

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.10.015

螺杆桩机动力头双电机模糊控制策略研究*

吴龙正, 马 飞, 廖 哲

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

摘要:针对螺杆桩机动力头双电机转速不均的问题,对桩机钻进控制系统的结构和工作特点进行了研究,对基于模糊控制理论的钻进系统控制策略进行了归纳。提出了一种基于模糊控制的双电机模型,设置了合理的系统参数,利用 Simulink 对螺杆桩机电机进行了仿真分析,获得了双电机转速的特性曲线;对采用了模糊控制器的螺杆桩机钻进控制系统进行了实地试验,并测试了动力头双电机的转速。研究表明:基于模糊控制策略的双电机最大转速差明显减小,显著改善了动力头双电机转速不均的问题;实地测试结果验证了提出的模糊控制策略的正确性;该研究为螺杆桩机钻进控制方案的设计提供了理论技术支持和有效实践指导。

关键词:螺杆桩机;双电机;模糊控制;Simulink;试验

中图分类号:TH-39;TD633

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)10-1083-06

Fuzzy control strategy of double motor for screw pile machine

WU Long-zheng, MA Fei, LIAO Zhe

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problem of uneven speed of the double motor of the screw pile machine, the structure and working characteristics of the pile drilling control system were studied. The control strategy of the drilling system based on fuzzy control theory was summarized. System parameters were reasonably set. The simulation of the screw pile motor was carried out by Simulink, and the characteristic curve of the double motor speed was obtained. Field test was carried out on the screw pile machine drilling control system with fuzzy controller, and the speed of the power head double motor was tested. The results indicate that the maximum speed difference of the two motors based on fuzzy control strategy is significantly reduced, which significantly improves the problem of uneven speed of the dual motor of the power head. The field test results verify the correctness of the fuzzy control strategy. This study provides theoretical technical support and effective practical guidance for the design of drilling control scheme for screw pile machine.

Key words: screw pile machine; double motor; fuzzy control; Simulink; test

0 引 言

螺杆桩机以高承载力、地质适应性强、环保、经济性好等特点被广泛应用于铁路等施工领域^[1]。

自动送钻技术是螺杆桩机的一项关键技术^[2-3]。该技术在国外的钻机较早地获得了广泛的应用,如科普柯公司生产的 C 型钻车,采用集成网络控制系统,提高了钻机的自动化水平,并因此获得了巨大的经济效益^[4-5]。

针对国内螺杆桩机的自动送钻领域这片空白,为了增强产品的竞争力、改善工人劳动强度和工程质量,螺杆桩机的自动钻进技术研究具有现实意义。谢丹彤^[6]采用了分数阶 PID 控制提高卷扬回转系统的定位控制性能,从时域角度结合 ITSE 指标对分数阶 PID 控制器参数进行了最优整定;胡均平等^[7]对长螺旋钻机动力头使用了模糊控制器,基于 V/f 变频调速模型建立了动力头仿真系统,并在仿真过程中确定了模糊控制器的量化因子及比例因子的最佳初值;娄

收稿日期:2019-03-11

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0802900)

作者简介:吴龙正(1995-),男,湖南娄底人,硕士研究生,主要从事工程机械控制方面的研究。E-mail:17610889572@163.com

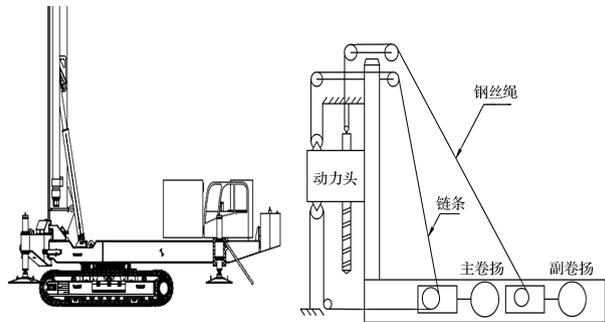
磊^[8]等针对旋挖钻机桅杆举升控制系统多变量、不确定及非线性等特征,提出了一种模糊控制策略来控制桅杆举升油缸的双缸同步;朱振新^[9]等针对旋挖钻机施工参数非线性、时变的特点,采用基于转速感应的极限负荷控制策略及单神经元 PID 控制算法,并利用仿真模型对动力系统功率匹配进行了仿真分析,为匹配方案的实现提供了理论依据和指导;张政华^[10]等根据长螺旋自动送钻系统,制定了实现转速最大化的自动送钻控制的内环 PID 控制算法和外环模糊控制算法,并通过仿真分析得到了适合自动送钻系统的控制参数,获得了良好的控制品质。

