



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103512592 A

(43) 申请公布日 2014. 01. 15

(21) 申请号 201310449935. 3

(22) 申请日 2013. 09. 27

(71) 申请人 中国科学院电子学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路 19 号

(72) 发明人 王军波 鲍凯凯 陈德勇 史强 陈健

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021

代理人 宋焰琴

(51) Int. Cl.

G01D 5/243 (2006. 01)

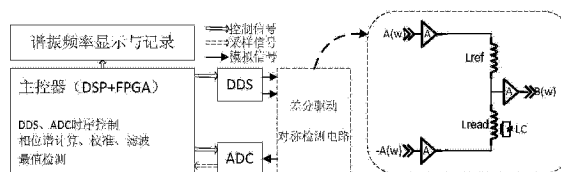
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

无线无源 LC 谐振传感器检测电路及相应的信息获取方法

(57) 摘要

本发明公开了一种无线无源 LC 谐振传感器信息检测电路,该电路包括:主控制器、直接数字频率合成器、高速模数转换器和差分驱动对称检测电路,主控制器控制信号源输出扫频信号,经过差分驱动对称检测电路后由主控制器控制采样,主控制器通过 DFT 计算出网络的相位谱,最终主控制器完成相位谱的校准和谐振频率的检测。本发明还公开了一种无线无源 LC 谐振传感器信息获取方法,该方法中,首先获取无传感器时系统本身的相位谱,通过与系统本身相位谱相减校准每次获取的相位谱,由校准后的相位谱滤波后检测出 LC 谐振传感器的谐振峰频率。本发明有效提高了检测的灵敏度,消除了系统和读取线圈本身相位谱的影响,同时提高了检测的稳定性和系统的便携性。



1. 一种无线无源 LC 谐振传感器的信息检测电路,其特征在于,该电路包括:主控制器、直接数字频率合成器 DDS、高速模数转换器 ADC 和差分驱动对称检测电路,其中:

所述 DDS 与所述主控制器和差分驱动对称检测电路连接,用于接收所述主控制器的控制信号并产生由所述控制信号决定的扫频信号,所述 DDS 产生的扫频信号输出至所述差分驱动对称检测电路;

所述差分驱动对称检测电路与所述 DDS 和 ADC 连接,用于接收所述 DDS 输出的扫频信号,提取并放大其读取线圈阻抗的相位变化,并将相位变化反馈信号输出至所述 ADC;

所述 ADC 与所述差分驱动对称检测电路和所述主控制器连接,用于对于所述差分驱动对称检测电路输出的相位变化反馈信号进行模数转换处理,并将处理后得到的反馈信号输出至所述主控制器;

所述主控制器与所述 DDS、高速模数转换器 ADC 连接,用于对所述 DDS 和 ADC 进行控制并对接收到的信号进行处理以确定当前 LC 谐振传感器的谐振峰频率。

2. 根据权利要求 1 所述的电路,其特征在于,所述扫频信号为两路差分信号。

3. 根据权利要求 1 所述的电路,其特征在于,所述差分驱动对称检测电路采用差分驱动对称检测网络拓扑结构。

4. 根据权利要求 1 所述的电路,其特征在于,所述差分驱动对称检测电路包括参考电感 L_{ref} 、读取线圈 L_{read} 、第一差分信号放大电路 A1、第二差分信号放大电路 A2、输出信号放大电路 A3,其中:

所述第一差分信号放大电路 A1、第二差分信号放大电路 A2 的输入端分别连接由所述 DDS 输出的两路扫频信号 $A(W)$ 、 $-A(W)$,其输出端分别连接所述参考电感 L_{ref} 、读取线圈 L_{read} 的一端;

所述参考电感 L_{ref} 、读取线圈 L_{read} 的另一端相互连接,连接点作为所述输出信号放大电路 A3 的输入端,所述输出信号放大电路 A3 的输出端连接至所述 ADC 的输入端,以将输出信号 $B(W)$ 发送至所述 ADC。

5. 根据权利要求 1 所述的电路,其特征在于,所述主控制器包括数字信号处理器 DSP 和现场可编程器件 FPGA,其中:

所述 FPGA 通过控制信号对所述 DDS 和 ADC 分别进行控制,以实现扫频信号和反馈信号的同步采样;

