

文章编号: 0258-0926(2018)03-0176-05; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0176

核反应堆控制棒驱动机构故障检测仪研制

何攀, 彭翠云, 曾杰

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 以控制棒驱动机构为研究对象, 基于机构结构噪声检测原理, 自主研发了一套故障检测仪, 并在试验台架模拟控制棒驱动机构上进行了测试分析, 测试结果表明该检测仪可实现控制棒驱动机构的故障鉴别, 为核反应堆控制棒驱动机构的安装调试和检修提供了一种科学有效的故障检测手段。

关键词: 控制棒驱动机构; 故障; 检测

中图分类号: TP216 **文献标志码:** A

Development of Fault Detection Instrument for Control Rod Drive Mechanism of Nuclear Reactors

He Pan, Peng Cuiyun, Zeng Jie

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Taking the CRDM as the study object, a fault detection instrument based on the detection theory of the mechanism structure noise is developed and tested on an experimental CRDM. Test result shows that the fault detection instrument can distinguish the fault of CRDM. An scientific effective fault detection method is provided for the installation and overhaul of CRDM.

Key words: Control rod drive mechanism (CRDM), Fault, Detection

0 引言

控制棒驱动机构是核反应堆的重要安全设备, 其运行状态直接关系到核反应堆的性能和安全。控制棒驱动机构在制造中可能存在缺陷, 在安装中发生变形或不对中等, 长期运行后由于磨损、结构劣化等因素可能引起控制棒驱动机构故障, 导致控制棒提升过程的失步、滑棒以及落棒过程的不畅甚至卡棒等现象。而上述显性故障往往是由早期的部件松动、阻滞、摩擦等早期隐性故障诱发的。目前, 核反应堆控制棒驱动机构仅依靠落棒时间测量和人工监听落棒行程的声音判断控制棒驱动机构的状态, 检测方式落后, 人为因素影响严重, 缺乏先进、可靠的早期故障检测手段。本文以核反应堆控制棒驱动机构为研究对象, 研制了一套早期故障检测仪, 并在试验台上

进行了测试分析。

1 检测原理

控制棒驱动机构内部出现松动、阻滞、摩擦等异常状态, 会诱发结构部件间出现相互作用力, 产生结构噪声, 然后以应力波的形式传递至控制棒驱动机构表面, 并且携带了控制棒驱动机构结构部件的故障信息。因此, 可以通过测量控制棒驱动机构外壳的结构噪声来实现控制棒驱动机构内部的故障检测。

结构噪声实际上是一种振动, 可以用位移、速度或加速度随时间的变化来描述, 测量振动就是将振动运动量转变成与之成比例的电学或其他便于观察、显示和处理的物理信号, 压电传感器就是将振动运动量转换为电荷的敏感元件。目前

收稿日期: 2018-01-30; 修回日期: 2018-04-20

作者简介: 何攀(1979—), 男, 副研究员, 硕士学位, 现从事核反应堆故障监测与诊断技术研究及设备研发工作

常用的是压电加速度传感器，具有频响范围宽、动态范围大、质量小等优点，但对后续电路要求较高，压电传感器可看成是一个能产生电荷的高内阻元件，可等效为一个电荷源和一个电容相并联的等效电路。

电荷放大器能直接将传感器产生的电荷信号转换成电压信号，它实际上是一个具有电容负反馈、高输入阻抗及高增益的运算放大器，其输出电压与输入电荷之间有如下关系：

$$U_0 = -\frac{AQ}{(1+A)C_f} \approx -\frac{Q}{C_f} \quad (1)$$

式中， U_0 为输入电压，V； A 为放大倍数； Q 为输入电荷，C； C_f 为反馈电容，F。

从式(1)可见，输出电压与输入电荷的频率特性只与反馈电容有关，而不受电缆电容的影响，同时 C_f 的误差也影响着放大器的误差，所以要求 C_f 必须有足够的精度。故障检测仪采集该电压信号，并在时域和频域与正常落棒和提棒的基准信号特征开展对比分析，从而实现控制棒驱动机构升降故障早期检测。

