

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.02.009

基于转子位置角预测的车用异步电机控制算法

刘亚男, 马钧华

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:在车用异步电机控制系统中,采用的低线数光电编码器不但影响速度和位置的检测精度,而且影响电机解耦算法的准确实现。课题组根据间接转子磁场定向控制算法,设计了基于位置而非速度的转子磁链角观测模块,规避了速度计算误差的干扰;提出了一种基于加速度在线辨识的转子位置角预测算法。该方案通过前一时刻的转子位置,结合转动惯量辨识和负载观测器计算得出加速度,从而对转子当前位置进行估算,并在光电编码器的位置更新点进行修正,提高了位置精度。仿真和实验结果表明:在车用异步电机矢量控制系统中,该方案能够有效提高低线数光电编码器电机控制系统的解耦精度,改善加速性能。

关键词:异步电机;光电编码器;位置检测;转动惯量辨识

中图分类号:TM35 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)02-0051-07

Vehicle Asynchronous Motor Control Algorithm Based on Rotor Position Prediction

LIU Yanan, MA Junhua

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In the asynchronous motor control system of electrical vehicles, using low-line optical encoders will reduce the accuracy of speed and position detection, which in turn reduce the accurate implementation of the motor decoupling algorithm. Based on the indirect rotor field oriented control algorithm, a rotor flux angle observation module for position measurement rather than speed measurement was designed to effectively reduce the interference of speed calculation error. A rotor position angle prediction algorithm based on online inertia identification was proposed. Based on the rotor position at the previous moment, the acceleration was calculated by combining the moment of inertia identification and the load observer to predict the current rotor position. The position update point of the optical encoder was corrected to improve the position accuracy. The simulation and experimental results show that in the electrical vehicle asynchronous motor vector control system, the designed scheme can effectively improve the decoupling performance of the low-line optical encoder motor control system and improve the acceleration performance.

Keywords: asynchronous motor; optical encoder; position measurement; inertia identification

面对日益严重的温室效应,清洁能源的发展已成为当下亟待解决的问题。就汽车行业而言,其重点发展方向为大力研发电动汽车。电动汽车是典型的有限能量供电的载人工具;一个性能优越且高效的电驱系统是提高电动汽车整车性能的关键。

异步电机结构简单,运行可靠,被广泛应用于电动汽车驱动系统。在异步电机控制系统中,电机转速与位置检测环节至关重要,其刷新率和精准度直接影响

系统的解耦精度,从而影响驱动系统性能。其中,速度检测结果一般由电机转子位置计算得出。在众多的位置传感器中,光电编码器抗干扰性能优良,检测精度高,因而被广泛应用。特别是低线数光电编码器,具有更好的环境适应性,成本较低,应用前景广阔。然其受限于自身机械条件,低线数光电编码器位置检测精度较低,从而影响了速度计算。如何通过算法克服低线数光电编码器自身的不足,提高其位置精度,是低线数光电

收稿日期:2019-11-18;修回日期:2019-12-23

第一作者简介:刘亚男(1994),女,重庆云阳人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车电机控制。E-mail:zjulyn@zju.edu.cn

编码器应用在电动汽车中亟需解决的关键问题之一。

基于光电编码器的转速测量方法,常见的有3种:M法、T法和M/T法^[1-3]。文献[4]在传统M法基础上提出了一种在宽转速范围内测量精度都较高的同步测速S法,但未考虑低线数光电编码器自身机械条件所带来的问题。文献[5]设计了一种基于变采样周期状态观测器的速度估计算法,该算法较复杂,实际应用时对处理器的计算速度要求过高,且观测器法输出存在超调,在起始时刻误差较大。

课题组针对低线数光电编码器在位置检测、转速计算方面的不足,提出了一种基于转子位置角预测的车用异步电机控制算法,规避了转速计算环节带来的误差,提高了位置精度。

1 低线数光电编码器对电机控制性能的影响

光电编码器的线数高低直接决定了编码器的位置检测精度。一个64线的光电正交编码器,能检测到的最小位置区间为

$$\theta_{\min} = \frac{360^\circ}{4 \times L_{\text{encoder}}} = 1.4063^\circ. \quad (1)$$

