

一种基于 PWM 原理的多路信号发生器

王小立¹, 李莹², 张一工¹

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 哈尔滨商业大学, 黑龙江 哈尔滨 150076)

摘要: 在电能质量分析研究和电力电子实验中经常会遇到需要多路信号源的情况, 但目前市场上绝大部分的信号发生器只有单路或双路输出。提出了一种利用 PWM 原理实现多路信号发生器的方法, 利用调制的方法产生所需波形的 PWM 脉冲, 产生的脉冲信号可以经过滤波, 得到所需线性波形, 作为采样电路的信号源, 也可以直接输出, 用来驱动功率放大电路, 产生大功率信号。以 TMS320F2812 DSP 为平台实现了该信号发生器, 可同时输出 10 路独立信号。基于 Labview 开发了管理软件, 通过 USB 口与信号发生器通信。实验验证, 该信号发生器产生的线性信号总谐波畸变率较低, 符合要求, 频率、幅值及相位差的调节范围和调节精度满足实验要求。

关键词: 信号发生器; 电能质量; 谐波; PWM; DSP; Labview

A PWM based multi-channel signal generator

WANG Xiao-li¹, Li Ying², ZHANG Yi-gong¹

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

Abstract: A multi-channel signal source is necessary in some power quality research and power electronics experiments, but most signal generators in the market have only single channel or double channels. In this paper, a PWM based method to realize multi-channel signal generator is presented. The PWM pulse generated from modulation, can be divided into two parts. One for filter circuit to get linear waveform, which can be the source of sample circuit, and another for output directly to drive power amplify circuit. This signal generator, which has 10 channels, is realized with TMS230F2812 DSP. Management software based on Labview is developed, in which USB is used to communicate with signal generator. The experimental results show that the linear signal from this signal generator contains low THD, and its frequency, scope and phase difference have a wide regulative range enough to meet experimental requirement.

Key words: signal generator; power quality; harmonics; PWM; DSP; Labview

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)09-0041-04

0 引言

在电路调试、教学实验和产品开发等领域, 信号发生器被广泛用作测量仪器的信号源, 为开发和测试提供输入信号。目前市场上常见的信号发生器及相关资料基本都是以 DDS (直接数字合成) 技术为基础, 利用高速 DA 输出模拟信号, 其精度较高, 但多数仅有单路或双路输出, 在实现多路信号输出时电路复杂, 成本较高, 且输出的信号驱动能力较弱^[1,2], 不能为大功率负载提供输入信号。这些缺点极大地限制了这类信号发生器的应用范围, 因为在实际应用中很多情况下需要多路信号源, 各路信号之间的相位差可任意调节, 或者为了模拟实际系统, 需要具有多路输出的大功率信号源。例如, 在利用瞬时无功理论计算瞬时无功电流和谐波电流时, 要求信号源能产生三相电压和三相电流共六路信号,

其中三相电压互差 120°, 三相电流也互差 120°, 电压和电流的相位差要求能任意调节, 且要求电流信号上可以叠加指定比重的谐波, 以模拟各种实际情况。

本文考虑到以上需求, 提出了一种利用 PWM 原理产生信号的方法。PWM 技术产生较早, 80 年代被应用在工业功率控制装置的逆变器中, 其控制方式灵活, 产生的波形经滤波后谐波含量低, 由于这些优势, 目前 PWM 技术已经被广泛应用于电力变换领域。PWM 技术的核心思想是以脉宽调制信号的幅值, 利用等幅但不等宽的脉冲序列等效各种信号^[3], 据此, 本文提出如下方法: 在程序中合成所需波形, 将该波形和三角载波比较, 输出的 PWM 脉冲经滤波后即可得到所需的信号。利用该原理实现的信号发生器电路简单, 调节方式灵活, 而且可以将输出的 PWM 脉冲用以驱动功率放大电路, 输出大功率信号。

