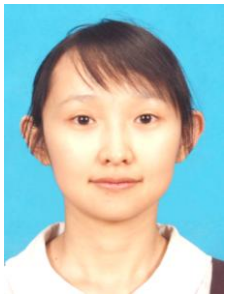
建筑安全动力次声网络系统的应用研究

许会超 汪 苏
（北京建筑工程学院电气与信息工程学院，北京 100044）



摘要：介绍了动力次声检测技术应用于复杂钢结构监测以及建筑安全动力次声网络系统的应用研究。建筑安全动力次声网络系统采用无损伤传感技术，有效地解决了钢结构建筑等固体材料在复杂环境条件下，内部结构发生微位移形变的实时在线监测问题。实验表明，该系统响应速度快，钢结构形变检测和分析结果准确，抗干扰能力强，有重要的实践意义和推广价值。

关键词：动力次声；传感器；钢结构监测

Application Research of Architectural Construction Safety Dynamic Infrasound Network System

Xu Huichao Wang Su
（Department of Electronics and Information Engineering,
Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044）

Abstract: This paper introduces the dynamic infrasound detection technology applied to the complexity steel structure monitoring and the application research of ACSDINS (Architectural Construction Safety Dynamic Infrasound Network System). This system adopted non-destructive sensing technology to effectively solve the problem of micro-displacement deformation real-time online monitoring of the internal structure of steel and other solid materials in complex environmental conditions. Experiments show that the system is featured with speed response, accurate detection and analysis, and anti-interference ability. It has important practical significance and application value.

Key words: dynamic infrasound; sensor; steel structure monitoring

1 引言

近几年来，随着钢结构在建筑中的广泛应用与钢结构建筑的不断发展，人们对于建筑结构的性能状况越来越关注，因此，对钢结构形变检测分析方面的研究越来越多。钢结构建筑等固体材料在复杂环境条件下，受到外力作用，内部会发生结构的变化。然而，固体结构受力后发生形变的变化量有时会很微小，不容易对其内部结构进行实时的监测以了解固体结构内部的微小变化。

因此，对于这种微小的变化，可以利用钢结构形变过程中机械波，也就是声波的传递，通过对声波信号的采集、处理、分析，观察声波信号的变化来了解钢结构发生形变的情况，并进行分析与处理，进一步了解结构内部存在的问题，及时地对其进行有效的防护与加固，以确保钢结构建筑的安全，避免因结构健康安全问题所导致的事故与损失。

建筑安全动力次声网络系统采用先进的无损伤传感技术，利用物理共振膜原理，检测固体微变位移，并且应用动力次声检测技术实现钢结构在不同应用环境中的受力与变形情况的实时在线监测。通过该动力次声网络系统的应用，可以对一些安全要求较高的钢

作者简介：许会超（1987-），硕士，控制理论与控制工程专业；研究方向：建筑智能化技术。
收稿日期：2011-10-14

结构进行实时在线监测、数据分析、风险预警等，可以让我们及时发现安全隐患，并采取必要措施排除潜在的危险，避免事故的突然发生。

2 次声在钢结构监测技术中应用

次声学在复杂钢结构监测技术的研究属于固体次声学的研究领域，或者说是研究由动力源的机械动能直接或间接作用在复杂钢结构上所产生的机械振动，这种振动源是固体次声波辐射源。次声波在复杂钢结构上传播，其传播速度、传播距离、频谱特性、波类转换等与复杂钢构的物理特性有着直接密切的关联。

建筑次声安全监测工程构成的主要设备是次声矢量探测系统，泛指一般的固体次外声探测设备，即利用在建筑钢结构中传播的次声波为信息载体，对其钢结构目标物体的动力特性进行任意波动面的次声波的物理场探测分析、标定以及定位，其物理场中包括次声波波动面在内应力场及应变梯度、微位移及宏位移、能量流及力矩偶、远次声荷载及高次声荷载、机械强度及刚度、机械疲劳的损伤与破坏、自由共振及强迫震动进行标定与测量。此外还包括对目标物的表面动力场的测量以及对次声波性质的标定。