式中 L_{encoder} 为编码器线数。

当电机控制系统采用M法对编码器采集到的位置信号进行转速检测时,检测到的最小转速区间为

$$n_{\min} = \frac{2\pi}{4 \times L_{\text{encoder}}} \times \frac{1}{T_s} \times \frac{30}{\pi}. \quad (2)$$

式中 T_s 为采样周期。

可知转速检测精度取决于编码器线数和采样周期。编码器线数越低,转速检测精度越低;采样周期越小,转速检测精度越低。

当电机处于匀速状态时,可通过拉长采样周期来提高转速检测精度。但若电机处于加减速状态,延长采样周期会直接影响电机系统解耦的实时性,从而影响控制性能。因此,加减速状态下的电机控制系统,需要在保证实时性的前提下,提高位置分辨率与转速检测精度。

当 $T_s = 1 \text{ ms}$ 时,采用64线光电编码器对异步电机系统进行位置检测,得到的转速检测结果及局部放大图如图1所示。转速检测曲线以最小检测区间为阶,检测结果存在较大波动,可达230 r/min,误差极大。

若采用T法对编码器采集到的位置信号进行转速检测,检测结果刷新频率为

$$\frac{1}{T_i} = \frac{n}{360^\circ / (4 \times L_{\text{encoder}})}. \quad (3)$$

式中: n 为电机转速; T_i 为光电编码器2次位置刷新的

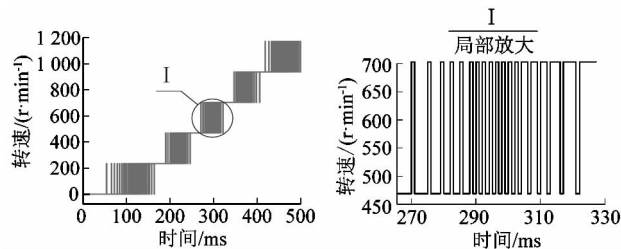


图1 M法仿真结果

Figure 1 Simulation results of M method

时间间隔。

由式(3)可知,低速阶段位置检测刷新频率较低,若此时电机控制系统处于加减速状态,则转速检测的实时性无法得到保证。采用T法对64线光电编码器采集到的位置信息进行转速计算,得到转速检测结果如图2所示。因T法计算的是刷新闻隔时段内的平均转速,当电机处于加减速状态时,低速阶段计算转速严重偏离该时刻的真实转速。

