

一种新型任意信号发生器的设计与实现

朱恒军, 姜有亮

(齐齐哈尔大学 通信与工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要: 为了适应电子技术的发展, 需要产生结构复杂, 具有特殊功能的任意波形, 文章在传统的函数信号发生器的基础上, 提出了一种基于 DDS 技术, 通过主控芯片 DSP 和数模转换芯片相结合, 使用七阶椭圆低通滤波器作为信号调理电路的总体硬件电路设计, 软件上采用函数式生成函数波形数据和上位机采样生成任意波形数据, 能够产生至少 30 kHz 的标准函数波形以及最高频率 1 kHz 的复杂任意波形; 通过测试, 该方案具有可行性, 易于实现, 适合在科研和生产中使用。

关键词: 数字频率合成; 任意波形; 数字信号处理; 模数转换

A New Design and Implementation of Arbitrary Waveform Signal generator

Zhu Hengjun, Jiang Youliang

(Communication and Electronics Engineering Institute of Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

Abstract: In order to adapt to the development of electronic technology and the need to generate complex, arbitrary waveform with special features, on the basis of the traditional function of the signal generator, the paper proposes a design scheme which is based on DDS technology, through the master chip DSP and digital to analog converter chip combining the use of seven order elliptic low-pass filter as the overall hardware circuit design. The software design uses functions to generate sampled waveform data and PC software to generate arbitrary waveform data to achieve not only can produce at least 30 kHz the standard function waveform also can produce the highest frequency complex arbitrary waveform of 1 kHz. Through testing, the program which is feasible and easy to implement is suitable for use in scientific research and production.

Keywords: direct digital synthesis; arbitrary waveform; digital signal process; digital to analog conversion

0 引言

DDS (即直接数字频率合成) 是一种由相位概念出发把一系列数字形式的信号通过 DAC 器件转换成模拟形式信号的合成技术, 这种技术的相位转换连续、频率转换速度快、频率分辨率高、相位噪声小、频率稳定度高、集成度高、易于调整及控制灵活等优点, 已经广泛应用在实践中。很多国外的公司虽然已经有各种各样的 DDS 专用芯片, 比如 ADI 公司经典的 AD9854 芯片, 该专有 DDS 芯片能够在 80 dB 无杂散动态范围的情况下, 产生 100 MHz 的正弦波, 完全可以满足电子产业对正弦波高精度、高频率的需求。但是随着现代电子测量技术的发展, 对波形的产生提出了更高的要求, 不仅仅要求能够实现正弦波, 方波等基本波形, 还要求能够产生任意波形。本文在该背景下, 提出了一种能生成任意波形信号发生器方案的设计。

1 系统结构及原理

任意波形发生器的原理如图 1 所示。它是由相位累加器、ROM 查找表、数模转换器和低通滤波器构成^[1]。频率控制字实际上是相位增量值 (二进制编码), 作为相位累加器的累加值。相位累加器根据输入的频率控制字的不同, 输出相位序列作为地址去寻址 ROM 查找表, 而 ROM 查找表中存储的是想要输出的波形的一个周期的幅值编码。DDS 基本结构如图 1 所示。

以正弦波为例进行说明, 设频率控制字为 K , 参考时钟信

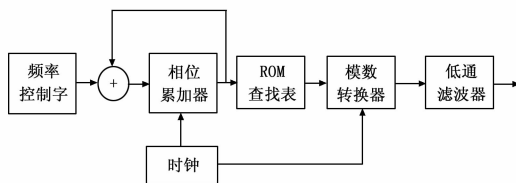


图 1 DDS 结构

号为 f_c , 相位累加器的位长为 L , 则 DDS 输出信号频率^[2]为:

$$f_0 = \frac{f_c}{2^L} K \quad (1)$$

输出信号的分辨率为:

$$\Delta f_0 = \frac{f_c}{2^L} \quad (2)$$

从上式可以看出, 波形的分辨率跟他的相位累加器的位数有关系, 位数越多, 则分辨率越高, 但是越多的位数代表越大的存储容量, 对系统的设计和稳定性都有一定的影响, 而产生的正弦波的频率大小, 则跟频率控制字 K 有关系, K 越大, 波形采样的点数越少, 在相同的时钟频率 f_c 下, 则完成一个周期的时间短, 频率越高。但是随着采样点数的增加, 其波形会呈现阶梯型, 即量化失真。因此为了得到平滑的曲线, 需要在后面加一个低通滤波器。

