

基于 Proteus 的模拟三相交流信号源设计

吕曙东

(盐城工学院 实验教学部, 江苏 盐城 224051)

摘要:为合成高性能三相低频正弦波信号,以降低研究成本,提出了一种基于集成运放及电阻、电容元件的工频三相交流信号源设计方法。通过正弦波发生器、电压幅值调节电路、移相网络、输出电路及电压—电流转换电路产生的对称三相电压及三相电流分别在 0~1 V、0~5 mA 之间同步精确可调。在星形连接对称电阻负载时,Proteus 对三相交流电压源及电流源的仿真结果表明,电路性能指标达到了设计要求,具有成本低、精度高、性能稳定、输出波形无失真等优点,可应用于自动控制系统及仪表检测系统。

关键词:工频;三相电源;对称;Proteus

中图分类号:TM13;TN751

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2010)12-0098-04

Design of analog three-phase AC signal source based on Proteus

LV Shu-dong

(Department of Experiment Teaching, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: To synthesize three-phase low-frequency sine-wave signal with high performance and reduce the research costs, a design method of power-frequency three-phase AC signal source based on operational amplifiers and resistors and capacitors was proposed. Composed of the circuit of sine-wave generator, voltage amplitude regulating, phase-shifting, output and voltage-current converting, the symmetrical three-phase voltage and three-phase current could be synchro-regulated exactly in the range of 0~1 V and 0~5 mA. The simulation results of three-phase AC voltage source and current source with symmetrical resistor load star-connected in Proteus show that the performance indicators of the circuit meet the design requirements, the circuit has the advantages of low cost, high accuracy, stable performance, without distortion of the output wave, and can be applied to automatic control system and instrument test system.

Key words: power-frequency; three-phase AC power; symmetrical; Proteus

0 引 言

Proteus 是英国 Labcenter Electronics 公司开发的基于 ProSPICE 混合模型仿真器的、完整的嵌入式系统软硬件设计仿真平台^[1]。在 Proteus 中,从原理图设计、系统仿真到 PCB 制版真正实现了从设计到实际电路的完整设计。Proteus 提供了丰富的元器件库、各种测试仪表及激励源,不仅能对各种电子电路进行交互式动态仿真及图表仿真,更具备独特的其他 EDA 软件所无法媲美的单片机仿真功能。

在自动控制系统和仪表检测系统中,需要三相低频正弦波信号源。基于三相同步发电机的信号发生器

由于需用直流电动机带动,使得信号发生器的重量大,稳定性不高,不便于控制。可提供三相正弦波电压信号与电流信号的三相精密功率信号源应用广泛^[2~4],诸如用于电能表或功率表的检定设备。在信号源中,对波形的精度和稳定度要求很高,失真度要求极低^[5],因此合成高性能的三相正弦波是研制三相精密功率信号源的基础和条件。文献[6]虽提出了工频三相标准信号源的设计思路及参数要求,但并未给出系统具体实现方案。

本研究在 Proteus 中设计了由集成运放及电阻、电容元件构成的模拟工频三相交流信号源,并对电路的性能指标进行了测试和分析。

1 电路设计

对称三相电源由 3 组同频率、等幅值和初相位依次相差 120° 的正弦波电压源按一定方式连接而成,依次称为 A 相、B 相和 C 相。工频三相交流信号源由正弦波发生器、电压幅值调节电路、移相网络、输出电路及电压—电流转换电路 5 部分组成,电路框图如图 1 所示。正弦波发生器采用 RC 振荡电路,通过电压幅值调节电路、二级 RC 移相网络及输出电路分别产生 U_a 、 U_b 、 U_c 三相交流电压源,通过电压—电流转换电路分别产生 I_a 、 I_b 、 I_c 三相交流电流源。