所述 DSP 基于所述 ADC 输出的相位变化反馈信号确定当前 LC 谐振传感器的谐振峰频率。

6. 根据权利要求 5 所述的电路,其特征在于,所述 DSP 确定当前 LC 谐振传感器的谐振峰频率时,首先基于所述 ADC 输出的相位变化反馈信号通过 DFT 算法计算得到所述差分驱动对称检测电路的相位谱;然后将计算得到的相位谱与无 LC 谐振传感器时的系统相位谱相减实现相位谱的校准;然后采用 FIR 滤波器设计的数字序列与校准后的相位谱卷积完成数字滤波;最后通过峰值检测算法查找滤波后的相位谱中的最值来确定当前 LC 谐振传感器的谐振峰频率。

7. 根据权利要求 1 所述的电路,其特征在于,还包括显示器,所述显示器与所述主控制器连接,用于接收所述主控制器的控制信号来显示相关数据。

8. 根据权利要求 7 所述的电路,其特征在于,所述数据包括所述主控制器的运行状态、

当前 LC 谐振传感器的谐振频率以及 LC 谐振传感器的谐振频率变化曲线。

9. 一种无线无源 LC 谐振传感器的信息获取方法,其特征在于,该方法包括:

步骤 1,主控制器控制直接数字频率合成器 DDS 完成一次扫频输出,差分驱动对称检测电路提取并放大其读取线圈阻抗的相位变化,所述主控制器控制高速模数转换器 ADC 对相位变化反馈信号采样,并读取经过 ADC 处理的相位变化反馈信号;

步骤 2,主控制器中的 DSP 根据所述步骤 1 处理得到的相位变化反馈信号根据 DFT 算法得到本次扫频的相位谱;

步骤 3,利用所述步骤 2 得到的相位谱对系统相位谱进行更新;

步骤 4,将待检测的 LC 谐振传感器放置于差分驱动对称检测电路中的读取线圈内,并重复所述步骤 1-2;

步骤 5,利用所述步骤 4 得到的相位谱与所述步骤 3 得到的系统相位谱进行相位谱校准;

步骤 6,对于所述步骤 5 校准后的相位谱进行滤波;

步骤 7,基于滤波后的相位谱,采用峰值检测算法得到所述 LC 谐振传感器的谐振峰频率。

10. 根据权利要求 9 所述的方法,其特征在于,所述步骤 5 中的相位谱校准采用所述步骤 4 得到的相位谱与所述步骤 3 得到的系统相位谱进行相减的方式。

无线无源 LC 谐振传感器检测电路及相应的信息获取方法

技术领域

[0001] 本发明涉及传感器检测领域,尤其涉及一种无线无源 LC 谐振传感器检测电路及相应的信息获取方法。

背景技术

[0002] 无线无源 LC 谐振传感器是由读取线圈和电感、电容谐振回路组成的传感器系统,图 1 (a)是现有技术中常用的无线无源 LC 谐振传感器的结构示意图,其中可变电感或可变电容作为敏感单元感受被测量(例如:压力、温度、化学量),谐振回路将被测量转换为谐振回路的谐振频率;图 1 (b)是所述无线无源 LC 谐振传感器的简化模型,其中读取线圈获取谐振回路谐振频率的原理是由于读取线圈与谐振回路中电感的耦合作用,导致读取线圈阻抗相位谱在谐振回路谐振频率处出现小的凹陷,凹陷的位置随着谐振频率的改变而移动,通过检测凹陷位置获取谐振回路的谐振频率,从而实现被测量的检测。

[0003] 由于无线无源 LC 谐振传感器的敏感单元采用无源器件——电感和电容组成,使其具有结构简单、易于小型化、制造成本较低的优点,同时由于无源特性使其特别适合于长期监测系统,例如人体内部压力监测、工业高温环境下的监测以及密闭系统的检测等。

[0004] 根据无线无源 LC 谐振传感器的工作原理,在实验中常常使用高精度的网络分析仪测量读取线圈的阻抗相位谱,从阻抗相位谱中检测出谐振频率的位置,但网络分析仪的体积大、设备笨重、成本高,由于网络分析仪存在上述体积、成本等方面的限制使其很难应用于实际检测中。Michel Nowak 等人提出使用闭环电路检测谐振频率,其闭环电路的方式为相位法,通过锁定读取线圈阻抗相位为零的位置实现闭环。由于读取线圈本身相位为 90° ,因此需要读取线圈与电感较强的耦合系数使相位凹陷变化大于 90° ,从而限制了该电路的检测距离。J. Coosemans 等人采用读取线圈构造出压控振荡器(VCO),通过电压控制 VCO 扫频输出,在该过程中,读取线圈两端的电压由于 LC 谐振传感器的存在而改变,电压变化最大的位置即 LC 谐振传感器的谐振频率,同样该检测电路需要较强的耦合系数,J. Coosemans 等人采用该电路仅实现了耦合距离为 7.5mm 的无线无源 LC 谐振传感器的检测。

