

# 48V 输入 220V 输出逆变器的软件代码实现

## 摘要

本文档主要是解释如何利用 RA6T2 来实现 48V 输入 220V 输出逆变器的例程程序。包括：软件的整体架构、软件的使用。

该例程仅作为参考，请正确调试评估后，再使用。

## 核心处理芯片

本代码例程是针对以下核心处理芯片的使用

RA6T2(R7FA6T2BD3CFP)

## 目录

|                    |    |
|--------------------|----|
| 1 软件描述.....        | 1  |
| 1.1 开发环境.....      | 1  |
| 2 系统概述.....        | 2  |
| 2.1 硬件配置.....      | 2  |
| 2.2 硬件说明.....      | 2  |
| 2.2.1 用户接口.....    | 2  |
| 2.3 软件配置.....      | 3  |
| 2.3.1 软件文件配置.....  | 3  |
| 2.4 软件规格.....      | 4  |
| 2.4.1 时钟规格.....    | 4  |
| 2.4.2 ADC 规格.....  | 4  |
| 2.4.3 PWM 规格.....  | 5  |
| 2.4.4 IIC 规格.....  | 5  |
| 2.4.5 中断.....      | 5  |
| 2.5 程序流程.....      | 6  |
| 3 控制程序说明.....      | 7  |
| 3.1 控制内容.....      | 7  |
| 3.1.1 逆变器启动.....   | 7  |
| 3.1.2 SPWM 调制..... | 7  |
| 3.1.3 系统保护功能.....  | 7  |
| 3.2 宏定义.....       | 9  |
| 3.3 全局变量.....      | 10 |
| 4 注意事项.....        | 11 |
| 4.1 校准电压.....      | 11 |
| 4.2 Boost 中断.....  | 11 |

# 1 软件描述

## 1.1 开发环境

表 1-1 和表 1-2 显示了本应用程序的开发环境

表 1-1 硬件开发环境

| 核心处理器                | 硬件版本                  |
|----------------------|-----------------------|
| RA6T2(R7FA6T2BD3CFP) | 48V 输入 220V 输出逆变器 3.0 |

表 1-2 软件开发环境

| 工具链              | 工具链版本           | FSP 版本 |
|------------------|-----------------|--------|
| GCC ARM Embedded | 10.3.1.20210824 | 3.6.0  |

