

文章编号: 2095-4980(2015)06-0957-04

## 侵彻引信压阻传感器的信号调理技术

谢玉斌, 阮朝阳

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 侵彻过程产生的高频振动信号会引起压阻传感器测量机构的谐振效应, 从而导致传感器信号的零位偏移, 造成传感器信号失真, 严重影响了侵彻引信计层起爆控制功能的炸点精确度。为了消除侵彻过程中传感器信号的零位漂移问题, 本文针对压阻传感器的侵彻环境, 设计了一种接口信号调理电路, 该电路可以在实现传感器信号调理功能的同时, 实时校正传感器的零位偏移, 确保了后端电路的信号完整性与实时性。通过建模仿真与打靶数据半实物仿真的测试, 该信号调理电路可以有效解决传感器信号的零位漂移问题。

**关键词:** 侵彻引信; 信号调理; 零位偏移; 压阻传感器

**中图分类号:** TN972<sup>+</sup>.22

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201506.0957

## Piezoresistive sensor signal conditioning technique for penetration fuse

XIE Yubin, RUAN Zhaoyang

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** Penetration process generates mechanical vibrations, and some frequencies of these mechanical vibrations are close to the resonance frequency of the piezoresistive sensor, which will cause the elements out of control at resonance and eventually cause gage breakdown. A signal conditioning interface circuit is introduced toward the application of PR sensor in penetration circumstance. The interface circuit realizes signal process properly, and zero-output and zero-shift are adjusted in real time accordingly, which guarantees the signal integrity and real-time processing. Circuit modeling simulation and semi-physical simulation demonstrate the zero-shift problem can be solved properly by this circuit.

**Key words:** penetration fuse; signal conditioning; zero shift; piezoresistive sensor

侵彻引信的核心技术之一是炸点的控制。根据目标的不同, 打击模式可以分为延时模式、计层模式、空穴识别模式。在弹体侵彻目标的过程中, 侵彻引信是依据压阻传感器感知的过载等信息计算弹体侵彻目标情况, 当计算数据与预装订数据一致时, 引信给出起爆信号, 完成战斗部对目标的毁伤。从侵彻引信的作用过程来看, 对侵彻环境的信息处理是个关键技术。如何准确、有效地处理加速度传感器的输出信号, 是压阻传感器信号调理技术的核心内容。本文提出了一种针对侵彻引信应用条件下的压阻传感器信号调理电路, 该电路通过仿真试验以及多次打靶试验的考核, 考核结果表明, 该电路很好地完成了传感器微弱信号的调理功能。

弹体侵彻靶标的过程中所产生冲击响应频谱的截止频率在 20 kHz 以下, 然而大多数高  $g$  值冲击测量值都含有超过 100 kHz 的频率成分<sup>[1]</sup>。这些高频成分覆盖了传感器的谐振频率, 侵彻过程中几乎会使所有的实际结构发生谐振。压阻传感器谐振时, 容易产生 3 种故障。a) 损坏: 因为测量机构是无阻尼的, 因此元件发生谐振时的错位将不受控制, 严重的会损坏; b) 零位偏移: 压阻传感器只有在测量机构损坏或者性能下降时才出现零点漂移现象; c) 非线性: 压阻传感器在谐振时的输出有时是非线性的, 并且不可重复, 这种故障的结果导致对冲击环境的测量有误差<sup>[2-3]</sup>。

高  $g$  压阻传感器的损坏需要经历几十毫秒数量级的高过载环境, 通过能量的积累才可能引起测量机构的损坏, 而通常的侵彻过程属于冲击的瞬态作用, 作用脉冲宽度为几百微秒到几毫秒的数量级, 在此情况下由于谐振导致的零点漂移现象更为常见。

侵彻过程中传感器谐振后, 会导致测量系统引入较大的测量误差, 如果该误差进行累积可能会导致算法计

算结果错误。消除零位偏移带来的测量误差有 2 种方式。其一，软件数字滤波方式，即数据采集完成后，设计数字滤波器，用软件实现零位偏移校正。该方式对嵌入式平台的高速信号处理能力有要求，而且软件 FIR 数字滤波器的实现对 MCU 的要求较高且占用软件资源较多。其二，采用模拟电路实现方式，即通过合理设计传感器信号调理电路，完成硬件零位偏移校正。该方式不会占用任何软件资源，可做到在线实时处理。本文提出的传感器信号调理电路就是通过模拟电路方式实现硬件零位偏移校正。

