

输气管道末段储气规律动态仿真

郑志炜, 吴长春

中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249

摘要 末段储气是输气管道短期调峰的重要手段, 工程上经常用稳态算法估算输气管道末段储气量, 而末段储气过程是一个复杂的非稳态过程, 因此用稳态算法估算末段储气量具有一定的偏差。本文通过对管道末段进行多种工况下的非稳态模拟来界定末段储气量稳态算法的偏差范围, 并得到了若干管道末段的储气规律。针对影响输气管道末段储气的各种因素, 分别按不同管径、管长、进口压力和流量设计了 6 种工况并利用国际上通用的管道仿真软件 SPS 9.6 (Stoner Pipeline Simulator 9.6) 进行动态仿真。结果表明, 在非稳态工况下, 稳态法计算末段储气量比非稳态计算末段储气量低约 14%—25%; 输气管道末段储气量的变化受用气负荷变化规律的影响, 在不同工况下末段最大储气量出现的时间一般比管道末端最大用气负荷出现的时间有所提前或时间相近; 当管道末端用气流量发生变化时, 管道末段起点压力的变化较终点压力的变化具有滞后性, 管段越长、管径越大, 滞后越明显。

关键词 输气管道; 末段储气; 稳态算法; 动态仿真

中图分类号 TE832

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.17.002

Dynamic Simulation on the Pattern of End Section Storage of Gas Pipelines

ZHENG Zhiwei, WU Changchun

Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The end section storage is an important mean for short term peak shaving of gas pipeline. Steady state calculation is usually adopted to estimate end section inventory, however the process of end section storage is a complicated dynamic process, and the end section inventory obtained by steady state calculation has some deviation. The deviation range of steady state calculation is defined via dynamic simulations on end section storage in many conditions. And some patterns involving end section storage are obtained. According to the factors which affect end section storage of gas pipelines, six conditions which have different inner diameters, lengths, inlet pressures, and flow rates of end section are simulated by using an internationally popular pipeline simulation software of Stoner Pipeline Simular (SPS) 9.6. The simulation results indicate that with dynamic conditions, end section inventory obtained by steady state calculation is about 14%—25% less than that by dynamic calculation. The change of end section inventory is affected by the change pattern of end point gas load, the largest end section inventory occurs nether before the largest end point gas load or more or less at the same time. When the end point flow rate changes, end section inlet pressure changes after outlet pressure. The longer end section is, and the larger inner diameter is, the more obvious hysteresis is.

Keywords gas pipeline; end section storage; steady state calculation; dynamic simulation

0 引言

长距离输气管道的末段是指其最末一个压气站和管道

终点之间的管段。末段的 2 种特殊情况是管道全线不设压气站或仅在管道起点设置一个压气站, 此时整条管道都属于末

收稿日期: 2012-03-27; 修回日期: 2012-06-05

作者简介: 郑志炜, 博士研究生, 研究方向为油气储运及营销系统工程(包括城市燃气输配), 电子信箱: zhengzhiwei_1@126.com; 吴长春(通信作者), 教授, 研究方向为油气储运与城市输配系统工程, 电子信箱: wuchangchun@vip.sina.com

段。由于末段紧靠管道终点,因而通常将其作为解决城市小时用气不均衡性的储气容器^[1-6]。当城市用气处于低峰时(城市的耗气量小于管线的输送量),多余的气体就积存在末段;反之,当城市用气处于高峰时(城市的耗气量大于管线的输送量),不足的气体就由积存在末段的剩余气体来补充^[7]。但一般都是按管道最大和最小平均压力计算管道末段的最大储气能力,并未与城市的实际用气变化规律耦合。

输气管道末端的用户种类多样,用户的用气量随时间不断变化,管道末段始终处于非稳态的运行过程中,管内压力及储气量变化规律非常复杂^[8]。因此要对管道末段储气规律进行细致地研究,有必要对其进行动态仿真,掌握运行期间末段的工艺参数随时间和空间的变化规律,以便为实际生产制定运行调度计划提供更加合理的依据。

Stoner Pipeline Simulator (SPS) 软件是由美国 Stoner 公司(2001 年 5 月被英国 Advantica 公司收购)开发的用于长输管道瞬态工况模拟的软件,是目前国内外应用最广泛的油气长输管道仿真软件。SPS 功能强大、实用性强,可以方便地实现对管道系统的控制,如进、出站压力控制,流量控制以及强大的逻辑控制能力^[9-11]。在本文中,应用 SPS 9.6 软件对输气管道末段储气过程进行动态仿真,总结出末段储气的一系列规律。

