



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118300464 A

(43) 申请公布日 2024. 07. 05

(21) 申请号 202410399365.X

H02P 23/12 (2006.01)

(22) 申请日 2024.04.03

H02P 25/032 (2016.01)

(71) 申请人 广西大学

H02P 7/02 (2016.01)

地址 530003 广西壮族自治区南宁市西乡塘区大学东路100号

H02P 6/00 (2016.01)

(72) 发明人 华杨 李想 黄伟 张冬冬

武新章 郭平辉 王素燕 赵志越

(74) 专利代理机构 广西中知华誉知识产权代理有限公司 45140

专利代理师 王超

(51) Int. Cl.

H02P 21/00 (2016.01)

H02P 21/13 (2006.01)

H02P 21/18 (2016.01)

H02P 23/00 (2016.01)

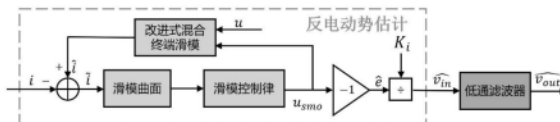
权利要求书1页 说明书4页 附图2页

## (54) 发明名称

一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法,属于直线振荡电机控制技术领域,其包括以下步骤:步骤1:获取直线振荡电机的电流状态方程;步骤2:构建改进式混合终端滑模观测器;步骤3:选择滑模面为二阶非奇异终端滑模面;步骤4:设定改进式混合终端滑模观测器的滑模控制律;步骤5:通过改进式混合终端滑模观测器重构反电动势,并根据反电动势与速度成正比的关系计算出速度估算信号,改进式混合终端滑模观测器的输出端输出速度估算信号。本发明通过设计新型滑模面并相应限定滑模控制律,可以有效减小系统的滑动抖振,进而减少速度观测误差,解决了现有滑模观测器速度观测误差大的问题。



1. 一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:通过直线振荡电机的电气动力学方程变形得到电流状态方程;

步骤2:基于步骤1的电流状态方程构建改进式混合终端滑模观测器;

步骤3:基于步骤2构建的改进式混合终端滑模观测器,选择滑模面为二阶非奇异终端滑模面,其公式为 $s = \tilde{i} + \dot{\tilde{i}} + \frac{1}{\beta} \tilde{i}^{\frac{p}{q}}$ ,其中 $\beta > 0$ 为常数, $p$ 和 $q$ 均为满足 $1 < p/q < 2$ 的奇数;

步骤4:基于步骤3选择的滑模面,设计改进式混合终端滑模观测器的滑模控制律;

步骤5:通过改进式混合终端滑模观测器重构反电动势,并根据反电动势与速度成正比的关系计算出速度估算信号,改进式混合终端滑模观测器的输出端输出速度估算信号。

2. 根据权利要求1所述的一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法,其特征在于:步骤1中,直线振荡电机的电气动力学方程为 $u = Ri + L \frac{di}{dt} + e$ ,相应地,电流状态方程为 $\frac{di}{dt} = -\frac{Ri}{L} + \frac{1}{L}(u - e)$ 。

3. 根据权利要求2所述的一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法,其特征在于:步骤2中,构建的改进式混合终端滑模观测器的公式为 $\frac{\hat{d}i}{dt} = -\frac{\hat{R}i}{\hat{L}} + \frac{1}{\hat{L}}(u + u_{smo})$ ,其中, $u_{smo}$ 是滑模控制率。

4. 根据权利要求3所述的一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法,其特征在于:步骤2中,假设 $\hat{R} = R, \hat{L} = L$ ,将改进式混合终端滑模观测器的公式与步骤1得到电流状态方程相减,得到电流误差方程为 $\frac{\tilde{d}i}{dt} = -\frac{\tilde{R}i}{L} + \frac{1}{L}(e + u_{smo})$ 。

5. 根据权利要求4所述的一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法,其特征在于:步骤4中,滑模控制律设计为: $u_{smo} = R\tilde{i} - \int_0^t [k \operatorname{sgn}(s) + \mu s] dt$ ;其中, $k > |\dot{e}|$ , $\mu > 0$ , $k, \mu$ 均为设计参数。

6. 根据权利要求5所述的一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法,其特征在于:步骤4中,引入变指数趋近律,并将变指数趋近律取为 $\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s) - \mu s$ 。

