

仿真技术研究及其在气田管网改造中的应用^{*}

刘恩斌 彭善碧 李长俊 杨毅

(西南石油学院)

刘恩斌等.仿真技术研究及其在气田管网改造中的应用.天然气工业,2005;25(1):135~137

摘 要 天然气管道系统在运行过程中,由于供气量和用气量的变化、阀门的开关、压缩机的启停等,往往会使管网系统处于不稳定的运行状态,加上目前管网运行中存在着区域供用气不平衡、管网服役时间长、运行环境恶劣、管线破漏频繁、事故隐患严重等问题。因此对管道系统进行动态分析是很有必要的。文章通过建立管道数学微分模型以及管网中非管元件数学微分模型,并用隐式差分法将偏微分模型转换为有限的差分方程,然后用牛顿迭代法求解有限差分方程组,最后通过自制软件对某气田管网进行了仿真。仿真结果表明:各管道中的压力没有超过管道允许压力,管网内压降较小。因此,可以适当增加输气量;而部分管段流量很小,利用率很低,则需要调整输气方案。仿真结果与实际情况对比表明,该方法具有仿真精度高、求解速度快的优点。

主题词 气田 管网 改造 仿真 技术 管道 压力 输送能力

一、复杂管网数学模型

天然气复杂管网系统由管道、节点以及站、场(厂)(集气站、配气站、增压站、气体处理厂)等基本单元组成。当天然气流经这些元件时,应该满足质量守恒、能量守恒、动量守恒以及热力学方面的有关基本方程。

1. 管道单元数学模型

天然气在管道中流动,其质量守恒方程、动量守恒方程可由式(1)、(2)来描述^[1,2]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{a^2}{A} \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A p + \frac{A^2 M^2}{A p} \right) + \frac{A p g \sin \theta}{a^2} + \frac{\lambda}{2} \frac{a^2 M^2}{D A p} = 0 \quad (2)$$

式中: ρ 表示气体密度, kg/m^3 ; p 表示气体压力, Pa ; θ 表示管道与水平面间的倾角, rad ; t 表示时间变量, s ; M 表示气体的质量流量, kg/s ; D 表示管道内径, m ; g 表示重力加速度, m/s^2 ; x 表示管道位置变量, m ; λ 表示管道水力摩擦系数。

2. 气体在非管道单元中流动的数学描述

非管道单元包括压缩机、阀门以及一些局部阻

力装置,其流动模型可由元件入口压力 p_{in} 、出口压力 p_{out} 以及所经过的流量 M 来描述,其一般形式为:

$$f_3(p_{\text{in}}, p_{\text{out}}, M) = 0 \quad (3)$$

3. 节点平衡方程

根据质量守恒定律,在任何时间流进、流出任意节点 n 的流量必须相等,即:

$$f_2 = \sum_{k \in C_n} \alpha_{nk} M_{nk} + L_n = 0 \quad (4)$$

式中: M_{nk} 表示与第 n 节点相连的元件 k 流入(出) n 节点流量的绝对值; L_n 表示 n 节点与外界交换的流量(流入为正,流出为负);

$$\alpha_{nk} = \begin{cases} 1 & \text{当 } k \text{ 元件中流量注入 } n \text{ 节点时} \\ -1 & \text{当 } k \text{ 元件中流量流出 } n \text{ 节点时} \end{cases}$$

此外,每个元件两端在靠近节点处的压力与节点压力相等。

二、模型求解

1. 差分方程

由于天然气具有可压缩的性质,它在管道中的不稳定流动是一种近似于液体的慢瞬变过程^[3]。因此,采用对时步要求不严格的隐式差分法。在仿真

^{*} 本成果属于四川省重点学科建设研究项目(编号:SZD0416)。

作者简介: 刘恩斌,1980年生;西南石油学院油气储运工程专业在读硕士研究生;主要从事油气管道故障诊断技术研究。
地址:(610500)四川省成都市新都区西南石油学院硕士2002级2班。电话:(028)83030544。E-mail:sunriselebpsh@163.com

过程中,由于时步取值可长可短,这就增加了仿真的灵活性,同时也缩短了仿真过程所需的计算时间。

如图1所示,设以步长 Δx 和 Δt 将管道和时间组成的平面网格化后,由隐式差分法可得到每个网格内偏微分方程(5)、(6)的两个差分方程:

这样,就将在 $x-t$ 平面上研究管道内天然气参变量变化问题转变成在有限网格上进行研究。管道偏微分方程也就变成了有限的差分方程。差分方程满足收敛性、相容性和稳定性。

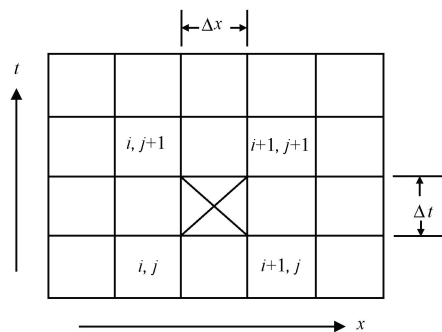


图1 管道差分网格图

$$F_1 = \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{2\Delta t} + \frac{p_{i+1,j+1} - p_{i+1,j}}{2\Delta t} + \frac{a^2}{A} \frac{M_{i+1,j} - M_{i,j}}{2\Delta x} + \frac{M_{i+1,j+1} - M_{i,j+1}}{2\Delta x} = 0 \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{M_{i,j+1} - M_{i,j}}{2\Delta t} + \frac{M_{i+1,j+1} - M_{i+1,j}}{2\Delta t} + \frac{1}{2\Delta x} \left(\frac{a^2}{A} \frac{M_{i+1,j}^2}{p_{i+1,j}} + A p_{i+1,j} - \frac{a^2}{A} \frac{M_{i,j}^2}{p_{i,j}} - A p_{i,j} \right. \\ \left. + \frac{a^2}{A} \frac{M_{i+1,j+1}^2}{p_{i+1,j+1}} + A p_{i+1,j+1} - \frac{a^2}{A} \frac{M_{i,j+1}^2}{p_{i,j+1}} - A p_{i,j+1} \right) \\ + \frac{\lambda a^2}{8DA} \frac{(M_{i,j} + M_{i,j+1} + M_{i+1,j} + M_{i+1,j+1}) (M_{i,j} + M_{i,j+1} + M_{i+1,j} + M_{i+1,j+1})}{p_{i,j} + p_{i,j+1} + p_{i+1,j} + p_{i+1,j+1}} \\ + \frac{A g \Delta h}{4 a^2 l} (p_{i,j} + p_{i,j+1} + p_{i+1,j} + p_{i+1,j+1}) = 0 \quad (6)$$

2. 方程组的求解

为了求解式(3)~(6)所组成的方程组,笔者采用了牛顿迭代法。首先根据初始条件求出第一个时间层上的未知量,然后,以此作为求解第二个时间层上未知量的初始条件。这样依次一层一层的求解直至达到目的。方程(5)、(6)的迭代式为:

$$\sum_i^{i+1} \left(\frac{\partial F_1}{\partial p_{i,j+1}} \right) \Delta p_{i,j+1} + \sum_i^{i+1} \left(\frac{\partial F_1}{\partial M_{i,j+1}} \right) \Delta M_{i,j+1} = F_1 \quad (7)$$

$$\sum_i^{i+1} \left(\frac{\partial F_2}{\partial p_{i,j+1}} \right) \Delta p_{i,j+1} + \sum_i^{i+1} \left(\frac{\partial F_2}{\partial M_{i,j+1}} \right) \Delta M_{i,j+1} = F_2 \quad (8)$$

若考虑整个管道系统,并为变量统一编号后,可以得到类似上述方程组成的方程组,其一般形式为:

$$J(X) \Delta X = F(X) \quad (9)$$

式中: X 表示变量向量; ΔX 表示修正向量; $F(X)$ 表示函数向量。

分析方程组(9)不难发现,雅可比矩阵 $J(X)$ 是非对称、非带状的稀疏矩阵,为了节省求解大型管网问题的计算时间和存储空间,采用了特定的计算技巧^[4,5]。

首先,对式(7)、(8)的管道方程进行如下变换:

$$-\Delta M_{i+1,j+1} + A_1 \Delta M_{i,j+1} + B_1 \Delta p_{i,j+1} = \bar{F}_1 \quad (10)$$

$$-\Delta p_{i+1,j+1} + A_2 \Delta M_{i,j+1} + B_2 \Delta p_{i,j+1} = \bar{F}_2 \quad (11)$$

