

引用格式:轩慎青,陈良超,方舟,等.大跨度空间网格结构健康监测系统设计及应用[J].北京化工大学学报(自然科学版),2022,49(5):108-116.

XUAN ShenQing, CHEN LiangChao, FANG Zhou, et al. Design and application of a health monitoring system for large-span space grid structures[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2022, 49(5): 108-116.

# 大跨度空间网格结构健康监测系统设计及应用

轩慎青<sup>1</sup> 陈良超<sup>2\*</sup> 方舟<sup>1</sup> 王哲<sup>3</sup>

(1.北京化工大学 机电工程学院,北京 100029; 2.北京化工大学 信息科学与技术学院,北京 100029;

3.北京市建筑设计研究院有限公司,北京 100044)

**摘要:**为全面保障大型建筑在施工及运营期间的结构健康和安全,基于信息化和物联网技术设计并实现了针对大跨度空间网格结构的健康监测系统。该系统具备结构健康状态监测多源数据的实时采集与传输、数据存储与处理、结构健康评估、异常状态报警以及三维模型展示等功能,系统通过集成大跨度空间网格结构多维状态数据,实现建筑的关键部件和整体结构的异常与完整性的判别,以及建筑整体健康的有效评估,为建筑的安全施工与运营提供了可靠保障。目前该系统已应用于某大型体育场并稳定运行,提升了体育场馆等大跨度空间网格结构建筑的智能化和安全管理水平。

**关键词:**大跨度钢结构;健康监测;评估预警;系统应用

**中图分类号:** TU399 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2022.05.014

## 引言

近年来,大跨度空间网格结构被相继应用于体育场馆、火车站等工程建设中。大跨度空间网格结构建筑一般是由屋顶索网、环桁架和外侧幕墙斜拉索组成的钢结构建筑<sup>[1]</sup>。此类建筑在施工阶段及运营期间,受环境变化和材料老化等自然因素以及人为因素的影响<sup>[2]</sup>,结构稳定性会降低,极易引发坍塌事故,严重威胁人民的生命财产安全。因此对此类建筑结构进行监测和健康状态评估,对结构异常状况及时预警,保障损伤结构维护的有效性,对于提高建筑结构的安全性和安全管理水平具有重大意义<sup>[3]</sup>。

结构健康监测(structural health monitoring, SHM)主要利用无损传感技术采集结构健康状态相关参数数据来判断结构的健康状况,及时发现异常

状况并报警,降低结构失效产生的损失。结构健康监测可分为施工过程和运营过程两个阶段<sup>[4]</sup>;施工阶段监测是为了保证工程顺利完工,从工程施工开始,对关键结构的关键部位进行监测,分析结构健康状态,并及时将结果反馈给施工方;运营阶段监测是对所有关键结构进行监测,并分析结构的健康状态,预测结构的健康趋势。

我国的结构健康监测研究起步较晚。莫南明等<sup>[5]</sup>对高层建筑结构的变形和位移进行了监测,武浩鹏<sup>[6]</sup>对大跨度空间结构的施工阶段进行了监测分析及结构安全性评估,张树岗<sup>[7]</sup>对某大剧院钢结构的施工过程进行了在线监测,王洽亲<sup>[8]</sup>对2010年上海世博会英国馆的结构施工和展出阶段采取了持续远程监测,汪菁<sup>[9]</sup>研究了某大型网架结构的智能健康监测系统,吴少伟<sup>[10]</sup>、刘建秀<sup>[11]</sup>对火车站大跨空间桁架结构进行了健康监测,杨礼东<sup>[4]</sup>、董浩森<sup>[12]</sup>、谢晓凯<sup>[13]</sup>、王剑非等<sup>[14]</sup>、陈克军<sup>[15]</sup>对体育场的施工和卸载阶段进行了结构健康评估。此外,一些工程人员为监测桥梁结构健康状况,在桥梁支撑结构和桥面上安装了温度传感器、风速风向传感器及加速度传感器等多种传感设备<sup>[16]</sup>。国外的建筑健康监测研究发展较早,技术较为领先,在重要桥梁

收稿日期:2022-05-06

基金项目:北京市西城区财政科技专项项目(XCSTS-TI2021-29)

第一作者:男,1995年生,硕士生

\*通信联系人

E-mail: 15001257838@163.com

及高层建筑等结构的健康监测方面有较多的研究和应用。美国新墨西哥州的阿拉莫萨峡谷大桥采用了结构监测系统来监测桥梁的结构状态<sup>[17]</sup>, Inaudi 等<sup>[18]</sup>对瑞士 Siggenthal 混凝土拱桥的施工阶段进行了监测, Iwaki 等<sup>[19]</sup>针对高层钢结构建筑开发了基于光纤光栅传感器的建筑结构健康监测系统, Habel 等<sup>[20]</sup>在德国柏林 Lehrter Bahnhof 中央火车站安装了预应力梁的长期监测综合测量系统, Whelan 等<sup>[21]</sup>使用布拉格光纤光栅传感器系统对意大利科莫大教堂进行了远程结构健康监测。

