

## 如何用 HT45FM03B 驱动 BLDC 马达 (汇编语言)

### 简介

直流无刷电机由于采用电子换相、PWM 调速,克服了直流电机机械换相带来的一系列问题,从而大大延长了电机的使用寿命。近年来已广泛应用于家电、电动自行车、数控机床、机器人等领域。

HT45FM03B 是 Holtek 公司开发的高性能 RISC 结构单片机,主要用于直流无刷电机控制。HT45FM03B 内建比较器、运算放大器、多路 A/D 转换器、多路外部中断以及含死区时间的互补型 PWM 控制器。

本文介绍以 HT45FM03B 为核心构成的直流无刷电机的控制系统中, HT45FM03B 的各个功能部件在无刷电机使用方法,如速度设定、换相原理、PWM 调速原理、电机过流保护方法、电机快速制动方法等。

### 基本特征介绍

HT45FM03B 是构成直流无刷电机控制系统的核心,具有丰富的内建资源,其基本特征如下:

- 工作电压:  
 $f_{SYS} = 0.4 \sim 20\text{MHz}$  at 4.2V~5.5V
- 26 个双向输入/输出口
- 4 个与输入/输出口共用引脚的外部中断输入
- 1 个 8 位可编程定时/计数器,具有溢出中断及 7 位预分频
- 1 个 16 位可编程定时/计数器,具有溢出中断及 7 位预分频
- 4096×15 程序储存器 ROM
- Flash Type MCU
- 192×8 数据储存器 RAM
- 内置晶体、内部 RC 和外部 RC 振荡电路
- 内部集成 12MHz、16MHz 和 20MHz RC 振荡器
- 看门狗定时器
- 具有 PFD 功能,可用于发声
- HALT 和唤醒功能可降低功耗
- 在  $V_{DD}=5\text{V}$ , 系统频率为 20MHz 时,指令周期为 0.2 $\mu\text{s}$
- 8 层硬件堆栈
- 8 通道 12 位分辨率的 A/D 转换器

- 3 通道 10 位的带互补功能的 PWM 输出，与 6 个输入/输出口共用引脚，且具有 3 对占空比控制寄存器
- 位操作指令
- 查表指令
- 63 条指令
- 指令执行时间为 1 或 2 个指令周期
- 低电压复位功能
- 低电压保护功能
- 一个运算放大器
- 一个带中断功能的比较器
- 28-pin SOP 封装 (图 1)

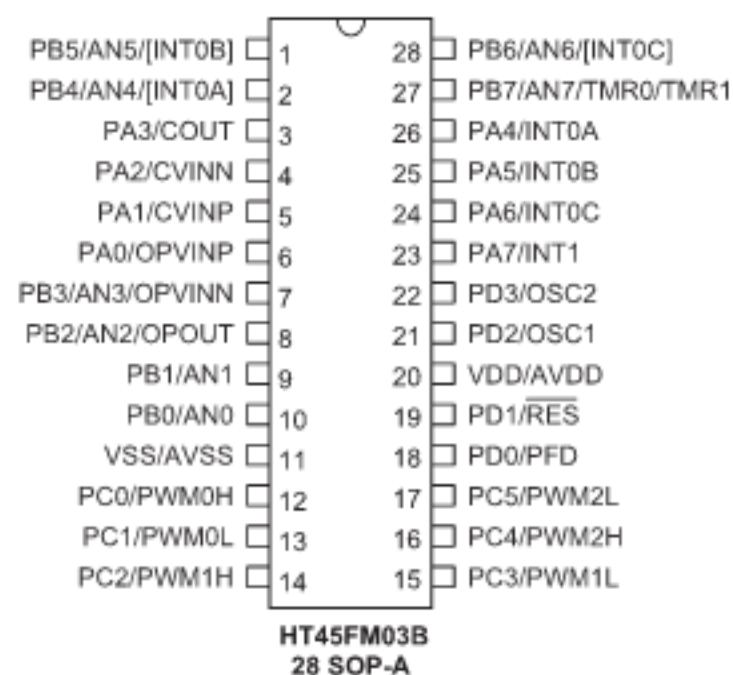


图 1

了解 HT45FM03B 的基本特征后，下面重点介绍，HT45FM03B 相关元件在直流无刷电机控制过程中的作用以及相关控制原理和使用方法。

## BLDC 马达的简介

直流无刷 (BLDC) 马达，即直流无刷电动机，是采用半导体开关元件实现电子换相，即使用电子开关元件代替传统的接触式换相器和电刷。直流无刷马达由永磁体转子、多级绕组定子、位置传感器等组成。具有可靠性高、无换相火花、机械噪声等优点。

## A/D 转换器在 BLDC 马达中的应用

### 速度设定方法

速度设定值，通过 A/D 端口送一个电压给 MCU，MCU 将转换数据作为速度基准值，如图 2 所示，VR 用来调整速度设定值的电压，R9 和 C15 构成滤波电路。

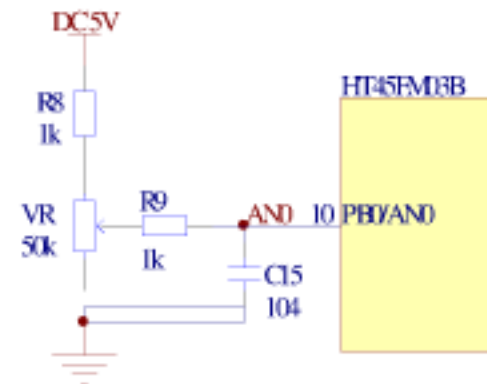


图 2

### A/D 的使用简介

HT45FM03B 中与 A/D 转换相关的寄存器有：ADRL、ADRH、ADCR、ACSR。下面简要说明在进行 A/D 转换时，相关寄存器设定方法。

- ADCR
  - 通过设定 ADCR 中位 3~5 中 PCR0~PCR2 的值，选择相应的 I/O 口为模拟输入口。
  - 通过设定 ADCR 中位 0~2 中 ACS0~ACS2 的值，选择相应的模拟输入口与内部 A/D 转换模块相连接。
  - 通过给 ADCR 中位 7 (START) 由低到高，再由高到低 (0→1→0)，启动 A/D 转换。
  - 当 A/D 转换开始后，可通过查询 ADCR 中位 6 (EOCB) 是否为“0”，来判断 A/D 转换是否完成。
- ACSR
  - 主要通过设定 ACSR 中位 0~4 中 ADCS0~ADCS3 的值，选择 A/D 转换的时钟。
- ADRH、ADRL
  - 主要用于保存 A/D 转换的结果。高 8 位存于 ADRH，低 4 位存于 ADRL 的高 4 位。

以上为 HT45FM03B A/D 的使用简介，具体使用方法请参照规格书及 Holtek 网站上相关 A/D 使用的应用范例。

## Hall Sensor 在 BLDC 马达中的应用

### HT45FM03B 的 Hall Sensor 检测电路

如图 3 所示，Hall Sensor 的三根线连接到 HT45FM03B 外部中断 0 的 INT0A~INT0C，INT0A~INT0C 引脚与 PA4、PA5、PA6 引脚共用，只要 INT0A、INT0B、INT0C 中任何一个外部中断端口有下降沿信号产生，均可产生外部中断 0。可在外部中断 0 服务程序中读取 Hall Sensor 的状态，对电机进行换相。

