

桥梁健康监测数据的结构化存储与分析

曹素功^{1,2}, 黄立浦², 张勇¹, 田浩¹, 胡皓¹

(1.浙江省交通运输科学研究院, 浙江 杭州 311305; 2.长沙学院 土木工程学院)

摘要:大跨桥梁一般都安装有规模不等的结构监测系统,对桥梁的环境荷载、运营荷载、桥梁特征和桥梁响应等参数进行实时监测。因各系统的开发者和监测内容各不相同,导致积累的海量原始数据结构定义各异,开发利用较困难,形成了信息孤岛。该文以9座大桥健康监测系统为例,对桥梁健康监测数据进行调研、梳理和分析,给出长大桥梁结构监测数据的格式规范,提出自动初步处理与人工专业分析的两步数据处理方法。研究表明:针对海量原始监测数据提出的规范化命名、结构化存储方法行之有效,可为桥梁健康监测系统的开发应用、数据结构定义、接口交互和采集提供规范参照;经过该文提出的数据处理方法处理后的数据与原始数据相比,其容量大幅减少,可保证处理后的数据量不超过原始数据量的5%,可为长大桥梁数据分析和挖掘利用工作奠定基础。

关键词:桥梁工程;健康监测;数据存储;数据分析;结构化数据

1 前言

桥梁是交通运输大动脉的重要组成部分,在国家经济建设与社会发展中有着极为重要的地位。作为一种跨越江海河谷的架空构造建筑结构,桥梁一旦出现垮塌等安全事故,将造成难以估量的生命及财产损失,产生极为恶劣的社会影响。据2018年交通运输行业发展统计公报,2018年末中国公路桥梁85.15万座,比上年增加1.90万座,其中特大桥梁5 053座,大桥98 869座,建设水准亦达到了世界级水平。庞大的桥梁基数,意味着艰巨的养护任务。近年来,中国很多长大桥梁实施应用了桥梁结构健康监测系统,在桥梁结构的关键部位部署相应的传感器监测节点,对桥梁的环境荷载、运营荷载、桥梁特征和桥梁响应等参数进行

实时监测。同时,利用各种数据分析方法,对监测数据进行智能处理,从而有效地评估桥梁结构的健康状况。

近年来对结构监测系统数据的处理与分析也开展了不少探索性的理论研究工作,主要可分为两个方面:基于确定性分析和基于概率分析。Seo等重点介绍了如何通过结构监测系统数据所获得的荷载和结构响应信息修正理论有限元模型;Kwon和Frangopol利用监测数据(即钢箱梁应变)进行钢桥屈服强度和疲劳强度可靠度分析,其中针对的研究对象是单个构件的可靠度,而不是整体结构;葡萄牙学者Costa和Figueiras研究了如何利用应变传感器系统对服役期较长的铁路钢桥进行性能评估;德国学者Hosser等研究并给出了如何利用结构监测数据对结构进行基于可靠度的结构体系评估方法的整体框架;徐幼麟利用香港青马大桥监测系统所获海量数据开展了全方位的大跨度桥梁结

- *****
- [8] 宋世刚.桥梁预应力碳纤维加固施工技术要点[C].中国公路学会养护与管理分会第七届学术年会论文集,2017.
- [9] 庞忠华,陆绍辉.OVM 预应力碳纤维板锚具及其静载试验研究[J].预应力技术,2015(4).
- [10] 卓静,李唐宁.FRP 片材波形齿夹具锚的原理[J].土木工程学报,2005(10).

- [11] 许尚贤.机械设计中的有限元法[M].北京:高等教育出版社,1992.
- [12] GBT 700—2006 碳素结构钢[S].
- [13] GB/T 3077—2015 合金结构钢[S].
- [14] 黄侨,万世成,侯旭.桥梁预应力碳纤维板加固中的参数取值及损失计算方法研究[J].公路交通科技,2016(9).

