

研究论文

液体管道实时仿真与动态响应分析

葛传虎, 王桂增, 叶 昊
(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 在液体管道输送中, 管内流动状态的监测对于管道运行具有重要的意义。基于管道模型, 通过仿真方法研究了管内流动状态预测, 并进一步研究了管道边界条件对仿真计算结果的影响。理论分析和仿真结果均表明: 边界条件直接影响仿真的输出波形, 并且会影响仿真的动态特性。对在线仿真而言, 采用压力作为边界条件可以获得更快的响应速度, 从而可以提高基于实时仿真方法的泄漏检测系统的响应速度。所得结论对基于实时模型的泄漏检测方法中边界条件的选择具有指导意义。

关键词: 管道; 模型; 边界条件; 仿真; 动态特性

中图分类号: TP 1

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 07-1625-06

Analysis of real-time simulation and dynamic response for liquid pipelines

GE Chuanhu, WANG Guizeng, YE Hao

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the pipeline transportation of liquid, the flow parameters are essential for management and operation. Based on the physical model of pipeline, flow parameters prediction was studied by means of simulation. And several kinds of boundary conditions were also investigated. The results from both theoretical analysis and simulation showed that the boundary condition would determine the waveform of the model outputs and influence the dynamics of the simulation. It can be concluded that using the pressure measurements at both upstream and downstream would have a relatively shorter setting time for the online simulation which would ensure quicker response when leak detection system based on real-time simulation was adopted. This can be used as an aid for the selection of boundary condition of the leak detection method based on real-time simulation.

Key words: pipeline; model; boundary conditions; simulation; dynamics

引 言

管道在原油 (成品油)、天然气输送等领域有着广泛应用。管道运行过程中的内部流动状态是管理人员关注的重点。基于机理模型, 通过仿真能较

好地描述管道内的流动状态, 给管道运行和调度人员提供操作指导, 并可实现基于实时仿真的泄漏检测^[1-6]。

管道仿真可分为离线仿真和在线仿真两种, 其主要区别在于管道两端流体状态参数的获得方式不

2008-04-15 收到初稿, 2008-04-28 收到修改稿。

联系人: 王桂增。第一作者: 葛传虎 (1980—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2006AA04Z428); 国家自然科学基金项目 (60574085, 60736026)。

Received date: 2008-04-15.

Corresponding author: WANG Guizeng. **E-mail:** wgz@tsinghua.edu.cn

Foundation item: supported by the High-tech Research and Development Program of China (2006AA04Z428) and the National Natural Science Foundation of China (60574085, 60736026).

同。对于离线仿真来说，边界条件的具体形式具有重要意义。而在实时仿真中，边界条件的具体形式已不重要，此时边界条件已为实测的压力和流量时间序列信号所代替。

本文在研究液体输送管道的离线仿真和在线仿真基础上，研究了不同边界条件对仿真动态特性及其输出波形的影响，为基于实时模型泄漏检测方法中边界条件的选择提供参考。

1 管道模型

管道机理模型由运动方程和连续性方程组成^[7-8]

$$\frac{P_x}{\rho} + VV_x + V_t + g\sin\alpha + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (1)$$

$$VP_x + P_t + \rho a^2 V_x = 0 \quad (2)$$

式中 P 为压力，Pa； V 为流速， $m \cdot s^{-1}$ ； ρ 为密度， $kg \cdot m^{-3}$ ； g 为重力加速度， $m \cdot s^{-2}$ ； α 为倾角， $(^\circ)$ ； f 为摩擦系数； D 为管道直径，m； a 为负压波的波速， $m \cdot s^{-1}$ ；下角标 x 、 t 表示偏微分 ($P_x = \frac{\partial P}{\partial x}$)。式 (1)、式 (2) 可通过特征线方法进行数值求解，在计算中，管道内部各分段点上的状态参数可通过两个兼容性方程联立求解获得。但在管道上游端和下游端处，两个兼容性方程中只有一个有效，为求解两个端点的状态参数，必须利用边界条件。

进行数值求解，在计算中，管道内部各分段点上的状态参数可通过两个兼容性方程联立求解获得。但在管道上游端和下游端处，两个兼容性方程中只有一个有效，为求解两个端点的状态参数，必须利用边界条件。

