

基于5G通信的风力机叶片监测方法研究*

张惊蛰¹ 李海鹏¹ 王 燕² 王 博²

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院 兰州 730050; 2. 兰州理工大学绿色能源与储能学院 兰州 730050)

摘要: 风力机叶片作为风力发电设备的核心部件,其健康状态对于整个设备的正常运行至关重要。针对运行状态下叶片状态参数实时监测需求,设计并实现了一套基于5G通信的分布式实时监测系统。系统采用双层分布式架构,由多节点数据采集单元集群和上位机软件构成。提出两级同步触发策略,实现全数据采集通道的高精度同步采样,触发延迟仅为最小采样周期的0.13%。融合压缩感知技术构建触发率和数据传输速率动态调节模型,并进行参数优化设计,实现了5G网络波动环境下触发率的自适应闭环调节以及数据采集与数据传输的动态匹配,提高了系统数据传输的可靠性。实验测试表明,系统本底噪声波动小于0.5%,非线性误差小于1.1%,通道一致性误差小于1%,压缩感知重构准确率达98%。该设计不仅为风力机叶片的实时监测提供有效的解决方案,其两级同步触发策略与动态调节机制也为其他在线实时监测系统开发提供技术参考。

关键词: 风力机叶片;5G通信;监测系统;同步触发;动态调节

中图分类号: TM315;TN931.3

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

Research on monitoring method of wind turbine blades based on 5G communication

Zhang Jingzhe¹ Li Haipeng¹ Wang Yan² Wang Bo²

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Green Energy and Storage, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: As the core component of wind power equipment, the health status of wind turbine blades is crucial for the normal operation of the entire system. In response to the real-time monitoring requirements of blade condition parameters during operation, a distributed real-time monitoring system based on 5G communication has been designed and implemented. The system employs a two-layer distributed architecture, consisting of a multi-node data acquisition unit cluster and upper computer software. A two-level synchronous trigger strategy has been proposed to achieve high-precision synchronous sampling across all data acquisition channels, with the trigger delay being only 0.13% of the minimum sampling period. A dynamic adjustment model of trigger rate and data transmission rate was developed by fusing the compressed sensing technology, and the parameters were optimized accordingly. This approach enables the dynamic matching of data collection and transmission in the variable environment of 5G networks, thereby improving the reliability of system data transmission. Experimental results indicate that the fluctuation of background noise is less than 0.5%, the nonlinear error is below 1.1%, the channel consistency error is under 1%, and the reconstruction accuracy of compressed sensing reaches 98%. This design not only provides an effective solution for the real-time monitoring of wind turbine blades but also serves as a technical reference for the development of other online real-time monitoring systems.

Keywords: wind turbine blades; 5G communication; monitoring system; synchronous trigger; dynamic regulation

0 引言

随着我国“碳达峰、碳中和”目标的提出,风能产业迎来了前所未有的发展机遇与挑战。近年来,我国风电技术取得显著进展,装机容量已稳居全球首位。然而,随着风电机组规模的不断扩大,在复杂运行环境下的故障风险也日益凸显。风力机叶片作为最易发生故障的关键部件,对其状态参数进行监测,并进行故障诊断和预判尤为重要。目前获取风力机叶片状态参数的技术手段分为非接触式和接触式两类。非接触式技术主要用于风力机叶片表面图像的获取,如红外成像和无人机视觉,但其通常需要停机作业,且易受环境因素干扰^[1-4]。相比之下,接触式技术通过在叶片上布设传感器,更适合对运行中的叶片进行长期健康监测。主要方法包括:利用声发射传感器在线监测叶片损伤信号^[5-7];通过超声波传感器定位叶片内部缺陷^[8-10];借助应变传感器获取叶片表面应变变化以识别早期损伤^[11-12];以及采用振动传感器捕捉叶片动态形变,实现结构健康监测^[13-15]。这些接触式方法为实现叶片状态在线监测奠定了基础,然而,要将其应用于长期运行的旋转叶片上,仍需解决传感器数据高效可靠传输的难题。

由于叶片工作时处于旋转状态,有线信号传输通过旋转接头实现,存在安装复杂、维护成本高,易因为机械磨损导致信号不稳等问题。而无线信号传输技术,因其部署灵活、抗干扰能力强等优势,成为更优选择。目前,无线信号传输在风力机监测中已有一定应用,例如 Kilic 等^[16]将 SESHMS 无线系统应用于塔架振动监测。沈润杰等^[17]采用 ZigBee 实现了风机塔架振动监测。孙智鹏等^[18]采用 LoRa+4G 的混合传输方案监测了风力机桨叶应力变化。然而,面对大叶片监测中可能产生的高频、多通道传感数据,上述低带宽、低速率的无线技术或传统的 4G 网络在传输容量和实时性上均面临瓶颈。随着对数据量与实时性要求不断提高,具备超低时延(<1 ms)、超高带宽(10 Gbps)和超高可靠性(99.999%)的 5G 技术^[19],为实现叶片状态的大规模实时监测提供了新的技术手段。

本文针对风力机叶片状态参数在线实时监测需求,设计了一套基于 5G 通信的风力机叶片状态参数监测系统。结合压缩感知技术,有效降低了数据传输量,并通过同步触发和动态调节机制,实现了多节点全通道的同步采样及 5G 网络波动环境下的可靠数据传输。通过试验验证了系统性能和所提方法的可行性。

1 系统方案设计

系统采用双层分布式架构设计,由分布式数据采

集单元集群(终端设备)和上位机软件(服务端)组成,如图 1 所示。在数据采集单元集群中,采用主从式节点拓扑结构,包括 1 个主节点和多个从节点。从节点作为终端设备,接收主节点的触发信号,实时采集安装在风力机叶片上的各类传感器(包括应变、振动、压力和温度传感器)信号,并通过 FPGA 对多通道数据进行压缩打包处理,借助无线通信模块实现数据向服务端的高效传输。主节点除了具有从节点的功能外,还承担全局同步控制功能,一方面向从节点发送同步触发信号,另一方面根据上位机平台下发的调节控制指令动态调节触发率。上位机软件作为服务端,集成了数据接收、存储、校准、处理、可视化展示以及故障诊断预警等功能,同时实时监测数据上传速率对触发率进行动态调节。

