

永磁同步电机伺服系统抗扰动自适应控制

鲁文其, 胡育文, 梁骄雁, 黄文新

(南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室, 江苏省 南京市 210016)

Anti-disturbance Adaptive Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Servo System

LU Wenqi, HU Yuwen, LIANG Jiaoyan, HUANG Wenxin

(Aero-Power Sci-Tech Center, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: In order to meet the operation requirement under time-variable inertia and time-variable load condition, an adaptive torque control method with anti-disturbance is proposed for permanent magnet synchronous motor (PMSM) servo system. With time-variable inertia, a Landau discrete-time recursive algorithm used to estimate the inertia is adopted. According to the rules, the parameters of speed controller were regulated by the estimated inertia, which guarantees good dynamic and static performance in servo system. Under time-variable load condition, a simple reduced-order observer is established to identify the load torque. And with the estimated value, speed disturbances caused by heavy load can be adaptively compensated which improves system robustness. Experimental results show that the proposed adaptive algorithm is effective and the convergence rate of inertia identification is fast. Compensation measure used in this scheme has strong robustness to the change of system parameters and the disturbance, and it can be applied to some drive fields that have time-variable load and inertia changing slowly.

KEY WORDS: permanent magnet synchronous motor (PMSM); time variable inertia; time variable load; adaptation; Landau; load observer; disturbance

摘要: 为使永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)伺服系统能够满足某些驱动场合时变惯量、时变负荷的工作特性,提出一种具有抗扰动作用的自适应转矩控制方法。针对时变惯量,采用朗道离散时间递推算法对惯量进行实时估计,然后用辨识得到的惯量当前值依照规则对速度控制器各参数进行整定,使伺服系统在惯量发生变化时仍具有良好的动静态性能。针对时变负荷,采用一种简单的降维负载观测器对负载力矩进行辨识,并用辨识得到的负载力矩值对变载引起的速度扰动进行自适应补偿,以提高系统的鲁棒性。以一台面贴式永磁同步电机为对象进行试验,结果表明所提出的自适应算法有效,参数辨识的收敛速度较

快,该方案所采用的补偿措施对系统参数变化和扰动等有很强的鲁棒性,能应用在一些时变负荷、时变惯量的驱动场合。

关键词: 永磁同步电机; 时变惯量; 时变负荷; 自适应; 朗道; 负载观测器; 扰动

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有体积小、效率高、电磁转矩大、控制方便等优点,故其成为伺服系统中执行机构的最佳选择之一。在电机实际运行时,电机所带的负载转矩或者转动惯量变化(视为扰动)都会对系统期望的伺服性能造成不良的影响。高性能的伺服系统要求伺服电机的输出无超调又快速地跟踪输入指令,且稳态无静差,对系统参数的变化具有强鲁棒性。因此,对于某些变惯量、变负荷场合应用的永磁同步电机伺服系统来说,抗扰性是衡量其伺服性能的重要指标之一。

目前国内外研究学者在抗扰动方面提出了多种方法,如滑模控制^[1-2]、自抗扰控制^[3-4]、模型参考自适应控制^[5-6]和智能控制^[7-8]等。文献[5-6]主要针对抑制惯量变化(扰动)展开研究,基于离散模型参考自适应理论,通过仿真和实验,对异步电机伺服系统的机械参数进行了在线辨识,并提出了自调整速度控制的方法。实验结果显示,这种方法的辨识误差较大(接近35%),收敛时间约为10s。文献[7]通过模型变换将PMSM变换成标称模型和不确定项的形式(各种扰动均包含在这个不确定项中),然后设计鲁棒补偿器对不确定项进行补偿,整个控制器结构简单,容易实现,但鲁棒控制方法很难实现对PMSM非线性完全补偿;文献[9]设计了一个扰动观测器(disturbance observer, DOB)对负载扰动进行辨识,并提出了基于扰动观测器前馈补偿和有限时间反

馈控制的复合控制方法,能够提高系统的抗扰动性能,仿真结果验证了该方法的有效性,但该算法对硬件要求较高,实现起来较困难。文献[10-12]设计了一个全维状态观测器,通过设计的速度观测器估算位置误差,并计算负载扰动,实验结果显示该算法在低速领域对参数变化具有抗扰性,但实现起来稍显复杂。

