

飞机交流电源测频电路低通滤波器设计与仿真

杨卫朋*, 张勇, 何博

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘 要: 针对型号研制过程中出现的交流电源频率测量出现跳变的问题, 进行了故障定位和原因分析, 并提出了解决方案。设计了适用于飞机交流电源系统频率测量电路的低通滤波器, 对其特性进行了计算分析, 并基于SIMULINK建立了滤波器的模型, 进行了仿真验证。结果表明, 设计的滤波器是有效的。

关键词: 交流电源; 低通滤波器; 频率测量; 仿真

中图分类号: V242.2

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2014) 03-0035-5

交流电源是大、中型飞机普遍采用的一次电源类型。频率是交流电源一项重要的物理参数, 也是评价交流电源电能质量的重要内容之一。在系统运行的过程中, 既要保证频率在规定的范围之内, 还要在频率超出规定的范围时按要求停止向用电负载供电, 从而保护电源设备和用电负载免受危害。

然而飞机所处的电磁环境非常复杂, 电源系统极易受到电磁干扰的影响而在测频电路的输入信号中混入高频噪声, 使测频结果产生较大的误差, 或者出现频率跳变的现象。在某型机交流电源地面模拟试验的过程中就出现了反复的频率跳变问题, 虽然没有导致交流电源频率保护动作, 但可以想象, 在机上复杂的电磁环境中, 尤其是在战时强电磁干扰的条件下, 后果不可忽视, 轻者将使系统性能降级, 重者可能导致交流电源因保护误动作而失效, 甚至危及飞行安全。实时、准确地获取系统频率信息是交流电源系统安全、可靠运行的关键环节。

1 原因分析及解决思路

某型飞机是采用脉冲计数法计算系统频率的。该方法首先将被测信号的波形变换为方波后, 向方波中填充计数脉冲进行计数, 最后根据计数脉冲的个数和计数脉冲的周

期计算被测信号的频率。经分析发现, 引起频率产生跳变的原因是测频电路中的过零比较器在信号过零点附近因误触发而翻转, 这正是在测频电路的输入信号中混入了高频噪声所致。

为消除或有效减小电磁干扰的影响, 保证测频结果的准确性, 在被测信号输入过零比较器之前应滤除混入电路中的高频噪声。这里选择三阶巴特沃斯有源低通滤波器实现。巴特沃斯滤波器具有通频带内频率响应曲线平坦, 阻频带内逐渐下降为零, 因此滤波特性好, 获得较为普遍的应用。利用巴特沃斯函数, 通过选择合适的阶数, 可以在一定精度范围内近似实现理想低通滤波器特性。函数的阶数越高, 转移特性越逼近理想滤波器, 但是所需的元件数量也就越多, 电路也就越复杂, 对于一般的工程需要采用二阶电路即可满足要求, 而对滤波性能要求更高的场合, 可选择三阶低通滤波电路。

2 二阶有源RC低通滤波器

一种二阶有源RC电路如图1所示^[1], 该电路称为Sallen-Key低通电路, 属于有源滤波器。有源滤波电路不仅能够补偿无源网络中的能量损耗, 提高信号的输出功率; 同时, 运算放大器有高输入阻抗和低输出阻抗的特点, 在实现多级相连

收稿日期: 2013-07-18; 退修日期: 2013-12-20; 录用日期: 2014-02-28

*通讯作者. Tel.: 029-86832317 E-mail: sutuanu@163.com

引用格式: YANG Weipeng, ZHANG Yong, HE Bo. Design and simulation of frequency measurement circuit low pass filter for aircraft ac power system[J]. Aeronautic Science and Technology, 2014, 25(03): 35-39. 杨卫朋, 张勇, 何博.

飞机交流电源测频电路低通滤波器设计与仿真[J]. 航空科学技术, 2014, 25(03): 35-39.

