

空间结构健康监测研究现状与展望

罗尧治, 赵靖宇

(浙江大学 空间结构研究中心, 浙江杭州 310058)

摘要: 空间结构是大跨度、大空间和大面积建筑结构的主要形式, 在国家基础设施与城市建设领域有广泛应用, 其结构安全性至关重要。空间结构健康监测通过传感技术准确获取结构响应, 实时反映结构的性能状态, 为空间结构施工、运营与管理决策提供科学的依据与指导。经过多年的研究和工程实践, 已经发展了适合大型空间结构的物联网无线传感监测技术, 建立了多维数据分析理论, 并在国家体育场、国家速滑馆、北京大兴国际机场航站楼等重大工程中实现规模化应用, 取得了阶段性研究进展。通过对空间结构健康监测的研究及应用现状进行系统总结, 梳理空间结构健康监测的特点, 围绕荷载与响应多维传感及大面域传输网络综述了其传感监测技术的研究现状, 归纳了结构荷载分析、响应分析以及结构状态评估的监测数据分析理论。同时, 基于融合大数据、云计算以及人工智能展望其未来研究方向, 旨在进一步推动空间结构健康监测的创新与发展。

关键词: 空间结构; 结构健康监测; 传感技术; 数据分析理论; 结构状态评估; 工程应用

中图分类号: TU393.3 **文献标志码:** A

Research status and future prospects of space structure health monitoring

LUO Yaozhi, ZHAO Jingyu

(Space Structure Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Space structures are the main form of long-span, large-space, and large-area building structures, which are widely used in national infrastructure and urban construction, and their structural safety is of paramount importance. Space structure health monitoring (SSHM) accurately obtains structural responses through sensing technology, reflects the performance state of the structure in real-time, and provides a scientific basis and guidance for the construction, operation, and management decision of space structures. After years of research and engineering practice, wireless-sensor technology based on the internet of things has been developed, which is suitable for large-span space structures. Multi-dimensional data analysis theory has been proposed, and the large-scale applications have been implemented in major projects such as the National Stadium, the National Speed Skating Oval, and the Beijing Daxing International Airport Terminal Building, the research progress has been achieved. By systematically summarizing the current research and applications of SSHM, the characteristics of SSHM are clarified, and the current research situation of the sensing technology is reviewed around the multi-dimensional sensing of load and response, as well as the large-area transmission networks. The monitoring data analysis theories are summarized, including structural load analysis, response analysis, and structural condition assessment. Meanwhile, future research directions are foreseen based on the integration of big data, cloud computing, and artificial intelligence, aiming to further promote the innovation and development of SSHM.

Keywords: space structure; structural health monitoring; sensing technology; data analysis theory; structural condition assessment; engineering application

基金项目: 浙江省重点研发计划(2021C03154), 国家重点研发计划(2017YFC0806100, 2021YFF0501001)。

作者简介: 罗尧治, 出生于 1966 年, 男, 工学博士, 教授, 主要从事空间结构与钢结构体系理论和设计、结构健康监测技术研究。

email: luoyz@zju.edu.cn

收稿日期: 2022 年 1 月

0 引言

空间结构是一种具有三维空间形体,且在荷载作用下具有三维受力特性的结构。相较于平面结构,空间结构具有结构受力合理、使用空间大、工业化程度高和结构形式多样等特点,是大跨度、大空间和大面积建筑与工程结构的主要形式。自20世纪80年代以来,各种新型的空间结构形式不断涌现^[1],造型新颖的地标性大型公用建筑和民用设施在国内广泛应用,其中具有代表性的有国家体育场、国家速滑馆和北京大兴国际机场等。

快速发展空间结构的同时,更要重视其潜在的安全风险。一方面空间结构大多为创新性的结构设计,其工程庞大施工过程复杂,部分新工艺缺乏充足的工程案例经验;另一方面,空间结构在长期服役过程中荷载作用具有显著的随机性,加之环境侵蚀、材料老化、疲劳效应等各种因素的影响,其性能状态存在较大的不确定性^[2]。结构健康监测能够有效地定量获取结构在复杂工况下的响应,实时反映结构的性能状态,弥补数值仿真与模型试验难以精确模拟其施工和运营复杂全过程的缺陷,对保障空间结构安全具有重要意义。

结构健康监测通过传感技术模拟人体自我感知能力,能够对结构性能状态及其演化规律进行实时感知。光纤传感技术作为早期空间结构健康监测领域的主要技术手段,具有集传感与传输于一体、体积小、抗电磁干扰能力强等优点,但实际应用却受到线路布设复杂及后期维护困难等的限制。为了解决上述有线监测中存在的问题,科研人员对无线传感技术开展广泛的研究,并逐渐确立了其为空间结构健康监测发展的主导方向。诸如,Lynch^[3]基于Mica平台开发出一种计算能力强、能耗低的无线传感单元,但仅支持单跳的星型网络拓扑,传输距离十分有限。Nagayama等^[4]与Intel公司合作研发了基于Imote微处理器的无线传感器,并对数据丢包、数据同步性以及数据传输范围等开展深入研究,提高了无线传感器的性能。罗尧治等^[5-8]基于模块化设计,研发定制化传感器数据采集板及节点嵌入式程序,形成了具有多用途通用性的硬件设计平台,通过搭载多种参数监测原理的采集模块,实现了加速度、位移、应变、索力、风速风压等各类无线传感器的功能个性化开发,适用于大规模的空间结构荷载与响应实测;同时,研究了适用于大空间、大面域、大规模测点布设的树形智能无线传感技术^[9-10],解决了无线传输网络的动态拓展智能组网与时间同步精度修正问题^[11-12],实现了上述技术在空间结构监测中的规模

化应用^[13-16],推动了空间结构健康监测的发展。

文中从监测方法、传感技术、数据分析理论以及工程应用方面系统总结空间结构领域健康监测的研究现状,即对空间结构健康监测的特点进行总结,明确健康监测方法的核心内容;就空间结构健康监测所面临的技术挑战,系统总结传感监测的研究问题与技术方法;阐述空间结构健康监测的数据分析目标,总结数据处理的研究方向与分析理论;概括空间结构领域健康监测工程应用的发展趋势,并提出空间结构健康监测未来研究方向的建议。

1 空间结构健康监测方法

1.1 监测特点

空间结构作为大型公共建筑典型结构形式,主要特点是沿平面方向延伸,呈现大面域的覆盖,明显区别于桥梁、大坝、石油管道等线性分布的结构。通常将其分为薄壳结构、网架结构、网壳结构、悬索结构和薄膜结构。其成型过程呈多阶段、多工艺混合等特点,具有明显的结构时效效应。此外,其长期服役过程的外界环境状况存在较大的不确定性,且各类荷载的作用机理相较于平面结构更为复杂。可见,空间结构健康监测具有分布面域大、体系分类多、施工难度高以及荷载效应复杂的特点。

1.2 监测机制

空间结构具有丰富的结构体系、复杂的施工方法、多样的结构单元,其监测机制应以空间结构受力性能特点为基础,综合考虑不同施工方法的关键工序,兼顾不同结构单元的力学性能。

不同刚度类型的结构体系致使结构受力性能上存在显著的差异,因而对于不同刚度体系的空间结构其健康监测对象应有所区别。对于刚性空间结构,一般以一种或多种刚性的梁、杆、板壳作为基本受力单元,由于太阳辐射以及建筑构造的影响,刚性空间结构通常处于非均匀温度场中,导致其温度效应极其复杂^[13]。而对于柔性空间结构,一般以柔性的索、膜作为基本受力单元,风荷载远大于结构自重,对风等低频脉动荷载较为敏感,且结构与风场间的耦合作用明显^[17]。与刚性、柔性空间结构相比,刚柔性结构兼顾了两者的结构性能,决定了其对温度与风均具有相对敏感性。

