

# XC800 Family

## AP98000

基于英飞凌 XC800 系列微控制器的三相带霍尔直流无刷风机 180 度控制方案

### 设计指导手册

V1.0 2011-03

**Edition 2011-03**

**Published by  
Infineon Technologies AG  
81726 Munich, Germany  
© 2011 Infineon Technologies AG  
All Rights Reserved.**

#### **LEGAL DISCLAIMER**

THE INFORMATION GIVEN IN THIS APPLICATION NOTE IS GIVEN AS A HINT FOR THE IMPLEMENTATION OF THE INFINEON TECHNOLOGIES COMPONENT ONLY AND SHALL NOT BE REGARDED AS ANY DESCRIPTION OR WARRANTY OF A CERTAIN FUNCTIONALITY, CONDITION OR QUALITY OF THE INFINEON TECHNOLOGIES COMPONENT. THE RECIPIENT OF THIS APPLICATION NOTE MUST VERIFY ANY FUNCTION DESCRIBED HEREIN IN THE REAL APPLICATION. INFINEON TECHNOLOGIES HEREBY DISCLAIMS ANY AND ALL WARRANTIES AND LIABILITIES OF ANY KIND (INCLUDING WITHOUT LIMITATION WARRANTIES OF NON-INFRINGEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS OF ANY THIRD PARTY) WITH RESPECT TO ANY AND ALL INFORMATION GIVEN IN THIS APPLICATION NOTE.

#### **Information**

For further information on technology, delivery terms and conditions and prices, please contact the nearest Infineon Technologies Office ([www.infineon.com](http://www.infineon.com)).

#### **Warnings**

Due to technical requirements, components may contain dangerous substances. For information on the types in question, please contact the nearest Infineon Technologies Office.

Infineon Technologies components may be used in life-support devices or systems only with the express written approval of Infineon Technologies, if a failure of such components can reasonably be expected to cause the failure of that life-support device or system or to affect the safety or effectiveness of that device or system. Life support devices or systems are intended to be implanted in the human body or to support and/or maintain and sustain and/or protect human life. If they fail, it is reasonable to assume that the health of the user or other persons may be endangered.

**XC800**

**Revision History: V1.0, 2011-01**

**Previous Version: none**

Page	Subjects (major changes since last revision)

**We Listen to Your Comments**

Is there any information in this document that you feel is wrong, unclear or missing?  
 Your feedback will help us to continuously improve the quality of this document.  
 Please send your proposal (including a reference to this document) to:

[mcdocu.comments@infineon.com](mailto:mcdocu.comments@infineon.com)



## Table of Contents

<b>1</b>	<b>方案概述.....</b>	<b>5</b>
1.1	应用对象 .....	5
1.2	系统主要构成 .....	5
1.3	英飞凌 XC800 系列微控制器主要特点 .....	6
1.4	英飞凌分立 IGBT 特点 .....	7
<b>2</b>	<b>方案系统介绍.....</b>	<b>9</b>
2.1	概况 .....	9
2.2	主要功能和指标 .....	9
<b>3</b>	<b>方案硬件设计.....</b>	<b>10</b>
3.1	主回路 .....	10
3.1.1	逆变电路 .....	10
3.1.2	电流采样及过流保护 .....	12
3.2	控制回路 .....	13
<b>4</b>	<b>方案主要算法介绍 .....</b>	<b>15</b>
4.1	正弦波 PWM 的生成 .....	15
4.1.1	开关损耗最小 SPWM.....	15
4.1.2	开关损耗最小 SVPWM .....	16
4.2	梯形波控制启动 .....	18
4.3	转子位置估算及转速计算.....	21
4.4	速度闭环控制 .....	22
4.5	相位超前角调整 .....	23
<b>5</b>	<b>方案软件设计.....</b>	<b>25</b>
5.1	概述 .....	25
5.2	资源分配 .....	25
5.3	主要程序设计说明.....	26
5.3.1	角度插值计算 .....	26
5.3.2	梯形波控制切换至正弦波控制 .....	26
5.3.3	切换时刻转子位置角及 U、V、W 相位计算 .....	27
5.3.4	开关损耗最小 SPWM 计算.....	28
5.4	状态图和流程图 .....	29
5.4.1	状态图.....	29
5.4.2	主程序流程图 .....	30
5.4.3	T12 周期中断程序流程图 .....	31
5.4.4	CHE 中断程序流程图.....	32
5.4.5	T2 定时中断程序流程图 .....	33
5.4.6	自定义子程序流程图 .....	34
<b>6</b>	<b>方案测试.....</b>	<b>35</b>
6.1	测试条件 .....	35
6.2	测试结果 .....	35
<b>7</b>	<b>基于 XC866 的风机套件运行说明.....</b>	<b>36</b>
<b>8</b>	<b>附件 .....</b>	<b>37</b>
8.1	主回路及控制回路原理图.....	37
8.2	参考代码 .....	39

## 1 方案概述

### 1.1 应用对象

直流无刷电机作为一种新的电机类型，具有效率高，控制简单等优点，应用领域越来越广泛。在当今节能减排的要求下，直流无刷风机正逐步取代原先效率较低的交流异步电机，应用于家电和汽车空调系统等领域。传统的直流无刷电机采用梯形波控制，换向噪声较大，无法满足一些应用领域对噪声的要求，而采用正弦波控制可以很好的解决噪声问题。

本设计指导将介绍直流无刷电机的正弦波控制方式，以及基于英飞凌 XC800 系列微控制器的三相带霍尔传感器直流无刷风机 180 度控制方案硬件和软件设计说明，并附相关电路原理图和参考代码，同时给出了配套的风机控制套件的介绍及使用说明。

### 1.2 系统主要构成

英飞凌作为全球的主要半导体厂商之一，可以提供从微控制器、驱动 IC、电源管理到 IGBT 功率器件的整体器件解决方案。

如 0 图 - 1 所示，三相带霍尔传感器直流无刷风机 180 度控制系统（以下简称“系统”）主要由以下几大部分构成：整流电路、逆变电路、控制电路、驱动电路、开关电源、直流无刷风机及扇叶负载。具体硬件平台的介绍及使用说明见 1 [第七章](#)。

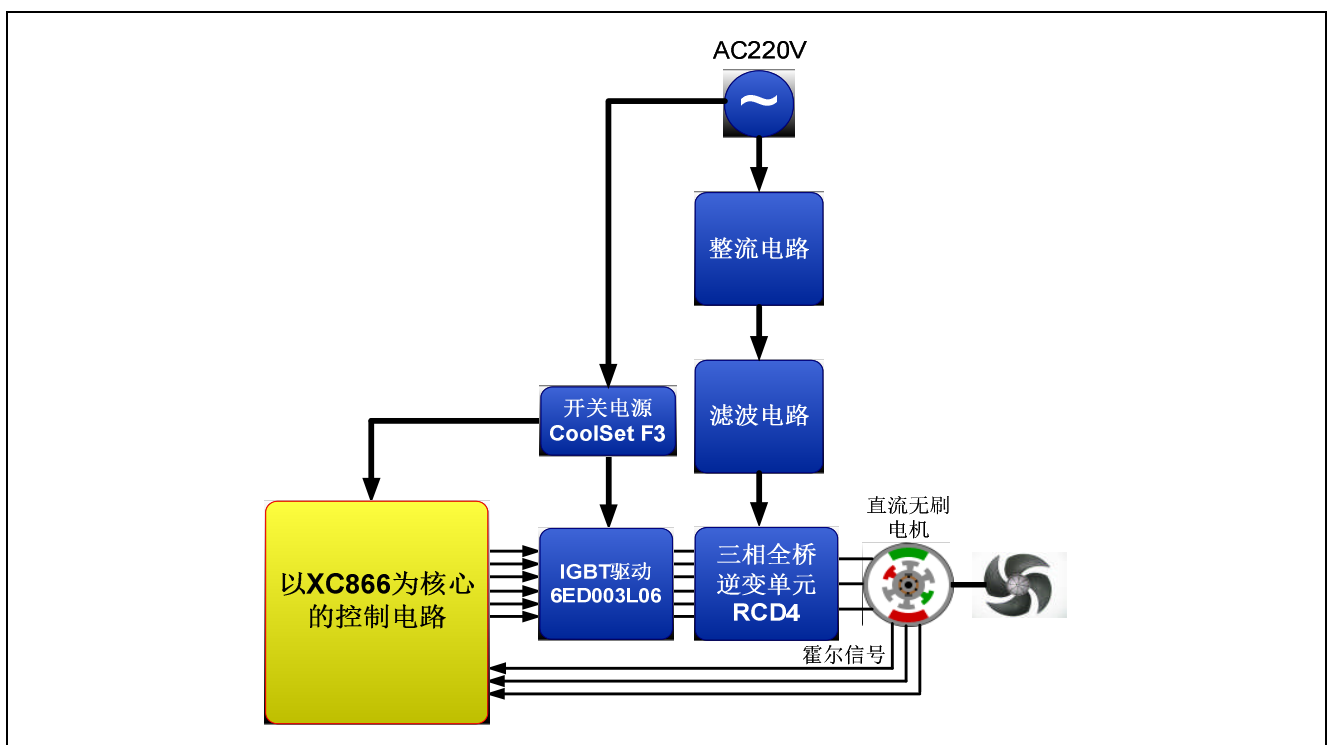


图 - 1 基于 XC800 系列微控制器的三相带霍尔传感器直流无刷风机 180 度控制系统构成图

本方案中采用了 8 位单片机 XC866 作为主控芯片。驱动部分采用了驱动 IC 6ED 和分立 IGBT RC-D。下面先对单片机和分立 IGBT 的特性做个介绍。



### 1.3 英飞凌 XC800 系列微控制器主要特点

英飞凌高性能 XC800 系列微控制器基于增强型 8051 内核，片上集成 Flash 和功能丰富强大的外设单元，应用领域广泛。XC800 系列微控制器集成较多新的特性，如工作温度最高至 150°C；电容式触控以及内嵌 16 位矢量计算机单元（三角运算单元 CORDIC 和硬件乘除单元 MDU）；Flash 容量从 2K 字节到 64K 字节；RAM 容量最大 3K 字节；封装从 16 引脚到 64 引脚均有；工作电压范围宽（3V-5V），客户可根据应用要求灵活选择。

当今许多应用领域对于高能效提出了较高的要求，直流无刷风机控制便是其中之一。英飞凌 XC800 系列微控制器为用户提供先进的控制算法以达到优化能效目的，丰富的通信接口满足消费类、自动化、照明等领域的网络应用要求。

XC800 主要特性概述如下：

- 节省系统成本
  1. 内嵌电压调节器
  2. 支持EEPROM
  3. 片内振荡器
- 安全特性
  1. 欠压检测
  2. 上电复位
  3. 时钟恢复系统
  4. Watchdog单元
  5. I/O保护电路
- 专用PWM单元CCU6
  1. 两个16位专用定时器单元T12、T13
  2. T12支持3组比较/捕获通道
  3. T13支持1路比较输出通道
  4. 集成死区时间生成单元，可输出互补PWM信号，防止功率级短路
  5. 定时器支持单次运行模式（Single Shot mode）
    - a) 支持类磁滞控制模式
  6. 专用霍尔传感器模式，硬件支持直流无刷电机的块交换控制
    - a) 自动进行霍尔信号的滤波、采样、比较以及输出换相操作
    - b) 自动检测电机速度
  7. 集成多通道模式，支持多相电机的控制
  8. 可与A/D单元进行联动，自动触发A/D转换操作
- 增强型A/D模块
  1. 支持最多8个通道，8/10位转换精度
  2. 采样时间可编程，最小转换时间<1μs
  3. TUE: ±1LSB（8位）、±2LSB（10位）
  4. 4个独立的结果寄存器
  5. 参考电压：3.3V-5V
  6. 支持自动扫描功能
  7. 转换请求触发方式可选
  8. 转换结果自动边界检测功能
  9. 丰富的中断节点，转换优先级可配置

- LED扫描/电容式触控单元
  1. 集成相关应用ROM库函数
- 16位矢量计算机单元
  1. 三角运算单元CORDIC和硬件乘除单元MDU
  2. 协处理器形式运行
  3. 支持矢量旋转变换等运算
- 丰富的串行接口单元
  1. 全双工UART
  2. 高速SSC（兼容SPI）
  3. I<sup>2</sup>C接口
- 专业应用协议支持
  1. LIN主/从协议
  2. 照明DALI从协议
  3. 传感器/换向器IO-Link从协议

#### 1.4 英飞凌分立 IGBT 特点

RC-D (Reverse Conducting Technology for Drives) IGBT 是改革创新的 IGBT:

1. 适用于硬开关，将反向并联的二极管芯片集成于 TrenchStop IGBT 芯片，如图 - 2 所示：

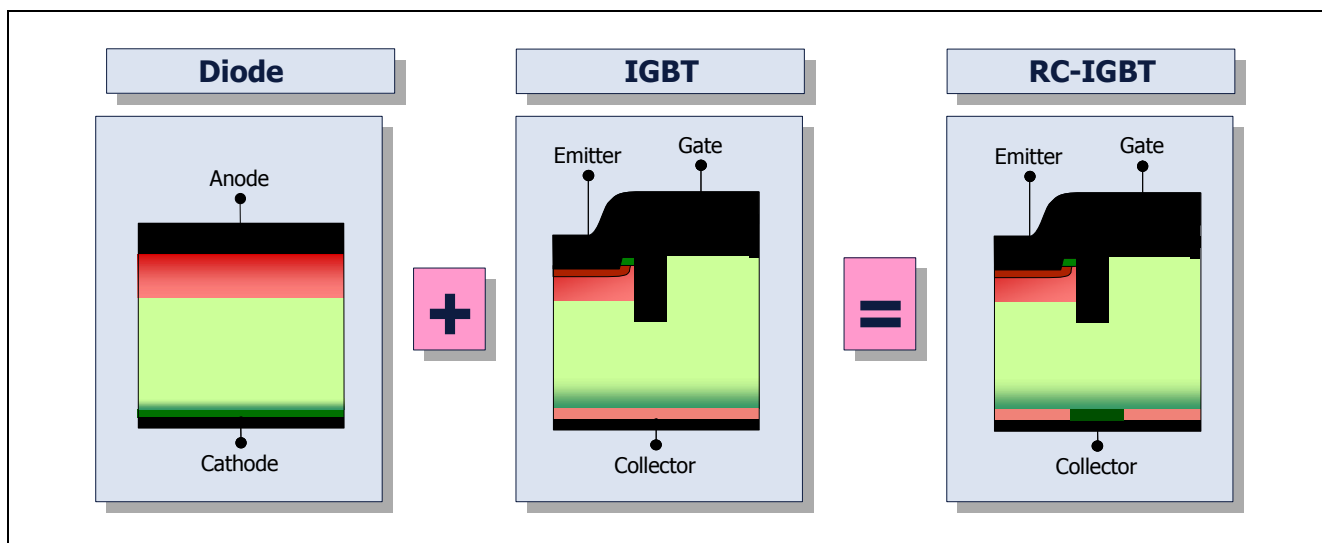


图 - 2 RC-D IGBT 的结构示意图

2. Diode 具有和 IGBT 同样的 DC 电流等级
3. 目前有 IPAK 和 DPAK 封装的 4A, 6A, 10A 和 15A 的产品，基本参数参考下面的表格：

表-1 RC-D IGBT 的产品目录

Part number	Package type	Bvces	Ic @25°C	Ic @ 00°C	Vceon @175°C	Ets @175°C	Tsc	Vgeth
		[V]	[A]	[A]	[V]	[mJ]	[us]	[V]
IKU04N60R	I-PAK	600	8	4	1.9	0.21	5	5
IKD04N60R	D-PAK							
IKU06N60R	I-PAK	600	12	6	1.9	0.3	5	5
IKD06N60R	D-PAK							
IKU10N60R	I-PAK	600	20	10	1.9	0.58	5	5
IKD10N60R	D-PAK							
IKU15N60R	I-PAK	600	30	15	1.9	1.22	5	5
IKD15N60R	D-PAK							

4. 很高的性价比
5. 封装的体较小，一方面减少 PCB 的面积，另一方面增加 PCB layout 的灵活性，如图 - 3 所示:

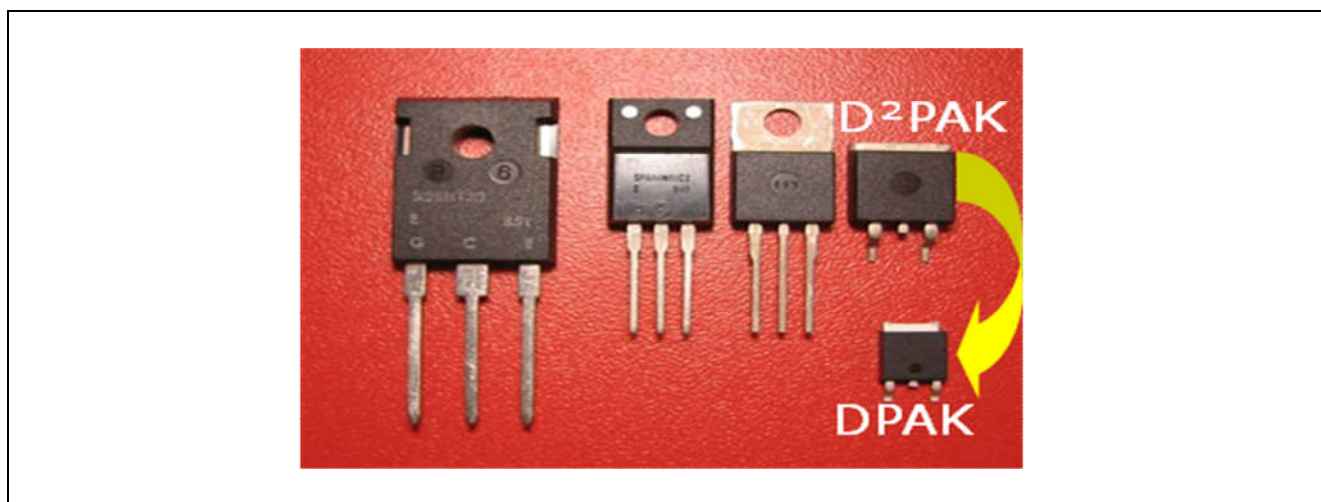


图 - 3 DPAK 封装 RC-D IGBT 的实物图

6. 很低的饱和压降  $V_{ce(sat)}$ , 也就是很低的传导损耗
7. 通过控制门极驱动电阻, 可以在很宽范围内调解开关时间
8. 开关波形很平滑, 非常好的 EMI 性能
9. 5us 的短路能力
10. 最高结温高达 175°C



