

基于Matlab的NPC单相五电平H桥 SPWM目标代码生成

艾胜 孙驰

(海军工程大学电力电子技术应用研究所, 武汉 430033)

摘要: 介绍了基于 Matlab/Target Support Package TC2 的系统设计方法和开发流程, 提出了一种基于嵌入式目标代码生成工具的中性点箝位 (NPC) 单相五电平正弦脉宽调制波产生方法, 利用 Matlab/Simulink 工具建立了算法模型、仿真验证算法后, 给出了以 TMS320F28335 浮点 DSP 为目标的五电平 SPWM 控制模型, 并自动生成代码, 编译、下载到目标 DSP 中运行, 产生波形与理论吻合, 体现了利用 MATLAB 进行系统设计与代码生成的简易性。

关键词: TMS320F28335DSP Matlab 实时工作站 自动代码生成 正弦脉宽调制 五电平

中图分类号: TM921.5 文献标识码: A 文章编号: 1003-4862 (2009) 04-0013-05

Target Code Generation of NPC Single-phase Five-level SPWM H-bridge Based on Matlab

Ai Sheng, Sun Chi

(Research Institute of Power Electronic Technique & Application, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A system method and development flow chart based on Matlab/Target Support Package TC2 is introduced. An embeded code generation plan is proposed in single-phase five-level SPWM system. After building and validating the algorithm models in Matlab/ Simulink, a five-level SPWM control system model whose target device is TMS320F28335 float-point DSP is presented. Automatic code generation is accomplished from this model, then compiled and downloaded into the DSP board. The results of the experiment agree with present theory which tell the facilities of system design and code generate in Matlab.

Key words: TMS320F28335DSP; Matlab; RTW; code generate; SPWM; five-level

1 引言

DSP凭借运算速度快、控制能力强, 在逆变电路、变频调速等电力电子设备中得到了广泛应用。DSP控制系统的开发效率与产品的开发周期息息相关。传统的系统开发手段, 需要先建立模型、设计与验证算法, 然后通过手工编程实现算法程序。这种分步设计法, 不仅造成了算法模型与程序编制的脱节, 而且使开发者在程序编制过

程中耗费过多的时间和精力, 从而加大了产品开发的工作量, 延长了开发周期。

由美国 TI 与 Mathworks 公司联合开发的 Target Support Package TC2 工具箱为传统设计方法的革新提供了可能, 其基于模型的图形化设计方法提供了将 Matlab\Simulink 与 CCS、TI C2000 DSP 集成在一起的一体化开发手段。DSP 开发平台的嵌入式对象, 使 Matlab\Simulink 与 TI 高速

收稿日期: 2008-09-01

作者简介: 艾胜(1974-), 男, 高工, 专业: 长期从事船舶电器及自动化工作。

DSP结合成为一体。这套软件使设计者能够利用 Matlab平台在DSP目标板上, 由系统模型设计到自动代码生成^[1], 实现系统设计的一体化, 避免了分步设计的烦琐, 完全将开发者从手工编程中解放出来, 显著地简化并缩短系统设计过程。

文献[2]基于自动代码生成功能, 开发无刷直流电机调速系统, 证实了自动代码生成技术在加快系统开发进程中发挥的重要作用。文献[3]利用 RTW, 采用五段法 SVPWM, 实现了基于 TMS320F2812 定点 DSP 的目标代码生成, 验证了系统的可行性。文献[4]采用 PID 调节, 实现了直流电机控制的 DSP 程序直接代码生成。然而目前国内外文献虽然为实现嵌入式系统的一体化开发提供了新思路, 但对目标模型的设计方法涉及较少, 且算法模型均是基于定点 DSP 的, 对于较为复杂的多电平电路没有涉及, 难以推广到复杂系统。

