

DOI: 10.7672/sjgs2015020054

# 大跨度钢管桁架结构全过程现场健康监测研究\*

王秀丽<sup>1 2</sup>, 马润田<sup>1 2</sup>(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 西部土木工程防灾减灾教育部  
工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

[摘要] 大跨度钢管桁架结构空间形式复杂, 各杆件相互作用。以西宁海湖体育馆为例, 介绍了基于光纤光栅传感器和振弦传感器的健康监测技术在体育馆施工阶段的应用。阐述了健康监测系统的组成、监测方法、测点布置等。分析监测数据表明, 在施工阶段, 各关键杆件应力变化稳定, 杆件内力远小于钢材的屈服强度, 各测点的应力状态始终处于弹性工作状态, 满足设计要求; 各环位移监测数据变化稳定, 结构刚度储备丰富, 对西宁海湖体育馆在施工过程中的安全是一个重要评价指标。

[关键词] 体育馆; 钢管桁架; 监测; 应力; 变形

[中图分类号] TU323.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-8498(2015)02-0054-04

## The Whole Process Health Monitoring Research on Site of Large-span Steel Truss Structure

Wang Xiuli<sup>1 2</sup>, Ma Runtian<sup>1 2</sup>(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;  
2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou, Gansu 730050, China)

**Abstract:** Large-span steel pipe truss has complex spatial forms, whose members interact. Taking Xining Haihu Gymnasium for example, the application of healthy monitoring technology in gymnasium construction based on fiber Bragg grating sensor and the vibrating wire sensor is introduced. It expounds the composition, monitoring measure, monitoring points arrangement of healthy monitoring. The monitoring data show that during construction, key members' stresses are stable, and the internal forces are less than steel yield strength, which can meet design requirements. Meanwhile, each ring displacement monitoring data are stable, which is key evaluation index for Xining Haihu Gymnasium.

**Key words:** gymnasiums; steel pipe truss; monitoring; stresses; deformation

大跨度空间钢管桁架结构广泛应用在各种大型体育场馆、剧院、会议展览中心、机场候机楼等重要标志性建筑, 是新材料、新技术、新工艺为综合技术的现代文明的体现<sup>[1-2]</sup>。随着2008年北京奥运会、2010年上海世博会的相继召开, 国内大跨度空间结构的应用进入了蓬勃发展的新时期, 一大批规模宏大、结构新颖的大空间甚至超大空间的公共建筑展现在公众的视野中<sup>[3]</sup>。但这类大型体育场馆人流密集, 屋盖钢结构跨度大、受力复杂, 为了保障结构的安全性、适用性与耐久性, 重大工程结构有必要在工程建设的施工阶段进行结构健康监测<sup>[4]</sup>。

若不及时关注和控制, 将会带来一定的质量缺陷, 严重时甚至会影响到整体结构<sup>[5]</sup>。所以, 对此类大型工程进行结构健康状况的实时、在线监测, 建立完善的监测、诊断分析系统, 对于分析结构受力状态、保证结构施工安全具有重要意义<sup>[6]</sup>。国内外也有专家学者对此进行了研究和工程应用<sup>[7]</sup>。

本文以西宁海湖体育馆为例, 介绍结构的健康监测系统以及测点布置, 并对施工阶段进行全过程应力及变形监测, 确保结构的安全性, 为结构在施工阶段的安全提供评估指标。

### 1 工程概况

西宁海湖体育中心位于青海省西宁市西部。主要由“一场两馆”组成, 即一个4万座规模的体育场, 一个7181座规模体育馆, 一个1500座规模游泳馆。体育馆与周边的体育场、游泳馆结为组群, 呈三位一体布局<sup>[8]</sup>。

