
STM32 的 PWM 精讲

通过对 TIM1 定时器进行控制，使之各通道输出插入死区的互补 PWM 输出，各通道输出频率均为 17.57KHz。其中，通道 1 输出的占空比为 50%，通道 2 输出的占空比为 25%，通道 3 输出的占空比为 12.5%。各通道互补输出为反相输出。

TIM1 定时器的通道 1 到 4 的输出分别对应 PA.08、PA.09、PA.10 和 PA.11 引脚，而通道 1 到 3 的互补输出分别对应 PB.13、PB.14 和 PB.15 引脚，中止输入引脚为 PB.12。将这些引脚分别接入示波器，在示波器上观察相应通道占空比的方波^[12]。

配置好各通道后，编译运行工程；点击 MDK 的 Debug 菜单，点击 Start/Stop Debug Session；通过示波器察看 PA.08、PA.09、PA.10、PB.13、PB.14、PB.15 的输出波形，其中 PA.08 和 PB.13 为第一通道和互补通道，PB.09 和 PB.14 为第二通道和其互补通道，PB.10 和 PB.15 为第三通道和其互补通道；第一通道显示占空比为 50%，第二通道占空比为 25%，第三通道占空比为 12.5%。

第 2 章 STM32 处理器概述

STM32F103xx 增强型系列产品中内置了多达 3 个同步的标准定时器。每个定时器都有一个 16 位的自动加载递加/递减计数器、一个 16 位的预分频器和 4 个独立的通道，每个通道都可用于输入捕获、输出比较、PWM 和单脉冲模式输出，在最大的封装配置中可提供最多 12 个输入捕获、输出比较或 PWM 通道。它们还能通过定时器链接功能与高级控制定时器共同工作，提供同步或事件链接功能。

在调试模式下，计数器可以被冻结。任一个标准定时器都能用于产生 PWM 输出。每个定时器都有独立的 DMA 请求机制。

2.4.2 高级控制定时器^[22]

高级控制定时器(TIM1)由一个 16 位的自动装载计数器组成，它由一个可编程预分频器驱动。它适合多种用途，包含测量输入信号的脉冲宽度(输入捕获)，或者产生输出波形(输出比较，PWM，嵌入死区时间的互补 PWM 等)。

使用定时器预分频器和 RCC 时钟控制预分频器，可以实现脉冲宽度和波形周期从几个微秒至几个毫秒的调节。高级控制(TIM1)和通用(TIMx)定时器是完全

独立的，它们不共享任何资源，它们可以同步操作。

高级控制定时器(TIM1)可以被看成是一个分配到 6 个通道的三相 PWM 发生器，它还可以被当成一个完整的通用定时器。四个独立的通道可以用于：

- 输入捕获 ；
- 输出比较 ；
- 产生 PWM(边缘或中心对齐模式) ；
- 单脉冲输出 ；
- 反相 PWM 输出，具有程序可控的死区插入功能；

配置为 16 位标准定时器时，它与 TIMx 定时器具有相同的功能。配置为 16 位 PWM 发生器时，它具有全调制能力(0~100%)。

在调试模式下，计数器可以被冻结。很多功能都与标准的 TIM 定时器相同，内部结构也相同，因此高级控制定时器可以通过定时器链接功能与 TIM 定时器协同操作，提供同步或事件链接功能。

TIM1 定时器的功能包括：

- 16 位上，下，上/下自动装载计数器 ；
- 16 位可编程预分频器，计数器时钟频率的分频系数为 1~65535 之间的任意数值；

- 4 个独立通道：

- 输入捕获 ；
- 输出比较；
- PWM 生成(边缘或中间对齐模式)；
- 单脉冲模式输出 ；
- 死区时间可编程的互补输出。

- 使用外部信号控制定时器和定时器互连的同步电路；
- 在指定数目的计数器周期之后更新定时器寄存器；
- 刹车输入信号可以将定时器输出信号置于复位状态或者一个已知状态；
- 如下事件发生时产生中断/DMA：
 - 更新：计数器向上溢出/向下溢出，计数器初始化(通过软件或者内部

/外部触发)；

- 触发事件(计数器启动，停止，初始化或者由内部/外部触发计数)；
- 输入捕获；
- 输出比较；
- 刹车信号输入。

时基单元

可编程高级控制定时器的主要部分是一个 16 位计数器和与其相关的自动装载寄存器。这个计数器可以向上计数、向下计数或者向上向下双向计数。此计数器时钟由预分频器分频得到。

计数器、自动装载寄存器和预分频器寄存器可以由软件读写，即使计数器还在运行读写仍然有效。

时基单元包含：

- 计数器寄存器(TIM1_CNT)；
- 预分频器寄存器 (TIM1_PSC)；
- 自动装载寄存器 (TIM1_ARR)；
- 周期计数寄存器 (TIM1_RCR)；

自动装载寄存器是预先装载的。写或读自动重装载寄存器将访问预装载寄存器。根据在 TIM1_CR1 寄存器中的自动装载预装载使能位 (ARPE) 的设置，预装载寄存器的内容被永久地或在每次的更新事件 UEV 时传送到影子寄存器。当计数器达到溢出条件(向下计数时的下溢条件)并当 TIM1_CR1 寄存器中的 UDIS 位等于 0 时，产生更新事件。更新事件也可以由软件产生。随后会详细描述每一种配置下更新事件的产生。

计数器由预分频器的时钟输出 CK_CNT 驱动，仅当设置了计数器 TIM1_CR1 寄存器中的计数器使能位 (CEN) 时，CK_CNT 才有效。(有关更多的计数器使能的细节，请参见控制器的从模式描述)。

注：真正的计数器使能信号 CNT_EN 是在 CEN 后的一个时钟周期后被设置。
预分频器描述。

预分频器可以将计数器的时钟频率按 1 到 65536 之间的任意值分频。它是

基于一个(在 TIM1_PSC 寄存器中的)16 位寄存器控制的 16 位计数器。因为这个控制寄存器带有缓冲器，它能够在工作时被改变。新的预分频器的参数在下一次更新事件到来时被采用。

