程和运动方程来描述低压管路压力瞬态脉动过程. 连续方程

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho}{\pi r_0^2} \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

运动方程

$$\frac{\rho}{\pi r_0^2} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + F(q) + \rho g \sin \theta_0 = 0 \quad (2)$$

式中, p 为管路中某点的瞬时压力; q 为管路中某点的瞬时流量; x 为空间变量; t 为时间变量; c 为油中的声速; ρ 为油的密度; r_0 为管路内径; $F(q)$

为摩擦阻力项; $\rho g \sin \theta_0$ 为重力项, 如果管路水平, 这一项值为零.

为了求解双曲型偏微分方程 (1) 和 (2), 采用有限差分法将管路分为 n 个计算单元. 在仿真模型中, 管路中的流量和压力以向量形式可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= (q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_n)^T \\ \mathbf{p} &= (p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_n)^T \end{aligned}$$

将流量边界条件 q_0 和前 $n-1$ 个计算单元的流量组成新的向量 $\mathbf{q}'$

$$\mathbf{q}' = (q_0 \quad q_1 \quad \cdots \quad q_{n-1})^T$$

这样, $\partial \mathbf{q} / \partial x$ 可表示为

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x} = \frac{\mathbf{q} - \mathbf{q}'}{\Delta x} \quad (3)$$

式中, Δx 为单元的长度.

对于压力 $\mathbf{p}$, 将后 $n-1$ 个计算单元的压力和压力边界条件 p_0 组成新的向量 $\mathbf{p}'$

$$\mathbf{p}' = (p_2 \quad \cdots \quad p_n \quad p_0)^T$$

所以, $\partial \mathbf{p} / \partial x$ 可表示为

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial x} = \frac{\mathbf{p}' - \mathbf{p}}{\Delta x} \quad (4)$$

1.2 有效体积弹性模量

管路中油液的有效体积弹性模量可表示为

$$B_{\text{eff}} = \frac{B_{\text{gas}} B_{\text{liquid}}}{(V_{\text{gas}}/V)(B_{\text{liquid}} - B_{\text{gas}}) + B_{\text{gas}}} \quad (5)$$

式中 B_{gas} 和 B_{liquid} 分别为气体和油的体积弹性模量, V_{gas} 为气泡体积, V 为油液的体积.

可见, 气泡体积将影响管路中油液的有效体积弹性模量. 由于有效体积弹性模量与管路压力和油中的声速之间有着密切的联系, 因此即使油中有少量的气泡也会影响压力瞬态脉动过程.

1.3 摩擦阻力项

在公式 (2) 中, 摩擦阻力项可表示为

$$F(q) = F_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 Y_i \quad (6)$$

其中, 等式右边第一项为稳态摩擦项, 第二项为与频率相关的动态摩擦项. 其中关于 Y_i 的约束方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial Y_i}{\partial t} = -\frac{n_i \omega}{\rho_0^2} Y_i + m_i \frac{\partial F_0}{\partial t}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \\ Y_i(0) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

表 1 列出了系数 n_i 和 m_i 的值^[7].

2 气穴和气泡模型

2.1 气穴体积

当管路某处的压力低于油的饱和蒸汽压时,

表 1 n_i 和 m_i 的值
Table 1 Values of n_i and m_i

i	n_i	m_i
1	39.48	2.01
2	298.27	5.39
3	2 227.96	16.26
4	88 782.07	320.49

该处产生气穴,液相和气相分离.管路中油的密度随着气穴体积的变化而变化.因此,油中的气穴体积不可忽略.根据流量连续性方程和液柱分离模型,气穴的体积 V_{cav} 可表示为

$$\frac{dV_{\text{cav}}}{dt} = q_{\text{out}} - q_{\text{in}} \tag{8}$$

式中 q_{out} 为流出单元体流量; q_{in} 为流入单元体流量.

