

电动汽车电机控制转矩抑制算法

陈贤章, 余卓平, 熊 璐

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 分析了导致电流波动的旋转变压器角度信号偏差形式, 研究利用抑制角度波动的角度观测器以及内模控制算法抑制电流波动. 以联合汽车电子某项目电机为实例, 利用本算法, 在 $4\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, $100\ \text{N} \cdot \text{m}$ 时电流波动减小 77%, 转矩波动降低 83%, 验证了其有效性.

关键词: 转矩波动; 角度波动; 大磁阻电机; 角度观测器; 内模控制

中图分类号: U462.3

文献标志码: A

E-Drive Motor Torque Ripple Suppression Algorithm

CHEN Xianzhang, YU Zhuoping, XIONG Lu

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper analyzes the resolver angle error, and introduces the rotor angle observer to reduce angle ripple and the internal mode control algorithm to reduce phase current ripple of the big reluctance torque motor. Using this method, a certain PHEV project in United Automotive Electronic Systems Cooperation was studied. It is found that the motor control current ripple is decreased by 77%, and the torque ripple is reduced by 83% at $4\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, $100\ \text{N} \cdot \text{m}$.

Key words: torque ripple; angle error; big reluctance motor; angle observer; internal mode control

汽车的 NVH(noise, vibration, harshness)问题一直是相关领域的关注焦点, 也是车辆开发中遇到的难点之一. 混合动力汽车及纯电动汽车项目中均存在不同程度的电驱动系统噪声问题. 该噪声有别于传统汽车汽油机噪声, 其频率较高, 更易使人产生不适感.

电机的转矩波动是产生电驱动系统噪声的主要原因之一, 包括电机本体电磁结构引起的转矩波动, 如齿槽转矩; 电机控制电流产生转矩波动, 如由磁链谐波和电流谐波产生的转矩波动^[1]. 而电流谐波的产生除受 PWM(pulse width modulation)驱动方式中“死区”影响外, 转子位置信号即角度波动也是一个主要影响因素, 但目前国内外相关研究较少^[2-3]. 高磁阻转矩电机转矩密度和功率密度高, 在混合动力汽车上应用较多. 此类电机对电机角度波动较为敏感, 因此角度波动抑制对减小转矩波动尤为重要^[4].

1 电流波动影响因素分析

1.1 旋变信号偏差

车用驱动电机常用的电机转子角度传感器——旋转变压器, 具有稳定、高效、抗冲击震动和温湿度变化能力强等特点, 其可靠性和使用寿命均较优良, 适合在电动汽车驱动系统中应用. 旋转变压器的输出信号为模拟量, 需要使用旋转变压器解码芯片将模拟信号转化成为数字信号, 从而得到电机转子的绝对位置信号^[5].

旋转变压器 \sin/\cos (正弦/余弦)信号偏差是产生角度误差的直接原因. 常见的信号误差形式包括: \sin/\cos 幅值不平衡, \sin/\cos 直流分量, \sin/\cos 相位不正交, \sin/\cos 信号非正弦, 如图 1 所示. 旋转变压器信号偏差主要来源于旋转变压器制造偏差、安装偏差、处理电路(如匹配电阻)偏差、解码偏差等^[6].

1.2 角度偏差

针对不同的旋转变压器信号偏差, 根据理论计算, 其解码后产生的角度偏差形式如图 2^[7-8]所示. 根据以往实际测试结果分析, 电驱动系统旋转变压器

收稿日期: 2016-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(U1564207);“十二五”国家科技支撑计划(2015BAG17B01)

第一作者: 陈贤章(1964—),男,博士生,主要研究方向为车辆工程. E-mail:1559447001@qq.com

通讯作者: 熊 璐(1978—),男,副教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为汽车系统动力学与控制.

E-mail: xiong_lu@tongji.edu.cn

传感器信号以幅值误差和零位误差为主. 图 3 是某款电机旋转变压器 SIN/COS 信号, 该信号主要包含

直流偏差, 经解码后角度偏差为 $\pm 3^\circ$, 其角度偏差频率和电机电频率一致, 即一次谐波.

