

引文: 张对红, 杨毅. 大型复杂天然气管网离线仿真软件国产化研发及应用[J]. 油气储运, 2023, 42(9): 1064–1072, 1080.

ZHANG Duihong, YANG Yi. Development and application of localized offline simulation software for large complex natural gas pipeline networks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(9): 1064–1072, 1080.

大型复杂天然气管网离线仿真软件国产化研发及应用

张对红¹ 杨毅²

1. 国家管网集团科学技术研究总院分公司; 2. 国家管网集团油气调控中心

摘要: 面向国家石油天然气管网集团有限公司(简称国家管网集团)大规模复杂天然气管网的仿真应用需求与管道行业智能化转型的实际需要,提出了一种全新的仿真引擎核心算法——分区增量迭代法,攻关完成了具备先进性、健壮性、开放性的工业级天然气管网仿真引擎,基于总体架构与应用架构设计,完成了离线仿真软件的开发,实现了大型复杂天然气管网仿真核心技术自主可控。依托研发的天然气管网离线仿真软件,对某新建管道完成了设计校核,平均相对误差为 0.1%;以全要素涩宁兰管道为对象建模,并与商业软件结果进行对比发现,管道沿线各站的压力、流量在稳态与瞬态仿真下的最大相对误差均小于 1%;针对大规模、复杂拓扑结构的 2×10^4 km 级全要素天然气工业管网,该离线仿真软件对其具备仿真能力。所研发天然气管网离线仿真软件能够满足未来“全国一张网”的仿真需求,可为国家管网集团的数字化战略及智能化转型提供专业化仿真服务。(图 7,表 3,参 22)

关键词: 天然气管网; 软件; 国产化; 引擎; 离线仿真; 应用

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)09-1064-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.010

Development and application of localized offline simulation software for large complex natural gas pipeline networks

ZHANG Duihong¹, YANG Yi²

1. PipeChina Institute of Science and Technology; 2. PipeChina Oil & Gas Control Center

Abstract: Facing the simulation application requirements of large complex natural gas pipeline networks of China Oil & Gas Pipeline Network Corporation (hereinafter referred to as PipeChina) and the actual need for intelligent transformation of the pipeline industry, a new core simulation engine algorithm, i.e. sectional increment iteration method, was proposed. On this basis, the industrial simulation engine of the natural gas pipeline network with progressiveness, robustness and openness was completed. Then, the offline simulation software was developed based on the overall architecture and the application architecture design, realizing the autonomous control over the core simulation technology of large complex natural gas pipeline networks. Using the developed offline simulation software for natural gas pipeline networks, design verification was completed for a newly built pipeline, with an average relative error of 0.1%. By modeling based on the all-element Se-Ning-Lan Pipeline and comparing with the results of commercial software, the maximum relative error of pressure and flow of stations along the pipeline is less than 1% in the steady-state and transient simulation. Besides, the offline simulation software is capable of simulating the all-element natural gas pipeline networks at 2×10^4 km level with a large complex topological structure. Generally, the developed offline simulation software of natural gas pipeline networks could meet the simulation needs of the unified national network in the future, providing professional simulation service for the digital strategy and intelligent transformation of PipeChina. (7 Figures, 3 Tables, 22 References)

Key words: natural gas pipeline networks, software, localization, engine, offline simulation, application

中国有超过 95% 的陆上原油、天然气是通过管道输送,油气管道已成为经济发展与民生保障的能源生命线^[1-3]。截至 2022 年底,中国长输油气管道总里程达到

15.5×10^4 km,其中天然气管道、原油管道、成品油管道里程分别为 9.3×10^4 km、 3.2×10^4 km、 3.0×10^4 km,基本形成了“西气东输、北气南下、海气登陆、就近供应”的

供气格局^[4]。随着国家石油天然气管网集团有限公司(简称国家管网集团)成立,全国油气干线及基础设施将实行统一化调配运行管理,形成“全国一张网”运营模式^[5-6]。在此背景下,天然气管网规模不断扩大、结构日益复杂,其高效运行难度显著增加^[7]。如何实现管网系统的经济高效输送、灵活可靠调配是管网设计运行面临的关键问题,也对管网系统仿真软件的适用规模、稳定性、容错性、计算精度及效率提出了更高要求。天然气管网仿真软件作为国家管网集团数字化建设的核心组成部分,是其数字化战略及管道行业智能化转型的重要工具,有助于打破数据壁垒,实现数字化应用、智能化转型以及管网全业务链协同运转,可为管网调控运行、决策优化、智慧互联、价值创造提供核心技术支持^[8-10]。

仿真软件作为典型的工业软件^[11],其技术难度主要体现在两个方面:①超大规模油气管网涉及的要素多、非线性强、功能多、交互复杂;②对仿真软件的性能(适应性、准确性、高效性、稳定性、容错率等)要求极高。基于此,以中国管网业务需求为导向,面向大型复杂天然气管网,提出了一种满足工业级应用的仿真引擎核心算法——分区增量迭代法,并开发了自主可控的工业级离线仿真软件,实现管网仿真软件国产化,以期为国家管网集团的数字化战略及智能化转型提供专业化仿真服务。

1 国内外管网仿真发展现状

现代意义的管网仿真研究始于20世纪70年代中期,随着计算机技术、应用数学及计算流体力学的发展而不断扩展,自20世纪80年代以来,国外开始加速管道仿真技术的研究,并开发出相应的仿真软件。经过50多年的发展与工业化应用,世界上已基本形成较为成熟的管网系统仿真软件产品,如挪威DNV-GL公司的SPS、美国EMERSON公司的Pipeline Studio/Pipeline Manager、美国GREGG公司的NextGen、德国PSI Software AG公司的PSI-ganesi、捷克SIMONE Research Group公司与德国LIWACOM公司联合开发的SIMONE、美国Stoner-Advantica公司的Synergi Gas等,上述软件已广泛应用于全球油气管网,市场占有率达到90%以上,为油气管网输送业务的发展与管理水平的提高发挥了重要作用^[12-13]。中国油气管道仿

