

基于 RTW 的空间矢量脉宽调制的 DSP 控制系统

孔 涛, 李建勇*, 王 恒, 聂 蒙
(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要:针对控制器快速原型化的设计概念,提出了基于实时代码生成工具(RTW)的空间矢量脉宽调制的数字信号处理器(DSP)控制系统的设计方法。基于七段式空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法与 Matlab/Simulink 工具箱建立了系统的算法模型,实现了从模型到实时代码的转换。基于 Matlab F2812 eZdsp 子模块生成的代码使 DSP 通用定时器工作在连续递增/递减计数模式,通过 CCS 软件编译、下载移植可执行文件到 TMS320F2812 DSP 目标板上实现了在线实时仿真调试与验证。研究结果表明,该设计方法实现了工程开发从算法设计到最终实现的所有阶段,提高了产品开发效率,降低了成本。

关键词:实时代码生成工具;空间矢量脉宽调制;TMS320F2812;数字信号处理器;CCS

中图分类号:TM921.52

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)09-0006-06

DSP control system for SVPWM based on RTW

KONG Tao, LI Jian-yong, WANG Heng, NIE Meng

(School of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In view of the rapid prototype design of the controller, a design method of the digital signal processor(DSP) control system of the space vector pulse width modulation(SVPWM), based on real-time workshop(RTW) was discussed. The model transformed to the real time code, based on the 7-segment SVPWM algorithm and Matlab/Simulink toolbox were built. The codes generated by Matlab F2812 eZdsp made the DSP TICON work in the continuous-ascending or continuous-descending mode. And the executable file compiled by the TI DSP CCS was downloaded into the TMS320F2812 DSP chip to carry on real-time online debugging and verification. All the development process from algorithm scheme to the realization, were integrated by this method. The result shows that the efficiency of product development is improved, and the manufacturing cost is reduced.

Key words: real-time workshop(RTW); space vector pulse width modulation(SVPWM); TMS320F2812; digital signal processor(DSP); CCS

0 引 言

控制系统一般由 3 个子系统构成,即控制器、执行机构和被控对象。其设计开发过程一般分成 3 个阶段:第 1 阶段为分析与设计阶段,需要对执行机构和被控对象建模,通过全仿真试验验证模型的正确性,了解系统的静态和动态特性,进而设计控制器;第 2 阶段为半实物仿真实验阶段,将执行机构部分换成实物进行仿真试验,确保执行机构的行为符合设计要求;最后阶段为接入实际被控对象,实现整个控制系统。针对前

两个阶段,以往的做法是先在 Simulink^[1] 中用模块图对系统建模并进行全仿真,设计控制器,然后用 C 或 C++ 等高级语言重新实现整个系统,以进行半实物仿真或制作实际控制软件。半实物仿真时用编程语言实现被控制对象的各个环节,同时完成仿真的推进、控制和记录,整个过程的实现极为繁琐。

为了简化半实物仿真过程,提出了控制器快速原型化的概念^[2]。针对控制器快速原型化的设计概念,本研究提出了一种基于实时代码生成工具的 DSP 数字控制系统设计方法,以 TI 公司的 TMS320F2812 DSP

为控制芯片,利用 Matlab 中的 Embedded Target for TI C2000 DSP 模块建立 SVPWM 控制算法模型,然后用 RTW 和 C 编译器直接将模型编译为可执行的文件,不需要编写任何的代码,并通过 TI 公司 CCS 软件编译、下载移植到 DSP 目标板上,实现在线实时仿真调试,极大程度上缩短了控制器开发周期,降低了开发成本。

1 七段式空间矢量算法原理

如图 1 所示,在 $\alpha\beta$ 参考坐标系中,旋转矢量 V_{ref} 可以用 $V_0 \sim V_7$ 共 8 个矢量的线性组合去等效,6 个有效电压空间矢量 $V_1 \sim V_6$ 和 2 个零电压空间矢量 $V_0、V_7$ 。空间矢量由一个有效状态转移到另一个有效状态,产生连续的三相电压,使所产生的实际电机气隙磁通轨迹逼近圆形^[3]。