2 仿真的边界条件

2.1 离线仿真中的边界条件

在离线仿真中，压力和流量参数根据管道两端边界的具体形式来确定。对于石油管道而言，代表性的边界条件是储油罐、泵、阀门和压力保护装置，最典型的是上游的增压泵和下游的储油罐。

2.1.1 上游边界条件为增压泵 增压泵通常有两种类型：离心泵和柱塞泵。

离心泵的特性可以用式 (3) 描述

$$P_1 = P_0 + A_1 Q_1 + A_2 Q_1^2 \quad (3)$$

式中 P_1 为离心泵的实际出口压力，Pa； P_0 为离心泵的断流出口压力，Pa； Q_1 为离心泵的出口流量， $m^3 \cdot s^{-1}$ ；系数 A_1 、 A_2 与离心泵结构以及转速有关，对特定的泵，在转速不变时为常数。

柱塞泵是容积泵的一种，其数学描述为^[9]

$$Q_2 = \pi D^2 e Z n \eta / 2 \quad (4)$$

式中 Q_2 为泵的实际输出流量， $m^3 \cdot s^{-1}$ ； D 为腔

室内径，m； e 为柱塞行程，m； Z 表示在泵中柱塞个数（通常是 7 个或者 9 个）； n 表示泵转速， $r \cdot s^{-1}$ ； η 表示容积效率。从式 (4) 可以看出，柱塞泵出口流量仅与泵结构以及电机转速有关，与出口压力没有关系。

由于两种泵具有不同的特性，当管道的运行状态发生瞬态变化时，管道内流动参数的变化会不同。以流量为例，当边界条件分别为柱塞泵和离心泵时，泄漏仿真的曲线如图 1 (a)、(b) 所示。

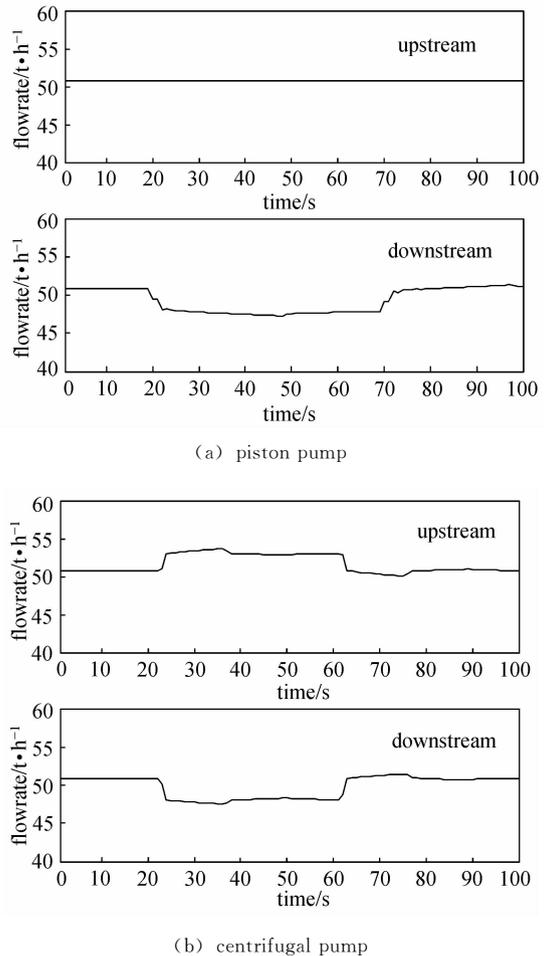


图 1 不同边界条件下的流量特性

Fig. 1 Flowrate characteristics under different boundary conditions

2.1.2 下游边界条件为储油罐 下游的储油罐通常可用水库模型模拟，即用恒定压力代替。而实际管道在进油罐之前通常会安装阀门，且下游实际压力测点距油罐有一段距离，因而本文对下游边界条件采用水库模型加局部阻力损失来描述。局部阻力损失模型为^[10]

$$p_t = \zeta \frac{V^2}{2} \quad (5)$$

式中 p_i 表示局部阻力损失, Pa; ζ 为局部阻力系数, 可以通过表格查得。以上游为柱塞泵为例, 采用水库模型与局部阻力损失模型相结合的方法所得到的仿真曲线与实测曲线的比较如图 2 所示。从图中可以看到, 模型计算值和测量值吻合得较好, 说明本文所采用的边界条件设置比较符合实际。

