

文章编号:1009-3087(2013)03-0151-07

井下智能节流及智能节流器系统开发

何明格^{1,2},林丽君²,殷国富²,马发明¹,陈 骥¹

(1. 中国石油西南油气田公司 采气工程研究院,四川 广汉 618300;

2. 四川大学 制造科学与工程学院,四川 成都 610065)

摘 要:井下智能工具是支撑智能完井和数字化天然气田发展的一种关键基础设备装置。针对天然气井井下智能节流工艺技术需要,构建了适用于远程控制的井下智能节流体系结构及节流器系统,阐述了井下智能节流控制的算法原理;详细论述了基于 CAN 总线技术的电机控制系统设计、基于 CAD/CAE 的机械系统结构设计、数字化井下温度压力采集与处理以及模块化分层软件设计等智能节流器系统设计的关键技术;最后对整个系统进行了试验运行和分析。结果表明,所研发的智能式井下节流器系统具有实时监测节流参数和远程控制节流的特点,能为井下智能节流工艺技术的实施提供设备支撑,对相关智能化井下工具的研发具有参考意义。

关键词:天然气井;井下节流;节流器;智能控制

中图分类号:TE938

文献标志码:A

Study and Design of an Intelligent Downhole Throttle System

HE Ming-ge^{1,2}, LIN Li-jun², YIN Guo-fu², MA Fa-ming¹, CHEN Ji¹

(1. Gas Production Eng. Research Inst., Southwest Oil & Gas Field Co., PetroChina, Guanghan 618300, China;

2. School of Manufacturing Sci. and Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to improve the traditional throttling technology and promote intelligent downhole throttling technology, many advanced technologies were adopted to build up an intelligent downhole choke system which can realize remote control and monitoring, and a control algorithm for this system was designed. Various key techniques of the choke system were elaborated, such as electric control system design based on CAN bus technology, mechanical structure design based on CAD/CAE, downhole temperature and pressure data collection and processing based on digital information technology and software design based on modular layering method. The control software and operation process of the practical system were tested and analyzed. The result demonstrated that the intelligent downhole throttle system has two main advantages of real-time monitoring and real-time remote control and throttling, which can provide equipment supports for intelligent throttling technology. These methods have some reference for other researches in developments of intelligent downhole tools.

Key words: gas well; downhole throttling; throttle system; intelligent control

近年来,天然气井下节流工艺的成熟运用,推动了井下节流理论的发展^[1]。在国内现有的天然气开采中,普遍使用的是带有节流嘴的活动式和固定式纯机械井下节流器。在智能完井和数字化天然气田技术蓬勃发展的今天^[2-3],传统节流工艺技术在天然气井生产中主要有2大劣势:第一是传统的节

流工艺系统无法实时获取井下压力、温度等相关生产资料,很难及时获知节流器的携液效果如何、滑脱量是多少等情况;这样,井下的生产和安全状况无法直接得到及时反映,也就无法及时制定下一步措施,对天然气井的稳定产生严重的影响。第二是传统的井下节流器无法实时调节节流器嘴径的大小,必须通过关井和采取绳索作业更换不同尺寸的节流嘴来实现不同等级的节流功能,以致无法及时调整天然气井的产量,影响生产进度,增大作业风险。因此,研究井下智能节流方法以及将智能化和自动化技术应用到井下节流工具研发中,将会是推动完井模式

收稿日期:2013-01-25

基金项目:中石油重大专项资助项目(2011E-2402)

作者简介:何明格(1981—),男,博士后。研究方向:智能完井、智能化井下工具等。E-Mail: hminge@petrochina.com.cn

和采气工艺革新的具有战略意义的研究。

在国外,井下节流工艺和节流装置多趋于自动化^[4],井上发出指令遥控处于井下的生产控制装置,从而控制井下流体的流量和流动特性^[5-6]。然而,国外的相关技术还处于封锁阶段;而在国内,井下智能节流技术和流量控制装备也几乎没有相关的研发和应用报道^[7]。随着中国天然气开发的突飞猛进,智能完井系统的优越性已经被业内人士逐渐认识。采用智能式井下工具后,操作人员就能够在地面对天然气产层流入或是流出的流体进行远程控制,进一步优化天然气藏开发方案,使得气藏的开发效果和开发率达到最优^[8]。因此,研究发展中国自己的智能完井技术和智能工具系统显得越发重要和紧迫。

