

# 管路系统中热沥青流动特性的动态建模与仿真

王安麟<sup>1</sup>, 程海鹰<sup>2</sup>, 汪昱栋<sup>1</sup>, 咎鹏宇<sup>1</sup>

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804; 2. 内蒙古工业大学 机械学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:** 为了实现管路系统中热沥青流动的动态特性描述以解决沥青过程控制的精度问题, 提出了基于键合图理论的热沥青管路系统模型的方法, 即在热沥青管路系统温度一定的条件下, 近似地用键合图理论构建热沥青这一非牛顿流体模型以及系统中的管道、泵、阀、流量计等各零部件模型, 实现易于描述的管路系统中热沥青流动特性的工程化图示解法, 为沥青管路系统元器件匹配的参数化设计提供了有力的理论支持. 通过物理实验与系统仿真的稳态结果比较, 证明了基于键合图理论的热沥青管路系统模型的方法有效性.

**关键词:** 热沥青; 流动特性; 键合图; 建模; 仿真

**中图分类号:** N 945.12

**文献标识码:** A

## Dynamic Modeling and Simulation of Flow Characteristics of Hot Asphalt in Pipeline System

WANG Anlin<sup>1</sup>, CHENG Haiying<sup>2</sup>, WANG Yudong<sup>1</sup>, ZAN Pengyu<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** In order to achieve the description of flow dynamics of hot asphalt in pipeline system, and to solve the accuracy problems of process control of asphalt, this paper presents a hot asphalt piping system modeling way based on the theory of bond graph. Under certain temperature in the hot asphalt pipeline system, the non-Newtonian fluid model of hot asphalt, as well as the pipeline system, pumps, valves, flow meters and other parts and components models by using bond graph theory are established. The project solution of the flow characteristics of hot asphalt in pipeline system is realized, which is easy to describe, providing a strong theoretical support for parameters design of the components matching in asphalt piping system. The effectiveness of hot asphalt pipeline system model based on the bond graph theory is proved by a

comparison of the steady-state results of physical experiment and system simulation.

**Key words:** hot asphalt; flow characteristics; bond graph; modeling; simulation

管路系统中热沥青的流动具有非牛顿流体特性. 在管道系统中流动的非牛顿流体应用广泛, 如原油的输送、高分子材料的混合、血液在血管内的流动等现象. 这些非牛顿流体在管路中的动态流动特性直接影响着其流量配比、压力分布, 进而影响其生产质量<sup>[1]</sup>. 有关管路系统中非牛顿流体的流动特性的定量化描述问题用解析法求解其流动方程是非常困难的, 工程上一般使用有限差分方法<sup>[2]</sup>、反解法<sup>[3]</sup>等对其进行简化求解. 在管路系统中热沥青流动特性的定量化建模与仿真的研究论文尚未发现.

生产实际中, 很多场合都需要精确地控制热沥青的流量. 比如: 泡沫沥青的生产过程、搅拌站混合料的拌和工艺等. 以沥青发泡装置为例, 沥青管路系统包括沥青泵、过滤器、止回阀、流量计以及沥青喷嘴等. 笔者在热沥青管路系统加热温度一定的条件下, 首先对非线性粘弹性流体本构方程进行简化, 用线性的 Maxwell 模型来表述其流动特性, 然后应用键合图理论建立整个热沥青管路系统中的管道、泵、阀、流量计等各零部件模型, 实现易于描述的管路系统中热沥青流动特性的工程化图示解法, 意在实现沥青管路系统参数化设计, 提高沥青流量的精度控制, 为装置的开发提供理论设计指导.