收稿日期:2018-07-30

基金项目:浙江省科学技术厅项目(编号:2017F30049,LGF18E080002);长沙市科技局指导性科技计划项目(编号:ZD1601023);浙江省交通运输厅科技项目(编号:2016009,2017016);浙江省自然科学基金资助项目(编号:LQY18E080002)

作者简介:曹素功,男,硕士,工程师.E-mail:caosg@zjtkyy.com

构健康监测和安全评估的研究;李爱群以润扬大桥健康监测海量数据为研究对象,开展数据分析与评估研究,形成了系统的桥梁健康监测海量数据分析和评估理论、方法和技术体系。

该文以舟山跨海大桥中的西堠门大桥、金塘大桥两座大跨桥梁结构监测数据为蓝本,结合钱江三桥、之江大桥等桥梁健康监测系统的数据信息,以及几座较

为典型的长大桥梁,对其结构健康监测数据、结构安全评估方法进行调研,对动态监测数据和历史数据进行梳理、筛选,分析不同大桥的个性和共性特征,如不同大桥相同的监测参数信息,不同桥梁健康监测系统数据格式、存储方式的异同等。上述桥梁健康监测系统的情况整理统计如表 1 所示。

表 1 部分桥梁结构健康监测系统统计

序号	大桥名称	桥梁类型	监测参数	运行情况评价	桥方运行维护情况	数据分析状况评价
1	西堠门大桥	悬索桥	车辆车速、温湿度、振动、变形、索力、风速风向等 12 个参数	良好	专业人员维护	良好
2	金塘大桥	斜拉桥	车辆车速、温湿度、振动、变形、索力、风速风向等 12 个参数	良好	专业人员维护	良好
3	之江大桥	斜拉桥	车辆车速、气象、振动、应变、索力、风速风向等 10 个参数	良好	专业人员维护	良好
4	钱江三桥	斜拉桥	变形(挠度、位移)视频监控	一般	无	一般
5	钱江五桥	混凝土连续箱梁桥	变形(挠度、位移)	一般	无	一般
6	钱江六桥	连续钢构组合体系梁桥	变形(挠度、位移)	一般	无	一般
7	九堡大桥	连续组合梁—钢拱组合体系拱桥	温湿度、风速风向、变形等参数	一般	专业人员维护	一般
8	苏通大桥	超千米跨径斜拉桥	风、大气温湿度、桥梁内部温度、整体位移、支座位移、加速度、应力应变	良好	专业人员维护	良好
9	润扬大桥	斜拉桥与悬索桥组成的大跨径组合型桥梁	索力、振动、线形监测(倾角)、应力、温度监测、位移与沉降、车道车辆荷载和车流、环境风监测(风速、风向)	良好	专业人员维护	良好

2 健康监测数据的异化原因

2.1 项目监测需求不同

由表 1 可知:由于桥梁业主单位在项目投资、规划设计和运行维护方面的原因,不同系统监测桥梁结构

运行的技术参数各不相同,对系统采集的监测数据的分析研究深浅不同,系统运行情况也好坏不一。

2.2 传感器命名不同

舟山跨海大桥、之江大桥、钱江三桥、苏通大桥及润扬大桥传感器编号的规律性各有差异,具体如表 2 所示,这对于大桥管理有直接的影响。

表 2 各桥梁健康监测传感器命名方式对比

桥梁	梁端位移	索力	振动	命名规则
西堠门大桥	XHM_DT01	XHM_CT01	XHM_VIB01	桥名(汉语拼音简拼)+传感器英文缩写+顺序
金塘大桥	JT_DT01	JT_CT01	XHM_VIB01	桥名(汉语拼音简拼)+传感器英文缩写+顺序
之江大桥	—	SL01	TZD—H/Z01	监测参数(汉语拼音简拼)+顺序
钱江三桥	701399	—	—	比较无序
苏通大桥	WY010101	SL010100	ZD020102	监测参数关键字字母缩写+顺序编号
润扬大桥	WY060101	SL030100	ZD070102	监测参数关键字字母缩写+顺序编号