通过大量文献与实地调研发现, 目前结构健康监测系统多应用于大型桥梁, 而应用于大跨度空间网格结构的工程实例较少; 对关键结构和关键部位的健康状态监测较多, 对整体结构健康状态的监测与评估较少<sup>[22]</sup>。基于实际工程应用需求, 结构健康监测系统需实现以下功能: 1) 数据集成与管理。系统应具备温度、风速风向、索力、加速度及位移等多参数监测的功能; 实现施工和运营不同阶段的监测需求及数据共享, 并对不同来源的数据进行数据融合分析。2) 结构健康评估与预警。系统应基于有限元分析, 精确三维布点功能; 对施工和运营阶段进行多层级健康评估; 具备预报预警功能, 包括结构环境信息预警和结构关键参量预警, 并能够以多种通信方式进行预警。3) 应用与展示。系统应结合地理信息系统( Geographic Information System, GIS) 地图展示项目工程信息、健康状况、预警信息等, 并实现结构健康监测信息、监测对象三维模型的可视化, 以及环境信息、荷载变化和结构状态的动态显示。基于上述功能考虑, 本文面向大跨度空间网格结构建筑健康管理需求, 设计实现了集成结构健康监测、结构健康状态评估与报警、环境参数监测和结构健康结果分析及可视化管理等于一体的系统功能, 并成功应用于多个大型体育馆的健康状态监测、评估与管理, 有效提升了建筑的智能化和安全管理水平。

## 1 系统架构及功能设计

### 1.1 系统架构设计

根据项目需求, 本文将结构健康监测系统分为感知采集层、网络传输层、数据汇聚层、应用分析层以及信息传输与控制层, 如图 1 所示。其中, 每个层均是独立的, 上下层之间可以互相通信, 下一层服务于上一层。每一层都可以单独修改, 对其他层没有

影响, 方便系统维护和升级。

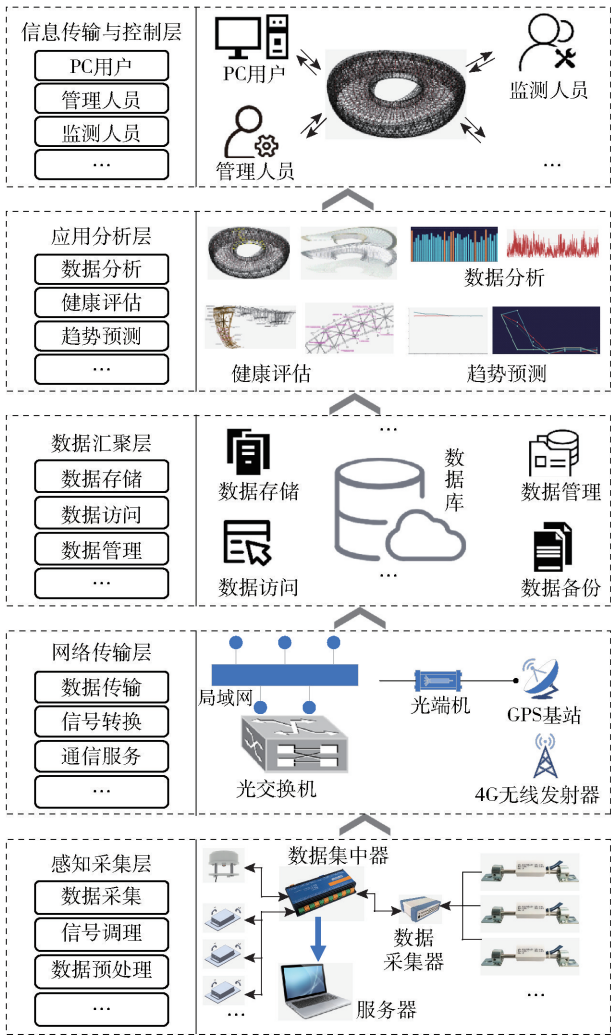


图 1 系统整体架构

Fig. 1 Framework of the system

感知采集层主要包括数据采集、信号调理和数据预处理; 网络传输层包括数据传输、信号转换、通信服务等; 数据汇聚层可实现数据的存储、访问管理和备份等; 应用分析层包括监测数据分析、结构健康评估、结构状态趋势预测等功能; 信息传输与控制层保证 PC 端用户的访问等权限, 和管理人员的项目管理、参数管理、日志管理和系统管理等权限, 以及监测人员的传感器配置、数据查看等权限。

系统的无线通讯部分由传感器、数据集中器、4G 通信模块、高增益吸盘天线、电源模块等设备组成。其中, 传感器均采用直接引线连接, 485 串口连接, 现场数据集中至多模多路数据集中器后, 传至服务器存储控制端, 实现服务器数据互通。

### 1.2 功能设计

以建筑施工阶段和运营阶段过程中的异常信息

感知、结构健康评估为目的<sup>[23]</sup>,设计结构健康监测系统,包括传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据处理与控制子系统、结构健康评估与预警子系统共 4 部分,以实现大跨度空间网格结构健康状态

