

低噪声声发射信号调理系统设计

王伟魁, 李一博, 刘欣雨, 曾周末

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要:针对金属腐蚀声发射信号检测要求,设计并实现了一种低噪声的声发射信号调理系统。该系统由电荷放大电路、电压放大电路和滤波电路组成。详细论述了各部分电路的原理,并分析了电路噪声水平。分析试验表明,电荷放大电路中运算放大器的输入电压噪声是影响电路噪声的主要原因。在满足带宽的条件下,选用低噪声的运算放大器能够有效降低整个信号调理系统的噪声,从而提高系统信噪比。

关键词:声发射检测;腐蚀检测;信号调理;电荷放大器;Sallen-key 滤波器;噪声分析

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)04-0029-04

Design of Low-noise Acoustic Emission Signal Conditioning System

WANG Wei-kui, LI Yi-bo, LIU Xin-yu, ZENG Zhou-mo

(College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For corrosion acoustic emission test, a low-noise acoustic emission signal conditioning system was designed. The system consists of a charge amplifier circuit, the voltage amplification circuit and the filter circuit. The principle of each part of the circuit is described, and the level of circuit noise is analyzed. The theoretical analysis and experiments show that the op amp input voltage noise of charge amplifier circuit is the main reason that affects the whole circuit noise. In the condition of bandwidth being met, the selection of low-noise op amp can effectively reduce the noise of the signal conditioning system and improve the system's signal-to-noise ratio.

Keywords: Acoustic emission test; Corrosion test; Signal conditioning; Charge amplifier; Sallen-key filter; Noise analysis

声发射是材料中由局部应力集中源的能量迅速释放而产生瞬时弹性波的现象。用仪器探测、记录和分析声发射信号以及利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射检测技术。由于该技术具有效率高、成本低、灵敏度高等优点,已经广泛用于对材料力学性能检测、大型结构健康监测等领域^[1]。近些年,金属腐蚀的声发射在线检测技术研究是国内外声发射检测领域的热点^[2-3]。根据研究,金属腐蚀过程中会产生极其微弱的声发射信号,而在腐蚀不同阶段声发射信号的特征也不尽相同,这就为检

测腐蚀类型和程度提供了依据^[4]。尤其对于应力腐蚀开裂检测来说,发现早期的裂纹萌生和扩展,对于金属结构的安全监测具有重要的现实意义^[5]。

现代声发射仪的结构一般由声发射传感器、信号调理系统、数据采集系统、主控制器、存储器、通讯模块和电源模块等组成^[6]。其中信号调理系统是实现检测微弱声发射信号的关键,其主要功能就是将声发射传感器输出的微弱信号进行放大和滤波。将 μV 级的信号放大到数据采集系统的量程至少需要百倍甚至千倍。要实现如此高的放大倍数,对电路的稳定性和噪声抑制能力均提出了更高的要求。笔者在分析噪声的基础上,针对金属腐蚀声发射信号的特点,设计并实现了一种结构简单、信噪比高的声发射信号调理系统。

收稿日期: 2013-06-19

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2012M510749); 国家自然科学基金资助项目(61240038)

作者简介: 王伟魁(1983-),男,博士后,主要从事声发射检测技术研究。

1 信号调理系统设计

声发射传感器一般采用压电陶瓷作为敏感元件,其在外力作用下会产生电荷,因此首先需要采用电荷放大电路将微弱的电荷信号转换成电压信号^[7]。该电压信号还需要进一步放大和滤波以满足模数转换的量程范围和噪声要求。整个信号调理系统包括电荷放大电路、电压放大电路和带通滤波电路。

1.1 电荷放大电路

传感器与电荷放大电路的等效电路模型,如图1所示。

$$\dot{U}_0 = \frac{j\omega K Q}{[(1+R_s) + (1/R_i) + (1+K)/R] + j\omega[C_s + C_c + C_i + (1+K)]} \quad (1)$$

式中: K 为运算放大器 N 的开环放大倍数; ω 为传感器供电角频率。

由于输入电缆电容的增大和反馈电容的减小会在输出端引起较大的噪声电压,而运算放大器的零漂则会因反馈电阻的减小和放大器输入电阻的减小而增大。因此经综合考虑选取 $R = 22 \text{ k}\Omega$, $C = 100 \text{ pF}$,以在保证高电荷灵敏度的同时使信号的失真度控制在可接受的范围内。