基于此方案设计,系统对无线传输性能提出了要求:以单个采集单元(40 通道、每个通道 16 位、采样率 100 kSPS)为例,每秒产生 64 Mb 数据,需具备极高的上行传输速率;同时,传感器数据的周期性上报也要求无线传输具备高稳定性和连续性。面对这些要求,现有主流技术均存在瓶颈:4G 模块的理论上行速率(约 50 Mb/s)难以保障多通道数据的稳定传输;WiFi 6 在理想环境下速率虽达标,但其广域覆盖、移动性与抗干扰能力不足,无法适应室外、移动及大范围部署场景。因此,为同时满足高带宽、低时延、高可靠与广域移动性覆盖的核心指标,5G 模块成为必然选择。其理论上行速率可达数百 Mb/s 至 Gb/s 级,足以支撑当前与未来数据需求;其具备的海量连接、高可靠通信能力及对边缘计算的原生支持特性,更能应对未来多节点并发接入冲突、保障核心算法的实时效能,并为系统向边缘智能演进提供关键支撑。

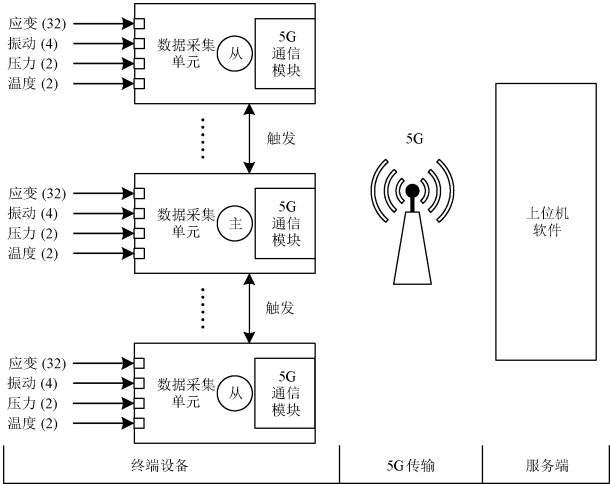


图 1 系统整体设计方案

Fig. 1 Overall system design scheme

2 系统软硬件设计

2.1 硬件设计

数据采集单元硬件结构如图 2 所示,主要由 FPGA 主控模块、OSC 时钟模块、信号调理模块、AD7606 模块、DDR3 存储模块、USB 接口模块、5G 通信模块、同步触发模块和电源模块组成。FPGA 主控模块为整个硬件系统的核心控制单元,不仅负责各模块的逻辑控制和时序管理,还承担着触发生成与数据处理等关键任务。数据采集单元具备 30 路模拟输入通道,包括 32 个应变传感器通道、4 个加速度振动传感器通道、2 个压力传感器通道和 2 个温度传感器通道。信号调理模块采用多通道独立设计,用于对输入的应变、振动、压力和温度 4 种传感器的模拟信号进行调理。AD7606 模块实现将模拟信号转换为数字信号,并通过 SPI 协议与 FPGA 通信。为提升系统鲁棒性,设计了 DDR3 存储模块防止数据溢出和丢失。USB 接口模块使用高速 USB PHY 芯片构建了 FPGA 与 5G 通信模块之间的高速数据传输通道。5G 通信模块采用 FM650 工业级模块,为系统提供了稳定的无线数据传输能力,确保监测数据实时上传至上位机平台。此外,主节点的同步触发模块使用 MC100EPT21 驱动器将 FPGA 的 LVCMOS 信号转换为 PECL 信号,经过同轴电缆传输后,从节点同步触发模块通过 MC100EPT20 接收器将其还原为数字信号,可实现多节点间的精确同步工作。

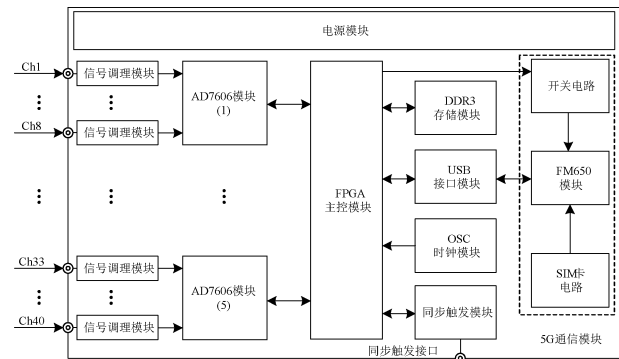


图2 数据采集单元结构

Fig. 2 Structure of data collection unit

2.2 逻辑设计

FPGA 主控负责对数据的处理和对外围模块的控制,其逻辑结构如图 3 所示。采用高精度 100 MHz 的 OCXO 时钟源作为系统时钟,同时利用 PLL 模块分频和倍频得到 15、160 MHz 时钟信号。其中 15 MHz 时钟作为 AD7606 的 SPI 传输时钟信号,通过 BUFG 分配到 5 个 AD7606 的 CLK 引脚,160 MHz 时钟则用于 DDR3 控制模

块的高速数据写入。运行时,所有设备处在等待接收指令状态,主节点通过 USB 通信模块接收到上位机开始采样的指令后系统开始运行,此时,主设备的控制模块通过同步触发控制模块向从节点发送触发信号,同时延时并生成自身的全局采样信号控制 ADC 采集控制模块采样。从节点采用两级寄存器对接受到的触发信号进行同步化处理,在可靠捕获触发信号后复位内部计数器并启动 ADC 采样。由于 ADC 采集控制模块、DDR3 控制模块以及数据处理模块之间涉及到跨时钟域处理,因此使用异步 FIFO 来安全的传输数据。采集的数据通过 FIFO 写模块存入到 DDR3 存储模块,数据处理模块再通过 FIFO 读模块读取并处理数据,最后将数据通过 USB 通信模块传输至 5G 通信模块。同时,主节点的控制模块实时监测由 USB 通信模块接收到的调节指令,并根据调节指令来控制系统以新触发率进行采样。

