

基于滑模自适应鲁棒的超高速电机调速控制

林立斌 沈宏丽 郭 健 吴益飞

(南京理工大学自动化学院 江苏 南京 210094)

摘要: 针对超高速铣削永磁同步电主轴高性能、高精度的控制需求,设计了一种滑模变结构自适应鲁棒控制器。该控制器利用滑模变结构控制产生滑动模态,削弱了建模误差的影响;利用自适应鲁棒控制减少了电主轴超高速运行中受外界扰动和系统内部参数摄动的影响。针对超高速运行的电主轴控制器控制周期时间短的特点,设计了基于比例谐振的电流矢量控制器,在保证电流控制效果的前提下减少了坐标变换和电流解耦,降低了控制算法实现的难度。仿真结果表明:基于比例谐振控制的电流矢量控制器能对给定电流进行较好跟随,滑模自适应鲁棒调速控制器具有良好的控制性能,并对负载扰动具有较强的鲁棒性。

关键词: 超高速电机; 永磁同步电机; 滑模控制; 自适应鲁棒控制; 比例谐振

中图分类号: TM301.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-509X(2017)11-0072-06

超高速加工和超精度加工是未来工业的两大发展方向,但普通电机无法满足这些加工要求。永磁同步电机因其功率密度高、可靠性高、动态响应特性好、效率高等独特优势^[1],使得其在超高速电主轴领域及超高速电主轴驱动控制技术领域的运用成为当前研究的重点课题。如何对超高速电主轴进行高性能、高精度转速控制更是当前研究的热点问题^[2]。

在超高速铣削电主轴调速控制系统中,超高速运行的永磁同步电主轴是一个非线性、强耦合、参数敏感、易受扰动的多可变量系统,当高速控制系统受到外界扰动或者电机内部参数发生变化时,传统的如 PI(proportional integral)、滑模等控制方法就无法满足实际要求。近年来,包括鲁棒控制、自适应控制、 H_∞ 控制、特征建模在内的很多先进控制理论被逐渐应用到超高速电主轴的调速控制系统中^[3-5]。其中滑模变结构控制作为一种对扰动和参数不敏感的非线性控制策略,在电机控制领域得到了广泛应用^[6]。文献[7]针对 PMSM(permanent magnet synchronous motor) 伺服系统的模型不精确因素,考虑了滑模控制的抖动影响,设计了一种基于自适应模糊算法的滑模控制器,针对负载参数扰动等不确定因素获得了良好的控制效果。文

献[8]针对交流永磁同步伺服系统中单一滑模控制中的抖振问题和传统 PI 调节的超调问题,设计了一个模型参考自适应滑模控制器,减小了抖振与超调,提高了伺服系统的品质。自适应鲁棒控制可较好地抑制参数变化、负载扰动以及未知非线性因素对系统稳定性的影响^[9]。文献[10]针对一类直接转矩电机控制系统,引入了摩擦因素,通过在线自适应参数变化,改善了控制特性。在常规积分滑模控制器^[11-12]的基础上引入自适应补偿项和鲁棒反馈项^[9,13],实时估计系统的变化参数,可以加快系统对外界扰动的动态响应,增强系统鲁棒性。采用比例谐振控制^[14]电流矢量控制策略可以减小控制器对系统参数的依赖以及控制算法实现的难度,增强鲁棒性,适合超高速铣削电主轴在高速运转工况中使用。由此可知,设计一种以超高速铣削电主轴调速系统为研究对象的积分型滑模变结构自适应鲁棒调速控制器具有重要意义。

1 数学模型

超高速铣削电主轴的结构为永磁同步电机,为了简化分析,采用 $i_d = 0$ 的矢量控制。假设转子永磁磁场在气隙空间分布为正弦波;忽略定子铁心饱和,认为磁路为线性,电感参数不变;不计铁心涡流

收稿日期: 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61673219); 江苏省科技重点研发计划项目(BE2017161, BE2015164); 江苏省科技成果转化项目(BA2015147)

