

文章编号: 1000-8241(2017)01-0068-07

樊北煤层气集输管网动态仿真调度系统

王寿喜¹ 郭简² 张廷廷^{1,3} 梅永贵² 王佳^{1,3}

1. 西安石油大学; 2. 中国石油华北油田分公司; 3. 中国石化天然气分公司

摘要: 樊北煤层气因其低压、高密、大起伏、小流量的特征, 使得其集输管网系统结构复杂、压力敏感、流动参数变化细微, 工艺分析和调度管理工作困难。以 PNS(Pipeline Network Simulation) 管网仿真软件为核心, 结合樊北煤层气集输管网三维地理信息系统、SCADA 系统及实时数据库, 描述了樊北煤层气集输管网动态仿真调度系统的构架, 阐述了动态仿真模型、模型自适应及在线仿真的实现过程, 讨论了动态仿真与 GIS 地理信息系统交互式作用及自动建模和动态查询展示的方法和过程, 实现了动态仿真调度系统在线分析和跟踪煤层气管网系统的流动, 量化集输管网系统运行状态并分析评价指标, 直观搜索、查询及展示系统中各个部分的运行参数, 为大型、复杂煤层气地面集输管网系统的调度管理提供及时、准确的分析手段和决策依据, 协助调度方案的决策和实施。将系统应用于樊 9 集气站煤层气集输管网, 得到整个管网系统的流动状况, 可为调度管理决策提供及时、准确的量化数据。(图 6, 参 20)

关键词: PNS; 动态仿真; GIS; 煤层气; 集输管网; 调度

中图分类号: TE866

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.01.009

网络出版时间: 2016-10-25 14:29:45

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20161025.1429.012.html>

Dynamic simulation dispatching system for the CBM gathering pipeline network in northern Fanzhuang

WANG Shouxi¹, GUO Jian², ZHANG Tingting^{1,3}, MEI Yonggui², WANG Jia^{1,3}

1. Xi'an Shiyou University; 2. PetroChina Huabei Oilfield Company; 3. SINOPEC Gas Company

Abstract: The coalbed methane (CBM) in northern Fanzhuang is characterized by low pressure, high density, large topographic undulation and low flow rate. To deal with these characteristics, its gathering pipeline network is complicated with complex structure, sensitive pressure and subtle variation of flow parameters, so its technological analysis and dispatching management are difficult. In this paper, the framework of dynamic simulation dispatching system for the CBM gathering pipeline network in northern Fanzhuang was described with the PNS Pipeline Simulation Software as the core, combined with its 3D geographic information system (GIS), SCADA system and real-time database. Then, the dynamic simulation model, the model self-adaptation and online simulation process were illustrated. The interaction between the dynamic simulation and the GIS system was discussed. The methods and process of automatic modelling and dynamic inquiry & display were investigated. It is shown that this dynamic simulation dispatching system can be used to online analyze and track the flow of CBM pipeline network, quantify the operation state of gathering pipeline network, analyze the evaluation index and search, inquire and display intuitively the operation parameters of each part, so as to provide in time the accurate analysis methods and decision basis for the dispatching and management of large-scale complex CBM ground gathering pipeline network and coordinate the decision and implementation of the dispatching programs. The system was applied to the CBM gathering pipeline network of Fan 9 gas gathering station and the flow conditions of the overall system was obtained. It can provide timely and accurate quantified data for the decision of dispatching management. (6 Figures, 20 References)

Key words: PNS, dynamic simulation, GIS, coalbed methane, gathering pipeline network, dispatching

煤层气田低压、低产的特点,使得气田地面建设工作非常繁杂。中国石油华北油田分公司樊北区块 $6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的产能建设,形成了复杂的煤层气地面集输管网系统,包括 1 座处理厂、7 座集气站、6 条集气管道(约 40 km)、700 条采气管道(约 498 km)、24 台压缩机,连接成几个环形网络,承担区内 700 口井的煤层气集输任务。对于这样一个单井产量低、井口压力低、井数多而密集、点多面广、地形起伏高差大、结构复杂的煤层气集输管网系统而言,其调度运行方案的制定、实施及调整涉及众多因素,需要及时了解管网系统的输送能力,掌握管网系统的流动参数(压力、流量等)分布,精确描述管网系统流动及系统中各元素间的相互影响,同时需要一个集成的展示、操作及调度平台,以便及时且形象地展示管网系统的介质流动,发现问题,制定合理的调度方案,迅速决策,提高产量,降低系统的运行能耗。

基于此,以管网仿真软件 PNSTM4.0 为核心,结合 GIS 和 SCADA 系统开发了樊北煤层气集输管网动态仿真调度系统,并应用于中国石油华北油田煤层气分公司集输管网系统的日常调度管理。

1 樊北管网动态仿真调度系统构架

为了配合动态仿真调度管理系统,樊北煤层气地面集输系统建成 GIS 三维地理信息系统,所有静态数据均由 GIS 系统录入和管理,如结构、井站及管道坐标、管道参数、连接关系等。此外,该地面集输系统的实时动态数据由 SCADA 系统采集,如井口流量、压力,站场及设备运行工况及参数等,采集后存入 SQL 实时数据库,以便于进行各种生产分析。