1 末段储气稳态计算与非稳态计算

1.1 末段储气稳态算法

管道末段某一时刻实际容纳的气体数量(通常用工程标准状态下的体积表示)称为末段管存,管道末段储气量等于末段目前的管存量减去末段最小运行管存量,末段管存的稳态算法如式(1)所示^[12]:

$$p_{av} = \frac{2}{3} \left(p_1 + \frac{p_2^2}{p_1 + p_2} \right) \quad (1)$$

$$V = \frac{p_{av} V_1 Z_0 T_0}{p_0 Z_1 T_1}$$

式中, p_1 为管道末段入口压力,Pa; p_2 为管道末段出口压力,Pa; p_{av} 为管道末段的平均压力,Pa; V 为管道末段管存量, m^3 ; V_1 为管道末段的几何容积, m^3 ; T_1 为管道末段的平均温度,K; Z_1 为管道末段平均压力、平均温度下的气体压缩因子; p_0 为工程标准状况下的压力, $p_0=101325Pa$; T_0 为工程标准状况下的温度, $T_0=293K$; Z_0 为 p_0 、 T_0 下的气体压缩因子, $Z_0=1$ 。

1.2 非稳态算法

输气管道非稳态算法气体管流基本方程组包括连续性方程、动量方程和能量方程。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \frac{ds}{dx} + \frac{\lambda}{d} \frac{v|v|}{2} \rho = 0 \quad (3)$$

能量方程

$$-\frac{\partial Q}{\partial x}(\rho v) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(u + \frac{v^2}{2} + gs \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\rho v) \left(h + \frac{v^2}{2} + gs \right) \right] \quad (4)$$

式中, ρ 为气体密度, kg/m^3 ; v 为气体流速, m^3/s ; λ 为水力摩擦系数; d 为管道的内径, m ; p 为气体压力,Pa; s 为管道沿线高程, m ; u 为气体比内能, J/kg ; h 为气体比焓, J/kg ; $\partial Q/\partial x$ 为单位质量流量气体在单位管长上的热交换率; g 为重力加速度, m/s^2 。其中 p 和 h 是 ρ 的函数,上述差分方程可采用 Newton-Raphson 法求解。

2 案例仿真与分析

长输管道的末段储气与末段的长度、管径、进口压力和流量等因素有关。为了比较在多种非稳态工况下管道末段非稳态计算储气量与稳态计算储气量的偏差,根据影响管道末段储气的因素设计了 6 种工况应用 SPS 软件进行动态仿真。

假设长输管道末段向某一城市供气,城市允许的最低供气压力为 4MPa,该城市一天的小时用气负荷按 $Q=Q_1+Q_2 \sin\left(\frac{\pi}{12}t-0.5\pi\right)$ 变化,末段进口流量保持 Q_1 不变(图 1)。

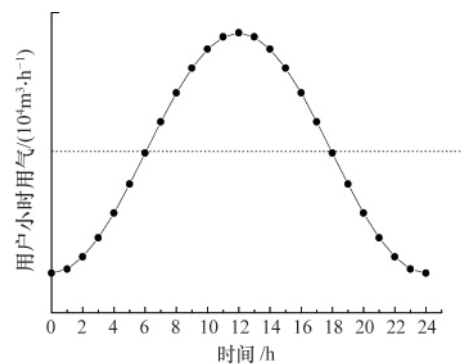


图 1 城市小时用气流量变化规律

Fig. 1 Pattern of hourly city flow rate change

末段管道外径、长度、进口压力、进口流量的设定如表 1 所示。

表 1 末段管道基础参数

Table 1 Basic parameters of pipeline end sections

外径/mm	长度/km	壁厚/mm	进口压力 /MPa	进口流量 / $(10^4 m^3 \cdot d^{-1})$
660	200	7.14	6.5	800
660	400	7.14	7.6	800
1012	200	14.6	6.5	2000
1012	400	14.6	7.5	2000
1219	200	25.7	7.7	5000
1219	400	25.7	9.2	5000

