EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 带传感器梯形控制固件设计

固件详细描述

作者：**Leonard Xiao**

关于本文档

范围和目的

本文档详细介绍了固件的功能模块，可作为使用 **EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH** 电机驱动板的参考。该驱动板由 **XMC1400 系列微控制器**、**MOTIX™ 6EDL7141 三相智能驱动 IC** 以及英飞凌最佳功率 MOSFET **OptiMOS™ 6** 组成。该系统可用于无绳电动工具和其他电池供电的电机驱动应用。固件可以通过进一步修改而用于定制的驱动板或电机。

目标读者

本文档的目标读者为那些希望深度了解基于 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 驱动板的梯形控制固件解决方案的设计人员，该驱动板适用于无绳电动工具和其他电池供电的电机驱动应用市场。主要针对设计工程师、应用工程师以及学生。

目录

关于本文档 1
目录 1
1 简介 3
1.1 安装 3
1.2 目录和文件 3
2 架构 5
2.1 方框图 5
2.2 XMC™ 资源分配 5
2.3 管理参数 7
2.4 内存映射 8
2.5 中断 8
2.5.1 换向中断函数 8
2.5.2 霍尔事件中断函数 9
2.5.3 控制环中断函数 9
2.5.4 系统定时器中断函数 10
2.6 状态机 10
2.7 控制方案 12
2.7.1 控制方案配置 12
2.7.2 电压控制 13
2.7.3 转速控制 13
2.7.4 电流控制 13
2.7.5 转速电流控制 14
2.8 斜坡发生器 14

目录

2.8.1 快速制动期间的电压钳位 14
2.9 PWM 方案 15
2.10 相位超前角 16
2.11 位置接口 16
2.12 测量 19
2.12.1 模拟输入测量 20
2.12.2 直流母线电流测量 20
2.12.3 直流母线电压测量 20
2.12.4 电位器测量 20
2.12.5 数字输入测量 21
2.12.6 浮动预定标器 22
2.12.7 速度测量 22
2.13 电压补偿 24
2.14 霍尔模式学习 24
2.14.1 霍尔学习配置 24
2.14.2 霍尔学习描述 24
2.15 PI 控制器 26
2.16 保护 26
2.16.1 Trap 保护 26
2.16.2 霍尔错误保护 26
2.16.3 霍尔学习保护 26
2.16.4 电机堵转保护 26
2.16.5 直流母线过压/欠压保护 27
2.16.6 SPI 故障保护 27
2.16.7 栅极驱动器复位保护 27
2.17 控制 MOTIX™ 6EDL7141 智能栅极驱动器 27
2.18 使用 GUI 示波器 27
3 图形用户界面 GUI 29
4 参考文献 30
修订记录 31

1 简介

本文档提供了在英飞凌 (XMC1400 + MOTIX™ 6EDL7141) 平台上进行带霍尔传感器的三相无刷直流电机 (BLDC) 梯形控制的相关信息。该示例固件作为一个 ModusToolbox™ (MTB)工程提供，包含了 BSP (板载支持包)和一个代码例程。例程包含了与三相无刷直流电机控制相关的算法固件，主要用于电池供电的电机驱动等终端应用。例程具有高度的可配置性和模块化以给各个部分提供参考。

掌握了例程的基础知识后，只需稍加修改，就可以用于 IMD7xx 系列集成控制器。

1.1 安装

为快速验证固件版本，并从提供的解决方案中受益，建议您安装以下软件：

- BPA 电机控制图形用户界面 (GUI)
  - 图形用户界面 (GUI) 可提供简单的配置，快速使电机运行
- ModusToolbox™工具包
  - ModusToolbox™是由多平台开发工具和一整套 GitHub® 软件库的集合。它们一起给客户开发集中的 MCU 和 Wireless 系统提供了沉浸式的开发体验。

1.2 目录和文件

固件的文件夹结构如图 1 所示。

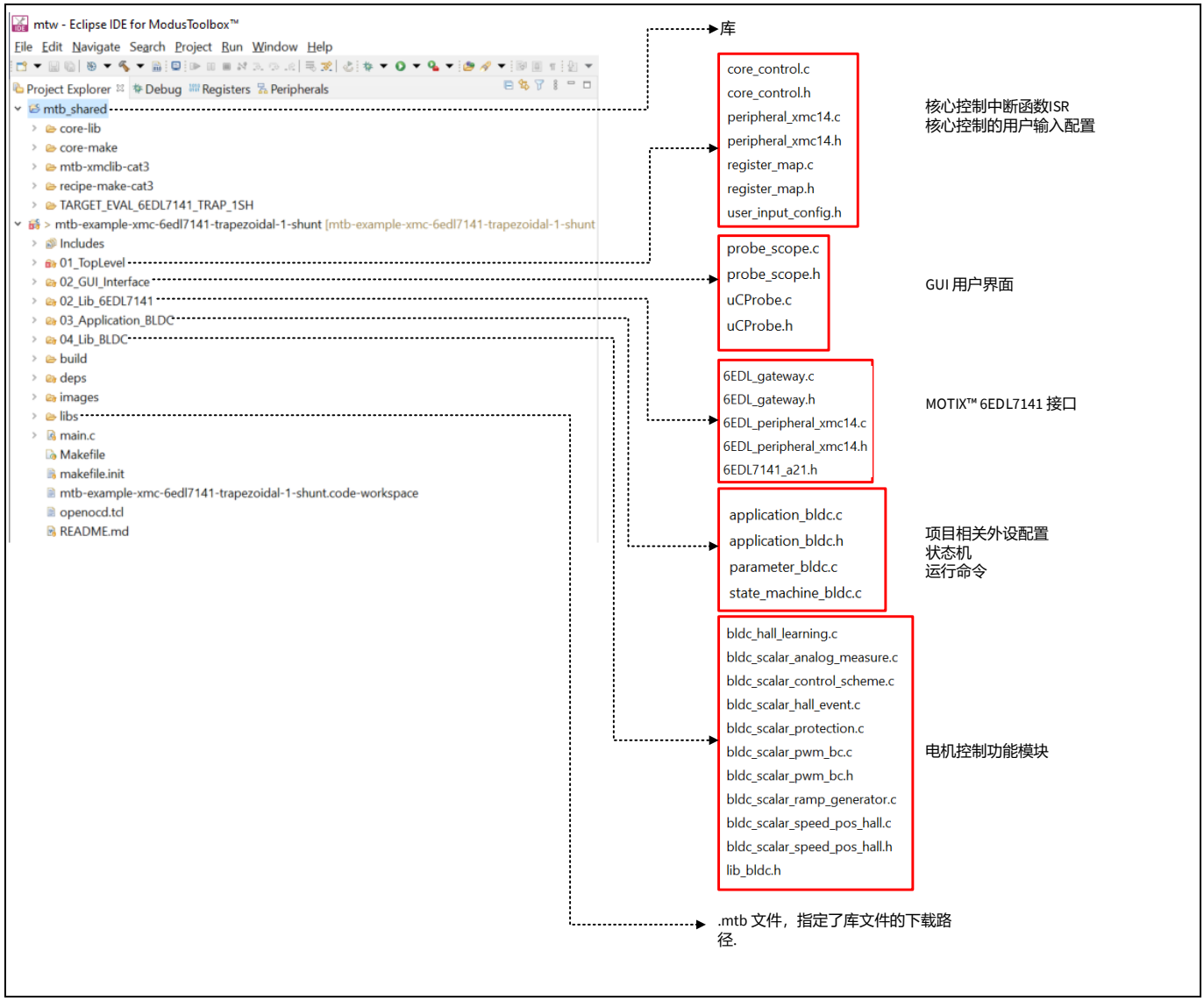

mtw - Eclipse IDE for ModusToolbox™
File Edit Navigate Search Project Run Window Help
Project Explorer
Debug
Registers
Peripherals
mtb_shared
core-lib
core-make
mtb-xmclib-cat3
recipe-make-cat3
TARGET_EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH
mtb-example-xmc-6edl7141-trapezoidal-1-shunt [mtb-example-xmc-6edl7141-trapezoidal-1-shunt
Includes
01_TopLevel
02_GUI_Interface
02_Lib_6EDL7141
03_Application_BLDC
04_Lib_BLDC
build
deps
images
libs
main.c
Makefile
makefile.init
mtb-example-xmc-6edl7141-trapezoidal-1-shunt.code-workspace
openocd.tcl
README.md
库
core_control.c
core_control.h
peripheral_xmc14.c
peripheral_xmc14.h
register_map.c
register_map.h
user_input_config.h
核心控制中断函数ISR
核心控制的用户输入配置
probe_scope.c
probe_scope.h
uCProbe.c
uCProbe.h
GUI 用户界面
6EDL_gateway.c
6EDL_gateway.h
6EDL_peripheral_xmc14.c
6EDL_peripheral_xmc14.h
6EDL7141_a21.h
MOTIX™ 6EDL7141 接口
application_bldc.c
application_bldc.h
parameter_bldc.c
state_machine_bldc.c
项目相关外设配置
状态机
运行命令
bldc_hall_learning.c
bldc_scalar_analog_measure.c
bldc_scalar_control_scheme.c
bldc_scalar_hall_event.c
bldc_scalar_protection.c
bldc_scalar_pwm_bc.c
bldc_scalar_pwm_bc.h
bldc_scalar_ramp_generator.c
bldc_scalar_speed_pos_hall.c
bldc_scalar_speed_pos_hall.h
lib_bldc.h
电机控制功能模块
.mtb 文件，指定了库文件的下载路径.

图 1　文件/文件夹结构

2 架构

2.1 方框图

示例软件的主要模块如图 2 所示。

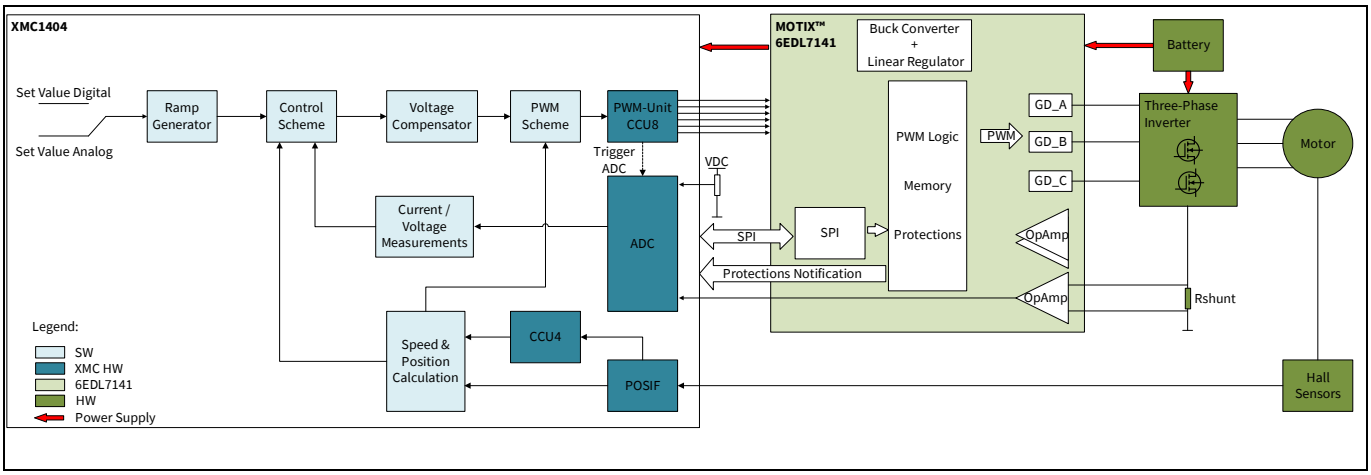


图 2 方框图

2.2 XMC™ 资源分配

XMC™ 控制器资源分配包括了引脚分配和外设分配，如表 1 和 2 所示。

表 1 XMC1404-VQFN64-200kB MCU 引脚分配

端口	VQFN64 引脚	EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 原理图	配置	描述
P0.0	41	MOSI_P0_0	USIC1_CH1.DOUT0、ALT9	和 MOTIX™ 6EDL7141 通信的 SPI MOSI
P0.1	42	MISO_P0_1	USIC1_CH1.DX0B	和 MOTIX™ 6EDL7141 通信的 SPI MISO
P0.2	43	–	–	–
P0.3	44	SCLK_P0_3	USIC1_CH1.SCLKOUT、ALT8	和 MOTIX™ 6EDL7141 通信的 SPI SCLK
P0.4	45	NSCS_P0_4	USIC1_CH1.SELO0、ALT8	和 MOTIX™ 6EDL7141 通信的 SPI CS
P0.5	46	–	–	–
P0.6	47	–	–	–
P0.7	48	XMC_EN_DRV_P0_7	GPIO 输出	EN_DRV 至 MOTIX™ 6EDL7141
P0.8/RTC_XTAL1	51	–	–	–
P0.9/RTC_XTAL2	52	–	–	–

