



油气储运

Oil & Gas Storage and Transportation

ISSN 1000-8241, CN 13-1093/TE

《油气储运》网络首发论文

题目：油气管网仿真技术在智能管网建设中的应用及展望
作者：宫敬，史博会，李晓平，虞维超，吴海浩
收稿日期：2023-06-09
网络首发日期：2023-07-18
引用格式：宫敬，史博会，李晓平，虞维超，吴海浩. 油气管网仿真技术在智能管网建设中的应用及展望[J/OL]. 油气储运.
<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/13.1093.TE.20230717.1931.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

油气管网仿真技术在智能管网建设中的应用及展望

宫敬¹ 史博会¹ 李晓平¹ 虞维超² 吴海浩¹

1. 中国石油大学（北京）机械与储运工程学院 城市油气输配技术北京市重点实验室·

油气管道输送安全国家工程研究中心；2. 国家管网集团油气调控中心

摘要：智能管网建设需要准确描述管网特性和行为，随着智能管网的快速发展和应用，仿真技术成为智能管网建设中不可或缺的一部分。梳理了国内外油气管网仿真技术在理论研究、工程应用及仿真软件研发的发展现状，明确了智能管网建设对油气管网仿真技术和仿真平台的需求，从规划与设计、投产、运行维护等不同阶段，阐述了油气管网仿真技术在智能管网建设中的应用场景，并从通用性、高效性、智能化等方面对油气管网仿真技术的发展进行了展望，以期更好地发挥油气管网仿真技术在智慧管网建设中的作用。

关键词：油气管网；仿真；智能管网；机理模型；数据驱动

油气管网涵盖上游地面多相流、中游单相原油/成品油/天然气及下游城市配气管网。其仿真内容略有不同，但应用的基础理论都是采用流体力学中的连续性方程、动量方程及能量方程建立微分方程，并耦合相应的状态方程与管网系统边界特征，采取数值分析方法对管道进行模拟。其优化内容会由于目标不同而相差较大，但无论是何目标，仿真都是优化的基础。

近年来，随着互联网、大数据、人工智能等技术的快速发展，在内在需求和外在技术背景的作用下，智能管道建设已经开展。按照当前的普遍认识，以工业发展特点划分，利用信息化技术促进产业变革的智能化时代已经到来，并形成了一系列具有代表性的理论技术体系。这些技术都有一个基本的含义就是“利用数据的仿真过程”，此处的“数据”包括实体物理数据、传感数据、历史数据等，“仿真过程”则指对学科知识、物理变量及物理模型（涉及不同尺度、维度、概率）等的计算过程。

1. 油气管网仿真技术发展现状

智能管道是指在标准统一和管道数字化的基础上，应用信息化、智能化手段，实现对传统管道运营的升级和智能化改造，并基于仪表、设备、设施以及通信技术，对流量、温度、压力等参数的实时数据进行采集、管理、传输及预处理，以实现通过数据分析对初期故障和潜在的风险进行实时监测。对于分析预测或者监测到的问题，智能管道可以采用软件建模方法给出各类可能的解决方案，并根据所有可用数据、技术限制、风险和经济学方法来评估替代方案的优越性，为优化决策提供信息并改进生产运行计划，实现管道的生产优化。同时智能管道通过建立生产运行数字孪生体实现资源市场匹配度的预测，进而基于供气可靠性和经济效益目标，自动给出运行控制参数和方法以达到系统整体最优并可持续发展^[1-2]。智能管道的应用可以大幅提升生产质量、进度以及安全管控能力，实现管道的可视化、网络化、智能化管理，并最终形成具有全面感知、自动预判、智能优化、自我调整能力，且安全高效运行的智能管网^[3-4]。仿真技术能够通过建立管道的物理模型和行为描述，对管道进行仿真模拟，从而更好地了解管道的运行特性和响应，包括管道内部流动、温度分布、压力变化等，能够为智能管网的设计和优化提供参考，是智能管网建设中不可或缺的一部分^[5]。

国外油气管网仿真技术领域的研究起步较早，拥有较为完善的技术方案和功能成熟且具有一定垄断趋势的商业软件，其中多为挪威、美国、德国、英国等国公司通过研发并购的国际通用商业仿真软件产品，如 SPS、OLGA、TLNET/TGNET、ATMOS、SIMONE、Gregg、Synergi gas、Pipesim、Ledaflow、Pipephase 等，已广泛应用于全球油气管网，约占 90% 的市

市场份额，为油气生产和输送业务的发展及管理水平的提高发挥了重要作用。国外对管网仿真机理模型的基础研究已相当成熟和完善，面对流体特征复杂、外部环境多变、内部节点特性多变的油气管网系统，可以实现对复杂管网稳态和瞬态的水/热力计算以及对设备操作和控制的流程模拟^[6]。

中国对管道模拟仿真技术的研究起步于 20 世纪 80 年代初。目前在多相管流和油气处理过程的理论研究方面取得了不错的进展，在油气混输流动机理及工艺过程模拟领域也取得了宝贵的研究成果，部分成果以软件或分析系统的形式在一些油气田工程中得以应用^[7]。然而开发的技术方案和软件都是针对某具体的工程项目，所建软件功能的完整性、扩展性、适用性、通用性与国外软件仍存在很大差距^[8]，难以普适地应用到大型管网仿真中。此外，中国主要是依托世界主流油气管网仿真软件，建立离线、在线、稳态、动态等仿真技术应用体系，从各大石油院校、管道设计院到管道运营公司，逐渐形成了管道设计、工艺过程仿真及调度培训、试运投产模拟、运行方案优化、管道逻辑保护、调节阀 PID 参数整定等相关技术的应用系统。