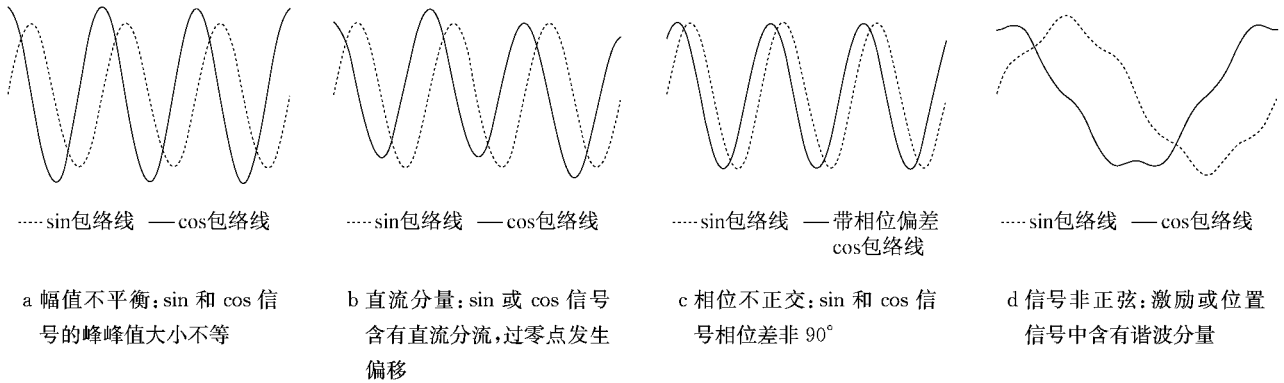


图 1 旋转变压器信号误差形式
Fig.1 Fault pattern of resolver signals

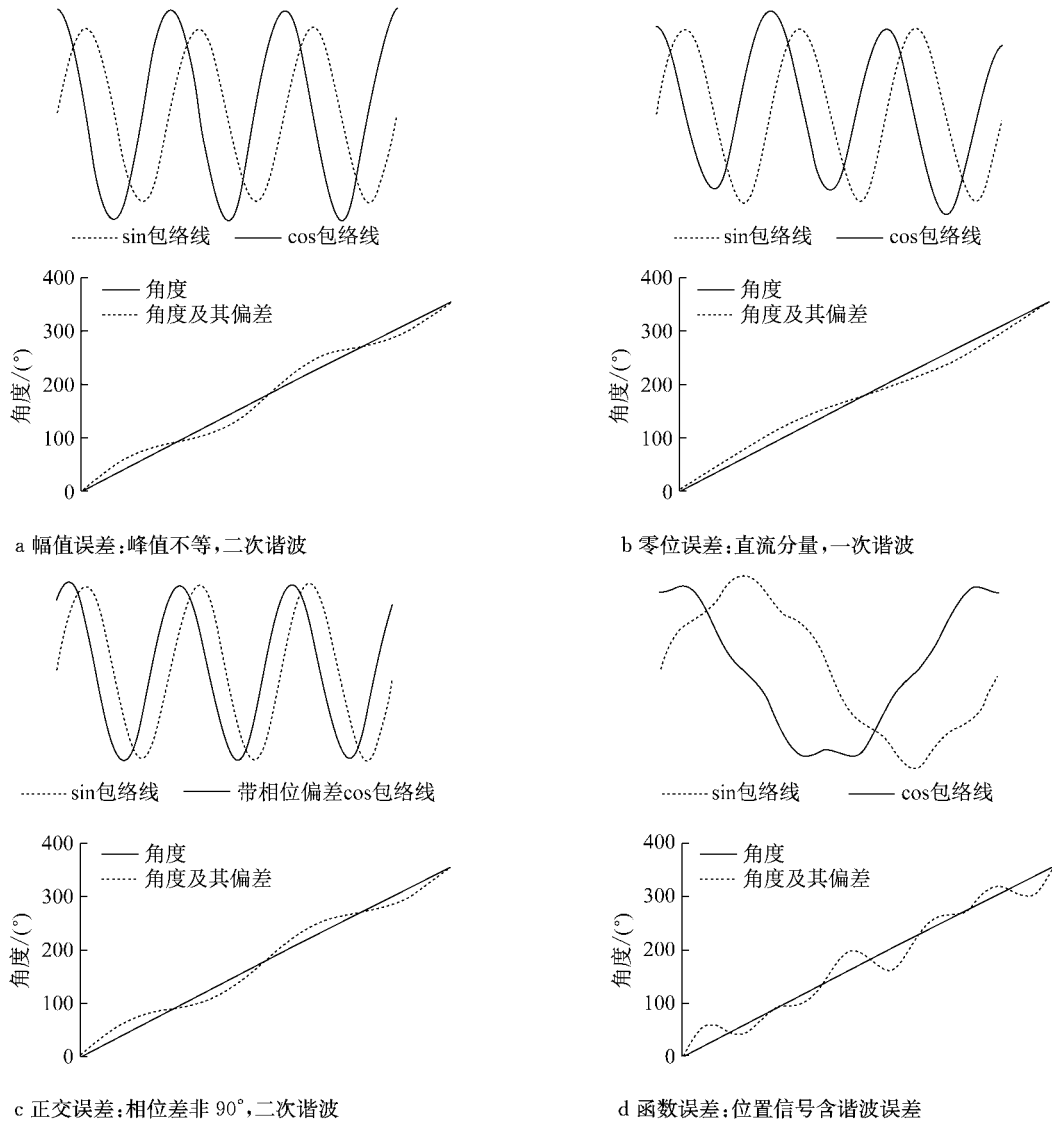


图 2 角度偏差形式
Fig.2 Pattern of angle error

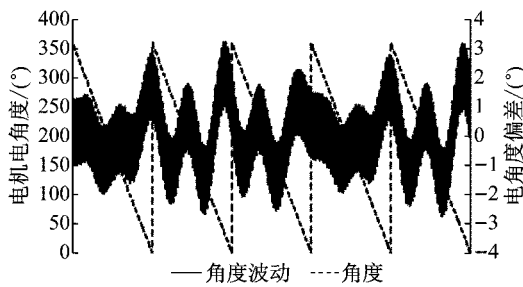


图 3 某款电机旋变信号直流偏差导致角度偏差形式

Fig.3 Resolver angle error caused by signal DC error

1.3 高磁阻电机电流波动

对于高磁阻转矩(Q轴电感 L_q 与 D轴电感 L_d 之比大于 2.5)电机,由于磁阻转矩分量加大,角度波动会导致电流波动,引起相应转矩波动.随着转速增加,弱磁程度越深,电流波动越大.图 4 为某一款电机($L_q/L_d > 2.5$)旋变角度波动曲线,角度波动范围 $\pm 1.5^\circ$.

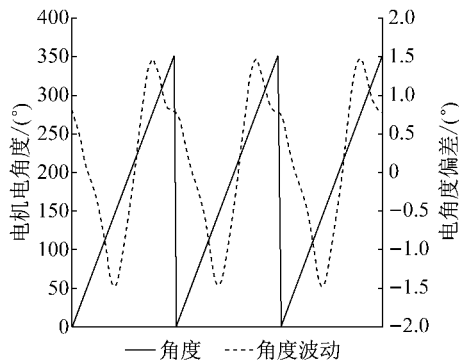


图 4 某电机角度波动

Fig.4 Angle error of a certain project

