钢桁架结构静载试验与理论分析

Static load test and theory analysis of steel truss structure

辛钰林[1] 冯大哲[2] 徐少波[2]

(1甘肃第七建设集团股份有限公司，甘肃 张掖 730050；2兰州理工大学土木工程学院，甘肃 兰州 730050)

摘要：为检测某新建剧院钢桁架结构的承载能力并验证其投入运营后的安全性，对主舞台葡萄架及上方承受荷载较大处的钢桁架下弦檩条及吊杆进行了现场静力荷载试验及理论分析。通过静载试验得到了主要构件截面在各级静力荷载作用下的挠度、应力、应变等数值的变化，并进行了强度和稳定性的验算及最大挠度和最大应力应变的分析。将测试结果、结构的理论计算值与有关规范规定值进行了比较，验证了结构的可靠性。

关键词：静载试验；钢桁架结构；检测鉴定

Abstract: In order to test the bearing capacity of the steel truss structure of the a newly-built theater and verify its safety after being put into operation, field static load tests and theory analysis were carried out on the grids of the main stage and the purlins and suspenders of the lower chord of the steel truss where the load is relatively high. Through static load test, the changes of deflection, stress, and strain of the main component sections under various static loads are obtained. In addition, the strength and stability are checked and the maximum deflection and maximum stress are analyzed. The reliability of the structure is verified by comparing the test results and the theoretical calculated values of the original structure with the values specified in the relevant codes.

Keywords: static load tests; steel truss structure; inspecting and appraising

中图分类号：U441.2　**文献标志码：**B　**文章编号：**1003-8965(2020)01-0063-05

工程结构静载试验是考虑结构或构件在静力荷载作用下的变形、内力变化，以评定其工作性能及承载能力。

1　建筑结构概况

某大剧院主体部分可划分为前厅、观众厅、舞台、商业区四大部分。其中舞台口大梁(跨度24m)、舞台屋盖(跨度23.6m)和观众厅屋盖(跨度34m)为空间平面钢桁架结构，其构件采用Q345钢材[1]。剧院屋顶钢桁架结构如图1所示。整个建筑的抗震设防烈度为7度，基本地震加速度为0.15g，设计地震分组为第三组，建筑场地类别为Ⅱ类，建筑抗震设防分类为乙类[2]。

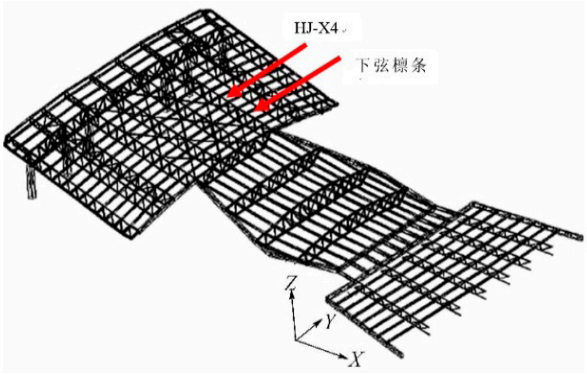

图1 钢结构桁架屋盖示意图

2　现场荷载试验

2.1　试验目的和内容

试验设计荷载作用下的理论分析计算是评价结构工作及安全性能的重要指标[3]。因此，试验前对该剧院钢桁架结构进行了理论计算分析和加载方案设计，之后进行现场静力荷载试验。试验按照规范要求确定试验荷载值，记录主舞台葡萄架和葡萄架上方主要构件截面在各级静力荷载作用下的挠度、应变(应力)等数值的变化[4-6]，验算各杆件强度和稳定性以及分析最大挠度和最大应力应变。通过检验系数的计算，研究结构的承载能力[7]，验证结构的可靠性。此次加载试验内容有：

1)对试验主舞台葡萄架、下弦檩条及吊杆进行理论分析，确定其控制截面的内力；

2)根据试验主舞台葡萄架、下弦檩条及吊杆的具体情况，设计静力荷载试验方案；

3)对试验主舞台葡萄架、下弦檩条及吊杆依据试验方案进行现场静力试验。

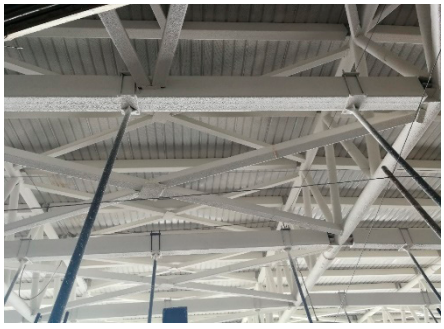

图2　下弦檩条及吊杆

2.2　加载方案

根据现场条件，本次试验采用注水法模拟重力荷载，将4个15×3m水池搭设于葡萄架上，通过水深控制荷载大

基金项目：兰州市科技计划项目(2018-1-27)“超高层建筑施工整体自升钢平台模架体系的研发”

