

目 录

实验一	Code Composer Studio 入门	1
实验二	离网逆变器实验（光伏电池）	12
实验三	离网逆变器实验（模拟光伏电源）	19
实验四	并网逆变器实验	26

实验一 Code Composer Studio 入门

一、实验目的

1. 了解 DSP 开发系统、计算机及目标系统的连接方法；
2. 了解 CCStudio v3.3 软件的操作环境和基本功能；
3. 掌握 TMS320F2812 软件开发过程；
4. 学习使用 CCStudio v3.3 软件调试 TMS320F2812 的程序。

二、实验设备

- | | |
|-----------------------------|-----|
| 1. THSTFD-2C 型 并网逆变控制系统 | 1 台 |
| 2. THREM-1 型 DSP 实时在线仿真器 | 1 个 |
| 3. USB 线（一头方，一头扁） | 1 根 |
| 4. 电脑（安装有 CCStudio v3.3 软件） | 1 台 |

三、实验原理

1. 开发 DSP 应用系统一般需要以下几个调试工具来完成：

(1) 软件集成开发环境(CCStudio v3.3)：完成系统的软件开发，进行软件和硬件仿真调试。它也是硬件调试的辅助手段。

(2) DSP 实时在线仿真器：实现硬件仿真调试时与硬件系统的通信，控制和读取硬件系统的状态和数据。

(3) 接口模块：由 DSP 控制系统与辅助电路部分组成，其中 DSP 控制系统提供软件运行和调试的平台。

2. CCStudio v3.3 主要完成系统的软件开发和调试。它提供一整套的程序编制、维护、编译、调试环境，能将汇编语言和 C 语言程序编译连接生成 COFF(公共目标文件)格式的可执行文件，并能将程序下载到目标 DSP 上运行调试。

3. 用户系统的软件部分可以由 CCS 建立的工程文件进行管理，工程一般包含以下几种文件：

- (1) 源程序文件：C 语言或汇编语言文件(*.ASM 或*.C)
- (2) 头文件(*.H)
- (3) 命令文件(*.CMD)
- (4) 库文件(*.LIB, *.OBJ)

四、实验准备

1. 首先确保实验程序文件保存在英文目录下。
2. 确认计算机已安装 CCStudio v3.3 软件（安装说明详见使用说明书）。

3. 将控制屏上的总电源开关，控制电源开关，光伏电源开关，直流负载开关，交流负载开关，电网电源开关，离网负载开关均打到“关”状态。

4. 用 USB 线连接 DSP 仿真器到 PC 机上, DSP 开发板选“仿真”模式。(选择“仿真”模式的方法为将 DSP2812 核心板上 JP6 的短路帽插在“H”一侧)

五、实验内容与步骤

1. 系统连接

进行 DSP 实验之前, 先必须连接好仿真器、接口模块上的 DSP2812 开发板上的 JTAG 口及计算机, 连接方法如下图 1-1 所示:

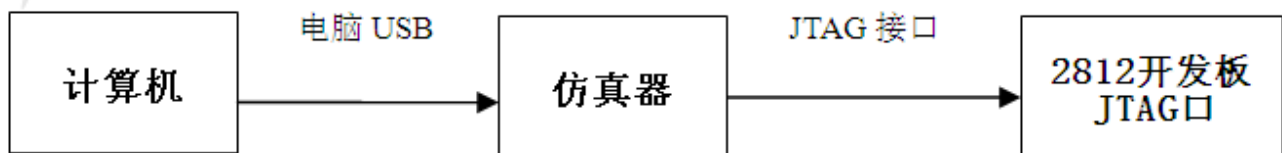


图 1-1 连接方法

2. 上电

在硬件连接后, 依次打开控制屏上的总电源开关, 控制电源开关(不需要打开其他的开关)。

3. 安装 CCStudio v3.3 软件

按照使用说明书所述方法安装好 CCStudio v3.3 调试软件和仿真器 USB 驱动, 并配置好仿真器。

4. 运行 CCStudio v3.3 软件

打开 CCStudio v3.3 软件, 具体方法为: 双击(在本实验指导书中, 若不声明, 点击或双击均指鼠标左键)桌面 CCStudio v3.3 图标, 软件运行至图 1-2 界面, 此时软件左下角有个红色小叉表示软件为“未连接”状态, 点菜单“Debug=>Connect”, 出现如图 1-3 界面, 此时软件左下角出现绿色连接状态并且仿真器绿色运行指示灯亮, 表明 CCStudio v3.3 软件与 DSP 连接正常。

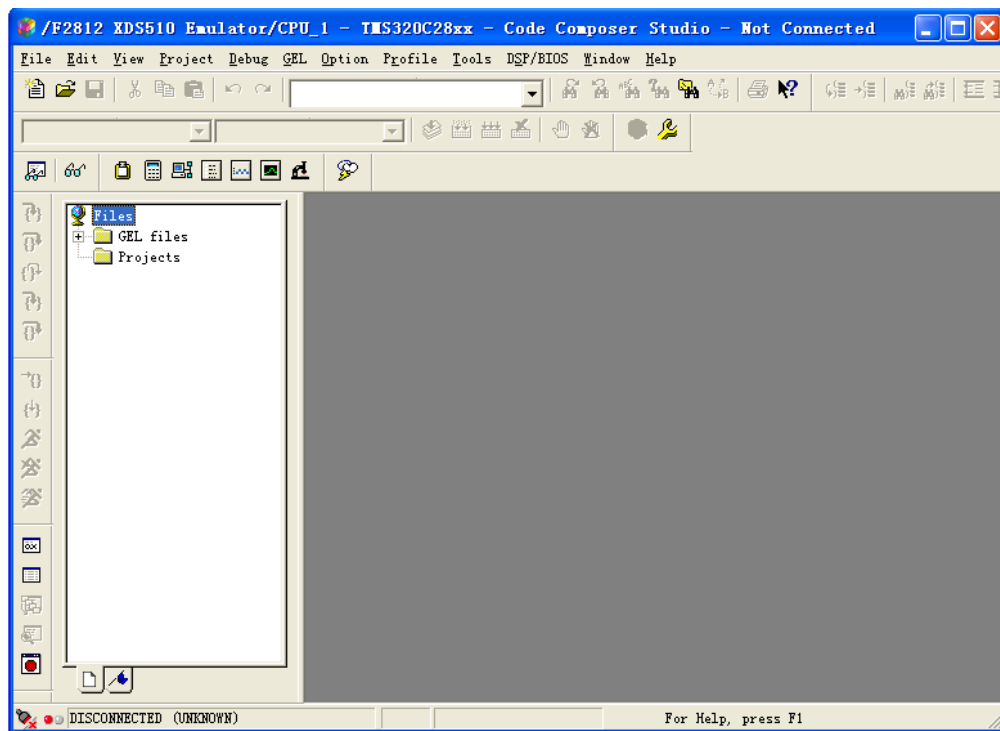


图 1-2 CCStudio v3.3 软件无连接状态界面

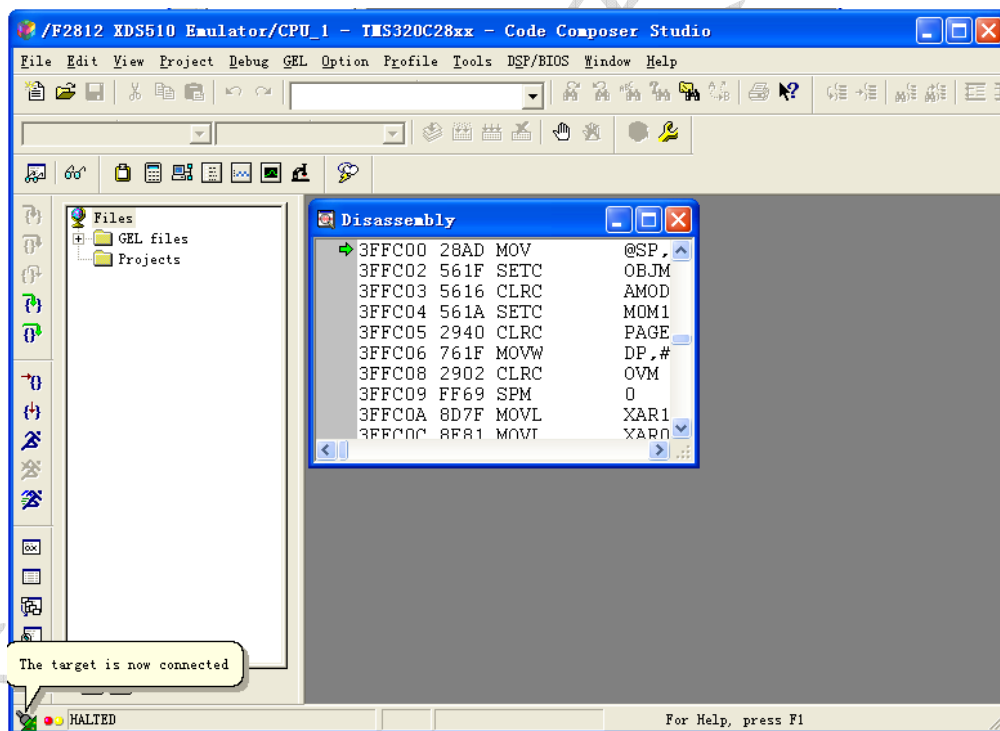


图 1-3 CCStudio v3.3 软件连接状态界面

5. 创建工程

用 CCStudio v3.3 创建用户程序时需要先创建一个工程“Project”，创建工程后可以把代码文件和必要的库文件加入工程中。具体操作步骤如下：

(1) 创建新的工程文件

点击 CCStudio v3.3 软件工具栏上的“Project”菜单如图 1-4，选择“New...”项，出现图 1-5 界面。

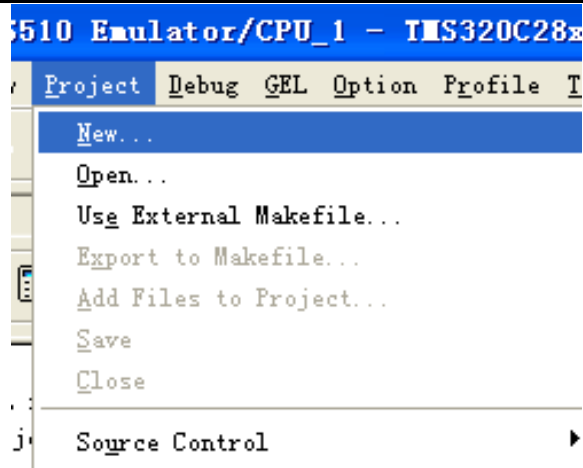


图 1-4

按图 1-5 所示，在工程目录中建立工程 (Project)，点击“Finish”按钮生成“hello.pjt”工程文件。展开主窗口左侧工程管理窗口中“Projects”下新建的工程“hello.pjt”，其各项均为空，如图 1-6 所示。

