

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107056

基于 LoRa 基站的滚动轴承运行状态 远程监测系统设计*

李 瑞^{1,2} 范玉刚^{1,2} 张光辉¹

(1.昆明理工大学 信息工程与自动化学院 昆明 650500; 2.云南省人工智能重点实验室 昆明 650500)

摘要: 随着工业生产向智能化发展,无人化已经成为一种趋势。机械设备运行中,滚动轴承容易发生损坏,远程监测机械设备的运行情况已成为急需解决的问题。本文设计了一种基于 LoRa 基站对滚动轴承运行状态进行远程监测的系统,该系统以 STM32 为核心,形成一个采集子节点,用于采集轴承振动信号,然后将采集的数据通过 SX1278 射频芯片发送到 LoRa 无线网关。LoRa 无线网关通过 GPRS 模块将接收到的数据发送到远程服务平台。远程服务平台采用互补集合经验模式分解(CEEMD)方法,分析振动信号以确定轴承的工作状态。实验表明,该系统有效地实时监控机械设备,确保长期稳定运行并安全有效地生产。

关键词: LoRa;无线网关;远程监控;CEEMD

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Design of remote monitoring system for rolling bearing running status based on LoRa base station

Li Rui^{1,2} Fan Yugang^{1,2} Zhang Guanghui¹(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Yunnan Key Laboratory of Artificial Intelligence, Kunming 650500, China)

Abstract: With the development of industrial production to intelligence, unmanned has become a trend. In the operation of mechanical equipment, the rolling bearing is easy to be damaged. Remote monitoring of the operation of mechanical equipment has become an urgent problem to be solved. This paper designs a remote monitoring system for the running state of rolling bearing based on LoRa base station. The system takes STM32 as the core and forms a collection sub node to collect the bearing vibration signal, and then sends the collected data to LoRa wireless gateway through SX1278 RF chip. LoRa wireless gateway sends the received data to the remote service platform through GPRS module. The remote service platform uses the complementary ensemble empirical mode decomposition method to analyze the vibration signal to determine the working state of the bearing. Experiments show that the system can effectively monitor mechanical equipment in real time to ensure long-term stable operation and safe and effective production.

Keywords: LoRa; wireless gateway; remote monitoring; CEEMD

0 引 言

滚动轴承作为旋转机械设备中核心的部件之一^[1],已经广泛应用于航空工业、交通运输和发电设备等领域。滚动轴承需要在复杂工况下保持高精度的连续运行,同时能够承受各种振动冲击,其运行状态直接影响设备的稳定性和生产的效率^[2-3]。因此,对滚动轴承运行状态进行远程在线监测具有重要的意义。

滚动轴承的振动信号易受环境噪声影响,需要对采集的原始振动信号进行去噪处理。针对这个问题,国内外大量学者对其进行了相关研究。小波变换(wavelet transform, WT)^[4]去噪的方法,该方法运算简单,计算量小,特别适用于低信噪比的信号,但是对于不同的信号要选择适合的小波基进行分析,缺乏灵活性^[5]。总体平均经验模式分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)^[6]方法,将原始信号中加入白噪声后,消除了模态混叠。但

收稿日期:2021-06-24

* 基金项目:国家自然科学基金(649220180003)项目资助

EEMD 方法在计算上过于繁琐,完备性不能被证明,最终的平均问题仍然没有解决^[7]。互补总体平均经验模态分解 (complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)^[8]方法在信息提取和消除噪音方面具有显著效果,通过自适应添加白噪声,解决了 EEMD 在信号加入白噪声后产生重构误差,失去完备性的问题。

无线网络通信方式种类繁多,可根据不同的监测环境采用不同方式。ZigBee^[9]是一种新型的短距离、低速率网络技术,适用于数千个传感器之间的相互通信,但是它通信稳定性较差,穿墙能力弱^[10]。长距离通信中的 4G/5G 或 NB-IoT 通信方式受移动网质量的影响较大^[11],不适合对滚动轴承振动信号的传输。LoRa 是一种低功耗广域网通信技术^[12],具有低成本、低功耗、非常适用于长距离通信、抗干扰能力强等特点,更适合对滚动轴承的监测。

