



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103713516 B

(45)授权公告日 2017.07.18

(21)申请号 201310695273.8

(22)申请日 2013.12.17

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 103713516 A

(43)申请公布日 2014.04.09

(73)专利权人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路  
1037号

(72)发明人 宋宝 唐小琦 杨勇泉 郑世祺

陈天航 苏玲宏 代攀 唐玉枝  
宛世源

(74)专利代理机构 华中科技大学专利中心

42201

代理人 朱仁玲

(51)Int.Cl.

G05B 11/42(2006.01)

(56)对比文件

CN 203135776 U, 2013.08.14,

US 2012/0153885 A1, 2012.06.21,

杨承志. 参数寻优智能PID控制.《昆明理工大学学报》.1998,第23卷(第5期),第95-99页.

尹泉等. 永磁同步电机变结构控制器设计.《微电机》.2013,第46卷(第10期),第61-77页.

郑世祺等. PMSM伺服系统参数自整定研究.《电气传动》.2013,第43卷(第3期),第10-17页.

李宁刚等. PDFF调节在交流永磁同步电机控制中的应用.《科学技术与工程》.2006,第6卷(第13期),第1907-1910页.

孔震等. 经编机伺服控制系统的参数调节方法.《纺织学报》.2008,第29卷(第10期),第102-108页.

何晋元. 用于控制器参数寻优的目标函数研究.《控制系统》.2006,第22卷(第3-1期),第86-88页.

(续)

审查员 艾春艳

(54)发明名称

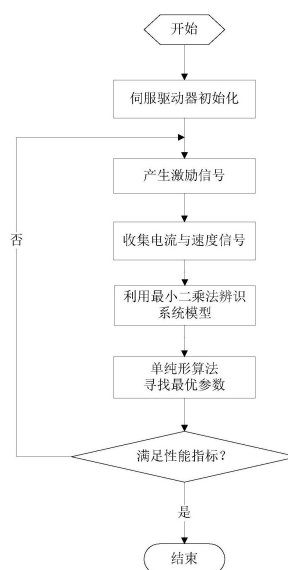
一种基于PDFF的交流伺服驱动器控制参数自整定方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于PDFF的交流伺服驱动器控制参数自整定方法,所述方法首先采集辨识交流伺服系统模型所需要的电流与速度信号;其次,根据所采集的信号,辨识永磁同步电机交流伺服驱动系统的速度环被控对象模型,辨识出模型的参数;最后,根据模型的参数以及性能指标对伺服驱动器的控制参数进行寻优整定,以获得最优的控制参数。该自整定方法在伺服驱动器的速度环利用PDFF控制器取代传统的PI控制器,并自动地整定控制器的参数。该自整定方法利用递推最小二乘法来辨识被控对象的模型,在根据可行的性能指标,利用模式搜索算法对控制器参数进行寻优,得到最优的控制参数,使得伺服驱动系统具有良好的抗扰动能力、控制精度以及鲁

棒性。

权利要求书2页 说明书6页 附图2页



[转续页]

[接上页]

**(56)对比文件**

陈鹏展.交流伺服系统控制参数自整定策略研究.《中国博士学位论文全文数据库 工程科技I辑》.2010,(第11期),第B022-40页.

王福永.单纯形法在控制系统调节器优化设计中的应用.《苏州大学学报(工科版)》.2002,第22卷(第4期),第38-41页.

1. 一种基于PDFF的交流伺服驱动器控制参数自整定方法,其特征在于,所述方法包括:

(1) 在每个采样时刻K从伺服驱动系统中采集电机转速  $\omega(k)$  和电流值  $i_q(k)$ , 获得辨识交流伺服系统模型所需要的电流与速度信号;

(2) 根据所采集的电流与速度信号,辨识交流伺服驱动系统的速度环被控对象模型,获得模型的参数,其中速度环被控对象模型为  $i_q(k) = -m_1 i_q(k-1) - m_2 i_q(k-2) + n_1 \omega(k-1) + n_2 \omega(k-2)$ ,  $m_1, m_2, n_1, n_2$  为待辨识速度环被控对象模型的参数,  $k$  为采样时刻,表示此时的数据是第K次采样时刻采集的数据,其取值范围为  $[3, N]$ ,  $N$  为采样次数;

(3) 根据步骤(2)中获得的速度环被控对象模型的参数以及性能指标对伺服驱动器的控制参数进行寻优整定,以获得最优的控制参数  $(K_{vi}, K_{vp}, K_{vfr})$ , 速度环根据所述控制参数按照公式  $I_{cmd} = (K_{vi} * \int (V_{cmd} - V_{fb}) dt + K_{vfr} V_{cmd} - V_{fb}) K_{vp}$  对电流环进行输入控制,其中  $I_{cmd}$  表示速度环的输出电流,  $V_{cmd}$  表示速度环的指令速度,  $V_{fb}$  为速度的前反馈,  $K_{vi}$  为积分系数,  $K_{vp}$  为比例系数,  $K_{vfr}$  为前馈增益系数;其采用单纯形加速法来进行控制参数寻优,得到最优值  $(K_{vi}, K_{vp}, K_{vfr})$ , 其具体步骤如下:

(3-1) 在参数范围内选取不在同一三维平面上的四个参数点  $x_0, x_1, x_2, x_3$  构成的四面体作为初始的单纯形,其中,  $x_k = (K_{vi}^k, K_{vp}^k, K_{vfr}^k)$ ;

(3-2) 计算  $x_0, x_1, x_2, x_3$  各参数点所对应的目标函数值  $f_0, f_1, f_2, f_3$ ;

(3-3) 判断  $f_0, f_1, f_2, f_3$  之间差值的最大值是否小于设定的精度值  $\epsilon$ , 如果是,则参数寻优结束,取目标函数值  $f_0, f_1, f_2, f_3$  中最小值所对应的参数点作为最优参数;否则继续下一步;

(3-4) 获取  $f_0, f_1, f_2, f_3$  中的最大值及最大值  $f_H$  所对应的点  $x_H$ , 并求取  $x_H$  相对于除  $x_H$  之外三参数点所构成平面的对称点  $x_R$ ;

(3-5) 计算  $x_R$  所对应的目标函数值  $f_R$ , 若  $f_R > f_H$ , 则跳到步骤(3-6); 否则跳到步骤(3-7);

(3-6) 在  $x_H$  与  $x_R$  延长线上重新取一点  $x_F$ , 并计算  $x_F$  所对应的目标函数值  $f_F$ , 若  $f_F > f_H$ , 则将  $x_F$  作为  $x_R$ , 并继续在  $x_H$  与  $x_R$  延长线上重新取一点  $x_F$  并计算  $f_F$ , 直到  $f_F < f_H$ , 然后取  $x_F$  及  $x_0, x_1, x_2, x_3$  中除  $x_H$  之外三参数点构成新的参数点  $x_0, x_1, x_2, x_3$ , 并跳转到步骤(3-2);

(3-7) 在  $x_3$  与  $x_R$  的连线上重新取一点  $x_S$ , 并计算  $f_S$ , 若  $f_S > f_R$ , 则取  $x_R$  及  $x_0, x_1, x_2, x_3$  中除  $x_H$  之外三参数点构成新的参数点  $x_0, x_1, x_2, x_3$ , 并跳转到步骤(3-2); 若  $f_S < f_R$ , 则取  $x_S$  及  $x_0, x_1, x_2, x_3$  中除  $x_H$  之外三参数点构成新的参数点  $x_0, x_1, x_2, x_3$ , 并跳转到步骤(3-2); 其中, 所述目标函数的方程为:

$$f(x_k) = J_{ISE}(x_k) = J_{ISE}(K_{vi}^k, K_{vp}^k, K_{vfr}^k) = \sum_{i=1}^N (o(i) - o_{res}(i))^2$$

其中:  $J_{ISE}$  表示利用参数  $x_k$  计算出来的积分平方误差值, 其中  $N$  代表采样次数,  $o(i)$  取步骤(1)中获取的  $\omega(i)$ ,  $o_{res}(i)$  根据以下被控对象的二阶模型公式  $o_{res}(i) = -m_1 o_{res}(i-1) - m_2 o_{res}(i-2) + n_1 o'(i-1) + n_2 o'(i-2)$  计算得到, 其中  $m_1, m_2, n_1, n_2$  四个参数为步骤(2)中获得的速度环被控对象模型的参数,  $o'(i) = K_{vp}^k (o(i) - o_{res}(i)) + K_{vi}^k (o(i-1) - o_{res}(i-1)) + K_{vfr}^k (o(i) - o_{res}(i-1))$ , 在上述公式中, 当  $o_{res}(i)$  的变量  $i$  小于等于0时, 取  $o_{res}(i) = 0$ 。

2. 如权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述步骤(3-6)中在  $x_H$  与  $x_R$  延长线上重新取一点  $x_F$ , 具体为  $|\overline{x_3 x_F}| = |\overline{x_3 x_R}| * \alpha, \alpha \geq 1$ 。

3. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤(3-7)中在 $x_3$ 与 $x_R$ 的连线上重新取一点 $x_S$ ,具体为 $|\overline{x_3 x_S}| = |\overline{x_3 x_R}| / \alpha$ ,  $\alpha \geq 1$ 。

4. 如权利要求1至3任一项所述的方法,其特征在于,所述步骤(1)中采集电机转速 $\omega(k)$ 和电流值 $i_q(k)$ 采用的激励信号为,伪随机二进制序列。

