

结构健康监测研究进展及增加建筑智能化程度

王健^{1,2}, 李红民^{1,2}, 张家瑞^{1,2}, 王立新^{1,2}, 曲宗昊^{1,2}

(1. 山东建筑大学信息与电气工程学院; 2. 山东省智能建筑技术重点实验室)

【摘要】综述了结构健康监测系统的部分应用, 分析了当前公共建筑结构健康监测中的一些重点难点。在此基础上, 从智能建筑发展的角度提出了一套大型公共建筑健康监测系统的设计流程, 其中强调了以传感器布置、损伤识别和安全评估作为当前研究重点, 使整个结构的监测与安全评估有机结合, 从而为智慧城市的发展奠定基础, 为智慧城市的发展奠定基础。

【关键词】智能建筑; 健康监测系统; 安全评估; 智慧城市

【基金项目】国家自然科学基金资助, 项目编号: 61273326

中图分类号: TU855; TU17

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2022.03.033

A Review of Structural Health Monitoring and Increasing the Degree of Building Intelligence

WANG Jian^{1,2}, LI Hong-min^{1,2}, ZHANG Jia-rui^{1,2}, WANG Li-xin^{1,2}, QU Zong-hao^{1,2}

(1. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Intelligent Building Technology)

【Abstract】In this paper, part of the applications of the structural health monitoring system are summarized, and some key points and difficulties in the current structural health monitoring of public building are analyzed. On this basis, a set of design process of a large-scale public building health monitoring system is proposed from the perspective of the development of intelligent buildings, which emphasizes the current research focus on sensor arrangement, damage identification and safety assessment, so that the monitoring and safety assessment of the entire structure are organically combined, so as to increase the intelligence of intelligent buildings and lay the foundation for the development of smart cities.

【Keywords】intelligent buildings; health monitoring systems; safety assessments; smart cities

1 引言

当前, 我们需要从学术角度重新审视智能建筑、智慧建筑, 以学术创新为建筑智能化赋能、添动力。在此, 可以将智能建筑看作一个具有开放性的复杂系统^[1]。在世界范围内, 我国拥有建筑领域的最大市场。对大型公共建筑智能化的设计普遍包括信息化应用系统、智能化集成系统、信息设施系统、建筑设备管理系统、公共安全系统、机房工程等。

目前, 国内无论是智能建筑设计标准, 还是绿色建筑评价标准所针对的范围都是建筑全寿命周期, 这就涉及在役建筑结构在整个寿命周期内的性能状态, 其安全问题是否对使用者生命财产构成了威胁。同时, 研究表明, 建立结构健康监测的工程结构, 通过既有建筑适当延寿可以大幅降低碳排放量^[2]。对大型公共建筑建立结构健康监测系统不仅保障人民生命财产安全, 对绿色可持续发展也具有推动作用。

2 结构健康监测技术国内外研究现状

结构健康监测技术包括多学科的交叉融合, 如

传感技术、结构工程、材料科学、数据科学等。随着各类科学技术的发展, 结构健康监测在土木工程、航空航天、机械制造等领域具有广泛的实际工程应用, 大量的工程实例表明该技术对保障结构安全具有重要作用^[3-4]。完整的结构健康监测系统包括传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据管理子系统、损伤识别和安全评估子系统四部分。其完整的功能及流程如图1所示。

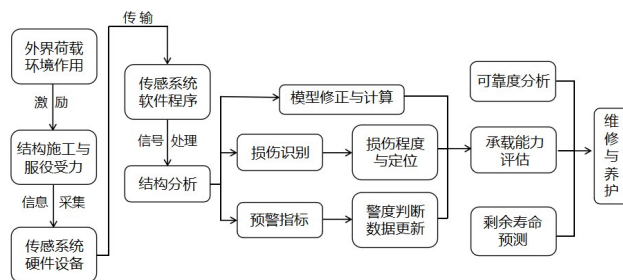


图1 结构健康监测的功能与流程

为了保障公共建筑的安全, 国内外对结构健康监测做了大量研究。Roghaei等^[5]使用压电传感器对三层钢结构医院建立了监测系统, 利用 Sap2000 和

FEMA356软件建立模型进行了非线性静力分析,监测系统可对地震作用时进行预警;Pierdicca等^[6]对改造后的钢筋混凝土学校进行了持续一年的监测,通过模态分析追踪到了结构动态演变,其监测数据为改造工程干预措施奠定了基础;Zhang等^[7]为上海某250m高的超高层建筑设计了健康监测系统并进行不同时期模态参数变化的研究,为超高层建筑的模态修正、损伤识别奠定了基础;Saisi等对意大利一座历史教堂建筑进行了实时监测,为历史建筑的保护提供了数据支撑^[8]。国内已建立健康监测系统的部分公共建筑如表1所示。

