



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101989827 B

(45) 授权公告日 2012.12.05

(21) 申请号 201010551460.5

复合控制算法.《南京理工大学学报(自然科学版)》.2009, 第33卷 87-91.

(22) 申请日 2010.11.18

Nam-Joon Kim等. Inertia Identification for the speed observer of the low speed control of induction machines.《IEEE TRANSACTIONS OF INDUSTRY APPLICATIONS》.1996, 第32卷(第6期), 1371-1379.

(73) 专利权人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市四牌楼2号  
专利权人 南京埃斯顿自动控制技术有限公司(72) 发明人 李世华 顾浩 吴波 吴蔚  
廖富全

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

代理人 彭英

刘志刚等. 基于永磁同步电机模型辨识与补偿的自抗扰控制器.《中国电机工程学报》.2008, 第28卷(第24期), 118-123.

审查员 李新瑞

(51) Int. Cl.

H02P 6/08(2006.01)

H02P 21/14(2006.01)

(56) 对比文件

US 2007/0007920 A1, 2007.01.11, 全文.

潘书娜等. 永磁同步电机调速系统的自适应

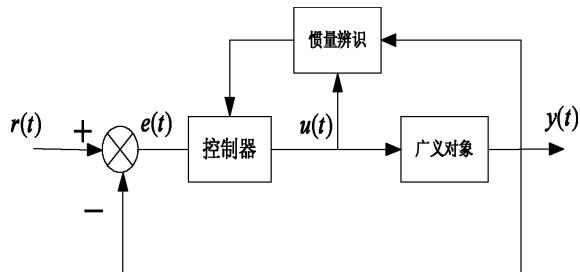
权利要求书 1 页 说明书 8 页 附图 3 页

(54) 发明名称

基于惯量辨识的交流伺服系统速度环控制参数自整定方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于惯量辨识的交流伺服系统速度环控制参数自整定方法,首先将电流环和伺服电机作为广义对象,通过基于扰动转矩观测器的惯量辨识得到该伺服电机及其负载的转动惯量估计值;然后采用极点配置法,对速度环PID控制器比例参数 $K_p$ 和积分参数 $K_i$ 进行自动整定。本发明将基于扰动转矩观测器的惯量辨识算法和交流伺服系统的特性相结合,可以实现不同转动惯量下交流伺服系统的速度环的PID参数的自整定。工程人员不需要根据经验手动设定和调节控制器参数,系统能自动完成速度环参数自整定,与现有技术相比,具有设计原理简单,对外部负载设备惯量变化较大的情况,有良好的适应性等优点。



1. 一种基于惯量辨识的交流伺服系统速度环控制参数自整定方法,其特征在于,首先将电流环和伺服电机作为广义对象,通过惯量辨识得到该伺服电机及其负载的转动惯量估计值;然后采用极点配置法,对速度环 PID 控制器的比例参数  $K_p$  和积分参数  $K_I$  进行自动整定;其中:比例参数  $K_p$  和积分参数  $K_I$  的自动整定具体包括以下步骤:

(1) 辨识转动惯量估计值  $\hat{J}$ ——给定一个周期性的速度指令信号,该速度指令信号由幅值 A、周期 T、相位  $\varphi$  定义;通过基于扰动转矩观测器的惯量辨识模块,根据前述给定的周期性速度指令信号,按以下公式计算出第 k 周期内伺服电机和负载总的等效转动惯量的估计值  $\hat{J}(k)$ :

$$\hat{J}(k) = J_n - \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\int_{(k-1)T}^{kT} \hat{T}_d(t) \times \dot{q}_1(t) dt}{\int_{(k-1)T}^{kT} \dot{q}_1(t)^2 dt}, \quad (k=1, 2, \dots) \quad (22)$$

其中,  $q_0(t)$ 、 $q_1(t)$  分别满足如下条件:

$$\begin{cases} \dot{q}_0(t) = -\lambda q_0 + \lambda u, & q_0(0) = 0 \\ \dot{q}_1(t) = -\lambda q_1 + \lambda \omega, & q_1(0) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\hat{T}_d(t) = J_n \dot{q}_1 - q_0, \hat{T}_d(0) = 0 \quad (8)$$

式中: $\hat{J}(k)$ 是指第 k 周期内伺服电机和负载总的等效转动惯量估计值; $J_n$  是电机转动惯量额定值; $\hat{T}_d(t)$ 为扰动转矩观测值  $\hat{T}_d$  随时间 t 变化的函数; $-\lambda$  为扰动转矩观测器极点; $q_0$  和  $q_1$  为内部状态变量;t 为时间量; $\dot{q}_1(t) = \frac{dq_1}{dt}$ , 为内部状态变量  $q_1$  对时间量 t 的导数; $\dot{q}_0(t) = \frac{dq_0}{dt}$ , 为内部状态变量  $q_0$  对时间量 t 的导数; $\omega$  为电机转速;u 为电机电磁转矩;

