

# 上海中心大厦结构健康监测软件集成设计及应用

胡 笏<sup>1</sup>, 李 晗<sup>1</sup>, 杨晖柱<sup>2</sup>, 张其林<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海同磊土木工程技术有限公司, 上海 200433)

**摘要:** 论述了上海中心大厦结构健康监测软件系统的集成框架及实现要点. 首先提出了由数据采集端、数据发布端和数据应用端构成的软件集成框架. 继而结合大厦监测硬件系统的布置特点, 论述了各部分功能的关键实现技术和特殊部署, 数据管理系统通过 2 层数据库结构实现监测信息集成; 远程发布系统基于 B/S(浏览器/服务器)模式实现了监测数据的远程可视化查询和获取; 结构监测/分析/评估软件 SMAE 基于数据发布接口实现了模态识别与有限元方法的集成分析和结构动力特性的对比评估. 最后结合实例说明了系统应用效果. 软件系统灵活地实现了功能集成, 且易于扩展和重构, 具有一定的通用性.

**关键词:** 结构健康监测; 超高层结构; 软件集成; 远程数据发布; 模态识别

**中图分类号:** TP274

**文献标志码:** A

visualization. Utilizing the on-line data port, a structure modal analysis system named structural monitor/analysis/evaluation software system (SMAE) is developed which can execute modal analysis and finite element dynamic characteristics analysis separately to provide a visualized comparison of the corresponding results. The result helps to the assessment of the dynamic behaviour of structure. Finally, the system effects are illustrated by examples. This prototype system is flexible on function integration and easy to expend and rebuild.

**Key words:** structural health monitoring (SHM); super-tall building; software integration; remote data publishing; modal analysis

## Integrated Design and Application of Structural Health Monitoring Software System of Shanghai Tower

HU Jia<sup>1</sup>, LI Han<sup>1</sup>, YANG Hui-zhu<sup>2</sup>, ZHANG Qilin<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Tonglei Civil Engineering Technology Co. Ltd., Shanghai 200433, China)

**Abstract:** This paper introduces the prototype software system for structural health monitoring (SHM) of Shanghai Tower. The core conception of this prototype system is the integrated framework, composed of the data acquisition layer, the data publication layer and the data application layer. According to the characteristics of the hardware arrangement of SHM system of Shanghai Tower, the particular deployment and implementation of each layer is discussed. A two-tier database structure is applied to data management system to store data centralized. A B/S model data public system is established, providing web-based data accessing and

在土木工程领域, 结构健康监测系统最早被应用在大跨度桥梁结构的长期监测中, 主要用于监测环境荷载、结构振动和局部应力, 以控制施工质量、验证设计假定和评定结构安全状态<sup>[1-2]</sup>. 近 20 年来, 结构健康监测系统的应用逐步拓展到高层建筑中. 其中, 1995 年, 新加坡在一幢 66 层办公楼中安装了应变计、加速计和 GPS(global positioning system)用以监测结构的静力和动力特性<sup>[3]</sup>; 世界最高建筑“迪拜塔”中设置了加速度、位移和环境监测系统, 用以观测结构在风或地震作用下的动力响应<sup>[4]</sup>; 广州电视新塔是国内首个设置了较完备健康监测系统的超高层结构<sup>[5]</sup>.

目前国内外在结构健康监测领域的研究主要集中在传感器系统布置优化、监测结果分析和安全评估方法上<sup>[6]</sup>. 在结构健康监测系统方面, 前人从理论层面上对系统的设计原则和功能目标做了定义<sup>[7-8]</sup>, 也讨论了工程应用中的技术创新和实践效果<sup>[3-5]</sup>. 然而, 之前的研究往往将各部分功能作为独立的子系

收稿日期: 2013-05-23

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划(11XD1404900)

第一作者: 胡 笏(1983—), 女, 博士生, 主要研究方向为建筑工程信息化与土木工程计算机仿真. E-mail: 2008iviehj@tongji.edu.cn

通讯作者: 张其林(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构与土木工程计算机仿真.

E-mail: zhangqilin@tongji.edu.cn

统,较少讨论模块间的配合与协同. 结构健康监测系统是涉及传感器技术、数据传输技术、数据处理技术、数据存储技术、图形技术等多领域技术的复杂集成系统,其中计算机软件系统承担了包括采集控制、数据存储、数据发布和分析评估等在内的多项重要功能,对整个系统自动化协同工作起到关键作用. 本文从系统集成的角度出发,讨论了上海中心大厦结构健康监测软件系统设计,并以如何保证监测数据的安全存储、实时发布和应用为集成目标论述了软件系统实现的关键技术.

