

引文: 王军防, 宇波, 李亚平, 等. 国产化液体管道云仿真软件 CloudLPS 的应用[J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1419-1434.

WANG Junfang, YU Bo, LI Yaping, et al. Application of domestic cloud simulation software CloudLPS for liquid pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1419-1434.

国产化液体管道云仿真软件 CloudLPS 的应用

王军防¹ 宇波² 李亚平³ 曹旦夫¹ 余红梅¹ 龚军华⁴ 袁庆⁵ 陈宇杰² 向月⁶

1. 国家管网集团东部原油储运有限公司; 2. 北京石油化工学院机械工程学院; 3. 国家管网集团科学技术研究总院分公司;
4. 西安交通大学能源与动力工程学院; 5. 西安交通大学化学工程与技术学院; 6. 清华四川能源互联网研究院

摘要: 国产化液体管道云仿真软件 CloudLPS (Cloud-based Liquid Pipeline Simulator) 是一款具备自主知识产权的液体管道通用仿真软件, 在此介绍其应用。首先通过一个案例, 介绍了从管网模型搭建、仿真计算到结果查看的操作流程; 然后采用 CloudLPS 软件对稳态输送、瞬态水击、冷热油交替输送等多种不同工况进行计算, 并将计算结果与国外商业软件 SPS、TLNET 进行对比, 发现 CloudLPS 的水力和热力仿真精度与 SPS、TLNET 相当; 随后将 CloudLPS 应用于常温输送、加热输送、冷热油交替输送等实际管道问题, 并与现场数据进行了对比, 发现 CloudLPS 能满足实际工程计算的需求; 最后展示了软件可视化控制逻辑搭建与能耗优化两大特色功能。结果表明: CloudLPS 具有强大的水热力仿真、逻辑控制以及能耗优化能力。(图 22, 表 8, 参 35)

关键词: 液体管道; 仿真软件; 国产化; 应用实践

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)12-1419-16

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.012

Application of domestic cloud simulation software CloudLPS for liquid pipelines

WANG Junfang¹, YU Bo², LI Yaping³, CAO Danfu¹, YU Hongmei¹, GONG Junhua⁴, YUAN Qing⁵, CHEN Yujie², XIANG Yue⁶

1. PipeChina Eastern Oil Storage and Transportation Co. Ltd.; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology; 3. PipeChina Institute of Science and Technology; 4. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University;

5. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University;

6. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University

Abstract: The Cloud-based Liquid Pipeline Simulator (CloudLPS) is a universal liquid pipeline simulation software with completely independent intellectual property rights in China. Herein, its applications are introduced. Its operation processes from pipeline network modeling and simulation calculation to result viewing are elaborated based on a specific case. Then, calculations are performed with CloudLPS for various operating conditions, including steady-state transportation, transient water hammer, and alternating transportation of cold and hot oil, after which the results are compared with those obtained from the foreign commercial software SPS and TLNET, making the discovery that the CloudLPS has comparable accuracy in terms of hydrodynamic and thermal simulations. Subsequently, CloudLPS is applied to solve practical pipeline problems such as normal-temperature transportation, heated transportation, and alternating transportation of cold and hot oil. By comparing the results of these practical applications with the field data, it is proven that the CloudLPS can meet the requirements of the actual engineering calculations. Finally, the two special features of CloudLPS, including visual control logic construction and energy consumption optimization, are presented. The results of this paper indicate that CloudLPS is of great competence in hydrodynamic and thermal simulations, logic control, and energy consumption optimization. (22 Figures, 8 Tables, 35 References)

Key words: liquid pipeline, simulation software, domestication, application practice

中国的原油与成品油管道数值仿真长期依赖于 SPS、TLNET、VariSim 等国外商业软件, 为有效应对

使用国外软件所带来的软件升级困难、数据泄漏风险、技术封锁限制等问题, 国家管网集团联合北京石油化

工学院等单位研发了一款具备自主知识产权的国产化液体管道云仿真软件 CloudLPS (Cloud-based Liquid Pipeline Simulator)^[1]。CloudLPS 是一款液体管道通用仿真软件,可提供友好的可视化建模,支持稳态输送^[2]、非稳态输送^[3]、逻辑控制输送^[4]、热油预热投产^[5]、瞬态水击^[6]、混油发展^[7]、停输再启动^[8]等多种仿真工况,适用于油品常温输送^[9]、热输^[10]、混输^[11]、批次输送^[12]、间歇输送^[13-14]、正反输送^[15-16]以及冷热交替输送^[17-19]等多种管输工艺的仿真。CloudLPS 不仅能满足中国输油管道系统多场景的仿真需求,而且以强大的仿真引擎为驱动实现了液体管道能耗优化功能,可满足输油管道节能降耗需求^[20-22]。CloudLPS 的软件框架、模型算法及软件功能在文献[1]中进行了

详细介绍,在此主要介绍 CloudLPS 的应用,重点介绍 CloudLPS 对输油管道运行过程中一些典型场景的仿真和优化。下面将从软件操作流程、案例验证及特色功能 3 方面来介绍 CloudLPS 的应用。

1 软件操作流程

从软件仿真计算和前后端两个角度介绍 CloudLPS 的功能结构(图 1):在仿真计算(即模型算法)方面,CloudLPS 提供了 26 种元件模型,支持 10 余种仿真工况以及各工况的复合仿真;在软件前后端方面,CloudLPS 主要提供了算例管理、拓扑建模、结果显示及帮助文档 4 大功能模块。

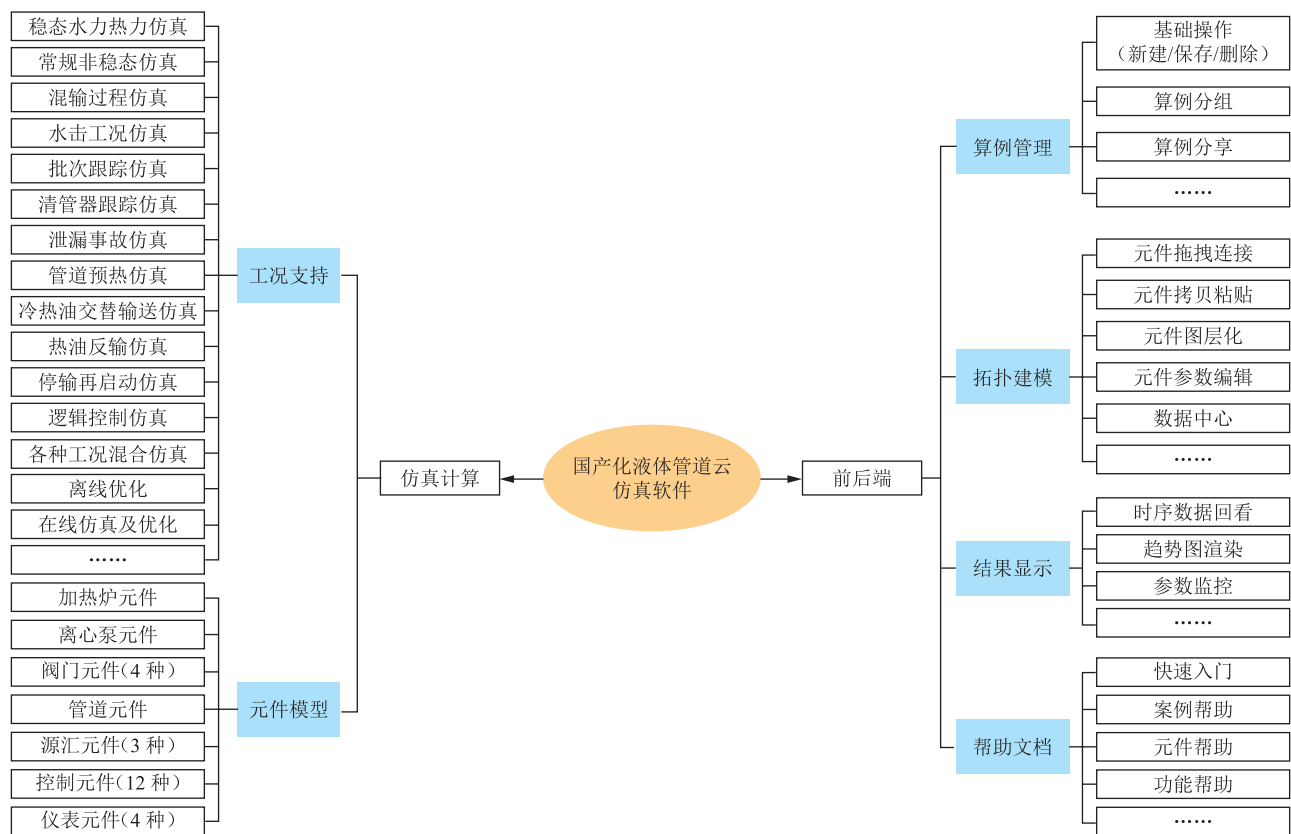


图 1 CloudLPS 主要功能示意图
Fig. 1 Sketch map of the main functions in CloudLPS

用户在使用 CloudLPS 软件时,通常需要通过用户中心登录、管网拓扑建模、仿真参数输入、控制逻辑搭建、仿真计算以及仿真结果查看共 6 个步骤完成算例的搭建和计算。在此通过一个简单仿真算例对软件的使用流程进行具体说明。

1.1 用户中心登录

在浏览器中输入 CloudLPS 软件网址后,通过软件用户账号和密码可进入用户中心界面,该页面提供

了离线/在线仿真模块、仿真算例空间、个人信息设置及帮助文档系统的导航入口。

在该案例中,通过 CloudLPS 用户中心界面的“离线仿真模块”导航按钮可直接进入离线仿真建模工作台(图 2)。整个工作台主要由菜单栏、工具栏、元件列表、工作空间、系统状态栏以及仿真参数栏组成,用户可以在此环境下构建管网仿真模型、执行仿真计算、查看仿真结果。

