

输气站场无人化自动分输技术 在西气东输工程的实现

梁 恽 彭太冲 李明耀

中国石油管道有限责任公司西气东输分公司

摘 要 为了解决西气东输工程输气站场当前输气模式需要大量人工干预和由于人为因素造成的天然气超输、分输不稳定、分输中断、计量不准确的问题,利用 SCADA 系统程序,设置了基于时间的自动启输逻辑,基于自适应广义预测算法的智能分输逻辑,基于瞬时流量监控、电动球阀位置监控、电动调节阀状态监控、流量计运行监控的故障响应逻辑以及基于分输到量判断的自动停输逻辑,实现了输气站场无人化自动分输运行。试运行和测试结果表明:①无人化分输逻辑具有更好的可靠性,在 31 座站场的半年试运行期间,逻辑成功控制输送天然气 $22.48 \times 10^8 \text{ m}^3$,期间未出现任何旧输气模式中存在的问题;②无人化分输逻辑具有更好的稳定性,逻辑被控参数超调量低于 5%,降低的阀门开度变化率超过 10%;③无人化分输逻辑具备较好的无扰切换、故障切换、防呆控制和故障响应能力。结论认为,无人化分输改造提高了输气站场的生产效率和自动化、智能化管理水平。

关键词 西气东输 天然气管道 SCADA 无人化 自动分输 智能分输 广义预测 自适应

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.11.015

Application of unmanned automatic offtake in gas transmission stations of the West-to-East Gas Pipeline Project

Liang Yi, Peng Taichong & Li Mingyao

(West-East Gas Pipeline Company, PetroChina Pipeline Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 39, ISSUE 11, pp.112-116, 11/25/2019. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The West-to-East Gas Pipeline Project is the energy lifeline for China's "gasification", and its gas transmission efficiency has a direct effect on the whole natural gas energy industry of China. At the gas transmission stations of the West-to-East Gas Pipeline Project, massive manual intervention is needed and some problems are caused by human factors, e.g. over-amount offtake, offtake instability, offtake interruption and inaccurate measurement. In order to solve these problems and improve the efficiency, accuracy and stability of natural gas offtake, this paper applied the SCADA system program to set the time-based automatic start offtake logic, the intelligent offtake logic based on adaptive generalized prediction algorithm, the fault response logic based on instantaneous flow monitoring, position monitoring of electrical ball valves, status monitoring of electric regulating valves and flow meter operation monitoring, and the automatic offtake stop logic based on amount judgment. And consequently, the unmanned automatic offtake of gas transmission stations was realized. And the following results were obtained on the basis of trial run and test. First, the unmanned offtake logic has a better reliability. During its trial run at 31 stations for half a year, $2.248 \times 10^9 \text{ m}^3$ natural gas was successfully transmitted and the problems existing in the old gas transmission mode never happened. Second, the unmanned offtake logic has a better stability. The overshoot of the logically controlled parameters is reduced to less than 5%, and the change rate of valve opening is reduced by more than 10%. Third, the unmanned offtake logic has a better capacity of undisturbed switching, fault switching, mistake-proofing control and fault response. In conclusion, the application of unmanned offtake technology improves the production efficiency and automatic and intelligent management level of gas transmission stations.

Keywords: West-to-East Gas Pipeline; Gas pipeline; SCADA; Unmanned; Automatic offtake; Intelligent offtake; Generalized prediction; Adaptive

基金项目: 中国石油管道有限责任公司西气东输分公司科技创新基金“站场工艺流程自动切换技术”(编号: CX201908)。

作者简介: 梁恽, 1987 年生, 工程师; 主要从事长输天然气管道自动化技术方面的研究工作。地址: (430073) 湖北省武汉市洪山区雄楚大道 977 号中国石油华中管道大厦 916 室。ORCID: 0000-0003-3504-0785。E-mail: xqdsliangy@petrochina.com.cn