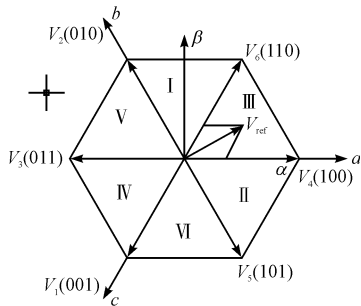


图 1 基本电压空间矢量

图 2 给出了七段式合成法算法第三扇区开关信号的分布。图中 $V_1 \sim V_6$ 为 6 个有效电压空间矢量, $V_0、V_7$ 为 2 个零电压空间矢量,PWM1、PWM2、PWM3 分别表示三相桥上桥开关器件的开关信号, $T_0、T_4、T_6$ 分别表示零矢量和第三扇区 2 个特定矢量的作用时间, $T_{aon}、T_{bon}、T_{con}$ 分别表示三相开关信号的切换时间。分析可以看出七段式和五段式的主要区别在于各扇区开关序列不同,算法的其余流程是相同的^[4]。

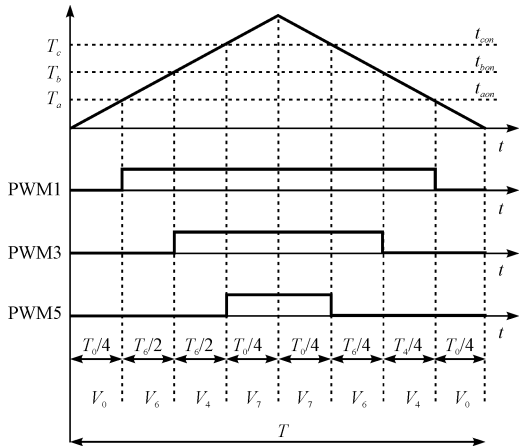


图 2 七段式电压空间矢量 PWM 波形

定义 3 个变量 $B_0、B_1、B_2$,且根据图 1 中各扇区与 $V_\alpha、V_\beta$ 的关系,有:

$$\begin{cases} B_0 = V_\beta \\ B_1 = \sin 60^\circ V_\alpha - \sin 30^\circ V_\beta \\ B_2 = -\sin 60^\circ V_\alpha - \sin 30^\circ V_\beta \end{cases} \tag{1}$$

$$N = 4\text{sign}(B_2) + 2\text{sign}(B_1) + \text{sign}(B_0)$$

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \tag{2}$$

N 与扇区号对应关系如表 1 所示。通过查表 1,即可确定扇区号。

表 1 N 与扇区号对应关系

N	1	2	3	4	5	6
扇区号	II	VI	I	IV	III	V

由图 2 可知,为使波形对称,把每个矢量的作用时间都一分为二,同时把零矢量时间等分给两个零矢量 $V_0、V_7$ 。产生的开关序列为:

$$V_0 - V_4 - V_6 - V_7 - V_7 - V_6 - V_4 - V_0$$

这样即可以提高电压的利用率,又可以降低逆变器输出的谐波含量,减少电机的转矩脉动,避免了五段式 SVPWM 控制方法由于零矢量集中插入。而在低速运行不平稳的问题^[5-6]。

$X、Y、Z$ 定义如下:

$$\begin{cases} X = U_\alpha \frac{\sqrt{3}T}{U_{dc}} \\ Y = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} U_\beta + \frac{3}{2} U_\alpha \right) \frac{\sqrt{3}T}{U_{dc}} \\ Z = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} U_\beta - \frac{3}{2} U_\alpha \right) \frac{T}{U_{dc}} \end{cases} \tag{3}$$

