

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220427010

文章编号:1672-9331(2023)01-0086-09

引用格式:叶李斌.基于长期健康监测的大跨空间结构使用阶段的状态分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(1):86-94.

Citation: YE Libin. State analysis of long-span space structure in service stage based on long-term health monitoring[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(1): 86-94.

# 基于长期健康监测的大跨空间结构 使用阶段的状态分析

叶李斌

(福建省永正工程质量检测有限公司, 福建 福州 350012)

**摘要:**【目的】确定健康监测方法,确保大跨钢结构体育场在使用过程中的安全。【方法】以正常使用极限状态、承载能力极限状态及材料屈服强度为依据设置构件应力的预警阈值;以规范规定的正常使用性能及承载性能要求设置挠度的预警阈值;根据风压重现期设置风压的预警阈值;结合有限元软件对结构进行理论分析,并确定测点位置;利用结构健康监测系统实时监测正常使用情况下桁架结构的应力、挠度以及钢罩棚的风压,并与相应的理论值进行分析比较。【结果】在监测周期内,体育场桁架结构的应力、挠度及钢罩棚的风压均小于一级预警阈值,且均满足设计要求,即结构处于正常工作状态。【结论】温度应力对空间桁架结构的影响较大,在极端天气下可能对结构产生局部不利影响。研究方法和成果可为类似工程的健康监测提供一定参考。

**关键词:**健康监测;大跨空间结构;使用阶段;预警阈值;有限元分析

**中图分类号:**TU245.2;TU391

**文献标志码:**A

## 0 引言

已投入使用的大跨空间钢管桁架结构、网架结构会因荷载及环境等影响而出现变形、疲劳损伤等问题,进而会削弱构件承载力<sup>[1]</sup>。结构亚健康状态往往会导致构件应力超限、结构应力异常重分布或变形等,判断结构是否安全,最直接的指标是结构的应力及位移<sup>[2]</sup>。因此,对该类建筑结构进行长期健康监测,及时发现安全隐患,在维护地区人民生命财产安全方面具有重要意义。

健康监测主要应用于施工阶段及后期使用阶段(长期健康监测)。为了确保大型空间钢结构施工过程的顺利进行,越来越多的研究人员对大型场馆进行了施工期健康监测。王秀丽等<sup>[3]</sup>结合关键杆件确定了临夏体育场传感器的最优布置方

案,达到了准确预警空间杆件可能出现损伤位置的目的,并进行了结构安全性评价;刘宇飞等<sup>[4]</sup>对在役空间网格结构进行监测分析,得到了重点杆件的弯曲变形损伤,并提出了采用三维激光扫描与数字图像法进行多视角几何三维建模的方法,该方法适用于空间网格结构的单次或者长期监测;田志昌等<sup>[5]</sup>针对实际情况设计了一套符合包头体育馆的健康监测系统,并对主桁架进行监测以了解体育馆的工作状态;杨付增等<sup>[6]</sup>对郑州奥体中心空间网架结构的施工过程进行健康监测,结果表明,该结构处于安全状态,这为施工的顺利进行提供了保障。

目前,长期健康监测多用于大跨桥梁,以确保桥梁的正常使用。为了实现管理的信息化和现代化,一些学者对监测系统及传感器的优化布置做了大量研究<sup>[7-9]</sup>,也为桥梁维护管理提供了重要依

收稿日期:2022-04-27;修回日期:2022-07-04;接受日期:2022-07-20

基金项目:福建省建设科技研究开发项目(2020-K-66)

通信作者:叶李斌(1988—),男,工程师,主要从事工程监测、鉴定和加固等方面的研究。E-mail: yelbcjt@163.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

据。杜彦良等<sup>[10]</sup>对武汉长江大桥进行了长期健康监测,结果表明监测过程中系统的工作稳定性良好、监测数据准确可信;秦清华<sup>[11]</sup>提出了基于结构健康评价模型的桥梁长期健康监测系统,该系统可在交通出现紧急情况时发出预警指令;夏烨等<sup>[12]</sup>提出了基于中性轴的长期监测指标体系,提高了中性轴位置计算的准确性;赵瀚玮等<sup>[13]</sup>通过长期监测数据给出了桥梁在长期服役过程中竖向动力特性的预警阈值,为桥梁的长期健康监测提供了预警阈值的设置思路。

由于长期健康监测在大跨空间桁架、网架建筑结构使用阶段的运用较少,本研究通过设置应力、挠度及风压各3个级别的预警阈值,结合南平市武夷新区体育场的监测数据和有限元分析所得的理论数据,分析了体育场使用阶段应力、挠度的变化情况及其原因,以期能及时排除该体育场在使用过程中由各种不利因素引起的应力突变、结构破损等问题起到一定的指导作用,同时也为今后类似工程的长期健康监测提供一定的参考。

