

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.02.019

模糊自适应 PID 控制器在磁粉制动器加载系统中的应用研究*

薛 超,白国振*

(上海理工大学 机械工程学院,上海 200090)

摘要:针对磁粉制动器在扭矩加载时,由于磁阻的磁滞、磁通的饱和性和磁导率的非恒定性,造成的加载精度低和系统响应滞后等问题,对磁粉制动器加载控制方法进行了研究,使用 Matlab/Simulink 设计了一种模糊自适应 PID 控制器,利用模糊规则在线对 PID 参数进行了优化调整,并对蜗轮蜗杆减速器扭矩加载系统中磁粉制动器的加载特性进行了仿真和实验。研究表明,模糊自适应 PID 控制器在磁粉制动器加载系统的控制中,大大提高了磁粉制动器的加载精度,且明显减小了系统响应的时间,表现出了良好的自适应性和稳定性,能够用来实现对磁粉制动器加载系统的有效控制。

关键词:模糊自适应 PID 控制器;磁粉制动器;扭矩加载;蜗轮蜗杆减速器

中图分类号:TP273;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)02-0217-04

Application and research of self-adaptive fuzzy PID controller in magnetic powder brake loading system

XUE Chao, BAI Guo-zhen

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aiming at problems of the magnetic powder brake in torque loading system, such as the loading precision is not high enough and the response time is not fast enough, because of the hysteresis of magnetic resistance, saturation of magnetic flux, Non constancy of magnetic conductivity. The self-adaptive fuzzy PID controller is studied by matlab/simulink that applicants in worm reducer loading system. It is used to optimize the parameters of PID online. By the test, the results indicate that the self-adaptive fuzzy PID controller can improve the loading precision and reduce response time of the system. It also has good adaptability and stability, and can be used to realize effective control of the loading system.

Key words: self-adaptive fuzzy PID controller; magnetic powder brake; loading; worm reducer

0 引 言

磁粉制动器加载是常用的机械运动加载方式,具有响应速度快、结构简单、无污染、无噪音、无冲击振动、节约能源等优点,被广泛应用于有关卷取加工行业中的张力控制,以及传动机械的转矩转速测试系统中的加载和制动等。

由于磁阻的磁滞、磁通的饱和性和磁导率的非恒定性,使得磁粉制动器的加载精度和动态响应速度不够。为了解决该问题,本研究通过建立磁粉制动器的数学模型,运用 Simulink 仿真器和 Fuzzy 工具箱对模糊自适应 PID 控制器进行设计和仿真,并通过实验研究磁粉制动器在蜗轮蜗杆减速器扭矩加载系统中的加载特性,得出磁粉制动器输入激磁电流和输出制动扭矩的静态特性、动态特性和跟踪加载的特性关系,为更好地应用

收稿日期:2015-08-20

基金项目:上海市自然科学基金资助项目(12ZR1420700)

作者简介:薛超(1990-),男,山东淄博人,主要从事机电一体化、测试与控制方面的研究. E-mail:791197502@qq.com

通信联系人:白国振,男,副教授. E-mail:bguozhen@163.com

和控制磁粉制动器,提高其加载精度和性能提供参考。

1 磁粉制动器原理

磁粉制动器利用磁粉磁化后之间的相互作用及摩擦来产生制动扭矩,所产生的制动扭矩在其额定范围内可任意调节。该实验选用线圈静止型磁粉制动器,其内部结构如图 1 所示。

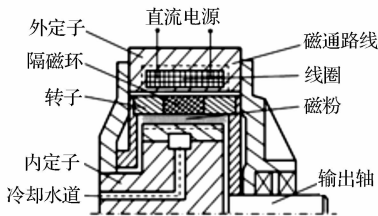


图 1 线圈静止型磁粉制动器内部结构图

当激磁线圈不通电时,工作间隙和储粉腔中的磁粉在离心力作用下被压附在主动转子的内壁上,磁粉不产生“磁粉链”,转子与定子处于脱离状态,输出轴不产生扭矩。当激磁线圈中通入激磁电流时,所产生的磁通穿过转子使磁粉被磁化形成“磁粉链”,分别与定子和转子表面相连接。当转子带动输出轴转动时,必须剪切“磁粉链”并克服磁粉之间和磁粉与定子、转子表面之间的摩擦力,这些摩擦力的总和构成了阻碍主动转子转动的制动扭矩^[1]。

