Freescale Semiconductor
Application Note

文档编号：AN4796
Rev. 1, 11/2013

基于FRDM-KE02Z和Tower Board的无传感器BLDC电机控制

1 引言

本应用手册介绍了基于飞思卡尔FRDM_KE02Z微控制器的无传感器三相无刷直流电机的控制技术。该设计是基于飞思卡尔的FRDM-KE02Z控制板实现的，在电机控制上它可以实现良好的控制效果。

本应用是基于双闭环和反电动势过零检测转子位置进行设计的。该应用可以作为飞思卡尔微控制器和三相低压电机驱动板的无传感器BLDC电机控制的一个范例。同时，电机控制应用中的片上外设资源的使用，控制器特性，BLDC电机控制理论基础，系统架构，硬件设计，软件实现都在本应用中得到了介绍。应用设计中还包含了可调试工具FreeMASTER的使用和系统的搭建以及演示。

目录

1	引言	1
2	KE02 系列的优势和特性	2
3	BLDC 电机控制理论	2
4	系统设计理念	3
5	硬件	6
6	软件	11
7	Demo 的搭建和使用	19
8	参考手册	22

© Freescale Semiconductor, Inc., 2013. All rights reserved.

2 KE02系列的优势和特性

KE02适用于电机控制的特性：

- Cortex™-M0+内核
- 在电压范围2.7–5.5 V内高达20 MHz的CPU主频
- 高达64 KB flash，256 B EEPROM，4 KB RAM
- 具有16通道12位数据的AD转换器
- 模拟比较器
- 2通道的PIT中断定时器，10通道的FlexTimer模块
- 高达2个8位数据的SPI模块，3个SCI/UART模块以及1个I^2C模块
- 57个GPIO引脚，包括8个20mA驱动引脚以及2个真正的开漏引脚

3 BLDC电机控制理论

无刷直流电机（BLDC电机）是由具有类似于三相感应电机的定子和安装了永磁体的转子组成的。它也被称作为电子换相电机，电机上没有机械换向器，换相是在转子到达某个位置时由程序来实现的。转子上的磁极通常是由永磁材料制成的。BLDC电机的典型横截面如图1所示。定子相绕组嵌入在沟槽中（分布绕组）或者可以作为一个线圈绕到磁极（集中绕组）上。因为气隙磁场是由永磁体产生的，所以转子磁场大小是恒定的。

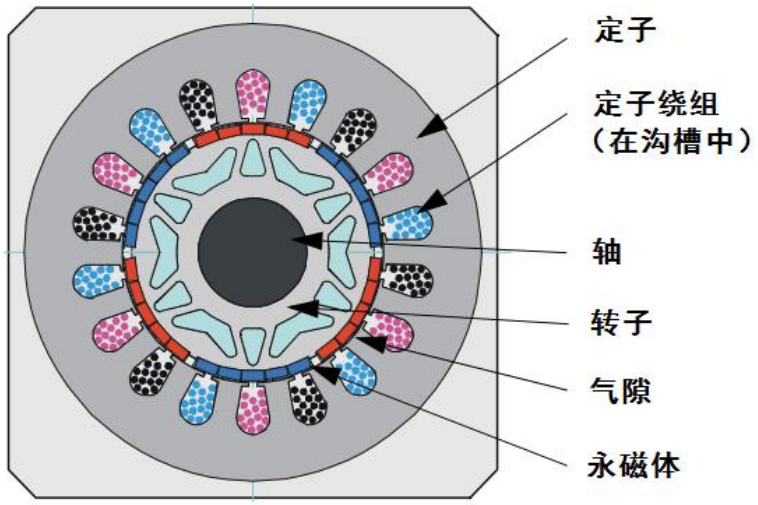


图 1. BLDC电机横截面

永磁体的磁化强度和它们放在转子上的位置都需要精确固定，这样反电势（由于转子的转动在定子绕组上感应的电压）的形状才会是梯形的。对于星形绕组我们可以使用两两导通的方式（如图2）来得到六步旋转的磁场，转矩脉动较小。

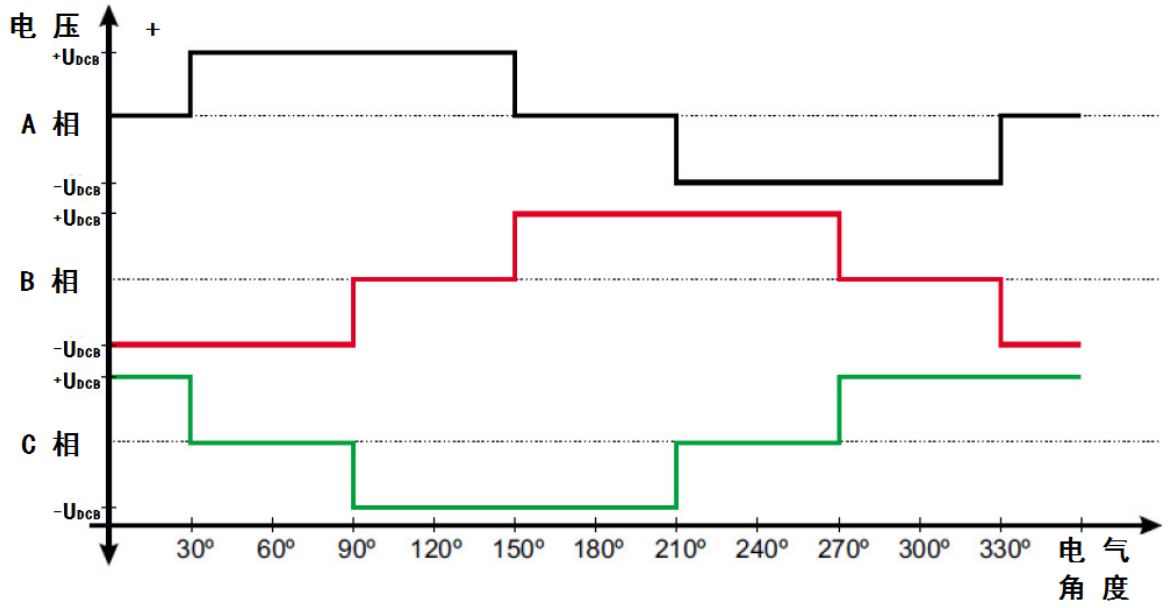


图 2. BLDC电机的三相电压系统

4 系统设计理念

4.1 系统说明

本应用设计是在转速和转矩双闭环控制的基础上通过检测不导通相过零点获得转子位置来驱动三相无刷直流电机（BLDC），满足以下控制特性：

通过反电势过零点检测转子位置实现无传感器无刷直流电机的换相控制。

控制技术包含：

- 采用转速和转矩闭环的低压无传感器控制。
- AD转换器用来检测反电动势过零和母线电流、电压。
- 过压，欠压，过流等故障保护。
- 通过转子对齐电机可以从任何位置启动。
- 电机最小转速为500 rpm，最大转速为4500 rpm。
- FreeMASTER软件控制界面（电机启动/停止, 转速/转矩设置）。
- FreeMASTER软件调试监控。

4.2 系统架构和转子位置检测

如下图3所示，系统包含以下硬件结构：

- FRDM – KE02Z核心板
- TWR-MC-FRDMKE02Z转接板

- TWR – MC – LV3PH驱动板
- TWR – SER串口转接板
- Tower Elevator
- LINIX45ZWN24-40 BLDC电机
- 供电电源24V DC,3.75A