基本电压矢量作用时间 $T_1、T_2$ 与 $X、Y、Z$ 及扇区 N 的关系如表 2 所示。

表 2 $T_1、T_2$ 与 $X、Y、Z$ 及扇区 N 的关系

扇区号	I	II	III	IV	V	VI
T_1	Z	Y	$-Z$	$-X$	X	$-Y$
T_2	Y	$-X$	X	Z	$-Y$	$-Z$

$T_a、T_b、T_c$ 定义如下:

$$\begin{cases} T_a = (T - T_1 - T_2)/4 \\ T_b = T_a + T_1/2 \\ T_c = T_b + T_2/2 \end{cases} \tag{4}$$

则扇区 N 与逆变器三相桥臂功率器件导通时间 $T_{on1}、T_{on2}、T_{on3}$ 之间的关系如表 3 所示。

表 1 表 3 N 与 $T_{on1}、T_{on2}、T_{on3}$

扇区号	I	II	III	IV	V	VI
T_{on1}	T_b	T_a	T_a	T_c	T_c	T_b
T_{on2}	T_a	T_c	T_b	T_b	T_a	T_c
T_{on3}	T_c	T_b	T_c	T_a	T_b	T_a

2 基于 RTW 的 SVPWM DSP 的实现

2.1 SVPWM 模块的建立

基于 RTW 的 SVPWM DSP 的实现过程如图 3 所示。在 Matlab/Simulink 环境中构建的 SVPWM 模块一般包括扇区判断、 X 、 Y 、 Z 计算、 T_1 、 T_2 及 T_{on1} 、 T_{on2} 、 T_{on3} 赋值 4 个子模块。模型框图如图 4 ~ 图 7 所示。