2.3 数据存储形式不同

对 6 座大桥健康监测数据的存储方式进行对比分析,具体如表 3 所示。

表 3 各桥梁监测数据存储方式对比

桥梁	数据存储方式	优劣对比
舟山跨海大桥	① EXECL 文本格式; ② 数据库格式	通过总结发现目前主要存在 4 种数据存储方式:
之江大桥	① 文本文件夹+文本文件形式; ② 数据库格式; ③ 多个传感器数据存于同一个文本文件形式	① EXECL 文本格式:易于存储,但不易识别数据类别;② 文本文件夹+文本文件形式:易于识别各类数据,存储方便;③ 数据库格式:易于检索数据,但不易操作;④ 多个传感器数据存于同一个文本文件形式:易于存储,但不易识别
钱江三桥	数据库形式	
苏通大桥	① 文本文件夹+文本文件形式; ② 数据库格式	
润扬大桥	① 文本文件夹+文本文件形式; ② 数据库格式	
杭州湾大桥	文本文件夹+文本文件形式	

2.4 数据采样和存储频率不同

(1) 舟山跨海大桥车流量数据为基于信号采集,其他监测数据为基于时间采集,而且各类传感器信号

的采集频率和存储频率一致。

(2) 之江大桥的监测数据采集:车流量数据为基于信号进行数据采集,其余监测数据为基于时间采集,但是采集频率与存储频率存在不一致的情况。例如气象数据,每 10 s 采集一次数据(0.1 Hz),正常情况下每 10 min 存储一次数据,当有异常情况发生时所有采集的数据则全部存储。

(3) 钱江三桥监测挠度数据存储频率为 10 次/min。

(4) 杭州湾大桥监测数据存储频率统一为 1 次/min。

3 监测数据的属性分析

3.1 监测数据的基本属性

桥梁健康监测数据的基本属性主要有:数据进制、数据单位、数据精度。舟山跨海大桥与之江大桥监测数据均已转为十进制数据存储,数据单位换算为国际单位或常用单位的较多,而数据精度与各个具体参数有关。

3.2 监测值的生成周期与形式

以舟山跨海大桥和之江大桥为例,其生成周期与形式如图 1 所示。

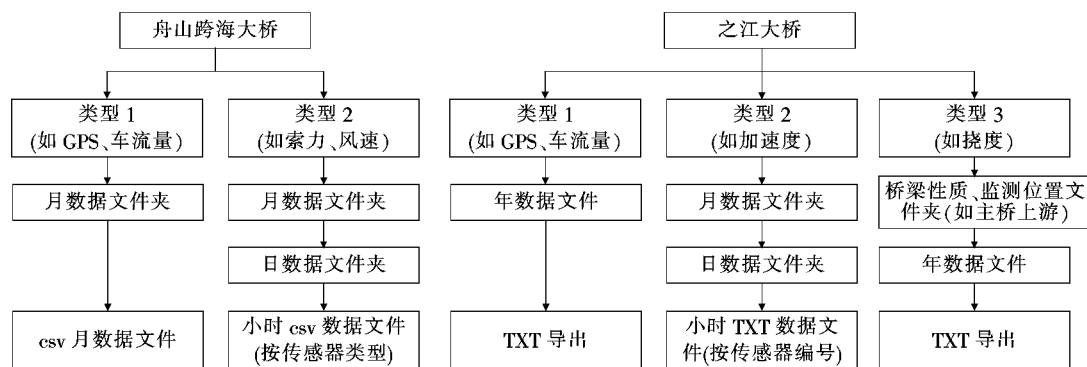


图 1 监测数据生成周期与形式

4 监测数据的规范化

4.1 传感器命名及信息规范化

桥梁上传感器命名涉及的各类信息详细分析解释,表 4 为构成桥梁传感器命名的主要内容。

4.2 监测系统与外部系统交互原则

桥梁健康监测系统与外部系统的交互,应遵循以下原则:

(1) 对外进行数据交互需不影响桥梁健康监测系

统的正常运行,包括数据性的、功能性方面的操作都不能影响,需保持桥梁健康监测系统独立和完整性。

(2) 所有对外提供的数据信息需按照原始数据进行十进制的转换,确保外部系统在数据交换、分析和利用时,数据是真实的、有效的、客观的。

所以,桥梁健康监测系统与外部系统的数据交互的边界在桥梁健康监测系统外部。根据桥梁健康监测系统的原始数据提供对应的数据交互服务器,与桥梁健康监测系统数据库服务器是松耦合部署的,也是对外系统数据交互服务的边界。

