

引文: 刁洪涛, 虞维超, 王凯鸿, 等. 天然气管网运行数据应用平台建设[J]. 油气储运, 2024, 43(10): 1129-1137.

DIAO Hongtao, YU Weichao, WANG Kaihong, et al. Construction of application platform for operational data of natural gas pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(10): 1129-1137.

## 天然气管网运行数据应用平台建设

刁洪涛<sup>1</sup> 虞维超<sup>1</sup> 王凯鸿<sup>1</sup> 苏怀<sup>2</sup> 张轶<sup>1</sup> 杨兆铭<sup>2</sup>

1. 国家管网集团油气调控中心; 2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院·油气管道输送安全国家工程研究中心·城市油气输配技术北京市重点实验室

**摘要:**【目的】为充分挖掘天然气管网运行数据价值,解决管网运行数据价值密度低、数据源异构性强、数据采集汇聚不全面、流通共享不充分、开发应用不深化、治理安全短板突出等问题,国家管网集团油气调控中心自主搭建了天然气管网运行数据应用平台。【方法】该平台充分利用自动化数据采集与关键设备远程控制技术,通过关系型数据库完成底层数据结构的搭建,实现对天然气管网运行态势的全景感知;通过具有底层统一特征的数据交换技术来挖掘管网运行数据价值、优化运行数据结构、整合管网运行数据资产。此外,该平台进一步优化了生产运行数据的展示界面,极大降低了数据查询相关操作量,可协助运行管理与分析人员快速掌握管网实时生产信息、运行情况及历史数据,并采用深度学习算法和特征增强技术开展了天然气管网关键气量预测。【结果】天然气管网运行数据应用平台的建成促进了 SCADA 数据、管道中间数据、生产运行管理数据、台账报表、仿真优化数据的交互共享,形成管网系统物理参数数据库,实现了多源-多尺度高维数据共享规范应用,并提高了数据利用水平。【结论】天然气管网运行数据应用平台的高效利用可以显著提升国家管网集团油气调控中心的数据应用水平,增强管网管控与应急保供能力,助力集团公司数字化转型以及智慧管网、智能管道、智能调控的建设。(图 6, 表 1, 参 25)

**关键词:** 天然气管网; 运行数据; 应用平台; 油气调控中心; 数据挖掘; 数据价值

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)10-1129-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.10.006

## Construction of application platform for operational data of natural gas pipeline network

DIAO Hongtao<sup>1</sup>, YU Weichao<sup>1</sup>, WANG Kaihong<sup>1</sup>, SU Huai<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, YANG Zhaoming<sup>2</sup>

1. PipeChina Oil & Gas Control Center; 2. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing)// National Engineering Research Center for Pipeline Safety//Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology

**Abstract:** 【Objective】The PipeChina Oil & Gas Control Center has independently developed an application platform for the operational data of its natural gas pipeline network, in an attempt to fully explore the value of network operational data and to address issues such as low data value density, significant heterogeneity of data sources, incomplete data acquisition and aggregation, insufficient data circulation and sharing, a lack of in-depth development and application, and notable weaknesses in data governance and security. 【Methods】The underlying data structure of this platform was constructed using a relational database, fully leveraging the automated data acquisition process and remote control technology of key equipment. This structure enables a panoramic perception of the network's operational dynamics. Further research and development efforts led to the creation of data exchange technology with unified lower features, aimed at exploring the value of operational data within its network, optimizing the data structure, and integrating data assets. Additionally, the display interfaces for production and operational data were optimized, significantly reducing the workload associated with data queries and enabling operation management and analysis personnel to quickly access real-time production information, operational status, and historical data for these pipelines. Furthermore, deep learning algorithms and feature enhancement technologies were introduced to support the prediction of key gas volume parameters in the natural gas pipeline network. 【Results】The application platform established for operational data of the natural gas

pipeline network facilitates the interactive sharing of various data types, including SCADA data, intermediate pipeline data, production and operational management data, ledgers, statements, and simulation optimization data. It also supports the creation of a physical parameter database for the pipeline network system. This setup enables the standardized application of multi-source and multi-scale high-dimensional data sharing, thereby enhancing data utilization levels. **[Conclusion]** The efficient utilization of the application platform for operational data of the natural gas pipeline network could significantly enhance data application levels at the PipeChina Oil & Gas Control Center. This improvement would strengthen the capabilities of pipeline network control and supply assurance during emergencies and support PipeChina's digital transformation toward the vision of "smart pipeline network, intelligent pipelines, and intelligent control". (6 Figures, 1 Table, 25 References)

**Key words:** natural gas pipeline network, operational data, application platform, PipeChina Oil & Gas Control Center, data mining, data value

国家管网集团油气调控中心(简称油气调控中心)作为国家石油天然气管网集团有限公司的运营中枢,目前集中调控运行天然气主干管道 55 条,总里程超过  $5 \times 10^4$  km,包括天然气站场 800 余座、阀室 2 000 余座,整个管网一次输气能力超  $3\,000 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/a,输运调配全国超 60% 的天然气资源,每日通过 SCADA、管道生产管理系统(Pipeline Production System, PPS)实时采集  $70 \times 10^4$  个数据点。此外,油气调控中心还掌握着日常生产台账报表数据与基于仿真优化平台的仿真优化数据库。可见,天然气管道在完成天然气管输任务的同时,还生产了海量数据,充分挖掘这些数据的潜力对掌握业务现状、满足工艺需求及灵活调度资源等均具有重大意义。

