



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118826552 B

(45) 授权公告日 2025. 05. 09

(21) 申请号 202410801071.5

H02P 21/18 (2016.01)

(22) 申请日 2024.06.20

H02P 21/24 (2016.01)

H02P 25/024 (2016.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 118826552 A

(56) 对比文件

CN 111342727 A, 2020.06.26

(43) 申请公布日 2024.10.22

审查员 李伟腾

(73) 专利权人 淮阴工学院

地址 223000 江苏省淮安市经济技术开发区
枚乘东路1号

(72) 发明人 黄晓洁 鲁庆 祁煜哲 张涛

陈万 武莎莎 叶小婷 莫丽红

(74) 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所

(普通合伙) 32204

专利代理师 柏尚春

(51) Int. Cl.

H02P 21/13 (2006.01)

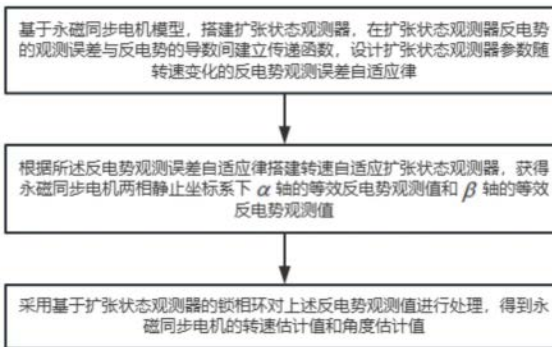
权利要求书7页 说明书17页 附图3页

(54) 发明名称

一种无位置传感器控制方法、系统、设备及存储介质

(57) 摘要

本发明公开了一种无位置传感器控制方法、系统、设备及存储介质,其种方法包括:基于永磁同步电机模型,搭建扩张状态观测器,在扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势的导数间建立传递函数,设计扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律;根据所述反电势观测误差自适应律搭建转速自适应扩张状态观测器,获得永磁同步电机两相静止坐标系下 α 轴的等效反电势观测值和 β 轴的等效反电势观测值;采用基于扩张状态观测器的锁相环对上述反电势观测值进行处理,得到永磁同步电机的转速估计值和角度估计值;本发明能够高观测精度和电机驱动系统可靠性。



1. 一种无位置传感器控制方法,其特征在于,包括:

S1:基于永磁同步电机模型,搭建扩张状态观测器,在扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势的导数间建立传递函数,设计扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律;所述的永磁同步电机模型建立方法如下:

首先建立永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型:

$$\begin{cases} \dot{i}_\alpha = -\frac{R}{L_s}i_\alpha + \frac{1}{L_s}u_\alpha - k_e e_\alpha \\ \dot{i}_\beta = -\frac{R}{L_s}i_\beta + \frac{1}{L_s}u_\beta - k_e e_\beta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_\alpha = -\omega_e \psi_f \sin \theta_e \\ e_\beta = \omega_e \psi_f \cos \theta_e \end{cases} \quad (2)$$

其中: i_α 、 i_β 分别为 α 、 β 相定子电流, $i_{\alpha\beta} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ 、 $u_{\alpha\beta} = [u_\alpha \ u_\beta]^T$ 和 $e_{\alpha\beta} = [e_\alpha \ e_\beta]^T$ 分别为两相静止坐标系下的定子电流、定子电压和反电势; R 、 ψ_f 、 k_e 和 L_s 分别表示定子相电阻、转子磁链、感应电动势系数和电感参数值; ω_e 为转子电角速度, θ_e 为转子电角度; i_α 、 i_β 由采集的

三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 经过3s/2s变换得到: $\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$; u_α 、 u_β 由定子电压给定

值 u_d 、 u_q 经过2r/2s变换得到: $\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$;

所述基于永磁同步电机模型,搭建扩张状态观测器,在扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势的导数间建立传递函数,具体为:

根据永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型,以定子电流为状态变量,反电动势为扩张变量建立扩张状态观测器;

将 α 、 β 轴的反电势作为扩张的状态变量,令 $x_{11} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ $x_{12} = [-k_e e_\alpha \ -k_e e_\beta]^T = f$,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_s} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix}, \quad u = [u_\alpha \ u_\beta]^T, \text{将(1)式扩张为下式:}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{11} = Ax_{11} + x_{12} + Bu \\ \dot{x}_{12} = f \\ y = x_{11} \end{cases} \quad (3)$$

进而建立扩张状态观测器:

$$\begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{z}_{11} = Az_{11} + z_{12} + Bu - \beta_{11}e_{11} \\ \dot{z}_{12} = -\beta_{12}e_{11} \end{cases} \quad (4)$$

其中 e_{11} 表示定子电流观测误差, β_{11} 、 β_{12} 为扩张状态观测器的反馈增益系数; $z_{11} = [z_{1\alpha} \ z_{1\beta}]^T$ 表示两相静止坐标系下的定子电流的观测值; $z_{12} = [z_{2\alpha} \ z_{2\beta}]^T$ 表示反电势的观测值, $k_e = 1/L_s$;

由式(3)和式(4)可得扩张状态观测器的误差方程为:

$$\begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{e}_{11} = Ae_{11} + e_{12} - \beta_{11}e_{11} \\ \dot{e}_{12} = -\beta_{12}e_{11} - \dot{f} \end{cases} \quad (5)$$

其中 e_{12} 表示反电势观测误差;

α 、 β 两相对称,以 α 相为对象分析,由式(5)可得扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势间建立传递函数为:

$$\frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s + (\beta_{11} - A)}{s^2 + (\beta_{11} - A)s + \beta_{12}} \quad (6)$$

其中 s 代表复频率;

所述设计扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律,具体为,

设 $\beta_{11} - A = 2\omega_0$ 、 $\beta_{12} = \omega_0^2$,其中 ω_0 为扩张状态观测器带宽,将式(6)转化为:

$$\frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s + 2\omega_0}{s^2 + 2\omega_0s + \omega_0^2} = -\frac{s + 2\omega_0}{(s + \omega_0)^2} \quad (7)$$

将式(7)转化为频域,可得:

$$\frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} = -\frac{j\omega + 2\omega_0}{(j\omega + \omega_0)^2} \quad (8)$$

其中 j 是虚数单位, ω 是角频率;

由式(8)得到反电势观测误差幅频响应幅值为:

$$\left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2 + 4\omega_0^2}}{\omega^2 + \omega_0^2} \quad (9)$$

因 $\omega \ll \omega_0$,由式(9)得到:

$$\left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2 + 4\omega_0^2}}{\omega^2 + \omega_0^2} < \frac{C}{\omega_0} \quad (10)$$

其中 C 为大于2的常数;最大反电势误差观测幅值可表示为:

$$|e_{12}(j\omega)| = \frac{C}{\omega_0} |\dot{f}(j\omega)| \quad (11)$$

其中 \dot{f} 为 x_{12} 的导数, 表示为:

$$\dot{f} = \begin{bmatrix} \dot{f}_\alpha \\ \dot{f}_\beta \end{bmatrix} = \frac{\psi_f \omega_e^2}{L_s} \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \sin \theta_e \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式 (12) 可得 \dot{f} 的上界为:

$$\dot{f} = \frac{\psi_f}{L_s} \omega_e^2 \quad (13)$$

由式 (13) 得到 e_{12} 在时域 t 时刻的绝对值为:

$$|e_{12}(t)| = \frac{C\psi_f}{L_s \omega_0} \omega_e^2 \quad (14)$$

同理可得电流观测误差 e_{11} 为:

$$|e_{11}(t)| = \frac{\psi_f}{L_s \omega_0^2} \omega_e^2 \quad (15)$$

由式 (14) 和式 (15) 得到电流观测误差 e_{11} 与反电势观测误差 e_{12} 的关系:

$$|e_{11}| C \omega_0 = |e_{12}| \quad (16)$$

由式 (14) 可得扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律为:

$$\omega_0 = \frac{C\psi_f}{L_s e_{12}^*} \omega_e^2 \quad (17)$$

其中 e_{12}^* 为额定的最大反电势观测误差值;

S2: 根据所述反电势观测误差自适应律搭建转速自适应扩张状态观测器, 获得永磁同步电机两相静止坐标系下 α 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_α 和 β 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_β ;

S3: 采用基于扩张状态观测器的锁相环对上述反电势观测值进行处理, 得到永磁同步电机的转速估计值 $\hat{\omega}_e$ 和角度估计值 $\hat{\theta}_e$ 。

2. 根据权利要求1所述的无位置传感器控制方法, 其特征在于, 步骤S2所述转速自适应扩张状态观测器, 具体通过将所述反电势观测误差自适应律代入步骤S1的扩张状态观测器得到。