评估、异常状态预报预警等功能,保障结构安全长期运营。系统的功能架构如图 2 所示。各子系统的介绍如下。

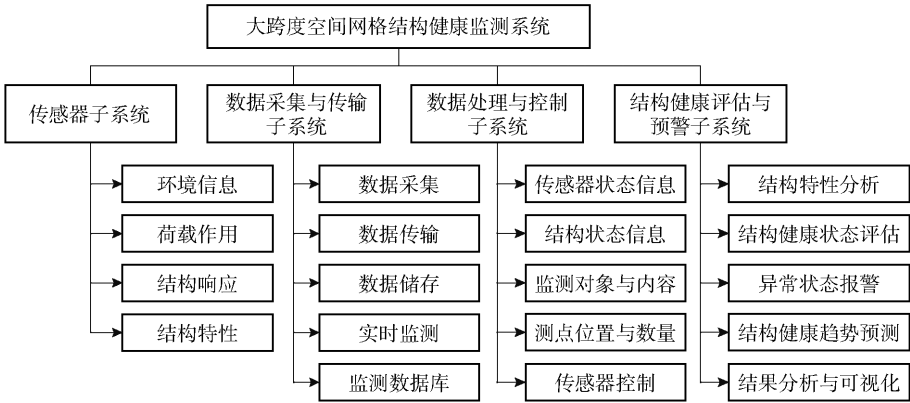


图 2 系统功能架构

Fig.2 Framework of the system function

1) 传感器子系统包括监测环境信息、荷载作用、结构响应和结构特性的各类传感器、线缆等,是结构健康监测系统的信息感知部分。传感器选型与测点布置应综合考虑传感器的性能参数和适用性,同时应尽量避免安装过程中大量布线,以方便施工和后期维护。

2) 数据采集与传输子系统包括硬件部分(如数据集中器、数模转换器、4G 通信模块、4G 天线、电源及线缆等设备)以及软件部分,将现场传感器的数据实时传输并存储至云服务器数据库和本地计算机中,并进行数据预处理。

3) 数据处理与控制子系统由软件和计算机硬件组成,能够对结构监测数据进行处理分析,并在系统上实时显示传感器状态、结构状态、监测对象与内容、测点位置与数量、数据汇总等信息。管理人员可通过系统进行项目管理、设备管理以及日志管理等操作,其中的传感器控制主要包括传感器分类、传感器运行模式、监测策略分组、传感器触发条件、传感器运行策略等。

4) 结构健康评估与预警子系统对各类传感器监测数据进行综合分析,能够实现结构特性分析、结构健康状态评估、异常状态报警、结构健康趋势预测、结果分析与三维模型可视化等功能。

2 结构健康评估指标体系

结构健康评估可分为安全性评估、耐久性评估

和疲劳性评估<sup>[24]</sup>:1) 安全性评估与结构的极限强度有关,用来评估结构的极限破坏状态,通过结构安全性评估能客观了解结构服役现状,还可为结构维修养护和加固改造提供技术依据;2) 耐久性评估是评估结构在运营阶段维持其服役性能的能力,当结构使用时间较长、环境明显改变或出现其他特殊情况时,需对结构进行耐久性评估,并提出相应的维修养护策略;3) 疲劳性评估是评估建筑结构在遭受交变荷载重复作用下发生的疲劳破坏,由于建筑结构长期承受如振动、风荷载及温度等随时间变化的荷载,当受到多次重复变化的作用力后,结构会由于应力集中而发生破坏<sup>[24]</sup>。

通过分析目标结构主要受力构件与关键部位的健康影响因素,本文拟采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)对建筑结构的健康状态进行评估。层次分析法主要包括以下 3 个步骤。

1) 建立结构健康评估指标体系

将大跨度空间网格结构整体的健康状态作为目标层,索网结构、桁架支撑结构、幕墙结构作为准则层,然后对各个准则层细分得到评估指标,如图 3 所示。

2) 构建判断矩阵

对于上述指标,采用 5 级定量法,按照重要性程度赋予相应的值(即 1、3、5、7、9);然后基于结构特性和专家打分方法,得到指标权重打分表。在此基础上,确定准则层对目标层的判断矩阵  $A$  以及指标层对准则层的判断矩阵  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 。



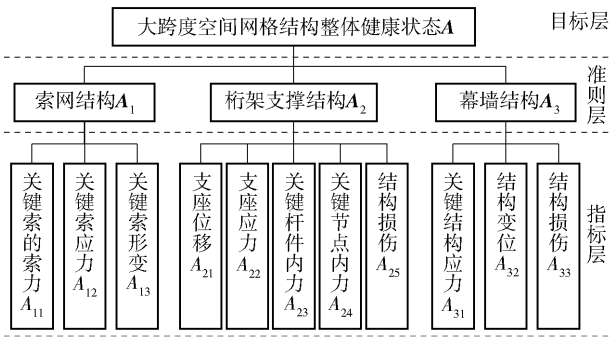


图 3 结构健康评估指标体系

Fig. 3 Structural health assessment index system

3) 计算权重向量及判断矩阵的一致性检验

计算判断矩阵的特征值和特征向量,并进行一致性判定。随后计算评估指标层各元素对目标层的合成权重,以确定结构安全评估指标体系中指标层各元素在目标层中的重要程度。

根据评估指标的安全状况,计算各关键结构的健康分值,最终实现结构整体的健康状态等级评估。本文将大跨度空间网格结构整体健康状态评估等级分为一级、二级、三级、四级和五级共 5 个等级,分别对应良好、较好、较差、差、危险这 5 种健康状态。大跨度空间网格结构建筑健康评估流程如图 4 所示。