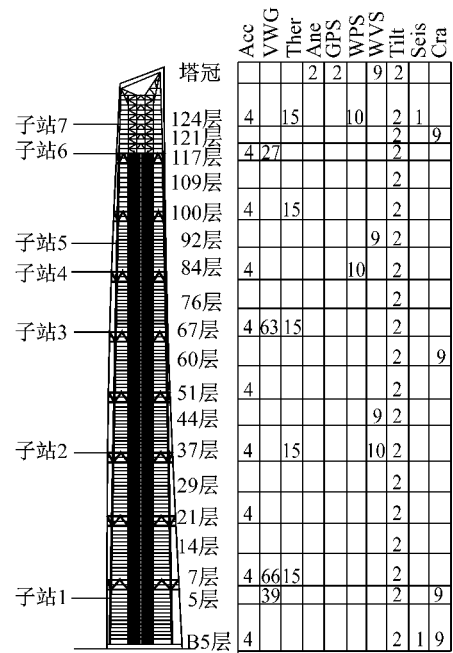
### 1 监测对象与监测方案

上海中心大厦建筑高度为 632 m,结构内部设置核心筒,外围为型钢外包混凝土巨型柱,并结合机电层区布置了 6 道 2 层高外伸臂桁架和 8 道箱型空间环带桁架,由环带桁架和巨柱形成外围巨型框架,从而组成“巨型框架-核心筒-外伸臂”结构体系. 由于上海中心大厦结构的复杂性和重要性,对结构实施了从施工阶段到运营阶段的长期监测,以建立全面的结构健康监测数据库,为结构的施工指导、设计验证和性能评估提供支持.

为了全面掌握上海中心大厦施工及运营期间的结构状态参数,对包括荷载及荷载作用下的结构响应在内的 10 个分项实施了监测,分别是:结构顶部风速及风向、外幕墙风压、外幕墙风振响应、位移、加速度、构件内力、温度、构件裂缝、标高和地震作用.

图 1 显示了大厦结构健康监测的布置方案和传感器分布情况,其中标高监测为手动测量,钢筋腐蚀监测为定期检测,其他项目均由传感器在采集系统控制下统一自动采集. 从采集频度出发,监测内容可分为动态实时监测、静态实时监测和条件触发监测 3 类. 对于监测数据随时间变化频率高的监测项目如风环境、结构水平位移及竖向倾角等采用动态实时监测;对于构件的应变和开裂等随时间变化相对缓慢的结构特性采用静态实时监测,数据采集周期以天为单位;另外,对于地震及风振监测,只对强震或强风下的荷载时程及结构振动响应时程进行记录.

由于系统传感器数量众多,为保证数据传输的信号强度和效率,设置了 7 个采集子站和 1 个数据采集总站. 子站将各类传感器信号统一调制为数字信号,并通过控制器和路由器将数据集中发送到总站采集服务器.



Acc—加速度计; Tilt—倾角仪; Seis—强震仪;  
VWG—弦式应变计; WPS—风压传感器; Gra—裂缝传感器;  
Ther—温度传感器; WVS—风振传感器; Ane—风速计

图 1 传感器及子站布置

Fig. 1 Distribution of sensors and sub-stations

针对上海中心大厦结构健康监测动态采集的特殊要求,采集系统在以下方面进行了特殊设计:

(1)对于动态实时采集,时钟同步是采集控制中的重要问题. 为解决这一问题,采集单元中配置了晶振时钟芯片,由采集中心服务器通过系统广播实现定时的时间校对,以消除各采集器间的时间差异,使同步采集的时间误差控制在毫秒级别.

(2)由于动态实时采集频率高、数据量大,数据传输需要兼顾实时性和传输容量. 采集器具有 128 kB 数据存储功能,实时采集先形成数据包缓存在采集器中,再由控制系统以时分复用方式循环读取,从而降低了数据写入频率和系统开销.

(3)通过软件设置采集阈值,并通过嵌入式编程实现采集器阈值判断,控制阈值采集;通过软件设置预警阈值,并由软件程序进行阈值判断实现异常报警.

(4)作为监测数据的直接来源,采集控制系统将各项监测数据以测点为单位存储到数据库中,保证了数据存储的统一.

上述方案和措施在硬件上保证了监测数据的正常采集和传输,进一步,硬件系统的驱动以及监测数据的存储、发布、处理等工作均由软件系统完成.