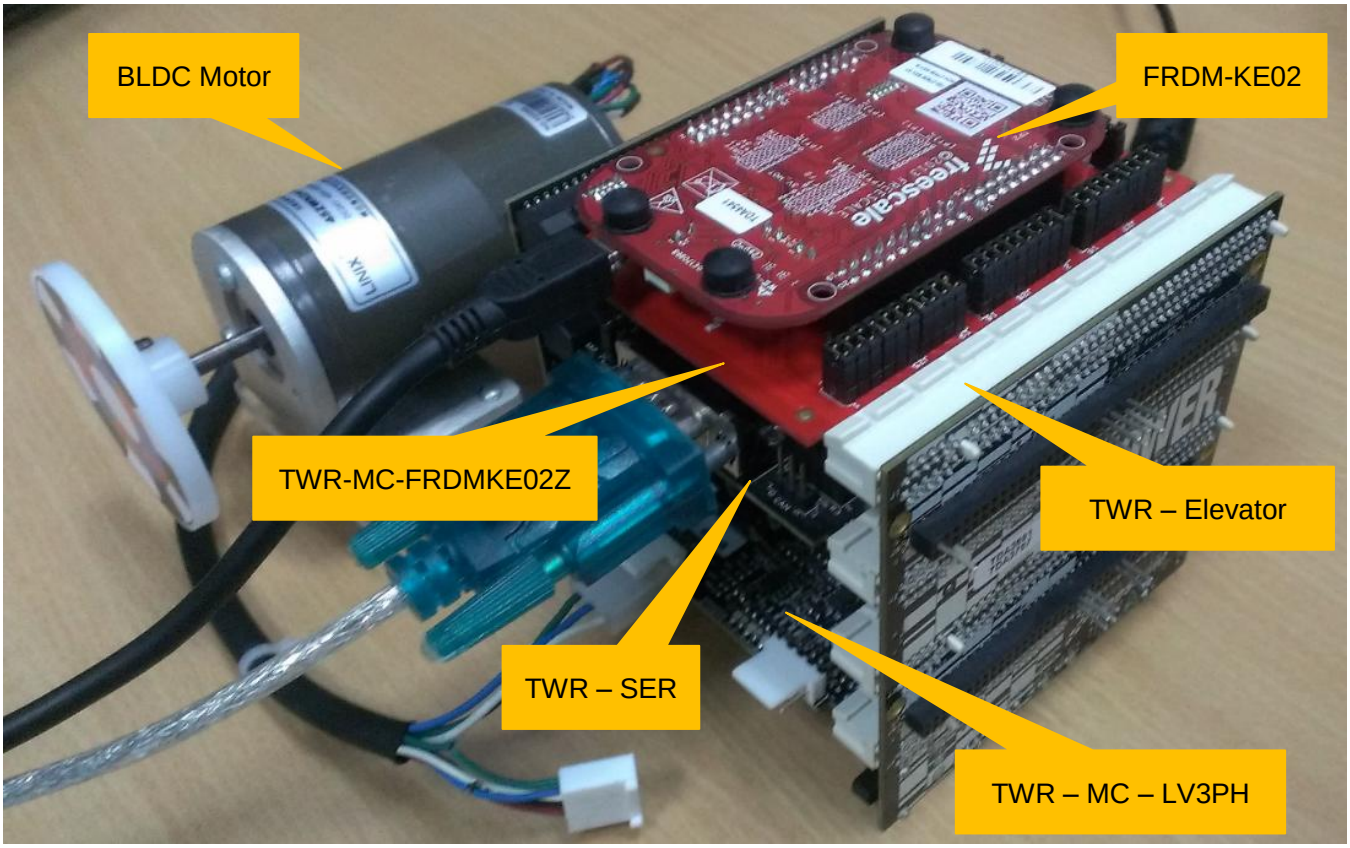


图 3. KE02Z64VQH2 Tower Board

控制系统的组成如图4所示。无传感器转子位置检测技术的实质是检测电机不导通相绕组中感应的反电势过零点时刻。当三相绕组中的其中一相没有通电时，该相反电势的过零点可以被检测到，通过过零时刻点计算换相时刻点用来控制电机的换相。

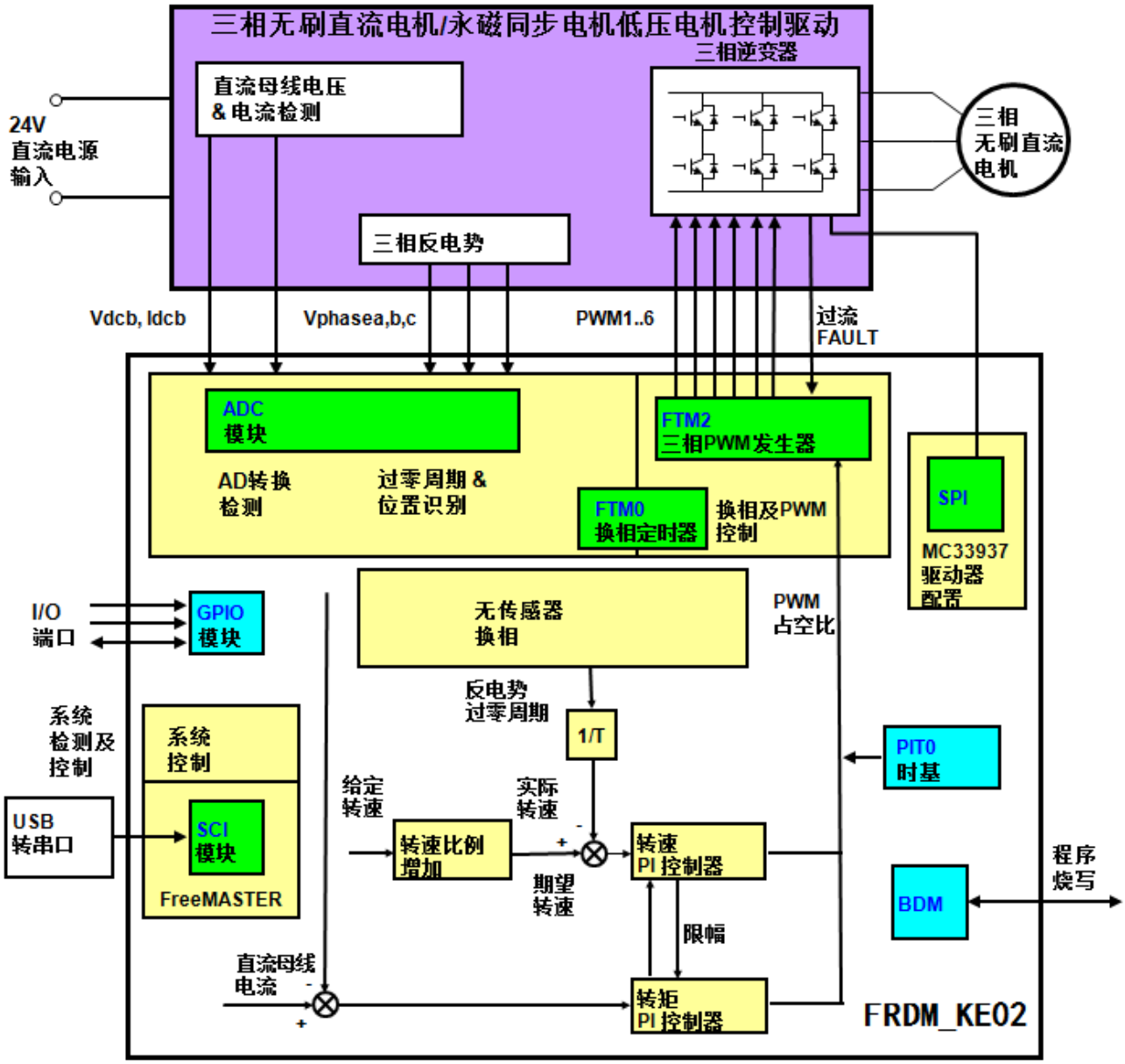

三相无刷直流电机/永磁同步电机低压电机控制驱动
三相逆变器
直流母线电压
& 电流检测
24V
直流电源
输入
三相
无刷直流
电机
三相反电势
Vdcb, Idcb
Vphasea,b,c
PWM1..6
过流
FAULT
ADC
模块
AD转换
检测
过零周期 &
位置识别
FTM2
三相PWM发生器
FTM0
换相定时器
换相及PWM
控制
SPI
MC33937
驱动器
配置
I/O
端口
GPIO
模块
无传感器
换相
PWM
占空比
反电势
过零周期
1/T
系统
检测及
控制
系统
控制
SCI
模块
FreeMASTER
USB
转串口
给定
转速
实际
转速
转速比例
增加
转速
PI 控制器
期望
转速
PIT0
时基
程序
烧写
BDM
限幅
直流母线
电流
转矩
PI 控制器
FRDM_KE02