2.2 气泡体积

当压力降到空气分离压以下时,溶解在油中的气体析出形成气泡,油中的气泡体积增加;当压力升高时,气泡又重新溶解于油中,油中的气泡体积减少.存在于油中气泡体积的变化会改变油的有效体积弹性模量,油中的声速也随之变化.因此,气泡体积的变化也会影响管路中压力瞬态脉动.

假设初始时刻,管路中油处于平衡状态(油中气体溶解和析出趋于平衡),则 t 时刻油中气泡体积为

$$V_{\text{gas}} = V_{\text{in gas}} + v_e - v \tag{9}$$

式中, $V_{\text{in gas}}$ 为油中初始气泡体积; v_e 为初始时刻溶解于油中的气体体积; v 为 t 时刻溶解于油中的气体体积,其变化率的表达式为

$$\dot{v} = \frac{dv}{dt} = \frac{v_{\infty} - v}{\tau} \tag{10}$$

当压力下降时,溶解在油中的气体以气泡的形式析出, τ 为气体析出时间常数;当压力升高时,气体又重新溶解到油中,此时 τ 为气体溶解时间常数.根据亨利定律,在平衡状态下溶解于油中的气体体积正比于油液的绝对压力 p_e ,即

$$v_e = S \frac{p_e}{p_0} V \tag{11}$$

式中, S 为溶解度系数.在常温常压下,油一般含有 10% (体积百分比) 的溶解气体.当管路压力为 p 时,在平衡稳态下油中溶解的气体体积 v_{∞} 为

$$v_{\infty} = v_e \frac{p}{p_e} \tag{12}$$

2.3 模型参数分析

压力脉动随着管路中初始气泡体积的不同而

不同.初始气泡越多,则压力脉动的峰值越小,并且压力响应速度也相应变慢^[3].因此在低压管路压力瞬态过程中,油中的气泡类似于弹簧,对管路压力脉动起缓冲作用.在低压管路系统中,沿管线分布的自由气泡位置、数量和体积是很难估计和测量的.因此在压力瞬态脉动数学模型中,油中初始气泡体积是一个需要辨识的重要参数.

压力脉动与气体溶解时间常数和析出时间常数有关,而气体溶解时间常数大于析出时间常数,因为气体从油中析出后很难再重新溶解于油中^[8].气体溶解时间常数和析出时间常数反映了瞬态过程中气体溶解和析出的快慢,但是无法通过实验测得.因此气体溶解时间常数和析出时间常数是另两个需要辨识的重要参数.

3 仿真与实验验证

如图 1 所示,对阀门突然关闭时的水平低压管路压力瞬态过程进行研究.管路被等分为 $n=20$ 个计算单元,阀门处为第 1 个单元,油箱处为第 20 个单元.

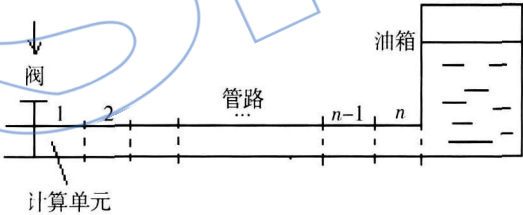


图 1 研究模型
Fig. 1 Analytical model

采用 Matlab/Simulink 进行仿真,其模块如图 2 所示.按照公式 (5) ~ (12),模型中计算了有效体积弹性模量、摩擦阻力项以及气泡和气穴体积.根据公式 (3) ~ (4),对流量和压力向量重新排序以实现有限差分.仿真采用 ode23 s 变步长积分,仿真时间为 0.11 s,最大积分步长为 0.000 1 s,其它仿真参数见表 2.