1.2 电压放大电路

由于声发射信号非常微弱,故经过电荷放大器的 Q/U 转换后还需要对信号进行放大。当放大倍数为 60 dB 、带宽达 1 MHz 时即可满足金属腐蚀声发射检测的要求^[8]。在放大电路的实现上,考虑到反相放大电路输入阻抗低,不能满足低噪声的要求,故采用同相放大电路,如图2所示。

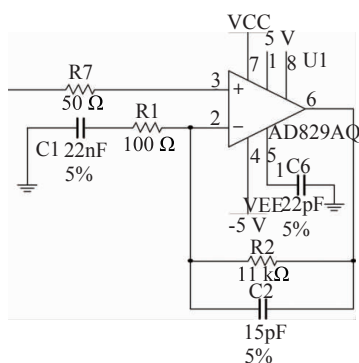


图2 同相放大电路

考虑到对增益、带宽的要求,需要高速放大器,故采用AD829,其单位增益带宽积可达 130 MHz ,共模抑制比为 120 dB ,完全满足信号带宽和同相放大电路对运放共模抑制比的要求。补偿电容 $C6$ 可

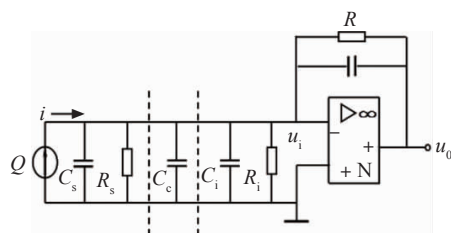


图1 电荷放大电路的实际等效电路模型

图1中 Q 、 C_s 以及漏电阻 R_s 并联构成了声发射传感器的等效电路模型, C_c 是电缆电容, R_i 和 C_i 分别为所选的运算放大器的输入阻抗和输入电容。考虑到 C 电荷的泄放和加入直流负反馈以稳定工作点,在 C 两端并联电阻 R 。则电路输出为:

以使运放在低放大倍数条件下稳定工作, $R2$ 和 $R1$ 的比值决定了放大电路的放大倍数, $C2$ 做相位补偿, $C1$ 限制信号的低频通路,使放大电路表现为高通特性,滤除低频信号,以抑制音频干扰。

1.3 带通滤波器设计

为进一步抑制音频和电磁噪声的干扰,还必须在放大电路之后增加带通滤波电路。由于压控电压源型(Sallen-key)滤波器对运放理想程度依赖性最低,故基于Sallen-key滤波器模型^[9],设计了一个由四阶低通串联二阶高通组成的巴特沃斯型带通滤波电路^[10],如图3所示。其 -3 dB 带宽为 $100 \sim 500 \text{ kHz}$ 。

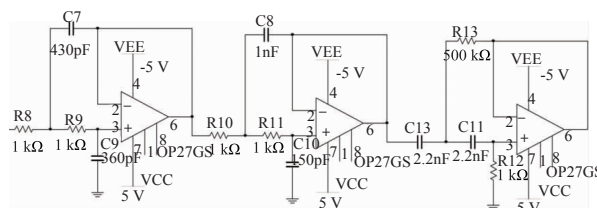


图3 Sallen-key 带通滤波器设计

2 电路噪声分析

对于裂纹萌生、金属点蚀等检测,能够检测到越微弱的声发射信号越有利于及时发现被检测对象早期的缺陷。因此对电路噪声进行分析,进而有针对性的进行抑制,是实现低噪声声发射信号调理系统的关键。

电路中噪声源主要由运放的电压噪声、电源噪声和电阻热噪声组成^[11]。其中电阻热噪声可根据式(2)计算。

$$V_{NR} = \sqrt{4KTRB} \quad (2)$$

式中: K 为波尔兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T 为热力学对温度; B 为带宽; R 为电阻。

由于电路中前端的电荷放大电路和同相比例放大电路的信号增益很大,是主要噪声源,故主要分析这部分电路的噪声。其等效噪声模型如图 4 所示。

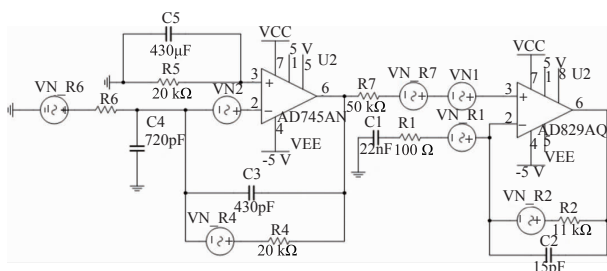


图 4 前端放大电路的噪声模型

图中,VN1 和 VN2 分别代表运放 U1 和 U2 的电压噪声,VN_R1 代表电阻 R1 的热噪声。R6 为声发射传感器的内阻,C4 为声发射传感器的等效电容,由试验测得。

