AN1029
应用笔记

PY32F030/PY32F003 内部 RC 振荡器（HSI）校准应用笔记

前言

PY32F030/PY32F003 微控制器具有内部 RC 振荡器(档位 4/8/16/22.12/24MHz HSI) ，在 25℃时，HSI 的典型精度为 7‰ 。在 –40 到 85 ℃，HSI 的精度值扩大为 ±3%。因此，温度对 RC 精度有影响。

为补偿应用中的温度等环境影响，用户可使用运行时校准程序，进一步微调 RC 振荡器的输出频率，提高 HSI 的频率精度。对通信外设来说，这可能是至关重要的。

本应用笔记给出了校准内部 RC 振荡器的方法：通过提供精确的参考源，设置 RCC_ICSCR 寄存器中的 HSI_TRIM 位，找到具有最小误差的频率档位。

表 1. 适用产品

类型	产品系列
微型控制器系列	PY32F030、PY32F003

目录

1 RC 振荡器

PY32F030/PY32F003 系列内部有一组 RC 振荡器，HSI 时钟信号由内部 RC 振荡器生成，可分为 4M/8M/16M/22.12M/24M 共 5 档，可直接用作系统时钟，或者用作 PLL 输入（仅支持 PY32F030 系列）。 RC 振荡器的优点是成本较低 （无需使用外部组件）。它还比 HSE 晶振具有更快的启动时间。但即使校准后，频率也不如外部晶振或陶瓷谐振器的频率精度高。