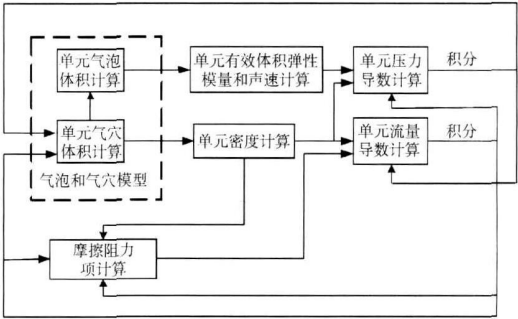


图 2 管路瞬态 Simulink 仿真模块
Fig. 2 Simulink module of pipeline transient s

表 2 仿真参数

Table 2 Parameters in the simulation

参数	值
油的体积弹性模量/ 10^5 Pa	16 000
油的运动粘度/ (mm^2/s)	44
油的密度/ (kg/m^3)	875
油箱的液面高度/ m	0.3
初始流量/ 10^{-5} (m^3/s)	8
管路内径/ m	0.005 1
管路长度/ m	3.856

低压管路压力瞬态数学模型中包含三个需要辨识的参数. 这里采用遗传算法, 并结合 Matlab/ Simulink 仿真模块来辨识模型中的参数, 从而实现低压管路压力瞬态模型的仿真与辨识^[9]. 在遗传算法中, 适应度函数 f 为

$$f = 1 \setminus \sqrt{\sum_i (y(t) - y_0(t))^T (y(t) - y_0(t))}$$

(13)

式中 $y(t)$ 为模型仿真结果, $y_0(t)$ 为实验数据, 即通过仿真结果与实验数据的最小二乘来辨识模型中的三个参数, 其中实验数据来源于文献[10]. 算法采用二进制对个体进行编码以及轮盘赌法进行最优个体的选择, 它的交叉概率为 0.4, 变异概率为 0.005, 其参数辨识结果如表 3 所示.

表 3 参数辨识

Table 3 Parameters identification

	析出时间 常数/ s	溶解时间 常数/ s	初始气泡 体积/ m^3
辨识前	11.01	13.65	4.08×10^{-7}
辨识后	5.88	11.35	6.72×10^{-9}

参数辨识以后管路瞬态模型中第 4 个计算单元的压力仿真结果与实验结果的比较如图 3 所示. 当阀门突然关闭时, 该处最大压力冲击为 14×10^5 Pa; 之后压力降低, 气泡和气穴的产生使波速下降, 第一和第二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, 压力峰值之间的时间间隔也相应缩短. 同时, 图 3 也给出了采用表 3 中参数辨识前的仿真结果^[8]. 通过比较可知, 参数辨识后压力瞬态模型的

仿真结果比参数辨识前具有更高的精度, 尤其是在第一个压力峰值处.

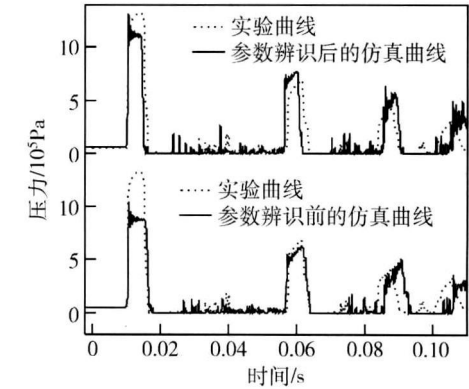


图 3 第 4 个单元的压力脉动仿真曲线和实验曲线的比较

Fig. 3 Comparison of simulation and experimental pressure pulsation in the fourth element

图 4(a) 给出了参数辨识后瞬态模型中第 1 个单元的压力脉动仿真曲线. 第 1 个单元的压力曲线与第 4 个单元基本一致, 但是由于第 1 个单元距离阀门处近, 所以正压波到达时间比第 4 个单元提前. 图 4(b) 给出了第 1 个单元中气泡和气穴的体积变化仿真曲线. 在整个压力瞬态过程中, 第 1 个单元出现了三次气穴, 其中最大气穴体积

