

文章编号:1673-2049(2019)04-0022-09

空间管桁架结构健康监测传感器布置优化分析

王秀丽^{1,2}, 张强^{1,2}, 冉永红^{1,2}

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 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:以临夏体育场空间管桁架罩棚为研究对象,基于小扰动分析方法与承载能力分析方法找出结构的关键杆件,通过对管桁架罩棚结构有限元模型各阶模态进行分析来了解动力作用下的结构响应。结合所选关键杆件确定传感器布置最优方案,包括传感器的种类、数量及位置。对管桁架罩棚结构整体与局部细部实体模型进行有限元分析,将管桁架有限元实体模型进行局部吊装、整体卸载等全过程模拟分析,同时将优化的承载能力分析方法应用于体育场空间管桁架罩棚健康监测,并对比有限元模拟结果和实际监测结果。结果表明:现场安装传感器时定位偏差越小,各阶段实测数据与模拟值吻合越好;传感器种类、数量、位置及安装精度都会直接影响数据分析的逻辑性,且对后续准确评价结构安全性起决定作用;承载能力分析方法结合结构动力学传感器布置方法比单一小扰动分析方法更为高效快捷,能准确预警空间杆件可能损伤的位置,从而进行结构安全性评价。

关键词:空间管桁架;健康监测;关键杆件;传感器布置;优化分析

中图分类号:TU323.4

文献标志码:A

Optimization Analysis of Sensor Layout for Structural Health Monitoring of Spatial Tube Truss

WANG Xiu-li^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, RAN Yong-hong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Taking the space pipe truss roof of Linxia Stadium as the study object, the key members of the structure were found by small disturbance analysis method and load-carrying capacity analysis method. The structural response of the pipe truss roof structure under dynamic action was obtained by finite element analysis on model modality. The optimal sensor layout scheme was determined by combining the selected key members, including the type, number and location of sensors. The finite element analysis on the whole and local detail solid models of pipe truss roof structure was carried out. The whole process of local hoisting and overall unloading was simulated and analyzed by finite element solid model of pipe truss. At the same time, the optimum bearing capacity analysis method was applied to health monitoring of space pipe truss roof in stadium. The results of finite element simulation and actual monitoring were compared. The results show that the smaller the positioning deviation is, the better the coincidence between the measured data and the simulated values is. The type, quantity, location and installation

收稿日期:2018-09-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51778273);甘肃省科技支撑计划项目(1504GKCA040)

作者简介:王秀丽(1963-),女,辽宁沈阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:2757226839@qq.com。

accuracy of sensors will directly affect the logic of data analysis, and play a decisive role in the subsequent accurate evaluation of structural safety. The load-carrying capacity analysis method combined with structural dynamics sensor placement method is better than a single small disturbance score. The analysis method is more efficient and fast, and can accurately predict the possible damage location of space members, so as to carry out structural safety evaluation.

Key words: spatial tube truss; health monitoring; key member; sensor layout; optimization analysis

0 引言

针对结构健康监测的研究源于桥梁结构建设与运行的需要,20世纪末期,在空间结构领域也逐渐开展了深入的研究和探索。闫维明等^[1]改进了现有损伤诊断方法的不足,降低结构健康监测的成本并提高其准确性和分析速度;何浩祥^[2]基于传统的模态分析理论和技术,研究了基于节点能量和模态保证准则的传感器优化布置方法,综合考虑结构模态动能和模态变形能等参数,研究了基于小波智能健康监测的传感器优化布置方法;周雨斌^[3]对空间网架结构健康监测传感器进行了优化布置研究,结合遗传算法的特点,重点论述了应变传感器和加速度传感器的优化布置准则和应用遗传算法解决此类优化问题的适应度选取问题;罗尧治等^[4]通过研究提出了科学的健康监测及预警系统组成;卢伟^[5]为了使结构健康监测系统的前端传感器设备对系统运行具有可靠性与有效性,将数据融合方法运用到土木工程实际问题中,提出了加速度传感器的局部优化方法与加速度传感器的失效故障诊断方法;刘倩^[6]对拉索张拉安装施工阶段及后续的施工阶段进行了长期的施工实时监测,根据后期运营期间的监测要求,开发了适合大跨空间结构的健康监测系统。然而上述研究都没有给出监测关键杆件的选取原则和传感器布置方案的优化方法。结构健康监测方案中关键杆件的选取会使监测方案更高效、结果更精确,同时提高了监测方案的经济性。

1 确定关键杆件的方法

1.1 小扰动分析方法

小扰动分析方法是一种基于结构组成部分损伤识别的传感器优化布置方法^[7]。假设既有建筑物在复杂服役环境中,结构组成部分出现损伤,分析中结构刚度变化为主要参数,不考虑结构质量和阻尼发生的变化。