由于后面滤波器的存在,故可以忽略滤波频带以外的噪声,于是按照式(3)计算各项输出噪声电压 V_{RMS} :

$$V_{RMS} = 1.3A \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} V_N^2 df} \quad (3)$$

式中:1.3 为滤波器修正系数; A 为该噪声信号的输出总增益; V_N 为频域的噪声值。

经计算得系统主要噪声值如表 1 所示。

表 1 系统噪声主要噪声源及其均方值

噪声源	输出(RMS)
VN2	3.4 mV
VN_R7	54.2 μ V
VN_R1	78.3 μ V
VN_R2	<0.1 μ V
VN1	0.24 mV

从表 1 中可以看出,在电路中起决定作用的噪声源为电荷放大器所用运放的电压噪声 VN2,故选用输入电压噪声小的运算放大器实现电荷放大器是减小整个系统噪声的关键。

3 试验验证

3.1 系统底噪测试与分析

为测试系统底噪,必须消除环境声学噪声通过

传感器耦合进电路的影响,故采用一个与传感器等效电容大小相近的 1 000 pF 聚苯乙烯电容代替传感器。经测试,噪声峰峰值约为 40.0 mV,如图 5 所示。

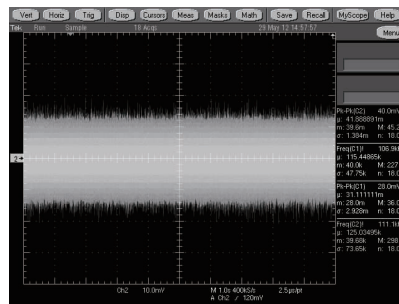


图 5 噪声测试结果

而利用噪声模型计算得系统理论噪声为:

$$\begin{aligned} V_{Npp} &= V_N \times A \times \sqrt{B} \times 2 \times 1.3 \times 6.6 \\ &= 2.9 \times 10^{-6} \times 1210 \times \sqrt{400\,000} \times 17.16 \\ &\approx 38.1 \text{ mV} \end{aligned}$$

式中: A 为信号增益,包括电荷放大增益和放大电路增益。

从理论计算结果看,电路实际噪声与理论一致。由于电路放大倍数为 1 000,故该系统实际底噪 $V_{Nrms} = 40\,000 \mu\text{V} / 6.6 / 1\,000 \approx 6.6 \mu\text{V}$ 。能够满足金属腐蚀声发射信号采集的要求。

为了进一步验证电荷放大电路中运放噪声对系统噪声的影响,将电荷放大电路中的 AD745 换成了输入噪声较大的 AD820,经计算理论噪声值为 114.5 mV,测试得噪声峰峰值为 119.2 mV,比采用 AD745 时噪声增大了 3 倍。可见电荷放大器中运算放大器的输入电压噪声是影响整个系统噪声的主要因素。

3.2 金属腐蚀声发射检测试验

为验证系统的腐蚀声发射信号检测能力,设计了如图 6 所示的试验系统,在 Q235 钢板上封装了浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液,在钢板的另一面安装美国物理声学公司的 ws α 型宽频声发射传感器接收腐蚀产生的声发射信号。采用带有 AD 采集卡的 PC104 进行信号采集。系统采样率为 1MSPS,采样

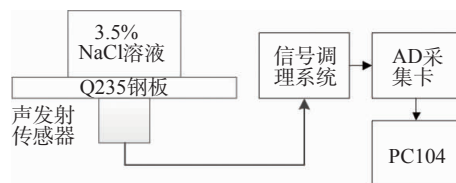
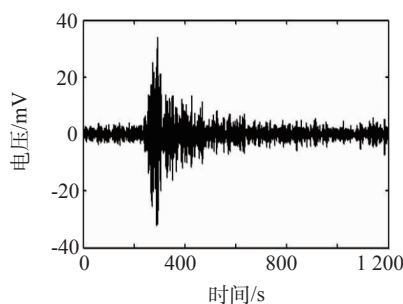
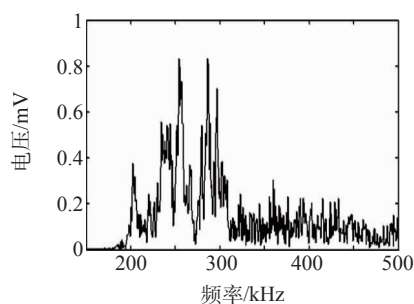


