

基于霍尔元件的永磁同步电机转子位置辨析*

张余超^{1,2}, 迟 颂^{1,2}, 李 雪^{1,2}, 杨海靖^{1,2}

(1. 河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130;

2. 河北工业大学 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130)

摘 要: 提出了一种改进的基于霍尔元件的永磁同步电机转子位置估计方法。利用牛顿插值法对霍尔元件提供的离散位置点进行曲线拟合, 对位置信息进行预测、插值, 从而估算出电机转子的实时位置信息。改进后的方法可以消除转子位置估算的阶跃现象, 提供稳定可靠的转子位置信息, 提高了闭环系统的稳定性。在 Ples 仿真平台中对该算法进行了仿真验证, 与传统转子位置估算方法进行了对比, 仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 霍尔元件; 转子位置估算

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)08-0019-05

Rotor Position Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Hall-Effect Sensors*

ZHANG Yuchao^{1,2}, CHI Song^{1,2}, LI Xue^{1,2}, YANG Haijing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,

Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: An improved rotor position estimation method of permanent magnet synchronous motor (PMSM) using Hall-effect sensors was proposed. According to the Newton interpolation method, the curve fitting of discrete locations provided by Hall sensors was made. The real-time position information of the motor rotor was estimated in the algorithm for position fitting and interpolating. This method promised to eliminate the step position of the rotor position estimation and provided stable and reliable rotor position information, so that the stability of the closed-loop system was improved. The simulation based on the simulation platform of Ples was built. Compared with the traditional estimation method of rotor position, the results illustrated the effectiveness of the proposed method.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); Hall-effect sensors; rotor position estimation

0 引 言

随着稀土永磁材料的发展, 永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 得以快速发展。PMSM 具有体积小、重量轻、效率高、转矩脉动小等一系列优点, 因此在现代交流运动

控制系统中应用越来越广泛^[1]。准确可靠的转子位置直接影响到 PMSM 的控制效果。转子位置信息的获取分为有位置传感器和无位置传感器两种^[2]。位置传感器包括旋转变压器、光电码盘等, 此类位置传感器分辨率高, 能够实时提供准确的位置信息, 但增加了系统的尺寸和成本, 且受环境

* 基金项目: 河北省高层次人才资助项目 (E2015100007)

作者简介: 张余超 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制。

迟 颂 (1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为高频电力电子, 电机控制。

李 雪 (1984—), 女, 博士研究生, 研究方向为电机控制。

限制。无位置传感器检测方法有卡尔曼滤波法、滑模观测器法、反电动势法等,这些方法降低了系统成本但运算量大,对参数要求高,并且无法保证低速性能。因此在很多场合,低成本和低分辨率的霍尔传感器被广泛用于转子位置检测^[3-4]。

霍尔传感器具有成本低、体积小、可靠性高等优点,因此其在低分辨率位置传感器中成为一种高性价比的选择^[5]。但霍尔元件只能提供离散的转子位置信号,无法提供连续的位置信息,该位置信号不能直接用于电机控制。因此基于霍尔元件提供的离散位置信号完成连续转子位置的估算成为该方案的研究重点。传统位置检测多用前几个离散霍尔信号计算转子角速度再对时间积分来估算转子位置,但存在一定的缺陷。本文提出了新的转子位置估算方法,利用牛顿插值法对离散位置点进行曲线拟合,对位置信息进行预测、插值。该方法消除了传统转子位置估算的阶跃问题,能为控制系统提供稳定可靠的转子位置信息。

1 霍尔元件估算原理

将3个霍尔元件分别相差120°放置,每个电周期可以获得6个霍尔信号,相邻两个霍尔信号之间相差π/3,霍尔信号以及对应转子位置如图1所示。

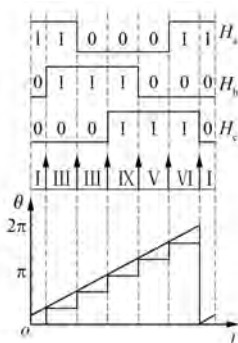


图1 霍尔信号以及对应转子位置

根据霍尔传感器的6个信号的状态可将转子位置分为6个区间如表1所示。每个霍尔信号到来时可以提供一次较准确的转子位置信息,而区间内每时刻对应的转子转速与位置信息只能通过算法进行估算。