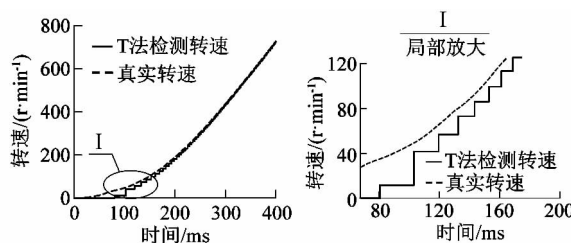


图2 T法仿真结果

Figure 2 Simulation results of T method

转速检测M法和T法受限于低线数光电编码器的机械条件,都无法对电机转速进行精确测量。由仿真结果可知,对于低线数光电编码器而言,T法波动较小,检测性能优于M法。

课题组采用间接转子磁场定向的电机控制方案^[6],其控制框图如图3所示。

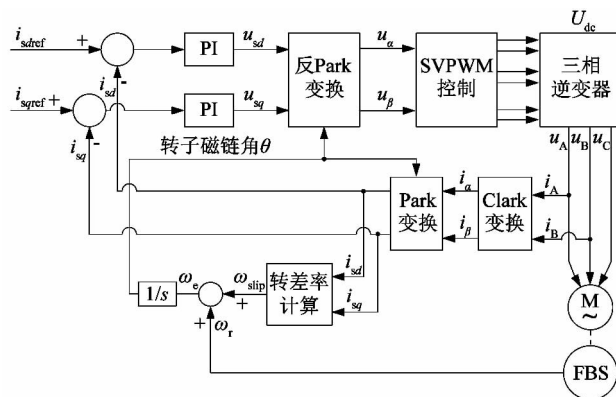


图3 电机矢量控制框图

Figure 3 Motor vector control block

这是一种基于转子转速检测和转差率计算的转子磁链定向电机控制方式。当定子旋转坐标系的 d 轴和转子磁链矢量重合时,其在定子旋转坐标下有:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_r &= \frac{L_m}{T_r s + 1} i_{sd}; \\ T_e &= \frac{3}{2} n_p \frac{L_m}{L_r} \Psi_r i_{sq} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: s 代表微分算子; Ψ_r 是转子磁链; T_e 是电磁转矩; i_{sd} 是励磁电流; i_{sq} 是转矩电流; $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ 是转子时间常数, $L_r = L_m + L_{lr}$ 是转子电感, R_r 是转子电阻, L_{lr} 是转子漏感, L_m 是励磁电感; n_p 是极对数。

在转子速度及电机定子电流已知的前提下,转子磁场速度有:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{slip} &= \frac{L_m i_{sq}}{T_r \Psi_r}; \\ \omega_e &= \omega_r + \omega_{slip} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: ω_{slip} 为转差速度; ω_r 为转子速度; ω_e 为转子磁场速度。

由式(5)可知,速度检测将影响转子磁场速度计算,转子磁场速度经积分后得到转子磁链角 θ ,故而计算所得的转子磁链角也将偏离真实值,使得电机偏离精确的解耦方向,影响电机控制性能。因此,需要对该控制方案以及低线数光电编码器的位置速度检测方法

进行一定的改进。

2 基于位置的转子磁链角观测

电动汽车用异步电机控制系统一般采用转矩闭环控制,驾驶者通过踏板进行转矩指令给定,从而控制汽车行进速度。因此,在间接转子磁场定向电机控制方案中,速度检测仅应用于转子磁链角计算。对图3所示的电机控制方案中转子磁链角观测模块进行改进,无需进行速度检测,改用位置检测结果直接进行计算,如图4所示。

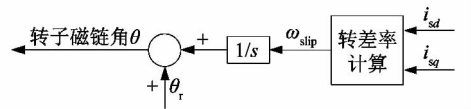


图4 基于位置检测的转子磁链角计算

Figure 4 Rotor flux angle calculation based on position detection

基于位置的转子磁链角观测模块,在转子位置及电机定子电流已知的前提下,转子磁链角为

$$\theta = \theta_r + \int \omega_{slip} dt. \quad (6)$$

式中: θ 为转子磁链角; θ_r 为转子位置角度。

在 MATLAB/Simulink 环境下搭建基于间接转子磁场定向的电机控制仿真模型,如图5所示。模型采用双电流闭环,转速开环,模拟车用异步电机的转矩指令给定^[7]。

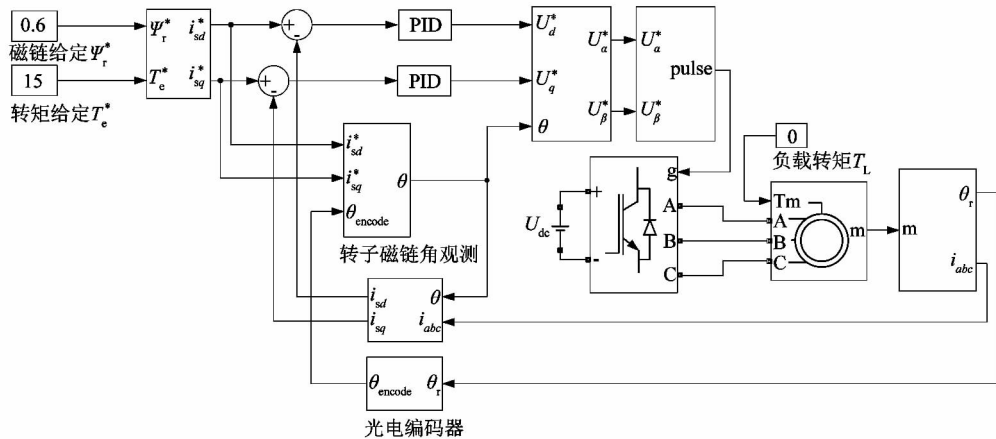


图5 基于 Simulink 的电机仿真模型

Figure 5 Motor simulation model based on Simulink

图6(a)所示为64线光电编码器位置检测结果与实际转子位置的对比图;图6(b)所示为应用基于位置的转子磁链角观测模块时,电机启动过程的加速曲线与传统基于速度方案对比图。