## 1 工程概况及监测内容

### 1.1 工程概况

武夷新区体育场位于南平市,采用钢桁架结构体系,在桁架间设置与空间网壳相连的环桁架,用弦杆将主桁架支撑在混凝土结构上,在悬挑处设置V型支撑,其平面形状呈同心椭圆环,高度为39.3 m,长轴为262.0 m,短轴为228.0 m。桁架悬挑端跨度为24.3 m,桁架高度为2.0~4.0 m,采用相贯节点及焊接空心球节点连接。桁架材料为焊管和无缝钢管,材质均为Q355B,最大管径为560 mm(钢管外径)×20 mm(壁厚)。桁架内侧支座下方为预埋型钢,形式为混凝土劲性柱结构,数量为56个。混凝土劲性柱底部标高为-2.95 m,并设置4根直径为20 mm的预埋锚栓。桁架外侧支座为预埋钢板和螺纹钢,数量为56个。屋面系统主要包括铝镁锰屋面系统、铝板装饰系统、天沟排水系统、屋面防雷系统、防坠落系统等。该工程地面粗糙程度为B类,基本风压为0.35 kN/m<sup>2</sup>,设计使用年限为50 a,场地类别为Ⅱ类,设计地震分组为第

一组,抗震设防烈度、设计基本地震加速度分别为6度、0.05g。体育场示意图见图1(图中数字为轴的编号)。

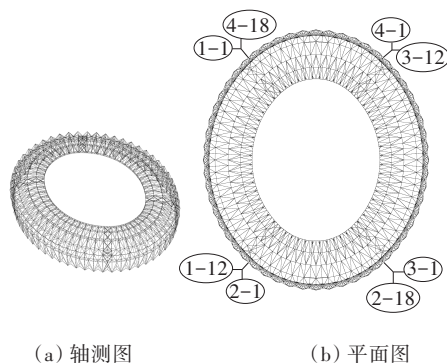


图1 体育场示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the stadium

### 1.2 监测内容

根据体育场桁架的结构特点,考虑其在运营过程中各阶段的受力特性,本次监测的主要内容为:① 桁架关键杆件的应变;② 桁架挠度;③ 工作环境(温度、风压)。

在具体实施过程中,采用长期监测与定期监测相结合、实时在线监测与定时离线监测相结合的原则进行。

## 2 监测方案

### 2.1 有限元分析

由于体育场桁架结构构件数量庞大,且部分杆件因场地原因等无布设条件,对杆件逐一布设应变测点是不现实的。因此,本研究根据工程特点,基于有限元模拟分析思路<sup>[14]</sup>,结合测点布置的可行性、经济性和合理性,采用midas Gen软件建立双线性强化模型(考虑材料非线性和几何非线性),计算得到有限元分析结果,再根据应力最大的构件的分布状况、结构挠度情况,最终确定传感器的数量和布设位置。

由于主桁架钢管采用相贯节点,更接近刚接,因此在建模过程中,桁架杆件均采用梁单元,这样能在计算过程中兼顾杆件的压弯性能。在建模过程中参数的取值为:钢材弹性模量 $2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比0.3,钢材密度 $7.85 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,剪切模量 $7.9 \times 10^4$  MPa,钢罩棚的恒载0.6 kN/m<sup>2</sup>,活

载 0.6 kN/m<sup>2</sup>, 马道荷载 5.0 kN/m。根据设计资料, 在桁架支座端及 V 型支撑支座端均采用完全固结的形式, 并在支座处对 3 个平动自由度进行限制, 所建立的有限元模型如图 2 所示。为了确定传感器的具体布置位置, 需结合单榀桁架应力、位移进行分析, 有限元分析得到的单榀桁架应力、位移云图见图 3~4。

