

开关线性复合式功率放大器波形发生电路设计

刘晓东, 施艳艳, 李淑波

(安徽工业大学 电气信息学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 波形发生电路为开关线性复合式功率放大器的功率放大单元提供所需频率范围的柔性波形信号。介绍了一种基于直接数字频率合成技术的波形发生电路的设计方案。给出了系统设计的整体思路、主要功能模块电路的硬件电路设计及软件设计。设计中充分利用了单片机的控制管理功能和 DSP 快速处理能力, 采用单片机作为波形发生电路的控制核心, DSP 作为波形生成核心。通过对系统输出进行测试证明, 该系统输出的波形信号具有较高的精度, 可以满足开关线性复合式功率放大器对柔性信号的要求。

关键词: 任意波形发生器; 直接数字频率合成; TMS320VC5509; SPCE061A

中图分类号: TN722.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2007) 09-0788-04

Design of Waveform Generating Circuit for Switch-Linear Hybrid Power Amplifier

LIU Xiao-dong, SHI Yan-yan, LI Shu-bo

(School of Electrical Engineering & Information, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: Waveform generating circuit generates flexible waveforms of required frequency for power amplifying circuit in switch-linear hybrid power amplifier. A design of arbitrary waveform generating circuit based on DDS was presented, the overall design of the system, the hardware circuit of the main parts and the software design were given. MCU (micro-control-unit) acted as main control part because of its control and management ability while DSP worked as waveform generating part with its fast handling speed were used in the design. The test outputs of the proposed system prove the output waveforms of the system have high precision and meet the requirements of the switched linear hybrid power amplifier.

Key words: arbitrary waveform generator; DDS; TMS320VC5509; SPCE061A

1 引言

功率放大器是一种把直流能量转换为交流的变换电路, 广泛应用于军事、航空、工业测量及机械加工业中。传统的线性功率放大器线性度好、带宽宽、动态性能优良, 但由于静态电流的影响, 存在着闲置功耗、效率低等缺点。与线性功率放大器相比, D 类功率放大器工作在开关状态, 功耗小、效率高、满功率输出时效率可达 90% 以上, 但由于它是一种非线性放大器又存在着失真问题。针对以

上两类放大器存在的问题, 提出的开关线性复合式功率放大器, 结合了线性功率放大器失真小和 D 类功率放大器效率高的优点, 这正是设计放大器所追求的优越性能^[1-2]。为了利用开关线性复合技术实现 10 kHz 以内任意波形的功率放大, 需设计开关线性复合式功率变换电路。整个系统分为波形产生电路和功率放大电路两部分。本文主要对系统中的波形发生电路进行了设计研究, 将按照功率放大电路的要求, 提供所需的频率为 10 kHz 以内的各种信号波形, 包括正弦波、三角波、方波等常规波形以及各种频率、相位可调的任意波形。本文采用直接数字频率合成技术, 充分利用 DSP 的高速

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50407017); 安徽省科技厅国际合作项目 (06088021)

信号处理能力及单片机的管理功能, 设计了高分辨率、生成波形质量好的任意波形发生电路。

2 任意波形发生电路的原理

任意波形发生电路作为一种信号源将按照用户要求为被测电路提供所需的波形信号。传统的波形发生电路往往只能产生几种波形。要实现性能复杂、波形种类多样的波形发生电路就必须使用直接数字频率合成技术(DDS)^[3]。该技术直接从“相位”角度出发合成所需要的波形, 将一系列数字量形式的信号通过模数转换器转换成模拟量形式的信号。图1为典型的基于DDS技术的任意波形发生电路的原理框图, 图中 K 为频率控制字, N 为相位累加器位数。其基本原理为: 在参考频率源 f_c 作用下, 相位累加器进行相位累加, 其输出的数据作为波形存储器的取样地址进行波形的相位-幅度转换, 然后ROM输出的幅度量序列经D/A转换后变成了阶梯波, 最后低通滤波器会平滑阶梯波, 抑制不需要的抽样分量和其它杂散信号, 进而输出频谱较纯的所需频率波形。根据奈奎斯特采样定理, 当满足条件 $f_o/f_c < 1/2$ 时, 采样的波形数据才会唯一地恢复模拟的波形。

