

Design of Weak Signal Conditioning Circuit for Vibration Transducer

Ruikun Ke

Wenzhou Darong Textile Instrument Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325016, China

Abstract

With technological advancements, vibration sensors have become essential components for monitoring equipment status in high-end fields such as industrial health monitoring and aerospace vibration detection. However, their output signals are susceptible to mechanical noise interference and energy attenuation, resulting in signal degradation and extremely low signal-to-noise ratios that severely compromise measurement accuracy. To address this, this study integrates the output characteristics of piezoelectric and eddy current sensors. By optimizing conditioning circuit designs through charge-to-voltage conversion and low-noise amplification, and enhancing signal fidelity via topology reconstruction and parameter matching, we aim to provide support for constructing high-precision vibration measurement systems. This approach seeks to facilitate breakthroughs in vibration monitoring technology for engineering applications under extreme operating conditions.

Keywords

vibration sensor; weak signal conditioning; circuit design

振动传感器微弱信号调理电路设计

柯瑞焜

温州大荣纺织仪器有限公司, 中国·浙江温州 325016

摘要

随着科技的进步, 现如今在工业设备健康监测、航空航天振动检测等高端领域中, 振动传感器成为获取设备状态信息的核心器件, 但其输出信号却很容易受到机械噪声叠加、能量衰减影响, 使得信号变弱的同时呈现信噪比极低现象, 严重影响传感器的监测精度。基于此, 本文结合压电式、电涡流式传感器输出特性, 从电荷-电压转换、低噪声放大等关键环节优化调理电路设计, 通过拓扑重构与参数匹配提升信号保真度, 以期为高精度振动测量系统构建提供支持, 助力振动监测技术在极端工况的工程应用取得突破。

关键词

振动传感器; 微弱信号调理; 电路设计

1 引言

振动传感器利用机械振动量和电信号的转换来实现动态监测, 微弱信号调理电路是传感器和数据采集模块之间的关键接口, 其主要作用是将微弱、易受干扰的信号转换成稳定的标准信号。工业智能化、航空航天技术升级促使振动测量精度向微幅级别跃升, 现有的调理电路普遍存在着低噪声性能不足、频带适配性差、环境稳定性差等问题, 难以满足高端应用的需求。由此可见, 高精度调理电路研发突破, 对破解高端振动监测设备技术瓶颈、提高装备国产化水平具有十分重要的研究价值。

2 振动传感器的原理

振动传感器是一种将机械振动量转换为电信号的装置, 其工作原理主要有压电式、电涡流式和电阻应变式三种。压电式振动传感器利用压电材料在应力作用下产生电荷的压电效应(如图1所示), 将振动引起的应力变化转化为电荷信号输出, 如采用PZT-5H压电陶瓷制成的加速度传感器, 其电荷灵敏度可达12.3 pC/g。电涡流式振动传感器的主要工作原理是电磁感应, 激励线圈产生交变磁场, 被测金属构件振动时引起线圈阻抗的变化, 实现非接触式振动量的转换, 测量频率范围为10Hz ~ 1MHz, 适合于旋转机械振动监测^[1]。电阻应变式振动传感器利用粘贴在弹性元件上的应变片, 将振动产生的机械应变转换成电阻值的变化, 再经电桥电路转换成电压信号, 具有测量精度高、线性度好的特点, 在静态及低频振动测量中应用广泛。

【作者简介】柯瑞焜(1982-), 男, 中国浙江永嘉人, 本科, 工程师, 从事机电制造(设计开发)研究。



图 1 压电式振动传感器

3 振动传感器微弱信号调理电路设计要点

3.1 前置电荷 - 电压转换电路设计

压电式振动传感器输出的是高阻抗电荷信号，信号衰减速度与负载输入阻抗呈负相关，因此前置转换电路的高输入阻抗设计是保证信号完整性的首要前提^[2]。选用 JFET 输入型运算放大器 TLV2771 作为电荷 - 电压转换的核心模块，其输入偏置电流小于 10pA、输入阻抗大于 $10^{12}\Omega$ ，可以很好地降低电荷信号的泄漏损耗。电路设计时，设计者应选用屏蔽电缆连接传感器和调理电路输入端，屏蔽层单端接地，减小电磁干扰对高阻抗信号的耦合影响。另外在运放输入端并联一个 $100M\Omega$ 的高阻电阻，构建直流泄放通道防止电荷累积引起运放饱和，这一电阻使用高精度金属膜电阻，温度系数控制在 $\pm 50ppm/^\circ C$ 以内，保证泄放电流的稳定性。