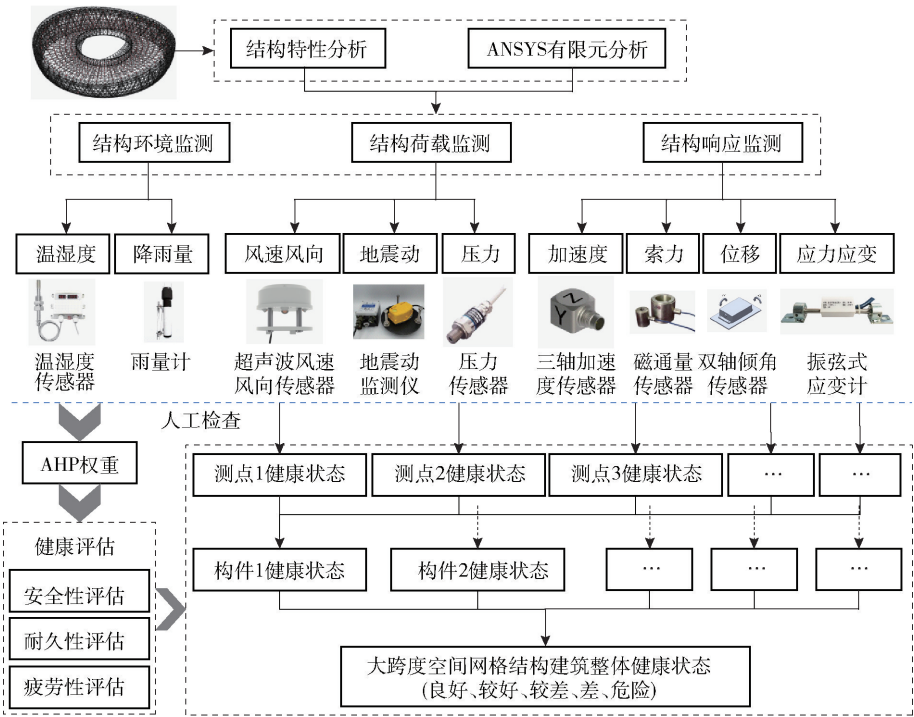


图 4 大跨度空间网格结构建筑健康评估

Fig. 4 Health assessment for a large-span space grid structure building

3 系统实现与应用

3.1 总览界面

系统总览界面主要包括项目总览、设备状态、报警统计、报警列表、异常状态列表、趋势统计、数据汇总和 GIS 地图等模块。项目总览以图表形式展示各个类型的设备数量。设备状态以图表形式显示各个项目的各个设备状态的数量占比情况,包括正常、离线、异常、报警等状态,并可切换为按照类型显示。报警统计按照设备类型展示报警数量,分为一级报警和二级报警。报警列表以表格形式展示报警的历史记录信息。异常状态列表以表格形式展示异常设

备的历史记录信息。趋势统计以曲线图的形式展示各个设备类型的数据趋势统计。数据汇总展示所有项目的数据汇总信息。此外,结合 GIS 地图的形式展示项目的位置信息、项目数量、监测点数量、项目名称、健康状况、预警信息、设备数量、离线数量和报警数量。结构健康监测系统总览界面如图 5 所示。

3.2 测点布置

使用 ANSYS 有限元分析软件对结构进行受力分析及施工模拟,并对预应力索的张拉过程作跟踪分析。分析过程中考虑结构的预应力刚化以及大变形效应,上部网壳结构杆件连接均视为刚接,因此上部网壳结构杆件采用 PIPE16 单元模拟;环索和径向





图5 系统总览界面

Fig. 5 System overview interface

拉索采用拉杆单元 LINK10 单元模拟,撑杆单元采用 LINK8 单元模拟;撑杆与上部网壳连接为铰接,环梁采用 BEAM4 单元模拟。采用张力补偿法来施加径向预应力。分析模型如图 6 所示。