当前转子转速由前几个区间的转速估算得到霍尔传感器的角速度与位置信息估算如图2所示。每个区间内的平均电角速度可以表示为

表1 霍尔信号与转子位置对应关系

H_a	H_b	H_c	区间	转子位置/(°)
1	0	0	I	0~60
0	1	0	II	60~120
0	1	1	III	120~180
0	0	1	IV	180~240
1	0	1	V	240~300
1	0	0	VI	300~360

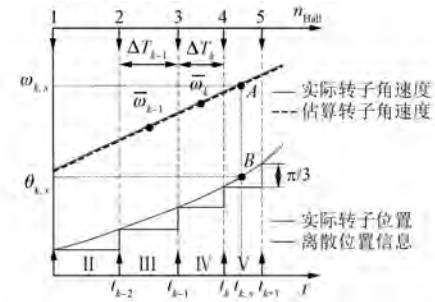


图2 霍尔传感器的角速度与位置信息估算

$$\bar{\omega}_k = \frac{\pi/3}{\Delta T_k} \tag{1}$$

式中: ΔT_k ——两个连续霍尔信号 t_{k-1} 、 t_k 之间的时间间隔。

假设每个区间内的角加速度恒定,由角速度可进一步计算出转子位置区间 III、IV 内的转子平均角加速度:

$$\bar{a}_k = \frac{\bar{\omega}_k - \bar{\omega}_{k-1}}{(\Delta T_{k-1} + \Delta T_k)/2} \tag{2}$$

因此计算 t_k 时刻的角速度:

$$\omega_k = \bar{\omega}_k + \bar{a}_k \frac{\Delta T_k}{2} \tag{3}$$

在转速发生变化时,当前转子位置区间内的角加速度可由转子位置区间 III、IV 内的转子平均角加速度 \bar{a}_k 近似代替来跟踪转速。则当前转子角速度为

$$\omega_{k,x} = \omega_k + \bar{a}_k (t_{k,x} - t_k) \tag{4}$$

式中: $t_{k,x}$ ——当前时刻值。

转子位置信息可由角速度对时间积分得到:

$$\theta(t) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \omega(t) dt + \theta_{k-1} \tag{5}$$

因此,由式(5)可得当前转子位置为

$$\theta_{k,x} = \omega_k (t_{k,x} - t_k) + \frac{1}{2} \bar{a}_k (t_{k,x} - t_k)^2 \tag{6}$$

每当第 n_{Hall} 个霍尔信号到来时都会对位置信息进行纠正:

$$\theta = n_{Hall} \cdot \frac{\pi}{3} \quad (7)$$

如果电机工作在稳态或者均加、减速状态时上述方法可以精确计算转子位置信息。然而实际运行中不会存在绝对的稳态并且转速发生变化时也不会保持恒定加速度。因此,当霍尔信号到来时,式(6)所计算出的位置信息并不会满足式(7),即估算出的角度与实际转子角度存在一定差值:

$$\theta_{step} = \theta_k - n_{Hall} \cdot \frac{\pi}{3} \quad (8)$$

式中: θ_k ——第 n_{Hall} ($n_{Hall} = k$) 个霍尔信号到来时对应的位置信息估算值。

当位置信息被强行纠正时,会存在大小为 θ_{step} 的阶跃,如图 3 所示,阶跃信号对电机的稳定控制造成很大影响并导致电机扭矩波动^[6-9]。以上为传统位置信息估算方法的原理以及缺点。

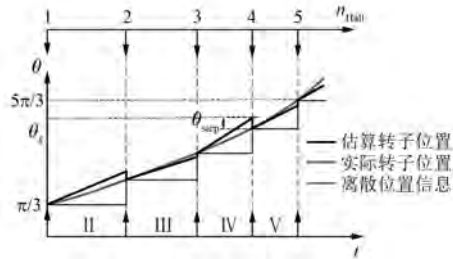


图 3 位置信息估算产生阶跃分析

2 改进的位置信息估算方法

为解决位置信息的阶跃现象,本文根据霍尔信号提供的离散位置点,提出了基于牛顿插值法的位置估算方法,利用两次牛顿插值法分别完成下一离散位置点的预测和当前位置信息的插值估算。算法简单可行,有效弥补了位置信息的阶跃现象。