上述文献的研究主要集中在钻进系统控制策略的仿真分析上,缺乏实地试验的验证。因此,研究钻进系统的控制策略,并进行实地试验显得尤其重要。

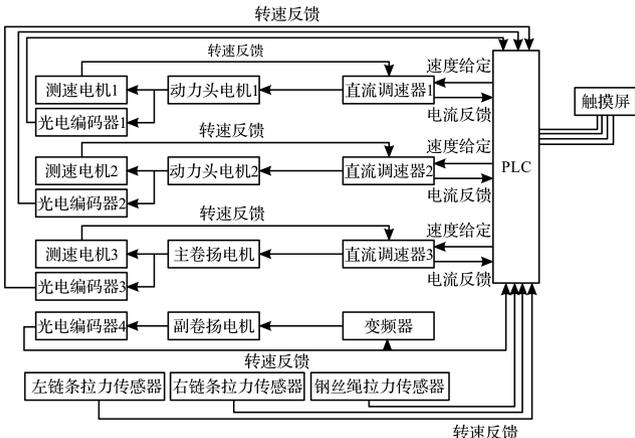
针对某自主研发的高铁螺杆桩机动力头转速不均的问题,本文提出基于模糊控制的电机控制策略,对动力头双电机及其控制方案进行仿真,最后对螺杆桩机钻进控制系统进行实地试验。

1 螺杆桩机钻进控制系统

螺杆桩机钻进控制系统示意图如图 1 所示。



(a) 螺杆桩机传动系统示意图



(b) 钻进系统结构图

图 1 螺杆桩钻进控制系统示意图

由图 1 可以看出:

(1) 螺杆桩机传动系统有动力头—钻杆系统、主

卷扬—链条系统和副卷扬—钢丝绳系统。其中:动力头由 2 台电机并联,控制钻杆的旋转;主卷扬通过链条控制动力头上下运行,提供加压力及拔桩力;副卷扬通过钢丝绳吊在钻杆顶端,保持钻杆的垂直。在实际操作中,动力头及主卷扬不会频繁换向,但经常带载启动,因此,具有良好的调速特性、较高的启制动转矩和过载能力的直流电动机在动力头及主卷扬上得到了广泛应用^[11-12]。

(2) 螺杆桩机钻进系统由 3 台直流电动机及直流调速器、1 台交流电动机及变频器、3 台测速电机、4 个光电编码器、1 台 PLC 及 1 台触摸屏组成。PLC 分别控制动力头、主卷扬及副卷扬电机。动力头电机通过模糊规则匹配 2 台电机的转速,输出至钻杆。钻杆转速反馈给主卷扬电机,主卷扬电机转速反馈至副卷扬电机,副卷扬电机根据钢丝绳拉力决定副卷扬电机最终转速。触摸屏通过总线采集各个电机的电流及转速信号,在内部使用模糊控制规则,通过宏命令运算处理,从而调节各电机的转速。

主、副卷扬电机的转速根据电流的变化而变化,通过控制钻进速度以达到适应地基土参数的目的,以提高螺杆桩机的协调性能。

2 螺杆桩机动力头电机数学模型

反馈控制闭环直流调速系统的开环传递函数为^[13]:

$$W(s) = \frac{K_p K_s \alpha}{C_e} \frac{1}{(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)} \quad (1)$$

