

文章编号: 1000-8241(2018)07-0798-06

# 电驱压缩机组控制系统的整合

唐小江<sup>1</sup> 李华<sup>2</sup>

1. 中油管道物资装备有限公司; 2. 中国石油管道科技研究中心

**摘要:** 长输管道压气站变频器、同步电动机、离心压缩机等关键设备供应日趋多元化, 品种多样使得电驱压缩机组不同设备的整合控制难度加大。针对经常出现的控制系统调整合问题, 应用系统分析、理论推导、数据统计方法, 阐述了电驱压缩机组控制系统的结构原理, 分析了压缩机及电机等设备主要运行参数的影响因素, 并据此制定了解决方案: 对变频器进行电流限制, 对压缩机负载进行控制; 增加自动判别辅助设施功能, 强制在某一时间进行系统对时。电驱压缩机组控制系统的整合在西气东输压气站的应用效果较好, 实现了电驱机组过负荷保护控制、一键启机及时钟同步, 为压缩机组运行管理和检查维修优化创造了有利条件, 满足天然气管道系统高效率灵活运行的需求, 可在后续压缩机调试中应用。(图 6, 参 25)

**关键词:** 电驱压缩机组; 控制系统; 过负荷, 一键启机; 时钟同步

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.07.012

## Integration on control systems for electric drive compressor sets

TANG Xiaojiang<sup>1</sup>, LI Hua<sup>2</sup>

1. China Petroleum Pipeline Material and Equipment Co. Ltd.; 2. PetroChina Pipeline R &amp; D Center

**Abstract:** Recently, the key electrical equipments (e.g. frequency converter, synchronous motor and centrifugal compressors) in compressor stations of long-distance natural gas pipelines are increasingly supplied by a variety of new manufactures and are diversified in brands, so the control on the integration between different parts of electric drive compressor sets is more and more difficult. In this paper, systematic analysis, theoretical derivation and data statistics were applied to deal with the problems that often occur during the debugging and integration of control system. The structural principles of the control system of electric drive compressor set were illustrated. Then, the factors that affect the main operation parameter of compressors and motors were analyzed. And accordingly the reliable solution was prepared as follows. First, it is necessary to limit the current of the frequency converter and to regulate the load of the compressor. Second, it is necessary to automatically identify whether auxiliary facilities satisfy the requirement and check the time systematically at the designated time. This solution is well applied in the compressor stations of West-to-East Gas Pipeline. As a result, overload control, one key start and clock synchronization of electric drive compressor sets are realized. It is favorable for operation management and inspection & maintenance optimization of compressor sets and ensures high-efficiency flexible operation of natural gas pipeline systems. The research results are applicable to the subsequent debugging of compressors. (6 Figures, 25 References)

**Key words:** electric drive, control system, overload, one key start, clock synchronization

与燃气轮机驱动压缩机组相比, 变频调速电机驱动压缩机组具有环境污染小、结构简单、造价低、能耗少、占用空间小等诸多优点, 在天然气管道增压站中应用越来越广泛<sup>[1-5]</sup>。据统计, 仅 2007—2015 年期间, 在国家重点建设的陕京三线、西气东输二线、西气东输三

线、中缅线等能源输送管道项目中, 变频调速电机驱动压缩机组的应用数量就达到 97 台, 占压缩机组总数量的 56%。变频器、电机、压缩机由不同生产商制造, 设计理念不同, 系统组合有 11 种<sup>[6]</sup>。如何整合变频电机与压缩机控制系统, 完善控制系统技术规范, 成为压气

站建设及运营方关注的焦点。

调试整合控制系统的主要问题有3个方面:①变频器、压缩机等机组设备过载保护功能不完善引起机组频繁启停;②需要大量人工确认而不能实现完全自动顺序启机;③各分系统时钟序列不同步影响故障数据分析。

目前,中国学者主要从电网参数波动及功率因素影响等方面探讨了同步电机故障的处理方案<sup>[7-9]</sup>,从调度中心远程控制角度研究了燃驱压缩机组的远程设计方式<sup>[10-11]</sup>,从国产化角度设计了电驱机组控制系统<sup>[12]</sup>,对计算机网络、电力行业网络设备的同步应用研究较多<sup>[13-17]</sup>,但在压缩机组自身设备的互联互通方面研究较少,基于此,有必要对控制程序进行专项研究<sup>[18]</sup>。以西气东输20 MVA TMdrive-XL75变频器+18.5 MW同步电机+18 MW RV080离心压缩机为例,对整合主要问题的原因及措施进行分析,可为压缩机组控制系统技术规范完善提供借鉴。