1.1.1 应力小扰动分析方法

应力是结构分析中最普遍的分析参数,基于应力的扰动分析同样是最有效的杆件重要性评价指标。以无损结构的杆件应力为分析响应参数,以损伤结构的杆件应力为分析损伤参数。 j 杆破坏后 i 杆的小扰动指数 S_{ij} 为

$$S_{ij} = \frac{\gamma_i - \gamma'_i}{\gamma_i} \quad (1)$$

式中: γ_i 为无损结构杆件 i 的关键点应力; γ'_i 为杆件 j 拆除后杆件 i 的关键点应力。

规定 j 杆的关键系数 K_j 为

$$K_j = \sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{|S_{ij}|}{n-1} \quad (2)$$

卢婧^[8]根据公式(2)计算了钢网架中杆件小扰动指数,分别评价了不同杆件的重要性。

1.1.2 位移小扰动分析方法

位移是结构分析中使用最为广泛的分析参数,基于位移小扰动分析方法的原理与基于应力小扰动分析方法相同,只需要把响应参数和损伤参数由关键点应力换成节点位移即可实现。 j 杆破坏后 i 杆的小扰动指数 S_{ij} 为

$$S_{ij} = \frac{v_i - v'_i}{v_i} \quad (3)$$

式中: v_i 为无损结构杆件 i 的位移; v'_i 为杆件 j 拆除后节点 i 的位移。

同样规定 j 杆的关键系数 K_j 为

$$K_j = \sum_{i=1}^n \frac{|S_{ij}|}{n} \quad (4)$$

冼耀强^[9]根据位移小扰动分析方法对轮辐式索膜结构进行了结构组成构件重要性分析。

1.2 承载能力分析方法

1.2.1 基于极限承载能力分析方法

对体育场空间管桁架罩棚倒塌时破坏机理进行研究,发现结构在线性静力荷载作用下部分杆件在某一时刻会发生屈服,而对应的杆件则为结构的关键杆件。同样对结构杆件的局部进行力学性能分

析,假设受拉杆件为理想弹塑性,而受压杆件不能忽略杆件刚度的退化,故取其残余承载力为受拉杆件屈服承载力的 30%(图 1)^[10]。采用线弹性模型对结构整体进行模拟,对屈服的杆件进行拆除,同时拆除处的节点荷载采用其残余承载力,而后再分析有损结构,最终结构变成几何可变或刚度矩阵出现奇异,这时认为结构承载能力达到极限状态^[11]。

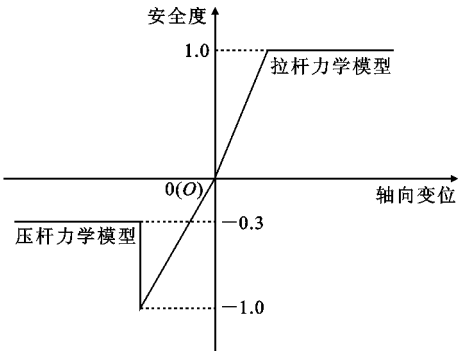


图 1 力学模型
Fig. 1 Mechanical Model

1.2.2 基于极限支座反力分析方法

使用破坏机制分析整体结构并初步选定关键杆件为前提,同时对拆除关键杆件的有损结构做 Pushdown 分析。线性增加竖向荷载,使结构发生竖向位移超限或结构部分发生破坏。通过 Pushdown 分析可以确定整体结构在竖向荷载作用下的最大承载能力^[12]。

使用 Pushdown 分析法,以无损结构的极限支座反力 R 为响应参数,损伤关键杆件 i 后的极限支座反力 R_i 为分析参数,在其极限状态条件下,计算出不同杆件的关键系数 K_i ,公式为

$$K_i = \frac{|R - R_i|}{R} \tag{5}$$

对体育场空间管桁架罩棚的杆件破坏机理进行分析,首先选取了关键杆件的范围,而后使用结构在不同状态下的极限支座反力为参数计算。

2 计算分析及优化布置

临夏体育场空间管桁架罩棚(图 2)的整体造型与马鞍形似。结构整体关于短轴对称,且短轴略有高差。空间管桁架罩棚结构体系为悬挑管桁架,最



图 2 临夏体育场
Fig. 2 Linxia Stadium

大悬挑 27 m。主桁架依靠尾桁架与地面连接,由支座支撑连接在看台混凝土结构上,主桁架之间通过环向桁架、屋面桁架连接成结构整体。

2.1 有限元建模分析

在理论模型计算中,管桁架节点形式多数采用理想铰接,然而在现实情况下管桁架节点一般介于铰接与刚接区域之间的某种工作状态。在有限元分析时考虑到刚接形式计算出的结果趋于保守,但是与实际情况十分接近且对杆件压弯性能也能兼顾,故建模时杆件采用梁单元形式,节点使用刚接。建模参数如表 1 所示。有限元模型如图 3 所示。