油气调控中心所拥有的数据来源多样、维度复杂、统计口径多、应用需求广,因此对所属数据的应用分析是典型的工业大数据驱动技术应用场景<sup>[1-3]</sup>。为了进一步挖掘油气管网在经营管理阶段工业大数据的价值<sup>[4-7]</sup>,油气调控中心从天然气管网安全、高效、可靠运行及管理角度出发,率先开展了工业大数据的应用探索,并在天然气管网运行业务中实现了部分数据驱动技术的应用<sup>[8]</sup>。相比于互联网服务领域大数据应用的普及和成熟,工业大数据虽然实时性高、数据量大,但价值密度低、数据源异构性强,且存在数据采集汇聚不全面、流通共享不充分、开发应用不深化、治理安全短板突出等问题,因此,天然气管网运行数据的应用总体上仍处于探索和起步阶段,亟待拓展与深化<sup>[9-11]</sup>。基于此,为充分挖掘天然气管网运行数据价值,提升调控中心数据应用水平,油气调控中心自主开展了天然气管网运行数据应用平台建设,以期为攻克中国复杂长输天然气管网系统运行大数据的综合应用与工业化难题提供技术支撑。

## 1 油气调控中心数据现状

油气调控中心多年来积累了大量天然气长输干线管网运行数据,同时管道的日常调控运行也随时产生大量的静态、动态数据。天然气管网运行数据应用平台的数据源包括 SCADA 数据、中间(Plant Information, PI)数据库数据、国家管网 PPS 数据库数据、台账报表数据及仿真优化数据库数据,各数据各有优缺点(表 1)。

### 1.1 SCADA 数据

油气调控中心目前已建一级调控管道 SCADA 系统 20 套,包括 ViewStar 系统 7 套、OASyS 系统 7 套、国产化生产控制系统(Production Control System, PCS)6 套,数据点规模超过  $131 \times 10^4$  个,其中国产化 PCS 数据点为  $24.8 \times 10^4$  个。SCADA 系统包括实时服务器、通讯服务器、历史服务器、磁盘阵列、工作站、网络设备及 GPS 等。为实现生产网络与信息网络的有效隔离,同时兼顾必要的生产数据共享,SCADA 系统中的数据不直接对外使用,而是采用 PI 数据库技术,实现第三方信息系统对生产网络实时数据的访问和共享。

### 1.2 PI 数据库

油气调控中心已建成一套 SCADA 系统的 PI 数据库系统(图 1),用于采集与存储 SCADA 系统数据。作为 SCADA 系统数据对外应用的平台,PI 数据库系统可与其他各应用系统进行信息交换<sup>[12]</sup>。PI 数据库系统位于油气管道 SCADA 系统与各应用系统之间,通过数据平台构建的网络安全隔离体系,实现各应用系统与油气管道 SCADA 系统之间的物理隔离,同时在保证 SCADA 系统安全的前提下,向位于办公网的各应用系统提供安全、可靠的油气管道运行实时数据资源,以满足各应用系统对 SCADA 系统数据的访问需求。

表 1 天然气管网运行数据应用平台的各数据源优缺点表

Table 1 Advantages and disadvantages of data sources in application platform for operational data of natural gas pipeline network

数据源	优点	缺点
台账报表数据	①数据整合能力强,可将原始数据加以集中并满足各类数据的调用,有利于数据的系统化;②数据报送效率高,工作可在日常开展,加快了终期呈报进度;③数据针对性强,可根据具体业务需求整合,相对直观	①需求界限模糊,展示数据的同时也承担了数据处理任务;②数据复杂性高,嵌套大量格式、公式、合并单元格等;③数据结构化弱,内部组织与关联不够清晰规范;④人工维护成本,需要耗费大量时间和精力
PPS 数据库	①数据一致性高,汇总管网的历史生产数据,避免了数据分散和冗余问题;②数据可追溯性强,明确了数据来源、采集时间及处理过程;③数据可靠性强,内部数据稳定、质量较好	①需求界限模糊,展示需求与数据处理需求界限模糊;②数据获取难度大,数据获取过程复杂、报表再整理成本高
PI 数据库	①数据时效性强,提供管网实时生产数据,能够及时监控和分析管网运行状态;②数据获取便捷,数据尺度较小,使得数据的获取与处理更为便捷和高效;③数据灵活性强,适用于灵活统计及算法训练,有助于数据处理和模型建立	①数据单位繁多,点位繁杂、描述不准确、单位混乱;②数据稳定性差,部分类别数据质量一般,可能存在数据异常的情况;③数据完整性差,数据点位可能不完整,无法覆盖或提供所有关键的数据点位
仿真优化数据库	①提供管网当前运行工况的数据,弥补传感器盲区;②保证管网仿真在可控的环境下进行,便于验证和调试;③管网仿真可以模拟危险或不易达到的环境,避免实际操作中的风险	①管网仿真与优化的准确性高度依赖于输入数据质量和模型准确性;②管网仿真和优化过程需要大量的计算资源;③开发高精度的管网仿真模型需要很高的专业知识和技术投入

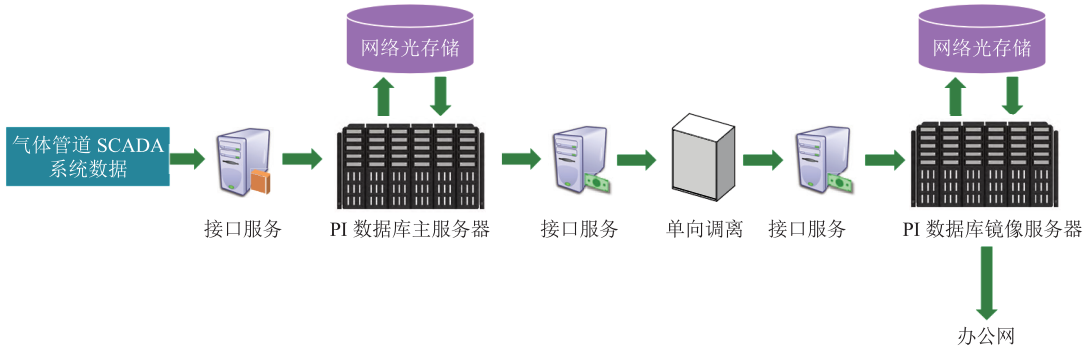


图 1 油气调控中心 PI 数据库系统数据流示意图

Fig. 1 Data flow diagram of PI database system of PipeChina Oil & Gas Control Center