作者简介: 林立斌(1992—),男,浙江宁波人,南京理工大学硕士研究生,主要从事电机控制方面的研究。

与磁滞损耗; 转子上无阻尼绕组。此时表贴式永磁同步超高速铣削电主轴的数学模型近似为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + p_n\omega_m i_q + \frac{1}{L}u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - p_n\omega_m i_d - \frac{p_n\psi_f}{J}\omega_m - \frac{1}{L}u_q \\ J\frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m = T_e - T_L \\ T_e = \frac{3p_n\psi_f}{2}i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d i_q u_d u_q 分别为电主轴 d q 轴上的定子电流和电压; ω_m 为电主轴转子机械角速度; R L ψ_f 分别为定子的电阻、电感和永磁磁链; p_n 为极对数; B 为电主轴的黏滞摩擦系数; J 为调速系统等效在转轴上的转动惯量; T_e 为电磁转矩; T_L 为等效在铣削刀头上的负载转矩。

考虑到超高速铣削电主轴模型参数不精确, 以及运行过程中不可预知的动态扰动, 将式(1)数学模型变换为:

$$\begin{cases} J\frac{d\omega_m}{dt} = T_e - B\omega_m - T_L - \Delta \\ T_e = \frac{3p_n\psi_f}{2}i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δ 为不确定项之和, 包括负载转矩扰动、其他未建模动态、建模误差、未知外部扰动等。假设不确定项之和的上界是 Δ_{\max} 。考虑到超高速铣削电主轴实际工况, 定子电阻、电感、转速等可通过监测电机运行状态进行测量与补偿, 而黏滞摩擦系数与等效转动惯量在不可预知的工况下难以预知, 有必要进行实时观测。

本文定义需要观测的未知参数向量集合为:

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T = [J \ B]^T \quad (3)$$

考虑到实际系统应用中未知参数均有界, 且边界一般可知或易测, 令 $\hat{\theta}_i$ ($i = 1 \ 2$) 为参数估计值, 即

$$\theta_{i \min} \leq \hat{\theta}_i \leq \theta_{i \max} \quad (4)$$

2 调速控制器设计与分析

超高速铣削电主轴调速控制系统结合了滑模控制与自适应鲁棒控制的思想, 可在模型参数不精确的情况下, 保证电主轴转速能高精度、快速地跟踪期望转速, 并能够实现负载干扰、参数摄动的抑制。设计主要分为 3 步: 1) 进行积分型滑模面设计; 2) 在控制量 i_q 中引入自适应模型补偿项、鲁

棒项和反馈项, 设计补偿项中估计参数的自适应律; 3) 设计比例谐振电流矢量控制策略。

2.1 滑模变结构自适应鲁棒调速控制器设计

假定给定的期望转速是 ω_{ref} , 实际转速是 ω_m 。

定义永磁同步电主轴调速系统的状态变量为:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_m \\ x_2 = \int_{-\infty}^t x_1 dt \end{cases} \quad (5)$$

根据电主轴运动方程(2)可知:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{\omega}_{\text{ref}} - \dot{\omega}_m = -\frac{3p_n\psi_f}{2J}i_q + \frac{B}{J}\omega_m + \frac{1}{J}T_L + \frac{\Delta}{J} + \dot{\omega}_{\text{ref}} \\ \dot{x}_2 = x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_m \end{cases} \quad (6)$$

定义积分型滑模面为:

$$s = x_1 + cx_2 \quad (7)$$

式中: c 为滑模面待设计参数。

定义控制量输出 $u = i_q$ 。选取 x_2 的初始值 X_{20} 为:

$$X_{20} = \int_{-\infty}^0 x_1(t) dt = -\frac{X_{10}}{c} \quad (8)$$

式中 X_{10} 是 x_1 的初始值。这样设计可以使系统从运行初始时刻就在滑模面上, 且 $c > 0$ 以满足 $p + c = 0$ 为 Hurwitz 多项式, 其中 p 为 Laplace 算子。

由式(2)、(5)、(6)可得:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{x}_1 + c\dot{x}_2 = \dot{x}_1 + cx_1 = -\frac{3p_n\psi_f}{2J}i_q + \frac{B}{J}\omega_m + \\ &\frac{T_L}{J} + \frac{\Delta}{J} + cx_1 + \dot{\omega}_{\text{ref}} \end{aligned} \quad (9)$$

