

引用格式: 奚骏, 孙洪军, 李佳桐, 等. 振动监测系统的可调增益技术与实现[J]. 声学技术, 2020, 39(4): 490-493. [XI Jun, SUN Hongjun, LI Jiatong, et al. Adjustable gain technique and implementation of vibration measurement system[J]. Technical Acoustics, 39(4): 490-493.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.04.018

振动监测系统的可调增益技术与实现

奚 骏, 孙洪军, 李佳桐, 符栋梁

(中国船舶重工集团公司第 704 研究所, 上海 200031)

摘要: 文章设计了一种具有可调增益功能的振动监测系统。首先从监测层和测量层两个方面提出了振动监测系统的整体框架, 之后给出了硬件系统和软件系统的设计方法及软件实现代码, 利用控制芯片和可调增益放大器, 在监测系统中整合了一套可根据采集信号幅值大小调整增益的数据采集装置; 利用模拟信号发生器对不加增益和设置可调增益之后的两种信号进行了对比分析, 并在汽轮发电机组实际工况下进行了振动信号采集。结果表明, 具备可调增益功能的振动监测系统可有效提高采集信号的信噪比, 提高汽轮发电机组的振动监测能力。

关键字: 振动监测; 可调增益; 数据采集; 信噪比

中图分类号: TN722

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-04-0490-04

Adjustable gain technique and implementation of vibration measurement system

XI Jun, SUN Hongjun, LI Jiatong, FU Dongliang

(No.704 Research Institute, China Shipping Industry Corporation, Shanghai 200031, China)

Abstract: In this paper, a vibration monitoring system with adjustable gain function is designed. Firstly, the whole framework of the vibration monitoring system is proposed from two aspects of the monitoring layer and the measuring layer. Then the design method of hardware system and software system and the code of software implementation are given. A set of data acquisition devices which can adjust the gain according to the magnitude of the acquisition signal is integrated into the monitoring system by using the control chip and the adjustable gain amplifier. The analog signal generator is used to compare and analyze the signals without gain and with adjustable gain, and the vibration signal is collected under the actual condition of steam turbine generator set. The results show that the vibration monitoring system with adjustable gain function can effectively improve the signal-to-noise ratio of the acquisition signal and the vibration monitoring capability of the turbine generator set.

Key words: vibration monitoring set; adjustable gain; data acquisition; signal-to-noise ratio

0 引言

振动测量系统是用于监测设备运行振动情况的常用系统, 是振动噪声控制领域中必不可少的重要部分^[1-2]。在振动噪声控制工程应用领域, 一旦出现振动故障, 面临维护难度和成本极高的问题, 因此需使用振动状态监测装置监测其运行状态, 发现异常振动问题, 消除安全隐患, 降低设备风险, 以保障设备的安全可靠运行。

振动监测装置一般是对机器振动的基本参数进行测量, 测量振动结构上某点的位移、速度、加速度等参数, 用于识别该构件的运动状态和噪声程度^[3], 一般利用传感器获取振动位移和加速度等信息, 并将其转换为易于处理的信号^[4], 通过对信号

的分析, 判断机械设备振动的程度, 从而有效地施加减振措施或诊断故障^[5]。由于测量设备处环境复杂, 噪声源种类较多, 以及电器干扰等因素, 振动信号会叠加许多干扰信号, 传统的振动监测系统采用对采集信号进行倍数放大或缩小的方法, 单纯调整增益倍数, 信号过大会会引起跳量程, 而信号较小时信噪比又很差。因此, 为确保振动监测结果的有效性, 本文设计了一种具备可调增益功能的振动监测系统^[6-8], 在传感器输出电压采样前施加合理增益, 能够做到在线、实时控制数据采集(Analog-to-Digital Converter Sampling, ADS)电路电压的放大倍数, 确保采集到的信号始终保持在数据采集器的最优采样量程内, 满足 ADS 较高的信噪比。