基于位置的转子磁链角计算,因规避了速度检测

误差的干扰,改善了电机系统解耦精度,从而改善了加速性能。但由图6(a)看出,受限于低线数光电编码器自身的机械条件,位置检测呈阶梯型上升,未能较好吻合实际位置曲线,尚有改进空间。

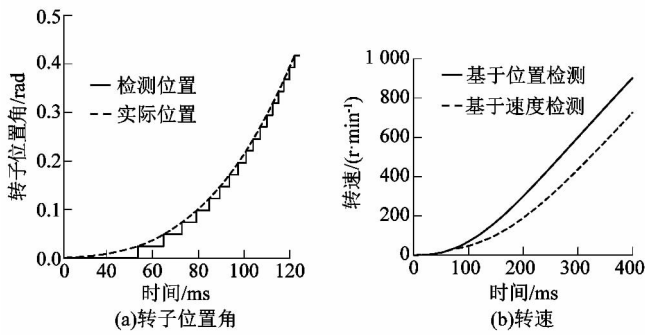


图6 基于位置检测的转子磁链角仿真结果
Figure 6 Rotor flux angle simulation results
based on position detection

3 转子位置角预测算法的实现

低线数光电编码器存在最小位置检测区间。当线数过低时,位置检测结果在刷新率及精度上都存在缺陷,从而产生位置误差,影响电机控制性能。

课题组提出一种基于加速度在线辨识的转子位置预测算法,通过辨识加速度从而实现转子位置的高频率实时预测。利用光电编码器输出的位置信息对预测结果进行有效性判断以及修正,保障其准确性。

转子位置角预测算法逻辑如图7所示。

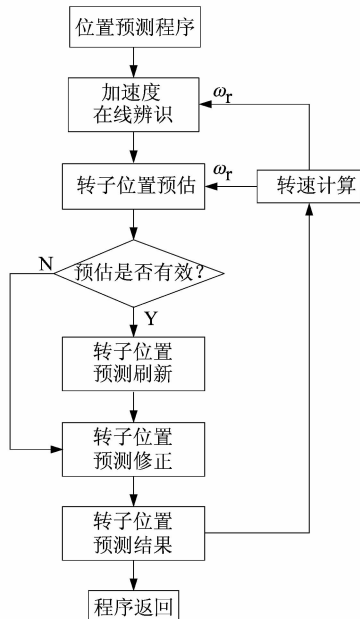


图7 转子位置角预测算法

Figure 7 Rotor position angle estimation algorithm

车用异步电机控制系统中,位置检测的采样周期 T_s 远小于电机的机械周期,故而可认为在一个 T_s 内,电机加速度 a 恒定不变。若根据电机运行工况对加速度 a 进行在线辨识,并结合系统前一时刻得到的转子位

置 θ_{old} 、转子速度 ω_r ,以及系统采样周期 T_s ,则转子位置预估值

$$\theta_{esti} = \theta_{old} + \omega_r T_s + \frac{1}{2} a T_s^2 \quad (7)$$

通过低线数光电编码器输出的位置检测信息 $\theta_{encoder}$ 对该预估结果进行有效性判断。由式(1)知,光电编码器存在最小检测位置区间,若预估结果落于该区间内,即 $0 \leq \theta_{esti} - \theta_{encoder} \leq \theta_{min}$ 时,认为预估值有效,程序将对转子位置进行刷新。反之,则不进行刷新操作。同时,为减小预估过程产生的累计误差,在光电编码器位置信息刷新时刻,转子位置预测结果也跟随刷新。

