

# 大型桥梁健康监测系统多源异构数据集成研究

王代君,周天图,傅俊敏,陈星,卢帅,喻征

(江西省交通科学研究院,江西 南昌 330000)

**摘要:**大型桥梁健康监测系统具有传感器数量巨大、种类繁多、通信方式多样、组网形式灵活等特点,数据的多源性和异构性十分突出,给数据集成带来了很大的困难。该文针对桥梁健康监测的应用需求,设计一套多源异构数据集成方案,不仅实现多源异构数据的结构化存储,还提出“结构化通信”的概念,实现结构化的通信配置、统一的通信控制和灵活的数据处理,使数据采集系统的通信配置管理更加标准化和规范化,提高代码的简洁性和可维护性,进一步提高大型桥梁健康监测系统软件平台的集成化水平。该文提出的方案在九江长江公路大桥结构健康监测系统中进行了应用,结果表明:系统界面简单易用、运行稳定可靠,具有一定的实用价值。

**关键词:**大型桥梁;健康监测;多源异构;数据采集

**中图分类号:**U446

**文献标志码:**A

## 0 引言

进入大数据时代以来,数据采集的重要性变得更加突出。但数据的来源和种类也更加多元化,不同的数据在采集的难易程度上存在很大区别,使得现代数据采集系统日益复杂化。基于PC的数据采集(DAQ)就是通过模块化硬件、软件和计算机的结合,对电压、电流、温度、压力等各种电量或非电量信号进行定量测量,然后传送至上位机进行分析处理的过程。

桥梁结构状态的识别以大量监测数据为基础<sup>[1-3]</sup>,因而大型桥梁一般都安装了几百至上千个不同类型的传感器,这些传感器不仅数量巨大、种类繁多,而且通信方式多样、组网形式灵活,数据的多源性和异构性十分突出,给桥梁结构健康监测系统的数据集成带来了很大的技术挑战。目前专门针对桥梁健康监测系统多源异构数据集成的研究一般局限于数据的结构化存储方面<sup>[4-6]</sup>,集成化程度仍有待提高。本文的研究可以为大型桥梁健康监测及多源异构数据集成的相关工作提供一些有益的思路。

## 1 数据采集系统设计难点分析

### 1.1 传感器种类多

根据桥梁结构健康监测的业务需求,大型桥梁健康监测系统通常安装有成百上千个传感器<sup>[7]</sup>,并且需要配套相应的采集模块、调理器、解调仪等设备。这些传感器中包括风速仪、温湿度计、能见度传感器、雨量计等气象类传感器,索力计、应变计、挠度计、风压计、振动传感器、强震仪等力学类传感器,还有GPS、位移计等位移类传感器,种类多达十几种。采集量涉及模拟量和数字量、瞬时值和特征值、数值和图像等,既有接触式测量,也有非接触式测量,种类十分庞杂。

### 1.2 通信方式多

传感器类型的多样性决定了通信方式的多元化,不同厂家、型号、用途的传感器都可能采用不同的通信方式<sup>[8]</sup>。当前主流的通信方式包括:串行接口、并行接口、API、TCP、UDP、数据库抽取、文本读取等。具体的通信协议更是五花八门,除了一些数据量比较少的传感器会采用Modbus等通用协议外,其他大部分较复杂的传感测量设备,如非国家或行

收稿日期:2021-01-13

基金项目:江西省交通运输厅科技项目(编号:2019X0017,2022X0043)

作者简介:王代君,男,硕士,工程师.E-mail:494610095@qq.com

业强制规定,一般都会采用厂家自定义的非标通信协议,这是造成数据异构性的重要原因之一。由于桥梁现场条件的限制,许多传感器信号(如电压、电流)不能进行远传,必须就近转化为数字量并采用RS-485、以太网、无线网络等远传通信技术才能传输到采集站或远程监控中心。

