

CIPC 2017

Proceedings of the 6th China International Pipeline Conference

第六届中国国际管道会议

论文集

(上册)

《第六届中国国际管道会议论文集》编委会 编

石油工业出版社

第六届中国国际管道会议论文集

(上册)

《第六届中国国际管道会议论文集》编委会 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书收录我国油气储运行业骨干科学技术人员最新科研成果与技术应用成果相关论文 150 篇, 涵盖油气储运行业的主要技术领域, 上册包括管道设计技术、管道建设技术、管道输送技术、运行与维护技术 4 个部分共计 74 篇文章, 下册包括检测与监测技术、完整性评价技术、新设备与新技术 3 部分共计 76 篇文章。其中, 高钢级管道完整性评价、焊缝缺陷信号识别与评估、高清内检测一体化技术、基于大数据的智能管道解决方案、管道建设智能化和数字化移交、全生命周期数据建设、安全监测预警, 以及油气管道及附属设施、储备库及 LNG 安全保障一体化及应急装备等研究热点, 成为本次会议论文的一大特色, 文章适用性、实践性、科学性较强。

本书可供油气储运行业科技人员、管道人员以及高校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

第六届中国国际管道会议论文集. 上册/《第六届中国国际管道会议论文集》编委会编. —北京: 石油工业出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-5183-2198-8

I. ①第… II. ①第… III. ①管道工程-国际学术会议-文集 IV. ①U172-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 248566 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010)64523738 图书营销中心: (010)64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 39.25

字数: 930 千字

定价: 280.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

油气管道是国民经济和社会发展的能源大动脉，是油气资源最安全、高效的输送方式。截至2016年底，我国陆上长输油气管道总里程达到 $12.3\times 10^4\text{km}$ ，覆盖全国32个省区市，年输石油 $3.5\times 10^8\text{t}$ 、天然气 $1500\times 10^8\text{m}^3$ ，目前已形成“三纵四横、连通海外、覆盖全国”的大型油气管网。未来相当长一段时间，管道仍将处于快速发展期，根据国家《中长期油气管网规划》，到2025年，我国主干管道里程将增至 $24\times 10^4\text{km}$ 。

近年来，我国在管道建设、运行管理、材料装备国产化方面，取得了卓越的成绩。管道建设方面，以中俄东线X80、管径1422大口径输气管道顺利开工建设为标志，我国成为国际高钢级、大口径、高压力管道建设领域的领跑者。运行管理方面，在集中调控、泄漏监测、安全预警、完整性管理等技术领域，我国达到世界先进水平。材料装备国产化方面，X80高钢级管材研制成功并大规模应用，X90、X100管线钢开展研发与应用，燃气轮机、压缩机组等核心装备实现国产化研制及不同程度的工业化应用，彰显我国在主要技术领域取得的重大进展。

油气管道处于开放的自然和社会环境中，安全影响因素众多，部分因素的偶发性强。管道一旦发生事故，将对生命财产、能源供给和环境保护等公共安全产生巨大影响。随着我国大口径、高压力、高钢级管道里程不断增长，加之我国特殊的自然和社会环境，管道保护任务愈加繁重，在安全理论、安全技术与安全管理等方面需要不断完善，构建完备的安全理论体系，研发系统的保护技术体系，建设完整的安全监管体系。

第六届中国国际管道会议(CIPC2017)从安全生产、运行保障、节能降耗、技术创新等诸多方面，总结我国油气管道技术的发展现状与趋势，以期推动油气管道技术进步与交流合作，促进油气管道建设与运行新理论、新技术的发展与应用。同时，为了全面提升智能化管道管理水平，围绕“数字化移交、智能化运营、全生命周期管理”的目标，开展相关领域前沿关键技术的交流与研讨。大

会征集我国油气储运行业骨干技术人员最新科研与技术应用成果相关论文 150 篇，并分上下两册正式出版，其中上册包括管道设计技术、管道建设技术、油气输送技术、运行与维护技术 4 个部分共计 74 篇文章，下册包括检测与监测技术、完整性评价技术、新设备与新技术 3 部分共计 76 篇文章。其内容涵盖油气储运行业的主要技术领域，反映了我国油气管道科技工作者的智慧和油气管道事业的科技发展水平，具有较高的参考价值。