真技术起步较晚,为掌握其核心技术,中国管道科研机构、各大石油院校等相继开展了攻关研究,并在商业软件开发与应用上进行了积极尝试,在模型建立、处理、求解等方面均取得了较大进步^[10,12-17]。

随着中国油气管网规模逐渐扩大、管网信息安全要求逐步提高,仿真软件核心自主知识产权的“卡脖子”问题日益凸显^[12,18]。目前,中国天然气管道仿真计算与运行分析主要依赖国外进口的商业软件,限制了中国管道运营公司的业务发展。随着“全国一张网”运行管理模式的建立,管网在线仿真计算需求将超过 10×10^4 个计算节点,原有的自20世纪70、80年代发展的商业软件将难以满足未来接近 30×10^4 km级多介质融合输送管网的仿真需求。此外,管网仿真模型涉及管道的具体走向、部分国家地理信息,在线仿真系统包含大量真实的生产运行数据,这些数据一旦泄漏,将严重威胁国家能源输送安全。因此,拥有自主可控的天然气管网仿真软件对国家信息安全与能源安全意义重大。

2 天然气管网仿真引擎核心算法

2.1 算法研究现状

输气管道内的流体受供气用气波动、设备启停运行、控制系统调节等多因素影响,沿线气体参数(压力、流量、温度等)时刻发生变化,属于瞬态流动^[19]。基于公开文献可知,主流商业软件的仿真引擎核心算法初代原型多完成于20世纪70、80年代,一般为全局求解方法,即直接求解大规模、离散后具备稀疏性特征的非线性方程组。从数学角度分类,全局求解方法可分为直接线性化、逐次线性化两类。直接线性化的代表方法为水力配置法;逐次线性化的代表方法有牛顿-拉夫逊(Newton-Raphson's, N-R)法、改进N-R法^[20]、拟牛顿法^[21]等。全局求解方法在求解大规模复杂管网仿真问题上一般面临两大难题:①大规模问题整体求解导致矩阵规模过大,从而使矩阵条件数增大,难以收敛。②对于真实管网,规模与其拓扑结构具有明显的正相关性,拓扑变化会导致矩阵的稀疏性发生变化,使得常规算法不适应或者效率急剧下降。

中国管道仿真业界经过长期与国外管道仿真软件的对比、分析,另辟蹊径采用了分层算法。该算法通过将大规模问题分解成若干小规模问题,使得顶层矩阵

涉及的计算规模大大降低,提升了稳定性的同时也减少了计算时间。在工业实践中,由于分层算法的顶层矩阵牵涉到全局相关信息,且其底层采用的是线性化技术,因此,当出现不匹配、不符合物理规律甚至边界条件变化过大的情况时,难以保证其容错率及稳定性。对于大规模全要素管网,分层算法涉及元件较多,元件相关联的数据亦较多,故存在误差累积现象,因此,容错率是必须要考虑的重要指标。

2.2 分区增量迭代法

针对国内外仿真核心算法的不足,基于管道流动物理机理,国家管网集团仿真团队提出了可满足工业级应用的仿真引擎核心算法——分区增量迭代法。该算法采用从局部至整体迭代的思路,将整个管网分解为若干子网络直至元件(管段、设备)。基于离散格式,任意元件间都包含离散节点(或面),用于通信数据。在具体求解过程中,分为两类情况:①含有边界条件的元件,由已知的边界条件获得基本变量的数值,若边界条件数量不足,则基本变量通过相邻设备补足;②不含边界条件的中间元件,通过读取与其所处节点(或面)相邻设备提供的3个变量,结合自身数学模型来计算更新另外3个待求变量。管网中各元件上的变量便可通过节点(或面)互相联系,并反复迭代更新,最终更新至满足收敛条件,便可得到整个管网流动状态的最终解。

对于管网任意元件,其控制方程均可通过迭代法线性化为以下通用形式:

$$\mathbf{g} \cdot \delta \mathbf{w} = -f(\mathbf{w}) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{g}$ 为梯度向量; $\mathbf{w}$ 为决策变量; $\delta \mathbf{w}$ 为决策变量的迭代增量变量; f 为余量。

任意元件一般有3个控制方程,共包含6个变量:入口流量 v_u 、入口压力 p_u 、入口温度 T_u 、出口流量 v_d 、出口压力 p_d 、出口温度 T_d 。根据上述规则读取其中3个变量作为已知量即可求解,在线性方程组上就是将已知自变量合并入右端项:

$$\begin{bmatrix} A v_u & A p_d & A T_d \\ B v_u & B p_d & B T_d \\ C v_u & C p_d & C T_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_u \\ \delta p_d \\ \delta T_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1 - h_1(\delta p_u, \delta T_u, \delta v_d) \\ -f_2 - h_2(\delta p_u, \delta T_u, \delta v_d) \\ -f_3 - h_3(\delta p_u, \delta T_u, \delta v_d) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: f_1 、 f_2 、 f_3 分别为质量守恒、动量守恒、能量守恒方程的余量; h_1 、 h_2 、 h_3 分别为质量守恒、动量守恒、能量守恒方程的焓值; δp_u 、 δT_u 、 δv_d 分别为 p_u 、 T_u 、 v_d 的

迭代增量; A 、 B 、 C 分别为 v_u 、 p_d 、 T_d 对应的矩阵系数。

分区增量迭代法是直接基于设备连接关系进行分区求解的,各元件的线性方程组可以独立计算,不必构造全局大型稀疏矩阵。该算法计算灵活高效,无需求解大规模矩阵,无需获得管网的拓扑信息,适合并行计算,一旦发生输入错误,错误将分散至管网局部区域,对其他区域影响较小。该算法先后在某新建管道设计校核、双管并行的涩宁兰管道、大规模复杂南部管网进行了试用,结果表明:该算法能够适应复杂拓扑结构管网,具有较好的仿真精度、稳定性、容错率及计算效率。