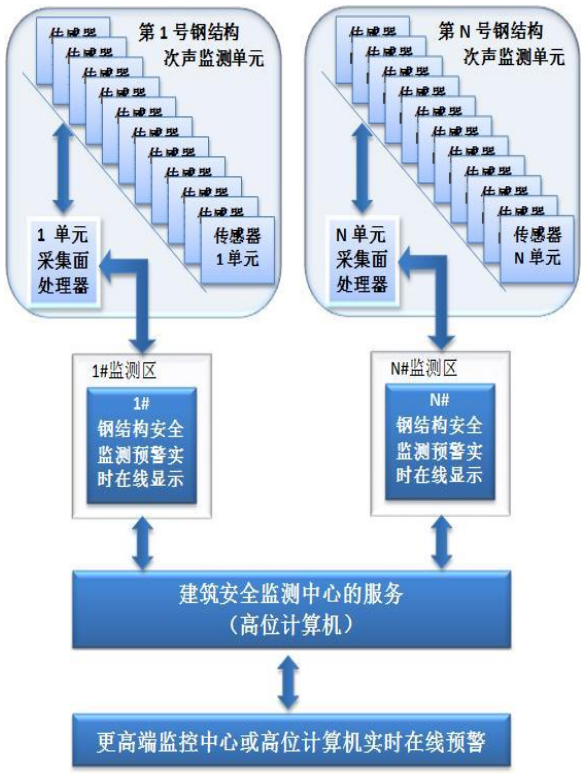


图 1 建筑钢结构安全监测预警网关系框图

建筑安全动力次声网络系统采用动力次声检测技术，应用次声矢量膜传感器对建筑钢构的机械杆件的强刚度进行在线监测和预警分析，如图 1 所示。动力次声检测技术是指将复合函数的多元动力次声源作用在建筑钢构的任意机械杆件上，利用声波矢量膜传感器感知钢结构机械杆件的强度和刚度等方面发生的快速响应与物理变化，从而实现对建筑钢结构的实时监测。可将次声矢量膜传感器及其相关辅助工装件安装在不同几何形状、材料性质和不同用途的建筑钢构的机械杆件的上面，并与相关设备的硬软系统相连接匹配。机械杆件材料性质包括：各型钢材、各类金属以及合金、钢筋混凝土、混凝土、硬性木材、玻璃、砖砌和石料等硬性材料所制成的建筑钢构的机械杆件。建筑钢构的机械杆件不同用途包括：钢筋水泥桥梁、斜拉索桥梁、砖砌石料桥梁、木料桥梁、各种中大型建筑钢结构杆件系、建筑大厦、江堤、水坝和护堤等等。

3 建筑安全动力次声网络系统模型

建筑安全动力次声网络系统模型的安全监测系统由三个主要部分组成，即钢结构模型、次声信息采集处理平台、人机界面。由于复合函数的多元动力次声源作用在建筑钢构的任意机械杆件上，其建筑钢构机械杆件的强度和刚度等方面将发生快速的响应与物理变化，利用次声矢量膜传感器感知钢结构机械杆件的微量形变，从而完成对建筑钢结构的实时监测。因此，该系统是进行检测计量或在线监测及分析的一种专用仪器。

3.1 钢结构模型

本系统中钢结构模型是基于各类大型复杂钢结构建筑的部分结构框架设计，目前各类大型复杂钢结构建筑中，钢结构各类机械杆件的交叉情况在结构设计中十分普遍，对框架及杆件交叉结构的受力形变监测和分析也就显得尤为重要。因此，本系统选用这种结构的模型为研究和监测对象。在钢结构四自由度交叉杆件（交叉声道）的交叉点四周设计动力次声方形式，将部分监测位置及传感仪器设计布置在动力次声方当中，其它监测点设在动力次声方外部钢结构交叉声道上。钢结构模型中动力次声方是建筑安全动力次声网络系统最为基础的底层部分。次声矢量膜传感器中的矢量膜一端安装在钢结构模型固定参考端上，另一端固定在可移动采样端上，因此矢量膜的张力是便于调

节的。次声矢量膜传感器与相关工装件进行紧密配合安装在钢结构机械杆件的监测位置上，钢结构受到外力作用时传感器感知微弱监测信号并经过前置放大装置并最终传送到信号采集处理系统中，从而采集出监测数据。