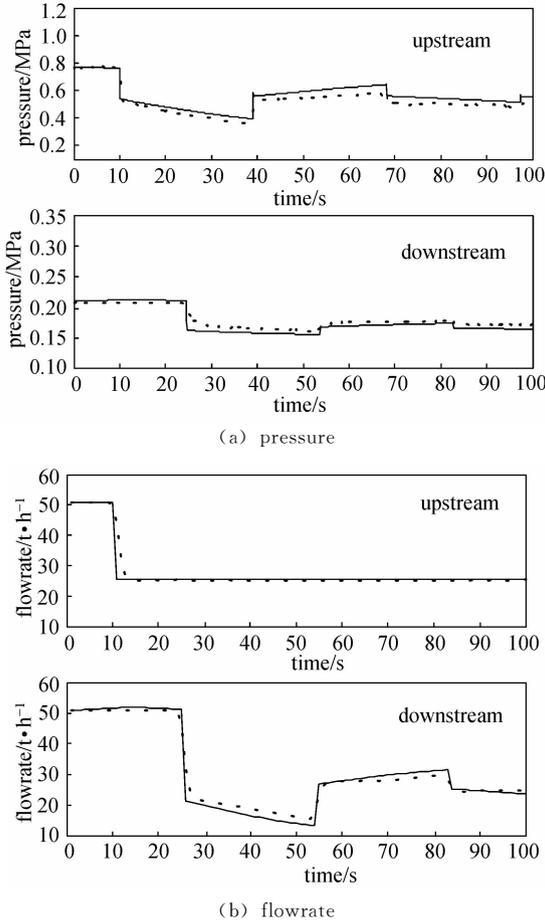


图 2 计算值与测量值比较

Fig. 2 Comparison of calculations and measurements

— calculation; - - - - measurement

2.2 在线仿真中的边界条件

与离线仿真不同的是, 实际管道运行时, 可在管道两端实时测得压力和流量数据, 作为管道实时仿真的边界条件。实时仿真中边界条件的选择可以有 3 种组合: ①输入为入口和出口流量, 输出为入口和出口压力; ②输入为入口和出口压力, 输出为入口和出口流量; ③输入为入口 (或出口) 压力和出口 (或入口) 流量, 输出为出口 (或入口) 压力和入口 (出口) 流量。

3 不同边界条件下的动态响应

边界条件不同, 管道内流体状态参数的动态响

应也不同。下面通过传递函数的分析和仿真实例分别讨论不同边界条件对过渡时间的影响。

3.1 不同边界条件下的传递函数

通常管道中对流项的影响比较小, 式 (1) 中第二项、式 (2) 中第一项可以忽略不计, 流速 V 用 $Q/(A\rho)$ 代替, Q 为质量流量 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), A 为管道截面积 (m^2), 则由式 (1)、式 (2) 可得式 (6)、式 (7)

$$P_x + \frac{Q}{A} + \rho g \sin \alpha + \frac{fQ|Q|}{2D\rho A^2} = 0 \quad (6)$$

$$P_t + a^2 Q_x / A = 0 \quad (7)$$

假定管内流动状态在工作点附近的小范围内变化, 则管内压力 P 和流量 Q 可表示为

$$P = \bar{P} + p, Q = \bar{Q} + q \quad (8)$$

式中 \bar{P} 、 p 为工作点的压力和压力变化量, Pa; \bar{Q} 、 q 为工作点的质量流量及质量变化量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在工作点附近对式 (6)、式 (7) 线性化, 则在定常条件下^[7]

$$\bar{Q}_x = \bar{Q}_t = 0, \bar{P}_t = 0, \bar{P}_x = fQ|Q|/(2D\rho A^2) \quad (9)$$

将式 (8)、式 (9) 代入式 (6)、式 (7) 可以得到

$$L \frac{\partial q}{\partial t} + Rq = -\frac{\partial p}{\partial x}, C \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} \quad (10)$$