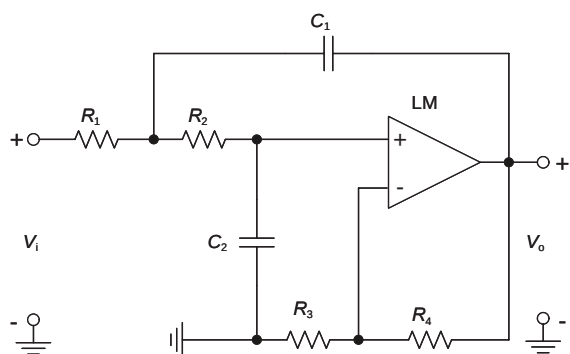


图1 二阶有源RC低通电路

Fig.1 Low-pass circuit of two order active RC

时相互之间的影响很小,负载效应也明显下降,尤为适用于低频应用场合。

根据节点电压方程可得电路的电压转移函数为:

$$H_{sk}(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_f \omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2} \quad (1)$$

式中: A_f 是电路的直流电压放大倍数, $A_f = 1 + \frac{R_4}{R_3}$; ω_n 是滤波器的截止频率, $\omega_n^2 = \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}$; Q 是电路的品质因数,

$$Q = \frac{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}{C_2 R_1 + C_2 R_2 + (1 - A_f) C_1 R_1}.$$

二阶巴特沃斯滤波电路的归一化传递函数为

$$H_{II}(s) = \frac{1}{s^2 + 1.414s + 1} \quad (2)$$

利用MATLAB绘出该电路的伯德图如图2所示。

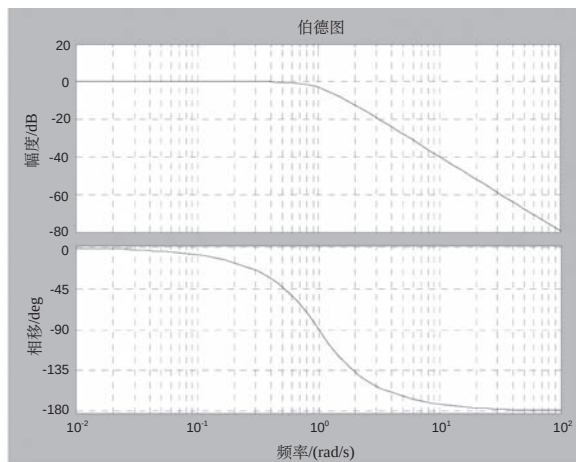


图2 二阶巴特沃斯低通滤波器的伯德图

Fig.2 Bode diagram of two order Butterworth low-pass filter

由图2可以看出,该低通滤波器通带内较为平坦,相移也不大,对基波几乎能无衰减通过,但滤波器阻带内的特性下降较为缓慢。为了得到更为理想的低通滤波器,既要求通带内特性平坦,又要求阻带内下降速度更快,这里选择三阶有源低通滤波器。

