



# 基于粒子群算法的液体管道仿真模型参数校正方法

华东阳 王寿喜 郭乔 刘丹

西安石油大学石油工程学院管网仿真综合实验室

**摘要:** 针对液体管道模型参数存在偏差从而导致管道仿真模型与实际管道系统存在偏差的问题,提出一种管道模型参数校正方法。首先,根据管道内流体运动特性,建立流体动力学模型,分析管道模型不准确性的原因;其次,分析管长、内径、高程差、粗糙度等参数的不准确性对模型精度的影响;然后将参数校正问题转换为最优化问题,建立参数校正模型,并以粒子群算法求解该优化问题;最后,基于室内实验和仿真实验数据验证校正结果准确性、校正后模型适应性以及校正方法适用性。结果表明:对于准确性,基于26组室内试验数据的参数校正结果平均相对误差在2%以内;对于适应性,管长和内径校正后,分别有超过84.6%和96.1%的模型精度提升;对于适用性,10组仿真模型的参数校正结果相对误差均在1%以内,参数校正后,模型适应性显著提高,模型适应率从0.04%~0.53%降至0.01%~0.18%。(图7,表3,参25)

**关键词:** 液体管道; 管网仿真; 参数校正; 粒子群算法

中图分类号: TE973

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.12.011

## Correction method for parameters of liquid pipeline simulation model based on particle swarm optimization algorithm

HUA Dongyang, WANG Shouxi, GUO Qiao, LIU Dan

Integrated Laboratory of Pipe Network Simulation, College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University

**Abstract:** In view of the deviation between the simulation model and the actual pipeline system due to the deviation of liquid pipeline model parameters, a pipeline model parameter correction method was proposed. At first, a fluid dynamics model was established based on the fluid motion characteristics in the pipeline to analyze the reasons for the inaccuracy of the pipeline model. Then, the influence of the inaccuracy of pipeline parameters such as length, inner diameter, elevation difference and roughness on the accuracy of the model was analyzed. Thus, the parameter correction problem was transformed into an optimization problem. A parameter correction model was established, and the optimization problem was solved by particle swarm optimization algorithm. Finally, the accuracy of the corrected results, the adaptability of the corrected model, and the applicability of the correction method were verified based on the laboratory experiments and simulation data. The verification results show that: In terms of accuracy, the average relative error of the parameter correction results based on 26 test data sets is within 2%. As for adaptability, after the correction of pipe length and inner diameter, the precision is improved for more than 84.6% and 96.1% of the models respectively. In view of applicability, the relative error of the parameter correction results based on 10 simulation models is within 1%. After parameter correction, the adaptability of the models is improved obviously and the adaptive rate is reduced from 0.04%–0.53% to 0.01%–0.18%. (7 Figures, 3 Tables, 25 References)

**Key words:** liquid pipeline, network simulation, parameter correction, particle swarm optimization algorithm

管网仿真技术是研究管道水力及热力问题的重要方法之一<sup>[1-4]</sup>,精确的仿真模型是管网仿真计算的关键。而实际的管道模型参数存在测量误差,并且管道

输送效率等参数随时间缓慢变化<sup>[5-7]</sup>,这些问题都将导致管网仿真模型与实际管道系统存在差异,最终增大管网仿真系统的计算误差。

Modisette<sup>[8]</sup>分析了不同误差来源对管道稳态模型和瞬态模型计算结果的影响,基于退火算法对管道内壁粗糙度和流体密度进行校正,该方法只适用于成品油管道顺序输送,并且需要现场运行数据。Abdolahi等<sup>[9]</sup>提出对于大口径输气管道,粗糙度对管道压力和温度变化的影响大于导热系数的影响,并提出一种粗糙度校正方法,该方法对于大口径输气管道具有较高精度,未对中小口径管道进行适用性验证。Strelnikova等<sup>[10]</sup>建立了加入减阻剂的管道水力模型,利用牛顿法对管道内径和粗糙度进行校正,并将粗糙度校正结果分别与Blasius和Colebrook模型的摩阻系数反算结果进行对比,但该方法需要针对不同类型减阻剂分别建模,应用不便。赵昆鹏<sup>[11]</sup>分析了天然物性参数偏差、设计参数偏差以及缓变参数偏差对天然气管网稳态、瞬态以及在线仿真精度的影响,建立了天然气管网自适应仿真模型,利用敏度法对管道内径、粗糙度、管长进行修正,但该研究只验证了参数校正结果的准确性,并未验证校正后模型的适应性。