根据输入参数,闭环直流调速系统的传递函数为:

$$W_{cl}(s) = \frac{\frac{K_p K_s}{C_e}}{1 + \frac{(T_s s + 1)(T_m T_l s^2 + T_m s + 1)}{K_p K_s \alpha}} = \frac{K_p K_s}{C_e (1 + K)} \frac{1}{\frac{T_m T_l T_s s^3}{1 + K} + \frac{T_m (T_l + T_s) s^2}{1 + K} + \frac{T_m + T_s}{1 + K} s + 1} \quad (2)$$

式中: K_s —动力头电机比例系数; K_p —运算放大器的放大系数; K —放大系数; T_l —电枢回路电磁时间常数; T_m —电力拖动系统机电时间常数; T_s —整流电路平均失控时间; C_e —电动机的电动势系; α —额定电压与额定转速的比值。

为了达到转速和电流同时负反馈的目的,可以在

系统中同时引入转速负反馈和电流负反馈,通过两个不同的调节器分别调节转速和电流。设 $I_{DL} = 0$,两个调节器嵌套联接组成双闭环直流调速系统。

电流环的控制对象是双惯性型的,若想将其校正为典型 I 型系统,应采用 PI 型电流调节器^[14-15]。

其传递函数为:

$$W_{ACR}(s) = \frac{K_i(\tau_i s + 1)}{\tau_i s} \quad (3)$$

式中: K_i —电流调节器的比例系数; τ_i —电流调节器的超前时间常数。

$$W_{ASR}(s) = \frac{K_n(\tau_n s + 1)}{\tau_n s} \quad (4)$$

式中: K_n —速度调节器的比例系数; τ_n —速度调节器的超前时间常数。

3 螺杆桩机动力头电机仿真

动力头电机参数如表 1 所示。

表 1 动力头电机参数

项目	参数
功率 P/kW	90
额定转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 000
额定电压 U/V	440
额定电流 I/A	227

动力头测速电机参数如表 2 所示。

表 2 动力头测速电机参数

项目	参数
功率 P/W	22
额定转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	2 000
输出电压 U/V	110
电阻 R/Ω	0.093

动力头电机模型参数如表 3 所示。

表 3 动力头电机模型参数及其数值

参数	数值
动力头电机比例系数 K_s	44
整流电路平均失控时间 T_s/s	1.67×10^{-3}
电阻 R/Ω	0.093
电动机的电动势系数 $C_e/(\text{V} \cdot \text{min} \cdot \text{r}^{-1})$	0.419
放大系数 K	≥ 16.6
$\alpha/(\text{V} \cdot \text{min} \cdot \text{r}^{-1})$	0.055
β	0.274
运算放大器的放大系数 K_p	≥ 1.9
电枢回路电磁时间常数 T_l/s	0.03
电力拖动系统机电时间常数 T_m/s	1.3×10^{-3}
电流调节器的超前时间常数 τ_i/s	0.036
速度调节器的比例系数 K_n	482
电流调节器的超前时间常数 τ_n/s	0.087

3.1 动力头电机模糊控制器

主从电机速度的偏差会造成动力头电机的电流持续上升,最终有烧毁电机的危险。本研究将动力头电机模型进行封装。原双电机驱动方式使用主从式,即只调节主电机的控制电压,副电机根据主电机的速度反馈确定转速。

改进后的模糊控制电机仿真模型如图 2 所示。

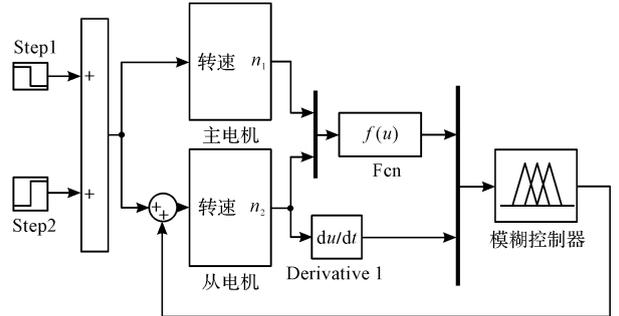


图 2 模糊控制动力头双电机仿真模型

图 2 中:

$f(u)$ 为主从电机转速比,将主从电机速比和从电机转速变化率作为控制量输入模糊控制器,输出量为从电机的控制量。

动力头双电机在工作过程中要尽可能保持主从电机的速度一致。因此,模糊控制器采用二维模糊控制器,控制器的输入为主电机转速 a 与副电机转速 b 的比 ei ,和副电机的速度变化率 ec ;输出为副电机调整转速比 i 。则有:

$$ei(t) = \frac{a(t)}{b(t)} \quad (5)$$

$$ec(t) = \frac{d[b(t)]}{dt} \quad (6)$$

式中: a —主电机转速; b —副电机转速。

PLC 通过模拟量获取被控制的动力头主从电机的转速,其比值可以反应主从电机转速的关系。由于大部分时间内动力头电机的转速在设定转速附近变化,一般认为主电机转速不变,此时经过模糊化得到的模糊变量主从电机转速比 ei 和副电机转速变化趋势 ec 可以推导出副电机调整转速比 i ,此时 bi 为副电机转速的控制量。

将主从电机转速比 ei 分为 3 个模糊集:SS(副电机速度小于主电机速度)、MS(副电机速度等于主电机速度)、LS(副电机速度大于主电机速度)。选用三角形隶属函数可以实现主从电机转速比 ei 的模糊化,即:

$$\mu_{ei} = \begin{cases} \mu_{SS}(x) = 1 - x & 0 \leq x \leq 1 \\ \mu_{MS}(x) = \begin{cases} x & 0 \leq x \leq 1 \\ 2 - x & 1 \leq x \leq 2 \end{cases} \\ \mu_{LS}(x) = x - 1 & 1 \leq x \leq 2 \end{cases} \quad (7)$$

式中： x —主从电机转速比。

同理，将副电机转速变化趋势 ec 分为 3 个模糊集：N(负)、Z(零)、P(正)。

选用三角形隶属函数可以实现副电机转速变化趋势 ec 的模糊化，即：

$$\mu_{ec} = \begin{cases} \mu_N(y) = \frac{-y}{20} & -20 \leq y \leq 0 \\ \mu_Z(y) = \begin{cases} \frac{y+20}{20} & -20 \leq y \leq 0 \\ \frac{20-y}{20} & 0 \leq y \leq 20 \end{cases} & \\ \mu_P(y) = \frac{y}{20} & 0 \leq y \leq 20 \end{cases} \quad (8)$$

式中： y —副电机转速变化。

将副电机调速转速比 i 分为 5 个模糊集：VS(很慢)、S(慢)、M(维持)、L(快)、VL(很快)。

选用三角形隶属度函数实现副电机调整转速比 i 的模糊化，即：

$$\mu_i = \begin{cases} \mu_{VS}(z) = -1 - z & -2 \leq z \leq -1 \\ \mu_S(z) = \begin{cases} z + 2 & -2 \leq z \leq -1 \\ -z & -1 \leq z \leq 0 \end{cases} & \\ \mu_M(z) = \begin{cases} z + 1 & -1 \leq z \leq 0 \\ 1 - z & 0 \leq z \leq -1 \end{cases} & \\ \mu_L(z) = \begin{cases} z & 0 \leq z \leq 1 \\ 2 - z & 1 \leq z \leq 2 \end{cases} & \\ \mu_{VL}(z) = z - 1 & 1 \leq z \leq 2 \end{cases} \quad (9)$$

式中： z —副电机调速转速比。

根据人的操作经验，动力头双电机模糊控制器控制规则的基本思想是：

当误差比较大时，控制量的变化应尽快使误差迅速减小；当误差比较小时，除了要减小误差，还要合理的控制系统的超调量以达到控制系统的稳定性要求。当系统稳定时， ei 接近于 MS， ec 接近于 N， i 接近于 M。

根据动力头双电机模糊控制器的输入变量 ei 和 ec 的变化趋势，可以建立如下的控制规则。例如：当副电机速度大于主电机速度(SS)，当副电机转速变化趋势 ec 为负(N)时，说明动力头主副电机的速度差保持着一直减小的趋势，所以可以保持这个趋势，因此副电机的调整转速比 i 处于维持(M)状态；当副电机转速变化趋势 ec 为 Z(零)时，说明动力头主副电机的转速差没有改变的趋势，所以为了使主副电机的转速差减小，需要使副电机的调整转速比 i 处于慢(S)状态；当副电机转速变化趋势 ec 为 P(正)时，说明动力头主副