在 $4\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, $150\ \text{N} \cdot \text{m}$ 工况下 $\pm 1.5^\circ$ 角度波动导致电机控制相电流幅值有效值波动 $\pm 22\ \text{A}$,同时产生 $\pm 4.5\ \text{N} \cdot \text{m}$ 转矩波动.在 $8000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, $100\ \text{N} \cdot \text{m}$ 时电流波动达到 $\pm 50\ \text{A}$,电机产生明显不平衡三相电流,如图 5 所示.因而对于 8 对极电机而言,三相电流直流偏置及不平衡会导致 8/16

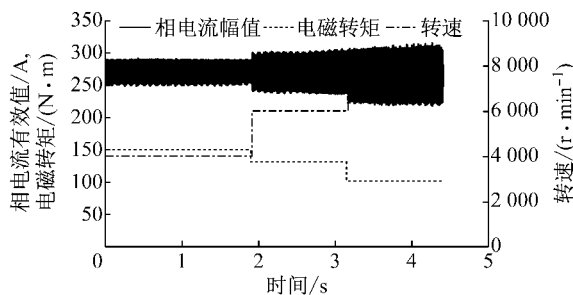


图 5 某电机控制电流波动

Fig.5 Motor control current ripple of a certain project

倍频转矩波动,对应 8/16 倍频噪声.因此解决旋变角度波动对于解决电流波动及电驱动系统噪声问题意义重大.