## 2 软件集成系统框架设计

软件系统采用了由数据采集端、数据发布端与数据应用端构成的集成框架,包括 4 个相辅相成的子模块,分别是采集控制软件、数据管理系统、远程监测网站和模态识别分析评估软件,如图 2 所示。其中,数据管理系统由原始数据库、发布数据库与数据

备份接口组成,是集成系统的数据基础和桥梁;数据采集端由采集控制系统与原始数据库组成,是集成系统的数据输入端;数据发布端由发布数据库与远程监测网站组成,构成面向广域网的数据发布端;数据应用端是基于数据发布接口的本地离线分析软件,模态分析评估系统是该框架下的一个应用实例。以下详细阐述各模块的功能职责和相互协作方式。

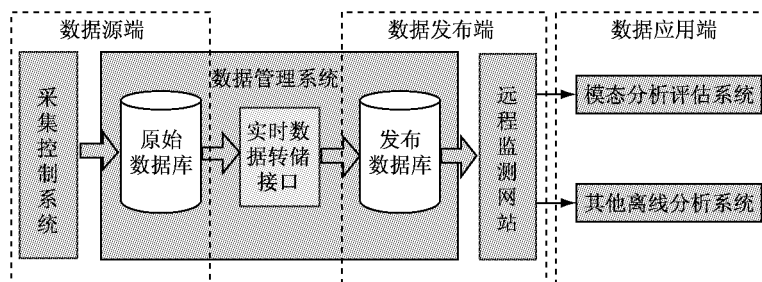


图 2 软件系统集成框架

Fig. 2 Integration framework of software system

作为集成软件系统的一部分,采集控制系统负责设置采集方案,集中控制采集硬件设备,读取监测数据并以指定的格式产生数据输出。采集控制软件一般由采集设备供应商配套提供,其数据输出方式根据软件不同而有差异,但一般均提供文本文件、Excel 表格和数据库输出 3 种方式。作为数据来源,采集控制软件的数据输出和存储方式须经过恰当的选择。考虑到上海中心结构健康监测的数据量巨大,直接选用数据库保存原始监测数据更安全可靠。本项目设备供应商提供的采集控制软件统一以每测点一表的方式进行数据库存储。这种存储方式简单、通用性强,但数据量冗余大且不利于查询。因此根据采集数据特点和需求重新设计了发布数据库,并开发了数据转储接口,实现数据库间的备份。

数据管理系统负责原始数据库与发布数据库的管理维护。如前所述,发布数据库与原始数据库的职责不同,原始数据库直接接收采集控制系统传来的全部数据,要为数据不间断采集提供保证,其设计重点是保证足够的存储空间;发布数据库的职责是数据备份和数据发布,其设计重点是优化结构以减少冗余并提高查询效率。原始数据库通过实时数据转储接口将数据定时拷贝到发布数据库中,其本身只保存最近 3 个月的数据,更长时间的数据存储于发布数据库。

选择基于浏览器/服务器(Browser/Server, B/S)模式实现监测数据网站查询主要由于考虑以下几方面:浏览器客户端具有通用性,系统更新在服务器

端进行,易于升级维护;网页开发技术成熟,能够实现多种形式的交互查询和数据显示;能够在服务器端完成大量监测数据的处理操作,只返回处理结果,减少数据传输量,提高访问效率;功能灵活,易于集成,通过订制数据下载功能可作为其他离线监测分析软件的数据获取接口。

模态分析评估软件是利用上述数据接口开发的模态识别及分析软件,该系统整合了同济大学开发的 3D3S 钢结构/空间结构设计软件,实现了结构动力特性的有限元计算与模态识别 2 种方法的集成分析和相互对比。

软件框架中各模块通过以上功能架构方式既能相互配合以达到整个健康监测系统自动化采集、传输、存储、发布、处理数据的集成效果,又实现了模块间的松散耦合,使功能模块易于替换、扩展和重构。以下详细讨论各模块设计及实现的关键技术。

## 3 系统关键模块的设计与实现

### 3.1 监测信息集成策略

监测数据集成主要通过由原始数据库与发布数据库构成的 2 层数据库结构实现。采集控制系统将从传感器得到的原始测量值直接保存到原始数据库,再由实时数据转储接口将原始数据库的数据备份到发布数据库,最后通过监测网站访问发布数据库实现数据的远程获取,从而实现监测数据从采集到获取的自动化集成。

因此,数据管理系统承担着数据存储、管理、备份、查询的任务,是实现系统信息集成的关键.考虑到数据对象本身并不复杂,但数据存储量较大,数据管理系统选用 SQL Server 2005 以提供并发控制、备份还原等数据库服务.

原始数据库采用每测点一表的方式进行存储,没有充分利用测点布置的规律,存在大量的冗余数据.因此仅将原始数据库作为数据的临时存储处,只保存最近 3 个月的数据,对历史数据进行定期清理,以保证连续采集所需的存储容量.

发布数据库保存了全部的历史数据和最新数据,为了压缩数据量节省存储空间,同时也为了更好地提供数据查询,发布数据库采取了一系列面向查询的设计和优化策略.