不同的施工方法导致结构成型方式的不同,因而对于不同成型方式的空间结构其健康监测的关键工序亦有所不同^[18]。整体提升安装方法是利用提升设备将结构提升至预设位置再进行安装,主要用于大面积网架的屋盖结构施工中,其关键在于对提升点高度以及结构应力的控制。整体张拉方法是利用

特定数量的液压设备将索同步张拉至合理标高,适用于大型索膜结构安装,其难点在于对拉索索力以及结构应力的控制。而高空拼装方法则是通过增设临时支撑将杆件和节点在结构设计位置直接进行拼装,将结构安装完成后撤去临时支撑使结构达到设计状态,其关键在于对卸载过程结构变形和应力监测的控制。

不同的结构单元在力学性能上具有不同的特征,杆单元以轴力为主,索、膜单元以张力为主,梁、板壳单元既有轴力又受弯矩。索、膜柔性单元一般注重内力监测,杆、梁、板壳刚性单元则不仅考虑内力监测还需跟踪其变形。支座作为特殊的结构单元,能够将结构反力可靠地传向支撑结构并保证上部结构的平移与转动,其位移监测结果能够有效地反映空间结构整体工作性能。

1.3 监测策略

结构健康监测参数作为监测机制的直接体现,对监测数据能否有效反映空间结构的荷载信息与响应状态至关重要。基于其监测机制,确定加速度、速度、位移、应变、轴力、索力、温度及风荷载等多种监测参数,其中温度、风荷载监测直接反映结构静动态荷载在空间上的分布状况,而加速度、速度、位移、应变、轴力、索力监测则直接量化结构在环境荷载以及突发事件作用下的局部与整体响应。

不同监测参数反映空间结构的不同特性,因而不同类型传感器布置原则不尽相同,但均要最大程度反映结构信息,并满足对结构状态变化敏感的要求。加速度、速度动态数据是获取结构自振特性的基础,其测点布置一般依据其动力特性。而位移、应变、轴力及索力静态数据的变化一般与温度、风荷载以及雪荷载相关,其测点布置需充分参考可变荷载敏感性分析的结果;结构温度测点布置需考虑其时空分布的不均匀性,而风荷载测点布置则要依据其表面风场特性确定。

综上,空间结构监测策略是在监测机制的基础上明确监测对象的参数类别及其布置依据,具体见表 1。

表 1 空间结构监测策略			
Table 1 Monitoring strategy of space structure			
监测类别	监测参数	测点布置依据	
结构响应	整体	加速度、速度	动力特性
		位移	荷载敏感性
	局部	应变、索力	荷载敏感性
结构荷载	静态	温度	温度时空分布
	动态	风荷载	表面风场

2 空间结构健康监测传感技术

监测传感技术是利用各类智能传感元件组建采集与传输网络,实现对监测对象力学、热学及电学等属性进行感知的技术。表 2 中汇总了空间结构健康监测传感技术分类,由表 2 可知,围绕荷载与响应多维传感技术及大面域传输网络技术,开展了多测点布置、多参数采集、大面域传输及多通道同步等方面研究,提出了包括多参数传感器开发、多测点优化布置的传感采集技术,与大面域数据传输、多通道时间同步的传输网络技术。

表 2 空间结构监测传感技术汇总
Table 2 Summary of sensing technology for space structures

技术分类	研究对象	研究内容	监测技术
传感采集	多参数传感	加速度、位移、应变、索力、风速、风压传感器开发	荷载与响应多维传感
	多测点布置	布置方法、优化算法	
传输网络	大面域传输	节点硬件平台、网络拓扑控制、组网技术、压缩感知	大面域传输网络
	多通道同步	硬件同步、软件同步	

2.1 荷载与响应多维传感技术

多维传感器技术是获取空间结构在施工与长期服役过程中结构荷载与响应的关键,其研究涉及加速度、位移、应变、索力、风速、风压等各类传感器的硬件开发。图 1 所示为本文作者自主研发的各类无线传感器在实际工程中的应用^[5-8]。

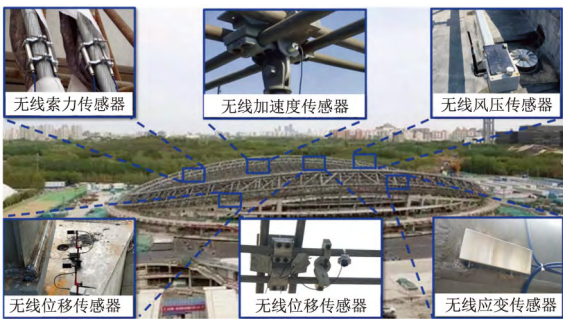


图 1 无线传感器应用^[5-8]

Fig. 1 Application of wireless sensors^[5-8]

2.1.1 加速度传感器

加速度传感器用于空间结构振动响应的监测,包括压电式、压阻式、电容式以及 MEMS 型,其中压电式加速度传感器属于惯性式传感器,由压电晶体元件产生的电荷电压换算得到加速度,适用于高频

响应的监测,但易受环境温度影响产生数据漂移^[19]。而压阻式加速度传感器则是基于压阻效应,由接入惠斯通电桥压阻条产生的电信号反算加速度^[20],对低频率响应非常敏感,适用于低频响应的监测。电容式加速度传感器是通过置板电容技术感应由加速度引起的电容位移,适用于短时剧烈冲击产生的振动监测,但其滞后误差大且寿命短^[21]。MEMS型加速度传感器则采用微机电系统技术,具有体积小、质量轻、能耗低等特点,为此,Zhu等^[22]总结多种适用于结构振动监测的MEMS加速度计,并讨论了其在信号类型、噪声密度、测量范围以及灵敏度等方面的性能特点;罗尧治等开发了基于MEMS的低功耗、高灵敏度无线三向加速度传感器,适用于大规模的空间结构振动响应实测。

2.1.2 索力传感器

索力传感器用于空间结构中索的拉力监测,主要包括频率、压力传感器、磁通量及应变等方法。其中频率方法是由自振频率换算得到索力,然而对于索网类结构,索力与自振频率的关系复杂,因而频率方法应用受到了限制^[23]。压力传感器方法是通过在拉索锚具上安装压力传感器以实现索力实测,仅适用于具有穿心式锚具的索力实测^[24]。磁通量方法是基于磁弹效应根据磁导率的变化测定索力,但现场标定工作繁琐,实测成本高,难以实现大规模索力实测^[25]。应变方法则是一种直接实测拉索应变并利用索轴向刚度换算得到索力的测量方法,对此,吴俊等^[26]提出了在拉索锚具内布置智能光纤进行索力测量,但光纤的封装工艺复杂,影响锚具的受力性能;罗尧治等^[6]提出了基于表面应变的外置应变法进行索力实测,适用于大规模索力的长期实测。

2.1.3 应变传感器

应变传感器用于空间结构中构件的应力监测,包括电阻式、光纤光栅式以及振弦式,其中光纤光栅式和振弦式应变传感器的应用最为普遍。电阻式应变传感器基于电阻丝的应变效应,通过测量应变片敏感栅的电阻值变化得到被测试构件的应变,测试方法比较成熟、性价比高且对试件影响小,但易受环境因素影响,仅适用于短期室内监测^[27]。光纤光栅式应变传感器是基于光纤材料的光敏性,通过光纤光栅解调仪测量的Bragg光栅反射波长得到应变值,具有体型小、灵敏度高以及抗干扰能力强的特点,适用于静态和周期性动态监测^[28]。振弦式传感器是基于钢弦张力与固有频率的对应关系,通过固有频率的变化来得到结构的应变,具有性能稳定、寿命长的特点,适用于长期静态监测^[29]。基于振弦原理的抗干扰、漂移小的无线应变传感器,适用于大规模的空间结构应变长期实测^[5]。