## 2 方案系统介绍

### 2.1 概况

如图 - 4 所示，以 XC800 系列为核心的控制电路主要完成直流母线电流、直流母线电压、电机相电流、调速电压等物理量的采集；并根据霍尔信号进行速度计算，生成三相 SPWM 控制信号；同时完成人机界面交互功能。

开关电源部分以英飞凌 CoolSET F3 系列的专用集成 IC（包括 MOSFET 及其驱动等）为核心进行设计；逆变电路部分采用英飞凌单管 IGBT 及 EiceDRIVER 驱动芯片。

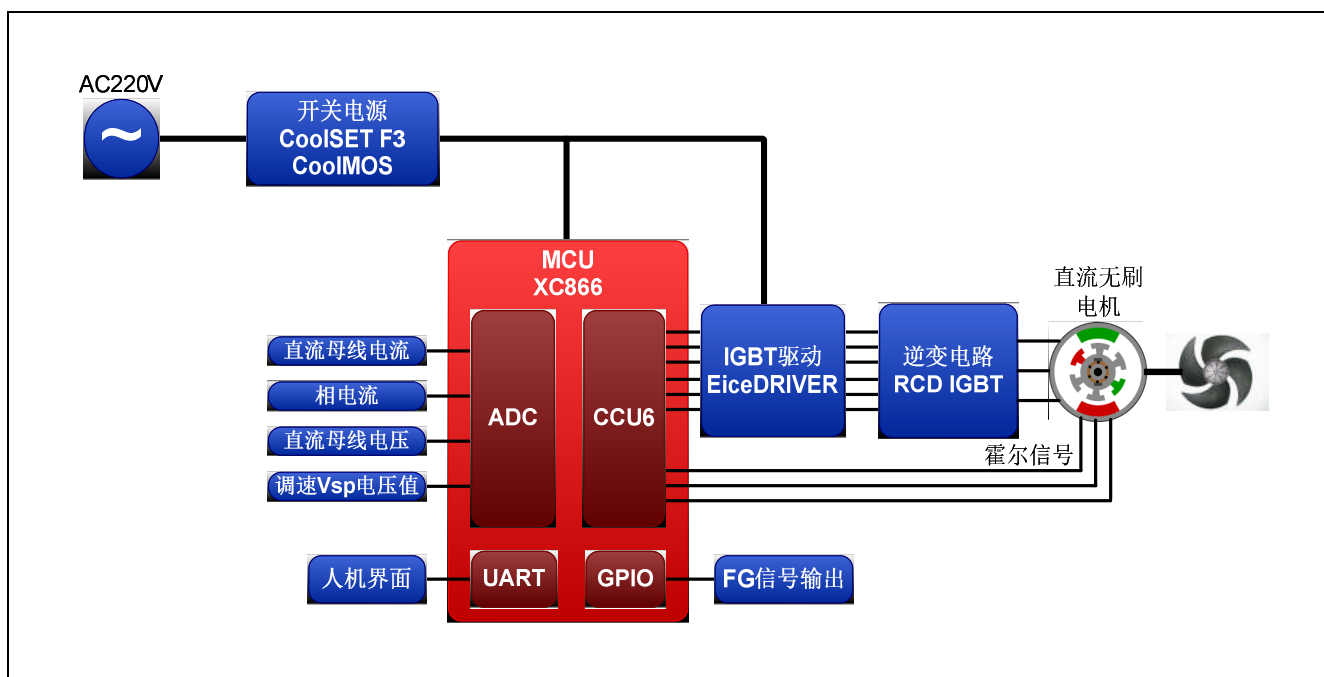


图 - 4 系统控制框图

### 2.2 主要功能和指标

系统实现的主要功能和指标如下：

- 系统主要功能
  1. 电机控制方法：两相正弦波控制
  2. 起动方式：梯形波控制
  3. 转速控制：转速 PI 调节器
  4. 超前角校正功能
  5. 保护功能：过流、过压、欠压
- 套件参数
  1. 供电电压：交流 220V
  2. 电机类型：永磁同步电机（带霍尔传感器）
  3. 最大输出功率：100W
  4. 电机调速范围：300-1200RPM（4 对极）

### 3 方案硬件设计

#### 3.1 主回路

##### 3.1.1 逆变电路

逆变电路的原理图如图 - 5 所示：

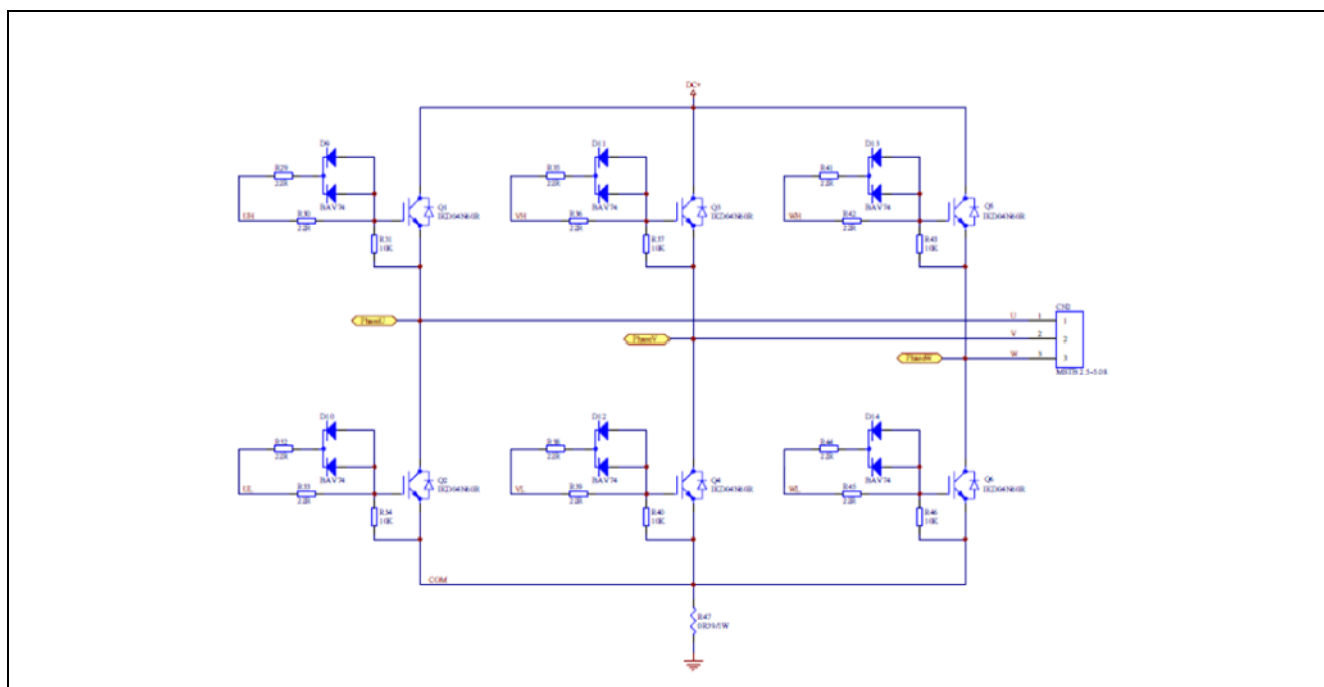


图 - 5 逆变电路原理图

该硬件电路的设计,主要的难点在于 IGBT 的散热.英飞凌推荐过孔导热的导热方式,利用导热孔以实现最近的热传播,而且可以减小 PCB 面积和系统散热的成本,基本示意图如图 - 6, 图 - 7 如下:

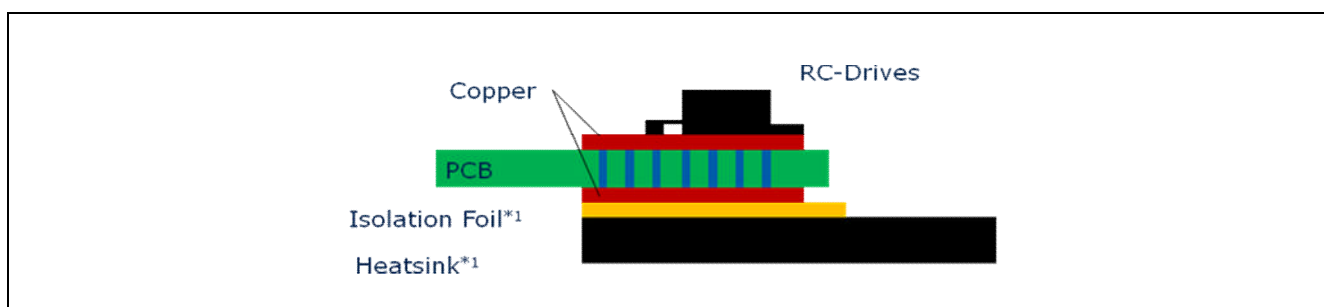


图 - 6 Infineon 推荐的装配示意图

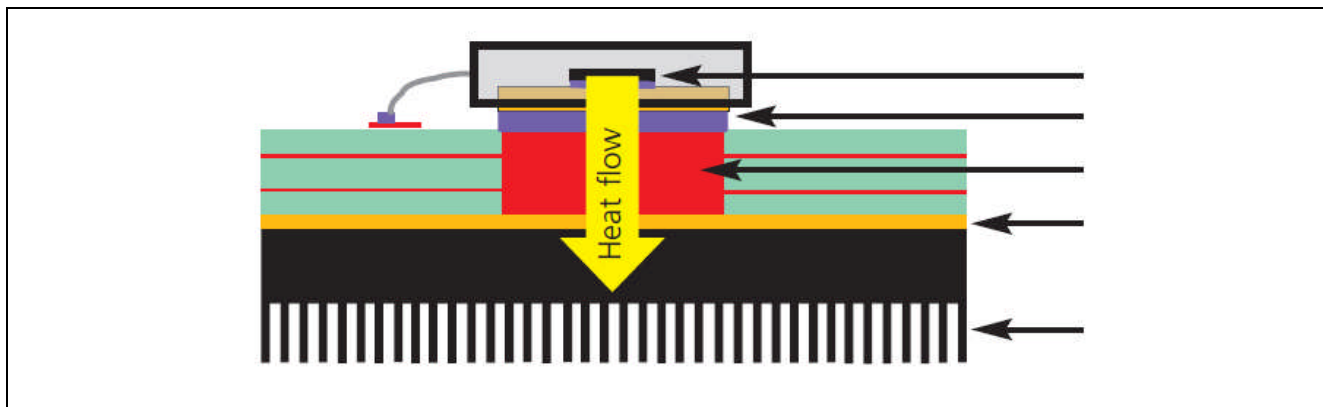


图 - 7 过孔导热的导热示意图

该过孔导热的导热理念，Infineon 已经在 demon 板上成功测试验证：15A RCD IGBT 使用于 1.5KW 16kHz 系统， $T_j < 150^\circ\text{C}$ 。

设计中需要对所选用元器件规格、尺寸、面积等有完全的了解；对各部件的位置安排作合理、仔细的考虑。

#### ● 机构设计考量

包括 PCB 尺寸大小，高度等的限制，PCB 固定位置，含有插座的 PCB 的位置等。确认 PCB 的机构限制条件，作为 PCB layout 及元器件选择和设计的标准以完成 PCB 的外形轮廓。

#### ● 热流设计考量

- 热性能参数与风流位置基本关系：耐热性及热性能差的器件置于冷却气流的上游；耐热性及热性能好的器件放在冷却气流下游；耐热性及热性能相当者，发热大或散热性差的元器件设计在冷却气流的上游，反之置于下游处。

- 热源均衡原则：均衡布局，适当分散排列高发热元件以改善 PCB 半成品的散热性。

- 温度独立原则：需要保持温度独立性如热敏电阻等器件须与无关的发热或散热器保持适当距离，并与其所感应器件保持良好接触及最小温差。

- 热敏感器件布置原则：电解电容及因温度会引起关键参数较大变化（包括寿命参数）的元器件，须远离大发热源并注意其有效散热性。

#### ● 平面布局及走线基本原则

- 平面布局原则：以电流回路面积最小化及独立性为基本原则。

- 方向原则：从焊接面看，元件的排列次序尽可能保持与原理图相一致。

- 参数清晰原则：清楚了解电路各部分参数—包括各环路电流、电压、频率等。

- 间距原则：以大间距为基本原则。

- 走线原则：以近、短、简为基本。信号线应少拐弯少用外接跨线，改变方向时应走斜线并取半径大者，不可产生锐角。避免走线交叉。

- 强电流线路原则：公共地线、功率电源引线、功率电路等大电流走线应尽可能宽大，以降低路径电阻及其电压降，减小寄生耦合而产生的自激。

- 差分信号原则：差分信号走线应遵循基本原则“等长、等距”和“尽量靠近”原则。

- 接地原则：以阻抗最小化及回路独立为基本原则。控制部分的地系统与功率变换部分地系统保持单点接地。

- 滤波器布置：滤波器的前后走线不得重叠或交叉，以避免干扰源跨越滤波器干扰到滤波后的线路。

- 功率开关器件布置：开关及整流器件须靠近电感器或变压器件放置，连接导线须短而粗。

### 3.1.2 电流采样及过流保护

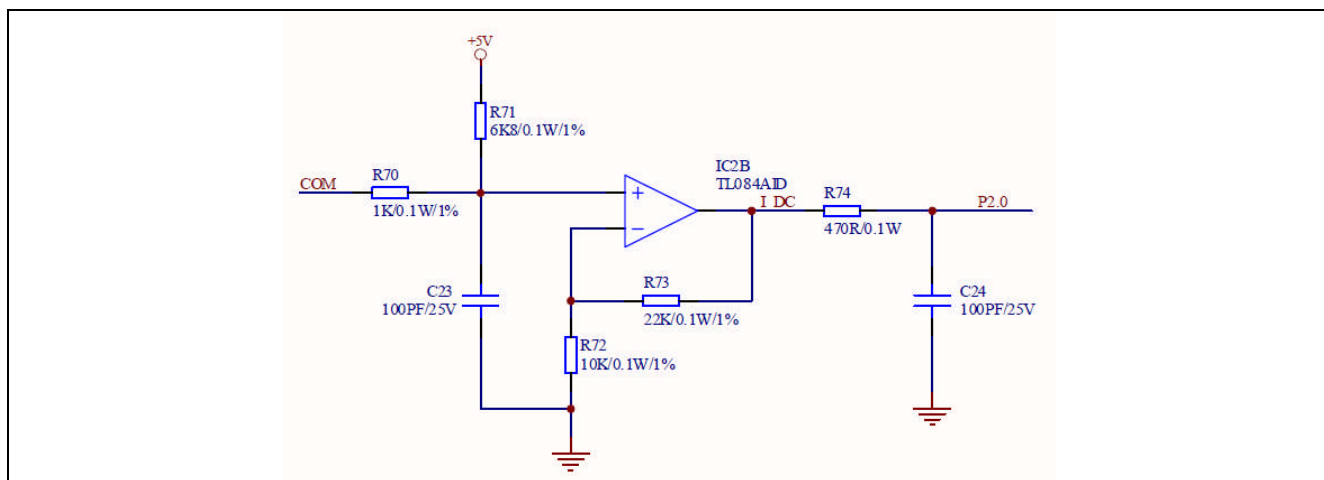


图 - 8 直流母线电流采样电路

如图 - 8 所示，直流母线电流通过采样电阻和放大电路送入 XC800 的 AD 端口。图 - 9 为过流保护电路，通过比较器检测直流母线电流是否过流，比较器输出连接到 XC800 的 CCU6 单元/CTRAP 端口，实现过流故障时的快速硬件保护。