作为油气调控中心 SCADA 系统实时数据的统一集成平台,PI 数据库目前已实现筛选采集油气管道运行数据点超过  $30 \times 10^4$  个,涵盖油气调控中心所有一级调控气体和液体管道,可为国家管网 PPS、在线仿真系统、压缩机组动态效率监测系统、管道数据应用系统、调度日常生产运行分析等智能化应用工作,以及其他管输成员企业业务提供实时有效的管道运行数据支撑。

1.3 国家管网 PPS 数据库

国家管网 PPS 数据库(图 2)包含计划、调度、运销计量、能源、自控与通信 5 部分管理数据,并包含开放服务与交易平台、资产完整性管理系统、工程项目管理系统、自控系统共 4 大系统的集成数据。

1.4 台账报表数据

油气调控中心台账报表数据包括静态文件、生产工作、安全管理、应急管理及调度台工作等文件夹。静态文件文件夹存放管道初设、投产、生产运行相关基础资料;生产工作文件夹存放调度台在日常值班工作中

使用到的各类文件;安全管理文件夹存放调度台安全活动的相关文件,包括 QHSE 体系文件、调度台每月安全活动记录、风险台账以及安全专项检查等资料;应急管理文件夹存放异常事件下的应急处理相关文件,包括应急预案、异常事件信息记录、应急处置卡、通讯录管理及应急演练等资料;调度台工作文件夹存放调度台人员能力培训与考核的相关文件,包括上级文件学习宣贯、调度员培训考核情况、调度台月度例会、应知应会基础等资料。

1.5 仿真优化数据库

从 2008 年始,油气调控中心开始建设国家管网天然气管道离线和在线仿真系统,形成较完善的基于自研和商业软件的在线、离线兼备的仿真体系<sup>[13-14]</sup>。该系统采用“1+3+3”的建设模式,其中“1”是指 1 套仅含简单压缩机组(仅压比或压差特性)的全管网在线仿真系统;“3”是指国家管网管辖的西部、北部、南部区域管网压缩机组运行状态的在线仿真系统;“3”是指

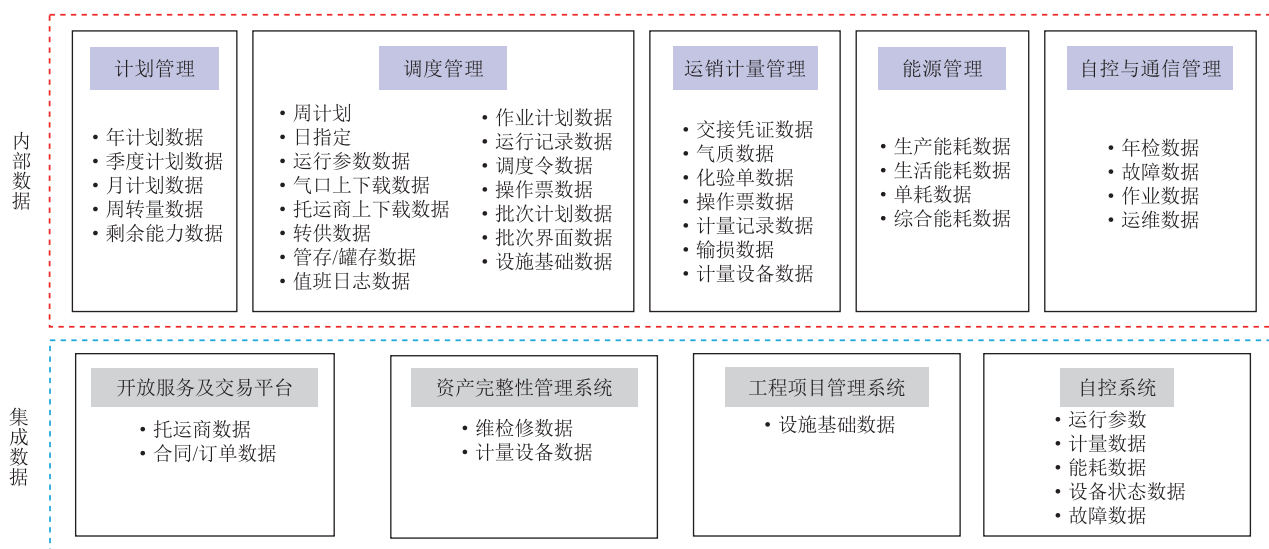


图 2 国家管网 PPS 数据库主要组成图

Fig. 2 Main components of PPS database of PipeChina

TGNET、SPS、SIMONE 共 3 套离线仿真软件,且已深入应用到管道运行各个方面。全管网模型建设范围包含西气东输一二三线、陕京管道一二三四线、中贵、中缅、涩兰长及各支线等中国大部分天然气管道,总里程约  $5 \times 10^4$  km,包括压气站 93 座、压缩机 332 台,采集 SCADA 数据点 12 000 个(含 PPS 数据)。