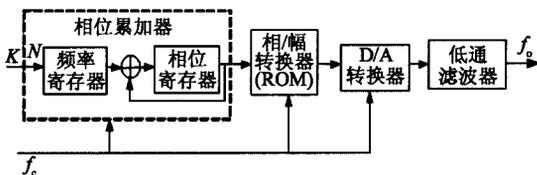


图1 任意波形发生电路原理框图

基于DDS技术的任意波形发生器所产生的波形完全取决于波形存储器(ROM)中所存储的波形采样数据。因而, 只要通过更新ROM中的数据, 而不需对硬件电路进行修改即可生成所需的波形。利用该技术实现的任意波形发生器, 具有频率分辨率高、频率转换时间短、输出波形相位连续、输出波形灵活等优点。同时, 其电路设计简单、功耗低、可靠性高, 具有很高的性价比。

3 系统设计

任意波形发生电路的设计主要包括控制单元和波形生成单元两部分, 总体结构框图如图2所示。单片机通过键盘输入得到所需波形的参数信息, 再将该信息数据传入DSP芯片进行DDS数据处理,

生成所需波形离散数据信息, 该离散的波形数据信息通过D/A转换器、低通滤波器及信号放大电路, 完成任意波形的输出功能。

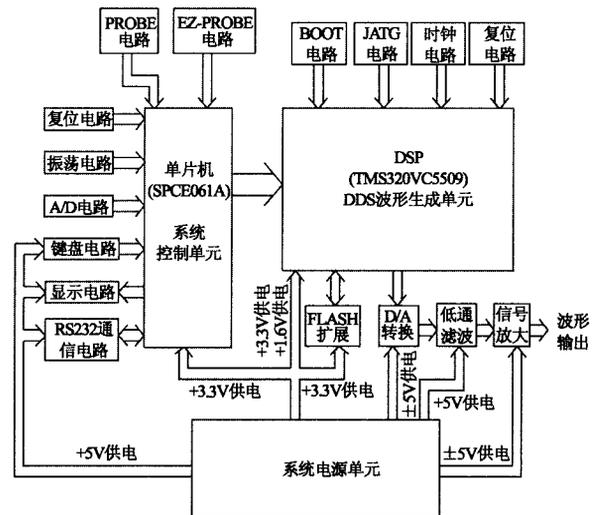


图2 任意波形发生电路总体结构框图

3.1 硬件电路设计

3.1.1 控制单元电路设计

控制单元以SPCE061A为主控制芯片, 外围连接通讯电路、键盘电路、显示电路、A/D采样电路等几部分, 主要完成人机交互、数据通讯、数据采集及信息显示等功能。SPCE061A从键盘获得输出波形类型及其频率、幅度、直流偏置等波形参数, 并在LCD进行显示, 对于复杂波形输出可以和PC机相连, 通过RS232串口下载波形数据到ROM中。

虽然51系列单片机的发展已经有较长时间, 应用也非常广泛, 各项技术比较成熟, 但它是8位机, 处理速度不是很快, 资源不够充足, 而且其最小系统的外围电路设计都要自己设计和制作, 使用起来并不方便。相比而言, SPCE061A是凌阳公司设计生产的16位微处理器, 主频可达49 MHz, 速度很快, 并将各种功能部件模块化地集成在一个芯片, 除此之外, 还具有功能强、效率高的指令系统, 性价比很高^[4]。综合各种因素后, 本方案设计选用了SPCE061A单片机作为主控制芯片。

键盘电路(如图3)主要完成输出波形信息的设置, 监控程序运行。考虑到本系统按键较多, 为减少SPCE061A的I/O端口的占用, 选用周立功公司设计生产的ZLG7289进行键盘管理与控制。ZLG7289可以扫描管理多达64键, 并具有多种控