樊北管网动态仿真调度系统(图 1)从 GIS 系统提取所选部分的静态数据,快速准确地创建管网初步仿真模型,然后根据仿真要求和目标进行完善;该管网动态仿真模型由 SCADA 系统所采集的实时数据驱动,实现在线仿真,实时分析和跟踪管网系统的流动分布和工作状态;在线仿真结果记录到 SQL 数据库中,并传送到 GIS 系统,以便形象、生动地展示整个管网系统和各个部分的工作状况和异常工况报警。

该系统通过 SCADA 系统将星罗棋布的管网测量数据采集到日常生产管理局域网,实时数据库和 GIS 系统分布在该局域网上的不同服务器上,网络上的不

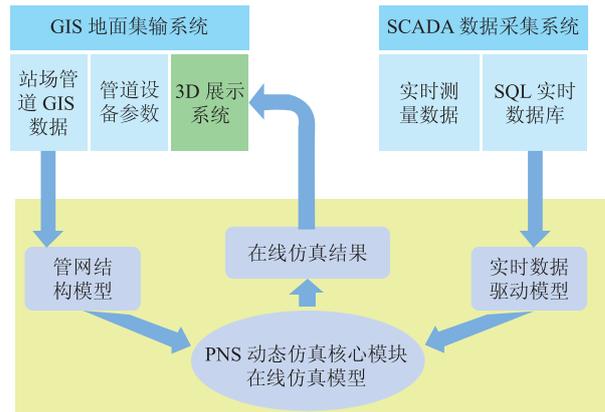


图 1 樊北管网动态仿真调度系统结构示意图

同用户可根据调度管理需要建立相应的仿真模型,仿真结果发布到 SQL 仿真数据库和 GIS 系统,供不同的调度和日常生产管理人员共享。

该系统最大特点就是 will 将 GIS 和 SCADA 系统的静态和动态数据结合起来,快速准确地建立仿真模型并实现在线动态仿真,同时为 GIS 系统提供了动态仿真分析结果和参数,实现了动态数据的三维数字化展示,以便于操作人员决策分析。

2 在线动态仿真模型及实现

2.1 在线动态仿真模型

不论管网静态仿真^[1],还是动态仿真的隐式法和特征线法^[2-6],在对管道进行差商离散化处理后,即定义了一个 n 维实数状态空间,对于每个外部和管道内部节点,其状态向量为 (p_m, M_m, T_m) ,各个工艺设备有其状态控制参数 S_k ;因此定义了总数为 n 的状态空间向量 \mathbf{X} 。对于管道中任一管段 m ,通过离散化和数值处理,可得到该状态子空间模型。对于管网系统中的工艺设备,同样也可以建立其状态空间模型,将这些状态子空间用管道网络关系式(节点连续性关系)联立,即可得到管网系统仿真的状态空间模型,即非线性代数方程组 $F_i(x_j) = 0$ 。采用不同的差分格式可得到不同的非线性状态空间模型,其一般形式为:

$$\begin{cases} \text{状态方程: } F_i(x_j) = 0 & i, j = 1, 2, \dots, n \\ \text{状态变量: } \mathbf{X} = \{ (p_m, M_m, T_m) \mid m = 0, 1, \dots, q; \\ S_k \mid k = 1, 2, \dots, K \} \in \Omega_X \in R^n \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 为压力, Pa; M 为流量, kg/s; T 为温度, K; 下标 m 为管道内部位置编号; 下标 k 为设备编号; Ω_X

为欧式有界 n 维实数状态空间; R^n 为实数; q 为管道内部位置编号总数; K 为设备总数。

若想利用式(1)仿真一特定问题,必须解决方程组的封闭性和收敛性的问题。在求解特定问题前,必须设定边界条件,即设备的工作状态(阀门开度等)、节点的压力或流量、流动起始节点的温度等。通过这些设置,必须保证方程的数目与待求变量的数目一致,这样解才唯一,管网系统才有一个明确的状态;边界条件相当于管网系统的输送条件、要求以及相对应的工艺设备的操作和控制状态。对于动态仿真,还必须给定一个初始状态,即动态仿真开始时管网系统、设备状态及流动分布,这样才可知动态变化的起点。

因此,对于任意规模和结构的管网系统,其静、动态仿真问题最终可以描述如下形式:

$$\begin{cases} \text{状态方程: } F_i(x_j) = 0 & i, j = 1, 2, \dots, n \\ \text{状态变量: } \mathbf{X} = \{ (p_m, M_m, T_m) \mid m = 1, \dots, q; \\ S_k \mid k = 1, \dots, K \} \in \Omega_X \in R^n & (2) \\ \text{边界控制条件: } x_k^j = f(t) \\ \text{初始条件: } x_i^0 = C_i & (\text{仅动态仿真时需要}) \end{cases}$$

