

永磁直线同步电机位置系统的模糊 IP 控制研究

周悦^{1,2,3}, 汪义¹, 高荣禄², 苏涵¹

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 沈阳建筑大学 信息与控制工程学院, 沈阳 110168;
3. 上海深渊科学技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 针对具有电磁推力大、响应快、易于矢量解耦控制的永磁直线同步电机 PMLSM, 研究高精度位置伺服控制系统的设计, 以满足高速加工与高精度微进给加工的需求; 考虑被控对象的变化和外界扰动, 控制器的参数难于在线修订, 设计了一种模糊/积分-比例 IP 位置控制器; 它具有并联反馈环节的 IP 控制器与模糊控制器有效结合, 根据位置偏差的变化率进行切换, 即存在较大输入指令与系统输出偏差较大时采用模糊控制, 而系统输出接近于输入指令时则采用 IP 控制器, 从而发挥模糊控制器对变参数系统的自适应性和 IP 控制器的快速和准确性优势; 仿真实验结果表明模糊/IP 控制器在稳态精度和动态性能方面优于单纯的 IP 控制器和模糊控制器, 能够满足变参数控制系统的性能指标。

关键词: 永磁直线同步电机; IP 位置控制器; 模糊控制器

Research of Fuzzy IP Control for Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Position System

Zhou Yue^{1,2,3}, Wang Yi¹, Gao Ronglu², Su Han¹

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. School of Information and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;
3. Engineering Research Center of Hadal Science and Technology, Shanghai 201306, China)

Abstract: To meet the demand of high speed machining and high precision micro feed processing, a high precision position servo control system is studied in this paper for permanent magnet linear synchronous motor PMLSM which has the characteristic of high electromagnetism thrust-intensity, fast response time and easiness to realize vector decoupling control etc. Considering the controlled object change and external disturbance, and it is difficult to adjust the controller parameters online, a fuzzy / integration-proportion IP position controller is proposed which combines the IP controller with the parallel feedback loop with the fuzzy controller effectively. The combined controller will be switched according to the change rate of position deviation, that is, the fuzzy controller is adopted when the input command is large and the system output error is large, and the IP controller is used when the system output is close to the input command, and thus makes use of the fuzzy controller's adaptability to the variable parameter system and the advantages of fast and accurate IP controller. The simulation results show that fuzzy/IP controller is better than the IP controller and fuzzy controller in the steady-state accuracy and dynamic performance, which can satisfy the performance index of the variable parameter system.

Keywords: permanent magnet linear synchronous motor; IP position controller; fuzzy controller

0 引言

迎接工业 4.0 时代, 我国提出由制造大国向制造强国的转变^[1]。作为国际装备制造竞争的焦点, 高端数控机床一直备受关注^[2]。高速加工与高精度微进给加工一直是数控机床技术发展的主流, 也是当今先进制造的关键装备技术之一。采用高能永磁体的永磁直线同步电机 (permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM), 具有电磁推力大、损耗小、电气时间常数小、响应快速、易于实现矢量解耦控制等

特点, 在数控机床实现微精进给、高速与超高速加工中成为首选方案。

在 PMLSM 伺服控制中, 常用的智能控制主要有神经网络控制和模糊控制。神经网络控制由于需要大量的样本信息, 且缺乏相关的硬件支持, 在实际应用中不多。模糊控制是通过将专家经验和知识表示成模糊规则, 用于控制对象, 就能够对系统进行智能调节^[3-4]。本论文针对直线位移的高精度定位伺服控制, 采用模糊控制与经典控制相结合的方法来设计控制器, 满足系统的性能要求。

1 PMLSM 数学模型及 IP 控制器设计

1.1 PMLSM 数学模型

PMLSM 以动子移动速度为参考坐标系的 d-q 轴电压-电流方程^[5]为:

收稿日期:2017-03-31; 修回日期:2017-04-12。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51439004);上海市科委“科技创新行动计划”资助项目(16142203200, 15DZ1207000)。