0 引言

随着国家大力推进清洁能源战略,天然气行业得到了迅速发展,天然气管网日趋庞大,输气量日益增多^[1-5]。西气东输工程是“气化”中国能源大动脉,其输气效率直接影响整个中国的天然气能源行业。西气东输工程自 2003 年投产以来,其输气模式在不断地进行升级改造^[6-10],但仍未从根本上实现无人化的目标。目前,西气东输输气站的天然气分输全过程包括:中国石油北京油气调控中心下达分输日指定任务后,站场输气工远控开启分输支路,然后根据经验设置比例—积分—微分控制器(Proportion-Integral-Differential, PID)参数,最后待分输日指定量到达时远控关闭分输支路的阀门。在长期运行中,发现该模式存在以下问题:①分输日指定量已到达,但输气工未及时关阀导致超输;②分输工况发生变化后,难以及时重新整定 PID 参数,致使分输稳定性下降;③输气过程中分输支路阀门发生故障,输气工未及时介入,导致天然气分输中断;④分输流量过低时,输气工未能及时发现并停止分输,导致计量不准确,引发输差问题。另外,该运行模式还大量占用站场人力资源,导致输气工不得不花费大量时间执行机械性、重复性工作。为提高天然气分输的效率、精度和稳定性,提出了无人化分输方案,将全周期的分输工作交由数据采集与监视控制系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)控制,实现无人化的定时启输、智能分输和到量停输。

1 无人化分输改造

1.1 定时启输

在可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)系统中设置定时启输逻辑(图 1),逻辑内容包括:

1) 设置“定时启输投用状态”。操作员可以在站控机上选择投用或禁用“定时启输”功能,投用“定时启输”逻辑后,分输支路的电动阀将切换至自动状态;

2) 设置“定时启输准备状态”。该状态用于判断分输支路中的电动阀和电动调节阀是否处于远控、自动、无故障状态。

3) 增加时间判断逻辑。逻辑用于定义执行自动启动的时间。

当逻辑满足条件:北京油气调控中心已发布分输

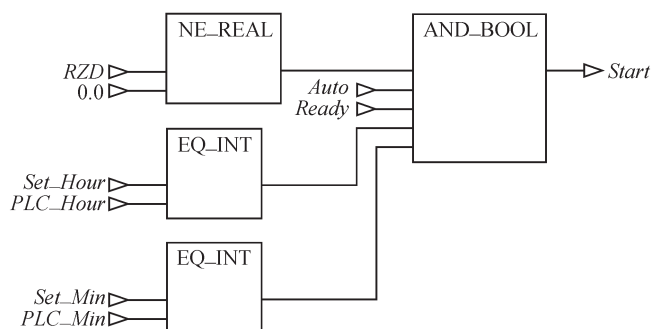


图 1 定时启输逻辑图

注: RZD 表示分输日指定任务量; Auto 表示定时启输逻辑的投用状态; Ready 表示定时启输逻辑的准备完成状态; Set_Hour 表示执行定时启输的指定时间, h; PLC_Hour 表示 PLC 系统的当前时间, h; Set_Min 表示执行定时启输的指定时间, min; PLC_Min 表示 PLC 系统的当前时间, min; Start 表示触发用户启输逻辑; NE_REAL 表示实型数据的不等于比较器; EQ_INT 表示整型数据的等于比较器; AND_BOOL 表示布尔型数据的与门

日指定任务,逻辑处于投用状态和准备完成状态,PLC 系统时间到达定时启输时间时,定时启输逻辑触发。

在 PLC 系统中设置顺序控制逻辑,当定时启输逻辑触发后,顺序控制逻辑将依次启动相关阀门(图 2)。

为了保证启输过程中分输参数的稳定性,在 PLC 系统中还设置了梯级开阀逻辑,逻辑内容如下:

1) 对于压力需求型用户,PLC 系统以 ΔP 为梯级,执行 PID 控制。初始的 PID 设定值 $PSP_1 = PV + \Delta P$ (PSP_1 表示首次压力设定值, PV 表示压力反馈值,单位均为 MPa),待 PID 控制开阀直至 $PV - PSP_1 \leq 25\% \Delta P$ 时,逻辑控制执行第二次赋值 $PSP_2 = PV + \Delta P$,然后依次循环,直到 $PSP = PSP_n$ 。