中国油气管网仿真软件研发应依据软件工程理念进行管理，在用户需求、设计开发、测试改进、维护更新等阶段加以改进。用户需求调研是软件开发的前提，应用场景应涵盖规划、设计、运行（离线、在线）、优化等各个方面。物理模型是工业软件设计开发的核心，尽管已形成可应用的基本算法，但不同场景下数值算法和边界条件的处理尚不完善，未达到工业软件应用要求。另外，设备特性、工业控制、经验知识也需进一步融入。初步设计开发完成后，应进行全面测试并加以改进，应用于工程实际不断迭代更新，保障工业软件的准确性、可靠性、鲁棒性。工业软件是系统模型、信息技术、工艺设计的结晶，需要高校与企业、油气储运行业与信息技术行业通力协作，共同完成。

针对仿真技术而言，管网仿真分为稳态模拟和瞬态模拟。稳态模拟的本质是求解节点流量平衡和元件压降特性的方程组，根据求解变量的不同，可分为节点压力法、管段流量法及环方程法^[9]。不同输送介质下，管段压降特性差异较大，多相管道则更为复杂，往往需要反复迭代求解，故收敛难度较高。随着管网结构的增大，可采用分块并行和全局梯度算法提高计算速度^[10]。瞬态模拟方面，输油管道和输气管道采用的计算方法有所不同。由于物理概念清晰、计算过程简便、边界描述方便，输油管网普遍采用特征线法进行瞬态计算。但由于每个管段均要划分为整数段，对于管段数量较多且长度差异较大的系统，时步极小导致计算速度较慢，可采用刚性法或内插法简化处理，在计算精度允许范围内提高计算速度。受气体可压缩性影响，天然气管道中的特征线并非直线，且相比于液体管道，波速流速相差较小，特征线法应用效果不佳。有限体积法^[11]基于交错网格采用 SIMPLE 算法逐步求解动量方程和压力修正方程，适用于天然气管道瞬变过程，但求解过程复杂，边界处理困难。隐式差分法计算精度高且易于收敛，是目前天然气管网仿真最常用的求解方法，但每个时步均需迭代求解影响计算效率^[12]。为加快大型天然气管网仿真的求解速度，目前常用方法包括：①根据计算误差自适应调整时间步长，水力波动剧烈时减小计算步长，捕捉动态特性，接近稳态工况时增大计算步长，加快计算速度；②基于 CPU 结构进行多线程计算，充分利用硬件资源；③基于分治思想分别求解管网节点和管段，减少结构相似系统的重复计算^[13]。以上瞬态仿真方法均基于管道流动偏微分方程组进行求解，另一种基于模型的简化方法则是将偏微分方程转为常微分方程后基于显式数值算法进行求解，此时可转化为状态空间模型^[14]，便于进行控制和优化。但简化模型丢失部分频域特征，且显式算法可能会导致计算发散，因此对计算时步和距步有一定要求。该模型往往应用于在线计算，可实时确定系统状态，修正模型参数。

受系统非线性与时滞性影响,油气管网仿真机理模型仍存在计算速度慢、控制优化难等问题。随着人工智能算法的发展,数据驱动模型广受关注。目前基于机器学习算法进行管网仿真有以下两种思路:①求解偏微分方程,内嵌物理知识^[15];②舍弃管流控制方程,利用输入输出数据直接训练神经网络模型^[16]。前者更具解释性但很难收敛,后者容易产生过拟合,泛化性能较差。为提高运行管理水平,可以建立机理与数据融合的状态估计与控制优化方法,确定系统实际状态,辅助支持人员决策,保障油气管网安全平稳运行。状态估计方面,融合瞬态流动机理模型和数据驱动方法进行状态估计^[17],进一步提升传统流动机理模型对实际站场及管道系统非稳态运行过程中工艺参数估计的准确性,进而建立适用于系统动态控制的状态估计模型及仿真平台。控制优化方面,受需求波动、环境变化等因素影响,开环最优控制可能无法达到期望的效果,采用模型预测控制^[18],基于预测模型在指定时域内求解开环最优控制问题获得控制律,并利用实际数据进行反馈校正,从而提高系统的控制精度和鲁棒性。

2. 智能管网建设对仿真技术的需求

为了更好地实现智能管网的管理、运行、优化,数字平台与仿真平台的支持必不可少。数字平台是智能管网的核心,它整合了传感器数据、管道信息、监测系统及决策支持系统等部分。在数字平台之上构建仿真平台,通过数字化信息对管道系统进行虚拟仿真和实时模拟。仿真平台能够评估不同操作策略和应对突发事件的效果,为决策提供参考依据。此外,仿真平台还可以提供培训和演练的操作平台,帮助操作人员熟悉管道系统的应急处理流程,提高应对突发事件的能力。数字平台与仿真平台的有机结合,能够实现对智能管网的全面监控、智能管理及优化决策,提高油气行业管道运营的安全性和效率。