(2) 速度环 PID 控制器参数整定——将电流环和伺服电机作为广义对象, 电流环采用 PI 控制器,且将电流环等效成增益为 1 的比例环节,以确定交流伺服系统速度环 PID 控制器被控对象以及所述伺服交流系统的速度环闭环传递函数,采用极点配置法求出速度环闭环传递函数极点,根据步骤(1)辨识所得到的转动惯量估计值  $\hat{J}$ ,按照以下速度环 PID 控制器比例参数  $K_p$  和积分参数  $K_I$  的整定公式,进行比例参数  $K_p$  和积分参数  $K_I$  整定:

$$K_p = \frac{2p\hat{J}}{K} \quad (24)$$

$$K_I = \frac{p^2\hat{J}}{K} \quad (25)$$

其中,K 是力矩系数, $\hat{J}$ 是步骤(1)中辨识所得到的转动惯量估计值  $\hat{J}(k)$ , $-p$  是速度环闭环传递函数极点。

2. 根据权利要求 1 所述基于惯量辨识的交流伺服系统速度环控制参数自整定方法,其特征在于,所述伺服电机为永磁同步电机。

## 基于惯量辨识的交流伺服系统速度环控制参数自整定方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种运动控制领域的技术，具体是一种利用惯量辨识技术实现速度环 PID 控制器参数自整定方法。

### 背景技术

[0002] 随着现代科学技术的飞速发展，特别是电力电子技术、微电子技术、数字控制技术和现代电机控制理论的巨大进步，为交流伺服系统的发展创造了有利条件，特别是在机器人、航空航天、数控机床等对电机性能、控制精度要求高的领域，交流伺服系统受到越来越多的关注。

[0003] 目前，永磁同步电机交流伺服调速系统多采用双闭环的控制结构，即内环为电流控制环，外环为速度控制环。控制器多采用 PID 调节器。其中电流环的作用是提高系统的快速性，及时抑制电流内部的干扰；速度环的作用是提高系统抗负载扰动的能力，抑制速度波动。

[0004] 交流伺服系统的控制器参数对交流伺服系统的性能有重要影响。只有当交流伺服驱动器的控制参数和伺服驱动系统的固有特性匹配时，才能使伺服驱动系统工作在最佳状态。因此，常常要求交流伺服系统能够根据实际运行状态，自动进行控制器参数的整定，使伺服系统获得优良的闭环控制性能。

[0005] 目前，交流伺服驱动器的控制参数主要是人工手动整定完成，整定过程中很大程度依赖于人的经验。由于整定过程繁琐复杂，对操作人员要求较高，往往无法得到满意的伺服控制性能。

[0006] 在实际调速系统中，负载转动惯量变化会影响系统的调速性能。在一些应用场合，比如卷线机控制系统，随着卷线机卷线，折合到电机上的总惯量也随着增加，当惯量增长较大时，如果控制器参数仍然保持不变，闭环系统的性能会变差，甚至导致系统不稳定。因此在系统转动惯量变化大的情况下，如果系统能够自动识别变化的工况（转动惯量），并据此对系统控制器参数进行自动调整，不仅能够提高交流伺服系统的控制性能，而且增强了交流伺服系统对工况变化的智能性和适应性。

[0007] 现有的 PID 参数自整定方法主要有两种：一是基于规则的方法，采用阶跃响应分析和一系列规则进行参数整定；另一种是基于模型的方法，即在系统模型结构已知的条件下，通过多次试验辨识对象模型参数，然后在此基础上整定 PID 控制器参数。针对永磁同步电机调速系统，文献(Li S H, Liu Z G. Adaptive speed control for permanent magnet synchronous motor system with variations of load inertia [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2009, 56(8):3050-3059)提出了基于惯量辨识的一阶自适应自抗扰控制器。根据辨识出来的惯量，利用模糊推理法，对一阶自抗扰控制器参数进行相应的调整，仿真和实验结果表明，一阶自适应自抗扰控制方案对惯量的变化有着较强的自适应性。文献(汪书萍,赵争鸣. 带修正因子模糊 PID 控制的 PMSM 交流伺服系统 [J]. 清华大学学报, 2007, 47(1): 9-12)提出了带修正因子的模糊 PID 控制器。根据控制系统的速度

偏差和速度误差率,利用修正因子对模糊控制器参数进行在线修改。仿真结果表明该方法具有较好的跟踪和抗负载扰动性能。

## 发明内容

[0008] 本发明的目的在于针对系统惯量变化较大这一情况,利用已有的一种基于扰动转矩观测器的在线惯量辨识算法(Kim N J, Moon H S and Hyun D S, Inertia identification for the speed observer of the low speed control of induction machines[J], IEEE Trans Ind Appl , 1996, 32(6):1371-1379),辨识出电机和负载总的等效转动惯量,接着按极点配置法自动整定速度环 PID 控制器参数。

[0009] 为实现以上的技术目的,本发明将采取以下的技术方案:

[0010] 一种基于惯量辨识的交流伺服系统控制参数自整定方法,首先将电流环和伺服电机作为广义对象,通过惯量辨识得到该伺服电机及其负载的转动惯量估计值;然后采用极点配置法,对速度环 PID 控制器参数  $\mathbf{K}_p$  和  $\mathbf{K}_i$  进行自动整定。

[0011] 具体地说,所述基于惯量辨识的交流伺服系统控制参数自整定方法,包括以下步骤:

[0012] (1) 辨识转动惯量估计值  $\hat{\mathbf{J}}$  给定一个周期性的速度指令信号,该速度指令信号由幅值  $A$ 、周期  $T$ 、相位  $\varphi$  定义;通过基于扰动转矩观测器的惯量辨识模块,根据前述给定的周期性速度指令信号,按以下公式计算出第 k 周期内伺服电机和负载总的等效转动惯量的估计值  $\hat{\mathbf{J}}(k)$ :

$$[0013] \hat{\mathbf{J}}(k) = \mathbf{J}_n - \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\int_{(k-1)T}^k \hat{T}_d(t) \times \dot{q}_1(t) dt}{\int_{(k-1)T}^k \dot{q}_1(t)^2 dt}, (k=1,2\dots) \quad (22)$$

[0014] 其中,  $q_0(t)$ 、 $q_1(t)$  分别满足如下条件:

$$[0015] \begin{cases} \dot{q}_0(t) = -\lambda q_0 + \lambda u, q_0(0) = 0 \\ \dot{q}_1(t) = -\lambda q_1 + \lambda \omega, q_1(0) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$[0016] \hat{T}_d(t) = J_n \dot{q}_1 - q_0, \hat{T}_d(0) = 0 \quad (8)$$

[0017] 式中:  $\hat{\mathbf{J}}(k)$  是指第 k 周期内伺服电机和负载总的等效转动惯量估计值; $J_n$  是电机转动惯量额定值; $\hat{T}_d(t)$  为扰动转矩观测值  $\hat{T}_d$  随时间  $t$  变化的函数; $-\lambda$  为扰动转矩观测器极点; $q_0$  和  $q_1$  为内部状态变量; $t$  为时间量; $\dot{q}_1(t) = \frac{dq_1}{dt}$ , 为内部状态变量  $q_1$  对时间量  $t$

的导数 ;  $\dot{\mathbf{q}}_0(t) = \frac{d\mathbf{q}_0}{dt}$ , 为内部状态变量  $\mathbf{q}_0$  对时间量  $t$  的导数 ;  $\omega$  为电机转速 ;  $\mathbf{u}$  为电机电磁转矩 ;

[0018] (2)速度环 PID 控制器参数整定 将电流环和伺服电机作为广义对象 , 电流环采用 PI 控制器 , 且将电流环等效成增益为 1 的比例环节 , 以确定交流伺服系统速度环 PID 控制器被控对象以及所述伺服交流系统的速度环闭环传递函数 , 采用极点配置法求出速度环闭环传递函数极点 , 根据步骤(1)辨识所得到的转动惯量估计值  $\hat{\mathbf{J}}$  , 按照以下速度环 PID 控制器参数  $\mathbf{K}_P$  和  $\mathbf{K}_I$  的整定公式 , 进行参数  $\mathbf{K}_P$  和  $\mathbf{K}_I$  整定 :

$$[0019] \quad \mathbf{K}_P = \frac{2p\hat{\mathbf{J}}}{\mathbf{K}} \quad (24)$$

$$[0020] \quad \mathbf{K}_I = \frac{p^2\hat{\mathbf{J}}}{\mathbf{K}} \quad (25)$$

[0021] 其中 ,  $\mathbf{K}$  是力矩系数 ,  $\mathbf{K}$  是力矩系数 ,  $\hat{\mathbf{J}}$  是步骤(1)中辨识所得到的转动惯量估计值  $\hat{\mathbf{J}}(\mathbf{x})$  ,  $-p$  是速度环闭环传递函数极点。

[0022] 所述伺服电机为永磁同步电机。

[0023] 根据以上的技术方案 , 可以实现以下的有益效果 :

[0024] 本发明将基于扰动转矩观测器的惯量辨识算法和交流伺服系统的特性相结合 , 可以实现不同转动惯量下交流伺服系统的速度环的 PID 参数的自整定。工程人员不需要根据经验手动设定和调节控制器参数 , 系统能自动完成速度环参数自整定 , 与现有技术相比 , 具有设计原理简单 , 对外部负载设备惯量变化较大的情况 , 有良好的适应性等优点。

