

文章编号 1004-924X(2012)12-2712-08

## 数字驱动系统死区效应的双刷新补偿

王 雷\*, 王 龙, 唐学军, 林灿发

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**针对死区效应会导致永磁同步直线电机相电流失真、推力波动,从而限制其在精密气浮工作台等高精度、低频轻载场合应用的问题,提出了一种根据相电流极性改变驱动器输入信号脉冲宽度来补偿死区效应的方法,双刷新补偿法(DUDTC)。首先,分析了死区效应引起的驱动器输出信号脉冲宽度变化,给出了脉宽调制(PWM)信号上升沿和下降沿的补偿与相电流极性间的关系;然后,在 Matlab/Simulink 中对死区效应的影响和双刷新补偿法的作用进行仿真;最后,在直线气浮工作台系统中实现了双刷新补偿法。实验显示,该方法相位延迟仅 0.5 个伺服周期,在电机速度开环和闭环下均使相电流畸变减小,波形正弦化。结果表明,双刷新补偿法能有效改善直线电机电流环性能,且代码量少、移植性好,适用于各类数字开关驱动系统。

**关键词:**死区补偿;永磁同步直线电机;精密工作台;电流环

**中图分类号:**TM351 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122012.2712

## Double updating dead-time compensation for digital drive system

WANG Lei\*, WANG Long, TANG Xue-jun, LIN Can-fa

(*Institute of Ultra-precision Optical&Electronic Instrument Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: hit\_wanglei@163.com*

**Abstract:** Dead-time effect results in distorted currents and force pulsations of Permanent Magnetic Linear Synchronous Motors(PMLSM), which limits the uses of precision stages in conditions of high accuracy, low frequency and lighter loadings. To compensate the Dead-time effect, this paper proposed a Double Updating Dead-time Compensation (DUDTC) method to correct each input pulse width of the motor driver according to phase current polarity. Firstly, the effect of dead-time on driver output pulses was analyzed and the correlation between correction of Pulse Width Modulation (PWM) and phase current polarities was given. Then, the method was evaluated through simulations in Matlab/Simulink and experiments in a linear-stage system. The results indicate that the phase error of DUDTC is only 0.5 servo periods and its phase current distortions is reduced. The DUDTC shows less codes and good portability, and is an efficient method to compensate the dead-time effect in digital drive systems.

**Key words:** Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor(PMLSM); dead-time compensation; precision stage; current loop

收稿日期:2012-06-08;修订日期:2012-06-28.

基金项目:02 科技重大专项资助项目(No. 2009ZX02021);国家自然科学基金资助项目(No. 50905046)

## 1 引 言

当前精密直线工作台多采用静压气浮导轨导向、直线电机无接触直接驱动的形式<sup>[1]</sup>,这种结构具有快速、行程大、低速时无爬行等特点,已被广泛用于激光直写机、光刻机等高精度精密机械和仪器中。但静压气浮导轨摩擦系数小会使其在工作时易受直线电机线缆扰动、直线电机推力波动<sup>[2]</sup>等扰动的影响,限制了其在超精密场合的应用。直线电机在高精密机械系统中应用时,大部分扰动都可以通过在直线电机驱动器中加入扰动观测器或是采用高带宽的电流环加以有效抑制<sup>[3]</sup>,而对于上述方法不能有效抑制的振动就需要考虑采用其它方法来消除。

用于直线气浮工作台系统的直线电机多为三相永磁同步直线电机(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM),其驱动器多采用空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)技术,通过控制三相桥臂上功率器件瞬时的不同开关组合使电机绕组中产生幅值恒定的圆形磁场,从而得到平稳的电机推力<sup>[4]</sup>。由于功率器件根据输入信号变化而导通和关断时会有一定的延时,同一桥臂上 2 个功率器件受两路完全互补的输入信号控制时就有可能全部导通出现短路,从而造成器件的损坏而发生危险。实际应用中是在控制同一桥臂上 2 个功率器件导通和关断的信号中加入一个死区时间来保证同一时刻同一桥臂上最多只有一个功率器件导通。但是,这个为保护器件而加入的死区时间和功率器件本身的开关时间的共同作用会使驱动器实际输出的信号相对于理想 SVPWM 信号发生脉冲宽度上的改变,这一现象被称为死区效应。死区效应会使电机相电流失真,这时电机绕组中产生的电磁场不再是规则的圆形,从而引起直线电机推力波动,在直线气浮工作台系统这类低频轻载的应用场合,直线电机的推力波动会严重影响系统运行性能,而高带宽的电流环并不能完全抑制死区效应,必须采用专门的死区补偿方法来解决这一问题<sup>[5]</sup>。

