

文章编号:1673-0062(2014)02-0061-06

声音传感器辐照实验研究

邓 骞

(南华大学 机械工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:在给定的剂量率点,对动圈式、电容式、硅微式声音传感器进行了大剂量辐照实验研究,观察传感器随总剂量增强时其输出信号的变化,分析辐射效应机理.结果表明:动圈式声音传感器耐辐照性能最强;硅微式声音传感器由于内部放大电路的静态工作点会在 γ 射线的影响下产生漂移,导致信号输出发生比较严重的失真;电容式声音传感器中用于电磁屏蔽的铝制外壳受到 γ 射线的影响会产生电荷累积效应,对信号引入较大的噪声.其研究结果对乏燃料后处理系统进行基于声信号的安全状态实时监测提供了支持,是后续故障分析诊断技术的应用的硬件保证.

关键词:声音传感器;辐照实验; γ 辐射

中图分类号:TP212 **文献标识码:**B

Irradiation Experiments Research of Sound Sensors

DENG Qian

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The irradiation experiments of three types of sound sensors in a given dose rate points are researched, the change of output signal is observed, and the radiation effect mechanism is analyzed. The results show that the moving coil sound sensor has the highest resistant radiation performance in the three types of sound sensors. There is an integrated amplifier circuit in the MEMS piezoelectric film sound sensor interior, static working point will drift and serious distortion in output signal will be caused by gamma rays effect. The output signal of the condenser sound sensor is very small, impedance transformation, small signal amplification and electromagnetic interference shielding in normal condition need to be design. But in irradiation environment, due to the influence of gamma rays, the charge accumulation effect will be produced at the aluminum shell and the large noise will be brought into the signal. The safe state real-time monitoring based on sound signal of lack fuel reprocessing system will be supported in result of this research, it is the following-up

收稿日期:2014-01-26

基金项目:衡阳市科技计划基金资助项目(2013KG65)

作者简介:邓 骞(1986-),男,湖南衡阳人,南华大学机械工程学院助教,硕士. 主要研究方向:机电系统控制.

hardware guarantee in the fault diagnose technology application.

key words: sound sensor; irradiation experiment; gamma radiation

以废弃物处理设施为主的核燃料循环系统运行的可靠性要求极高,现场环境有极强的放射性和强腐蚀性^[1]. 对系统关键设备进行可靠性分析,需综合运用设备状态监测技术、设备故障诊断技术,通过传感器采集被测系统产生的振动、噪声、温度等信号.但能在高辐射环境下长期工作的传感器没有成熟产品.由于 γ 射线产生的电离效应对半导体器件的损伤^[2],大部分传感器工作过早失效或无法使用,需采用耐辐射加固技术,这就限制了对核设备监测的信息种类.前期研究表明,采用声检测方式可以获得较多的设备运行信息,通过声音传感器辐照实验发现,抗辐射性能优异的声音信号前置探测单元相对容易研制^[3-4].

1 实验环境及对象

1.1 实验环境

乏燃料组件中存在大量没有消耗的 ^{238}U 或 ^{232}Th 等可增殖材料,未烧完的和新生成的 ^{239}Pu 、 ^{235}U 或 ^{233}U 等易裂变材料以及核燃料在辐照过程中产生的 Pu 、 Am 、 Cm 等超铀元素,另外还有裂变元素 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{99}Tc 等.在衰变8 a后,活化产物 ^{60}Co 的放射性活度仍然能够达到 10^3Ci 的量级.乏燃料后处理环境中存在大量的 γ 射线,在1至1.5 MeV能量之间^[5-6].

辐照实验在湖南省核农学与航天育种研究所进行,其辐照源为双栅 ^{60}Co γ 板源,约280 kCi.其剂量率点为研究所工作人员经过专业测试得出,能够很好的模拟出核设施系统强 γ 辐射现场环境.

辐照实验在室温下进行,考虑到温度的变化对实验所用传感器影响很小,故无需采用恒温箱进行实验.气压为正常大气压.

1.2 实验对象

1.2.1 动圈式声音传感器

动圈式声音传感器是依据电磁感应原理制成的.接受声波的膜片发生受迫振动,带动处于恒定磁场内的线圈切割磁力线从而产生交变的感应电动势,形成变化着的电信号.

