doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2019.04.015

基于六霍尔的无刷直流电机换相转矩脉动补偿

郝晓宇,杨国庆,唐勇斌

(航天科工智能机器人有限责任公司,北京 100074)

摘 要:针对永磁无刷直流电动机换相过程进行理论分析,提出了一种采用六路霍尔的无刷直流 电机换相方法,补偿由于换相引起的转矩脉动。仿真结果表明,与常规三路霍尔的换相方式相比, 采用六路霍尔的换相方式使脉动幅值减小了17%。结果证明,六霍尔换相方法可以有效补偿无刷 直流电机换相转矩脉动。

关键词:无刷直流电机;转矩脉动;换相

中图分类号:TM381 文献标志码:A 文章编号:2095-8110(2019)04-0102-06 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A Commutation Torque Ripple Reduction Method for Brushless DC Motors Based on Six-way Hall Position Sensors

HAO Xiao-yu, YANG Guo-qing, TANG Yong-bin

(Aerospace Science & Industry Intelligent Robot Co., Ltd., Beijing 100074, China)

Abstract: Based on the theoretical analysis of the commutation torque ripples of permanent magnet brushless DC motors(BLDCM), a method based on six-way Hall position sensors is proposed to compensate the commutation torque ripples. Simulation result shows that, compared with traditional method based on three-way hall position sensors, the torque ripples decrease by 17% using the proposed method, which verifies the effectiveness of the proposed method in compensating the commutation torque ripples of BLDCM.

Key words: BLDCM; Torque ripple; Commutation

0 引言

无刷直流电机体积小、质量小、散热容易、可靠 性高,既具有交流电动机结构简单、运行可靠、维护 方便、运行寿命长等优点,还具有直流电动机调速 性能好、控制方法灵活多变、效率高、起动转距大、 过载能力强、无换向火花、无无线电干扰、无励磁损 耗等优点^[1-2]。因此广泛用于军事工业领域,它是机 载、弹载及陆用等装备自动控制系统中的重要组成 部分,其性能和控制精度直接影响全系统的控制品 质,是现代精确打击武器的重要执行部件^[3-5]。但无 刷之流电机特有的转矩波动会造成电机的转速不 稳定、噪声大,严重时还会影响系统的稳定性,限制 了无刷直流电机在高精确度伺服系统中的应用。 无刷直流电机的转矩波动是无刷直流电机最突出 的问题,近年来,无刷直流电机的转矩波动及其抑 制技术一直成为无刷直流电机的研究热点。分析 转矩脉动的形成成了无刷直流电机控制的重要研 究内容,具有十分重要的意义^[6-8]。

造成无刷直流电机转矩波动有多方面原因,包 括电磁转矩产生原理引起的转矩波动、电流换相引 起的转矩波动、齿槽效应引起的转矩波动,还有电

收稿日期:2018-07-03;修订日期:2018-07-27

作者简介:郝晓宇(1988-),女,硕士,工程师,主要从事伺服电机方面的研究工作。

枢反应和电机工艺缺陷引起的转矩波动等。本文 主要分析了无刷直流电机电流换相引起的转矩波 动,并对其进行了补偿。

霍尔位置传感器是无刷直流电机系统的组件 之一,其作用是检测无刷直流电机主转子在运动过 程中对于定子绕组的相对位置。将永磁转子磁场 的位置信号转换成电信号,为逻辑开关电路提供正 确的换相信息,以控制它们的导通和截止,使电机 电枢绕组中的电流随着转子位置的变化按次序换 相,形成气隙中步进式磁场,驱动永磁转子连续不 断地旋转。霍尔位置传感器在无刷直流电机中应 用时需要多个组合,才能将电机的一个电周期区分 为若干个开关状态。霍尔位置传感器的最小个数 等于电机相数,因此三相无刷直流电机最少需要三 路霍尔位置传感器。常规无刷直流电机通常采用 三路霍尔进行三相六状态工作模式,本文主要针对 该工作模式下的永磁无刷直流电动机换相转矩脉 动进行研究,提出了一种采用六路霍尔进行三相十二状态的无刷直流电机换相方法。