随着工业生产向智能化发展,对设备运行状态进行远程监测,是生产无人化的必然需求。为此本文设计了基于 LoRa 基站的滚动轴承运行状态的远程监测系统,通过加速度传感器与 STM32 微控制器采集轴承的振动信号,再利用 LoRa 模块将振动数据发送到 LoRa 网关,最后由 GPRS 传输到远程服务平台。远程服务平台采用互补集合经验模式分解(CEEMD)对接收到的振动信号进行分析,使其分解成几个本征模函数(intrinsic mode function, IMF)分量^[13],选用其中两个峭度值大的 IMF 分量进行包络谱分析,以确定轴承是否故障。该方案实现对滚动轴承运行状态的远程监控,有效地解决了生产无人化的问题。

1 系统的总体设计

滚动轴承远程监测系统主要包括远程服务平台、LoRa 模块、GPRS 模块、采集子节点和无线网关。采集子节点采集滚动轴承的振动信号,无线网关通过 LoRa 模块接收到从采集子节点发送的振动信号,再通过 GPRS 将其传输至远程服务平台。采集子节点向下与加速度传感器通过 I²C 接口连接,向上利用 LoRa 模块与无线网关通信,将采集到的振动信号通过无线网关发送到远程服务平台。远程服务平台采用 CEEMD 方法,对采集到的数据进行分析判断轴承的运行状态。系统的整体框架如图 1 所示。系统的各个模块协同工作,能够实时判断滚动轴承运行状态。

2 系统的硬件设计

2.1 微控制器的选型

微控制器选用的芯片为 STM32F103C8T6,是一款基于 ARM Cortex-M 的内核的 32 位微处理器。主频率为 72 MHz,电压为 2~3.6 V,工作温度在 -40 ℃~85 ℃。STM32F103C8T6 拥有 2 个 SPI 接口,2 个 I²C 接口,CEC 功能,3 个 USART 接口,支持 USB。STM32F103C8T6 可写入 FIF。

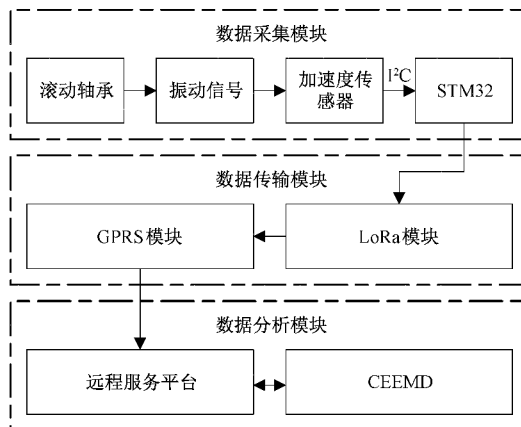


图 1 滚动轴承远程监测系统整体框架

2.2 LoRa 的选型

选用 LoRa 的 SX1278 射频模块拥有 256 Bytes 数据缓冲区,供电电压 3.3 V,低频段 169 M 和 433 M,高频段 868~915 M,其抗干扰能力强,不需要任何中继设备就可以拥有 1~3 km 的覆盖半径。LoRa 的传输速率在 0.3~11 kbit/s 之间。为了扩大总体的网络容量,LoRa 通过自适应数据速率(AR)对每个终端设备进行管理。

2.3 采集子节点设计

采集子节点包括传感器、微控制器、LoRa 模块和电源模块 4 个部分,主要负责生产设备的轴承振动信号的采集,硬件结构如图 2 所示。

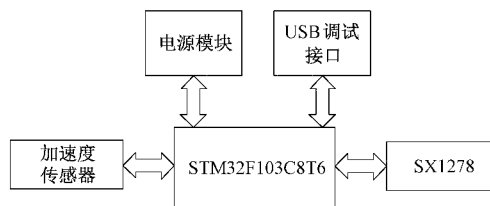


图 2 采集子节点硬件结构

加速度传感器和微控制器负责对机械设备轴承振动信号的采集,LoRa 模块负责接收无线网关下发的指令,和将采集的振动数据传输至无线网关,实现对机械设备轴承数据实时采集、控制。加速度传感器通过 I²C 接口与微控制器连接。

