

输气管道末段储气规律仿真模拟

房心怡 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 调峰是大多数天然气供气系统不可避免的问题。末段储气是输气管道短期调峰的重要手段。在实际运行过程中, 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。通过对管道末段储气进行动态仿真, 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。

关键词: SPS 仿真; 输气管道; 调峰; 末段储气; 管道运行

1 调峰概述

调峰是大多数天然气供气系统不可避免的问题。在一段时间内, 一个供气系统的气源供气量与用户需求量可能是总量平衡的, 但在各个时刻往往供需不平衡。这种不平衡主要是因为气源供气的相对稳定性和用户用气量的不均匀性所造成的。

管道调峰主要分为供气 and 用气调峰两个方面。供气方调峰的措施主要有: 调整气源产量、调整干线输气管道的运行方案、输气管道末段储气、地下储气库储气、调峰型 LNG 等。用气调峰主要措施有: 适当选择大型工业气源作为调峰用户、要求居民燃气用户配置备用加热装置。

末段储气是输气管道短期调峰的重要手段。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。末段的两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。

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。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。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。

2 末段储气稳态计算与非稳态计算

末段储气稳态计算法:

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, 末段管道储气能力计算公式如下:

$$V_s = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{(P_{mmax} - P_{mmin})}{P_0} \quad (1)$$

$$P_{2max} = \sqrt{P_{1max}^2 - KL_z q_v^2} \quad (2)$$

$$P_{1min} = \sqrt{P_{2min}^2 + KL_z q_v^2} \quad (3)$$

$$K = \frac{\lambda Z \Delta T}{c^2 d^5} \quad (4)$$

$$P_{mmax} = \frac{2}{3} \left(P_{1max} + \frac{P_{2max}^2}{P_{1max} + P_{2max}} \right) \quad (5)$$

$$P_{mmin} = \frac{2}{3} \left(P_{1min} + \frac{P_{2min}^2}{P_{1min} + P_{2min}} \right) \quad (6)$$

式中:

V_s - 末段储气能力, m^3 ;

d - 末段管线管径, m ;

P_{mmax} - 末段储气结束时平均压力, Pa ;

P_{mmin} - 末段储气开始时平均压力, Pa ;

P_0 - 标准状态下压力, $101325Pa$;

T_0 - 标准状态下温度, $293.15K$;

T - 末段储气时平均温度, K ;

Z - 末段储气压缩系数;

L_z - 末段管线长度, m ;

q_v - 输气流量, m^3/s ;

P_{1max} - 末段储气终了时的起点压力, Pa ;

P_{1min} - 末段储气开始时的起点压力, Pa ;

P_{2max} - 末段储气终了时的终点压力, Pa ;

P_{2min} - 末段储气开始时的终点压力, Pa ;

λ - 摩阻系数;

Δ - 天然气相对密度;

$C=0.03848$ 。

输气管道非稳态计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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \frac{ds}{dx} + \frac{\lambda |v|}{d} \rho = 0 \quad (8)$$

能量方程:

$$-\frac{\partial Q}{\partial x}(\rho v) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(u + \frac{v^2}{2} + gs \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\rho v) \left(h + \frac{v^2}{2} + gs \right) \right] \quad (9)$$

式中:

ρ - 气体密度, kg/m^3 ;

v - 气体流速, m^3/s ;

λ - 水力摩阻系数;

d - 管道的内径, m ;

p - 气体压力, Pa ;

s - 管道沿线高程, m ;

u - 气体比内能, J/kg ;

h - 气体比焓, J/kg ;

$\frac{\partial Q}{\partial x}$ - 单位质量流量气体在单位管长上的热交换率;

g - 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。

3 计算实例

3.1 储气能力计算

某长距离输气管道末段管长 485km, 管径 DN1200, 最末一个压气站出站压力 9.5MPa, 末站最低压力为 5.5MPa。

用稳态计算法, 算得管道的末段储气能力为 $2113.5 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

利用 SPS 动态计算得管道的末段储气能力为 $2418.2 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

根据文献数据, 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%, 该计算结果符合文献数据。

3.2 非稳态模拟规律

输气管道末段的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。因此

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。

假设管道末端城市一天的小时用气负荷按周期变化, 末段管道进口流量保持 $714 \times 10^3 \text{m}^3/\text{h}$ 不变。用气负荷如表 1 和图 1 所示:

表 1 城市小时用气流量变化规律

时间	h	0	1	2	3	4	5	6	7	8
流量	$10^3 \text{m}^3/\text{h}$	654	664	674	684	694	704	714	724	734
时间	h	9	10	11	12	13	14	15	16	17
流量	$10^3 \text{m}^3/\text{h}$	744	754	764	774	764	754	744	734	724
时间	h	18	19	20	21	22	23	24		
流量	$10^3 \text{m}^3/\text{h}$	714	704	694	684	674	664	654		