可得

$$\begin{aligned} \theta_1 \dot{s} &= -\frac{1}{D}u + \theta_2\omega_m + T_L + \Delta + (cx_1 + \dot{\omega}_{\text{ref}}) \theta_1 = \\ &-\frac{1}{D}(u + \varphi^T \theta^T - DT_L - D\Delta) \end{aligned} \quad (10)$$

式中 u 表征为 q 轴上的电流 i_q 。设 $D \varphi^T$ 的表达式为:

$$\begin{cases} D = \frac{2}{3p_n\psi_f} \\ \varphi^T = [-D(cx_1 + \dot{\omega}_{\text{ref}}), -D\omega_m] \end{cases} \quad (11)$$

考虑如下的 ARC 滑模控制律:

$$u = u_a + u_s = u_a + u_{s1} + u_{s2} \quad (12)$$

式中: u_a 为自适应模型补偿项; u_s 为待设计的鲁棒控制项, 分为 u_{s1} 反馈项和 u_{s2} 鲁棒项。 u_a 自适应模型补偿项可设计为

$$u_a = DT_L - \varphi^T \hat{\theta}^T = DT_L + \hat{\theta}_1 D(cx_1 + \dot{\omega}_{\text{ref}}) + \hat{\theta}_2 D\omega_m \quad (13)$$

反馈项和鲁棒项设计为式(14),自适应律设计为式(15):

$$\begin{cases} u_{s1} = Dk_s(1 + \alpha |s|)s \\ u_{s2} = D\eta \operatorname{sgn}(s) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_1 = -\gamma_1 s \frac{\varphi_1}{D} = \gamma_1 (cx_1 + \dot{\omega}_{\text{ref}})s \\ \dot{\hat{\theta}}_2 = -\gamma_2 s \frac{\varphi_2}{D} = \gamma_2 \omega_m s \end{cases} \quad (15)$$

式中: k_s 、 α 为反馈项系数; η 为鲁棒项系数; γ_1 为等效转动惯量自适应律系数; γ_2 为黏滞摩擦系数自适应律系数。

定理: 针对超高速电主轴数学模型(式(1)和式(2)), 采用滑模自适应鲁棒控制器(式(12))及自适应参数估计算法(式(15)), 闭环控制系统渐近稳定。

证明:

取 $\eta > \Delta_{\max}$ 。将式(12)、(13)、(14)代入式(10), 此时

$$\dot{\theta}_1 s = -k_s(1 + \alpha |s|)s - \eta \operatorname{sgn}(s) - \tilde{\theta}_1(cx_1 + \dot{\omega}_{\text{ref}}) - \tilde{\theta}_2\omega_m + \Delta \quad (16)$$

其中 $\tilde{\theta}_i = \hat{\theta}_i - \theta_i$ ($i = 1, 2$), 为参数估计误差。

定义 Lyapunov 函数为:

$$V_2 = \frac{1}{2}\theta_1 s^2 + \frac{1}{2\gamma_1}\tilde{\theta}_1^2 + \frac{1}{2\gamma_2}\tilde{\theta}_2^2 \quad (17)$$

根据实际模型, 未知参数 θ_i 多数是常数或者是慢时变的。因此可假设 $\dot{\theta}_i \approx 0$ ($i = 1, 2$), 则

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= s\theta_1 \dot{s} + \frac{1}{\gamma_1}\dot{\tilde{\theta}}_1\tilde{\theta}_1 + \frac{1}{\gamma_2}\dot{\tilde{\theta}}_2\tilde{\theta}_2 = s[-k_s(1 + \alpha |s|)s - \eta \operatorname{sgn}(s) - \tilde{\theta}_1(cx_1 + \dot{\omega}_{\text{ref}}) - \tilde{\theta}_2\omega_m] + \frac{1}{\gamma_1}\dot{\tilde{\theta}}_1\tilde{\theta}_1 + \\ &\frac{1}{\gamma_2}\dot{\tilde{\theta}}_2\tilde{\theta}_2 \leq -k_s(1 + \alpha |s|)s^2 + \tilde{\theta}_1(\frac{1}{\gamma_1}\dot{\tilde{\theta}}_1 - cx_1 s - \dot{\omega}_{\text{ref}}s) + \\ &\tilde{\theta}_2(\frac{1}{\gamma_2}\dot{\tilde{\theta}}_2 - \omega_m s) \dot{V}_2 \leq -k_s(1 + \alpha |s|)s^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