全时域全空域覆盖的管网仿真技术是仿真平台的关键要素。全时域仿真是指对管道系统进行动态仿真,模拟管道在不同工况下的运行状态,包括管道内部流体的变化、温度和压力的波动等以及管道的动态响应。全时域仿真能够实现管道系统在各种情况下运行特性的全面了解,为智能管网的设计、运行及优化提供支持。而全空域仿真则将仿真范围扩展到整个管网,涵盖各个分支管道、节点及连接点的仿真分析,模拟整个管网的运行状态,包括液体和气体在管道网络中的流动、压力变化以及能量传输等。通过这种综合仿真分析,可以评估不同操作策略对整个管网系统的影响,并优化管网的运行效率和稳定性。全时域全空域仿真技术的应用,不仅能够为智能管网的设计、运行及优化提供重要支持,还能通过模拟各种紧急情况(如泄漏、爆炸、管道损坏等),评估应对措施的有效性和管网的抗灾能力,帮助我们预测和识别潜在的安全风险,为应急响应和灾害管理提供指导,最大限度地降低事故发生的可能性和损失。

智能管网的建设对仿真技术的需求日益增长,通过准确描述智能管道的特性和行为,仿真技术可以为智能管网的设计、运行及优化提供关键支持。数字平台与仿真平台的有机结合,能够实现对智能管网的全面监控和智能化管理,而全时域全空域覆盖的仿真技术则可以帮助我们更好地了解管道系统的运行状态,并评估其在不同情况下的性能和可靠性。因此,在油气行业智能管网建设中,仿真技术的应用可以实现智能管网的精确模拟和优化,提升管道运营的安全性、可靠性、效率性。而且,管网系统仿真是数字孪生体的基础,可通过多维、多模态、多场景仿真,对数字孪生体模型进行模拟、预测、方案评估,实现物理实体的安全运行和控制优化等。

3. 仿真技术在油气管网的应用场景分析

3.1 规划与设计

在管网的规划与设计阶段,需要进行管道线路情况、输送工艺设计方案的确定,内容包

括输送工艺、管径管材优选、输送温度、输送压力、站场选址及规模、主要设备类型等的确定。通过管网仿真技术，可以进行不同设计方案模拟，评估不同布局和管道尺寸对于输送情况的影响，进行线路布置、管径优选。在管网稳态水热力计算中，可以对管道中流体流量、压力分布、温度等参数进行分析，考虑管道运行中的结蜡、水合物生成、腐蚀、段塞等多重风险，为站场地址及设备类型的选取提供决策依据，确保流体在管道中稳定运行。在管道运行的动态分析过程中，要确保在管道最大允许操作压力下运行，通过管网仿真，模拟不同的操作条件和控制策略，以评估管道系统中压力的分布及波动情况、压力控制设备的性能，设计站场管道操作逻辑，为油气管道系统采用的控制和保护措施提供设计参数等。

3.2 投产阶段

管道建设完成后想转向正常运行需先进行管道投产。对于液体管道，试运包括设备试运、仪器调试、管道冲洗试压、充水投油等过程，其中充水投油使管内介质由气相转向液相，在管道中的流动类型属于气液两相流。液顶气过程的进行，水头翻越高点后自流至管段低洼处形成积液，下坡段中的气体则会被密封在高点处，形成积气段^[19]。起伏大加剧管道积气现象，使得积气段更长，积聚于管道高点，若未及时排出管道，则会发生气阻，导致管道超压停输。对于液体管道投产，可通过仿真模拟投产的动态过程，基于管道油品物性、投产方式、沿线站点等相关参数，模拟气液运移、气泡聚并与破碎过程，预测管道投产时的全线动态压力、流量、持液率、气相分布等数据，进而推荐投产的联合排气方案（如气泡破碎、高点排气、清管器推气），为控制投产过程提供技术支撑。对于气体管道投产，刚好与液体管道相反，在投产过程中考虑试压、排水、干燥等过程，其仿真技术也有其特殊性^[20-21]。

3.3 运行维护

在管网运行阶段，根据管网仿真是否以 SCADA 实时数据作为边界条件对管道实际运行工况进行连续、实时的动态仿真，分为在线仿真和离线仿真（图 1）。为实现在线仿真长期稳定运行，考虑的因素更加复杂，包括实时数据传输、基础参数评价与修正、实时数据噪声处理、仿真数据校验及仿真求解的鲁棒性等^[22]。而在实际的应用场景中，离线仿真和在线仿真各有所长。



图 1 成品油管网仿真系统构架示意图

管网离线仿真技术在运行阶段的应用包括：①可以开展管网运行系统分析，将调控运行与管道规划建设有机结合，分析管道运行瓶颈，及时提出管道建设、站场改造及系统优化建议；②基于离线仿真辅助调度员操作培训，为调度员提供虚拟的油气管道对象，可进行管道浏览、流程切换、设备操控及报警查看等，开展正常、异常工况模拟操作，帮助调度员深刻了解管内流体变化过程，掌握调控运行操作原理，丰富操作经验；③对事故状态及影响进行

分析,辅助制定事故应急响应方案,优化应急响应策略,如泄漏源定位、紧急关闭装置操作、事故隔离等,以最小化事故损失^[23];④进行天然气月、周、日输送计划的校核及输送计划制定、成品油批次计划设计等;⑤确定当环境、控制参数、设备参数、流体物性参数等条件变化时的管网系统工艺参数变化^[24]。

管网在线仿真技术在运行阶段的应用包括:①管网运行工况的实时状态重构,提供管网当前运行工况的全息数据,弥补传感器盲区,进行管存分析、仪表校验及参数估计^[25];②天然气管网热值和组分跟踪,减少管网需配置的气质检测设备数量,进行天然气能量计量^[26];③成品油管网中批次输送模拟、清管器跟踪、混油跟踪,给出混油切割建议,进行动态优化分析^[27-28];④油气田集输管网流动保障分析,将多相流仿真理论与管网仿真技术相结合,基于水热力计算,进行虚拟计量及水合物生成、蜡沉积、积液及段塞的分析预警^[29-31];⑤实时在线趋势预测、泄漏监测、险情预警、实时监控;⑥基于在线仿真可得到压缩机、泵等设备能耗数据,为设备的优化配置和节能降耗提供数据基础。