3 天然气管网离线仿真软件架构设计

3.1 总体架构

大型复杂天然气管网离线仿真软件总体架构设计考虑的因素包括:①可靠性与可用性;②可扩展性,市场与用户在不断变化,为适应业务的高速迭代,软件架构要支持高并发、高扩展,可根据客户群的不同与市场需求的变化不断调整;③数据安全性。因此,从使用场景出发,充分考虑未来用户业务场景需求,并借鉴国家管网集团油气调控中心仿真应用经验,构建了大型复杂天然气管网离线仿真软件总体架构(图1)。该总体构架可抽象表示软件系统的整体轮廓、各个组件之间的相互关系、约束边界,是展示软件系统物理部署、演进方向的整体视图,具体是由人机交互界面、模型预处理、仿真引擎、数据共4个模块组成。

3.1.1 人机交互界面模块

人机交互界面模块可为用户提供天然气管网图形化仿真界面,支持管网模型绘制、参数设置、仿真控制、结果展示、工程管理等操作。该模块是用户建立的仿真模型、模型预处理、仿真运行等模块的最初入口,其性能直接影响用户体验。因此,该软件基于用户常用软件操作习惯,并根据行业专家的特定需求,增添了路径选择、元件定位与搜索、元件连续绘制、监视器属性自定义排序等功能,提升了软件的交互便利性。人机交互界面模块可与仿真引擎模块直接通信,负责将用户绘制的模型格式化,后经预处理输入至引擎,并根据用户操作指令控制整个仿真运行周期。仿真运行结果可通过标签、图表等方式直观地展现给用户,并根据运行结果及时更新模型中相关元件的状态。人机交互界

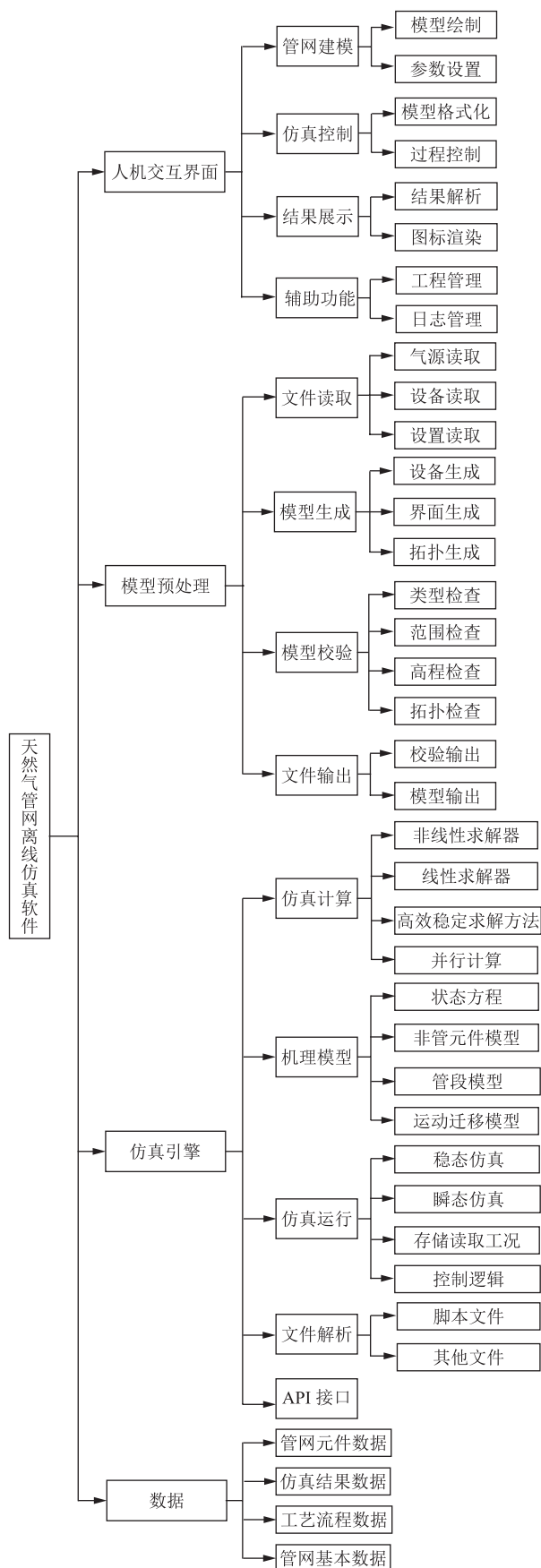


图1 大型复杂天然气管网离线仿真软件总体架构图

Fig.1 Overall architecture of offline simulation software for large complex natural gas pipeline networks

面在设计时即考虑到当前及未来中国天然气管网的规模对其性能的要求,即在管网规模包含数万元件时,人机交互界面的显示时滞亦不大于 900 μs ,以保证用户操作时无延迟感。该性能要求高于大多数同类软件,自主研发的渲染引擎经过设计、编码层面的优化,引入分区渲染、延迟渲染等技术,已达到预期性能要求。

3.1.2 模型预处理模块

模型预处理模块是人机交互界面模块与仿真引擎模块的枢纽,负责将用户在人机界面建立的图形化管网模型转换为可识别、可计算的引擎管网模型,同时也是用户与仿真引擎交互频率最多的环节,用户建模过程中出现的问题和建模的结果均是通过该模块进行反馈。模型预处理模块的功能架构按照工作流程分为文件读取、模型生成、模型校验、文件输出 4 个分模块。读取的文件是前端软件生成的图形化管网模型文件,包含了管网模型中所有元件的属性信息,在模型生成过程中这些信息将基于算法转换为具有完备拓扑信息的引擎管网模型。模型校验是将模型中的不合理信息全部检查出来并反馈给用户,由用户在开始计算之前消除这些不合理信息,避免发生无效计算,提升计算效率与稳定性。模型预处理模块将模型校验结果与引擎管网模型输出到文件中,分别供人机交互界面模块、仿真引擎模块读取。模型预处理模块的每次运行都要依次调用 4 个分模块,每次的运行结果会输出到文件中。

