

文章编号: 1000-8241(2022)06-0723-09

大型天然气管网系统在线仿真方法及软件开发

李长俊 张员瑞 贾文龙 仇柏林 何杰 王硕

西南石油大学石油与天然气工程学院

摘要:天然气管网系统仿真技术是管网系统设计方案论证、管输计划制定、运行方案优化、应急保障决策的核心技术。基于质量守恒、动量守恒、能量守恒原理及非管元件特性方程,建立了适用于任意结构形式的管网系统仿真模型;形成了基于管道数学模型泛函分析、大型稀疏矩阵压缩存储条件下的快速LU分解等方法的管网系统仿真模型求解算法。采用B/S软件架构、大数据高速缓存技术、大数据抽取实时可视化技术,开发了包括数据通讯模块、数据库存储模块、数据滤波模块、在线仿真模块、结果推送模块的大型天然气管网系统在线仿真软件,将其分别应用于总长6 100 km、45座压缩机站和总长31 000 km、117座压缩机站的大型管网系统,软件适用规模、计算精度与速度均达到国际同类商业软件水平。(图9,参25)

关键词:天然气管网;在线仿真;数学模型;软件开发

中图分类号:TE832

文献标识码:A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Online simulation method and software development of large-scale natural gas pipeline network system

LI Changjun, ZHANG Yuanrui, JIA Wenlong, QIU Bolin, HE Jie, WANG Shuo

Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University

Abstract: Natural gas pipeline system simulation is the core technology for design plan demonstration, transportation plan development, operation plan optimization, and emergency security decision-making of pipeline system. Hence, a simulation model applicable to the pipeline network systems in any structures was established based on the principles of conservation of mass, momentum and energy, as well as the characteristic equation of non-pipe elements. An algorithm for solving the simulation model of pipeline network system was formed based on the functional analysis of pipeline mathematical model and the fast LU decomposition under the large sparse matrix compression storage conditions. Besides, large-scale online simulation software for natural gas pipeline systems, comprising the modules of data communication, database storage, data filtering, online simulation and result pushing, was developed with the B/S software architecture, the big data caching technology and the real-time visualization technology for big data extraction. Then, the software was applied in a pipeline network system with a total length of 6 100 km and 45 compressor stations and a large pipeline network system with a total length of 31 000 km and 117 compressor stations. It is indicated that the applicable scale, calculation accuracy and speed of the software have reached the international level of similar commercial software. (9 Figures, 25 References)

Key words: natural gas pipeline network, online simulation, mathematical model, software development

天然气管网系统是由气源、管网、用户及储气库等“源-网-荷-储”各要素构成的规模庞大、组成复杂的一体化水动力系统,是重要的能源输送基础设施。截至2020年,中国天然气干线管道总里程约 10.2×10^4 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^[1-2]。随着中国天然气管网系统规模不断增大、结构日趋复杂、智慧化要求逐渐提高,如何实现管网系统的经济高效输送、安全稳定运行、灵活可靠

调配,是管网设计运行面临的关键问题,同时对管网系统仿真软件的适用规模、计算精度与速度也提出更高的要求。

天然气管网系统的计算机仿真技术可基于对管网流动过程的数学表征,量化管网内天然气的流动及变化过程,从而精确预测和回溯管网系统各气源、用户、管道、设备的运行状态,是实现管网系统安全、高效设计与运行管理的核心技术,也是智慧管网背景下支撑智能管输计划制定、方案优化、应急保障的基础^[3-6]。国外目前已基本形成较为成熟的管网系统仿真软件产品,如美国 Gregg 公司的 NextGen 软件、德国 DNV GL 的 SPS 软件、美国 Emerson 公司的 Pipeline Studio 软件、捷克 SIMONE Research Group 和德国 LIWACOM 公司联合开发的 SIMONE 软件^[7],这些软件的广泛应用为中国管网系统的科学规划、建设、运行管理做出了重要贡献。

在中国管网规模逐渐大型化、管网信息安全要求逐步提高、核心自主知识产权“卡脖子”问题日益凸显的背景下,国外软件的采购与维护费用高、深层次功能定制与开发、信息安全自主可控等方面的局限性也开始显现出来。特别是国外软件受其特殊版权与核心技术保护机制的影响,难以融入中国自主构建的智慧管网体系。因此,亟需掌握天然气管网系统仿真的核心理论方法,从而有效保障中国天然气干线管网和城市燃气管网规划、设计、运行及管理。虽然中国相关科研院所在此方面进行了长期的研究,但相关软件产品缺乏良好的应用生态和成熟商业化发展模式,在软件适用的管网规模、计算速度与精度、稳定性方面与国外产品还存在差距。

西南石油大学从 20 世纪 80 年代开始开展管网系统仿真技术研究,形成了大型管网系统仿真的核心理

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(h + \frac{M^2}{2A^2\rho^2} \right) M \right] + A \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(h - \frac{p}{\rho} + \frac{M^2}{2A^2\rho^2} \right) \rho \right] + \frac{4AK(T-T_0)}{D} + Mg\sin\theta = 0 \quad (3)$$

$$p = p(\rho, T) \quad (4)$$

$$h = h(\rho, T) \quad (5)$$

式中: M 为天然气质量流量, kg/s ; A 为管道流通截面积, m^2 ; ρ 为天然气密度, kg/m^3 ; x 为管道位置, m ; t 为时间, s ; p 为天然气压力, Pa ; g 为当地重力加速度, m/s^2 ; θ 为管道与水平面的夹角, rad ; D 为管道内径, m ; λ 为管道摩擦系数; h 为天然气的焓, J/kg ; K 为管道总传

