

# 一个高抗干扰数字自动控制增益的声发射监测系统

刘泽西, 吴 垒, 孔 力

(华中科技大学控制科学与工程系, 湖北省武汉市 430074)

**摘 要:**工业现场工况监测常常面临两个主要问题:微弱检测信号需要根据实时状况自动变增益放大;在恶劣强电磁场环境下,检测信号能否屏蔽掉绝大部分干扰,传递到计算机进行进一步处理。针对这两个问题,开发了一个高抗干扰数字自动控制增益的声发射监测系统,可适合于强电磁场环境,自动地调整前置放大器的增益。该系统包含一种大动态变化范围的新型数控可变增益放大电路、电源管理电路、模拟信号光纤传输电路和数字信号光纤传输电路。介绍了系统结构、电路原理及实验结果。

**关键词:**微弱检测信号;数字可变增益;光纤传输

**中图分类号:** TP277

## 0 引 言

材料结构受外力或内力作用产生位错、滑移、微裂纹形成、裂纹扩展、断裂,以弹性波的形式释放出应变能的现象称为声发射。声发射一般是频率为 20 kHz ~ 20 MHz 左右的微弱声波。声发射信号来自缺陷本身,同样大小和性质的缺陷,由于所处的位置和所受应力状态的不同,其声发射也有差别,故可用声发射来检测缺陷的程度或监测运转的机器,例如桥梁结构安全以及大型发电设备内部局部放电检测<sup>[1]</sup>。了解来自缺陷的声发射信号,建立声发射信号特征模型,就可以长期对缺陷的安全性进行监测,这是声发射技术优于其他方法的一个重要特点。声发射传感器不同于加速度传感器,它靠压电晶片自身的谐振变形把被测物体受应力波作用时表面振动声波大小转化为相应的电压信号输出。

由于声波在不同媒质交界面上的反射和散射以及同一媒质传播都会引起声能的衰减,实际压电晶片接收到的声信号已经非常微弱,现场干扰信号可能把实际声信号湮没。因此,这种由压电材料感知的微弱毫伏级电压信号必须经滤波放大后传输,才能减弱干扰信号对它的影响,并提高信噪比。因压电晶体带负载能力差,因此在保证精度的条件下必须提高输入信号的放大倍数。以上要求前置放大电路不仅要有较大的输入阻抗、高的共模抑制比、低噪声系数性能,并满足检测高频响特性,具有线性大动态范围,最好能够自动调节增益,以避免小信号时放大倍数不够,而信号较大

时放大严重饱和<sup>[2]</sup>。

室外金属压力容器及工程设施在役监测通常采用声发射技术<sup>[3,4]</sup>。不同的工况下,弹性波强度变化较大,声发射前置放大器必须能自动控制增益。由于交流电源供给困难,而且易受到强电磁场干扰,最好采用蓄电池供电。然而,市场上现有的声发射前置放大器没有增益自动调节功能,而且均为交流供电,不适合强电磁场环境。因此,本文开发了一个具有数字自动控制增益的声发射监测系统。声发射前置放大器采用蓄电池供电,避免交流电源内含的干扰。该系统具有强抗干扰和电源管理功能,适应高磁场高电压的恶劣环境,自动定时采样,能长期无人值守,在现场取得满意的效果。

## 1 数字自动控制增益的声发射监测系统结构

系统由声发射传感器、前置放大器、光电转换电路及光纤、高速数据采集卡和计算机软件组成,见图 1。

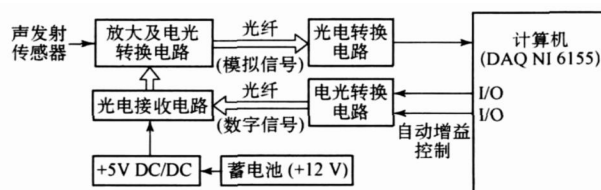


图 1 声发射监测系统框图

声传感器检测频带的选择是提高声传感器检测灵敏度的关键因素之一,传感器采用美国物理声学公司 WD 宽频响应差动结构声发射传感器,其频响范围为 100 kHz ~ 2 MHz,工作温度在 - 65 ~ 177 。考虑到该金属压力容器所处的恶劣强电磁场环境,声发射传感器和前置放大器被双重屏蔽,安放于金属压力容

