

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.11.027

电主轴上改善性直接转矩控制的振动实验

吴玉厚^{1,2}, 潘振宁¹, 张丽秀², 张云龙²

(1.大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2.沈阳建筑大学 机械工程学院, 沈阳 110168)

摘 要: 针对电主轴控制性能改善的迫切需求,在经典的直接转矩控制 (direct torque control, DTC) 中融入空间矢量脉宽调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM) 控制技术,给出其改善性的控制算法. 定子磁链空间位置与 Park 逆变换后的 u_d 和 u_q 作为输入, 利用 SVPWM 控制技术转换成逆变器的三相电压量,进而有效地控制电主轴;对电主轴上的定子磁链进行近似圆形轨迹的调制,计算出实验所需的离散数据. 使用 DSP 和 IGBT 模块搭建了硬件实验电路,对电主轴进行电磁振动速度及加速度实验,实验结果表明:3 个方向振动速度在不同运行频率、特别是 100~450 Hz 的转矩脉动明显减小,各向振动加速度的振动幅值明显减小,表明 DTC 融入 SVPWM 后,系统的控制性能得到改善,不仅改善了系统的动态性能,也减小了电磁磁链和电磁转矩的脉动.

关键词: DTC; SVPWM; 振动; 电主轴; DSP; 磁链

中图分类号: TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)11-0174-04

Vibration test of improved direct torque control on electrical spindle

WU Yuhou^{1,2}, PAN Zhenning¹, ZHANG Lixiu², ZHANG Yunlong²

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Aiming at the urgent requirement to improve the control performance of electric spindle, an improved control algorithm is given after integrating SVPWM (space vector pulse width modulation) technology into classical DTC (direct torque control). Stator flux linkage space position and u_d , u_q after Park inverse transformed are taken as the three inputs, and then converted into three phase voltage of dc-to-ac inverter to control the electric spindle efficiently under SVPWM control technology. By modulating the stator flux linkage running approximate circular trajectory on the electric spindle, the discrete data required for the test is calculated. After establishing the hardware circuit using DSP and IGBT module, the experiments of electric spindle electromagnetic vibration velocity and acceleration are conducted, and the experimental results show that the torque ripple obviously decreases in three directions of vibration velocity of each operation frequency, especially at 100–450 Hz the vibration amplitude of vibration acceleration significantly reduces in three directions. These verify that the control performance is improved by integrating SVPWM into DCT.

Keywords: DTC; SVPWM; vibration; electrical spindle; DSP; flux linkage

电主轴单元作为数控机床的主要功能性部件,其振动特性对工件的加工质量有直接影响. 由于其特殊的物理构造以及使用变频器驱动,电源中的谐波会使电主轴产生电磁谐波,进而产生电磁振动^[1],电主轴的运行特性亦会受到影响. 因此,为了减少电磁谐波,进而提高控制性能,就要分析出控制模式下变频器电磁谐波的特性及振动特点^[2].

采用直接转矩控制 (direct torque control, DTC)

作为电主轴的变频控制模式,其核心为 PWM 调制技术^[3],其优点是从 CPU 及外围控制电路到变频器都是以数字电路实现的. 本文尝试在 DTC 中融入空间矢量脉宽调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM) 的控制方法,并给出了控制系统的设计和实验结果.

1 融入 SVPWM 的 DTC 控制技术

DTC 利用定子的定向磁链,可以对转矩进行直接控制^[4]. 重要的是如何在每个周期里选出合适的电压矢量,并要时刻保证转矩在 $t = 0$ 时可以快速地

收稿日期: 2015-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(51375317)

作者简介: 吴玉厚(1955—),男,教授,博士生导师

通信作者: 潘振宁, panzn_78@163.com

向着设定的方向变化. 电压矢量的选择方法采用预期电压法^[5]: “首先, 根据转矩偏差、磁链偏差和转速计算出一个能达到最佳控制的预期电压; 然后, 用电压型逆变器的 6 个工作电压中与之相邻的两个电压矢量来合成^[6], 计算出各自的工作时间; 最后用零电压补足采样周期”.