图 3 RTW 开发技术流程

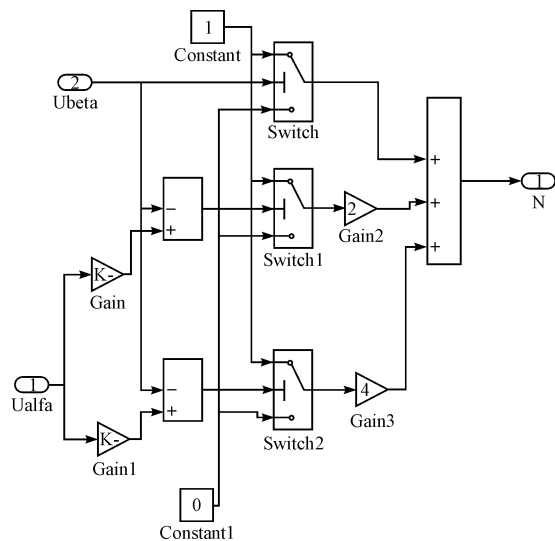


图 4 扇区判断仿真模型

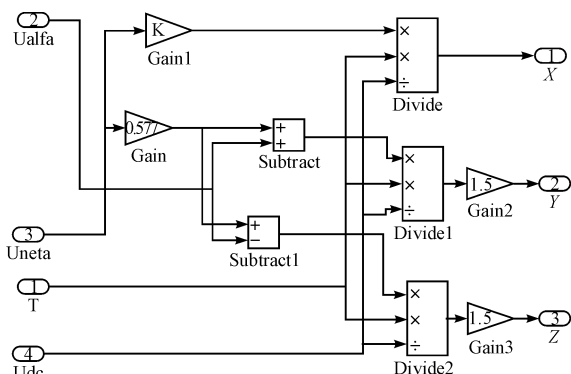


图 5 X 、 Y 、 Z 确定仿真模型

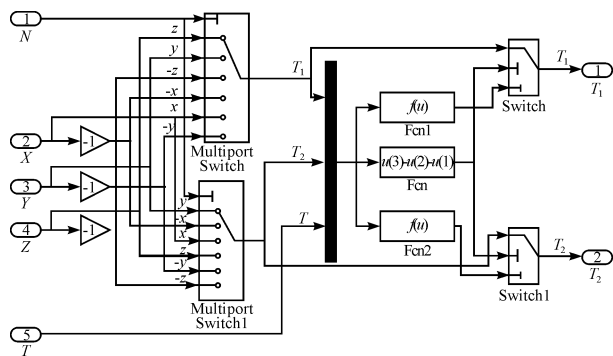


图 6 T_1 、 T_2 确定仿真模型

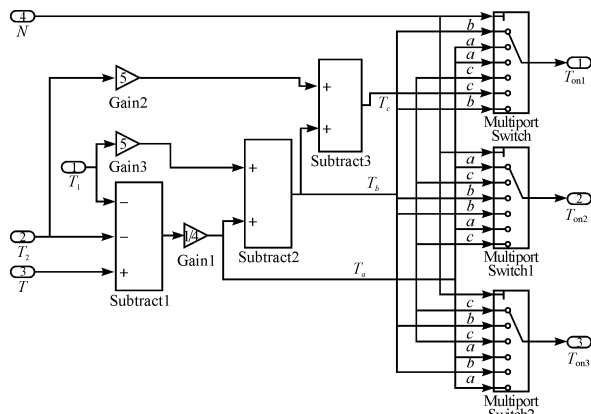


图 7 T_{on1} 、 T_{on2} 、 T_{on3} 确定仿真模型

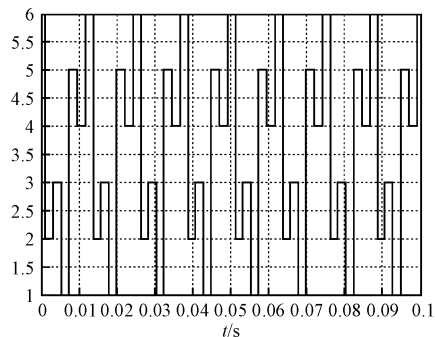


图 8 扇区号 N

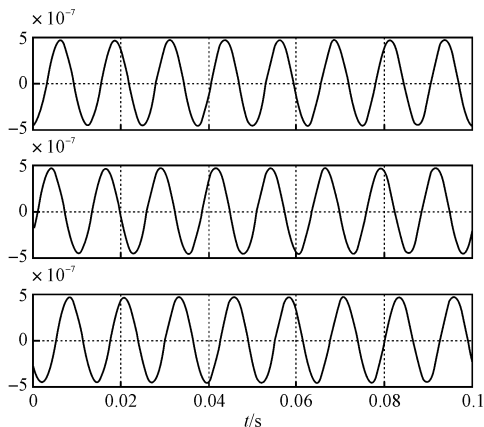


图 9 X 、 Y 、 Z 仿真

本研究通过调整系统模块参数来改变系统性能，仿真结果如图 8 ~ 图 11 所示。

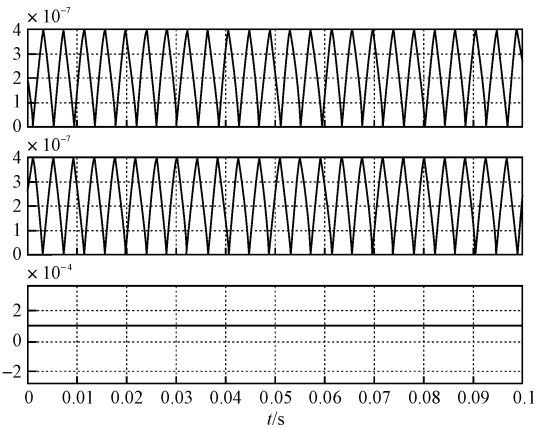


图 10 基本矢量作用时间

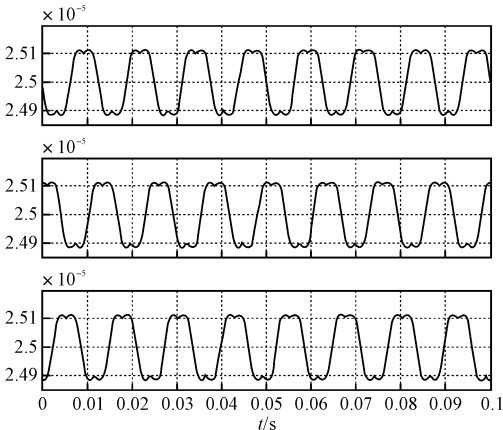


图 11 矢量切换时间

根据理论设计,在给定输入条件下,空间矢量发生模块的输出 T_{on1} 、 T_{on2} 、 T_{on3} 对应的仿真图形是马鞍波^[7],如图 11 所示,验证了模型的正确性。