本文在详细分析死区效应的产生机理和其对驱动器输出脉冲宽度影响的基础上,提出了双刷

新死区效应补偿法(Double Update Dead-time Compensation, DUDTC)。该方法通过改变驱动器输入信号脉宽来抵消死区效应对驱动器输出信号脉宽的影响,从而消除死区效应引起的电机相电流畸变和推力脉动。通过仿真和实验验证了该方法用于永磁同步直线电机驱动系统时的有效性。

## 2 死区效应分析

### 2.1 死区效应

图 1 给出了三相永磁同步直线电机驱动器的原理图。功率器件(IGBT 或 MOSFET 等) $G_1—G_6$ 和快速恢复二极管  $D_1—D_6$  组成的三相桥臂连接在直流电源  $V_d$  的正负两端,SVPWM Generator 输出的 PWM 信号( $U_{a+}, U_{a-}, U_{b+}, U_{b-}, U_{c+}, U_{c-}$ )控制功率器件开关状态的转化,三相输出端 A, B, C 与电机三相相连。

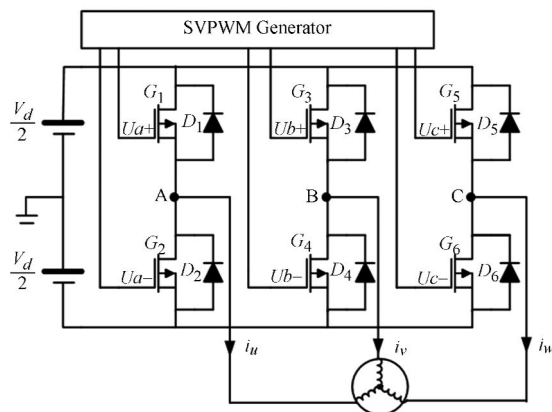


图 1 三相电机驱动器

Fig. 1 3-phase motor driver

以 A 相桥臂为例分析死区效应的产生。设输入功率器件的 PWM 信号为高电平时功率器件导通,低电平时功率器件关断。当上桥臂功率器件导通时,A 相输出电压应为  $V_d/2$ ;当下桥臂功率器件导通时,A 相输出电压应为  $-V_d/2$ 。规定三相电流  $i_u, i_v, i_w$  以流入电机为正方向。分析中均忽略功率器件和二极管的压降。图 2 给出了 A 相桥臂理想和实际的输入输出信号。图 2(a)为 A 相上下桥臂输入的两路互补的中心对称理想 PWM 信号  $U_{a+}$  和  $U_{a-}$ 。图 2(b)为忽略死区效应和功率器件开关时间后桥臂输出端 A 的理想输出信号。图 2(c)为加入防止桥臂直通的死区

时间  $T_d$  后的输入信号,这里将死区时间加在信号的上升沿。当上下桥臂输入信号都为低电平时,  $G_1$  和  $G_6$  关断,此时如果 A 相相电流  $i_u$  为正,则此电流只能由负电源端流经二极管  $D_2$  流入电机 A 相,  $D_1$  关断,  $D_2$  导通,所以此时 A 相桥臂输出电压应为  $-V_d/2$ ,输出波形如图 2(d)所示,这里考虑了功率器件导通时输出信号的上升时间  $T_{on}$ 和关断时输出信号的下降时间  $T_{off}$ 。此时如果 A 相相电流  $i_u$  为负,则此电流只能由电机 A 相流出,经二极管  $D_1$  流向正电源端,  $D_1$  导通,  $D_2$  关断,所以此时 A 相桥臂输出电压应为  $+V_d/2$ ,输出波形如图 2(e)所示。