3 三阶有源RC低通滤波器

图3是一种三阶有源RC低通滤波器的电路。它是通过将一阶有源低通滤波器和二阶有源低通滤波器级联实现的^[2]。

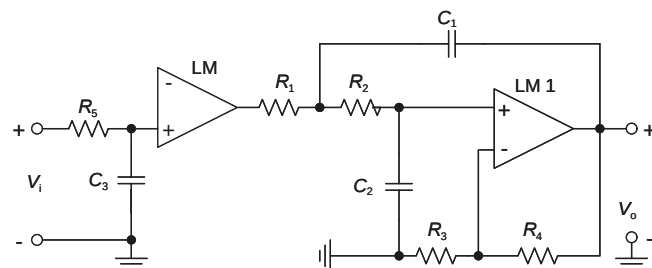


图3 三阶有源RC低通电路

Fig.3 Low-pass circuit of three order active RC

三阶巴特沃斯滤波器的归一化传递函数为

$$H_{III}(s) = \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \quad (3)$$

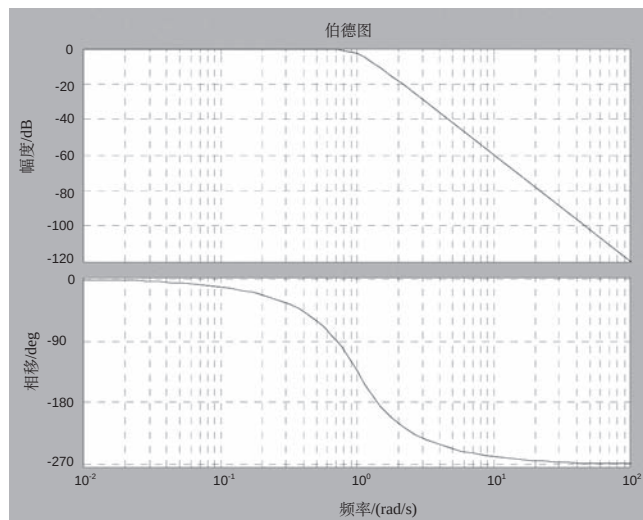


图4 三阶巴特沃斯低通滤波器的伯德图

Fig.4 Bode diagram of three order butterworth low-pass filter

利用MATLAB绘出其伯德图如图4所示。与图2相比,三阶巴特沃斯低通滤波器通带内也较为平坦,阻带内下降的更快,但相移更大些。

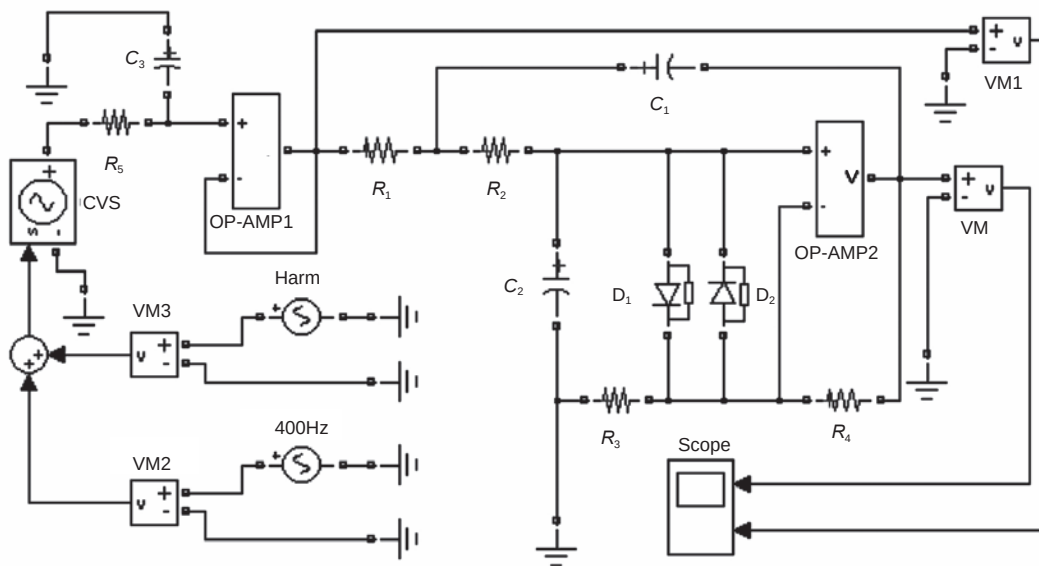


图5 三阶有源RC低通滤波电路的仿真模型

Fig.5 Simulation model of low-pass filter circuit for three order active RC

4 三阶有源RC低通滤波器的建模

SimPowerSystem库是SIMULINK中的一个专用模块库,是在SIMULINK环境下进行电力、电子系统建模和仿真的先进工具^[3]。图5为使用SimPowerSystem中的元组件建立的三阶有源RC低通滤波器仿真模型。滤波器的输入除基波电压信号外还有一个叠加在基波电压信号上的名为Harm的电压信号,用来模拟现场产生的高频干扰信号。滤波器的输出为电压信号。输入信号和输出信号的波形都可以通过示波器(Scope)显示。

在SimPowerSystem中没有可用的运算放大器模块,因此需要对运算放大器进行专门的建模。运算放大器的模型如

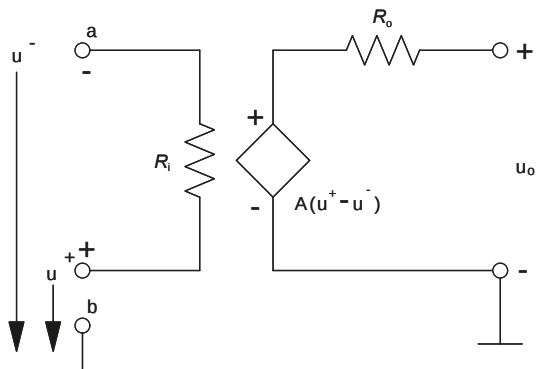


图6 运算放大器模型

Fig.6 Operational amplifier model

图6所示。电压控制电压源的电压为 u ,为运算放大器的输入电阻,为输出电阻。对于实际的运算放大器, R_1 约为 $1\text{M}\Omega$, R_0 约为 100Ω 。通过对输入信号进行调理可使运算放大器处于线性工作段,放大倍数可超过 10^5 ,这里取放大倍数 A 为 10^5 。