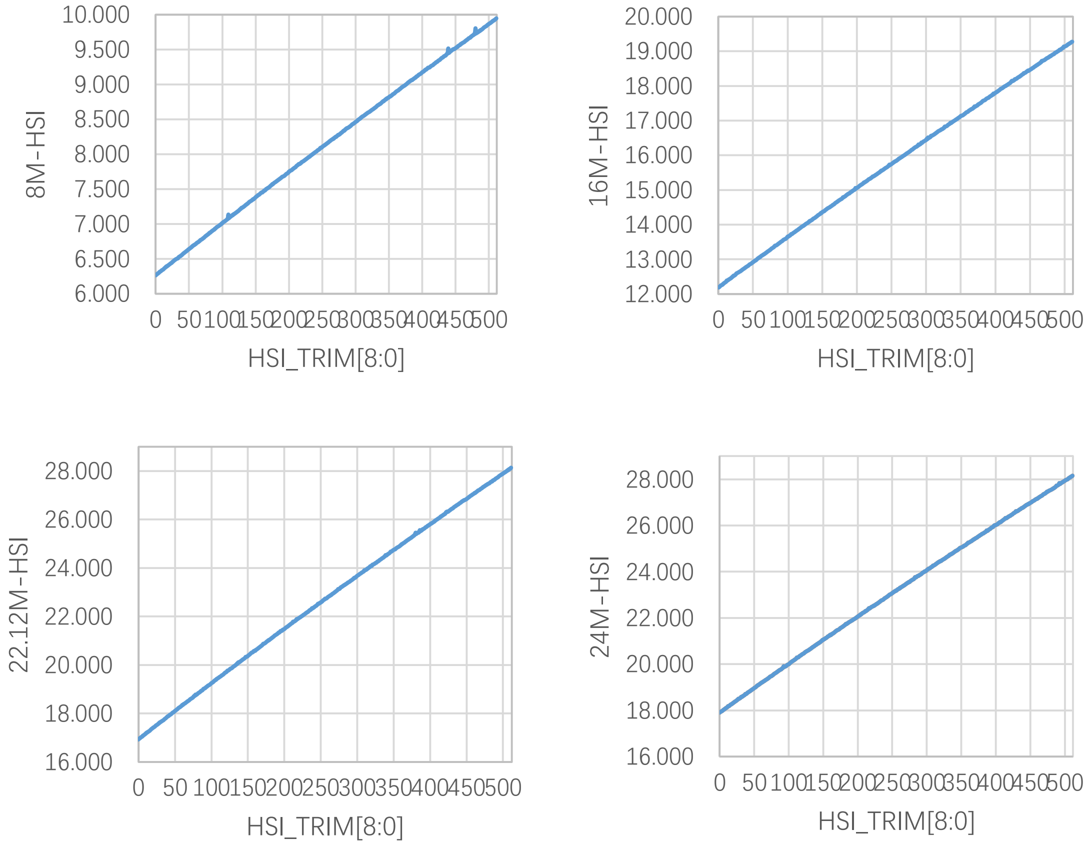
1.1 校准

由于生产过程的不同，每个芯片的 RC 振荡器的频率都可能不同。因此，每个器件都在出厂前做工厂校准，在 TA = 25 ℃时达到 0.7% 精度。

复位后，工厂校准值自动加载到时钟控制寄存器 RCC_ICSCR 的 HSI_TRIM[12:0] 位中。其中高 4bit 中 HSI_TRIM[12:9]为粗调，低 9bit 中 HSI_TRIM[8:0]为细调，粗调数据不需要改动，保留上电后的初始值即可，通过设置 RCC_ ICSCR 寄存器中的细调 HSI_TRIM[8:0] 位进行用户校准。可对这些位编程，以考虑电压和温度变化对内部 HSI RC 振荡器频率的影响。前后两个 HSI_TRIM 步进之间的微调步长约为 0.1% 。

图 2 显示了 HSI 频率与细调节校准值 HSI_TRIM[8:0]之间的关系，可以看出，两者间为线性关系，HSI 振荡器频率随校准值而增加。

图 2 HSI 频率和细调校准值



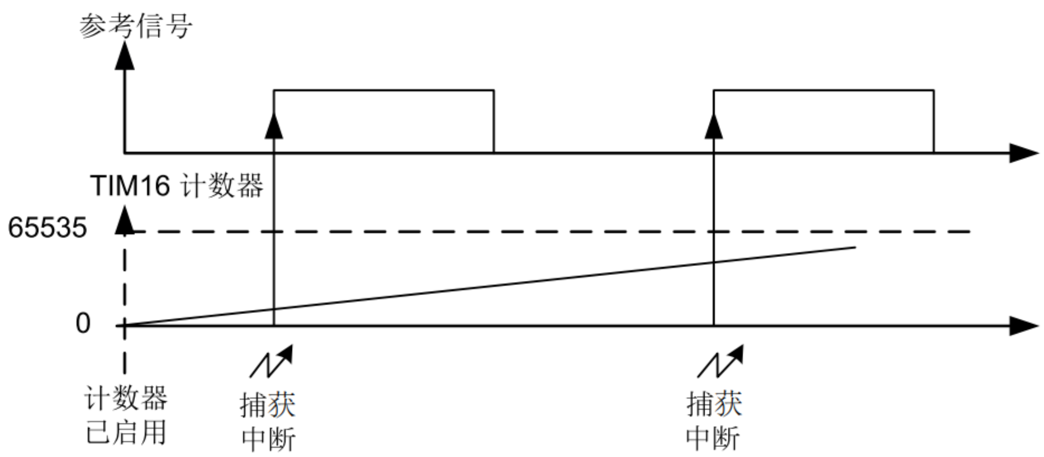
2 RC 校准

2.1 校准原理

校准的原理为首先测量 HSI 频率，然后计算频率误差，RCC_ICSCR 的 HSI_TRIM[12:9]保留初始值。最后设置 RCC_ICSCR 的 HSI_TRIM[8:0]位。

HSI 频率并不是直接测量的，而是使用定时器对 HSI 时钟沿计数方式算出，然后与典型值比较。为此，必须有一个非常精确的参考频率，比如由外部 32.768 kHz 晶振提供的 LSE 频率或 50 Hz/60 Hz 外部信号。

图 1.内部 RC 振荡器校准测量时序图



启用定时器计数后，当基准信号的第一个上升沿出现时捕获定时器计数器周期，并存储在 IC1ReadValue1 中。在第二个上升沿，又捕获到定时器计数，存储在 IC1ReadValue2 中。在两个上升沿之间的时间（IC1ReadValue2 - IC1ReadValue1）表示了参考信号的整个周期。