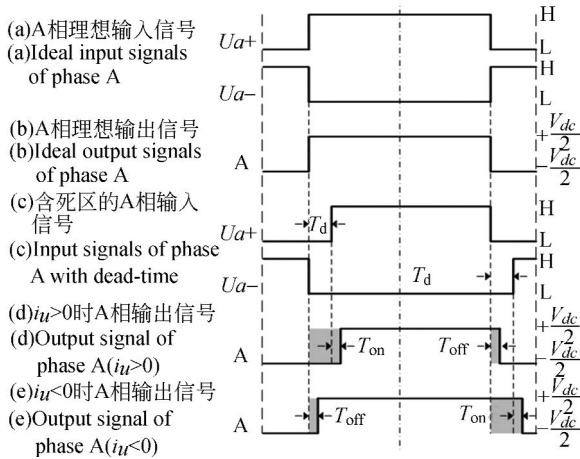


图 2 A 相输入输出信号

Fig. 2 Input and output signals of phase A

由以上分析可得,死区效应实际上就是由死区时间和器件的非理想性引起的输出信号脉宽的改变。图 3(a)为某一时刻三相桥臂理想的输出信号,设该时刻相电流  $i_u > 0, i_v < 0, i_w < 0$ ,则此

时三相桥臂受死区效应影响后实际输出信号如图 3(b)所示。与理想信号相比,当相电流为正时,该相实际输出信号在上升沿会减少  $T_d + T_{on}$ 时间,在下降沿会增加  $T_{off}$ 时间;当相电流为负时,在上升沿会减少  $T_{off}$ 时间,在下降沿会增加  $T_d + T_{on}$ 时间。与理想信号相比,每相实际输出信号的脉宽总会改变  $T_e = T_d + T_{on} - T_{off}$ 时间,但三相输出信号间的相位关系并未发生改变。

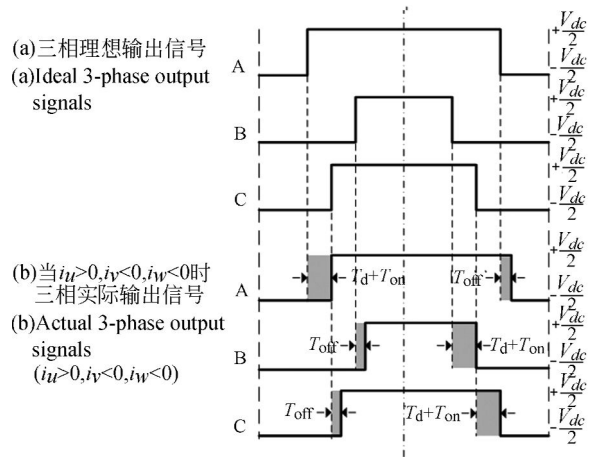


图 3 死区效应对三相输出信号脉宽的影响

Fig. 3 Influence of dead-time effect on pulse width of 3-phase output signals

2.2 死区效应仿真分析

基于以上对死区效应的分析,在 Matlab/Simulink 中建立基于 SVPWM 技术的三相永磁同步电机驱动模型<sup>[6]</sup>,包含旋转矢量给定、反 park 变换、空间矢量脉宽调制、集成 IGBT 功率模块及电机等环节,如图 4 所示。

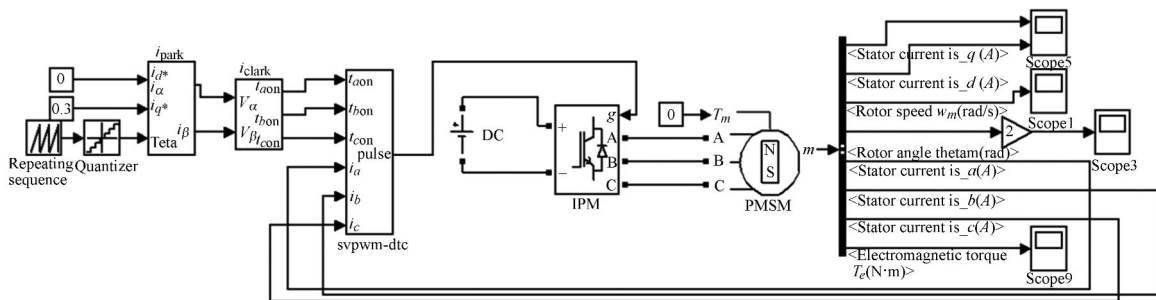


图 4 三相永磁同步电机驱动模型

Fig. 4 Driver model of 3-phase PMSM

利用该模型进行电机速度开环下死区效应的仿真。在仿真中,PWM 的载波频率设置为 10 kHz,同步转速设为 10 Hz,死区时间设为 3  $\mu$ s,功率器件开关时间设为 0.2  $\mu$ s。电机模型选用三相永磁同步旋转电机模型,绕组电阻为 18.7  $\Omega$ ,交直流电感为 0.027 H,极对数为 2。由仿真结果可以看出,死区效应导致:1. 电机相电流顶部失真,如图 5(a)所示;2. 电机转矩脉动,如图 5(b)所示;3. 电机转速脉动,如图 5(c)所示;4. 电机运行不平稳,如图 5(d)所示。