目前,仍缺乏一种计算精度高、适用范围广的油气管道模型参数校正方法。在此对管道模型不准确进行了分析,提出一种管道模型参数校正方法及校正结果适应性验证方法。

## 1 管道仿真模型

### 1.1 流体动力学模型

对于管道横截面积不发生变化的管道,可建立连续性方程、运动方程及能量方程<sup>[12-13]</sup>。

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\lambda \rho v^2}{2D} = 0 \\ -\rho v \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( u + \frac{v^2}{2} g z \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho v \left( h + \frac{v^2}{2} + g z \right) \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $t$ 为时间变量,s;  $v$ 为流体流速,m/s;  $x$ 为沿管长变量,m;  $p$ 为流体压力,Pa;  $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>;  $\lambda$ 为摩阻系数;  $D$ 为管道内径,mm;  $Q$ 为单位质量流体向外界放出的热量,J/kg;  $u$ 为流体内能,J/kg;  $h$ 为流体的焓,J/kg;  $z$ 为管道位置高度,m。

对于稳定流动,流动参数不随时间变化,式(1)可转换为:

$$\begin{cases} \frac{d(\rho v)}{dx} = 0 \\ \frac{dz}{dx} + \rho v \frac{dv}{dx} = -\rho g \frac{dz}{dx} - \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2} \rho \\ \frac{dh}{dx} + v \frac{dv}{dx} + \frac{dz}{dx} = -\frac{dQ}{dx} \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dp \quad (3)$$

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{4K(T-T_0)}{\rho v D} \quad (4)$$

式中: $T$ 为流体温度,K;  $T_0$ 为管道埋深处土壤温度,K;  $K$ 为管道总传热系数,W/(m<sup>2</sup>·K)。

对于液体管道等温流动,管道与外界不发生热交换,流体密度不变,式(2)可简化为:

$$\frac{d\rho}{dx} + \rho g \frac{dz}{dx} + \frac{\lambda \rho v^2}{2D} = 0 \quad (5)$$

式(5)对于管长进行积分,可得:

$$p_z = p_Q - \rho g \Delta h - \frac{8\lambda LM^2}{\rho \pi^2 D^5} \quad (6)$$

式中: $p_Q$ 为管道起点压力,Pa;  $p_z$ 为管道终点压力,Pa;  $L$ 为管道长度,m;  $\Delta h$ 为管道起点与终点高程差,m;  $M$ 为质量流量,kg/s。

### 1.2 仿真模型不准确

由式(6)可知,仿真模型精度受诸多因素影响,如物性参数(密度、黏度等)、流动参数(摩阻系数)以及管道模型参数(管长、内径、高程等)。对于物性参数,流体密度和黏度会随流体温度变化而变化,可通过密温关系式和黏温关系式<sup>[14-15]</sup>表示。对于流动参数,随着压力与流量变化,流体流态会发生变化,进而影响摩阻系数公式的选择<sup>[16]</sup>。对于管道模型参数,由于阀门、弯头、副管、变径管等元件存在,管道当量长度、当量内径不易准确测量<sup>[17]</sup>;受腐蚀、结蜡等因素影响,管道内径和粗糙度会随管道运行时间发生缓慢变化<sup>[18-19]</sup>。

目前,对于物性参数和流动参数的研究已较为透彻,基于各类理论公式和经验公式,能够较为准确地描述流体密度、黏度及摩阻系数随工况的变化情况<sup>[20-23]</sup>。在此主要研究管道模型参数不准确对仿真结果的影响。

根据式(6),影响管道模型准确性的模型参数有

管长  $L$ 、内径  $D$ 、高程差  $\Delta h$  及粗糙度  $\Delta$ 。对管道终点压力  $p_z$  求全微分,分析各参数对模型的影响。

$$dp_z = \frac{\partial p_z}{\partial L} dL + \frac{\partial p_z}{\partial D} dD + \frac{\partial p_z}{\partial \Delta h} d\Delta h + \frac{\partial p_z}{\partial \Delta} d\Delta \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} \frac{\partial p_z}{\partial L} = -\frac{8\lambda M^2}{\rho\pi^2 D^5} \\ \frac{\partial p_z}{\partial D} = -\frac{8\lambda M^2}{\rho\pi^2 D^5} \left( \frac{\partial \lambda}{\partial Re} \frac{\rho v}{\mu} L - \frac{5\lambda}{D} L \right) \\ \frac{\partial p_z}{\partial \Delta h} = -\rho g \\ \frac{\partial p_z}{\partial \Delta} = \begin{cases} 0 & (\text{层流和水力光滑区}) \\ -\frac{8M^2}{\rho\pi^2 D^5} \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta} L & (\text{混合摩擦区和完全粗糙区}) \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知:

(1) 当流体处于层流或水力光滑区时,管长、内径及高程不准确性会对模型计算产生影响。

(2) 当流体处于混合摩擦区或完全粗糙区时,粗糙度的不准确性也会对模型计算产生影响;管长、内径及粗糙度的不准确性对模型计算产生的影响与质量流量的平方成正比,与密度成反比。

(3) 不同流态下,摩阻系数计算公式不同,管长、内径及粗糙度不准确性对模型计算的影响规律也不同。

(4) 高程差的不准确性对模型的影响来源于流体密度和当地重力加速度,对于等温输送的液体管道,流体密度不变,因此在任意工况下高程差的不准确性对模型的影响程度不变。

由于高程差的不准确性对模型的影响不随工况发生变化,在此不对其进行研究;与粗糙度相比,管长和内径校正结果更容易得到验证,因此选择管长和内径作为本次研究的校正参数。

## 2 参数校正方法

对于实际管道系统,管道起点压力  $p_Q$ 、起点流量  $M_Q$ 、终点压力  $p_z$ 、终点流量  $M_z$  均可通过仪表测得(图1);对于管网仿真系统,基于起点压力  $p_Q$  和终点流量  $M_z$  可计算终点压力  $\tilde{p}_z$ 。若仿真模型参数存在误差,则终点压力的计算值  $\tilde{p}_z$  与测量值  $p_z$  之间必定存在偏差。可将参数校正问题转换为最优化问题:将模型参数作为优

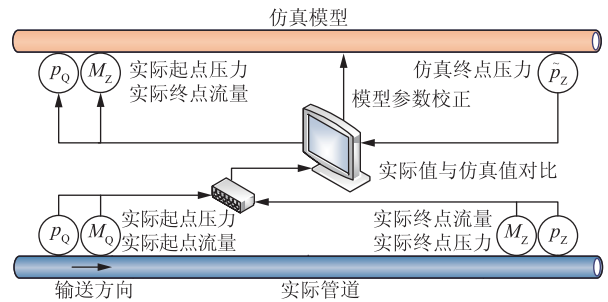


图1 管道仿真模型参数校正原理图

化参数,将终点压力计算值与测量值之差最小作为优化函数,通过求解优化函数实现参数校正的目标。

本次研究为单参数校正,选择管长  $L$  为校正参数时,设定其余模型参数不变。约束条件为管长校正值  $L^*$  的变化范围不超过测量值  $L$  的 10%,目标函数如下:

$$\begin{cases} \min F = |p_z - \tilde{p}_z(L^*)| \\ \text{s.t. } 0.9L \leq L^* \leq 1.1L \end{cases} \quad (9)$$

同理可建立管道内径校正模型:

$$\begin{cases} \min F = |p_z - \tilde{p}_z(D^*)| \\ \text{s.t. } 0.9D' \leq D^* \leq 1.1D' \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $D'$  为管道内径测量值, mm;  $D^*$  为管道内径校正值, mm。

由于粒子群算法具有操作简单、计算量少、适应性强的优点<sup>[24]</sup>,故选用粒子群算法求解式优化函数。

## 3 实例验证

分别从校正结果准确性、校正模型适应性、校正方法适用性 3 个方面对该校正方法开展验证。

(1) 准确性验证:基于室内实验数据,对比参数校正值与实际测量值的偏差。

(2) 适应性验证:基于室内实验数据,以某一组实验工况数据进行模型校正,观察参数校正后的模型在其他工况下的仿真计算误差。

(3) 适用性验证:建立不同管长和不同内径的仿真模型,基于仿真实验数据,观察管长和内径校正结果的准确性以及校正后仿真模型的适用性。

### 3.1 数据来源

室内试验数据由西安石油大学管网仿真综合实验室提供,仿真实验数据由 PNS 管网仿真软件<sup>[25]</sup>提供。

#### 3.1.1 室内实验数据

西安石油大学管网仿真综合实验室由 3 个泵站组成,每个泵站有两台相同型号的调频泵,全程无加热

炉;实验管道测量尺寸:管长 742 m, 内径 36 mm, 起点与终点高程差 0.5 m。

实验工艺流程(图 2)为:流体从首站经过加压、计量后越过二站和三站,在终点处再次计量,最后返回储水罐。实验以水作为介质,流体平均温度为 25.7 ℃;变频泵以并联方式连接,通过改变泵转速调节管道系统压力及流量,得到 26 组数据(表 1)。