## 1 热沥青流体模型的简化与建模

热沥青属于非牛顿流体中的粘弹性流体, 粘弹

收稿日期: 2009-10-14

基金项目: 建设部研究开发项目(2007-x2-25); 内蒙古自然科学基金(2009MS0711)

第一作者: 王安麟(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为多物理场条件下的微结构建模与解析、机械结构/控制一体化健壮性设计方法与理论. E-mail: wanganlin@tongji.edu.cn

性流体是非牛顿流体的一个重要类别.考虑半径为  $R$  的无限长圆管中的层流流动情况,其中粘弹性流体一般用分数阶导数的Maxwell 流体模型对其进行求解<sup>[1]</sup>.其物理模型如图 1a 所示,将参数分别为  $(a, G_1, \lambda_1)$  和  $(b, G_2, \lambda_2)$  的 2 个分数元串联.图中,  $a$  和  $b$  为分数维微分参数,  $\lambda = \mu/G$  为松弛时间,  $\mu$  为粘性系数,  $G$  为剪切模量,其本构方程为<sup>[4]</sup>

$$\sigma_{rz} + \lambda^a \frac{d^a \sigma_{rz}}{dt^a} = G \lambda^b \frac{d^{b-1}}{dt^{b-1}} \frac{\partial u_z}{\partial r} \quad 0 \leq a \leq b \leq 1 \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{rz}$  为剪切应力;  $t$  为流体流动时间;  $u_z$  为  $z$  方向上的速度分量.式(1)是由 2 个不同的分数阶导数的应力-应变关系式相加整理而成,首先解释分数阶导数的应力-应变关系式<sup>[5]</sup>.  $\sigma(t) = G \lambda^\gamma d^\gamma/dt^\gamma$ ,  $0 < \gamma < 1$ , 式中  $\sigma(t)$  由 3 个参数  $\gamma, G, \lambda$  确定,其中  $\gamma$  表示流体应力-应变关系.在数学上可以理解成对弹性体应力-应变关系( $\gamma=0$ )和粘性体应力-应变关系( $\gamma=1$ )的一种插值.分数阶导数的 Maxwell 流体模型即为 2 个分数元串联而成.当式(1)的  $a=b=1$  时,在物理上可以通过粘性体的油壶模型和弹性体的弹簧模型串联而成,如图 1b 所示,即为经典 Maxwell 模型.分数维导数的求解是非常困难的,郭永存等<sup>[6]</sup>的理论研究发现:可以通过非牛顿流体线性数学模型对地层温度梯度进行预测,因此笔者从相反的角度提出解决非牛顿流体流动特性的一个简化模型:当流体温度一定时,非线性粘弹性流体可以用线性数学模型对其求解,即用线性的经典 Maxwell 流体模型来代替分数阶导数的 Maxwell 流体模型,对热沥青的流动特性进行定量化的建模.键合图模型是一种用来描述工程系统能量结构的图示表示方法<sup>[7-8]</sup>,如图 1c 所示.0 结相当于并联电路中的节点,又称共势结或并联结;  $C$  表示容性元件; 1 结相当于一个串联电路,又称共流结或串联结;  $R$  表示阻性元件.

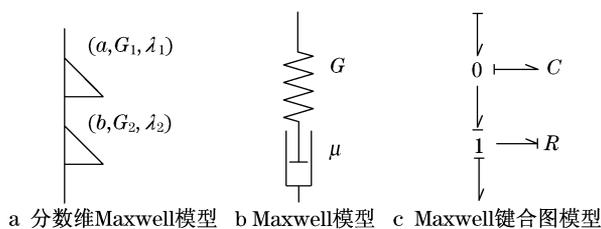


图 1 线性与非线性粘弹性流体模型

Fig.1 Linear and nonlinear viscoelastic fluid model

考虑管路中流体质量惯性以及与流体微团之间速度差有关的动态摩擦项能更真实地表达影响管路

动态的要素,可提高模型的仿真精度<sup>[9-11]</sup>,故建立热沥青流体模型如图 2 所示,图中  $R_f$  为管路静态摩擦液阻,  $S_f$  为键合图理论中的流源,  $R_d$  为管路动态摩擦液阻,  $I_1$  为管路液感,  $C_1$  为管路液容.