输入的激磁电流越大,磁粉产生的磁场强度越大,输出轴输出的制动扭矩也越大。当磁粉制动器长时间以较大输出扭矩加载时,磁粉制动器会有明显发热现象,进而影响输出轴输出扭矩。因此,内、外定子都设有冷却水道,以吸收制动时产生的摩擦热能,从而将温度控制在一定的范围内^[2]。

磁粉所传递的力矩是由内定子外径、工作宽度、气隙大小、粉末中的磁通密度、磁粉的磁性(导磁率、填充密度、粉末的形状等)等因素决定。忽略磁粉粘滞阻力和离心力产生的附加扭矩,由莫尔库仑原理可得磁粉制动器输出扭矩和输入电流之间的关系如下式所示:^[3]

$$T = \frac{\pi D_m^2 N^2 I^2 L_m}{4\mu_o \mu_s S_\delta^2 \left(\frac{\mu_s S_\delta}{l_\delta} + \frac{\mu_i S_i}{l_i} \right)^2} \quad (1)$$

式中: T —扭矩, N —线圈匝数, μ_i —铁芯磁导率, S_δ —间隙及磁粉截面积, S_i —铁芯截面积, l_δ —磁路中间隙宽, l_i —磁路中铁芯长度, D_m —制动器线圈的外径, I —电流强度, L_m —磁粉制动器线圈宽度, μ_s —磁粉磁导率, μ_o —气隙磁导率。

由式(1)可得,除电流外,其他物理量可认为不变。对于铁氧体材料来说,其磁导率不是一个常数,而与磁场强度和频率有关。由于磁阻的磁滞、磁通的饱和性以及磁导率的时变性,使得磁粉制动器的加载电

流和制动扭矩之间无法保持某一恒定的函数关系,呈现出较强的非线性和不确定性。当输入电流线性增大和线性减小时,实际的力矩加载特性曲线如图 2 所示。

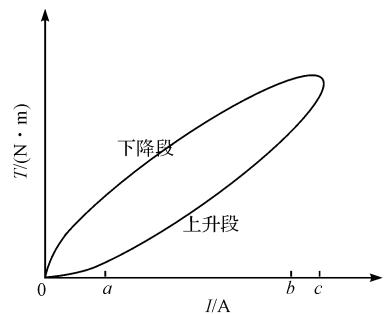


图 2 磁粉制动器电流与扭矩的关系曲线

可以看到,当输入电流在 $0 \sim a$ 段为非线性段,在 $a \sim b$ 段近似为线性段,在 $b \sim c$ 段为饱和段。

2 加载系统实验平台

磁粉制动器加载系统实验平台结构图如图 3 所示。

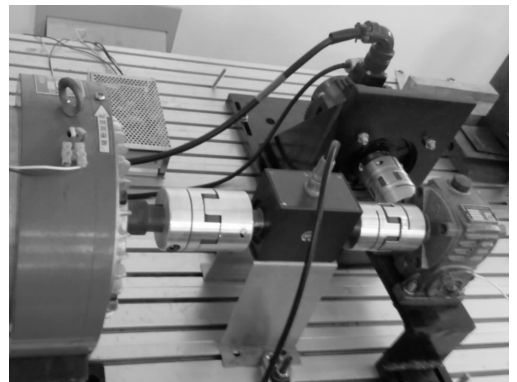


图 3 加载系统实验平台结构图

主要部件从左端起依次为:磁粉制动器及其功率放大器、扭矩传感器、蜗轮蜗杆减速器、伺服电机,各部件之间采用梅花联轴器连接。其中磁粉制动器为某品牌 FZ10F 型号,激磁电流 $0 \sim 2.4 \text{ A}$,额定扭矩 50 Nm ,滑差功率 300 kW ,扭矩传感器量程为 $\pm 20 \text{ Nm}$,蜗轮蜗杆减速器减速比为 $10 : 1$ 。

