

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904679

永磁同步电机转子位置复合检测及起动运行策略^{*}

王要强¹, 冯玉涛¹, 马小勇², 凡绍桂¹

(1. 郑州大学电气工程学院 郑州 450001; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院 天津 300072)

摘要: 电梯用永磁曳引机的驱动控制需要实时获取转子的机械角度, 如何在曳引机起动及运行阶段准确地检测转子位置是需要解决的关键问题。基于正余弦型复合编码器, 提出一种绝对式与增量式相结合的转子位置复合检测方案。首先在分析绝对式和增量式转子位置检测原理的基础上, 对两种转子位置检测算法进行优化, 提高转子位置检测精度; 然后结合转矩最大矢量控制策略, 提出在转子位置复合检测方案下的电机起动运行方案; 最后, 仿真与实验结果表明所提出的转子位置复合检测方案可以保证电机的正常稳定运行。

关键词: 永磁同步电机; 转子位置检测; 正余弦编码器; 正交细分

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Rotor position composite detection and start operation strategy of permanent magnet synchronous motor

Wang Yaoqiang¹, Feng Yutao¹, Ma Xiaoyong², Fan Shaogui¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The driving control of the elevator permanent magnet traction machine needs to obtain the mechanical angle of the rotor in real time. How to accurately detect the rotor position during the starting and operation phases of the traction machine is a key issue to be solved. Aiming at this problem, this paper proposes a composite rotor position detection scheme combining absolute and incremental detection based on sin-cos composite encoder. Firstly, based on analyzing the principle of absolute and incremental rotor position detection, two rotor position detection algorithms are optimized to improve the rotor position detection accuracy. Then, combining with the rotor maximum vector control strategy, the motor starting and operation scheme is proposed under the rotor position composite detection scheme. Finally, the simulation and experiment results show that the proposed rotor position composite detection scheme can ensure the normal and stable operation of the motor.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; rotor position detection; sin-cos encoder; orthogonal subdivision

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有功率密度高、调速性能好和易维护等优点, 在工业领域得到了广泛的应用^[1-2]。高精度的转子位置检测是实现永磁同步电机良好控制性能的前提^[3-5], 只有准确知道 PMSM 转子位置信息, 才可以借助矢量控制方法, 将 PMSM 按照他励直流电机的控制方法进行控制, 在

简化控制的同时, 达到他励直流电机传动系统的性能指标。

目前位置检测的各种方法从原理上可以分为电磁式、磁敏式、光电式和间接式等^[6-7]。各方法的实现方式可分为有位置传感器和无位置传感器。无位置传感器检测借助算法对定子电流和电压进行分析, 并从中获取转子的位置信息, 算法的好坏直接影响了转子位置检测的精度。目前, 无位置传感器检测存在算法过于复杂, 低速情况下转子位置检测不准确以及对电机参数依赖性强等问题^[8-10];

收稿日期: 2019-01-22 Received Date: 2019-01-22

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51507155)、郑州大学青年骨干教师项目(校人事[2017]11号)、郑州大学教育教学改革项目(校教务[2017]9号)资助

因此,有位置传感器检测目前仍处于主流地位。

有位置传感器检测可分为绝对式转子位置检测和增量式转子位置检测。绝对式转子位置检测通常利用位置传感器输出的电压信号或编码值直接检测转子位置,由于电压信号^[11]或编码值^[12]与转子的角度呈某种数学关系(如正弦或余弦),因此可以直接的得到转子的位置信息。这种转子位置检测方式没有累积误差,但是随着转子位置检测精度的提高,成本大幅度增加。增量式转子位置检测利用位置传感器输出的正交脉冲信号和参考零点标志信号计算转子位置。在检测到参考零点标志信号后,开始对正交脉冲信号进行计数,计数结果反映了转子相对于参考零点标志信号的位置,结合参考零点标志信号的实际位置,即可求出转子的位置^[13]。增量式转子位置检测能以较低的成本获取高精度的转子位置,但是必须在检测到参考零点标志信号之后进行,这就导致了转子初始位置检测问题。