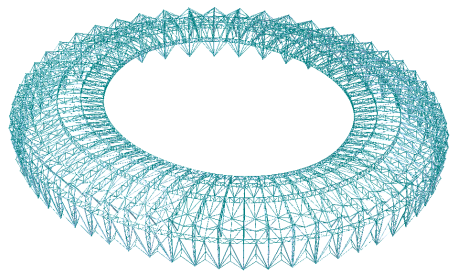


图 2 有限元模型  
Fig. 2 Finite element model

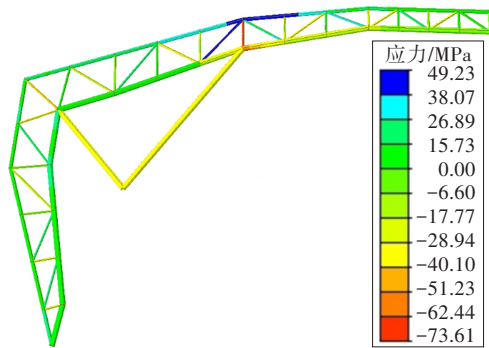


图 3 单榀桁架应力云图  
Fig. 3 Stress distribution of single frame

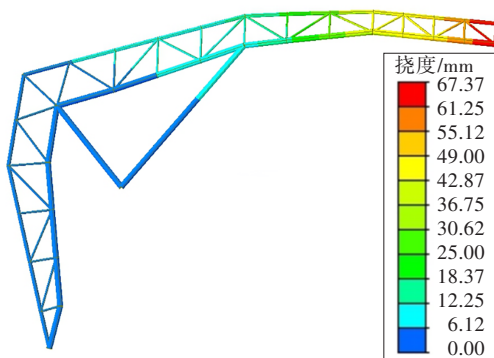


图 4 单榀桁架位移云图  
Fig. 4 Displacement distribution of single frame

2.2 传感器选型

采用表面型智能数码弦式应变计对体育场桁

架杆件进行应变监测。表面型智能数码弦式应变计具有灵敏度高、精度高、稳定性好的特点, 采用振弦理论设计制造, 钢弦内置张力结构, 两端采用点焊焊接锚固, 安装方便, 且对安装支座无剪力要求, 容易固定, 适用于长期监测。其优点主要体现在: 首先, 内置的高性能激振器采用脉冲激振方式, 具有测试速度快、钢弦振动稳定可靠、长距离传输频率信号不失真、抗干扰能力强的特点; 其次, 内置智能芯片, 全数字监测, 具有智能记忆功能, 在传感器中能存贮传感器型号、电子编号、标定系数、出厂日期等参数, 以实时对应被测构件的监测数据。其主要参数见表 1。

表 1 表面型智能数码弦式应变计主要参数

Table 1 Main parameters of surface intelligent digital string strain gauge				
型号	量程/10 <sup>-6</sup>	测量精度/10 <sup>-6</sup>	分辨率	标距/mm
JMZX-212HAT	±1 500	±7.5	10 <sup>-6</sup>	129

采用压差式静力水准仪对体育场桁架进行挠度监测。压差式静力水准仪是一款精度高、量程大的静力水准传感器, 其核心部件为进口压力敏感元件, 采用结构工业化设计, 具有体积小、响应速度快和长期稳定性好等优点。在实际应用中多个传感器通过水管相连接, 共同组成静力水准测试系统。压差式静力水准仪广泛应用于路面非均匀沉降与剖面非线性沉降、钢结构沉降与钢结构挠度等的精密测量。其主要参数见表 2。

表 2 压差式静力水准仪主要参数

Table 2 Main parameters of differential pressure static level				
型号	量程/ mm	灵敏度/ mm	精度(占总量程 的百分比)/%	工作温 度/℃
JMYC-6230	3 000	0.1	0.2	-40~85

采用超声波风压变送器对体育场上部钢罩棚结构的工作环境进行自动化监测。其主要参数见表 3。

表 3 超声波风压变送器主要参数

Table 3 Main parameters of ultrasonic wind pressure transmitter				
型号	量程/ kPa	相对湿度/ 度/%	综合精度(占总量 程的百分比)/%	工作温度/ ℃
JMFY	0~3	0~95	±1	-20~85



### 2.3 测点的设置

为了优化配置资源、降低数据处理的复杂性,在设置应力测点时,首先,结合有限元分析结果,确定关键杆件,即体育场桁架传力体系中关键部位的杆件;其次,确定主桁架中受力较大的杆件,并根据主桁架的受力状态均匀设置测点,使所测结果尽可能体现结构的受力情况。

依据上述测点设置原则,结合有限元计算结果(图3),在主桁架(1-1)、(2-1)、(3-1)、(4-1)及与之相连的环向桁架上共布置72个应变传感器,在主桁架及环向桁架的上弦杆、腹杆、下弦杆分别布置16、40和16个应变传感器。其中,主桁架应变测点的布置示意图见图5。