临夏体育场空间管桁架罩棚具有大悬挑、结构刚度变化大及自重产生的内力所占比例大等特点,其施工过程中的内力和变形变化复杂,采用局部建模计算和整体建模计算相结合的方式,对空间管桁架进行静力结构分析。结构实际受荷条件为:屋面所受均布恒荷载为 0.6 kPa,均布活荷载为 0.5 kPa;根据实际情况下弦悬吊物自重产生的荷载为 0.8 kN·m⁻¹。模拟过程中荷载以等效线荷载的形式直接作用在主桁架上弦杆上。

2.2 关键杆件选取

使用承载能力分析方法对整体结构模型进行研究^[13],同时依靠临夏体育场空间管桁架罩棚倒塌破坏机理分析结果,对结构中内力最大的杆件进行初选,发现结构支座支撑(ZZZC)及主桁架(ZHJ)中下弦杆、上弦杆和腹杆受力都比较大。局部空间管桁架编号如图 4 所示。分析研究局部桁架模型,采用应力小扰动分析方法、位移小扰动分析方法及极限支座反力分析方法分别对所受内力较大的杆件进行关键性分析。将选取的杆件全部进行重要性评价,

表 1 建模参数

Tab. 1 Modeling Parameters

钢材	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比	钢材重度/ (kN·m ⁻³)	阻尼比	材料模型
Q345	345	490	2.06×10 ⁵	0.3	78.5	0.04	双线性强化模型(考虑材料非线性和几何非线性)

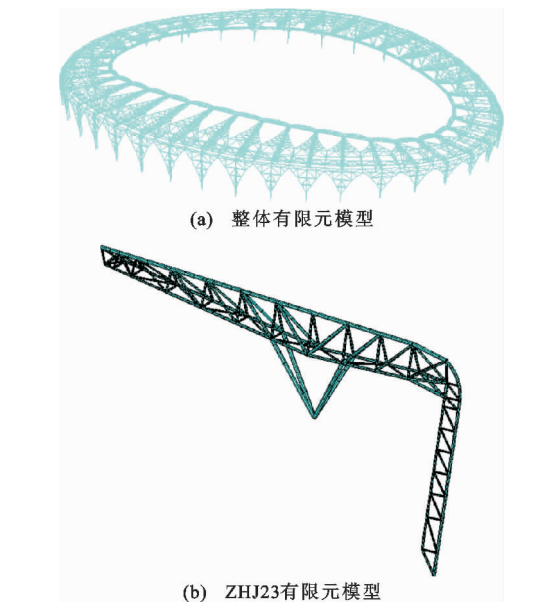


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite Element Models

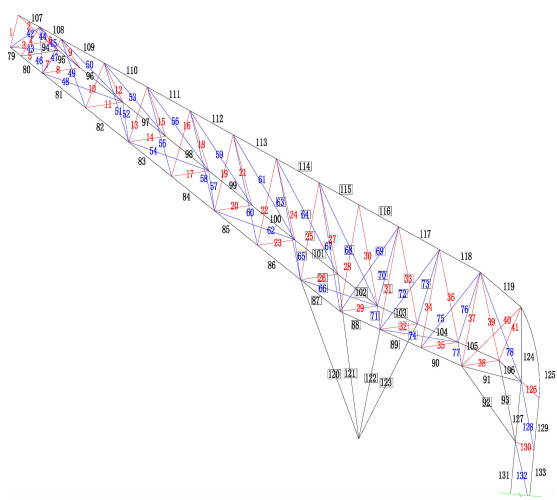


图 4 杆件编号

Fig. 4 Numbering of Bars

结果如表 2 所示。

通过应力小扰动分析方法计算得到的桁架重要杆件为:下弦杆 88[#], 89[#] 和 101[#] ~ 103[#], 上弦杆 114[#] ~ 116[#], 支座支撑 120[#] ~ 123[#]; 其余杆件的重要性为一般。应用位移小扰动分析方法计算分析确定的重要杆件为:下弦杆 88[#], 89[#] 和 101[#] ~ 103[#]; 次要的杆件为支座支撑 114[#] ~ 116[#]。采用极限支座反力分析方法得到的重要杆件为:下弦杆 88[#], 89[#] 和 101[#] ~ 103[#], 支座支撑 114[#] ~ 116[#] 及少数腹杆。把不同杆件计算得到的关键系数百分化后作为分子, 每种方法计算得到的关键系数最大值作为分母进行数据处理。3 种方法对比结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, 承载能力分析方法可以很高