4. 管网仿真技术展望

4.1 基于机理模型的管网仿真与运行优化技术

在机理模型和优化算法方面,随着算力和模型的提升,管网仿真由一维向三维发展,对真实环境中的客观事物应进行全方位的影射和描述,结合虚拟现实技术可帮助操作人员理解管道运行机制^[32-33];实现多物理场耦合计算,考虑流体、热力、结构等多物理域之间的相互影响,提高仿真的准确性和可靠性^[34];调度优化问题由单目标向多目标转变,由稳态向瞬态转变,由局部最优解向全局最优解转变,应采用智能算法求解优化问题,提高油气管网的输送效率^[35]。随着技术的发展,仿真技术的可视化与交互性更强,用户可以实时观察管道状态并进行调整和优化。

4.2 基于数据驱动模型的管网仿真与运行优化技术

高质量的输入数据是构建数据驱动模型的基础,但实际工业过程中受仪表测量精度、通信延迟、数据库故障等多种不确定因素的影响,测量数据往往存在缺失、异常、误同步等问题,需要通过数据清洗、数据集成、数据变换、数据归约等步骤提高数据质量。油气企业在生产运营过程中会产生大量数据,其中非结构化数据占绝大部分,其具有复杂性、不确定性、非对称性等缺点,因而无法直接获取极具价值的信息,可利用人工智能及大数据分析技术对这些非结构化数据进行深度挖掘,整合数字、文本、音频、视频等多模态数据,对其进一步探索及利用。

同时,通过将人工智能算法、机器学习模型与仿真平台相结合,可以实现智能管网的预测、故障诊断及优化控制。如基于机器学习的模型可以对管道系统进行预测分析,提前发现管道潜在的故障和安全隐患,并提供相应的修复和优化建议。这种智能化的仿真技术将大大提升智能管网的运行效率和安全性,减少人为干预和管理力度。工业过程中存在大量不可测变量,也可以通过建立实时可观数据与不可测变量的关系模型来实现关键生产参数的在线估计。人工智能和机器学习的发展将使仿真技术具备更高的智能性和自主性,通过对大量的实时数据进行分析和学习,自动识别系统运行状态并优化系统性能^[36]。

4.3 基于数据-机理融合的管网仿真与运行优化技术

由于机理模型与物理实体之间存在偏差,可基于离线数据确定模型参数,基于在线数据估计实际状态,通过在线仿真实现运行状态监测、设备故障诊断、动态实时优化等业务需求。数据驱动模型仅通过输入输出信息描述系统特征,具有强大的非线性拟合能力,适用于无法

建模或机理模型过于复杂的情况，但在小样本下容易出现过拟合的情况^[37]。

融合机理的数据驱动模型可以将实时数据与物理模型相结合，通过机器学习算法和深度学习模型，从大数据中提取有价值的信息，并将其纳入仿真模型中。综合采用多种方法实现机理模型和数据模型的耦合，提高瞬态工况下的计算精度，实现特定业务场景与知识利用的集成，形成深度融合的智能协同工作机制。同时，融合机理的数据驱动模型将实现更高效的仿真建模和参数优化。在传统的仿真建模中，需要手动调整和校准模型的参数，这是一项耗时且繁琐的工作^[38]。而融合机理的数据驱动模型可以利用大数据分析和机器学习技术，自动学习和调整仿真模型的参数，从而实现快速且准确的建模过程。通过数据驱动的参数优化，仿真模型可以更好地拟合实际运行数据，并提供更准确的仿真结果，为智能管网的决策和优化提供可靠的依据。

4.4 预测性仿真技术

随着管网运行的智能化，单纯对当前和历史工况进行仿真已经不能满足管网先进调度的要求。预测性仿真技术将成为直接指导管网建设、运行、维护的关键技术。预测性仿真按时间尺度可以分为中长期预测性仿真和短期预测性仿真。前者指通过市场与气源调研进行中长期需求预测，结合稳态仿真与优化技术决策管网改扩建、流向切换等方案。后者则通过各分输点的短期需求预测，结合瞬态仿真技术，模拟管网未来 24~48 h 的运行情况，从而调整管网运行方案。

该项技术实现的难点有两部分：需求预测算法和管网优化算法。需求预测算法的研究很多，包括灰色模型^[39-40]、统计学模型、系统动力学模型^[41]、弹性系数法^[42]、人工智能模型^[43]等，目前的研究多以中长期预测为主，鲜有考虑中国国情。未来，在“碳中和、碳达峰”战略支持下，天然气在能源转型中的地位非常明确，应根据政策实施类型、政策力度及时调整预测模型，提高预测精度，为管网规划及建设提供理论支撑。对于短期需求预测的研究仍不成熟，目前常用的手段是通过日指定量结合用气小时不均匀系数进行短期预测，对于小时级别的预测仍需要从数据本身出发，分析用户用气特性，从而研究精度更高、适用性更广的短期预测模型。