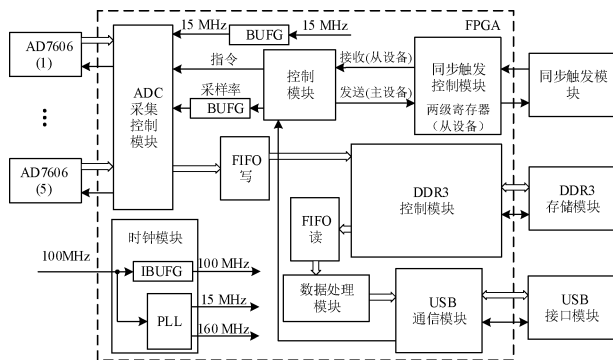


图 3 FPGA 逻辑结构

Fig. 3 FPGA logic structure

在系统设计初期为满足实时性要求,采用采一次传一次的传输方式,但测试发现该方式使得协议开销与有效数据的比例严重失衡,导致有效数据占比仅约为 70%,大大降低了系统的带宽利用率和有效采样率。针对这一问题,改用多次采样批量打包的传输策略,来减小协议开销占比,提高有效采样率,同时考虑到高采样率会产生大量冗余数据,设计引入压缩感知技术进一步改进系统的传输方式,减少传输中的冗余数据,提高系统的通信带宽利用率。

2.3 上位机软件设计

基于 LabVIEW 开发平台,构建了集数据监测和动态调节控制于一体的上位机软件,如图 4 所示。上位机接收到压缩数据后调用 Python 脚本进行压缩数据的快速重构,随后对各类传感器数据进行计算处理,最终将处理结果显示在波形图和表格中。上位机软件能够实时监测并显示各节点中的最低传输速率,通过动态调节算法实现对触发率的闭环控制调节。此外,上位机软件还集成阈值配置和异常预警功能,可实时监测各通道数据是否超出预设安全范围。



图 4 上位机软件界面

Fig. 4 Upper computer software interface

3 多通道同步采集与动态调节控制

3.1 同步触发机制

针对分布式数据采集系统的全通道同步采样需求,采用两级同步架构,通过多节点触发同步与单节点内部采集同步的协同机制,实现全系统的亚微秒级精度同步采样。在单节点层面,基于双重同步策略利用 FPGA 的全局时钟树网络 (BUFG) 分配相同的 SPI 时钟频率到 5 个 AD7606 的 CLK 引脚,以消除各模块间的时钟偏移(时钟抖动 < 200 ps);同时采用 FPGA 生成的全局采样信号,经由 BUFG 分配同步采样脉冲确保所有 AD7606 在 CONVST 引脚上升沿同时启动采样。该设计中时钟抖动和采样脉冲延迟引起的同步误差远远小于 $1/10$ 个采样周期 (AD7606 最大采样率 200 kSPS),完全满足同步采样要求。

在构建多节点触发同步时,需要解决信号传输和时钟同步两大问题。系统由多个独立运行的节点采用主从分布式架构组成,各节点均配置 100 MHz 的高稳定性 OCXO 时钟源,确保基础时钟的一致性。触发信号的传输采用同轴电缆 (50Ω , 延时 5 ns/m) 星型连接方式,该拓扑结构通过保持所有从节点到主节点的电缆长度一致,从根本上消除了传统级联方式带来的延时累积问题,考虑到电缆总延时要小于 $1/10$ 采样周期,因此该方式的电缆长度最大为 100 m (最长风叶 143 m),如图 5 所示。在信号传输环节,采用 PECL 电平转换方案,不仅解决了长距离传输的驱动能力问题,其差分特性同时显著提升了抗干扰能力。为保障信号完整性,电缆两端都进行了精确的阻抗匹配,采用双层屏蔽的同轴电缆,并在 PCB 布局时对触发信号路径也做了严格的阻抗控制和隔离处理。

系统运行时,主节点周期性地发送触发信号并延时生成自身的全局采样信号,从节点在接收到触发信号后立刻启动采样。在具体设计中,需确保触发信号的脉宽大于 30 ns,覆盖至少 3 个时钟周期,且信号的接收采用

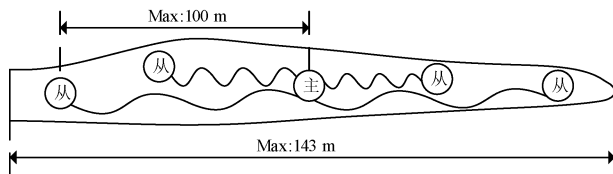


图 5 多节点同步工作分布图

Fig. 5 Multi node synchronous work distribution diagram

两级寄存器同步化处理,既保证了异步信号跨时钟域采样时的可靠性,又避免了亚稳态问题的出现。该同步机制设计避免了复杂的时钟分发网络,在保证精度的同时大大简化了系统架构。

3.2 数据压缩感知

压缩感知是一种基于信号稀疏性和非相干性的信号采样技术。其基本思想是通过随机采样获得少量的测量数据并使用优化算法从中恢复出原始信号。当信号具有稀疏性或压缩性时,压缩感知可以显著减少采样率,降低数据采集和传输的成本^[20-21]。

系统基于叶片应变和振动等信息在频域具有明显的稀疏特性,通过设计压缩和重构流程实现高效的数据压缩传输。系统首先对原始信号进行归一化预处理,既避免了数值溢出风险,又便于后续 FPGA 的定点运算。在压缩阶段,设计采用随机高斯矩阵作为观测矩阵 Φ ,并选择计算高效的离散余弦变换 (discrete cosine transform, DCT) 基作为稀疏矩阵 Ψ ,这种组合不仅满足矩阵间的低相干性要求,还符合有限等距性质 (restricted isometry property, RIP),为高质量信号重构奠定了基础。将观测矩阵预先存储在 FPGA 的硬件存储器中,通过并行处理实现对多通道数据的压缩采样,显著降低了数据传输量。

基于压缩感知表达,如式 (1) 所示,当确定观测矩阵 Φ 和稀疏矩阵 Ψ 后,此时,对于信号重构便由压缩感知问题转化为稀疏恢复问题^[22-23]:

$$y = \Phi x = \Phi \Psi S = \Theta S \quad (1)$$

式中: S 是原始信号 x 在 Ψ 域的变换向量,称为稀疏系数; Φ 为 $m \cdot n$ 的观测矩阵; Ψ 为 $n \cdot n$ 的稀疏矩阵; Θ 是 $m \cdot n$ 维的传感矩阵; m 为压缩后信号长度; n 为压缩前信号长度; m 与 n 的比值称为压缩率 CR 。