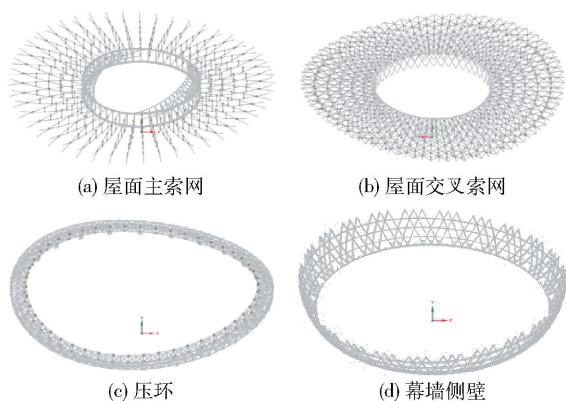


图6 体育场有限元分析模型

Fig. 6 Finite element analysis model of the stadium

根据 ANSYS 仿真模拟结果,结合理论计算确定传感器的布置位置与数量,并添加至系统层级管理中,如图 7 所示。测点详细信息包括设备名称与编号、设备类型、监测类别、负责人、采样频率、采样持续时间、间隔时间、触发条件、停止条件、设备编码、电池寿命、报警值、运行时间、所属产品(新的设备类型需咨询开发人员)、设备点 X 轴及 Y 轴和 Z 轴数据(定位设备在建筑内的位置)、设备点颜色等。

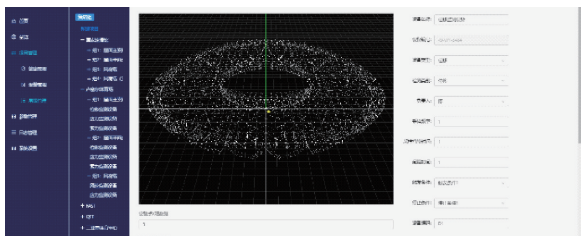


图7 测点布置

Fig. 7 Monitoring and measuring point arrangement

### 3.3 健康评估

根据第 2 节所述结构健康评估方法对某建筑关

键构件进行健康评估,并以建筑 3D 模型、图表和文字的形式在健康评估模块中展示项目的结构健康状态信息。其中在模型窗口右上方以绿色方框表示结构健康状态良好,红色方框表示结构健康状态异常,并对应 5 个健康等级,如图 8 所示。健康评估模块可通过策略组和设备类型切换项目的树形结构,以两种形式展示项目的设备信息,实现设备的快速定位。健康管理界面可以显示项目信息、组内设备信息、设备信息、历史数据和趋势统计等。进入某一个传感器界面可在线查询相应的历史数据和趋势图,如图 9 所示。

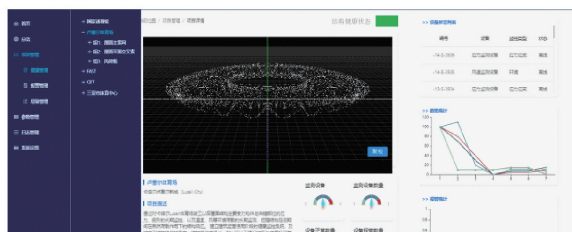


图8 某体育场结构健康评估示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the structural health assessment of the stadium

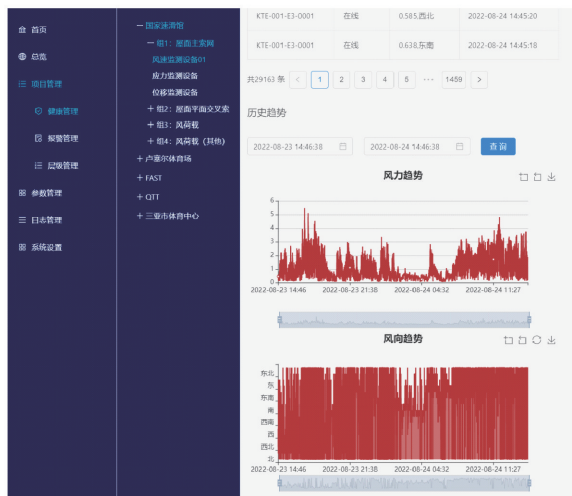


图9 系统监测数据趋势示意图

Fig. 9 Schematic illustration of system monitoring data trends

### 3.4 报警管理

报警管理包括结构环境信息异常报警、结构荷载过大报警、设备异常报警等。系统以表格形式展示报警的历史记录,可通过搜索快速确定报警信息,包括设备信息、设备编号、开始时间、结束时间等。报警管理界面如图 10 所示。

### 3.5 应用效果

所设计结构健康监测系统已投入使用一段时



图 10 报警管理

Fig. 10 Alarm management

间,通过对多个大跨度空间网格结构建筑的屋面结构和支撑结构关键受力构件与关键部位的应力应变、位移、倾角等参数以及温湿度、风等环境信息的长期监测,分析了结构在施工阶段和运营期间的健康状况。通过该系统可以及时全面地了解建筑结构的健康状况,发现并分析异常数据,获知结构异常的确切位置,从而采取相应的结构维护措施,有效预防安全事故的发生。

3.5.1 传感器选型及测点布设

建筑结构在服役过程中,常遭受单个或多个载荷的作用,如风荷载、地震、压力等,在长期荷载作用下,结构将出现持续的变形和振动,并产生累积损伤,在极端荷载作用下,结构甚至会发生直接破坏。此外,大气温湿度、降雨等环境因素会影响建筑结构中钢材的腐蚀过程,进而影响结构的承载能力和疲劳性能。因此对于建筑结构系统的分析,是以环境和荷载的作用为输入,结构响应为输出,即结构在环境和荷载作用下会发生几何变形、结构内部的各个构件会产生相应的应变等影响结构系统本身性能的响应。因此,结构环境、结构荷载和结构响应的监测,对于评估建筑结构的安全和长期服役性能具有十分重要的意义。

