

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313826

基于边缘计算的管道振动感知系统设计与研究^{*}

万 瑜 林劭辰

(江苏方天电力技术有限公司 南京 211102)

摘要: 本研究旨在解决管道振动实时测量数据庞大、传输时延长以及计算资源浪费等问题。通过采用边缘计算理论,将数据计算步骤前置至设备附近,以加速状态监测感知速度,同时优化计算资源的利用。详细介绍了边缘计算感知系统的总体功能框架、设备硬件设计方法和振动信号转化算法。该系统包括边缘计算设备和数据集中设备两部分,前者布置在机械振源位置,实时分析处理大量冗余数据;后者通过无线信号与多台边缘计算设备通信,将汇总信息投影至运维终端。以调相机管道振动实验为例,本研究发现,基于边缘计算的结构振动感知技术能够准确识别管道在64、115和279 Hz时的异常振动现象。通过指导减振器的使用,最终将管道的最高振动幅值由 $0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低至 $0.0016 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,取得了显著的减振效果,充分展示了其工程实用价值。

关键词: 边缘计算;振动感知;振动治理

中图分类号: TH113 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520

Design and research of pipeline vibration perception system based on edge computing

Wan Yu Lin Shaochen

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The aim of this study is to address issues such as the large volume of real-time measurement data for pipeline vibrations, prolonged transmission delays, and wastage of computational resources. By adopting edge computing theory, the data processing steps are moved closer to the devices, thereby accelerating the speed of status monitoring and optimizing the utilization of computational resources. This study provides a detailed overview of the overall functional framework, hardware design methodology, and vibration signal conversion algorithm of the edge computing perception system. The system consists of two parts: edge computing devices and data aggregation devices. The former is positioned at mechanical vibration sources for real-time analysis and processing of extensive redundant data, while the latter communicate with multiple edge computing devices via wireless signals to project aggregated information to maintenance terminals. Using a phase-shifting camera pipeline vibration experiment as a case study, this research demonstrates that the structural vibration perception technology based on edge computing can accurately identify abnormal vibration phenomena in the pipeline at frequencies of 64 Hz, 115 Hz, and 279 Hz. By guiding the use of vibration dampers, the study achieved a significant reduction in the pipeline's maximum vibration amplitude from $0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ to $0.0016 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, showcasing its substantial engineering practical value.

Keywords: edge computing; vibration perception; vibration control

0 引 言

随着信息技术的不断进步,以人工智能、大数据平台、数字孪生、云计算等为代表的生产模式成为我国工业4.0发展战略的重要组成部分^[1]。物联网技术的快速发展使得各行业的数据量激增。根据思科全球云指数报告,在2016

年全球的云数据总量约为6 ZB,而到2021年暴涨为19.5 ZB^[2],到2025年物联网设备产生的实时数据预计接近全球数据总量的1/3^[3]。这导致使用大规模的云计算集中处理方法会出现实时性不足、能耗高、资源浪费^[4]和数据安全等问题^[5]。为应对以上问题的挑战,需要转变计算模式,将原本在云计算处理器的服务和功能^[6]下放到互联设

收稿日期:2023-06-06

^{*} 基金项目:江苏方天电力技术有限公司自主立项科技项目(KJ202105)资助

备边缘,进行实时的初步数据储存、计算处理和网络通信等工作^[7]。

边缘计算理念得益于数据源端执行计算的分散处理模式,可以为能源电力、智慧农业、煤矿生产等多个行业场景提供高效、可靠的新型数据处理方案。与大规模云计算相比具有低延迟、低能耗、安全性高和适应性广等特点。

能源电力作为基础工业,要保证其安全稳定运行就必须对其中的关键设备进行状态监控,实时掌握设备的运行工作情况,提前预报突发情况^[8]。依靠边缘计算技术,可以在终端实时地对能源电力设备海量多源异构数据进行高效运算处理,为后期电力运维提供指导。文献[9]提出了基于边缘计算的低压用户窃电检测^[9]方法,开发了相应的智能融合终端,提高了检测准确率,降低了损电量。文献[11]基于边缘计算方法和改进 YOLOv5s 算法提高了输电线路的模糊故障目标图像检测精度,但只能识别绝缘子自爆、防震锤脱落和鸟巢这 3 类故障。叶远波等^[12]针对二次继保设备的测试技术的自动化程度低等问题,基于边缘网络理念开发了基于边缘物联网的变电站继电保护装置测试与管控技术,提高保护测试效率和数据保密性。

上述的研究成果证明,边缘计算理念在电力设备的运行维护中确实具备非常大的使用潜力。但是,目前的研究成果大多着眼于外部故障特征或电气化状态识别,对于电力设备内部的传统机械性能,尤其是对机械振动状态进行实时快速感知^[13]依然存在技术困难。比如,以特高压换流站调相机冷却润滑管道为代表的配套设备往往容易受到转子激振、流体冲击和局部共振等影响,不但会危及调相机的正常使用,严重时还可能造成安全事故。但是,依然缺乏完善的技术方法可以高效、低成本地感知整个管道系统的振动状态,高效定位振动异常位置,并为后续的振动治理提供参考。