(1)动态监测数据表结构优化.将传感器数目较多的动态监测项目进行多表合并,减少对时间标签的重复存储.以加速度传感器为例,若同一测点沿 X,Y,Z 三向布置了加速度计,原始数据库将存储 3 个表,表内每一行数据都保存“时间标签”和“数值”2 个数据项.实际上,同一测点的多个加速度计是由同一个采集器控制采集的,因此一次采集中 X,Y,Z 三向加速度数值应具有相同的时间标签,根据这一特点对数据表进行合并.经过优化,加速度数据所占存储空间可减少约 1/3.

(2)静态监测数据表结构优化.以应变数据的存储为例,发布数据库以楼层为单位设置数据表,主键为采集时间,监测数值按列存储,列名为测点编号.这样设计便于按测点编号和时间查询,而且同一楼层测点的数据存储在一张表中,便于多测点数据查询和比较.

(3)动态数据分区存储策略.对大表采取分区存储是优化查询速度的常用手段<sup>[9]</sup>,动态数据表随时间增长快,表增长最大可达  $840 \text{ 万行} \cdot \text{d}^{-1}$ ,采用按时间分区的存储策略,将大表分割成以天为单位的小表,避免每次扫描整张大表提取数据,同时也符合数据按天查询的特点.

原始数据库通过数据转储接口完成到发布数据库的定向备份,备份程序根据两数据库的对应规则,读取原始数据库表最新添加的数据行,写入到发布数据库相应数据表中,完成数据过渡.

数据存储管理系统通过上述双层数据库结构将数据的短期存储和考虑查询需求的长期存储进行职能分割,又通过数据转储接口实现 2 个数据库的数据过渡,为系统集成提供了数据基础.

### 3.2 基于互联网的远程数据发布系统实现

远程数据发布子系统由发布数据库和远程监测网站构成,主要作用是通过互联网实时发布监测数据,提供数据的在线浏览和下载,为进一步的处理分析提供数据接口.

远程监测网站在 ASP.NET 平台上开发,通过 ADO.NET 实现对数据库的访问,数据加工处理采用 C# 与 C++ 语言混合编程实现.网站按采集项目分类设计了加速度、风荷载、应变、位移、温度、标高及倾斜度监测的数据查询,程序具有以下功能特点:

(1)数据图表动态加工处理.根据查询请求,对原始监测数据进行动态处理,主要包括数值统计和物理量换算,并根据物理量常见图形表达将处理结果绘制成图,例如加速度时程图、应变时程图、位移轨迹图等.数据查询的业务流程如图 3 所示,用户通过网页提交查询条件,网站服务器根据请求将查询转换为 SQL(structured query language)语句,并建立数据库连接提交查询事务;数据库执行 SQL 查询并将结果返回给服务器;服务器得到查询结果后进行处理计算,并生成用于绘图的参数和数据,并调用绘图模块进行绘图;绘图模块基于 C++ 语言独立开发,实现了上述二维图表的参数化绘制,调用时须定义绘图类型,如折线图、散点图或时程图,并填充系列数、纵横坐标和数值等绘图控制参数完成图形生成和图片输出;服务器将数据查询和处理结果加载到页面,返回给用户.

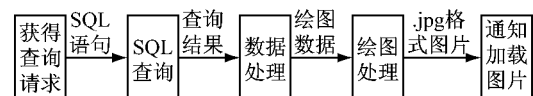


图 3 数据查询处理流程

Fig.3 Data-query processing flow

(2)利用结构三维模型表达测点布置.为了更直观地表现测点空间位置,对上海中心大厦建筑信息模型(Building Information Models, BIM)附加传感器模型,得到传感器空间位置图形.

(3)数据查询设计结合监测采集方案.对测点数量大的项目,将传感器分类,如应变数据可按应变计布置位置分为核心筒墙体、核心筒暗柱、桁架、巨柱四大类;对数据量大的项目,查询设计考虑按时间分割,如加速度数据可按监测日期查询.

(4)通过提供监测数据查询下载为进一步的监测分析及结构评估提供数据接口.每个数据文件包含文件头和数据 2 节,文件头包含所查询数据的测点编号、起止时间、监测频率、数据格式和数据条数

等总体信息,这些信息用于解析紧随其后的数据段。

以 B/S 方式实现远程监测数据查询网站既能够满足一般的数据浏览查询需求,又便于向其他系统集成,不论是大厦的运维系统还是其他离线分析客户端都可以通过内置浏览器控件集成网站功能,几乎不需要进行任何额外的程序开发就能实现监测数据发布的集成。

### 3.3 集成化结构模态识别软件实现

模态识别是结构性能评估分析的一项重要内容,大型复杂结构的整体模态识别具有相当的难度,不但依赖于传感器的合理布置,也依赖于分析手段的全面深入。为了提高模态识别的效率和可靠性,同济大学和上海同磊土木工程技术有限公司联合开发了结构监测/分析/评估软件 (Structural Monitor/Analysis/Evaluation software system, SMAE), 软件能够完成在线监测数据获取和模态识别,并提供了有限元动力特性计算与模态识别结果的对比分析。