7. 根据权利要求1所述的一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法,其特征在于:还包括步骤6:在改进式混合终端滑模观测器的输出端引入低通滤波器,对输出的速度估算信号进行滤波。

## 一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于直线振荡电机控制技术领域,具体涉及一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法。

### 背景技术

[0002] 滑模观测器(Sliding-Mode-Observer, SMO)是一种带有误差反馈环节的闭环观测器,在无位置传感器控制领域得到了广泛的应用,它具有抗干扰能力强、计算简单、对参数不敏感等一些吸引人的优点。

[0003] 如图1所示,传统SMO的设计如下:首先,写出直线振荡电机的电气动力学方程: $u = Ri + L \frac{di}{dt} + e$ ,由电气动力学方程可知,当前状态方程为: $\frac{di}{dt} = -\frac{Ri}{L} + \frac{1}{L}(u - e)$ ;然后,

根据当前状态方程,可将常规SMO设计为: $\frac{d\hat{i}}{dt} = -\frac{\hat{R}\hat{i}}{\hat{L}} + \frac{1}{\hat{L}}(u + z)$ ;其中, $\hat{i}$ 为观测电流, $\hat{R}$ 为R的估计值, $\hat{L}$ 为L的估计值,z为观测器的控制律。设 $\hat{R} = R$ ,  $\hat{L} = L$ ,电流误差方程为:

$\frac{d\tilde{i}}{dt} = -\frac{R\tilde{i}}{L} + \frac{1}{L}(e + z)$ ,式中 $\tilde{i} = \hat{i} - i$ 为当前误差。对于传统的SMO,控制律通常设计为

$z = -k \operatorname{sgn}(\tilde{i})$ , $k \geq e$ ,其中k为开关增益, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为sgn函数。当状态变量达到滑模 $\tilde{i} = 0$

时,得到等效控制律为 $z_{eq} = -[k \operatorname{sgn}(\tilde{i})]_{eq} = -e$ 。这意味着SMO可以重构反电动势e的信息。然而,该控制律中含有大量的开关信号,将极大地影响估计结果的质量。通常,LPF用于

提取估计的反电动势信号,LPF的变换函数为 $G(a) = \frac{\omega_c}{a + \omega_c}$ ,其中 $\omega_c$ 为截止频率,a为G(a)的

自变量。通过对SMO估计的反电动势进行积分,可以直接计算出活塞行程x。反电动势e与活塞速度v成正比,可以表示为 $e = K_i v = K_i \frac{dx}{dt}$ , $K_i$ 为电磁推力系数,通过反电动势e可以算出速度v。

[0004] 由上可见,SMO是一个具有电流误差反馈的闭环观测器,可以提高算法的估计精度和鲁棒性。然而,滑动抖振是SMO系统不可避免的问题。现有技术中也有提出用一些用饱和函数或sigmoid函数来代替不连续的切换函数,这样可以在一定程度上减少抖振,但观测器误差不能保证在边界层内收敛于零,减振效果不佳,误差大。本发明,相应地,可以有效减少。

### 发明内容

[0005] 本发明提供一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法,通过设计新型滑模面并相应限定滑模控制律,可以有效减小系统的滑动抖振,进而减少速度观测误差,用以解决现有滑模观测器速度观测误差大的问题。

[0006] 为达到上述目的,本发明所采用的技术方案是:

[0007] 一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤1:通过直线振荡电机的电气动力学方程变形得到电流状态方程;

[0009] 步骤2:基于步骤1的电流状态方程构建改进式混合终端滑模观测器;

[0010] 步骤3:基于步骤2构建的改进式混合终端滑模观测器,选择滑模面为二阶非奇异

终端滑模面,其公式为 $s = \tilde{i} + \dot{\tilde{i}} + \frac{1}{\beta} \tilde{i}^{\frac{p}{q}}$ ,其中 $\beta > 0$ 为常数, $p$ 和 $q$ 均为满足 $1 < p/q < 2$ 的奇数;

[0011] 步骤4:基于步骤3选择的滑模面,设计改进式混合终端滑模观测器的滑模控制律;