端口	VQFN64 引脚	EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 原理图	配置	描述
P0.10/XTAL1	53	–	–	–
P0.11/XTAL2	54	–	–	–
P0.12	55	XMC_nFAULT_P3_4	（保留）	（保留）
P0.13	56	–	–	–
P0.14	57	SWDIO TMS_P0_14	SWDIO	SWDIO
P0.15	58	SWDCLK TCK_P0_15	SWDCLK	SWDCLK
P1.0	34	INHC	PWM 输出	高边栅极脉冲——W 相
P1.1	33	INLC	PWM 输出	低边栅极脉冲——W 相
P1.2	32	XMC_AZ_P1_2	GPIO 输出	至 MOTIX™ 6EDL7141 的 Auto-Zero
P1.3	31	XMC_nBRAKE_P1_3	GPIO 输出	至 MOTIX™ 6EDL7141 的 nBRAKE
P1.4	30	–	–	–
P1.5	29	–	–	–
P1.6	28	–	–	–
P1.7	27	–	–	–
P1.8	26	–	–	–
P2.0	9	BEMF_W_P2_0	–	W 相反电动势（保留）
P2.1	10	BEMF_V_P2_1	–	V 相反电动势（保留）
P2.2	11	BEMF_U_P2_2	–	U 相反电动势（保留）
P2.3	12	BAT_SENSE_P2_3	模拟输入，G1CH5	电池电压测量
P2.4	13	Temp_Sense_P2_4	模拟输入，G1CH6	温度测量
P2.5	14	Speed_Control_P2_5	模拟输入，G1CH7	电位器测量
P2.6	15	P2_6	模拟输入，G0CH0	套件选择。 从电阻分压中采样 ADC 值并区分当前的板。可用板： EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH_v2 EVAL_6EDL7141_FOC_3SH_v1 EVAL_IMD700A_FOC_3SH_v1 … (待续)
P2.7	16	BRAKE_XMC_P2_7	GPIO 输入	（保留）
P2.8	17	–	–	–
P2.9	18	–	–	–
P2.10	19	Amp_iV_P2_10_XMC	模拟输入，G1CH2	直流母线电流测量
P2.11	20	–	–	–
P2.12	21	–	–	–
P2.13	22	XMC_EN_DRV_CLK_2_13	GPIO 输出	至 MOTIX™ 6EDL7141 的看门狗时钟输出

端口	VQFN64 引脚	EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 原理图	配置	描述
P3.0	36	INLB	PWM 输出	低边栅极脉冲——V 相
P3.1	37	INHB	PWM 输出	高边栅极脉冲——V 相
P3.2	38	INLA	PWM 输出	低边栅极脉冲——U 相
P3.3	39	INHA	PWM 输出	高边栅极脉冲——U 相
P3.4	40	XMC_nFAULT_P3_4	ERU1.2A3	来自 MOTIX™ 6EDL7141 的 nFAULT 信号
P4.0	59	–	–	–
P4.1	60	HALL0_P4_1	GPIO 输入	霍尔传感器输入——U 相
P4.2	61	HALL1_P4_2	GPIO 输入	霍尔传感器输入——V 相
P4.3	62	HALL2_P4_3	GPIO 输入	霍尔传感器输入——W 相
P4.4	63	PC_RX_P4_4	–	PC UART 接口
P4.5	64	PC_TX_P4_5	–	PC UART 接口
P4.6	3	–	–	–
P4.7	4	AUX_LED0_P4_7	GPIO 输出	LED，霍尔信号指示
P4.8	5	AUX_LED1_P4_8	GPIO 输出	LED，状态指示
P4.9	6	–	–	–
P4.10	7	DirectionSwitch_P4_10	GPIO 输入	电机方向
P4.11	8	–	–	–

表 2　　XMC™ 外设列表

否	资源	目的	固件配置
1	CCU41_CC41	用于多通道模式同步	边沿对齐、单次模式，使能了周期匹配中断来使能换向
2	CCU41_CC42	用于电机速度捕获	边沿对齐、捕获和清除、捕获霍尔事件之间时间
3	POSIF1	霍尔和 MCM 配置	霍尔接口，参考 CCU41
4	CCU81_CC80	PWM 生成——W 相	中心对齐
5	CCU81_CC81	PWM 产生——U 相	中心对齐、使能下溢中断
6	CCU81_CC82	PWM 生成——V 相	中心对齐
7	VADC GroupA QueueB	直流母线电流、直流母线电压、电位器采样及用户自定义信号的采样	由 CCU81_CC82（V 相）通道 2 比较匹配触发
8	NVIC	用于 ISR	–
9	SYSTICK	用于状态机	1 毫秒系统定时器中断

2.3　　管理参数

参数类型有两种：

- 用户输入——用户输入参数通常用工程单位（如 V、A、RPM 等）表示，用户可以根据应用的需要轻松配置。

- 内部参数——内部参数是固件实际使用的参数。为提高代码执行效率，大多数内部参数使用不同的比例系数，因此可能不容易理解。图形用户界面 (GUI) 的一个关键功能就是根据用户输入参数计算内部参数。同时，在固件中也有一个转换函数（但是被注释掉了）。在固件中，在头文件 01_TopLevel/user_input_config.h 中用 #define 定义用户输入，转换函数在 c 源文件 03_Framework_BLDC/parameter_bldc.c 中。

所有与电机控制相关的内部参数都被放在结构体 *MotorParam* 中，电机运行前必须正确配置 *MotorParam* 的各成员数据。使用 GUI 输入用户输入参数，并通由 GUI 计算内部参数值，然后在 GUI 中点击“写入参数”按钮，来将所有内部参数写入 MCU 的 RAM 中。完成此步骤后，电机准备就绪。

2.4 内存映射

XMC1404-VQFN64-200kB 为指令代码或常量数据提供了 200 kB 的 flash 空间，从地址 $1000'1000_H$ 开始。这不包括用于存储系统信息的 flash 扇区 0，该扇区始终为只读模式。在固件中，MCU flash 中指定了位置用于存储内部参数——这些参数为 MOTIX™ 6EDL7141 寄存器设置和电机控制参数，如**表 3** 所示。用户可能想将参数保存到 MCU 中，以便下次 MCU 通电时，电机可以立即运行。点击 GUI 中的“写入 flash”按钮将内部参数存储到 flash 中。

完整的内存映射请参阅 **XMC1400 参考手册**。

表 3 内存映射

地址空间	地址范围	描述
代码	10001000_H 到 $1000FFFF_H$	Flash (60 kB)
	10010000_H 到 $100100FF_H$	存储 MOTIX™ 6EDL7141 寄存器设置（256 字节）
	10010100_H 到 $100101FF_H$	存储电机控制参数（256 字节）
	10010200_H 到 $10032FFF_H$	Flash (139.5 kB)

2.5 中断

完整的中断表如**表 4** 所示。

表 4 中断表

中断	函数名称	间隔	服务请求来源	节点 ID	优先级
换向中断	*Commutation_ISR*	异步	CCU41.SR0	21 (IRQ21_IRQn)	0
霍尔事件中断	*Motor0_BLDC_SCALAR_HallEvent_ISR*	异步	POSIF1.SR0	27 (IRQ27_IRQn)	1
控制环中断	*Motor0_BLDC_SCALAR_ControlLoop_ISR*	1/PWM 频率	CCU81.SR0	25 (IRQ25_IRQn)	2
系统定时器中断	*SysTick_Handler*	1 毫秒	–	-1 (SysTick_IRQn)	3

2.5.1 换向中断函数

POSIF 的多通道影子传输事件被用作换向中断函数。它由 CCU41 slice 1 的周期匹配触发。也可在任何多通道模式需要立即更新的其他地方调用该函数。

中断函数任务

- 根据霍尔扇区设置 PWM 扇区。
- 获取影子多通道模式值，施加 PWM 调制模式。

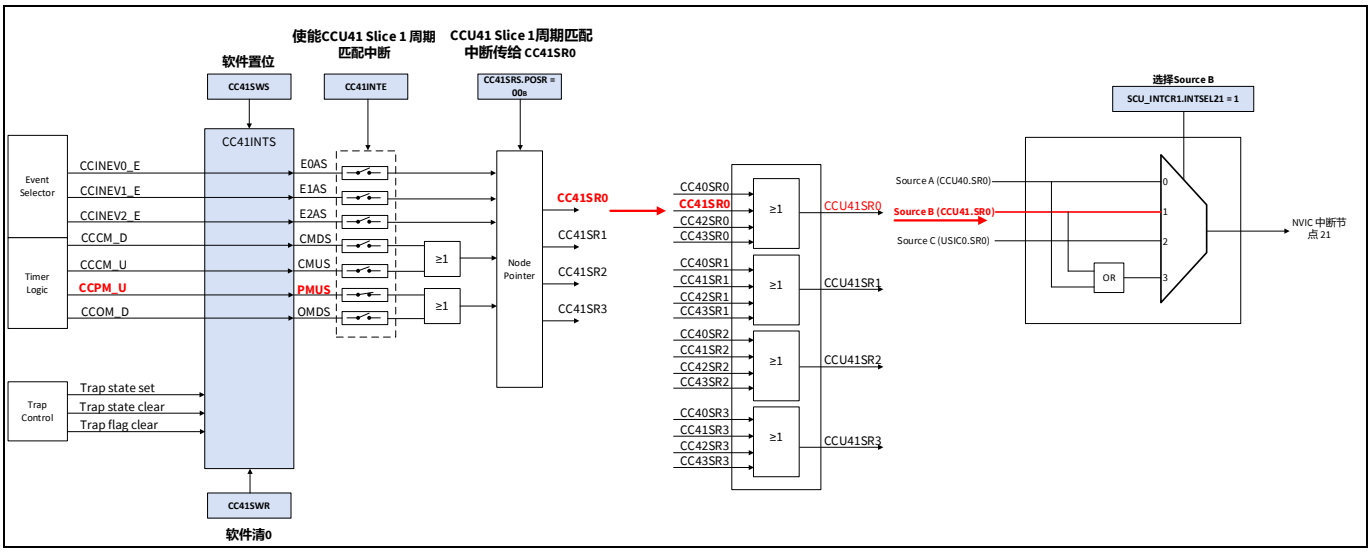


图 3　　NVIC 中断节点 21 的源选择

2.5.2　　霍尔事件中断函数

霍尔输入中断更新。

中断函数任务

- 更新霍尔模式并从 CCU4 捕获 slice，即 CCU41 slice 2 中读取捕获值。
- 如果霍尔模式非预期值则报错误霍尔故障。
- 为下一次换向准备霍尔和多通道模式。
- 根据捕获值计算速度。