2.2 DSP 代码直接生成

DSP(TMS320F2812)^[8]作为实验的目标机来验证利用 RTW 进行半实物仿真,其仿真模型如图 12 所示。

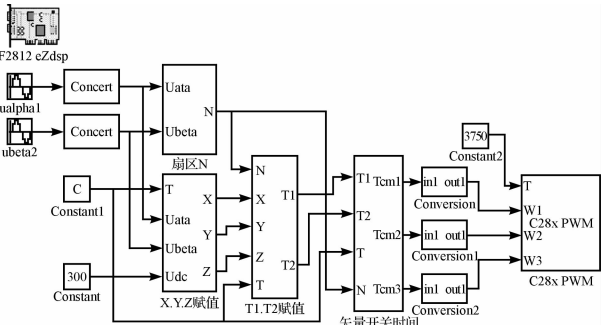


图 12 矢量仿真模型图

(1) 配置 F2812 eZdsp 模块。

在模型中添加 Embedded Target for TIC2000 DSP 所提供的 F2812 eZdsp 子模块,在此模块中要进行编译属性、目标板和仿真器的设定,用于生成目标 DSP

代码,设置如图 13 所示。该模块不需要与其他模块连接,可放在模型的任何地方。同时加入 C28xPWM 子模块,并进行 PWM 输出单元、PWM 引脚极性以及死区时间设置,设置如图 14 所示。

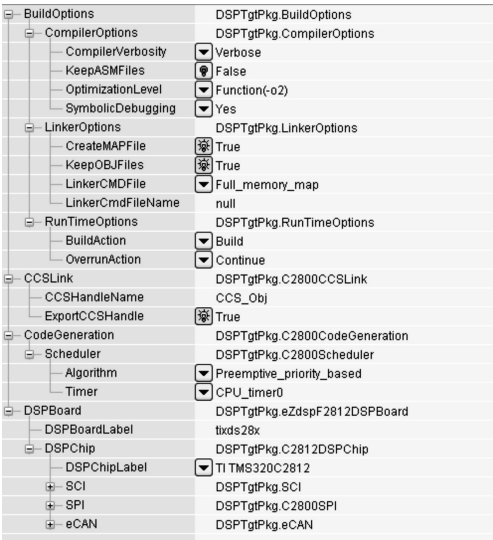


图 13 F2812 eZdsp 设置

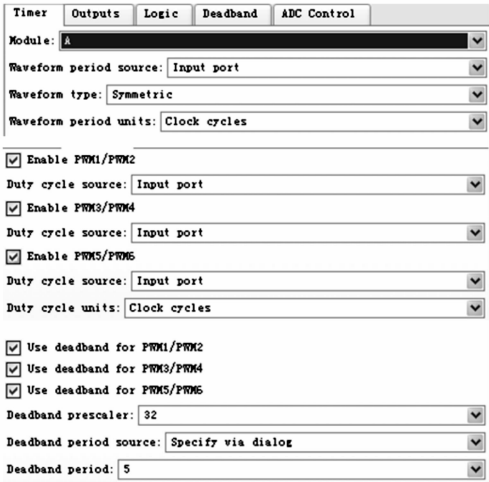


图 14 C28xPWM 设置

(2) 配置 Real-Time Workshop。

进入 Simulink 的 Simulation-Configuration Parameters, Solver options 和 Real-Time Workshop 具体配置如下^[9]:

- Type:Fixed-step;
- Solver:discrete (no continuous states);
- System target file:ti_c2000_grt.tlc 或者 ti_c2000_ert.tlc;
- Make command:make_rtw;
- Template makefile:ti_c2000_grt.tmf。

