

某展览馆张弦梁结构体系健康监测系統概述

孙祥清¹, 王璇², 唐催², 汪盛², 王明²

(1. 长沙市水利建设投资管理有限公司, 湖南 长沙 410000;
2. 湖南建院建设工程检测有限责任公司, 湖南 长沙 410000)

摘要 大跨度空间钢结构长期服役过程中会发生不利受力状态, 包括环境荷载变化、结构几何变形、结构力学性能变化、振动响应、材料老化劣化。为了实时了解上述不利因素影响, 并针对性及时处理, 需要针对结构受力的关键部位和关键构件受力及变形实时监测的健康监测系统, 对大跨空间结构进行实时的结构监测和诊断, 及时发现结构的损伤, 预测结构的性能变化。这是空间结构运营单位越来越迫切需要解决的问题。

关键词 张弦梁结构; 健康监测系統; 预警系統

中图分类号: TU3

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)07-0103-03

近年来, 我国各地相继建成了大量的大跨空间结构, 如航站楼、火车站场、体育场馆、展览馆等。这些结构为追求美观, 结构刚度常常较小。一旦结构失效或坍塌, 会造成巨大的人员伤亡以及财产损失。

大跨度空间钢结构长期服役过程中会发生不利受力状态, 包括环境荷载变化、结构几何变形、结构力学性能变化、振动响应、材料老化劣化^[1]。为了及时对其产生不利影响采取针对性的措施, 需要建立一套完整的健康监测系統, 对大跨空间结构进行实时的结构监测和诊断, 及时发现结构的损伤, 预测结构的性能变化就成为空间结构运营单位越来越迫切需要解决的问题。

1 工程背景

某展览馆一期工程已于 2016 年 11 月建成并投入运营, 1 组 2 个单层展馆, 最高点高度 32.1 m。单个展馆东西方向长度约 172.8 m, 南北方向宽度约 101 m, 下部框架支撑体系为钢管混凝土柱 + 钢梁结构, 屋盖体系为“人”字形反拱张弦梁体系。单个展馆的结构体系由 8 榀东西向凹式双索张弦梁, 上弦采用截面为 1 600×500×20 mm 的箱形钢梁, 下弦采用 2 根 97 高钒镀层拉索, 上弦和下弦之间设 8 对撑杆。每榀张弦梁设置 5 组共 35 拉杆式隅撑。

2 理论分析

本项目是对该既有建筑的柔性空间结构在服役运营状态下的监测。不同结构在不同部位的受力及变形不一样, 本项目监测测点的布置取决于对该张弦梁结构在运营各荷载组合状态下的受力及变形情况, 故需针对性地对该张弦梁结构进行运营状态下各种荷载作用组合的建模验算分析, 才能确定测点布置的合理部

位。一般有以下几个方式:

1. 寻求监测体相关设计院提供, 设计院在设计对各个构件预留的安全度不一样, 一般在关键性和重要性较高的构件或节点中选择安全富余度最低的布设监测点。由原设计院提供的该结构安全监测关键点, 是合理布置监测系統的最理想的方式。

2. 建模分析, 根据对该结构进行现场检测, 结合结构、构件、连接的实际情况建立有限元模型, 并调查实际荷载情况, 综合设计荷载和实际荷载情况, 针对性且符合实际情况的验算分析, 分析各荷载组合下结构的响应(包括应力、变形等), 在关键性和重要性较高的构件或节点中选择安全富余度最低的布设监测点。

该项目整个系統的监测内容包括: 张弦梁一立柱的连接点变形监测; 张弦梁应力、张弦梁下弦索力监测; 索夹、屋盖一立柱连接点滑移监测; 挠度变形位移监测; 屋盖风致响应(风速、振动加速度)监测; 屋盖温度监测; 场馆围护系統监测。

不同类型的钢结构, 受力和变形的关键构件或节点也不一样。本工程为单向张弦梁结构, 即单榀张弦梁平行布置, 用刚性系杆及支撑等构件进行空间连接, 并为其提供侧向支点, 从而形成单向张弦梁结构。屋面荷载主要由各榀结构单向传递, 整体结构呈一维传力体系。因此内部各榀张弦梁受力相同, 可选择相邻两榀张弦结构布置测点, 作为比对和相互验证。对选取的张弦结构进行钢梁、撑杆、隅撑的应力监测^[2]、拉索应力监测、张弦梁变形监测、整体屋盖结构变形监测等。

3 健康监测系統

本项目的健康监测系統包含四个子系统, 传感器系統、数据采集与传输系統、数据存储与分析系統、数据发布与预警系統^[3]。

1. 传感器系统：包括了所有感知结构响应的传感器元件及网络，是结构健康监测系统的最前端，也是系统的感知触手。

2. 数据采集与传输系统：是结构健康监测系统中进行感知数据信息有效收集及传输至服务器的部分。包括对各前端传感器获得的数据信息进行采集、解码和传输的系统。由数据采集单元和数据传输网络构成。