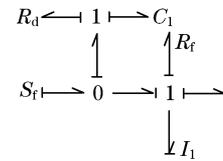


图 2 管路中热沥青模型

Fig.2 Model of hot asphalt in the pipeline system

通过对雷诺数的计算确定管路内部沥青的流动状态为层流时图中各参数.  $I_1 = 4\rho l/(\pi D^2)$ ,  $C_1 = \pi D^2 l/(4B)$ , 式中:  $\rho$  为流体密度;  $l$  为分段管路的长度;  $D$  为管路直径;  $B$  为液体体积的弹性模量.当流动状态为层流时<sup>[10]</sup>的表达式为  $R_f = 128\mu l/(\pi D^4)$ ,  $\mu$  为流体动力粘度系数.层流时一般表达式为  $R_d = 1304.987(2l/D)^{-0.6392} R_f$ .本实验装置所用的沥青在  $150^\circ\text{C}$  温度下  $\mu = 0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\rho = 1011 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $B = 4 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ .

分段集中参数的管路模型是由  $n'$  段如图 2 的模型拼接而成,  $n'$  可由管长确定,田树军等<sup>[12]</sup>经过实验研究提出:在较短的管路中,可以采用较少的分段数来进行管路的建模,当  $n' = L/L_0$  (其中,  $L$  为管路长度,  $L_0 = 1 \text{ m}$ , 分段数结果取整)时,仿真结果的压力峰值及波形衰减速度与实验曲线能够吻合,较适合工程应用,本流体模型中每段管路的分段数均根据上式确定.

## 2 基于键合图理论的热沥青管路系统建模

为系统描述管路中热沥青的流动特性,除了热沥青自身性质的影响外,管道中泵、阀、流量计等各零部件也会对其产生影响.因此,基于键合图理论构建热沥青管路系统的建模方法可以实现易于描述的管路系统中热沥青流动特性的工程化图示解法.键合图是用来描述工程系统能量结构的图示表示法,以向量形式给出热沥青管道系统的模块化描述<sup>[13]</sup>.本沥青管路系统中主要元件模型有:热沥青流体模型、螺杆泵模型、流量计模型、弯管模型和喷口模型.

### 2.1 螺杆泵模型

沥青泵电机采用速度矢量变频控制,泵的转速

只与频率有关,即频率恒定的情况下,转速不变,而转矩则会根据负载改变,因此热沥青管路系统键合图模型采用流源型输入.笔者对螺杆泵的建模采取了简化方法:根据变频器频率的动态变化规律来确定转速,不对其转矩进行反馈约束.螺杆泵的键合图模型如图 3 所示,其中,  $S_{e2}$  为螺杆泵势源;  $T_1$  为螺杆泵输入转矩;  $n_1$  为螺杆泵输入转速;  $P_1$  为螺杆泵输出压力;  $Q_1$  为螺杆泵输出流量;  $R_s$  是代表泵容积效率损失的阻性元件;  $S_{d1}$  为流量流源,与沥青桶相接;  $S_{d2}$  为转速流源,由变频器的输出频率确定;  $R_{if}$  是代表电机机械效率损失的阻性元件; TF 是变换器,由于本文中的螺杆泵属于定量泵,即其变换参数  $K = 1/V_0$ ,  $V_0$  为泵的排量,  $m^3 \cdot rad^{-1}$ .

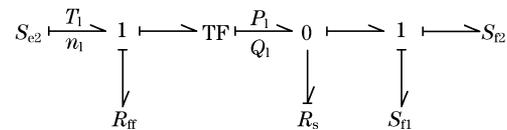


图 3 螺杆泵模型

Fig.3 Screw pump model

### 2.2 弯管、流量计、单向阀建模

弯管、流量计、单向阀的键合图模型如图 4a 所示.弯管的阻力确定由下式确定<sup>[14]</sup>:  $\Delta P = \xi \rho v^2/2$ ,  $\Delta P$  为压力损失, Pa;  $\xi$  为比例常数,由弯管管径和转角确定;  $v$  为流体速度,  $m \cdot s^{-1}$ .流量计的阻力确定由下式确定:  $\Delta P = (Q/Q_{max})^2 \Delta P_{max}$ , 其中,  $Q$  为流过流量计的实际流量,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ;  $Q_{max}$  为满刻度流量,

$m^3 \cdot s^{-1}$ ;  $\Delta P_{max}$  为满量程压力, Pa.