作者简介:周悦(1970-),女,上海市人,教授,研究生导师,主要从事海洋装备控制技术,网络化控制等方向的研究。

$$uq = Rsiq + p\lambda q - \frac{\pi}{\tau}vr\lambda d \quad (1)$$

$$ud = Rsiq + p\lambda q + \frac{\pi}{\tau}vr\lambda q \quad (2)$$

式中, 磁链 $\lambda q = Lqiq$, $\lambda d = Ldid + \lambda PM$ 。电磁推力方程为:

$$Fe = \frac{3\pi}{2\tau}[\lambda diq - \lambda qid] \quad (3)$$

采用矢量控制后, PMLSM 的电枢电流矢量正交于永磁体磁场, 当 $id = 0$ 时, 电磁推力 Fe 与 iq 成正比:

$$Fe = \frac{3\pi}{2\tau}\lambda PMiq = K'_{fj}iq \quad (4)$$

动子移动速度为:

$$vr = 2\pi f = -vs \quad (5)$$

式中, p 为微分算子; ud 和 uq 分别为 d 和 q 轴动子电压; λd 和 λq 分别为 d 和 q 轴动子磁链; λPM 为定子永磁体产生的励磁磁链; id 和 iq 分别为 d 和 q 轴动子电流; Ld 和 Lq 分别为 d 和 q 轴动子电感; $\mu(u)$ 为动子电阻; u^* 和 vs 分别为 PMLSM 动子的速度和同步速度; K'_{fj} 为推力系数。

PMLSM 机械运动方程为:

$$F_e = m \frac{dv_r}{dt} + Bv_r \quad (6)$$

式中, m 为电机动子质量, B 为粘滞摩擦系数, F_e 为电磁推力。

1.2 PMLSM 的 IP 控制器设计

为了提高系统的控制精度和抗扰动性, 位置伺服系统中的位置调节器采用比例环节, 速度调节器为积分比例 IP 控制器 (Integral Proportional Controller), 如图 1 所示, 虚线框内部分为 PMLSM 的 IP 位置控制器。由图 1 可见, IP 控制器属于并联校正, 即局部反馈校正。在摄动控制系统中, 局部反馈校正对受控对象的扰动敏感度低, 在这部分受到内回路的干扰会被闭环负反馈削弱, 即系统对环内扰动的敏感度也就降低了。

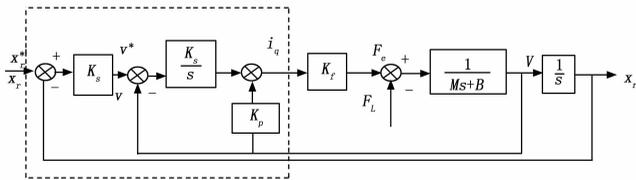


图 1 IP 位置控制器系统

2 基于模糊控制的 PMLSM 位置控制器设计

模糊控制系统的核心是模糊控制器设计。同经典控制器相比, 模糊控制器是基于专家经验总结的模糊规则库, 将输入的模糊物理量通过模糊推理为输出模糊量, 为了实现与控制系统中其他精确物理量的有效转换, 需要进行模糊化和去模糊化。因此, 模糊控制器的设计思路和过程为, 首先, 需要进行模糊化和去模糊化的设计, 通过量化因子实现精确量实际范围与模糊语言变量论域的变换; 然后, 将控制器的输入量用语言变量进行描述, 即选取适当多的语言值, 如正大 PB 、正中 PM 、负零 NZ 、负小 NS 等, 进而对每个模糊量的值进行描述或定义, 也就是设计每个模糊子集的隶属函数;

其次, 结合被控制对象和系统的性能要求, 根据专家的经验构建输入/输出关系的模糊控制规则, 同时去模糊化方法, 常用的有重心法、最大隶属度法和加权平均法等; 最后, 将模糊控制器置入控制系统中, 进行模糊控制规则和隶属函数与控制对象的联调, 直到获得满意的控制效果, 这个环节可以利用 Matlab 软件中模糊控制工具箱 (Fuzzy Logic Toolbox) 进行辅助完成^[6]。值得一提的是, 在模糊控制器设计过程中, 模糊控制规则是至关重要的, 它通常是领域专家的多年经验构成的, 并根据控制对象的响应特性和性能指标的要求可以建立不相同的模糊规则。