图 2-4 和 图 2-5 给出了一些在预分频器工作时，更改其参数的情况下计数器操作的例子。

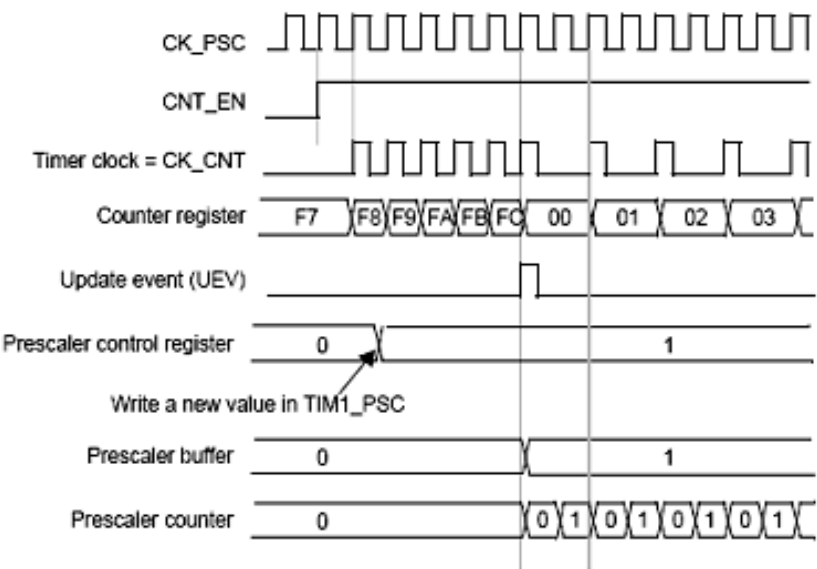


图 2-4 当预分频器的参数从 1 变到 2 时，计数器的时序图

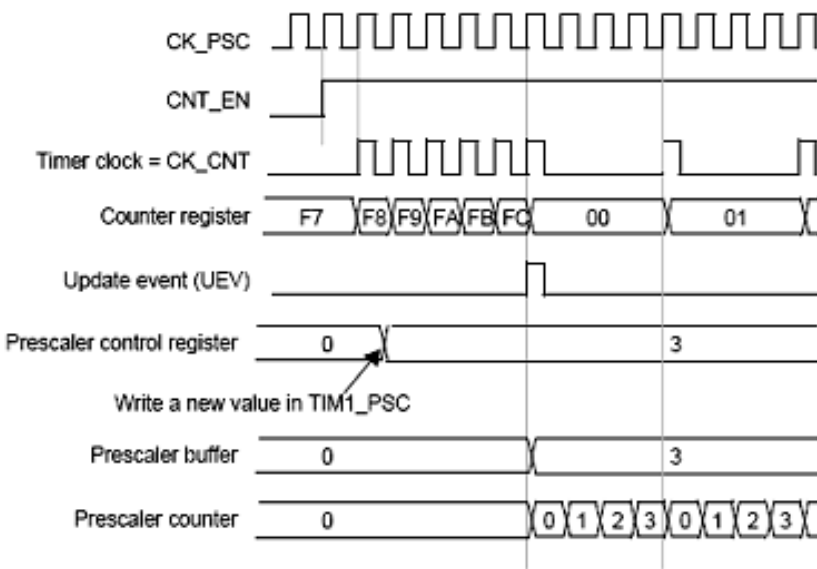


图 2-5 当预分频器的参数从 1 变到 4 时，计数器的时序图

2.4.3 小结

经过比较和针对设计需要，使用定时器预分频器和 RCC 时钟控制预分频器，

可以实现脉冲宽度和波形周期从几个微秒至几个毫秒的调节。高级控制(TIM1)和通用(TIMx)定时器是完全独立的,不共享任何资源,可以同步操作。高级控制定时器(TIM1)还可以被看成是一个分配到6个通道的三相PWM发生器,它还可以被当成一个完整的通用定时器。因此该设计选择高级控制定时器(TIM1)。

PWM 概述

PWM 是 Pulse Width Modulation 的缩写,中文意思就是脉冲宽度调制,简称脉宽调制。它是利用微处理器的数字输出来对模拟电路进行控制的一种非常有效的技术,其控制简单、灵活和动态响应好等优点而成为电力电子技术最广泛应用的控制方式,其应用领域包括测量,通信,功率控制与变换,电动机控制、伺服控制、调光、开关电源,甚至某些音频放大器,因此研究基于 PWM 技术的正负脉宽数控调制信号发生器具有十分重要的现实意义。

PWM 是一种对模拟信号电平进行数字编码的方法。通过高分辨率计数器的使用,方波的占空比被调制用来对一个具体模拟信号的电平进行编码。PWM 信号仍然是数字的,因为在给定的任何时刻,满幅值的直流供电要么完全有(ON),要么完全无(OFF)。电压或电流源是以一种通(ON)或断(OFF)的重复脉冲序列被加到模拟负载上去的。通的时候即是直流供电被加到负载上的时候,断的时候即是供电被断开的时候。只要带宽足够,任何模拟值都可以使用 PWM 进行编码。

多数负载(无论是电感性负载还是电容性负载)需要的调制频率高 10Hz,通常调制频率为 1kHz 到 200kHz 之间。占空比是接通时间与周期之比;调制频率为周期的倒数。

目前,运动控制系统或电动机控制系统中实现 PWM 的方法主要有传统的数字电路方式、专用的 PWM 集成电路、单片机实现方式和可编程逻辑器件实现方式。用传统的数字电路实现 PWM,电路设计较复杂,体积大,抗干扰能力差,系统的控制周期较长。专用的 PWM 集成电路或带有 PWM 的单片机价格较高。对于单片机中无 PWM 输出功能的情况,实现 PWM 将消耗大量的时间,大大降低了 CPU 的效率,而且得到的 PWM 信号精度不太高^[15]。