因为定时器计数器的时钟由系统时钟（内部 RC 振荡器），因此与参考信号有关的内部 RC 振荡器生成的真正频率为：

- 测得频率 = （IC1ReadValue2 - IC1ReadValue1） * 基准频率

误差为测得频率与典型值之差的绝对值。因此，内部振荡器频率误差表示为：

- 误差 = 测得频率 – 要求的典型值

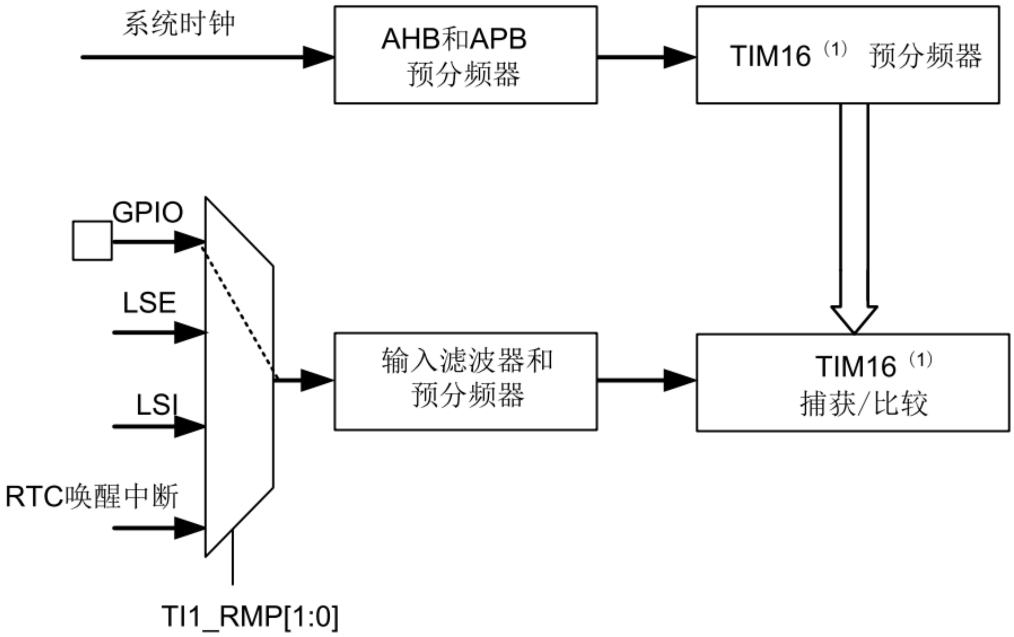
多次捕获后使用平均方法，可以使频率测量误差最小。

2.2 硬件实现

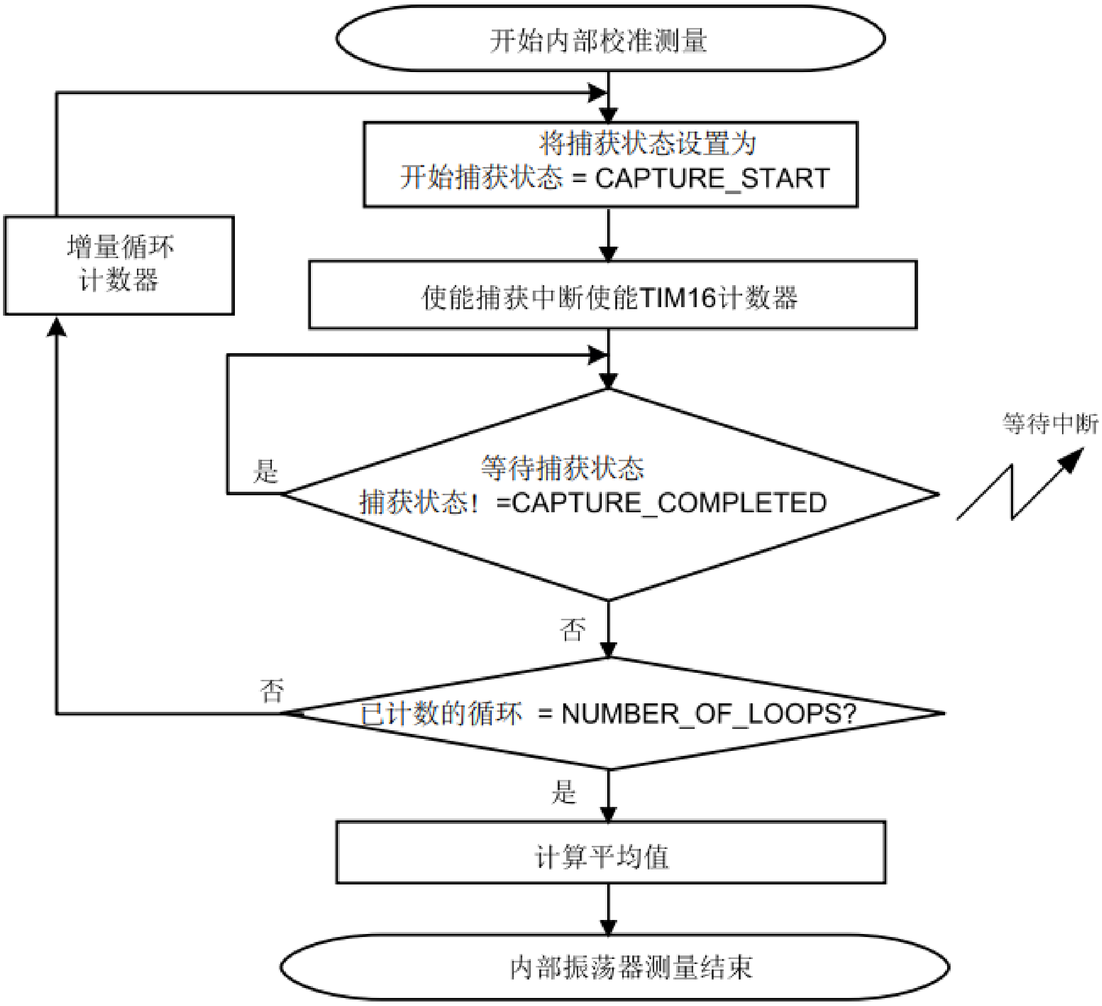
可以通过软件，将内部的 RC 振荡器连接到专用定时器（带输入捕获的均可）。

任何有精准频率的信号都可用于内部振荡器校准，例如外部信号。

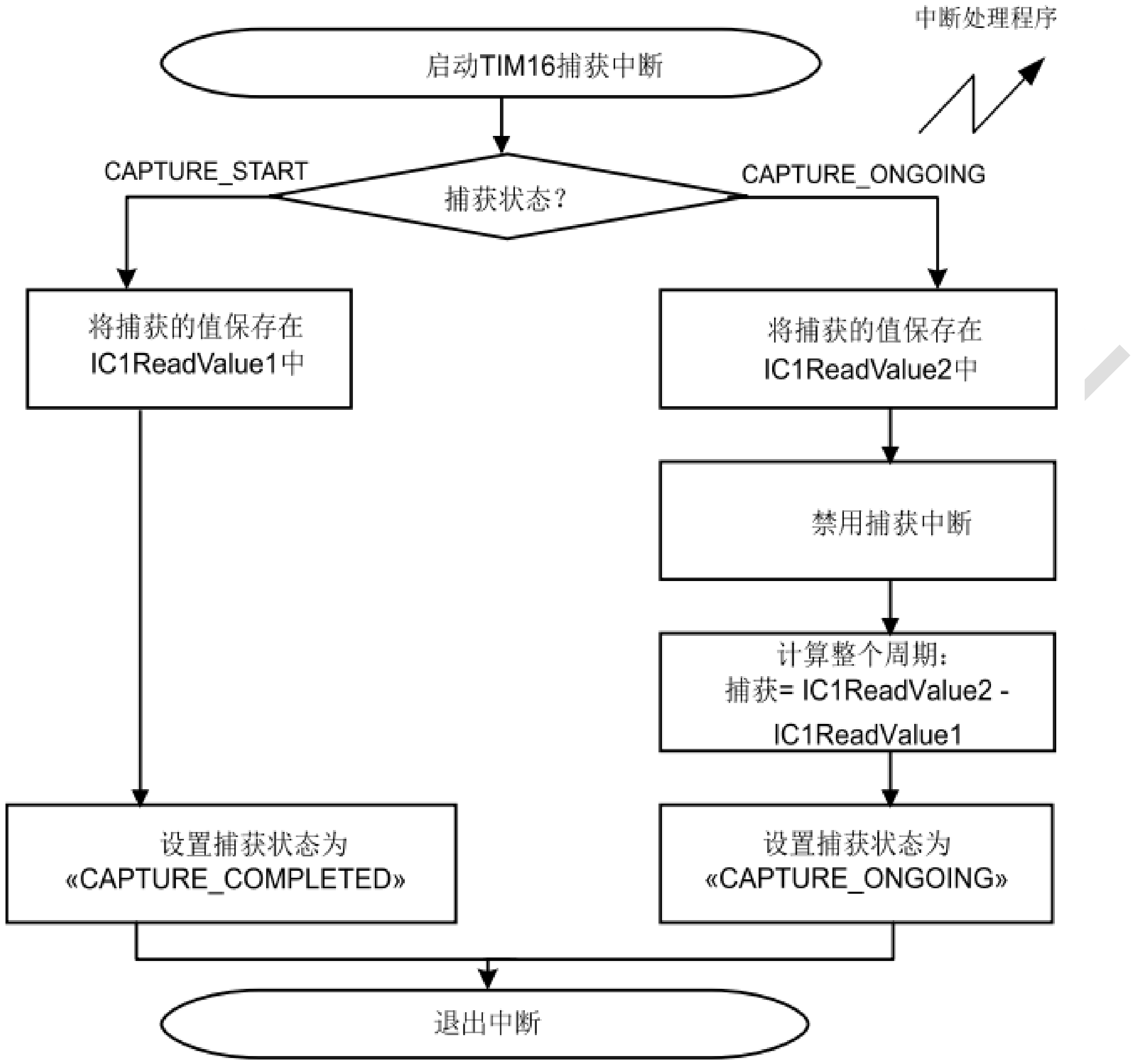
下图显示连接到定时器 16 通道 1 的参考信号。


系统时钟
AHB和APB
预分频器
TIM16 (1) 预分频器
GPIO
LSE
LSI
RTC唤醒中断
输入滤波器和
预分频器
TIM16 (1)
捕获/比较
TI1_RMP[1:0]

3 代码示例



开始内部校准测量
将捕获状态设置为
开始捕获状态 = CAPTURE_START
增量循环
计数器
使能捕获中断使能TIM16计数器
等待中断
是
等待捕获状态
捕获状态！ =CAPTURE_COMPLETED
否
否
已计数的循环 = NUMBER_OF_LOOPS?
是
计算平均值
内部振荡器测量结束



3.1 初始化

```
void HSI_MeasurementInit(uint32_t HSICLKSource_selt)
{
  SetSysClock_HSI(HSICLKSource_selt);

  /* HSI_Rough_Value default value */
