

HallFoc 算法解析

李若尘，子渊先生

1	代码简介	错误!未定义书签。				
1.1	文件组织	错误!未定义书签。		2.3	电角度增量	8
1.2	工程组织	错误!未定义书签。		2.4	电角速度	9
1.3	电角度增量	错误!未定义书签。		2.5	调试	10
1.4	电角速度	错误!未定义书签。		3	调试	错误!未定义书签。
1.5	调试	错误!未定义书签。		3.1	单板	错误!未定义书签。
2	角度估计	3		3.2	运行	错误!未定义书签。
2.1	HALL 处理	4		3.3	初始定位	错误!未定义书签。
2.2	HALL 静态角度	6				

1 角度估计

1.1 Hall 处理

CAP0/CAP1/CAP2 分别对应霍尔信号 HU/HV/HW, 与 H3/H2/H1 一一对应。以下霍尔角度的定义是参考的往上一份资料的定义, 实际上不一定正确。

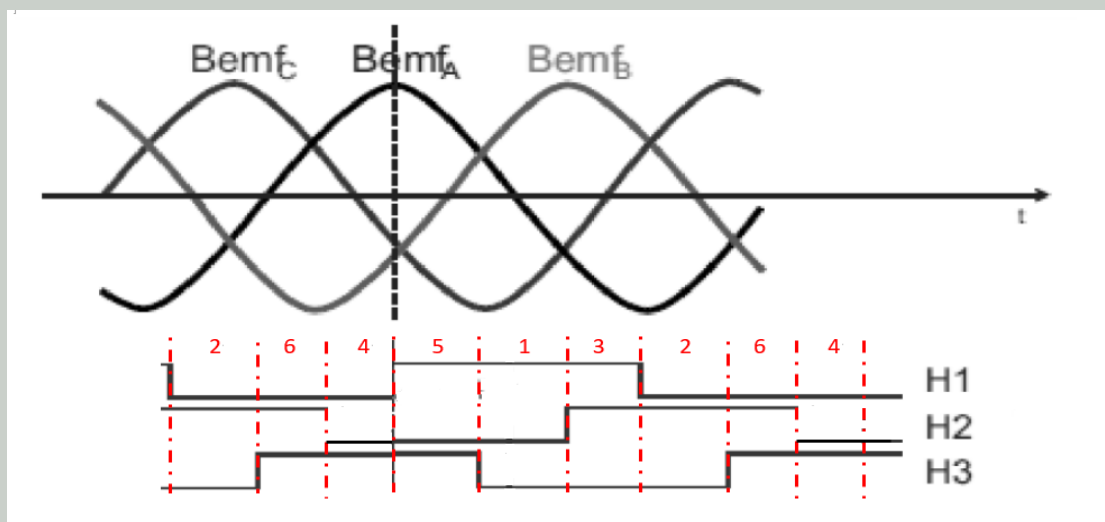


图 1.1-1 霍尔信号与角度

读到霍尔值为 5 的时候, 认为初始化角度为 30° , 这样误差最大也就是正负 30° 。当霍尔值跳变时对应的角度是精确的, 例如 4→5 的时刻角度为 0° 、5→1 时刻的角度为 60° 等等。

ST 的库可能是在上升沿触发;