单向阀的液阻的确定如图 4b, 图中,  $P_0$  为单向阀开启压力, 通过图中压力和流量的关系即可近似拟合出液阻的表达式.

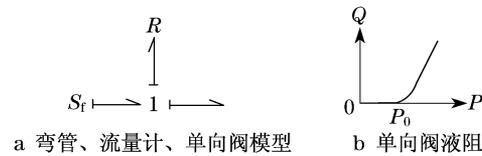


图 4 弯管、流量计、单向阀模型

Fig.4 Elbow, flow meter and check valve model

### 2.3 沥青喷口建模

沥青喷口的键合图模型如图 5, 根据喷口输出形式确定使用哪个键合图模型. 图中,  $S_{e3}$ ,  $S_{B3}$  分别为沥青喷口势源与流源. 喷口出口处流量  $Q$  由小孔节流公式确定<sup>[14]</sup>,  $Q = C_d A \sqrt{2\Delta p/\rho}$ , 其中,  $C_d$  为流量系数, 与孔的形状和流体雷诺数有关;  $A$  为小孔的截面积,  $m^2$ ;  $\Delta p$  为小孔两边压差, Pa.

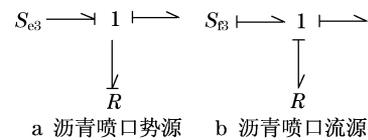


图 5 沥青喷口模型

Fig.5 Asphalt nozzle model

### 2.4 热沥青管路系统建模

用上述各元件键合图模型对整个热沥青管路系统建模, 如图 6 所示.

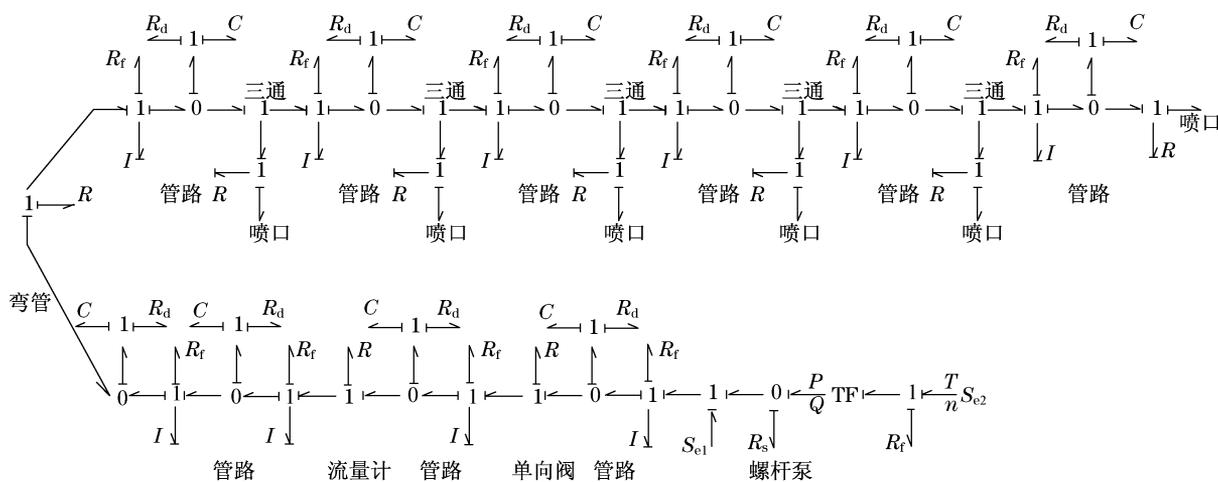


图 6 热沥青管路系统模型

Fig.6 Pipeline system model of hot asphalt

### 3 热沥青管路系统仿真分析

#### 3.1 系统仿真和实验结果对比

液压系统和元件仿真算法主要有3种形式:信号流法、基于方程法、能量端口法<sup>[15]</sup>.笔者将能量端

口法和信号流法综合在一起,用键合图法建立起物理模型,用MATLAB软件的Simulink工具箱中的信号流法进行仿真.根据图6所示的热沥青管路系统键合图模型搭建出如图7所示的整个管路系统仿真模型.其中,每个子模块(subsystem)均由各元器件的键合图模型转化而成,并封装成框图型式.

