

建筑抗震支吊架智能监测系统研究

丁李^{1,2} 万春风^{3*} 丁幼亮³

1. 江苏省建筑设计研究院有限公司; 2. 南京震坤物联网科技有限公司; 3. 东南大学土木工程学院

摘要: 为减少二次结构损害带来的损失, 对抗震支吊架进行智能监测, 本文提出并设计了一套抗震支吊架智能监测系统。本文首先介绍了该系统的框架结构与功能模块, 随后详细介绍了传感感知子系统、数据采集与传输子系统、数据存储与管理子系统, 以及数据分析与评估子系统等四大子系统, 并建立了支吊架病害识别算法。最后的实验表明该系统采用的算法能够有效的识别抗震支吊架的螺栓松动, 保障建筑机电系统的安全, 具有较强的工程实用价值。

关键词: 抗震支吊架; 智能监测; 采集与传输; 分析与评估; 快速傅里叶变换

引言

随着我国现代化建设的深入与发展, 我国的建筑行业也呈现出多种趋势建筑更加追求艺术美, 形体趋向于复杂而多变建筑的用途越来越多样化人们对建筑的使用安全性和舒适性提出了更高的要求具有一定历史意义的优美的古建筑及近现代建筑逐步受到人们重视并得到更加妥善的保护。以上各种趋势无一不对建筑结构的安全性评估提出了更高的要求, 人们迫切需要一种能够长期在线监测结构健康程度并做出安全预警的建筑结构健康监测系统, 该系统可以保证人们对建筑结构在施工和使用阶段的健康程度有一个实时的了解。然而, 与建筑结构相比, 建筑机电抗震防灾的关注度和相关支撑技术水平还远远落后。尽管国家和行业已经意识到这一问题, 并在2014年出台了《建筑机电工程抗震设计规范》, 自2015年8月1日在新建建筑中强制实施, 但是由于目前抗震设计方法简单、生产和安装标准欠缺、质量检测手段落后, 即使是经过专业抗震设计的工程项目, 其抗震性能的稳定性还需要经历时间的检验。同时, 对于大量的、未经过专业机电抗震设计的存量建筑, 其机电抗震水平更是未知的、难以掌握的。因此, 对支吊架进行抗震设计及智能监测是十分必要且重要的。

基于对桥梁健康监测系统的深入研究^[1], 本文构建了建筑抗震支吊架智能监测系统。该系统由传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据存储与管理子系统以及数据分析与评估子系统等四大子系统构成。此系统的工作流程与系统架构如图1所示。

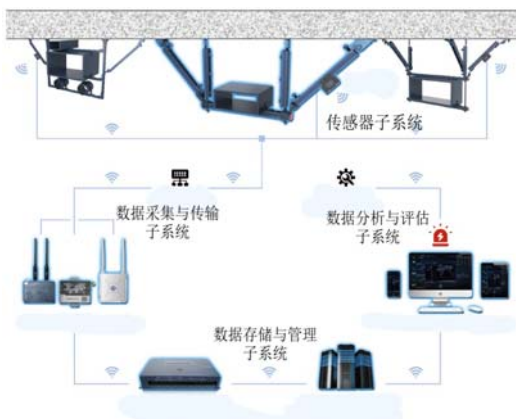


图1 建筑抗震支吊架智能监测系统架构

一、传感器子系统

抗震支吊架的实时状态可通过安装在支吊架某种或多种传感器进行传感获取。建筑抗震支吊架的智能监测应根据具体

的项目要求和实际应用条件, 本着力争实现“监测完整、性能稳定兼顾性价比最优”的主要原则选择合理的传感器类型和数量, 并根据现场调研和力学分析结果确定必要和合理的监测位置、数量和安装方式, 且在监测期间具有良好的稳定性和抗干扰能力, 采集信号的信噪比应满足实际工程需求^[2]。针对建筑抗震支吊架的智能监测特点, 本系统研发了一款高精度、低成本低功耗的无线加速度传感器, 如图2所示。