## 1 压阻传感器接口信号调理电路的设计需求

压阻传感器的原理实际上是一个惠斯通电桥，电桥上的电阻在受力过程中其电阻值会发生变化，压阻传感器正是通过这种变化来反映加速度的大小。基本的惠斯通电桥由 4 个电阻组成。理论上电桥的 4 个电阻取值相同。惠斯通电桥的示意图如图 1 所示。图 1 表示的是过载采集系统的前端处理电路。惠斯通电桥的输出为微伏级的差分信号，为了实现过载的实时采集，该微弱的差分信号需要信号调理电路、放大电路、AD 采样电路进行信号的实时处理。其中，放大电路实现差分信号的放大，同时将差分信号转变为单端信号，使信号的幅值符合 AD 采样的要求。

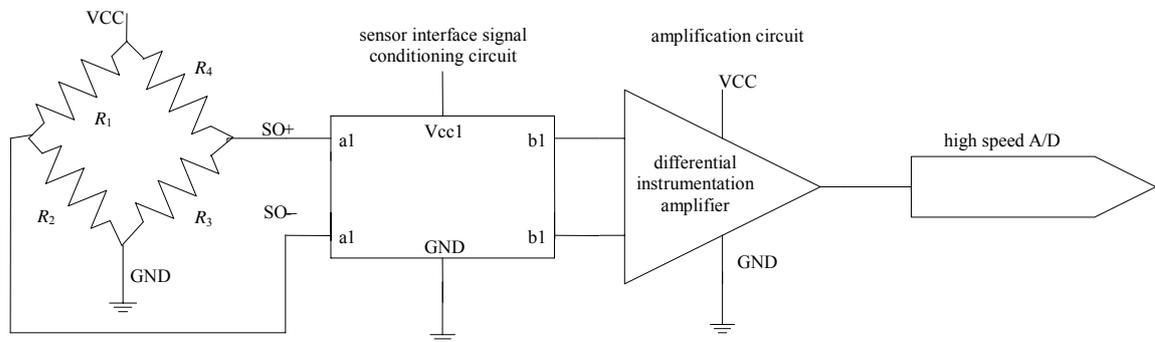


Fig.1 Interface circuit of PR sensor

图 1 压阻传感器接口电路

传感器接口信号调理电路是微弱差分信号的前端处理电路，根据高  $g$  压阻传感器的应用特点，该接口电路的设计需求为：a) 信号的阻抗匹配；b) 零位输出校正；c) 零位偏移校正等功能。

压阻传感器的输出阻抗范围为：2 k $\Omega$ ~5 k $\Omega$ ，为了提高信号采集质量，接口电路需要高输入阻抗，即输入阻抗必须远大于 k $\Omega$  数量级。接口电路的输出接差分仪表放大器，该放大器的输入阻抗为 G $\Omega$  数量级，因此，接口电路的输出阻抗又要求小于 M $\Omega$  数量级。

压阻传感器的零位输出范围为：-50 mV~50 mV，通常情况下，根据每一个传感器的零位输出，配置调零电阻，造成产品工程化生产时，调试工作量较大。

因此，压阻传感器在使用过程中，如果内部结构件产生谐振，将使得传感器零位产生偏移，需要设计具备校正零位偏移能力的接口信号调理电路。

## 2 压阻传感器接口信号调理电路的设计

压阻传感器接口信号调理电路保证微弱差分信号输入、输出阻抗的匹配，通过硬件的滤波技术实现同步的零位偏移校正，不需要更换匹配电阻使得传感器零位输出得到校正。

传感器接口信号调理电路如图 2 所示。通过合理设计  $R_1, R_2$  阻值，使得该接口电路的输入阻抗达到 10 M $\Omega$  的数量级，针对传感器的 k $\Omega$  数量级的输出阻抗，完全符合高输入阻抗的需求。差分仪表放大器的输入阻抗为 G $\Omega$  数量级，通过合理设计  $R_3$  的阻值，使得该接口电路的输出阻抗为 100 k $\Omega$  的数量级，完全符合低输出阻抗的需求。因此该接口信号调理电路符合阻抗匹配的需求。