辐照实验选用的动圈式声音传感器为广东得胜电子有限公司生产的TS-5型号.动圈式声音传感器输出电压信号幅值大,无需加预放大电路,接40 m电缆引出辐照室可直接读取输出信号.

1.2.2 电容式声音传感器

电容式声音传感器是利用导体间的电容充放电原理,以超薄的金属或镀金的塑料薄膜为振动膜感应声压,以改变导体间的电荷,经过放大,形成变化着的电信号.辐照实验选用的动圈式声音传感器为广东得胜电子有限公司生产的CTS-1型号.

电容式声音传感器需要外加直流电压供电,膜片与金属极板之间的电容量比较小,输出阻抗值很高,必须接入预放大电路来进行阻抗变换和放大.预放大电路是以结型场效应管2SK184搭建的放大电路,由于该电路属于小信号放大,对电磁干扰异常灵敏,整个电路需要进行电磁屏蔽.用铝制外壳包裹住传感器和预放大电路,信号通过电缆传输到上位机.在正常环境下测试性能优异.

1.2.3 硅微式压电薄膜声音传感器

硅微式声音传感器是将压电薄膜沉积在振膜上做振动而形成的传声器,大多采用MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems,微机电系统)加工工艺制备.硅微式声音传感器属于压电式声音传感器,包含一个因机械变形而产生电压(电荷)的传感器元件.在低于元件共振频率的范围内,电压(电荷)与声波振幅成正比.本次实验选用的硅微式压电薄膜声音传感器为Knowles Acoustics生产的型号为SPM0204HE5H-PB的硅微式声音传感器.

2 实验步骤

声音传感器辐照实验对象分别为动圈式声音传感器、电容式声音传感器、硅微式压电薄膜声音传感器.三种声音传感器均进行有声源激励辐照实验,采用普通电铃作为声源,传感器在高辐照环境中采集到电铃发出的声音,通过40 m长的电缆将信号传回到电脑声卡中,记录下实验数据并分析.电缆采用屏蔽电缆,能有效的减少电磁干扰将信号传输中引入的噪声将为最低.通过实验模拟出传感器在工作状态时经受大剂量的辐射照射后,其性能参数退化的程度.

3 实验结果与分析

3.1 动圈式声音传感器实验结果

将动圈式声音传感器置于量率为1.5 kGy/h

的位置进行实验. 动圈式声音传感器主要为机械式结构,并且直接输出的电压信号峰峰值最大可以达到 300 mV,输出信号信噪比大,抗干扰能力强. 永磁体耐受 2.5×10^5 Gy 的辐照剂量后,其磁性性能无明显变化^[8]. 传感器内部没有耐辐照性

能差的电子元器件,在受到高剂量辐照后仍然能够正常工作. 辐照 38 h 后传感器性能未发生明显变化,所受到的总剂量率为 5.7 kGy. 数据结果如图 1 所示,左侧为时域波形,右侧为频域波形,激励声源为电铃.

