

基于超声导波的高速列车承力结构健康监测系统

魏钧涛, 韩泽, 滕飞宇, 鲍昱安, 宋慧超

(山东大学, 山东 济南 250013)

摘要: 高速列车转向架等承力结构在服役过程中受交变载荷、严酷环境和外部冲击等影响, 易产生疲劳微裂纹损伤, 若不能及时发现, 将危及运行安全。基于超声导波技术主动扫查、检测范围大、灵敏度高等特点, 研制了由传感智能层、检测主机与智能识别软件组成的结构健康监测系统。系统通过计量机构检验, 并开展了多谱系列车工程应用。

关键词: 超声导波; 高速列车; 承力结构

1 传感器系统应用效果

研制的超声导波监测系统通过了高低温、湿热、电磁兼容、振动等环境试验, 并在转向架等结构开展了台架试验测试, 应用效果包含:

- (1) 128 测点大面积结构状态主动扫查实时监测;
- (2) mm 级微小损伤的及时判定识别;
- (3) 秒级监测数据无线传输和损伤信息远程预警。

在台架试验的基础上, 已在和谐号、复兴号等获得成功应用。

2 创新点与优势

新点进行提炼, 同时指出与其它传感器系统应用的不同与优势, 如与同类系统对比应用领域、复杂环境及特殊需求等, 不超过 3 点, 300 字以内)

系统利用压电智能层构建传感器网络, 基于超声导波主机实现全路径主动扫查, 并经由信号处理算法实现损伤识别。创新点如下:

(1) 抗干扰能力强的传感智能层: 压电传感器远离智能层走线部位, 增加信号线间距以降低信号间串扰的影响; 可依据结构形式设计传感智能层, 便于一体化整体监测。

(2) 高性能超声导波激发接收硬件设计: 设计宽频大功率放大模块, 实现高功率超声信号的激励, 提升有效传播距离; 设计程控放大滤波模块, 自适应放大微弱信号, 有效提高采集信号信噪比。

(3) 基于分布函数修正的概率损伤识别算法: 提取信号飞行时间以确定损伤与路径相对位置, 修正基于理论的分布函数, 实现损伤诊断, 提升了损伤定位精度, 优化了监测盲点问题。

3 方案简介

系统实现主要涵盖监测系统方案设计、传感器智能层设计、系统主机研制、软件开发和性能验证等环节。具体阐述如下：

(1) 监测系统由传感智能层、系统主机、系统软件组成。

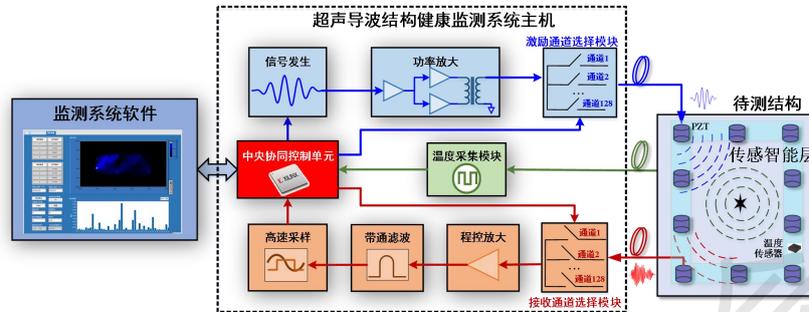


图1 系统框图

(2) 传感智能层由柔性电路板制成，集成压电和温度传感器，通过一个接口将所有信号引出，可满足不同形状结构的监测需求。

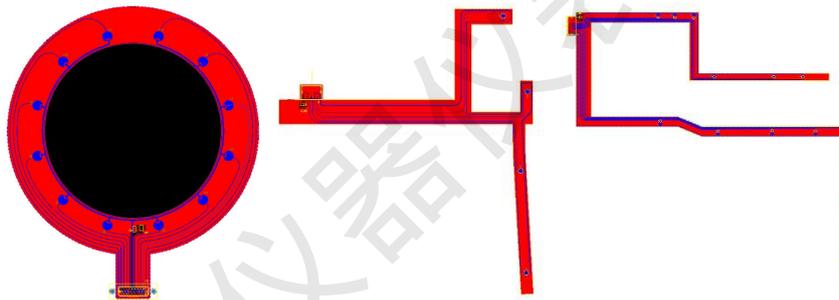


图2 智能层设计

(3) 系统主机利用直接数字合成和宽频功率放大技术生成超声激励信号，通过通道选择模块配置激励压电传感器发出超声波；接收压电传感器将超声响应信号转换成电信号，经自适应放大等功能实现信号采样。

