直流无刷电机

电动车控制器

设计白皮书

文档版本：V2

日期:2013-05-28

整理：程序匠人

（图片仅供参考）

目 录

一、 ☆概述.....6
1、 前言.....6
2、 原理概述.....6
3、 技术参数.....7
4、 常见功能.....7
二、 ☆电机驱动.....9
1、 原理简介.....9
2、 电机驱动电路.....9
3、 自举电路（高压浮栅型驱动电路）.....10
4、 为什么要减慢 MOS 管的开启速度.....11
三、 ☆电机分类.....12
1、 按电机输出传动方式区分.....12
2、 按电机转速区分.....13
四、 ☆电子换相.....14
1、 关于相角.....14
2、 相角检测电路.....14
3、 如何确保换相的及时性.....14
4、 如何确保换相的准确性.....15
5、 相位错乱保护.....16
6、 为什么 60°电机被淘汰.....16
7、 如何换相.....17
8、 电机线圈绕组的正/反区别及其对锁电机功能的影响.....18
五、 ☆相位兼容与学习.....19
1、 如何兼容 120° 与 60° 两种不同相位角的电机.....19
2、 人工对相.....19
3、 相位自学习功能.....21
4、 缺相补偿功能.....24
六、 ☆同步续流.....25
1、 同步续流的概念.....25
2、 同步续流原理分析.....25
3、 死区时间.....27
4、 同步续流的硬件实现.....27
5、 同步续流的芯片实现.....29
七、 *速度处理.....31
1、 模糊控制方式.....31
2、 无级调速.....31
3、 把手调速.....32
4、 限速功能选择.....32
八、 限流驱动.....33
1、 “双闭环控制”中的“电流环”.....33

2、 电流检测电路.....33
3、 峰值电流（相电流）和平均电流.....33
4、 如何采样峰值电流.....34
5、 数字滤波.....35
6、 限流控制规则.....35
7、 关于 PWM 调整精度（分辨率）.....36
九、 换相转矩脉动及补偿.....37
1、 启动时常见问题：振动、噪音、启动慢.....37
2、 解决方法——换相补偿.....37
3、 换相补偿功能的启动和退出时机.....37
4、 换相补偿注意事项.....38
十、 *信号采集.....39
1、 电机电流.....39
2、 把手电压.....39
3、 电源电压.....39
4、 车速检测与计算.....39
十一、 短路保护.....41
十二、 刹车、EABS 与反充电功能.....42
1、 普通刹车.....42
2、 电子刹车（EABS）.....42
3、 EABS 的反充电效果.....42
十三、 堵转保护.....43
1、 堵转保护说明.....43
2、 如何识别堵转.....43
十四、 欠压保护.....44
1、 欠压保护说明.....44
2、 如何识别欠压.....44
十五、 上电自检.....45
1、 把手异常保护.....45
2、 上电 MOS 管短路保护.....45
十六、 故障显示.....46
十七、 ☆巡航功能.....47
1、 如何区分手动/自动巡航.....47
2、 手动巡航.....47
3、 自动巡航.....47
十八、 1:1 助力功能.....48
十九、 电机锁功能.....49
二十、 电源电路.....50
二十一、 主流方案.....51
二十二、 附录.....52

图 片 目 录

图 1: 电动车控制系统原理框图.....6
图 2: 无刷电机驱动接法.....7
图 3: 控制器软件系统结构图.....7
图 4: 直流无刷电动机的控制原理简图.....9
图 5: 电机驱动电路.....10
图 6: 轮毂式电机.....12
图 7: 中置式电机.....12
图 8: 摩擦式电机.....12
图 9: 霍尔传感器安装位置示意图.....14
图 10: 相角检测电路.....15
图 11: 换相时序图.....17
图 12: 正绕/反绕时各自的输出时序对比图.....18
图 13: 电机相线输出序列.....21
图 14: 不同类型的电机相位替换示意图.....23
图 15: 上管导通时的电流通道.....25
图 16: 上管关闭时的电流通道.....26
图 17: 开启同步续流后电流通道.....26
图 18: 同步整流电路.....27
图 19: PWM 截波与死区控制电路.....28
图 20: 处理后波形示意图.....28
图 21: A 相驱动电路的实际电路.....29
图 22: 芯片内部带死区控制的 PWM 模块.....30
图 23: 转把信号检测电路.....32
图 24: 电流检测电路.....33
图 25: 电流采样时机.....34
图 26: 换相波形.....37
图 27: 短路检测电路.....41
图 28: 刹车检测电路.....42
图 29: 电池电压检测电路.....44
图 30: 电源电路.....50

表 格 目 录

表 1: MOS 管控制真值表.....10
表 2: 位置传感器信号.....14
表 3: 换相表.....17
表 4: 反绕电机的换相表.....18
表 5: 兼容 60°/120°的换相表.....19
表 6: 120° 霍尔线 6 种接法.....20
表 7: 60° 霍尔线 6 种接法.....20
表 8: 电机相线固定输出序列.....21
表 9: 8 种正确的输入序列.....22
表 10: 输入与输出的 6 种对应关系.....23
表 11: E2PROM 中数据保存保存格式.....24
表 12: 速度传递优先级表.....31
表 13: 无刷电机 PWM 占空调节规律(模糊控制方式).....31
表 14: 无刷电机 PWM 占空调节规律(模糊控制方式).....36
表 15: 主流厂家方案一览表.....51
表 16: 常见芯片方案一览表.....51

一、☆概述

1、前言

电动车控制器是用来控制电动车电机的启动、运行、进退、速度、停止以及电动车的其它电子器件的核心控制器件，它就象是电动车的大脑，是电动车上重要的部件。电动车就目前来看主要包括电动自行车、电动二轮摩托车、电动三轮车、电动三轮摩托车、电动四轮车、电瓶车等。电动车控制器也因为不同的车型而有不同的性能和特点。

早期的控制器方案是采用摩托罗拉的无刷马达驱动芯片 MC33035 加上适当的外围电路来实现。但后来随着竞争加剧，很多厂商都增加了不少附加功能。一些附加功能用硬件来实现就比较困难，所以使用单片机来做控制的控制器迅速取代了硬件电路芯片。

在这篇文章中，我们将全面地论述电动车控制器设计的各个细节。

2、原理概述

电动自行车是具有电力驱动、脚踏驱动、电力和脚踏并用等功效的绿色环保交通工具。电动自行车的原理和结构都不复杂，可以认为是在自行车的基础上加一套电机驱动机构组成。蓄电池经过一个控制器给一个电机送电，电机放在后车轮中，电机的旋转带动自行车的行进。电动自行车的控制器连接一个调速把手（又称为把手），在脚踏中轴上装有助力传感器，转动调速把手可以让控制器检测到不同的电压值，控制器根据电压值大小，模拟调节输送给电机电压的高低，从而控制了电机的转速。（见图 1：电动车控制系统原理框图）。

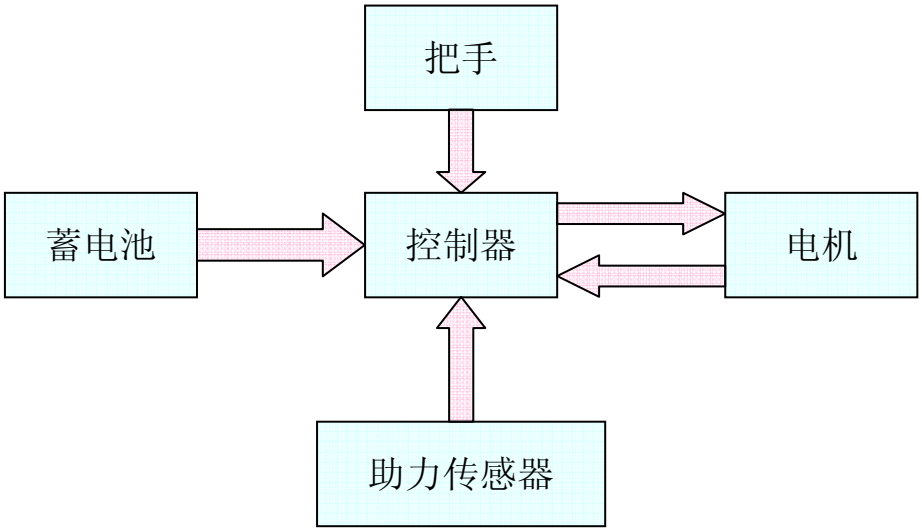


图 1：电动车控制系统原理框图

控制器无刷电机控制的方法是根据电机的位置反馈信号，控制电机三相驱动上下臂 MOS 管的导通和截止，从而实现电子换相。如（图 2：无刷电机驱动接法）所示，电机为三角形连接，三相驱动上下臂各 MOS 管导通顺序组合为：V1-V2，V2-V3, V3-V4，V4-V5，V5-V6，V6-V1。

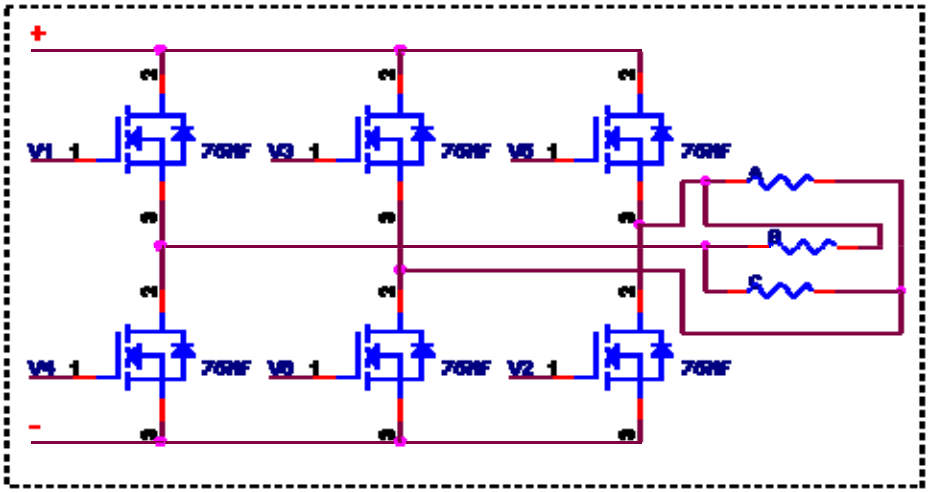


图 2：无刷电机驱动接法

MCU 主要任务是进行把手调速电压检测，电池电压检测，电流检测，过流中断检测，3 路霍尔位置信号检测，刹车信号检测，1：1 助力检测，巡航按钮检测，故障显示输出，PWM 控制电机转速输出，6 路电机驱动输出。基本的系统方框图见（图 3：控制器软件系统结构图）。

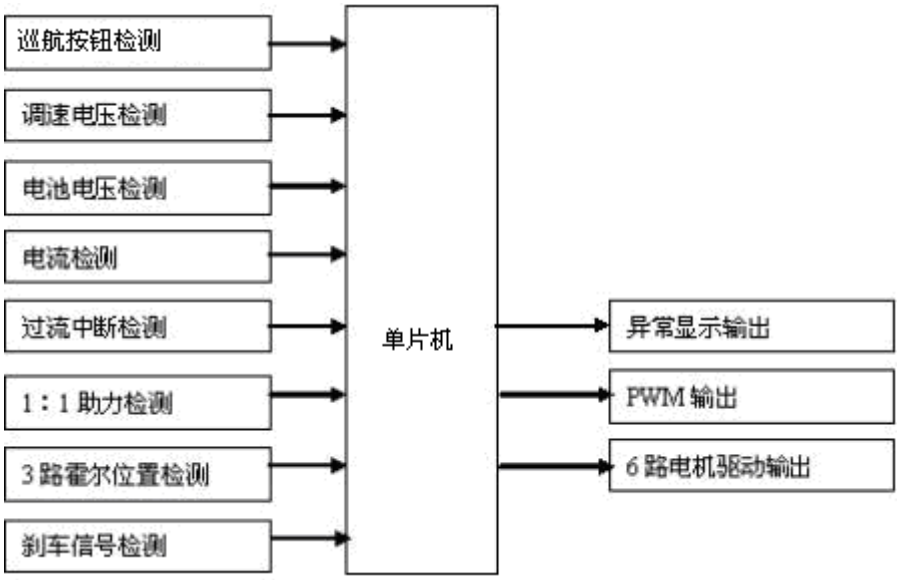


图 3：控制器软件系统结构图

3、技术参数

（1）电源电压：48V

（2）电机功率：350W

（3）电池欠压保护：41.5V±0.5V

（4）调速电压：1.1V～4.2V

4、常见功能

（1）把手调速：根据把手电压进行电机的无级调速。

（2）限速选择：可以通过跳线选择限速功能（＜20Km/H）。

（3）手动巡航功能：手动巡航按钮触发后，电动车进入巡航状态，保持在当前速度行驶；再次触发巡航按钮、刹车、把手旋转或发生故障后撤销巡航。

（4）自动巡航功能：把手固定在一个速度上并维持 8 秒不变，电动车进入巡航状态；刹车、把手旋转或发生故障后撤销巡航。

（5）故障显示：LED 指示。（无短路、堵转、上电把手异常等故障时，指示灯灭；发生上述故障时，指示灯亮）

（6）相位兼容：可自动识别 60°和 120°电角度的无刷电机。

（7）限流保护：流过电池端的电流最大值维持在 17A±1A。

（8）短路保护：当主控芯片检测到电路发生短路故障时，将立即关闭电机输出，以对电机和功率管进行保护；重新上电后撤销保护。

（9）刹车保护：48V 电平刹车，将关闭电机输出；刹车释放后撤销保护。

（10）堵转保护：电动自行车超载，爬坡，或者前行阻力过大时，若导致电机出现停止转动的状况。则控制器在几秒后关闭电机输出；调速把手复位后撤销保护。

（11）欠压保护：当电源电压连续 3S 低于 41.5V±0.5V 时，停止电机输出；电压正常后撤销保护。

（12）相位错乱保护：当传感器输入相位连续错乱时，关闭电机输出；把手复位后撤销保护。

（13）上电把手异常保护：上电时，如果把手位置未处于关闭位置，则关闭电机输出，以防止飞车状况的出现；调速把手复位后撤销保护。

（14）1:1 助力：电动车会根据 1：1 助力传感器反馈的信号提供 1:1 助力。

（15）防飞车保护：把手失灵时，控制器将立即关闭电机输出。

（16）电机锁：当报警器给控制器的电机锁信号端提供低电平锁车信号后，控制器将自行切换到电机锁定状态，致使车辆无法被推动行走，报警锁电机信号撤消后，恢复正常。

（17）48V 电门锁：根据报警器提供的 48V 信号的有无，决定电动车是否能启动。

（18）倒车：可通过开关的控制，实现正常行使和倒车的切换。

（19）普通刹车：在刹车启动时，通过关闭电机电源，提供辅助刹车功能。

（20）电子刹车：在刹车启动时，通过控制电机的阻力，提供辅助刹车功能。

（21）三速：将转速分为 3 档（1 档为最高转速的 65%，2 档为最高转速的 78%，3 档为最高转速的 100%），通过单按键的方式切换，把手归零，当前档位不变。

（22）内置报警：不用外接报警器，将报警器集成在控制器内部，当电门锁关闭 8 秒后，电动车有推动时会发出报警音同时锁死电机。

二、☆电机驱动

1、原理简介

电动机的定子绕组多做成三相对称星形接法，同三相异步电动机十分相似。电动机的转子上粘有已充磁的永磁体，为了检测电动机转子的极性，在电动机内装有位置传感器。驱动器由功率电子器件和集成电路等构成，其功能主要是：接受电动机的启动、停止、制动信号，以控制电动机的启动、停止和制动；接受位置传感器信号和正反转信号，用来控制逆变桥各功率管的通断，产生连续转矩；接受速度指令和速度反馈信号，用来控制和调整转速；提供保护和显示等等。见（图 4：直流无刷电动机的控制原理简图）。