1 系统设计

振动测量系统主要由前端传感器和监测终端等设备组成, 系统框图如图 1 所示。整个系统主要

收稿日期: 2019-07-25; 修回日期: 2019-08-29

作者简介: 奚骏(1971-), 男, 上海人, 本科, 研究方向为机电一体化。

通讯作者: 李佳桐, E-mail: 17740899512@163.com

分为两个层次，第一层是通过模拟信号线与信号转换箱相连接的各种类型的前端传感器，即采集层；第二层是处于局域网内，通过以太网相连用于采集前端传感器信号并作一定处理的监测终端，即监测层。

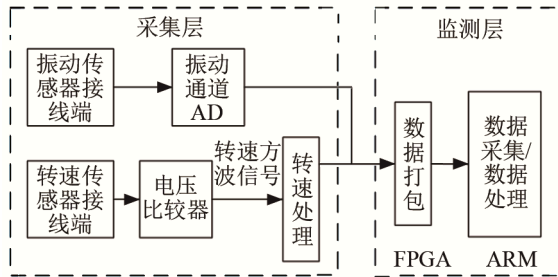


图 1 轴系振动状态监测系统框图
Fig.1 Block diagram of monitoring system for shaft vibration condition

采集层采集信号包括轴系振动位移信号、机脚加速度信号、轴承速度信号、设备整机转速信号。监测层主要包含 32 个通道的监测终端，通常布置于被测设备旁，该监测终端带有显示屏可方便现场查看设备振动及运行状态，主要用于集中各个测点信号，为前端传感器供电，实现测量层模拟信号的调理、变换、模数转换，可在终端内实现各路信号的处理、运算、设备全寿命周期内的数据库形式脱机离线存储。

监测终端为整个系统的核心，负责现场机组振动、转速、温度、压力等信号的采集和处理中同时作为可调增益控制的核心，它负责计算传感器初始测量值与数据采集量程的比例，按照设定好的放大倍数关系向可调增益放大器发送增益命令，控制增益的幅值。

数据采集通过现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)完成。FPGA 的采样频率为转速频率的 64 倍，对各个振动位移信号通道进行采集，以固定频率对振动加速度信号进行采集，然后将采集到的振动信号打包后发送到 ARM (Advanced RISC Machines)进行详细数据处理。ARM 对采集到的数据进行分析，处理特征数据，处理内容包括单位转化、快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)、各频段特征值求解、带通滤波和角度旋转等。

2 可调增益功能设计

为提高 ADS 模数转换数据采集时的信噪比，将采集信号的幅值控制在采集量程的合理范围内，本文在上述振动监测系统中整合了输入信号的可调增益功能。基本思路是在 ADS 数据采集器前端

增加一个可调增益控制器，以 ADS 数据采集量程范围为基准，通过第一批采集数据的最大值与 ADS 数据采集量程范围作比较，将较弱的信号进行放大，将过高的信号控制在合理范围内。可调增益功能主要由信号转换箱和监测终端两大部分实现，它以 PGA281 增益放大器为基础，结合 ARM 控制器，将这两部分组合成为一个可调增益程控 ADS 数据采集处理系统，系统原理框图如图 2 所示。

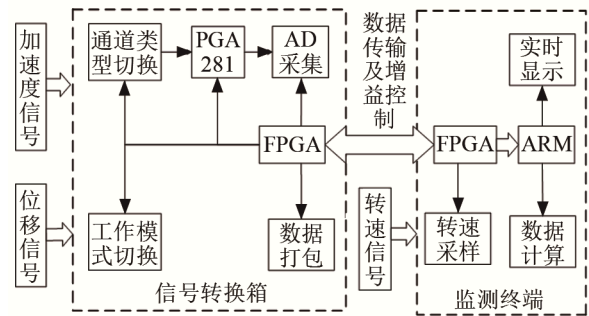


图 2 可调增益数据采集处理系统框图
Fig.2 Block diagram of adjustable gain data acquisition and processing system