在 MATLAB/Simulink 环境下对转子位置角预测算法进行仿真,得到位置检测结果如图8所示。图8(a)为实际转子位置、光电编码器检测位置及应用转子位置角预测算法得到的转子位置角三者对比图;图8(b)为图8(a)中后两者与实际转子位置角的误差曲线图。

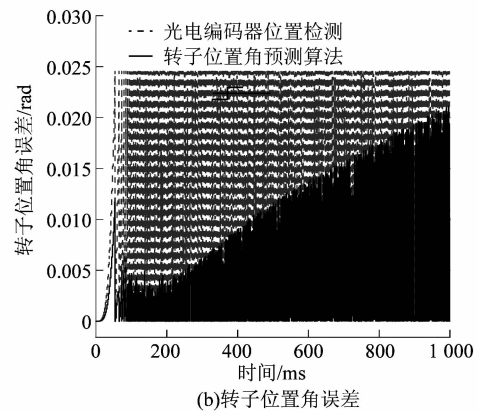
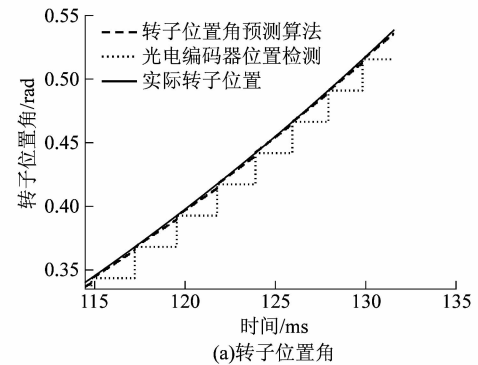


图8 转子位置角检测结果

Figure 8 Rotor position angle detection results

电机启动时,加速度在线辨识算法尚未收敛,转子位置角预测算法未达到最佳状态,同时转速过低导致

光电编码器刷新过慢,无法对预测结果进行修正,使得预测算法产生了累积误差,故而此时误差较大;之后基于转子位置预测算法的位置误差逐渐缩小。随着转子转速上升,光电编码器输出的转子位置信息刷新频率提高,转子位置预测结果将更多地采用光电编码器的输出结果,预测算法误差逐渐上升,此误差将逐渐逼近使用光电编码器进行位置检测的误差,但永不会大于该误差值。

因此,该算法可有效改善低速阶段的位置精度,进一步改善加速性能,加速曲线对比如图9所示。

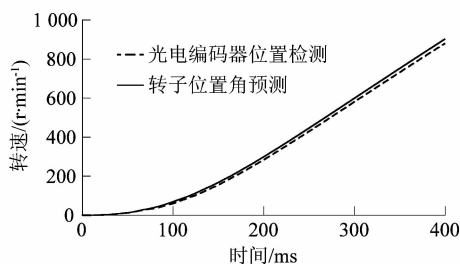


图9 加速曲线对比

Figure 9 Acceleration curve comparison

4 加速度在线辨识

转子位置角预测算法的核心要义是根据电机运行工况进行加速度 a 的计算预估。异步电机基于间接转子磁场定向的控制方案有:

$$\left. \begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} n_p \frac{L_m^2}{L_r} i_{sd} i_{sq}; \\ T_e - T_l &= J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: ω_m 为转子机械转速; T_l 为负载转矩; J 为转动惯量; D 为摩擦因数,其数值较小,可忽略不计。

因此,在电机输出转矩 T_e 、负载转矩 T_l 及转动惯量 J 已知的情况下,电机瞬时加速度可由式(9)计算得出。其中,电机输出转矩 T_e 可由转矩电流 i_{sq} 和励磁电流 i_{sd} 计算得出,负载转矩 T_l 和转动惯量 J 则需进行在线辨识。

4.1 转动惯量在线辨识

常见的转动惯量在线辨识算法主要有最小二乘法、模型参考自适应法以及卡尔曼滤波法^[8-10]。课题组选用模型参考自适应法进行转动惯量的在线辨识,其实现简单,辨识精度高。