本文针对时变惯量、时变负荷负载特性的驱动场合,寻找一种简单的抗干扰性能强的控制方法,使电机在系统转动惯量和负载转矩改变时仍能保持良好的控制性能。针对时变负荷,本文采用一个降维观测器对负载力矩进行辨识,通过实验对辨识的响应速度和精度进行分析。针对时变惯量,本文基于离散模型参考自适应理论,采用朗道离散时间递推算法(以下简称朗道)对惯量进行实时辨识。最后,用辨识得到的惯量值和负载力矩值分别进行控制器参数的调整和扰动补偿,并对伺服系统的动态响应性能及抗扰动性能进行测试。

1 参数辨识

1.1 负载力矩观测器设计

高精度的伺服系统要求伺服电机在外部出现大的扰动时能保证良好的响应性能。由于负载力矩是很难直接测量的非电物理量,因此需要对其进行在线观测。本文基于文献[10-12]设计的全维观测器以及控制领域的降维观测器思想^[13],提出一个降维负载力矩观测器,可以实时检测负载力矩的变化。由电机学原理可知,电机的运动学方程为

$$J(d\omega_m/dt) + B_m\omega_m + T_L = T_c \quad (1)$$

式中: ω_m 为转子机械角速度; T_c 为电机输出转矩; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量; B_m 为粘性阻尼系数。

控制器的采样频率远远高于负载转矩的变化时间,因此在控制周期内负载转矩可认为是一恒定值,即

$$dT_L/dt = 0 \quad (2)$$

由式(1)、(2)得伺服电机的动力学状态方程:

$$\begin{cases} dx/dt = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (3)$$

式中: $A = \begin{bmatrix} -B_m/J & -1/J \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 1/J \\ 0 \end{bmatrix}$; $x = \begin{bmatrix} \omega_m \\ T_L \end{bmatrix}$; $C = [1 \ 0]$; $u = T_c$; $y = \omega_m$ 。

输入变量为电机实际转矩,状态变量为机械角速度和负载力矩,输出变量为机械角速度。因此,式(3)可写为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_m \\ T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_m/J & -1/J \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/J \\ 0 \end{bmatrix} T_c \quad (4)$$

借鉴文献[13]的降维状态观测器思想,本文提出一个简单的降维状态观测器,表达式如下:

$$\begin{cases} d\hat{x}/dt = A\hat{x} + Bu + K(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\hat{x} = [\hat{\omega}_m \ \hat{T}_L]^T$ 为被估计的状态变量; $K = [k_1 \ k_2]^T$ 为状态反馈增益阵。

由式(3)~(5)得

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = (A - KC)\tilde{x} = \begin{bmatrix} -B_m/J - k_1 & -1/J \\ -k_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m - \hat{\omega}_m \\ T_L - \hat{T}_L \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $\tilde{x} = x - \hat{x}$ 为观测误差,其特征方程为

$$\det[sI - (A - KC)] = s^2 + (k_1 + B_m/J)s - k_2/J = 0 \quad (7)$$

选择适当的 K , 使 $(A - KC)$ 有稳定、适当的特征值, $\tilde{x} \rightarrow 0$ 时, 与 $x(t)$ 、 $u(t)$ 和 $\tilde{x}(0)$ 无关; $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ 与 $\tilde{x}(0)$ 无关。根据指定的期望极点 α 、 β , 观测器的期望特征多项式为

$$s^2 - (\alpha + \beta)s + \alpha\beta = 0 \quad (8)$$

由式(7)和(8)得

$$\begin{cases} k_1 = -(\alpha + \beta) - B_m/J \\ k_2 = -J(\alpha\beta) \end{cases} \quad (9)$$

假设 $B_m = 0$, 且 $\alpha = \beta$, 则式(9)可改写为

$$\begin{cases} k_1 = -2\alpha \\ k_2 = -J\alpha^2 \end{cases} \quad (10)$$

式(5)可以写为

$$\begin{cases} d\hat{\omega}_m/dt = \\ -(B_m/J)\hat{\omega}_m - \hat{T}_L/J + T_c/J + k_1(\omega_m - \hat{\omega}_m) \\ d\hat{T}_L/dt = k_2(\omega_m - \hat{\omega}_m) \end{cases} \quad (11)$$

根据系统期望的特性,选择极点所在的位置,按照式(11)构造观测器,即可观测出负载力矩的值。图1为负载力矩观测器的原理框图,图中 K_T 为电机转矩常数,相比文献[10-12]的全维观测器,图1所示的降维观测器的结构简单,容易实现。