因此,本文以研究开发适用于能源电力设备振动智能检测的边缘感知系统为核心,详细论述了边缘感知系统的整体设计理念、各模块设备的硬件设计方法、边缘数据分析方法等。并完成实验样机制作,通过搭建调相机管道实验台进行实验测试,证明所开发的边缘感知系统的有效性。

1 边缘感知系统整体功能设计

如图 1 所示,边缘感知系统共有 3 部分:设备振动信号采集终端、边缘计算设备和数据集中设备。设备振动信号采集终端主要用于换流站调相机及配套管道等关键设备的振动数据采集和传输,这里选用敏感度高、体积小巧的振动加速度传感器。传感器通过磁吸或粘接方法固定在终端设备上,保证连接牢靠同时便于拆卸。

边缘计算设备主要用于收集加速度振动传感器的原始信号,并进行初步的信号分析处理工作。边缘计算设备与传感器通过数据线连接,保证振动信号的传输速度和稳定性。边缘计算设备可使用自带电源和外界电源 2 种供电模

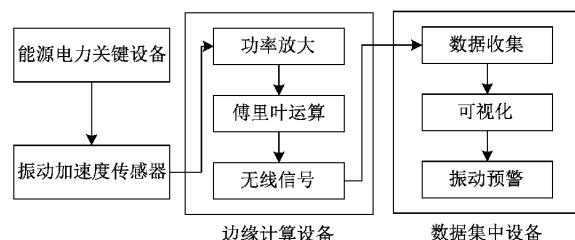


图 1 边缘感知系统整体功能设计

式,满足换流站和输电线路多种工作场景需求。

数据集中设备用于收集边缘计算设备处理后的数据,并将其可视化到运维人员的服务器终端。数据集中设备需要与多组边缘计算设备组成局域网^[14],进行无线的信息交互通信。

2 边缘感知系统整体设计

以边缘计算设备为例,主要由微型控制单元(micro controller unit, MCU)、Lora 模组和振动信号采集电路 3 部分组成,设备内置恒流激励源和信号调理电路,采用 $\Delta-\Sigma$ ADC 芯片,配合带通滤波器与信号放大器,采集压电加速度传感器(integral electronic piezoelectric, IEPE)信号。MCU 实时采集 IEPE 类传感器信号,并通过傅里叶运算实时计算各个频谱参数,分析换电站管道的关键节点处振动幅值信息。

2.1 设备硬件设计

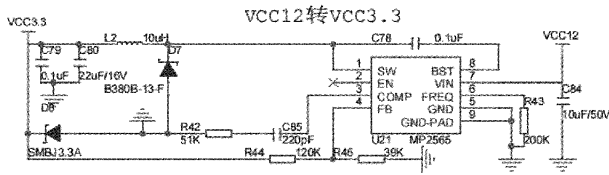
边缘设备使用 Cadence 软件进行硬件设计。采用分层设计方式,主要模块有:MCU、Power、模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)、Lora 和 Module,通过 Top 层进行各个功能模块的连接。Top 层设计图如图 2 所示,主要功能是实现各个功能模块的线路连接。

MCU 模块电路如图 3 所示。选取 STM32F401RCT6 为主控芯片,ARM Cortex-M4 内核,最大主频 84 MHz。

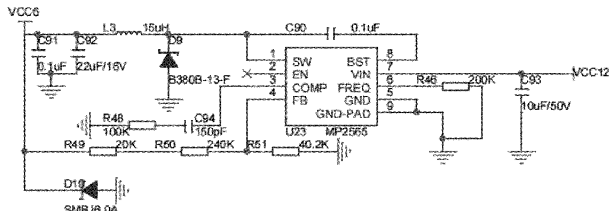
综合考虑能源电力设备的电磁工作环境,为避免由于外接电路造成一定的安全隐患,设备开发准备采用便携式电源作为能量供应。其 Power 模块电路图如图 4 所示。设备使用带充电功能的 12 V 锂电池作为供电电源,将 12 V 电源通过电源芯片依次转换为 +5 V、-5 V、+3.3 V,为保证信号质量,减少电源噪声,AD 模块所需电源全部采用 LDO 芯片,并加上专门的滤波电路。Power 模块电路供各个模块实现功能所需电源。

AD 模块电路图如图 5 所示。低噪声的高性能信号采集通道。输入信号量程为 ± 5 V,采样率高达 105 Ksps;采用 $\Delta-\Sigma$ ADC 芯片,具有 27 Msps 的过采样速率,极大的降低噪声,在 105 Ksps 采样率下噪声峰值仅为 0.3 mV。可实现 IEPE 类传感器的信号采集。

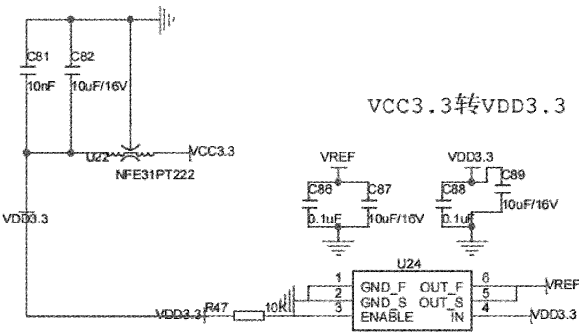
Lora 采用工业模组的形式,提供超长距离扩频通信及拥有超强抗干扰性并且电流功耗超低。模组电路如图 6 所示。