此外,国家管网油气调控中心根据各区域管网运行特点和规律,按照水力系统划分为西部、东北、陕京、长三角 4 个主要输供气通道,建立了超过 9 000 个工况组合的优化方案库。为便于调度人员快速、有效地使用这些优化方案,根据方案库计算出的各种最优运行方案,结合仿真软件测算出来的压气站失效能力,共同整理成为输量台阶表。

## 2 天然气管网运行数据应用平台构建

天然气管网运行数据应用平台将先进的数据处理技术<sup>[15]</sup>、深度学习算法<sup>[16]</sup>与天然气管网运行实际深度结合,基于业务逻辑定制应用功能。该平台充分利用已有的自动化数据采集与关键设备远程控制技术<sup>[17]</sup>,通过关系型数据库<sup>[18]</sup>完成底层数据结构的搭建,接入 SCADA 数据库、PI 数据库、国家管网 PPS 数据库、仿真优化数据库、压缩机运行状态监测等数据源,并通过规范不同层级的生产运行数据需求,进一步优化生产运行数据的展示界面。

### 2.1 建设架构

天然气管网运行数据应用平台(图 3,图中虚线框

表示功能更新)由数据层、服务层、应用层及终端层组成。数据层实现了操作业务、生产运行等数据的管理,主要负责数据源对接、数据集成及数据存储。具体的数据源包括 SCADA 系统、压缩机动态效率监测系统、PI 数据库、优化仿真数据库及 PPS 数据库等;数据集成形式分为数据采集、清洗、转换及协议转换等;数据存储采用天津南大通用数据技术股份有限公司自主研发的南大通用安全数据库管理系统(简称 GBase 8s),实现了数据库国产化。服务层实现了接口接入、消息接收与发送、地理信息融合、数据缓存、状态监控、报表生成、流程跟踪等基础服务,并支持数据管理类服务、数据分析类服务、数据建模类服务、数据查询类服务。应用层实现了综合展示、运销管理、运行管理、数据查询、报表工具等应用。终端层实现了 PC 端、大屏端两个维度不同用户的使用和展示要求。

### 2.2 数据流

从数据流转程序与信息传递角度归纳,天然气管网运行数据应用平台的数据流(图 4)可划分为数据采集层、分析处理层、服务应用层 3 个层级。数据采集层的数据主要来自于商务/计划类数据、运行日报类数据及实时状态类数据<sup>[19-20]</sup>共 3 个渠道,共同采集形成天然气管网运行数据池。分析处理层分为多源异构数据结构化处理与异常数据处理两方面。服务应用层基于 Echarts 开源可视化组件,设计交互功能可在简洁的图表画面上实现多维度、多层次的数据展示和信息挖掘,包括数据交互可视化、生产报表自动化及多维度统计查询等<sup>[8]</sup>。

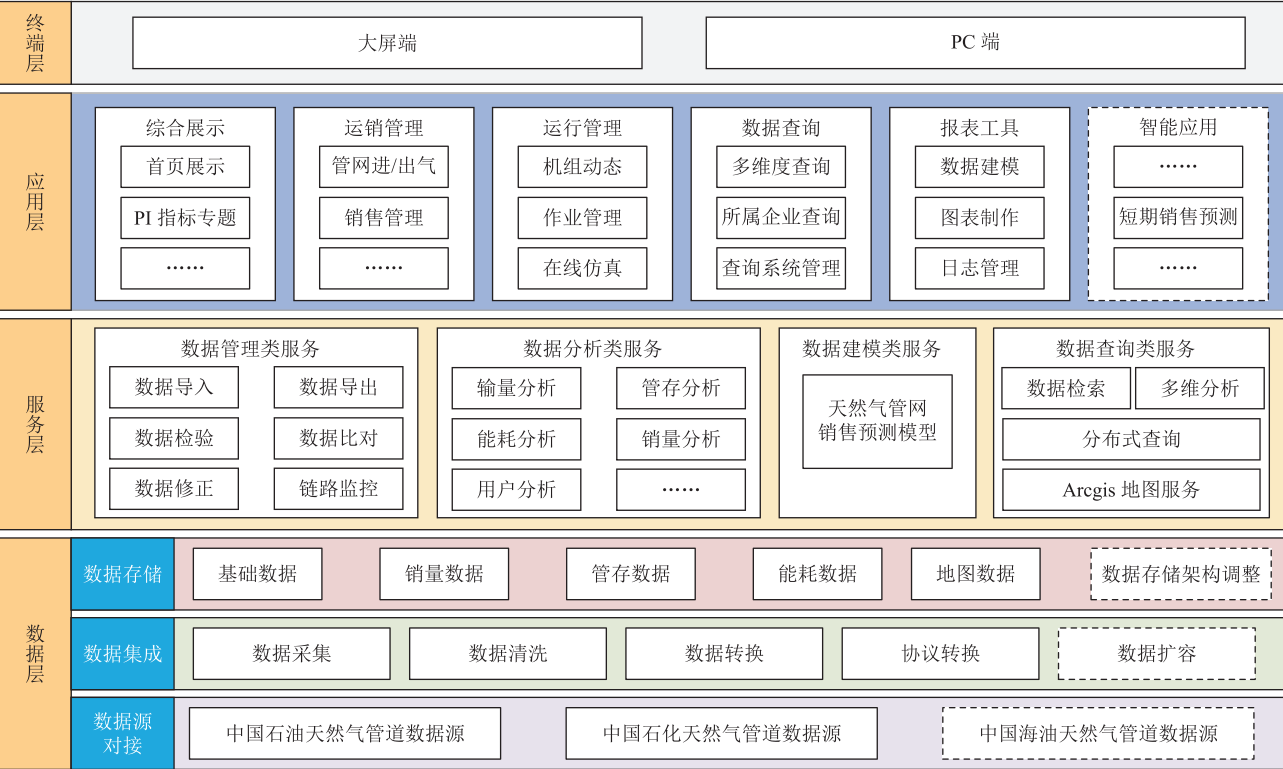


图 3 天然气管网运行数据应用平台建设架构示意图

Fig. 3 Architecture diagram of application platform for operational data of natural gas pipeline network