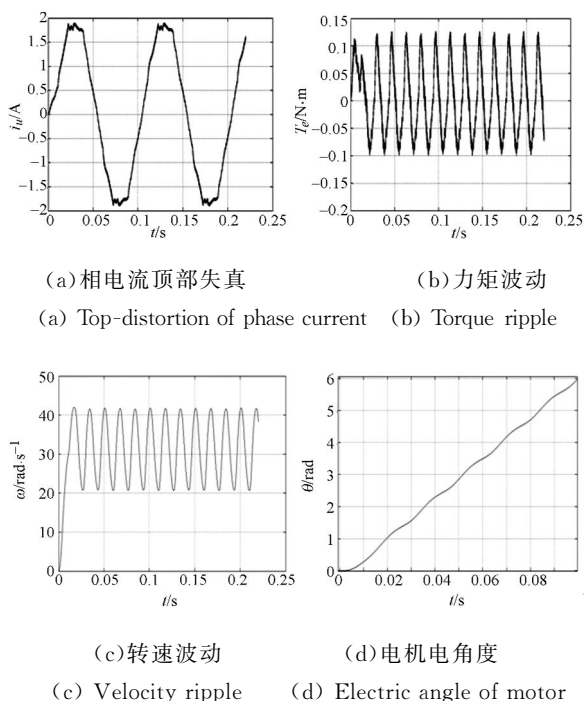


图 5 死区效应仿真结果  
Fig. 5 Simulation results of dead-time effect

### 3 双刷新死区效应补偿法

#### 3.1 死区效应补偿法

在电机低频轻载运行时驱动器的死区效应对电机电流环性能和电机运动性能有很大影响,虽然利用高带宽电流环可以在一定程度上削弱死区效应的影响,但是在纳米级气浮运动平台等对电机推力等性能要求极其苛刻的应用场合,有必要采用有效措施对死区效应进行补偿。

目前的死区补偿方法可以分为硬件方法和软件方法两类。Yoshihiro 等人提出了一种死区补偿的硬件方法<sup>[7]</sup>,即通过电路在功率器件的输出

端测量输出相电压的实际脉冲宽度,将实际脉冲宽度与理想脉宽之差反馈给控制器以补偿死区效应;吴茂刚等人提出了一种利用电压矢量补偿死区效应的方法<sup>[8]</sup>,即根据三相电流极性将死区效应对绕组旋转电磁矢量的影响等效为 6 个误差电压矢量,通过软件产生 6 个方向相反、大小相等的电压矢量以抵消误差矢量,以补偿死区效应;Jong 等人在  $d-q$  坐标系中基于功率器件压降和开关时间建立其数学模型,模型以实际  $q$  轴电流值作为输入,以模型输出  $q$  轴电压作为反馈并将其与理想  $q$  轴电压作比较,通过一个 PI 调节器闭环调整死区补偿时间,以使驱动器实际输出的  $q$  电压与理想值电压相同,从而补偿了功率器件非理想性对驱动器输出的影响<sup>[9]</sup>。以上介绍的补偿方法存在需要添加额外硬件电路、伺服周期内软件代码量大、相位滞后多等问题。

本文提出一种简单易行的死区效应补偿方法—双刷新补偿法(Double Updating Dead-Time Compensation, DUDTC)。即在中心对称的 PWM 输入信号周期中,根据当前相电流的极性分别对输入信号的上升沿和下降沿进行与死区效应互补的修改。使用经过修改后的 PWM 信号控制功率器件开关时,由于死区效应的作用,功率器件输出信号将接近理想输出信号,从而消除死区效应对驱动器输出的影响。实际应用该补偿法时,需要在每个 PWM 信号周期开始和周期中点时 2 次刷新脉冲宽度相关寄存器的值,故称之为双刷新补偿法。