收稿日期: 2007-10-09。

器上,高速数据采集卡及计算机远离金属压力容器近 100 m。放大的声发射模拟电信号将被转换成调制的光信号,通过光纤传送到计算机外一个光电转换器,变回模拟电信号再进入计算机采样卡成为数字信号。计算机发出的自动控制增益控制信号也通过光纤传回到前置放大器,实现增益的自动控制。这样,极大地减少强电磁干扰,确保检测信号的可靠性。为了节省电池能量,系统增加了电源管理功能,使系统能够自动进入休眠状态或定时采样状态。

经过现场测试,压电传感器输出 2 mV ~ 10 mV 之间的信号。光电二极管 MF359 的线性最佳工作区为

5 mA ~ 65 mA,由于单电源供电,中点可设在 35 mA 处。电压转换电流电路的输入电平应当在 0.165 V ~ 2.145 V,其中点电平是 1.155 V。因此,放大后的传感器电压信号应在  $\pm 1$  V 之间变化。总的最大放大增益是 500 倍。显然,一级放大器不能胜任这种高频信号的放大。通常,连接电缆的分布电容影响压电传感器灵敏度,电压放大器测量系统对电缆长度变化很敏感,更换电缆时需要重新标定。这里,压电传感器紧挨着前置放大器,电缆长度非常短且位置不变,连接电缆的分布电容受到控制,电压放大器能够胜任电荷放大器的的工作。系统电路原理如图 2 所示。