SMAE 软件主要功能模块包括:4 个界面交互模块,即远程监测数据获取模块、结构有限元分析模块、模态识别模块与对比评估模块;3 个功能性模块,即数值计算模块、三维绘图模块和图表生成模块;2 个独立模块,即监测网站和 3D3S 软件结构分析程序。模块间相互调用关系如图 4 所示。程序界面和主要功能使用 C++ 语言基于 MFC (Microsoft Foundation Classes) 应用程序框架开发,三维图形显示基于 OpenGL 图形库编程,数值计算使用 C++ 与 Fortran 语言混合编程基于 IMSL 数学函数库 (International Mathematics and Statistics Library) 实现。

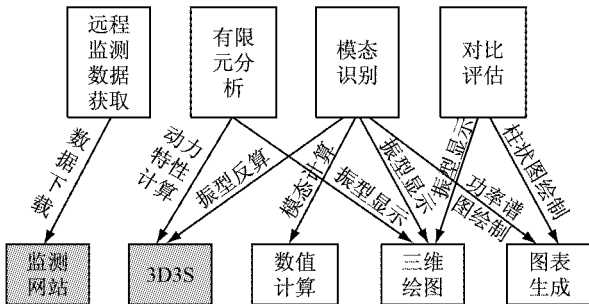


图 4 SMAE 功能模块调用关系  
Fig. 4 Function modules call graph

程序功能流程如图 5 所示,分为以下 4 个主要步骤:

(1) 远程监测数据获取. 利用浏览器控件将远程监测网站内置于程序界面中,通过网站获取模态识

别所需的加速度时程数据,从网站将数据文件下载到本地后进行解析,得到计算参数和数据。

(2) 结构动力特性有限元计算. 整合了 3D3S 软件,通过调用 3D3S 软件读取或新建结构分析模型,进行动力特性分析,并在 3D3S 软件中增加了定义测点功能,计算完毕后返回结构频率和振型信息,用于在 SMAE 中显示动力特性数值和结构三维振型动画。

(3) 模态识别. 使用频域峰值法和时域随机子空间法对实测加速度时程数据进行分析<sup>[10]</sup>, 识别结构频率和振型,并利用 3D3S 软件将识别得到的测点振型位移值作为结构强迫位移,经过反算得到整体振型,显示振型动画。

(4) 对比评估模块提取 2 种方法得到的结构频率及振型进行分析对比。图 6 显示了该功能的界面,图示结构为一个网架屋盖算例,界面上以三维线框模型表达结构某一频率的振型位移,从左到右分别为有限元计算结果、模态识别结果以及 2 种方法的差值;界面中的列表从左到右依次表示 2 种方法的频率对比以及某一频率对应的 X, Y, Z 三向振型对比。

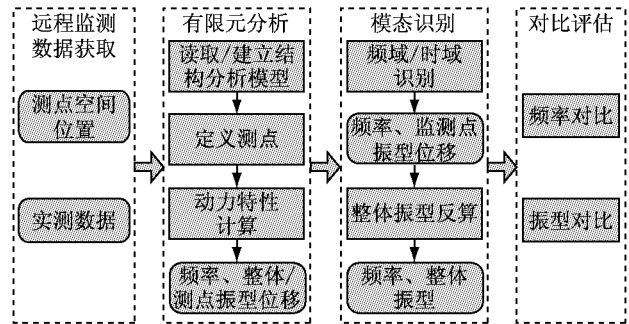


图 5 SMAE 功能流程图  
Fig. 5 SMAE functional flow diagram

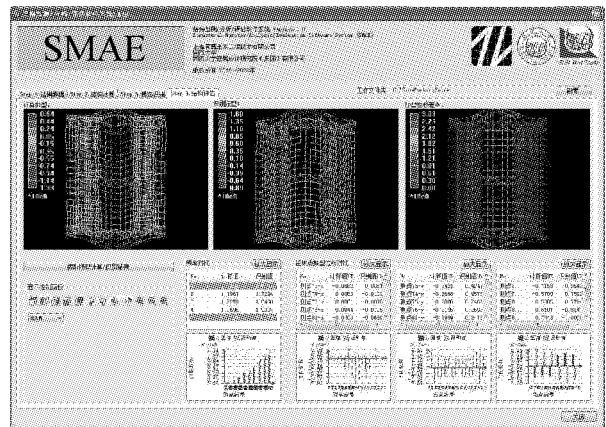


图 6 SMAE 对比评估模块程序界面  
Fig. 6 Program interface of comparison and assessment module in SMAE

SMAE 软件通过利用集成框架的数据发布接口在功能上实现了模态识别与数据采集模块的隔离,同时与有限元计算分析模块结合,以便与模态识别结果进行对比分析和评估.同时 SMAE 软件在程序设计上考虑了一定的通用性,由于模态识别和有限元分析都是独立设计的功能模块,只需要修改监测网站的地址接口并订制相应的数据文件解析格式就可以方便移植于同类监测系统.