在信号重构阶段,由于压缩维度 m 远小于信号维度 n ($m \ll n$),该问题本质上是一个欠定方程的求解问题。因此,需要使用 l_1 范数近似 l_0 范数,将问题转化为凸优化:

$$\hat{x} = \min_s \|S\|_{l_1} \text{ s.t. } y = \Phi \Psi S \quad (2)$$

为此,系统采用 Lasso 回归算法求解稀疏系数 S ,通过 l_1 正则化来逼近理想的 l_0 范数的稀疏约束,并利用交叉验证自动优化正则化参数 λ ,确保算法在噪声环境下

的鲁棒性。为进一步提升重构质量,系统还对 Lasso 解进行硬阈值处理,剔除不显著的小系数,最后通过逆稀疏变换和反归一化操作得到高质量的重构信号 x 。此方法结合了理论的最优性(l_1 松弛)和工程的鲁棒性(Lasso+硬阈值),在保证稀疏解的同时能高效处理实际测量中的噪声和计算复杂度问题。

3.3 动态调节机制

针对 5G 网络的波动特性,提出一种动态调节机制,通过动态闭环控制保障数据传输的稳定性。该机制构建了“监测-决策-控制”的智能调节体系,核心在于建立传输特征与采样参数的动态映射关系。图 6 为动态调节机制一个循环周期的示意图。在系统运行过程中,上位机通过实时统计接收的数据量计算实际上传速率。为避免时间边界误差,采用 3 个尺寸为 1 s 的滑动窗口以 1/3 s 间隔交错排列的设计,使每个数据包同时计入所有覆盖的时间窗口。这种方法实现了无缝连续的速率计算,有效消除了传统单窗口统计的测量盲区。随后判断是否进行调节,具体判断逻辑为:当检测到有效上行传输速率持续 3 个周期低于当前数据生成速率的 105%时,启动梯度下降调节算法;而当网络状态改善,有效上行传输速率持续高于当前数据生成速率的 130%并保持 5 个周期时,系统将采用渐进式提升策略,在保证 20% 传输余量的前提下逐步提高触发率。当上位机判断需要执行调节时,会依据调节算法计算生成新的触发率并以调节指令的方式下发至主节点,最后主节点控制系统以新的触发率采集并发送数据,最终实现全系统触发率的闭环控制和自适应调节。本文通过对动态调节模型的参数进行设计得到了上传速率与触发的映射关系,在此基础上结合判断逻辑建立了完整的调节算法,从而确保系统始终工作在最佳状态。

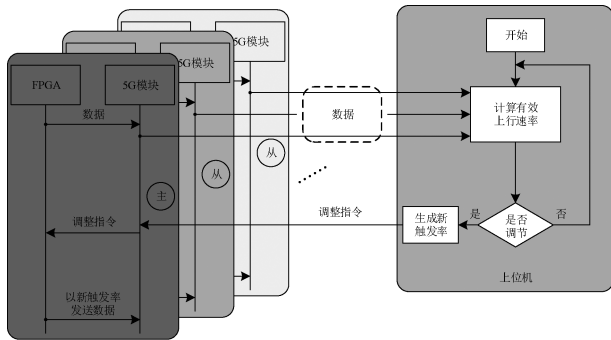


图6 动态调节流程

Fig. 6 Dynamic adjustment process

3.4 动态调节模型参数设计

在引入压缩感知技术时,通过固定观测矩阵 Φ 来降低系统计算复杂度,该方式使得数据包大小在系统运行

期间保持恒定。在此约束条件下,系统的动态调节功能只能通过优化触发率与传输速率的匹配关系来实现。同时,为确保系统运行的稳定性和高效性,避免动态调节前出现数据堆积现象,需通过严谨的理论分析,预先确定系统运行参数的合理取值范围,从而使得数据生成速率始终低于 5G 数据传输速率。

在数据采集单元中数据流可分为生成数据、处理数据和传输数据 3 个环节。要避免数据堆积,这 3 个环节各自所用时间应当逐级减少。只考虑主要影响因素对各部分时间进行初步估算。数据生成时间 T_1 由每次压缩的样本数 b 和实际触发率 a 决定。数据处理时间 T_2 主要包括稀疏变换和观测矩阵乘法运算时间,受 FPGA 内部 DSP 数量 N 、时钟频率 f 和压缩率 CR 影响。数据传输需要 USB2.0 将数据传输给 5G 模块,再由 5G 模块传输到云平台,USB2.0 高速模式最大传输速率为 480 Mb/s,5G 模块 NR Sub6 ENDC 模式下最大上行速率为 458 Mb/s,相较之下 USB2.0 的传输是在本地设备之间,较为稳定,而 5G 需要经过无线网络,会受到网络环境的影响存在更大的延迟抖动。数据传输时间 T_3 主要由 USB2.0 实际传输速率 R_U (MB/s) 和 5G 实际上传速率 R_G (MB/s) 决定,实际传输中会因为协议开销、带宽分配、软件及硬件等因素影响导致实际传输速率远远小于理论最大传输速率,其中 R_G 更容易受到网络环境的影响产生延迟抖动。基于以上分析,将实际触发率 a 、每次压缩的样本数 b 、压缩率 CR 以及 5G 实际传输速率 R_G 作为未知参数,且满足以下的不等式关系:

$$T_2 = \frac{40 \times (b^2 \times CR + b \times \log_2^b)}{N \times f} \leq \frac{b}{a} = T_1 \quad (3)$$

$$T_3 = \frac{80 \times b \times CR \times (1 + t_U)}{R_U} + \frac{80 \times b \times CR \times (1 + t_G)}{R_G} \leq$$

$$\frac{40 \times (b^2 \times CR + b \times \log_2^b)}{N \times f} = T_2 \quad (4)$$

$$0 < CR < 1 \quad (5)$$

$$2\,000 \leq b \leq a \leq 200\,000 \quad (6)$$

$$R_G \leq R_U \quad (7)$$

式(3)表示数据处理时间 $T_2 \leq$ 数据生成时间 T_1 。式(4)表示数据传输时间 $T_3 \leq$ 数据处理时间 T_2 ,其中, t_U 和 t_G 表示包头、包尾以及时间戳等协议开销占比。