图 4. 控制系统结构

5 硬件

5.1 组件描述

5.1.1 三相全桥逆变器以及直流母线过压保护

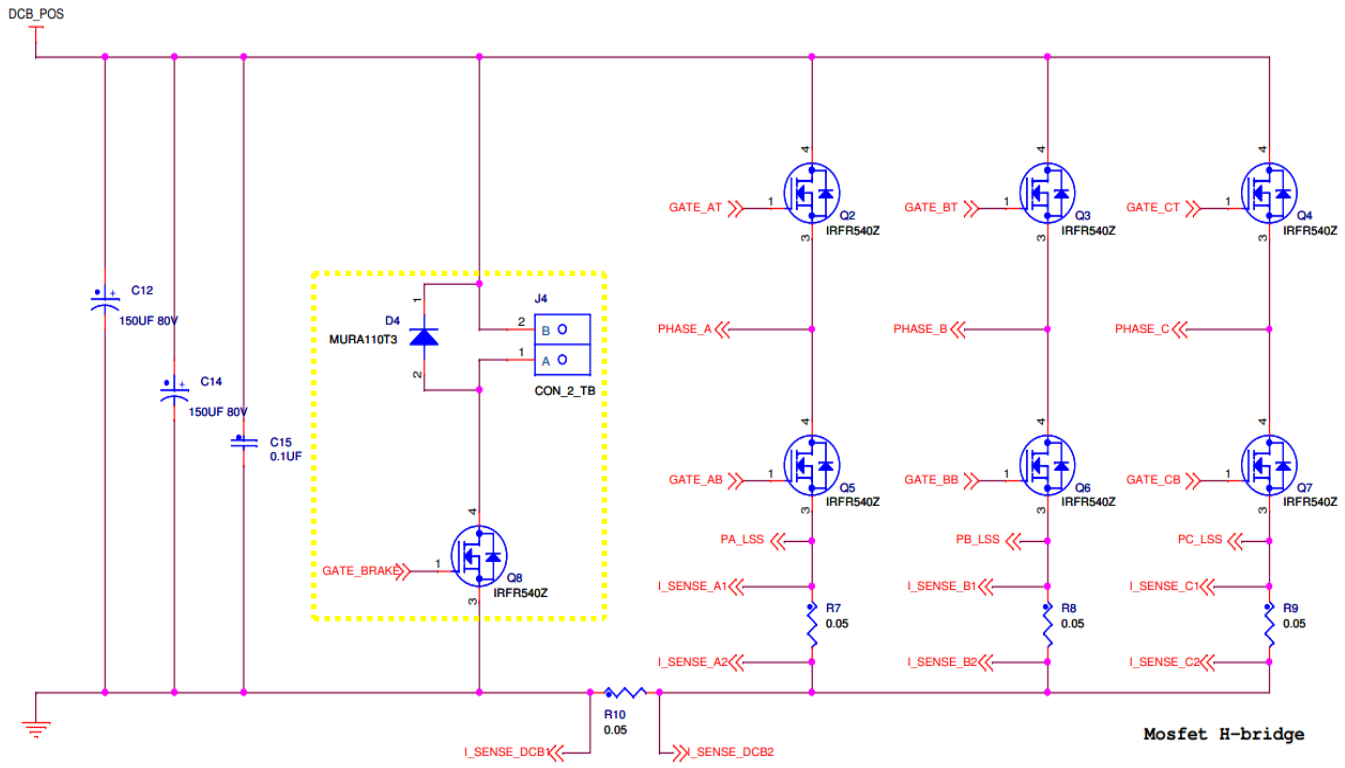


图 5. 三相全桥逆变器以及过压保护

三相全桥逆变电路包含6个MOSFET，三个相电流采样电阻，以及一个直流母线电流采样电阻，如图5所示。

在这个demo中，能耗制动电阻和MOSFET串联安装在DCB_POS和GND之间（如图5中黄线内）。如果DC_Bus上的电压比预设的过压值大，这个MOSFET将会导通，电能消耗在电阻上从而使得DC_Bus的母线电压降低，起到过压保护的作用。

5.1.2 预驱动器（MC33937）

MC33937是飞思卡尔为三相低压电机控制而设计的MOSFET预驱动器（见图6）,起到功率放大的作用。三个外部自举电容给上臂的三个MOS管提供栅极电压。MC33937集成芯片通过六路PWM直接控制信号、SPI端口、使能和中断信号接到MCU上，其中SPI通信接口用来设置驱动设备和异步复位。MC33937内部还集成了一个过流检测电路，如果母线电流过大，DRV_OC引脚电平将变为高电平，启动软件中断保护。

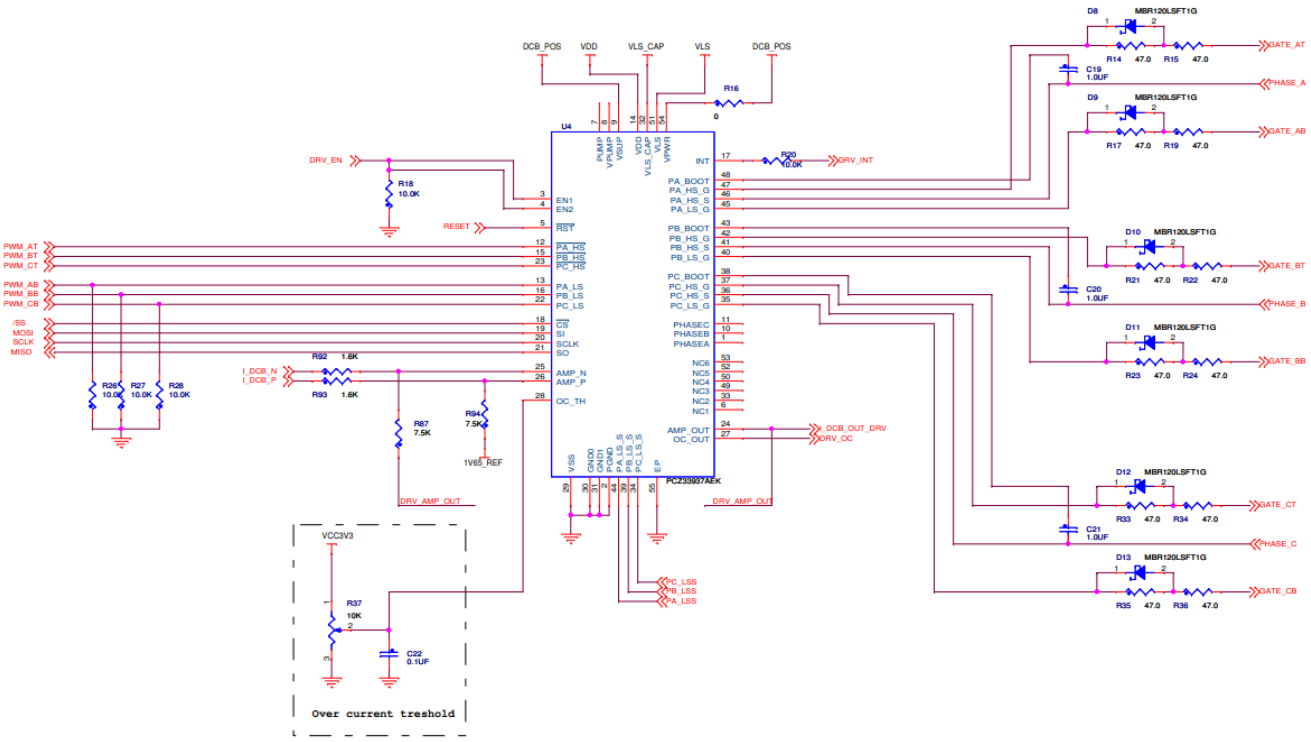


图 6. 预驱动器（MC33937）

5.1.3 直流母线DC_Bus电压和反电势检测电路

图7是直流母线DC_Bus电压检测电路以及A相绕组反电势检测电路，B相和C相的反电动势检测电路与A相相同。在这个Demo中，直流母线电压DC_Bus预设的定标值为36.3V，通过电阻分压得到AD口采样的最大电压为3.3 V，分压电阻值为30 kΩ和3 kΩ.