表 4 传感器及相关信息命名

信息名称	命名规则	备注	示例
桥梁名称	汉语拼音简称字母	如果大桥名称符号相同,增加一位识别符号即可	之江大桥:ZJDQ
传感器名称	监测参数_技术原理+顺序号		光纤光栅温度计:WD_GXGS_001
桥梁层数	1:一层,2:二层,3:三层,4:其他	默认为一层桥梁	
桥梁性质	1:引桥,2:主桥,3:匝道,4:其他		
桥梁平面坐标	采用 X 长 Y 宽 Z 高表示,数值表示,2 位小数		
上下游	0:中线,1:上游,3:下游,数字表示		
方向	东:D,西:X,南:N,北:B,角度:0—90 度,两者结合字符表示		DN45:东南方向
空间位置	上、中、下、左、右、左侧、右侧、内、外、顶板、底板、顶、低、横、纵、竖等,以文字表述		
桥梁构件	梁:L,塔:T,索:S,桥墩:D,路面:LM,锚碇:MD		
传感器采集信息子站	01、02、03、04……,00 表示没有信息子站;		
传感器设置安装时间	以年月日为参数,以时间格式表示		20160205:表示 2016 年 2 月 5 日设置安装时间
传感器标志位	0:原始安装,1:已更换,2:维修中,3:发生故障,4:废弃不用,5:临时处理,6:新增,7:其他,以数字表示		
信息采集有效否	0:有效,1:无效,2:其他,以数字表示		

4.3 桥梁监测数据属性的存储规范

(1) 数据进制

桥梁健康数据采用的数据分为数据类和时间类,数据类的进制为十进制,各类传感器采集的机器自定义码、二进制、十六进制、地理坐标、标志位等信息都需要换算成十进制的数据进行存储处理。时间类的进制为六十进制。上述进制的定义结合日常生活的习惯,便于理解和数据应用。

(2) 时间和日期规定

时间和日期单位采用中国建筑工程标准协会 CECS 333:2012《结构健康监测系统设计标准》要求,时间采用公历形式,最小单位为秒,具体形式为:年月日时分秒。

(3) 数据单位规定

采用中国建筑工程标准协会 CECS 333:2012《结构健康监测系统设计标准》要求,采用国际单位制,用国际基本单位以及与国际基本单位换算的相关单位,具体结合监测参数使用。

(4) 数据精度

数据精度直接与数据库存储空间和效率有关,数据精度以满足业务需求为主,兼顾数据的存储空间和效益。另外,数据精度与数值计算单位有关联,如某斜拉索桥梁的一根钢索的索力为 1 234 567.89 N,可换

算为 1 234.567 89 kN,而索力的监测使用“kN”为单位,保留小数位数 2 位即可。

(5) 存储频率

桥梁健康监测系统的数据采集有基于时间和基于信号采集的不同传感器提供数据采集,由于不同传感器技术原理不一致,导致采集的数据无法统一处理,但所有原始数据需保存在传感器数据采集服务器中,供数据转换以及查证用。

4.4 数据文件命名规范化

桥梁健康监测系统中一个传感器采集的数据对应有一个、二个、三个或多个数据的情况:

(a) 一对一,这种形式最多,如温度传感器、变形传感器、应变传感器等采集的数据都是一对一的。

(b) 一对二,如风速风向传感器有风速、风向两个数据。

(c) 一对三,如三向风速仪、GPS 设备等,基本上有 X、Y、Z 共 3 个方向的数据,有些还有记载期间最大值、最少值、平均值 3 个数据的。

(d) 一对多,如车载重传感器、气象(多维度)站,可以记录多个不同方面的数据信息。

将同类监测参数传感器数据的存储频率进行标准规范化后,同类监测参数的所有传感器数据每天的个数是一致的(个别除外),因此可以放在同一个数据库

表中,具体定义如下:

- (1) 同类传感器同一频率每一传感器对应一个技术参数的,存储在一张表。
- (2) 同类传感器同一频率每一传感器对应两个技术参数的,存储在一张表,同一个传感器的同一时间两个技术参数数据分两列显示,然后为后一个传感器的参数并列显示,以此类推。
- (3) 同类传感器同一频率每一传感器对应 3 个技

术参数的存储同一张表,同一个传感器的同一时间两个技术参数数据分 3 列显示,然后为后一个传感器的参数并列显示,以此类推。

- (4) 同一参数每一传感器对应多个技术参数存储在一张表,但显示的方法可能与(1)、(2)、(3)不同,有两种方式:一种类似车载车重的形式定义,见表 5;另一种以一对多的监测参数的各个属性为字段名形成一张数据库表。

表 5 3 种数据交换的比较

交换类别	跨平台	跨数据库	交换管理	交换错误处理	添加硬件	添加软件	交换安全性	整体费用	维护性	数据转换	占用存储空间
数据库格式交换	不一定	否	统一管理	可追踪具体交换的过程	不一定	交换中间件	中	较贵	专业人员维护	无需转换	相对较少
XML 格式交换	可	可	统一管理	较难追踪到交换过程	不一定	交换中间件	中	中	专业人员维护	容易转换	中
文本文件格式交换	可	可	没统一管理	要么成功要么失败	否	否	差	便宜	无需专业人员维护	容易转换	相对较多

4.5 数据对外规范化

数据对外交换的规范主要针对与外部系统进行信息交互业务而言,由于桥梁健康监测系统相对独立,大部分的数据对外交换是桥梁健康监测系统对外传输出去的。

(1) 数据接入方职责

① 负责与桥梁业主单位沟通,解释该接入规范具体的技术思路、数据采集的方法、数据交换的对接等应用,使桥梁业主单位及其桥梁健康监测系统的开发商、运维商理解该规范技术特点,协助桥梁业主单位完成按照该规范要求建设、实施、部署桥梁健康监测系统以及数据采集、存储、对外交互等工作;② 负责建立与桥梁业主单位沟通、交流、培训等机制,保证该规范要求的运行,实现桥梁健康监测系统数据及时、有效、准确地采集;③ 负责数据的符合性检查、存储。

(2) 桥梁业主单位职责

① 理解和分析该规范要求的技术思路特点,在建设、部署、实施桥梁健康监测系统过程中,以融合、共享、互利原则按照该规范来规划设计桥梁健康监测系统及相关数据库;② 保证桥梁健康监测系统涉及的各类传感器运行正常,采集数据、转换、存储的系统运行正常,做好日常维护工作;③ 按照该规范将桥梁健康监测系统的数据库服务器中的数据进行采集、整理并提交给数据交互服务器指定目录中;按照该规范数据

提交周期(一般为 1 天一次)每天晚上 24:00 提交前一天 0:00:00—23:59:59 的数据;④ 负责每天查看前一天提交数据的情况,如果提交失败,立即与桥梁接入方联系,沟通问题原因,并负责联系开发商、运维商,直至问题解决。

5 监测数据的分析处理

目前,中国大跨径桥梁基本都布设有不同规模的结构监测系统,用以实时获取大桥所处地区环境信息、车辆荷载信息以及关键结构响应信息。舟山跨海大桥监测系统每天产生的数据量达到 2~3 GB,全年下来监测系统原始数据存储量超过 1 TB。原始数据量过大并且数据有缺失、毛刺、参杂错误信息等各种情况,处理起来费时费力。此外,每次开展不同的研究都需要将原始数据进行重新处理,导致针对监测数据进行专业研究的时间成本大幅增加。

针对监测系统产生的海量数据的分析处理,提出了自动初步处理与人工专业分析的两步数据处理方法,即通过自主开发数据分析软件对采集到的监测数据进行自动实时的分析与处理,使经过处理后的数据能够初步反映环境、车辆荷载以及关键结构响应等有效信息,而后续的数据分析专业人员只需根据自己的研究专长直接调用处理后的数据进行进一步专业处理