3. 根据权利要求1所述的无位置传感器控制方法, 其特征在于, 所述步骤S3具体包括为:

将基于转速自适应扩张状态观测器输出的反电势观测值作为锁相环的输入, 根据下式计算角度误差:

$$e_\theta = -\hat{e}_\alpha \cos \hat{\theta}_e - \hat{e}_\beta \sin \hat{\theta}_e \quad (18)$$

电机电角度、转速、角加速度三者之间导数关系为:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_e = \omega_e \\ \dot{\omega}_e = a_e \\ \dot{a}_e = d \end{cases} \quad (19)$$

其中： a_e 为角加速度， d 为角加速度的导数；令： $x_{21} = \theta_e$ ， $x_{22} = \omega_e$ ， $x_{23} = a_e$ ；将式(19)转换为：

$$\begin{cases} \dot{x}_{21} = x_{22} \\ \dot{x}_{22} = x_{23} \\ \dot{x}_{23} = d \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)建立锁相环中的扩张状态观测器：

$$\begin{cases} e_{21} = z_{21} - x_{21} \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_{21}e_{21} \\ \dot{z}_{22} = z_{23} - \beta_{22}e_{21} \\ \dot{z}_{23} = -\beta_{23}e_{21} \end{cases} \quad (21)$$

其中： e_{21} 表示 θ_e 的观测误差值； z_{21} 表示 θ_e 的观测值； z_{22} 表示 ω_e 的观测值； z_{23} 表示 a_e 的观测值； β_{21} 、 β_{22} 、 β_{23} 为扩张状态观测器的反馈增益系数；

由式(21)可得基于扩张状态观测器的锁相环位置估计的传递函数为：

$$G(s) = \frac{\hat{\theta}_e(s)}{\theta_e(s)} = \frac{\beta_{21}s^2 + \beta_{22}s + \beta_{23}}{s^3 + \beta_{21}s^2 + \beta_{22}s + \beta_{23}} \quad (22)$$

其中 s 代表复频率；依据带宽法，将观测器增益整定为：

$$[\beta_{21} \ \beta_{22} \ \beta_{23}] = [3\sigma_0 \ 3\sigma_0^2 \ \sigma_0^3] \quad (23)$$

其中， σ_0 为锁相环里扩张状态观测器的带宽。

4. 一种无位置传感器控制系统，其特征在于，包括：

设计模块，用于基于永磁同步电机模型，搭建扩张状态观测器，在扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势的导数间建立传递函数，设计扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律；具体实现过程如下：

首先建立永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型：

$$\begin{cases} \dot{i}_\alpha = -\frac{R}{L_s}i_\alpha + \frac{1}{L_s}u_\alpha - k_e e_\alpha \\ \dot{i}_\beta = -\frac{R}{L_s}i_\beta + \frac{1}{L_s}u_\beta - k_e e_\beta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_\alpha = -\omega_e \psi_f \sin \theta_e \\ e_\beta = \omega_e \psi_f \cos \theta_e \end{cases} \quad (2)$$

其中： i_α 、 i_β 分别为 α 、 β 相定子电流， $i_{\alpha\beta} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ 、 $u_{\alpha\beta} = [u_\alpha \ u_\beta]^T$ 和 $e_{\alpha\beta} = [e_\alpha \ e_\beta]^T$ 分别为两相静止坐标系下的定子电流、定子电压和反电势； R 、 ψ_f 、 k_e 和 L_s 分别表示定子相电阻、转子磁链、感应电动势系数和电感参数值； ω_e 为转子电角速度， θ_e 为转子电角度； i_α 、 i_β 由采集的

三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 经过3s/2s变换得到：
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$
； u_α 、 u_β 由定子电压给定

值 u_d 、 u_q 经过2r/2s变换得到：
$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & -\sin\theta_e \\ \sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$$
；

根据永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型，以定子电流为状态变量，反电动势为扩张变量建立扩张状态观测器；

将 α 、 β 轴的反电势作为扩张的状态变量，令 $x_{11} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ $x_{12} = [-k_e e_\alpha \ -k_e e_\beta]^T = f$ ，

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_s} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix}, \quad u = [u_\alpha \ u_\beta]^T$$
，将(1)式扩张为下式：

$$\begin{cases} \dot{x}_{11} = Ax_{11} + x_{12} + Bu \\ \dot{x}_{12} = f \\ y = x_{11} \end{cases} \quad (3)$$

进而建立扩张状态观测器：

$$\begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{z}_{11} = Az_{11} + z_{12} + Bu - \beta_{11} e_{11} \\ \dot{z}_{12} = -\beta_{12} e_{11} \end{cases} \quad (4)$$

其中 e_{11} 表示定子电流观测误差， β_{11} 、 β_{12} 为扩张状态观测器的反馈增益系数； $z_{11} = [z_{1\alpha} \ z_{1\beta}]^T$ 表示两相静止坐标系下的定子电流的观测值； $z_{12} = [z_{2\alpha} \ z_{2\beta}]^T$ 表示反电势的观测值， $k_e = 1/L_s$ ；

由式(3)和式(4)可得扩张状态观测器的误差方程为：

$$\begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{e}_{11} = Ae_{11} + e_{12} - \beta_{11} e_{11} \\ \dot{e}_{12} = -\beta_{12} e_{11} - \dot{f} \end{cases} \quad (5)$$

其中 e_{12} 表示反电势观测误差；

α 、 β 两相对称，以 α 相为对象分析，由式(5)可得扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势间建立传递函数为：

$$\frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s + (\beta_{11} - A)}{s^2 + (\beta_{11} - A)s + \beta_{12}} \quad (6)$$

其中s代表复频率；

设 $\beta_{11} - A = 2\omega_0$ 、 $\beta_{12} = \omega_0^2$ ，其中 ω_0 为扩张状态观测器带宽，将式(6)转化为：

$$\frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s + 2\omega_0}{s^2 + 2\omega_0s + \omega_0^2} = -\frac{s + 2\omega_0}{(s + \omega_0)^2} \quad (7)$$

将式(7)转化为频域，可得：

$$\frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} = -\frac{j\omega + 2\omega_0}{(j\omega + \omega_0)^2} \quad (8)$$

其中j是虚数单位， ω 是角频率；

由式(8)得到反电势观测误差幅频响应幅值为：

$$\left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2 + 4\omega_0^2}}{\omega^2 + \omega_0^2} \quad (9)$$

因 $\omega \ll \omega_0$ ，由式(9)得到：

$$\left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2 + 4\omega_0^2}}{\omega^2 + \omega_0^2} < \frac{C}{\omega_0} \quad (10)$$

其中C为大于2的常数；最大反电势误差观测幅值可表示为：

$$|e_{12}(j\omega)| = \frac{C}{\omega_0} |\dot{f}(j\omega)| \quad (11)$$

其中 \dot{f} 为 x_{12} 的导数，表示为：

$$\dot{f} = \begin{bmatrix} \dot{f}_\alpha \\ \dot{f}_\beta \end{bmatrix} = \frac{\psi_f \omega_e^2}{L_s} \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \sin \theta_e \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式(12)可得 \dot{f} 的上界为：

$$\dot{f} = \frac{\psi_f}{L_s} \omega_e^2 \quad (13)$$

由式(13)得到 e_{12} 在时域t时刻的绝对值为：

$$|e_{12}(t)| = \frac{C\psi_f}{L_s\omega_0} \omega_e^2 \quad (14)$$

同理可得电流观测误差 e_{11} 为：

$$|e_{11}(t)| = \frac{\psi_f}{L_s\omega_0^2} \omega_e^2 \quad (15)$$

由式(14)和式(15)得到电流观测误差 e_{11} 与反电势观测误差 e_{12} 的关系：

$$|e_{11}|C\omega_0 = |e_{12}| \quad (16)$$

由式(14)可得扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律为:

$$\omega_0 = \frac{C\psi_f}{L_s e_{12}^*} \omega_e^2 \quad (17)$$

其中 e_{12}^* 为额定的最大反电势观测误差值;

搭建模块,用于根据所述反电势观测误差自适应律搭建转速自适应扩张状态观测器,获得永磁同步电机两相静止坐标系下 α 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_α 和 β 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_β ;

控制模块,用于采用基于扩张状态观测器的锁相环对上述反电势观测值进行处理,得到永磁同步电机的转速估计值 $\hat{\omega}_e$ 和角度估计值 $\hat{\theta}_e$ 。

5. 一种无位置传感器控制设备,其特征在于,包括:一个或多个处理器、一个或多个存储器以及一个或多个程序,所述程序存储在存储器中并被配置为由处理器执行,所述程序被加载至处理器时实现根据权利要求1至3任一项所述的无位置传感器控制方法的步骤。