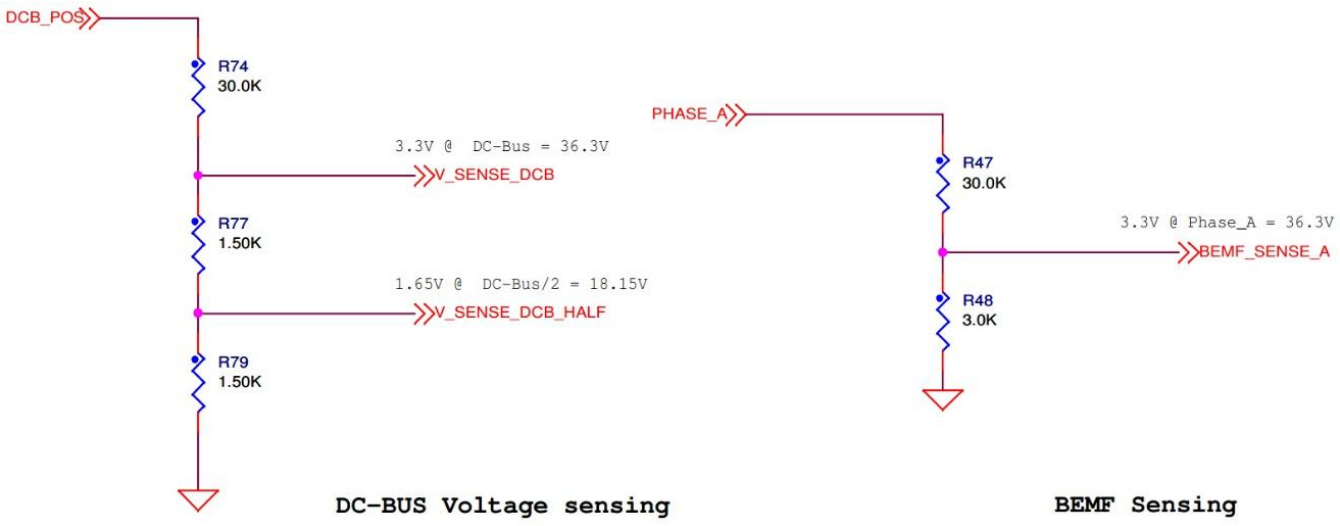


图 7. 直流母线DC_Bus电压和反电势检测电路

5.1.4 直流母线DC_Bus电流调理电路

下图为母线DC_Bus电流采样调理电路。

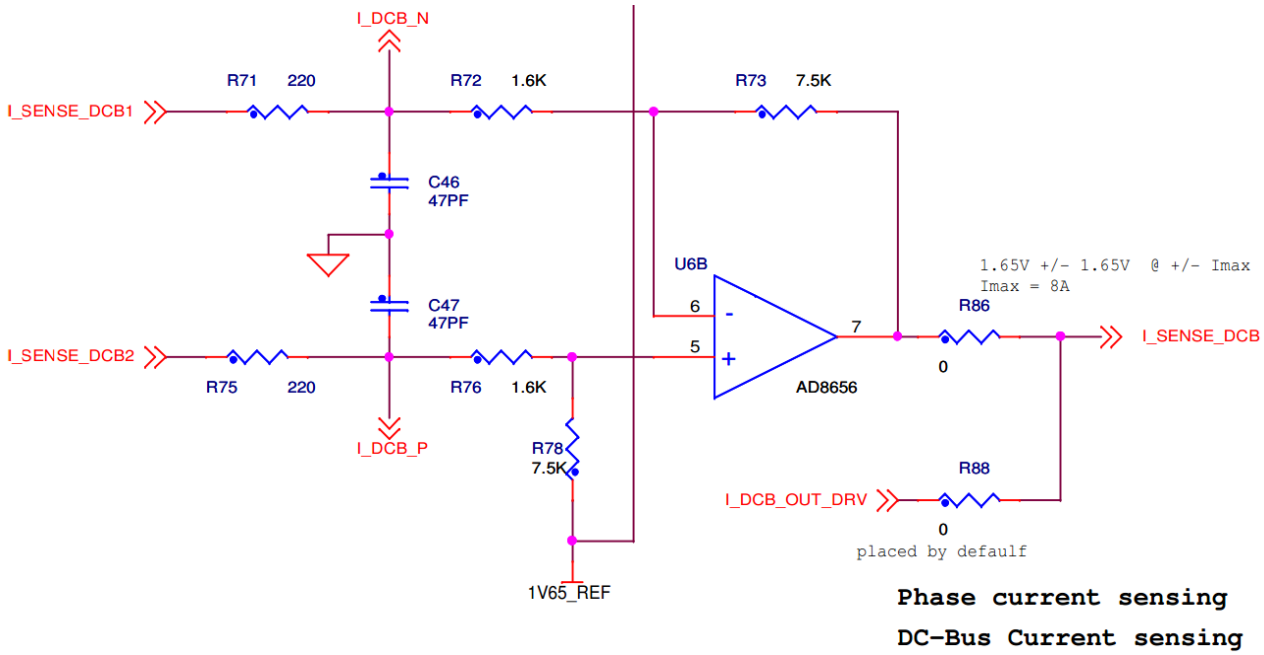


图 8. 直流母线DC_Bus电流检测电路

母线DC_Bus的电流用来进行电流闭环PI调节以及/或者软件过流保护。在这个demo板上，采样电阻为0.05Ω，由于运放为单电源供电，所以在同相输入端需要1.65V的偏置电压。差分放大方程为：

$$I_DCBUS = 1.65 + \frac{R73}{R71 + R72}(0.05 * i),$$

方程式 1

根据最大量程，最大电流不能超过8A。

5.1.5 过压保护驱动电路

图9为过压保护驱动。集成芯片MIC4127YME等同于一个功率放大器，用来驱动过压保护电路的MOSFET。如果直流母线电压DC_Bus比预设的最大母线电压值大，BRAKE_CONTROL信号置高，图5中过压保护电路的MOSFET导通，降低了直流母线电压。

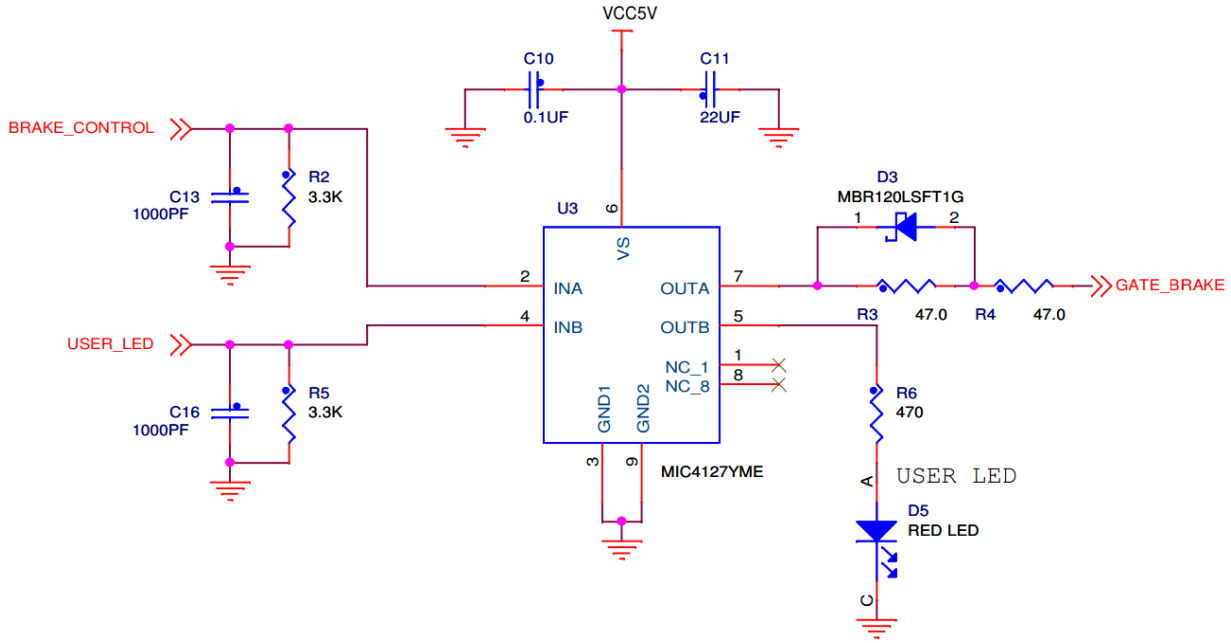


图 9. 刹车开关电路

5.2 电机45ZWN24-40（Linix生产）

下表为本系统中用到的无刷直流电机参数。具体的电机说明如表1所示。

表 1. Linix 45ZWN24-40电机的电气特性

特性	符号	最小值	典型值	最大值	单位
参考绕组电压	Vt	Jm	–	24	V
转速	–	–	–	4000	rpm
转矩常数	Kt	–	–	–	Nm/A
电压常数	Ke	–	–	–	V/RPM
终端电阻	Rt	–	–	–	Ω
绕组电感	L	–	–	–	mH
连续电流	Ics	–	–	–	A
极对数	–	–	2	–	–
额定温度	–	–	–	–	°C