设滤波器的截止频率 ω_n 为 2000 Hz ,即 12560 rad/s 。设定二阶RC低通电路的增益 $A_f=2$,可得 $R_3=R_4$ 。

由二阶和三阶RC低通电路的转移函数可知, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 和 C_1, C_2, C_3 等元件值服从的约束等式的数量少于元件的数目。理论上讲,具有多种可能的参数组合,但对于观察滤波器的特性并无差异。为简单起见,将以上元件的归一化参数均选定为1。

对参数去归一化,选取 $R_1=R_2=R_5=8.06\text{ k}\Omega$, $R_3=R_4=10.5\text{ k}\Omega$,计算可得 $C_1=C_2=9.88\text{ nF}$,这里选取 $C_1=C_2=10\text{ nF}$ 。

5 滤波器性能的仿真测试

考虑到该低通滤波器的幅频特性是频率的连续函数,在整个频带内都是单调下降的,并且目前飞机供电系统大都采用 400 Hz 恒频交流电源,因此这里通过模拟在 400 Hz 基波电压上分别叠加 1200 Hz 、 2000 Hz 、 4000 Hz 和 6000 Hz 的高频干扰信号输入到滤波器,通过分析输出信号的特性对滤波的效果进行验证。

假设 400 Hz 基波电压经过了信号调理,电压峰值为 10 V ,

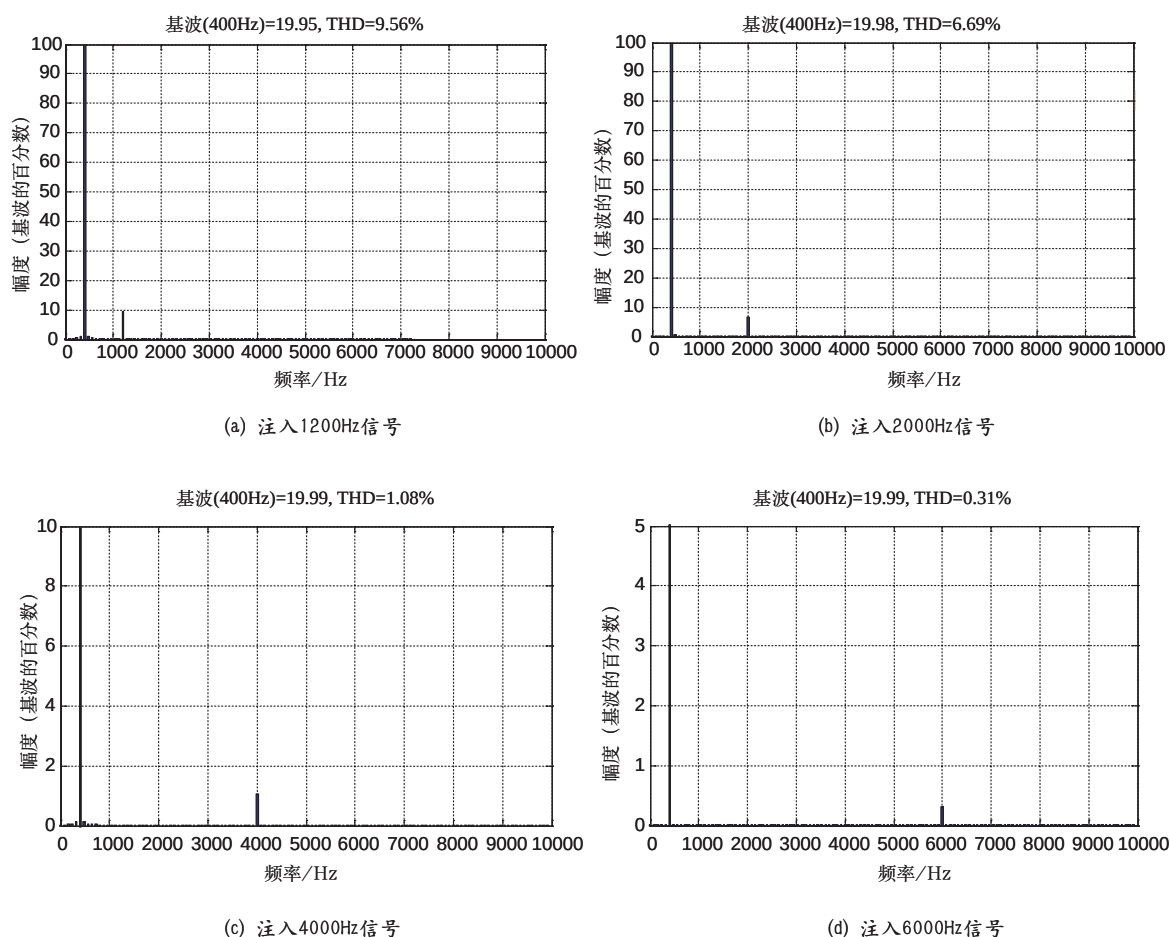


图7 注入高频干扰信号后的FFT结果

Fig.7 FFT results after injection high frequency interference signal

初相角为 0° 。在GJB181A-2003中规定了电压畸变系数最大为5%。这里设高频干扰信号的峰值为1V,初相角也为 0° 。使用SIMULINK中powergui模块提供的FFT分析工具对输出信号的频谱进行分析,结果如图7所示。

由图7可见,对于通带内1200Hz的信号衰减幅度很小;对于截止频率处2000Hz的干扰信号衰减约-3dB;对于4000Hz的干扰信号,滤波器具有很强的抑制能力;而对于6000Hz的干扰信号则被大幅滤除。

6 结束语

设计了适用于飞机交流电源测频电路的有源低通滤波器,选择一组参数并经过仿真测试验证了滤波器的有效性。该滤波器的结构具有低通特性,其性能由所实现的转移函数决定。通过设计和选择合适的参数,实现满足不同指标要求的低通转移函数,该滤波器也可被应用于包括变频交流电源

在内的其他低频交流信号电路中,具有一定的工程意义和推广价值。

AST

参考文献

- [1] 杨卫朋.新型馈线终端单元的设计与实现[D]. 西安:西安交通大学,2006.
YANG Weipeng.Design and Implementation of a New Type of Feeder Terminal Unit[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [2] 邱关源,罗先觉.现代电路理论[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