其中

$$L = 1/A$$

$$R = f\bar{Q}/(A^2\rho D)$$

$$C = A/a^2$$

式中 L 、 R 、 C 分别为单位长度上的流感、流阻和流容。对特定的管道、特定的介质和特定的稳定工况, L 、 R 、 C 可看成常数。

对式 (10) 两边作拉普拉斯变换并利用定常条件 $q(x, 0) = 0, p(x, 0) = 0$ 得到

$$(Ls + R)q(x, s) = -\frac{dp(x, s)}{dx}$$

$$Cs p(x, s) = -\frac{dq(x, s)}{dx} \quad (11)$$

其中, s 为复频率。式 (11) 两边同时对 x 求导, 得到

$$(Ls + R) \frac{dq(x, s)}{dx} = -\frac{d^2 p(x, s)}{dx^2}$$

$$Cs \frac{dp(x, s)}{dx} = -\frac{d^2 q(x, s)}{dx^2} \quad (12)$$

联立式 (11)、式 (12) 得到

$$p(x, s) = C_1 e^{-nx} + C_2 e^{nx}$$

$$q(x, s) = C_3 e^{-nx} + C_4 e^{nx}$$

$$n = \sqrt{(Ls + R)Cs} \quad (13)$$

系数 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 与流感 L 、流阻 R 和流容 C

有关, 对特定的管道、介质和稳定工况, 也可看成是常数, 且可根据管道起始 $x=0$ 和终端 $x=\infty$ 的压力与流量参数估计出来。

将 $x=\infty$ 代入, 得到 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 之间的关系

$$\begin{aligned} C_1/C_3 &= \sqrt{(Ls+R)/(Cs)} = Z_k \\ C_2/C_4 &= -\sqrt{(Ls+R)/(Cs)} = -Z_k \end{aligned} \quad (14)$$

将 $x=0$ 代入式 (13) 可得到系数 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 与管道入口端压力和流量的关系

$$\begin{aligned} p(0,s) &= C_1 + C_2 \\ q(0,s) &= C_3 + C_4 \end{aligned} \quad (15)$$

联立式 (14)、式 (15), 即可得到系数 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 。将其代入式 (13) 得到

$$\begin{aligned} p_{L_p}(s) &= -Z_k q_0(s) \sinh(nL_p) + p_0(s) \cosh(nL_p) \\ q_{L_p}(s) &= q_0(s) \cosh(nL_p) - p_0(s) \sinh(nL_p) / Z_k \end{aligned} \quad (16)$$

式中 L_p 为管道长度, $p_{L_p}(s)$ 和 $q_{L_p}(s)$ 分别为管道终端 (出口) 的压力和流量的拉氏变换。对式 (16) 作简单变换, 得到管道两种特殊的传递函数矩阵描述。输入为入口和出口流量, 输出为入口和出口压力时的传递函数

$$\begin{bmatrix} p_0(s) \\ p_{L_p}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_k \coth(nL_p) & -Z_k / \sinh(nL_p) \\ Z_k / \sinh(nL_p) & -Z_k \coth(nL_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0(s) \\ q_{L_p}(s) \end{bmatrix} \quad (17)$$

输入为入口和出口压力, 输出为入口和出口流量时的传递函数

$$\begin{bmatrix} q_0(s) \\ q_{L_p}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \coth(nL_p) / Z_k & -1 / [Z_k \sinh(nL_p)] \\ 1 / [Z_k \sinh(nL_p)] & -\coth(nL_p) / Z_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0(s) \\ p_{L_p}(s) \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.2 不同边界条件下的传递函数特性分析

