

# 基于 BIM 平台的结构健康监测系统集成方法研究

孙 丽<sup>1</sup>,徐自强<sup>1</sup>,金 峤<sup>1</sup>,张春巍<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266033)

**摘 要:**阐述了基于 BIM 平台的结构健康监测系统的集成方法,该方法依托 BIM 平台的信息整合能力,在 BIM 模型中实现实时监测数据的可视化表达以及建筑物在设计、施工、运营维护的各个阶段监测信息互通,并配套其他系统模块实现超限预警、构件剩余寿命预测等功能。BIM 技术与结构健康监测相结合,对未来智能楼宇、智慧城市的建设具有支撑作用。

**关键词:**结构健康监测;建筑信息模型(BIM);可视化监测;智能构件

**中图分类号:**TP274      **文献标志码:**A

大型建筑结构尤其像城市地下综合管廊等公共基础设施的服役期限长达几十年甚至上百年。由于周围自然环境侵蚀、材料疲劳效应以及老化等不利因素的影响,将无法避免地发生结构抗力衰减并逐步积累损伤,进而影响其在正常环境中的工作性能,降低其抵抗自然灾害的能力,甚至引发重大事故。因此,如何对大型土木工程结构采取有效的健康监测,如何对其安全情况进行评估,并在此基础上进行损伤控制和修复成为亟待解决的问题。然而,由于建筑结构的大型化、复杂化,造成了监测所需测点极多、监测方案极其复杂、监测数据海量等问题。此外,由于大型建筑项目的设计、施工和运营维护过程具有设计、施工专业性强的特点,协同工作数据量大,专业间、上下游间数据交换难等问题相继出现。对此,研究如何解决海量监测数据及时准确地交互、解析及显示等问题,对结构健

康监测技术的工程适用性及可操作性具有重大意义。在信息化技术的背景下,为解决以上问题,笔者深刻剖析我国结构健康监测现状以及 BIM 技术在实现信息可视化方面的优势,并以此为基础,提出在 BIM 软件的构架内集成结构健康监测系统(SHM-BIM)的方法。

## 一、我国结构健康监测系统的研究概况

早在 20 世纪 50 年代,结构健康监测就主要用于监测桥梁的健康状态,随后在建筑结构方面也开始沿用。90 年代初,我国初步建立了结构健康监测系统,并将其运用在一些重要的大坝和桥梁上,例如香港的青马大桥<sup>[1]</sup>。在建筑结构方面,彭炎华<sup>[2]</sup>进行了超高层建筑高强复合地基应力应变测试,开展复合地基的信息化监测。

随着国内外建筑向体量大型化、结构复

收稿日期:2017-03-15  
基金项目:国家自然科学基金项目(51578347);辽宁省高等学校创新团队项目(LT2015023);辽宁省自然科学基金项目(2015020578);辽宁省“百千万人才工程”资助项目(2014921045);沈阳市科技局科技创新专项基金项目(F14-192-4-00)  
作者简介:孙丽(1974—),女,辽宁营口人,教授。

杂化趋势转变,越来越多的监测专家着手将信息化技术应用于结构健康监测领域,以实现监测数据的三维可视化,并提高监测数据的分析速度和缺陷的识别效率。肖鹏<sup>[3]</sup>采用 VB 语言对 Auto CAD 进行二次开发,将模型显示界面整合入监测系统的操作界面中,构建实现了监测信息可视化的远程监测系统。谢全宁<sup>[4]</sup>采用 VC 6.0 开发平台,在构建桥梁结构健康监测系统时引入了三维图像技术。唐练<sup>[5]</sup>遵照 MVC 的设计模式,设计了具有数据查询与分析功能插件的结构健康监测三维可视化系统,该系统提供了具有较强真实感的结构模型及场景。此外,监测信息管理领域逐步增加对数据库技术的研究和运用。林健富等<sup>[6]</sup>研发了基于 Oracle 数据库的监测数据库。马锦萍<sup>[7]</sup>设计了一种采用 SQL Server 数据库的历史监测数据管理系统。张伟<sup>[8]</sup>开发了用于结构变形监测的 DMIMAS 数据库管理系统。