2) 对于流量需求型用户,PLC 系统以 ΔF 为梯级,执行 PID 控制。初始的 PID 设定值 $FSP_1 = FV + \Delta F$ (FSP_1 表示首次流量设定值, FV 表示流量反馈值,单位均为 m^3),待 PID 控制开阀直至 $FV - FSP_1 \leq 25\% \Delta F$ 时,逻辑控制执行第二次赋值 $FSP_2 = PV + \Delta P$,然后依次循环,直到 $FSP = FSP_n$ 。

1.2 智能分输

梯级开阀完毕后,无人化分输逻辑将由定时启输阶段切换至智能分输阶段。智能分输使用自适应广义预测控制方法^[11-16]。自适应广义预测控制方法对于工艺参数周期性变化的站场具有较好的适应性,可以避免调节阀的动作频繁、响应滞后、开度变化剧烈等问题。西气东输的自适应广义预测控制逻辑的预设参数如表 1 所示。

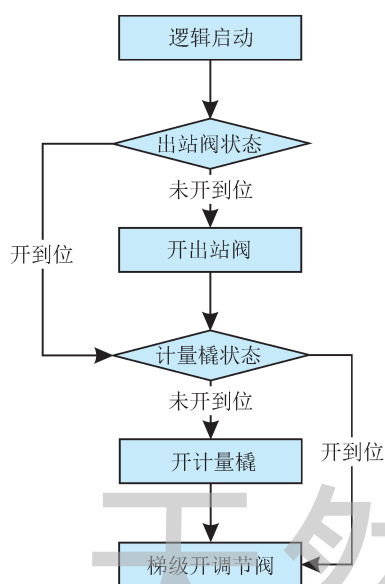


图2 用户启输逻辑执行顺序图

表1 西气东输自适应广义预测控制参数表

参考压力 (y_s)	遗忘因子 (λ)	柔化因子 (α)	预测步长 (P)	控制加权矩阵 (Γ)	矩阵 (M)
5	0.98	0.8	6	0.000 2	1

逻辑工作原理如下：

- 1) 基于当前周期采样的多个压力反馈值，剔除最大值和最小值，计算获取当前周期的压力反馈值 y 。
- 2) 计算获取当前周期的辨识参数：

$$\theta(k) = \theta(k-1) + K(k)[y(k) - h(k)\theta(k-1)] \quad (1)$$

其中

$$h(k) =$$

$$[-y(k-1), -y(k-2), \Delta u(k-1), \Delta u(k-2), \Delta u(k-3)]^T \quad (2)$$

$$K(k) = P(k-1)h(k)[h(k)^T P(k-1)h(k) + \lambda]^{-1} \quad (3)$$

$$P(k) = [I - K(k)h(k)^T]P(k-1) / \lambda \quad (4)$$

式中 k 表示当前采样周期； $k-1$ 表示上一个采样周期； $\theta(k)$ 表示当前周期的辨识参数； $K(k)$ 表示计算辨识参数的中间变量， $y(k)$ 表示当前采样周期压力反馈值， $h(k)$ 表示数据向量， $\Delta u(k-1)$ 表示上一周期的控制变量增量； $P(k-1)$ 表示上一周期的 P 矩阵； I 表示单位矩阵。

- 3) 计算获取阶跃响应系数：

$$g_n = y(k+n-1) = -a_1 y(k+n-2) - a_2 y(k+n-3) + b_0 \Delta u(k+n-1) + b_1 \Delta u(k+n-2) + b_2 \Delta u(k+n-3)$$

(5)

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ g_2 & g_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ g_p & g_{p-1} & \cdots & g_{p-M+1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中

$$\theta(k) = [a_1, a_2, b_0, b_1, b_2]^T \quad (7)$$

式中 g 表示阶跃响应系数； G 表示系数矩阵； a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 、 b_2 表示 $\theta(k)$ 中的元素。