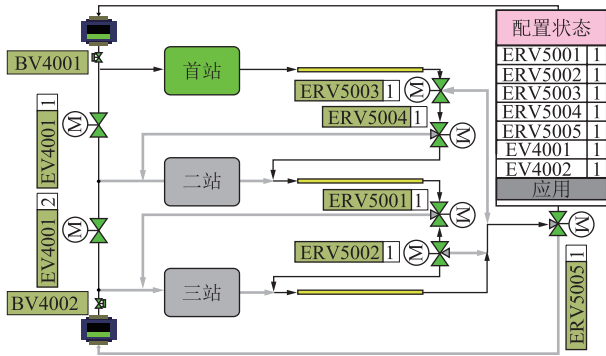


图 2 室内实验管道工艺流程图

表 1 室内流体管道实验数据

实验编号	压力/kPa		流量/(kg·h <sup>-1</sup> )	
	起点	终点	起点	终点
1	214.8	65.5	2 742	2 743
2	226.4	68.6	2 831	2 831
3	238.5	74.1	2 934	2 935
4	244.0	74.5	2 945	2 947
5	252.8	80.2	3 023	3 024
6	262.0	82.1	3 075	3 072
7	263.8	83.7	3 096	3 093
8	272.9	86.5	3 130	3 131
9	276.4	87.8	3 175	3 176
10	282.5	90.7	3 208	3 207
11	285.6	90.0	3 234	3 231
12	288.9	92.2	3 257	3 258
13	296.1	95.9	3 300	3 300
14	299.2	96.5	3 321	3 320
15	303.7	99.1	3 356	3 357
16	306.3	98.7	3 369	3 368
17	313.9	102.9	3 425	3 427
18	316.7	103.4	3 435	3 435
19	318.1	104.2	3 441	3 444
20	321.0	106.8	3 468	3 467
21	333.2	110.9	3 531	3 537
22	334.1	110.7	3 547	3 545
23	335.1	110.5	3 549	3 549
24	341.8	114.4	3 595	3 591
25	342.9	114.6	3 602	3 602
26	351.2	118.4	3 650	3 650

### 3.1.2 仿真实验数据

考虑到室内实验压力及流量变化范围较小,且管道长度和内径无法改变,选择 PNS 管网仿真软件建立不同管长和内径的仿真模型,将仿真实验数据用于该校正方法的适用性验证。仿真实验模拟单根管道水

力计算,以水为介质,介质温度为 10 ℃,全程地形无起伏,摩阻系数采用 Colebrook 公式计算,起点控制参数为压力,终点控制参数为流量。

建立不同规模的仿真模型,管长范围 1~5 km,内径变化范围 100~300 mm;设定起点压力 1 000 kPa,调整管道流量,记录终点压力;每个仿真模型分别记录 5 组不同工况的实验数据(表 2)。

表 2 仿真模型记录的实验数据

模型编号	模型参数	起点流量/(kg·h <sup>-1</sup> )	终点压力/kPa
1	$L=5\ 000\ \text{m},$ $D=100\ \text{mm}$	22 000	690.42
		24 000	639.50
		26 000	585.29
		28 000	527.85
		30 000	467.26
2	$L=5\ 000\ \text{m},$ $D=150\ \text{mm}$	42 000	860.12
		44 000	848.25
		46 000	835.98
		48 000	823.29
		50 000	810.21
3	$L=5\ 000\ \text{m},$ $D=200\ \text{mm}$	62 000	929.48
		64 000	925.45
		66 000	921.33
		68 000	917.11
		70 000	912.80
4	$L=5\ 000\ \text{m},$ $D=250\ \text{mm}$	82 000	960.15
		84 000	958.43
		86 000	956.68
		88 000	954.90
		90 000	953.10
5	$L=5\ 000\ \text{m},$ $D=300\ \text{mm}$	92 000	979.50
		94 000	978.71
		96 000	977.91
		98 000	977.10
		100 000	976.28
6	$L=1\ 000\ \text{m},$ $D=200\ \text{mm}$	40 000	993.45
		45 000	991.95
		50 000	990.32
		55 000	988.56
		60 000	986.68
7	$L=2\ 000\ \text{m},$ $D=200\ \text{mm}$	40 000	986.90
		45 000	983.90
		50 000	980.64
		55 000	977.13
		60 000	973.37
8	$L=3\ 000\ \text{m},$ $D=200\ \text{mm}$	40 000	980.35
		45 000	975.85
		50 000	970.96
		55 000	965.69
		60 000	960.05
9	$L=4\ 000\ \text{m},$ $D=200\ \text{mm}$	40 000	973.80
		45 000	967.80
		50 000	961.28
		55 000	954.26
		60 000	946.73
10	$L=5\ 000\ \text{m},$ $D=200\ \text{mm}$	40 000	967.25
		45 000	959.75
		50 000	951.60
		55 000	942.82
		60 000	933.42