[0012] 步骤5:通过改进式混合终端滑模观测器重构反电动势,并根据反电动势与速度成正比的关系计算出速度估算信号,改进式混合终端滑模观测器的输出端输出速度估算信号。

[0013] 步骤6:在改进式混合终端滑模观测器的输出端引入低通滤波器,对输出的速度估算信号进行滤波。

[0014] 进一步地,步骤1中,直线振荡电机的电气动力学方程为 $u = Ri + L \frac{di}{dt} + e$ ,相应地,电流状态方程为 $\frac{di}{dt} = -\frac{Ri}{L} + \frac{1}{L}(u - e)$ 。

[0015] 进一步地,步骤2中,构建的改进式混合终端滑模观测器的公式为 $\frac{d\hat{i}}{dt} = -\frac{R\hat{i}}{L} + \frac{1}{L}(u + u_{smo})$ ,其中, $u_{smo}$ 是滑模控制率。

[0016] 进一步地,步骤2中,假设 $\hat{R} = R, \hat{L} = L$ ,将改进式混合终端滑模观测器的公式与步骤1得到电流状态方程相减,得到电流误差方程为 $\frac{d\tilde{i}}{dt} = -\frac{R\tilde{i}}{L} + \frac{1}{L}(e + u_{smo})$ 。

[0017] 进一步地,步骤4中,滑模控制律设计为: $u_{smo} = R\tilde{i} - \int_0^t [k \operatorname{sgn}(s) + \mu s] d\tau$ ;其中, $k > |\dot{e}|, \mu > 0, k, \mu$ 均为设计参数。

[0018] 进一步地,步骤4中,引入变指数趋近律,并将变指数趋近律取为 $\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s) - \mu s$ 。

[0019] 由于采用上述技术方案,本发明具有以下有益效果:

[0020] 1. 本发明构建了改进式混合终端滑模观测器,只需获得电流及电压大小便可计算出电流误差进而实现对速度的观测,且其速度观测误差远小于传统SMO的速度观测误差。

[0021] 2. 本发明通过所构建的改进式混合终端滑模观测器与低通滤波器相结合,相较于传统滑模控制与低通滤波器而言,所观测的速度在相位跟踪上也与实际的电机系统更为相近,有利于误差的减少。

[0022] 3. 本发明使状态变量在有限时间内收敛,另外其省去了LPF的使用,有利于提高活塞行程估计的精度。

[0023] 4. 本发明通过设计新型滑模面并相应限定滑模控制律,可以有效减小系统的滑动抖振,进而减少速度观测误差。

### 附图说明

- [0024] 图1是基于传统SMO的行程估计方框图；  
 [0025] 图2是本发明的改进式混合终端滑模观测器的结构示意图；  
 [0026] 图3是本发明的效果仿真结果；  
 [0027] 图4是本发明的具体速度输出误差对比结果；

### 具体实施方式

[0028] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0029] 一种改进式混合终端滑模的直线振荡电机速度观测方法,包括步骤1-6。

[0030] 步骤1:通过直线振荡电机的电气动力学方程变形得到电流状态方程。其中,直线振荡电机的电气动力学方程为  $u = Ri + L \frac{di}{dt} + e$ , 相应地,电流状态方程为

$$\frac{di}{dt} = -\frac{Ri}{L} + \frac{1}{L}(u - e)。$$

[0031] 步骤2:基于步骤1的电流状态方程构建改进式混合终端滑模观测器,其公式为

$$\frac{\hat{d}i}{dt} = -\frac{\hat{R}\hat{i}}{\hat{L}} + \frac{1}{\hat{L}}(u + u_{smo}), \text{其中, } u_{smo} \text{ 是滑模控制率。}$$

[0032] 假设  $\hat{R} = R, \hat{L} = L$ , 将改进式混合终端滑模观测器的公式与步骤1得到电流状态方程相减,得到电流误差方程为  $\frac{\tilde{d}i}{dt} = -\frac{R\tilde{i}}{L} + \frac{1}{L}(e + u_{smo})$ 。