下面给出基于模型参考自适应的转动惯量辨识算法实现。当采样时间 T_s 足够小时,忽略摩擦因数,基于异步电机机械运动方程可得到可调系统:

$$\hat{\omega}_m(k) = 2\omega_m(k-1) - \omega_m(k-2) + b(k-1)\Delta T_e \cdot (k-1). \quad (9)$$

式中: $\hat{\omega}_m(k)$ 为辨识估计转速信号; $\hat{b}(k-1)$ 中包含待辨识参数信息,设参考模型与可调系统的输出误差为

$$\varepsilon(k) = \omega_m(k) - \hat{\omega}_m(k). \quad (10)$$

由 Popov 超稳定性理论得到转动惯量的自适应律为

$$\hat{b}(k) = \hat{b}(k-1) + \beta \frac{\Delta T_e(k-1)}{1 + \beta \Delta T_e(k-1)^2} \cdot \varepsilon(k). \quad (11)$$

式中 β 为增益因子,可调节辨识算法的收敛速度和精确度。

由式(9)~(11),基于模型参考自适应法的异步电机转动惯量辨识控制框图如图10所示。

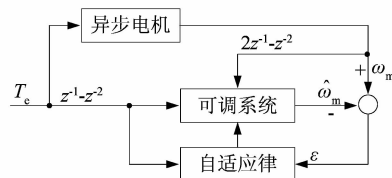


图10 转动惯量辨识算法控制框图

Figure 10 Inertia identification control block

在 MATLAB/Simulink 的异步电机仿真模型中对转动惯量在线辨识进行仿真分析,结果如图11所示。

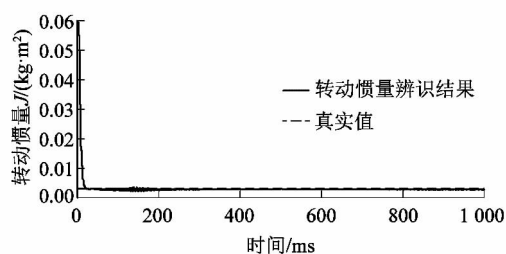


图11 转动惯量辨识结果

Figure 11 Results of inertia identification

由图11可知,基于模型参考自适应法的转动辨识算法具有较快的收敛速度及较高的收敛精度,满足后续加速度的计算要求。

4.2 负载转矩观测器

对于车用异步电机,当汽车运行于不同路况或载客载货量发生变化时,其负载转矩会随之变动,故而对于负载转矩的观测是有必要的。

当 T_s 足够小时,忽略摩擦因数,得到负载转矩在离散域内的降阶观测器实现^[11]:

$$\left. \begin{aligned} Z(k+1) &= Z(k) + L \frac{T_s}{J} [T_1(k) - T_e(k)]; \\ \hat{T}_1(k) &= Z(k) + L\omega_m(k). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 L 的取值大小可影响观测器的收敛速度和波形平滑程度。

为使负载转矩观测器稳定、收敛, L 的选取应满足:

$$\left| 1 + L \frac{T_s}{J} \right| < 1. \quad (13)$$

根据式(12)和(13), 负载转矩观测器的框图如图12所示。

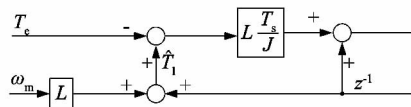


图12 负载转矩观测器控制框图

Figure 12 Load torque observer control block

在 MATLAB/Simulink 的异步电机仿真模型中对负载转矩观测器进行仿真分析, 辨识结果如图13所示。电机运行在空载状态, 0.5 s 时突加 6 N·m 的负载转矩。由图可知, 负载转矩观测器具有较快的响应速度和良好的稳态跟随性能。

