

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.02.007

复杂工况抽油机变频控制中游梁摆角 高精度测量技术研究

容建刚, 李晓莹*, 申 强, 赵彦明, 袁广民

(西北工业大学 空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对实际油井工程中游梁式抽油机变频调速的控制问题, 为了给其电机速度曲线优化提供高精度的摆角信息, 以达到提高变频控制效率及稳定性的目的, 设计了用于变频控制器的高精度实时游梁摆角测量系统。在复杂工况条件下, 为了提高系统测量精度, 采用了防脉冲干扰的移动平均滤波法以及分段补偿温度漂移等技术; 同时为了有效消除安装误差, 提出了摆角测量系统在线标定方法; 最后对游梁摆角进行了静态及动态试验。实验及研究表明: 在实际抽油机 $-50^{\circ}\sim+50^{\circ}$ 的摆幅内, 系统测量精度达到 $\pm 0.15^{\circ}$, 零偏为 $\pm 0.05^{\circ}$, 且抗振效果非常明显, 该系统能够满足油田恶劣工况下电机控制系统变频优化调速的使用要求。

关键词: 油井工程; 游梁式抽油机; 变频控制; 摆角测量; 移动平均滤波; 零点漂移; 分段补偿

中图分类号: TE933; TH86; TH39 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)02-0156-04

Beam swing angle precision measurement system for pumping unit variable frequency control under complex conditions

RONG Jian-gang, LI Xiao-ying, SHEN Qiang, ZHAO Yan-ming, YUAN Guang-min

(Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at beam-pumping unit variable frequency drive in oil well, a high-precision and real-time beam swing angle measurement system for variable frequency control was designed, which provides high precision swing angle for the motor speed value curve optimization in order to improve the efficiency and stability. Under complex conditions, moving-average filtering for anti-pulse interference and sectional compensation technique were employed to achieve higher measurement accuracy. The swing angle measuring system online calibration method was proposed to eliminate installation errors effectively. Finally, static and dynamic tests of the beam swing angle system were done. The results indicate that system measurement precision of the swing angle can reach $\pm 0.15^{\circ}$ in the range of $-50^{\circ}\sim+50^{\circ}$, zero bias is $\pm 0.05^{\circ}$ with rigorous anti-vibration ability. This measurement system meets variable frequency driver requirements of oilfield under severe conditions.

Key words: oil well; beam-pumping unit; variable frequency control; swing angle measurement; moving-average filtering; zero bias; sectional compensation technique

0 引 言

游梁式抽油机是实际油井工程中采油生产的主要设备。目前的抽油机普遍存在运行效率非常低、电机容易烧毁、电能严重浪费等问题。为了提高抽油机

的采油效率, 有效保护电机和节省能耗, 国内外普遍采用变频驱动技术来有效控制交流电机^[1]。常规变频调速采用的方法是按照预先设置的速度曲线, 通过控制电机频率调节电机转速达到控制驱动功率的目的, 速度曲线是根据理论分析平衡重的运动规律及油井

收稿日期: 2012-10-19

作者简介: 容建刚(1985-), 男, 海南乐东人, 主要从事微惯性系统设计方面的研究. E-mail: rongjiangang5255@163.com

通信联系人: 李晓莹, 女, 副教授, 硕士生导师. E-mail: xiaoy@nwpu.edu.cn

状态而拟合得到的,这种常规处理抽油机上、下冲程速度的方法不可避免地存在控制效率及精度不够高、系统稳定性差的问题,不能满足实际载荷与驱动功率匹配的要求^[2]。

油井井况的变动与抽油机平衡重的摆动位置引起了实际载荷变化,直接反映到抽油机实时运行游梁摆角的变动值。因此,为变频调速控制器提供准确、实时的角度信息,通过对其电机速度曲线进行多点插值的优化处理,可实现对电机的调速能够根据实时井况及频繁变动的载荷进行直接、有效的控制^[3]。目前,常规角度精确测量通常使用的是光电编码器测量法,光电编码器虽然测量精度比较高,能达到 0.05° ,但是该测量系统不仅成本高,而且在油田野外的恶劣工况中使用寿命极短,精度也大打折扣。