(3) 代码自动生成。

保存模型为 SVPWM_DSP.mdl,在 Real-Time Workshop 界面点击 generate code。代码自动生成流程图如图 15 所示。RTW 读取模型文件(SVPWM_DSP.mdl)并

对其进行编译,形成模型的中间描述文件(SVPWM_DSP.rtw),通过目标语言编译器(ti_c2000_grt.tlc)将中间描述文件(SVPWM_DSP.rtw)转换成目标指定代码。RTW 根据系统模板联编文件(ti_c2000_grt.tmf)生成自定义联编文件,即 SVPWM_DSP.mk 文件,最后通过 CCS 开发环境对代码进行交叉编译成为可执行程序(SVPWM_DSP.out),并下载到 DSP 芯片中。

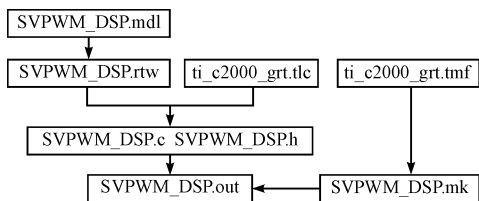


图 15 代码自动生成流程图

通过 CCS IDE 可以看到,RTW 代码在生成过程中建立了 SVPWM_DSP.pjt 工程文件,其中包括:源文件、库文件、链接文件等^[10]。所生成的逆变控制器 C 代码,保留了模型中相应的变量名,具有良好的可读性和可维护性。

(4) 代码验证。

将仿真模型直接编译的代码下载运行,通过示波器观察 DSP 的 PWM1、PWM3、PWM5 引脚的多周期和单周期输出波形如图 16、图 18 所示,PWM2、PWM4、PWM6 引脚的多周期和单周期输出波形如图 17、图 19 所示。

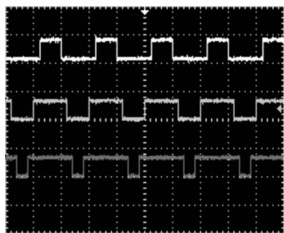


图 16 多周期波形

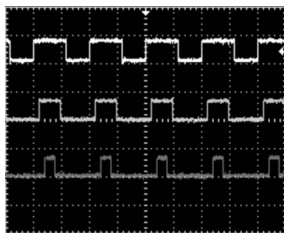


图 17 多周期波形

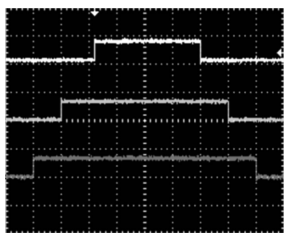


图 18 单周期波形

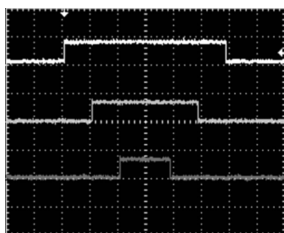


图 19 单周期波形图

对代码进行修改并调试、编译、下载,使 DSP 通用定时器 T1CON 工作在连续增计数模式下,PWM1、PWM3、PWM5 引脚的多周期和单周期输出波形如图 20、图 22 所示,PWM2、PWM4、PWM6 引脚的多周期和单周期输出波形如图 21、图 23 所示。

