

## 机电技术

# 基于 STM32 步进电机多细分控制的设计

曹彬乾 程远增 孙书鹰 张佩超

(军械工程学院电子与光学工程系, 石家庄 050003)

**摘要** 介绍了一种基于 STM32 与 A3988 的步进电机多细分控制的设计,通过 STM32 控制定时器产生 PWM 信号,经过低通滤波后,完成 PWM 的 DAC 转换。利用其输出的动态变化的电压为步进电机驱动芯片 A3988 提供参考;并且对电流方向进行控制,从而实现了步进电机的多细分控制。STM32 通过查表法得到对应占空比,占空比变化的时间间隔通过定时器实现。阐述了相关软硬件和设计原理,验证了该设计的控制效果,结果表明,该设计不仅控制精度高,灵活性强,而且相对于传统利用 DAC 转换芯片的方案,具有实现简单,效费比高等优点。

**关键词** STM32 A3988 多细分 PWM-DAC

**中图分类号** TM383.6 TP368; **文献标志码** A

在某装备模型设计中,为了给人以直观的印象,需要通过控制云台来实现模型定点或者航路跟踪的动态演示。云台主要是由水平方向和垂直方向的两个步进电机构成,模型演示的效果一定程度上取决于对这两个电机精度以及速度的控制。

针对这点,本文主要介绍了一种基于 STM32 的混合式步进电机控制方案,STM32 产生 PWM(脉宽调制信号),利用 PWM 完成 DAC 转换,通过 PWM-DAC 的输出电压实现对步进电机的多细分控制。该设计相比利用 DAC 数模转换芯片的设计方案具有电路简单,费效比高的优点,而且可实现步进电机十六分之一步的驱动控制,精度较高。

## 1 硬件设计

硬件设计框图如图 1 所示,主要由 PC 上位机给 STM32F103 发送控制命令,通过 STM32F103 控制 A3988,从而驱动两个步进电机转动。其中,STM32F103 是意法半导体公司生产的基于 ARM Cortex—M3 内核的微控制器,内核架构先进,性能优越,主频可达 72 MHz,执行效率高,具有较高的运

算能力及数据处理功能,拥有丰富的外设接口<sup>[1]</sup>,在硬件设计中,上位机与 STM32F103 之间的 RS—422 串行通信,就是通过外接 MAX3079 电平转换芯片来实现的。

STM32F103 控制定时器产生 PWM,通过 LPF(低通滤波器)实现 PWM 的 DAC 转换,并由 PWM-DAC 来提供 A3988 的 4 个基准电压,设计中,定时器 TIM1 的输出通道在经过滤波器后与 A3988 的参考电压 VERFx 接口相连,PC0~3, PB12~15, PB6~9 为通用 GPIO 输出端口,接 A3988 的逻辑控制信号输入脚 IOx、I1x 和 Phasex, PC0~3 和 PB12~15 分别置低, Phasex 用于控制流过电机各相电流的方向。选用的步进电机的步距角为 0.9°,额定电流为 0.5 A。

## 2 多细分控制原理分析与实现

### 2.1 多细分控制原理分析

选用电机为两相步进电机,假设为 A、B 相,通过两相的电流在相位上相差为 90°,控制流过两相的电流大小和方向就可以控制电机转动。A3988 是一个 4DMOS 全桥脉宽调制电机驱动器,可以同时驱动两个步进电机,每个全桥输出电流最大可达到 1.2 A。流过电机的每一相电流可以通过  $U_{REFx}$ , IOx, I1x, Phasex 和接 SENSEx 引脚的电阻  $R_x$  进行控制。工作电流通过公式(1)可以得到<sup>[2]</sup>。