## 2 系统概述

本章节分硬件配置、硬件说明、软件说明来描述本逆变器系统，整个系统说明如下

### 2.1 硬件配置

系统框架如图 2-1 所示

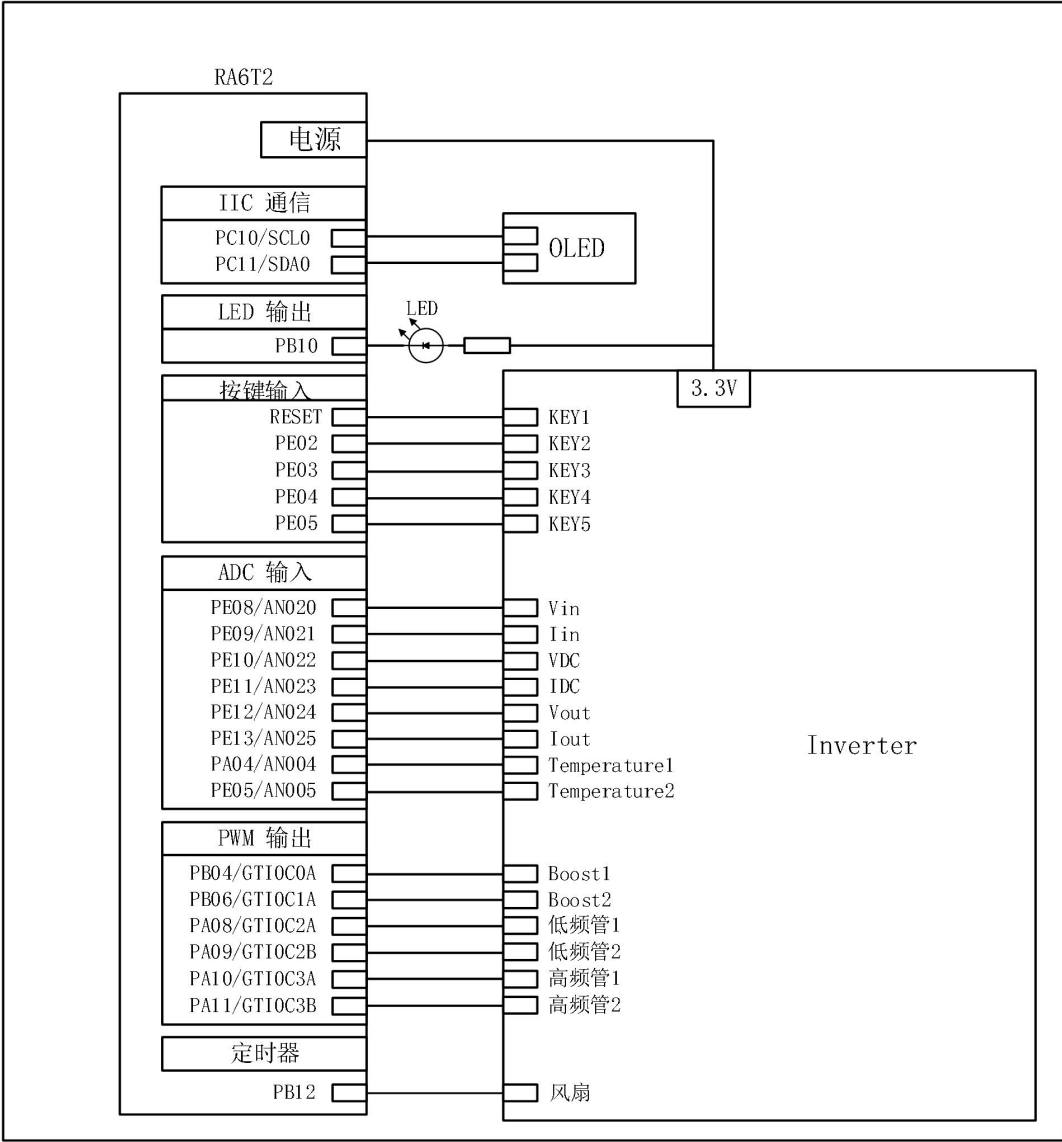


图 2-1 系统框架

### 2.2 硬件说明

#### 2.2.1 用户接口

用户接口功能如表 2-1 所示

用户接口表 2-1

| 事件      | 动作        | 功能说明    |
|---------|-----------|---------|
| 复位      | 按下按键 KEY1 | 系统复位    |
| LED1 常量 | 无         | 控制板供电正常 |
| LED2 闪烁 | 无         | 程序正常运行  |

本系统端口接口如表 2-2 所示

系统端口表格 2-2

| R7FA6T2BD3CFP 端口名字 | 功能                      |
|--------------------|-------------------------|
| PC10/SCL0          | IIC 通信，用于显示 OLED        |
| PC11/SDA0          | IIC 通信，用于显示 OLED        |
| PB10               | 控制 LED2 开/关，显示系统正常运行    |
| PE02               | 按键 2 输入                 |
| PE03               | 按键 3 输入                 |
| PE04               | 按键 4 输入                 |
| PR05               | 按键 5 输入                 |
| PE08/AN020         | ADC 输入，逆变板 48V 输入电压采样   |
| PE09/AN021         | ADC 输入，逆变板 48V 输入电流采样   |
| PE10/AN022         | ADC 输入，逆变板 Boost 输出电压采样 |
| PE11/AN023         | ADC 输入，逆变板 Boost 输出电流采样 |
| PE12/AN024         | ADC 输入，逆变板逆输出电压采样       |
| PE13/AN025         | ADC 输入，逆变板逆输出电流采样       |
| PA04/AN004         | ADC 输入，逆变板上散热片温度采样      |
| PA05/AN005         | ADC 输入，逆变板下散热片温度采样      |
| PB04/GTIOC0A       | PWM 输出，控制 Boost 控制管 1   |
| PB06/GTIOC1A       | PWM 输出，控制 Boost 控制管 2   |
| PA08/GTIOC2B       | PWM 输出，控制逆变低频管 1        |
| PA09/GTIOC2A       | PWM 输出，控制逆变低频管 2        |
| PA10/GTIOC3A       | PWM 输出，控制逆变高频管 1        |
| PA11/GTIOC3B       | PWM 输出，控制逆变高频管 2        |
| PB12               | 控制风扇开关                  |

