

# 基于边缘计算和微机电系统技术的 振动监测系统

方卫华<sup>1</sup>, 魏 勇<sup>2</sup>, 徐孟启<sup>3</sup>, 孙 勇<sup>4</sup>

(1. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012; 2. 北京中弘泰科科技有限公司, 北京 100024;  
3. 河海大学 计算机与信息学院, 江苏 南京 211100; 4. 江苏省秦淮河水利工程管理处, 江苏 南京 210022)

**摘要:**为提高水工建筑振动监测能力,基于边缘计算技术和MEMS(Micro Electro Mechanical System, 微机电系统)技术研制了一套振动监测系统。结合软硬件选型等问题介绍了基于边缘计算的振动监测系统结构,在实践中检验了该系统对混合频率振动的监测能力,通过时域加速度曲线、振动频率变化等维度测试表明该系统满足设计需求。

**关键词:**边缘计算; 振动监测; MEMS

中图分类号:TV698

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2022)12-0062-0006

## Vibration monitoring system based on edge computing and MEMS technology

FANG Weihua<sup>1</sup>, WEI Yong<sup>2</sup>, XU Mengqi<sup>3</sup>, SUN Yong<sup>4</sup>

(1. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China; 2. Beijing Zhonghong Taike Technology Co., Ltd., Beijing 100024, China;  
3. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China;  
4. Management Division of Qinhuai River Hydraulic Engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210022, China)

**Abstract:** In order to improve the vibration monitoring ability of hydraulic buildings, a vibration monitoring system is developed based on edge computing technology and MEMS technology. Combined with the selection of hardware and software, the vibration monitoring system structure based on edge computing is introduced. The monitoring ability of the system for mixed frequency vibration is tested in practice. The time domain acceleration curve and vibration frequency change dimension test show that the sensitivity and accuracy of the system meet the design requirements.

**Key words:** edge computing; vibration monitoring; Micro Electro Mechanical System

## 1 概 述

水流冲击是造成水工建筑疲劳损坏的主要原因,流体冲击频率引发建筑共振时会加剧对建筑的破坏作用,尤其是当振动幅度较大,超过阈值时,会对建筑材料造成不可逆的损伤,严重危害水利设施

安全。严根华<sup>[1]</sup>分析了闸门自激振动的防范措施,通过案例分析振动作用的破坏性。振动监测是动力稳定和共振评价的关键,也是检验动力计算、复核施工的必然要求,研究实时监测水工建筑表面振动的系统尤为重要。马斌等<sup>[2]</sup>从振动现象、诱因等多个方面详细介绍了闸门振动问题,针对不同诱因

收稿日期: 2022-05-18

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020024)

作者简介: 方卫华(1972—),男,教授级高级工程师,博士。E-mail: 13813843565@139.com

导致的振动问题提出的措施具有参考意义。王忠强等<sup>[3]</sup>使用低频振动位移传感器研究振动问题。张晓萍等<sup>[4]</sup>通过闸门在动水启闭过程中的振动加速度、振动位移等监测数据分析得出该闸门处于安全状态。安全分析是建立在实际监测数据的基础上,数值模拟在其中也起重要作用。李昊等<sup>[5]</sup>在模拟实验和理论分析的基础上结合数值模拟研究了水力自动滚筒闸门在动水压力作用下的振动特性分布规律,在模拟计算中使用了软件进行三维建模,模拟计算结果与测定结果趋势一致。徐磊等<sup>[6]</sup>使用三轴 MEMS 加速度传感器作为主体器件,设计了一套振动测量系统,在高过载环境下依然能够正常工作,体现出 MEMS 加速度传感器强大的环境适应性。此外 MEMS 传感器在功耗、成本和灵敏度方面具有一定优势,广泛应用于机械、建筑等领域。然而以上文献多基于进行振动分析,未充分考虑在实际应用场景中通信负载情况和后方处理计算能力。罗浩<sup>[7]</sup>提出了一种长期在深水复杂水流中运行的振动监测系统,分析了振动测量的一般原理。此外还指出实际场景中采集的多路数据可达 TB 级,为此其引入数据压缩技术减轻网络带宽需求,然而数据压缩虽然可以提高通信链路传输效率,但并未解决后方计算中心计算压力问题。为此本文引入边缘计算思想同时解决带宽压力和计算中心计算资源问题。