实际系统中安装精度是产生幅值偏差和零位偏差的主要原因.在批量生产过程中,过度提高机械精度要求,则可能大幅增加制造成本.而通过现代控制方法,根据系统自身特性,利用控制策略弥补机械系统的不足是一种优选方案.

2 高性能永磁同步电机控制

2.1 高性能永磁同步电机内膜控制

克服角度误差带来的影响可归结为一类鲁棒性控制问题.内膜控制是一种鲁棒性非常好的控制方法.使用内膜控制原理设计永磁同步电机闭环控制器可以获得高性能弱磁调速性能,可以直接将系统闭环传递函数构造具有低通滤波性质的系统.传统的内膜控制基本原理如图 6 所示.这种结构利用一个内模 $\hat{G}(s)$ 与被控对象 $G(s)$ 并联,在被控对象与并联内膜前增加一个闭环控制器 $C(s)$,被称为内膜控制器(IMC controller)^[9].

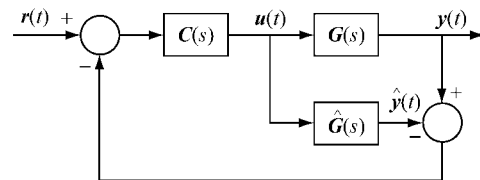


图 6 内膜控制系统结构

Fig.6 Structure of internal mode control system

其传递函数为

$$F(s) = \frac{u(s)}{r(s)} = [I - C(s)\hat{G}(s)]^{-1}C(s) \quad (1)$$

式中: I 为单位矩阵.

令

$$C(s) = G^{-1}(s)L(s) \quad (2)$$

将 $L(s)$ 的所有对角线元素都选择成相等值的一阶系统,这样的系统响应无超调,调节一阶系统时间常数达到理想的响应时间.永磁同步电机的 $G(s)$ 为 2×2 矩阵,因此构造获得的 $L(s)$ 表达式为

$$L(s) = \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{s + \alpha} & 0 \\ 0 & \frac{\alpha}{s + \alpha} \end{bmatrix} = \frac{\alpha}{s + \alpha} I \quad (3)$$

再将式(2)代入到控制器传递函数 $F(s)$ 的表达式中^[1],则

$$F(s) = [I - C(s)\hat{G}(s)]^{-1}C(s) = [I - G^{-1}(s)\frac{\alpha}{s+\alpha}\hat{G}(s)]^{-1} \cdot G^{-1}(s)\frac{\alpha}{s+\alpha} = \frac{\alpha}{s}G^{-1}(s) \quad (4)$$

对于永磁同步电机则存在

$$G^{-1}(s) = \begin{bmatrix} sL_d + R_s & \omega_r L_q \\ -\omega_r L_d & sL_q + R_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: R_s 为电机相电阻; ω_r 为旋转角速度。

将公式(5)代入公式(4)得

$$F(s) = \frac{\alpha}{s} \begin{bmatrix} sL_d + R_s & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & sL_q + R_s \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} L_d + \frac{R_s}{s} & -\frac{\omega_r L_q}{s} \\ \frac{\omega_r L_d}{s} & L_q + \frac{R_s}{s} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,经典的电机电压前馈解耦控制与内模控制传递函数的最主要区别在非对角线的两个元素上,而这两个元素的系数恰恰是电压前馈解耦控制算法中用于解耦的前馈量 $-\omega_r L_q i_q$ 和 $\omega_r L_d i_d$ 的系数,其中 i_q 为 Q 轴电流, i_d 为 D 轴电流。如果因为参数的摄动使得前馈量出现偏差,对电流控制的影响非常直接;而将前馈量放到控制器的传递函数中,通过积分效果逐步获得最终的输出电压,参数摄动对控制结果的影响就大大降低。

