



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102779238 A

(43) 申请公布日 2012. 11. 14

(21) 申请号 201210283239. 5

(22) 申请日 2012. 08. 09

(71) 申请人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路 37 号

(72) 发明人 魏彤 郭蕊 李海涛 刘云波

赵林 向岷

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责

任公司 11251

代理人 成金玉 贾玉忠

(51) Int. Cl.

G06F 19/00 (2011. 01)

H02P 6/00 (2006. 01)

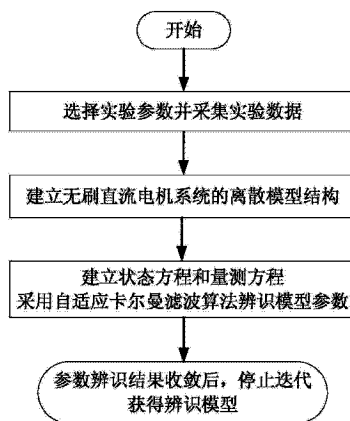
权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 3 页

## (54) 发明名称

一种基于自适应卡尔曼滤波的无刷直流电机系统辨识方法

## (57) 摘要

一种基于自适应卡尔曼滤波的无刷直流电机系统辨识方法,包括采集实验数据、建立离散模型结构、辨识模型参数三个环节。首先,在输入信号为方波电压的情况下采集无刷直流电机系统的输入输出数据,其次建立无刷直流电机系统以电压为输入以角速率为输出的传递函数,将该传递函数离散化,得到其离散模型结构,然后依据无刷直流电机系统的离散模型结构建立系统状态方程和量测方程,将采集的输入输出数据代入自适应卡尔曼滤波算法进行模型参数辨识,在参数辨识结果收敛之后,停止迭代,获得无刷直流电机系统的辨识模型。本发明能够在量测噪声特性变化的情况下,获得高精度的辨识结果,并且简单易行,便于在工程实践中应用。



1. 一种基于自适应卡尔曼滤波的无刷直流电机系统辨识方法,其特征在于包括下列步骤:

(1) 选择实验参数,并采集实验数据;

以单位阶跃电压作为无刷直流电机系统的输入,得到其单位阶跃响应曲线,依据单位阶跃响应曲线得到过渡过程时间  $t_s$ , 根据  $t_s$  选择无刷直流电机系统的输入信号周期  $t_{input}$  和采样周期  $t_{sample}$ 。以周期为  $t_{input}$  的方波电压作为无刷直流电机系统的输入信号,以  $t_{sample}$  为采样周期采集无刷直流电机系统的输入电压  $u(k)$  和输出角速率  $\omega(k)$ , 其中  $k$  表示第  $k$  个采样时刻,其取值为  $k = 1, 2, \dots, X$ ,  $X$  表示共采集  $X$  组数据,  $X$  通常的取值范围为  $X \geq 5000$ ;

(2) 建立无刷直流电机系统的离散模型结构;

建立无刷直流电机系统以电压为输入,以角速率为输出的传递函数  $G(s)$ , 其中  $s$  为连续域复变量,将  $G(s)$  离散化,得到无刷直流电机系统的离散模型结构  $G(z) = z^{-d} \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}}$ , 其中  $z$  为离散域复变量,  $z^{-1}$  为  $z$  的倒数,  $n_a$ 、 $n_b$  分别为分母阶次和分子阶次,  $d$  为延迟时间,  $a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}$  为无刷直流电机系统离散模型结构的待辨识参数;

(3) 建立无刷直流电机系统的状态方程和量测方程,采用自适应卡尔曼滤波算法辨识电机系统模型参数;

依据步骤(2)中建立的离散模型结构,以待辨识参数  $\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}]^T$  为状态变量,以步骤(1)中采集的输入电压  $u(k)$  和输出角速率  $\omega(k)$  作为量测值,以  $\varphi(k) = [-\omega(k-1), -\omega(k-2), \dots, -\omega(k-n_a), u(k-d), u(k-d-1), u(k-d-2), \dots, u(k-d-n_b)]$  作为量测矩阵,建立无刷直流电机系统的状态方程和量测方程为:

$$\begin{cases} \theta(k) = A(k)\theta(k-1) + \varepsilon(k-1) \\ \omega(k) = \varphi(k)\theta(k) + \xi(k) \end{cases}$$

其中  $A(k)$  为  $k$  时刻的一步转移矩阵,  $\varepsilon(k-1)$  为  $k-1$  时刻的系统噪声,  $\xi(k)$  为  $k$  时刻的量测噪声。采用自适应卡尔曼滤波算法辨识模型参数,得到  $\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}]^T$  在  $k$  时刻的参数辨识结果  $\hat{\theta}(k) = [\hat{a}_1(k), \hat{a}_2(k), \dots, \hat{a}_{n_a}(k), \hat{b}_0(k), \hat{b}_1(k), \dots, \hat{b}_{n_b}(k)]^T$ ;