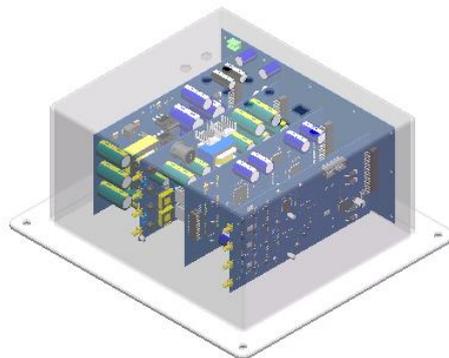


图3 主机设计

(4) 系统软件根据待测区域和传感器坐标搭建传感网络，控制主机激励和接收超声信号，提取信号的特征参数，融合定位算法对损伤进行可视化展示，损伤识别信息通过 4G/5G 无线上传远程平台。

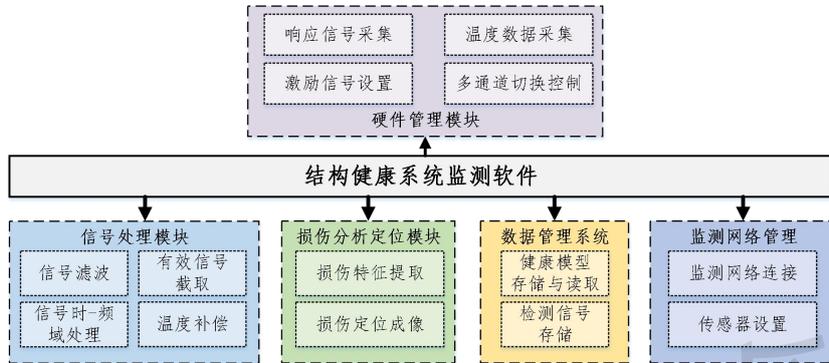


图 4 软件功能

(5) 损伤定位成像将采集的压电传感器信号作为输入，利用改进概率重建算法实现损伤识别。

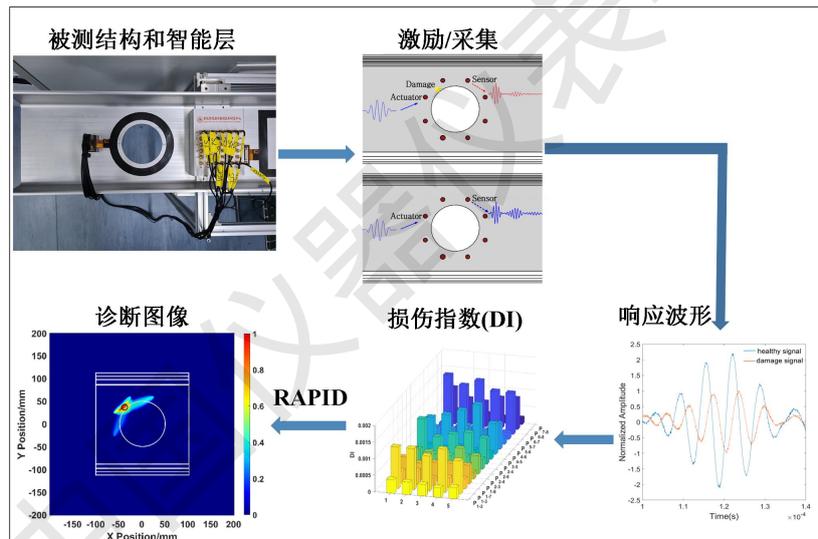


图 5 成像原理

(6) 系统工作流程主要涵盖系统准备、参数设置和健康模型建立、损伤定位成像等。