采集加速度信号的传感器输出电压范围为 $-5 \sim +5 \text{ V}$ ，使用 ADS1278 高精度数据采集器进行数据采集，可采集电压量程为 $-2.048 \sim +2.048 \text{ V}$ 。设置采样频率为 128 kHz ，为避免第 1 包 131 072 个点数据超过 ADS 采集范围，首先向各放大倍数寄存器写入 0.5 倍放大参数，然后从 FPGA 采集 131 072 个点，同时将 FPGA 的振动加速度 FIFO(FIFO5)置于复位状态，暂停信号采集。将采集到的数据打包发送至主板 FPGA，主板 FPGA 对接收到的数据进行二次采样和滤波处理，然后把二次采样后的数据发给主控制板 ARM，找出 131 072 个点中， $0 \sim 7\text{FFFFFF}$ 数据的最大值，即正电压最大值；找出 $\text{FF}800000 \sim \text{FFFFFFF}$ (高 8 位补 FF) 的最小值，即负电压最大值，依据电压计算公式(1)，可以得到正电压最大值和负电压最大值，取绝对值可得电压最大绝对值。

$$V = 2.048 \times \frac{\text{HEX2DEC}(X)}{8\ 388\ 607} \quad (1)$$

由于 ADS 采集到的数据为 16 进制数据，因此需将 16 进制数据强制转换为 10 进制， $\text{HEX2DEC}(X)$ 即为该过程， X 为 16 进制原始数据，是有符号数。进行数字量化转换，当 X 为 $0 \sim 7\text{FFFFFF}$ 时，即所采集的 24 bit 数据最高位为 0，则表示所采集的电压为正电压，对应的模拟电压为 $0 \sim 2.048 \text{ V}$ ；当 X 为 $\text{FF}800001 \sim \text{FFFFFFF}$ 时，即所采的 24bit 数据最高位为 1，则表示所采集的电压为负电压，对应的模拟电压为 $-2.048 \sim 0 \text{ V}$ 。ADS1278 为 24 bit 数模转

换器，将该设备采集电压的幅值换算为 10 进制数字为 $2^{24}(-8\ 388\ 607\sim+8\ 388\ 607)$ ，相对应的电压采集范围 $-2.048\ V\sim+2.048\ V$ ，通过式(1)可以实时计算加速度计实测输出值 V 。

ADS1278 模数转换器在采集加速度计输出电压前，需根据实测电压大小对应调节至有效采集量程，因此需要在控制程序中规定不同范围的实测电压对应的增益幅值。对输入信号进行放大/缩小则要求电压放大部分按照给定的增益，由控制算法调节放大倍数来实现信号的放大/缩小，放大倍数与电压绝对值范围对应关系如表 1 所示。

表 1 控制寄存器放大倍数查找表
Table 1 Checklist of controlling register magnification

电压绝对值 范围/mV	写入数据		放大倍数
	10 进制	16 进制	
0~5	26	1A	176
6~10	25	19	88
11~20	24	18	44
21~35	23	17	22
36~45	7	07	16
46~65	22	16	11
66~85	6	06	8
86~130	21	15	5.5
131~175	5	05	4
176~255	20	14	2.75
256~355	4	04	2
356~500	19	13	1.375
501~700	3	03	1
701~1 000	18	12	0.688
1 001~1 400	2	02	0.5
>1 400	35	23	0.1673

依据得到的电压值 V 查询表 1，确定写入放大倍数寄存器的增益放大值，依据集成电路总线 (Inter-Integrated Circuit, I2C)地址与通道号对应关系，通过 I2C 写入数据，延迟 5 ms 后将振动加速度 FIFO (FIFO5)置于工作状态，继续采集一包 131 072 个点进行运算，以此循环完成整个增益控制环节。

振动监测装置共 32 个通道，其中 22 个通道用于采集振动加速度，10 个通道用于采集振动位移，加速度计的输出电压范围为 $-5\sim+5\ V$ ，根据需要，仅加速度信号需要进行增益控制，因此可调增益数据采集命令流程需要同时对 22 个通道进行配置，以达到实时调节增益的目的。

2.1 硬件系统设计

根据上述设计要求，可调增益电路如图 3 所示。可调增益的程控放大功能由可编程增益放大器 PGA281、AD 转换芯片 ADS1278 和主处理器来实现，PGA281 的增益大小通过主处理器的 IO 直接控制。系统每次确定下一包数据的增益之前，需要先给 PGA281 一个固定的增益，并通过 ADS1278 采集一包样本数据，然后根据样本数据的最大值确定