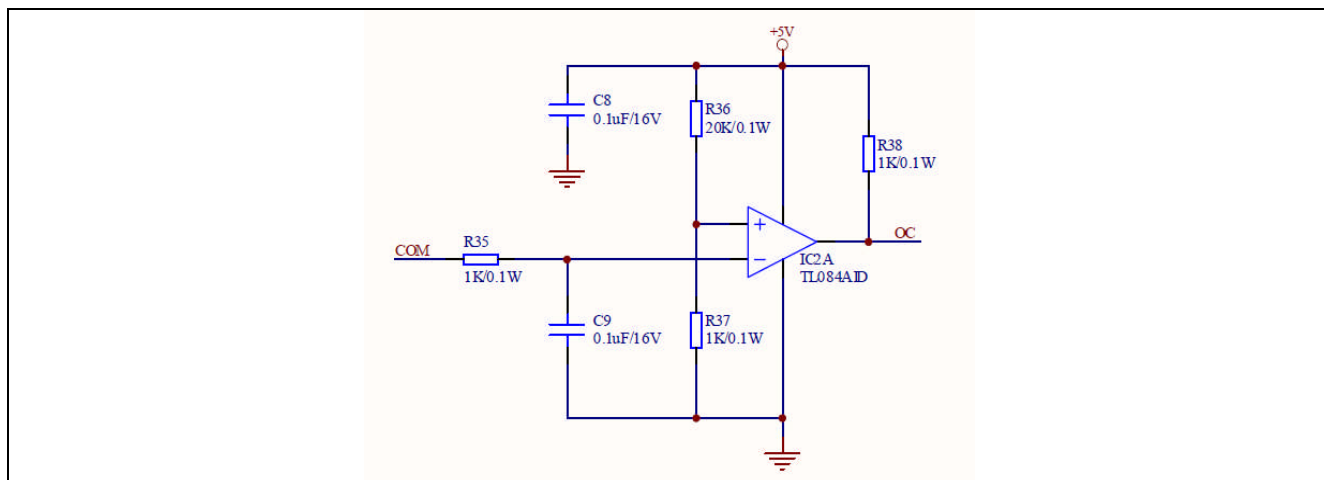


图 - 9 过流保护电路

### 3.2 控制回路

图 - 10 为 MCU（以 XC866 为例）周边原理图。系统所使用的微控制器主要引脚资源说明如下（以 XC866 为例）：

**表-2 XC866 资源分配**

功能分类	所选引脚名称	所属模块	说 明
电机驱动 PWM 信号输出	P3.0/CC60	CCU6	U 相下管
	P3.1/COUT60		U 相上管
	P3.2/CC61		V 相下管
	P3.3/COUT61		V 相上管
	P3.4/CC62		W 相下管
	P3.5/COUT62		W 相上管
霍尔信号输入	P1.5/CCPOS0	CCU6	需与电机三相输出线相对应
	P1.6/CCPOS1		需与电机三相输出线相对应
	P1.7/CCPOS2		需与电机三相输出线相对应
保护功能	P3.6/CTRAP#	CCU6	过流保护
模拟量检测输入	P2.3/AN3	ADC	调速电位器
	P2.6/AN6		直流母线电流
	P2.7/AN7		直流母线电压
RS232 通信	P1.0/TXD	UART	串口数据发送
	P1.1/RXD		串口数据接收

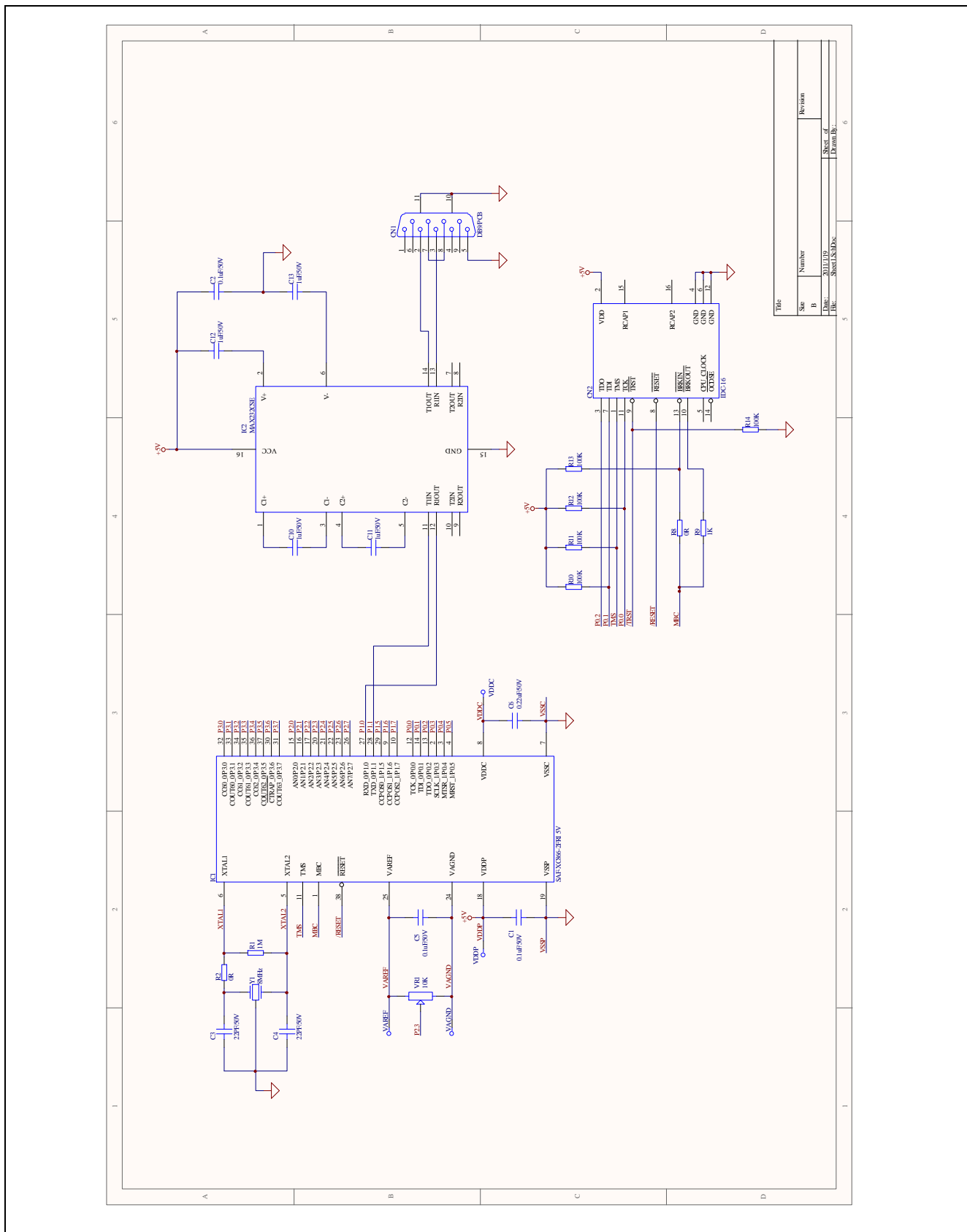


图 - 10 XC866 周边原理图



## 4 方案主要算法介绍

### 4.1 正弦波 PWM 的生成

#### 4.1.1 开关损耗最小 SPWM

如图 - 11 所示，常规三相 SPWM 是将三相正弦调制波和三角载波相比较，产生三相正弦调制信号，施加到电机相线上，电机相电压为正弦。由于电机为感性负载，因此电机相电流为正弦电流。

开关损耗最小 SPWM 为一种新的正弦 PWM 形式，同一时刻只有两相导通，开关损耗较小、驱动级效率较高。开关损耗最小 SPWM 采用如图 - 11 图 - 12(a)所示的非正弦调制波，此时为线电压控制（线电压为正弦），如图 - 12(b)所示。通过控制  $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$  的相位以及幅值即可实现控制相电流的目的。

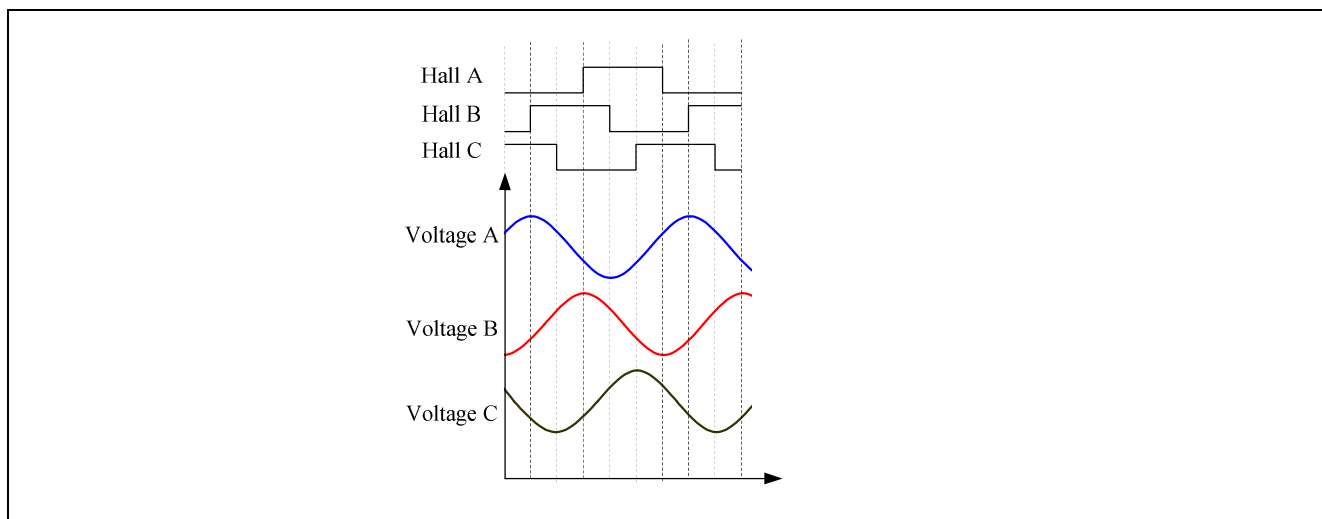


图 - 11 三相 SPWM

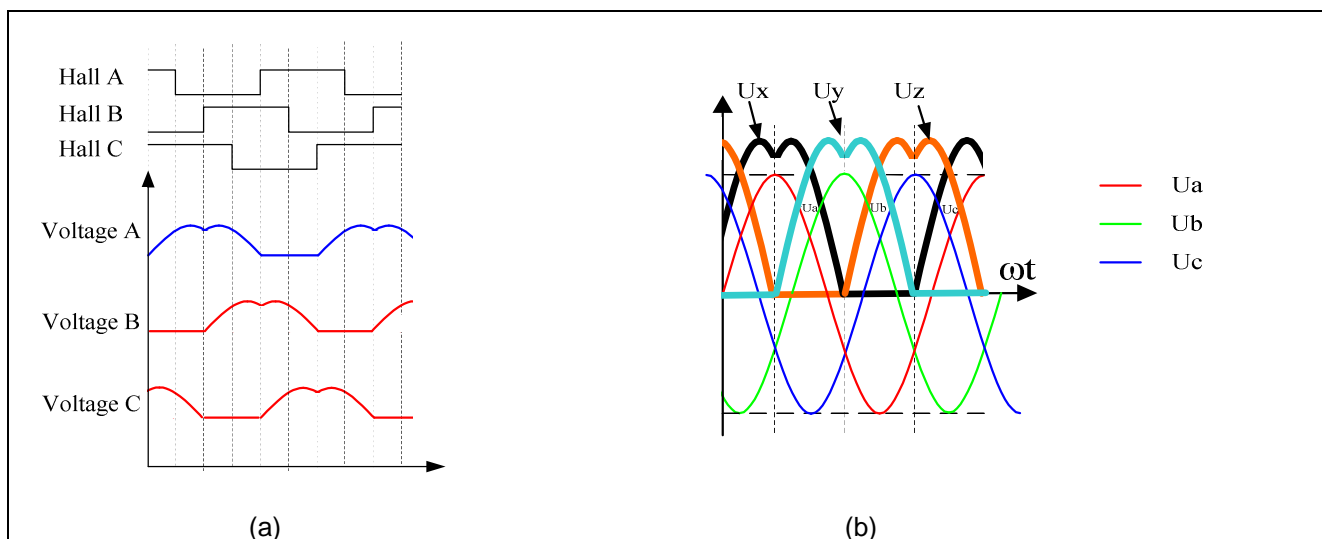


图 - 12 开关损耗最小 SPWM

电压  $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$  和线电压  $U_{xy}$ 、 $U_{yz}$ 、 $U_{zx}$  计算公式如下：

$$U_x = \begin{cases} \sqrt{3} * \sin(\omega t + 30^\circ), & \omega t \in [-30^\circ, 90^\circ] \\ \sqrt{3} * \sin(\omega t - 30^\circ), & \omega t \in [90^\circ, 210^\circ] \\ 0, & \omega t \in [210^\circ, 330^\circ] \end{cases}$$

$$U_y = \begin{cases} \sqrt{3} * \sin((\omega t + 30^\circ) - 120^\circ), & \omega t \in [90^\circ, 210^\circ] \\ \sqrt{3} * \sin((\omega t - 30^\circ) - 120^\circ), & \omega t \in [210^\circ, 330^\circ] \\ 0, & \omega t \in [-30^\circ, 90^\circ] \end{cases}$$

$$U_z = \begin{cases} \sqrt{3} * \sin((\omega t + 30^\circ) - 240^\circ), & \omega t \in [210^\circ, 330^\circ] \\ \sqrt{3} * \sin((\omega t - 30^\circ) - 240^\circ), & \omega t \in [-30^\circ, 90^\circ] \\ 0, & \omega t \in [90^\circ, 210^\circ] \end{cases}$$

$$U_{xy} = U_x - U_y = \sqrt{3}(\sin(\omega t + 30^\circ))$$

$$U_{yz} = U_y - U_z = \sqrt{3}(\sin(\omega t - 90^\circ))$$

$$U_{zx} = U_z - U_x = \sqrt{3}(\sin(\omega t - 210^\circ))$$

#### 4.1.2 开关损耗最小 SVPWM

三相逆变器的 6 个开关器件共有 8 种开关组合状态，其中 2 个为无效零矢量，6 个为有效矢量，它们将 360 度的电压空间分为 6 个扇区（每扇区 60 度）。SVPWM 采用相邻两个基本电压矢量的矢量和来合成任意电压矢量。相邻两个基本矢量的选择由当前电压矢量所处的扇区决定，其作用时间由当前电压矢量的幅值和相位角计算得到；作用时间之和小于 PWM 周期值的部分为零矢量作用时间。常规的 7 段式 SVPWM 每个扇区中各相都有导通，如图 - 13(a)所示。

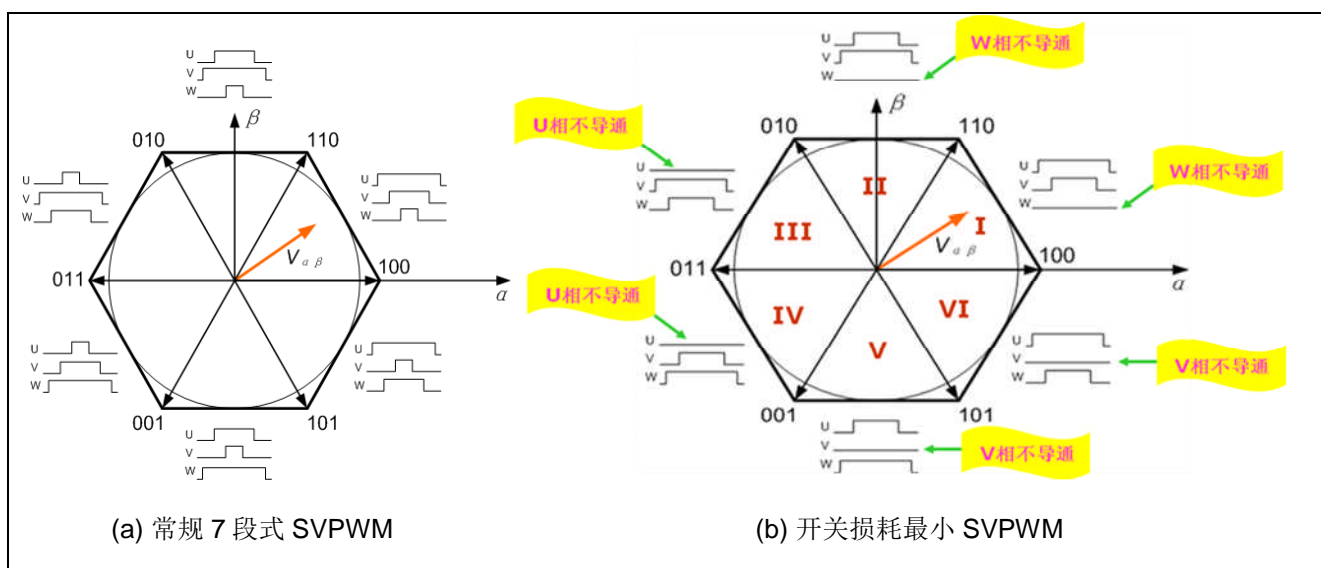


图 - 13 SVPWM

开关损耗最小 SVPWM（又称 5 段式 SVPWM），每个扇区只有两相导通，具有开关次数小，开关损耗低、提高效率的优点，见图 - 13(b)。此时为不连续 PWM 模式，每个扇区根据需选择不同零矢量  $U_0(000)$  或  $U_7(111)$ ，每一相有  $1/3$  周期( $120^\circ$ )不开关，因此与常规 7 段式 SVPWM 相比开关次数减少  $1/3$ ，降低了开关损耗；同时与最小开关损耗 SPWM 相比，最大输出电压亦提高 15.47%。

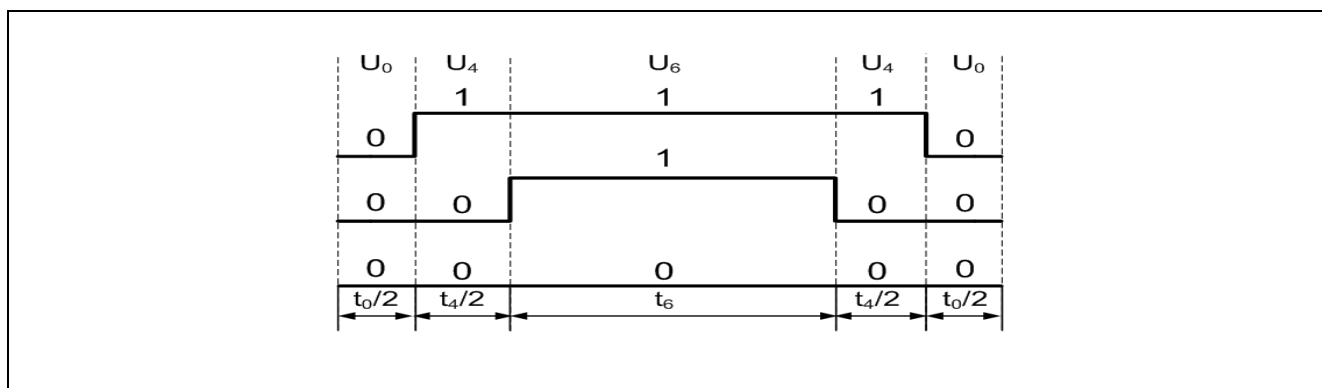


图 - 14 开关损耗最小 SVPWM 扇区 I 矢量示意图

图 - 14 为扇区 I 全部选择  $U_0(000)$  时的矢量及其作用时间示意图，电压矢量计算公式如下：

$$U_{\alpha\beta} = \frac{1}{T_s} (t_0 \cdot U_0 + t_4 \cdot U_4 + t_6 \cdot U_6) = \frac{t_4 \cdot U_4 + t_6 \cdot U_6}{T_s}$$