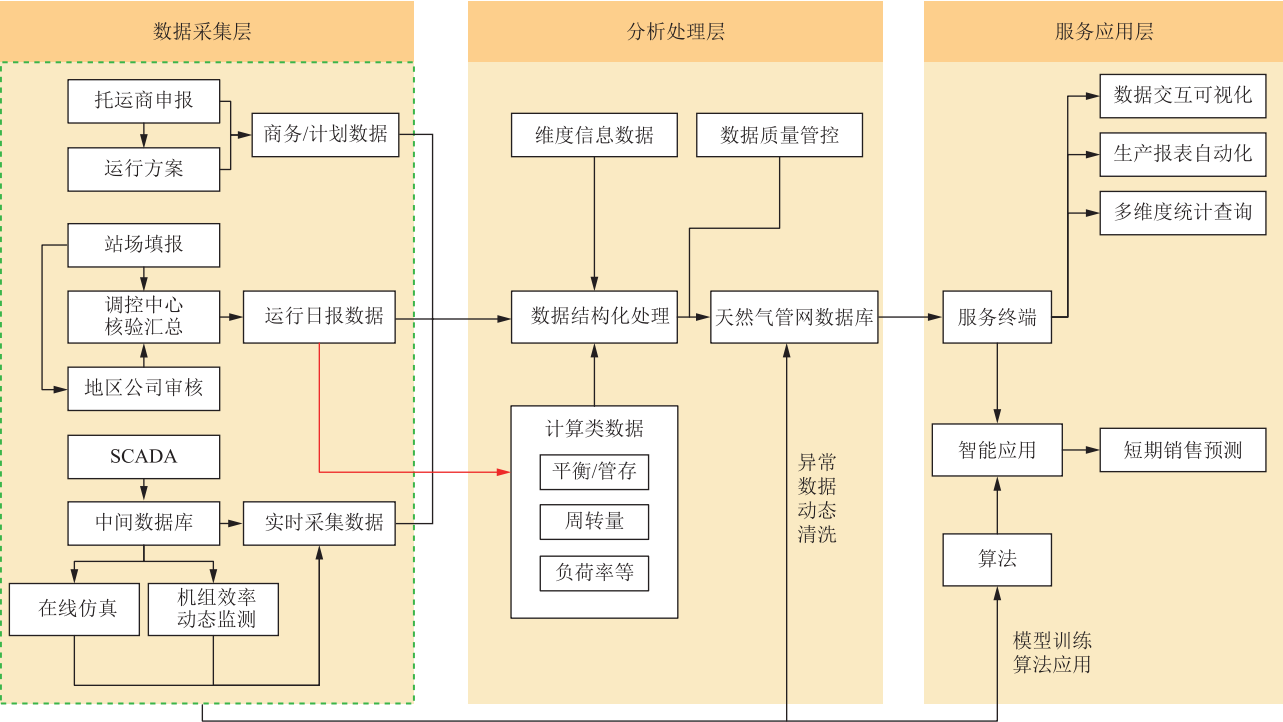


图 4 天然气管网运行数据应用平台的数据流层级划分示意图

Fig. 4 Data flow hierarchy diagram of application platform for operational data of natural gas pipeline network

2.3 技术实现路径与数据驱动业务能力

天然气管网运行数据应用平台的技术实现路径(图 5)为前台展示服务+后台数据处理服务+数据库服务+预测服务。前台展示服务中的 Web 容器采

用 Tomcat 服务器,并应用 Ngnix 服务器反向代理进行负载均衡,以确保高可用;程序编写使用 html、css、css3、js、jquery、vue、echarts、bootstrap、layui 等编程语言搭建;表格类渲染使用 vue、bootstrap、layui 等工

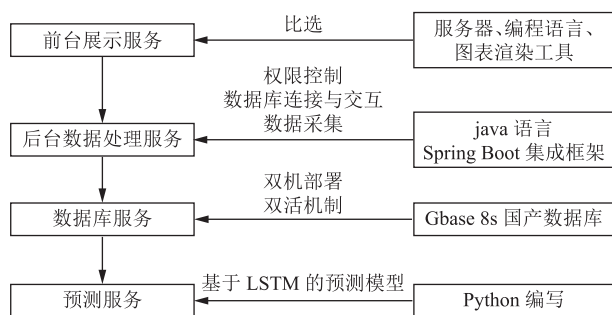


图 5 天然气管网运行数据应用平台技术实现路径图

Fig. 5 Technical realization path of application platform for operational data of natural gas pipeline network

