

# 油田注水目标函数大闭环优化控制系统的构建

阮岩<sup>1</sup> 程为彬<sup>1</sup> 吴九辅<sup>1</sup> 刘志英<sup>2</sup>

**摘要:** 在中国石化2015年油田注水大调查中,分析了大量注水测试数据,发现了目前油田注水系统存在的主要问题,提出前置宽频高效增压泵的PCP技术,研究PCP系统特性并建立其数学模型,实现管网数值模拟,并在此基础上构建注水目标函数大闭环优化控制系统。该系统通过注水系统动态优化软件实时采集注水系统状态,通过分析计算,建立优化控制目标函数,向PCP泵站系统发出控制调节信号,实现压力和流量调节,并通过大系统反馈不断修正,最终使注水系统达到优化运行。应用该系统可显著提升泵效,降低注水单耗,实时掌握管网运行情况,正确地判别整个管网系统配置是否合理,评价改造方案及效果。

**关键词:** 注水系统; 泵控泵; 数值模拟; 闭环控制

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.4.009

## Establishment of Large-Scale Closed Loop Optimization and Control System of Oilfield Water Injection Objective Function

Ruan Yan, Cheng Weibin, Wu Jiufu, Liu Zhiying

**Abstract:** To achieve the goal of Sinopec oilfield water injection survey in 2015, significant numbers of Sinopec test data were analyzed. Major problems on current oilfield water injection system are being recognized and PCP technology on broadband high efficient preceding booster pump is being introduced. Furthermore, after analyzing the characteristics of PCP system, establishing its mathematical model and implementing pipe-line network numerical simulation, large-scale closed loop optimization and control system of oilfield water injection objective function is being constructed. This system use real-time acquisition through the water injection system dynamic optimization software system to acquire the state of water injection system, through the analysis and calculation, to establish optimal control objective function, send control signal to the PCP pump station system to realize the pressure and flow control, and correction unceasingly through the large system feedback, finally achieve the optimal operation of water injection system. This system largely increases pump efficiency as well as lowers water injection consumption rate. In addition, this system oversees the running condition of pipe-line network on real time base and therefore makes judgments on the reasonableness of pipe-line network system deployment as well as predicts modification scheme and its effect.

**Key words:** water injection system; pump-control-pump (PCP); numerical simulation; closed loop control

中国石化2015年油田注水大调查的主要目的是评价在用节能降耗措施的有效性,进一步挖掘节能潜力,提出提高注水系统能量利用率的可行性建议与措施,完善注水系统能耗分析方法和能耗指标。为实现这一目标,开展了一系列研究工作。通

过大量测试数据以及各油田调查结果分析,发现目前油田注水系统存在的主要问题有:①泵站注水单耗较高,泵站综合效率低;②大部分注水泵站无调节功能,无法与管网动态需求相匹配;③注水管网损失率偏高,各种阀组损耗和管线摩阻损失较大;

<sup>1</sup>西安石油大学 <sup>2</sup>华北油田公司采油工程研究院

④注水系统的运行、改造主要依靠管理人员的认识和经验，无法保证系统运行方案达到最优，也无法准确、及时地进行系统调整；⑤为提高泵效，逐渐将离心泵替换为柱塞泵，但后期维护量大，运行成本高。

油田注水系统主要由注水泵站、注水管网、配水间、注水井等组成。其中注水泵站能耗占注水系统总能耗的30%左右，管网能耗占注水系统总能耗的20%~40%<sup>[1-2]</sup>，因此注水泵站与注水管网是节能降耗的主要目标。

## 1 前置宽频高效增压泵的PCP泵站

### 1.1 技术方案及效果

为解决泵站方面存在的问题，提出前置宽频高效增压泵的PCP技术<sup>[3-4]</sup>，对油田采用高压离心泵的注水泵站进行了技术升级改造；并在此基础上，研究泵站系统特性，建立其数学模型。