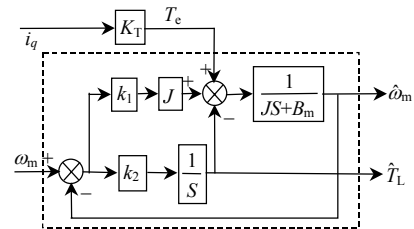


图1 负载力矩观测器原理框图
Fig. 1 Schematic block diagram of load torque observer

1.2 惯量辨识算法原理分析

本文采用朗道算法对惯量进行辨识^[14]，当辨识算法对速度的采样间隔足够小时，有

$$d\omega_m/dt \approx [\omega_m(k) - \omega_m(k-1)]/\Delta t = [\omega_m(k) - \omega_m(k-1)]/T_s \quad (12)$$

式中 T_s 为辨识算法控制周期。

忽略粘性阻尼系数，式(1)可以简单离散化为

$$\omega_m(k) = \omega_m(k-1) + (T_s/J)[T_c(k-1) - T_L(k-1)] \quad (13)$$

假设电机所带负载力矩恒定，或变化周期远远大于速度计算周期，则可认为 $k-1$ 、 $k-2$ 时刻的负载转矩相同，即：

$$T_L(k-1) = T_L(k-2) \quad (14)$$

由以下公式：

$$\omega_m(k) = \omega_m(k-1) + (T_s/J)[T_c(k-1) - T_L(k-1)] \quad (15)$$

$$\omega_m(k-1) = \omega_m(k-2) + (T_s/J)[T_c(k-2) - T_L(k-2)] \quad (16)$$

可得

$$\omega_m(k) = 2\omega_m(k-1) - \omega_m(k-2) + (T_s/J)[T_c(k-1) - T_c(k-2)] \quad (17)$$

设 $U(k-1) = T_c(k-1) - T_c(k-2)$ ，又 $T_s/J = b(k-1)$ ，则式(17)可化简为

$$\omega_m(k) = 2\omega_m(k-1) - \omega_m(k-2) + b(k-1)[T_c(k-1) - T_c(k-2)] \quad (18)$$

将式(18)作为参考模型，可得可调模型方程(速度估计值)：

$$\hat{\omega}_m(k) = 2\hat{\omega}_m(k-1) - \hat{\omega}_m(k-2) + \hat{b}(k-1)[T_c(k-1) - T_c(k-2)] \quad (19)$$

设

$$\varepsilon(k) = \omega_m(k) - \hat{\omega}_m(k) \quad (20)$$

由朗道思想的辨识迭代算法可得

$$\hat{b}(k) = \hat{b}(k-1) + [\beta U(k-1)\varepsilon(k)]/[1 + \beta U(k-1)^2] \quad (21)$$

式中： $\hat{b}(k) = T_s/\hat{J}$ 为待辨识参数； β 为自适应增益。因 T_s 保持不变，由辨识值 \hat{b} 可求出 \hat{J} 的大小。

2 自适应算法控制原理框图

本文提出的自适应转矩控制方法原理如图 2 所示。系统采用电流内环、速度外环的矢量控制两环结构，速度和位置信号由光电码盘反馈；电流环、速度环采用积分分离的 PI 调节器进行控制，其中速度控制器的 PI 参数根据日本学者北森氏提出的部分模型匹配设计法^[15]进行调整，负载力矩的辨识值反馈到交轴电流对速度进行补偿；负载或惯量的施加通过控制磁粉制动器或磁粉离合器的励磁电源来实现，为了验证负载力矩辨识值的正确性，实际负载(T_L)通过检测磁粉制动器的励磁电流来体现。