图 6 金属腐蚀声发射检测试验系统



(a) 波形



(b) 频谱

图7 典型声发射信号波形及其频谱图

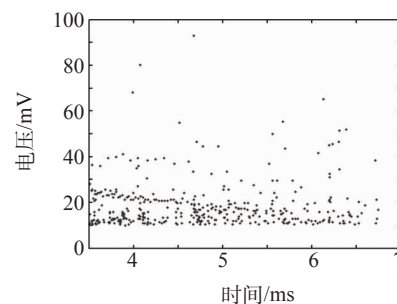


图8 声发射信号幅值随时间的分布图

精度12位,量程 $\pm 5\text{ V}$ 。经过6h试验,接收到大量声发射信号,其典型波形如图7所示。与文献[12]中所述的因点蚀产生的声发射信号相符。接收到的所有声发射信号幅值与时间分布如图8所示。从图8中可以看出,随着试验时间增加,单位时间内产生的声发射信号数量以及幅值呈现减少趋势。该现象表明随着腐蚀时间增加,腐蚀产物逐渐堆积,影响了腐蚀进一步的产生,同样与文献[12]结论相符。由此可见,系统能够稳定长时间捕获微弱的腐蚀声发射信号。

4 结语

采用电荷放大电路、电压放大电路和带通滤波器三级结构设计了一种低噪声声发射信号调理系统。经试验验证,其系统噪声指标约为 $6.6\text{ }\mu\text{V}$,可用于金属腐蚀声发射检测。理论分析与试验表明,电荷放大电路中运算放大器的输入电压噪声是影响电路噪声的主要原因,选用低噪声高输入阻抗运放可以明显降低系统噪声。该系统结构简单,性能稳定,可用于实现嵌入式声发射检测系统。

参考文献:

- [1] 沈功田,戴光,刘时风. 中国声发射检测技术进展——学会成立25周年纪念[J]. 无损检测,2003,25(6):302-307.
- [2] JIRARUNGSATIAN C, PRATEEPASEN A. Pitting and uniform corrosion source recognition using acoustic emission parameters[J]. Corrosion Science, 2010, 52(1):187-197.
- [3] 徐健,吴欣强,韩恩厚,等. 声发射技术在金属电化学腐蚀与应力腐蚀研究中的应用[J]. 腐蚀科学与防护技术,2009(5):472-476.
- [4] 王伟魁,杜刚,曾周末,等. 酸性NaCl溶液中304控氮不锈钢腐蚀过程的声发射特征[J]. 化工学报,2010,61(4):916-922.
- [5] 王伟魁,曾周末,杜刚,等. 304控氮不锈钢应力腐蚀过程中声发射信号聚类分析[J]. 化工学报,2011,62(4):1027-1032.
- [6] PCI-2 Based AE system user's manual[M]. Princeton Junction: Physical Acoustics Corporation,2002.
- [7] 李金田. 压电传感器与前置放大器的配接[J]. 传感器技术,2004(1):54-56.
- [8] DU Gang, LI Jian, WANG Wei-kui, et al. Detection and characterization of stress-corrosion cracking on 304 stainless steel by electrochemical noise and acoustic emission techniques[J]. Corrosion Science, 2011, 53(9):2918-2926.
- [9] 杨朝龙,滕建辅. 高通跨阻滤波器的设计[J]. 电路与系统学报,2012(6):132-136.
- [10] 杨勇,邢磊,诸远奇,等. 压控电压源2n阶单位增益巴特沃斯低通滤波器优化设计[J]. 电子学报,2011(8):1894-1897.
- [11] 何峥嵘. 运算放大器电路的噪声分析和设计[J]. 微电子学,2006(2):148-153.
- [12] GANG D, SHIJIU J, CONGYING Z, et al. A study on acoustic emission technology for tank bottom corrosion inspection[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials,2010,57(6):275-279.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告