为了解决以上问题,文献[14]提出一种基于磁场定位原理的动态定位法。通过对电机施加系列的电流矢量,利用增量式编码器输出脉冲检测电机转动方向,根据电流矢量和转动方向的关系,不断调整电流矢量,直到电机稳定,该方法定位时间长,定位过程中电机转动,不利于乘坐舒适度;文献[15]提出一种转子初始位置修正算法,通过不间断地利用给定目标位置的定子电流以试探转子位置,并通过叠代算法不断减小探测范围,减小转子定位振动幅度的同时提高了初始位置定位精度;文献[16]提出改进的正交细分方法,采用多段准线性近似法。但是其分割段数多,模拟实现需要硬件量大,并且占用大量的程序空间;文献[17]采用四倍频细分结合 A/D 转换计算反正切的方法,对增量式光栅编码器的输出进行处理,提高了转子角位移的测量精度。

本文提出了一种绝对式检测与增量式检测相结合的转子位置复合检测方案。首先,分析了该编码器的转子位置检测方式:增量式和绝对式转子位置检测;其次,利用正交细分算法,对两种转子位置检测方式进行优化,通过引入一个非整数的正数,用其小数部分描述转子处于非整数脉冲的情况,用以提高位置测量精度;再次,结合矢量控制策略,提出了电机的转子位置检测方案及起动运行方案;最后,分别通过仿真与实验验证本文所提方案的有效性。

1 正余弦型复合编码器工作原理

正余弦型复合编码器可以输出 5 路信号,分别为(A、B、C、D、R)。根据信号的功能,将其分为两类:增量式转子位置检测信号(增量信号)和绝对式转子位置检测信号(绝对信号)。

1.1 绝对式工作模式

正余弦型复合编码器绝对信号共两路,分别记为信号 C 和信号 D,其特点为:信号形式是正弦,角频率与转子机械角频率一致,且信号 C 超前信号 D 的相角为 90° 。绝对信号与转子机械角度的关系如图 1 所示。

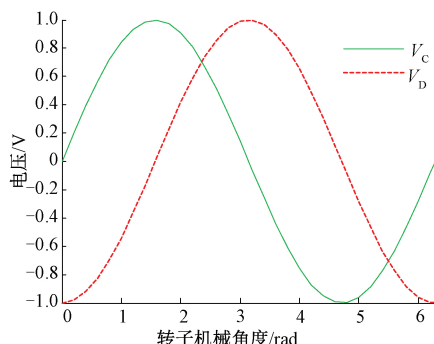


图 1 绝对信号与转子机械角度关系

Fig.1 The relationship between absolute signal and rotor mechanical angle

1.2 增量式工作模式

正余弦型复合编码器增量信号也分为两路,分别记为信号 A 和信号 B,其信号形式亦正弦,且信号 A 超前信号 B 的相角为 90° 。与绝对信号不同的是,增量信号的角频率是转子机械角频率的 N 倍, N 称为“编码器线数”。增量信号与转子机械角度的关系,如图 2 所示。

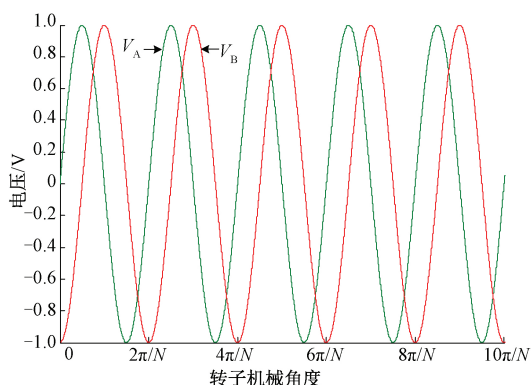


图 2 V_A 和 V_B 与转子机械角度关系

Fig.2 The relationship between V_A & V_B and rotor mechanical angle

1.3 编码器参考信号

参考信号是编码器随转子旋转过程中输出的单脉冲信号。转子每转一周,输出一个参考信号。其作用为,消除因增量信号计数缺失而造成的累积误差。对于增量式转子位置检测具有重要的作用。由于安装误差和运输过程中的震动等问题,参考信号的位置通常是未知的。因