2.1 模糊控制系统结构及模糊变量选取

针对 PMLSM 位置伺服控制系统, 考虑到被控量为位置信号, 模糊控制器设计为基于位置偏差 e 和位置偏差变化率 ec 的比例微分 PD 模糊控制器, 即模糊位置控制器的输入量为位置偏差和位置偏差变化率, 输出量 u 为电流指令, 控制电机的转矩 (加速度), 如图 2 所示。

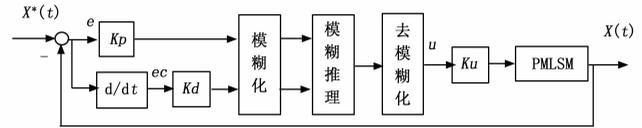


图 2 模糊控制器系统框图

基于模糊控制的永磁直线同步电机位置伺服系统包括: 受控对象 PMLSM、模糊控制器、输入/输出接口和测量装置, 其中, K_p 、 K_d 和 K_u 分别对应位置偏差 e 、位置偏差变化率 ec 和输出量 u 的量化因子。在设计位置模糊控制器的过程中根据实际需要, 将 e 、 ec 和 u 三个语言变量进行取值, 即构建模糊子集。这里均取 8 个, 分别为“正大”(PB)、“正中”(PM)、“正小”(PS)、“正零”(PZ)、“负零”(NZ)、“负小”(NS) 和“负大”(NB)。这样, 模糊子集可表示为:

$$e = \{NB, NM, NS, NZ, PZ, PS, PM, PB\}$$

$$ec = \{NB, NM, NS, NZ, PZ, PS, PM, PB\}$$

$$u = \{NB, NM, NS, NZ, PZ, PS, PM, PB\}$$

2.2 模糊子集隶属函数的建立

本系统中 e 、 ec 和 u 的论域均取 $[-2, 2]$, 各模糊子集的隶属函数均采用三角形分布, 灵敏度较高, 分辨率高。 e 、 ec 和 u 变量的模糊子集隶属度函数的选取如图 3 所示。由图 3 可见, 对于 e 、 ec 和 u 的模糊子集 PZ 和 NZ 的隶属函数于零点附近选取较窄, 而且反复调试, 形状也均是偏向零点的非等腰三角形, 这样做是为了提高控制器的灵敏度, 保证良好的控制精度。

2.3 模糊控制规则的建立

基于偏差及其微分的 PD 模糊控制器的模糊控制规则的设计原则是: 根据 PMLSM 被控对象的模型参数, 系统的惯性常数及其范围, 以及位置偏差 e 和偏差的变化率 ec 来决定控制器的输出 u , 来使得系统输出响应的动静态特性达到要求, 即能够快速响应指令, 同时超调量小, 稳态精度高。本模糊控制器设计经过多次调试和反复研究, 根据输入输出模糊子集 (模糊语言值) 个数, 形成表 1 所示的模糊控制规则表。

