



# 一种应用传感器网和实景三维模型的复杂 建筑物实时动态监测方法

徐敬海<sup>1</sup> 杜东升<sup>2</sup> 李枝军<sup>2</sup> 王曙光<sup>2</sup>

1 南京工业大学测绘科学与技术学院,江苏 南京,211816

2 南京工业大学土木工程学院,江苏 南京,211816

**摘要:**建筑结构动态监测是重要建筑日常维护管理的重要工作之一,如何有效地采集、传输和管理时态建筑监测数据是其中难点。提出了一种面向实时动态监测的建筑信息模型,该模型实现了建筑物建筑信息模型(building information model, BIM)、实景三维模型与传感器网的融合,服务于建筑物几何、构造和运行状态信息的综合管理;建立了基于传感器网的建筑结构时态监测信息传输、管理框架与方法,包括各类传感器网数据在下位机中的时态对齐与打包、基于JSON(JavaScript object notation)的传输协议、传感器数据在上位机中的时态压缩和重构以及时态数据的数据库管理方法。以中国江苏省南京市博物院老大殿为监控对象进行了案例应用,开发了相应的动态监控系统,通过系统演示验证了所提方法的可行性与实用性。目前该系统仍处于运行初期,未来随着海量传感器数据的累积,将进一步开展数据智能分析研究。

**关键词:**智慧城市;建筑实时监控;时态数据;传感器网;建筑信息模型(BIM)

**中图分类号:**P208

**文献标志码:**A

随着经济建设水平的发展,中国新建房屋规模激增,成为居世界首位的建筑大国。大量大跨结构公共建筑如鸟巢、水立方的建设,在推动中国建筑行业快速发展的同时,也带来了建筑安全风险。国外已有一些相关灾害发生,如2013年巴西科林蒂安体育场在安装配件时坍塌,2009年马来西亚苏丹米占再纳阿比丁体育馆突然坍塌等<sup>[1]</sup>。如何有效地对建筑物开展健康监控与安全诊断,防止建筑灾害具有重要意义。近年来,对重要基础设施的结构安全性进行监测和诊断得到了业界的广泛关注和积极实践,其核心是利用现场的无损传感技术,通过对包括结构响应在内的结构系统特性进行分析,以实现检测结构损伤或退化的目的<sup>[2-3]</sup>。目前,结构健康监测在大跨桥梁、大坝等重大基础设施中应用较多,如青马大桥、润扬大桥、苏通大桥、泰州大桥等<sup>[4]</sup>。已有相关研究大量集中于传感器的优化布设<sup>[5]</sup>、新型传感器的设计<sup>[6]</sup>、传感器数据处理<sup>[7]</sup>等方面。随着智慧城市与大数据技术的兴起,将相关技术引入建筑结构健康监测,探索复杂建筑物实时动态监

测与智慧诊断技术,可提升建筑运营管理能力<sup>[8]</sup>。文献[9]分析了数字地球到智慧地球的转变,论述了智慧地球时代可实现“秀才不出门,能做天下事”,并进一步提出随着大数据时代发展,智慧地球时代将产生“对地观测脑、智慧城市脑和智能手机脑”等脑科学<sup>[10]</sup>。建筑物健康监测、诊断数据也是一种典型的实时数据,大数据GIS、实时GIS数据模型的研究,将为采集、管理和应用建筑诊断传感器网数据提供良好的借鉴<sup>[11-12]</sup>。文献[13]已在实时GIS等方面开展了系列深入的研究,提供了一些效果良好、可供借鉴的应用案例。

与传统大坝、桥梁等结构健康监测系统相比,面向实时动态监测的建筑信息模型也是一个值得探索的问题。现有桥梁、大坝健康监测系统中传感器数据采集与分析较侧重结构表面变化,对结构细部运行状态的关注不深。与桥梁、大坝相比,建筑物的内部结构构件复杂,对结构细部监控是建筑结构监测的一个重点。建筑信息模型(building information model, BIM)可对结构细部进行建模,并通过细部构件的组合形成结构整

收稿日期:2020-08-31

项目资助:国家重点研发计划(2018YFC0704300);江苏省抗震专项资金(2019B2461-25);江苏省建设系统科技项目(2018JH011)。

第一作者:徐敬海,博士,教授,主要从事智慧城市、空间信息综合减灾研究。xu\_jing\_hai@163.com

体的模型,目前已有部分研究尝试将BIM技术应用于建筑结构监测,并表现出好的应用前景<sup>[14]</sup>。然而BIM模型不具有空间位置信息,难以分析结构对周边影响以及周边的环境对结构的影响。实景三维模型作为一种GIS模型,可补充BIM此方面的不足。本文引入BIM技术、实景三维技术以及物联网技术,实现建筑物结构状态信息的实时采集、传输和监测。可为不同的利益相关者提供不同层级的监测管理服务,如对建筑结构使用提供直观的建筑物运行信息,对建筑结构维护技术人员提供专业的建筑结构状态信息,并辅助决策人员在建筑物灾时和平常的管理。本文以中国江苏省南京市博物院老大殿为监控对象进行了案例开发与应用。

## 1 建筑动态监测模型

### 1.1 面向动态监测的建筑信息概念模型

从建筑物实时监测管理角度,建筑信息模型需满足3个方面的需求,如图1所示:(1)模型可以表示建筑结构信息,如梁、板、柱,除了可以表示它们的尺寸和几何信息外,还需要表达彼此之间的连接与组合关系,此方面的信息可用于结构的动力与静力状态下的力学性能分析;(2)建筑的位置信息、轮廓、几何外形等外部信息,此方面的信息可用于分析建筑物与周边的关系,如建筑物建设过程中基坑开挖对周边建筑物的影响,或者建筑物在遭受周边扰度时的影响等场景;(3)建筑状态信息监测需求,在对建筑物进行实时监测时,通过各类传感器实时动态采集建筑结构受外界的影响及结构自身在使用过程中的内在改变,如应力传感器、位移传感器、振动传感器等,模型需实现各类传感器采集信息的集成。