本文利用 Matlab 嵌入式直接目标代码生成工具, 对 TMS320F28335 浮点 DSP 在控制系统一体化设计中的应用作了初步探索, 提出了一种基于实时代码生成工具的五电平 SPWM 波形产生方法, 以 TI 公司最新推出的 TMS320 F28335 为控制芯片, 利用 Target Support Package TC2 模型库, 建立了五电平 SPWM 控制模型, 在 MATLAB 环境中分别进行算法仿真和自动代码生成, 并编译、下载到目标 DSP 中运行。从控制思想的产生到控制的实现, 真实的体现了利用 MATLAB 进行系统设计与代码生成的简易, 展现了直接目标代码生成在复杂电力电子装置中的应用前景。

2 Target Support Package TC2 应用介绍

Target Support Package TC2 工具箱利用 Matlab 实时工作站的 C 代码产生功能, 产生目标模型的实时 C 代码, 从 Simulink 模型自动生成面向 C2000 DSP 的 CCS 工程文件, 并可进一步编译下载到硬件执行^[5]。该工具有助于实现 DSP 算法原型及系统级的算法验证, 实现从 Simulink 模型到 CCS IDE 工程的无缝转换, 降低编写 DSP 代码的难度和工作量。其系统开发流程如图 1 所示。

首先, 通过 MATLAB\ Simulink 建立控制算法模型, 仿真验证算法正确以后, 利用 Embedded Target for TI C2000 中提供的目标功能模块, 建立与硬件相对应的模型, 在正确的配置下, 编译,

链接生成可在目标板上执行的 C 代码, 这时 MATLAB 会自动调用 Link for CCS Development Tools, 创建连接对象把 MATLAB 和 TI CCS 及目标 DSP 连接起来, 并自动打开 Code Composer Studio, 将生成的程序下载到目标 DSP 板运行。

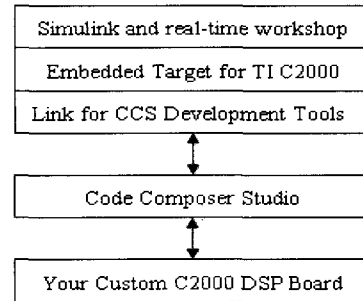


图1 从模型到应用流程图

3 主电路拓扑及 PWM 产生原理

主电路如图 2(a) 所示: 采用中性点箝位 (NPC) 型单相五电平 H 桥拓扑结构, 对于该电路的 PWM 控制方法有多种^[4], 但载波层叠法应用最为广泛, 该方法采用一对反相的正弦信号作为调制波, 与两个层叠的三角波比较, 产生四路独立的 PWM 脉冲, 控制功率管的开通与关断, PWM 原理图如图 2(b) 所示。

wave1 与 wave2 是一对反相的正弦调制波, tr1 与 tr2 为层叠的三角载波, PWM 输出原理表述如下:

$$\begin{cases} Wave1 > tr1 \Rightarrow PWM1 = 1 \\ Wave1 > tri2 \Rightarrow PWM2 = 1 \\ Wave2 > tr1 \Rightarrow PWM1' = 1 \\ Wave2 > tri2 \Rightarrow PWM2' = 1 \end{cases} \quad (1)$$

如式 (1) 所述, 产生的四路独立 PWM 信号 PWM1、PWM2、PWM1'、PWM2', 分别为 T1、T2、T1'、T2' 的驱动信号, 另外四路信号与前者互补, 对应规则如下:

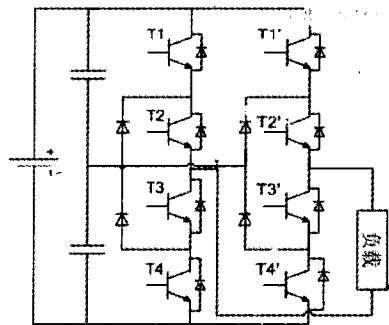
$$\overline{PWM1} \xrightarrow{Drive} T3, \overline{PWM2} \xrightarrow{Drive} T4, \overline{PWM1'} \xrightarrow{Drive} T3', \overline{PWM2'} \xrightarrow{Drive} T4'$$

根据上述 PWM 原理, 建立仿真模型如图 3:

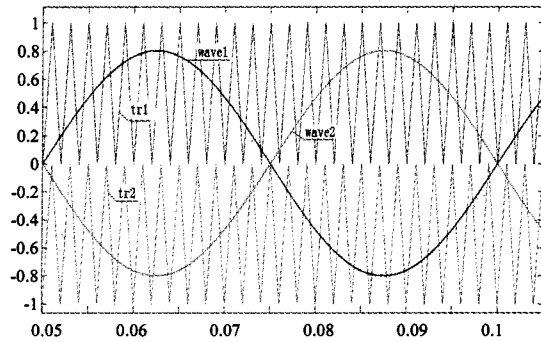
图中 SineWave 即代表原理图中的 wave1, 幅值为 0.7, 频率为 20 Hz, 三角波 tr1 最大值为 1 最小值为 0, 频率为 1 kHz。Wave2 由 SineWave 反相得到, 三角波 tr2 最大值为 1 最小值为 0, 频率为 1

kHz。将输出PWM波作为主电路IGBT的驱动信号，当主电路直流侧电压为500 V时，仿真得到逆

变频器交流输出电压波形如图4所示。仿真结果证明了控制算法的正确性。



(a) 主电路原理图



(b) PWM原理

图2 主电路原理图及PWM原理图

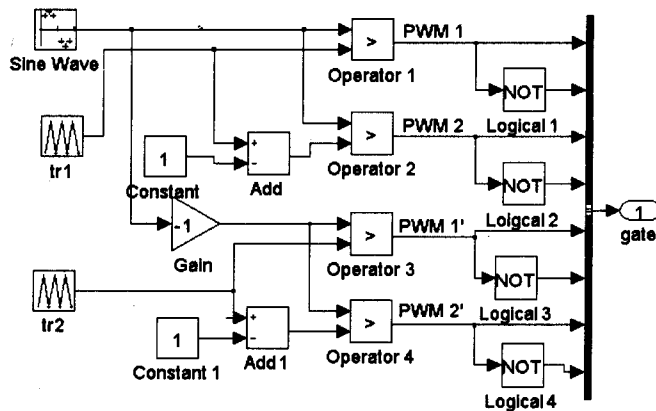


图3 单相五电平H桥PWM仿真模型

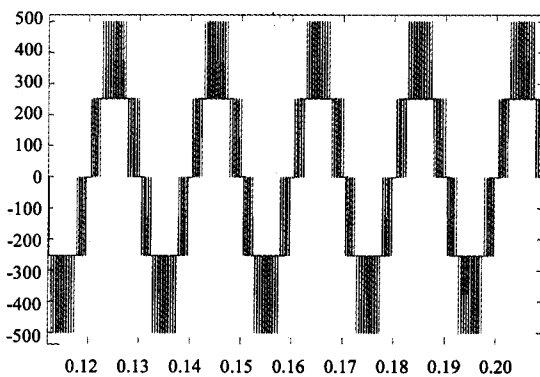


图4 逆变器交流输出电压仿真波形

下面将仿真模型进行改造，使其能正确生成目标DSP代码。

4 控制电路与模型实现

试验硬件电路采用基于TI公司最新推出的浮点控制芯片TMS320F28335的最小系统，目标电路板通过JTAG仿真口与PC机相连，提供12路

PWM信号输出端口和各种接口功能。

TMS320F28335 具有 150MHz 的高速处理能力，具备 32 位浮点处理单元，6 个 DMA 通道支持 ADC、McBSP 和 EMIF，有多达 18 路的 PWM 输出，其中有 6 路为 TI 特有的更高精度的 PWM 输出(HRPWM)，12 位 16 通道 ADC。与前代 DSC 相比，平均性能提升 50%，并与定点 C28x 控制器软件兼容。

由于本文主要用到ePWM外围功能，这里对ePWM模块作详细介绍。TMS320F28335有多达六个ePWM模块，每个ePWM模块有两路输出ePWMA、ePWMB，两个比较寄存器CMPA、CMPB，同一个模块中的比较输出ePWMA或ePWMB，可以由任意一个或几个比较匹配事件触发，包括比较寄存器A匹配，比较寄存器B匹配、周期匹配和定时器为零事件，而ePWM模块的AQ(Action-Qualifier)子模块允许对事件响应行为进行任意设定，包括置位，清零和翻转。同时，

