

'94 国际石油与石油
化工科技研讨会论文

大型注水系统的建模、优化和控制

陈森鑫 刘铁男 司光宇

(大庆石油学院)

1994 年 9 月 北京

大型注水系统的建模、优化和控制

摘 要

本文提出了大型油田注水系统的一套完整的建模、优化和控制方法,它能使注水系统配注误差和注水耗能达到最小,这对于油田中后期开发的稳油控水和缓和十分紧张的油田供电有巨大的价值,产生很好的经济效益。

引 言

油田注水是采油生产中最重要的工作之一,特别是对于进入中高含水期开发的油田,每天要向地下注入数十万方水乃至数百万方水,如何有效地管理和运行注水系统,是一个非常重要的问题。

注水系统运行中有两个问题很重要:①如何控制注水来保证油田长期高产稳产,即用“控水”来达到“稳油”的目标是中高含水期油田保持高产稳产的重要的技术方针。这就要求控制油井高含水层的产水量,并且在注水井上调整不同油层的注水量。通过有效控制注、采水量的增长幅度,有效地控制油井综合含水量的上升,保证油田长期高产稳产。要能有效地达到上述目的,就必须正确运行整个注水系统,使系统内的流量和压力具有最适当的分布。②注水系统的节能问题。注水通常需要消耗大量电能,例如一年产5000万t的油田,当综合含水率达到80%时,为保持注采平衡,每年至少向地下注入3.5亿t水,如果将每立方米水注入地下需要消耗6.5 kW·h电能,则每年需要耗电22.75亿kW·h,因此如何正确运行注水系统,节约电能是一个非常重要的问题。

上述两个问题的解决,均需要对注水系统建立适当的数学模型,并解决系统的计算、优化及控制问题。由于一般大型油田的注水系统极为复杂,现在尚未见到注水系统建模、计算和优化的完整理论。我们在研究注水系统的控制过程中,系统地解决了这个问题,在本文中扼要介绍这个理论。文中首先介绍建模方法,然后介绍计算方法、优化和控制方法,最后简单介绍软件包和所获得的几点简单的结论。

注水系统的建模

一般大型注水系统是由水源处理系统,注水站、注水管网、配水间及注水井等基本单元组成,因此我们首先建立这些基本单元的模型。由于每个注水站都建有较大容量的贮水罐,因此污水处理系统和水源系统对注水系统的动态影响不大,我们将不考虑污水处理系统及水源系统的模型。

1. 注水站的数学模型

注水站主要设备是电机和注水离心泵,与注水系统运行有关的数学模型为注水泵的压力——流量特性,注水泵的效率——流量特性和电动机的效率——轴功率特性,这些特性可根据制造厂提供的特性测试数据及实际运行数据用系统辨识方法建立的模型来描述。为了提高模型的准确度,我们采取了一些特殊的处理方法,得到的模型如下:

$$P = A - B \left(\frac{Q_s}{n} \right)^2 \quad (1)$$

$$\eta_p = C_p - A_p (Q_s - Q_0)^2 \quad (2)$$

$$\eta_e = C_e - A_e (N - N_e)^2 \quad (3)$$

$$N = a \cdot \frac{P \cdot Q}{\eta_p \cdot \eta_e} \quad (4)$$

其中: Q_s 、 Q 分别为泵站总体积流量和单台泵的体积流量(m^3/h); P 为注水泵出口压力(MPa); η_p 、 η_e 分别为注水泵和电动机的效率(%); n 为注水站开泵台数(台); N 为电动机输出轴功率(kW); a 为单位转换系数; A 、 B 、 C_p 、 A_p 、 C_e 、 A_e 、 Q_0 、 N_e 为常数,其意义由上述方程自明。推导公式(1)时已假设是同一个注水站使用同种型号的泵。如果注水泵特性不同,公式略为复杂,本文从略。由式(1)~(4)可以计算注水站排出每立方米水所消耗的电能

$$n = \alpha \cdot \frac{P \cdot Q}{\eta_0} \quad (5)$$

2. 注水管网模型

注水管网由管道、阀门、弯头、三通等管件组成。管网输水过程中压力能消耗包括摩擦损失及克服地形高差所需的位能。摩擦损失包括沿管道流动的沿程摩擦损失及通过阀门、弯头、三通等管件产生的局部摩擦损失,我们直接引用常规水力学公式可进行一段管路的压降 ΔP 的计算,

$$\begin{aligned} \Delta P &= \gamma \left(\sum \lambda_i \cdot 8 \cdot L_i / \pi^2 \cdot g \cdot d^5 + \right. \\ &\quad \left. + \sum \lambda_{ji} \cdot 8 \cdot L_{ji} / \pi^2 \cdot g \cdot d^5 \right) \cdot Q^2 \\ &= K \cdot Q^2 + \gamma (Z_e - Z_s) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: ΔP 为管路起点到终点的总压降;

