文章编号:1674-7070(2015)02-0137-05

孟瑞丽[1] 宋安[1] 张宏群[1] 尤天羽[1] 刘恒[1]

一种数字频率特性测试仪的设计

摘要

设计了一种基于正交调制原理的数字频率特性测试仪,系统用稳态响应法测量电路的频率特性.单片机作为主控芯片,完成系统的总体控制及数字信号处理;使用集成的直接数字频率合成芯片输出全频率范围内的正弦波.系统对待测电路的输入信号及其输出响应采样,经数字信号处理后,获得电路的幅频特性和相频特性.设计的测试仪测某RLC网络,中心频率的相对误差小于0.2%,有载品质因数相对误差小于1.25%,最大电压增益大于-1 dB.频率特性测试仪输入输出阻抗均为50 Ω,幅频误差绝对值小于0.5 dB,相频误差绝对值小于3°,测试仪能满足微机械谐振传感器特征参数测试需求.

关键词

直接数字频率合成(DDS);正交;幅频曲线;相频曲线

中图分类号 TN911.23

文献标志码 A

0 引言

基于硅微机械加工技术制造的,具有力学谐振频率的微谐振式传感器是一类非常重要的传感器.它通过检测其机械谐振器谐振频率的变化来实现外部物理量的测量,特点是尺寸小、制作成本低廉、功耗小,易与数字电路接口,具有广阔的应用前景.同时,微谐振式传感器的重复性、分辨率和稳定性非常优良,它适于测量多种物理量,如压力、真空度、角速度、加速度、流量、大气电场强度等[1].微机械谐振式传感器的品质因数和谐振频率的确定可以为后续的测控电路参数的选定提供重要依据[2-3],而微机械谐振式传感器又可以等效为一个RLC串联网络[4-5],通过扫频测试可以获得品质因数和谐振频率.目前,谐振频率和品质因数的测试主要采用电学和光学两种测试方法,光学测试中需要利用显微镜和计算机视觉辅助仪器,电学测试一般采用动态信号分析仪器,通过频率扫描来测定幅频和相频曲线,进而确定品质因数和谐振频率.由于实验经费的限制,本文介绍了一种基于正交调制原理的数字频率特性测试仪设计,价格低廉、操作简单.设计研制的频率特性分析仪通过测试某RLC网络,获得了较好的精度,能够应用于微机械谐振传感器品质因数和谐振频率特征参数的测量.

1 基于正交的频率特性仪设计原理

设计的一种数字频率特性测试仪由正交信号源采用直接数字频率合成(DDS)芯片AD9854、自动增益控制芯片AD603、模拟乘法器AD835、有源二阶低通滤波器(LPF)、主控芯片MSP430F149单片机、晶体管显示屏(TFT)矩阵按键等组成.

其中主控芯片MSP430F149控制AD9854产生两路正交正余弦电压信号,产生的信号频率和变换方式由单片机写入AD9854储存器的控制字来实现.产生的I、Q两路正交信号经过自动增益放大,其中放大后的I路电压信号一支路通过被测量的RLC(电阻-电感-电容)网络,RLC网络出来的信号同时进入I、Q两路的模拟乘法器,两路模拟乘法器将自动增益放大器出来的信号与网络出来的信号混频,前向信号通道示意如图1所示.正交信号指相位相差90°的两路信号,由正交信号源直接产生的两路正交信号:$I=A\cos(\omega t)$,$Q=A\sin(\omega t)$,其中,A是信号的电压幅值,ω是信号的角频率,受单片机控制.经自动增益控制后,实现稳幅输出及电压放大,其中一路经被测网络后产生电压信号:

收稿日期 2014-02-15

资助项目 江苏省自然科学基金(BK20131001);江苏省高校自然科学研究基金(13KJB510017);制造过程测试技术-省部共建教育部重点实验室开放基金(14ZXZK02)