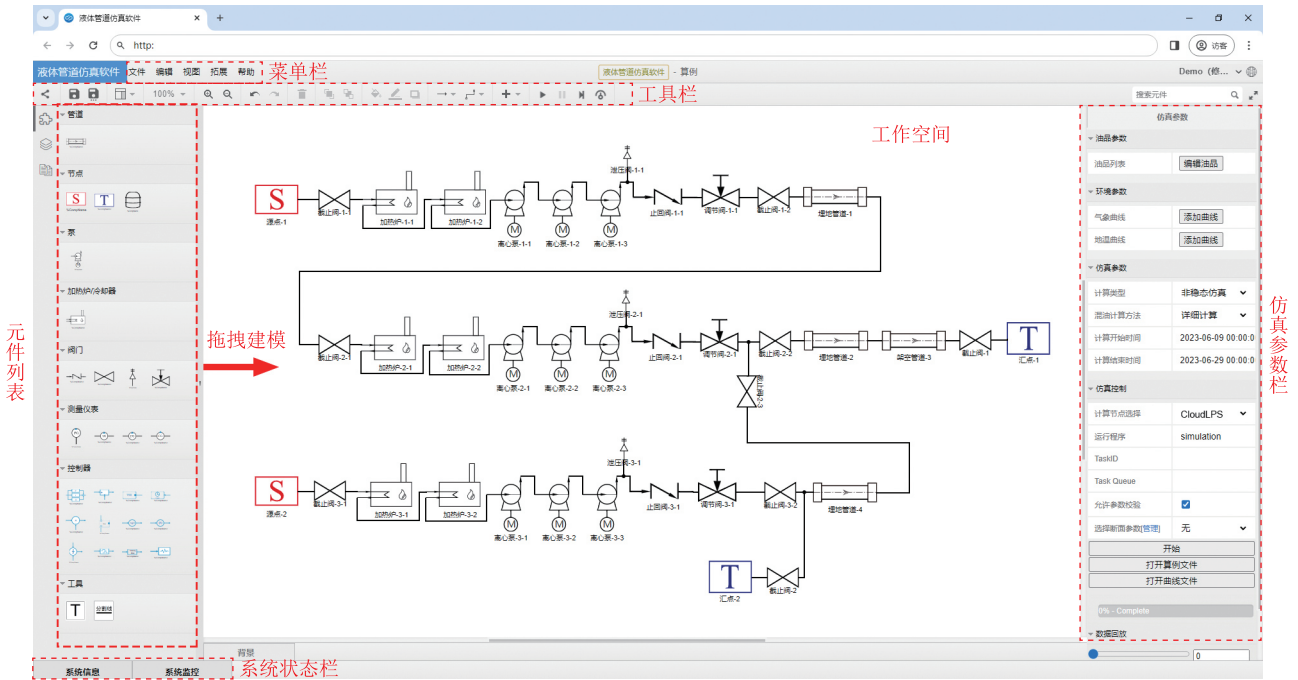


图 2 CloudLPS 仿真算例拓扑结构图
Fig. 2 Topology structure of a simulation example in CloudLPS

1.2 管网拓扑建模

CloudLPS 提供了图形化的建模环境,用户可以从工作台左侧的元件列表拖拽目标元件放置到工作空间合适位置,然后从目标元件的端口引出连接线与其他元件端口相连,从而实现管网拓扑建模(图 2)。

1.3 仿真参数输入

CloudLPS 仿真基础参数分为全局参数和元件参数两类:全局参数包括流体物性参数、全局地温参数、全局气温参数等;元件参数包括管道参数、泵参数、源汇点参数等,上述参数均可在仿真参数栏中输入。以地温参数输入为例(图 3),用户可以手动编辑输入数据,也可从数据中心或本地文件导入。参数输入完成后,用户可将数据保存至数据中心或本地,便于重复使用。

时间点	地温(°C)
2023-06-09 00:00:00	17.9
2023-06-10 00:00:01	18.1
2023-06-11 00:00:00	18.3
2023-06-12 00:00:00	18.5
2023-06-13 00:00:00	18.7
2023-06-14 00:00:00	18.9
2023-06-15 00:00:00	19.1
2023-06-16 00:00:00	19.3
2023-06-18 00:00:00	19.5
2023-06-19 00:00:00	19.7

图 3 CloudLPS 仿真地温参数设置图
Fig. 3 Ground temperature setting in CloudLPS

1.4 控制逻辑搭建

CloudLPS 在拓扑建模环境的基础上,允许用户通过组合不同的基础控制元件来实现特定控制逻辑的可视化建模。以一个简单的出站压力控制场景为

例(图 4),需要通过调节阀开度控制热泵站出站压力,使压力稳定在设定值附近。在 CloudLPS 工作空间通过连接 PID 控制器、减法器与常量输入元件实现了上述控制过程:①与减法器相连的压力表监测热泵站出站压力,其压力信号输入至减法器,同时减法器还接收

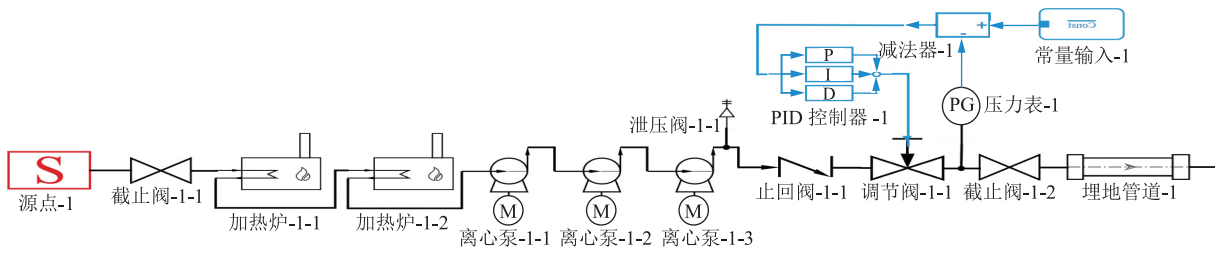


图 4 出站压力逻辑控制图
Fig. 4 Sketch map of the logic control for the outlet pressure

常量输入元件的压力设定值;②减法器将输入的两个信号进行减法运算,之后将处理好的偏差信号输出至PID控制器;③PID控制器将输入的偏差信号按比例、积分、微分线性组合运算后输出控制信号;④根据PID控制器输出信号调节阀开度,此时热泵站出站压力随阀门的调节而变化;⑤热泵站出站处的压力表将监测所得压力值再次输出至减法器,形成反馈调节回路。

在上述反馈调节中,若热泵站出站压力大于设定值,上述控制逻辑通过减小调节阀开度来增大过阀压降,使得出站压力逐渐降低至设定值;相反,若出站压力小于设定值,上述控制逻辑通过增大调节阀开度来减小过阀压降,使得出站压力逐渐增至设定值。经过上述控制过程的多次反馈调节,热泵站出站压力可维持在设定值。

当控制逻辑过于复杂时,在管网拓扑图上直接连接控制逻辑图会使得整个工作空间特别繁杂,此时可利用同名引脚功能实现控制逻辑图与管网拓扑图

的分离,使工作空间更为简洁清晰。

1.5 仿真计算

完成管网拓扑建模、仿真参数输入以及控制逻辑搭建后,用户便可通过点击仿真参数栏中的“开始”或工具栏中的“▶”按钮启动仿真计算。在仿真过程中,通过点击工具栏中的“暂停”、“继续”、“下一步”、“结束”等按钮可实现对仿真运行过程的控制,系统信息窗会显示仿真状态。

1.6 仿真结果查看

在仿真过程中或者仿真结束后,用户可点击管网中任意元件,通过系统监控窗口查看元件仿真结果,图5底部窗口显示的是当前选中管道元件的沿线压力分布图。此外,通过在绘图区中添加数据监控浮窗可以查看不同元件的即时仿真结果,从而实现系统状态的全景展示,图5中蓝色数据监控浮窗显示埋地管道-1此刻的出口流量、压力及温度。

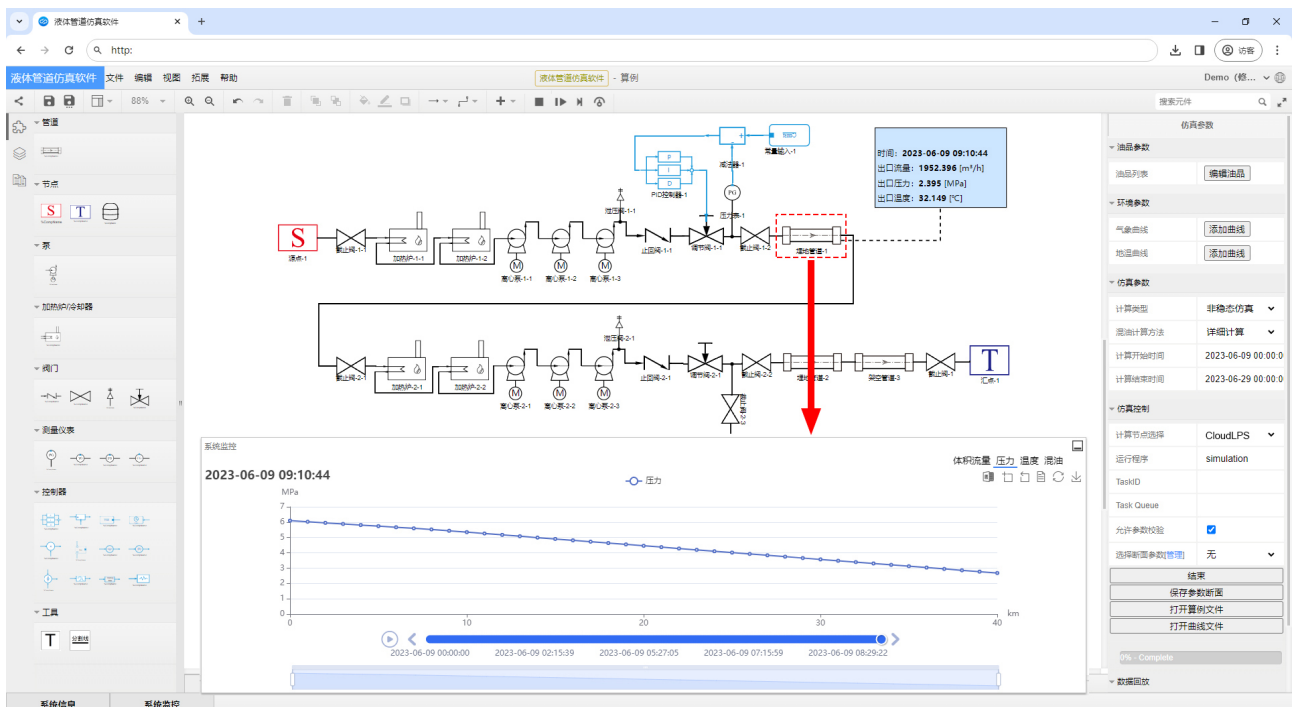


图5 仿真过程中埋地管道-1内沿线参数变化的监控显示图
Fig. 5 A profile of parameter along the buried pipeline-1 during the simulation

除以上两种仿真结果查看方式之外,CloudLPS还具有强大的Dashboard显示功能。其可以根据用户多样化的查看需求,自定义仿真结果显示方式,不但能够同时查看某一元件的流量、压力、温度等运行参数的变化情况,还可以同时查看不同元件的运行参数变化情况,并且还能够将不同元件的仿真结果进行拼合,便于用户进行整体查看和分析(图6)。

2 CloudLPS 案例验证

为了验证CloudLPS仿真结果的准确性与可靠性,采用CloudLPS分别对常温管道稳态输送、热输管道稳态输送、常温管道瞬态水击、冷热油交替输送等多种工况进行计算,将结果与国外商业软件SPS、TLNET进行对比;随后将CloudLPS应用于常温输