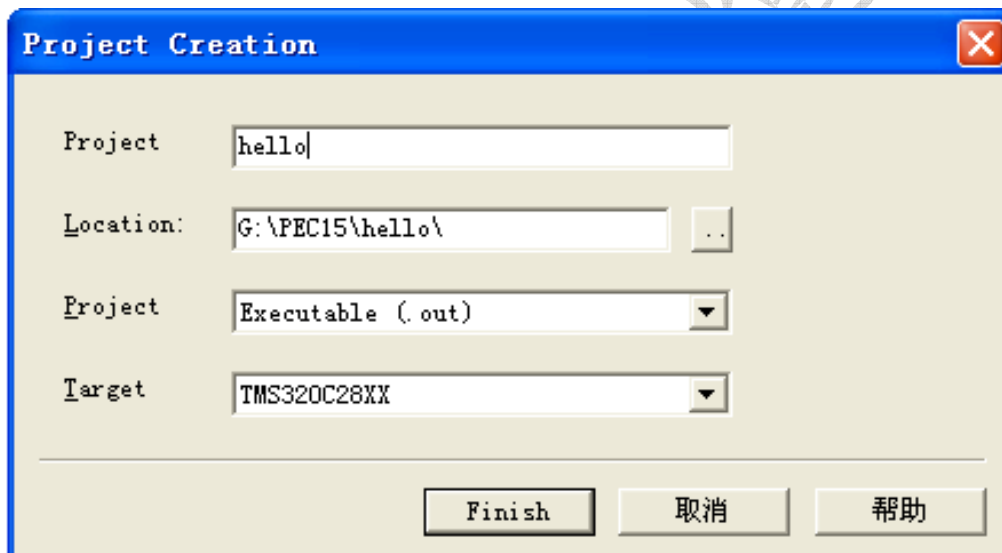


图 1-5 生成工程文件

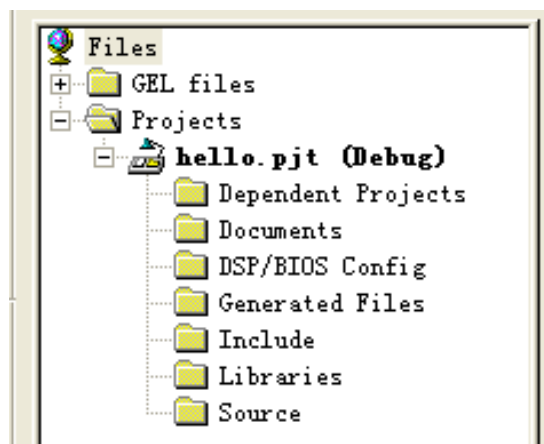


图 1-6 工程文件展开图

(2) 创建新的程序源文件

点击 CCStudio v3.3 软件工具条上的“File=>New”菜单，选择“Source File”项，建立

一个文本源文件，点击“File”=>“Save”菜单或按键盘快捷键“Ctrl+S”将新建的文本文件保存为 C /C++ Source files (*.c*)文件格式，文件名为“hello”，保存在工程根目录下，如图 1-7 所示：

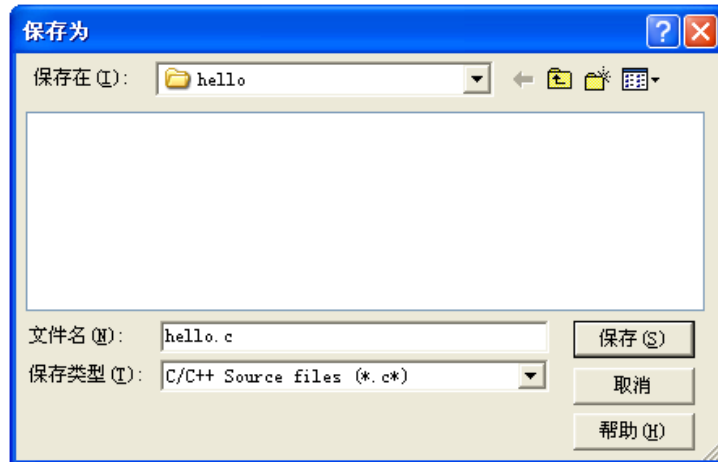


图 1-7 创建程序源文件

在“hello.c”中输入如下程序代码：

```
#include "DSP281x_Device.h"    // DSP281x Headerfile Include File
#include "DSP281x_Examples.h"  // DSP281x Examples Include File
#include "stdio.h"

char str[17]="hello,DSP world!";

void main()
{
    // Initialize System Control registers:
    InitSysCtrl();                //系统初始化
    // Disable and clear all CPU interrupts:
    DINT;                         //禁止并清除所有的 CPU 中断
    IER = 0x0000;
    IFR = 0x0000;
    // Initialize Pie Control Registers:
    InitPieCtrl();                //调用外设中断扩展初始化单元
    // Initialize the PIE Vector Table:
    InitPieVectTable();           //初始化 PIE Vector 向量表
    puts(str); // write a string to stdout
    for(;;) {}
}
```

保存“hello.c”文件在 hello 文件夹下。其中函数“InitSysCtrl()”为初始化 DSP 系统控制子函数，在文件“DSP281x_SysCtrl.c”中定义，函数“InitPieCtrl()”和“InitPieVectTable()”分别在文件“DSP281x_PieCtrl.c”和“DSP281x_PieVect.c”中定义，

“//”或“/* */”分别为行注释和块注释,以增加程序的可读性。值得一提的是在“puts(str);”语句后,需要加设死循环语句“for(;;){}”。标准C运行在操作系统下,退出main()函数后,控制权会交给操作系统。而在DSP中并没有操作系统,退出main()函数就意味着程序跑飞了!故需在DSP执行到main()函数的最后使其进入死循环。其他程序语法解释请参考相关C语言书籍。

(3) 在工程文件中添加程序文件

首先打开发货光盘任一实验程序文件夹,复制“cmd、headers、source、lib”四个目录的所有文件到上一步工程目录的“hello”文件夹下,如图1-8。

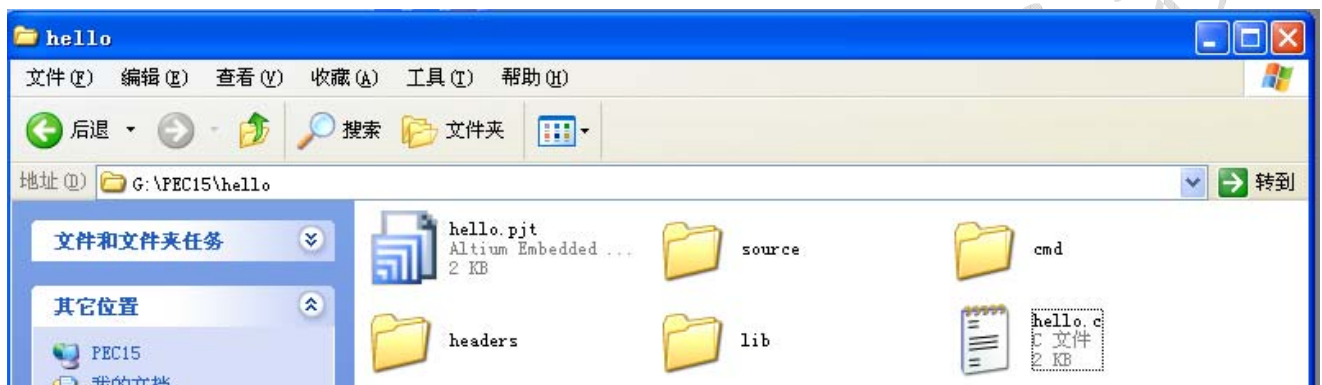


图 1-8

鼠标右键单击工程管理窗口中“Projects”下新建的工程“hello.pjt”,选择弹出菜单“Add Files to Project...”命令,如图1-9所示。在弹出的添加文件对话框中选择文件“hello.c”和source文件夹下“DSP281x_CodeStartBranch.asm、DSP281x_DefaultIsr.c、DSP281x_PieCtrl.c、DSP281x_GlobalVariableDefs.c、DSP281x_PieVect.c、DSP281x_SysCtrl.c”以及cmd文件夹下文件“DSP281x_Headers_nonBIOS.cmd和F2812_EzDSP_RAM_lnk.cmd”,将其添加到工程“hello.pjt”中,如图1-10所示。

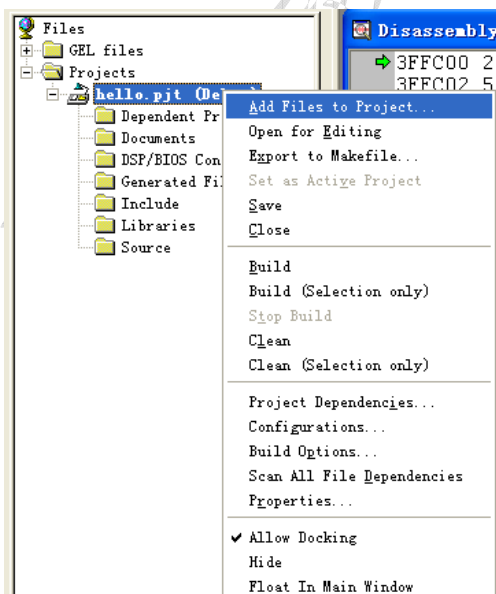


图 1-9

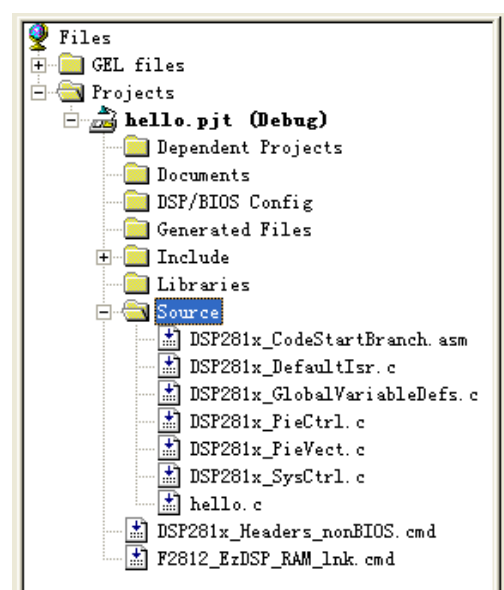


图 1-10

(4) 修改工程文件的设置

鼠标右键单击工程管理窗口中“Projects”下新建的工程“hello.pjt”，选择弹出菜单“Build Options...”命令，弹出编译设置对话框，选择“Compiler”选项卡的“Preprocessor”项，修改头文件 (*.h) 搜索路径“Include Search Patch”为“..\headers;headers”，如图 1-11 所示。若有多个搜索路径则用分号“;”将各路径隔开。若头文件 (*.h) 与工程文件 (*.pjt) 在同一目录中则可略过此步，CCStudio v3.3 编译器会自动包含当前工程目录下的所有头文件。

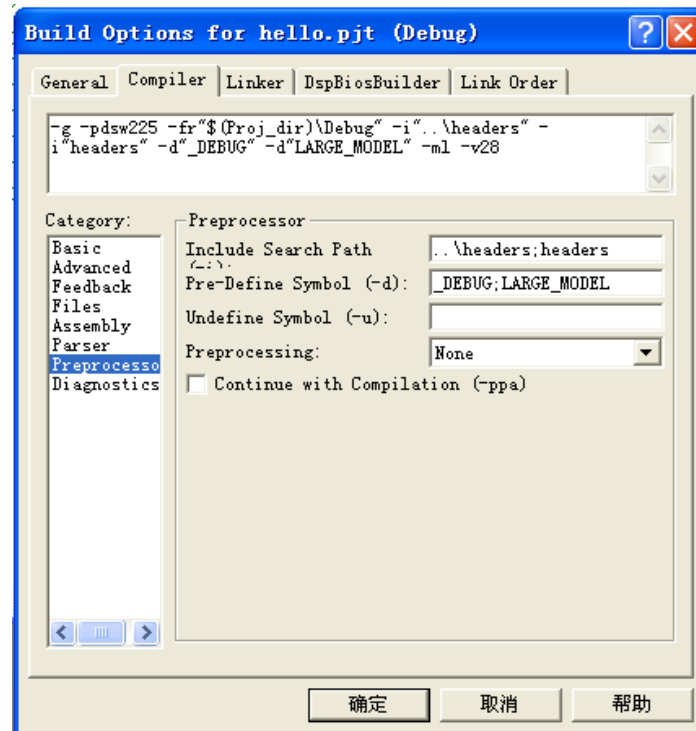


图 1-11

选择“Linker”选项卡的“Basic”项，修改堆栈大小（Stack Size）为“0x400；库文件路径（Library Search Patch）为“lib”目录及库文件名（Include Libraries）为“rts2800_ml.lib”如图 1-12 所示，点击“确定”保存设置。