作者简介

孟瑞丽,女,硕士生,主要研究微机械谐振传感器设计及测试.ghost80boy@163.com

张宏群(通信作者),女,副教授,硕士生导师,研究方向为通用和专用自动测试系统、虚拟仪器的开发设计和应用,数字化通用电子测量仪器系统及高性能测试仪系列产品的开发设计.001360@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 电子与信息工程学院,南京,210044

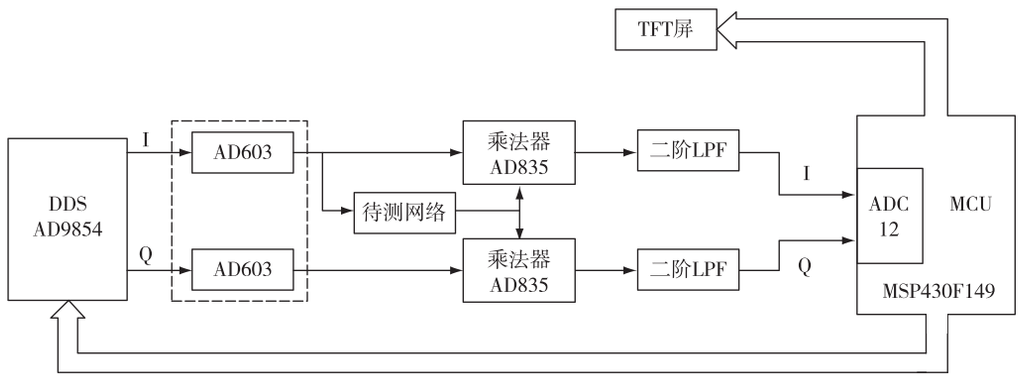


图 1　一种数字频率特性测试仪原理

Fig. 1　Schematic diagram for a digital frequency characteristic analyzer

$$U_0 = B\cos(\omega t + \theta), \tag{1}$$

其中,B 是经过被测网络后的电压幅值,θ 是产生的相移,B 和 θ 的大小与 ω 及被测网络参数有关.经过两路模拟乘法器后,I、Q 两路输出电压为

$$I_1 = \frac{AB}{2} \times [\cos(2\omega t + \theta) + \cos(\theta)], \tag{2}$$

$$U_1 = \frac{AB}{2} \times [\sin(2\omega t + \theta) - \sin(\theta)]. \tag{3}$$

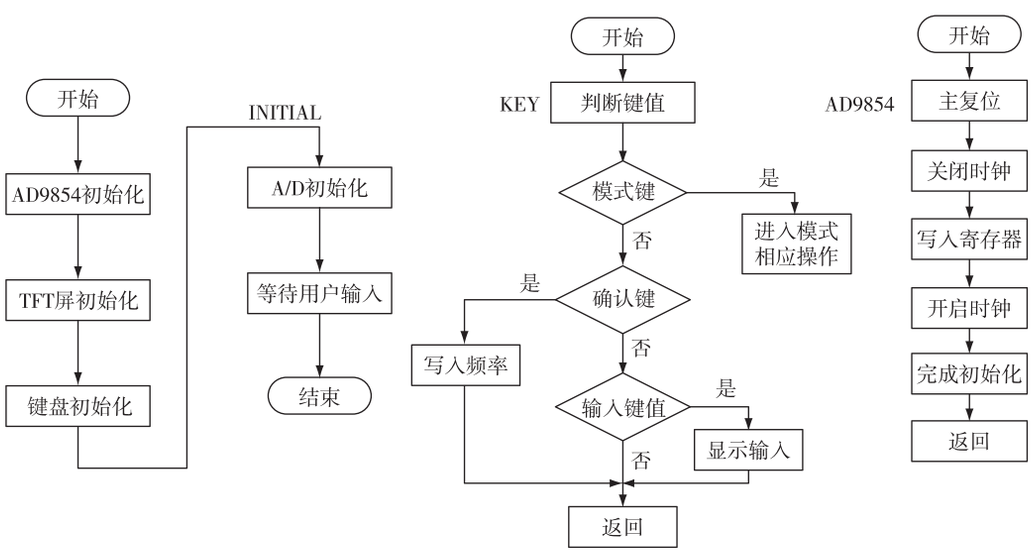
I_1、U_1 是模拟乘法器混频后的输出,两路信号分别经过二阶低通滤波和放大后将高频成分滤掉,得到式(2)和式(3)中的直流电压 I_2、U_2,I_2 和 U_2 的大小与低通滤波器的性能有关,但 I_2 和 U_2 的比例关系不变.直流分量电压 I_2 和 U_2 分别被单片机 MSP430F149 的两路 12 位 AD 转换器进行转换,最终可得到幅度 H 和相位 ϕ 在不同频率下的关系[6]:

$$H = \alpha \cdot \sqrt{I_2^2 + U_2^2}, \tag{4}$$

$$\phi = -\arctan\left(\frac{U_2}{I_2}\right). \tag{5}$$

式(4)中,α 是电压变换的系数,与滤波器、放大电路和被测网络的参数有关,但不影响系统对被测网络的中心频率和相位的测量.幅度 H 和相位 ϕ 在不同频率 ω 下具有不同的数值[7-8].通过 TFT 屏绘制幅频和相频曲线就可以得到被测网络的中心频率和品质因数.图 1 中限于篇幅,未给出用于模式切换的矩阵按键.

整个系统软件流程如图 2 所示,包括系统初始化流程、按键工作模式流程及关键信号源 DDS 初始化流程.系统上电启动后,首先进行一系列初始化,



a. 系统初始化　　b. 按键工作模式　　c. DDS初始化

图 2　一种数字频率特性测试仪软件流程

Fig. 2　Software process for a digital frequency characteristic analyzer

包括 AD9854 的初始化、TFT 屏初始化、键盘初始化、MSP430F149 内部的 AD 转换初始化,初始化完成后等待键盘的按键,确定下一步的工作模式.当有按键按下后,通过扫描键盘来判断按键性质,当确定是模式键后,进入相应的模式操作.当确定是不是模式键后,再进行判断,是确认键后,写入 DDS 产生的频率值,当是输入键后,确定相应的输入键值并显示测量信息,未输入键值就返回等待.

整个系统中的关键芯片 AD9854 的初始化非常重要,它包括以下控制过程:先主复位,等待一段时间后关闭时钟,然后就对寄存器进行写入操作,确定产生频率的一些参数,接着开启芯片时钟,等待接收命令输出.

2 数字频率特性测试仪硬件设计及测试

设计的数字频率特性测试仪实物如图 3 所示.通过变压器和电源稳压模块给系统其他模块供电.图 3 中红色区域的背面为待测量的 RLC 网络.本设计通过串口 SPI 控制 AD9854,初始化时改变其 32 位的控制寄存器,实现 I 和 Q 两路信号的正交输出,通过改变其相位和频率寄存器内容,实现 1 MHz 到 40 MHz 正弦波的输出;使用 MSP430F149 内部 12 位 ADC 采样两路直流输出,内部完成相位与增益的计算.扫频的功能由单片机内部的定时器完成,可以完成精确的定时,有助于稳定相位幅度参数的测量.