具;插图类渲染使用 echarts 库实现。后台数据处理服务是基于 java 语言编写,使用 Spring Boot 集成框架搭建而成,权限控制使用 Shiro 安全框架,数据库连接使用 Druid 实时分析型数据库,与数据库交互使用 Mybatis 框架,接口编写使用 java。使用 Web Service 接口从 PPS 数据库采集数据,使用 Python 语言调用 OPC (OLE for Process Control) 服务从 PI 数据库采集数据,使用 http client 从仿真优化数据库采集数据,使用数据库直连 JDBC (Java Database Connectivity) 从压缩机动态效率监测平台采集数据。数据库服务使用 Gbase 8s 国产数据库,采用双机部署、双活机制,主库与备库两套数据库服务可同时读取,以确保高可用。预测服务采用 Python 实现,对比循环神经网络 (Recurrent Neural Network, RNN)、长短期记忆网络 (Long Short-Term Memory, LSTM) 及卷积神经网络 (Convolutional Neural Networks, CNN) 3 种模型框架,并选取均方根误差 (Mean Square Error, MSE) 作为误差评价指标。由于 RNN 模型在长序列计算过程存在梯度爆炸与梯度消失的问题,而 LSTM 模型独特的门控逻辑结构有效缓解了这些问题,因此 LSTM 模型在训练过程中能够更快收敛,并且模型预测误差更小。CNN 模型在提取时序特征的过程中忽视了数据的先后顺序, LSTM 模型的循环结构在依次训练过程中保证了越近的序列数据受到的关注越多,因此 LSTM 模型时序特征提取过程更具优势,最终选取基于 LSTM 的预测模型,并使用训练集数据对模型进行训练,通过验证集数据进行超参数调整。

天然气管网运行数据应用平台可以实现以下功能:①通过图表、地图等多种形式集中展示业务数据,包括变化趋势、比例结构等信息;根据天然气管网数据内容和地理位置分布特征,与地图、管网拓扑结构图进行交互,对数据实现形象体现。②将天然气各应用系

统数据进行关联,形成整体数据模型<sup>[21]</sup>,利用工业数据分析技术<sup>[22]</sup>提升天然气管网运营数据分析挖掘能力,并完成结构化数据库的建立及可视化。③ 24 个专题页面可实现生产报表自动生成、供气状态短周期预测、历史运行极值查询、关键数据便捷查询与导出、日常短信与生产日志自动生成等功能,满足油气调控中心各级管理人员和运行分析优化人员的各项需求。④应用深度学习算法与特征增强技术<sup>[23-25]</sup>可对上载、下载气量变化趋势进行短周期预测,包括未来 24 h 的日指定完成量、未来 24 h 的周转气量预测;利用 PI 数据库可实现实时管存计算和天然气管网供气状态实时平衡监测。

## 2.4 平台展示及安全维护

天然气管网运行数据应用平台主要展示了 7 个模块:① KPI 指标信息模块,包括系统安全运行时间、KPI 的计划目标以及实际达成量;②管网实时生产数据模块,上方以表格形式展示管网实时、日累计及预测的进出气、平衡、管存信息,下方以折线图形式展示进气、销售及管存信息;③管网负荷率模块,展示各管道负荷率;④管网实时能耗模块,以折线图形式展示管网能耗、管网数量及管网管存信息;⑤机组运行情况模块,以曲线图和柱状图的形式展示机组远控率与机组运行数;⑥ LNG 与储气库模块,可直观展示 LNG 的当日外输、累计外输、罐存数量及储气库的注采气等信息;⑦数据综合展示模块,可整体展示管网进气、管网分输、管网管存、管输收益、管网输量、管网周转量、管网能耗及能耗成本等信息。

此外,为了保障数据在共享和应用过程中的安全性,该平台还采用多层次的安全措施。数据传输过程中采用 SSL、TLS 等加密协议,确保了数据传输的安全性。基于角色的访问控制 (Role-Based Access Control, RBAC) 确保只有授权用户才能访问敏感数据。审计日志记录了所有数据访问和操作的详细日志,以便在发生安全事件时进行追踪和分析。该平台可定期进行数据备份,并采用冗余存储策略来防数据丢失或损坏。

## 3 实例应用

采用天然气管网运行数据应用平台分别对江苏华电昆山热电有限公司未来 24 h 用气量、西气东输一线西段未来 24 h 进出气量及安平压气站未来 24 h 站内转供情况进行预测,并与实际结果进行对比 (图 6)。可