其中载波周期  $T_s = t_0 + t_4 + t_6$ 。

同理可得其他各扇区的电压矢量计算公式，见图 - 15。各扇区电压矢量作用时间可由下式计算得到：

$$\begin{cases} T_k = \frac{\sqrt{3}}{2U_{dc}} \left( \sin\left(\frac{k\pi}{3}\right) \cdot U_\alpha - \cos\left(\frac{k\pi}{3}\right) \cdot U_\beta \right) \\ T_{k+1} = \frac{\sqrt{3}}{2U_{dc}} \left( -\sin\left(\frac{k-1}{3}\pi\right) \cdot U_\alpha + \cos\left(\frac{k-1}{3}\pi\right) \cdot U_\beta \right) \end{cases}$$

其中  $\frac{k-1}{3}\pi \leq \arg(U_\alpha, U_\beta) \leq \frac{k}{3}\pi$ ， $U_{dc}$  为直流母线电压， $U_\alpha$ 、 $U_\beta$  为扇区相邻电压矢量。

$k = 1, 2, 3, 4, 5$

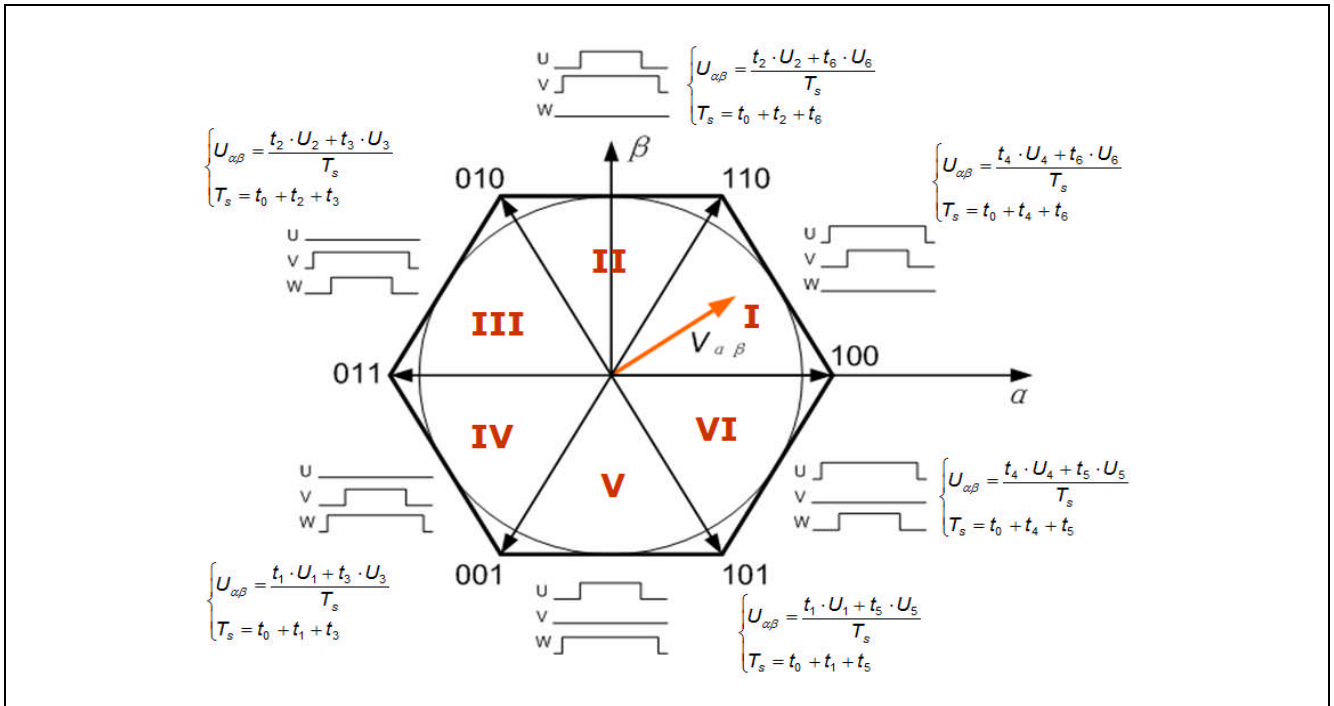


图 - 15 开关损耗最小 SVPWM 各扇区电压矢量计算

更多关于 SVPWM 的详细算法说明及相关配置，请参见英飞凌 XC866 相关应用笔记（[AP0803620-Optimized Space Vector Modulation and Over-modulation with the XC866](#)）

## 4.2 梯形波控制启动

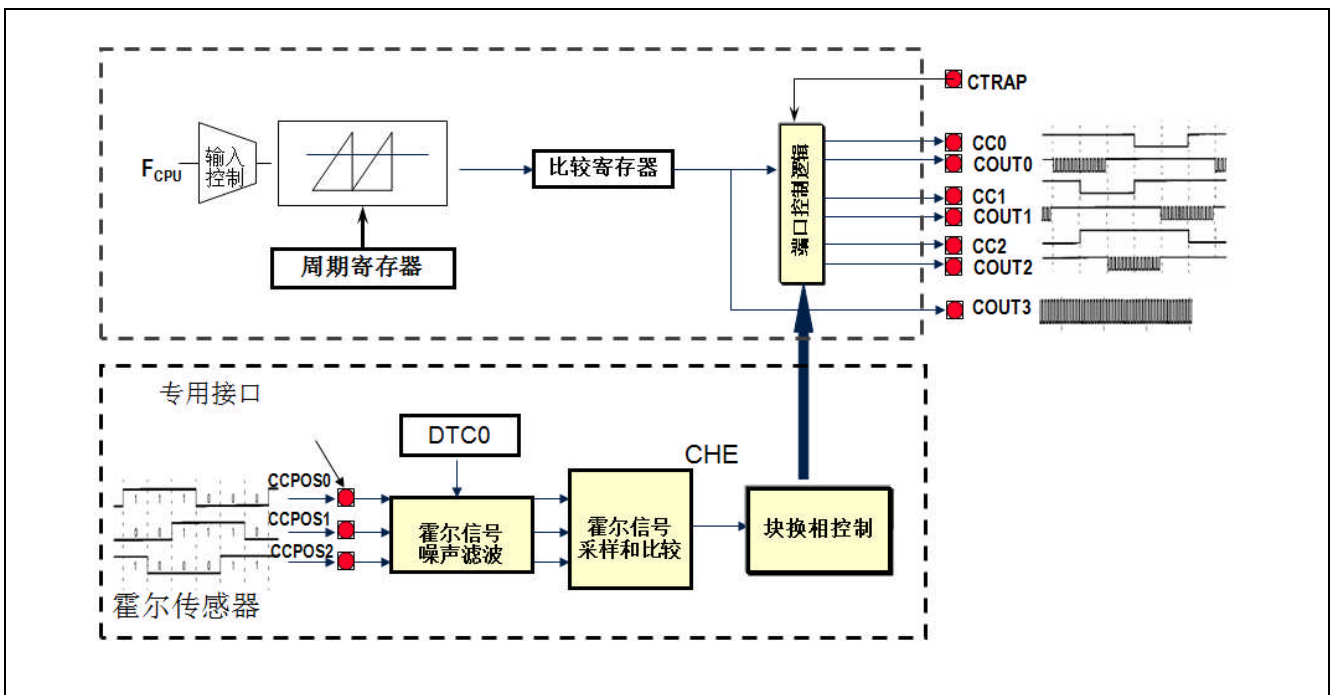


图 - 16 CCU6 的霍尔传感器模式

由于正弦波控制需要角度信息，直流无刷电机的 3 个霍尔传感器可产生相隔 60 度的角度信号。此信号可作为换相参考即 0°、60°、120°、180°、240°、300°。由于刚上电时由于转子是静止状态，仅能得知当前霍尔状态，无法由霍尔传感器得到具体动态换相信息，由此启动时一般采用梯形波控制方式，待达到一定速度平稳运行可以获得准确换相信息后即可切入三相正弦波控制。

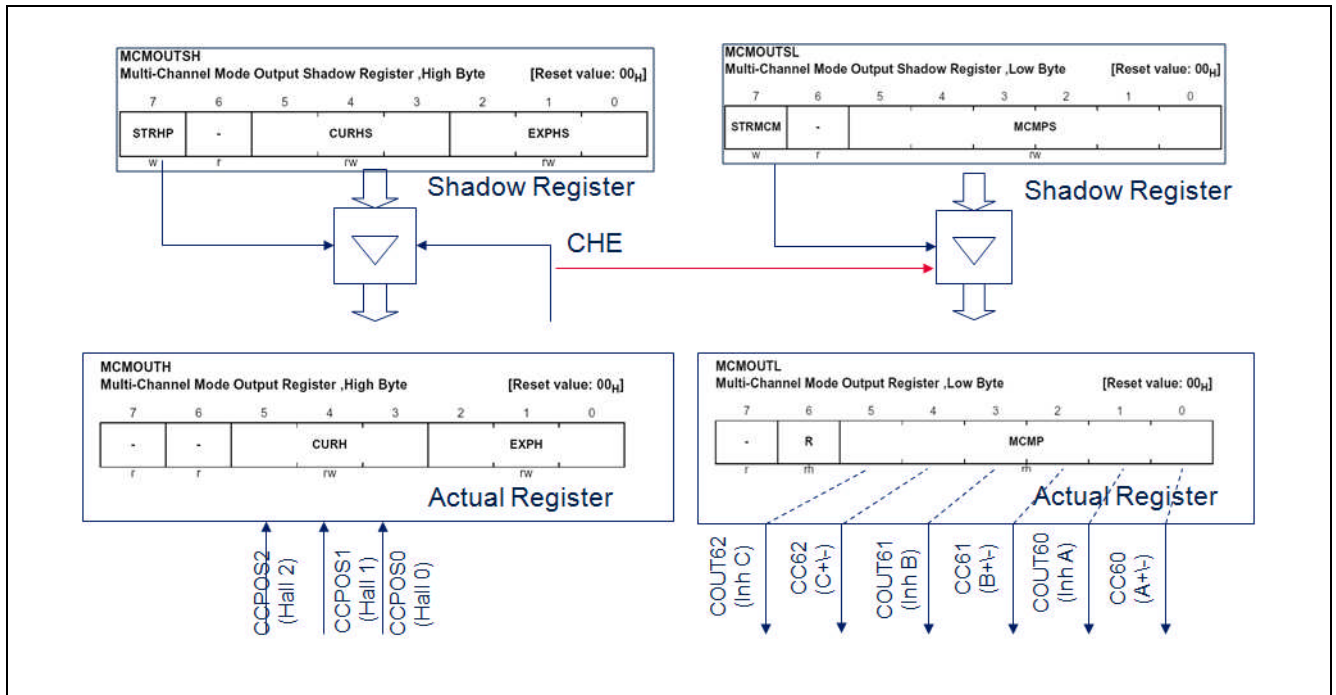


图 - 17 霍尔序列比较及传送输出

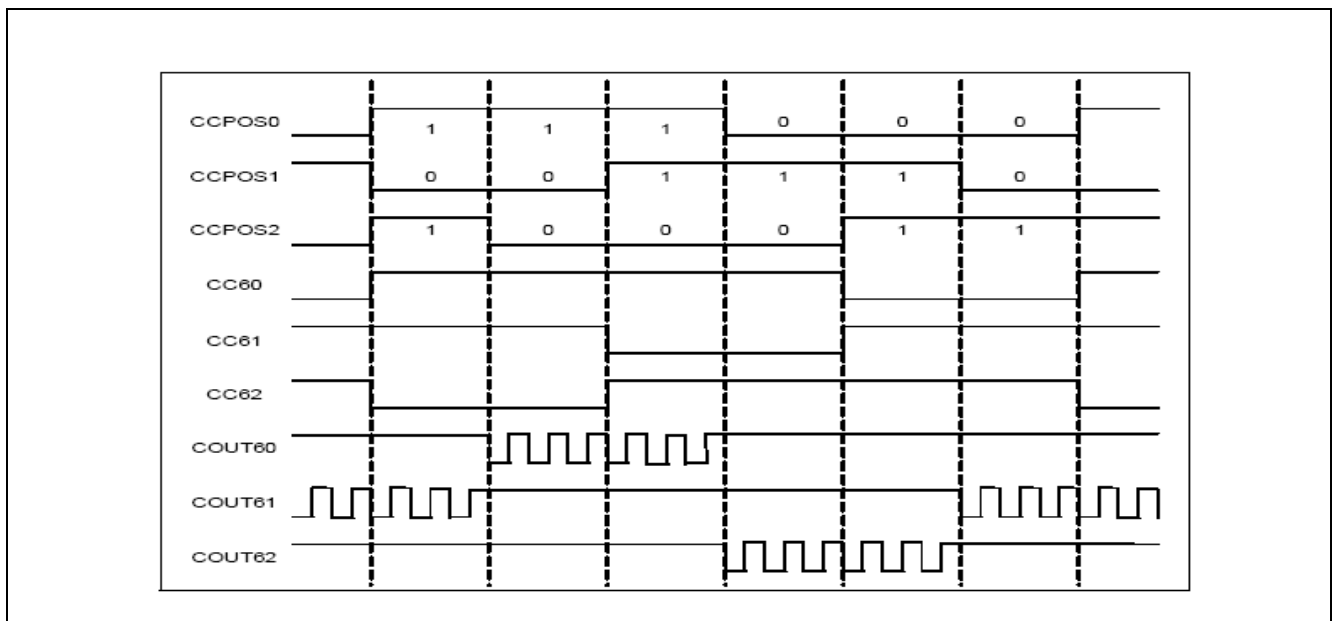


图 - 18 CCU6 输出与霍尔序列的对应关系

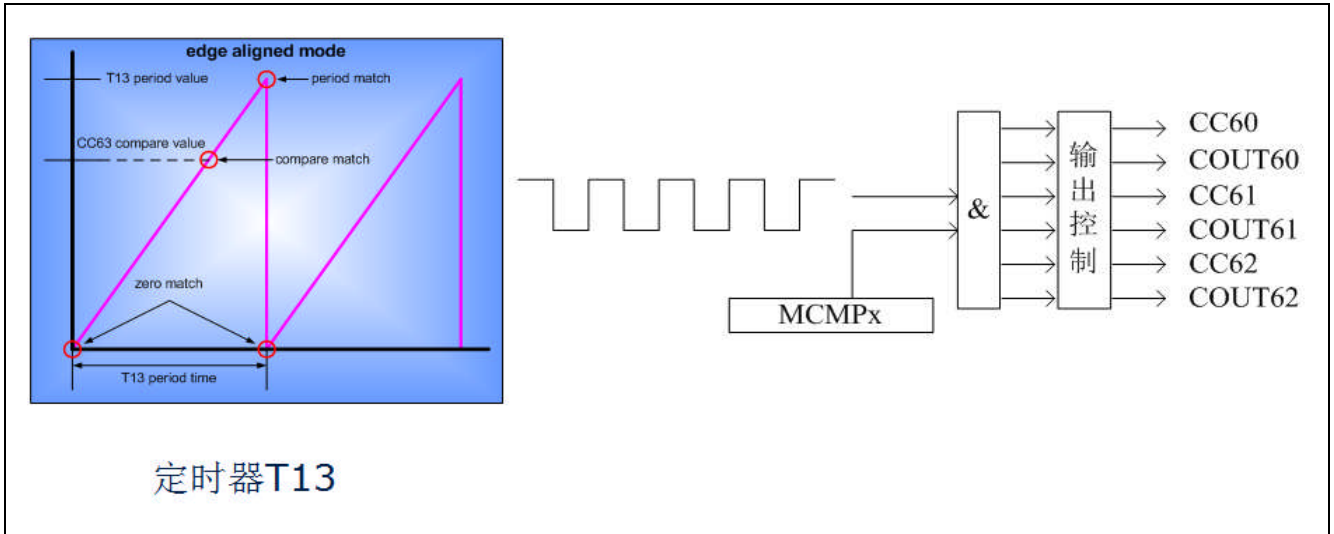


图 - 19 T13 调制

如图 - 16 所示，XC866 的专用 PWM 单元 CCU6 具有支持直流无刷电机控制的专用霍尔传感器模式。专用输入接口 CCPOS0、CCPOS1、CCPOS2 可以接收霍尔传感器信号，通过 DTC0 对霍尔信号进行硬件滤波；DTC0 减计数到 1 时采样 CCPOSx(x=0,1,2)的输入信号，将采样值和当前的霍尔序列以及期望的霍尔序列进行比较，若采样序列和期望序列相同则 CCPOSx(x=0,1,2)的跳变沿为正确霍尔事件（Correct Hall Event），从而引发 CHE 中断。正确霍尔事件可作为寄存器 MCMOUT 的传送请求事件，使能映射传送将当前霍尔序列、期望霍尔序列、输出调制信息从 MCMOUTS 复制到 MCMOUT 中，见图 - 17。CCU6 的三相输出 CC6x、COUT6x(x=0,1,2)与霍尔信号序列的对应关系如图 - 18 所示，其中 COUT6x(x=0,1,2)的 PWM 调制可由定时器 T13 来完成，见图 - 19。更多关于直流无刷电机梯形波控制的详细设置及说明，请参见英飞凌 XC866 相关应用笔记（[AP08026-XC866 Brushless DC Motor Control with Hall Sensors Using Infineon 8-bit XC866 Microcontroller -description](#)）。