期待大会圆满成功，感谢中国管道界对本次大会的支持。

本书编委会
2017 年 9 月

目 录

管道设计技术

天然气管道的状态空间模型研究	温 凯 闫小东 夏子杰 等(3)
输气管道电驱压气站两级供电电压设计技术	李福荣 于文明 孙玉国(11)
新形势对油气管道标准化工作的启示	张 妮 王 岳 徐葱葱 等(18)
油气管道球形双封封堵器的设计及实验研究	全 意 张仕民 范进朝 等(23)
低表面能防垢内管的开发与应用	孙 磊(34)
国标、美标和俄标在输气管道设计与试压要求上的差异对比	董 楠 陈 文 左 栋 等(40)
跨断层海底管道最佳穿越角度分析	曹文冉 曹先凡(48)

管道建设技术

中国长输油气管道工程现场焊接技术	隋永莉(57)
天然气管道在役焊接温度场数值模拟研究	黄志强 汤海平 丁雅萍 等(65)
2016 年全球油气管道建设发展现状	祝惠智 张玉志 吴 超 等(75)
长输管道建设中液体环氧补口技术的质量控制	张秀云(84)
水下油气管道盾构穿越中俄标准主要差异分析	任文明 詹胜文 霍锦宏(93)
模拟仿真技术在肯尼亚 1 号线成品油管道投产应用的探索	李欣泽(100)
中国页岩气管道建设现状	潘代波 高 辉 何子延 等(106)
永冻土区与油气管道同沟光缆的敷设方式研究	刘桂志(112)
庆—咸输油管道增输扩建研究与应用	张 平 夏 政 郭 刚 等(118)
沉管技术在广西输气管道工程河流穿越中的应用和对比	房海晓 胡晓钰(126)
海洋管道混凝土层对铺管船施工的影响	荣世伦 王站榜 李 恒(133)
荷载平衡体系转换法在悬索管道跨越施工中的应用研究	张 杰(142)
高温环境 INCONEL825 原油管道焊接技术	余尚林 杨 昕 张 圆 等(147)

管道输送技术

长输液体管道的调控中心投产操作	陈泓君 代文平 于 涛 等(159)
油包水型乳状液蜡沉积模型研究与验证	贺 三 邹永莉 鄂广杏 等(166)
胶凝含蜡原油黏弹性对管道再启动影响的研究	包有权 张劲军(174)
成品油管道站场盲端管段的油品置换研究	娄 晨(183)

成品油输送管道油携水流动的三维仿真 宋晓琴 牟星洁 熊柯杰 等(192)

油包水乳状液管流蜡沉积模型研究 李清平 王 玮 杨居衡(202)

油—气两相分层流蜡沉积预测模型研究 段纪森 邓松圣 刘慧妹 等(213)

高压含气烃类体系下的蜡析出预测研究 杨居衡 王 丹 王 玮 等(232)

胶凝含蜡原油非线性蠕变模型的建立 季温革(242)

输油管道双管同沟敷设停输过程的数值计算 赵兴民 高晓蓓(253)

基于人工智能方法预测剪切历史作用下的加剂改性原油黏度
..... 户 凯 张 帆 张钰焱 等(259)

接收站卸料与返气匹配研究 熊华彬 刘 涛(265)

关于储运厂长输管线返输石脑油的可行性分析 聂兰勇 李延卿 王 玉(271)

基于深度学习结构网络的输气管道水力预测模型 陈新果 李晓平 王第玺 等(276)

胶凝原油管道再启动问题研究进展 陈 雷 刘 刚 李秉繁(286)

石克 D377mm 输油管道停输再启动试验研究 刘 霞 周卫国 郭荃宏 等(298)

运行与维护技术

地铁杂散电流对埋地管道干扰规律及牺牲阳极干扰缓解作用研究
..... 沈李沪 葛彩刚 肖强荣 等(309)

浅谈长输天然气管道动火作业要求及带来的思考 刘 洪 刘玉展 王维国(318)

植物根系对油气长输管道的影响及管理办法研究 黄文尧 冯 慧 王 璐(324)