### 4 系统应用效果

监测软件集成系统由监测控制中心的采集服务器、数据发布服务器和安装于本地的浏览器客户端与 SMAE 客户端组成.以应变、位移和加速度数据的查询处理为例说明系统的应用效果.

#### 4.1 应变数据查询

应变监测数据通过监测网站进行发布,图 7 是应变查询页面.页面通过三维模型显示了传感器的全局位置和局部放大模型,可以直接选择图片上的文字标签查询该编号的测点监测数据.图中显示了

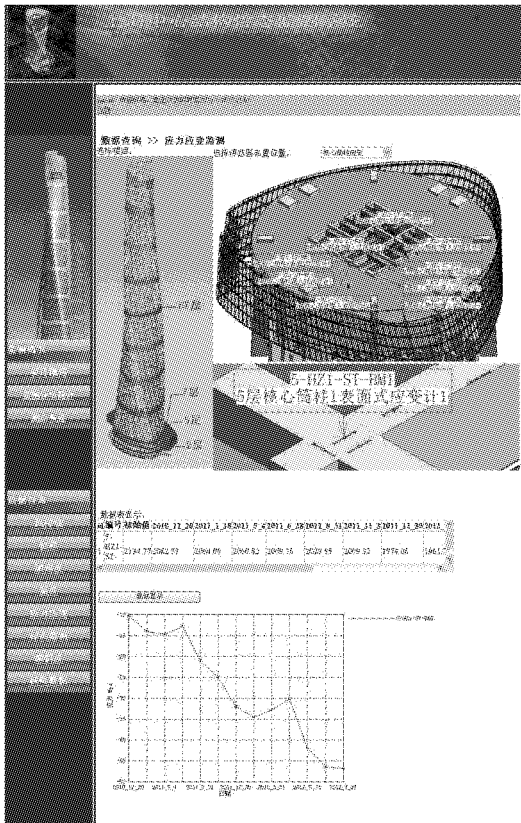


图 7 5 层核心筒暗柱内埋钢板表面应变测点查询页面

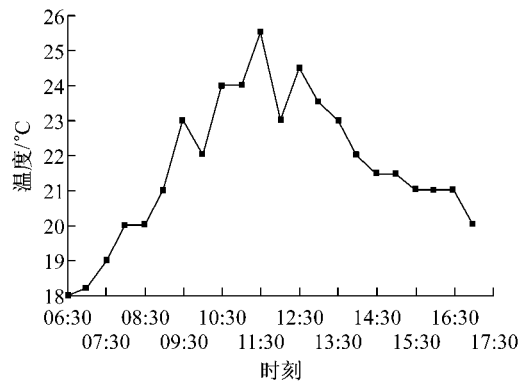
Fig.7 Query result of stress data on the surface of the steel column embedded in core-tube on the 5th floor

位于第 5 层核心筒暗柱内埋钢板表面的一个应变计监测数据,数据表列出了应变值,折线图显示了换算后的应力随时间的变化趋势,该测点受压且压应力增量大致呈增加趋势.

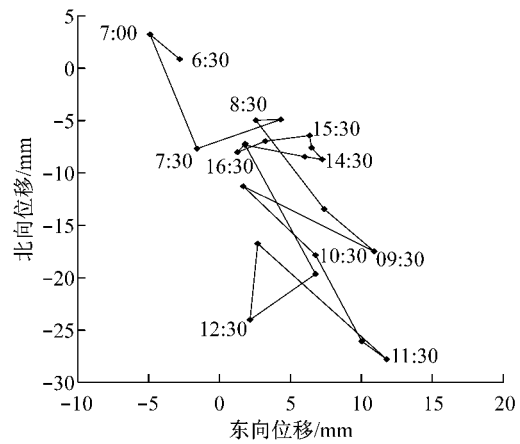
#### 4.2 位移数据查询

网站位移查询页面的形式与应变查询页面相似,查询条件设计为按时间查询.用户选择要查询的日期,服务器从数据库获取当天的位移监测数据,并进行统计处理,求出各时段的温度和位移平均值,最后以数据图表形式输出.