作者将详细阐述井下智能节流方法研究及其智能系统设计开发过程中的关键技术,研发的智能式井下节流系统能够实现在不关井作业的情况下实时调节节流器的嘴径大小,达到节流降压稳产的目的,为实现智能化节流工艺提供设备支撑。通过作者的介绍,以期对国内井下智能工具的研发起到一定的促进作用,推动中国采气工艺技术水平的提升。

1 井下智能节流方法与控制原理

1.1 智能节流方法及体系结构

井下智能节流旨在应用计算机技术、自动化控制技术和现代信号处理技术来实现远程控制井下节流的智能化天然气生产控制工艺技术,主要包括智能节流模式研究和一套能长期置于井下的智能节流器。其中,智能节流模式的构建原理与总体结构框图如图 1 所示。

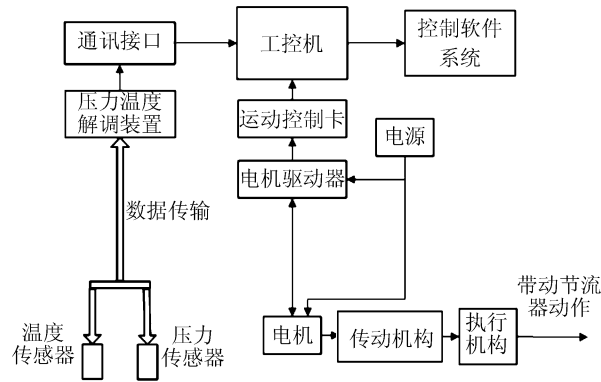


图 1 井下智能节流体系

Fig. 1 Intelligent downhole throttling system

实现井下智能节流的节流器系统主要由上位机和井下机构 2 部分组成,其中井下控制机构主要由

温度/压力传感器、电机、传动机构、执行机构、机械密封机构以及铠装电缆等辅助器件组成,井上机构主要有温度/压力解调装置、电机驱动、运动控制卡、通讯接口、工控机等组成。上位机主要是对采集的压力、温度数据进行分析、存储,为用户合理安排生产提供依据,同时根据气田的情况合理调节节流嘴径的大小。控制软件是基于计算机系统上的数字信号分析处理系统,它应用软件技术来实现数字信号的处理功能。控制软件可以向用户显示井下实时的压力、温度信息以及节流口的开度信息;根据这些信息,分析井下气流的情况,建立节流装置的动态方程,为合理的安排生产提供依据。由于系统压力、温度监测是实时进行的,因此调节后的压力、温度数据会实时、直观反应出来,从而形成闭环的控制系统,实现节流降压的精准控制。图 2 为智能式井下节流器系统的井下结构简图。

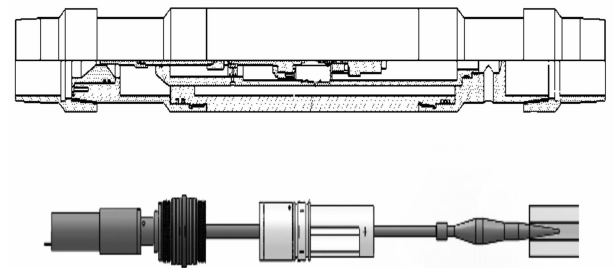


图 2 井下节流器结构

Fig. 2 Structure of downhole throttle

1.2 节流控制原理

在对井下节流装置进行控制时,节流嘴和节流阀座采用锥阀配合的形式,其结构简图如图 3 所示。

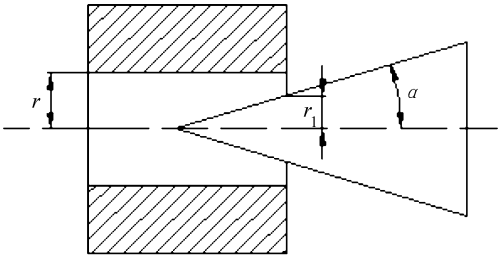


图 3 锥阀配合简图

Fig. 3 Cooperation of cone valve

根据节流有效流通直径计算方法,通过气体临界状态判别公式以及气嘴流动方程^[9](1)~(3),就可以得到相应的节流嘴调节直径计算公式(4)。

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K}{K-1}} \tag{1}$$

当 $\frac{p_2}{p_1} < \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K}{K-1}}$ 时,为临界流,此时通过气嘴的气体流量将达到最大值,既不能继续增大,也不