式中: C_i 为控制常数。

根据上述管网仿真理论和模型,未作任何简化处理,建立隐式差分法动态仿真模型。实现了任意结构、规模油气管网的静态仿真,可以模拟管网系统的水力热力状态及动态变化过程。可视化的图形输入界面和电子表格数据录入方式,为快速便捷地建立各种管网仿真模型提供了良好的应用平台,是解决大型复杂煤层气管网系统流动问题的有力工具,也为樊北煤层气集输管网动态仿真调度系统的建设提供了实施手段。

2.2 管网仿真参数学习与自适应模型

由于煤层气管道敷设条件和各种管件分布的复杂性,精确描述实际管道系统参数且建模是非常困难的。此外,管道内部状态必将或快或慢地随着时间和运行条件而变化,如管道有效流动面积会随着水的沉积而减小。因此,管道参数的不准确性和不确定性将导致所建立的管道模型与所要考察的实际管道不匹配,也不易得到满意的动态仿真结果。

建立管网仿真参数学习与自适应模型的目的是根据管道实际工作条件和所测量的运行状态参数,估计和修正管道的某些参数(有效管径等),即在已知边界条件下确定一组偏微分方程中的参数。这是一个典型

的系数反演问题,且显然是非线性的。关于这类问题,目前尚无成熟的理论可以遵循,首先根据敏度分析建立参数估计的敏度法模型,然后确定其最小方差解(最小二乘解)的递推公式,其无偏、高效且具有一致性,最后利用其正问题的解,即动态仿真结果,完成参数估计和学习^[7-12]。

管网仿真参数学习与自适应模型不仅对提高管道在线模拟器的仿真精度具有重要意义,同时也是标定管道参数、检测管道运行状态的有效方法。

对于单条管道来说,由仿真模型式(2)可以推导出其参数学习模型:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = \{ (M_0, p_0), (M_1, p_1), \dots, (M_{n-1}, p_{n-1}), (M_n, p_n) \}^T \\ \mathbf{X}^{j+1}(\boldsymbol{\theta}) = F(\mathbf{X}^j, \mathbf{U}^{j+1}, \boldsymbol{\theta}) \\ \mathbf{U}^{j+1} = \{ p_0^{j+1}, p_n^{j+1} \}^T \\ \mathbf{Y}^{j+1} = \mathbf{h} \mathbf{X}^{j+1} \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{h} = \begin{cases} 1, 0, \dots, 0 \\ 0, \dots, 0, 1 \end{cases}, (n+1) \times 2 \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}$ 为待估计参数形成的 r 维向量, $\boldsymbol{\theta} \in R^r$, 其可以是时间序列的缓变参数,也可以是空间分布参数,根据学习和估计的需要确定其形式; \mathbf{U} 为系统输入; \mathbf{Y} 为系统输出; \mathbf{h} 为系统变量和系统输出的转换矩阵。

设管网仿真模型(式(2))的仿真结果为 $\overline{\mathbf{Y}}$, 则测量值 \mathbf{Y} 与仿真结果 $\overline{\mathbf{Y}}$ 间的偏差 \mathbf{e} 即可定义为:

$$\mathbf{e}^j = \mathbf{Y}^j - \overline{\mathbf{Y}}^j = \mathbf{Y}^j - \mathbf{h} \overline{\mathbf{X}}^j = \begin{Bmatrix} M_0^j - \overline{M}_0^j \\ M_n^j - \overline{M}_n^j \end{Bmatrix} \quad (5)$$

在此认为该偏差是由于待估计参数 $\boldsymbol{\theta}$ 的微小变化而造成的,则待估计参数 $\boldsymbol{\theta}$ 可由式(6)所描述的过程来修正和学习:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}^j = \boldsymbol{\theta}^{j-1} - \Delta \boldsymbol{\theta}^j \\ \Delta \boldsymbol{\theta}^j = (\mathbf{C}_j^t \mathbf{C}_j)^{-1} \mathbf{C}_j^t \mathbf{e}^j, \mathbf{C}_j = \left\{ \mathbf{h} \frac{\partial \overline{\mathbf{X}}_m^j}{\partial \boldsymbol{\theta}_i} \right\} \\ m = 0, 1, \dots, 2(n+1); i = 1, 2, \dots, r; j \geq r \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\frac{\partial \overline{\mathbf{X}}_m^j}{\partial \boldsymbol{\theta}_i}$ 为第 j 次样品空间的第 m 个系统变量对第 i 个待估计参数的灵敏度,其反映了 $\overline{\mathbf{X}}_m^j$ 的微小变化对 $\boldsymbol{\theta}_i$ 的依赖程度; \mathbf{C}_j 是第 j 次样品空间 \mathbf{X} 对 $\boldsymbol{\theta}$ 的敏度矩阵。