下一包数据的增益值。综上所述，程控增益电路最终实现对信号增益的在线控制功能。

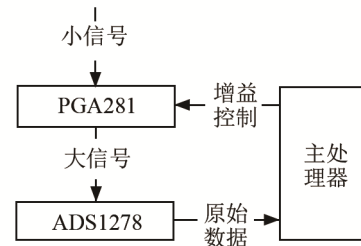


图 3 实现可调增益的电路图
Fig.3 Circuit diagram of implementing adjustable gain

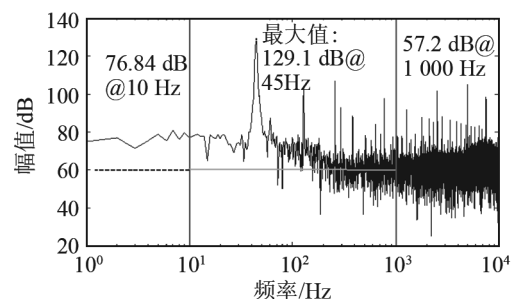
2.2 软件系统设计

软件部分使用 verilog 编程语言。由表 1 可知，为实现电路的可调增益控制功能，需要编程数据依据电压实测大小，写入对应控制量程的增益幅值。主处理器会根据当前时刻小信号的幅度来设定 PGA281 的增益，即每次设定有效增益之前，先设定一个固定增益，并通过 AD 采集一包样本数据，根据样本数据的最大值来给出相应的增益。

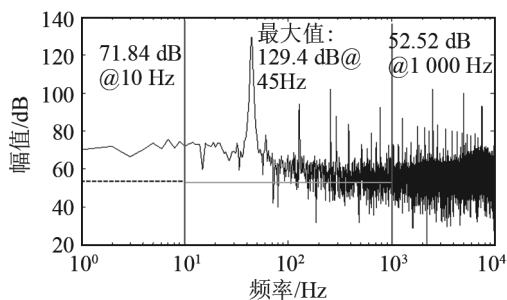
首先判断 131 072 点的绝对值最大值，并转换为电压值，其中放大倍数 N 共 16 级，为 $G_0\sim G_6$ 二进制数对应的 10 进制整数。然后在该电压值对照表内找到对应的放大倍数，并将每个通道的增益写入 FPGA，最终实现整个增益在线可控的效果。

3 模拟对比测试

使用函数发生器模拟频率为 15 kHz 的差分方波信号，同时使用函数发生器模拟频率为 45 Hz、幅度为 20 mV(峰峰值)的正弦波信号输入到机脚加速度通道 1，跟踪转速和固定采样共用一个物理通道，且共用一次采样的数据。利用 ADS 数据采集装置可获取该通道的振动频谱图，如图 4 所示。图 4(a)和图 4(b)分别为引入可调增益前后的频谱图，两者在 45 Hz 处的尖峰幅值均为 129 dB，但噪声均值分别为 60 dB 和 55 dB，可见引入可调增益后对于 ADS 采集数据的信噪比有明显的改善效果。



(a) 未加可调增益的频谱图



(b) 引入可调增益后频谱图

图 4 可调增益处理前后的振动信号频谱对比图

Fig.4 Spectrum comparison of vibration signals before and after adjustable gain processing

4 实际工况测试

汽轮发电机组实际转速工况为：转速 $6\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，功率 1.6 MW ，利用振动监测系统测量电机自由端轴承径向水平振动位移与振动加速度。在相同工况条件下测量 6 次，测得位移振幅峰值处频率变化在 0.2 Hz 以内，位移幅值变化在 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以内。将平均测量结果得到的振动位移幅值的时域波形图与频谱图分别如图 5 和图 6 所示。汽车机组自由端径向振动波特图如图 7 所示。根据实际工况下的测试数据可以看到，其轴系振动位移幅值较小，自由端振动位移有效值为 $5\text{ }\mu\text{m}$ ，振动加速度尖峰幅值为 106.6 dB 。