(4) 当参数辨识结果满足收敛条件后停止迭代,获得无刷直流电机系统的辨识模型

$$\hat{G}(z) = z^{-d} \frac{\hat{b}_0 + \hat{b}_1 z^{-1} + \hat{b}_2 z^{-2} + \dots + \hat{b}_{n_b} z^{-n_b}}{1 + \hat{a}_1 z^{-1} + \hat{a}_2 z^{-2} + \dots + \hat{a}_{n_a} z^{-n_a}}。$$

2. 根据权利要求1所述的一种基于自适应卡尔曼滤波的无刷直流电机系统辨识方法,其特征在于:所述步骤(1)中的输入信号周期  $t_{input}$  和采样周期  $t_{sample}$  的选择范围为:

$$\frac{t_s}{100} \leq t_{input} \leq t_s, \quad \frac{t_s}{10^5} \leq t_{sample} \leq \frac{t_s}{10}。$$

3. 根据权利要求1所述的一种基于自适应卡尔曼滤波的无刷直流电机系统辨识方法,其特征在于:所述步骤(3)中的采用自适应卡尔曼滤波算法辨识模型参数的步骤为:

(a) 设定一个  $M$  时刻,  $M$  通常的取值范围为  $500 \leq M \leq 2000$ ,  $k < M$  时为自适应卡尔曼

滤波算法的启动阶段,此时采用常规的卡尔曼滤波算法进行模型参数辨识,算法为:

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = A(k)\hat{\theta}(k-1) + K(k)[\omega(k) - \varphi(k)A(k)\hat{\theta}(k-1)] \\ e(k) = \omega(k) - \varphi(k)A(k)\hat{\theta}(k-1) \\ K(k) = P_{k/k-1}(k)\varphi^T(k)[P_v(k)]^{-1} \\ P_v(k) = R(k) + \varphi(k)P_{k/k-1}(k)\varphi^T(k) \\ P_{k/k-1}(k) = A(k)P(k-1)A^T(k) + \varepsilon(k-1) \\ P(k) = [I - K(k)\varphi(k)]P_{k/k-1}(k) \end{cases}$$

其中  $K(k)$  为  $k$  时刻的滤波增益,  $e(k)$  为  $k$  时刻的新息,  $P_{k/k-1}(k)$  为  $k$  时刻的一步预测方差,  $P_v(k)$  为  $k$  时刻  $e(k)$  的理论方差,  $R(k)$  是  $k$  时刻的量测噪声理论方差,  $P(k)$  是  $k$  时刻估计误差的方差, 设定常规的卡尔曼滤波算法的初值  $\hat{\theta}(0) = \mathbf{0}$ ,  $P(0) = 1000I_{n_a+n_b+1}$ , 其中  $I_{n_a+n_b+1}$  表示  $(n_a+n_b+1) \times (n_a+n_b+1)$  的单位阵;

(b) 当  $k \geq M$  时, 采用自适应卡尔曼滤波算法进行参数辨识, 方法为: 首先通过第  $M$  个时刻到第  $k$  个时刻的新息计算新息的实际方差  $C_v(k)$ , 计算方法为:

$$C_v(k) = C_v(k-1) + \frac{1}{k-M+1} [e(k)^2 - C_v(k-1)]$$

其中  $C_v(k)$  的初值给定为 0, 然后以  $C_v(k)$  代替新息理论方差  $P_v(k)$  在滤波增益  $K(k)$  中的位置参与迭代计算, 即可实现根据量测噪声特性变化自适应调整滤波增益  $K(k)$  的值。

4. 根据权利要求 1 所述的一种基于自适应卡尔曼滤波的无刷直流电机系统辨识方法, 其特征在于: 所述步骤 (4) 中的收敛条件以及获得无刷直流电机系统的辨识模型的方法为:

(a) 在参数辨识过程中, 如果有连续  $N$  个时刻的  $\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-1) \leq 1 \times 10^{-4}$ , 则认为参数收敛, 停止迭代,  $N$  通常取大于等于 3000 的数值。

(b) 对最后  $N$  个时刻的参数辨识结果取平均值, 将该平均值作为辨识模型的参数  $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_{n_a}, \hat{b}_0, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{n_b}$ , 从而得到辨识模型

$$\hat{G}(z) = z^{-d} \frac{\hat{b}_0 + \hat{b}_1 z^{-1} + \hat{b}_2 z^{-2} + \dots + \hat{b}_{n_b} z^{-n_b}}{1 + \hat{a}_1 z^{-1} + \hat{a}_2 z^{-2} + \dots + \hat{a}_{n_a} z^{-n_a}}.$$