比较寄存器可以配置为两路独立输出,也可以配置为互补输出,配置为互补输出时,ePWMA、ePWMB为互补的信号,死区的上升沿或者下降沿延时都可独立控制。

根据TMS320F28335芯片的特点,产生SPWM信号的三角载波由ePWM模块内部硬件电路产生,不能为负值,更不能对其进行加减运算,因此,需对调制波进行适当变换才能符合要求,考虑到 $tr1=tr2+1$,调整后的比较关系如下:

$$\begin{cases} SineWave > tr1 \Rightarrow PWM1 = 1 \\ SineWave > tr1 - 1 \Rightarrow PWM2 = 1 \\ -SineWave > tr1 \Rightarrow PWM1' = 1 \\ -SineWave > tr1 - 1 \Rightarrow PWM2' = 1 \end{cases}$$

$$\begin{matrix} \text{调制波} \\ \text{变换} \end{matrix} \Rightarrow \begin{cases} SineWave = m_wave1 \\ SineWave + 1 = m_wave2 \\ -SineWave = m_wave3 \\ -SineWave + 1 = m_wave4 \end{cases} \quad (2)$$

经过变换后的调制波 $m_wave N (N=1,2,3,4)$,对应的载波均是最大值1、最小值0,频率为1KHZ的三角波 $tr1$ 。考虑到ePWM模块内部三角波是由内部定时计数器产生,设载波频率为 f_c ,计数时钟频率为 f_{con} ,计数周期P满足:

$$P = \frac{f_{con}}{2f_c} > 0$$

则有:

$$m_wave > tr1 \Leftrightarrow P*m_wave > P*tr1 \quad (3)$$

由于比较值 $P*m_wave$ 有可能小于0,也有可能大于周期寄存器的值,PWM模块要求输入的比较值必须非负,且不能超出周期寄存器所能表示的范围,而 $0 \leq P*tr1 \leq P$,于是对式(3)作如下等效:

$$\begin{cases} P*tr1 \leq P*m_wave, \dots \dots \dots cm_eq = P; \\ P*m_wave \leq 0, \dots \dots \dots cm_eq = 0; \\ 0 < P*m_wave < P*tr1, \dots \dots \dots cm_eq = P*m_wave; \\ P*m_wave > P*tr1 \end{cases} \quad (4)$$

其中,cm_eq为等效的比较值。结合下面设定的ePWM模块比较动作,调整后最终输出的比

较值 $cm_out=p-cm_eq$,需注意的是,最终输入到DSP模块的值数据类型必须符合DSP寄存器的定义,这里为16位无符号整型。

根据以上分析,结合Embedded Target for TI C2000提供的模块,建立五电平SPWM控制模型如图5(a)所示。

图5(a)中sin wave为幅值0.8、频率为20 Hz,相位为0的正弦调制信号,输入到compare value generation子模块进行比较值等效变换,子模块内部封装如图5(b)所示,变换后得到的比较值cm_out1、cm_out2、cm_out3、cm_out4分别作为模块ePWM1、ePWM2、ePWM3、ePWM4的输入,至此,算法模型已搭建完成。

建立模型的另一个重点内容就是ePWM模块的设置:

(1) 在参数设置对话框中设置计数模式为Up-Down,使模块输出对称的PWM波形。

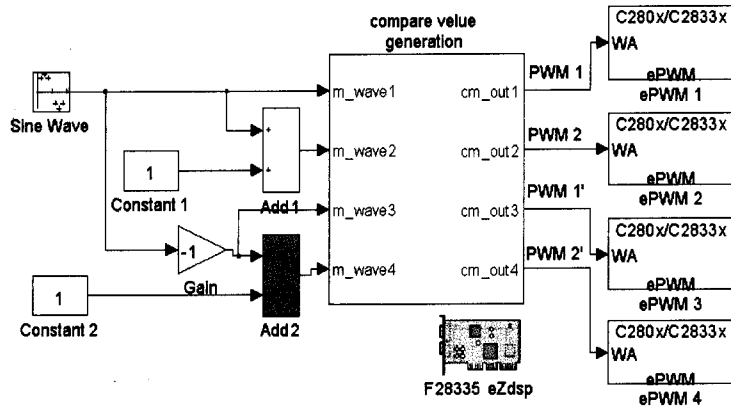
(2) 设置CMPA数值来源为端口输入,输入时刻为计数器为零。完成设置后会在模块旁边出现一个输入端口用来装载CMPA数值,这里将其分别与四路比较值产生子模块输出相连,根据设置,一旦计数器到零,ePWM模块就会从该端口读入新的比较值,用来更新比较寄存器。