由于主桁架悬挑端竖向位移最大(图4),故在主桁架悬挑端布置6个挠度测点,并在支座处设置基准点。主桁架挠度测点布置示意图见图6。

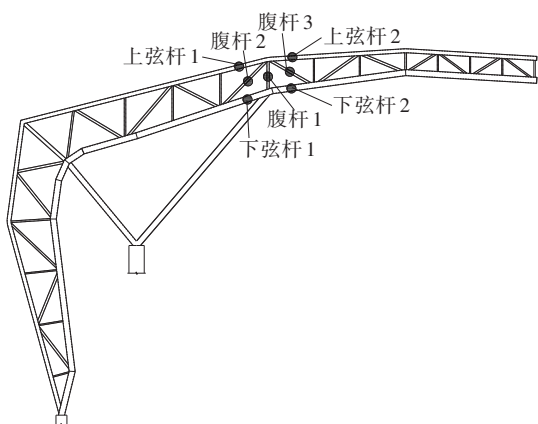


图5 主桁架测点布置示意图

Fig. 5 Layout of measuring points of main truss

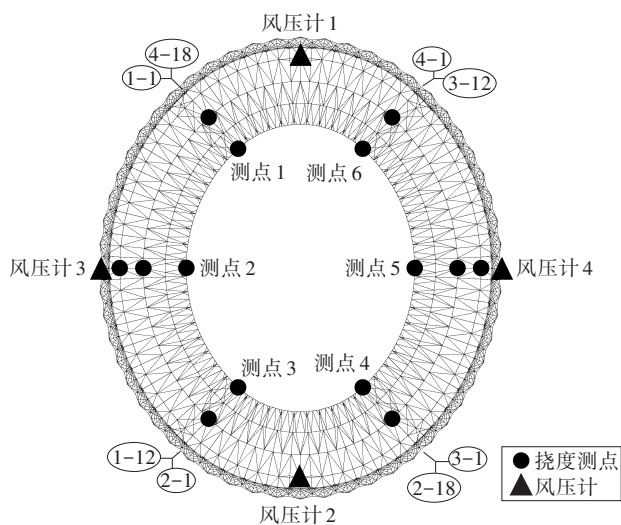


图6 挠度测点布置示意图

Fig. 6 Layout of deflection measuring points

结合当地主要风向以及结构特性,所布置的挠度测点如图6所示。

仪器安装后应做好保护措施,避免后期因结构养护、维修等导致仪器破损,进而引起监测信号中断、数据缺失。同时,为了确保采集过程中数据的连续性,还应配备临时电源,防止因断电等意外情况,引起信号中断。

### 2.4 预警阈值的设置

因体育场的建筑面积大、使用期人员密集等特点,当结构出现损伤、应力突变、极端天气等情况时,为了能争取宝贵时间确保人员有秩序地疏散,对结构设置应力、挠度预警阈值以及对上部钢罩棚结构设置风压预警阈值是十分必要的。

#### 2.4.1 应力预警阈值

在健康状态的评估过程中,若采用统一固定阈值或统一比例系数设置结构构件的应力预警阈值,则不能精确地对大型空间桁架结构中不同弦杆(上弦杆、腹杆、下弦杆)、不同位置和不同截面构件的实际应力进行预警,且所测数据存在匹配困难、针对性不明确甚至失真等情况,不能准确地对构件进行预警。

为了得到较理想的预警阈值,本次健康监测将体育场相同截面的弦杆构件划分为同一类构件,并对各类构件分别取预警阈值。鉴于需要确保体育场在使用阶段正常使用,结合结构受力情况,本研究以结构在正常使用的极限状态下各类杆件应力的理论值作为该类杆件的一级应力预警阈值;以极限承载力状态下各类杆件应力的理论值为该类构件的二级应力预警阈值;以各类杆件80%的屈服强度作为各类杆件的三级应力预警阈值。

由于在本次健康监测开始时,该体育场已经竣工并投入使用,未采集结构在自重状态下的初始应变,因此以南平市年平均气温(20.5℃左右)、年平均风速(低于1.5 m/s),且屋面上无人时所采集的构件应力、挠度作为初始监测值;运营阶段杆件对应的预警阈值为上述预警阈值减去自重状态下的初始应力值<sup>[15]</sup>。主桁架(1-1)、(2-1)的上弦杆2、腹杆1及下弦杆2(图5~6)应力的预警阈值见表4。

**表4** 正常使用阶段各杆件应力的预警阈值  
**Table 4** Early warning threshold of member stress  
 in normal use stage MPa

杆件		预警阈值		
		一级	二级	三级
主桁架(1-1)	上弦杆2	40.23	56.33	166.88
	腹杆1	-45.60	-63.84	-124.83
	下弦杆2	-59.80	-83.72	-101.60
主桁架(2-1)	上弦杆2	40.46	56.65	167.24
	腹杆1	-46.98	-65.78	-127.24
	下弦杆2	-58.38	-81.74	-102.73

#### 2.4.2 挠度预警阈值

由于监测开始时,体育场已投入使用,监测所得的挠度中不含自重引起的挠度。同理,根据2.4.1节中的方式求出含自重的挠度,然后进行预警阈值的设置。

根据文献[16],满足钢结构正常使用的构件挠度限值为构件自由长度的1/660,满足承载力要求的挠度限值为构件自由长度的1/400,不能载物的挠度限值为构件自由长度的1/200。该体育场主桁架悬挑长度 $l=24.359$  m,根据上述规定,所设置的主桁架挠度3个级别的预警阈值分别为:36.91、60.90和121.80 mm。

#### 2.4.3 风压预警阈值

对极端天气设置对应的风压预警阈值,可提醒监控人员及时关注结构应力的变化,提前做好防范措施。

该体育场设计使用年限为50 a,根据文献[17-18],将风荷载重现期5、10和50 a对应的风压分别设置为一级、二级、三级风压预警阈值,即0.23、0.25和0.35 kN/m<sup>2</sup>。

### 3 监测结果与分析

在结构健康监测过程中实时采集的数据量庞大,但通过可视化编程处理,对采集时段中具有代表性的数据进行分析可减轻数据处理的工作量。结合数据处理结果,提取2021年8月11日至2022年4月11日的实时监测数据,对体育场结构的应力、挠度进行分析。由监测数据可知,在正常使用

阶段仅温度效应对结构应力、挠度影响较大,其余可变荷载对结构的影响不明显。由于钢结构对温度变化较敏感,且昼夜温差、季节温差变化大,因此应对结构表面的昼夜温差变化进行重点监测。结合监测数据,该体育场杆件表面的昼夜温差可达18~23℃。