3.1.3 仿真引擎模块

仿真引擎模块主要由仿真计算、机理模型、仿真运行、文件解析、API 接口共 5 个部分组成。仿真计算可分为线性求解器、非线性求解器、高效稳定求解方法、并行计算等求解方法。机理模型主要包括状态方程(BWRS、AGA 等)、非管元件模型、管段模型、运动迁移模型等。仿真运行主要涉及的功能包括稳态仿真、瞬态仿真、存取/读取工况、控制逻辑,其中:稳态仿真用于分析管网系统在固定不变的边界条件下的仿真计算,如管网系统设计与改造方案论证、管网输配能力与压缩机组能耗分析等;瞬态仿真用于在动态变化的气源、用户、压缩机等设备参数条件下,预测管网系统内压力、温度、流量等工艺参数的变化趋势,如管网系统调度运行、调峰能力分析、泄漏等事故工况下的应急运行预案制定、回溯管网历史运行工况等。仿真引擎模块通过文件解析功能解析模型预处理生成的模型文件,并展开相关计算。API 接口可为仿真软件提供调用其他函数的接口。

3.1.4 数据模块

天然气管网离线仿真软件中的数据可分为管网基本数据、管网元件数据、工艺流程数据、仿真结果数据共4个部分。管网基本数据主要包括已有管网拓扑结构,新建、改线、改造信息,气源、分输、转供等更新信息,站场、阀室、放空点、储气库等公共属性信息。管网元件数据包括管道/段的名称、管径、壁厚、长度、里程、高程、设计压力、设计输量、最小输量等,压缩机的名称、编号、位置、设计压力、最高设计温度、最低设计温度、额定压比、额定流量、额定转速、驱动类型、最低转速、最高转速、性能曲线、功率效率曲线等,阀门的名称、编号、位置、功能类型、关阀时间、开阀时间、口径、全开流通系数、全关流通系数、特性曲线等,站内其他关键设备设施基本信息包括公共属性信息、压力等级、最大最小量程(测量仪器仪表类)、功率等。工艺流程数据主要是逻辑保护数据(全线各位置的压力、压降速率、温度保护相关数据等)及工艺运行数据(各站场、储

气库等的工艺流程图)。仿真结果数据主要包括管段、节点、元件的压力、流量、温度等数据。

3.2 应用架构

应用架构起着统一规划、承上启下的作用。向上承接了天然气管网离线仿真软件的业务应用,即梳理系统的主要模块与功能点;向下指导系统开发,包括从前端展示到业务处理逻辑,再到后台数据架构的实现。大型复杂天然气管网离线仿真软件应用架构(图2)包括业务应用、技术模型、数据共3部分。业务应用涉及管网全生命周期运行管理,在规划设计阶段,可用于规划设计方案校核、设计建模、瞬态精细化模拟、管网/管道系统分析、设备选型等;在管网运行阶段,可为投产模拟、运行方案制定、管网运行适应性分析、事故应急、运行优化、管输能力测算、调度操作培训等提供技术支持。技术模型分为管道水力、热力仿真模型与业务算法模型。数据主要来源于运行数据及静态数据。

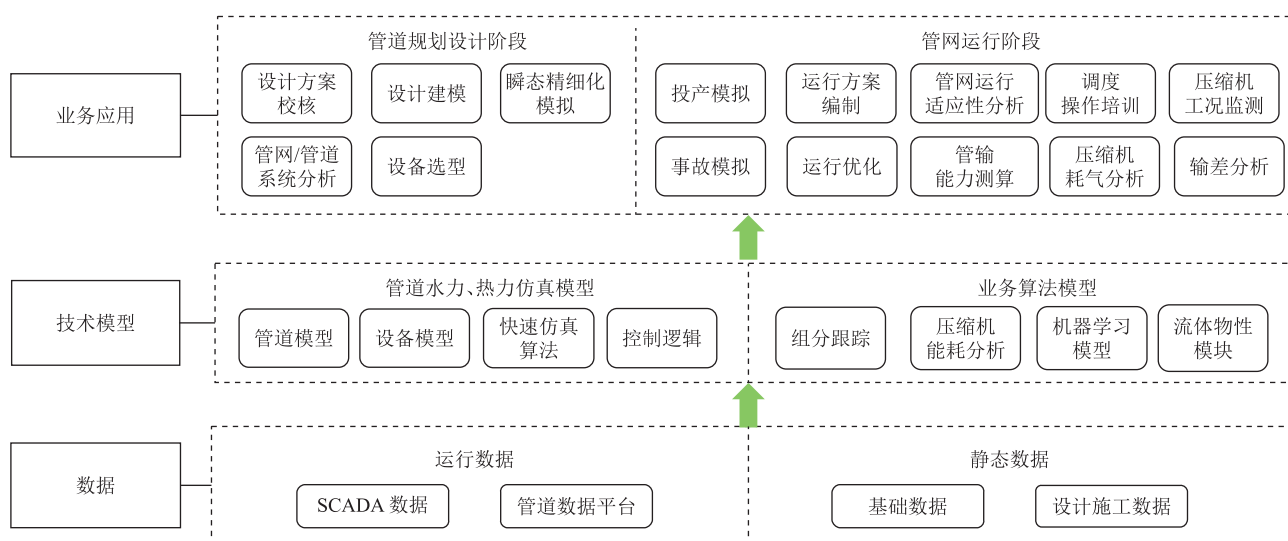


图2 大型复杂天然气管网离线仿真软件应用架构图
Fig. 2 Application architecture of offline simulation software for large complex natural gas pipeline networks

4 实例应用

4.1 管道设计校核

依托某新建管道,采用自主研发的大型复杂天然气管网离线仿真软件开展管道设计校核。该新建管道(图3)设计全长827.91 km,首站Z0进站流量 $2\,978\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、进站压力8.52 MPa,途经7个分输站(编号为Z1~Z7)、9个分输点(编号为F1~F9)。气源的控制方式为压力控制,压力设定为8.6 MPa;