同时,为使系统具有更高的效率, T_1 、 T_2 和 T_3 在满足不等式要求的前提下应该使系统的冗余时间(即各环节时间之差)最小化。基于上述设计要求,结合硬件和软件参数,取 $N = 800$, $f = 100$ MHz, $R_U = 20$ MB/s, $t_U = 2.33\%$, $t_G = 7.33\%$ 对系统的运行参数进行初步估算,采用网格搜索结合约束优化的数值求解方法,通过离散化参数空间、遍历可行解并评估目标函数来寻找未知量 a 、 b 、 CR 和 R_G 在满足不等式且使得系统具有最小冗余

时间的最优解,得到未知量 a 、 b 和 CR 的可行解,如图7所示。

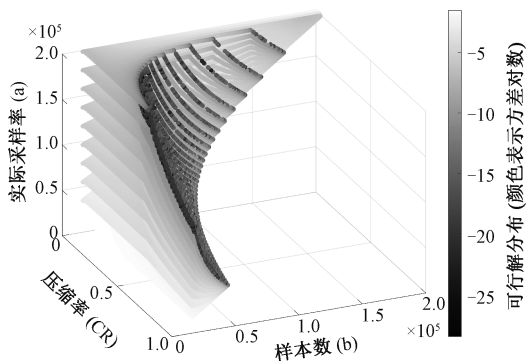


图7 a 、 b 、 CR 和 R_G 使系统具有最小冗余时间的解

Fig. 7 a , b , CR and R_G enable the system to have the solution with the minimum redundancy time

图7中,颜色越深表示冗余时间越小,计算时压缩率 CR 的步长按线性等分50步,样本数 b 的步长按对数等分1000步,实际触发率 a 的步长为每个 (CR, b) 组合下再次线性等分20步,最终得到 b 最小取值为15414,当 $CR=0.53$, $b=21383$, $a=176252$ 以及 $R_G=12.987$ MB/s 时系统具有最小冗余时间,各环节时间方差约为 4.05×10^{-13} ,此时系统具有最高效率。

考虑到在FPGA中生成数据、处理数据和传输数据3个环节并行进行,即便上传速率降低导致传输数据时间 T_3 超过处理数据时间 T_2 ,只要不超过生成数据时间 T_1 便不会出现数据堆积。因此,便可根据式(8)得到5G实际上传速率 R_G 与触发率 a 的关系。

$$\frac{80 \times b \times CR \times (1 + t_u)}{R_u} + \frac{80 \times b \times CR \times (1 + t_c)}{R_c} \leq \frac{b}{a} \quad (8)$$

最终,将最优解参数取整,取 $CR=0.53$, $b=21300$ 代入不等式(8),得到 R_G 与 a 的变化关系,基于此关系并结合判断逻辑得到完整的动态调节算法,从而构建完整的闭环动态调节控制系统。

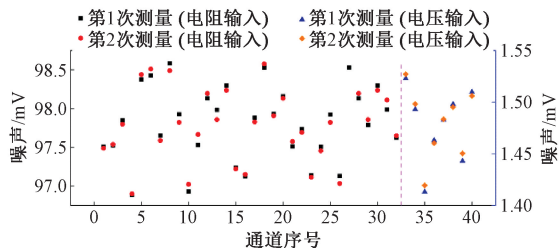
4 系统性能测试

4.1 数据采集单元测试

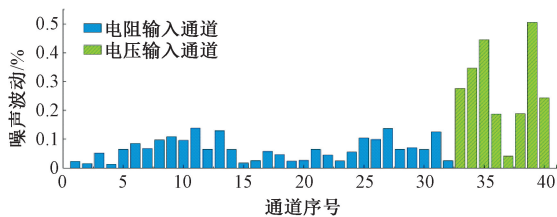
1) 本底噪声及稳定性测试

应变传感器通道为阻值输入,电路中电桥的桥臂电阻为 348Ω ,使用外接 348Ω 电阻的方法对所有应变传感器通道进行测量,采样1 min取平均值,连续采集2次本底数据。以同样的方式,使用直流电源输出0 V电压测量振动、压力以及温度传感器通道。在此数据基础上

计算各通道的本底噪声稳定性,以确保后续测量的稳定性与准确性。第1次测量值表示为 $A1$,第2次测量值为 $A2$,由公式 $S = |A2 - A1| / A1$ 计算得到本底噪声稳定性。两次测试的本底噪声分布及噪声稳定性,如图8所示。图8(a)为各通道噪声分布较为密集,没有特别突出的噪声值。图8(b)为应变传感器通道的本底噪声波动均小于0.2%,其余电压输入通道的本底噪声波动最大不超过0.5%,整体效果较好。



(a) 本底噪声分布图
(a) Distribution map of background noise



(b) 稳定性测试结果
(b) Stability test results

图8 本底噪声及稳定性测试结果

Fig. 8 Background noise and stability test results

2) 非线性测试

对系统进行非线性测试,在 $350 \sim 353 \Omega$ 的范围内以 0.5Ω 为步长对32路应变传感器通道进行测试,其余电压输入通道根据其不同的运算放大倍数分别设置不同步长和范围进行测试,具体的:振动传感器通道,步长 0.5 V,范围 $0.5 \sim 5$ V;压力传感器通道,步长 0.002 V,范围 $0.003 \sim 0.013$ V;温度传感器通道,步长 0.25 V,范围 $0.25 \sim 1.5$ V。将测量结果进行去噪处理后,再以最小二乘法进行线性拟合,得到各通道输入-输出拟合曲线,结果如图9(a)~(d)所示。在各通道拟合曲线上计算其最大非线性误差,结果如图9(e)所示,可以看出最大非线性误差小于1.1%,系统整体线性度较好。

3) 通道一致性测试

考虑到系统具有32路应变传感器通道,对应变传感器通道进行通道一致性测试,同样以 0.5Ω 为步长,读取在 $350 \sim 353 \Omega$ 范围内的输出结果,得到在相同测点下32通道输出曲线,如图10(a)所示,可以看出同一输入下各通道输出结果曲线的波动较小。提取不同测点下32路通道读出结果的最值与均值,如图10(b)所示,结果显示