2.1.4 位移传感器

位移传感器用于空间结构的变形监测,一般分为接触式与非接触式两类。LVDT作为接触式位移传感器的一种,在静态和动态位移测量中表现良好^[30]。而GPS作为另一种接触式传感器,可以在全天候条件下监测结构的绝对位移^[31]。由于上述两者都需要与被测目标形成固定连接,所以测点的位置很大程度上受安装难度的影响。而非接触式传感器则可以实现位移传感器在被测目标周围的灵活布置,主要包括基于视觉^[32]、基于雷达^[33]和基于激光的位移传感技术^[34]。其中,基于视觉的传感技术通过图像测量技术实现标记点位移的跟踪,适用于多目标动态监测,但依赖于理论方法和软硬件条件,可靠性有待进一步提高。基于雷达的传感技术是通过测量电磁波的相位差来获得位移,适用于测点表面平整且周围环境简单的位移监测,不便于进行大规模的部署。激光位移传感器则是通过成像系统捕捉激光像斑位置的变化计算位移,其技术成熟经济实用;基于激光测距的长距离、高精度、非接触式无线位移传感器,适用于大规模的空间结构位移实时监测^[8]。

2.1.5 风速、风压传感器

空间结构风场监测主要包括风速、风向及风压三类,一般风速风向传感设备同时提供风速与风向信息,而风压则需要压力传感设备单独测定。目前,风速、风向传感器分为机械类和超声波类,后者的精度以及耐久性较前者具有明显优势,但其能耗与价格相对较高。风压传感器一般基于膜片的压阻效应,通过捕捉膜片的电阻变化转换为膜片压差,依据压力来源不同分为绝压、差压和表压等类型。对于空间结构屋盖,风荷载在其表面形成静压场^[35],表压传感器测量值基本在0附近波动,该静压场为10~1000 Pa的微压级别,与大气压相差2~3个量级,绝压传感器需要达到0.05%以上的精度才能满足测量需求。例如,美国佛罗里达海岸监测计划FCMP研发了一套基于绝压传感器的无线风压传感系统^[36],用于飓风期间建筑屋面的风压监测;罗尧治等^[7]相继开发了基于差压原理高分辨率的无线风压传感器,以及基于绝压原理无外部管路的无线风压传感器,适用于大规模的空间结构强风条件下的连续监测,并成功应用于北京大兴国际机场超大面域屋面风荷载监测。

2.2 大面域传感网络技术

与有线传感相比,无线传感适用于传感器在大范围分布的连接与数据传输,契合了空间结构大面域监测的需要,其研究涉及测点优化布置、网络拓扑控制与组网技术、时间同步、压缩感知以及节点硬件开发等多方面。

2.2.1 测点优化布置

测点优化布置是传感网络拓扑控制的基础,对健康监测系统能否高效采集结构有效信息至关重要。主要涉及测点布置方法与优化算法的研究。其中,测点布置方法包括基于敏感性的静力参数布置方法以及基于动力特性的动力参数布置方法。同时,进一步细分为基于易损性理论的构件重要性评价法^[37]、基于 Fisher 信息矩阵的有效独立法^[38]、模态置信准则法^[39]、模态应变能法^[40]以及联合方法^[41]等。而优化算法则随着优化原理的发展,逐渐向全局优化目标深入过渡,形成了以遗传优化^[42]、粒子群优化^[43]、猴群优化^[39]、狼群优化^[44]、K-means 聚类优化^[45]等为代表的测点布置智能优化算法。

2.2.2 网络拓扑控制及组网技术

网络拓扑控制与组网技术是传感技术的核心,决定了传感网络能否方便快捷、持续稳定地传输监测数据。常用的拓扑结构有平面网络、分层网络两种形式,其中平面网络结构的所有节点都具有完全相同的通信功能;而分层网络结构中节点功能区分明确,并且具有很好的可拓展性。平面网络基于功率的拓扑控制算法^[46],而分层网络则基于层次分簇进行拓扑控制^[47],通过获取高效优化的骨干网络,以提高网络的吞吐量、生存周期、能耗等性能。路由协议是组网技术的关键,例如:韩雨滂等^[48]提出一种低占空比网络下能量高效动态路由协议 EEDRP,解决了因链路不可靠导致数据传输失败问题;武小年等^[49]提出了一种基于改进粒子群算法的分簇路由协议,降低节点通信能耗且延长网络生存周期。上述路由协议局限于模拟仿真测试,缺乏节点硬件的实测性能研究。为此,Shen 等^[10-11]基于 LoRa 技术开发了节点的嵌入式程序以及定制化的组网软件系统,针对不同的结构体量和采集节点分布实现了星形、链型以及树形多种网络形式的组网实测,提出并测试了一种新型多跳、动态和多参数网络协议,解决了空间结构时变过程采集测点的自由拓展、动态组网难题。

2.2.3 时间同步

时间同步是传感网络协同工作的关键,其精度影响结构模态振型、风荷载相关性等数据分析结果。数据的时间同步精度受采集时长、采样频率、软件和硬件等因素的影响,其同步方法可以分为硬件和软件两类。在硬件时间同步方法方面,Araujo 等^[50]研发基于 Zigbee 标准的同步模块,采用基站节点向所有采集节点发送同步时钟信号的方式,实现大量采集节点的时间同步;Spencer 等^[51]则开发用于时间同步的工具包 SHMST,通过 GPS 接收器周期性调节路由节点时钟,并将更新后的时钟信息发布到子网络

的采集节点,实现了基于 GPS 模块的时钟同步;王煜成^[12]开发了 FM 接收模块自动或人工干预侦听民用 FM 准点报时信号,基于 FM 准点报时的同步及其精度修正方法,实现了大面域传感网络的高精度同步采集。在软件时间同步方面,根据数据传输的方向大致可以分为发送者-接收者、接收者-接收者和仅接收者三类。其中,发送者-接收者同步通过单个节点双向或单向通信实现,包括 TPSN^[52]和 FTSP^[53]传感器网络时间同步协议。接收者-接收者同步则允许参考节点向一组节点发送数据,以便将其余时钟同步到参考时钟,如参考广播同步 RBS^[54]。仅接收者同步中,一组传感器节点的同步可以通过只接收一对同步计时消息来完成,如成对广播同步 PBS^[55]。此外,TSMP 网络协议通过时分多址 TDMA 与频率跳频的结合实现在噪声复杂条件的同步^[56];Hu 等^[57]通过最小化广播同步消息的数量节约节点功耗,提出了能量平衡时间同步协议。

2.2.4 压缩感知

压缩感知作为数据采集传输的关键技术,有效地提高了传感网络的能源利用效率。诸如: Xu 等^[58]提出在无线传感器中应用小波数据压缩方法,解决无线传感器数据传输带宽限制的问题;Lynch 等^[59]采用 Huffman 编码减少无线传感器的数据传输量。上述数据压缩算法,先采集完整数据后对数据进行压缩处理,增加了传感器节点数据处理的能耗与时间。为此,Bao 等^[60]提出基于贝叶斯概率模型的压缩采样方法,直接用于采集压缩格式的数据。Peckens 等^[61]提出了基于哺乳动物听力系统的启发传感器实现数据的压缩感知,并传统数据压缩方法进行了比较。O'Connor 等^[62]采用压缩采样匹配追踪方法对压缩采集的数据进行重构,并开展了模态识别的研究。Wan 等^[63-64]提出多任务贝叶斯压缩采样方法,通过考虑测点之间的数据相关性,进一步提高了多测点的数据压缩率与数据重构精度。

2.2.5 节点硬件开发

节点硬件是搭载上述多维传感技术与网络传输技术的基础平台,其硬件质量直接影响结构监测结果的可靠性。对于硬件平台的研发,集中于数据采集、嵌入式计算以及无线信道等模块,进而推动了传输硬件的处理器性能、数据存储、传输距离以及传输速率的发展,形成了以 Zolertia、Waspmote、Shimmer3、Panstamp 以及 LRWAN 为代表的商业化传感平台^[65]。同时,Jr 等^[66]在 Imote2 硬件平台的基础上开发了 SHM_S、SHM_A 以及 SHM_W 传感板,增强了数据采集的分辨率;Dondi 等^[67]设计了基于 Shimmer3 的超声波监测平台,提高了嵌入式模块的数据处理能力;Loubet 等^[68]设计了基于 LRWAN 平台的无线