3 模糊自适应 PID 控制器的设计

模糊控制是一种基于规则的控制,它直接采用语言型控制规则,不需要事先知道对象精确的数学模型,具有系统响应快、超调小、过渡过程时间短等优点^[4]。

模糊自适应 PID 控制器以误差 e 和误差变化率 ec 作为输入,将 PID 控制器的 3 个参数比例系数 k_p 、积分系数 k_i 和微分系数 k_d 作为输出。本研究利用模糊规则在线对 PID 参数进行优化调整,从而调节系统的性能和误差,其结构原理图如图 4 所示。^[5-7]

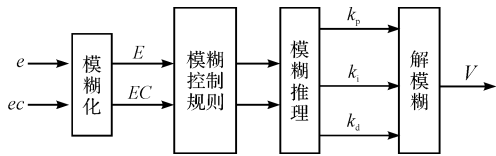


图4 模糊自适应PID控制器结构示意图

3.1 模糊控制规则库和隶属函数的设计

模糊逻辑控制器选用工程上最常用的线性控制规则库,如表1所示。

表1 线性模糊控制规则库

U \ EC	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO
NM	NB	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO
NS	NM	NM	NM	NM	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZO	PM	PM	PM	PM
PM	ZO	ZO	PM	PB	PB	PB	PB
PB	ZO	ZO	PM	PB	PB	PB	PB

标准三角形隶属函数 $[-3, 3]$,如图5所示。笔者将模糊化后的输入变量 E 、 EC 分为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大7个模糊集合,分别表示为表1中的NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB。^[8]

模糊自适应PID控制器控制性能如图7所示。曲线1为传统PID控制,曲线1的参数为: $k_p = 1.2, k_i = 0.2, k_d = 0$;曲线2为基本模糊PID控制曲线,2的参数为: $k_p = 1.55, k_i = 0.2, k_d = 0.01$;曲线3为模糊自

适应PID控制,曲线3的参数为: $k_p = 1.95, k_i = 0.1, k_d = 0.01$ 。对比可以看出,在单位阶跃输入条件下,模糊自适应PID控制器的超调量更小,相应速度更快。

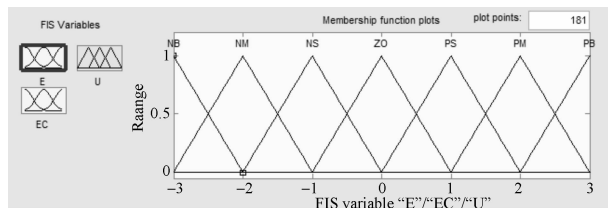


图5 标准三角形隶属函数

3.2 模糊自适应PID控制器仿真模型的建立

本研究在 Matlab/Simulink 仿真环境下建立的模糊自适应PID控制器模型和磁粉制动器仿真模型如图6所示。笔者先运行模糊推理系统,将模糊推理系统 fuzzpid.fis 调入内存中,再运行所设计模糊自适应PID控制器系统模型程序^[9]。

