

桥梁远程结构综合参数获取与智能评估软件设计

庞珂^{1,2}, 李剑^{1,2}, 苏新彦^{1,2}, 马慧宇^{1,2}

(1. 中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 太原 030051;
(2. 中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室, 太原 030051)

摘要: 针对老旧桥梁受环境与自身寿命的影响, 养护维修的成本不断提高的问题, 文章设计开发了桥梁远程结构综合参数获取与智能评估软件; 首先利用在桥梁上布设的多个传感器组成一个全天候硬件监测系统, 软件通过 5G 公共网络与监测系统通信, 同时借助软件内嵌的多分类卷积神经网络, 将深度神经网络在分类领域的独特优势应用于老旧桥梁健康状况的评估; 经过实际测试, 满足设计要求, 解决了老旧桥梁因监测周期长和效率低, 而导致的健康诊断难的问题, 该系统具有参数获取难度低、精度高、健康评估准确的优势。

关键词: Qt; 桥梁健康检测; 深度学习; 5G; 无线传感器; 百度地图; 北斗定位

Design of Comprehensive Parameter Acquisition and Intelligent Evaluation Software

PANG Ke^{1,2}, LI Jian^{1,2}, SU Xinyan^{1,2}, MA Huiyu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Key Laboratory of Information Detection and Processing of Shanxi Province, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem that the cost of maintenance and repair for old bridges is affected by the environment and its own life, a comprehensive parameter acquisition and health assessment system for bridge remote structure is designed and developed in this paper. First of all, the multiple sensors on the bridge are used to form an all-weather hardware monitoring system, the software communicates with the monitoring system through the 5G public network, and at the same time, with the help of the multi-classification convolutional neural network embedded in the software, the unique advantages of the deep neural network in the field of classification are applied to the assessment of the health status for the old bridges. After practical testing, the design requirements are satisfied, the old bridges are solved due to the long monitoring cycle and low efficiency, resulting in the difficulty of health diagnosis, the system has the advantages of low difficulty in obtaining parameters, high precision and accurate health assessment.

Keywords: Qt; bridge health detection; deep learning; 5G; wireless sensors; baidu map; beidou positioning

0 引言

随着综合国力的提升和国民经济的发展, 以及国家的“交通强国”战略、“一带一路”倡议的不断推进, 桥梁等基础设施建设的比例和规模也在逐年上升。中国公路学报在 2021 年关于中国桥梁工程的学术研究^[1]中提到, 近年来桥梁建造的技术日趋完善, 抗灾变能力显著提高, 桥梁的智能化水平也得到大幅的提升。我国公路桥梁总数截至 2020 年底, 已接近 100 万座^[2], 其中将近 70% 是老旧桥梁。由于受到当时建造水平和对结构复杂性认知的限制, 人们无法实时获知老旧桥梁内部结构的受损情况, 不能对老旧桥梁的运营维护作出及时准确的评估, 导致桥梁损伤

积累, 引起结构的突发性失效, 使用的风险日益增加, 维护成本逐年攀升。

近年来, 针对老旧桥梁的监测问题, 国内外学者广泛采用传感器监测、GPS 监测以及移动车辆监测等方式, 同时随着深度学习算法的不断优化, 也逐渐开始有学者将深度学习应用于健康状况的评估诊断中。在 2019 年 Lee 等学者就提出了在桥墩倾斜度监测中应用全球导航卫星系统^[3]; Xuan Ji 等学者提出使用智能采集器、组网、云平台等现代网络技术, 实现了实时桥梁监控、智能分析、安全报警等功能^[4]; 刘康旭开发了一套基于 FPGA 和 Linux 的桥梁健康实时大数据分析系统^[5]; 张青春等人设计了一种基于 Arduino 单片机和云服务器的桥梁健康状态在线监测预警系

收稿日期: 2021-12-22; 修回日期: 2022-01-04。

基金项目: 山西省高等学校科技成果转化培育项目(2020CG038)。

作者简介: 庞珂(1996-), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式开发方向的研究。

通讯作者: 李剑(1985-), 男, 山西太原人, 博士研究生, 教授, 研究生导师, 主要从事多维信号获取系统嵌入式开发、阵列化信号处理与重建方向的研究。

引用格式: 庞珂, 李剑, 苏新彦, 等. 桥梁远程结构综合参数获取与智能评估软件设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 143-149.