表 2 杆件关键系数

Tab. 2 Key Coefficients of Members

杆件 编号	杆件类型	截面尺寸	关键系数 K_p		
			应力小扰动 方法	位移小扰动 方法	极限支座 反力方法
87	ZHJ-XX1	$\phi 299 \times 20$	2.936 8	22.463 8	0.967 8
88	ZHJ-XX1		2.876 5	33.742 6	0.936 6
89	ZHJ-XX1		2.693 4	31.876 9	0.901 9
101	ZHJ-XX1		1.936 4	36.228 3	0.919 2
102	ZHJ-XX1		1.697 1	28.967 1	0.904 7
103	ZHJ-XX1		0.904 6	18.548 8	0.907 2
114	ZHJ-SX1	$\phi 402 \times 24$	1.604 2	0.307 3	0.432 2
115	ZHJ-SX1		1.706 6	0.259 1	0.351 4
116	ZHJ-SX1		1.976 3	0.283 6	0.236 5
25	ZHJ-FG1	$\phi 299 \times 16$	0.654 9	0.056 7	0.000 7
26	ZHJ-FG1		0.740 8	0.094 2	0.026 7
27	ZHJ-FG1		1.400 8	0.140 1	0.140 1
31	ZHJ-FG1		0.459 6	0.030 7	0.013 6
32	ZHJ-FG1		0.504 2	0.034 1	0.007 4
33	ZHJ-FG1		0.492 6	0.027 6	0.000 8
120	ZZZC	$\phi 402 \times 30$	4.579 0	36.975 2	0.943 3
121	ZZZC		2.364 9	32.361 0	0.929 4
122	ZZZC		3.236 0	35.674 0	0.926 4
123	ZZZC		2.985 3	34.459 2	0.947 6
92	ZHJ-XX2	$\phi 299 \times 16$	1.832 3	0.197 0	0.036 2
93	ZHJ-XX2		0.734 0	0.043 6	0.001 8
63	ZHJ-FG1	$\phi 299 \times 16$	0.694 6	0.096 7	0.273 3
64	ZHJ-FG1		0.740 9	0.088 4	0.224 9
65	ZHJ-XXZC2	$\phi 180 \times 6$	0.273 2	0.018 9	0.082 4
66	ZHJ-XXZC2		0.220 8	0.017 3	0.007 8
67	ZHJ-FG1	$\phi 299 \times 16$	0.665 1	0.097 6	0.232 8
68	ZHJ-FG1		0.780 8	0.089 7	0.209 7
69	ZHJ-FG1		0.594 7	0.076 9	0.008 4
70	ZHJ-FG1		0.713 8	0.047 8	0.190 5
71	ZHJ-XXZC2	$\phi 180 \times 6$	0.330 7	0.020 9	0.039 2
72	ZHJ-FG1	$\phi 299 \times 16$	0.932 8	0.099 4	0.262 7
73	ZHJ-FG1		0.829 7	0.089 7	0.210 5
74	ZHJ-XXZC2	$\phi 180 \times 6$	0.317 3	0.020 7	0.079 2

效地确定关键杆件^[14], 小扰动分析方法也可确定出结构的关键杆件, 但次关键杆件和一般关键杆件的界限很模糊。

通过研究发现, 应力小扰动分析方法和位移小扰动分析方法建模过程较简单, 材料非线性和几何非线性可以忽略, 仅需要简单的线模型就可以对其进行分析, 分析过程不要求精确模拟结构的实际受力情况, 但模拟结果数据分析过程非常繁琐, 假设结构有 n 个构件则要进行 n^2 次运算, 而且计算中没有

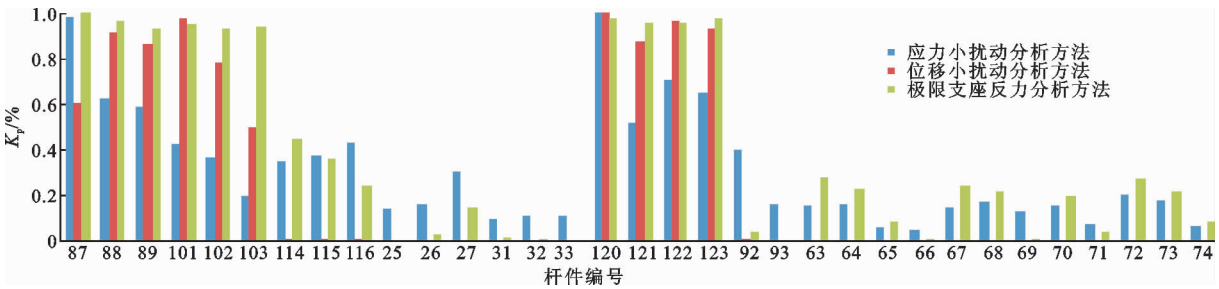


图 5 3 种方法计算的关键系数对比

Fig. 5 Comparison of Key Coefficients by Three Methods

考虑杆件与节点的综合效应,计算准确性较低。相对而言极限承载能力分析方法和极限支座反力分析方法在建模过程中有较高的要求,需要对杆件材料非线性 and 几何非线性综合考虑,同时要求对结构实际受荷情况进行模拟,得到有效的有限元模型调试非常耗时,但模拟结果处理量非常少,建模材料明确时分析准确率高^[15]。