信息物理系统,降低了广域网络通讯传输的功耗。罗尧治等基于模块化设计形成了具有多用途通用性的硬件设计平台,研发了基于 LoRa 与 4G 通信相结合的数据传输节点,实现了北京大兴国际机场超大面域监测系统的传感网络搭建,如图 2 所示。

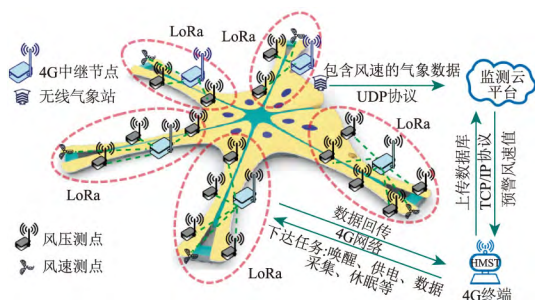


图 2 北京大兴国际机场监测传感网络
Fig. 2 Monitoring sensing networks of BDIA

3 空间结构健康监测数据分析理论

数据分析理论很大程度上决定空间结构健康监测结果的有效性,分析目标包括但不限于结构荷载分析(用于揭示结构荷载特性)结构响应分析(用于反映结构受力性能),以及结构状态评估(用于协助制定科学运维管理方案)。

3.1 结构荷载分析

3.1.1 温度分布特性

温度作用是空间结构长期的控制性荷载,太阳辐射、环境通风等条件致使温度实际分布与均匀温度场的计算假设有所不同。诸如,罗尧治等^[13]根据国家体育馆钢结构温度监测数据,研究了日照与无日照条件下结构温度场的分布形式,发现了其结构温度响应滞后程度随构件标高增加而递减。Liu 等^[69]开展了玻璃屋面覆盖下的空间结构在太阳照射下的温度分布规律的研究,提出并验证了一种预测透光屋面空间结构构件温度的数值方法。Zhao 等^[70]讨论了大跨度 ETFE 膜网架在太阳辐射下的温度分布和热行为,现场监测和数值分析的结果表明,ETFE 膜降低了网壳温度场的日温变化与非均匀性。

3.1.2 风荷载特性研究

风荷载作为结构荷载工况计算的重要部分,研究其特性有助于提高对复杂建筑表面风场环境的认识,对空间结构的抗风设计具有重要意义。诸如,周峰等^[71]基于国家游泳中心健康监测系统的风速和风压数据,研究水立方风场特性和屋盖风压分布特性,发现风速的脉动性极强,受来流湍流度和 ETFE 膜结构的影响,其屋盖表面的平均风压值均为负值且分

布较为平缓。罗尧治等^[72]分析了国家体育场的屋面风场实测数据,发现其屋盖风场的脉动风速非高斯特性明显,脉动风速特性相关度较弱,阵风系数变化相差较大。Fu 等^[73]给出了台风“凡亚比”作用下大跨度屋盖结构时风效应的实测结果,研究了台风作用下广州国际体育场屋盖结构脉动风速功率谱密度函数随风速的变化、湍流强度以及湍流积分长度与平均风速的关系,认为冯卡门经验谱能够很好地描述纵向、横向和垂直方向上的脉动风速的能量分布。Wang 等^[7]根据杭州东站风速风压监测数据,分析了脉动风速和脉动风压之间的时空相关性,研究了空间结构脉动风的行波效应,发现行波速度接近平均风速。Luo 等^[14]根据风洞实验与现场实测对浙江大学体育馆屋盖的风压特性进行了对比分析,发现两者在平均风压系数和峰值风压系数方面具有较好的一致性,而实测风压峰值因子的概率密度分布更为离散,呈现出更多的非高斯特性。

3.2 结构响应分析

3.2.1 结构静态响应

基于结构位移、构件应力以及索力的准静态时序数据,实现结构静态响应建模是结构响应分析的重点。有学者对此展开研究,诸如:罗尧治等^[13]根据国家体育馆钢结构温度与应力监测数据,提出了气温均布温度场叠加非均匀温差的结构响应实测分析方法,结果表明非均匀温度场作用不能忽略,且非均匀温度场作用与均匀温度场作用所引起的应力变化在结构不同部位的差异较大。于敬海等^[74]对比分析了椭圆形弦支穹顶结构施工全过程的结构索力、网壳应力、节点与支座位移监测数据与施工模拟结果,验证了基于模型方程的位移补偿法应用于弦支穹顶施工的可靠性。Zhang 等^[75]基于杭州奥林匹克中心体育场钢结构的长期监测数据,研究了测点应力变化的相关性,提出了离散与连续缺失应力数据的插值方法,利用相关测点多次线性回归插值实现了施工与运营阶段的应力缺失数据插补。马帆等^[76]基于结构静力响应序列,研究了概率主成分分析(PPCA)方法,考虑了监测数据不确定性,有效提高了数据插补的准确性,并通过武夷山旋转观众席结构的监测数据验证该方法的有效性(图 3)。

3.2.2 结构动态响应

基于结构振动加速度、屋面风速及风压的动态时序数据,实现结构动态响应建模是结构响应分析的关键。诸多学者对此展开研究,例如,Marins 等^[77]连续识别布拉加体育场悬架屋顶模态参数,分析了风和温度对模态参数变化的影响,发现结构固有频率受风与温度共同影响,且温度占主要作用,而风则会产生结构气动阻尼使结构阻尼比增加。Ji

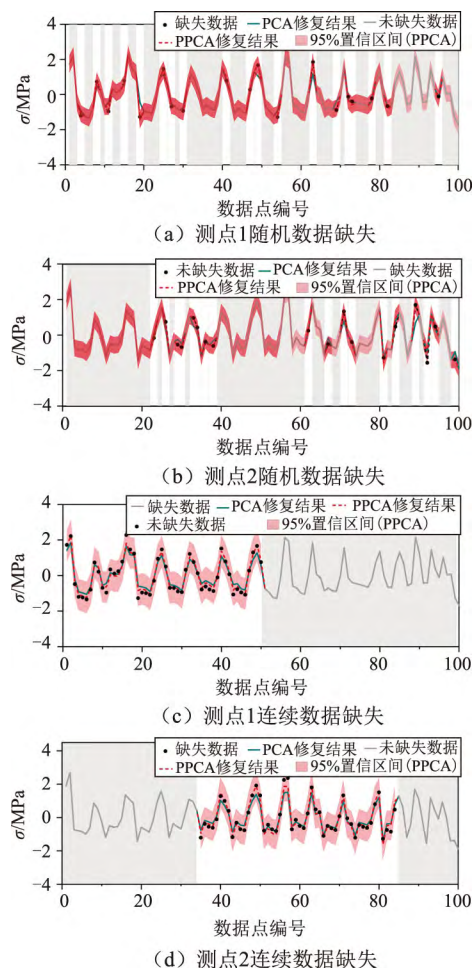


图3 基于PPCA的应力响应数据插补^[76]

Fig. 3 Stress response data recovery based on the PPCA^[76]

等^[78]对济州岛世界杯体育场屋面结构振动响应进行长期监测,通过随机减量法RDF提取结构模态特性,研究了结构的固有频率、模态阻尼比等动力特性的变化与振动幅值和环境温度的变化之间的关系,并建立了基于风洞试验数据考虑环境温度的风致响应预测模型。FU等^[73]基于台风“凡亚比”过境时广州国际体育馆屋盖结构振动数据,研究了随机子空间识别SSI与RDF在识别结构阻尼比的区别,对比结果显示,前者确定阻尼比大于后者,且与结构振幅表现出明显的相关性。Dior等^[79]分别采用基于数据及基于协方差的SSI分析了布拉加体育场的振动监测数据,实现了屋面结构模态特性的高分辨率识别,并研究了在不同工况条件下多阶模态识别结果对振动响应的贡献情况。Datteo等^[80]基于梅阿查体育场看台振动响应长期监测数据,提出了一种基于加速度数据自回归系数的主成分分析方法,结果表明第一阶主成分与温度有明显的相关关系,而第二、三阶主成分则能够反映结构状态变化。