传感器的选型需要考虑精度、分辨率、灵敏度、稳定性和采样频率等多种性能参数,还应注意体积、耐久性、接触方式、供电方式、价格等多种因素。对于环境、荷载局部物理量和结构几何量的监测,一般根据有限元分析结果和工程经验来确定传感器合理的布置位置。反映结构整体特点的传感器布点选择与环境作用、结构形式、结构参数和损伤识别方法有关<sup>[25]</sup>。

大跨度空间网格结构跨度大、内部传力形式复杂,并且在发生变形时,其内力分布分析难度大。为了能够对结构的内力水平和分布有全面的了解,本文采用 ANSYS 软件对关键结构进行有限元模拟仿真,从而获取杆件内部的应力、轴力等力学指标,选取受力较大或者关键部位的杆件进行监测,提出合

理有效的监测方案及监测方法,确定传感器布设方案和监测策略。本文系统根据项目需求布设了不同类型的传感器,如位移传感器、应力应变传感器、索力传感器、振动传感器、加速度传感器、温度传感器及风速风向传感器等<sup>[26]</sup>。系统的传感器分类及编码如表 1 所示。

表 1 传感器分类及编码

Table 1 Classifications and codes of sensors

序号	传感器类型	细分	编码	作用
1	位移	构件变形	D1	响应输出
		支座位移	D2	
2	应力应变	钢结构应力应变	S1	响应输出
		混凝土结构	S2	
3	索力	屋面索	S3	响应输出
		幕墙索	S4	
4	振动	屋面加速度	A1	响应输出
5	环境	温度	E1	结构输入
		风	E2	
		地震	E3	
6	其他	混凝土裂缝	C1	损伤跟踪

系统监测内容主要有风速风向监测、应力应变监测、位移监测、索力监测和加速度监测等。各类测点布置主要依据结构静动力计算、环桁架杆件敏感性分析和有限元仿真模拟结果,在此基础上提出以下主要测点布置的原则:

(1) 风速风向测点的布置考虑监测结构周围自由风场的特征,对于大跨度空间结构,一般在结构最高位置处以及建筑周边布置风速风向测点;

(2) 应力应变测点布置在结构受力较大的构件、对结构整体工作起关键性作用的构件和对外部荷载较为敏感的构件上;

(3) 位移测点主要布置于易变形部位,对于整体结构,测点布置还要能体现整体变形性能;

(4) 索力测点布置遵循满布、均布的原则,在索力较大的部位测点布置可相对密集,对张拉模拟过程中索力超限的索进行重点监测;

(5) 加速度测点布置主要考虑结构的动力响应,一般在径向杆件及节点等结构动力响应较明显的部位布置测点;

(6) 各类测点的布置遵循对称原则。

3.5.2 应用案例 1

应用案例 1 是由屋顶索网、环桁架和外侧幕墙斜拉索等组成的钢结构建筑,如图 11 所示。屋盖采用约 180 m × 240 m 的马鞍形单层双向正交索网结



构,南北立面采用索-拱幕墙支承系统。屋面索网锚固在周边巨型环状立体桁架上,环桁架支承在下部间距不等的混凝土巨柱上。幕墙索采用公称直径为 48 mm 或 56 mm 的钢索,上端固定在环桁架下弦节点上,下端则锚固在混凝土基础环梁上。应用案例 1 的部分关键结构布点示意图如图 12 所示。

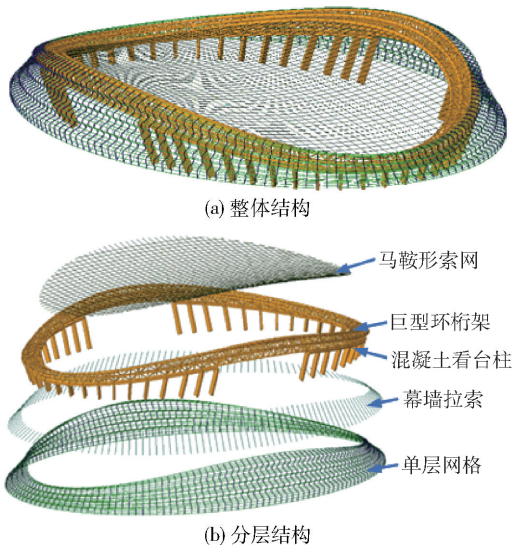


图 11 应用案例 1 建筑结构

Fig. 11 Building structure of application case 1

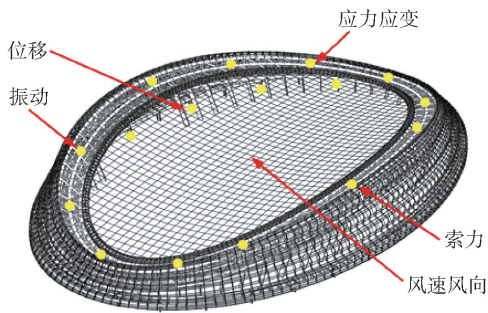


图 12 应用案例 1 部分关键结构布点示意图  
Fig. 12 Schematic diagram of the key structural layout of application case 1