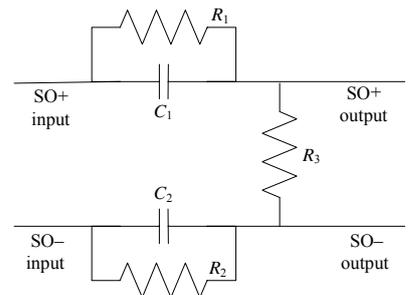


Fig.2 Sensor interface signal conditioning circuit

图 2 传感器接口信号调理电路

压阻传感器的 4 个电桥电阻无法做到完全相等，因此电桥存在零位输出，通常零位输出的范围为 50 mV 范围以内。为了消除零位输出，通常根据零位输出值选择合适的调零电阻进行阻值的补偿，使得电桥在零位时平衡。当传感器接口信号调理电路采用图 2 所示的电路后，可以忽略零位输出的问题。图 2 所示的直流回路中，零位输出的电压差加在  $R_1, R_2, R_3$  的串联回路中，差分信号的输出端口在  $R_3$  的两端，因此零位输出的电压等于被分压为原零位输出的  $R_3/(R_1+R_2+R_3)$  倍，通过合理选择  $R_1, R_2, R_3$  阻值，可以使得毫伏数量级的零位输出变为微伏数量级。图 2 的接口信号调理电路避免了每套传感器使用调零电阻，大幅减少了调试工作量。

图 2 所示的传感器接口信号调理电路可以实时校正使用过程中产生的零位偏移。通过分析差分信号的交流通路，可以计算出该电路的传递函数，其传递函数见式(1)。

$$u_o = \frac{R_3}{\frac{2}{j\omega C_1} + R_3} \tag{1}$$

该接口电路是一个高通滤波电路，通过调整电容  $C_1$ ，设计出高通滤波的截止频率。根据高通滤波器的特性，低频干扰信号可以被滤除，而零位偏移就属于典型的低频干扰信号，因此该接口电路可以消除侵彻过程中由于谐振现象导致的传感器零位偏移问题。滤除零位偏移后的信号就实现了信号的零位校正，避免了零位偏移带来的系统误差的累积，为后续信号处理的可靠性以及采集数据的健壮性提供了技术保障。

为解决零位偏移问题，必须合理设计高通滤波器的 -3 dB 截止频率。高通滤波器需要消除的低频干扰包括：零位偏移低频干扰，工频 50 Hz 低频干扰。大于 200 Hz 的频率为有用信号的频谱区间。根据需求并结合电容型谱，选择 15 nF 的一类陶瓷电容作为该高通滤波器的滤波电容。15 nF 的电容对应的 -3 dB 截止频率为 212 Hz，其对 50 Hz 工频干扰抑制的能力为 -12.79 dB。即工频干扰经过该滤波电路，能量损失率为 78%。滤波电容为 15 nF 时的信号传递效率如图 3 所示。

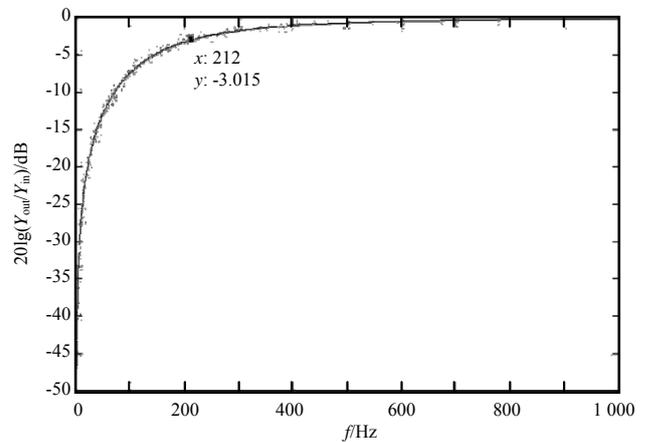


Fig.3 Signal transfer efficiency with the filtering cap 15 nF  
图 3 滤波电容为 15 nF 时的信号传递效率

通过实弹打靶的数据来验证该传感器信号调理电路的有效性。图 4 为单层靶侵彻试验，压阻传感器未使用该信号调理电路的数据。在碰靶前，传感器零位电平为 2.5 V，其表示弹体没有过载。其中在侵彻过程中，传感器的零位电平逐步升高，过靶后，零位电平稳定在 2.66 V。零位电平差为 0.16 V，对应 2 400 g 的误差。打靶后的常态测试下，传感器基准恢复，进行锤击试验，传感器可以准确输出过载信号，传感器性能正常。对打靶的传感器组件进行解剖，发现印制板无受损迹象，传感器焊接牢靠，各焊点无短路、断路现象。经过仿真分析与测试，零位电平偏移定位为侵彻过程中的传感器谐振问题。