目前，在无刷直流电机上，均安装三个 Hall Sensor，则对 HT45FM03B 来讲，可有 8 个输入状态，以 120 度电机为例，则各状态为：001、010、011、100、101、110、111、000，在此 8 个状态中，111 和 000 两个状态没有用，一般检测到这两个状态，则认为电机缺相。Hall Sensor 的作用除了对电机进行换相外，亦可用于进行位置和速度反馈，用 Hall Sensor 对速度进行反馈的优点是可以节约成本，缺点是定位精度较差。

在图 3 中, R1、R2、R3 为上拉电阻, R4、R5、R6 为限流电阻, C7、C8、C9 为旁路电容, D1、D2、D3 为隔离二极管防止电机 Noise 串入到 HT45FM03B。

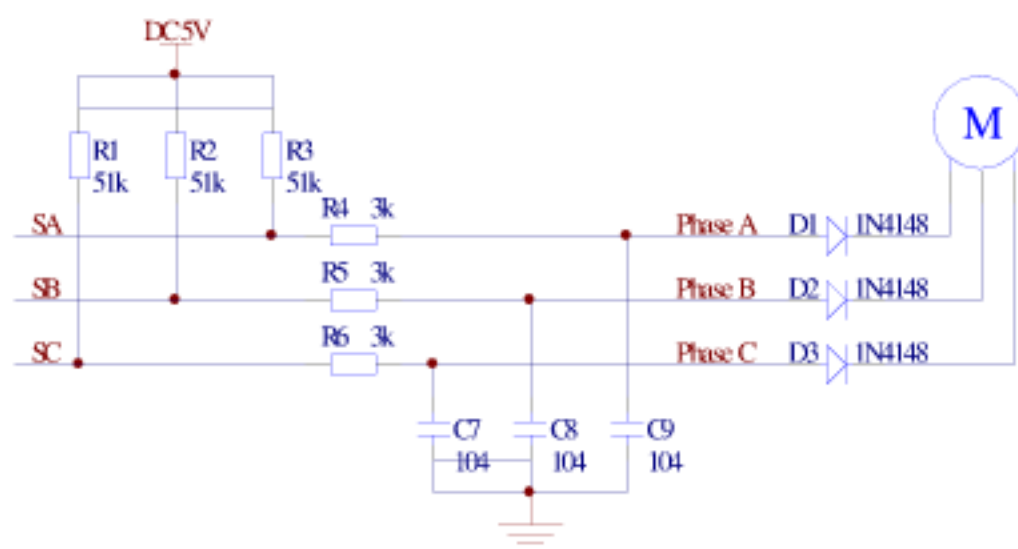


图 3

### 电机换相原理

直流无刷电机的驱动, 是根据 Hall Sensor 的状态, 来控制六个 MOSFET 对电机进行换相, 从而推动电机运转。图 4 为六个 MOSFET 推动电机原理图。

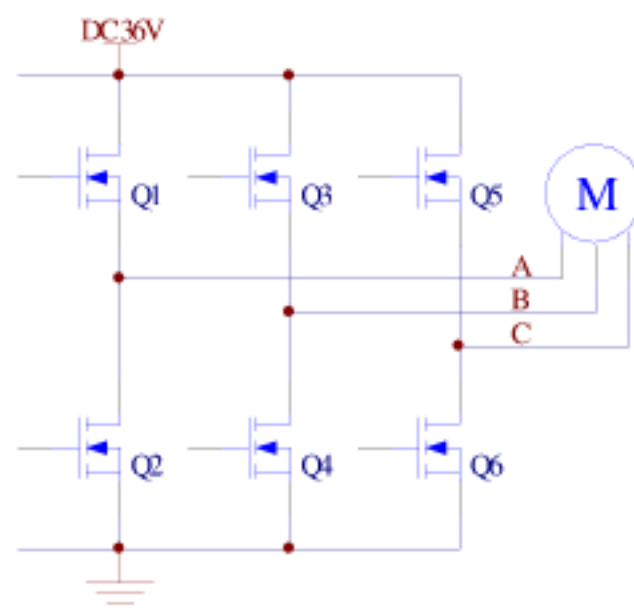


图 4

对于直流无刷电机而言, 具有 60 度和 120 度两种, 对每种电机而言, 其 Hall Sensor 状态, 与其 MOSFET 状态的对应关系如下:

60 度无刷电机换相真值表:

| Hall sensor(SA: SB: SC) | MOSFET 管状态 |
|-------------------------|------------|
| 000                     | Q1, Q4 on  |
| 001                     | Q5, Q4 on  |
| 011                     | Q5, Q2 on  |
| 111                     | Q3, Q2 on  |
| 110                     | Q3, Q6 on  |
| 100                     | Q1, Q6 on  |

120 度无刷电机换相真值表:

| Hall sensor (SA: SB: SC) | MOSFET 管状态 |
|--------------------------|------------|
| 101                      | Q1, Q4 on  |
| 001                      | Q5, Q4 on  |
| 011                      | Q5, Q2 on  |
| 010                      | Q3, Q2 on  |
| 110                      | Q3, Q6 on  |
| 100                      | Q1, Q6 on  |

## 电机快速制动原理

电机制动在定位系统中是很重要的, 传统的机械制动存在许多缺点, 例如: 随着闸皮的磨损, 定位误差会越来越大。E-ABS (电磁主动刹车) 电子制动方法克服了机械制动的缺点。

E-ABS 电子制动的方法为:

- 短路电机至少两个相线, 可通过 HT45FM03B 同时打开三个上臂或三个下臂, 使电机三个相线短路。这时电机内部定子上的线圈将形成闭合回路。当定子转动, 就会引起磁感线切割, 从而产生感生磁场阻碍定子转动。
- 目前无刷电机的控制方式是三相六状态, 3 个 Hall Sensor 的 8 个状态为(对 120 度电机而言): 001、010、011、100、101、110、111、000, 有两个状态为缺相状态, 即: 000、111。除去缺相的两个状态, 另 6 个状态分别对应了电机六种位置。当按照 Hall Sensor 状态 001→010→011→100→101→110 来驱动电机时, 电机正转。当按照 Hall Sensor 的状态反向驱动电机时, 则电机反转, 则可利用电机反转产生的反向力来达到制动效果。

## PWM 在 BLDC 马达中的应用

### HT45FM03B PWM 特征简介

HT45FM03B 提供三个通道互补型 PWM 输出, PWM 输出与 PC0-PC5 引脚共用。各个 PWM 被命名为 PWM0H~PWM2H, 其互补端被命名为 PWM0L~PWM2L, 互补型 PWM 输出, 提高了电机工作效率。

HT45FM03B 在互补型 PWM 输出中同时加入了死区时间, 死区时间可防止由于驱动器执行速度原因造成同一桥臂同时导通的情况。

HT45FM03B 同时也为 PWM 提供了中断服务程序入口, PWM 在每个调制周期的上升沿可产生中断。

HT45FM03B 可提供四种 PWM 工作模式, 即 10 bits 模式、(9+1) bits 模式、(8+2) bits 模式、(7+3) bits 模式, 不同工作模式可提供不同频率的 PWM 输出。

## 功能设定

- PWM 时钟的设定

PWM 时钟由 PWMC1 寄存器的 bit 5 ~bit 7 (PWMP50~PWMP52) 对系统时钟进行除频而来, PWM 时钟  $f_{PWM}$  与系统时钟  $f_{SYS}$  的关系如下表所示:

| PWMP52 : PWMP51 : PWMP50 | PWM 时钟                |
|--------------------------|-----------------------|
| 000                      | $f_{PWM} = f_{SYS}$   |
| 001                      | $f_{PWM} = f_{SYS}/2$ |
| 010                      | $f_{PWM} = f_{SYS}/3$ |
| 011                      | $f_{PWM} = f_{SYS}/4$ |
| 100                      | $f_{PWM} = f_{SYS}/5$ |
| 101                      | $f_{PWM} = f_{SYS}/6$ |
| 110                      | $f_{PWM} = f_{SYS}/7$ |
| 111                      | $f_{PWM} = f_{SYS}/8$ |