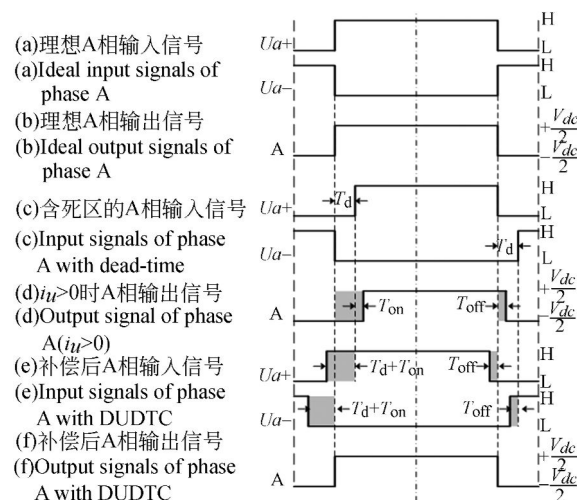


图 6 A 相信号的双刷新死区补偿  
Fig. 6 DUDTC on signals of phase A

以 A 相桥臂为例来说明死区效应的双刷新补偿方法。图 6 给出了当相电流  $i_u$  为正时的补偿过程。图 6(a) 为理想输入信号, 图 6(b) 为理想输出信号, 图 6(c) 为加入防止桥臂直通的死区时间  $T_d$  后的输入信号, 图 6(d) 为当  $i_u$  为正时双刷新补偿后的输入信号。由前面的分析可知, 当相电流为正时, 该相输出信号在上升沿会减少  $T_d + T_{on}$  时间, 在下降沿会增加  $T_{off}$  时间, 故在双刷新补偿中, 将上半桥臂的输入信号的脉宽在周期中心线左侧增加  $T_d + T_{on}$  时间, 在中心线右侧减少  $T_{off}$  时间, 下半桥臂输入信号也作出相应调整。图 6(e) 为功率器件的输入波形。当  $i_u$  为正时, 在上下桥臂输入信号都为低电平时,  $G_1, G_6$  关断, 此时电流由负电源端流经二极管  $D_2$  流向电机 A 相,  $D_1$  关断,  $D_2$  导通, 所以此时 A 相桥臂输出电压应为一  $V_d/2$ 。可以看出, 最终的输出波形与理想输出波形一致。

### 3.2 仿真验证

在上节中提到的 Matlab/Simulink 模型中加入死区效应双刷新补偿环节, 如图 7 所示。该环节根据每相相电流极性, 对 SVPWM 矢量运算得出的理想脉宽进行补偿, 最终得到经过死区补偿的 PWM 信号, 连接到功率模块控制信号输入端。

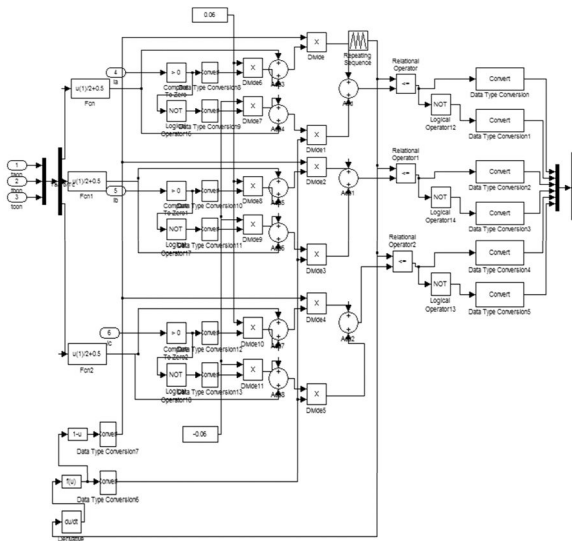


图 7 驱动模型中的双刷新补偿环节  
Fig. 7 DUDTC module in driving model

利用加入了双刷新死区补偿环节的三相永磁同步电机驱动模型进行电机速度开环仿真。由仿真结果可得: 电机相电流顶部削平现象得到改善, 相电流峰值增大, 如图 8(a) 所示; 电机转矩脉动

