

一种无线振动传感器频响带宽提高方法

张浩¹, 陈朋²

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023;
2. 浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310023)

摘要: 高频响无线振动传感器是机械设备预测性维护领域不可或缺的信号采集设备, 目前机械设备监测应用中常用的无线振动传感器频率响应较低, 限制了其在机械设备预测性维护领域的应用; 为了进一步提高无线振动传感器频率响应带宽, 提出一种提高无线振动传感器频响范围的方法, 从结构设计、振动探头设计、信号调理链路设计和模数转换器设计 4 个方面对传统无线振动传感器进行了改进; 实验结果表明, 无线振动传感器带宽提高方法将无线振动传感器频率响应带宽提高了 7.96 dB; 在振动监测领域具有较强的实用性, 对智能传感器制造领域具有较好的指导意义。

关键词: 预测性维护; 无线传感器; 频率响应带宽; 振动监测; 谐振频率

Method for Improving Frequency Response Bandwidth of Wireless Vibration Sensor

Zhang Hao¹, ChenPeng²

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: High-frequency response wireless vibration sensors are indispensable signal acquisition equipment in the field of predictive maintenance of mechanical equipment. At present, wireless vibration sensors commonly used in mechanical equipment monitoring applications have a low frequency response, which limits their application in the field of mechanical equipment predictive maintenance. In order to further improve the frequency response bandwidth of the wireless vibration sensor, a method to improve the frequency response range of the wireless vibration sensor is proposed. The method is compared with the traditional four aspects: structure design, vibration probe circuit design, signal conditioning link design and analog-to-digital converter design. The wireless vibration sensor has been improved. The experimental results show that the wireless vibration sensor bandwidth improvement method increases the frequency response bandwidth of the wireless vibration sensor by 7.96 dB. It has strong practicability in the field of vibration monitoring and has guiding significance for the field of smart sensor manufacturing.

Keywords: predictive maintenance; wireless sensors; frequency response bandwidth; vibration monitoring; resonance frequency

0 引言

旋转机械设备广泛应用于石油、化工和电力产生等领域, 并发挥着至关重要的作用, 随着科学技术和工业技术的飞速发展, 机械设备结构和功能日益复杂, 发生故障的可能性也随之增加^[1]。一个较小的机械故障便可能造成设备损毁, 甚至是整个生产线的停机, 造成重大经济损失。为了减少机械故障造成的影响, 国内外科研院所对旋转机械设备的预测性维护展开研究^[2]。其中, 由于振动信号可以直观反应机械设备的各种状态, 振动分析已成为机械设备预测性维护的重要分析手段^[3]。然而, 较高转速旋转设备的早期故障信号往往以微小信号的形式反映在 4kHz 以上的较高频段^[4], 这对振动传感器的频率响应范围提出了更高的要求。

PCB、CTC、EMERSON 等公司在振动传感器研究方面起步较早, 生产种类丰富, 覆盖了工业设备常见的各个频段, 为工业界机械状态监测提供了重要工具^[5], 但上述公司的产品多为有线传感器, 均没有生产高频响范围的振动传感器。

无线振动传感器作为一种新型的基于无线传感网络 (WSN, wireless sensor networks) 的机械振动监测设备, 因体积小、成本低、便于安装等优势受到了用户的普遍青睐。然而, 无线振动传感器的内部结构复杂、体积难以控制, 频率响应带宽交窄 (很难超过 4 kHz), 只能用于简单的阈值判断等已经发生的故障分析^[5]。因此, 无线振动传感器频率响应带宽范围亟待提高, 以便应用于预测性维护场景。

目前, 无线振动监测领域主要集中于 1~2 kHz 等频段的应用。张琨等人开发了基于无线传输网络的振动传感器,

收稿日期:2020-12-09; 修回日期:2020-12-23。

作者简介:张浩(1992-),男,山东菏泽人,硕士,工程师,主要从事智能传感与数据采集硬件研究与设计方向的研究。

陈朋(1981-),男,浙江温州人,教授,博士生导师,主要从事嵌入式系统设计和模式识别方向的研究。

引用格式:张浩,陈朋.一种无线振动传感器频响带宽提高方法[J].计算机测量与控制,2021,29(6):260-265.