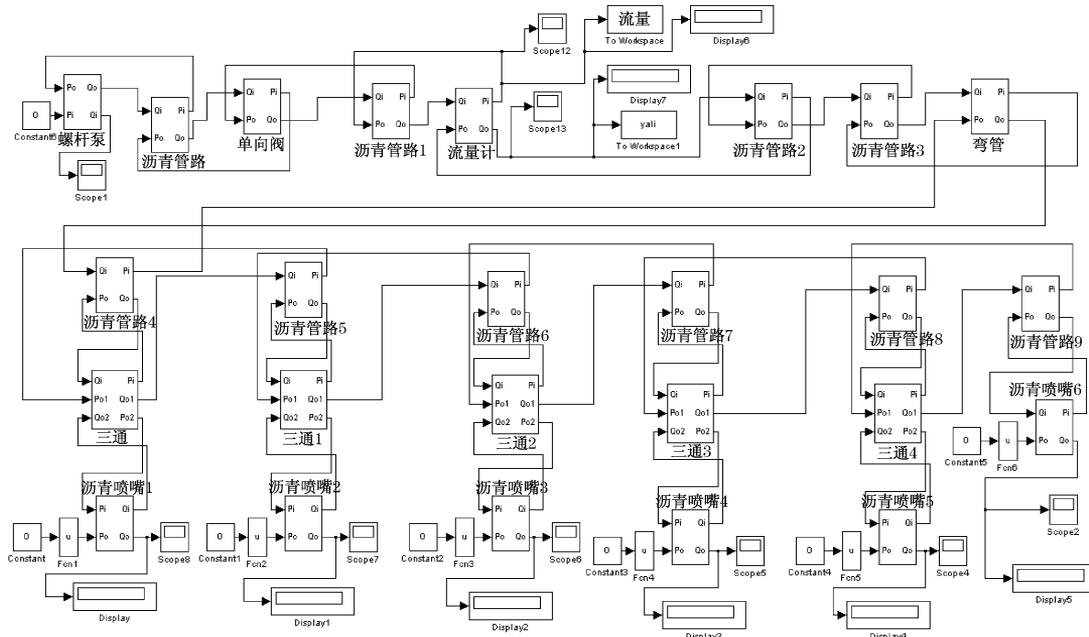


图7 热沥青管路系统 Simulink 仿真模型

Fig.7 Simulink model of hot asphalt pipeline system

在使用中,只要双击每个框图便可进入相应的元器件模型进行参数设置,极大地方便了修改系统参数与仿真研究.系统各处观测点设置的 Scope 和 Display 中可直接观测到仿真结果.

为了验证上述方法的有效性,根据实际系统的试验参数进行仿真设置.配置参数如下:求解器采用 TR-BDF2 方法,即 Runger-Kutta 公式的第1级采用梯形法则,第2级采用 Gear 法.由于试验台使用的变频器设置响应时间为 3 s,因此仿真时间设定为 5 s,电机频率稳态值为 8.92 Hz.管路系统中取流量计所在位置为数据观测点,仿真结果输出的压力和流量动态特性如图8所示.表1列出了热沥青管路系统仿真结果与试验结果的对比数字,包含了流量和压力仿真结果的稳态值以及试验的测量值.实验装置中设置了流量计和压力变送器,它们采集到流量和压力试验实时数据的平均值就是试验测量值.通过对仿真稳态值与试验测量值相对误差的比较可得到流量的相对误差是 2.94%,压力的相对误差是 5.26%,能够满足工程应用的精度需求.