综上,目前关于监测信息可视化的研究虽有进展,但由于各方面因素均不能利用现有的结构模型,需再次建模,且存在界面交互性差、管理效率低等问题,均难以达到监测信息可视化的要求。

## 二、BIM 技术在结构健康监测系统中的适用性

建筑信息模型 ( Building Information Modeling, BIM) 的产生为建筑结构健康监测系统实现以上功能提供了新的契机。BIM 技术采用流程的理念,通过建立虚拟三维模型,将建筑工程的图形化与非图形化资料进行了整合,从而大大减少了建筑全生命周期中各阶段间工程资料转移造成的信息遗漏问题。在 BIM 环境中实现监测数据的可视化,可大大提高监测信息的可读性,降低信息理解难度,提高事故处理效率。对此, BIM 平台可以作为监测信息管理平台,与结构健康监测系统相整合,通过运用其强大的信息管理能力,使监测系统信息管理水平得到显著提高。

## 三、基于 BIM 平台的三维可视化监测系统 ( SHM – BIM ) 设计

针对复杂结构工程分别开展测点布置设计以及 BIM 数字化模型建设的工作。通过开发结构健康监测模块与 BIM 软件的数据通信接口,实现监测数据实时共享。同时,利用 BIM 平台信息高度集成化的优势提升在结构全寿命安全监测前提下的建筑设计、施工和管理水平。

### 1. 设计目标

本系统依托于 BIM 平台,以传感器阵列响应、智能分析和超限预警为主线,软硬件相结合,构建 SHM – BIM 系统,以实现对施工和运营阶段建筑结构的在线监测。通过对城市建筑物以及构筑物损伤敏感特征值的实时动态监控及数据分析,确定结构的健康状态,旨在构建一个即时、准确、直观的结构健康监测平台。基于 BIM 平台的动态工程监测数据库由本监测系统框架内的各个模块共用,以实现 3D 可视化的结构健康监测。

SHM – BIM 结合监测技术规范、信息表达规范与结构健康监测系统设计标准,分为感应层、交互层和核心层 3 个层面 ( 见图 1 ),用以确保各单位数据共享和资源互通。其中,感应层主要由各类传感元件构成,通过把传感器安放到所需监测建筑物及构筑物的预设部位,实时获取结构动力特性、加速度响应、位移响应、地震响应、风荷载及其响应、构件应力应变、温度、构件裂缝、构件腐蚀等信息;交互层主要由各类传输设备构成,分为有线传输和无线传输两类,其传输方式的选取对系统运行稳定性和可靠性具有重要影响;核心层主要由各终端软件组成,用以接收采集层传递的数据,实现对其整理归类入库、分析预警和图形化表达等功能。

### 2. 系统主要功能模块

根据民用建筑、工业建筑以及桥梁、隧道、公路、地下管廊等构筑物的结构健康监测的要求,采用 SHM – BIM 系统可实现对被测结构自身特性以及受激励下响应的监测。为

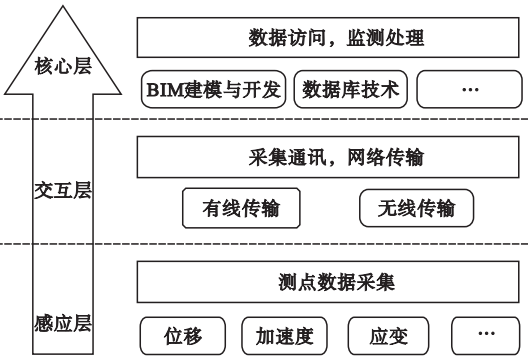


图 1 SHM - BIM 系统结构层类模型

实现对建筑结构健康状况的智能监测, SHM - BIM系统设计了包括系统信息共享、监测数据管理、三维可视化、建筑诊断与风险评估、预警系统以及信息拓展在内的六大功能模块(见图 2)。