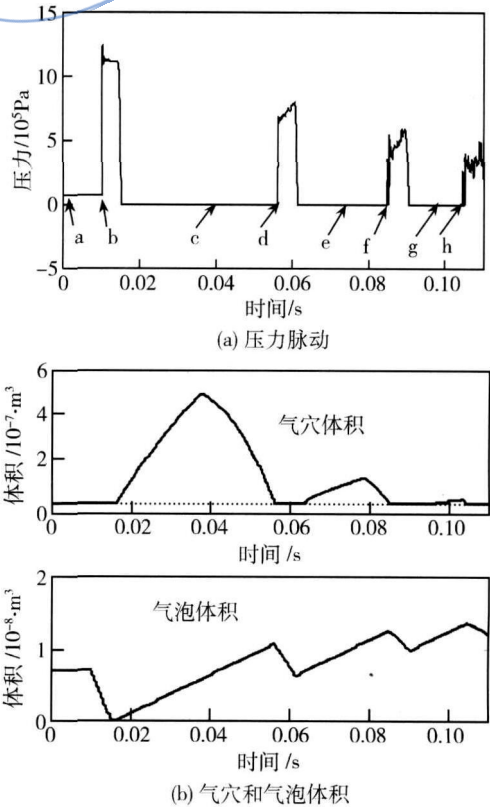


图 4 第 1 个单元的压力脉动和气穴与气泡体积仿真曲线
Fig. 4 Simulation of pressure pulsation and cavitation and gas bubble volume in the first element

为 $5 \times 10^{-7} \text{ m}^3$, 第二个气穴体积为 $1.7 \times 10^{-7} \text{ m}^3$, 约为最大气穴体积的 $1/3$, 第三个气穴体积很小, 约为 $1 \times 10^{-8} \text{ m}^3$. 第1个单元中气泡体积比气穴体积小, 但是气泡体积在整个压力脉动过程中是逐渐增加的, 这是由于气体析出时间常数比气体溶解时间常数小.

为了进一步验证参数辨识后模型的可靠性, 将第1个单元的仿真结果与实验结果进行比较. 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^[10]. 采用高速摄影机以500帧/秒记录瞬态过程中管路第1个单元的气泡和气穴产生和破灭过程, 如图5所示. 在0.01 s时, 小球撞击阀座, 压力迅速升高, 如图5(a), (b); 负压波从油箱处反射回来, 压力下降到饱和蒸汽压, 气泡和气穴在小球表面迅速生成并膨胀至最大体积, 如图5(c); 在第二个波峰处, 即0.058 s时气穴在高压的作用下破灭, 气泡体积减少, 如图5(d); 之后压力又下降, 气泡和气穴产生, 但是气泡和气穴的体积比第一次小, 大约为第一次气泡和气穴最大体积的 $1/3$, 如图5(e), 这与仿真计算得到的第1个单元中该时刻气

泡和气穴体积吻合; 在0.082 s时, 当第三个压力波峰到达, 气穴消失, 气泡减少, 如图5(f); 之后压力又下降, 气泡和气穴又一次产生, 其体积比前两次都小, 如图5(g); 最后, 在0.1 s时, 气穴在正压波的作用下消失, 如图5(h). 因此, 实验拍摄到的气泡和气穴生成和破灭过程与仿真得到的压力脉动和对应的时间点(如图4(a)所示)基本吻合. 由此可知参数辨识以后伴随气泡和气穴的低压管路瞬态分析数学模型是合理的, 其仿真方法简单可行.

4 结 论

利用流体动力学原理, 提出了基于运动方程和连续方程的航空航天低压管路压力瞬态数学模型, 并考虑了油的压缩性、管路摩擦阻力以及气泡和气穴的体积变化对压力脉动的影响; 采用有限差分法, 将管路分为有限个计算断面, 通过 Matlab/Simulink 建模, 对管路瞬态数学模型进行了仿真, 其仿真方法简单可行; 对模型中的参数采用遗传算法进行辨识, 得到了辨识后的参数模型, 其仿真结果与实验结果比较可以看出, 辨识后的伴随气泡和气穴低压管路压力瞬态数学模型是合理的, 可以用来计算低压管路中气泡和气穴的产生和破灭过程以及瞬态压力脉动过程.