在 SPS 软件设置中,气体状态方程采用 BWRS 方程,如

图 2 所示。仿真界面如图 3 所示。

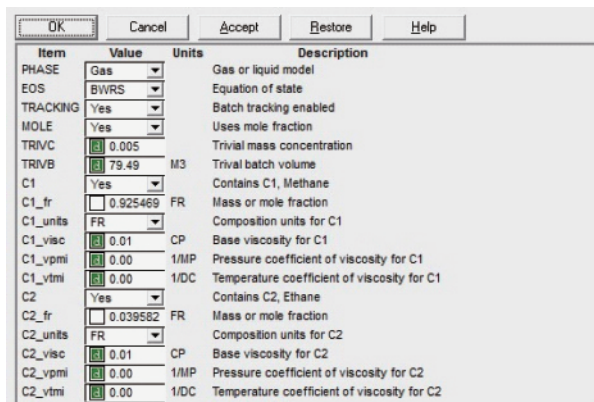


图 2 软件中 BWRS 方程参数设置
Fig. 2 Parameters setting of BWRS equation in the software

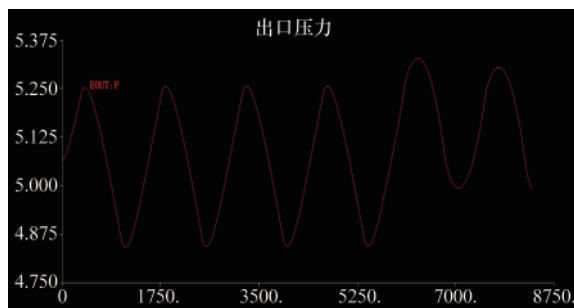


图 3 仿真运行界面
Fig. 3 Simulation interface

当末端管道外径为 660mm 时, 管道末端用气流量随 $Q=33.3+10\sin(\frac{\pi}{12}t-0.5\pi)$ 变化, 单位 $10^4\text{m}^3/\text{h}$, 当管长分别为

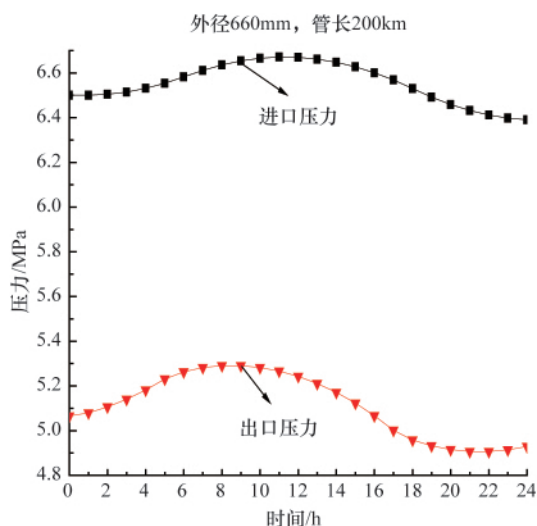


图 4 末端进出口压力随时间的变化
Fig. 4 Inlet and outlet pressures of end section changing with the time

200km 和 400km 时, 利用 SPS 软件对管道末段 24h 的运行规律进行动态仿真, 仿真结果如图 4 至图 7 所示。

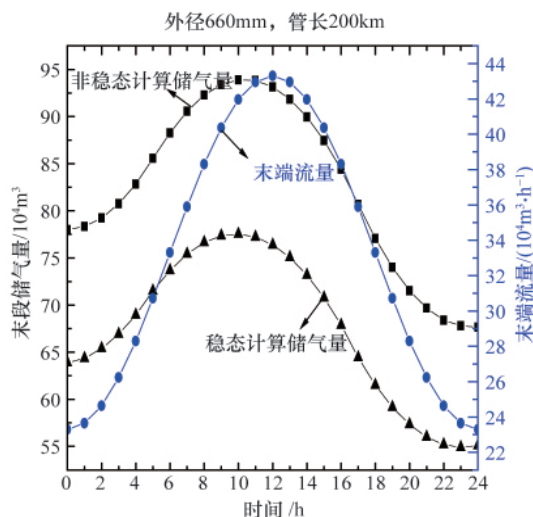


图 5 末端储气量和末端流量随时间的变化
Fig. 5 Inventory and flow rate of end section changing with the time