如图 1 所示, 融入 SVPWM 后, 利用旋转坐标变换^[7], 把观测到的磁链和转矩转换成 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压控制量 u_α 和 u_β , 结合定子旋转角度 θ , 通过 Park 逆变换转换成 dq 坐标系下的电压 u_d 和 u_q , 再利用 SVPWM 转换成实际的三相电压量来完成对电主轴转矩的控制^[8].

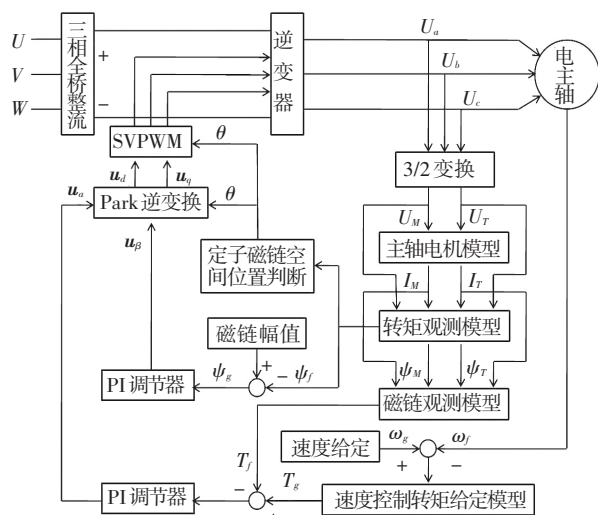


图 1 改善型 DTC 框图

Fig.1 Block diagram of improved DTC

2 在电主轴上的应用

2.1 定子磁链近似圆形轨迹的调制

磁链及转矩的偏差越细化^[9], 预期的电压空间矢量的作用越精确, 不仅能改善 DTC 系统的静态和动态性能, 也能减小电磁磁链和电磁转矩的脉动^[10-11]. 图 2 中显示了 8 个基本电压空间矢量, 其中非零向量的幅值相同、模长为 $2U/3$, 相邻矢量的间隔 60° , 两个零矢量的幅值为零, 位于中心点. 在任意时刻, 选择零向量和两个非零的电压空间矢量, 都可以根据伏秒平衡的原理去合成任意的电压空间矢量^[12], 即

$$U_{out} * T = U_x * T_x + U_y * T_y + U_z * T_z. \quad (1)$$

使用电压矢量合成技术, 预期的电压向量从 $U_4(100)$ 点开始操作, 每次增加或者减少一个微小的量, 而变化后的电压矢量可以由相邻的非零基本向量与 U_0 或 U_7 合成获得, 得到的预期电压向量就可以等效为在电压空间向量平面哈桑平滑旋转后的电

压空间向量^[13], 实现了调制电压空间向量脉宽的目的.

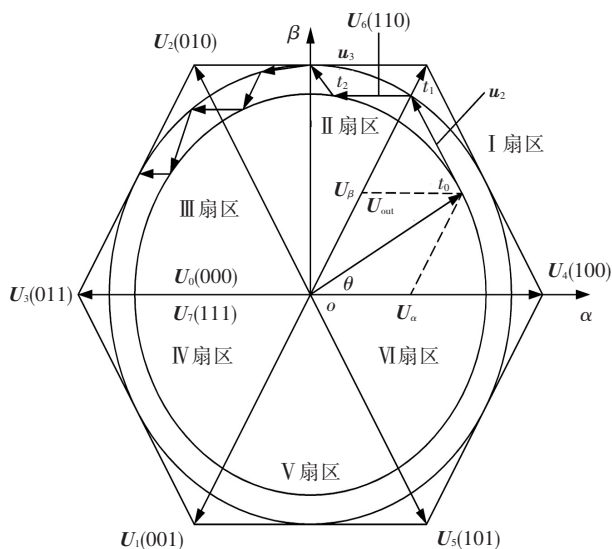


图 2 圆形磁链轨迹示意

Fig.2 Schematic diagram of circular flux track

2.2 电主轴上的调制数据

把磁链轨迹分为 6 个区域, 每个区域占 60° , 分别标以 I, II, ..., VI. 用 $|\Psi_g|$ 表示定子磁链实时幅值^[14], 用 $|\Psi_f|$ 作为两个圆的半径差, $\Delta|\Psi_f|$ 表示允许的误差, 为了保证定子磁链矢量的幅值仅在设定幅值 $|\Psi_g|$ 的允许偏差 $\Delta|\Psi_f|/2$ 内变化, 在不同的时间段内选择适当的电压空间矢量^[15], 即