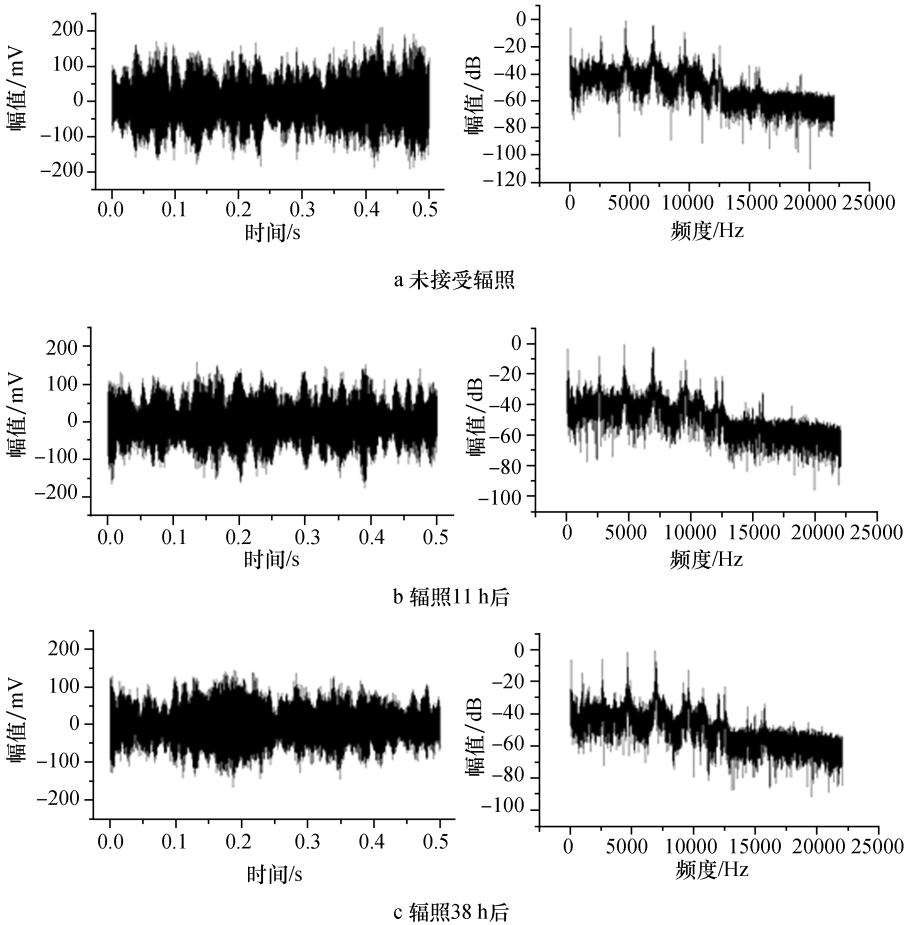


图 1 动圈式声音传感器电铃激励辐照实验数据

Fig. 1 Experiment data of moving-coil sound sensor in bell incentive

在本次实验设计之初,考虑到带电粒子穿过传感器磁力线可能引入噪声引起信噪比过低而无法识别出信号,但实验结果表明传感器在高辐照环境中仍然能够正常工作. 电铃产生的声音频率分量最大的为 6 960 Hz,其次为 4 620 Hz,2 600 Hz,9 670 Hz等,50 Hz 为工频干扰,是所有干扰中最大的一部分. 通过实验结果对比发现,辐照前后信号的频率分量以及幅值没有发生明显的变化,这表明动圈式声音传感器的频幅响应曲线以及灵敏度等几个关键性能指标没有发生明显变化.

3.2 电容式声音传感器辐照实验结果

将电容传声器置于剂量率为 1.5 kGy/h 的位置,激励声源为电铃. 辐照源还未升起时,能够清

楚的接收到电铃发出的声音. 但当辐照源升起,由于电离辐射的干扰,传感器接收到的信号完全被噪声淹没,无法正常工作. 在后续实验中已对结型场效应管放大电路进行了辐照实验,证明采用预放大电路的电容式声音传感器受到的干扰不是由结型场效应管受到辐射而导致的性能退化而引入的. 数据结果如图 2 所示,左侧为时域波形,右侧为频域波形,激励声源为普通电铃.

当辐照源升起后, γ 射线在铝制外壳上形成感生电荷,外壳上的电荷会随着辐照时间慢慢积累^[8-9]. 从图 2 中的对比发现,经过 29 h 辐照后,由累计电荷产生的脉冲干扰增大到了 4 倍左右,已经无法分辨出信号. 所受的总剂量为 43.5 kGy.