制指令, 如消隐、闪烁、左移、右移、段寻址等, 且内部含有去抖动电路, 因而可以简化软件编程, 节省硬件资源。为使其电源更加稳定, 在 V_{cc} 到 GND 之间接入 $100\ \mu\text{F}$ 的电解电容, 同时为了提高电路抗干扰能力、减小电源噪声干扰, 还并接一个 $100\ \text{nF}$ 的电容。晶振 Y_1 取 $16\ \text{MHz}$, 起振电容 C_4 和 C_5 取值为 $10\ \text{pF}$ 。复位信号低电平有效, 一般只需外接简单的 RC 复位电路, 也可以通过直接拉低 RST 引脚的方法进行复位。下拉电阻 $R_1 \sim R_8$ 和位选电阻 $R_9 \sim R_{13}$ 是必须的, 它们之间还要遵从一定的比例关系, 比值在 $5:1$ 到 $50:1$ 之间, 典型值是 $10:1$, 这里下拉电阻取值 $100\ \text{k}\Omega$, 位选电阻取值 $10\ \text{k}\Omega$ 。ZLG7289 通过 3 线制 SPI 串行总线与 SPCE061A 进行连接, 其中 /CS 是片选信号, CLK 是时钟信号, DIO 是双向数据信号, 它们分别与 SPCE061A 的 IOB₄, IOB₀, IOB₁ 相连, 此外还有一个 /INT 引脚, 作为键盘中断请求输出信号与 SPCE061A 的 IOB₂ 相连。当有按键发生时, 单片机根据不同的按键返回值进行相应的处理^[5]。

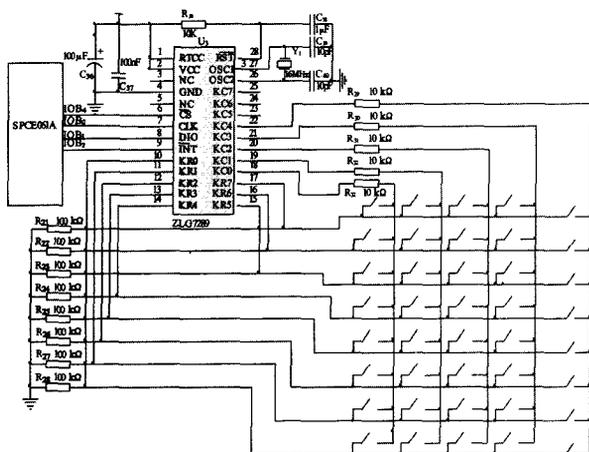


图3 键盘电路图

显示电路作为人机交互界面显示波形信息。考虑到同一公司产品的兼容性, 显示模块采用凌阳公司的 SPLC501 液晶显示模组, 此模组为 128×64 点阵, 接口电路简单、应用方便、功耗低, 而且此液晶模组可以显示字符、汉字、图形等, 供电电压为 $5\ \text{V}$, 最大工作电流为 $2.0\ \text{mA}$ 。设计中只需将模组的控制引脚 A_0 , RWP, EP 分别连接到 SPCE061A 的 IOB₁₃, IOB₁₄, IOB₁₅, 并将数据线 $D_0 \sim D_7$ 分别连接到 SPCE061A 的 IOA₈-IOA₁₅, 通过相应的软件设置, 即可显示波形种类、频率、幅度及直流分量等

参数。

SPCE061A 单片机本身带有 UART 接口, 只需通过一个简单的电平转换电路即可实现与 PC 通讯, 使用方便。

3.1.2 波形生成单元电路设计

波形生成单元根据控制单元输出的波形参数信息进行波形的合成和输出, 以有高速数据信息处理能力的 DSP 芯片为核心, 并结合 D/A 转换器及低通滤波器来实现 DDS 数据处理功能, 从而生成所需任意波形信息。波形发生单元的硬件电路原理图如图 4 所示。