## 一种基于自适应卡尔曼滤波的无刷直流电机系统辨识方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于自适应卡尔曼滤波的无刷直流电机系统辨识方法,用于在量测噪声特性变化的情况下获得准确的无刷直流电机系统模型,特别适用于磁悬浮控制力矩陀螺用无刷直流电机,以提高无刷直流电机系统的控制精度。

### 背景技术

[0002] 无刷直流电机以其运行效率高、调速性能好等优点在国民经济的各个领域以及人们的日常生活中获得了广泛应用。但在长期运行过程中,无刷直流电机的绕组会随着使用时间增长而出现特性慢变,再加上温度变化和磁路饱和的影响,电机参数不再保持恒定,继而引起无刷直流电机模型发生变化,其结果会导致依照先前模型设计的控制器无法得到令人满意的控制效果,严重时甚至会发生系统失稳无法控制的情况,因此获得准确的无刷直流电机模型对于高精度的控制系统来说是十分重要的。

[0003] 系统辨识是获得无刷直流电机模型的一种有效方法,通过系统辨识可以实现无刷直流电机的干扰观测、自适应控制和在线故障诊断等,有利于无刷直流电机的长期正常运行。但在实际工作过程中,实测的电机转速经常包含有各种量测噪声,而且这些噪声的特性通常是变化的。在这种情况下进行系统辨识,辨识结果往往易受噪声影响而精度不高,因此要想在量测噪声特性变化的情况下获得准确的辨识结果,就需要选择一种能够有效抑制噪声影响的辨识方法。

[0004] 系统辨识的传统方法包括脉冲响应法、频率响应法、极大似然法和最小二乘法等,其中带有遗忘因子的递推最小二乘法因能跟踪系统参数的慢变并能克服“数据饱和”的影响,在工程实践中应用最为广泛。但是这种算法在量测噪声显著变化的情况下,辨识结果随噪声而波动,辨识精度低。除了传统的系统辨识方法之外,随着智能控制理论研究的不断深入,近些年来出现了一些基于神经网络、遗传算法、模糊理论等知识的现代系统辨识方法,但是由于这些算法比较复杂,目前大都处于仿真阶段,在生产实践中应用较少。可见,现有的系统辨识方法在量测噪声特性变化情况下难以得到准确的辨识结果,为了提高控制系统的精度,必须寻求一种能够有效抑制量测噪声影响的系统辨识方法。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是:为了有效抑制量测噪声特性变化对无刷直流电机系统辨识精度的影响以获得准确的无刷直流电机系统模型,提出一种基于自适应卡尔曼滤波的无刷直流电机系统辨识方法。该算法能够准确跟踪量测噪声特性的变化,参数估计平滑,辨识结果准确。

[0006] 本发明的技术解决方案是:一种基于自适应卡尔曼滤波的无刷直流电机系统辨识方法,包括下列步骤:

[0007] (1) 选择实验参数,并采集实验数据;

[0008] 以单位阶跃电压作为无刷直流电机系统的输入,得到其单位阶跃响应曲线,依据

单位阶跃响应曲线得到过渡过程时间  $t_s$ , 根据  $t_s$  选择无刷直流电机系统的输入信号周期  $t_{\text{input}}$  和采样周期  $t_{\text{sample}}$ 。以周期为  $t_{\text{input}}$  的方波电压作为无刷直流电机系统的输入信号, 以  $t_{\text{sample}}$  为采样周期采集无刷直流电机系统的输入电压  $u(k)$  和输出角速率  $\omega(k)$ , 其中  $k$  表示第  $k$  个采样时刻, 其取值为  $k = 1, 2, \dots, X$ ,  $X$  表示共采集  $X$  组数据,  $X$  通常的取值范围为  $X \geq 5000$ ;

[0009] (2) 建立无刷直流电机系统的离散模型结构;

[0010] 建立无刷直流电机系统以电压为输入, 以角速率为输出的传递函数  $G(s)$ , 其中  $s$  为连续域复变量, 将  $G(s)$  离散化, 得到无刷直流电机系统的离散模型结构

$$G(z) = z^{-d} \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}}, \text{ 其中 } z \text{ 为离散域复变量, } z^{-1} \text{ 为 } z \text{ 的倒数, } n_a, n_b \text{ 分别}$$

为分母阶次和分子阶次,  $d$  为延迟时间,  $a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}$  为无刷直流电机系统离散模型结构的待辨识参数;

[0011] (3) 建立无刷直流电机系统的状态方程和量测方程, 采用自适应卡尔曼滤波算法辨识电机系统模型参数;

[0012] 依据步骤(2)中建立的离散模型结构, 以待辨识参数  $\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}]^T$  为状态变量, 以步骤(1)中采集的输入电压  $u(k)$  和输出角速率  $\omega(k)$  作为量测值, 以  $\varphi(k) = [-\omega(k-1), -\omega(k-2), \dots, -\omega(k-n_a), u(k-d), u(k-d-1), u(k-d-2), \dots, u(k-d-n_b)]$  作为量测矩阵, 建立无刷直流电机系统的状态方程和量测方程为:

[0013]

$$\begin{cases} \theta(k) = A(k)\theta(k-1) + \varepsilon(k-1) \\ \omega(k) = \varphi(k)\theta(k) + \xi(k) \end{cases}$$

[0014] 其中  $A(k)$  为  $k$  时刻的一步转移矩阵,  $\varepsilon(k-1)$  为  $k-1$  时刻的系统噪声,  $\xi(k)$  为  $k$  时刻的量测噪声。采用自适应卡尔曼滤波算法辨识模型参数, 得到  $\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}]^T$  在  $k$  时刻的参数辨识结果  $\hat{\theta}(k) = [\hat{a}_1(k), \hat{a}_2(k), \dots, \hat{a}_{n_a}(k), \hat{b}_0(k), \hat{b}_1(k), \dots, \hat{b}_{n_b}(k)]^T$ ;

[0015] (4) 当参数辨识结果满足收敛条件后停止迭代, 获得无刷直流电机系统的辨识模

$$\text{型 } \hat{G}(z) = z^{-d} \frac{\hat{b}_0 + \hat{b}_1 z^{-1} + \hat{b}_2 z^{-2} + \dots + \hat{b}_{n_b} z^{-n_b}}{1 + \hat{a}_1 z^{-1} + \hat{a}_2 z^{-2} + \dots + \hat{a}_{n_a} z^{-n_a}}。$$

[0016] 本发明的原理是: 依据无刷直流电机系统的阶跃响应来选择实验参数, 以方波电压作为输入信号充分激励无刷直流电机系统, 同时采集无刷直流电机系统的输入输出数据。在建立无刷直流电机系统离散模型结构的基础上, 采用自适应卡尔曼滤波算法辨识模型参数, 继而获得无刷直流电机系统的辨识模型。

[0017] 其中自适应卡尔曼滤波算法的原理为: 由于量测噪声特性的变化可以通过新息的实际方差  $C_v(k)$  体现出来, 因此可以通过计算新息的实际方差  $C_v(k)$  并将  $C_v(k)$  代替新息理论方差  $P_v(k)$  在滤波增益  $K(k)$  中的位置来实现根据量测噪声特性变化自适应调整滤波增益  $K(k)$ , 从而有效抑制量测噪声特性变化对辨识结果的影响, 获得准确而且平滑的参数辨识结果。

[0018] 本发明与现有技术相比的优点在于：本发明采用自适应卡尔曼滤波算法来抑制量测噪声特性变化对辨识结果的影响，实现了对模型参数的准确估计，获得了高精度的辨识结果，并且简单易行，便于在工程实践中应用。

### 附图说明

[0019] 图 1 为本发明的流程图；

[0020] 图 2 为本发明的无刷直流电机单位阶跃响应曲线；

[0021] 图 3 为本发明的无刷直流电机输出端所加噪声；

[0022] 图 4 为本发明的无刷直流电机模型参数辨识结果；

[0023] 图 5 为本发明的辨识模型输出与无刷直流电机实际输出对比图。

### 具体实施方式

[0024] 以一种磁悬浮控制力矩陀螺用无刷直流电机为例，如图 1 所示，本发明的具体实施的步骤如下：

[0025] (1) 选择实验参数，并采集实验数据；

[0026] 以单位阶跃电压作为无刷直流电机的输入，得到无刷直流电机的单位阶跃响应曲线如图 2 所示，依据其单位阶跃响应曲线，得到过渡过程时间  $t_s = 2000s$ 。根据  $t_s$  选

择无刷直流电机的输入信号周期  $t_{input}$  和采样周期  $t_{sample}$ ，选取原则为： $\frac{t_s}{100} \leq t_{input} \leq t_s$ ，

$\frac{t_s}{10^5} \leq t_{sample} \leq \frac{t_s}{10}$ ，因此可计算得到输入信号周期  $t_{input}$  和采样周期  $t_{sample}$  的选择范围为

$20s \leq t_{input} \leq 2000s, 0.02s \leq t_{sample} \leq 200s$ 。本实施例中取  $t_{input} = 200s, t_{sample} = 0.1s$ 。

以周期为  $t_{input}$ 、幅值为 1.2V、偏置为 2V 的方波电压作为无刷直流电机的输入信号，以  $t_{sample}$  为采样周期采集无刷直流电机的输入电压  $u(k)$  和输出角速率  $\omega(k)$ ，其中  $k$  表示第  $k$  个采样时刻，其取值为  $k = 1, 2, \dots, X$ ，共采集  $X$  组数据， $X$  通常的取值范围为  $X \geq 5000$ ，本实施例中取  $X = 27500$ 。为了模拟系统在长期运行过程中量测噪声特性变化的情况，本实施例中在系统输出端叠加方差变化的零均值高斯白噪声，该噪声的最大幅值约为输出转速的 2%，以充分验证本发明的有效性，其中噪声幅值随时间的变化情况如图 3 所示。