- PWM 工作模式的选择

PWM 共有四种工作模式, 即 10 bits 模式、(9+1) bits 模式、(8+2) bits 模式、(7+3) bits 模式, 不同工作模式可提供不同频率的 PWM 输出。此四种模式的选择是在 Configuration Options 中。

- PWM 输出总控制(PWMCTRL)

PWMC0 的 bit 6 (PWMCTRL)是 PWM 输出总控制位。为“1”时, PWM 输出有效; 为“0”时, PWM 输出无效。

- PWM 输出控制方式的选择(PWMCM)

PWMC2 的 bit 1 (PWMCM)是 PWM 输出控制方式选择位。为“1”时, PWM 输出由寄存器 PCPWM 控制; 为“0”时, PWM 输出由 I/O 口 PC6、PC7 共同控制。

- PWM 输出使能控制(PWMEN)

PWMC0 的 bit 0 (PWMEN)是 PWMxH 输出的使能位。为“1”时, 允许 PWMxH 输出; 为“0”时, 禁止 PWMxH 输出。

- PWM 互补输出使能控制 (PWMCEN)

PWMC0 的 bit 1 (PWMCEN)是 PWMxL 输出的使能位。为“1”时, 允许 PWMxL 输出; 为“0”时, 禁止 PWMxL 输出。

- PWM 输出选择控制的设定

PCPWM 是 PWM 输出选择控制寄存器, 其输出选择控制如图 5 所示:

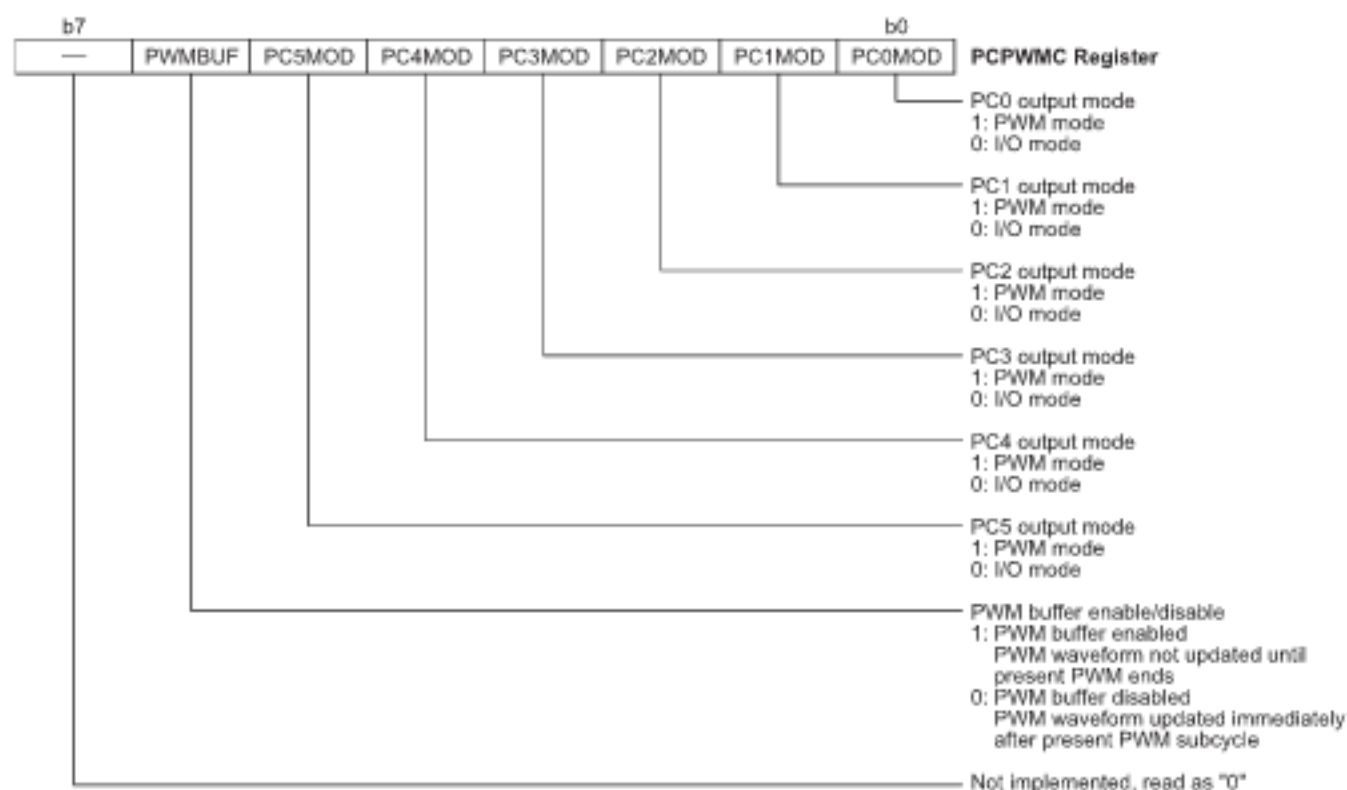


图 5 PCPWM Register

- PWM 数据输出控制的设定

PCPWMD 是 PWM 数据输出控制寄存器，其数据输出控制如图 6 所示：

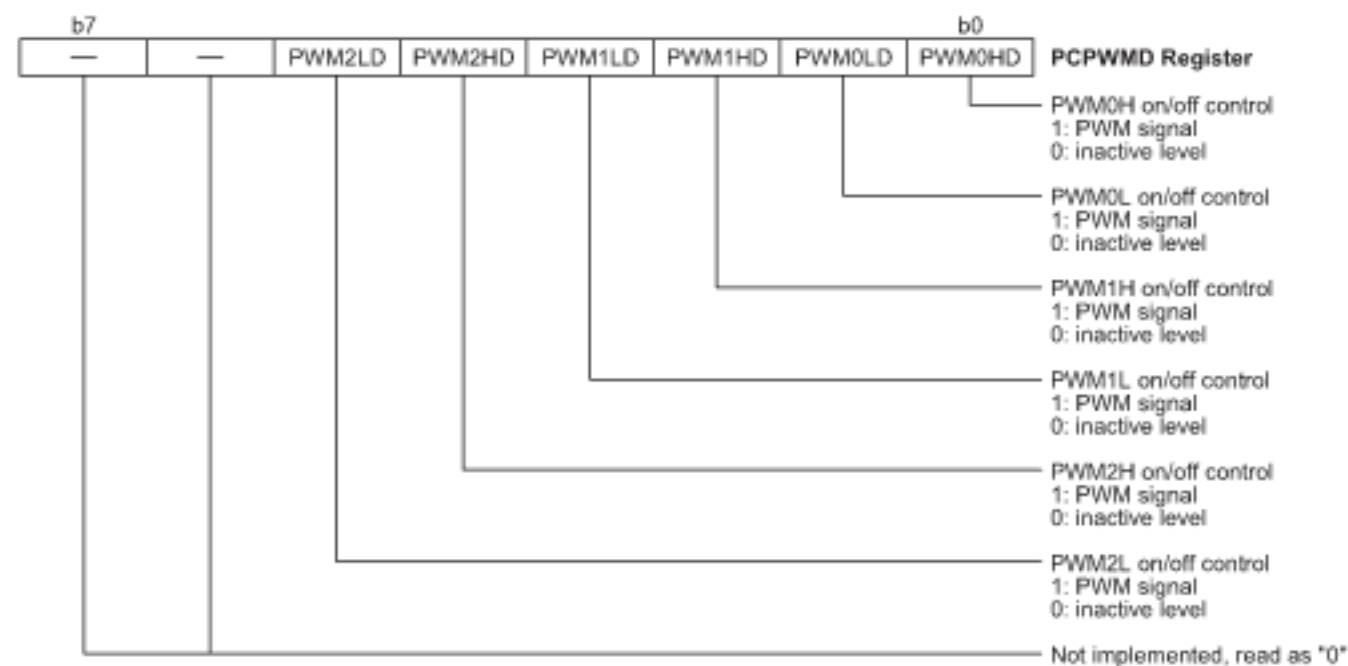


图 6 PCPWMD Register

- PWM 停止输出的设定

PWM 停止输出是由 PWMC1 的 bit 2~bit 4 (PWMSP0~PWMSP2) 共同控制。其控制方式如下表所示：

| PWMSP2:PWMSP1:PWMSP0 | PWM 停止输出方式   |
|----------------------|--|
| 000                  | 只由软件控制。  |
| 001                  | 由 COUT/PA3 下降沿控制。  |
| 010                  | 由 INT1 中断控制。   |
| 011                  | 由 COUT/PA3 下降沿或 INT1 中断控制。   |
| 100                  | 当 COUT/PA3 下降沿时，PWMxH、PWMxL 输出无效。<br>当 COUT/PA3 上升沿时，PWMxH、PWMxL 输出有效。 |
| 101                  | 当 COUT/PA3 下降沿时，PWMxH 输出无效。<br>当 COUT/PA3 上升沿时，PWMxH 输出有效。             |
| 110                  | 当 COUT/PA3 下降沿时，PWMxH 输出无效。  |
| 111                  | 当 COUT/PA3 下降沿时，PWMxH、PWMxL 输出无效。                                      |

## Dead Time 相关设定

- PWM Dead Time 输出使能控制 (DTEN)

PWMC0 的 bit 2 (DTEN) 是 PWM 互补输出是否加入 Dead Time 使能位。为“1”时，PWM 互补输出时含有 Dead Time；为“0”时，PWM 互补输出时不含有 Dead Time。

- Dead Time 时钟的选择

Dead Time 的时钟，是依赖于 MISC 寄存器的 bit 6~ bit 7 (DTPS0~DTPS1) 对系统频率的分频。Dead Time 时钟与系统频率的关系如下表所示：

| DTPS1: DTSP0 | Dead Time 的时钟     |
|--------------|-------------------|
| 00           | $f_D = f_{SYS}$   |
| 01           | $f_D = f_{SYS}/2$ |
| 10           | $f_D = f_{SYS}/4$ |
| 11           | $f_D = f_{SYS}/8$ |

- Dead Time 时间的选择

Dead Time 时间长短的选择, 是在 PWMC0 寄存器的 bit 3~bit 5 (PWMDT0~PWMDT2) 中选择, 其时间对应如下表所示:

| PWMDT2: PWMDT1: PWMDT0 | Dead Time 时间 |
|------------------------|--------------|
| 000                    | $1/f_D$      |
| 001                    | $2/f_D$      |
| 010                    | $3/f_D$      |
| 011                    | $4/f_D$      |
| 100                    | $5/f_D$      |
| 101                    | $6/f_D$      |
| 110                    | $7/f_D$      |
| 111                    | $8/f_D$      |

- 在互补型 PWM 输出中加入 Dead Time 的作用

HT45FM03B 在互补型 PWM 输出中加入 Dead Time 的作用是为了避免同一组 PWM (PWMxH 和 PWMxL)在输出时, 由于驱动器的执行速度造成同一组 PWM (PWMxH 和 PWMxL)的驱动器出现同时开启(Active)的情况。

例如: 对于 PWMxH 和 PWMxL 不含有 Dead Time 的输出波形, 如图 7 所示。

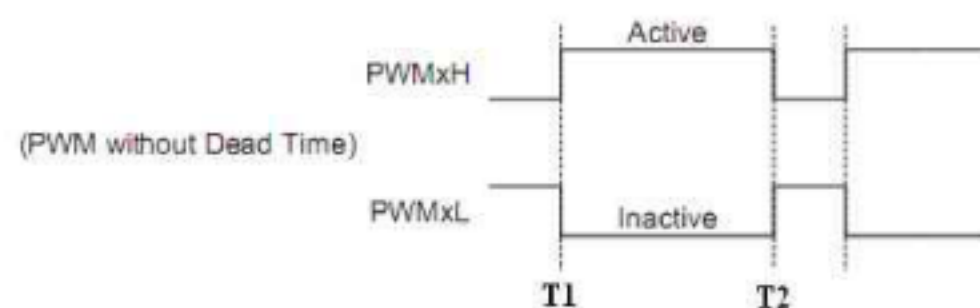


图 7

在图 7 中存在的问题是: PWMxH 在 T1 变为 Active 而 PWMxL 在 T1 变为 Inactive, 此时若驱动器的开启速度快而关断速度慢, 则 PWMxH 及 PWMxL 的驱动器会出现同时 Active 的情况。

对于 PWMxH 和 PWMxL 含有 Dead Time 的输出波形, 如图 8 所示。

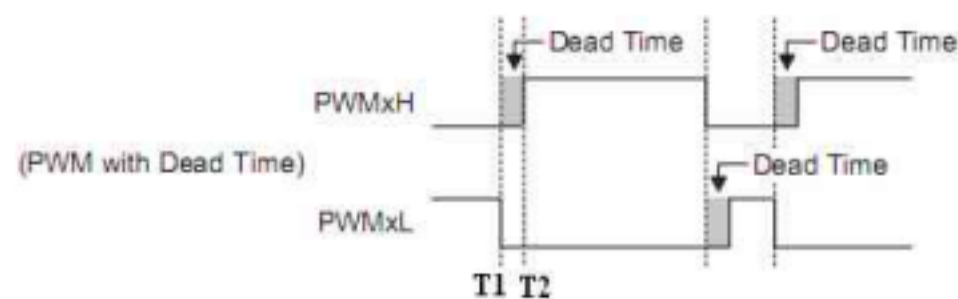


图 8

如图 8 对于含有 Dead Time 的 PWMxH 和 PWMxL 输出, 在 T1 时, PWMxL 变为 Inactive 而 PWMxH 在 T2 变为 Active, 这样就避免了由于驱动器关断速度慢而出现同一组驱动器都 Active 的情况。

在 HT45FM03B 中, 对于 Dead Time 时间选取, 应注意:

- Dead Time 时间不宜太短, 太短会出现同一组驱动器都 Active 的情况。
- Dead Time 时间不宜太长, 太长会影响效率。要根据所选用的驱动器的速度选取合适的 Dead Time 时间。



## PWMxH 和 PWMxL 输出逻辑选择

在 PWM Configuration Options 中, 有两个位可用来选择 PWM 的输出逻辑, 即 PWMLEV 和 PWMCLEV。

PWMLEV 选项是用来选择 PWM0H~PWM2H, 各 PWM 调制输出工作周期 (Duty Cycle) 的逻辑关系。

若 PWMLEV 选项选为 Active High, PWMnH/PWMnL 中的值决定了一个 PWM 调制周期内高电平输出宽度。

若 PWMLEV 选项选为 Active Low, PWMnH/PWMnL 中的值决定了一个 PWM 调制周期内低电平输出宽度。

例如: PWM 工作在 (9+1) bits 模式,  $f_{PWM} = 8\text{MHz}$  时,

若 PWMLEV 选项选为 Active High, PWMH/PWML=0014H, PWM 输出波形如下:

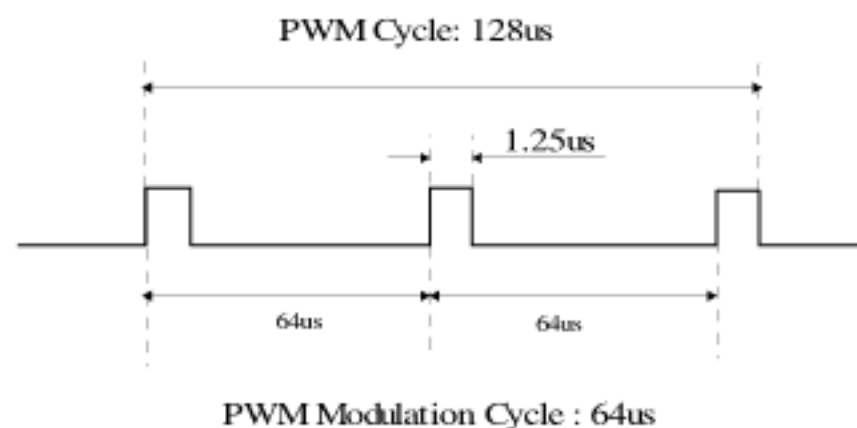


图 9

若 PWMLEV 选项选为 Active Low, PWMH/PWML=0014H, PWM 输出波形如下:

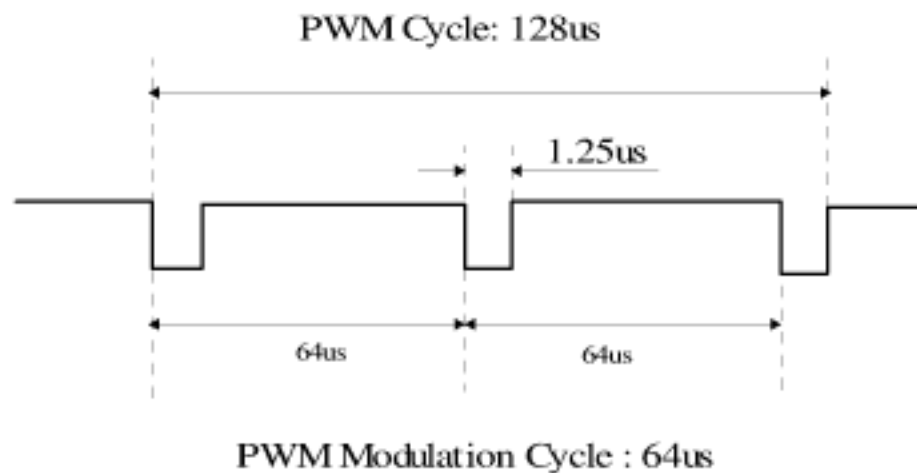


图 10

## PWM 数据输出

PWM 调制数据寄存器 PWMnH 和 PWMnL, 数据位分配如图 11 所示:

| Register | Bit 7 | Bit 6 | Bit 5 | Bit 4 | Bit 3 | Bit 2 | Bit 1 | Bit 0 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PWMnH    | D9    | D8    | D7    | D6    | D5    | D4    | D3    | D2    |
| PWMnL    | -     | -     | -     | -     | -     | -     | D1    | D0    |

图 11

PWM 数据寄存器中的值, 决定了一个 PWM 调制周期内, 高低电平的占空比。

## PWM 开关控制

在设定好 PWM 的各控制选项, 对 PWM 的开关可通过 PC0~PC5 寄存器来设定。当 PC0~PC5 为“1”时开启 PWM 输出, 当 PC0~PC5 为“0”则关闭 PWM 输出。例如:

当 PC0 = 1, 则开启 PWM0H 输出; 当 PC0 = 0, 则关闭 PWM0H 输出。

## PWM 中断控制

PWM 在每个调制周期的上升沿会产生中断。HT45FM03B PWM 的工作模式有: 10 bits 模式、(9+1) bits 模式; (8+2) bits 模式和 (7+3) bits 模式, 共计四种模式。不论 PWM 工作在何种模式下, PWM 中断间隔时间均为 PWM 调制周期的时间。了解 PWM 的中断间隔时间, 对书写 PWM 中断服务程序非常重要。下面举例说明 PWM 中断间隔时间如何计算。

例如: HT45FM03B PWM 工作在 (9+1) bits 模式时, PWM 中断间隔时间计算方法为:

$$T=512/f_{PWM}$$

其中 T 为中断间隔时间,  $f_{PWM}$  为 PWM 时钟频率,  $f_{PWM}$  的大小是 PWMC1 寄存器的 bit 5 ~ bit 7 (PWMP50~PWMP52) 中的值对系统频率  $f_{SYS}$  的分频值。

若  $f_{SYS}=8\text{MHz}$ , PWMC1 寄存器的 bit 5~bit 7=001 时,

则  $f_{PWM}=f_{SYS}/2=8\text{MHz}/2=4\text{MHz}$ ,  $T=512/f_{PWM}=512/4\text{MHz}=128\mu\text{s}$

即在上述条件下, PWM 每间隔 128 $\mu\text{s}$  发生一次中断。

## PWM 驱动 MOSFET 原理

PWM 驱动 MOSFET，对电机进行调速，驱动电路有很多方法，例如可用 IR2103 驱动块或 HT45B0C 驱动块，为了更好地阐述 PWM 驱动 MOSFET 原理，下面介绍由晶体管组成的驱动电路。如图 12 所示。