成品油泵站主输泵噪声治理对策 郁 斌(330)

香港支线清管作业过程及问题分析 单鲁维 张 静 张 鑫 等(338)

数值仿真技术在阴极保护系统优化设计与杂散电流干扰分析中的应用
..... 张永飞 杨 锐 杨 磊 等(344)

油气回收技术在炼化储运系统中的应用 冯 润(357)

油气管网调控技术应用现状与发展趋势 袁满仓 郭长滨 李 慧 等(363)

成品油管道工艺运行方案优化 于 阳 吴长春 王大鹏 等(370)

长输管道带压封堵技术分析 倪 俊(391)

中亚天然气管道能耗控制与优化分析 杨金威 张 鹏 姜进田 等(397)

北海—大理管道沿线成品油供给链一次物流优化研究
..... 刘 静 袁 梦 张 万 等(406)

海底管道事故分析及维修方案研究 王德军 邹 星 贾 旭(415)

LNG 储罐压力控制技术优化及成果 张 震 章 妍 张兵兵(423)

华中成品油管网 SCADA 系统的二次开发与应用..... 邱 东 张 贺 赵 勇 等(432)

压力变化对于管线钢中氢脆作用的影响 邢 潇(442)

西门子燃调阀及其相关系统故障与分析 罗易洲(452)

丁二烯储运系统安全运行对策 冯 强(459)

长沙地铁 2 号线对某管道的直流干扰影响 惠海军 戴乾生 罗四元 等(466)

油溶性缓蚀剂对腐蚀介质中氢渗透的影响 高继峰(473)

长输天然气管道维抢修中心设计浅析	何 源 韩国星	(479)
某型燃气轮机涡轮叶片失效机理研究	关 睿	(486)
靖安油田管道内防腐工艺技术研究与应用	龙雄云 崔建军 周冰欣 等	(493)
拟建高压直埋地极对附近埋地管道的干扰问题研究	姜子涛 王修云 李永发 等	(504)
基于 Φ -OTDR 的光纤安全预警系统研究及在管道运维行业的应用	曾科宏 李 刚 王耀忠 等	(513)
天然气管道氮气置换的模拟研究	徐伟良 王成祥 邱忠华 等	(520)
在线环氧玻璃纤维内衬技术在油田管道防腐中的应用	罗慧娟 成 杰 孙银娟 等	(526)
储罐内壁强制电流阴极保护技术应用	卢克勤 白 雪 焦 凯 等	(532)
某双管并行输气管道系统整体运行方案优化	左丽丽 冯 亮 刘 刚 等	(539)
20 万立方米 LNG 储罐基础电伴热系统的应用	刘 萍 李志龙 陈 磊	(550)
20 万立方米 LNG 储罐冷却技术研究	巩志超 熊华彬 庄 芳	(557)
成品油管网调度支持与异常智能诊断系统设计	陈 勇	(564)
非洲某低渗陆地油田 RTP 管道研究及探讨	徐敏航	(574)
天然气管道生产管理系统能耗数据挖掘分析与应用	高继江	(580)
天然气长输管道清管器运行速度控制研究	高新杰 刘凤霞	(589)
某西部油田双金属复合管环焊缝腐蚀穿孔及控制措施	冯 泉 鲜 俊 刘绍东 等	(596)
输气管道稳态泄漏率计算模型研究	王炜硕 程 哲	(604)
天然气管道球阀故障分析与排除探讨	于海安 周长李 胡汉董 等	(614)

管道设计技术

天然气管道的状态空间模型研究

温 凯 闫小东 夏子杰 宫 敬

(中国石油大学(北京); 城市油气输配技术北京市重点实验室)

摘 要: 对于管道实时控制, 只有在满足实时性要求的前提下来提高模型的精度才有意义, 采用低阶状态空间模型分析管道动态变化。本文对天然气管道系统的非线性偏微分控制方程分别进行线性化处理和拉普拉斯变换后得到等价传递函数方程, 由于传递函数方程不适用于复杂的天然气管道系统, 而状态空间表达式可以很方便地处理大型复杂的系统, 因此由传递函数方程推导得到状态空间表达式进行天然气管道的动态分析。为了验证模型的准确性, 在 MATLAB-Simulink 环境下建立管道模型进行仿真分析, 将得到的结果与商业仿真软件 SPS 仿真结果进行对比。通过对两种实例分析发现, 总体来说, 模型满足天然气管道动态分析所需的精度要求。