当测量数据足够时 ($j \geq r$), 式(6)所描述的递推和迭代过程可用来修正选定的待估计参数,实现参数学习,并以此修正后的参数更新管网仿真系统中的管道

模型,以保证管道模型与实际管道流动状况一致。该学习过程已是 PNS 软件的功能之一,以实现管网仿真模型的自适应。

在樊北调度管理系统的应用过程中,根据量测参数的分布,选取了部分集气干线的管道长度实施学习过程,进一步增加仿真模型的准确性。这里必须说明,参数学习和自适应必须在管道流动和测量系统均完好的情况下才能实施。

2.3 动态仿真调度系统的实现

樊北煤层气集输管网在线仿真是基于其生产调度管理系统局域网而实现的。首先根据上述自适应仿真理论和方法,结合 GIS 三维地理信息系统及数据库,可以快速建立精细的煤层气集输管网动态仿真模型;此外,通过 SCADA 系统采集现场运行数据,并将这些数据存入 SQL 实时数据库并及时更新, PNS 的 SQL2OPC 模块将所需的实时数据通过 OPC 协议发布,并以此数据驱动动态仿真模型,实现在线仿真; PNS 通过两种途径发布仿真信息:①通过 PNS 的 OPC 服务程序发布仿真模型及实时仿真结果,供局域网上所有 OPC 客户程序共享;②将不同动态仿真模型所产生的仿真结果存入 SQL 仿真结果数据库,供局域网上所有 GIS 终端选择并展示管网的运行动态。在线仿真过程及数据流动关系图(图 2)中的数据导向仅表明数据的流动方向和关系,实际数据传输是通过生产调度管理系统局域网在各个服务器及终端的不同系统中实现的。

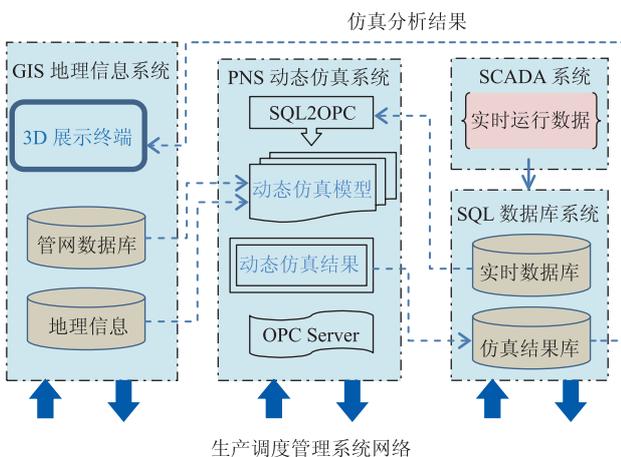


图 2 在线仿真过程及数据流分析界面示意图

该系统按照设定的周期和频率提取实时数据,自动实现动态仿真,更新数据库及显示内容。SCADA 系统扫描管网系统的所有测量点^[8],及时更新实时数

据库。仿真系统定期(60 s)从实时数据库中提取特定模型所涉及的下列运行数据,驱动仿真模型,进行动态仿真并更新仿真结果:所有井口的开关状态及温度,流量和压力;所有站场的进出口压力、流量及温度;所有阀门开关状态;所有压缩机运行状态、排量、进口压力和温度、出口压力和温度、功率等。

根据上述理论、模型及方法,开发了管网静态仿真软件 PNS,其中与 SCADA 系统的 OPC 通讯、GIS 快速建模、参数学习与模型自适应是 PNS 的标准功能,可实现快速、准确的在线应用。

此外,通过 PNS 动态仿真系统,将 GIS 系统的静态数据与 SCADA 系统的实时运行数据有机地结合,形成樊北煤层气集输管网动态仿真调度系统,既能生动形象地展示管网系统的运行状态,又能精确描述管网系统的各项流动参数和变化趋势,为管网系统调度管理和生产决策提供量化依据和科学手段。

3 GIS 三维仿真模型自动生成

樊北煤层气集输系统地域分布广和高差起伏大的特征,使得管网仿真精细建模难度很大,同时由于用户和信息渠道的不同,很难保证同一设施的基础参数在不同仿真模型中的一致性。而 GIS 系统包含有精确的井站坐标和管道沿线高程数据,其数据库系统也便于存储和管理地面集输系统众多管道和设施的静态数据,这为管网仿真建模提供了一个统一、准确的信息渠道和数据源,实现快速准确建模^[13-20]。

为了实现 GIS 三维仿真建模,对该 GIS 系统的管网图形结构、数据进行了详细定义和设计;同时还开发了 PNS 管网动态仿真软件与 GIS 系统的交互协议和接口技术。管网动态仿真系统可以利用 GIS 系统的图形和数据的查询、处理功能,快速分区、分级、分系统建立集输管网系统结构模型,提取场站三维坐标信息、各个管道的沿线高程数据及管网系统的静态参数(管径、长度等),自动生成集输系统管网仿真初始模型。

管网动态仿真调度系统的集成操作平台提供了交互式作用功能,充分利用 GIS 系统的图形和数据查询、处理能力,允许在 GIS 平台上选择平面几何区域/区块、管网级制(集气干线、集气支线、采气干线、采气支线等)、站场系统(站场、阀组)等,然后根据所确定的查询条件,进行相关管网系统的图形和数据查询,并将所