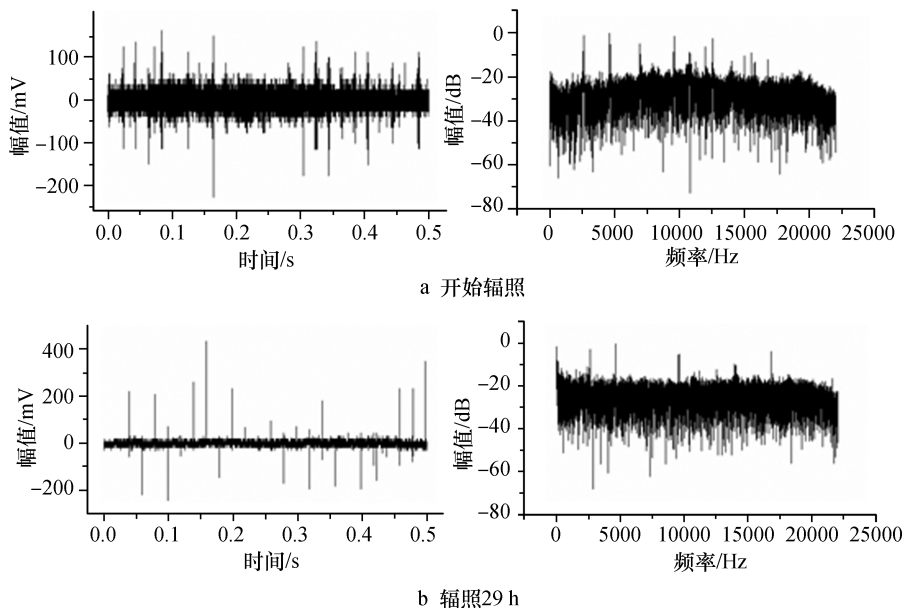


图2 电容式声音传感器电铃激励辐照实验数据

Fig.2 Experiment data of condenser sound sensor in bell incentive

内部的电容式声音传感器及其预放大电路的共地端接到了铝制外壳上,在正常的环境中能够起到屏蔽外界电磁干扰的作用,实现小信号放大.但在辐照环境中,外壳本身就存在电荷积累,引入的电磁干扰完全淹没了输出很小的电荷信号,故电容式声音传感器需要比较复杂的屏蔽措施才能够辐射环境下工作.

3.3 硅微式压电薄膜声音传感器辐照实验结果

将硅微式压电薄膜声音传感器置于剂量率为 1 kGy/h 的位置进行照射,电铃作为声源激励.数据结果如图 3 所示.

辐照开始前,采集到电铃的声音.数据结果如图 3a 所示,左侧为时域波形,右侧为频域波形.时域波形中,电铃产生的信号的峰峰值大概在 $\pm 2\ 000\ \text{mV}$,结合频域波形,可以明显观察出电铃产生的声音的频率分量,并且噪声比较小,监听中能够很清楚的听到电铃的声音.辐照开始后,在辐照前十分钟的过程中存在这样一个变化:信号的增益迅速增大,从图 3b 可以看出,在经过 6 min 辐照后,信号幅值的负半段峰值达到了 $-3 \times 10^4\ \text{mV}$,比未辐照前增大了 15 倍左右,而正半段在 $1.5 \times 10^4\ \text{mV}$ 位置发生信号失真的现象.对比频域波形,发现噪声开始增大,信噪比减小.监听中明显发现声音变得太大,出现失真的现象,并能够听到比较大的噪声.出现这种现象是由于硅微式声音传感器中集成了 N 沟道 MOS 场效应管放大电路.在开始辐照时,MOS 晶体管的开启电压 V_T 以及转移特性

开始往负方向漂移^[10],原先电路所在的静态工作点经过转移特性的漂移后对应更大的斜率以及更大的漏极电流 I_D ,这就导致放大后的信号增益变大,而正半段部分由于转移特性的漂移后超出了能够放大的电压范围,出现饱和失真.

当辐照 178 min 后,信号的增益下降了许多,峰峰值降到了 3 000 mV 左右,如图 3c 所示.观察频域波形,虽然信号的增益下降,但噪声并没有下降,特别是低频噪声大大增加了. N 沟道 MOS 场效应管在 γ 电离辐射下俘获正空间电荷使得开启电压向负方向漂移,但在高剂量下,因为界面态电荷为负电性,补偿了部分正空间电荷的影响,导致开启电压的漂移得到一部分的恢复.随着总剂量的增加,开启电压的漂移会得到一些恢复,但 MOS 管的其他参数会受到较大的影响.例如电离辐射会使沟道迁移率减少,从而降低 MOS 管的跨导,此外,MOS 场效应管的 $1/f$ 噪声与界面电荷和界面陷阱有关,所以电离辐射还会增加 $1/f$ 噪声^[11-13].