分输点的控制方式为流量控制,F1~F9分输点的分输流量分别为 $5.7\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $31.9\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $8.4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $113.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $104.2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $15.1\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $11.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $16.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $59.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。以该运行工况为例,将自研离线仿真软件计算得到的各站进出站压力、进站流量与某成熟商业软件结果进行对比(表1)可知,管道沿线各站的压力、流量最大相对误差小于1%,平均相对误差约为0.1%,表明自研离线仿真软件具有较高的计算精度。

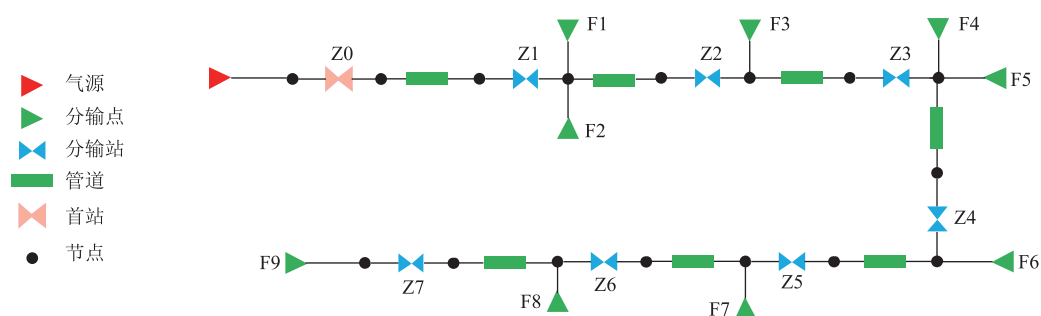


图3 某新建管道仿真模型图
Fig. 3 Simulation model of a new pipeline

表1 某新建管道采用自研仿真软件与商业软件计算得到的进出站压力、进站流量结果对比表
Table 1 Comparison of inlet pressure, outlet pressure and inlet flow results of a new pipeline obtained by self-developed offline simulation software and commercial software

站场	数据来源	压力/MPa		进站流量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	站场	数据来源	压力/MPa		进站流量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
		进站	出站				进站	出站	
Z0	商业软件	8.52	8.52	2 978.00	Z4	商业软件	7.47	7.47	2 714.00
	自研离线仿真软件	8.52	8.52	2 978.25		自研离线仿真软件	7.46	7.46	2 714.65
Z1	商业软件	8.38	8.38	2 978.00	Z5	商业软件	7.20	7.20	2 699.00
	自研离线仿真软件	8.38	8.38	2 978.28		自研离线仿真软件	7.19	7.19	2 699.49
Z2	商业软件	8.13	8.13	2 940.00	Z6	商业软件	6.80	6.80	2 687.00
	自研离线仿真软件	8.13	8.13	2 940.64		自研离线仿真软件	6.79	6.79	2 687.92
Z3	商业软件	7.83	7.83	2 932.00	Z7	商业软件	6.45	—	2 671.00
	自研离线仿真软件	7.82	7.82	2 932.20		自研离线仿真软件	6.45	—	2 671.53

4.2 涩宁兰管道

涩宁兰管道复线工程起自青海省柴达木盆地东部三湖地区涩北首站,东至甘肃省兰州市,全长940.6 km,途经青海、甘肃两省的13个市区县共5个压气站。涩宁兰一线、二线并联运行条件下的最大输气量为1 894.4×10⁴ m³/d,涩宁兰二线最大输气量为933.47×10⁴ m³/d,设计压力为6.3 MPa,干线管

径为660 mm^[22]。以全要素涩宁兰管网系统为对象建立管网仿真模型(图4,其中Q1、Q2为气源编号,C1~C5为压气站编号,S1~S9为分输站编号,F1~F9为分输点编号),开展自研离线仿真软件功能测试,分别针对稳态仿真、瞬态仿真设计不同工况,在涩宁兰一线、二线的C2~C4压气站、S2分输站共设置8个监测点,观察各监测点状态变化情况。

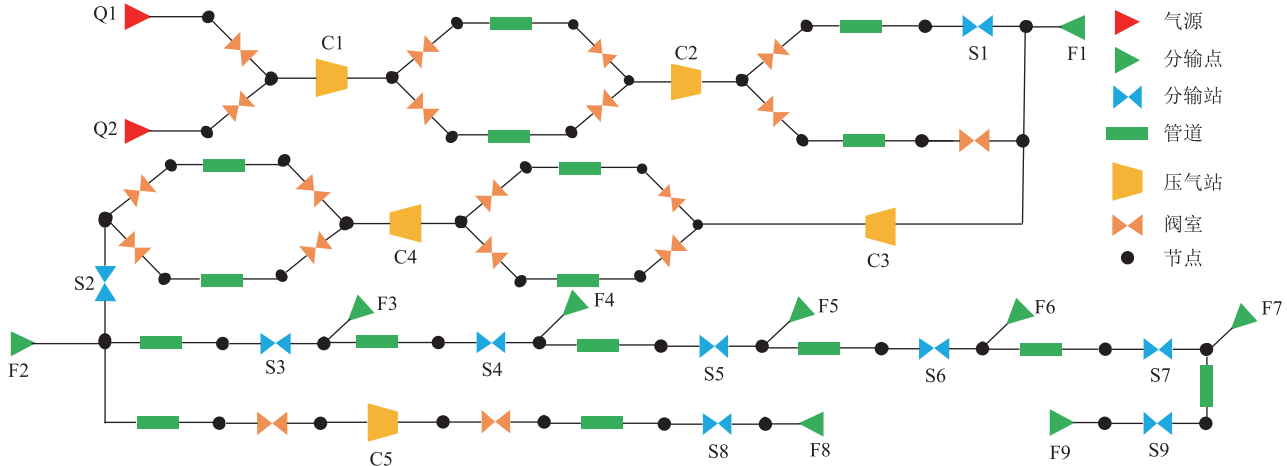


图4 涩宁兰管网系统仿真模型图
Fig. 4 Simulation model of Se-Ning-Lan Pipeline Network System

4.2.1 稳态仿真

气源采用压力边界控制,下游采用流量边界控制,压气站采用压比控制。设定入口气源压力为4.5 MPa,

C1~C4压气站的压比分别为1.2、1.2、1.2、1.5,空冷器控制温度为25℃,管道内壁的粗糙度为0.04 mm,管道热传导系数为1.471 W/(m²·℃),地温为-5℃,涩