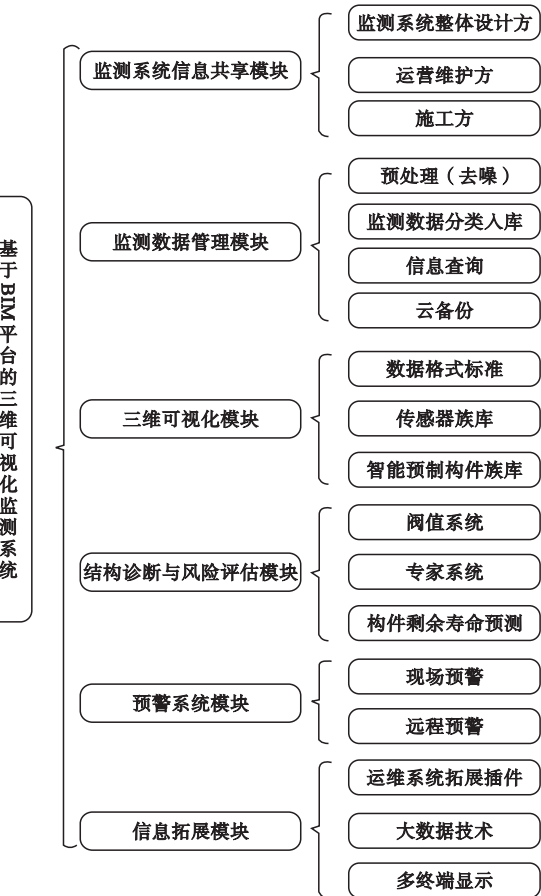


图 2 基于 BIM 平台的三维可视化监测系统框架结构图

(1)监测系统信息共享。结构健康监测系统内嵌于 BIM 平台中,利用 BIM 平台自身的 API 开发环境开发两者信息传递接口,

运用 BIM 平台自身信息整合功能将监测过程中的各方参数与监测数据进行互联互通,提高监测信息交互的即时性和准确性。设计院或者三方的监测单位可将测点的监测位置、测点所用传感器类别、传感器特征系数和测点处注意事项等信息包含在所创建的模型项目中。施工方作业阶段,BIM 模型项目中所包含的测点位置信息、传感器相关属性都将被直观表达,便于施工单位预留出测点监测面,增进施工方与监测方之间的交流,减少误会损失。在运营、维护阶段,采用 BIM 的信息分享机制,除了将施工与运营两阶段的监测工作有机结合,还可采用 BIM 的信息拓展平台将门禁、电梯、消防等系统整合进来,实现智能建筑监测管控一体化。

(2)监测数据管理。通过集线或者无线接收装置,系统可实时采集传感器监测到的结构健康安全数据信息,进而由交互层将获取的信息传输到 BIM 数据库中,同时对监测数据进行基于小波变换等分析方法的预处理,用来数据去噪。最后,将预处理后的数据通过云技术存储在云端网络服务器中,为拥有权限的用户提供实时共享查询所需信息。

(3)三维可视化。结构健康监测信息可视化是利用计算机技术,将抽象晦涩的信息图形化表达,并进行交互处理的技术。监测信息的可视化能够对建筑结构各部分性状进行在线直观展示。此外,健康监测系统的运行状态、安全性评估与预警均可被直观显示。

大型建筑结构的健康监测往往伴随着众多测点以及海量监测信息,这使传统结构健康监测系统记录式监测方式的操作变得极其复杂。同时,造成数据分析效率低下。SHM - BIM系统具备三维可视化监测技术,可解决海量监测点和监测数据繁冗的问题,降低操作人员对数据的理解难度。运用 BIM 软件集成的 API 开发工具,开发一种用以实现监测数据可视化的插件。插件应具备传感器自动监测、测点设置与查找、属性查询、监测数据查询与管理 and 文件导出等功能,使监测信息与建筑模型进行交互,实现监测