### 3.2 结果验证

#### 3.2.1 准确性验证

校正管长时,内径以 36 mm 计算,按照式(11)计算管长校正值与测量值的误差(图 3)。

$$\phi(L) = \frac{L^* - L}{L} \times 100\% \quad (11)$$

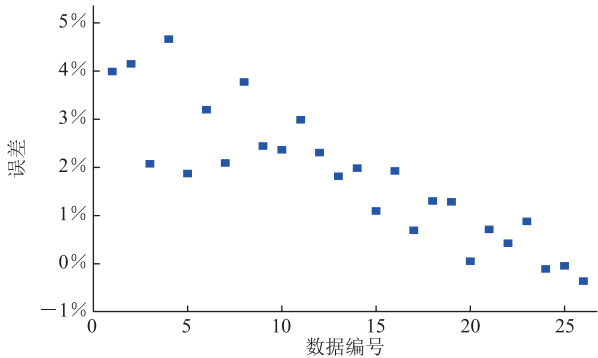


图3 管道长度校正结果图

校正内径时,管长以 742 m 计算,按式(12)计算内径校正值与测量值之间的误差(图 4)。

$$\phi(D) = \frac{D^* - D}{D} \times 100\% \quad (12)$$

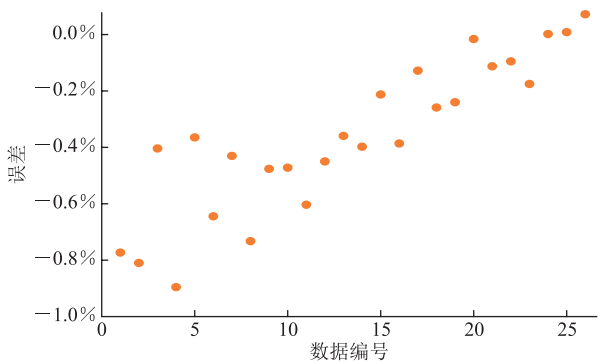


图4 管道内径校正结果图

由计算结果可知:对于管道长度,校正结果最大值 776.60 m,最小值 739.34 m,最大相对误差为 4.66%,平均相对误差为 1.87%;对于管道内径,校正结果最大值 36.03 mm,最小值 35.68 mm,最大相对误差为 0.9%,平均相对误差为 0.37%;随着实验系统压力与流量逐渐增大,管长校正值逐渐减小,内径校正值逐渐增大。

#### 3.2.2 适应性验证

仿真结果的偏差并不是由某一个参数引起的,单个参数校正后的模型是否适用于其他工况,需要对参数校正后模型进行适应性验证。

适应性验证的方法:选择 1 组实验数据建立目标函数,校正管长或内径;基于其余 25 组实验数据,用参数校正后的模型计算下游压力;将下游压力计算值与实际

测量值的平均偏差定义为管道模型适应率。管道模型适应率越小,证明管道模型与实际管道系统越贴近。

$$\phi_i = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \left| \frac{p_{z,j}^{rel} - p_{z,j}^{cal}}{p_{z,j}^{rel}} \right| \times 100\% \quad (13)$$

式中: $\phi$  为管道模型适应率; $i$  为用于建立参数校正模型的实验数据编号; $j$  为除建立参数校正模型以外的实验数据编号; $n$  为实验数据的总数; $p_{z,j}^{rel}$  为第  $j$  组实验数据的下游压力测量值,Pa; $p_{z,j}^{cal}$  为第  $j$  组实验数据的下游压力计算值,Pa。

选择编号为 1 ( $i=1$ ) 的实验数据校正管长和内径,以编号为 2~26 的实验数据 ( $j=2, 3, \dots, 26$ ) 验证校正结果,得到参数校正前后模型在不同工况下的下游压力计算值与实际测量值之间的相对误差(图 5)。参数校正前,模型适应率为 8.29%;校正管长和内径后,模型适应率分别为 2.80%、2.73%。