由 Lyapunov 稳定性判据可知, 只要 $\dot{V}_2 \leq 0$, 则证明系统稳定。

2.2 比例谐振电流矢量控制器设计

传统的电流矢量控制策略为旋转坐标系下进行前馈解耦的 PI 控制, 但在实际工况中, 电主轴高速运行过程中电磁特性的变化会使交叉耦合项不准确, 导致系统控制精度下降。

比例谐振电流矢量控制基于比例谐振的思想, 控制中不依赖与电机参数有关的前馈补偿项和解耦项, 并减少了矢量控制中坐标变换运算, 适合作为超高速铣削电主轴调速系统的电流内环控制策略。

被控量为交流信号时, 同步坐标系下 PI 等效的一种改进的 PR 控制器传递函数为^[14]:

$$G_{\text{PR}}(s) = K_p + \frac{2K_1\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (19)$$

式中: ω_c 为截止频率, 决定控制器的带宽, ω_c 越大, 带宽越大; K_p 为控制频带以外的幅值增益; K_1 为影响谐振频率处的幅值增益; ω_0 为谐振频率; s 为传递函数的复参数。

本文使用双线性变换离散策略对上述控制器进行离散化:

$$\begin{cases} G_{\text{PR}}(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \\ s = \frac{2}{T_s} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \end{cases} \quad (20)$$

其中:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{4Ki\omega_c T_s}{4 + 4\omega_c T_s + \omega_0^2 T_s^2} \\ b_1 &= 0 \\ b_2 &= \frac{-4Ki\omega_c T_s}{4 + 4\omega_c T_s + \omega_0^2 T_s^2} \\ a_1 &= \frac{2\omega_0^2 T_s^2 - 8}{4 + 4\omega_c T_s + \omega_0^2 T_s^2} \\ a_2 &= \frac{4 - 4\omega_c T_s + \omega_0^2 T_s^2}{4 + 4\omega_c T_s + \omega_0^2 T_s^2} \end{aligned}$$

式中: T_s 为采样周期。最终得到的控制器差分方程输出为:

$$y(k) = b_0 e(k) + b_2 e(k-2) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) \quad (21)$$

调速控制系统中将 $d-q$ 轴电流 i_d^* 、 i_q^* 转换为两相静止坐标系下的交流给定值 i_α^* 、 i_β^* , 将交流给定值与电主轴转子静止坐标系下的电流分量 i_α 、 i_β 作差后, PR 控制器对电流进行接近无差的跟踪调节。PR 控制器相对于传统 PI 控制器减小了单个控制周期的运算量, 降低了调速控制算法的难度。超高速铣削电主轴调速控制器 α 轴电流环控制框图如图 1 所示。

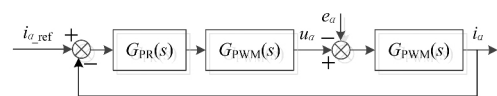


图 1 α 轴电流环控制框图

3 仿真分析

3.1 仿真模型

基于滑模自适应鲁棒的超高速电机调速控制

框图如图 2 所示。系统采用滑模自适应鲁棒控制作为速度环,采用比例谐振电流矢量控制作为电流环。在矢量控制下建立二阶滑模自适应鲁棒模型,以给定转速为输入,在运行过程中对未知参数估值后补偿。最后结合 MATLAB/Simulink 进行仿真实验。超高速铣削永磁同步电主轴参数见表 1。

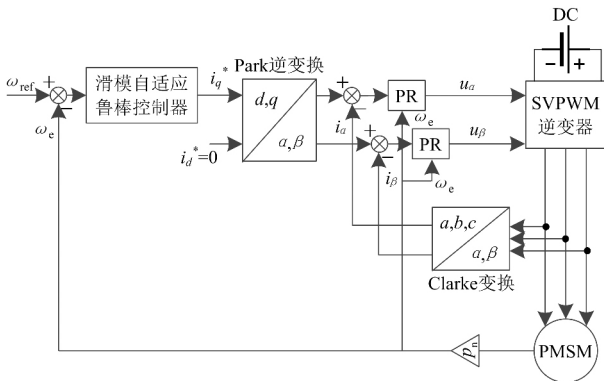


图 2 基于滑模自适应鲁棒的超高速电主轴调速控制框图

表 1 超高速永磁同步电主轴参数说明

参数名称	取值
额定功率/kW	4.0
额定转矩/(N·m)	1.5
额定电流/A	7.7
额定电压/V	380
转子磁链/(V·s)	0.032 8
空载转动惯量/(kg·m ²)	0.002
定子相电阻/Ω	0.244
d,q 轴电感/mH	1.62
极对数	2
额定转速/(r·min ⁻¹)	28 000
最大转速/(r·min ⁻¹)	40 000
空载阻尼系数/(N·m·s)	1.25×10 ⁻⁵