Z_e, Z_s 分别为终点和起点的高程;

λ, λ_{ji} 分别为水力摩擦系数和当量摩擦系数;

L_i, L_{ji} 分别为管段长度和管件或阀门的当量长度;

d_i 为管道的内径;

γ 为管内流体(水)的重量;

K 的定义由公式(6)自明;求和号表所有管段沿程损失之和及所有局部摩擦损失之和。

3. 配水间及单井的数学模型

单井模型包括配水间到井口的地面管段,井筒内油管、配水嘴,及地层吸水规律。

$$P_i - P_n = \Delta P_i$$

$$\begin{aligned} &= \beta \gamma \left(\sum \lambda_i \cdot 8 \cdot L_i / \pi^2 \cdot g \cdot d^5 + \right. \\ &\quad \left. + \sum \lambda_{ji} \cdot 8 \cdot L_{ji} / \pi^2 \cdot g \cdot d^5 \right) Q_i^2 + \\ &\quad + \beta \gamma (Z_b - Z_s) \end{aligned} \quad (7)$$

$$P_n = P_{oi} + K_i Q_i \quad (8)$$

式中: P_i, P_n 分别是配水间和井底水压力(mPa); Z_b, Z_s 分别是井底及配水间高程(m); P_{oi} 为第 i 口井开始吸水时的压力(mPa); K_i 为第 i 口井吸水指数; β 为单位换算常数。

合并式(7)及式(8),得

$$\begin{aligned} P_i &= \beta \gamma \left(\sum \lambda_i \cdot 8 \cdot L_i / \pi^2 \cdot g \cdot d^5 + \right. \\ &\quad \left. + \sum \lambda_{ji} \cdot 8 \cdot L_{ji} / \pi^2 \cdot g \cdot d^5 \right) Q_i^2 + \\ &\quad + \beta \gamma (Z_b - Z_s) + P_{oi} + K_i Q_i \\ &= (M_i Q_i + U_i)^2 - U_i^2 + P_{oi} \end{aligned} \quad (9)$$

$$M_i = \left[\beta \gamma \left(\sum \lambda_i \cdot 8 \cdot L_i / \pi^2 \cdot g \cdot d^5 + \sum \lambda_{ji} \cdot 8 \cdot L_{ji} / \pi^2 \cdot g \cdot d_{ji}^5 \right) \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$U_i = K_i / 2 M_i \quad P_{oi} = \beta \gamma [Z_b - Z_s] + P_{oi} \quad (11)$$

当配水间有 m 口井时,由公式可推得配水间总流量

$$Q_s = \sum_{i=1}^m [(P_s - P_{oi} + U_i^2)^{1/2} - U_i] / M_i \quad (12)$$

$$(P_s - P_{oi} > 0, \quad P_s - P_{oi} \leq 0)$$

实际上,实测和理论分析均可得出方程(12)中 P_s 和 Q_s 的关系,可以用下式足够精确地近似

$$P_s = P_{oi} + K_s (Q_s + U_s)^2 \quad (13)$$

4. 注水系统的数学模型

利用上面建立的基本模型,就可以用组合和分解方法建立整个注水管网的模型。为节省篇幅,这里只举一个极简单的例子,见下一部分(图1及公式(14)~(18))。

注水系统的计算方法及优化方法

注水系统计算问题分两类,一类是确定了各注水站开泵台数,计算各配水间、注水井的压力及流量;另一类是确定了各配水间和注水井的注水流量,要求确定注水站开泵台数。这两类计算问题对一个大型注水系统都十分困难。我们提出了一套解算及优化的理论和方法,解决了这个问题。

1. 油田注水系统解算方法

注水系统是规模庞大、结构复杂的非线性系统。对于这样一个系统没有现成解算方法可借鉴。应用线性化方法解这个系统误差太大,不能满足注水要求,而且结构庞大,计算难度很大。其它供水系统的一些方法,如有限元法也不适合于油田注水系统,因为油田注水系统是一个多源多汇的复杂网络,地域分布较广。