表1 健康监测系统在公共建筑工程中的应用

序号	工程名称	监测内容	监测设备
1	大连市体育馆	索应力、撑杆应力、弦杆应力、结构整体位移、支座位移和倾角、温度、结构整体和局部振动	光纤光栅应变传感器、光纤光栅温度传感器、单轴倾角传感器、IC压电加速度传感器
2	深圳市民中心屋顶网架	风荷载、自振频率、应力场、焊缝损伤	风速风向仪、风压传感器、加速度传感器、应变传感器
3	国家游泳中心	应变、应力、温度	230个焊接式光纤光栅应变传感器
4	国家体育场	构件应力、应变	基于静态应变无线数据采集与传输的应力监测系统

2.1 传感器布置研究现状

如何利用有限的传感器获得可以反映结构完整状态的监测数据是健康监测中的难点,专家学者对此做了大量研究。传统布置方法有:有效独立法^[9]、模型缩减法^[10]、敏感性分析法^[11]、奇异值分解法^[12]和灵敏度法^[13]等。这些方法可以归纳为两类:基于模态可观性和基于损伤识别的优化布置方法。为了评估不同布置方法的优劣,Penny等^[14]提出了5条量化优劣的准则:模态保证准则、模态修正准则、奇异值分解准则、模态振型动能和Fisher信息矩阵。Mahjoubi等^[15]以上海中心大厦为例对三轴加速度计的布置方案进行了研究,以确定传感器的最佳位置。无线智能传感器组建成监测传感网络极大方便了健康监测技术的实施^[16],传感器组成传感网络的优化布置方法也取得了较多研究^[17]。随着无人机技术的发展,无人机对应急监测可取得传统传感器难以取得的效果。Zhao等^[18]提出一种基于无人机的三维重建模型用于大坝应急监测,提高了应急监测的效率。

若能将应急监测方法有效融入健康监测系统,将大大提升系统对应急事件如地震、台风等不可抗自然灾害的应急处置能力。

2.2 损伤识别研究现状

损伤识别在土木工程领域是一大研究热点,Sohn等^[19]将损伤识别归纳概括为5个层次:①判断结构是否有损伤部位;②确定出损伤位置;③诊断损伤类型;④对损伤程度进行量化;⑤估计结构剩余寿命。结构损伤识别按照范围大小可以分为局部损伤识别和全局损伤识别两种方法^[20],局部损伤识别通过先进检测技术,如超声波、X射线等方式对结构局部进行检查,但是对大型复杂结构工程则不适用。研究学者们为解决大型复杂结构损伤识别问题,将研究方向逐步转向全局损伤识别方法。依据损伤识别判断性质不同,又将其分成确定性损伤识别和不确定性损伤识别两种方法。确定性方法主要有^[20]:①基于动力指纹的识别方法;②基于模型修正的识别方法;③基于时域信号的识别方法;④基于神经网络的识别方法。其中,前三种识别方法是结构工程中的主要研究方向,但在实际工程中不确定性因素较大,影响了确定性方法的应用效果,发展不确定性识别方法成为趋势,主要包括三个方向:①基于概率统计损伤识别^[21];②基于数据融合损伤识别^[22];③基于区间模型修正损伤识别^[23]。随着人工智能的发展,国内外学者对其在损伤识别中的应用做了相关研究,Tang等^[24]基于群体稀疏性感知的卷积神经网络对离散缺失的监测数据进行了恢复,提高了所获监测数据的质量;鲍跃全等^[25]通过机器学习利用所获数据进行损伤识别,提出了结构健康监测数据科学与工程研究方向。