[0027] (2) 建立无刷直流电机的离散模型结构；

[0028] 磁悬浮控制力矩陀螺用无刷直流电机的工作原理可由电势平衡方程

$$[0029] \quad u - 2E = 2ir + 2L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

[0030] 和转矩平衡方程

$$[0031] \quad 2T_e = B\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

[0032] 描述，其中  $T_e = K_T i$ ， $E = K_e \omega$ ， $T_e$  为单相绕组的电磁转矩，单位为  $N \cdot m$ ， $K_T$  为单相绕组转矩常数，单位为  $N \cdot m/A$ ， $i$  为电枢电流，单位为  $A$ ， $t$  为时间，单位为  $s$ ， $E$  为单相绕组的反电动势，单位为  $V$ ， $K_e$  为电机单相绕组反电动势常数，单位为  $V \cdot s/rad$ ， $\omega$  为电机的角速率，单位为  $rad/s$ ， $u$  为电机输入电压，单位为  $V$ ， $r$  为单相绕组电枢电阻，单位为  $\Omega$ ， $L$  为电枢自感与互感差值，单位为  $H$ ， $J$  为转子转动惯量，单位为  $kg \cdot m^2$ ， $B$  为系统阻尼系数。

[0033] 根据式(1)(2)建立无刷直流电机以电压为输入,以角速率为输出的传递函数  $G(s)$  为:

$$[0034] \quad G(s) = \frac{\frac{K_T}{LJ}}{s^2 + \left(\frac{L}{r} + \frac{J}{B}\right) \cdot \frac{rB}{LJ} s + \left(1 + \frac{2K_T K_e}{rB}\right) \cdot \frac{rB}{LJ}} \quad (3)$$

[0035] 将  $G(s)$  离散化,得到无刷直流电机的离散模型结构为:

$$[0036] \quad G(z) = z^{-d} \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}} \quad (4)$$

[0037] 其中  $n_a$ 、 $n_b$  分别为分母阶次和分子阶次,  $d$  为延迟时间,  $a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}$  为无刷直流电机的离散模型结构的待辨识参数。本实施例中  $n_a = 2, n_b = 1, d = 1$ , 离散模型结构的待辨识参数为  $a_1, a_2, b_0, b_1$ , 本实施例中无刷直流电机的离散模型结构为:

$$[0038] \quad G(z) = z^{-d} \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

[0039] (3) 建立无刷直流电机的状态方程和量测方程,采用自适应卡尔曼滤波算法辨识电机模型参数;

[0040] 依据步骤(2)中建立的离散模型结构,以待辨识参数  $\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}]^T$  为状态变量,以步骤(1)中采集的输入电压  $u(k)$  和输出角速率  $\omega(k)$  作为量测值,以  $\varphi(k) = [-\omega(k-1), -\omega(k-2), \dots, -\omega(k-n_a), u(k-d), u(k-d-1), u(k-d-2), \dots, u(k-d-n_b)]$  作为量测矩阵,建立无刷直流电机系统的状态方程和量测方程。本实施例中待辨识参数  $\theta = [a_1, a_2, b_0, b_1]^T$ , 量测矩阵  $\varphi(k) = [-\omega(k-1), -\omega(k-2), u(k-1), u(k-2)]$ , 由此建立无刷直流电机的状态方程和量测方程为:

$$[0041] \quad \begin{cases} \theta(k) = A(k)\theta(k-1) + \varepsilon(k-1) \\ \omega(k) = \varphi(k)\theta(k) + \xi(k) \end{cases} \quad (5)$$

[0042] 其中  $A(k)$  为  $k$  时刻的一步转移矩阵,  $\varepsilon(k-1)$  为  $k-1$  时刻的系统噪声,  $\xi(k)$  为  $k$  时刻的量测噪声。由于在正常工作过程中,磁悬浮控制力矩陀螺用无刷直流电机的参数变化极其缓慢,为了简化算法可以认为一步转移矩阵  $A(k)$  为单位阵且系统噪声可以忽略不计,可将式(5)简写为:

$$[0043] \quad \begin{cases} \theta(k) = \theta(k-1) \\ \omega(k) = \varphi(k)\theta(k) + \xi(k) \end{cases} \quad (6)$$

[0044] 设定一个  $M$  时刻,  $M$  通常的取值范围为  $500 \leq M \leq 2000$ , 本实施例取  $M = 1000$ ,  $k < M$  时为自适应卡尔曼滤波算法的启动阶段,此时采用常规的卡尔曼滤波算法进行模型参数辨识,由式(6)可以得出常规的卡尔曼滤波算法为:

[0045]

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = A(k)\hat{\theta}(k-1) + K(k)[\omega(k) - \varphi(k)A(k)\hat{\theta}(k-1)] \\ e(k) = \omega(k) - \varphi(k)A(k)\hat{\theta}(k-1) \\ K(k) = P_{k/k-1}(k)\varphi^T(k)[P_v(k)]^{-1} \\ P_v(k) = R(k) + \varphi(k)P_{k/k-1}(k)\varphi^T(k) \\ P_{k/k-1}(k) = A(k)P(k-1)A^T(k) + \varepsilon(k-1) \\ P(k) = [I - K(k)\varphi(k)]P_{k/k-1}(k) \end{cases} \quad (7)$$

[0046] 其中  $A(k) = I_4$ ,  $I_4$  表示  $4 \times 4$  的单位阵,  $\varepsilon(k-1) = 0$ ,  $K(k)$  为  $k$  时刻的滤波增益,  $e(k)$  为  $k$  时刻的新息,  $P_{k/k-1}(k)$  为  $k$  时刻的一步预测方差,  $P_v(k)$  为  $k$  时刻  $e(k)$  的理论方差,  $R(k)$  为  $k$  时刻的量测噪声理论方差,  $P(k)$  为  $k$  时刻估计误差的方差。设定常规的卡尔曼滤波算法的初值  $\hat{\theta}(0) = \mathbf{0}$ ,  $P(0) = 1000I_4$ 。

[0047] 当  $k \geq M$  时, 采用自适应卡尔曼滤波算法进行模型参数辨识, 方法为: 首先通过第  $M$  个时刻到第  $k$  个时刻的新息计算新息的实际方差  $C_v(k)$ , 计算方法为:

$$[0048] \quad C_v(k) = \frac{1}{k-M+1} \sum_{i=M}^k e(i)^2 \quad (8)$$

[0049] 由于式 (8) 的计算量较大, 为了简化算法以便实现模型参数的在线辨识, 将式 (8) 改写成递推形式, 得到:

$$[0050] \quad C_v(k) = C_v(k-1) + \frac{1}{k-M+1} [e(k)^2 - C_v(k-1)] \quad (9)$$

[0051] 设定  $C_v(k)$  的初值为 0, 然后以  $C_v(k)$  代替新息理论方差  $P_v(k)$  在滤波增益  $K(k)$  中的位置参与迭代计算, 即可实现根据实际量测噪声特性变化自适应调整滤波增益  $K(k)$  的值。

[0052] 通过上述自适应卡尔曼滤波算法辨识得到  $\theta = [a_1, a_2, b_0, b_1]^T$  在  $k$  时刻的参数辨识结果  $\hat{\theta}(k) = [\hat{a}_1(k), \hat{a}_2(k), \hat{b}_0(k), \hat{b}_1(k)]$ ,  $\hat{\theta}(k)$  随时间的变化情况如图 4 所示。由图可见在  $t = 600s$  以后, 参数辨识结果不再剧烈波动, 趋于收敛, 说明该算法能有效抑制量测噪声特性变化产生的影响, 参数辨识结果平滑。

[0053] (4) 当参数辨识结果满足收敛条件后停止迭代, 获得无刷直流电机的辨识模型;

[0054] 本实施例中取  $N = 5000$ , 当有连续  $N$  个时刻的  $\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-1) \leq 1 \times 10^{-4}$  时, 认为参数收敛, 停止迭代。对最后  $N$  个时刻的参数辨识结果取平均值, 将该平均值作为辨识模型的参数, 得到  $\hat{a}_1 = -0.5076$ ,  $\hat{a}_2 = -0.4923$ ,  $\hat{b}_0 = 0.08632$ ,  $\hat{b}_1 = -0.07443$ , 继而得到辨识模型

$$\hat{G}(z) = z^{-1} \frac{0.08632 - 0.07443z^{-1}}{1 - 0.5076z^{-1} - 0.4923z^{-2}}。$$

[0055] 以采集到的无刷直流电机输入电压  $u(k)$  作为辨识模型

$$\hat{G}(z) = z^{-1} \frac{0.08632 - 0.07443z^{-1}}{1 - 0.5076z^{-1} - 0.4923z^{-2}}$$

的输入, 得到辨识模型的输出为  $\omega'(k)$ 。各个时刻辨识模型输出角速率与无刷直流电机实际输出角速率的对比情况如图 5 所示。由图可见辨识模型输出与电机实际输出基本一致, 说明在量测噪声特性变化的情况下, 本发明的辨识模型与实际电机系统十分吻合。