## 一种基于PDFF的交流伺服驱动器控制参数自整定方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于交流伺服系统控制技术领域,更具体地,涉及一种基于PDFF的交流伺服驱动器控制参数自整定方法。

### 背景技术

[0002] 装备制造业是国民经济和国防建设的基础产业,其发展水平决定了国民经济的发展水平。在现代科学技术飞速发展的影响下,制造业向着高性能、高精度、多品种、低成本等方向发展。由于目前高性能的数控系统一般都配置交流伺服系统,所以研究高性能的交流伺服系统,提升伺服控制系统对永磁同步电机的控制就成为了装备制造业快速发展的关键。

[0003] 交流伺服驱动器是交流伺服系统的控制核心,通常由位置环、速度环和电流环三个控制环组成。三环控制结构可以使伺服系统获得较好的动态跟随特性和抗干扰性能,一般而言内层控制环电流环的作用是提高系统的响应速度,及时抑制内部干扰,可以近似看作比例系数为1的比例环节。中间控制环速度环的作用是增强系统抗负载扰动的能力,提高速度的稳定性,速度环的性能直接影响到整体伺服系统的性能。外层控制环位置环保证系统的动态跟踪性能和静态精度,保证伺服系统的稳定快速运行。

[0004] 传统的交流伺服系统一般采用PID(Proportion IntegrationDifferentiation,比例积分微分)调节器来完成控制过程,例如论文文献(仇国庆,罗宣林,王平,吴迪,杨志龙,PMSM伺服系统的PID控制器设计及仿真,重庆大学学报,2008,3(31))中对伺服系统的PID控制器做了详尽的描述,在其伺服系统速度控制策略中,速度调节器采用传统的PI控制器来实现。传统的交流伺服驱动器一般位置环采用P调节器,速度环采用PI调节器,电流环采用PI或P调节器。

[0005] 交流伺服系统的性能不仅取决于其采用的控制策略,而且取决于该伺服驱动器各控制环调节器中设置的控制参数。其控制参数的优劣直接影响伺服驱动器的性能。只有当交流伺服驱动器中设置的控制参数、采用的控制策略符合伺服驱动器当前的工况以及自身特性时,伺服驱动器才能发挥出最佳性能。

[0006] 但是,实际工作过程中,交流伺服系统的负载惯量、运动摩擦系数等因素常常会发生变化,会导致速度环的控制性能下降,因此常常需要工程调试人员对速度环的控制参数进行重新整定。但是由于实际工况的复杂性以及控制参数调试的繁琐,需要调试人员有较强的专业知识水平。

### 发明内容

[0007] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求,本发明的目的是提供一种基于伪微分反馈与前馈(PDFF,Pseudo Derivative Feedback with Feedforward)的交流伺服系统速度环控制参数的自整定方法,伺服系统自整定方法是指根据伺服系统的固有特性以及工况自动优化伺服系统的控制参数,使其达到最优。该自整定方法在伺服驱动器的速度环利用PDFF

控制器取代传统的PI控制器,并自动地整定控制器的参数。该自整定方法利用递推最小二乘法来辨识被控对象的模型,在根据可行的性能指标,利用模式搜索算法对控制器参数进行寻优,得到最优的控制参数,使得伺服驱动系统具有良好的抗扰动能力、控制精度以及鲁棒性。

[0008] 本发明提出了一种基于PDFF的交流伺服驱动器控制参数自整定方法,其特征在于,所述方法包括:

[0009] (1) 在每个采样时刻K从伺服驱动系统中采集电机转速 $\omega(k)$ 和电流值 $i_q(k)$ ,获得辨识交流伺服系统模型所需要的电流与速度信号;

[0010] (2) 根据所采集的电流与速度信号,辨识交流伺服驱动系统的速度环被控对象模型,获得模型的参数,其中速度环被控对象模型为 $i_q(k) = -m_1 i_q(k-1) - m_2 i_q(k-2) + n_1 \omega(k-1) + n_2 \omega(k-2)$ ,  $m_1, m_2, n_1, n_2$ 为待辨识速度环被控对象模型的参数;

[0011] (3) 根据步骤(2)中获得的速度环被控对象模型的参数以及性能指标对伺服驱动器的控制参数进行寻优整定,以获得最优的控制参数( $K_{vi}, K_{vp}, K_{vfr}$ ),速度环根据所述控制参数按照公式 $I_{cmd} = (K_{vi} * \int (V_{cmd} - V_{fb}) dt + K_{vfr} V_{cmd} - V_{fb}) K_{vp}$ 对电流环进行输入控制,其中 $I_{cmd}$ 表示速度环的输出电流, $V_{cmd}$ 表示速度环的指令速度, $V_{fb}$ 为速度的前反馈, $K_{vi}$ 为积分系数, $K_{vp}$ 为比例系数, $K_{vfr}$ 为前馈增益系数;其采用单纯形加速法来进行控制参数寻优,得到最优值( $K_{vi}, K_{vp}, K_{vfr}$ ),其具体步骤如下:

[0012] (3-1) 在参数范围内选取不在同一三维平面上的四个参数点 $x_0, x_1, x_2, x_3$ 构成的四面体作为初始的单纯形,其中, $x_k = (K_{vi}^k, K_{vp}^k, K_{vfr}^k)$ ;

[0013] (3-2) 计算 $x_0, x_1, x_2, x_3$ 各参数点所对应的目标函数值 $f_0, f_1, f_2, f_3$ ;

[0014] (3-3) 判断 $f_0, f_1, f_2, f_3$ 之间差值的最大值是否小于设定的精度值 $\epsilon$ ,如果是,则参数寻优结束,取目标函数值 $f_0, f_1, f_2, f_3$ 中最小值所对应的参数点作为最优参数;否则继续下一步;

[0015] (3-4) 获取 $f_0, f_1, f_2, f_3$ 中的最大值及最大值 $f_H$ 所对应的点 $x_H$ ,并求取 $x_H$ 相对于除 $x_H$ 之外三参数点所构成平面的对称点 $x_R$ ;

[0016] (3-5) 计算 $x_R$ 所对应的目标函数值 $f_R$ ,若 $f_R > f_H$ ,则跳到步骤(3-6);否则跳到步骤(3-7);

[0017] (3-6) 在 $x_H$ 与 $x_R$ 延长线上重新取一点 $x_F$ ,并计算 $x_F$ 所对应的目标函数值 $f_F$ ,若 $f_F > f_H$ ,则将 $x_F$ 作为 $x_R$ ,并继续在 $x_H$ 与 $x_R$ 延长线上重新取一点 $x_F$ 并计算 $f_F$ ,直到 $f_F < f_H$ ,然后取 $x_F$ 及 $x_0, x_1, x_2, x_3$ 中除 $x_H$ 之外三参数点构成新的参数点 $x_0, x_1, x_2, x_3$ ,并跳转到步骤(3-2);

[0018] (3-7) 在 $x_3$ 与 $x_R$ 的连线上重新取一点 $x_S$ ,并计算 $f_S$ ,若 $f_S > f_R$ ,则取 $x_R$ 及 $x_0, x_1, x_2, x_3$ 中除 $x_H$ 之外三参数点构成新的参数点 $x_0, x_1, x_2, x_3$ ,并跳转到步骤(3-2);若 $f_S < f_R$ ,则取 $x_S$ 及 $x_0, x_1, x_2, x_3$ 中除 $x_H$ 之外三参数点构成新的参数点 $x_0, x_1, x_2, x_3$ ,并跳转到步骤(3-2);其中,所述目标函数的方程为:

$$[0019] \quad f(x_k) = J_{ISE}(x_k) = J_{ISE}(K_{vi}^k, K_{vp}^k, K_{vfr}^k) = \sum_{i=1}^N (o(i) - o_{res}(i))^2$$

[0020] 其中: $J_{ISE}$ 表示利用参数 $x_k$ 计算出来的积分平方误差值,其中N代表采样次数, $o(i)$ 取步骤(1)中获取的 $\omega(i)$ , $o_{res}(i)$ 根据以下被控对象的二阶模型公式 $o_{res}(i) = -m_1 o_{res}(i-$

1)  $-m_2 o_{res}(i-2) + n_1 o'(i-1) + n_2 o'(i-2)$  计算得到, 其中  $m_1, m_2, n_1, n_2$  四个参数为步骤 (2) 中获得的速速环被控对象模型的参数,  $o'(i) = K_{vp}^k(o(i) - o_{res}(i)) + K_{vi}^k(o(i-1) - o_{res}(i-1)) + K_{vfr}^k o(i) - o_{res}(i-1)$ , 在上述公式中, 当  $o_{res}(i)$  的变量  $i$  小于等于 0 时, 取  $o_{res}(i) = 0$ 。

[0021] 作为本发明的进一步改进, 所述步骤 (3-6) 中在  $x_H$  与  $x_R$  延长线上重新取一点  $x_F$ , 具体为  $|\overline{x_3 x_F}| = |\overline{x_3 x_R}| * \alpha, \alpha \geq 1$ 。

[0022] 作为本发明的进一步改进, 所述步骤 (3-7) 中在  $x_3$  与  $x_R$  的连线上重新取一点  $x_S$ , 具体为  $|\overline{x_3 x_S}| = |\overline{x_3 x_R}| / \alpha, \alpha \geq 1$ 。

