

矿用提升机变频调速系统自适应鲁棒控制设计方法

王一点,曹成刚,黄碧云

(青海省环境地质勘查局,青海 西宁 810008)

摘要:目前常用的矿用提升机变频调速系统具有非线性特点,跟踪性能难以达到要求,不具备参数自适应收敛性,控制鲁棒性较差。为此,提出一种矿用提升机变频调速系统自适应鲁棒控制设计方法,利用模糊控制理论,调整控制参数,同时分析工频差值、变频差值以及差值,设置模糊子集,根据模糊运算确定伸缩因子。引入积分,减小工频差值与伸缩因子,监测矿用提升机变频调速系统中驱动变频器的运行状态。对继电器的常闭触头进行自主控制,结合采样、积分与微分方式实现鲁棒控制。实验结果表明:该方法能够保证调速工作过程的闭环稳定性,提高控制鲁棒性能,与传统方法相比跟踪性能更好,选择的参数收敛性更能满足要求。

关键词:矿用提升机;变频调速系统;自适应控制;鲁棒控制;控制设计

中图分类号:TP273+.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)04-0229-04

Adaptive Robust Control Design Method for Frequency Conversion Speed Regulation System of Mine Hoist

WANG Yidian, CAO Chenggang, HUANG Biyun

(Qinghai Bureau of Environmental Geology Exploration, Xining 810008, China)

Abstract: To solve the problems such as poor tracking performance in failure to meet the requirements, the unavailability of parameter adaptive convergence and poor control robustness due to the non-linear characteristics of current frequency conversion speed regulation system of mine hoist, a design method of adaptive robust control for the frequency conversion speed regulation system of mine hoists is advanced. The fuzzy control theory is used to adjust the control parameters, and meanwhile the power frequency difference, the frequency conversion difference and the difference are analyzed and fuzzy subset is set. The expansion factor is determined according to fuzzy operation. Integration is introduced to reduce the power frequency difference and expansion factor, and the operation status of the drive inverter in the frequency conversion speed regulation system of the mine hoist is monitored. Autonomous control of the normally closed contacts of the relay is conducted, and robot control is realized by combining sampling, integration and differentiation. Experimental results show that designed method can ensure the closed-loop stability of the speed regulation process and improve the robustness of control, and compared with the traditional method, the tracking performance is better, and the selected parameters can meet the requirements with more satisfaction.

Keywords: mine hoist; frequency conversion speed regulation system; adaptive control; robust control; control design

0 引言

在矿用提升机变频调速系统中,控制转子串联电阻能够通过启动转矩对异步电机转子电阻进行串联,并在调速过程中逐渐切掉多段电阻,完成控制。提升机在启动开始时瞬时电流较大。为了避免烧坏电机,使矿用提升机具有较好的启动性能与调速性能,需要对矿用提升机变频调速系统的鲁棒性进行自适应控制^[1-2]。

目前已有的矿用提升机变频调速系统鲁棒控制方法,主要利用变论域模糊控制原理,设计矿用提升机变频调速系统的调速控制律,运用直接反馈线性化方法来设计提升机转矩二阶传递函数,再通过函数整定方法对所设计的调速控制律与转矩二阶传递函数进行整定,根据整定结果对矿用提升机变频调速系统进行控制。该方法虽然实现了

矿用提升机变频调速系统的鲁棒性控制,但控制时延长、控制鲁棒性效果差^[3]。相关学者提出了其他系统自适应鲁棒控制方法,并对变频调速系统中的转矩数据与运行数据进行了挖掘,根据挖掘结果建立了矿用提升机变频调速系统鲁棒控制模型,通过控制模型实现了控制,但此方法实现过程较为复杂^[4]。

基于此,本文提出了一种矿用提升机变频调速系统自适应鲁棒控制设计方法。

1 变频调速系统伸缩因子的模糊确定

随着矿用提升机加载速度的提升,伸缩因子的误差逐渐增大。为了减小误差,在确定矿用提升机变频调速系统的伸缩因子时,需要利用模糊控制方法,利用插值器增加插值点,改变模糊控制规则^[5]。伸缩因子的确定将会影

响矿用提升机变频调速系统自适应鲁棒控制精度,因此伸缩因子的选择非常关键^[6]。为了保证系统的变频调速功能能够充分发挥作用,本文设计了模糊自适应控制方法,该方法不仅可以提升系统的变频调速能力,最为重要的是可以有效确定矿用提升机变频调速系统的伸缩因子。矿用提升机变频调速系统控制参数如图1所示。