本文以 TI 公司的 TMS320F2812 DSP 作为平台, 基于以上原理实现了多通道信号发生器, 可输出 10 路信号^[4], 各路信号波形可独立调节, 可输出正弦波、三角波、锯齿波、方波等波形, 正弦波还可以叠加一定次数、一定比重的谐波。各路信号之间的相位差可以任意调节, 信号的频率和幅值也可以调节。信号发生器独立运行时能实现的调节方式有限, 为了能够实现上述所有功能以及为将来扩展提供一种可行的途径, 本文以 Labview7.1 为平台开发了管理软件, 基于简洁的可视化界面以及高速的 USB 通讯, 为信号发生器提供了功能强大的后台支持。

1 总体设计

1.1 基本原理^[5]

在采样控制理论中有一个重要的结论: 冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时, 其效果基本相同。冲量即指窄脉冲的面积, 效果相同是指环节的输出响应波形基本相同。PWM 控制技术即是在该原理的基础上发展起来的, 以正弦波为例, 将半个周波的正弦信号分成 N 等份, 就可以把正弦半波看成是由 N 个彼此相连的脉冲序列所组成的波形。这些脉冲宽度相等, 都等于 π/N , 但幅值不等, 且脉冲顶部不是水平直线, 而是曲线, 各脉冲的幅值都按正弦规律变化。如果把上述脉冲序列用相同数量的等幅而不等宽的矩形脉冲代替, 使矩形脉冲的中点和相应的正弦波部分的中点重合, 且使矩形脉冲和相应的正弦波部分面积相等, 就得到该正弦波的 PWM 波形。

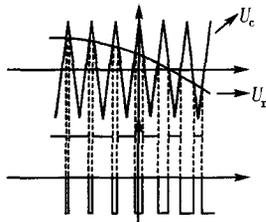


图 1 PWM 基本原理图

Fig.1 Diagram of fundamental PWM theory

根据以上基本原理, 如果给出正弦波的输出频率、幅值和半个周期内的脉冲数, PWM 波形中各脉冲的宽度和间隔就可以准确的计算出来。但这样的计算是很繁琐的, 实际应用中常用调制的方法产生 PWM 脉冲。把希望输出的波形作为调制信号, 把接受调制的信号作为载波, 通过信号波的调制得到所期望的 PWM 波形, 通常用等腰三角形作为载波。采用调制的方法, 当调制波为任意信号时也可以很容易得到其 PWM 波形。如图 1 所示, 其中 U_c 为三角载波, U_r 为调制波, 当三角载波的频率远大于调制信

号的频率, 即频率调制比 m_f 足够大时, 将该信号经过滤波后, 可认为和调制信号等效。利用这种方法产生的波形, 只需要通过改变频率调制比 m_f 和幅度调制比 m_a 即可调节信号的频率和幅值。

TMS320F2812 是美国 TI 公司开发的专用于工业控制的 DSP 芯片, 芯片上集成的事件管理器模块 (Event-Manager Module) 可以很方便的实现 PWM 功能, 2812 上集成了两个事件管理器, 每个事件管理器可以输出 5 路独立信号, 总共可以输出 10 路信号, 每路信号都可由软件控制, 实现单路信号波形、频率、幅值的灵活调节, 以及各路信号之间相位差的灵活调节。

1.2 滤波及波形补偿

由 PWM 脉冲波形的频谱可知, 谐波分量主要集中在三角载波频率 f_c 及其倍频 $2f_c, 3f_c, \dots$ 周围^[6], 为了简化滤波电路的设计以及提高输出波形的质量, 三角载波的频率应该尽量高, 但频率的大小还受 DSP 性能的影响, 综合考虑, 选择三角载波频率为 100 kHz。在频率调制比 m_f 很小的时候, 采用同步 PWM 方式或异步 PWM 方式差别很大, 因为异步 PWM 方式会产生分数次谐波, 但随着 m_f 的增大, 分数次谐波的幅值减小, 在 m_f 足够大时, 分数次谐波的影响可以不用考虑, 而采用异步 PWM 方式, 即固定三角载波频率, 有利于简化滤波电路的设计, 故本文采用异步 PWM 方式。