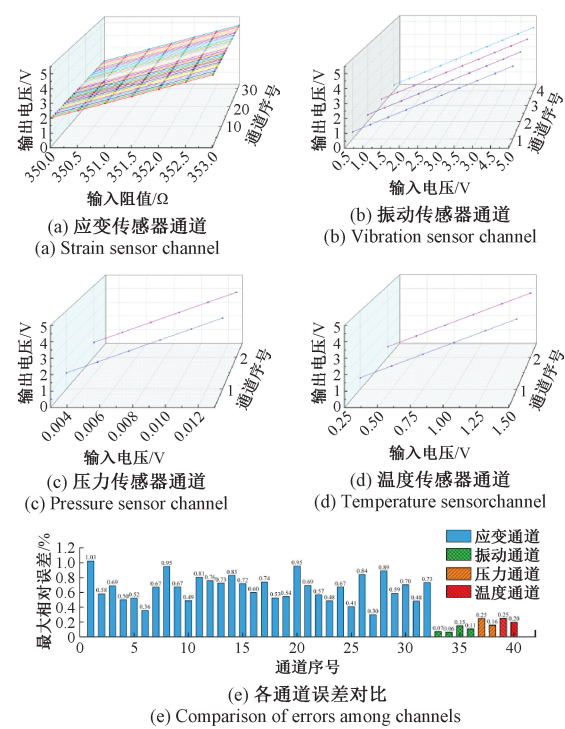


图9 非线性误差测试结果
Fig. 9 Nonlinear error test results

均值与最值分布紧凑。最后计算各通道最值与均值的最大误差,结果如图 10(c) 所示,结果显示最大误差小于 1%,表明各应变传感器通道采集数据的一致性较好。

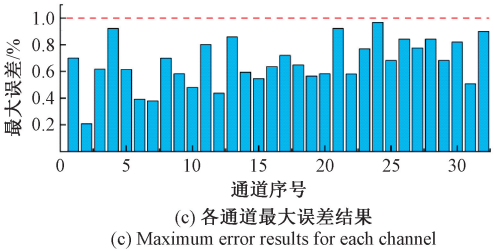


图 10 32 路应变传感器通道一致性测试结果
Fig. 10 32 channel strain sensor channel consistency test results

4.2 压缩感知模型性能测试

测试压缩感知模型的准确性,以一个 1.2 m 长树脂材料的风叶模型作为测试目标,将传感器布置在目标合适位置(测试现场如图 11 所示),敲击测试目标得到一组测试数据。取位于叶根部位的一个应变采集通道的一组数据作为原始信号进行测试,原始数据共 21 300 个样本点,测试结果如图 12 所示。图 12(a) 为原始信号,图 12(d) 为重构信号,二者最大相差 0.193 V,通过对比均方差与峰值信噪比得到重构信号与原始信号相似度达 92%。图 12(c) 显示了压缩 53% 后的传输信号。对原始信号和重构信号进行快速傅里叶变化得到图 12(b) 和(e)。图 12(b) 显示原始信号一阶、二阶以及三阶固有频率分别在 5、12 和 15 Hz 附近,图 12(e) 同样显示在 5、12 和 15 Hz 附近具有明显峰值,通过皮尔逊相干系数分析得到原始信号频谱与重构信号的频谱相关性达 98%。通过此次验证可知该压缩感知模型可以有效恢复出原始信号。

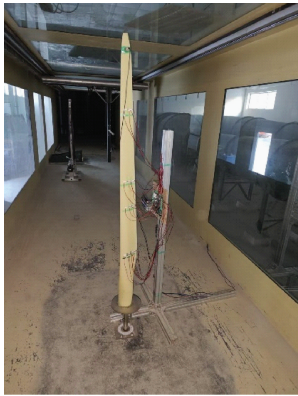
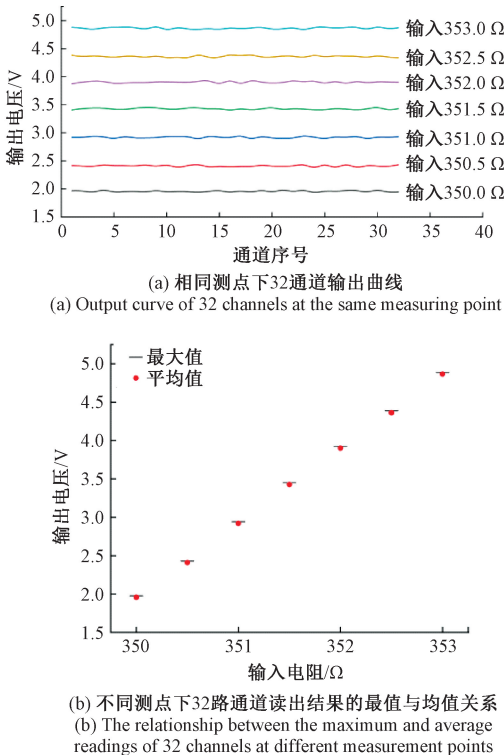


图 11 测试现场
Fig. 11 Test-site

4.3 同步触发性能测试

测试系统的同步触发性能,在单节点层面,由于 FPGA 内部 BUFG 分配的时钟抖动小于 200 ps,远远小于节点间同步误差,因此,此处只对节点间同步触发的性能进行测试。主节点和从节点两者之间触发端口通过