管网优化算法可分为稳态优化和瞬态优化两类。前者的研究相对成熟，以动态规划和启发式算法为代表的优化算法已经可以解决大部分稳态优化问题。随着“双碳”目标的提出，管网稳态优化问题将从以经济为主的单目标优化转变为以安全、经济、环保等多方面协调考虑的多目标优化问题。瞬态优化算法则是后续重点的研究方向，增加时间维度后，各类优化算法均会陷入维数灾难问题，如何平衡优化效果与计算成本是该算法需要重点解决的问题。

4.5 多介质能源系统耦合仿真技术

随着能源互联网时代的到来，油气管网，尤其是天然气管网将不单单输送石油与天然气，更多的输送介质（如氢气、二氧化碳等）将进入管网。以氢气为例，高压纯氢或高掺氢管道存在氢脆失效等安全风险，因此低掺氢管道输送是目前较为成熟的氢能输送方式。研究表明，掺氢比不超过 10% 就不会造成泄漏/失火风险的增加与管道疲劳寿命的降低^[44]。但是，由于氢气热值较低，氢气的掺入会导致天然气整体热值下降，影响下游用户用气。为了追踪复杂管网内部气体热值的变化情况，需要开发复杂管网多介质跟踪技术，从组分运移方程出发，考虑管网拓扑、气体流向及水热力状态等方面实时仿真管内气体组分变化情况。

此外，随着可再生能源发电（P2G，Power to Gas）技术的成熟，以及能源互联网系统统一调度的需要，电网、气网、热网等能源系统的联系将更加紧密，需要开发能源系统耦合仿真技术。能源互联网的建模仿真是综合能源系统能量管理的基础，同时也是后续能源互联网

优化调度、供应保障的基础^[48]。能源互联网建模主要包含能源网络建模及耦合元件建模两部分，也正是由于不同系统间耦合元件的不同，所以存在不同的耦合方式，即能源互联网的单向耦合和双向耦合，这进一步带来了不同类型能源系统的多时间尺度、多动态特性及多耦合交互的特点。针对上述特点，目前有以下两种综合能源系统的建模仿真方法，混合建模法及通用建模仿真法。混合建模仿真法即分别建立天然气管道瞬态模型、压缩机模型、电力系统稳态模型及电网与气网耦合模型（燃气轮机模型、P2G 模型）。通用建模仿真法是将天然气系统中的参数与电路系统中的参数相对应，实现气路、电路模型的统一建模^[45]。

4.6 基于虚拟现实和增强现实的可视化技术

虚拟现实和增强现实的融合应用将为智能管网的仿真技术带来重大突破。虚拟现实技术可以创建一个完全的数字环境，用户能够身临其境地体验管道系统的运行和交互。通过配备虚拟现实设备，操作人员可以进入仿真的管道环境中，直观地观察和操作各个部件，并模拟不同的工况和应急情况。增强现实技术则可以将数字信息与实际场景相结合，为操作人员提供实时的管道数据、指示及警告信息，从而提高操作的安全性和效率。这种虚拟现实和增强现实的融合应用将使仿真技术更加直观、互动及智能化，为智能管网的建设和运维提供更强大的支持。

4.7 油气管网仿真平台

为了实现油气管网全生命周期、全业务场景数据资产化下的多元动态在线仿真，以服务于油气管网高效、安全、经济、低碳地智慧化运行与管理，不仅需要底层支撑的基础设施感知层，还需要多元技术的全面支撑，在数据资产维护层的作用下，构建基于数据资产化的在线仿真平台，以实现动态仿真决策层的功能应用。以天然气管网为例，在基于数据资产化的在线仿真平台的顶层设计架构图（图 2）中，基础设施感知层是在线仿真平台的底层支撑，为整个平台运行提供硬件与软件的通用基础环境；多元技术支撑层是在线仿真平台的必要组成部分，多元技术本体的可持续发展性与可扩展性可为平台的持续迭代赋能；动态仿真决策层是在线仿真平台的核心所在，通过动态在线仿真实现为管网各种问题的解决提供分析优化决策方案；数据资产维护层是在线仿真平台的内驱动力，是实现动态仿真决策层有效解耦的关键之一。