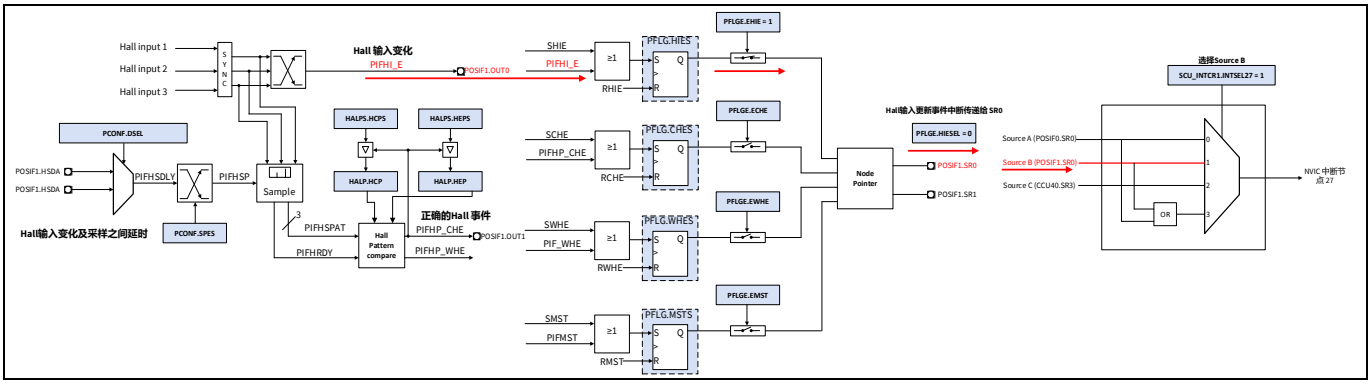


图 4　　NVIC 中断节点 27 的源选择

2.5.3　　控制环中断函数

控制环中断跟 PWM 频率一致。U 相 PWM slice 的下溢中断被用作控制环。

中断函数任务

- 读取直流母线电流。

- 读取直流母线电压。
- 检查直流母线过压/欠压。
- 执行预先配置好的控制方案，更新占空比。
- uCProbe 波形采样。

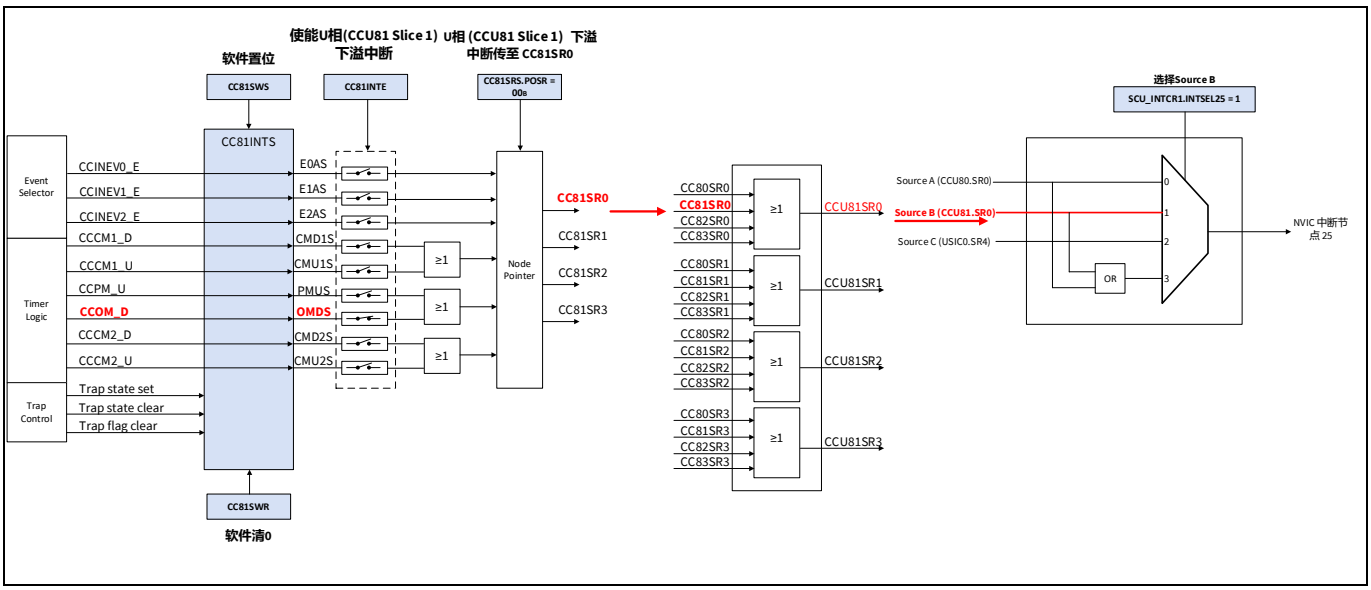


图 5　　NVIC 中断节点 25 的源选择

2.5.4　　系统定时器中断函数

系统定时器中断函数可用作调度器。

中断函数任务

- 滤波并计算温度。
- 状态机。
- 翻转状态 LED。
- 处理从 GUI 或控制参数得到的对 MOTIX™ 6EDL7141 的写入请求。
- 更新 MOTIX™ 6EDL7141 GUI 监测值。
- 通过从 MOTIX™ 6EDL7141 读取来刷新变量。
- 控制 EN_DRV 和 nBRAKE 引脚输出。
- 以 500 Hz 翻转 EN_DRV_CLK 引脚，作为 MOTIX™ 6EDL7141 看门狗时钟。

2.6　　状态机

电机控制状态机在系统定时器中断函数里执行。状态流程图如下。

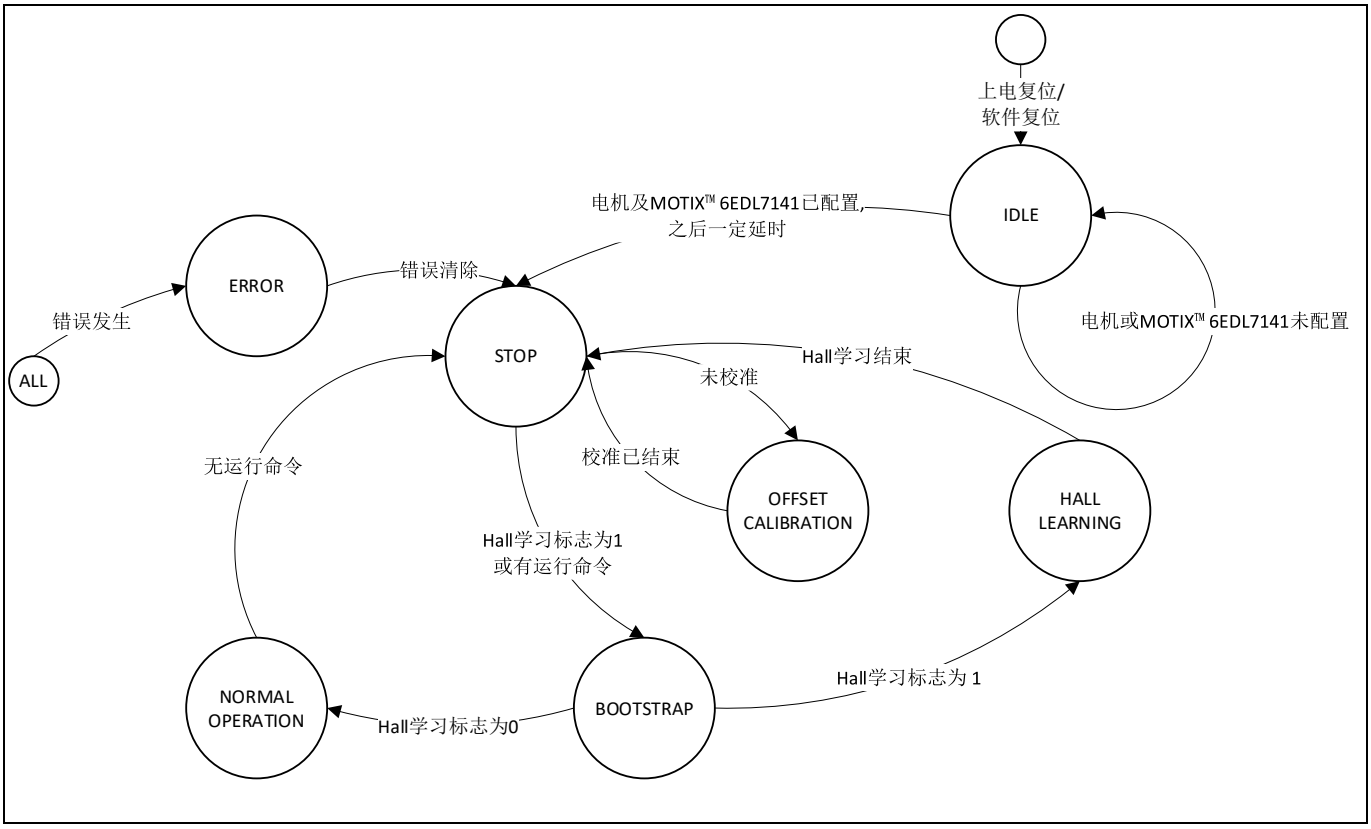


图 6　　状态机流程图

状态切换矩阵如**表 5** 所示。

表 5　　状态机切换矩阵

状态	状态功能	触发切换事件	触发事件后的状态
IDLE (空闲)	检查确保已配置电机和 MOTIX™ 6EDL7141 参数 计算推导参数，初始化 XMC™ 外设，更新霍尔模式和霍尔扇区	已配置电机参数和 MOTIX™ 6EDL7141 参数 初始化完成	STOP (停止)
		Trap 错误 SPI 通信故障 过压/欠压错误	ERROR (错误)
STOP (停止)	更新参数 检查偏移校准状态	偏移尚未校准	OFFSET CALIBRATION (偏移校准)
		霍尔学习标志有效 或接收到直接来自 GUI 或电位器的运行命令	BOOTSTRAP (自举充电)
		Trap 错误 霍尔错误事件 MOTIX™ 6EDL7141 复位故障 SPI 通信错误 过压/欠压错误	ERROR (错误)
OFFSET CALIBRATION (偏移校准)	执行偏移校准	偏移校准完成	STOP (停止)
		Trap 错误 霍尔错误事件	ERROR (错误)

状态	状态功能	触发切换事件	触发事件后的状态
		MOTIX™ 6EDL7141 复位错误 SPI 通信错误 过压/欠压错误	
BOOTSTRAP (自举充电)	每一输出相进行自举充电	自举充电已完成且霍尔学习标志为 1	HALL LEARNING (霍尔学习)
		自举充电已完成且霍尔学习标志为 0	NORMAL OPERATION (正常运行)
		Trap 错误 霍尔错误事件 MOTIX™ 6EDL7141 复位错误 SPI 通信错误 过压/欠压错误	ERROR (错误)
HALL LEARNING (霍尔学习)	霍尔模式识别算法	霍尔模式识别成功	STOP (停止)
		Trap 错误 霍尔错误事件 MOTIX™ 6EDL7141 复位错误 SPI 通信错误 过压/欠压错误 超时——未能检测霍尔模式	ERROR (错误)
NORMAL OPERATION (正常运行)	控制环执行 加速/减速 堵转检测	接收到停止命令	STOP (停止)
		Trap 错误 MOTIX™ 6EDL7141 复位错误 SPI 通信错误 霍尔错误事件 过压/欠压错误 堵转检测	ERROR (错误)
ERROR (错误)	设置停止命令，等待错误被清除	错误被清除	STOP (停止)

2.7 控制方案

该固件可通过以下控制方案之一控制三相无刷直流电机：电压控制、转速控制、电流控制、转速电流控制。在电机停止状态下，可以通过改变 *MotorParam.ControlScheme* 中的值来切换不同的控制方案。

2.7.1 控制方案配置

MotorParam.ControlScheme——该变量可以配置控制方案，如下所示：

电压控制——*VOLTAGE_CONTROL*

转速控制——*SPEED_CONTROL*

电流控制——*CURRENT_CONTROL*

转速电流控制——*SPEED_CURRENT_CONTROL*

2.7.2 电压控制

电压控制提供了一种类似于有刷直流电动机的运行方式。虽然使用霍尔传感器控制定子磁场的位置与转子同步，但转速和转矩跟电机结构和机械负载有关。根据配置，电压设定值输入连接到加减速输出（如果加减速启用）或用户设定值/模拟输入。

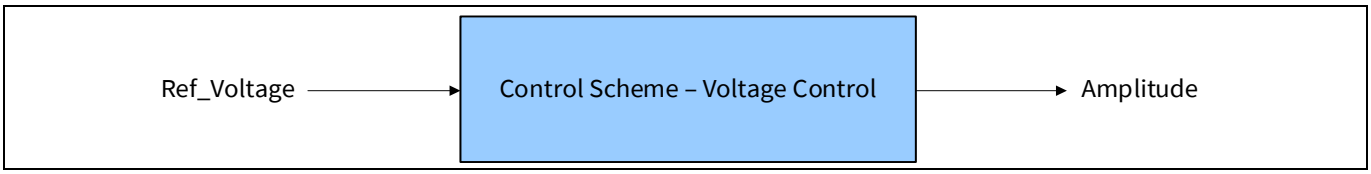


图 7 控制方案——电压控制

Ramp.output 是用于 Ref_Voltage 的变量。

2.7.3 转速控制

转速控制方案为闭环控制，根据转速设定值调整电压。在负载动态变化的情况下，输出到电机的电压自动调整，转速维持恒定。由霍尔传感器/相电压得到实际速度值。根据配置，速度设定值输入连接到加减速输出（如果加减速启用）或用户设定值/模拟输入。

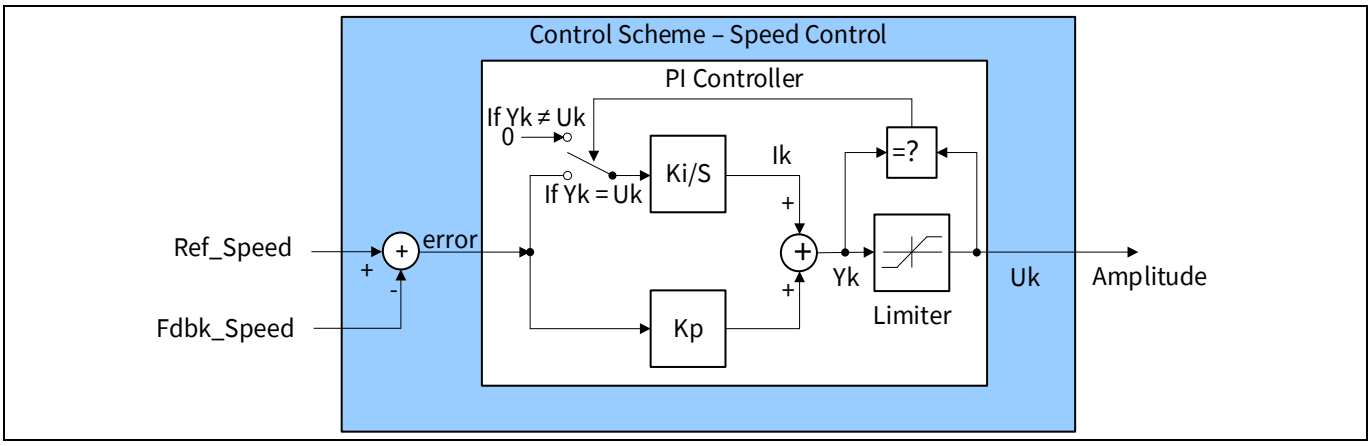


图 8 控制方案——转速控制

Ramp.output 是用于 Ref_Speed 的变量；*Motor0_BLDC_SCALAR.motor_speed* 是用于 *Fdbk_Speed* 的变量。