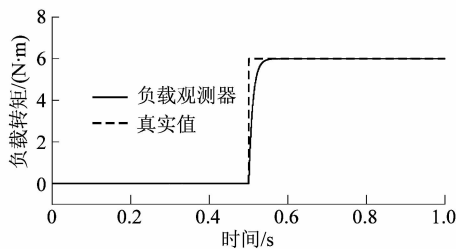


图13 负载转矩观测器结果

Figure 13 Results of load torque observer

结合转动惯量在线辨识及负载转矩观测器, 对电机瞬时加速度进行计算, 控制框图如图14所示。

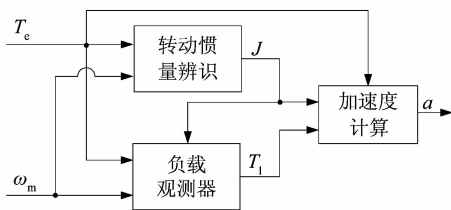


图14 速度检测改进控制框图

Figure 14 Speed detection improvement control block

将计算所得的电机瞬时加速度引入文中论述的转子位置角预测算法, 可有效改善位置精度。

5 实验验证

基于 TMS320F28069 搭建了电机驱动系统平台, 对转子位置角预测电机控制算法进行了实验验证。电机的额定参数如表1所示。

表1 异步电机额定参数

额定功率/kW	额定线电压/V	额定线电流/A	额定转速/(r·min ⁻¹)	额定频率/Hz
5	48	94	3 000	103

电机实验平台采用间接转子磁场定向的电机控制方案, 转子位置角预测算法的计算频率为 10 kHz。光电编码器的位置检测则采用 eCAP 模块, 在位置刷新时产生中断, 更新位置信息。

实验中, 电机在空载条件下启动, 双电流闭环, 转速开环, 模拟车用异步电机的转矩指令给定。

对转动惯量辨识算法进行实验验证, 得到电磁转矩曲线和对应的转动惯量辨识曲线, 如图15所示。由图可知辨识结果收敛速度较快, 收敛后波动较小, 满足后续进行加速度计算的要求。

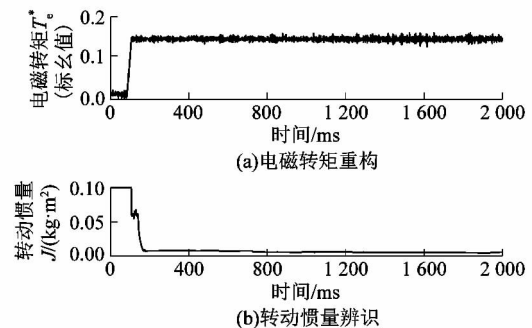


图15 转动惯量辨识算法实验结果

Figure 15 Experimental results of the moment of inertia identification algorithm

对比采用光电编码器及转子位置角预测算法输出的转子位置角, 得到实验结果如图16所示。光电编码器位置检测结果呈阶梯状上升, 而通过转子位置角预测算法得到的位置值呈斜线稳步上升, 在编码器刷新时刻也较好吻合了实际位置刷新值。实验结果证明, 转子位置角预测算法有效改进了位置刷新频率及精度。

图17所示为给定励磁电流 i_{sd}^* 为 0.48, 给定转矩电流 i_{sq}^* 为 0.2 (皆为标幺值) 时, 电机空载启动得到的电流波形及加速曲线。图17(a)为采用传统速度检测算法得到的实验结果, 图17(b)为采用基于转子位置角预测算法得到的实验结果。