\* 国家自然科学基金项目(51278236); 国家科技支撑计划项目(2011BAK12B07)。

[作者简介] 王秀丽, 教授, 博士生导师, E-mail: wangxl9104@163.com

[收稿日期] 2014-01-24

体育馆总建筑面积为 13 976.6m<sup>2</sup>,呈圆形,看台直径为 88m,建筑外形为折叠式表皮,立面高度为 21.45m。外围护幕墙圆直径为 104.8m,采用空间折面网格结构,由 36 个形状大小一致的结构单元构成,每个结构单元上部与结构主体钢屋盖相连,下部支承在混凝土结构顶板处,上、下连接点均采用铰接。钢屋盖采用空间平面桁架结构,平面桁架沿径向和环向正交布置,6 榀主桁架通过建筑物中心且由中心铸钢节点构成一体,分别支承在 12 根大柱上。屋盖按支座所围成的圆周分为 2 部分,即中心圆部分和外围护圆部分。结构抗震设防烈度为 7 度,建筑结构安全等级:钢屋盖为一级,混凝土结构为二级,设计使用年限为 50 年。钢屋盖如图 1 所示。

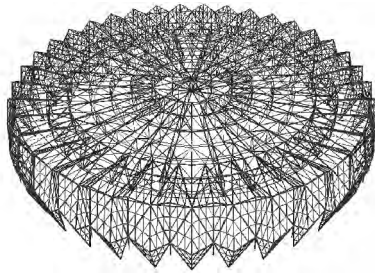


图 1 体育馆钢屋盖

Fig. 1 Steel roof of the gymnasium

## 2 监测系统的组成

本工程的健康监测系统主要由传感器子系统、数据采集和传输子系统、数据管理与分析子系统组成,可实现监测数据连续采集、自动存储、实时连续监测。各子系统的功能如下。

1) 传感器子系统 根据监测内容,在体育馆结构的关键部位布设传感器,用于获得结构在荷载作用下的响应信息。

2) 数据采集与传输子系统 采集传感器传来的信息,对模拟信号进行调制、处理,转换为数字信号,并将信号传输到数据管理与分析子系统。

3) 数据管理与分析子系统 处理、分析传输来的数字信号,得到所需要的图、表,用数据库存储和管理数据,并判别是否需要预警。

### 2.1 应力监测系统

本项目拟采用 2 套应力应变传感系统,即光纤光栅应变传感器和振弦式传感器。在结构的关键部位布置光纤光栅应变传感器和振弦式(钢弦)传感器,2 套系统各有所长。如图 2a、2b 所示。

### 2.2 位移监测系统

本工程在卸载阶段拟采用高精度全站仪的测量方法。结构施工过程中选定测点的变形观测需

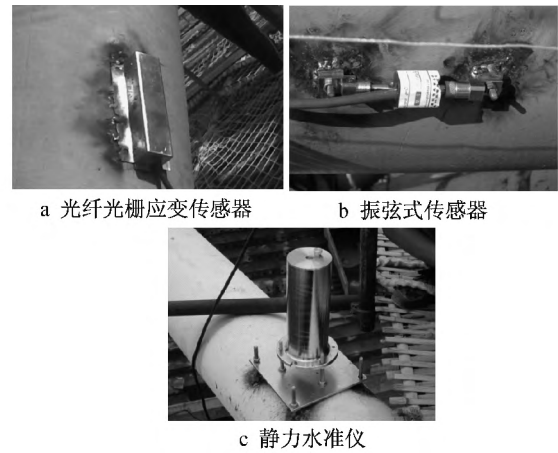


图 2 监测仪器

Fig. 2 Monitoring instrument

要得到选定点 3 个方向的位移数据,重点是竖向位移,进行静态观测。所选用全站仪精度需要在 1s 以上。

本工程在使用阶段拟采用静力水准仪的测量方法,该仪器特别适合于要求高精度监测垂直位移的场合,可监测到 0.05mm 的高程变化,可以进行连续实时监测。静力水准仪如图 2c 所示。