变频器控制两大系统,以工厂总线通讯、终端总线通讯方式通过光纤环形连接,进行数据通信(图1)。西气东输RV080压缩机组控制系统采用西门子 Simatic PC S7 分散性控制系统,集成在 PLC 控制柜中,由入口压力限制器、出口压力限制器、防喘振控制器、机器监测系统、辅助设备监控系统等构成,具备紧急停车、设备运行参数(转速、压力、温度等)监测和控制、压缩机启动和停止、主电机启动和停止等功能。负荷控制可以在手动模式下,在给定速度范围内直接选择每一压缩机的速度,也可通过入口压力控制、出口压力控制、站流量控制等自动模式按照相应方式来调整每一台工作压缩机的速度<sup>[19]</sup>,以实现压缩机工况点的平衡运行。变频器控制系统采用三菱 Mitsubishi Melsec-Q 系列可编程控制器(CPU)连接至图形显示终端系统(GOT 1000),对变频器、电机运行及电力故障进行保护、控制及监视,CPU具备电机温度监控、净化系统监控、传动监控等功能,通过 Profibus DP、Modbus-RTU、DeviceNet 等数据传输设备,进行 PLC 与压缩机系统(UCS)、励磁柜、电机等设备的通讯,显示传动状态、电机温度、电机速度(给定和反馈值)、吹扫系统数据、过载保护停机报警信息等参数。

