

DOI 10.3969/j.issn.1001-3881.2010.19.029

黏弹流体在变频调速系统中的水击数值模拟

李鸣¹, 邱水才¹, 周国发¹, 张玲艳²

(1. 南昌大学环境与化学工程学院, 江西南昌 330031; 2. 南昌大学科学技术学院, 江西南昌 330029)

摘要: 研究黏弹性流体变频流量控制水击产生机理的相关理论对于变频流量控制流体输送系统的设计和水击控制设计具有参考价值。基于 Mini-Element法、罚函数法、Galerkin法、DEVSS-G/SUPG法等混合有限元稳态离散技术, 建立求解黏弹性流体变频流量控制输送系统水击产生过程的全三维黏弹性理论模型的稳态有限元数值离散模型。通过建立的稳态有限元数值算法, 系统模拟黏弹性流体流变性能参数对变频流量控制流体输送系统水击过程的影响规律。结果表明: 变频流量控制流体输送系统水击强度随着黏弹性流体的松弛时间和密度的增加而增加, 随着流体黏度的增加而减小。

关键词: 黏弹性; 水击; 数值模拟; 变频调速

中图分类号: TQ022 文献标识码: A 文章编号: 1001-3881(2010)19-101-4

Numerical Investigation on Water Hammer Process of Viscoelastic Fluid Variable Frequency Flow Regulation System

LIMing¹, QU Shucai¹, ZHOU Guofa¹, ZHANG Lingyan²

(1. School of Environmental & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang Jiangxi 330031, China

2. College of Science & Technology, Nanchang University, Nanchang Jiangxi 330029, China)

Abstract It is very important to study the mechanism of water hammer for the design method and water hammer pressure control method of viscoelastic fluid variable frequency flow regulation transporting system. Based on the mixed finite element stable discrete techniques of Mini-Element method, penalty function method, Galerkin method and DEVSS-G/SUPG method etc., the stable finite element numerical model was established for 3D water hammer process of viscoelastic fluid variable frequency flow regulation transporting system. The influencing rules of viscoelastic rheological parameters on the water hammer were modeled by the stable numerical algorithm established. The simulation results show that water hammer strength increase with increasing of viscoelastic fluid relaxation time and density, but decrease with increasing of viscoelastic fluid viscosity.

Keywords Viscoelasticity; Water hammer; Numerical simulation; Variable frequency flow regulation

从流体动力学角度来讲, 变频流量控制所致的水击现象是由于过程装备系统进口流速或流量变化产生系统流动动力学特性变化而导致的, 而传统的阀控流量控制所致的水击现象是由于系统中的阀瓣边界运动导致系统流动动力学特性变化而导致的, 二者在产生机理上有一定的本质区别, 这使得现有的国内外相关水击压力控制方法不适用于过程装备流体输送系统变频流量控制所致水击压力控制。目前对有关阀致水击产生机理和水击压力控制研究进行了广泛的研究, 取得较大进展。MHAfshar^[1]等对阀致水击产生过程进行了数值模拟研究, 姜礼斌^[2]进行了阀致水击 PD 控制研究。但至今国际上仍缺乏对黏弹性流体变频流量控制水击产生机理的相关理论研究, 使得其产生机理至今尚未完全弄清, 其过程装备变频流量控制流体输送系统的设计和水击控制仍处于经验试差法的不科学状态。由此可见, 揭示黏弹性流体变频流量控制水击产生的流变学机理, 建立其预测方法具有重要的理论和工程应用研究价值。作者针对这一实际工程问题, 基

于数值模拟方法, 系统研究了黏弹性流体流变性能参数对水击产生过程的影响规律, 为建立科学的过程装备变频流量控制流体输送系统的设计和水击控制设计的方法奠定科学的理论基础。

1 理论模型的建立

1.1 理论模型

设有两台变频调速泵(泵 1、泵 2)并联运行^[3], 变频调速泵 1 一直处于全开状态, 变频调速泵 2 通过变频流量控制达到工艺流量参数要求。其工艺流程如图 1 所示。

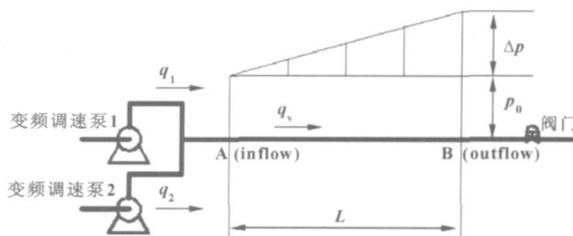


图 1 并联变频调速泵运行示意图

收稿日期: 2009-09-16

作者简介: 李鸣(1957-), 男, 博士, 教授, 从事化学工程研究工作。电话: 0791-3969028, E-mail: liming@ncu.edu.cn