实现无线振动信号的采集和传输,但仍属于传统无线振动传感器的典型架构,其有效频率响应范围为 0~800 Hz,仅适用于低转速设备的故障分析^[6]。Khurram Shahzad 等人针对无线振动传感器计算速度问题提出了优化方案,使用 FP-GA 实现 50 kHz 的高频采样和实时处理,但没有考虑机械结构的影响,仅能在 2 kHz 以内的频率范围内分析^[7]。

综上所述,本文针对传统无线振动传感器频响范围低的缺点,提出一种提高无线振动传感器频响范围的方法,从结构设计、振动探头设计、信号调理链路设计和模数转换器设计 4 个方面对传统无线振动传感器进行了改进。通过实验验证该方法的有效性和可行性。

1 高频无线振动传感器总体设计

1.1 设计流程

本文提出的高频响无线振动传感器设计流程如图 1 所示,设计过程主要分为三个部分。

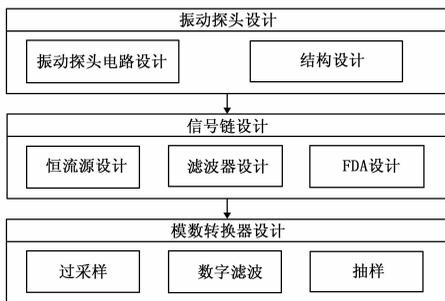


图 1 设计流程

第一部分:振动探头设计。振动探头是感知振动信号的敏感器件,其性能的优劣对采集数据的质量具有直接影响。传统振动传感器振动探头与传感器本体结构上是一个整体,导致体积难以控制,频响带宽难以提高。本设计采用振动探头与振动传感器本体分离的设计,结构上传感器探头通过软线与传感器本体相连,避免了传感器本体谐振噪声对传感器探头的影响。由于传感器探头单独封装所以可以做的很小,进一步提高了传感器探头的谐振频率。电路上,传感器探头采用机电系统(MEMS, micro-electro-mechanical system)芯片作为振动敏感元件,通过电源管理、运算放大等电路使其对外呈现集成电路型压电式传感器(IEPE, Integrated Electronic Piezoelectric)通用振动探头接口。

第二部分:信号链设计。振动信号为高频的交流信号,对噪声非常敏感,因此在信号调理链路设计过程中要重点考虑通频带的宽度、信噪比(SNR, signal to noise ratio)等参数。恒流源设计为振动探头提供供电的稳定恒流源信号,滤波器设计用于消除信号传输过程中引入的噪声,并配合模/数转换器(ADC, analog to digital converter)实现抗混叠(anti-aliasing filtering)。FAD 设计实现单端信号到差分信号的转变。

第三部分:模数转换器设计。使用 ADC 作为模拟信号

转换成数字信号的器件,A/D 转换将时间、幅值均连续的模拟信号转换为数字信号。为了确保 A/D 获取到能够正确反应振动信号的状态数据,要同时考虑 ADC 的转换精度和与前置抗混叠滤波器的配合程度,通过过采样、内部数字滤波和抽样获取高信噪比数据。

1.2 硬件架构设计

高频无线振动传感器的硬件架构如图 2 所示,传感器主要分为传感器探头和传感器主体两部分。为了减小体积、提高频率响应带宽,传感器探头单独封装,内部只包含传感器芯片和信号调理部分。传感器本体则主要负责总体控制、信号的调理、模数转换、数据传输等工作。