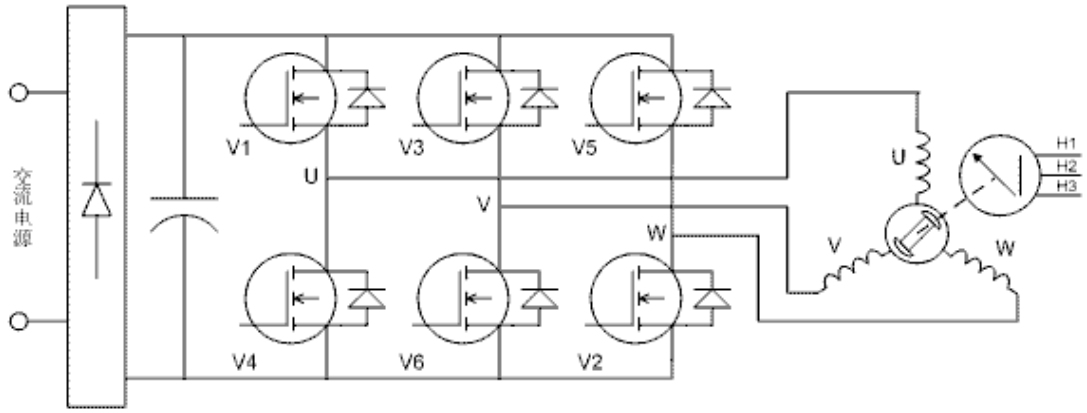


图 4：直流无刷电动机的控制原理简图

电机转动时，永磁体 N-S 交替交换，使位置传感器产生相位差 120° 的 H3、H2、H1 方波，从而产生有效的六状态编码信号： 101、100、110、010、011、001。通过 MCU 进行识别，并输出对应的控制信号令各功率管即按固定组合成六种状态的依次导通。也就是说，一共有 6 个节拍状态，周而复始。

每种状态下，仅有两相绕组通电，依次改变一种状态，定子绕组产生的磁场轴线在空间转动 60° 电角度，转子跟随定子磁场转动相当于 60° 电角度空间位置，转子在新位置上，使位置传感器 U、V、W 按约定产生一组新编码，新的编码又改变了功率管的导通组合，使定子绕组产生的磁场轴再前进 60° 电角度，如此循环，直流无刷电动机将产生连续转矩，拖动负载作连续旋转。

2、电机驱动电路

电机驱动电路包括 3 个基本相同的部分，分别用于驱动 U、V、W 三个相位。我们给出其中一个相位的驱动电路，见（图 5：电机驱动电路）。这是一个具有三态输出控制的驱动电路。我们对该电路进行简要的分析：

当 WH_OUT=1 时，Q12、Q15、D8 分别导通，V5 也随之导通；反之，如果 WH_OUT=0 时，Q12、Q15 截止，而 Q21 导通，V5 关闭。

当 WL_OUT=0 时，Q9，Q6 分别导通，V6 也随之导通；反之，如果 WL_OUT=1 时，Q9，Q6 截止，而 Q18 导通，V6 关闭。

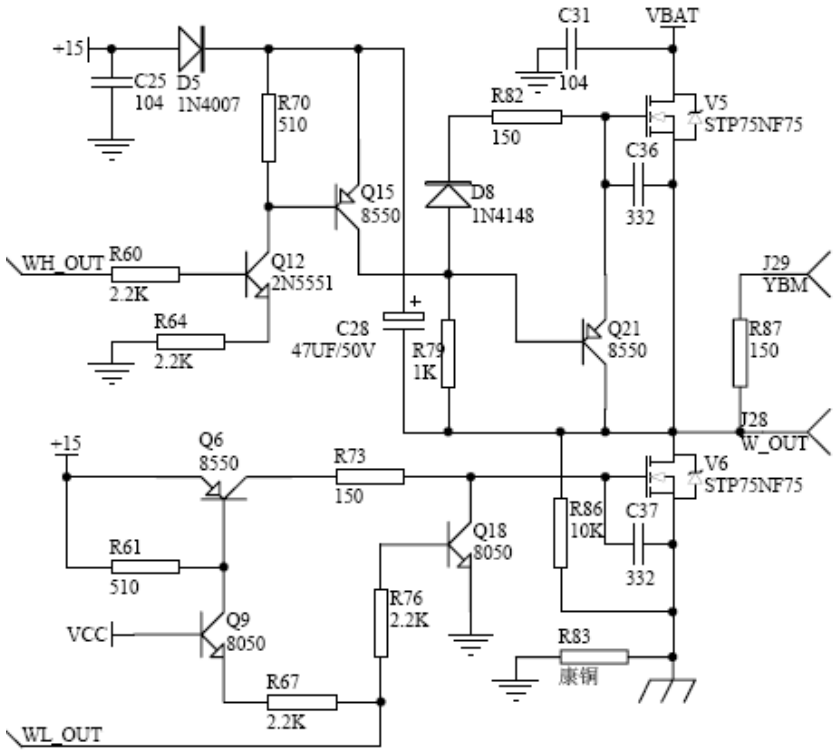


图 5：电机驱动电路

根据前面的分析，我们可以得到控制真值表，见（表 1：MOS 管控制真值表）。也就是说，只要合理地控制 WH_OUT 和 WL_OUT 上的电平状态，就可以让上下桥臂 MOS 管输出我们需要的控制信号。

WH_OUT	WL_OUT	V5	V6	输出
0	0	截止	导通	低
0	1	截止	截止	高阻态
1	0	导通	导通	错误！在这种状态下，上下桥臂 MOS 管同时导通，会导致短路烧毁！
1	1	导通	截止	高

表 1：MOS 管控制真值表

R83 是一个康铜丝电阻，用于采样工作电流。

3、自举电路（高压浮栅型驱动电路）

在（图 5：电机驱动电路）中 C28（47uF/50V）为自举电容。该图中的上桥驱动电路叫“自举电路”，正式点的说法是“高压浮栅型驱动电路”。

很多人可能会问：为何上桥的驱动电路如此复杂？

很显然，这么复杂的电路一定有其用途。如果要简单一点的话，上桥的功率开关直接用 P 沟道的 MOSFET 来做就可以，这样驱动电路会简单很多。但 P 沟道的功率 MOSFET 又贵又难买，为了节省成本，只能用 N 沟道的代替。但 N 沟道的 MOSFET 导通时其栅极 G 的

电压必须比源极 S 高出 10V 以上才能保证完全导通。这样在上桥导通时，假设电源电压为48V，那么上桥栅极的电压就必须比电源电压高 12V,也就是大于 60V 才行。但怎样获得比电源电压还高的驱动电压呢？一般情况可以通过变压器耦合驱动信号，电荷泵升压提供高压等方法。而在这里，则采用了一种叫做“高压浮栅型驱动电路”来驱动上桥。

顾名思义，浮栅驱动的栅极是浮动的，这是一个很形象的描述，我们根据线路图来分析一下栅极是怎样“浮动”起来的。

我们先看一下 C28 的接法，这是整个驱动的关键所在。C28 正极通过二极管 D5 接到 15V 电源（实际在 13V 左右），负极很奇怪地接到电机的相位线，与它所驱动的 MOSFET V5 的源极接在一起。在电机不动的情况下，所有的 MOSFET 关闭，此时 C28 通过二极管 D5、电阻 R86 充电至 13V。

当 V5 导通使电源电压加至负载，也就是 V5 的源极电压会升高至 48V，而此时由于 C28 充满电，C28 上的电压仍然是 13V，所以可以维持 Q15 的导通并使 V5 栅极的电压始终保持高于源极，这样 V5 的栅极就好像随着源极电压浮动而浮动，所以叫做“浮栅驱动”。

如果 C28 足够大，那么可以在相当长的一段时间内保证 V5 的驱动电压在合理的范围内。

当 V5 被关闭，而此时由于另两组中的一组之下桥维持在导通状态，电容 C28 就会通过电机绕组和该下桥迅速充电补充电能，为下一个周期做准备。

从上面的过程可以看出，电容 C5 的充电量应该是越大越好。但电容大了，可能二极管来不及给电容充电；电容小了，又不能保证导通时间，所以这种驱动不能使 V5 长时间维持在导通状态。这也是为什么 PWM 信号要耦合到上桥的一个原因。

4、为什么要减慢 MOS 管的开启速度

其次对于这个驱动电路有人还会产生一个疑问：按理说用作功率开关的 MOSFET，为了减少开关损耗，应尽量避免 MOSFET 工作在放大状态。按照这个原则，驱动 MOSFET 的电平应该是快速上升、快速下降，而且这个速度是越快越好。但此电路中增加了电阻 R82、R73，电容 C32、C37，这四个元件在这里的作用显然有悖于快升快降的原则。

实际上这四个零件在电路中的作用也确实是有意减慢 MOSFET 的开启速度，使驱动 MOSFET 的电压波形上升沿没那么陡峭。

为什么要这样做呢？

这个要从 MOSFET 的结构来看，MOSFET 本身各极之间存在极间电容，这个电容被称为密勒电容。而我们现在这种上下桥类似推挽结构的电路，上桥导通时，由于下桥漏极的电压急剧升高，这种电压变化会通过下桥的密勒电容传递给下桥的栅极，我们把上桥导通时下桥漏极电压升高的速度以 $\Delta v/\Delta t$ 表示，当 $\Delta v/\Delta t$ 足够大时，传递给下桥栅极的电荷便会积蓄到足以使下桥导通的地步，这样就会导致上下桥直接将电源短路。而解决这个问题最简单的办法，就是让上下桥开通的速度不要那么快，所以加上阻容延时。

并且这里的电阻电容还有吸收部分冲击电压的功效,这里就不多做描述了。

三、☆电机分类

电机是将电池电能转换机械能，驱动电动车轮旋转的部件。在电动车上使用的电机，其机械结构、转速范围与通电形式上有许多种。常见的有：有刷有齿轮毂电机、有刷无齿轮毂电机、无刷无齿轮毂电机、无刷有齿轮毂电机、高磁盘电机、侧挂电机等。

1、按电机输出传动方式区分

（1）轮毂式

图 6：轮毂式电机

轮毂式电机一般是直接安装在后轮中轴，也就是所谓的后轮驱动（也有个别是前轮驱动）。电机采用外转子形式（跟吊扇电机一样），为低速电机，直径较大，省去了传动装置，电机直接驱动后轮。

轮毂式结构简单，外形好，但电机轴受力大，对电机要求高。一般电动自行车都是使用此种电机。

（2）中置式

图 7：中置式电机

中置式电机是安装在电动自行车的中间位置（也就是自行车脚踏）处，通过传动装置（如链条+飞轮）传动给后轮。通常采用高速电机，直径较小，转子为内轴（与常见的电机形式一样）。

中置式结构较复杂，但电机轴受力小，对电机损害小。中置式电机的市场份额很小。

（3）摩擦式

图 8：摩擦式电机

摩擦式电机是通过带动车轮外胎来驱动的。结构较简单但对车轮外胎损坏较大，而且雨天打滑。

电动自行车很少选此种电机。一般用于自行车的改装。

2、按电机转速区分

（1）低速大力距电机直接驱动式

由于省去减速箱，故噪音小，结构简单，可靠性高。但和后者相比，重量要重。

（2）高速电机减速式

轮式宜采用低速直接驱动，而中置式一般为高速电机减速式。

四、☆电子换相

1、关于相角

无刷电机的相角是无刷电机的相位代数角的简称，指无刷电机各线圈在一个通电周期里面线圈内部电流方向改变的角度。在业内，“相角”又被大家习惯性称为“相位角”或“相位”。相角是通过安装在电机内部的三个位置传感器（霍尔开关）来检测的。由于位置传感器安装位置的不同，电动车用无刷电机常见的相位角有 120° 与 60° 两种（参见图 9：霍尔传感器安装位置示意图）。这两种不同相角，对应的信号序列有所不同，见（表 2：位置传感器信号）。

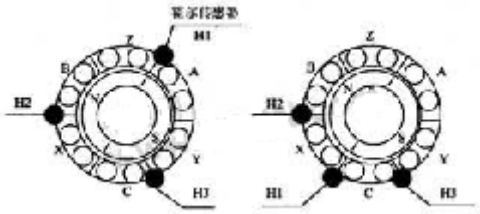


图 9：霍尔传感器安装位置示意图

	120°电机霍尔信号			60°电机霍尔信号		
节拍	U（A）	V（B）	W（C）	U（A）	V（B）	W（C）
1	1	0	0	1	0	0
2	1	1	0	1	1	0
3	0	1	0	1	1	1
4	0	1	1	0	1	1
5	0	0	1	0	0	1
6	1	0	1	0	0	0

表 2：位置传感器信号

针对 120° 与 60° 两种不同的相位角，可以通过跳线来选择。也可以通过软件自动识别。

2、相角检测电路

相角信号检测电路见（图 10：相角检测电路）。

3、如何确保换相的及时性

控制器对信号的检测必须及时。如果不及时，将会出现电机失步、效率下降、换相错误、噪声变大等问题，严重的还会导致 MOS 管、电机烧毁。

如何及时换相？关键是要及时检测到相角信号的变化。有两种方法：

（1）方法一：定时查询

一般是通过高频率的定时中断（时间间隔控制在 120us 以下），来定期查询霍尔信号的变化。这种方法，一般需要占用一个定时器中断（也可以考虑使用 PWM 中断（64us））。

解释一下为什么定时中断必须控制在 120us 以下。市面上普通的无刷电机在最高转速时(考虑到顺风和下坡的情况)每 1.2ms 左右换相一次。根据实际的使用效果，软件必须在 120us 以内检测到换相信号并且输出换相驱动信号。但是，这种方法只能用在普通电机上，对于高

速电机来说，是很难满足其快速的变相速度要求的。

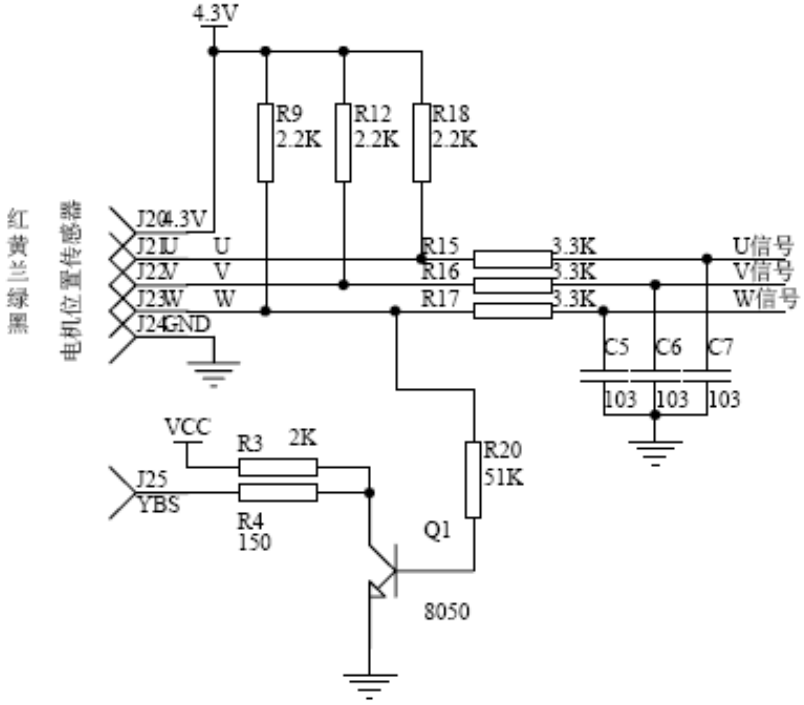


图 10：相角检测电路

早期的 PIC 的方案中，也曾经有人用在主程序中查询的方法来做。

使用定时查询方法，需要频繁的检测。对单片机来说，会浪费较多的时间资源，产生很大的负担，因此不建议使用定时查询法。

市面上很多厂家仍旧沿袭了老的传统的定时查询的方式，比如，无锡协昌，就是采用 PWM 中断（64us）来做定时查询。

（2）方法二：电平变化翻转中断

当霍尔产生电平变化时产生中断来实现。这种方法，一般都可以利用芯片的 3 个外部中断口或电平翻转中断口来实现。

需要注意的是，如果使用外部中断口来检测，必须设置为边沿（含上升沿和下降沿）触发模式。

使用电平变化翻转中断来检测，最好是芯片的外部中断口具备了硬件消抖滤波功能。这样可以避免因为干扰误触发频繁进入中断。

4、如何确保换相的准确性

如何准确换相？首先要确保读入的相角是正确的，滤除干扰信号、检测出错相故障。

（1）鉴相处理（微妙级的消抖滤波）

在大电流运行时，霍尔信号容易被干扰，导致频繁进入中断，如果不加处理，换相就会错误。这就需要 “鉴相”。

鉴相的方法是：当进入中断程序后，在读取霍尔信号时，连续检测到 N 次（N=3~6）相

同的信号才认为该信号是有效信号。鉴相的本质其实就是微妙级的消抖滤波。

N 代表了消抖滤波的时间常数，该值的选择要视指令速度而定。目前 350W 电机在 48V 电压下不带负载工作的情况下全速运行的换相处时为 2us 左右。因此只要让“连续 N 次读取信号的执行时间”约等于 2us 即可。