[0005] 对于低耦合系数、远距离的无线无源 LC 谐振传感器系统,由于读取线圈相位变化小造成检测困难,本发明提出了一种无线无源 LC 谐振传感器的信息获取方法和检测电路,提高了无线无源 LC 谐振传感器检测的灵敏度和便捷性。

发明内容

[0006] 为了解决上述现有技术中存在的问题,本发明提出一种无线无源 LC 谐振传感器检测电路及相应的信息获取方法,目的在于提供在更低耦合系数情况下无线无源 LC 谐振传感器有效的信息检测电路和获取方法,所述信息检测电路和获取方法同样适用于高耦合系数下无线无源 LC 谐振传感器的检测。

[0007] 根据本发明的一方面,提出一种无线无源 LC 谐振传感器的信息检测电路,该电路

包括：主控制器、直接数字频率合成器 DDS、高速模数转换器 ADC、差分驱动对称检测电路其中：

[0008] 所述 DDS 与所述主控制器和差分驱动对称检测电路连接，用于接收所述主控制器的控制信号并产生由所述控制信号决定的扫频信号，所述 DDS 产生的扫频信号输出至所述差分驱动对称检测电路；

[0009] 所述差分驱动对称检测电路与所述 DDS 和 ADC 连接，用于接收所述 DDS 输出的扫频信号，提取并放大其读取线圈阻抗的相位变化，并将相位变化反馈信号输出至所述 ADC；

[0010] 所述 ADC 与所述差分驱动对称检测电路和所述主控制器连接，用于对于所述差分驱动对称检测电路输出的相位变化反馈信号进行模数转换处理，并将处理后得到的反馈信号输出至所述主控制器；

[0011] 所述主控制器与所述 DDS、高速模数转换器 ADC 连接，用于对所述 DDS 和 ADC 进行控制并对接收到的信号进行处理以确定当前 LC 谐振传感器的谐振峰频率。

[0012] 根据本发明的另一方面，提出一种无线无源 LC 谐振传感器的信息获取方法，该方法包括以下步骤：

[0013] 步骤 1，主控制器控制直接数字频率合成器 DDS 完成一次扫频输出，差分驱动对称检测电路提取并放大其读取线圈阻抗的相位变化，所述主控制器控制高速模数转换器 ADC 对相位变化反馈信号采样，并读取经过 ADC 处理的相位变化反馈信号；

[0014] 步骤 2，主控制器中的 DSP 根据所述步骤 1 处理得到的相位变化反馈信号根据 DFT 算法得到本次扫频的相位谱；

[0015] 步骤 3，利用所述步骤 2 得到的相位谱对系统相位谱进行更新；

[0016] 步骤 4，将待检测的 LC 谐振传感器放置于差分驱动对称检测电路中的读取线圈内，并重复所述步骤 1-2；

[0017] 步骤 5，利用所述步骤 4 得到的相位谱与所述步骤 3 得到的系统相位谱进行相位谱校准；

[0018] 步骤 6，对于所述步骤 5 校准后的相位谱进行滤波；

[0019] 步骤 7，基于滤波后的相位谱，采用峰值检测算法得到所述 LC 谐振传感器的谐振峰频率。

[0020] 本发明所公开的上述一种无线无源 LC 谐振传感器的信息获取方法和检测电路具有以下优点：

[0021] a、差分驱动对称检测网络具有放大读取线圈阻抗的相位变化的功能，有效提高了检测的灵敏度；

[0022] b、系统相位谱的校准消除了系统和读取线圈本身相位谱的影响；

[0023] c、有限长单位冲激响应(FIR)数字滤波器消除相位谱中的噪声，提高了检测的稳定性；

[0024] d、DSP 和 FPGA 实现的嵌入式系统提高了系统的便携性。

附图说明

[0025] 图 1 是现有技术中的无线无源 LC 谐振传感器的结构示意图；

[0026] 图 2 是本发明提出的无线无源 LC 谐振传感器检测电路的结构示意图；

[0027] 图 3 是本发明所采用的差分驱动对称检测电路网络拓扑结构图；

[0028] 图 4 是本发明提出的无线无源 LC 谐振传感器信息获取方法流程图；

[0029] 图 5 是本发明的扫频相位谱(包括 FIR 滤波前与滤波后)与 Agilent E5061B 网络分析仪的扫频相位谱对比图。

具体实施方式

[0030] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白，以下结合具体实施例，并参照附图，对本发明进一步详细说明。