2013 年 4 月 24 日收到

第一作者简介:曹彬乾(1988—),男,硕士研究生。研究方向:导航、制导与控制。E-mail:cbqing104@163.com。

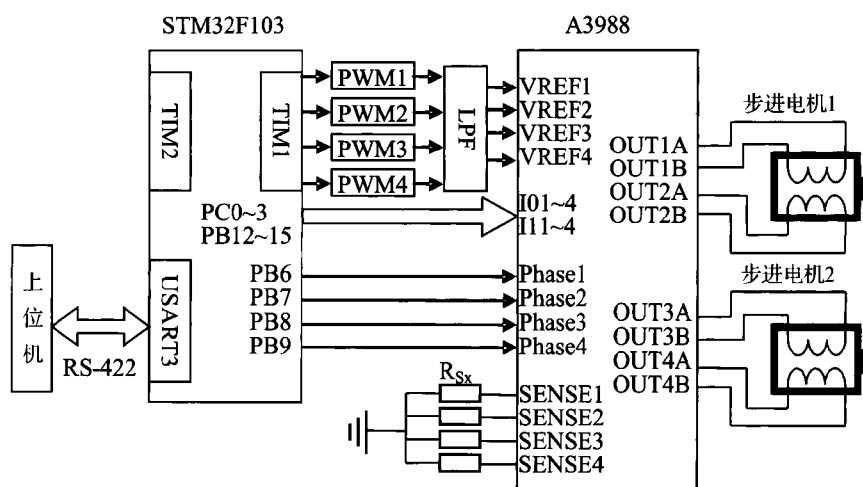


图1 硬件设计框图

$$I_{\text{TripMax}} = U_{\text{REFx}} / (3R_{\text{Sx}}) \quad (1)$$

由式(1)可知,最大电流  $I_{\text{TripMax}}$  是由  $U_{\text{REFx}}$  和  $R_{\text{Sx}}$  共同决定,  $U_{\text{REFx}}$  为 PWM-DAC 的输出电压,其最大值为 1.1 V,  $R_{\text{Sx}}$  选用 1 欧的电阻。

$$I_{\text{Trip}} = (\% I_{\text{TripMax}} / 100) I_{\text{TripMax}} \quad (2)$$

式(2)中,  $I_{\text{Trip}}$  为实际输出的电流,逻辑接口  $\text{IOx}$ ,  $\text{IIx}$  控制  $\% I_{\text{TripMax}}$ ,由 A3988 的用户文档可知,当  $\text{IOx}$ ,  $\text{IIx}$  控制逻辑都为低时,实际输出电流就等于最大电流,由上述公式可知,  $I_{\text{Trip}}$  最大输出约为 367 mA。

为实现步进电机多细分控制,必须能够控制流过步进电机的两相电流,在参考电压  $U_{\text{REFx}}$  一定的情况下,使用逻辑接口  $\text{IOx}$ ,  $\text{IIx}$ ,  $\text{Phasex}$  仅可实现步进电机整步、半步和四分之一步的驱动控制,这样的细分控制并不能满足设计需求,为了得到更多的细分,设计采用动态改变  $U_{\text{REFx}}$  的方法来输出动态变化的电流,通过对  $U_{\text{REFx}}$  的多细分控制,来实现对  $I_{\text{Trip}}$  的多细分,从而实现对步进电机多细分控制。

$U_{\text{REFx}}$  由 PWM-DAC 输出,其值在 0 ~ 1.1 V 变化,将其按 0 ~  $\pi$  的正旋曲线 32 等分得到 32 个电压值,令 PWM-DAC 输出的值为这 32 个值,从而对应得到 0 ~ 1.1 V 的 32 个电压值和按正弦规律变化的 32 个电流值,通过  $\text{Phasex}$  控制电流方向,可实现步进电机 1/16 步的驱动控制。

## 2.2 PWM 实现 DAC 转换的原理及设计

虽然大容量的 STM32F103 具有内部 DAC,但是更多的型号是没有 DAC 的,本文中所用到的

STM32F03 就没有 DAC 外设功能。不过 STM32 所有的芯片都有 PWM 输出,因此,可以用 PWM + LPF 来实现 PWM-DAC 输出,从而节省成本。

PWM 本质上是一种周期一定而高低电平的占空比可以调制的方波信号,实际电路中典型的 PWM 波形如图 2 所示<sup>[3]</sup>。

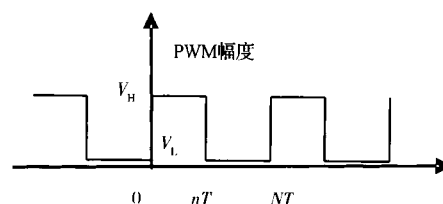


图2 典型的 PWM 波形

图 2 的 PWM 波形可以用分段函数表示为式(3)。

$$f(t) = \begin{cases} V_H, & kNT \leq t \leq nT + kNT \\ V_L, & kNT + nT \leq t \leq NT + kNT \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $T$  是 STM32 定时器 TIM1 的计数频率(最高可达 72 MHz)的倒数,  $N$  是 PWM 波一个周期的计数脉冲个数,也就是 STM32 的 ARR-1 的值,  $n$  是 PWM 波一个周期中高电平的计数脉冲个数,也就是 STM32 的 CCRx 的值,  $V_H$  和  $V_L$  分别是 STM32 产生 PWM 波的高低电平电压值,高电平为 3.3 V,低电平为 0 V,  $k$  为谐波次数,  $t$  为时间。将式(3)展开成傅里叶级数,得到式(4)。