1.1 正弦波发生器

在 Proteus 中建立的由 RC 串并网络 and 运算放大器构成的正弦波发生器如图 2 所示。电路实现自激

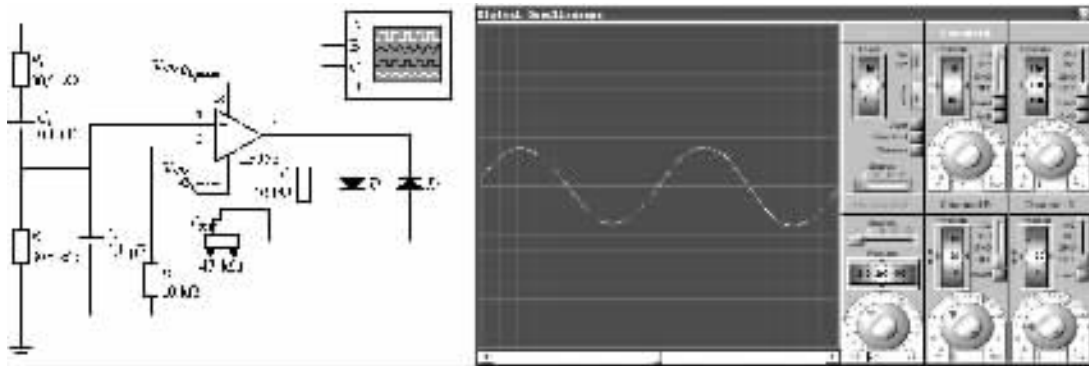


图 2 正弦波发生器及输出波形

为了稳定振荡幅度,通常在放大电路的负反馈回路中采用非线性元件来自动调整负反馈放大电路的增益,以维持输出电压幅度的稳定。图 2 中二极管 D_1 、 D_2 即是稳幅元件,其作用是输出限幅,改善输出波形。当输出电压幅度较小时,电阻 R_4 两端的电压较小,二极管 D_1 、 D_2 截止,反馈系数由 R_3 、 R_4 及 R_{p1} 决定。当输出电压的幅度增加到一定值时,二极管 D_1 、 D_2 导通,其动态电阻与 R_4 并联后使反馈系数增大,电压增益下降。输出电压的幅度越大,二极管的动态电阻越小,从而维持输出电压的幅度基本稳定^[7]。

图 2 中正弦波发生器的振荡频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

因工频三相交流信号源的频率为 50 Hz,电路设计时应根据式(1)确定图 2 中 RC 串并网络的电阻及电容的参数。本研究选用 LF353 双集成运放^[8],电源电压采用 ± 5 V,并选用 1N4148 开关二极管。

由于稳幅时 $A_{uf} \approx 3$,当输出电压达到正弦波峰值

振荡的起振条件为:输出电压与输入电压同相、电压增益略大于 3。RC 串并联选频网络接于运放的输出端与同相输入端之间以满足相位条件,调节 R_{p1} 可改变负反馈放大电路的反馈系数以满足幅度条件。

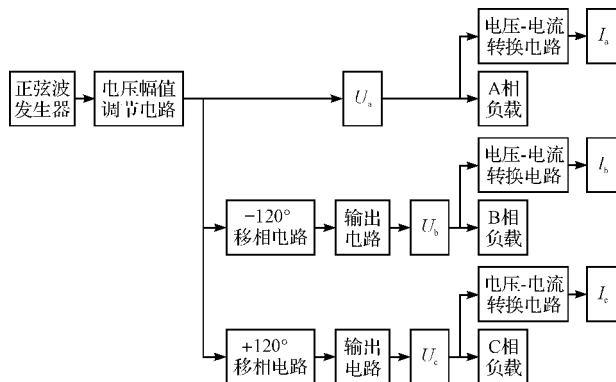


图 1 三相交流信号源电路框图

时,二极管的正向压降约为 0.6 V,估算图 2 正弦波发生器的输出电压幅值约为:

$$U_{om} \approx \frac{30 \times 0.6}{10} = 1.8 \text{ V} \quad (2)$$

单击运行按钮开始仿真,调节 R_{p1} 为 23% 时电路起振,由图 2 中示波器测得正弦波发生器输出波形的周期为 20 ms,即频率为 50 Hz,输出电压幅值约为 1.4 V(与估算值稍有误差),有效值约为 1 V。