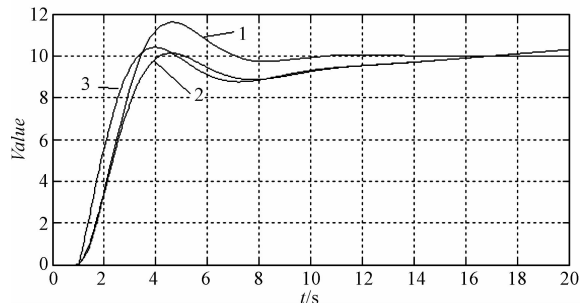


图7 模糊自适应PID控制器控制性能

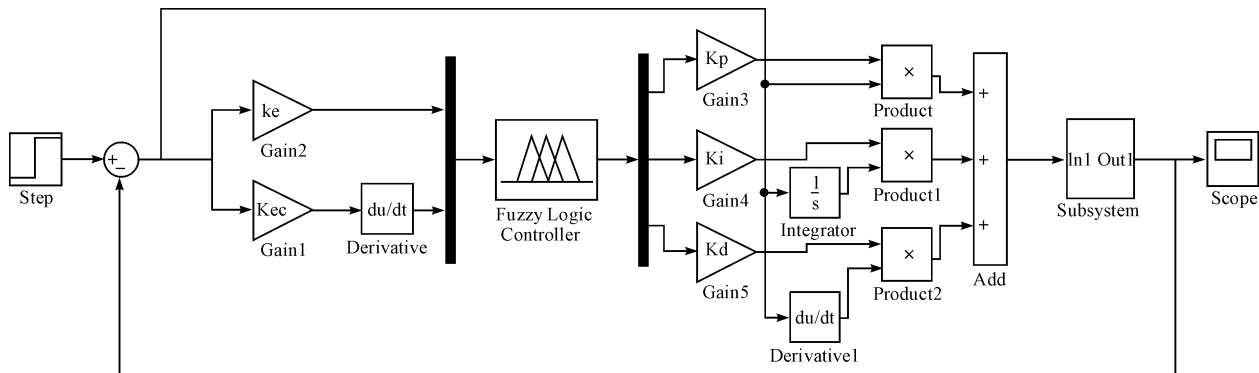


图6 模糊自适应PID控制器系统模型

4 实验及结果分析

4.1 加载系统静态特性实验

静态特性是指输入电流缓慢线性变化一个周期,研究磁粉制动器输入电流与输出转矩的关系。该实验采用以周期为30s,幅值为0.9A的正弦电流曲线,作为磁粉制动器输入信号,采集稳定状态下电动机输出力矩与转速的关系。

本研究通过实验得到的磁粉制动器在不同转速时

的输入电流和输出力矩关系曲线,如图8所示。

由图8可以看出,电流在0~0.3A时,由于磁阻的磁滞、磁通的饱和性以及磁导率的非恒定性,输入电流和输出扭矩不呈现近似线性关系;电流在0.3A~0.55A时,可近似为线性关系;当电流大于0.55A时,磁粉制动器扭矩处于相对稳定状态,此时扭矩为当前电机转速下的最大扭矩。且当电机转速越大时,磁粉制动器的输出最大力矩更大。不同转速下对应的最大扭矩如表2所示。

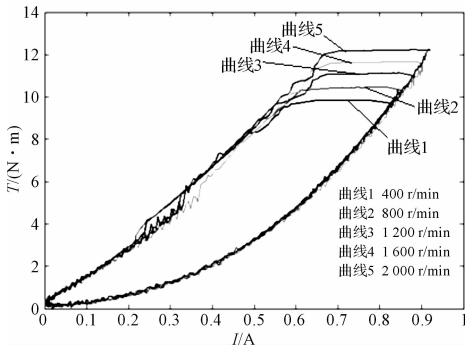


图 8 不同转速下的输入电流和输出扭矩关系曲线

表 2 各转速下的最大扭矩值

电机转速/(r · min ⁻¹)	扭矩/(N · m)
400	9.80
800	10.34
1 200	11.02
1 600	11.50
2 000	12.08

4.2 加载系统动态特性实验

动态响应特性是指磁粉制动器的输入电流发生阶跃变化时,研究输出转矩的响应特性。该实验中,磁粉制动器分别给定恒力负载和变力负载,在模糊自适应 PID 控制器的控制下,实验结果如图 9、图 10 所示。