2.3 安全评估方法研究现状

受检测设备和方法限制时期,安全评估主要以传统经验法为主,受专家主观因素影响较大,难以反应结构真实状态。随着基础科学研究的不断深入,以概率论为基础的可靠度理论评估法、以层次分析法为基础的模糊综合评价法、神经网络法等众多评估方法被提出并应用于既有建筑的安全评估。1996年Melhem等^[26]首次将通过模糊层次分析法对桥梁结构进行了稳定性评估;Kawamura等^[27]针对桥梁专家评价系统提出神经网络评估方法;López等^[28]对智利Concepción的十四层钢筋混凝土建筑进行了安全

评估,通过现场检测数据及结构模型评估了该建筑海啸发生期间垂直疏散结构的安全性;Wang等^[29]通过600m高超高层建筑结构健康监测系統所获数据,基于贝叶斯理论对强风作用下的人体舒适度作出了评估。

综上所述,基于监测数据的安全评估、舒适度评估等是当下发展的方向,就目前已建立的监测系统而言,尚未有满意的运营实例,有的只做到了监测预警而无安全评估。可以说不具有安全评估的健康监测系统是不完整的,充分挖掘监测到的数据对既有建筑结构安全运营维护是重要的。

3 结构健康监测技术对智能建筑的推动作用

建筑智能化的程度归根到底还是使用者的需求决定的。对大型公共建筑设计一套结构健康监测系統对于智能运维可以起到推动作用,将其看作子系统综合集成到建筑信息设施系統中,毫无疑问增加了建筑智能化的程度。当然,在设计初期首先要明确健康监测系統的等级,如实时动态在线监测、定期监测/检测等。健康监测系統设计流程如图2所示。

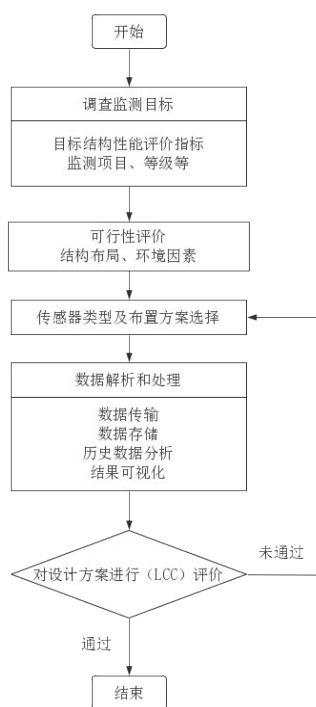


图2 结构健康监测系统设计流程

4 总结与展望

尽管目前结构健康监测技术已经取得了丰富的研究结果,但实际结构工程中很少有较满意的运营案例,甚至有部分研究仅停留在理论或实验阶段,难以具体应用。原因不排除实际工程结构复杂,随机因素较多,但根本在于结构健康监测技术属于交叉学科领域,研究过程中存在多学科融合。

1) 传感器的优化布置

合理的传感器布置方案是获得准确结构参数的首要环节。虽然当前已有大量的研究结果,但针对不同的结构形式必然有不同的传感器布置方案,特别是复杂结构,对传感器的最佳布置数量、提高传感系统的抗噪性等方面还有大量问题需要解决。

2) 结合有限元模型修正的损伤识别

有限元模型修正是行业研究热点与难点。对于复杂建筑结构,由于缺少所需的现场实测数据及完整的模拟技术,因此很少有系统的研究成果和工程范例。将现有的修正方法应用到大型建筑结构的模型修正或在已有研究基础上发展新的模型修正理论是当前具有挑战性的课题。

3) 科学的安全评估方法

复杂结构整体稳定性往往取决于极限承载力,对整体安全性进行评估则需进行非线性分析。现有评估方法针对混凝土结构、砖混结构和普通钢结构而言是合理的,但对于大型公共建筑,尤其是大跨度空间结构,其安全评估方法有待进一步研究。

总之,进一步增加对结构健康监测系統中关键技术和理论的研究,尤其是本文所强调的三部分理论应用问题,对大型公共建筑建立的结构健康监测系統而言,无论是从安全性还是增加建筑智能化程度来讲都具有积极作用。因此,结构健康监测系統对推动建筑智能化的发展及智慧城市的实施具有不可或缺的作用。

参考文献

- [1] 林志森. 智能建筑的开放性探析[J]. 四川建筑科学研究, 2005(3): 109-111.
- [2] Raeisi F, Algothi B, Mufti A, et al. Reducing carbon dioxide emissions through structural health monitoring of bridges[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11(3): 679-689.
- [3] Ou J, Li H. Structural health monitoring in mainland