## 1 电驱压缩机组控制系统

电驱压缩机组控制系统包括压缩机组控制和变

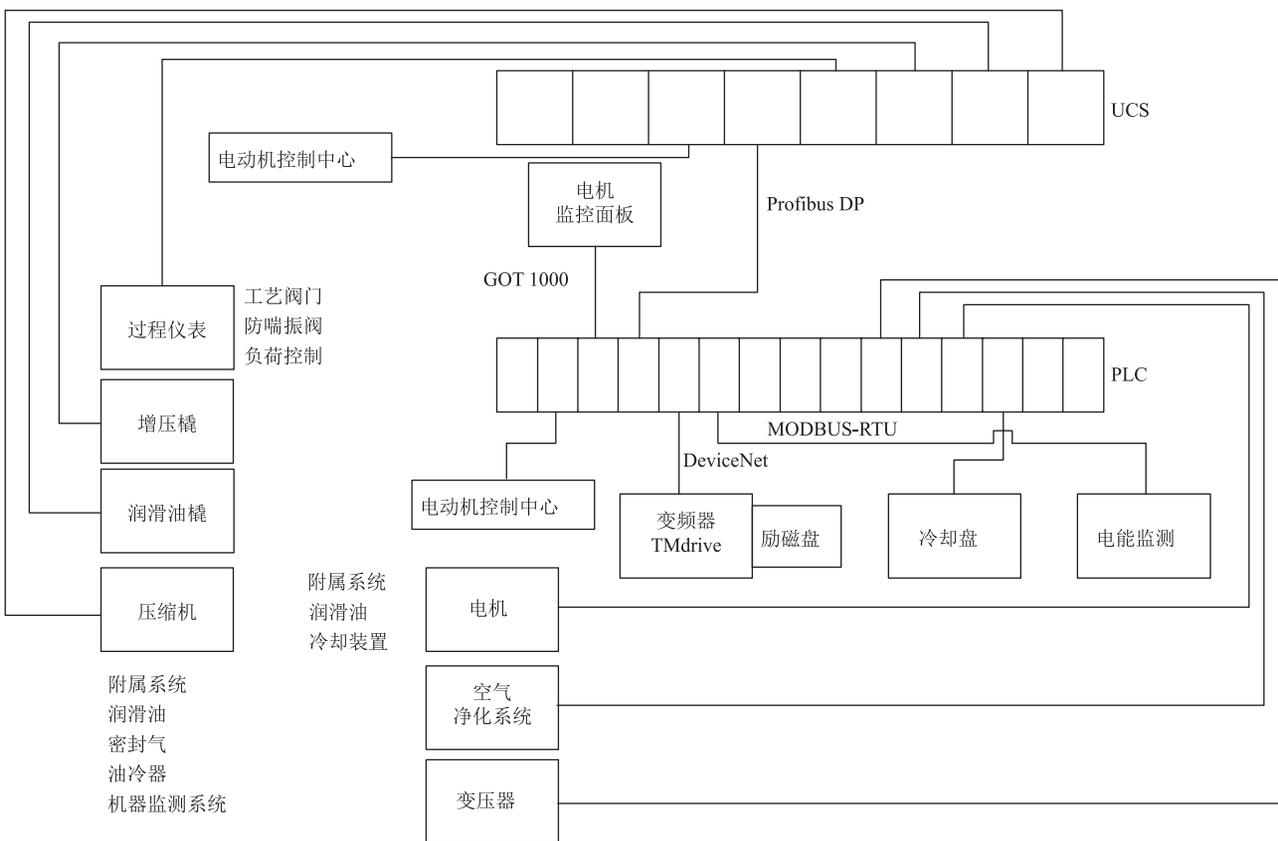


图1 电驱压缩机组控制系统示意图

## 2 压缩机组过负荷保护

### 2.1 问题描述

2015年5月,西气东输某压气站压缩机组在进行负荷分配运行测试时,其中1台压缩机的转速从4 700 r/min 迅速升高到4 985 r/min,变频器输出电流达到1 998 A,超出电机的满载额定电流(1 857 A),诱发电机过负荷保护性跳闸停机。

### 2.2 原因分析

首先从产品选型及性能上看,该站变频调速系统采用的是东芝三菱电机最先进的36脉冲整流、5电平逆变的大容量电压源变频器产品,不需使用高次谐波滤波器和无功补偿,变频器抗电源干扰能力强,新型的高速可调正压通风无刷励磁同步电机振动低,效率高。压缩机是德国曼透平公司高功率离心压缩机。上述产品均已成熟应用,只是第1次进行联机运行。按照TMdrive-XL75变频器的安全保护设置,过负荷5 min将导致停机。

通过调查站场运行日报,在跳机前正在进行负荷分配测试,调度中心设定出口压力9.3 MPa,在压缩机自动升速过程中,发生变频器输出过载保护性停机。排除设备故障<sup>[20]</sup>,导致停机的根本原因有两个方面:①变频电机驱动系统的最大电流、输入电压、频率变化,造成变频器输出电流超过最大允许值,变频系统发出过载信号,进行保护性停机;②压缩机未在设计工况下运行,如流量过低、压缩机喘振或压力、温度过高处于不稳定运行,造成驱动系统输出电流过大。

#### 2.2.1 电机

同步电机功率 $P$ 与电压 $U$ 、电流 $I$ 、功率因素 $\cos\phi$ 及效率 $\eta$ 成正比<sup>[21]</sup>。电机功率的计算式为:

$$P = \sqrt{3} UI\eta\cos\phi \quad (1)$$

负载 $\beta$ 一般用电机实际功率 $P_o$ 与额定功率 $P_N$ 的比值来表示:

$$\beta = P_o / P_N \quad (2)$$

根据20 MVA TMdrive-XL75变频器驱动电机现场试验数据(图2),在额定条件(100% $P_N$ )下,功率因素、效率达到最大值,且在电机功率(75% $P_N$ ~100% $P_N$ )附近, $\eta\cos\phi$ 基本保持不变,且正常情况下输出电压 $U$ 比较稳定,为便于确定电流与负载关系,式(2)可简化为实际电流 $I_o$ 与额定电流 $I_N$ 的比值:

$$\beta = I_o / I_N \quad (3)$$

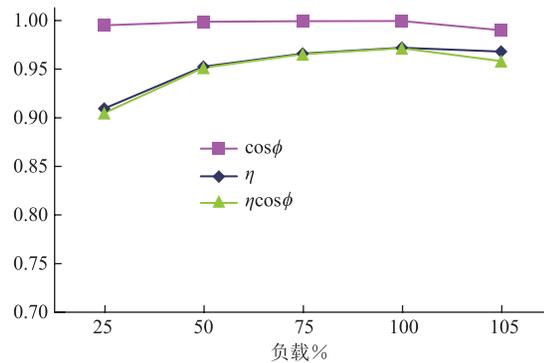


图2 20 MVA TMdrive-XL75 变频驱动电机的效率、功率因素与负载关系曲线

由式(3)中可以看出,负载大的主要原因是电流过大。因此,在实际工作中,可以通过控制实际电流来控制负载。

#### 2.2.2 压缩机

压缩机承担着管道输气的直接负载,其功耗与流量、转速、进排气压力、进排气温度、工艺气组分有关<sup>[22-23]</sup>。统计18 MW RV080离心压缩机的试验数据发现,在同一流量下,转速越大,功率显著增大,而在同种转速下,流量越大,功率也随之增大(图3, $n$ 为额定转速)。因此正常运行工况下,不会出现功率和负载超出的情况,但当转速突然增大,流量偏小时,功耗将突然变大,引发压缩机喘振等<sup>[24]</sup>,若控制系统不及时进行调整,将诱发机组停机。

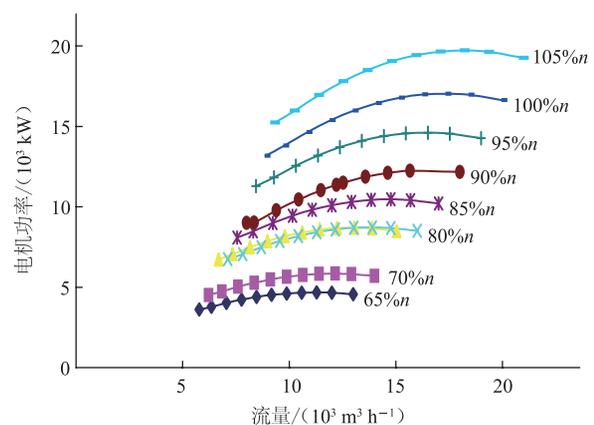


图3 65%~105% 转速下的功率曲线

## 2.3 解决措施

### 2.3.1 电机限流

为避免造成电机跳闸停机,首先对变频器输出进行功率限制,从而达到控制电流的目的,使其不超过电机的额定电流。为实现此目的,需要对变频电机监控系统进行改造,设定最大电流限制值(该值应低于额定电流值,避免在电机电流波动时发生振动超标),即为