[0031] 本发明提出一种无线无源 LC 谐振传感器的信息获取方法和检测电路，目的在于提供在更低耦合系数情况下无线无源 LC 谐振传感器有效的信息获取方法和检测电路，所述信息获取方法和检测电路同样适用于高耦合系数下无线无源 LC 谐振传感器的检测。

[0032] 由无线无源 LC 谐振传感器的工作原理可知，可以通过测量读取线圈阻抗相位的变化来检测谐振峰的频率。因此，本发明使用差分驱动对称检测网络来实现读取线圈阻抗相位变化的放大。

[0033] 图 2 是本发明提出的无线无源 LC 谐振传感器检测电路的结构示意图，如图 2 所示，所述检测电路包括：主控制器、直接数字频率合成器(DDS)、高速模数转换器(ADC)、差分驱动对称检测电路以及显示器，其中：

[0034] 所述直接数字频率合成器(DDS)与所述主控制器和差分驱动对称检测电路连接，用于接收所述主控制器的控制信号并产生由所述控制信号决定的扫频信号，所述 DDS 产生的扫频信号输出至所述差分驱动对称检测电路，其中，所述扫频信号为两路差分信号，分别表示为 $A(\omega)$ 和 $-A(\omega)$ ，所述扫频信号的频率范围是 10kHz ~ 20MHz；

[0035] 所述差分驱动对称检测电路与所述直接数字频率合成器(DDS)和高速模数转换器(ADC)连接，用于接收所述直接数字频率合成器(DDS)输出的扫频信号，提取并放大其读取线圈 L_{read} 阻抗的相位变化，并将相位变化反馈信号输出至所述高速模数转换器(ADC)；

[0036] 所述差分驱动对称检测电路采用如图 3 所示的差分驱动对称检测网络拓扑结构，所述差分驱动对称检测网络是由参考电感与读取线圈组成的对称结构，由差分信号驱动，参考电感与读取线圈的连接点为检测网络的输出端，具体地，所述差分驱动对称检测电路进一步包括参考电感 L_{ref} 、读取线圈 L_{read} 、第一差分信号放大电路 A1、第二差分信号放大电路 A2、输出信号放大电路 A3，其中：

[0037] 所述第一差分信号放大电路 A1、第二差分信号放大电路 A2 的输入端分别连接由所述 DDS 输出的两路扫频信号 $A(\omega)$ 、 $-A(\omega)$ ，其输出端分别连接所述参考电感 L_{ref} 、读取线圈 L_{read} 的一端；所述参考电感 L_{ref} 、读取线圈 L_{read} 的另一端相互连接，连接点作为所述输出信号放大电路 A3 的输入端，所述输出信号放大电路 A3 的输出端连接至所述 ADC 的输入端，以将输出信号 $B(\omega)$ 发送至所述 ADC。

[0038] 在该结构中，当该网络的工作频率为 LC 谐振传感器的谐振频率时：参考电感 L_{ref} 的阻抗为 $Z_{ref}=R_{ref}+j\omega L_{ref}$ ，其中 $\omega L_{ref} \gg R_{ref}$ ， R_{ref} 为所述参考电感 L_{ref} 的寄生电阻， ω 为 LC 谐振传感器的谐振频率；读取线圈 L_{read} 中没有 LC 谐振传感器时，读取线圈 L_{read} 的阻抗为 $Z_{read}=R_{read}+j\omega L_{read}$ ，其中 $\omega L_{read} \gg R_{read}$ ， R_{read} 为所述读取线圈 L_{read} 的寄生电阻；读取线圈 L_{read} 中存在 LC 谐振传感器时，读取线圈 L_{read} 的阻抗为 $Z_{read}'=R_{read}+\Delta R+j\omega L_{read}$ ，其中 ΔR 为 LC