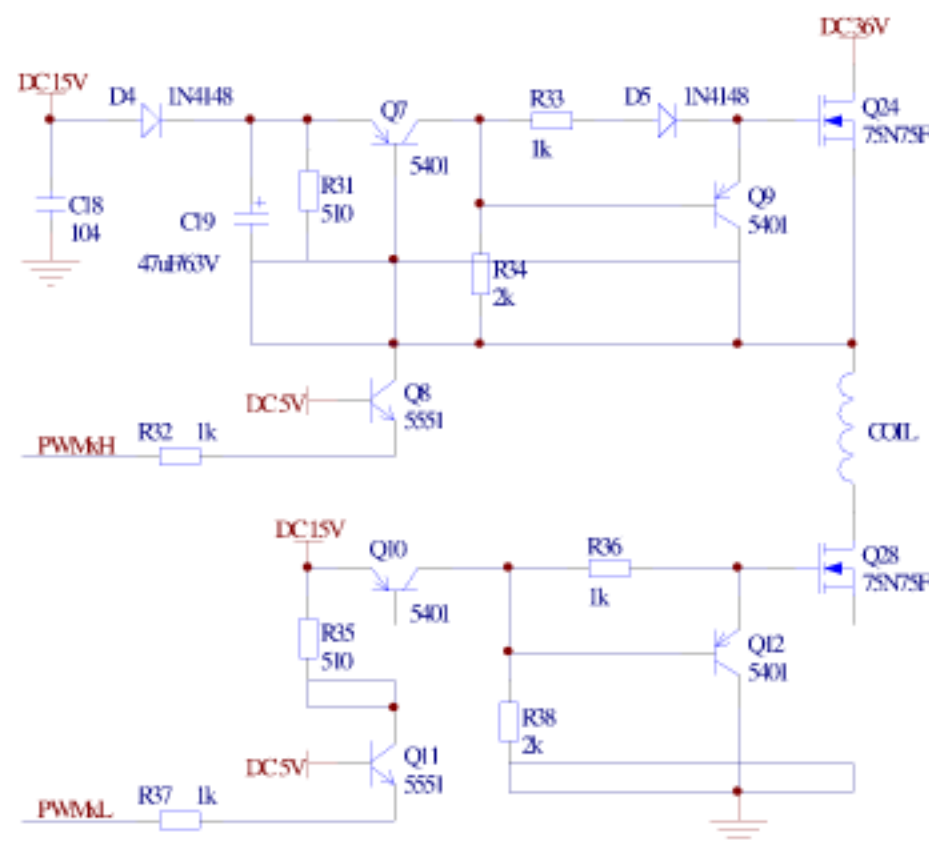


图 12

在图 12 中，COIL 为电机的一个绕组，MOSFET 的驱动分上臂驱动电路和下臂驱动电路。上臂驱动电路相对下臂驱动电路来说比较复杂，其原因是当上下臂全部导通时，DC36V 电压会降落在 COIL 线圈上，所以在上臂中加入了 D4、D5 隔离二极管，及 C19 维持电容。驱动电路完成两个作用：

- 完成准位转换，转换方法上下臂均由电子开关组成。在上臂中，该电子开关由 R31、Q7、Q8、R32 等组成；在下臂中该电子开关由 R35、Q10、Q11、R37 等组成。
- 该驱动电路包含一个放电回路，主要是因为 MOSFET 栅极间存在杂散电容，在 PWM 快速开关 MOSFET 时，若无此放电电路，MOSFET 可能存在无法关断的情况。上臂中放电电路由 Q9 和 R34 组成。下臂中放电电路由 Q12 和 R38 组成。

## 逐次逼近式 PWM 调速算法

目前 PWM 控制直流无刷电机进行调速的方法很多，例如：PI 调节等，此处给出一种逐渐逼近式调节方法，其方法如下：

- 步骤一：读取速度设定 A/D 值，根据此 A/D 值查表求出对应的 PWM 输出设定值，PWM 输出设定值与速度为一一对应关系。
- 步骤二：在 PWM 中断服务程序中，每间隔一定时间，将现在 PWM 输出值与 PWM 设定值进行比较。若目前 PWM 输出值小于 PWM 设定值，那么增加 PWM 输出值；若目前 PWM 输出值大于 PWM 设定值，那么减小 PWM 输出值；直到输出值等于设定值。这样进行速度调节时，速度就会平滑地增加或减小。

总之，A/D 设定值决定了速度的目标值，要达到此速度，不是立刻将其对应的 PWM 值送出，而是在 PWM 中断服务程序中，逐渐增加或减小 PWM 输出，使速度平滑地逼近设定值。

## OP 与 CP 在 BLDC 马达中的应用

### HT45FM03B CP 特征简介

HT45FM03B 为用户提供一个 CP 比较器，其输入输出脚分别与 PA1、PA2、PA3 共用，具体如图 13 所示。

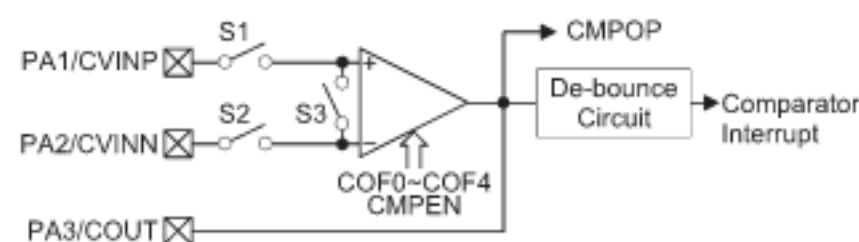


图 13

### CP 相关寄存器的设定

- CP 使能控制**  
 MISC 的 bit 3 (CMPEN)是 CP 使能控制位。为“0”时，禁止作为 CP 比较器使用；为“1”时，允许作为 CP 比较器使用。
- CP 输出选择控制**  
 MISC 的 bit 5 (COUTEN)是 CP 输出选择控制位。为“0”时，PA3/COU 为正常 I/O 口；为“1”时，PA3/COU 作为 CP 比较器输出。
- CP 迟滞使能控制**  
 CMPC 的 bit 7 (CHYSON)是 CP 迟滞使能控制位。为“0”时，关闭迟滞功能；为“1”时，打开迟滞功能。
- CP 输入偏置电压校验模式选择控制**  
 CMPC 的 bit 6 (COFM) 是 CP 输入偏置电压模式选择控制位。为“0”时，作为正常 CP 比较器模式；为“1”，作为输入电压偏置校验模式。
- CP 输入偏置电压校验参考选择控制**  
 CPMC 的 bit 5 (CRS)是 CP 输入偏置电压校验参考电压选择控制位。为“0”时，选择 CVINN 作为参考电压的输入；为“1”时，选择 CVINP 作为参考电压的输入。
- CP 输入偏置电压校验控制位的设定**  
 CMPC 的 bit 0~bit 4 (COF0~COF4)是 CP 输入偏置电压校验控制位。
- CP 中断迟滞时间的设定**  
 CP 中断迟滞时间的选择是在 DBTC 的 bit 0~bit 3 (CMPDB0~CMPDB3) 中选择，其时间对应如下表所示。

| CMPDB3: CMPDB2: CMPDB1: CMPDB0 | 迟滞时间           |
|--------------------------------|----------------|
| 0000                           | 0              |
| 0001                           | $4/f_{SYS}$    |
| 0010                           | $8/f_{SYS}$    |
| 0011                           | $16/f_{SYS}$   |
| 0100                           | $32/f_{SYS}$   |
| 0101                           | $64/f_{SYS}$   |
| 0110                           | $128/f_{SYS}$  |
| 0111                           | $256/f_{SYS}$  |
| 1000                           | $512/f_{SYS}$  |
| 1001~1111                      | $1024/f_{SYS}$ |

## CP 输入偏置电压校验步骤

- 步骤 1: 将 COFM 设定“1”，选择 CP 作为输入偏置电压校验模式(即将 S3 闭合)。
- 步骤 2: 将 CRS 设定“0”或“1”，选择 CVINN 或 CVINP 的输入电压为校验的参考电压。
- 步骤 3: 按顺序更改 COF0~COF4 的值，直至 COUT 的输出电压发生变化，记录此时的 COF0~COF4 的值。
- 步骤 4: 将 COFM 设定“0”，选择 CP 作为正常的比较器使用。

以上为 HT45FM03B CP 的使用简介，具体使用方法请参照规格书及 Holtek 网站上相关 CP 使用的应用范例。

## HT45FM03B OP 特征简介

HT45FM03B 为用户提供一个 OP 运放，其 OPVINP、OPVINN、OPOUT 分别与 PA0、PB3、PB2 共用。其相关寄存器设定如下。

- OP 使能控制  
OPAC 的 bit 7 (OPAEN) 是 OP 使能控制位。为“0”时，禁止作为 OP 运放使用；为“1”时，允许作为 OP 运放使用。
- OP 输入偏置电压校验模式选择控制元  
OPAC 的 bit 5 (AOFM)是 OP 输入偏置电压模式选择控制位。为“0”时，作为正常 OP 运放模式；为“1”时，作为输入电压偏置校验模式。
- OP 输入偏置电压校验参考选择控制  
OPAC 的 bit 4 (ARS)是 OP 输入偏置电压校验参考电压选择控制位。为“0”时，选择 OPVINN 作为参考电压的输入；为“1”时，选择 OPVINP 作为参考电压的输入。
- OP 输入偏置电压校验控制位的设定  
OPAC 的 bit 0~bit 3 (AOF0~AOF4)是 OP 输入偏置电压校验控制位。