### 1.3 拓扑形式多变

在大型桥梁健康监测系统设计中,考虑成本、技术、硬件、现场条件等因素,传感器通常会涉及许多不同的拓扑形式,例如单点布置、总线拓扑、环形拓扑、星形拓扑、树形拓扑等。在桥梁健康监测的应用场景中,最常见的是单点布置、总线拓扑和星形拓扑,而不同的拓扑形式对采集控制逻辑的设计起决定性作用,例如总线形布置的传感器只能通过轮询的方式采集,这种拓扑方式直接制约了采集频率的提高。

## 2 多源异构数据集成方案设计

### 2.1 结构化的通信配置

由于每个传感器都有不同的采集方式、通信方式和通信协议,因此需要生成一个配置文件来记录这些通信参数。在程序设计中,将每个传感器抽象为一个“对象”,传感器的相关信息则作为该对象的属性,主要属性包括:通信方式、通信标识、串口号、波特率、IP地址、端口号、硬件地址、通道号等,这样就在抽象层次上实现了通信参数的结构化。图1为部分配置代码。

```
<Sensor>
<SENSOR_ID>5</SENSOR_ID>      <!--传感器ID-->
<STRUCTURE_ID>2</STRUCTURE_ID> <!--桥梁ID-->
<TYPE_ID>43</TYPE_ID>          <!--传感器类型ID-->
<Settings>
  <CommSetting>
    <CommToken>1</CommToken>    <!--通信标识-->
    <DaqFreq>1</DaqFreq>        <!--采集频率-->
    <CommMode>SerialPort</CommMode> <!--通信方式-->
    <ParserType>PC8_Parser</ParserType> <!--通信协议-->
    <IP>192.168.2.3</IP>        <!--IP地址-->
    <Port>6666</Port>           <!--端口-->
    <ComPort>3</ComPort>         <!--串口号-->
    <BaudRate>9600</BaudRate>    <!--波特率-->
    <SAddr>1</SAddr>            <!--传感器地址-->
    <Channel>1</Channel>        <!--通道号-->
  </CommSetting>
  <ParamSetting>                <!--计算参数-->
    <Param Key="p1" Value="1"/>
    <Param Key="p2" Value="0"/>
  </ParamSetting>
  <Physic>13,14</Physic>       <!--物理量-->
</Settings>
</Sensor>
```

图1 部分配置代码

在图1配置中:SENSOR\_ID为每个传感器指定了全局唯一的ID;TYPE\_ID为每个传感器指定了传

感器类型;CommToken指定传感器的通信标识;DaqFreq规定了采集频率;CommMode指定了通信方式;ParserType指定了通信协议;Physic指定采集的物理量。可见,配置文件的内容直接决定了采集程序的运行逻辑。当这些参数发生变化时,只需要相应修改配置文件即可,无需进行代码级修改。

### 2.2 统一的通信控制

在大型桥梁健康监测系统中,采集系统设计的难点之一是通信方式的多样性。为了达到程序执行逻辑的统一,本文设计一套统一的通信接口方式,使程序根据配置文件自动完成通信接口的选择。采集控制逻辑如图2所示。