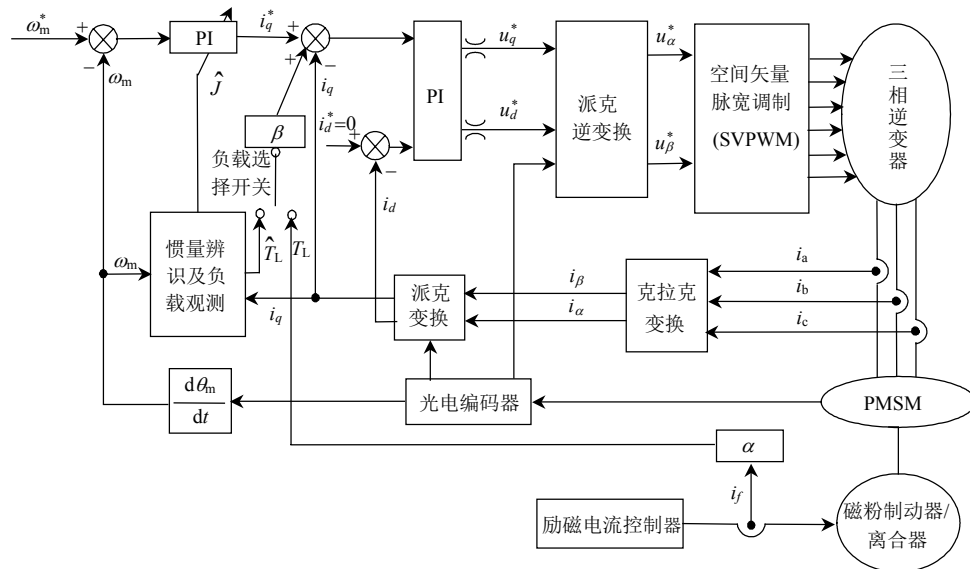


图 2 伺服系统自适应转矩控制方法原理框图

Fig. 2 Schematic block diagram of control method for servo system adaptive torque

3 实验验证

3.1 实验平台

为了验证自适应控制算法的有效性，本文设计了 2 个试验平台分别实现变负载和变惯量的目的，

如图 3 所示。变负载实验平台主要分为 3 部分：伺服电机、联轴器、磁粉制动器。变负载是通过 DSP 控制的基于 DC-DC 电路的励磁电源实现的。变惯量实验平台主要分为 4 部分：伺服电机、联轴器、

磁粉离合器和碟式制动器, J_m 、 J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 分别表示伺服电机转子惯量、联轴器惯量、磁粉离合器前级惯量、磁粉离合器后极惯量、碟式制动器惯量。开始时制动器处于制动状态, 磁粉离合器不通激磁电流, 伺服电机经过柔性联轴器只拖动磁粉离合器前级旋转。改变转动惯量时, 使制动器处于非制动状态, 并同时给定磁粉离合器激磁电流, 此时磁粉离合器前级与后级实现同步旋转。伺服电机参数为: 额定功率 2.3 kW; 额定转矩 15 N·m; 交直流电感 3.675 mH; 额定转速 1 500 r/min; 相绕组电阻 0.47 Ω 。

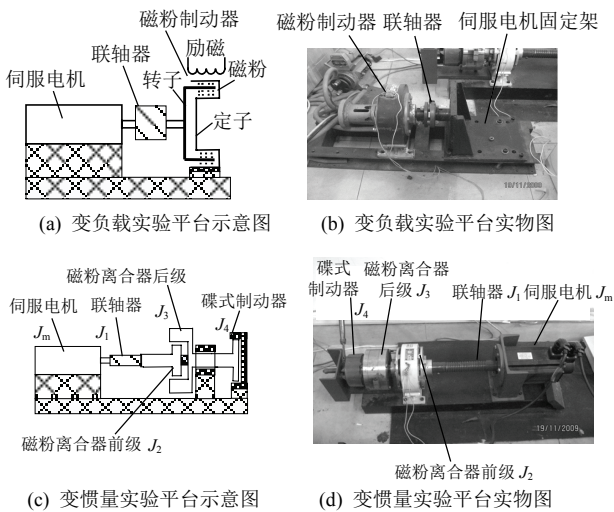


图3 试验平台

Fig. 3 Experimental platform

3.2 负载力矩辨识

为了验证负载观测器算法的有效性, 本文基于变负载试验平台对算法进行测试, 负载的改变通过 DSP 控制励磁电源实现。伺服电机首先在 800~400 r/min 之间变速运行(周期为 4 s), 施加的负载为恒定的 5 N·m。图 4 为本文采集的实验波形, 图中

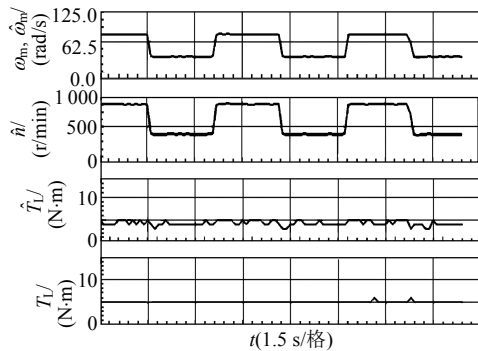


图4 电机 800~400 r/min 变速运行、负载恒定时负载观测器实验波形

Fig. 4 Experimental waveform of load observer at variable speed between 800 and 400 r/min with constant load