统^[6]；杨李东等学者结合物联网和 GIS 技术开发了城市桥梁健康监测系统^[7]；2020 年杜立婵等学者基于 NB-IoT 开发了桥梁健康远程监测系统^[8]；欧阳歆泓设计了一种应用于小桥梁的车辆荷载监测方法^[9]；黄志贤提出了一种基于 NB-IoT 通信技术的桥梁健康监测系统方案^[10]；2021 年申志宇利用 STM32 和 FPGA 搭建了硬件控制平台，上位机则采用 C# 编写各控制功能^[11]；同年张鹏飞利用遗传算法优化 BP 神经网络对桥梁健康进行监测^[12]；Thanh Q 将离散模型和深度学习结合应用于桥梁的健康监测中，提高了损伤定位的精度^[13]；邓斌也提出了一种实时的桥梁健康监测系统^[14]。

但这些学者只是针对桥梁的监测数据获取的硬件平台或者应用于损伤定位的深度学习算法做出的优化和改进，并没有将这些硬件平台的搭建和深度学习算法综合运用到桥梁监测的全过程中，没有形成一个完整的监测系统，桥梁的监测过程并不“智能”，无法满足当前社会对于智慧城市或智慧桥梁的需要。

本文设计了一个桥梁远程结构综合参数获取与智能评估软件，综合利用布设在桥梁结构关键部位的传感器，获取桥梁服役环境、运营荷载，软件则借助深度学习训练生成一个可以适用于大部分老旧桥梁的多分类网络模型，从而实现对桥梁结构状态和安全性能评估，解决了老旧桥梁监测周期长、效率低、健康评估难的问题，具有参数获取方便、精度高、健康评估准确的优势。

1 监测系统方案

1.1 总体设计方案

监测系统主要包括：硬件监测系统和控制终端两个部分。硬件监测系统主要负责接收和解析控制终端下发的指令，并完成数据采集和传输等功能；控制终端主要实现与硬件监测系统的通信、数据处理、健康监测与评估等功能。硬件监测系统与控制终端通过 WIFI+5G 的数据传输方式，严格按照 TCP/IP 协议进行通信。监测系统总体设计框图如图 1 所示。

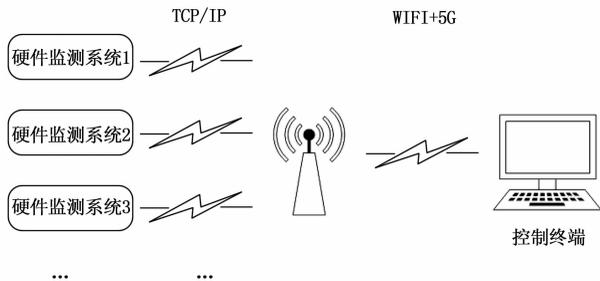


图 1 监测系统总体设计方案框图

1.2 硬件监测系统设计方案

硬件监测系统主要包括：数据采集存储模块、传感器模块和无线通信模块。硬件监测系统采用 ST 公司的 STM32H743 高性能单片机作为主控芯片，结合 MEMS 加速度传感器、温湿度传感器和应变传感器等多种传感器构

建桥梁多参数监测节点，利用北斗定位系统标记传感器节点和监测桥段的位置，通过 DMA 的传输方式，将上述几种传感器采集到的数据存储在外部的 SDRAM 中，然后通过 WIFI+5G 的方式组成超远程通信链路，将传感器监测节点和终端服务器构建异构跨区域的健康监测网络。该硬件监测系统融合了分布式跨区域的网络传输技术和多传感器融合技术，具有通信距离远，网络质量好、传输速率高，在保证通信质量的情况下实现无线长距离数据传输的特点。各部分功能如图 2 所示。

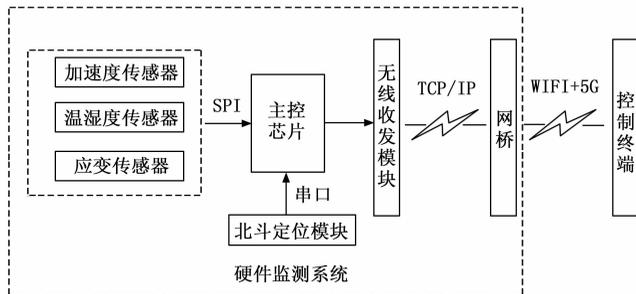


图 2 硬件系统设计方案框图

1.3 软件设计方案

Qt 是一套可以跨平台使用的 C++ 开发库，它封装了大量的工具库^[15]；Qt 模块化程度高，可重用性好，程序的开发和配置不受平台的限制；Qt 中独特的信号和槽机制也方便程序开发^[16]。因此本软件基于 Qt5.9 开发，软件功能模块主要包括 3 个模块，分别是通信模块、控制模块和数据处理模块。