图2 研发的无线加速度传感器

该无线加速度传感器主要包括检测单元、微处理单元、无线收发单元和能量单元等模块^[3]。检测单元在传感器节点中的作用举足轻重, 检测单元的内部组成部分包括传感单元AD转换电路及其附属电路, 其作用是检测对象的工作状态, 然后把信号传输至微处理单元; 微处理单元的作用是对传感器采集的信号进行预处理, 同时可与无线收发单元进行数据交互, 从而实现数据传输; 无线收发模块的作用是将传感器采集到的数据通过无线通信的方式进行传输; 无线传感器能量单元模块是整个研究的关键, 目前能源多采用化学电池或者锂电池, 对于锂电池, 可以外接电路对其进行充电。无线传感器的硬件组成如图3所示。

无线加速度传感器的外部设计采用高强可拼装塑料封装, 并设有锚固螺栓用于固定在支架杆件上; 内部设计采用模块化方法, 各模块单独调试, 各模块之间预留接口, 这样可以更容易发现和解决传感器内部的问题, 也使设计更加趋于标准化, 便于实现传感器的工业化生产。

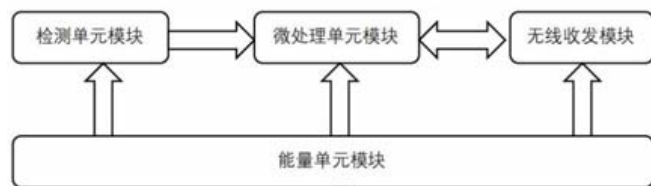


图3 无线传感器原理结构

二、数据采集和传输子系统

数据采集和传输子系统的主要功能就是将声、光、电、磁等信号转换成数字信号, 然后通过光纤网络、电子网络等传输介质进行数据传输, 最后送到监测系统的智慧大脑进行分析和处理。数据采集和传输子系统的选取和布置要根据传感器子系统的布置确定, 其寿命应尽可能的选择与传感器元件寿命相当, 保证整个系统在规定使用年限内, 能够协调一致正常的使用和工作^[4]。

本系统的无线数据采集与传输模块由路由器、POE交换

机、汇聚交换机和光端机等构成。通过无线传感器与路由器形成组网，将无线传感器采集到的数据传输到路由网络，然后再汇聚到附近的“小型中转站”POE交换机中，由该交换机将网络信号传输到后台服务器附近的POE交换机中，若两交换机间传输距离较远，则需增设一对光端机，光端机的作用是实现网络信号与光信号间的转换，以减少网络光信号由于长距离传输导致的衰减问题，最后再将信号传输到汇聚交换机中。

三、数据存储和管理子系统

数据采集与传输子系统采集数据后传输到数据存储与管理子系统进行数据的统一存储与管理。其中，后台服务器中的数据库是数据存储与管理子系统的核心。数据库按主题可划分为监测设备数据库、结构模型信息数据库、监测信息数据库及用户数据库等。数据库系统设计的基本原则有可靠性、经济性、开放性、先进性、可扩展性和标准性等，在此基础上，要保证数据的共享性、数据结构的整体性、数据库系统与应用系统的统一性等^[5]。

与以地址为中心的计算机网络不同，基于无线传感器的数据存储和管理网络是以数据为中心的网络，也就是把传感器视为感知数据流或感知数据源，把传感网视为感知数据空间或感知数据库，把数据管理和查询处理作为网络的应用目标。其任何应用都离不开数据的收集、存储、查询和分析，大规模传感网就像一个庞大的分布式数据库，数据存储和管理技术就是传感器网络的核心技术之一。国外许多研究机构已经开始了传感网数据存储和管理的研究并取得了一定进展^[6]。