对系统分析之后,我们用大系统分解迭代算法来解这个问题。这个方法可概述如下:①首先将注水系统分解成一些子系统;②然后对所得的子系统按一定次序逐个进行计算,为了保证系统计算的精度,直接应用上述模型进行计算,不再作线性化或其它简化;③最后对子系统之间的相关变量进行反复迭代运算,直到收敛为止。

我们对第三步作进一步解释。在计算一个子系统时,与其它系统有关联的变量,在本子系统计算时,均作为已知量。这时有两种情况:一种情况是在计算本子系统时,这些量已计算过,此时就取已算得的值作已知量;另一种情况是在本系统计

算时,这些变量尚未计算,此时就猜测一个值作为这些变量的已知值。

需要说明的是,对第一种情况关联变量也不一定是完全正确的值,因为在计算它们的值时,也含有一些关联变量的猜测值。按这种方法将所有的子系统计算完成以后,再按上述步骤和次序重新计算各子系统,此次关联变量均可以取计算所得量。不过也有两种情况:一种是取第二次计算所得量,另一种则需用上次计算所得的量。如果整个系统两次计算所得同一变量的值之差在规定误差范围之内,则计算停止,否则,继续迭代。

为了说明上述计算方法,我们举一个极简单的例子。图1是注水系统的一个子系统,其数学模型为:

$$P_{SL6} = A_{SL6} - B_{SL6} \left(\frac{Q_{AL4} + Q_{AL2} + Q_{301L} + Q_{201L}}{N_{SL6}} \right)^2 \quad (14)$$

$$P_{SL6} = K_{101L}(Q_{AL4} + Q_{AL2} + Q_{301L})^2 + K_{102L}Q_{AL2}^2 + P_{AL2} \quad (15)$$

$$P_{AL4} = K_{102L} \cdot Q_{AL2}^2 + P_{AL2} \quad (16)$$

$$P_{AL2} = P_{AL02} + K_{AL2} \cdot Q_{AL2}^2 \quad (17)$$

$$P_{AL4} = P_{AL04} + K_{AL4} \cdot Q_{AL4}^2 \quad (18)$$

在这组方程中, Q_{301L} 和 Q_{201L} 是需要在外子系统计算的两个流量,因为其它系统尚未计算,这时需要根据其它子系统内各配水间的配注要求,运行的历史数据,猜测它们的初始值,然后用这些猜测值作为已知量代入上述模型。这时,上述模型中除了常数外含有6个变量:泵压 P_{SL6} ,开泵台数 N_{SL6} ,配水间2和4的实际注水量 Q_{AL2} 和 Q_{AL4} ,配水间2和4的压力 P_{AL2} 和 P_{AL4} 。方程组式(14)~式(18),含有6个变量,即有一个自由变量。根据注水系统的实际要求,解这组方程有两种方式:一种方式是附加一个指标,例如使两个配水间的配注量和实注量的误差平方和最小或使区域内注水单耗最小;另一种方式是确定开泵台数或一个配水间的注水量。附加了这个条件以后,就可求得上述方程组唯一精确解。当然解题具体数学方法很多,我们一般使用求严格解的方法,确保了解的精度。

用这种方法我们可以依次将注水系统的各子系统逐个解出来。待全部子系统解出来后,进行第二次迭代计算。这次计算中,关联变量都可取已经计算出的值。如果所有关联变量的本次计算值与

计算前的预测值差均小于精度要求,计算结束。否则继续进行迭代运算。可以证明,适当选择关联量的初值,可以很快地收敛。详细的模型及解题过程见我们的研究报告。

2. 注水系统运行最优化原理

油田大型注水系统的数学模型极为复杂,所含变量极多。对这样一个大型非线性系统的最优化,我们的研究结果可摘要叙述如下。

(1)“压力谷”的基本性质

如果把注水站看作“源”,注水井或配水间看作“阱”,则油田大型注水系统是一个巨型多源多阱水力学系统,它具有典型的非线性性质,线性化近似因为误差太大,不适合于这样的系统。一般文献中介绍的非线性优化方法也不适合解这么庞大的系统。