电机的转速差有增大的趋势，所以此时要迅速减小副电机的速度，因此需要使副电机的调整转速比 i 处于很慢(VS)状态。

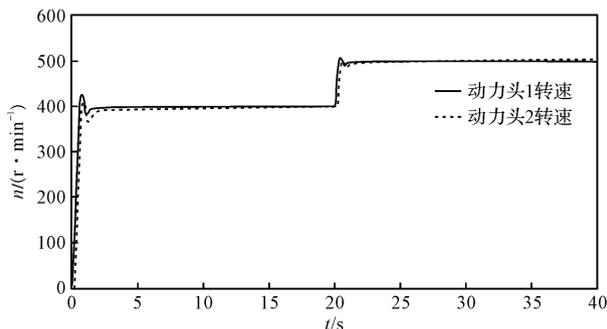
以此类推，采取上述的推理方式，可得到一系列的控制规则，最后可以得到 9 条模糊规则，整理为模糊控制规则表，如表 4 所示。

表 4 动力头双电机模糊控制规则表

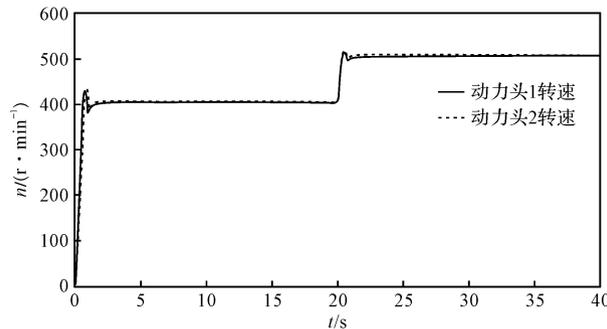
i	ei		
	SS	MS	LS
N	M	L	VL
ec	Z	S	M
	P	VS	S

3.2 双电机模型仿真结果

主从式和模糊控制动力头双电机转速曲线如图 3 所示。



(a) 主从式动力头转速曲线



(b) 模糊控制动力头转速曲线

图 3 两种控制方式的动力头转速曲线

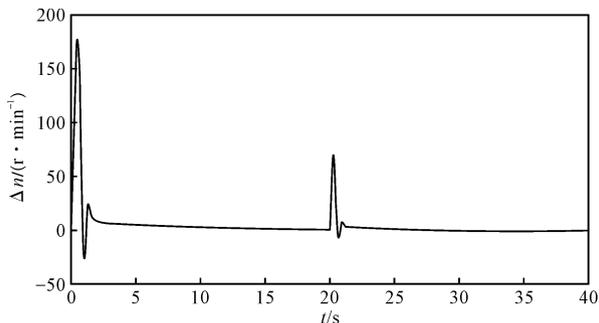
分析图 3 可以得出：

仿真时由于负载变化，两种控制方式的主电机在 0 s 时转速为 400 r/min，20 s 时时转速为 500 r/min。

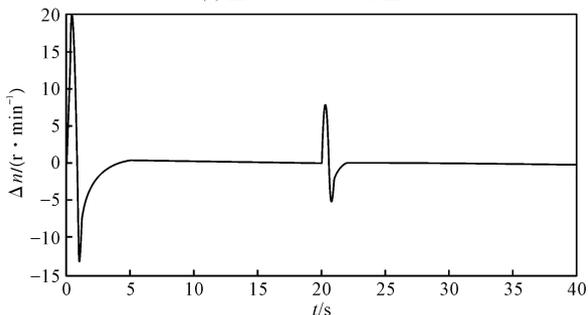
两种控制方式的动力头转速差曲线如图 4 所示。

分析图 4 可以得出：

由于电机转速会有一定滞后作用，主从式双电机在加速时会有较大的速度差，最高转速差达 175 r/min，在 2 s 左右提速时候的转速差约 25 r/min。实际应用中，在遇到突加负载，如地质条件改变、撞击鹅卵石等工况时，会对电机造成较大冲击，不利于电机