对于任意波形来说, 其带宽大, 为保证波形不失真, 不能简单的通过频率控制字来增加其频率, 而是通过改变采样的时钟频率 f_c 来改变其频率。在本设计里, 采样频率 f_c 是主控芯片 DSP 定时器的中断时间。

2 系统硬件设计

2.1 电路总设计方案

TMS320F2812 是 TI 公司的一个 32 位的定点 DSP 芯片。

收稿日期: 2015-02-03; 修回日期: 2015-04-07。

作者简介: 朱恒军 (1969-), 男, 硕士, 教授, 主要从事信号检测与信息处理、通信系统设计方向的研究。

通讯作者: 姜有亮 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事信号检测与处理方向的研究。

该芯片 CPU 主频可达到 150 MHz, 时钟周期可达到。片内含有位的 Flash, 方便存储任意波形的数据。本设计的是以 DSP2812 为主控芯片, 用 DAC7724 作为数模转换芯片, 通过两种方案来生成任意波形, 一种是对有函数表达式的波形, 通过数字信号处理芯片, 计算出所需要的系数, 这种方案的优点是占用存储空间非常少; 另一种方案是通过上位机上的波形编辑软件, 生成任意波形的相位分量, 存储在存储器中, 这种方案的相应速度相当快, 但占用存储空间。两种方案的相互配合, 不仅可以提高任意波形的分辨率, 而且也可以产生很高频率的正弦函数波形。本文为研究方便, 只采样了 1 024 个整型数据, 验证了方案的可行性。总系统设计框图如图 2 所示。

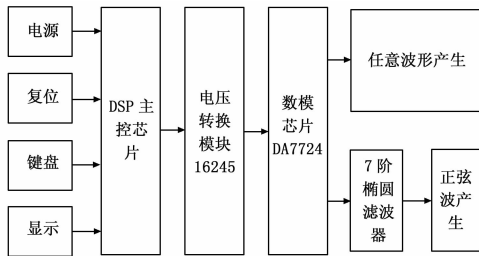


图 2 系统结构框图

2.2 DA 模块的设计

本设计采用了 DA7724^[3] 作为模数转换芯片。DAC7724 是一个 4 通道、12 位分辨率、±10 V 信号幅度、建立时间为 10、±15 V 供电的 D/A 转换器。它内部有两级缓存, 第一级缓存只分别缓存各个通道的 D/A 数字输入, 而并不将该数字转换为模拟输出; 而第二级缓存则是将第一级缓存的数字输入装载到相应的 D/A 寄存器中, 并将数字输入转换成模拟输出, 从而实现了多通道的 D/A 同时输出。因此, 对于每个通道的 D/A 输出的第一级, 也就是 D/A 寄存器均映射到 DSP2812 的一个存储单元, 而所有通道的 D/A 输出的第二级, 共用 DSP2812 的一个存储单元, 共占用 5 个存储单元。DAC 寄存器地址的代码如下:

```
uint * DA_PORT0 = (unsigned int *) 0x3000;
uint * DA_PORT1 = (unsigned int *) 0x3002;
uint * DA_PORT2 = (unsigned int *) 0x3004;
uint * DA_PORT3 = (unsigned int *) 0x3006;
uint * DA_OUT = (unsigned int *) 0x3008;
```

根据 DAC7724 的数据手册可知, 其理想的输入数字量和输出的模拟量之间的关系如下式所示:

$$V_{out} = V_{REAL} + (V_{REFH} - V_{REFL}) \times N \div 4\ 096 \quad (3)$$

其中: N 代表数字输入; V_{out} 代表模拟输出; V_{REFH} 代表高参考电压, 可以为 -10 V 或者 0 V; V_{REFL} 代表低参考电压, 可以为 +10 V 或者 +5 V。