ω_m 、 $\hat{\omega}_m$ 分别为电机的实际机械角速度和估机械角速度, \hat{n} 为电机估算转速, \hat{T}_L 为负载力矩辨识值, T_L 为给定施加负载。从实验波形可知, 估机械角速度与实际机械速度几乎保持一致, 跟随性较好; 负载观测器的辨识结果在 4~5 N·m 之间变化, 基本不受电机速度动态过程的影响, 忽略磁粉制动器的磁粉特性、DC-DC 电路的非线性因素和电压检测回路的误差, 负载力矩的辨识精度为 20%。

为了验证负载观测器对负载变化的动态响应性能, 伺服电机以 800 r/min 恒速运行, 施加负载在 1~12 N·m 内实时变化。图 5 为采集的实验波形, 可见负载观测器辨识的负载力矩为 2~11 N·m, 与施加负载的变化趋势一致, 辨识结果稍有误差且存在一定的延迟, 但能够反映负载力矩的变化。

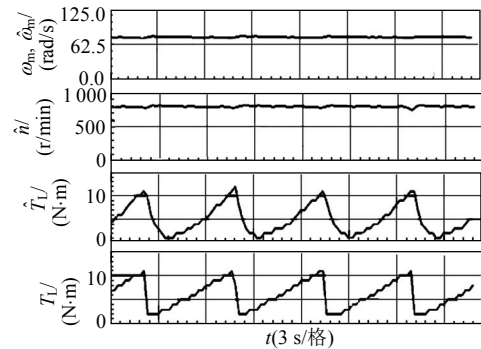


图5 电机以 800 r/min 恒速运行、负载实时变化时负载观测器的实验波形

Fig. 5 Experimental waveform of load observer at constant speed 800 r/min with real time changing load

3.3 惯量辨识

为了验证惯量辨识算法的有效性, 本文基于变惯量试验平台对朗道算法进行测试, 惯量突变通过手动控制励磁电源实现。

1) 自适应增益 β 的选取。

伺服电机空载起动运行, 速度在 500~250 r/min 间变化, 周期为 2 s, 系统未施加惯量时, 电机轴上的转动惯量值为标称值: $J_m+J_1+J_2=4.73 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $T_s/J=1.298 \text{ s}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ (参见图 3)。图 6 为不同增益值 β 作用时, 采用朗道辨识算法得到在起动过程的电机实际速度、估算速度、 T_s/\hat{J} 辨识值和交轴电流的实验波形。实验数据如表 1。由图 6(a)可知, $\beta=0.001$ 时朗道算法的 T_s/\hat{J} 辨识值为 $1.294 \text{ s}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$, 换算得到的转动惯量值为 $4.64 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 辨识误差为 2%, 算法的辨识收敛时间约为 24 s。再结合表 1 的数据知, 当增益 β 为 0.000 1 时, 辨识值的收敛时间较长, 在 50 s 以上; 当自适应增益 β 在 0.001~0.01

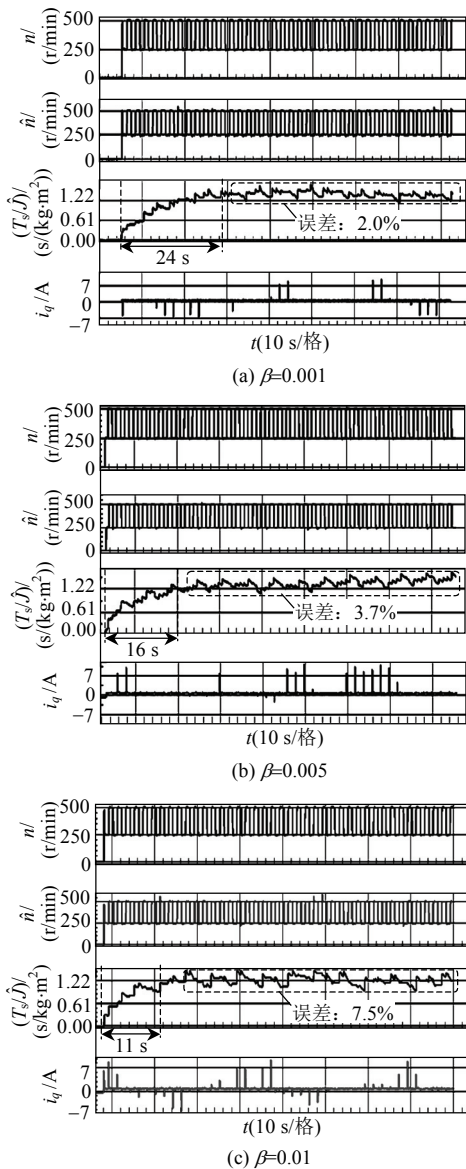


图 6 不同自适应增益 β 下的实验结果比较
Fig. 6 Comparison of experiment results with different parameter β