## 2.3 软件配置

### 2.3.1 软件文件配置

文件描述由图 2-2 所示：

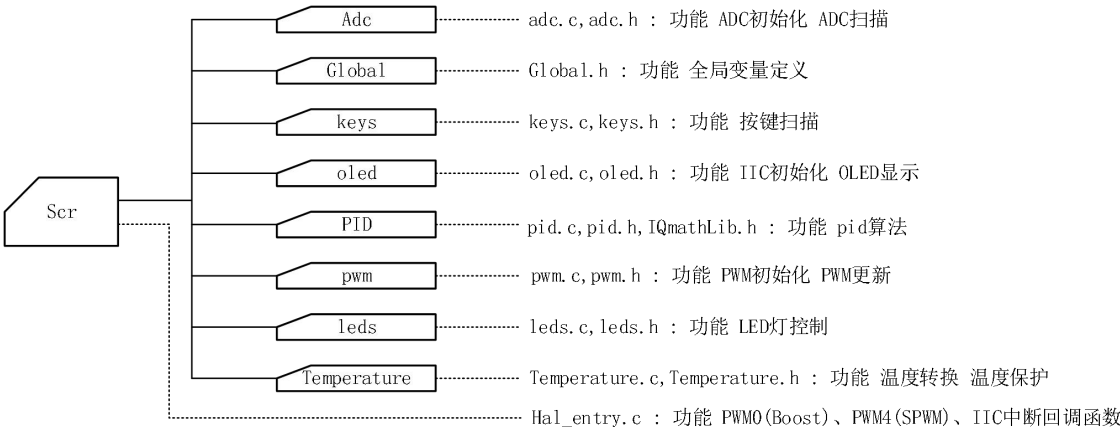


图 2-2 文件配置

## 2.4 软件规格

下面将描述样机程序的软件规格，包括外设系统时钟(图 2-3)、ADC(表格 2-2-a)、PWM(表格 2-2-b)、IIC(表格 2-2-c)、中断(表格 2-2-d)，关于 e<sup>2</sup> studio 的配置详见样机例程代码的 configuration 文件。