有符合条件的信息按协议和接口格式提供给PNS管网仿真系统。PNS管网仿真系统由其GIS接口接收并组织信息,自动生成所选区块或系统的管网仿真初始模型,包括管网系统结构关系及管道设备的静态数据;然后根据特定仿真任务、条件及要求进行配置与完善,最终生成所需的仿真模型,实现预定的分析任务,为调度管理提供科学手段和依据。

自动生成的樊6站集气管道PNS仿真初始模型(图3)可以评价樊6集气站所辖上游集气管网的输送能力、压降分布及系统中最不利的流动堵塞段。在设定相关查询条件后,GIS系统查询和搜索樊6集气站及其上游所有管道、阀组、井口的结构及静态数据,PNS的GIS接口据此自动建立樊6集气管网系统的连接关系,填充相关的静态数据,生成初始模型。

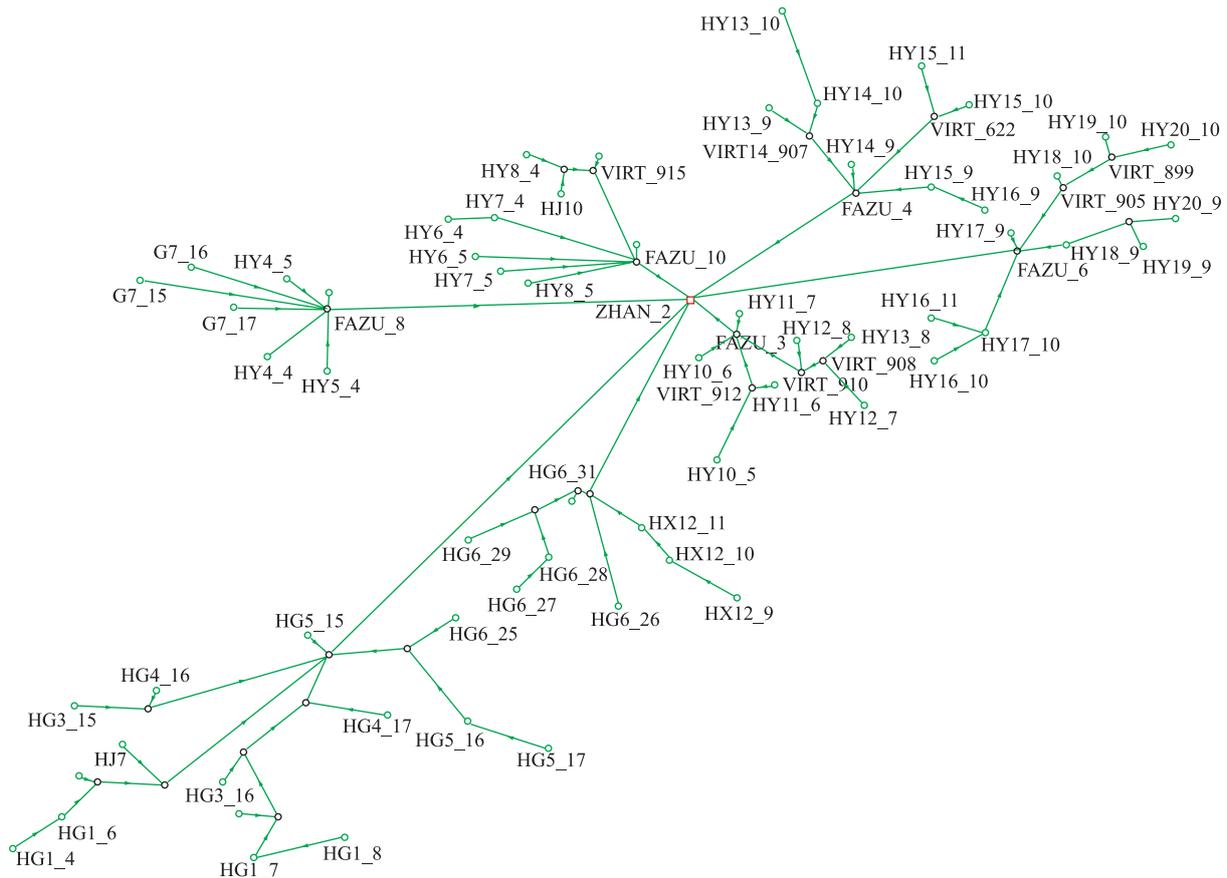


图3 樊6站集气管道PNS仿真初始模型示意图(GIS导出)

4 动态仿真调度管理与应用

4.1 仿真分析结果处理

除了辅助建模外,樊北煤层气集输管网动态仿真调度系统的另一个作用是利用GIS系统实现动态仿真分析结果的可视化查询、搜索及3D展示(图4),从而直观地描述管网系统的运行历史与现状,量化管网系统运行状态与评价指标,以便调度人员分析和迅速发现存在的问题。