回路等效到读取线圈中的等效电阻。由于参考电感与读取线圈具有相似性,因此可以假设 $Z_{\text{ref}} = \alpha Z_{\text{read}}$, α 为参考电感与读取线圈的电感值比例, $0.4 < \alpha < 2.5$ 。

[0039] 所述差分驱动对称检测网络的系统函数为:

$$[0040] \quad F(w) = 2 \frac{Z_{\text{read}}}{Z_{\text{read}} + Z_{\text{ref}}} - 1 \quad (1)$$

[0041] 当 LC 谐振传感器加入读取线圈中后,该网络的相位差是:

$$[0042] \quad \Delta\theta(w) = \arctan\left(\frac{(1-\alpha)wL_{\text{read}}}{(1-\alpha)R_{\text{read}} + \Delta R}\right) - \arctan\left(\frac{(1+\alpha)wL_{\text{read}}}{(1+\alpha)R_{\text{read}} + \Delta R}\right) \quad (2)$$

[0043] 读取线圈自身的相位差为:

$$[0044] \quad \Delta\theta_0(w) = \arctan\left(\frac{wL_{\text{read}}}{R_{\text{read}} + \Delta R}\right) - \arctan\left(\frac{wL_{\text{read}}}{R_{\text{read}}}\right) \quad (3)$$

[0045] 当参考电感与读取线圈阻抗的比值 $\alpha \approx 1$ 时,存在以下关系:

[0046]

$$\arctan\left(\frac{(1-\alpha)wL_{\text{read}}}{(1-\alpha)R_{\text{read}} + \Delta R}\right) < \arctan\left(\frac{wL_{\text{read}}}{R_{\text{read}} + \Delta R}\right) < \arctan\left(\frac{(1+\alpha)wL_{\text{read}}}{(1+\alpha)R_{\text{read}} + \Delta R}\right) < \arctan\left(\frac{wL_{\text{read}}}{R_{\text{read}}}\right)$$

[0047] (4)

$$[0048] \quad \arctan\left(\frac{wL_{\text{read}}}{R_{\text{read}} + \Delta R}\right) \approx \arctan\left(\frac{(1+\alpha)wL_{\text{read}}}{(1+\alpha)R_{\text{read}} + \Delta R}\right) \approx \arctan\left(\frac{wL_{\text{read}}}{R_{\text{read}}}\right) \quad (5)$$

[0049] 根据公式(4)、(5)可得 $\Delta\theta(w) > \Delta\theta_0(w)$,这说明差分驱动对称检测网络的相位差大于读取线圈自身的相位差,此外采用数值分析方法验证了当所述检测网络对称性越高时,该系统相位差的放大倍数越高。

[0050] 所述高速模数转换器(ADC)与所述差分驱动对称检测电路和所述主控制器连接,用于对于所述差分驱动对称检测电路输出的相位变化反馈信号进行模数转换处理,并将处理后得到的反馈信号输出至所述主控制器;

[0051] 所述主控制器与所述直接数字频率合成器(DDS)、高速模数转换器(ADC)以及显示器连接,用于对所述 DDS 和 ADC 进行控制并对接收到的信号进行处理以确定当前 LC 谐振传感器的谐振峰频率,其进一步包括数字信号处理器(DSP)和现场可编程器件(FPGA),其中,所述 FPGA 通过控制信号对所述 DDS 和 ADC 分别进行控制,以实现扫频信号和反馈信号的同步采样;所述 DSP 基于所述 ADC 输出的相位变化反馈信号确定当前 LC 谐振传感器的谐振峰频率,具体为:首先所述 DSP 基于所述 ADC 输出的相位变化反馈信号通过 DFT 算法计算得到所述差分驱动对称检测电路的相位谱;然后将计算得到的相位谱与无 LC 谐振传感器时的系统相位谱相减实现相位谱的校准;然后采用 FIR 滤波器设计的数字序列与校准后的相位谱卷积完成数字滤波;最后通过峰值检测算法查找滤波后的相位谱中的最值来确定当前 LC 谐振传感器的谐振峰频率。

[0052] 所述显示器与所述主控制器连接,用于接收所述主控制器的控制信号来显示相关数据,比如所述主控制器的运行状态、当前 LC 谐振传感器的谐振频率以及 LC 谐振传感器的谐振频率变化曲线等。

[0053] 图 4 是本发明提出的无线无源 LC 谐振传感器信息获取方法的流程图,如图 4 所示,所述方法包括以下步骤:

[0054] 步骤 1,主控制器控制 DDS 完成一次扫频输出,差分驱动对称检测电路提取并放大其读取线圈 L_{read} 阻抗的相位变化,所述主控制器控制 ADC 对相位变化反馈信号采样,并读取经过 ADC 处理的相位变化反馈信号;

[0055] 步骤 2,主控制器中的 DSP 根据所述步骤 1 处理得到的相位变化反馈信号根据 DFT 算法得到本次扫频的相位谱;

[0056] 步骤 3,利用所述步骤 2 得到的相位谱对系统相位谱进行更新;

[0057] 步骤 4,将待检测的 LC 谐振传感器放置于差分驱动对称检测电路中的读取线圈内,并重复所述步骤 1-2;

[0058] 步骤 5,利用所述步骤 4 得到的相位谱与所述步骤 3 得到的系统相位谱进行相位谱校准,所述校准采用所述步骤 4 得到的相位谱与所述步骤 3 得到的系统相位谱进行相减的方式;

[0059] 步骤 6,对于所述步骤 5 校准后的相位谱进行滤波,以消除高频噪声的影响,在本发明一实施例中,采用 FIR 数字滤波器进行滤波;

[0060] 步骤 7,基于滤波后的相位谱,采用峰值检测算法得到所述 LC 谐振传感器的谐振峰频率,即所述 LC 谐振传感器的谐振峰的位置为滤波后的相位谱中最大值的位置。

[0061] 所述步骤 1-3 属于系统校准部分,所述步骤 4-7 属于传感器测量部分,系统校准的目的是获取无传感器时系统本身的相位谱,在对传感器进行测量时,所述信息获取方法每次获取的相位谱都使用系统本身的相位谱进行校准,校准后的相位谱采用 FIR 数字滤波器消除高频噪声,采用峰值检测算法查找出 LC 谐振传感器的谐振峰频率,从而实现读取传感信息的功能。

[0062] 本发明所公开的上述一种无线无源 LC 谐振传感器的信息获取方法和检测电路具有以下优点:

[0063] a、差分驱动对称检测网络具有放大读取线圈阻抗的相位变化的功能,有效提高了检测的灵敏度。

[0064] b、系统相位谱的校准消除了系统和读取线圈本身相位谱的影响。

[0065] c、有限长单位冲激响应(FIR)数字滤波器消除相位谱中的噪声,提高了检测的稳定性。

[0066] d、DSP 和 FPGA 实现的嵌入式系统提高了系统的便携性。

[0067] 图 5 是针对同一个无线无源胃压传感器,分别采用 Agilent E5061B 网络分析仪和所述信息获取方法与检测电路测得的校准后相位谱曲线,以及 FIR 滤波后相位谱曲线。由图中可以非常清晰地看出,采用所述信息获取方法与检测电路可以明显提高检测灵敏度,可有效地降低了相位谱中的噪声,提高检测的综合性能。