控制终端位于远端方便操作的地方，主要由计算机和软件组成，软件将硬件监测系统采集到的参数经过计算转换为桥梁挠度、环境和频率等信息，同时将轻量化桥梁监测评估的多分类网络模型嵌入软件中，通过该网络模型对桥梁健康状态进行快速评估，当桥梁出现损失时，测试节点会向监控终端发送报警信号，并由监控终端进行二次精准诊断，从而提高桥梁的健康监测效率。本次桥梁远程结构综合参数获取与智能评估软件的系统功能框图如图 3 所示。

2 软件功能设计

2.1 通信模块设计

常用的通信协议主要包括 TCP/IP 协议和 UDP 协议等。由于桥梁测试系统中传感器采集到的数据量大且数据类型复杂，而且该模块是软件与硬件进行正常交互的前提，通信链路的稳定与否也会直接影响到交互的质量，同时通信过程的可靠性也要求该模块的设计需要很高的稳定性，软件的通信协议如果采用 UDP 协议则无法保证上述要求，故软件选择采用相对可靠的、基于字节的 TCP/IP 协议与硬件监测系统进行通信^[17]。

由于 Qt 对传统的 TCP/IP 协议进行了封装，这使得使用 TCP/IP 协议更加方便^[10]。通过 Qt 自带的 QTcpServer

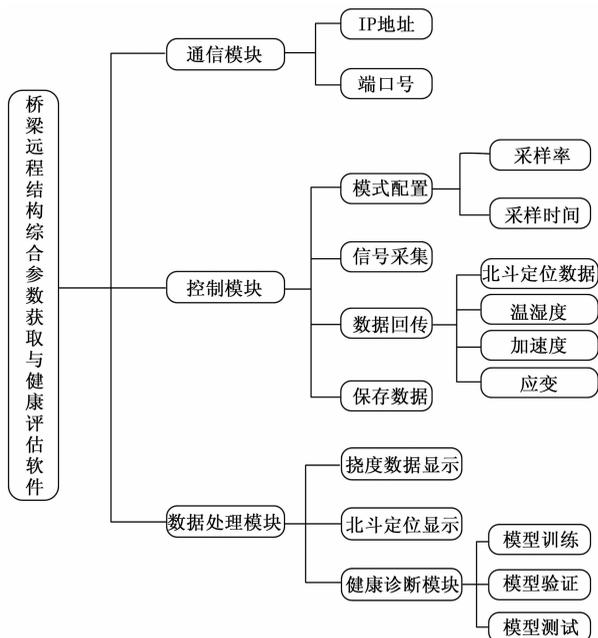


图 3 软件系统功能框图

类实现创建 TCP 服务器、添加或删除多个客户端等基础功能, 并通过 TCP/IP 协议下发控制指令与硬件监测系统进行交互, 对采样率和采样时间进行设置, 读取客户端数据。同时该模块也具有客户端连接状态检测的功能, 当客户端连接状态不稳定或者有中断出现的时候, 软件中会有相应的预警信息提示操作人员, 在通信过程中软件会每隔 5 s, 下发自检的指令, 对通信链路进行自检, 以保证通信链路的稳定性, 防止因链路中断而导致的指令下发和数据接收失败等问题, 如果链路中断则停止当前的操作, 等待硬件监测系统重新发出链接请求的握手信号。通信模块功能如图 4 所示。

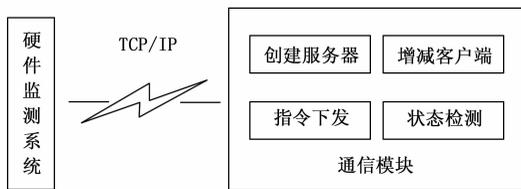


图 4 通信模块功能框图

2.2 控制模块设计

如图 5 所示, 这部分的设计主要是下发相应的指令控制到硬件系统中, 控制硬件监测系统执行相应的操作。控制模块是整个软件设计的重要组成部分, 指令的正确下发时硬件可以按照既定功能正常工作的保障。控制模块主要功能包括以下几个方面: 模式配置、控制指令和数据保存。

2.2.1 模式配置

模式配置主要是针对硬件监测系统的信息采集模块设置, 主要包括采样率和采样时间这两个部分, 这两个部分都是可调的, 具体配置选项列表如下所示:

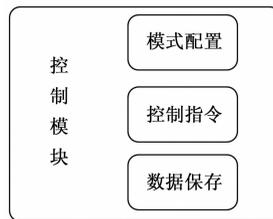


图 5 控制模块功能框图

1) 采样率为 1 MHz、512 kHz、256 kHz、128 kHz、100 kHz。

2) 采样时长为 2 s、1.5 s、1 s、0.5 s。

采样率和采样时间都是通过勾选框和按钮的配合实现指令的下发。选择合适的采样率和采样时长后, 点击按钮向监测系统下发对应的指令, 指令的格式为八位的十六进制数。其中采样率、采样时长与下发指令的对应关系如表 1 所示。