(a) 主从式动力头转速差曲线



(b) 模糊控制动力头转速差曲线

图 4 两种控制方式的动力头转速差曲线

的寿命及螺杆桩机的安全。因此,有必要使用模糊规则控制电机。

与主从式控制相比,模糊控制动力头双电机同步性有较大提升,0 s 时转速差由 175 r/min 缩小至 20 r/min;在 2 s 左右提速过程中,最大速度差由 25 r/min 缩小至 8 r/min。

4 螺杆桩机电机试验

4.1 试验方案

该试验对象是某厂生产的 ZNL6026 螺杆桩机。长螺旋钻机采用履带式底盘,机身与支架由液压马达连接,可旋转 ±180°,最大钻深 26 m,采用 8 t 绞车作为卷扬,许用加载力 600 kN,许用拔桩力 660 kN。安装钻杆并将钻杆插入地层,钻杆每转一圈,下降一个螺距。

本研究将螺杆桩机的全部控制元件集成在两个电器柜中,1 号电器柜安装总闸、软启动器、变频器;2 号电器柜安装 PLC、直流调速器、继电器、稳压电源等元件。

在螺杆桩机在钻进过程中,本研究记录所钻孔的土壤参数以及钻孔消耗时间并利用多通道采集仪 LMS 采集动力头电机的运行参数。

在进行试验时,除螺杆桩机电器柜中控制元件外,本研究还使用了其他仪器,如表 5 所示。

表 5 试验用仪器

仪器	用途
隔离器	4 mA ~ 20 mA 信号转 0 ~ 5 V 信号
西门子 LMS 型号多通道数据采集仪	采集模拟量数据
威纶通 TP6070IP 型号触摸屏	采集数字量数据处理数据
屏西门子 S7 - 300PLC	采集数字量数据处理数据
笔记本电脑	存储数据

根据控制方案,本研究选择欧陆 590P 型直流调速器作为直流电机的驱动器,动力头电机调速器选取型号为 590P/380A,主卷扬电机调速器选取型号为 590P/165A;选取艾默生 SP3402 型变频器作为副卷扬电机驱动器。

上述电机分别配套一个编码器将转速信号发送给 PLC。

位于螺杆桩机顶端的钢丝绳滑轮上安装了钢丝绳拉力传感器,携带钢丝绳拉力的电信号同样会发送给 PLC。

将上述信号最终存入电脑,就完成了数据的记录。

4.2 试验结果

桩机动力头双电机转速曲线如图 5 所示。

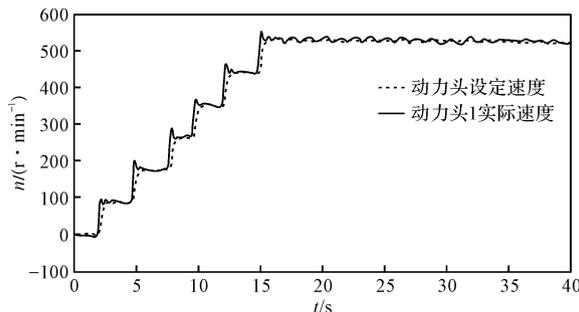


图 5 螺杆桩机动力头双电机转速

分析图 5 可以得出:

在螺杆桩机钻杆入土后,操作者在 20 s 内进行了 6 次提速,将动力头转速提升 520 r/min,螺杆桩机动力头电机实际转速良好跟随设定转速,人工监控动力头直流调速器电流没有急速增长。动力头运行平稳、噪音小,可以稳定钻进粉土层。可见,试验的动态性能良好,验证了仿真模型的正确性。