  HSI_Rough_Value   =   ( READ_REG(RCC->ICSCR) & 0x00001fff ) >>9;//High 4 bits
  /* HSI_Fine_Value default value */
  HSI_Fine_Value    =   ( READ_REG(RCC->ICSCR) & 0x000001ff );     //Low 9 bits

  /* Configure the GPIO ports before starting calibration process */
  GPIO_ConfigForCalibration();

  /* Configure TIMx before starting calibration process */
  HSI_TIMx_ConfigForCalibration();
}
```

3.2 系统时钟初始化

```
void SetSysClock_HSI(uint32_t HSICLKSource_selt)
{
    RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
    RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};

    RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSI;
    RCC_OscInitStruct.HSIState = RCC_HSI_ON;
    RCC_OscInitStruct.HSIDiv = RCC_HSI_DIV1;
    RCC_OscInitStruct.HSICalibrationValue = HSICLKSource_selt;
    RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_OFF;
    RCC_OscInitStruct.LSEState = RCC_LSE_OFF;
    RCC_OscInitStruct.LSIState = RCC_LSI_OFF;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_NONE;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSI;

    if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }

    /**Initializes the CPU, AHB and APB busses clocks
    */
    RCC_ClkInitStruct.ClockType          =          RCC_CLOCKTYPE_HCLK          |
RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK|RCC_CLOCKTYPE_PCLK1;
    RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_HSI;
    RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
    RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;

    if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct,FLASH_LATENCY_1) != HAL_OK)
    {
            Error_Handler();
    }
}
```