会降低为零。

$$q_{\max} = \frac{4.066 \times 10^3 p_1 d^3}{\sqrt{r_g T_1 Z_1}} \sqrt{\frac{K}{K-1} \left[\left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{2}{K-1}} - \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}} \right]} \quad (2)$$

当 $\frac{p_2}{p_1} > \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K}{K-1}}$ 时, 为非临界流, 在开采过程中, 有些时候为了方便地控制天然气井的产气量, 而将气嘴设计在非临界状态下工作。

$$q_{\text{sc}} = \frac{4.066 \times 10^3 p_1 d^3}{\sqrt{r_g T_1 Z_1}} \sqrt{\frac{K}{K-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right]} \quad (3)$$

式中: $q_{\max}$ 为临界状态下通过气嘴的天然气体积流量, m^3/d ; q_{sc} 为标准状态下通过气嘴的天然气体积流量, m^3/d ; d 为气嘴开孔直径, mm ; p_1 、 p_2 为分别表示井下气嘴入口与出口处的压力, MPa ; r_g 为天然气的相对密度, 没有因次; T_1 为节流嘴入口处的温度, K ; Z_1 为节流嘴入口的天然气体压缩系数, 没有因次; K 为天然气的绝热系数, 一般为 $1.25 \sim 1.30$ 。

考虑结构设计的实际应用, 主要目的是想通过井下节流器控制节流后气流压力并稳定产量。所以将节流嘴设定在临界状态下工作, 通过经验公式(2), 可以确定节流嘴直径的大小, 得到在临界状态下气嘴的直径公式:

$$d = \frac{\sqrt{q_{\max}}}{\sqrt{4.066 \times 10^3 p_1}} \sqrt{\frac{r_g T_1 Z_1}{\frac{K}{K-1} \left[\left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{2}{K-1}} - \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}} \right]}} \quad (4)$$

利用通流面积相等, 通过固定节流嘴直径 d 与阀座半径 r , 能够得到图3中对应的阀芯半径 r_1 , $r_1 = \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}}$ 。不同的直径 d 就对应不同的 r_1 , 映射于锥阀, 将径向的直径变化转化为轴向的位移 Δs , 如式(5)所示。该锥阀的径向直径变化将成为系统的控制变量调节终端, 以实现节流降压的实时控制。

$$\Delta s = \left| \sqrt{r^2 - \frac{d_2^2}{4}} - \sqrt{r^2 - \frac{d_1^2}{4}} \right| \frac{1}{\tan \alpha} \quad (5)$$

式中: Δs 为竖直方向阀芯位移的变化, mm ; α 为锥形阀的半角, 且 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$; r 为节流阀阀座的内孔半径, mm ; d 为节流气嘴直径, 可以由式(4)得到。

2 井下智能节流器系统开发关键技术

2.1 基于 CAN 总线的电气控制系统设计

电气系统是整个控制系统的核心部分, 电气控

制部分的性能直接影响节流嘴运动的精度和准确性。在设计研发电气控制系统时必须克服3个难点, 其一是井下高温高压的恶劣工作环境; 其二是井下远距离数据的稳定准确传输; 其三是井下空间体积小, 必须研发特殊形状的大功率电机。根据井下的压力和阀芯的有效节流面积和阀芯材料的摩擦系数, 计算推动阀芯运动所需要的扭矩, 根据阀芯运动的转速, 从而选择合适功率的耐高温电机。电机与驱动器相连, 在控制卡的监控下, 精确进行运动, 其运动的参数在软件系统里进行实现和调节。再根据选定的电机来设计合适的传动机构, 从而完成电气控制系统的设计。鉴于节流系统下井较深, 系统采用 CAN 总线协议来传输数据, 从而保证数据传输的准确性^[10-11]。电气系统连接方式如图4所示。由于受井下高温的要求, 电子元器件、控制元件以及电机的设计和制造时都选用的是适合高温的器材。