[0068] 以上所述的具体实施例,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

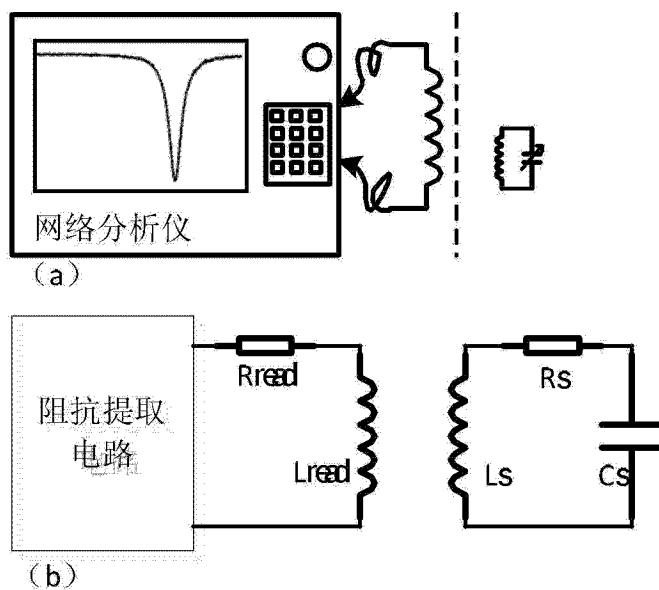


图 1

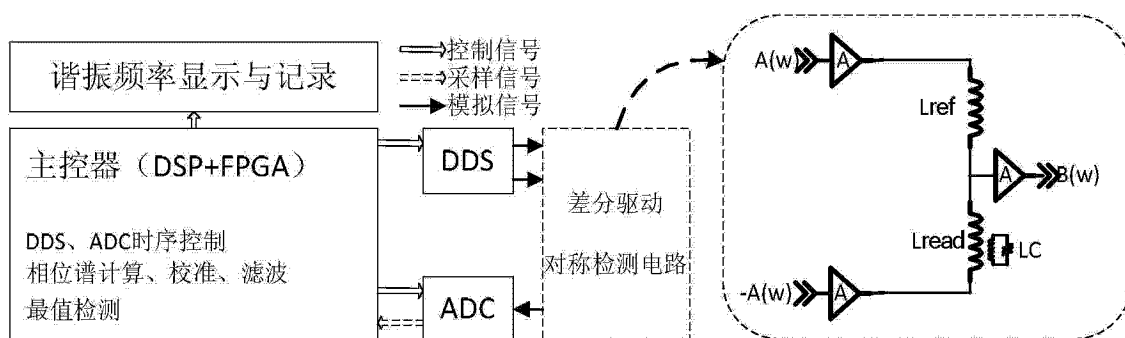