(e) VCC12转VCC3.3

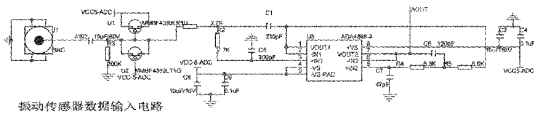


(f) VCC12转VCC6

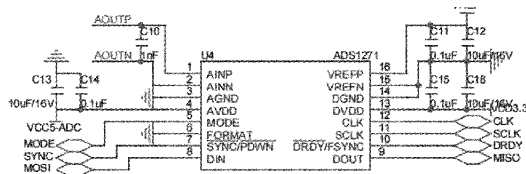


(g) VCC3.3转VDD3.3

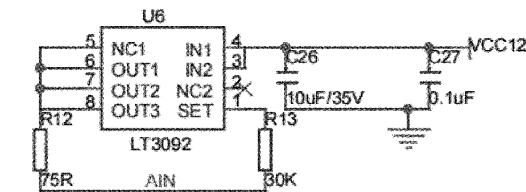
图 4 边缘计算设备 Power 模块



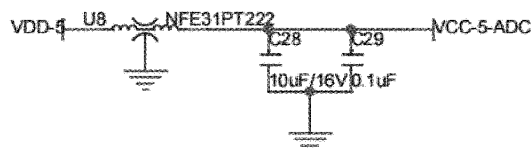
(a) 振动传感器数据输入电路



(b) mcu输入电路



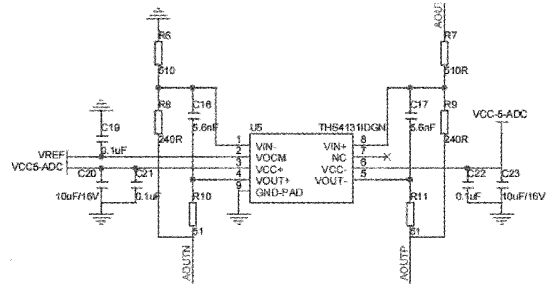
(c) 4mA恒流源



(d) VDD-5转VCC-5-ADC



(e) VDD5转VCC5-ADC



(f) 中间转换电路

图 5 边缘计算设备 AD 模块

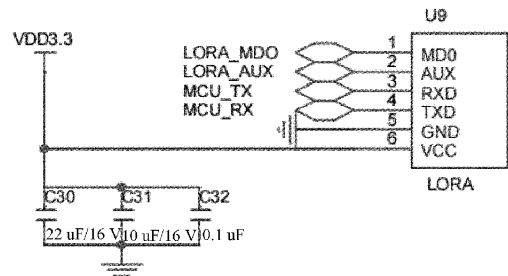
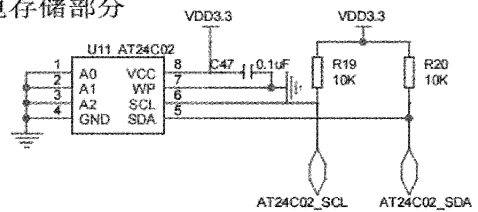


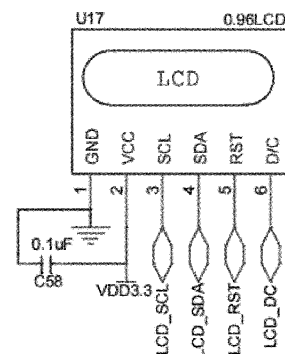
图 6 边缘计算设备 Lora 模块

Module 模块电路图如图 7 所示。主要包含带电可擦可编程只读存储器 (electrically erasable programmable read only memory, EEPROM) 芯片电路,用于存储设备配置信息;RS232 电路,用于前期调试配置并打印状态信息;液晶显示模块;状态指示灯电路。