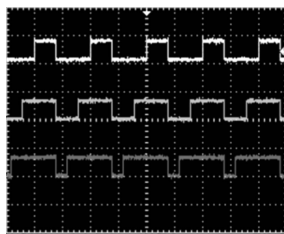


图 20 多周期波形

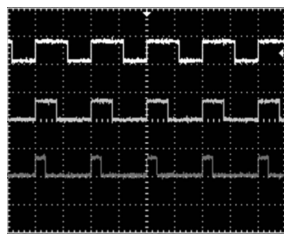


图 21 多周期波形

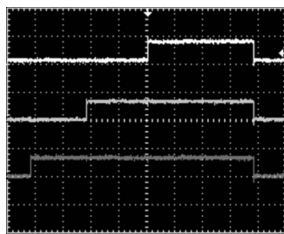


图 22 单周期波形

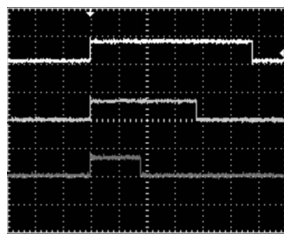


图 23 连单周期波形

通过以上 PWM 波形对比,可以得出:基于 Matlab F2812 eZdsp 子模块产生的七段式脉宽矢量法生成的代码使 DSP 通用定时器 T1CON 工作在连续递增/递减计数模式。当两种工作模式 T1CNT 每计数一次所需时间相同时,若要产生周期相等的 PWM 波形,则连续增计数工作模式 EvaRegs.T1PR 寄存器的值是连续递增/递减工作计数模式 EvaRegs.T1PR 寄存器值的 2 倍。

设定频率为 10 kHz,死区时间为 4 μ s,DSP 通用定时器 T1CON 的工作模式为连续递增/递减计数模式,PWM1、PWM2、PWM3 与 PWM4 引脚的多周期和单周期死区输出波形如图 24、图 25 所示。根据输出波形可判断代码的正确性。

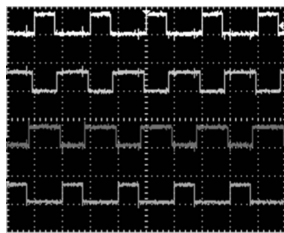


图 24 死区多周期波形

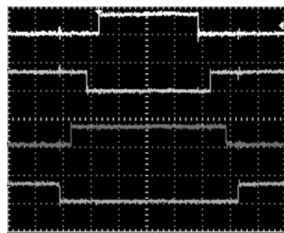


图 25 死区单周期波形

3 结束语

本研究提出并验证了基于 Matlab F2812 eZdsp 子模块产生的七段式脉宽矢量法生成的代码使 DSP 通用定时器 T1CON 工作在连续递增/递减计数模式。基于实时代码生成工具(RTW)的空间矢量脉宽调制的 DSP 控制系统的设计方法实现了从 SVPWM 算法设计到最终实现的所有开发阶段,同时避免了汇编语言仿

(下转第 36 页)

- [3] 邹卫军. 制导控制系统的实时多线程软件设计[J]. 计算机工程, 2008, 34(9): 268 - 269.
- [4] 何 伟, 陈 彬. DSP/BIOS 在基于 DM642 的视频图像处理中的应用[J]. 信息与电子工程, 2006, 14(1): 60 - 62.
- [5] 丁宜栋, 华 芸. 基于 DSP/BIOS 的软件系统设计[J]. 舰艇电子工程, 2001(5): 52 - 55.
- [6] 谭小林, 黄洪全. DSP/B IOS 多任务环境下电机保护装置的开发生[J]. 电气开关, 2009(3): 20 - 22.
- [7] 杨尚罡, 黄席樾, 李宝林, 等. 基于 DSP/BIOS 的隧道视频监控生系统[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(7): 81 - 84.
- [8] Texas Instruments Incorporated. TMS320 DSP/BIOS User's guide[EB/OL]. [2006 - 01 - 01]. <http://www.Ti.com>.
- [9] Texas Instruments Incorporated. TMS320C6000 Chip Support Library API Reference Guide[EB/OL]. [2006 - 01 - 01]. <http://www.Ti.com>.
- [10] Texas Instruments Incorporated. TMS320C6000 DSP/BIOS AP I Refenerce guide (Rev. F) [EB/OL]. [2006 - 01 - 01]. <http://www.Ti.com>.
- [11] Texas Instruments Incorporated. TL16C752B. 3.3-V Dual UART with64-Byte FIFO[EB/OL]. [2006 - 01 - 01]. <http://www.Ti.com>. [编辑: 张 翔]

(上接第 10 页)

真中各模块之间的衔接问题, 使设计人员从繁重的编写代码的工作中解脱出来, 专心致力于优化算法的开发和系统性能的提高。同时, 降低了开发成本, 缩短了开发周期。

参考文献 (References):