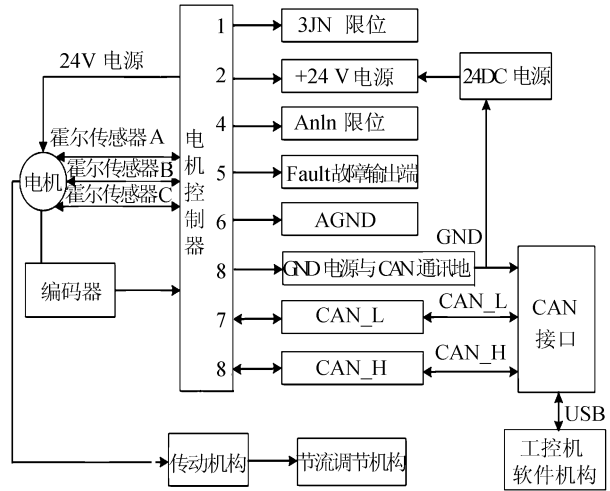


图4 电气控制系统

Fig. 4 Electrical control system

在本系统中, 采用定位闭环控制模式来控制电机, 根据实际生产要求输入节流调节机构的目标位置 (可以是绝对位置也可以是相对位置), 然后驱动电机按照一定的转速运动, 到达设定的目标位置后, 电机自动停止转动。电机定位模式如图5所示。定位控制器、斜率调节器和调速控制器是其核心模块, 各模块中通过内置 PID 算法来实现对电机的精准控制。

通过设计的电气控制系统, 就可以将井下节流器的电机状态参数检测与远程控制实现数字化操作, 提高了节流系统的自动化和智能化水平, 并且具有检测速度快、精度高、可靠性和稳定性好的特点; 同时通过计算机对数据进行全面、客观的采集和存储, 便于工程技术人员对数据进行实时处理和后续分析。

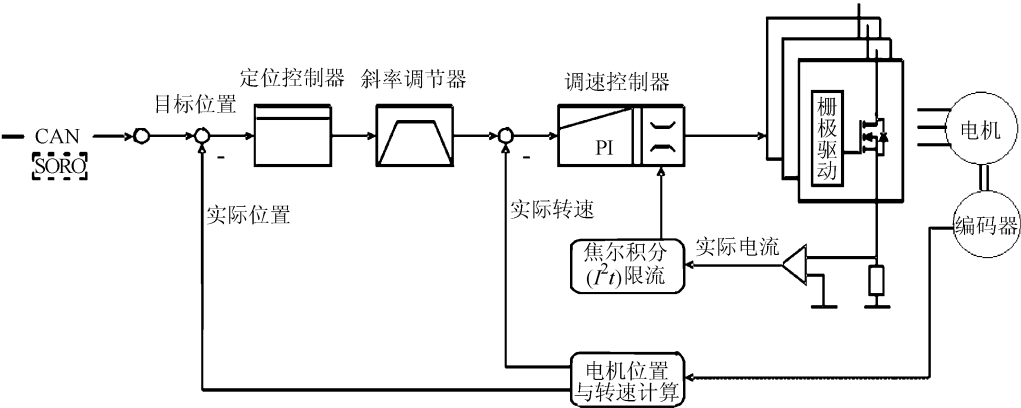


图 5 基于 CAN 总线的电机定位控制模式

Fig. 5 Location control model of motor based on CAN

2.2 基于 CAD/CAE 的系统机械结构设计

CAD(computer aided design)技术和 CAE(computer aided engineering)理论发展到现在都已经相当成熟了,能够满足多个行业的绝大多数条件下的工程和产品结构设计和分析,已成为现代机械设计领域内不可或缺的设计工具^[12]。在本系统中,作者基于 CAD 和 CAE 技术对整个节流器结构进行了设计和分析,通过专业的 CAD 设计软件对系统各组成零件进行了结构设计和装配设计,在此基础上运用专业 CAE 软件对零部件和整体机构进行了静力学、动力学、流体流速场、流体温度场以及流体压力场等方面的分析,利用 CAE 分析结果在 CAD 中来修正和优化零部件的设计,然后再分析,如此反复直到整体结构达到最合理要求,其设计流程如图 6 所示。