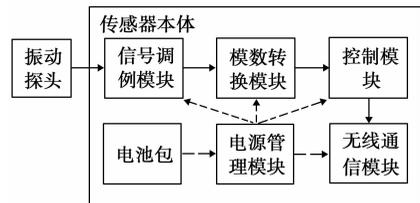


图 2 硬件架构图

2 振动探头设计

2.1 振动探头硬件设计

传统振动探头多采用压电晶体作为敏感元件^[9],使用“IEPE 接口”作为对外接口^[10],IEPE 加速度传感器采用恒流源供电。电流源将电流引入加速度传感器。加速度传感器内部的电路使它对外表现的像一个电阻。传感器的加速度和它对外表现出的电阻成正比,传感器的信号电压和加速度成正比。

但是压电晶体只对交变信号有响应,压电晶体对低频信号的响应质量较差^[11],信噪比较低,且带宽范围内非线性误差(NEL, non-linear error)较大。因此,本设计使用 MEMS 芯片作为敏感元件,很好的避免了低频信号采集时的失真现象,保证带宽范围内良好的线性度。为了能够与常用振动采集器匹配,本设计仍然采用 IEPE 接口作为振动探头电气接口。振动探头硬件架构图如图 3 所示,IEPE 接口采用恒流源供电,供电回路和信号回路公用同一个回路,方便采用同轴电缆连接,能够减少线缆数量,提高信噪比。电源管理部分可以将外部恒流源提供的电源转化成内部器件可用的电压范围,振动敏感元件采用 MEMS 振动芯片,相对于压电式振动传感器具有更好的低频响应性能和更低的非线性误差^[12],低通滤波器滤除高频干扰,防止高频噪声被放大器放大,从而提高信噪比。放大器提高信号幅值,减少信号在传输过程中噪声信号的影响,同时提高振动传感器的驱动能力,减少传感器输出电阻,以便于更好与采集回路进行阻抗匹配。

振动探头的接头如图 4 所示,本文采用将振动探头和传感器主体分离设计的方案,将敏感元件和部分信号调理电路放在一个较小的电路板上,可以减少振动探头的体积,从而提高振动探头的谐振频率。随着谐振频率的提高振动

探头的频率响应性能可以得到大幅提高。在电路板与外壳的固定方式设计中,本设计抛弃了传统的螺栓固定的方式,采用环氧树脂电子密封胶“灌封”的方式。

采用电子密封胶“灌封”有如下三个优点:

- 1) 可以减小螺丝占用,从而减小体积。
- 2) 环氧树脂硬度大,能够辅助振动传递,提高传感器设计一致性。
- 3) 环氧树脂灌封后对电路板形成保护膜,可以提高传感器 IP 等级,增强传感器在恶劣环境下的稳定性。

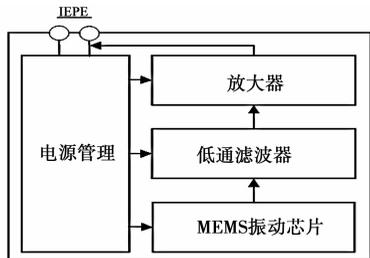


图 3 振动探头硬件架构图

2.2 振动探头结构设计

传动振动传感器设计中振动探头与传感器本体是一个整体,使用 Solidworks 建立传统传感器仿真模型,如图 4 所示。由于所有模块集中在一个壳体内,所以传感器无线振动传感器尺寸普遍较大,进而导致其共振频率较低(大约 2 kHz),因为 2 kHz 落在了振动监测有效带宽范围内,所以传统无线振动传感器的频率响应范围收到了极大的限制。其仿真结果如图 6 所示,其 2.5 kHz 在两个振动方向上存在谐振。