表 1 模式配置指令

采样率 采样时间/s	1 MHz	512 kHz	256 kHz	128 kHz	100 kHz
2	01	02	03	04	05
1.5	06	07	08	09	10
1	11	12	13	14	15
0.5	16	17	18	19	20

2.2.2 控制功能

这部分主要就是实现采集和数据回传指令的下发。在界面中分别放入不同的 QPushButton (按钮) 控件, 在每一个控件中添加对应的指令, 指令格式同样为八位的十六进制数, 硬件监测系统在收到相应的指令后, 根据指令解析出对应的字符, 再根据获得的字符执行相应操作。设置 QProgressBar (进度条) 控件显示相应的数据回传进度, 设置 QTextEdit (文本框) 控件用来存放回传数据。相应操作功能列表如表 2 所示。

表 2 指令对应功能

指令	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
功能	开始采集	加速度数据			应变片数据	温湿度数据	北斗数据
		通道 1	通道 2	通道 3			

2.2.3 数据保存

如图 6 所示, 数据保存包括两部分: 软件接收的数据和软件的使用日志。

1) 软件接收到的数据类型包括两种: 加速度传感器和应变传感器采集到的八位十六进制数据, 以及温湿度传感器和北斗定位模块采集到的字符类型数据等。放置 QPushButton 控件用来选择保存数据的路径, 按照数据的不同格式要求, 选择合适的保存方式, 如八位十六进制数据采用二进制 bat 文件格式存放, 而字符数据则选择采用 txt 文本文件的格式存放。

2) 设计使用日志的功能主要是为了方便后期对软件的优化和升级,同时也方便操作人员对软件的使用和维护,减少应操作失误带来的不必要的隐患,降低数据丢失的风险。软件使用日志由软件后台自动生成,无需操作,使用日志主要包含两个部分:软件的操作过程和错误提示。

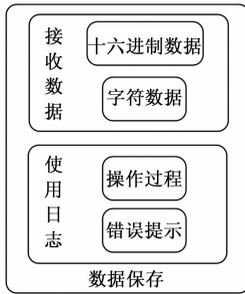


图 6 数据保存功能框图

2.3 数据处理模块设计

2.3.1 挠度数据显示

QCustomPlot 是在 Qt 框架下实现的基于 LGPL 版权协议的开源项目,它无需进一步的库依赖,文档丰富且使用方便,主要可以对二维曲线绘图和进行数据的可视化,绘图的种类包括如曲线图、趋势图、坐标图、柱状图等^[18]。由于 Qt 自带的 QChart 库在绘制大数据量的波形图时,运行效率低,无法满足桥梁监测中对复杂的大数据量处理的要求,因此选择采用 QCustomPlot 库绘制挠度等数据的波形图。

在这部分中挠度的计算主要采用分段曲线拟合的方法^[19],通过将桥梁依据布设硬件系统的位置划分成不同的区域,然后将每一个区域中的挠度值累加求和,从而得出监测区域的挠度值。其中每一区域中的挠度计算公式如下:

$$y_i(x) = \sum_{i=1}^m X_i N_i(x) \quad (1)$$

公式(1)中 $N_i(x)$ 为布设在桥梁不同位置处的应变片采集到的形变数据, X_i 为该位置处承受力的幅值。 m 为采集到的形变值的个数。

整座桥梁的挠度为各区域挠度值的和,计算公式如下:

$$y(x) = \sum_{i=1}^{n-1} y_i(x) \quad (2)$$

其中: n 为布设区域的个数。

2.3.2 北斗定位数据显示

通过对 2.2.3 中保存的北斗定位数据进行拆包处理得到包括客户端 IP 地址、经度、纬度、UTC 时间和采集日期等在内的硬件监测系统的布设点位置信息。创建一个 QTableView 控件,将这些信息依次添加到表格中,同时创建 QAxWidget 控件,在控件中加载 html 文件,调用百度离线地图的 api 接口实现向地图中添加拆包得到的经度和纬度信息,并将其标记在地图中。

通过百度地图可以方便的对布设点的位置进行查看,同时使用百度地图显示也会比表格的显示效果更加直观和

清楚。而离线的百度地图也会降低软件本身对网络的依赖程度,提高软件的适用场景。

2.4 健康诊断模块设计

这部分主要设计了一个基于移位卷积的多分类桥梁健康状态识别网络,利用移位卷积操作和轻量点卷积降低了计算的复杂度,并且移位卷积操作为时间序列提供了灵活的感受野,提高了桥梁识别准确度,从而完成对桥梁健康的诊断,当诊断结果为较差、差和危险时会对操作人员做出预警,同时软件将进行二次精准诊断,从而提高桥梁的健康监测的效率。