## 附图说明

[0025] 图 1 是 本发明系统框图 ;  
 [0026] 图 2 是 基于惯量辨识的交流伺服系统自适应 PID 控制原理图 ;  
 [0027] 图 3 是 基于扰动转矩观测器的惯量辨识结构图 ;  
 [0028] 图 3 中 , 虚线框表示内容为扰动转矩观测器 ;  
 [0029] 图 4 是交流伺服系统惯量辨识曲线图 ;  
 [0030] 图 4 中 , 曲线 1 表示惯量观测值 , 曲线 2 则表示惯量真实值 ;  
 [0031] 图 5 是惯量变化情况下 , 控制器参数整定前后 , 速度响应对比图 ;  
 [0032] 图 5 中 , 曲线 1 表示速度环 PI 控制器参数未调整 ( $\mathbf{K}_P = 0.0222$  ,  $\mathbf{K}_I = 1.1125$ ) 的永磁同步电机系统速度响应示意图 ; 曲线 2 则表示速度环 PI 控制器参数调整后 ( $\mathbf{K}_P = 0.222$  ,  $\mathbf{K}_I = 11.125$ ) 的永磁同步电机系统速度响应示意图。

## 具体实施方式

[0033] 附图非限制性地公开了本发明所涉及一个优选实施例的结构示意图 , 以下将结合

附图详细地说明本发明的技术方案。另外，该实施例在发明技术方案为前提下进行实施，给出了详细的实施方式和具体实施过程，但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

[0034] 本发明所述基于惯量辨识的交流伺服系统控制参数自整定方法，首先将电流环和伺服电机作为广义对象，通过惯量辨识得到该伺服电机及其负载的转动惯量估计值；然后采用极点配置法，对速度环 PID 控制器参数  $K_p$  和  $K_i$  进行自动整定。

[0035] 具体地说，所述基于惯量辨识的交流伺服系统控制参数自整定方法包括以下的两个步骤：

[0036] 步骤一：如图 1 所示的结构图，其组建了一个基于惯量辨识的交流伺服系统速度环控制参数自整定方法的系统，其中，广义对象包含电流环和永磁同步电机，电流环采用 PI 控制器，考虑到电流环实时性较高，在设计过程中，可以将电流环等效成增益为 1 的比例环节（即  $i_g = i_g^*$ ），不考虑电流响应过程和延迟。控制器是指控制的算法（如 PID 控制器），惯量辨识模块是指基于扰动转矩观测器的惯量辨识算法。图 1 中的  $r(t)$ ,  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $y(t)$  分别是速度给定信号、速度误差、控制器输出和实际转速输出。给定一个周期性的速度指令信号，该速度指令信号由幅值  $A$ 、周期  $T$ 、相位  $\varphi$  定义，如： $r(t) = 1000 + 90 \sin(4.5\pi t)$ ，在惯量辨识环节中，如图 3 所示，第  $k$  周期内伺服电机和负载总的等效转动惯量估计值  $\hat{J}(k)$  由以下公式计算而出：

$$[0037] \hat{J}(k) = J_n - \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\int_{(k-1)T}^{kT} \hat{T}_d(t) \times \dot{q}_1(t) dt}{\int_{(k-1)T}^{kT} \dot{q}_1(t)^2 dt}, (k = 1, 2, \dots) \quad (22)$$

[0038] 该公式(22)具体地由以下方式推导而出：

[0039] 根据永磁同步电机的机械运动方程

$$[0040] J\ddot{\omega} = T_e - T_L - B\omega \quad (1)$$

[0041] 式中， $J$  是伺服电机和负载总的等效转动惯量， $\omega$  是电机转速， $T_e$  是电机的电磁转矩， $T_L$  是负载转矩， $B$  是运动阻尼系数。

[0042] 定义扰动转矩  $T_d$  为除电磁转矩之外的所有转矩之和，即：

$$[0043] T_d = -B\omega - T_L \quad (2)$$

[0044] 为了估计扰动转矩的大小，我们设计一个扰动转矩观测器。由于实际的采样频率远高于扰动转矩变化的频率，所以可认为扰动转矩  $T_d$  在采样周期中是一个常数，于是有

$$[0045] \dot{T}_d = 0 \quad (3)$$

[0046] 由以上三个式子可得如下状态方程：

$$[0047] \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (4)$$

[0048] 其中,  $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \omega \\ \mathbf{T}_d \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1/J} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{1/J} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{u} = \mathbf{T}_e$ ,  $\mathbf{y} = \omega$ ,  $\mathbf{C} = (\mathbf{1} \quad \mathbf{0})$ 。利用上述状态方程, 可构造估计  $\mathbf{T}_d$  的最小阶观测器如下:

$$\begin{aligned} [0049] \quad & \begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = -\lambda z + \lambda \mathbf{J}_n \omega + u \\ \hat{\mathbf{T}}_d = -\lambda z + \lambda \mathbf{J}_n \omega \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

[0050] 其中,  $\mathbf{J}_n$  为转动惯量的额定值,  $z$  为内部变量,  $\hat{\mathbf{T}}_d$  为扰动转矩估计值,  $-\lambda$  为扰动转矩观测器的极点,  $\lambda > 0$ 。对上式进行拉氏变换, 可得到  $\hat{\mathbf{T}}_d$  为:

$$\begin{aligned} [0051] \quad & \hat{\mathbf{T}}_d(s) = \mathbf{J}_n \lambda \frac{s}{s + \lambda} \omega(s) - \frac{\lambda}{s + \lambda} u(s) \end{aligned} \quad (6)$$