数据自动采集与显示、信息共享、数据处理分析和系统自动预警等功能。

①数据格式标准。由于监测传感器和配套设备的多样性,其输出的数据类型也具有多样性,将数据流传输到 BIM 模型中需要对接收到的数据进行预处理。统一的数据格式对该系统的运用、开发和推广具有极其深远的作用。鉴于现有的各种数据类型,考虑将 BIM 模型与监测数据进行集成,以及 BIM 模

型的导出他用,笔者推荐采用工业基础类标准,即 1997 年国际协作联盟发布的 IFC 标准,目的是实现项目各方、各阶段 BIM 应用软件之间信息的交换和共享<sup>[9]</sup>,采用 IFC 标准可以大大简化项目各方的信息交互流程,提高信息传输效率和准确性(见图 3)。对此,可以运用 IFC 格式标准,将监测数据集成到 BIM 中,从而实现在 BIM 平台上反馈结构健康监测信息。

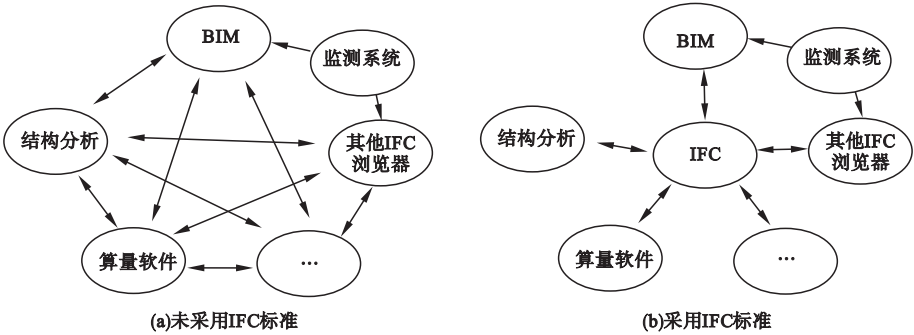


图 3 IFC 标准引起的数据交换变化

另外,考虑到建筑结构运营维护监测时,建筑模型与测点布置均已敲定成型,为节省设备资源,降低监测硬件配置标准,大可不必使用 BIM 建模的全部建模功能,可以通过 IFC 格式,直接将模型及监测数据导入其他 IFC 模型只读软件,用以实现监测系统的轻量化,并且使系统的拓展性得以大幅度提高。

②传感器族库。BIM 中族的概念是一个

包含通用属性集和相关图形表示的图元组。依照相关规范建立传感器族库,将常见类型的传感器制成族,便于在设计院给出的 BIM 模型中直接添加测点,不需重复建模(见图 4)。此外,传感器族库的建立与完善,不仅将各类传感器的参数规范化,还可以将各类传感器获取监测数据的数据格式进行统一化,从而便于监测系统的数据端口的使用与开发。

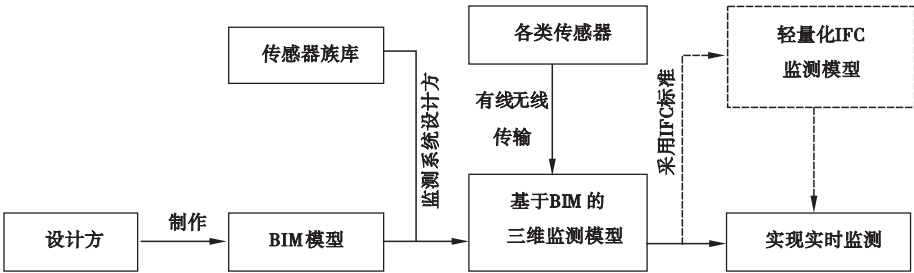


图 4 基于 BIM 的三维监测模型建立过程

③智能预制构件族库。随着建筑结构建造技术的不断完善,装配式建筑因具有建造效率高、机械化施工水平高、成品质量好、受气候条件影响小等优点,也因此成为建筑业研究的热点。若将传感器预埋入装配式构件,并在构件表面预留数据交换端口,从而形成智能预制构件,可显著提高传感器在施工