## 3 测点布置

综合考虑结构受力分析结果,分析结构在施工阶段的内力、位移等变化情况,参考理论计算结果,找出结构的关键及敏感部位,布设监测点。

### 3.1 应力测点布置

本工程选择 15 个关键构件选用光纤光栅传感器进行应变监测,如图 3a 所示,在屋盖结构中选取上弦最大内力及下弦最大内力各 2 处,混凝土支柱点 2 处及中间竖腹杆 1 处等关键部位布设测点。同时选择 11 个关键部位选用钢弦传感器进行应力应变监测,如图 3b 所示,选取铸钢节点上、下表面各 1 处,环杆最大应力点 2 处,及上弦最大应力和下弦最大应力各 2 处等关键部位布设测点。钢弦传感器可同时测量测点周围的温度值。每个构件测点的传感器数量应足以真实反映相应位置的应力情况。

### 3.2 位移测点布置

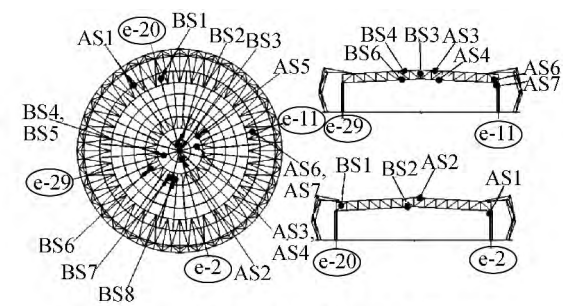
西宁海湖体育馆在卸载阶段拟采用高精度全站仪的测量方法,变形观测点位置如图 3c 左图所示,共 28 个测点。在运营阶段拟采用静力水准仪监测系统,变形观测点位置如图 3c 右图所示,共 3 个测点。

## 4 监测结果与分析

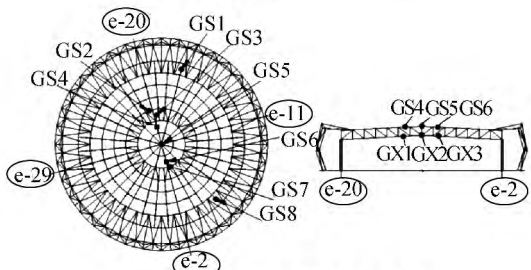
### 4.1 应力监测结果与分析

#### 4.1.1 施工阶段全过程监测分析

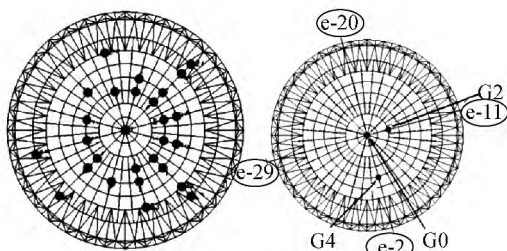
由于体育馆屋盖钢结构形式新颖,跨度较大,



a 光纤光栅关键构件及节点位置



b 钢弦关键构件及节点位置



c 结构变形监测位置

图 3 测点布置

Fig.3 Arrangement of measuring points

受力复杂,建筑结构安全等级高,为保障结构的安全性,需要在施工阶段和运营阶段对钢屋盖进行监测,提供施工准确性的保证和运营阶段结构安全的保障。本项目在施工阶段实施的监测项目有:关键部位应力应变监测、结构变形监测。西宁海湖体育馆钢屋盖结构在主体竣工验收后,2011年9月健康监测开始实施,永久结构开始卸载,临时支撑的拆除,实现由临时支撑塔架承重向钢结构自身承重的转换,是永久结构受力逐渐转移和内力重分布的过程。屋面卸载完成后结构开始加载,从2011年12月开始,随着屋面板、檩条以及马道和各种管道、音响等的施工,加载逐渐完成,到2012年7月屋面部分施工完成。随后开始安装外立面围护幕墙等,到2013年11月,完成体育馆整体竣工验收。

由于监测测点较多,限于篇幅,本文仅选取体育馆零环到二环之间的上弦测点 AS2,GS4 和下弦测点 GX1,GX3,以及环杆测点 AS5,BS6 为例,说明体育馆屋盖结构在整个施工阶段的受力变化情况。各关键杆件在施工阶段应力变化如图 4 所示。