[0056] 本发明说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员公知的现有技术。



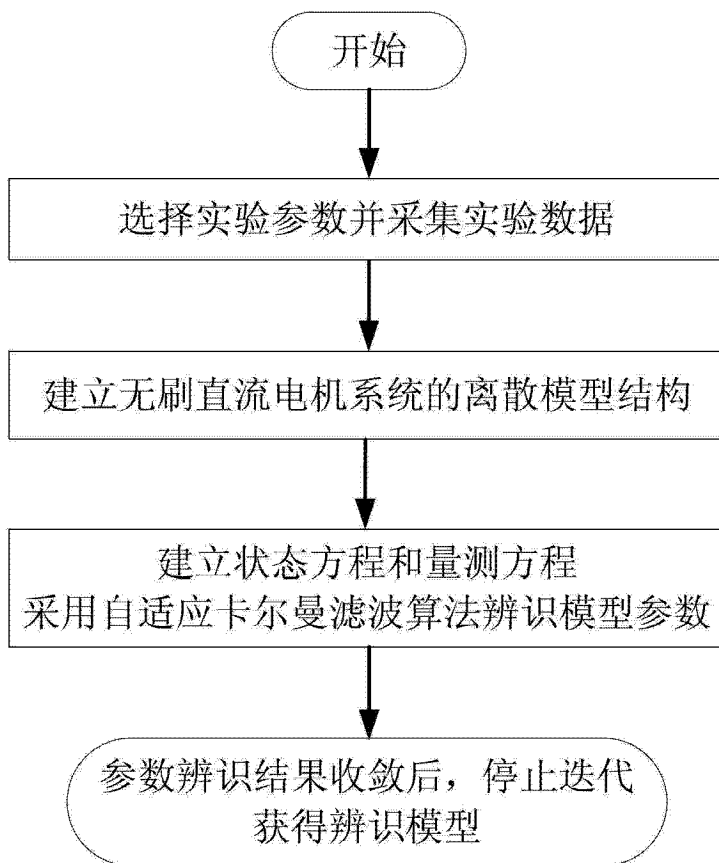


图 1

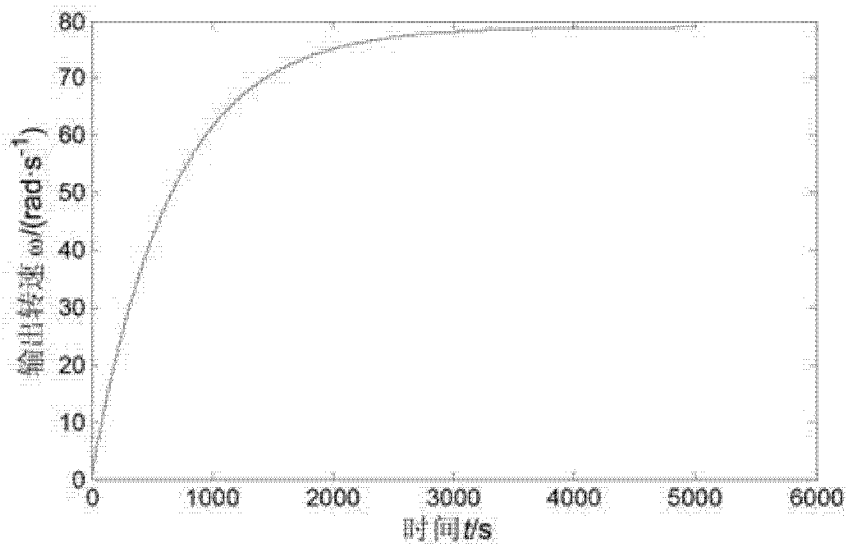