PWM 模式

脉冲宽度调制模式可以产生一个由 TIM1_ARR 寄存器确定频率、由 TIM1_CCRx 寄存器确定占空比的信号。在 TIM1_CCMRx 寄存器中的 OCxM 位写入“110”(PWM 模式 1)或“111”(PWM 模式 2),能够独立地设置每个通道工作在 PWM 模式,每个 OCx 输出一路 PWM。必须通过设置 TIM1_CCMRx 寄存器 OCxPE 位使能相应的预装载寄存器,最后还要设置 TIM1_CR1 寄存器的 ARPE 位使能自动重载的预装载寄存器(在向上计数或中心对称模式中)。

因为仅当发生一个更新事件的时候,预装载寄存器才能被传送到影子寄存器,因此在计数器开始计数之前,必须通过设置 TIM1_EGR 寄存器中的 UG 位来初始化所有的寄存器。

OCx 的极性可以通过软件在 TIM1_CCER 寄存器中的 CCxP 位设置,它可以设置为高电平有效和低电平有效。OCx 输出通过 CCxE、CCxNE、MOE、OSSI 和 OSSR 位(在 TIM1_CCER 和 TIM1_BDTR 寄存器中)的组合控制。

在 PWM 模式(模式 1 或模式 2)下,TIM1_CNT 和 TIM1_CCRx 始终在进行比较,(依据计数器的计数方向)以确定是否符合 $TIM1_CCRx \leq TIM1_CNT$ 或者 $TIM1_CNT \leq TIM1_CCRx$ 。根据 TIM1_CR1 寄存器中 CMS 位的状态,定时器能够产生边沿对齐的或中央对齐的 PWM 信号。

PWM 边沿对齐模式

- 向上计数配置

当 TIM1_CR1 寄存器中的 DIR 位为低的时候执行向上计数。

当 $TIM1_CNT < TIM1_CCRx$ 时 PWM 参考信号,OCxREF 为高,否则为低。如果 TIM1_CCRx 中的比较值大于自动重载值(TIM1_ARR),则 OCxREF 保持为“1”。如果比较值为 0,则 OCxREF 保持为“0”。图 3-1 为 TIM1_ARR=8 时边沿对齐的 PWM 波形实例。

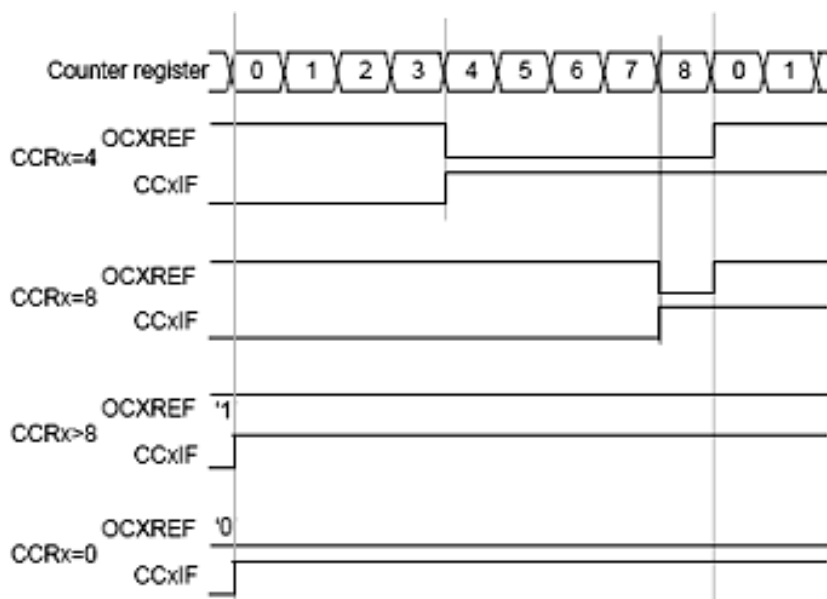


图 3-1 边沿对齐的 PWM 波形 (ARR=8)

- 向下计数的配置

当 TIM1_CR1 寄存器的 DIR 位为高时执行向下计数。

在 PWM 模式 1，当 $TIM1_CNT > TIM1_CCR_x$ 时参考信号 OC_xREF 为低，否则为高。如果 $TIM1_CCR_x$ 中的比较值大于 $TIM1_ARR$ 中的自动重装载值，则 OC_xREF 保持为“1”。该模式下不能产生 0% 的 PWM 波形。

PWM 中央对齐模式

当 TIM1_CR1 寄存器中的 CMS 位不为 00 时为中央对齐模式 (所有其他的配置对 OC_xREF/OC_x 信号都有相同的作用)。根据不同的 CMS 位的设置，比较标志可能在计数器向上计数时被置 1、在计数器向下计数时被置 1、或在计数器向上和向下计数时被置 1。TIM1_CR1 寄存器中的计数方向位 (DIR) 由硬件更新，不要用软件修改它。

图 3-2 给出了一些中央对齐的 PWM 波形的例子

- TIM1_ARR=8 ；
- PWM 模式 1；
- TIM1_CR1 寄存器中的 CMS=01，在中央对齐模式 1 时，当计数器向下计数时标志被设置。[21]