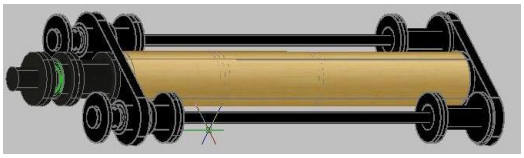


图 2　一维次声通道设计

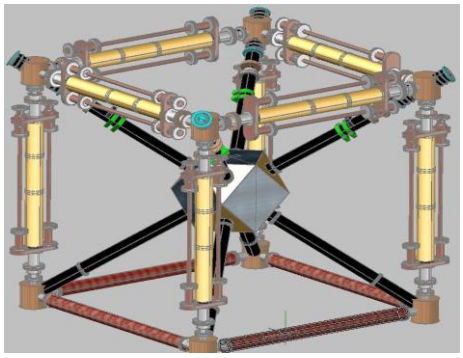


图 3　多维次声通道及钢结构模型整体设计

建筑安全动力次声网络系统中的钢结构模型具有多维次声传输通道，采用一维次声相加变成多维次声，汇集到次声源。一维次声通道、多维次声通道及钢结构模型整体设计如图 2 和图 3 所示。系统通过动力次声方中次声矢量膜传感器进行实时在线检测，连续监测钢结构在复杂环境中不同位置的受力与变形情况。

3.2　次声信号采集处理平台

信号采集处理系统采用的是次声矢量膜传感器多点式分布安装，多通道有效信号传递，多通道数字卡精密采集，智能化预处理发送，高速大容量数据分析处理系统和人机界面数据显示。该信号采集处理系统为独立的单回路监测系统，主要由多维次声矢量膜传感器、电流变送器、信号分析预处理器及通信接口组成。系统总体结构如图 4 所示，其通过次声矢量膜传感器采集到钢结构的力学及声学微变信号，在电流变送器中进行处理，输出标准信号到信号分析与处理器中，计算成标准测量值。该系统可将次声方的重要结构应力的位置，以及承重点和应力集中点的微变参量：剪切（拉压）应力、声阻能量、声透能量监测出来，通过计算机的处理和分析，在终端人机界面的显示屏幕上进行集中显示和管理。

次声信息采集处理平台中，将光电耦合器模块的输出端与串行数字采集模块的输入端相连接；将串行数字采集模块的多位并行输出端通过并行多位数据总线与预处理信号采集计算机的并行输入端相连接；再将预处理信号采集计算机的串行输出端口与数据处理分析计算机串行输入端口相连接，形成在预处理采集计算机和数据处理分析之间的串行数据流的传送，使得预处理采集计算机通过窗口发送的数据流可以通达安全地传递到数据处理分析计算机的输入端。最终通过数据处理分析计算机显示屏显示出数据流。

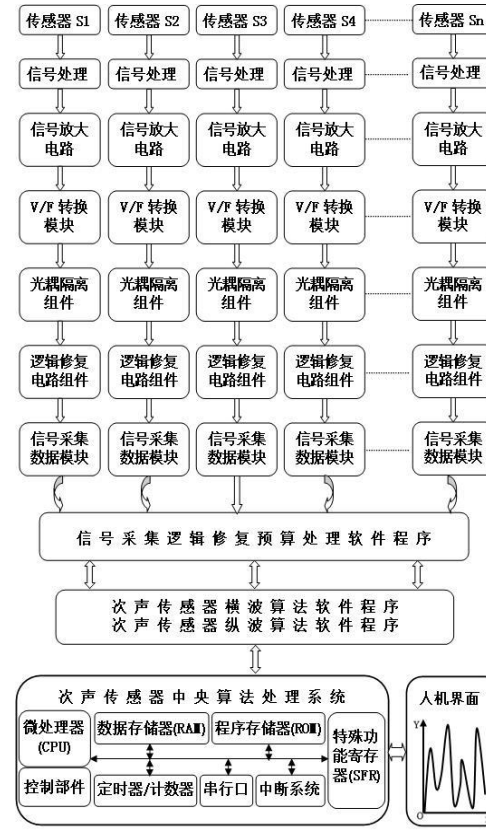


图 4　采集处理系统总体结构图

3.3　人机界面

人机界面部分将次声信息采集处理平台处理计算的数据在小屏幕上进行实时在线的显示。同时信号分析与处理器输出测量值信号，通过通信模块，并入现场数据总线，将信号传送到中央数据处理系统。主要由工控机与各类信号扩展及控制模块组成，一方面完成多回路信号的集中处理与计算，并通过现场总线将信号与数据传送到中控室主站监控系统；另一方面接受并分析现场信号及中控室指令，输出相应的控制信号，可直接控制现场或监控室的信号指示灯或报警器件，也可以控制启停开关，以确保设施在次声安全的受力范围内运行。