图4 系统监测大屏

本抗震支吊架智能监测系统数据库的功能主要包括：监测设备管理、监测信息管理、结构模型信息管理、数据转储管理、用户管理及安全管理等方面。针对这些功能特点和应用需求，该系统开发了包括云服务器及网页端的云平台，以实现远程数据的接收和存储，并对传感器和路由网关的布设等进行管理。其中网页端主要实现两大功能：一是实时查看抗震支吊架的特征参数和预警指标值，对于异常状态迅速及时的发出报警信号；二是对抗震支吊架智能监测的数据进行历史数据查询。用户可以通过多种途径查看抗震支吊架现场实时情况，在现场用户可以通过监测大屏查看各种工作状态及其统计情况，监测大屏如图4所示。同时，用户也可以通过无线网络在移动端或电脑端实时接收信息。

四、数据分析与评估子系统

数据分析与评估子系统是对经过传感、采集传输及存贮下来的数据通过智能算法进行分析，并由智慧大脑进行恰当的判断和评价，最终决定预警信号是否发出。数据分析与评估子系统的核心是进行建筑抗震支吊架的损伤评估。

抗震支吊架损伤识别的基本原理是由于损伤引起其局部性质（如刚度、质量、阻尼等）发生改变，导致抗震支吊架的力学特性（如模态、动力特性等）随之改变，从而降低了其在服役期内承载能力。损伤识别就是利用抗震支吊架的力学特性

是否变化，来判断其是否发生了损伤以及确定损伤的位置。完整的损伤识别过程包括四个部分：（1）判断损伤是否存在；（2）确定损伤位置；（3）诊断结损伤程度；（4）性能评估。

本建筑抗震支吊架数据分析与评估子系统使用基于小波分析理论和傅里叶变换相结合的频率法作为其损伤识别方法。固有频率是模态参数中最容易获得的一个参数，并且测量精度较高。通过固有频率的变化可以判断抗震支吊架是否存在损伤以及损伤程度。

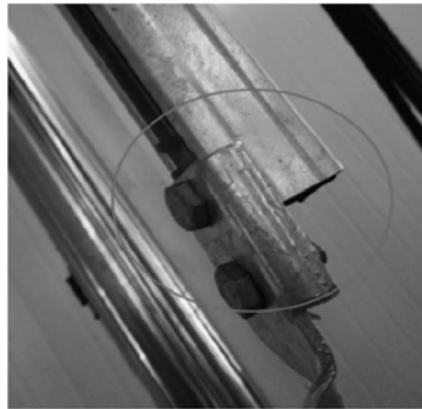


图5 槽钢处连接螺栓滑脱

在实际应用过程中，抗震支吊架的破坏多是因为铰链与墙板处的连接螺栓或铰链与槽钢处的连接螺栓滑脱而失去固有承载能力^[7]，如图5所示，而抗震支吊架主体结构由于其刚度较大，一般不会发生破坏，所以可以不用直接使用小波分析定位抗震支吊架的损伤位置，而是先利用小波进行高频去噪，后使用傅里叶变换进行整体的频域分析^[8]。另外，螺栓在不同松动程度下，螺栓扭矩以及抗震支吊架自身的特征频率也会发生相应改变^[9]。因此，我们可以据此构建一条扭矩-特征频率关系曲线，来定量反映抗震支吊架损伤程度。数据分析与评估具体流程为：基于快速傅里叶变换来分析无线加速度传感器采集到的数据，得到实时状态下的抗震支吊架频率，然后通过扭矩-特征频率关系曲线找到对应频率下的螺栓扭矩，进而判断螺栓松动程度，即是抗震支吊架损伤程度，据此进行性能评估。

五、智能监测系统实验研究

为了智能监测系统能够更精准的做到损伤识别和及时预警，本节进行了详细的实验研究：研究抗震支吊架顶板螺栓在完全松动与完全拧紧下的特征频率差异及误报警率。

（一）实验装置及步骤

实验装置包括：装有抗震支吊架的钢框架、研发的无线加速度传感器、电脑、路由器、MATLAB软件、配套数据采集软件、带有显示屏的扭矩扳手（量程为0-135N·m）等，如图6所示。



图6 实验装置图



图7 实验现场

实验步骤如下:

(a) 将研发的无线加速度传感器固定在抗震支吊架斜杆的中部位置;