式中:

$$A_1 = \left(\frac{\partial F_1}{\partial p_{i+1,j+1}} \cdot \frac{\partial F_2}{\partial M_{i,j+1}} - \frac{\partial F_2}{\partial p_{i+1,j+1}} \cdot \frac{\partial F_1}{\partial M_{i,j+1}} \right) / D$$

$$B_i = \left(\frac{\partial F_1}{\partial p_{i+1,j+1}} \cdot \frac{\partial F_2}{\partial p_{i,j+1}} - \frac{\partial F_2}{\partial p_{i+1,j+1}} \cdot \frac{\partial F_1}{\partial p_{i,j+1}} \right) / D$$

$$\bar{F}_1 = \left(F_2 \cdot \frac{\partial F_1}{\partial p_{i+1,j+1}} - F_1 \cdot \frac{\partial F_2}{\partial p_{i+1,j+1}} \right) / D$$

$$A_2 = \left(\frac{\partial F_2}{\partial M_{i+1,j+1}} \cdot \frac{\partial F_1}{\partial M_{i,j+1}} - \frac{\partial F_1}{\partial M_{i+1,j+1}} \cdot \frac{\partial F_2}{\partial M_{i,j+1}} \right) / D$$

$$B_2 = \left(\frac{\partial F_1}{\partial p_{i,j+1}} \cdot \frac{\partial F_2}{\partial M_{i+1,j+1}} - \frac{\partial F_2}{\partial p_{i,j+1}} \cdot \frac{\partial F_1}{\partial M_{i+1,j+1}} \right) / D$$

$$\bar{F}_2 = \left(F_1 \cdot \frac{\partial F_2}{\partial M_{i+1,j+1}} - F_2 \cdot \frac{\partial F_1}{\partial M_{i+1,j+1}} \right) / D$$

$$D = \left(\frac{\partial F_1}{\partial M_{i+1,j+1}} \cdot \frac{\partial F_2}{\partial p_{i+1,j+1}} - \frac{\partial F_2}{\partial M_{i+1,j+1}} \cdot \frac{\partial F_1}{\partial p_{i+1,j+1}} \right)$$

然后,针对具有 m 个剖分管段、 r 个非管单元和 n 个节点的管道系统,将 $2m+r$ 个方程排列在前面,而将 n 个方程排列到后面,则方程(9)可写成:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{H}_2 \\ \mathbf{H}_3 & \mathbf{H}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{F}_1 \\ \bar{F}_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: Δx_1 、 Δx_2 表示增量向量; $\bar{F}_1$ 、 $\bar{F}_2$ 表示由前面确定的函数向量; $\mathbf{H}$ 表示带状矩阵; $\mathbf{H}_2$ 、 $\mathbf{H}_3$ 表示稀疏矩阵; $\mathbf{H}_1$ 表示零矩阵。由方程组(12)得:

$$\mathbf{H} \Delta x_1 + \mathbf{H}_2 \Delta x_2 = \bar{F}_1 \quad (13)$$

$$\mathbf{H}_3 \Delta x_1 + \mathbf{H}_1 \Delta x_2 = \bar{F}_2 \quad (14)$$

由式(13)、(14)可以得到:

$$(\mathbf{H}_3 \cdot \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) \Delta x_2 = \mathbf{H}_3 \cdot \mathbf{H}^{-1} \cdot \bar{F}_1 - \bar{F}_2 \quad (15)$$

由式(15)可见,原方程组具有 $(2m+r+n)$ 个方程,通过变换后就化为只有 n 个方程的方程组了。求解方程组(15)后代入式(13)可得到 Δx_1 的修正向量:

$$\Delta x_1 = \mathbf{H}^{-1} (\bar{F}_1 - \mathbf{H}_2 \Delta x_2) \quad (16)$$