基于泵的特性分析，通过理论定性和系统辨识的方法，泵的特性曲线 $Q-H$ 可近似用如下表达式描述<sup>[5]</sup>

$$H = A Q^2 + B Q + C \quad (1)$$

式中： $H$ 为泵的出口扬程，m； $Q$ 为泵的流量， $m^3/s$ ； $A$ 、 $B$ 、 $C$ 分别为二次项、一次项和常数项的系数。

前置宽频高效增压泵后PCP泵站系统特性是主泵和前置泵特性的叠加，即

$$H_{总} = H_{主} + H_{增} \quad (2)$$

$$Q_{总} = Q_{增} = Q_{主} \quad (3)$$

系统及其变频运行的数学模型为

$$H = (-A_{前} Q^2 + B_{前} Q + C_{前})(/50) + (-A_{主} Q^2 + B_{主} Q + C_{主}) \quad (4)$$

以某油田3#机组KGF500-970/7离心泵为例，依据泵站测试数据及厂家泵数据建立其数学模型

$$H = -6.6 \times 10^{-6} Q^2 + 0.08 Q + 13 \quad (5)$$

实现闭环优化控制技术改造后效果如表1所示。改造前，主泵电动机过载，出口阀强行关小，电流245~250A；满足400 $m^3/h$ 以内注水要求，泵憋压，运行效率低。改造后，主泵电动机不过载，在同样流量下电流下降10%以上，电流220A；满足320~450 $m^3/h$ 注水需要，泵长期运行在高效区。

若对中石化油田目前所有符合条件的泵站做前置宽频高效增压泵的PCP技术改造，节能潜力巨大。

### 1.2 泵站主要节能点

通过实施的前置宽频高效增压泵PCP技术，泵

表1 KGF500-970/7离心泵站改造前后对比结果

改造项目	改造前	改造后
泵管压差/MPa	1.9~2.5	0.3 MPa 以内
注水量/( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	400	320~450
压流调节	无调节	压流可调
注水单耗/( $kWh \cdot m^{-3}$ )	7.67	6.44
主泵效率/%	72	79
电量/kWh	$2\,024 \times 10^4$	$1\,900 \times 10^4$
水量/ $m^3$	$264 \times 10^4$	$295 \times 10^4$

站实现了高效节能的目标，目前主要节能点有以下几个方面：

(1) 主泵可进行减级处理，主泵压力等级降低的部分由增压泵来承担，并对增压泵变频调速，使系统输出的压力和流量按需调节，这样注水泵出口阀门就可以完全打开，降低了泵管压差。

(2) 增压泵的加入提高了注水泵入口压力，使注水泵的工作点向高效区移动，从而改善了注水泵的工作状况，因此注水泵的效率得到提高。

(3) 过去完全由注水泵输出的能量现在由增压泵来承担一部分。高效泵替代部分低效负荷，提高了泵站的效率。

(4) 改造后的注水泵站可以和管网需求高效动态匹配，可在一定范围内根据配注需求进行压力和流量的调节，增加了有用功，提高了整个注水系统的效率。

(5) 泵站的压力、流量可以在 $\pm 15\%$ 左右调节，因此也可作为管网调峰站，这是很值得推荐的。若在一个区域内有2~3台PCP泵站，就可以关停一个小流量泵站，或者少建一个泵站，这也是一个节能点。

技术改造后，还可完善设备自动保护、远程启停注水泵和增压调节泵，实现报警及系统连锁控制，提高人员和设备安全。

### 1.3 泵站节能改造

目前油田普遍认为：离心泵虽然运行连续平稳、流量大、维护简单、运行成本低，但泵效偏低，特别是高效区范围狭窄，可调范围较小，且高压变频器直接驱动，投资大。而柱塞泵虽然有诸多不足，如流量小、维修成本高，但效率高，调速性能好。因此，在泵站设计和改造中，用柱塞泵逐渐取代离心泵。

而前置宽频高效增压泵的PCP技术是专门针对离心泵效率低、高压大变频的不足而研发的技术，可以使离心泵始终工作在高效区，还有较好的调速性能，很好地解决了目前离心泵存在的问题。因此，在泵站节能改造中，不必将离心泵替换为柱塞

泵, 而应该在现有离心泵的基础上做前置宽频高效增压泵的PCP技术改造, 同样可以达到节能降耗的目的, 且后期维护量较小、运行成本低。在考虑泵效时, 不应仅考虑泵效, 而应该综合考虑泵的运行和维护成本。

