

文章编号:1673-5005(2010)01-0125-04

油田注水地面枝状管网水力计算

王旱祥¹, 杨德伟²

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: 利用节点矩阵的方法, 依据流体管路的质量和能量平衡方程式, 建立注水系统地面枝状管网水力计算的数学模型, 并用多元函数泰勒展开对模型进行线性化处理后求解, 最后运用模型进行实例计算。结果表明: 该方法具有计算精度高、速度快, 编机程序简单等特点, 为解决大型枝状管网水力计算问题提供了一种实用可靠的手段, 流量和压力计算值与实际值的平均偏差分别为 4.1% 和 2.4%, 足以满足工程需要。

关键词: 注水; 管网; 节点矩阵; 水力计算

中图分类号: TE 973.94 文献标志码: A

Hydraulic calculation of branch form pipe networks for oilfield above-ground water injection system

WANG Han-xiang¹, YANG De-wei²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: Using the nodal matrix method, a mathematical model was set up according to the quality and energy balance equation for hydraulic calculation of branch form pipe networks for oilfield above-ground water injection system. The mathematical model was solved using function of many variables Taylor expansion formula. The illustration was given. The results show that the method has the advantages of high in computing precision, quick in speed and simple in programming. The method is a reliable way for solving hydraulic calculation of bulk branch form pipe networks. The average deviations of calculation value and real value for flow rate and pressure are 4.1%, 2.4% respectively. The result is satisfied with engineering requirement.

Key words: water injection; pipe networks; nodal matrix; hydraulic calculation

油田注水系统是大型的流体网络结构, 由注水站、配水间、注水井及它们之间起联系作用的管段组成^[1]。把注水站、配水间、注水井都当作管段的端点, 假设注水系统中的地面管网由一系列的基本单元即“管元”组成, 管元之间以节点(管段的端点)相连。建立正确合理的注水管网数学模型是对整个管网参数进行分析的基础, 也是注水系统仿真及优化研究的关键技术之一。由于目前油田注水系统多采用五点法和九点法注水方式, 其注水管网以枝状管网为主, 其水力计算问题大多采用手算和查表推算的办法^[2-3], 不仅工程计算量大, 计算速度缓慢, 而且

也难以满足工程技术发展的需要, 因此建立枝状管网的水力计算模型, 并寻求快速有效的求解方法非常必要。笔者利用节点矩阵方法, 建立注水系统地面枝状管网水力计算的数学模型, 并对模型进行线性化处理后求解。

1 能量方程

1.1 管元的压降方程

图 1 为任一管元, 与此管元相连的节点为 j 与 k , 规定水流由 j 流向 k , 则 $p_j > p_k$ 。

此管元的能量方程为

收稿日期: 2009-03-10

基金项目: 国家重大专项课题(2009ZX059038-004); 中国石油天然气集团公司中青年创新基金项目(2005F70119)

作者简介: 王旱祥(1967-), 男(汉族), 浙江上虞人, 教授, 博士, 主要研究方向为石油钻采设备与工艺技术。

$$H_{jk} = p_j - p_k \quad (1)$$

式中, H_{jk} 为与节点 j, k 相连的管元的总水头损失, m ; p_j, p_k 为节点 j, k 的压力, MPa 。

图1 管元示意图

Fig. 1 Sketch map of pipe element

由于实际流体是有黏性的,所以在流动时要损耗一部分能量,这种能量损失表现为压力损失。管路压力损失可表示^[4]为

$$H = \lambda \frac{v^2}{2gd} l + \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

式中, H 为管路压降, m (水头); d 为管内径, m ; λ 为水力摩阻系数; ζ 为局部阻力系数; g 为重力加速度, m/s^2 ; l 为管路实际长度, m ; v 为液流平均速度, m/s 。