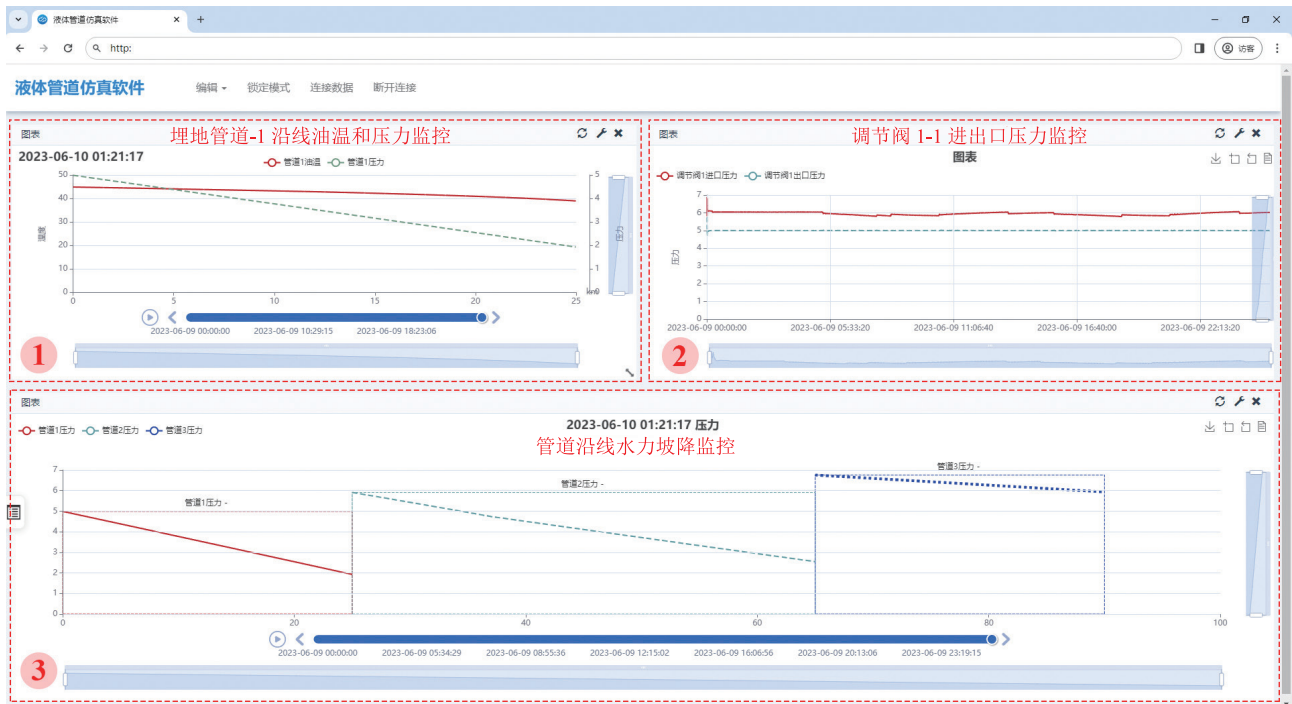


图 6 Dashboard 结果展示图
Fig. 6 Result presentation on the Dashboard

送、加热输送、冷热油交替输送等实际管道的仿真,并将仿真结果与现场实际数据进行对比。

2.1 与商业软件对比

2.1.1 常温管道稳态输送

常温管道中输送的流体多为牛顿流体,但也有可能为非牛顿流体,在此将 3 款软件分别对管道输送两种性质流体的计算结果进行对比。

管道输送牛顿流体算例的仿真基础参数为:①管道长 70 km,管道规格为 515.2 mm×7.6 mm,埋深 1 m。②输送介质的密度、比热容、黏度分别为 900 kg/m³、2.2 kJ/(kg·°C)、0.02 Pa·s。③考虑两种边界条件情况,管道上下游均采用压力边界,分别为 3 MPa、0.25 MPa;管道上游采用流量边界,为 900 m³/h,管道下游采用压力边界,为 0.25 MPa。

基于上述仿真基础参数,采用 TLNET、SPS、CloudLPS 分别进行仿真计算,得到稳态流量、压降(表 1、表 2)。CloudLPS 与 TLNET、SPS 仿真得到

表 1 管道上下游均采用压力边界时 TLNET、SPS 与 CloudLPS 仿真结果对比表
Table 1 Comparison of simulation results among TLNET, SPS, and CloudLPS with pressure boundaries applied upstream and downstream of pipeline

软件	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	相对偏差
TLNET	955.1	0.08%
SPS	956.1	0.19%
CloudLPS	954.3	—

表 2 管道上游采用流量边界、下游采用压力边界时 TLNET、SPS 与 CloudLPS 仿真结果对比表

Table 2 Comparison of simulation results among TLNET, SPS, and CloudLPS with flowrate boundary applied upstream and pressure boundary applied downstream of pipeline

软件	压降/MPa	相对偏差
TLNET	2.471	-0.72%
SPS	2.478	-0.44%
CloudLPS	2.489	

的稳态流量与稳态压降相对偏差均在 1% 以内,表明 CloudLPS 稳态水力仿真精度与其他两款软件相当。

管道输送非牛顿流体算例的仿真基础参数为:①管道长 50 km,管道规格为 420 mm×10 mm,埋深 1.5 m;②输送介质的密度、比热容分别为 808.9 kg/m³、2.2 kJ/(kg·°C),在某一温度下黏度与剪切率的关系如下(表 3);③管道上下游分别采用流量与压力边界,数值分别为 346.76 m³/h、0.5 MPa。

表 3 输送介质在不同剪切率下的黏度表
Table 3 Viscosity of a transport medium at different shear rates

剪切率/(s ⁻¹)	黏度/(Pa·s)	剪切率/(s ⁻¹)	黏度/(Pa·s)
5	0.314 1	20	0.191 5
10	0.245 3	25	0.176 8
15	0.212 2	30	0.165 7

基于上述仿真基础参数,采用 TLNET、SPS、CloudLPS 分别进行仿真计算,可得到稳态压降分别为 1.902 MPa、1.624 MPa、1.756 MPa。此外,根据

GB 50253—2014《输油管道工程设计规范》推荐的幂律流体摩阻计算公式^[25]同样可得到管道稳态压降为1.755 MPa。将3款软件的仿真结果与幂律流体摩阻计算公式的计算结果进行对比(表4),可见 TLNET、SPS、CloudLPS 的仿真结果与规范推荐公式获得的压降之间相对偏差分别为 8.38%、-7.46%、0.06%,这表明 CloudLPS 仿真结果更符合 GB 50253—2014。

表4 3款软件仿真结果与规范公式计算结果对比表
Table 4 Comparison of the simulation results from three types of software and calculation results of standard formula

计算方式	压降/MPa	相对偏差
TLNET	1.902	8.38%
SPS	1.624	-7.46%
CloudLPS	1.756	0.06%
规范推荐公式	1.755	—

2.1.2 热输管道稳态输送

本算例的仿真基础参数为:①管道长 70 km,管道规格为 515.2 mm×7.6 mm,埋深 1 m。②钢管层厚度为 7.6 mm,导热系数为 48 W/(m·°C);防腐层厚度为 2 mm,导热系数为 0.15 W/(m·°C);保温层厚度为 20 mm,导热系数为 0.04 W/(m·°C)。③土壤导热系数为 1.5 W/(m·°C),1 m 埋深处温度为 5 °C。④输送介质的密度为 900 kg/m³,比热容为 2.2 kJ/(kg·°C),黏度 μ 与油温 t 之间满足关系式 $\mu=0.02 \exp[-0.027(t-20)]$ 。⑤管道上游采用压力边界,为 5 MPa;管道下游采用两种流量边界,分别为 600 m³/h、1 200 m³/h。

基于上述仿真基础参数,采用 TLNET、SPS、CloudLPS 分别进行仿真计算,可得到稳态温降。此外,结合福尔赫盖伊麦尔公式的列宾宗温降公式^[26-27]被广泛应用于热输管道温降计算,在行业内深受认可。因此将3款软件仿真结果与列宾宗温降公式计算结果进行对比(表5、表6)。在两种管输流量下,CloudLPS、TLNET、SPS 与列宾宗温降公式获得温降之间的相对

表5 600 m³/h 边界条件下3款软件仿真结果与列宾宗温降公式计算结果对比表

Table 5 Comparison of simulation results from the three software programs and calculation results from Leapienzon's temperature drop formula with 600 m³/h boundary condition

计算方式	温降/°C	相对偏差
TLNET	11.30	-0.88%
SPS	11.14	-2.28%
CloudLPS	11.43	0.26%
列宾宗温降公式	11.40	—

表6 1 200 m³/h 边界条件下3款软件仿真结果与列宾宗温降公式计算结果对比表

Table 6 Comparison of simulation results from the three types of software and calculation results from Leapienzon's temperature drop formula with 1 200 m³/h boundary condition

计算方式	温降/°C	相对偏差
TLNET	4.800	-1.84%
SPS	4.900	0.20%
CloudLPS	4.895	0.10%
列宾宗温降公式	4.890	—

偏差均小于 3%,其中,CloudLPS 表现出最小的温降相对偏差,仅为 0.26%、0.10%,这说明 CloudLPS 具有较高的稳态热力仿真精度。

2.1.3 常温管道瞬态水击

本算例的仿真基础参数为:①管道共有 2 条管段,其长度分别为 80 km、70 km,规格均为 520 mm×10 mm,埋深 1.5 m;②输送介质的密度、比热容、黏度分别为 900 kg/m³、2.2 kJ/(kg·°C)、0.045 Pa·s;③管道上下游均采用压力边界,分别为 5 MPa、1 MPa;④ 2 条管段之间设有 1 个调节阀,该调节阀在短时间内由全开变为全关状态以产生水击^[28]。

基于上述仿真基础参数,采用 TLNET、SPS、CloudLPS 分别进行水击工况仿真计算,得到调节阀上下游压力随时间的变化情况(图7,其中负号表示调节阀上游压力,正号表示调节阀下游压力)。3款软件的压力变化曲线相互吻合良好,调节阀上下游压力出现波峰、波谷的时间及相应的压力基本相同,这说明 CloudLPS 非稳态水力仿真精度与其他两款软件相当。

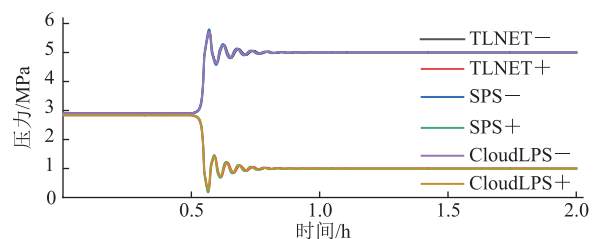


图7 管道发生水击后阀门上下游压力随时间变化曲线
Fig. 7 Time evolution of pressure upstream and downstream of the valve after water hammer in the pipeline

2.1.4 冷热油交替输送

本算例的仿真基础参数为:①管道长 30 km,管道规格为 664 mm×7 mm,埋深 1.5 m。②钢管层厚 7 mm,密度为 7 850 kg/m³,导热系数为 48 W/(m·°C),比热容为 480 J/(kg·°C);防腐层厚度为 7 mm,密度为 1 100 kg/m³,导热系数为 0.15 W/(m·°C),比热容为 1 670 J/(kg·°C)。③土壤密度为 1 700 kg/m³,导热