拉格朗日插值法与牛顿插值法是两种常见的插值方法。牛顿插值法克服了增加一个节点时整个计算工作必须重新开始的缺点,有效降低运算量。以 $[x_0, f(x_0)]$ 、 $[x_1, f(x_1)]$ 、 $[x_2, f(x_2)]$ 3 点为拟合点,利用牛顿插值法对曲线拟合。

$$f[x_0, x_1] = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \quad (9)$$

式中: $f[x_0, x_1]$ —— $f(x)$ 的一阶差商。

$$f[x_0, x_1, x_2] = \frac{f[x_1, x_2] - f[x_0, x_1]}{x_2 - x_0} \quad (10)$$

式中: $f[x_0, x_1, x_2]$ —— $f(x)$ 的二阶差商。

$f(x)$ 的拟合曲线为

$$f(x) = f(x_0) + f[x_0, x_1](x - x_0) + f[x_0, x_1, x_2](x - x_0)(x - x_1) \quad (11)$$

拟合曲线 $f(x)$ 的截断误差极限为

$$|R_n(x)| \leq \frac{M_{n+1}}{(n+1)!} |\omega_{n+1}(x)| \quad (12)$$

其中, $M_{n+1} = \max_{a \leq x \leq b} |f^{(n+1)}(x)|$, $\omega_{n+1}(x) = (x - x_0)(x - x_1) \cdots (x - x_n)$, 因此牛顿插值法具有较高的计算精度。

以位置信息 θ 为横坐标,时间 t 为纵坐标,对离散霍尔信号点建立平面直角坐标系如图 4 所示,由于相邻两个霍尔信号之间相差 $\pi/3$,即 $\theta_{k+1} - \theta_k = \theta_k - \theta_{k-1} = \theta_{k-1} - \theta_{k-2} = \pi/3$ 。在此坐标系下将离散位置点转化成了横坐标等步长的点,可以方便地对下一离散位置点精确预测。

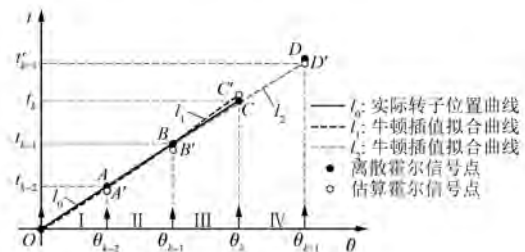


图 4 牛顿插值法对下一霍尔信号点预测

设 C 点为当前霍尔信号点, A 、 B 为距当前时刻最近的两个霍尔信号点。利用 $A(\theta_{k-2}, t_{k-2})$ 、 $B(\theta_{k-1}, t_{k-1})$ 、 $C(\theta_k, t_k)$ 3 个离散位置点,由牛顿插值法进行曲线拟合。

设拟合的二次曲线方程为

$$t = f(\theta) = a + b_1\theta + b_2\theta^2 \quad (13)$$

式中: a ——常数项;

b_1, b_2 ——曲线一次项与二次项系数。

其中,

$$a = f(x_0) \quad (14)$$

$$b_1 = f[\theta_{k-2}, \theta_{k-1}] = \frac{f(\theta_{k-1}) - f(\theta_{k-2})}{\theta_{k-1} - \theta_{k-2}} \quad (15)$$

$$b_2 = f[\theta_{k-2}, \theta_{k-1}, \theta_k] = \frac{f[\theta_{k-1}, \theta_k] - f[\theta_{k-2}, \theta_{k-1}]}{\theta_k - \theta_{k-2}} \quad (16)$$

拟合曲线如图 4 中曲线 l_2 所示, 该拟合曲线用于预测下一霍尔信号点, 将 $\theta_{k+1} = \theta_k + \frac{\pi}{3}$ 代入式(13) 计算出下一霍尔信号出现的时刻 t'_{k+1} , 即得到下一离散位置点 D' 的坐标 $(\theta'_{k+1}, t'_{k+1})$ 。同样地, 点 C' 由曲线 l_1 估算得到。所有下一离散位置点均由实际的 3 个最近的离散霍尔信号点插值估算得出。由式(12) 可知, 离散位置的估算点与实际离散位置点的误差很小。同理, 图 5 中的 A' 、 B' 、 C' 、 D' 均利用牛顿插值法估算离散点得出。不同的是, 图 5 中将上述实际霍尔信号点以及估算霍尔信号点以时间 t 为横轴, 转子位置 θ 为纵轴表示在直角坐标系上。现以 B' 、 C' 以及刚刚估算出的 D' 再次利用牛顿插值法拟合位置曲线:

$$\theta = f(t) = a' + b'_1 t + b'_2 t^2 \quad (16)$$

式中: a' ——常数项;

b'_1 、 b'_2 ——曲线一次项与二次项系数。

该拟合方程如图 5 中的曲线 B' 、 C' 、 D' 所示, 沿该曲线的 C' 、 D' 段进行插值计算, 假设当前时刻为 $t=t'_{k,x}$, 则当前转子位置为 (X 点):

$$\theta = \theta'_{k,x} = f(t'_{k,x}) \quad (17)$$

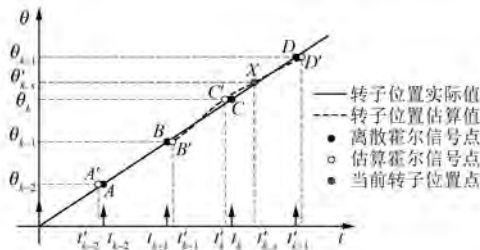


图 5 牛顿插值法对下一区间转子位置信息插值估算

第 2 次牛顿插值法插值出的转子位置信息将实时用于同步电机控制, 在该坐标系下每次牛顿插值曲线均由两个最近霍尔信号估算点与刚估算出的下一霍尔信号点拟合得出, 由于牛顿插值法拟合的曲线必过拟合点, 因此拟合出的插值曲线应为一条无阶跃的连续曲线, 该方法有效解决了传统方法估算转子位置信息的阶跃现象。

3 仿真验证

为验证该算法的有效性, 在 Plecs 仿真平台上建立基于霍尔元件的永磁同步电机控制仿真模型, 利用实际转子位置获取霍尔信号并在此离散

信号上施加 0.5° 的抖动偏移量, 对传统转子位置估算方法以及改进后的牛顿插值估算方法所得的位置信息结果进行了对比。

图 6(a) 对实际转速与估算转速进行了对比, 图 6(b) 为估计转速与实际转速的差, 转速误差在 $\pm 1.67\%$ 以内。电机稳态位置信息如图 7 所示。图 7(a) 对电机稳态时, 实际位置信息、传统位置估算法和牛顿插值估算法的位置信息进行了对

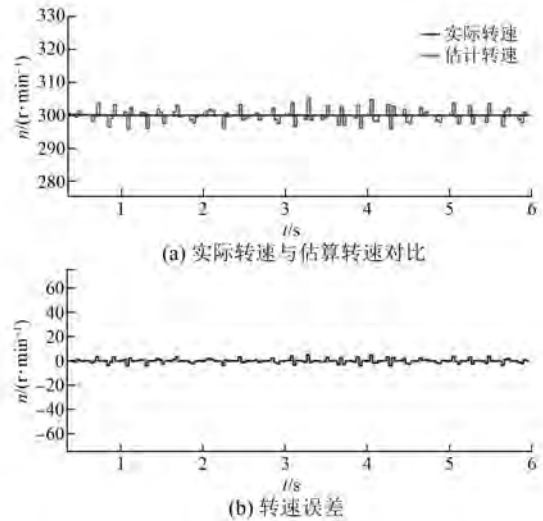


图 6 实际转速与估算转速以及误差

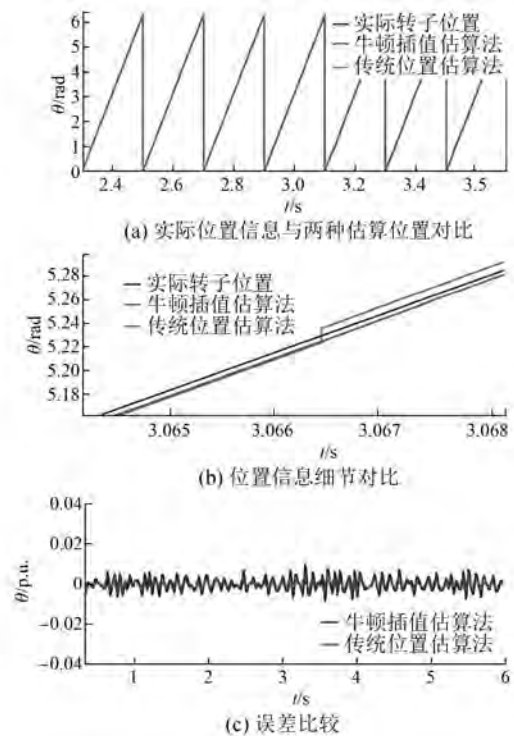


图 7 电机稳态位置信息

比,由于坐标范围较大差异并不明显;图7(b)将坐标范围缩小,展示了三者的细节图;图7(c)为文章提出的牛顿插值法位置信息估算方法的误差,可以看出该条件下该算法也存在一定误差,误差范围在 $\pm 0.7\%$ 以内,但很好的消除了位置信息的阶跃现象。