综上所述, 对泵站进行前置宽频高效增压泵的PCP技术改造, 不仅实现了压力、流量可调, 使泵站可以与管网需求高效动态匹配, 而且提高了泵效及系统效率, 降低了能耗, 同时也提高了泵站的自动化水平。前置宽频高效增压泵的PCP技术的应用是实现整个注水系统优化的基础, 可为下一步的管网优化创造必要的基础条件。

## 2 注水管网系统的优化

注水管网系统的优化目的是为注水系统动态科学管理提供及时、准确的决策依据, 从定量分析角度评价系统运行状态, 正确地判别整个管网系统配置是否合理, 预测、评价改造方案及效果, 从而在满足注水需求的前提下尽可能提高系统运行效率。

### 2.1 注水系统数值模拟软件

通过分析中石化油田提供的数据<sup>[1]</sup>, 结合现有油田注水系统数值模拟研究和应用的工作基础, 对中石化各油田进行管网改造和优化; 分析归纳油田管网节点单元规律特点, 并进行相关测试与实验, 建立数学模型<sup>[6-7]</sup>。

通过现场管线数据分析, 确定注水管线沿程阻力计算公式

$$h_f = \lambda \frac{8lQ^2}{\pi g d^5} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{\Delta}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (7)$$

$$Re = \frac{vd}{\gamma} = \frac{4Q}{\pi d \gamma} \quad (8)$$

式中:  $h_f$  为管段的压力损失, Pa;  $\lambda$  为沿程摩擦系数;  $l$  为管段的长度, m;  $d$  为管段的直径;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $Re$  为雷诺数;  $\Delta$  为管壁相对粗糙度;  $v$  为管段内流体的流速,  $m/s$ 。

因在用管线内部结垢、腐蚀程度不一, 实验证明传统算法(水力内径取管线内径、表面粗糙度则采用实验或查表法获得)误差较大, 而引用当量直径和当量粗糙度来表征管路水力特征的计算误差应保持在5%以内; 又针对管损计算要求,  $d$  和  $\Delta$  值必须唯一, 通过理论与试验结果相结合, 确定  $\Delta$  的取值, 简化数学模型。

注水井的数学模型可以根据注水井的吸水指数

曲线来获得。

系统的基本算法采用迭代算法, 然后编制注水系统动态数值模拟软件, 再进行历史拟合及验证。

油田注水系统数值模拟软件可以实现以下功能:

(1) 对现有管网进行模拟仿真, 即时掌握管网运行情况, 可实时实施参数显示、调整等动态管理运行方案。

(2) 可找出系统流程中摩阻变大、效率变低等异常变化的管段或部位, 为生产管理或管网改造提供依据。

(3) 可进行注水模拟计算并提供数据评价分析的结果, 从而指导管网改造和设计、泵运行方案和井注水方案的制定, 以及确定注水系统能耗指标。

(4) 通过对实际注水状态分析, 计算出系统效率、区域效率、干支线局部效率, 以及效率低的环节和管损大的环节, 指导管网改造、管线清洗和管线分流。

(5) 实现对注水系统的宏观管理, 根据管网模拟仿真实时数据来指导注水系统运行参数的调整, 实现能耗最低, 运行效率最优(满足最大配注率), 以及注水系统优化调度和管理。

### 2.2 技术资料的补充

为完成注水系统数值模拟软件的研究及软件开发工作, 需要进一步补充完善现有技术资料。

(1) 地理信息系统。现阶段提供的数据中还缺少管段信息(管长、管径、等高线等), 无法实现对管段物理参数的描述。

(2) 现场管线拟合实验的验证。鉴于各油田水质和注水环境的不同, 管网系统中管段的情况也会有一定的个性和共性, 因此需要必要的检测和实验来验证模拟的准确性。

(3) 需多组数据。管网计算中, 由于所采用的模拟公式为非线性多元公式, 因此在模拟计算中需要用多组数据进行代入计算, 而且该数据在准确的基础上还需要一定的变化。

## 3 优化控制系统的构建

在研究应用注水管网优化系统和PCP技术的基础上, 将两者结合起来, 通过管网优化系统宏观优化系统效率、泵区域效率、注水满足率, 微观计算各节点状态, 以压力和流量作为目标值, 利用PCP控制调节技术实现注水系统大闭环控制(图1), 使系统效率最高, 达到节能降耗的目的。

(下转第31页)