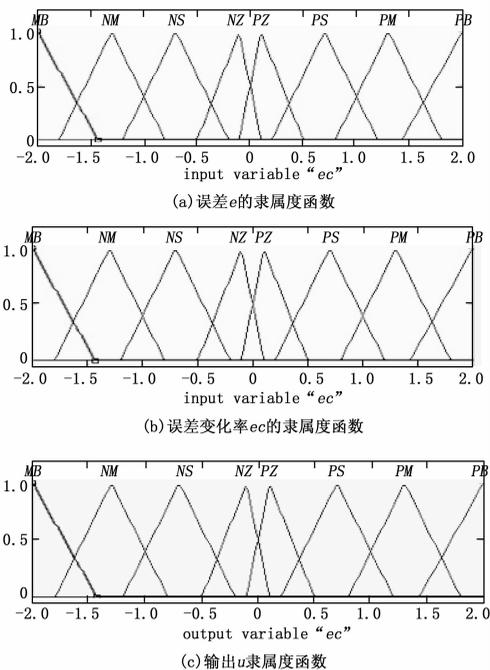


图 3 模糊子集隶属函数选取图

表 1 模糊控制规则表

U		EC							
		NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NB	NB	NB	PZ	PZ	PS
	NM	NB	NB	NB	NM	NM	PZ	PZ	PM
	NS	NB	NB	NM	NS	NM	PZ	PS	PB
	PZ	NB	NM	NS	PZ	PZ	PS	PM	PM
	PS	NB	NM	NS	PZ	PZ	PS	PM	PB
	PM	NM	NS	PZ	PS	PZ	PM	PB	PB
	PB	NM	PZ	PZ	PS	PM	PB	PB	PB

根据模糊规则表, 可以归纳出 $8 \times 8 = 64$ 条控制逻辑规则, 具体的控制规则如下所示:

- [1] If(e is NB) and (ec is NB) then (u is NB)
- [2] If(e is NM) and (ec is NB) then (u is NB)
- [3] If(e is NS) and (ec is NB) then (u is NB)
- ...
- [64] If(e is PB) and (ec is PB) then (u is PB)

3 基于模糊/IP 控制的 PMLSM 位置控制器设计

众所周知, 经典的控制方法对参数固定的系统设计和研究很适用, 但是对于结构或者参数的变化有时无能为力。然而, 模糊控制作为智能控制的一个重要方法, 对于变化的参数具有很好的适应性和控制性, 主要体现在系统的暂态过程, 但是受模糊控制规则和隶属函数等专家经验的影响, 模糊控制对于小误差的反应比较迟钝, 控制效果不佳, 尤其是对高精度的定位控制伺服有时达不到很好的控制精度。

如何结合经典位置控制器和模糊控制器的优点, 使得系统的超调量小, 调节时间短, 无稳态误差? 为此, 将常规的 IP 位置控制器与模糊控制器相结合, 根据位置偏差进行切换, 即存在较大输入指令与系统输出偏差较大时采用模糊控制,

而系统输出接近于输入指令时则采用 IP 控制器进行精确微调, 从而发挥模糊控制器对变参数系统的自适应性和 IP 控制器的快速和准确性优势, 灵活有效地控制系统, 其结构原理如图 4 所示。

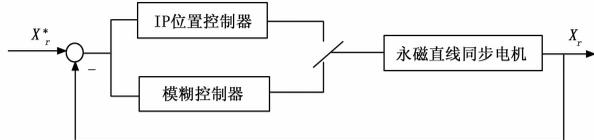


图 4 模糊/IP 控制器结构图

4 仿真实验与分析

PMLSM 系统参数为 $M = 10 \text{ kg}$, $B = 1.2 \text{ Ns/m}$, $K_f = 50 \text{ N/A}$, 并要求上升时间 $t_s = 0.3 \text{ s}$, 位移无超调。经过理论计算和反复实验, 为最佳地满足性能要求, IP 位置控制器的参数选择为: $K_s = 6.07$, $K_p = 34.61$, $K_I = 809.56$, 系统响应如图 5 所示, 其中虚线部分为位置响应曲线, 实线部分速度响应曲线。