#### 3.2 系统仿真分析

在装置的研制中,通常需要对系统中各个元器件进行匹配设计,但往往由于理论计算和实际制造存在误差,使元器件的匹配过程产生很多不定因素,为元器件的设计与匹配达到最佳效果增加了难度.本研究用直观的图示解法实现了热沥青管路系统中的元器件的参数化设计,为系统的元器件的设计与匹配提供了理论技术支持.如图9所示,通过本文方法构建的热沥青管路系统模型可以任意改变管路系统中的参数(如管径、管长、孔口大小、流体粘度以及变频器的频率等)获得相应仿真结果,进而指导元器件的设计.

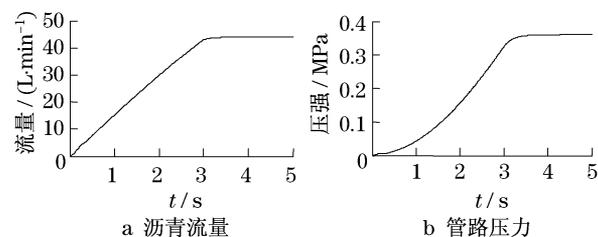


图8 沥青管路系统动态特性

Fig.8 Asphalt pipeline system dynamics

表1 仿真数据与实验数据的比较

Tab.1 Comparison of simulation and experiment data

比较数值	流量/(L·min <sup>-1</sup> )	压力/MPa
实验测量值	42.66	0.38
仿真稳态值	43.91	0.36
相对误差/%	2.94	5.26

图9a,9b是沥青粘度从0.20 Pa·s分别调整为0.02 Pa·s和2.00 Pa·s后流量和压力的动态仿真结果,沥青粘度越大,流量越小,管路压力越大.当沥青的粘度减小到一定程度时,还会因雷诺数的增加使流量出现波动.由于沥青具有粘温特性,温度对沥青的粘度影响很大,故在装置的研制中为提高沥青的计量精度需要对沥青的加热温度进行有效控制.图9c,9d是喷口直径从3.0 mm分别调整为2.8 mm

和3.2 mm时流量和压力的动态仿真结果,由图可见,喷口直径稍作改动,管路系统中的压力变化很大,说明管路系统中压力取决于负载;喷口越小,系统中的压力越大,流量越小.这个定量化的仿真结果为喷口的尺寸设计提供了理论指导.本试验装置采用的沥青泵是容积式泵,因此供给系统的沥青量与泵的转速成正比,沥青泵的转速由变频器控制.图9e,9f是变频器频率从8.92 Hz分别改为8.00 Hz和9.95 Hz后系统中的流量和压力的仿真结果,当频率增大时,系统的压力和流量随之增大,反之亦然,表明系统实现了变频调流的目的.热沥青在管道中动态流动特性的规律为管道系统的匹配设计提供了必要的理论指导.