- 4) 计算获取期望压力轨迹 (Y_r):

$$Y_r(k+i) = \alpha^i y(k) + (1-\alpha^i) y_s \quad (8)$$

- 5) 计算获取开环预测输出 (Y_m):

$$Y_m(k+j) = \sum_{i=j+1}^p g_i \Delta u(k+j-i+1) + g_p \sum_{i=k-p+1}^{k+j-p} \Delta u(i) + y_{k0} \quad (9)$$

其中

$$y_{k0} = y(k) - \sum_{i=1}^p g_i \Delta u(k-i+1) \quad (10)$$

式中 y_{k0} 表示计算开环预测输出的中间变量。

- 6) 计算获取当前周期的控制变量增量 (Δu):

$$\Delta u = (G^T G + \Gamma)^{-1} G^T (Y_r - Y_m) \quad (11)$$

- 7) 基于上一周期电动调节阀的控制量和当前周期的控制变量增量，计算获取当前周期的电动调节阀的控制量，然后输出控制电动调节阀动作。

1.3 状态监控

1.3.1 低流量分输监控

用户每日各个时刻的用气量不均衡，存在波峰和波谷现象。用气量的波峰通常不会超过流量计正常计量的上限，但波谷却经常低于流量计正常计量的下限。在分输过程中，若用气量长时间低于计量下限，将造成计量不准确。为解决该问题，在 PLC 系统中设置了低流量状态监控逻辑（图3）。在智能分输阶段，逻辑实时监控分输的瞬时流量，若瞬时流量在 2 min 内持续低于流量计正常计量的下限，PLC 系统将执行用户停输逻辑，停止分输。

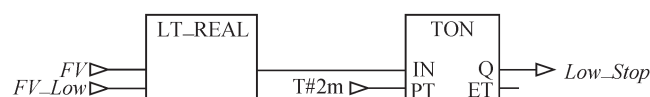


图3 低流量停输判断逻辑图

注：FV 表示分输的瞬时流量；FV_Low 表示流量计正常计量的下限流量；T#2m 表示 2 min；Low_Stop 表示触发用户停输逻辑；LT_REAL 表示实型数据的小于比较器；TON 表示延时导通计时器

低流量停输完成后，PLC 系统还将持续监测分输用户出口压力。若分输用户出口压力持续 10 min 低于工艺允许的出口压力时，PLC 系统将再次执行启输逻辑和智能分输，以保障分输参数的稳定性（图 4）。

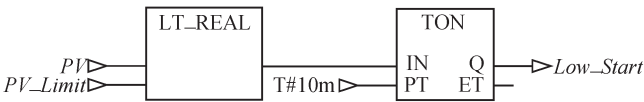


图 4 低流量停输后自动启输判断逻辑图

注：PV 表示用户出口压力，MPa；PV_Limit 表示工艺允许的用户出口最低压力，MPa；T#10m 表示 10 min；Low_Start 表示触发用户启输逻辑

1.3.2 计量橇状态监控

PLC 系统实时监控计量橇的状态，当 PLC 系统检测到分输在用路计量橇发生了电动阀事故关断或者流量计死机，并且备用路计量橇状态正常时，PLC 系统将执行计量橇故障切换逻辑：自动开启备用路计量橇，备用路计量橇启动完毕后再自动关停故障路计量橇，保障分输不间断和计量的准确性。

1.3.3 调压橇状态监控

PLC 系统实时监控调压橇的状态，当 PLC 系统检测到分输在用路调压橇的工作调节阀发生了故障或电动阀发生了事故关断，并且备用路调压橇状态正常时，PLC 系统将执行调压橇故障切换逻辑：开启备用路调压橇的同时，关闭在用路调压橇，保障分输不间断和分输的稳定性。

1.4 到量停输

无人化自动分输逻辑采用到量停输功能来停止分输。该逻辑在 PLC 系统中设置了两个参数“已输百分比”和“停输百分比”。“已输百分比”是当日已输气量与日指定输气量的商。“停输百分比”可在操作员工站上设置，当“已输百分比”大于或等于“停输百分比”时，无人化自动分输逻辑将自动由智能分输阶段切换至到量停输阶段。