表 1 不同自适应增益 β 下的实验数据比较
Tab. 1 Comparison of experiment data for different parameter β estimations

自适应增益 β	辨识收敛时间/s	辨识精度/%
0.000 1	>50	—
0.001	24	2.0
0.005	16	3.7
0.01	11	7.5
0.05	—	振荡

之间时，朗道算法辨识的收敛时间随着自适应增益 β 的增大而减小，辨识结果的抖振幅度和稳态误差随着自适应增益 β 的增大而变大；当增益 β 为 0.05 时，辨识值抖振严重无法辨识。增益 β 的大小可以在收敛时间和辨识精度之间折中选取，当 $\beta=0.01$ 时，辨识精度为 7.5%，收敛时间为 11 s。

2) 变惯量实验。

伺服电机依然空载运行，转速在 500~250 r/min 间变化，周期为 3 s，手动控制励磁电源使电机的惯量由标称值变为原来的近似 1.9 倍(参见图 3, $J_m+J_1+J_2+J_3+J_4=8.99\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$)，自适应增益 $\beta=0.01$ 。图 7(a)为伺服电机带标称惯量起动过程的实验波形，可知 T_s/\hat{J} 辨识值为 1.22 s/(kg·m²)，换算得惯量值为 $4.72\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，辨识误差为 0.2%；图 7(b)为惯量突加时的实验波形， T_s/\hat{J} 辨识值减小到 0.586 s/(kg·m²)，对应的惯量值为 $10.24\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，辨识误差为 14%，辨识响应时间为 5 s；图 7(c)为惯量突卸过程的实验波形，辨识响应时间约为 15 s，最后辨识得到的 T_s/\hat{J} 辨识值为 1.19 s/(kg·m²)，换算得惯量值为 $5.02\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，辨识误差为 6.1%。