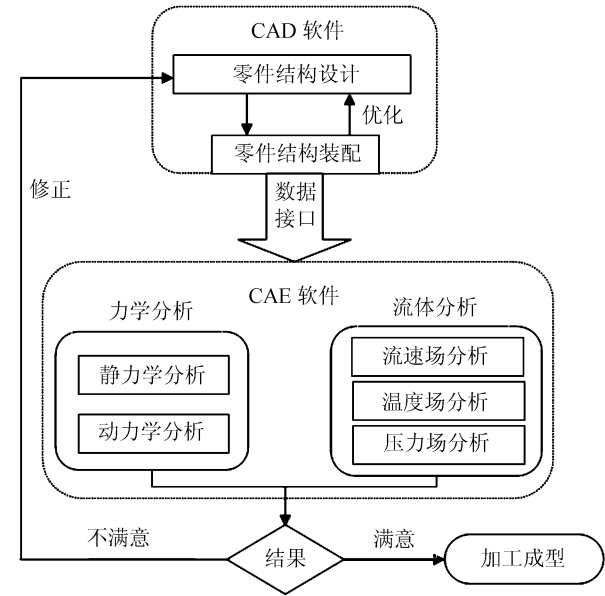


图 6 节流器结构设计流程

Fig. 6 Design flow of throttle structure

图 7 是对智能节流器中某关键装配部分进行的

力学分析,图 8 是节流嘴部分在某一尺寸大小时的流体速度分析,其余多份分析实例在此不再赘述。根据这些分析结果和计算数值,能够快速地帮助研究者完成系统结构的修正和优化,提高整个系统的设计质量并缩短了设计周期。

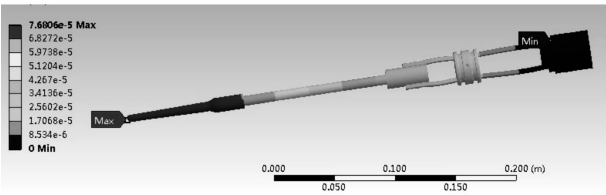


图 7 结构力学分析

Fig. 7 Analysis of structure mechanics

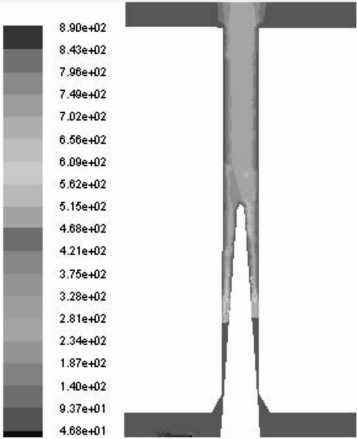


图 8 流体分析

Fig. 8 Fluid analysis of throttle

2.3 数字化井下数据采集与处理技术

电机的运动控制是建立在节流目标是否达到的基础上的,因此,在节流调节机构前后端,设计了 2 个位置处的温度和压力检测子系统,来准确及时监测节流前后的流体状态表征参数,从而为精确的控制节流机构提供客观数据支撑。所以,温度压力数据的准确稳定采集是本项目实施的关键基础技术问

题。

本系统中,地面电源通过单芯电缆向井下传感器供电,各传感器的检测转换电路将传感器检测的模拟量处理成数字信号后进入数据发送过程,当井下仪器检测到单芯电缆上无地面解调仪发送数据时,开始发送数据,如果单芯电缆上有数据信号,当前的发送过程自动终止,数据不会发送到电缆上,同时将本次发送过程自动延迟到下一个发送时刻再重新开始发送操作。从而实现单芯电缆井下数据码多分址竞争传输技术^[13]。

测试信号传输到地面的解调仪后,通过放大和整形后,由硬件电路完成初级解码,然后送入嵌入式系统中完成数字解码和校验,并把原始的测试数据转换为工程制数据,同时把测试数据按照设计的数据格式进行存储和传输。地面解调仪主要包括电源模块、主板模块、信号处理模块、通讯模块等几大模块;其中,通讯模块提供了从井口到监控中心的远程无线数据传输接口;主板模块内部还设计了运行监控模块,在解调仪工作异常时能够自动恢复正常,继

续被中断的测试过程。

利用数字化井下温度压力检测系统,可以随时监测井下的生产动态情况,获取全面、准确的节流前后参数,完善天然气井生产制度并为后期工艺措施的实施提供依据,为天然气井的合理、经济、高效开发起到重要支撑作用。

2.4 基于分层设计法的软件系统设计

软件分析和控制系统模型也是本项目的关键环节,其主要作用是采集、分析井下的温度、压力数据以及电机的相关状态参数、运行参数等实时现场数据,再根据这些参数自动或半自动调节节流装置的动作,建立井下参数与节流口参数的分析模型。