2.7.4 电流控制

电流控制方案需要电流反馈并根据所需转矩调整电压输出。在动态负载下，速度会发生变化，但转矩将维持恒定。根据配置，电流设定值输入连接到加减速输出（如果加减速启用，此处即电流设定值斜坡变化）或用户设定值/模拟输入。

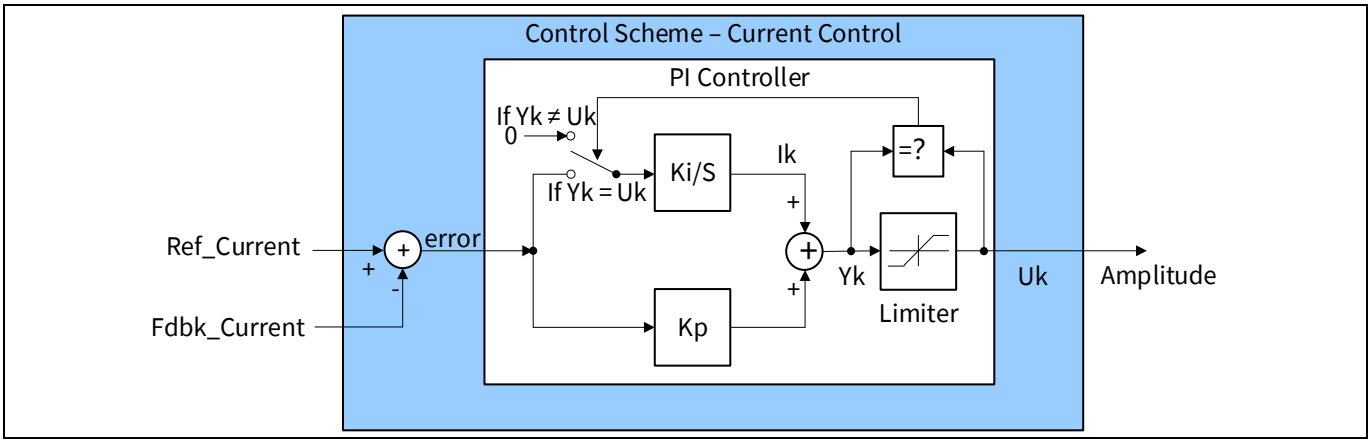


图 9　　控制方案——电流控制

Ramp.output 是用于 Ref_Current 的变量；*MotorVar.MotorCurrent* 是用于 Fdbk_Current 的变量。

2.7.5　　转速电流控制

转速电流控制方案提供了一种级联控制方案，内环通过改变输出到电机的电压来调节电流（转矩），外环提供电流给定值来控制转速。根据配置，速度设定值输入连接到加减速输出（如果加减速启用）或用户设定值/模拟输入。

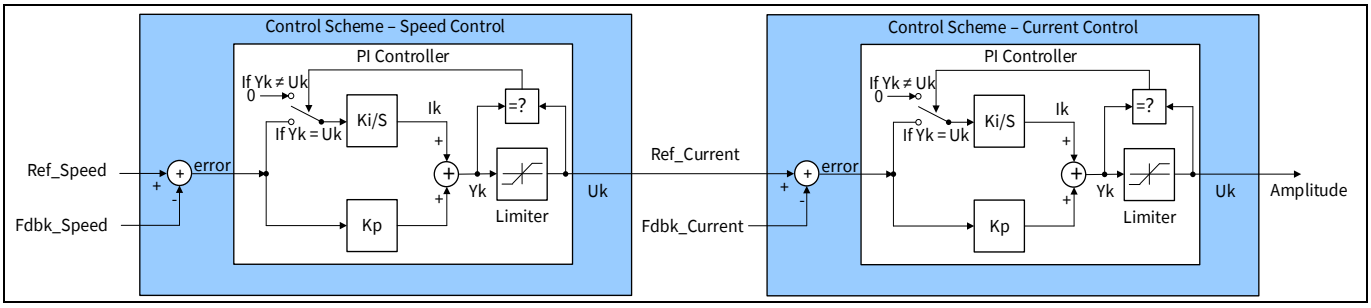


图 10　　控制方案——电流控制速度

2.8　　斜坡发生器

该固件可提供斜坡函数，按线性曲线和输入参数从初始值斜坡到结束值得到设定值。初始值和结束值都可配置。根据配置，斜坡发生器输入连接到用户设定值或模拟输入。

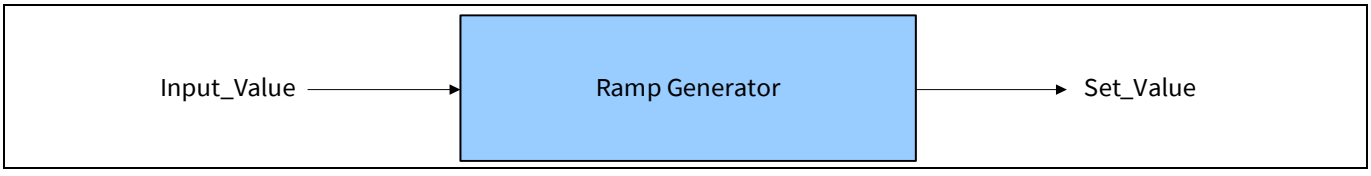


图 11　　斜坡发生器

2.8.1　　快速制动期间的电压钳位

示例固提供“快速制动/减速期间的电压钳位”功能。

总的说来，在减速期间监测直流母线电压。只有当直流母线电压低于用户设定的电压限制值时，才会发生减速。可通过修改 *RAMP_DOWN_MAX_VOLTAGE* 设定电压限制值，默认值为 28 V。

2.9 PWM 方案

表 6 解释了可以用于组合得到 PWM 方案的三位的位设置。总共可以得到八种 PWM 方案应用在无刷直流电机控制中。

表 6 PWM 方案位设置（第 2 位~第 0 位）

位设置	= 0	= 1
DiodeRect（第 0 位）	互补开关	非互补开关
LowSideSw（第 1 位）	高边开关	低边开关
SixtyDegPwm（第 2 位）	120 度 PWM	60 度 PWM

在固件中，直接提供了其中三种 PWM 方案作为示例：

- PwmType = 0（带有同步整流的高边调制）
- PwmType = 2（带有同步整流的低边调制）
- PwmType = 4（带有同步整流的高-低切换调制）

这三种 PWM 方案进一步阐述如图 12 所示。

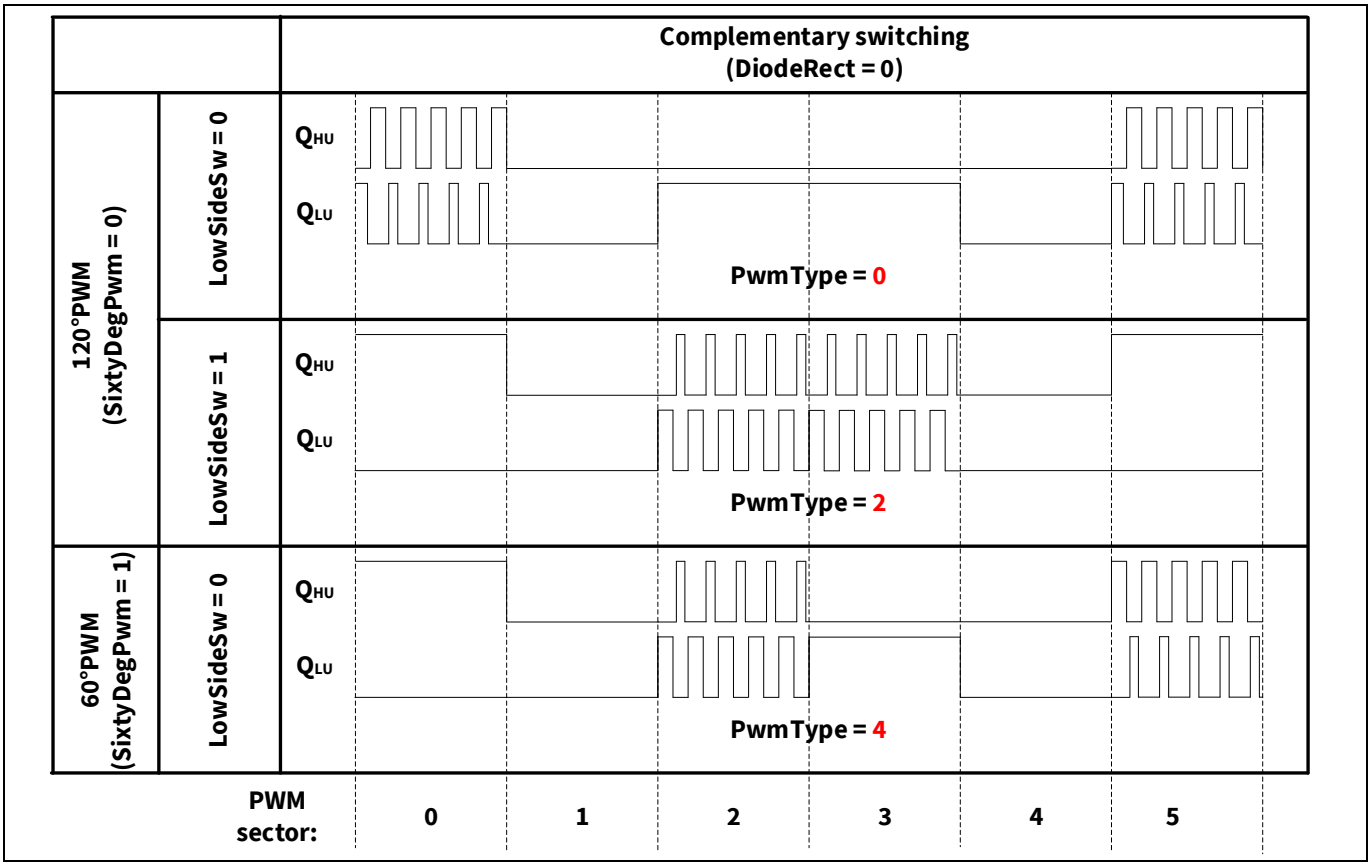


图 12 PWM 方案

表 7 显示了与图 12 中的 PwmType 相对应的实际变量设置。

表 7　　对应 PWM 方案的固件变量

MotorParam.PwmModulationType	MotorVar.PwmScheme	PwmType	方案说明
0（默认值）	0（默认值）	0（默认值）	PWM_高边_同步整流
1	1	2	PWM_低边_同步整流
2	2	4	PWM_高低边切换_同步整流

2.10　相位超前角

采用相位超前可以获得更高的效率和更广的速度范围。实现方法如下。

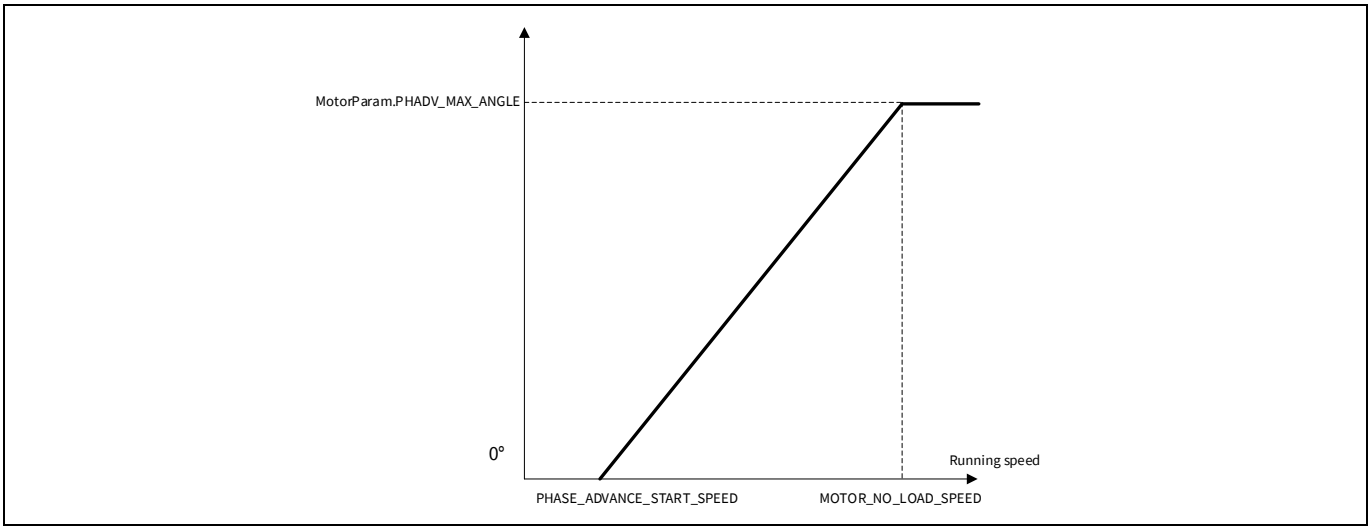


图 13　　相位超前角

- 设置 *PHASE_ADVANCE_MAX_ANGLE* 为非零值来使能相位超前。
- 当电机速度高于 *PHASE_ADVANCE_START_SPEED* 时，相位超前开始生效，相位超前角度会根据当前运行速度进行线性调整。
- 根据实际速度和 *PHASE_ADVANCE_MAX_ANGLE* 调整换向延迟，然后将其应用于 CCU41 slice 1 周期值。这会改变新的多通道模式的启用时刻。参阅 **2.5.1**。
- PWM 超前一个扇区，在此过程中会考虑运行方向。如果相位超前已生效则使用此新 PWM 扇区，如果无效则不使用。