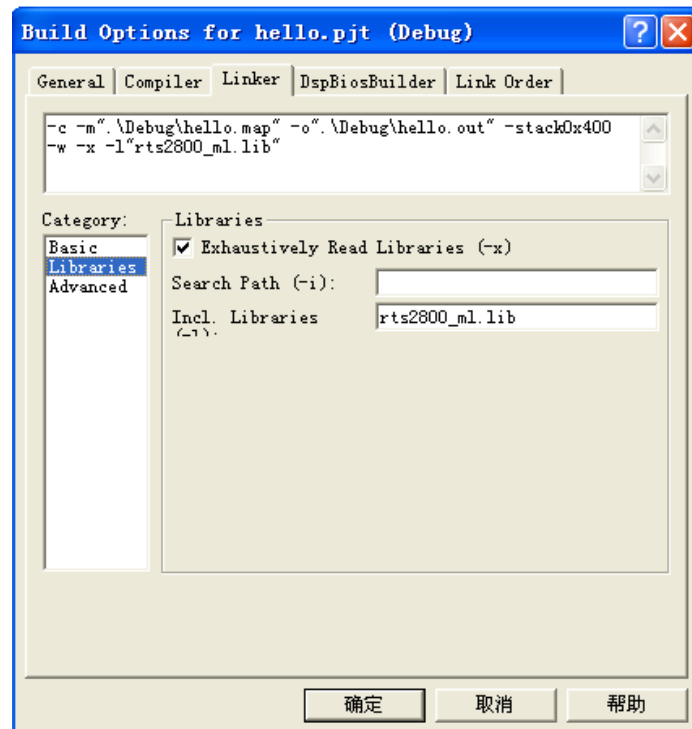


图 1-12

(5) 编译下载工程

点击图标窗口横条上的全编译图标“”（打开 CCStudio v3.3 软件后在菜单“Option”中的“Customize”的“Program/Project/CIO Option”中选中“Load Program After Build”选项，编译通过后自动加载目标文件到 DSP），程序编译成功后，会在信息窗口提示相关编译信息，如图 1-13 所示。

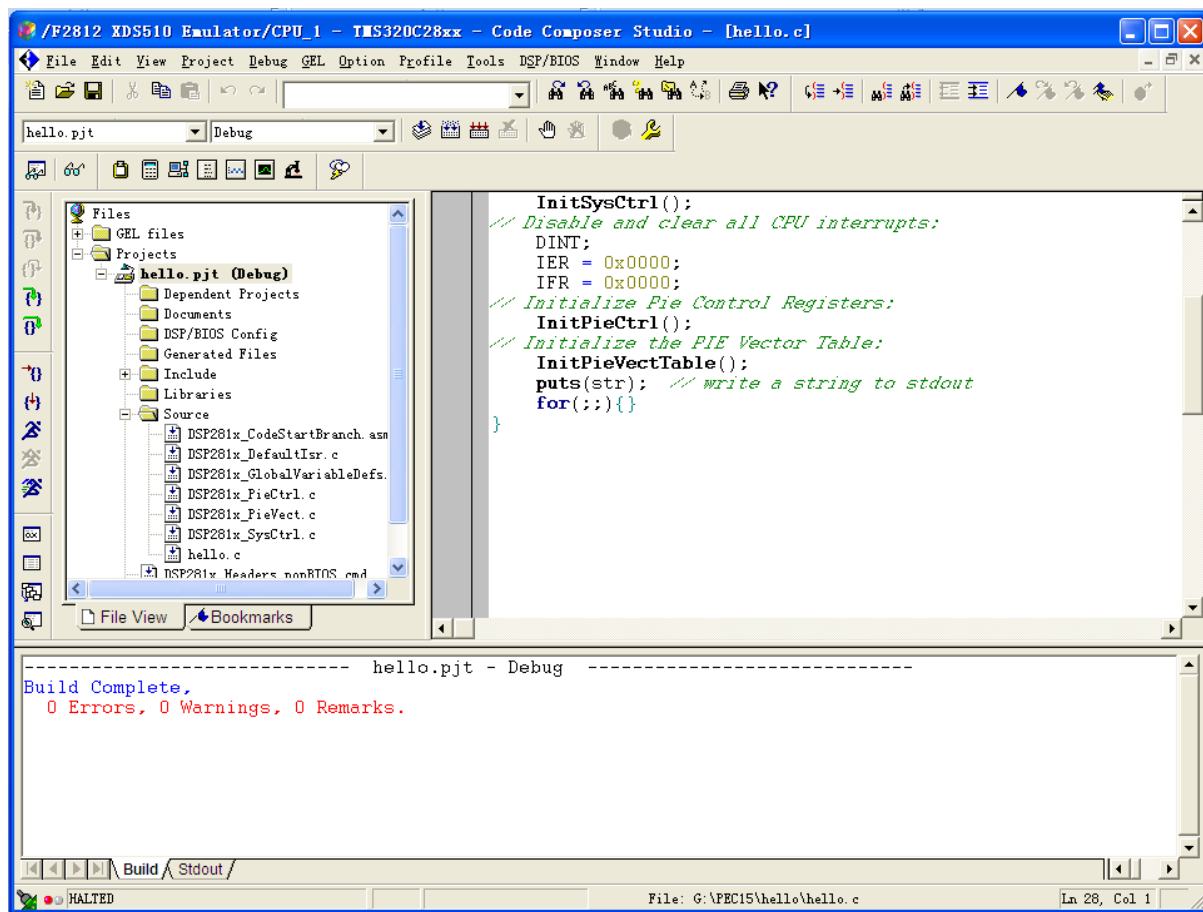


图 1-13

6. 调试程序

程序调试就是检验我们设计的程序是否能够正常运行，是否产生正确的结果，是否存在设计漏洞，算法设计是否合理，是否能够准确地控制各种硬件资源，是否能够实现预期的功能等等。

CCS 的调试环境功能很强，可以在 C 语言级调试，也可以在汇编语言级调试，并提供了多种运行程序的方式或调试手段，比较常用的有以下几种：连续运行、设置观察窗、单步运行、动画运行和设置断点运行等。下面将以前面给定的例子介绍各种调试手段。

(1) 连续运行方式

在图 1-13 所示的界面上，将源程序观察窗作为当前窗口。首先应选择菜单命令“Debug=>Reset CPU”（调试=>CPU 复位），使 DSP 复位，然后选择菜单命令“Debug=>Restart”（调试=>程序复位），然后选择菜单命令“Debug=>Go Main”（调试=>跳到 main() 函数），此时可以看到程序已经执行到 main() 函数的第一条指令处。点击 CCS 工具栏的 Run 图标“”或者按动 F5 键，使程序进入实时运行状态。点击图标“”停止程序的运行，此时我们可以看到程序的运行结果：在 CCS 的 Stdout 窗口输出“hello, DSP world!”，如下图 1-14 所示。

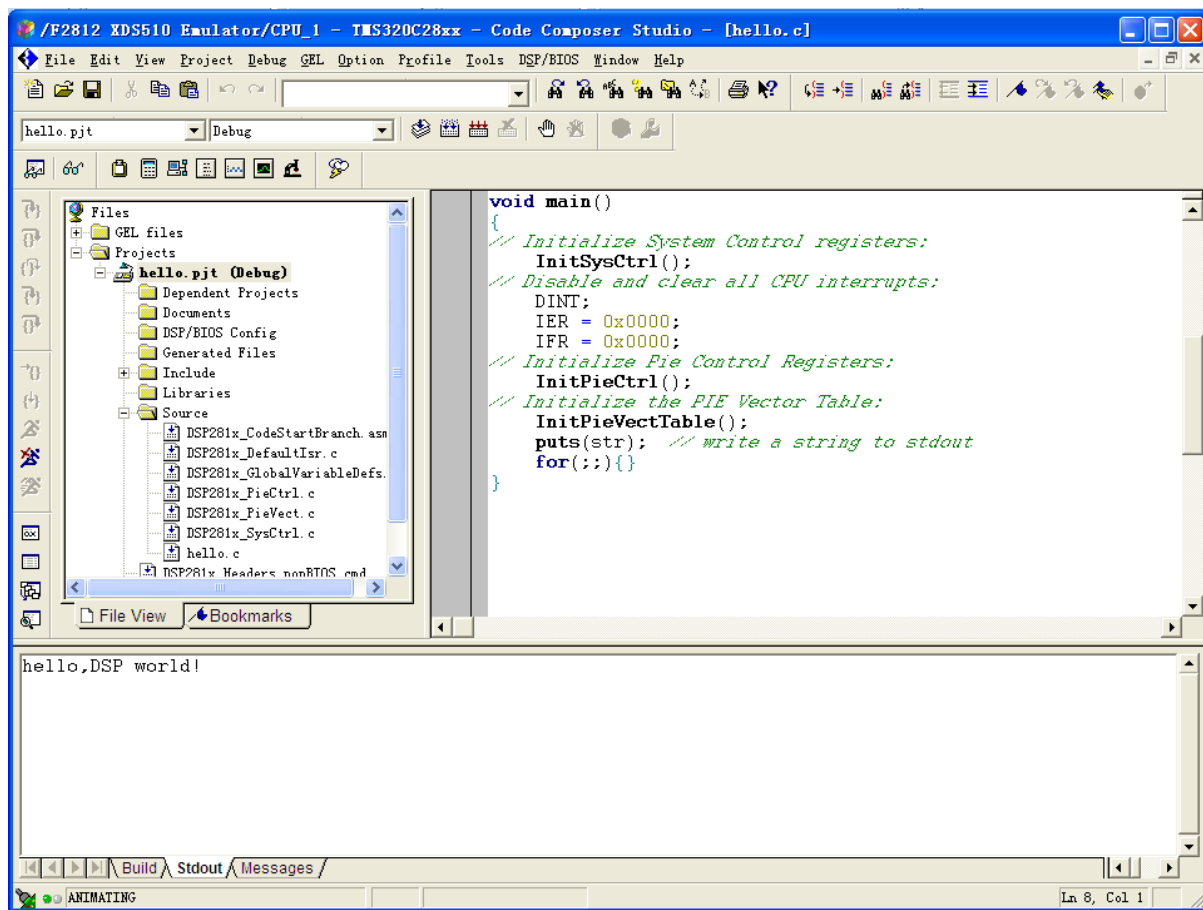


图 1-14

(2) 使用观察窗口 (Watch Window)

展开主窗口左侧工程管理窗口中在“Projects”下新建的工程“hello.pjt”，双击 Source 下的源文件“hello.c”，打开文件，双击 main() 函数中的变量“str”将其选中，点击鼠标右键选择“Add to Watch Window”命令，将变量“str”添加到观察窗口中。点击其左边的“+”展开变量数组，观察字符串在 C 语言中的存放格式。变量的地址、值等显示默认格式为十六进制 (hex)，如果想改变显示格式，则单击观察窗口的最后一栏，在弹出的菜单中选择要显示的格式。常用的格式指示和其代表格式的对应关系如表 1 所列。

表 1 常用格式指示表

字母符号	代表的格式
dec	十进制
bin	二进制
scientific	指数浮点
float	十进制浮点
hex	十六进制
oct	八进制
unsigned	无符号整型
char	ASCII 字符 (字节)

7. 关闭所有窗口，关闭控制电源开关，实验完毕。

六、实验报告

1. 简述 DSP 开发系统和计算机与目标系统的连接方法。
2. 简述实验过程中是如何创建工程的。

七、思考题

1. “hello.c”中的显示语句为“puts”，为什么不用“printf”语句。
2. F2812 的 C 语言与标准 C 语言有什么区别，工程由哪些文件组成。