1.2 电压幅值调节电路

电压幅值调节电路为集成运放构成的反相放大器,如图 3 所示。图 3 中的 U_i 接至图 2 正弦波发生器的输出端, U_a 作为 A 相电源,可见图 3 亦是 A 相的输出电路。由于正弦波发生器输出电压的有效值约为 1 V,因此设计图 3 反相放大器的可调电压增益最大值为 1,通过改变 R_{p2} (多圈电位器)即可对 U_a 的幅值进行精确调节,从而实现三相电源输出电压在 0 ~ 1 V 之间连续可调。

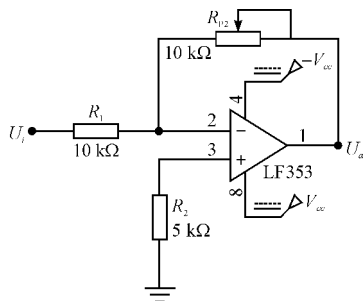


图 3 电压幅值调节电路

1.3 移相网络

所谓移相是指两组同频信号以其中的一路作为参考信号；另一路相对于该信号作超前或滞后的移动，即称为相位的移动。最简单的移相电路是 RC 移相，当正弦波信号通过 RC 电路时，输出信号的电压幅度和相位与输入信号不同。一级 RC 电路的最大移相为 90° ，因此选用二级 RC 电路构成移相网络，分别如图 4、图 5 所示。图 3 电压幅值调节电路输出 A 相，经过图 4 负 120° 移相电路成为 B 相，经过图 5 正 120° 移相电路成为 C 相。

因二级 RC 电路需实现 120° 精确移相，电路设计时应根据输入信号频率为 50 Hz 时二级 RC 电路的相频特性确定图 4、图 5 中各对电阻及电容的参数。

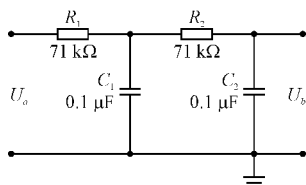


图 4 -120° 移相电路

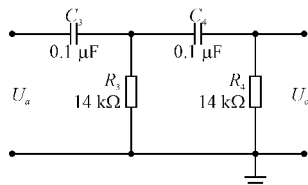


图 5 $+120^\circ$ 移相电路

1.4 输出电路

三相交流信号已经产生，但其带负载的能力有限，且经过移相网络后各相的电压幅值存在差异，因此移相信号（B 相、C 相）需分别通过各自的输出电路保持与基准信号（A 相）幅值的严格同步，同时提高电路的带负载能力。

由同相放大器构成的输出电路如图 6 所示，电路设计时应根据输入信号频率为 50 Hz 时二级 RC 电路的幅频特性，分别确定应用于 B 相、C 相的如图 6 所示同相放大器的精确电压增益（反馈电阻 R_F 可选用多圈电位器），以实现经过移相网络后三相电压幅值的严格对称相等。

1.5 电压—电流转换电路

在测控系统中，当需要远距离传送电压信号时，为避免信号源电阻及线路电阻带来的精度影响，通常可

先将电压信号转换为相应的电流信号再进行传送。负载接地的电压—电流转换电路如图 7 所示，取 $R_1 = R_3$ ， $R_2 = R_4 + R_5$ ，根据理想运放工作在线性区的特性，分析流过负载 R_L 的电流 I_L 为 $-U_i/R_5$ ，即 I_L 与输入电压成正比，而与负载 R_L 无关^[9]。由于三相电源输出电压在 0 ~ 1 V 之间可调，因此设计图 7 电压—电流转换电路中 R_5 为 200 Ω，从而实现三相电源输出电流 0 ~ 5 mA 的调节范围。