(b) 在无线传感器配套采集软件上设置采集频率为400Hz, 将顶板连接螺栓拧紧, 打开传感器及对应采集装置开关连续采集数据5h, 结束后再把连接螺栓完全拧松, 打开传感器连续采集5h;

现场情况如图7所示。

(二) 实验分析结果

以4096个点位一组分析数据, 从前往后依次提取出1000组数据, 共2000组数据, 使用MATLAB软件对各组振动数据做傅里叶变换, 分析每组数据0-200Hz频域间的特征频率值, 得到螺栓拧紧与完全松动下的频谱图大致如图8和图9所示。

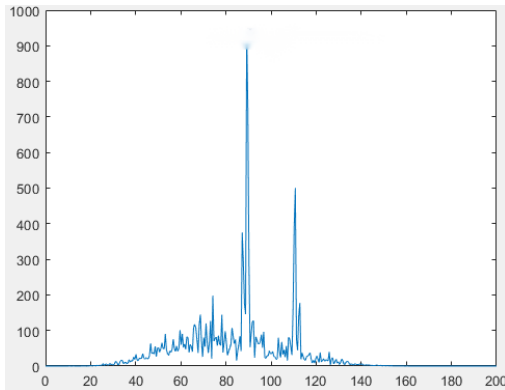


图8 拧紧状态下频谱图

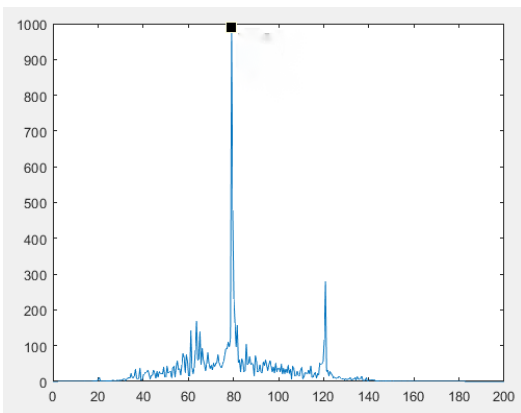


图9 完全松动状态下频谱图

统计归纳2000组数据的特征频率, 将各频率段出现的次数列出, 如表1所示。

表1 各频率段出现次数

完全拧紧状态		完全松动状态	
扭矩 (N·m)	次数	扭矩 (N·m)	次数
<85	5	<75	52
85-87	74	75-77	123
87-89	408	77-79	331
89-91	336	79-81	384
91-93	123	81-83	101
>93	54	>83	9

根据表做出特征频率的分布柱状图, 如图10所示。

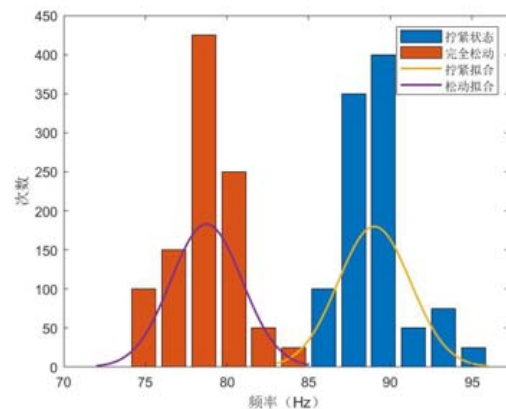


图10 拧紧和松动状态频率直方图

通过直方图可以看出, 当抗震支吊架的连接螺栓拧紧时, 特征频率集中在89Hz左右; 当抗震支吊架的连接螺栓完全松动时, 特征频率集中在79Hz左右。将拧紧状态下特征频率小于85Hz的情况或完全松动状态下特征频率大于83Hz的情况视为误报警, 考虑安全最大化, 忽略两种情况同时出现的数据组, 取两种情况发生概率的并集, 则误报警的概率最大为1.4%, 这说明基于傅里叶变换的特征频率法可以有效的识别抗震支吊架的螺栓松动损伤。

六、结论

通过对抗震支吊架智能监测系统的详细研究, 可以得出以下结论:

(1) 基于模块集成技术的无线加速度传感器摆脱了有线的束缚, 且精度高、成本低, 可大规模生产应用, 满足了智能监测系统的开发需求。

(2) 通过路由网络和交换机传输构建数据采集与传输子系统, 通过云平台服务器及网页端构建数据存储与管理子系统, 保障了抗震支吊架智能监测系统的稳定健康运行。

(3) 抗震支吊架的损伤多是由于螺栓松动造成。通过对螺栓拧紧与完全松动的2000组数据分析, 得出基于快速傅里叶变换的特征频率指标可以有效的判别螺栓松动。

(4) 本文开发的建筑抗震支吊架智能监测系统采用了无线传感, 云端管理, 智慧大脑等最新技术, 能够有效的监测并反馈抗震支吊架的实时状态。

参考文献

[1] 张启伟, 袁万城, 范立础. 大型桥梁结构安全监测的研究现状与发展[J]. 同济大学学报, 1997, 25 (增刊): 76- 81.

(下转第121页)

来选购苗木。针对苗木,其需要满足株高、胸径、冠幅等指标要求。为了达到设计意图,在开展绿化施工养护时需要按照设计的规格把控苗木的质量,尽量保持苗源地的统一性,以此来保证苗木规格相差无几,同时能选择到品种相同的植物。第二,按照施工现场的实际情况,在种植之前做好客土的换填处理。第三,基于苗木实际的成活情况,做好苗木品种的替换与更换处理。第四,积极改进景观绿化施工技术,在开展绿化施工的阶段,针对苗木的成活率而言还需要合理采用新工艺、新材料和新技术,为后续的养护奠定基础条件。

(二) 注重后期养护

对于城市道路绿化的后期养护管理而言,需要考虑到“三分种、七分养”的要求,以此来提升苗木的成活率,帮助提升绿化景观效果。针对景观植物养护管理,要综合考虑维持植物生长所需的养分、水分、光照、温度等环境因子,采取对应的技术措施。

当施工完毕之后就转入到养护阶段,需要根据植物的实际生长特性,重点做好整形修剪、水肥管理、防冻、防治病虫害等一系列养护管理工作。尤其是在苗木生长的弱势期要做好对应的病虫害防治工作,针对病虫害,始终需要坚持“综合防治,以防为主”的基本原则,在合理的范围内,使用低浓度的农药,杜绝高残留、高污染农药的使用,并且正确配置,控制好喷药时间与喷洒方位。对于北方城市来说,为了确保景观植物的成活率,就要保持冬季足量的浇水,同时做好对应的防冻

(上接第92页)

保证养护过程顺利进行。

(七) 选拔优秀的技术和管理人才

大体积混凝土浇筑施工作为一项整体且复杂的工作,需要一支非常强劲以及经验丰富的施工团队来完成。因此施工单位必须要控制施工技术人才和管理人才的培养,具体有以下几个要点:一是确保混凝土施工管理人员的素质。只有管理人员的素质高才能带领一批素质较高的团队;二是管理层定期对团队员工进行技术的培训工作,加强工作人员的个人素质以及工作能力,提高整个团队凝聚力;三是合理分配工作,明确每位施工人员的工作职责,只有这样才能保证每个关键环节顺利开展;四是增强员工的积极主动性以及团队的凝聚力。在实际的工程项目进行时一定要确保各人员的相互协调,避免出现多工少工情况,更好地保障大体积混凝土浇筑施工技术的顺利应用。

(八) 强化施工安全管理

在实际的进行大体积混凝土浇筑施工期间,为了更好地保证施工的顺利进行,相关建筑单位必须要重视施工期间的安全管理工作,安全管理就是要通过控制人、物以及环境等内容,科学的管理人和物,最大限度的预防施工现场中的安全事故,有

(上接第62页)

[2] 欧进萍. 土木工程结构用智能感知材料、传感器与健康监测系统的研发现状[J]. 功能材料信息, 2005(05):26-36.