2 检测仪的设计与实现

控制棒驱动机构故障检测仪主要由压电加速度传感器、电荷放大器及信号测量主机、分析软件等构成，结构如图1所示。控制棒驱动机构动作时产生结构噪声，结构噪声被传感器获取，通过电荷放大器转换成模拟电压信号，再由信号采集模块转换成数字信号，通过外设部件扩展互连标准(PXI)总线传输至计算机。软件对信号进行分析处理，通过分析就能确定故障原因^[1-2]，保证控制棒驱动机构的正常运行。

2.1 压电加速度传感器

传感器采用双轴压电加速度传感器，在控制

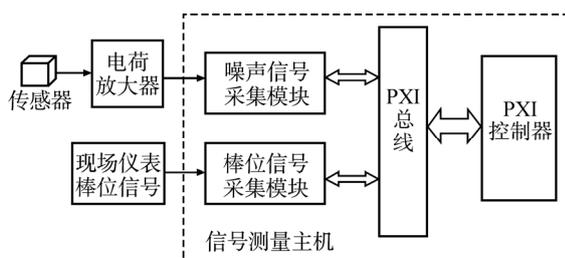


图1 检测仪总体结构

Fig. 1 Structure of Detection Instrument

棒驱动机构外壳上可同时测量2个相互垂直方向上的结构噪声，最大测量范围为1000 g (g 为重力加速度)，灵敏度系数为10 pC/g，频率响应范围为1 Hz~10 kHz，安装谐振频率高达40 kHz。

2.2 电荷放大器

电荷放大器将压电加速度传感器的电荷信号转换成电压信号，并实现信号的滤波和增益放大。其低通滤波的频率为10 kHz，并具有倍频程40 dB衰减特性；信号增益具有很宽的调整范围，在0.1 mV/pC到10 V/pC范围内可调，可根据实际测量情况适时调节。电荷放大器通过RS232接口与PXI控制器连接，由PXI控制器实现参数设置。

2.3 信号测量主机

信号测量主机集成为一台便携式一体化工控机。为了克服485等传统通讯方式数据传输与处理限制的问题^[3]，主机采用PXI总线与虚拟仪器技术相结合。图2为PXI总线测试系统的硬件结构框架。

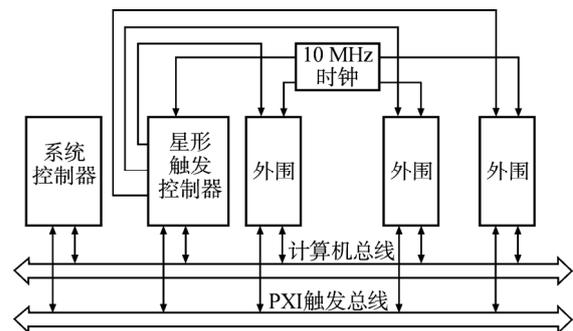


图2 PXI总线硬件结构

Fig. 2 Structure of PXI Bus Hardware

信号测量主机的模块包括：噪声信号采集模块、棒位信号采集模块、PXI控制器等，噪声信号采集模块接受来自电荷放大器的信号输出，棒位信号采集模块接受现场仪表的棒位信号输出。在PXI控制器的统一调配下，当检测到落棒和提棒的棒位触发信号，立即启动噪声信号采集模块实现噪声信号的采集与分析，保证采集到完整的动作过程信号。

噪声信号采集模块为4通道同步采样，采样分辨率为16位，每通道最高采样率为 $15 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ，电压输入范围为 $\pm 5 \text{ V}$ ，提供 $\pm 30 \text{ V}$ 过电压保护，具有软件轮询、触发器采样2种模式。

棒位信号采集模块为16通道采样，采样分辨

率为 16 位，每通道最高采样率 $10 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ，电压输入范围 $\pm 10 \text{ V}$ ，提供 $\pm 30 \text{ V}$ 过电压保护，具有软件触发、外部触发采样 2 种模式。