关键词: 动态流动; 传递函数; 状态空间; 天然气

Study on the State Space Model of Gas Pipelines

WEN Kai, YAN Xiaodong, XIA Zijie, GONG Jing

(China University of Petroleum (Beijing); Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology)

Abstract: The real-time pipeline control has meaning only when the model accuracy is improved on the premise that the real-time requirements are satisfied, hence, a low-order state space model was used to analyze the dynamic changes of the pipeline. In this paper, the equivalent transfer function equation is derived after linearizing and Laplace transformation of the nonlinear partial differential governing equations of the gas pipeline systems. As the transfer function equation cannot be used for a complex gas pipeline system, but a state space expression can easily deal with a large and complicated system. Therefore, the dynamic analysis of the gas pipelines can be made with the state space expression derived from the transfer function equation. In order to verify the accuracy of the model, the results obtained by the simulation analysis with the pipeline model established in MATLAB-Simulink environment are compared with those obtained in the simulation with the commercial simulation software SPS. As indicated by the results of two test cases, the accuracy of the state space model could basically meet the accuracy

requirements required by the dynamic analysis of gas pipelines.

Key words: dynamic flow; transfer function; state space; natural gas

输气管内气体流动可用连续性方程、运动方程、能量方程、状态方程的一组非线性的偏微分方程来描述,要想求得方程的解析解相当困难,因此只能退而求其次求得方程组的近似解或数值解。随着计算机技术的成熟,数值解法得到极大发展,数值解法主要是通过特征线差分法、隐式中心差分法等将偏微分方程转化成差分方程求解管内气体流动状态分布和动态变化过程。经过 60 多年的发展,天然气管网动态仿真技术已相当成熟,为了使仿真技术更接近实际情况,目前的仿真模型研究正朝着多相流方向发展。

特征线差分法、隐式中心差分法等可以得到很高的计算精度,可以直接服务于天然气管网的设计、预测等各个层次,但是由于这些方法计算非常耗时,不适合天然气管网的在线监测应用,如状态估计、泄漏检测与识别、实时优化等^[1,2]。为了解决这一问题,1984 年 Kralik 等^[3]提出一种简化的传递函数模型,探讨由于管道控制偏微分方程通过隐式中心差分法空间离散而引入的误差。研究结果表明,该模型对于复杂的天然气管网可以提高计算效率,虽然 Kralik 仅仅把这种方法用于天然气管道离线仿真,但是这种方法为在线应用提供了一种新的想法。之后的一段时间,其他学者提出液体管道系统传递函数模型并在频域进行分析,随后传递函数模型被用于水管道的泄漏检测。2006 年,Reddy 等^[4]引用 Kralik 提出的传递函数模型用于分输量发生变化的在线状态估计,为了使应用更广泛,压缩因子用 AGA 模型计算。2010 年,Behbahani-Nejad 等^[5]利用 MATLAB 的 Simulink 构建函数模拟气体管道中流体运动,他们的模型中采用的是二阶传递函数模型。由于传递函数模型不适用于复杂的天然气管道,而状态空间模型可以很好地解决这一问题,2012 年 Alamian 等^[6]引用 Kralik 提出的传递函数推导得到了状态空间模型。

本文的主要目的是用低阶状态空间模型仿真天然气管道的动态变化,在满足精度要求的前提下提高管道的实时性,为以后管道系统可控性分析和控制器设计建立基础。第一部分,得到天然气管段等温动力学模型,并对模型进行简化处理;第二部分,通过动力学模型得到等价的传递函数模型,从而得到状态空间模型分析天然气管道的动态变化;第三部分,对模型进行分析。

1 管段动力学方程

等直径刚性管道一元流动可用连续性方程、运动方程、能量方程和气体状态方程的一组偏微分方程描述,为了简化计算,忽略输气管内气体温度变化,认为是等温流动恒等于周围环境温度和忽略动量方程中的对流项^[7],得到方程组(1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - \lambda \frac{u|u|}{2D} \rho - \rho g \sin \alpha \\ \frac{p}{\rho} &= ZRT = c^2 \end{aligned} \tag{1}$$