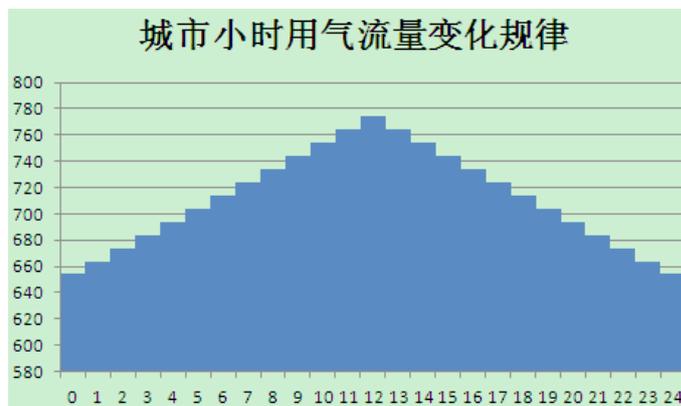


图 1 城市小时用气流量变化规律

在 SPS 软件设置中, 气体状态方程采用 BWRS 方程, 界面如下图 2 所示。

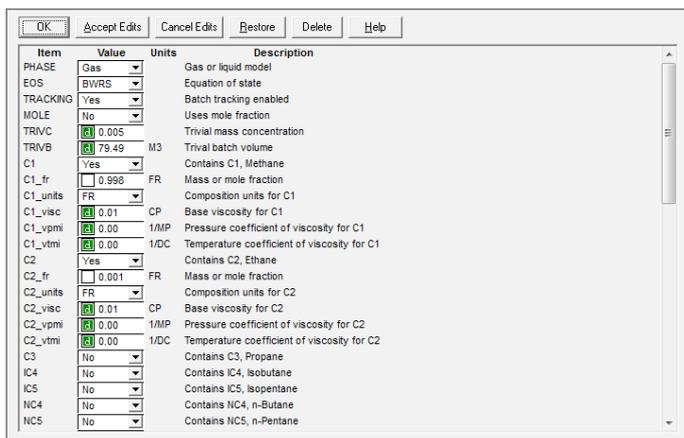
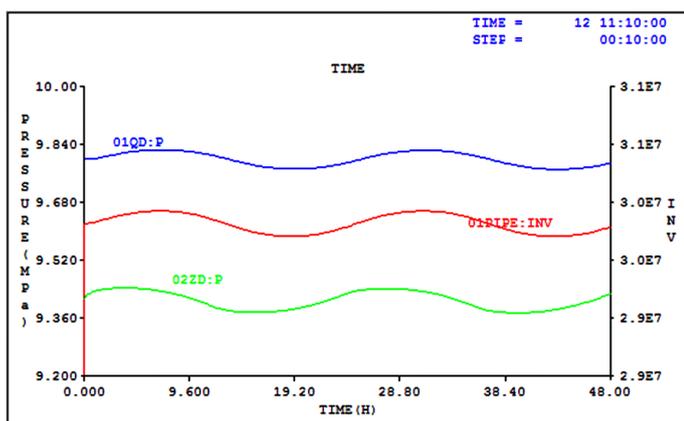


图 2 SPS 软件参数设置界面

仿真结果如图 3 所示:

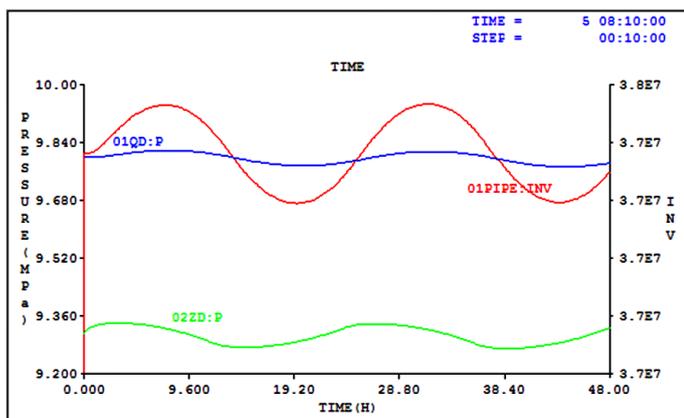


01QD: P 起点压力波动曲线;

02ZD: P 终点压力波动曲线; 01PIPE: INV 管存量波动曲线

图 3 $\Phi 1219\text{mm}/485\text{km}$ 管道末端参数随时间变化规律

由上图 3 可以看出, 当末端用气量发生变化时, 末端进口压力的变化较出口压力的变化具有滞后性。



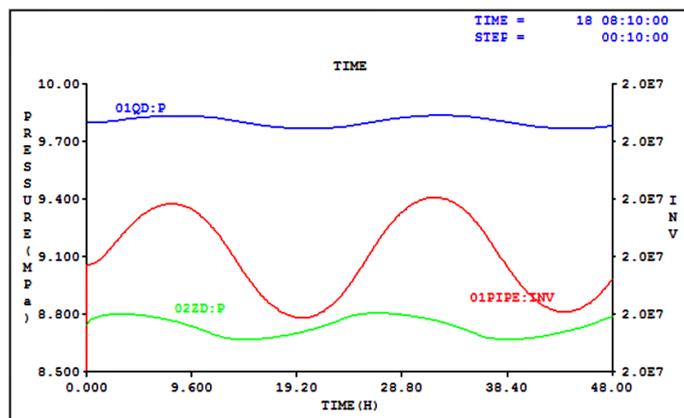
01QD: P 起点压力波动曲线;

02ZD: P 终点压力波动曲线; 01PIPE: INV 管存量波动曲线

图 4 $\Phi 1219\text{mm}/600\text{km}$ 管道末端参数随时间变化规律

将管道长度改为 600km, 稳态模拟结果如图 4 所示。可以看出: 在其他条件相同的情况下, 管长 600km 的滞后性比管长 485km 更为明显。

维持管道长度 485km 不变, 管径改为 $\Phi 1016\text{mm}$, 稳态模拟结果如图 5 所示。可以看出: 在其他条件不变的情况下, 管径 $\Phi 1219\text{mm}$ 的管道滞后性比管径 1016mm 的管道更为明显。并且, 管道的管存量的变化趋势与管道起点的压力变化趋势相近。



01QD: P 起点压力波动曲线;

02ZD: P 终点压力波动曲线; 01PIPE: INV 管存量波动曲线

图 5 $\Phi 1016\text{mm}/485\text{km}$ 管道末端参数随时间变化规律

4 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。

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用户最大用气负荷出现的时间提前或时间相近;

③当输气管道末端用户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。