由流体输送过程遵循的三大守恒定理^[4]，可得其控制方程式为

$$\Delta \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \Delta) \mathbf{u} \right] = \Delta \cdot \boldsymbol{\sigma} \tag{2}$$

式中： \mathbf{u} 为速度矢量；

$\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量， $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \mathbf{T}$ ；

p 为压力；

\mathbf{T} 为偏应力张量；

\mathbf{I} 为单位矩阵。

对于动量方程式 (2)，为了保障有限元数值算法具有高效收敛性，依据 RAJAGOPALAN^[5] (1990) 提出的弹黏分裂格式 (Elastic Viscous Split Stress EVSS)，将偏应力张量 \mathbf{T} 分为

$$\mathbf{T} = \mathbf{S} + 2\eta_2 \mathbf{D}, \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2}(\mathbf{G} + \mathbf{G}^T), \quad \mathbf{G} = \Delta \cdot \mathbf{u}$$

式中： \mathbf{S} 为黏弹性液体的黏弹性偏应力张量；

η_2 为溶剂的牛顿黏度；

\mathbf{D} 为应变速率张量。

本构方程采用 Phan-Thien-Tanner (PIT) 黏弹性本构模型^[6]

$$\exp \left[\frac{\varepsilon \lambda}{(1 - \eta_r) \eta} \text{tr}(\mathbf{S}) \right] \mathbf{S} + \lambda \left[\left(1 - \frac{\xi}{2} \right) \overset{\Delta}{\mathbf{S}} + \frac{\xi}{2} \overset{\Delta}{\mathbf{S}} \right] = 2(1 - \eta_r) \eta \mathbf{D} \tag{3}$$

式中： $\overset{\Delta}{\mathbf{S}}$ 、 $\overset{\Delta}{\mathbf{S}}$ 分别为黏弹性液体的黏弹性偏应力张量的上、下随体导数，定义为

$$\overset{\Delta}{\mathbf{S}} = \frac{D\mathbf{S}}{Dt} - \mathbf{S} \cdot \Delta \mathbf{u} - \Delta^T \mathbf{u} \cdot \mathbf{S}$$

$$\overset{\Delta}{\mathbf{S}} = \frac{D\mathbf{S}}{Dt} - \mathbf{S} \cdot \Delta^T \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u} \cdot \mathbf{S}$$

式中： η_r 为黏度比， η_2 / η ；

η 为黏弹性液体的总黏度；

ξ 和 ε 为无量纲材料参数，反映控制黏弹性液体剪切黏度和拉伸特性的材料参数；

λ 为松弛时间。

1.2 边界条件

$$\iint_{\Gamma} \left[\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \Delta) \mathbf{u} + \lambda_p \Delta \cdot \mathbf{u} + \eta_1 (\Delta \mathbf{u} + \Delta^T \mathbf{u}) + \mathbf{S} + (\eta_2 - \bar{\eta}) \times (\mathbf{G} + \mathbf{G}^T) \right] \Delta \phi_u d\Omega = \iint_{\Gamma} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} d\Gamma \tag{10}$$

$$\iint_{\Gamma} \left[\exp \left[\frac{\varepsilon \lambda}{(1 - \eta_r) \eta} \text{tr}(\mathbf{S}) \right] \mathbf{S} + \lambda \left[\left(1 - \frac{\xi}{2} \right) \times (\mathbf{u} \Delta \mathbf{S} - \mathbf{S} \cdot \mathbf{G} - \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{S}) + \frac{\xi}{2} (\mathbf{u} \Delta \mathbf{S} - \mathbf{S} \cdot \mathbf{G}^T + \mathbf{G} \cdot \mathbf{S}) \right] - (1 - \eta_r) \eta (\mathbf{G} + \mathbf{G}^T) \right] \phi_s d\Omega = \mathbf{0} \tag{11}$$

式中： k 为 SUPG 法的稳态因子， $\bar{\eta}$ 为参考黏度。 \mathbf{G} 作为中间变量附加方程的离散为

$$\iint_{\Gamma} -\Delta \mathbf{u} \phi_G d\Omega = \mathbf{0} \tag{12}$$

由方程 (9) — (12)式，即可计算速度场、压力场和应力场。

进口

$$Q = Q_{oi}(x, t) \quad \forall x \in \Gamma_{inlet} \tag{4}$$

式中： Q 为进口处流体体积流量；

Γ_{inlet} 为管道进口边界。

管道内壁

$$\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad \forall x \in \Gamma_{wall} \tag{5}$$