2.2 角度波动抑制算法改进

根据上述分析,角度波动为内模控制电机控制系统电流/转矩波动的主要影响因素。在原有控制基础上,构建电驱动系统状态观测器,通过角度观测器可以实现角度波动消除。角度观测器原理如图 7 所示,上半部为实际系统,下半部为设计观测器,通过输出差值的反馈来实现角度波动消除。图 7 中 A 为状态矩阵, B 为观测矩阵, C 为输出矩阵。

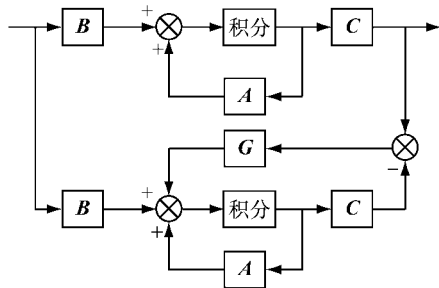


图 7 角度观测器模型

Fig. 7 Model of resolver angle observer

系统可以表示为

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx \quad (7)$$

式中: x 为状态变量; u 为输入变量; y 为输出变量。

带输出反馈的估计系统空间表达式为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + Gy_{Err} \\ \hat{y} &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: y_{Err} 为输出偏差。

状态方程误差表达式为

$$x - \hat{x} = e^{(A-GC)t} [x(0) - \hat{x}(0)] \quad (9)$$

只要选择合适反馈矩阵 G 就可以使得 $A - GC$ 具有负实部特征值,从而消除误差。

把电机驱动整车系统等效为双质量系统,如图 8 所示,其物理关系为

$$\begin{aligned} J_1 \dot{\theta}_e &= T_{em} - k(\dot{\theta}_e - \dot{\theta}_v) - c(\theta_e - \theta_v), \\ J_2 \ddot{\theta}_v &= k(\dot{\theta}_e - \dot{\theta}_v) + c(\theta_e - \theta_v) - T_{load} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: J_1 为电机转子的转动惯量; J_2 为车辆等效的转动惯量; θ_e 为电机的转动角度; θ_v 为车轮的转动角度; T_{em} 为电机输出的驱动扭矩; T_{load} 为车体负载扭矩; k 为传动系的刚度系数; c 为传动系的阻尼系数。

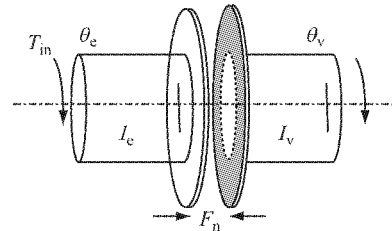


图 8 双质量系统

Fig. 8 E-drive vehicle dual mass equivalent system

设定状态变量如下:

$x[0] = T_{load}$ 为负载扭矩的状态变量, $N \cdot m$; $x[1] = \dot{\theta}_e$ 为电机转子的角速度, $rad \cdot s^{-1}$; $x[2] = \theta_e$ 为电机转子的机械角度, rad ; $x[3] = \dot{\theta}_v$ 为从动盘的角速度, $rad \cdot s^{-1}$; $x[4] = \theta_v$ 为从动盘的机械角度, rad 。

输入输出量如下:

P 为电机极对数; $u = T_{em}$ 为电机的驱动扭矩, $N \cdot m$; y 为观测器的电角度值, rad 。

增加反馈后,可构建系统状态空间方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}[0] \\ \dot{x}[1] \\ \dot{x}[2] \\ \dot{x}[3] \\ \dot{x}[4] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k}{J_1} & -\frac{c}{J_1} & \frac{k}{J_1} & \frac{c}{J_1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{J_2} & \frac{k}{J_2} & \frac{c}{J_2} & -\frac{k}{J_2} & -\frac{c}{J_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} x[0] \\ x[1] \\ x[2] \\ x[3] \\ x[4] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T_{em} \frac{180}{\pi} + \begin{bmatrix} C_F[0] \\ C_F[1] \\ C_F[2] \\ C_F[3] \\ C_F[4] \end{bmatrix} (y - \hat{y}),$$

$$y = [0 \quad 0 \quad P \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x[0] \\ x[1] \\ x[2] \\ x[3] \\ x[4] \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: C_F 为反馈矩阵。