6. 一种用于无位置传感器控制的存储介质,其特征在于,所述存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序包括程序指令,所述程序指令当被处理器执行时使所述处理器执行根据权利要求1至3任一项所述的无位置传感器控制方法的步骤。

一种无位置传感器控制方法、系统、设备及存储介质

技术领域

[0001] 本发明涉及一种传感器控制方法、系统、设备及存储介质,尤其涉及一种无位置传感器控制方法、系统、设备及存储介质,属于电机控制技术领域。

背景技术

[0002] 永磁同步电机依靠永磁体励磁,具有结构简单、转矩密度大、效率高等优点,现广泛应用于新能源汽车、机器人、数控机床等领域。

[0003] 传统永磁同步电机的调速系统中通常采用光电编码器、旋转变压器等获取转子位置和转速信息,这些装置精度比较高,但存在体积增大、成本增加、易受外界环境影响而失效等缺点。采用无位置传感器的控制方法可以解决这些问题。无位置传感器的控制方法通常分为零低速无位置传感器技术与中高速无位置传感器技术。中高速的无位置传感器技术通过反电势或磁链模型获取转子位置和转速信息,这一类方法有扩张状态观测器法、滑模观测器法、卡尔曼滤波器法、有效磁链观测器法、模型参考自适应等。其中,扩张状态观测器法观测精度高、抗扰动能力强,调参更方便,且可以实现频域分析,故本发明使用扩张状态观测器法。

[0004] 目前扩张状态观测器的应用大多都是基于某个额定转速工作点的性能设计固定参数,但固定参数扩张状态观测器的反电势估计精度会随转速升高而下降,估计转子位置和转速精度降低。因此,使用具有转速自适应的扩张状态观测器具有重要意义。

[0005] 无位置传感器控制系统在估计出反电势后,可直接通过反正切计算转子位置,但转速由转子位置微分而来,无法抑制噪声,且转子位置估计精度受估计的反电势波形影响。锁相环通过PI环节积分得到转速信息,无需微分运算,目前已得到广泛应用。但传统基于PI的锁相环只能应对转速缓慢变化的情况,在转速快速变化时,会存在估计性能较差的问题。

[0006] 针对上述问题,传统方法采用电流观测误差与转速、观测器带宽之间的关系,建立观测器,虽然保证了转速升高时电流观测误差保持在一定范围内,但并未解决反电势观测误差随转速变化的问题。

发明内容

[0007] 发明目的:本发明的目的是提供一种能够高观测精度和电机驱动系统可靠性的无位置传感器控制方法、系统、设备及存储介质。

[0008] 技术方案:本发明所述的一种无位置传感器控制方法,包括:

[0009] S1:基于永磁同步电机模型,搭建扩张状态观测器,在扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势的导数间建立传递函数,设计扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律;

[0010] S2:根据所述反电势观测误差自适应律搭建转速自适应扩张状态观测器,获得永磁同步电机两相静止坐标系下 α 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_α 和 β 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_β ;

[0011] S3:采用基于扩张状态观测器的锁相环对上述反电势观测值进行处理,得到永磁

同步电机的转速估计值 $\hat{\omega}_e$ 和角度估计值 $\hat{\theta}_e$ 。

[0012] 进一步地,步骤S1所述的永磁同步电机模型建立方法如下:

[0013] 首先建立永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型:

$$[0014] \quad \begin{cases} \dot{i}_\alpha = -\frac{R}{L_s} i_\alpha + \frac{1}{L_s} u_\alpha - k_e e_\alpha \\ \dot{i}_\beta = -\frac{R}{L_s} i_\beta + \frac{1}{L_s} u_\beta - k_e e_\beta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_\alpha = -\omega_e \psi_f \sin \theta_e \\ e_\beta = \omega_e \psi_f \cos \theta_e \end{cases} \quad (2)$$

[0015] 其中: i_α 、 i_β 分别为 α 、 β 相定子电流, $i_{\alpha\beta} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ 、 $u_{\alpha\beta} = [u_\alpha \ u_\beta]^T$ 和 $e_{\alpha\beta} = [e_\alpha \ e_\beta]^T$ 分别为两相静止坐标系下的定子电流、定子电压和反电势; R 、 ψ_f 、 k_e 和 L_s 分别表示定子相电阻、转子磁链、感应电动势系数和电感参数值; ω_e 为转子电角速度, θ_e 为转子电角度; i_α 、 i_β 由采

集的三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 经过3s/2s变换得到: $\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$; u_α 、 u_β 由定子电压

给定值 u_d 、 u_q 经过2r/2s变换得到: $\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$ 。

[0016] 进一步地,步骤S1所述基于永磁同步电机模型,搭建扩张状态观测器,在扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势的导数间建立传递函数,具体为:

[0017] 根据永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型,以定子电流为状态变量,反电动势为扩张变量建立扩张状态观测器;

[0018] 将 α 、 β 轴的反电势作为扩张的状态变量,令 $x_{11} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ $x_{12} = [-k_e e_\alpha \ -k_e e_\beta]^T = f$,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_s} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix}, \quad u = [u_\alpha \ u_\beta]^T, \text{ 将(1)式扩张为下式:}$$

$$[0019] \quad \begin{cases} \dot{x}_{11} = Ax_{11} + x_{12} + Bu \\ \dot{x}_{12} = f \\ y = x_{11} \end{cases} \quad (3)$$

[0020] 进而建立扩张状态观测器:

$$[0021] \quad \begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{z}_{11} = Az_{11} + z_{12} + Bu - \beta_{11} e_{11} \\ \dot{z}_{12} = -\beta_{12} e_{11} \end{cases} \quad (4)$$

[0022] 其中 e_{11} 表示定子电流的观测误差, β_{11} 、 β_{12} 为扩张状态观测器的反馈增益系数; $z_{11} = [z_{1\alpha} \ z_{1\beta}]^T$ 表示两相静止坐标系下的定子电流的观测值; $z_{12} = [z_{2\alpha} \ z_{2\beta}]^T$ 表示反电势的观测值, $k_e = 1/L_s$;

[0023] 由式(3)和式(4)可得扩张状态观测器的误差方程为:

$$[0024] \quad \begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{e}_{11} = Ae_{11} + e_{12} - \beta_{11}e_{11} \\ \dot{e}_{12} = -\beta_{12}e_{11} - \dot{f} \end{cases} \quad (5)$$

[0025] 其中 e_{12} 表示反电势的观测误差;

[0026] α 、 β 两相对称,以 α 相为对象分析,由式(5)可得扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势间建立传递函数为:

$$[0027] \quad \frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s + (\beta_{11} - A)}{s^2 + (\beta_{11} - A)s + \beta_{12}} \quad (6)$$

[0028] 其中 s 代表复频率。

[0029] 进一步地,步骤S1所述设计扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律,具体为,

[0030] 设 $\beta_{11} - A = 2\omega_0$ 、 $\beta_{12} = \omega_0^2$,其中 ω_0 为扩张状态观测器带宽,将式(6)转化为:

$$[0031] \quad \frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s + 2\omega_0}{s^2 + 2\omega_0s + \omega_0^2} = -\frac{s + 2\omega_0}{(s + \omega_0)^2} \quad (7)$$

[0032] 将式(7)转化为频域,可得:

$$[0033] \quad \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} = -\frac{j\omega + 2\omega_0}{(j\omega + \omega_0)^2} \quad (8)$$

[0034] 其中 j 是虚数单位, ω 是角频率;

[0035] 由式(8)得到反电势观测误差幅频响应幅值为:

$$[0036] \quad \left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2 + 4\omega_0^2}}{\omega^2 + \omega_0^2} \quad (9)$$

[0037] 因 $\omega \ll \omega_0$,由式(9)得到:

$$[0038] \quad \left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2 + 4\omega_0^2}}{\omega^2 + \omega_0^2} < \frac{C}{\omega_0} \quad (10)$$

[0039] 其中 C 为大于2的常数;最大反电势误差观测幅值可表示为:

$$[0040] \quad |e_{12}(j\omega)| = \frac{C}{\omega_0} \left| \dot{f}(j\omega) \right| \quad (11)$$

[0041] 其中 \dot{f} 为 x_2 的导数,表示为:

$$[0042] \quad \dot{f} = \begin{bmatrix} \dot{f}_\alpha \\ \dot{f}_\beta \end{bmatrix} = \frac{\psi_f \omega_e^2}{L_s} \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \sin \theta_e \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0043] 由式(12)可得 \dot{f} 的上界为:

$$[0044] \quad \dot{f} = \frac{\psi_f}{L_s} \omega_e^2 \quad (13)$$

[0045] 由式(13)得到 e_{12} 在时域 t 时刻的绝对值为:

$$[0046] \quad |e_{12}(t)| = \frac{C\psi_f}{L_s \omega_0} \omega_e^2 \quad (14)$$