为便于分析上述传递函数, 对式 (17)、式 (18) 进行 Taylor 展开^[11-14]。由于实际管道比较长, 摩阻比较大, 管道参数中高频成分衰减迅速, 在 Taylor 展开式中 s 的高阶项可以忽略。此时, $Z_k \coth(nL_p)$ 、 $Z_k / \sinh(nL_p)$ 、 $\coth(nL_p) / Z_k$ 和 $1 / [Z_k \sinh(nL_p)]$ 的 Taylor 展开式分别为

$$\begin{aligned} Z_k \coth(nL_p) &= \sqrt{\frac{Ls+R}{Cs}} \coth(\sqrt{(Ls+R)Cs}L_p) \approx \\ &= \frac{(L_p^2 LC/2 + L_p^4 R^2 C^2/24)s^2 + L_p^2 RCs/2 + 1}{(C^2 L_p^3 L/6 + C^3 L_p^5 R^2/120)s^3 + L_p^3 RC^2 s^2/6 + L_p Cs} = \\ &= \frac{1}{s} \frac{(L_p^2 LC/2 + L_p^4 R^2 C^2/24)s^2 + L_p^2 RCs/2 + 1}{(C^2 L_p^3 L/6 + C^3 L_p^5 R^2/120)s^2 + L_p^3 RC^2 s/6 + L_p C} = \end{aligned}$$

$$\frac{1}{s} a_1(s) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Z_k / \sinh(nL_p) &= \sqrt{\frac{Ls+R}{Cs}} / \sinh(\sqrt{(Ls+R)Cs}L_p) \approx \\ &= \frac{1}{(C^2 L_p^3 L/6 + C^3 L_p^5 R^2/120)s^3 + L_p^3 RC^2 s^2/6 + L_p Cs} = \\ &= \frac{1}{s} \frac{1}{(C^2 L_p^3 L/6 + C^3 L_p^5 R^2/120)s^2 + L_p^3 RC^2 s/6 + L_p C} = \\ &= \frac{1}{s} a_2(s) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \coth(nL_p) / Z_k &= \sqrt{\frac{Cs}{Ls+R}} \coth(\sqrt{(Ls+R)Cs}L_p) \approx \\ &= \frac{(L_p^2 LC/2 + L_p^4 R^2 C^2/24)s^2 + L_p^2 RCs/2 + 1}{L_p^3 RLCs^2/3 + (L_p L + L_p^3 R^2 C/6)s + L_p R} = \\ &= b_1(s) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} 1 / [Z_k \sinh(nL_p)] &= \sqrt{\frac{Cs}{Ls+R}} / \sinh(\sqrt{(Ls+R)Cs}L_p) \approx \\ &= \frac{1}{L_p^3 RLCs^2/3 + (L_p L + L_p^3 R^2 C/6)s + L_p R} = \\ &= b_2(s) \end{aligned} \quad (22)$$

将式 (19) ~ 式 (22) 代入式 (17)、式 (18) 可以得到

$$\begin{bmatrix} p_0(s) \\ p_{L_p}(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} a_1(s) & -a_2(s) \\ a_2(s) & -a_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0(s) \\ q_{L_p}(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{s} G_q(s) \begin{bmatrix} q_0(s) \\ q_{L_p}(s) \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} q_0(s) \\ q_{L_p}(s) \end{bmatrix} = 1 \begin{bmatrix} b_1(s) & -b_2(s) \\ b_2(s) & -b_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0(s) \\ p_{L_p}(s) \end{bmatrix} = 1 \times G_p(s) \begin{bmatrix} p_0(s) \\ p_{L_p}(s) \end{bmatrix} \quad (24)$$

式 (23) 可以看作一个积分环节和二阶系统 $G_q(s)$ 串联, 式 (24) 可以看作一个比例环节和二阶系统 $G_p(s)$ 串联。二阶系统 $G_q(s)$ 、 $G_p(s)$ 中传递函数所对应的过渡时间分别为^[15]

$$t_q = 8(L + CL_p^2 R^2 / 20) / R$$

$$t_p = 8L_p^2 RLC / (3L + L_p^2 R^2 C / 2)$$

两者之间的差为

$$\begin{aligned} \Delta t_s = t_q - t_p &= 8L/R + 2L_p^2 RC/5 - \\ &= 8L_p^2 RLC / (3L + L_p^2 CR^2 / 2) \end{aligned} \quad (25)$$