有些芯片可以对外部中断口信号进行硬件滤波，以避免因干扰信号而导致的频繁的中断误触发。如果其滤波时间常数合适的话，也可以考虑选用。

（2）错相检测

取得换相信号后，我们将其与上次读到的值做对比，如果相同，则表示没有换相，如果不同，则还需要进一步判断是否有错相。

错相一般是因为电机中霍尔元件损坏、线路出现故障、或者是接错线之类原因引起的。

错相判断规则有两种。

先说第一种规则。我们知道一个 3 位的二进制数，可以表示 8 种状态（000，001，010，011，100，101，110，111）。而位置传感器的实际有效信号只有 6 个，对于 120° 电机来说，000B 和 111B 是非法信号；对于 60° 电机来说也用两个非法信号。（见表 2：位置传感器信号）。这种非法信号，即为错相。

另一种规则是这样的。电机的相角变化是有规律的，举个例子，假设当前相位信号为 101B，那么正转一拍后，应该为 100B；如果出现其它信号都可以视为错误。

很显然，第二种判断规则比第一种更“苛刻”。在行业内，有些人只判断第一种规则，而不判断第二种规则。这样做的目的是为了避免“误判”。

检测到错相之后，要执行相应的故障保护动作，一般是关闭电机，等待把手复位后再启动。

5、相位错乱保护

当传感器输入相位连续错乱时，关闭输出；调速把手复位后撤销保护。

6、为什么 60° 电机被淘汰

市面上有两种电机，即所谓的 120°和 60°霍尔信号，这个角度代表三个霍尔器件输出的三相电信号其相位角相差的角度，其实这里面的区别仅仅是电平的不一样。在马达内部的安装上，位置没什么不同，只是中间一相的传感器安装面相反，所以仍然是六种信号对应六种驱动，软件上将相位表稍作调整即可。

需要提一下的是，在 120°的霍尔信号中，不可能出现二进制 000B 和 111B 的编码，所以在一定程度上避免了因霍尔零件故障而导致的误操作。因为霍尔元件是开路输出，高电平依靠电路上的上拉电阻提供，一旦霍尔零件断电，霍尔信号输出就是 111B。一旦霍尔零件短路，霍尔信号输出就是 000B。

而 60°的霍尔信号在正常工作时这两种信号均会出现，所以一定程度上影响了软件判断故障的准确率。

目前市面电机已经逐渐舍弃 60°相位的霍尔排列。

7、如何换相

控制器根据电机位置传感器反馈的相角信号，判断出转子永磁体位置，并作出相应得换相动作，控制电机三相驱动上下臂 MOS 管的导通和截止，从而实现电子换相。这个过程可以使用逐项比较法，查表法等来实现。鉴于查表法比较快捷，一般使用查表法。（见表 3: 换相表 和图 11: 换相时序图）

节拍	120° 电机霍尔信号			60° 电机霍尔信号			输出信号	
	U（A）	V（B）	W（C）	U（A）	V（B）	W（C）	开通上管	开通下管
1	1	0	0	1	0	0	U（A）	W（C）
2	1	1	0	1	1	0	V（B）	W（C）
3	0	1	0	1	1	1	V（B）	U（A）
4	0	1	1	0	1	1	W（C）	U（A）
5	0	0	1	0	0	1	W（C）	V（B）
6	1	0	1	0	0	0	U（A）	V（B）

表 3: 换相表

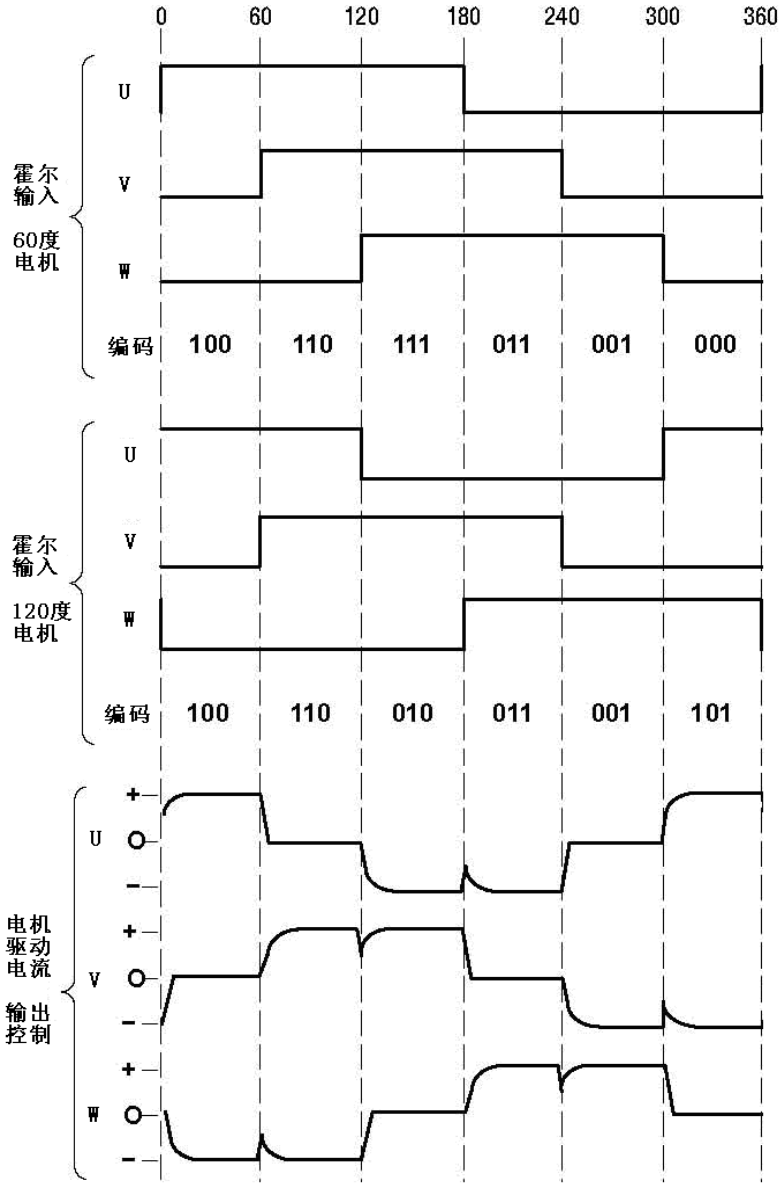


图 11: 换相时序图

8、电机线圈绕组的正/反区别及其对锁电机功能的影响

在业内，绕组的“正绕反绕”，又被称为“左出线/又出线”

前面介绍的基本上都是假设电机绕组为正。当电机绕组为反方向时，换相表也要做相应的调整。（见表 4：反绕电机的换相表）。仔细观察正绕和反绕时各自的输出时序，是完全反向的，或者也可以说两者的相位角相差了 180°（参见图 12：正绕/反绕时各自的输出时序对比图）。

节拍	120° 电机霍尔信号			60° 电机霍尔信号			输出信号	
	U（A）	V（B）	W（C）	U（A）	V（B）	W（C）	开通上管	开通下管
1	1	0	0	1	0	0	W（C）	U（A）
2	1	1	0	1	1	0	W（C）	V（B）
3	0	1	0	1	1	1	U（A）	V（B）
4	0	1	1	0	1	1	U（A）	W（C）
5	0	0	1	0	0	1	V（B）	W（C）
6	1	0	1	0	0	0	V（B）	U（A）

表 4：反绕电机的换相表

由于存在着绕组的正反之别，所以在实现锁电机功能时要特别注意。因为我们在实现该功能时要先判断电机的人为推动转向，然后反向施加阻力，阻止盗贼推走电动车。如果程序中错误认定了绕组的正反，识别出来的电机人为推动转向正好相反，即输出的阻力也正好相反，有可能阻力就变成了推力。届时不但锁不住电机，反而会产生助推的效应。

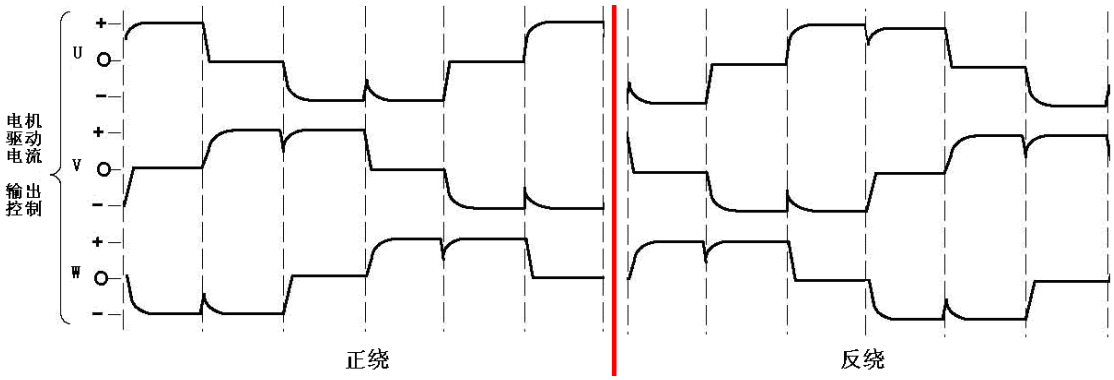


图 12：正绕/反绕时各自的输出时序对比图

解决方法：在程序中，设立一个代表绕组方向的标志。

对于人工对相操作方式来说，“绕组方向标志”可以事先在程序初始化中固化（或用条件编译），也可以用跳线形式选择。

对于相位自学习操作方式来说，“绕组方向标志”可以通过判断输入相位序列的正/反来进行学习，也可以通过人工旋转一下把手（或者捏一下刹车）来取反。学习到的“绕组方向标志”可以放入 E2PROM 中。

五、☆相位兼容与学习

1、如何兼容 120°与 60°两种不同相位角的电机

针对 120°与 60°两种不同的相位角，可以通过跳线来选择。也可以通过软件自动识别。从而实现兼容。

我们仔细观察（表 3：换相表）会发现以下一些规律：

（1）在 6 个节拍中，节拍 1、2、4、5 中 120°和 60°电机霍尔信号是完全一样的；

（2）在节拍 3、6 中 120°和 60°电机霍尔信号是不一样的；

（3）在 120°中的节拍 3、6 霍尔信号为 010B、101B，这两个二进制数在旁边的 60°电机霍尔信号列表中并没有出现；

（4）反之，在 60°中的节拍 3、6 霍尔信号为 111B、000B，这两个二进制数在旁边的 120°电机霍尔信号列表中也没有出现；

（5）不管哪个节拍，他们的输出上管和下管都是一样的。

因此，我们可以把两种电机的换相表合并成这样（见表 5：兼容 60°/120°的换相表）：

节拍	说明	电机霍尔信号			输出信号	
		U（A）	V（B）	W（C）	开通上管	开通下管
1	60°/120°	1	0	0	U（A）	W（C）
2	60°/120°	1	1	0	V（B）	W（C）
3	120°	0	1	0	V（B）	U（A）
	60°	1	1	1		
4	60°/120°	0	1	1	W（C）	U（A）
5	60°/120°	0	0	1	W（C）	V（B）
6	120°	1	0	1	U（A）	V（B）
	60°	0	0	0		

表 5：兼容 60°/120°的换相表

在程序中把霍尔信号作为查表的输入，则上表中 6 个节拍中的 8 种二进制组合状态正好涵盖了全部的二进制排列可能性，既没有冲突重叠的，也没有遗漏的。按照这张表格查表求输出，就可以实现对 120°与 60°的兼容。

2、人工对相

在不知道电机的相线及霍尔线与控制器端相应线的对应关系时，我们一般都是把所有的接线组合逐个测试，直到找出正确的接线方法。这也就是所谓的“人工对相”。

电机的 3 根霍尔信号线，如果随机接，那么一共有 6 种接法；同样，3 根电机相线也有 6 种接法；二者合在一起，排列组合之后一共有 36 种接法。对于不带相位自学习功能的控制器来说，这 36 种接法中，有多少种接法是正确的呢？

我们分别针对 120°与 60°两种电机，根据其输入霍尔线的 6 种接法来分析之。

（1）120°电机

首先看 120°电机，由于其传感器信号的相位差为 120°，3 个信号正好在 360°中实现

等分，所以无论霍尔线怎么接，其输入序列（如果不考虑转向）只有一种（定义为类型 0）（参见表 6：120° 霍尔线 6 种接法）。即：

类型 0：4、6、2、3、1、5。

其中，接法 1、接法 3、接法 5 为正向序列。接法 2、接法 4、接法 6 为反向序列。

120°	接法 1				接法 2				接法 3				接法 4				接法 5				接法 6			
节拍	U	V	W	十进制	W	V	U	十进制	W	U	V	十进制	U	W	V	十进制	V	W	U	十进制	V	U	W	十进制
1	1	0	0	4	0	0	1	1	0	1	0	2	1	0	0	4	0	0	1	1	0	1	0	2
2	1	1	0	6	0	1	1	3	0	1	1	3	1	0	1	5	1	0	1	5	1	1	0	6
3	0	1	0	2	0	1	0	2	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	4	1	0	0	4
4	0	1	1	3	1	1	0	6	1	0	1	5	0	1	1	3	1	1	0	6	1	0	1	5
5	0	0	1	1	1	0	0	4	1	0	0	4	0	1	0	2	0	1	0	2	0	0	1	1
6	1	0	1	5	1	0	1	5	1	1	0	6	1	1	0	6	0	1	1	3	0	1	1	3
类型	0																							

表 6：120° 霍尔线 6 种接法

每一种输入（霍尔信号）接法，其对应的 6 种输出（电机相线）接法，必然只有一种能够正常驱动电机，其它 5 种输出接法都不能正常驱动。

这也就是意味着，对于 120° 电机，36 种接法中，有 3 种正转接法，3 种反转接法。

120° 电机对相成功的概率为 3/36（即 1/12）。

（2）60° 电机

再看 60° 电机，由于其传感器信号的相位差为 60°，3 个信号无法在 360° 中实现等分，所以其输入序列（如果不考虑转向）将有三种（定义为类型 1、2、3）（参考表 7：60° 霍尔线 6 种接法）。即：

类型 1：4、6、7、3、1、0；（见接法 1、接法 2）。
类型 2：2、3、7、5、4、0；（见接法 3、接法 4）。
类型 3：1、5、7、6、2、0；（见接法 5、接法 6）。

其中，接法 1、接法 3、接法 5 为正向序列。接法 2、接法 4、接法 6 为反向序列。也就是说，每种类型都只有一种正确的正向序列，一种正确的反向序列。

60°	接法 1				接法 2				接法 3				接法 4				接法 5				接法 6			
节拍	U	V	W	十进制	W	V	U	十进制	W	U	V	十进制	U	W	V	十进制	V	W	U	十进制	V	U	W	十进制
1	1	0	0	4	0	0	1	1	0	1	0	2	1	0	0	4	0	0	1	1	0	1	0	2
2	1	1	0	6	0	1	1	3	0	1	1	3	1	0	1	5	1	0	1	5	1	1	0	6
3	1	1	1	7	1	1	1	7	1	1	1	7	1	1	1	7	1	1	1	7	1	1	1	7
4	0	1	1	3	1	1	0	6	1	0	1	5	0	1	1	3	1	1	0	6	1	0	1	5
5	0	0	1	1	1	0	0	4	1	0	0	4	0	1	0	2	0	1	0	2	0	0	1	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
类型	1								2								3							

表 7：60° 霍尔线 6 种接法

对于不带自学习功能的控制器来说，不能同时识别 3 种类型的序列。一般都是只选择其中的一种类型作为默认类型。一旦选定类型，则其它两种类型的输入（霍尔）接法就被认为是错误的。只有两种输入（霍尔）接法是正确的。

比如在（表 5：兼容 60°/120°的换相表）中，我们实际上只考虑了类型 0（120° ）和类型 1（60° ）的序列。虽然实现了 60°/120°的兼容，但并不是说 60° 电机的输入霍尔就可以顺心所欲地接线了。