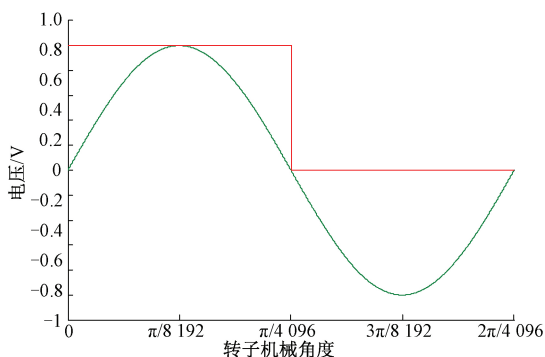


图5 正弦信号检测转换过程

Fig.5 Sine signal detection conversion process

设编码器线数为 N , 采用双边沿检测方法对增量脉冲信号进行计数, 即转子每转一周, 脉冲计数器的最大值为 $4N$ 。在 t 时刻, 脉冲计数值为 M , 则转子与信号 R 之间的相对位置 θ_i 为:

$$\theta_i = \frac{2\pi M}{4N} \quad (4)$$

假设 R 信号所在位置的机械角度为 θ_R , 则转子的机械角度 θ 可描述为:

$$\theta = \theta_R + \theta_i \quad (5)$$

增量式转子位置检测示意图如图 6 所示。

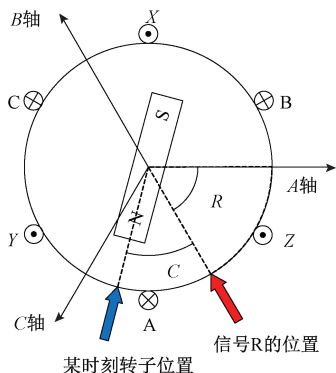


图6 增量式转子位置检测原理

Fig.6 Incremental rotor position detection principle

由图 5 和式(4)所示, 传统的增量式转子位置检测精度取决于编码器线数, 其检测精度为 $2\pi/4N$ 。然而, 因为编码器线数限制, 因脉冲宽度而引起的检测误差不可避免。

图 7 所示为其检测误差原理分析。当转子磁场方向正好与脉冲的上升沿或下降沿重合时, 增量式转子位置检测结果准确地反映了转子位置。然而, 在实际检测过程中, 转子很有可能位于两个正交脉冲之间, 这就造成了增量式转子位置检测的误差。

在正余弦复合编码器中, 增量信号为正弦信号, 可结合正交细分算法, 对增量式转子位置检测结果进行优化。

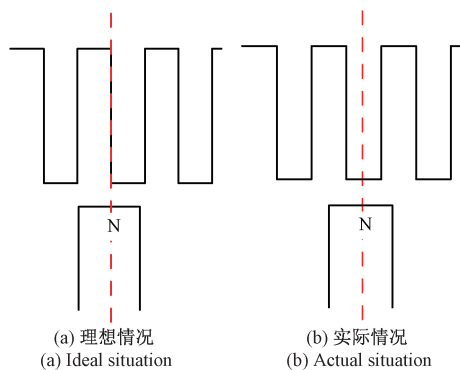


图7 传统增量式转子位置检测误差原理分析

Fig.7 Principle analysis of traditional incremental rotor position detection error

信号 A 和信号 B 的电压分别记为 V_A 和 V_B , 结合图 2 可得 V_A 、 V_B 与转子机械角度 θ 的关系为:

$$\begin{cases} V_A = \sin \left[\theta - \text{floor} \left(\frac{\theta \cdot N}{2\pi} \right) \right], & \theta \in [0, 2\pi] \\ V_B = \cos \left[\theta - \text{floor} \left(\frac{\theta \cdot N}{2\pi} \right) \right], & \theta \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad (6)$$

式中: floor 为取整函数。

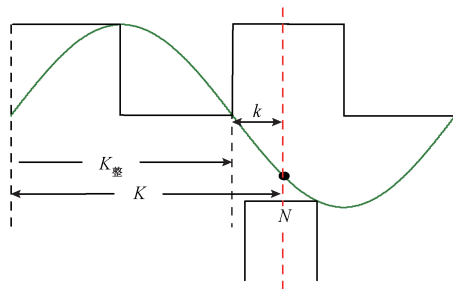
因为式(6)中取整函数的结果未知, 因此无法根据信号 A、B 的电压获取转子位置。为方便描述, 在此引入变量 θ_0 描述 V_A 和 V_B , θ_0 和 θ 的关系为:

$$\theta_0 = \theta - \text{floor} \left(\frac{\theta \cdot N}{2\pi} \right) \quad (7)$$