[0033] 步骤3:基于步骤2构建的改进式混合终端滑模观测器,选择滑模面为二阶非奇异终端滑模面,其公式为  $s = \tilde{i} + \dot{\tilde{i}} + \frac{1}{\beta} \tilde{i}^{\frac{p}{q}}$ , 其中  $\beta > 0$  为常数,  $p$  和  $q$  均为满足  $1 < p/q < 2$  的奇数。采用该滑模面可以使状态变量  $\tilde{i}$  收敛更快, 获得更高的估计精度。从该滑模面的公式可以看出当  $s$  在有限时间内达到零时, 系统状态将保持在二阶滑模  $\tilde{i} = \dot{\tilde{i}} = 0$  上。

[0034] 步骤4:基于步骤3选择的滑模面,将改进式混合终端滑模观测器的滑模控制律设计为:  $u_{smo} = R\tilde{i} - \int_0^t [k \operatorname{sgn}(s) + \mu s] d\tau$ ; 其中,  $k > |e|, \mu > 0, k, \mu$  均为设计参数。引入变指数趋近律,并将变指数趋近律取为  $\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s) - \mu s$ 。该变指数趋近律用于提高状态变量到达过程中的自适应调节能力,从而进一步抑制滑动抖振,减小外部对系统的干扰影响。

[0035] 步骤5:通过改进式混合终端滑模观测器重构反电动势,并根据反电动势与速度成正比的关系计算出速度估算信号,改进式混合终端滑模观测器的输出端输出速度估算信号。

[0036] 步骤6:在改进式混合终端滑模观测器的输出端引入低通滤波器,对输出的速度估算信号进行滤波。通过在改进式混合终端滑模观测器的输出端引入低通滤波器对所观测的

速度进行滤波,去除速度估算信号中的高频噪声,从而使信号更加平滑稳定。

[0037] 附图中,图2为改进式混合终端滑模观测器的结构示意图,如图3-4所示,本发明的速度观测误差远小于传统SMO的速度观测误差。

[0038] 本发明构建了改进式混合终端滑模观测器,只需获得电流及电压大小便可计算出电流误差进而实现对速度的观测。本发明通过所构建的改进式混合终端滑模观测器与低通滤波器相结合,相较于传统滑模控制与低通滤波器而言,所观测的速度在相位跟踪上也与实际的电机系统更为相近,有利于误差的减少。此外,本发明使状态变量在有限时间内收敛,另外其省去了LPF的使用,有利于提高活塞行程估计的精度。

[0039] 上述说明是针对本发明较佳可行实施例的详细说明,但实施例并非用以限定本发明的专利申请范围,凡本发明所提示的技术精神下所完成的同等变化或修饰变更,均应属于本发明所涵盖专利范围。