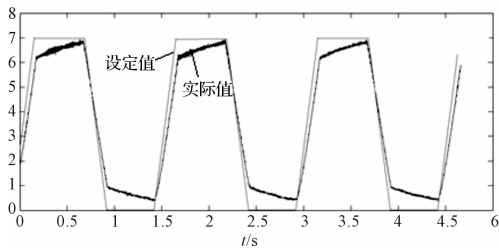


图 9 阶跃响应时间-扭矩曲线

由于磁阻的磁滞,磁粉制动器的扭矩输出存在较严重的滞后性。由图 10 可以看出,当设定扭矩值为 7 N · m 时,上升阶段响应时间约为 100 ms,下降阶段响应时间约为 60 ms,上升阶段响应时间比下降阶段略慢;同时,实验证明,当磁粉制动器输入电流一定时,磁粉制动器的阶跃响应时间与电机转速无关。

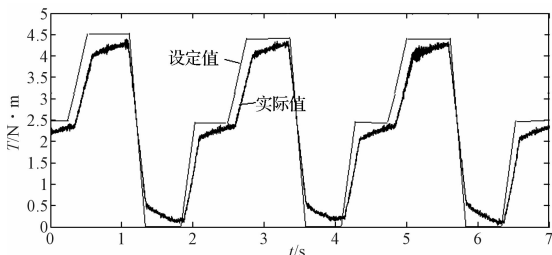


图 10 模糊自适应 PID 控制器整定的动态特性曲线

如图 9、图 10 所示,实际扭矩曲线的响应速度和控制精度较高,实际扭矩对设定扭矩跟随效果较好,说明模糊自适应 PID 控制器在磁粉制动器针对蜗轮蜗杆减速器的加载实验系统中起到了良好的作用,为之后测试蜗轮蜗杆减速器的疲劳和寿命提供了保障。

5 结束语

本研究介绍了磁粉制动器加载系统的硬件平台,对磁粉制动器在蜗轮蜗杆减速器加载系统中的特性进行了研究,分析研究其静态加载特性和输入阶跃电流的动态加载特性,以及所设计的模糊自适应 PID 控制器对磁粉制动器加载的控制效果。

通过仿真和实验,总结磁粉制动器在该加载系统中的加载特性,得出结论:通过模糊自适应 PID 控制器对 PID 参数的优化整定,大大提高了磁粉制动器的加载精度和响应速度^[10],满足了蜗轮蜗杆减速器加载系统的加载条件。

参考文献(References):

- [1] 王力,钱林方,高强. 磁粉制动器的建模与辨识研究[J]. 电气自动化,2010,32(5):56-58.
- [2] 穆安乐,原大宁,邹信用,等. 面向混合驱动实验平台加载的磁粉制动器磁滞特性研究[J]. 西安理工大学学报,2008,24(1):58-61.
- [3] 杨益兴,崔大连,周爱军. 模糊自适应 PID 控制器及 Simulink 仿真实现[J]. 舰船电子工程,2010(4):127-130.
- [4] 刘素琴,刘新平,戚平,等. PID 与模糊控制算法的比较及其改进[J]. 控制工程,2003,10(1):51-53.
- [5] 骆志云,张春华,王铃. 挖掘机器人电液比例位置自调整模糊 PID 控制技术[J]. 兵工自动化,2014,33(10):77-81.
- [6] 宋晓华. 基于 PID 与模糊控制的切削加工过程双模控制[J]. 轻工机械,2015,33(2):61-64.
- [7] 刘京亮,宋影,刘飞. 磁粉制动器加载特性研究[J]. 航空精密制造技术,2013,49(2):52-56.
- [8] 茅硕,何永勇. Fuzzy-PID 设计及控制性能分析[J]. 中国惯性技术学报,2006,14(2):60-68.
- [9] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 3 版. 北京:电子工业出版社,2011:288.
- [10] GAO Xiang, FENG Zheng-jin. Design study of an adaptive Fuzzy-PD controller for pneumatic servo system[J]. control engineering practice. 2005,13(2):55-65.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

薛超,白国振. 模糊自适应 PID 控制器在磁粉制动器加载系统中的应用研究[J]. 机电工程,2016,33(2):217-220.

XUE Chao, BAI Guo-zhen. Application and research of self-adaptive fuzzy PID controller in magnetic powder brake loading system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(2):217-220.