为了找出有效的优化方法,我们分析了系统的压力分布。图2是注水系统一个简单的局部压力分布示意图。注水站提供压力源,经过管网损耗,流到配水间,因此从注水站到配水间压力逐步下降。从整个压力分布曲线看,各个注水站形成压力峰值,在两个(或多个)注水站之间,压力呈山谷形分布。我们称这种山谷形压力分布为“压力谷”。压力谷的概念是一个关键的概念,它是注水的子系统划分和系统优化原理的基础。下面我们叙述压力谷的基本性质。

基本性质:压力谷内各配水间的注水量仅由构成压力谷边界的各注水站提供,而与谷外的任何注水站无关(假定各注水站压力相同或相近)。

这个重要性质很容易用水力学原理加以证明,却是子系统划分的基础。由这个性质可知,在压力谷内的各配水间主要受到谷缘各注水站的影响,其它注水站只能通过间接的途径发生影响。例如图2中压力谷A内的配水间1和2主要受注水站I和II的影响,注水站III的影响是间接的。如果注水站III改变向压力谷B的流量,压力谷B的形状就要改变,从而注水站I流向压力谷B的流量也发生变化,因此注水站I的总流量发生变化。根据特性(1),注水站I的压力变化,再影响到压力谷A的压力分布和流量分配。显然,如果注水泵具有刚性特性,即特性公式(1)中 $B=0$ 时,谷外的注水站对谷内配水间没有任何影响。油田上应用的注水泵的B值很小(见“数学模型”),因此谷外各注水站运行情况对谷内配水间的影响很小。

应用这个重要性质可得出子系统划分原则:

注水系统的计算应当按照压力谷划分子系统,每个压力谷构成一个子系统。

我们的数学模型就是根据压力谷来划分的。需要指出的是,如果某个注水站因故障或限电而停运,改变了压力峰,因而压力谷的范围和形状将发生变化;反之,某个注水站投运,将增加一个压力峰,也将改变压力谷的形状和范围。

(2) 注水系统最优化原理

上面,我们已经应用压力谷概念将注水系统划分成许多子系统,对于这样复杂的系统直接优化还是困难的,为此,我们利用大系统理论和动态规划理论相结合的方法求最优解。我们用图3所示的简单例子来说明优化的原理。假定我们已经用压力谷概念,将整个系统划分为 N 个子系统,如图3所示。对这样一个系统的优化可以应用动态规划来解决。如果我们已经将整个系统最优化,则利用最优原理可知,对于某一级以后的系统,只要其关联(协调量)是最优的,剩下的这部分系统仍是最优的。应用这个原理可知,如果整个系统已经最优化,那么对第 N 个子系统来说,只要第 $N-1$ 个子系统对它的关联量处于最优状态,则也是最优的。同样对于最后两个($N-1$ 及 N)子系统组成的剩余系统,只要第 $N-2$ 个子系统对其关联(协调)量取最优值,则也是最优的。以此类推,只要关联量取最优值,所有剩余系统均是最优的。

不但如此,利用注水系统数学模型和压力谷概念,我们还可以证明下述重要定理。

定理:如果第 N 个子系统在第 $N-1$ 级子系统对它的关联量取最优值时是最优的, $N-1$ 和 N 组成的两级复合系统在第 $N-2$ 级子系统对它的关联量取最优值时是最优的,那么第 $N-1$ 级子系统和第 N 级子系统均是最优的。

该定理的证明参考我们的研究报告。反复应用最优化原理及上述定理,我们可以得到作为我们最优化计算基础的推论。

推论:如果整个注水管网系统是最优化的,它相当于所有子系统都是最优化的,只要它们的关联(协调量)取最优值。

由于开泵台数只能取整数,再将上述优化的结果进行最优整量化,可获得最优开泵台数。

在计算中还要用到一些非常容易理解的原则。例如图4中,如果注水站Ⅰ未开泵,而注水站Ⅰ流向配水间5、6、7、8的水量超过1台泵的额定排量,这种运行方式是不经济的,如果没有其它原

因,注水站Ⅰ应当启动适当数量的泵代替注水站Ⅰ的泵;反之,如果实际运行时,由于各配水间配注量少,注水站Ⅰ的注水泵的流量不到额定流量的一半,则注水泵工作在低效率区域,也是不经济的,应该停泵。

根据上述原理和方法,我们可以把注水系统的计算步骤归纳如下:①首先按照压力分布情况将注水系统分为一系列子系统;②将所分的子系统按一定次序排列;③如果是按实际运行情况计算各配水间实际注水量,将各注水站实际开泵台数作为已知量,用前面所给方法按上述子系统次序逐个进行计算,在进行优化计算时,需将优化准则也加到子系统模型,求得每个子系统的最优解,这两种计算都要预先猜测子系统之间的协调关联量,然后进行迭代运算;④如果由于限电或其它原因使某些注水站停泵,则按照上述方法调整子系统的划分,再进行计算。