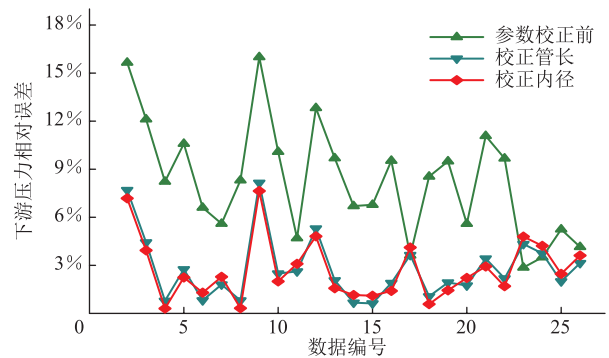


图5 基于编号 1 数据校正的模型适应性验证结果图

以此类推,分别基于编号 2~26 的数据建立校正模型,并用其余 25 组数据验证校正结果的适应性(图 6)。在 26 个管长校正模型中,有 22 个模型适应率降低,占比 84.6%;在 26 个内径校正模型中,有 25 个模型适应率降低,占比 96.1%。结果表明:参数校正后,模型能更准确地描述绝大部分管网系统的运行工况。

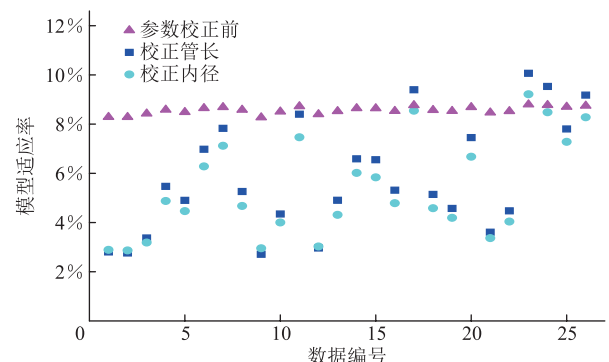


图6 参数校正前、后模型适应率对比图

分析误差来源:①仪表计量误差;②实验设备安装有较多弯头、三通、阀门等元件,产生局部阻力,管

长测量存在误差;③实验室从建成至今已超过3年,管道内壁可能存在生锈和结垢情况,管道内径测量值存在误差。

### 3.2.3 适用性验证

基于仿真实验数据,按照3.2.1节的方法校正仿真模型的管长或内径(表3)。基于仿真实验数据的管长校正结果相对误差均小于1%,内径校正结果均小于0.2%。这是由于仿真实验不存在仪表计量误差,也不受局部阻力影响,数据准确性高,因此校正结果准确度高。

表3 基于仿真实验数据的参数校正结果

模型编号	校正管长			校正内径		
	L/m	L*/m	相对误差	D/mm	D*/mm	相对误差
1	5 000	5 047.32	0.95%	100	99.81	0.19%
2	5 000	5 047.01	0.94%	150	149.71	0.19%
3	5 000	5 046.90	0.94%	200	199.61	0.19%
4	5 000	5 046.85	0.94%	250	249.52	0.19%
5	5 000	5 046.81	0.94%	300	299.42	0.19%
6	1 000	1 009.32	0.93%	200	199.62	0.19%
7	2 000	2 018.73	0.94%	200	199.62	0.19%
8	3 000	3 028.10	0.94%	200	199.62	0.19%
9	4 000	4 037.48	0.94%	200	199.62	0.19%
10	5 000	5 046.85	0.94%	200	199.62	0.19%

对校正结果适应性验证可知:参数校正前,仿真模型的适应率为0.04%~0.53%;参数校正后,仿真模型适应率为0.01%~0.18%;无论是校正管长还是校正内径,参数校正后的仿真模型适应率均下降(图7)。

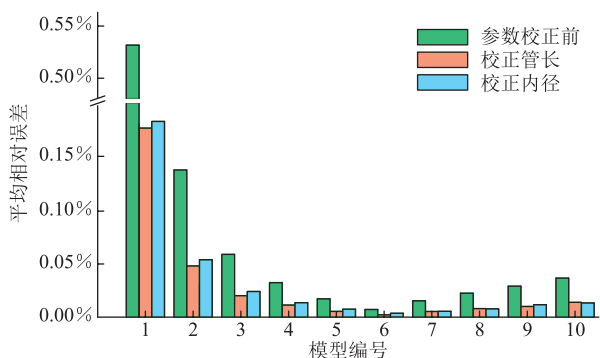


图7 仿真模型参数校正前后模型误差对比图

## 4 结论

对管道模型参数不准确性进行分析,提出一种管道模型参数校正方法以及校正结果适应性验证方法;分别基于室内实验数据和仿真实验数据对该方法的准确性、适应性及适用性进行了验证。

(1)基于26组室内试验数据,管长和内径校正值的平均相对误差在2%以内,表明校正结果具有较高的准确性。

(2)对于室内实验系统,模型的管长和内径校正后,分别有22组、25组模型精度提升,分别占比84.6%、96.1%,校正结果具有良好的适应性。

(3)对于不同规模的仿真模型,管长和内径校正值的相对误差均小于1%,管长和内径校正后,模型的适应性显著提升,表明该方法对于不同管长、不同内径、不同工况下的管道模型均适用。

(4)随着管道系统压力及流量增大,管长校正值逐渐减小,内径校正值逐渐增大,表明工况变化对参数校正结果存在影响;该研究未考虑多个参数同时存在偏差的情况,今后应在该方面予以考虑。

### 参考文献:

[1] 王寿喜,曾自强.天然气管网静态仿真[J].天然气工业,1995,15(2):59-63,111-112.  
WANG S X, ZENG Z Q. Static and dynamic simulation of natural gas pipeline network[J]. Natural Gas Industry, 1995, 15(2): 59-63, 111-112.