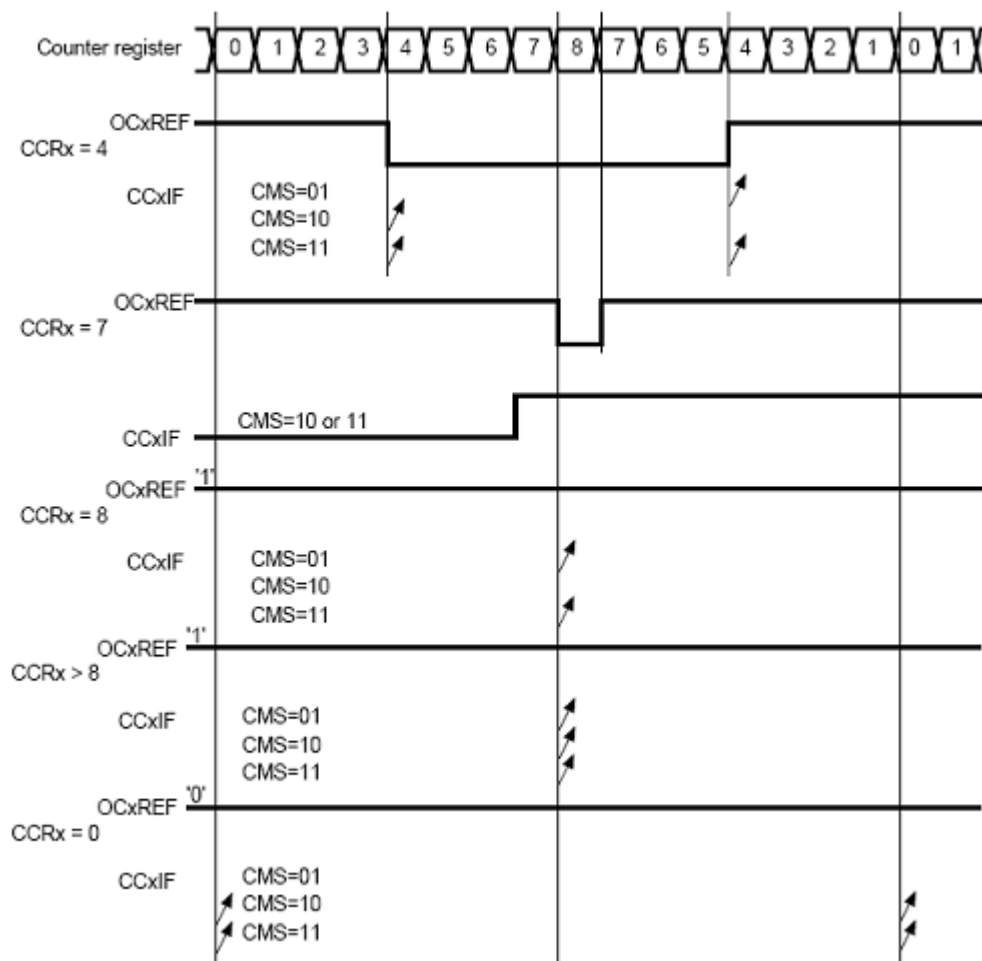


图 3-2 中央对齐的 PWM 波形 (APR=8)

3.1.2 互补输出与死区插入

高级控制定时器 TIM1 能够输出两路互补信号并且能够管理输出的瞬时关断和接通。这段时间通常被称为死区，应该根据连接到输出的器件和它们的特性（电平转换的延时、电源开关的延时等）来调整死区时间。

配置 TIM1_CCER 寄存器中的 CCxP 和 CCxNP 位，可以为每一个输出独立地选择极性（主输出 OCx 或互补输出 OCxN）。互补信号 OCx 和 OCxN 通过下列控制位的组合进行控制：TIM1_CCER 寄存器的 CCxE 和 CCxNE 位，TIM1_BDTR 和 TIM1_CR2 寄存器中的 MOE、OISx、OISxN、OSSI 和 OSSR 位，带刹车功能的互补输出通道 OCx 和 OCxN 的控制位。特别是，在转换到 IDLE 状态时 (MOS 下降到 0) 死区被

激活。

同时设置 CCxE 和 CCxNE 位将插入死区，如果存在刹车电路，则还要设置 MOE 位。每一个通道都有一个 10 位的死区发生器。参考信号 OCxREF 可以产生 2 路输出 OCx 和 OCxN。如果 OCx 和 OCxN 为高有效：

- OCx 输出信号与参考信号相同，只是它的上升沿相对于参考信号的上升沿有一个延迟。
- OCxN 输出信号与参考信号相反，只是它的上升沿相对于参考信号的下降沿有一个延迟。

如果延迟大于当前有效的输出宽度 (OCx 或 OCxN)，则不会产生相应的脉冲。

图 3-3, 3-4 显示了死区发生器的输出信号和当前参考信号 OCxREF 之间的关系 (假设 CCxP=0、CCxNP=0、MOE=1、CCxE=1 并且 CCxNE=1)。

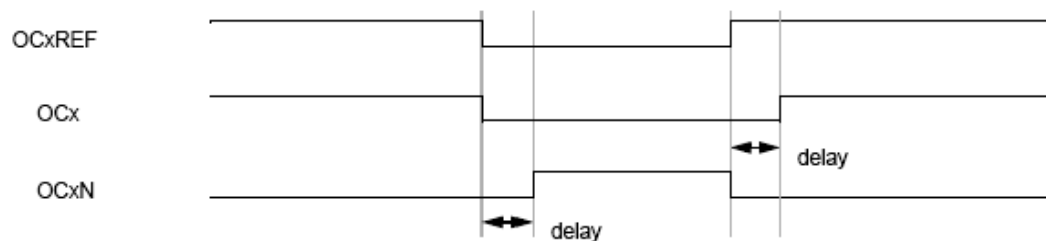


图 3-3 带死区插入的互补输出

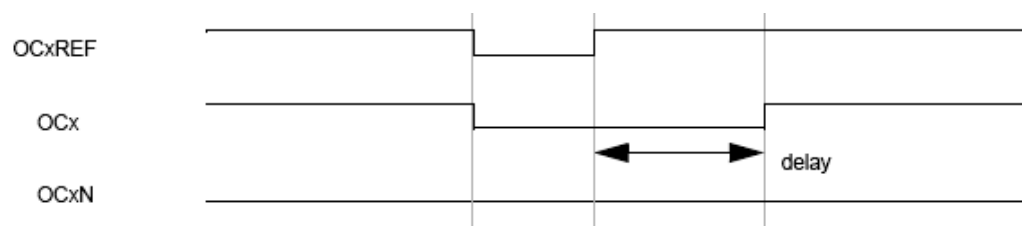


图 3-4 死区波形延迟大于负脉冲

3.2 PWM 输出的实现^[12]

STM32 的高级定时器时钟 TIM1CLK 为固定 72MHz, TIM1 预分频为 0x0 (系统高速时钟不分频), 所以 TIM1 计数器时钟频率为 72MHz。I/O 口时钟为固定值 50MHz, PA8、PA9、PA10、PA11 设为推拉模式。