3 仿真及实验结果

根据角度观测器状态方程(11),搭建观测器仿真模型,通过设定原系统矩阵和观测器系统矩阵一致,查看原系统输出和观测器输出是否收敛,并确定有无净差。

设置系统仿真参数如表 1 所示。

表 1 观测器系统参数

Tab.1 Angle observer system parameters

参数	数值
系统刚度/($N \cdot m \cdot rad^{-1}$)	449
系统阻尼/($N \cdot m \cdot rad^{-1} \cdot s^{-1}$)	0.2
电机转动惯量/($kg \cdot m^2$)	0.557
整车转动惯量/($kg \cdot m^2$)	5.7

仿真结果见图 9。

图 9a 为原系统角度输出值和观测值。图 9b 为电机角度原系统和观测结果误差。图 9c 为电机转速原系统输出值和观测值。图 9d 为电机转速原系统和观测结果误差。

从仿真结果可以看出,如果观测器的 A 矩阵和原系统 A 矩阵一致,使用一定的反馈矩阵 C_F ,可以使观测值快速逼近传感器信号值(原系统),且不存在静态误差。

以联合汽车电子某项目为例,搭建电机控制算法验证平台如图 10 所示,其电机主要参数如表 2 所示。

试验结果显示,该角度观测器模型可以消除该项目角度波动 $\pm 1.5^\circ$,如图 11 所示。与图 5 相比,该方法成功将 $4\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $150\text{ N} \cdot \text{m}$ 电流波动控制在 $\pm 5\text{ A}$ 内,减少了 77%;转矩波动控制在 $\pm 0.8\text{ N} \cdot \text{m}$,减少了 83%;在工况 $8000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $1\,000\text{ N} \cdot$

m 时电流波动从 $\pm 50\text{ A}$ 减小到 $\pm 6\text{ A}$,如图 12 所示,改善效果明显。

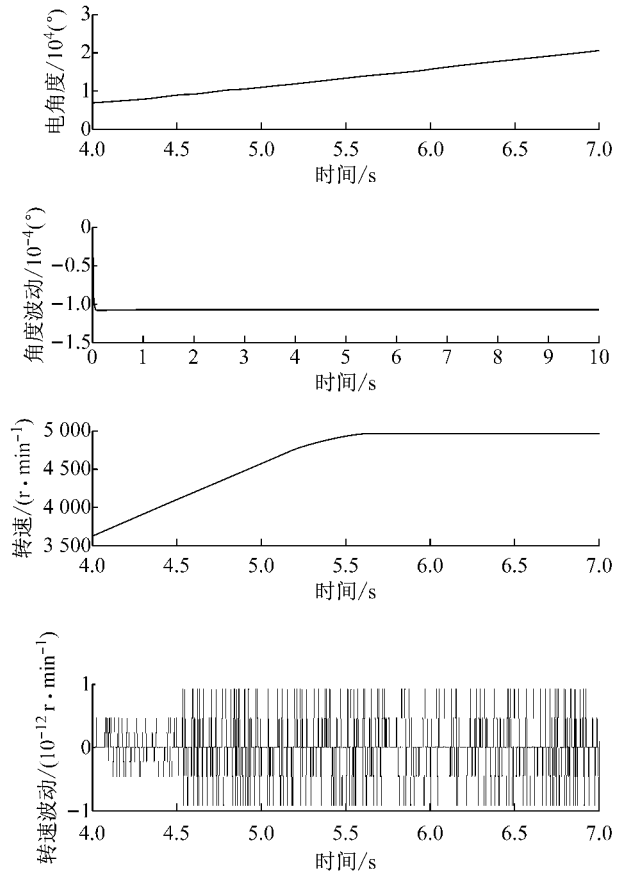


图 9 角度观测器仿真结果

Fig.9 Simulation results of angle observer

表 2 某永磁同步电机主要参数

Tab.2 PMSM parameters for experiment

参数	数值
D 轴电感/mH	150
Q 轴电感/mH	400
永磁磁链/($V \cdot s$)	0.035
相电阻/($m \cdot \Omega$)	9.8