2.4.1 数据预处理

利用 12 组传感器采集桥梁的健康状态信息,每组传感器包括位移、速度和加速度信息。桥梁健康状态特征信息,单个样本尺寸为 $250\ 000 \times 3 \times 12$ (时间长度 * 特征通道数 * 传感器组数量),按照《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2004)^[20]将桥梁健康与桥梁损坏共有 5 个等级(良好、较好、较差、坏、危险),每个等级 2 000 个样本,共有 10 000 个样本。桥梁强度评定标准如表 3 所示。

表 3 桥梁强度评定标准

k_{te}	k_{tm}	强度状况
≥ 0.95	≥ 1.00	良好
$0.95 > k_{te} \geq 0.90$	$1.00 > k_{tm} \geq 0.95$	较好
$0.90 > k_{te} \geq 0.80$	$0.95 > k_{tm} \geq 0.90$	较差
$0.80 > k_{te} \geq 0.75$	$0.90 > k_{tm} \geq 0.85$	差
< 0.75	< 0.85	危险

$$\text{推定强度均匀系数: } k_{te} = \frac{R_t}{R}$$

$$\text{平均强度均匀系数: } k_{tm} = \frac{R_m}{R}$$

式中, R_t 为按标准荷载计算的抗力值, R 为结构构件的实际抗力值, R_m 为平均抗力值。

将上述单个样本平均划分为 500 段,则每段时间长度为 500,10 000 个样本得到 5 000 000 个 $500 \times 3 \times 12$ (时间长度 * 特征通道数 * 传感器组数量)桥梁健康状态信号样本,同时所有传感器的特征串联起来得到大小为 500×36 (时间长度 * 总特征通道数)的桥梁健康特征信息。

2.4.2 桥梁健康状态识别网络

桥梁健康状态识别网络层由 1 个移位卷积层、1 个全局平均池化层和 1 个 softmax 激活层组成。桥梁健康深度特征信息首先经过逐点元素卷积,然后通过全局平均池化作用,最后通过 softmax 激活函数处理,输出桥梁健康状态的预测结果。其网络结构如图 7 所示。

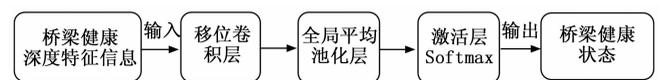


图 7 桥梁健康状态识别网络结构

桥梁健康深度特征信息大小为 16×128 ,经 $3 \times 1 \times 5$

(卷积核大小×卷积核通道数×卷积核个数)大小, 步长为 1 的卷积操作后, 输出特征图大小为 16×5, 再经过全局平均池化, 最终输出的大小为 5, 再经 softmax 激活层最终输出桥梁健康状态预测, 即实现桥梁健康状态的多分类预测。

2.4.3 移位卷积层

移位卷积层具体结构如图 8 所示, 首先对输入张量进行移位操作, 用来重新分配空间信息, 然后进行逐点卷积处理, 实现跨通道混合信息。其中, 逐点卷积之前有批量归一化和非线性激活函数 (ReLU) 的作用。当输入输出形状不一样时, 对输入进行平均池化与卷积操作, 通过残差连接的方式实现输入与输出的特征信息融合。

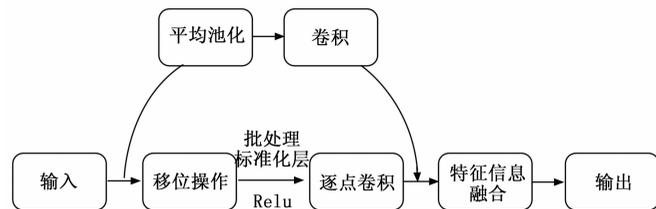


图 8 移位卷积层网络结构

通过移位操作和逐点卷积代替了常规的空间卷积。其中, 移位操作实现了无参数操作, 达到网络轻量化的目的。

输入数据首先经过移位操作, 移位操作通过将卷积核构造为移位矩阵, 对输入数据不同通道进行不同方向的数据移位。

设输入数据为 F , G 为 F 经过移位卷积后的输出数据, 移位操作如公式 (3) 所示:

$$G_{l,m} = \sum_j K_{j,m} F_{l+j,m} \quad (3)$$

其中: j, m 分别为数据沿着帧数轴和通道轴的地址索引, K 为移位卷积核, 其内部定义值如式 (4) 所示:

$$K_{j,m} = \begin{cases} 1, & j = j_m \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