因此,本研究基于MEMS倾角计设计游梁摆角测量系统,通过采用抗振动数字滤波、零偏补偿及安装误差在线标定等技术,提高系统的测量精度及可靠性。

1 测量系统总体设计

游梁摆角测量系统总体框架如图1所示。

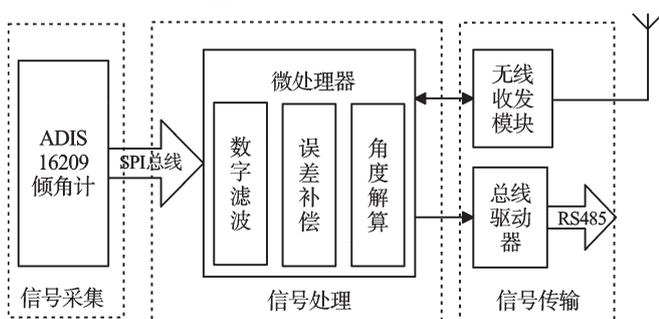


图1 游梁摆角测量系统总体框架

该系统包含3个模块,分别是:数据采集、信息处理、数据传输模块。其中,每个模块的设计都严格按照油田的特殊工作环境选择合适的器件,保证电路的安全可靠^[4]。

信号采集模块选择ADI公司的倾角传感器ADIS16209,其量程为 $\pm 1.7\text{ g}$,分辨率 0.244 mg/LSB ,内置一路12 bit数字温度传感器输出,标准的SPI串行接口可以实现与大多数工业系统设计的简单集成;信息处理模块选用了ST公司基于CORTEX-M3内核的STM32F103T4,其CPU内置了一个单周期硬件乘法器,其乘法运算速度大幅提高,非常适合高精度的姿态测量场合^[5];信号传输模块设计两路接口方式:一路RS485数据总线,通过RS485总线,把摆角测量系统的角度测量信息传输给变频控制器,实现对电机速度曲线的多点插值优化处理,同时变频控制器的启动、在

线标定、休眠等指令也可以通过总线下达给摆角测量系统,实现主变频控制系统对摆角测量系统的实时控制;另外一路接口是无线收发模块,无线收发模块便于试验测试场合。

ADIS16209输出的倾角值及温度均为数字信号,经过SPI总线接口进入微处理器STM32F103T4,处理器对倾角计信号进行数字滤波、温度漂移误差补偿及角度解算等处理,最后通过RS485总线发送给上位机,或通过无线收发模块把信号发送给地面信号接收站。

系统原理样机的实物如图2所示。

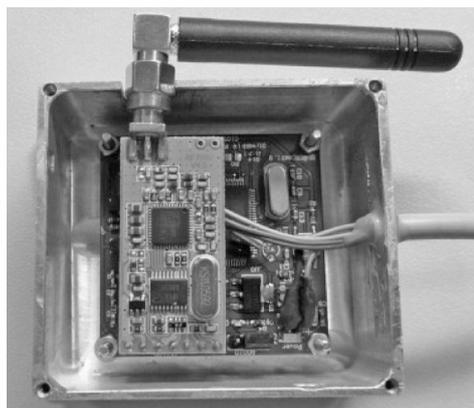


图2 系统原理样机图

2 信号数字滤波

抽油机采用变频驱动时,电磁状态等突变不可避免地会引入脉冲干扰等高频噪声,地面或其他部位振动也会引起脉动干扰,虽然常规的均值滤波可以在一定程度上衰减脉冲干扰,但如果脉冲干扰比较严重,均值滤波之后的剩余干扰值仍然较大^[6]。为了解决这一问题,本研究采用防脉冲干扰移动平均值法进行数字滤波,其算法为:

$$\begin{cases} y(k) = \frac{1}{N-2} \left[\sum_{n=k-N+1}^k x(n) - x(i) - x(j) \right] \\ x(i) = \max[x(k), x(k-1), \dots, x(k-N+1)] \\ x(j) = \min[x(k), x(k-1), \dots, x(k-N+1)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x(n)$ —第 n 次采样时刻的信号输入, $n=k, k-1, \dots, k-N+1$; $y(k)$ —第 k 次采样时刻的滤波输出。

与常规的均值滤波相比,该方法因为去掉了计算第 k 次采样时刻滤波输出所采用的 N 个采样输入数据中的最大值和最小值,可以更好地衰减脉冲干扰,有效提高系统测量精度。

3 温度漂移补偿

油田存在季节及昼夜温度变化范围大等因素,往

往使得摆角测量系统具有较大的温度漂移误差,从而很难满足工程实际要求。为了减小温度漂移的影响,研究者一般采用软件补偿^[7]的方法进行修正,主要有非线性反函数校正方法、神经网络方法、基于最小二乘法原理的多项式拟合方法等。非线性反函数通常不易精确求得,因此,补偿精度不高,应用场合受限。神经网络方法由于对初始值很敏感、容易陷入局部极小值等,其泛化能力很难保证;多项式拟合方法对测量误差补偿具有补偿精度较高,且操作简便^[8-10]。因此,本研究采用多项式拟合方法进行摆角测量系统测量误差的补偿。