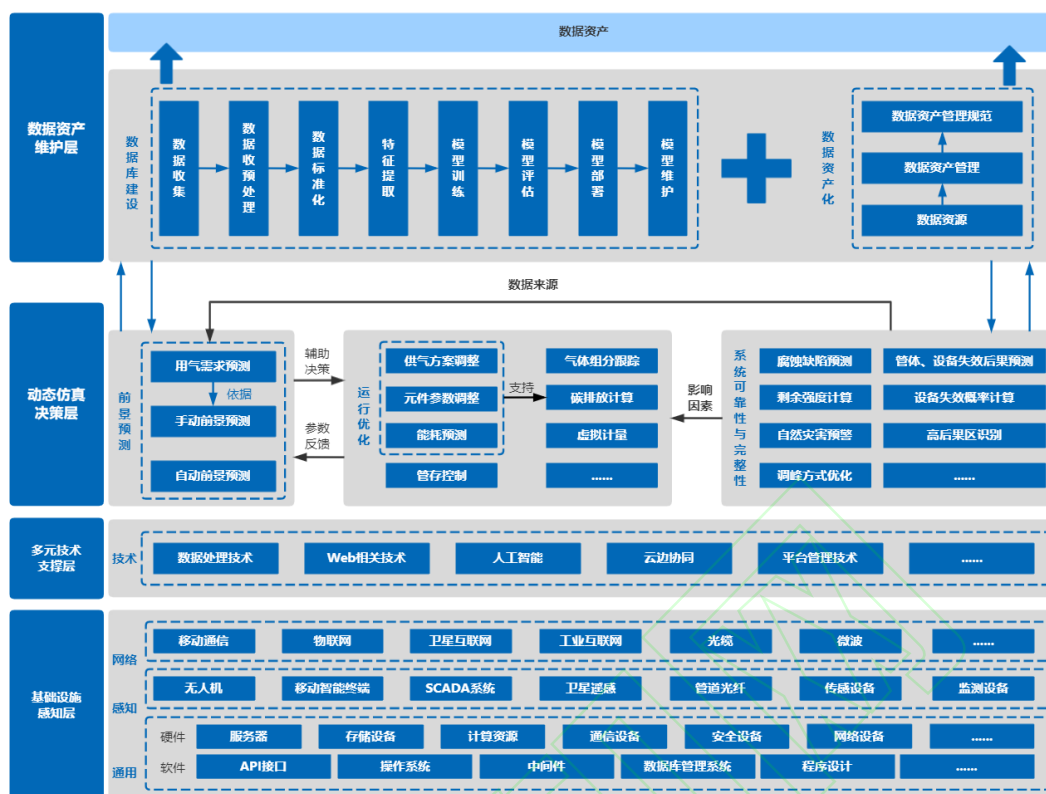


图 2 天然气管网在线仿真平台顶层设计架构示意图

5. 结论

通过梳理国内外油气管网仿真技术的发展现状,明确了智能管网建设中管网仿真技术和仿真平台需求,阐述了管网仿真技术在智能管网建设中的应用场景,并对管网仿真技术的发展进行了展望。

在油气行业智能管网建设中,仿真技术的应用可以实现智能管网的精确模拟和优化,提升管道运营的安全性、可靠性及效率性,仿真技术是智能管网建设中不可或缺的一部分。国外关于油气管网仿真技术的研究起步较早,拥有较为完善的技术方案和功能成熟且具有一定垄断趋势的商业软件,中国近年来在模拟仿真软件方面虽然取得了一些成果,但在软件稳定性、计算性能、通用性上与国外软件仍存在较大差距。

管网仿真技术可以实现单相或多相介质在各类结构管网中的稳态和瞬态水热力分布模拟、动态变化过程模拟、设备操作及控制模拟,其应用涵盖管网规划设计、投产、运行管理等阶段。油气管网仿真将向更通用、更高效、更智能等方向发展,以期实现在不同需求场景下的准确快速预测,并通过辅助决策支持工具实现人机协同决策。未来仿真技术将从机理模型和数据模型两个核心出发,在实时性仿真、预测性仿真以及多介质能源系统综合性仿真 3 个方面进行研究与应用,进而构建基于数据资产化的油气管网在线仿真平台,以满足管网智慧化所带来的新业务需求。

参考文献

- [1] 宫敬, 徐波, 张微波. 中俄东线智能化工艺运行基础与实现的思考[J]. 油气储运, 2020, 39(2): 130-139. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.02.002.
- GONG J, XU B, ZHANG W B. Thinking on the basis and realization of intelligent process operation of China-Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(2): 130-139.
- [2] 吴长春, 左丽丽. 关于中国智慧管道发展的认识与思考[J]. 油气储运, 2020, 39(4): 361-370. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.04.001.
- WU C C, ZUO L L. Understanding and thinking on the development of China's intelligent pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(4): 361-370.
- [3] 王振声, 陈朋超, 王巨洪. 中俄东线天然气管道智能化关键技术创新与思考[J]. 油气储运, 2020, 39(7): 730-739. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.07.002.
- WANG Z S, CHEN P C, WANG J H. Key technological innovations and thinking of pipeline intelligence in China-Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(7): 730-739.
- [4] 徐葱葱, 刘冰, 张妮, 谭笑, 张巍, 马江涛, 等. 智能化技术发展对油气管道行业的启示[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(12): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2019.12.001.
- XU C C, LIU B, ZHANG N, TAN X, ZHANG W, MA J T, et al. Revelation of intelligent technology development on oil and gas pipeline industry[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2019, 38(12): 1-5.
- [5] 吴鑫鑫, 安垚, 孙啸, 张思杨, 陈妍君, 杨沙沙. 管道仿真技术发展与应用进展[J]. 管道技术与设备, 2017(4): 1-3, 14. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9614.2017.04.001.
- WU X X, AN Y, SUN X, ZHANG S Y, CHEN Y J, YANG S S. Development and advances in application of pipeline simulation technology[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2017(4): 1-3, 14.
- [6] 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.
- [7] 骆科东. 我国智能油气管网的建设基础与发展方向[J]. 中国信息界, 2020(5): 82-85.
- LUO K D. The construction foundation and development direction of intelligent oil and gas pipeline networks in China[J]. Information China, 2020(5): 82-85.
- [8] 孙晓. 基于多元数据融合的油气管网虚拟仿真引擎设计与实现[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- SUN X. Research on virtual simulation engine for oil and gas pipeline network based on multi-data fusion[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2021.
- [9] 汪德友, 崔艳雨, 李旭光, 陈媛媛. 基于牛顿迭代法的复杂机坪管网水力计算[J]. 油气储运, 2020, 39(12): 1394-1400. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.12.012.
- WANG D Y, CUI Y Y, LI X G, CHEN Y Y. Hydraulic calculation for complicated apron pipeline network

based on Newton iteration method[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(12): 1394-1400.