用户停输逻辑的执行顺序如下：

- 1) 工作调节阀切换至软件手动控制状态。
- 2) 切换成功后，工作调节阀的阀位值被自动设置为 0%，执行关阀操作。
- 3) 工作调节阀的开度小于 10% 或者工作调节阀持续关阀超过 2 min 开度仍大于 10% 时，逻辑将自动关工作调节阀前的电动阀。
- 4) 电动阀关到位视为逻辑执行成功，若用户停

输逻辑在 10 min 内未成功关闭电动阀将视为逻辑执行失败。逻辑执行失败时将产生警铃报警，以提示需要进行人工干预。

当日分输完毕后，待第二天 PLC 系统的时钟到达设定的启输时间时，控制系统将继续按照之前设置的参数自动进行定时启输、自动分输和到量停输，完成新一天的天然气分输任务。

2 应用测试

无人化分输逻辑在西气东输一线中的 31 座输气站场的 55 家用户进行了为期半年的试运行，期间每日使用无人化分输逻辑进行天然气分输，累计输送天然气 $22.48 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。试运行期间对逻辑进行了各种测试，测试内容如表 2 所示。

表 2 逻辑测试表

指标	测试方法	结果
无扰切换能力	启输、分输、停输阶段切换中心 / 站场控制权限，控制是否能够平稳执行	正常
故障切换能力	启输、分输、停输阶段工艺设备遇到故障，逻辑是否能够执行完毕	正常
防呆控制能力	输入异常控制参数，查看参数是否会被拒绝	正常
故障响应能力	PLC 系统发生时钟丢失、通信中断等故障时，是否会误触发逻辑	正常

试运行结果显示无人化分输逻辑具有更为稳定、精准和高效的输气效果，试运行期间未出现任何分输中断、输差和计量不准确问题，天然气分输被控参数的超调量低于 5%，降低的阀门开度变化率超过 10%。

3 结束语

无人化分输功能将需要大量人工操作的分输工作简化为只需要一次人工参数设定，后续的所有每日分输工作由 SCADA 系统自动完成。无人化分输改造将站场从繁重的输气工作中解放了出来，优化了人力资源配置，实现了无人化的自动分输，提高了站场的自动化、智能化管理水平。但是从另一方面来看，目前无人分输控制逻辑仍存在一定的局限性，表现在其状态监控功能仍是基于固定模式的故障响应，在一般情况下无需人工干预，但是一旦出现预设模式以外的状况，SCADA 系统可能无法进行有效应对。未来，以自适应和自学习为基本要素的智能化分析将作为新的发展方向，智能化后的分析系统将