变频器 TMdrive-XL75 设定一个速度上限值,这样即使在压缩机系统的速度参数信号增加时,电机转速也将保持不变。若电机电流超出额定电流,持续 1 s,变

频电机监控系统会向压缩机系统发出预过载报警信号(图 4),使压缩机系统降低速度参数以避免发出过载停机信号。

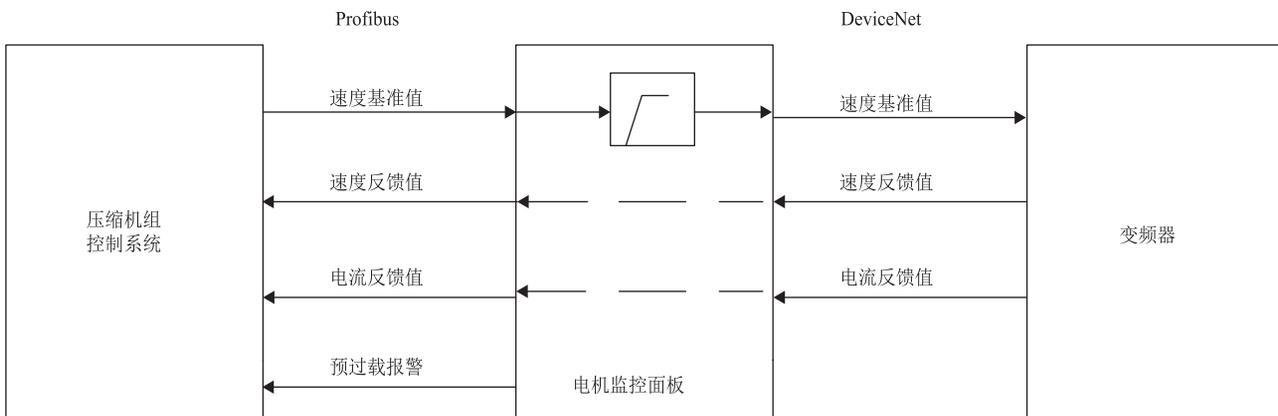


图 4 压缩机控制系统-变频器过载保护示意图

报警信号将在电机电流低于预设值并持续 1 s 时关闭。若报警信号持续 1 min 以上,监控系统会以每分钟 2% 的减速率降低速度参数上限值,以降低电机电流。

### 2.3.2 降低压缩机负载

在选择运行工况时,调度人员需对压缩机流量进行控制,使其运行到压缩机性能曲线的合理区间。通过降低出口压力,打开防喘振阀,提高进气温度等方式来降低负载。

### 2.4 改造效果

经过限流改造后,未发生过该类型停机,减少了非正常停机次数,提高了机组运行水平;同时,对压缩机负载控制程序进行了修改,快速打开开喘振阀,以避免发生压缩机喘振。

## 3 自动启机和时钟同步

### 3.1 问题描述

压缩机组启动运行,不仅需要进行启动辅助设施(压缩机、电机润滑油系统,干起密封系统)、压缩机充压(指天然气进入压缩机及进出口管道)、最终启动压缩机 3 个步骤,而且在启动过程中需要人工干预,如在润滑油系统出口油温满足要求且人工确认后,方可启动压缩机,以及电机润滑油系统信号需要就地 PLC 柜上人工复位等。另外,压缩机控制系统和电机控制系统的时间仍不一致,无法正确判断压缩机组各功能部件故障发生的时序。

### 3.2 原因分析

#### 3.2.1 压缩机

考虑安全原因,压缩机供应商在压缩机控制系统中将辅助设施启动和压缩机启动隔离开来,控制系统中未设置自动辨识条件,待润滑油系统等辅助设施达到压缩机启动条件(如油温、油压等满足要求),需要再次人工确认是否启动压缩机。压缩机在与上位机进行时钟同步调试时,未考虑配套电机的时间同步。

#### 3.2.2 电机

由于油系统启动前,电机润滑油流量开关信号传送至 PLC 柜,待油系统启动后,虽然油流量满足条件,但 PLC 设置有故障自我保持功能,因此还需要手动复位(图 5)。变频电机控制系统供应商担心网络病毒侵入,未与系统外的网络直接进行通讯,在机组调试阶段,变频电机控制系统未按照压缩机控制系统或上一级系统的基准时间进行校正,未与 UCS 进行 72 h 同步性测试(图 6)。

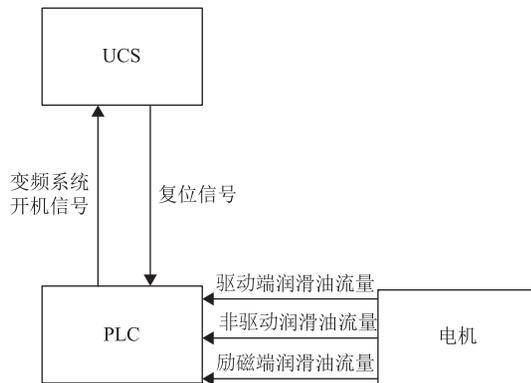


图 5 压缩机控制系统-电机润滑油系统流量故障复位示意图

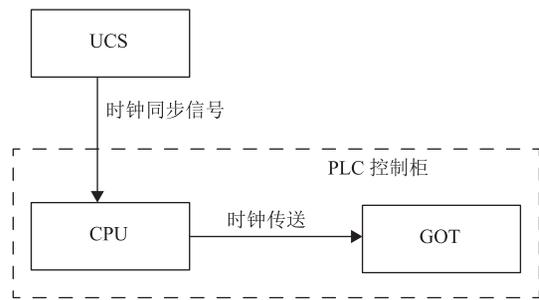


图6 压缩机控制系统-变频调速 PLC 控制柜基准时间校准示意图

### 3.3 解决措施

#### 3.3.1 压缩机

压缩机供应商对 UCS 进行重新编程,在系统控制界面上,增加一个新按钮,将辅助设施和启机整合在一个程序中,在操作员发出“一键启机”命令后,润滑油系统启动运行,自动判断油温(一般在 20~30 min 内即可达到润滑油设置温度)。压缩机 UCS 系统设置防火墙 M-guard,其具有安全隔离功能,可以保证在电机接入网络时,不会发生外界病毒入侵。