三、应用实例

某气田主要向大化肥厂和当地城镇供气,该片区的管网场站近年来进行了许多改造工作,但由于管网较多、分布面广,仍有不少管线需要改造。

该气田现有管网仿真图如图2所示,该管网系



图 2 某气田现有管网仿真示意图

统共由 28 条管道、39 个节点及 10 个阀门组成。其中管道基础数据如表 1 所示。以 1 节点的压力和其

表 1 现有管网基础数据表

管道 编号	管径 (mm)	管长 (m)	管壁厚 (mm)	粗糙度	摩阻 系数
1	203	4.1	8	0.02	0.02
2	203	3.0	8	0.02	0.02
3	203	3.0	8	0.02	0.02
4	203	3.0	8	0.02	0.15
5	96	3.5	6	0.02	0.01
6	75	2.1	7	0.02	0.01
7	145	13.4	7	0.02	0.15
8	311	0.2	7	0.02	0.02
9	145	13.2	7	0.02	0.02
10	998	0.1	1	0.02	0.02
11	259	1.0	7	0.02	0.02
12	259	1.0	7	0.02	0.02
13	94	0.4	7	0.02	0.02
14	79	2.5	5	0.02	0.02
15	980	1.0	10	0.02	0.02
16	980	1.0	10	0.02	0.02
17	144	10.18	7.5	0.02	0.02
18	147	2.2	6	0.02	0.02
19	147	6.0	6	0.02	0.02
20	147	6.5	6	0.02	0.02
21	102	0.4	6	0.02	0.02
22	111	1.0	8	0.02	0.02
23	259	5.0	7	0.02	0.02
24	259	9.0	7	0.02	0.02
25	259	19	7	0.02	0.02
26	311	0.2	7	0.02	0.02
27	980	0.1	10	0.02	0.02
28	203	3.0	8	0.02	0.02

表 2 现有管网仿真结果表

管道	上端 压力	下端 压力	流量	上端 温度	下端 温度	储气量
1	0.99	1.05	-18.5	-2.57	-2.25	0.15
2	1.17	1.14	18.50	-1.61	-1.82	0.12
3	1.20	1.17	14.65	-1.49	-1.61	0.13
4	1.24	1.20	7.50	-1.59	-1.82	0.13
5	1.20	1.33	-7.15	-1.15	-0.47	0.04
6	1.33	1.42	-4.35	-0.47	0.00	0.01
7	1.56	1.24	4.27	0.00	-1.59	0.34
8	0.99	0.99	18.5	-2.57	-2.57	0.02
9	0.99	0.99	0.00	0.00	0.00	0.23
10	0.99	0.99	-0.00	-0.07	-0.07	0.08
11	0.99	0.99	-1.16	-0.07	-0.07	0.06
12	0.99	0.99	-0.5	-0.15	-0.15	0.06
13	0.99	1.02	-5.86	-0.15	-0.00	0.00
14	1.02	1.02	0.00	0.00	0.00	0.01
15	0.99	0.99	0.00	0.00	0.00	0.81
16	0.99	0.99	0.00	0.00	0.00	0.81
17	0.99	0.99	0.00	0.00	0.00	0.18
18	0.99	0.99	0.00	0.00	0.00	0.04
19	0.99	0.99	0.00	0.00	0.00	0.11
20	0.99	0.99	-0.00	-0.00	0.00	0.12
21	0.99	0.99	-1.16	-0.08	-0.07	0.00
22	0.99	0.99	0.66	0.00	-0.00	0.01
23	0.99	0.99	5.36	-0.15	-0.16	0.28
24	0.99	0.99	5.36	-0.16	-0.18	0.51
25	0.99	0.99	6.10	-0.18	-0.22	1.07
26	0.99	0.99	19.5	-1.29	-1.29	0.02
27	0.99	0.99	19.5	-1.29	-1.29	0.08
28	0.99	0.99	-0.00	0.00	0.00	0.10

注:压力单位为 MPa;温度单位为 ℃;流量和储气量单位为 10⁴ m³/d。

余节点流量为控制边界条件进行仿真,得到各管道中的流量和两端压力如表 2 所示。从仿真结果可以得出如下结论。

- (1)各管道中的压力没有超过管道允许压力。
- (2)管网内压降较小,矿可适当增加输气量。
- (3)管道 1、2、3、8、26、27 所输送的气量最大,但由于管段较短,压降也较小。
- (4)管道 9、10、14、15、16、17、18、19、20 内所输流量很小,利用率低。

参 考 文 献

1 李长俊.天然气管道输送.北京:石油工业出版社,2000

2 李长俊,曾自强.气体管网系统的仿真.油气储运,1997;(2)

3 江茂泽,徐羽镗,王寿喜.输配气管网的模拟与分析.北京:石油工业出版社,1995

4 李长俊.天然气在管道系统中不稳定流动的分析.天然气工业,1994;(6):54~59

5 李长俊,江茂泽.输气管道中的不稳定流动分析.石油学报,1998;19(4)

(修改回稿日期 2004-11-09 编辑 居维清)