3. 数据处理与分析系统：直接对测量信息进行处理和分析，同时将数据传输至云端，并根据结构设计单位提供的结构参数与控制指标，对结构性能进行评估。数据处理与分析系统由高性能计算机和数据处理及分析软件构成。

4. 数据发布与预警系统：对接收到的信息进行处理和分析，并在平台中对数据进行可视化动态展示，超过预警阈值时发布预警信息，并与互联网 INTERNET 相结合，实现自动化远程监测及展示^[4]。

监测项目与监测传感器布置的对应情况见表1。

4 预警系统

4.1 确定预警阈值

预警值的确定设置，是结构健康监测一个非常重要的环节。设置过于严格，则会不停伪报警，设置过宽松，又将导致风险不可控。

且不同结构形式、不同监测部位的预警值不一样，需要针对性分析，合理确定预警值。定预警阈值一般有以下几个途径：

1. 寻求监测体原设计院提供。对于近年来的新建工程，在设计中就将从施工期到运营期的健康监测纳入考虑，设计院在设计图纸时已对各个监测项给出合理的控制值。因此设计院提供结构正常使用极限状态、结构弹性承载极限状态、结构塑性受力状态的控制值，

分别作为不同等级预警。由于具备施工期的初始监测数据，按照设计院提供的对应测点的受力及变形控制值作为某级别对应预警值，较为准确可靠，是确定预警值最理想的途径。

2. 理论计算。对于既有工程，原设计时并未考虑健康监测，施工期也未进行健康监测，在投入使用一段时间后才考虑健康监测。此类工程结构则需要建立准确的有限元模型，模拟分析设计荷载作用所导致的结构正常使用极限状态、结构弹性承载极限状态、结构塑性受力状态的结构响应作为各级预警值的参考值；且还需要调查安装监测传感器时结构实际的荷载作用，模拟分析此荷载作用时的监测初始响应值。各级预警值的参考值减去监测模拟初始响应值，作为不同等级监测值的预警取值；同时设置各监测值的变化速率预警值，作为结构相应变化趋势预警取值。

3. 试验及测试。根据项目在设计期间的等比例模拟试验的极限值，将其作为某级别对应预警值。也可根据相关规范要求及分析该项目已有的人工检测监测数据资料得到某级别对应的预警值。在健康监测设备安装及系统运调试行后，对后期监测数据进行积累，建立基础预警数据库。结合模型有限元分析及监测数据库进行分析后，动态调整各级初始的预警值。

4.2 预警等级

结构从正常使用状态到损坏垮塌之间有较大幅度，因此需要结合现场监测数据信息，通过核查、综合分析和专家咨询等，判定工程风险大小，确定多级预警等级，并对关键参数进行不同层级的预警^[5]。

预警级别按工程风险由大到小分为四级：一级红色预警、二级橙色预警、三级黄色预警、四级蓝色预警，对应严重程度：严重、重要、次要、告知。预警定义：一级预警，当监测数据反应结构物出现重大安全隐患，