#### 3.1 应力分析

考虑到结构的对称性,现仅列出主桁架(1-1)、(2-1)的数据进行分析。主桁架(1-1)、(2-1)正常使用阶段的上弦杆2、腹杆1及下弦杆2的应力变化趋势如图7~9所示;仅考虑温度效应时,杆件应力与温度的关系曲线如图10~12所示;2022年4月12日最高气温为33℃,杆件日最大温度附加应力监测值及理论值见表5。

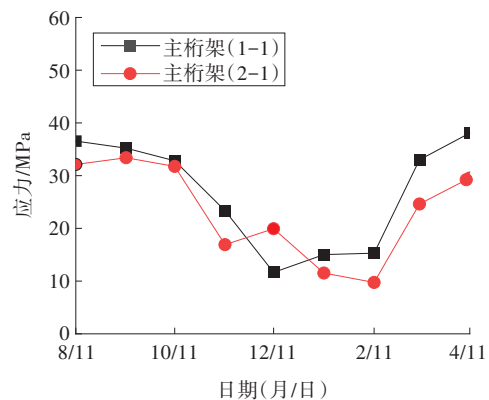


图7 上弦杆2应力变化趋势

Fig. 7 Stress variation trend of upper chord 2

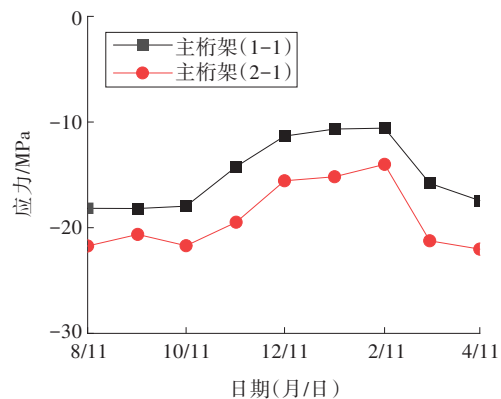


图8 腹杆1应力变化趋势

Fig. 8 Stress variation trend of web member 1

1) 结合表5及图7~9可知,监测过程中各杆件的监测应力均未超过表4所列的一级应力预警阈值,结构处于安全状态。

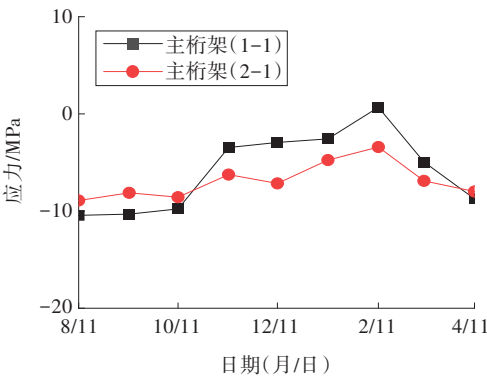


图9 下弦杆2应力变化趋势

Fig. 9 Stress variation trend of lower chord 2

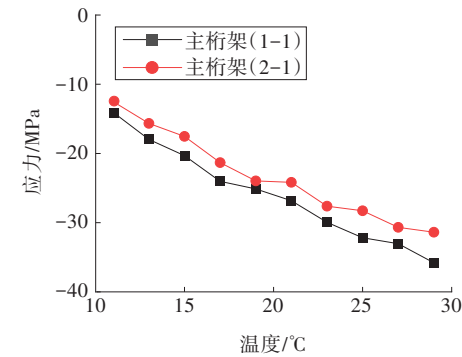


图10 上弦杆温度-应力关系曲线

Fig. 10 Temperature-stress curves of upper chord

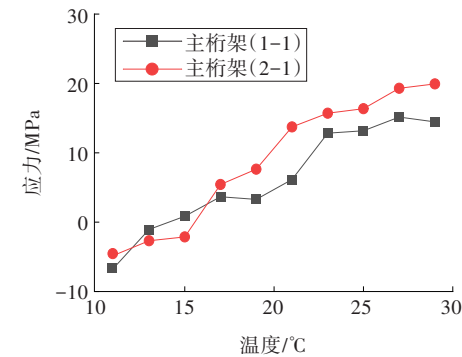


图11 腹杆温度-应力关系曲线

Fig. 11 Temperature-stress curves of web member

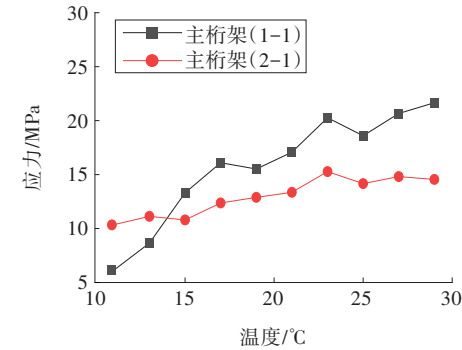


图12 下弦杆温度-应力关系曲线

Fig. 12 Temperature-stress curves of lower chord

表5 杆件日最大温度附加应力监测值及理论值

Table 5 Monitoring and theoretical values of daily maximum temperature additional stress of bars