PHASE_ADVANCE_START_SPEED - Q14，可定义相位超前角的初始速度，在高于此速度时相位超前角从 0° 开始线性增加。

PHASE_ADVANCE_MAX_ANGLE - 可定义最大速度下的最大相位超前角。将此值设置为 0 则禁用相位超前。

Note:　　*请确保 PHASE_ADVANCE_START_SPEED < MOTOR_NO_LOAD_SPEED*

请确保 PHASE_ADVANCE_MAX_ANGLE < 60 °

2.11　位置接口

XMC™ 器件的 POSIF 模块可用作位置接口。POSIF 模块负责捕获电机的位置和速度。同时还负责更新换向模式。

架构

在 BLDC 电机中，用三个相距 120 度的霍尔传感器来获得电机的位置和速度。霍尔传感器输入连接到 XMC™ 器件的 POSIF 模块。

此处使用 XMC™ 器件中霍尔传感器模式的配置文件 1（关于配置文件 1 的更多详情信息，请参阅 XMC™ 参考手册），使用了两个 CCU4 slice。

1.一个 slice 用于获取位置并生成用于换向模式更新的信号（MCM 更新）。在固件中为 CCU41 slice 1。

2.另一个 slice 用于速度测量。在固件中为 CCU41 slice 2。

利用 CCU41 slice 1 的上升沿 ST 信号进行霍尔重新采样。ST 信号上升沿的延迟为消隐时间。可防止霍尔信号中的任何噪音。

CCU41 slice 1 定时器的周期值用于控制换向的相位延迟。相位延迟事件结束后，换向模式与 PWM 信号同步更新。

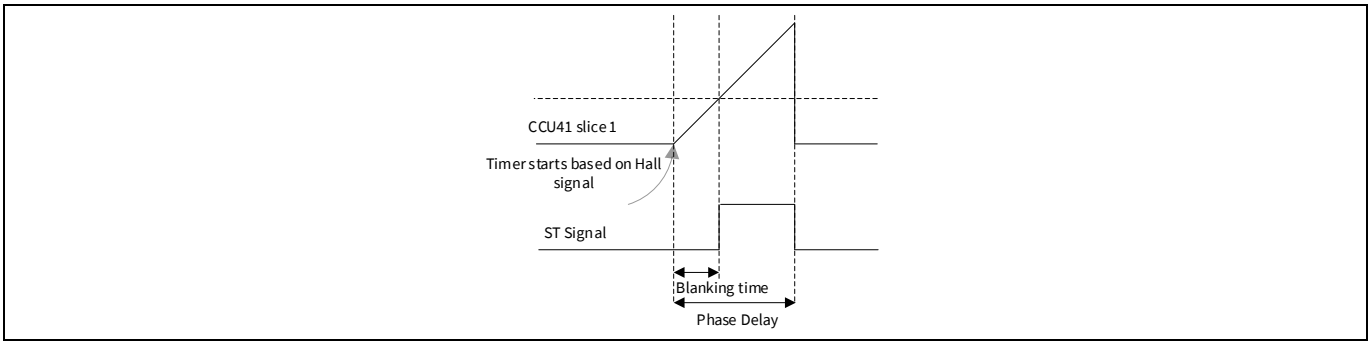


图 14　　用于霍尔边沿检测的 CCU4 定时器

霍尔输入引脚选择如图 **15** 所示。

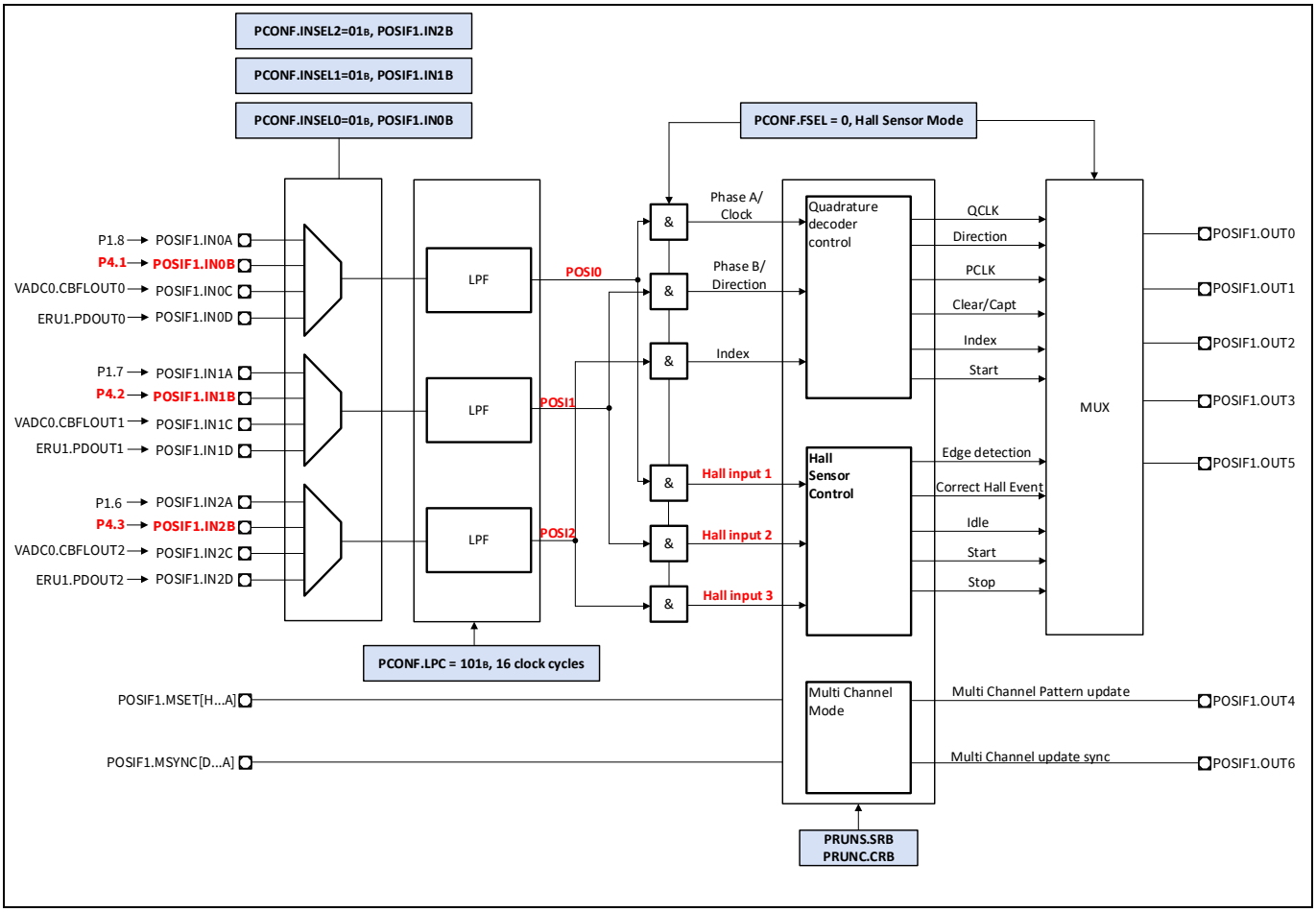


图 15　　霍尔输入选择图表

整个霍尔传感器的时序图如**图 16** 所示。请注意：

- 固件具体实现为通过启用 CCU41 slice 1 周期匹配中断 (即换向中断函数)，之后在该中断函数中更新比较值以及设置 MCMS.MNPS 位来使能多通道模式。多通道模式不会立刻更新，因为更新仍需要与 PWM 同步触发，实际更新时刻为等待下溢事件发生时。
- 此处的 POSIF1.OUT2/POSIF1.OUT3 展示了错误的霍尔事件 (WHE) 如何能产生 IDLE 信号和自动停止 PWM 生成单元。在固件中，实际 PCONF.HIDG 位设为 1，即禁用 了 IDLE 信号生成，且人为手动检测 WHE。

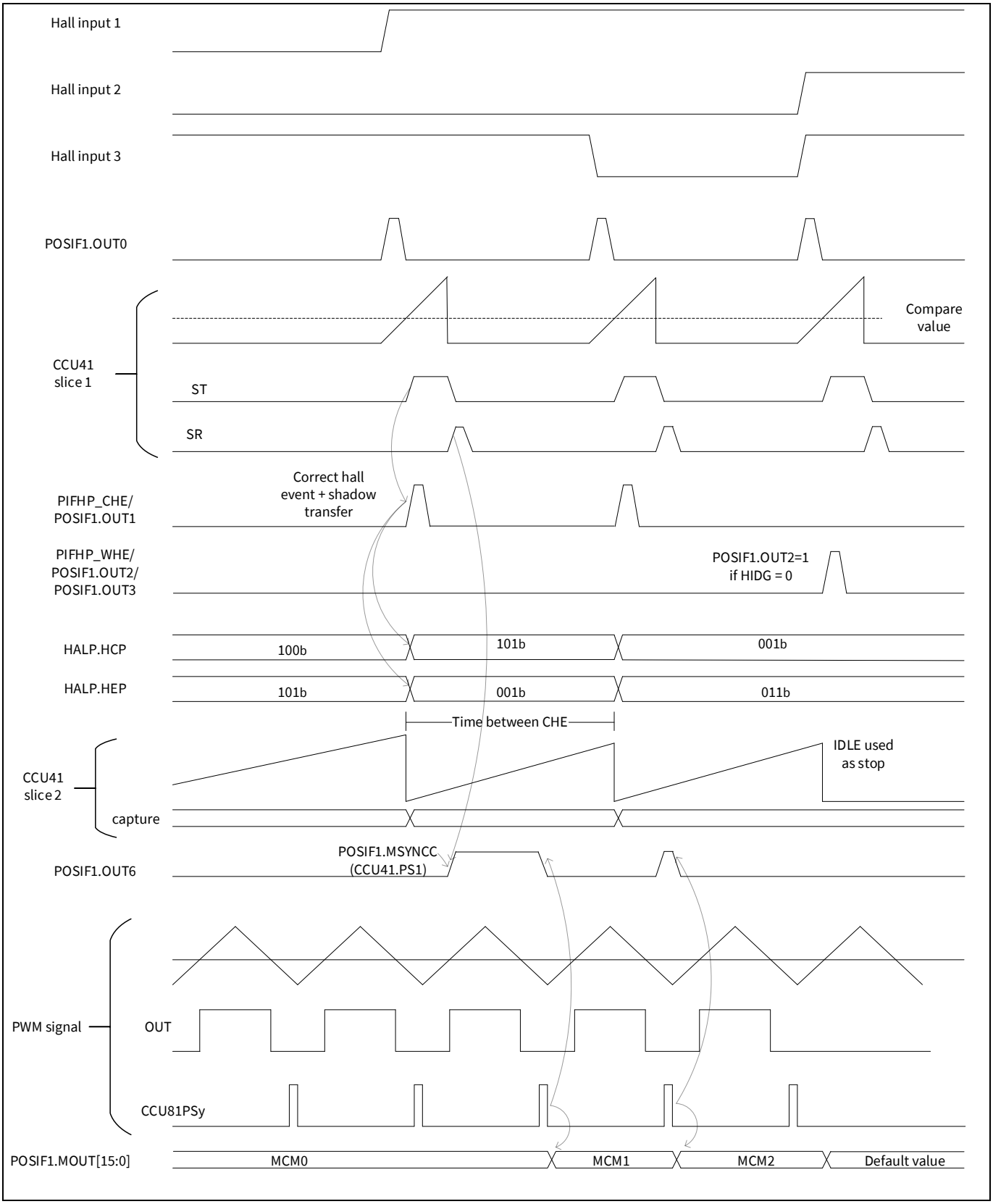


图 16　　霍尔传感器时序图

2.12　　测量

电机参数测量可分为模拟输入测量和数字输入测量。

2.12.1 模拟输入测量

模拟输入测量包含了电流、电压和电位器的测量。

VADC 的队列请求源被用于模拟输入测量。队列填充顺序按优先级依次从电流、电压、电位器开始。

VADC 分辨率固定为 12 位。基于外部触发信号进行 VADC 转换，即 V 相比较匹配事件（在递减计数期间触发）。可以通过宏 *CURRENT_TRIGGER_DELAY* 设置触发延迟，以微秒为单位。