2.3 最优测点布置分析

结构特性里一个非常重要的指标就是动态特性,质量、刚度、阻尼是不同结构动力学系统的重要组成部分。既有结构若发生损伤或破坏,以上物理参数自然发生改变,使得结构刚度减小伴随着阻尼增大。刚度的变化引起结构模态振型发生改变。对关键杆件及部分次关键杆件进行损伤后的振型分析,对关键杆件损伤前后的模态进行对比,若损伤对结构振型影响不容忽视则为传感器应布置的最佳位置。

忽略阻尼影响的结构特征方程为

$$(K-\lambda_i M)Q_i=0 \tag{6}$$

式中: K 为无损结构的刚度矩阵; M 为无损结构的质量矩阵; Q_i 为相应的位移模态; λ_i 为特征值。

结构发生损伤首先反映到结构上是位移改变超限,位移超限的原因为刚度的降低,结构质量分布的改变可以忽略,假设结构的刚度矩阵发生了一个小的摄动量,对应的 λ_i 和 Q_i 也会发生改变。

损伤结构运动方程的摄动方程为

$$[K+\Delta K-(\lambda_i+\Delta\lambda_i)M]\phi_i=0 \tag{7}$$

式中: ΔK 为刚度矩阵的改变量; $\Delta\lambda_i$ 为特征值的改变量; ϕ_i 为与 $\lambda_i+\Delta\lambda_i$ 相应的位移模态。

用 ANSYS 将临夏体育场有限元模型进行模态分析时,因为仅分析管桁架 Z 向的弯曲振动,所以只考虑沿 Z 轴的转动自由度。同时对位移模态振型进行计算,计算出的模态振型根据质量矩阵进行归一化处理,即

$$Q_i^T Q_i=1 \tag{8}$$

$$\phi_i^T \phi_i=1 \tag{9}$$

因为特征频率对结构损伤的变化不敏感,所以有必要考虑模态的变化,模态变化列向量 Δ_i 为

$$\Delta_i=Q_i-\phi_i \tag{10}$$

模态变化向量 W_j 的最大值为

$$W_j=\max\{\Delta_i\} \tag{11}$$

利用 W_j 的特性可以检测结构的损伤,其大小可以反映损伤的程度^[16]。分析结构前 10 阶振型,其中部分振型如图 6 所示,考虑低阶振型时,由于该结构基频低,结构较柔,测点应首先考虑布置在静力变形最大的区域,当考虑高阶模态时,桁架竖向刚度比水平刚度小,竖向薄弱处更容易被振动激发,应变传感器应布置在靠近支座的位置。

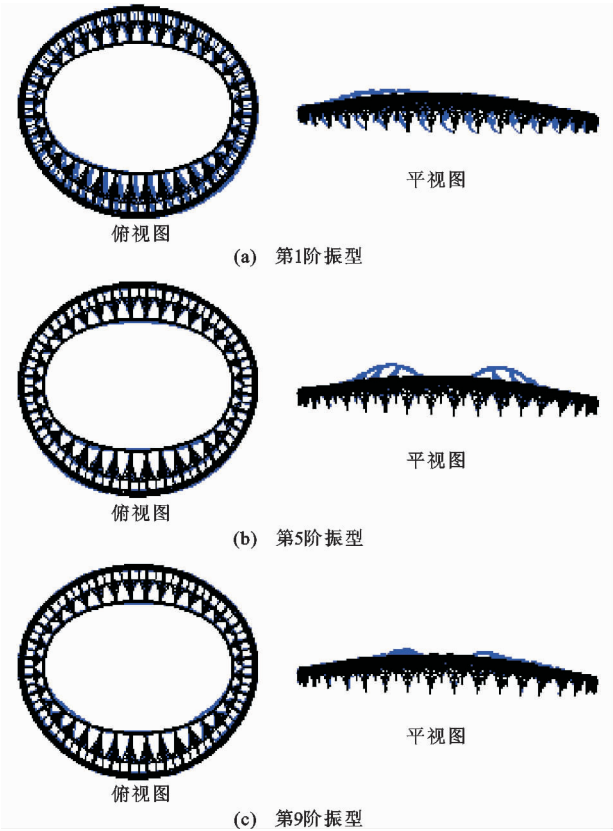


图 6 部分振型

Fig. 6 Part of Vibration Pattern

首先对无损结构有限元模型进行模态分析,提取前 10 阶振型频率,同时对不同关键杆件损伤的有损结构有限元模型进行模态分析,同样提取前 10 阶振型频率(表 3)进行对比分析,结果显示关键杆件损伤对结构低阶振型频率影响显著,非关键杆件损伤对结构振型频率影响非常小(图 7)。根据杆件损