结合式(6)和(7), 可得:

$$\begin{cases} V_A = \sin \theta_0, & \theta_0 \in [0, 2\pi] \\ V_B = \cos \theta_0, & \theta_0 \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad (8)$$

根据信号 A 和信号 B 的电压, 结合图 4 正交细分算法, 可求出 θ_0 。由式(8)可知, θ_0 的范围为 $0 \sim 2\pi$, 由于传统的增量式转子位置检测对脉冲信号采用 4 倍频处理, 因此 θ_0 对应的脉冲个数为 $0 \sim 4$ 。两者间的关系如图 8 所示。

图8 θ_0 与脉冲数的关系Fig.8 The relationship between θ_0 and the number of pulses

若某时刻,转子的位置如图 8 所示,位于两脉冲之间,根据图示关系,用常数 K 来描述 θ_0 ,两者间的关系为:

$$K = \theta_0 \cdot N / 2\pi$$

(9)

其中, K 的范围为 $0\sim 4$ 。由图 8 可知, K 是一个非整数的正数,其小数部分 k 描述了转子处于非整数脉冲的情况。

则在 t 时刻,优化后的增量式转子位置检测公式为:

$$\theta_{\text{new}} = \frac{2\pi(M+k)}{4N} + \theta_R$$

(10)

2.3 转子位置复合检测方案

绝对式转子位置检测的优势在于可以直接获取转子位置,但是由于信号 C 和信号 D 是电压模拟信号,幅值较小且易受干扰,其测量精度和外界因素对绝对式转子位置检测的结果影响较大,这不利于电机的长时间稳定运行。

增量式转子位置检测的检测精度高、受外界因素影响较小,但必须在检测到信号 R 后才能进行。为了保证电机的长时间稳定运行,在复合式光电编码器的使用过程中,两种转子位置检测方式切换进行。如图 9 所示,在电机起动阶段,即在检测到信号 R 之前,首先进行转子位置绝对式检测,获取粗略的转子位置,实现电机的平稳起动;在检测到信号 R 后,转为增量式检测,实现电机继续平稳运行。

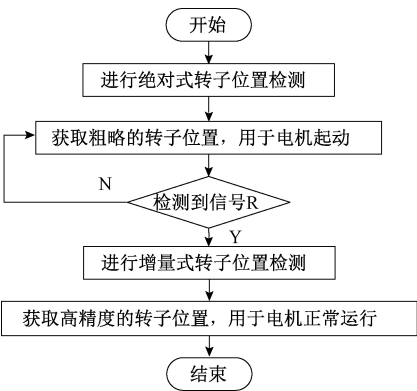


图 9 转子位置复合检测流程

Fig.9 Rotor position composite detection process

由以上设计可以看出,相比于同类型转子位置检测方法旋转变压器检测法,本文设计的转子位置复合检测方案设计过程更加简单,并且由于正余弦型复合编码器省去了旋转变压器检测所需的高频正弦激励磁信号产生与调理电路,具有在简化硬件电路设计的同时减少成本的优势。

3 仿真及其分析

将提出的转子位置复合检测方案应用于 PMSM 控制系统,搭建仿真模型,验证方案的有效性。仿真用电机参数设置如下:定子相电阻为 $2\ \Omega$;电子相电感为 $8.35\times 10^{-4}\ \text{H}$;转子惯量为 $1\times 10^{-3}\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$;极对数为 4;转矩系数为 $1.05\ \text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$;额定转速为 $1\ 000\ \text{r}/\text{min}$;负载为 $15\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。模型中复合式光电编码器参数为线数为 2 048;采用 4 倍频,即转子每转一周输出的脉冲总数为 8 192;信号 R 与 A 轴夹角为 $\pi/3$ (该值可为 $0\sim 2\pi$ 之间的任意值),其对应的编码器校正值为 1 365。