八、注意事项

1. 由于本实验为 DSP 基础实验，只需要接口模块上的 DSP2812 开发板就可以完成实验，所以实验过程中只需要依次打开控制屏上的总电源开关，控制电源开关。
2. 设备工作时带有强电，操作应谨慎小心防止触摸到强电，严禁违反实验规定进行操作，设备上电后即使工作正常，也应该有人在现场进行监管。
3. 如果在实验过程中出现软件死机或者 CCStudio v3.3 断开等现象，请首先关闭控制屏上控制电源开关，再断开连接仿真器的 USB 线，最后关闭 CCStudio v3.3 软件。完成前面步骤后，先连接好 USB 线，再打开控制屏上控制电源开关，最后按照实验步骤做实验。

实验二 离网逆变器实验（光伏电池）

一、实验目的

1. 掌握 SPWM 调制的原理。
2. 实现光伏离网逆变。

二、实验器材

- | | |
|-----------------------------|-----|
| 1. THSTFD-2A 型 模拟光源跟踪控制系统 | 1 台 |
| 2. THSTFD-2C 型 并网逆变控制系统 | 1 台 |
| 3. THREM-1 型 DSP 实时在线仿真器 | 1 个 |
| 4. USB 线（一头方，一头扁） | 1 根 |
| 5. 电脑（安装有 CCStudio v3.3 软件） | 1 台 |
| 6. 数字万用表 | 1 只 |

三、实验原理

1. 离网逆变器实验（光伏电池）结构

如图 2-1 所示，本实验是将光伏电池板发出的直流电通过逆变器逆变，然后将逆变器输出经过 LC 滤波，最后经隔离变压器后输出接负载。本实验中逆变器采用 SPWM 调制方式。

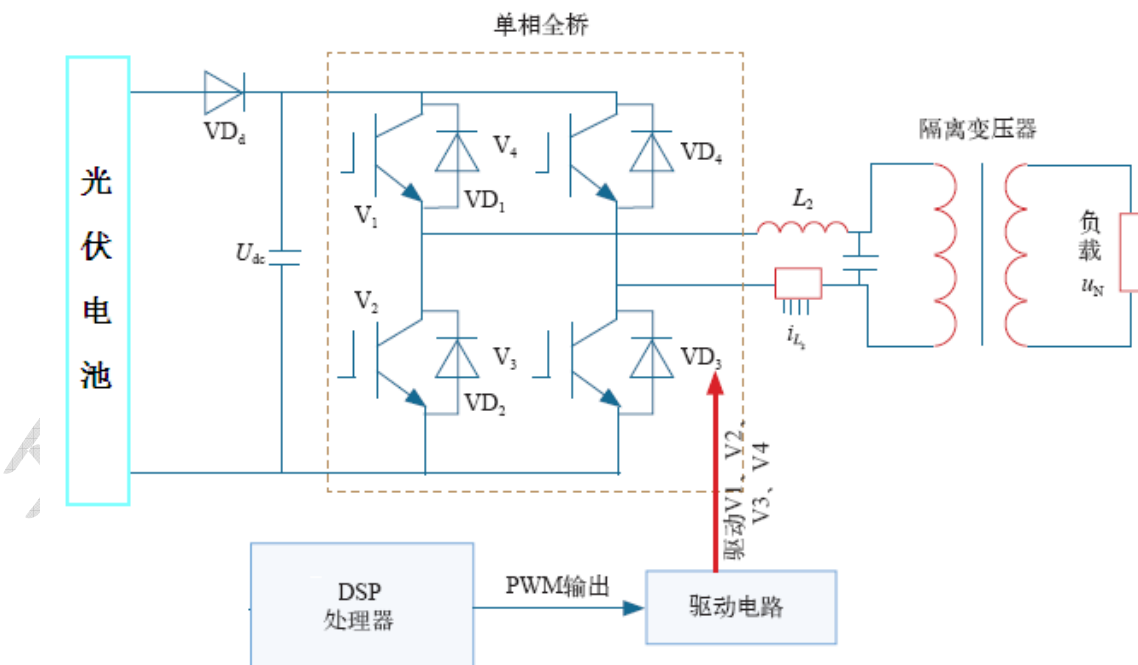


图 2-1 离网逆变器实验（光伏电池）结构

2. SPWM 调制原理

电压正弦调制就是把正弦半波看成由 N 个相连的脉冲所组成的波形，这些脉冲宽度相等但幅值不等，根据采样控制理论中的面积等效原理，把这些等宽不等幅的脉冲用相应数量的等幅不等宽的矩形脉冲列来代替，矩形脉冲的中点与正弦每一等份的面积相等。这样，由 N 个等幅

而不等宽的矩形脉冲所组成的波形与正弦波的半周等效。对于正弦波的负半周也可以用相同的方法来等效。

在调制过程中，把希望得到的波形作为调制波，受它调制的信号作为载波，载波通常为等腰三角形，因为等腰三角形的高度和宽度呈线性关系且左右对称，当它与一个正弦波曲线相交时，在交点时刻控制逆变器电流中开关器件的通断，就可以得到一组幅值相等而脉冲宽度正比于对应区间正弦波曲线数值的矩形脉冲，如图 2-2。这就是 SPWM 法的基本思想。

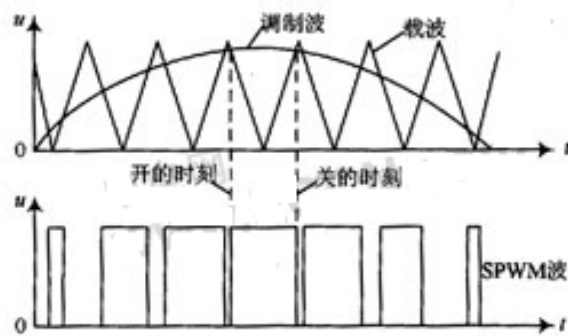


图 2-2 SPWM 产生方法

3. SPWM 调制常见的方法

常见的调制方法有单极性调制法与双极性调制法。

(1) 单极性调制

本实验采用控制理论是单极性倍频 SPWM 调制。下图 2-3 是本实验逆变主电路拓扑图：

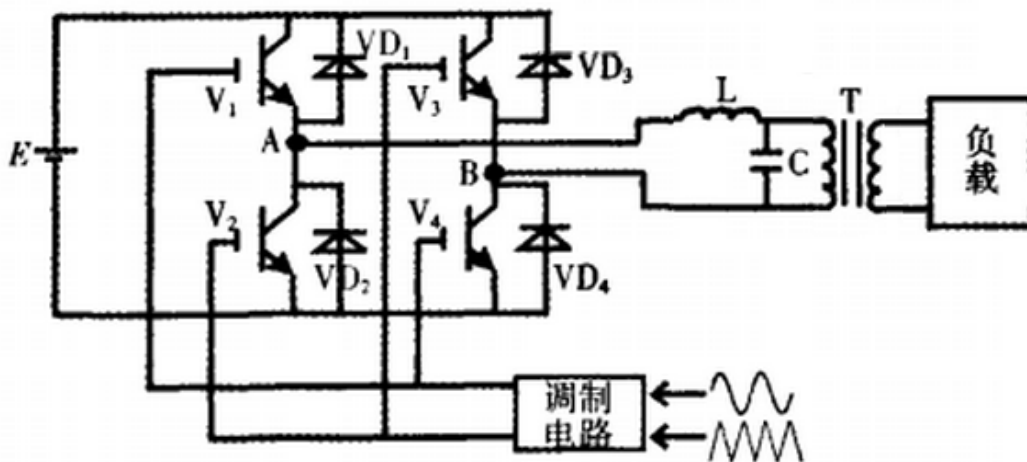


图 2-3 DC/AC 主电路拓扑图

单极性倍频 SPWM 调制法就是用 2 个极性相反的参考正弦波与双向三角形载波相交产生功率开关驱动信号。原理如下图 6-3 所示，这种调制方式含有 2 个基波 U_g 和 $-U_g$ 。 U_g 与三角波 U_c 相交产生 2 个信号 U_a 和其互补信号 $\overline{U_a}$ ，而 $-U_g$ 与 U_c 相交也产生 2 个信号： U_b 和 $\overline{U_b}$ 。

输出电压 U_o 的正半周是由 U_a 和 U_b 的与逻辑决定的。当 U_a 、 U_b 为高电平时， V_1 和 V_4 导通，使得 $U_o = U_d$ ；当 U_a 或 U_b 有一个为低电平时，则 V_2 和 V_4 或者 V_1 和 V_3 导通而使得 $U_o = 0$ 。因为在正半周内， U_a 的高电平一直比 U_b 的低电平区宽，所以 V_2 、 V_3 不会同时开通，从而使得

输出电压 U_o 中只包含 U_d 和 0 两个电平。同理，在负半周输出电压 U_o 由 U_a 和 $\overline{U_b}$ 的与逻辑决定，它只包含 0 和 $-U_d$ 两个电平。由于 U_o 在一个载波周期内有 2 次状态转变，所以其频率是开关管的 2 倍。

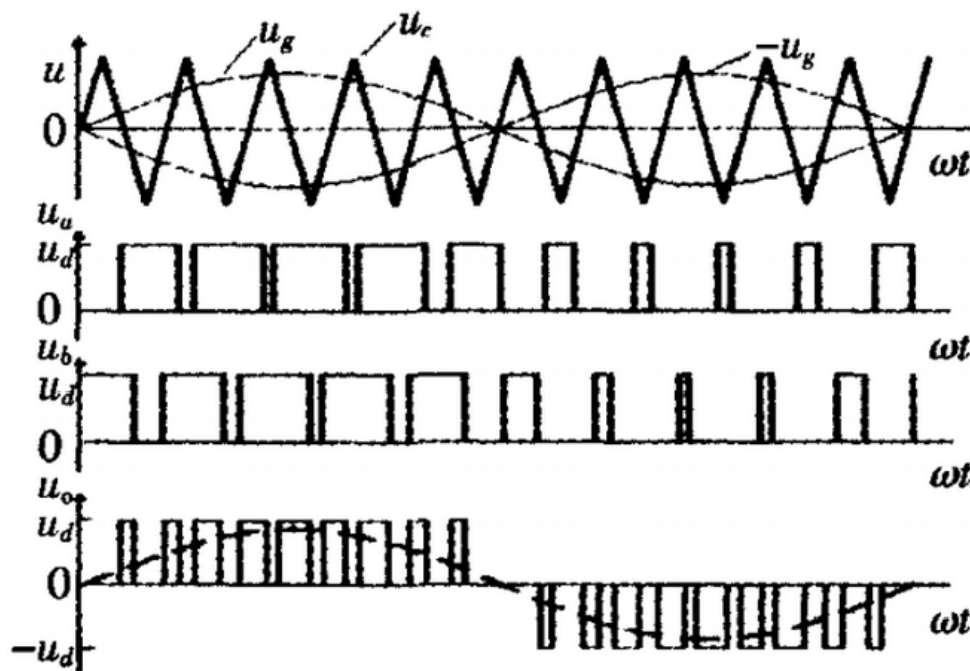


图 2-4 单极性调制法

(2) 双极性调制

图 2-5 为单相 H 桥双极性调制法时的波形。 U_r 为正弦调制波， U_c 为三角载波。当 U_r 大于 U_c 时 V_1 与 V_4 导通，当 U_r 小于 U_c 时 V_2 与 V_3 导通，所以输出电压在 $\pm E$ 之间切换，因此这种调制被称为双极性调制法。