信号通过滤波电路后, 由于滤波电路对不同频率的信号衰减不同, 且产生的相移也不同, 对于非标准正弦波形会有失真, 为了消除失真, 需考虑对原始波形进行补偿。以下以图 2 滤波电路为例对不同频率正弦信号幅值和相位补偿量进行分析。

对于不同频率的正弦信号, 满足如下关系:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + jnR\omega_0 C}, \quad \text{其中 } \omega_0 = 2\pi \times f_0 \text{ 为基波角频率, } f_0 \text{ 为基波频率。}$$

角频率, f_0 为基波频率。

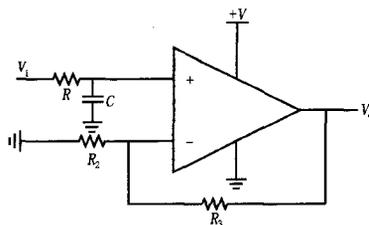


图 2 滤波电路

Fig.2 Filter circuit

首先考虑对幅值的补偿, 为了不使信号发生失真, 滤波电路对各次波形的衰减应该一致, 以基波为标准, 则原始波形中 n 次谐波应该乘上系数

$$\frac{\sqrt{1+(nR\omega_0C)^2}}{\sqrt{1+(R\omega_0C)^2}}$$

; 信号通过滤波器后还会产生相位偏移, 不同次数的谐波产生的偏移也不同, 也会导致波形的失真, 所以还应该考虑对原始波形的相位进行补偿, 由以上公式可知, n 次谐波通过滤波器后相位滞后 $\arctan(nR\omega_0C)$, 所以在补偿的时候应该以基波相位偏移为标准, 原始波形中 n 次谐波相位超前 $\arctan(nR\omega_0C) - \arctan(R\omega_0C)$ 。

补偿后所得波形经过滤波电路后, 滤波电路将补偿的部分衰减, 得到的就是所希望输出的波形, 经试验验证, 该方法有效的改善了因滤波电路对不同频率信号衰减不同而导致的波形畸变。

1.3 USB 通讯

USB 通讯程序的组成结构如图 3 所示, 从底层向上主要由 DSP 程序、USB 设备驱动、动态链接库、Labview 程序四部分组成。其中 DSP 程序通过访问 F2812 的并行异步存储器接口对 USB 控制芯片的 FIFO 进行操作, 负责读取数据和写入数据; USB 设备驱动是联系底层硬件和上层应用程序的纽带, 将读写 USB 控制芯片的操作封装起来供应用程序调用; 由于 Labview 本身不提供 USB 驱动程序, 用 Labview 程序直接调用 USB 设备驱动也很困难, 但可以调用 Windows 的动态链接库, 故利用 Visual C++ 编写动态链接库程序调用 USB 设备驱动将 USB 的读写操作再次封装, Labview 应用程序调用动态链接库, 实现对底层硬件的访问。

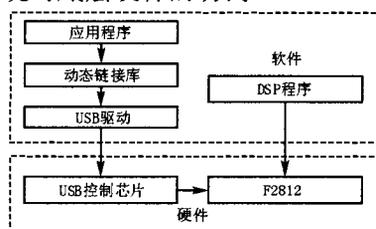


图 3 USB 通讯程序结构图

Fig.3 Structure diagram of USB communicating program

1.4 Labview 管理程序的设计

NI 公司开发的 Labview 是当前流行的图形化开发环境, 也是一种功能强大的编程语言, 它是一套专为数据采集与仪器控制、数据分析和数据表达而设计的图形化编程软件, 使创建的程序模块化, 易于调试、理解和维护, 而且程序编程简单、直观。因此它特别适用于数据采集处理系统。本文提出的