过程中的存活率,对大型预制结构的健康监测具有促进作用。

通过制定相关行业规范,使得预制智能构件达到一定的标准,并将其编制入 BIM 标准构件族库,使装配式建筑在设计时可直接选用包含传感器的标准预制智能构件建立 BIM 模型,并可直接将该模型作为结构健康监



测的模型,不需要二次添加传感器,以此提高设计效率(见图 5)。此外,智能构件标准化亦便于预制厂家提高预制工艺和提升构件质量。

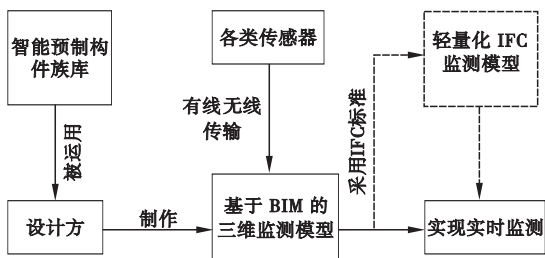


图 5 采用智能预制构件库的基于 BIM 的装配式建筑三维监测模型建立过程

(4) 结构诊断与风险评估。对于可通过单个损伤敏感特征值进行安全判定的测点,本系统采用阈值体系控制。每个测点的预警阈值可按以下 3 方面进行取值。

① 实测统计值。根据监测数据进行简单数据处理,得到各个预警指标的实测值,以各指标的实测统计值作为预警提示阈值。一般而言,实测统计值应取至少具备 95% 保证率的统计值。

② 最不利工况响应值。采用有限元分析软件模拟建筑结构在运营期间的受力状态,并在正常使用极限状态下充分考虑温度变化、混凝土收缩和徐变、活载等设计荷载的组合情况,取所有荷载组合下的最不利内力值作为预警极限阈值。

③ 规范限值。该值遵照国家或地方颁布的相关规范和规程测定,是对阈值取值的最苛刻要求,一般不允许结构预警指标达到或十分接近规范的限值<sup>[10]</sup>。

对于某些测点超过阈值,但不能直接判断结构安全现状的情况,系统将激活并连线专家系统。专家系统为每位专家提供独立的高权限账号,可以全权访问查询监测数据库,并通过系统的三维可视化功能,直观地对监测结构进行认知。通过 BIM 数据库可以获得结构几何信息、材料信息、边界条件信息等,可实现远程对结构安全性状作出诊断,提高了对突发事件的处理效率与准确性。此外,专家系统还会将问题处理意见存入专家

处理方案数据库,为今后的类似事件处理提供参考依据。

(5) 预警系统。根据结构诊断与风险评估模块的判定结果,预警系统分别采取亮灯、响铃、发送预警邮件等不同的预警措施,及时、准确地提示监测管理者,为被测结构安全性能提供保障。

(6) 信息拓展。BIM 平台的运用,使结构健康监测系统具备了数据拓展功能,便于监测系统的升级与功能的拓展。通过 BIM 平台自带的 API 开发平台,可以满足特种建筑的特殊监测需求。

通过构建各种类型的族库与添加运营维护管理数据库,可以将建筑物使用阶段的监控、通信、通风、照明和电梯等系统的运营维护与该监测系统融合,实现一套系统多重利用,充分提高模型利用率。此外,可针对具体工程构建结构安全指标体系和适用性指标体系模块,运用模糊综合评价等评价方法对监测到的各种指标数据进行分析,从而全面准确地评估被测建筑结构的适用性、安全性和耐久性。