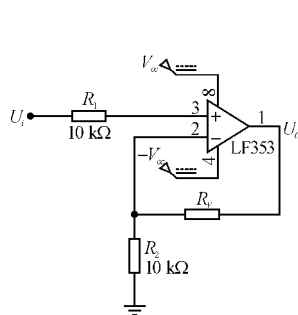


图 6 输出电路

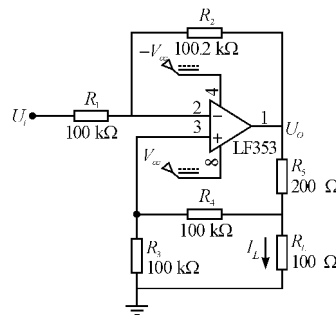


图 7 电压—电流转换电路

为分析工频三相交流信号源的技术参数，电路采用星形连接对称电阻负载，通过交流电压表、电流表分别测量三相电压源输出电压及三相电流源输出电流，以测试各相信号的精度、稳定度及对称度。

2 Proteus 仿真分析

2.1 三相交流电压源

在 Proteus 中建立如图 8 所示的工频三相交流电压源电路。图 8 中 U1 : A 为正弦波发生器单元电路，U1 : B 为三相电源的电压幅值调节电路亦是 A 相电源的输出电路， R_7 、 R_8 、 C_3 、 C_4 为 -120° 移相单元电路， R_{12} 、 R_{13} 、 C_5 、 C_6 为 $+120^\circ$ 移相单元电路，U2 : A、U2 : B 分别为 B 相、C 相电源的输出电路，A、B、C 工频三相交流电压分别见图 8 中所标示的 U_a 、 U_b 、 U_c 。 R_{17} 、 R_{18} 、 R_{19} 为无中线星形连接的三相对称电阻负载（1 kΩ），6 只交流电压表分别用于测量三相电源电压及三相电阻负载的相电压。

单击运行按钮开始仿真，调节 R_{p1} 为 23% 时电路起振，当调节 R_{p2} 由 0 至最大值时，由 6 只交流电压表分别测得工频三相电源电压及对称负载电压在 0 ~ 1 V 之间同步精确可调，步进达 0.01 V，电源电压及负载电压同步对称相等，达到了设计要求。