TIM1 在下面定义的频率下工作:

$$\text{TIM1 频率} = \text{TIM1CLK} / (\text{TIM1_Period} + 1) = 17.57 \text{ KHz}.$$

TIM1 CC1 寄存器的值为 0x7FFF, 所以 TIM1_CH1 和 TIM1_CH1N 产生一个频率为 17.57KHz 的信号, 这个信号的占空比为:

$$\text{TIM1_CH1 占空比} = \text{TIM1_CCR1} / (\text{TIM1_Period} + 1) = 50\%.$$

TIM1 CC2 寄存器的值为 0x3FFF, 所以 TIM1_CH2 和 TIM1_CH2N 产生一个 17.57KHz 的信号, 它的占空比为:

$$\text{TIM1_CH2 占空比} = \text{TIM1_CCR2} / (\text{TIM1_Period} + 1) = 25\%.$$

TIM1 CC3 寄存器的值为 0x1FFF, 所以 TIM1_CH3 和 TIM1_CH3N 产生一个 17.57KHz 的信号, 它的占空比为:

$$\text{TIM1_CH3 占空比} = \text{TIM1_CCR3} / (\text{TIM1_Period} + 1) = 12.5\%.$$

TIM1 波形可以在示波器上显示出来。

输出信号观察

下列引脚分别依次接到示波器上 (两个一组), 示波器接线正接触线下列引脚, 负接触线接地 (GND)。

- TIM1_CH1 pin (PA8);
- TIM1_CH1N pin (PB13);
- TIM1_CH2 pin (PA9);
- TIM1_CH2N pin (PB14) ;
- TIM1_CH3 pin (PA10);
- TIM1_CH3N pin (PB15);
- TIM1_CH4 pin (PA11)。

第 4 章 软件设计

4.1 开发环境

4.1.1 STM32 的开发软件

STM32 自问世至今，采用过如下软件，皆有利弊。

- IAR

IAR 是 STM32 开发使用最多的软件平台。IAR 官方提供 IAR for ARM 两种类型的版本供免费评估：32K 学习版，只能支持编译 32K 目标代码，等效无时间限制；30 天评估版，无编译代码限制。

- MDK

自从 keil 被 ARM 收购以后，在 keil 中集成了 ARM 自己的编译器，改名 MDK。

- RIDE

该软件支持 GCC 编译器开发 STM32 产品。该套开发板使用 keilmdk370 开发软件，该软件使用简单，keil 是众多单片机应用开发的优秀软件之一，它集编辑编译仿真于一体，支持汇编，PLM 语言和 C 语言的程序设计，界面清晰，易学易懂。

这里选用的是 keilmdk370，4.1.2 节着重介绍。

4.1.2 MDK370^[11]

Real View MDK (Microcontroller Development Kit) 是 ARM 公司最先推出的基于 ARM 微控制器的专业嵌入式开发工具。它采用了 ARM 的最新技术编工具 RVCT，集成了享誉全球的 μ Vision IDE，因此特别易于使用，同时具备非常高的性能。它适合不同层次的开发人员使用，包括专业的应用程序开发工程师和嵌入式软件开发的入门者。MDK 包括符合工业标准的 Real View 编译工具、测试器以及实时内核等组件，支持所有基于 ARM 的设备，能帮助工程师按照计划完成项目。

- MDK 提供启动代码生成向导——提高开发效率；
- MDK 提供强大的设备模拟器——缩短开发周期；

目标设备的所有组件都可仿真，代码可在整个设备上运行。完全的目标硬件仿真，完整的目标，高效指令集仿真，中断仿真，片内外围设备有 ADC, DAC, EBI, Timers , UART, CAN, I2C, 包含外部信号和 I/O。充足的仿真信息，包含在设备数据库里。

- MDK 提供高效的性能开发工具；
- MDK 支持最新的 Cortex-M3 处理器：

Cortex-M3 处理器是 ARM 公司推出的最新的针对微控制应用的内核，提供业界领先的高性能和低成本解决方案，将成为 MCU 应用的热点和主流。但是目前能支持 Cortex-M3 构架的开发工具很少，包括 SDT, ADS1.2 等多数开发工具都不支持。MDK 是目前性价比最高的支持 Cortex-M3 处理器的开发工具。

- MDK 集成了 Flash 编程模块；
- MDK 提供业界最好的 μ Vision IDE—易学易懂。

4.2 软件实现

4.2.1 设计标准

该设计对 TIM1 定时器进行控制，使之各通道输出插入死区的互补 PWM 输出，各通道输出频率均为 17.57KHz。 I/O 口时钟为固定值 50MHz，PA8、PA9、PA10、PA11 设为推拉模式。

其中，通道 1 输出的占空比为 50%，通道 2 输出的占空比为 25%，通道 3 输出的占空比为 12.5%。各通道互补输出为反相输出。TIM1 定时器的通道 1 到 4 的输出分别对应 PA.08、PA.09、PA.10 引脚，而通道 1 到 3 的互补输出分别对应 PB.13、PB.14 和 PB.15 引脚，这些处理器引脚在开发板上已经以插针形式引出。