图 10 所示为采用基于转子磁场定向的 PMSM 矢量控制策略框图。

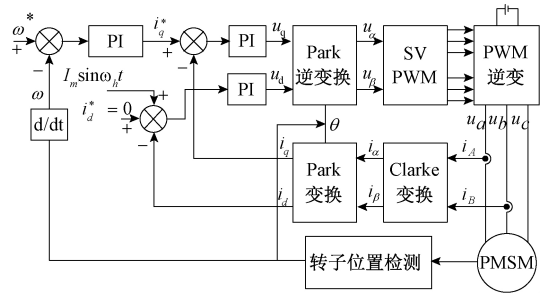
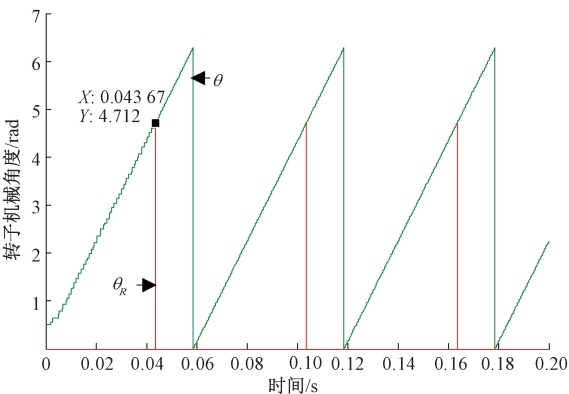


图 10 矢量控制策略原理

Fig.10 Principle diagram of vector control strategy

图 11 所示为增量式与绝对式转子位置检测的对比。图 11 中, $t=0.04\ 367\ \text{s}$ 时,检测到信号 R,转子位置检测方式由绝对式转为增量式,在这一转换过程中转子机械角度无突变;在绝对式转子位置检测中,转子机械角度变化不均匀,毛刺较多;增量式转子位置检测中,机械角度均匀变化。由图 11 可知,所提出的转子位置检测方案能够检测出转子位置并顺利完成转子位置检测方式的转换。



(a) 转子位置检测中转子机械角度仿真波形
(a) The simulation waveform of rotor mechanical angle in rotor position detection

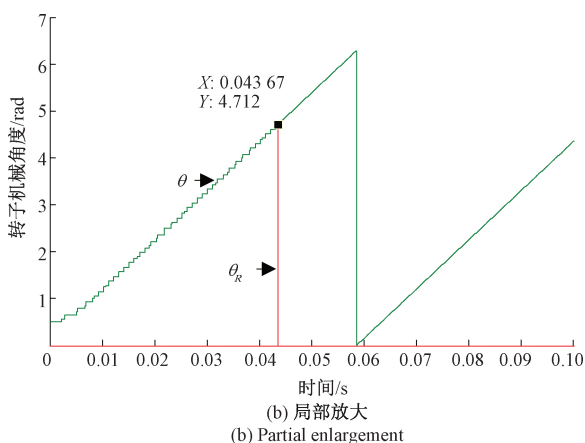
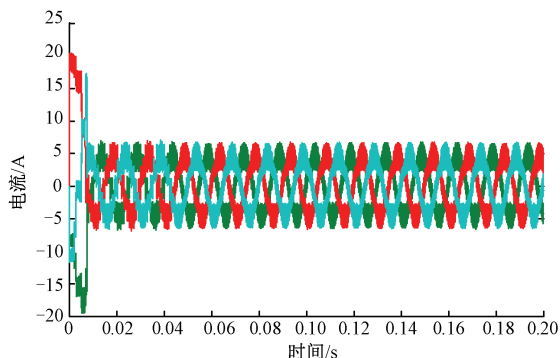


图 11 转子机械角度仿真波形

Fig.11 Rotor mechanical angle simulation waveform

图 12 所示为绝对式与增量式转子位置检测方式下的三相定子电流对比波形。由图可知,在 $0 \sim 0.043\ 67\ \text{s}$ 之间绝对式转子位置检测方式下,电机三相定子电流变化毛刺较多;在 $t = 0.043\ 67\ \text{s}$ 时转子位置检测方式转换为增量式,且在这一转换过程中定子三相电流波形无突变,在 $0.043\ 67\ \text{s}$ 之后的增量式转子位置检测过程中三相定子电流波形平滑。由图 12 可知,增量式转子位置检测有利于电机的长时间运行。