在式 (4) 中, 在移位卷积核中指定某一位置的值为 1, 其它位置皆为 0, 经过卷积后相当于将原通道进行了平移。

3 软件仿真测试

3.1 硬件监测系统布设

在太原龙城大桥上选取长度约 60 m 的测试区域, 每隔 10 m 布设如图 9 所示的硬件监测系统。由于监测桥梁的每个节点处需要布设大量的传感器, 图中硬件监测系统的布设仅为其中一处的布设情况, 在进行现场试验时, 硬件监测系统采用胶合的方式安装到被测桥梁的桥面上, 设置硬件监测系统的采样率为 1 MHz, 采集时间为 2 s。

3.2 软件仿真测试步骤

软件实际测试步骤如图 10 所示。

1) 填写合适的 IP 地址和端口号, 勾选“TCP 模式”, 创建一个 TCP 服务器, 开启硬件监测系统电源, 等待硬件监测系统与软件连接, 连接成功后如图 11 所示;

2) 勾选所需测试的客户端, 同时勾选合适的采样率和

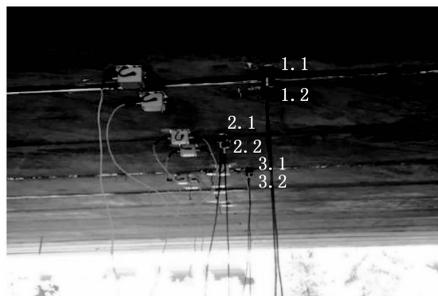


图 9 实验现场

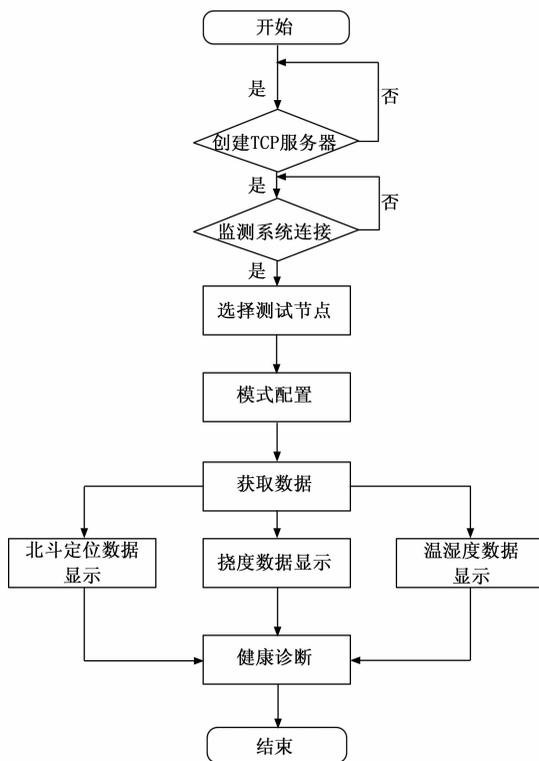


图 10 软件测试流程



图 11 监测系统控制主界面

采样时间, 点击控制主界面中的“模式配置”按钮, 软件将下发指令配置采样率和采样时间;

3) 点击“开始采集”按钮等待硬件监测系统对桥梁健康监测所需的加速度数据、应变数据、北斗定位数据, 以及温湿度数据进行采集。

4) 分别点击“数据回传”、“应变片”、“定位信息”和“温湿度”按钮分别对步骤 3) 中采集到的数据进行回传,回传过程中会有进度条显示,点击“保存数据”按钮选择合适的路径和数据格式保存数据。

5) 点击“综合参数采集”按钮,可一次性执行步骤 3)、4),节省操作步骤。

6) 选择“监测时间(小时)”的下拉框,等待相应的时间后,即可执行步骤 3)、4),同时达到相应时间后,该步骤可自动重复进行。经过这一步骤的操作便可达到定时监测的目的,方便对桥梁进行长时间的监测。

3.3 软件仿真结果分析

根据 3.2 中的测试步骤,对软件进行实际测试。在测试过程中软件运行稳定,与硬件监测系统配合,使用方便且灵活,初步达到了软件设计的要求。

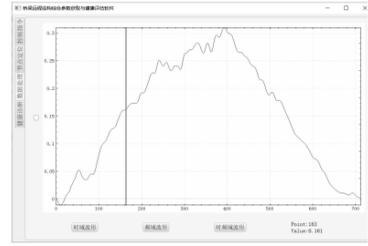
点击“显示定位”按钮,根据不同的客户端 IP 地址对保存的北斗定位数据进行拆分,得到每个节点的经度、纬度、UTC 时间和日期,并将这些数据在节点定位页面的表格中显示;同时调用百度地图 api 将经纬度转换为地图中的坐标点,并标记在地图中。地图中可以直观地看到实际布设的硬件监测系统的位置和预设位置一致。北斗定位显示界面如图 12 所示。