图8、图9分别展示了电机加速、减速时两种估算方法估算的位置信息以及误差,传统估算方法所计算出的位置信息误差范围达到了 $\pm 2.5\%$,而牛顿插值估算法计算出的位置信息误差降到了 $\pm 0.6\%$ 以内。从图8(b)、图9(b)可以看出,电机转速发生变化时牛顿插值估算法能更加平滑、准确地估算转子位置信息。

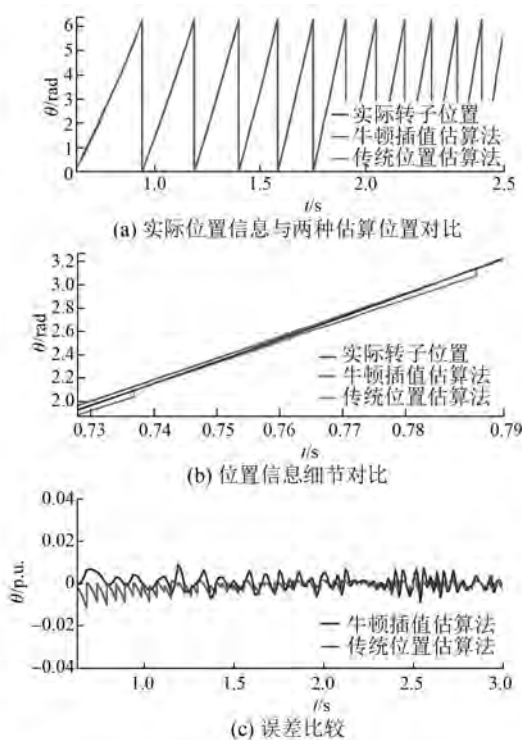


图8 电机加速时位置信息

4 结 语

经过对传统转子位置估算方法的分析,在霍尔信号到来时,若该算法的估算转子位置与实际转子位置存在差异,会由估算值强行纠正至实际值,这将导致输出的位置信息产生阶跃。针对传统位置估算方法的缺陷,本文提出了一种改进的转子位置估算方法,利用两次牛顿插值法对位置信息进行预测估算。首先由牛顿插

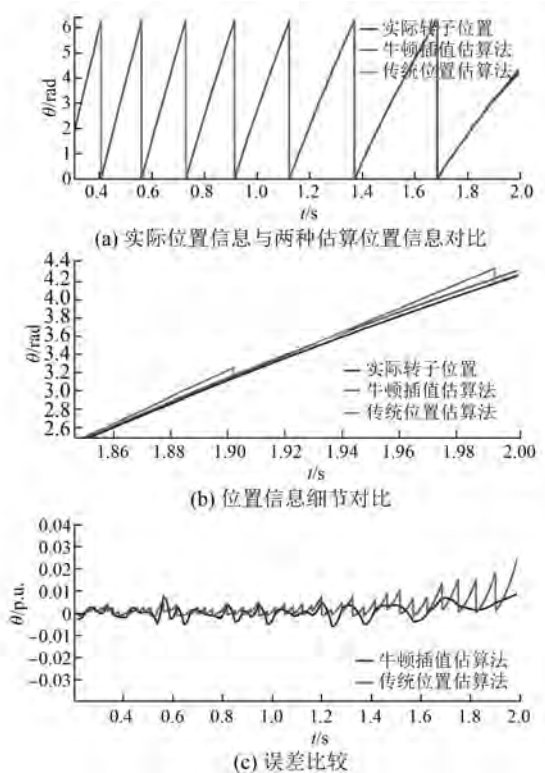


图9 电机减速时位置信息

值法对距离当前时刻最近的3个实际霍尔信号点进行曲线拟合,预估算下一个霍尔信号点,一直利用最新实际点修正拟合曲线提高位置信息的准确度。再次利用牛顿插值法对第1次牛顿插值所估算出的最新3个霍尔信号点进行曲线拟合,由该拟合曲线插值计算当前时刻转子位置。该方法消除了传统转子位置估算方法存在的阶跃现象,提高了闭环系统的稳定性,并在Plecs仿真平台上对算法进行了深入研究,仿真结果表明提出的新算法可以得到更平稳、准确的转子位置信息。

【参考文献】

- [1] 朱孟美,张云,解兆延,等.基于霍尔位置传感器的电动汽车用永磁同步电机的控制[J].电机与控制应用,2016,43(11): 23-27.
- [2] MEHTA H, THAKAR U, JOSHI V, et al. Hall sensor fault detection and fault tolerant control of PMSM drive system [C] // 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), Pune, 2015: 624-629.