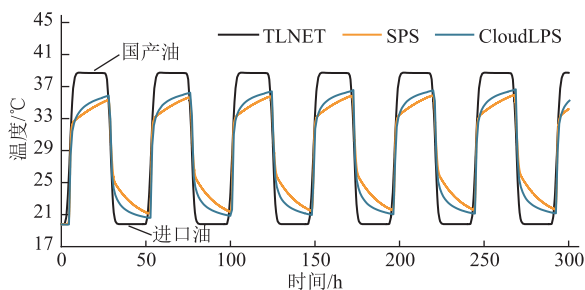
系数为 $1.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$, 比热容为 $1010 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{C})$, 1.5 m 埋深处温度为 11.7 C 。④管道交替输送进口油与国产油, 两种油品来油温度分别为 20 C 、 40 C , 每个油品批次输送时间有 24 h 、 72 h 两种情况。⑤进口油与国产油的密度 ρ_1 、 ρ_2 与温度 t 分别满足关系式 $\rho_1=872.6-(1.825-1.315\times 10^{-3}\times 872.6)(t-20)$ 、 $\rho_2=931.7-(1.825-1.315\times 10^{-3}\times 931.7)(t-20)$, 两种油品的比热容分别为 $2.1 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{C})$ 、 $2.2 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{C})$, 黏温关系如下(表 7)。⑥管道上下游分别采用流量、压力边界, 分别为 $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 0.8 MPa 。

表 7 两种油品在不同温度下的黏度统计表
Table 7 Viscosity of two kind of oil at different temperatures

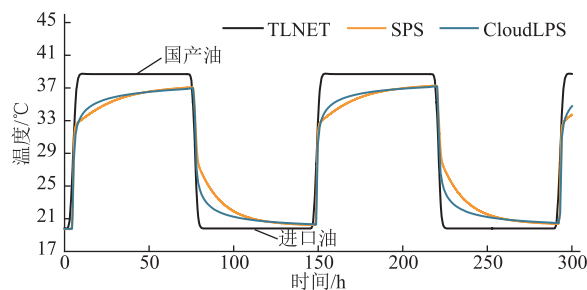
油品	不同温度下的黏度/(Pa·s)					
	15 C	20 C	25 C	30 C	35 C	40 C
进口油	0.034 5	0.026 6	0.020 2	0.015 6	0.013 4	0.011 5
国产油	3.740 9	1.722 4	0.943 8	0.577 3	0.381 0	0.265 8

基于上述仿真基础参数, 采用 TLNET、SPS、CloudLPS 分别进行冷热油交替输送仿真计算, 可得到两种批次输送时间下管道末端油温随时间的变化情况(图 8)。可见, 在批次输送时间较短时, 由 3 款软件

仿真获得的管道末端油温存在较为明显的差距; 当每种油品批次输送时间从 24 h 变为 72 h 时, 3 款软件得到的油温差距缩小, 其中 CloudLPS 与 SPS 计算所得的油温逐渐趋于一致。就此 3 款软件的热力仿真而言, TLNET 几乎未考虑土壤的蓄放热效应, 管道末端的油温主要由土壤热阻决定, 在单一热阻影响下, 管道末端处进口油与国产油的温度几乎不随时间发生变化; SPS 根据热阻相等的原则将管道周围的土壤等效为一个包裹在管道外侧的圆筒, 通过具有轴对称特点的圆筒导热来简化土壤传热, 一定程度上可通过圆筒非稳态传热考虑土壤的蓄放热效应, 但该方法实际上仅能等效热阻大小, 并不能等效管道埋地敷设条件下土壤蓄放热过程, 在土壤热阻与土壤蓄放热效应双重影响下, 管道末端处进口油与国产油的温度会随时间发生变化, 但土壤蓄放热过程并不真实, 因此并不能保证油温变化趋势完全合理; CloudLPS 考虑了管道真实埋地敷设条件, 引入管道热力影响区的概念将土壤半无穷大区域简化为一个有限的矩形区域^[29-31], 通过管道真实敷设条件下矩形区域内土壤非稳态传热考虑土壤的蓄放热效应, 该方法更符合实际, 土壤蓄放热效应能够更为真实地影响油温变化趋势。



(a) 每种油品批次输送时间为 24 h



(b) 每种油品批次输送时间为 72 h

图 8 不同输送周期下管道末端油温随时间的变化图

Fig. 8 Time evolution of temperature at the outlet of the pipeline in different transportation cycles

由于 3 款软件考虑的土壤热阻大小几乎相等(前面 3 款软件稳态热力仿真对比已证实了这一点), 可以预期, 随着每种油品批次输送时间的进一步增加, 由 3 款软件获得的油温将最终趋于一致。这是由于随着批次输送时间延长, 管道输送过程逐渐由非稳态趋向于稳态, 在接近于稳态时管道与土壤之间的传热过程由土壤热阻主导, 土壤的蓄放热效应不明显, 几乎不再对土壤传热过程产生影响, 进而不再影响管内油温变化。

2.2 与现场数据对比

2.2.1 多级分支常温输送

某掺混原油常温输送多级分支管道全长 881 km ,

包括一条主干道、两条分支管道, 沿线共设有 10 座输油站, 包含首站 1 座、中间分输站 2 座、主干道末站 1 座、分支管道末站 2 座、一般泵站 4 座(图 9)。

基于该常温输送管道仿真基础参数, 采用 CloudLPS 进行稳态仿真计算, 可得到该管道各季度的总压降仿真结果, 并将其与管道实际压降数据进行对比(图 10), 可见每个季度下 CloudLPS 获得的压降仿真结果与管道实际压降数据之间的相对偏差均在 $\pm 6\%$ 以内, 可满足实际工程计算的精度要求。这从现场数据验证角度说明了 CloudLPS 具有较高的稳态水力仿真精度。

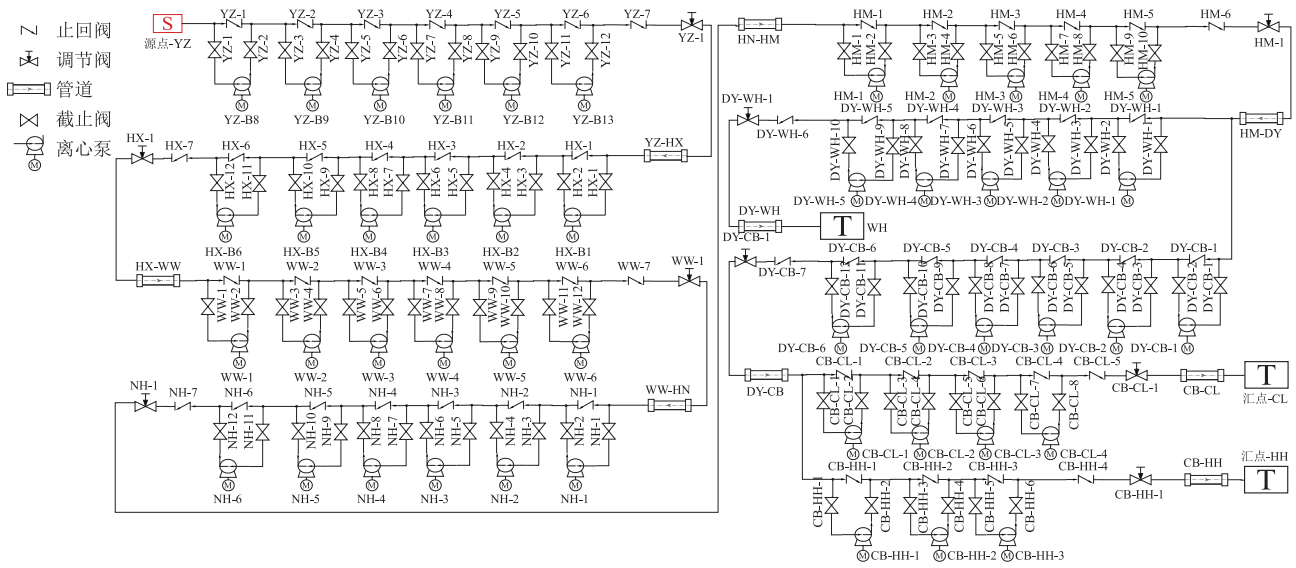


图9 某多级分支常温输送管道仿真案例拓扑结构图

Fig. 9 Topology structure of a normal-temperature transportation pipeline with multistage branches

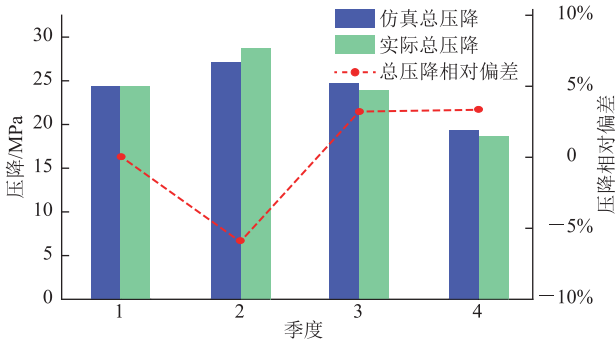


图10 某多级分支常温输送管道压降仿真结果与现场数据对比图

Fig. 10 Comparison of simulation results and field data of pressure drop in a normal-temperature transportation pipeline with multistage branches

2.2.2 加热输送

某重质国产原油加热输送管道全长 154.4 km, 中间设有两个注入点, 沿线共设有 5 座输油站, 包含泵站 2 座、泵站 2 座、末站 1 座(图 11)。

基于该加热输送管道仿真基础参数, 采用 CloudLPS 进行稳态仿真计算, 可得到该管道 4 个季度的平均温降和压降仿真结果, 将其与管道实际数据进行对比(图 12), 可见每个季度下 CloudLPS 获得的平均温降仿真结果与管道实际平均温降数据之间的偏差均在 $\pm 1.5\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ km}$ 以内, 获得的压降仿真结果与管道实际压降数据之间的相对偏差均在 $\pm 10\%$ 以内。