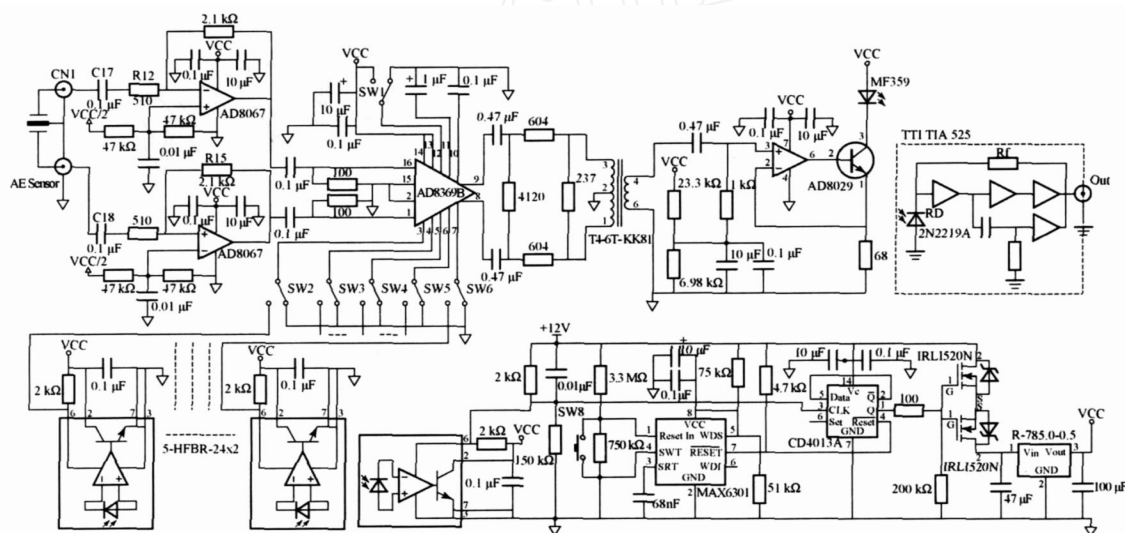


图 2 电路原理

AD8067 组成高阻抗差动输入电路,拾取压电传感器毫伏级电压信号,其信号增益  $A_v$  为 10。通过差动放大,降低由传感器及其电缆引进的共模电噪声;AD8067 除了放大作用外,它把压电传感器的高输出阻抗转换为低输出阻抗,即阻抗匹配和转换作用。AD8369 是数字可变增益放大器,保持高频特性不变状况下,最大的信号增益可达到 100。高频变压器 T4-6T 能够匹配输出阻抗,并将差动输出转为单端输出,它的工作频率范围在 20 kHz ~ 250 MHz,其插入损耗在 0.3 dB 左右。AD8029 是一个高频低功耗电压电流转换器,其静态电流只有 1.6 mA,它将 AD8369 输出电压信号转换成电流信号,驱动光电二极管 MF359,使模拟电流信号变换成调制的光信号,通过光纤传到计算机端的光电转换器 TT-TIA525,光信号又变成模拟电压信号送到采样卡。MAX6301 和 MC14013 组成电源管理电路,类似一个电源开关,在计算机控制下启动电源供给前置放大器。MAX6301 最大静态电流为 4  $\mu$ A,MC14013 最大静态电流为 60  $\mu$ A,对蓄电池消耗极微。当计算机采样发现压电传感器信号较小时,

AD8369 自动地被设置较大的增益;当压电传感器信号较大时,AD8369 自动地被设置较小的增益。图 3 为数字控制信号光纤传输电路框图。

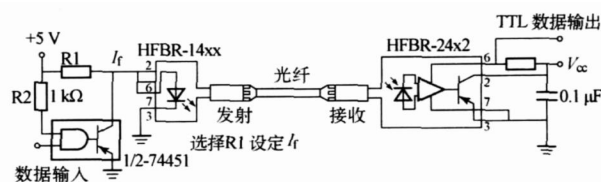


图 3 数字信号光纤传输电路框图

## 2 关键芯片选择与分析

对第 1 级放大器的基本要求是:高输入阻抗,高增益带宽及单电源供电。大部分差动放大集成电路芯片无法同时满足这些条件。经多方比较,AD8067 被挑选作为第 1 级放大器,它是一款高速低噪声 FET 输入、满幅度输出放大器,其输入阻抗为 1 000 G;当增益为 10 dB 时,带宽为 54 MHz;转换速率为 640 V/ $\mu$ s;高的共模抑制比 (-106 dB);经过激光精调的

AD8067直流偏置电压最大不超过 1 mV;其供给电流只有 6.5 mA;非常适用于单电源、大动态低失真场合。电阻 R12、R15和电容 C17、C18组成滤波器,滤掉不需要的频率信号。

AD8369是一种单电源供电、以 dB 为单位的线性数字 VGA(可变增益放大器),具有 45 dB 的增益调节范围,3 dB 步长,工作频率从低频到 600 MHz,在 380 MHz 范围内  $\pm 20$  MHz 带宽增益波动(平坦度)小于 0.15 dB。输入阻抗为 200  $\Omega$  时,动态输入阻抗匹配可获得 22 dB 的低噪声系数。在  $V_{OUT} = 1 V_{P-P}$ ,  $f_{in} = 70$  MHz,负载为 1 k  $\Omega$  时,双音 3 阶互调失真为 -69 dBc。AD8369 的增益控制是通过一个数字接口(串行或并行)实现的,以减低电路设计的复杂程度<sup>[6,7]</sup>。

AD8369 的内部电路结构如图 4 所示,由一个 7 阶 R-2R 梯形电阻衰减网络、固定增益放大器、3 dB 开关衰减器、互补电流源输出网络、偏置电路、增益步进控制电路和数字接口等部分组成。AD8369 工作时,数字接口(并口或 SPI 串口)接收的 4 位二进制增益控制代码,其高 3 位用于控制跨导单元和梯形电阻衰减网络,实现步长 6 dB、最大 42 dB 的增益调节,最低位用来控制 3 dB 开关衰减器,并配合前面的电阻衰减网络,最终实现在 45 dB 增益调节范围内,3 dB 步长的数字增益调节功能。AD8369 的输出电路采用两对互补电流源的全差分形式,差分输出阻抗 200  $\Omega$ 。

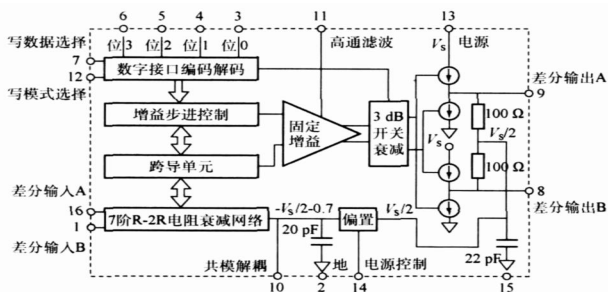


图 4 AD8369 内部电路框图

AD8369 的电压增益可以用下式计算:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 0.6 \frac{200R_L}{200 + R_L} \frac{1}{\sqrt{2}^{(15-n)}} \quad (1)$$