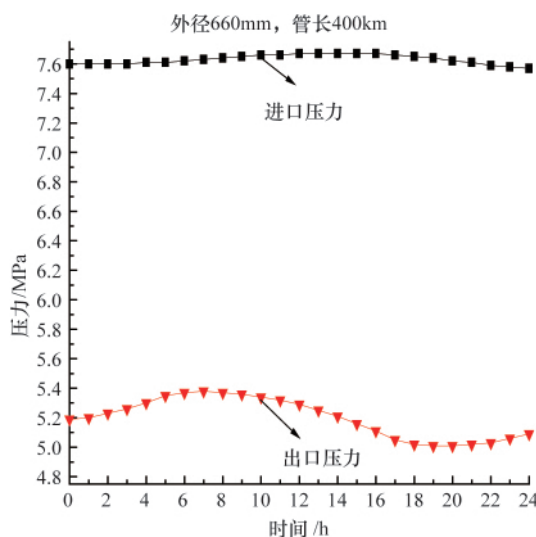


图 6 末端进出口压力随时间的变化
Fig. 6 Inlet and outlet pressures of end section changing with the time

当末端管道外径为 660mm, 管长分别为 200km 和 400km 时, 由图 4、图 6 可知, 当末端用气流量发生变化时, 末端进口压力的变化较出口压力的变化具有滞后性, 且管长 400km 的滞后性比管长 200km 更明显; 由图 5、图 7 可知, 在各个时刻非稳态计算储气量比稳态计算储气量大, 二者的偏差范围是 16%—25%, 并且管道末段最大储气量出现的时间比末端最大流量出现的时间更早。

当末端管道外径为 1012mm, 管道末端用气流量随 $Q=83.3+25\sin(\frac{\pi}{12}t-0.5\pi)$ 变化, 单位 $10^4\text{m}^3/\text{h}$, 当管长分别为

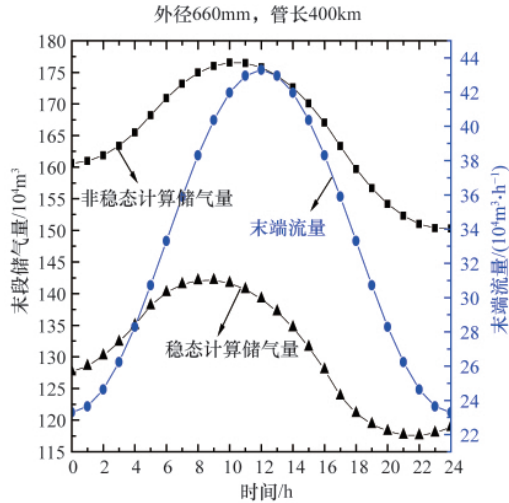


图 7 末段储气量和末端流量随时间的变化

Fig. 7 Inventory and flow rate of end section changing with the time

200km 和 400km 时,利用 SPS 软件对其 24h 运行规律进行动态仿真,仿真结果如图 8 至图 11 所示。

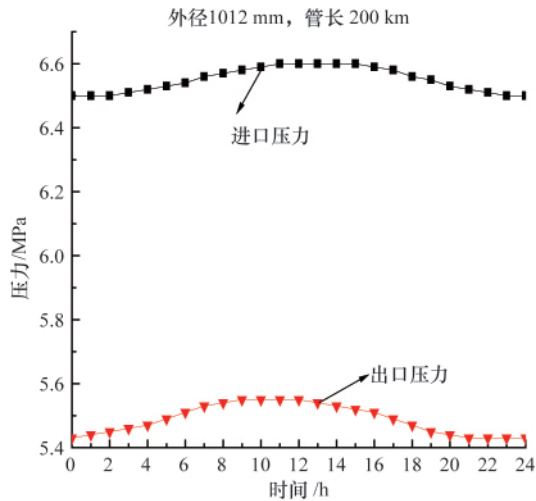


图 8 末段进出口压力随时间的变化

Fig. 8 Inlet and outlet pressures of end section changing with the time

当末段管道外径为 1012mm,管长为 200km 和 400km 时,由图 8、图 10 可知,当末端用气流量发生变化时,末段进口压力变化较出口压力变化具有滞后性,管长 400km 的滞后性比管长 200km 更明显,并且相同管长下管径 1012mm 的滞后性比管径 660mm 更显著;由图 9、图 11 可知,在各个时刻非稳态计算储气量比稳态计算储气量大,二者的偏差范围是 16%—22%,并且管道末段最大储气量出现的时间与末端最大流量出现的时间相近。

当末段管道外径为 1219mm,管道末端的用气流量随 $Q=208.3+50\sin(\frac{\pi}{12}t-0.5\pi)$ 变化,单位 $10^4\text{m}^3/\text{h}$,管长分别为 200km 和 400km 时,利用 SPS 软件对其 24h 的运行规律进行