#### 3.3.2 电机

为了实现电机润滑油流量开关信号的自动复位,制定了两种方案:①在供油正常时,从 UCS 硬件或软件传送电机流量开关复位信号至 PLC 柜,故障信号复位后,变频器达到伺应状态。②当油系统启动,流量满足条件后,实现变频器 PLC 润滑油流量报警自动消除,变频器 PLC 向机组控制系统发出准备就绪可以启机的信号。

由于方案②仅涉及电机供应商,工作量较小,整合成本低,因此选择方案②。

在时钟同步调试方面,采用的三菱 Mitsubishi Melsec-Q 系列控制器 CPU 的时钟精度较高,不必反复进行时间校核,因此修改变频系统监控程序,在每天的固定时刻与压缩机 UCS 系统直接采用以太网方式进行时钟校准<sup>[25]</sup>。

### 3.4 改造效果

通过 10 天的联合调试,压缩机组控制系统实现了站场一键启机,解决了电机由于时间差异影响故障分析的问题,机组运行可控,同时还实现了站场控制系统的远程启机。

## 4 结论

通过分析近几年电驱压缩机组调试中出现的问题

并进行对策研究,得出如下结论:要最大化发挥管道-压缩机系统效能,必须加强设备的整合研究。基于此,对压缩机-电机联机运行系统进行专项研究,制定了限流保护、一键启机、时钟同步的控制措施,实现了系统的资源共享和协同工作,有利于降低建设、运行及维护成本,可在后续天然气管道电驱压缩机组控制系统采购规范中继续推广应用,并强化人机界面的设计考核,加大力度进行控制系统的工厂测试验证,不断提高电驱压缩机组运行自动化水平。

### 参考文献:

- [1] 王华青,姜进田,潘涛,等. 燃驱压缩机组 GE 普通型与 GE-DLE 型能效对比分析[J]. 石油石化节能,2018,8(4):50-51.  
WANG H Q, JIANG J T, PAN T, et al. Energy efficiency analysis of ge common and GE-DLE type of fuel-driven compressor[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2018, 8(4): 50-51.
- [2] 刘子晓,梁伟,林扬,等. 一种燃驱压缩机组效率的评价方法[J]. 流体机械,2017,45(12):38-44.  
LIU Z X, LIANG W, LIN Y, et al. A method for evaluating efficiency of gas reciprocating compressor unit[J]. Fluid Machinery, 2017, 45(12): 38-44.
- [3] 郭刚,高仕玉,卜乾. 西气东输管道燃驱压缩机组节能改造的实施与效果[J]. 燃气轮机技术,2017,30(2):64-67.  
GUO G, GAO S Y, BU Q. Implementation and evaluation of modification on gas turbine compressor unit in West to East Gas Pipeline[J]. Gas Turbine Technology, 2017, 30(2): 64-67.
- [4] 李刚,谷思宇,贾东卓,等. 燃驱压缩机组性能监测系统的开发[J]. 油气储运,2018,37(1):52-56.  
LI G, GU S Y, JIA D Z, et al. Development of performance monitoring system used for turbine-driven compressor set[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(1): 52-56.
- [5] 范满意,周登极,候大立,等. 基于性能仿真模型的燃驱压缩机组数据调和的方法及应用[J]. 热能动力工程,2017,32(1):43-48.  
FAN M Y, ZHOU D J, HOU D L, et al. Data reconciliation method and application for gas turbine driven compressor unit based on performance simulation model[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(1): 43-48.
- [6] 林森,高山,彭晶,等. 电压源型大功率变频驱动系统在西气东