和转速脉动减弱了 50%, 如图 8(b)、8(c) 所示; 电机速度开环下运行较为平稳, 如图 8(d) 所示。

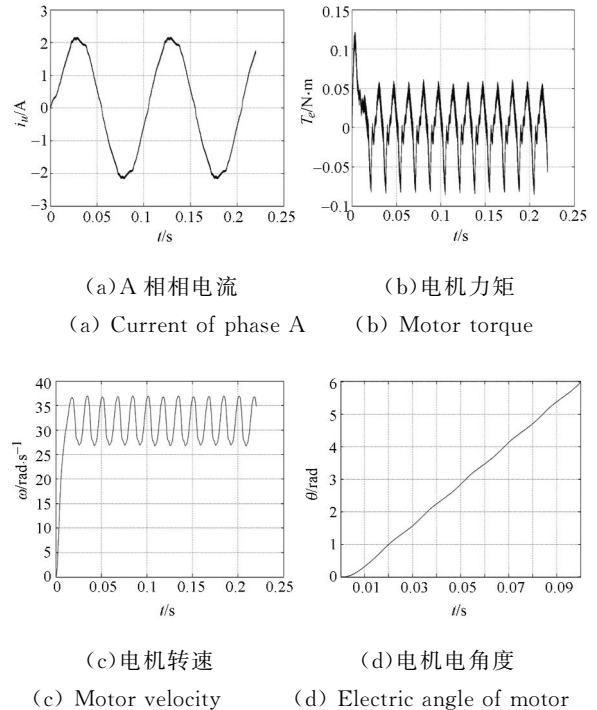


图 8 双刷新死区补偿法仿真结果

Fig. 8 Simulation results of DUDTC

## 4 死区补偿实验与结果

### 4.1 双刷新补偿法的实现

一维直线气浮工作台驱动实验系统由自制的驱动器(以 TMS320F2812 为核心控制器)、Park 公司永磁同步直线电机 Trilogly-410 和超精密光电仪器工程研究所自制的一维直线静压气浮导轨组成, 如图 9 所示。驱动器采用场定向控制(FOC)算法和空间矢量调制(SVPWM)算法, 采用三菱公司智能功率模块 PS21267 作为三相功率放大桥臂( $T_{on} = 0.3 \mu s$ ,  $T_{off} = 0.4 \mu s$ ), 驱动器开关频率为 16 kHz, 死区时间设为  $3 \mu s$ , 直线电机连续工作电流为 4.1 A, 最大电压为 330 V, 反电势常数为  $126 \text{ V/m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

驱动器核心控制芯片 TMS320F2812 含有 2 个事件管理器模块, 可以输出 6 路两两互补的中心对称 PWM 信号, 该芯片支持在事件管理器计数器发生下溢事件(underflow)和匹配事件(period match)时均更新决定 PWM 信号脉冲宽度的比较寄存器的值。可见, TMS320F2812 适合用来实现双刷新补偿法<sup>[10]</sup>。

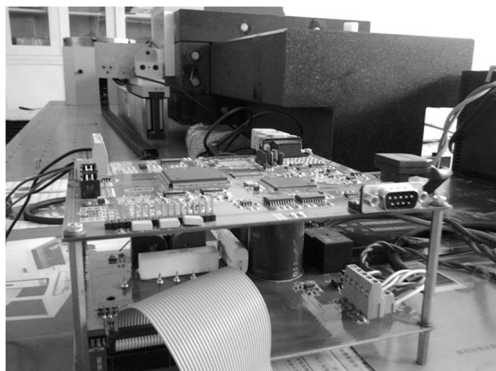


图 9 直线工作台驱动系统

Fig. 9 Driving system of linear stage

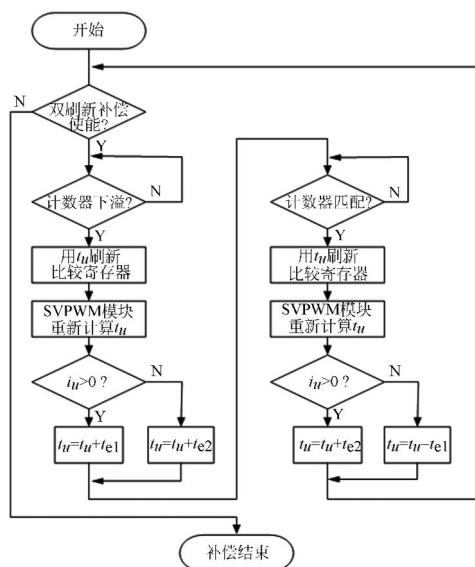


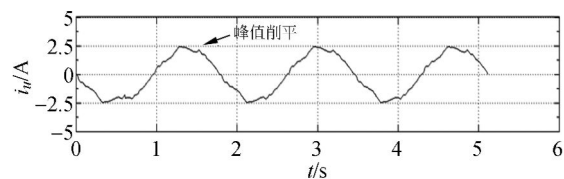
图 10 双刷新补偿法程序框图

Fig. 10 Block diagram of DUDTC

图 10 给出了利用 TMS320F2812 实现双刷新补偿方法的程序框图。这里只列举出 A 相输出信号的双刷新补偿过程,其他两相补偿过程与此完全相同。图中  $t_u$  为 SVPWM 模块计算出的理想脉冲宽度,  $t_{e1} = T_d + T_{on}$ ,  $t_{e2} = T_{off}$ , 具体数值由实际应用中的功率器件参数决定。实验中,计数器下溢中断为驱动器的伺服闭环中断,而每次计数器下溢和计数器匹配均触发中断,可以看出,双刷新死区补偿只滞后相电流半个伺服周期,而其他补偿方法最少滞后相电流一个伺服周期。