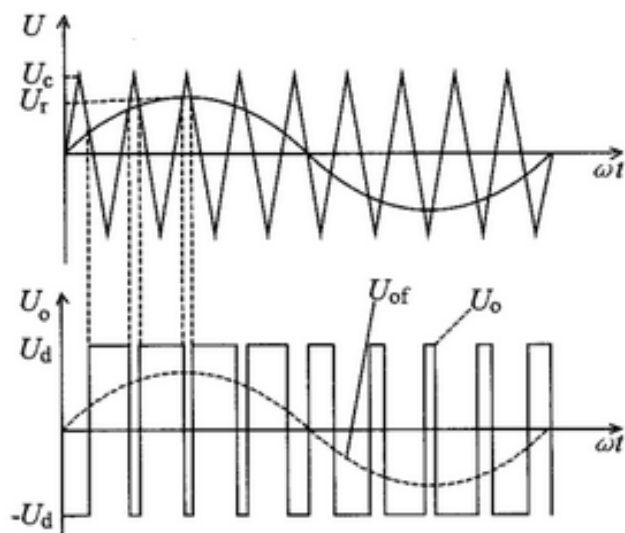


图 2-5 双极性调制方法

4. SPWM 调制在 DSP 上的实现方法

(1) 互补的驱动信号的产生

以定时器 T1 为例，具体描述 PWM1 和 PWM2 引脚输出互补的 PWM 波形的方法。

如图 2-6 所示，定时器 T1 工作于连续增/减计数模式。当 T1CNT 的值递增计数到和 CMPR1 的值

相等时，发生比较匹配事件，PWM1脚产生低电平信号，PWM2产生高电平信号。当T1CNT的值递减计数到和CMPR1的值相等时，发生比较匹配事件，PWM1脚产生高电平信号，PWM2产生低电平信号。这样PWM1和PWM2就会输出对称的PWM波形，实现对一对互补的开关管 V_1 与 V_2 的控制。

实际应用中，开关管从导通到关断，总会有延迟，这样，如果采用图6-5中的PWM驱动信号，就会有一小段时间一对互补的开关管同时处于导通状态，这是非常危险的。为了解决这个问题，我们需要一对互补的开关管的驱动信号有一定的死区，如图2-7所示。这样，任何一对互补的开关管从关断到导通都要经过一段死区时间的延时，也就是等到一个开关管完全关断的时候，另一个开关管才能导通，反过来也是一样。具体时间的计算，请参考相关数据或芯片手册。

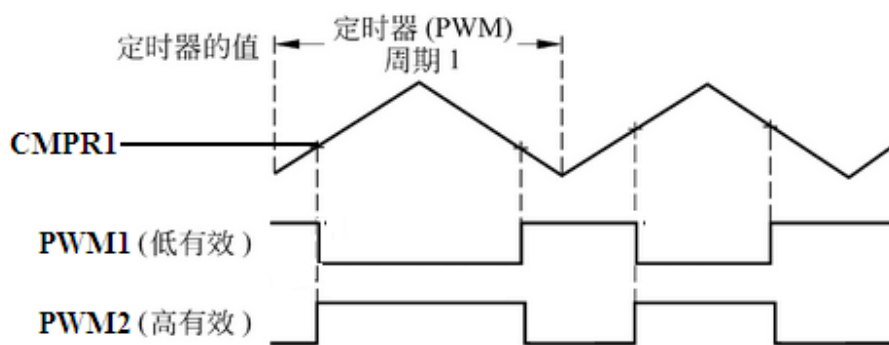


图2-6 使用比较单元和PWM电路产生对称PWM波形

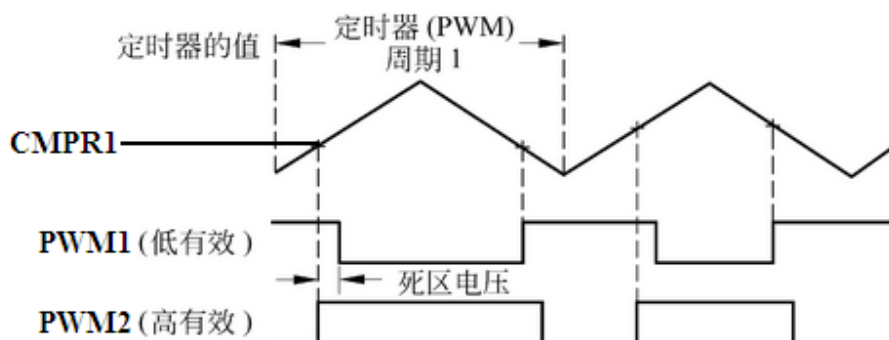


图2-7 使用比较单元和PWM电路产生对称PWM波形（加入死区）

(2) SPWM 调制算法具体实现方法

本程序采用对称规则采样法，计算出每个周期中占空比的值，然后将占空比得到的值赋给DSP的CMPR1与CMPR2，实现SPWM调制，具体方法详见王晓明，王玲编著的《电动机的DSP控制—TI公司DSP应用》一书的第三章。

四、实验准备

1. 首先确保实验程序文件保存在英文目录下。
2. 确认计算机已安装 CCStudio v3.3 软件。
3. 将控制屏上的总电源开关，控制电源开关，光伏电源开关，直流负载开关，交流负载开关，电网电源开关，离网负载开关均打到“关”状态。
4. 将 THSTFD-2A 型模拟光源跟踪控制系统连接模块上的光伏电池输出接口（具体接口

为从模拟光源跟踪控制系统控制屏从右数第二个连接口) 连接到 THSTFD-2C 型并网逆变控制系统连接模块上的光伏电池输入接口 (具体接口为从并网逆变控制系统控制屏从左数第一个接口)。

5. 用 USB 线连接 DSP 仿真器到 PC 机上, DSP 开发板选“仿真”模式。(选择“仿真”模式的方法为将 DSP2812 核心板上 JP6 的短路帽插在“H”一侧)

五、实验内容与步骤

本实验将逆变器主电路连接成 SPWM 调制输出电路, 然后下载程序, 实现逆变器 SPWM 调制输出。

(一) 组成 SPWM 调制输出电路

1. SPWM 调制输出主电路图见图 2-8 所示, 模拟光伏装置电源连接到 Boost 升压电路输入端, 经 Boost 电路升压后经全桥逆变, 全桥逆变输出经 LC 滤波器, 然后通过隔离升压变压器。

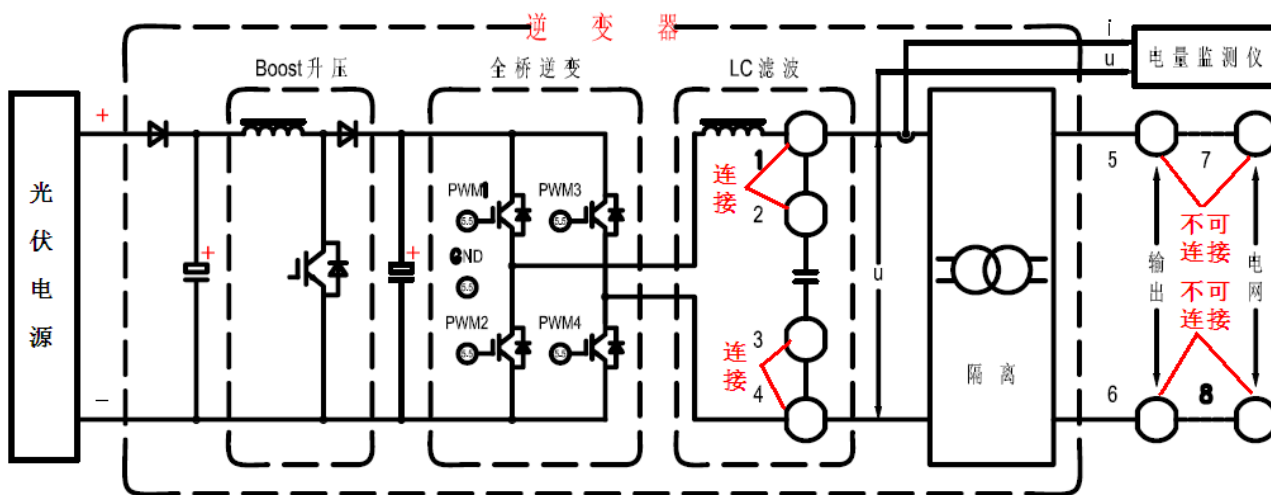


图 2-8 逆变器主电路图

2. 连接成为 SPWM 调制输出电路。具体方法: 用四号强电线, 将铝面板上 1 连接到 2, 将铝面板上的 3 连接到 4。注意: 逆变器输出不需要并入电网, 所以在离网逆变器实验中电网 7 和 8 不允许接到输出 5 和 6, 否则有可能会引起逆变器损坏。

3. 接线确认无误后, 依次打开控制屏上总电源开关, 控制电源开关, 光伏电源开关。

(二) 通过 CCStudio v3.3 下载 DSP 代码并运行

1. 打开 CCStudio v3.3 软件, 点击菜单栏上的“Debug”, 选择“Connect”, 确认 CCStudio v3.3 软件正常连接后, 点击“Project\Open”打开“...\program\SPWM\SPWM.pjt”工程项目。(注意程序不能放在中文路径下)

2. 在 CCStudio v3.3 集成开发软件的左端可以看到工程 SPWM.pjt 所包含的头文件及源文件, 仔细阅读源文件及头文件, 了解程序流程。(用户可以修改或增加自己的算法)

3. 点击编译“”编译下载程序, 点击“Debug—Reset CPU”, 再点击“Debug—Restart”, 接着点击“Debug—Go Main”, 再点击“Debug—Run”或者点击左侧运行图标点“”运行程序。

4. 关闭 CCStudio v3.3 软件或者点选在 CCStudio v3.3 软件中“Debug”下的“Disconnect”。

(三) 离网逆变器实验（光伏电池）

1. 按下键盘接口模块上的“启/停”，逆变器开始工作。

2. 通过电量监测仪观察隔离变压器输入电压，电流的大小，波形，参考见图 2-9，2-10。也可以通过示波器测量隔离变压器输入电压的波形。（用电量监测仪观察波形的方法为按电量监测仪 SET 键进入主菜单，通过上下键选择谐波参数，按回车键，进入谐波参数菜单，然后选择谐波波形）。



图 2-9 电量监测仪输入电压，电流参考值

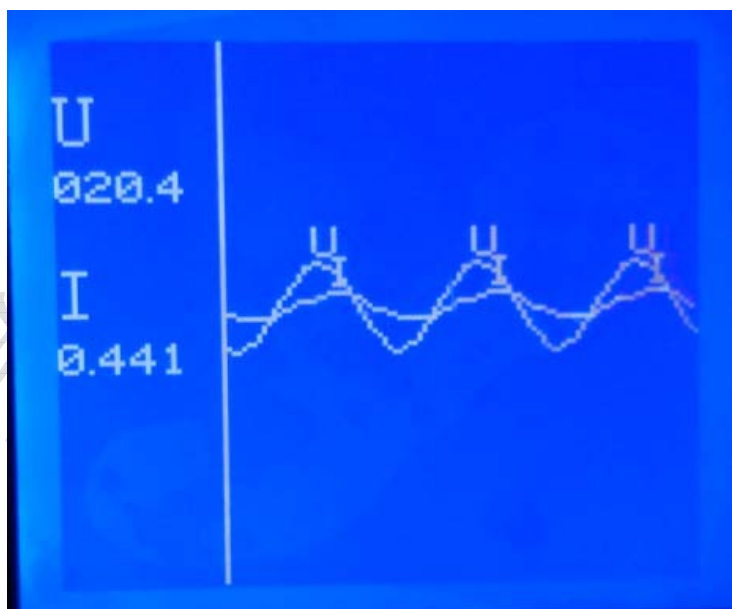


图 2-10 电量监测仪显示参考波形

3. 通过万用表交流电压档测量隔离变压器输入前，输入后的电压大小。

4. 打开控制屏上的离网负载开关，交流负载开关，负载风扇（AC 220V）开始转动，装饰灯（AC 220V）开始闪烁。

5. 做完实验后，按下键盘接口模块上的“启/停”，逆变器停止工作，然后依次关闭离网负载开关，交流负载开关，光伏电源开关，控制电源开关，总电源开关。

六、实验报告

1. 简述 SPWM 调制的原理。
2. 记录实验中的波形。
3. 通过测量变压器输入前，输入后的电压大小，计算出变压器的变比。

七、思考题

在本实验中电网 7 和 8 为什么不允许接到输出 5 和 6。

八、注意事项

1. 设备工作时带有强电，操作应谨慎小心防止触摸到强电，严禁违反实验规定进行操作，设备上电后即使工作正常，也应该有人在现场进行监管。
2. 离网逆变器实验时，不需要打开控制屏上的电网电源开关。
3. 做本实验时，电网 7 和 8 不允许接到输出 5 和 6，否则会损坏逆变器。
4. 在通电前，一定要检查接线有没有错误。逆变器输出不能短路，否则会损坏逆变器。
5. 如果程序在非实时在线模式下运行，用户不能在 CCStudio v3.3 窗口中对变量进行操作。如果想观察变量变化情况，对变量进行操作，请选择实时在线模式。
6. 如果在实验过程中出现软件死机或者 CCStudio v3.3 断开等现象，请首先按下键盘接口模块上的“启/停”，逆变器停止工作，然后依次光伏电源开关总电源开关，控制电源开关，再断开连接仿真器的 USB 线，最后关闭 CCStudio v3.3 软件。完成前面步骤后，先连接好 USB 线，再依次打开控制屏上总电源开关，控制电源开关，光伏电源开关，最后重新按实验步骤做实验。