### 4.3 转子位置估算及转速计算

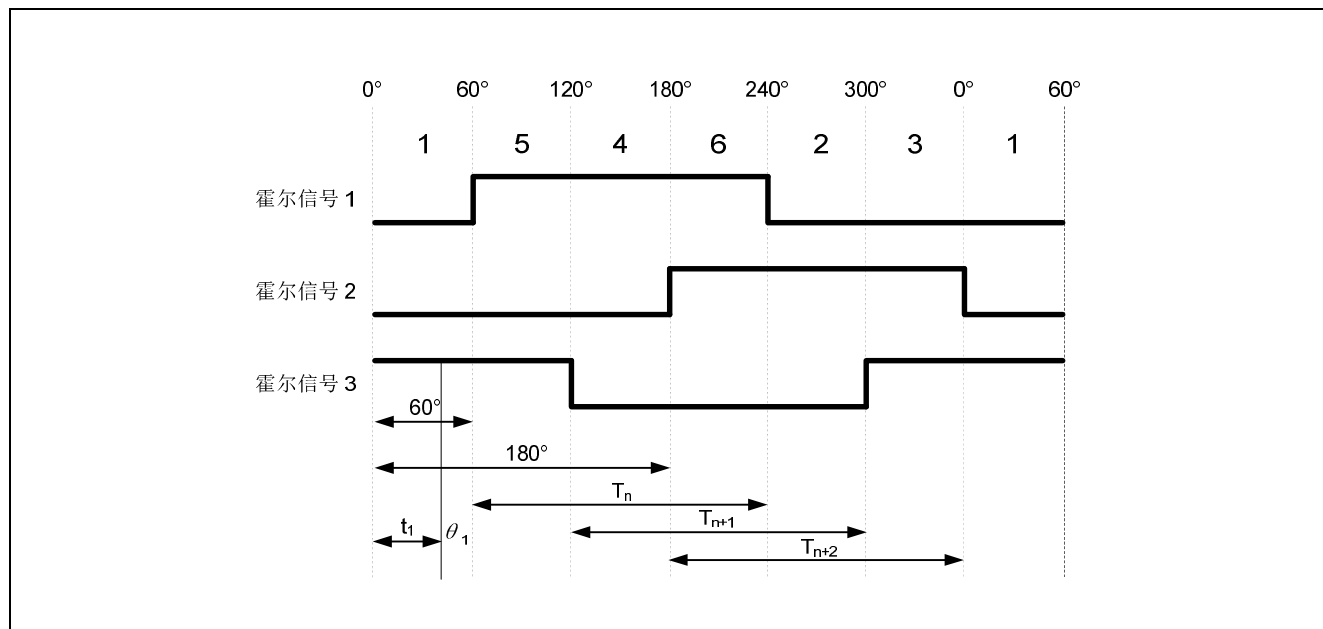


图 - 20 转速计算

三相正弦波控制时若仍使用梯形波控制时每隔 60 度的角度信息则太过于粗略，需要更加精确和细分的角度信息。实际采用角度插值计算方法，即可在当前 60 度区间内根据当前转速以及转子在此 60 度区间内已转过的时间  $t_1$  来计算当前转子的具体角度值  $\theta_1$ ，如图 - 20 所示。

当前转速可通过对某个霍尔信号的每 180 度时间进行计时或边沿捕获的方式计算得到。实际控制时为了减小误差、提高速度计算的精度，一般采用相邻多个 180 度的时间进行平均来计算转速。如图 - 15 所示，采用  $T_n$ 、 $T_{n+1}$ 、 $T_{n+2}$  平均值  $T_{avr} = (T_n + T_{n+1} + T_{n+2}) / 3$  来计算转速  $n$ ，

公式如下：
$$n = \frac{1}{2 * T_{avr}} \cdot \frac{60}{p}$$
，其中  $p$  为电机极对数。

#### 4.4 速度闭环控制

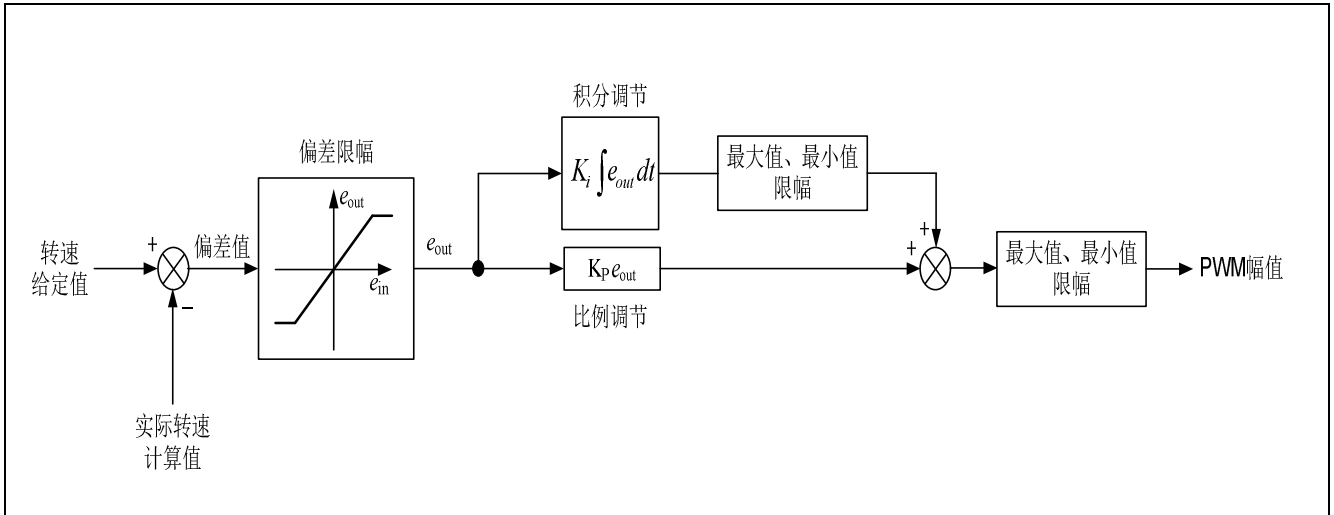


图 - 21 转速 PI 调节框图

在直流无刷风机正弦波控制中为了达到平稳和低噪音的要求，通常需要对电机转速进行比较精确的控制，因此直接通过调节调制波的幅值来调节转速的开环方法已无法满足要求，实际应用中多采用转速闭环 PI 调节的方法来提高转速精度和稳定性。

在转速 PI 调节中，给定信号为设定的转速值，反馈信号为实际转速值，输出量则为 PWM 调制的幅值；设定转速值可通过串口由上位机、或者通过调速电位器的 A/D 值来给定；给定转速和实际转速计算值的偏差值、积分调节的输出以及 PI 调节器的输出都需要最大值和最小值限幅。图 - 21 给出了转速 PI 调节的框图。

#### 4.5 相位超前角调整

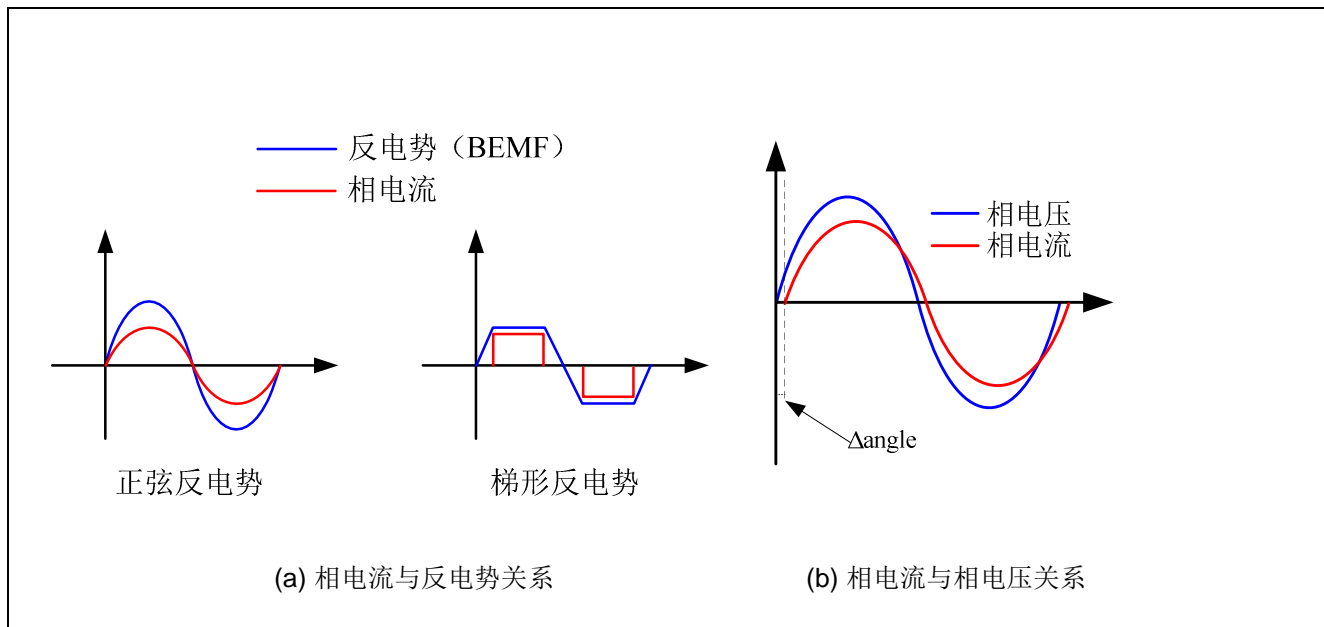


图 - 22 直流无刷风机相电流与反电势、相电压关系

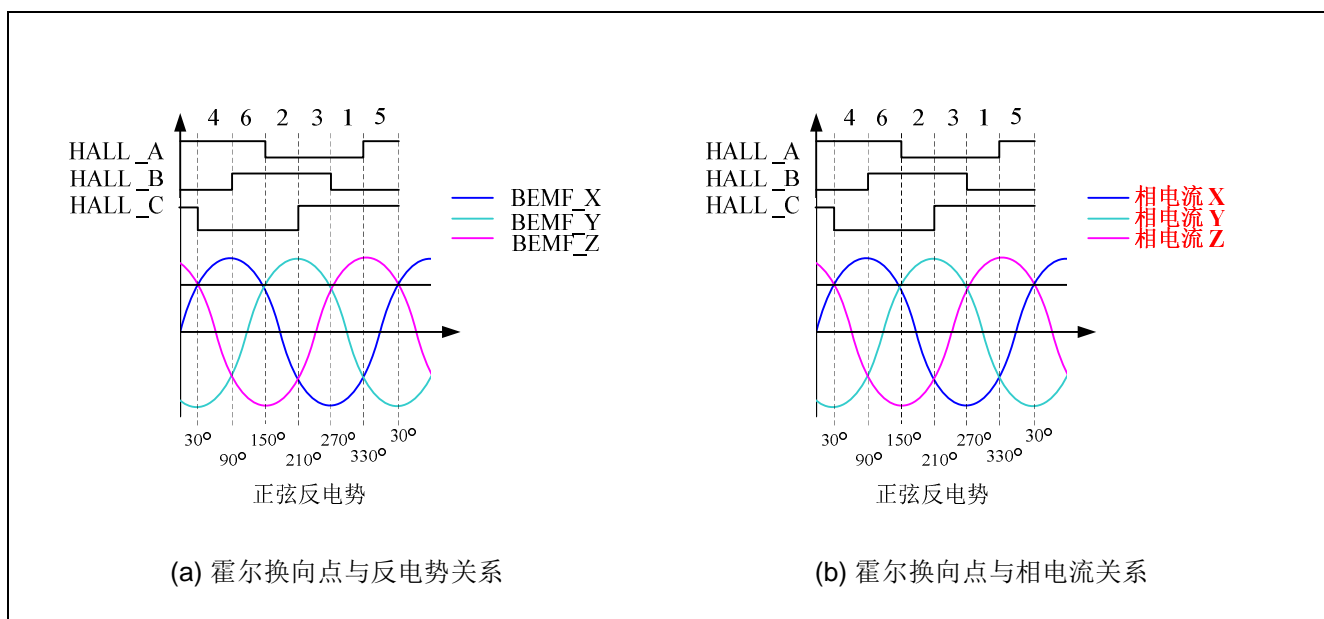


图 - 23 直流无刷电机霍尔换向点与反电势、相电流关系

由于绕组结构的不同，直流无刷电机的反电势有梯形波和正弦波两种形式。理想控制下，要实现相电流需要与反电势同相位，如图 - 22(a)所示。在一个周期中，霍尔传感器输出状态的换向点对应于反电势(BEMF)的角度则为  $30^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $150^\circ$ 、 $210^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $330^\circ$ ，如图 - 23(a)所示；霍尔传感器输出状态的换向点与电机相电流的关系如图 - 23(b)所示。

对于直流无刷风机，由于电机为感性负载，因此电机相电压超前电机相电流一个角度，称为相位超前角  $\Delta angle$ ，如图 - 23(b)所示。采用开关损耗最小 SPWM 控制方式时由于电机端线电压超前于相电压  $30^\circ$ ，因此电机相电压与反电势是同相位的；同时由于相电压超前于相电流  $\Delta angle$ ，因此相电流滞后于反电势  $30^\circ$ 。由于只有电机相电流与反电势同相位时电机才能输出

最大转矩，因此通过调整相位超前角  $\Delta angle$  可使生成的正弦波相电压超前于反电势从而可以提高输出转矩，达到提高效率的目的。 $\Delta angle$  的值一般可通过实际测试手动进行调整，也可以通过检测相电流相位配合一定的软件算法来自动调整。

采用开关损耗最小 SPWM 控制直流无刷风机时，电机端线电压与霍尔传感器输出状态之间的关系如图 - 24 所示。采用开关损耗最小 SVPWM 控制直流无刷风机时各扇区与霍尔状态的对应关系亦可以通过 U、V、W 相的各开关状态组合推导得到，此时同样需要考虑相位超前角  $\Delta angle$  的调整以期达到提高效率的目的。

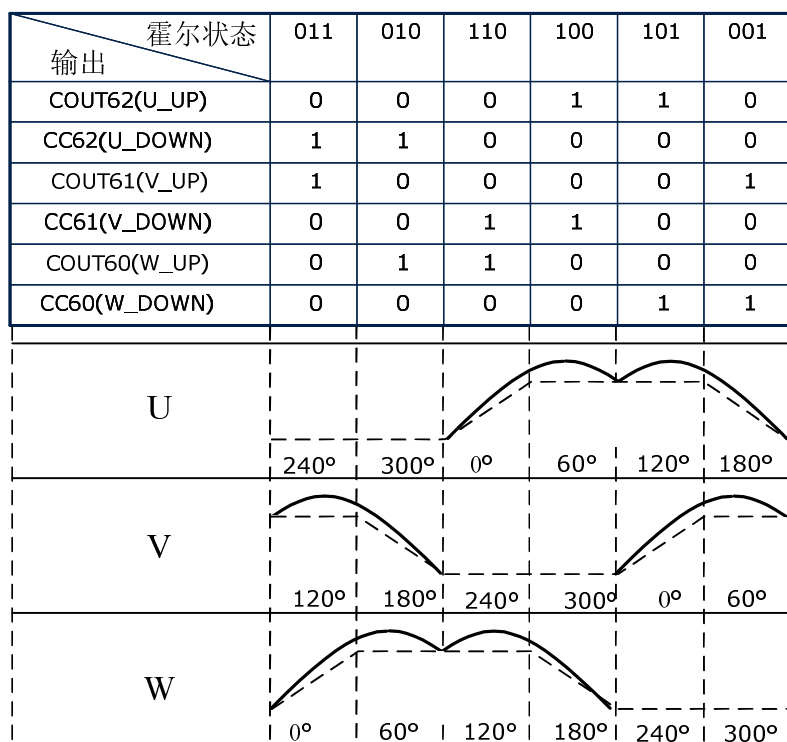


图 - 24      开关损耗最小 SPWM 控制时电机端线电压与霍尔输出状态关系

## 5 方案软件设计

### 5.1 概述

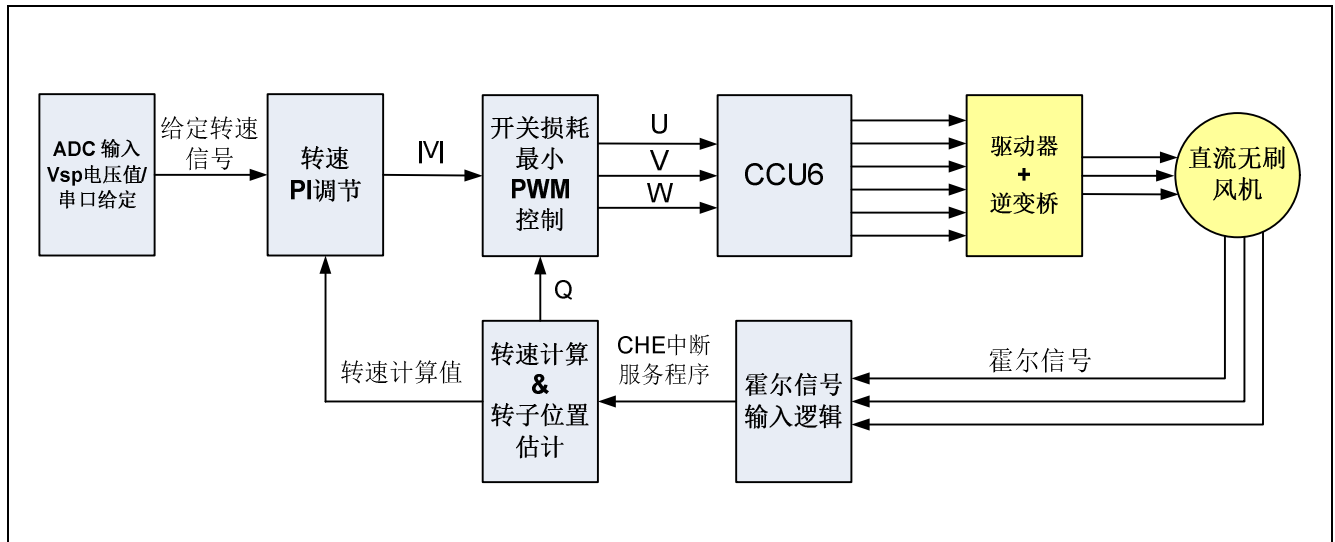


图 - 25 系统控制框图

如图 - 25 所示，基于 XC866 的直流无刷风机正弦波控制系统主要由霍尔信号采样、转速计算、转速 PI 调节和 PWM 生成等部分构成。由转速调节电位器或上位机通过串口设定转速给定值；根据直流无刷风机的霍尔信号进行转子位置估算和转速计算，得到的实际转速值和给定转速一起进入转速 PI 调节器，其输出为 PWM 调制幅值；通过以上 PWM 幅值和转子位置信息可以计算得到驱动电机的三相 PWM 信号，通过逆变电路驱动直流无刷风机运转。本方案采用的调制策略为开关损耗最小 SPWM。

