

基于数字孪生技术在天然气计量方面的探讨与应用

宋建平 李志宏

乌兰察布市产品质量计量检验检测中心 内蒙古 乌兰察布 012000

摘要: 数字孪生技术融合感知、建模等多项技术,可实现物理与数字世界实时交互。本文先介绍该技术及其在天然气计量系统分析基础上,阐述其在天然气计量中的应用,包括数字孪生建模、数据融合处理、状态监测与故障诊断以及计量优化与决策支持,为提升天然气计量精度与效率提供新思路,推动行业规范化、精细化发展。

关键词: 数字孪生技术;天然气计量;系统建模;数据融合

引言:天然气计量在开采、输送、贸易交接等环节至关重要,其准确性关乎公平与效益。然而,当前天然气计量面临计量精度控制难、设备运行稳定性不足、数据管理机制不完善及工况适配能力弱等挑战。数字孪生技术作为综合性数字化技术,能打破物理与数字世界壁垒,为复杂系统运行提供支撑。在此背景下,探讨其在天然气计量方面的应用具有现实意义。

1 数字孪生技术概述

1.1 数字孪生技术定义

数字孪生技术是一种融合感知、建模、仿真、数据传输与分析的综合性数字化技术,核心是通过数字空间构建与物理实体完全对应的虚拟孪生体,实现物理世界与数字世界的实时映射、双向交互与协同演进。其本质是依托物联网、大数据、人工智能等技术,将物理实体的几何形状、物理属性、运行状态、环境特征等全部信息进行数字化建模,形成可感知、可仿真、可调控、可优化的虚拟镜像。与传统数字化建模不同,数字孪生强调“全生命周期同步”,虚拟孪生体能够实时接收物理实体的运行数据,动态更新自身状态,同时可通过仿真推演反向指导物理实体的运行与维护^[1]。该技术广泛应用于智慧城市、工业制造、能源化工等领域,其核心价值在于打破物理世界与数字世界的壁垒,实现对物理实体的精准监控、故障预判与优化调控,为各类复杂系统的高效运行提供数字化支撑,契合现代工业智能化、精细化发展的核心需求。

1.2 数字孪生技术体系架构

数字孪生技术体系架构遵循分层协同、闭环联动的设计原则,整体可分为五层,各层相互支撑、协同运作,构成完整的技术闭环。最底层为物理实体层,是整个体系的基础,涵盖各类需要映射的物理设备、构件及运行环境,负责采集自身运行状态数据并接收上层调控指令。第二层为感知传输层,由各类传感器、数据采集模块及通信

设备组成,核心功能是实时采集物理实体的温度、压力、流量等运行参数,通过5G、物联网等通信技术,将数据高效、精准传输至上层,同时实现指令的反向传输,是连接物理与数字世界的桥梁。第三层为数据资源层,负责对采集到的多源异构数据进行存储、清洗、整合与标准化处理,形成结构化、可利用的数据资源池,为后续建模与仿真提供数据支撑。第四层为建模仿真层,是体系的核心,通过三维建模、物理仿真等技术构建虚拟孪生体,实现物理实体的精准映射与运行状态的仿真推演。最顶层为应用服务层,基于虚拟孪生体与数据资源,提供状态监控、故障诊断、优化调控等个性化应用服务,满足不同场景的实际需求。

1.3 数字孪生技术关键技术

数字孪生技术的实现依赖多项核心关键技术的协同支撑,其中最核心的四项技术分别是三维建模技术、物联网感知技术、数据融合分析技术与仿真推演技术。三维建模技术是构建虚拟孪生体的基础,需结合CAD、BIM等技术,精准还原物理实体的几何形状、物理属性与连接关系,同时兼顾建模精度与实时更新效率,确保虚拟孪生体与物理实体的一致性。物联网感知技术是数据采集的核心,通过部署高精度传感器、数据采集终端,实现对物理实体运行状态的全方位、实时采集,传感器的精度与采集频率直接决定虚拟孪生体的同步精度。数据融合分析技术负责处理多源异构数据,通过数据清洗、去噪、整合,消除数据冗余与误差,结合大数据分析技术挖掘数据背后的关联规律,为仿真推演与优化调控提供数据支撑。仿真推演技术是实现虚拟孪生体“可调控”的核心,基于物理规律与运行数据,通过仿真算法模拟物理实体在不同工况下的运行状态,实现故障预判、流程优化等功能。