式中 m ——气体的质量流量, kg/s ;
 ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;
 D ——管道内径, m ;
 g ——重力加速度, 9.8m/s^2 ;
 α ——管道与水平面的夹角;
 R ——气体常数, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;
 λ ——管道水力摩阻系数;
 Z ——气体压缩因子;
 c ——气体的波速, m/s ;
 u ——气体的流速, m/s ;
 T ——气体的温度, K ;
 x ——管道位置变量, m ;
 t ——时间变量, s 。

输气管道中气体的流态大多在阻力平方区, 摩阻系数 λ 一般由柯尔布鲁克公式计算, 通过迭代计算出 λ , 也可由 Hofer(1973)得到的适用于阻力平方区的近似显式公式[式(2)]计算; 对于给定的气体, 压缩因子 Z 是关于气体压力和温度的函数, 本文中的 Z 通过式(3)计算:

$$\lambda = \left\{ 2 \lg \left[\frac{4.518}{Re} \lg \left(\frac{Re}{7} \right) + \frac{r}{3.71D} \right] \right\}^{-2} \quad (2)$$

其中:

$$Z = 1 + ap - \frac{bp}{T} = \frac{1}{1 + \rho(b^* - a^* T)} \quad (3)$$

$$a = 0.257/p_c$$

$$b = 0.533T_c/p_c$$

$$a^* = aR$$

$$b^* = bR$$

式中 Re ——输气管道的雷诺数;
 r ——管壁的绝对当量粗糙度, m ;
 p_c ——气体的临界压力, Pa ;
 T_c ——气体的临界温度, K 。

2 管段传递函数方程

在输气管道系统中, 通过仪表可以测取管道进出口的流量、压力或密度, 因此流速 u 用质量流量 m 代换。为了得到管段的传递函数, 围绕稳态压力、流量进行线性化(摩阻项围绕稳态流量进行泰勒展开), 得到的线性偏微分方程组和 Reddy 等得到的结果类似^[8], 对偏微分方程组进行拉普拉斯变换, 得到一组线性常微分方程组(4):

$$\frac{\partial \Delta m(\xi, s)}{\partial \xi} + \frac{AL}{\tilde{c}^2} s \Delta p(\xi, s) = 0$$

$$\frac{\partial \Delta p(\xi, s)}{\partial \xi} + L(g \sin \theta) \frac{\Delta p(\xi, s)}{\tilde{c}^2} - \frac{\lambda L \tilde{w} |\tilde{w}|}{2D \tilde{c}^2} \Delta p(\xi, s) + \frac{\lambda L \tilde{w}}{DA} \Delta m(\xi, s) + \frac{L}{A} s \Delta m(\xi, s) = 0$$
(4)

其中:

$$\begin{aligned} \Delta m(x, t) &= m(x, t) - m(x, 0) \\ \Delta p(x, t) &= p(x, t) - p(x, 0) \\ \xi &= \frac{x}{L} \\ \tilde{c}^2 &= ZRT \\ \tilde{w} &= \frac{m(x, 0) \tilde{c}^2}{A \tilde{p}(x, 0)} \end{aligned}$$
(5)

管道的进口压力和出口流量被指定为边界条件, 常微分方程 (ODE) 可以得到方程组 (6) 的结果:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{out}}(s) &= e^{\frac{\gamma}{2}} \frac{2b}{2b \cosh b - \gamma \sinh b} \Delta p_{\text{in}}(s) + \frac{-2\alpha \sinh b}{2b \cosh b - \gamma \sinh b} \Delta m_{\text{out}}(s) \\ \Delta m_{\text{in}}(s) &= \frac{2\beta \sinh b}{2b \cosh b - \gamma \sinh b} \Delta p_{\text{in}}(s) + e^{-\frac{\gamma}{2}} \frac{2b}{2b \cosh b - \gamma \sinh b} \Delta m_{\text{out}}(s) \end{aligned}$$
(6)

其中:

$$b = \frac{\sqrt{\gamma^2 + 4\alpha\beta}}{2}$$
(7)