信号发生器功能强大、调节灵活, 单纯靠仪器完成这些功能会导致硬件电路和软件逻辑非常复杂, 甚至不可能实现。因此本文引入 Labview, 利用其强大的图形化编程功能和直观的开发界面, 简化系统的开发以及使用。在 Labview 平台上开发的管理程序主要根据用户的特殊需求生成所需波形, 如调节相位差、叠加谐波等, 并将波形数据发送给信号发生器, 以简化信号发生器的硬件及软件设计。Labview 的引入, 不但简化了信号发生器本身的结构, 而且为以后其功能的进一步扩展提供了更广阔的空间。

2 软硬件设计

系统主程序流程如图 4 所示, 为了保证输出的 PWM 信号经过滤波后含有较少的谐波, 需要选择较高的载波频率, 即定时器的中断周期较短, 在设计系统软件的时候应该将软件的运行效率放在首位, 尤其是定时器中断服务程序, 如果其运行时间超过中断周期, 将会导致输出波形严重畸变, 这是绝对不允许的。在中断服务程序中占用 CPU 时间最多的是浮点的乘除运算, 为了实现多个通道信号的灵活调节, 中断服务程序中浮点的乘法运算是不可避免的, 为了解决中断服务程序的效率问题, 在满足精度要求的前提下使用定点数实现浮点数的运算, 极大的提高了程序运行的效率。

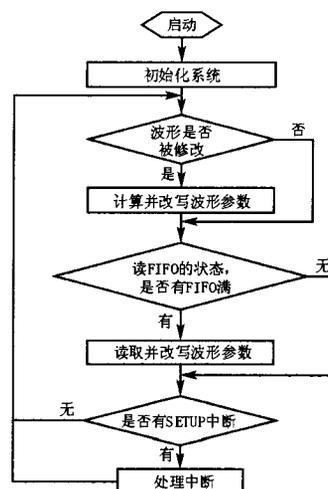


图 4 系统软件流程图

Fig.4 Program flow diagram of system software

系统硬件电路框图如图 5 所示, 采用 TMS320F2812 作为 CPU, 由于 2812 中集成了 PWM 电路, 故系统的硬件电路主要包括 USB 通讯控制电路、调节电路和滤波电路。外扩 Cypress 公司的 CY7C68001 作为 USB 通讯控制芯片, 采用并行异步

存储器接口与 F2812 相连接。外扩的调节电路用来调节各通道信号的频率、幅值、相位等参数。滤波电路如图 2 所示, 采用低通有源滤波电路滤除输出波形中载波频率及其以上的谐波。

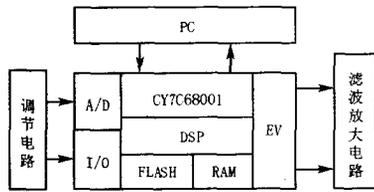


图 5 系统硬件电路框图

Fig.5 System hardware circuit diagram

3 实验及结果分析

本文实现的信号发生器产生的 PWM 信号经过滤波电路滤除高频载波信号后得到的波形可直接用于低功率的应用, 在需要输出大功率信号时, 可以将信号发生器和功率放大电路结合, 利用信号发生器输出的 PWM 信号驱动功率放大电路, 其容量取决于功率放大电路的容量。以下是该信号发生器功能的实验验证结果:

1) 可产生多达 10 路信号, 各路信号的波形可独立调节, 且各路信号之间的相位关系也可调节, 实际应用中可根据需要灵活设置。本文使用三相正弦波验证, 图 6 为输出的 50 Hz 三相正弦波形以及该波形的误差分析结果。