电荷 - 电压转换电路的核心性能由反馈网络参数决定，转换增益公式为：

$$V_o = -Q \times \frac{1}{C_f}$$

其中： V_o 为输出电压； Q 为传感器输出电荷； C_f 为反馈电容

根据 PZT-5H 压电陶瓷传感器的电荷灵敏度 $12.3pC/g$ ，为了在 $5-20g$ 加速度范围内得到 $5-130pC$ 电荷信号的有效转换，选择反馈电容为 $10pF$ ，转换增益为 $100mV/pC$ ，可以将最大 $130pC$ 电荷信号转换为 $13V$ 输出电压，匹配后面放大电路的输入范围。反馈电容采用聚四氟乙烯电容，介质损耗小、温度稳定性好， $-40^\circ C \sim 85^\circ C$ 范围内电容值变化率小于 $\pm 1\%$ 。另外在反馈电容两端并接 $100M\Omega$ 的反馈电阻，其与反馈电容一起组成 RC 网络来决定电路的下限截止频率，可有效地覆盖振动信号的低频范围^[3]。

3.2 低噪声放大电路优化设计

微弱信号放大环节的噪声抑制能力直接决定了调理电路的整体性能，运放的输入噪声电压和电流是主要的噪声源。设计者选用高精度低噪声的运放 TLE2064CDR 做放大核心元件，在 $1kHz$ 频率下它的输入噪声电压为 $3.5nV/\sqrt{Hz}$ ，

输入噪声电流为 $0.7pA/\sqrt{Hz}$ ，可以有效抑制放大过程中产生的固有噪声^[4]。根据振动传感器输出信号的幅值特性，设计同相放大拓扑结构，输入阻抗高，不会对前置转换电路输出信号造成负载。同相放大电路的增益公式为 $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ ，为实现 100 倍的固定增益，选取 $R_f = 99k\Omega$ 、 $R_1 = 1k\Omega$ 电阻均选用 0.1% 精度的金属膜电阻，确保增益精度。另外，在运放电源端接上 $10\mu F$ 电解电容和 $0.1\mu F$ 陶瓷电容的组合来抑制高频和低频的纹波，保证运放工作电压的稳定。对于幅值小于 $1mV$ 的超微弱振动信号，设计了两个放大器：第一级使用 100 倍低噪声放大，第二级采用可编程增益放大器 PGA202，通过外部逻辑实现 1-8 倍增益的切换，总增益范围为 100-1000 倍。为了抑制两级电路噪声耦合，在电路加入了 $1k\Omega$ 的电阻和 $100pF$ 的电容组成的 RC 隔离网络（截止频率为 $1.59MHz$ ），很好地隔离了高频噪声。低噪声放大模块是独立屏蔽罩封装，其与其它模块的间隔不小于 $5mm$ ，电源线以星形拓扑方式防止互相干扰。实验测试结果表明，该电路在 1000 倍增益下，输出噪声电压峰峰值在 $5mV$ 以内，信噪比可达 $60dB$ 以上，可以满足超微弱信号放大的要求^[5]。

3.3 宽频带滤波电路精准设计

振动传感器输出信号的频率范围是 $0.1Hz$ 到 $2kHz$ ，环境干扰主要是 $50Hz$ 工频干扰、高频电磁干扰和低频漂移干扰，因此需要设计一个宽频带通滤波电路来精确提取目标信号。该电路是由前置高通滤波和后置低通滤波串联而成的，采用有源滤波拓扑来保证滤波特性稳定^[6]。高通滤波用以抑制低频漂移，利用一阶有源电路设置截止频率后可滤除 $0.1Hz$ 以下低频干扰；低通滤波用以抑制高频噪声，采用稳定增益可调的二阶 Sallen-Key 拓扑，截止频率设定为 $2kHz$ ，在 $2kHz$ 以上高频部分有 $-40dB/decade$ 滤波斜度可以起到抑制作用。为了提高抗干扰能力，改善二阶低通滤波电路品质因数 Q ，使电路具有最大的平坦幅频特性，在截止频率附近不会造成信号幅值失真问题。经过参数优化后，在 $0.1Hz$ 到 $2kHz$ 的通频带内，幅值波动小，对于 $50Hz$ 工频干扰抑制效果好。同时为了适应不同的信号频率，设计可重构电路，用拨码开关来切换电容的容值，从而实现三种不同的通频带切换，大幅提升电路的通用性。

3.4 温度与工艺补偿电路设计

环境温度变化会造成电路器件参数漂移（如运放失调电压、阻容参数变化），进而影响调理电路测量精度；同时电路制作的工艺误差（如电阻偏差、焊接寄生参数）易导致性能偏离设计值。针对上述问题，对应的解决方案、具体实施细节及实现效果如下表所示：