对实际管道而言, L 、 C 、 R 、 L_p 的数量级通常分别为 $10^1 \sim 10^2$ 、 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 、 $10^{-1} \sim 1$ 、 $10^4 \sim 10^5$, 因此 $\Delta t_s > 0$ 。同时, 采用流量作为边界条件的系统, 积分环节的响应速度慢于比例环节。这表明, 采用压力作为边界条件的系统较以流量作为边界条件的系统具有更短的过渡时间^[15]。

上述分析针对的是高摩阻管道, 但对于短管道, 摩阻比较小, 会出现振荡现象, 高频成分不可

忽略，为此需推导低摩阻条件下的模型。式 (17)、式 (18) 可以写作

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_{L_p} \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_k} \begin{bmatrix} \coth(nL_p) & -1/\sinh(nL_p) \\ 1/\sinh(nL_p) & -\coth(nL_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_{L_p} \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_k} G(s) \begin{bmatrix} p_0 \\ p_{L_p} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p_{L_p} \end{bmatrix} = Z_k \begin{bmatrix} \coth(nL_p) & -1/\sinh(nL_p) \\ 1/\sinh(nL_p) & -\coth(nL_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_{L_p} \end{bmatrix} = Z_k G(s) \begin{bmatrix} q_0 \\ q_{L_p} \end{bmatrix} \quad (27)$$

式 (26)、式 (27) 分别以压力和流量作为边界条件，其动态响应的差别取决于 $G(s)$ 前面所串联的环节 $1/Z_k$ 和 Z_k ，为此分析这两个环节的差别。

对于 Z_k 可利用 Padé 近似方法将其转化成有理分式^[13]。这里采用如下二阶函数对 Z_k 进行近似

$$G_1(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (28)$$

由式 (14) 可知 Z_k 的静态增益和高频增益分别为

$$\lim_{s \rightarrow 0} Z_k = \lim_{s \rightarrow 0} \sqrt{(Ls + R)/(Cs)} = \infty \quad (29)$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} Z_k = \lim_{s \rightarrow \infty} \sqrt{(Ls + R)/(Cs)} = \sqrt{L/C} \quad (30)$$

利用静态增益和高频增益可以分别确定： $a_0 = 0$ ， $a_2 = 1$ ， $b_2 = \sqrt{L/C}$ ，从而待定的系数只有 b_1 、 b_0 和 a_1 。对 Z_k 进行 Taylor 展开得到

$$Z_k = \sqrt{\frac{Ls + R}{Cs}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{1 + \frac{R}{Ls}} = \sqrt{\frac{L}{C}} + \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{R}{2Ls} - \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{R^2}{8L^2 s^2} + \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{R^3}{16L^3 s^3} + \dots \quad (31)$$

而

$$G_1(s) = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}} s^2 + b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s} = \sqrt{\frac{L}{C}} + (b_1 - \sqrt{\frac{L}{C}} a_1) s^{-1} + (b_0 - b_1 a_1 + \sqrt{\frac{L}{C}} a_1^2) s^{-2} + a_1 (-b_0 + a_1 b_1 - \sqrt{\frac{L}{C}} a_1^2) s^{-3} + \dots \quad (32)$$

由于近似针对高频成分， s^{-1} 的四次方及其更高阶次方忽略不计。令式 (31)、式 (32) 对应幂次的系数相等，得到

$$Z_k \approx \frac{\sqrt{\frac{L}{C}} s^2 + \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{R}{L} s + \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{R^2}{8L^2}}{s^2 + \frac{R}{2L} s} \quad (33)$$

$$\frac{1}{Z_k} \approx \frac{s^2 + \frac{R}{2L} s}{\sqrt{\frac{L}{C}} s^2 + \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{R}{L} s + \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{R^2}{8L^2}} \quad (34)$$

式 (33)、式 (34) 所对应的系统同样可视为二阶系统，过渡时间为： $t_{Z_k} = 16L/R$ ， $t_{1/Z_k} = 8L/R$ 。可以看出低摩阻条件下，采用压力作为边界条件，系统同样具有更快的速度。

3.3 仿真实例

本文以一条实际管道为例，验证不同边界条件下系统响应的速度。管道数据为：管道长度 32 km，管道内径 529 mm，上游压力 2.68 MPa，下游压力 0.41 MPa，输量为 $581.2 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ ，仿真曲线如图 3 所示。