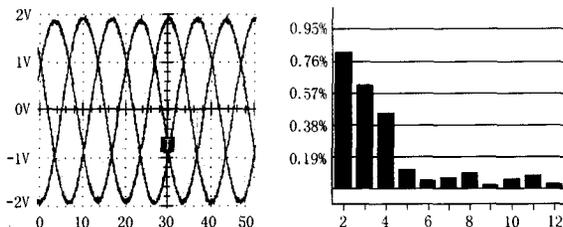


图 6 三相正弦波及其中一相波形的频谱分析

Fig.6 3-phase sin wave and frequency analysis

2) 信号发生器的每个通道都可以输出多种波形, 其频率、幅值可调节, 图 7 和图 8 分别是输出为正弦波和三角波的波形以及误差分析。

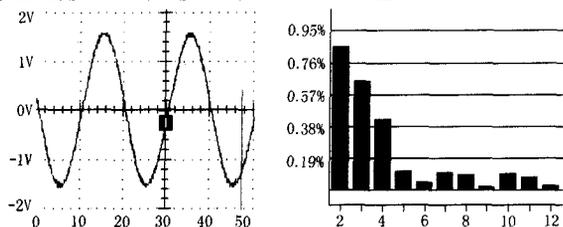


图 7 50 Hz 正弦波及其频谱分析

Fig.7 50 Hz sin wave and frequency analysis

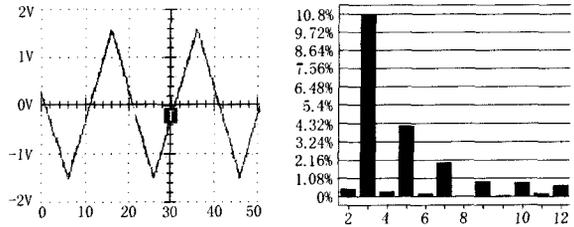


图 8 50 Hz 三角波及其频谱分析

Fig.8 50 Hz tri-wave and frequency analysis

3) 信号发生器支持任意周期波形的输出, 利用基波和多个不同比例的谐波叠加到一起产生任意波形, 图 9 是将基波叠加了 10% 的三次谐波、5% 的五次谐波和 5% 的七次谐波之后输出的波形以及对该波形的谐波分析。

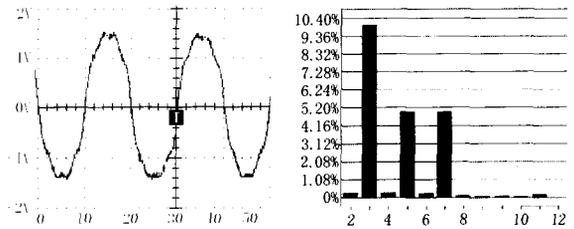


图 9 任意波形及其频谱分析

Fig.9 Random wave and frequency analysis

实验结果表明, 各种信号经滤波后的谐波畸变率被控制在 1% 以下, 该误差可以满足一般应用要求。

4 结论

1) 基于 PWM 原理实现了多路信号发生器, 满足设计要求功能, 可同时输出十路信号, 各路信号的波形、相位、频率、幅值可独立调节, 可产生正弦波、三角波、锯齿波、方波, 正弦信号结合后台管理软件还可产生叠加任意次谐波, 频率可在 1~1 kHz 范围内调节, 幅值调节范围为 0~10 V。

2) 信号发生器产生的 PWM 脉冲不经过滤波电路, 而直接作为功率放大电路的触发信号, 输出大功率信号。

3) 在 Labview7.1 平台上开发了后台管理软件, 将信号发生器和 PC 机结合起来, 利用 PC 上丰富的资源和友好的界面扩展信号发生器的功能, 并为该仪器能进一步扩展功能提供了广阔的空间。

4) 实现了 DSP 和 Windows 之间的 USB 通讯, 为 DSP 和主机之间需要大量数据交换的应用提供了一种可行的解决方案。

(下转第 55 页 continued on page 55)