论方法^[8-9]。近年来,抓住国家和行业重视并推动国产仿真软件发展的契机,融合大数据、人工智能等新兴技术,实现了管网系统仿真软件架构从 C/S 架构向 B/S 架构、仿真模式从离线仿真向在线仿真、适用规模从小型管网向大型复杂环状管网的快速发展。详细论述了管网系统建模及求解算法、大型天然气管网系统在线仿真软件开发及相关应用实例,以期国产化仿真软件的开发应用提供借鉴。

1 大型天然气管网系统仿真模型

根据组成天然气管网系统的要素,可将管网系统(图 1)分为 3 个子系统^[10]:管道元件、非管道元件(除管道以外的其他设备,如阀门、压缩机、储气库等)、节点(气源、用户、各元件的交汇点)。

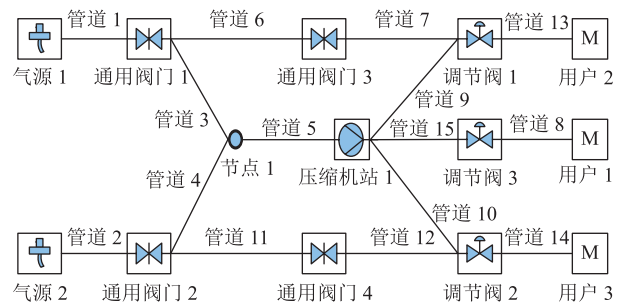


图 1 天然气管网系统组成示意图

根据天然气在管道内一维流动的连续性方程、动量方程、能量方程等运行方程,可建立管道元件数学模型^[11-15]。连续性方程、动量方程、能量方程、状态方程、焓方程的表达式分别为:

$$\frac{\partial M}{\partial x} + A \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(A^2 p + \frac{M^2}{\rho} \right) + A \frac{\partial M}{\partial t} + A^2 g \rho \sin\theta + \frac{\lambda}{2} \frac{M^2}{D \rho} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(h + \frac{M^2}{2A^2\rho^2} \right) M \right] + A \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(h - \frac{p}{\rho} + \frac{M^2}{2A^2\rho^2} \right) \rho \right] + \frac{4AK(T-T_0)}{D} + Mg\sin\theta = 0 \quad (3)$$

$$p = p(\rho, T) \quad (4)$$

$$h = h(\rho, T) \quad (5)$$

热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T 为天然气温度, K ; T_0 为管道埋深处温度, K 。

根据离心式压缩机、调节阀等非管道元件进出口压力、流量、温度之间的关系,建立非管道元件特性方程^[16-19]。以压缩机为例,其特性方程主要包括压头方程、效率方程、压比方程、功率方程、排气温度方程,具体表达式分别为:

$$H = a_1 + a_2 n + a_3 n^2 + (a_4 + a_5 n + a_6 n^2) Q + (a_7 + a_8 n + a_9 n^2) Q^2 \quad (6)$$

$$\eta = b_1 + b_2 n + b_3 n^2 + (b_4 + b_5 n + b_6 n^2) Q + (b_7 + b_8 n + b_9 n^2) Q^2 \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{p_o}{p_r} \quad (8)$$

$$P = M \frac{H}{\eta} \quad (9)$$

$$T_o = T_r \varepsilon^{\frac{k-1}{k} z_r} \quad (10)$$

式中: H 为绝热压头, kJ/kg ; n 为压缩机转速, r/min ; $a_1 \sim a_9$ 为系数; Q 为入口条件下的体积流量, m^3/s ; η 为绝热效率; $b_1 \sim b_9$ 为系数; ε 为压缩机压比; p_r 、 p_o 分别为压缩机入口、出口压力, Pa ; P 为轴功率, kW ; T_o 、 T_r 分别为压缩机出口、入口温度, K ; k 为天然气绝热指数; T' 为理想气体压缩后的出口温度, K ; z_r 为入口条件下的压缩因子; z 为压力 p_o 、温度 T' 条件下的压缩因子。

以调节阀为例,其特性方程主要包括压力方程和温度方程,具体表达式分别为:

$$p_r - p_o = \frac{1}{2} \xi \rho_r \left(\frac{4M}{\pi D_v^2 \rho_r} \right)^2 \quad (11)$$

$$h_{in} = h_{out} \quad (12)$$

式中: ξ 为压力损失系数; ρ_r 为进口气体密度; D_v 为阀门直径, m ; h_{in} 、 h_{out} 分别为调节阀进口、出口焓值, J/kg 。

对于非管道元件,从组成管网系统的实际元件出发,可建立通用阀、止回阀、调节阀、局部阻力件、换热器、过滤器、放空火炬、储罐、缓冲罐、安全阀、泄漏点、储气库、配气站、集气站、分输站、压缩机站的数学模型。考虑压缩机在实际运行过程中存在的压比控制、出口压力控制、转速控制等多种控制模式,调节阀的流量控制、压差控制、出口压力控制、入口压力控制等多种控制模式,换热器的温差控制、出口温度控制等多种模式,采用基于 PID 的控制方法,即可实现对各种控制模式的模拟。

根据天然气在节点处交汇的质量守恒、能量守恒、组分守恒原理,建立节点流量平衡、能量平衡及组分平衡方程^[20],其表达式分别为:

$$\sum_{i=1}^{N_{in}} M_i = \sum_{j=1}^{N_{out}} M_j \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{in}} M_i h_i = \sum_{j=1}^{N_{out}} M_j h_j \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{in}} C_{i,n} Q_{\text{mol},i} = \sum_{j=1}^{N_{out}} C_{j,n} Q_{\text{mol},j} \quad (15)$$

式中: N_{in} 、 N_{out} 分别为流入、流出节点的元件数量; M_i 、 M_j 分别为流入、流出节点的元件的质量流量, kg/s ; $C_{i,n}$ 、 $C_{j,n}$ 分别为流入、流出节点的元件的第 n 个组分摩尔分率; $Q_{\text{mol},i}$ 、 $Q_{\text{mol},j}$ 分别为流入、流出节点的元件的摩尔流量, mol/s 。