宁兰一线、二线的总输量为 $1\,200\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,并设置各分输点的分输流量(表 2)。各参数设置保持一致,将自研离线仿真软件稳态工况计算的结果与某商业软

件计算结果进行对比(表 3)可见,压力、流量的相对误差均小于 1%,表明自研离线仿真软件具有较好的稳态仿真能力。

表 2 涩宁兰管道稳态运行工况各分输点流量统计表
Table 2 Flow list of distribution points of Se-Ning-Lan Pipeline at steady operation condition

分输点	分输流量/($10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	供给线路	分输点	分输流量/($10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	供给线路
F1	10	涩宁兰一线	F6	20	涩宁兰一线
F2	350	涩宁兰一线、涩宁兰二线	F7	10	涩宁兰一线
F3	100	涩宁兰一线	F8	30	涩宁兰二线
F4	10	涩宁兰一线	F9	660	涩宁兰一线、涩宁兰二线
F5	10	涩宁兰一线			

表 3 涩宁兰管道采用自研离线仿真软件与商业软件计算得到的进出站压力、出站流量结果对比表
Table 3 Comparison of inlet pressure, outlet pressure and outlet flow results of Se-Ning-Lan Pipeline obtained by self-developed offline simulation software and commercial software

线路	站场	数据来源	压力/MPa		出站流量/($10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)
			进站	出站	
涩宁兰一线	C1	自研离线仿真软件	4.500	5.400	603.755
		商业软件	4.500	5.400	602.585
	C2	自研离线仿真软件	4.307	5.168	605.584
		商业软件	4.338	5.165	604.321
	C3	自研离线仿真软件	4.325	5.190	597.110
		商业软件	4.312	5.190	597.476
	C4	自研离线仿真软件	4.041	6.062	600.325
		商业软件	4.062	6.062	599.960
	S2	自研离线仿真软件	5.935	5.935	457.143
		商业软件	5.922	5.921	459.924
涩宁兰二线	C1	自研离线仿真软件	4.500	5.400	598.548
		商业软件	4.500	5.400	597.416
	C2	自研离线仿真软件	4.307	5.168	596.373
		商业软件	4.338	5.168	595.680
	C3	自研离线仿真软件	4.325	5.190	594.250
		商业软件	4.312	5.190	592.524
	C4	自研离线仿真软件	4.041	6.062	590.582
		商业软件	4.062	6.062	590.042
涩宁兰一、二线合并	S2	自研离线仿真软件	5.935	5.935	383.677
		商业软件	5.922	5.922	380.076
	S9	自研离线仿真软件	6.216	—	649.960
		商业软件	6.177	—	650.000

4.2.2 瞬态仿真

在涩宁兰天然气管网稳态仿真的基础上,改变 S9 站分输流量(从 $330\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 调整为 $200\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$),使其随时间不断变化,观察各监测点 72 h 内的状态变化。以涩宁兰一线 C2 压气站 72 h 内进站压力、流量随时间的变化情况为例,对比自研离线仿真软件与商业软件的计算结果(图 5)。可见,进站压力随时间变化逐渐减小,进站流量随时间变化逐渐增大,符合实际运行规律;瞬态工况条件下,压力、流量的相对误差均小于 1%,表明自研离线仿真软件具有较好的瞬态仿真能力。

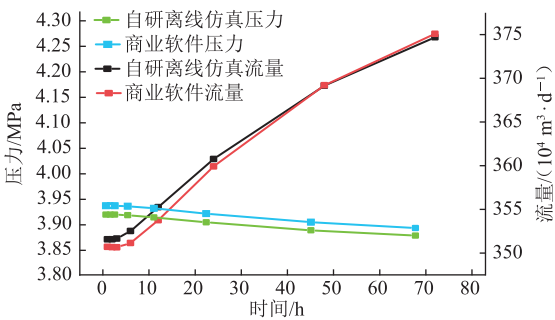


图 5 涩宁兰一线 C2 压气站在瞬态工况条件下采用自研离线仿真软件与商业软件计算得到的进站压力、流量随时间变化曲线
Fig. 5 Variation of inlet pressure and flow of C2 compressor station in Line 1 of Se-Ning-Lan Pipeline at transient simulation condition obtained by self-developed offline simulation software and commercial software with time

4.3 南部管网

南部管网主要由西气东输一线、西气东输二线、西气东输三线东段及其支线、冀宁管道、泰青威管道等组成,整个管网规模约 2.04×10^4 km。采用自研离线仿真软件建立南部管网仿真模型,该模型由 2 992 个元件组成,共有 35 个注入点、375 个分输点、1 179 段管道、1 265 个截断阀、96 个调节阀、42 个压气站。采用自研离线仿真软件建模并完成了模型调试,满足流量守恒、质量守恒,并证明了该软件在稳定性、容错率、适应性、准确性、计算效率等指标方面不低于国外仿真软件。

以南部管网某干线为例,该线全长 1 876 km,途经 4 个气源、32 个分输点、17 条支线、9 个压气站(第 2 个压气站在距离起点 180 km 处,且为旁通模式),模拟得到的某稳态工况下全线各点压力、流量变化曲线(图 6)与实际运行情况相符,某压气站内压缩机特性曲线(图 7)均处于正常工况范围内,证明自研离线仿真软件具备大型复杂管网的稳态仿真能力。