3.4 系统实验描述

系统实验过程中，控制液压装置，使钢结构液压管伸缩量发生变化，钢结构自由度受力情况发生改变，产生微弱机械振动，由次声矢量膜传感器收纳机械波信号，即声波信号，经过信号放大，在电流变送处理器中进行计算。信号采集预处理器对声波信号进行采集，测量值通过数据总线传送给中央算法处理系统。中央算法处理系统完成多路信号的计算并接受分析现场信号及中控指令，直接控制现场，确保设施在安全的受力范围内运行，并通过串口通信连接人机界面，描绘出剪切（拉压）应力、声阻能量、声透能量等参数的曲线函数波形，实现对钢结构形变的实时在线监测。

4 系统实验验证

为了验证本文给出的动力次声网络系统的准确性、可靠性和有效性，以建筑安全动力次声网络系统模型为平台进行实验测试。在实验中，系统可监测到承重点和应力集中点的剪切（拉压）应力、声阻能量、声透能量，通过分析处理可以准确完成对建筑钢结构机械杆件强刚度的实时在线监测和预警分析。图 5 和图 6 给出了实验过程中次声源传感器的感知趋势示例。

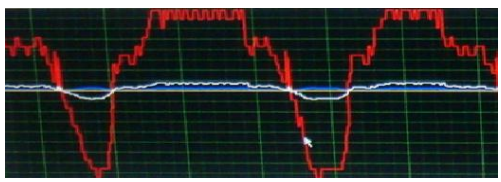


图 5 次声源纵波传感器 1 号感知趋势

图 6 次声源横波传感器 2 号感知趋势

通过对大量的监测数据进行累计和分析验证，结果表明：系统响应速度快；有着良好的电磁兼容特性，抗电磁干扰能力强；钢结构受力和形变分析结果准确，误差较小且适应于温度、振动、向心力、核辐射和电磁干扰的恶劣工作环境。

5 基本性能

a. 应力应变监测计量精度：最大误差不大于±0.1%；

b. 频率响应范围宽：响应声学频谱范围在 0.00000001～500Hz 之间；

c. 频率响应速度快：采样敏感部分质量较小；

d. 系统特征：系统为纯数字化通道信号传递与分析处理的系统设计；

e. 传感器可靠性高：工作寿命长，可靠性高，传感器设计寿命 5 年以上；

f. 电磁兼容：有着良好的电磁兼容特性，系统抗电磁干扰能力强；

g. 较高矢量选择性：可以有效地滤除各类干扰性质类的声波，如滤出建筑钢结构杆件系的声表面波，而响应建筑钢结构杆件声道中的次声波；

h. 环境兼容：可以适应-30～+60℃不同温度环境条件下的工作，且适应于振动、向心力、核辐射和电磁干扰的恶劣工作环境；

i. 自检定功能：具有零点自动校正及确认；

j. 人机关系：安装调试方便，人机关系简单，便于维修保养。

6 结束语

本文主要介绍了动力次声检测技术应用于复杂钢结构监测的建筑安全动力次声网络系统的应用研究。建筑安全动力次声网络系统采用无损伤传感技术，利用动力次声检测技术检测固体微变位移，从而连续监测各类钢材料在不同应用环境中的受力与形变情况。该系统响应速度快，有着良好的电磁兼容特性，受力和形变分析结果准确，误差较小且适应于温度、振动、向心力、核辐射和电磁干扰的恶劣工作环境。有效地解决了钢结构建筑等固体材料在复杂环境条件下、受到外力作用时，内部结构发生微位移形变的实时在线监测问题，有重要的实践意义和推广价值。

参考文献

1 刘俊民，唐伟，王晓明，等. 次声信号产生机理与特性分析. 环境工程，2010(4)：92～96

2 方永定. 润扬大桥结构安全监测系统通信网络研究. 现代交通技术，2007(4)：55～58

3 计荣利，陆岩. 大跨度空间网架结构施工安全监测. 国外建材科技，2008(1)：101～103

4 Teo, Evelyn Ai Lin. Developing an electronic system to enhance building safety Audits. Architectural Science Review, 2007, 50(4)：375～379