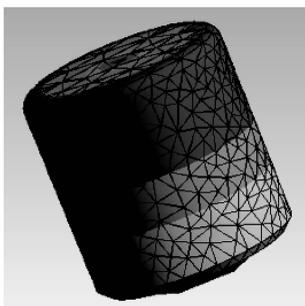


图 4 传统传感器模型

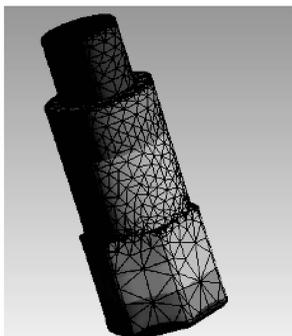


图 5 改进探头模型

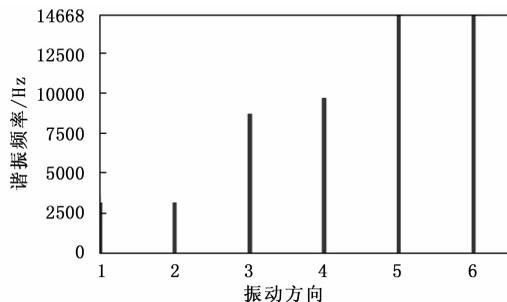


图 6 传统传感器结构仿真结果

为了提高无线振动传感器频率响应范围,本文采用振动探头与传感器主体分开封装的传感器优化模型(如图 7 所示),将敏感的振动探头单独封装,减小了传感器结构复杂度和体积。振动探头与传感器主体采用柔性电缆连接,从而减少了从传感器主体传递到振动探头的干扰信号。

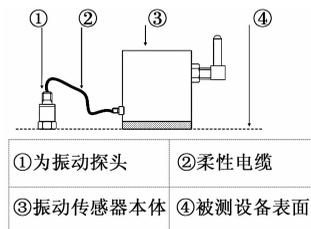


图 7 无线振动传感器优化模型

使用 Solidworks 对改进结构的传感器探头建立仿真模型如图 5 所示,使用 ANSYS 进行有限元分析,结果如图 8 所示,优化模型的谐振频率得到了明显提高,最低的一个方向的谐振频率也达到 5 kHz 以上。

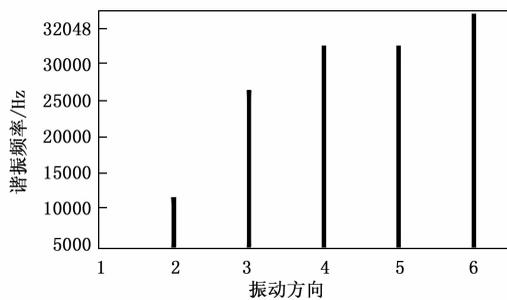


图 8 改进探头模型仿真结果

3 信号链设计

信号调理模块的主要功能是接收振动探头传入的模拟信号,进行预处理,使其能满足模数转换器的输入要求。如图 9 所示,信号调理链路主要有恒流源、偏置校准、抗混叠滤波、模数转换部分组成。

3.1 恒流源模块设计

传感器的最大带宽与激励电流成正比,与电缆电容成反比。为了能够满足 IEPE 传感器输出范围,恒流源必须能够提供足够高的电压范围^[13],标称的供电电压通常要大于 24 V。选择恒定电流水平时,必须考虑传感器的最大期望

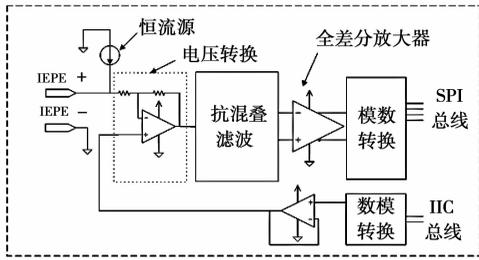


图 9 信号采集模块

输出带宽和电缆类型。需要设置的输出电流可以由公式 (1) 计算得出:

$$f_{\max}(\text{Hz}) = \frac{109 \times (I_c(\text{mA}) - 1\text{mA})}{2\pi \times C(\text{pF}) \times V(\text{V})} \quad (1)$$

式中, f_{\max} 是振动探头输出信号的最大频率 (Hz); 1 mA 是振动探头维持正常工作所需要的电流; C 是线缆上的寄生电容; V 是从振动探头上输出的最大峰值电压 (V)。

例如, 振动探头最大峰值电压是 10 V, 一段 3 m 的线缆, 线缆的寄生电容为 96.67 pF/m, 恒流源的输出设置为 2.5 mA, 此时的传感器带宽可以接收 82.3 kHz, 可以满足应用要求。