图 8 显示了 2011 年 10 月 19 日的位移查询结果,由图可知当天大厦表面温度为 18.0~25.5℃,



a 大厦表面温度



b 大厦顶部位移轨迹

编号	监测时间	温度	风速	北坐标	东坐标	位置	大气压	备注
116	2011-10-19 11:30:00	25.5		-0.550	6 3 238.203			
117	2011-10-19 11:30:00	25.5		-0.553	1 3 238.205			
118	2011-10-19 11:30:00	25.5		-0.549	4 3 238.202			
119	2011-10-19 11:30:00	25.5		-0.543	7 3 238.198			
120	2011-10-19 12:00:00	23.0		-0.537	6 3 238.193			
121	2011-10-19 12:00:00	23.0		-0.543	9 3 238.198			
122	2011-10-19 12:00:00	23.0		-0.536	3 3 238.191			
123	2011-10-19 12:00:00	23.0		-0.538	1 3 238.194			
124	2011-10-19 12:00:00	24.5		-0.545	1 3 238.194			
125	2011-10-19 12:00:00	24.5		-0.547	5 3 238.193			

c 位移数据界面

图 8 位移查询效果  
Fig.8 Query results

在 11:30 达到最高温度 25.5 °C,同时核心筒施工最高处水平位移最大值出现在 11:30,向东偏移 13.0 mm,向南偏移 26.5 mm. 监测结果体现了位移值 1 d 内的变化趋势与温度变化趋势基本一致.

4.3 利用加速度数据识别结构自振周期

使用 SMAE 客户端分析大厦的自振频率,首先通过客户端的内置浏览器登录远程监测网站,查看加速度数据,如图 9 所示,并将数据文件下载到本地,经过解析和复制后供模态分析使用. 然后进入模态识别页面,数据采样频率、采样长度和数据直接从文件读入,先用频域识别方法进行功率谱计算,再使用时域识别方法计算稳定图,然后对比 2 种方法计算结果确定频率. 程序提供了交互式的图形界面,可在功率谱与稳定图的叠加输出上直接拾取图谱重合度较高的频率作为识别结果. 图 10 是使用 SMAE 对 2012 年 4 月 9 日采集的加速度数据识别频率的结果,当时结构核心筒施工到第 56 层,外框架施工到第 43 层,楼板浇筑到第 32 层,其有限元计算结果

如图 11 所示. 表 1 为使用 SMAE 进行有限元计算得到的结构自振频率  $f_A$  和模态识别计算得到的结构自振频率  $f_M$  比较,可以看到 2 种方法计算得到的前 2 阶频率基本吻合,第 3 阶频率模态识别结果较有限元结果小 8.9%,其原因主要是施工过程中局部震动对加速度监测产生一定干扰,反应到模态识别结果上,对高频率的影响较大.



图 11 SMAE 频率振型有限元计算结果

Fig.11 FEA results of natural frequency and vibration mode in SMAE

表 1 SMAE 有限元计算和模态分析的频率结果  
Tab.1 Natural frequency results by FEA and modal analysis using SMAE

阶次	$f_A$ /Hz	$f_M$ /Hz	$\frac{f_M - f_A}{f_M} / \%$
1	0.379	0.383	1.0
2	0.385	0.399	3.5
3	0.587	0.539	-8.9

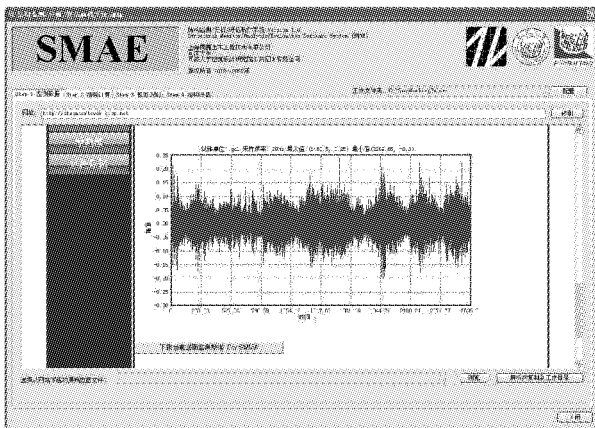


图 9 SMAE 加速度数据查询结果

Fig.9 Screenshot of acceleration query in SAME

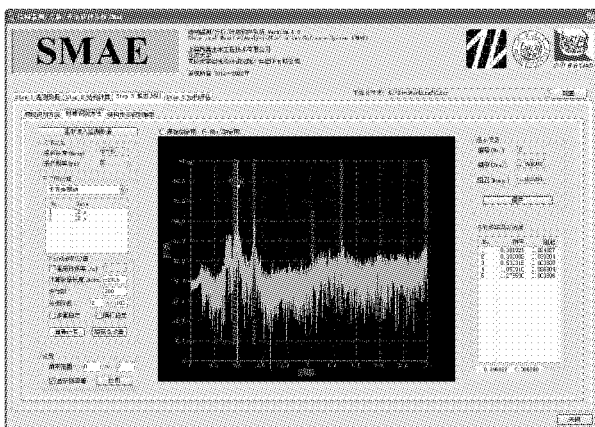


图 10 SMAE 频率识别结果

Fig.10 Screenshot of identification of natural frequency using SSI method and Peak method in SMAE