- China: review and future trends[J]. Structural health monitoring, 2010, 9(3): 219-231.
- [4] Weijtjens W, Verbelen T, De Sitter G, et al. Foundation structural health monitoring of an offshore wind turbine—A full-scale case study[J]. Structural Health Monitoring, 2016, 15(4): 389-402.
- [5] Roghaei M, Zabihollah A. An efficient and reliable structural health monitoring system for buildings after earthquake[J]. APCBEE procedia, 2014, 9: 309-316.
- [6] Pierdicca A, Clementi F, Mezzapelle P, et al. One-year monitoring of a reinforced concrete school building: Evolution of dynamic behavior during retrofitting works[J]. Procedia engineering, 2017 (199) : 2238-2243.
- [7] Zhang F L, Yang Y P, Xiong H B, et al. Structural health monitoring of a 250 - m super - tall building and operational modal analysis using the fast Bayesian FFT method[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(8): e2383.
- [8] Saisi A, Gentile C, Ruccolo A. Pre-diagnostic prompt investigation and static monitoring of a historic bell-tower [J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 833-844.
- [9] Kammer D C. Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1991, 14(2): 251-259.
- [10] Guyan R J. Reduction of stiffness and mass matrices[J]. AIAA journal, 1965, 3(2): 380-380.
- [11] 吴子燕, 何银, 简晓红. 基于损伤敏感性分析的传感器优化配置研究[J]. 工程力学, 2009(5): 239-244.
- [12] Kim H B, Park Y S. Sensor placement guide for structural joint stiffness model improvement[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1997, 11 (5): 651-672.
- [13] Shi Z Y, Law S S, Zhang L M. Optimum sensor placement for structural damage detection[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(11): 1173-1179.
- [14] Penny J E T, Friswell M I, Garvey S D. Automatic choice of measurement locations for dynamic testing[J]. AIAA journal, 1994, 32(2): 407-414.
- [15] Mahjoubi S, Barhemat R, Bao Y. Optimal placement of triaxial accelerometers using hypotrochoid spiral optimization algorithm for automated monitoring of high-rise buildings[J]. Automation in Construction, 2020 (118) : 103273.
- [16] Sofi A, Regita J J, Rane B, et al. Structural health monitoring using wireless smart sensor network – An overview[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022 (163) : 108113.
- [17] Chong C Y, Kumar S P. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(8): 1247-1256.
- [18] Zhao S, Kang F, Li J, et al. Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction[J]. Automation in Construction, 2021 (130) : 103832.
- [19] Sohn H, Farrar C R. Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals[J]. Smart materials and structures, 2001, 10(3): 446.
- [20] 赵一男, 公茂盛, 杨游. 结构损伤识别方法研究综述[J]. 世界地震工程, 2020, 36(2): 73-84.
- [21] Huang Y, Beck J L, Li H. Multitask sparse Bayesian learning with applications in structural health monitoring [J]. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2019, 34(9): 732-754.
- [22] 刘涛, 李爱群, 缪长青, 李枝军. 基于数据融合的结构损伤识别方法研究[J]. 工程力学, 2008(1): 16-21.
- [23] Gabriele S, Valente C. An interval-based technique for FE model updating[J]. International Journal of Reliability and Safety, 2009, 3(1-3): 79-103.
- [24] Tang Z, Bao Y, Li H. Group sparsity-aware convolutional neural network for continuous missing data recovery of structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2021, 20(4): 1738-1759.
- [25] Bao Y, Chen Z, Wei S, et al. The State of the Art of Data Science and Engineering in Structural Health Monitoring[J]. Engineering, 2019, 5(2): 234-242.
- [26] Melhem H G, Aturaliya S. Bridge condition rating using an eigenvector of priority settings[J]. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, 1996, 11(6): 421-432.
- [27] Kawamura K, Miyamoto A. Condition state evaluation of existing reinforced concrete bridges using neuro-fuzzy hybrid system[J]. Computers & structures, 2003, 81(18-19): 1931-1940.
- [28] López J J O, Reyes L V, Vera C O. Structural health assessment of a R/C building in the coastal area of Concepción, Chile[J]. Procedia engineering, 2017 (199) : 2214-2219.
- [29] Wang Y W, Zhang C, Ni Y Q, et al. Bayesian probabilistic assessment of occupant comfort of high-rise structures based on structural health monitoring data[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022 (163) : 108147.