3.1 温度漂移实验及分析

摆角测量系统的温度漂移误差主要表现为温度引起的零点漂移,由于温度对零点漂移的影响是比较复杂的,本研究需要通过温度实验反映摆角测量系统零点漂移随温度变化的规律。

实验方法:将摆角测量仪放入温控箱,按照大庆油田实际的温度变化工况在-40℃~50℃范围内,每5℃测量一次零点漂移;在每个温度点上采样10min,再计算平均值,作为该温度下陀螺的零点漂移值。

摆角测量系统在各个温度点对应的零点漂移值如图3所示。

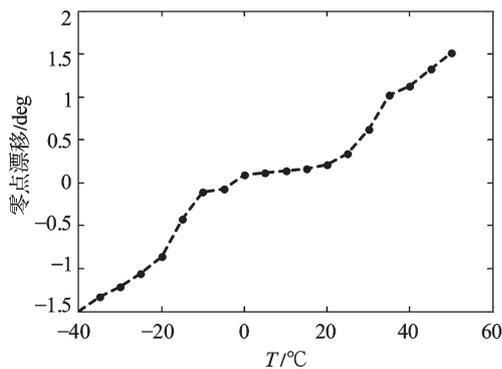


图3 补偿前的零偏误差

图3中:圆点表示实际各温度点的零点漂移值,虚线为拟合曲线。由此看出,摆角测量系统零点漂移随温度漂移呈较复杂的非线性关系。

3.2 补偿模型建立

不同温度引起摆角测量系统的漂移趋势不一样,因此,本研究采用分段多项式拟合的补偿方法,补偿模型如下:

$$\begin{cases} Bias1 = a_1 + b_1T + c_1T^2 + d_1T^3, & -40\text{ }^\circ\text{C} \leq T < -10\text{ }^\circ\text{C} \\ Bias2 = a_2 + b_2T + c_2T^2 + d_2T^3, & -10\text{ }^\circ\text{C} \leq T < +20\text{ }^\circ\text{C} \\ Bias3 = a_3 + b_3T + c_3T^2 + d_3T^3, & +20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq +50\text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Bias1, Bias2, Bias3$ —不同温度段下的零偏补偿因子; a_i, b_i, c_i, d_i —多项式系数, $i=1, 2, 3$ 。

结合3.1节的温度试验数据,本研究采用最小二

乘法,对各温度段的实验数据进行曲线拟合,求出每个温度段多项式的相应系数:

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.133\ 6 & 0.152\ 4 & 0.003\ 3 & 3E-05 \\ 0.077\ 8 & 0.018\ 2 & -0.001\ 8 & 6E-05 \\ 0.460\ 2 & -0.078\ 9 & 0.004\ 1 & -4E-05 \end{bmatrix}$$

最终摆角测量系统补偿后的零漂误差变动范围如图4所示。

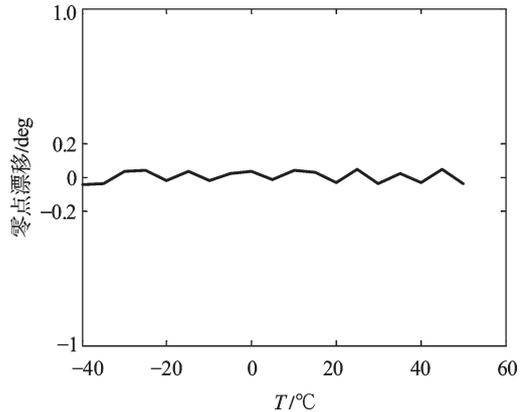


图4 补偿后的零偏误差

由图4可看出:分段多项式拟合方法补偿精度较高,零偏达到 $\pm 0.05^\circ$ 。

4 在线标定技术

系统在游梁上安装时不能保证安装面平整,同时,PCB板的平整度和芯片焊接等引起的传感器初始角度不为零,需要现场在线标定^[11]。系统每次安装在不同抽油机上后,启动标定模式,采集5个周期的游梁摆角值,分别找出5个周期最小摆角值做平均,该平均值即为安装误差值,系统最后输出角度时需要减去该安装误差值,标定完成后系统自动进入正常工作状态。标定的计算公式如下:

$$\begin{cases} \theta_i = \min[\theta(1), \theta(2), \dots, \theta(k)], & i = 1, 2, 3, 4, 5 \\ \theta_{zero} = \frac{1}{5}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\ \theta_{out} = \theta - \theta_{zero} \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_i —第 i 个采样周期中的最小值, θ_{zero} —安装误差值, θ_{out} —标定后输出角度值, θ —未经误差补偿角度值。