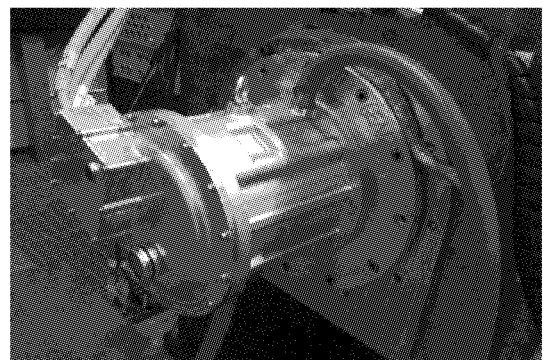


图 10 某永磁同步电机试验台架

Fig.10 PMSM motor control experiention dyno

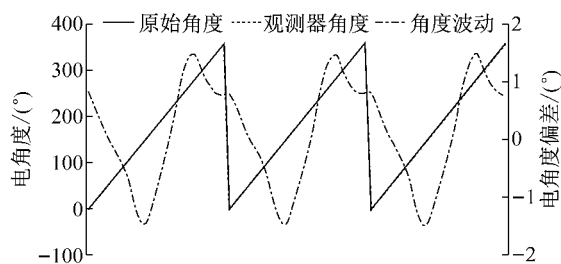


图 11 某电机角度观测器角度补偿偏差

Fig. 11 Angle compensation error after angle observer

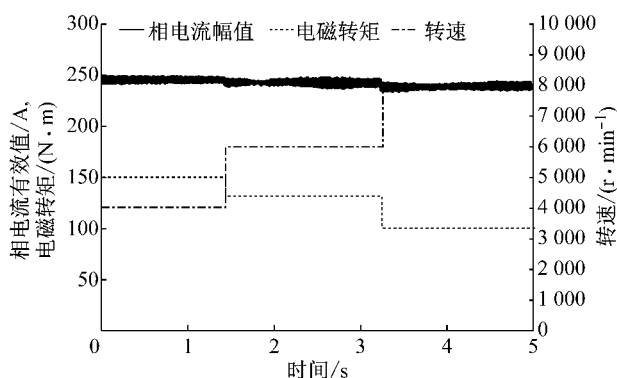


图 12 通过角度观测器后电流波动

Fig. 12 Current ripple applying angle observer

4 结论

针对车用永磁同步电机中位置传感器信号误差造成的电流高次谐波以及引发的转矩波动问题,本文提出了一种引入角度观测器,提高系统鲁棒性的控制方法.仿真分析结果以及不同控制策略实际控制效果均证明了该方法的有效性.

参考文献:

- [1] XU J X, PANDA S K, PAN Y J, *et al.* A modular control scheme for PMSM speed control with pulsating torque minimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(3): 526.
- [2] HWANG S, KIM H, KIM J, *et al.* Compensation of amplitude imbalance and imperfect quadrature in resolver signals for PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(1): 134.
- [3] 梁文毅. 矢量控制调速永磁同步电动机 PWM 谐波电流分析[J]. 微特电机, 2011, 39(6): 37.
- LIANG Wenyi. Analysis and simulation of harmonic electric current for vector-controlled PMSM system[J]. Small & Special Electrical Machines, 2011, 39(6): 37.
- [4] MOK H S, KIM S H, CHO Y H. Reduction of PMSM torque ripple caused by resolver position error[J]. Electron Lett, 2007, 43(11): 646.
- [5] 邹旭. 旋转变压器信号处理与设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- ZOU Xu. Signal processing and design of rotary transformer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [6] YIM C H, HA I J, KO M S. A resolver-to-digital conversion method for fast tracking[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1992, 39(5): 369.
- [7] 梅雷. 基于旋转变压器获取 PMSM 驱动系统位置和转速[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- MEI Lei. Acquirement of rotor position and rotor speed in PMSM drive system based on the resolver[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [8] 郑殿臣. 具有误差抑制功能的全数字 RDC 算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- ZHENG Dianchen. Research on all-digital RDC algorithm with error suppression function[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [9] HARNEFORS L, NEE H P. Model-based current control of AC machines using the internal model control method[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(1): 133.