[0047] 同理可得电流估计误差 e_{11} 为:

$$[0048] \quad |e_{11}(t)| = \frac{\psi_f}{L_s \omega_0^2} \omega_e^2 \quad (15)$$

[0049] 由式(14)和式(15)得到电流估计误差 e_{11} 与反电势估计误差 e_{12} 的关系:

$$[0050] \quad e_{11} |C \omega_0 = |e_{12}| \quad (16)$$

[0051] 由式(14)可得扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律为:

$$[0052] \quad \omega_0 = \frac{C\psi_f}{L_s e_{12}^*} \omega_e^2 \quad (17)$$

[0053] 其中 e_{12}^* 为额定的最大反电势观测误差值。

[0054] 进一步地,步骤S2所述转速自适应扩张状态观测器,具体通过将所述反电势观测误差自适应律代入步骤S1的扩张状态观测器得到。

[0055] 进一步地,所述步骤S3具体包括为:

[0056] 将基于转速自适应扩张状态观测器输出的反电势观测值作为锁相环的输入,根据下式计算角度误差:

$$[0057] \quad e_\theta = -\hat{e}_\alpha \cos \hat{\theta}_e - \hat{e}_\beta \sin \hat{\theta}_e \quad (18)$$

[0058] 机电角度、转速、角加速度三者之间导数关系为:

$$[0059] \quad \begin{cases} \dot{\theta}_e = \omega_e \\ \dot{\omega}_e = a_e \\ \dot{a}_e = d \end{cases} \quad (19)$$

[0060] 其中: a_e 为角加速度, d 为角加速度的导数;令: $x_{21} = \theta_e, x_{22} = \omega_e, x_{23} = a_e$;将式(19)转换为:

$$[0061] \quad \begin{cases} \dot{x}_{21} = x_{22} \\ \dot{x}_{22} = x_{23} \\ \dot{x}_{23} = d \end{cases} \quad (20)$$

[0062] 由式(20)建立锁相环中的扩张状态观测器:

$$[0063] \begin{cases} e_{21} = z_{21} - x_{21} \\ \cdot \\ z_{21} = z_{22} - \beta_{21}e_{21} \\ \cdot \\ z_{22} = z_{23} - \beta_{22}e_{21} \\ \cdot \\ z_{23} = -\beta_{23}e_{21} \end{cases} \quad (21)$$

[0064] 其中: e_{21} 表示 θ_e 的观测误差值; z_{21} 表示 θ_e 的观测值; z_{22} 表示 ω_e 的观测值; z_{23} 表示 a_e 的观测值; β_{21} 、 β_{22} 、 β_{23} 为扩张状态观测器的反馈增益系数;

[0065] 由式(21)可得基于扩张状态观测器的锁相环位置估计的传递函数为:

$$[0066] G(s) = \frac{\hat{\theta}_e(s)}{\theta_e(s)} = \frac{\beta_{21}s^2 + \beta_{22}s + \beta_{23}}{s^3 + \beta_{21}s^2 + \beta_{22}s + \beta_{23}} \quad (22)$$

[0067] 其中s代表复频率;依据带宽法,将观测器增益整定为:

$$[0068] [\beta_{21}\beta_{22}\beta_{23}] = [3\sigma_0^3\sigma_0^2\sigma_0^3] \quad (23)$$

[0069] 其中, σ_0 为锁相环里扩张状态观测器的带宽。

[0070] 基于相同的发明构思,本发明还提供了一种无位置传感器控制系统,包括:

[0071] 设计模块,用于基于永磁同步电机模型,搭建扩张状态观测器,在扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势的导数间建立传递函数,设计扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律;

[0072] 搭建模块,用于根据所述反电势观测误差自适应律搭建转速自适应扩张状态观测器,获得永磁同步电机两相静止坐标系下 α 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_α 和 β 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_β ;

[0073] 控制模块,用于采用基于扩张状态观测器的锁相环对上述反电势观测值进行处理,得到永磁同步电机的转速估计值 $\hat{\omega}_e$ 和角度估计值 $\hat{\theta}_e$ 。

[0074] 进一步地,所述设计模块,具体实现过程如下:

[0075] 首先建立永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型:

$$[0076] \begin{cases} \dot{i}_\alpha = -\frac{R}{L_s}i_\alpha + \frac{1}{L_s}u_\alpha - k_e e_\alpha \\ \dot{i}_\beta = -\frac{R}{L_s}i_\beta + \frac{1}{L_s}u_\beta - k_e e_\beta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_\alpha = -\omega_e \psi_f \sin \theta_e \\ e_\beta = \omega_e \psi_f \cos \theta_e \end{cases} \quad (2)$$

[0077] 其中: i_α 、 i_β 分别为 α 、 β 相定子电流, $i_{\alpha\beta} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ 、 $u_{\alpha\beta} = [u_\alpha \ u_\beta]^T$ 和 $e_{\alpha\beta} = [e_\alpha \ e_\beta]^T$ 分别为两相静止坐标系下的定子电流、定子电压和反电势; R 、 ψ_f 、 k_e 和 L_s 分别表示定子相电阻、转子磁链、感应电动势系数和电感参数值; ω_e 为转子电角速度, θ_e 为转子电角度; i_α 、 i_β 由采集

的三相电流 i_a, i_b, i_c 经过3s/2s变换得到：
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$
； u_α, u_β 由定子电压给

定值 u_d, u_q 经过2r/2s变换得到：
$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & -\sin\theta_e \\ \sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$$
；

[0078] 根据永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型,以定子电流为状态变量,反电动势为扩张变量建立扩张状态观测器；

[0079] 将 α, β 轴的反电势作为扩张的状态变量,令 $x_{11} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ $x_{12} = [-k_e e_\alpha \ -k_e e_\beta]^T = f$,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_s} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix}, \quad u = [u_\alpha \ u_\beta]^T$$
,将(1)式扩张为下式：

$$[0080] \quad \begin{cases} \dot{x}_{11} = Ax_{11} + x_{12} + Bu \\ \dot{x}_{12} = \dot{f} \\ y = x_{11} \end{cases} \quad (3)$$

[0081] 进而建立扩张状态观测器：

$$[0082] \quad \begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{z}_{11} = Az_{11} + z_{12} + Bu - \beta_{11} e_{11} \\ \dot{z}_{12} = -\beta_{12} e_{11} \end{cases} \quad (4)$$

[0083] 其中 e_{11} 表示定子电流的观测误差, β_{11}, β_{12} 为扩张状态观测器的反馈增益系数; $z_{11} = [z_{1\alpha} \ z_{1\beta}]^T$ 表示两相静止坐标系下的定子电流的观测值; $z_{12} = [z_{2\alpha} \ z_{2\beta}]^T$ 表示反电势的观测值, $k_e = 1/L_s$ ；

[0084] 由式(3)和式(4)可得扩张状态观测器的误差方程为：

$$[0085] \quad \begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{e}_{11} = Ae_{11} + e_{12} - \beta_{11} e_{11} \\ \dot{e}_{12} = -\beta_{12} e_{11} - \dot{f} \end{cases} \quad (5)$$

[0086] 其中 e_{12} 表示反电势的观测误差；

[0087] α, β 两相对称,以 α 相为对象分析,由式(5)可得扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势间建立传递函数为：

$$[0088] \quad \frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s + (\beta_{11} - A)}{s^2 + (\beta_{11} - A)s + \beta_{12}} \quad (6)$$

[0089] 其中 s 代表复频率；

[0090] 设 $\beta_{11}^{-1}A=2\omega_0$ 、 $\beta_{12}=\omega_0^2$,其中 ω_0 为扩张状态观测器带宽,将式(6)转化为:

$$[0091] \quad \frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s+2\omega_0}{s^2+2\omega_0s+\omega_0^2} = -\frac{s+2\omega_0}{(s+\omega_0)^2} \quad (7)$$

[0092] 将式(7)转化为频域,可得:

$$[0093] \quad \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} = -\frac{j\omega+2\omega_0}{(j\omega+\omega_0)^2} \quad (8)$$

[0094] 其中j是虚数单位, ω 是角频率;

[0095] 由式(8)得到反电势观测误差幅频响应幅值为:

$$[0096] \quad \left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2+4\omega_0^2}}{\omega^2+\omega_0^2} \quad (9)$$

[0097] 因 $\omega \ll \omega_0$,由式(9)得到:

$$[0098] \quad \left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2+4\omega_0^2}}{\omega^2+\omega_0^2} < \frac{C}{\omega_0} \quad (10)$$