- [1] The Math Works Inc.. Real-time Workshop for User with SIMULINK[M]. The Math Works Inc., 1999.
- [2] 王中华, 王兴松, 徐卫良. 实时控制系统的快速成型及在运动控制中的应用[J]. 自动化仪表, 2001, 22(12): 41 - 43.
- [3] 达正花. 电压空间矢量脉宽调制原理[J]. 甘肃科学学报, 2004, 16(3): 65 - 68.
- [4] 王晓明, 王 玲. 电动机的 DSP 控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [5] PROFUMO F, BOGLIETTI A, GRIVA G, et al. Space vector and sinusoidal PWM techniques comparison keeping in account the secondary effects[C]//3rd Africon Conference, 1992: 394 - 399.
- [6] KUNG Y S, HUANG P G. High performance position controller for PMSM drives based on TMS320F2812 DSP[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, 2004: 290 - 295.
- [7] 王焕文. 基于 DSP 的数字式逆变控制器仿真系统研究[J]. 华中科技大学学报, 2005, 33(2): 103 - 105.
- [8] HERCOG D, CURKOVIC M, EDELBAHER G, et al. Programming of the DSP2 board with the Matlab/Simulink [C]//IEEE International Conference on Industrial Technology, 2003: 709 - 713.
- [9] TENG F C. Real-time control using Matlab Simulink [C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2000: 2697 - 2702.
- [10] 李真芳, 苏 涛, 黄小宇, 等. DSP 程序开发: Matlab 调试及直接目标代码生成[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003. [编辑: 张 翔]

(上接第 13 页)

参考文献 (References):

- [1] GARRARD K, BRUEGGE T, HOFFMAN J, et al. Design tools for freeform optics [C]//Proceedings of the SPIE, 2005: 95 - 105.
- [2] YIU K L, TAM H Y. An alternate approach to free-form surface fabrication[J]. **Materials Processing Technology**, 2007(192): 465 - 469.
- [3] 李荣彬, 李建广, 张志辉, 等. 虚拟精密加工系统开发的研究[J]. 机械工程学报, 2001(6): 66 - 71.
- [4] 张以漠. 应用光学(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [5] LERNER S A. Optical Design Using Novel Aspheric Surfaces[D]. University of Arizona, 2000: 13 - 17.
- [6] 辛企明. 投影显示系统中的非球面技术[J]. 现代显示, 2003, 37(3): 20 - 23.
- [7] 吴 丹, 谢晓丹, 王先逵. 快速刀具伺服机构研究进展[J]. 中国机械工程, 2008, 19(11): 1379 - 1386.
- [8] KIM H S, LEE K I, LEE K M. Fabrication of free-form surfaces using a long-stroke fast tool servo and corrective figuring with on-machine measurement[J]. **Machine Tools & Manufacture**, 2009, 6(11): 1 - 7.
- [9] 房丰洲, 张效栋. 一种金刚石超精密车床自由曲面加工路径生成方法: 中国, CN 101187807A[P]. 2008 - 05 - 28.
- [10] 任松涛. NC 代码编译器的设计与实现[D]. 西安: 西北工业大学机械电子工程学院, 2007: 3 - 5.
- [11] 魏 林. 基于 VERICUT 的数控加工仿真系统的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学机械工程学院, 2008: 7 - 9.
- [12] 李荣彬, 杜 雪, 张志辉, 等. 光学曲面的超精密加工技术及应用[J]. 制造技术与机床, 2004(1): 17 - 19.
- [13] HU Yong, XU Ming-xu, ZHANG Jun. Research on machining simulation system for optical free-form surfaces [J]. **Advanced Materials Research**, 2010, 101(97): 3020 - 3023.
- [14] 赵燕伟, 朱双胜, 卢 东, 等. 基于直线插补的字体边缘识别技术[J]. 机电工程, 2009, 26(5): 52 - 55. [编辑: 张 翔]