[0052] 此处引入变量  $q_0(t)$ ,  $q_1(t)$ , 他们分别满足如下条件:

$$\begin{aligned} [0053] \quad & \begin{cases} \dot{q}_0(t) = -\lambda q_0 + \lambda u, q_0(0) = 0 \\ \dot{q}_1(t) = -\lambda q_1 + \lambda \omega, q_1(0) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

[0054] 扰动转矩  $\mathbf{T}_d$  在物理上是不可测的, 我们采用扰动转矩观测器间接地得到它的估计值, 其中  $q_0(t)$ ,  $q_1(t)$  是扰动转矩观测器组成的一部分, 属于扰动转矩观测器的内部状态变量。

[0055] 于是扰动转矩的估计值可以用下式表示:

$$\begin{aligned} [0056] \quad & \hat{\mathbf{T}}_d(t) = \mathbf{J}_n \dot{q}_1 - q_0, \hat{\mathbf{T}}_d(0) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

[0057] 惯量的变化量  $\delta J$  通常是由负载变化或估计误差引起的, 它可表达为:

$$\begin{aligned} [0058] \quad & \delta J = J - J_n \end{aligned} \quad (9)$$

[0059] 式中,  $J$  是伺服电机和负载总的等效转动惯量,  $J_n$  是伺服电机转动惯量的额定值。

[0060] 由式(1), (5), (9)可以得到  $\hat{\mathbf{T}}_d$  的微分方程如下:

$$\begin{aligned} [0061] \quad & d\hat{\mathbf{T}}_d(t)/dt = -\lambda \hat{\mathbf{T}}_d(t) - \lambda(\delta J \dot{\omega} + B\omega + T_L) \end{aligned} \quad (10)$$

[0062] 再引入变量  $q_2$ , 并使它满足如下条件:

$$\begin{aligned} [0063] \quad & \dot{q}_2(t) = -\lambda q_2(t) + \lambda, q_2(0) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

[0064] 则  $\hat{\mathbf{T}}_d$  可表示如下:

$$\begin{aligned} [0065] \quad & \hat{\mathbf{T}}_d(t) = -\delta J \dot{q}_1(t) - Bq_1(t) - T_L q_2(t) \end{aligned} \quad (12)$$

[0066] 上式表明, 扰动转矩的估计值由 3 部分组成: 惯量变化转矩  $\delta J q_1(t)$ , 阻尼转矩  $Bq_1(t)$  和负载转矩  $T_L q_2(t)$ 。

[0067] 为了辨识转动惯量的值, 可以先给出一个周期性的速度指令测试信号:

[0068]  $\omega(t) = \omega(t-T)$  (13)

[0069] 其中,  $T$  为速度指令的周期。当伺服系统加上这一速度指令信号之后, 稳态时它的角速度也将是一个周期信号, 有:

[0070]  $\lim_{t \rightarrow \infty} [\omega(t) - \omega(t-T)] = 0$  (14)

[0071]  $\lim_{t \rightarrow \infty} [q_1(t) - q_1(t-T)] = 0$  (15)

[0072] 而且可以由式(11) 得到:

[0073]  $\lim_{t \rightarrow \infty} q_2(t) = 1$  (16)

[0074]  $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}_2(t) = 0$  (17)

[0075] 定义两个信号  $\varphi_a$  和  $\varphi_b$  的内积为:

[0076]  $[\varphi_a, \varphi_b] = \int_{t-\eta T}^T \varphi_a \varphi_b dt$  (18)

[0077] 则信号  $q_1(t)$  和  $\dot{q}_1(t)$  以及  $q_2$  和  $\dot{q}_1$  的内积为:

[0078]  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t-\eta T}^T q_1(t) \dot{q}_1(t) dt = 0$  (19)

[0079]  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t-\eta T}^T q_2(t) \dot{q}_1(t) dt = 0$  (20)

[0080] 将式(12)两边同乘  $\dot{q}_1(t)$ , 并取内积, 由式(12)、(19)、(20)可以得到惯量的表达式为:

$$[0081] \begin{cases} \delta J(k) = -\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\int_{t-\eta T}^T \hat{T}_d(t) \times \dot{q}_1(t) dt}{\int_{t-\eta T}^T \dot{q}_1(t)^2 dt} \\ \hat{J}(k) = J_n + \delta J(k) \end{cases} \quad (21)$$

[0082] 式中,  $\delta J(k)$  为第  $k$  周期内伺服电机和负载总的等效转动惯量变化量的估计值,  $\hat{J}(k)$  为第  $k$  周期内伺服电机和负载总的等效转动惯量的估计值。

[0083] 因此,

[0084]  $\hat{J}(k) = J_n - \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\int_{t-\eta T}^T \hat{T}_d(t) \times \dot{q}_1(t) dt}{\int_{t-\eta T}^T \dot{q}_1(t)^2 dt}, (k=1,2, \dots)$  (22)