电路图如图 3 所示。

考虑到 DSP2812 的驱动能力, 该设计方案需要电平转换芯片 SN74LV16245, 对要用到的端口进行电平转换, 将 DSP 的端口输出的 3.3 V 电平转变成 5 V 电平转换电路如图 4 所示。

12 位精度的 DAC 转换芯片 7724 还需要 AD587 来为 D/A 转换提供参考电压。AD587 是一个高精度的 DAC 基准源。在应用时, 除了用它做 +10 V 基准源外, 还可以做 -10 V 基准源, 只需 Pin2 接电源大于 +5 V, Pin6 输出端接地, Pin4 引脚通过电阻 R_s 接 -15 V 电源, 这样在 AD587 的 Pin4 接地端

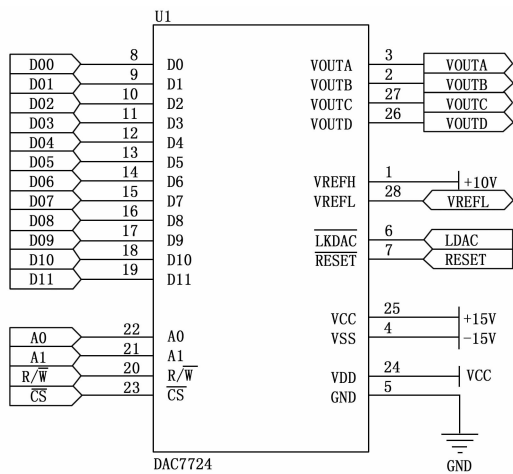


图 3 DAC 电路图

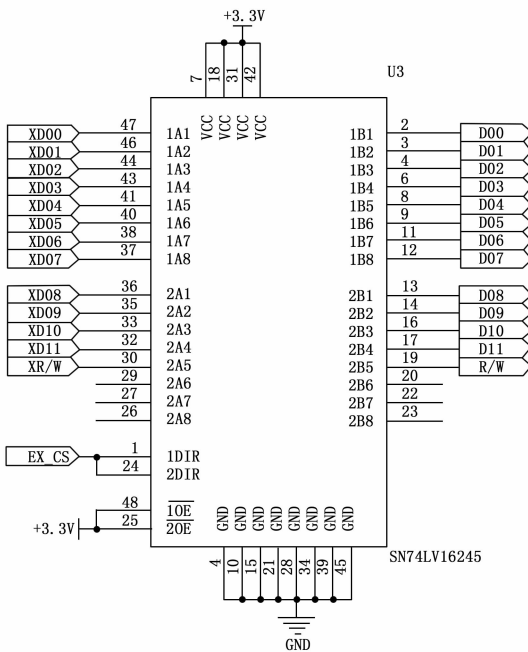


图 4 电平转换电路

产生一个 -10 V 电源, 并且得到的电压特性与 +10 V 电源一样, 精度很高。电路图如图 5 所示。

2.3 滤波器的设计

对于通过 DDS 产生的正弦波, 在理想情况下, DDS 的输出为一阶梯波形, 而阶梯波的傅里叶变换 $X(\omega)$ 如下^[4]:

$$X(\omega) = -j\pi \sum_{l=-\infty}^{l=+\infty} Sa\left(\frac{f_0 - lf_c}{f_c}\pi\right) \delta(\omega + l\omega_c - \omega_0) e^{-j\frac{lf_c - f_0}{f_c}} + j\pi \sum_{l=-\infty}^{l=+\infty} Sa\left(\frac{f_0 + lf_c}{f_c}\pi\right) \delta(\omega + l\omega_c + \omega_0) e^{-j\frac{lf_c + f_0}{f_c}} \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 理想 DDS 的输出谱线^[5] 仅位于 $lf_c \pm f_0$ 处 (其中 $l=0, 1, 2, \dots, N$), 而且所有的谱线都在 Sa 函数的包络内, 当 $l=0$ 时输出基频, 当 $l \neq 0$ 时 DDS 输出镜像频率, DDS 输出的波形的频谱特性如图 6 所示。