利用 $v = 4Q/(\pi d^2)$, 代入得

$$H = KQ^2 \quad (3)$$

其中

$$K = \frac{8\lambda l}{\pi^2 g d^5} + \frac{8\zeta}{\pi^2 g d^4}$$

式中, Q 为液流在管路中的体积流量, m^3/s ; K 为管道的压降系数。

这样式(1)可变为

$$H_{jk} = p_j - p_k = K_{jk} Q_{jk}^2 \quad (4)$$

式中, K_{jk} 为管元的压降系数; Q_{jk} 为管元的体积流量, m^3/s 。

1.2 枝状管网的压降方程

目前油田五点和九点法注水中,地面采用枝状管网,单一水源,即仅有一个注水站^[5]。现把注水站作为一级节点,配水间作为二级节点,注水井作为三级节点。把注水站与配水间之间的管网称为一级管网,把配水间与注水井之间的管网称为二级管网,如图2所示。

图2 地面注水枝状管网示意图

Fig. 2 Sketch map of branch form pipe networks for above-ground water injection system

1.2.1 一级注水管网

在图2中,节点0为一级节点注水站,节点1,2

为二级节点配水间。由式(4)可得

$$H_{01} = p_0 - p_1 = K_{01} Q_{01}^2,$$

$$H_{02} = p_0 - p_2 = K_{02} Q_{02}^2,$$

可记为

$$\mathbf{H}^I = \mathbf{K}^I \mathbf{Q}^I \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{H}^I = \begin{bmatrix} H_{01} \\ H_{02} \end{bmatrix}, \mathbf{K}^I = \begin{bmatrix} K_{01} & 0 \\ 0 & K_{02} \end{bmatrix}, \mathbf{Q}^I = \begin{bmatrix} Q_{01}^2 \\ Q_{02}^2 \end{bmatrix}.$$

若一级管网中有 n 个二级节点,则

$$\mathbf{H}^I = \begin{bmatrix} H_{01} \\ \vdots \\ H_{0i} \\ \vdots \\ H_{0n} \end{bmatrix}, \mathbf{K}^I = \begin{bmatrix} K_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{0i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{0n} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}^I = [Q_{01}^2 \quad \dots \quad Q_{0i}^2 \quad \dots \quad Q_{0n}^2]^T.$$

1.2.2 二级管网的压降方程

在图2中,与二级节点1相连的二级管网压降方程为

$$H_{11} = p_1 - p_{11} = K_{11} Q_{11}^2,$$

$$H_{12} = p_1 - p_{12} = K_{12} Q_{12}^2.$$

可记为

$$\mathbf{H}_1^II = \mathbf{K}_1^II \mathbf{Q}_1^II \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{K}_1^II = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 \\ 0 & K_{12} \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_1^II = \begin{bmatrix} Q_{11}^2 \\ Q_{12}^2 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_1^II = \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{12} \end{bmatrix}.$$

同理,与二级节点2相连的二级管网压降方程为

$$\mathbf{H}_2^II = \mathbf{K}_2^II \mathbf{Q}_2^II \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{K}_2^II = \begin{bmatrix} K_{21} & 0 \\ 0 & K_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_2^II = \begin{bmatrix} Q_{21}^2 \\ Q_{22}^2 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_2^II = \begin{bmatrix} H_{21} \\ H_{22} \end{bmatrix}.$$

这样图示二级管网的整体压降方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_1^II \\ \mathbf{H}_2^II \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1^II & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_2^II \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^II \\ \mathbf{Q}_2^II \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式(6)还可得,若与二级节点1相连的三级节点有 m_1 个,则有

$$\mathbf{K}_1^II = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{1m_1} \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_1^II = \begin{bmatrix} Q_{11}^2 \\ Q_{12}^2 \\ \vdots \\ Q_{1m_1}^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_1^II = [H_{11} \quad H_{12} \quad \dots \quad H_{1m_1}]^T.$$

依此类推,若与第*i*个二级节点(即第*i*个配水间)相连的三级节点为 m_i (即与配水间相连的注水井个数)时,其压降方程为

$$\mathbf{H}_i^{\prime\prime} = \mathbf{K}_i^{\prime\prime} \mathbf{Q}_i^{\prime\prime}. \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{K}_i^{\prime\prime} = \begin{bmatrix} K_{i1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{i2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{im_i} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_i^{\prime\prime} = \begin{bmatrix} Q_{i1}^2 \\ Q_{i2}^2 \\ \vdots \\ Q_{im_i}^2 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_i^{\prime} = \begin{bmatrix} H_{i1} \\ H_{i2} \\ \vdots \\ H_{im_i} \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, n.$$