5 结论

研究了上海中心大厦结构健康监测软件系统的集成设计与实现方法. 首先介绍了监测内容与采集布置方案,然后提出了软件系统的集成框架并阐述了各模块的主要功能和协作流程,之后详细讨论了系统集成的关键技术,并通过实例说明了系统应用的效果. 主要结论有:

(1)提出了由数据采集端、数据发布端和数据应用端构成的监测软件集成框架,各软件模块通过明确的功能划分实现了模块间的松散耦合,也易于功能扩展和系统重构.

(2)监测信息集成是实现系统集成的关键,通过设置原始数据库与采集控制软件接驳实现数据的统一存储,同时通过设置发布数据库与远程监测网站接驳实现数据的发布. 原始数据库通过定期清理维

护和实时备份保证连续动态采集的数据存储安全.发布数据库通过表结构优化和物理设计优化,不但大大减少了数据冗余,而且更便于数据查询.两数据库通过实时转储接口实现备份.

(3)监测网站利用结构 BIM 模型获得了良好的传感器布置可视化效果,并提供了多种数据图表的动态查询生成,能满足一般的监测数据查询和处理.同时数据下载功能为进一步的数据分析处理提供了接口.

(4)基于此框架开发了模态识别分析软件 SMAE,实现了结构动力特性的模态识别、有限元分析和对比评估,论证了集成框架的可行性. SMAE 软件通过利用集成框架的数据发布接口,在功能上实现了模态识别与数据采集模块的隔离,同时与有限元计算分析模块结合,便于 2 种分析方法的对比.

(5)系统实现了集成框架和主要功能,通过应变、位移数据的查询实例和施工阶段结构自振周期的识别说明了系统应用的效果.系统功能能够满足目前施工阶段结构健康监测的需求,但随着工程完工并投入使用阶段,系统仍有以下部分需要进一步完善,即使用期结构风作用和地震作用的阈值采集算法的研究;SMAE 中模态识别算法的改进及增加有限元模型修正功能;风、地震作用监测的在线报告和离线分析功能集成等.

软件系统通过上述集成框架实现了从监测数据采集、存储、发布到分析的自动化集成,并为其他离线分析功能的集成提供了数据接口.该软件系统的设计方法可为同类健康监测系统的设计与构建提供参考.

#### 参考文献:

- [1] 李宏男,高东伟,伊廷华. 土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 151.  
LI Hongnan, GAO Dongwei, YI Tinghua. Advances in structural health monitoring systems in civil engineering[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(2): 151.
- [2] 张其林. 大型建筑结构健康监测和基于监测的性态研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(12): 68.  
ZHANG Qilin. Health monitoring system and monitoring-based performance study on large scale building structures [J]. Building Structure, 2011, 41(12): 68.
- [3] Brownjohn J M, Pan T, Mita A, et al. Dynamic and static response of Republic Plaza [J]. Journal—Institution of Engineers Singapore, 1998, 38(2): 35.
- [4] Kijewski-Correa T, Kwon D, Kareem A, et al. Smartsync: an integrated real-time structural health monitoring and structural identification system for tall buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(10): 1675.
- [5] Ni Y, Xia Y, Liao W, et al. Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou New TV Tower[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2009, 16(1): 73.
- [6] 张启伟. 大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2001, 29(1): 65.  
ZHANG Qiwei. Conception of long-span bridge health monitoring and monitoring system design[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(1): 65.
- [7] 李惠,欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(I): 系统设计[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 45.  
LI Hui, OU Jinping. Design and implementation of health monitoring systems for cable-stayed bridges (I): design methods[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 45.
- [8] 丁幼亮,李爱群. 润扬长江大桥结构损伤预警系统的设计与实现[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2008, 38(4): 704.  
DING Youliang, LI Aiqun. Design and realization of structural damage alarming system for Runyang Yangtse River Bridge [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(4): 704.
- [9] 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, 29(12): 55.  
LIN Jianfu, CHENG Ying, HUANG Jianliang, et al. Numerical simulations of downburstwind speeds in civil engineering[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(12): 55.
- [10] 张其林,李晗,杨晖柱,等. 钢结构健康监测技术的发展和研究[J]. 施工技术, 2012, 41(369): 13.  
ZHANG Qilin, LI Han, YANG Huizhu, et al. Development and study of steel structures[J]. Construction Technology, 2012, 41(369): 13.