2.4 无线网关设计

无线网关负责对采集子节点的指令下达,数据的接收和上传数据到远程服务平台。无线网关也具有对数据采集的功能,其电路原理如图 3 所示。无线网关通过 LoRa 技术接收采集子节点采集到的现场数据,再通过 GPRS 将数据传至远程服务平台。

3 系统的软件设计

3.1 通信协议设计

系统的软件设计,主要以任务调度机制为核心,并且能

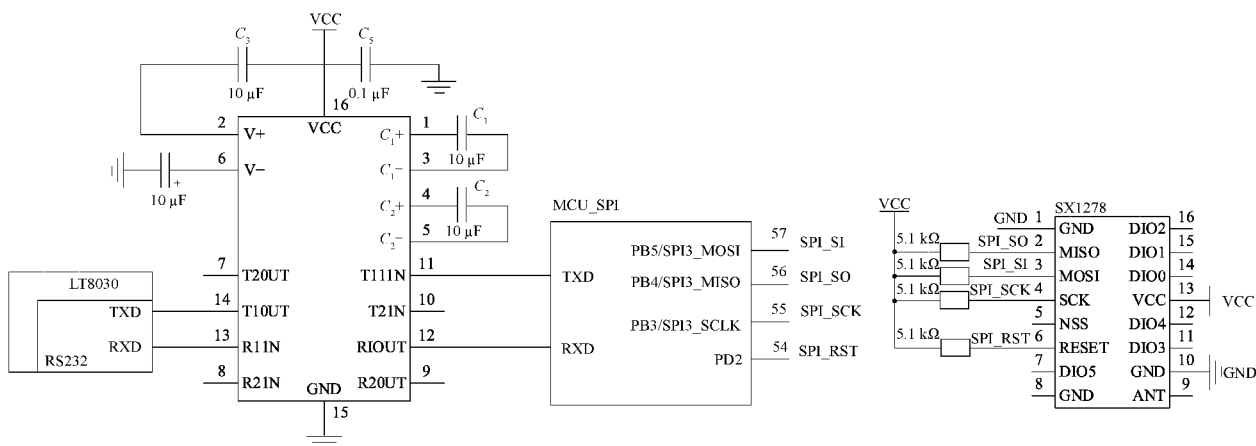


图 3 无线网关电路原理

够保证远程服务平台下发多个任务一起执行。通过远程服务平台合理地控制,唤醒现场采集子节点开始采集振动信号的工作,并且及时上传数据。

为了体现出设计的系统具有智能化水平,将用数据帧模式传输振动信号。为了保证信号在传输过程中的准确率,采用 CRC16 算法^[14]进行验证。

整个 LoRa 网络系统使用同一个信道传输振动数据,多个采集子节点向无线网关发送数据会导致数据错乱。为了避免这种情况的发生,采集子节点与无线网关建立一对多的映射关系。LoRa 会区分上传链路和下载链路^[15]。上传链路指的是对滚动轴承进行采集的节点,以及无线网关向远程服务器发送数据。下载链路指的是由远程服务器发送的指令,经过无线网关传送给采集子节点。

下载链路主要是由服务器发送给各采集子节点的控制指令。并且对下载链路的需求远小于对上传链路的需求。下载链路同上传链路的物理层都采用的是 LoRa radio 的显示格式,其中含有 Preamble、PHDR、PHDR_CRC 和 CRC,这些部分都是由 LoRa radio 硬件填充,PHY Payload 是用户数据段,有 CRC 校验来保证完整性。为了给上传链路传输留更多的带宽,下载链路不带有 CRC 校验。为了给上传链路传输留更多的带宽,下载链路不带有 CRC 校验。

采集子节点发送 0x02 指令时,采集子节点用来验证连接。无线网关发送 0x02 指令是无线网关应答,同时发送接受功率,告知连接质量。无线网关发送 0x03 指令,通知采集子节点修改数据速率,发送功率和通道。采集子节点发送 0x03 回复无线网关的应答。无线网关发送 0x06 指令是请求采集子节点状态,采集子节点发送的 0x06 指令用于将采集子节点的设备信息发送到无线网关。