边缘计算<sup>[8]</sup>旨在邻近数据源头的地方产生地实时处理数据,相比于集中处理的云计算方式其优点是能够减低网络带宽需求,且可以分担服务中心的计算压力,实时性能更强。李麒等<sup>[9]</sup>从多个方面对边缘计算应用于中小型水库信息化管理进行了研究,结果表明引入边缘计算有利于节约开支,提高实时性。刘旭等<sup>[10]</sup>使用 DSP 技术实时处理采集的振动信号,在边缘端的计算处理有效提高了数据信息密度。以上文献表明,邻近数据源头处对数据进行初步处理的边缘计算方法具有以下 3 个特点:实时性能强、传输带宽小、服务器压力分散。

人们对于安全监测的认知,往往是按发现规律、总结规律、应用规律的顺序循序渐进的。以振动问题为例,振动位移是可以直观判断的,所见即所得,而任意非周期的振动在频域却可以分解为许多不同频率的周期运动的叠加。以往振动监测往往是将传感器采集到的时域信号直接发送到后方进行处理,这样处理会带来较大的通信负载和服务

器负担。为解决这 2 个问题,本文提出在边缘端对

采集数据实时分析,计算得到频域的安全特征,从时域和频域 2 个角度去看待被测结构的安全问题。如图 1 所示,振动时间序列在时域和频域上具有完全不同的分布,引入频域进行分析使得时间序列可以分解为多不同频率的周期序列,这种分解对于研究振动问题十分具有意义。

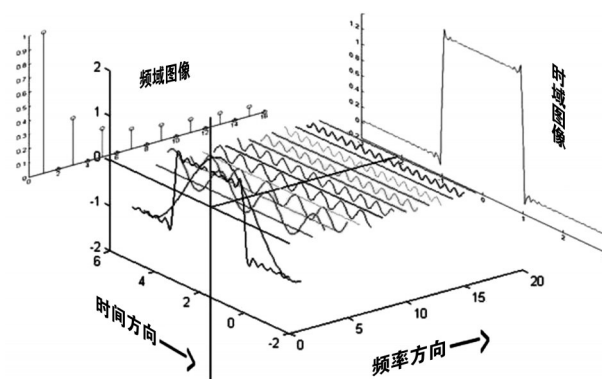


图1 时间序列的频域分解

如图 2 所示,对时域、频域数据进行综合分析,通过卓越频率和振幅的变化对水工建筑物损伤进行早期识别和防治。将时频分析由计算中心前移至边缘端进行,有效缓解了后方计算中心的计算压力。

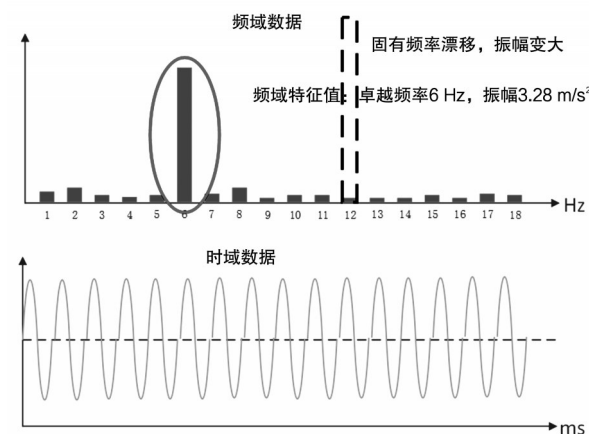


图2 卓越频率和振幅变化

水工建筑特别是水闸振动监测存在低频、模态叠加,干扰多、各部位不一样等难点,且在实际应用中采集的多路数据需要通信带宽大,存在后方计算压力大等问题。为提高水闸振动监测感知能力,基于边缘计算思想,以低噪声、高速采集的 MEMS 加速度传感器为核心开发了一套振动监测系统,实现时域(加速度)、频域(振动频率、振幅)的实时监测(每秒上报数据)。