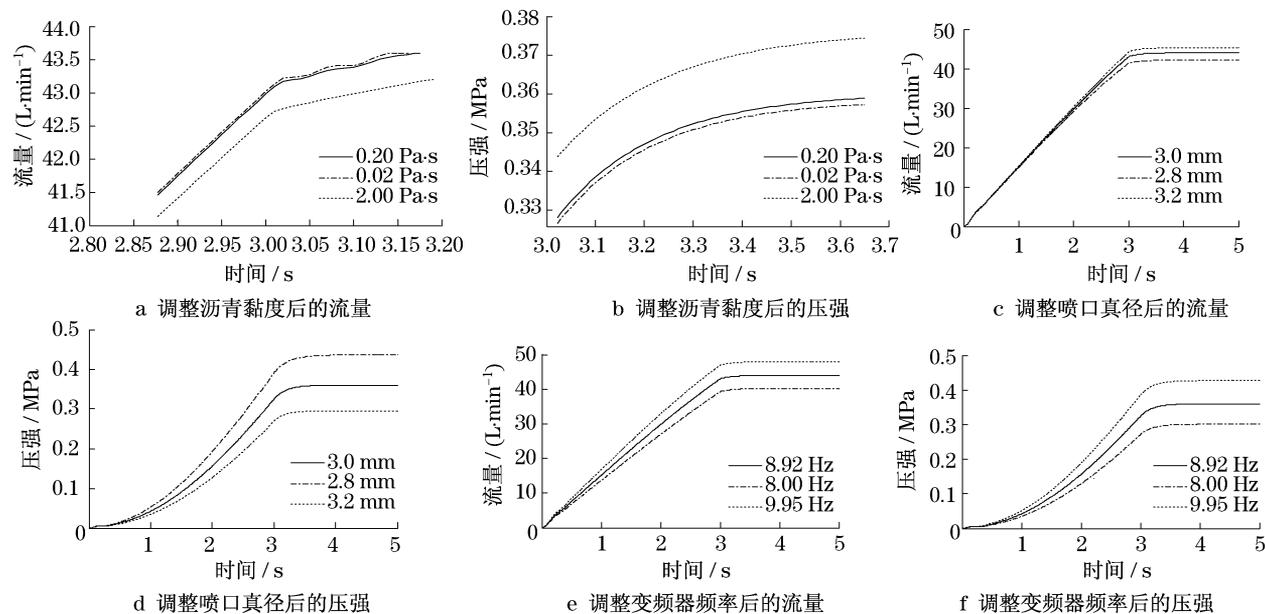


图9 参数调整后管路系统动态特性

Fig.9 Pipeline system dynamics with different parameters

## 4 结论

提出了基于键合图理论的热沥青管路系统模型的方法,将在一定温度条件下的热沥青流体模型简化成线性粘弹性流体模型,并基于键合图理论建模分别对系统中的泵、阀、流量计等各零部件搭建完整的热沥青管路系统模型进行仿真分析.试验数据与仿真结果对比表明,流量的相对误差为2.94%,压强的相对误差为5.26%.模型实现了管路系统中热沥青流体动力学特性的定量化描述,为沥青管路系统的参数设置提供理论依据,方便沥青流量控制方案

的优化和沥青管路系统硬件的再设计.

## 参考文献:

- [1] 朱克勤.非牛顿流体力学研究的若干进展[J].力学与实践,2006,28(4):1.  
ZHU Keqin. Some advance in non-Newtonian fluid mechanics [J]. Mechanics in Engineering, 2006, 28(4): 1.
- [2] 张茂林,吴青松,李传亮,等.非牛顿流体的差分方法研究[J].西南石油学院学报,2000,22(1):5.  
ZHANG Maolin, WU Qingsong, LI Chuanliang, et al. Research on the formulation of finite difference methods for non-Newtonian fluids in porous media [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(1): 5.