掉电存储部分



(a) 掉电存储部分



(b) 液晶显示部分

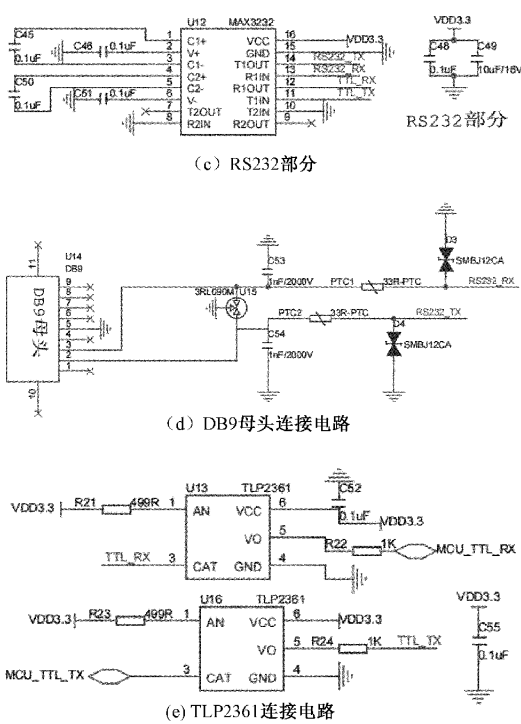


图 7 边缘计算设备 Module 模块

数据集中设备的设计思路与边缘计算设备类似,2 项设备的印制电路板 (printed circuit board, PCB) 实物如图 8 所示。

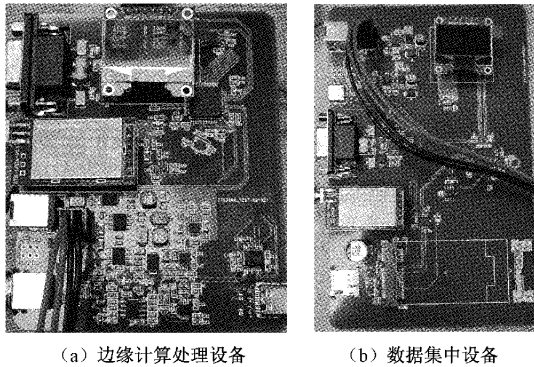


图 8 设备 PCB 电路板实物

2.2 边缘数据分析方法

理论上,加速度传感器的振动信号处理可以使用傅里叶级数方法^[15],将周期为 τ 的时域加速度信号 $a(t)$ 分解为多个正弦函数和余弦函数和的形式:

$$a(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

式中: $\omega = 2\pi/\tau$ 是基波频率; a_0, a_n, b_n 是常系数,通过对式(1)两边分别乘以 $\cos n\omega t$ 和 $\sin n\omega t$,并在一个周期内求积分得到:

$$a_0 = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} a(t) dt = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} a(t) dt \quad (2)$$

$$a_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} a(t) \cos n\omega t dt = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} a(t) \cos n\omega t dt \quad (3)$$

$$b_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} a(t) \sin n\omega t dt = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} a(t) \sin n\omega t dt \quad (4)$$

设备振动的速度数据 $v(t)$ 和位移响应数据 $x(t)$ 则可以通过对 $a(t)$ 进行二次积分求得。

考虑到传感器信号的采集往往是离散的,且存在噪声干扰需要一些更加合理的信号处理技术。常规的方法有直接时域数值积分方法和基于 FFT 变换和频域计算的方法 2 种,但由于直接时域数值积分时需要使用多次滤波器,计算误差较大,本研究选用第 2 种方法。设加速度信号的频谱为 $X(k)$:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} a(n) e^{-j(2\pi nk/N)} \quad (5)$$

式中: N 为总的采样数据数量, $a(n)$ 为离散化的加速度, n, k 为正整数。加速度时域信号可以认为是很多条与频域信号的正弦波的叠加:

$$a_k(t) = X(k) e^{j\omega_k t} \quad (6)$$

对每条正弦波进行积分得到对应频率下的振动速度:

$$v_k(t) = \int_0^t X(k) e^{j\omega_k t} dt = \frac{X(k)}{j\omega} e^{j\omega_k t} \quad (7)$$

式中: ω_k 为对应正弦波的圆频率:

$$\omega_k = 2\pi k \Delta f \quad (8)$$

$$\Delta f = F_s/N$$

式中: Δf 为频率分辨率。

最终,只需将边缘计算设备处理后的频域信息传输至数据终端,减少数据传输量,同时依据电力行业标准对振动幅值进行判断^[16]。超出一定阈值时转为时域高频采样,后台依据振动时域数据进行振动原因等复杂分析。

2.3 边缘感知系统数据架构及可视化

制造完成的边缘设备可按照图 9 的方式进行感知系统架构布置。其中边缘计算设备将加速度信号进行实时频谱分析后通过 Lora 天线将振动信号的主要振幅和频率信息无线传输给数据集中设备,再以导线或者 4G 信号的方式发送到运维工程师的数据接受终端,并使用前端软件进行管道振动数据的可视化。将处理后的数据上传云端服务器,减少了数据总量,提高了运维效率。

3 系统实验

为验证边缘计算设备在实际工程中的使用效果,将边缘设备系统运用在调相机管道振动测试及减振措施实验中,实时展示管道振动状态和减振器效果。

实验以管道处于共振、非共振以及不同激振力作用时的振动状态为感知诊断的关键问题,来验证本文所设计的边缘设备对管道振动状态的诊断分析能力,目的在于为减振器的安装提供相应的理论指导。