式中： Γ_{wall} 为管道内壁边界。

管道出口

$$(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) \cdot \boldsymbol{\tau} = \mathbf{0} \quad \forall x \in \Gamma_{outlet} \tag{6}$$

式中： \mathbf{n} 为界面单位法向矢量；

$\boldsymbol{\tau}$ 为界面单位切向矢量；

Γ_{outlet} 为出口边界。

1.3 有限元离散模型

三维黏弹性流动数值模拟的技术关键是建立一种高效稳定的有限元数值计算方法。作者采用 Mini-Element 单元和 DEVSS-G / SUPG 有限元技术^[7]建立理论模型的稳态有限元数值算法。现以 p 、 \mathbf{S} 、 \mathbf{u} 和 \mathbf{G} 为基本未知量，则单元内的 p 、 \mathbf{S} 、 \mathbf{u} 和 \mathbf{G} 可近似表示为

$$p = \sum_{i=1}^8 \phi_{pi} p_i \quad \mathbf{u} = \sum_{i=1}^9 \phi_{ui} \mathbf{u}_i$$
$$\mathbf{S} = \sum_{i=1}^8 \phi_{Si} \mathbf{S}_i \quad \mathbf{G} = \sum_{i=1}^8 \phi_{Gi} \mathbf{G}_i \tag{7}$$

式中： ϕ_i 为插值函数。为了减少计算对内存和 CPU 的要求，压力和应力采用线性插值，而对于速度，则采用含高次气泡项的六面体 Mini-Element 单元，即在六面体线性单元重心处增设一个气泡节点。 $\phi_{u9} = \phi_{i0}$ ， ϕ_{i0} 为 C^0 连续的高次气泡形函数，气泡函数 ϕ_{i0} 为

$$\phi_{i0} = (1 - \xi)^2 (1 - \eta)^2 (1 - \zeta)^2 \tag{8}$$

通过对气泡节点值的凝聚，消去方程中的气泡节点值，这样在不增加求解工作量的前提下，起到稳定求解的效果，使计算更加稳定。引入罚函数，并依据 Galerkin 和 DEVSS-G / SUPG 法，连续性方程式 (1)、运动方程式 (2) 和本构方程式 (3) 离散为

$$\iiint_{\Omega} [p + \lambda_p \Delta \cdot \mathbf{u}] d\Omega = 0 \tag{9}$$

2 影响规律与机理的数值分析

2.1 模拟条件

作者采用图 2 所示圆管实体模型，管道直径为 10 mm，长度为 100 mm，采用正

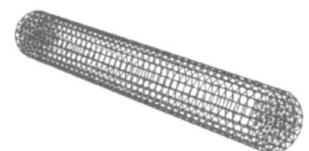


图 2 有限元实体模型

六面体最小单元进行网格划分。其 PTT 黏弹性本构模型参数见表 1。初始管道进口流量为 $1.545 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$

然后通过变频流量控制, 在 0.0005 s 内使系统进口流量增至 $3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$

表 1 材料模型参数

项目名称	黏度 $\eta / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	松弛时间 λ / s	材料参数 ξ	材料参数 ε	黏度比 η_r	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
黏度影响研究	改变	5	0.2	0.015	0.11112	1000
松弛时间影响	1	改变	0.2	0.015	0.11112	1000
密度影响研究	1	0.01	0.2	0.015	0.11112	改变

为了衡量水击的强度, 定义一个水击压力强度因子, 其定义为

$$\delta = \frac{p_{m \max}}{p_{st}}$$

式中: $p_{m \max}$ 为水击的最大压力;

p_{st} 为稳态流动时水击压力。

2.2 流体黏度与水击压力的关系

从流变学来讲, 液体黏度是表征液体流动特性的一个重要性能参数, 黏度越大, 流动阻力越强。为了研究该参数对水击压力的影响, 固定进口流量和其他流变性能参数, 人为改变流体黏度, 研究其对水击过程的影响规律。流体黏度对变频流量控制所致水击压力影响的模拟研究结果如图 3 和 4 所示。研究结果表明: 在 0.0005 s 时间内的变频流量增加控制时, 流体输送系统的压力出现急升, 形成水击; 而当变频流量增加至所需工艺流量后, 流体输送系统的压力下降, 并趋于稳定, 且变频流量控制所致水击的水击压力强度因子随着流体黏度增加而减小, 提高流体黏度有利于减小水击。当流体黏度由 $0.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 增至 $5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, 流体输送系统水击压力强度因子由 523 倍减小至 7.7 倍, 可见提高流体黏度有利于水击压力控制。水击压力强度因子随着流体黏度增加而减小的流变学机理是由于流体黏度具有黏性耗散阻尼作用, 黏性耗散阻尼作用随流体黏度增加而增加, 可有效减小压力波的传播, 从而有利于水击压力控制。由图 4 流体黏度对水击压力强度因子的影响研究结果可知, 流体黏度与水击压力强度因子呈对数衰减曲线关系, 通过数据回归, 得到流体黏度与水击压力强度因子的经验关系式为