参考文献:

- [1] 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 Mechanical, 2006, 23(9): 184-188.
- [2] JIANG Dan, LI Songjing. Simulation of hydraulic pipeline pressure transients accompanying cavitation and gas bubbles using matlab/simulink [R]. Miami, USA: 2006 ASME Joint U. S.-European Fluids Engineering Summer Meeting. Paper No. FEDSM98389, 2006.
- [3] Wylie E B, Streeter V L, Suo L S. Fluid transients in system [M]. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1993.
- [4] Bergant A, Simpson A R. Pipeline column separation flow regimes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125 (8): 835-848.
- [5] 叶宏开, 何枫, 陈国祥. 管路中有气泡时的水锤计算 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1993, 33(5): 17-21.
YE Hongkai, HE Feng, CHEN Guoxiang. Calculation of water hammer when free gas bubbles are existence [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1993, 33(5): 17-21.
- [6] 郑源, 索丽生, 屈波, 等. 有压输水管道系统含气水锤研究 [J]. 河海大学学报, 2005, 33(3): 277-281.
ZHENG Yuan, SUO Lisheng, QU Bo, et al. Study on

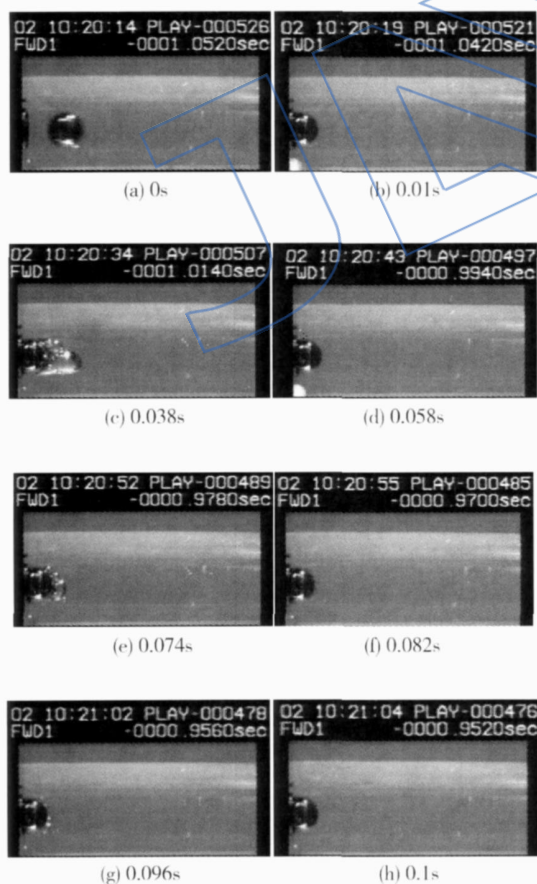


图5 气泡和气穴产生和破灭过程

Fig. 5 Growth and collapsing of gas bubbles and cavitation

water hammer with gas in pressurized water delivery pipe line system[J]. Journal of Hehai University, 2005, 33 (3): 277-281.

[7] Taylor S E M, Johnston D N, Longmore D K. Modelling of transient flow in hydraulic pipelines [J]. PIME, Part I, 1997, 211: 447-456.

[8] Schweitzer P H, Szebehely V G. Gas evolution in liquids and cavitation [J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21 (12): 1218-1224.

[9] Giacobbo F, Marseguerra M, Zio E. Solving the inverse problem of parameter estimation by genetic algorithms: the case of a groundwater contaminant transport model [J]. Annals of Nuclear Energy, 2002, 29: 967-981.

[10] 李松晶, 朱冬. 含气泡和气穴的液压管路瞬态实验研究 [J]. 机床与液压, 2006, 8: 146-147.

LI Songjing, ZHU Dong. Experiment research on the fluid transient in hydraulic pipeline including cavitation and gas bubbles [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006, 8: 146-147.