整个二级管网中各管段的压降方程可表示为

$$\mathbf{H}^{\prime\prime} = \mathbf{K}^{\prime\prime} \mathbf{Q}^{\prime\prime}, \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{H}^{\prime\prime} = \begin{bmatrix} H_1^{\prime\prime} \\ \vdots \\ H_i^{\prime\prime} \\ \vdots \\ H_n^{\prime\prime} \end{bmatrix}, \mathbf{K}^{\prime\prime} = \begin{bmatrix} K_1^{\prime\prime} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_i^{\prime\prime} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_n^{\prime\prime} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}^{\prime\prime} = [Q_1^{\prime\prime} \ \dots \ Q_i^{\prime\prime} \ \dots \ Q_n^{\prime\prime}]^T.$$

由此可得从注水站到各注水井的管道的压降方程为

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^{\prime} + \mathbf{H}^{\prime\prime}. \quad (11)$$

中间由于一级管网中的第*i*个管段被二级管网中的 m_i 个管段所公用,这样为使式(11)成立,需将 \mathbf{K}^{\prime} 和 \mathbf{Q}^{\prime} 变换成如下形式:

$$\mathbf{K}^{\prime\prime} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1^{\prime} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_i^{\prime} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{K}_n^{\prime} \end{bmatrix}, \mathbf{Q}^{\prime\prime} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^{\prime} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_i^{\prime} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_n^{\prime} \end{bmatrix},$$

其中

$$\mathbf{K}_i^{\prime} = \begin{bmatrix} K_{0i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{0i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{0i} \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_i^{\prime} = \begin{bmatrix} Q_{0i}^2 \\ \vdots \\ Q_{0i}^2 \\ \vdots \\ Q_{0i}^2 \end{bmatrix}.$$

可得

$$\mathbf{H} = \mathbf{K}^{\prime\prime} \mathbf{Q}^{\prime\prime} + \mathbf{K}^{\prime} \mathbf{Q}^{\prime}. \quad (12)$$

其中

$$\mathbf{H} = [p^1 \ \dots \ p^i \ \dots \ p^n]^T,$$

而

$$\mathbf{p}^i = \begin{bmatrix} p_0 - p_{i1} \\ p_0 - p_{i2} \\ \vdots \\ p_0 - p_{im_i} \end{bmatrix}_{m_i \times 1}, i = 1, 2, \dots, n.$$

式中, p_0, p_{im_i} 分别为一级节点压力及与第*i*个配水间相连的第 m_i 口注水井的注入压力,MPa。

式(12)是共有 $\sum_{i=1}^n m_i$ 个压力和流量非线性方程组成的方程组,其中 $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im_i}, i = 1, 2, \dots, n$ 为各三级节点的压力值,即注水井压力值是已知的,这样未知数为一级节点压力 p_0 (即注水站压力)、一级管网内各管段流量和二级管网内各管段流量,共有 $(1 + n + \sum_{i=1}^n m_i)$ 个。若求解上述方程组,还缺 $1 + n$ 个方程,必须通过流体流动的连续方程和辅助方程来解决。

2 连续方程

在二级节点上,流入的流体总量应等于流出的液体总量,这样对第*i*个二级节点就有

$$Q_i = \sum_{j=1}^{m_i} Q_{ij}, i = 1, 2, \dots, n.$$

可写成

$$\mathbf{Q} = \mathbf{A} \bar{\mathbf{Q}}. \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{Q} = [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_n]^T,$$

$$\bar{\mathbf{Q}} = [q_{11} \ \dots \ q_{1m_1} \ \dots \ q_{i1} \ \dots \ q_{im_i} \ \dots \ q_{n1} \ \dots \ q_{nm_n}]_{1 \times Z}^T,$$

$$\mathbf{Z} = \sum_{i=1}^n m_i, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1Z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nZ} \end{bmatrix},$$