由图 8 中示波器观测电路的三相交流电压输出波形如图 9 所示，可以看出，三相电源的输出电压大小相等，相位相差 120° ，波形无失真、精度高、稳定可靠。

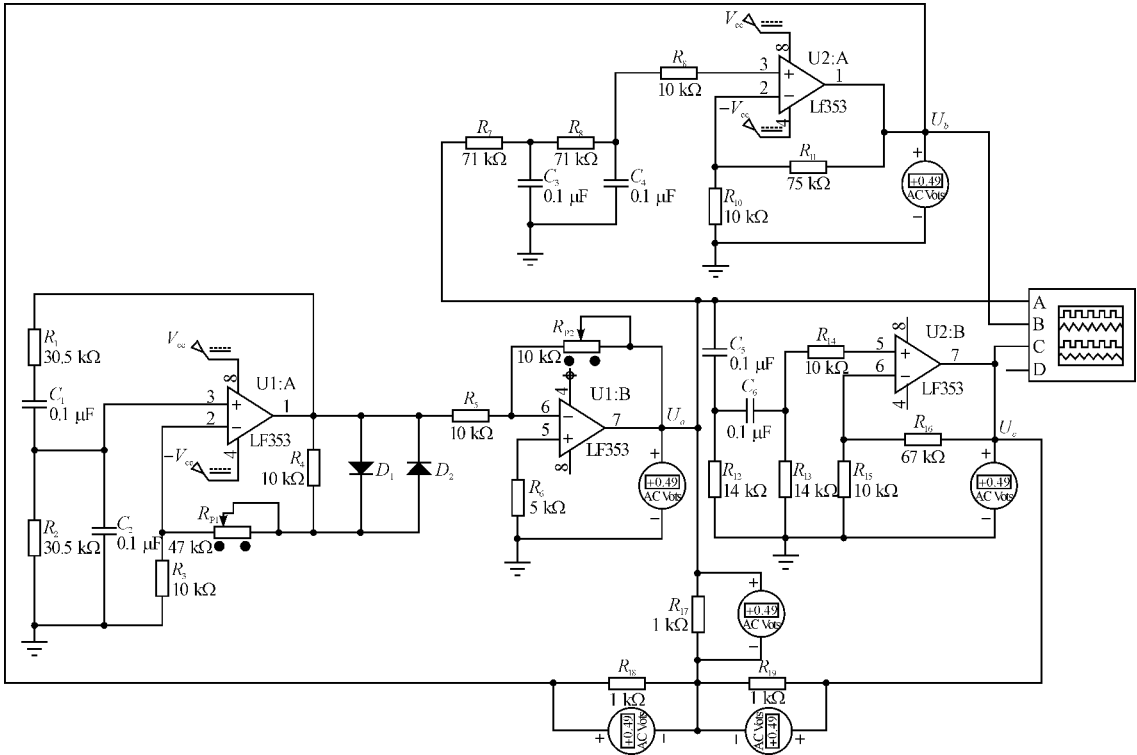


图 8 三相交流电压源电路

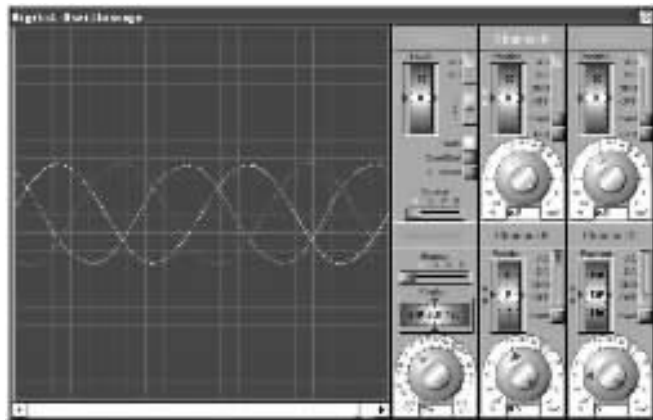


图 9 三相交流电压源输出波形

2.2 三相交流电流源

将图 8 中三相交流电压源的输出端 U_a 、 U_b 、 U_c 分别接至 3 组如图 7 所示电压—电流转换电路的输入端 U_i , 构成三相交流电流源电路, 该电路仍采用星形连接的三相对称电阻负载 (100Ω)。通过 Proteus 仿真分析, 当调节 R_{p2} 由 0 至最大值时, 工频三相交流电流源输出电流在 $0 \sim 5 \text{ mA}$ 之间同步精确可调, 步进达 0.05 mA , 各相电流同步对称相等, 达到了设计要求。

在电路调试过程中, 作为系统核心的正弦波发生器单元电路的电压增益的调节至关重要 (即图 8 中的 R_{p1} 应略大于 $2R_5$), 否则会出现无振荡波形或输出波形失真的现象。同时在调节 R_{p2} (如图 8 所示) 时应密

切观察三相电压源输出电压及三相电流源输出电流是否同步对称可调。

3 结束语

本研究的重点和难点是实现三相交流电源参数 (相电压及线电压、相电流) 的严格同步对称相等。由于软件仿真与实际参数存在一定的差别^[10], 在实际应用中, 正弦波发生器及移相网络中的各对电阻均宜选用同轴多圈电位器以实现 50 Hz 精确振荡频率及 120° 精确移相, 电压—电流转换电路中的负载电阻不能过大, 各单元电路宜先确定标称电容值再选择各电阻参数, 选用介质损耗小、性能稳定的电容^[11], 同时选用高输入阻抗运放。

本研究给出了基于集成运放及常用电阻、电容元件的工频三相交流信号源的设计方法, 电路由全硬件构成, 不占用微处理器软、硬件资源, 并利用功能强大的 EDA 软件 Proteus 对系统进行仿真分析, 提高了开发效率, 降低了设计成本。在星形连接对称电阻负载时, Proteus 对三相交流电压源及三相交流电流源电路参数的仿真结果表明, 设计电路成本低廉、调试方便、性能稳定, 各项技术指标均达到了设计要求, 具有良好的可行性和实用性, 可用来检定、标定交流测量设备, 如电力自动化系统中的检测装置、保护装置等, 具有很好的推广价值。
(下转第 105 页)