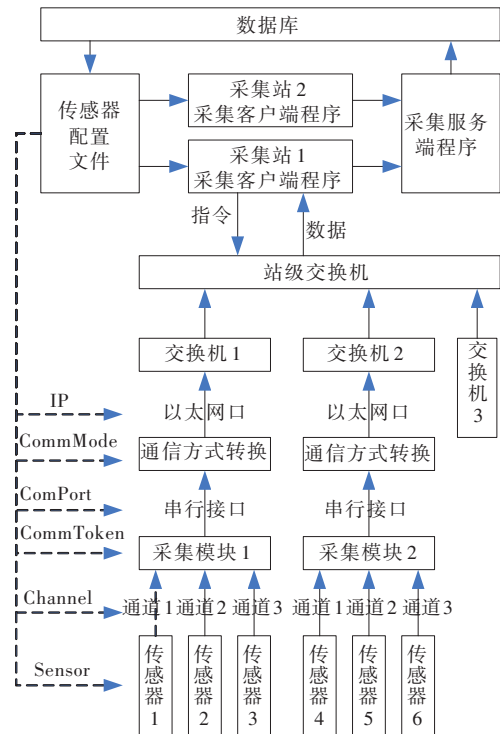


图2 系统通信逻辑框图

(1) 采集客户端程序启动后,自动读取传感器配置文件并暂存于内存中。

(2) 确定通信方式。根据每个传感器对象的属性,自动确定每个传感器的通信参数。规则如下:每个CommToken属性值开启一个通信实例;根据CommMode属性自动调用不同的通信接口;如果多个传感器的CommToken属性值相同,则采用遍历方式进行轮流采集;如果某个传感器的CommToken属性值与其他均不相同,则以定时任务的方式采集。

图2中的传感器1、传感器2和传感器3是由同一采集模块进行采集的,因此其配置文件中的

CommToken 属性值应配置为相同,程序仅会为这 3 个传感器开启一个通信实例,并轮流采集这 3 个传感器的数据。如果配置文件指定了该传感器采用串行通信方式,则会调用串口类与硬件串口建立通信;如果指定了 TCP 通信方式,则会向传感器发起一个 TCP 连接请求。

由于 RS-485/422 和 RS-232 等串行通信方式的传输距离十分有限,并且在计算机重启后其端口号有可能发生变化,因此在大型桥梁健康监测系统的现场实施安装中,将所有的串行接口转换为以太网口,这样就可以将所有的传感器都统一接入交换机。为了保持传感器硬件本身的串行通信方式,可以通过虚拟串口的方式为每个 IP 绑定一个串口号,使采集程序仍然可以通过串口编程完成硬件交互。

在图 2 的方案中,每个采集模块下面都连接了多个传感器,因此可以将采集模块看成一条数据总线,总线下挂接了多个传感器,每个传感器设备通过地址或通道号来区分。实际上有些传感器是不需要采集模块的,但可以将传感器本身看成是一个虚拟的采集模块,该模块下只挂接了一个传感器,这样就保持了逻辑的统一。这里所讲的“统一的逻辑”实际上是一种结构化的通信管理思想。程序代码的编写构架如图 3 所示。

```
public abstract class BaseComm{
    public CommSettingEntity Setting;
    public event CommDataUpDlg CommDataUpEvent;
    public event LogUpDlg LogUpEvent;
    public abstract void Start();
    public abstract void Stop();
    public void LogUp(string log){
        //打印运行日志
        LogUpEvent(log);
    }
    public void DataUp(byte[] data){
        //接收并上传数据
        CommDataUpEvent(data);
    }
    public virtual bool ExeCommand(object o){
        //控制指令交互
        return false;
    }
}
```

图 3 程序代码的编写框架

上面定义了一个抽象类 BaseComm,可以为所有的通信实例指定通信接口,无论是串口通信还是 TCP 通信,都可以通过继承该抽象类达到结构化通信的目的,使整个采集子系统的通信配置管理更加标准化和规范化,提高代码的简洁性和可维护性。

根据每类传感器的特征,其采集方式也不尽相同。根据采集时间间隔的不同,可分为定时采集、定

点采集、循环采集等方式;根据采集样本数量的不同,可分为全量采集、定量采集、增量采集和抽样采集等方式;根据上位机是否需要发采集指令,可以分为“传感器主动推送”和“上位机发指令询问”两种方式。

对于多通道采集模块,如果各通道之间的采样电路同步,可以采用定时采集的方式;如果通道间异步,则模块下的传感器只能采用循环的方式逐个进行采集,只有前一个传感器返回数据后才能获取下一个传感器的数据,否则会导致数据传输混乱。对于数据库的数据获取,一般采用增量采集方式,只取出数据表中最新增加的记录即可。

### 2.3 灵活的数据处理

不同的传感器在测量原理上不尽相同,其信号处理过程也各不相同。除部分数字式智能传感器可以直接输出所需物理量外,其他大部分传感器输出的都不是所需的物理量。例如,温度计可以有热电偶温度计、压力式温度计、电阻式温度计、光纤温度计、红外测温仪等,从这些传感器采集到的原始物理量分别为电流、压力、电阻、频率和热辐射,这些信号都需要经过一系列处理才能得到所需的温度值。根据桥梁健康监测的应用场景,本文制定的数据处理流程如图 4 所示。