[2] 韩志广,宫敬.兰成渝成品油管道仿真系统的开发[J].油气储运,2003,22(2):20-23.  
HAN Z G, GONG J. The development of simulation system for Lanzhou-Chengdu-Chongqing Products Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2003, 22(2): 20-23.

[3] 唐建峰,李玉星,张建,刘建武,杜培恩.川气东送管道模拟仿真软件开发[J].天然气工业,2008,28(3):114-116.  
TANG J F, LI Y X, ZHANG J, LIU J W, DU P E. Study and development on simulation software for "Sichuan-to-East Gas Transmission" Pipeline[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 114-116.

[4] GREYVENSTEIN G P. An implicit method for the analysis of transient flows in pipe networks[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002, 53(5): 1127-1143.

[5] 王庆.中短距离地下管道长度测量方法的研究[J].化工管理,2014(11):105-106.  
WANG Q. Research on measurement method of middle and short distance underground pipe length[J]. Chemical Enterprise Management, 2014(11): 105-106.

- [6] 杨晓鸿,朱薇玲. 粗糙度对输气管道摩阻系数的影响[J]. 石油化工设备, 2005, 34(1): 25-28.  
 YANG X H, ZHU W L. The influence of inner surface roughness on the friction factor of gas transmission pipeline[J]. Petro-Chemical Equipment, 2005, 34(1): 25-28.
- [7] 李青青,董平省,陆美彤,王洪,高磊. 天然气管道工程设计中输气效率系数的取值[J]. 油气储运, 2015, 34(8): 863-868.  
 LI Q Q, DONG P S, LU M T, WANG H, GAO L. Gas transmission efficiency coefficient value in pipeline engineering design[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(8): 863-868.
- [8] MODISETTE J P. Automatic tuning of pipeline models[C]. Palm Springs: Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting, 2004: PSIG-0406.
- [9] ABDOLAHI F, MESBAH A, BOOZARJOMEHRY R B, WILLIAM Y S. The effect of major parameters on simulation results of gas pipelines[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49(8): 989-1000.
- [10] STRELNIKOVA S, YUSHCHENKO T. Adaptation of fluid motion mathematical model in pipelines using drag reducing agents[C]. London: Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting, 2019: PSIG-1906.
- [11] 赵昆鹏. 管道实时在线自适应仿真技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015: 96-129.  
 ZHAO K P. The research of the pipeline self-adaptive online simulation technology[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015: 96-129.
- [12] 李长俊. 天然气管道输送[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 61-62.  
 LI C J. Natural gas pipeline transportation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 61-62.
- [13] WANG Y, WEI N, WAN D, WANG S X, YUAN Z M. Numerical simulation for preheating new submarine hot oil pipelines[J]. Energies, 2019, 12(18): 3518.
- [14] 蒋华义. 输油管道设计与管理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 80-81.  
 JIANG H Y. Oil pipeline design and management[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 80-81.
- [15] 蒋华义,李薇,林森,郑思佳. 流型、流态变化对含蜡热油管道设计计算的影响[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2010, 25(3): 46-48.  
 JIANG H Y, LI W, LIN S, ZHENG S J. Influence of the variation of the flow pattern and the flow state of the waxy hot oil by pipeline transportation on the design calculation of pipeline transportation[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2010, 25(3): 46-48.
- [16] 陈小榆. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015: 146-149.  
 CHEN X Y. Engineering fluid mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015: 146-149.
- [17] 王静波. 管道当量直径的计算[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2005, 25(3): 69-70, 75.  
 WANG J B. Calculation of the equivalent diameter in the pipeline[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2005, 25(3): 69-70, 75.
- [18] 钟功祥,石强,赵乾坤. 含CO<sub>2</sub>油气管道内腐蚀模拟及剩余寿命预测[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 106-112.  
 ZHONG G X, SHI Q, ZHAO Q K. Corrosion simulation inside oil-gas pipelines containing CO<sub>2</sub> and prediction of residual life[J]. Surface Technology, 2016, 45(11): 106-112.
- [19] QUAN Q, WANG W, WANG P Y, YANG J H, GAO G, YANG L, et al. Effect of oil temperature on the wax deposition of crude oil with composition analysis[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2016, 33(4): 1055-1061.
- [20] 张永良,高进胜,纪建英,励争取. 油品温度密度曲线在油流量计量中的应用[J]. 计量技术, 2017(6): 31-33.  
 ZHANG Y L, GAO J S, JI J Y, LI Z Q. Application of oil temperature density curve in oil flow metering[J]. Measurement Technique, 2017(6): 31-33.
- [21] 肖林波,肖荣鸽,陈俊志. 原油粘温曲线特性研究[J]. 辽宁化工, 2015, 44(8): 930-932.  
 XIAO L B, XIAO R G, CHEN J Z. Research on characteristics of crude oil viscosity-temperature curve[J]. Liaoning Chemical Industry, 2015, 44(8): 930-932.
- [22] 姜永明,吴明,谢飞,洪海燕,王军,刘勇峰,等. 盘锦线原油粘温特性及流变特性实验研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2011, 31(2): 24-26.  
 JIANG Y M, WU M, XIE F, HONG H Y, WANG J, LIU Y F, et al. Experimental on viscosity-temperature characteristics and rheological properties for crude oil of Panjin pipeline[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2011, 31(2): 24-26.