### 5.2 资源分配

基于 XC866 的直流无刷风机开关损耗最小 SPWM 控制系统微控制器资源分配说明如下：

- 电机控制专用单元 CCU6
  - T12 周期中断: 产生开关损耗最小 SPWM 信号
  - 正确霍尔事件 CHE 中断: 驱动更新
  - T13 周期中断: 霍尔信号滤波
  - /CTRAP 中断: 过流保护
- 定时器 T2 单元
  - 电机不同状态查询及判断: 状态机
- ADC 单元
  - 调速电位器 A/D 值
  - 直流母线电流 A/D 值
  - 直流母线电压 A/D 值
  - 电机相电流 A/D 值

## 5.3 主要程序设计说明

### 5.3.1 角度插值计算

采用平均速度法，即假设两次采样点之间转速是恒定的，例如每 60°、120°、360° 计算转速。在两次采样点之间累计 T12 周期中断次数(Var\_T12Sample)，在每次 T12 周期中断中 Var\_Angle 加一个步长 Var\_Step，Var\_Step = 360° / (Var\_T12Sample)。

### 5.3.2 梯形波控制切换至正弦波控制

在正确霍尔事件中断中，梯形波控制时根据任意一个霍尔状态 Con\_SelectedHallState 判断正确运行周期数，若大于 Con\_CorrectHallCount（可根据实际情况修改），则设置首次进入正弦控制标志 Flag\_FirstTimeIntoSIN，梯形波控制标志 Flag\_TrapzControl 清零，具体代码如下：

```

674         if (Var_Sector == Con_SelectedHallState)
675             Var_CHECorrectCount ++;
676         if (Var_CHECorrectCount > Con_CorrectHallCount)
677         {
678             Var_CHECorrectCount = 0;
679             Flag_TrapzControl = 0;
680             Flag_FirstTimeIntoSIN = 1;
681             Var_Modulation = 0x40;
682         }
    
```

另外需要注意的是首次进入正弦波控制时需配置 CCU6 相关寄存器，并使切换时的占空比保持一定的时间。

```

693         if (Flag_FirstTimeIntoSIN)
694         {
695             SFR_PAGE(_cc2, noSST);
696             CCU6_MODCTRL = 0xBF; //sine
697             SFR_PAGE(_cc0, noSST);
698             CCU6_MCMOUTSL = 0xBF;
699             Flag_FirstTimeIntoSIN = 0;
700             Var_MotorState = Con_StateSINE;
701         }
702         if (!Flag_SINTransitionOk)
703         {
704             Var_CHECorrectCount ++;
705             if (Var_CHECorrectCount > 10)
706             {
707                 Var_CHECorrectCount = 0;
708                 Flag_SINTransitionOk = 1;
709             }
710         }
    
```



### 5.3.3 切换时刻转子位置角及 U、V、W 相位计算

对 U 相，当霍尔状态 Hallstate = 110(6)时切换，转子位置角 Var\_Angle 初始值为 60 度。子程序 SP\_SinuModulate()用来确定 U、V、W 相位关系并计算开关损耗最小 SPWM 脉宽值，见以下代码。

```

491 void SP_SinuModulate(void)
492 {
493     unsigned char Var_CompareA,Var_CompareB,Var_CompareC;
494
495     #ifdef Def_FORWARD
496         Var_AngleC = Var_Angle;
497         Var_AngleA = Var_Angle + 341;
498         Var_AngleB = Var_Angle + 682;
499     #else
500         Var_AngleA = Var_Angle;
501         Var_AngleC = Var_Angle + 341;
502         Var_AngleB = Var_Angle + 682;
503     #endif
504
505     if(Var_AngleC > 1023)
506         Var_AngleC -= 1024;
507     if(Var_AngleB > 1023)
508         Var_AngleB -= 1024;
509     if(Var_AngleA > 1023)
510         Var_AngleA -= 1024;
511
512     Var_CompareA = SP_CalSinTable(Var_AngleA,Var_Modulation);
513     Var_CompareB = SP_CalSinTable(Var_AngleB,Var_Modulation);
514     Var_CompareC = SP_CalSinTable(Var_AngleC,Var_Modulation);
515
516     CCU6_CC60SRL = Var_CompareA;
517     CCU6_CC61SRL = Var_CompareB;
518     CCU6_CC62SRL = Var_CompareC;
519
520     CC6_vEnableShadowTransfer_CC6_TIMER_12();
521 }

```

### 5.3.4 开关损耗最小 SPWM 计算

以 U 相为例，开关损耗最小 SPWM 的计算公式如下：

$$U_x = \begin{cases} \sqrt{3} * \sin(\omega t + 30^\circ), & \omega t \in [-30^\circ, 90^\circ] \\ \sqrt{3} * \sin(\omega t - 30^\circ), & \omega t \in [90^\circ, 210^\circ] \\ 0, & \omega t \in [210^\circ, 330^\circ] \end{cases} \Leftrightarrow U_x = \begin{cases} \sqrt{3} * \sin(x), & x \in [0^\circ, 120^\circ] \\ \sqrt{3} * \sin(180^\circ - x), & x \in [120^\circ, 0^\circ] \\ 0, & \end{cases}$$

由此可见其波形分成 3 个部分，其中 sector1 和 sector 是完全对称的，sector3 为 0（见图 - 26），因此仅需要 0~120 度的正弦表（程序中为 Tab\_SINTable）即可。实际 0~120 度正弦表数据可在 excel 中通过数学计算自动生成，然后将生成的数据直接拷贝到程序中即可。

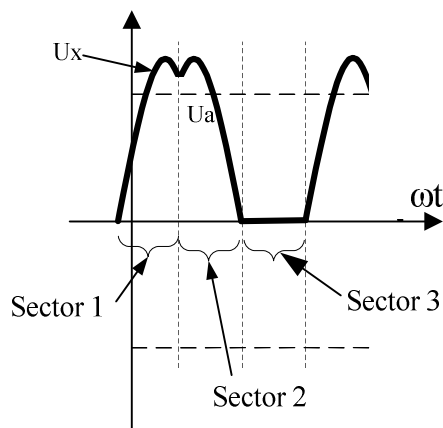


图 - 26 开关损耗最小 SPWM 调制波形

程序中具体计算过程如下：

在 T12 周期中断服务程序，转子位置角度增量 Var\_AngleAcc 增加一个步长 Var\_Step，然后更新转子位置角度 Var\_Angle 并调用子程序 SP\_SinuModulate() 计算 SPWM 脉宽值。

```

626 Var_AngleAcc += Var_Step;
627 if (Var_AngleAcc > 0x4000)
628     Var_AngleAcc -= 0x4000;
629 Var_Angle = Var_AngleAcc >> 4;
630 SP_SinuModulate();
    
```

在正确霍尔事件中断服务程序中，根据霍尔状态表及驱动波形得到 Con\_HallStateForInitAngle 并确定转子位置角度 Var\_Angle 起始值，然后更新转子位置角度增量 Var\_AngleAcc 的值。

```

758         if (Var_Sector == Con_HallStateForInitAngle)
759         {
760             Var_Angle = 170;
761             Var_AngleAcc = Var_Angle << 4;
762             SP_SinuModulate();
763         }
    
```

在 T2 定时中断服务程序中，更新当前 Var\_Modulation 的值（由调速电位器 AD 值 Var\_SpeedADValue 得到）。

```

256         if (Flag_SINTransitionOk)
257             Var_Modulation = Var_SpeedADValue;
    
```