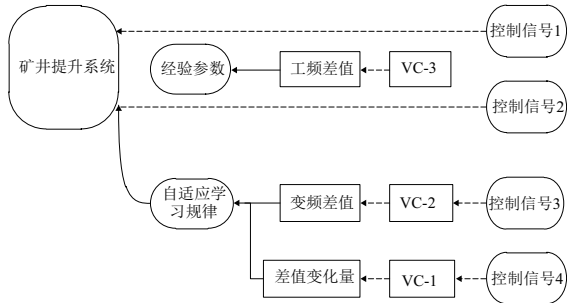


图1 矿用提升机变频调速系统控制参数

根据图1可知,矿用提升机变频调速系统的控制参数,包括提升机的工频差值、变频差值以及差值变化量。以上的控制参数需要以工频差与变频差变化率作为伸缩因子的修正参数进行输入,通过模糊矩阵表对以上参数进行调整,调整时根据模糊规则来实现。调整完成后,进行伸缩因子的确定,首先选择指数型伸缩因子:

$$\alpha = 1 - \lambda k^2 \quad (\lambda \in (0, 1), k > 0) \quad (1)$$

式中: α 表示指数型伸缩因子; λ 表示共频差值; k 表示变频差变化率。在输入工频差值 λ 与变频差变化率 k 时,需要采用模糊控制进行伸缩变换,将工频差值 λ 变换为 $\lambda_i(x_i)$,变频差变化率变换为 $k_i(x_i)$,其中 i 表示变换系数; x 表示输入变量。将变换后的 $k_i(x_i)$ 与 $\lambda_i(x_i)$ 进行初始化输出^[7]。

将输出的两者通过模糊控制设定成模糊子集,输入到矿用提升机变频调速系统中。由于矿用提升机在启动开始时,启动速度值小于变频调速值,因此将设定的模糊子集以差值变换方式应用到矿用提升机的初始阶段,采用自适应控制器对提升机初始阶段进行控制,控制后矿用提升机变频调速系统的伸缩因子为

$$\alpha_j(x_j) \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中 j 表示伸缩因子的控制系数。通过确定的伸缩因子,采用最大、最小合成法进行模糊运算。经过模糊运算后,得到的伸缩隶属度为 $u_j(\alpha)$ 。采用质心法对伸缩隶属度进行去模糊化操作,将去模糊化后的参数在矿用提升机变频调速系统中进行输出^[8]。

通过以上确定的伸缩因子,可提升矿用提升机变频调速系统的自适应控制鲁棒性。

2 矿用提升机变频调速系统自适应鲁棒控制

将以上确定的伸缩因子以及各种控制参数进行参数整定,再根据整定结果对矿用提升机变频调速系统进行控制。对确定的伸缩因子以及控制参数进行整定的目的,是提升变频调速系统的鲁棒性能,使控制效果达到预期标

准。在进行参数整定时,伸缩因子所起的控制作用较为显著,在确定的伸缩因子基础上,将控制参数中的工频值与变频差值引入,选出最适合的参数或者设定一个较为合理的参数,对伸缩因子、变频差值测试,获得最适合控制的数值,选出或者设定最适合的参数。这两种引入方式均可达到参数整定的目的^[9]。

为了保证矿用提升机变频调速系统的稳定性,消除控制参数由于变频而引起的余差,需要引入积分,减小工频差值与伸缩因子,减小幅度控制在20%左右。引入的积分由于存在一定的过渡滞后,会影响控制参数的整定。为了解决这一问题,在引入积分时,不要采用直接引入方式,需要对积分进行适当抑制,避免造成高频分量的增加。对积分进行适当抑制后,控制参数将趋于稳定,矿用提升机变频调速系统的控制鲁棒性能更好。

参数整定完成后,计算矿用提升机变频调速系统的转矩。矿用提升机在运行时,其静张力差随着负载的增加而逐渐降低。静张力差的降低会使矿用提升机变频调速系统的启动性能、调速性能下降,这时变频调速系统的鲁棒性将会受到抑制。为了提升变频调速系统的启动性能与调速性能,需要计算出矿用提升机的转矩,转矩的计算公式为

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} \rho V^2 R_c l \quad (3)$$