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

小。加载方式采用分级加载，便于控制加(卸)载速度和观测分析各种变化。初期对葡萄架加载时，同时对4个水池注水，在保证加载装置、仪器仪表正常工作前提下，测点与荷载关系变化曲线符合要求之后，先进行预加载，之后按分级加载要求进行正式加载，直到完成三级加载后把水导入所测试檩条和吊杆两侧水池完成卸载过程。对下弦檩条和吊杆加载测试时，向檩条和吊杆两侧水池注水，直到完成三级加载，然后把水排出完成卸载过程。加载现场见图3。

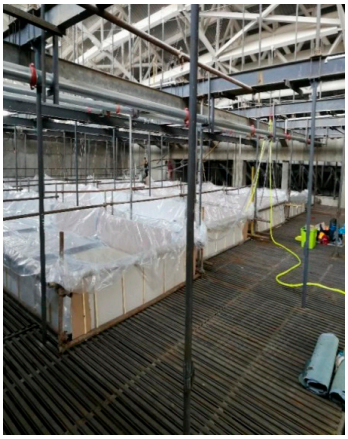

图3　注水加载

由于葡萄架是对称结构，按半跨加载。根据规范[8-9]本次荷载试验葡萄架设计荷载为2.5KN/m^2，静力荷载效率值取0.96。因此确定100t为试验荷载值，取半跨计算得到均布荷载大小为5KN/㎡，注水配重共需50t。经计算，其中葡萄架静载试验的最大试验荷载值取2.4KN/㎡。试验过程中分三级加载：第一级加载0.8KN/㎡(相应水位8cm)，第二级加载1.6KN/㎡(相应水位16cm)，第三级加载2.4KN/㎡(相应水位24cm)。吊点梁按最不利荷载布置控制，每根吊杆的传递荷载为28.8KN，吊点层面荷载为3.2KN/㎡，将葡萄架层和吊点层面荷载叠加后，最不利檩条下的最不利吊杆所吊挂的最大荷载为5.7KN/㎡。试验过程中分三级加载：第一级加载2.4KN/m^2(相应水位24cm)，第二级加载3.6KN/m^2(相应水位36cm)，第三级加载5.0KN/m^2(相应水位50cm)。

每个工况加载之前采集数据，持荷时间20min后采集各仪器数据，同时在加载过程中随时观测并计算各控制测点的应变、挠度变化情况，保证试验安全顺利进行。最后在卸载完成并稳定15min后，采集各测点的残余变形。

2.3　测量方案

此次试验测量内容主要包括应变观测和位移观测。应变观测选用应变片连接静态应变仪的电测法，同时也设置了温度补偿措施。位移观测采用位移计进行观测。

2.3.1　应变测点布置与数量

在静载试验中，利用应变片测量结构应变要合理选择测点位置。应变测试采用金属应变片，采集设备为DH3816静态应变测试系统，分辨率为±1με。

葡萄架及吊杆的应变(应力)测试位置为连接葡萄架和檩条的吊杆(编号1~13)和葡萄架下部的主梁(编号31~33)，具体如图4所示。下弦檩条的位置的选取如图5所示。为获得更多的试件的性态信息，确定应变(应力)测试断面为下弦檩条的跨中截面处，并在相应位置布置应变测点，每根檩条布置3个应变测点，且测点布置位置相同，檩条11的三个测点位置如图6所示，数字14~16为应变测点编号。檩条22的3个测点编号为17~19；檩条33的3个测点编号为20~22。