根据测试结果，在汽轮发电机组位移振幅较小

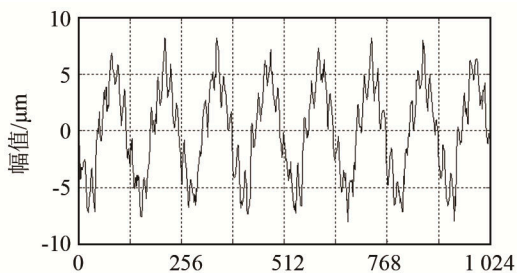


图 5 汽轮发电机组自由端的径向振动位移图

Fig.5 Radial vibration displacement at free end of steam turbine generator set

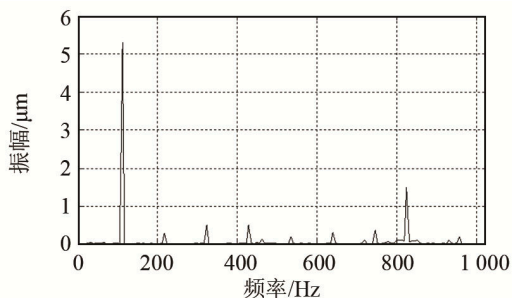


图 6 汽轮发电机组自由端径向振动位移频谱图

Fig.6 Spectrum of radial vibration displacement at free end of steam turbine generator set

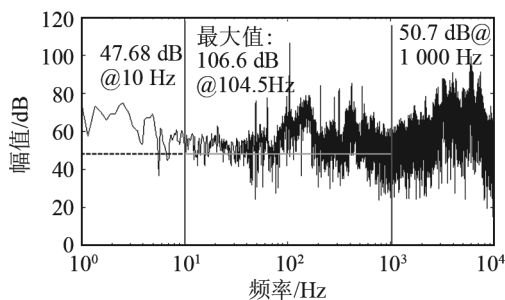


图 7 汽轮发电机组自由端径向振动波特图

Fig.7 Bode diagram of radial vibration at free end of turbine generator set

的情况下，振动监测装置测得的加速度信号可以达到优于 50 dB 以上的信噪比，能够满足设备振动噪声的监测与分析要求。

5 结语

本文设计了一种具备可调增益功能的振动监测系统，将 ADS 数据采集器与增益放大电路相结合，对加速度计的输出电压进行有效放大或缩小。通过仿真和实际测量实验可以得出：引入可调增益环节后，采集信号始终保持在数据采集器最优采样量程内，能够实现较高信噪比的数据采集，在汽轮发电机组振动监测领域具有工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 温继圆. 机械设备振动监测原理及应用[J]. 设备维修, 1985, 25(1): 1-2. WEN Jiyuan. Principle and application of mechanical equipment vibration monitoring[J]. Equipment Maintenance, 1985, 25(1): 1-2.
- [2] 杨贵恒, 杨雪, 苏红春, 等. 噪声与振动控制技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 1-11.
- [3] 赖凡. 一种评估旋转式机械设备工况的方法[J]. 微电子学, 1995, 25(3): 1-3. LAI Fan. A method for evaluating the working condition of rotating mechanical equipment[J]. Microelectronics, 1995, 25(3): 1-3.
- [4] 刘继承, 徐庆华, 查建新. 用加速度传感器测量振动位移的方法[J]. 现代雷达, 2007, 29(5): 1-3. LIU Jisheng, XU Qinghua, ZHA Jianxin. Measurement of vibration displacement with acceleration sensor[J]. Modern Radar, 2007, 29(5): 1-3.
- [5] 付明月. 大回转筒体振动监测装置的研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
- [6] 朱丹, 陶成, 夏澎. 增益可调的高性能低噪声放大器的设计与实现[J]. 计算机应用, 2006, 11(15): 1-3. ZHU Dan, TAO Cheng, XIA Peng. Design and implementation of gain adjustable high-performance low noise amplifier[J]. Computer Applications, 2006, 11(15): 1-3.
- [7] 张建新, 张合. 压电加速度传感器输出信号可变增益控制[J]. 测试技术学报, 2011, 25(4): 1-4. ZHANG Jianxin, ZHANG He. Variable gain control of piezoelectric accelerometer output signal[J]. Journal of Testing Technology, 2011, 25(4): 1-4.
- [8] 缙新科, 常改苗. 基于 MAX262 的可调增益程控滤波器设计[J]. 电气自动化, 2012, 34(2): 1-3. GU Xinke, CHANG Gaimiao. Design of programmable filter with adjustable gain based on MAX262[J]. Electrical Automation, 2012, 34(2): 1-3.