- 输二线西段工程上的应用[J]. 电气传动, 2014, 44(11): 61-64.
- LIN S, GAOS, PENG J, et al. Application of high power variable speed driving system of the voltage type in west part of the West-East Gas Pipeline II[J]. Electric Drive, 2014, 44(11): 61-64.
- [7] 刘守前, 李长利. 同步电动机过电流故障原因分析[J]. 山东冶金, 2010, 32(6): 36-38.
- LIU S Q, LI C L. Cause analysis of overcurrent fault for synchronous motor[J]. Shandong Metallurgy, 2010, 32(6): 36-38.
- [8] 潘湘高. 大功率同步电动机的建模与仿真方法研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(3): 231-234.
- PAN X G. Research on high power synchronous motors modeling and simulation method[J]. Computer Simulation, 2013, 30(3): 231-234.
- [9] JOHNS T M. Interior permanent-magnet synchronous motors for adjustable-speed drives[J]. IEEE Trans. IA, 1986, 22(6): 738-747.
- [10] 王怀义, 杨喜良. 长输天然气管道压缩机组远程控制系统设计[J]. 油气储运, 2016, 35(12): 1360-1364.
- WANG H Y, YANG X L. Design of remote control system for compressor sets of long-distance gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(12): 1360-1364.
- [11] 李星星, 陈翠翠. 天然气管道压缩机远程控制技术[J]. 压缩机技术, 2015(6): 51-53.
- LI X X, CHEN C C. Remote control technology for compressor in natural gas pipeline[J]. Compressor Technology, 2015(6): 51-53.
- [12] 魏琦. 长输管线天然气变频电驱压缩机控制系统的设计与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2012: 76-79.
- WEI Q. Design and implementation of long-distance pipeline natural gas conversion electric drive compressor control system[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012: 76-79.
- [13] 田克君, 陈虎. 基于CAN总线的多伺服电机同步控制[J]. 微计算机信息, 2007, 23(9): 40-42.
- TIAN K J, CHEN H. Multi-servo motor synchronized control based CAN bus[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(9): 40-42.
- [14] 黄长江. 局域网时间同步应用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006: 14-17.
- HUANG C J. Research on application of time synchronization in LAN[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006: 14-17.
- [15] 汪洋, 伍小波, 赵宏波, 等. 电力时钟同步网建设及应用的思考[J]. 电力系统通信, 2011, 32(220): 7-12.
- WANG Y, WU X B, ZHAO H B, et al. Construction and application of digital synchronizing network in power grid[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(220): 7-12.
- [16] 杨锦涛, 单庆晓, 肖昌炎, 等. 电网卫星驯服时钟的网络时间同步服务器设计[J]. 计算机系统应用, 2011, 20(3): 94-97.
- YANG J T, SHAN Q X, XIAO C Y, et al. Design of network time synchronization system based on network satellite disciplined clock[J]. Computer Systems & Applications, 2011, 20(3): 94-97.
- [17] 祝婧, 刘水, 朱亮, 等. 时钟同步在用电信息采集系统中的应用[J]. 电测与仪表, 2016, 53(增刊1): 157-159.
- ZHU J, LIU S, ZHU L, et al. Application of time clock synchronization in power information collection system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(S1): 157-159.
- [18] 刘超, 赵洪亮, 李刚. 天然气管道压缩机组控制系统的应用现状[J]. 油气储运, 2016, 35(9): 1018-1022.
- LIU C, ZHAO H L, LI G. Application of control systems for natural gas pipeline compressor sets[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(9): 1018-1022.
- [19] 崔艳星, 杨立萍, 马永祥, 等. 西三线压缩机组负荷分配控制方案[J]. 油气储运, 2015, 34(5): 538-543.
- CUI Y X, YANG L P, MA Y X, et al. Program for control of load distribution in compressors of the 3rd West-to-East Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(5): 538-543.
- [20] 段志刚, 李长俊, 李川, 等. 基于RCM的电驱压缩机故障分析[J]. 油气储运, 2013, 32(9): 993-996.
- DUAN Z G, LI C J, LI C, et al. RCM-based analysis on faults of motor-driven compressor[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(9): 993-996.
- [21] 曹玉泉, 尹丽春, 姚建红, 等. 变频调速输油电机功率因数和频率、负载率的关系[J]. 天然气与石油, 2003, 21(4): 46-49.
- CAO Y Q, YIN L C, YAO J H, et al. Relation between motor power factor and load coefficient in oil transfer system with frequency variation speed-regulation[J]. Natural Gas and Oil, 2003, 21(4): 46-49.