6 软件

软件程序流程图如图10所示。

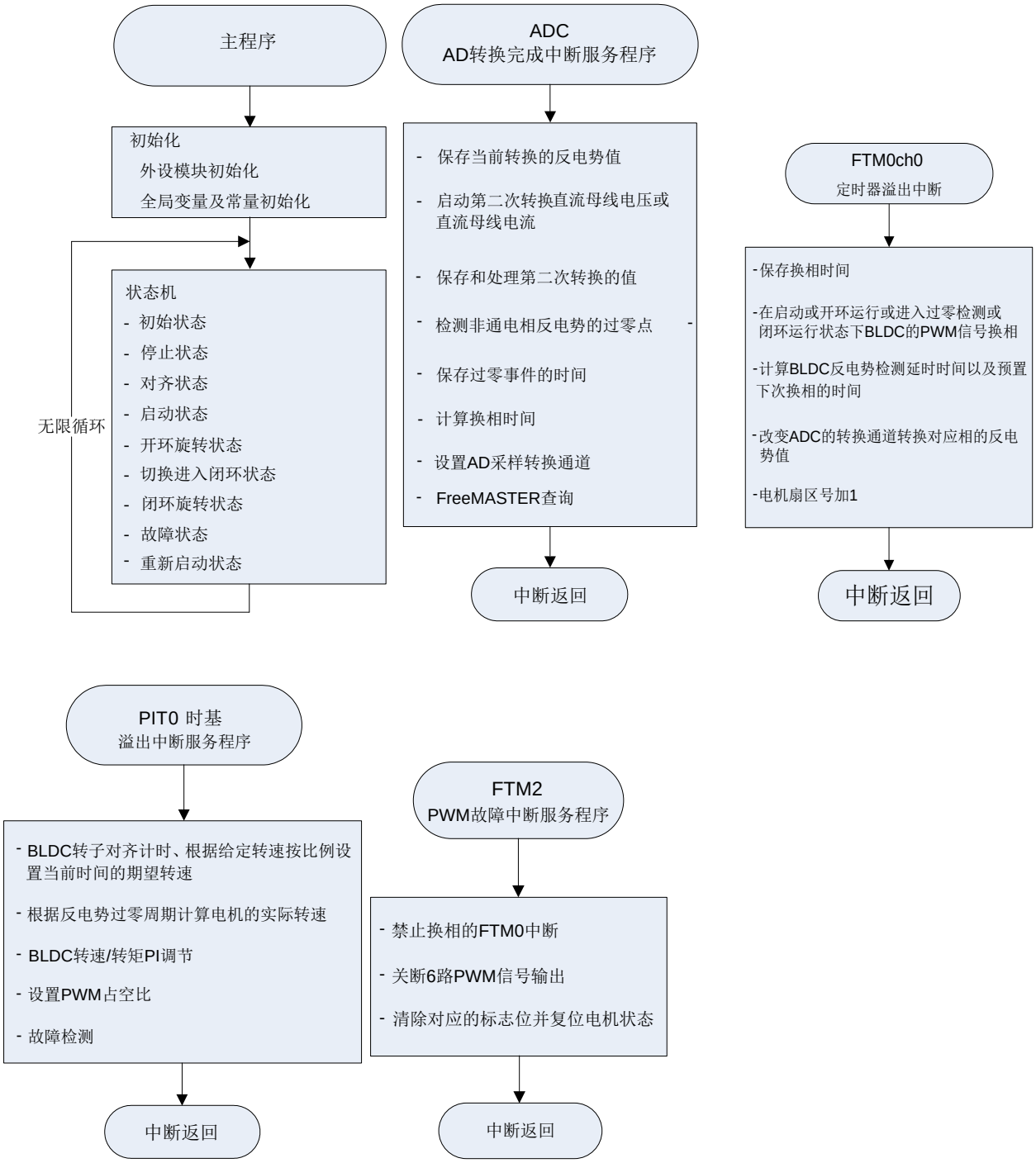


图 10. 软件主要程序流程图

6.1 数据流程

图11为控制算法的数据流程图。

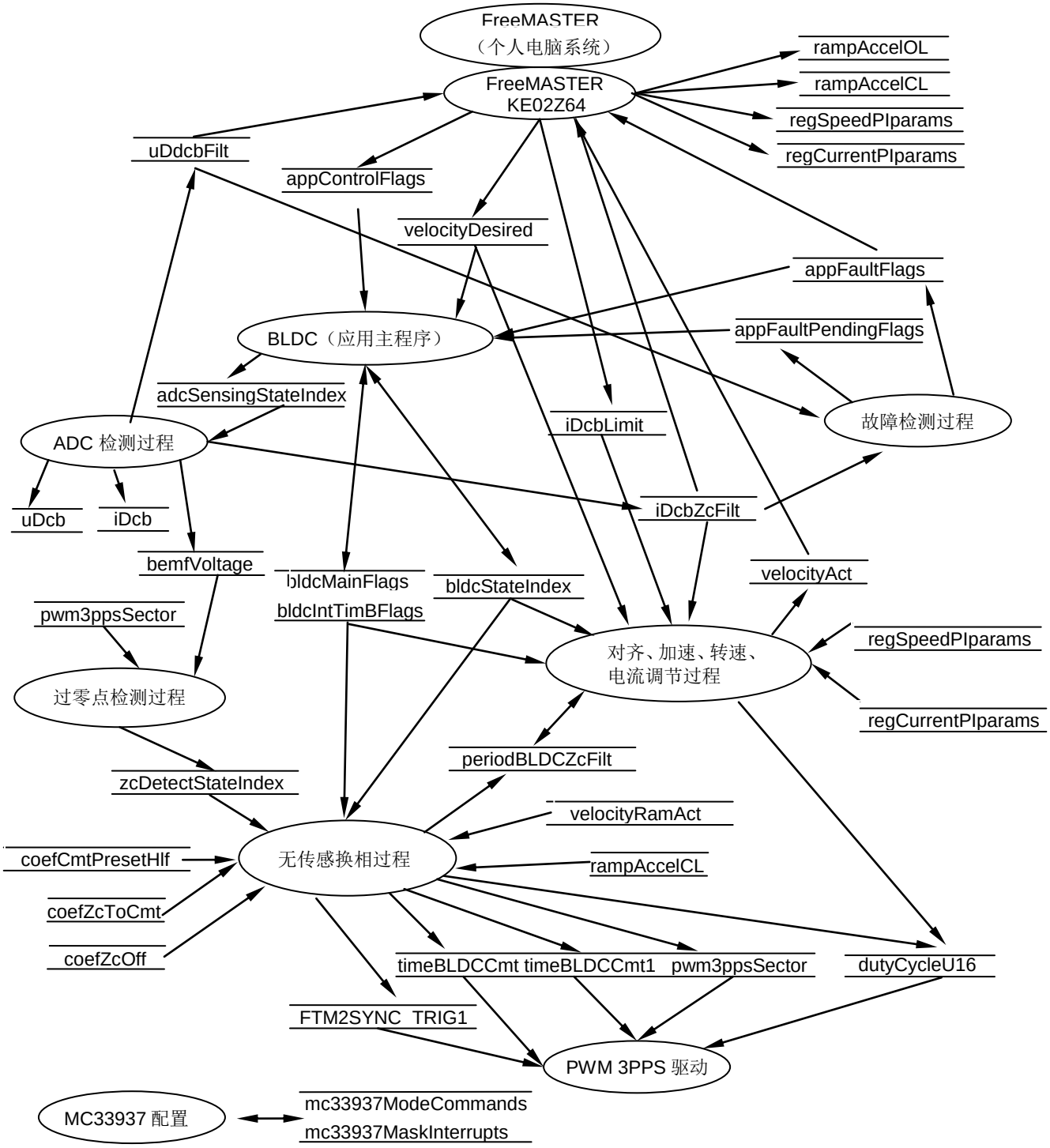


图 11. 软件数据流程

6.1.1 主程序

在FreeMASTER调试界面里设置变量**velocityDesired**为非零值，则无刷直流电机开始运行。电机所处的状态根据**bldcStateIndex**的值而改变。在电机的Running状态下，在3毫秒的定时中断中电流PI调节和转速PI调节用来计算PWM占空比，在AD中断中检测反电势过零点。

6.1.2 ADC检测

ADC检测的任务是转换直流母线DC_Bus的电压、电流以及不导通相反电动势（在Running状态下）的值。转换结果**uDcbFilt**和**iDcbZcFilt**分别代表母线电压和母线电流的大小。前一个变量在Fault Checking Process中检测过压或者欠压，后一个变量为电流环提供电流反馈值。通过检测不导通相的反电动势AD值得到过零时刻点信息，通过运算处理得到相应的换相时刻点。

6.1.3 过零点检测

不导通相的反电动势AD值和直流母线DC_Bus电压的一半AD值进行比较，根据转子所在的扇区和比较值判断是否检测到了过零点。如果检测到了过零点，过零检测标志**zcDetectStateIndex**被置为**ZCDETECT_STG3ZCDETECTED**。

6.1.4 无传感器换相

在不导通相过零点检测到后通过运算得到换相时刻点的信息。运算处理后输出的两个变量**timeBLDCCmt**和**timeBLDCCmt1**用来设置下一次换相的时间，变量**periodBLDCZcFilt**在转速调节中用来计算电机的实际转速。

6.1.5 故障检测

电机控制中故障保护都是在该过程中实现的。电机控制过程中发生的故障主要包括过压，欠压，过流以及其他可能的故障。在该应用中，过压和欠压保护是在软件中用轮询方式来实现的。过流是在软件中通过中断方式来实现的。当故障发生时，所有的PWM信号全都被禁止。

6.2 状态图

6.2.1 主程序状态机

BLDC电机无传感器控制的状态机如图12所示。电机的启动和停止命令是由FreeMASTER所设置的转速值为非零或零所决定的，同样电机的期望转速也是由FreeMASTER软件设置的。任何时候在按下复位按键或转速设置为零时，电机都将会立刻停转。所有处理程序的执行都是由该状态机所控制的。