1 换相转矩脉动分析

无刷直流电机采用方波电流驱动模式,如图 1 所示,三相星型连接的无刷直流电机绕组端 A、B、C 连接到由 6 个功率开关器件 (Q1~Q6)组成的三相 桥式逆变器的 3 个桥臂上。霍尔位置传感器检测转 子在运动过程中对于定子绕组的相对位置,将转子 磁场的位置信号转换成电信号,经控制电路与斩波 信号进行逻辑变换后产生脉宽调制(Pulse Width Modulation,PWM)信号(G1~G6);再经过驱动电 路对其进行放大后送至逆变器,驱动功率开关器件 (Q1~Q6)按一定的顺序导通,从而控制电机 A、B、 C 三相绕组按一定的顺序导通,在电机中产生跳变 的旋转磁场^[9],驱动转子连续不断地旋转。



Fig. 1 The principle diagram of BLDCM

无刷电机的换相由霍尔传感器检测的转子位 置决定,霍尔传感器的每个霍尔电路输出占空比是 1:1,即逻辑1和逻辑0,各占180°电角度。当霍尔 元件标志面面向永磁体 S 极时,输出逻辑为0;当霍 尔元件标志面面向永磁体 N 极时,其输出逻辑为1。 霍尔电路输出是以它们的上跳沿和下降沿时刻来 决定电机的换相点。

无刷直流电机大多采用三霍尔安装方式,如图 4 中 HA、HB、HC 位置。在一对磁极下,三路霍尔 传感器 HA、HB、HC 安装位置均布,间隔为 120°电 角度,永磁体每转过 60°电角度,三路霍尔传感器输 出逻辑变化1次,在360°的一个电气周期时间内共变化6次,如图2所示。



Fig. 2 The logic output of three-way Hall position sensors

霍尔逻辑变化对应三相绕组的一种导通状态, 在一个电气周期时间内,三相绕组导通状态分为6 个状态,每个状态只有两相绕组导通,每一个状态 持续60°电角度,每相绕组导通120°电角度。假定 功率开关器件在六导通状态下按时间顺序排列为 Q1Q6、Q1Q2、Q2Q3、Q3Q4、Q4Q5、Q5Q6,从第6 个状态换相到第1个状态时,电机三相由CB两相 导通换相为AB两相导通,C相通过D2续流。

换相过程中电机三相端电压平衡方程为

$$\begin{cases} U_{a} = U_{d} = Ri_{a} + e_{a} + U_{n} + L_{M}Pi_{a} \\ U_{b} = 0 = Ri_{b} + e_{b} + U_{n} + L_{M}Pi_{b} \\ U_{c} = 0 = Ri_{c} + e_{c} + U_{n} + L_{M}Pi_{c} \end{cases}$$
(1)

式中: i_a 、 i_b 、 i_c 为定子绕组相电流;R为每相绕 组的电阻; L_M 为每相绕组的自感减去相邻两相绕 组间的互感; U_d 为直流母线电压;P为微分算子。

其中,U_n为电机中性点电压

$$U_{\rm n} = \frac{U_a + U_b + U_c}{3} - \frac{e_a + e_b + e_c}{3} \qquad (2)$$

$$\begin{cases} e_{a}(t) = \omega k_{e} \\ e_{b}(t) = -\omega k_{e} \\ e_{c}(t) = \omega k_{e} \left(1 - \frac{6\omega}{\pi}t\right) \end{cases}$$
(3)

电流初始条件为

$$i_a = 0, \quad i_b = -I, \quad i_c = I \tag{4}$$

解出相电流表达式为

$$\begin{cases} i_{a}(t) = \left[\frac{2U_{d} - 2\omega k_{e}}{3R} + \frac{2\omega^{2} k_{e} L_{M}}{\pi R}\right] (1 - e^{\frac{-R}{LM}t}) - \frac{2\omega^{2} k_{e}}{\pi R}t \\ i_{b}(t) = \left[\frac{-U_{d} + 4\omega k_{e}}{3R} + \frac{2\omega^{2} k_{e} L_{M}}{\pi R}\right] (1 - e^{\frac{-R}{LM}t}) - \frac{2\omega^{2} k_{e}}{\pi R}t - Ie^{\frac{-R}{LM}t} \\ i_{c}(t) = \left[\frac{-U_{d} - 2\omega k_{e}}{3R} - \frac{4\omega^{2} k_{e} L_{M}}{\pi R}\right] (1 - e^{\frac{-R}{LM}t}) + \frac{4\omega^{2} k_{e}}{\pi R}t + Ie^{\frac{-R}{LM}t} \end{cases}$$