[3] 喻言,李宏伟,欧进萍. 结构监测的无线加速度传感器设计与制作[J]. 传感技术学报, 2004(03):112-115+120.

[4] 高斯敏. 基于物联网的特大型桥梁健康监测监测系统研究[D]:[硕士学位论文]. 武汉:华中科技大学土木工程学院, 2017.

[5] Kim C Y, Kim N, Yoon J G, et al. Monitoring system and ambient vibration test of Namhae Suspension Bridge[C]// Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, & Pipelines IV. International Society for Optics and Photonics, 2000.

[6] 余波,邱洪兴,王浩,等. 苏通大桥结构健康监测系

工作。对乔木的保护可以选择根部覆盖塑料膜、搭建防风障、树干刷白等方式,实现保温防风处理;针对灌木则可利用草帘包裹、防冻温棚、根部覆土等有效的防护措施进行处理。

另外,考虑到城市道路绿化的特殊性,所以,还需要格外关注景观的降土去尘,如,以绿化隔离带、花卉布置区域作为重点,就需要将其中多余的土壤清楚,确保种植土要低于路缘石。并且结合植物浇灌重点,针对植物灰尘进行冲洗,确保其干净。

四、结语

随着城市的不断发展和进步,城市道路绿化景观发挥的作用越来越明显,其不仅可以为人们营造健康的生活环境,同时能让人们保持身心愉悦。所以城市道路绿化景观作为城市的名片,其设计具有重要的意义,再配合有效的施工养护措施的应用,能为城市建设贡献更大的力量。

参考文献

[1] 楼晓梅. 城市道路绿化景观园林设计及施工要点探析[J]. 江西建材, 2020(05):90-91.

[2] 郑江涛. 以问题为导向的城区道路绿化景观改造设计[J]. 绿色环保建材, 2020(06):239-240.

[3] 徐毅平,李炬. 常熟市城区道路绿化改造提升策略及设想[J]. 绿色科技, 2020(07):70-71.

[4] 刘一竹,曹尚杰. 城市道路绿化改造工程——以武汉市友谊大道为例[J]. 住宅与房地产, 2020(09):40.

效的保障施工人员的生命财产安全。在具体应用大体积混凝土施工技术期间,首先就要端正安全管理的态度,更加详细、全面的认识到工程中的安全隐患,对安全隐患进行更深的排查,确保无遗漏情况。

三、结语

综上所述,现阶段在房屋建筑工程中大体积混凝土浇筑施工技术应用非常广泛,不仅提高了房屋建筑的整体质量和性能,同时还对建设行业的发展有很大的促进作用。因此相关建筑单位必须要熟练掌握大体积混凝土浇筑施工技术,施工单位需要从人才引进、混凝土配比、施工过程以及施工后养护工作等进行监督管理,确保混凝土的施工质量和效率。

参考文献

[1] 厉志平. 大体积混凝土施工技术在房屋建筑工程的应用[J]. 建材与装饰, 2019(35):45-46.

[2] 许钢,张慧. 大体积混凝土施工技术在房屋建筑工程的应用[J]. 科技经济导刊, 2017(03):95.

[3] 王建恩. 大体积混凝土施工技术在房屋建筑工程的应用[J]. 绿色环保建材, 2018(05):203.

统设计%Health monitoring system for Sutong Yangtze River Bridge[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 029(004):170-177.

[7] 罗干,丁幼亮,朱浩樑. 抗震支吊架抗震连接构件的破坏试验与数值分析研究[J]. 工程建设与设计, 2019.

[8] 徐超,周帮友,刘信恩,等. 机械螺栓连接状态监测和辨识方法研究进展[J]. 强度与环境, 2009(02):30-38.

[9] Esmaeel R A, Taheri F. Application of a simple and cost-effective method for detection of bolt self-loosening in single lap joints[J]. Nondestructive Testing & Evaluation, 2013, 28(3):208-225.

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0806001),江苏省杰出青年基金(BK20190013),国家自然科学基金(51978154)