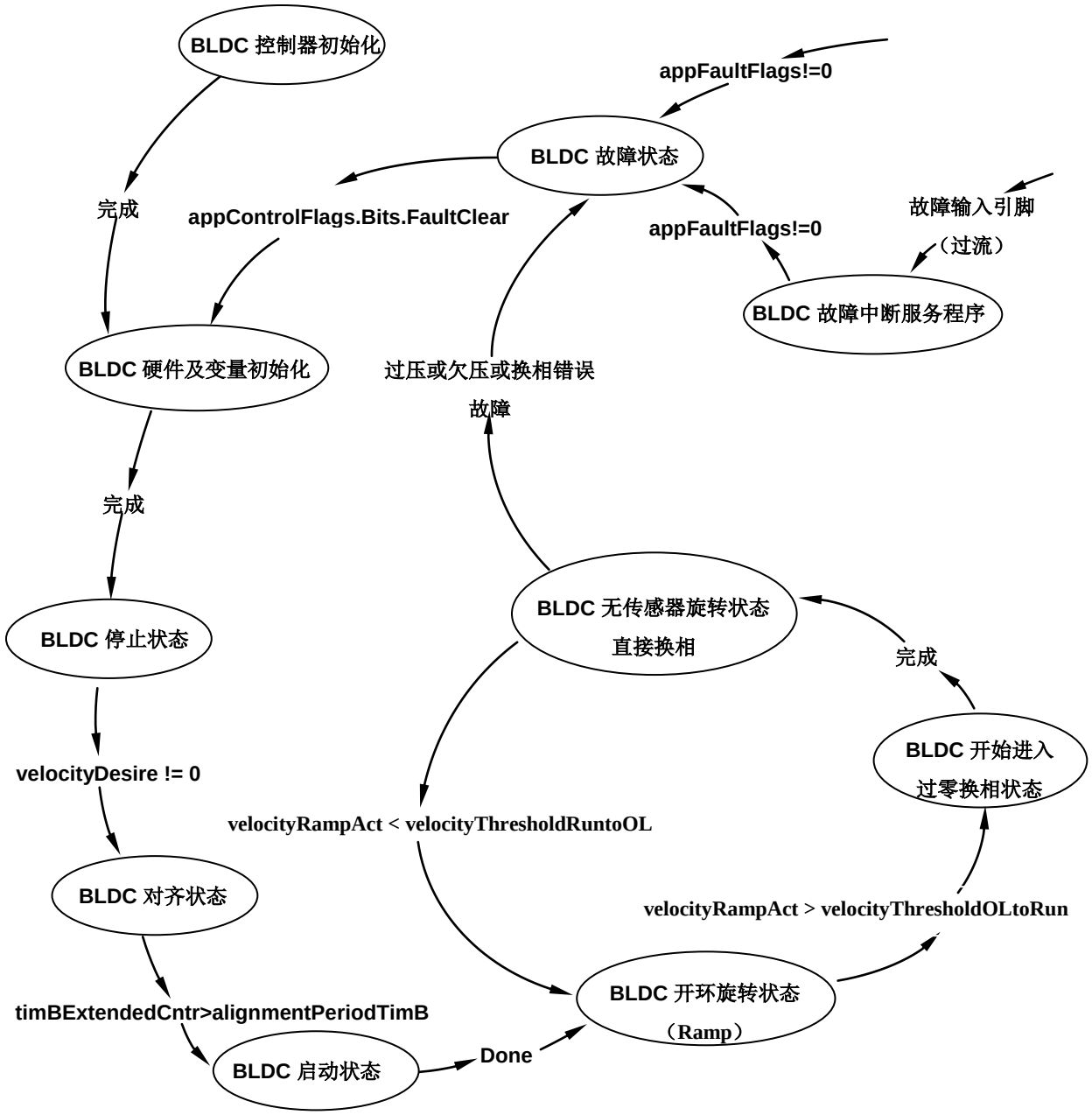


图 **12.** 无刷直流电机的控制状态机

6.2.2 检测反电势过零换相状态图

反电势过零点检测和换相的状态图如图13所示。在完成一次换相后，电机的状态由之前的换相周期内的检测到反电势过零与否所决定。在电机开始进入Running状态时，首先预设一个换相时间。

如果在延时时间periodBLDCZcToff计满后检测到过零点，那么换相周期将重新计算，换相寄存器将重置，计算程序如下所示：

```
timeBLDCZcPrev = timeBLDCZc;
timeBLDCZc = timeBackEmf;
periodBLDCZc = timeBLDCZc - timeBLDCZcPrev;
periodBLDCZcFlt = （periodBLDCZc0 + periodBLDCZc）>>1;
periodBLDCZc0 = periodBLDCZc;
periodBLDCZcToCmt = F16Mul（periodBLDCZcFlt, coefZcToCmt）;
timeBLDCCmt = timeBLDCzC + periodBLDCZctoCmt;
FTM0_MOD = timeBLDCCmt - timeBLDCCmt1;
```

在这里，变量timeBackEmf是在Sensorless commutation Process中计算的，准确的换相动作在换相时间来到时执行。

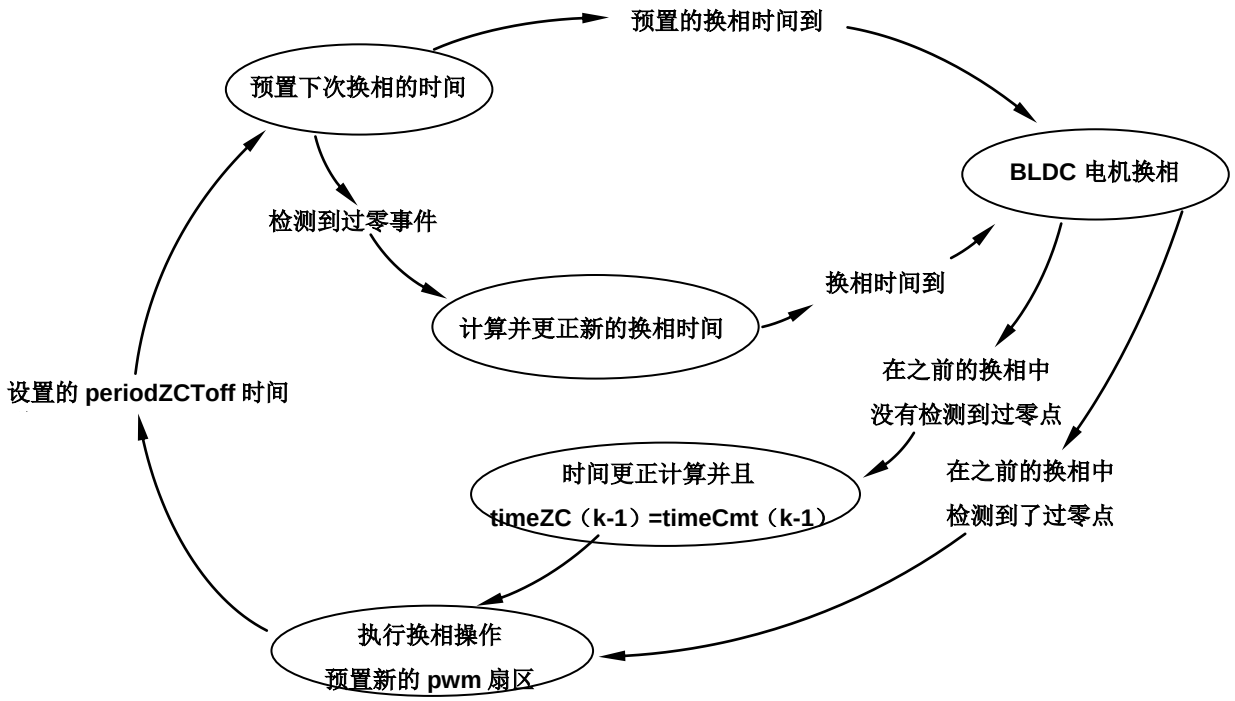


图 13. 检测反电势过零事件换相

如果预置的换相时间计满则表明在这段时间内没有检测到反电势过零点，电机照样执行换相但之后的换相时间将使用下面的Corrective Calculation进行矫正。

```
timeBackEmf = timeBLDCCmt + FTM0_CNT;
```

```
timeBLDCZcPrev = timeBLDCZc;
timeBLDCZc = timeBackEmf;
periodBLDCZc = timeBLDCZc - timeBLDCZcPrev;
periodBLDCZcFlt = （periodBLDCZc0 + periodBLDCZc）>>1;
periodBLDCZc0 = periodBLDCZc;
periodBLDCZcToCmt = F16Mul（periodBLDCZcFlt, coefZcToCmt）;
```

6.3 配置

6.3.1 MOSFET驱动器配置

在正确驱动MC33937前，该预驱动器必须预先进行配置。只有通过SPI通信接口，驱动器才能够被配置。在微控制器和驱动器之间实现SPI通信来配置该MOSFET驱动器还需要另外两个文件：

- spi_comm.h包含了MC33937驱动器所定义的配置和状态常数。
- spi_comm.c 包含了SPI通信函数以及进行MC33937驱动器配置的调用函数。

SPI通信并不仅仅只是用来配置MC33937驱动器，而且还能用来诊断该驱动器是否正常工作。

6.3.2 PWM生成以及定时器

KE02Z64VQH2微控制器的FTM模块拥有三个子模块。但这里只使用了FTM0和FTM2分别用来换相和产生6路PWM信号。PWM信号通过预驱动器MC33937后驱动三相逆变桥的MOSFET。使用的FTM模块配置如下：

- FTM0
  - 32分频的系统时钟源
    `FTM0->SC |= FTM_SC_CLKS（1） | FTM_SC_PS（5）;`
  - 使能通道0并工作在边沿对齐PWM模式
  - 配置PWM信号High-true脉冲（匹配时清除输出）
    `FTM0->CONTROLS[0].CnSC |= FTM_CnSC_MSB_MASK | FTM_CnSC_ELSB_MASK;`
  - 用溢出中断来换相，中断时间可变
  - 当使能了换相中断时，设置通道值为10
    `FTM0->CONTROLS[0].CnV = 10;`
- FTM2
  - 系统时钟源
    `FTM2->SC |= FTM_SC_CLKS（1）;`
  - 产生频率为16 kHz的PWM信号
  - 周期寄存器Modulo设为1250，PWM的分辨率为0.08%
    `FTM2->MOD = PWM_MODULO;  （ #define PWM_MODULO 1250 ）`
  - PWM采用组合互补模式，插入1μs 的死区时间

```
FTM2->COMBINE =  FTM_COMBINE_FAULTEN0_MASK
| FTM_COMBINE_SYNCEN0_MASK | FTM_COMBINE_DTEN0_MASK
| FTM_COMBINE_COMP0_MASK | FTM_COMBINE_COMBINE0_MASK
| FTM_COMBINE_FAULTEN1_MASK
| FTM_COMBINE_SYNCEN1_MASK | FTM_COMBINE_DTEN1_MASK
| FTM_COMBINE_COMP1_MASK | FTM_COMBINE_COMBINE1_MASK
| FTM_COMBINE_FAULTEN2_MASK
| FTM_COMBINE_SYNCEN2_MASK | FTM_COMBINE_DTEN2_MASK
| FTM_COMBINE_COMP2_MASK |FTM_COMBINE_COMBINE2_MASK;

FTM2->DEADTIME = FTM_PWM_DEAD_TIME;
（ #define FTM_PWM_DEAD_TIME 20 ）
```