## 2 振动监测系统研制

### 2.1 国内外相关芯片比较和选型

振动测量是振动监测系统的核心问题,在实际应用中需要考虑测量精度、传感器水工环境适应性、传感器芯片价格等因素。振动会产生加速度,利用这个特点使用加速度传感器测量振动的加速度,再通过积分电路可获得振动绝对位移。

如表1所示,综合比较各类加速度计芯片接口、功耗、成熟度、稳定性等因素,选定 ADXL355 型3轴

加速度计芯片。此款芯片在性能上满足需求,价格适中,是ADI公司2016年推出的产品,已稳定供货6年。ADXL355使用陶瓷密封封装,测量模式下功耗低至200  $\mu\text{A}$ ,内置20位ADC可编程高通和低通数字滤波器,同时集成了温度传感器,工作温度范围为 $-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,具备机电自检功能,这些优点使得其可以在水下环境长期稳定工作。此外ADXL355型加速度计在惯性测量单元,平台稳定系统,结构健康监控,地震成像,倾斜检测,机器人等领域也有广泛应用。

表1 国内外主要加速度计芯片比较

型号	厂商	国别	轴数	量程/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	分辨率/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	噪声密度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ )	价格/元
ADXL355	ADI	美国	3	20	$3.9\times 10^{-5}$	$2.5\times 10^{-4}$	200
SCA3300	Murata	日本	3	15	$1.8\times 10^{-3}$	$3.7\times 10^{-4}$	70
IIS3DHHIC	ST	意大利/法国	3	25	$7.1\times 10^{-4}$	$4.5\times 10^{-4}$	60
AS3002A	WIZMEMS	中国	1	20	$2.9\times 10^{-6}$	$1.0\times 10^{-5}$	1 200
VS1000.A	Colibrys	瑞士	1	20	$7.4\times 10^{-6}$	$7.0\times 10^{-5}$	2 700