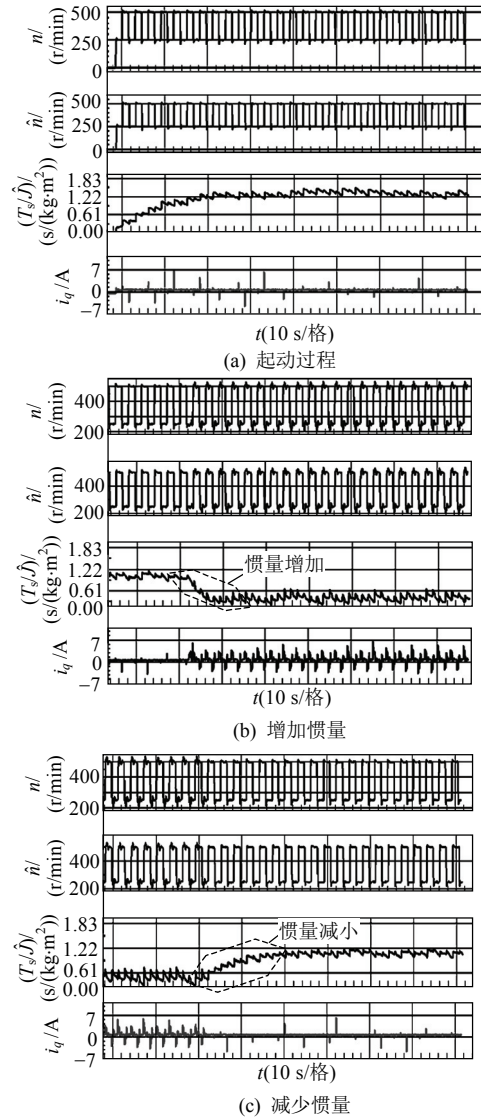


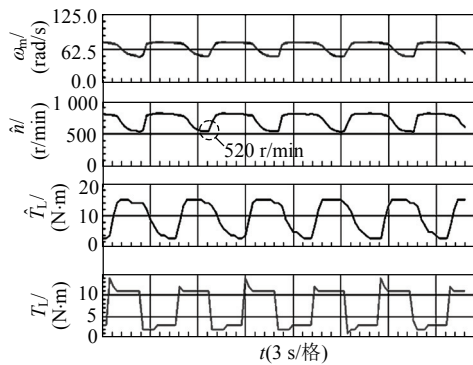
图 7 变惯量实验

Fig. 7 Experiments of variable inertias

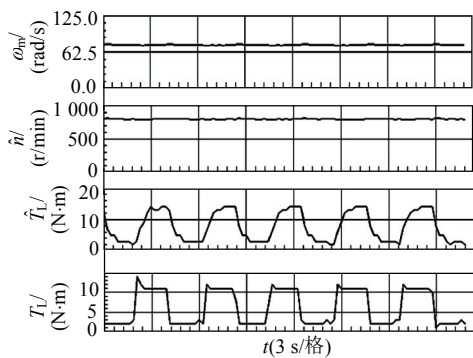
综合上述实验结果可知,基于朗道算法的惯量辨识方法,伺服电机带标称惯量启动时,辨识时间稍长,约为11 s;惯量突变时,辨识时间最快可控制在5 s;辨识精度最好达0.2%。

3.4 速度伺服系统的自适应性能测试

为了验证自适应算法在负载扰动时对速度的补偿作用,本文基于变负载试验平台进行实验。图8为电机给定转速800 r/min稳态运行过程中,突加突卸负载的实验波形。由图8(a)可知,系统未引入补偿算法,突加负载时电机转速有一个瞬态降落,由800 r/min下降到520 r/min,突卸负载后转速又恢复到800 r/min。系统加入了负载扰动补偿后的实验波形如图8(b)所示,由于存在实时补偿作用,转速受负载改变影响较小,瞬态速降得到有效抑制,转速仅有不到10 r/min的降落,说明负载补偿环节的引入减小了动态速降,有效抑制了负载扰动所带来的转速变化。通过实验可知,本文设计的自适应算法可使系统的速度环响应性能明显提高,减小了系统因负载变化对电机转速造成的冲击。



(a) 无负载力矩反馈补偿



(b) 引入负载力矩反馈补偿

图8 伺服系统在负载改变时的自适应性能测试

Fig. 8 Servo system adaptive performance testing while load changing

为了验证自适应算法的自调整功能,本文基于变惯量试验平台进行测试。伺服电机的给定转速在

500~250 r/min之间变化,周期为2 s。实验分3个阶段进行:1)伺服电机空载运行,惯量为 $4.73 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$;2)通过手动控制励磁电源实现转动惯量的突变(突变为原来的1.9倍),此阶段伺服系统不更新速度控制器的PI参数;3)切入更新的速度控制器参数。得到的电机实际转速、估算转速和 T_s/\hat{J} 辨识值实验波形如图9所示。由图9可知,电机在第1阶段给定转速500 r/min和250 r/min运行的稳态误差小于0.8%;第2阶段惯量突加,无参数自调整时,电机转速出现较大畸变,在给定转速250 r/min运行时转速超调约为24%,在给定转速500 r/min时转速超调约为8%,速度响应性能明显变差;第3阶段切入调整后的PI参数,电机转速畸变减弱,在给定转速250 r/min运行时转速超调约为10%,在给定转速500 r/min运行时转速超调约为1%,速度响应性能得到改善。整个实验过程估算速度都能跟随实际速度,证明了本文设计的自适应转矩控制算法在惯量发生变化的情况下,能够最大限度地提高伺服驱动系统的响应性能。

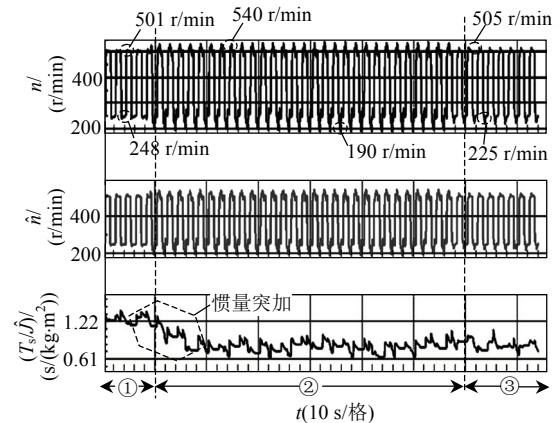


图9 伺服系统在惯量改变时的自适应性能测试

Fig. 9 Servo system adaptive performance testing while inertia changing

4 结论

1)为了抑制负载力矩和惯量变化对PMSM伺服系统性能的影响,着眼于速度伺服系统,提出了一种具有抗扰动作用的自适应转矩控制方法,可应用在惯量变化较缓慢、负载阻力随机变化的场合。