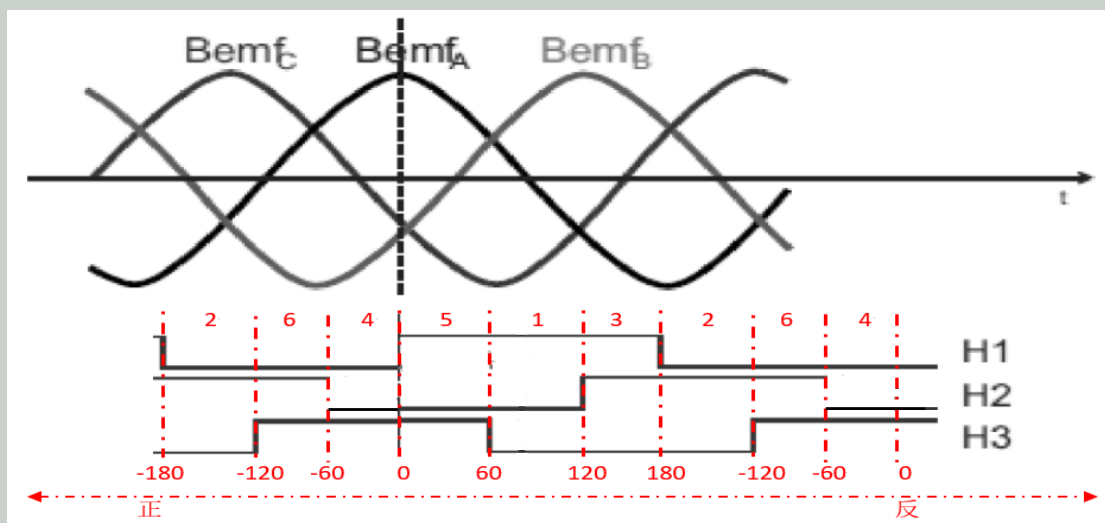


图 1.1-2 旋转方向

将状态出现的顺序 6→5 定义为正向、3→5 定义为反向, 很明显, 正向对应于 d 轴逆时针旋转, 反转对应为顺时针旋转。

目前都是只检测霍尔信号的单一边沿, 据称可以提高抗干扰的能力; 比如, 只选择在上升沿中断, 那么就会只读到 6、5、3 这三个状态。同步将会间隔 120° , 同步的次数和精度有所下降。

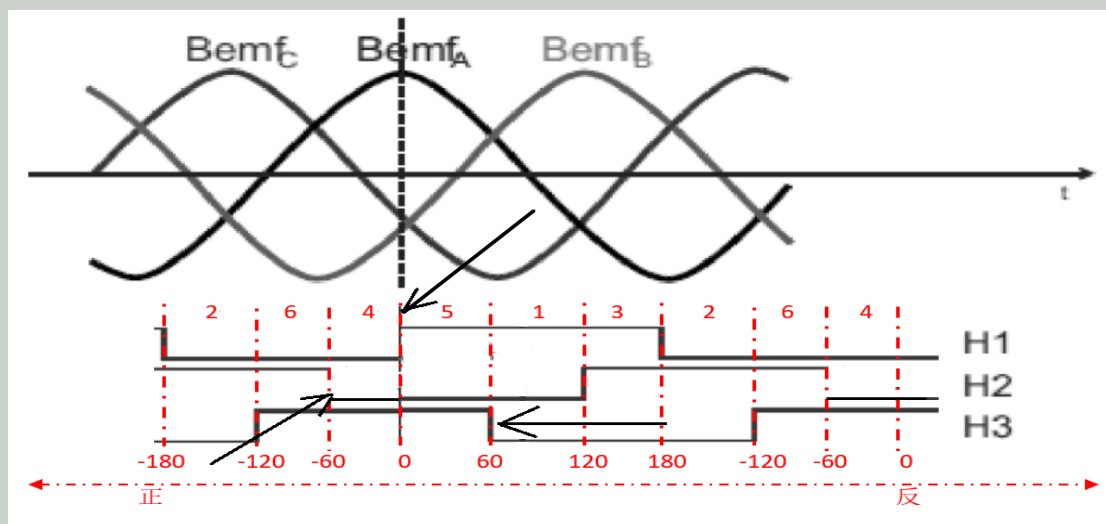


图 1.1-3 出现方向交换

本来是往左运动, 读到状态 5; 继续往左到状态 1 但未到状态 3, 此时改为向右运动再次得到状态 5, 那么角度应该是 60° , 并且转向改为向右。

还有一个可能是, 状态 5-4-5, 这样抖动几下, 相当于角度还是没有变。

所以计算转速和角度增量时要加倍!