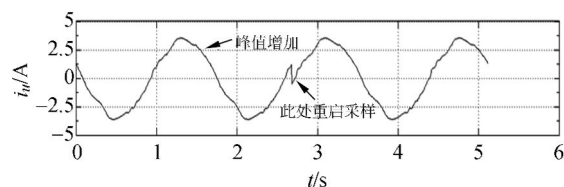
#### 4.2 死区补偿实验结果分析

图 11 是令电机在速度开环下以 51.204 m/s 的速度(电流矢量频率为 0.6 Hz)运动时 A 相相电流波形,采样频率为 2 kHz。图 11(a)为没有死



(a) 补偿前

(a) Without DUDTC



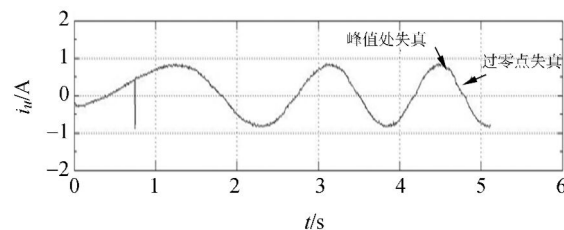
(b) 补偿后

(b) With DUDTC

图 11 开环下相电流波形

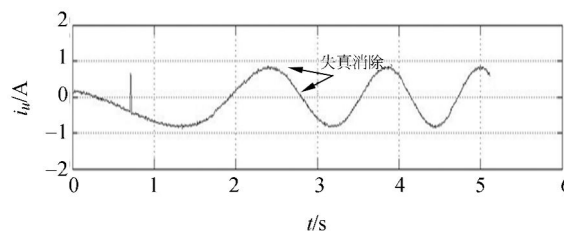
Fig. 11 Waveform of phase current in open-loop mode

区补偿时的电流波形,图 11(b)为进行双刷新死区补偿后的电流波形。可见,与仿真所得结果相似,死区补偿对于电机相电流顶部失真有明显改善,相电流峰值增大,使速度开环下相电流波形更趋近于正弦,减小了电机推力和速度的脉动。图 11(b)中 2.6 s 出现的波形畸变是重启采样造成的,并非相电流发生了畸变。



(a) 补偿前

(a) Without DUDTC



(b) 补偿后

(b) With DUDTC

图 12 闭环下相电流波形

Fig. 12 Waveform of phase current in close-loop mode

图 12 是令电机速度闭环下运动时 A 相相电流波形,采样率为 2 kHz。图 12(a)为没有死区补偿时的电流波形,可以看出闭环运动时相电流失真明显减弱,但仍存在过零点失真和峰值削平现象;图 12(b)为进行双刷新死区补偿后的电流波形。可见,补偿基本消除了过零点和峰值处的失真。

## 5 结 论

驱动器死区效应会影响永磁同步直线电机在

直线气浮工作台系统中的表现。本文提出的双刷新补偿法(DUDTC)是一种实际应用中相对调制波相移最小(0.5 个伺服周期)的死区效应补偿法。仿真结果表明,该方法在电机速度开环下能够使峰值相电流增加,电机推力波动和转速脉动减少 50%。实验结果证明该方法在电机速度开环和闭环下均可以使相电流的过零点失真和顶部削平现象得到消除,使相电流谐波含量减少,而且该方法只需少量编程即可实现,不受载波频率、相数、母线电压变化的影响,便于应用到各类电机的数字开关式驱动器中。