### 2.2 基于边缘计算的系统研制

#### 2.2.1 系统架构及硬件设计

如图3所示边缘端振动信号收集装置架构。外部电压为各个模块供电;MEMS处理振动造成的加速度信号;MCU控制模块协调用于控制其他模块运行。

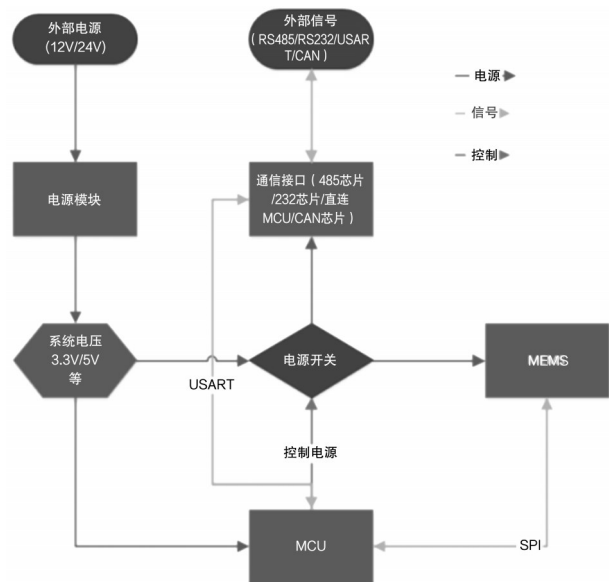


图3 边缘端振动监测装置架构

各模块具体选型如下:(1)MCU选型为低功耗,基于ARM Cortex-M4架构的STM32L431CCT6型号

的芯片,该芯片为48引脚LQFP封装,内置256KB Flash,64K SRAM,工作温度为 $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高主频可达80 MHz,供电电压范围1.71~3.6 V。(2)电源模块选型为车规级线性稳压器TPS70933DBVR,此芯片为小尺寸晶体管SOT23-5封装,输入电压范围为2.7~30 V,超低静态电流1  $\mu\text{A}$ ,拥有反电流保护,热关断及过流保护,支持200 mA峰值电流输出,输出恒定电压3.3 V,在 $-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作范围内的精度为2%。(3)电源开关控制模块选型为超低泄漏电流负载开关TPS22860DBVR,此芯片使用节省空间的6引脚SOT23-6封装。该器件需要一个VBIAS电压,工作输入电压范围为0~VBIAS,VBIAS电压范围为1.65~5.5 V,导通电阻小于1  $\Omega$ 拥有10 nA超低的泄漏电流,可支持最大200 mA的持续电流。此开关可由一个打开/关闭输入(ON)控制,此输入可与低压控制信号直接对接。器件额定运行温度为 $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。(4)通信接口选型为RS485信号,芯片型号为MAX3483EESA,此芯片具有输出短路保护,高达 $\pm 20\text{ kV}$  ESD静电防护,数据通信速率高达20 Mbps,总线最多可挂载128个收发器,工作温度为 $-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。(5)MEMS芯片选型为陶瓷密封封装的三轴ADXL355型加速度传感器。

#### 2.2.2 系统应用软件开发

监测系统使用边缘计算架构,边缘端采集振动



信号并现场计算信号时域频域信息,边缘端处理后的信息送至服务器端,边缘计算结构可以有效降低对服务器端的计算需求。此外采用浏览器/服务器架构模式呈现实时监测效果,用户无需安装客户端,而是通过网页直观获取各个时刻振动的时频信息。

如图4~5所示的基于边缘计算的水闸振动监测系统网页可视化效果,以直接访问网页形式监测实时采集的信号。服务器部署在云端,开发语言采用Java语言,同时采用mysql 8.0数据库用于存储历史数据。

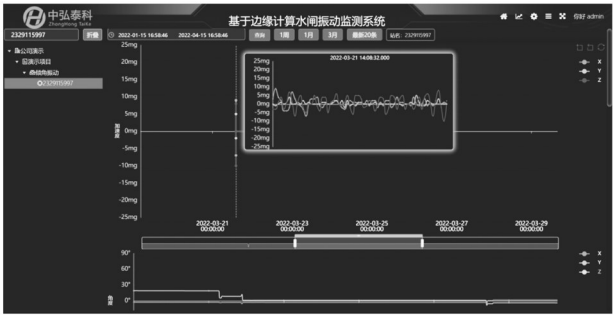


图4 实时加速度曲线  
(注:1 mg=10<sup>-3</sup> g=10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>)

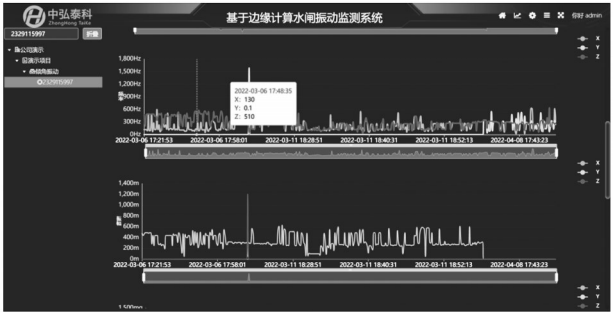


图5 卓越频率和振幅曲线  
(注:1 mg=10<sup>-3</sup> g=10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>)

2.3 室内检验和系统校准

实际部署的系统需要经过室内校准,检验合格后才能部署在户外环境。振动监测系统需要在室内进行系统校准消除系统误差,使用高精度转台对传感器进行加速度校准保证加速度精度 10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup> 以内。

如图6~7所示,将加速度计固定在高精度双周转台上,通过转台输出指定角度,传感器通过加速度计算对应角度进行精度校准验证。

如表2~3所示,换算后角度精度优于0.005°,可以满足加速度校准精度要求。室内验证结果表明振动监测系统满足设计精度要求,可以进行实地部署。



图6 高精度双轴转台

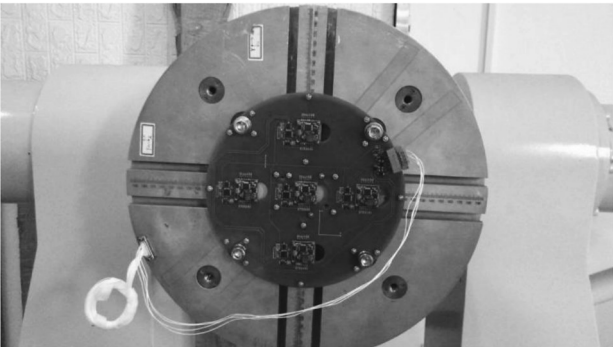


图7 采用12方位法进行加速度校准

表2 转台角度对应加速度值

转台输出标准 角度/(°)	X轴加速度 目标值/(m·s <sup>-2</sup> )	Y轴加速度/ (m·s <sup>-2</sup> )
X轴+15	2.58819	
X轴-15	2.58819	
Y轴+15		2.58819
Y轴-15		-2.58819