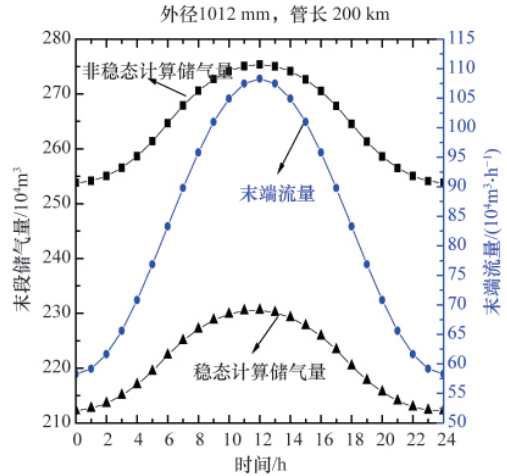


图 9 末段储气量和末端流量随时间的变化

Fig. 9 Inventory and flow rate of end section changing with the time

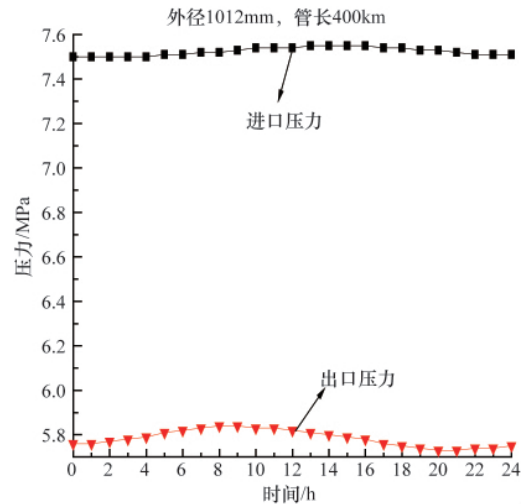


图 10 末段进出口压力随时间的变化

Fig. 10 Inlet and outlet pressures of end section changing with the time

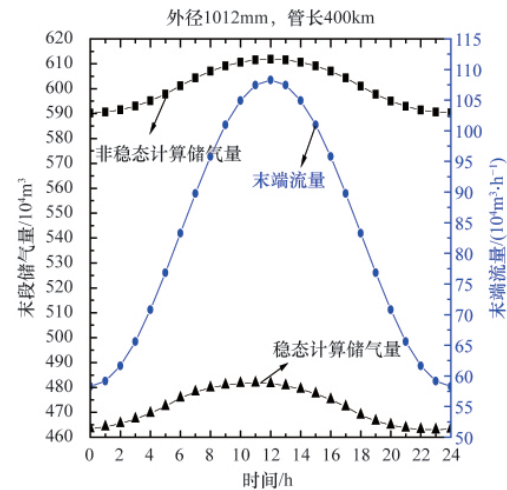


图 11 末段储气量和末端流量随时间的变化

Fig. 11 Inventory and flow rate of end section changing with the time

动态仿真, 仿真结果如图 12 至图 15 所示。

当末端管道外径为 1219mm, 管长分别为 200km 和 400km 时, 由图 12、图 14 可知, 当末端用气流量发生变化时, 末段进口压力变化较出口压力变化具有滞后性, 管长 400km 的滞后性比管长 200km 更明显, 且相同管长下管径 1219mm 的滞后性比管径 1012mm 和 660mm 更显著; 由图 13、图 15 可知, 在各个时刻非稳态计算储气量比稳态计算储气量大, 二者的偏差范围是 14%—19%, 并且管道末段最大储气量出现的时间与末端最大流量出现的时间相近。

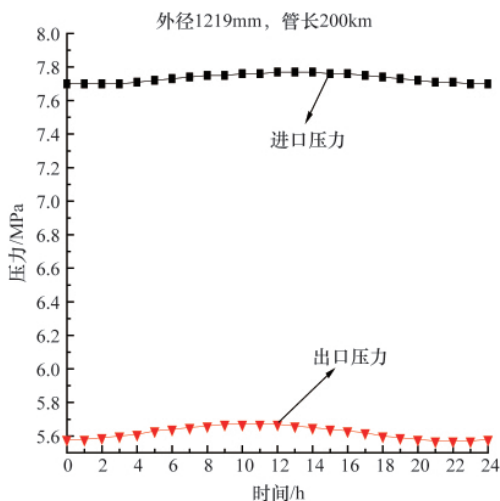


图 12 末段进出口压力随时间的变化
Fig. 12 Inlet and outlet pressures of end section changing with the time