方程组 (6) 很难求得时域解析解, 因此采用泰勒展开得到简化的传递函数:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{out}}(s) &= k_1 \frac{1}{1 + a_1 s + a_2 s^2} \Delta p_{\text{in}}(s) - k_2 \frac{1 + T_{21}s + T_{22}s^2}{1 + a_1 s + a_2 s^2} \Delta m_{\text{out}}(s) \\ \Delta m_{\text{in}}(s) &= \frac{T_{11}s + T_{12}s^2}{1 + a_1 s + a_2 s^2} \Delta p_{\text{in}}(s) + \frac{1}{1 + a_1 s + a_2 s^2} \Delta m_{\text{out}}(s) \end{aligned}$$
(8)

其中:

$$\begin{aligned} k_1 &= e^{\gamma} \\ k_2 &= e^{\frac{\gamma}{2}} \left[\frac{\lambda L |\tilde{w}|}{DA} \left(1 + \frac{1}{24} \gamma^2 + \frac{1}{1920} \gamma^4 \right) \right] \\ a_1 &= e^{\frac{\gamma}{2}} \left[\frac{\lambda L^2 |\tilde{w}|}{2D \tilde{c}^2} \left(1 - \frac{1}{6} \gamma + \frac{1}{24} \gamma^2 - \frac{1}{240} \gamma^3 \right) \right] \\ a_2 &= e^{\frac{\gamma}{2}} \left[\frac{\lambda L^2 |\tilde{w}|}{24D \tilde{c}^2} \frac{\lambda L^2 |\tilde{w}|}{D \tilde{c}^2} \left(1 - \frac{1}{10} \gamma \right) + \frac{L^2}{\tilde{c}^2} \left(1 - \frac{1}{6} \gamma + \frac{1}{24} \gamma^2 - \frac{1}{240} \gamma^3 \right) \right] \end{aligned}$$

$$T_{11} = e^{\frac{\gamma}{2}} \left[\frac{AL}{\tilde{c}^2} \left(1 + \frac{1}{24} \gamma^2 + \frac{1}{1920} \gamma^4 \right) \right] \quad (9)$$

$$T_{12} = e^{\frac{\gamma}{2}} \left[\frac{\lambda L^2 |\tilde{w}|}{6D \tilde{c}^2} \left(1 + \frac{1}{40} \gamma^2 \right) \right]$$

$$T_{21} = \frac{D}{\lambda |\tilde{w}|} + \frac{\lambda L^2 |\tilde{w}|}{D \tilde{c}^2} \left(1 + \frac{1}{40} \gamma^2 \right) \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \gamma^2 + \frac{1}{320} \gamma^4}$$

$$T_{22} = \frac{1}{1 + \frac{1}{24} \gamma^2 + \frac{1}{1920} \gamma^4} \times \left[\frac{D}{\lambda |\tilde{w}|} \frac{\lambda L^2 |\tilde{w}|}{6D \tilde{c}^2} \left(1 + \frac{1}{40} \gamma^2 \right) + \frac{\lambda L^2 |\tilde{w}|}{120D \tilde{c}^2} \frac{\lambda L^2 |\tilde{w}|}{D \tilde{c}^2} + \frac{L^2}{6\tilde{c}^2} \left(1 + \frac{1}{40} \gamma^2 \right) \right]$$

3 管段状态空间方程

由管段传递函数推导可得到管道状态空间方程来分析管道系统动态变化^[6]：

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (10)$$

其中：

控制输入向量 $u = (p_{in} \quad m_{out})$

输出向量 $y = (p_{out} \quad m_{in})$

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{a_1}{a_2} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{a_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{a_1}{a_2} & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{a_1} & 0 \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_2 T_{21}}{a_2} + \frac{a_1 k_2 T_{22}}{a_2^2} \\ \frac{k_1}{a_2} & -\frac{k_2}{a_2} + \frac{k_2 T_{22}}{a_2^2} \\ \left(\frac{T_{11}}{a_2} - \frac{a_1 T_{12}}{a_2^2} \right) & 0 \\ -\frac{T_{12}}{a_2^2} & \frac{1}{a_2} \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & D &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_2 T_{22}}{a_2} \\ \frac{T_{12}}{a_2} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