$$f(t) = \left[ \frac{n}{N} (V_H - V_L) + V_L \right] + 2 \frac{V_H - V_L}{\pi} \sin\left(\frac{n}{N}\pi\right) \cos\left(\frac{2\pi}{NT}t - \frac{n\pi}{N}k\right) + \sum_{k=2}^{\infty} 2 \frac{V_H - V_L}{k\pi} \left| \sin\left(\frac{n\pi}{N}k\right) \right| \times \cos\left(\frac{2\pi}{NT}kt - \frac{n\pi}{N}k\right) \quad (4)$$

从式(4)可以看出,式(4)中第1个方括弧为直流分量,第2项为1次谐波分量,第3项为大于1次的高次谐波分量。直流分量与 $n$ 成线性关系,并随着 $n$ 从0到 $N$ ,直流分量在0~3.3 V变化。这正是电压输出的DAC所需要的。因此,如果能把式中除直流分量外的谐波过滤掉,则可以得到从PWM波到电压输出DAC的转换,即:PWM波可以通过一个低通滤波器进行解调。其中,第2项的幅度和相角与 $n$ 有关,频率为 $1/(NT)$ ,其实就是PWM的输出频率。该频率是设计低通滤波器的依据。如果能把1次谐波很好过滤掉,则高次谐波就基本不存在了。

选用RC二阶低通滤波器实现PWM波的解调,电路设计如图3所示。

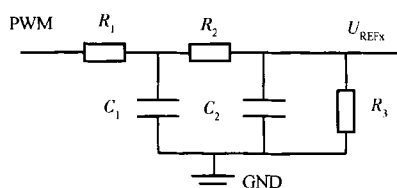


图3 二阶低通滤波器调理电路

当 $N$ 取值为256时,PWM-DAC的分辨率为 $\log_2(N) = 8$ 位,在8位分辨条件下,要求1次谐波对输出电压的影响不要超过1个位的精度,也就是 $3.3/256 = 0.01289$  V。由式(4)可知,一次谐波的最大值是 $2 \times 3.3/\pi = 2.1$  V,所以,RC滤波电路要提供至少 $-20\lg(2.1/0.01289) = -44$  dB的衰减<sup>[4]</sup>。

当STM32的定时器TIM1的计数频率是72 MHz,分辨率为8的时候,PWM频率为 $72/256 = 281.25$  kHz。如果是1阶RC滤波,则要求截止频率为1.77 kHz,如果为2阶RC滤波,则要求截止频率

为22.34 kHz。相比之下,2阶滤波器的信号抑制能力更强,滤波效果更好。由分析可知,2阶RC滤波截止频率计算公式为

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5)$$

式(5)要求 $RC = C_1 R_1 = C_2 R_2 = \frac{1}{2\pi \times 22.34 \times 10^3} = 7.96 \times 10^{-5}$ ,可确定电路参数值,令 $R_1 = R_2 = 2.4$  k $\Omega$ , $C_1 = C_2 = 3300$  pF,可计算出图3的截止频率为21.9 kHz,略小于22.34 kHz,符合设计需求。

PWM波调制后,输出的直流分量最大值为3.3 V,而 $U_{REFx}$ 可操作的电压的范围是只有0~1.5 V,可利用一个2.4 k $\Omega$ 的电阻 $R_3$ 与滤波器串联,从而实现对直流分量的分压调理。

### 3 软件设计

软件设计主要是电机驱动软件的相关设计,通过对定时器的控制,实现电机的转动方向和速度的调节,其次是PC上位机控制软件设计,主要利用C++ Bulider平台开发,完成对步进电机的测试。