[0023] 作为本发明的进一步改进, 所述步骤 (1) 中采集电机转速  $\omega(k)$  和电流值  $i_q(k)$  采用的激励信号为, 伪随机二进制序列。

[0024] 总体而言, 通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比, 具有以下有益效果:

[0025] 1、在速速环用 PDFF 控制器取代原有的 PI 控制器, 使得控制更加灵活, 能够充分利用 PDFF 中的前馈增益系数, 提高控制器的鲁棒性和控制性能。

[0026] 2、递推最小二乘算法在被控对象的模型结构已知的情况下, 可以通过采集的输入输出等激励信号来准确地辨识系统模型, 算法易于实现, 并且适合不同种类的工作环境。

[0027] 3、单纯形寻优算法简单易行, 针对特定的目标函数能够快速寻优得到最佳的控制参数, 算法的复杂程度低, 收敛速度快, 能够方便地集成到系统中。

[0028] 4、本方案可以实现惯量和外部负载扰动大范围变化下交流伺服驱动系统速速环控制参数自整定, 调试人员不必再手动调试控制器参数来适应工作环境的变化, 集成了上述自整定方案的软件将能够自动完成对速速环控制参数的自整定, 能够降低对调试人员的能力、经验要求, 提高调试效率, 提高生产力。

## 附图说明

[0029] 图1是本发明实施例的PDFF速速环控制结构示意图;

[0030] 图2是本发明实施例的单纯形寻优法示意图;

[0031] 图3是本发明实施例的控制参数自整定方法流程图。

## 具体实施方式

[0032] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白, 以下结合附图及实施例, 对本发明进行进一步详细说明。应当理解, 此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明, 并不用于限定本发明。此外, 下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0033] 交流伺服驱动器一般由位置环、速速环和电流环三个控制环组成。电流环的作用是系统的快速响应能力, 以及抑制电流环内部的干扰, 速速环的作用是增强系统抗外部扰动能力, 提高速度的稳定性。位置环主要用于保证系统动态跟踪性能和位置精度。由于电流环的带宽较大, 响应速度较快, 参数对其性能的影响不明显, 所以本发明主要是针对速速环控制器的设计。

[0034] 本发明实施例中的PDFF速速环控制结构示意图如图1所示, 其对应的控制算法如

下:

$$[0035] \quad I_{\text{cmd}} = (K_{vi} * \int (V_{\text{cmd}} - V_{fb}) dt + K_{vfr} V_{\text{cmd}} - V_{fb}) K_{vp} \quad (1)$$

[0036] 其中,  $I_{\text{cmd}}$  表示速度环的输出电流, 即被控对象模型中的  $i_q$ ,  $K_{vi}$  为积分系数,  $K_{vp}$  为比例系数,  $K_{vfr}$  为前馈增益系数,  $V_{\text{cmd}}$  表示速度环的指令速度, 即被控对象模型中的  $\omega(k)$ ,  $V_{fb}$  为速度的前反馈。

[0037] 由于采用PDFF控制器, 控制器的参数个数比传统的PI控制器要多, 需要采用寻优算法对控制器参数进行自整定。自整定采用单纯形寻优法, 其基本原理如图2所示。首先需要确定四个初值点, 然后找出其中最大值点, 从而判断目标函数的上升或下降方向, 再沿响应的方向进行下一个坐标点的选取, 迭代执行, 直到误差值满足设定的需求。

[0038] 基于PDFF的交流伺服系统的速度环控制参数的自整定方法可以分为一下几步, 图3是控制参数自整定流程图。

[0039] 第一步: 采集信号

[0040] 根据辨识系统模型的最小二乘算法的需求, 我们要首先采集伺服系统速度环里的电机转速  $\omega$  和电流值  $i_q$  信号。因此, 我们需要选择合适的激励信号来激励速度环被控对象, 从而获取所需要的信号。所选激励信号应该能够充分激励伺服系统, 覆盖伺服系统工作的各个频率段。本实施例中优先选择伪随机二进制序列 (PRBS, Pseudo-Random Binary Sequence), 它具有近似白噪声性质, 对系统的输入净扰动小, 幅值、周期、时钟节拍容易控制。利用PRBS激励伺服系统, 在每个采样时刻  $K$  从伺服驱动系统中采集电机转速  $\omega(k)$  和电流值  $i_q(k)$ , 从而得到多组电机转速和电流的采样值并保存下来作为参数辨识的基础。

[0041] 第二步: 辨识永磁同步电机伺服系统速度环的被控对象模型

[0042] 本实施例中近似认为其模型为二阶系统, 其离散表达式可表示为

$$[0043] \quad i_q(k) = -m_1 i_q(k-1) - m_2 i_q(k-2) + n_1 \omega(k-1) + n_2 \omega(k-2) \quad (2)$$