[0099] 其中C为大于2的常数;最大反电势误差观测幅值可表示为:

$$[0100] \quad |e_{12}(j\omega)| = \frac{C}{\omega_0} |\dot{f}(j\omega)| \quad (11)$$

[0101] 其中 \dot{f} 为 x_2 的导数,表示为:

$$[0102] \quad \dot{f} = \begin{bmatrix} \dot{f}_\alpha \\ \dot{f}_\beta \end{bmatrix} = \frac{\psi_f \omega_e^2}{L_s} \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \sin \theta_e \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0103] 由式(12)可得 \dot{f} 的上界为:

$$[0104] \quad \dot{f} = \frac{\psi_f}{L_s} \omega_e^2 \quad (13)$$

[0105] 由式(13)得到 e_{12} 在时域t时刻的绝对值为:

$$[0106] \quad |e_{12}(t)| = \frac{C\psi_f}{L_s\omega_0} \omega_e^2 \quad (14)$$

[0107] 同理可得电流估计误差 e_{11} 为:

$$[0108] \quad |e_{11}(t)| = \frac{\psi_f}{L_s\omega_0^2} \omega_e^2 \quad (15)$$

[0109] 由式(14)和式(15)得到电流估计误差 e_{11} 与反电势估计误差 e_{12} 的关系:

$$[0110] \quad e_{11}|C\omega_0 = |e_{12}| \quad (16)$$

[0111] 由式(14)可得扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律为:

$$[0112] \quad \omega_0 = \frac{C\psi_f}{L_s e_{12}^*} \omega_e^2 \quad (17)$$

[0113] 其中 e_{12}^* 为额定的最大反电势观测误差值。

[0114] 基于相同的发明构思,本发明还提供了一种无位置传感器控制设备,包括:一个或多个处理器、一个或多个存储器以及一个或多个程序,所述程序存储在存储器中并被配置为由处理器执行,所述程序被加载至处理器时实现根据上述任一项所述的无位置传感器控制方法的步骤。

[0115] 基于相同的发明构思,本发明还提供了一种用于无位置传感器控制的存储介质,所述存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序包括程序指令,所述程序指令当被处理器执行时使所述处理器执行根据上述任一项所述的无位置传感器控制方法的步骤。

[0116] 有益效果:与现有技术相比,本发明具有如下显著优点:(1)基于反电势观测误差自适应律的扩张状态观测器通过转速自适应,减小了转速变化时的观测误差,提高了观测精度,提高了电机驱动系统可靠性;(2)本发明以反电势估计误差与转速间的关系推导自适应律,相较于使用电流观测误差与转速间关系推导自适应律的方法,不仅保证了反电势估计误差在一定范围内,且电流观测误差的值会随转速升高而减小,进一步提高了观测精度;(3)基于扩张状态观测器的锁相环相较于基于PI的锁相环,在转速变化时,具有更低的角度位置估计误差,进一步提升了系统的观测精度;(4)本发明所提出方法不需要额外的硬件设备,只需要从软件控制策略上实现,不增加额外的成本。

附图说明

- [0117] 图1为本发明实施例的方法流程图;
 [0118] 图2为本发明实施例的原理框架图;
 [0119] 图3为本发明实施例的转速自适应扩张状态观测器原理框架图;
 [0120] 图4为本发明实施例基于扩张状态观测器的锁相环原理框架图;
 [0121] 图5为传统扩张状态观测器及基于PI锁相环估计的转速和实际转速仿真图;
 [0122] 图6为本发明实施例的估计转速和实际转速的仿真图;
 [0123] 图7为传统扩张状态观测器及基于PI锁相环估计的转速误差仿真图;
 [0124] 图8为本发明实施例的估计转速误差的仿真图。

具体实施方式

[0125] 为了使本发明的技术方案及优点更加清楚明白,下面结合附图与实施例对本发明的技术方案作进一步说明。

[0126] 如附图1所示,本实施例的无位置传感器控制方法,包括:

[0127] S1:基于永磁同步电机模型,搭建扩张状态观测器,在扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势的导数间建立传递函数,设计扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律;

[0128] S2:根据所述反电势观测误差自适应律搭建转速自适应扩张状态观测器,获得永磁同步电机两相静止坐标系下 α 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_α 和 β 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_β ;

[0129] S3:采用基于扩张状态观测器的锁相环对上述反电势观测值进行处理,得到永磁同步电机的转速估计值 $\hat{\omega}_e$ 和角度估计值 $\hat{\theta}_e$ 。

[0130] 本实施例相对应的永磁同步电机无位置传感器控制系统的原理框架,如图2所示。

[0131] 模块6为3s/2s坐标变换,表达式为:

$$[0132] \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

[0133] 模块5为2r/2s坐标变换,表达式为:

$$[0134] \quad \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$$

[0135] 模块7为2s/2r坐标变换,表达式为:

$$[0136] \quad \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}$$

[0137] 通过模块4获得的定子电流 i_a, i_b, i_c 经过3s/2s坐标变换模块6,得到两相静止坐标系下的电流指令 i_α, i_β 。

[0138] 将电流指令 i_α, i_β 输入到基于反电势观测误差自适应律的扩张状态观测器模块11中,将2r/2s坐标变换模块5输出的电压指令 u_α, u_β 输入到转速基于反电势观测误差自适应律的扩张状态观测器模块11中,同时将锁相环输出的观测转速 $\hat{\omega}_e$ 输入到基于反电势观测误差自适应律的扩张状态观测器模块11中,基于反电势观测误差自适应律的扩张状态观测器模块11输出反电势观测值 \hat{e}_α 和 \hat{e}_β 。

[0139] 反电势观测值 \hat{e}_α 和 \hat{e}_β 输入到基于扩张状态观测器的锁相环模块12,估算出转子位置观测值 $\hat{\theta}_e$ 和转速观测值 $\hat{\omega}_e$ 。

[0140] 将得到的转子位置观测值 $\hat{\theta}_e$ 分别输至2r/2s坐标变换模块5和2s/2r坐标变换模块7。将得到的转速观测值n反馈到转速输入端与 n^* 比较后输入给转速环调节器模块10,经模块10调节后得到电流 i_q^* 。

[0141] 经2s/2r坐标变换模块7输出的电流 i_d 和 i_q ,电流 i_d 与d轴电流给定参考值 d^* 比较后输入到电流环调节器模块8,输出d轴电压 u_d^* 。转速环调节器模块10输出的电流 i_q^* 与电流 i_q 比较后输入到电流环调节器模块9,输出q轴电压 u_q^* 。

[0142] 电压指令 u_d^* 和 u_q^* 经过2r/2s坐标变换模块5,得到两相静止坐标系下的电压指令 u_α, u_β 。将电压指令 u_α, u_β 输入到SVPWM模块3中,输出PWM驱动信号,再经过逆变器模块2驱动永磁同步电机模块1。

[0143] 本实施例的无位置传感器控制方法,具体如下:

[0144] 步骤S1:根据永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型,以定子电流为状态变量,反电动势为扩张变量建立扩张状态观测器;

[0145] 首先建立永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型,该数学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{i}_\alpha = -\frac{R}{L_s}i_\alpha + \frac{1}{L_s}u_\alpha - k_e e_\alpha \\ \dot{i}_\beta = -\frac{R}{L_s}i_\beta + \frac{1}{L_s}u_\beta - k_e e_\beta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_\alpha = -\omega_e \psi_f \sin \theta_e \\ e_\beta = \omega_e \psi_f \cos \theta_e \end{cases} \quad (2)$$

[0147] 其中: $i_{\alpha\beta} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$, $u_{\alpha\beta} = [u_\alpha \ u_\beta]^T$, $e_{\alpha\beta} = [e_\alpha \ e_\beta]^T$ 分别为两相静止坐标系下的定子电流、定子电压和反电势;

[0148] R 、 ψ_f 、 k_e 、 L_s 分别表示定子相电阻、转子磁链、感应电动势系数和电感参数值;

[0149] ω_e 为转子电角速度, θ_e 为转子电角度;

[0150] 其中 i_α 、 i_β 由采集的三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 经过模块6, 3s/2s变换得到, 如下式所示:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

[0152] u_α 、 u_β 由定子电压给定值经过模块5, 2r/2s变换得到, 如下式所示:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$$

[0154] 将 α 、 β 轴的反电势作为扩张的状态变量, 令

$$x_{11} = [i_\alpha \ i_\beta]^T, x_{12} = [-k_e e_\alpha \ -k_e e_\beta]^T = f, A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_s} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix}, \text{ 则可将}$$

(1) 式扩张为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_{11} = Ax_{11} + x_{12} + Bu \\ \dot{x}_{12} = f \\ y = x_{11} \end{cases} \quad (3)$$