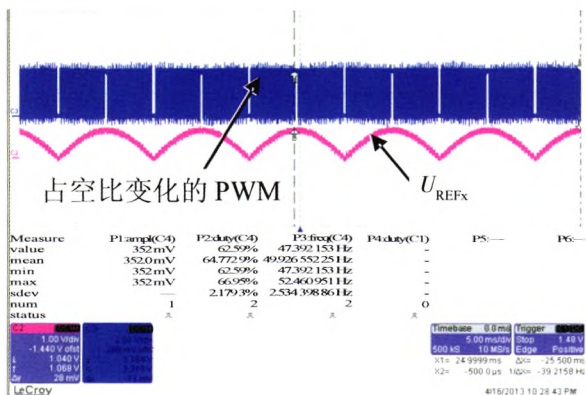
#### 3.1 PWM信号产生的设计

STM32F103中的7个定时器,每个定时器均有4个独立可编程通道输出的PWM信号。选用高级定时器TIM1,它由APB2总线提供时钟,设置为72MHz,向上(增)计数,自动装载寄存器ARR—1的值为256,所以,PWM波的占空比的取值范围为0~256,不同占空比的取值存储在每个通道的捕获比较寄存器CCRx中,编程时,通过改变寄存器CCRx的值来改变PWM波的占空比<sup>[5]</sup>。占空比值的计算如式(6)所示。

$$D = (\text{int})256\sin\left(\frac{\pi}{32}k\right); (k = 0, 1, 2, \dots, 31) \quad (6)$$

这样就得到正弦曲线0~ $\pi$ 范围内的32个点对应的占空比的值。将得到的占空比的值放在定义的数组Sequence[32]内,通过查表的方法,使定时器TIM1输出占空比变化的PWM波,通过滤波器后产生 $U_{REFx}$ 的波形如图4。

从图中可以看出,输出信号 $U_{REFx}$ 波形达到了预期目标。由于选择了合适的滤波器参数,PWM波和

图4 PWM 产生  $U_{REFx}$  波形图

$U_{REFx}$  几乎不存在大的相位差。

### 3.2 Phasex 信号产生的设计

Phase1 ~ Phase4 用于控制流过电机各相电流的方向,当 Phase1 为 1 时,电流从 OUT1A 流向 OUT1B 流向,当 Phase1 为 0 时,电流从 OUT1B 流向 OUT1A,其他三相控制原理相同,下面就以 Phase1 为例加以阐述。

STM32F103 通过 PB6 来控制 Phase1 信号,配置 PB6 为推挽输出端口,在  $U_{REFx}$  奇数次周期时,将 PB6 置 1,偶数次周期时,PB6 置 0,在  $0 \sim 2\pi$  区间内,PB6 将变化两次。Phase1 信号变化如图 5 所示。

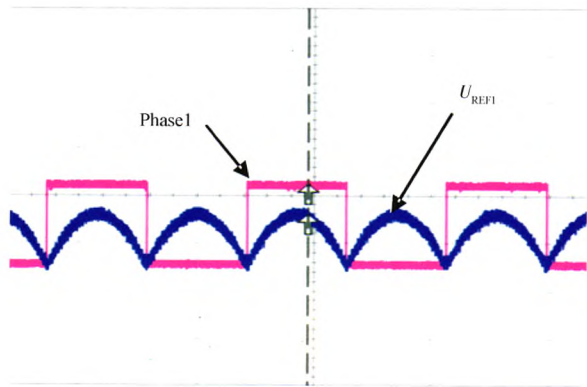


图5 Phase1 信号变化波形

通过 Phasex 信号对电流方向的控制,可实现实际输出电流  $I_{Trip}$  以  $2\pi$  为周期的正弦曲线变化,在  $0 \sim 2\pi$  共产生 64 个电流值,从而实现了步进可实现步进电机十六分之一步的驱动控制。

### 3.3 步进电机正反转和变速控制

由于通过步进电机 A、B 相的电流在相位上相

差为  $90^\circ$ ,当 A 相超前 B 相时,电机正转,而当 B 超前 A 时,则电机反转。所以,控制流过 A、B 相电流的相位差,即可实现对步进电机的方向控制,也就是控制输入参考电压的相位差。在软件设计时,定时器 TIM1 通过查表法输出 PWM 波,在占空比数组的初始下标取值时,让 A、B 相对应的 PWM 输出相差  $90^\circ$ 。例如,当 A 相对应的 PWM 输出的初始占空比为 Sequence[0]时,B 相为 Sequence<sup>[16]</sup>,这样使得输入各相的参考电压在相位上相差了  $90^\circ$ 。

在步距角已知的情况下,通过控制相邻两个取值的变化时间间隔,便可以控制电机的转动速度,时间间隔越小,转动速度越高,时间长则转速低<sup>[6]</sup>。为了得到两个取值变化之间精确的时间间隔,设计通过定时器 TIM2 进行精确的定时控制,TIM2 中 ARR—1 的取值通过等分  $0 \sim \frac{\pi}{2}$  正弦曲线的办法计算得到,在这里不再赘述,定时器产生定时中断,中断响应中改变 PWM 占空比的值,实现了速度 10 级可调<sup>[7]</sup>。可知,在步进电机实现变速控制时,Phasex 和  $U_{REFx}$  的频率都发生了变化。