从施工阶段应力变化图可以看出,上弦应力测

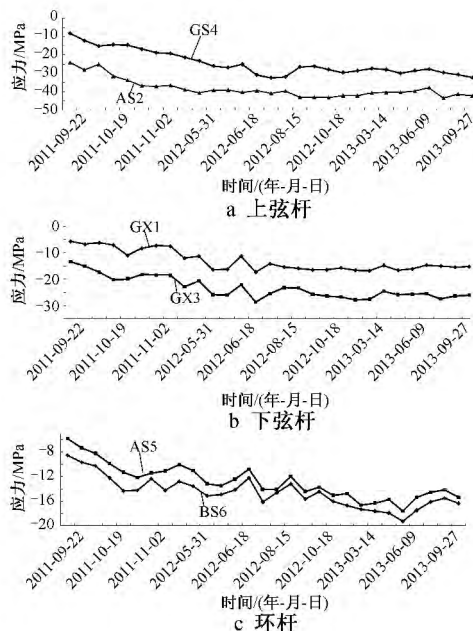


图 4 施工阶段应力变化曲线

Fig.4 Stress variation curves of construction stage

点 GS4,AS2 的应力变化曲线变化均匀,最大应力在 -50MPa 以内。且 GS4,AS2 同为二环内的上弦杆件测点,其内力变化规律基本相似,可以互相对比验证,同样可以对比验证两套监测系统的监测结果。下弦应力测点 GX1,GX3 为一环到二环之间 e-20 和 e-2 轴线对称的下弦杆件测点,分析应力曲线变化图 2 个测点具有相同的变化规律和应力突变值,且在应力到达最大之后明显得有一个回升,这是因为在加载完成后,施工人员、安装设备等荷载的撤离使得荷载变小,相应的杆件应力产生一个回升。环杆测点 AS5,BS6 最大应力在 -20MPa 以内,在图中可以看出在施工后期杆件应力出现明显的突变值,这种突变受温度,风荷载等影响较大,在西宁市这种高海拔、早晚温差大的地区,温度、风荷载等活荷载对结构影响较大,在施工后期是影响杆件应力变化的主要荷载之一。

#### 4.1.2 施工加载与稳定阶段对比分析

整个施工全过程可以分为从 2011 年 9 月开始施工加载阶段,以及从 2012 年 9 月开始屋面板安装完毕的稳定阶段。从监测数据选取测点混凝土支柱点 AS1、中间竖腹杆 BS3,分别选取施工加载阶段和稳定阶段每月的应力监测值各 12 次,详细数据如表 1 所示。

由表 1 可以得出,随着结构加载的开始,结构应力逐渐增大,在到达施工后期随着加载的结束,杆件应力趋于稳定,进入一个相对稳定的变化范围,杆件内力基本处于一个相对稳定的值。分析原因

表1 施工加载与稳定阶段应力监测对比  
Table 1 Stress monitoring values comparison during the construction loading and stable phase

日期	MPa			
	AS1 应力		BS3 应力	
	施工加载	稳定阶段	施工加载	稳定阶段
1	14.26	38.42	26.91	62.77
2	15.68	38.42	33.96	62.38
3	23.12	41.49	26.90	61.41
4	18.43	41.47	34.11	62.87
5	18.56	37.94	32.45	60.56
6	23.45	40.93	40.48	61.39
7	25.82	41.53	37.08	58.63
8	32.78	42.04	42.02	62.62
9	30.15	40.58	52.74	59.23
10	33.43	41.51	56.49	63.47
11	35.41	41.45	54.75	62.50
12	38.86	41.34	59.41	62.01