通过上述温度补偿与软件校准相结合的方式，可有效抑制环境温度变化及工艺误差对电路精度的影响，保障电路在宽温工作范围内的稳定可靠运行^[7]。

问题成因	解决措施	具体参数 / 操作细节	实现效果
环境温度变化导致运放失调电压漂移	基于 NTC 热敏电阻的温度补偿网络设计	1. 器件选型: 负温度系数 (NTC) 热敏电阻, 型号 MF52-103F-3950, 25°C 阻值 10kΩ, 温度系数 -3.95%/°C; 2. 安装方式: 串联于低噪声放大电路反馈回路; 3. 参数优化: 经仿真确定串联位置及阻值配比	-40°C 到 85°C 工作范围内, 失调电压漂移抑制率 ≥80%
环境温度变化导致聚四氟乙烯电容温度特性偏差, 影响转换增益	基于 PTC 电容的温度补偿设计	1. 器件类型: 正温度系数 (PTC) 电容; 2. 安装方式: 并联于电荷 - 电压转换电路反馈电容两端	抵消聚四氟乙烯电容温度特性偏差, 保证转换增益稳定性
电路制作工艺误差 (电阻偏差、焊接寄生参数)	软件辅助校准技术	1. 硬件配置: 增加 8 个精密电阻组成的校准电阻阵列, 由单片机控制继电器切换; 2. 调节能力: 借助 3 位二进制信号实现 256 级连续调节, 调节精度 0.1%; 3. 校准流程: 标准信号源输入已知幅值和频率的信号 → 测量输出信号 → 计算增益误差 → 利用最小二乘法求得最佳参数并切换电阻	补偿工艺误差, 使电路性能回归设计值, 提升整体测量精度

3.5 高稳定性电源模块设计

调理电路电源噪声会直接耦合到信号链路上, 使微弱信号难以提取出来。采用线性稳压电源拓扑, 相比于开关电源来说, 线性稳压电源具有纹波小、噪声低的优点, 更适合微弱信号调理电路供电的需求^[8]。采用双电源供电结构, 正电源用 LM1117-5.0 输出稳定的 5V 电压; 负电源用 LM1117-3.3 的负压版本输出稳定的负 3.3V 电压, 为运放等电路提供对称供电, 减小零点漂移^[9]。线性稳压电源输入滤波采用两级 LC 滤波电路, 第一级用 1000 μF 电解电容和 10 μH 电感来抑制低频纹波, 第二级用 100 μF 钽电容和 0.1 μF 陶瓷电容来抑制高频纹波。经过测试电源输出纹波峰峰值为 1mV 以下, 满足低噪声供电要求。为了防止外部电源总线对调理电路的干扰, 在电源部分使用电源隔离模块来做到供电隔离。采用 B0505S-1W 隔离电源模块, 输入 5V, 输出 5V, 隔离电压 1kV, 能很好地抑制地环路干扰^[10]。

4 结语

综上所述, 振动传感器微弱信号调理电路的设计水平, 对振动测量系统的精度、稳定性有着重要影响, 振动传感器微弱信号调理电路技术与工业智能、航空航天等领域的需求密切相关, 低噪、宽频带、稳定是调理电路发展趋势, 通过改变电路拓扑结构、匹配器件参数、建立温度和工艺补偿机制等方式可解决微弱信号提取难点问题, 服务于高端装

备的健康监测和智能诊断。

参考文献

- [1] 韩佳一, 卞栋, 赵嘉豪, 等. 分布式光纤振动传感器在高压电缆故障点精准定位中的应用研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (20): 131-133.
- [2] 邓林梁. 基于光纤光栅振动传感器的斜拉桥索力无损检测技术应用 [J]. 交通世界, 2025, (30): 107-109.
- [3] 朱江转, 陈晓雯, 徐思雨, 等. 微纳光纤振动传感器设计与制作 [J]. 实验室研究与探索, 2025, 44 (09): 59-62+74.
- [4] 李威, 卢泽宇, 陈荣. 振动监测传感器加速退化试验及寿命评估 [J]. 船舶工程, 2025, 47 (S1): 586-593.
- [5] 孙凯越, 代兴磊, 海聪波. 基于振动传感器的电气控制系统气泵故障诊断研究 [J]. 轻工科技, 2025, 41 (04): 83-85+104.
- [6] 宋海飞, 于亚运, 李小娟. 电力无源传感器的振动式微型发电机研究现状 [J]. 微电机, 2025, 58 (06): 83-90.
- [7] 李建翔, 李醒飞, 刘帆, 等. 磁流体动力学角振动传感器噪声等效指标优化分析 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46 (07): 115-125.
- [8] 虞鹏, 黄杰, 李虎, 等. 基于振动传感器的发动机曲轴主轴颈加工实时监控研究 [J]. 内燃机, 2025, 41 (03): 22-28.
- [9] 申丁. 振动加速度传感器磁灵敏度检测方法研究 [J]. 质量与市场, 2025, (04): 28-30.
- [10] 王志飞, 王心怡, 张庆宏, 等. 基于复用结构的高灵敏度自取能式无线振动传感器 [J]. 高压技术, 2025, 51 (05): 2425-2435.