从广义地理信息视角,以上3类信息可统一理解为地理信息的几何信息和属性信息,地理信息领域的已有管理模式可供借鉴。但对于建筑结构信息,建筑行业领域已有管理模型BIM。BIM采用数字化技术,以三维模型的方式为建筑工程提供完整的建筑工程信息库。BIM不仅包括描述建筑物构件的几何信息、专业属性和状态信息,还包含了非构件对象(如运动行为)的状态信息<sup>[14]</sup>。因此,本文选择BIM作为建筑动态监测模型的基础模型。

BIM可以较好地表达建筑物梁、板、柱等骨架,但对于位置信息、外观信息等表达存在一定困难,而这正是地理信息模型的优势。本文选择

实景三维模型作为动态监测模型中的地理信息表达模型,实景三维模型不仅带有真实的地理位置信息,而且模型效果逼真,有量测精度,相比较BIM可以真实地还原建筑物的外形与周边环境,可给人身临其境之感。由于是GIS模型,还可支持空间分析。构建建筑物的实景三维模型,并与建筑物BIM进行融合,可形成复杂建筑物实时监控的基础。

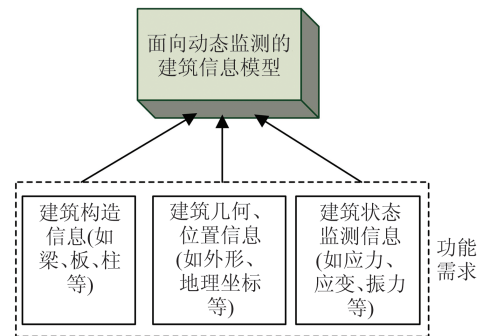


图1 建筑动态监测概念模型

Fig.1 Conceptual Model of Building Dynamic Monitoring

对建筑物进行实时监控管理,大量的专业传感器是必须的。通过在建筑物关键部位安装各类传感器,可实时掌握建筑物运行状态,为各种结构分析提供数据支撑。相比较地理信息领域的常规传感器,建筑结构使用的各种传感器数据采集频率与数据量更大,如高精度振动传感器采样频率可达120 Hz(每秒120个数据点)。建筑动态监测模型中,将建筑物传感器与前面的建筑物BIM/实景三维模型集成,并应用物联网技术实现数据传输。

### 1.2 建筑动态监测模型的实现

从概念模型的角度,建筑动态监测模型构建的关键是实现BIM、实景三维以及传感器网的融合与集成,其中建筑物BIM与建筑物实景三维模型的融合又是基础。

1)建筑物BIM与实景三维模型的融合。二者融合时,需首先选择源模型和目标模型。考虑到传感器与建筑动态监测模型的集成以及建筑物监测、预警功能实现的便捷性,本文选择实景三维模型为目标模型,而将BIM作为源模型。选取开源平台Cesium的3Dtitles格式作为建筑物实景三维模型,此格式的关键是采用b3dm文件保存三维模型信息。融合过程如图2所示,需分别将建筑物的几何信息、位置信息和语义信息进行转换。转换前先将建筑物BIM根据结构构件类型,如梁、板、柱进行重构,实现其子构件化处理,

分类后的子构件便于按类型分别转换。

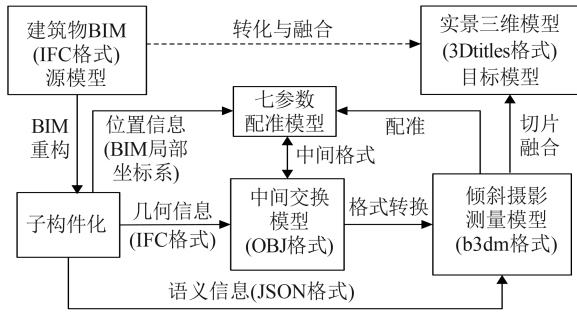


图2 建筑物BIM模型与实景三维模型融合  
Fig.2 Merging of BIM and Reality 3D Model

对于构件的几何/语义信息需分别进行转换,而子构件之间由于存在相对稳定的空间关系,因此其位置(坐标)信息可以统一转换。在具体操作实现层面上,转换几何信息时,以BIM常用的建筑对象的工业基础类(industry foundation class, IFC)格式为出发点,IFC格式具有代表性和广泛性。选取Wavefront OBJ格式作为中间交

换格式,向b3dm格式倾斜摄影测量目标格式转换。目前,IFC至OBJ和OBJ至b3dm格式之间的转换已有许多开源和商业软件支持,如Revit可实现IFC至OBJ的转换,而Cesium提供了开源的OBJ转换工具,采用glTF格式为过渡实现OBJ至b3dm的转换。建筑子构件的语义信息主要是指建筑物构件中的各类描述信息,如构件材质、门窗类型等。在进行转换时,可将不同构件的语义信息以JSON(JavaScript Object Notation)的形式描述,如图3所示。在b3dm内部也采用JSON保存不同三维对象的属性信息,建筑构件语义信息如beam.json最终保存在b3dm文件内部的batchTable中,而其对应的几何信息则存储于Binary glTF中。因此,在b3dm中可以较好地实现建筑物构件语义信息与几何信息的集成。位置信息则以OBJ格式为中间格式,采用7参数法进行配准即可。随后便可根据b3dm文件方便地生成3Dtiles格式,从而实现BIM与实景三维模型的融合。