3.3 IO 初始化

```
void GPIO_ConfigForCalibration(void)
{
```

```
    GPIO_InitTypeDef gpio_init;

    /* GPIOA clock enable */
    TIMx_CHANNEL_GPIO_PORT();

    /* TIMx channel 1 pin (PA4) configuration */
    gpio_init.Pin = GPIO_PIN_4;
    gpio_init.Mode = GPIO_MODE_AF_PP;
    gpio_init.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_HIGH;
    gpio_init.Pull   = GPIO_NOPULL;
    gpio_init.Alternate = GPIO_AF4_TIMx;
    HAL_GPIO_Init(GPIOA, &gpio_init);
}
```

3.4 定时器 14 初始化

```
void HSI_TIMx_ConfigForCalibration(void)
{
    TIM_IC_InitTypeDef         ic_config; /* Timer Input Capture Configuration Structure
declaration */

    /* Enable TIMx clock */
    __TIMx_CLK_ENABLE();

    /* Set TIMx instance */
    TimHandle.Instance = TIMx;

    /* Reset TIMx registers */
    HAL_TIM_IC_DeInit(&TimHandle);

    /* Connect input signal */
    HSI_Timer_ConnectInput();

    /* Initialize TIMx peripheral as follows:
         + Period = 0xFFFF
         + Prescaler = 0
         + ClockDivision = 0
         + Counter direction = Up
    */
    TimHandle.Init.Period              = 0xFFFF;
    TimHandle.Init.Prescaler           = HSI_TIMx_COUNTER_PRESCALER;
```

```
    TimHandle.Init.ClockDivision        = 0;
    TimHandle.Init.CounterMode          = TIM_COUNTERMODE_UP;
    if (HAL_TIM_IC_Init(&TimHandle) != HAL_OK)
    {
      /* Initialization Error */
      Error_Handler();
    }
    /*##-2-          Configure          the          Input          Capture          channel
##################################*/
    /* Configure the Input Capture of channel 2 */
    ic_config.ICPolarity   = TIM_ICPOLARITY_RISING;
    ic_config.ICSelection = TIM_ICSELECTION_DIRECTTI;
    ic_config.ICPrescaler = HSI_TIMx_IC_DIVIDER;
    ic_config.ICFilter      = 0;
    if (HAL_TIM_IC_ConfigChannel(&TimHandle, &ic_config, TIM_CHANNEL_y) != HAL_OK)
    {
      /* Configuration Error */
      Error_Handler();
    }
    /*##-2- Configure the NVIC for TIMx */
    HAL_NVIC_SetPriority(TIMx_IRQn, 0, 1);

    /* Disable the TIMx global Interrupt */
    HAL_NVIC_DisableIRQ(TIMx_IRQn);
  }
```

3.5 时钟细调校准

```
  uint32_t Hsi_Fine_Trimming()
  {
    uint32_t i;
    uint32_t trim_Dac;//细调最终值，低 9bit
    uint32_t dac_Index;
    uint32_t dac_Array[511];
    uint32_t first_Index=255;
    uint32_t binary_Cyc=9;
    uint32_t sysclockfrequency = 0;
    uint32_t measuredfrequency = 0;
    uint32_t trim_Final_Value=0;
    uint32_t Fine_trim_Final_freq   =0;
    uint32_t Fine_trim_Final_Dac = 0;
```

```
    for(i=0;i<511;i++)
    {
        dac_Array[i]=i+1;
    }

    dac_Index=first_Index;
    trim_Dac=dac_Array[dac_Index];

    /* Get system clock frequency */
    sysclockfrequency = HAL_RCC_GetSysClockFreq();

  //二分法主体
    do
    {
            if (StartCalibration != 0)
            {
                /* Set the Intern Osc trimming bits to trimmingvalue */
                HSI_RCC_AdjustCalibrationValue(__HAL_RCC_GET_SYSCLK_SOURCE(),
(HSI_Rough_Value<<9) + trim_Dac);
            }

          /* Get actual frequency value */
            measuredfrequency = HSI_FreqMeasure();

        if(ABS_RETURN((int32_t)(measuredfrequency-
sysclockfrequency))<ABS_RETURN((int32_t)(Fine_trim_Final_freq-sysclockfrequency))) //选择
最优 DAC
        {
          Fine_trim_Final_freq = measuredfrequency ;
          Fine_trim_Final_Dac    = trim_Dac ;
        }
        if(measuredfrequency  <sysclockfrequency)//根据当前 DAC 测量的频率和目标频率关
系，选择下一个 DAC
        {
           dac_Index    = dac_Index +(uint32_t)pow(2,binary_Cyc-2);
           trim_Dac    = dac_Array[dac_Index ];
        }
        else
        {
          dac_Index    = dac_Index -(uint32_t)pow(2,binary_Cyc-2);
```

```
            trim_Dac    = dac_Array[dac_Index];
          }
        binary_Cyc-=1;
      }while(binary_Cyc>0);
      return Fine_trim_Final_Dac;
  }
```