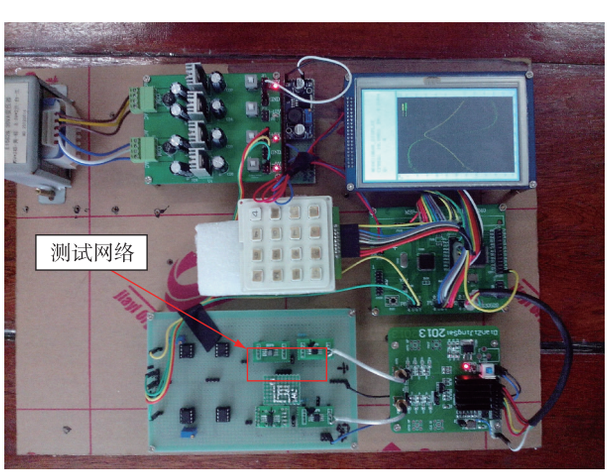
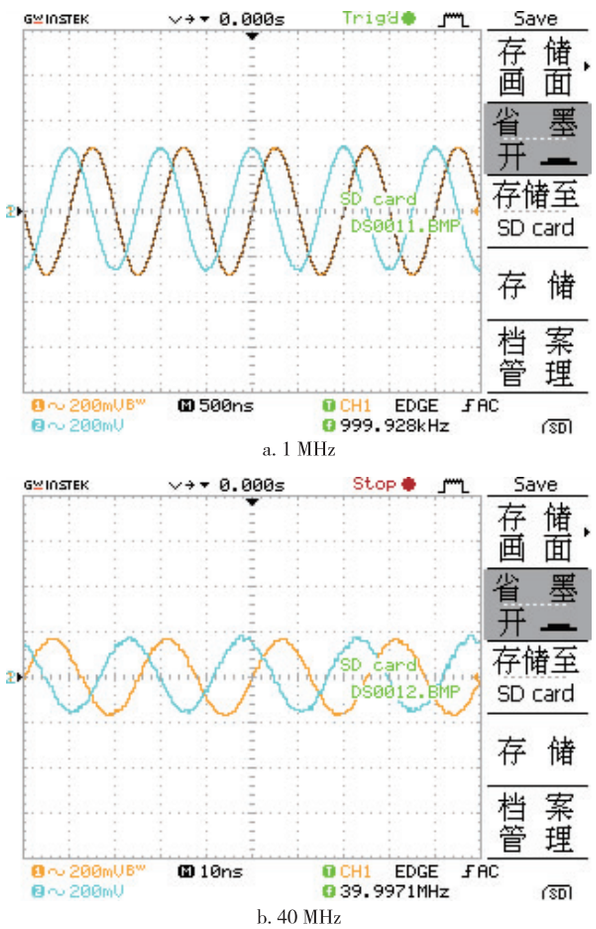


图 3 一种数字频率特性测试仪实物

Fig. 3 Picture of a digital frequency characteristic analyzer

在扫频测量模式下,AD9854 实现 I 和 Q 两路信号的正交输出如图 4 和图 5 所示.图 4 中两通道的信号频率为 1 MHz,图 5 中两通道的信号频率为 40 MHz,无论是图 4a 还是图 4b,两路信号的幅度大小完全一致,相位均相差 90°,满足正交的要求.



a. 1 MHz

b. 40 MHz

图 4 DDS 扫频信号对应的两路正交波形

Fig. 4 Two orthogonal output waves for DDS with frequency signal of 1 MHz and 40 MHz

根据式(2)和式(3),模拟乘法器出来的应该是直流和 2 倍频电压信号.由于自动增益控制芯片输出含有直流成分,本设计没有进行隔直处理,图 5 为中间一路模拟乘法器的输出,波形中有直流有效信号,有 2 倍频信号,还有 1 倍频信号,跟理论分析相一致.后续二阶低通滤波器进行滤波和放大,得到的直流电压信号供单片机内部的 AD 采样.

图 6 为对应的 RLC 网络参数测试仪测得某 RLC 网络的幅频和相频曲线.由于测试网络的中心频率为 20 MHz,所以频率扫描的范围为 1~40 MHz.图 6 测试得到的幅频曲线关于中心频率点左右对称,相频曲线关于中心水平线上下对称,曲线特性与理论分析是一致的,验证了测试结果的正确性.

对待测网络的性能测试数据如表 1 所示.