数据库是进行数据分析和软件设计的基础^[14],目前最常用也最主流的数据库是关系型数据库,如Microsoft SQL Server,ORACLE,Sybase,Informix,IBM DB2等,关系型数据库的逻辑结构用实体-关系(Entity-Rerlation,简称E-R)来表示。通过对本系统的数据流以及数据格式进行分析,建立如图9所示的数据逻辑结构模型。

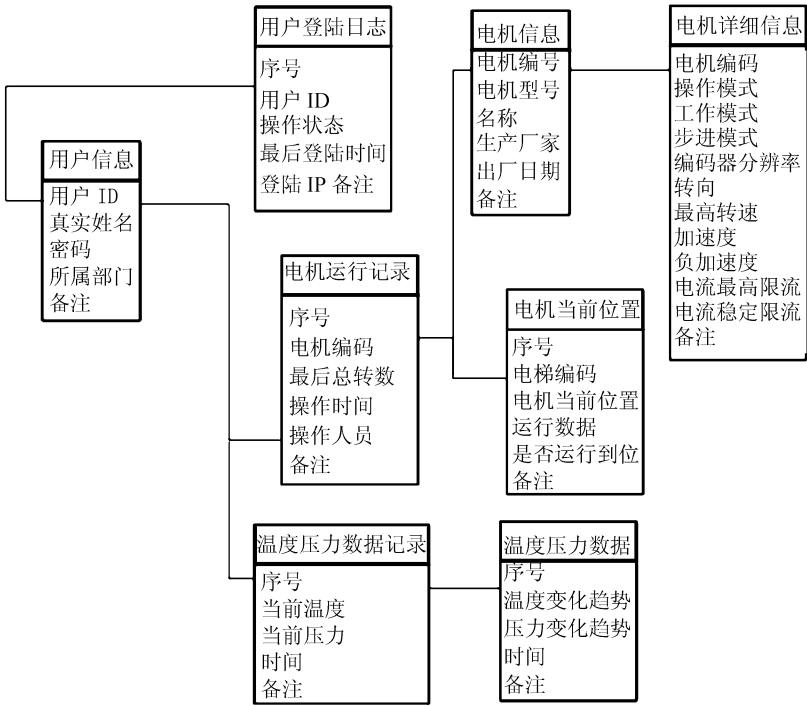


图9 系统数据逻辑结构图

Fig.9 Logical construction of system data

为了便于系统开发和维护,软件系统的升级更新,以及实现通用化、标准化打下良好的基础。结合当前常用的软件开发方法和设计思想,按照自顶向下、逐步细化的原则,将软件系统划分成相对独立、功能单一的若干模块;采用分层设计的方法^[15],从

下到上将本系统分为物理层、链接层、对话层、应用层和用户层,各层之间通过通讯接口互相传输数据和消息。

软件系统采用的是C/S软件体系结构,如图10所示,将数据库服务器和操作系统均安装在工控计

算机上,以 Windows 7 操作系统为运行平台,整个系统软件以 COM 组件或 DLL 动态链接库的形式对电机驱动器进行控制,实现井下电机的信息反馈和控制命令执行。基于以上的设计目标和设计思想,针对项目的总体目标,结合软件系统,将系统的功能模块结构划分如图 11 所示。