$$(5)$$

因为换相时间一般比较短,将式(5)一阶泰勒展 开, $e^{\frac{-R}{L_M}t} = 1 - \frac{-R}{L_M}t$,可得到电流表达式近似计算为 $\int_{i_a}(t) = \frac{2U_d - 2\omega k_e}{2L}t$

$$t = \frac{3IL_{\rm M}}{U_{\rm d} + 2\omega k_{\rm e} + 3IR} \tag{7}$$

电磁转矩为

$$T_{e} = \frac{e_{a}i_{a} + e_{b}i_{b} + e_{c}i_{c}}{\omega} = 2k_{e} |i_{b}| \qquad (8)$$

转矩脉动为

$$\Delta T_{e} = T_{e} - 2k_{e}I = \frac{2k_{e}(U_{d} - 4k_{e}\omega)}{U_{d} + 2k_{e}\omega + 3IR} \qquad (9)$$

当 $U_d = 4\omega k_e$ 时, i_a 与 i_e 的变化率大小相等, $\Delta T_e = 0$,没有转矩脉动,如图 3(a)所示;

当 $U_d > 4\omega k_e$ 时, i_c 还未降为0, i_a 已达到稳态值, $\Delta T_e > 0$,电磁转矩增加,如图3(b)所示;

当 $U_d < 4\omega k_e$ 时, i_e 还未降为0, i_a 已达到稳态 值, $\Delta T_e < 0$,电磁转矩减小,如图3(c)所示。





Fig. 3 The variation trend of electric current and torque with the commutation method based on three-way Hall position sensors

可见采用三霍尔六状态工作模式时,换相过程 中三相电流分别处于开通、关断和非换相状态。由 于绕组电感的存在^[10],关断相和开通相电流变化 率不相等,使得非换相电流在换相期间发生变化, 从而产生换相转矩脉动。

2 六霍尔换相模式原理分析

换相转矩脉动可造成电机抖动,产生噪声,增 加谐波污染。无刷直流电机在高速区和低速区的 换相转矩波动有所不同,研究控制方法时大都分开 考虑。电流反馈法和滞环电流法较好地解决了低 速时的换向转矩脉动问题,但在高速时效果不 佳^[11-13]。电机工作在高速区段,换相期间,由于关 断相电流下降率快于开通相上升率,造成非换相相 电流凹陷,使换相期间电磁转矩减小。因此,在高 速区对换相期间电流补偿的原则是,通过调节关断 相的电流下降率减小非换相电流的波动。现采用 一种六霍尔换相模式来减小高速时转矩脉动。 在原来三路霍尔传感器 HA、HB、HC 的基础 上再增加三路 HA'、HB'、HC',新增加的三路霍尔 传感器的位置相对原来霍尔传感器位置分别相差 30°电角度,安装位置如图 4 所示。电机每旋转 30° 电角度,六路霍尔传感器输出逻辑变化 1 次,在 360° 的一个电气周期时间内共变化 12 次,如图 5 所示。 每次变化对应三相绕组的一种导通状态,每个周期 有 12 个状态,每一个状态持续 30°电角度。





图 4 霍尔安装位置图





Fig. 5 The logic output of six-way Hall position sensors

假定功率开关器件在六导通状态下按时间顺 序 排 列 为 Q5Q6Q1、Q1Q6、Q1Q6Q2、Q1Q2、 Q1Q2Q3、Q2Q3、Q2Q3Q4、Q3Q4、Q3Q4Q5、 Q4Q5、Q4Q5Q6、Q5Q6,从第 12 个状态换相到第 1 个状态时,电机三相由 CB 两相导通换相为 ABC 三 相导通,A 相开始建立正电流。

$$\begin{cases} U_{a} = U_{d} = Ri_{a} + e_{a} + U_{n} + L_{M}Pi_{a} \\ U_{b} = 0 = Ri_{b} + e_{b} + U_{n} + L_{M}Pi_{b} \\ U_{c} = U_{d} = Ri_{c} + e_{c} + U_{n} + L_{M}Pi_{c} \end{cases}$$
(10)
相导通过程中电机三相反电势为

$$\begin{cases} e_{a}(t) = \omega k_{e} \\ e_{b}(t) = -\omega k_{e} \\ e_{c}(t) = \omega k_{e} \left(1 - \frac{6\omega}{\pi}t\right) \end{cases}$$
(11)