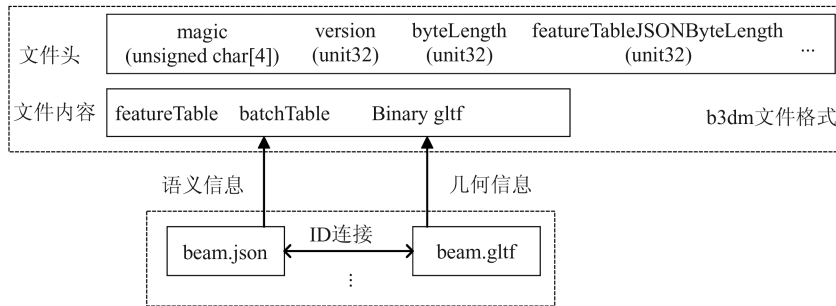


图3 基于b3dm的建筑物信息集成  
Fig.3 Building Information Fusion Based on b3dm Format

2)传感器网与BIM/实景三维融合模型的集成。BIM与实景三维融合后的建筑模型为建筑监测传感器提供了表达的框架,实景三维模型为传感器空间定位信息提供了基础(如传感器的经纬度信息),而BIM则为传感器在结构构件上的定位提供支撑,如某传感器位于一层左中柱底。传感器空间坐标信息便于分析建筑物受周边环境的影响,而构件定位信息则便于分析结构在外部响应下的内部变化,如结构受温度影响时的应力与应变变化等。

将传感器与BIM/实景三维融合模型进行集成,可以结合图2所示的融合过程进行开展。即在构建BIM时,先将各种监测传感器作为BIM的子构件,分别放置于设定的结构构件上,如相应的梁、柱、板的位置等;接着将各种传感器作为BIM的子构件,按照图2的流程分别对几何、语义

和位置信息进行转换;最后根据传感器唯一标识(identification, ID)进行识别,以区别BIM中其他子构件,并在3Dtiles模型中用不同的图层进行管理,从而实现传感器的集成。

本文以南京博物院老大殿为实验对象,实现了建筑物BIM与实景三维模型的融合、传感器网与BIM/实景三维融合模型的集成。采用大疆Dji Matrice 600电动多旋翼无人机,并搭载了五镜头倾斜相机进行外业测绘,建立了南京博物院实景三维模型。传感器为SONY DSC-QX100,尺寸13.2 mm,焦距10.4 mm、2 020万像素,分辨率为5 472×3 648像素。航测时,航向重叠度为80%,旁向重叠度为75%,拍照间隔为3 s,获取航片1 600余张,原始航测照片数据量约11 GB,经过后处理后建立了3Dtiles格式的南京博物院实景三维模型。

南京博物院老大殿 BIM 采用 Revit 软件人工建模,为实现 BIM 与实景三维模型融合,首先采用开源软件 BIM Server 对南京博物院老大殿 BIM 进行重构,南京博物院老大殿 BIM 在 BIM Server 中的展示如图 4 所示。通过编写程序操作 BIM Server 提供的应用程序接口(application programming interface, API)函数,形成按照不同结构类型构建的南京博物院老大殿子构件模型(IFC 格式),重构后的子构件 BIM 信息如表 1 所示。接着对 BIM 子构件与实景模型选择相同的控制点如屋顶点、墙角点进行坐标变换匹配,实现二者坐标系的统一。最终将 IFC 格式转换为 b3dm 格式,从而在物理格式上也实现二者的融合。

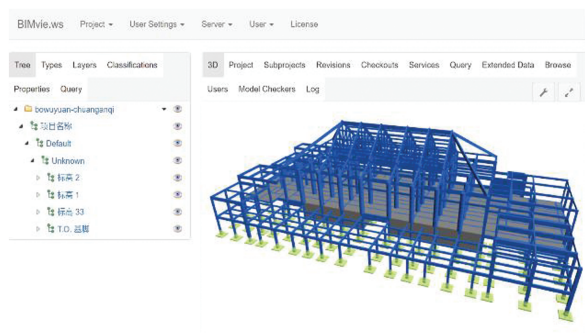


图 4 BIM Server 中的南京博物院老大殿 BIM 模型

Fig.4 BIM of Audience Hall in BIM Server

表 1 南京博物院老大殿 BIM 模型子构件信息表

Tab. 1 Component Information of BIM of Audience Hall of Nanjing Museum

类别	个数	OBJ 数据量	JSON 数据量/ MB
IfcWalls	129	604 kB	43.2
IfcSlabs	151	3.74 MB	47.9
IfcBeams	1 154	6.08 MB	443
IfcColumns	1 373	516 kB	421
IfcBuildingElementProxy	56	1.27 MB	2.50

图 5 展示了 BIM 与实景三维模型的融合结果,融合后的模型中实景三维模型与 BIM 位于空间同一位置,类似一个模型。其中,实景三维模型作为 BIM 的“外壳”,一方面装饰 BIM,表达南京博物院老大殿的外部情况,以及南京博物院的整体情况,另一方面也控制 BIM,实现 BIM 在空间上的定位。反之,BIM 为实景三维模型提供了骨架,从而为建筑物监控传感器的定位提供了基础,使得对建筑结构细部的监测变得可能,如定位传感器于建筑结构不同楼层中的关键梁、柱等构件,也为建筑物根据收到的传感器数据进行结

构力学分析提供支撑,便于根据建筑结构状态作出判断。为了展示方便,将两张图合并在一起,图 5 左部分表示南京博物院老大殿的实景模型,右部分表示实景模型“后面”的 BIM,二者不仅在地图上处于同一空间位置,也已完整融合于一个软件系统,类似传统二维地图中两个不同的图层,关于模型融合的更多应用介绍见§3。