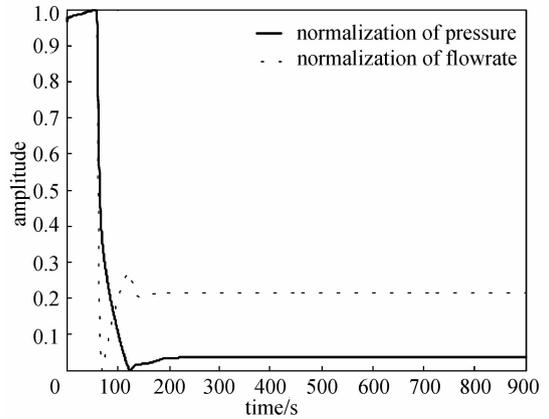


图 3 归一化的压力和流量曲线

Fig. 3 Curves for normalization of pressure and flowrate

图 3 中仿真曲线以管道下游端（出口）的数据为例，同时为便于比较，对流量和压力数据均做了归一化处理。在图中归一化压力曲线（实线）表示采用流量作为边界条件时的输出，而归一化流量曲线（虚线）表示采用压力作为边界条件时的输出。从曲线可以明显看出，流量曲线的上升时间明显小于压力曲线的上升时间，同时，以 2% 的误差为标准计算得到流量曲线的过渡时间为 100.8 s，而压力曲线的过渡时间为 107.1 s。由此可以看出当采用压力作为边界条件时，系统能够更快地到达稳态，具有更高的响应速度。

4 结 论

管道边界条件的设置直接影响仿真输出的动态特性，当选取两端压力作为边界条件时，系统能更快地消除边界条件误差带来的影响，更快地达到稳态，从而可以提高基于实时仿真的泄漏检测系统的响应速度。

References

- [1] Liou J C P, Tian J. Leak detection-transient flow simulation approaches. *Journal of Energy Resources Technology*, 1995, **117**: 243-248
- [2] Thompson W C, Skogman K D. The application of real time flow modeling to pipeline leak detection. *Journal of Energy Resources Technology*, 1983, **105**: 536-541
- [3] Kenya Fukushima, Reiko Maeshima, *et al.* Gas pipeline leak detection system using the online simulation method. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, **24**: 453-456
- [4] Liou C P. Leak detection by mass balance effective for Norman wells line. *Oil & Gas Journal*, 1996, **94** (17): 69-74
- [5] Nicholas R E. Leak detection on pipelines in unsteady flow. *Forum on Unsteady Flow, Fluids Engineering Division ASME*, 1990, **102**: 23-25
- [6] Nicholas R E. Leak detection by model compensated volume balance. *Petroleum Division ASME*, 1987, **16**: 13-20
- [7] Benjamin Wylie E, Victor L Streater, Lisheng Suo. *Fluid Transients in Systems*. New Jersey: Prentice-Hall, 1993: 20-26
- [8] Yan Dafan (严大凡). *Design and Management of Oil Pipeline (输油管道设计与管理)*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 143-147
- [9] Zuo Jianmin (左建民). *Hydraulic and Pneumatic Drive (液压与气压传动)*. Beijing: China Machine Press, 1998: 62
- [10] Chen Minheng (陈敏恒), Cong Dezi (丛德滋), Fang Tunan (方图南), Qi Mingzhai (齐鸣斋). *Chemical Engineering Principles (化工原理)*. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 1999: 45
- [11] Drago Matko, Gerhard Geiger, Withold Gregoritia. Pipeline simulation technique. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2000, **52**: 211-230
- [12] Drago Matko, Gerhard Geiger, Withold Gregoritia. Verification of various pipeline models. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2000, **53**: 303-308
- [13] Drago Matko, Gerhard Geiger, Thomas Werner. Modeling of the pipeline as a lumped parameter system. *Automatika*, 2001, **42**: 177-188
- [14] Drago Matko, Gerhard Geiger. Models of pipelines in transient mode. *Math. Comput. Model Dyn. Syst.*, 2002, **8** (1): 117-136
- [15] Wu Qi (吴麒). *Automatic Control Theory (自动控制原理)*. Beijing: Tsinghua University Press, 1990: 138