3.2 低功耗设计

微控制器 STM32F103C8T6 采用睡眠、等待、唤醒的工作状态,最大限度地降低系统的功耗^[16]。只有采集任务指令下达后,微控制器才开始供电工作,其余时候保持睡

眠状态。SX1278 采用扩频调制信道,具有抗干扰能力强,远距离传输等特点,其工作模式下功耗消耗大,合理设计其睡眠和运行模式,降低电池能源消耗。

3.3 无线网关软件设计

无线网关接收到远程服务平台下发的指令或是采集子节点发送的数据时,都会对其进行 CRC 校验,判断是上传链路还是下载链路。如果是采集子节点上传的数据,对上传的数据进行 CRC 校验,保证数据准确无误,再通过 GPRS 上传到远程服务器;如果是远程服务平台下发的任务指令,就通过 LoRa 模块发送到采集子节点。流程如图 4 所示。

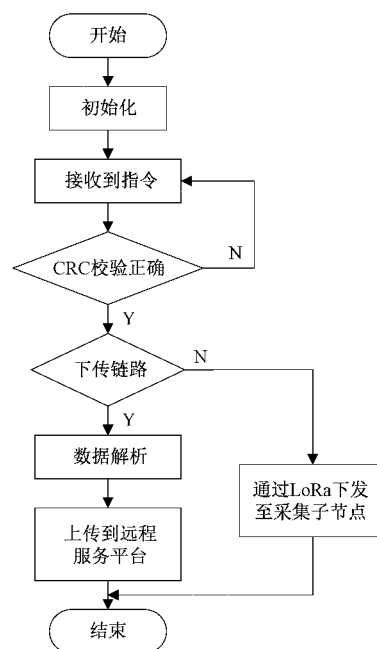


图 4 无线网关的工作流程

3.4 采集子节点软件设计

采集子节点需对轴承的振动信号进行采集,也要通过 LoRa 模块接收命令和上传数据。采集子节点收到无线网

关发送的采集任务指令后,根据指令中帧命令完成采集任务,采集完成后上传数据到无线网关。然后继续查看有无无线网关下发的任务指令,如果有就完成任务指令,没有就进入睡眠状态。采集子节点采用阈值触发采集数据模式,流程如图 5 所示。

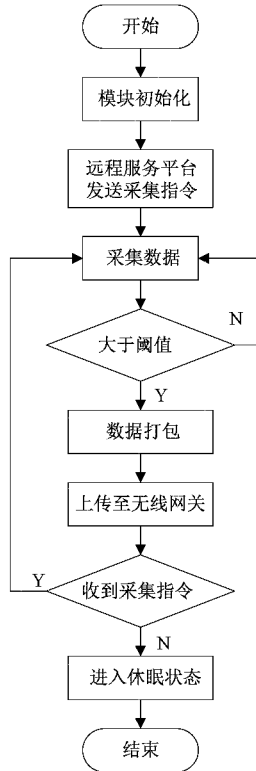


图 5 采集子节点工作流程

4 CEEMD 数据分析

EEMD 添加白噪声,优化了模式混叠,但白噪声在集总平均之后不能完全抵消,存在残留,导致重建之后的噪声不可忽略。CEEMD 方法在 EEMD 方法上添加 N 组符号为负的白噪声,对得到的两组信号同时进行 EMD 分解,之后经过 $2N$ 次集成平均以抵消信号中加入的噪声,其分解过程如下。

在原始轴承振动信号中加入 N 组符号相反、幅值相同的噪声辅助信号。

$$m_i^-(t) = x(t) + n_i^+(t) \quad (1)$$

$$m_i^+(t) = x(t) + n_i^-(t) \quad (2)$$

式中: $x(t)$ 为原始信号; $n_i^+(t)$ 为正噪声; $n_i^-(t)$ 为负噪声。

对 $m_i^+(t)$ 以及 $m_i^-(t)$ 进行 EMD 分解后得到两组 IMF 分量 IMF_1 和 IMF_2 。 IMF_1 为加入正噪声组集成平均结果, IMF_2 为加入负噪声的集成平均结果。轴承振动信号最终的分解结果为 IMF_1 和 IMF_2 的平均值。

$$IMF = \frac{1}{2}(IMF_1 + IMF_2) \quad (3)$$

CEEMD 分解出来的 IMF 分量有虚假分量,利用相关系数-峭度准则来选取真实的 IMF 分量,相关系数公式为:

$$\rho = \frac{E |(x - \mu_x)(y - \mu_y)|}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