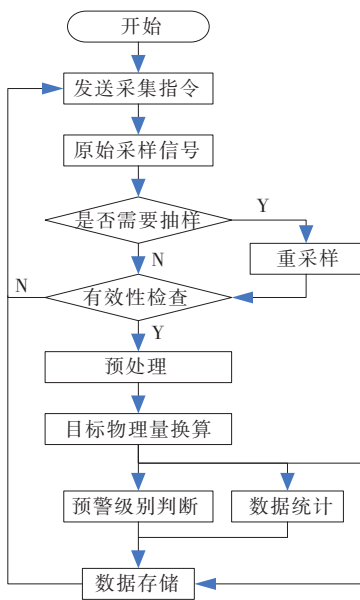


图 4 数据处理流程

图 4 中,重采样是针对一些特殊类型传感器而言,例如某传感器主动向某端口推送频率为 5 Hz 的数据,而系统仅需 1 Hz 数据,则需要进行重采样。对于



所有采集到的数据,必须根据规范要求进行数据有效性判断,不满足要求的应舍弃。对于一些微弱信号来说,例如图像信号、振动信号等,应进行滤波、去噪、截取等预处理。然后根据标定参数或工程经验参数计算出最终所需的物理量。为了满足监测规范的相关要求,计算结果还应进行统计、预警级别判断、存储等后处理过程。

在采集程序的开发中,不同类别的传感器信号处理过程将被封装成一个独立的DLL,然后通过配置文件中的ParserType属性指定协议的解析规则,这样就允许不同的传感器有不同的信号处理过程,而程序总体逻辑上仍保持一致性。

2.4 结构化的数据存储

由于不同类型传感器采集的物理量不一样,因此在传统的数据存储方案中通常需要为每一类传感器设计一个独特的数据表。这种设计方案只是对数据进行了分类存储,并没有实现真正意义上的结构化和集成化存储。因此,本文提出一种新的结构化存储方案,使不同类型传感器均采用相同的数据表结构,因而进一步提高数据的集成度。传感器数据表物理量定义和传感器类型定义如表1~3所示。

表1 传感器数据表

编号	传感器ID	传感器类型ID	数值	物理量ID	说明
1	1	11	28.0	100	温湿度的温度值
2	1	11	67.0	103	温湿度的湿度值
3	2	22	3.4	101	风速仪的风速值
4	2	22	165.0	102	风速仪的风向值

表2 物理量定义表

编号	物理量	单位
100	温度	℃
101	风速	m/s
102	风向	
103	湿度	RH%

表3 传感器类型定义表

编号	传感器类型	物理量ID
11	温湿度计	100,103
22	风速仪	101,102

在表1中同时存储了温湿度计和风速仪两类传感器的实时数据,尽管两类传感器采集的物理量不同,但通过physical\_quantity\_id字段的设计,使这些物理量可以集成在一张数据表中并且可以很好地区分开,从而实现多源异构数据的结构化和集成化存储。

3 应用案例

3.1 工程概况

九江长江公路大桥全长25 km,主桥长1 405 m,为双塔混合梁斜拉桥,主跨818 m。九江长江公路大桥健康监测系统采用了B/S和C/S相结合的设计理念,将查询和访问功能放在B/S架构体系中,而需要进行大量运算的数据处理与采集控制则由C/S架构的软件完成。全桥共布置GPS、索力加速度计、伺服加速度计、三维强震仪、光纤温度传感器、光纤应变传感器、摄像机、锚索计、风速仪、风压计、压力变送器(挠度测量系统)、振弦式应变计、拉绳式位移计、温湿度计、动态称重系统等传感器,共计518个,采集物理量47个。显然,九江长江公路大桥结构健康监测系统的数据采集属于典型的多源异构数据集成问题<sup>[9]</sup>。