3.2.3 荷载效应分离

空间结构运营期间荷载工况变化引起的结构响应有时会掩盖结构自身损伤,实现荷载效应的分离对获取可靠的结构状态评估结果具有重要意义。有学者对此展开研究,诸如周峰等^[81]采集了国家游泳中心钢膜结构在温度和雪荷载共同作用下的监测应变,提出了基于神经网络的荷载效应分离方法,应变响应分离结果表明,降雪期间结构的主要控制荷载由温度作用向雪荷载转变。Ma等^[82]改进了一种基于贝叶斯动态线性模型BDLM的荷载效应分离方法,基于武夷山旋转舞台模拟响应数据及实测应力数据的荷载效应分离结果分析,认为改进的BDLM有效提高荷载效应分离的准确性。Luo等^[16]提出了一种基于独立分量分析ICA和集成经验模态分解EEMD的荷载效应分离方法,提高了结构响应分离的自动化水平,基于正交方形索网结构响应的模拟数据,实现了日温度、年温度、突发荷载以及预应力松弛等荷载效应的有效分离,验证了EEMD-ICA方法的有效性;在对国家速滑馆索力长期监测数据的分析中,采用EEMD-ICA方法有效提取了年温度作用、日温度作用以及施工荷载效应,如图4所示。现有研究工作仅局限于对单测点数据的分析,忽略了测点数据之间的相关关系,针对多测点数据的荷载效应分离研究有待进一步开展。

3.3 结构状态评估

3.3.1 结构异常识别

结构异常识别能够及时发现结构损伤或性能退化,是结构健康监测数据分析理论研究的核心。有学者对此展开研究,如马帆^[83]45-69提出了基于荷载响应预测模型建立异常指标或者基于荷载效应分离结果进行贝叶斯假设检验的结构异常识别方法,通过武夷山旋转观众席结构的数值算例验证和实测数据应用,发现上述方法均能有效识别结构异常发生的时刻,且后者能够进一步判断和分析异常类型和程度。为了发展仅基于结构响应数据的异常识别方法, Ma等^[84]提出了基于概率主成分分析PPCA的结构异常识别方法,通过建立概率PCA量化监测数据中的不确定性,根据武夷山旋转观众席结构的有限元模拟数据和实际监测数据分析,表明PPCA能够准确识别和判断不同工况的结构异常,并根据测点数据的残差对结构异常进行定位。对于多状态结构异常识别,马帆^[83]103-137在PPCA的基础上提出基于混合概率主成分分析MPPCA的结构异常识别方法,基于两阶段的期望最大算法实现对不同状态下的响应数据自动分类与局部PPCA模型的建立,通过杭州奥体中心网球馆开合屋盖的有限元模拟验证了方法的有效性。目前研究工作主要集中于对结构异常存在

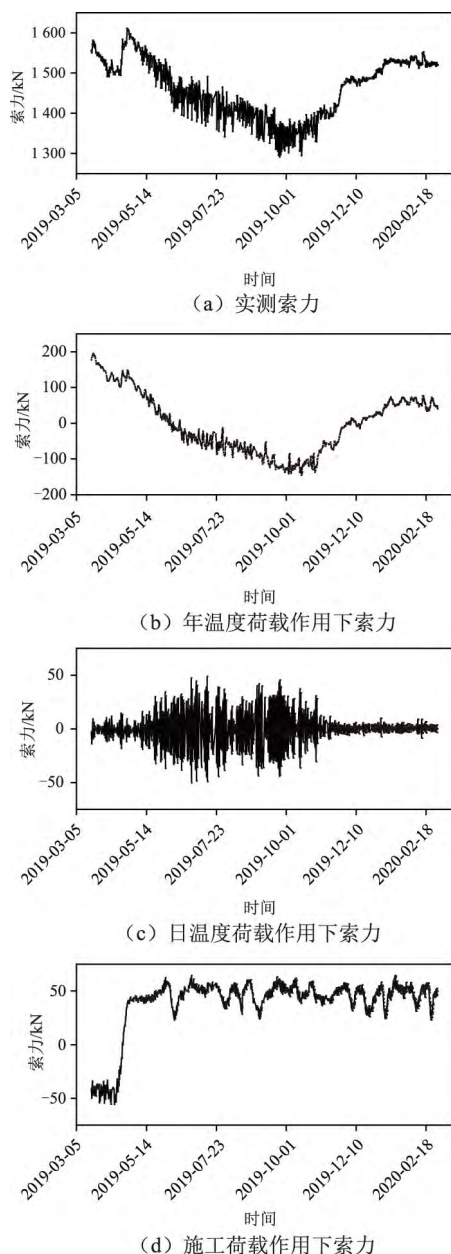


图4 基于 EEMD-ICA 方法的索力荷载效应分离^[16]

Fig. 4 Separation of cable force considering load effects based on the EEMD-ICA^[16]

与否的判断,对结构异常出现后其损伤位置精确定位有待进一步研究。

3.3.2 结构状态评价

结构状态评价能够定性且定量地表征结构损伤程度,是结构健康监测数据分析理论研究的焦点,涉及构件层面、结构层面以及综合评价方法等方面的研究。

构件的性能状态是空间结构评价体系中的重要组成部分,有学者对此展开研究,例如,张泽宇^[85]在 GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》基础上按照构件受力方式的不同,构造了基于构件监

测应力的构件静力性能与稳定性能评价指标,通过确定性评价方法定量计算构件评价指标,并制定了基于构件性能评价的等级划分标准。马帆^[83]138-142提出了基于 BDLM 及 PPCA 的构件可靠度评价方法,考虑了监测数据的不确定性,通过计算抗力及荷载效应的概率分布估计给出构件可靠度分析结果,从概率角度反映了构件工作状态,并制定了基于构件可靠度指标的构件安全等级划分标准。

结构构件性能的评价指标与方法旨在从强度与稳定性角度定量表征构件状态,但并不能完整体现结构的整体性能。随着层次分析法、模糊理论及可靠度理论等基础理论的发展,综合评价、模糊评价等被提出并应用于结构评价中,例如:马帆^[83]143-147在构件可靠度评价的基础上,提出了基于贝叶斯网络的结构状态评价方法,引入贝叶斯网络建立了结构整体可靠度与构件可靠度的概率递推关系,定量给出了结构整体失效概率。上述评价方法从结构构件层面出发得出对结构整体的综合评价,弱化甚至忽略了结构整体性能对结构状态评价的贡献。为此,张泽宇^[85]提出了基于模型修正的结构整体性能评价方法,构建了基于结构位移与振动监测数据的结构整体静力性能、稳定性能及动力性能评价指标,通过神经网络优化结构模型静力与动力修正结果定量计算结构整体评价指标,并制定了基于结构整体性能评价的等级划分标准。

基于构件层面的状态评价方法难以捕捉结构整体性能的变化,而基于结构层面的状态评价方法缺乏对结构局部变化的敏感性。为此,张泽宇^[85]提出了考虑构件状态指标与结构状态指标的综合评价方法,构建了基于层次分析法的空间结构状态评价体系,通过建立隶属度模糊评价理论定量计算结构综合评价指标,并制定了基于结构模糊综合评价指标的等级划分标准。上述结构状态评价指标忽略了结构或构件抗力随时间的退化,针对结构抗力时变模型的结构状态评价方法有待进一步开展。

4 空间结构健康监测工程应用

伴随空间结构监测传感技术和数据分析理论的研究发展,健康监测已广泛应用于大型体育场馆、高铁站房及机场航站楼等空间结构中,如图 5 所示。在监测周期方面,从施工阶段短期监测发展到服役阶段长期监测;在监测内容方面,从单一内力监测扩展到多维结构参数监测;在监测技术方面,从施工繁复的有线传感技术发展安装便捷的无线传感技术;在数据分析方面,从逐渐由基于模型的方法过渡到数据驱动的监测分析理论。