杆件		杆件温度/℃	日最大温度附加应力/MPa	
			理论值	监测值
主桁架(1-1)	上弦杆 2	42.1	56.33	35.22
	腹杆 1	33.8	63.84	16.98
	下弦杆 2	30.5	83.72	10.31
主桁架(2-1)	上弦杆 2	40.9	56.65	33.39
	腹杆 1	37.7	65.78	23.87
	下弦杆 2	30.0	81.74	9.62

2) 由图 7~9 可知,在监测周期内,主桁架(1-1)、(2-1)各杆件的最大应力监测值分别为 35.56 和 33.39 MPa,分别为理论值的 63.12% 和 58.94%,表明主桁架各杆件的应力监测值远小于理论值,满足正常使用要求,结构处于安全状态。在冬季,各杆件的应力均变小,而在夏季,各杆件的应力均呈不同程度的增大趋势,表明季节变化对各桁架杆件应力的影响较大,尤其是夏季的高温天气对杆件的温度附加应力有明显的增大作用,但杆件的应力变化均满足承载力要求。

3) 由图 10~12 可知,当仅考虑温度效应时,在监测周期内随着温度的升高,上弦杆温度附加压应力、下弦杆温度附加拉应力均有所增大;腹杆温度附加应力的变化较为复杂,由压应力变为拉应力。

4) 由表 5 可知,在正常使用阶段的监测周期内,上弦杆受日照影响最大,杆件最高温度可达 42.1℃,下弦杆受日照影响最小,杆件最高温度为 30.0℃,表明体育场主桁架在太阳的照射下,杆件所在的位置直接影响着杆件的温度。在监测周期内,杆件温度附加应力的变化幅值为 9.62~35.22 MPa,表明温度对杆件应力的影响较大,在正常使用过程中应注意温度变化带来的影响。主桁架(1-1)上弦杆 2 的最大温度附加应力可达 35.22 MPa,为理论值的 0.63 倍,下弦杆 2 的最大温度附加应力为 10.31 MPa,为理论值的 0.12 倍,表明杆件温度变化越大,其附加应力也越大,且杆件的位置不同,温度变化对附加应力的影响也有所不同。上弦杆温度附加应力较腹杆、下弦杆更接近理论值,其原因是有限元分析过程中的理论温度场与

实际温度场差异较大。此外,理想的有限元模型与实际结构在刚度、节点连接等方面均存在差异,这些均可导致温度附加应力的理论值与监测值之间存在偏差。

### 3.2 挠度分析

在正常使用阶段,图6中测点1、测点2的挠度增量及挠度-温度关系曲线如图13~14所示。

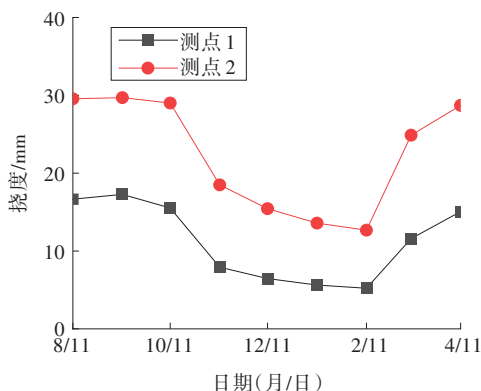


图13 测点挠度增量

Fig. 13 Deflection increment of measuring points

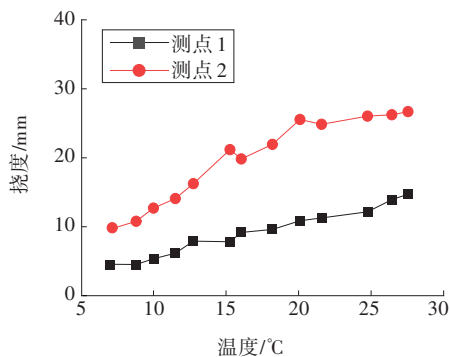


图14 测点挠度-温度关系曲线

Fig. 14 Deflection-temperature curves of measuring points

由图13可知,桁架挠度随季节变化较明显。在监测周期内主桁架(1-1)、(2-1)的最大挠度分别为17.27和29.71 mm,均未超过一级预警阈值(36.91 mm),说明结构挠度均满足正常使用要求。由图14可知,主桁架挠度随着温度的升高而增大,在使用过程中应注意由温差产生的挠度对结构、构件可能造成的影响。

### 3.3 风压分析

监测周期内风压、温度变化趋势如图15所示。由图15可知,在监测周期内,各测点最大风压为0.20 kN/m<sup>2</sup>,小于一级预警阈值(0.23 kN/m<sup>2</sup>),未出现极端天气,说明风压满足结构的正常使用要求。