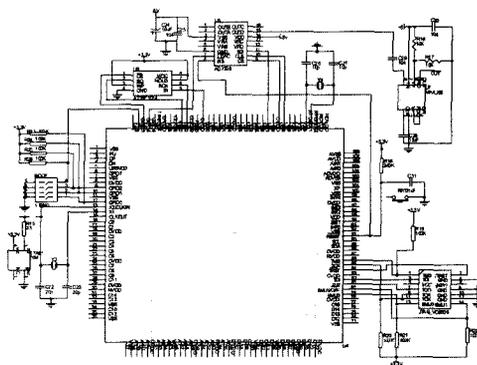


图4 波形生成单元硬件电路图

由于 DSP 采用程序空间与数据空间分开的哈佛结构, 其多总线、流水线和多处理单元等特点使其运行速度大大提高, 在复杂运算和高速数据处理上, DSP 芯片有着单片机不可比拟的优势。考虑到 DSP 的这些优点, 设计中将 DSP 作为整个波形发生电路的核心, 选用德州仪器 (TI) 公司针对低功耗应用领域推出的一款低功耗高性能的 TMS320VC5509^[6-7]。该芯片采用 $1.6\ \text{V}$ 的核心电压以及 $3.3\ \text{V}$ 的外围接口电压, 最低可支持 $0.9\ \text{V}$ 的核心电压并可以 $0.05\ \text{mW/MIP}$ 的低功耗运行, 有丰富的外设接口, 时钟频率最高为 $144\ \text{MHz}$, 片内具有双乘累加器, 每周可执行一条指令或两条并行指令, 具有高达 $288\ \text{MIPS}$ 的处理能力。除此之外, TMS320VC5509 有 $128\ \text{K}$ 字 RAM、 $64\ \text{K}$ 字节 ROM, 内部存储器采用统一编址, 并可以实现高达 $4\ \text{MB}$ 的外部存储空间扩展, 是一款具有较高性价比的低功耗 DSP 芯片。

在任意波形的生成中往往要进行大量波形数据的存储, 而 TMS320VC5509 片内没有足够的存储空间, 且无法掉电存储, 因此利用 AT25F1024 对 DSP

进行了存储扩展。AT25F1024 为 1M 位的串行 FLASH 芯片，TMS320VC5509 多通道缓冲串口 (McBSP) 的时钟停止模式与 AT25F1024 的 SPI 主从模式兼容。AT25F1024 的 SCK 为串行时钟引脚，连接到 VC5509 的 CLKX0；SI，SO 引脚为串行数据输入和输出引脚，分别连接到 VC5509 的 DX0 和 DR0；/CS 引脚为低电平有效的片选引脚，与 GIOP4 连接以满足 SPI 模式 Bootloader 的引导要求；/WP，/HOLD 分别为写保护引脚和中止串行输入引脚，在电路中将其连接到高电平。AT25F1024 的供电电源为 3.3 V，为了提高电源精度，在电源引脚处连接去耦电容。对 FLASH 编程时，首先使 /CS 片选有效，然后通过 SI 引脚传送编程指令、地址和待烧写的数据，最后当 /CS 片选信号提高后，芯片内部开始编程。

D/A 输出是该任意波形发生器的关键，直接影响输出信号的质量。AD7398^[8] 是 12 位分辨率串行四通道输出的电压型数模转换芯片，内部三线 SPI 串行数据接口与 TMS320VC5509 的串行口 SD₂ 兼容。在 SD₂ 模式下，VC5509 的 S₂₃ 为其时钟引脚，S₂₄ 为 DAT0 引脚，S₂₅ 为双向 IO 口线，它们分别连接到 AD7398 的时钟信号引脚 CLK、输入信号引脚 SDI 及 /CS 引脚。当 /CS 片选信号生效后，串行数据在时钟脉冲上升沿置入串行输入寄存器，并以 16 位的数据格式保存。需要注意的是 D/A 输出电路对电源精度要求非常高，V_{DD} 和 V_{SS} 分别接 +5 V 和 -5 V 模拟电源，且电源和地之间应加大容量的去耦电容以提高电源的精度和抗干扰能力。通过软件设置 AD7398 即可输出四路相位幅度可调的各种波形的模拟电压量。