[10] 张清周.基于水力模型的供水管网压力管理与漏损区域识别研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

ZHANG Q Z. Research on pressure management and leakage zone identification for water distribution systems based on hydraulic model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[11] WANG H, LIU X J, ZHU W G. Transient flow simulation of municipal gas pipelines and networks using semi implicit finite volume method[J]. Procedia Engineering, 2011, 12: 217-223. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.05.034.

[12] 郑建国, 陈国群, 宋飞, 艾慕阳, 赵佳丽.大型天然气管网仿真模型及其求解技术研究[J].系统仿真学报, 2012, 24 (6) : 1339-1344.DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2012.06.012.

ZHENG J G, CHEN G Q, SONG F, AI M Y, ZHAO J L. Research on simulation model and solving technology of large scale gas pipe network[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(6): 1339-1344.

[13] 王鹏.复杂天然气管网快速准确稳健仿真方法研究及应用[D].北京: 中国石油大学(北京), 2016.

WANG P. Study on the fast, accurate and robust simulation method for a complex natural gas pipeline network and its application[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2016.

[14] BEHBAHANI-NEJAD M, BAGHERI A. The accuracy and efficiency of a MATLAB-Simulink library for transient flow simulation of gas pipelines and networks[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 70(3/4): 256-265. DOI: 10.1016/j.petrol.2009.11.018.

[15] MADOLIAT R, KHANMIRZA E, POURFARD A. Application of PSO and cultural algorithms for transient analysis of natural gas pipeline[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 504-514. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.09.042.

[16] HADIAN M, ALIAKBARI N, KARAMI M. Using artificial neural network predictive controller optimized with Cuckoo Algorithm for pressure tracking in gas distribution network[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27(Part 3): 1446-1454. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.10.009.

[17] HE L, WEN K, WU C C, GONG J, PING X. Hybrid method based on particle filter and NARX for real-time flow rate estimation in multi-product pipelines[J]. Journal of Process Control, 2020, 88: 19-31. DOI: 10.1016/j.jprocont.2020.02.004.

[18] 王永红, 李晓平, 宫敬.长输管道在线仿真系统的应用与展望[J].油气储运, 2011, 30 (2) : 90-93.DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2011.02.003.

WANG Y H, LI X P, GONG J. The application and futurity of long-distance pipeline on-line simulation system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2011, 30(2): 90-93.

[19] 陈思杭, 李旺, 冯亮, 杨起, 李晓平, 宫敬.连续起伏管道投产过程中的气相运移研究[J].中国安全生产科学技术, 2021, 17 (6) : 72-78.DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2021.06.012.

CHEN S H, LI W, FENG L, YANG Q, LI X P, GONG J. Study on gas phase migration of continuous

- undulating pipeline during commissioning process[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(6): 72-78.
- [20] 邓涛, 陈泷, 肖斌涛, 宫敬.大落差输气管道水试压后清管的压力脉冲[J].油气储运, 2017, 36 (11) : 1302-1307.DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.11.012.
- DENG T, CHEN L, XIAO B T, GONG J. The pressure pulse in the process of pigging after hydrotest of great-fall gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(11): 1302-1307.
- [21] 邓涛, 宫敬, 于达, 吴海浩, 姚亚男, 陈曦, 等.复杂地形对长距离输气管道试压排水的影响[J].油气储运, 2014, 33 (12) : 1326-1330.DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.12.014.
- DENG T, GONG J, YU D, WU H H, YAO Y N, CHEN X, et al. Influence of complex terrain on the pressure test and drainage of long-distance gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(12): 1326-1330.
- [22] 王寿喜, 邓传忠, 陈传胜, 李伟, 李俊, 高翔.天然气管网在线仿真实理论与实践[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.
- [23] 虞维超.基于需求侧分析的天然气管网供气可靠性研究[D].北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- YU W C. Study on the gas supply reliability of natural gas pipeline networks based on demand side analysis[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.
- [24] 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.
- [25] 温凯, 焦健丰, 袁运栋, 董楠, 殷雄, 樊迪, 等.基于瞬态仿真的天然气管道动态管存分析[J].油气与新能源, 2022, 34 (5) : 122-133.DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2022.05.019.
- WEN K, JIAO J F, YUAN Y D, DONG N, YIN X, FAN D, et al. Dynamic storage analysis on natural gas pipeline based on transient flow simulation[J]. Petroleum and New Energy, 2022, 34(5): 122-133.
- [26] WEN K, XU H L, XU M, PEI Y T, LU Y F, ZHENG H W, et al. Digital twin-driven intelligent control of natural gas flowmeter calibration station[J]. Measurement, 2023, 217: 113140. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113140.
- [27] 沈瑞灏.成品油管道批次位置跟踪及溯源研究[D].北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- SHEN R H. Study on product pipeline batch location tracking and oil source tracing[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2021.
- [28] 何国玺.成品油管道输送过程混油特性及泄漏测算方法研究[D].北京: 中国石油大学(北京), 2018.

HE G X. Study on the oil mixing characteristics and leakage estimation method during batch transportation process in a multi-product pipeline[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.

[29] 宫敬, 史博会, 陈玉川, 宋尚飞.含天然气水合物的海底多相管输及其堵塞风险管控[J].天然气工业, 2020, 40 (12): 133-142.DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.12.015.

GONG J, SHI B H, CHEN Y C, SONG S F. Submarine multiphase pipeline transport containing natural gas hydrate and its plugging risk prevention and control[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(12): 133-142.