为了使管网系统模型封闭,还需在管网系统的气源和用户处设置边界条件。其中,气源处一般设置压力温度边界条件、流量温度边界条件;用户处则需设置压力边界条件、流量边界条件中任何一个^[21]。如果是随时间变化的,还应给定这些参数随时间的变化关系。

2 管网系统仿真模型的求解算法

天然气管网系统仿真模型是由一系列非线性偏微分方程组和非线性代数方程组构成,传统的求解方法首先采用隐式差分法、特征线法等方法将非线性偏微分方程展开为线性方程,然后采用 Newton-Raphson 迭代法、Gauss-Seidel 迭代法等方法进行求解,并在小型管网模型中得到较为广泛的应用。这类方法实际是用线性化方程的解来近似非线性方程的解,所以求解的准确性很大程度上取决于管道网格划分的长度,网格长度越小,计算结果越接近实际情况。对于大型天然气管网系统而言,随着元件、节点数量的增加,仿真模型规模急剧增大,如果管网网格长度划分过小,会使得数学模型规模激增,导致计算机求解速度缓慢、内存消耗急剧增加。

针对上述问题,结合管道流动方程的特点,基于泛函理论,创新研究了采用大网格描述压力、温度、流量等工艺参数分布的有效基函数及其叠加形式,以不同基函数及其叠加形式来表征管道大网格内压力、流量等参数的分布,并通过研究这种分布函数来逼近偏微分方程的解^[22]。通过该方法扩大了管道网格步长,减少了仿真方程的数量,进而扩大了仿真规模。同时,针对大型管网系统仿真模型迭代求解过程中,雅克比矩阵为稀疏非对称矩阵的特点^[23],将大型方程组分解成一系列小型方程组,采用稀疏矩阵的压缩存储法,利用压缩存储条件下的 LU 分解法、自适应仿真等多项技术进行快速求解,从而避免对稀疏矩阵中零元素的访问和求解。测试表明,采用上述方法后,可节省计算机

内存 95% 以上,能够大大提升仿真软件对于管网规模的适应性。

上述数学模型与求解方法对于管网系统拓扑结构、方程的分布形式没有特别要求,因此,可适用于任意结构形式的管网系统,构成了大型天然气管网系统在线仿真软件的计算核心。

3 管网系统在线仿真软件开发

以上述数学模型和求解算法为基础,结合天然气管网系统智能化运行的业务需求,设计了天然气管网系统运行管控平台,完成了管网在线仿真软件的开发。大型天然气管网系统在线仿真软件(图 2)基于 B/S 架构,采用 Java EE 企业级开发平台开发,由图形化组态、实时数据通讯、在线数字滤波、大数据存储、在线仿真、参数评价与修正、大数据可视化模块构成;可实现大型天然气管网系统的在线仿真、运行参数预测与回溯、运行参数预警、系统能耗分析、清管作业分析、虚拟计量等功能^[24]。

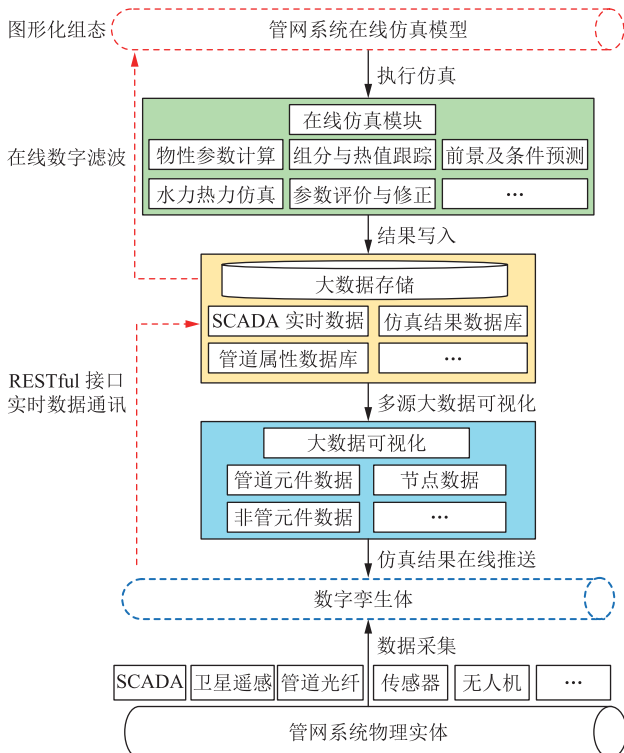


图 2 大型天然气管网系统在线仿真软件架构示意图

(1) 图形化组态模块。广泛借鉴国外管网系统仿真软件、绘图办公软件的风格,开发了全中文的图形化组态界面,具备与微软 Visio 软件类似的绘图风格,界面友好易用。

(2) 实时数据通讯模块。基于 HTTPS、HTTP 通讯协议及 RESTful 数据接口,实现了在线仿真软件与数字孪生体数据的集成、数字孪生体数据向仿真软件的实时传输、仿真结果向数字孪生体的实时推送。

(3) 在线数字滤波模块。数字孪生体采集的数据可能出现异常值或缺失,如果将这些数据作为计算的边界条件输入在线仿真模块,将获得明显异常的仿真结果,甚至导致计算崩溃。为此,采用在线多尺度滤波方法(On-line Multiscale Filtering, OLMS)将采集到的数据进行数字滤波处理(图 3a),去除异常信号;采用预测参数、移动插值平均等方法进行参数补齐(图 3b),保证仿真过程的稳健性。