1.2 Hall 静态角度

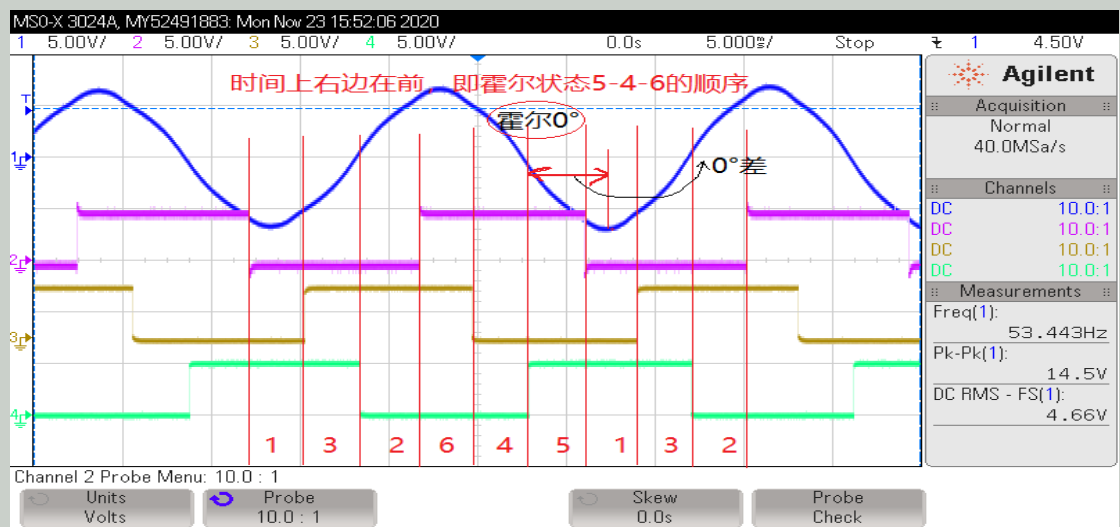


图 1.2-1 这个图上搞反了，左边才是先出现的

从上到下霍尔信号为 HU、HV、HW，霍尔状态为 HUHVVHW。霍尔各个状态对应的角度可以随便定义，这里采用常用的方式，定义

霍尔状态	2	6	4	5	1	3
角度值	-180~-120	-120~-60	-60~0	0~60	60~120	120~180

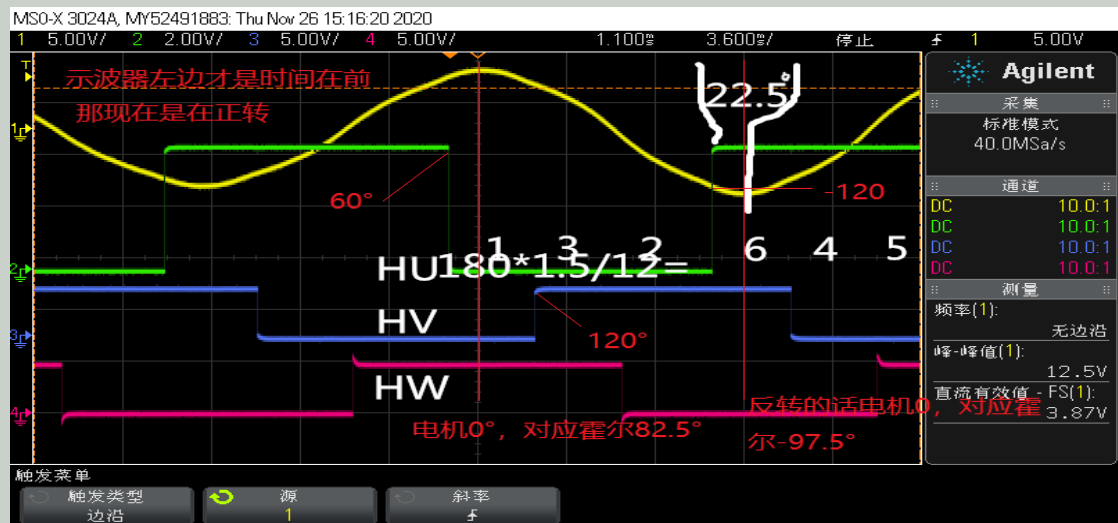
上述定义默认霍尔状态 4 和 5 之间为 0°，因为是反转，故反电势 U_{bc} 的负向峰值处对应电机 0 度，两者之间相差 $60 + 180/8$ (示波器读出)度。电机实际角度(转子/d 轴角度)为 $Angle_Hall - (60 + 180/8)$ 。

正转时经过的霍尔顺序为 2-6-4-5-1-3，切换霍尔值时的同步角度为

刚刚进入的霍尔状态	2	6	4	5	1	3
同步角度值	-180	-120	-60	0	60	120
重排	1	2	3	4	5	6
重排同步角度	60	-180	120	-60	0	-120