[30] GONG J, KANG Q, WU H H, LI X P, SHI B H, SONG S F. Application and prospects of multi-phase pipeline simulation technology in empowering the intelligent oil and gas fields[J/OL]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2023: 100127[网 络 访 问 日 期 缺 失].
<https://doi.org/10.1016/j.jpse.2023.100127>. DOI: 10.1016/j.jpse.2023.100127.

[31] SONG S F, WU M, QI J N, WU H H, KANG Q, SHI B H, et al. An intelligent data-driven model for virtual flow meters in oil and gas development[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2022, 186: 398-406. DOI: 10.1016/j.cherd.2022.08.016.

[32] 艾慕阳, 柳建军, 李博, 刁洪涛, 张俊, 康阳.天然气管网稳态运行优化技术现状与展望[J].油气储运, 2015, 34 (6): 571-575.DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.06.001.

AI M Y, LIU J J, LI B, DIAO H T, ZHANG J, KANG Y. Current status and prospect of steady operation optimization techniques for gas pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(6): 571-575.

[33] 陈国群, 郑建国, 柳建军, 彭世焘, 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.

[34] OSIADACZ A J, CHACZYKOWSKI M. Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models[J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 81(1/3): 41-51. DOI: 10.1016/S1385-8947(00)00194-7.

[35] 梁永图, 张浩然, 邵奇.成品油管网调度优化研究进展[J].油气储运, 2015, 34 (7): 685-688.DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.07.001.

LIANG Y T, ZHANG H R, SHAO Q. Progress in the study on scheduling optimization of products pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(7): 685-688.

[36] 张钹, 朱军, 苏航.迈向第三代人工智能[J].中国科学 (信息科学), 2020, 50 (9): 1281-1302.

ZHANG B, ZHU J, SU H. Toward the third generation of artificial intelligence[J]. Science in China(Information Sciences), 2020, 50(9): 1281-1302.

- [37] MURALIDHAR N, ISLAM M R, MARWAH M, KARPATNE A, RAMAKRISHNAN N. Incorporating prior domain knowledge into deep neural networks[C]. Seattle: 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 2018: 36-45.
- [38] BIKMUKHAMETOV T, JÄSCHKE J. First principles and machine learning virtual flow metering: a literature review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106487. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106487.
- [39] ZENG B, LI C. Forecasting the natural gas demand in China using a self-adapting intelligent grey model[J]. Energy, 2016, 112: 810-825. DOI: 10.1016/j.energy.2016.06.090.
- [40] 张涛, 杨娇敏. 我国区域天然气消费量的趋势预测[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 135-140. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2016.09.017.
- ZHANG T, YANG J M. Trend prediction of natural gas consumption in different regions of China[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(9): 135-140.
- [41] 陈红仙. 基于系统动力学的中国天然气需求预测与分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- CHEN H X. Forecasting and analysis of China's natural gas demand based on system dynamics[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2016.
- [42] 胡小夫, 易梓仪, 肖克勤. 我国天然气市场消费量预测与发展趋势研究[J]. 天然气技术与经济, 2016, 10(2): 57-60, 83. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1132.2016.02.015.
- HU X F, YI Z Y, XIAO K Q. Consumption prediction and development trend research of Chinese natural gas market[J]. Natural Gas Technology, 2016, 10(2): 57-60, 83.
- [43] 张东明, 田光. 陕西省天然气供需平衡分析及对策[J]. 油气储运, 2017, 36(2): 132-137. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.02.002.
- ZHANG D M, TIAN G. Analysis of Shaanxi natural gas supply and demand balance and countermeasures[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(2): 132-137.
- [44] 程玉峰, 孙颖昊, 张引弟. 氢气管道发展与管线钢氢脆挑战[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 54-69. DOI: 10.16772/j.cnki.1673-1409.20220129.002.
- CHENG Y F, SUN Y H, ZHANG Y D. Development of hydrogen pipelines and hydrogen embrittlement challenges of pipeline steel[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2022, 19(1): 54-69.
- [45] 陈彬彬, 孙宏斌, 吴文传, 郭庆来, 乔铮. 综合能源系统分析的统一能路理论(三): 稳态与动态潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4820-4830. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200647.
- CHEN B B, SUN H B, WU W C, GUO Q L, QIAO Z. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (III): steady and dynamic energy flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4820-4830.

(收稿日期: 2023-06-09; 修回日期: 2023-07-11; 编辑: 张雪琴)

基金项目：国家重点研发计划“深远海水下油气田多相流智能生产安全保障技术”，2022YFC2806200。

作者介绍：宫敬，女，1962年生，教授，享受国务院政府特殊津贴，1995年博士毕业于中国石油大学（北京）油气储运工程专业，现主要从事油气储运系统仿真与运行控制、油气输送流动安全保障等技术方向的研究工作。地址：北京市昌平区府学路18号，102249。电话：13501036944。Email: ydgj@cup.edu.cn

创新点名称：本文明确了智能管网建设对油气管网仿真技术和仿真平台的需求，指出了油气管网仿真技术发展方向。

创新点内容：本文明确了智能管网建设对管网仿真技术和仿真平台的需求，从管网仿真通用性、高效性、智能化等方向，指出了管网仿真技术发展方向，包括基于机理模型的管网仿真与运行优化技术、基于数据驱动模型的管网仿真与运行优化技术、基于数据-机理融合的管网仿真与运行优化技术、预测性仿真技术、多介质能源系统耦合仿真技术、基于虚拟现实和增强现实的可视化技术、基于虚拟现实和增强现实的可视化技术、油气管网仿真平台。