表 1 评测结果

内容		本设计指标	
频率分辨率		$\leq 0.4\%$	
频率测量	主信号	频率测量范围	10 Hz ~ 30 kHz
		频率测量误差	$\leq 0.0056\%$
	次信号	频率测量范围	10 Hz ~ 30 kHz
		频率测量误差	$\leq 0.0040\%$
幅值测量	主信号	幅值测量范围	0.1 ~ 1 V
		幅值测量误差	$\leq 1.12\%$
	次信号	幅值测量范围	0.1 ~ 1 V
		幅值测量误差	$\leq 1.43\%$

6 结束语

研究表明,采用全相位谱分析方法进行频谱分析与校正的精度高于传统方法,但是全相位谱分析所需的样本长度要高于传统方法,因此如何减小样本长度是接下来的工作所要考虑的。本研究将全相位谱分析理论应用于实践中,为复合叠加信号高精度的检测与识别提供了一种新方法。全相位谱分析理论的应用前景并不局限于本研究所讨论的范围,在相位测量、频率测量和频率测量紧密相关的其他领域也有很广阔的应用前景。

参考文献 (References):

- [1] 徐科军,张瀚,陈智渊. TMS320X281X DSP 原理与应用[M]. 1 版. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [2] TMS320F28335 Data Manual[M/CD]. Texas Instruments, 2007.
- [3] 丁康,谢明,杨志坚. 离散频谱分析校正理论与技术[M]. 1 版. 科学出版社,2007.
- [4] XIE Ming, DING Kang. Correction for the frequency, amplitude and phase in FFT of harmonic signal[J]. **Mechanical System and Signal Processing**, 1996, 10(2): 211 - 221.
- [5] JENQ Yih-Chyun. Direct digital synthesizer with jittered clock[J]. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 1997, 46(3): 653 - 655.
- [6] 王兆华,黄翔东. 数字信号全相位谱分析与滤波技术[M]. 1 版. 北京:电子工业出版社,2009.
- [7] 丁康,张小飞. 频谱校正理论的发展[J]. 振动工程学报, 2000, 13(1): 14 - 22.
- [8] RIFE D G, VINCENT G A. Use of the discrete fourier transform in the measurement of levels and tones[J]. **Bell Syst. Tech. J.**, 1970, 49(2): 197 - 228.
- [9] 李正周. MATLAB 数字信号处理与应用[M]. 1 版. 北京:清华大学出版社,2008.
- [10] 张德丰. Matlab/Simulink 建模与仿真[M]. 1 版. 北京:电子工业出版社,2009. [编辑:张翔]

(上接第 101 页)

参考文献 (References):

- [1] 朱清慧,张凤蕊,翟天嵩,等. Proteus 教程—电子线路设计、制版与仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [2] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality[S]. IEEE Std. 1159 - 1995.
- [3] DUGAN R C, MEGRANGHAN M F, BENTY H W. Electrical Power System Quality[M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [4] KARA A, DAHLER P, AMHOF D, et al. Power supply quality improvement with a dynamic voltage restorer[C]//Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC, New York, 1998: 986 - 993.
- [5] 刘大成,黄引. 基于 AD9959 的高精度三相正弦信号源的设计[J]. 电子元器件应用, 2008, 10(12): 18 - 21.
- [6] 吕曙东,孙宏国. 电工电子实验技术[M]. 第 2 版. 南京:东南大学出版社,2010.
- [7] 高文焕,张尊侨,徐振英,等. 电子电路实验[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [8] National Semiconductor Corporation. Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier[EB/OL]. [2003 - 12 - 01]. <http://www.national.com/ds/LF/LF353.pdf>.
- [9] [日]马场清太郎. 运算放大器应用电路设计[M]. 何希才,译. 北京:科学出版社,2007.
- [10] 郑贤标,姜伟,周见行,等. 基于 Proteus 的单片机数据采集系统仿真[J]. 机电工程, 2010, 27(1): 31 - 33, 37.
- [11] 万京,冀建利,刘靖纳. 低失真教学用三相电源研究[J]. 电源技术应用, 2007, 10(8): 38 - 40. [编辑:张翔]