随着“互联网+”时代的到来,将监测数据与处理结果进行云同步,开发与本系统相匹配的移动 APP,可实现移动端的实时监测。通过智能手机等任何可以接入因特网的移动设备,实时查询监测数据,获取解决方案。同时,采用云计算的技术,建设单位并不需要自己购置高性能电脑终端,降低了运营成本。

综上所述,SHM-BIM 结构健康监测系統可对结构的安全性状进行全面、具体、智能、实时的在线监测。相关部门和监测技术人员可以通过 SHM-BIM 系统的数据信息共享模块,有针对性地监测对象的实时工作状态并进行协同工作,从而科学高效地决策建筑工程发生的异常状况。

## 四、结 语

提出实现 BIM 平台的结构安全监测系统与建筑信息化管理方法的一体化技术,运用 SHN-BIM 系统把结构设计、施工和运营

维护与结构健康监测、安全评定、实时结构分析等要素系统地集成在统一的数字化信息平台中,共享、传递和分析处理建筑结构生命周期内的全部信息,实现监测数据 3D 可视化表达,从而真正实现重大工程结构的全寿命设计、施工和运维管控以及全寿命结构灾变监测、评估、预警等两方面的协调与统一。此外,随着计算机能力的快速提升,未来可开发 BIM 软件与有限元软件之间的数据交互端口,可充分利用 BIM 平台的建模优势以及监测系统采集的结构实时响应数据,对建筑结构进行有限元实时分析,可对重大建筑进行实时精确监测。BIM 平台的数据整合能力与健康监测系统数据采集与分析能力的结合,是结构健康监测领域的一个重大进步,对未来智能楼宇、智慧城市的建设具有支撑作用。

参考文献:

[1] 刘正光. 青马大桥的初步监测结果:中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十三届年会议论文集(下册)[C]. 北京:中国土木工程学会,1998:11.

[2] 彭炎华. 某超高层建筑高强复合地基应力应变测试及受力特征分析[J]. 施工技术,2013(9):29-31.

[3] 肖鹏. 可视化远程结构健康监测预警系统开发[D]. 武汉:华中科技大学,2013.

[4] 谢全宁. 三维可视化桥梁远程健康监测系统的设计与实现[D]. 重庆:重庆大学,2007.

[5] 唐练. 插件式桥梁健康监测三维可视化系统研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.

[6] 林健富,程瀛,黄建亮,等. 大型建筑结构健康监测的海量数据处理与数据库开发研究[J]. 振动与冲击,2010(12):55-59.

[7] 马锦萍. 桥梁健康监测数据显示系统的设计与实现[D]. 太原:太原理工大学,2013.

[8] 张伟. 海量变形监测数据集成管理与分析系统的研制[D]. 成都:西南交通大学,2014.

[9] NAKAMURA K, OTOSHI A, BABAGUCHI N. Development of an industry foundation classes assembly viewer[J]. Journal of computing in civil engineering,2006,20(2):121-131.

[10] 袁昆. 桥梁健康监测结构预警关键问题研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.

Research on Integration Method of Structural Health Monitoring System Based on BIM Platform

SUN Li<sup>1</sup>,XU Ziqiang<sup>1</sup>,JIN Qiao<sup>1</sup>,ZHANG Chunwei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering,Shenyang Jianzhu University,Shenyang 110168,China;2. School of Civil Engineering,Qingdao University of Technology,Qingdao 266520,China)

**Abstract:**The integration method of structural health monitoring system(SHM)based on Building Information Model(BIM)platform is expounded in this paper,which relies on the information integration ability of BIM platform. In BIM model,the visualization of data real-time monitoring and monitoring information exchange in various stages of building design,construction,operation and maintenance are realized. In addition,through supporting other system modules,this system will realize the function of transfinite warning and residual life prediction of components. The combination of BIM technology and structural health monitoring will support the construction of intelligent buildings and smart cities.

**Key words:**structural health monitoring; Building Information Model(BIM); visual monitoring; intelligent components