式中: F 为矿用提升机的转矩; ρ 为矿石密度; V^2 为变频调速系统的运行速度; R_c 为矿用提升机的转矩系数; l 为矿用提升机的负载。

通过计算得到的矿用提升机转矩可了解当前变频调速系统的负载情况,针对负载的变化情况调整矿用提升机的静张力差,从而实现提升变频调速系统启动性能与调速性能的目的。

矿用提升机的转矩计算完成后,针对变频调速系统的鲁棒性进行控制。矿用提升机控制运行如图2所示。

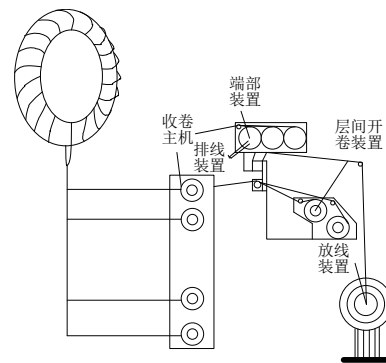


图2 矿用提升机控制运行过程

根据图2可知,在控制过程中,需要监测矿用提升机的提升和下放动作,通过以上控制动作可了解矿用提升机变频调速系统的鲁棒性能,然后将采集到的运行数据,包括矿用提升机的工频数据、变频数据、调速速度等传输给控制器,控制器接收到变频调速系统的调速命令后,会向矿用提升机发出命令请求,通过变频调速系统对矿用提升机驱动,由此完成了矿用提升机变频调速系统的控制响应。接下来根据控制算法实现矿用提升机变频调速系统

的自适应鲁棒控制。

采样控制是矿用提升机变频调速系统自适应鲁棒控制的主要控制方式。鲁棒控制中的被控变量具有高度离散的特点,输出变频系统的调速变化量需要通过控制算法获得。在保证矿用提升机鲁棒性的基础上,根据被控变量的离散特性,从积分、微分角度消除各个控制参数之间的关联性,使调速系统中各类控制参数的非鲁棒性降到最低,消除矿用提升机对鲁棒控制产生的时变干扰,并对矿用提升机调速系统的稳定性与干扰性进行补偿与控制,来提升系统的自适应鲁棒性。通过对矿用提升机变频调速系统的控制参数整定、转矩计算、控制响应与控制算法的设计,最终实现了矿用提升机变频调速系统自适应鲁棒控制。

3 实验研究

为了验证本文提出的矿用提升机变频调速系统自适应鲁棒控制设计方法控制效果,选用本文方法与传统基于变论域自适应控制的矿用提升机变频调速系统鲁棒控制方法和基于数据挖掘的矿用提升机变频调速系统自适应鲁棒控制方法进行实验对比。

矿用提升机变频调速系统的工作模式主要包括固定角度调速控制和随机跟踪调速控制,因此本文选用这两种方式进行对比实验。

3.1 固定角度调速控制

分析矿用提升机固定角度调速控制的跟踪角度,得到的期望指令角度如图3所示。

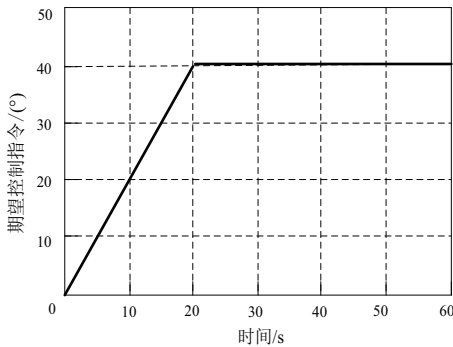


图3 期望指令角度

根据图3可知,期望设计的矿用提升机角度为40°,当矿用提升机的变频调速角度达到40°后,调速角度保持稳定,从20s以后,矿用提升机的变频调速角度稳定在40°。

同时使用本文控制方法和传统控制方法进行实验对比,得到的跟踪控制误差实验结果如图4所示。

观察图4可知,本文提出的跟踪控制方法在初始阶段存在跟踪控制误差,控制误差峰值最高点为0.23°,但是很快得到收敛。而传统的变论域自适应控制产生的跟踪控制误差较大,上下产生极大的波动,正向最大误差达到0.5°,负向最大误差达到0.39°。当控制时间为1.25s时进行第一次收敛;当控制时间为3s时,出现第二次波动,直到4.3s才开始进行第二次收敛。传统的数据挖掘控制方法正向最大误差达到0.47°,负向最大误差达到0.39°。当控制时间为1.25s时进行第一次收敛,当控制时间为3s