$$\delta = 784.75 \exp^{-8.9\eta} + 20$$

$$\delta = 784.75 \exp^{-8.9\eta} + 20$$

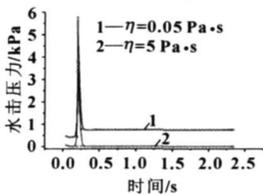


图 3 流体黏度和水击压力关系曲线

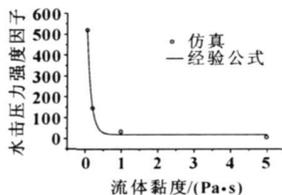


图 4 流体黏度和水击压力强度因子的关系

2.3 流体松弛时间与水击压力的关系

从流变学来讲, 松弛时间是表征黏弹性流体弹性

程度的一个重要性能参数, 松弛时间越长, 黏弹性流体的弹性也越强。为了研究该参数对水击压力的影响, 固定进口流量和其他流变性能参数, 人为改变流体松弛时间, 研究其对水击过程的影响规律。流体松弛时间对变频流量控制所致水击压力影响的模拟研究结果如图 5 和 6 所示。研究结果表明: 在 0.0005 s 时间内的变频流量增加控制时, 流体输送系统的压力出现急升, 形成水击; 而当变频流量增加至所需工艺流量后, 流体输送系统的压力下降, 并趋于稳定, 且变频流量控制所致水击的水击压力强度因子随着流体松弛时间增加而增加。当流体松弛时间由 0.01 s 增至 5 s 时, 流体输送系统水击压力强度因子由 4.3 倍增加至 32.5 倍, 可见减小流体松弛时间有利于水击压力控制。由图 5 可知, 流体松弛时间还影响系统压力大小, 系统压力随着流体松弛时间的减小而增加。变频流量控制所致水击的水击压力强度因子随着流体松弛时间增加而增加的流变学机理是松弛时间是表征黏弹性流体弹性程度的一个重要性能参数, 松弛时间越长, 黏弹性流体的弹性也越强。流体弹性越强, 自然对压力波传播的放大作用效果越大, 从而提高水击压力强度。由图 6 可知, 松弛时间与水击压力强度因子呈对数增加曲线关系, 通过数据回归, 得到松弛时间与水击压力强度因子的经验关系式为

$$\delta = -29.48 \cdot \exp^{-3.27\lambda} + 32.18$$

$$\delta = -29.48 \cdot \exp^{-3.27\lambda} + 32.18$$

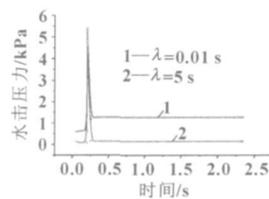


图 5 松弛时间和水击压力关系曲线

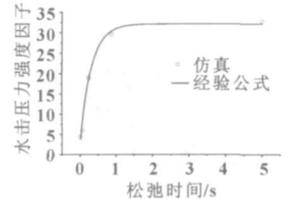


图 6 松弛时间和水击压力强度因子的关系

2.4 流体密度与水击压力的关系

从流变学来讲, 密度是表征黏弹性流体惯性的一个重要性能参数, 密度越大, 流体惯性也越强。为了研究该参数对水击压力的影响, 固定进口流量和其他流变性能参数, 人为改变流体密度, 研究其对水击过程的影响规律。流体密度对变频流量控制所致水击压力影响的模拟研究结果如图 7 和 8 所示。研究结果表