由于 TIM1 计数器的时钟频率为 72MHz，各通道输出频率 f_{TIM1} 为 17.57KHz，根据： $f_{TIM1} = TIM1CLK / (TIM1_Period + 1)$ ，可得到 TIM1 预分频器的 TIM1_Period 为 0xFFFF。根据通道输出占空比 $TIM1_CCR_x / (TIM1_Period + 1)$ ，可以得到各通道比较/捕获寄存器的计数值。其中：TIM1_CCR1 寄存器的值 0x7FFF、TIM1_CCR2 寄存器的值为 0x3FFF、TIM1_CCR3 寄存器的值为 0x1FFF。

程序部分原代码：

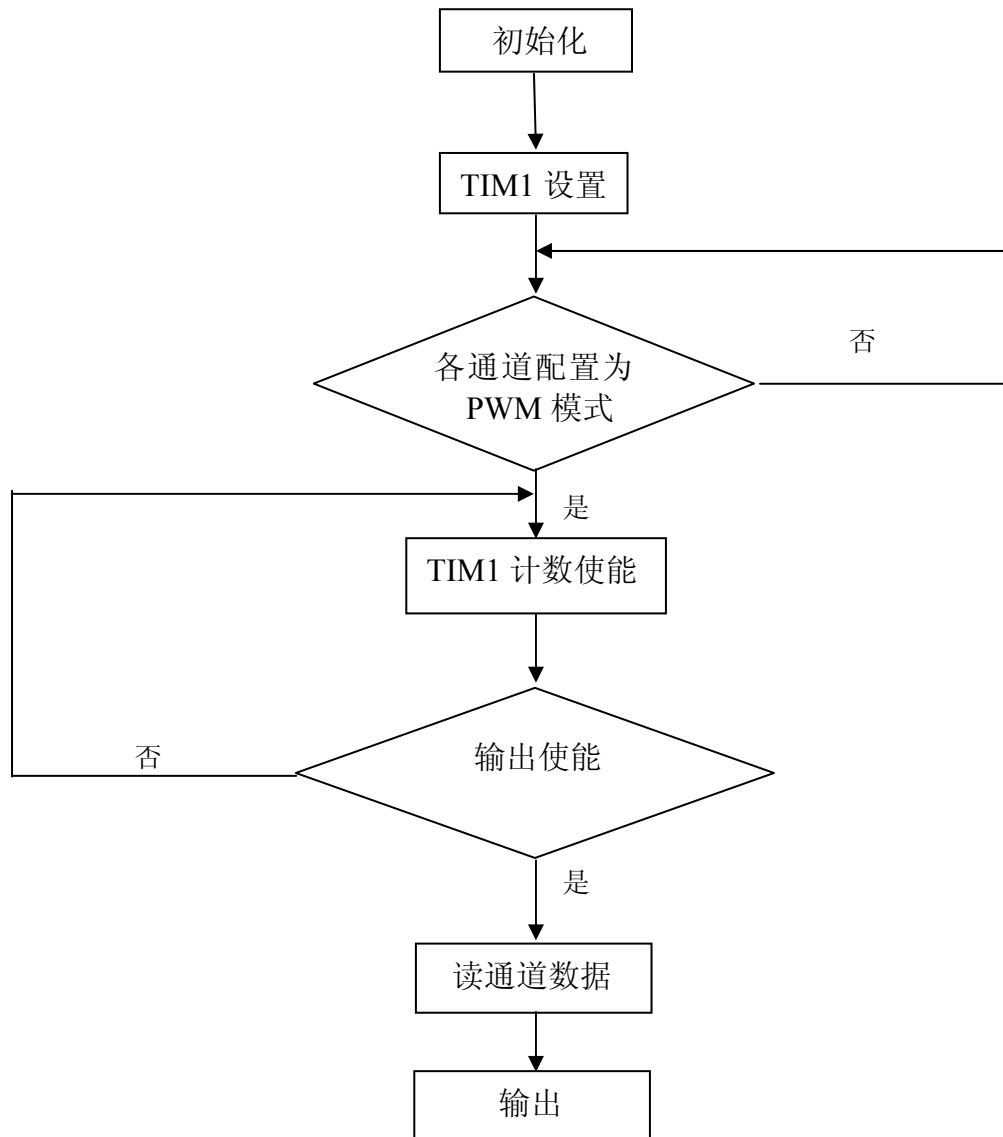
```
/* Channel 1, 2, 3 and 4 Configuration in PWM mode */  
TIM1_OCInitStructure.TIM1_OCMode = TIM1_OCMode_PWM2;  
TIM1_OCInitStructure.TIM1_OutputState = TIM1_OutputState_Enable;  
TIM1_OCInitStructure.TIM1_OutputNState = TIM1_OutputNState_Enable;  
TIM1_OCInitStructure.TIM1_Pulse = CCR1_Val;  
TIM1_OCInitStructure.TIM1_OCPolarity = TIM1_OCPolarity_Low;  
TIM1_OCInitStructure.TIM1_OCNPolarity = TIM1_OCNPolarity_Low;  
TIM1_OCInitStructure.TIM1_OCIdleState = TIM1_OCIdleState_Set;  
TIM1_OCInitStructure.TIM1_OCNIdleState = TIM1_OCIdleState_Reset;  
TIM1_OC1Init (&TIM1_OCInitStructure);  
TIM1_OCInitStructure.TIM1_Pulse = CCR2_Val;  
TIM1_OC2Init (&TIM1_OCInitStructure);  
TIM1_OCInitStructure.TIM1_Pulse = CCR3_Val;  
TIM1_OC3Init (&TIM1_OCInitStructure);
```

运行过程：

- (1) 使用 Keil uVision3 编译链接工程；
- (2) 点击 MDK 的 Debug 菜单，点击 Start/Stop Debug Session；
- (3) 通过示波器察看 PA. 08、PA. 09、PA. 10、PB. 13、PB. 14、PB. 15 的输出波形，其中 PA. 08 和 PB. 13 为一组，PB. 09 和 PB. 14 为一组，PB. 10 和 PB. 15 为一组。