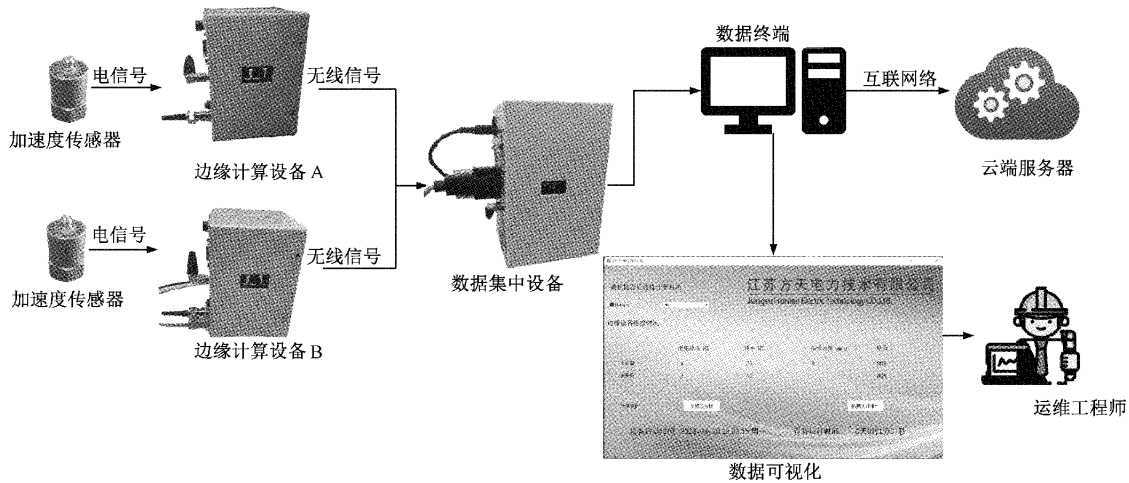


图 9 边缘设备系统架构及数据可视化

3.1 实验台搭建

如图 10 所示,以某特高压换流站同步调相机的润滑油进油管道的振动监测和治理工作为例,在图 10 的标识位置发现了管道振动异常问题,对调相机的安全稳定运行埋下了安全隐患。考虑到特高压换流站工作环境复杂,设备管道多,调相机停机困难等特点,需要一套高效便携的管道振动状态识别方法,以对管道关键部位的振动实时监测,并对后期的使用减振器减振进行指导。

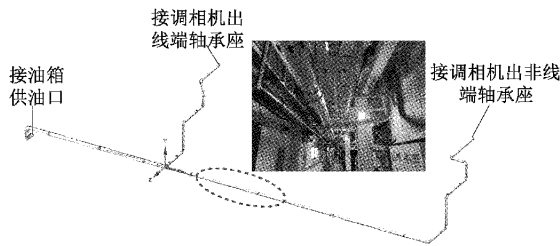


图 10 调相机润滑油供油管道

如图 11 所示,搭建管道振动模拟实验台,模拟图 10 中直管部位的异常振动。管道外径 89 mm,采用不锈钢材料,与调相机的润滑油进油管道一致。

该实验台主要包括管道系统、激振系统和测量系统。管道系统由管道、管道支架等组成,激振系统由 DH1301 扫频信号发生器、DH5872 功率放大器和 DH40200 激振器组成,测量系统由本文所设计的振动状态感知设备和边缘计算设备组成。

3.2 实验步骤

要近似模拟管道振动异常情况,需要提前计算管道的固有频率,再通过匹配的激振信号参数诱发管道共振,使管道的振动速度幅值增大,超出调相机工作要求。

通过振动衰减法计算管道的模式频率,在管道的不同位置重复进行力锤敲击,再由加速度传感器进行数据采集,经过傅里叶变换后得到管道的前 3 阶固有频率,如图 12 所示分别为 64、115 和 279 Hz,振动方向和激振器部

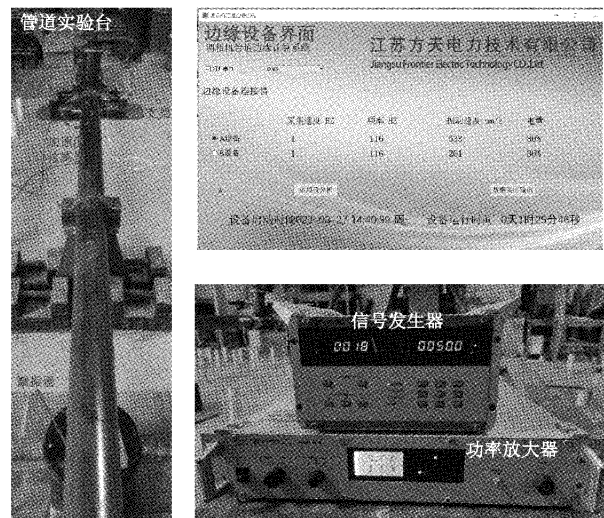


图 11 管道实验台搭建

署方向一致。

按照表 1 进行激振信号设置。激振频率与管道的固有频率一致,28 mV 的原始信号电压可以保证管道产生明显径向振动。分别对没有安装减振器和安装减振器的管道进行振动测试,使用边缘计算设备进行实时监控,考察管道的振动状态和减振器的实际效果。

考虑到调相机管道在实际工作中大部分时间不会处于振动异常状态,即激振力的频率与管道系统的固有频率保持安全距离。此状态下管道的振动情况以及是否需要加装减振器仍然需要边缘感知系统进行分析。作为对比,加做激振频率为 50 和 100 Hz 时的管道振动测试实验,如表 2 所示。

同时,还需要对比激振力大小对管道振动状态的影响,保持激振频率为 64 Hz 不变,调整信号发生器输出电压分别为 18 mV 和 38 mV,具体数据由表 3 所示。