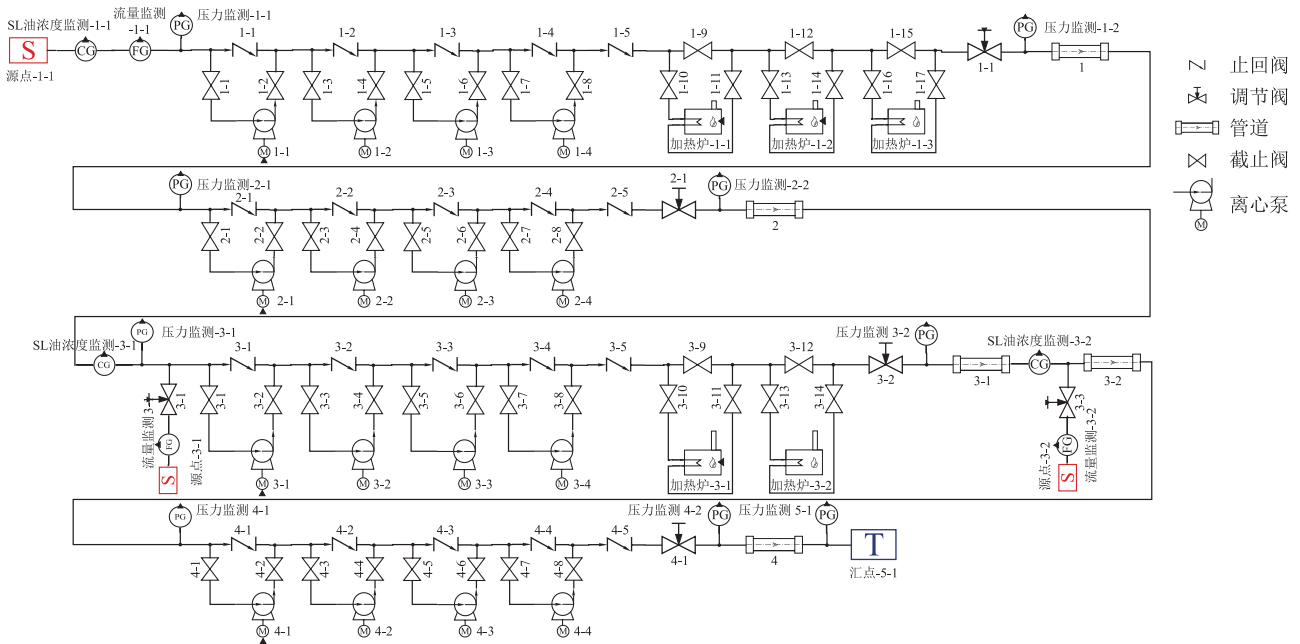


图11 某加热输送管道仿真案例拓扑结构图

Fig. 11 Topology structure of a heated transportation pipeline

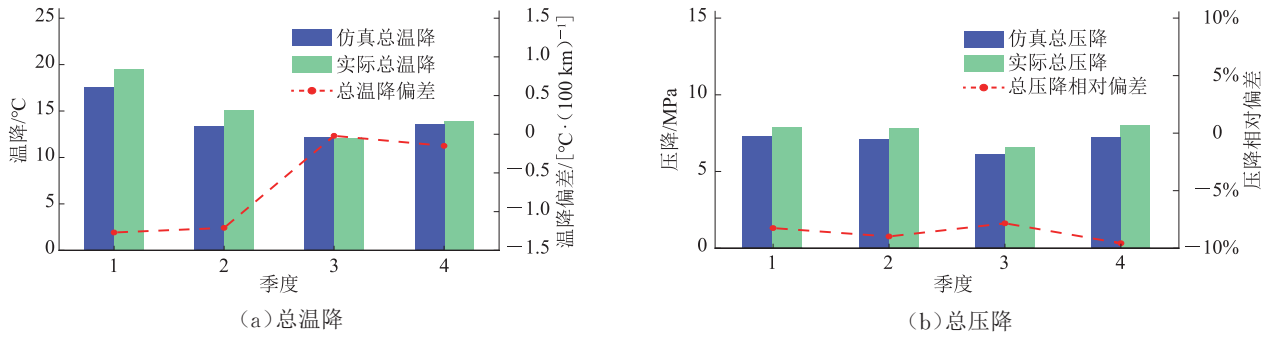


图 12 某加热输送管道仿真结果与现场数据对比图
 Fig. 12 Comparison of the simulation results and the field data of a heated transportation pipeline

这从现场数据验证角度较好地说明了 CloudLPS 具有较高的稳态热力与水力仿真精度。

2.2.3 冷热油交替输送

某两条并行敷设的原油管道,一条管道常温输送轻质进口原油,另一条管道加热输送重质国产原油。由于第 1 条管道老化,轻质进口原油转入第 2 条管道与重质原油进行冷热交替输送^[32]。2.2.2 节介绍的加热输送管道即为这里提及的第 2 条管道,后期的输送工艺由加热输送转变为冷热油交替输送,其拓扑图可参见图 11。

基于图 11 管道仿真基础参数,采用 CloudLPS 进行非稳态仿真计算,可得到该管道冷热油交替输送过程中终点油温和压降的变化情况,对比其中温度和压

力变化最为剧烈的管道 1 的仿真结果与实际数据(图 13)可见 CloudLPS 获得的冷热油交替输送仿真结果与实际数据趋势一致、吻合较好。

为整体定量评估 CloudLPS 冷热油交替输送仿真偏差,分别统计各季度冷油和热油输送过程中全线的总温降与总压降数据,并将统计结果平均值与 CloudLPS 的仿真结果平均值进行对比(图 14)。可见每个季度下 CloudLPS 获得的两种油品温降和压降仿真结果与管道实际数据之间的偏差均分别在 $\pm 1.5\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ km}$ 、 $\pm 10\%$ 以内,可满足实际工程计算的精度需求,这从现场数据验证角度说明了 CloudLPS 具有较高的非稳态热力和水力仿真精度。

3 CloudLPS 特色功能

从现场管道实际业务出发,分别以站场压力控制^[33]、常温管道能耗优化^[34]、热输管道能耗优化^[21,35]为例介绍 CloudLPS 可视化控制逻辑搭建和能耗优化两大特色功能。

3.1 站场压力控制

某轻质进口原油常温输送管道全长为 796 km,沿线共设有 6 座输油站,其中仅有 3 座输油站设有输油泵(图 15)。

为了使原油管道运行时站场进站不欠压、出站不超压,往往需要添加相应的控制逻辑以达到站场压力控制目的。CloudLPS 将不同的控制逻辑抽象为可视化的基础控制元件,类似管道可视化拖拽建模方式,组合不同的基础控制元件即可搭建较为复杂的控制逻辑。通过组合常量输入、减法器、乘法器、符号函数、最大最小比较器等控制元件搭建 3 个控制逻辑块,分别获得进站压力大于 3 MPa、进站压力小于 1 MPa 及出站压力大于 8 MPa 时的偏差信号,再将其搭配

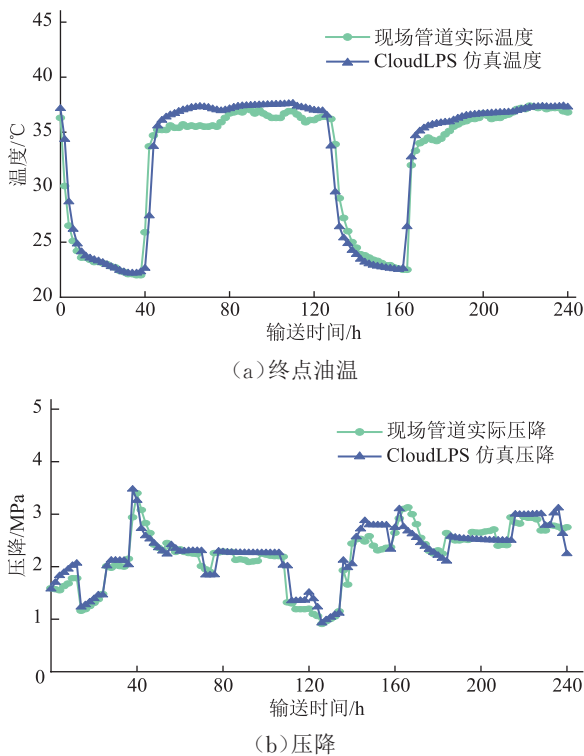


图 13 管道 1 仿真结果与现场数据对比图
 Fig. 13 Comparison of the simulation results and the field data of pipeline 1

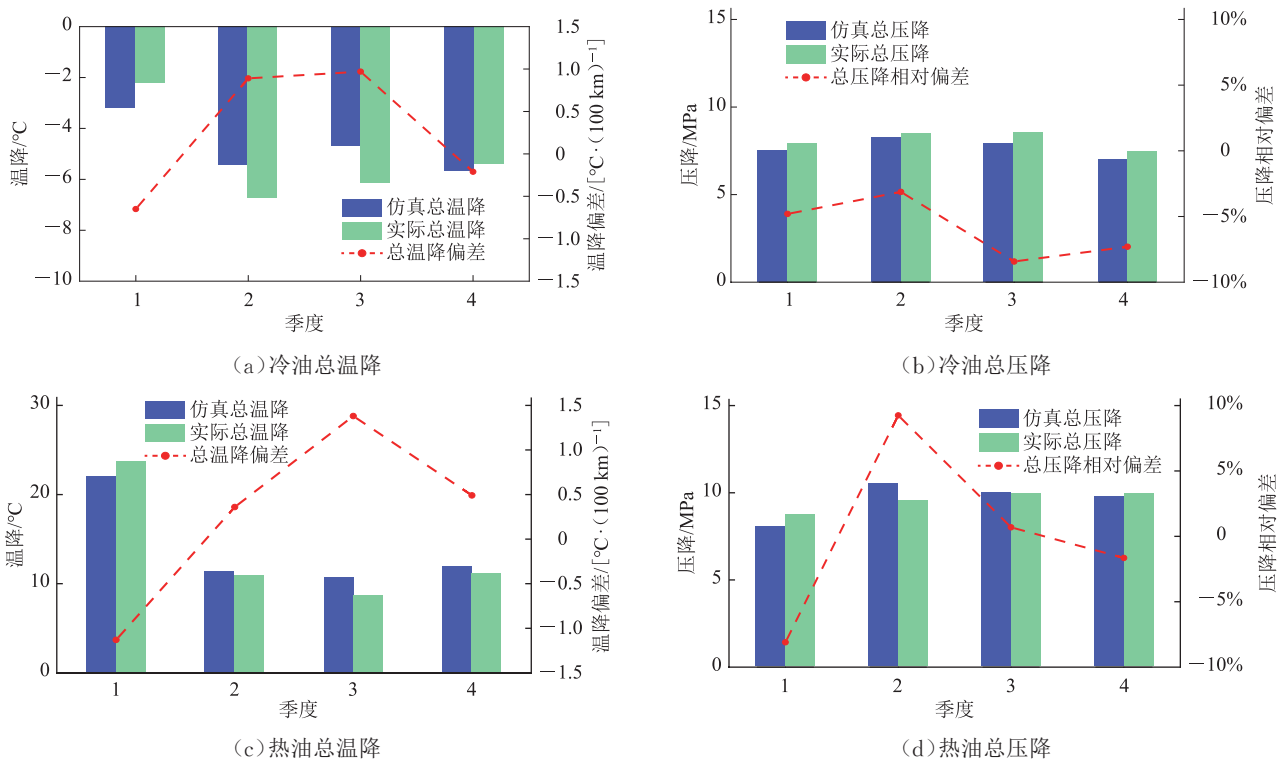


图 14 某冷热油交替输送管道仿真结果与现场数据对比图

Fig. 14 Comparison of the simulation results and the field data of a pipeline for alternating transportation of cold and hot oil