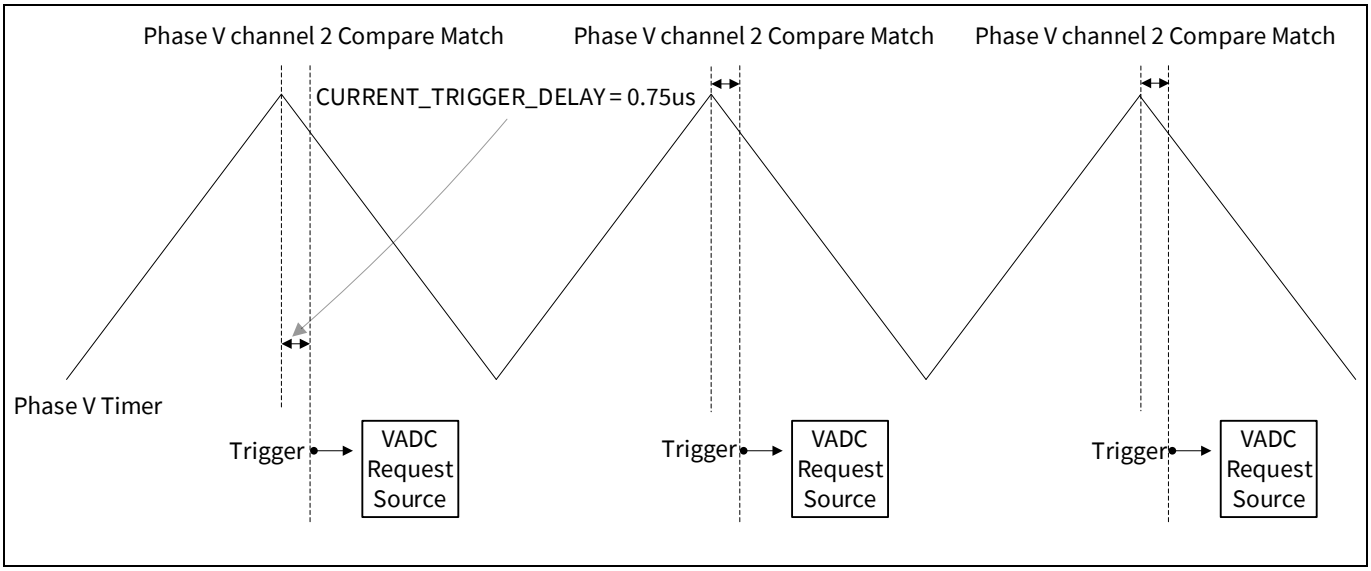


图 17 VADC 触发

2.12.2 直流母线电流测量

通过从 ADC 值中减去 DC 运放偏移来计算直流母线电流，然后使用预先计算好的电流量程将其设置为 2^14 范围。

IDC_FILTER_TIMECONST 宏可定义直流母线电流低通滤波器时间常数，以毫秒为单位。

退磁期间可跳过直流母线电流测量，以避免测量错误。此持续时间由用户配置。*DEMAG_BLANKING_TIME* 宏指令可用于此配置，以微秒为单位。经过转换并四舍五入为 PWM 周期值的倍数。

2.12.3 直流母线电压测量

直流母线电压计算为首先获得 ADC 值，然后根据电阻分压值使用预先计算好的电压量程将其设置为 2^14 范围。

VDC_FILTER_TIMECONST 宏可定义直流母线电压低通滤波器时间常数，以毫秒为单位。

2.12.4 电位器测量

根据所选的控制方案，电位器值可被用于确定电压/电流/速度的设定值。

电位器使用的是单方向控制模式：使用一个额外的方向信号用来控制方向。电位器的零位为最小占空比值；最大位为最大占空比值。

宏 *ANALOG_INPUT_LOW_LIMIT* 用于配置模拟输入下限，低于此值时电位器模拟输入值为 0。默认值是满量程输入的 5%。

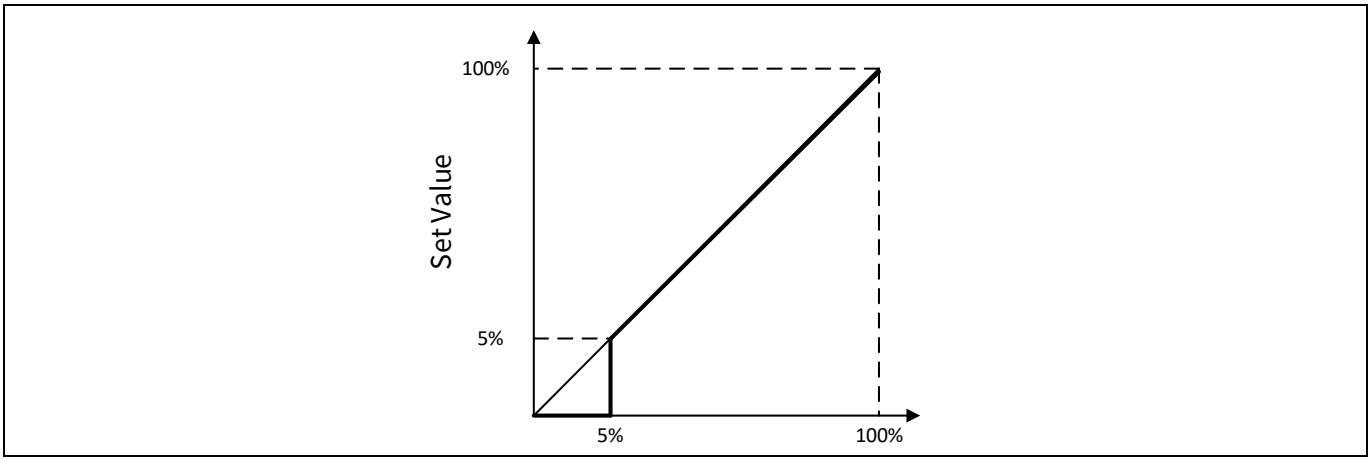


图 18　　单向模式电位器

2.12.5　数字输入测量

这一部分介绍电机速度测量。利用两个霍尔事件之间的时间间隔来计算电机速度。

在 XMC™ 中，使用 CCU4 的浮动预定标器选项来捕获时间间隔。如位置接口部分所述，使用一个 CCU4 slice 进行速度测量。POSIF 模块基于正确的霍尔边沿提供捕获事件信号。外部捕获框图如图 19 所示。

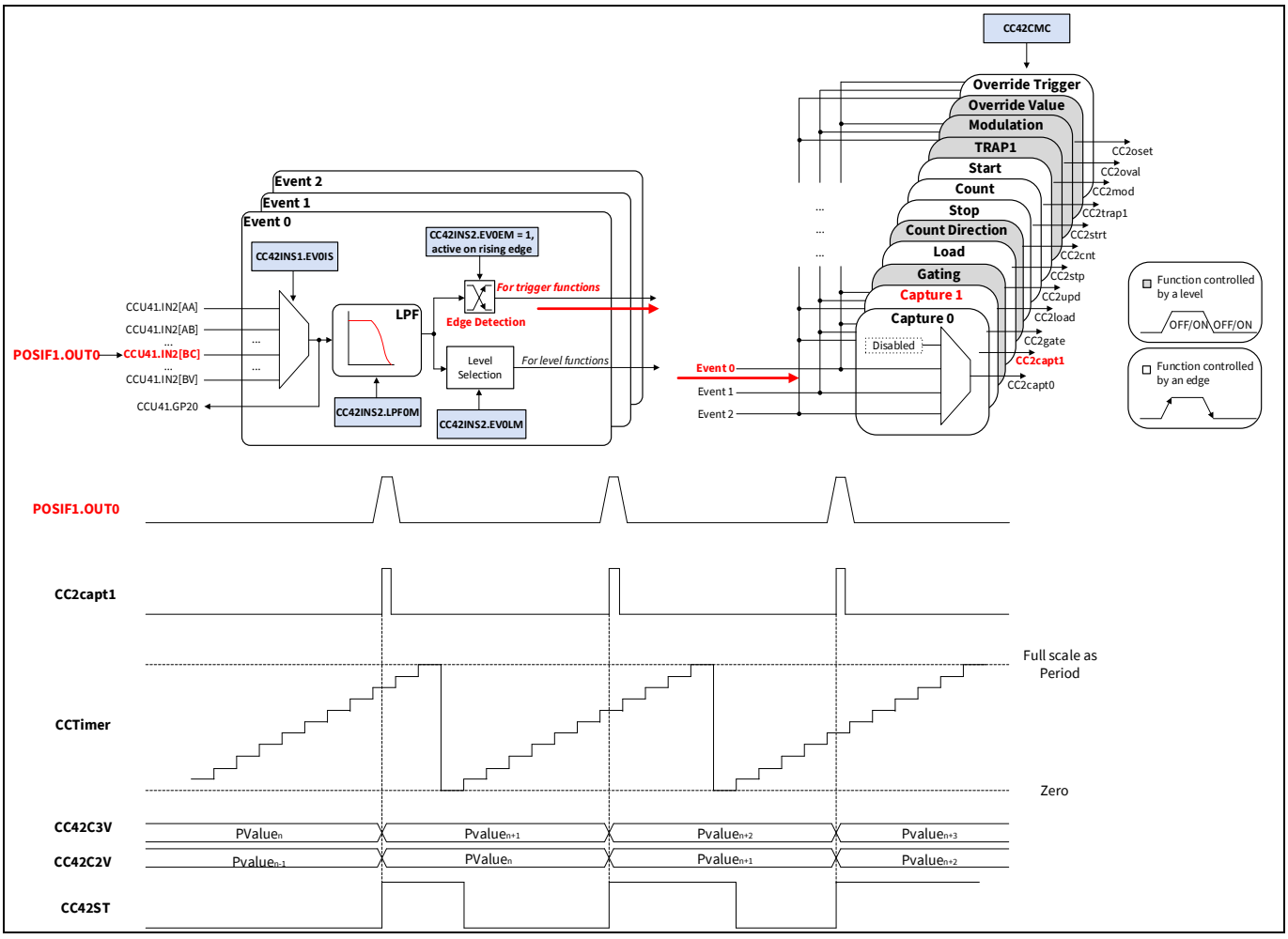


图 19　　外部捕获框图

2.12.6 浮动预定标器

XMC™ 的浮动预定标器可用于测量非常宽范围的速度。当计数器溢出时，预定标器加 1。捕获事件发生后，预定标器将重置为初始值。

在固件中，预定标器初始值 (PSIV) 设置为 4，由宏 *CCU4_PRESCALER* 定义。初始捕获时钟因此为 96 MHz/2^4 = 6 MHz。

通过读取最终的预定标器数值及在每个捕获事件中的计数来完成速度计算。可通过以下公式计算 PSIV 单元中所捕获的计数：

$$\text{capval} = (2^{(final\ prescaler - PSIV)} - 1) * 2^{16} + CC42C3V.CAPTV$$

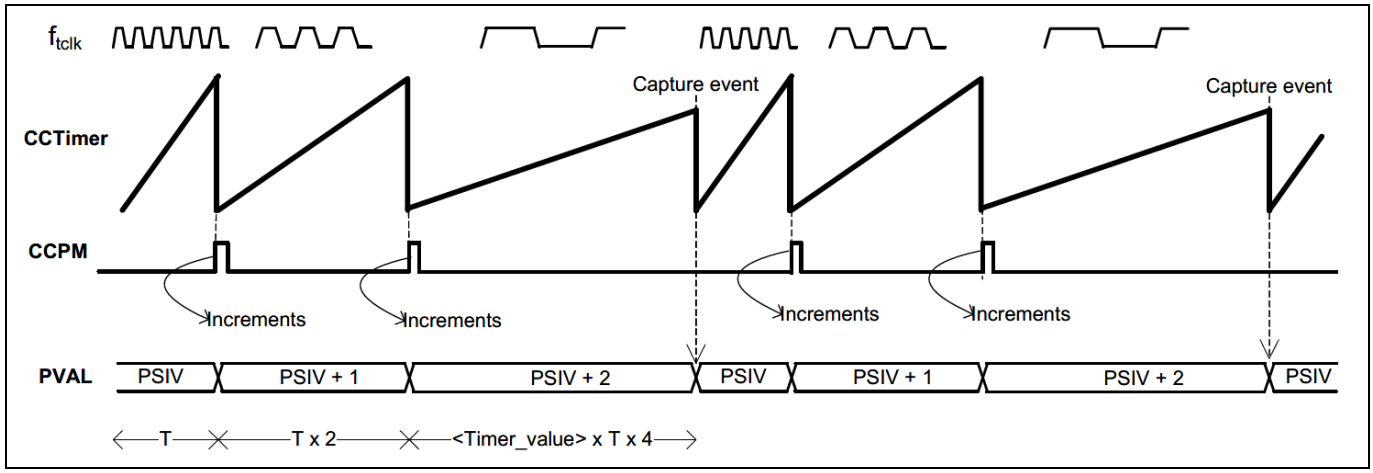


图 20 浮动预定标器捕获模式

2.12.7 速度测量

捕获事件由正确的霍尔事件触发，每 60 度电角度触发一次。为避免由于霍尔传感器安装不对齐而导致的速度测量误差，在计算中取最后六个读数的移动平均值，如图 21 所示。