- 以外部触发FTM0通道0的输出信号作为PWM的同步信号
- 控制高端MOSFETs的PWM信号极性为low
- 控制低端MOSFETs的PWM信号极性为high

```
FTM2->POL = FTM2POL_INIT ;
（ #define FTM2POL_INIT FTM_POL_POL0_MASK | FTM_POL_POL2_MASK |
                                          FTM_POL_POL4_MASK ）
```

- FTM2 Fault
  - 故障输入引脚1上的高电平信号表明故障发生
  - 检测到故障信号后，高端PWM信号被设置为高电平
  - 检测到故障信号后，低端PWM信号被设置为低电平
  - 禁止故障输入滤波器

```
FTM2->FLTCTRL |= FTM_FLTCTRL_FAULT1EN_MASK;
FTM2->MODE |= FTM_MODE_FAULTM（2） | FTM_MODE_FAULTIE_MASK;
```

  该应用中使用到一个PIT模块来产生3ms的定时中断，以此来作为速度闭环和电流闭环的工作时基。

- PIT0
  - 运行频率为20 MHz

```
PIT->MCR = 0x00;
```

  - 计数直到比较匹配后重新初始化

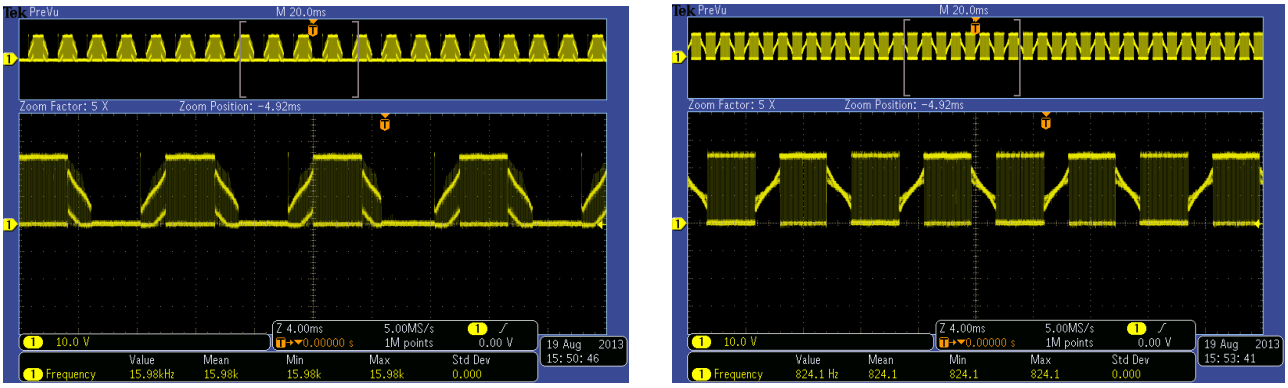
```
PIT->CHANNEL[0].TCTRL = 0x03;
```

  - 产生3ms中断，周期值设为0xEA60

```
PIT->CHANNEL[0].LDVAL = （0xEA60-0x01）;
```

6.3.3 单极性PWM和双极性PWM

单极性PWM和双极性PWM是两种不同的脉宽调制。这两种调制方式的不同之处在于，单极性PWM只能在二象限内运行，而双极性PWM（对角线形式）可以在四象限内运行。



单极性 PWM　　双极性 PWM

图 14. 单极性PWM和双极性PWM比较

图 14是从示波器中观测到的某一相相电压的波形。左图是单极性PWM方式下的反电势，右图是双极性PWM方式下的反电势。附在该应用手册后的源程序代码支持以上这两种方式的脉宽调制，默认情况下是使用单极性PWM，如果要使用双极性PWM，只需打开C文件*State_machine.c*打开宏定义*#define PWM_BIPOLAR_SWITCHING* 。

6.3.4 AD转换

ADC模块用来进行相反电动势，直流母线电压和直流母线电流的采样及转换，配置如下：

- 输入时钟为总线时钟
- 单次转换模式
- 转换结果12位，右对齐

```
ADC->SC3 = ADC_SC3_MODE（2） | ADC_SC3_ADIV（2）;
```

- 使用外部PWM信号触发

```
ADC->SC2 |= ADC_SC2_ADTRG_MASK;
```

- 采样通道设置为：直流母线DC_Bus电压为通道AD11，直流母线DC_Bus电流为通道AD14，A相反电势为通道AD10，B相反电势为通道AD3，C相反电势为通道AD7

```
ADC->APCTL1 = 0xC488;
```

ADC模块根据无刷直流电机转子所在的扇区选择并转换当前状态下的不导通相的反电势。ADC中断服务程序主要完成以下这些任务：保存相应不导通相的反电动势值，使用轮询方式启动下一次转换（直流母线DC_Bus电压或电流），判断过零事件是否发生，映射AD采样通道。由于电机定子绕组之间存在的互感作用，采样时刻点必须和PWM同步。

6.3.5 FreeMASTER通信

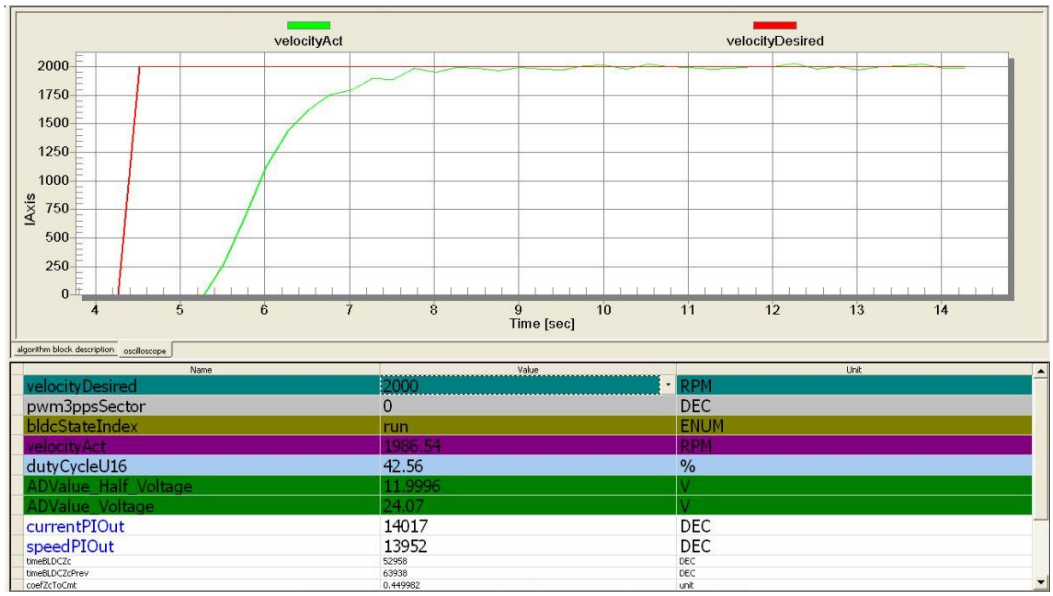


图 15. FreeMASTER调试界面

图 15为FreeMASTER调试工具的GUI（图形用户界面）。使能UART模块后采用串口通信就可以实现FreeMASTER的远程控制。主机通过一个USB转串口的连接线连接到微控制器，用户电脑的USB端口作为一个虚拟串口。在 *project ->Options->Comm->Communication*选项中选择“*Direct RS232*”作为通信方式，波特率设为9600bps. 在 *project->Options->MAP Files*下的“*Defulat symbol file*”选项中选择输出文件的后缀，即选择工程生成的可执行文件；在“*File format*”选项中选择“*Binary ELF with DWARF1 or DWARF2 dbg format*”。

6.3.6 其他

最后，电机参数、对齐和启动常数等常量都保存在头文件main.h和hw_config.h中。本应用中使用的电机和MC9S08PT60参考设计中使用的电机一样，因此电机参数也是一样的。

7 Demo的搭建和使用

按照如下操作，整个demo用户就可以使用了。

7.1 硬件安装

系统的硬件如图3所示，在4.2节已详述。

在使用图3所示的KE02Z64VQH2 Tower board之前需要完成以下步骤：

1. 插入供电电源的插头到低压电机控制板接口J1。

2. 用USB 2.0数据线连接个人电脑和KE02Z中央控制板上的接口J6。
3. 使用通用串口线连接TWR – MC – LV3PH驱动板上的DB9接口J8和个人电脑的USB口。
4. 确认TWR-MC-LV3PH板上跳线J2，J3，J10，J11，J12，J13和J14的设置：
   - J3（引脚2和3短接）设置TowerBoard上的供电电源。
   - J10，J11，J12 （引脚2和3短接）代表A相反电势检测，B相反电势检测，C相反电势检测。
   - J13 （引脚2和3短接）代表直流母线DC_Bus电流检测。
   - J14 （引脚2和3短接）代表检测直流母线DC_Bus电压的一半。
5. 确认KE02Z中央控制板以及转接板（TWR-MC-FRDMKE02Z）上跳线J31，J32的设置。
   - 为了调试方便J3，J4，J5必须短接。
   - 去掉电阻R37，R52，R53。
   - J31，J32 （引脚2和3短接）代表从TowerBoard上获得3.3V和5V供电电压。