3.2 偏置校准模块设计

由于 IEPE 传感器输出的信号为带有直流偏置的信号, 直流偏置电压可以达到 13 V。因此需要通过偏移校正电路消除直流偏移。图 10 为使用一个集成运算放大器制作的偏置校准电路拓扑图。

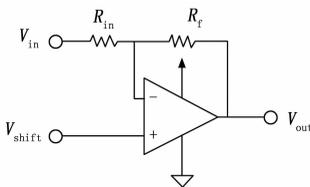


图 10 偏置校准电路拓扑图

偏置校准电路可以通过公式 (2) 计算。

$$V_{\text{shift}} = \frac{V_{\text{out}} + V_{\text{in}} \left(\frac{R_f}{R_{\text{in}}} \right)}{1 + \left(\frac{R_f}{R_{\text{in}}} \right)} \quad (2)$$

式中, V_{shift} 为通过 D/A 转换器产生的电压, 由 MCU 通过 IIC 总线控制; V_{in} 为振动探头输出电压。 R_{in} 、 R_f 为精密电阻。 V_{out} 为校准电路的输出电压。

3.3 滤波及全差分放大器设计

为了达到较高的频率响应带宽, 需要将抗混叠滤波器和截止频率设置的比振动探头的频响带宽高, 但考虑到抗混叠的效果^[14], 需要配合 ADC 采样率, 以满足奈奎斯特采样定理^[15]的要求, 在 1/2 采样率处有足够的阻带抑制。由于本设计采用 $\Sigma-\Delta$ 型 ADC, 有效采样率可以设置在 4.096 MHz, 使用如图 11 所示的二阶巴特沃斯低通滤波器^[16], 将抗混叠滤波器-3 dB 截止频率设置为 24 kHz, 此时在 4.096 MHz 处具有-151 dB 的衰减系数, 可以满足所

需要的信噪比, 如图 12 所示。

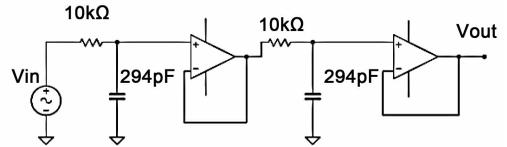


图 11 二阶有源低通滤波器

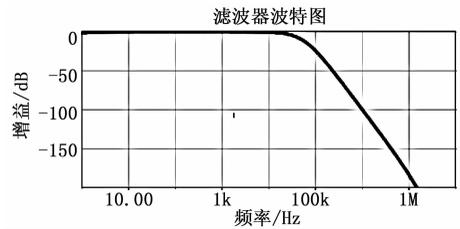


图 12 滤波器波特图

IEPE 信号是单端信号, 如果使用差分 ADC 采集则需要实现单端信号到差分信号的转换。传统方式都是采用平衡-不平衡器 (balun) 作为转换的器件^[17]。但是使用 balun 器件设计的电路具有占板面积大、不能 DC 去耦、损耗较大等缺点。本设计采用全差分放大器 (FDA, fully differential amplifier) 作为单端信号转差分信号的方案, 除了具有单端信号转差分信号的作用, FDA 还有如下优点: 1) 去除信号线上的共模干扰; 2) 为电路提供电压增益; 3) 提供 ADC 输入缓冲, 吸收 ADC 采样保持电路的“回踢”干扰能量。4) 使用 FDA 占板面积小, 适合紧凑型设计^[18]。

4 模数转换器设计

在振动信号分析工作中, 需要观察振动信号的频谱图, 振动信号的混叠现象会对分析结果产生严重影响。传统振动采集使用 LPCM 型 ADC 作为模数转换器件, 为了防止信号混叠需要设置衰减曲线非常陡峭的高阶滤波器, 这无疑提高了系统复杂度和制造成本。本设计采用 $\Sigma-\Delta$ 型 ADC 作为模数转换器件, 可以方便的做到抗混叠, 减轻了前级滤波器的压力。