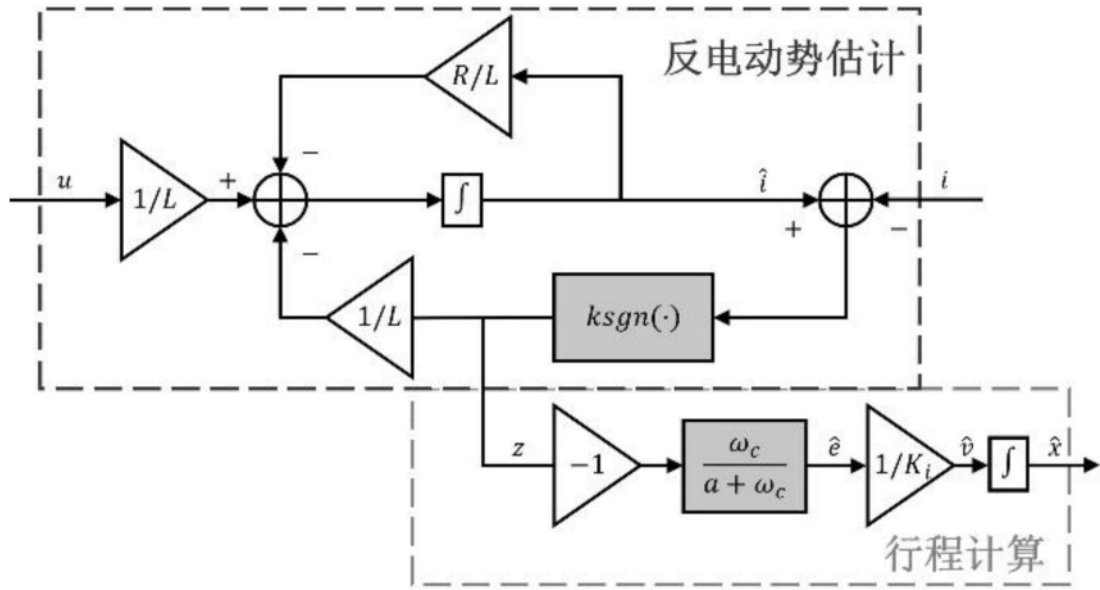


图1

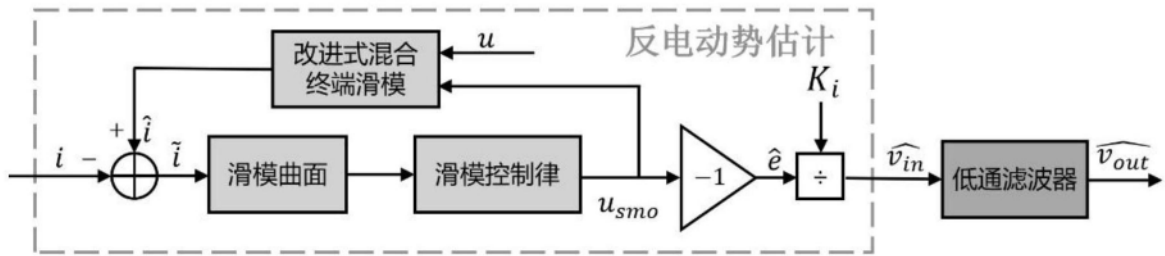


图2

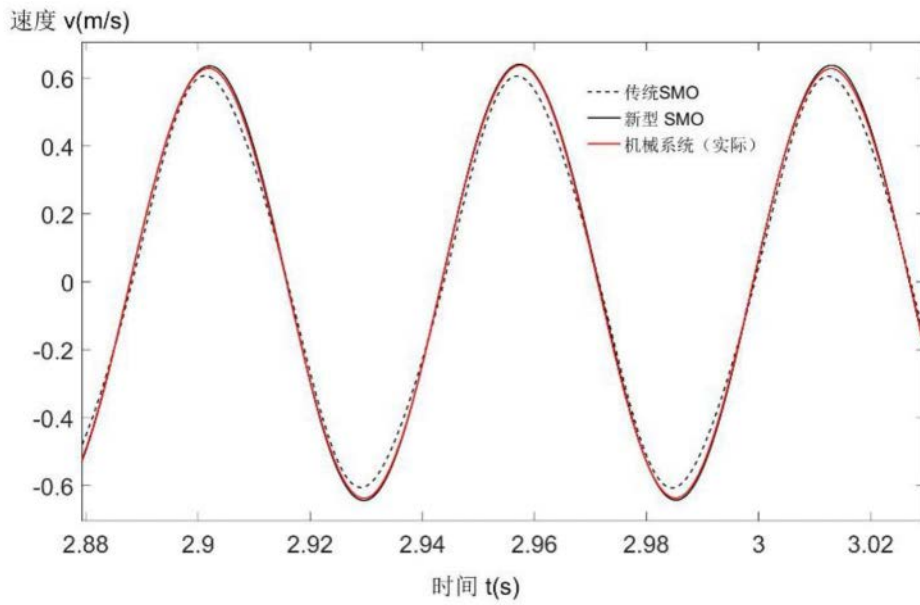


图3

序号	时间 (s)	对应速度值 (m/s)			误差值 (m/s)	
		实际电机系统	改进式混合终端滑模	传统滑模控制	改进式误差	传统式误差
1	1.3467	0.64	0.6434	0.6069	0.0034	-0.0331
2	1.5412	-0.6404	-0.6415	-0.602	-0.0011	0.0384
3	2.1797	0.6382	0.6427	0.6055	0.0045	-0.0327
4	2.3742	-0.6393	-0.6443	-0.6044	-0.005	0.0349
5	2.7908	0.6365	0.6423	0.6087	0.0058	-0.0278
6	2.9295	-0.6373	-0.6438	-0.5969	-0.0065	0.0404
7	3.2908	0.6365	0.6423	0.6086	0.0058	-0.0279
8	4.2073	-0.6268	-0.6382	-0.6084	-0.0114	0.0184

图4