[0157] 由此建立扩张状态观测器:

$$\begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{z}_{11} = Az_{11} + z_{12} + Bu - \beta_{11} e_{11} \\ \dot{z}_{12} = -\beta_{12} e_{11} \end{cases} \quad (4)$$

[0159] 其中 e_{11} 表示定子电流的观测误差;

[0160] $z_{11} = [z_{1\alpha} \ z_{1\beta}]^T$ 表示两相静止坐标系下的定子电流的观测值;

[0161] $z_{12} = [z_{2\alpha} \ z_{2\beta}]^T$ 表示反电势的观测值, $k_e = 1/L_s$;

[0162] 由式(3)和式(4)可得扩张状态观测器的误差方程为:

$$[0163] \begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{e}_{11} = Ae_{11} + e_{12} - \beta_{11}e_{11} \\ \dot{e}_{12} = -\beta_{12}e_{11} - \dot{f} \end{cases} \quad (5)$$

[0164] 其中 e_{12} 表示反电势的观测误差;

[0165] 因 α 、 β 两相对称,故以 α 相为对象分析。由式(5)可得扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势间建立传递函数为:

$$[0166] \frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s + (\beta_{11} - A)}{s^2 + (\beta_{11} - A)s + \beta_{12}} \quad (6)$$

[0167] 设 $\beta_{11} - A = 2\omega_0$ 、 $\beta_{12} = \omega_0^2$,其中 ω_0 为扩张状态观测器带宽,得式(6)为:

$$[0168] \frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s + 2\omega_0}{s^2 + 2\omega_0s + \omega_0^2} = -\frac{s + 2\omega_0}{(s + \omega_0)^2} \quad (7)$$

[0169] 将式(7)转化为频域,可得:

$$[0170] \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} = -\frac{j\omega + 2\omega_0}{(j\omega + \omega_0)^2} \quad (8)$$

[0171] 由式(8)可得反电势观测误差幅频响应幅值为:

$$[0172] \left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2 + 4\omega_0^2}}{\omega^2 + \omega_0^2} \quad (9)$$

[0173] 因 $\omega \ll \omega_0$,由式(9)可得:

$$[0174] \left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2 + 4\omega_0^2}}{\omega^2 + \omega_0^2} < \frac{C}{\omega_0} \quad (10)$$

[0175] 其中C为大于2的常数。

[0176] 最大反电势误差观测幅值可表示为:

$$[0177] |e_{12}(j\omega)| = \frac{C}{\omega_0} |\dot{f}(j\omega)| \quad (11)$$

[0178] 其中 \dot{f} 为 x_2 的导数,可表示为:

$$[0179] \dot{f} = \begin{bmatrix} \dot{f}_\alpha \\ \dot{f}_\beta \end{bmatrix} = \frac{\psi_f \omega_e^2}{L_s} \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \sin \theta_e \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0180] 由式(12)可得 \dot{f} 的上界为:

$$[0181] \quad \dot{f} = \frac{\psi_f}{L_s} \omega_e^2 \quad (13)$$

[0182] 由式(13)可得 e_{12} 在时域 t 时刻的绝对值为:

$$[0183] \quad |e_{12}(t)| = \frac{C\psi_f}{L_s\omega_0} \omega_e^2 \quad (14)$$

[0184] 同理可得电流估计误差 e_{11} 为:

$$[0185] \quad |e_{11}(t)| = \frac{\psi_f}{L_s\omega_0^2} \omega_e^2 \quad (15)$$

[0186] 由式(14)和式(15)可得电流估计误差 e_{11} 与反电势估计误差 e_{12} 的关系:

$$[0187] \quad e_{11} |C\omega_0| = |e_{12}| \quad (16)$$

[0188] 由式(16)可以看到 e_{11} 与 e_{12} 存在以 $C\omega_0$ 为倍数得关系,若以 e_{11} 与转速的关系推导参数自适应律,虽然保证了 e_{11} 的值在一定范围内,但随着转速升高, ω_0 也在随之升高,此时反电势估计误差 e_{12} 也随之升高。本发明以反电势估计误差 e_{12} 与转速间的关系推导自适应律,不仅保证了反电势估计误差 e_{12} 在一定范围内,且 e_{11} 的值会随转速升高而减小,进一步提高了观测精度。

[0189] 式(11)是频域描述,表示反电势观测误差值 e_{12} 在正弦稳态响应下的幅值;式(14)是时域描述,表示 t 时刻反电势观测误差值 e_{12} 的绝对值。由此可见,反电势观测误差值 e_{12} 在任意时刻不会超过 $\frac{C\psi_f}{L_s\omega_0} \omega_e^2$ 。

[0190] 由式(14)可得扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律为:

$$[0191] \quad \omega_0 = \frac{C\psi_f}{L_s e_{12}^*} \omega_e^2 \quad (17)$$

[0192] 其中 e_{12}^* 为额定的最大反电势观测误差值。

[0193] 步骤S2:将式(17)带入式(4)即得本发明所述基于反电势观测误差自适应律的扩张状态观测器,即转速自适应扩张状态观测器,如图3所示,所述基于反电势观测误差自适应律的扩张状态观测器观测反电势 \hat{e}_α 的原理,因 $\alpha\beta$ 轴对称,同理可得观测 β 轴反电势的结构框图。

[0194] 步骤3具体为:

[0195] 将基于反电势观测误差自适应律的转速自适应扩张状态观测器输出的反电势观测值作为锁相环的输入,如图4所示;根据如下关系计算角度误差:

$$[0196] \quad e_\theta = -\hat{e}_\alpha \cos \hat{\theta}_e - \hat{e}_\beta \sin \hat{\theta}_e \quad (18)$$

[0197] 机电角速度、转速、角加速度三者之间导数关系为:

$$[0198] \quad \begin{cases} \dot{\theta}_e = \omega_e \\ \dot{\omega}_e = a_e \\ \dot{a}_e = d \end{cases} \quad (19)$$

[0199] 其中： a_e 为角加速度， d 为角加速度的导数。令： $x_{21} = \theta_e$ ， $x_{22} = \omega_e$ ， $x_{23} = a_e$ 。可得式(19)为：

$$[0200] \begin{cases} \dot{x}_{21} = x_{22} \\ \dot{x}_{22} = x_{23} \\ \dot{x}_{23} = d \end{cases} \quad (20)$$

[0201] 由式(20)建立锁相环中的扩张状态观测器：

$$[0202] \begin{cases} e_{21} = z_{21} - x_{21} \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_{21}e_{21} \\ \dot{z}_{22} = z_{23} - \beta_{22}e_{21} \\ \dot{z}_{23} = -\beta_{23}e_{21} \end{cases} \quad (21)$$

[0203] 其中： e_{21} 表示 θ_e 的观测误差值； z_{21} 表示 θ_e 的观测值； z_{22} 表示 ω_e 的观测值； z_{23} 表示 a_e 的观测值； β_{21} 、 β_{22} 、 β_{23} 为扩张状态观测器的反馈增益系数。应当注意，扩张状态观测器的位置估计误差定义为 $\hat{\theta}_e - \theta_e$ ，而式(18)中输出的误差定义为 $\theta_e - \hat{\theta}_e$ 。因此，在误差前向通道增加了一个负单位增益环节，以实现符号转换。

[0204] 由式(21)可得基于扩张状态观测器的锁相环位置估计的传递函数为：

$$[0205] G(s) = \frac{\hat{\theta}_e(s)}{\theta_e(s)} = \frac{\beta_{21}s^2 + \beta_{22}s + \beta_{23}}{s^3 + \beta_{21}s^2 + \beta_{22}s + \beta_{23}} \quad (22)$$

[0206] 依据“带宽法”，可将观测器增益整定为：

$$[0207] [\beta_{21}\beta_{22}\beta_{23}] = [3\sigma_0^3\sigma_0^2\sigma_0^3] \quad (23)$$

[0208] 其中， σ_0 为锁相环里扩张状态观测器的带宽。

[0209] 本发明中提及的所有角度均为电角度。

[0210] 通过Matlab/Simulink进行仿真验证，电机参数如表1所示：

[0211] 表1电机参数表

变量	符号	数值
定子电阻	R	2.857 Ω
定子电感	L_s	8.5 mH
[0212] 粘滞摩擦系数	B	0.008 N·m·s
极对数	Pn	4
转子磁链	$flux$	0.175 Wb
转子惯量	J	0.003 kg·m ²

[0213] 采用基于反电势观测误差自适应律的扩张状态观测器及基于扩张状态观测器的锁相环估计的转速，如图5、图6、图7和图8所示，当转速变化时，相较于传统扩张状态观测器及基于PI的锁相环，估计转速误差波动更小，到达稳定转速的时间更短，具有更好的估计性能。