图16是KE02Z的转接板（TWR-MC-FRDMKE02Z），图17是KE02Z中央控制板（FRDM – KE02），图18是低压电机控制板（TWR – MC – LV3PH）。

图 16. KE02Z转接板

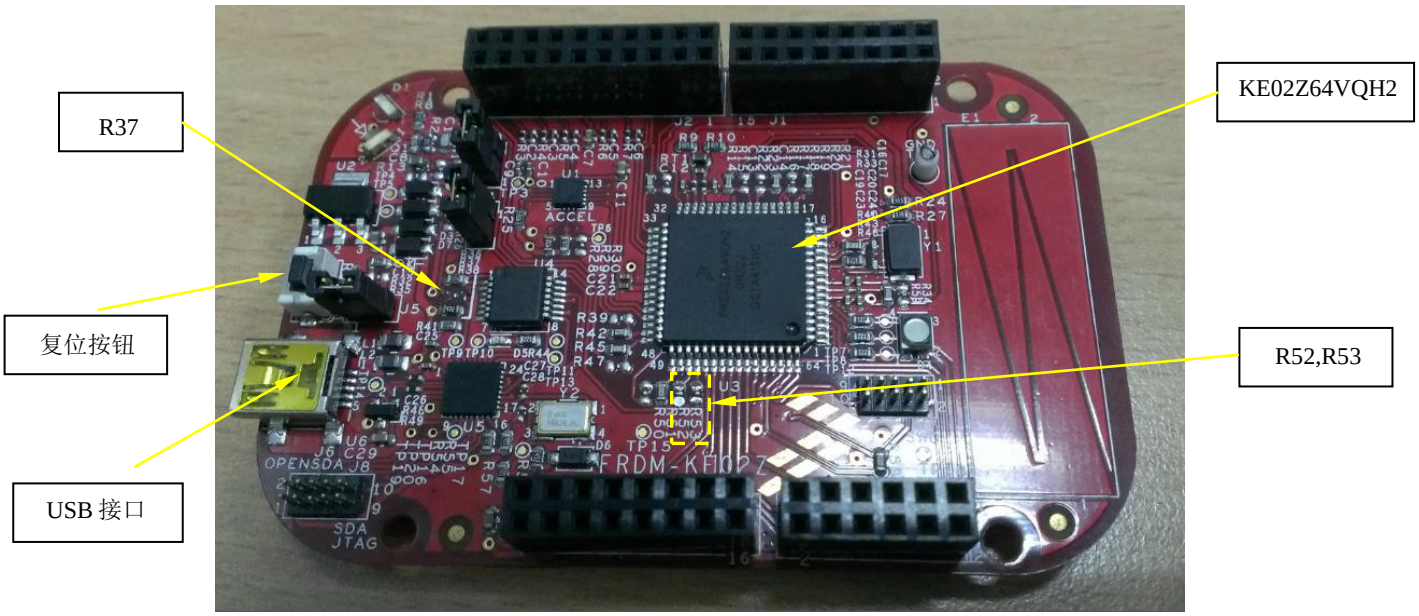


图 17. KE02Z中央控制板（FRDM-KE02Z）

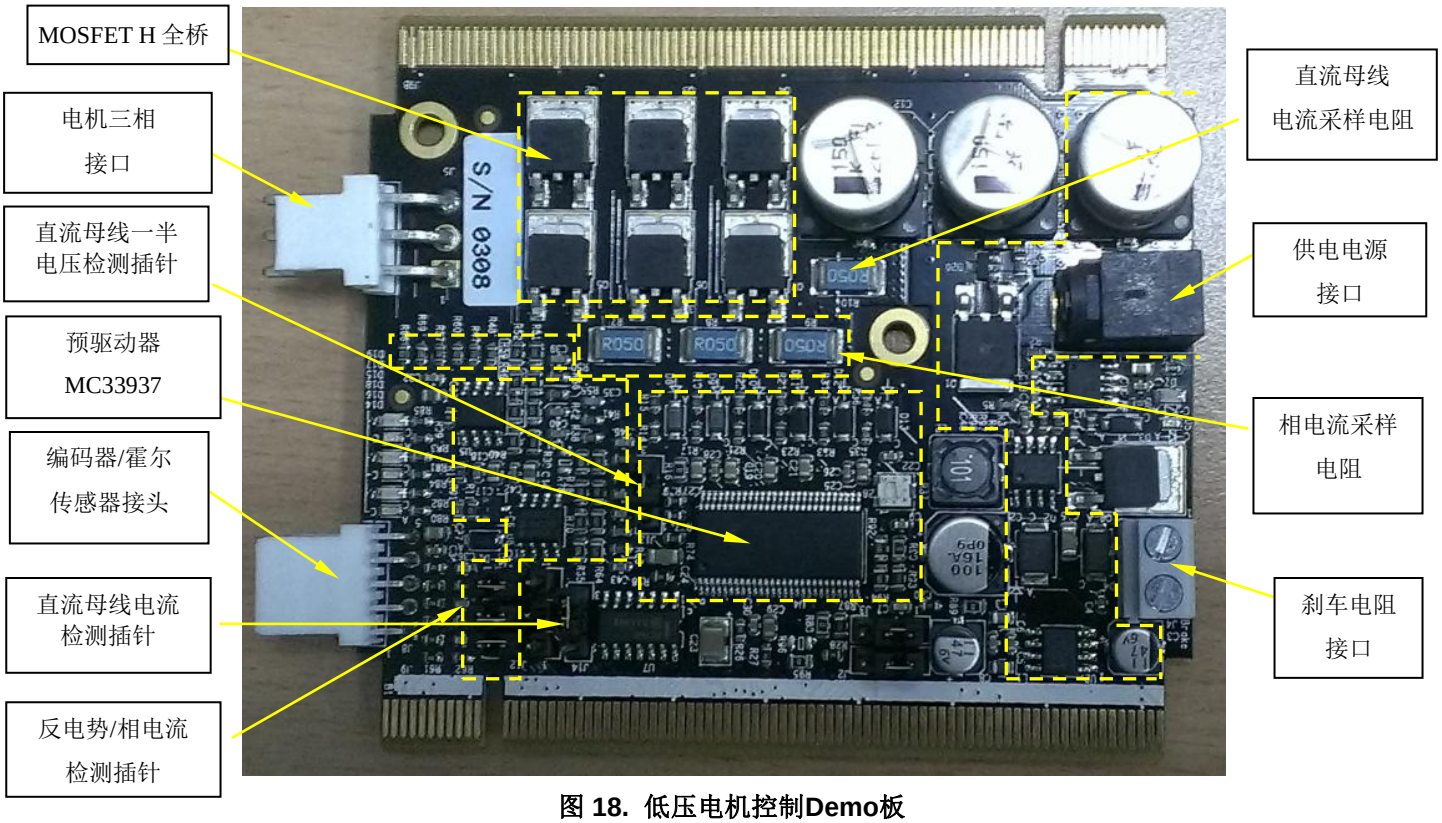


图 18. 低压电机控制Demo板

7.2 软件安装

本系统的软件开发环境为IAR Embedded Workbench for ARM v6.5。在第一次使用FreeMASTER软件之前需要安装USB转SCI驱动。在MS Word文件“Installation USB/SCI Bridge manual”中描述了驱动的安装。在成功安装了驱动之后，选择一个连接到USB端口的串口，这样FreeMASTER调试工具就已经准备好并可以使用了。

8 参考手册

以下参考手册均可在飞思卡尔官网（freescale.com)上获得。

- KE02 Sub-Family Reference Manual
- TWRMCLV3PHUG: TWR-MC-LV3PH User’s Guide
- TWR-MC-LV3PH Schematic
- TWR-SER-SCH Schematic
- KE02 Series Data Sheet

How to Reach Us:

Home Page:
freescale.com

Web Support:
freescale.com/support

本文档中的信息仅供系统和软件实施方使用 Freescale 产品。未包含基于本文档信息设计或加工任何集成电路的任何明示或暗示的版权许可授权。

Freescale 保留对此处任何产品进行更改的权利，恕不另行通知。 Freescale 对其产品在任何特定用途方面的适用性不做任何担保、表示或保证，也不承担因为应用或使用产品或电路所产生的任何责任，明确拒绝承担包括但不局限于因果性或附带损害在内的所有责任。 Freescale 数据表和 / 或规格中所提供的 “ 典型 ” 参数在不同应用中可能并且确实不同，实际性能会随时间而有所变化。所有操作参数，包括 “ 典型值 ” 在内，在每个客户应用中必须经由客户的技术专家进行验证。 Freescale 未转让与其专利权及其他权利相关的许可。 Freescale 销售产品时遵循以下网址中包含的标准销售条款和条件： freescale.com/SalesTermsandConditions

Freescale, the Freescale logo, and Kinetis are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc., Reg. U.S. Pat. & Tm. Off. All other product or service names are the property of their respective owners.
© 2012, 2013 Freescale Semiconductor, Inc.

文档编号： AN4796
版本 1, 11/2013