### 3.4 上位机控制和实验测试

STM32F103 提供功能强大的 USART 串口功能,在本设计中,通过外接电平转换芯片实现了上位机与 MCU 之间的 RS—422 串行通信,RS—422 是一种全双工的通讯总线。STM32F103 通过计算 PWM 占空比变化的次数和 TIM2 的中断周期,将电机的位置点和速度信息发送至上位机,上位机利用增量式 PID 算法<sup>[8]</sup>,向步进电机发送控制命令,实现对电机的实时控制。

为了确定系统能否按照设计需求工作,需要对系统进行测试。上位机模拟生成一段目标航路,控制步进电机跟踪,测试结果如图 6 所示。

由测试结果可知,步进电机跟踪精度在 2 mil 之内,达到了模型设计的需求。

## 4 结束语

本文介绍了基于 STM32F103 和 A3988 的步进电机多细分控制系统,较传统的利用 DA 转换芯片的方案,具有结构简单,灵活性较好等优点,充分利



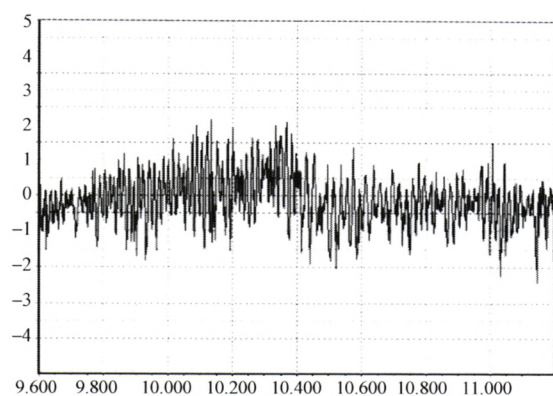


图6 模拟航路跟踪误差曲线

用了 A3988 技术应用特点和 STM32F103 芯片优越的性能,极大提高了系统的性能和可扩展性。经实际实验表明,该系统工作稳定,精度高,且具有较高精度及效费比,达到了设计要求,为步进电机控制提供了一种新的方法,具有一定推广价值。

## 参 考 文 献

- 1 意法半导体. STM32F103 中文参考手册. <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/13587.pdf>, 2007; (11): 1—20
- 2 Allegro Micro. A3988 数据手册. <http://www.allegromicro.com/~media/.../A3988-Datasheet.ashx.pdf>, 2011; 5—10
- 3 秦 健. 一种基于 PWM 的电压输出 DAC 电路设计. 现代电子技术, 2004; 27(14): 81—82
- 4 赵录怀, 王仲奕. 电路基础. 北京: 高等教育出版社, 2012
- 5 喻金钱, 喻 斌. STM32F 系列 ARM Cortex-M3 核微控制器开发与应用. 北京: 清华大学出版社, 2010
- 6 黄 辉, 操 星, 赵志中, 等. 基于 LPC1766 的多细分步进电机控制设计. 控制与应用技术, 2011; 38(2): 15—17
- 7 刘威龙, 孙明磊, 王 颀, 等. 基于 STM32 的分布式步进电机控制系统设计. 数字技术与应用, 2012; (03): 13—14
- 8 杨学存, 杨战社, 孔令红. 基于 ARM 的嵌入式直流电机 PWM 调速系统设计. 煤矿机械, 2012; 04(33): 256—257

## Design of the Stepper Motor Subdivision Control Based on the STM32

CAO Bin-qian, CHEN Yuan-zeng, SUN Shu-ying, ZHANG Pei-chao

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, P. R. China)

**[ Abstract ]** A higher resolution step method for the stepper motor that is based on the STM32 MCU is designed. The timer controlled by STM32 generates PWM signals, and the PWM-DAC conversion is completed after low-pass filtering, of which the dynamic outputs provide the A3988's reference, then the STM32 achieves the stepper motor higher subdivision control by changing the current direction. The timer's duty cycle of the STM32 is obtained *via* the look-up table method and its changing time interval is determined by the timer. The software and hardware and their design principles are described, and verified the results of this design. It shows that the design not only has the high control accuracy and flexibility, but also simple implementation and the benefit-cost advantages relative to the traditional use of DAC conversion chip solution.

**[ Key words ]** STM32 A3988 higher resolution PWM-DAC