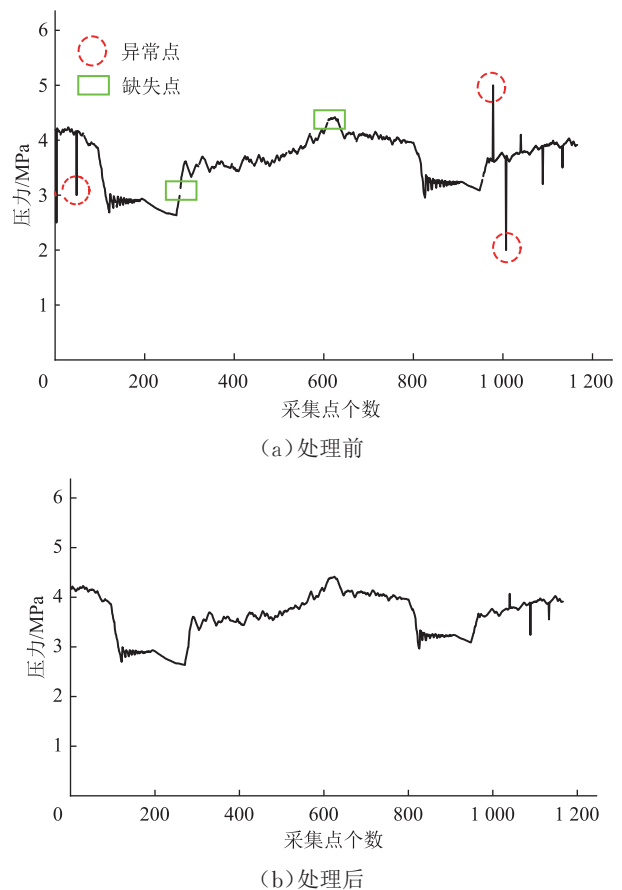


图 3 数字滤波与参数补齐处理前后的压力信号数据图

(4) 大数据存储模块。针对数字孪生体与在线仿真软件数据传输量大及时序数据结构的特点,设计了管道属性数据库、天然气物性数据库、环境参数数据库、仿真结果数据库、SCADA 实时数据等在内的核心数据库。针对海量数据的接收与存储难题,首先采用高速缓存技术满足时序数据即时读写需求,再将数据持久化到硬盘。理论上可实现

100×10⁴条/s的数据读写要求,实现5 000×10⁴条数据分库存储、100×10⁴条数据分表存储。

(5)在线仿真模块。基于上述理论模型和求解算法,开发在线仿真软件内核,包括基于BWR5、PR、SRK、GERG-2008等状态方程的天然气热物性参数计算、管网水力与热力仿真、组分与热值跟踪、前景及条件预测、清管器跟踪等核心功能^[25]。

(6)参数评价与修正模块。为提高仿真软件的计算精度,根据仿真结果与实际运行参数之间的偏差,采用遗传算法与深度学习神经网络算法,修正管道的总传热系数、粗糙度、压缩机特性参数等可调参数,实现模型的自主学习和修正。

(7)大数据可视化模块。基于大数据可视化框架,实现实时采集数据、在线仿真数据、压缩机组能耗数据、管输计划及实际执行数据等多源大数据汇聚展示。

4 应用实例

4.1 西部管道天然气管网

西部管道天然气管网包括西气东输一线、二线、三线西段以及轮吐线,全长6 100 km,包括4个主要气源、15个沿途分输点、206座阀室、45座压缩机站、292条管道。西二线和西三线并行布置,站内压缩机通过管道、阀门连接,形成一个更为复杂的管网系统(图4)。模型中,天然气物性计算采用PR状态方程,摩阻系数采用Colebrook公式,管道网格长度1~10 km。气源采用流量温度边界条件,如西二线霍尔果斯站流量为8 413×10⁴ m³/d,入口温度为30℃;分输用户采用压力边界或者体积流量边界条件,如西二线西段终点压力为8 MPa;压缩机站采用压比或出口压力控制,如西二线霍尔果斯站压比为1.5,站内压缩机的串并联配置按照实际压缩机组配置方式。

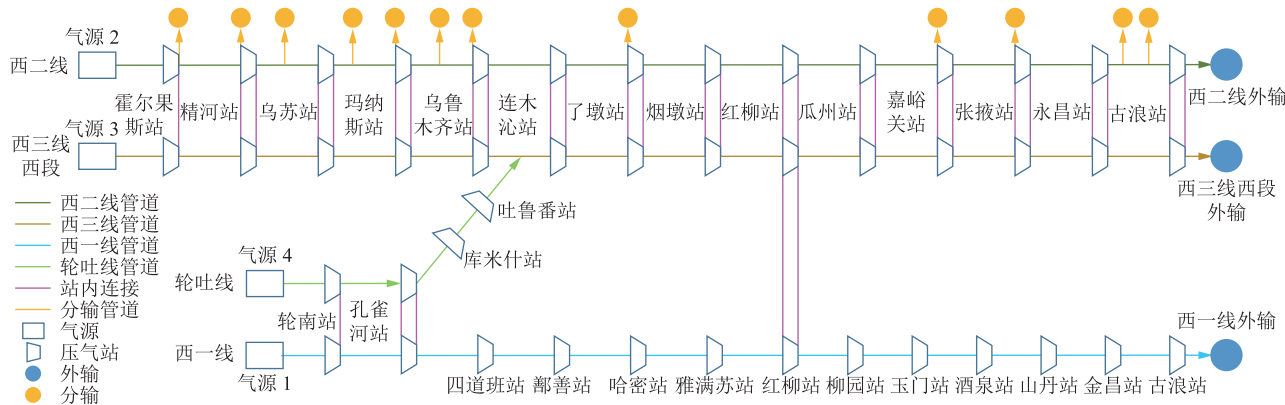
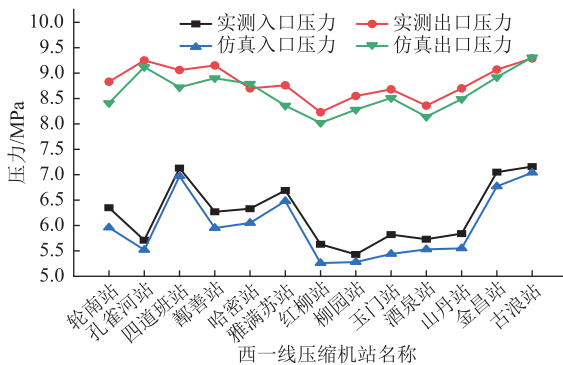