3.3 共振状态数据分析

通过边缘感知系统的输出端口可以将管道的前 10 阶

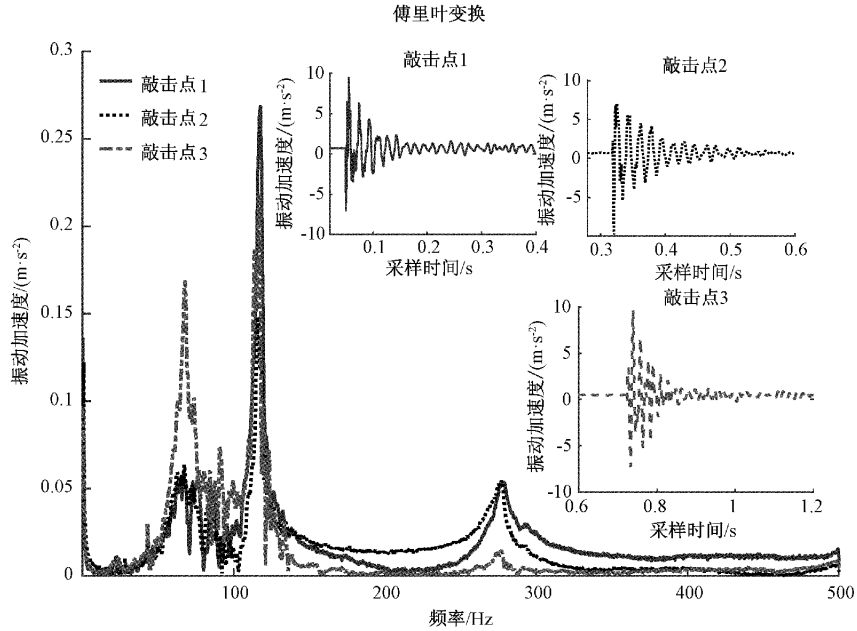


图 12 管道固有频率计算实验

表 1 共振状态下激振信号参数

信号发生器		功率放大器		
电压/mV	频率/Hz	电压/V	电流/A	增益/dB
28	64	2.7	1.4	40
28	115	2.7	1.1	40
28	279	2.7	0.9	40

表 2 非共振状态下激振信号参数

信号发生器		功率放大器		
电压/mV	频率/Hz	电压/V	电流/A	增益/dB
28	50	2.7	1.4	40
28	100	2.7	1.2	40

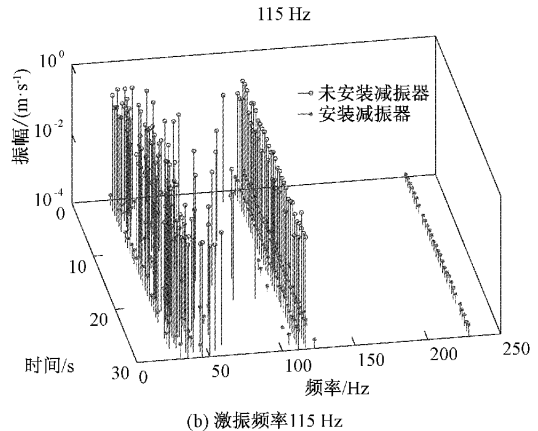
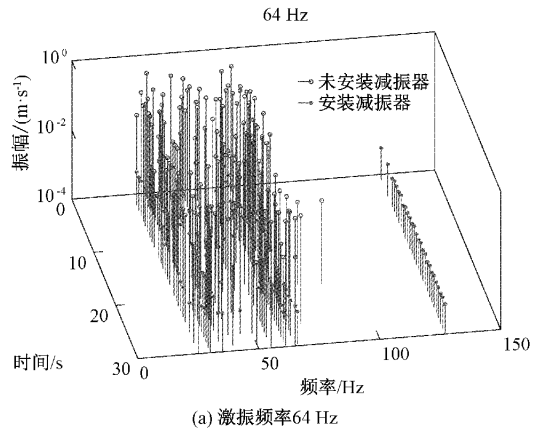
表 3 调整激振力的相关参数

信号发生器		功率放大器		
电压/mV	频率/Hz	电压/V	电流/A	增益/dB
18	64	1.7	0.8	40
38	64	3.7	1.9	40

实时振动数据保存为 txt 文件格式,通过数据接口可将数据进行时间-频率-振幅的三维可视化,如图 13 所示。

如图 13 所示,通过边缘感知系统很好地捕捉了管道的时域-频域振动特征。可以看到,原始管道的速度振幅峰值均集中在低频段附近,最高振幅可以达到 $0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在 3 种激振频率下,使用减振器的管道振动速度的幅值都有明显下降,最高振动速度仅为 $0.0016 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,起到了显著的减振作用。同时可以发现减振器可以将管道的最高振动响应频率提高至激振器的二倍频左右,在激振频率为

64 Hz 时,管道的振动响应频率提高至 127 Hz;激振频率为 115 Hz 时,管道的振动响应频率提高至 228 Hz;激振频率为 279 Hz 时,管道的振动响应频率提高至 559 Hz。这表明在管道发生共振时,减振器对管道振动有很好的抑制作用,对低频振动尤其明显。