按照上述思路,我们用C语言编制了“注水系统计算及优化运行软件包”(以下简称注水系统软件包)。这个软件包具有以下功能:①运行计算,即根据各注水站开泵台数,可以计算各配水间的实际注水量及反压力;②按优化指标,计算各注水站开泵的台数;③由于限电或其它原因,某些注水站应停运时,调整其它注水站开泵台数,使运行优化。这套软件系统具有较高的计算精度。

结 束 语

我们经过长期的艰苦努力,完成了课题所必须的理论研究工作及工作量很大的现场测试工作。在理论研究成果和现场测试数据的基础上,建立了“注水系统模型”,并编制了“注水系统计算及优化运行软件包”。应用这个软件包,对注水系统运行进行了优化计算,按计算结果调整后的方案比原来运行的泵的台数约减少5%~10%,由于注水系统耗能特别大,因此经济效益非常可观。

实际上,本文完成的理论工作,数据模型和软件工作还具有许多重要的应用价值。例如,上面已经指出,我们的优化指标也可以用配注误差平方和作为优化指标,为自动满足配注方案提供了一个工具,也就为用地上注水自动控制地下驱油准备了一个条件。本文提出的理论对于注水管网和注水站的设计也有一定的参考价值。从理论上讲,本文也提供了非线性系统优化的一种新方法。

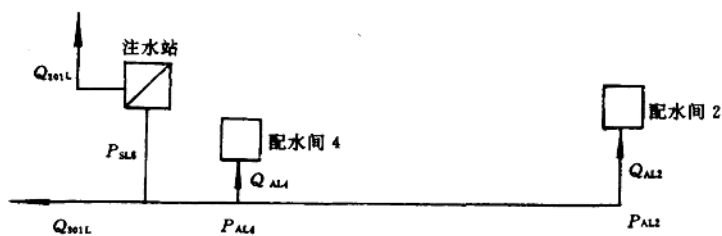


图 1 注水系统的一个子系统

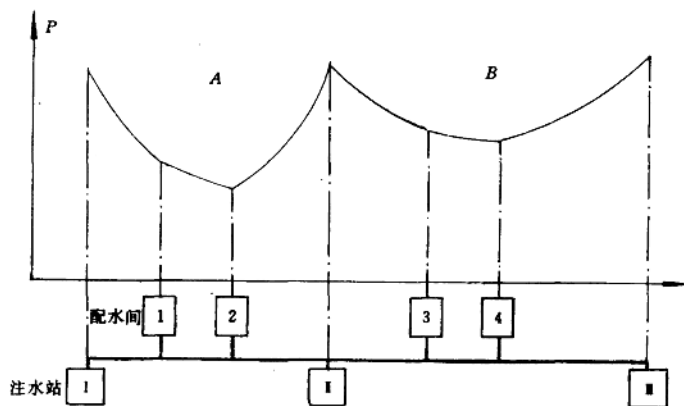


图 2 注水系统压力分布示意图

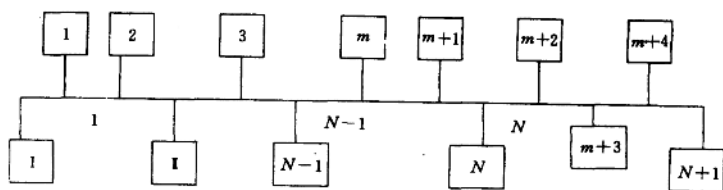


图 3 注水系统最优化原理示意图 I

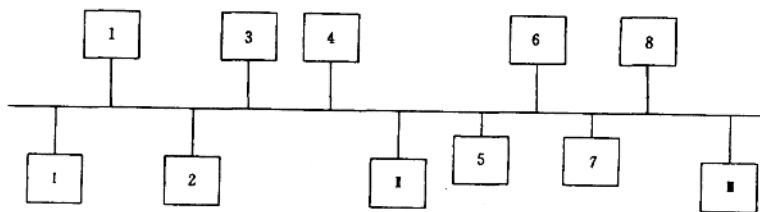


图 4 注水系统最优化原理示意图 II

石油物探局制图印刷厂
照排印刷