## 5.4 状态图和流程图

### 5.4.1 状态图

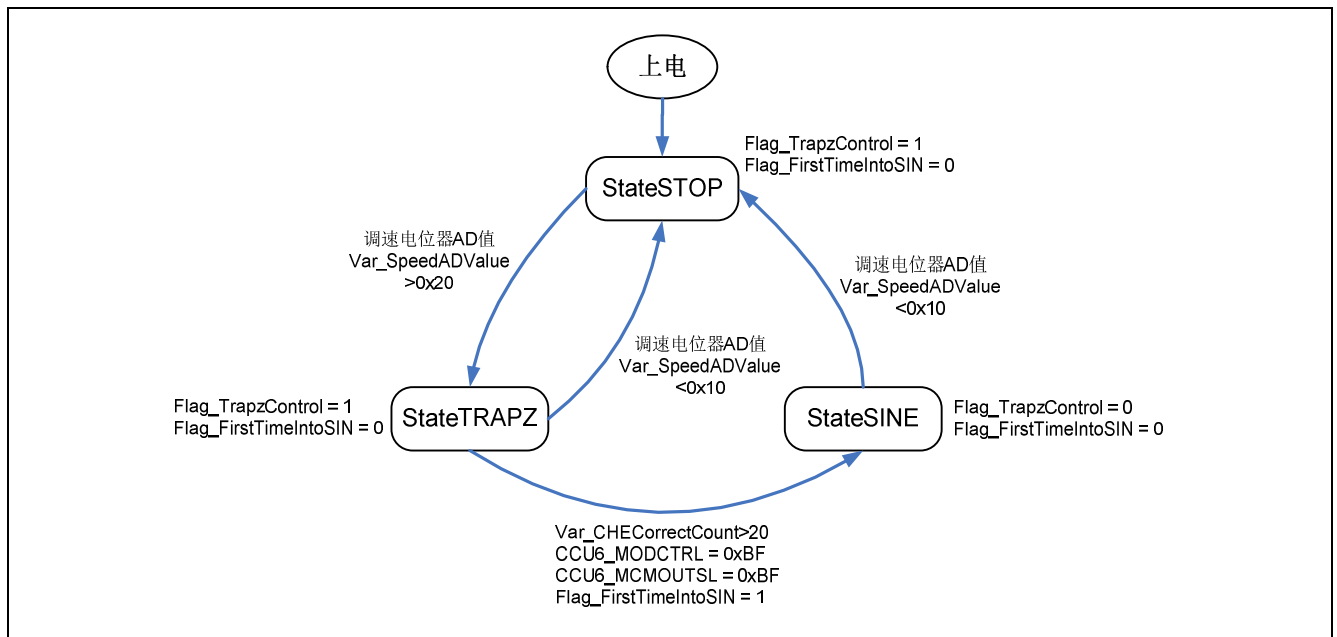


图 - 27 系统状态图

## 5.4.2 主程序流程图

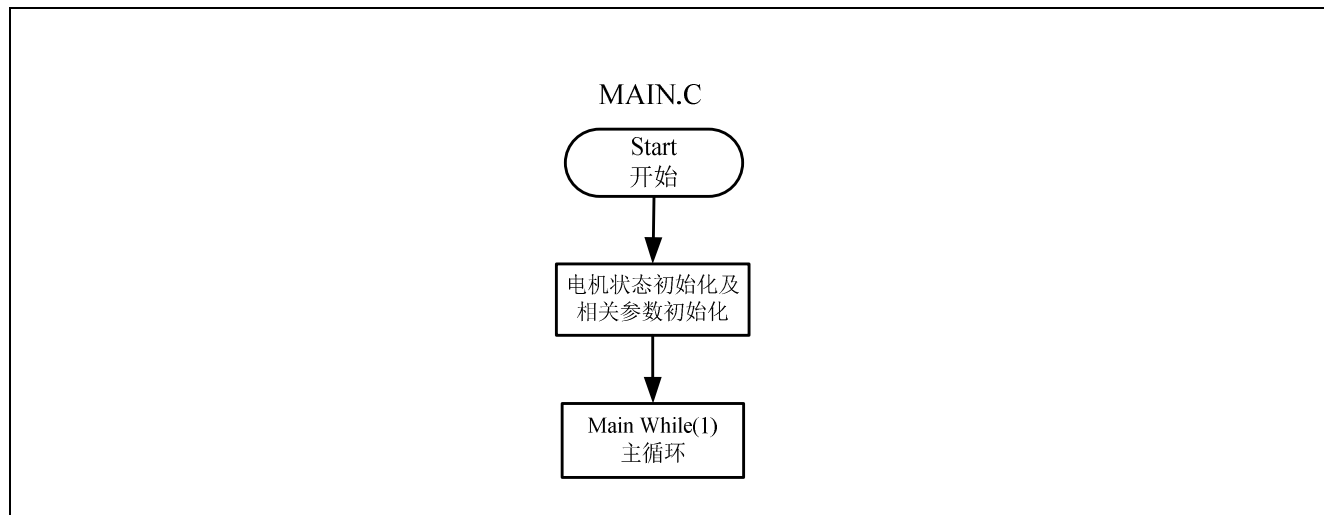


图 - 28 主程序流程图

### 5.4.3 T12 周期中断程序流程图

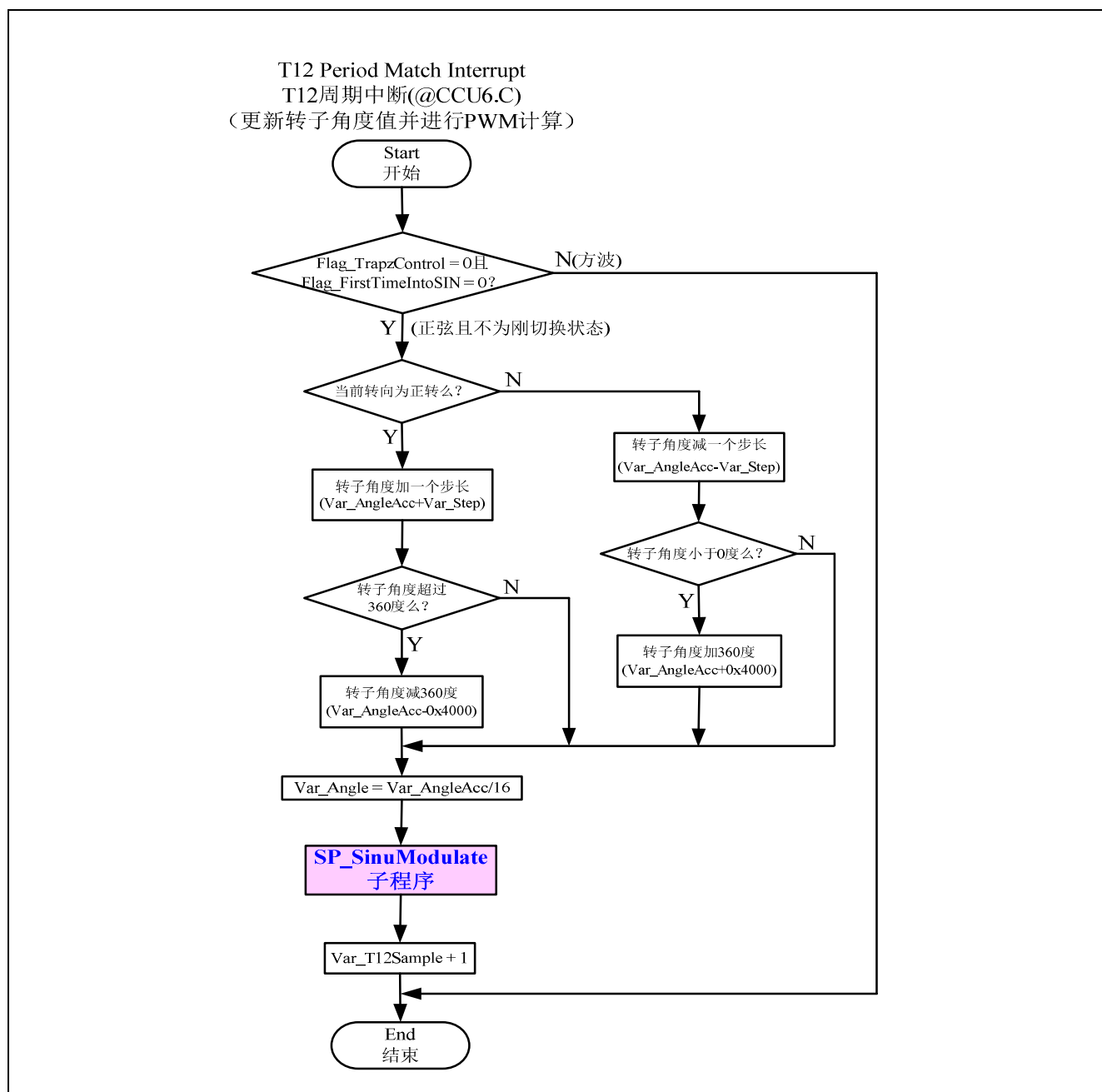


图 - 29 T12 周期中断处理程序流程图

#### 5.4.4 CHE 中断程序流程图

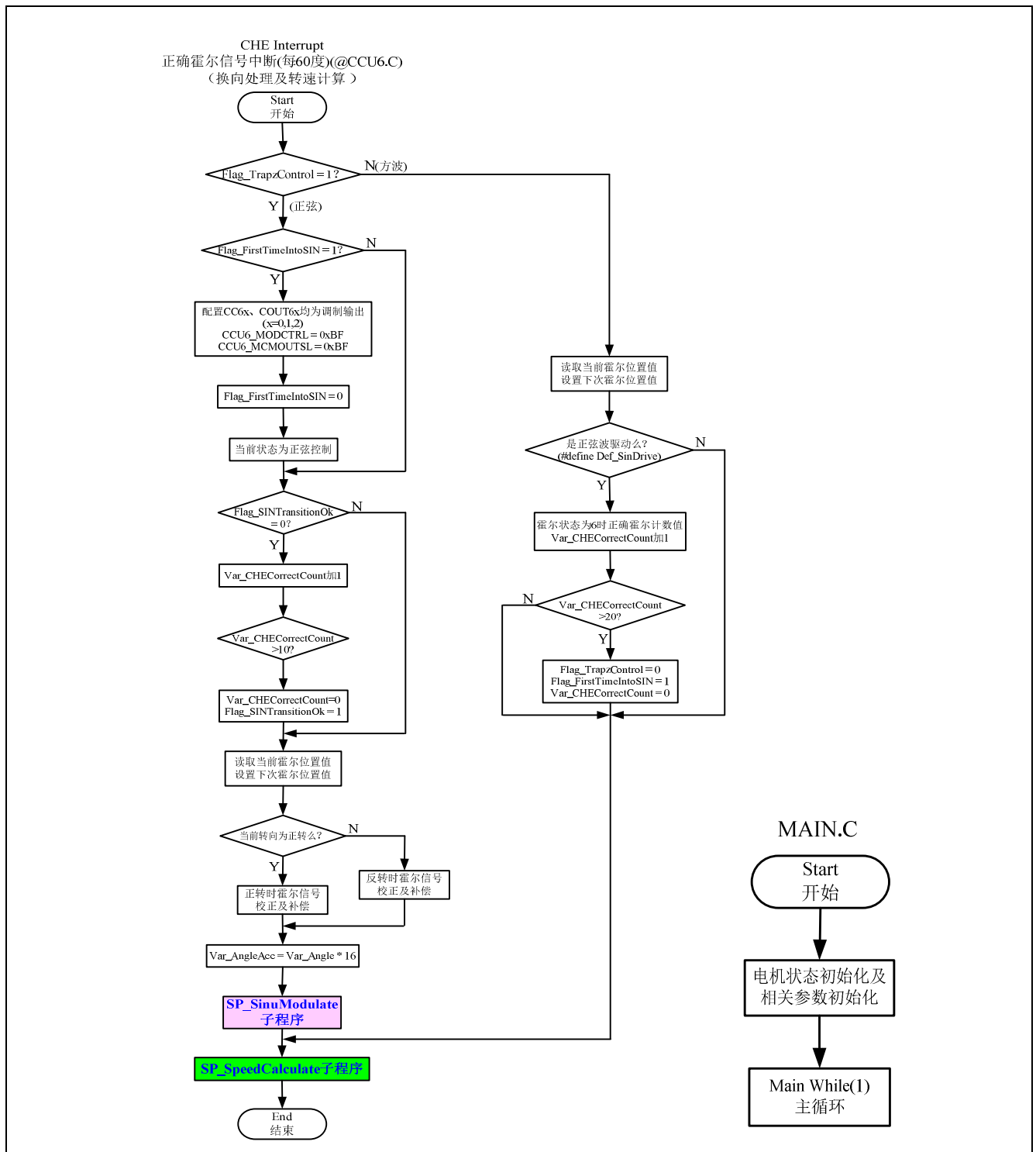


图 - 30 CHE 中断程序流程图



### 5.4.5 T2 定时中断程序流程图

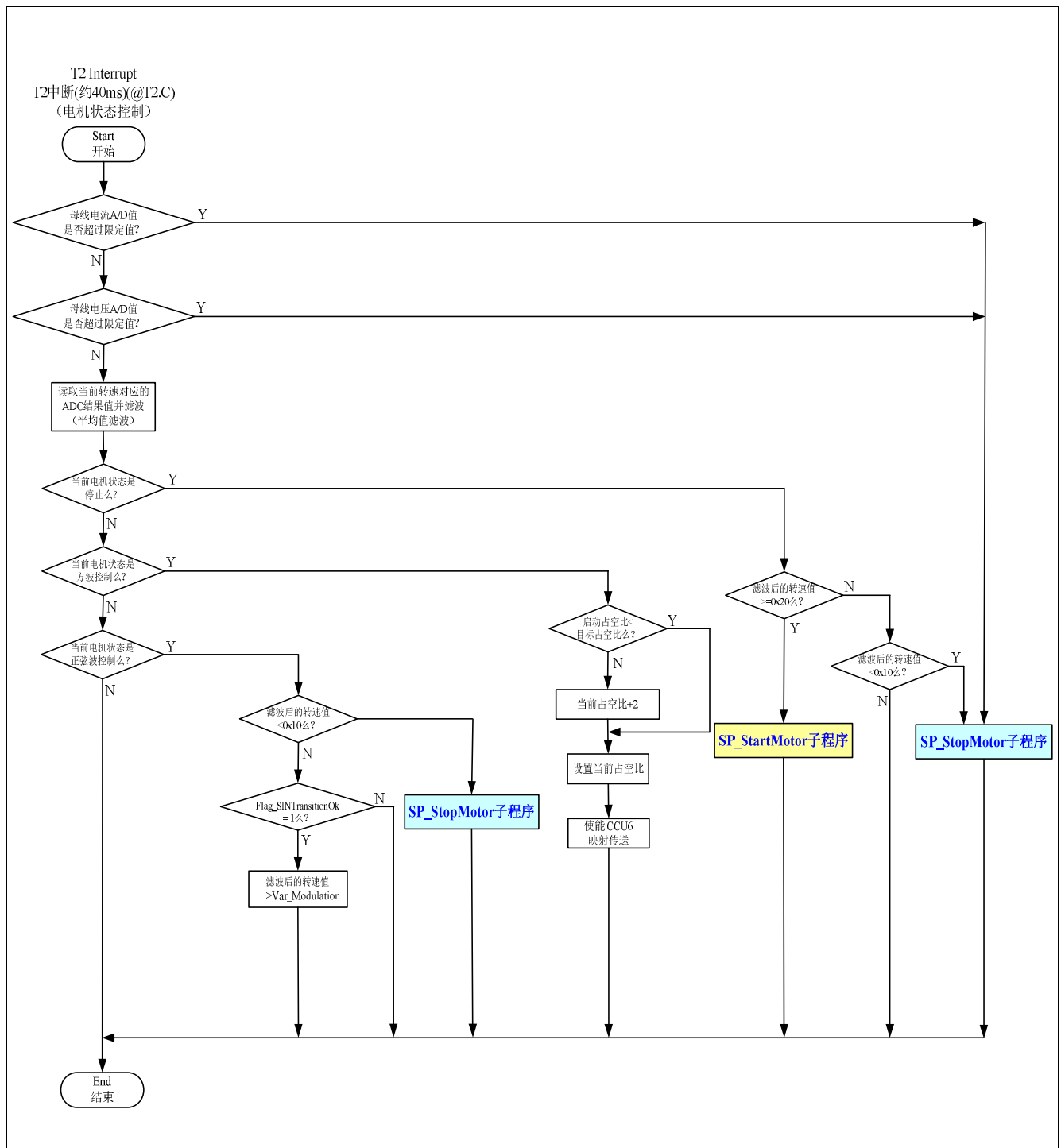


图 - 31 T12 中断处理程序流程图

## 5.4.6 自定义子程序流程图

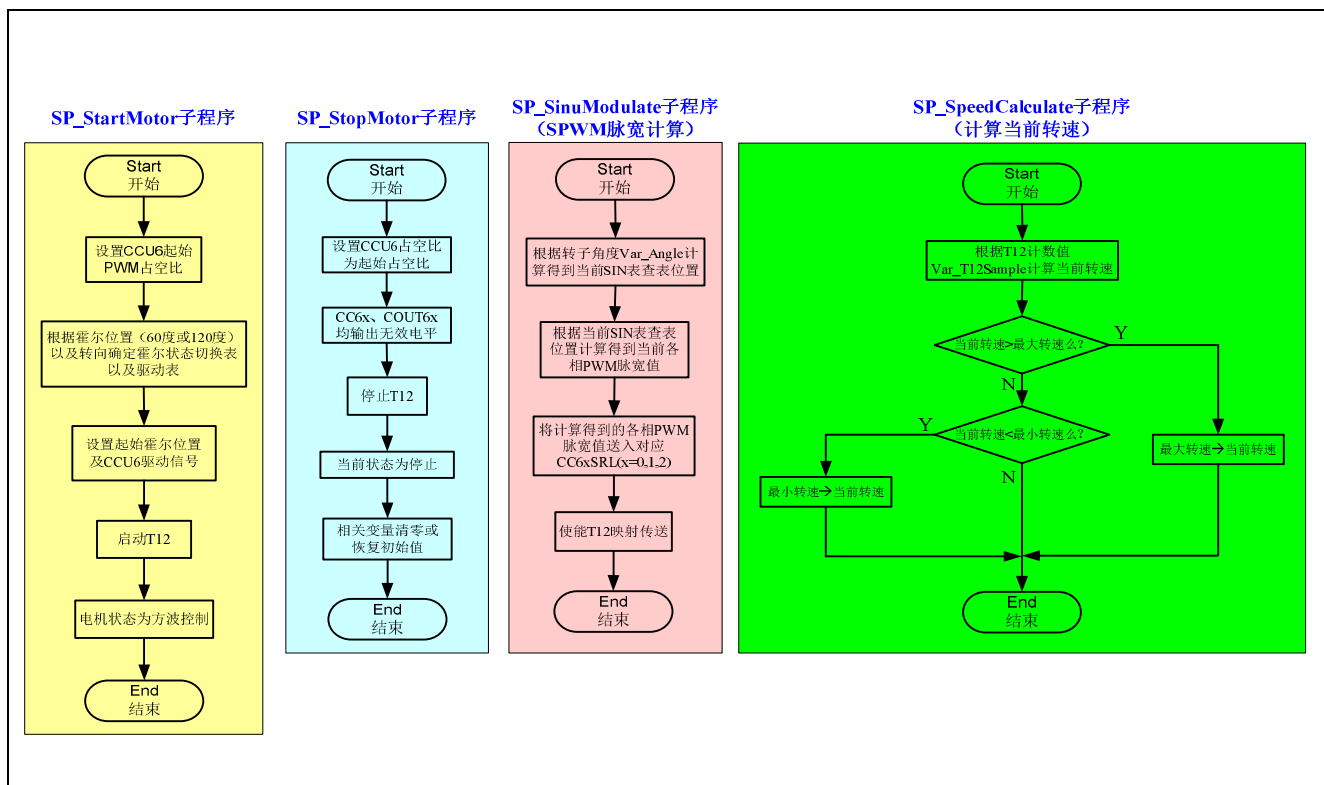


图 - 32 子程序流程图

## 6 方案测试

### 6.1 测试条件

实际测试用直流无刷风机型号为 RD-280-40-8P，额定功率为 40W，4 对极，DC310V，轴上带直径为 40cm 的 4 片式贯流扇叶。系统采用 Agilent 6813B AC Power Source/Analyzer 作为输入电源，测试示波器型号为 Agilent MSO6054A。