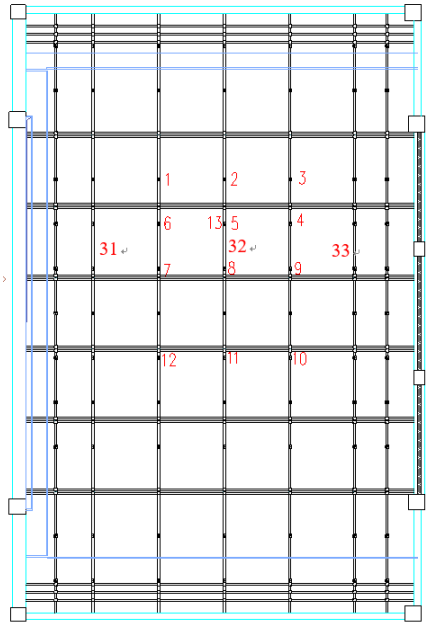

图4　葡萄架应变测点布置图

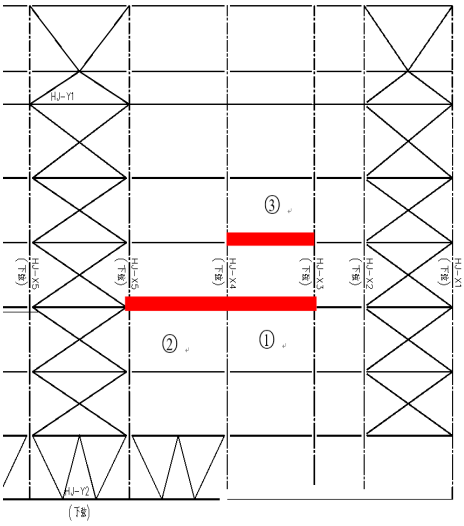

图5　下弦檩条位置分布

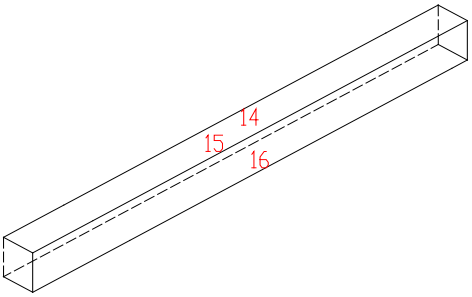

图6　下弦檩条应变测点布置图

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

檩条两侧连接的桁架分别为HJ–X4和HJ–X5，布置的校核测点位置分布相同，其中HJ–X4测点编号为23–26，HJ–X5测点编号为27–30，测点位置分布如图7所示。

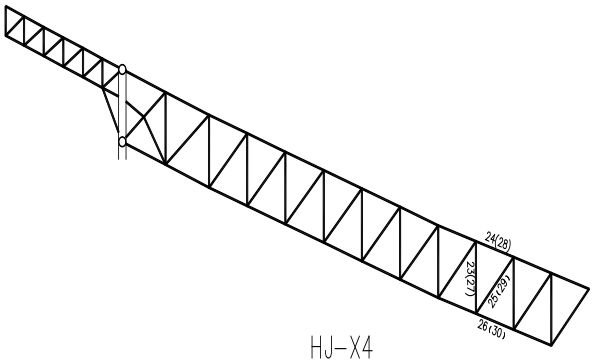

图7　桁架HJ–X4应变测点布置图

2.3.2　位移测点布置和数量

此次静载试验布置位移测点若干。据现场观察，葡萄架主次龙骨连接位置与预埋件位置偏移错位严重且焊接面过小，因此在葡萄架西侧主龙骨支座处架设3个位移计，以便观察静载试验过程中支座的滑移。同时在最大跨的跨中处架设一个位移计以测量葡萄架在最大试验荷载作用下的挠度。具体测点布置如图8所示，a、b、c、d均为挠度测点。

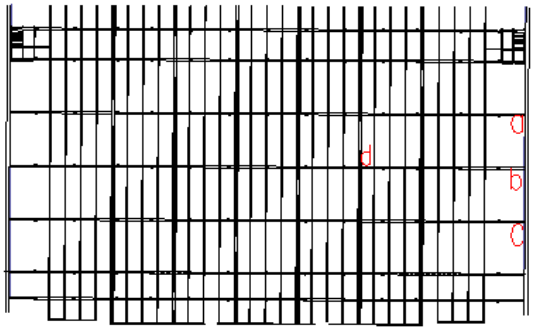

图8　葡萄架位移测点布置图

下弦檩条的位移测点分别布置在檩条跨中、1/4跨、支座处。采用拉线位移计，具体架设见图9。桁架下弦檩条位移测点布置具体见图10。图中字母编号a、b、c为挠度测点。挠度测试采用应变式位移传感器，分辨率为±0.01mm。