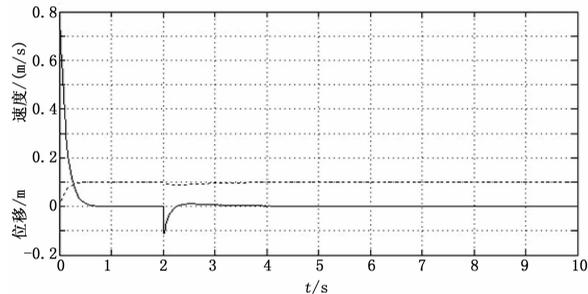


图 5 IP 位置控制系统的速度和位置响应

由图 5 可见, IP 位置控制系统在动态的上升阶段和在扰动情况下的抗扰动性更好, 能够满足快速性和稳态精度的要求。

若 $M = 100 \text{ kg}$, 在系统其他参数和 IP 控制器参数不变的情况下, 系统的位置输出如图 6 所示。

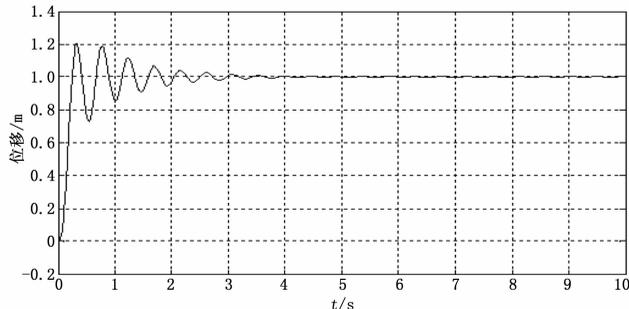


图 6 变参数下 IP 位置控制系统的位置输出响应

由图 5 和图 6 可见, IP 位置控制器的参数只依赖于控制系统的参数, 因此在对控制对象进行准确描述的前提下能够计算求得控制器的各个参数值, 进行实现对系统的有效控制, 换言之, 经典的控制方法对参数固定的系统设计和研究很适用, 但是对于结构或者参数的变化有时无能为力, 控制效果很差。

在模糊控制器设计中取量化因子分别为 $K_p = 2$, $K_d = 2$ 和 $K_u = 50$, 采用重心法对控制量 U 去模糊化。即使在 $M = 10 \text{ kg}$ 和 $M = 100 \text{ kg}$ 时, 系统能够依靠模糊控制规则进行自我调

整,比 IP 控制器上升比较快,超调量小,但稳态有静差,如图 7 所示。

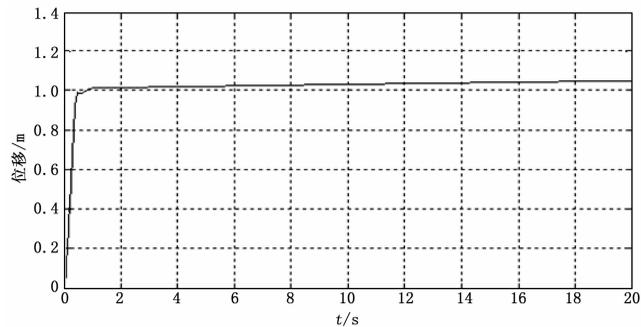


图 7 模糊控制器的位置输出仿真实验结果

采用模糊/IP 控制器,当质量发生 10 倍变化的情况下,系统输出响应如图 8 所示。

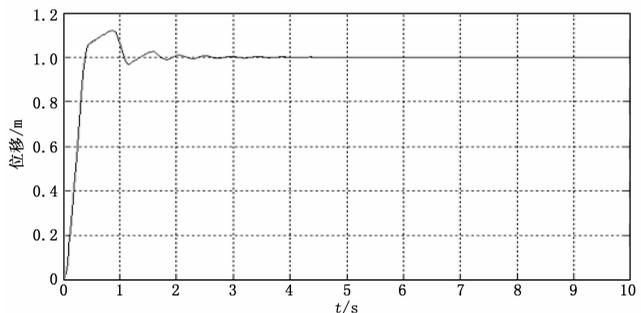


图 8 模糊/IP 位置控制器的位置输出响应

由图 8 可见,应用 IP 控制器虽然波形很快趋于稳定,但是在达到稳定状态前有一段非常明显的超调和振荡,且幅度较大,显然这样难于满足永磁直线电机位置伺服系统的高精度要求,甚至对电机造成很大的损害;采用模糊控制器虽然最终达到了稳定,但是精度不好,主要是专家经验不是很丰

富,模糊控制对于小误差的反应比较迟钝,模糊规则及其隶属函数的设置有待改善,模糊控制对高精度控制效果不是很理想;而模糊/IP 控制器,不仅能达到稳定状态,相比单纯的 IP 控制超调现象得以缓解,也相比单纯的模糊控制将达到良好的精度,能够满足变参数系统的控制,控制效果良好。