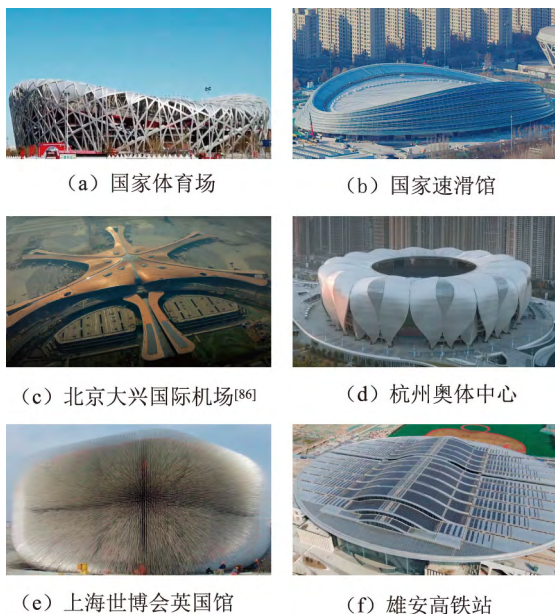


图5 工程应用案例

Fig. 5 Application cases of engineering structures

工程应用中具有代表性的有国家体育场“鸟巢”无线健康监测系统,该系统持续工作长达10余年,验证了无线传感技术长期工作的稳定性与可靠性,初步奠定了空间结构全寿命周期监测的基础。国家速滑馆“冰丝带”无线健康监测系统覆盖环境荷载与结构响应多类监测参数,监测设备采集的数据通过云平台进行汇总、管理与展示(图6),基本具备了空间结构多维度监测的条件。

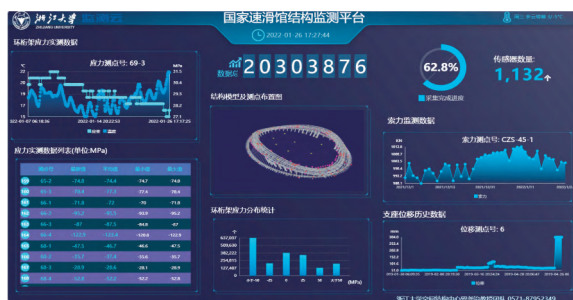


图6 国家速滑馆监测平台

Fig. 6 Monitoring platform of NSSO

5 结论与展望

5.1 结论

1) 在总结空间结构健康监测特点的基础上,阐述以结构受力性能为基础,综合考虑不同施工方法关键工序,兼顾不同结构单元力学性能的监测机制,确定基于监测机制的监测策略,形成以特点-机制-策略为核心的空间结构健康监测方法。

2) 围绕荷载与响应多维传感及大面域传输网络技术,总结多测点布置、多参数采集、大面域传输及多通道同步等方面研究,构成以多维度传感与大面域传输为核心的空间结构健康监测传感技术。

3) 阐述空间结构健康监测的数据分析目标,综述结构荷载分析、结构响应分析以及结构状态评估的研究现状,初步建立基于数据驱动的空间结构健康监测分析理论。

4) 总结空间结构健康监测周期、监测内容、监测技术以及数据分析在工程应用中的发展,现阶段初步奠定了空间结构多维度、全寿命周期监测的基础。

5.2 展望

空间结构健康监测仍处于起步阶段向智能化发展阶段的过渡,有许多挑战需要解决。未来,紧密融合大数据、云计算和人工智能,建立完善的监测理论体系、技术体系和应用体系,进一步推动空间结构健康监测的创新与发展。在此,提出以下具体研究方向建议:

1) 建立空间结构健康监测分析理论体系,发展监测数据挖掘的人工智能方法。时空深度融合方面,研究基于机器学习的同源异构监测数据时空相关性分析技术;基于深度学习的多源异构监测数据时空融合技术;数据智能挖掘方面,研究基于数据清洗、数据变换及数据降维的监测数据智能化预处理技术,研究基于人工智能的结构状态敏感特征筛选与提取方法、基于人工智能的结构异常识别与定位方法。

2) 研究空间结构健康监测多维度智能感知原理,推动监测传感技术的智能化与协同化。多维度智能感知方面,研究基于北斗、激光雷达的天际远距离大范围传感监测技术,研究基于无人机、DIC数字图像识别的空间中距离全面域传感监测技术、基于接触式与非接触式的地面近距离高精度传感监测技术;多参数一体协同方面,研究“天-空-地”三位一体传感监测系统的统一时钟校准方案与同步采集控制策略、基于云计算兼容多类传感参数的智能化协同工作平台。

3) 制定空间结构健康监测多层次应用管理标准,完善数字化智能建造维护的技术体系。规范应用与管理方面,研究标准化与规范化健康监测系统多层次设计与应用,状态评价和预警评估的流程化管理方案;智能建造与维护方面,研究基于监测数据库的结构信息数字孪生模型,建立立体化数字赋能的智能建造与维护管理系统,研究基于全寿命周期性能曲线的空间结构设计理论,促进设计理念优化更新。

参 考 文 献

- [1] DONG S, ZHAO Y, XING D. Application and development of modern long-span space structures in China [J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2012, 6(3): 224-239.
- [2] 罗尧治, 沈雁彬, 童若飞, 等. 空间结构健康监测与预警技术[J]. *施工技术*, 2009, 38(3): 4-8. (LUO Yaozhi, SHEN Yanbin, TONG Ruofei, et al. Health monitoring and early warning technology in spatial structure[J]. *Construction Technology*, 2009, 38(3): 4-8. (in Chinese))
- [3] LYNCH J P. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring [J]. *Shock and Vibration Digest*, 2006, 38(2): 91-128.
- [4] NAGAYAMA T, SPENCER JR B F, RICE J A. Autonomous decentralized structural health monitoring using smart sensors [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2009, 16(7/8): 842-859.
- [5] 罗尧治, 童若飞, 王小波, 等. 采用无线传感器网络技术的低功耗振弦式应变采集系统: CN101832752B [P]. 2012-01-04.
- [6] 罗尧治, 傅文伟, 姚俊杰, 等. 一种基于表面应变的拉索索力测量方法及装置: CN112964411A [P]. 2021-06-15.
- [7] WANG Y C, LUO Y Z, SUN B, et al. Field measurement system based on a wireless sensor network for the wind load on spatial structures: design, experimental, and field validation [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(9): e2192.
- [8] LUO Y, CHEN Y, WAN H P, et al. Development of laser-based displacement monitoring system and its application to large-scale spatial structures [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2021, 11(2): 381-395.
- [9] SHEN Y, YANG P, LUO Y. Development of a customized wireless sensor system for large-scale spatial structures and its applications in two cases [J]. *International Journal of Structural Stability & Dynamics*, 2016, 16(4): 1640017.
- [10] SHEN Y, YANG P, ZHANG P, et al. Development of a multitype wireless sensor network for the large-scale structure of the National Stadium in China [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 9(12): 709724.
- [11] LUO Y, YANG P, SHEN Y, et al. Development of a dynamic sensing system for civil revolving structures and its field tests in a large revolving auditorium [J]. *Smart Structures and Systems*, 2014, 13(6): 993-1014.
- [12] 王煜成. 基于现场实测的大跨度空间结构表面风荷载特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 17-37. (WANG Yucheng. Field measurement of wind load on large-span spatial structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 17-37. (in Chinese))
- [13] 罗尧治, 梅宇佳, 沈雁彬, 等. 国家体育场钢结构温度与应力实测及分析 [J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(11): 24-32. (LUO Yaozhi, MEI Yujia, SHEN Yanbin, et al. Field measurement of temperature and stress on steel structure of the National Stadium and analysis of temperature action [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(11): 24-32. (in Chinese))
- [14] LUO Y, LIU X, WAN H P, et al. Field measurement of wind pressure on a large-scale spatial structure and comparison with wind tunnel test results [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2021, 11(3): 707-723.
- [15] SHEN Y, FU W, LUO Y, et al. Implementation of SHM system for Hangzhou East Railway Station using a wireless sensor network [J]. *Smart Structures and Systems*, 2021, 27(1): 19-33.
- [16] LUO Y, FU W, WAN H P, et al. Load-effect separation of a large-span prestressed structure based on an enhanced EEMD-ICA methodology [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2022, 148(3): 04021288.
- [17] 沈世钊. 大跨空间结构的理论研究和工程实践 [J]. *中国工程科学*, 2001, 3(3): 34-41. (SHEN Shizhao. Theoretical study and engineering practice of long-span spatial structures [J]. *Engineering Science*, 2001, 3(3): 34-41. (in Chinese))
- [18] 雷素素, 刘宇飞, 段先军. 复杂大跨空间钢结构施工过程综合监测技术研究 [J]. *工程力学*, 2018, 35(12): 203-211. (LEI Susu, LIU Yufei, DUAN Xianjun. Study of comprehensive monitoring technology of the construction process of complex large-span spatial steel structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(12): 203-211. (in Chinese))
- [19] KARANTONIS D M, NARAYANAN M R, MATHIE M, et al. Implementation of a real-time human movement classifier using a triaxial accelerometer for ambulatory monitoring [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2006, 10(1): 156-167.
- [20] LYNCH J P, PARTRIDGE A, LAW K H, et al. Design of piezoresistive MEMS-based accelerometer for integration with wireless sensing unit for structural monitoring [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2003, 16(3): 108-114.
- [21] BAO Y, BECK J L, LI H. Compressive sampling for accelerometer signals in structural health monitoring [J]. *Structural Health Monitoring*, 2011, 10(3): 235-246.
- [22] ZHU L, FU Y, CHOW R, et al. Development of a high-sensitivity wireless accelerometer for structural health monitoring [J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 262.
- [23] JANG S, JO H, CHO S, et al. Structural health