表3 校准后角度

转台输出标准 角度/(°)	X轴角度/(°)	Y轴角度/(°)
X轴+15	15.001	0.001
X轴-15	-14.998	0.002
Y轴+15	0.001	15.002
Y轴-15	-0.001	-14.998

2.4 系统安装调试要求

边缘端安装:边缘端传感器采用RS-485接口引线输出,传输距离可达1 200 m(实测),传感器部署在闸门固定部位、旋转轴等对振动敏感部位,通

过线缆引线至通信设备或机房;

供电和通信系统安装:采用太阳能板浮充蓄电池供电+无线通信终端进行数据传输;安装点位选择较为灵活,选择采光(或交流电供电较好)和运营商信号较好的区域。

### 3 数据分析

在实验室振动台模拟不同频率的振动及其叠加,对系统测定数据进行分析,观察预设振动与分析结果频率是否一致。振动台分别用3 Hz、5 Hz、

12 Hz的激励以及不同强度的组合信号进行输出,测量传感器时域加速度数据和频谱。

如图8所示,图8(a)表示使用振动台模拟振动频率为3 Hz、振幅为0.05 m/s<sup>2</sup>时提出的振动监测系统测量波形与频谱;图8(b)表示模拟振动频率为5 Hz、振幅为0.15 m/s<sup>2</sup>时振动监测系统测量结果;图8(c)表示模拟频率为12 Hz、振幅为2 m/s<sup>2</sup>;图8(d)表示振动台模拟频率为3 Hz、振幅0.05 m/s<sup>2</sup>的振动与频率为5 Hz、振幅为0.15 m/s<sup>2</sup>的振动叠加时振动监测系统监测结果。