(a) 转子位置检测中三相定子电流仿真波形

(a) Three-phase stator current simulation waveform in rotor position detection

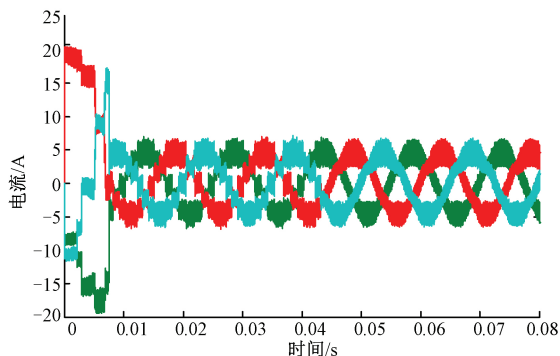
(b) 局部放大
(b) Partial enlargement

图 12 三相定子电流仿真波形

Fig.12 Three-phase stator current simulation waveform

图 13 所示为转速仿真波形,其中,转速稳定在额定转速。由图 13 可知,电机转速由零速至额定转速期间,转速波形平稳,未出现明显的因转子位置检测方式由绝对式、增量式之间切换而导致的转速波动现象,因此提出的转子位置检测方案可以保证电机正常起动与稳定运行。

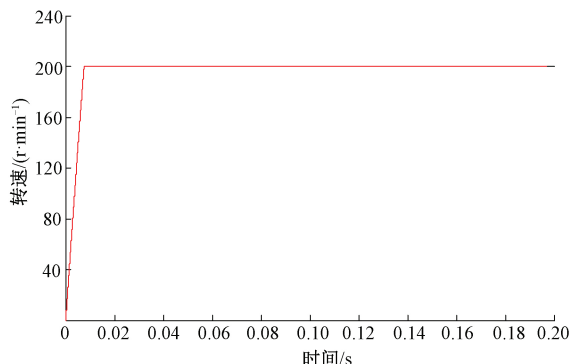


图 13 转速仿真波形

Fig.13 The rotation speed simulation waveform

4 实验验证

为了验证所提永磁同步电机转子位置复合检测方案的在工程实践中的可行性,在图 14 所示 PMSM 驱动控制实验平台上进行实验验证。该平台以 TMS320F2812 为主控芯片。开关频率为 $6\ \text{kHz}$,实验用 PMSM 额定电流 $26.6\ \text{A}$,额定转速 $192\ \text{r/min}$,额定频率 $38.4\ \text{Hz}$,额定转矩 $650\ \text{N}\cdot\text{m}$,电机极对数 12。



图 14 实验硬件平台

Fig.14 The photo of the experiment hardware platform

为了对比转子位置检测方式切换前后绝对式、增量式两种方式的检测精度,引入相邻两次转子位置采样差值 $\Delta\theta_m$ 。当电机稳速运行时,若转子位置检测结果准确,则误差 $\Delta\theta_m$ 也会趋于定值;相反,则 $\Delta\theta_m$ 变化幅度将会较大。

图 15(a)、(b)所示为电机以 $10\ \text{r/min}$ 运行时的 $\Delta\theta_m$ 实验对比。由结果可以看出,绝对式检测时转子位置误