而不再需要调用原始数据,有效提高原始数据的分析处理效率,具体数据分析处理流程见图 2。

数据软件将监测系统所获原始数据进行初步处理,转变成桥梁技术人员关心的数据初步统计处理信

息和后续结构分析所需的专业技术信息,经处理后的数据与原始数据相比较,其数据量大量减少,可以很好地起到监测系统原始数据与后续数据统计分析与结构分析之间的桥梁作用,软件框架见图 3。

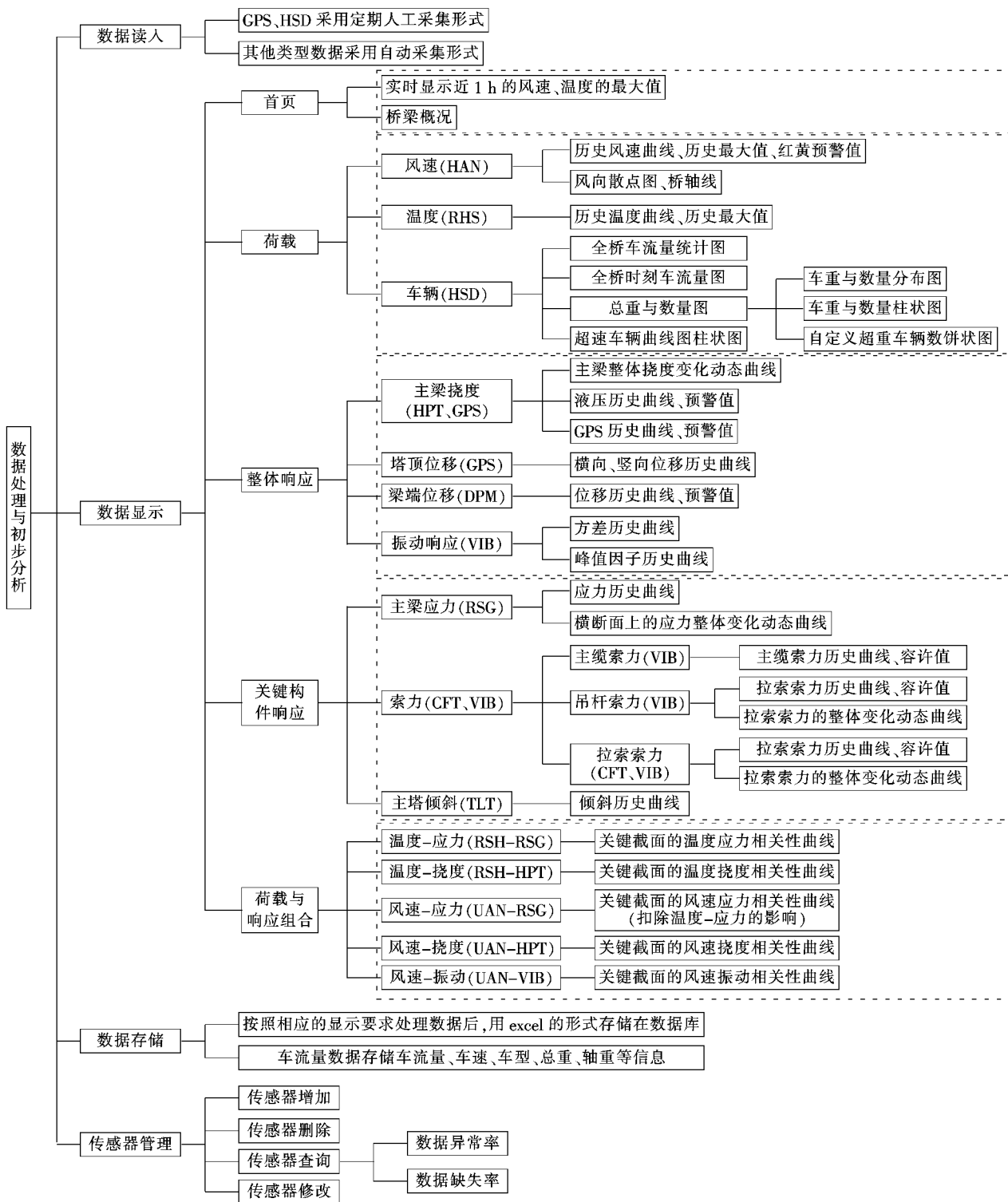


图 3 监测数据分析系统架构

数据处理完后,分析软件将自动删除原始数据,而将分析处理后的数据以及后续结构分析需要用到的部分原始数据保留在 SQL 数据库中,经过方法处理后的数据与原始数据相比,其容量大幅减少,每天由监测系统产生 3 GB 左右的原始数据压缩到 30 MB 左右,后续的数据显示和结构评估只需调用经方法处理后的数据而不再需要调用原始数据,这样后续数据显示和结构评估等技术工作的效率将大幅提高。

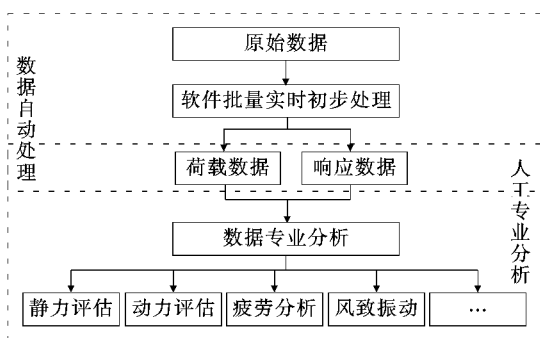


图2 数据处理整体框架

6 结语

虽然目前多数大桥安装了健康监测系统,但目前对海量监测数据基本只是做到实时显示和妥善存储的程度,真正开始利用监测数据开展对结构安全性能评估工作的较少,特别是大桥管理单位日常管理养护工作的需求,监测系统目前所具备的评估功能更是无法满足要求。

针对专业分析对于监测系统所获海量数据的实际需求,对监测数据命名、文件存储形式、采样频率和属性等进行分析,提出了自动初步处理与人工专业分析的两步数据处理方法,并自主开发了监测数据分析软件,能够实时分析处理监测系统所获得的海量原始数据,后续的数据分析专业人员只需根据分析的要求直接调用处理后的数据进行下一步专业处理而不再需要使用原始数据重新处理,这样可大幅提高后续专业分

析的工作效率。

参考文献:

- [1] http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/201904/t20190412_3186720.html.
- [2] 苏成,廖威,袁昆,韦锋.桥梁健康监测在线预警指标研究[J].桥梁建设,2015(3).
- [3] 郭翠翠,张华兵.基于健康监测的武汉军山长江大桥重车过桥响应分析[J].桥梁建设,2014(6).
- [4] 王浩,王龙花,樊星辰,等.基于健康监测的苏通大桥风速风向联合分布研究[J].桥梁建设,2013(5).
- [5] 田浩,马如进,邵吉林.大跨桥梁结构监测数据分析与安全评估[M].北京:人民交通出版社,2016.