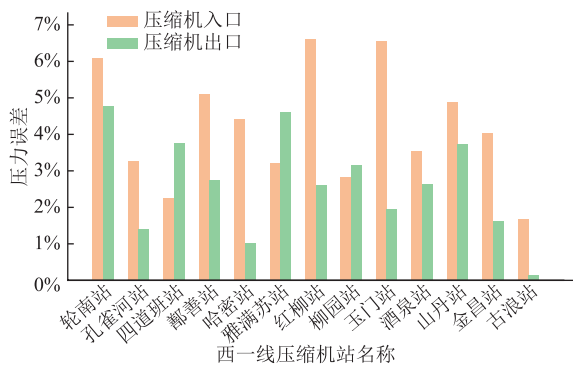
图4 西气东输天然气管网系统主要结构示意图

采用上述模型进行稳态仿真,计算机主要配置为CPU Intel Core i7-7700HQ (2.80 GHz,4核),内存12 G(DDR2400),完成稳态仿真用时仅为3 s,优于Pipeline Studio 4.0软件(用时20 s)。以西一线为例,计算得到各压缩机站的进出口压力与实际压力对比

及误差(图5)。可见,入口压力、出口压力仿真值与实际值的相对偏差分别为4.16%、2.63%,最大偏差不超过7%。计算得到的西一线轮南站、西二线霍尔果斯站压缩机实际工况条件下的工况点(图6)均处于正常工况范围内。