实现过程分为以下步骤:①仿真分析结果存储在局域网上的SQL数据库中,按指定周期动态添加和更新;②按类存储仿真分析结果,如每条管道的每个仿真记录均包含管道名称、记录时间、系统名称、模型名

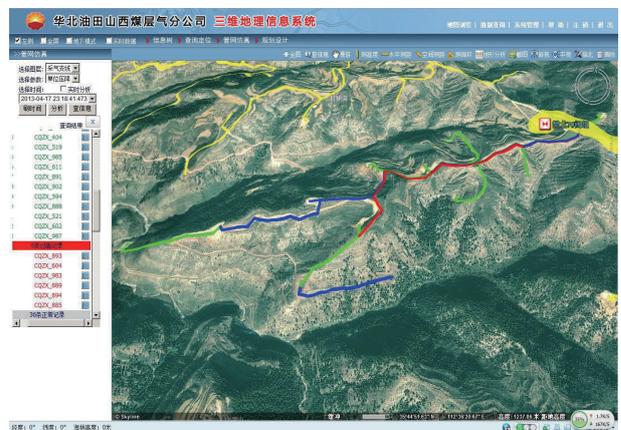


图4 樊北区块煤层气集输系统三维地理信息系统界面

称、仿真工号、压力流量温度(首末端点)、总压降、单位压降等,便于查询和评价;③调用PNS仿真结果,根据

单位压降大小改变 GIS 上管道的颜色,实时显示流动情况(图 4);④ GIS 接收管网仿真或 SCADA 系统的实时数据,并显示在 GIS 界面;⑤用户可随意选择对象,按指定方式显示定制的各项数据;⑥通过输送效率、单位压力损失或其他分析结果,显示各个设施的工作状态。

4.2 应用实例

樊 9 集气站煤层气集输管网 PNS 仿真模型(图 5)

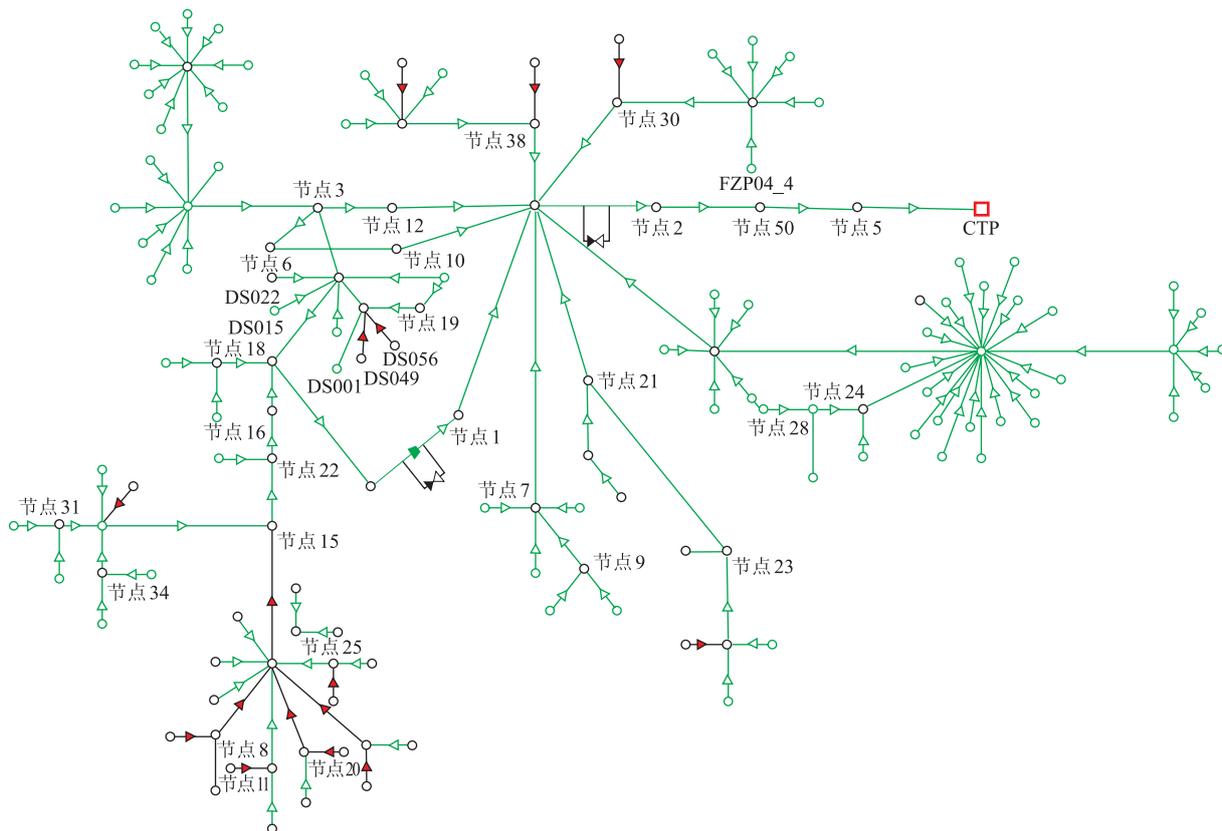


图 5 樊 9 集气站煤层气集输管网 PNS 仿真模型示意图

通过仿真分析,可得到整个管网系统的流动状况,并可选择任意路径,自动生成沿途的流动参数分布图。由成庄 8[#] 阀组至中央处理厂的集气干线(由 Pipe119-Pipe120-Pipe116-Pipe95-Pipe10-Pipe15-Pipe16-Pipe5 组成)压力流量分布图(图 6)可知,该路径上游流量小,下游逐步增加,在压缩机前急剧增加;上游压力高,沿管道逐步降低,但在压缩机站压力骤增;Pipe15(压缩机后)的压降较大,对集输能力有一定影响。