表4 频率3 Hz、振幅0.05 m/s<sup>2</sup>测量数据

加速 时间/s 度/ (m·s <sup>-2</sup> )	加速 时间/s 度/ (m·s <sup>-2</sup> )	加速 时间/s 度/ (m·s <sup>-2</sup> )	加速 时间/s 度/ (m·s <sup>-2</sup> )	加速 时间/s 度/ (m·s <sup>-2</sup> )	加速 时间/s 度/ (m·s <sup>-2</sup> )	加速 时间/s 度/ (m·s <sup>-2</sup> )	加速 时间/s 度/ (m·s <sup>-2</sup> )	加速 时间/s 度/ (m·s <sup>-2</sup> )
0.0000 0	0.1250 3.5×10 <sup>-3</sup>	0.2500 -4.9×10 <sup>-2</sup>	0.3750 3.5×10 <sup>-2</sup>	0.5000 0	0.6250 -3.4×10 <sup>-2</sup>	0.7500 5.0×10 <sup>-2</sup>	0.8750 -3.4×10 <sup>-2</sup>	
0.0078 0.7×10 <sup>-3</sup>	0.1328 3.0×10 <sup>-3</sup>	0.2578 -4.8×10 <sup>-2</sup>	0.3828 4.0×10 <sup>-2</sup>	0.5078 -0.6×10 <sup>-2</sup>	0.6328 -2.9×10 <sup>-2</sup>	0.7578 4.9×10 <sup>-2</sup>	0.8828 -3.9×10 <sup>-2</sup>	
0.0156 1.5×10 <sup>-3</sup>	0.1406 2.4×10 <sup>-3</sup>	0.2656 -4.7×10 <sup>-2</sup>	0.3906 4.4×10 <sup>-2</sup>	0.5156 -1.4×10 <sup>-2</sup>	0.6406 -2.3×10 <sup>-2</sup>	0.7656 4.8×10 <sup>-2</sup>	0.8906 -4.3×10 <sup>-2</sup>	
0.0234 2.1×10 <sup>-3</sup>	0.1484 1.7×10 <sup>-3</sup>	0.2734 -4.4×10 <sup>-2</sup>	0.3984 4.7×10 <sup>-2</sup>	0.5234 -2.0×10 <sup>-2</sup>	0.6563 -1.6×10 <sup>-2</sup>	0.7734 4.5×10 <sup>-2</sup>	0.8984 -4.6×10 <sup>-2</sup>	
0.0313 2.8×10 <sup>-3</sup>	0.1563 1.0×10 <sup>-3</sup>	0.2813 -4.1×10 <sup>-2</sup>	0.4063 4.9×10 <sup>-2</sup>	0.5313 -2.7×10 <sup>-2</sup>	0.6641 -0.9×10 <sup>-2</sup>	0.7813 4.2×10 <sup>-2</sup>	0.9063 -4.8×10 <sup>-2</sup>	
0.0391 3.4×10 <sup>-3</sup>	0.1641 0.2×10 <sup>-3</sup>	0.2891 -3.6×10 <sup>-2</sup>	0.4141 5.0×10 <sup>-2</sup>	0.5319 -3.3×10 <sup>-2</sup>	0.6719 -0.1×10 <sup>-2</sup>	0.7891 3.7×10 <sup>-2</sup>	0.9141 -4.9×10 <sup>-2</sup>	
0.0469 3.9×10 <sup>-3</sup>	0.1719 -0.4×10 <sup>-3</sup>	0.2969 -3.1×10 <sup>-2</sup>	0.4219 5.0×10 <sup>-2</sup>	0.5469 -3.8×10 <sup>-2</sup>	0.6797 0.5×10 <sup>-2</sup>	0.7969 3.2×10 <sup>-2</sup>	0.9219 -4.9×10 <sup>-2</sup>	