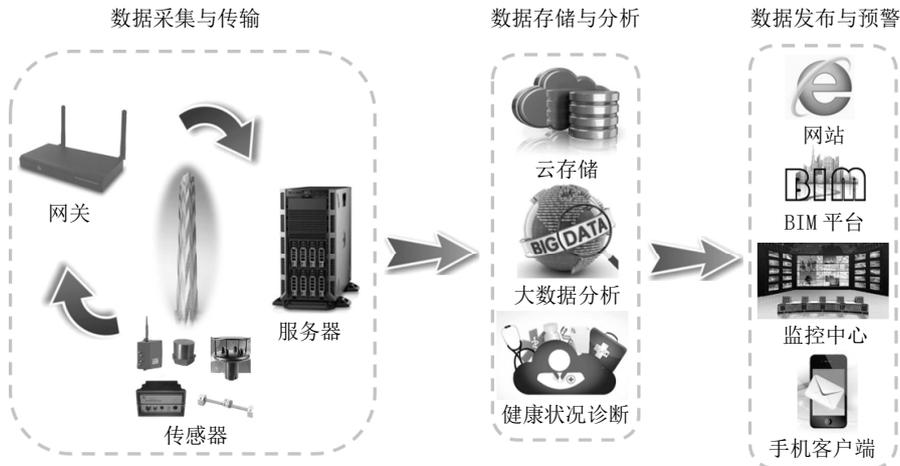


图1 健康监测系统示意图

表 1 监测项目与传感器布置表

监测项目	监测传感器布置
张弦梁—立柱的连接点变形监测	2 个展馆各选择 1 榀受力较大张弦梁进行监测，单榀 4 个节点，每个节点布置 3 个不同方向位移传感器
挠度变形位移监测	选择挠度变形较大的张弦梁进行监测，每馆选择 2 榀张弦梁，每榀布置跨中点、四分之一点、支点共 5 个测点
索夹、屋盖—立柱连接点位移监测	选择张弦梁索夹受力较大部位和张弦梁挠度较大部位的索夹进行监测，每馆 2 榀张弦梁，每榀 2 个测点
屋盖整体变形	每馆选 4 个内角柱顶点作为监测点位，每柱布置 1 个测点
张弦梁应力、张弦梁下弦索力监测	选择张弦梁内力最大部位进行监测，每馆选择 1 榀张弦梁 1. 张弦梁主梁，每榀跨中、支点设监测点位，每个部位 1 个测点 2. 弦索，每榀跨中段、支点段设监测点位，每段 2 个测点 3. 撑杆，每榀跨中段 2 个撑杆，每个设 1 个监测点 4. 撑杆平衡隅撑，撑杆监测处对应的平衡隅撑设置监测点，每根隅撑 1 个测点 5. 立柱和斜柱间连接拉弦，每榀张弦梁设 1 个监测点
屋盖风致响应（风速、振动加速度）监测	1. 风环境监测：采用 2 个超声风速仪（EC-A2）对会展中心风环境进行实时监测，安装位置为 W4 馆屋面对侧角点 2. 振动监测：每馆选 3 榀张弦梁进行监测，每榀的跨中部位布置 1 个测点
屋盖温度监测	每馆选 4 榀张弦梁进行监测，每榀张弦梁跨中部位布置 1 个测点；每馆室内、室外各布置一个测点；采用高精度温度传感器
场馆围护系统监测	1. 屋面倾角监测：每馆选 4 个角柱顶点作为监测点位，每柱布置 1 个测点 2. 屋面相对位移监测：W3 馆，选择 7 轴~17 轴间 5 块屋面板进行监测，每块屋面板设 1 个测点；W4 馆，由于该馆屋面板已经出现位移情况，选择已经发生位移的屋面板进行监测，为 5 轴~9 轴间 4 块屋面板，其中 7 轴~8 轴间屋面板位移较为严重，布置 2 个测点，其他屋面板布置 1 个测点 3. 屋面排水防水构造监测：每个展馆选择 3 个天窗部位，在天窗底部张弦梁上安装高清摄像机实时监测天窗漏水情况，在每个展馆屋面最高处中部安装 1 个高清摄像机实时监测屋面排水情况

若无适当应急处治措施，将会出现监测体结构整体失效、失稳甚至完全垮塌和危及群众生命财产安全等事故。二级预警，当监测数据反应结构物出现安全隐患，若无适当处治措施，将会出现监测体结构的安全状态继续恶化，甚至结构体局部失效、失稳和影响到群众生命财产安全等事故。三级预警，当监测体数据出现持续性、规律性的数据异常变化，数据变化反馈出结构体正朝不利的态势发展，但尚不会出现结构失效、失稳和影响到群众生命财产安全的情况。若无适当处治措施，这种态势将会有继续发展的可能。四级预警，当监测体数据出现异常变化征兆，或开始出现一定的数据规律性变化，数据信息反馈出结构体可能会朝不利的态势发展。

5 结束语

对城市的大跨空间结构、老旧建筑以及存在安全隐患的建筑进行健康监测，不仅对维护和管理城市具

有重大意义，更是城市体检工作中不可或缺的一环。积极推进建筑物结构健康监测相关工作，能有效防范各类重大事故的发生，消除建筑物安全隐患，保障人民群众的生命财产安全，确保城市结构安全和稳定运行。

参考文献：

[1] 吴一凡,潘文豪,罗尧治.大跨钢-混凝土组合楼盖的优化设计[J].浙江大学学报(工学版),2023,57(05):988-996.
 [2] 王小盾,朱菊,陈志华.某项目张弦梁结构屋面参数化设计[J].建筑结构,2023,53(11):1-6.
 [3] 汤东婴,魏晓斌,孙正华,等.结构健康监测系统综述研究[J].智能建筑与智慧城市,2023(08):6-11.
 [4] 李俊杰,葛德,孙文.基于结构健康监测系统的某办公建筑运营期结构响应分析[J].建筑结构,2023,53(21):107-111.
 [5] 房芳,虞凯茜,邱雷.基于嵌入式结构健康监测系统的高斯混合模型结构损伤预警软件设计[J].南京航空航天大学学报(英文版),2023,40(z2):62-68.