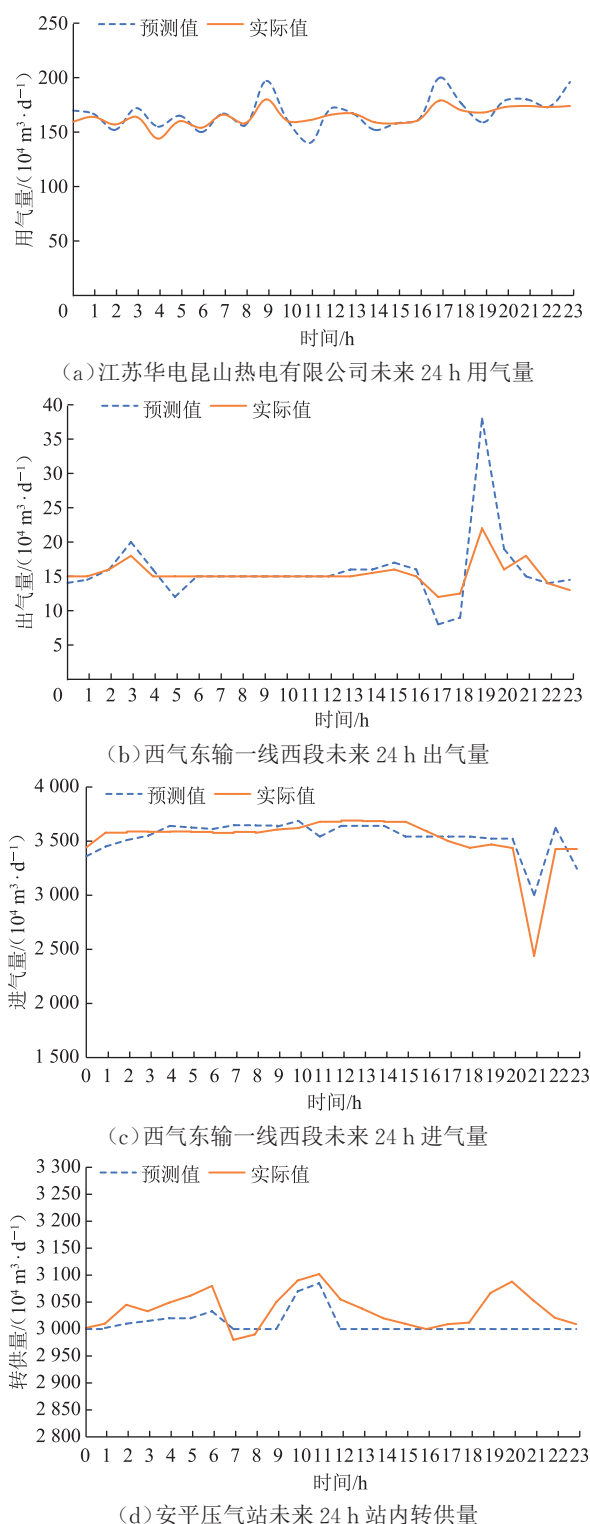


图 6 天然气管网运行数据应用平台实例预测结果图  
Fig. 6 Prediction examples of application platform for operational data of natural gas pipeline network

见,预测结果平均误差不超过 5%,表明通过应用该平台,可有效提升数据利用水平,降低调控中心数据查询相关操作量,并可实现天然气管网上载、下载、转供量的精准预测,为保证管输计划与日指定计划的准确完成提供关键性技术支持。

## 4 结论

天然气管网运行数据应用平台充分利用自动化数据采集与关键设备远程控制技术,通过关系型数据库完成了底层数据结构的搭建,接入管网运行数据、PPS 数据库等多个数据源。同时通过规范不同层级生产运行数据需求,形成管网系统物理参数数据库和具有底层统一特征的数据交换技术,实现了数据共享规范应用并提高了数据利用水平。数据应用平台进一步优化了生产运行数据的展示界面,可协助调控中心各级运行管理人员和运行分析优化人员快速掌握管网实时生产信息、运行情况及历史数据,并开展天然气管网关键气量预测,助力管网运行状态预测预警,保障管网安全平稳高效运行。

为进一步提高油气调控中心数据应用水平,未来应整合油气调控中心现有平台及数据库数据资源,挖掘管网工艺运行、设备监测、区域能耗、系统排碳量、运营收益等数据间的相关关系,从海量数据中反演系统规律、发现隐含知识,形成油气管道数据挖掘与知识发现技术体系,从系统视角提升对管网的整体认知水平与把控能力,提高调控决策效率与准确性。此外,油气管网系统在运行与管理过程中会产生大量结构化数据(工艺运行数据、设备监测数据等)与非结构化数据(报告文本、指导手册等)。其中,工艺运行数据往往需要融合专家知识进行标注才能为工况判断、风险预警等场景服务,而报告文本、指导手册蕴含大量高密度的专家知识。鉴于此,应通过对比学习、多模态学习等机器学习技术,高效融合多源数据,提高海量运行数据的利用效率,发展多元数据自驱动、自循环的智能化决策支持技术,从而推动油气管网的智能化建设。

## 参考文献:

- [1] 张卫,王兴康,石涌江,顾新建,王俊,田景红. 工业大数据驱动的智能制造服务系统构建技术[J]. 中国科学(技术科学), 2023, 53(7): 1084-1096. DOI: 10.1360/SST-2022-0372.
- ZHANG W, WANG X K, SHI Y J, GU X J, WANG J, TIAN J H. Construction technology of intelligent manufacturing service systems driven by industrial big data[J]. Scientia Sinica Technologica, 2023, 53(7): 1084-1096.
- [2] 陈楠,蔡跃洲. 工业大数据的属性特征、价值创造及开发模式[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2023, 22(3): 25-36.