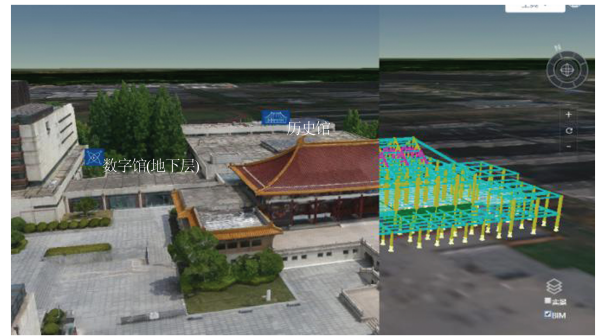


图 5 BIM 与实景三维模型融合

Fig.5 Illustration of Fusion of BIM and 3D Reality Model

## 2 基于传感器网的复杂建筑状态信息监测

本文案例中共安装了 4 大类 60 个传感器,其中传感器的类型和性能参数如表 2 所示。如何实现不同参数传感器信息的采集、传输与管理是项目实施中的难点。本文根据传感器类型的不同,设计了传感器信息采集、传输及存储的框架,如图 6 所示。

图 6 所示的框架中,采用不同的工控机实现不同类型传感器的采集控制。不同类型的传感器制造厂商提供了相应的硬件操作 API 或二进制操作指令。当传感器信息监测到相关的响应信号后,如振动、应变、温度、位移等,通过运行于工控机中的信号采集控制软件实现建筑结构原始信号的采集。工控机作为直接控制传感器信息采集的机器,相较于传统电脑,其优点在于有较高的防磁、防尘、防冲击能力,电源抗干扰能力强,有良好的长时间工作能力。

本文采用了 3 台工控机,分别对光纤类传感器(包括光纤类振动传感器、位移传感器等)、视频位移传感器和高灵敏度振动传感器等进行管理。从传感器信息传输框架看,工控机也被称为下位机。下位机的功能有两个:(1)控制相关信号的采集,并对采集到的信息进行初步的处理;(2)通过与上位机约定的协议,将采集的数据打包传输给上位机。

表2 南京博物院项目传感器参数  
Tab. 2 Sensors Parameters of Nanjing Museum Project

种类	设备名称	测点数量	采样频率	性能参数	安装位置
振动	高灵敏度传感器	16	120 Hz 采样 降采样(20 Hz)传输	高灵敏度(1 500 mV/g)、宽频响(0~80 Hz)	基础与结构
	光纤振动传感器	5	20 Hz 采样	宽频响(0.2~100 Hz)、传输距离长	基础与结构
位移	计算机视觉	9	10 Hz 采样	高精度(0.01 mm)、高分辨率	基础与结构
	光纤位移计	10	20 Hz 采样	测量范围( $\pm 50$ mm)、精度(满量程百分比0.1%)	基础与伸缩缝
应变	光纤应变传感器	10	20 Hz 采样	测量范围( $\pm 1 000 \mu\epsilon$ )、精度(满量程百分比0.1%)	重要构件
温度	光纤温度传感器	10	20 Hz 采样 降采样(1 Hz)传输	测量范围( $-30 \sim 120$ °C)、精度(0.5 °C)	基础与结构

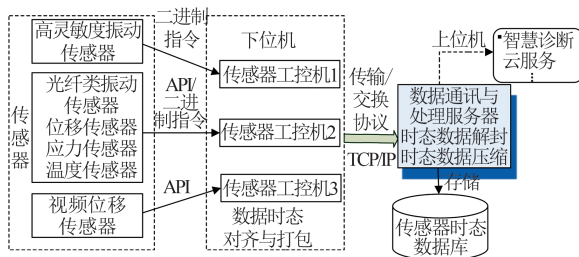


图6 传感器信息传输框架

Fig.6 Framework of Transferring Sensor Information

## 2.1 传感器时态数据传输

下位机向上位机传输可以采用两种模式：(1)单传感器逐个发送；(2)将一类传感器数据集成后整体发送，如光纤类传感器，由于光纤类传感器采用一根光纤连接，因此可将其接收到的数据一起由下位机打包后上传给上位机。具体来说，下位机在获取不同传感器数据时各传感器采样频率不一致，在下位机传输前，需先对其整理和打包，即将同一下位机中不同的传感器数据进行缓存，达到相同打包时间间隔后如采样5 s后，将相关传感器数据整体打包后统一进行传输。为此，本文设计了如下下位机时态数据包逻辑格式：

工控机设备号,开始时间戳,{传感器ID1,传感器Type1,传感器采样频率,数据[d1,d2,d3...]};传感器ID2,传感器Type2,传感器采样频率,数据[e1,e2,e3...];...

由于不同传感器的采样频率不一致,所以相同采样时间间隔后,将产生长度不一样的数据缓存,为了有效封装这些时态数据,本文采用JSON格式传输数据包。JSON是一种轻量级的数据交换格式,采用完全独立于编程语言的文本格式来存储和表示数据。它既易于人阅读和编写,也易

于机器解析和生成,并可有效地提升网络传输效率。传感器获取的信息大多采用16进制编码,不利于阅读,需要在工控机中转换为ASCII格式的明码,接着以JSON方式描述。JSON以动态数组的形式表示变长的数据内容,这对表达不同传感器时间缓冲数据和不同工控机对应数量不等的传感器均比较方便。本文采用的传输协议示例如下：

```
{ "dev" : 1, "t0" : "2020-06-20T06: 30: 00.00", "len" : 18, data: [ { "id" : 1, "Hz" : 20, "type" : 1, "vls" : [ 22.3, 22.4, 22.3, 22.4, 22.5, 22.6... ] }, { "id" : 2, "Hz" : 30, "type" : 2, "vls" : [ 252.3, 25.4, 25.3, 25.4, 25.5, 25.6... ] } ] }
```

其中,dev表示工控机设备编号;t0表示传感器开始的采样时间;len表示工控机对应的传感器数量;id表示传感器编号;Hz表示采样频率;type表示传感器类型编号;vls表示采样数据数组。