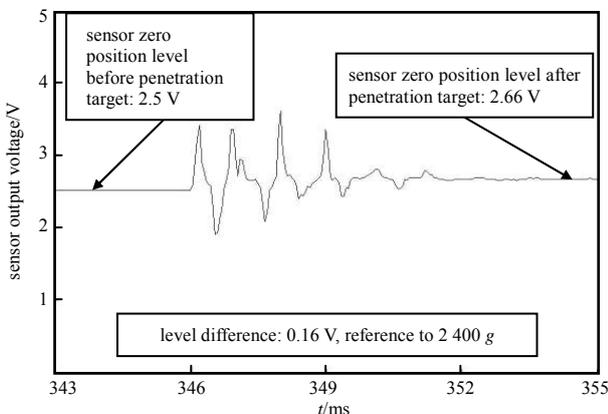


Fig.4 Zero position offset of load signal for penetration single layer target without the signal conditioning circuit  
图 4 侵彻单层靶未使用本文信号调理电路的过载信号零位偏移

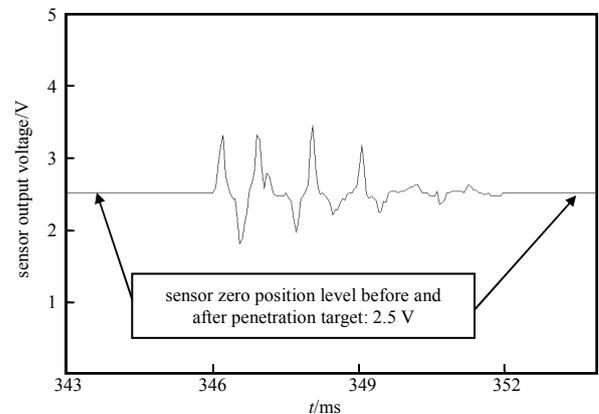


Fig.5 Zero position offset of load signal for penetration single layer target with the signal conditioning circuit  
图 5 单层靶数据经过接口电路滤波后的半实物仿真数据

使用传感器接口信号调理电路，其中滤波电容选择 15 nF。通过半实物仿真的手段，将图 4 所示的试验数据，作为传感器接口电路的输入，其输出结果如图 5 所示。该数据表明，信号调理电路可以完成传感器零位偏移校正功能。

从图 5 中可以看出，压阻传感器的原始输出信号存在零位偏移的现象，经过接口电路的信号调理作用以后，原始数据中的零位偏移现象得到很好的滤除，同时信号的完整性和信号的实时性与原始信号保持了一致。

### 3 结论

侵彻环境下的信号处理电路因受体积、功耗、器件生存能力的制约，如果通过软件设计数字滤波器的技术来处理过载信号很难保证信号处理的实时性。压阻传感器的接口信号调理电路主要实现了 3 个方面的功能，即阻抗匹配、零位输出校正、零位偏移校正的功能。通过理论计算、半实物仿真及实际应用，可以很好地满足后端电路的信号完整性与实时性的需求。

#### 参考文献：

- [ 1 ] Jon S Wilson. Sensor Technology Handbook[M]. [S.l.]:Posts & Telecom Press, 2009.
- [ 2 ] Anthony Chu. Built-in mechanical filter in a shock accelerometer[C]// Shock and Vibration Symposium(59th). Albuquerque, New Mexico:Sandia National Labs, 1988.
- [ 3 ] Anthony Chu. Zeroshift of piezoelectric accelerometers in pyroshock measurements[C]// Shock and Vibration Symposium (56th). Washington,DC:Naval Research Lab Washington DC Shock And Vibration Information Center, 1987:71-80.

#### 作者简介：



谢玉斌(1984-)，男，西安市人，硕士，助理研究员，研究方向为侵彻类引信总体技术、信号处理技术.email:344154146@qq.com.

阮朝阳(1972-)，男，四川省德阳市人，硕士，研究员，主要研究方向为侵彻类智能直列式电子引信关键技术研究。

\*\*\*\*\*

## 2015 年度《太赫兹科学与电子信息学报》优秀编委和优秀审稿人名单

优秀编委：艾 渤      冯进军      黄卡玛      王宏强      俞俊生

优秀审稿人：陈晓光      陈 星      华 光      刘长军      邢 锋      余世里