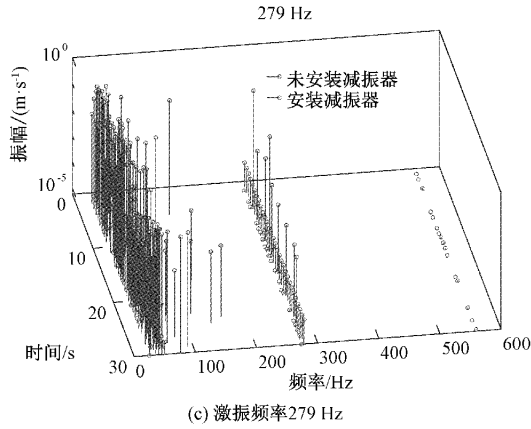
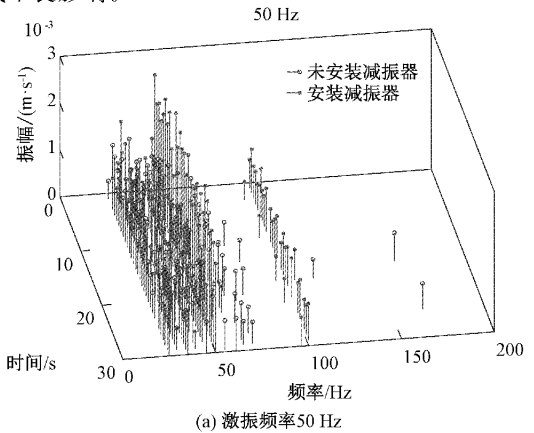


图 13 管道共振状态可视化

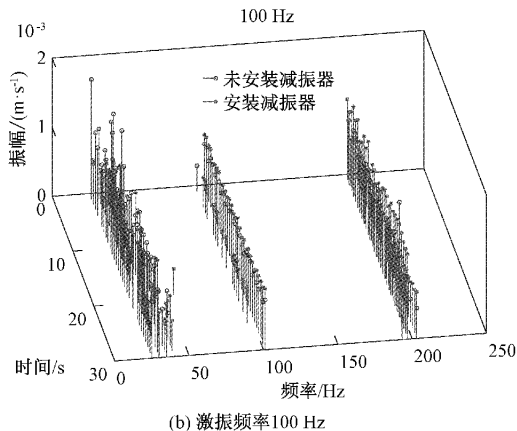
3.4 非共振状态数据分析

分别对没有安装减振器和安装减振器的管道在激振频率为 50 和 100 Hz 时的边缘计算系统输出数据进行可视化。

如图 14 所示,当激振器的激振频率避开管道系统的固有频率时,原始管道系统的振动速度峰值并不大,分别为 50 Hz 时 $0.0019 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 100 Hz 时 $0.0018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此时的管道振动保持在合理区间,不会对调相机的安全运行造成不良影响。



(a) 激振频率 50 Hz



(b) 激振频率 100 Hz

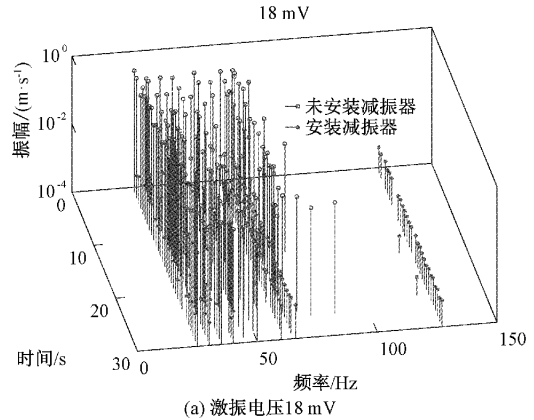
图 14 管道非共振状态可视化

安装减振器后,管道的振动速度幅值并没有明显减少,反而在激振频率和激振的二倍频率处有一定量的增加。

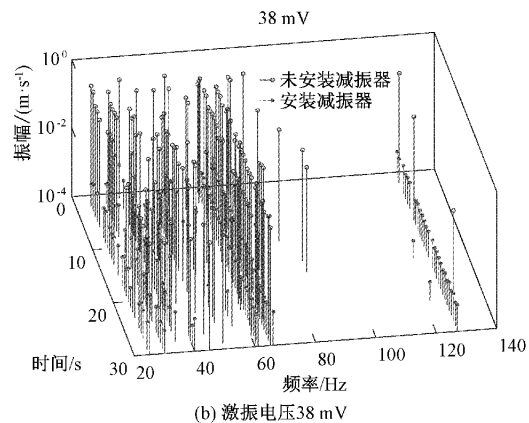
以上结果说明,减振器并不能在所有状态下都保持很好的减振效果,在某些振动状态下可能会加剧管道振动。减振器的使用受到管道振动原因和激振频率的强约束,这就需要边缘计算系统能及时、高效地感知管道振动状态,以此指导部署减振器等设备减振措施。

3.5 激振力对管道振动影响分析

按照表 3 中参数,对改变激振大小后的管道系统振动状态进行可视化,如图 15 所示。对比图 15 和图 13(a)可以看出,在保持激振频率不变的前提下,通过改变激振信号来调整激振力大小对管道振动加速度的频率影响不大,未安装减振器的管道振动速度幅值均在 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。安装减振器后管道振动下降明显,均在保持在 $0.001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。



(a) 激振电压 18 mV



(b) 激振电压 38 mV

图 15 改变激振力后管道振动状态可视化

以上结果说明,激振器的振动频率是影响管道振动状态和减振器工作效果的主要因素。对管道的振动状态进行正确的诊断,准确分析管道诊断原因、频率范围和影响程度是保证管道安全运行的关键前提条件。