[0214] 基于相同的发明构思,本发明还提供了一种无位置传感器控制系统,包括:

[0215] 设计模块,用于基于永磁同步电机模型,搭建扩张状态观测器,在扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势的导数间建立传递函数,设计扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律;

[0216] 搭建模块,用于根据所述反电势观测误差自适应律搭建转速自适应扩张状态观测器,获得永磁同步电机两相静止坐标系下 α 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_α 和 β 轴的等效反电势观测值 \hat{e}_β ;

[0217] 控制模块,用于采用基于扩张状态观测器的锁相环对上述反电势观测值进行处理,得到永磁同步电机的转速估计值 $\hat{\omega}_e$ 和角度估计值 $\hat{\theta}_e$ 。

[0218] 进一步地,所述设计模块,具体实现过程如下:

[0219] 首先建立永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型:

$$[0220] \quad \begin{cases} \dot{i}_\alpha = -\frac{R}{L_s} i_\alpha + \frac{1}{L_s} u_\alpha - k_e e_\alpha \\ \dot{i}_\beta = -\frac{R}{L_s} i_\beta + \frac{1}{L_s} u_\beta - k_e e_\beta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_\alpha = -\omega_e \psi_f \sin \theta_e \\ e_\beta = \omega_e \psi_f \cos \theta_e \end{cases} \quad (2)$$

[0221] 其中: i_α 、 i_β 分别为 α 、 β 相定子电流, $i_{\alpha\beta} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ 、 $u_{\alpha\beta} = [u_\alpha \ u_\beta]^T$ 和 $e_{\alpha\beta} = [e_\alpha \ e_\beta]^T$ 分别为两相静止坐标系下的定子电流、定子电压和反电势; R 、 ψ_f 、 k_e 和 L_s 分别表示定子相电阻、转子磁链、感应电动势系数和电感参数值; ω_e 为转子电角速度, θ_e 为转子电角度; i_α 、 i_β 由采集

的三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 经过3s/2s变换得到: $\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$; u_α 、 u_β 由定子电压给

定值 u_d 、 u_q 经过2r/2s变换得到: $\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$;

[0222] 根据永磁同步电机两相静止坐标系下的数学模型,以定子电流为状态变量,反电动势为扩张变量建立扩张状态观测器;

[0223] 将 α 、 β 轴的反电势作为扩张的状态变量,令 $x_{11} = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ $x_{12} = [-k_e e_\alpha \ -k_e e_\beta]^T = f$,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_s} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix}, \quad u = [u_\alpha \ u_\beta]^T, \text{ 将(1)式扩张为下式:}$$

$$[0224] \quad \begin{cases} \dot{x}_{11} = Ax_{11} + x_{12} + Bu \\ \dot{x}_{12} = \dot{f} \\ y = x_{11} \end{cases} \quad (3)$$

[0225] 进而建立扩张状态观测器:

$$[0226] \quad \begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{z}_{11} = Az_{11} + z_{12} + Bu - \beta_{11}e_{11} \\ \dot{z}_{12} = -\beta_{12}e_{11} \end{cases} \quad (4)$$

[0227] 其中 e_{11} 表示定子电流的观测误差, β_{11} 、 β_{12} 为扩张状态观测器的反馈增益系数; $z_{11} = [z_{1\alpha} \ z_{1\beta}]^T$ 表示两相静止坐标系下的定子电流的观测值; $z_{12} = [z_{2\alpha} \ z_{2\beta}]^T$ 表示反电势的观测值, $k_e = 1/L_s$;

[0228] 由式(3)和式(4)可得扩张状态观测器的误差方程为:

$$[0229] \quad \begin{cases} e_{11} = z_{11} - x_{11} \\ \dot{e}_{11} = Ae_{11} + e_{12} - \beta_{11}e_{11} \\ \dot{e}_{12} = -\beta_{12}e_{11} - \dot{f} \end{cases} \quad (5)$$

[0230] 其中 e_{12} 表示反电势的观测误差;

[0231] α 、 β 两相对称,以 α 相为对象分析,由式(5)可得扩张状态观测器反电势的观测误差与反电势间建立传递函数为:

$$[0232] \quad \frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s + (\beta_{11} - A)}{s^2 + (\beta_{11} - A)s + \beta_{12}} \quad (6)$$

[0233] 其中 s 代表复频率;

[0234] 设 $\beta_{11} - A = 2\omega_0$ 、 $\beta_{12} = \omega_0^2$,其中 ω_0 为扩张状态观测器带宽,将式(6)转化为:

$$[0235] \quad \frac{e_{12}(s)}{\dot{f}(s)} = -\frac{s + 2\omega_0}{s^2 + 2\omega_0s + \omega_0^2} = -\frac{s + 2\omega_0}{(s + \omega_0)^2} \quad (7)$$

[0236] 将式(7)转化为频域,可得:

$$[0237] \quad \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} = -\frac{j\omega + 2\omega_0}{(j\omega + \omega_0)^2} \quad (8)$$

[0238] 其中 j 是虚数单位, ω 是角频率;

[0239] 由式(8)得到反电势观测误差幅频响应幅值为:

$$[0240] \quad \left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2 + 4\omega_0^2}}{\omega^2 + \omega_0^2} \quad (9)$$

[0241] 因 $\omega \ll \omega_0$,由式(9)得到:

$$[0242] \quad \left| \frac{e_{12}(j\omega)}{\dot{f}(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega^2 + 4\omega_0^2}}{\omega^2 + \omega_0^2} < \frac{C}{\omega_0} \quad (10)$$

[0243] 其中C为大于2的常数;最大反电势误差观测幅值可表示为:

$$[0244] \quad |e_{12}(j\omega)| = \frac{C}{\omega_0} |\dot{f}(j\omega)| \quad (11)$$

[0245] 其中 \dot{f} 为 x_2 的导数,表示为:

$$[0246] \quad \dot{f} = \begin{bmatrix} \dot{f}_\alpha \\ \dot{f}_\beta \end{bmatrix} = \frac{\psi_f \omega_e^2}{L_s} \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \sin \theta_e \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0247] 由式(12)可得 \dot{f} 的上界为:

$$[0248] \quad \dot{f} = \frac{\psi_f}{L_s} \omega_e^2 \quad (13)$$

[0249] 由式(13)得到 e_{12} 在时域t时刻的绝对值为:

$$[0250] \quad |e_{12}(t)| = \frac{C\psi_f}{L_s\omega_0} \omega_e^2 \quad (14)$$

[0251] 同理可得电流估计误差 e_{11} 为:

$$[0252] \quad |e_{11}(t)| = \frac{\psi_f}{L_s\omega_0^2} \omega_e^2 \quad (15)$$

[0253] 由式(14)和式(15)得到电流估计误差 e_{11} 与反电势估计误差 e_{12} 的关系:

[0254] $|e_{11}| C \omega_0 = |e_{12}|$ (16) 由式(14)可得扩张状态观测器参数随转速变化的反电势观测误差自适应律为:

$$[0255] \quad \omega_0 = \frac{C\psi_f}{L_s e_{12}^*} \omega_e^2 \quad (17)$$

[0256] 其中 e_{12}^* 为额定的最大反电势观测误差值。

[0257] 基于相同的发明构思,本实施例还提供了一种无位置传感器控制设备,包括:一个或多个处理器、一个或多个存储器以及一个或多个程序,所述程序存储在存储器中并被配置为由处理器执行,所述程序被加载至处理器时实现根据上述任一项所述的无位置传感器控制方法的步骤。

[0258] 基于相同的发明构思,本实施例还提供了一种用于无位置传感器控制的存储介质,所述存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序包括程序指令,所述程序指令当被处理器执行时使所述处理器执行根据上述任一项所述的无位置传感器控制方法的步骤。

[0259] 本发明提供了一种无位置传感器控制方法,在扩张状态观测器反电势的观测误差 e_{12} 与反电势的导数间建立传递函数,提出一种基于反电势观测误差自适应律的扩张状态观测器,相较于传统方法的观测器,不仅可以保证反电势观测误差在转速升高时保持在一定范围内,且电流观测误差会随转速升高而下降,在同一数量级的最大误差值设置下,本发明所提基于反电势观测误差自适应律的扩张状态观测器的电流观测误差也远远小于传统方