2.4 检测软件开发

检测软件以 PXI 控制器为硬件平台，运行于 Windows XP 环境下，编程环境采用 LabVIEW，数据库采用 Microsoft SQL Sever，具有友好的图形用户界面，操作方便直观，实现核反应堆控制棒驱动机构结构噪声的采集、分析、显示和存储等，软件系统总体结构框图如图 3 所示。

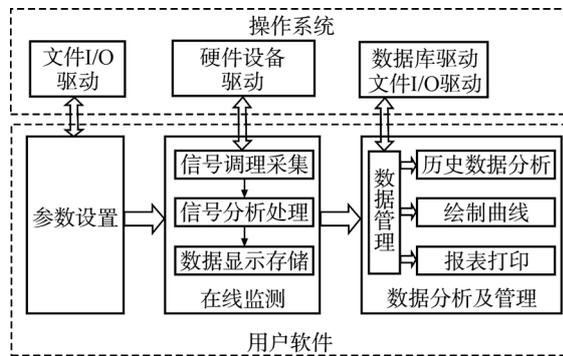


图 3 软件总体结构
Fig. 3 Structure of Software

3 信号分析方法

棒位信号是通过控制棒上的一组感应线圈获取，感应线圈间隔一定距离均布于控制棒，是标准的正弦信号，当控制棒穿过感应线圈，改变线圈的磁通量，相应感应线圈输出正弦信号的幅值将发生改变，信号如图 4 所示，同时采集所有感应线圈的输出信号，根据设定的信号阈值来判断控制棒是否穿过感应线圈，从而确定控制棒的位置。

结构噪声信号分析及特征提取主要针对信号峰值、有效值计算以及在频域上进行频谱变换。

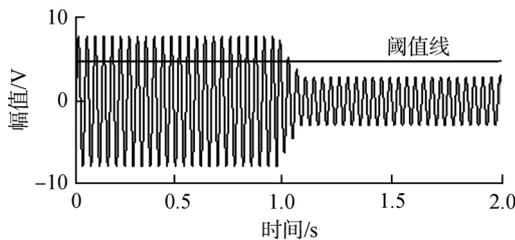


图 4 棒位信号
Fig. 4 Rod Position Signal

在落棒和提棒过程中，对噪声信号在时域提取对应不同棒位的峰值、有效值等特征量，具体方法如以下公式：

$$a_{\max} = \max(a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (2)$$

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2}{n}} \quad (3)$$

式中， a_i 为 2 s 内的噪声加速度采样序列， $(i=1,2,\dots,n)$ ， m/s^2 ； n 为 2 s 内的噪声加速度采样点个数； a_{\max} 为噪声加速度的峰值， m/s^2 ； a_{rms} 为噪声加速度的有效值， m/s^2 。

除上述信号时域特征外，为了更进一步地通过所测得的信号了解被诊断对象的动态行为，往往需要频域信息。在频域针对每帧数据在 10 kHz 频率范围内提取不同特征频率下的幅值等。

频域分析是将结构噪声进行快速傅里叶变换 (FFT) 后，求取各频率下的幅度，当驱动机构出现故障后相应的特征频率幅值将会有所改变。FFT 采用的是分裂基 (split-radix) 算法。将输出项按照奇偶分为 2 组，偶序列输出项使用基 2FFT 算法，奇序列输出项使用基 4FFT 算法^[4-5]。对 M 个点的序列 $x(m)$ 的离散傅里叶变换 (DFT) 的偶序列采用基 2FFT 算法，即：

$$x(2s) = \sum_{m=0}^{\frac{M}{2}} \left[x(m) + x\left(m + \frac{M}{2}\right) \right] e^{-j2\pi \frac{ms}{M/2}} \quad (4)$$

式中， $s=0,1,2, \dots, M/2-1$ ； j 为虚数。

对于奇数列输出项使用基 4FFT 算法，即：

$$x(4s+1) = \sum_{m=0}^{\frac{M}{4}-1} \left\{ x(m) + x\left(m + \frac{M}{2}\right) - j \left[x\left(m + \frac{M}{4}\right) - x\left(m + \frac{3M}{4}\right) \right] \right\} e^{-j2\pi \frac{ms}{M}} e^{-j2\pi \frac{ms}{M/4}} \quad (5)$$