实验三 离网逆变器实验（模拟光伏电源）

一、实验目的

1. 了解离网逆变原理和离网逆变电路的结构。
2. 了解 SPWM 控制思想。
3. 了解利用 Matlab/Simulink 自动生成 DSP 代码的方法。

二、实验器材

- | | |
|-----------------------------|-----|
| 1. THSTFD-2C 型 并网逆变控制系统 | 1 台 |
| 2. THREM-1 型 DSP 实时在线仿真器 | 1 个 |
| 3. USB 线（一头方，一头扁） | 1 根 |
| 4. 单路直流可调稳压电源 | 1 台 |
| 5. 电脑（安装有 CCStudio v3.3 软件） | 1 台 |
| 6. 数字万用表 | 1 只 |

三、实验原理

通常，把将交流电能转换成直流电能的过程称为整流，把完成整流功能的电路称为整流电路，把实现整流过程的装置称为整流设备或整流器。与之相对应，把将直流电能转换成交流电能的过程称为逆变，把完成逆变功能的电路称为逆变电路，把实现逆变过程的装置称为逆变设备或逆变器。

1. 离网逆变器拓扑结构

离网逆变器是将直流电逆变成要求的交流电直接供负载使用，而不并入电网。如图 3-1 所示，离网逆变器主要由 DSP 处理器，采样与反馈，驱动电路，Boost 升压斩波电路，单相全桥，滤波及隔离变压器等部分组成。本实验系统，直流电源为单路直流可调稳压电源（0-30V/5A），经隔离变压器后的交流输出为 220V，50Hz。

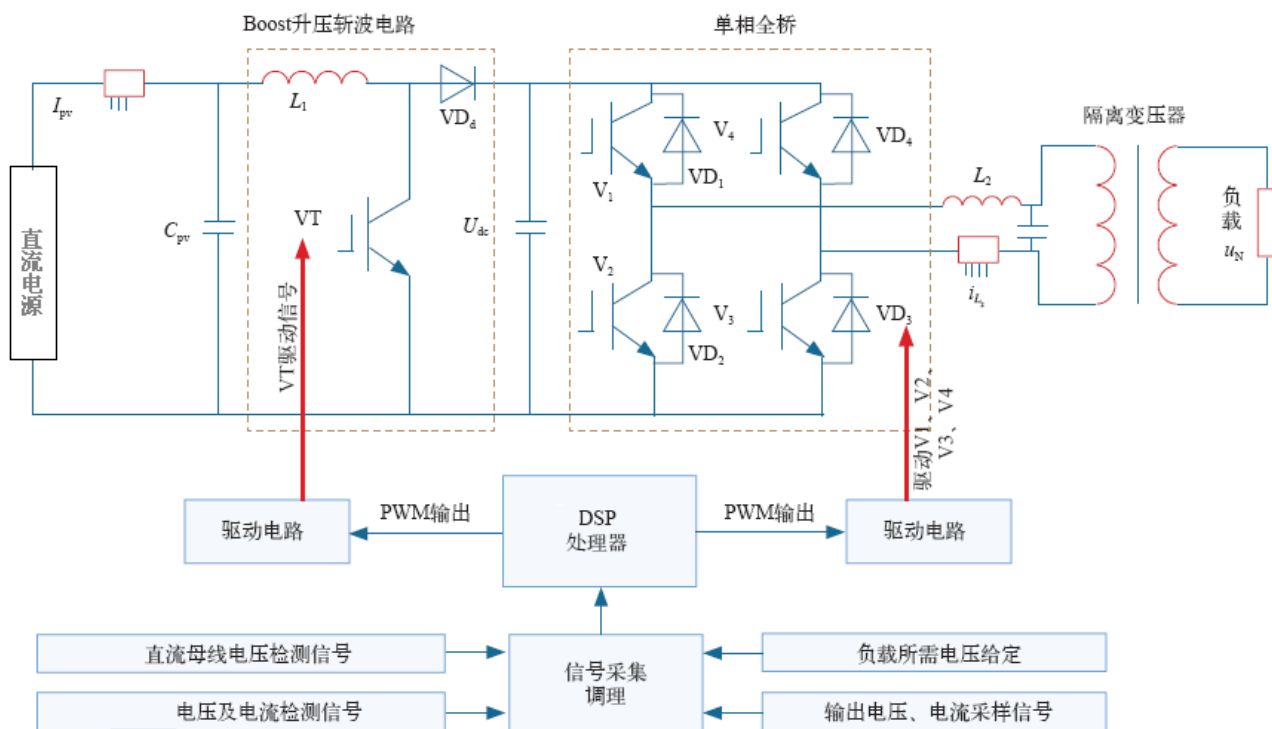


图 3-1 离网逆变器拓扑结构图

2. DC/DC 主电路简介

在本实验组件中采用 Boost 升压电路。逆变器开始工作时，Boost 升压电压电路把直流母线电压升高。

3. DC/AC 主电路及控制方法

DC/AC 逆变主电路的拓扑结构主要有推挽式逆变主电路、半桥式逆变主电路、全桥式逆变主电路等。全桥式逆变主电路因为其承载功率大，输出电能质量好等优点，被广泛应用于逆变器、变频器等。

本实验采用控制理论是单极性倍频 SPWM 调制。具体调制方法见实验二实验原理部分。

四、实验准备

1. 首先确保实验程序文件保存在英文目录下。
2. 确认计算机已安装 CCStudio v3.3 软件和 MATLAB 软件（安装说明详见使用说明书）。
3. 将控制屏上的总电源开关，控制电源开关，光伏电源开关，直流负载开关，交流负载开关，电网电源开关，离网负载开关均打到“关”状态。
4. 将单路直流可调稳压电源（0-30V/5A）输出“+”，“-”依次连接到 THSTFD-2C 型并网逆变控制系统端子排上的“IN+”，“IN-”（“IN+”具体为从并网逆变控制系统控制屏从左数编号为 1 的端子，“IN-”具体为从并网逆变控制系统控制屏从左数编号为 6 的端子）。
5. 用 USB 线连接 DSP 仿真器到 PC 机上，DSP 开发板选“仿真”模式。（选择“仿真”模式的方法为将 DSP2812 核心板上 JP6 的短路帽插在“H”一侧）
6. 仔细阅读使用说明书中的第六章 Matlab 环境下 DSP 编程介绍。
7. 仔细阅读使用说明书中第一章注意事项。

五、系统模型简介

目前的离网逆变器系统基本上都是首先采用电力电子仿真进行算法验证，然后嵌入式 C 语言直接编程的方法进行控制，这就需要熟悉 C 语言编程。而本产品中本实验提供一种新的方法，主要是根据 MathWorks 公司推出的针对 DSP 应用控制系统而开发的嵌入式目标模块（Embedded Target for TI DSP C2000 系列），采用 Matlab—Embedded Targets—Processors—Texas Instrument C2000 库中能够下载到 DSP 处理器的模块，使用这些模块进行了系统仿真，应用该库中的模块进行算法仿真，仿真成功后，直接进行代码生成，能够很好地实现控制。

系统模型主要模块及其功能如下：

1. Conversion 数据类型转换模块：数据类型的转换。
2. Ramp Generator 斜坡生成模块：斜坡生成模块输入斜坡信号的斜率（gain），斜坡信号直流截距（offset）和频率（freq）生成斜坡输出。
3. Inverse Park 模块：Park 逆变换模块，实现两相旋转坐标到两相静止坐标的转换。
4. PWM Scaling 模块：实现标么值转换为真实值。
5. PWM 模块：配置该模块，控制 DSP PWM 的工作模式。
6. C281x Hardware Interrupt：DSP 硬件中断模块，配置 DSP 硬件中断。
7. Function-Call RS232：串口接收中断回调函数模块。
8. Function-Call PDPINDA：功率中断保护函数模块。
9. PID Controller 模块：PID 控制器模块，带有抗饱和和校正功能的数字 PID 控制器。
10. 自定义代码模块：Model Source、System Initialize、System Update。

六、实验内容与步骤

本实验将逆变器主电路连接成离网逆变器电路，然后下载程序，实现逆变器离网输出。

（一）组成单相离网逆变器电路

1. 离网逆变器主电路图见图 3-2 所示，太阳能电池板或蓄电池或备用电源连接到 Boost 升压电路输入端，经 Boost 电路升压后经全桥逆变，全桥逆变输出经 LC 滤波器，然后通过隔离升压变压器，升压到 AC 220V。

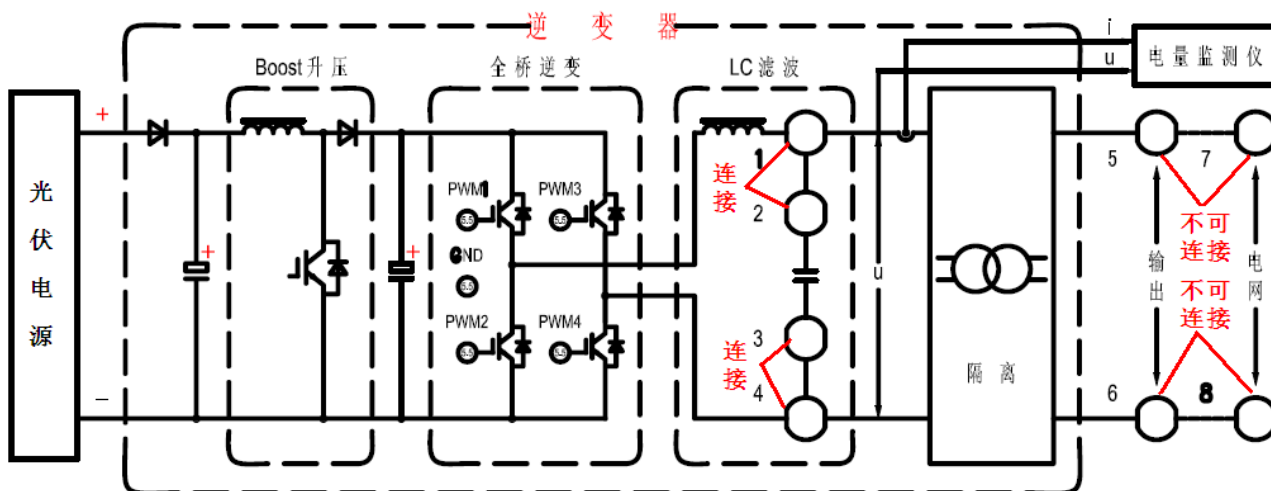


图 3-2 逆变器主电路图

2. 连接成为单相离网逆变器电路。具体方法：用四号强电线，将铝面板上 1 连接到 2，将铝面板上的 3 连接到 4。**注意：离网逆变器输出不需要并入电网，所以在离网逆变器实验中电网 7 和 8 不允许接到输出 5 和 6。**