反转时

刚刚进入的霍尔状态	3	1	5	4	6	2
同步角度值	180	120	60	0	-60	-120
重排	1	2	3	4	5	6
重排同步角度	120	-120	180	0	60	-60



实际上, 软件中按照角度增加的方向输出电流矢量, 将拖动电机按照一个某一个方向运行。这时候霍尔信号的变化方向其实是不确定的, 霍尔有可能是按照 2-6-4-5-1-3 变化, 也有可能是按照 3-1-5-4-6-2 变化。

但使用霍尔反馈角度时, 是读取霍尔序列确定运行方向, 进而确定确定软件中角度的增加方向, 和开环运行角度的变化没有关系。

比如, 转速设定为+1000, 那么速度环会输出+ i_q , 此时若霍尔序列为 3-1-5-4-6-2 (即实际检测转速为负值) 那么会输出更大的+ i_q , 直到电压饱和, 转速达到负向最大。前期电流加上后, 后面由于电压饱和对电流失去调节能力所以电流可能也会很大。

怎么处理呢?

那只能将 3-1-5-4-6-2 序列重新定义一下, 定义为角度增加的方向

霍尔状态	2	6	4	5	1	3
角度值	180~120	120~60	60~0	0~-60	-60~-120	-120~-180
初始值	150	90	30	-30	-90	-150

正转就是

刚刚进入的霍尔状态	3	1	5	4	6	2
同步角度值	-180	-120	-60	0	60	120
重排	1	2	3	4	5	6
重排同步角度	-120	120	-180	0	-60	60

反转时

刚刚进入的霍尔状态	2	6	4	5	1	3
同步角度值	180	120	60	0	-60	-120
重排	1	2	3	4	5	6
重排同步角度	-60	180	-120	60	0	120

1.3 电角度增量

捕获中断发生之后立即复位捕获模块计数器, 这样下次捕获发生时直接由捕获值即可计算时间间隔。之所以这么处理是因为模块的时钟频率是动态调节的, 所以两次捕获值代表的时间间隔可能不一样。

捕获模块时钟 f_{cap} 由芯片系统时钟 f_{sys} 分频得到

$$f_{cap} = f_{sys} / k_{psc} \quad 1.3-1$$

由捕获值 X_{cap} 得时间间隔为

$$\Delta t = \frac{X_{cap}}{f_{cap}} = \frac{X_{cap}}{f_{sys} / k_{psc}} = \frac{X_{cap} \cdot k_{psc}}{f_{sys}} \quad 1.3-2$$

在此时间间隔内电机转过的角度是固定的 $2\pi/3$, 故电机转动的电角速度为

$$w_e = \frac{2\pi}{3} / \Delta t = \frac{2\pi}{3} / \left(\frac{X_{cap} \cdot k_{psc}}{f_{sys}} \right) = \frac{2\pi}{3} \cdot \frac{f_{sys}}{X_{cap} \cdot k_{psc}} \quad 1.3-3$$

在一个 PWM 周期内电机转过的电角度为

$$\Delta\theta_e = w_e / f_{pwm} = \frac{2\pi}{3f_{pwm}} \cdot \frac{f_{sys}}{X_{cap} \cdot k_{psc}} \quad 1.3-4$$

在软件中, 角度以 2π 为基值进行标么化并且使用 Q32 格式表示, 于是

$$\Delta\theta_{pu} = \frac{\Delta\theta_e}{2\pi} \times 2^{32} = \frac{1}{3f_{pwm}} \cdot \frac{f_{sys}}{X_{cap} \cdot k_{psc}} \times 2^{32} \quad 1.3-5$$

目前, 载波和系统频率是固定的, 那么

$$\Delta\theta_{pu} = \frac{1}{3f_{pwm}} \cdot \frac{f_{sys}}{X_{cap} \cdot k_{psc}} \times 2^{32} = \frac{1}{3 \times 16000} \cdot \frac{84 \times 10^6}{X_{cap} \cdot k_{psc}} \times 2^{32} = \frac{1750}{X_{cap} \cdot k_{psc}} \times 2^{32} \quad 1.3-6$$