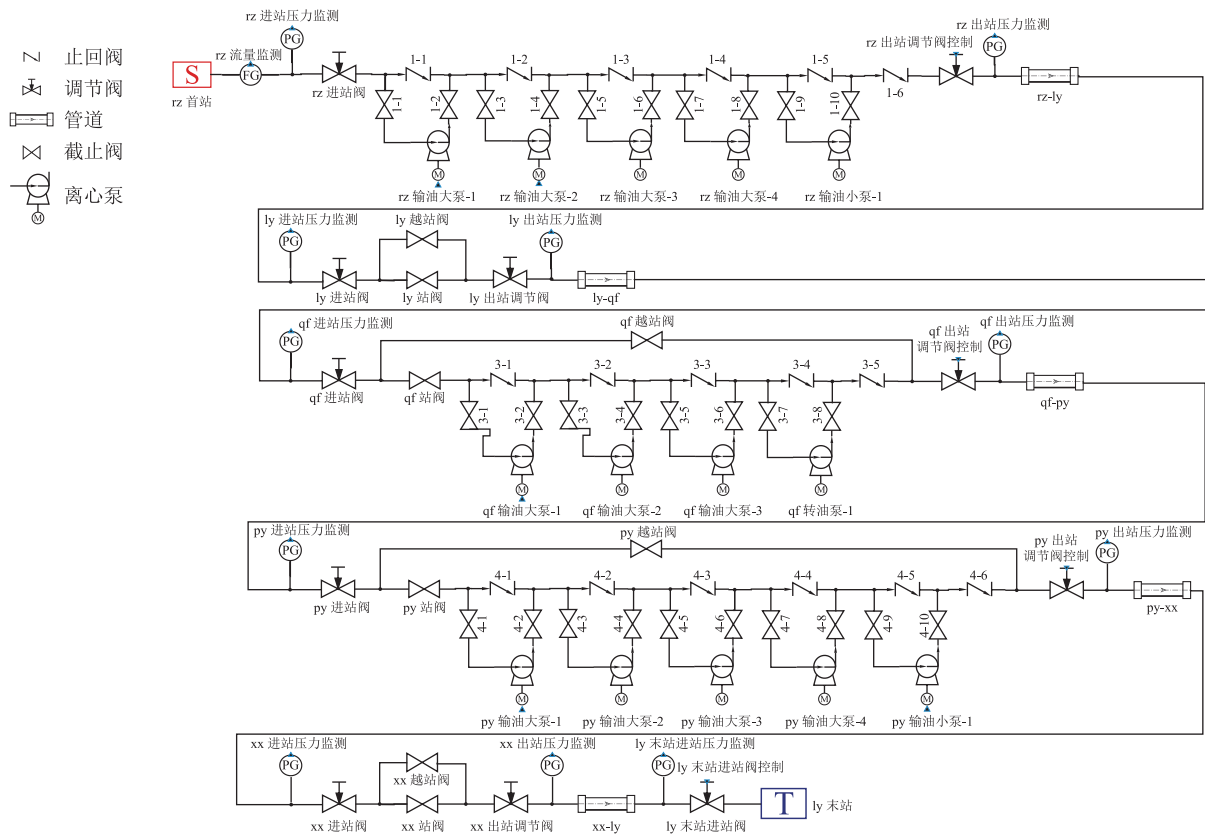


图 15 某常温输送管道压力控制案例拓扑结构图

Fig. 15 Topology structure of a normal-temperature transportation pipeline under pressure control

常量输入、减法器、除法器、最大最小比较器及 PID 控制器等控制元件, 形成一个站场压力控制逻辑

(图 16)。整个控制逻辑是可视化的, 因此用户可直接查看整个控制逻辑中不同信号传递与转换的细节,

方便用户调试控制逻辑、分析控制过程。

该控制逻辑能够通过调节站场调节阀的开度使得进站压力保持在 1~3 MPa 范围内、出站压力不超过 8 MPa(图 16)。当站场的进站压力超过 3 MPa 时,逻辑块 1 将进站压力与设定的 3 MPa 压力作比较,差值信号经逻辑块 1 处理后,输出至 PID 控制器,将其作为 PID 控制器的正值输入偏差信号,通过 PID 控制器转换后输出正值控制信号,使调节阀开度增加,从而逐

渐降低进站压力使其不超过 3 MPa;当进站压力低于 1 MPa 时,逻辑块 2 将进站压力与设定的 1 MPa 压力作比较,差值信号经过上述类似的信号传递与转换过程传入 PID 控制器,通过 PID 控制器转换后输出负值控制信号,使调节阀开度降低,从而逐渐增加进站压力使其不低于 1 MPa;当出站压力超过 8 MPa 时,逻辑块 3 对差值信号的作用与逻辑块 1 类似,最后通过降低调节阀的开度从而降低出站压力使其不超过 8 MPa。

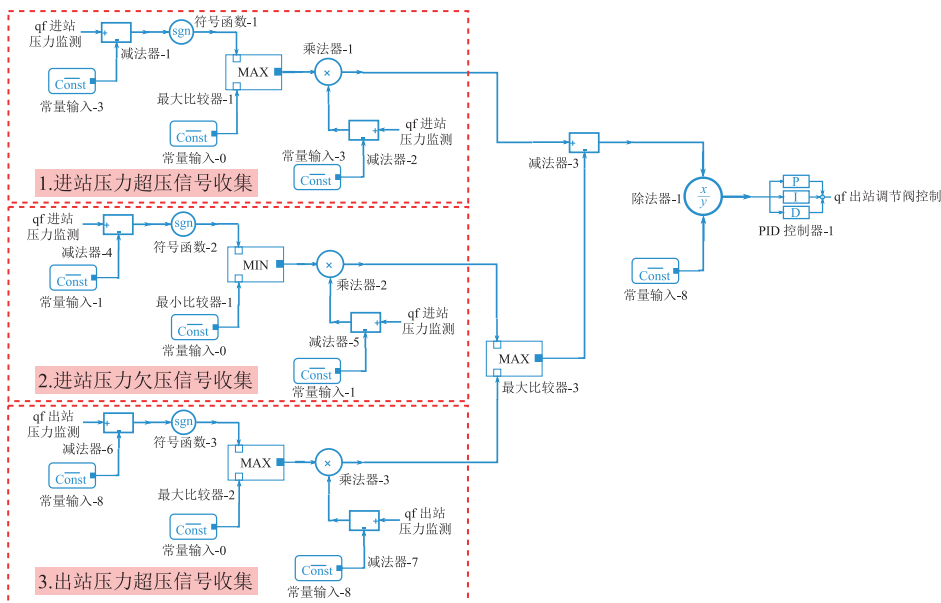


图 16 某常温输送管道站场压力控制逻辑图

Fig. 16 Pressure control logic of a station in a normal-temperature transportation pipeline

由上述控制逻辑在站场进站压力过低时的作用效果(图 17)可见,当进站压力过低时,在站场压力控制逻辑的作用下,调节阀的开度逐渐降低,进站压力逐渐增加,使其不低于 1 MPa,最终满足管道运行要求。

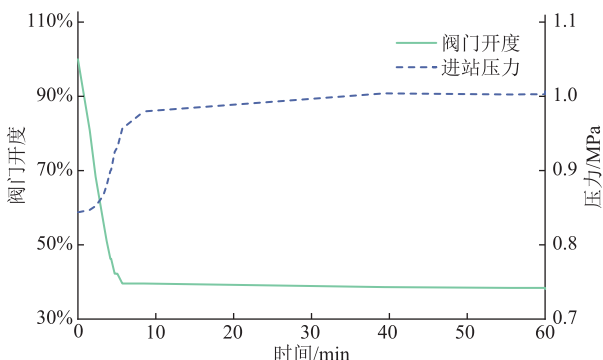


图 17 某常温输送管道在站场进站压力过低时调节阀开度和进站压力变化曲线

Fig. 17 Time evolution of regulating valve opening and inlet pressure of a station in a normal-temperature transportation pipeline when the inlet pressure is too low

3.2 常温管道能耗优化

某轻质进口原油常温输送管道全长 379 km, 沿线

共设有 5 座输油站, 包括泵站 4 座、末站 1 座, 每座泵站均设有 6 台型号相同的输油泵与 1 个出站调节阀, 且每座泵站均设有变频器用于输油泵转速调节(图 18)。该管道首站进站压力为 0.7 MPa, 沿线共有 4 条管段, 最大允许承压均为 5 MPa, 各泵站的进站压力不得低于 0.5 MPa, 末站的进站压力不得低于 0.1 MPa。由于各地区工业用电的电价政策存在差异, 该管道各泵站电价均不相同, 按照电价由高到低排序依次为泵站 1、泵站 3、泵站 2、泵站 4。

基于该常温输送管道基础参数, 采用 CloudLPS 进行能耗优化计算, 可得到该管道能耗优化后的阀门开度和输油泵转速。能耗优化前后所有调节阀开度均为 100%, 没有额外的节流损失。由优化前后泵转速组合情况与压力分布(表 8、图 19)可见, 相比于优化前的泵运行方案, 优化后的方案中泵站 1、泵站 3 各少开了 1 台泵, 而泵站 2、泵站 4 各多开了 1 台泵。因此, 优化后泵站 1、泵站 3 处压升较优化前更小, 泵站 2、泵站 4 处压升较优化前更大(图 19)。由于泵站 2、泵站 4

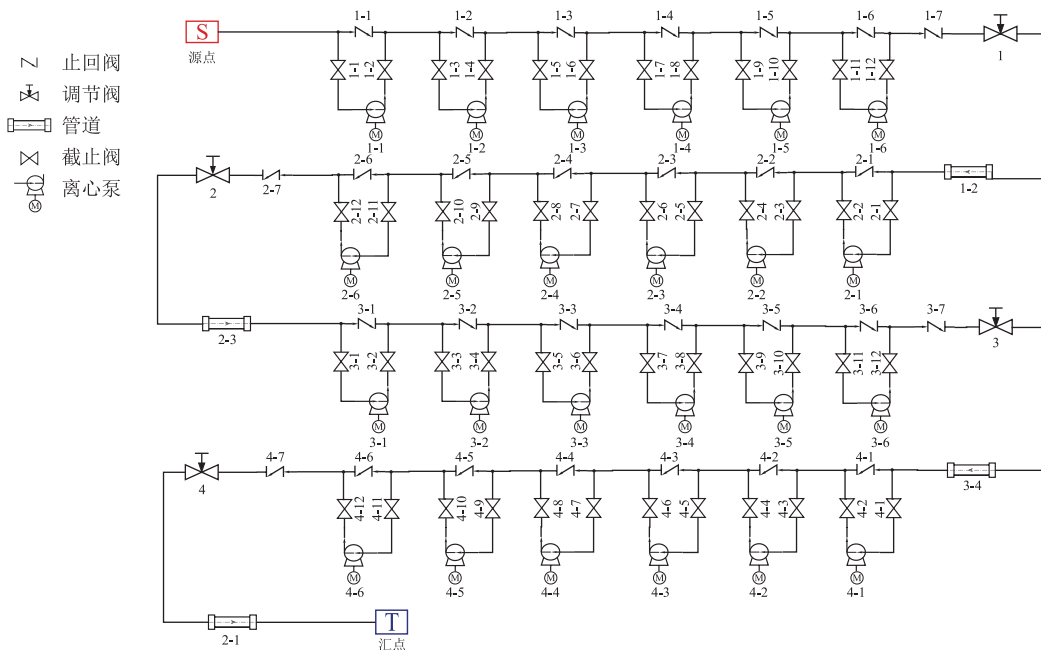


图 18 某常温输送管道能耗优化案例拓扑结构图

Fig. 18 Topology structure of a normal-temperature transportation pipeline under energy consumption optimization

表 8 某常温输送管道优化前后泵状态参数统计表
Table 8 Pump state parameters of a normal-temperature transportation pipeline before and after energy consumption optimization

泵状态	泵站编号	开泵台数	泵转速/(r·min ⁻¹)
优化前	1	2	1 490、1 490
	2	1	1 490
	3	2	1 490、1 250
	4	0	0
优化后	1	1	1 490
	2	2	1 490、1 490
	3	1	1 242
	4	1	1 490