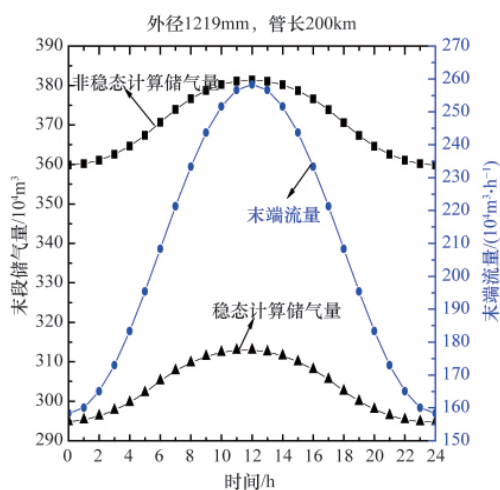


图 13 末段储气量和末端流量随时间的变化
Fig. 13 Inventory and flow rate of end section changing with the time

3 结论

根据上述一系列工况的仿真结果, 可以得出输气管道末段在储气过程中的一系列特点和规律。

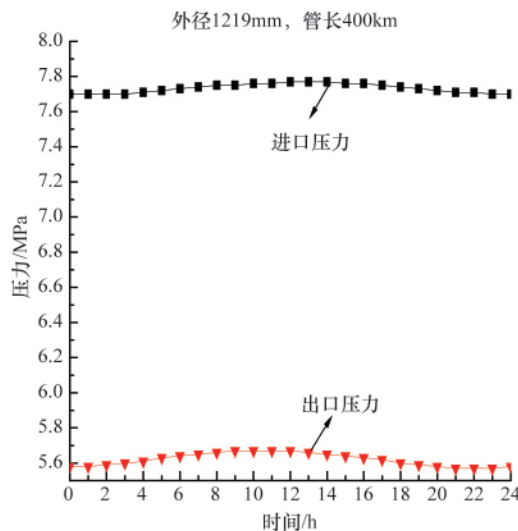


图 14 末段进出口压力随时间的变化
Fig. 14 Inlet and outlet pressures of end section changing with the time

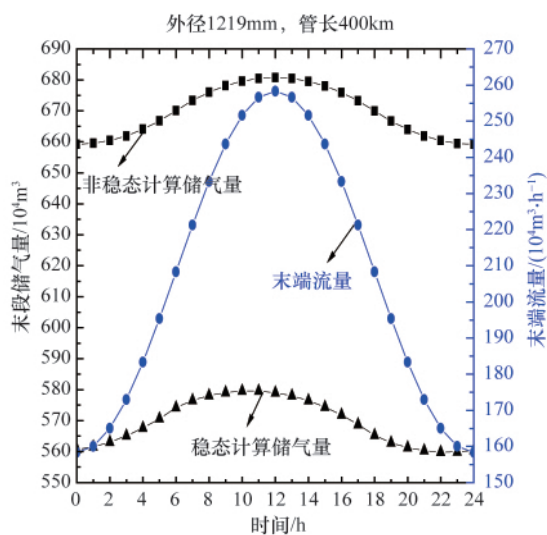


图 15 末段储气量和末端流量随时间的变化
Fig. 15 Inventory and flow rate of end section changing with the time

(1) 在末段储气过程中, 按稳态方法计算的储气量比非稳态计算储气量小, 偏差范围约为 14%—25%。因此当用气高峰来临时, 如果按稳态方法计算的末段储气量能够满足调峰需求, 那么末段的实际储气量是可以保障调峰安全的。