在输入（霍尔信号）接法正确的前提下，每一种输入接法，其对应的 6 种输出（电机相线）接法，必然只有一种能够正常驱动电机，其它 5 种输出接法都不能正常驱动。

这也就是意味着，对于 60° 电机，36 种接法中，只有 1 种正转接法，及 1 种反转接法。

60° 电机对相成功的概率为 1/36。60° 电机在人工对相时比 120° 电机更加麻烦（因为前者对相成功概率更低）。

3、相位自学习功能

“人工对相”那么麻烦，所有就有了相位自学习功能的推出。

相位自学习，又称为相位自识别。该功能主要针对二级（维修）市场。当输入霍尔信号线和电机相线被随机连接时，控制器能自动识别接线次序并记忆下来，实现正常功能。

自学习的步骤及细节如下：

（1）确定输出序列

仔细观察（图 11：换相时序图）和（表 5：兼容 60°/120°的换相表），可以发现无论 60° 还是 120°电机，也无论输出 3 根电机相线如何接（也就是说电机相线随机命名为 U、V、W），输出序列都是固定的（参见图 13：电机相线输出序列）。因此，输出序列是不需要学习的。我们把这 6 个节拍的序列定义为（O1、O2、O3、O4、O5、O6）（参见表 8：电机相线固定输出序列）。

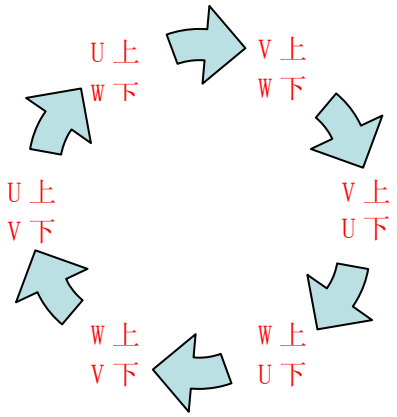


图 13：电机相线输出序列

序号	O1	O2	O3	O4	O5	O6
输出	U 上 W 下	V 上 W 下	V 上 U 下	W 上 U 下	W 上 V 下	U 上 V 下

表 8：电机相线固定输出序列

（2）学习输入序列

只要电机能够转动起来，那么我们就可以通过连续采集输入信号的方法，来获取输入序列。我们把这 6 个节拍的输入序列定义为（S1、S2、S3、S4、S5、S6）。

这一步的核心是如何把电机转起来。很简单，依次输出 6 个节拍的输出序列（O1、O2、O3、O4、O5、O6），每当输入霍尔信号换相时，输出也跟随着切换到下一节拍，电机就会旋转起来。在此过程中可以忽视输入与输出的匹配问题，因此也称为“盲推”。

“盲推”时，注意以下细节：

占空设置：在学习过程中的占空比是固定的，一般设置为 15%~25%左右即可。占空过大可能导致烧管，过小可能推动不了电机。

鉴相时间：在正常推动电机时的鉴相时间，一般都只是几个 us 足矣，但是在“盲推”的过程中，由于输出与输入霍尔信号不匹配，此时电机往往振动的很厉害，在换相过程中有很多抖动，所以此时的鉴别时间应该设置得更大一些，比如 100us。

（3）校验输入相位序列

这一步主要的目的，一是为了校验输入相位序列是否合法，二是为了确定电机及接线的类型。

在人工对相的环节中，我们介绍了，不同的电机（120°/60°）按不同的接线方法，会有 4 种相位序列类型，这 4 种类型如果再结合正反方向，则一共有 8 种序列（参见表 9：8 种正确的输入序列）。

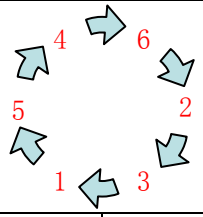
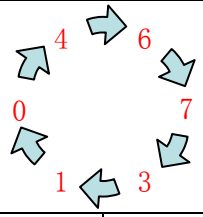
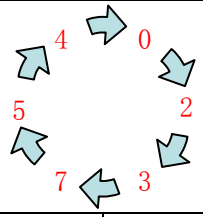
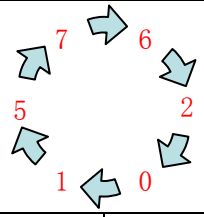
电机	120°		60°					
类型	0		1		2		3	
输入相位序列								
	4	5	4	0	2	0	1	0
	6	1	6	1	3	4	5	2
	2	3	7	3	7	5	7	6
	3	2	3	7	5	7	6	7
	1	6	1	6	4	3	2	5
	5	4	0	4	0	2	0	1
方向	正	反	正	反	正	反	正	反

表 9：8 种正确的输入序列

我们可以把学习到的输入相位序列（队列）与表格中的 8 种序列对比，获得电机及接线类型等信息。

一般来说，必有一种序列比对能够成功，如果 8 种序列比对都失败了，则意味着学习到的输入序列有错误。

（4）匹配输入和输出序列

如果我们把输入序列与输出序列之间一一对应着排列，那么可以有 6 种对应关系（参见

表 10：输入与输出的 6 种对应关系）。

在这 6 种对应关系中，只有两种可以正常驱动电机，其余 4 种对应关系都无法正常驱动电机。在两种正确的对应关系中，一种为正转、另一种为反转，两种关系正好相差 180° 相位角（3 个节拍）。

输出序列（预先固定）		O1	O2	O3	O4	O5	O6
输入序列 （6 种对应关系）	1	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	2	S2	S3	S4	S5	S6	S1
	3	S3	S4	S5	S6	S1	S2
	4	S4	S5	S6	S1	S2	S3
	5	S5	S6	S1	S2	S3	S4
	6	S6	S1	S2	S3	S4	S5

表 10：输入与输出的 6 种对应关系

由于控制器在学习时无法识别电机的运转方向是正转还是反转，所以我们只需要去判断 6 种对应关系中的任意相邻的 3 种关系。用这 3 种对应关系分别试推一下，并检测电流，电流最小的那种关系就是正确的。

在试推的同时要判断此时电机霍尔信号的方向，并设置“绕组方向标志”。最终这个“绕组方向标志”要服务于锁电机功能。

（5）人工改变电机转向

前面说了，控制器无法识别电机转向，因此学到的相序可能相差 180°，导致电机反转。所以控制器学完之后，还要再次自转演示一下，此时可以通过操作者来判断电机是否在反转。

如果是想改变转向，那么可以人工旋转一下把手（或者捏一下刹车），控制器即会把“绕组方向标志”取反，同时调整输出相序与输入相序的对应关系，让电机转向发生逆转。

（6）学习数据的存储

学习到相序后，要保存到 E2PROM 中。我们可以把在 E2PROM 中开辟两组各 8 个字节的单元，分别对应输入值为 0~7（0B000~0B111）的输出序列。

对于具体电机来说，只有 6 种霍尔输入值（比如对于 120° 电机来说，0 和 7 是非法的），所以，对于 120° 电机，我们可以把表格简化，只存贮这有效的 6 个输出值。对于 60° 电机电机来说，只要把输入略做替换（参见图 14：不同类型的电机相位替换示意图），就可以与 120° 电机兼容了。

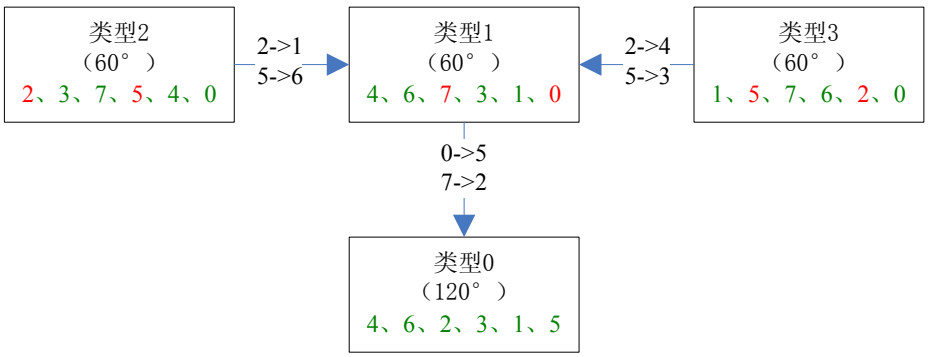


图 14：不同类型的电机相位替换示意图

示例（参见表 11：E2PROM 中数据保存保存格式）：

电机类型		对应霍尔输入					
0	120°	001B	010B	011B	100B	101B	110B
		1	2	3	4	5	6
1	60°	001B	111B	011B	100B	000B	110B
		1	7	3	4	0	6
2		010B	111B	011B	100B	000B	101B
		2	7	3	4	0	5
3		001B	111B	101B	010B	000B	110B
		1	7	5	2	0	6
EEPROM 地址		0X06	0X07	0X08	0X09	0X0A	0X0B
存储内容		对应的电机相线输出编码（上管）					
EEPROM 地址		0X0C	0X0D	0X0E	0X0F	0X10	0X11
存储内容		对应的电机相线输出编码（下管）					

表 11：E2PROM 中数据保存保存格式

4、缺相补偿功能

缺相补偿的概念是指，如果 3 根输入相线有 1 根损坏后，依靠其它 2 相上的电片变化规律可以推导出该线上的电平。用软件补上这一相，从而让电动车可以继续行使。

六、☆同步续流

1、同步续流的概念

“同步续流”也称为“同步整流”。从字面理解上来说，称“续流”似乎更确切一些。“续流”概念在开关电源中比较常见。

我们知道电感上的电流是不能突变的（就像电容上的电压不能突变一样）。大禹治水，宜疏不宜赌，否则就会水漫金山。电流也同样如此。当电流控制开关突然关断时，必须给电流安排一条继续流动的通道。这就是“续流”一说的来历。

2、同步续流原理分析

接下来我们结合电动车控制电路来分析一下。同步续流功能是对 PWM 控制方式的改进。

假设此时 A 相上管和 B 相下管通电，A 相上管 PWM 占空比没有达到 100%。

当 A 相上管打开时，电流方向如图 3 所示，电流从 48V 电源->A 相上管->A 相绕组->B 相绕组->B 相下管->电源地。（见图 15：上管导通时的电流通道）

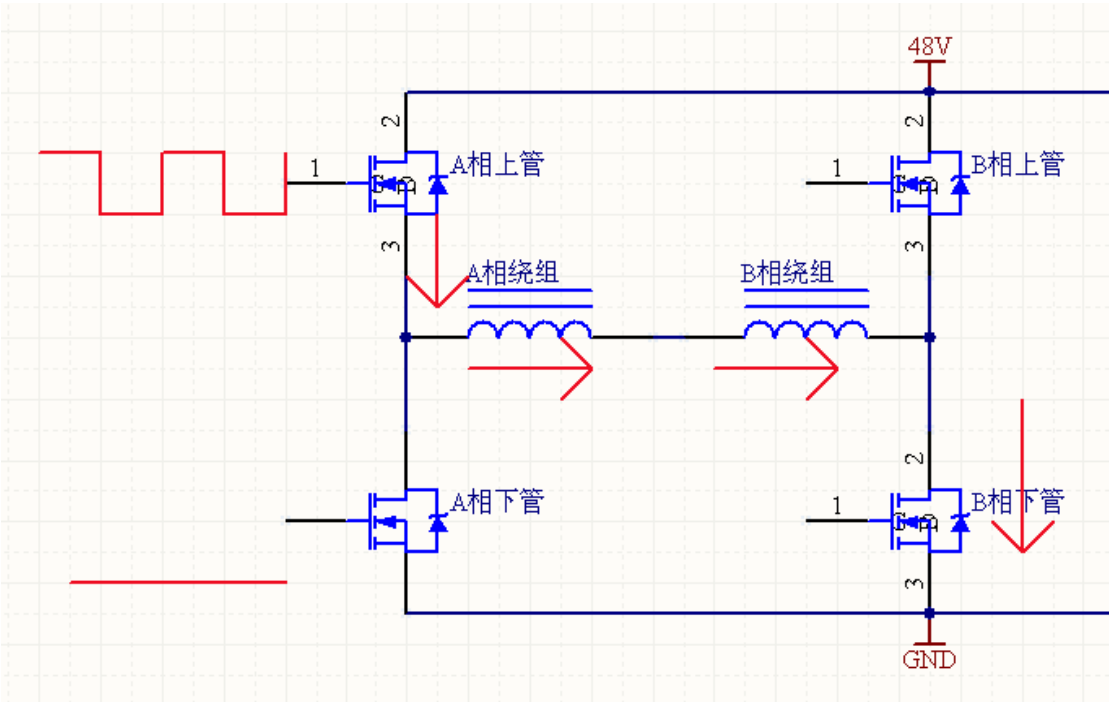


图 15：上管导通时的电流通道

当 A 相上管关闭，B 相下管开通时，由于电机线圈是一个电感，线圈上必定会出现一个自感反电动势，这个反电动势必须维持线圈电流的方向不变。由于 A 相上管已经关闭，这个电流就会通过原来已经开通的 B 相下管、地、A 相下管的续流二极管继续流动。电流方向：A 相绕组->B 相绕组->B 相下管->A 相下管续流二极管->A 相绕组。（见图 16：上管关闭时的电流通道）

计算 A 相下管续流二极管的功耗：假设经过 A 相绕组的电流是 10A，续流二极的压降为 0.7V，此时理论功耗为 7W。

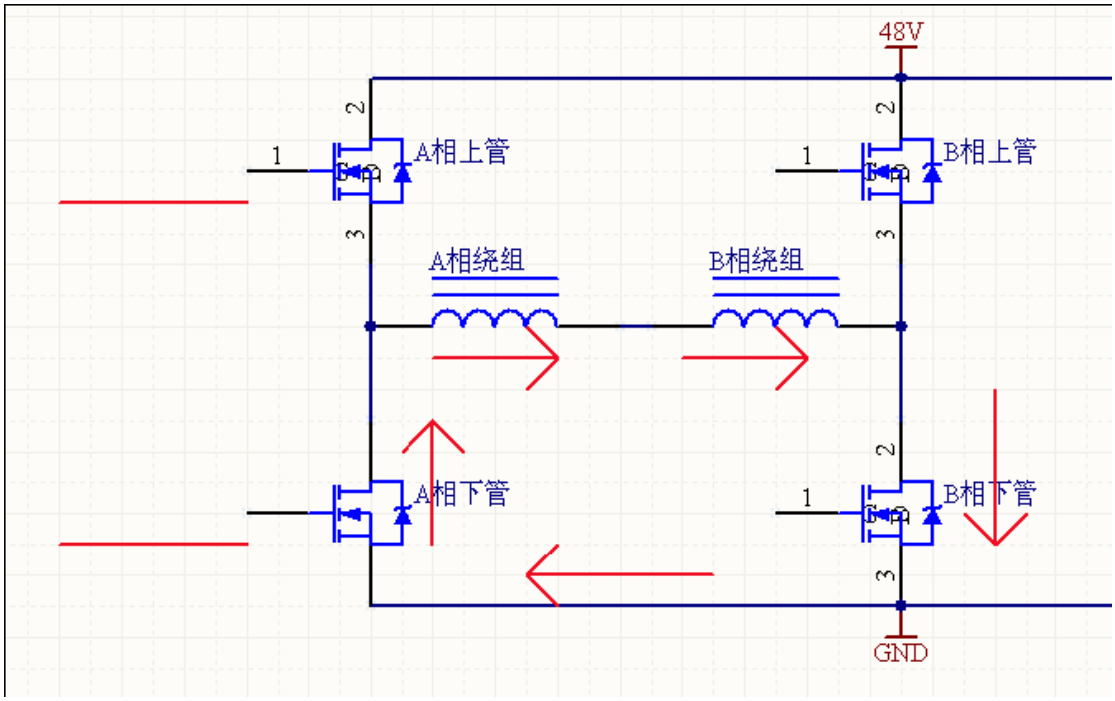


图 16：上管关闭时的电流通道

如果我们使用 A 相下管(MOSFET 可以反向导通)来代替续流二极管来进行续流。此时电流方向为：A 相绕组->B 相绕组->B 相下管->A 相下管->A 相绕组。（见图 17：开启同步续流后电流通道）

计算 A 相下管功耗：假设经过 A 相绕组的电流仍为 10A，MOSFET 的 RDSon=10mΩ。此时理论功耗仅为 1W，仅为原来的 1/7（由于后面要谈到的死区时间的原因，实际效果要稍微打一点折扣。）。从理论上来看，A 相的下管的功耗得到明显降低，温升也将减小。