数据采集缓冲时间并未出现在传输协议中,而是直接出现在上位机和下位机的约定中,南京博物院项目中采用的传输时间间隔为5 s,也可根据具体项目对实时性的不同需求灵活调整,传输链路为传输控制协议/网际协议(transmission control protocol/internet protocol, TCP/IP)。

## 2.2 传感器时态数据管理

传感器数据到达上位机后有显示和分析这两个方面的应用需求。其中,显示是指将结构细部的各种状态信息,如某梁、柱的应变、位移,实时呈现给用户,从而为系统使用者提供结构状态直观的感受;而分析是根据收到的详细传感器数据,采用结构动力学和静力方法分析结构运行状态,从而对结构性态进行预警。

从显示的角度,高频率的时态数据(如每秒

120 个采样点)易产生显示滞后、数据量过大等问题,且大量数据细节的堆积也不利于对数据整体变化趋势的认知,因此需要对数据在时间维度上重采样和实时压缩。从数据显示角度,本文在综合考虑系统实时性需求后,选择 2 min 作为重采样时间间隔。以 2 min 内各传感器的最大值、最小值、平均值和当前值(以每个 2 min 周期的起始值作为当前值)作为显示数据的压缩值(代表),其压缩原理为:

$$R = \{G_i | i < i_s\} \quad (1)$$

$$G_i = \{dev, vm, sd\} \quad (2)$$

$$C = \{\max(G_i), \min(G_i), \text{average}(G_i), t_s\} \quad (3)$$

式(1)表示原始传感器数据由多组采样频率的数据组成,其中  $R$  为传感器原始数据,  $G_i$  为传感器原始数据组,  $i_s$  表示采样频率,本文案例中为 5 s;式(2)表示每组传感器数据包括工况机设备号 dev、验证元数据 vm、传感器数据 sd 等内容;式(3)表示时态压缩后的传感器数据( $C$ ),由最大值等特征值以及新的时间戳  $t_s$  等组成。

无论是压缩数据还是原始数据,都面临如何在数据库中存储的问题,如果采用数据从下位机

传输来的时间频率(5 s)进行存储,在很短的时间如系统运行 1 周后,将导致数据库表的记录过长,从而影响数据使用效率,也会使数据存储量过大。即使采用压缩数据的 2 min 时间频率,这些问题依旧存在。因此,本文对数据在时态上重构,以 1 h 为时间片段将数据在上位机上重新组合,而在数据库表记录中以每小时一条记录原始数据和压缩后的数据,并进一步采用二进制大对象(BLOB)字段保存,实现数据量的压缩。在此基础上设计了传感器时态数据库核心表的表结构(见表 3)。但对数据进行重构和压缩后,易造成数据在时间维上检索困难,尤其是检索位于一条记录中的 1 h 内传感器数据。因此,本文在 1 h 的传感器数据内添加了时间戳标识,以便于数据检索。为了方便数据处理,添加时间戳的时间间隔也与数据压缩的时间一致,即 2 min。具体实现时以字符串保存数据,添加特殊符号(本文采用“M”)隔离不同时间段的数据,实现时间戳的标识。传感器数据字符串格式示例见表 4。表 3 中的 rawdata 和 compdata 是将表 4 中的字符串转化为 BLOB 字段保存,从而进一步压缩数据量。

表 3 传感器数据存储表结构

Tab.3 Table Structure of Sensor Data

字段	类型	说明
id	int	序号
dev_id	Char	设备编号
sensordata_starttime	datetime	数据保存的开始时间,下一条记录与上一记录时间相差 1 h
rawdata	Binary	原始数据
compdata	Binary	压缩数据

表 4 单位小时记录内带时间戳的传感器数据字符串格式

Tab.4 Data Format of Sensor Data with Timestamps in One Hour Record

数据类型	格式	说明
原始数据	17.8,39.5,20.3...20.6M29.6,30.8...20.8M...12.5,32,14.5 ...30.5M...20.2,39.5...	数值用逗号分割,每 2 min 以 M 分割,数据每 2 min 更新一次,每小时产生新的传感器原始数据字符串
压缩数据	28.5,27.6,36.9,29.7M18,29.3,30.5,33.8M30.5,15,20, 22M23...	依次记录原始数据每 2 min 内的当前值、最小值、最大值、平均值,每 2 min 更新一次,数据以 M 分隔,每小时产生新的传感器压缩数据字符串

### 3 案例系统实现

南京博物院是重要的历史文化标志性工程之一,是中国第一座由国家投资兴建的大型综合类博物馆。南京博物院老大殿有着 70 a 的悠久历史,2008 年后对其进行了整体提升,在首层切柱、抬高了 3.0 m,并在基底设置隔震支座进行抗

震加固。随着使用年限的增加,橡胶隔震支座易产生屈服后刚度增加、水平变形能力下降的问题。隔震支座力学性能的降低会影响隔震结构在强震作用下的安全性。同时,在使用过程中,因各种自然或人为因素的作用,南京博物院结构也会发生构件损伤,影响结构的安全使用。有必要对南京博物院建筑物的使用状态进行实时监