- monitoring of a cable stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation [J]. *Smart Structures & Systems*, 2010, 6(5/6): 439-459.
- [24] CHO S, YIM J, SHIN S W, et al. Comparative field study of cable tension measurement for a cable-stayed bridge[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(8): 748-757.
- [25] DUAN Y F, ZHANG R, DONG C Z, et al. Development of elasto-magneto-electric (EME) sensor for in-service cable force monitoring [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2016, 16(4): 1640016.
- [26] 吴俊,陈伟民,舒岳阶,等. 锚头植入式应变均化光纤布喇格光栅测力传感器[J]. *光子学报*, 2015, 44(7): 95-100. (WU Jun, CHEN Weimin, SHU Yuejie, et al. Embedded strain homogenized FBG sensor for smart cables [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(7): 95-100. (in Chinese))
- [27] XIAO H, HUI L, OU J. Strain sensing properties of cement-based sensors embedded at various stress zones in a bending concrete beam[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2011, 167(2): 581-587.
- [28] SUN M, STASZEWSKI W J, SWAMY R N. Smart sensing technologies for structural health monitoring of civil engineering structures [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2010, 2010: 724962.
- [29] TENG J, LU W, WEN R, et al. Instrumentation on structural health monitoring systems to real world structures[J]. *Smart Structures and Systems*, 2015, 15(1): 151-167.
- [30] MIGUEL V, DORYS G, JESUS M, et al. A novel laser and video-based displacement transducer to monitor bridge deflections[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 970.
- [31] CASCIATI F, FUGGINI C. Monitoring a steel building using GPS sensors [J]. *Smart Structures & Systems*, 2011, 7(5): 349-363.
- [32] FENG D M, FENG M Q. Vision-based multipoint displacement measurement for structural health monitoring [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, 23(5): 876-890.
- [33] HUANG Q, CROSETTO M, MONSERRAT O, et al. Displacement monitoring and modelling of a high-speed railway bridge using C-band Sentinel-1 data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017, 128: 204-211.
- [34] SOAVE E, D'ELIA G, MUCCHI E. A laser triangulation sensor for vibrational structural analysis and diagnostics [J]. *Measurement and Control London Institute of Measurement and Control*, 2020, 53(1/2): 73-82.
- [35] 罗尧治,孙斌,洪江波. 建筑物周围风致静压场的分布及振动特性研究[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(14): 1-10. (LUO Yaozhi, SUN Bin, HONG Jiangbo. Distribution and vibration characteristics of wind-induced static pressure field around a building [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(14): 1-10. (in Chinese))
- [36] SUBRAMANIAN C, LAPILLI G, KREIT F, et al. Experimental and computational performance analysis of a multi-sensor wireless network system for hurricane monitoring [J]. *Sensors and Transducers*, 2011, 10: 206-244.
- [37] ENGLAND J, AGARWAL J, BLOCKLEY D. The vulnerability of structures to unforeseen events [J]. *Computers & Structures*, 2008, 86(10): 1042-1051.
- [38] FENG S, JIA J. Acceleration sensor placement technique for vibration test in structural health monitoring using microhabitat frog-leaping algorithm [J]. *Structural Health Monitoring*, 2018, 17(2): 169-184.
- [39] YI T H, LI H N, ZHANG X D. Health monitoring sensor placement optimization for Canton Tower using immune monkey algorithm [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2015, 22(1): 123-138.
- [40] HE C, XING J, LI J, et al. A combined optimal sensor placement strategy for the structural health monitoring of bridge structures [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 9(11): 820694.
- [41] CHEN B, HUANG Z, ZHENG D, et al. A hybrid method of optimal sensor placement for dynamic response monitoring of hydro-structures [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2017, 13(5): 155014771770772.
- [42] JUNG B K, CHO J R, JEONG W B. Sensor placement optimization for structural modal identification of flexible structures using genetic algorithm [J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2015, 29(7): 2775-2783.
- [43] SEYEDPOOR S M. A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2012, 47(1): 1-8.
- [44] YI T H, LI H N, WANG C W. Multiaxial sensor placement optimization in structural health monitoring using distributed wolf algorithm [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, 23(4): 719-734.
- [45] YOGANATHAN D, KONDEPUDI S, KALLURI B, et al. Optimal sensor placement strategy for office buildings using clustering algorithms [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 158(2): 1206-1225.
- [46] NING L, HOU J C, SHA L. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(3): 1195-1206.