### 2.4.1 时钟规格

本样品例程采用外部 10Mhz 晶振，内部时钟经过 24 倍频作为系统时钟。其配置如图 2-3 所示：

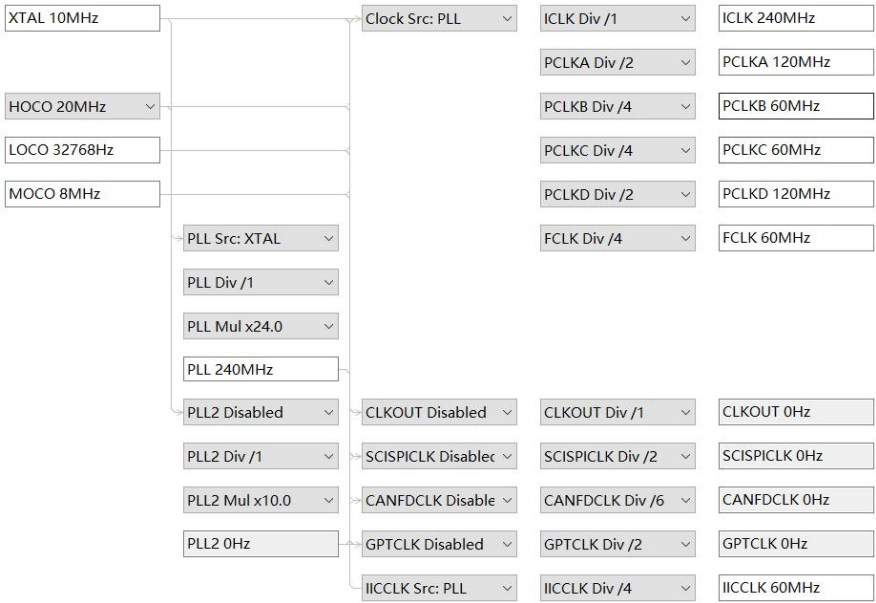


图 2-3 系统时钟

### 2.4.2 ADC 规格

ADC 时源钟为 PCLKA(60Mhz)，不分频，采用了 8 个通道进行电压、电流采样，均采取 8 次平均模式，采样时间为 10\*CLK。

表格 2-2-a ADC 规格

| 管脚         | 虚拟通道 | 通道模式        | 扫描时间   | 触发模式 | 扫描组 | ADC 单元 |
|------------|------|-------------|--------|------|-----|--------|
| PE08/AN020 | 0    | 平均模式(8 次平均) | 10*CLK | 软件触发 | 0   | 0      |
| PE09/AN021 | 1    | 平均模式(8 次平均) | 10*CLK |      |     |        |
| PE10/AN022 | 2    | 平均模式(8 次平均) | 10*CLK |      |     |        |
| PE11/AN023 | 3    | 平均模式(8 次平均) | 10*CLK |      |     |        |
| PE12/AN024 | 4    | 平均模式(8 次平均) | 10*CLK |      |     |        |
| PE13/AN025 | 5    | 平均模式(8 次平均) | 10*CLK |      |     |        |
| PA04/AN004 | 6    | 平均模式(8 次平均) | 10*CLK |      |     |        |
| PA05/AN005 | 7    | 平均模式(8 次平均) | 10*CLK |      |     |        |

2.4.3 PWM 规格

采用 GPT 来产生 6 路 PWM，使用了 GPT0、GPT1、GPT2、GPT3 四个模块，GPT0-GPT3 的时钟源均为 PCLKD(120Mhz)。GPT0 使用了 A 通道(PB04)用于控制 Boost 开关管 1；GPT1 使用了 A 通道(PB06)用于控制 Boost 开关管 2；GPT2 使用了 A、B 两个通道(PA08、PA09)来控制逆变端低频管；GPT3 使用了 A、B 两个通道(PA10、PA11)来控制逆变端高频管；各个 GPT 的详细配置参数如表格 2-2-b 所示

表格 2-2-b PWM 规格

| 模块   | 通道 | 模式          | 频率                         | 自定义波形波形                  | 管脚   | 中断 | 死区时间                       |
|------|----|-------------|----------------------------|--------------------------|------|----|----------------------------|
| GPT0 | 0  | 三角波<br>模式 1 | 30KHz                      | 初始化为低<br>截止时为低<br>计数值时翻转 | PB04 | 有  | 无                          |
| GPT1 | 1  |             | 30KHz                      |                          | PB06 | 无  | 无                          |
| GPT2 | 2  |             | 50Hz                       |                          | PA08 | 无  | Up 480*CLK<br>Down 480*CLK |
| GPT2 |    |             |                            |                          | PA09 |    |                            |
| GPT3 | 3  |             | 25KHz(50Hz)<br>30KHz(60Hz) |                          | PA10 | 有  | Up 48*CLK<br>Down 48*CLK   |
| GPT3 |    |             |                            |                          | PA11 |    |                            |
| GPT4 | 4  | PWM<br>模式   | 10KHz                      | 无                        | 无    | 有  | 无                          |

2.4.4 IIC 规格

本样机例程采用 IIC 与 OLED 屏通信，实现在 OLED 屏上显示相关数据，IIC 的配置参数如表格 2-2-c 所示：

表格 2-2-c IIC 规格

| 通道 | 速率   | 从机地址 | 地址模式 | 中断 |
|----|------|------|------|----|
| 0  | 快速模式 | 0x3c | 7 位  | 有  |

2.4.5 中断

本样机例程有三个中断，如表格 2-2-d 所示

表格 2-2-d 中断

| 中断名称    | 中断回调函数               | 中断优先级 |
|---------|----------------------|-------|
| GPT3 中断 | spwm_callback        | 2     |
| GPT0 中断 | boost_timer_callback | 3     |
| IIC 中断  | IIC_master_callback  | 5     |
| GPT4 中断 | Timer4_callbac       | 10    |