由奈奎斯特定理可知, 最高输出频率为 $f_c/2$, 所以, 应设计一截止频率为 $f_c/2$ 的低通滤波器, 且在通带内要有一定

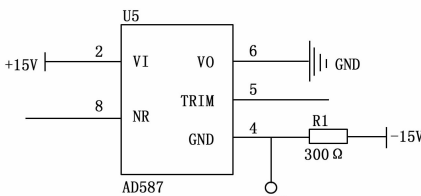
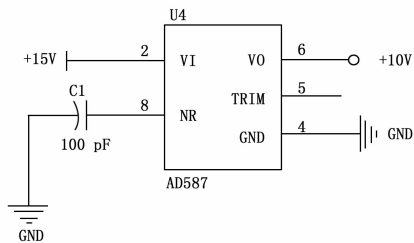


图 5 稳压源设计

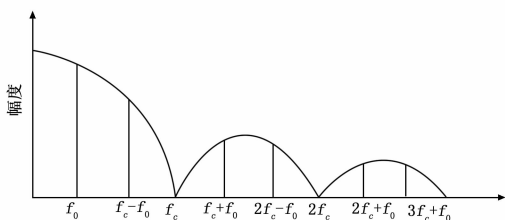


图 6 DDS 输出波形频谱特性示意图

的平坦度, 根据要求, 本文中设计了一个截止频率为的七阶椭圆滤波器, 其设计的方法采用了归一法^[6], 如图 7 所示。

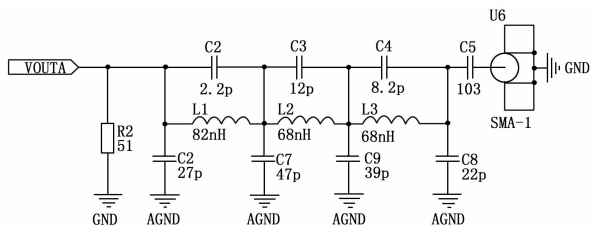


图 7 七阶椭圆滤波器

3 系统软件设计

软件设计主要包括两大部分, 第一部分是函数波形的生成方法, 第二部分是任意波形的产生。之所以采用两种方式相结合的系统设计方案, 是为了减少系统硬件的开发难度, 降低成本。主程序流程是先进行系统初始化和时钟的设置, 然后在启动 DSP 定时器 0, 设置定时器的周期为 25, 也就是每一次定时器中断的时候, 在中断子程序把波形 ROM 存储器里的一个值赋值给 DAC 芯片的一个通道。定时器的周期与产生的波形周期息息相关。对于函数波形来说, 在 DA 子程序里要生成根据函数式, 可以直接生成波形所需要的系数值; 对于任意波形, 必须通过波形编辑软件, 取得相应的系数, 存储在 DSP 里, 才能够产生。主程序设计流程如图 8 所示。

3.1 正弦信号波形的产生

定时器 0 的周期是 25, 也就是每一次中断, DA 都会输出一个数据, 1 s 内会输出 40000 个数据。假设产生的正弦波频率为 f , 幅值为 Value, 则所需的采样点数 $time_sum$ 为:

$$time_sum = \frac{40000}{f}$$

幅值转化为相对应的数字幅值 da_value 则为:

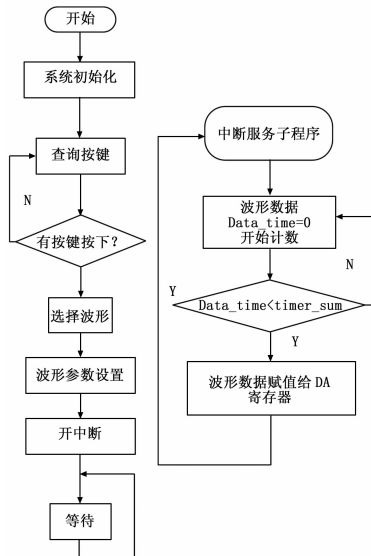


图 8 软件开发总设计框图

$$da_value = \frac{Value}{10} \times 2048$$

相位差 $angle_diff$, 即前一个点的相位和后一个点的相位之差为:

$$angle_diff = \frac{2\pi}{timer_sum}$$

则函数波形的产生系数的核心代码如下:

```

tongdao_flag[tongdao] = 1;
timer_sum[tongdao]=DA_TIMER_NUM/ freq;
angle_diff = 6.2831852 / timer_sum[tongdao];
angle = 0;
da_kind[tongdao] = kind;
da_value = value;
da_value = da_value / DA_SETVALUE * 2048;
for(i = 0; i < timer_sum[tongdao]; i++)
{
    angle = angle + angle_diff;
    xishu1[i] = da_value * sin(angle) + 2048;
}
    
```

3.2 任意波形数据的产生

上位机软件^[7]可以产生任意波形的 ROM 存储表, 方便快捷。可以设置的参数有两个, 波形的采样点数、DA 转换的位数。采样点数即 ROM 的存储深度, 采样的点数越多, 则波形的还原度越高, 显示的任意波形越完美。数据位宽也就是 DA 转换的位数, 本设计是采用了 12 位的 DAC7724, 采用 12 位宽即可。

手动绘制产生波形是波形生成方法中最直观、最方便的方法, 它同时也充分体现了任意波形编辑过程中的“任意性”。产生的波形文件打开后, 会看到采样的波形数据, 把这些整型数据存放在一个容量为 1024 的整型数组里, 通过 DA 输出。操作界面如图 9 所示。

4 仿真和调试

测试平台采用的是安捷伦的 DSO-X 2002 示波器, 利用本系统生成了两种具有代表性的信号, 一种是可以函数产生系数的正弦波, 另外一种就是基于波形编辑软件的任意波形。通过这两种方法相互配合, 实现了在没有增加其他元器件的基础

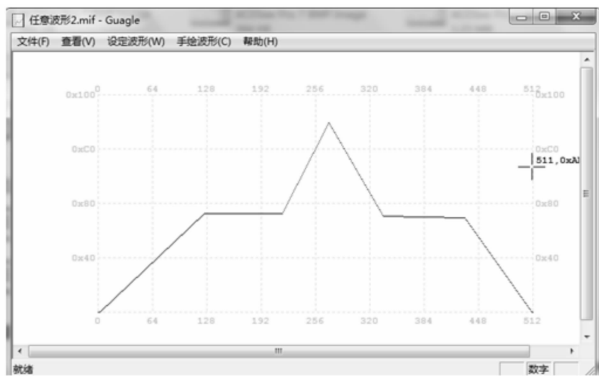


图 9 任意波形上位机操作界面

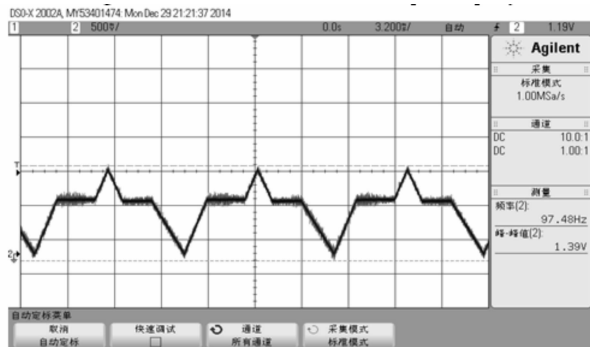


图 11 任意波形的示波器显示

上, 实现了任意波形的产生, 系统设计简单稳定, 符合实验要求。产生的正弦波和任意波形分别如图 10 和 11 所示。

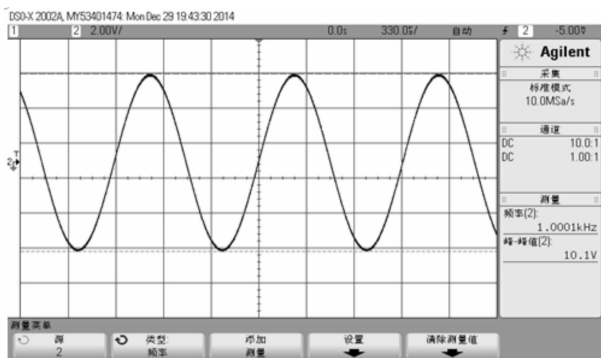


图 10 正弦波的示波器显示

5 结论

任意波形信号发生器是一种特殊的信号源, 在科研和实际生产中, 具有广泛的实用价值。其主要的技术指标如下:

- 1) 最高采样率: 100 kSa/s;
- 2) 波形分辨率: 12 bit;
- 3) 波形存储深度: 1 024;
- 4) 通道数: 4 个;

- 5) 正弦波频率范围: 1 Hz~30 kHz;
- 6) 任意波形频率范围: 1 Hz~1 kHz。

本文的所提出的设计方案, 经济适用, 方便灵活, 既能够产生传统波形, 也能够通过修改波形 ROM 产生实验室和教学科研中所需要的任意“特殊信号”, 该方案具有可行性。

参考文献:

- [1] 闫明亮. 基于 FPGA 技术的信号发生器设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [2] 曹郑蛟, 滕召胜, 李华忠, 等. 基于 FPGA 的 DDS 信号发生器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011 (12): 3175-3177.
- [3] 黄爱芹. 数模转换器 DAC7724 与 AT89S51 单片机的接口及程序设计 [J]. 电子元器件应用, 2010 (12): 18-20.
- [4] 张树团, 张 凯, 李 静. 基于 TMS320F2812 的任意波形发生器设计 [J]. 电子测量技术, 2009 (4): 87-90.
- [5] 蒋 涛, 唐宗照, 张 彪. 一种基于 DDS+PLL 结构的频率合成器的设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009 (10): 91-95.
- [6] 尹继武, 王少华. 基于 PC 声卡的超低频函数信号发生器的设计 [J]. 电测与仪表, 2006 (4): 58-60.
- [7] 李春剑, 吉望西, 刘达伦. 基于 DDS 椭圆形低通滤波器的设计 [J]. 国外电子测量技术, 2009 (1): 36-38.
- [8] 王力生, 毕文峰. 波形编辑软件界面与处理模块设计 [J]. 电脑知识与技术, 2012, 20: 4895-4898.

(上接第 2588 页)

方式, 在此基础上, 设计一种具有数据采集、分析、记录、报警、显示检测开关总数及开关合格总数功能的自动化检测的仪器, 实验结果表明:

- 1) 基于单刀双掷开关的工作原理设计的由步进电机驱动的自动化接触式压力感知机械装置具有较高的精确性和稳定性。
- 2) 结合单刀双掷开关的 3 种工作模式, 在有效的控制 3 路继电器工作的同时, 实现了单刀双掷开关在 3 种不同工作状态下电压值的检测。
- 3) 基于单刀双掷开关在 3 种不同工作状态下的电压检测值, 通过开关电压值与开关压力值公式转换, 并将压力值及压力曲线送往显示屏显示, 明显提高了检测开关的效率, 降低了检测人员的负担。

参考文献:

- [1] 单 莹, 王新军, 李道民, 等. 基于 LAN 的耐电压测试仪检测系统 [J]. 计量技术, 2011 (1): 51-53.
- [2] 郭素敏, 徐克宝, 苏春建, 等. 通用数字电路板自动测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (7): 2040-2042.
- [3] 宋兴元, 李 威, 严 旭. 基于 MSP430F149 的数字式绝缘电阻测试仪 [J]. 中国仪器仪表, 2003 (7): 26-28.
- [4] 张新英. 具有噪声巡检功能的 LD 可调串联群驱动电源的设计 [D]. 开封: 河南大学, 2010.
- [5] 付 伟. PLC 在材料自动分拣系统中的应用 [J]. 制造业自动化, 2012 (6): 136-138.
- [6] 覃智广, 陈洪容, 曾 鹏, 等. 数字式电阻自动测试仪研究 [J]. 企业技术开发, 2013 (8): 3-4.
- [7] 丁香香. 浅析单片机温度控制系统的设计与实现 [J]. 数字化用户, 2013 (15): 72-77.
- [8] 熊建云. 基于光电耦合器的智能仪器 I/O 接口电路设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2013 (5): 51-52.