时,出现第二次波动,直到4.2s才开始进行第二次收敛。由此可见,传统的控制方法波动误差大,收敛性能很难达到要求,而本文方法能够快速实现收敛,具有很好的收敛性,对于选择自适应参数有积极的意义。

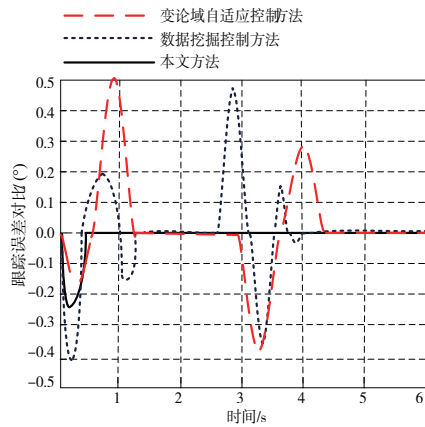


图4 跟踪控制误差实验结果

在固定角度下对多个参数进行估计,得到的参数估计结果如图5所示。

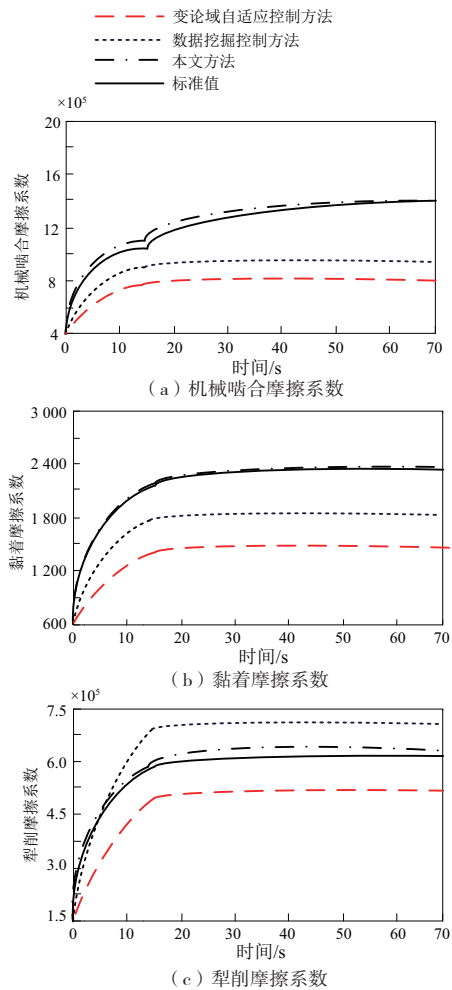


图5 参数估计实验结果

根据图5可知,本文得出的方法对于参数的估计能力要优于传统方法,在估计未知摩擦参数时,本文控制方法

具有更好的收敛性,符合自适应参数的鲁棒控制有效性规律。而传统的控制方法在估算矿用提升机变频调速系统未知参数时,始终与实际参数结果相差过大,参数估计能力难以满足用户要求,容易造成控制结果不准确。

固定角度调速控制输入电压实验结果如图 6 所示。

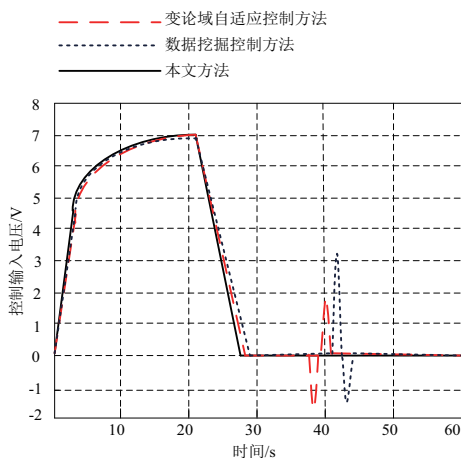


图 6 固定角度调速控制输入电压实验结果

根据图 6 的固定角度调速控制输入电压实验结果可知,本文提出的控制方法的补偿控制输入和总控制输入不会产生较大的差距,方法具有很好的非线性动态能力,不需要输入过多的鲁棒控制电压。虽然受到冲击电压的影响存在干扰,内部的控制输入电压很快增大,但是可以在短时间趋于平稳。而传统的控制方法在受到冲击电压影响后,产生了极大的波动,波动时间超过 5s。因此,本文提出的控制方法具有更强的控制性能,具备的鲁棒反馈控制能力可以很好地防止外部的干扰。虽然传统控制方法产生的跟踪误差相对较小,但是产生的超调过大,虽然进入稳态,但是出现多次振荡,控制输入能力无法达到要求。