3.2 组网方案设计

本文通过如图5所示的组网方式,在尽量适应传感器特点的同时,对所有传感器进行统一的组网,实现多源异构数据的集成化采集。

在该架构中,由下至上包括传感器层、数据汇聚层、网络通信层和采集控制层4个层次。

(1) 传感器层

主要由各类传感器组成,负责对桥梁的各种物理量参数进行实时采集,是多源异构数据的生产者。

(2) 数据汇聚层

数据汇聚层的作用是对一组传感器数据进行统一收集和转发,通过采集模块实现,因此数据汇聚层实际上起数据总线的作用,一条总线上挂接多个传感器。其中风压计、压力变送器和拉绳式位移计均采用了研发公司的模拟量输入模块ADAM-4117,每个模块汇聚8路传感器信号;振弦式应变计采用基康仪器的Micro-40自动化数据采集仪,每个采集仪汇聚32路传感器信号;光纤温度计和光纤应变计采用光纤解调仪实现数据的预处理,每台解调仪有8通

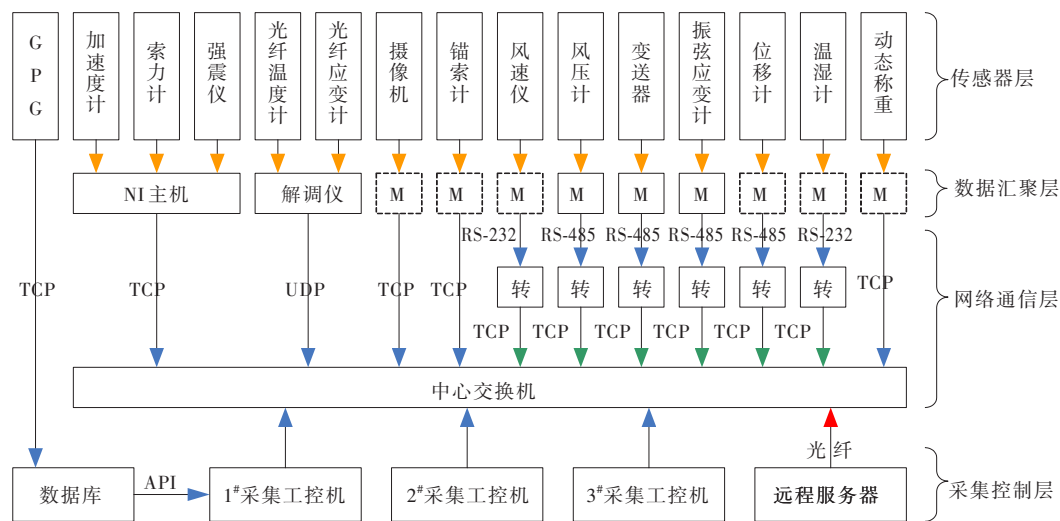


图5 多源异构数据采集组网方案

道,每通道可接入8个传感器,可同时汇聚64路传感器信号;索力加速度计、伺服加速度计和三维强震仪采用了NI振动测量系统进行统一采集,使用了16通道PXIe-4497采集卡、8通道PXIe-4492采集卡和80通道PCI-6225采集卡进行数据汇聚;其余传感器无需采集模块即可直接采集,本文将其当成1通道的虚拟采集模块(图5中虚线框)作统一处理。数据汇聚层设计如表4所示。

(3) 网络通信层

网络通信层用于完成所有传感器的数据传输,由于不同类型传感器采用不同的通信方式,为了采集方便,将所有RS-232和RS485串行接口均转换为以太网输出,然后与中心交换机对接。这样就实现了所有传感器均以TCP方式统一通信,为现场的安装实施和采集程序的设计提供了极大的方便。