式中:  $R_L$  为外接负载电阻,单位是  $\Omega$ ;  $n$  为增益控制代码,最小是 0,最大是 15。

显然,  $R_L$  与 AD8369 的输出电阻的并联值共同决定 AD8369 的最大增益和输出信号的幅值,但  $R_L$  的大小并不影响该芯片的增益调节步长。表 1 显示了 AD8369 的引脚及其功能;表 2 给出不同负载下增益与增益编码的关系。

AD8369 的增益调节步长、线性动态范围、频响特

性、增益调节的响应速度及噪声系数等参数对系统的设计非常关键。当增益控制代码不变时,负载  $R_L$  增大,则芯片的增益提高;当负载电阻一定时,在整个 45 dB 增益调节范围内,AD8369 的增益与增益控制代码之间都能保持良好的、以 3 dB 为单位步进的线性关系。在从低频到 400 MHz 工作频率范围内,AD8369 都具有较平坦的幅频特性。当负载电阻由 1 k  $\Omega$  变为 200  $\Omega$  时,在同一电源电压和工作频率条件下,噪声系数大约可降低 1.5 dB;当电源电压由 3 V 增大到 5 V 时,在同一负载和工作频率条件下,噪声系数略有上升;而当电源电压和负载都不变时,噪声系数随工作频率的提高而增加;但当 AD8369 的工作频率低于 300 MHz 时,其噪声系数可保证小于 7 dB。

表 1 AD8369 引脚及功能

编号	名称	功能
1	差分输入 B	交流耦合,均衡差分输入,具有内部偏置
2	地	芯片地,连接到低阻抗地
3	位 0	增益选择最低有效位,串口 SPI 模式时为数据输入脚
4	位 1	增益选择控制位,串口 SPI 模式时为时钟输入脚
5	位 2	增益选择控制位,串口 SPI 模式时无功能
6	位 3	增益选择最高有效位,串口 SPI 模式时无功能
7	写数据选择	数据使能,写数据到数据寄存器
8	差分输出 B	交流耦合,均衡差分输出,对电源中点电平偏置
9	差分输出 A	交流耦合,均衡差分输出,对电源中点电平偏置
10	共模解耦	除了现有内部解耦外,连接一个旁路电容到地,提供附加共模解耦
11	高通滤波	连接一个电容到地,用于设定高通滤波的转折频率
12	写模式选择	串/并接口选择,接连电源时为串口 SPI,接地为并口操作
13	电源	正的电源电压, $V_S = +3 V \sim +5.5 V$
14	电源控制	接连电源时为启动芯片工作,接地为待机状态(待机电流小于 1 mA)
15	地	芯片地,连接到低阻抗地
16	差分输入 A	交流耦合,均衡差分输入,具有内部偏置

MF359 是一种端部出射的发光二极管,专用于 62.5  $\mu m$  / 125  $\mu m$  传输光纤。其功率波长为 780 nm,电信号频宽为 55 MHz,数字孔径为 0.275,双透镜结构能将光功率最佳地耦合进光纤。TTFTA525 是一个连接方便的高速光纤光电转换器,具有 125 MHz 频宽,少于 3 pA /  $Hz^{1/2}$  RMS 噪声水平;跨导范围在 14 kV;检测波长范围为 400 nm ~ 1 000 nm,数字孔径为 0.29;线性输出功率大于 12 mW,输出负载在 50  $\Omega$  时,输出电压峰峰值为 2 V,输出偏置电压为  $\pm 1 V$ 。其输出电压直接接地接 NDAQ6155 采样卡。PCI 总线 NDAQ6155 多功能采样卡有 4 个 12 位分辨率模拟输