[0044] 其中,  $m_1, m_2, n_1, n_2$  为待辨识的参数,  $k$  为采样时刻, 表示此时的数据是第  $K$  次采样时刻采集的数据, 其取值范围为  $[3, N]$ ,  $N$  为采样次数。

[0045] 令:

$$[0046] \quad \hat{\theta}(k) = [\hat{n}_1(k), \hat{n}_2(k), \hat{m}_1(k), \hat{m}_2(k)]^T \quad (3)$$

$$\varphi(k-1) = [-\omega(k-1), -\omega(k-2), i_q(k-1), i_q(k-2)]^T$$

[0047]

(4)

[0048] 其中  $\hat{\theta}(k)$  是第  $K$  次参数估计向量,  $\hat{m}_1, \hat{m}_2, \hat{n}_1$  和  $\hat{n}_2$  是参数的估计值,  $\varphi(k-1)$  激励信号向量, 其中的速度值, 电流值即步骤1中采集的信号。

[0049] 将第一步中采集到的信号按照采样时间的先后进行分组, 假设共得到  $N$  组激励信号向量:



$$\varphi(3) = [-\omega(2), -\omega(1), i_q(2), i_q(1)]^T$$

$$\varphi(4) = [-\omega(3), -\omega(2), i_q(3), i_q(2)]^T$$

.....

[0050]

$$\varphi(k-1) = [-\omega(k-2), -\omega(k-3), i_q(k-2), i_q(k-3)]^T$$

.....

$$\varphi(N) = [-\omega(N-1), -\omega(N-2), i_q(N), i_q(N)]^T$$

[0051] 然后采用最小二乘法对伺服系统的速度环控制模型参数进行辨识,利用下面的公式进行迭代,最终就能辨识得到系统模型的参数估计值。

$$[0052] \quad \begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[i_q(k) - \varphi^T(k-1)\hat{\theta}(k-1)] \\ K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k-1)}{\alpha + \varphi^T(k-1)P(k-1)\varphi(k-1)} \\ P(k) = \frac{1}{\alpha} [P(k-1) - \frac{P(k-1)\varphi^T(k-1)P(k-1)\varphi(k-1)}{\alpha + \varphi^T(k-1)P(k-1)\varphi(k-1)}] \end{cases} \quad (5)$$

[0053] 其中,  $K(k)$  是方差矩阵;  $P(k)$  为观测矩阵;  $\alpha$  是遗忘因子, 用来控制历史数据对辨识模型的影响。

[0054] 首先, 给辨识参数  $\hat{\theta}$  和协方差矩阵  $P$  赋初值。一般取  $\hat{\theta}_0 = 0$  或充分小的实向量, 取  $P_0 = \delta^2 I$ ,  $\delta$  取一个很大的值, 随后用  $P_0$  计算出  $P_1$ , 再用  $P_1$  计算出  $K_1$ , 再由  $K_1$  计算出  $\hat{\theta}(1)$ , 然后开始迭代。迭代过程从  $k=3$  依次迭代到  $k=N+1$ , 由 (5) 式迭代后最终得到辨识的参数  $\hat{\theta}(N) = [\hat{n}_1(N), \hat{n}_2(N), \hat{m}_1(N), \hat{m}_2(N)]^T$ 。

[0055] 第三步: 利用辨识出的模型, 采用单纯形加速算法对参数进行优化

[0056] 对于PDF控制, 需要整定的参数是  $(K_{vi}, K_{vp}, K_{vfr})$ , 选择性能指标平方误差积分ISE作为目标函数, 下面是参数寻优过程。图2是单纯形加速算法原理示意图。单纯形加速寻优算法的基本思想是判断当前特征点所揭示的目标函数的走向趋势, 然后根据其趋势, 在响应的向量上选取合适的下一个特征点, 然后重新判断其趋势, 直到目标值达到用户设定的误差要求。

[0057] 单纯形加速寻优算法的基本流程如下:

[0058] (1) 给定初始参数  $x_0, x_1, x_2, x_3 \in R^3$  ( $x_k = K_{vi}, K_{vp}, K_{vfr}$ ),  $R^3$  表示三维实数空间, 遗忘因子  $\alpha \geq 1$ , 精度  $\varepsilon > 0$ 。

[0059] (2) 取ISE性能指标作为目标函数, 其计算公式如下:

$$[0060] \quad J_{ISE}(x_k) = J_{ISE}(K_{vi}^k, K_{vp}^k, K_{vfr}^k) = \sum_{i=1}^n (o(i) - o_{res}(i))^2 \quad (6)$$