- [3] 谢柏松.非牛顿流体的某些反解[J].北京师范大学学报:自然科学版,2001,37(1):19.  
XIE Baisong. Some inverse solutions for non-Newtonian fluid [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2001,37(1):19.
- [4] Hernandez Jimenez, J Hernandez Santiago, A Macias Garcia, et al. Relaxation modulus in PMMA and PTFE fitting by fractional Maxwell model [J]. Polymer Testing, 2002, 21: 325.
- [5] Ren L, Zhu K Q. Dual role of viscosity during start-up of a Maxwell fluid in a pipe [J]. Chinese Physics Letter, 2004, 21(1): 273.
- [6] 郭永存, 曾亿山, 卢德唐. 地层静温预测的非牛顿流体数学模型 [J]. 物理学报, 2005, 2(54): 802.  
GUO Yongcun, ZENG Yishan, LU Detang. The non-Newtonian fluid mathematical model for strata static temperature forecast [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 2(54): 802.
- [7] 李晓田, 王安麟, 慈健. 变冲击系数的几何参数化变矩器特性模型 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 15.  
LI Xiaotian, WANG Anlin, CI Jian. Parametric torque converter dynamic model with variable shock loss coefficient [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 15.
- [8] 李晓田, 王安麟, 慈健. 几何参数化计算的柴油机冷却风道键合图模型 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 31.  
LI Xiaotian, WANG Anlin, CI Jian. Geometry based parametric bond graph model of diesel cooling fan-channel analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 31.
- [9] 李洪人, 陈照弟. 新的液压管路分段集中参数键图模型及其实验研究 [J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 61.  
LI Hongren, CHEN Xidi. New sectional concentrated parameter model using bond graphs for hydraulic pipelines [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(3): 61.
- [10] 閻世敏, 李洪仁. 层流流体管路分段集中参数键图模型研究 [J]. 工程设计学报, 2002, 9(3): 113.  
YAN Shimin, LI Hongren. Research on a sectional lumped parameter model using bond graphs for laminar pipelines [J]. Engineering Design, 2002(3): 113.
- [11] Margolis D L, Yang W C. Bond graph modes for fluid networks using model approximation [J]. Journal of Dynamic System, Measurement and Control, 1985, 107(9): 169.
- [12] 田树军, 张宏. 液压管路动态特性的 Simulink 仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1136.  
TIAN Shujun, ZHANG Hong. Study on simulation of hydraulic pipelines dynamic characteristic by Simulink software [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(5): 1136.
- [13] 王中双. 键合图理论及其在系统动力学中的应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000.  
WANG Zhongshuang. Bond-graph theory and the application in system dynamics [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2000.
- [14] 章宏甲, 黄谊. 液压传动 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
ZHANG Hongjia, HUANG Yi. Hydraulic drive [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 2000.
- [15] 吴跃斌, 谢英俊, 徐立. 液压仿真技术的现在和未来 [J]. 液压与气动, 2002, 11: 1.  
WU Yuebin, XIE Yingjun, XU Li. The present and future of the fluid power simulation technology [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2002, 11: 1.

(上接第 265 页)

#### 参考文献:

- [1] 钱春香, 赵联芳, 付大放, 等. 路面材料负载纳米二氧化钛光催化降解氮氧化物 [J]. 硅酸盐学报, 2005(4): 422.  
QIAN Chunxiang, ZHAO Lianfang, FU Dafang, et al. Photocatalytic oxides by nano-TiO<sub>2</sub> immobilized on road surface materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005(4): 422.
- [2] 白海莹, 王荣国, 刘文博, 等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化材料分散性及其降解效率研究 [J]. 材料科学与工艺, 2005(10): 499.  
BAI Haiying, WANG Rongguo, LIU Wenbo, et al. Nano-TiO<sub>2</sub> photocatalytic dispersion and degradation efficiency [J]. Materials Science and Technology, 2005(10): 499.
- [3] 张一兵, 张文彦. TiO<sub>2</sub> 可见光光催化的研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007(7): 1299.  
ZHANG Yibin, ZHANG Wenyan. Progress of TiO<sub>2</sub> visible light catalysis [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007(7): 1299.
- [4] 韩世同, 习海玲, 史瑞雪, 等. 半导体光催化研究进展与展望 [J]. 化学物理学报, 2003(10): 339.  
HAN Shitong, XI Hailing, SHI Ruixue, et al. Semiconductor photocatalysis progress and prospects [J]. Journal of Chemical Physics, 2003(10): 339.
- [5] Chen M, Lin Y. NO<sub>x</sub> removal from vehicle emissions by functionality surface of asphalt road [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1-3): 375.
- [6] Dalton J S, Janes P A, Jones N G, et al. Photocatalytic oxidation of NO<sub>x</sub> gases using TiO<sub>2</sub>: a surface spectroscopic approach [J]. Environ Pollut, 2002, 120: 415.
- [7] Hashimoto K, Wasada K, Osaki M, et al. Photocatalytic oxidation of nitrogen oxide over titania-zeolite composite catalyst to remove nitrogen oxides in the atmosphere [J]. Appl Catal B: Environ, 2001, 30: 429.