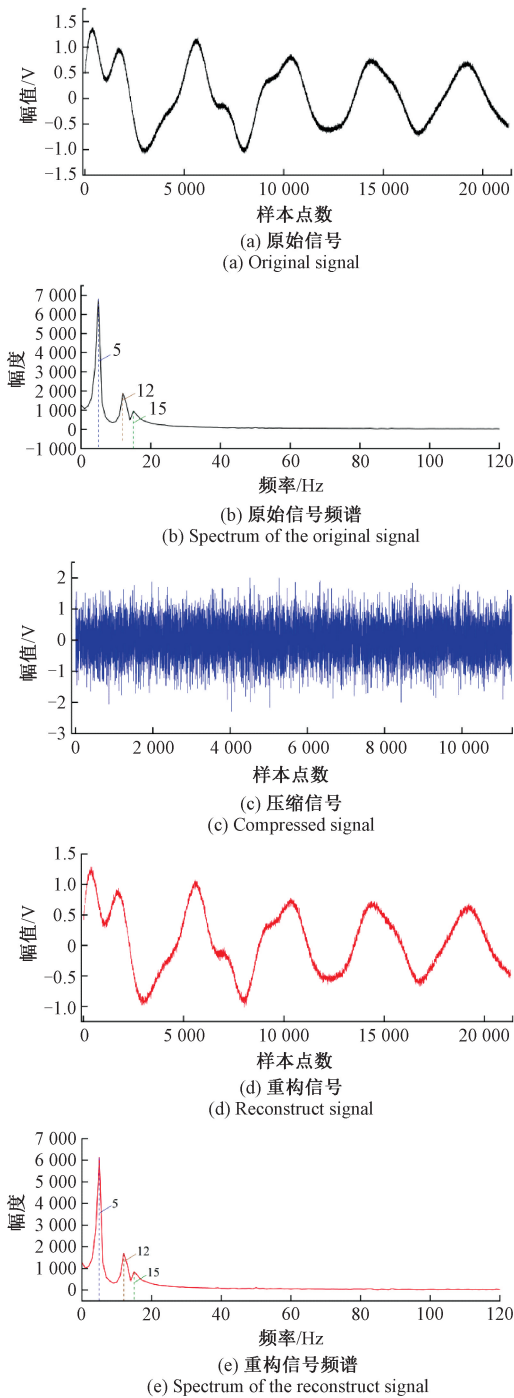


图 12 压缩感知模型性能测试结果

Fig. 12 Performance test results of compressed sensing model

100 m 的同轴电缆 ($50\ \Omega$, 延时 $5\ \text{ns/m}$) 连接, 使用高精度示波器 (带宽 $\geq 1\ \text{GHz}$) 精确测量触发信号从主节点发送端到从节点接收端的传输延时, 图 13 为一次的测量结果, CH1 是主节点触发信号脉冲, CH2 是从节点接收到的触发信号脉冲, 蓝色虚线表示 $2.5\ \text{V}$ 的触发信号阈值电压。由图 13 可知, 实际传输延时为 $505.5\ \text{ns}$, 与理论

计算值 $500\ \text{ns}$ 的差值为 $5.5\ \text{ns}$ 。多次测量主节点与不同从节点间的触发延时, 取平均后为 $6.3\ \text{ns}$ 。系统最大采样率为 $200\ \text{kSPS}$, 对应最小采样周期为 $5\ \mu\text{s}$, 触发延迟仅为最小采样周期的 0.13% 。测试结果验证了该同步触发机制在长距离传输条件下的可靠性和精确性, 为分布式数据采集系统的同步触发提供了保障。

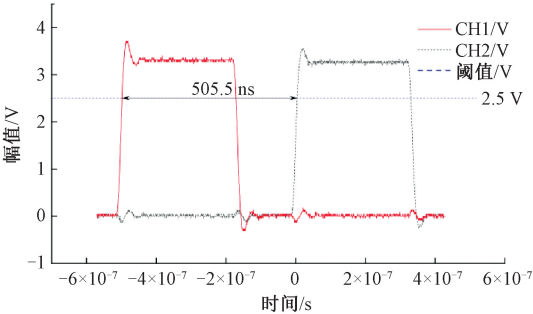


图 13 同步触发性能测试结果

Fig. 13 Synchronize trigger performance test results

4.4 动态调节机制测试

测试系统的动态调节功能。通过人为干预手段模拟网络环境恶化的场景, 采集 $4\ \text{min}$ 内的数据上传速率与触发率数据, 关系曲线如图 14 所示。结果显示, 当系统处在良好的网络环境下时, 系统以最大 $200\ \text{kHz}$ 触发率采样; 当人为干预使得网络环境恶化, 导致数据上传速率明显降低, 可以观察到此时触发系统的动态调节功能, 触发率随着数据上传速率降低呈现梯度下降的变化, 直到数据上传速率趋于稳定, 触发率也稳定维持在该状态; 取消人为干预, 网络处于良好环境, 触发率随着数据上传速率的提升而梯度回升。实验结果表明, 该动态调节机制具有优良的动态响应特性, 能够有效适应网络环境的变化, 满足系统对动态调节功能的要求。这一验证为系统在实际复杂环境中的可靠运行提供了实验依据。

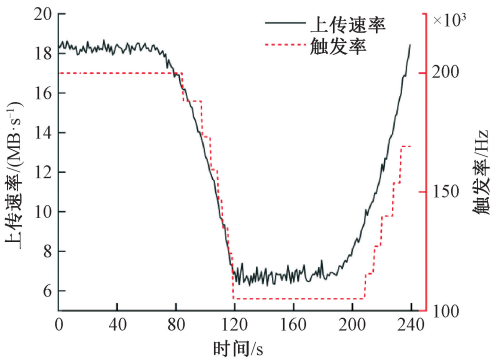


图 14 动态调节机制测试结果

Fig. 14 Test results of dynamic adjustment mechanism

5 结 论

设计并实现了一套用于风力机叶片状态参数监测的分布式监测系统,通过两级同步触发策略,实现全数据采集通道的高精度同步采样,触发延时仅为最小采样周期的0.13%,有效解决了分布式监测中的同步采样难题。系统融合数据压缩感知技术与5G数据传输技术,实现了叶片状态参数的实时采集和传输。针对5G网络数据传输速率的波动问题,设计了数据传输速率和触发率联动的动态调节机制,确保了系统在不同网络环境下高效可靠数据传输。测试显示系统具有较好的性能指标:本底噪声波动 $\leq 0.5\%$,非线性误差 $<1.1\%$,通道一致性误差 $<1\%$,压缩感知模型信号重构准确率达到98%。该系统不仅为风力机叶片状态监测提供了完整的技术方案,其同步触发和动态调节机制的设计理念,也为其他在线监测系统开发提供了可借鉴的技术参考。

参考文献

[1] 尹玉,张永,王健,等. 基于热红外图像的风力机叶片损伤识别方法研究[J]. 太阳能学报,2022,43(2):492-497.

YIN Y, ZHANG Y, WANG J, et al. Research on wind turbine blade damage identification method based on thermal infrared images [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2022,43(2):492-497.

[2] 焦嵩鸣,白健鹏,首云锋. 风机叶片精准巡视的无人机控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(10):3822-3832.

JIAO S M, BAI J P, SHOU Y F. Research on UAV control strategy for accurate inspection of wind turbine blades [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023,43(10):3822-3832.