(4) 采集控制层

该层主要完成数据的存储和处理,运行采集客户端程序、数据处理服务程序、数据展示平台等软件

系统,其中采集客户端程序运行在现场的工控机上,通过程序设计完成采集逻辑的执行控制。

表4 数据汇聚层设计

传感器类型	汇聚层模块	通道数/个	信号类型
风压计、压力变送器和位移计	ADAM-4117模块	8	电流 (4~20 mA)
振弦式应变计	Micro-40模块	32	频率
光纤温度计和光纤应变计	光纤解调仪	8	频率
索力加速度计	PXIe-4497采集卡	16	电压 (-10~10 V)
伺服加速度计	PXIe-4492采集卡	8	
三维强震仪	PCI-6225采集卡	80	
其他	传感器自身	1	—

3.3 采集方案设计

根据九江长江公路大桥布设的传感器类型和组网结构,本文制定如表5所示的多源异构数据集成方案。

表5 九江长江公路大桥采集方案设计

传感器类型	通信方式	协议类型	数量/ 个	物理量/ 个	采集频率/ Hz	采集方式	数据量/ (个·d <sup>-1</sup> )
索力加速度计	TCP	自定义	110	3	50.000 0	抽样	1.18×10 <sup>8</sup>
伺服加速度计	TCP	自定义	55	2	50.000 0	抽样	3.96×10 <sup>7</sup>
强震仪	TCP	自定义	1	2	50.000 0	抽样	1.00×10 <sup>3</sup>
光纤温度计	UDP	厂家定义	72	2	0.001 7	全量	2.01×10 <sup>4</sup>
光栅应变计	UDP	厂家定义	142	2	0.001 7	全量	4.09×10 <sup>4</sup>

续表5

传感器类型	通信方式	协议类型	数量/ 个	物理量/ 个	采集频率/ Hz	采集方式	数据量/ (个·d <sup>-1</sup> )
GPS	DB	自定义	6	3	0.017 0	增量	1.44×10 <sup>3</sup>
锚索计	TCP	厂家定义	12	3	1.000 0	抽样	3.11×10 <sup>6</sup>
风速仪	RS-232	Mobus	4	3	1.000 0	全量	1.04×10 <sup>6</sup>
风压计	RS-485	Mobus	11	2	0.050 0	定时	3.80×10 <sup>7</sup>
压力变送器	RS-485	厂家定义	24	3	0.200 0	定时	1.24×10 <sup>6</sup>
振弦式应变计	RS-485	厂家定义	75	2	0.001 7	轮询	2.16×10 <sup>4</sup>
拉绳式位移计	RS-485	Mobus	3	2	1.000 0	定时	5.18×10 <sup>5</sup>
温湿度计	RS-485	Mobus	2	2	0.001 7	定时	5.76×10 <sup>2</sup>
动态称重系统	API	厂家定义	1	16	—	触发	1.60×10 <sup>5</sup>

(1) 对于索力加速度计、伺服加速度计和强震仪,由于采集板卡最低采样率为1 600 Hz,而工程振动监测中实际只需要50 Hz,因此必须进行重采样处理,即采用抽样的采集方式。数据采集后,由NI主机以TCP方式通过自定义通信协议发送至桥梁采集客户端。

(2) 受厂家硬件设计限制,锚索计会定时以5 Hz的频率对外推送数据,而实际只需要1 Hz,因此采用了抽样采集方式。动态称重系统的数据也是主动对外推送的,有车辆通过传感器时才会推送一次数据,因此没有固定的采集频率。

(3) 由于温度、湿度、结构应变等参数的变化通常十分缓慢,因此光纤温度计、光栅应变计、振弦式应变计、温湿度计等传感器的采集频率定为0.001 7 Hz(即10 min采集一次)。

(4) GPS实际上是一套独立的“GPS变形位移监测系统”,该系统自带数据库,其采集的数据会直接进入自身的数据表中,因此桥梁的采集客户端软件只能通过数据库接口来获取GPS解算结果。在数据库中查询数据时,只取最新生成的记录,即采用增量采集方式。

(5) 风速仪、风压计、压力变送器、振弦式应变计、拉绳式位移计、温湿度计等传感器出厂时仅提供RS-232或RS-485等串行通信方式,为了统一接入交换机,均采用串口服务器转为以太网接口输出。