伤后结构振型频率明显变化这一指标对传感器进行优化布置。管桁架布置应变传感器的时候,在考虑高阶模态参与的情况下传感器的布置逼近支座,在考虑低阶振型时,传感器首先考虑布置在静力变形最大的区域^[17]。最优的布置应该是在对外界激励最敏感的杆件上^[18]。

表 3 振型频率

Tab. 3 Vibration Frequencies

阶次	原结构频率/Hz	受损结构频率/Hz				
		ZZZC-120 [#]	ZHJ-FG1-26 [#]	ZHJ-XX1-101 [#]	ZHJ-SX1-116 [#]	ZHJ-XXZC2-65 [#]
1	2.185 5	2.054 8	2.178 2	2.123 8	2.163 9	2.179 5
2	2.502 8	2.141 7	2.491 2	2.288 4	2.193 0	2.497 8
3	2.579 7	2.569 0	2.578 5	2.545 5	2.575 1	2.578 9
4	2.854 8	2.808 9	2.852 7	2.801 3	2.837 9	2.847 6
5	2.927 4	2.897 5	2.924 1	2.920 3	2.915 5	2.926 5
6	3.077 8	3.067 4	3.077 4	3.074 3	3.075 0	3.077 1
7	3.185 2	3.147 0	3.183 9	3.170 0	3.178 2	3.179 4
8	3.401 1	3.241 7	3.397 7	3.374 5	3.382 7	3.390 6
9	3.484 7	3.415 0	3.475 6	3.479 7	3.461 6	3.478 1
10	3.698 8	3.558 3	3.698 1	3.697 0	3.698 7	3.698 4

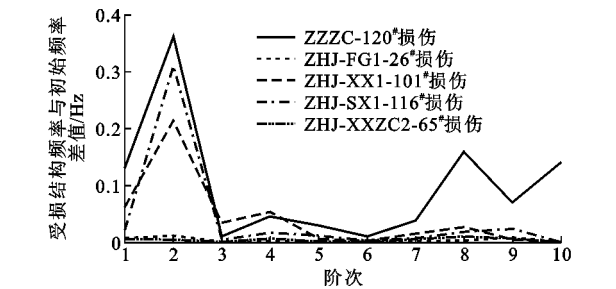


图 7 振型频率差值

Fig. 7 Difference Values of Vibration Frequency

2.4 传感器的布置

优化结果表明,在对称结构中测点应对称布置,可以在测点很少的情况下,使测点布置具有继承性且与理论逻辑吻合较好。综合考虑结构关键杆件与结构损伤模态分析结果,在相应位置布置传感器^[19],传感器分布见图 8。布置的传感器有单向电阻应变片(Y)、振弦式钢弦应变计(G)、两向加速度传感器(J)、静力水准仪(W)、风速传感器(F)等传感器。现场传感器安装如图 9 所示。

3 结果对比分析

临夏体育场管桁架钢罩棚采用分块吊装高空拼接方法,桁架的吊装也是监测的重要过程,对 ZHJ23 与 ZHJ32 的吊装过程进行监测。有限元模拟时对吊点位置施加强制位移,此次监测与模拟都不考虑温度的影响。监测数据与模拟数据的对比分

析结果见图 10,现场监测应变与模拟应变发展趋势一致,现场实测值高于模拟值,完全起吊后数值在一个平衡位置进行波动。由于吊点选择都在上弦节点处,使得结构杆件受力与正常使用受力反向,因而吊装验算在此过程不能缺少。通过验证,吊装都是安全的,材料都在弹性范围内工作。

结构还有一个危险的施工阶段,就是胎架的卸载^[20],此时打破原有的平衡状态,会使内力重新分布。卸载模拟采用支座位移法,本文采用分级对称分步卸载,卸载过程持续了 4 d,应力监测系统经过 13 次监测作业,自始至终工作正常。卸载时应力的模拟值和实测值(图 11)都呈现阶梯性变化且规律一致,从卸载开始结构各杆件的受力均增大,在卸载完成时,结构受力与正常使用阶段受力基本趋于一致。结构各杆件出现极值都发生在施工胎架卸载时,而且在卸载后一段时间结构振动明显,以后处于稳定期。后续监测发现,在重大活动和极端天气出现时结构应力会发生明显波动,主要都是由于温度和风压的改变引起,应力都在材料的弹性范围之内,不影响结构的安全,但是不规律的振动会使结构产生疲劳的损伤积累。现场监测条件较为复杂,影响因素多,考虑主要影响因素后,卸载模拟计算与实测结果达到了良好的一致性。