### 3.5.3 应用案例 2

应用案例 2 建筑由屋面主索网、屋面交叉索网、压环、幕墙侧壁以及 V 柱结构等组成,是具有大跨度索网体系、较大悬挑距离的索网屋面单体建筑,如图 13 所示。屋面主索网采用双层轮辐式张力结构,跨度达 274 m,悬挑距离为 76 m。应用案例 2 的部分关键结构布点示意图如图 14 所示。

## 4 结论

本文针对大跨度空间网格结构,基于物联网技术建立了结构健康监测系统,实现了系统架构及功

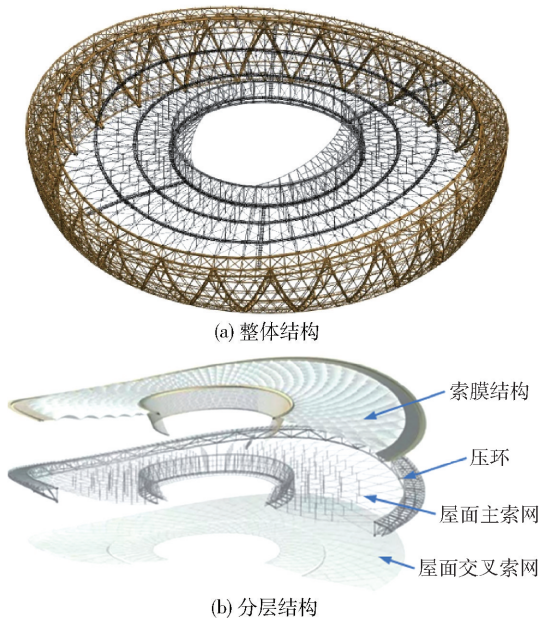


图 13 应用案例 2 建筑结构

Fig. 13 Building structure of application case 2

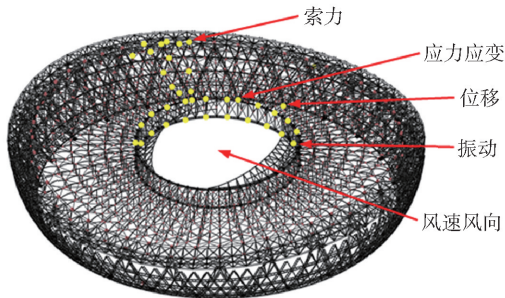


图 14 应用案例 2 部分关键结构布点示意图  
Fig. 14 Schematic diagram of the key structural layout of application case 2

能设计;提出了结构健康评估指标体系,实现了大跨度空间网格结构建筑健康评估,为结构的维修养护与管理提供依据和指导。该系统目前已应用于某大型体育场,可实现该体育场馆结构的健康实时监测、异常状态预报预警、各类信息展示和结果分析可视化,取得了良好的应用效果,具有很好的工程应用价值。

## 参考文献:

[1] 曹聪. 包头市奥林匹克体育场钢罩篷健康监测[D]. 包头:内蒙古科技大学,2019.  
CAO C. Health monitoring of steel sheds at Olympic stadium in Baotou city[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)  
[2] CIGADA A, MOSCHIONI G, VANALI M, et al. The measurement network of the San Siro Meazza stadium in