### 6.2 测试结果

图 - 33 为梯形波启动切换到正弦波控制的波形，图 - 34 为设定转速为 800rpm 时 U 相电流波形（右图为展开波形）。

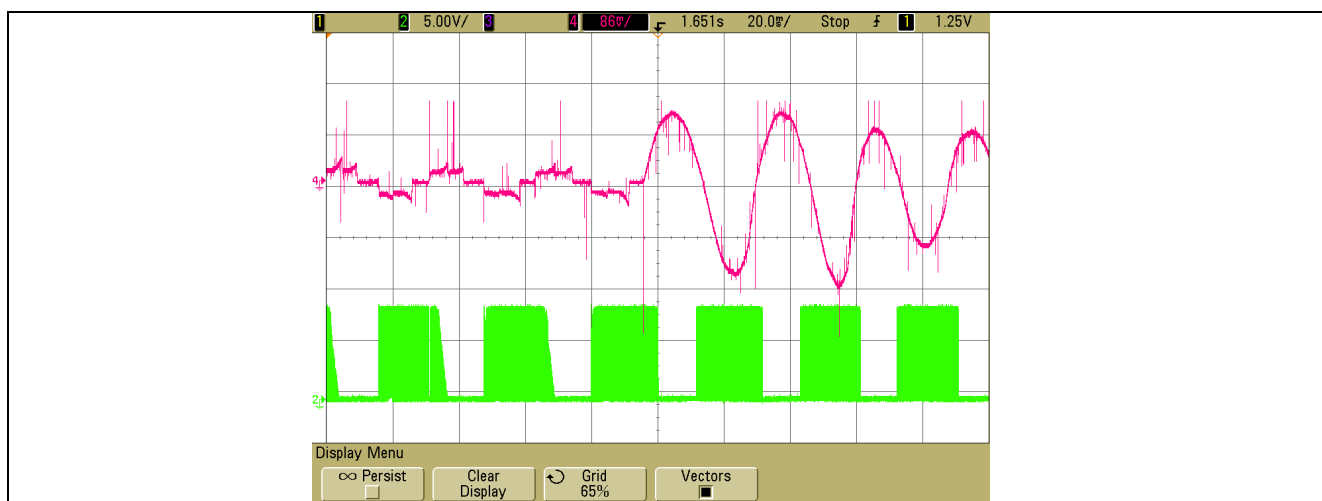


图 - 33 梯形波启动切换到正弦波控制的实测波形

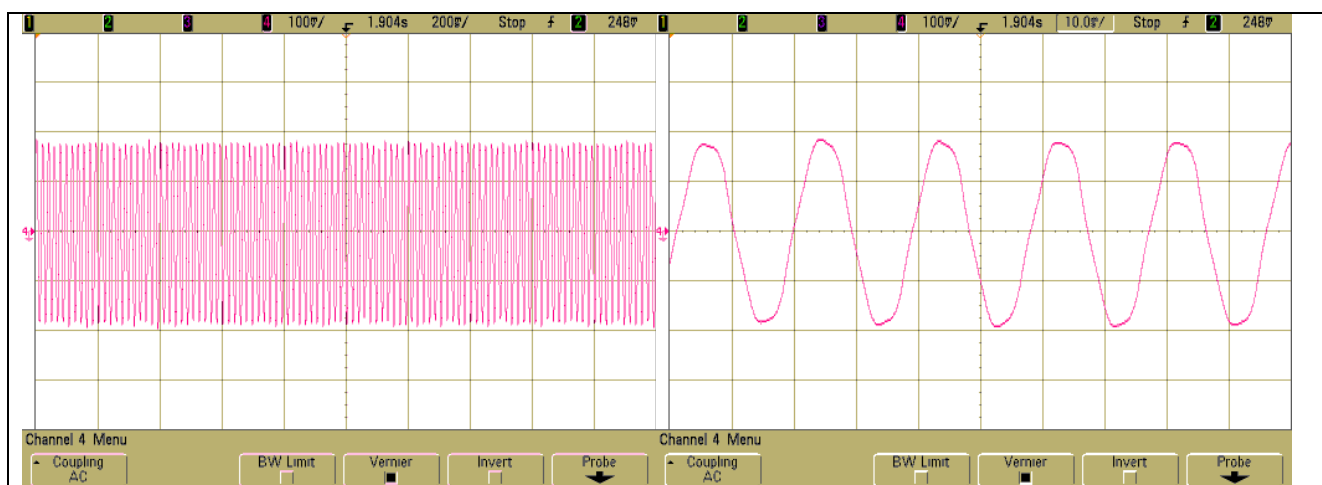


图 - 34 设定转速为 800rpm 时的 U 相电流实测波形

## 7 基于 XC866 的风机套件运行说明

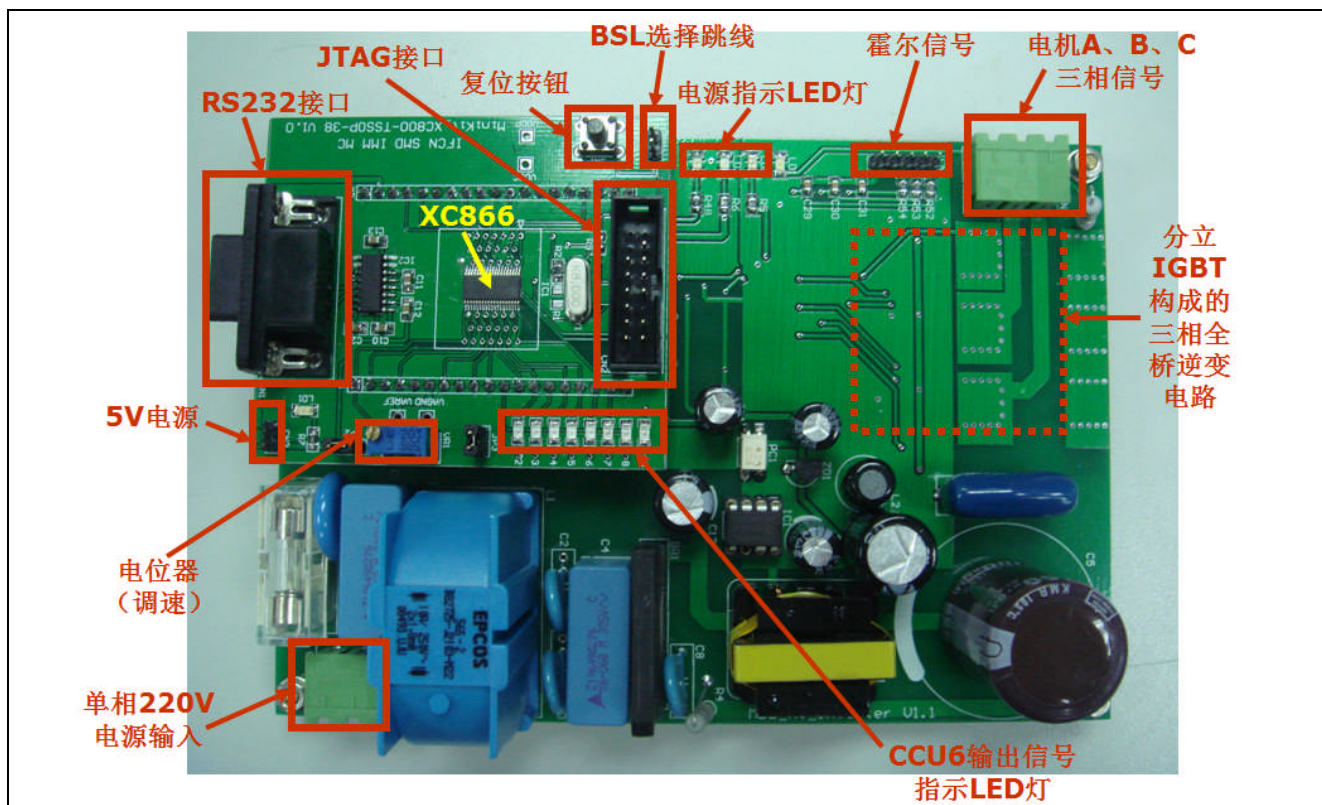


图 - 35 基于 XC866 的风机套件实物图

使用基于 XC866 的英飞凌风机控制套件，请按下述步骤进行：

- 先给 XC866 MiniKit 板单独供+5V 电源，然后使用 Memtool 软件通过板上的 RS232 接口将 Hex 文件写入 Flash 并完成校验。
- 完成 Flash 烧写后断开+5V 电源，将 XC866 MiniKit 板插到功率板上，注意确保连接方向正确；用短路块将 MiniKit 板上的 BSL 选择跳线短接；顺时针多圈拧动 MiniKit 板上的调速用电位器使其位于较小 AD 值的位置。
- 分别连接单相 220V 交流电源线、电机三相信号线、三根霍尔信号线以及电源和地线到功率板上，特别注意不要将输入交流电源线与三相电机线接错。
- 接通 220V 交流电源，等待约 2~3 秒电源指示 LED 灯点亮，说明电源工作正常；然后取下 BSL 选择跳线上的短路块，按下复位按钮并放开，逆时针多圈拧动 MiniKit 板上的调速用电位器，电机将会从停止状态慢慢加速运行到某一稳定转速。
- 需要停机时，可以先用短路块将 MiniKit 板上的 BSL 选择跳线短接，再按下复位按钮再放开即可；或者直接断开 220V 电源，电机逐渐停止运行，需要注意此时需待电源指示 LED 灯彻底熄灭后方可取下 MiniKit 板。

## 8 附件

### 8.1 主回路及控制回路原理图

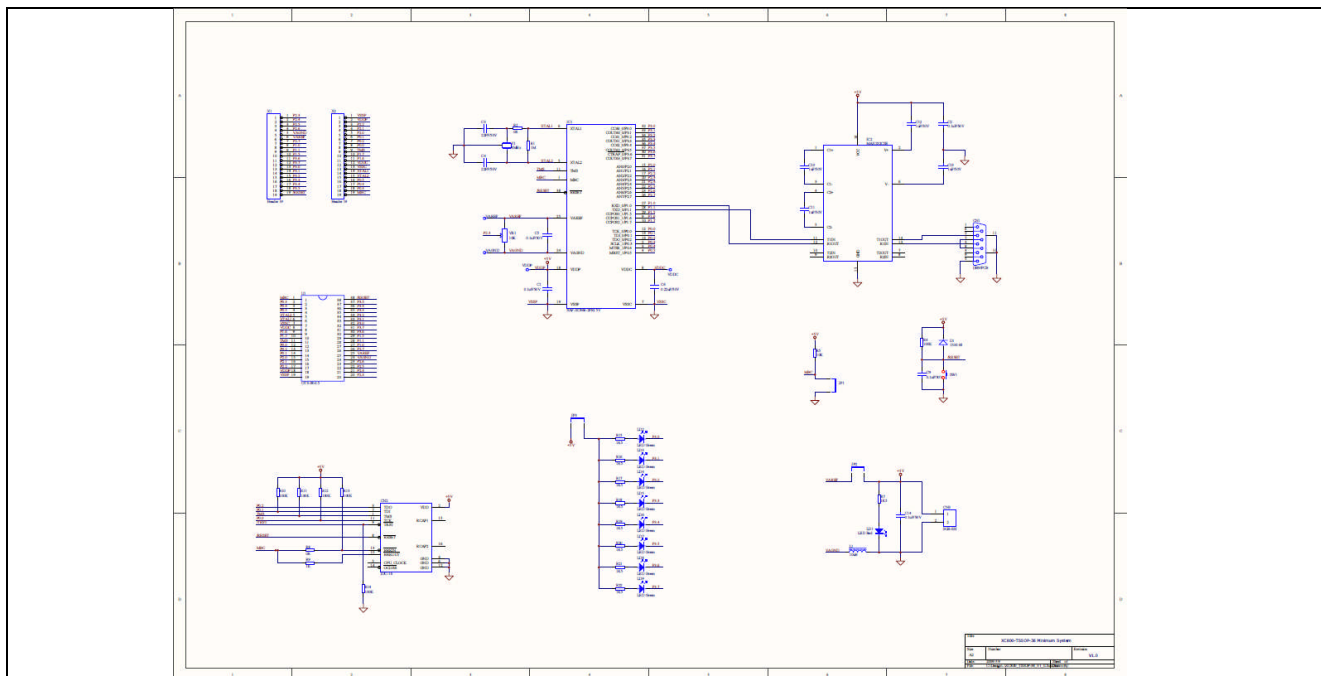


图 - 36 MCU 部分原理图

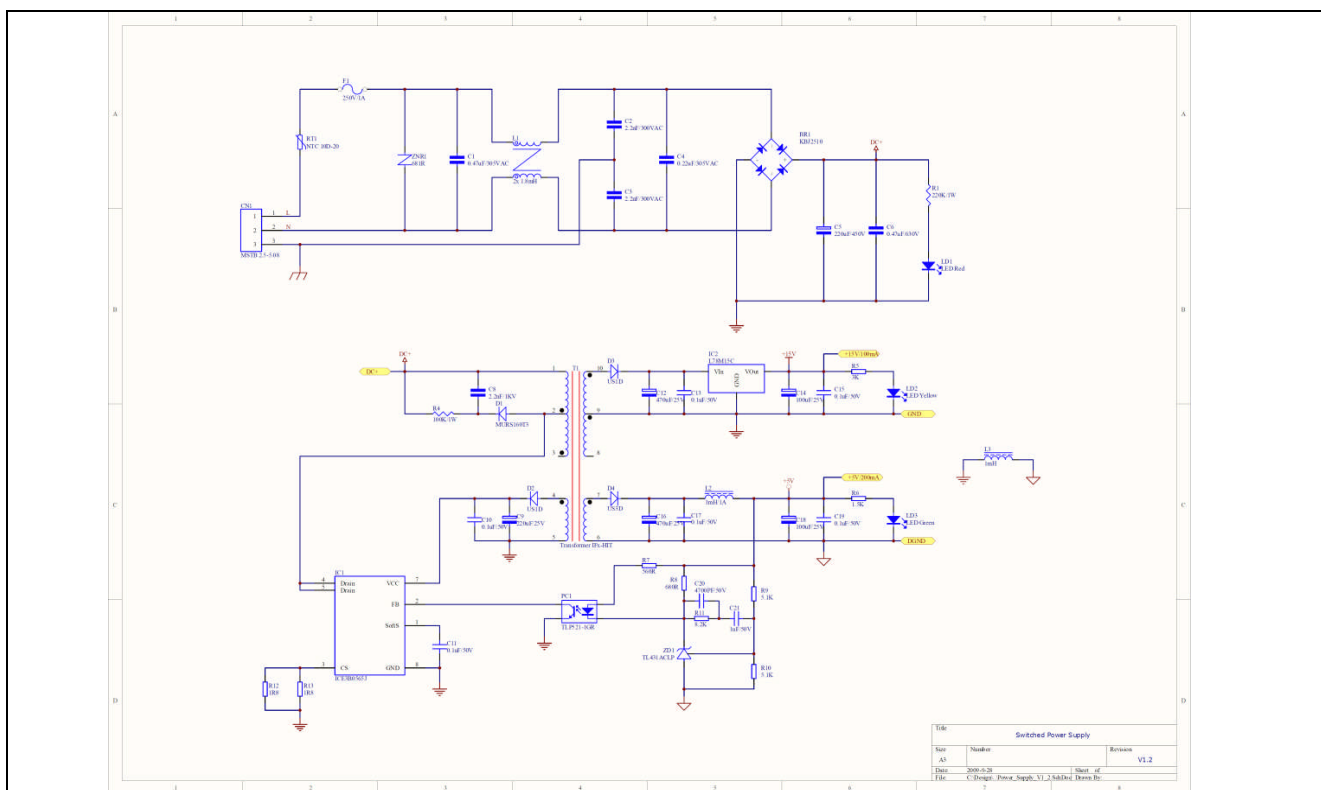


图 - 37 开关电源及整流电路原理图

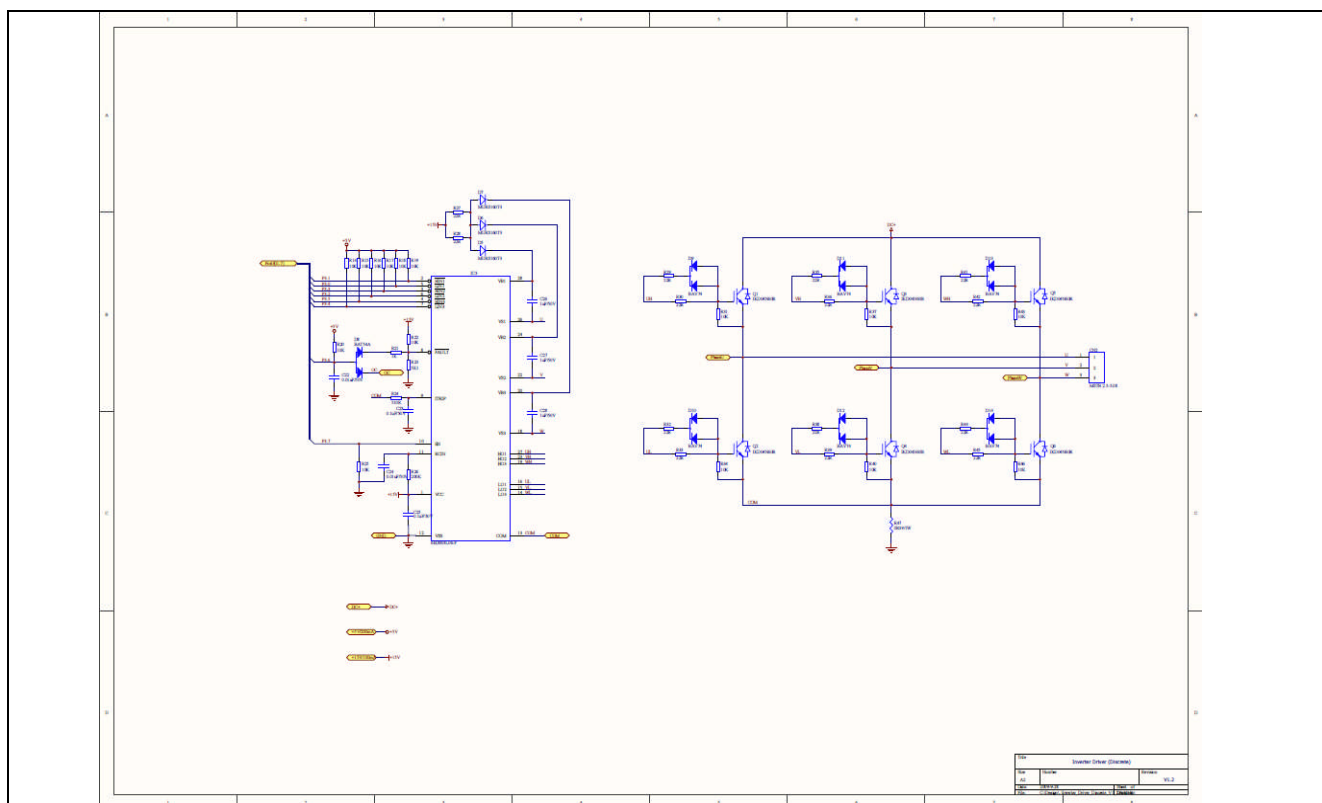


图 - 38 逆变电路原理图

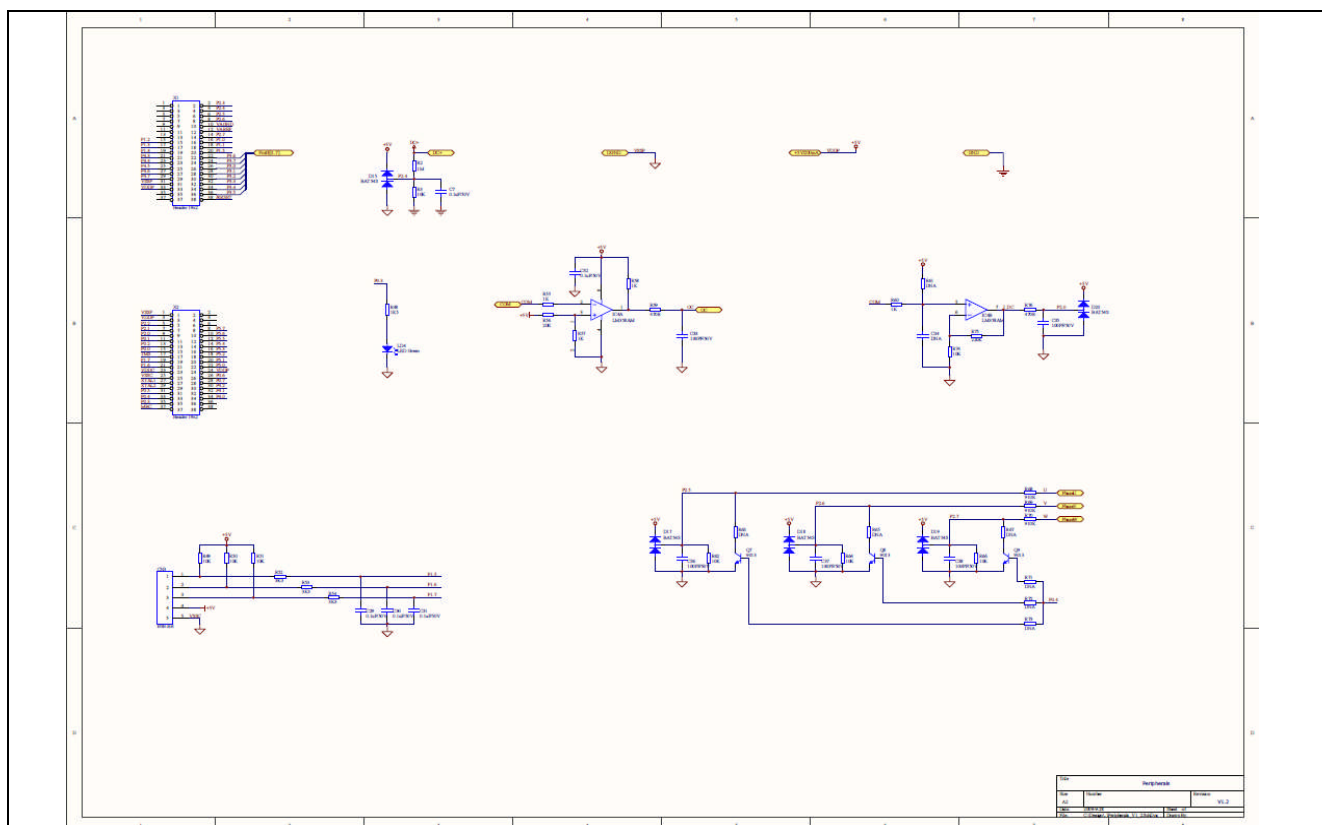


图 - 39 霍尔采样及电流保护电路

## 8.2 参考代码

本设计手册对应的参考代码请见与本文档对应的样例程序。



[www.infineon.com](http://www.infineon.com)