能够不断积累经验,对各类异常状况自行决策,最终实现故障响应智能化的目标。

参 考 文 献

- [1] 姜子昂,杨再勇,邹晓琴,王智雄,杨雅雯.对加快建设我国现代化天然气市场体系的战略思考[J].天然气工业,2018,38(10): 120-127.
Jiang Zi'ang, Yang Zaiyong, Zou Xiaoqin, Wang Zhixiong & Yang Yawen. Strategic thinking on accelerating the construction of modern natural gas market system in China[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 120-127.
- [2] 王小强,王保群,王博,林燕红,郭彩霞.我国长输天然气管道现状及发展趋势[J].石油规划设计,2018,29(5): 1-6.
Wang Xiaoqiang, Wang Baoqun, Wang Bo, Lin Yanhong & Guo Caixia. The current situation and development trend of China's long distance natural gas pipeline[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2018, 29(5): 1-6.
- [3] 祝慈智,吴超,李秋扬,张雪琴,曾力波,高山卜.全球油气管道发展现状及未来趋势[J].油气储运,2017,36(4): 375-380.
Zhu Quezhi, Wu Chao, Li Qiuyang, Zhang Xueqin, Zeng Libo & Gao Shanbu. Development status and trend of global oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(4): 375-380.
- [4] 刘勇,赵忠德,周淑慧,武松,郭杰,赵志诚.中国燃气行业天然气利用状况及发展趋势[J].国际石油经济,2016,24(6): 52-60.
Liu Yong, Zhao Zhongde, Zhou Shuhui, Wu Song, Guo Jie & Zhao Zhicheng. Utilization and development of natural gas in China's city gas industry[J]. International Petroleum Economics, 2016, 24(6): 52-60.
- [5] 张伟.天然气产业链的协调发展及升级研究[D].北京:中国地质大学,2013.
Zhang Wei. Research on the coordinated development and upgrade of natural gas industry chain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [6] 赵康斌,田家兴,王海峰,王多才,彭太肿,苍松.输气站场自控系统夜间无人值守功能的实现[J].油气储运,2012,31(4): 314-317.
Zhao Lianbin, Tian Jiaying, Wang Haifeng, Wang Duocai, Peng Taichong & Cang Song. Application of unattended station functions at night in West-to-East Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(4): 314-317.
- [7] 梁恽,韩建强,王磊.远控自动分输系统在西气东输甘塘站的应用[J].油气储运,2013,32(2): 171-173.
Liang Yi, Han Jianqiang & Wang Lei. Application of remote-control automatic offtake system in Gantang Compressor Station of West-to-East Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(2): 171-173.
- [8] 王海峰.西气东输一线分输压力PID控制效果改进[J].化工自动化及仪表,2015,42(4): 451-454.
Wang Haifeng. Improvement of PID control effect of the West-to-East Gas Pipeline[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2015, 42(4): 451-454.
- [9] 曹永乐,李灿,马铁量,彭太肿.西气东输站场控制功能提升的实现[J].化工自动化及仪表,2019,46(5): 344-347.
Cao Yongle, Li Can, Ma Tielang & Peng Taichong. Realization of control function improvement in West-to-East Gas Pipeline station[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2019, 46(5): 344-347.
- [10] 梁恽,王磊,赵康斌,马健.工业网络安全深度防御策略——以西气东输天然气管道SCADA系统网络为例[J].油气储运,2019,38(6): 692-696.
Liang Yi, Wang Lei, Zhao Lianbin & Ma Jian. In-depth defense strategy for industrial network security: A case study on the SCADA system network of West-to-East Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(6): 692-696.
- [11] 李立刚,张朝晖,昂扬,王多才,戴永寿.基于改进自适应广义预测控制的天然气分输站压力控制[J].信息与控制,2014,43(5): 637-640.
Li Ligang, Zhang Chaohui, Ang Yang, Wang Duocai & Dai Yongshou. Pressure control in natural gas distribution station based on an improved adaptive generalized predictive control method[J]. Information and Control, 2014, 43(5): 637-640.
- [12] 吴悠,刘国平.使用黄金分割法的管道压力系统自适应控制[J].控制理论与应用,2019,36(6): 858-866.
Wu You & Liu Guoping. Adaptive control of a pipeline pressure system using the golden section method[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(6): 858-866.
- [13] 陈景召,陈军,马世伟.广义预测控制算法在电镀废水处理中的应用[J].电镀与环保,2018,38(2): 68-70.
Chen Jingzhao, Chen Jun & Ma Shiwei. Application of generalized predictive control algorithm in electroplating wastewater treatment[J]. Electroplating & Pollution Control, 2018, 38(2): 68-70.
- [14] 张俊,罗大庸.广义预测控制和PID控制在混凝投药中的应用[J].信息与控制,2012,41(1): 89-94.
Zhang Jun & Luo Dayong. The application of GPC control and PID control to coagulant dosing[J]. Information and Control, 2012, 41(1): 89-94.
- [15] Li Chaoshun, Mao Yifeng, Yang Jiandong, Wang Zanbin & Xu Yanhe. A nonlinear generalized predictive control for pumped storage unit[J]. Renewable Energy, 2017, 114: 945-959.
- [16] Clarke DW. Application of generalized predictive control to industrial processes[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1988, 8(2): 49-55.

(修改回稿日期 2019-09-15 编辑 何明)