由于结构体型不规则,屋盖短轴方向较柔和,长轴方向刚性较大。在卸载时,选取 3 个测点进行分

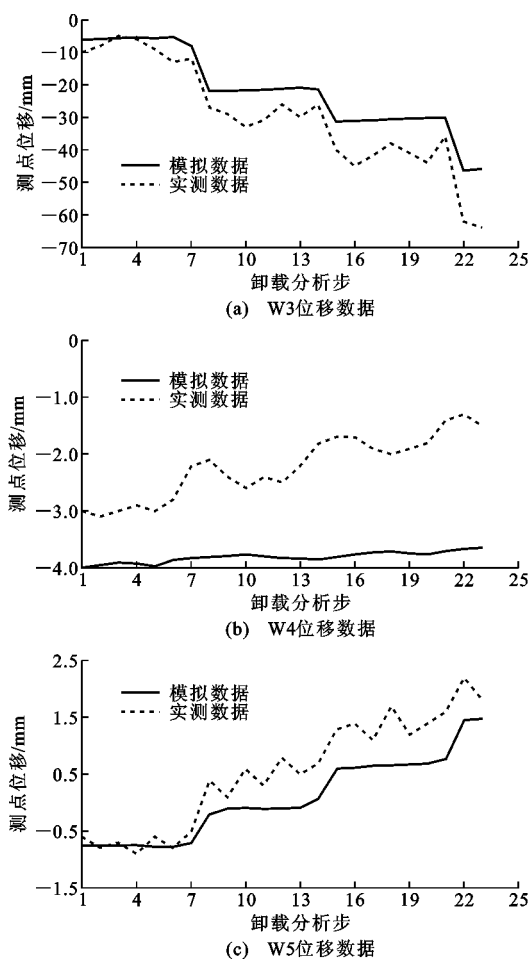


图 12 卸载位移数据分析结果

Fig. 12 Analysis Results of Unloading Displacement Data

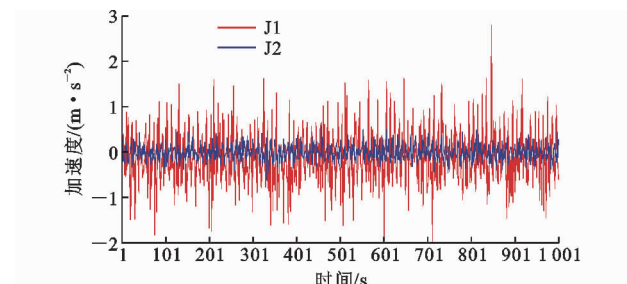


图 13 加速度数据分析结果

Fig. 13 Analysis Results of Acceleration Data

之内,胎架卸载使结构产生振动,由于卸载十分缓慢,振动产生的加速度没有大的突变,出现部分尖点是由于结构内力重新分布引起,此时结构会产生明显异响。卸载完成后加速度波趋于稳定,且只有卸载时的 30%左右。

4 结 语

(1)结合结构动力学基本理论分析空间管桁架健康监测测点布置,结果表明合理的测点数目和布

置方案会使监测数据有逻辑性,可以实时监测结构施工中的危险点变化,避免结构受力及位移超过允许值。

(2)相对于承载能力分析方法,小扰动分析方法具有普遍适用性,但计算产生误差较大,数据分析过程繁琐等缺点制约其发展。采用承载能力分析方法选取空间管桁架关键杆件比其他方法更加准确且计算量小,便于在实际应用中的使用。

(3)根据优化布点方案,实时监测临夏体育场管桁架罩棚吊装、卸载及正常使用阶段关键杆件应力变化过程。通过有限元模拟与现场监测相结合分析可知,各阶段应力的变化规律一致,且都在材料弹性范围内。

(4)传感器的安装受到现场各种因素的影响,故与设计存在一定的误差,导致所测数值与模拟值存在一定的偏差。传感器定位偏差越小,与精细模拟吻合度越高,反之,则吻合度越低。根据数据对比发现,定位偏差影响模拟与实测数据的吻合度,但是不影响应变发展的趋势。

参考文献:

References:

- [1] 闫维明,何浩祥,马 华,等. 基于粗糙集和支持向量机的空间结构健康监测[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2006,22(1):86-90.
YAN Wei-ming, HE Hao-xiang, MA Hua, et al. Structural Health Monitoring for Spatial Structures Based on Rough Set and Support Vector Machine[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2006, 22(1): 86-90.
- [2] 何浩祥. 空间结构健康监测的理论及试验研究[D]. 北京:北京工业大学,2006.
HE Hao-xiang. Theoretical and Experimental Research on Structural Health Monitoring for Space Structure[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.
- [3] 周雨斌. 网架结构健康监测中传感器优化布置研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
ZHOU Yu-bin. Research on Optimal Sensor Placement of Health Monitoring on Grid Structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [4] 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 Yao-zhi, SHEN Yan-bin, TONG Ruo-fei, et al. Health Monitoring and Early Warning Technology in Spatial Structure[J]. Construction Technology, 2009,