式中， $s=0,1,2, \dots, M/4-1$ 。

4 测试与分析

4.1 测试环境与过程

检测仪研制完成后进行结构噪声测试，测试采用试验台架模拟核反应堆控制棒驱动机构。对驱动机构在正常状态和滚轮松动故障状态下的结构噪声进行了测试与分析。噪声测量方向为径向，

即垂直于控制棒向内。传感器为 Endevco 2273AM1 防辐射压电加速度传感器。

测试中，将核反应堆控制棒驱动机构故障检测仪和经过标定的噪声测试仪同时安装在测试对象上，让驱动机构模拟不同工况运行，对噪声信号进行同步测量，通过对比两者的测量值，获取研制仪器的测量误差。误差分析完成后，对控制棒驱动机构在正常状态和滚轮松动状态下的结构噪声进行测试与分析。

4.2 数据分析

驱动机构在模拟不同工况下，核反应堆控制棒驱动机构故障检测仪和噪声测试仪采集数据如表 1 所示。

表 1 误差测试数据
Table 1 Error Test Data

序号	噪声加速度/ $m \cdot s^{-2}$		误差/%
	噪声测试仪	故障检测仪	
1	1.52	1.56	2.6
2	4.34	4.29	1.1
3	8.21	8.36	1.8
4	12.72	12.86	1.1
5	14.47	14.78	2.1
6	16.65	16.24	2.5
7	18.27	18.54	1.5
8	23.85	23.23	2.6

误差测试结果显示，核反应堆控制棒驱动机构故障检测仪和噪声测试仪采集数据误差在 3% 以内，满足工程应用要求。

核反应堆控制棒驱动机构故障检测仪在驱动机构正常状态和滚轮松动状态下，落棒噪声信号的时域波形对比如图 5。

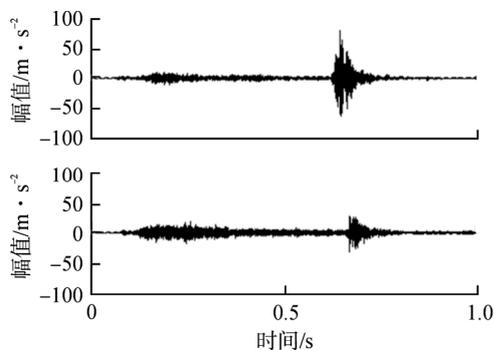


图 5 驱动机构正常（上）和滚轮松动（下）的信号对比
Fig. 5 Signal Contrast of CRDM Normal and Loose Idle Wheel

从图 5 中可见，落棒噪声信号波形分为两段，前段较长的波形是由落棒过程中摩擦产生的噪声，后一个冲击波为控制棒组件与底部缓冲座撞击产生；并且由于滚轮松动状态下，摩擦增大导致冲击减小。落棒过程中摩擦段（即信号前半段）的时域特征量（峰值、有效值）见表 2，从表 2 中可以看出，滚轮松动状态下的噪声时域特征量比正常状态明显增大。

表 2 落棒噪声信号的时域特征量
Table 2 Time-Domain Eigenvalue of Rod Dropping Noise Signal

实验状态	实验次数编号	峰值/ $m \cdot s^{-2}$	有效值/ $m \cdot s^{-2}$
正常	1	10.237	1.926
	2	10.614	2.401
	3	14.158	2.149
滚轮松动	1	18.021	3.095
	2	23.651	3.842
	3	16.649	3.57

落棒过程中摩擦段（即信号前半段）的特征频率幅值分布对比如图 6，滚轮松动与正常状态的频谱特征对比表明，在图 6 中 5 个特征频率的幅值除 2600 Hz 减小，其他都明显增大，特别在 1200 Hz、4500 Hz 处频谱幅值差异较大。