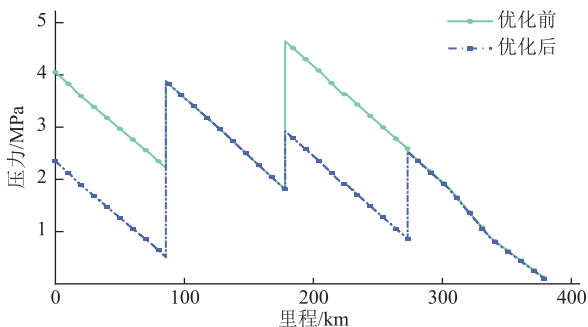


图 19 某常温输送管道能耗优化前后压力分布图

Fig. 19 Distributions of pressure in a normal-temperature transportation pipeline before and after energy consumption optimization

的电价低于泵站 1、泵站 3 的电价,故优化后的方案显然更优。能耗优化后,管道运行的总能耗费用为 8914 元/h,相比现场能耗费用 9541 元/h,可节省 6.6%的能耗费用。

对优化后的运行方案进行合理性分析:由于泵

站 1 进站压力为 0.7 MPa,要使油品过泵站 1 后不欠压,泵站 1 必须开泵,但泵站 1 处电价最高,并不适于多开泵,故泵站 1 仅开 1 台泵是合理的。考虑到泵站 2 的进站压力已接近最低允许压力 0.5 MPa,不适合变频(变频会带来额外功耗),因此泵站 1 仅开 1 台额定转速下的输油泵是最优的。泵站 4 处的电价最低,从电价角度而言,泵站 4 适合多开泵,但泵站 4 接近于末站,多开泵反而会引起压力的浪费。因此,泵站 4 开 1 台额定功率下的输油泵是最优的,多开会引起压力的浪费,少开或变频则没有充分利用电价最低这一优势。与泵站 3 相比,泵站 2 电价更低,因此泵站 2 适合于多开泵,并且尽量不变频,充分发挥泵站 2 比泵站 3 电价低的优势,因此泵站 2 开两台额定功率输油泵、泵站 3 开 1 台变频输油泵是合理的。

3.3 热输管道能耗优化

某掺混原油加热输送管道全长 235 km,沿线共设有 11 座输油站,包括热泵站 2 座、热站 8 座、末站 1 座(图 20)。该管道首站进站压力、温度分别为 0.17 MPa、51℃,沿线共有 10 条管段,最大允许承压均为 3.0 MPa,各输油站的进站不允许出现负压,其中末站的进站压力不得低于 0.3 MPa。油品输送温度不得超过 70℃且不得低于 32℃。该管道各输油站的电价按固定电价统一处理。

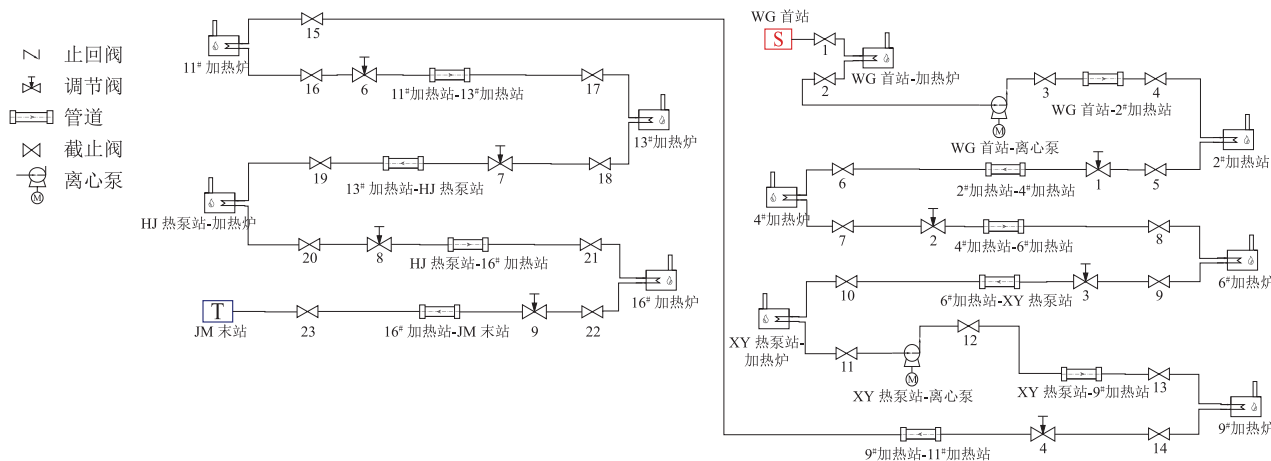


图 20 某热输管道能耗优化案例拓扑结构图
Fig. 20 Topology structure of a heated transportation pipeline under energy consumption optimization

基于该热输管道基础参数,采用 CloudLPS 进行能耗优化计算,可得到该管道能耗优化后的加热炉和输油泵的最优运行状态。由能耗优化前后加热炉与输油泵的功率及油温、压力分布(图 21、图 22)可见,优化后的方案中,首站加热炉可不开启,其余各站加热炉的功率相比于优化前的功率并没有统一的变化规律。在加热炉、输油泵最优功率组合下,能耗优化后管道运行的总能耗费用为 11 985 元/h,相比于现场能耗费用 13 060 元/h,可节省 8.2%。优化后的管道沿程油温相比于优化前有所下降,其原因为加热炉总功率减小。油温下降使得油品黏度上升,进而使得摩擦阻增加,因此需要输油泵提供更高的压力来补偿摩擦阻损失,使油品能够顺利输送至管道末端。

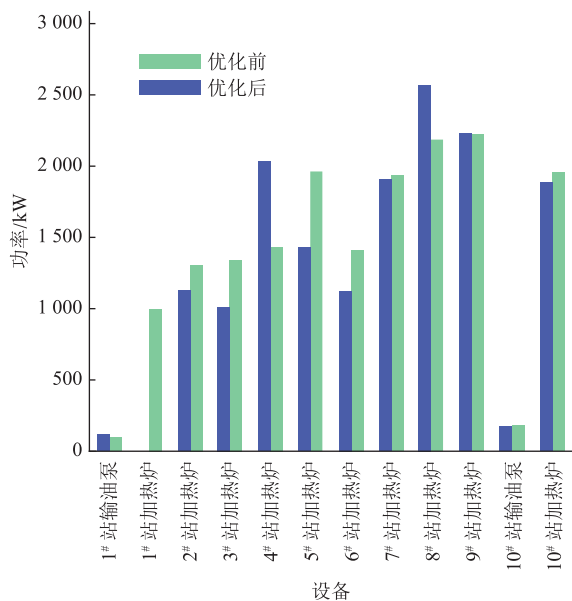
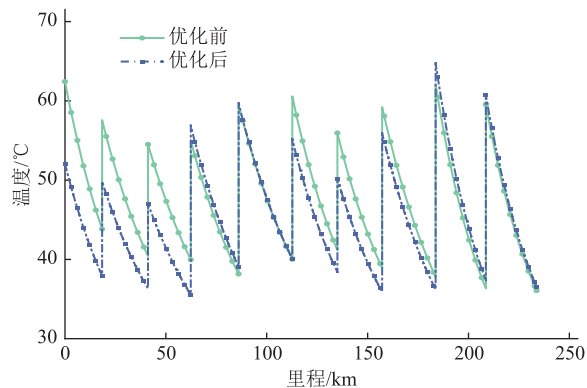
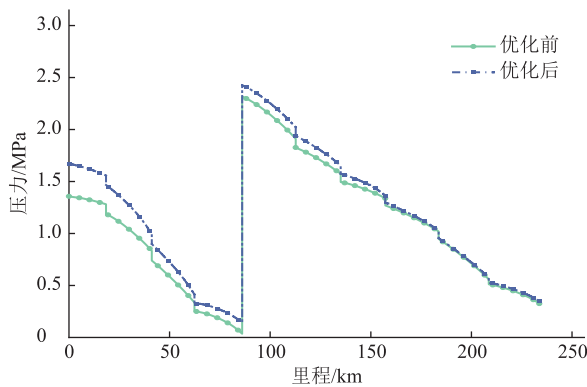


图 21 某热输管道能耗优化前后加热炉与输油泵的功率结果图
Fig. 21 Power of heater and oil pump of a heated transportation pipeline before and after energy consumption optimization



(a) 油温



(b) 压力

图 22 某热输管道能耗优化前后油温与压力分布图
Fig. 22 Distributions of oil temperature and pressure in a heated transportation pipeline before and after energy consumption optimization

4 结论

介绍了国产化液体管道云仿真软件 CloudLPS 的操作流程与多个应用案例,主要结论如下:

(1) CloudLPS 提供了友好的可视化建模环境,可

方便用户进行模型搭建及结果查看。

(2) CloudLPS的水力仿真精度与SPS、TLNET相当,其得到的瞬态水击压力与SPS、TLNET偏差很小。针对冷热油交替输送,CloudLPS计算得到的温度变化趋势与SPS吻合良好,但CloudLPS对土壤蓄放热过程的建模更为准确,因此具有更佳的热力仿真效果。

(3) 通过对3个实际管道输送案例研究发现,CloudLPS计算得到的平均温降与现场数据之间的偏差在 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,总压降与现场数据之间的相对偏差在 $\pm 10\%$ 以内,能满足实际工程计算的精度要求。

(4) CloudLPS软件可通过可视化的搭建方式方便地实现站场压力控制逻辑。该控制逻辑不仅能够有效监测管道运行过程发生的超压、欠压事件,而且能采取相应的阀门自动调节措施,将站场进出站压力控制在合理范围内。

(5) 采用CloudLPS分别对常温输送、加热输送两条实际管道进行了能耗优化,优化后能耗费用分别下降6.6%、8.2%,表明CloudLPS可为管道经济运行提供技术支撑。