通过仿真实验分析可以得到这样的结论,IP 控制器和模糊控制器具有各自鲜明的特点,对于控制要求的满足程度各不相同,但是模糊/IP 控制器可以在结合两者各自的优点的同时,很好的满足控制要求。

5 结论

本文针对高精度永磁直线同步电机位置伺服控制系统,考虑系统参数和外界扰动的变化,研究了模糊/IP 位置控制器的设计,包括输入、输出变量的选取、模糊子集隶属函数和模糊控制规则的建立等,仿真实验结果表明了模糊/IP 位置控制的混合控制方法优于单独的模糊控制器或 IP 位置控制器,具有良好的动态和静态性能。

参考文献:

[1] 周 济. 智能制造 中国制造 2025 的主攻方向 [J]. 中国机械工程, 2015, 26 (17): 2273-2284.

[2] 蔡锐龙, 李晓栋, 钱思思. 国内外数控系统技术研究现状与发展趋势 [J]. 机械科学与技术, 2016, 35 (4): 493-500.

[3] 刘金琨. 智能控制 (第三版). 北京: 电子工业出版社, 2011.

[4] Chaudhary H, Panwar V, Prasad R. Adaptive neuro fuzzy based hybrid force/position control for an industrial robot manipulator [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016; 27 (6): 1299-1308.

[5] 郭庆鼎, 周 悦, 郭 威. 高精度永磁直线同步电动机伺服系统鲁棒位置控制器的设计 [J]. 电机与控制学报, 1998; 2 (4) 208-212.

[6] 于浩祥, 初红霞, 王希凤. MATLAB 实用教程——控制系统仿真与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

(上接第 76 页)

机械变速压力机执行元件进行控制,并进一步通过增量式的 PID 算法对压力机进行控制,由此可以很好地控制上述 3 个参数。

4 结束语

电液伺服自动控制系统广泛应用至军事以及民用等各个方面,它具有响应速度快、输出功率大、控制精度高等特点,而在机械变速压力机上的应用也十分常见,本文利用软硬件结合的方式对机械变速压力机电液伺服自动控制系统进行设计,具有良好地控制性能。但依然需要对某些方面做进一步提高:

- 1) 对于系统中存在的多输入及多输出现象应做进一步研究;
- 2) 应对自动控制系统的设计与实现的成本进行控制,从而进一步提高本文方法的整体性能;
- 3) 随着科技的日新月异,机械变速压力机电液伺服自动控制系统也应随着时代的进步而进步,更好地服务大众。

参考文献:

[1] 郭艳艳, 邓显文. 无级变速器的电液伺服波动规律分析 [J]. 科技通报, 2015, 31 (12): 266-268.

[2] 樊 索, 莫健华, 叶春生. 伺服压力机机械负载模拟系统的设计 [J]. 机械科学与技术, 2015, 34 (6): 877-880.

[3] 那 奇, 韩宝玲, 罗庆生, 等. 液压驱动型四足机器人电液伺服控制系统仿真建模与实验分析 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3398-3401.

[4] 徐 建, 余常文, 黄 华, 等. 抗抖控制器的理论与仿真 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (8): 118-124.

[5] 宋世哲, 邓志良. 基于 PLC 与电液伺服的编环机控制系统设计 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (21): 143-146.

[6] 陈红兵, 孙运吉, 邵会兵. 基于多数据源的电液伺服机构模型可信度评估 [J]. 计算机仿真, 2017, 34 (3): 29-32.

[7] 王延年, 丁 恒. 多工位冲压生产线自动送料机械手控制系统设计 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (6): 55-60.

[8] 鲁文其, 阮建国, 金 海, 等. 曲柄伺服压力机数字化仿真系统开发及应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21 (5): 1334-1342.

[9] 洪 瑞, 叶春生. 基于牛顿迭代算法的伺服压力机控制系统研究 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (12): 82-87.

[10] 黄 静, 李长春, 延 皓, 等. 改进 HHT 在线滤波算法在电液伺服系统控制中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33 (8): 1096-1104.