差 $\Delta\theta_m$ 变化幅度较大,检测方式切换后,增量式检测误差 $\Delta\theta_m$ 变化明显减小,即转子位置检测精度更高。

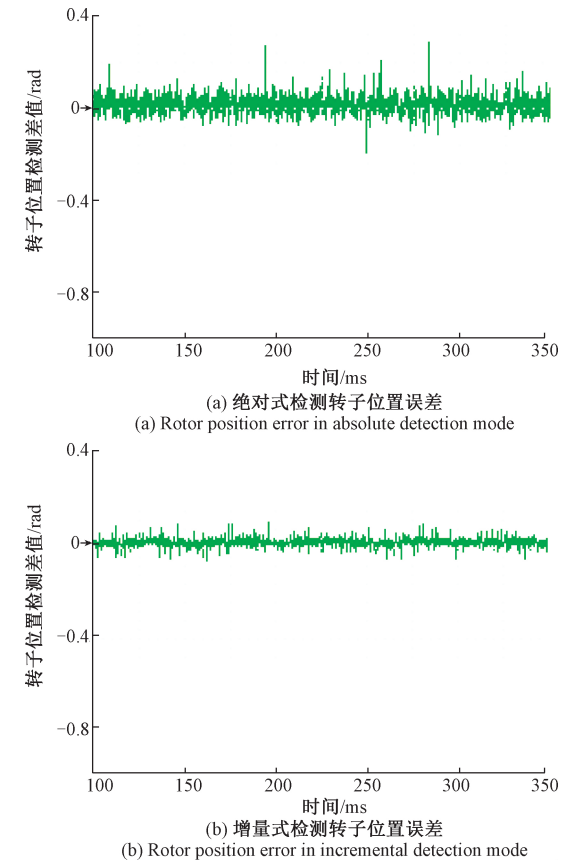


图 15 相邻两次转子位置采样差值

Fig.15 The difference of adjacent two rotor position samplings

图 16 与 17 所示分别为 PMSM 起动及以额定转速 192 r/min 运行过程中的 A 相电流、转子机械角度和转速的实验波形。由实验结果可知,在电机起动运行后,绝对式、增量式两种转子位置检测方法切换过程中,电机转子位置角检测结果波动小,过渡平滑,且转速波形稳定,没有出现明显波形现象,证明了本文提出的转子位置复合检测策略可以保证电机的顺利起动与平稳运行。

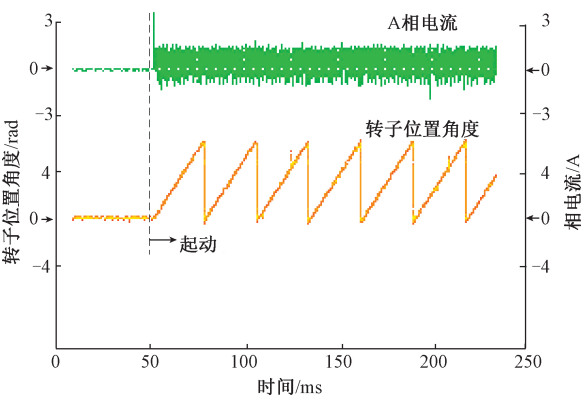


图 16 PMSM 转子位置检测波形

Fig.16 PMSM rotor position detection waveform

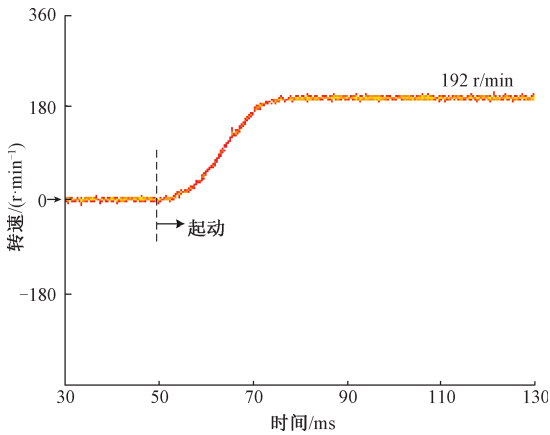


图 17 PMSM 转速实验波形

Fig.17 PMSM rotation speed experiment waveform

5 结 论

本文基于正余弦型复合编码器,提出了一种转子位置复合检测方案。通过分别对绝对式和增量式转子位置检测方法的优化,提高了复合式转子位置检测精度;该方案结合矢量控制策略,可以完成电机的正常起动和转子位置的精确检测,进而实现电机的正常稳定运行。仿真和实验结果与理论分析推导一致,证明了本文所提方案的正确性与有效性。

参考文献

[1] WANG Y, WANG SH CH, CHEN H N, et al. Study and analysis on control technique of speed sensorless in electric dynamometer [J]. Key Engineering Materials, 2014(584):179-183.

[2] WANG ZH, NIU SH X, ZHU J G. et al. A position detection strategy for sensorless surface mounted permanent magnet motors at low speed using transient finite-element analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2):1003-1006.

[3] 吴忠强, 杜春奇, 李峰, 等. 基于蝙蝠算法的永磁同步电机健康状态监测 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 695-702.

WU ZH Q, DU CH Q, LI F, et al. Health condition monitoring of the permanent magnet synchronous motor based on bat algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3):695-702.