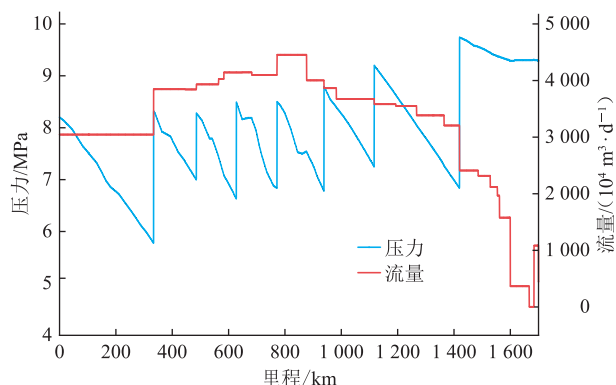


图 6 南部管网某干线在某稳态工况下全线各点压力、流量变化曲线

Fig. 6 Variation of pressure and flow of a trunk line in the southern pipeline network under a steady-state condition

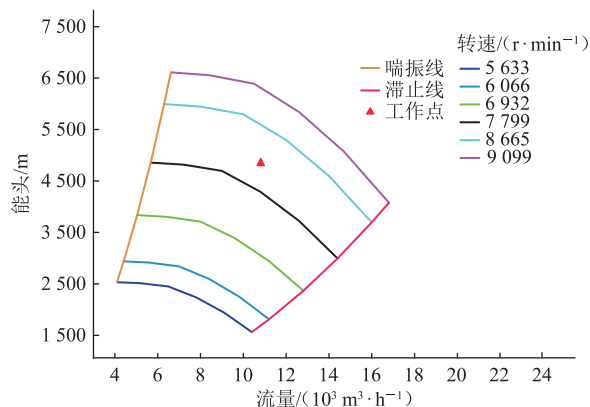


图 7 南部管网某干线压气站内压缩机特性曲线

Fig. 7 Characteristic curves of compressor in a compressor station of a trunk line in the southern pipeline network

5 结论及展望

拥有自主可控的大型复杂天然气管网离线仿真软件对掌握管网仿真核心技术、确保管网系统运行调度信息安全具有重大意义。提出了满足工业级应用的仿真引擎核心算法——分区增量迭代法,介绍了天然气管网离线仿真软件的总体架构与应用架构。以自研的天然气管网离线仿真软件为基础,针对某新建管道开展了设计校核应用;以涩宁兰管道为对象建立了管网仿真模型,完成了软件稳态、瞬态功能测试;分析了大规模、复杂拓扑结构的 2×10^4 km 级全要素南部管网的运行参数。通过实例应用证明自研天然气管网离线仿真软件针对不同规模天然气管网的仿真计算准确性基本一致,与国外同类软件性能相当,可为中国工业级国产化高水平天然气管网离线仿真软件的规模化应用奠定基础。未来将继续开展大型复杂天然气管网离线仿真软件压力测试,对软件性能进行全面优化提升,以期为中国天然气管网的调控运行与管理提供技术支持。

参考文献:

- [1] 丁建林,西昕,张对红. 能源安全战略下中国管道输送技术发展展望[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 632-639. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.005.
DING J L, XI X, ZHANG D H. Development and outlook of China's pipeline transportation technologies under energy security strategy[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(6): 632-639.
- [2] 李秋扬,赵明华,张斌,温文,王乐乐,张雪琴,等. 2020 年全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2021, 40(12): 1330-1337, 1348. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.12.002.
LI Q Y, ZHAO M H, ZHANG B, WEN W, WANG L L, ZHANG X Q, et al. Current construction status and development trend of global oil and gas pipelines in 2020[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(12): 1330-1337, 1348.
- [3] 严琳,赵云峰,孙鹏,刘明顺,王琦. 全球油气管道分布现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2017, 36(5): 481-486. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.05.001.
YAN L, ZHAO Y F, SUN P, LIU M S, WANG Q. The distribution status and development trend of global oil & gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(5): 481-486.
- [4] 高振宇,张慧宇,高鹏. 2022 年中国油气管道建设新进展[J]. 国际石油经济, 2023, 31(3): 16-23. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2023.03.003.

- GAO Z Y, ZHANG H Y, GAO P. New progress in China's oil and gas pipeline construction in 2022[J]. International Petroleum Economics, 2023, 31(3): 16-23.
- [5] 王振声. 油气储运资产完整性管理一体化标准体系建设与思考[J]. 油气储运, 2022, 41(4): 372-380. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.002.
- WANG Z S. Construction and consideration of integrated standard system for integrity management of oil and gas storage and transportation assets[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(4): 372-380.
- [6] 王亮, 焦中良, 朱锋, 武斌. 油气“全国一张网”构建所存在问题及方法论探讨[J]. 油气储运, 2022, 41(11): 1260-1268. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.11.003.
- WANG L, JIAO Z L, ZHU F, WU B. Problems in building the One Pipeline Network of oil and gas and discussion on methodology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(11): 1260-1268.
- [7] 李鹭光. 中国天然气工业发展回顾与前景展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 1-11. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.001.
- LI L G. Development of natural gas industry in China: review and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 1-11.
- [8] 王进举. 在线管网仿真系统在天然气行业中的应用[J]. 化工管理, 2019(28): 82-83. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2019.28.050.
- WANG J J. Application of online pipeline network simulation system in the natural gas industry[J]. Chemical Enterprise Management, 2019(28): 82-83.
- [9] 马贵利, 刘海峰, 彭磊, 王浩, 魏群坤, 袁豹, 等. 长输油气管道智慧化管理的应用及发展趋势[J]. 天然气技术与经济, 2022, 16(5): 45-49. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1132.2022.05.008.
- MA G L, LIU H F, PENG L, WANG H, WEI Q K, YUAN B, et al. Application and development trend of intelligent management for long-distance oil and gas pipelines[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2022, 16(5): 45-49.
- [10] 王寿喜, 邓传忠, 陈传胜, 李伟, 李俊, 高翔. 天然气管网在线仿真理论与实践[J]. 油气储运, 2022, 41(3): 241-255. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.03.001.
- WANG S X, DENG C Z, CHEN C S, LI W, LI J, GAO X. Online simulation of natural gas pipeline networks: theories and practices[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(3): 241-255.
- [11] 李长俊, 张员瑞, 贾文龙, 仇柏林, 何杰, 王硕. 大型天然气管网系统在线仿真方法及软件开发[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 723-731. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.014.
- LI C J, ZHANG Y R, JIA W L, QIU B L, HE J, WANG S. Online simulation method and software development of large-scale natural gas pipeline network system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(6): 723-731.
- [12] 陈国群, 郑建国, 柳建军, 彭世垚, 张明. 油气管网仿真技术现状与展望[J]. 油气储运, 2014, 33(12): 1278-1281. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.12.004.
- CHEN G Q, ZHENG J G, LIU J J, PENG S Y, ZHANG M. Current situation and outlook of oil and gas pipeline network simulation technology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(12): 1278-1281.
- [13] LI C J, JIA W L, WU X. A steady state simulation method for natural gas pressure-relieving systems[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 19: 1-12. DOI: 10.1016/j.jngse.2014.04.012.
- [14] WANG P, YU B, DENG Y J, ZHAO Y. Comparison study on the accuracy and efficiency of the four forms of hydraulic equation of a natural gas pipeline based on linearized solution[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 235-244. DOI: 10.1016/j.jngse.2014.11.032.
- [15] GYRYA V, ZLOTNIK A. An explicit staggered-grid method for numerical simulation of large-scale natural gas pipeline networks[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 65: 34-51. DOI: 10.1016/j.apm.2018.07.051.
- [16] 李长俊, 南发学, 亢春. 输气管道稳态计算公式改进研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(5): 155-157. DOI: 10.3863/j.issn.1000-2634.2008.05.037.
- LI C J, NAN F X, KANG C. Improved steady state formula for gas pipeline[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(5): 155-157.
- [17] 钱建华, 牛彻, 杜威. 管道智能化管理的发展趋势及展望[J]. 油气储运, 2021, 40(2): 121-130. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.02.001.
- QIAN J H, NIU C, DU W. Development trend and prospect of intelligent pipeline management[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(2): 121-130.
- [18] 路保平. 中国石化石油工程技术新进展与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 1-10. DOI: 10.11911/syztjs.2021001.
- LU B P. New progress and development proposals of Sinopec's petroleum engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 1-10.