(二) 利用 Matlab/Simulink 自动生成 DSP 代码并下载运行

1. 接线确认无误后，依次打开控制屏上总电源开关，控制电源开关。
2. 打开 Matlab 软件，打开 Matlab 软件，在 MATLAB 工具栏中选择程序 Boost_Inverter_01C 所在路径。
3. 双击 Boost_Inverter_01C 文件夹，双击 Boost_Inverter_01C 打开模型。
4. 在打开的 Boost_Inverter_01C 工具栏中点击  进行仿真，确认仿真无误。
5. 在打开的 Boost_Inverter_01C 工具栏中点击 ，Matlab 将根据设置自动连接 CCStudio v3.3 开发环境，生成 DSP 工程文件，并且对工程代码进行编译、链接，下载到目标板运行。通过 CCStudio v3.3 可以看到在代码的生成过程中建立了 Boost_Inverter_01C.pjt 工程文件，其中包括：源文件、库文件、链接文件等。（如果编译过程中出现错误请仔细阅读使用说明书第四章 CCStudio v3.3 安装说明—注意：如果使用 Matlab 自动产生代码后运行的话，不需要 Load Program After...前面打勾）
6. 关闭 CCStudio v3.3 软件或者点选在 CCStudio v3.3 软件中“Debug”下的“Disconnect”。

(三) 离网实验

1. 打开控制屏上的光伏电源开关，打开单路直流可调稳压电源（0-30V/5A）电源，并将输出电压调节到最大。
2. 按下键盘接口模块上的“启/停”，离网逆变器开始工作。打开控制屏上的离网负载开关，交流负载开关，负载风扇（AC 220V）开始转动，装饰灯（AC 220V）开始闪烁。
3. 通过电量监测仪观察隔离变压器输入电压，电流的大小，波形，参考见图 3-3，3-4。也可以通过示波器测量隔离变压器输入电压的波形。（用电量监测仪观察波形的方法为按电量监测仪 SET 键进入主菜单，通过上下键选择谐波参数，按回车键，进入谐波参数菜单，然后选择谐波波形）。



图 3-2 电量监测仪显示电压，电流参考值

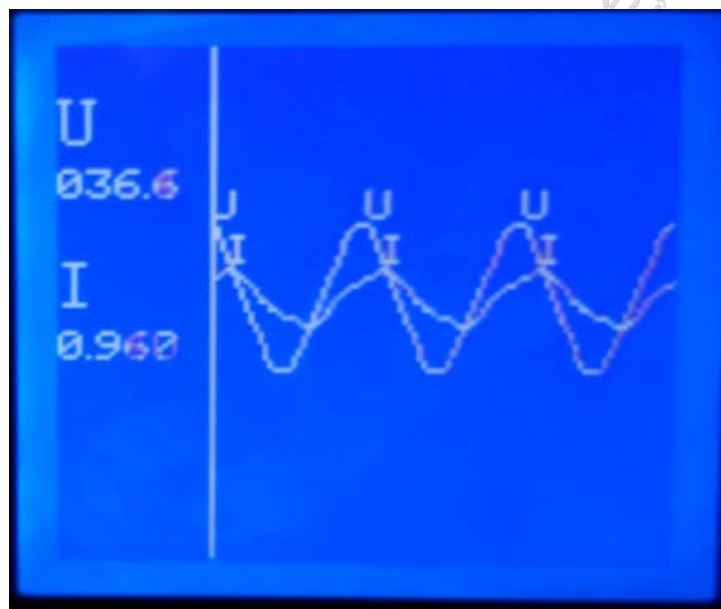


图 3-4 电量监测仪显示电压及电流参考波形

4. 通过万用表交流电压档测量隔离变压器输入前，输入后的电压大小。
5. 做完实验后，按下键盘接口模块上的“▼”，逆变器停止工作，然后依次关闭离网负载开关，交流负载开关，光伏电源开关，控制电源开关，总电源开关。

七、实验报告

1. 记录实验中的波形。
2. 通过测量离变压器输入前，输入后的电压大小，计算出变压器的变比。
3. 简述离网逆变器的电路结构。
4. 简述利用 Matlab/Simulink 自动生成 DSP 代码的方法。

八、思考题

1. Boost 升压电路的作用。
2. 在离网逆变器实验中电网 7 和 8 为什么不允许接到输出 5 和 6。

九、注意事项

1. 设备工作时带有强电，操作应谨慎小心防止触摸到强电，严禁违反实验规定进行操作，设备上电后即使工作正常，也应该有人在现场进行监管。
2. 离网逆变器实验时，不需要打开控制屏上的电网电源开关。
3. 离网逆变器实验时，电网 7 和 8 不允许接到输出 5 和 6，否则会损坏逆变器。
4. 在通电前，一定要检查接线有没有错误。逆变器输出不能短路，否则会损坏逆变器。
5. 如果在实验下载程序过程中出现如下图 3-5 错误，则需要首先关闭错误提示窗口，然后在 MATLAB 软件的 **Command Window** 输入 **clear all** 命令，最后按电脑回车键执行命令，再按照实验步骤做实验。下同，不再提示。

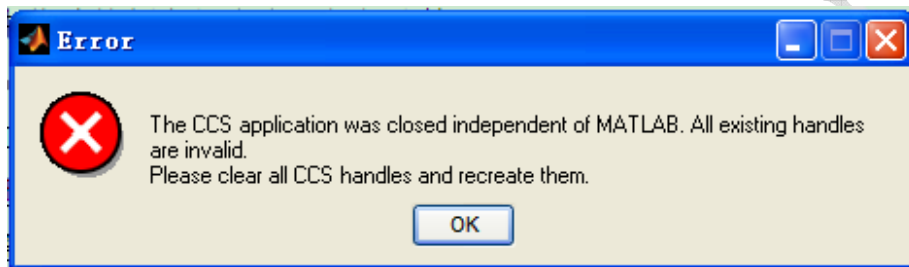


图 3-5 错误提示界面

6. 如果在实验下载程序过程中出现如下图 3-6 错误提示，需要的对 CCS 软件进行设置。具体方法为：如果用户自己编写程序，然后下载程序时，需要 CCS 菜单中的 **Option\Customize...** 作如下设置(**Load Program After...**前面打钩)。如果使用 **Matlab** 自动产生代码后运行的话，不需要 **Load Program After...**前面打钩。由于本实验中采用 **Matlab** 自动产生代码，所以不需要 **Load Program After...**前面打钩。下同，不再提示。

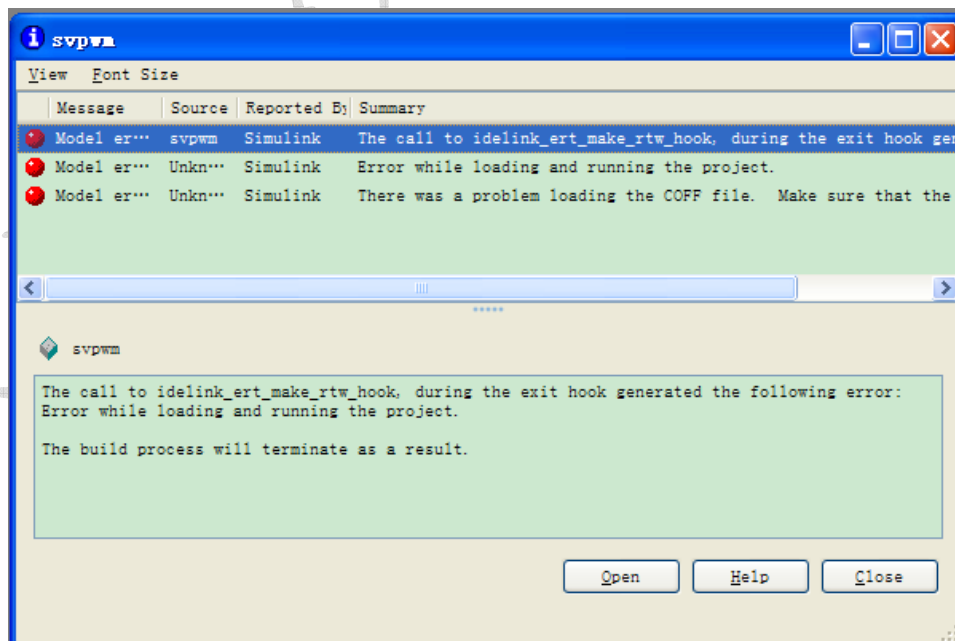


图 3-6 错误提示界面



图 3-7 CCS 软件需要设置界面

7. 如果程序在非实时在线模式下运行，用户不能在 CCStudio v3.3 窗口中对变量进行操作。如果想观察变量变化情况，对变量进行操作，请选择实时在线模式。

8. 如果在实验过程中出现软件死机或者 CCStudio v3.3 断开等现象，请首先按下键盘接口模块上的“▼”，逆变器停止工作，然后依次光伏电源开关总电源开关，控制电源开关，再断开连接仿真器的 USB 线，最后关闭 CCStudio v3.3 软件。完成前面步骤后，先连接好 USB 线，再依次打开控制屏上总电源开关，控制电源开关，光伏电源开关，最后重新按实验步骤做实验。