3.4 系统的实现

九江长江公路大桥结构健康监测系统数据采集子系统采用了基于.NET平台的WPF框架实现,全

桥所有传感器均通过该软件进行统一采集,实现多源异构数据的集成,采集端软件除了完成所有传感器的采集任务外,还提供实时数据显示、时程曲线、采集参数设置、数据导出、运行日志显示等功能,为用户提供了丰富的人机交互功能。

图6为本文设计实现的采集客户端软件界面,分别为伺服加速度计、温湿度计和动态称重的数据采集界面。

采集客户端软件的前端界面设计与后台的逻辑设计在代码层面上是分离的,这是为了便于后期的修改和优化,但前、后端在数据结构上保持一致。各类传感器的采集界面从上至下均为功能菜单区、传感器选择区、通信参数显示区、实时数据显示区、里程曲线显示区、日志显示区、软件运行状态栏。由于后台逻辑采用通信结构化配置和数据结构化存储,因而前端界面的交互控制逻辑和后台数据源是完全统一的。

这种设计也为数据的导出提供了极大的便利,用户可以同时勾选多类传感器一次性导出,而导出的数据表格结构是完全一致的,便于后续进一步分析数据。数据导出功能的实现如图7所示。

4 结语

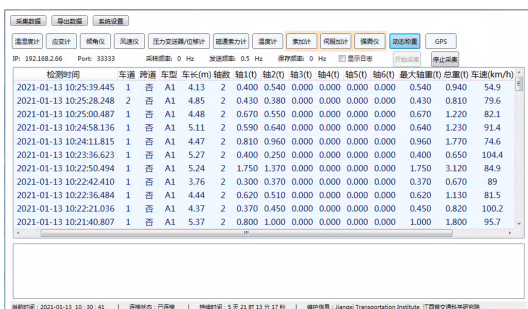
大型桥梁健康监测系统数据采集子系统的设计难点在于传感器种类多、通信方式多和拓扑形式多。本文提出的多源异构数据集成方案,通过配置文件的设计,在抽象层次上实现通信参数结构化,采用统



(a) 加速度计采集



(b) 温湿度计采集



(c) 动态称重系统采集

图 6 集成化采集软件界面

一的通信控制逻辑和接口方式,可以适应不同类型传感器的采集控制要求。为了方便数据后期处理,设计了灵活的数据处理方案,以应对不同的通信协议和物理量换算方法,提出一种新颖的数据表结构,实现真正意义上的多源异构数据结构化和集成化存储。该方案在九江长江公路大桥的应用实践表明:数据采集子系统可以高效、稳定、可靠地运行,可以



图 7 集成化采集软件界面(数据导出)

满足大型桥梁健康监测系统的信息采集要求。

## 参考文献:

- [1] 孙利民,尚志强,夏焱. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J]. 中国公路学报,2019,32(11):1-20.
- [2] 张丰. 东江大桥健康监测系统设计[J]. 中外公路,2016,36(4):202-206.
- [3] 胡兴意,陈波,刘国强,等. 融合 BIM 与影像建模技术的桥梁检测方法及其应用研究[J]. 中外公路,2020,40(1):107-112.
- [4] 任普,丁幼亮,李亚东,等. 基于大数据的桥梁健康监测数据存储及预警方法[J]. 科学技术与工程,2019,19(12):266-270.
- [5] 曹素功,黄立浦,张勇,等. 桥梁健康监测数据的结构化存储与分析[J]. 中外公路,2019,39(2):102-108.
- [6] 刘天成,程潜,王小宁,等. 基于 BIM 的平塘特大桥建养多源信息融合技术及系统研发[J]. 公路,2019,64(9):12-17.
- [7] 邓扬,丁幼亮,李爱群. 桥梁健康监测海量数据分析与评估[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.
- [8] ZHANG Zhengxin, LIU Qianhui. Research of bridge health monitoring data acquisition system[J]. Boletín Tecnico/Technical Bulletin,2017,55(10):411-418.
- [9] 王代君,华鹏. 大型桥梁健康监测数据存储优化设计[J]. 中外公路,2019,39(5):176-178.