(2) 输气管道末段储气量的变化受末端用气负荷变化规律的影响, 仿真结果表明在不同工况下末段最大储气量出现的时间比末端最大用气负荷出现的时间提前或时间相近。

(3) 当输气管道末端用气负荷发生变化时, 管道末段起点压力变化较终点压力变化具有滞后性, 管段越长、管径越大, 滞后越明显。

末段储气是一种重要的输气管道调峰方式, 对于输气管

道末段储气规律的研究能有效地提高管道末段的调峰效率,保障调峰安全;如果末段储气不能满足调峰需求,就应考虑采取其他的调峰措施,这对在生产中供气系统的设计、规划及运行管理具有一定的实际指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 苗承武, 陈祖泽. 强化天然气管道输送工艺 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
Miao Chengwu, Chen Zuze. Strengthening of natural gas pipeline transportation technics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [2] 隋元春, 薛世达. 沿途有分输的长输燃气管道不稳定计算 [J]. 煤气与热力, 1988, 8(4): 25-27.
Sui Yuanchun, Xue Shida. *Gas & Heat*, 1988, 8(4): 25-27.
- [3] 周游, 田贯三, 刘燕. 长输管道末段储气的解析法模拟[J]. 煤气与热力, 2004, 24(7): 359-364.
Zhou You, Tian Guansan, Liu Yan. *Gas & Heat*, 2004, 24(7): 359-364.
- [4] 唐建峰, 段常贵, 吕文哲, 等. 输气管道静态模拟及管道末段储气量计算[J]. 油气储运, 2001, 20(9): 20-24.
Tang Jianfeng, Duan Changgui, Lu Wenzhe, et al. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2001, 20(9): 20-24.
- [5] 李猷嘉. 长输管道末段储气的计算与分析 [J]. 煤气与热力, 2002, 22(1): 8-11.
Li Youjia. *Gas & Heat*, 2002, 22(1): 8-11.
- [6] 段常贵, 杨立民, 严铭卿, 等. 燃气长输管线分析与末段储气计算[J]. 煤气与热力, 1997, 17(3): 16-20.
Duan Changgui, Yang Limin, Yan Mingqing, et al. *Gas & Heat*, 1997, 17(3): 16-20.
- [7] 郑清高, 廖勇. 输气管末段长度和管径的计算 [J]. 西南石油学院学报, 1992, 14(1): 55-61.
Zheng Qinggao, Liao Yong. *Journal of Southwestern Petroleum Institute*, 1992, 14(1): 55-61.
- [8] 高丽艳, 潘振, 李清斌, 等. 输气管道干线末段储气调峰研究 [J]. 油气储运, 2008, 27(7): 27-30.
Shang Liyan, Pan Zhen, Li Qingbin, et al. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2008, 27(7): 27-30.
- [9] 苏欣, 章磊, 刘佳, 等. SPS 与 TGNET 在天然气管网仿真中应用与认识[J]. 天然气与石油, 2009, 27(1): 1-3.
Su Xin, Zhang Lei, Liu Jia, et al. *Natural Gas and Oil*, 2009, 27(1): 1-3.
- [10] 郭雁冰, 岳志波. 利用 SPS 软件分析城市高压燃气管网工况[J]. 油气储运, 2010, 29(10): 788-790.
Guo Yanbing, Yue Zhibo. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2010, 29(10): 788-790.
- [11] 姚玉萍, 沈晓燕, 熊小琴, 等. 利用 SPS 仿真模拟软件优化风城特稠油输送工艺[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(3): 330-332.
Yao Yuping, Shen Xiaoyan, Xiong Xiaoqin, et al. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(3): 330-332.
- [12] 李玉星, 姚光镇. 输气管道设计与管理[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2009.
Li Yuxing, Yao Guangzhen. Design and management of gas pipeline[M]. Beijing: China University of Petroleum Press, 2009.

(责任编辑 岳臣)

·学术动态·



“2012 年中国电机工程学会 电力系统专委会学术年会”征稿

中国电机工程学会电力系统专业委员会决定于 2012 年 10 月举行 2012 年学术年会, 会议将邀请国内各行业的知名院士、专家、教授就广泛关注的热点问题做主旨发言, 并就大家广泛关注的热点学术问题进行交流讨论。

征稿范围: (1) 人型交直流输电系统规划; (2) 特高压交直流输电关键技术; (3) 人电网仿真计算分析技术; (4) 输电系统电力电子技术; (5) 电力系统安全稳定控制及保护技术; (6) 智能电网技术; (7) 新能源接入系统技术; (8) 人电网的运行及管理技术等。

论文截稿日期: 2012 年 7 月 30 日。

联系电话: 010-82813113-106。

通信地址: 北京市海淀区清河小营东路 15 号中国电力科学研究院系统所, 100192。

电子信箱: wanglm@epri.sgcc.com.cn。

会议网站: <http://www.csee.org.cn/tplt002.aspx?PageId=690C53E7-F7B9-481A-B771-B26578A08DB4&ArticleId=31d901c0-74f0-48c3-93bc-eb52fb7dfc7d>。