$$|\Psi_g| - \Delta|\Psi_f|/2 \leq |\Psi_f| \leq |\Psi_g| + \Delta|\Psi_f|/2. \quad (2)$$

在电主轴转动时, 任何一个时间上电压空间矢量的选择, 需要依据磁链偏差程度, 并且要考虑磁链所处的方向^[16]. 当定子磁链 $|\Psi_f|$ 位于 II 区域内, 并有 $|\Psi_g| - \Delta|\Psi_f|/2$ 的值, 如果要求定子磁链逆时针方向旋转时, 需要依次使用电压矢量 U_2 及 U_3 , 这样就可以使 $|\Psi_f|$ 满足式(2). 为了获取预期的电压矢量调制信号 U_{out} , 可以根据矢量图解析获得所需的基本电压空间矢量以及旋转角度 θ , 进而去驱动功率开关元件动作. 实验取 18° 为增量, 推导出时间系数见表 1, 乘以 $T_s/(360/18)$ 可计算出式(1)中 T_x, T_y, T_z , 在电压矢量转动一周时, 电压周期的正弦波形即可由逆变器中输出.

由以上结果可推出, 无论定子的磁链处于任何区域, 电压空间矢量 $U_0 \sim U_7$ 都可以任意使用. 任何一个电压空间矢量都会影响到定子磁链和电磁转矩, 根据定子磁链位置检测信号 θ, u_d 和 u_q 来挑选电压矢量进行控制, 即可获得圆形的磁链轨迹, 并且其

电磁转矩脉动量也会变小.

表 1 时间系数
Tab.1 Time coefficient

$\theta/(^{\circ})$	k_x	k_y	k_z
0	0.866	0	0.134
18	0.699	0.309	0.022
36	0.407	0.588	0.005
54	0.105	0.809	0.086
72	0.743	0.208	0.049
90	0.500	0.500	0
108	0.208	0.743	0.049
126	0.809	0.105	0.086
144	0.588	0.407	0.005
162	0.309	0.699	0.022
180	0	0.866	0.134
198	0.699	0.309	0.022
216	0.407	0.588	0.005
234	0.105	0.809	0.086
252	0.743	0.208	0.049
270	0.500	0.500	0
288	0.208	0.743	0.049
306	0.809	0.105	0.086
324	0.588	0.407	0.005
342	0.309	0.699	0.022

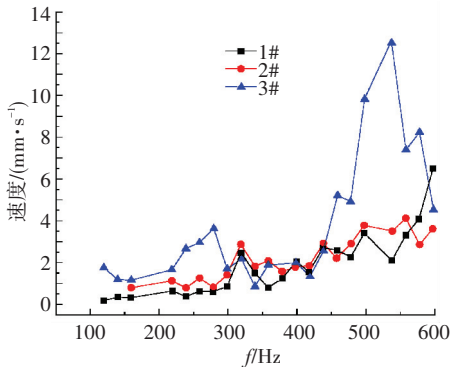
3 硬件电路的搭建

采用 DSP 控制器, 将控制算法烧写到 DSP 中, 用串口指令通过 IGBT 驱动板对 IGBT 开关模块精确操作, 以完成对电主轴的控制. 放置传感器: 1#前端垂直径向、2#前端水平径向、3#前端轴向, 连接振动分析仪测试其电磁振动特性. DSP 选用 TMS320F2812PGFA, IGBT 选用 FS200R12PT4 模块, 驱动电路选用 AST965, 三相整流桥选用 MDS100A1800V 模块, 选用实验室自行设计、型号为 150MD18Z9 的两对极对数的电主轴, 额定电压 380 V, 额定频率 1 000 Hz, 额定转速是 30 000 r/min, IGBT 的开关频率选择 20 kHz(360/18 * 1 000 Hz), 本文实验选择最高转速 18 000 r/min, 系统有很大的冗余满足该实验.