- Milan: origin and implementation of a new data acquisition strategy for structural health monitoring[J]. *Experimental Techniques*, 2010, 34(1): 70–81.
- [3] 李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(3): 82–90.
- LI H N, LI D S. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(3): 82–90. (in Chinese)
- [4] 杨礼东. 大连体育场结构健康监测系统的研发[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- YANG L D. Design and development of structural health monitoring system for Dalian stadium[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] 莫南明,过静琚,张胜良,等. CCTV主楼施工变形监测技术应用研究[J]. *测绘工程*, 2007, 16(5): 48–52.
- MO N M, GUO J J, ZHANG S L, et al. Research on technical application of deformation observation in CCTV new site construction[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2007, 16(5): 48–52. (in Chinese)
- [6] 武浩鹏. 大跨度空间钢结构施工过程监测分析与结构安全性评估[D]. 兰州:兰州理工大学, 2017.
- WU H P. Monitoring analysis and structure safety evaluation of large-span space steel structures during construction[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [7] 张树岗. 哈尔滨大剧院钢结构屋盖施工卸载分析及监测[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2014.
- ZHANG S G. Construction unloading analysis and monitoring for steel structure roof of the Harbin grand theater[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [8] 王洽亲. 2010上海世博会英国馆结构健康监测研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- WANG Q Q. The structural health monitoring research of the UK Pavilion at 2010 Expo Shanghai[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [9] 汪菁. 深圳市民中心屋顶网架结构健康监测系统及关键技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2008.
- WANG J. Research on the health monitoring system and its key technics for long-span roof space latticed structure of Shenzhen citizen center[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] 吴少伟. 太原南站钢结构健康监测方案及安全预警研究[D]. 太原:太原理工大学, 2017.
- WU S W. Research on steel structure health monitoring scheme and safety early warning of Taiyuan south station[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] 刘建秀. 大跨拱形空间钢管桁架结构健康监测系统设计安装[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2018.
- LIU J X. Design and installation of the large-span-arch space steel-tube truss structure's health monitoring system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [12] 董浩森. 空间管桁架结构施工过程分析及健康监测评估[D]. 兰州:兰州理工大学, 2019.
- DONG H S. Analysis of construction process of space tubular truss structure and health monitoring assessment[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] 谢晓凯. 空间钢结构监测技术及结构性能研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- XIE X K. Research on monitoring techniques and structural performance for steel spatial structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [14] 王剑非,杨玲,郭旻,等. 曲靖体育场大型复杂钢结构施工过程应力与位移监测分析[J]. *施工技术*, 2014, 43: 416–421.
- WANG J F, YANG L, GUO Y, et al. Monitoring and analysis on stress and displacement of large complex steel structure construction in Qujing stadium[J]. *Construction Technology*, 2014, 43: 416–421. (in Chinese)
- [15] 陈克军. 宣城体育馆大跨度钢结构施工与监测关键技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.
- CHEN K J. Study on key technique of construction and monitoring of large-span steel structure of Xuancheng gym[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [16] 冯云龙. 大跨度单曲面双层悬索结构施工力学性能研究及监测分析[D]. 邯郸:河北工程大学, 2019.
- FENG Y L. Study on mechanical properties and monitoring analysis of long-span single-curved double-layer suspension structures[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019. (in Chinese)
- [17] LYNCH J P. Overview of wireless sensors for real-time health monitoring of civil structures[C]//*Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Control and Monitoring*. New York, 2004.
- [18] INAUDI D, RÜFENACHT A, VON ARX B, et al. Monitoring of a concrete arch bridge during construction[C]//*Conference on Smart Structures and Materials 2002: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*.

- San Diego, 2002: 146 – 153.
- [19] IWAKI H, SHIBA K, TAKEDA N. Structural health monitoring system using FBG-based sensors for a damage tolerant building [C] // *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems* pt. 2. San Diego, 2005: 624 – 633.
- [20] HABEL W, HOFMANN D, KOHLHOFF H, et al. Complex measurement system for long-term monitoring of prestressed railway bridges of the new “Lehrter Bahnhof” in Berlin [C] // *Conference on Smart Structures and Materials 2002: Smart Sensor Technology and Measurement Systems*. San Diego, 2002: 236 – 241.
- [21] WHELAN M P, ALBRECHT D, CAPSONI A. Remote structural monitoring of the cathedral of Como using an optical fibre Bragg sensor system [C] // *Conference on Smart Structures and Materials 2002: Smart Sensor Technology and Measurement Systems*. San Diego, 2002: 242 – 252.
- [22] 路鹤. 大型体育馆钢结构工程健康监测数据采集系统的开发与应用 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2009.
- LU H. Development and application of the data acquisition system of health monitoring on large stadiums’ steel structure engineering [D]. Jinan: Shandong University of Construction, 2009. (in Chinese)
- [23] 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.
- ZHANG Z Y. Research on health evaluation system of spatial steel structure based on monitoring [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [24] 伊廷华. 结构健康监测教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2021: 26 – 27, 411 – 416.
- YI T H. Structural health monitoring [M]. Beijing: Higher Education Press, 2021: 26 – 27, 411 – 416. (in Chinese)
- [25] 卢伟. 基于现场总线的大跨空间结构健康监测系统设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- LU W. The structural health monitoring system of large span space structure based on fieldbus [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [26] 王贵阳. 体育场结构健康监测系统的设计与应用 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- WANG G Y. Design and application of stadium structure health monitoring system [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)

## Design and application of a health monitoring system for large-span space grid structures

XUAN ShenQing<sup>1</sup> CHEN LiangChao<sup>2\*</sup> FANG Zhou<sup>1</sup> WANG Zhe<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

3. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A health monitoring system for large-span space grid structures based on information technology and the Internet of Things has been designed to ensure the structural health and safety of large buildings during construction and operation. The system is equipped with real-time data collection and transmission, data storage and processing, structural health assessment, abnormal state alarms and a 3D model display for structural health monitoring. By integrating the multi-dimensional state data for the large-span space grid structure, the system allows discrimination between key components. This identifies any defects and ensures the overall structural integrity of the building, as well as giving an effective evaluation of the overall health, thus providing a reliable guarantee of safe construction and operation of the building. At present, the system has been applied to a large stadium and shown to operate in a stable fashion, improving the intelligence and safety management of such large-span spatial grid structure buildings.

**Key words:** large-span steel structure; health monitoring; assessment and early warning; system application

(责任编辑: 吴万玲)