法。同时提出一种基于扩张状态观测器的锁相环估计转子位置与转速,进一步提高无位置传感器控制系统的估计性能。

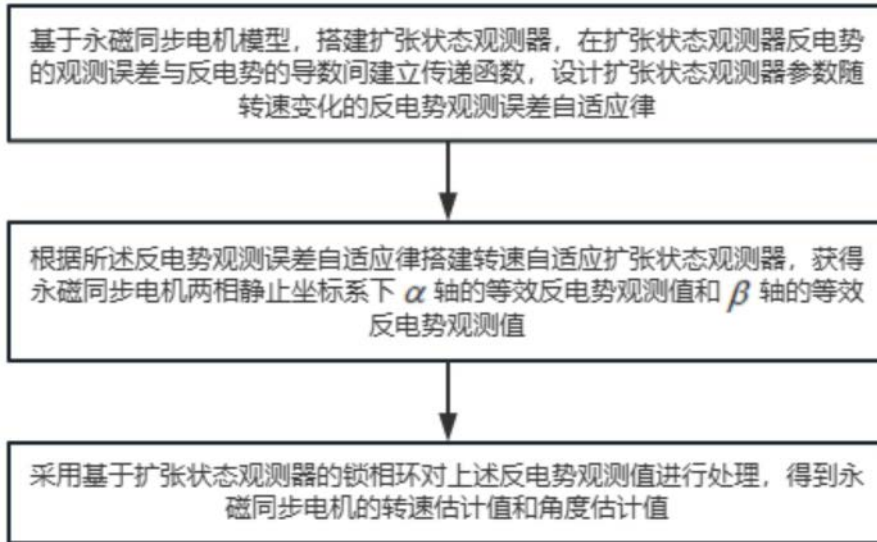


图1

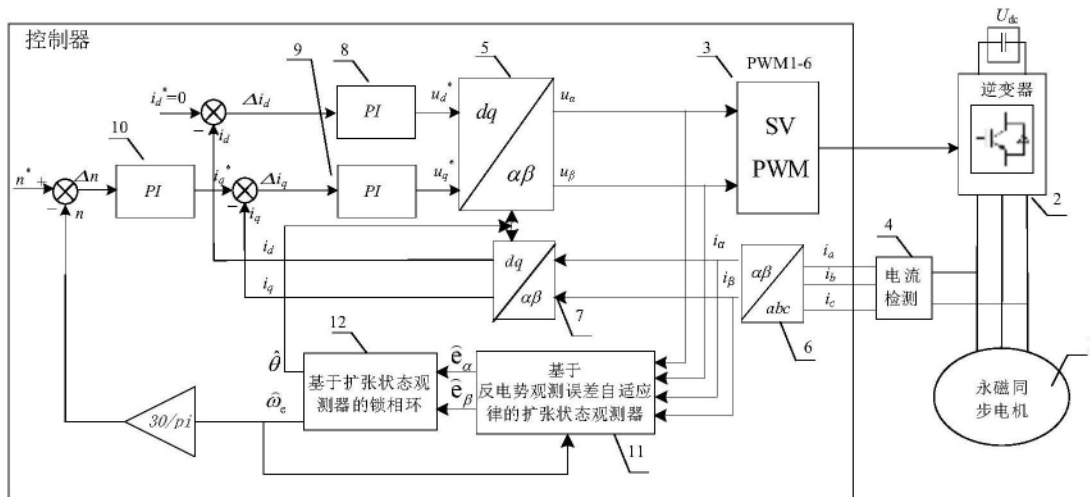


图2

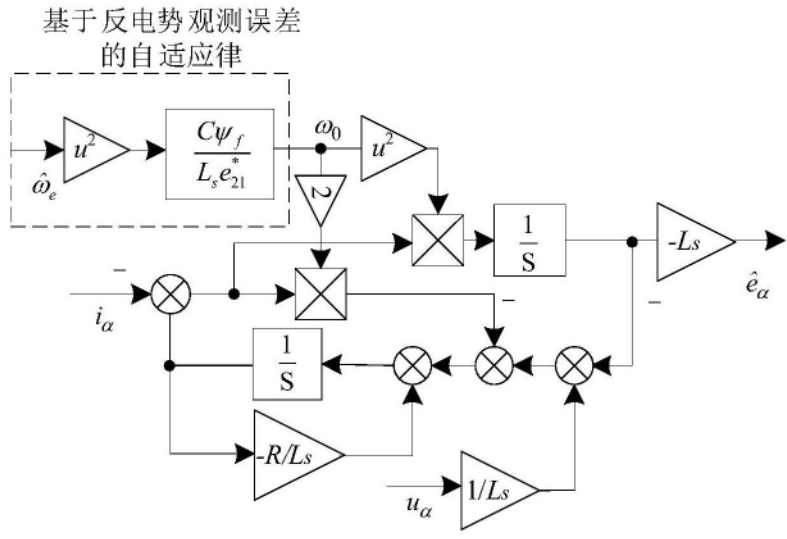


图3

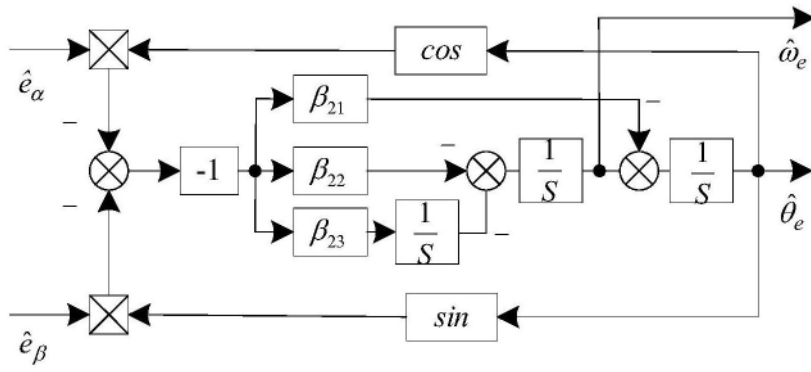


图4

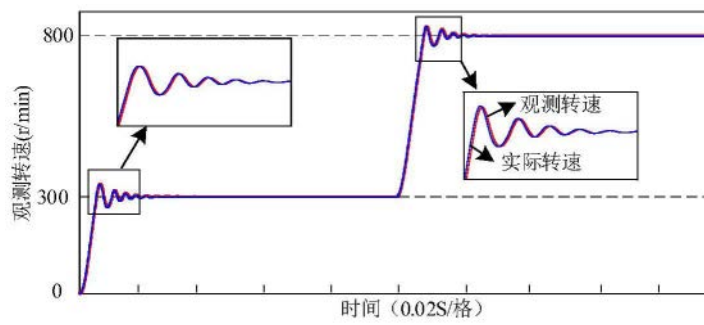


图5

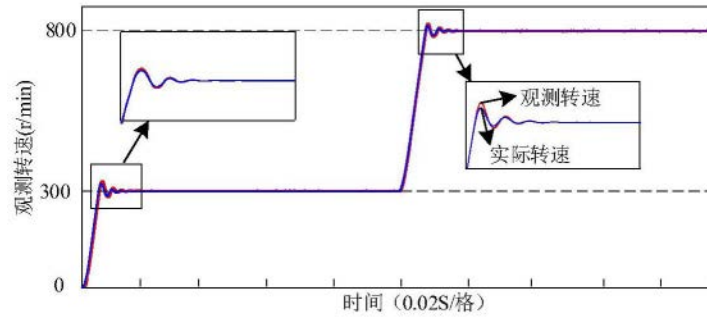


图6

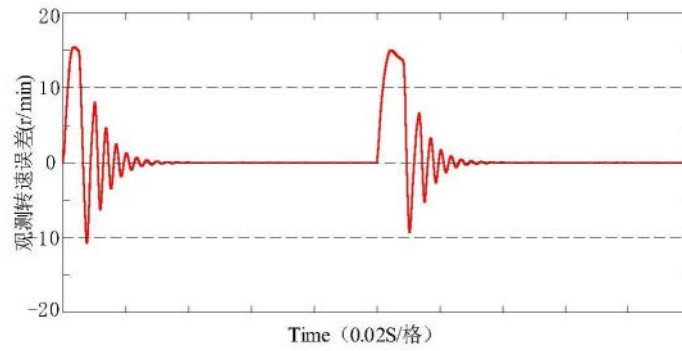


图7

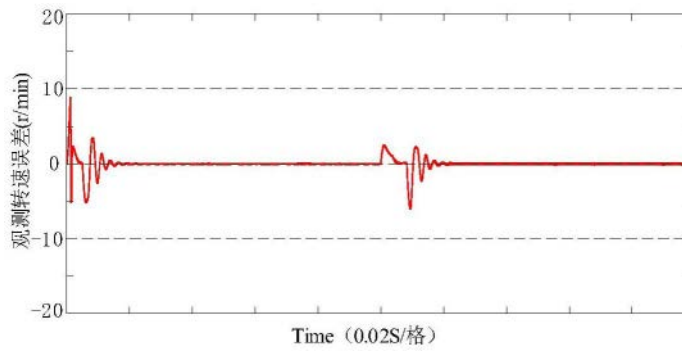


图8