3.2 自适应参数估计仿真

在不对控制量进行输出限幅、不对自适应律得到的估计值限幅、不对滑模面函数的积分环节作抗饱和控制的情况下,参数 θ_1 自适应控制中的估计值波形如图 3 所示,参数 θ_2 自适应控制中的估计值波形如图 4 所示。可以看出在上述情况下,自适应参数估计能够较好地估计实际参数。估计的参数值实时应用到滑模控制器中可以提高控制精度。转速 (r/min) 输入信号是幅值为 5、频率为 2 rad/s 的正弦信号。控制参数取 $c = 20$, $\gamma_1 = 0.006$, $\gamma_2 = 3.6$, 参数 θ_i 变化范围取: $\theta_{\min}^T = [0.000\ 5$,

$0.03] \theta_{\max}^T = [1 \times 10^{-5}\ 1 \times 10^{-4}]$ 。

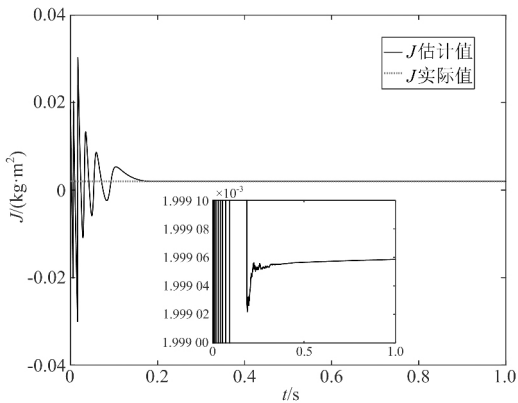


图 3 θ_1 自适应控制中的估计值波形

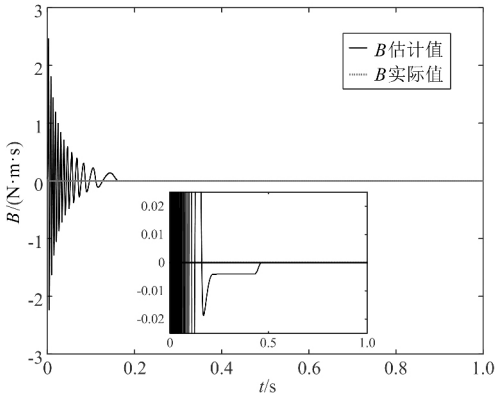


图 4 θ_2 自适应控制中的估计值波形

3.3 抗负载扰动的滑模自适应鲁棒控制验证

超高速铣削电主轴在工作过程中,其负载转矩可能会有突变。仿真参数设计为: $c = 20$, $T_1 = 1$, $\eta = 20$, $k_s = 5$, $\alpha = 1$ 。速度输入为 38 000 r/min, J 参数初值取 $0.018\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, B 参数初值为 1.25×10^{-5} , X_{20} 初值取 -198 , 抗积分饱和系数 $K_1 = 5$ 。电主轴在恒转矩负载运行工况下,在 3.0~3.3s 加入一个幅值 $3\text{ N}\cdot\text{m}$ 的转矩突变,持续时间为 0.3s,如图 5 所示。从图可知,本文设计的基于滑模变结

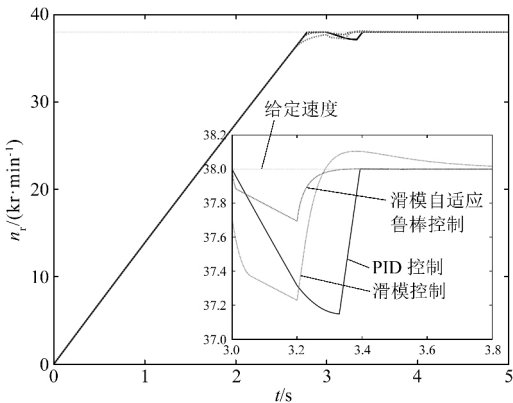


图 5 超高速电主轴启动时加负载扰动的转速波形

构自适应鲁棒调速控制,在允许范围内的抗负载扰动上与传统的 PID 控制和滑模变结构控制相比具有明显的优势,可以更好地抑制负载突变带来的影响,且超调量小,动态响应好。