可以解得相电流为

А

$$\begin{cases} i_{a}(t) = \frac{U_{d} - 2\omega k_{e}}{3L_{M}}t \\ i_{b}(t) = -I + \left[\left(\frac{-2U_{d} + 4\omega k_{e}}{3L_{M}} + I \frac{R}{L_{M}} \right) \right] t \quad (12) \\ i_{c}(t) = I + \left[\left(\frac{U_{d} - 2\omega k_{e}}{3L_{M}} - I \frac{R}{L_{M}} \right) \right] t \end{cases}$$

电机转过 30°电角度,用时 t₁。功率开关器件 Q1Q6导通,Q5关断,电机三相由为 ABC 三相导通 变为 AB 两相导通,换相过程中电机三相端电压平 衡方程为

$$\begin{cases} U_{a} = U_{d} = Ri_{a} + e_{a} + U_{n} + L_{M}Pi_{a} \\ U_{b} = 0 = Ri_{b} + e_{b} + U_{n} + L_{M}Pi_{b} \\ U_{c} = 0 = Ri_{c} + e_{c} + U_{n} + L_{M}Pi_{c} \end{cases}$$
(13)

C相电流经D2续流然后降为0的过程中,三相反电势为

$$\begin{cases} e_{a}(t) = \omega k_{e} \\ e_{b}(t) = -\omega k_{e} \\ e_{c}(t) = \omega k_{e} \left(1 - \frac{6\omega}{\pi}(t+t_{1})\right) \end{cases}$$
(14)

可以解得三相电流为

$$\begin{cases} i_{a}(t) = I_{a} + \left[\left(\frac{2U_{d} - 2\omega k_{e}}{3L_{M}} - \frac{2\omega^{2}k_{e}t_{1}}{\pi L_{M}} - I_{a}\frac{R}{L_{M}} \right) \right] t \\ i_{b}(t) = I_{b} + \left[\left(\frac{-U_{d} + 4\omega k_{e}}{3L_{M}} - \frac{2\omega^{2}k_{e}t_{1}}{\pi L_{M}} - I_{b}\frac{R}{L_{M}} \right) \right] t \\ i_{c}(t) = I_{c} + \left[\left(\frac{-U_{d} - 2\omega k_{e}}{3L_{M}} + \frac{4\omega^{2}k_{e}t_{1}}{\pi L_{M}} - I_{c}\frac{R}{L_{M}} \right) \right] t \end{cases}$$

$$(15)$$

由式(12)与式(15)三相电流表达式可以看出, 当电机处于高速区域时,即当U_d < 4ωk_e时,非换相 B相电流的绝对值先上升后下降,而不是像式(6)中 一直下降,有利于减小非换相电流的波动。由换相 转矩与非换相电流的关系可知,换相转矩波动减 小,六霍尔换相模式下电流及转矩变化趋势如图 6 所示。



图 6 六霍尔换相模式下电流及转矩变化趋势 Fig. 6 The variation trend of electric current and torque with the commutation method based on six-way Hall position sensors

而当电机处于低速阶段,即当U_d > 4ωk_e时,非 换相 B 相电流的绝对值与式(6)变化趋势相同。因 此,六霍尔换相方式适用于高速阶段的无刷直流电 机,可以有效减小电机的换相转矩波动。

3 仿真分析

为了验证六霍尔换相模式的可实现性,搭建无 刷直流电机换相过程的数学模型,分别采用三霍尔 和六霍尔两种换相模式进行仿真。

三霍尔换相模式下,电机通过三路霍尔位置传 感器检测转子位置输出逻辑信号,转子每转过 60°, 输出逻辑变换触发电机换相。在 360°的一个电气 周期时间内共有 6 个状态,三相绕组按导通状态 AB、AC、BC、BA、CA、CB 循环导通。

六霍尔换相模式下,电机通过六路霍尔位置传 感器检测转子位置输出逻辑信号,转子每转过 30°, 输出逻辑变换触发电机换相。在 360°的一个电气 周期时间内共有 12 个状态,三相绕组按导通状态 ACB、AB、ABC、AC、ABC、BC、BAC、BA、BCA、 CA、CAB、CB循环导通。