以上为 HT45FM03B OP 的使用简介，具体使用方法请参照规格书及 Holtek 网站上相关 OP 使用的应用范例。

## OP 与 CP 在 BLDC 马达中的应用

OP 与 CP 在 BLDC 马达中，主要运用于电机过流保护原理中。HT45FM03B 内建一个比较器、一个运算放大器。比较器可对瞬间过电流进行保护，运放可用来监控电机运转电流。电流采样值可通过鍍铜电阻来完成。如图 14 所示。

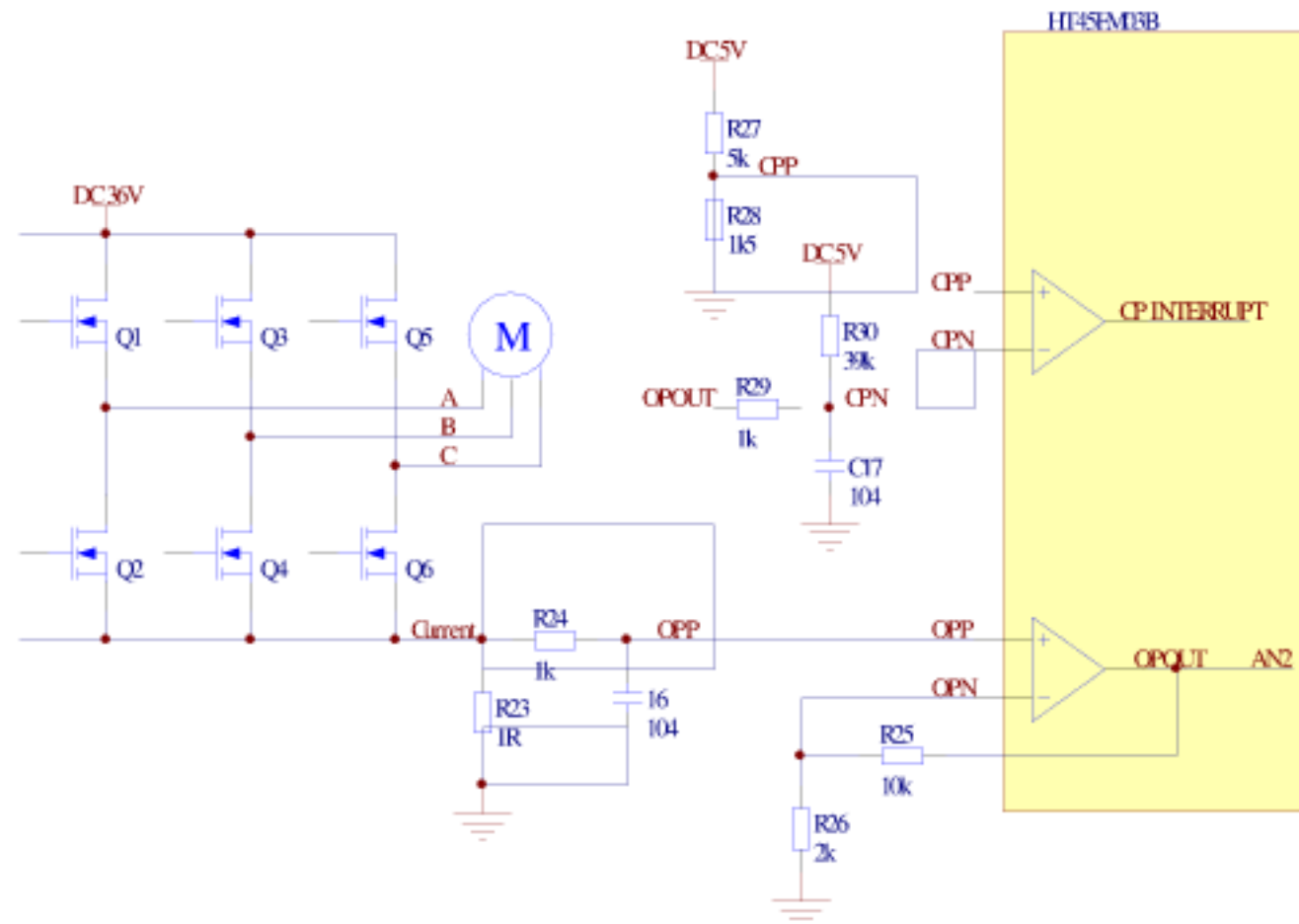


图 14

在图 14 中 R23 为鍍铜电阻，电阻值的大小与电机功率有关。利用 HT45FM03B 内建 OP 对电流进行放大，R24 和 C16 构成电流滤波网络连接到运放的同相端，R25 为反馈电阻。在 HT45FM03B 内部，运算放大器输出一路与 A/D 转换器 AN2 相连，可通过监测电流值，监测电机运转情况。

另一路经 R29 和 C17 构成电流滤波网络，连接到 HT45FM03B 内部比较器的反相端；R27 和 R28 为电流基准值设定网络，连接到比较器的同相端。在 HT45FM03B 内部，比较器的输出与中断系统相连，当电流值大于基准时，则比较器快速反转，产生中断，可在比较器中断服务程序中进行保护处理。