0.0547 4.3×10 <sup>-3</sup>	0.1797 -1.1×10 <sup>-3</sup>	0.3047 -2.5×10 <sup>-2</sup>	0.4297 4.9×10 <sup>-2</sup>	0.5547 -4.2×10 <sup>-2</sup>	0.6875 1.2×10 <sup>-2</sup>	0.8047 2.6×10 <sup>-2</sup>	0.9297 -4.8×10 <sup>-2</sup>	
0.0625 4.6×10 <sup>-3</sup>	0.1875 -1.8×10 <sup>-3</sup>	0.3125 -1.8×10 <sup>-2</sup>	0.4375 4.6×10 <sup>-2</sup>	0.5625 -4.5×10 <sup>-2</sup>	0.6953 1.9×10 <sup>-2</sup>	0.8125 1.9×10 <sup>-2</sup>	0.9375 -4.5×10 <sup>-2</sup>	
0.0703 4.9×10 <sup>-3</sup>	0.1953 -2.5×10 <sup>-3</sup>	0.3203 -1.1×10 <sup>-2</sup>	0.4453 4.3×10 <sup>-2</sup>	0.5703 -4.8×10 <sup>-2</sup>	0.7031 2.6×10 <sup>-2</sup>	0.8203 1.2×10 <sup>-2</sup>	0.9453 -4.2×10 <sup>-2</sup>	
0.0781 5.0×10 <sup>-3</sup>	0.2031 -3.1×10 <sup>-3</sup>	0.3281 -0.4×10 <sup>-2</sup>	0.4531 3.9×10 <sup>-2</sup>	0.5781 -4.9×10 <sup>-2</sup>	90/128 3.2×10 <sup>-2</sup>	0.8281 0.5×10 <sup>-2</sup>	0.9531 -3.8×10 <sup>-2</sup>	
0.0859 5.0×10 <sup>-3</sup>	0.2109 -3.6×10 <sup>-3</sup>	0.3359 0.2×10 <sup>-2</sup>	0.4609 3.4×10 <sup>-2</sup>	0.5859 -4.9×10 <sup>-2</sup>	0.7109 3.7×10 <sup>-2</sup>	0.8359 -0.1×10 <sup>-2</sup>	0.9609 -3.3×10 <sup>-2</sup>	
0.0938 4.9×10 <sup>-3</sup>	0.2188 -4.1×10 <sup>-3</sup>	0.3438 1.0×10 <sup>-2</sup>	0.4688 2.8×10 <sup>-2</sup>	0.5938 -4.8×10 <sup>-2</sup>	0.7188 4.2×10 <sup>-2</sup>	0.8438 -0.9×10 <sup>-2</sup>	0.9688 -2.7×10 <sup>-2</sup>	
0.1016 4.7×10 <sup>-3</sup>	0.2266 -4.4×10 <sup>-3</sup>	0.3516 1.7×10 <sup>-2</sup>	0.4766 2.1×10 <sup>-2</sup>	0.6016 -4.6×10 <sup>-2</sup>	0.7266 4.5×10 <sup>-2</sup>	0.8516 -1.6×10 <sup>-2</sup>	0.9766 -2.0×10 <sup>-2</sup>	
0.1094 4.4×10 <sup>-3</sup>	0.2344 -4.7×10 <sup>-3</sup>	0.3594 2.4×10 <sup>-2</sup>	0.4844 1.5×10 <sup>-2</sup>	0.6094 -4.3×10 <sup>-2</sup>	0.7344 4.8×10 <sup>-2</sup>	0.8594 -2.3×10 <sup>-2</sup>	0.9844 -1.4×10 <sup>-2</sup>	
0.1172 4.0×10 <sup>-3</sup>	0.2422 -4.8×10 <sup>-3</sup>	0.3672 3.0×10 <sup>-2</sup>	0.4922 0.7×10 <sup>-2</sup>	0.6172 -3.9×10 <sup>-2</sup>	0.7422 4.9×10 <sup>-2</sup>	0.8672 -2.9×10 <sup>-2</sup>	0.9922 -0.6×10 <sup>-2</sup>	