## 2.5 程序流程

本样机程序在初始化外设后，会进入 15 秒的交流电输出频率选择模式，按 KEY2 选择输出 50Hz 交流电，按 KEY3 选择输出 60Hz 交流电。之后以温度获取、温度保护、显示为循环。SPWM 中断为 PWM3 的中断服务子程序(每一个 PWM 周期进入一次)、Boost 中断为 PWM0 的中断服务子程序(每一个 PWM 周期进入一次)，其流程如图 2-4 所示：

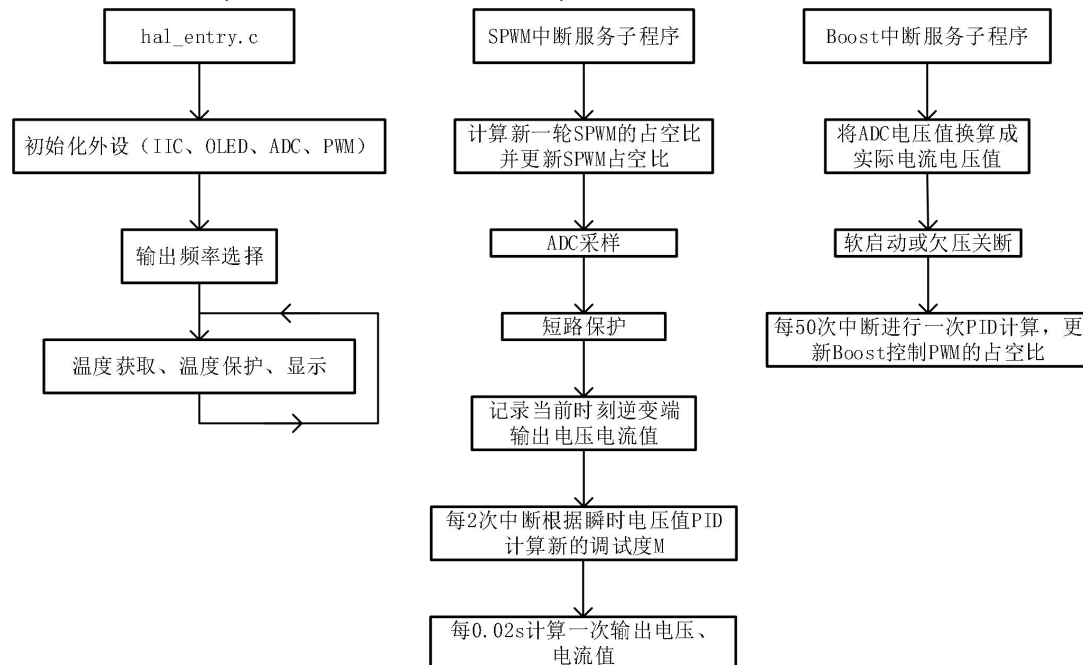


图 2-4 程序流程图

对于 SPWM 中断，进入中断后，最先更新的是 SPWM 下一周期的占空比。根据 SPWM 算法取出当前时刻的  $U_g$ ，再由上一次 PID 计算的调制度  $M$  值，计算出新一轮 SPWM 的占空比。接着进行 ADC 电压值采样，根据采集到的电压值判断电路是否发生短路，如果短路，则关断所有 PWM。不短路则记录当前时刻的电压电流值，每 2 次中断根据瞬时电压进行 PID 计算，得出最新的调制度；每 50Hz-0.02 秒(60Hz 0.017)计算大周期的电压值、电流值以实现稳定输出电压。

对于 Boost 中断，进入中断后，先将 SPWM 中断采集到的电压值转换成实际电压值，根据输入电压判断是否软启动(初始化 Boost PWM 正占空比为 0)，当达到标定电压(>35V <52V)后，启动 Boost PWM；当输入欠压(<30V)、输入过压(>54V)、Boost 输出过压(>400V)的时候，则关断 Boost PWM；每进入 50 次 Boost 中断，则进行一次 PID 运算，更新 Boost PWM 的占空比。



### 3 控制程序说明

#### 3.1 控制内容

##### 3.1.1 逆变器启动

逆变器在满足输入电压为 48V 的情况下，上电后会运行在输出频率选择模式下，通过 KEY2 和 KEY3 选择逆变器的输出频率。当超过 15 秒不做选择时，默认输出 50Hz 交流电。