[3] CAR M, MARKOVIC L, IVANOVIC A, et al. Autonomous wind-turbine blade inspection using LiDAR-equipped unmanned aerial vehicle [J]. *IEEE Access*, 2020,8:131380-131387.

[4] 杨亚东,刘鹏,周光亮,等. 叶片型面视觉检测系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报,2023,44(6):213-222.

YANG Y D, LIU P, ZHOU G L, et al. Design and implementation of the blade profile detection system based on computer vision [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023,44(6):213-222.

[5] 官宇楠,王超,宋博扬. 采用小波分析的风力机叶片声发射信号处理与分析[J]. 西安交通大学学报,2025,59(5):209-216.

GUAN Y N, WANG CH, SONG B Y. Processing and analysis of acoustic emission signals from wind turbine

blades using wavelet analysis [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025,59(5):209-216.

[6] MUÑOZ G Q C, MÁRQUEZ G P F. A new fault location approach for acoustic emission techniques in wind turbines [J]. *Energies*, 2016,9(1):40.

[7] XIANG P, ZHONGDI L, RONG X, et al. Early warning of damaged wind turbine blades using spatial-temporal spectral analysis of acoustic emission signals [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 537. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117209>.

[8] YANG K, RONGONG A J, WORDEN K. Damage detection in a laboratory wind turbine blade using techniques of ultrasonic NDT and SHM [J]. *Strain*, 2018,54(6). <https://doi.org/10.1111/str.12290>.

[9] TIWARI K A, RAISUTIS R. Post-processing of ultrasonic signals for the analysis of defects in wind turbine blade using guided waves [J]. *The journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2018, 53(8):546-555.

[10] 王炳楷,孙文磊,王宏伟,等. 风力机叶片表面应变的光纤光栅检测方法研究[J]. 机械科学与技术,2021,40(11):1741-1746.

WANG B K, SUN W L, WANG H W, et al. Study on detection method of blade surface strain wind turbine with fiber bragg grating [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2021,40(11):1741-1746.

[11] 李浩琪,行鸿彦,王水璋,等. 多反射式超声波测风模型及算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(9):110-118.

LI H Q, XING H Y, WANG SH ZH, et al. Multi-reflection ultrasonic wind measuring model and algorithm research [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023,37(9):110-118.

[12] SIERRA-PÉREZ J, TORRES-ARREDONDO A M, GÜEMES A. Damage and nonlinearities detection in wind turbine blades based on strain field pattern recognition. FBGs, OBR and strain gauges comparison [J]. *Composite Structures*, 2016, 135: 156-166.

[13] GARCÍA D, TCHERNIAK D. An experimental study on the data-driven structural health monitoring of large wind turbine blades using a single accelerometer and actuator [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019,127:102-119.

[14] WANG W J, XUE Y, HE CH K, et al. Review of the typical damage and damage-detection methods of large wind turbine blades [J]. *Energies*, 2022, 15(15):5672-5672.

- [15] 王冰佳,韩毅,童博,等. 海上风力机叶片状态监测技术应用现状与展望[J]. 船舶工程,2022,44(S1):1-5.
WANG B J, HAN Y, TONG B, et al. Status and prospects on condition monitoring technologies of offshore wind turbine blade [J]. Ship Engineering, 2022, 44(S1):1-5.
- [16] KILIC G, UNLUTURK M S. Testing of wind turbine towers using wireless sensor network and accelerometer [J]. Renewable Energy, 2015, 75:318-325.
- [17] 沈润杰,任涛,王青华. 风力发电机塔筒振动监测系统研究[J]. 系统仿真技术,2014,10(4):309-312.
SHEN R J, REN T, WANG Q H. Study on vibration signal detection system of wind turbine tower[J]. System Simulation Technology, 2014, 10(4):309-312.
- [18] 孙智鹏,陈平,田勇,等. 基于光纤光栅的风机桨叶监测系统设计[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版), 2023, 41(2):206-211.
SUN ZH P, CHEN P, TIAN Y, et al. Design of monitoring system for wind turbine blade based on fiber bragg grating [J]. Journal of Hubei Minzu University (Natural Science Edition), 2023, 41(2):206-211.
- [19] 陆平,李建华,赵维铎. 5G 在垂直行业中的应用[J]. 中兴通讯技术,2019,25(1):67-74.
LU P, LI J H, ZHAO W D. Applications of 5G in vertical industry [J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(1):67-74.
- [20] 曾春艳,余琰,王志锋,等. 面向可解释压缩感知的算法展开综述[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(11):35-43.
ZENG CH Y, YU Y, WANG ZH F, et al. Survey on algorithm unrolling for interpretable compressed sensing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(11):35-43.
- [21] 侯保军,田金鹏,杨洁,等. 基于多通道采样和注意力重构的图像压缩感知[J]. 电子测量技术, 2022, 45(16):102-108.
HOU B J, TIAN J P, YANG J, et al. Image compressive sensing based on multi-channel sampling and attention

reconstruction[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(16):102-108.

- [22] CHEN B, ZHANG J. Practical Compact deep compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2025, 47(3):1610-1626.
- [23] 程亚楠,万生鹏,吕纬龙,等. 基于改进压缩感知技术的 Φ -OTDR 系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(3):82-87.
CHENG Y N, WAN SH P, LYU W L, et al. Phase sensitive OTDR system based on improved compressed sensing technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(3):82-87.

作者简介



张惊蛰 (通信作者), 2004 年于兰州理工大学获得学士学位, 2010 年于电子科技大学获得硕士学位, 2016 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为兰州理工大学高级工程师, 主要研究方向为高速数据传输、测控技术与仪器。

E-mail: zhangjzh@lut.edu.cn

Zhang Jingzhe (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 2004, M. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2010, and Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2016, respectively. Now he is a senior engineer in Lanzhou University of Technology. His main research interests include high-speed data transmission, measurement and control technology and instruments.



李海鹏, 2023 年于西安石油大学获得学士学位, 现为兰州理工大学硕士研究生, 主要研究方向为电子学及数据处理。

E-mail: 939798404@qq.com

Li Haipeng received his B. Sc. degree from Xi'an Shiyou University in 2023. Now he is a M. Sc. candidate at Lanzhou University of Technology. His main research interests include electronics and data processing.