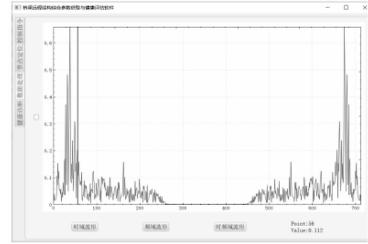
图 12 北斗定位信息显示

经过数据处理模块,对硬件监测系统采集到的加速度和应变的数据进行计算处理,依据公式(1)、(2)计算得到测试区域的桥梁挠度,对其绘制波形,如图 13(a)所示;提取处测试区域桥梁的主频率,如图 13(b)所示;之后将经过预处理的数据导入健康诊断模块进行训练,得到训练的精度和损失度曲线如图 14 所示,可以看出训练精度达到 70%左右,损失曲线稳定在 0.5 左右。将训练好的网络模型保存后,在该桥梁上不同位置处重新布设一组测试区域,之后重复上述测试流程中的步骤(3)、(4),并将采集到的数据重新预处理,导入训练好的模型中测试,得到该桥梁的健康诊断结果,如图 15 所示。

在实际测试过程中也发现了一些设计不足的地方,如硬件监测系统采用的是 WIFI+5G 的方式组成超远程通信链路,但是 5G 目前为止没有做到全覆盖,故该硬件监测系统的使用会受到限制;软件连接大量了客户端后,通信链路会在周围环境条件复杂的时候存在拥堵的情况;后台自动保存使用日志时会存在卡顿的现象;软件在调用健康诊



(a) 挠度波形显示



(b) 频率波形显示

图 13 频率和位移数据显示

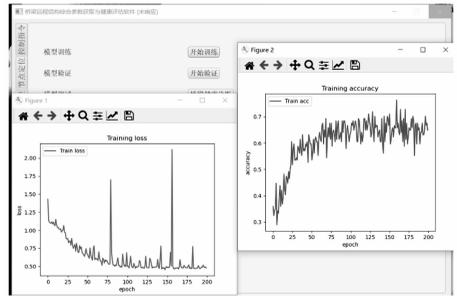


图 14 训练精度和损失曲线

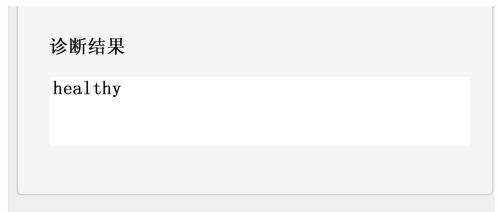


图 15 桥梁健康诊断结果显示

断模块时需要进行大量的计算,因此也会存在卡顿的情况健康诊断模块的训练精度和损失度也存在优化的空间。

4 结束语

本文设计了桥梁远程结构综合参数获取与智能评估软件,通过与硬件监测系统的结合,完成了桥梁健康参数的获取和智能评估的需求。在保证软件性能和功能的同时,可以同时监测桥梁上布设的多个硬件监测系统,获取监测系统采集到的数据、分析数据并显示,同时依据软件中的健康诊断模块得到当前测试桥梁的健康状况。软件解决了传统监测和健康评估过程耗时的问题。最终实验证明,软件控制界面友好、易操作、功能完善,具有参数获取难度低、精度高、健康评估准确的优势,解决了长期存在于老

旧桥梁监测中周期长、效率低、健康评估难的问题, 为桥梁的维修人员提供了参考的价值, 具有实际意义。

参考文献:

- [1] 中国桥梁工程学术研究综述·2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (2): 1-97.
- [2] 李星新, 袁里, 陈湘亮, 等. 桥梁智慧检测边缘计算技术及系统开发 [J]. 湖南城市学院学报 (自然科学版), 2021, 30 (4): 1-5.
- [3] A Study on Increased Utilization of GNSS In Pier Inclination Monitoring [J]. Journal of the Korean Society for Geo-spatial Information Science, 2019, 27 (2): 43-54.
- [4] XUAN J, ZHUO Y, HUANG X D, et al. Problems in Bridge Health Monitoring and Application of Intelligent Monitoring Technology [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267 (5): 1-7.
- [5] 刘康旭. 基于 Java-EE 和 Android 的桥梁健康监测系统的软件设计 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [6] 张青春, 王劲尧, 何威, 等. 桥梁健康状态在线监测预警系统的设计 [J]. 仪表技术, 2019 (3): 18-20, 32.
- [7] 杜立婵, 王文静, 韦冬雪, 等. 基于 NB-IoT 的桥梁健康远程监测系统设计 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (20): 155-159.
- [8] 欧阳敬泓, 徐剑, 徐一超. 小桥梁的车辆荷载监测方法研究与应用 [J]. 建筑技术开发, 2020, 47 (18): 123-124.
- [9] 黄志贤. 基于 NB-IoT 的桥梁健康监测系统设计 [D].