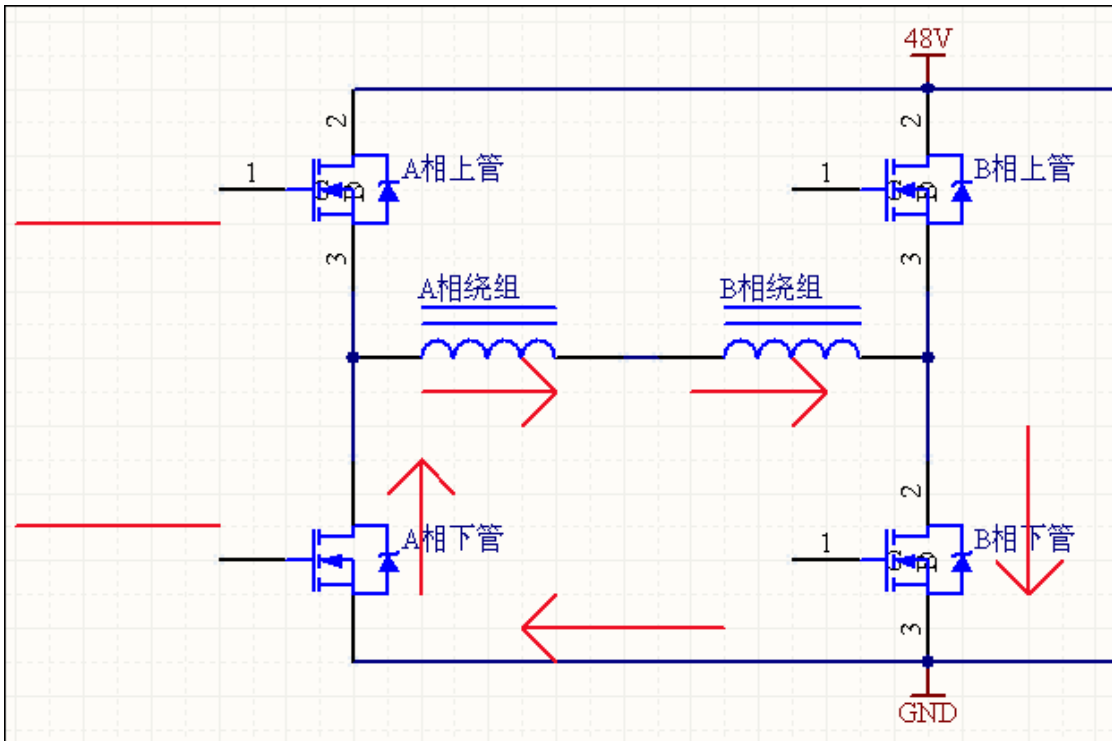


图 17：开启同步续流后电流通道

总结：某一相上管在关断后，开通同相下管来续流。下管还是会这也是为什么很多产品的下桥会用好一点的管子的原因。

在实际应用中，当电流>1.5~2A 时，打开同步续流，下管的温升将明显减小。但是当电流<1.5~2A 时，同步续流的效应不大，反而会有负作用（电机啸叫噪音、抖动）。

3、死区时间

由于 MOS 管在关闭时有延时关闭现象，所以在上管关断后，需要延长一定的时间才能打开同相的下管。否则，上下管同时导通，就会“冒烟”。这个需要延长的时间就是死区时间。

死区时间的长短，取决于上管关闭的延时时间。在实际设计中，还要考虑到温漂导致的关断时间漂移以及单片机工作频率的漂移等因素。一般取 800~1000ns。

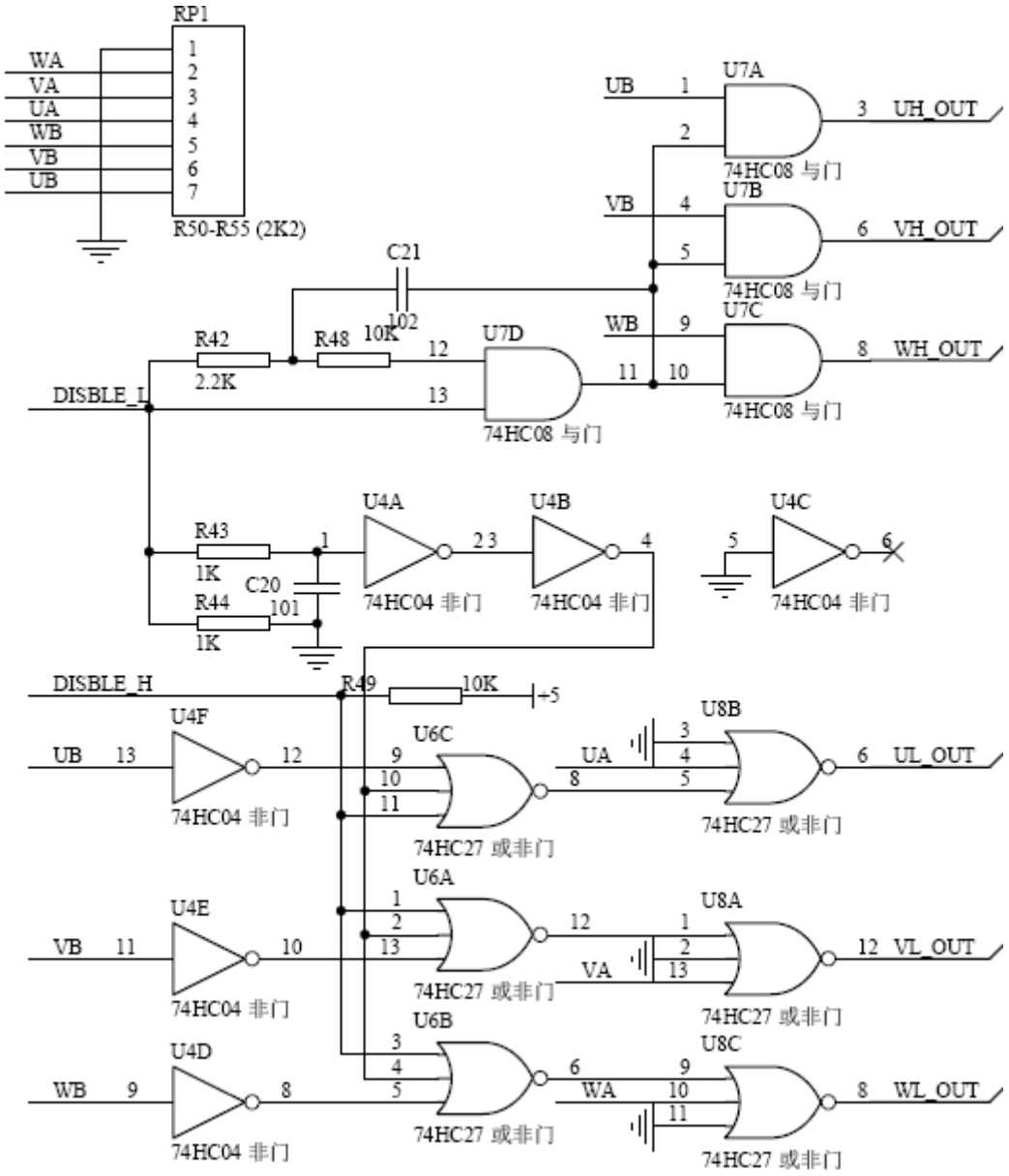


图 18：同步整流电路

4、同步续流的硬件实现

在早期的 PIC 方案（以及跟风产品中），是用 4 颗数字门电路芯片来实现电机驱动信号的整理及同步整流功能。见（图 18：同步整流电路）

为了便于分析，单独来看 PWM 截波与死区控制部分（见图 19：PWM 截波与死区控制）

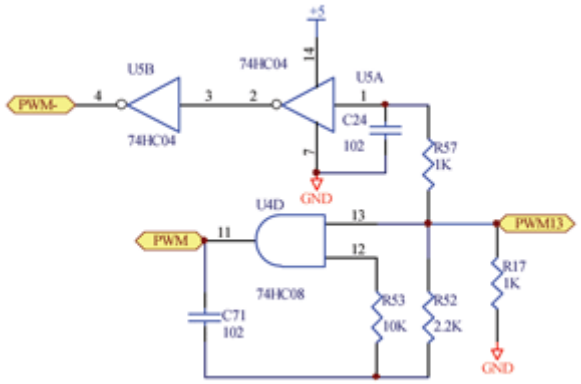


图 19：PWM 截波与死区控制电路

单片机产生的 PWM 占空比信号一路通过与门，经 R53,R52,C71 截波（缩小占空比）后输出，相位不变，截波量大约为 1.5μS,形成 PWM 信号，此路输出至上桥驱动，与上桥逻辑开关信号相与后驱动上桥 MOSFET。另一路经 R57 和 C24，反相器 U5A 移相，相移量大约 750nS,再经 U5B 反相，形成 PWM-信号，最后合成至下桥驱动。此时两个信号输出时相位相同，但 PWM-信号占空比比 PWM 信号占空比大 1.5μS,但由于 PWM-信号已经偏移 750nS,所以 PWM 信号刚好套在 PWM-信号中间，两边空出 750nS 作为 MOSFET 开关的死区。

处理后波形示意图见（图 20：处理后波形示意图）。

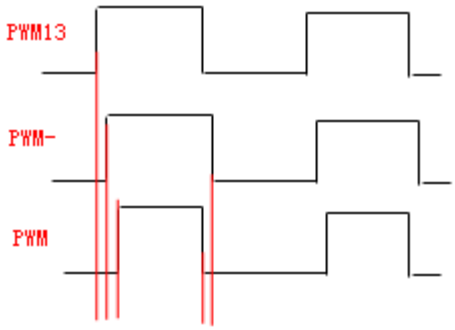


图 20：处理后波形示意图

因为 3 相驱动相同，所以我们这里仅以 A 相为例说明同步续流功能的实现过程。（见图 21：A 相驱动电路的实际电路）

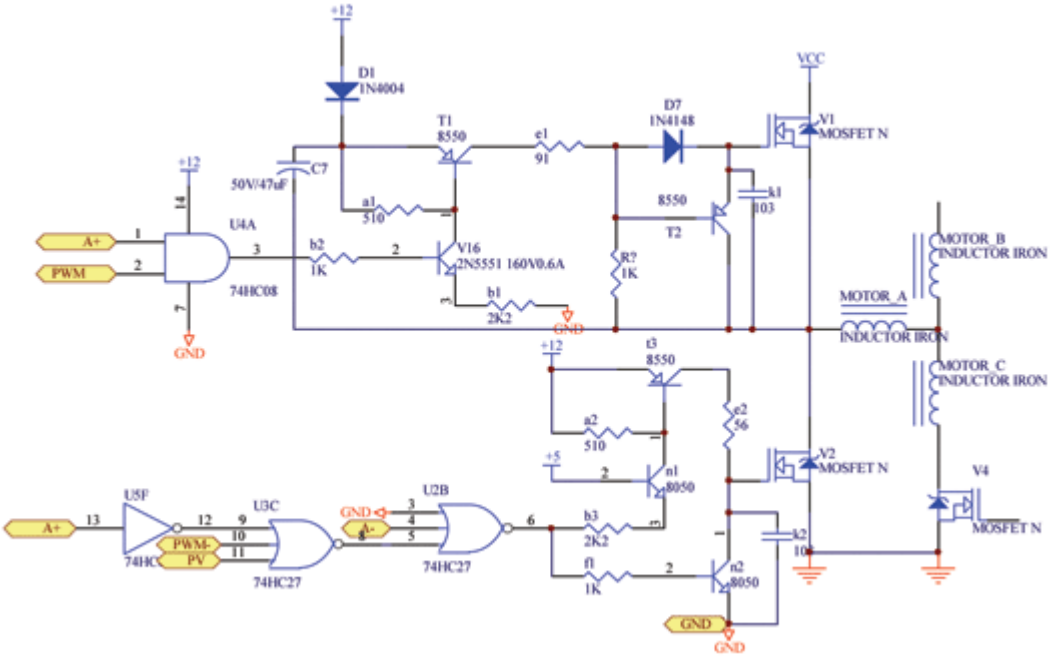


图 21：A 相驱动电路的实际电路

当 A 向的逻辑开关信号“A+”为高电平时，A 相上桥被“PWM”信号驱动，在整机电流较小的情况下，PV 信号为高电平，不管或非门 U3C 其它两个输入脚电平如何，其输出总是低，所以此时或非门 U2B 仅受“A-”信号控制，“A-”信号是下桥的逻辑开关，它仅在下桥需要导通时置高，平时为低。当整机电流比较大，而 PWM 占空比小于 100%时，由于 A 相上桥在 PWM 间隙关断导致电机线圈中出现较大感应电流，感应电流通过另一相的下桥和 A 相下桥的二极管泄放，为降低该二极管的功耗，此时应将 A 相下桥 MOSFET 打开以减小压降，这时单片机将“PV”信号端拉低，在 PV 信号和反向后的“A+”信号共同作用下，“PWM-”信号通过 U3C 传递到 U2B，而此时由于“A-”为低，所以 U2B 受“PWM-”信号控制，在 PWM 信号关断的间隙使下桥 MOSFET 导通。当“A+”信号为低电平时，“PWM-”信号并不影响下桥，保证了下桥的正确逻辑而不会误导通。

5、同步续流的芯片实现

现在有些新的芯片，支持 6 路（3 对）PWM 输出。每一对 PWM 都可以设置为带死区控制。那么实现同步续流就很方便了。（见图 22：芯片内部带死区控制的 PWM）

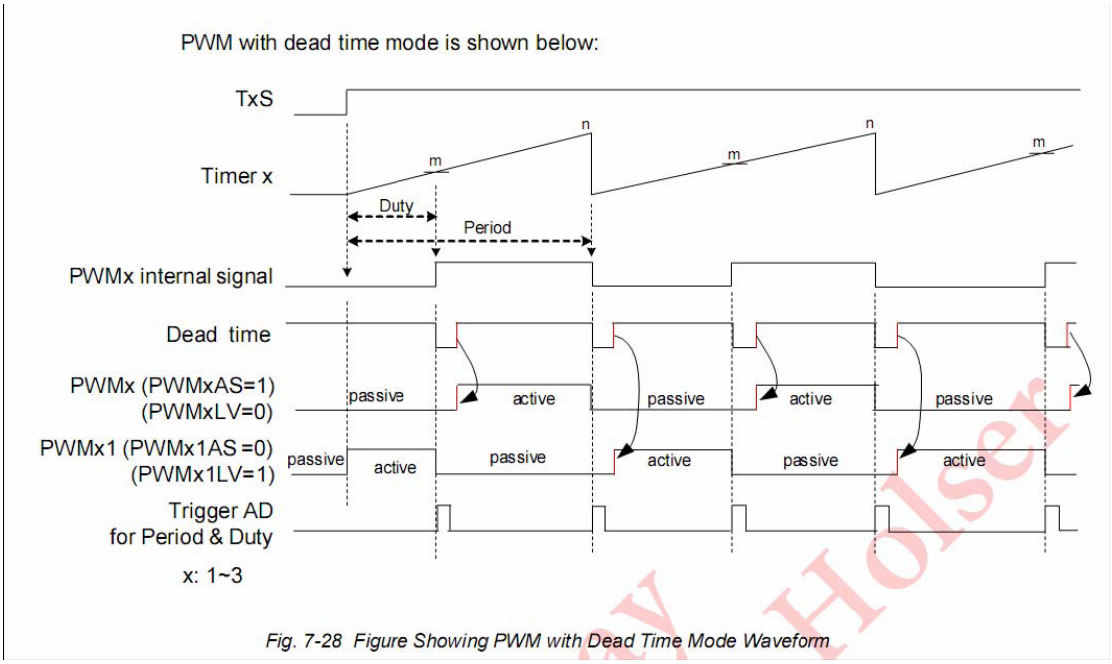


Fig. 7-28 Figure Showing PWM with Dead Time Mode Waveform

图 22：芯片内部带死区控制的 PWM 模块

参考文字（网友：碧水长天）

关于同步整流,我来补充一些:

当电机工作在大电流时,由于此时转速低,反电动势小,软件中的限流使得 PWM 占空比较少,这样同步整流就有用武之地了.

在没有同步整流的情况下，一个 PWM 周期里,当 PWM 为低时,上桥 MOS 管关断,此时绕组中电流不能反向,而是通过导通的下管和另一个关闭的下管内部的并联二极管进行续流.

二极管正向导通的压降太大,高温下可到 1~1.5v,此时,设 30A 的电流流过,其功率损耗达 30A*1.25v=37.5W.

若在续流的时候,打开续流通道的这个原本关闭的下桥臂 MOS 管,由于其 Rds 在 10 毫欧左右(75 管),可以推算此时的功率损耗为 30A*30A*0.01ohm=9W.

可想而知,同步整流在理论上,要大大降低 MOS 管的热耗.在实际的应用中,同步整流对降低 MOS 管的温升也是有好处的.市面上有部分厂家不理解同步整流的作用,自以为懂一点硬件,于是改了电路，省掉两颗 IC,也敢将产品投放市场,电动车厂家则更是不懂了，越便宜越喜欢.

由于同步整流仅在启动和爬坡时发挥作用,而这段时间不长,所以目前来看没有大面积翻修,但最后很可能就会出问题,害人害己的.