5 静态和动态验证试验

本研究对游梁摆角系统进行了静态及动态试验,验证系统的相关性能是否达到设计要求。

为了验证系统精度,本研究用分度台进行系统测试试验。由于抽油机游梁的摆角幅度在 $-50^\circ \sim +50^\circ$ 范围内,测试也在该范围内进行。

静态测试结果如表1所示。表1中的标定结果

表1 倾角测量结果

基准值/(°)	测量值/(°)	误差/(°)
50	50.14	+0.14
45	44.89	-0.11
40	39.91	-0.09
30	30.07	+0.07
20	19.94	-0.06
10	10.02	+0.02
0	-0.01	-0.01
-10	-10.03	-0.03
-20	-19.98	+0.02
-30	-30.05	-0.05
-40	-39.91	+0.09
-45	-45.11	-0.11
-50	-50.15	-0.15

表明,摆角测量系统在 $-50^{\circ}\sim+50^{\circ}$ 之间的误差保持在 $\pm 0.15^{\circ}$ 内,静态精度很高。

为了验证数字滤波方法的抗振动效果,本研究在大庆油田南1-2122-斜310号抽油机上进行现场测试实验,现场测试环境如图5所示。

摆角测量仪安装位置



图5 油田测试现场

测试曲线如图6所示,在重复的变频运动中,测试曲线平滑且运动基本一致,这表明本研究所提出的数

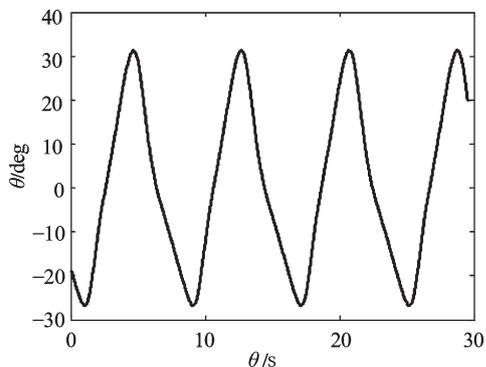


图6 周期变频运动测试曲线

字滤波方法十分有效,能够很好地剔除变频容易引起的振动脉冲干扰。

6 结束语

为了给游梁式抽油机的变频控制器提供准确、实时的角度信息,以达到提高其变频控制效率及稳定性的目的,本研究开发了用于抽油机变频控制器的高精度、实时游梁摆角测量系统,采用了防脉冲干扰移动平均值法进行数字滤波处理,并对摆角测量系统的温度漂移及角度安装误差作出了补偿,极大地提高了系统的游梁摆角测量精度及可靠性。

经在大庆油田工程实践的实际应用证明,该高精度、实时游梁摆角测量系统是一种性能优越、效果良好的游梁摆角测量系统。

本研究对于相关工程机械的变频控制领域具有一定的借鉴意义及拓展价值。

参考文献(References):

- [1] 张斌,庞鹏,万云峰,等.抽油机变频调速装置[J].油气田地面工程,2006,25(7):771.
- [2] 田晰,程建国.曳引式抽油机运行曲线的优化设计[J].石油机械,2011,39(1):43-46.
- [3] 杨耕,罗应力.电机与运动控制系统[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [4] 韩宏,吴嘉澍.基于加速度计的数字式倾角仪的设计[J].传感器技术,2005,24(4):48-50.
- [5] 李宁.基于MDK的STM32处理器开发应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.10.
- [6] 刘光临,易建钢,严开勇.复合数字滤波算法及其在风机在线监测系统中的应用[J].噪声与振动控制,2006(6):47-49.
- [7] 郑永红,彭世镠,靳映霞,等.消除环境温度对倾角传感器性能影响的方法[J].压电与声光,2008,30(1):33-35.
- [8] 阚保强,张安堂,王建业,等.传感器信号非线性的软件补偿[J].空军工程大学学报:自然科学版,2005,6(2):25-27.
- [9] 李德胜,赵新民.一种传感器非线性反函数校正方法[J].仪器仪表学报,2001,12(2):215-218.
- [10] 曾喆昭,竺炜,王耀南.一种基于正交神经网络算法的传感器误差补偿方法[J].传感技术学报,2007,20(3):536-539.
- [11] 薛峰,苑伟政,常洪龙,等.基于MEMS传感器的起重机吊钩运动实时监控[J].机电工程,2012,29(8):911-915.

[编辑:罗向阳]