2 天然气计量系统分析

2.1 天然气计量原理与方法

天然气计量是天然气开采、输送、贸易交接等环节

的核心工作,其核心原理是基于天然气的物理特性,通过精准测量天然气的体积、质量或能量,结合相关标准规范,计算出天然气的实际流量与总量,确保计量结果的准确性与公正性。天然气计量的核心依据是国家计量技术规范,计量过程需遵循规定的参比条件,通常为20°C、101.325kPa干基,也可依据合同约定调整。目前主流的计量方法主要分为三类,分别是体积计量法、质量计量法与能量计量法^[2]。体积计量法是最常用的方法,通过流量计测量天然气在标准状态下的体积流量,结合温度、压力补偿公式修正,得到实际体积总量,常用设备有差压式、超声波流量计等。质量计量法通过测量天然气的质量流量,直接得到质量总量,适用于高压、大流量场景。能量计量法是最精准的计量方法,通过测量天然气的体积流量与发热量,计算出天然气的能量总量,广泛应用于大宗贸易交接,其计量结果需符合相关国家标准,确保贸易双方的公平公正,计量过程需配备精准的计量器具与数据采集处理装置。

2.2 天然气计量系统组成

天然气计量系统是一个综合性的复杂系统,由计量检测设备、数据采集处理系统、辅助保障系统及管控系统四部分组成,各部分协同运作,确保计量工作的精准、高效开展。计量检测设备是核心组成部分,包括流量计、压力变送器、温度传感器、气相色谱仪等,流量计负责测量天然气流量,压力、温度传感器用于采集工况参数,气相色谱仪用于分析天然气组分,为流量修正与能量计量提供依据,所有计量器具需符合GB/T 18603等标准要求,并具备有效的检定或校准证书。数据采集处理系统由数据采集终端、传输模块及处理软件组成,核心功能是实时采集计量检测设备的运行数据与计量结果,进行数据清洗、修正与整合,形成标准化的计量报表,同时实现数据的存储与查询。辅助保障系统包括管路系统、保温防冻装置、防雷防静电设备等,管路系统确保天然气平稳输送,保温防冻装置防止冬季低温导致的管路冻堵,保障计量设备正常运行。管控系统负责对整个计量系统进行统一管控,实时监控设备运行状态,处理计量异常,确保计量系统的稳定、精准运行。

2.3 天然气计量面临的挑战

当前天然气计量系统在实际运行过程中,面临诸多亟待解决的挑战,主要集中在计量精度控制、设备运行稳定性、数据管理及工况适配四个方面。首先,计量精度控制难度大,天然气的流量、压力、温度等参数易受气质特性、输送工况影响,气质中含有的杂质、凝析液会磨损计量仪表、堵塞管路,导致计量误差增大,同时

仪表长期运行后的精度衰减、零点漂移,若未及时校准会引发系统性误差。其次,设备运行稳定性不足,天然气计量系统多部署在野外或复杂工况环境中,昼夜温差大、冬季严寒等极端环境易导致仪表失灵、管路冻堵,密封失效引发的天然气泄漏也会影响计量准确性。再者,数据管理机制不完善,计量数据多源异构,采集与分析的时效性不足,不同站点的数据修正方式不统一,数据存储与生产监控系统未完全融合,难以实现计量异常的及时发现与误差溯源。最后,工况适配能力不足,天然气输送过程中工况波动频繁,传统计量系统难以快速适配工况变化,导致计量精度下降,无法满足现代天然气输送精细化、高效化的计量需求。

3 数字孪生技术在天然气计量中的应用

3.1 天然气计量系统数字孪生建模

数字孪生技术在天然气计量中的核心应用第一步是构建天然气计量系统数字孪生建模,实现整个计量系统的精准数字化映射,为后续应用奠定基础。建模过程需遵循“全要素、高精度、实时同步”的原则,覆盖计量系统的所有物理组件,包括流量计、压力变送器、温度传感器、管路系统及辅助保障设备等。建模时,首先通过CAD、BIM等三维建模技术,结合计量设备的设计图纸与实际参数,精准还原各设备的几何形状、安装位置与连接关系,确保虚拟模型与物理设备的几何一致性^[3]。其次,整合计量设备的物理属性、运行参数、校准记录等全生命周期数据,结合物理仿真技术,赋予虚拟孪生体与物理系统一致的运行特性,实现温度、压力、流量等参数的实时同步。针对天然气计量的特殊性,重点优化管路流体仿真与仪表运行仿真模块,模拟不同气质、工况下计量系统的运行状态,确保虚拟孪生体能够精准复刻物理系统的运行规律,为后续的状态监测、故障诊断与优化调控提供精准的虚拟载体,打破传统建模仅能静态展示的局限。