图 2

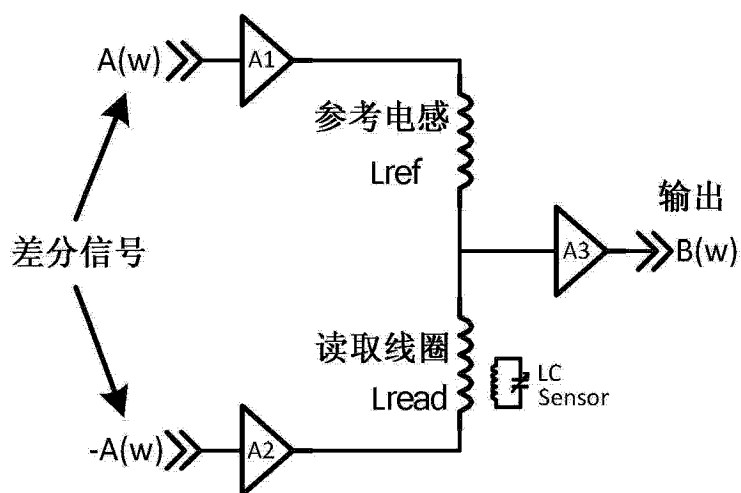


图 3

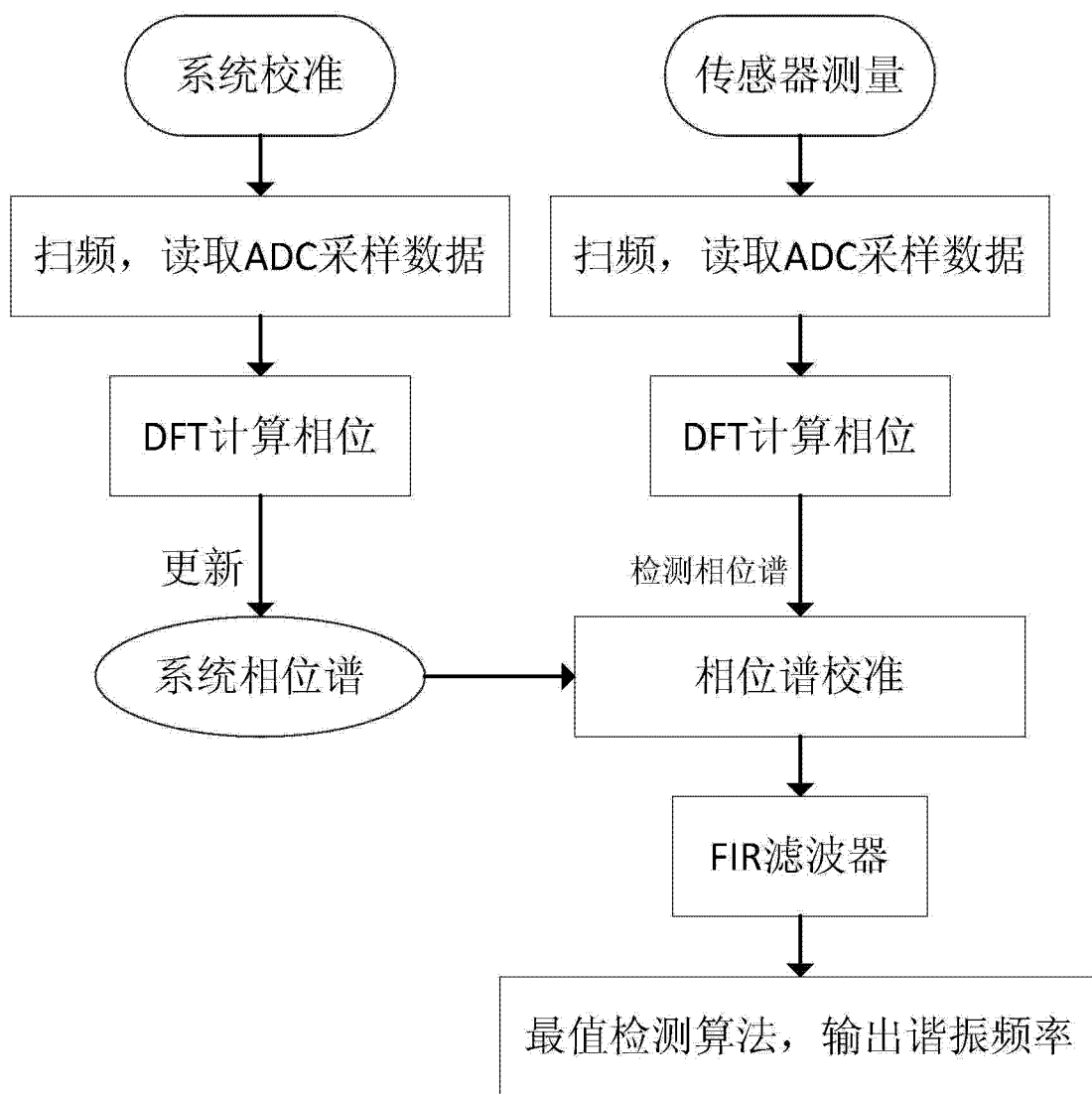


图 4

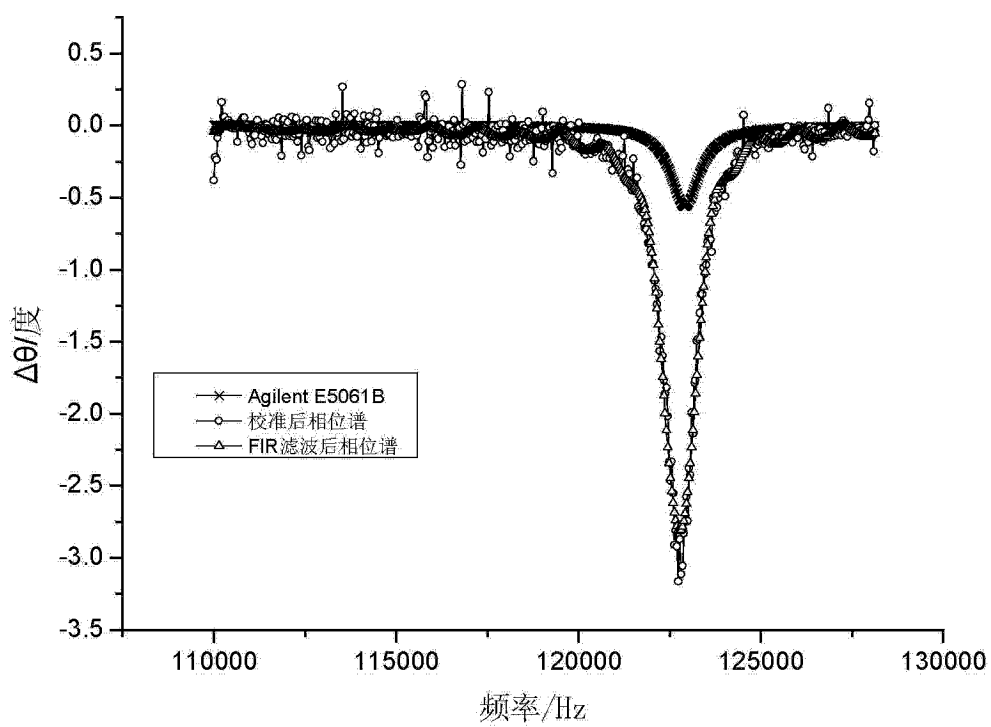


图 5