- DOI: 10.3969/j.issn.1672-8106.2023.03.005.
- CHEN N, CAI Y Z. Characteristics, value creation and development mode of industrial big data[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2023, 22(3): 25-36.
- [3] 任磊, 贾子翟, 赖李媛君, 周龙飞, 张霖, 李伯虎. 数据驱动的工业智能: 现状与展望[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(7): 1913-1939. DOI: 10.13196/j.cims.2022.07.001.
- REN L, JIA Z Z, LAI L Y J, ZHOU L F, ZHANG L, LI B H. Data-driven industrial intelligence: current status and future directions[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(7): 1913-1939.
- [4] 唐善华, 杨毅, 张麟, 郭永华, 侯本权, 杨金辉, 等. 天然气管网智能调控初探[J]. 油气储运, 2021, 40(9): 991-996, 1026. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.09.004.
- TANG S H, YANG Y, ZHANG L, GUO Y H, HOU B Q, YANG J H, et al. Preliminary study on intelligent control of natural gas pipeline networks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 991-996, 1026.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 艾力群, 张鹏, 艾浩安, 孙晓波, 贺中强, 张华斌. 基于“全国一张网”的天然气管网调度应急系统设计与应用[J]. 石油工程建设, 2023, 49(1): 72-78.
- AI L Q, ZHANG P, AI H A, SUN X B, HE Z Q, ZHANG H B. Design and application of natural gas dispatching emergency system based on an integrated network[J]. Petroleum Engineering Construction, 2023, 49(1): 72-78.
- [8] 唐善华, 杨金辉, 徐春野, 杨毅, 周晓莹, 郭永华, 等. 工业数据驱动技术在大型复杂天然气管网运行中的应用[J]. 天然气工
- 业, 2021, 41(9): 135-141. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.09.014.
- TANG S H, YANG J H, XU C Y, YANG Y, ZHOU X Y, GUO Y H, et al. Application of industrial data-driven technology in the operation of large-scale complex natural gas pipeline network[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(9): 135-141.
- [9] 周登极, 邢同胜, 张麟, 马世喜, 郭永华. 大数据背景下天然气管网数据挖掘与应用[J]. 油气储运, 2021, 40(3): 271-276. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.03.005.
- ZHOU D J, XING T S, ZHANG L, MA S X, GUO Y H. Data mining and its application in natural gas pipeline network under the context of big data[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(3): 271-276.
- [10] 苏怀, 张劲军. 天然气管网大数据分析方法及发展建议[J]. 油气储运, 2020, 39(10): 1081-1095. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.10.001.
- SU H, ZHANG J J. Approach of big data analysis and suggestions on development of natural gas pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(10): 1081-1095.
- [11] 董绍华, 张河苇. 基于大数据的全生命周期智能管网解决方案[J]. 油气储运, 2017, 36(1): 28-36. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.01.004.
- DONG S H, ZHANG H W. Solution of full-life-cycle intelligent pipeline network based on big data[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 28-36.
- [12] 吕峰. 基于 SCADA 系统的中间数据库平台的研究与实现[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- LYU F. Research and implement of the middle database system based SCADA system[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [13] 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. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.010.
- ZHANG D H, YANG Y. 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.
- [14] 黄维和, 宫敬. 天然气管道与管网多能融合技术展望[J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1321-1328. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.001.
- HUANG W H, GONG J. Prospect for the development of

- natural gas network and the multi-energy integration technology in pipeline networks[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(12): 1321-1328.
- [15] 虞维超, 马子健, 李愚, 岳远志, 庞诚浩, 白亚星, 等. 储气库地面工程在线仿真技术[J]. *油气与新能源*, 2023, 35(3): 83-88. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2023.03.012.
- YU W C, MA Z J, LI Y, YUE Y Z, PANG C H, BAI Y X, et al. Online simulation technology research of gas storage ground engineering[J]. *Petroleum and New Energy*, 2023, 35(3): 83-88.
- [16] REHMAN A, ZHU J J, SEGOVIA J, ANDERSON P R. Assessment of deep learning and classical statistical methods on forecasting hourly natural gas demand at multiple sites in Spain[J]. *Energy*, 2022, 244(Part A): 122562. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122562.
- [17] 王怀义, 杨喜良. 长输天然气管道压缩机组远程控制系统设计[J]. *油气储运*, 2016, 35(12): 1360-1364. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2016.12.019.
- WANG H Y, YANG X L. Design of remote control system for compressor sets of long-distance gas pipelines[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2016, 35(12): 1360-1364.
- [18] 李垚. 数据库技术在天然气传输监控系统中的综合应用[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- LI Y. The integrated application of database technology in the gas transferring monitor system[D]. Ji'nan: Shandong University, 2011.
- [19] 闫峰, 高保成, 祁国成, 陈清山, 温昭琦. 油气管道 SCADA 系统数据回填技术[J]. *天然气工业*, 2013, 33(11): 98-103. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2013.11.017.
- YAN F, GAO B C, QI G C, CHEN Q S, WEN Z Q. A data backfilling technology in an oil and gas pipeline SCADA system[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(11): 98-103.
- [20] 黄河, 张伟, 祁国成, 闫峰, 陈鹏. 油气管道 SCADA 系统数据传输的安全风险及其解决方案[J]. *天然气工业*, 2013, 33(11): 115-120. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2013.11.020.
- HUANG H, ZHANG W, QI G C, YAN F, CHEN P. Risk analysis of data transmission security in an oil and gas pipeline SCADA system and countermeasures[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(11): 115-120.
- [21] 胡德芬, 秦伟, 冉丰华, 蒲艳玲, 胡璐瑶, 任玉清, 等. 天然气生产数据集成整合与智能分析系统[J]. *天然气工业*, 2020, 40(11): 96-101. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.11.011.
- HU D F, QIN W, RAN F H, PU Y L, HU L Y, REN Y Q, et al. Natural gas production data integration and intelligent analysis system[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(11): 96-101.
- [22] SHANG C, YOU F Q. Data analytics and machine learning for smart process manufacturing: recent advances and perspectives in the big data era[J]. *Engineering*, 2019, 5(6): 1010-1016. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.019.
- [23] 李梅, 宁德军, 郭佳程. 基于注意力机制的 CNN-LSTM 模型及其应用[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(13): 20-27. DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.1901-0246.
- LI M, NING D J, GUO J C. Attention mechanism-based CNN-LSTM model and its application[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(13): 20-27.
- [24] KIM T Y, CHO S B. Predicting residential energy consumption using CNN-LSTM neural networks[J]. *Energy*, 2019, 182: 72-81. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.230.
- [25] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, USZKOREIT J, JONES L, GOMEZ A N, et al. Attention is all you need[C]. Long Beach: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, 2017: 6000-6010.
- (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“天然气管网智能调控辅助工具研发及试点应用”, YQDKZX-2023-KJ-3。
- 作者简介:** 刁洪涛, 男, 1984 年生, 高级工程师, 2009 年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事天然气管网运行调度管理与科研工作。地址: 北京市朝阳区东土城路 5 号, 100013。电话: 010-87982095。Email: diaoht@pipechina.com.cn
- Received: 2024-05-13
  - Revised: 2024-07-10
  - Online: 2024-07-31

