

基于黑箱方法的压气站运行优化模型研究 ——管段约束处理方法研究

王希勇, 贺 三, 袁宗明

(西南石油学院石油工程学院, 四川 成都 610500)

摘 要: 针对枝状长输天然气管道运行状况, 首次提出采用将整个长输管道系统分为压气站系统和管道系统两大类, 然后对两大系统分别进行单独的处理。基于黑箱方法的复杂枝状管网系统压气站运行优化模型, 主要包括目标函数和约束条件。在约束条件中, 最难以处理的问题之一就是管段的约束, 针对复杂枝状输气管网的管段约束条件提出了一种新的处理方法。研究证明: 该处理方法易于进行计算机编程实现, 体现了结构化的算法思想。

关键词: 运行优化; 枝状管网; 黑箱; 数学模型; 压气站

文章编号: 1006-5539(2006)01-0020-04

文献标识码: A

0 前言

在文献^[1]中建立的基于黑箱方法的压气站运行优化模型如下:

目标函数

$$F(w, p) = \sum_{k=1}^m g_k(v_k, p_{ks}, p_{kd}) \quad (1)$$

约束条件

$$\begin{cases} A_w = s \\ A_l^T p^2 = \phi(u) \\ p^L \leq p \leq p^U \end{cases}$$

$$(v_k, p_{ks}, p_{kd}) \in D_k \subset R^3, k = 1, 2, \dots, m$$

其中: $A = A_l + A_m$, A_l 为节点—管段关联矩阵, A_m 为节点—压气站关联矩阵。其它参数详细说明可以参见文献 1。

在压气站运行优化模型的求解中, 约束条件的处理一直都是比较困难的问题, 尤其是管段约束方程, 而对于沿线有若干进分气点、首末具有明显的高程差、管路沿线地形起伏较大、两压气站之间管段可能采用非等径管串联等这样的复杂枝状管网, 更不能采用常见的统一的管段流动方程进行求解。在本文中提出了一种处理复杂枝状管网管段约束方程的新方法。

其基本思路见图 1。

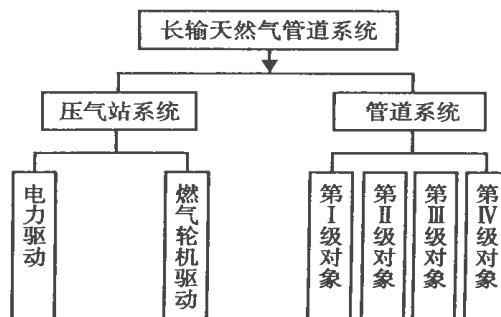


图 1 长输天然气管道优化运行模型求解基本思路

由图 1 可知, 处理方法: 将整个长输天然气管道系统分为压气站系统和管道系统两大类, 然后对两大系统分别进行次类别的分类, 并对压气站和管道系统进行单独的处理。管道系统作为压气站运行优化模型的约束条件而出现, 对于管道系统的各个次类别, 即各级对象之间通过节点的压力、输量平衡关系式联系起来。

1 基本定义和一些约定

为了对管段约束进行处理, 将管道系统这个类别分为含四个对象级别的次类别:

收稿日期: 2004-11-25

作者简介: 王希勇(1974), 男, 1998 年毕业于西南石油学院石油工程专业, 2001 年油气井工程专业硕士毕业, 现在本院攻读油气储运专业博士学位, 从事油气管道运行优化和泄漏机理研究。电话: (028) 83030431。

第Ⅰ级对象:将两相邻压气站之间的管段作为该级对象,该级对象可能含有进分气点(节点),可能有管径变化,也可能有地形起伏段;

第Ⅱ级对象:将第Ⅰ级对象中相邻两节点(包含进气节点—进气节点、进气节点—分气节点、分气节点—进气节点和分气节点—分气节点四种可能形式)之间的管段作为该级对象,该级对象中可能有管径变化,同时还可能有地形起伏段;

第Ⅲ级对象:将第Ⅱ级对象中含管径发生变化的相邻两节点之间的管段作为该级对象,该级对象中管径一致,仅可能包含有地形起伏的情形;

第Ⅳ级对象:对第Ⅲ级对象管段按地形起伏段的情形考虑分析其压力输量的变化。

采用逐级嵌套,逐级细化,然后第Ⅳ级对象可以逐级反推到第Ⅰ级,各级对象之间通过节点的压力输量平衡关系式联系起来。

对于进分气点,我们都将其统一为节点,所不同的仅是节点输量的正负差异而已。对于首站前面的管段和末站之后的管段将分别单独考虑,不纳入下面的分析之中。

2 管道约束处理方法的基本过程

2.1 第Ⅰ级对象

在第Ⅰ级对象中第*i*个管段的两节点参数主要和相邻的两压气站有关参数相关联。示意图如图2。

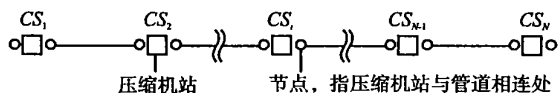


图2 第Ⅰ级对象(两相邻压气站之间的管段)示意图

基本关系式如下:

不考虑天然气经过压气站后的冷却所产生的压力损失,则第*L_i*个管段的起点压力等于相连接的压气站的出口压力:

$$P_{L,i}^p = P_i^d \quad (2)$$

第*L_i*个管段的终点压力与下游相连接的压气站的入口压力相等:

$$P_{L,i}^z = P_{i+1}^s \quad (3)$$

考虑到燃气轮机驱动压气机时需要消耗一部分天然气,而这部分天然气通常直接取自于管输天然气^[2],故假设这部分自耗气为 Q_i^h ,当采用电动机驱

动时, $Q_i^h=0$,且

$$Q_{L,i}^z = Q_{i+1} + Q_{i+1}^h \quad (4)$$

式(4)表示当管输天然气输送到压气站时,一部分将用于燃气轮机的消耗,余下的经压气站增压后继续输送。

则第*i*个管段的起点流量:

$$Q_{L,i}^p = Q_i - Q_i^h \quad (5)$$

$$Q_{L,i}^p = Q_i \quad (6)$$

考虑第*i*个管段沿线可能有进分气点,因此管段沿线流量发生变化,管段终点流量可能不再和起点流量相等。

$$Q_{L,i}^z = Q_{i+1} \quad (7)$$

有关参数说明如下:

N——枝状管网系统的压气站总数;

P_i^s, P_i^d ——第*i*个压气站的入口、出口压力,

$i=1, 2, \dots, N$;

M_i, Q_i ——第*i*个压气站的质量流量、体积流量, $i=1, 2, \dots, N$;

L_i ——第*i*个管段的长度,即相邻两个压气站之间的管段,也即第*i*个压气站和*i+1*个压气站之间的管段长度, $i=1, 2, \dots, N-1$;

$P_{L,i}^p$ ——第Ⅰ级对象中第*i*个管段的起点压力, $i=1, 2, \dots, N-1$;

$P_{L,i}^z$ ——第Ⅰ级对象中第*i*个管段的终点压力, $i=1, 2, \dots, N-1$;

$Q_{L,i}^p$ ——第Ⅰ级对象中第*i*个管段的起点流量, $i=1, 2, \dots, N-1$;

$Q_{L,i}^z$ ——第Ⅰ级对象中第*i*个管段的终点流量, $i=1, 2, \dots, N-1$;

Q_i^h ——第*i*个压气站由于燃气驱动产生的自耗气量,若为电动机驱动,则 $Q_i^h=0$ 。

2.2 第Ⅱ级对象

由于在相邻两个压气站之间的管段可能含有若干进气点或若干分气点,无论是进气还是分气点,我们都统一为节点,所不同的是节点流量的正负而已。因此在这一级对象中处理的就是两相邻节点之间的管段。第Ⅰ级管段起始节点与进(分)气节点之间,和进(分)气节点之间与第Ⅰ级管段终止节点之间的管段将单独处理。而且我们总是把进分气流量纳入到其相邻的下游管段中进行处理的。

我们将任意两相邻压气站之间的管段划分成具

有若干进(分)气点的管段, 示意图如图 3。

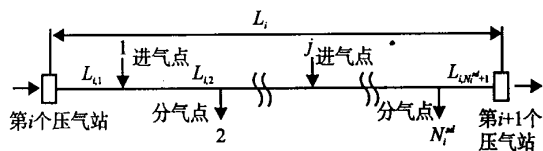


图3 第Ⅱ级对象(任意一个Ⅰ级对象含有若干进分气点)的示意图

在 $j=1$ 的管段中(即任意第Ⅰ级对象中第1个Ⅱ级对象), 起始节点为第 i 管段的起点, 因此我们将其单独处理:

管段起点压力:

$$P_{i,1}^Q = P_{i,1}^Q = P_i^d \quad (8)$$

管段终点压力:

$$P_{i,1}^Z = P_{i,2}^Q \quad (9)$$

管段起点流量:

$$Q_{i,1}^Q = Q_{i,1}^Q = Q_i - Q_i^{sh} \quad (10)$$

管段起点流量:

$$Q_{i,1}^Q = Q_{i,1}^Q = Q_i \quad (11)$$

管段终点流量:

$$Q_{i,1}^Z = Q_{i,1}^Q \quad (12)$$

在第 j 管段($j=2, 3, \dots, N_i^{sd}$)中(第Ⅱ级对象), 所有的节点仅包含进(分)气节点, 因此可以一并处理:

管段起点压力:

$$P_{i,j}^Q = P_{i,j-1}^Z \quad (13)$$

管段终点压力:

$$P_{i,j}^Z = P_{i,j+1}^Q \quad (14)$$

管段起点流量:

$$Q_{i,j}^Q = Q_{i,j-1}^Z + \text{sgn}(Q_{i,j}^s) \quad (15)$$

管段终点流量:

$$Q_{i,j}^Z = Q_{i,j}^Q \quad (16)$$

在第 $j = N_i^{sd} + 1$ 管段(即第 $N_i^{sd} + 1$ 个Ⅱ级对象)中, 终止节点为 i 管段的终点, 因此我们也将它单独处理:

管段起点压力:

$$P_{i,N_i^{sd}+1}^Q = P_{i,N_i^{sd}}^Z \quad (17)$$

管段终点压力:

$$P_{i,N_i^{sd}+1}^Z = P_{i,i}^Z = P_{i+1}^s \quad (18)$$

管段起点流量:

$$Q_{i,N_i^{sd}+1}^Q = Q_{i,N_i^{sd}}^Z + \text{sgn}(Q_{i,N_i^{sd}}^{sd}) \quad (19)$$

管段终点流量:

$$Q_{i,N_i^{sd}+1}^Z = Q_{i,1}^Z = Q_{i+1} \quad (20)$$

管段终点流量:

$$Q_{i,N_i^{sd}+1}^Z = Q_{i,1}^Z = Q_{i+1} + Q_{i+1}^{sh} \quad (21)$$

有关参数说明如下:

N_i^{sd} ——第Ⅰ级对象第 i 个管段中所含的进分气节点数(不包含第 L_i 个管段的起始点和终止点);

$Q_{i,j}^{sd}$ ——第 i 个管段(第Ⅰ级对象)中第 j 个进(分)气点的流量, 进气为正, 分气为负, $i=1, 2, \dots, N-1, j=1, 2, \dots, N_i^{sd}$;

$L_{i,j}$ ——第 i 个管段(第Ⅰ级对象)由于进分气节点所划分的管段中第 j 管段(第Ⅱ级对象)的长度, 且有 $\sum_{j=1}^{N_i^{sd}+1} L_{i,j} = L_i, i=1, 2, \dots, N-1, j=1, 2, \dots, N_i^{sd}+1$;

$P_{i,j}^Q, P_{i,j}^Z$ ——第 j 管段(第Ⅱ级对象)的起点压力和终点压力, $i=1, 2, \dots, N-1, j=1, 2, \dots, N_i^{sd}+1$;

$Q_{i,j}^Q, Q_{i,j}^Z$ ——第 j 管段(第Ⅱ级对象)的起点流量和终点流量, $i=1, 2, \dots, N-1, j=1, 2, \dots, N_i^{sd}+1$ 。

2.3 第Ⅱ级对象

该级对象实际上是针对任意两个进(分)气点之间含有变径管的情形, 其示意图如图 4。

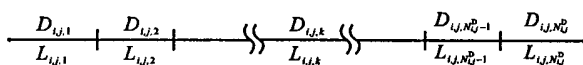


图4 第Ⅲ级对象(任意一个Ⅱ级对象含有若干变径管段)的示意图

变径点又将 $L_{i,j}$ 管段分成若干管段, 第一变径段和最后的变径段都分别与进分气节点相关联, 因此我们也将它们分别处理。

第 j 管段中(第Ⅱ级对象)第 $k=1$ 个变径管段, 即 $L_{i,j,1}$ 管段:

管段起点压力:

$$P_{i,j,1}^Q = P_{i,j}^Q \quad (22)$$

管段终点压力:

$$P_{i,j,1}^Z = P_{i,j,2}^Q \quad (23)$$

管段起点流量:

$$Q_{i,j,1}^Q = Q_{i,j}^Q \quad (24)$$

管段终点流量:

$$Q_{i,j,1}^Z = Q_{i,j,2}^O \quad (25)$$

第 j 管段中(第 II 级对象)第 k 个变径管段($k=2, 3, \dots, N_{i,j}^D-1$), 各节点参数为:

管段起点压力:

$$P_{i,j,k}^O = P_{i,j,k-1}^Z \quad (26)$$

管段终点压力:

$$P_{i,j,k}^Z = P_{i,j,k+1}^O \quad (27)$$

管段起点流量:

$$Q_{i,j,k}^O = Q_{i,j,k}^Z = Q_{i,j,k+1}^O \quad (28)$$

第 j 管段中(第 II 级对象)第 $k=N_{i,j}^D$ 个变径管段其节点参数为:

管段起点压力:

$$P_{i,j,N_{i,j}^D}^O = P_{i,j,N_{i,j}^D-1}^Z \quad (29)$$

管段终点压力:

$$P_{i,j,N_{i,j}^D}^Z = P_{i,j}^Z \quad (30)$$

管段起点流量:

$$Q_{i,j,N_{i,j}^D}^O = Q_{i,j,N_{i,j}^D-1}^Z \quad (31)$$

管段终点流量:

$$Q_{i,j,N_{i,j}^D}^Z = Q_{i,j,N_{i,j}^D}^O = Q_{i,j}^Z \quad (32)$$

有关参数说明如下:

$N_{i,j}^D$ ——第 j 管段中(第 II 级对象)所含不同管径的管段数目;

$L_{i,j,k}, D_{i,j,k}$ ——第 j 管段中(第 II 级对象)第

k 个变径管段的长度和管径, 其中, $\sum_{k=1}^{N_{i,j}^D} L_{i,j,k} = L_{i,j}$, $k=1, 2, \dots, N_{i,j}^D$;

$P_{i,j,k}^O, P_{i,j,k}^Z$ ——第 j 管段中(第 II 级对象)第 k 个变径管段的起点压力和终点压力, $k=1, 2, \dots, N_{i,j}^D$;

$Q_{i,j,k}^O, Q_{i,j,k}^Z$ ——第 j 管段中(第 II 级对象)第 k 个变径管段的起点流量和终点流量, $k=1, 2, \dots, N_{i,j}^D$ 。

2.4 第 IV 级对象

在每一个变径管段中, 按地形起伏变化公式就可以计算管段压力和流量^[3], 这就是本级对象需要解决的问题。这里起伏点数包括始末两点在内。其地形起伏示意图如图 5。

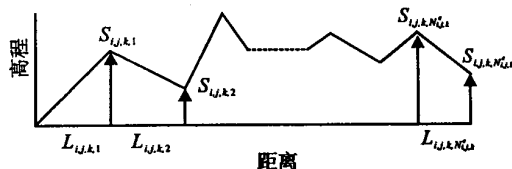


图 5 第 IV 级对象(考虑任意变径管段为地形起伏的情形)的示意图

基本公式:

$$(Q_{i,j,k}^O)^2 = C^2 \frac{[(P_{i,j,k}^O)^2 - (P_{i,j,k}^Z)^2 \cdot (1 + a_{i,j,k} \cdot \Delta S_{i,j,k})] \cdot D_{i,j,k}^5}{\lambda_{i,j,k} Z_{i,j,k} \hat{\rho}_{i,j,k} T_{i,j,k} L_{i,j,k} \left[1 + \frac{a_{i,j,k}}{2L_{i,j,k}} \sum_{m=2}^{N_{i,j}^D} (S_{i,j,k,m} + S_{i,j,k,m-1}) \cdot L_{i,j,k,m-1} \right]} \quad (33)$$

有关参数说明如下:

$N_{i,j,k}^e$ ——第 k 个变径管段($k=1, 2, \dots, N_{i,j}^D$)中(第 II 级对象)地形起伏点数;

$L_{i,j,k,m}$ ——第 k 个变径管段($k=1, 2, \dots, N_{i,j}^D$)中(第 II 级对象)地形起伏段的管段长度, $m=1, 2, \dots, N_{i,j,k}^e-1$;

$S_{i,j,k,m}$ ——第 k 个变径管段($k=1, 2, \dots, N_{i,j}^D$)中(第 II 级对象)各地形起伏点的高程, 起点高程 $S_{i,j,k,1}=0$, $m=1, 2, \dots, N_{i,j,k}^e$;

$\Delta S_{i,j,k}$ ——第 k 个变径管段($k=1, 2, \dots, N_{i,j}^D$) (第 III 级对象)起点和终点之间的高程差, $\Delta S_{i,j,k} = S_{i,j,k,N_{i,j,k}^e} - S_{i,j,k,1}$ 。

3 结束语

本文对复杂枝状天然气管网系统的管段约束处

理方法作了比较详细的介绍。这里的复杂管网是指: 沿线有若干进分气点、首末具有明显的高程差、管路沿线地形起伏较大、两压气站之间的管段可能采用非等径管串联。其基本思路就是: 采用逐级嵌套, 逐级细化, 通过第 IV 级对象计算出该对象级别中接点的压力和输量, 然后逐级反推到第 I 级, 各级对象之间通过两对象级别之间相邻节点的压力、输量平衡关系式联系起来。这样的解决思路有利于实现计算机软件编程, 体现了结构化的程序设计思想。

参考文献:

- [1] 王希勇, 熊继有, 袁宗明. 运用关联矩阵建立压缩机站优化运行模型[J]. 天然气勘探与开发, 2003, 26(4): 52-54.
- [2] 苗承武, 蔡春知, 陈祖泽. 干线输气管道工艺计算方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000. 14-22.
- [3] 博布罗夫斯基. 天然气管路输送[M]. 陈祖泽译. 北京: 石油工业出版社, 1988. 191-199.