[0085] 式中:  $\hat{J}(k)$  是指第  $k$  周期内伺服电机和负载总的等效转动惯量估计值;  $J_n$  是电机

转动惯量额定值 ;  $\hat{T}_q(t)$  为扰动转矩观测值  $\hat{T}_q$  随时间  $t$  变化的函数 ;  $q_0$  和  $q_1$  为内部状态变量 ;  $t$  为时间量 ;  $\dot{q}_1(t) = \frac{dq_1}{dt}$ , 为内部状态变量  $q_1$  对时间量  $t$  的导数 ;  $\dot{q}_0(t) = \frac{dq_0}{dt}$ , 为内部状态变量  $q_0$  对时间量  $t$  的导数。

[0086] 图 4 是交流伺服系统惯量辨识曲线图, 其中, 曲线 1 表示惯量观测值, 曲线 2 则表示惯量真实值。

[0087] 步骤二 : 根据辨识的结果, 利用极点配置方法, 确定出速度环 PID 控制器的控制参数。如图 2 所示, 本实例中的速度环控制器采用 PI 控制器, 根据对交流伺服系统的速度环数学模型分析可知, 可以用一阶模型来近似交流伺服系统速度环开环特性, 其传递函数表示为 :

[0088]

$$G(s) = \frac{K}{Js}$$

[0089] 其中,  $J$  是电机和负载总的等效转动惯量,  $s$  为复频率算子,  $K$  是力矩系数, 例如取永磁同步电机对象参数为  $J = 1.78e-4 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ ,  $K = 1.608 \text{ Nm/A}$ 。

[0090] 另外, PI 控制器传递函数  $W_P(s) = K_p + \frac{K_I}{s}$ , 则系统闭环传递函数为 :

$$[0091] W_{\Phi}(s) = \frac{\frac{K}{J}(K_p s + K_I)}{s^2 + \frac{KK_p}{J}s + \frac{KK_I}{J}} = \frac{\frac{K}{J}(K_p s + K_I)}{(s + p)^2} \quad (23)$$

[0092] 其中  $-p$  (二重极点) 是速度环闭环传递函数极点。

[0093] 由此可得, PI 控制器参数整定公式如下 :

$$[0094] K_p = \frac{2p\hat{J}}{K} \quad (24)$$

$$[0095] K_I = \frac{p^2\hat{J}}{K} \quad (25)$$

[0096] 通过图 5 可以看出, 基于惯量辨识的交流伺服系统速度环控制参数自整定方法在负载设备更替或惯量发生变化的情况下, 能自动调整 PID 控制器参数, 使得系统具有良好的自适应功能。

[0097] 为了进一步验证本实施例提出的整定方法的有效性, 本实施例中的实验平台是永磁同步电机系统, 采用基于 DSP 的全数字控制实现方式, 编程语言为 C 语言。系统的主要组成部分有 : 由 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320 系列芯片 TMS320F2808 为核心组成的控制电路部分、由智能功率器件 (Intelligent Power Module, 简称 IPM) 为核心的逆变器电路部分及永磁同步电机, 光电编码器和霍尔器件等传感器, 还包括键盘及显示模块和通信模块。各个器件的主要用途为 : 霍尔传感器用于采集两路电流信号  $i_A, i_B$ , 光电编码器在电机内部用于采集电机的转速信号及转子位置 ; TMS320F2808 DSP 为整个伺服系统的核心, 用于完成坐标

变换、速度控制器和电流控制器的运算、SVPWM 信号的生成等核心运算 ; 键盘和显示模块用于设定参数及显示当前系统状态 ; 通信模块用于和上位机进行通信(串口通信) ; 逆变器电路以功率器件 IPM 为核心, 它根据 DSP 生成的 SVPWM 控制信号, 将电源输入转换成相应的三相交流电压, 用于驱动电机工作。

[0098] 在电机空载时, 速度环 PI 控制器参数为  $K_p = 0.0222$ ,  $K_i = 1.1125$ 。

[0099] 电机拖动负载设备, 使其惯量增加(惯量为电机转子的惯量的 10 倍), 在线给定一个速度周期信号, 得出惯量的估计值  $\hat{J}$ , 如图 3 所示, 通过公式(24) 和公式(25), 得到速度环控制器的参数 :  $K_p = 0.222$ ,  $K_i = 11.125$ 。图 5 给出了控制器参数调整前后永磁同步电机系统的速度响应对比图。

[0100] 本实施例将基于扰动转矩观测器的惯量辨识算法应用于交流伺服系统的 PID 参数整定, 通过将惯量辨识和极点配置方法结合起来, 可以简单高效地完成对交流伺服电机控制器参数的调整。实验结果表明 : 本实施例普适性强, 对外部负载设备惯量变化较大的情况, 有良好的适应性。