##### 3.1.2 SPWM 调制

根据算法文档，SPWM 调制原理，图 4-1 为单极性 SPWM 脉冲调制原理，下面介绍在软件中的实现

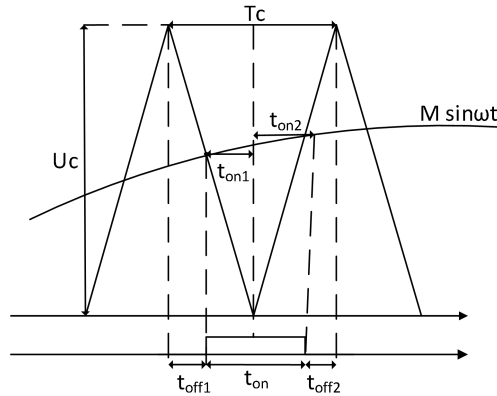


图 4-1 SPWM 调制

根据公式

$$t_{on} = t_{on1} + t_{on2} = \frac{T_c}{2} M [\sin(\omega t_1) + \sin(\omega t_2)]$$

$$D = \frac{t_{on}}{T_c}$$

可知，计算每一个 SPWM 周期新的占空比需要  $\sin(\omega_1 t)$  和  $\sin(\omega_2 t)$ 。在本样机例程中， $\sin(\omega_1 t)$ 、 $\sin(\omega_2 t)$  利用 matlab 调制计算出来，存储在静态数组数组 sinne[1000] 中。每一个周期取出  $\sin(\omega_1 t)$ 、 $\sin(\omega_2 t)$  结合上一次 PID 计算的调制度 M，计算出新的占空比 D。

##### 3.1.3 系统保护功能

###### 1、输入软启动功能

本样机例程具备软启动功能，以减小输入电流的冲击。当输入电压达标称电压(40V)的时候，Boost 开始启动，占空比从 0 慢慢上升到 0.5，软启动时间为 0.667s。

###### 2、输入欠压、过压保护功能

本样机例程具备输入欠压(<35V)、过压(54V)保护功能。当输入电压不在正常范围时，关断 Boost 端的控制，以保护硬件电路。

###### 3、Boost 输出过压保护功能

本样机例程具备 Boost 输出过压(>400V)保护功能。空载时，Boost 小占空比也可以输出大电压，为对硬件电路的保护，当 Boost 输出电压大于 400V 的时候，关断 Boost 端控制的输出，当 Boost 端输出电压小于 350V 时，则恢复控制，Boost 正常工作。

#### 4、逆变端欠压保护功能

本样机例程具备逆变端欠压保护功能。当 Boost 端输出电压低于 300V 时，逆变端不工作。当 Boost 端输出电压大于 300V 时，则启动逆变端。

#### 5、输出短路保护功能

短路是电路中最严重故障之一，本样机例程也添加了短路保护。当出现大电流、小电压及 Boost 端输出大电流时，则判断为短路事件。当触发“短路事件”时，第一时间关断 PWM 控制后重新建立一个小电压(25V)试探负载，当短路事件一直发生并且累计一定次数时，则确定为短路故障，关断所有 PWM 控制，并在显示屏显示 Short Circuit，需要排除短路故障后按复位键，才能恢复正常工作。

#### 6、输出过流保护功能

本样机例程具有输出过流保护功能。当输出电流周期有效值超过 5A(1100W) 60 秒或者 6A 时，判断为过流事件，关断所有 PWM 控制，在显示屏出显示 Over Current。需要按复位键才能恢复正常工作。