(a) 压缩机站进出口压力



(b) 误差

图5 西一线天然气管道各压缩机站进出口压力对比及误差图

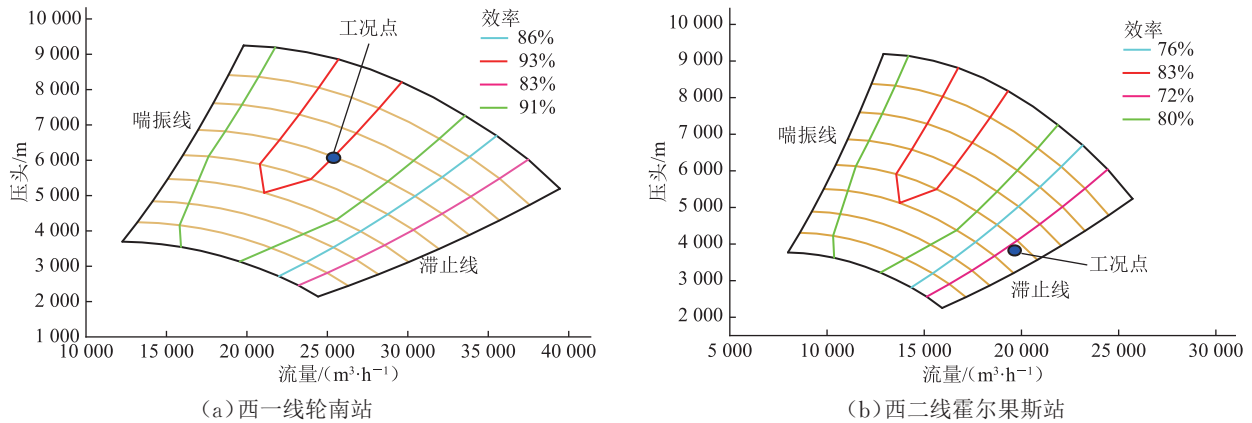


图6 西一线轮南站和西二线霍尔果斯站压缩机特性参数及实际工况点曲线

4.2 复杂干线天然气管网

以简化的中国天然气干线管网为研究对象(图7)。管网总长度达31 000 km,包含29个主要气源、165个用户、956座阀室、1 215条管段、117座压缩

机站,共同组成了结构形式复杂的管网系统。采用大型天然气管网系统在线仿真软件建立仿真模型,进行稳态和动态仿真,检验软件适用的管网规模范围和计算速度。

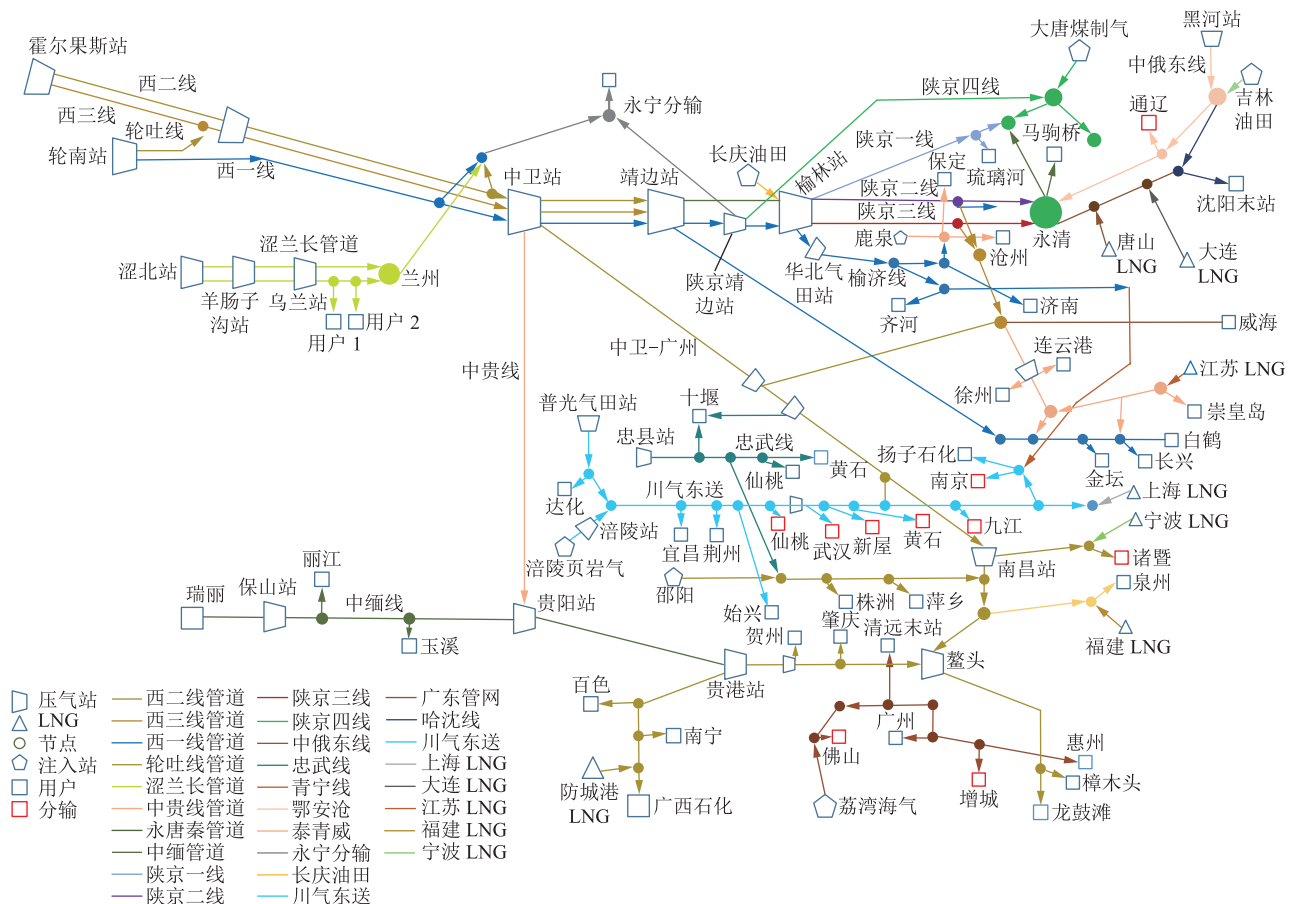


图7 简化的中国天然气干线管网系统结构示意图

4.2.1 稳态仿真

气源采用压力温度边界和体积流量温度边界控制,分输用户采用体积流量边界或压力边界条件,压缩机组采用出口压力控制或压比控制。天然气物性计算采用PR状态方程,摩阻系数采用Colebrook计算公式。

完成稳态仿真用时6 s,计算速度远远优于Pipeline Studio 4.0、SPS 9.7等国外商业软件(如Pipeline Studio 4.0用时50 s)。由模拟计算得到的部分压缩机组进、出口压力及压缩机功率图(图8)可知:计算结果符合实际运行情况。