对无刷直流电机施加额定负载 2 N•m,仿真 结果为:三霍尔换相模式下,电机稳态的转矩脉动 为 0.6N•m,如图 7 所示;六霍尔换相模式下,电 机稳态的转矩脉动为 0.5N•m,如图 8 所示。仿 真结果表明,采用六霍尔换相模式使该无刷直流 电机转矩脉动比采三霍尔换相模式时转矩脉动减 小 17%。



Fig. 7 The torque with the commutation method based on three-way Hall position sensors



Fig. 8 The torque with the commutation method based on six-way Hall position sensors

4 结论

本文对无刷直流电机的换相脉动的产生进行 了详细分析和数学推导,为了补偿电机换相时非换 相电流的波动,提出了一种采用六路霍尔进行三相 十二状态的无刷直流电机换相方法,并对此方法进 行数学原理推导证明该理论的可实现性。分析与 仿真结果表明,采用六霍尔换相模式可有效抑制换 向转矩脉动。

参考文献

 [1] 谭建成.永磁无刷直流电机技术[M].北京:机械工 业出版社,2011.
 Tan Jiancheng. Permanent magnet brushless DC motor technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2011(in Chinese).

- [2] 张深.无刷直流电动机的原理及应用[M].北京:机 械工业出版社,2004:7.
 Zhang Shen. Principle and application of brushless DC motor[M]. Beijing: China Machine Press, 2004:7 (in Chinese).
- [3] 黄琳,段志生,杨剑影.近空间高超声速飞行器对控制科学的挑战[J].控制理论与应用,2011,28(10): 1496-1505.

Huang Lin, Duan Zhisheng, Yang Jianying. Challenges of control science in near space hypersonic aircrafts[J]. Control Theory & Application, 2011, 28(10): 1496-1505(in Chinese).

- Guo H, Xu J, Kuang X. A novel fault tolerant permanent magnet synchronous motor with improved optimal torque control for aerospace application [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28 (2): 535-544.
- [5] 张新华,黄建.大功率高性能多余度宇航电传伺服 技术发展综述[J].导航定位于授时,2017,4(5):
 1-7.

Zhang Xinhua, Huang Jian. Review on the development of high power and high-performance redundant aerospace electric servo system[J]. Navigation Positioning & Timing, 2017, 4(5): 1-7(in Chinese).

- [6] Won C, Song J H, Choy I. Commutation torque ripple reduction in brushless DC motor drives using a single DC current sensor[C]// Proceedings of 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE, 2002: 985-990.
- [7] 齐蓉,林辉,陈明.无刷直流电机换向转矩脉动分析 与抑制[J]. 电机与控制学报,2006,10(3): 287-290.

Qi Rong, Lin Hui, Chen Ming. Analysis and attenuation on commutation torque ripples of brushless DC motor[J]. Electric Machines and Control, 2006, 10
(3): 287-290(in Chinese).

[8] 王兴华,励庆孚,王署鸿,等.永磁无刷直流电机换 相转矩波动的分析研究[J].西安交通大学学报, 2003,37(6):612-616.

Wang Xinghua, Li Qingfu, Wang Shuhong, et al. Analysis of the commutation torque ripple of permanent magnet brushless DC motors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(6): 612-616(in Chinese).

- [9] 李钟明,刘卫国.稀土永磁电机[M].北京:机械工 业出版社,1999.
 Li Zhongming, Liu Weiguo. Rare earth permanent magnet motor[M]. Beijing: China Machine Press, 1999(in Chinese).
- [10] Kim C G, Lee J H, Youn M J. A commutation torque minimization method for brushless DC motors with trapezoidal electromotive force [C]// ICPE. Kore, 1998(1): 476-481.
- [11] Dai M, Keyhani A, Sebastian T. Torque ripple analysis of a PM brushless DC motor using finite element method[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 40-45.
- [12] 师蔚, 蔚兰, 张舟云, 等. 无刷直流电动机换相转矩脉动控制[J]. 微特电机, 2008, 36(5): 25-29.
 Shi Wei, Wei Lan, Zhang Zhouyun, et al. Control and implement of commutating torque ripples for brushless DC motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 2008, 36(5): 25-29(in Chinese).
- [13] 王海峰,任章.无刷直流电动机的转矩脉动控制技术[J]. 微特电机,2002,30(6):36-39.
 Wang Haifeng, Ren Zhang. Pulsating torque minimization techniques for brushless DC motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 2002, 30(6): 36-39 (in Chinese).