肖梓铭等^[17]也设计了一套管道检测系统,用于通过管道振动加速度传感器信号的收集与分析来定位管道泄

漏点,这是一种传统的管道振动感知分析方法。与此相比,本研究基于边缘计算的思路,设计的管道振动感知系统具备以下显著优势:首先,本研究中的数据集中设备与边缘计算设备之间采用无线信号传输数据,从而减少了工作场地的约束;其次,数据集中设备可以同时连接多台边缘计算设备,使其能够同时检测多个关键节点,因此,本研究更适用于大规模工业应用,如变电站的复杂管道系统;再次,本研究的边缘感知系统将计算分析步骤集成在边缘计算设备中,使数据集中设备能够直接收集计算分析后的结果,从而大幅降低了数据量;最后,本研究通过数据可视化方法直接向运维人员呈现结果,无需使用 MATLAB 等软件进行后期处理^[17],从而减少了运维人员的工作负担。

所以,通过边缘感知系统高效、准确地分析出管道的实时振动状态和减振器效果,充分体现了边缘计算系统的工程实用价值。

4 结 论

本文基于边缘计算理念,设计研究了针对电力设备内部机械振动状态监测的感知系统,给出了详细的机械振动边缘感知系统数据处理流程和硬件设计方法,可以在电力设备源端进行实时地数据处理,保证电力设备的安全运行。

本文给出了详细的边缘感知系统整体设计理念、硬件系统设计方法、数据处理计算方法和可视化方法,并通过生产加工实验样机和搭建调相机管道振动实验台证明了边缘计算感知设备的可行性。

使用边缘感知系统及时高效地感知了实验管道的振动速度幅值及相应的振动频率。通过对比不同激振器预设参数和管道振动响应,了解的激振频率与管道系统固有频率接近和造成振动异常的主要原因,方便后续的振动治理。

使用边缘感知系统可以有效地对管道振动治理效果进行评估。通过比较激振状态下加装减振器的工作效果,发现在管道共振前提下减振器效果明显,但当激振频率避开管道固有频率时,管道振动普遍较小,加装减振器甚至会加剧振动。

综上所述,使用边缘计算感知系统高效、实时地完成了管道振动状态感知和减振器效果评估工作,对于降低电力设备维护工作量,保护安全运行具有很高的参考意义。但由于测试所用管道样本不足,在更复杂干扰环境下的适应性还需要验证,后期将基于实际的特高压变电站调相机管道系统进行实验测试,不断改进边缘计算感知系统性能。

参考文献

[1] 崔耀,吴景红,叶壮,等. 高瓦斯综放工作面智能放

煤关键技术研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10):252-265.

[2] 黄成龙,柯宇曦,华向东,等. 边缘计算在智慧农业中的应用现状与展望[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 224-234.

[3] 陆旭,陈影,许中平,等. 面向 5G 边缘计算网络的联合需求响应与任务卸载策略[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 209-218.

[4] 吴设军,何辅江,吴高波,等. 边缘计算技术在变电站施工网络中的新型应用技术[J]. 电子测量技术, 2020, 43(23): 178-182.

[5] 秦强,刘文泽,谭炜豪,等. 面向软件定义网络的配电边缘计算终端优化部署方法[J]. 电力建设, 2023, 44(1): 82-90.

[6] 蔡春雨,陈志刚,钟新荣,等. 基于云平台的压裂车泵送系统监测设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(10): 145-150.

[7] 杨琪,刘畅,杨建维,等. 面向边缘计算的机械装备状态监测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 226-234.

[8] 程林,江翼,高杨德,等. 图像边缘检测算法对变电设备智能组件环境监测[J]. 电力电子技术, 2021, 55(5): 66-68.

[9] 郑应俊,杨艺宁,舒一飞,等. 基于边缘计算的低压用户窃电检测[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 111-120.

[10] BISWAS P P, CAI H, ZHOU B, et al. Electricity theft pinpointing through correlation analysis of master and individual meter readings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3031-3042.

[11] 黄悦华,陈照源,陈庆,等. 基于边缘计算和改进 YOLOv5s 算法的输电线路故障实时检测方法[J]. 电力建设, 2023, 44(1): 91-99.

[12] 叶远波,章昊,王同文,等. 基于边缘物联网的电力系统二次继保设备测试管控技术[J]. 中国电力, 2023, 56(7):156-162,174.

[13] 张西晨,徐璐. 基于边缘智能的风电机组设备监测系统[J]. 电子测量技术, 2023, 46(2): 52-58.

[14] 陈明玺,孙玉国,曾恺昀. 工程结构振动 LoRa 远程监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2021(9): 67-69,73.

[15] 王鸿鹏,段发阶,蒋佳佳,等. 基于非谐波傅里叶变

换的发动机转速测量系统[J]. 电力电子技术, 2020, 54(4): 57-60.

- [16] 火力发电厂汽水管道振动测试与评估技术导则:DL/T 292-2021[S]. 北京:电力行业标准化技术委员会,2021.
- [17] 肖梓铭,赵文龙,娄嘉骏. 供水管道泄漏信号检测系统

设计[J]. 电子测量技术,2021,44(24):85-90.

作者简介

万瑜,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统失效分析与结构分析。

E-mail:wanyujs@163.com