通过多个应用案例以及与商业软件、现场数据的对比,表明国产化液体管道云仿真软件CloudLPS具有强大的水热力仿真、逻辑控制以及能耗优化能力,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 王军防,宇波,李亚平,曹旦夫,余红梅,焦开拓,等. 国产化液体管道云仿真软件CloudLPS的研发[J]. 油气储运, 2023, 42(11): 1275-1290. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.11.008.
WANG J F, YU B, LI Y P, CAO D F, YU H M, JIAO K T, et al. Research and development of domestic cloud simulation software CloudLPS for liquid pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(11): 1275-1290.
- [2] YU B, LI C, ZHANG Z W, LIU X, ZHANG J J, WEI J J, et al. Numerical simulation of a buried hot crude oil pipeline under normal operation[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(17/18): 2670-2679. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.07.016.
- [3] YUAN Q, WU Z M, LI W, YU B, WU C C. Comparative study on atmospheric temperature models for the buried hot oil pipeline[C]. Calgary: 2018 12th International Pipeline Conference, 2018: V002T08A002.
- [4] 周良胜,颜筱函,周晓红,路宏,张文欣. 基于PID控制的深水双管系统运行效果分析[J]. 中国海上油气, 2020, 32(3): 170-174. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2020.03.022.
ZHOU L S, YAN X H, ZHOU X H, LU H, ZHANG W X. Analysis on operation effect of PID control based on deep water double-pipeline system[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(3): 170-174.
- [5] ZHANG J, WANG Y, WANG X R, DONG H D, HUANG J P, YU B. Study on optimizing operation of preheating commissioning for waxy crude oil pipelines[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 894256. DOI: 10.1155/2014/894256.
- [6] 孙璐璐,李长俊,贾文龙,张财功,余秋爽,罗金华. 大落差输油管道局部高点水击压力预测方程研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(6): 172-177. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2022.06.026.
SUN L L, LI C J, JIA W L, ZHANG C G, YU Q S, LUO J H. Study on prediction equation of water hammer pressure at local high point of oil pipeline with large drop[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(6): 172-177.
- [7] 王军防,陈雪娇,沈允,陈宇杰. 长输管道顺序输送混油高效数值模拟方法研究[J]. 油气田地面工程, 2021, 40(4): 33-40. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2021.04.006.
WANG J F, CHEN X J, SHEN Y, CHEN Y J. Study on efficient numerical simulation methods of contamination in batch transportation in long distance pipeline[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2021, 40(4): 33-40.
- [8] 宇波,付在国,李伟,毛珊. 热油管道大修期间停输与再启动的数值模拟[J]. 科技通报, 2011, 27(6): 890-894. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7119.2011.06.017.
YU B, FU Z G, LI W, MAO S. Numerical simulation of shutdown and restarting of hot oil pipeline during overhauling period[J]. Bulletin of Science and Technology, 2011, 27(6): 890-894.
- [9] 刘天佑,孙维中,高艳清,徐诚. 多组分混合原油常温输送技术[J]. 油气储运, 1999, 18(9): 1-7. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.1999.09.001.
LIU T Y, SUN W Z, GAO Y Q, XU C. Study on the ordinary temperature transportation process of multi-blended crude[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1999, 18(9): 1-7.
- [10] 寇杰,钟齐斌,曹亚鲁. 稠油掺稀热化学脱水工艺参数优化[J].

- 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 189-194. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2022.05.022.
- KOU J, ZHONG Q B, CAO Y L. Optimization of process parameters for thermochemical dehydration of heavy oil with dilution[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(5): 189-194.
- [11] 王芳, 张雪琴, 张君. 新大一线低凝与高凝原油混合输送风险[J]. 油气储运, 2019, 38(9): 1003-1008. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.09.006.
- WANG F, ZHANG X Q, ZHANG J. Risk of mixed transportation of low pour point oil and high pour point oil in No.1 Xinda Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(9): 1003-1008.
- [12] 廖绮, 涂仁福, 徐宁, 段志刚, 梁永图. 成品油管道智能化批次调度研究现状及思考[J]. 油气田地面工程, 2023, 42(5): 90-97. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2023.05.015.
- LIAO Q, TU R F, XU N, DUAN Z G, LIANG Y T. Research status and discussion on intelligent batch scheduling of product oil pipelines[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2023, 42(5): 90-97.
- [13] LIU X, ZHANG J J, LI H Y, YU B. Intermittent operations, PPD optimize low flow-rate waxy crude system[J]. Oil & Gas Journal, 2010, 108(46): 134-138.
- [14] 柳歆, 张劲军, 宇波. 热油管道间歇输送热力水力特性[J]. 油气储运, 2011, 30(6): 419-422. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2011.06.004.
- LIU X, ZHANG J J, YU B. Thermodynamic and hydraulic characteristics of hot oil pipeline under the intermittent transportation process[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2011, 30(6): 419-422.
- [15] XING X K, DOU D, LI Y T, WU C C. Optimizing control parameters for crude pipeline preheating through numerical simulation[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1/2): 890-898. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.08.060.
- [16] 刁宇, 兰浩, 刘朝阳, 蒋国辉, 闫锋, 康春生, 等. 保温热油管道不同投产方案对比[J]. 油气储运, 2018, 37(4): 428-434. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.04.011.
- DIAO Y, LAN H, LIU C Y, JIANG G H, YAN F, KANG C S, et al. Comparison between different commissioning plans of insulated hot oil pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(4): 428-434.
- [17] 宇波, 徐诚, 张劲军. 冷热原油交替输送停输再启动研究[J]. 油气储运, 2009, 28(11): 4-16. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2009.11.002.
- YU B, XU C, ZHANG J J. Study on restart of crude oils batch pipelined with different outlet temperature[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(11): 4-16.
- [18] 韩东旭, 王鹏, 邵倩倩, 宇波. 冷热油交替输送热力快速计算研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(1): 130-135.
- HAN D X, WANG P, SHAO Q Q, YU B. Fast calculation of the thermal process during hot and cold oil alternating transportation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(1): 130-135.
- [19] CHEN Z M, YUAN Q, JIANG W X, LI Z Z, YU B. Thermo-hydraulic characteristics of Non-Isothermal batch transportation pipeline system with different inlet oil temperature[J]. Journal of Thermal Science, 2023, 32(3): 965-981. DOI: 10.1007/s11630-023-1812-0.
- [20] 王军防, 矫捷, 余红梅, 袁庆, 陈志敏, 宇波. 基于群体智能优化的原油管道系统能耗优化方法[J]. 油气储运, 2022, 41(11): 1269-1276. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.11.004.
- WANG J F, JIAO J, YU H M, YUAN Q, CHEN Z M, YU B. Optimization method for energy consumption of crude oil pipeline systems based on swarm intelligence optimization[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(11): 1269-1276.
- [21] YUAN Q, GAO Y Y, LUO Y Y, CHEN Y J, WANG B H, WEI J J, et al. Study on the optimal operation scheme of a heated oil pipeline system under complex industrial conditions[J]. Energy, 2023, 272: 127139. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127139.
- [22] 王军防, 曹旦夫, 矫捷, 余红梅, 袁庆, 宇波, 等. 面向智慧原油管道建设的运行方案快速智能决策[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(5): 210-222. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2023.05.014.
- WANG J F, CAO D F, JIAO J, YU H M, YUAN Q, YU B, et al. Fast intelligent decision of operation schemes for construction of intelligent crude oil pipelines[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(5): 210-222.
- [23] YUAN Q, LI J F, CHEN B, YU B, WEI J J, DENG Y J, et al. Cross-dimensional isothermal model for the transient restart of weakly compressible laminar/turbulent flow of time-dependent non-Newtonian fluid in a long pipeline[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2023, 319: 105077. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2023.105077.

- [24] YUAN Q, JIANG W X, GUO M Y, CHEN Y J, YU B, WEI J J. GPU-accelerated transient thermo-hydraulic simulation of weakly compressible restart flow of a non-Newtonian fluid in a long-buried hot oil pipeline[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 227: 120299. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120299.
- [25] 朱坤锋, 张文伟, 王彦, 张振永, 徐兴文, 谢伟峰, 等. 输油管道工程设计规范: GB 50253—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014: 1-152.
- ZHU K F, ZHANG W W, WANG Y, ZHANG Z Y, XU X W, XIE W F, et al. Code for design of oil transportation pipeline engineering: GB 50253—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014: 1-152.
- [26] 阿卡帕金, 克里沃舍因, 尤芬. 原油和油品管道的热力与水力计算[M]. 罗塘湖, 译. 北京: 石油工业出版社, 1986: 14-21.
- А Г А П К И Н В М, К Р И В О Ш Е И Н Б Л, Ю Ф И П В М. Thermal and hydraulic calculations of crude oil and product oil pipelines[M]. LUO T H, translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 14-21.
- [27] YUAN Q, LUO Y Y, SHI T, GAO Y Y, WEI J J, YU B, et al. Investigation into the heat transfer models for the hot crude oil transportation in a long-buried pipeline[J]. *Energy Science & Engineering*, 2023, 11(6): 2169-2184. DOI: 10.1002/ese3.1446.
- [28] AFSHAR 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. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2008.08.006.
- [29] 吴国忠, 庞丽萍, 卢丽冰, 胡德胜. 埋地输油管道热力计算数值求解结果分析[J]. *油气田地面工程*, 2001, 20(2): 1-2. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2001.02.001.
- WU G Z, PANG L P, LU L B, HU D S. Thermal computational solution result analysis for buried oil transferring pipeline[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2001, 20(2): 1-2.
- [30] 崔秀国, 张劲军. 埋地热油管道稳定运行条件下热力影响区的确定[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(2): 75-78. DOI: 10.3321/j.issn:1000-5870.2004.02.021.
- CUI X G, ZHANG J J. Determination of the thermal influence zone of buried hot oil pipeline on steady operation[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2004, 28(2): 75-78.
- [31] YU B, YU G J, CAO Z Z, HAN D X, SHAO Q Q. Fast calculation of the soil temperature field around a buried oil pipeline using a body-fitted coordinates-based POD-Galerkin reduced-order model[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2013, 63(10): 776-794. DOI: 10.1047782.2013.756762.
- [32] 蔡磊, 袁庆, 于红梅, 张春, 宇波. 东临复线停输再启动研究[J]. *北京石油化工学院学报*, 2018, 26(4): 29-33. DOI: 10.12053/j.issn.1008-2565.2018.04.006.
- CAI L, YUAN Q, YU H M, ZHANG C, YU B. Study of the shutdown and restart of Dongyin-Linyi parallel crude oil pipeline[J]. *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2018, 26(4): 29-33.
- [33] PRIYANKA E B, KRISHNAMURTHY K, MAHESWARI C. Remote monitoring and control of pressure and flow in oil pipelines transport system using PLC based controller[C]. Coimbatore: 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET), 2016: 1-6.
- [34] YUAN Q, CHEN Z M, WANG X R, YU B, WEI J J. Investigation and improvement of intelligent evolutionary algorithms for the energy cost optimization of an industry crude oil pipeline system[J]. *Engineering Optimization*, 2023, 55(5): 856-875. DOI: 10.1080/0305215X.2022.2044805.
- [35] 吴长春, 严大凡. 热油管道稳态运行的两级递阶优化模型[J]. *石油学报*, 1989, 10(3): 109-117.
- WU C C, YAN D F. A two-level hierarchical model for optimizing steady operation of hot oil pipelines[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1989, 10(3): 109-117.
- (收稿日期: 2023-10-02; 修回日期: 2023-11-09; 编辑: 刘朝阳)

基金项目: 国家管网集团东部原油储运有限公司科研项目“基于大数据分析技术的管道优化运行研究”, 2021 东储科 03 号。

作者简介: 王军防, 男, 1973 年生, 高级工程师, 2013 年硕士毕业于中国石油大学(北京)石油与天然气工程专业, 现主要从事管道输送技术方向的研究工作。地址: 江苏省徐州市泉山区北京路 1 号, 221008。电话: 0516-83457565。Email: wangjfyh@163.com

通信作者: 宇波, 男, 1972 年生, 教授, 1999 年博士毕业于西安交通大学工程热物理专业, 现主要从事计算流体力学与传热学、油气长距离输送技术方向的研究工作。地址: 北京市大兴区清源北路 19 号, 102617。电话: 15101531828。Email: yubobox@vip.163.com

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