(3) 根据设计的载波频率 f_c ,选择ePWM模块的基准时钟频率 f_{con} 与计数周期P,通过计算,设计开关频率为1 kHz,取 f_{con} 为75 MHz时,应该选择计数周期P为37500,对应的设置TB clock 预分频为2,计数周期值内部指定,初始值为37500。

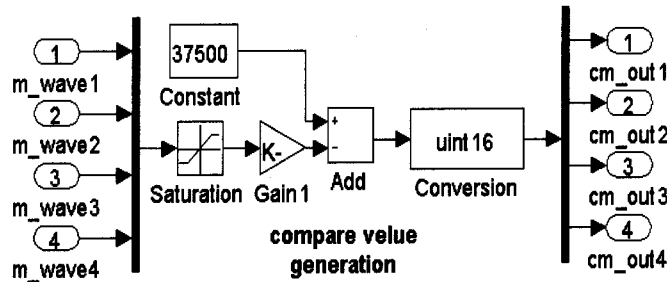
(4) 设置比较事件动作,当CMPA在计数上升沿发生比较匹配时ePWMA为输出为高,CMPA在计数下降沿发生比较匹配时ePWMA为输出为低,其他事件均不动作。

(5)最后,设置前后沿死区时间均为1微秒,这里通过对死区的时间的设置将会自动使ePWMA、ePWMB设置为互补的信号输出。

控制模型中的F28335 eZdsp模块主要用于完成用户定制开发板的设置,是建立MATLAB\Simulink与目标板的重要纽带。通过该模块用户可以访问building、linking、compiling、targeting的设置,从而可以根据需要配置实时工作站产生的代码,MATLAB将根据其设置,定制适合目标板的C程序。



(a) PWM 控制模型



(b) 比较值产生子模块

图5 基于嵌入式目标代码的控制模型

5 实验结果

根据以上建立的目标模型，自动生成目标代码、编译、下载到目标板运行。DSP输出SPWM波形如图6所示。

图6中1、2、3、4通道波形分别对应PWM1、PWM2、PWM1'、PWM2'。经测量，开关频率，PWM波形输出模式均符合设计要求。

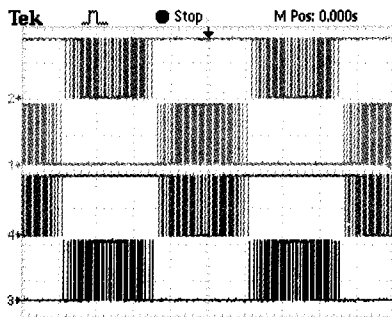


图6 SPWM波形输出

这种基于模型的直接目标代码生成方法，不需要熟练掌握DSP繁杂的寄存器位的设置，不需要在手工编程上花费过多的时间和精力，方便而简单的实现了复杂的五电平SPWM控制。充分的展现了一体化系统设计方法在复杂电力电子装置

中应用的光明前景。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴志红, 孙萌, 毛明平. 基于MATLAB/RTW的车载无刷直流电机调速系统代码自动生成. 沈阳理工大学学报[J], 2005, 12(4): 43~45
- [3] 张卫丰, 余岳辉. 基于RTW的SVPWMDSP控制系统. 电工技术学报[J], 2007, 22(3): 23~28.
- [4] R Duma, P Dobra, M Abrudean, et al. Rapid Prototyping of Control Systems using Embedded Target for TI C2000 DSP[J]. 2007 Mediterranean Conference on Control and Automation, July 27~29, 2007.
- [5] 李永东, 肖曦, 高跃. 大容量多电平变换器[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 陈永春. 从Matlab_Simulink模型到代码实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.