### 参考文献:

- [1] 叶树亮,李东升.应用有限体积法空气静压导轨力学特性的研究[J].光学精密工程,2008,16(5):809-814.  
YE SH L, LI D SH. Study on mechanical characteristics of aerostatic bearing with finite volume method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 809-814. (in Chinese)
- [2] 宋彦,高慧斌,张淑梅,等.直流力矩电机力矩波动的自适应补偿控制[J].光学精密工程,2010,18(10):2212-2220.  
SONG Y, GAO H B, ZHANG SH M, *et al.*. Adaptive compensation of torque ripple in DC torque motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2212-2220. (in Chinese)
- [3] 刘晶红,朱志强,沈宏海,等.加速度的扰动补偿在控制系统中的应用[J].光学精密工程,2009,17(9):2191-2198.  
LIU J H, ZHU ZH Q, SHEN H H, *et al.*. Application of control system based on acceleration to disturbance compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2191-2198. (in Chinese)
- [4] JORGE O E, MARQUES C A J. Comparison of different modulation strategies applied to PMSM drives under inverter fault conditions [C]. *Proceedings of the Second IFIP WG 5.5/SOCOLNET Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, Costa de Caparica, Portugal: DOCEIS*, 2011:493-501.
- [5] BELKACEM S, NACERI F, ABDESSEMED R. Reduction of torque ripple in DTC for induction motor using input-output feedback linearization [J]. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2011, 8(2):97-110.
- [6] BADRE B, MOHAMMED K, SILVIU I, *et al.*. The optimal direct torque control of a PMSM drive: FPGA-based implementation and Matlab/Simulink simulation [J]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2011, 28(2):63-72.
- [7] YOSHIHIRO M, TOMOFUMI W, HARUMITU I. Waveform distortion and correction circuit of PWM inverters with switching lag-times [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1987, 23(5):881-886.
- [8] 吴茂刚,邓荣祥,汤新舟.空间矢量 PWM 逆变器死区效应分析与补偿方法[J].浙江大学学报,2006,40(3):469-473.  
WU M G, DENG R X, TANG X ZH. Analysis and compensation method of dead time effect for space vector PWM inverter [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2006, 40(3): 469-473. (in Chinese)
- [9] JONG W C, SUNG Y, SEUNG K S. Inverter output voltage synthesis using novel dead time compensation [C]. *Proceedings of the Ninth Applied Power Electronics Conference: APEC*, 1994: 100-106.
- [10] 季宏丽,裘进浩,赵永春,等.基于 TMS320F2812 的悬臂梁振动半主动控制[J].光学精密工程,2009,17(1):126-131.  
JI H L, QIU J H, ZHAO Y CH, *et al.*. Semi-active control of structural vibration of cantilever beam based on TMS320F2812 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):126-131. (in Chinese)

## 作者简介:



王 雷(1976—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,2004年、2006年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事超精密驱动控制与光机电一体化技术等方面的研究。E-mail: hit\_wanglei@163.com



唐学军(1988—),男,四川蓬安人,硕士研究生,2011年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事超精密驱动控制技术方面的研究。E-mail: tangxuejun-sichuan@126.com



王 龙(1988—),男,甘肃静宁人,硕士研究生,2010年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事超精密驱动控制技术方面的研究。E-mail: lucev.wang@gmail.com



林灿发(1988—),男,福建晋江人,硕士研究生,2011年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事超精密驱动控制技术方面的研究。E-mail: canfa2008@qq.com

## ● 下期预告

## 空间光电跟踪系统动量平衡设计方法与试验

李治国<sup>1,2</sup>,高立民<sup>1</sup>,张博妮<sup>3</sup>,崔 凯<sup>2</sup>,王振宇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119;

2. 中国科学院研究生院,北京 100039;

3. 西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

为了使光电跟踪系统在保证快速捕获、高精度和高平稳性跟踪、清晰成像的基础上,降低光电跟踪系统运动对卫星平台姿态的影响,提出了几种技术实现途径,详细给出了出力矩(角动量)自补偿的平衡轮的实现方法。根据光电跟踪系统对目标捕获和跟踪成像的指标要求,针对其频繁启动、速度和加速度变化范围大、速度频繁过零等不同于卫星姿态控制用平衡轮的特点,基于角动量平衡原理设计了一种平衡轮,通过有限元法完成了平衡轮的模态分析和结构优化,建立了包含平衡轮的光电跟踪系统机电动力学数学模型,利用 Matlab/Simulink 对光电跟踪系统的方位轴系进行了模型的仿真计算。为验证其可行性,研制了一套平衡轮原理样机,提出了基于单轴气浮平台的平衡轮性能测试方法,并完成了模拟方位轴系的残余角动量检测。仿真和试验结果显示,平衡轮的使用将光电跟踪系统对平台的残余角动量输出减小了 96%,表明所设计的平衡轮结构和控制系统合理可行,能够满足空间应用的需求。