#### 7、温度保护功能

由于上散热片温度总是会高于下散热片，本样机例程采样了上散热片温度，当上散热片温度达到某一温度时，开启散热风扇，以实现温度保护功能。

## 3.2 宏定义

本逆变器样机例程的宏定义如表格 4-1 所示：

表格 4-1 宏定义

| 文件       | 宏                    | 功能                  |
|----------|----------------------|---------------------|
| Global.h | channel_Vin          | 输入电压采样通道            |
|          | channel_lin          | 输入电流采样通道            |
|          | channel_VDC          | Boost 电压采样通道        |
|          | channel_IDC          | Boost 电流采样通道        |
|          | channel_VAC          | 输出电压采样通道            |
|          | channel_IAC          | 输出电流采样通道            |
|          | channel_temperature1 | 上散热片温度采样通道          |
|          | channel_temperature2 | 下散热片温度采样通道          |
|          | Delay_us(us)         | us 延时               |
|          | Delay_ms(ms)         | ms 延时               |
|          | Delay_s(s)           | s 延时                |
|          | Pi                   | $\pi$ 值             |
|          | VREFADCG_ENABLE      | ADC 基准电压使能          |
|          | VREFADCG_VALUE       |                     |
|          | RESET_VALUE          | WDT 复位              |
|          | Boost_30KHz          | GPT0 输出 30KHz 周期计数值 |
|          | SPWM_Fre_30KHz       | GPT3 输出 30KHz 周期计数值 |
|          | SPWM_Fre_60Hz        | GPT2 输出 60Hz 周期计数值  |
|          | SPWM_Fre_25KHz       | GPT3 输出 25KHz 周期计数值 |
|          | SPWM_Fre_50Hz        | GPT2 输出 60Hz 周期计数值  |

### 3.3 全局变量

本样机例程的全局变量如表格 4-2 所示

表格 4-2 全局变量

| 变量名称               | 类型        | 功能               |
|--------------------|-----------|------------------|
| err                | fsp_err_t | 错误标志位            |
| timeout_ms         | int       | IIC 延时           |
| M                  | double    | 调制度              |
| V_in               | double    | 输入电压             |
| I_in               | double    | 输入电流             |
| V_DC               | double    | Boost 输出电压       |
| I_DC               | double    | Boost 输出电流       |
| V_out              | double    | 输出电压             |
| I_out              | double    | 输出电流             |
| temperature1       | double    | 上散热片温度           |
| temperature2       | double    | 下散热片温度           |
| V_in_bias          | double    | 输入电压采样偏置分量       |
| V_DC_bias          | double    | Boost 输出电压采样偏置分量 |
| V_AC_bias          | double    | 输出电压采样偏置分量       |
| I_in_bias          | double    | 输入电流采样偏置分量       |
| I_DC_bias          | double    | Boost 输出电流采样偏置分量 |
| I_AC_bias          | double    | 输出电流采样偏置分量       |
| AC_mul             | double    | 输出电压还原倍数         |
| DC_mul             | double    | Boost 输出电压还原倍数   |
| IN_mul             | double    | 输入电压还原倍数         |
| I_out_mul          | double    | 输出电流还原倍数         |
| ADC_val[8]         | double    | 存储 ADC 电压数组      |
| Boost_PWM_PhaseSet | double    | Boost 占空比设置数值    |
| Mode               | uint8_t   | 显示模式标志位          |
| Over_Current       | _Bool     | 过流标志位            |
| Short_Circuit      | _Bool     | 短路标志位            |
| Mode_choice        | _Bool     | 模式选择标志位          |
| Mode_AC_50Hz       | _Bool     | 输出交流 50Hz 标志位    |
| Mode_AC_60Hz       | _Bool     | 输出交流 60Hz 标志位    |
| PidVAC             | PIDVARS   | 输出 PID 变量        |
| PidVDC             | PIDVARS   | Boost 输出 PID 变量  |

## 4 注意事项

### 4.1 校准电压

输出电压的准确性主要由两个因素决定，一个采样电路的偏置电压、一个是电压的还原倍数。采样电压的偏置电压可以采用只供电反激变换器，使采样电路、驱动电路正常工作，读取 ADC 采样的值，记录该值作为偏置电压。还原倍数则在偏置电压正确的情况下，根据电路实际调试。

### 4.2 Boost 中断

在 Boost 中断，没有每一次中断都进行 PID 计算是有原因的。每一次 PID 计算需要耗费 7-8us 的时间，Boost 中断是 30KHz，每次中断都 PID 计算的话，是可以提高 Boost 端的响应速度，但是会耗费大量的 CPU 资源进行 PID 运算。在兼顾 Boost 端响应速度和节省 CPU 资源下，选择了每 50 次中断进行一次 PID 运算。