控,本文案例以南京博物院中历史最悠久、最重要的建筑物老大殿为实时监测对象,其中部分传感器设计、安装如图7和图8所示。

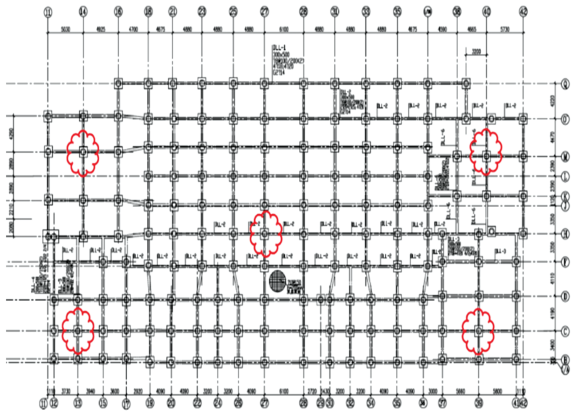


图7 隔震层传感器平面分布图

Fig.7 Plane Distribution of Sensors in Isolation Storey



图8 部分传感器安装实例图

Fig.8 Illustration of Some Installed Sensors

传感器的采样频率及功能如表2所示,除了布设传感器硬件设备,还开发了相应的软件系统,此系统也是南京博物院建筑结构安全智慧诊断云平台系统中的下位机子系统,该子系统采用Python语言开发,界面如图9所示。子系统部署于南京博物院本地机房,一方面便于直接控制各类传感器数据的采集和管理;另一方面也利于服务南京博物院内部建筑结构维护相关技术人员。此类人员需要了解详细的结构状态信息,以便于对南京博物院老大殿的结构安全性进行专业的分析,此类信息通常为20 Hz(即每秒20个数据采样点),数据量较大且详细。图9所示呈现了20 Hz结构振动信息的实时波形图,同时子系统还能对这些实时数据进行统计分析,如图10所示。

应用BIM、实景三维技术开发了南京博物院建筑结构安全智慧诊断云平台系统,系统采用B/S架构,该系统部署于云端即上位机,上位机系统

的服务端采用Visual Studio C#开发,客户端采用Vue.js开发,客户端的三维引擎为CesiumJS。系统中老大殿的BIM和实景三维模型分别如图11和图12所示,应用前面的融合方法实现了二者的融合,结果如图13所示。将各种传感器与融合模型进行集成,结果如图14所示。

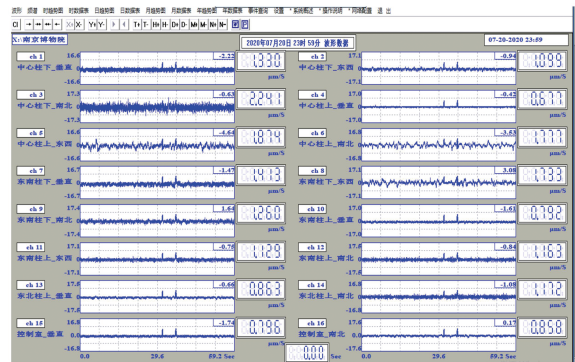


图9 下位机实时监控界面

Fig.9 Real-Time Monitor Interface of Lower Computer

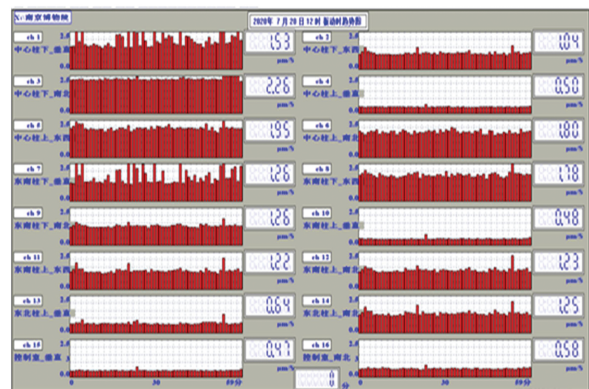


图10 实时振动数据统计图

Fig.10 Statistics of Real-Time Vibration Data

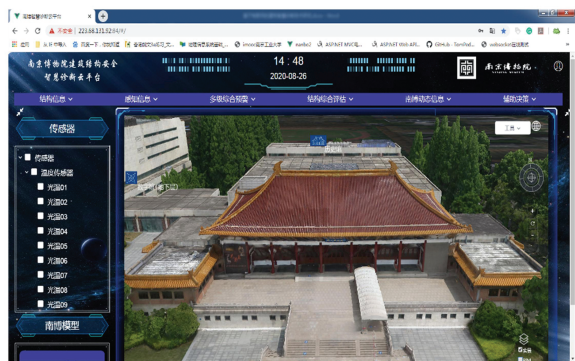


图11 南京博物院老大殿实景三维模型

Fig.11 Reality 3D Model of Audience Hall in Nanjing Museum

上位机与下位机不同,其服务对象主要为南京博物院安全管理人员,而非专业的建筑结构安全维护人员,此类人员对于结构运行监测数据的

实时性要求相对低一些,反面对结构运行实时数据的趋势和变化更加关心,因此在上位机中提供的建筑结构实时监测数据是 2 min 抽稀压缩后的结构状态信息。该信息将实时采集到的结构状态信息以 2 min 为时间切片,计算该时间段内传感器采集的最大值、最小值、平均值和数据压缩时的当前值,如图 15 所示。图 15 中以表格格式(还可以以折线图、柱状图等格式)呈现了 2 min 切片的实时结构振动数据,该振动数据来源于 941 振动传感器,此传感器在下位机的采样频率为 20 Hz,虽然下位机每 5 s 打包上传一次数据,但上位机会累积 2 min 抽稀压缩一次,因此上位机中的数据更新频率为 2 min 一次。