- 38(3):4-8.
- [5] 卢 伟. 基于现场总线的大跨空间结构健康监测系統研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
LU Wei. The Structural Health Monitoring System of Large Span Space Structure Based on Fieldbus[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2010.
- [6] 刘 倩. 大跨空间结构健康监测系統研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
LIU Qian. Research on Health Monitoring System of Long-span Spatial Structure[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2011.
- [7] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Optimum Sensor Placement for Structural Damage Detection[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(11): 1173-1179.
- [8] 卢 婧. 江西地区钢网架结构抗连续倒塌性能分析及评价[D]. 南昌:南昌大学,2012.
LU Jing. Analysis and Evaluation on Performance of Resisting Progressive Collapse of Steel Grid Structure in Jiangxi District[D]. Nanchang:Nanchang University,2012.
- [9] 冼耀强. 轮辐式索膜结构损伤情况下的动力性能研究[D]. 西安:长安大学,2013.
XIAN Yao-qiang. Research on Dynamic Performance of Wheel-spoke Cable-membrane Structure in Damaging Condition[D]. Xi'an:Chang'an University,2013.
- [10] 虞国伟, 严 慧, 董石麟. 网架结构极限承载能力的追踪分析[J]. 建筑结构学报, 1989, 10(4): 55-61.
YU Guo-wei, YAN Hui, DONG Shi-lin. Tracing Analysis of the Ultimate Loading Capacity of Space Truss[J]. Journal of Building Structures, 1989, 10(4): 55-61.
- [11] 严 慧, 陈武贞, 肖志斌. 干煤棚网壳结构极限承载能力分析及其合理设计[J]. 工业建筑, 2004, 34(2): 50-52.
YAN Hui, CHEN Wu-zhen, XIAO Zhi-bin. Ultimate Bearing Capacity Analysis of Reticulated Shell of Dry Coal Shed and Its Rational Design[J]. Industrial Construction, 2004, 34(2): 50-52.
- [12] 于晓辉, 钱 凯, 吕大刚. 竖向加载模式对结构连续倒塌 Pushdown 分析的影响[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增 2): 126-130.
YU Xiao-hui, QIAN Kai, LU Da-gang. Effects of Vertical Loading Patterns on Pushdown Analysis of Structures in Resisting Progressive Collapse[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S2): 126-130.
- [13] 牛 犇, 陈志华, 孔翠妍. 天津大剧院钢屋盖卸载施工模拟与监测[J]. 空间结构, 2014, 20(2): 55-63.
NIU Ben, CHEN Zhi-hua, KONG Cui-yan. Simulation and Monitoring for the Unloading Construction of the Steel Roof of the Tianjin Grand Theater[J]. Spatial Structures, 2014, 20(2): 55-63.
- [14] 高 扬, 刘西拉. 结构鲁棒性评价中的构件重要性系数[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2575-2584.
GAO Yang, LIU Xi-la. Importance Coefficients of Components in Evaluation of Structure Robustness[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2575-2584.
- [15] 荣子豪. 空间管桁架结构施工阶段及使用阶段连续性倒塌分析[D]. 兰州:兰州理工大学,2017.
RONG Zi-hao. Progressive Collapse Resistance Analysis of Spatial Pipe Truss Structure in Normal Use Process and Construction Process [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2017.
- [16] 耿 浩, 王 睿, 高芳清. 模态变化对钢桁梁模型桥的损伤检测研究[J]. 桥梁建设, 1998(2): 67-70.
GENG Hao, WANG Rui, GAO Fang-qing. Study on Damage Test of the Steel Truss Girder Model Bridge [J]. Bridge Construction, 1998(2): 67-70.
- [17] 徐 菁, 李 壮, 刁延松. 基于粒子群算法的大跨度空间结构监测系统中应变传感器最优布点研究[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(1): 57-64.
XU Jing, LI Zhuang, DIAO Yan-song. Optimal Placement of Strain Sensors for Monitoring Systems on Reticulated Shells Using Particle Swarm Optimization [J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(1): 57-64.
- [18] CHEN L, MA J, ZHAO D Y, et al. Curvature of Flexibility Matrix for Damage Identification in Legs of Jacket Platforms[J]. China Ocean Engineering, 2008, 22(4): 547-559.
- [19] 张 琨, 戴立先, 王 磊, 等. CCTV 主楼施工过程关键构件应力监测技术[J]. 建筑科学, 2009, 25(11): 86-90.
ZHANG Kun, DAI Li-xian, WANG Lei, et al. Stress Monitoring Technique for CCTV Main Tower During Construction[J]. Building Science, 2009, 25(11): 86-90.
- [20] 李正华, 邱小军, 周 元, 等. 大悬挑结构临时支撑卸载施工技术[J]. 建筑钢结构进展, 2012, 14(5): 59-64.
LI Zheng-hua, QIU Xiao-jun, ZHOU Yuan, et al. Unloading Construction Technology for Temporary Support of Large Cantilever Steel Structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2012, 14(5): 59-64.