经 D/A 电路输出的波形模拟电压量需经低通滤波器平滑后才能近似得到所需的各种波形，滤波电路对输出波形的频谱纯度有很大影响。该滤波电路采用八阶低通开关电容滤波芯片 MAX296，其截止频率为 50 kHz，时钟频率与截止频率之比为 50:1，考虑到正弦波以外的波形除基波外还含有 3 次、5 次等谐波分量，设计中将截止频率设置为 50 kHz。MAX296 芯片利用在 CLK 引脚外接电容的方式来产生时钟频率。该滤波电路采用单电源供电模式，V⁺ 引脚接 +5 V 电源；C₃₀ 为电源滤波电容，

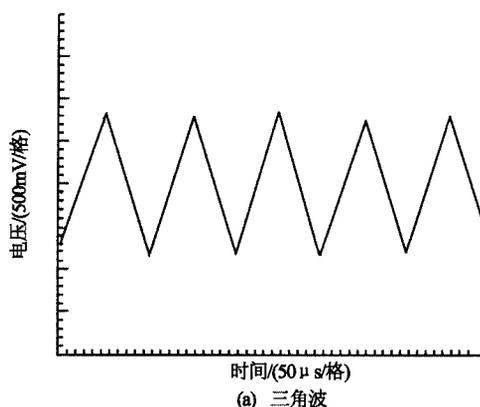
以确保输入电压的质量；R₁₆，R₁₇ 为等值电阻，通过分压得到 GND 引脚的参考电压为电源电压的一半；OPI，OPO 引脚为芯片内部独立运放的同相输入端与输出端，在应用中将其连接在一起；CLK 引脚为时钟输入引脚；IN 引脚为信号输入引脚，连接到 D/A 输出引脚；OUT 引脚为电路输出引脚，通过接线端子向外输出各种任意波形^[9]。

3.2 软件设计

该系统软件主要由 5 部分组成：系统初始化程序、主循环程序、按键中断程序、显示程序以及串口通信程序。其中：系统初始化程序主要是对单片机、DSP 进行初始化设置；按键中断程序完成键盘的中断及响应；串口通信程序实现单片机与 PC 机进行数据交换。具体来说，在硬件电路的基础上，通过键盘设定输出波形的形状、频率、幅度及其直流偏置等具体参数，液晶显示模组 SPLC501 进行这些波形设定参数的显示，具体参数由 DSP 芯片完成 DDS 数据处理后生成离散波形信号，再经 D/A 转换及低通滤波生成常规波形信号，复杂波形可通过 RS-232 串行口将由 PC 机生成的波形采样数据下载到单片机来实现。

4 实测结果

采用该设计方案输出的波形频率可达 100 kHz，然而对于开关线性复合式柔性功率放大器研究项目而言，10 kHz 以内的输出频率波形即可满足要求。图 5 给出了采用泰克 TDS1002B 示波器对设计的波形发生电路进行测试所得到的 10 kHz 正弦、方波与三角波 3 种基本波形。



(下转第 808 页)

参考文献:

- [1] LAI T S A. FPGA Test and Coverage [EB/OL]. IEEE International Test Conference (2002-12-10/2004-03-01) <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8073/22329/01041811.pdf>.
- [2] XILINX Inc. XC3000 serial field programmable gate arrays [K]. 1998:3-8.
- [3] 黄维康. FPGA 的测试[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(5):396-400.
- [4] HUANG W K, MEYER F J, LOMBARDI F. Array-based testing of FPGAs: architecture and complexity [C] // Proc IEEE Conference on Innovative Systems in Silicon. Austin Tex, USA, 1996:249-258.
- [5] HUANG W K, LOMBARDI F. An approach for testing programmable/configurable field programmable gate array [C] // Proc 14th IEEE VLSI Test Symposium. Princeton NJ, USA, 1996:450-455.