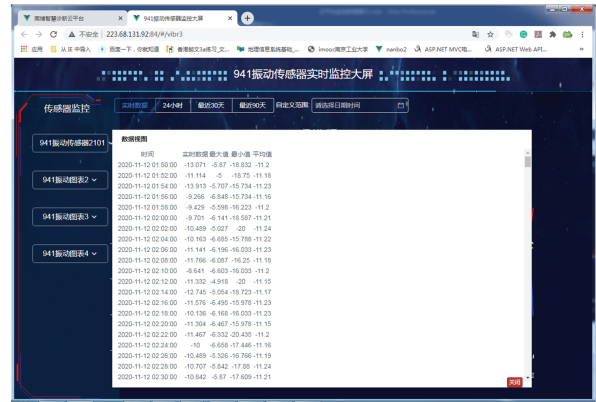


图 15 2 min 切片实时监控数据  
Fig.15 Real-Time Monitoring Data in 2 Minutes Time-Slicing

相比较下位机,这种压缩后的实时建筑状态信息同样能反映南京博物院建筑结构运行状态和变化趋势,也有利于非结构安全维护人员的理解和后继的预警分析。同时,从系统开发的角度,采用 2 min 时间切片数据也有利于压缩数据量,减轻 Web 系统开发中的数据压力。整体上,通过下位机和上位机系统合作运行,实现了对南京博物院老大殿的全天候实时动态监测,为南京博物院管理人员提供支撑。

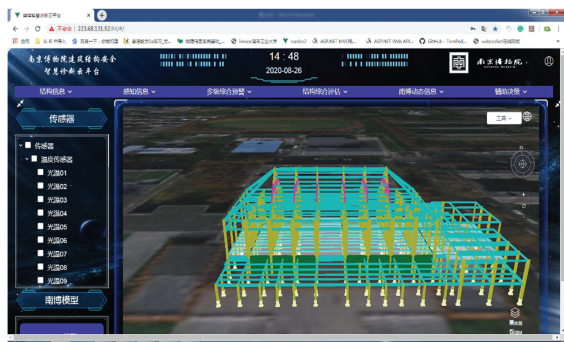


图 12 南京博物院老大殿 BIM 模型  
Fig.12 BIM Model of Audience Hall in Nanjing Museum

#### 4 结语

随着智慧城市的建设,相关技术已逐渐应用于各个领域,在此背景下将建筑结构领域的结构健康监测技术进行智慧化升级是一个具有良好研究潜力和巨大应用前景的工作。现有结构健康监测系统在大坝、桥梁等领域研究应用较多,对建筑结构监测存在传感器与结构细部融合不足、数据传输和管理困难等方面的问题。本文围绕上述问题,研究了面向动态监测的建筑模型,该模型综合 BIM、实景三维和物联网技术。具体实现时,先将建筑物 BIM 与实景三维模型融合,融合过程为:先将建筑物子构件化,接着对不同类型构件进行语义、几何和位置转换,然后将子构件融入实景三维模型,最后将传感器网作为子构件集成到融合模型。针对传感器时态数据传输、存储等需求,论述了数据传输架构,此架构先采用下位机管理不同类型的传感器数据的采集,并将传感器数据时间对齐,然后打包后上传至上位机。以 JSON 为基础,设计了传感器时态数据包传输协议,该协议以下位机固定时间缓冲为基础,实现变长传感器数据的封装,以 TCP/IP 协议

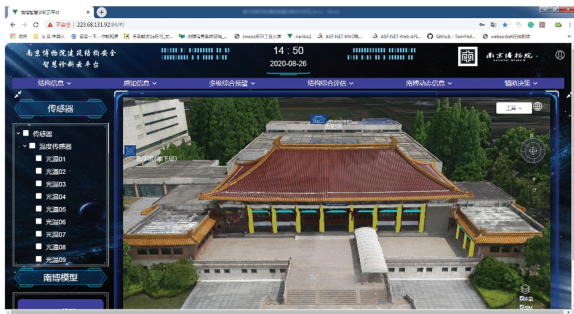


图 13 BIM 与实景三维融合结果  
Fig.13 Merging Result of BIM and 3D Reality Models

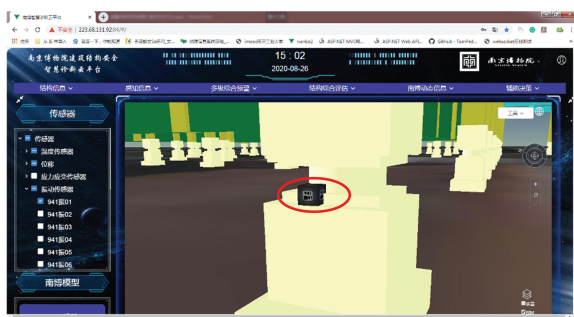


图 14 传感器与融合模型的集成  
Fig.14 Integration of Sensors and Fusion Model

为数据链路通道实现了数据的传输。上位机结合数据显示和分析需要,分别以2 min和1 h的固定时间切片对接收到的传感器数据进行压缩与重组,实现时态数据的管理。分别采用Python、C#、Vue.js等开发语言,结合南京博物院老大殿监测和智慧诊断需要,开发了南京博物院智慧诊断系统,该系统实现了南京博物院老大殿结构运行状态信息的采集、传输和监控等功能,服务于南京博物院运营管理需要。目前,该系统仍处于上线初期,相关结构监测数据累积仍然不足,后期随着历史监测数据的增加,未来将进一步应用大数据分析方法对历史数据进行分析与挖掘,形成更加智能的方法与应用。