- [47] YOUNIS O , FAHMY S. HEED: a hybrid , energy-efficient , distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing , 2004 , 3(4) : 366-379.
- [48] 韩雨滂,陈三清. 一个适于结构健康监测的 WSN 能量高效动态路由协议[J]. 传感技术学报, 2017 , 30 (7) : 1106-1111. (HAN Yulao , CHEN Sanqing. An energy efficient dynamic routing protocol in WSN for structural health monitoring [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators , 2017 , 30(7) : 1106-1111. (in Chinese))
- [49] 武小年,张楚芸,张润莲,等. WSN 中基于改进粒子群优化算法的分簇路由协议[J]. 通信学报, 2019 , 40 (12) : 114-123. (WU Xiaonian , ZHANG Chuyun , ZHANG Runlian , et al. Clustering routing protocol based on improved PSO algorithm in WSN [J]. Journal on Communications , 2019 , 40(12) : 114-123. (in Chinese))
- [50] ARAUJO A , GARCIA-PALACIOS J , BLESJA J , et al. Wireless measurement system for structural health monitoring with high time-synchronization accuracy [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement , 2012 , 61(3) : 801-810.
- [51] SPENCER B F , JO H , MECHITOV K A , et al. Recent advances in wireless smart sensors for multi-scale monitoring and control of civil infrastructure [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring , 2016 , 6 (1) : 17-41.
- [52] GANERIWAL S , KUMAR R , SRIVASTAVA M B. Timing-sync protocol for sensor networks [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York , USA: Association for Computing Machinery , 2003: 138-149.
- [53] MARÓTI M , KUSY B , SIMON G , et al. The flooding time synchronization protocol [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York , USA: Association for Computing Machinery , 2004: 39-49.
- [54] ELSON J , GIROD L , ESTRIN D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review , 2003 , 36 (SI) : 147-163.
- [55] NOH K L , SERPEDIN E , QARAQE K. A new approach for time synchronization in wireless sensor networks: pairwise broadcast synchronization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications , 2008 , 7 (9) : 3318-3322.
- [56] PIN N , ZHIHUA J. Requirements , challenges and opportunities of wireless sensor networks in structural health monitoring [C]// 2010 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology (IC-BNMT) . New York: IEEE , 2010: 1052-1057.
- [57] HU X , WANG B , HU X. A novel energy-balanced time synchronization protocol in wireless sensor networks for bridge structure health monitoring [C]// 2010 2nd International Workshop on Database Technology and Applications. New York: IEEE , 2010: 1-5.
- [58] XU N , RANGWALA S , CHINTALAPUDI K K , et al. A wireless sensor network for structural monitoring [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York , USA: Association for Computing Machinery , 2004: 13-24.
- [59] LYNCH J P , SUNDARARAJAN A , LAW K H , et al. Power-efficient data management for a wireless structural monitoring system [C]// Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford , CA , USA: Stanford University , 2003: 15-17.
- [60] BAO Y , SHI Z , WANG X , et al. Compressive sensing of wireless sensors based on group sparse optimization for structural health monitoring [J]. Structural Health Monitoring , 2018 , 17(4) : 823-836.
- [61] PECKENS C A , LYNCH J P. Utilizing the cochlea as a bio-inspired compressive sensing technique [J]. Smart Materials and Structures , 2013 , 22(10) : 105027.
- [62] O'CONNOR S M , LYNCH J P , GILBERT A C. Compressed sensing embedded in an operational wireless sensor network to achieve energy efficiency in long-term monitoring applications [J]. Smart Materials and Structures , 2014 , 23(8) : 085014.
- [63] WAN H P , DONG G S , LUO Y Z. Compressive sensing of wind speed data of large-scale spatial structures with dedicated dictionary using time-shift strategy [J]. Mechanical Systems and Signal Processing , 2021 , 157: 107685.
- [64] WAN H P , DONG G S , LUO Y Z , et al. An improved complex multi-task Bayesian compressive sensing approach for compression and reconstruction of SHM data [J]. Mechanical Systems and Signal Processing , 2022 , 167: 108531.
- [65] ABDULKAREM M , SAMSUDIN K , ROKHANI F Z , et al. Wireless sensor network for structural health monitoring: a contemporary review of technologies , challenges , and future direction [J]. Structural Health Monitoring , 2019 , 19(3) : 693-735.
- [66] JR B , NAGAYAMA T , RICE J A. Structural health monitoring using smart sensors [J]. Structural Control & Health Monitoring , 2010 , 16(7/8) : 842-859.
- [67] DONDI D , POMPEO A D , TENTI C , et al. Shimmer: a wireless harvesting embedded system for active ultrasonic structural health monitoring [C]// Sensors , 2010 IEEE.

- New York ,USA: IEEE ,2010: 2325-2328.
- [68] LOUBET G , TAKACS A , DRAGOMIRESCU D. Implementation of a battery-free wireless sensor for cyber-physical systems dedicated to structural health monitoring applications [J]. IEEE Access , 2019 , 7: 24679-24690.
- [69] LIU H , LIAO X , CHEN Z , et al. Thermal behavior of spatial structures under solar irradiation [J]. Applied Thermal Engineering , 2015 , 87: 328-335.
- [70] ZHAO Z , LIU H , CHEN Z. Thermal behavior of large-span reticulated domes covered by ETFE membrane roofs under solar radiation [J]. Thin-Walled Structures , 2017 , 115: 1-11.
- [71] 周峰,陈文礼,赖马树金,等. 水立方风场特性及屋盖表面风压特性研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43 (增刊 2): 230-234. (ZHOU Feng , CHEN Wenli , LAIMA Shujin , et al. Wind characteristics and pressure distribution over the roof of Water Cube [J]. China Civil Engineering Journal , 2010 , 43(Suppl. 2) : 230-234. (in Chinese))
- [72] 罗尧治,蔡朋程,孙斌,等. 国家体育场大跨度屋盖结构风场实测研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3) : 64-68. (LUO Yaozhi , CAI Pengcheng , SUN Bin , et al. Field measurement of wind characteristics on roof of the National Stadium [J]. Journal of Vibration and Shock , 2012 , 31(3) : 64-68. (in Chinese))
- [73] FU J , ZHENG Q , WU J , et al. Full-scale tests of wind effects on a long span roof structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration , 2015 , 14(2) : 361-372.
- [74] 于敬海,冷明,闫明婷,等. 基于位移补偿法的某椭圆形弦支穹顶施工模拟及监测研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(5) : 91-98. (YU Jinghai , LENG Ming , YAN Mingting , et al. Construction simulation and monitoring of elliptical suspended-dome structure based on displacement compensation analysis method [J]. Journal of Building Structures , 2018 , 39(5) : 91-98. (in Chinese))
- [75] ZHANG Z , LUO Y. Restoring method for missing data of spatial structural stress monitoring based on correlation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing , 2017 , 91: 266-277.
- [76] 马帆,罗尧治,万华平,等. 基于概率主成分分析的结构健康监测数据修复方法研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(21) : 135-141. (MA Zhi , LUO Yaozhi , WAN Huaping , et al. Repair method of structural health monitoring data based on probabilistic principal component analysis [J]. Journal of Vibration and Shock , 2021 , 40(21) : 135-141. (in Chinese))
- [77] MARTINS N , CAETANO E , DIORD S , et al. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: wind and temperature influence on modal parameters and structural response [J]. Engineering Structures , 2014 , 59: 80-94.
- [78] JI Y K , YU E , KIM D Y , et al. Long-term monitoring of wind-induced responses of a large-span roof structure [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics , 2011 , 99(9) : 955-963.
- [79] DIORD S , MAGALHÃES F , CUNHAÁ. High spatial resolution modal identification of a stadium suspension roof: assessment of the estimates uncertainty and of modal contributions [J]. Engineering Structures , 2017 , 135: 117-135.
- [80] DATTEO A , LUCÁ F , BUSCA G , et al. Statistical pattern recognition approach for long-time monitoring of the G. Meazza Stadium by means of AR models and PCA [J]. Engineering Structures , 2017 , 153: 317-333.
- [81] 周峰,李惠,朱焰煌,等. 国家游泳中心钢膜结构雪荷载及其效应监测与分析[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 13(2) : 33-43. (ZHOU Feng , LI Hui , ZHU Yanhuang , et al. Monitoring and analysis of snow load on the national aquatics center and its effect [J]. Progress in Steel Building Structures , 2011 , 13(2) : 33-43. (in Chinese))
- [82] MA Z , YUN C B , SHEN Y B , et al. Bayesian forecasting approach for structure response prediction and load effect separation of a revolving auditorium [J]. Smart Structures and Systems , 2019 , 24(4) : 507-524.
- [83] 马帆. 基于健康监测数据和贝叶斯方法的结构状态评估 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021. (MA Zhi. Structural condition assessment based on health monitoring data and Bayesian approach [D]. Hangzhou: Zhejiang University , 2021. (in Chinese))
- [84] MA Z , YUN C B , WAN H P , et al. Probabilistic principal component analysis-based anomaly detection for structures with missing data [J]. Structural Control and Health Monitoring , 2021 , 28(5) : e2698.
- [85] 张泽宇. 基于监测的空间钢结构健康状态评价体系研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 45-128. (ZHANG Zeyu. Research on health evaluation system of spatial steel structure based on monitoring [D]. Hangzhou: Zhejiang University , 2017: 45-128. (in Chinese))
- [86] TOM R. Zaha Hadid Architects' giant starfish-shaped airport opens in Beijing [Z/OL]. United Kingdom: Dezeen , 2019. (2019-09-26) [2022-04-06]. <http://www.dezeen.com/2019/09/26/zaha-hadid-architects-starfish-beijing-daxing-international-airport/>.