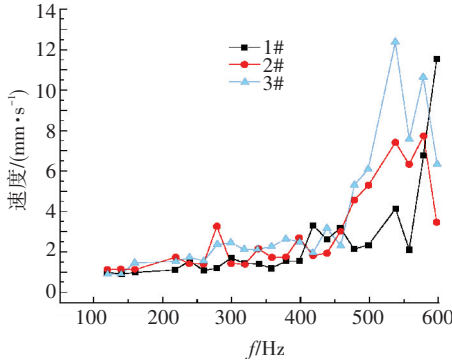
4 实验结果分析

在相同实验条件下, 传统 DTC 与改善型 DTC 的实验结果见图 3, 4. 由图 3, 4 可知:

1) 实验频率运行在 100 ~ 450 Hz 时, 改善型 DTC 各个方向上振动速度的振动幅值有明显减小, 特别是前端轴向的振动速度下降 30% 左右;



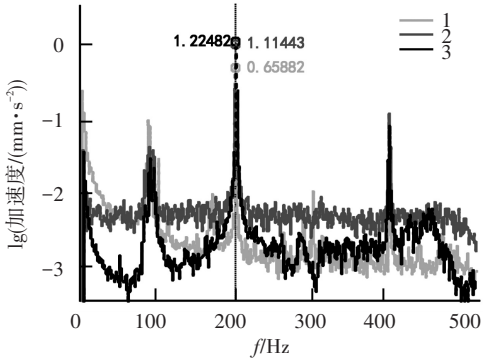
(a) DTC



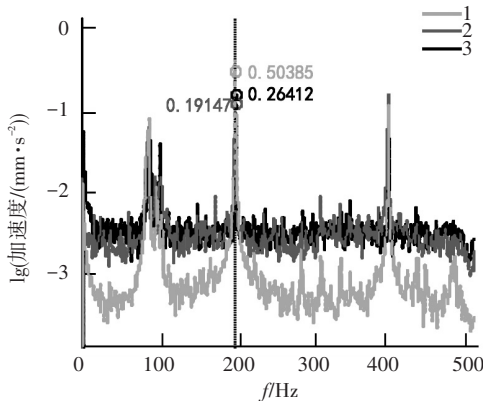
(b) 改善型 DTC

图 3 电主轴电磁振动速度

Fig.3 Electromagnetic vibration speed of electric spindle



(a) DTC



(b) 改善型 DTC

图 4 电主轴电磁振动加速度频谱

Fig.4 Electromagnetic vibration acceleration frequency spectrum of electric spindle

2) 实验频率运行在 450~600 Hz 时,电主轴的轴向振动速度及水平振动速度均明显增大,且大于其前端垂直径向振动速度;

3) 实验频率在 200 Hz 时,振动加速度的幅值在垂直径向由 $0.658\ 82\ \text{m/s}^2$ 变为 $0.503\ 85\ \text{m/s}^2$,水平径向由 $1.114\ 3\ \text{m/s}^2$ 变为 $0.191\ 47\ \text{m/s}^2$,轴向由 $1.224\ 84\ \text{m/s}^2$ 变成 $0.264\ 12\ \text{m/s}^2$,其水平径向和轴向的振动明显变小。

综上,可以给出如下结论:在改善型 DTC 控制下,各方向振动速度在各个运行频率、特别是 100~450 Hz 时的转矩脉动明显减小,水平径向和轴向的振动加速度的幅值在 200 Hz 时大幅减小,其动态性能得到明显改善。

5 结 论

1) 本文在研究 DTC 控制策略的基础上,融入了 SVPWM 控制技术,有效地改善电主轴的运行特性,对于高性能的电主轴的控制设计具有一定的指导参考价值;