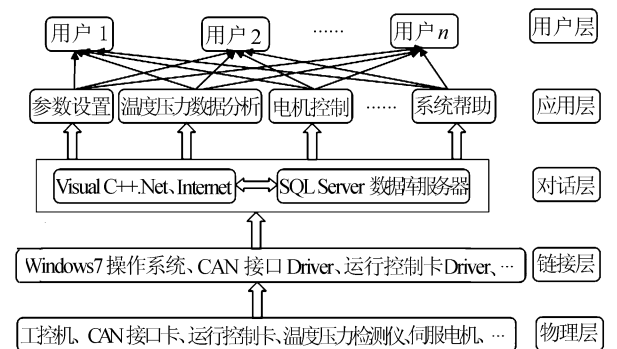


图 10 系统软件架构图

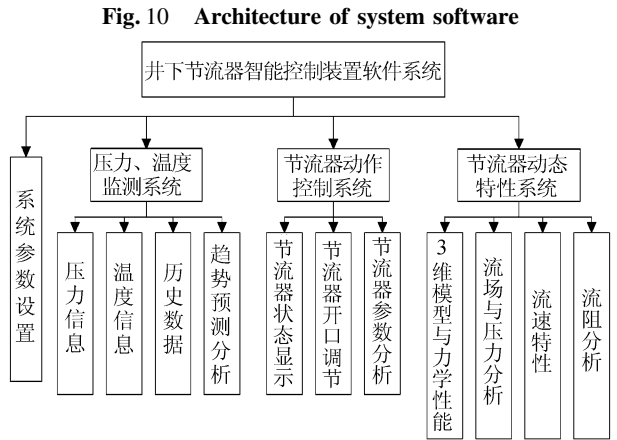


图 11 系统软件模块

Fig. 11 Module of system software

3 系统运行分析

开发的智能式节流器系统目前已完成实验测试,系统的上位机控制软件主界面的功能主要包括菜单栏、工具栏、CAN 通讯参数设置栏、CAN 指令、温度压力检测数据显示、电机运动控制设置、CAN 指令日志以及电机状态参数、状态栏等功能模块。主界面显示的所有系统运动指令日志,都可以进行存储,以使用户分析电机的状态。在主界面上,用户可以随时刷新显示电机的状态参数信息,如工作模式、操作模式、实际转速、工作电流、工作电压、最高转速、定位比例系数、定位积分系数等。

整个系统的控制流程如图 12 所示。电机运动控制部分的功能是控制电机的常用功能,用户直接输入合适的数

据,点击相应按钮就可以使电机按照设置的速度、目标位置(正值为正转:面向电机的输出轴顺时针方向规定为正向,负值为反转)、最高速度等控制参数进行运动;当运行到位的时候,电机自动停止转动。在定位控制时,定位比例系数和定位积分系数的值可能需要调整,因此,软件还依据 PID 控制算法原理为用户设有 PI 和 PD 参数输入的对话框。

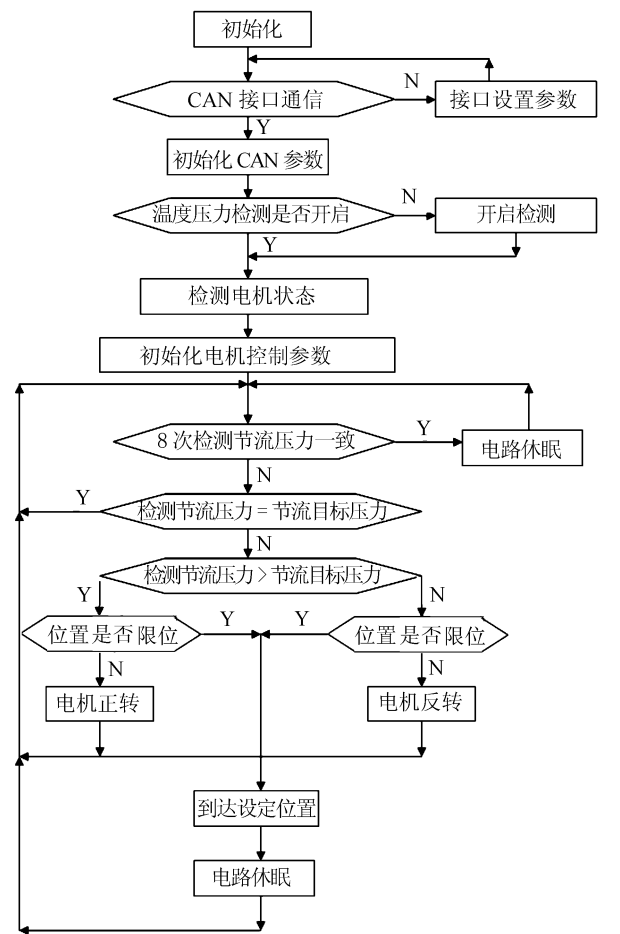


图 12 系统操控流程

Fig. 12 Control flow of intelligent throttling system

通过在实验室的实验验证,该系统的密封性要求、高温高压环境下稳定性要求、精度要求、准确性要求等都基本达到预期的设计目标,表明提出的井下智能节流模式是完全可以实现的。下一步将进行实际生产井的试验。

4 结束语

设计研发的井下智能节流器系统在实验室试验中表现出优良稳定的性能,验证了井下智能节流方式是切实可行的。相比于传统的井下节流工艺技术,主要呈现出以下几大特点:

1) 实时动态监测:利用传感技术和工控机强大的处理能力,采用先进数字处理技术完成对井下传感器检测信号的实时存储、信号滤波、各性能参数计算以及后续分析处理,连续不断地向作业者提供节流前后的压力、温度状况,可以实时有效地做出数据趋势分析。

2) 远程实时控制:应用计算机技术、自动化控制技术、现代信号处理技术建立的智能式井下节流系统,在地面上即可实时调节节流嘴大小,改变了传统关井和采取绳索作业更换节流嘴的方式,节约了大量的人力、物力。

3) 井下智能式节流器系统按照井场生产中的节流理论建立了合理的数据检测方法和控制策略,满足智能完井或数字化天然气田技术中要求的数字化、自动化要求。在系统投入生产后,通过大量运行数据的积累,可以帮助技术人员确定天然气井生产制度,作出天然气藏动态预测,提高天然气资源的利用率,增强天然气井开发安全性,提高工作气量和运行效率,降低运行成本。

4) 通过对井下智能节流器系统的开发设计,能够为其他井下智能工具提供研发思路,提升完井工具的技术水平,为采气工艺技术的改进提供设备支撑。

参考文献:

- [1] Jiang Daijun, Chen Cichang, Wu Chao. Distribution of pressure and temperature in downhole choke of the natural gas well[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2006, 38(6): 47 - 50. [蒋代君, 陈次昌, 伍超. 天然气井下节流嘴前后压力温度分布的数值计算[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2006, 38(6): 47 - 50.]
- [2] Han Danxiu, Li Xiangfang, Fu Lixia. Adaptability study of intelligent well systems in east china sea oil field[J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2008, 13(4): 205 - 213.
- [3] Abdullatif A, Omair A L. Economic evaluation of smart well technology[D]. Texas: Texas A&M University, 2007.
- [4] Gao Changhong, Rajeswaran, Edson Nakagawa. A literature review on smart-well technology[C]//Proceeding of SPE Production and Operations Symposium. Oklahoma, 2007: 62 - 70.
- [5] Meum P, Tndel P, Godhavn J M, et al. Optimization of smart well production through nonlinear model predictive control[C]//Proceeding of SPE Intelligent Energy Conference and

Exhibition. Amsterdam, 2008: 395 - 405.

- [6] Mochizuki S, Saputelli L A, Kabir C S, et al. Real time optimization: Classification and assessment[C]//Proceeding of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, 2004: 1833 - 1846.
- [7] Yu Jinling, Wei Xinfang. New development of intelligent well completion technology in shengli oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 68 - 72. [余金陵, 魏新芳. 胜利油田智能完井技术研究新进展[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 68 - 72.]
- [8] Arashi Ajayi, Michael Konopczynski. A dynamic optimization technique for simulation of multi-zone intelligent well systems in reservoir development[C]//Proceeding of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, SPE, 2003: 1233 - 1239.
- [9] 李士伦. 天然气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [10] Zhang Haitao, Dou Manfeng, Hao Xiaoyu. Research on control system of multi-brushless DC motors based on CAN[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(4): 86 - 89. [张海涛, 窦满峰, 郝晓宇. 基于 CAN 总线的多无刷直流电机控制研究[J]. 测控技术, 2012, 31(4): 86 - 89.]
- [11] He Anchao, Liu Weiguo, Ma Shan. Design of embedded multi-motor monitor system based on CAN bus[J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(7): 1605 - 1067. [贺安超, 刘卫国, 马珊. 基于 CAN 总线的多电机嵌入式监控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(7): 1605 - 1067.]
- [12] Wei Wei, Zhang Lianhong, Xu Yanwei. CAD/CAE integration and stepwise regression model of machine tool mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 187 - 192. [魏巍, 张连洪, 徐彦伟. 机床结构 CAD/CAE 集成分析与逐步回归建模方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 187 - 192.]
- [13] Cao Yulin. Mobility management module designation of wideband code division multiple sub-site communication system[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(16): 3751 - 3754. [曹玉林. 宽带码分多址通讯系统的移动管理模块设计[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(16): 3751 - 3754.]
- [14] 严蔚敏. 数据结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [15] 蔡娥, 许跃敏. 工程应用软件开发技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008.