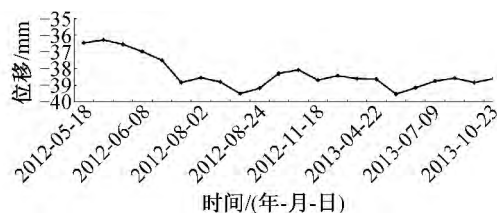


图5 施工阶段四环竖向位移变化曲线

Fig. 5 The fourth ring vertical displacement variation in the construction stage

可知,结构在卸载阶段随着临时支撑的拆除,永久结构受力逐渐转移并产生内力重分布,随着檩条、屋面板及马道和各种管道的施工,屋面荷载逐渐增大,杆件应力也随之逐渐变大,满足结构内力变化的规律。在到达施工阶段后期时,结构加载已经基本结束,恒载施加完毕,结构应力也基本处于一个相对稳定的值,所有杆件内力均超过 70MPa,远远小于钢材的屈服强度(345MPa),在一个相对稳定的范围内变化,上下波动不大,偶尔的变化也是因为一些活荷载,如风荷载和温度荷载等的影响,使得引起关键杆件内力的变化,这种变化有着相应的规律,受时间、天气等因素影响较大,杆件应力表现为有增有减,但总体变化不大,满足健康监测的要求。

4.2 变形监测结果与分析

体育馆在卸载阶段采用高精度全站仪的测量方法,监测屋盖结构在施工卸载阶段的位移变化。在施工后期 2012 年 5 月开始,采用静力水准仪的监测方法,在屋盖零环、二环、四环布置 3 个测点监测结构竖向位移值,限于篇幅,本文选取四环测点 G4 说明屋盖结构在施工后期的位移变化,如图 5 所示。2012 年 5 月施工卸载已经结束,屋面板安装进入后期,从监测结果可以看出,从监测开始竖向位移有个短时间的增长,到 2012 年 6 月底,屋面板安装结束后,位移变化曲线基本处于平滑状态,竖向位移在 39mm 左右波动。

5 结语

本文利用应力监测系统及位移监测系统对西宁海湖体育馆进行关键杆件在施工阶段的应力、位移等监测,得出以下结论。

1) 通过对西宁海湖体育馆施工阶段的全过程

实时监测,其结果表明,钢结构杆件的最大应力在合理设计范围之内,各关键部位的应力实测值变化稳定,无明显突变,杆件内力均在 70MPa 内,远小于材料的屈服强度,各测点的应力状态始终处于弹性工作状态,对材料的利用留有充足的余量,体育馆具备安全服役能力,整个结构承载力安全,满足要求。

2) 体育馆屋盖各测点均较卸载前产生向下的竖向位移,且由于体育馆钢屋盖为对称结构,故环向各测点竖向位移值基本一致,最大实测值在 -50mm 以内,各测点的竖向高程均在设计范围之内,保证了结构的安全性。结构刚度储备丰富,达到了设计的预期值,满足设计要求。

3) 西宁海湖体育馆钢结构健康监测结果分析说明,本工程监测系统选择合理,各关键杆件点和关键部位选取是有效的,对于分析结构受力状态、保证结构施工安全及健康具有重要意义。本文的监测方法、测点布置及方法可以为类似的工程结构提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 钱稼茹,张微敬,赵作周,等. 北京大学体育馆钢屋盖施工模拟与监测[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 13-20.  
 [2] 罗尧尧,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.  
 [3] 罗尧尧,苑佳谦. 大跨度空间结构安全预警评估技术研究[J]. 空间结构, 2011, 17(3): 61-68.  
 [4] 周学军. 济南奥体中心场馆钢结构设计特色与健康监测[J]. 工程力学, 2010, 27(S2): 105-112.  
 [5] 秦杰,徐瑞龙,徐亚柯,等. 国家体育馆安全监测系统研究[J]. 施工技术, 2009, 38(3): 40-43.  
 [6] 李惠,周峰,朱焰煌,等. 国家游泳中心钢结构施工卸载过程及运营期间应变健康监测及计算模拟分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 1-9.  
 [7] 罗尧尧,王洽亲,童若飞,等. 上海世博会英国馆结构健康监测[J]. 施工技术, 2011, 40(2): 24-27.  
 [8] 王秀丽,梁宝祥. 西宁某体育馆钢屋盖卸载模拟分析及现场监测[J]. 施工技术, 2013, 42(20): 39-43.