3.4 比例谐振电流矢量控制策略验证

基于比例谐振电流矢量控制策略仿真框图如图 6 所示。

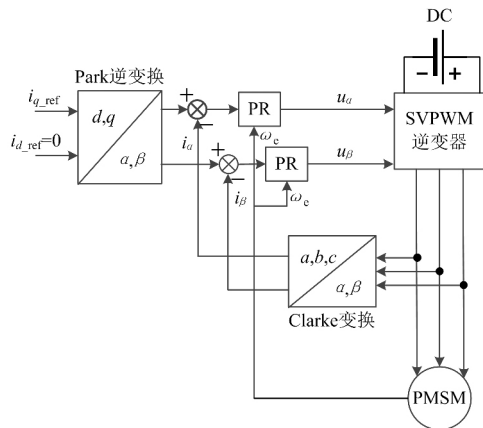


图 6 基于比例谐振的电流控制策略仿真框图

为了验证所设计的基于比例谐振的电流矢量控制方法的正确性,搭建仿真环境进行电流跟随验证。

仿真参数设计为: $\omega_c = 20$, $K_p = 500$, $K_i = 0.2$, $T_s = 1 \times 10^{-5}$, $i_d = 0$ 。给定的 i_q (A) 信号是幅值为 40、偏移量为 10、频率为 100rad/s 的正弦信号。初始时刻转矩负载为 $1.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。启动后 0.5s 时突变为 $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。图 7 所示为 q 轴电流跟随曲线,图 8 所示为 q 轴电流跟随误差曲线。

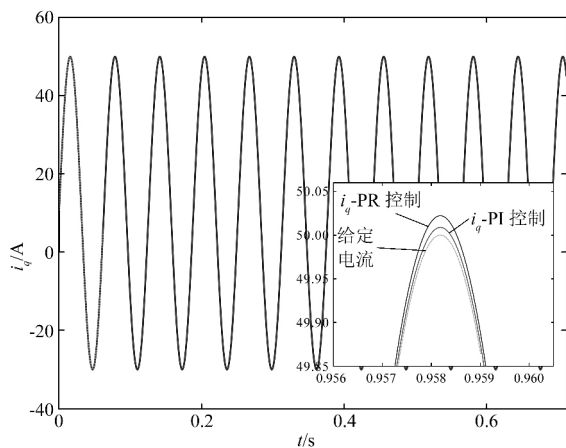


图 7 q 轴电流跟随曲线

由图 7 和图 8 可知,基于比例谐振的电流跟随策略与传统 PI 电流控制有着几乎相同的效果,但不需要坐标变换与 d q 轴电流前馈补偿和解耦,适

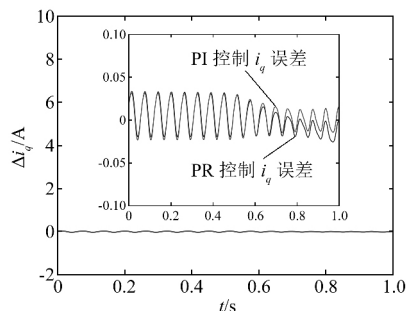


图 8 q 轴电流跟随误差曲线

合在超高速铣削电主轴这种模型参数存在摄动、电机参数不精确、控制周期短的工况下采用。图 9 为超高速铣削电主轴从启动到转速稳定在 38 000 r/min 时 ABC 三相电流的变化曲线波形图,验证了此控制策略的可行性。