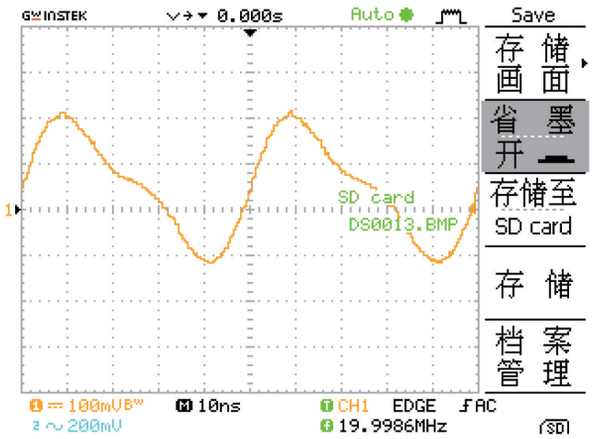


图 5　Q 通道的模拟乘法器输出波形(20 MHz)

Fig. 5　Output wave from multiplier for DDS with 20 MHz

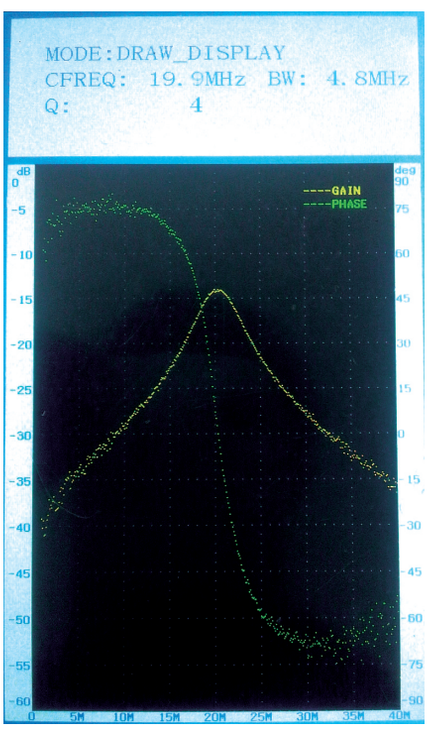


图 6　测试仪测得的幅频和相频特性曲线

Fig. 6　Amplitude and frequency curves measured by the characteristic analyzer

表 1　频率特性测试仪测量某网络结果

Table 1　Frequency characteristics of a test network measured by the proposed analyzer

通频带中心频率/MHz	中心频率误差/%	品质因数	品质因数误差/%	有载最大电压增益/dB
20.4	0.2	4.05	1.25	−0.7

由表 1 可知,测试仪对被测网络通带中心频率测试相对误差为 0.2%,有载品质因数相对误差为 1.25%,最大电压增益大于−1 dB.

对频率特性测试仪的性能检测数据如表 2 所示.由表 2 可知,频率特性测试仪输入输出阻抗均为 50 Ω,幅频测量误差绝对值小于 0.5 dB,相频测量误差绝对值小于 3°.

表 2　特性测试仪测量误差

Table 2　Measurement error of the frequency characteristic analyzer

频率/MHz	输入阻抗/Ω	输出阻抗/Ω	理论电压增益/dB	测量电压增益/dB	理论相位/(°)	测量相位/(°)
1			−31.5	−31.8	65.0	67.0
10			−19.4	−19.6	75.0	76.8
20	50	50	−4.1	−4.2	3.3	6.2
30			−17.7	−17.6	−67.3	−70.0
40			−25.3	−25.0	−81.2	−79.2

3　结论

本文针对项目中需求的微机械谐振传感器特征参数测量仪器的高费用问题,利用单片机和低值外围 DDS 芯片及其他元器件,设计了一种数字频率特性测试仪,并将调试成功的测试仪用于某 RLC 网络的测试,测试结果表明设计的测试仪测量某网络中心频率的相对误差为 0.2%,有载品质因数的相对误差为 1.25%,最大电压增益大于−1 dB.频率特性测试仪输入输出阻抗均为 50 Ω,幅频测量误差绝对值小于 0.5 dB,相频测量误差绝对值小于 3°.该测试仪器能够应用于微机械谐振传感器的谐振频率和品质因数的测量.