QIU Guanyuan,LUO Xianjue. Modern Circuit Theory[M]. Beijing:Higher Education Press,2001. (in Chinese)
- [3] 王晶,翁国庆,张有兵.电力系统的MATLAB/SIMULINK仿真与应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.

WANG Jin, WENG Guoqing, ZHANG Youbin. MATLAB/
SIMULINK Application and Simulation of Power System[M].
Xi'an: Xidian University Press, 2008. (in Chinese)

Tel: 029-86832317
E-mail: sutuaniu@163.com

张勇(1982—) 男, 工程师, 硕士。主要研究方向: 飞机电气系统设计。

作者简介

杨卫朋(1980—) 男, 工程师, 硕士。主要研究方向: 飞机电气系统设计与分析。

何博(1987—) 男, 助理工程师, 硕士。主要研究方向: 飞机电气系统仿真。

Design and Simulation of Frequency Measurement Circuit Low Pass Filter for Aircraft AC Power System

YANG Weipeng*, ZHANG Yong, HE Bo

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: Analysis is carried out on frequency measurement outcome leaping phenomenon during aircraft electrical power system ground test. Fault reason is found out and relative circuit is located. A type of active Low-Pass Filter (LPF) is designed to solve the problem. Characteristics of the LPF are depicted; model of the LPF is constructed with SIMULINK. Simulation verification is performed, and results show the LPF proposed herein is effective.

Key Words: AC power source; low-pass filter; frequency measurement; simulation