在控制棒驱动机构正常状态和滚轮松动状态下，对提棒过程的噪声信号有效值随棒位变化情况见图 7 和图 8。

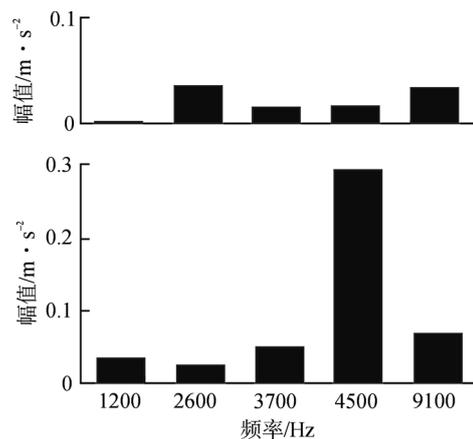


图 6 驱动机构正常（上）和滚轮松动（下）的噪声频谱特征对比

Fig. 6 Noise Frequency-Domain Eigenvalue Contrast of CRDM Normal (above) and Loose Idle Wheel (below)

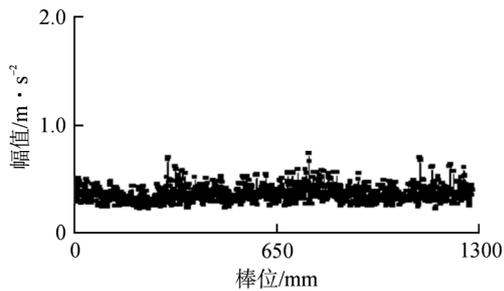


图7 驱动机构正常状态提棒噪声随棒位变化情况
Fig. 7 Noise vs. Rod Position of CRDM Normal

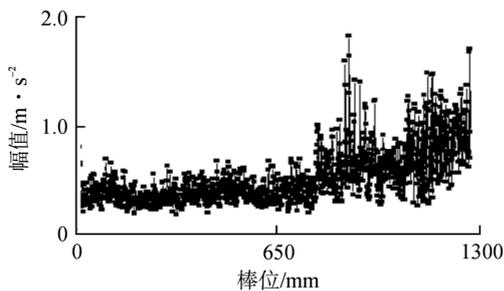


图8 驱动机构滚轮松动状态提棒噪声随棒位变化情况
Fig. 8 Noise vs. Rod Position of CRDM Loose Idle Wheel

从图7和图8中可见,在正常状态下提棒过程中,噪声信号分布均匀,没有较大的起伏,幅值基本在 $0.4\sim 0.8\text{ m/s}^2$ 之间;而滚轮松动状态下,棒位提升至 800 mm 后,噪声信号明显变大,且整体有上扬的趋势。这是由于滚轮松动状态下提升,丝杠处于偏心状态,当棒位提升至 800 mm 之后,加速弹簧便开始压缩,部件之间的接触摩擦增大,导致提棒噪声随之增大。

从上述特征分析可知,核反应堆控制棒驱动机构故障检测仪能够有效地识别驱动机构的滚轮松动故障。

5 结论

本文的核反应堆控制棒驱动机构故障检测仪基于PXI总线设计模块化的软硬件设计思想,具有良好的稳定性、可靠性。测试与分析结果表明:通过对试验台架模拟控制棒驱动机构进行噪声测试,可实现控制棒驱动机构故障的有效检测,为核反应堆控制棒驱动机构的安装调试和检修提供了一种科学有效的故障检测手段。

参考文献:

- [1] 马建仓,刘小龙. 航空发动机转子振动信号的早期故障分析[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(2): 276-279.
- [2] 张林锐,唐力伟,栾军英. 基于PXI总线和虚拟仪器的智能传感器测试系统[J]. 仪表技术与传感器, 2007, (5): 74-76.
- [3] 顾江,何攀,刘才学. PXI总线核反应堆主泵振动在线监测系统[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(12): 1498-1501.
- [4] 钟秉林,黄仁. 机械故障诊断学[M]. 第3版,北京:机械工业出版社, 2007.
- [5] 覃兴琨,申萍,王立德. PXI总线机车测试性能系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 307-310.

(责任编辑:马蓉)