(下转第85页)

小了 0.231%。

【参考文献】

- [1] 程明,张淦,花为.定子永磁型无刷电机系统及其关键技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5204-5220.
- [2] HAO L, LIN M Y, XU D, et al. Cogging torque reduction of axial field flux-switching permanent magnet machine by adding magnetic bridge in stator tooth [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2014,24(3):1-5.
- [3] ISHAK D. Design improvement and performance analysis of 12Slot-10Pole permanent magnet flux switching machine with field excitation coils [C] // Power Engineering and Optimization Conference, 2011: 202-207.
- [4] SULAIMAN E, KOSAKA T. Design improvement and performance analysis of 12s-10p permanent magnet flux switching machine with field excitation coil [J]. Journal of Electrical Systems,2012,8(4):425-432.
- [5] 王晨,曹光华,陈栋.一种削弱内置式永磁电动机齿槽转矩的新方法[J].微特电机,2015,43(1):9-12.
- [6] 崔薇佳,黄文新,邱鑫.基于 Ansoft 的内置式永磁电机齿槽转矩优化研究[J].电机与控制应用,2014,41(7):27-31.
- [7] JIN M J, WANG Y, SHEN J X, et al. Cogging torque suppression in a permanent magnet flux-switching integrated-starter-generator [J]. IET Electric Power Applications,2010,4(8):647-656.
- [8] FEI W Z, LUK P C K, SHEN J X, et al. Permanent magnet flux-switching integrated starter generator with different rotor configurations for cogging torque and torque ripple mitigations [J]. IEEE Transactions on Industry Application,2011,47(3):1247-1256.
- [9] FEI W, LUK P C K, SHEN J X. Torque analysis of permanent magnet flux switching machines with rotor step skewing [J]. IEEE Trans Magn,2012,48(10):2664-2673.
- [10] 李健,王爱元.磁通切换永磁电动机的齿槽转矩削弱研究[J].上海电机学院学报,2015,18(2):82-88.
- [11] WANG D H, WANG X H, SANG Y J. Reduction on cogging torque in flux-switching permanent magnet machine by teeth notching schemes [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48 (11): 4228-4231.
- [12] ZHAO J, YAN Y S, LI B, et al. Influence of different rotor teeth shapes on performances of flux switching permanent magnet machine used for electric vehicles [J]. Energies,2014,7(12):8056-8075.
- 收稿日期:2018-02-06
-
- (上接第 23 页)
- [3] ZHAO Y, HUANG W X, YANG J F, et al. A PMSM rotor position estimation with low-cost Hall-effect sensors using improved PLL [C] // 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Busan, 2016: 804-807.
- [4] 王高林,杨荣峰,于泳,等.内置式永磁同步电机无位置传感器控制[J].中国电机工程学报,2010,30(30):93-98.
- [5] 栾捷,陈阳生.基于低分辨率位置传感器的电动汽车用轮毂电机的控制[J].机电工程,2013,30(5):524-529.
- [6] ZHANG X, ZHANG W. An improved rotor position estimation in PMSM with low-resolution hall-effect sensors [C] // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, Hangzhou, 2014: 2722-2727.
- [7] KREINDLER L, IACOB I, CASARU G, et al. PMSM drive using digital hall position sensors for light EV applications [C] // 2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, 2015: 199-204.
- [8] YOO A, SUL S K, LEE D C, et al. Novel speed and rotor position estimation strategy using a dual observer for low-resolution position sensors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (12): 2897-2906.
- [9] VANSOMPEL H, DE B F, MELKEBEEK J. Improving the rotor position estimation in permanent-magnet synchronous machines with a low-resolution position sensor [C] // The XIX International Conference on Electrical Machines,2010:1-6.
- 收稿日期:2017-12-04