## 电路原理图

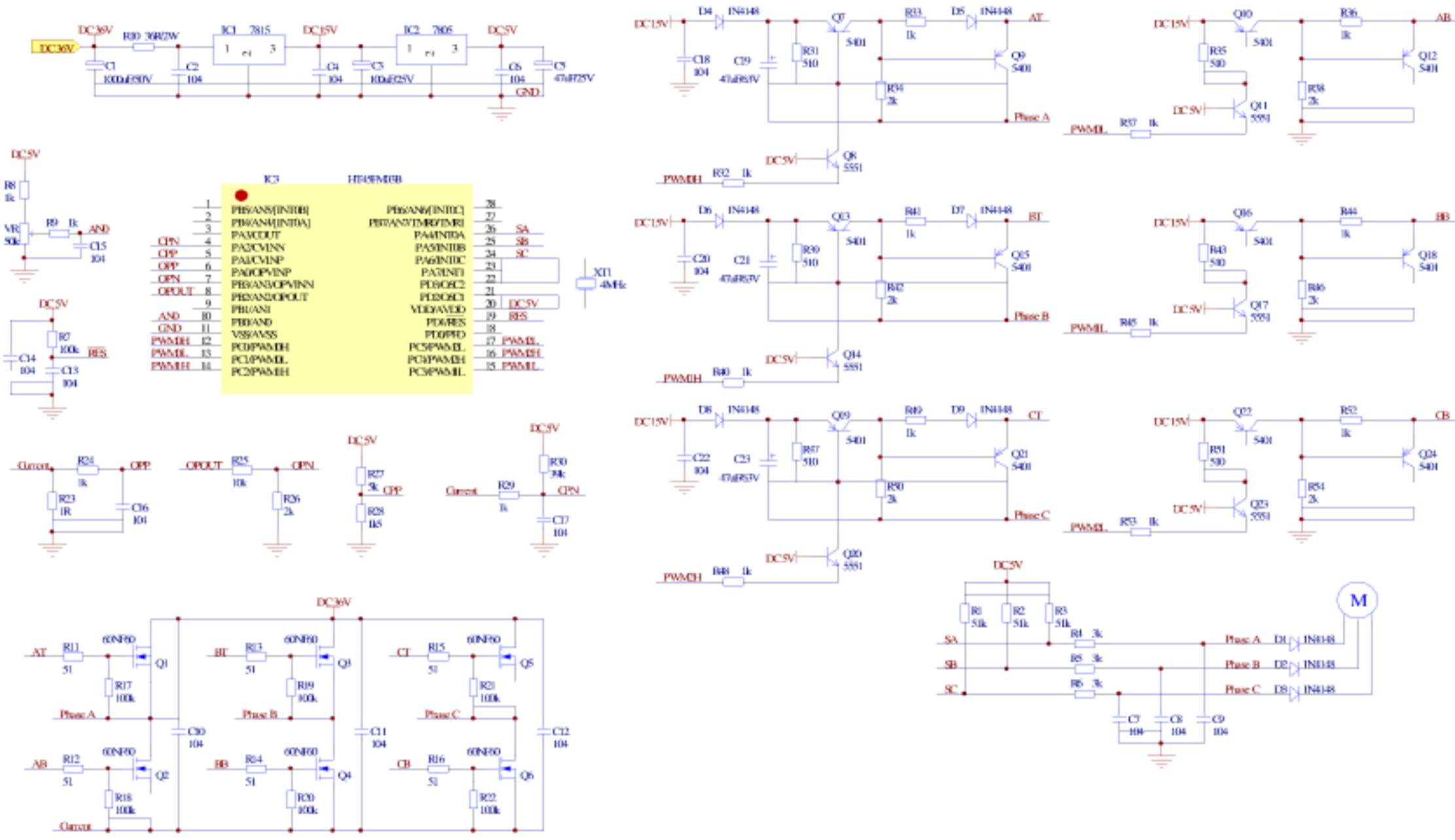
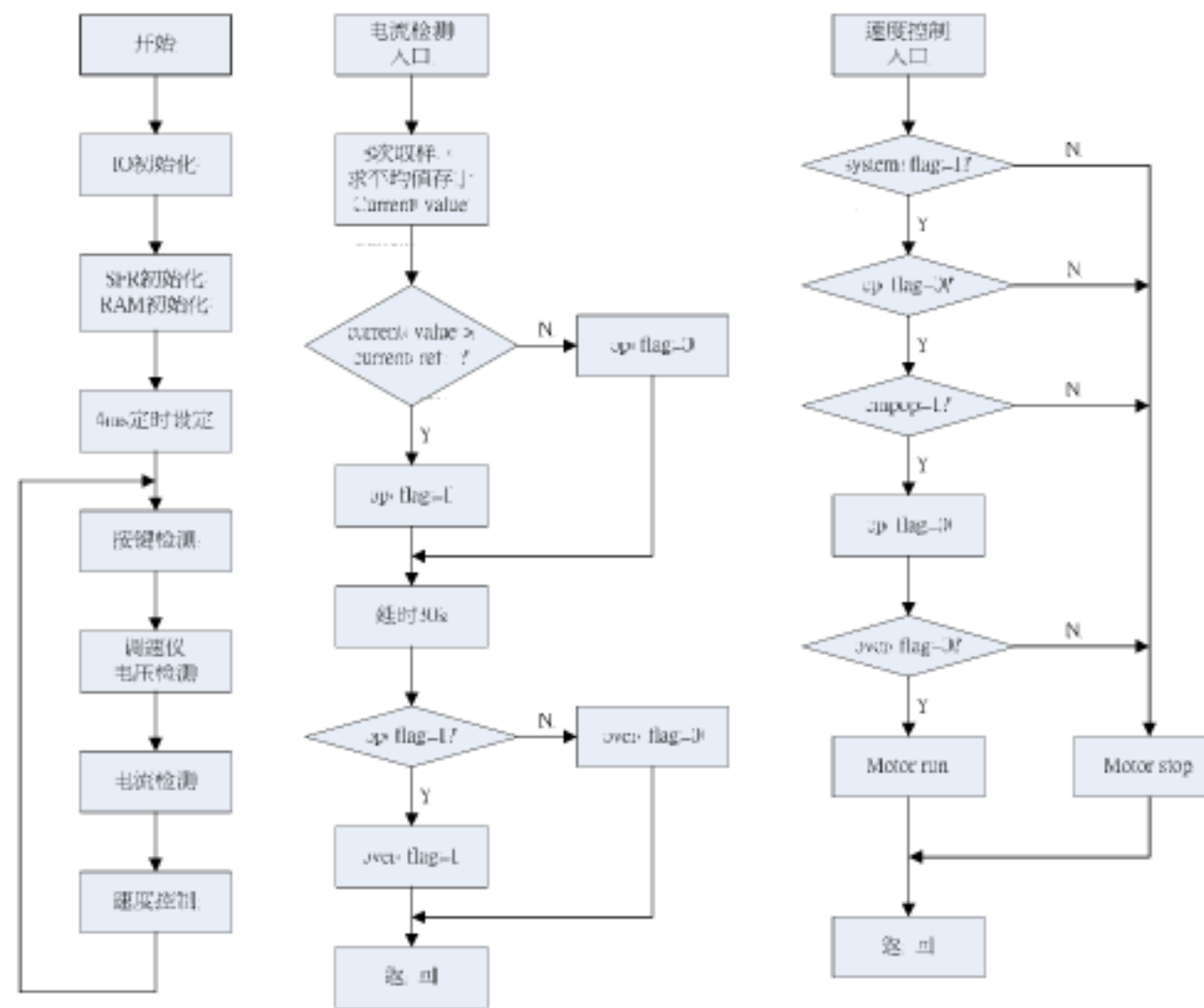


图 15

## 软件流程图



## 程序说明

主程序首先进行 I/O 口初始化、RAM 初始化、SFR 初始化以及 4ms 定时的设定；然后依次进行按钮检测、调速仪电压检测、电流检测和速度控制四个子程序的反复调用。

电流检测子程序主要完成电机的电流经转换及放大为电压后，对这个电压进行 A/D 取样。将所测得的电压值存于 current\_value 与基准值 current\_ref 进行比较。若 current\_value 大于 current\_ref，将 op\_flag 设定“1”，否则 op\_flag 设定“0”。延时 30s 后，若 current\_value 仍大于 current\_ref，即 op\_flag 为“1”，则将 over\_flag 设定“1”，否则 over\_flag 设定“0”。

速度控制子程序主要完成电机是否运行的控制。主要通过判断 system\_flag、cp\_flag、over\_flag 三个标志位是否满足电机运行的条件，来设定电机是运行还是停止。



## 程序范例

```
configuration option:
OSC:                    external XTAL
PWM mode:               (9+1) bits mode
Comparator interrupt source: Comparator output falling edge
PWM duty mode:         1 PWM duty mode
INT0A pin-shared option: Pin share with PA4
INT0B pin-shared option: Pin share with PA5
INT0C pin-shared option: Pin share with PA6
PDO/PFD:               PDO
PD1/RESB:               RESB
WDT:                   Enable
;other option select by user.
```

程序代码及说明: 见附件。

## 结论

本文重点介绍了 HT45FM03B 应用于直流无刷电机控制中各个功能元件的使用方法, 并给出了参考电路及软件程序。HT45FM03B 已在电动自行车、遥控玩具飞机中得到应用, 随着我们对 HT45FM03B 的介绍和推广, HT45FM03B 将在直流无刷电机控制领域得到广泛应用。