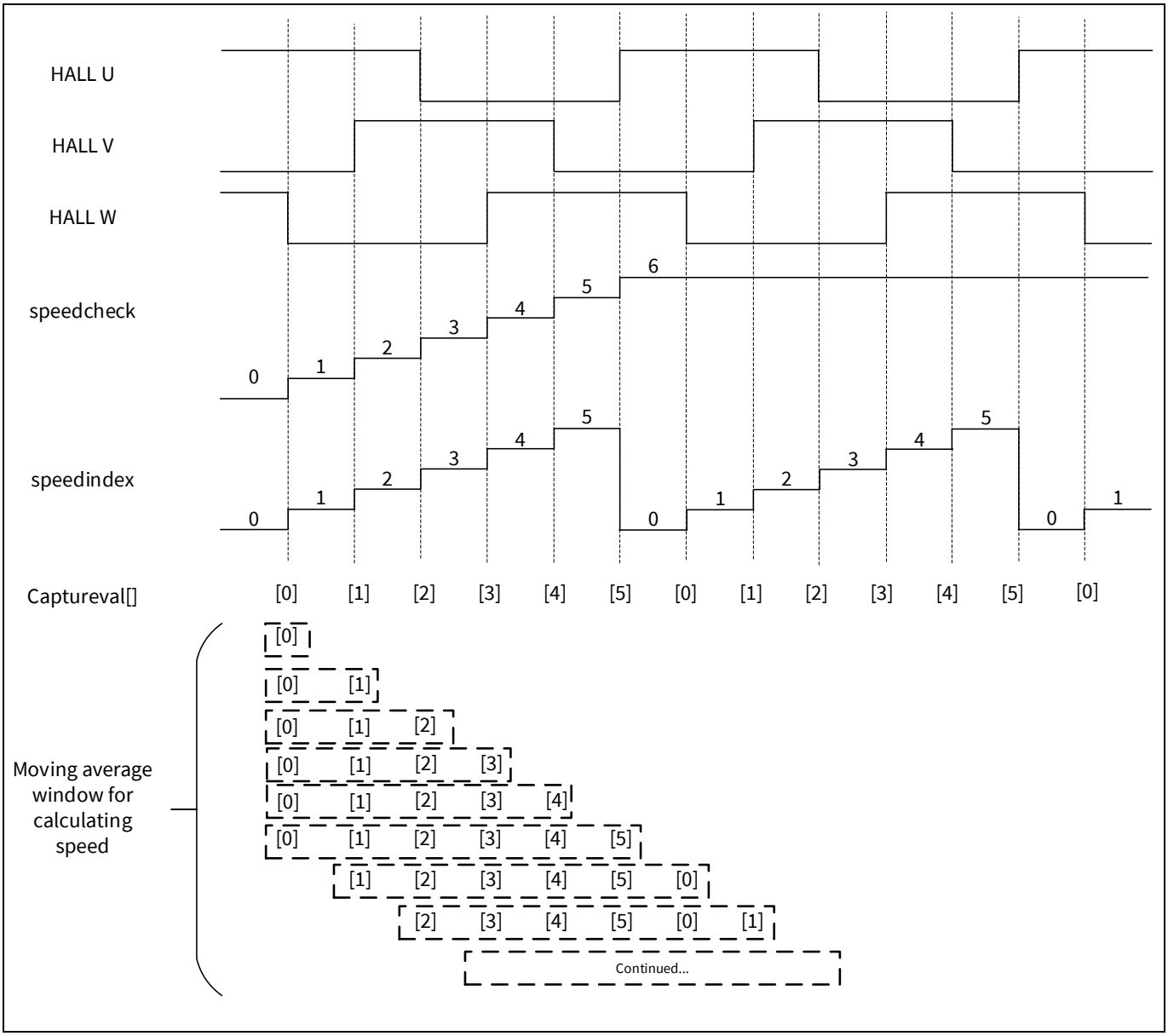


图 21　　用移动平均窗口进行速度测量

使用速度常量值以转每分 (RPM) 为单位计算实际电机电转速。

$$\text{电机电转速} = \frac{speed_constant}{speedaccum} RPM$$

$$= \frac{10^6 * \frac{96}{2^{PSIV}} * 10 * 6}{Sumoflast6values} \text{RPM}$$

$$= \frac{10^6 * 6 * 10 * 6}{Sumoflast6values} \text{RPM}$$

然后根据极对数和速度量程计算机械速度并转换为 2^14 格式。

$$MechanicalSpeed = \frac{\text{ElectricalSpeedInRPM} * 2^{14}}{MOTOR_NO_LOAD_SPEED * Polepair}$$

2.13 电压补偿

每个 PWM 周期测量一次直流母线电压，并对直流母线电压的变化进行补偿。根据实际直流母线电压增加或减少输出电压，因此即使直流母线电压发生变化，也能有效地保持输出给电机的电压。

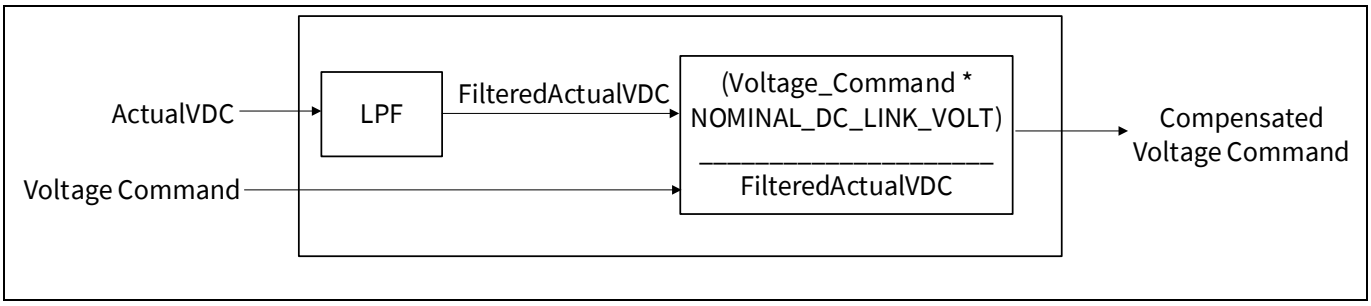


图 22 电压补偿

2.14 霍尔模式学习

自适应霍尔学习为三相无刷直流电机提供了一种生成正确六步换向模式的方法。目前的版本支持三个霍尔传感器彼此之间的相对电角度为 120 度且其边沿与线反电动势过零对齐。

为使基于霍尔传感器的无刷直流电机正常运行，需要根据三个霍尔传感器的二进制组合按正确的顺序激励电机每相。霍尔学习技术可自动捕获和定义这些顺序。

自适应霍尔学习的实现方式为：通过使用预先定义的激励模式施加到电机绕组，将转子对准到每个换相序列并读取霍尔信号。为成功调试，转子每次对齐到新施加的序列是非常重要的。此操作相当于强制使电机以开环方式逐步运行，而不是连续转动。每个换向模式会在电机上施加一定的时间。该时间由开环速度和所需电压定义的 PWM 占空比决定。

电机所需要的速度和电压还由电机上的负载决定，因此电机可能会被锁定在一个位置。此时，读取霍尔传感器输出得到霍尔模式，与施加的换向模式相对应。接着施加下一个换向模式，电机继续往前转动，并得到相应的霍尔模式。重复相同的过程并捕获所需的序列。

2.14.1 霍尔学习配置

HALL_LEARNING_VOLTAGE——在霍尔学习过程中施加的开环电压，以标称电压的百分比表示。

HALL_LEARNING_TPULSE——霍尔学习过程中每个扇区的脉冲时长，以毫秒为单位。

HALL_LEARNING_PATTERN——霍尔学习结果。该宏指定了一个初始值。如果因电机各相连接、霍尔信号连接等原因该值与真实硬件不对应，就必须进行霍尔学习来更新该值。

2.14.2 霍尔学习描述

整个霍尔学习过程如**图 23** 所示。

1. 换向 PWM 输出从 PWM 扇区 0 开始，然后按固定顺序依次为 1、2、3、4、5、0、1……。根据所选的 PWM 方案，每个 PWM 扇区将有对应相关相的换向输出。电机将逐步转动。

   PWM 扇区如**图 23** 所示。根据实际选择的 PWM 方案，可以进一步推导出多通道模式。例如，如果 PWM 扇区为 1，则输出为 V -> W。参阅 **2.9（PWM 方案）**章节了解每相的多通道模式。

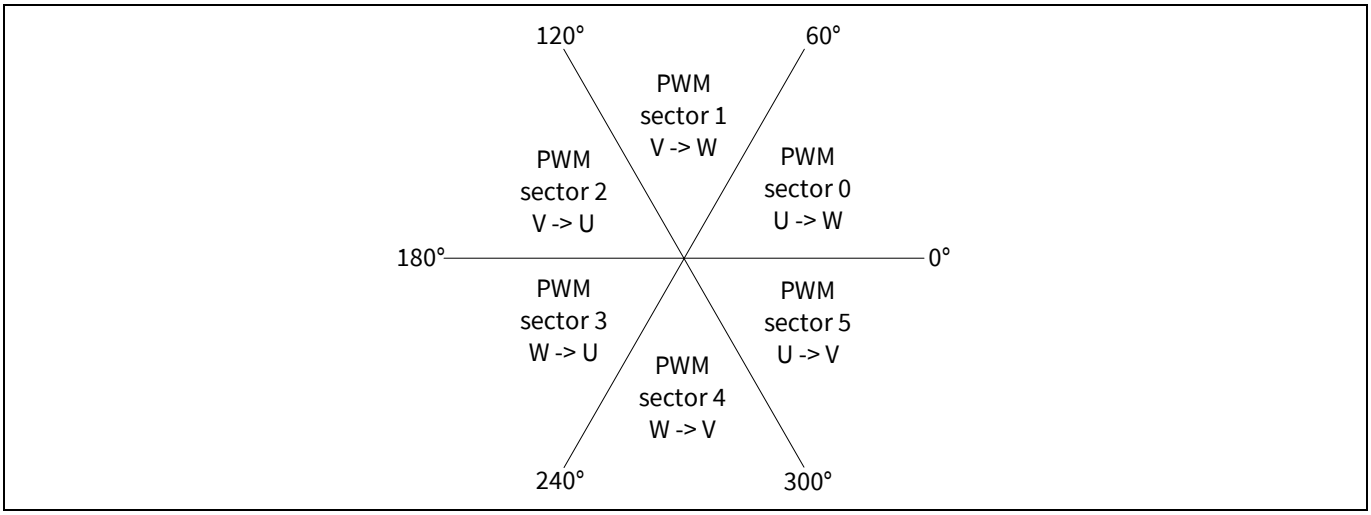


图 23　　PWM 扇区图解

2. 当电机转动时，捕获霍尔输入 1~ 霍尔输入 3 的引脚跳变。三个霍尔输入构成一个霍尔模式，总共将捕获 14 个相邻的霍尔模式。这将至少覆盖两个电周期以确保完整性，因为两个电周期为 12 个霍尔模式。该 14 个相邻的霍尔模式被存储在 capt_hallpatt[0]~ capt_hallpatt[13] 数组中。
3. 第一个霍尔模式被视作无效数据，为准确性将丢弃该数据，因此有效数据是从第二个霍尔模式开始的。这也意味着第一个 PWM 扇区（即 PWM sector 0）将被丢弃。
   霍尔扇区变量从 0 开始计数是与第二个霍尔模式输入同时进行的。这代表序列。
4. 提取并结合第一个电周期内霍尔模式输入与霍尔扇区之间的关系，然后推导出 *MotorParam.HALL_SECTOR_MAP*。
5. *MotorParam.HALL_SECTOR_MAP* 接着被更新并在 GUI 中显示。