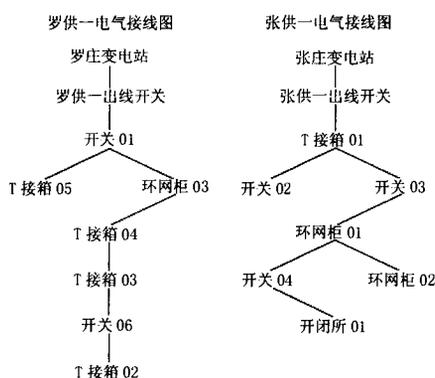


图 6 电气接线图 2

Fig.6 The 2nd electric diagram

文献[3]提出的方法是将各电气设备分级, 然后把偶数级水平放置, 奇数级垂直放置。若产生交叉或重叠则采取水平或垂直一维局部拉伸平移的方法来消除。本文采用的是树型结构, 从电源点(变电站)到联络开关断开处, 由上至下, 供电线路的电气连接状况一目了然。该方法也还适用于多电源的配电网络, 若出现的开关误操作也给予了相应的警告提示。并且在开关操作网络拓扑信息变化的时候, 采用了拓扑数据库的局部修正技术, 避免对全网拓扑结构的操作, 大大提高了程序的运行效率, 为用户提供了极大的方便。

本文论述的方法, 已经应用于某市配电网电力信息系统, 起到了良好的配电网辅助运行效果。

参考文献

[1] 刘建, 毕鹏翔, 董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社.

(上接第 44 页 continued from page 44)

参考文献

[1] Cabiati F, Pogliano U. High-Accuracy Two-Phase Digital Generator with Automatic Ratio and Control[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1999, 36(2): 411-417.
 [2] Varnes R S, Ball J A R, Hancock N H.A Dual-Output Coherent Signal Generator Using Direct Digital Synthesis[J]. Proceedings on Sensing, Processing, Networking, 1997, (2) : 1299-1304.
 [3] Morie T, Sakabayashi S, Nagata M, et al. Nonlinear Function Generators and Chaotic Signal Generators Using a Pulse-width Modulation Method[J]. Electronics Letters, 1997: 1351 - 1352.
 [4] TMS320F28x DSP Event Manager(EV) Reference Guide[Z]. Texas Instruments, 2003.
 [5] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
 WANG Zhao-an, HUANG Jun. Power Electronic

LIU Jian, BI Peng-xiang, DONG Hai-peng. Simplified Analysis and of Complicated Distribution Networks[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[2] 李光辉, 陈雄波, 孟遂民. 基于图论构建输电线路动态拓扑关系方法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2006, 28(4): 321-323.
 LI Guang-hui, CHEN Xiong-bo, MENG Sui-min. Method to Compose Dynamic Topological Relations of Relations of Power Transmission Line Based on Graph Theory[J]. Journal of China Gorges University(Natural Sciences), 2006, 28(4): 321-323.
 [3] 刘建, 吴媛, 刘巩权. 配电馈线地理图到电气接线图的转换[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 73-77.
 LIU Jian, WU Yuan, LIU Gong-quan. Conversion from GIS Based Feeder Maps to Electric Diagrams[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 73-77.
 [4] ONG Y S, GOOI H B, CHAN C K. Algorithms for Automatic Generation of One-line Diagrams[J]. IEEE Proceedings Gener, Transm, and Distrib, 2000, 147(5): 292-298.
 [5] Modeling Our World[Z]. ESRI, 2000.
 [6] Prais M, Bose A. A Topology Processor that Tracks Network Modification Over Time[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(3): 992-998.

收稿日期: 2006-11-23; 修回日期: 2006-12-20

作者简介:

胡森(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向是基于地理信息系统的配电管理信息系统; E-mail: cheery-hs@126.com

徐学军(1964-), 男, 副教授, 研究方向是地理信息系统。

冯晓良(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向是配电地理信息系统。

Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.

[6] 佟为明, 李可敬, 翟国富, 等. SPWM 电压源逆变器变压变频过程中的谐波分析[J]. 电力电子技术, 1995, 29(3): 47-51.
 TONG Wei-ming, LI Ke-jing, ZHAI Guo-fu, et al. Harmonic Analysis of SPWM VSI in Process of VVVF[J]. Power Electronic Technology, 1995, 29(3): 47-51.

收稿日期: 2006-10-10; 修回日期: 2006-12-02

作者简介:

王小立(1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: wxl_972116@163.com

李莹(1977-), 男, 硕士, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

张一工(1955-), 男, 教授, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。