实验四 并网逆变器实验

一、实验目的

1. 了解并网逆变器的工作原理。
2. 了解并网逆变原理和并网逆变电路的结构。

二、实验器材

1. THSTFD-2C 型 并网逆变控制系统
2. 单路直流可调稳压电源
3. 数字万用表

1 台
1 台
1 只

三、实验原理

1. 并网逆变器拓扑结构

并网逆变器拓扑结构如图 4-1 所示，主要由 BOOST 升压斩波电路，单相全桥，滤波器，隔离变压器，DSP 处理器及信号检测等组成。

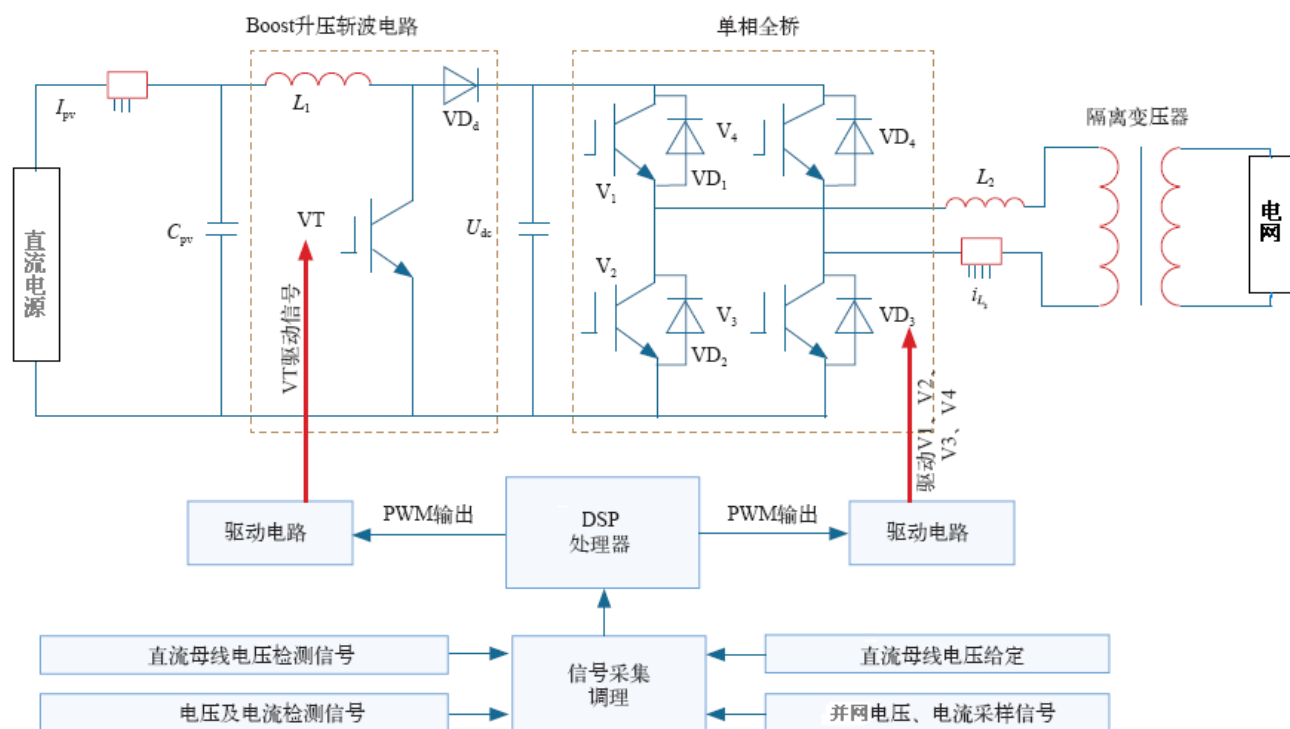


图 4-1 并网逆变器拓扑结构图

(1) BOOST升压斩波电路：BOOST升压电路主要将直流电源电压变换成能满足并网要求的直流母线电压。

(2) 单相全桥：实现DC-AC转换，将该直流母线电压经过DC-AC逆变成与电网电压同频、同相、同幅的正弦交流电以实现与电网的并网连接。

(3) 滤波器：滤除逆变器输出高频PWM谐波电流，减小进网电流中的高频环流作用，又能在

逆变器与电网间进行能量的传递，使并网逆变器获得一定的阻尼特性，减小冲击电流、有利于系统的稳定运行。

(4) 隔离变压器：一次侧220V，二次侧36V，频率50Hz。作用，保证人身安全，阻止直流分量进入电网。

(5) 直流母线电压检测：完成电压闭环及保护作用。

(6) 输出电流检测：完成电流闭环及保护作用。

(7) 并网电压检测：完成电网锁相、电压前馈及保护作用。

(8) 隔离驱动：完成对开关管的隔离驱动作用。

(9) DSP处理器：执行并网逆变器的软件算法功能。

2. 并网逆变器控制框图

如图 4-2，采用三闭环控制，除了电流跟踪控制脉宽计算环节以外，还有直流电压控制及锁相控制，直流电压控制的输出作为交流电流的幅值给定信号，由锁相控制得到与电网电压同步的正弦信号，二者相乘得到了交流电流的给定信号，由电流跟踪环节计算脉宽。锁相环保证了电流相位和电网相电压相位一致。

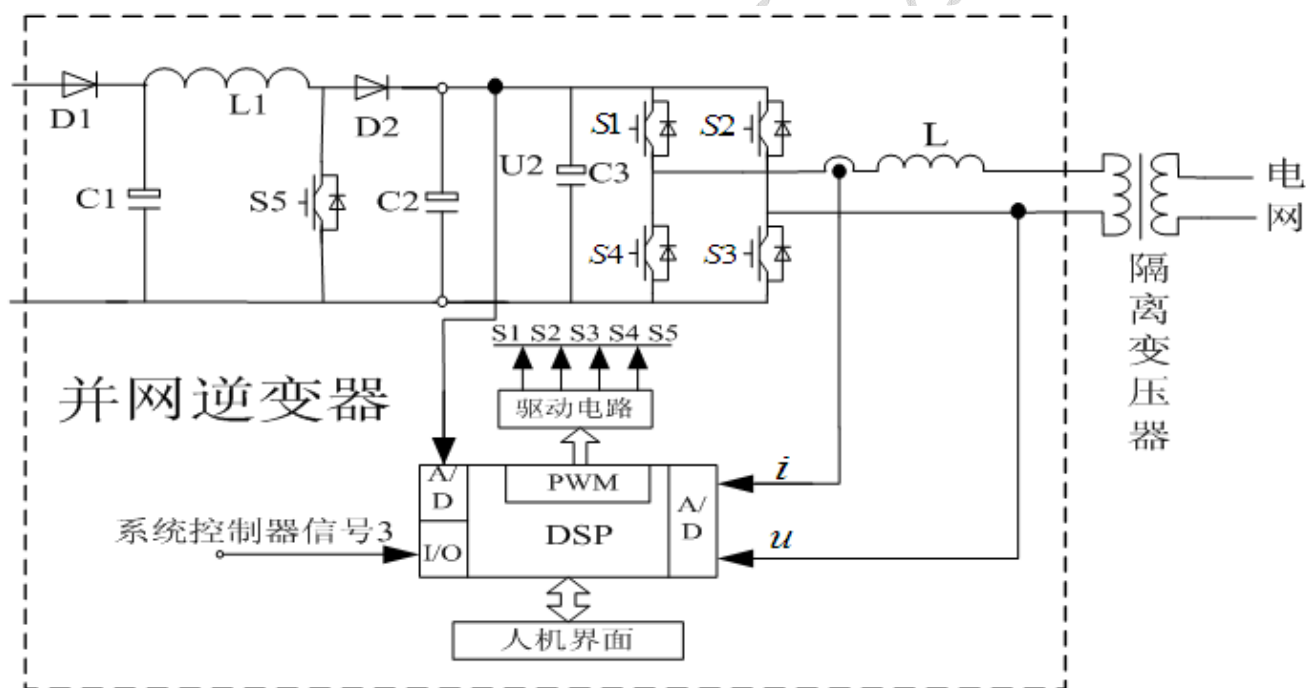


图 4-2 并网逆变器控制框图

四、实验准备

1. 将控制屏上的总电源开关，控制电源开关，光伏电源开关，直流负载开关，交流负载开关，电网电源开关，离网负载开关均打到“关”状态。

2. 将单路直流可调稳压电源（0-30V/5A）输出“+”，“-”依次连接到 THSTFD-2C 型并网逆变控制系统端子排上的“IN+”，“IN-”（“IN+”具体为从并网逆变控制系统控制屏从左数编号为 1 的端子，“IN-”具体为从并网逆变控制系统控制屏从左数编号为 6 的端子）。

3. 用 USB 线连接 DSP 仿真器到 PC 机上，DSP 开发板选“运行”模式。（选择“运行”模式的方法为将 DSP2812 核心板上 JP6 的短路帽插在“F”一侧）

4. 仔细阅读使用说明书中第一章注意事项。

五、实验内容与步骤

本实验将逆变器主电路连接成并网逆变器电路，然后利用 DSP 开发板中已经固化的程序，实现逆变器并网输出。

(一) 组成单相并网逆变器电路

1. 并网逆变器主电路图见图 4-3 所示，太阳能电池板或蓄电池或备用电源连接到 Boost 升压电路输入端，经 Boost 电路升压后经全桥逆变，全桥逆变输出经滤波器，然后通过隔离变压器将电能送入电网。

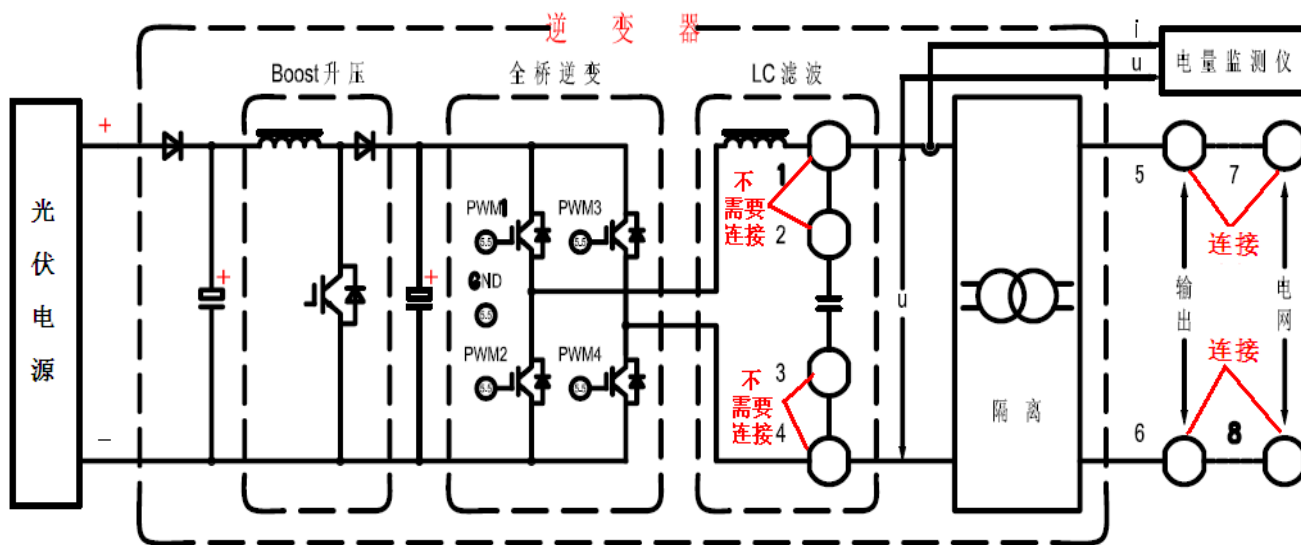


图 4-3 逆变器主电路图

2. 连接成为单相并网逆变器电路。具体方法：用四号强电线，将铝面板上 5 连接到 7，将铝面板上的 6 连接到 8，即隔离变压器输出接电网。**注意：做并网逆变器实验时，需要 L 滤波器而不是 LC 滤波器，所以不需要将铝面板上 1 连接到 2，不需要将铝面板上的 3 连接到 4。**

3. 接线确认无误后，依次打开控制屏上总电源开关，控制电源开关，电网电源开关。

(二) 并网实验

1. 打开控制屏上的光伏电源开关，打开单路直流可调稳压电源（0-30V/5A）电源，并将输出电压调节到最大。

2. 按下键盘接口模块上的“启/停”，并网逆变器开始工作。记录逆变器启动并网前后各电表的值：

序号	项目	直流电压、电流表		电量监测仪	
		U (V)	I (A)	U (V)	I (A)
1	并网前				
2	并网后				

3. 逆变器正常工作后；分别记录空载、负载为装饰灯（通过打开交流负载开关加载）时电量监测仪的参数：

序号	项目	电量监测仪				
		U (V)	I (A)	P (W)	Q (VA)	PF
1	并网后(空载)					
2	并网后(装饰灯)					

4. 通过电量监测仪观察隔离变压器输入电压，电流的大小，波形，参考波形见图 4-4，图 4-5。（用电量监测仪观察波形的方法为按电量监测仪 SET 键进入主菜单，通过上下键选择谐波参数，按回车键，进入谐波参数菜单，然后选择谐波波形）。



图 4-4 电量监测仪显示电压、电流参考大小



图 4-5 电量监测仪显示电压、电流参考波形

5. 通过电量监测仪观察谐波数据。（用电量监测仪观察谐波数据的方法为按电量监测仪

SET 键进入主菜单，通过上下键选择谐波参数，按回车键，进入谐波参数菜单，然后选择谐波数据)。

6. 做完实验后，按下键盘接口模块上的“启/停”，逆变器停止工作，然后依次关闭电网电源开关，光伏电源开关，控制电源开关，总电源开关。

六、实验报告

1. 完成实验中的表格。
2. 简述并网逆变器的电路结构。
3. 简述离网逆变器与并网逆变器的不同。

七、思考题

并网逆变器的应用领域。

八、注意事项

1. 设备工作时带有强电，操作应谨慎小心防止触摸到强电，严禁违反实验规定进行操作，设备上电后即使工作正常，也应该有人在现场进行监管。
2. 并网逆变器需要将铝面板上 5 连接到 7，将铝面板上的 6 连接到 8，即隔离变压器输出接电网，并且需要打开电网电源开关。
3. 并网逆变器需要 L 滤波器而不是 LC 滤波器，所以不需要将铝面板上 1 连接到 2，不需要将铝面板上的 3 连接到 4。
4. 在通电前，一定要检查接线有没有错误。逆变器输出不能短路，否则会损坏逆变器。