七、*速度处理

1、模糊控制方式

电动车的车速范围=0~40km/h；为了便于运算及处理，系统将车速划分为 0~150 个等级，对应于 0~40km/h。电动车的设置速度，取决于 3 个参数：助力速度等级、巡航速度等级、把手速度等级。三者的优先级分配见（表 12：速度传递优先级表）。

优先级	参数
1（高）	助力速度等级
2（中）	巡航速度等级
3（低）	把手速度等级

表 12：速度传递优先级表

根据以上 3 个参数，最终可以得到一个“设置速度等级”，用于控制电机的速度。当设置速度等级等于 0 时，电机停止转动，并清除部分故障标志。电机速度是由 PWM 占空比来进行控制的。系统根据各参数之间的关系自动控制要输出的 PWM 占空，从而实现对速度的动态调节。见（表 13：无刷电机 PWM 占空调节规律(模糊控制方式)）。

速度 / 电流		0	1	2	3	4	5
		实测速度等级<<设置速度等级	实测速度等级<设置速度等级	实测速度等级≈设置速度等级	实测速度等级>设置速度等级	实测速度等级>>设置速度等级	设置速度等级=0
0	实测电流<<限制电流	设置 PWM 占空快速 +1					
1	实测电流<限制电流		设置 PWM 占空慢速 +1				
2	实测电流≈限制电流			设置 PWM 占空不变化			
3	实测电流>限制电流				设置 PWM 占空慢速 -1		
4	实测电流>>限制电流					设置 PWM 占空快速 -1	
5	实测电流>短路电流						关闭电机

表 13：无刷电机 PWM 占空调节规律(模糊控制方式)

2、无级调速

由于使用直流电源，电机的速度得依靠调节加在电机两端的电压来调整，较简单的办法

是使用 PWM 脉宽调制来调节加到电机两端的电压。PWM 的工作周期根据电机的使用环境，采用 64μS，折算成频率大约 15。625KHz，频率太低了会产生人耳能明显感觉到的高频噪声，电流也不容易控制;太高了又增加电子开关的开关损耗。PWM 脉冲的最大宽度，这个直接影响到电机的最高速度，则由把手输出的电压决定。

把手电压检测简单，人对速度的感觉很迟钝，所以把手的检测不需要很频繁，这个 AD 检测与电源电压，刹车等检测均不需要很快的速度，所以每隔 10mS-50mS 轮番检测一次便足够，AD 的检测在定时中断中做，而结果则放在中断外做，这样不会占用中断太多的时间。编程提示：

由于现在大多采用线性霍尔作为把手调节速度方案，优点是无触电，故障率极低。缺点是在 5V 供电的情况下，电压只能在 1。1V-4。3V 的范围内变化，因此软件的处理相对复杂一点，不过对于硬件处理来讲要简单许多。这只需要我们做一点简单的运算，或者采用查表的方法，将这期间的 AD 数值转换成 PWM 占空比的值即可。虽然讲是无级调速，实际上分 32 级时人已经感觉不出来了。但是有一点，根据把手得出的 PWM 脉冲宽度不能直接用来控制 PWM 占空比，需要在电流允许的情况下才能让占空比达到设定值。

3、把手调速

根据把手电压自动控制速度。电路见（图 23：转把信号检测电路）。

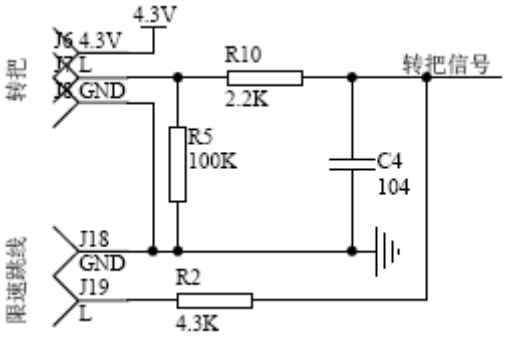


图 23：转把信号检测电路

把手调速电压范围=1.1V～4.1V。

4、限速功能选择

为了满足人身安全方面的要求，电动车可以通过跳线来选择限速功能。可以通过 MCU 来读取该跳线的状态，并在软件中进行限速处理；这种方法的缺陷是需要占用宝贵的 MCU 端口资源。

另一种办法是，将该跳线连接一个电阻，并用来旁路把手输入电压，实现硬件限速（见图 23：转把信号检测电路）。当限速跳线闭合时，R2 被并联到电路中，拉低把手电压，进而限制了车速。

八、限流驱动

1、“双闭环控制”中的“电流环”

业内有个说法，即“双闭环控制”。何谓“双闭环”？其实就是“速度环”+“电流环”。

为什么要引入电流环？

电动车控制器的电子开关均使用功率 MOSFET 控制，MOSFET 的最大允许电流、最大允许功耗都有其限制。如果没有电流控制，或者电流控制不好，均会导致功率 MOSFET 的烧毁，从而导致整个控制器报废。因此电流控制是程序的重中之重，这个做不好，其它功能一概免谈。

参考文字：

电流环的作用主要是什么呢？其核心还是电流环本身作用，以最大的允许力矩运行。从这一点出发电流环作用，主要是三个，一个是启动过程的加速。二个是对反拉时的电流保护。三个是对电压波动的抗干扰。

2、电流检测电路

电流信号经康铜丝采样之后的信号非常微弱，所以必须把该信号放大。（见图 24：电流检测电路）。该电路的放大倍数大约 6。5 倍。放大后的信号提供给单片机进行 AD 采样转换。

$$放大倍数=1+\frac{R37}{R31}=1+\frac{10K}{1.8K}=6.556$$

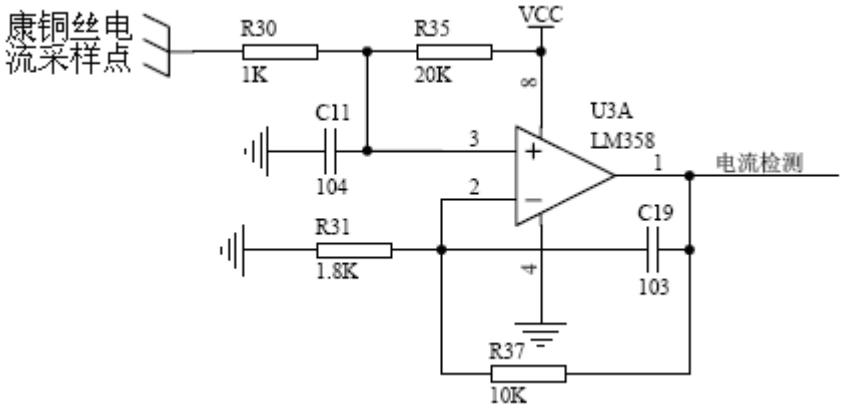


图 24：电流检测电路

如果单片机内部 ADC 模块集成了放大器，也可以考虑选用。

3、峰值电流（相电流）和平均电流

我们现在使用的是 PWM 脉冲驱动，这种脉冲驱动导致的直接结果是放大后的电流信号与 PWM 脉冲频率相同，相位上滞后一定时间的脉动电流波形。这种波形如果没有经过滤波处理，将会类似于一个梯形。

所以，这里就引出了峰值电流和平均电流的概念。

（1）峰值电流

峰值电流就是 PWM 驱动上管开启时，线圈上流过的最高电流。由于峰值电流反映的是电机每一相线圈上的即时工作电流，所以业内又称为“相电流”或“即时电流”。

（2）有效电流

平均电流是根据峰值电流计算出来的。公式：

有效电流=电流峰值×占空比

因此，我们只需要采样峰值电流，即可计算出有效值来。

有效电流又被称为“平均电流”。

4、如何采样峰值电流

如果我们要获得准确的峰值电流 AD 转换值，最好的办法就是在梯形波的上边中间采样电流信号（参见图 25：电流采样时机），这样所获得的电流 AD 值才能较为准确地反应电流的实际大小。

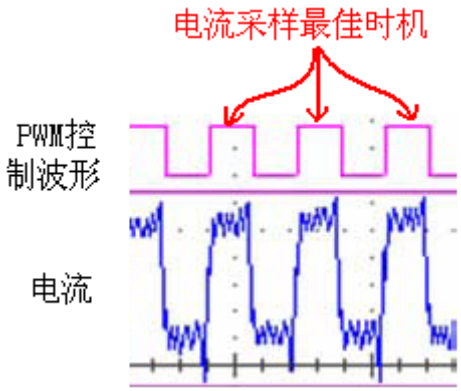


图 25：电流采样时机

检测峰值电流，关键是合理控制电流的 AD 采样和转换的时机。

PWM 的周期是 64us，ADC 的采样速度和转换速度必须足够快，才能在合适的时间段内完成电流采样的工作。

那么怎样保证采样和转换的时机的准确性呢？办法就是使用与 PWM 周期同步的定时中断。我们可以预先设定好 AD 的通道，将 AD 转换器切换到检测电流的那个通道。当进入定时中断处理完现场保护，中断源判断等一系列动作之后，开启 ADC 的时刻刚好落在电流梯形波的中央，采样完毕之后马上进行转换。

如果单片机的转换时间比较长（比如要 10~20us 或以上时），我们可以在等待转换完成的过程中，做一些比如“鉴相”的工作，避免 CPU 空跑，浪费资源。如果单片机的转换时间足够快（比如只需要几微秒），那就罢了。

如果单片机本身已经提供了 PWM 自动触发 AD 的功能，那么就可以利用该功能，让采样时间落在电流梯形波的中央。采用这种方法，就可以大大减小 AD 的时序控制，节省

芯片的时间资源。

如果我们想及时准确地控制电流，采样次数也是要求越多越好。因为电流的变化相当快，在一个 PWM 周期中变化量可能会很大，最好是在一个 PWM 周期里采样数次，然后再求平均值。但是我们的单片机没有这么快的速度，再说 PWM 的占空比在一个周期中只接受最后的改变，而且要到下个周期才能发挥作用，所以一个 PWM 周期采样一次就够了。如果为了更好地处理其它事情，也可以考虑两个周期才对电流采样一次。

5、数字滤波

即使采样的峰值电流很不稳定，所以，一般都是采集 10 个周期的值（去除一个最大值和一个最小值），做中值平均滤波之后才当作峰值电流来用。

有效值要在峰值的基础上计算，计算完毕后，可以再进行一次递推中值平均滤波。这样数据会比较稳定。

滤波时要注意，过于滞后的滤波环节，会导致失调，输出无法及时跟进，反而会产生较大的波动。这也是为什么在对有效值进行滤波时，要采用递推中值平均滤波。

6、限流控制规则

采样转换之后的工作，就是限流控制的处理了。怎样根据 AD 结果去调节电流？调节电流和车速，其实就是调节 PWM 的占空。在高端芯片中也许会用到 PID，但是在有些低端芯片中，不支持硬件乘除计算，完成 PID 计算太耗费时间，这样无法满足实时性的要求。

所以，大多数人不会考虑 PID 控制。而是采用简单的模糊控制，通过条件判断去控制 PWM 占空比的递增、递减。当然，我们可以适当控制占空递增、递减的速率。比如每次增减 1、2 或 3，一切以电流比较稳定为准，不要有太大的波动。

规则描述如下：

（1）当电流没有达到限流值时，采用速度环控制，PWM 占空比根据设定速度来调节；

（2）当电流达到限流值时，禁止 PWM 占空比继续上升（即使这个时候，速度仍旧未设定值）；

（3）当电流超过限流值时，强制让 PWM 占空比下降，降低电流，保护电路。

限流驱动，到底是判断峰值还是平均值呢？答案是两个值都要判断。一般来说，峰值限流值为 40~60A，平均值为 17~20A。这两个值任意一个不不允许超越限定阀值。

速度 / 电流		0 速度<<设置值	1 速度<设置值	2 速度≈设置值	3 速度>设置值	4 速度>>设置值	5 设置值=0
0	电流<<限制值	+2	+1	不变	-1	-2	=0
1	电流<限制值	+1	+1	不变	-1	-2	=0
2	电流≈限制值	不变	不变	不变	-1	-2	=0
3	电流>限制值	-1	-1	-1	-1	-2	=0
4	电流>>限制值	-2	-2	-2	-2	-2	=0
5	电流>短路值	=0	=0	=0	=0	=0	=0

表 14：无刷电机 PWM 占空调节规律(模糊控制方式)

7、关于 PWM 调整精度（分辨率）

为了避免车速、工作电流出现较大的波动，我们要求 PWM 占空比调整精度越高越好。那么，到底要做到多高？

很多芯片的 PWM 的占空比调整分辨率可以做到 10BIT 的甚至更高。但 10BIT 的数据涉及 2 个字节的运算，比单字节数据的计算更耗费时间。所以我们还是只采用 8BIT 的调整精度。

实践证明 8BIT 的精度对调整车速和电流来说已经足够。

参考文字：

恒流算法——电流即时值和有效值的矛盾

也许我们注意到大多数控制器的最大电流并没有出现在堵转的时候，这是因为上面我们所检测到的是电流的峰值，而我们在电流表上看到的是电源电流的平均值。

当 PWM 占空比不是 100%的情况下，平均电流=电流峰值×占空比，也就是说，占空比越小，要保证电流平均值达到我们的期望值，电流的峰值要提高。

这样就涉及一个算法问题：提高多少？我们可以根据上面那个做一个表格，或者根据 CCPR1L 中的值做一个简单的换算。总之是不能占用太多的系统时间。

编程提示

电子换相，电流检测处理等大部分要紧的工作均在同一个 64us 或 128μs 的定时中断中完成。另外中断中还要完成计时工作，由于单片机的 AD 模块是复用的，所以每隔一段时间还要照顾一下其他需要 AD 转换的功能，比如把手，电源电压等，其它对时间，时机要求不严格的则放在中断外空余时间或主程序处理。

九、换相转矩脉动及补偿

1、启动时常见问题：振动、噪音、启动慢

在低速、大电流运行（比如电动车刚刚起步）的时候，电机会产生的振动，发出噪音，使骑行者感觉不适。

这是由于在低速时，反电动势较小，加在绕组上的电压较大，接近到电源电压，此时电流较大。由于电机是个感性负载，换相后由于电机线圈电流不会一下增大到换相前的水平，这样就造成换相前后电流反差非常大，从而导致牵引力的急剧变化（转矩脉动），这种变化便会引起电机强烈振动。

启动时的另一个问题，就是车速无法即时跟上把手的调节速度。尤其是在负载较重时表现更明显。其实，也也是因为换相时电流不足导致。

2、解决方法——换相补偿

这种振动、噪声不能完全消除，但可以用简单的方法减小，并且可以提高启动速度。方法就是在换相后的一段时间内，让 PWM 全波开通，使电流增长快一点，从而减轻振动噪声。当电流一达到换相前的水平就可以恢复换相前的 PWM 占空比。

如（图 26：换相波形）所示，蓝色线是电流，上面第一根粉红色线为上管 PWM，第二根粉红色线为下管，黄色线为换相点。当发生换相时，电流忽然变小，此时把 PWM 占空设置为 100% 。等到峰值电流上升至换相前的峰值电流后停止换相补偿，PWM 占空恢复正常数值。

换相补偿只是临时状态。如果换相后峰值电流始终达不到之前水平，那么在最多延时十多个 PWM 周期后，也要恢复正常占空值，以免影响到鉴相等其它重要工作。

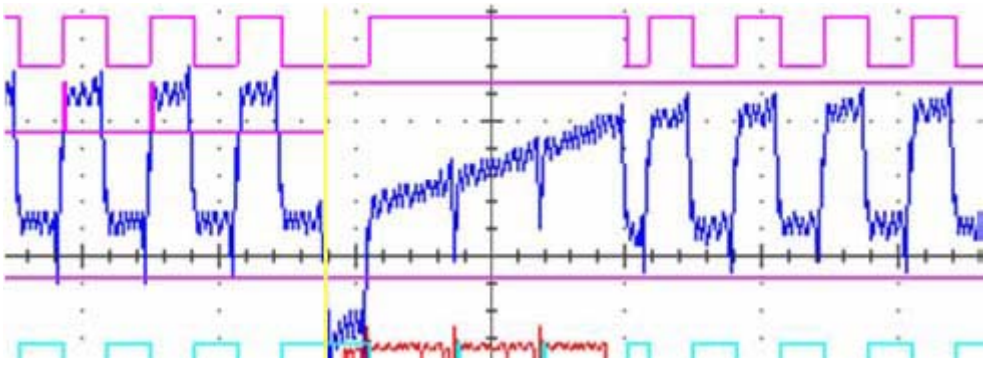


图 26：换相波形

仔细观察上图，会发现换相时的 PWM 占空还不是 100%（中间有两个小的负毛刺）。原因是因为拍这张图时的控制器没有关闭同步续流。那两个小毛刺正是因为同步续流时的死区造成的。所以在换相补偿时，应该关闭同步续流功能。