2) 针对电主轴的振动问题从控制策略角度,提出了控制性能改善的措施,通过对电主轴电磁振动速度及加速度实验,验证了改善型 DTC 控制策略对降低振动幅值的有效性。

参考文献

- [1] 吴玉厚. 数控机床电主轴单元技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 25-37.
WU Yuhou. Electric spindle unit technology of CNC machine tools [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 25-37.
- [2] 熊万里, 吕浪, 阳雪兵, 等. 高频变流诱发的电主轴高次谐波振动及其抑制方法[J]. 振动工程学报, 2008, 21(6): 600-607.
XIONG Wanli, LÜ Lang, YANG Xuebing, et al. High-order harmonic vibration of motorized spindle caused by high-frequency converting current and the suppressing methods[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(6): 600-607.
- [3] BOGLIETTI A, FERRARIS P, LAZZARLI M, et al. Influence of the inverter character on the iron losses in PWM inverter-fed induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(5): 1190-1194.
- [4] ABDELHALIM T, OUAHID B, KHELIFA B, et al. Direct torque control (DTC) strategy based on fuzzy logic controller for a permanent magnet synchronous machine drive[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2009, 4(1): 66-78.

- [5] 张翊诚, 陈吉红, 唐小琦, 等. 改进型直接转矩控制在高速电主轴上的应用[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(9): 26-29.
ZHANG Yicheng, CHEN Jihong, Tang Xiaoqi, et al. Application for enhanced direct torque control of high speed motorized spindle[J]. Electric Machines & Control Application, 2008, 35(9): 26-29.
- [6] BROECK H W, SKUDELNY H C, STANKE G V. Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors[J]. IEEE Trans, IA, 1988, 24(1): 142-150.
- [7] 巫庆辉, 邵诚, 许占国. 直接转矩控制技术的研究现状与发展趋势[J]. 信息与控制, 2005, 34(4): 444-450.
WU Qinghui, SHAO Cheng, XU Zhanguo. Survey of research status quo and development trends about direct torque control[J]. Information and Control, 2005, 34(4): 444-450.
- [8] SOLTANI J, ARAB MARKADEH G R, HOSSEINNY S H. A new adaptive direct torque control (DTC) scheme based-on SVM for adjustable speed sensorless induction motor drive[C]//The 30th annual conference of the IEEE industrial electronics soelaty. Busan: [s.n.], 2004: 1111-1116.
- [9] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A L M. Fast method for the iron loss prediction in inverter-fed induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(2): 806-811.
- [10] WANG H, XU W, SHEN T, et al. Stator flux and torque decoupling control for induction motors with resistances adaptation[J]. IEE Proc Control Theory Appl, 2005, 154(4): 363-370.
- [11] NASH J N. Direct torque control, Induction motor vector control without an encoder[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(3/4): 333-341.
- [12] CASADEI D, GRANDI G. Effects of flux and torque hysteresis band amplitude in direct torque control of induction machines[J]. Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1994(1): 299-304.
- [13] 张云, 吴凤江, 孙力, 等. 异步电动机铁耗对直接转矩控制性能的影响及补偿方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(9): 51-56.
ZHANG Yun, WU Fengjiang, SUN Li, et al. Iron loss influence of induction motors on DTC performance and Its compensation method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(9): 51-56.
- [14] MUSTAFA A, OKUMUS H I. Stator resistance estimation using ANN in DTC IM drives[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2010, 18(2): 197-210.
- [15] 丁惜瀛, 夏强, 赵鑫, 等. 直接转矩控制磁链低频脉动分析及抑制[J]. 电气技术, 2008(9): 46-50.
DING Xiyang, XIA Qing, ZHAO Xin, et al. Analysis and restrain of low frequency ripple for direct torque control of flux linkage[J]. Electrical Engineering, 2008(9): 46-50.
- [16] ZIDANI F, DIALLO D, BENBOUZID M E H, et al. Direct torque control of induction motor with fuzzy stator resistance adaptation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 619-621.

(编辑 杨 波)