观察辐照 178 min 到辐照 37 h 的波形,基本上完整的反映出了信号的特征.但信号的幅值随着辐照时间的增加而慢慢降低,而噪声特别是低频的噪声慢慢增加.对比辐照 37 h 后的波形与未接受辐照的波形,发现幅值峰峰值差别不是太大,辐照后的低频噪声增加了大概 20 dB,而高频分量得到不同程度的衰减,最多的衰减了 10 dB.产生此种现象的原因是由于静态工作点相对工作曲

线的漂移,导致漏极电流大大增加,而选用的电池容量不是很大,电池电压的下降造成了信号的衰

减. 实验结束后取出器件,用万用表测量电池电压,电压由 3.6 V 下降到了 1.2 V,与预想相符.

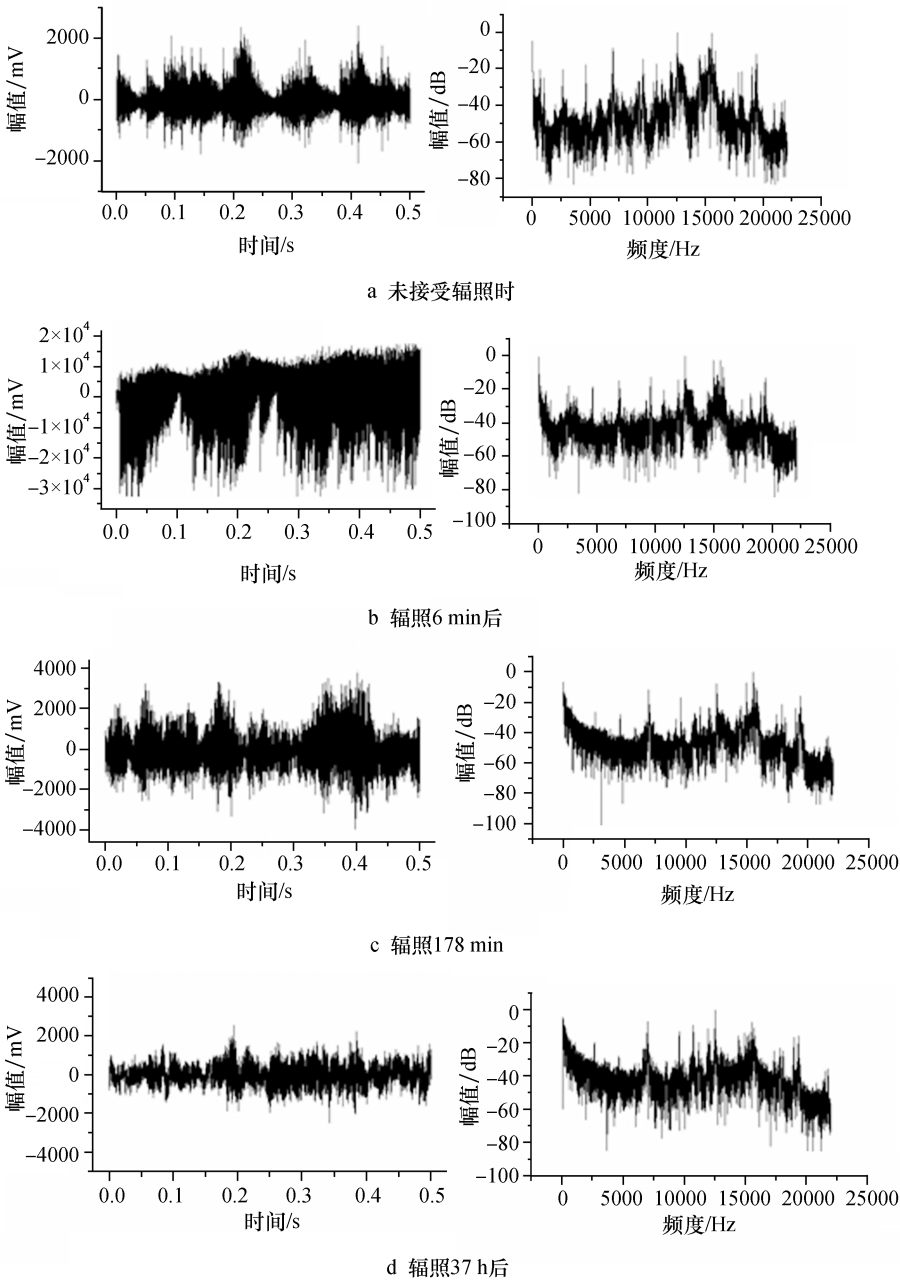


图 3 硅微式压电薄膜声音传感器电铃激励辐照实验数据
Fig.3 Experiment data of MEMS piezoelectric film sound sensor in bell incentive

在 37 h 辐照实验中,器件所受的总剂量为 37 kGy,辐照效应相当明显.

4 结 论

本文对三种声音传感器进行了辐照效应机理分析和 γ 射线辐照实验,获得的主要结论有:

1) 动圈式声音传感器抗辐照性能最优异,由于其内部结构没有抗辐照性能差的电子元器件或集成电路,换能形式为电磁感应,输出信号电压峰值大等原因, γ 射线的辐照对其性能几乎不造成影响,在耐受 5.7 kGy 辐射总剂量后仍然能够正常工作;

2) 电容式声音传感器属于小信号放大, γ 辐射打在屏蔽体如铝制外壳上会产生电荷累积效应, 容易将大的噪声干扰引入到电路中, 其屏蔽方式比较复杂;

3) 硅微式压电薄膜传感器内部集成了放大电路, 在 γ 射线的辐照下, 晶体管的静态工作点发生偏移, 导致输出信号的增益增大, 放大电路的漏源电流增大, 最后产生严重的削波失真。

在获取核设备工作时的声音信号进行故障诊断以及安全状态监测的方案中, 可以采用动圈式声音传感器作为前置探测单元。对采集到的音频信号进行频域分析并提取特征量, 通过相关算法建立起故障数据库, 进行在线的故障诊断和监测。

参考文献:

- [1] 刘永阔, 夏虹, 谢春丽, 等. 核电设备状态监测与故障诊断系统的研究[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(3): 200-205.
- [2] 陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 86-105.
- [3] 邓骞, 赵立宏, 左夏茂, 等. 图像传感器与声音传感器耐辐照实验[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2011, 25(3): 31-34.