煤层气排水采气的开发特点决定其产能规模是不断变化的。因此,在初期开发阶段,随着新井不断投入生产,需要及时分析和掌握地面集输管网的能力,以满足气田开发的整体要求。随着相关井投入生产,整个樊 9 集输管网流动及压力分布将发生变化,通过重新

包括了樊 9 集气站所辖的所有生产井、管道以及到中央处理厂的集气干线,包含 143 个节点(105 口生产井,其余为连接点)、143 条管道及 2 座压缩机站(含有 3 个环状结构)。图中黑色表示采气井停产及管道流量为 0,绿色表示管道有流量且流动方向与箭头一致。根据 2011 年 8 月 8 日生产日报表,控制各井口流量和终点(中央处理厂)的进气压力,分析各管道的压力流量分布,考察集输系统的输送能力和运行状态。

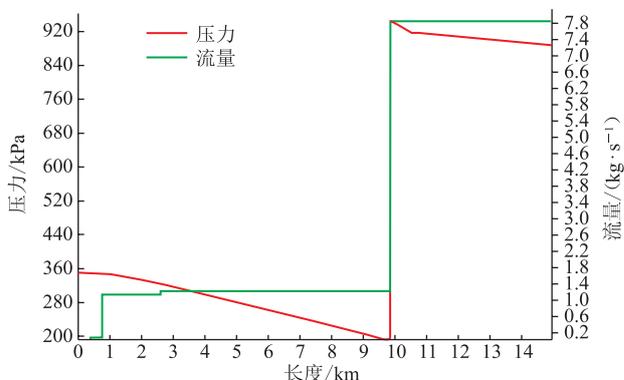


图 6 成庄 8[#] 阀组至中央处理厂集气干线压力流量分布图

设置模型中相关井场的运行条件,即可针对新的工况进行仿真分析,为调度管理决策提供及时、准确的量化依据。

5 结论

(1)我国石油天然气管道系统日益大型化、复杂化及现代化,建设水平逐渐提高,很多系统都配备了GIS系统和SCADA系统,提供了大量的静态数据和实时运行数据。充分利用这些数据可以更好地服务于日常调度管理,提高工作效率,指导生产,进行科学分析和决策。

(2)樊北煤层气因其压力低、密度高、起伏大、流量小的特征,使其集输管网系统成为结构复杂、压力敏感、流动参数变化细微的复杂系统。进行动态仿真分析,掌握系统的压力分布,量化管网系统的产能规模和单元间的相互作用和影响,便于发现流动瓶颈并制定解决方案。

(3)通过管网动态仿真系统,将GIS系统的静态数据与SCADA系统的实时运行数据有机结合,形成樊北煤层气集输管网动态仿真调度系统,既能生动形象地展示管网系统的运行状态,又能精确描述管网系统的各项流动参数和变化趋势,为管网调度管理和生产决策提供量化依据和科学手段。

参考文献:

- [1] 王寿喜,曾自强.天然气管网静态仿真[J].天然气工业,1995,15(2):59-63.
WANG S X, ZENG Z Q. Static and dynamic emulation of natural gas pipeline network[J]. Natural Gas Industry, 1995, 15(2): 59-63.
- [2] WANG S, CARROLI J J. Leak detection for gas and liquid pipelines by online modeling[J]. SPE Projects, Facilities & Construction, 2007, 2(2): 1-9.
- [3] 王寿喜,曾自强.管网稳态分析[J].石油学报,1987,8(4):117-123.
WANG S X, ZENG Z Q. Node pressure model for network steady-state analysis[J]. Acta Petrolei Sinica, 1987, 8(4): 117-123.
- [4] KE S L, TI H C. Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network[J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 76(2): 169-177.
- [5] ABRAHAM D W, MOHD A M. Simulation model for natural gas transmission pipeline network system[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011, 19(1): 196-212.
- [6] MAPUNDI K B, MICHAEL H, AXEL K. Gas flow in pipeline networks[J]. Networks and Heterogeneous Media, 2006, 1(1): 41-56.
- [7] 田立平.数学物理方程及其反问题研究[M].北京:机械工业出版社,2010:79-84.
TIAN L P. The reverse problems of the equations of the mathematical physics[M]. Beijing: Mechanical Engineering Publisher, 2010: 79-84.
- [8] 王寿喜,王杰.长输管道自动化[M].北京:石油工业出版社,1996:48-67.
WANG S X, WANG J. Long-distance pipeline automation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 48-67.
- [9] HERBERT L S. Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1968, 5(3): 530-558.
- [10] TJOA I B, BIEGLER L T. Simultaneous solution and optimization strategies for parameter estimation of differential-algebraic equation systems[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1991, 30(2): 376-385.
- [11] ZAHRA E, KIMBERLEY B M. Mean square error based method for parameter ranking and selection to obtain accurate predictions at specified operating conditions[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(14): 6033-6046.
- [12] MORENO M S, FEDERICO E A, DIAZ M S. Dynamic modeling and parameter estimation for unit operations in lignocellulosic bioethanol production[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(11): 4146-4160.
- [13] PAVEL R. Using GIS information to build pipeline model[C]. Palm Springs: PSIG Annual Meeting, 2004: SIG-04B4.
- [14] TAO T, MELISSA W. GIS simulation and visualization of community evacuation vulnerability in a connected geographic network model[J]. Middle States Geographer, 2005, 38: 22-30.
- [15] BRAD B. Maps to models-building distribution system models from GIS or CAD data[C]. Napa Valley: Pipeline Annual Meeting, 2011: PSIG-1105.
- [16] CLAY N, MICHAEL L. Integrating GIS with pipeline simulation software[C]. Galveston: PSIG Annual Meeting, 2009: PSIG-0908.

(下转第84页)

- 技术研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(6): 1339-1344.
- ZHENG J G, CHEN G Q, SONG F, et al. Research on simulation model and solving technology of large scale gas pipe network[J]. Journal of system simulation, 2012, 24(6): 1339-1344.
- [20] 宋涛. 天然气管网特征线法动态仿真分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2015: 8-11.
- SONG T. Dynamic simulation analysis of natural gas pipeline network in method of characteristics[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015: 8-11.
- [21] 赵昆鹏. 管道实时在线自适应仿真技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015: 2-5.
- ZHAO K P. The research of the pipeline self-adaptive online simulation technology[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015: 2-5.
- [22] 李长俊, 文继军. 输油管道中不稳定流动分析[J]. 油气储运, 1994, 13(5): 5-9.
- LI C J, WEN J J. An analysis on the unsteady flow in oil pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1994, 13(5): 5-9.
- [23] 郑建国. 大型天然气管网仿真计算引擎的研究与实现[D]. 成都: 西南石油大学, 2012: 42-59.
- ZHENG J G. Research and implementation on simulation engine of large-scale gas pipe network[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012: 42-59.
- [24] LUSKIN M. An approximation procedure for nonsymmetric, nonlinear hyperbolic systems with integral boundary conditions[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1979, 16(1): 145-164.
- [25] WANG P, YU B, DENG Y, et al. 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.
- [26] KEENAN P T. Collocation and upwinding for thermal flow in pipelines: The linearized case[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1996, 22: 835-847.
- (收稿日期: 2016-10-21; 修回日期: 2016-11-03; 编辑: 李在蓉)

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金项目“传热传质学”, 51325603。

作者简介: 宇波, 男, 1972年生, 教授, 1999年博士毕业于西安交通大学工程热物理专业, 现主要从事油气储运研究工作。地址: 北京市大兴区黄村镇清源北路19号, 102617。电话: 010-81292805, Email: yubobox@vip.163.com

(上接第74页)

- [17] TAO T, XIN K L, LIU S Q, et al. A pipe network skeleton method based on GIS network analysis technologies[C]. Shanghai: ICPTT, 2009: 18-21.
- [18] 郑绵彬, 陈国华. ArcGIS实现三维燃气管网仿真的研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(7): 1824-1827.
- ZHENG M B, CHEN G H. Study on 3D simulation of gas-pipelines applying ArcGIS[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(7): 1824-1827.
- [19] JANKOWSKI P, RICHARD L. Integration of GIS-based suitability analysis and multicriteria evaluation in a spatial decision support system for route selection[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1994, 21: 323-340.
- [20] CHMILAR W, POISSANT G. Data management and exchange in a pipeline simulation environment[C]. Palm Springs: PSIG Annual Meeting, 2004: PSIG-04B2.
- (收稿日期: 2016-10-08; 修回日期: 2016-10-17; 编辑: 杜娟)
- 基金项目:** 国家自然科学基金项目“大型复杂天然气管道系统实时动态模型泄漏检测技术研究”, 51274166; 国家科技重大专项项目“山西沁水盆地煤层气水平井开发示范工程”, 2011ZX05061。
- 作者简介:** 王寿喜, 男, 1962年生, 教授, 加拿大注册工程师, 1998年博士毕业于西南石油大学油气储运工程专业, 现主要从事油气管网仿真、油气管道泄漏检测、油气集输工艺的教学和研究工作。地址: 陕西省西安市电子2路18号西安石油大学石油工程学院, 710065。电话: 029-88382936, Email: wangsx@yahoo.com