3.6 细调档位调节

```
void HSI_RCC_AdjustCalibrationValue(uint8_t InternOsc, uint32_t TrimmingValue)
{
        MODIFY_REG(RCC->ICSCR,       RCC_ICSCR_HSI_TRIM,       (TrimmingValue)       <<
    RCC_ICSCR_HSI_TRIM_Pos);
}
```

3.7 频率测量

```
uint32_t HSI_FreqMeasure( void )
{
  uint32_t measuredfrequency;
  uint32_t loopcounter = 0;
    uint32_t       timeout = HSI_TIMEOUT;


  /* Start frequency measurement for current trimming value */
  measuredfrequency = 0;
  loopcounter = 0;

  /* Start measuring Internal Oscillator frequency */
  while (loopcounter <= HSI_NUMBER_OF_LOOPS)
  {
    CaptureState = CAPTURE_START;


    /* Enable capture 1 interrupt */
    HAL_TIM_IC_Start_IT(&TimHandle, TIM_CHANNEL_y);

    /* Enable the TIMx IRQ channel */
    HAL_NVIC_EnableIRQ(TIMx_IRQn);

    /* Wait for end of capture: two consecutive captures */
        while ((CaptureState != CAPTURE_COMPLETED) && (timeout != 0))
```

```
        {
            if(--timeout == 0)
            {
                return ERROR;
            }
        }

    /* Disable IRQ channel */
    HAL_NVIC_DisableIRQ(TIMx_IRQn);

    /* Disable TIMx */
    HAL_TIM_IC_Stop_IT(&TimHandle, TIM_CHANNEL_y);

    if (loopcounter != 0)
    {
      /* Compute the frequency (the Timer prescaler isn't included) */
      measuredfrequency += (uint32_t) (REFERENCE_FREQUENCY * Capture);
    }

    /* Increment loop counter */
    loopcounter++;
  }
  /* END of Measurement */

  /* Compute the average value corresponding the current trimming value */
  measuredfrequency = (uint32_t)((__HAL_GET_TIM_PRESCALER(&TimHandle) + 1) *
(measuredfrequency / HSI_NUMBER_OF_LOOPS));
  return measuredfrequency;
}
```


3.8 定时器捕获中断回掉函数

```
void HAL_TIM_IC_CaptureCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
{

     if (htim->Channel == HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_y)
  {
    if (CaptureState == CAPTURE_START)
    {
      /* Get the 1st Input Capture value */
      IC1ReadValue1 = HAL_TIM_ReadCapturedValue(htim, TIM_CHANNEL_y);
      CaptureState = CAPTURE_ONGOING;
```

```
        }
        else if (CaptureState == CAPTURE_ONGOING)
        {
          /* Get the 2nd Input Capture value */
          IC1ReadValue2 = HAL_TIM_ReadCapturedValue(htim, TIM_CHANNEL_y);

          /* Capture computation */
          if (IC1ReadValue2 > IC1ReadValue1)
          {
            Capture = (IC1ReadValue2 - IC1ReadValue1);
          }
          else if (IC1ReadValue2 < IC1ReadValue1)
          {
            Capture = ((0xFFFF - IC1ReadValue1) + IC1ReadValue2);
          }
          else
          {
            /* If capture values are equal, we have reached the limit of frequency
            measures */
            Error_Handler();
          }
          CaptureState = CAPTURE_COMPLETED;
        }
    }
}
```

1 版本历史

版本	日期	更新记录
V1.0	2022.07.10	初版

Puya Semiconductor Co., Ltd.