4 模拟仿真与结果

4.1 进口压力阶跃变化

长度为 64km 的刚性等直径天然气管道，直径为 660mm，在 21℃ 的运行温度下相对密度为 0.55，粗糙度为 0.012mm。初始稳态时进口压力为 5MPa，全线输量为 60m³/s。管道平稳

运行 10min 时进口压力发生阶跃变化, 变为 5.1MPa, 图 1 和图 2 分别展示了模型与 SPS 管道出口压力和进口流量的对比结果。从图 1 和图 2 中可以看出, 模型可以达到与 SPS 相同的稳态值 4.87MPa 和 60m³/s, 但是变化相对剧烈。

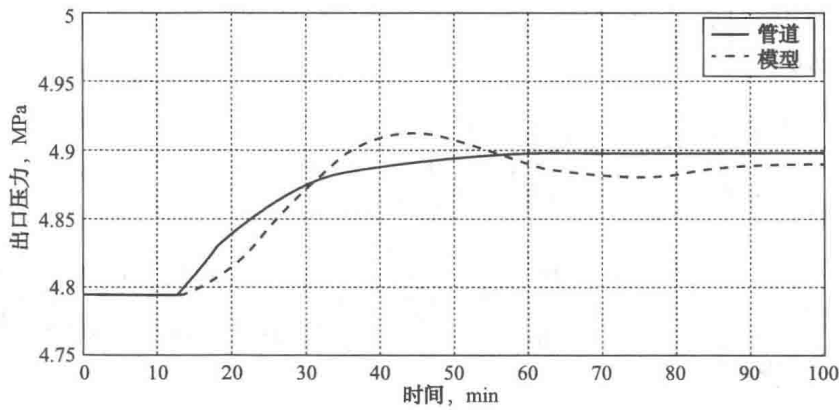


图 1 出口压力变化曲线

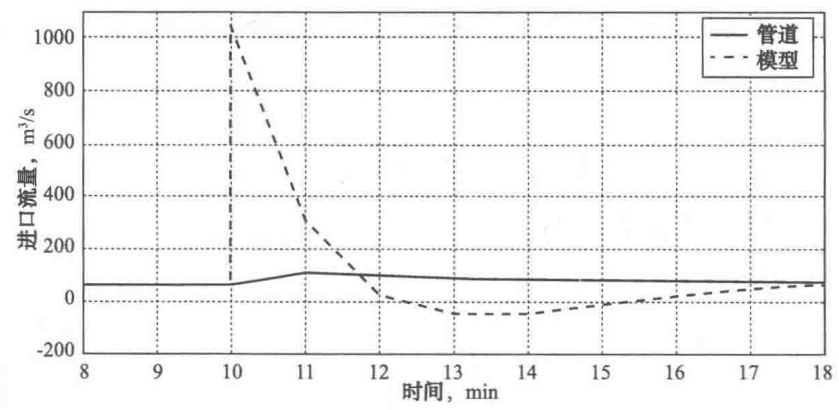


图 2 进口流量变化曲线

4.2 出口流量周期性变化

长度为 100km 的刚性等直径天然气管道, 直径为 800mm, 在 5℃ 的运行温度下相对密度为 0.6, 粗糙度为 0.0617mm。整个仿真过程中进口压力恒为 5.5MPa, 假设出口流量发生周期性变化, 如图 3 所示。图 4 和图 5 分别展示了模型与 SPS 管道进口流量和出口压力的对比结果。从图 4 和图 5 中可以看出, 当管道出口流量在一天内发生周期性变化时, 模型仿真结果的整体趋势与 SPS 仿真结果吻合, 并且误差较小。

5 结论

从上述实例分析可以看出, 本文提出的模型满足天然气管道动态分析所需的精度要求, 由于状态空间模型是由传递函数推导得到的, 相比于特征线差分法、隐式中心差分法等传统的数值方法可以得到很高的计算速度。并且由于模型是由传递函数得到的, 我们只能模拟边界点的压力、流量随时间变化的趋势, 这一特点非常符合控制模型的要求。因此, 状态空间模型将被用在管道系统可控性分析和控制器设计当中。