4.2.2 程序流程图

整个设计程序流程如图 4-1 所示：



第 5 章 测试及结果

5.1 JTAG 仿真器介绍^[11]

J-Link 是支持仿真 ARM 内核芯片的 JTAG 仿真器。配合 IAR EWARM, ADS, KEIL, WINARM, RealView 等集成开发环境支持所有 ARM7/ARM9 内核芯片的仿真, 通过 RDI 接口和各集成开发环境无缝连接, 操作方便、连接方便、简单易学, 是学习开发 ARM 最好最实用的开发工具。

DQ 电子推出的 J-LinkV7 仿真器采用原版固件, 参照原版原理图, 经过 DQ 团队的长时间精工制作, 板型合理, 元件布局美观大方, 走线严谨精致, 并且每一个产品都经过功能和老化测试, 功能完全与原版一致, 支持在线升级。

J-Link ARM 主要特点:

- IAR EWARM 集成开发环境无缝连接的 JTAG 仿真器。
- 支持所有 ARM7/ARM9 内核的芯片, 以及 cortexM3, 包括 Thumb 模式。
- 支持 ADS, IAR, KEIL, WINARM, REALVIEW 等几乎所有的开发环境。
- 下载速度高达 ARM7:600kB/s, ARM9:550kB/s, 通过 DCC 最高可达 800 kB/s*最高 JTAG 速度 12MHz。

- 目标板电压范围 1.2V—3.3V。
- 自动速度识别功能。
- 监测所有 JTAG 信号和目标板电压。
- 完全即插即用。
- 使用 USB 电源 (可接通 J12 跳线给目标板供电, 出厂时未接通)。
- 带 USB 连接线和 20 芯 JTAG 连接排线。
- 支持多 JTAG 器件串行连接。
- 标准 20 芯 JTAG 仿真插头。
- 带 J-Link TCP/IP server, 允许通过 TCP/IP 网络使用 J-Link

支持的内核:

- ARM7TDMI (Rev 1) ;

-
- ARM7TDMI (Rev 3) ;
 - ARM7TDMI-S (Rev 4) ;
 - ARM720T ;
 - CORTEXM3。

5.2 测试

在电脑主机 USB 接口上插入开发板的电源线和 J-LINK 的连接线，同时给示波器供电，示波器两个通道接线的负接线与开发板 STM32 的 GND 连接，正接线分别接通道 n (n=1, 2, 3) 和其互补通道。其中，通道 1 到 3 的输出分别对应 PA. 08、PA. 09、PA. 10 引脚，而通道 1 到 3 的互补输出分别对应 PB. 13、PB. 14、PB. 15 引脚。前序工作准备好后，再在 Keil uVision3 环境里打开 TIM1 的工程，编译连接运行，观察示波器图像，并记录。