螺杆桩机动力头双电机转速差如图 6 所示。

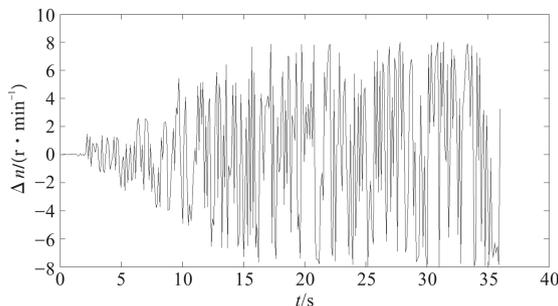


图 6 螺杆桩机动力头双电机转速差

从图 6 可以看出:两电机转速差小于 8 r/min。

通过实地试验与仿真结果的对比可以得出:采用模糊控制算法的螺杆桩机钻进系统,改善了动力头双电机输出转速不均的问题。

5 结束语

针对螺杆桩机钻进系统动力头双电机存在转速不同步导致齿轮受力不均的问题,本文采用了以直流调速器控制动力头、主卷扬电机,变频器控制副卷扬电机的自动钻进系统,设计了螺杆桩机钻进系统的控制方案。具体过程及结论如下:

(1)提出了基于模糊控制理论的电机控制策略,通过 Simulink 对螺杆桩机动力头双电机控制策略进行了仿真,仿真结果表明:0 s 时转速差由 175 r/min 缩小至 20 r/min,在 2 s 左右提速过程中,最大速度差由 25 r/min 缩小至 8 r/min;基于模糊控制的双电机同步性更好,拥有更好的动态性能;

(2)对改进后的螺杆桩机钻进控制系统进行了实地试验,试验结果表明:双电机转速差小于 8 r/min;试验结果不仅验证了仿真模型的正确性,还显著改善了动力头双电机转速不均的问题。

参考文献 (References):

- [1] 郭海艳. JUS180 履带式螺杆桩机的研发[J]. 科技传播, 2014(5):110-111.
- [2] 张连山. 国外自动送钻装置的现状与发展[J]. 国外石油机械, 1996(1):1-8.

- [3] 沈林,丁勤,尹飞. 提高数控钻床在管板钻孔工序中质量和效率[J]. 压力容器, 2017, 34(11):956-960.
- [4] LIU Shao-tang, ZHAO Rang-qian, XU Cheng-gong. GPS surveying in coal field geological exploration [J]. **Equipment for Geotechnical Engineering**, 2008, 9(5):29-32.
- [5] SEWARD D W, SCOTT J N, DIXON R, et al. The automation of piling rig positioning using satellite GPS [J]. **Automation in Construction**, 1997, 6(3):229-240.
- [6] 谢丹彤. 基于联合仿真的旋挖钻机钻孔作业系统性能分析[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院, 2013.
- [7] 胡俊平,代建龙,刘成沛,等. 自调整模糊控制在动力头变频调速中的应用[J]. 测控技术, 2013, 32(9):74-76.
- [8] 娄磊,马宏远,陈君辉. 模糊控制在旋挖钻机桅杆油缸同步控制上的应用[J]. 液压与气动, 2013(6):81-83.
- [9] 张政华. 液压长螺旋钻机自动送钻系统研究[D]. 长沙:中南大学机械工程学院, 2013.
- [10] 朱振新. 旋挖钻机动力系统功率匹配控制策略及试验研究[D]. 湖南:中南大学机械工程学院, 2014.
- [11] 杨婷. 无刷直流电机软特性调速系统的研究[D]. 北京:中国石油大学机械与储运工程学院, 2007.
- [12] 牛海清,谢运祥. 无刷直流电动机及其控制技术的发展[J]. 微电机:伺服技术, 2002(5):36-38.
- [13] 刘翔,曹萍,陈致远,等. 直流调速系统与 Matlab 仿真[J]. 电气传动, 2013, 43(4):12-16.
- [14] 韩胜明. 纯电动汽车双电机耦合动力传动系统控制策略研究[D]. 四川:西华大学机械工程学院, 2015.
- [15] 杨晨娜. 多电机同步控制方式的研究[J]. 工程技术, 2011(12):99-100.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

吴龙正,马飞,廖哲. 螺杆桩机动力头双电机模糊控制策略研究[J]. 机电工程, 2019, 36(10):1083-1088.

WU Long-zheng, MA Fei, LIAO Zhe. Fuzzy control strategy of double motor for screw pile machine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(10):1083-1088.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>