峭度准则公式为:

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)^4}{X_{rms}^4} \quad (5)$$

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)^2} \quad (6)$$

当轴承正常运行时,振动信号的峭度值约为 3,当其发生故障时的峭度值会增大。故通过分析 IMF 分量的峭度值大小,以判断轴承是否故障。

5 实验测试

在生产现场厂间对机械设备滚动轴承布设一个监测系统,由一个无线网关,两个采集子节点组成前端远程通信系统。无线网关通过 GPRS 与远程服务平台连接。LoRa 射频采用 477 MHz,发射功率为 20 dBm。为了检验数据的收发状态,采集子节点采用串口调试工具向无线网关发送数据。

通过设定不同传输距离验证远程通信系统传输性能,每次发送数据包 150 个,测试结果如表 1 所示。测试结果表明,在数据传输距离小于 2 km 时,数据丢包率小于 10%,远程通信系统具有良好的传输性能。

表 1 远程通信系统测试结果

组数	距离/km	接收数据包	丢包率/%
1	0.2	150	0
2	0.5	150	0
3	0.8	150	0
4	1.1	146	1
5	1.3	144	4
6	1.5	140	6
7	1.7	136	9
8	2.1	128	14
9	2.3	110	26
10	2.5	98	34

在复杂的环境中监测到的轴承的振动信号受环境噪声,机器振动等影响,需要对其进行预处理。远程服务平台调用 MATLAB 对采集到的振动信号进行 CEEMD 分析,得到 6 个 IMF 分量,如图 6 所示。

对采集的振动信号分解出来的 6 个 IMF 分量的峭度与原信号 IMF 分量的峭度值进行比对,选取其中两个峭度值大的 IMF 分量,求其包络谱来判断轴承是否故障。由图 7 可知轴承的故障频率在 105.5 Hz。