以机械转速 1rpm 为例, 四对极电机对应电角速度为

$$w_e = 2\pi \times \frac{4 \times 1}{60} = 0.4189 \text{ rad/s}$$

在 16k 载波频率下, 一个载波周期内转过角度为

$$\theta_{pu} = \frac{w_e}{2\pi f_{pwm}} \times 2^{32} = \frac{1}{16000} \times \frac{4 \times 1}{60} \times 2^{32} = 17895$$

如果是使用 Q16 格式, 精度就已经不够了。

这个速度大约需要 5s 钟才能转过 $2\pi/3$ 电角度, 发生一次捕获。以最慢的时钟 feed 捕获模块, 大约要发生 $5/0.8=6.25$ 次溢出。估算一下

$$\Delta\theta_{pu} = \frac{1}{3 \times 16000} \cdot \frac{84 \times 10^6}{6.25 \times 65535 \cdot 1024} \times 2^{32} = 17920$$

与上面的结果是吻合的。

1.4 电角速度

由上一小节知道电机的角速度为

$$\omega_e = \frac{2\pi}{3} / \Delta t = \frac{2\pi}{3} / \left(\frac{X_{cap} \cdot k_{psc}}{f_{sys}} \right) = \frac{2\pi}{3} \cdot \frac{f_{sys}}{X_{cap} \cdot k_{psc}} \quad 1.4-1$$

转换成频率, 则有

$$f_e = \frac{\omega_e}{2\pi} = \frac{f_{sys}}{3X_{cap} \cdot k_{psc}} \quad 1.4-2$$

在软件中, 转速 (频率) 以频率基值进行标么化并以 Q15 格式数据表示, 于是

$$f_{pu} = \frac{f_e}{f_b / 10} \times 2^{15} = \frac{f_{sys}}{3X_{cap} \cdot k_{psc}} \cdot \frac{10}{f_b} \times 2^{15} \quad 1.4-3$$

其中, 目前频率相关变量都有 1 个小数点, 故 fb 需要除以 10。系统时钟频率是 84E6, 故

$$f_{pu} = \frac{84 \times 10^6}{3X_{cap} \cdot k_{psc}} \cdot \frac{10}{f_b} \times 2^{15} = \frac{28 \times 10^7}{X_{cap} \cdot k_{psc}} \cdot \frac{2^{15}}{f_b} = \frac{35000}{X_{cap} \cdot k_{psc}} \cdot \frac{2^{15} \times 10^3}{f_b} \times 8 \quad 1.4-4$$

在软件中将 fb 限制在 50.0Hz 以上, 那么 $2^{15} \times 1000 / fb$ 就不会溢出, 整个项可以在初始化阶段预先计算出来备用。

$$\left. \begin{aligned} f_{pu} &= \frac{f_{sys}}{3X_{cap} \cdot k_{psc}} \cdot \frac{10}{f_b} \times 2^{15} \\ \Delta\theta_{pu} &= \frac{1}{f_{pwm}} \cdot \frac{f_{sys}}{3X_{cap} \cdot k_{psc}} \times 2^{32} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{f_{pu}}{\Delta\theta_{pu}} = \frac{\frac{f_{sys}}{3X_{cap} \cdot k_{psc}} \cdot \frac{10}{f_b} \times 2^{15}}{\frac{1}{f_{pwm}} \cdot \frac{f_{sys}}{3X_{cap} \cdot k_{psc}} \times 2^{32}} = \frac{10 f_{pwm}}{2^{17} f_b} \quad 1.4-5$$

于是有

$$f_{pu} = \frac{5 f_{pwm}}{2^{16} f_b} \cdot \Delta\theta_{pu} = \frac{320 f_{pwm}}{f_b} \cdot \Delta\theta_{pu} \times \frac{1}{2^{22}}$$

1.5 调试

上电后捕获计数器溢出时间大约是 0.8s

$$t_o = \frac{1024 \times 65535}{84 \times 10^6} \approx 0.8s$$

初始化完成之后, 计数器开始向上计数。如果电机静止, 那么将一直触发溢出中断而没有捕获中断; 如果电机在高速转动, 那么很快就会有捕获中断。

第一次捕获的捕获值相对于初始值 0, 无论中间有溢出或者没有, 从初始化到第一次捕获事件发生之间的时间是确定的。但是, 第一次捕获发生无法明确所转动的角度是多少, 所以只能进行角度同步而无法对角速度进行计算。