(收稿日期:2007-03-15)

作者简介:

赵娟(1981—),女,黑龙江人,工程师,主要负责 ASIC 电路的研发工作;

于宗光(1964—),男,山东人,博士,教授,博士生导师,副总工程师,中国电子学会理事,学术委员会委员,获部级科技进步奖 10 次,发表论文 100 余篇,出版专著 3 部,从事集成电路的设计开发工作,先后主持完成了 30 多项国家重点项目的开发。

(上接第 791 页)

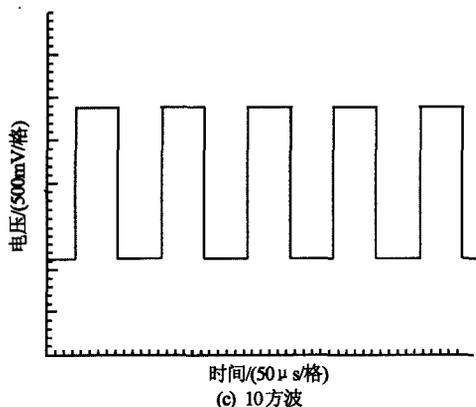
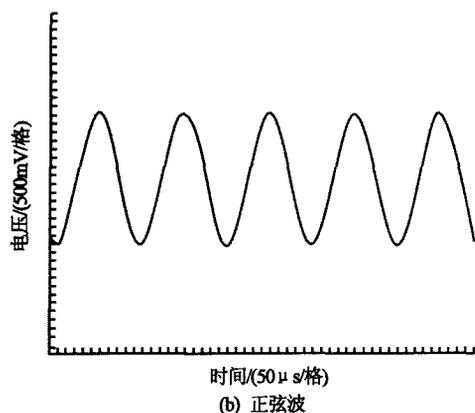


图 5 输出频率为 10 kHz 的波形

5 结论

本文针对开关线性复合式功率放大器中功率放大单元对参考波形信号的要求,介绍了基于 DDS 原理采用 DSP 与 MCU 相结合的任意波形发生电路的设计方案。其电路结构简单、体积小、成本低、操作简单方便、产生的波形质量好,频率稳定度高、可方

便获得各种波形信号,很好地满足了开关线性功率放大器对柔性波形信号的要求。实验结果充分说明了该设计的正确性,同时该电路还可应用于其他需要产生任意波形的场合。

参考文献:

- [1] 周谦之,李定,张捍东. 开关线性复合功率变换技术机理和实效分析[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4):75-79.
- [2] 周谦之. 开关线性复合功率变换技术及应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8):28-33.
- [3] 高玉良. 现代频率合成与控制技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2002:52-69.
- [4] 张培仁,张志坚,高修峰. 十六位单片机微处理器原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [5] 刘晓东,施艳艳,李淑波. 基于 SPI 接口的凌阳单片机键盘设计[J]. 电测与仪表, 2007(2):46-49.
- [6] TMS320VC5509 DSP host port interface (HPI) reference guide [K]. USA: Texas Instruments, 2004:21-27.
- [7] Texas Instruments. TMS320VC5509 fixed-point digital signal processor [EB/OL]. (2004-1-6) [2007-4-25]. <http://www.ti.com/broadband>.
- [8] 孙红霞,李田. 具有 12 位/10 位分辨率的四组串行输入 DACs 芯片 AD7398/AD7399 [J]. 国外电子元器件, 2002(1):39-41.
- [9] 刘晓东,李淑波,施艳艳. 基于 MAX296 的低通滤波电路的设计与应用[J]. 中国仪器仪表, 2006(12):46-51.

(收稿日期:2007-03-22)

作者简介:

刘晓东(1971—),男,吉林人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为测控技术、电力电子功率变换技术;

施艳艳(1982—),女,山东人,硕士研究生,主要研究方向为测控技术。