2)针对时变负荷本文提出采用一种简单的降维观测器对负载力矩进行辨识,并采用辨识得到的结果对交轴电流进行前馈补偿。试验结果显示,该观测器能够准确的辨识负载力矩,反映负载力矩的动态变化,提出的负载力矩自适应控制方法改善了速度环的动态响应性能并提高了系统的鲁棒性。

3) 针对时变惯量本文设计了基于朗道算法的惯量辨识方法, 并用辨识值调整控制器参数。试验结果显示, 基于朗道算法的惯量辨识方法在惯量突变过程辨识收敛时间最快可控制在 5 s 左右, 稳态时辨识精度最好为 0.2%。基于朗道辨识的自适应算法, 具有控制器参数自调整功能, 相比无参数自调整的系统, 速度响应性能得到改善。

参考文献

- [1] Lai C K, Shyu K K. A novel motor drive design for incremental motion system via sliding mode control method[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2005, 52(2): 499-507.
- [2] 方斯琛, 周波. 滑模控制的永磁同步电机伺服系统一体化设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 96-101.
Fang Sichen, Zhou Bo. Integrated design for permanent magnet synchronous motor servo systems based on sliding mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 96-101(in Chinese)
- [3] 孙凯, 许镇琳, 盖廓. 基于自抗扰控制器的永磁同步电机位置伺服系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 43-46.
Sun Kai, Xu Zhenlin, Gai Kuo. A novel position controller of PMSM servo system based on active-disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15): 43-46(in Chinese).
- [4] 刘志刚, 李世华. 基于永磁同步电机模型辨识与补偿的自抗扰控制器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 118-123.
Liu Zhigang, Li Shihua. Active disturbance rejection controller based on permanent magnetic synchronous motor model identification and compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 118-123(in Chinese).
- [5] 黄立培, 邱阳, 郭宇婕. 异步电机转动惯量在线辨识与自适应控制的研究[J]. 电工电能新技术, 2000(1): 11-16.
Huang Lipei, Qiu Yang, Guo Yujie. Research on online identification of inertia and auto-tuning for induction motors[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2000(1): 11-16(in Chinese).
- [6] 郭宇婕, 黄立培, 邱阳. 交流伺服系统的转动惯量辨识及调节器参数自整定[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(9): 1180-1183.
Guo Yujie, Huang Lipei, Qiu Yang. Inertia and auto-tuning of speed controllers for AC servo systems[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2002, 42(9): 1180-1183(in Chinese).
- [7] 杨书生, 钟宜生. 永磁同步电机转速伺服系统鲁棒控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 84-90.
Yang Shusheng, Zhong Yisheng. Robust controller design for PMSM speed servo systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 84-90(in Chinese).
- [8] Li Shihua, Liu Zhigang. 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.
- [9] 高扬, 杨明, 于泳. 基于扰动观测器的PMSM交流伺服系统低速控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 126-129.
Gao Yang, Yang Ming, Yu Yong. Disturbance observer based low speed control of PMSM servo system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 126-129(in Chinese).
- [10] Choi J W, Lee S C, Kim H G. Inertia identification algorithm for high-performance speed control of electric motors[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2006, 153(3): 379-386.
- [11] Wang Gaolin, Xu Dianguo, Yu Yong. Low speed control of permanent magnet synchronous motor based on instantaneous speed estimation [C]/The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China: IEEE, 2006: 8033-8036.
- [12] Lee K B, Yoo J Y, Song J H, et al. Improvement of low speed operation of electric machine with an inertia identification using ROELO[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2004, 151(1): 116-120.
- [13] Zhou Bin, Duan GuangRen. Solutions to the positive real control problem for linear systems via reduced-order observer[C]/The 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, China: IEEE, 2008: 25-27.
- [14] Landau I D. 自适应控制: 模型参考方法[M]. 吴百凡, 译. 北京: 国防工业出版社, 1985: 90-95.
Landau I D. Adaptive control: The model reference approach[M]. Wu Baifan Translation. Beijing: National Defence Industry Press, 1985: 90-95(in Chinese).
- [15] 郭庆鼎, 王成元. 交流伺服系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 20-26.
Guo Qingding, Wang Chengyuan. AC servo system[M]. Beijing: China Machine Press, 1994: 20-26(in Chinese).



鲁文其

收稿日期: 2010-03-20。

作者简介:

鲁文其(1982), 男, 博士研究生, 主要研究方向为特种永磁交流电机伺服系统及其关键控制技术, luwenqi@nuaa.edu.cn;

胡育文(1944), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电机控制、调速系统与发电系统电力电子变换;

黄文新(1966), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

(编辑 李婧妍)