(下转第 0809 页)

- CHEN M, CUI Q. Current research status and progress of H<sub>2</sub>S corrosion mechanism and prevention[J]. Petroleum Engineering Construction, 2010, 36(5): 1-5.
- [10] ZHU M, YU Y, ZHANG H H. Corrosion behavior of L245 steel in simulated oilfield produced water at different temperatures[J]. Journal of the Chinese Society of Corrosion & Protection, 2017, 37(3): 300-304.
- [11] LIANG P, DU C W, LI X G, et al. Effect of hydrogen on the stress corrosion cracking behavior of X80 pipeline steel in Ku'erle soil simulated solution[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2009, 16(4): 407-413.
- [12] ZHANG C, CHENG Y F. Synergistic effects of hydrogen and stress on corrosion of X100 pipeline steel in a near-neutral pH solution[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2010, 19(9): 1284-1289.
- [13] ZHAO W, ZOU Y, MATSUDA K, et al. Characterization of the effect of hydrogen sulfide on the corrosion of X80 pipeline steel in saline solution[J]. Corrosion Science, 2016, 102: 455-468.
- [14] HAN P, CHEN C, YU H, et al. Study of pitting corrosion of L245 steel in H<sub>2</sub>S environments induced by imidazoline quaternary ammonium salts[J]. Corrosion Science, 2016, 112: 128-137.
- [15] LIANG W, XIAO L P, KE W G. Effects of crude oil on the corrosion behavior of pipeline steel under wet CO<sub>2</sub> conditions[J]. Materials Performance, 2015, 54(5): 58-62.
- [16] YUAN G A, WANG S G B, ZHANG Y B, et al. Corrosion behavior of Q235B steel and L245 steel in Dalian soil saturated with water[J]. Materials Protection, 2010, 43(5): 61-63.
- [17] SHIRINZADEH D M, MOHAMMADI J, BEHNAMIAN Y, et al. Metallurgical investigations and corrosion behavior of failed weld joint in AISI 1518 low carbon steel pipeline[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 53: 78-96.
- [18] LIU M, WANG J Q, KE W. Effect of temperature and H<sub>2</sub>S concentration on corrosion of X52 pipeline steel in acidic solutions[J]. Materials Science Forum, 2013, 744: 589-596.
- [19] PENG Z, YANG P, PENG P, et al. Experimental study on resistance of L245A-steel pipe to HIC and SSCC in wet H<sub>2</sub>S environment[J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(12): 152-157.
- [20] ZHANG P, CHEN L Q, BIAO Y. Experiment study on safety evaluation of L245A-pipe steel in wet H<sub>2</sub>S environment[J]. Advanced Materials Research, 2010, 156-157: 1603-1608.

(收稿日期: 2016-11-03; 修回日期: 2018-05-26; 编辑: 杜娟)

**基金项目:** 中国石化科技开发部课题“高含硫化氢原油接卸储运加工安全保障研究”, 315093.

**作者简介:** 刘艳, 女, 1987年生, 工程师, 2014年毕业于中国石油大学(华东)动力工程及工程热物理专业, 现主要从事设备腐蚀性安全研究工作。地址: 山东省青岛市崂山区松岭路339号, 266100。电话: 18954253853, Email: liuyan.qday@sinopec.com

### (上接第 0803 页)

- [22] 徐忠. 离心式压缩机原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 178-197.
- XU Z. Principles of centrifugal compressors[M]. Beijing: China Machine Press, 1990: 178-197.
- [23] 熊浩云, 吴长春, 玉德俊. 适用于输气管道运行方案优化的压缩机功率拟合函数[J]. 油气储运, 2017, 36(6): 734-738.
- XIONG H Y, WU C C, YU D J. The fitting function of compress power suitable for optimization of gas pipeline operation scheme[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(6): 734-738.
- [24] 肖绍嵩. 离心压缩机的喘振分析与控制[J]. 压缩机技术, 2002(3): 4-7.
- XIAO S H. Analysis and control for surge of a centrifugal compressor[J]. Compressor Technology, 2002(3): 4-7.
- [25] 杨京渝. 智能变电站高精度时钟同步方法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013: 12-28.
- YANG J Y. The research of high precision clock synchronization system in smart substation[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013: 12-28.

(收稿日期: 2017-04-10; 修回日期: 2017-05-31; 编辑: 李华)

**作者简介:** 唐小江, 男, 1983年生, 工程师, 2015年硕士毕业于中国石油大学(北京)工商管理专业, 现主要从事油气储运设备采购及管理工作。地址: 河北省廊坊市广阳区金光道44号, 065000。电话: 18618217958, Email: tangxiaojiang@petrochina.com.cn