- [4] 王建, 邹树梁. 钨和铅作为 γ 射线屏蔽材料的性能对比研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2011, 25(4): 19-22.
- [5] 李冠兴. 我国核燃料循环产业面临的挑战和机遇

[J]. 铀矿地质, 2008, 24(5): 257-267.

- [6] 苏卓, 邹树梁, 于涛, 等. 压水堆乏燃料源项计算与分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2011, 25(4): 9-12.
- [7] 杨仕清, 张万里, 龚捷, 等. 稀土永磁体的 γ 辐照效应研究[J]. 功能材料, 2000, 31(3): 250-251, 254.
- [8] Yamano Y, Ohashi A, Kato K, et al. Charging characteristics on dielectric surface by different charging processes in vacuum[J]. IEEE Trans. DEI, 1999, 6(4): 464-468.
- [9] Chen G, Davies A E, Banford H M. Influence of radiation environments on space charge formation in γ -irradiated LDPE[J]. IEEE Trans. DEI, 1999, 6(6): 882-886.
- [10] 王剑屏, 徐娜军, 张廷庆, 等. 金属—氧化物—半导体器件 γ 辐照温度效应[J]. 物理学报, 2000, 49(7): 1331-1334.
- [11] 王祖军, 唐本奇, 肖志刚, 等. CCD 电离辐射效应损伤机理分析[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(3): 565-569.
- [12] Pickel J C, Kalma A H, Hopkinson G R, et al. Radiation effects on photonic imagers—a historical perspective[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3): 671-688.
- [13] Hopkinson G R, Goiffon V, Mohammadzadeh A, et al. Random telegraph signals in proton irradiated CCDs and APS[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(4): 2197-2204.