$\Sigma-\Delta$ 型 ADC 与传统的 LPCM 型 ADC 不同, 它不是直接根据信号的幅度进行量化编码, 而是根据前一采样值与后一采样值之差 (即所谓增量) 进行量化编码, 从某种意义上来说它是根据信号的包络形状进行量化编码的^[19]。过采样技术是改善模数转换器总体性能诸多技术中的一种^[20]。 $\Sigma-\Delta$ 结构的 ADC 是一种内在的过采样转换器。 $\Sigma-\Delta$ 型 ADC 以很低的采样分辨率 (1 位) 和很高的采样速率将模拟信号数字化, 通过使用过采样技术, 噪声整形和数字滤波技术增加有效分辨率, 然后对 ADC 输出进行抽取处理, 以降低 ADC 的有效采样速率, 去除多余信息, 减轻数据处理的负担。由于 $\Sigma-\Delta$ 型 ADC 所使用的 1 位量化器 (即 1 位比较器) 和 1 位数模转换器 (为一开关) 具有良好的线性, 所以 $\Sigma-\Delta$ 型 ADC 表现出的微分线性和积分线性性能非常优秀, 并且不像其它类型的 ADC 那样, 它无需任何的

修调。

本设计采用亚德诺半导体生产的 AD7768-1 作为模数转换器, 该 ADC 为单通道高精密的 $\Sigma-\Delta$ 型 ADC, 具有 24 bit 的分辨率, 204 kHz 的响应带宽, 标称 108.5 dB 动态范围, -120 dB 总谐波失真 (THD, total harmonic distortion)。

$\Sigma-\Delta$ 型 ADC 的数据输出速率可以通过公式 (3), 进行计算:

$$ODR(\text{Hz}) = \frac{MCLK}{MCLK_{DIV} \times FILTER_{OSR}} \quad (3)$$

式中, $MCLK$ 是 ADC 的主时钟; $MCLK_{DIV}$ 是主时钟分频系数; $FILTER_{OSR}$ 是内部数字滤波器的过采样率 (OSR, over sampling rate)。

本设计使用 32.768 MHz 的晶振作为主时钟, 设置主时钟分频系数 $MCLK_{DIV}$ 为 8, 此时 ADC 调制器的实际采样率为 4.096 Msps, 配合外部抗混叠滤波器, 如图 11 所示, 对外部混叠进入系统的干扰信号具有 -151 dB 的衰减作用。设置内部数字滤波器的过采样率 $FILTER_{OSR}$ 为 64, 经计算得数据输出速率 $ODR(\text{Hz}) = 64 \text{ kSPS}$ 。设置 ADC 不同配置对带宽和噪声的影响如表 1 所示, 此时 -3 dB 带宽为 27.7 kHz。噪声只有 $7.37 \mu\text{V}$, 能够满足设计需要。

表 1 不同 ADC 设置的带宽及噪声

工作模式	主时钟分频系数	滤波器降采样率	数据输出速率/kSPS	-3dB 带宽 /kHz	噪声有效值/ μV
Fast	2	32	256	110.8	10.98
Medium	4	32	128	55.4	10.94
Medium	8	64	64	27.7	7.37
Low	16	32	32	13.9	10.84
Low	16	1024	1	0.43	1.76

5 比对实验

5.1 传统无线传感器与参考传感器对比实验

本实验采用美国 PCB 公司生产的振动传感器“352C33”作为参考传感器, 在对拖电机试验台上进行对比实验。

实验条件为:

- 1) 对拖电机转速为 1 400 rpm。
- 2) 同一测点采集振动信号。
- 3) 传感器与测试平台采用强力胶水连接方式。

表 1 传感器参数对比

传感器	参考传感器	无线传感器
类型	1	1
量程/g	± 50	± 50
频响范围 $\pm 5\%$ /kHz	10	2
灵敏度/(mV/g)	100	40

将两传感器采集到的数据分别计算频谱图, 如图 13 所

示。可以看出, 无线振动传感器在 2 500 Hz 左右有明显的其他频点信号存在, 由于是在同一工况下测量, 所以可以判定干扰信号为无线振动传感器内部问题导致。

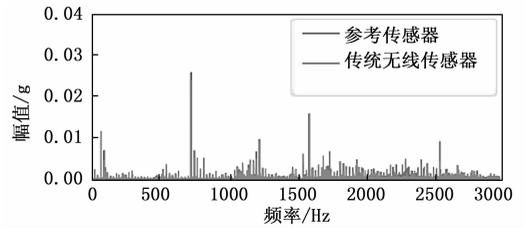


图 13 传感器频谱图

5.2 改进无线传感器与参考传感器对比实验

根据仿真过的传感器优化模型, 制作新型结构传感器, 并在对拖电机试验台上进行对比测试, 如图 15 所示。

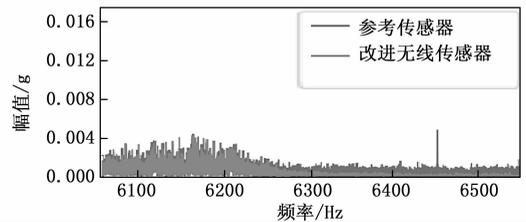


图 14 新型结构传感器测量结果

如图 14 所示, 优化后的无线振动传感器频率响应范围得到了明显改善, 同一工况下测试改进无线传感器与参考传感器采集到的数据对比可知, 振动频率成分在 6.25 kHz 之前都能保证较好的一致性, 相对于传统无线振动传感器频响范围提高了 7.96 dB。

6 结束语

针对传统无线振动传感器频率响应带宽窄的问题, 本文提出一种提高无线振动传感器频响带宽的方法, 从结构设计、振动探头设计、信号链设计和模数转换器设计 4 个方面对传统无线振动传感器进行了改进。结构改进使用 Solidworks 建立 3D 模型, 并使用 ANSYS 仿真软件进行软件仿真分析。探头电路设计使用先进的 MEMS 芯片作为敏感元件, 并且兼容常用压电式振动传感器常用的 IEPE 接口。信号调理链路和模数转换器的设计满足高频响要求的同时充分考虑抗混叠和高信噪比的设计经测试和认证, 采用优化模型所开发的无线振动传感器具有较高的频率响应范围。

改进型优化模型传感器的改进方法为:

- 1) 简化振动探头调理电路, 使用兼容传统压电式振动传感器的 IEPE 接口。
- 2) 将传统无线振动传感器内部振动探头单独封装, 严格控制探头外形尺寸。
- 3) 防止干扰信号传递, 振动探头与传感器本体之间采用柔性线缆连接。

4) 根据考虑传感器驱动电流、传感器线缆寄生电容、关注信号的最高频率和输出信号最大幅值确定恒流源输出电流的大小。

5) 根据关注信号频率确定抗混叠滤波器的截止频率。

6) 选择 $\Sigma-\Delta$ 型 ADC 作为模数转换器件, 并且与抗混叠滤波器配合设置合适的采样率、过采样倍数、数字滤波器截止频率等参数。

经测试, 优化后的振动传感器相对于传统无线振动传感器频响范围提高了 7.96 dB。

参考文献:

[1] Basten T G H, Schiphorst F B A. Structural health monitoring with a wireless vibration sensor network [A]. Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering [C]. ISMA. 2012: 17-19.

[2] Deebak B D, Fadi Al-Turjman. A hybrid secure routing and monitoring mechanism in IoT-based wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2020, 97: 2-3.

[3] 刘金伟, 王俊玲. 机械故障诊断技术的现状及发展趋势 [J]. 科技创新与应用, 2013, 31 (19): 92-93.

[4] Ghorbanpour A A, Soleymani T. Size-dependent vibration analysis of a rotating MR sandwich beam with varying cross section in supersonic airflow [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 151: 288-299.

[5] Li Y, Wang Y, Cao Q, et al. A self-powered vibration sensor with wide bandwidth [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 1: 1.

[6] 张 琨. 旋转机械无线传感器网络振动监测节点的设计 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.