3、换相补偿功能的启动和退出时机

每当电机的霍尔相位发生变化时，就保存最后一次采样到的即时电流滤波值（I_OLD），

并进行有效电流与实测速度的判断。当有效电流>补偿电流阀值，以及实测速度<补偿速度阀值时，即使能转矩脉动补偿，同时将电机的输出占空设成最大。

然后，禁止调速把手和电源电压的 AD 采样，以及关闭同步续流，只进行 64US 采样周期的电流采样，并将每次采样到的即时电流值（I_NEW）和 I_OLD 比较。若 I_NEW>=I_OLD，则结束补偿，并将电机的输出占空恢复为原值；若 I_NEW<I_OLD，但补偿计数值大于补偿计数阀值，也结束补偿，并将电机的输出占空恢复为原值。

4、换相补偿注意事项

首先是电流采样必须精准，确保每次补偿之后的电流与换相前的电流一致（可以通过示波器观察）。如果电流不一致，出现“补偿不足”或“过补偿”的现象，则不能取得理想的效果。

另一个问题，是补偿的范围。有时候会发现，车子启动时噪音和振动较小，而在升速的过程中有一个阶段，噪音和振动会变大。等过了这个阶段，速度进一步提升后，现象又消失了。这就说明过早地退出了补偿。应该把补偿的车速范围适当放大。

十、*信号采集

本项目中包括三个模拟量，分别是把手电压、工作电压、工作电流。所有采样到 AD 值都必须经过“递推中位平均滤波”运算处理。把手电压和工作电流是实时检测；

1、电机电流

2、把手电压

3、电源电压

4、车速检测与计算

系统通过对输入相位的变化进行计数来实现对实际车速的检测。输入相位每变化 6 个节拍视为一个脉冲周期，每 20 个脉冲周期，电机转动一周。因此，只要知道车轮的周长，即可求出实际车速等级。

由于在系统中车速是被划分为 0~150 个等级，对应于 0~40km/h。所以可以得到以下这个公式原型：

V / S = Vmax / Smax

上面公式经过以下推导和变换：

V = S * Vmax / Smax

= f*(L/M) * Vmax / Smax

= (1/ JSQ* T_jsq) * (L/M) * Vmax / Smax

= Vmax * L /(T_jsq *Smax* M* JSQ)

其中：

S = 实际车速 = 0~40km/h

V = 实际车速等级 =0~150

Smax = 最大车速 = 40 km/h

Vmax = 最大车速等级 = 150

JSQ = 测量脉宽计数值

f = 输入脉冲频率（HZ）

T_jsq = 计数器中断周期 = 16us

L = 车轮周长 = 1m

M = 车轮运行一周脉冲数 = 20

设： k = Vmax * L /（ T_jsq * Smax * M）

=150 * 1 /（0.000016 *（40 *3600/1000）* 20）= 42187.5

k 值可以预先算出，无需在程序中进行实时运算。

最后，我们得到程序中计算实际车速等级的公式：

V = k / JSQ

其中：

V = 实际车速等级 =0~150

JSQ = 测量脉宽计数值

k = 比例系数

十一、短路保护

当电流突然由于某种原因大大超过允许值（比如 MOS 管击穿或误导通），此时限流控制程序往往来不及响应。所以，我们需要另外做一个比较器，把短路信号检测出来，直接去触发中断，让单片机能够快速关断驱动，从而避免 MOS 管及控制起受到更大伤害。

电路见（图 27：短路检测电路）。如果单片机内部集成了比较器，也可以考虑选用。

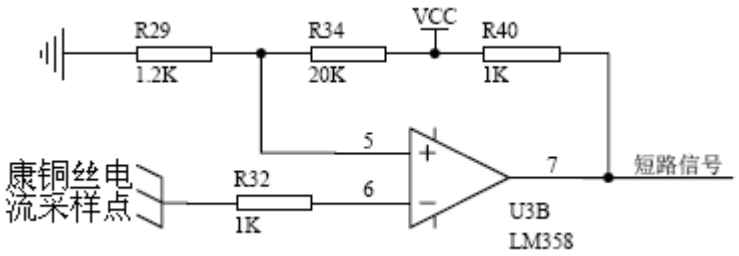


图 27：短路检测电路

当检测到短路时，关闭输出；重新上电后撤销保护。

十二、刹车、EABS 与反充电功能

1、普通刹车

高电平刹车，低电平刹车，关闭输出；刹车释放后撤销保护。

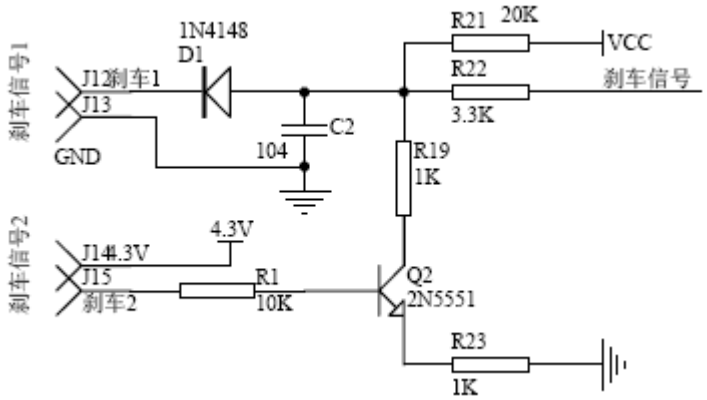


图 28：刹车检测电路

2、电子刹车（EABS）

电子刹车，即常说的 EABS 防抱死技术

3、EABS 的反充电效果

参考文字：

随动 abs 系统：具有反充电/汽车 EABS 刹车功能，引入了汽车级的 EABS 防抱死技术，达到了 EABS 刹车静音、柔和的效果，不管在任何车速下保证刹车的舒适性和稳定性，不会出现原来的 abs 在低速情况下刹车刹不住的现象，完全不损伤电机，减少机械制动力和机械刹车的压力，降低刹车噪音，大大增加了整车制动的安全性；并且刹车、减速或下坡滑行时将 EABS 产生的能量反馈给电池，起到反充电的效果，从而对电池进行维护，延长电池寿命，增加续行里程，用户可根据自己的骑行习惯自行调整 EABS 刹车深度。

十三、堵转保护

1、堵转保护说明

堵转是指电动自行车超载时，或是在爬坡时电流过大或者是阻力过大时，导致电机停止转动。

为了防止电机发生堵转时电流始终通过同一组 MOSFET 而造成永久损害，因此有必要在堵转发生之后数秒钟（一般时间是 2 秒）之内切断电机的供电。

要注意的是有时电机虽然发生堵转，但刚好在换相的临界点，此时会产生频繁的换相动作，这对 MOSFET 也是有害的，所以也应当作堵转来对待。

调速把手复位后撤销堵转保护。

2、如何识别堵转

每 1S 中检测一次堵转。当满足以下条件时，视为堵转：

- 电机处于开启状态
- 实测速度等级<=10
- 电流检测值>=80

当连续 5S 都检测到堵转时，设置相关的故障标志，进行保护（关闭电机）。

参考文字：

堵转保护功能：自动判断电机在过流时是处于完全堵转状态还是在运行状态或电机短路状态，如果过流时是处于运行状态，控制器将限流值设定在固定值，以保持整车的驱动能力；如电机处于纯堵转状态，则控制器 2 秒后将限流值控制在 10A 以下，起到保护电机和电池，节省电能；如电机处于短路状态，控制器则使输出电流控制在 2A 以下，以确保控制器及电池的安全。

十四、欠压保护

1、欠压保护说明

这是针对电池的保护动作，如果电池过放电，将导致电池的永久损坏。注意欠压保护和电池电压上升后恢复供电这两个电压应有一定回差，比如 48V 电池欠压点在 42V，而恢复供电点在 45V，当电池电压回到 45V 时还应延时数秒，避免控制器频繁进入保护状态使骑行者感到不适。另一点要注意的是，电池是具有内阻的电源，因此在大电流放电的情况下因适当调低欠压值。

电压值的检测也是不需要非常频繁的，所以和把手，刹车一道，在中断中每隔 10-50ms 轮流检测一次 AD 值即可，检测后的结果保存起来放在全局变量中，等到退出中断后，利用单片机的“空余时间”来处理这些值。

电压检测电路参见（图 29：电池电压检测电路）。

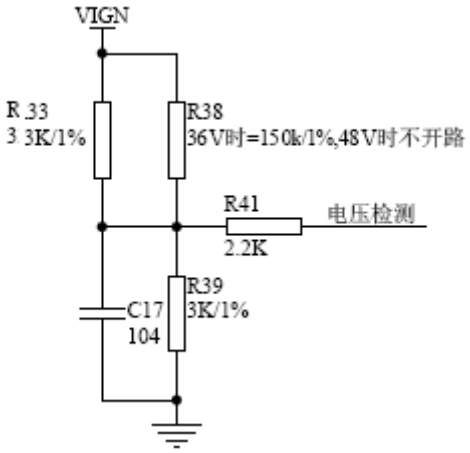


图 29：电池电压检测电路

2、如何识别欠压

工作电压变化比较缓慢，所以是每 1S 检测一次（通过“电压检测使能标志”来控制）。

当电压连续 3S 低于 41.5V±0.5V 时，激活欠压故障保护功能，停止输出；

当电压连续 3S 高于 43V±0.5V 时，或重新上电后，撤销保护。

当电压介于 41.5V~43V 之间时，维持原来检测到的状态。

十五、上电自检

1、把手异常保护

上电时，如果把手位置未处于关闭位置，则关闭输出；调速把手复位后撤销保护。

2、上电 MOS 管短路保护

为了避免生产过程中由于连锡或虚焊导致 MOSFET 烧毁，可以在开机时用极短的时间(大概 10-20μS)的时间全部开启一下上桥，关闭；然后再开启一下下桥。

如果其中有 MOSFET 短路就会产生比较大的电流。这个电流我们可以用单片机在开启 MOSFET 的同时检测到，并通过 LED 故障指示出来。

而在这么短的时间内即使某个 MOSFET 短路，也不至于把另外一个烧掉，所以可以利用这个检验方法来初步检查产品的好坏，也便于修理工修理。

参考文字：

自检功能：分动态自检和静态自检，控制器只要在上电状态，就会自动检测与之相关的接口状态，如转把，刹把或其它外部开关等等，一旦出现故障，控制器自动实施保护，充分保证骑行的安全，当故障排除后控制器的保护状态会自动恢复。

十六、故障显示

参考文字：

LED 故障指示，每家不统一。以下是参考方式：

慢闪：

1 秒钟闪一次，表示没有检测出故障。

快闪：

连续闪两次，停一下，表示刹车，或者刹车部分有故障。

连续闪三次，停一下，表示 INT0 口始终为低电平，很有可能是比较器部分有问题。

连续闪四次，停一下，表示上桥有短路现象

连续闪五次，停一下，表示下桥有短路现象

连续闪六次，停一下，表示电机霍尔信号有故障，或者相位选择有误。

连续闪七次，停一下，表示刚刚发生了过流保护，INT0 口有低电平脉冲出现

连续闪八次，停一下，表示电源电压过低或给单片机供电的 5V 电源电压过高。

十七、☆巡航功能

1、如何区分手动/自动巡航

分配一个 IO 口（输入口）用于巡航功能。在上电初始化时，先判断这个 IO 口。如果为低电平，则设置为自动巡航模式；反之则设置为手动巡航模式。

2、手动巡航

在手动巡航模式下，上述提到的 IO 口被当作按键输入口来识别巡航按钮信号。

手动巡航按钮触发后，电动车进入巡航状态，保持在当前速度行驶；

再次触发巡航按钮、刹车、把手旋转（归零后再转动）或发生故障后撤销巡航状态。

3、自动巡航

在自动巡航模式下，把手固定在一个速度上并维持 8 秒不变，电动车进入巡航状态；

刹车、把手旋转或发生故障后撤销巡航。

十八、1:1 助力功能

是指在没有旋转调速车把，电动车电池打开时，电动车会根据骑行者的骑行速度提供 1:1 助力。

十九、电机锁功能

当报警器给控制器的电机锁信号端提供低电平锁车信号后，控制器将自行切换到电机锁定状态，致使车辆无法被推动行走，报警锁电机信号撤消后，恢复正常。

电机锁系统：在警戒状态下，报警时控制器将电机自动锁死，控制器几乎没有电力消耗，对电机没有特殊要求，在电池欠压或其他异常情况下对电动车正常推行无任何影响。

二十、电源电路

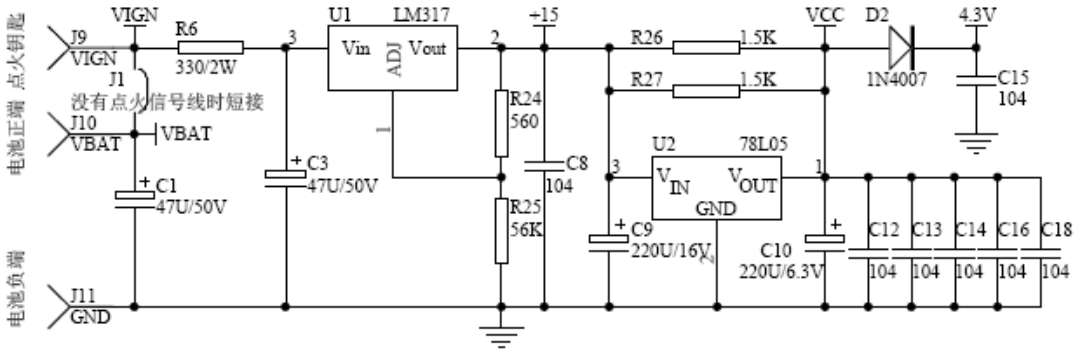


图 30：电源电路

二十一、主流方案

序号	公司	MCU		MOSFET		用量/月
1	无锡鼎天	Infineon	XC846	Infineon		
2	无锡协昌	Infineon	XC846	AOS	AOT430	
3	上海瑞峰	Cypress	CY8C24423	ST	STP75NF75	
4	溧水电子所	Cypress	CY8C24423	IR	IRF1010E	
5	无锡矽成	NEC	UPD78F9234			
6	永康紫微	NEC	UPD78F9234	NEC	2SK4145	
7	无锡方振	Atmel	MEGA48			
8	上海易栢科	Atmel	MEGA48			

表 15: 主流厂家方案一览表

品牌	型号	典型用户 1	典型用户 2	典型用户 3
Renesas	R5CF212	台州新大洋	南京浩悦	无锡矽成
Cypress	CY8C24423	无锡晶汇	上海瑞峰	溧水电子所
	CY8C24533	上海瑞峰		
Infineon	XC846	无锡鼎天	无锡协昌	
	XC866	无锡鼎天		
Atmel	MEGA48	上海易栢科	无锡方振	
NEC	UPD78F9234	无锡矽成	永康紫微	
Mircochip	PIC16F72	常州易尔通	常州五羊	南京浩悦
	HA3089	常州易尔通	常州五羊	
MDT	MDT10P72S			
ST	ST7214	苏州同盛		
Haier	HR6P72	无锡广天		
Philips	P89LPC935			
Sunplus	SPMC65P2404A	南京元朗		
	SPMC75F2313A			
Winbond	W79E82			
	W79E83			
Holtek	HT45RM03	北京恒尔康		
Sino Wealth	SH69P42	天津松正		
STC	STC12C2052	高邮金丰		

表 16: 常见芯片方案一览表

二十二、附录

参考文字：

电动车无刷电机控制器软件设计要点

本文以 MICROCHIP 公司所生产的 PIC16F72 为基础说明软件编程方面所涉及的要点，为节省篇幅，本文不附程序框图，电原理图等。本文适合在单片机编程方面有一定经验的读者，有些基础知识恕不一一介绍。

我们先列一下电动车无刷马达控制器的基本要求：

功能性要求：

1。电子换相

2。无级调速

3。刹车断电

4。附加功能

a。限速

b。1+1 助力

c。EBS 柔性电磁刹车

d。定速巡航

e。其它功能(消除换相噪音，倒车等)

安全性要求：

1。限流驱动

2。过流保护

3。堵转保护

3。电池欠压保护

4。降低温升

5。附加功能(防盗锁死，温升限制等)