3.2 随机跟踪控制

为更好地验证本文设计的方法是否具备动态跟踪能力,将 3 种控制方法切换成正弦指令,在正弦模式下期望的矿用提升机变频调速系统的期望指令如图 7 所示。

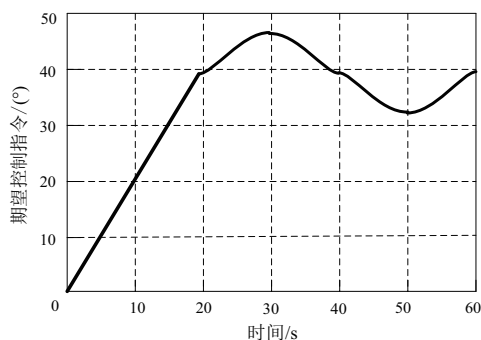


图 7 正弦模式下期望指令

随机调速控制输入电压实验结果如图 8 所示。

由图 8 可知,在随机调速控制过程中,本文控制方法控制误差小于传统控制方法,相比较于固定角度调速控制,本文控制方法的跟踪控制性能比传统控制方法性能更好。

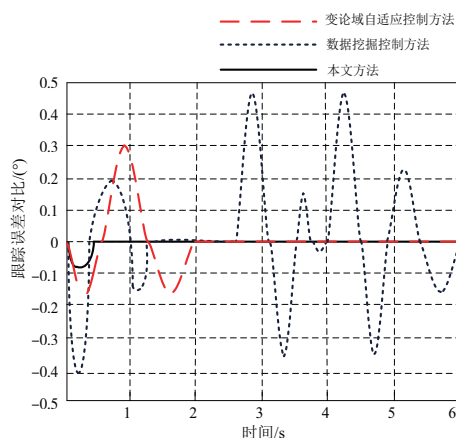


图 8 随机调速控制误差实验结果

综上所述,本文提出的矿用提升机变频调速系统自适应鲁棒控制设计方法具有非线性模型特点,同时可以很好地解决由于非线性特点造成的随机控制不稳定和不匹配的问题。与传统方法相比,本文的方法对于矿用提升机变频调速系统有更好的参考价值,更适用于实际应用。

4 结语

本文提出了矿用提升机变频调速系统自适应鲁棒控制设计方法,通过采用模糊控制理论确定了伸缩因子,实现了提升机变频调速系统的自主调速与鲁棒控制,在保证调速系统稳定性的基础上提升了矿用提升机的自适应鲁棒控制效果,为矿用提升机的调速、变速、加速等打下基础。本文控制方法仍然存在一些问题,主要体现在伸缩因子的确定过程不完善,在以后的工作中,将针对此项进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 王福忠,李媛媛,韩素敏,等. 基于模糊综合评价的矿用提升机电传动系统状态评估[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(9):166-172.
- [2] 杨莺,叶学龙,叶超. 超深矿井提升机制动盘热性能分析与优化[J]. 工程设计学报,2019,26(1):47-55.
- [3] 董芳,董煜. 电厂辅机变频调速系统的滑模自适应鲁棒控制[J]. 热力发电,2020,49(4):138-143.
- [4] 何常玉,施光林,郭秦阳,等. 阀控非对称液压缸位置控制系统自适应鲁棒控制策略[J]. 上海交通大学学报,2019,53(2):209-216.
- [5] 栗中华. 关于矿用提升机电控系统的优化改进研究[J]. 机械管理开发,2019,34(7):223-224,227.
- [6] 高强,朱玉川,王睿,等. 高速开关阀控电液位置伺服系统自适应鲁棒控制[J]. 航空动力学报,2019,34(2):503-512.
- [7] 李建峰. 矿井提升机变频调速控制系统的优化改造[J]. 机械管理开发,2019,34(8):191-192,223.
- [8] 刘海富. 矿用提升机控制系统设计分析[J]. 机械管理开发,2019,34(3):208-210.
- [9] 毛继兵,黄志高,俞越中,等. GIL 运输专用机具驱动与制动系统设计研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(4):196-200.

收稿日期:2021-01-02