参考文献

References

[1] 刘志远,姜晶,赵佳龙 等.小型振动电容式静电传感器的设计[J].仪表技术与传感器,2011(11):13-15
LIU Zhiyuan,JIANG Jing,ZHAO Jialong,et al.Design of mini-electrostatic-sensor based on vibrating capacitance [J].Instrument Technique and Sensor,2011(11):13-15

[2] Bechtold T, Rudnyi E B, Korvink J G. Automatic generation of compact electro-thermal models for semiconductor devices [J]. IEICE Transactions on Electronics,2003,3:459-465

[3] 章绍东,林谢昭.微结构器件宏模型的建模方法[J].机电工程,2007,24(1):71-73
ZHANG Shaodong, LIN Xiezhao. Compact modelling methods for micro-structure device[J].Mechanical & Electrical Engineering magazine,2007,24(1):71-73

[4] 李俊,李晓莹,吕湘连,等.梳齿谐振器宏模型的系统

级应用[J].传感技术学报,2006,19(5):1340-1343
LI Jun,LI Xiaoying,LÜ Xianglian.The system lever application of comb resonator macromodel [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19 (5): 1340-1343
[5] 闻飞纳,李伟华,戎华.梳状谐振器的大信号等效电路宏模型[J].半导体学报,2004,25(2):185-189
WEN Feina,LI Weihua,RONG Hua.Large-signal macro model for equivalent circuits representation of comb resonator[J].Chinese Journal of Semiconductors,2004,25(2):185-189
[6] 叶朝锋,崔爱芳,袁燕岭 等.数字式电路系统频率特性分析仪的研制[J].清华大学学报:自然科学版,2011,51(12):1792-1795
YE Chaofeng,CUI Aifang,YUAN Yanling,et al.Research of a digital circuit system frequency characteristics analyzer[J].Journal of Tsinghua University:Sci & Tech,2011,51(12):1792-1795
[7] 李高斌.基于 ARM 的频率特性分析仪的设计[D].武汉:武汉科技大学信息科学与工程学院,2011
LI Gaobin. The design of frequency response analyzer based on ARM [D]. Wuhan: College of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology,2011
[8] 赵柏树,操长茂.数字式频率特性测试仪的设计[J].电子技术应用,2001(1):38-40
ZHAO Boshu,CAO Changmao.The design of a digital frequency characteristics analyzer[J].Application of Electronic Technology,2001(1):38-40

Design of a digital frequency characteristic analyzer

MENG Ruili[1] SONG An[1] ZHANG Hongqun[1] YOU Tianyu[1] LIU Heng[1]
1 School of Electronic & Information Engineering,Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

Abstract A digital frequency characteristic analyzer based on orthogonal modulation principle is developed using steady-state response measurement method.The frequency response analyzer consists of Direct Digital frequency Synthesis(DDS),analog multiplier,low pass filter,and low power consumption MCU.The MCU is employed as main control unit to carry out overall control and digital signal processing.The sine wave over the full frequency range is output through the integrated DDS chip.The analyzer system samples and digitalizes the input signal and output response,hence the amplitude and phase frequency characteristics are obtained.An RLC network is chosen to test the frequency characteristic analyzer.Measurement results show that the center frequency error is not more than 0.2%, the absolute value of quality factor error is less than 1.25%,and the maximum voltage gain is larger than −1 dB. Both the input and output impedance of the frequency characteristic analyzer are 50 Ω,and the absolute value of measurement errors are less than 0.5dB and 3 ° for amplitude frequency and phase frequency,respectively.The analyzer is suitable for characteristic parameter measurement of micromechanical resonant sensor.

Key words Direct Digital frequency Synthesis(DDS);orthogonal;amplitude frequency curve;phase frequency curve