图 2

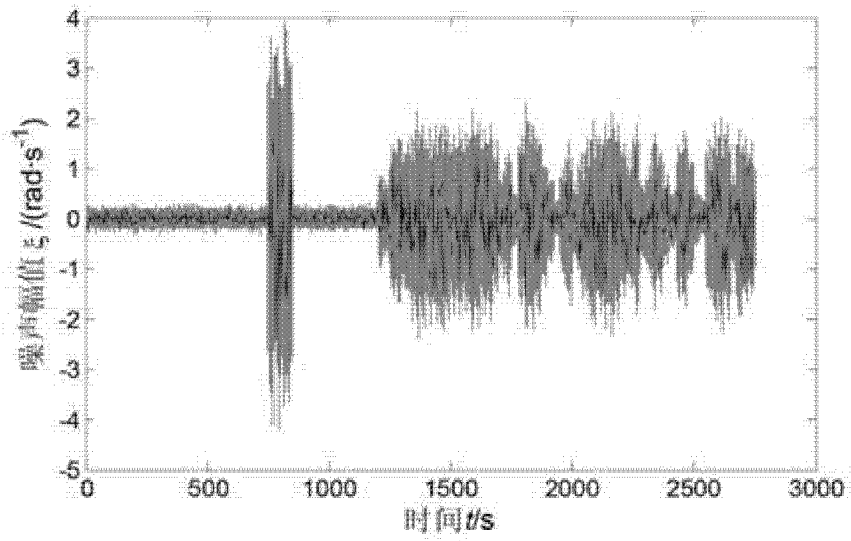


图 3

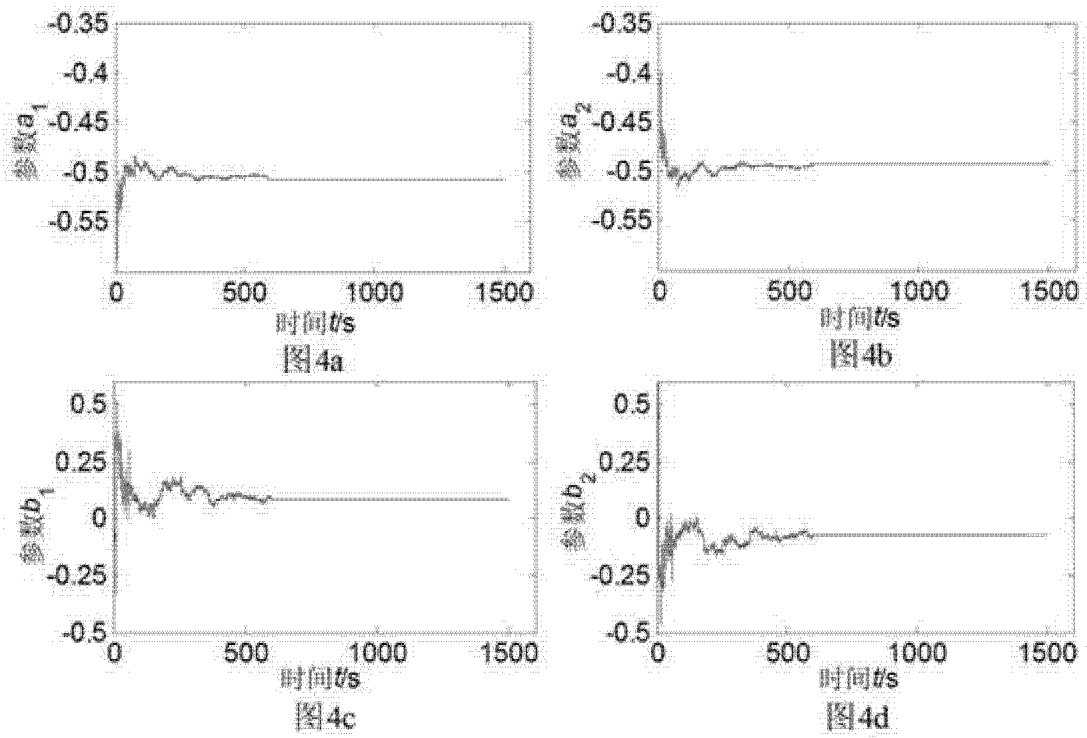


图 4

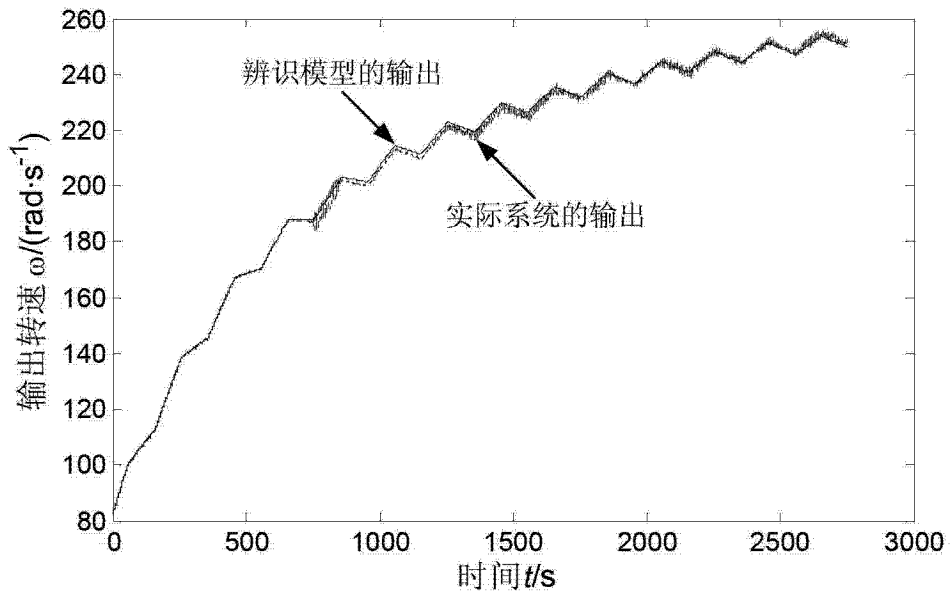


图 5