致谢:感谢南京工业大学博士研究生石晟和硕士研究生周海军、卜兰、陈洁对本文实验与撰写提供的帮助。

### 参 考 文 献

- [1] Yang Zhenwei. Research on Optimal Sensor Placement for Large-Span Spatial Structure Health Monitoring System [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019(杨振伟. 大跨空间结构健康监测系统传感器优化布置研究[D]. 大连:大连理工大学, 2019)
- [2] Li Hui, Zhou Feng, Zhu Yanhuang, et al. An Analysis of Monitored and Computed Strain of the National Aquatics Center in the States of Unloading and Daily Use[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(3):1-9(李惠,周峰,朱焰煌,等. 国家游泳中心钢结构施工卸载过程及运营期间应变健康监测及计算模拟分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3):1-9)
- [3] Abruzzese D, Micheletti A, Tiero A, et al. IoT Sensors for Modern Structural Health Monitoring: A New Frontier [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2020 (25): 378-385
- [4] Zhang Lixiao, Qiu Guoyang, Chen Zhishou. Structural Health Monitoring Methods of Cables in Cable-Stayed Bridge: A Review[J]. *Measurement*, 2021, 168(108 343):1-7
- [5] Zhou Shumei, Bao Yuequan, Li Hui. Optimal Sensor Placement Based on Substructure Sensitivity Analysis[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(4):242-247(周述美,鲍跃全,李惠. 基于子结构灵敏度分析的传感器优化布置[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4):242-247)
- [6] Gómez J, Casas R J, Villalba B S. Structural Health Monitoring with Distributed Optical Fiber Sensors of Tunnel Lining Affected by Nearby Construction Activity [J]. *Automation in Construction*, 2020, 117(103 261):1-18
- [7] Pan Yi, Liu Yangliang, Huang Chen, et al. A Review of Structural Health Monitoring of Large Railway Stations[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(1):70-80(潘毅,刘扬良,黄晨,等. 大型铁路站房结构健康监测研究现状评述[J]. 土木与环境工程学报, 2020, 42(1):70-80)
- [8] Li Deren, Gong Jianya, Shao Zhenfeng. From Digital Earth to Smart Earth[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(2):127-132(李德仁,龚健雅,邵振峰. 从数字地球到智慧地球[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(2):127-132)
- [9] Li Deren. Brain Cognition and Spatial Cognition: On Integration of Geo-spatial Big Data and Artificial Intelligence[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12):1 761-1 767(李德仁. 脑认知与空间认知:论空间大数据与人工智能的集成[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12):1 761-1 767)
- [10] Sun Limin, Shang Zhiqiang, Xia ye. Development and Prospect of Bridge Structural Health Monitoring in the Context of Big Data[J]. *China Journal Highway Transport*, 2019, 32(11):1-20(孙利民,尚志强,夏焯. 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)
- [11] Li Qingquan, Li Deren. Big Data GIS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(6):641-644(李清泉,李德仁. 大数据GIS[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(6):641-644)
- [12] Fang Zhixiang. Thinking and Challenges of Crow Dynamics Observation from the Perspectives of Public Health and Public Security[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12):1 847-1 856(方志祥. 公共卫生与安全应急视角下人群动态的观测思考与挑战[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(12):1 847-1 856)
- [13] Chen Nengcheng, Xiao Changjiang, Yang Chao, et al. Technology and Application of the Fusion Service of Geospatial Sensor Web[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(1):11-20(陈能成,肖长江,杨超,等. 地理空间传感网融合服务技术与应用[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(1):11-20)
- [14] Salehi A S, Yitmen I. Modeling and Analysis of the Impact of BIM-based Field Data Capturing Technologies on Automated Construction Progress Monitoring [J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, 16:1 669-1 685

## A Real-Time Dynamic Monitoring Method for Complex Building Applying Sensor Network and Reality 3D Model

XU Jinghai<sup>1</sup> DU Dongsheng<sup>2</sup> LI Zhijun<sup>2</sup> WANG Shuguang<sup>2</sup>

1 College of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

2 College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

**Abstract: Objectives:** Structural health dynamic monitoring is one of the most important jobs in the management and maintenance of key buildings, in which how to more effectively collecting, transferring, and managing temporal monitoring data are difficult issues. **Methods:** A building information model corresponding to real-time and dynamic monitoring is presented, which realizes the merge of building information model (BIM)/reality 3D model and monitoring sensor network. Firstly, transferring and managing method and framework of the temporal-monitoring data of building are discussed and applied, in which the sensor data are aligned and packaged in temporal dimension in the lower computer. Then the transfer protocol based on JSON (JavaScript Object Notation), the data compression, and the re-organization method are introduced. In the upper computer, we relate database management methods of temporal sensor data. Finally, we use the audience hall of Nanjing Museum as a case study and develop a corresponding monitoring system. The feasibility and operation of the proposed method are validated and displayed in the case. **Results:** (1)The new building information model merges the BIM and reality 3D model, which suits the dynamic monitoring of the complex building. The BIM presents the detailed components (building inside) information as a base for monitoring the sensor network. And reality 3D model adjusts coordination information of BIM to geographic location. (2)The framework of transferring sensor information includes an upper computer level, a lower computer level that can effectively collect and transfer monitoring information of complex building. Transfer protocol based on JSON working between upper computer level and lower computer level is extensible. (3)The temporal monitoring data with high speed and big volume have been significantly compressed and stored in the temporal database through the proposed management method. **Conclusions:** The integrated building information model, corresponding monitoring information transferring, and management method are useful to complex building monitoring. Currently, the system of the case just online shortly, more and more sensor data will be accumulated in the future and will be used to optimize and improve analysis methods. **Key words:** smart city; building structural real-time monitoring; temporal data; sensor network; building information model

**First author:** XU Jinghai, PhD, professor, specializes in smart city, synthetical disaster mitigation with spatial information. E-mail: xu\_jing\_hai@163.com

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China(2018YFC0704300); Special Fund for Earthquake Resistance of Jiangsu Province(2019B2461-25); the Science and Technology Project of Jiangsu Construction System in 2018(2018JH011).

**引文格式:** XU Jinghai, DU Dongsheng, LI Zhijun, et al. A Real-Time Dynamic Monitoring Method for Complex Building Applying Sensor Network and Reality 3D Model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(5): 630-639. DOI:10.13203/j.whugis20200462(徐敬海, 杜东升, 李枝军, 等. 一种应用传感器网和实景三维模型的复杂建筑物实时动态监测方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(5): 630-639. DOI:10.13203/j.whugis20200462)