3.2 基于数字孪生的数据融合与处理

基于数字孪生的数据融合与处理是提升天然气计量精度与效率的关键,核心是依托数字孪生的虚拟镜像优势,对计量系统的多源异构数据进行全方位、深层次的融合与优化处理。天然气计量系统采集的数据类型繁杂,包括设备运行参数、环境参数、计量结果数据及校准数据等,且数据来源分散、格式不统一,传统数据处理方式难以实现数据的高效利用。依托数字孪生技术,可将所有采集到的数据汇聚至虚拟孪生体对应的数据库,构建统一的数据资源池。首先,通过数据清洗技术去除冗余数据、异常数据,消除测量误差与传输误差;其次,

采用数据融合算法，将不同传感器、不同设备的相关数据进行整合，挖掘数据背后的关联规律，比如流量与温度、压力的关联关系，实现数据的互补与优化；最后，通过标准化处理将异构数据转化为结构化数据，同步更新至虚拟孪生体，确保虚拟孪生体与物理系统的数据同步。同时可通过数据回溯功能，实现计量数据的全生命周期追溯，为计量误差分析、责任认定提供精准的数据支撑，提升计量数据的可靠性与可用性。

3.3 天然气计量系统状态监测与故障诊断

基于数字孪生技术的天然气计量系统状态监测与故障诊断，打破了传统“事后维修”的模式，实现了计量系统的实时监测、提前预警与精准诊断，大幅提升系统运行的稳定性。其核心原理是通过虚拟孪生体实时接收物理计量系统的运行数据，动态同步自身状态，实现对计量系统的全方位可视化监测，工作人员可通过虚拟镜像直观查看各设备的运行参数、管路状态，实时掌握系统运行情况。当物理系统出现参数异常、设备故障时，虚拟孪生体能够第一时间捕捉异常信号，通过对比正常运行数据与异常数据，结合仿真推演技术，精准定位故障位置、分析故障原因。基于虚拟孪生体可进行故障仿真推演，模拟不同故障对计量系统的影响，提前预判故障发展趋势，发出预警信号，提醒工作人员及时处理。工作人员可通过虚拟孪生体进行故障模拟维修，优化维修方案，缩短维修时间，减少因故障导致的计量中断与误差，保障天然气计量工作的连续、精准开展。

3.4 天然气计量优化与决策支持

数字孪生技术为天然气计量系统的优化与决策支持提供了全新的解决方案，核心是依托虚拟孪生体的仿真推演能力，实现对计量系统的精准优化与科学决策。天然气计量系统的运行效率与计量精度受气质、工况、设

备状态等多种因素影响，传统优化方式难以兼顾多因素协同，优化效果有限。基于数字孪生技术，可通过虚拟孪生体构建多场景仿真模型，模拟不同气质、不同工况、不同设备参数下计量系统的运行状态，对比分析不同运行方案的计量精度与运行效率，筛选出最优运行参数与方案，比如优化流量计的安装位置、调整温度压力补偿参数等，实现计量系统的精准优化，提升计量精度与运行效率^[4]。同时虚拟孪生体可积累大量的运行数据与仿真数据，结合大数据分析技术，挖掘计量系统的运行规律与优化空间，为天然气计量系统的升级改造、设备选型、运维计划制定等提供科学的决策支持。针对贸易交接中的计量争议，可通过虚拟孪生体还原计量过程，精准分析计量误差原因，为争议解决提供客观依据，保障贸易双方的合法权益，推动天然气计量行业的规范化、精细化发展。

结束语

数字孪生技术在天然气计量领域展现出巨大潜力，通过构建数字孪生模型、融合处理数据、实现状态监测与故障诊断以及提供优化决策支持，有效应对了传统计量面临的诸多挑战。随着技术不断发展，其应用将更加深入广泛，有望进一步提升天然气计量的精准度与智能化水平，为天然气行业的稳定发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]冯渝,陈继,向勇均.天然气计量检定智能化技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(20):193-195.
- [2]姜玉峰.刍议天然气计量检定智能化技术[J].计量与测试技术,2023,50(7):51-53.
- [3]张弛.高压大流量天然气计量检定装置设计[J].化工管理,2024(33):125-128.
- [4]刘盼盼,钟永恒,刘佳,等.专利视角下天然气计量技术发展态势分析[J].现代化工,2024,44(z2):6-12.