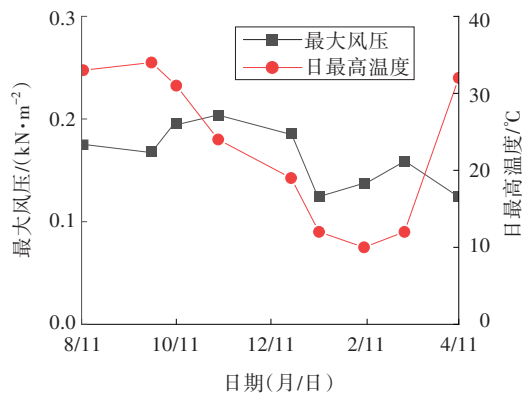


图15 监测周期内风压变化趋势

Fig. 15 Change trend of wind pressure in monitoring period

通过上述分析可知,体育场结构的工作性能良好,各关键杆件的应力变化及各测点的挠度均满足正常使用要求,结构承载力满足设计要求,在监测周期内未出现极端天气,体育场处于安全状态。

## 4 结论

1) 采用有限元软件确定应力最不利杆件,再结合结构特点进行应力、测点挠度传感器的布置,该方法简便、适用。建议在结构正常使用过程中增设对风、温度等的监测,和应力监测共同反映结构的工作状态。

2) 采用统一固定应力预警阈值或用统一比例系数设置应力预警阈值的方法过于笼统,不能准确地对大型空间桁架结构中的不同杆件进行预警。应对不同截面的弦杆、柱等构件进行分类,并分别设置各个构件的应力预警阈值。

3) 在工程监测中,以结构在正常使用的极限状态下的各类杆件应力的理论值、极限承载力状态下各类杆件应力的理论值及各类杆件屈服强度的80%作为各类杆件3个级别的应力预警阈值,根据规范规定的正常使用性能及承载性能要求设置挠度3个级别预警阈值的方法是可行的。在对结构工作环境的监测中,对重现期为5、10和50 a的风压分别设置3个级别的风压预警阈值是十分有必要的。

4) 在监测周期内,该体育场结构的应力、挠度及风压均在设计范围内,且均未达到一级预警阈



值,表明该体育场处于正常工作状态。

5) 在正常使用过程中,主桁架杆件的温度附加应力幅度为9.62~35.22 MPa,温度应力对空间桁架结构的影响较大,极端天气下可能会产生局部不利影响。

### 〔参考文献〕

- [1] 丁北斗,崔杰,陈洁,等.结构健康监测系统及其在工程上的应用[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2017,32(2):72-76.DOI:10.15873/j.cnki.jxit.000158.  
DING Beidou, CUI Jie, CHEN Jie, et al. Structural health monitoring system and its application in engineering[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2017, 32(2): 72-76. DOI: 10.15873/j.cnki.jxit.000158.
- [2] 刘建秀.大跨拱形空间钢管桁架结构健康监测系统设计及安装[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.  
LIU Jianxiu. Design and installation of the large-span arch space steel-tube truss structure's health monitoring system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [3] 王秀丽,张强,冉永红.空间管桁架结构健康监测传感器布置优化分析[J].建筑科学与工程学报,2019,36(4):22-30.DOI:10.19815/j.jace. 2019.04.003.  
WANG Xiuli, ZHANG Qiang, RAN Yonghong. Optimization analysis of sensor layout for structural health monitoring of spatial tube truss[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(4): 22-30. DOI:10.19815/j.jace. 2019.04.003.
- [4] 刘宇飞,樊健生,魏晓晨,等.在役空间网格结构的安全监测与杆件变形指标研究[J].工业建筑,2021,51(5):16-21,36.DOI:10.13204/j.gyzG20102908.  
LIU Yufei, FAN Jiansheng, WEI Xiaochen, et al. Research on safety monitoring of in-service spatial grid structure and member deformation index[J]. Industrial Construction, 2021, 51(5): 16-21, 36. DOI: 10.13204/j.gyzG20102908.
- [5] 田志昌,赵升,王贵阳.大跨空间钢结构用体育场健康监测系统的整体设计[J].建筑技术开发,2021,48(18):124-125.  
TIAN Zhichang, ZHAO Sheng, WANG Guiyang. Overall design of stadium health monitoring system for long-span spatial steel structure[J]. Building Technology Development, 2021, 48(18): 124-125.
- [6] 杨付增,贾子光,任亮,等.郑州奥体中心体育场屋盖结构施工安全监测[J].施工技术,2021,50(14):1-6.  
YANG Fuzeng, JIA Zigang, REN Liang, et al. Construction safety monitoring of roof structure in Zhengzhou Olympic sports center stadium[J]. Construction Technology, 2021, 50(14): 1-6.
- [7] 李春,陈超,夏宏达,等.大跨度连续刚构桥健康监测系统设计[J].四川建筑,2020,40(5):319-321,325.  
LI Chun, CHEN Chao, XIA Hongda, et al. Design of health monitoring system for long-span continuous rigid frame bridge[J]. Sichuan Architecture, 2020, 40(5): 319-321, 325.
- [8] 祝小龙,向泽君,谢征海,等.大型建筑结构长期安全健康监测系统设计[J].测绘通报,2015(11):76-79.DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2015.0351.  
ZHU Xiaolong, XIANG Zejun, XIE Zhenghai, et al. The design of large scale structure of long-term safety health monitoring system[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(11): 76-79. DOI: 10.13474/j.cnki. 11-2246.2015. 0351.
- [9] 唐建辉,周逸,樊仕建.重庆两江大桥长期健康监测系统研究[J].公路交通技术,2014,30(6):131-136.DOI:10.13607/j.cnki.gljt.2014.06.030.  
TANG Jianhui, ZHOU Yi, FAN Shijian. Research on monitoring system for long-term health of Chongqing Two-River Bridges[J]. Technology of Highway and Transport, 2014, 30(6): 131-136. DOI: 10.13607/j.cnki. gljt.2014.06.030.
- [10] 杜彦良,苏木标,刘玉红,等.武汉长江大桥长期健康监测和安全评估系统研究[J].铁道学报,2015,37(4):101-110.  
DU Yanliang, SU Mubiao, LIU Yuhong, et al. Study on the long-term health monitoring and safety evaluation system for the Wuhan Yangtze River Bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(4): 101-110.
- [11] 秦清华.蔡家嘉陵江特大桥长期健康监测系统的设计及实施[J].中外公路,2017,37(5):174-178.DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2017.05.038.  
QIN Qinghua. Design and implementation of long-term health monitoring system for Caijialingjiang Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(5): 174-178. DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2017.05.038.
- [12] 夏烨,王鹏,孙利民.基于中性轴指标的混凝土梁桥长期监测与性能评估[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(5):653-663.  
XIA Ye, WANG Peng, SUN Limin. Long-term monitoring and performance assessment for concrete beam bridge based on neutral axis index[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(5): 653-663.
- [13] 赵瀚玮,丁幼亮,李爱群,等.公铁两用斜拉桥竖向动力特性长期监测分析[J].铁道建筑,2016,56(11):26-30.  
ZHAO Hanwei, DING Youliang, LI Aiqun, et al. Long-term monitoring and analysis of vertical dynamic characteristic of rail-cum-road cable-stayed bridge[J]. Railway Engineering, 2016, 56(11): 26-30.
- [14] 叶李斌,张镔锋.加固后现浇钢筋混凝土楼板静载试验分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(3):32-37. DOI: 10.19951/j.cnki. csldgxbzkb. 2021. 03.004.  
YE Libin, ZHANG Bin Feng. Static load test analysis of