[0061] 其中  $n$  代表采样的点数,  $o(i)$  代表输入数据, 这里一般取第一步辨识模型过程中的输入数据  $\omega(i)$ ,  $o_{res}(i)$  表示辨识系统的输出数据, 根据以下被控对象的二阶模型公式计算得到  $o_{res}(i) = -m_1 o_{res}(i-1) - m_2 o_{res}(i-2) + n_1 o'(i-1) + n_2 o'(i-2)$ , 其中  $m_1, m_2, n_1, n_2$  四个参数由

辨识模型得到的参数 $\hat{\theta}$ 决定,  $o'(i) = K_{vp}^k(o(i) - o_{res}(i)) + K_{vi}^k(o(i-1) - o_{res}(i-1)) + K_{vfr}^k(o(i) - o_{res}(i-1))$ , 在工程领域, 当 $o_{res}(i)$ 的变量 $i$ 小于等于0时, 取 $o_{res}(i) = 0$ 。

[0062] (3) 根据公式(6)计算第(1)步中所给定的 $x_0$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 四个初值点的目标函数值分别为 $J_0$ 、 $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ 。

[0063] (4) 若 $x_0$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 所对应的 $J_0$ 、 $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ 之间差值的最大值小于设定的精度值 $\varepsilon$ , 则认为寻优已经结束, 达到了最佳的参数值, 取 $J_0$ 、 $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ 中最小值所对应的参数点作为最优参数; 否则跳转到第(5)步继续进行寻优。

[0064] (5) 找出 $J_0$ 、 $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ 中的最大值, 这里假设为 $J_3$ , 说明目标函数在垂直 $x_0$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ 组成的平面并指向 $x_3$ 的方向具有更强的变大趋势。则计算出 $x_3$ 相对于 $x_0$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ 三点所构成平面的对称点 $x_R$ 。

[0065] (6) 计算 $x_R$ 所对应的目标函数的值 $J_R$ , 若 $J_R > J_3$ , 则跳到第(6)步; 否则跳到第(7)步。

[0066] (7) 目标值大于 $J_3$ 说明 $J_R$ 在变大的反方向上取值不够, 我们可以在 $x_3$ 与 $x_R$ 延长线上重新取一点 $x_F$ , 本例取 $|\overline{x_3 x_F}| = |\overline{x_3 x_R}| * \alpha$ , 计算 $J_F$ 。若 $J_F > J_3$ , 则 $x_F$ 作为 $x_R$ 继续执行第(6)步, 直到 $J_F < J_3$ , 然后用 $x_F$ 作为 $x_3$ , 重回第三步, 开始循环执行。

[0067] (8) 目标值小于 $J_3$ 说明 $J_R$ 在变大的反方向上取值已经初步满足要求, 为了加快收敛速度, 可以在 $x_3$ 与 $x_R$ 间重新取一点 $x_S$ , 本例取 $|\overline{x_3 x_S}| = |\overline{x_3 x_R}| / \alpha$ , 计算 $J_S$ 。若 $J_S > J_R$ , 说明 $x_S$ 点差于 $x_R$ 点, 令 $x_S = x_R$ ; 若 $J_S < J_R$ , 说明 $x_S$ 点优于 $x_R$ 点。用 $x_S$ 作为 $x_3$ , 重回第三步, 开始循环执行。

[0068] 通过上述步骤最终得到满足要求的 $(K_{vi}, K_{vp}, K_{vfr})$ 值, 实现对基于PDF控制策略的交流伺服驱动系统的速度环控制参数自整定, 将此参数写入伺服驱动器内部的参数列表中, 即可实现对伺服系统的优化与控制。

[0069] 通过本发明对控制参数的自整定能够使伺服驱动器获得很好的动态性能。在不偏离本发明的基本原理及不超出本发明实质内容所涉及范围的前提下对其可作适当变形加以实施。

[0070] 本领域的技术人员容易理解, 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已, 并不用以限制本发明, 凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等, 均应包含在本发明的保护范围之内。