入通道,每通道采样率为  $10 \times 10^6$  次采样 /s,模拟电压输入范围  $\pm 200 \text{ mV} \sim \pm 42 \text{ V}$ ,每通道带有去假频滤波器;2个 12 位分辨率模拟输出通道,每通道输出速率为  $4 \times 10^6$  次采样 /s,8 个数字输出接口,5 V TTL / CMOS电平;2个 24 位计数器。1 个数字 I/O 用于控制电源启动;4 个数字输出接口用于控制 AD8369 的增益。

表 2 增益编码与电压增益 ( $V_s = 5 \text{ V}$ ;  $f = 70 \text{ MHz}$ )

增益编码	位 3 (脚 6)	位 2 (脚 5)	位 1 (脚 4)	位 0 (脚 3)	负载 $R_L = 1 \text{ k}$		负载 $R_L = 200$	
					电压增益 /dB	放大倍数	电压增益 /dB	放大倍数
0	0	0	0	0	- 5	0. 552	- 10	0. 331
1	0	0	0	1	- 2	0. 781	- 7	0. 469
2	0	0	1	0	1	1. 105	- 4	0. 663
3	0	0	1	1	4	1. 563	- 1	0. 938
4	0	1	0	0	7	2. 210	2	1. 326
5	0	1	0	1	10	3. 125	5	1. 875
6	0	1	1	0	13	4. 419	8	2. 652
7	0	1	1	1	16	6. 250	11	3. 750
8	1	0	0	0	19	8. 839	14	5. 303
9	1	0	0	1	22	12. 500	17	7. 500
10	1	0	1	0	25	17. 678	20	10. 607
11	1	0	1	1	28	25. 000	23	15. 000
12	1	1	0	0	31	35. 355	26	21. 213
13	1	1	0	1	34	50. 000	29	30. 000
14	1	1	1	0	37	70. 711	32	42. 426
15	1	1	1	1	40	100. 000	35	60. 000

3 实验与结论

为了验证所研制的高抗干扰数字自动控制增益的声发射监测系统的频响特性,采用美国材料与测试协会推荐的方法,对系统进行了标准铅心折断信号采集校正试验<sup>[8]</sup>,即把 WD 声发射传感器用耦合剂吸合在材质与压力金属容器相同钢板上,相距声发射传感器大约 30 mm 的地方折断直径为 0. 5 mm,长度为 3 mm 的 2H 铅笔心,断铅信号被声发射传感器拾取并转换为电信号输出到高抗干扰数字自动控制增益的声发射监测系统,最后由光纤送到 4 通道的 PC HDAQ6155 数据采集卡进行信号数据采集,采集到的数据最后由计算机软件进一步分析和显示。

图 5 展现了前置放大器的输入信号与 TTI-TA525 的输出信号的波形。曲线 是 AD8369 增益编码为 1000 时的 TTI - TA525 的输出信号;曲线 是 AD8067 的输入信号。波形显示这个前置放大器能够极小失真地放大声发射信号。

现场实验表明:该系统具有信号输出电压幅值高、频率响应范围宽、灵敏度高、抗干扰极强、使用方便等特点,能够用于工业生产设备的状态监测。系统的主要缺点是 6 条光纤成本较高,下一步将利用低成本、低功耗微电脑 MSP430F 来控制数字增益可调放大器 AD8369。把 MSP430F 融合于前置放大器内,使 6 条

光纤减少为 2 条,一条传递传感器信号进计算机,另一条传递计算机控制信号到微电脑 MSP430F,让 MSP430F 设置 AD8369 的增益代码及电源管理,这将较大地减小系统成本。

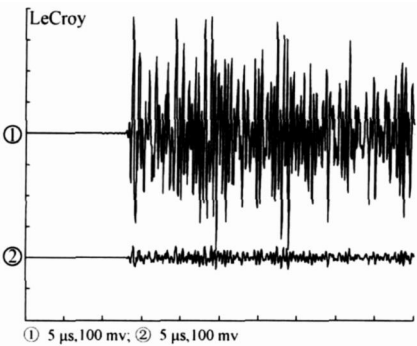


图 5 AE 传感器输出信号与计算机采样输入信号的比较

参 考 文 献

[1] STEEL J A, REUBEN R L. Recent developments in monitoring of engines using acoustic emission [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2005, 40 (1): 45-57.