- reinforced concrete floor[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(3): 32–37. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.03.004.
- [15] 贺海建,左志亮,杨春,等.某高铁站台大跨度空间钢结构健康监测及其预警系统研究[J].建筑钢结构进展, 2020, 22(2): 121–128. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.02.015.
- HE Haijian, ZUO Zhiliang, YANG Chun, et al. Study on health monitoring and early-warning system of long-span spatial steel structure in a high speed railway station[J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(2): 121–128. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.02.015.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑可靠性鉴定标准:GB 50292—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for appraisal of reliability of civil buildings: GB 50292—2015[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2016.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2012.
- [18] 陈伏彬,范翔,张轩浪,等.角钢塔典型节点受力性能有限元分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 45–52. DOI: 10.19951/j.cnki.1672.9331.2022.01.006.
- CHEN Fubin, FAN Xiang, ZHANG Xuanlang, et al. Mechanical performance of typical joints of angle steel tower based on finite element analysis [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 45–52. DOI: 10.19951/j.cnki.1672.9331.2022.01.006.

## State analysis of long-span space structure in service stage based on long-term health monitoring

YE Libin

(Fujian Yongzheng Construction Quality Inspection Co., Ltd., Fuzhou 350012, China)

**Abstract:** [Purposes] This study aims to establish the method of health monitoring to ensure the safety of long-span steel stadium in service stage. [Methods] Based on the serviceability limit state, bearing capacity limit state, and material yield strength, the warning threshold of the structural member strain is set. In addition, the warning threshold of deflection is set according to the requirements of serviceability and bearing performance determined in the specification. The warning threshold of wind pressure is set according to the return period of wind pressure. The structure is theoretically analyzed by combining with the finite element software, and the measuring point position is located. The stress, deflection, and wind pressure of the truss structure during the service stage are monitored in real-time by the structural health monitoring system, which is analyzed and compared with the theoretical value. [Findings] During the monitoring period, the stress, deflection, and wind pressure of the stadium truss structure are less than the first-class early warning thresholds and meet the design requirements. Thus, the structure is in normal working state. [Conclusions] The temperature stress has a great impact on space truss structure, which may have a local bad impact on the structure in extreme weather. The research methods and results can provide some reference for the health monitoring of similar projects.

**Key words:** health monitoring; long-span spatial structure; use stage; warning threshold; finite element analysis

**Manuscript received:** 2022-04-27; **revised:** 2022-07-04; **accepted:** 2022-07-20

**Foundation item:** Project (2020-K-66) supported by Construction of Scientific and Technological Research and Development Program of Fujian Province

**Corresponding author:** YE Libin (1988—), male, engineer, research interest: engineering monitoring, appraisal and reinforcement. E-mail: yelbcjt@163.com

(责任编辑:石月珍;校对:赵冰;英文编辑:栗淼)