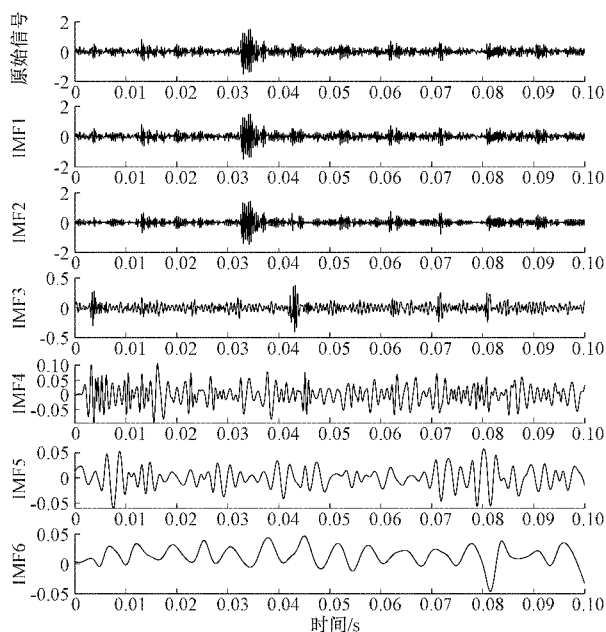


图6 CEEMD分解图

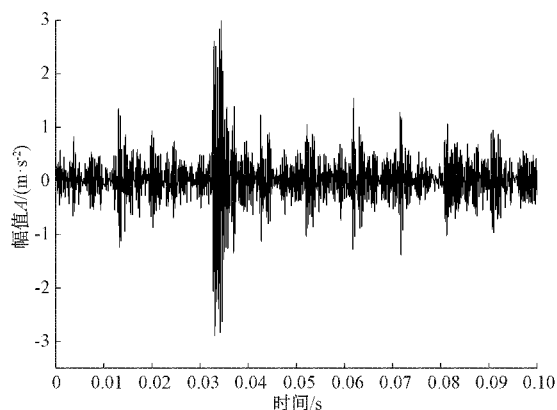


图7 模态分量频谱

6 结 论

本文提出一种基于LoRa基站的滚动轴承运行状态远程监测系统,该系统能够准确地检测出复杂工况下滚动轴承实时地运行状态。

1)通过SX1278芯片和微控制器,能顺利采集现场滚动轴承的振动信号,实现数据的双向传输。实验结果表明采用LoRa通信技术传输时,具有良好的传输性能。

2)远程服务平台对采集的振动信号进行CEEMD分析,提取出振动信号的振幅和频率特征,实现对滚动轴承振动信号的实时特征提取与显示。

参考文献

[1] 崔鹏宇,王泽勇,邱春蓉,等.基于IBA优化BP神经网络的滚动轴承故障诊断方法[J].电子测量技术,2019,42(12):33-36.

- [2] 尹诗,侯国莲,胡晓东,等.风力发电机组发电机前轴承故障预警及辨识[J].仪器仪表学报,2020,41(5):242-251.
- [3] 李云朋,熊柳景,牛刚.嵌入式轴承故障诊断系统的设计与实现[J].国外电子测量技术,2019,38(11):147-152.
- [4] CHEN B Q, CUI J G, SHU T, et al. Coupling denoising algorithm based on discrete wavelet transform and modified median filter for medical image[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(1):120-131.
- [5] LI X F, WU SH J, LI X Y, et al. Particle swarm optimization-support vector machine model for machinery fault diagnoses in high-voltage circuit breakers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1):104-113.
- [6] 殷礼胜,唐圣期,李胜,等.基于EEMD-IPSO-LSSVM的交通流组合预测模型[J].电子测量与仪器学报,2019,33(12):126-133.
- [7] YUAN P, LEI Z L, ZENG Q H, et al. Load forecasting of refrigerated display cabinet based on CEEMD-IPSO-LSTM combined model [J]. Open Physics, 2021, 19(1):360-374.
- [8] 李志军,张鸿鹏,王亚楠,等.排列熵 CEEMD分解下的新型小波阈值去噪谐波检测波检测方法[J].电机与控制学报,2020,24(12):120-129.
- [9] WANG X, ZHANG S L, SONG G X, et al. Remote measurement of low-energy radiation based on ARM board and ZigBee wireless communication[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, 29(1):33-38.
- [10] 杨旭,谭子轶,陈朋朋,等.基于编码拆分的跨网通信技术优化研究[J].电子学报,2021,49(7):1274-1278.
- [11] 黄正睿,潘森鑫,陈崇成,等.集成LoRa与BDS的应急环境监测数据获取与传输技术[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(4):530-537.
- [12] 洪杭迪,王剑侠.基于LoRa和蓝牙的智慧医院监测网设计[J].电子测量技术,2020,43(2):153-157.
- [13] GONG Y D, XING X G, WANG W H. Factors determining soil water heterogeneity on the Chinese Loess Plateau as based on an empirical mode decomposition method[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12(3):108-118.
- [14] 党成,黄海生,李鑫,等.基于E1链路的HDLC成帧解帧处理电路[J].光通信技术,2021,45(2):28-31.
- [15] 官铮,熊磊,贾雷,等.RoF-DAS架构下具有差错重传的预约式WLAN MAC协议研究[J].通信学报,2020,41(3):102-111.
- [16] ZHAO H Y, YAN J, LUO X Y, et al. Privacy preserving solution for the asynchronous localization of

underwater sensor networks[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(6): 1511-1527.

作者简介

李瑞, 硕士研究生, 主要研究方向为机械设备故障诊断、模式识别。

E-mail: 892310632@qq.com

范玉刚, 副教授, 博士, 主要研究方向为智能控制、故障诊断、图像处理。

E-mail: ygfan@qq.com

张光辉(通信作者), 讲师, 主要研究方向为综合自动化、机器学习与数据挖掘。

E-mail: zghkm@163.com