[4] 王子辉, 陆凯元, 叶云岳. 基于改进的脉冲电压注入永

- 磁同步电机转子初始位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36):95-101.
- WANG Z H, LU K Y, YE Y Y. Initial position detection method of permanent magnet synchronous motor rotor based on improved pulse voltage injection [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(36):95-101.
- [5] 王海兵, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 永磁同步电机位置检测偏差对驱动系统性能的影响研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4):910-918.
- WANG H B, ZHAO R X, TANG SH Q, et al. Research on the influence of the position detection error to the PMSM drive system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4):910-918.
- [6] 廖勇, 沈朗, 姚骏, 等. 改进的面贴式永磁同步电机转子初始位置检测[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(2):203-207.
- LIAO Y, SHEN L, YAO J, et al. Initial rotor position detection for surface mounted PMSM based on rotating high frequency signal injection[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(2):203-207.
- [7] 李毅拓, 陆海峰, 瞿文龙, 等. 一种新颖的永磁同步电机转子初始位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3):75-82.
- LI Y T, LU H F, ZHAI W L, et al. Novel novel permanent magnet synchronous motor rotor initial position detecting method[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3):75-82.
- [8] LU ZH D, RUAN G Q, CHENG J R. Hybrid position-sensorless control of PMSM for EV based on EtherLab technique [C]. Electric Engineering and Computer (MEC), 2013: 102-106.
- [9] 刘家曦, 李立毅, 杜鹏程. 考虑磁场交叉耦合的内嵌式永磁同步电机初始位置检测技术[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7):32-38.
- LIU J X, LI L Y, DU P CH. Initial position detection technology of embedded permanent magnet synchronous motor considering magnetic field cross coupling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7):32-38.
- [10] 王淑娴, 吴治峰, 彭东林, 等. 永磁伺服电机嵌入式位置检测理论及误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10):2547-2554.
- WANG SH X, WU ZH Y, PENG D L, et al. Embedded position detection theory and error analysis for permanent magnet servo motors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10):2547-2554.
- [11] 汪锴, 高瑾, 昌鹏. 基于渐近电压法的隐极式永磁同步电机转子初始位置检测[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(2):87-92.
- WANG K, GAO J, CHANG P. A salient pole permanent magnet synchronous motor rotor initial position estimation method based on asymptotic voltage vectors[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(2):87-92.
- [12] 倪启南, 杨明, 徐殿国, 等. 低分辨率位置传感器永磁同步电机精确位置估计方法综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22):70-81.
- NI Q N, YANG M, XU D G, et al. Review of precise position estimation method of PMSM with low-resolution position sensor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22):70-81.
- [13] 牛刚, 刘森轶. 永磁牵引系统退磁故障自主延寿控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9):167-173.
- NIU G, LIU S Y. Autonomous life extending control for PMSM rail vehicles under demagnetizing fault [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9):167-173.
- [14] 永华, 皮佑国. 基于磁定位原理的永磁同步电机转子初始位置定位研究[J]. 电气传动, 2010, 40(3):28-31.
- YONG H, PI Y G. Research on positioning of rotor initial position of permanent magnet synchronous motor based on magnetic positioning principle[J]. Electric Drive, 2010, 40(3):28-31.
- [15] 滕福林, 胡育文, 黄文新. 永磁同步伺服系统初始位置修正算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27):109-113.
- TENG F L, HU Y W, HUANG W X. Amending algorithm to measure motor's initial position in PMSM servo systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27):109-113.
- [16] 洪小圆, 王鹿军, 吕征宇. 一种新颖的正弦正交编码

器细分方法[J]. 电源学报, 2011, 8(1):7-11.

HONG X Y, WANG L J, LV ZH Y. A novel scaling method for sinusoidal quadrature encoder[J]. Journal of Power Supply, 2011, 8(1):7-11.

- [17] 王要强, 马小勇, 秦明, 等. PMSM 转子位置复合检测与编码器校正方法[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(7):41-48.

WANG Y Q, MA X Y, QIN M, et al. PMSM rotor position composite detection and encoder correction method [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(7):41-48.

作者简介



王要强, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为郑州大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为电力电子变换与控制技术及其在新能源并网、电机驱动、柔性直流输配电等方面的应用。

E-mail: WangyqEE@163.com

Wang Yaqiang received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. Now, he is an associate professor and M.Sc. supervisor in Zhengzhou University. His main research interests include power conversion & control technique and its applications in distributed generation, motor drive and flexible power transmission & distribution, etc.



马小勇 (通信作者), 2014 年于山东科技大学获得学士学位, 2017 年于郑州大学获得硕士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为高频电力电子变换器拓扑及数字控制研究。

E-mail: 944983954@qq.com

Ma Xiaoyong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2014 and M. Sc. degree from Zhengzhou University in 2017. He is currently a Ph. D. candidate at Tianjin University. His main research interests include high-frequency power electronic converter topology and digital control study.