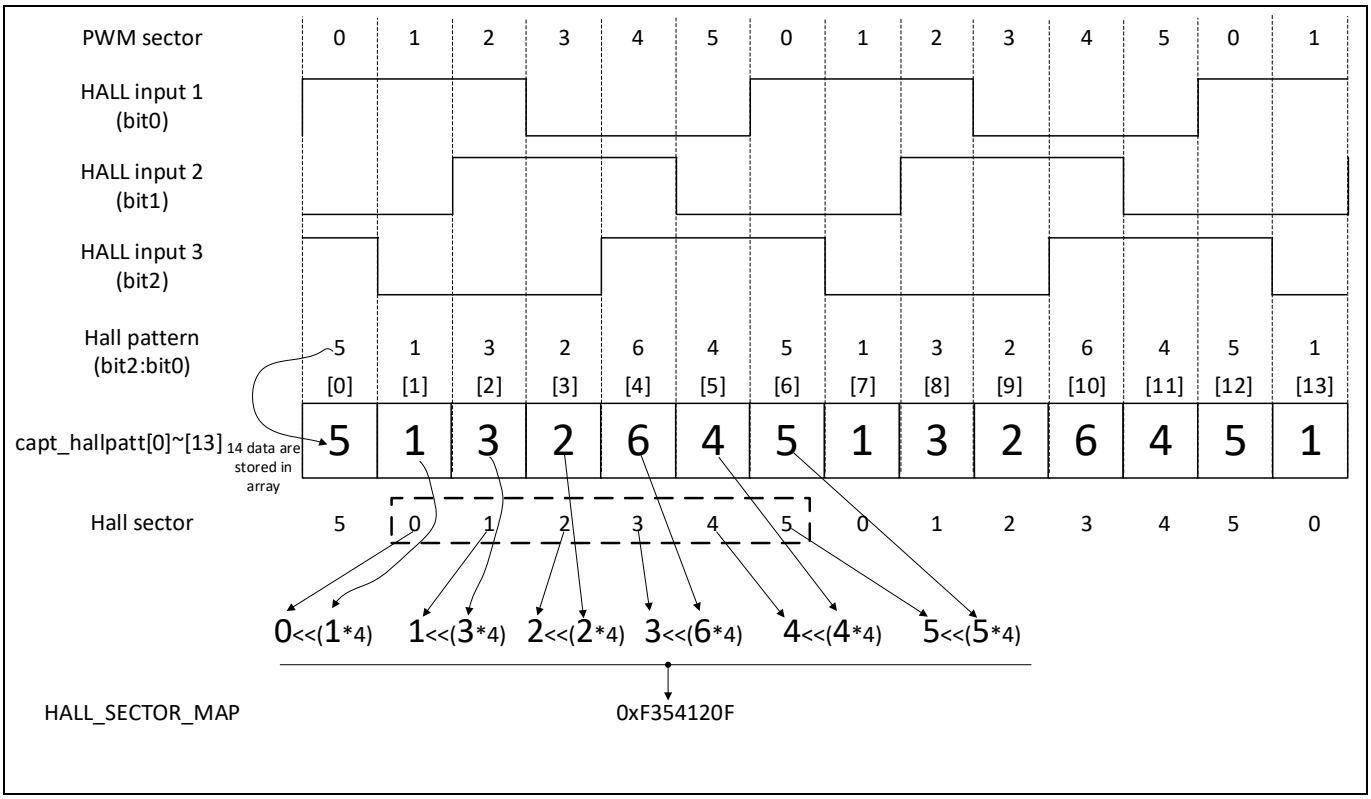


图 24　　霍尔学习图解

霍尔学习的目的是存储霍尔模式和 PWM 扇区之间的关系，从而在电机正常运行时，固件可以在得到霍尔模式输入后以正确的方式输出 PWM。霍尔模式和霍尔扇区之间的关系存在 *MotorParam.HALL_SECTOR_MAP* 中，这也是霍尔学习的结果。

在霍尔学习成功完成后的正常运行过程中，根据霍尔模式输入，在 *MotorParam.HALL_SECTOR_MAP* 中进行搜索得到霍尔扇区，然后进一步推导出 PWM 扇区。这是因为在考虑运行方向和相位超前后，PWM 扇区与霍尔扇区存在固定关系。因此，正常运行可视为与霍尔学习相反的过程。

2.15 PI 控制器

比例积分 (PI) 控制器支持积分抗饱和。当 PI 输出值达到最大值或最小值时停用积分，而当 PI 输出值在指定范围内时恢复积分。当 PI 输出达到指定限制值时， PI 控制器设置限制标志。

PI 控制器的 K_p 和 K_i 值用无符号值表示，取值范围为 0 到 65535。PI 控制器输出用带符号值表示，取值范围为 0xC000 到 0x4000 (Q14)。

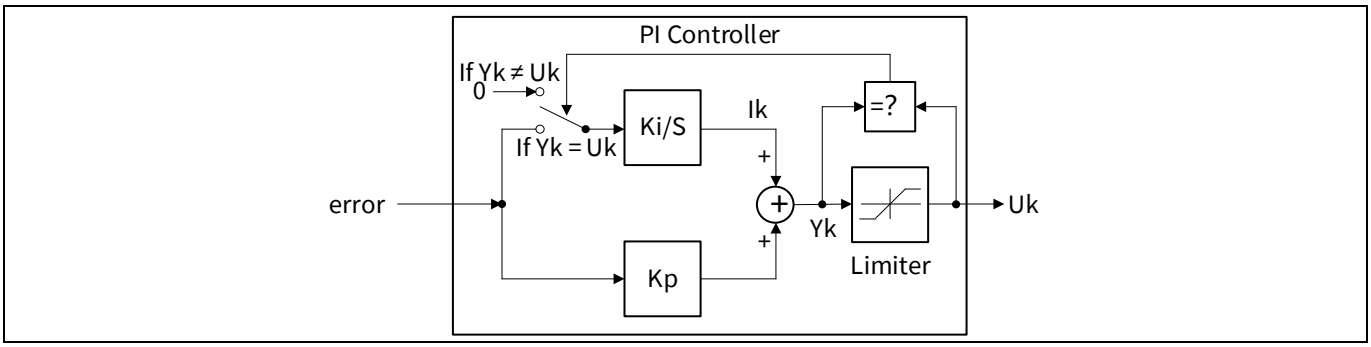


图 25 PI 控制器方框图

2.16 保护

固件可提供下述保护。在固件中，除非在 *MotorParam.EnableFault* 中设置了相应的位，否则 *MotorVar.error_status* 中的故障位不会导致电机故障。换句话说，*MotorParam.EnableFault* 可屏蔽 *MotorVar.error_status*；如果故障时 *MotorParam.EnableFault* 相应位没有置位，则该故障不会使电机控制进入 ERROR (错误) 状态。

2.16.1 Trap 保护

Trap 保护可检测 MOTIX™ 6EDL7141 的引脚 nFAULT 的信号，该信号反映 MOTIX™ 6EDL7141 中发生的任何故障。用户可在 GUI 中配置启用或禁用特定的故障。完整的故障和保护列表请参阅 **MOTIX™ 6EDL7141 数据表** 。

2.16.2 霍尔错误保护

如果霍尔模式非预期或无效，将检测到霍尔错误保护。

2.16.3 霍尔学习保护

如果在霍尔学习过程中发生错误的次数过多，将检测到霍尔学习保护。

2.16.4 电机堵转保护

如果霍尔信号在用户指定的时间内没有变化，将检测到电机堵转保护。配置：

STALL_MIN_AMPLITUDE_DEFAULT——堵转检测最小电压幅值，以百分比为单位。当电压幅值低于此值时，禁用电机堵转检测。

STALL_DETECTION_TIME_DEFAULT——堵转保护检测时间，以秒为单位；设置为 0 将禁用堵转保护。

2.16.5 直流母线过压/欠压保护

可以启用或禁用直流母线过压/欠压保护，在 GUI 中设置阈值。在固件中，默认配置如下：

DC_LINK_OVER_VOLTAGE_LEVEL——直流母线过压阈值，以伏特为单位

DC_LINK_UNDER_VOLTAGE_LEVEL——直流母线欠压阈值，以伏特为单位

NOMINAL_DC_LINK_VOLT——标称直流母线电压，以伏特为单位

2.16.6 SPI 故障保护

如果在与 MOTIX™ 6EDL7141 的 SPI 通信中发生故障，将检测到 SPI 故障保护。

2.16.7 栅极驱动器复位保护

如果在 IDLE (空闲) 以外的状态下发生 MOTIX™ 6EDL7141 复位，将检测到此保护。

实现方式如下：固件将 0xF 写入到 MOTIX™ 6EDL7141 中 OTP_PROG 寄存器的 USER_ID 位段，当 MCU 状态机在 IDLE (空闲) 以外的状态运行时，就会持续检查该位段。如果此位段值发生了变化，这意味着 MOTIX™ 6EDL7141 发生了意外的复位，将会检测到栅极驱动器复位保护。

2.17 控制 MOTIX™ 6EDL7141 智能栅极驱动器

以下是控制 6EDL7141 智能栅极驱动器的一些特性。

- *EdlIo.en_drv_level* 可控制 XMC1400 的 EN_DRV 引脚输出电平（1 或 0）。请注意，当状态发生一定变化时，电机状态机会控制 EN_DRV 引脚；EN_DRV 引脚控制只有在电机控制状态没有发生变化时才有效。
- *EdlIo.nbrake_level* 可控制 XMC1400 的 nBrake 引脚输出电平（1 或 0）。请注意，nBrake 引脚控制独立于电机控制。

Note: *EN_DRV 和 nBrake 控制仅用于测试目的。虽然固件或 GUI 不会进行阻止，但我们强烈建议在电机运行时，不要将 EN_DRV 或 nBrake 设置为低电平。*

- 直流校准控制可以打开或关闭，即通过对 MOTIX™ 6EDL7141 写入 1 或 0 来配置寄存器位段 CSAMP_CFG[11]。
- ADC 输入选择 ($I_{digital}$/D_{VDD}/V_{DDB}) 被写入 MOTIX™ 6EDL7141 配置寄存器位段 ADC_CFG[2:1]。
- 通过对 MOTIX™ 6EDL7141 配置寄存器位段 ADC_CFG[0] 写入 1 发起 ADC 请求。

2.18 使用 GUI 示波器

为了在 GUI 示波器的“Test bench”视图中选择示波器通道信号，在本固件的 Register.c 中由数组 *RegisterAddrMap[]* 来定义寄存器映射，数据根据 TraceId 来组织。更改 ProbeScope_Chx.TraceId (x=0,1,2,3…)来为每个示波器通道选择不同的 trace 信号。

如果想观察新的变量，请遵循以下流程来为 GUI 示波器中添加新的变量作为 trace 信号：

1. 打开 register_map.c，找到 *RegisterAddrMap[]*定义处。找到一个从“*Reserved*”变量获取地址的数组元素，把 *Reserved* 替换为想添加到 trace 信号的新的变量名字。

2. 把该新变量的数据类型对应添加到数组 *RegisterTypeMap[]*中，从而提供该变量的信息，如 32 位还是 16 位，有符号还是无符号。*RegisterTypeMap[]* 中的数据类型务必正确，且跟该变量在 *RegisterAddrMap[]* 中的位置一一对应。

注意： ***RegisterTypeMap[] 中的数据类型务必正确，且跟该变量在 RegisterAddrMap[] 中的位置一一对应。否则会有出现内存错误和烧坏电机的风险！***

3 图形用户界面 GUI

GUI 集成了默认的 .hex 和 .elf 文件，这些文件由本文档所述 XMC™ 固件的正式发布版本编译而成。因此可以实现以下操作：

- 更改 XMC™ RAM 中的变量值，并快速生效
- 烧写 XMC™ 固件
  - 烧写默认 .hex 文件或选择其他 .hex 文件进行烧写
- 写入参数
  - 将电机参数和 MOTIX™ 6EDL7141 参数存储到 XMC™ flash 中的指定区域。
- 烧录 MOTIX™ 6EDL7141 OTP
- 显示每个示波器通道的轨迹信号

有关 GUI 的更多信息，请参阅 BPA 电机控制 GUI 的“帮助”。

4 参考文献

[1] Infineon Technologies AG: *EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 18V brushless DC motor drive board*; **Available online**

[2] Infineon Technologies AG: *MOTIX™ 6EDL7141 datasheet*; **Available online**

[3] Infineon Technologies AG: *XMC1400 Reference Manual*; **Available online**

[4] Infineon Technologies AG: *ModusToolbox™ Software*; **Available online**

修订记录

文档版本	发布日期	变更说明
V 1.0	2021-11-08	首次发布
V 1.1	2022-01-24	更新商标
V 1.2	2022-04-25	由 DAVE 更改为 ModusToolbox™
V 1.3	2022-09-13	在 GUI 示波器中加入注意事项
V 1.4	2023-03-22	移除快速同步相关内容，增加相位超前角描述

商标
所有引用的产品或服务名称和商标均是其各自所有者的财产。

版本 2023-03-22
发布者
英飞凌科技股份公司
德国慕尼黑 817262023022 英飞凌科技股份公司
保留所有权利。

您对本文档有疑问吗？
电子邮箱：erratum@infineon.com

文档参考

AN_2110_PL88_2111_120446

重要提示
本应用说明给出的任何信息仅作为应用英飞凌产品的提示，在任何情况下均不应视为对我们产品的任何功能、条件或质量的描述或保证。在应用产品前，接收方必须验证本应用说明中所述的功能及其他技术信息在实际应用中的正确性。英飞凌科技特此声明不对本应用说明中所提供的任何及所有信息给予任何及所有形式之保证或负任何及所有形式之责任（包括但不局限于没有侵犯任何第三方的知识产权）。

本文档所含的数据仅供经过专业技术培训的人员使用。客户自身的技术部门有义务对于产品是否适宜于其预期的应用和针对该等应用而言本文档中所提供的信息是否充分自行予以评估。

如需了解产品、技术、交付条款与条件和价格的更多信息，请联系距离您最近的英飞凌科技办公室 (**www.infineon.com**)。

警告
由于技术要求，我们的产品可能包含有害物质。有关有疑问的危险物质类型信息请联系距离您最近的英飞凌办公室.

除非由经英飞凌科技授权代表签署的书面文件中做出另行明确批准的情况外，英飞凌科技的产品不应当被用于任何一项一旦产品失效或者产品使用的后果可被合理地预料到可能导致人身伤害的任何应用领域。