(上接第 131 页)

参考文献:

- [1] 王茜, 仲超, 杨雷. 某型导弹测试数据预处理研究与实现 [J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40 (3): 158-160.
- [2] 周璐, 顾均元, 冯玉光. 导弹测试数据的处理与权值计算 [J]. 火力与指挥控制, 2018, 43 (12): 65-68.
- [3] 吴立金, 夏冉, 詹红燕, 等. 基于深度学习的故障预测技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (2): 9-12.
- [4] 秦艳华. 数据挖掘技术中孤立点的分析研究 [J]. 硅谷, 2010, (4): 49-50.
- [5] 张宁. 离群点检测算法研究 [J]. 桂林电子科技大学学报, 2009, 29 (1): 22-25.
- [6] 李俊丽, 芦彩林. 离群点检测算法研究 [J]. 计算机与数字工程, 2017, 45 (6): 1045-1048.
- [7] 黄富平, 梁卓浪, 邢英俊, 等. 云计算 Hadoop 平台的异常数据检测算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (7): 260-263.
- [8] 文鹤锦. 数据挖掘中统计方法应用及其分析 [J]. 中国宽带, 2021, (4): 99-101.
- [9] 白洁静. 关于插值法与最小二乘拟合的讨论 [J]. 内江科技, 2009, 30 (1): 183.
- [10] 刘冬冬. 基于密度异常因子的武器装备故障检测方法 [J]. 舰船电子工程, 2019, 39 (5): 120-123.

苏州: 苏州大学, 2020.

- [10] 张鹏飞. 基于遗传算法优化的 BP 神经网络在桥梁健康监测安全评估中的应用 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [11] 申志宇. 嵌入式桥梁健康监测系统设计 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [12] THANH Q. Nguyen. A Data-Driven Approach to Structural Health Monitoring of Bridge Structures Based on the Discrete Model and FFT-Deep Learning [J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2021: 1-23.
- [13] 邓斌. 桥梁健康监测系统在某大桥的应用 [J]. 中国科技信息, 2021 (18): 71-74.
- [14] 戴巍, 霍亚, 马尚昌, 等. Qt 下基于组件的嵌入式软件框架设计及实现 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (S1): 257-261.
- [15] 贺伟, 刘通. 基于 Qt 的激光近炸引信信号缩比仿真软件设计 [J]. 现代电子技术, 2021, 44 (3): 45-48.
- [16] 吕焦盛. 基于 TCP/IP 协议的网络通信服务器设计与实现 [J]. 赤峰学院学报 (自然科学版), 2019, 35 (9): 50-52.
- [17] 侯彭亮, 郭莘, 王展鹏, 等. 基于 Qt 的雷达显示及手机客户端设计 [J]. 电子技术应用, 2021, 47 (8): 128-132.
- [18] 徐瑶. Qt 中基于 QCustomPlot 实现曲线绘制和显示的研究 [J]. 科技视界, 2019 (25): 54-55.
- [19] 杨学山, 侯兴民, 廖振鹏, 等. 桥梁挠度测量的一种新方法 [J]. 土木工程学报, 2002 (2): 92-96.
- [20] 刘玉玲. 考虑抗力随时间变化的桥梁可靠度评估研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [11] 张戈, 盖赟. 局部离群因子算法 (LOF) 在异常检测中的应用研究 [J]. 网络安全技术与应用, 2020, (11): 49-50.
- [12] LIU F T, TING K M, ZHOU Z H. Isolation forest [C] // Data Mining, ICDM, 2008 8th IEEE International Conference on; Pisa, Italy, 2008: 413-422.
- [13] LIU F T, TING K M, ZHOU Z H. Isolation-Based Anomaly Detection [J]. ACM transactions on knowledge discovery from data, 2012, 6 (1): 3.1-3.39.
- [14] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法的研究 [J]. 软件学报, 2008, 19 (1): 48-61.
- [15] 魏龙, 王勇. 基于密度划分的离群点检测算法 [J]. 计算机与现代化, 2015, (3): 26-32.
- [16] 杨俊闯, 赵超. K-Means 聚类算法研究综述 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (23): 7-14.
- [17] 乔少杰, 唐常杰, 陈瑜. 基于树编辑距离的层次聚类算法 [J]. 计算机科学与探索, 2007, 1 (3): 282-292.
- [18] 冯少荣, 肖文俊. DBSCAN 聚类算法的研究与改进 [J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37 (1): 105-111.
- [19] 徐晓丹. 复杂高维数据中异常点挖掘算法研究 [J]. 浙江师范大学学报, 2018, 41 (2): 46-52.
- [20] 魏伟杰, 张斌, 王波, 等. 一种用于数据挖掘算法的数据生成方法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2008, 29 (3): 328-331.