式中, \mathbf{Q} 为各二级节点流入的流量矩阵; $\bar{\mathbf{Q}}$ 为各三级节点流入的流量矩阵; \mathbf{A} 为三级节点与二级节点连接矩阵,其元素 a_{ij} 只有当 j 与 i 相连接时为 1,不相连时为 0,这样第*i*行中只有第 $j = \sum_{k=1}^{i-1} m_k + 1$ 列到第 $j = \sum_{k=1}^i m_k$ 列的元素为 1,其余全为 0。

3 辅助方程

管网必定和泵站连接在一起,这样两者才能正常工作,要实现稳定的工作状态,必须满足质量守恒和能量守恒两个条件。

质量守恒就是泵排出的液体应该等于进入管网的液体总量,即有

$$Q_0 = \sum_{i=1}^n Q_i.$$

能量守恒就是泵的扬程就应该等于一级管网中一级节点的压力,即

$$H_B = p_0. \tag{14}$$

对工作的离心泵来说,其扬程和流量应满足特性方程

$$H_B = a + bQ_0 - cQ_0^2. \tag{15}$$

4 方程求解

式(12) ~ (15) 组合是一个方程个数和未知数个数都为 $p = 2 + n + \sum_{i=1}^n m_i$ 的非线性方程组,可记为

$$F(X) = 0, \tag{16}$$

其中

$$F(X) = \begin{bmatrix} f_1(X) \\ f_2(X) \\ \vdots \\ f_p(X) \end{bmatrix}, X = (x_1, x_2, \dots, x_p).$$

设 $F(X)$ 在所讨论区域内关于自变量各分量的二阶偏导数连续,利用多元函数泰勒展开,可得

$$J^k(X - X^k) + F(X^k) = 0.$$

其中

$$J^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x^k)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x^k)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x^k)}{\partial x_p} \\ \frac{\partial f_2(x^k)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x^k)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x^k)}{\partial x_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_p(x^k)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_p(x^k)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_p(x^k)}{\partial x_p} \end{bmatrix}.$$

当 J^k 非奇异时,方程(16) 解存在且唯一,取其解作为 $(k + 1)$ 次近似,则

$$X^{k+1} = X^k - (J^k)^{-1} F(X^k), k = 0, 1, 2, \dots, n.$$

5 计算实例

胜利油田纯梁采油厂梁一注,共有注水站 1 座、配水间 7 个,注水井 15 口。

梁一注管网结构示意图见图 3。表 1 为梁一注注水系统配注参数和计算结果对比。

从表 1 可以看出,流量最大差异出现在 L38-6 注水井,偏差率 11%,流量的平均偏差率为 4.1%;压

力最大偏差为 L23-6 井,偏差率 10%,平均偏差为 2.4%,计算精度能满足工程需要。

图 3 梁一注管网结构示意图

Fig. 3 Structural sketch map of Liangyizhu pipe networks

表 1 梁一注注水系统配注参数和计算结果对比

Table 1 Comparison between injection allocation parameter and calculation result of Liangyizhu water injection system

井号	注水量 $Q/(m^3 \cdot d^{-1})$		压力 p/MPa	
	实际配注值	计算值	实际配注值	计算值
L23-9	100	100	14.2	14.2
L23-21	105	100	14.3	14.5
C56-2	300	300	11.5	11.5
C60	310	300	11.9	11.4
C56-3	230	250	13.2	13.0
L23-26	305	300	8.7	8.5
L23-25	62	60	10.9	10.9
L23-6	150	150	9.7	10.7
C56-34	510	500	10.0	10.0
C56-12	75	80	13.5	13.5
L52	150	150	10.7	10.3
L44-5	405	400	9.3	10.0
L38-6	180	200	9.5	10.0
L23-8	200	200	4.0	4.0
L23-7	205	205	5.2	5.2

6 结束语

根据油田注水系统地面管网的特点,利用节点矩阵的方法,依据流体管路的质量、能量平衡方程式和泵站内的泵辅助特性方程,建立了注水系统地面枝状管网水力计算的数学模型。由于模型为一多变量的非线性方程组,利用多元函数泰勒展开对模型进行线性化处理后求解,具有计算精度高、速度快,编程程序简单等特点,为解决大型枝状管网水力计算问题提供了一种实用可靠的方法。

(下转第 133 页)