以上频谱与波形结果与振动台预设模拟值完全一致,实验结果表明提出的基于边缘计算技术和MEMS技术的振动监测系统能够较好地检测振动问题,且能将时域信号准确的在频域分解为不同频率振动的叠加。对数据进一步分析,提出的监测系统角度精度达到0.005°;加速度精度为10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup>;加速度精度为10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup>;加速度温漂小于10<sup>-4</sup> m·s<sup>-2</sup>·℃<sup>-1</sup>;振动频率精度为0.25 Hz。模拟实验的目的主要是从时域加速度曲线、频率振动频率变化等维度进行针对分析,验证振动监测系统在振动感知的灵敏度、采集数据精度等方面满足设计需求。

此外振动传感器是否适应现场的恶劣环境,在复杂场景下能否长期工作还需要进一步观察。

### 4 结 论

为提高水工建筑监测能力,本文设计了一种基于边缘计算技术和MEMS技术的振动监测系统,以三轴MEMS加速度传感器为核心部件完成了对敏感部位振动信号的收集,基于边缘计算思想以ARM架构嵌入式芯片为核心,在临近数据源处对振动信号实时处理提高信息密度降低了服务器计算压力,同时采用B/S架构实时显示监测结果,后期维护更

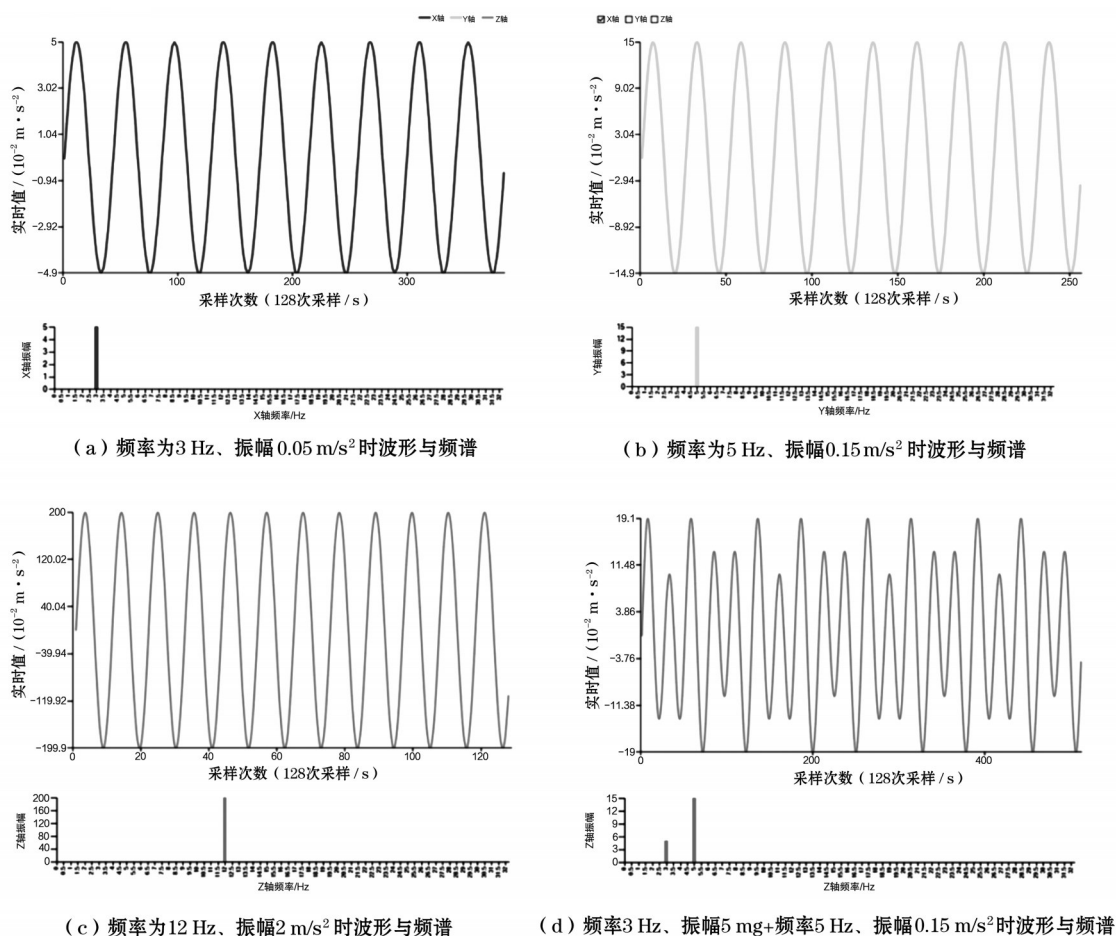


图8 不同频率不同振幅波形与频谱

新方便。时域加速度曲线、振动频率变化等多个维度表明本文提出的振动监测系统满足实际场景下对灵敏度、精度等指标的需求。此外基于边缘计算的设计框架有效降低了服务器的计算压力和网络带宽需求。

#### 参考文献:

- [1] 严根华. 水工闸门自激振动实例及其防治措施[J]. 振动测试与诊断, 2013, 33(增刊2): 203-208, 230.
- [2] 马斌, 郭乙良. 水工闸门振动研究现状及发展趋势[J]. 水利水运工程学报, 2019(2): 55-64.
- [3] 王忠强, 张延智, 屈伟强. 小浪底水电站水轮机水力振动监测与评估[J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 140-143.
- [4] 张晓萍, 吴杰芳, 张林让, 等. 三峡水利枢纽导流底孔闸门泄流振动监测与分析[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 82-85, 90.
- [5] 李昊, 张园, 文恒. 水力自动滚筒闸门振动特性的数值模拟及试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(11): 1360-1370.
- [6] 徐磊, 房立清, 齐子元, 等. 基于MEMS加速度传感器的振动加速度测量系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019(2): 18-21, 25.
- [7] 罗浩. 水利工程闸门水力振动监测技术应用研究[J]. 四川水利, 2021, 42(4): 134-136.
- [8] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924.
- [9] 李麒, 杨光, 张玉炳, 等. 基于边缘计算的中小型水库信息化管理新模式[J]. 人民长江, 2021, 52(增刊2): 316-319.
- [10] 刘旭, 刘海宁, 林心园, 等. 基于数字信号处理器的振动信号采集及边缘计算系统设计[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 307-314.