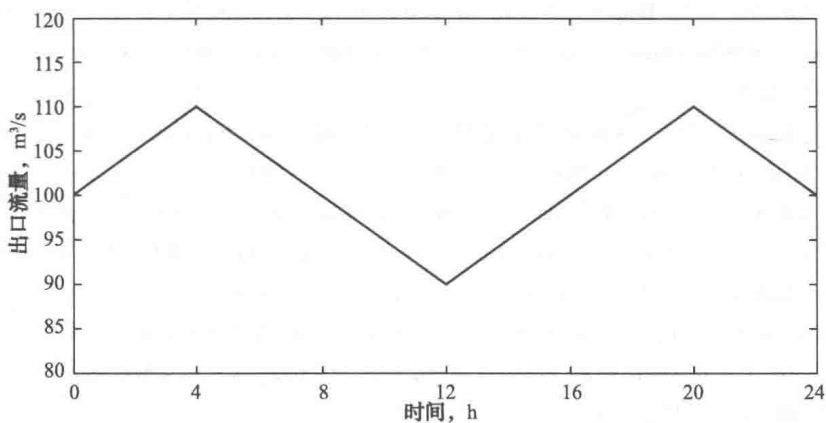


图3 出口流量周期性变化曲线

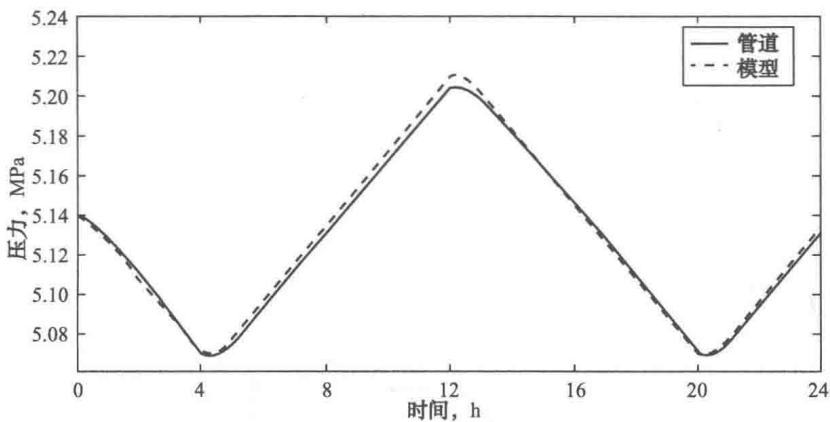


图4 出口压力变化曲线

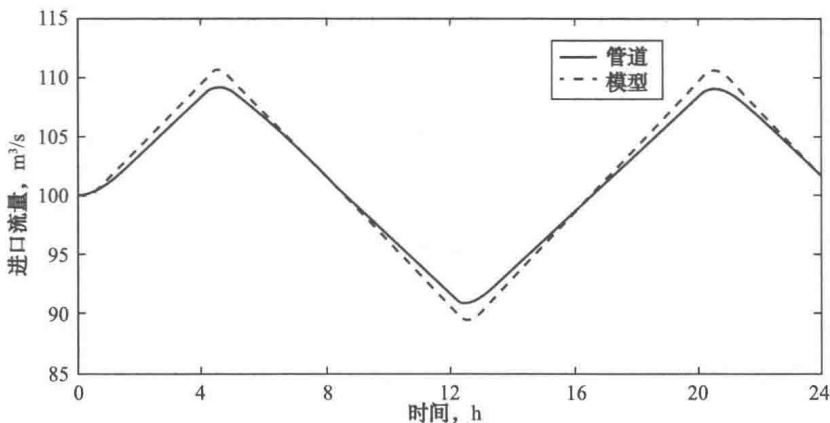


图5 进口流量变化曲线

参 考 文 献

[1] 王寿喜, 曾自强. 管网模拟特征线法[J]. 天然气工业, 1986, 6(2): 84-94.
[2] 于恩禄. 天然气管网的水力瞬态分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
[3] Kralic J, Stiegler P, Vostry Z, et al. Modeling the Dynamic Simulationmodel of Gas Pipeline Networks[J]. IEEE Trans. Syst. Manage., 1984, 14(4): 597-606.