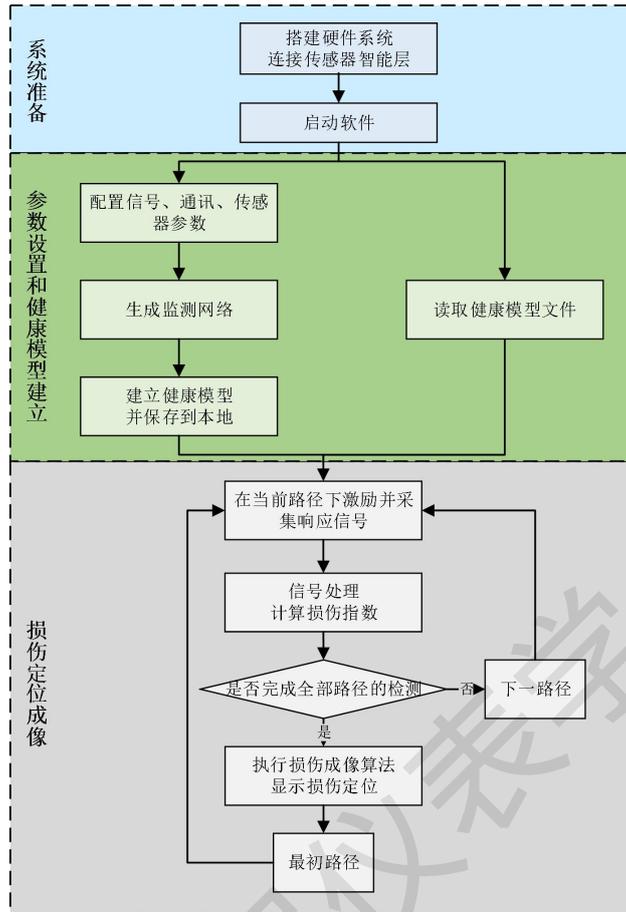


图 6 工作流程

(7) 系统运行状态包含传感网络构建、信号采集与处理、损伤识别和信息远程传输等。



图 7 传感器坐标和监测网络

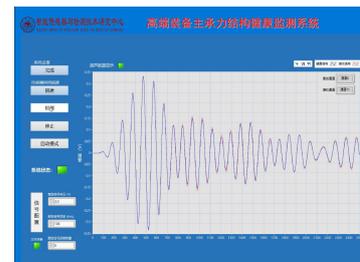


图 8 实时波形

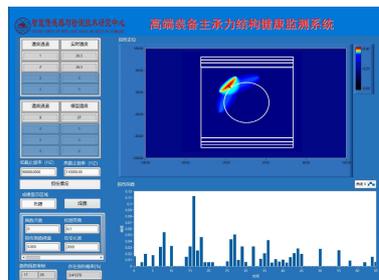


图 9 损伤定位成像



图 10 远程平台

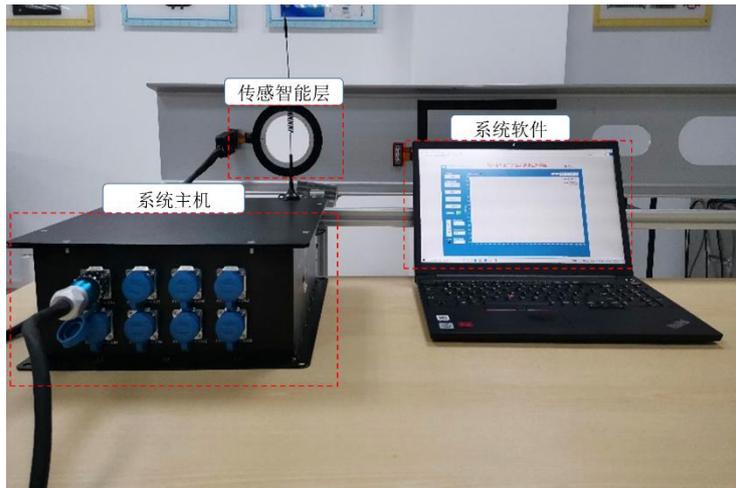


图 11 结构健康监测系统实物图

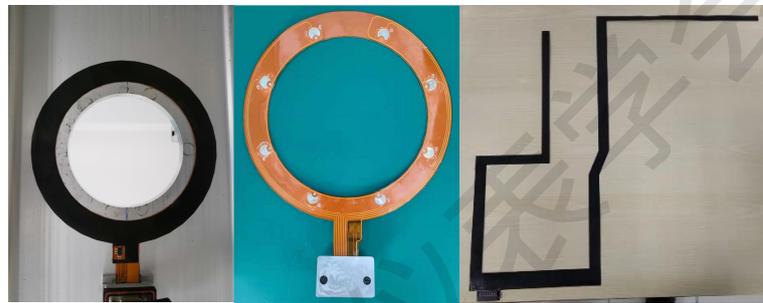


图 12 传感智能层



图 13 超声导波监测系统主机