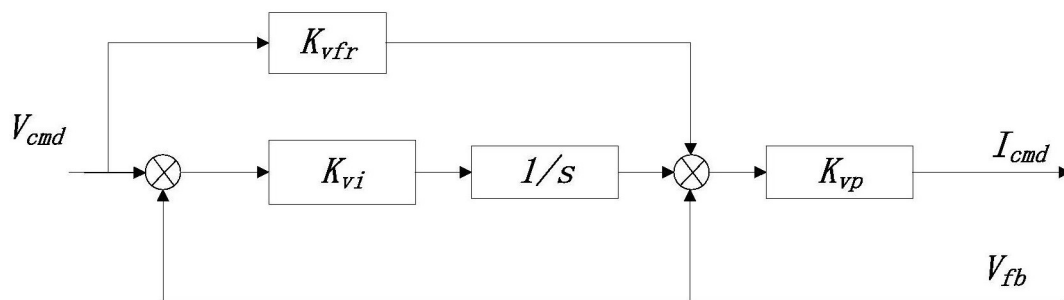


图1

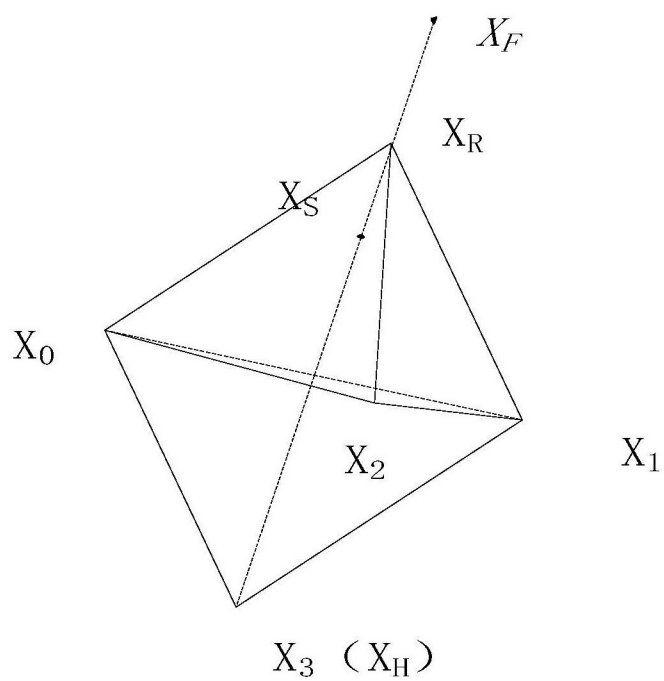


图2

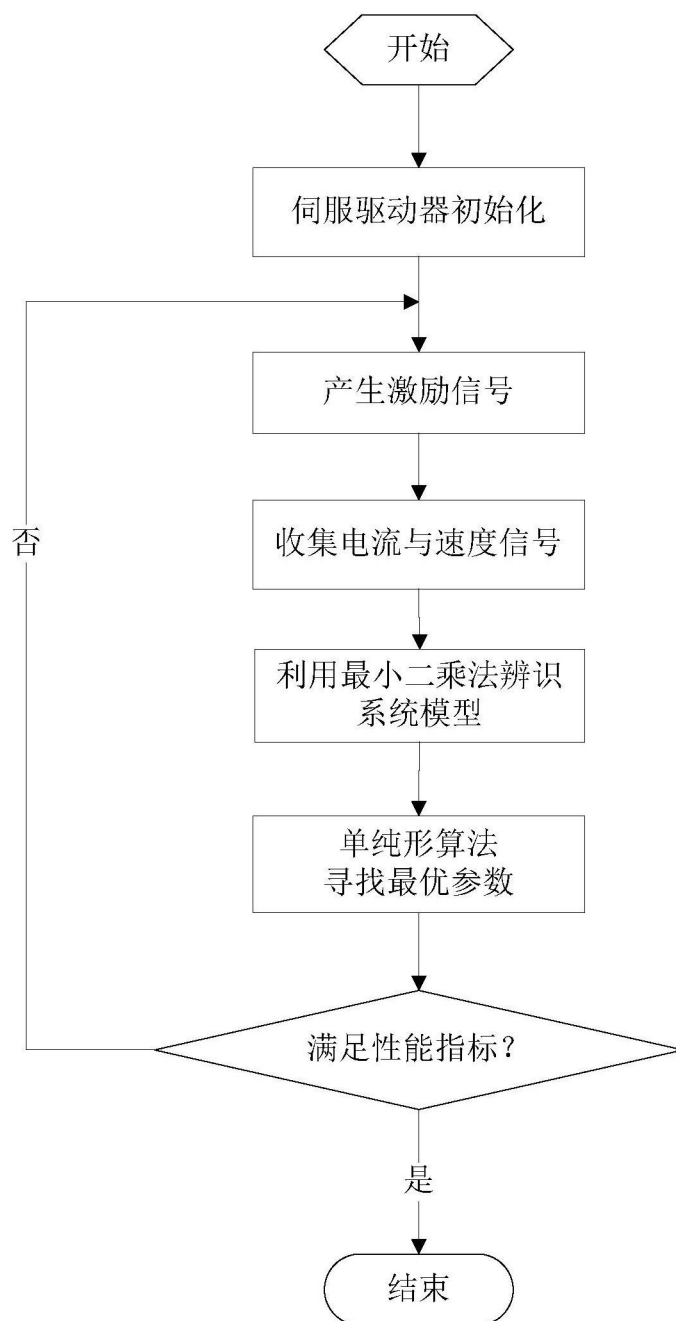


图3