6。附加故障检测功能

从上面的要求来看，功能性要求和安全性要求的前三项用专用的无刷马达驱动芯片加上适当的外围电路均不难解决，代表芯片是摩托罗拉的 MC33035，早期的控制器方案均用该集成块解决。但后来随着竞争加剧，很多厂商都增加了不少附加功能，一些附加功能用硬件来实现就比较困难，所以使用单片机来做控制的控制器迅速取代了硬件电路芯片。

但是硬件控制和软件控制有很大的区别，硬件控制的反应速度仅仅受限于逻辑门的开关速度，而软件的运行则需要时间。要使软件跟得上电机控制的需求，就必须要求软件在最短的时间内能够正确处理换相，电流限制等各种复杂动作，这就涉及到一个对外部信号的采样频率，采样时机，信号的内部处理判断及处理结果的输出，还有一些抗干扰措施等，这些都是软件设计中需要再三仔细考虑的东西。

下面我们挑选对控制器性能和安全比较重要的功能来讨论编程中应该注意的问题和使用的一般方法。

2。无级调速

由于使用直流电源，电机的速度得依靠调节加在电机两端的电压来调整，较简单的办法是使用 PWM 脉宽调制来调节加到电机两端的电压。PWM 的工作周期根据电机的使用环境，采用 64μS，折算成频率大约 15。625KHz，频率太低了会产生人耳能明显感觉到的高频噪声，电流也不容易控制;太高了又增加电子开关的开关损耗。PWM 脉冲的最大宽度，这个直接影响到电机的最高速度，则由把手输出的电压决定。

把手电压检测简单，人对速度的感觉很迟钝，所以把手的检测不需要很频繁，这个 AD 检测与电源电压，刹车等检测均不需要很快的速度，所以每隔 10mS-50mS 轮番检测一次便足够，AD 的检测在定时中断中做，而结果则放在中断外做，这样不会占用中断太多的时间。

编程提示：

由于现在大多采用线性霍尔作为把手调节速度方案，优点是无触电，故障率极低。缺点是在 5V 供电的情况下，电压只能在 1。1V-4。3V 的范围内变化，因此软件的处理相对复杂一点，不过对于硬件处理来讲要简单许多。这只需要我们做一点简单的运算，或者采用查表的方法，将这期间的 AD 数值转换成 PWM 占空比的值即可。虽然讲是无级调速，实际上分 32 级时人已经感觉不出来了。但是有一点，根据把手得出的 PWM 脉冲宽度不能直接用来控制 PWM 占空比，需要在电流允许的情况下才能让占空比达到设定值。

程序中所用关键控制寄存器及其作用：

PR2：决定 PWM 的工作周期，也就是 PWM 的调制频率，工作中其值不断地与 TMR2 中的值相比较，当 TMR2 的值等于 PR2 时 TMR2 归零重新开始另一个周期，由于用到 TMR2，所以 TMR2 的预分频器也同样影响到 PWM 的工作周期。具体计算公式在数据手册上可以找到，下同。

CCPR1L 及 CCP1CON 的第 4，5 位：决定 PWM 的占空比，单片机在运行时 TMR2 的值不断与 CCPR1L 中的值比较，当 TMR2=CCPR1L 时，PWM 输出脚输出低电平。当 CCPR1L 中的值大于 PR2 时，PWM 输出脚持续输出高电平。注意：CCP1CON 中的第 4，5 位在这里并非无用，在后面的电流调节中可以用来微调 PWM 的占空比。

T2CON：决定 TMR2 的预分频器和后分频器的分频比，预分频器和前面讲过的 PR2 共同决定 PWM 频率，后分频器决定 TMR2 的中断周期。

3。刹车断电：

电动车在刹车把手附近装了一个微动开关，一方面在刹车时点亮刹车灯，一方面给控制器提供一个刹车高或低电平信号，各厂家不一定，在电路上作一些电平转换很容易就可以提供给单片机一个准确的信号，我们可以采用数字测量的方法测量这个电平是高还是低，也可以使用 AD 去测量有几伏，总之监测到这个信号后必须关闭所有的驱动输出和 PWM 输出，这就可以实现刹车断电。编程方面我就不多说了。至于如何实现 EBS 电子刹车，由于篇幅关系，也不再多讲。

4。限流驱动

这是整个控制器的灵魂，如果限流驱动没做好，其他功能再好还是一个字：烧!。

电动车控制器的电子开关均使用功率 MOSFET 控制，MOSFET 的最大允许电流，最大允许功耗都有其限制，如果没有电流控制，或者电流控制不好，均会导致功率 MOSFET 的烧毁，从而导致整个控制器报废，因此电流控制是本程序的重中之重，这个做不好，其它功能一概免谈。

说起来严重，其实做起来，摸到窍门也是很简单的，其秘诀也只有四个字：准确，及时

电流信号经康铜丝采样之后分两路，一路送至放大器，一路送至比较器。放大器用来实时放

大电流信号，放大倍数大约 6。5 倍，放大后的信号提供给单片机进行 AD 采样转换，转换所得数字用来控制电流不超过我们所允许的值。另一路信号送至比较器，当电流突然由于某种原因大大超过允许值，比如一只 MOSFET 击穿或误导通时，比较器翻转送出低电平，触发单片机的 INT0 外部中断，使单片机能够快速关断驱动，从而保护 MOSFET 避免更大伤害。我们这里所要讲述的准确，及时两个要素，主要是针对放大器放大之后的信号处理过程来表述的。

准确

首先一个条件是准确，这里所指的是电流的 AD 采样和转换的时机。我们现在使用的是 PWM 脉冲驱动，这种脉冲驱动导致的直接结果是放大后的电流信号与 PWM 脉冲频率相同，相位上滞后一定时间的脉动电流波形，这种波形如果没有经过滤波处理，将会类似于一个梯形，如果我们要获得准确的电流 AD 转换值，最好的办法就是在梯形波的上边中间采样电流信号，这样所获得的电流 AD 值才能较为准确地反应电流的实际大小。在本文所选的单片机上，AD 转换的采样开始时间由 ADCON0 中的 ADON 位控制开始，AD 转换则由 ADGO 位启动，采样时间，在单片机的数据手册里有明确的规定，在一般控制器放大电路中，采样的时间一般采用 10-20μS，在这期间可以做一些固定的事，比如系统计时之类的，以免浪费资源。而转换时间，只要保证不小于数据手册所规定的 1。6μS/bit 的最低要求，当然是越快越好，这里设定为 2μS/bit。

那么怎样保证采样的准确性呢？这里有一个前面提过的办法，就是使用定时中断，我们可以设定好使定时中断和 PWM 周期同步，预先设定好 AD 的通道，将 AD 转换器切换到检测电流的那个通道，当进入定时中断处理完现场保护，中断源判断等一系列动作之后，开启 ADON 时刻刚好落在电流梯形波的中央，采样完毕之后马上进行转换。在等待转换结果出来的过程中，我们也不能闲着，毕竟那是>20μS 的时间，在资源比较紧张的时候浪费了可惜，我们可以做一些比如"鉴相"的工作，就是在电子换相中所作必须作的工作。

及时

其次是要及时。如果我们想及时准确地控制电流，采样次数也是要求越多越好，因为电流的变化相当快，在一个 PWM 周期中变化量可能会很大，所以我们最好是在一个 PWM 周期里采样数次，但是我们的单片机没有这么快的速度，再说 PWM 的占空比在一个周期中只接受最后的改变，而且要到下个周期才能发挥作用，所以一个 PWM 周期采样一次就够了，而且为了更好地处理其它事情，我们两个周期才对电流采样一次。

采样转换之后的工作，就是处理了。怎样根据 AD 结果去调节电流？我们不需要想到 PID 控制那么复杂的概念，只需要在电流没达到限制值时逐渐增加 CCPR1L 的值，直到等于把手设定值为止，如果在此过程中电流接近限制值，那么应该不再增加 CCPR1L 的值，直到电流减小。如果电流超过了限制值，则根据超过的量，找一个比较合适的减小量，比如 CCPR1L 减 1 或减 3，一切以电流比较稳定为准，不要有太大的波动，但波动越小，我们要求 PWM 占空比调整精度越高。

这里要提一下的是 PWM 分辨率，以 PIC16F72 的条件，在 16M 时钟的工作频率和 15。625K 的 PWM 频率前提下，PWM 的占空比调整可以有 10BIT 的精度，但 10BIT 的数据涉及 2 个字节的运算，所以我们还是只采用 8BIT 的调整精度，实践证明，8BIT 的精度对调整电流来说足够。所以我们只对 CCPR1L 进行操作就可以，前提是 TMR2 预分频值为 1：1

恒流算法--电流即时值和有效值的矛盾：也许我们注意到大多数控制器的最大电流并没有出现在堵转的时候，这是因为上面我们所检测到的是电流的即时值，我们在电流表上看到的是电源电流的有效值，当 PWM 占空比不是 100%的情况下，电流有效值≈电流即时值*PWM 占空比，也就是说，占空比越小，要保证电流有效值达到我们的期望值，电流的即时值要提高，这样就涉及一个算法问题：提高多少？我们可以根据上面那个公式做一个表格，或者根

据 CCPR1L 中的值做一个简单的换算。总之是不能占用太多的系统时间。
电流的测量和控制还涉及到其他两个附加功能：换相消噪和降低温升，降低温升这个要结合硬件讲，我们就把它放在以后《硬件设计要点》部分，先来讲讲换相消噪。关于电流的另一点：过流保护，当有 MOSFET 击穿或 MOSFET 误导通时，会造成上下桥直通将电源直接短路，这样会有很大的电流，为避免更大的伤害，在电流信号引起比较器翻转时触发 INT0 中断，由于 PIC16F72 没有中断嵌套，因此在整个定时中断中均要随时检测 INT0 中断标志，防止短路发生。

5。堵转保护
为了防止电机发生堵转时电流始终通过同一组 MOSFET 而造成永久损害，因此有必要在堵转发生之后数秒钟之内切断电机的供电。一般时间是 2 秒。要注意的是有时电机虽然发生堵转，但刚好在换相的临界点，此时会产生频繁的换相动作，这对 MOSFET 也是有害的，所以也应当作堵转来对待。

6。欠压保护
这是针对电池的保护动作，如果电池过放电，将导致电池的永久损坏。注意欠压保护和电池电压上升后恢复供电这两个电压应有一定回差，比如 48V 电池欠压点在 42V，而恢复供电点在 45V，当电池电压回到 45V 时还应延时数秒，避免控制器频繁进入保护状态使骑行者感到不适。另一点要注意的是，电池是具有内阻的电源，因此在大电流放电的情况下因适当调低欠压值。
电压值的检测也是不需要非常频繁的，所以和把手，刹车一道，在中断中每隔 10-50ms 轮流检测一次 AD 值即可，检测后的结果保存起来放在全局变量中，等到退出中断后，利用单片机的"空余时间"来处理这些值。

7。故障的检测，保护及显示：
使用了单片机这样的可以智能化的零件，我们就可以做一些工作来帮助生产和维修：
由于生产过程中不可避免会造成一些诸如虚焊，连锡之类的缺陷，所以在产品组装成半成品测试时就会出现一些故障，轻则某些功能失效，重的会导致元器件烧毁，这是老板绝对不愿意看到的，所以我们可以多做一些工作最大限度上避免此类问题的发生：
我们最担心的是生产过程中由于连锡或虚焊导致 MOSFET 烧毁，一个 MOSFET 好几块 RMB，谁见了都心疼。幸好现在有单片机，在开机时可以用极短的时间(大概 10-20μS)的时间全部开启一下上桥，关闭，然后再开启一下下桥，如果其中有 MOSFET 短路就会产生比较大的电流，这个电流我们可以用单片机在开启 MOSFET 的同时检测到，而在这么短的时间内即使某个 MOSFET 短路，也不至于把另外一个烧掉，所以可以利用这个检验方法来初步检查产品的好坏，也便于修理工修理。其他的故障比较好检测，这里就不一一赘述。
故障检测出来了，需要显示出来以告知人们出了什么故障，目前一般采用 LED 闪烁次数来表示，次数可以自己定，也可以采用比较流行的办法：
慢闪：
1 秒钟闪一次，表示没有检测出故障。
快闪：
连续闪两次，停一下，表示刹车，或者刹车部分有故障。
连续闪三次，停一下，表示 INT0 口始终为低电平，很有可能是比较器部分有问题。
连续闪四次，停一下，表示上桥有短路现象
连续闪五次，停一下，表示下桥有短路现象

连续闪六次，停一下，表示电机霍尔信号有故障，或者相位选择有误。
连续闪七次，停一下，表示刚刚发生了过流保护，INT0 口有低电平脉冲出现
连续闪八次，停一下，表示电源电压过低或给单片机供电的 5V 电源电压过高。

电动车控制器主要功能特点如下：

超静音设计技术：独特的电流控制算法，能适用于任何一款无刷电动车电机，并且具有相当的控制效果，提高了电动车控制器的普遍适应性，使电动车电机和控制器不再需要匹配。

恒流控制技术：电动车控制器堵转电流和动态运行电流完全一致，保证了电池的寿命，并且提高了电动车电机的启动转矩。

自动识别电机模式系统：自动识别电动车电机的换相角度、霍尔相位和电机输出相位，只要控制器的电源线、转把线和刹车线不接错，就能自动识别电机的输入及输出模式，可以省去无刷电动车电机接线的麻烦，大大降低了电动车控制器的使用要求。

随动 abs 系统：具有反充电/汽车 EABS 刹车功能，引入了汽车级的 EABS 防抱死技术，达到了 EABS 刹车静音、柔和的效果，不管在任何车速下保证刹车的舒适性和稳定性，不会出现原来的 abs 在低速情况下刹车刹不住的现象，完全不损伤电机，减少机械制动力和机械刹车的压力，降低刹车噪音，大大增加了整车制动的安全性；并且刹车、减速或下坡滑行时将 EABS 产生的能量反馈给电池，起到反充电的效果，从而对电池进行维护，延长电池寿命，增加续行里程，用户可根据自己的骑行习惯自行调整 EABS 刹车深度。

电机锁系统：在警戒状态下，报警时控制器将电机自动锁死，控制器几乎没有电力消耗，对电机没有特殊要求，在电池欠压或其他异常情况下对电动车正常推行无任何影响。

自检功能：分动态自检和静态自检，控制器只要在上电状态，就会自动检测与之相关的接口状态，如转把，刹把或其它外部开关等等，一旦出现故障，控制器自动实施保护，充分保证骑行的安全，当故障排除后控制器的保护状态会自动恢复。

反充电功能：刹车、减速或下坡滑行时将 EABS 产生的能量反馈给电池，起到反充电的效果，从而对电池进行维护，延长电池寿命，增加续行里程。

动静态缺相保护：指在电机运行状态时，电动车电机任意一相发生断相故障时，控制器实行保护，避免造成电机烧毁，同时保护电动车电池、延长电池寿命。

功率管动态保护功能：控制器在动态运行时，实时监测功率管的工作情况，一旦出现功率管损坏的情况，控制器马上实施保护，以防止由于连锁反应损坏其他的功率管后，出现推车比较费力的现象。

防飞车功能：解决了无刷电动车控制器由于转把或线路故障引起的飞车现象，提高了系统的安全性。

1+1 助力功能：用户可自行调整采用自向助力或反向助力，实现了在骑行中辅以动力，让骑行者感觉更轻松。

巡航功能：自动/手动巡航功能一体化，用户可根据需要自行选择，8 秒进入巡航，稳定行驶速度，无须把手控制。

模式切换功能：用户可切换电动模式或助力模式。

防盗报警功能：超静音设计，引入汽车级的遥控防盗理念，防盗的稳定性更高，在报警状态下可锁死电机，报警喇叭音效高达 125dB 以上，具有极强的威慑力。并具有自学习功能，遥控距离长达 150 米不会有误码产生。

倒车功能：控制器增加了倒车功能，当用户在正常骑行时，倒车功能失效；当用户停车时，按下倒车功能键，可进行辅助倒车，并且倒车速度最高不超过 10km/h。

遥控功能：采用先进的遥控技术，长达 256 的加密算法，灵敏度多级可调，加密性能更好，并且绝无重码现象发生，极大地提高了系统的稳定性，并具有自学习功能，遥控距离长达 150 米不会有误码产生。

高速控制：采用最新的为马达控制设计专用的单片机，加入全新的 BLDC 控制算法，适用于低于 6000rpm 高速、中速或低速电机控制。

电机相位：60 度 120 度电机自动兼容，不管是 60 度电机还是 120 度电机，都可以兼容，不需要修改任何设置。