[23] 周传辉,翁维安. 流体阻力系数的计算方法[J]. 制冷与空调, 2004, 18(3):35-36.  
 ZHOU C H, WENG W A. Calculational methods about the friction factor of fluid[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2004, 18(3):35-36.

[24] 薛洪波, 伦淑娴. 粒子群算法在多目标优化中的应用综述[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2009, 30(3):265-269.  
 XUE H B, LUN S X. A review on appliacion of PSO in multi-objective optimization[J]. Journal of Bohai University(Natural Science Edition), 2009, 30(3):265-269.

[25] 王寿喜, 郭简, 张廷廷, 梅永贵, 王佳. 樊北煤层气集输管网动态仿真调度系统[J]. 油气储运, 2017, 36(1):68-74, 84.

WANG S X, GUO J, ZHANG T T, MEI Y G, WANG J. Dynamic simulation dispatching system for the CBM gathering pipeline network in northern Fanzhuang[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1):68-74, 84.

(收稿日期:2019-10-13; 修回日期:2020-09-24; 编辑: 刘朝阳)

**基金项目:** 陕西省科技统筹创新工程项目“基于在线仿真的油气管网压力分布相关性分析泄漏检测技术研究”, 2016KTZDGY07-05.

**作者简介:** 华东阳, 男, 1996 年生, 在读硕士生, 2014 年毕业于西安石油大学油气储运工程专业, 现主要从事管网仿真、泄漏检测相关研究。地址: 陕西省西安市雁塔区电子二路东段 18 号, 710065。电话: 18402920043。Email: 624470780@qq.com

## 欢迎订阅 2021 年《油气储运》

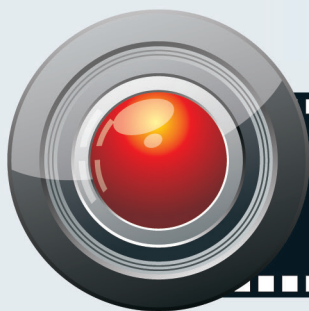
- ◆《油气储运》杂志创刊于 1977 年, 主要刊载石油、天然气、成品油以及其他介质输送与储存相关技术的科技文章, 传递国内外油气储运技术领域的新理论、新技术、新工艺和新动态, 其内容新、实用性强, 深受广大读者喜爱。
- ◆《油气储运》杂志为 A4 开本, 120 页, 全彩印刷, 每月 25 日出刊。国内每期定价 50 元, 全年 600 元; 国外每期定价 50 美元, 全年 600 美元。面向国内外公开发售, 全国各地邮局均可订购, 邮发代号: 18-89。

- ★ 中文核心期刊
- ★ RCCSE 中国核心学术期刊(A)
- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 全国石油和化工行业百强期刊
- ★ 中国期刊全文数据库收录期刊
- ★ 中国石油文献数据库收录期刊
- ★ 美国《化学文摘》(CA) 收录期刊
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊
- ★ 日本科学技术振兴机构数据库 (JST) 收录期刊

广告版心尺寸表

广告类型	版心尺寸/毫米
封二、邻封二、封三、封底	210×297
彩色插页	210×297

主要栏目: 前沿与综述    数字化与智能化    检测与完整性  
 工艺与工程    运行与管理



构筑科研平台  
 搭建合作桥梁