明: 在 0.000 5 s 时间内的变频流量增加控制时, 流体输送系统的压力出现急升, 形成水击; 而当变频流量增加至所需工艺流量后, 流体输送系统的压力下降, 并趋于稳定, 且变频流量控制所致水击的水击压力强度因子随着流体密度增加而增加。当流体密度由 500 kg/m^3 增至 5000 kg/m^3 时, 流体输送系统水击压力强度因子由 2.5 倍增加至 18 倍, 可见减小流体密度有利于水击压力控制。由图 7 可知, 流体密度变化不会影响流体稳态输送时系统压力, 但却影响变频流量调速瞬间的非稳态输送时的系统水击压力。变频流量控制所致水击的水击压力强度因子随着流体密度增加而增加的流变学机理是流体密度越大, 自然流速改变时的惯性力就越大, 从而导致水击压力强度增加。由图 8 可知, 流体密度与水击压力强度因子呈线性关系, 通过数据回归, 得到流体密度与水击压力强度因子的经验关系式为

$$\delta = 3.44\rho + 0.83$$

$$\delta = 3.44\rho + 0.83$$

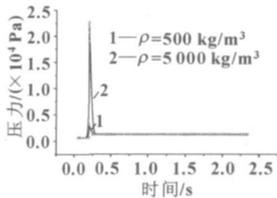


图 7 密度和水击压力关系曲线

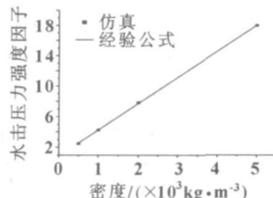


图 8 密度和水击压力强度因子的关系

3 结论

基于 Min+Element 法、罚函数法、Galerkin 法、DEVSS-G /SUPG 法等混合有限元稳态离散技术, 建立了求解黏弹性流体变频流量控制输送系统水击产生过程的全三维黏弹性理论模型的稳态有限元数值离散模型。

通过建立的稳态有限元数值算法, 系统模拟了黏

弹性流体流变性能参数对变频流量控制流体输送系统水击过程的影响规律。结果表明, 变频流量控制流体输送系统水击强度随着黏弹性流体的松弛时间和密度的增加而增加, 而随着流体黏度的增加而减小。

流体的弹性明显影响流体稳态输送时系统的压力, 流体稳态输送时系统的压力随着流体松弛时间的减小而增加。

流体密度变化不会影响流体稳态输送时系统压力, 但却影响变频流量调速瞬间的非稳态输送时的系统水击压力。

参考文献:

- 【1】A fshar M H, Rohani M. Water hammer simulation by implicit method of characteristic [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping 2008, 85(12): 851- 859
- 【2】姜礼斌. 阀致水击 PID 控制研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005
- 【3】Tiana Wenxi Sua G H, Wanga Gaopeng, et al Numerical simulation and optimization on valve-induced water hammer characteristics for parallel pump feedwater system [J]. Annals of Nuclear Energy 2008, 35(12): 2280- 2287.
- 【4】Palmer A S Phillips T N. Numerical approximation of the spectra of Phan-Thien Tanner liquids [J]. Numerical Algorithms 2005, 38(1- 3): 133- 153
- 【5】Rajagopalan D, Armstrong R C, Brown R A. Finite element methods for calculation of steady viscoelastic flow using constitutive equations with a Newtonian viscosity [J]. Non-Newtonian Fluid Mech., 1990 36: 159- 192
- 【6】黄树新, 江体乾. 黏弹流体流动的数值模拟研究进展 [J]. 力学进展, 2001, 31(2): 276- 288
- 【7】Kim Ju Min, Kim Chongyoup, Ahn Kyung Hyun, et al An efficient iterative solver and high-resolution computations of the Oldroyd-B fluid flow past a confined cylinder [J]. Non-Newtonian Fluid Mech., 2004 123(2- 3): 161- 173.

(上接第 90 页)

点线为利用压力变化率方程识别得到的结果 (图中标记为模型 2)。需要说明的是: 识别得到的增压和减压时的压力传递模型, 反映了包括压力调节器电磁阀开关影响在内的管路特性; 也就是说识别得到的模型除反映管路的影响外, 还体现了电磁阀内部通道对压力变化的影响及电磁阀的命令滞后, 因此其比利用压力变化率方程识别得到的结果更接近实际测试曲线。

4 结束语

对实际车辆的液压 ABS 系统的压力进行具体测试, 并与利用直接识别法得到的压力传递函数的计算结果进行对比, 结果表明识别得到的模型能够较好反

映压力变化过程的特征。在实际建模分析中直接使用识别得到的模型可以提高仿真效果, 有利于 ABS 系统的分析开发。

参考文献:

- 【1】Wang Xuzhong, Yue Hong, Gao Dongjie Direct identification of continuous models with dead-time/zeros [C] // Proceedings of the 3rd Asian Control Conference, Shanghai China 2000: 1709- 1714
- 【2】Bi Qiang, Cai Wenjian, Lee Engbeck, et al Robust identification of first-order plus dead-time model from step response [J]. Control Engineering Practice 1999(7): 71- 77
- 【3】王修中, 岳红, 高东杰. 二阶加滞后连续模型的直接辨识 [J]. 自动化学报, 2001, 27(5): 728- 731