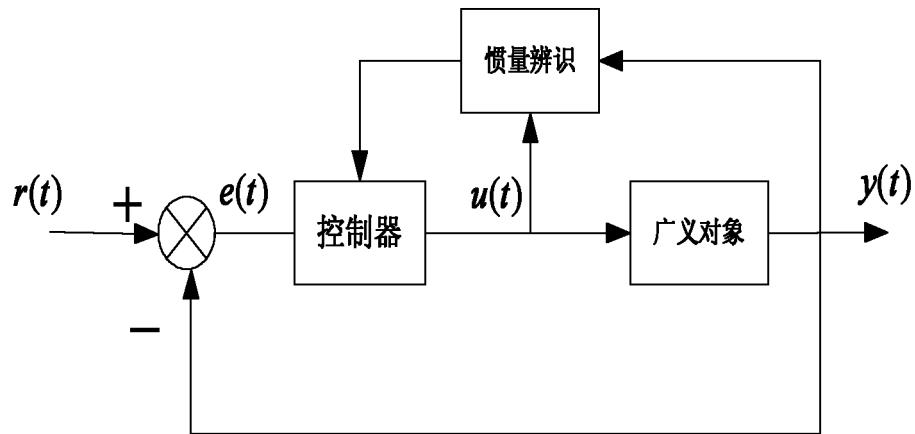


图 1

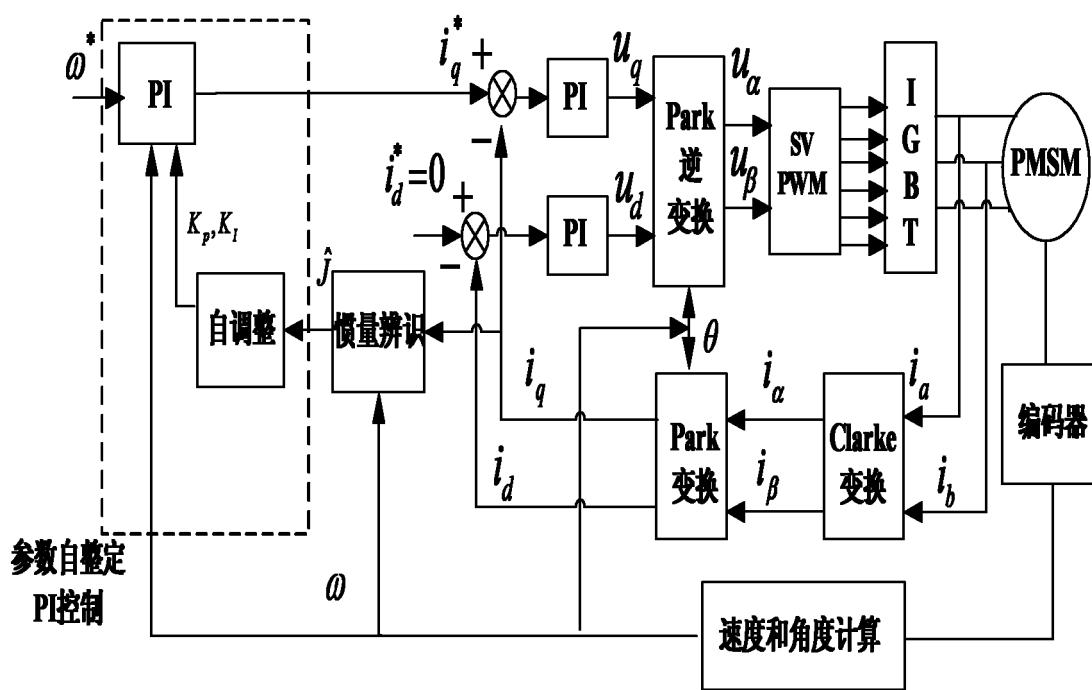


图 2

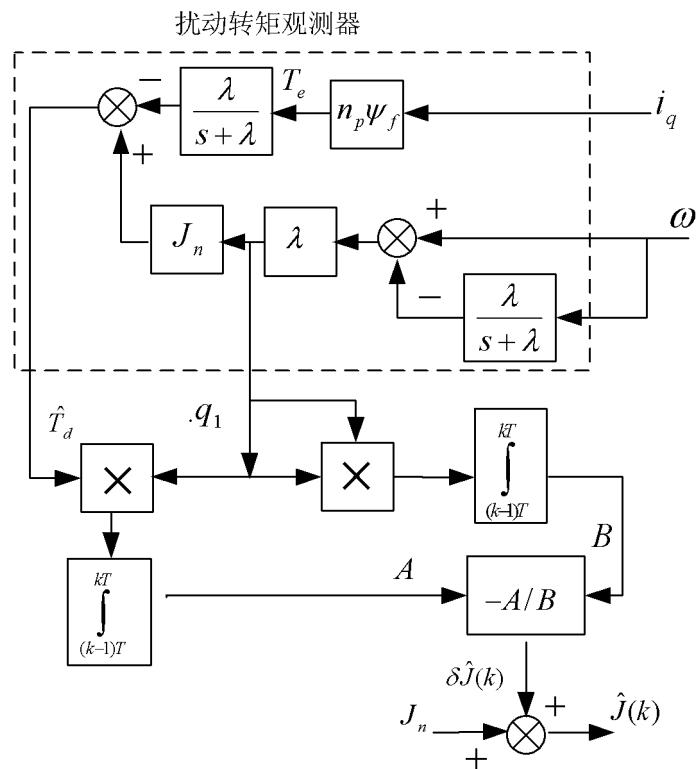