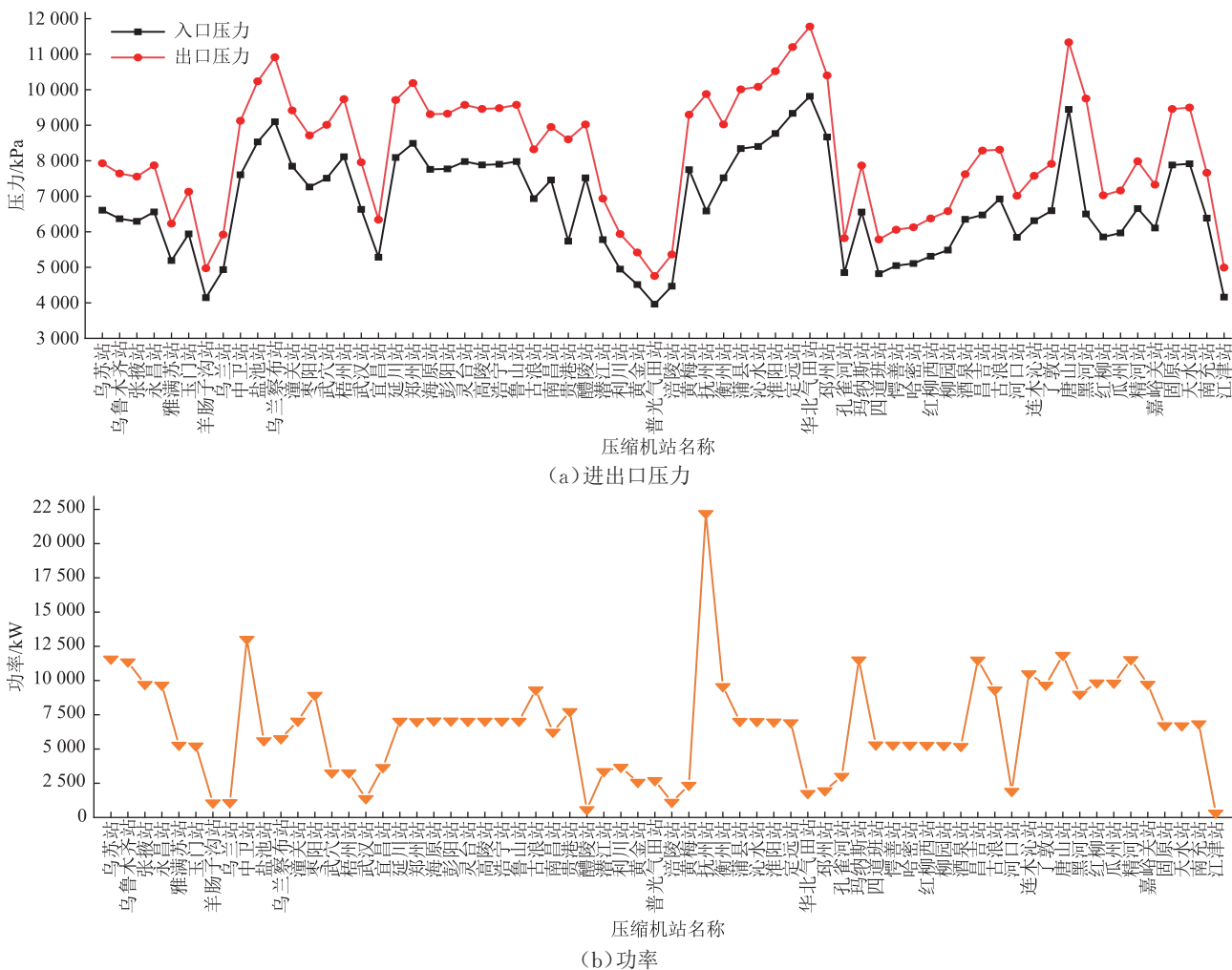


图 8 中国天然气干线管网系统部分压缩机站进出口压力及功率图

4.2.2 动态仿真

在稳态仿真基础上,改变南京分输站的流量,使其随时间不断变化,设置固定时间步长为 180 s,管道网格步长 0.1~10 km,进行 24 h 连续动态仿真,动态仿真完成时间为 105 s;进一步改变最小时间步长为 5 min,最大时间步长 20 min,进行 15 天的连续动态仿真,动态仿真完成时间为 460 s。通过与商业软件的

对比可见,计算速度均优于 Pipeline Studio 4.0、SPS 9.7 等国外商业软件(如 SPS 软件 15 天动态仿真用时 2 h),并与 SIMONE 软件(15 天动态仿真用时 200 s)处于同一数量级,总体达到了国外商业软件的先进水平。

采用上述软件模拟得到南京分输站及与南京分输站相邻的扬子石化分输站 6 h 内压力、流量随时间的变化情况(图 9)。可见,南京分输站压力、输量呈相

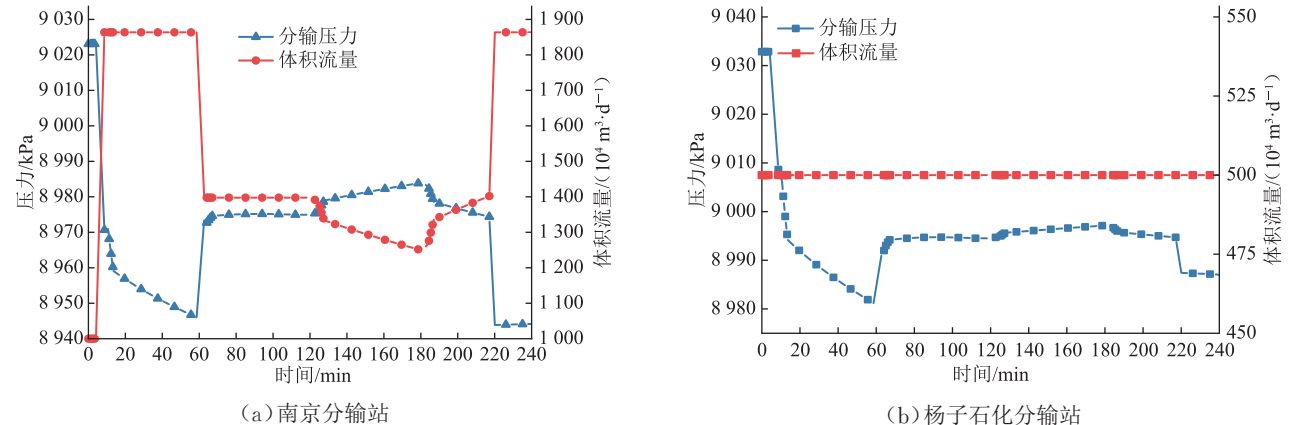


图 9 南京分输站及相邻扬子石化分输站 6 h 内压力、流量随时间变化曲线

反的变化趋势,而扬子石化分输站与南京分输站连接在一个阀室上,两者压力变化趋势相同,符合实际运行规律。

5 结论

开发具有自主知识产权的大型天然气管网系统在线仿真软件是掌握管网系统仿真核心技术、确保管网系统运行调度信息安全、推进天然气管网系统智能化运行的迫切需求。介绍了大型天然气管网系统仿真模型的构建方法、基于泛函分析的管网系统仿真模型高效求解算法,并基于B/S架构开发了由7大模块构成的大型天然气管网系统在线仿真软件,可实现管网系统的在线仿真、运行参数预测与回溯、运行参数预警、系统能耗分析、清管作业分析、虚拟计量等功能。通过西部管道天然气管网及国家干线天然气管网系统的实例应用,验证了该软件的计算精度符合要求,在计算速度及适用的管网系统规模方面也达到国外同类软件的先进水平,为中国国产化高水平管网系统仿真软件的开发奠定了基础。未来可继续开展管道、站场在全生命周期内各种运行场景的在线仿真、预测、优化、预演、预警与决策,指导天然气管网的运行业务优化和应急管理。

参考文献:

- [1] 刘合,梁坤,张国生,李志欣,丁麟,苏健,等. 碳达峰、碳中和约束下我国天然气发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 33-42.
- LIU H, LIANG K, ZHANG G S, LI Z X, DING L, SU J, et al. China's natural gas development strategy under the constraints of carbon peak and carbon neutrality[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 33-42.
- [2] 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.
- LI L G. Development of natural gas industry in China: review and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 1-11.
- [3] MARINO A, ZIO E. A framework for the resilience analysis of complex natural gas pipeline networks from a cyber-physical system perspective[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 162: 107727.
- [4] 宇波,王鹏,王丽燕,向月. 基于分而治之思想的天然气管网仿真方法[J]. 油气储运, 2017, 36(1): 75-84.
- YU B, WANG P, WANG L Y, XIANG Y. A simulation method for natural gas pipeline networks based on the divide-and-conquer concept[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 75-84.
- [5] 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.
- 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.
- [6] 王文凯,付子航,刘方,杨玉霞,黄洁馨. 多气源多用户环形管网供需预测数值模拟[J]. 油气储运, 2021, 40(10): 1187-1193.
- WANG W K, FU Z H, LIU F, YANG Y X, HUANG J X. Numerical simulation of supply and demand forecasting of multi-source and multi-user annular pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(10): 1187-1193.
- [7] 陈国群,郑建国,柳建军,彭世焱,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.
- 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.
- [8] 王寿喜,曾自强. 天然气管网静态动态仿真[J]. 天然气工业, 1995, 15(2): 59-63, 111-112.
- WANG S X, ZENG Z Q. Static and dynamic emulation of natural gas pipeline network[J]. Natural Gas Industry, 1995, 15(2): 59-63, 111-112.
- [9] 李长俊,曾自强. 气体管网系统的仿真[J]. 油气储运, 1997, 16(2): 21-25.
- LI C J, ZENG Z Q. Emulation of gas pipeline network system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1997, 16(2): 21-25.
- [10] WU X, LI C J, HE Y F, JIA W L. Operation optimization of natural gas transmission pipelines based on stochastic optimization algorithms: a review[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 1267045.
- [11] 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.

- [12] 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.
- [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.
- [14] 李长俊, 亢春, 刘恩斌, 贾文龙. 煤层气输送管道仿真技术研究[C]. 深圳: 2010 年中国天然气(含煤层气/煤制天然气)产业及系统管网建设发展论坛, 2010: 134-141.
- LI C J, KANG C, LIU E B, JIA W L. Research on simulation technology of coalbed methane transmission pipeline[C]. Shenzhen: 2010 China Natural Gas (Including Coalbed Methane/Coal To Natural Gas) Industry and System Pipe Network Construction and Development Forum, 2010: 134-141.
- [15] 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.
- 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.
- [16] MEIRA R L, COSTA G M N, KALID R A, MARTINS M A F. Improving the centrifugal compressor map through rigorous thermodynamic modeling: an analysis on a natural gas compression station pipeline[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 92: 104006.
- [17] WU X, LI C J, JIA W L, HE Y F. Optimal operation of trunk natural gas pipelines via an inertia-adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21: 10-18.
- [18] 杨毅, 周志斌, 李长俊, 向敏. 天然气管输调节控制仿真模型[J]. *天然气工业*, 2008, 28(10): 98-100, 147.
- YANG Y, ZHOU Z B, LI C J, XIANG M. Research on natural gas pipeline regulation-control simulation model[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(10): 98-100, 147.
- [19] WIID A J, LE ROUX J D, CRAIG I K. Modelling of methane-rich gas pipeline networks for simulation and control[J]. *Journal of Process Control*, 2020, 92: 234-245.
- [20] 康琦, 吴海浩, 张若晨, 樊迪, 李晓平, 王玮, 等. 面向智能油田的集输管网工艺模拟软件研制[J]. *油气储运*, 2021, 40(3): 277-286.
- KANG Q, WU H H, ZHANG R C, FAN D, LI X P, WANG W, et al. Development of process simulation software for gathering and transportation pipeline network of intelligent oilfield[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(3): 277-286.
- [21] WANG P, YU B, HAN D X, SUN D L, XIANG Y. Fast method for the hydraulic simulation of natural gas pipeline networks based on the divide-and-conquer approach[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 50: 55-63.
- [22] 李长俊, 柏毅, 赵金洲. 基于泛函理论分析输气管道不稳定流动[J]. *重庆建筑大学学报*, 2005, 27(3): 38-43.
- LI C J, BAI Y, ZHAO J Z. An unsteady flow analysis in gas transmission pipeline based on theory of functional analysis[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2005, 27(3): 38-43.
- [23] 任帅. 带压缩机输气干线稳态运行优化技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- REN S. Research on optimization technology of steady-state operation of gas transmission trunk line with compressor[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [24] 张国强, 李刚, 韩立涛. 京石邯输气管道清管作业 PSIGanesi 在线仿真[J]. *油气储运*, 2021, 40(11): 1314-1320.
- ZHANG G Q, LI G, HAN L T. PSIGanesi online simulation of pigging in Beijing—Shijiazhuang—Handan Gas Pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(11): 1314-1320.
- [25] DOS SANTOS S P, LEAL J E, OLIVEIRA F. The development of a natural gas transportation logistics management system[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(9): 4774-4784.
- (收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-04-03; 编辑: 张雪琴)
-
- 基金项目:** 国家自然科学基金面上项目“X70/X80 钢掺氢天然气输送管道氢脆失效机理及安全服役能力研究”, 52074238.
- 作者简介:** 李长俊, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 1987 年硕士毕业于西南石油学院油气储运工程专业, 现主要从事油气管道多相流方向的科研和教学工作。地址: 四川省成都市新都区西南石油大学国家重点实验室, 610500。电话: 13880553688。Email: lichangjunemail@sina.com