[2] ELWAN H, ISMA L M. Digitally programmable decibel-linear CMOS VGA for low-power mixed-signal applications [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems- : Analog and Digital Signal Processing, 2000, 47 (5): 388-390.

[3] OBODOVSKY B, FEDCHUN A, NEDOSEKA Y. Application of a permanent acoustic emission monitoring system on four

- ammonia storage tanks[M]//Ammonia Plant Safety and Related Facilities—A ChE Technical Manual: Vol 47. 2006: 23-34.
- [4] JIAO Jingpin, HE Cunfu, WU Bin, et al. A new technique for modal acoustic emission pipeline leak location with one sensor[J]. Insight Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2004, 46(7): 392-395.
- [5] 范雷雷, 施惠丰. 声发射技术在设备状态检修中的应用[J]. 电力设备, 2004, 5(11): 41-43.
- [6] Analog Device Inc AD8369 data sheet[EB/OL]. 2002-06-12/2002-12-10. <http://www.analog.com>.
- [7] NEWMAN J. A new 45 dB 500 MHz variable gain amplifier simplifies adaptive receiver designs[EB/OL]. 2001-12-01/2002-05-10. Analog Device Inc.
- [8] ASTM E 976-94. Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response[S]. Philadelphia, PA, USA: American Society for Testing and Materials 1994.
- 刘泽西 (1984-), 男, 美国坦普尔大学博士研究生, 从事自动化检测与控制研究。

## An Acoustic Emission Monitoring System with Digitally Controlled Variable Gain Amplification

LIU Zexi, WU Lei, KONG Li

(Department of Control Science and Engineering,

Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** There are two major issues in weak signal detection of industrial processes. One is that signal gain must be automatically set-up according to real time signals so as to avoid saturation or insufficiency; another is anti-interference, especially in a very strong electromagnetic field. An acoustic emission detection system with digitally controlled variable gain and anti-interference in a strong electromagnetic field is developed. The system consists of an impedance match circuit, a novel variable gain amplifier (VGA), a power management, an analog optical fibre transmitter and several digital optical fibre transmitters. The structure of the system is described and the experimental results are demonstrated.

**Keywords:** weak signal amplifier; digitally controlled variable gain; optical fibre transmitter

(上接第 43 页)

### 5 结束语

本文探讨了使用免费 I<sup>2</sup>C Master Core 的方法, 方便地实现了基于 Nios 的 I<sup>2</sup>C 接口芯片的开发, 为 I<sup>2</sup>C 的电子工程设计使用提供了一种简单快捷的方法。

### 参 考 文 献

- [1] 李渔. 基于 NDS 的 I<sup>2</sup>C 总线接口芯片 AT24C16 读写的实

现[J]. 信息技术, 2006(2): 99-102.

- [2] The I<sup>2</sup>C-bus specification[M]. Philips Semiconductors 2000.

- [3] HERVELLE R. I<sup>2</sup>C-master core specification[M]. 2003.

- [4] 李云, 刘桂华. FPGA 与 I<sup>2</sup>C 总线器件接口设计[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2004, 41(z1)(10): 290-295.

马金岭 (1975-), 男, 工程师, 研究方向为卫星通信及电子电路设计。

## Implementation of I<sup>2</sup>C Interface Based on Nios

MA Jinling<sup>1</sup>, LIU Guimin<sup>2</sup>, LI Hongbo<sup>3</sup>, LI Yuguang<sup>3</sup>

(1. The 63rd Research Institute of PLA General Staff Headquarters, Nanjing 210007, China;

2. Nanjing Sino-German Protection & Substation Control Systems Ltd, Nanjing 210003, China;

3. Hebei Polytechnic University, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** The I<sup>2</sup>C bus interface is used comprehensively in electronic products. This paper briefly describes fundamental structure and specifications of I<sup>2</sup>C bus, basic operational principles of interface chip between I<sup>2</sup>C bus, and basic operational principles of I<sup>2</sup>C Master Core. The procedure of I<sup>2</sup>C interface chip (AT24C02) operated on Nios is introduced in detail. The C Language program code is offered finally.

**Keywords:** I<sup>2</sup>C bus; Nios; I<sup>2</sup>C Master core