- [6] 王瑀,荆国强,王波.桥梁健康监测系统在线结构分析及状态评估方法[J].桥梁建设,2014(1).
- [7] Seo J, Phares B, Lu P, et al. Bridge Rating Protocol Using Ambient Trucks Through Structural Health Monitoring System[J]. Engineering Structures, 2013, 46(1): 569—580.
- [8] Kwon K, Dan M F. Bridge Fatigue Reliability Assessment Using Probability Density Functions of Equivalent Stress Range Based on Field Monitoring Data[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(8): 1 221—1 232.
- [9] Costa B J A, Figueiras J A. Evaluation of a Strain Monitoring System for Existing Steel Railway Bridges[J]. Steel Construction, 2012, 72(5): 179—191.
- [10] D. Hosser, C. Klinzmann, R. Schnetgöke. A Framework for Reliability—Based System Assessment Based on Structural Health Monitoring[J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2008, 4(4): 271—285.
- [11] Xu Y L, Chen Z W. Multiload Long Span Suspension Bridges with Structural Health Monitoring Systems: Fatigue and Reliability[J]. Journal of Disaster Prevention & Mitigation Engineering, 2010(S1).
- [12] 李爱群,缪长青.桥梁结构健康监测[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [13] 张丰.东江大桥健康监测系统设计[J].中外公路,2016(4).