5.3 现象及结果

通道 1 和其互补通道，频率为 17.57kHz，占空比为 50%，PWM 输出显示如图 5-1：

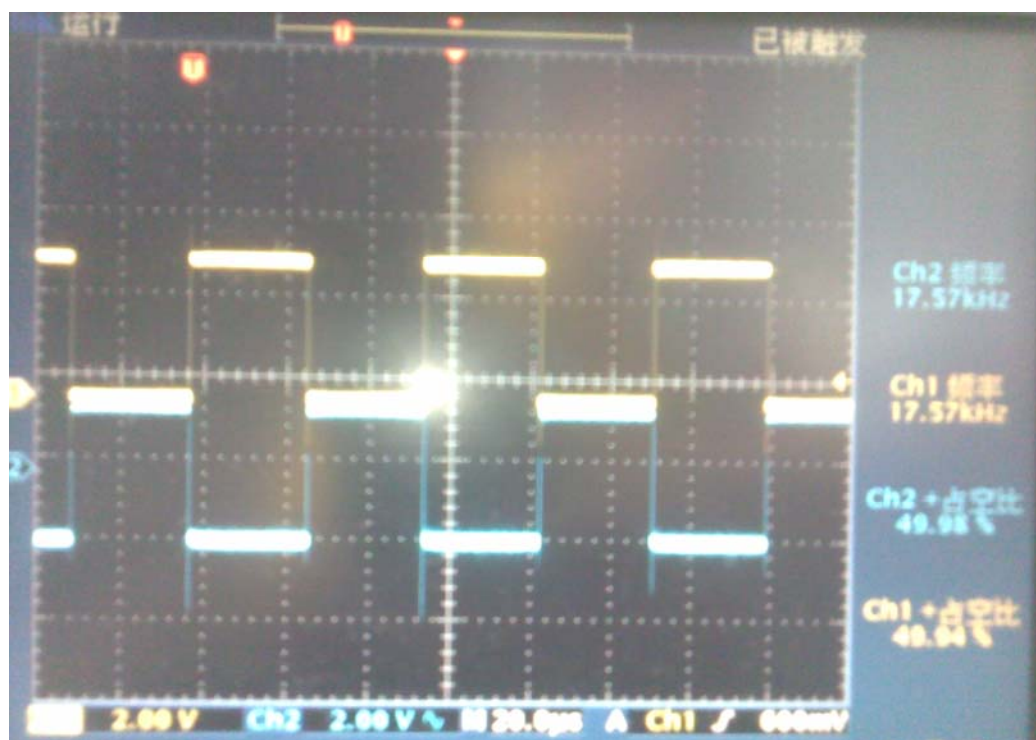


图 5-1 通道 1 与其互补通道的 PWM 输出图

通道 2 频率 17.57 kHz，占空比为 25%，其互补通道频率 17.57 kHz，占空比为 75%， PWM 输出显示如图 5-2。

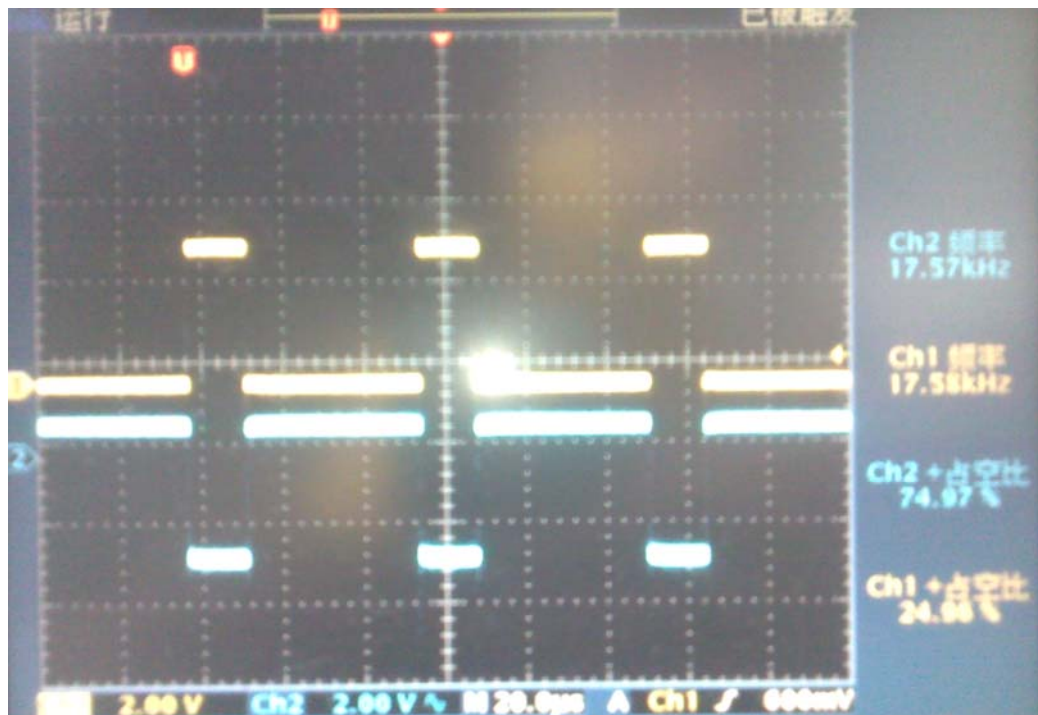


图 5-2 通道 2 与其互补通道的 PWM 输出图

通道 3 频率 17.57 kHz，占空比为 12.5%，其互补通道频率 17.57 kHz，占空比为 87.5%， PWM 输出显示如图 5-3。

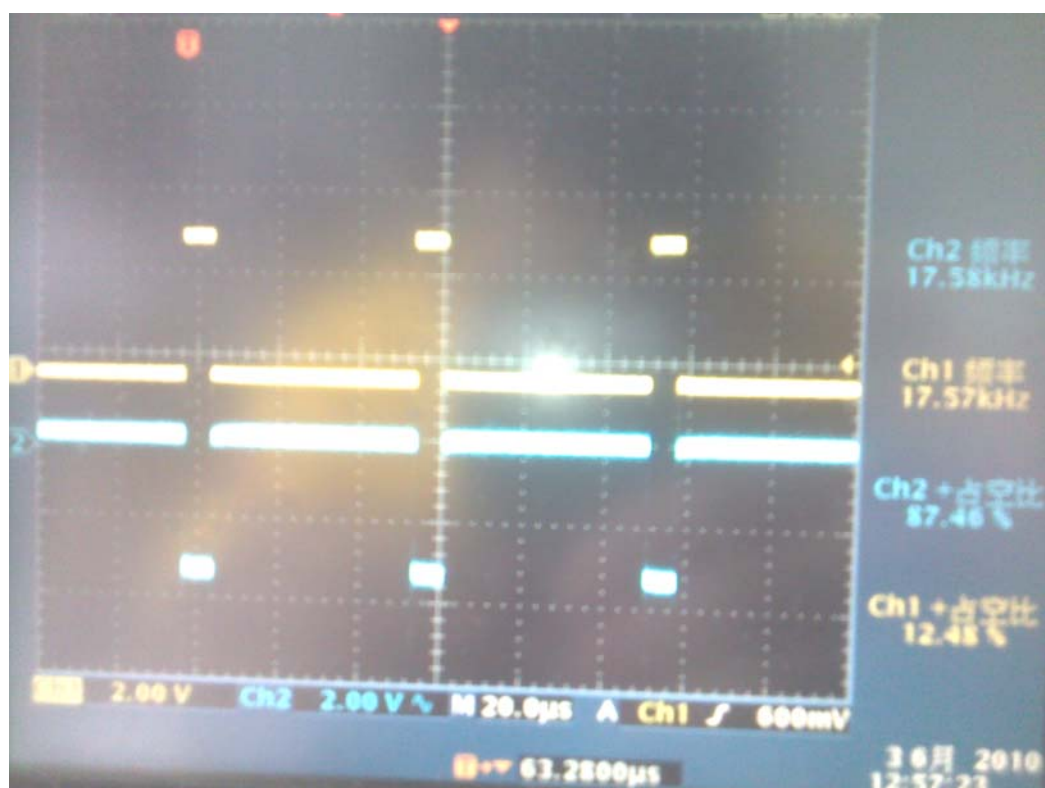


图 5-3 通道 3 与其互补通道的 PWM 输出图

结论

通过对 TIM1 定时器进行控制，使之各通道输出插入死区的互补 PWM 输出，各通道输出频率均为 17.57KHz。

其中，通道 1 输出的占空比为 50%，通道 2 输出的占空比为 25%，通道 3 输出的占空比为 12.5%。各通道互补输出为反相输出。

TIM1 定时器的通道 1 到 3 的输出分别对应 PA.08、PA.09、PA.10 引脚，而通道 1 到 3 的互补输出分别对应 PB.13、PB.14 和 PB.15 引脚，将这些引脚分别接入示波器正接线，GND 引脚接示波器负接线，在示波器上看到了相应通道占空比的 PWM 输出。