(下转第 1080 页)

- opinions)[EB/OL]. (2021-07-15)[2023-07-04]. https://hd.ndrc.gov.cn/yjzx/yjzx_add.jsp?SiteId=366.
- [35] 潘继平, 焦中良. 面向碳达峰碳中和目标的中国油气发展战略思考[J]. 国际石油经济, 2022, 30(8): 1-15. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2022.08.001.
- PAN J P, JIAO Z L. Study on China's development strategy for oil & gas industry toward the goal of carbon peaking and carbon neutrality[J]. International Petroleum Economics, 2022, 30(8): 1-15.
- [36] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局, 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 关于印发《油气管网设施公平开放监管办法》的通知[EB/OL]. (2019-05-24)[2023-07-05]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201905/t20190531_960966_ext.html.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Notice on issuing the supervision measures for the fair opening of oil and gas pipeline network facilities[EB/OL]. (2019-05-24)[2023-07-05]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201905/t20190531_960966_ext.html.
- [37] 芮旭涛, 赵连增, 宫敬, 张珊, 袁童玲. 天然气管输定价机制改革对管道项目经济评价工作的影响[J]. 天然气工业, 2021, 41(11): 170-178. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.11.018.
- RUI X T, ZHAO L Z, GONG J, ZHANG S, YUAN T L. Influence of the reform of natural gas pipeline transportation pricing mechanism on the economic evaluation of pipeline project[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(11): 170-178.
- (收稿日期: 2023-07-05; 修回日期: 2023-07-14; 编辑: 张静楠)

作者简介: 闫宝东, 男, 1963年生, 高级工程师, 1985年毕业于华东石油学院油气储运工程专业, 现主要从事油气储运、安全环保管理方向的研究工作。地址: 北京市朝阳区东土城路5号, 100028。电话: 010-87981700。Email: yanbd@pipechina.com

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



(上接第1072页)

- [19] 王鹏, 童睿康, 蒋若兰, 周冠行, 高智文, 张引弟. 天然气管道瞬态仿真研究综述[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 6959-6970. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.17.001.
- WANG P, TONG R K, JIANG R L, ZHOU G H, GAO Z W, ZHANG Y D. Review on transient simulation of natural gas pipeline[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(17): 6959-6970.
- [20] STONER M A. Sensitivity analysis applied to a steady-state model of natural gas transportation systems[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1972, 12(2): 115-125. DOI: 10.2118/3056-PA.
- [21] 郭乔, 谢文昊, 聂子豪, 卢鹏飞, 奚茜, 王寿喜. 基于断裂降维算法的天然气管网瞬态仿真新方法[J]. 天然气工业, 2023, 43(5): 78-87. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2023.05.009.
- GUO Q, XIE W H, NIE Z H, LU P F, XI Q, WANG S X. A new method for transient simulation of natural gas pipeline networks based on fracture-dimension-reduction algorithm[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(5): 78-87.
- [22] 王洪波, 黄丽, 孟献强, 邢贵先, 李春锋. 涩宁兰复线多年冻土地段治理方案研究[J]. 石油工程建设, 2016, 42(4): 50-54. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2206.2016.04.012.
- WANG H B, HUANG L, MENG X Q, XING G X, LI C F. Schematic studies of frozen soil treatment in Se-Ning-Lan second gas pipeline project[J]. Petroleum Engineering Construction, 2016, 42(4): 50-54.
- (收稿日期: 2023-07-29; 修回日期: 2023-08-14; 编辑: 张雪琴)

基金项目: 国家管网集团科学研究与技术开发项目“油气管网在线仿真平台研发及应用(一期)”, SSCC202104。

作者简介: 张对红, 男, 1970年生, 教授级高级工程师, 1999年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气长输管道的科研管理工作。地址: 河北省廊坊市广阳区金光道51号, 065000。电话: 13910718069。Email: zhangdh@pipechina.com.cn

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