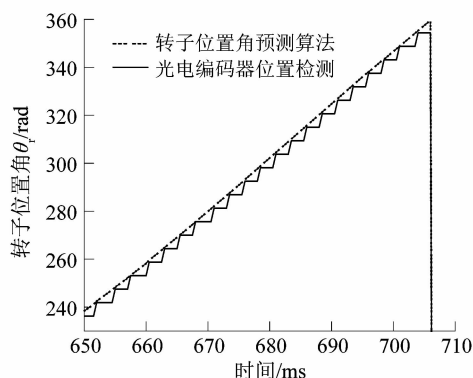
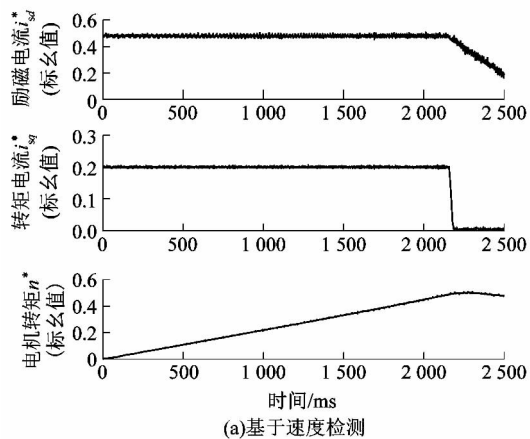
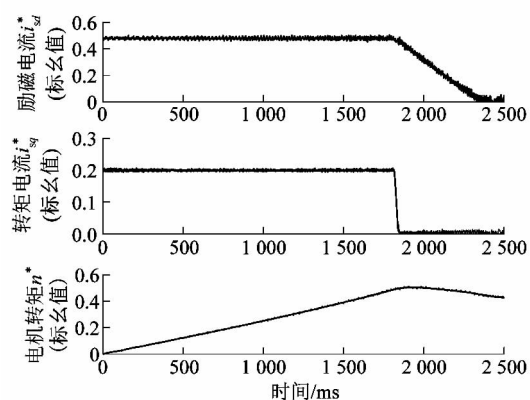


图 16 转子位置角预测算法

Figure 16 Rotor position angle prediction algorithm



(a)基于速度检测



(b)基于转子位置角预测算法

图 17 不同计算方法下的电流及转速曲线

Figure 17 Current waveform and speed curve under different calculation methods

当电机加速到 1 500 r/min (标幺值 0.5) 时, 转矩电流 i_{sq} 给定为 0, 励磁电流 i_{sd} 逐步下降, 记录加速时

间。传统速度检测控制算法的加速时间为 2.159 s, 转子位置角预测控制算法的加速时间为 1.818 s, 加速时间提升了 15.79%。证明转子位置角预测算法有效提升了电机加速性能。

6 结语

课题组针对低线数光电编码器在位置检测和速度计算中存在的精度问题, 结合车用异步电机的控制特性和负载特性, 提出了一种基于转子位置角预测的车用异步电机控制算法, 在转子磁链角计算环节中, 使用位置检测代替传统的速度检测, 并通过加速度的在线辨识对转子位置角进行预测, 以弥补低线数光电编码器自身的机械缺陷。

仿真及实验结果表明: 转子位置角预测控制算法能够有效提高低线数光电编码器的位置检测精度, 改善控制系统解耦精度, 从而提升电机加速性能。

参考文献:

- [1] BOGGARPU N K, KAVANGH R C. New learning algorithm for high-quality velocity measurement and control when using low-cost optical encoders [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(3): 565-574.
- [2] OHMAE T, MATSUDA T, KAMIYAMA K, et al. A microprocessor-controlled high-accuracy wide-range speed regulator for motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1982, 29(3): 207-211.
- [3] 周正干, 李然, 李和平. 高精度数字式转速测量系统的研究[J]. 测控技术, 2000, 19(5): 60-62.
- [4] 鲁进军, 梅志千, 刘向红, 等. 电动机的高精度宽范围转速测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 118-123.
- [5] 张靖, 吴忠, 黄丽雅. 基于光电编码器的电机变周期速度观测器设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(6): 824-828.
- [6] 李宏宇. 电动汽车异步电机转差频率矢量控制的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 15-16.
- [7] 周碧英. 基于 MATLAB 的异步电机间接矢量控制仿真与研究[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(12): 2179-2182.
- [8] 荀倩, 王培良, 李祖欣, 等. 基于递推最小二乘法的永磁伺服系统参数辨识[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 161-169.
- [9] 桑好. 永磁同步电机转动惯量辨识算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 31-34.
- [10] QUANG N K, TUNG D D, HA Q P. FPGA-based sensorless PMSM speed control using adaptive extended kalman filter[C]//2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Gothenburg; IEEE, 2015: 1650-1655.
- [11] 覃海涛. 交流伺服系统自调整技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 91-92.