图 3

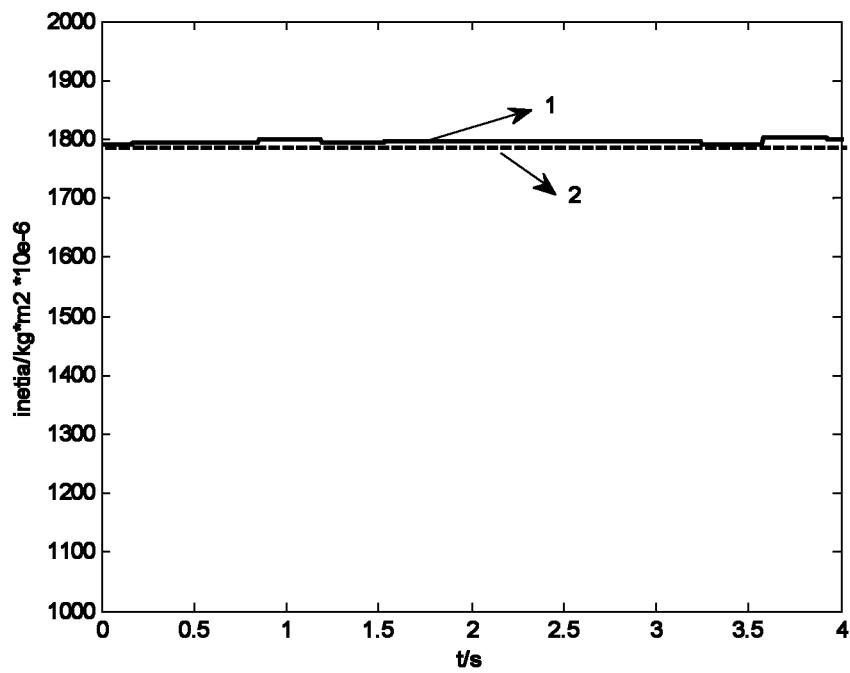


图 4

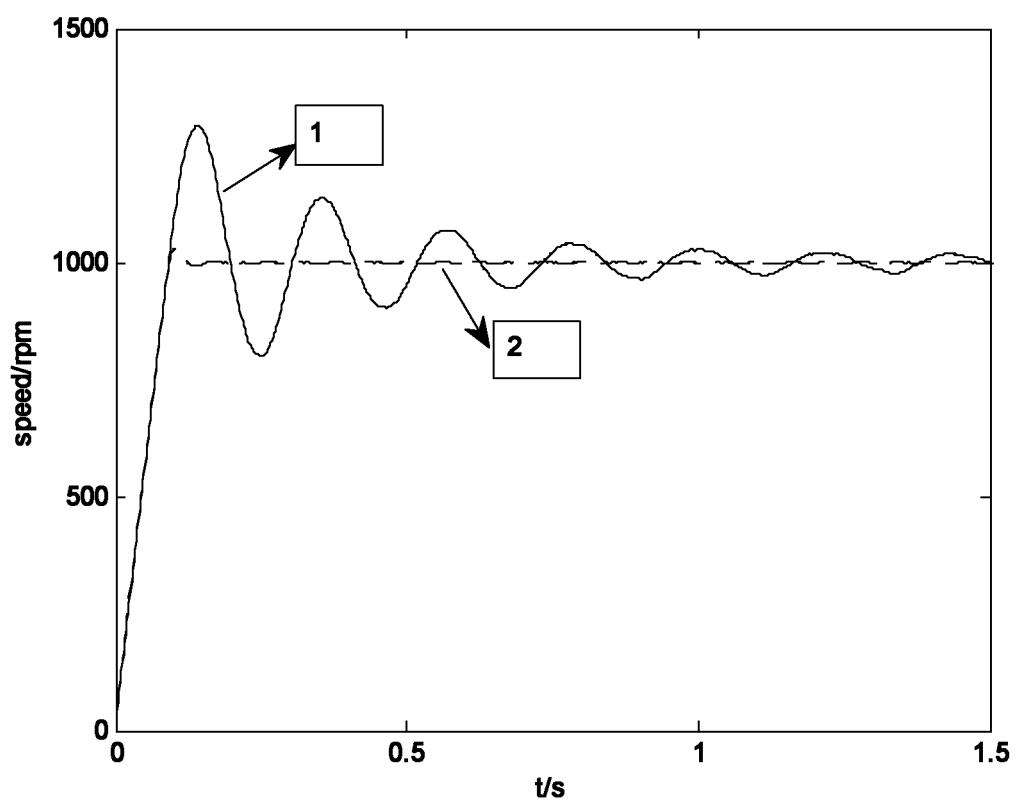


图 5