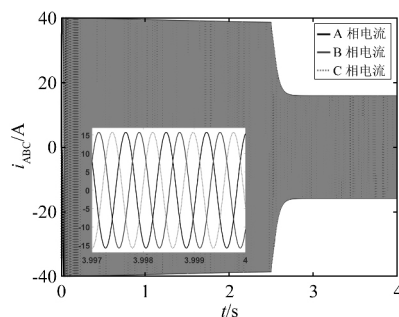


图 9 电主轴正常启动时 ABC 三相电流变化曲线

4 结束语

本文针对超高速铣削电主轴调速控制系统,提出了一种基于滑模鲁棒自适应控制算法的滑模变结构自适应鲁棒调速控制器。通过在常规积分滑模控制器的基础上引入自适应补偿项和鲁棒反馈项,加快了系统对外界干扰的动态响应,增强了系统鲁棒性,提高了系统的控制精度。考虑到超高速铣削电主轴高速运转工况控制周期短的特点,在电流环引入比例谐振控制电流矢量控制策略,减少了控制器对系统参数的依赖,降低了控制算法实现的难度,增强了鲁棒性。通过建模仿真实验验证,基于滑模自适应鲁棒的超高速电主轴调速控制器应用于高速铣削永磁同步电机具有良好动态特性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 毛永乐, 杨家强, 赵寿华, 等. 带负载转矩估算的非线性观测器内嵌式永磁同步电机无位置传感器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2252-2259.
- [2] 云龙. 超高速永磁同步电主轴无传感器直接转矩控制系统的

- 研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [3] 林立, 黄苏融. 永磁同步电机系统线性化 H_∞ 鲁棒控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(4): 541–547.
- [4] 罗慧, 王军林, 尹泉. PMSM 自适应观测器算法低速稳定性研究[J]. 电气传动, 2013, 43(8): 3–7.
- [5] 窦晓华, 王永. 基于特征模型的永磁同步电机非线性黄金分割自适应控制[J]. 系统科学与数学, 2015, 35(7): 860–870.
- [6] AZZA H B, MOUJAHEH M, JEMLI M, et al. Implementation of improved sliding mode observer and fault tolerant control for a PMSM drive[J]. Journal of Circuits Systems & Computers, 2017, 26(2): 1750032.
- [7] 刘姍梅, 马迁, 陈贤顺, 等. 自适应模糊滑模控制在 PMSM 中的应用[J]. 微电机, 2009, 42(5): 43–46.
- [8] 陈星, 吴秋轩, 王越, 等. 基于自适应滑模控制的 PMSM 伺服系统研究[C]//中国控制与决策会议论文集. 沈阳: 东北大学出版社, 2013: 3741–3746.
- [9] YAO B. High performance adaptive robust control of nonlinear systems: a general framework and new schemes [C]//Decision and Control. San Diego USA: IEEE, 1997: 2489–2494.
- [10] 贾洪平, 贺益康. 永磁同步电机滑模变结构直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 1–6.
- [11] 李政, 胡广大, 崔家瑞, 等. 永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 431–437.
- [12] 齐亮. 基于滑模变结构方法的永磁同步电机控制问题研究及应用[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [13] 邹权, 钱林方, 徐亚栋, 等. 链式回转弹仓的自适应鲁棒控制[J]. 兵工学报, 2014, 35(11): 1922–1927.
- [14] 周娟, 张勇, 耿乙文, 等. 四桥臂有源滤波器在静止坐标系下的改进 PR 控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 113–120.

Robust speed control for ultra – high – speed motorized spindle based on sliding mode adaptive algorithm

LIN Libin, SHEN Hongli, GUO Jian, WU Yifei

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Jiangsu Nanjing, 210094, China)

Abstract: A sliding mode controller with adaptive robust control scheme controller is designed to meet the requirement of high performance and high accuracy of ultra – high – speed milling PMSM. The controller uses sliding modal variable structure control to generate sliding mode, which weakens the influence of inaccurate model. When the ultra – high – speed spindle is operating, the influence of the external disturbance and the perturbation of the internal parameters are reduced by the adaptive robust control. For the short time of the control period, the current vector controller based on proportional resonant control is designed to reduce the coordinate transformation, the current decoupling and the difficulty of the control algorithm with good performance of current control. The simulation results show that the current vector controller with proportional resonant control can follow the given current well, and the sliding mode adaptive robust speed controller can accurately estimate the parameters of the system and have good control performance and strong robustness with load disturbance.

Key words: ultra – high – speed motor; permanent magnet synchronous motor (PMSM); sliding mode control; adaptive robust control; proportional resonant