[7] Shahzad K, Cheng P, Oelmann B. Architecture exploration for a high-performance and low-power wireless vibration analyzer [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13 (2): 670-682.

[8] 邓 卫. 基于虚拟仪器的超声导波断轨监测系统研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.

[9] Hao C, Li D. Electromagnetic pulse protection of piezoelectric vibration acceleration sensor [J]. Ferroelectrics, 2018, 535 (1): 1-7.

[10] Xian J S, Zhi W. Research on vibration test system based on IEPE accelerometer [J]. Journal of Anhui Vocational & Technical College, 2019: 2-3.

[11] Qihua C. Design for low-frequency compensation of piezoelectric sensor based on digital filter [J]. Electronic Measurement Technology, 2007: 1.

[12] Wang S, Wei X, Zhao Y, et al. A MEMS resonant accelerometer for low-frequency vibration detection [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2018, 283: 151-158.

[13] Hynd J W, Sill R D, Higbee J R. Bridge sensor with collocated electronics and two-wire interface [J]. 2012: 2.

[14] Milenkovic P H, Wagner M, Kent R D, et al. Effects of sampling rate and type of anti-aliasing filter on linear-predictive estimates of formant frequencies in men, women, and children [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 147 (3): EL221-EL227.

[15] Chen J, Pan X, Xu L, et al. Deception jamming against ISAR with coupled two-dimensional compressive sensing via sub-Nyquist Sampling [J]. IEEE Access, 2018, 6: 55693-55700.

[16] 刘 宛, 董金宁, 池思慧, 等. 基于 CFA 的巴特沃斯低通滤波器设计和仿真 [J]. 湖北大学学报 (自然科学版), 2019, 41 (3): 102-106.

[17] Xu H, Wang J, Zhu L, et al. Design of a dual-mode Balun Bandpass filter with high selectivity [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2018, 28 (1): 22-24.

[18] Huang Y, Belostotski L. Extraction of electrical- and noise-parameters of fully-differential-amplifier subcircuits [J]. IEEE Access, 2019: 1.

[19] Wang B, Sin S W, Seng P U, et al. A $550\mu\text{W}$ 20 kHz BW 100.8 dB SNDR Linear-exponential multi-bit incremental $\Sigma\Delta$ ADC with 256 clock cycles in 65nm CMOS [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019: 1161-1172.

[20] Zhong L, Yang J, Xu D, et al. Bandwidth-enhanced oversampling successive approximation readout technique for low-noise power-efficient MEMS capacitive accelerometer [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2020 (99): 1.

(上接第 238 页)

[2] 崔林林. 浅谈安全生产常用危险评价方法 [J]. 管理学家, 2012 (23): 149-150.

[3] 沈 斌. 野外作业危险性评价与防范对策 [J]. 江苏劳动保护, 2005 (12): 37-38.

[4] Hadeif H, Negrou B, Ayuso T G, et al. Preliminary hazard identification for risk assessment on a complex system for hydrogen production [J]. Hydrogen Energy, 2020, 45 (20): 11855-11865.

[5] Geraudie B, Kabiche S, Rigal M, et al. Preliminary hazard analysis applied to outsourcing sterile chemotherapy preparations [J]. Journal of Oncology Pharmacy Practice, 2019, 25 (2): 460-469.

[6] 周 超. 基于量子神经网络理论的信息系统安全风险评估方法研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.

[7] 侯 旋. 量子门线路神经网络及其改进学习算法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2014 (6): 213-218.

[8] 周 超, 潘 平, 黄 亮. 基于量子门线路神经网络的信息安全风险评估 [J]. 计算机工程, 2018 (12): 39-45.

[9] Zhang H, He X Q, Mitri H, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of virtual reality mine safety training system [J]. Safety Science, 2019, 120: 341-351.

[10] Fan X S, Li C H, Wang Y N, et al. Strict intuitionistic fuzzy entropy and application in network vulnerability evaluation [J]. Soft Computing, 2019, 23 (18): 8741-8752.