图9　位移计架设示意图

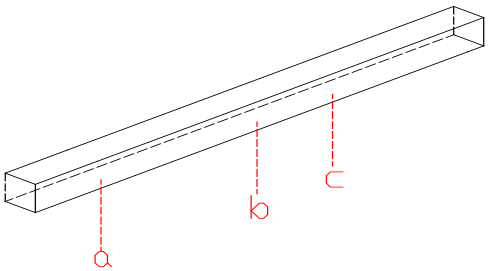

图10　檩条位移测点布置图

3　有限元分析与试验结果

3.1　有限元模型计算

3.1.1　葡萄架计算

葡萄架主要由主次龙骨(主次梁)和上铺的π型板组成，将葡萄架的主次梁简化成超静定多跨连续梁模型，并且采用PKPM软件进行校核计算。

1)持久状态下承载力极限状态

葡萄架主梁最不利截面的抗弯强度可按《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)[10]进行计算：

$$\sigma=\frac{Mx}{\gamma xWnx}=f \tag{1}$$

得：(N/mm^2)=24.46N/mm^2 <310.00N/mm^2，抗剪强度：

$$\tau=\frac{V\cdot Sx}{Ix\cdot tw}\leqslant f_v \tag{2}$$

则τ(N/mm^2)=12.14N/mm^2<180.00N/mm^2，整体稳定性：

$$\frac{Mx}{\varphi bWx}=f \tag{3}$$

则$M_x/\phi_b W_x$(N/mm^2)=45.06N/mm^2<310.00N/mm^2

上述计算表明，葡萄架结构主梁主要控制截面荷载效应小于结构的抗力效应，对于持久荷载状态下的葡萄架结构承载力极限状态满足验算要求。次梁承载力验算原理同主梁，其承载力极限状态满足验算要求。

2)持久状态下正常使用极限状态

主梁长期荷载作用下的最大变形应满足：

f_T=0.27mm<f_L=2797/400=7mm；

次梁在长期荷载作用下的最大变形应满足：

f_T=0.4mm<f_L=3550/400=8.8mm；

式中：f_T为考虑永久荷载与可变荷载标准值产生的变形计算值；f_L为变位限值。根据规范，梁挠度可取L/400。

上述计算结果表明，葡萄架变形值满足挠度限制值的要求。

3.1.2　下弦檩条及吊杆计算

采用ABAQUS有限元分析程序[11]对下弦檩条实际计算长度进行空间受力分析，对各种工况作用下进行理论计算。有限元模型采用实体单元建立，单元网格以20mm进行划分。加载制度与试验相同。ABAQUS模型荷载如表1。荷载最大时(工况3)应力云图如图11。

3.2　试验结果与理论数据分析

3.2.1　挠度测试与理论数据分析

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1　下弦檩条试验荷载以及有限元模型荷载

工况＼荷载	试验荷载(KN/m²)	模型荷载(KN)	节点集中力(KN)
工况1	2.4	8	8
工况2	3.6	16	16
工况3	5.0	25	25

图11　工况三荷载作用下应力云图(MPa)

静载试验后，对采集的数据进行整理换算、统计分析和归纳演绎。应变式位移计传感器测得的应变值换算成位移值，由测得的位移计算挠度。而檩条挠度理论值比试验值偏大是由试验荷载的布置方式和计算模型简化方式等因素引起的，在合理范围之内。

通过对葡萄架中4个位移传感器a、b、c、d所测到的数值进行分析处理，各测点荷载–位移曲线如图12。

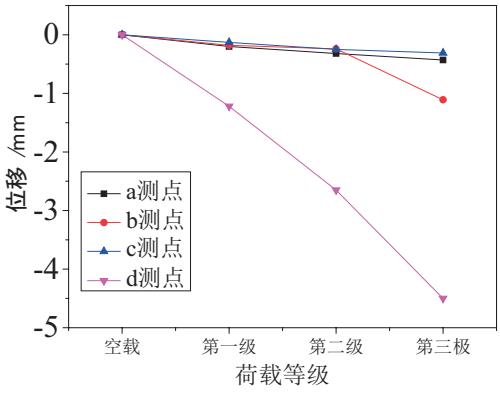

图12　葡萄架挠度测点荷载–位移曲线

从图中可以看出a、b、c三个测点的实测挠度值都很小，最大工况下b测点的最大位移达到1.11mm，说明主梁和预埋板由于位置偏差过大对葡萄架整体受力有一定影响。随着荷载的增加，d测点的竖向位移值成线性比例增长，表明该葡萄架在弹性范围内工作。实测挠度最大为4.5mm小于规范规定的l/400=9mm(l=3600mm)。由3.1.1中计算的葡萄架次梁最大理论挠度值为0.4mm，远小于规范规定值，且小于实测值是由试验荷载的布置方式和计算模型简化方式等因素引起的，在合理范围之内。

通过对下弦檩条中3个拉线位移传感器a、b、c所测到的数值进行分析，具体各工况下该结构上测点挠度的变化曲线见图13。

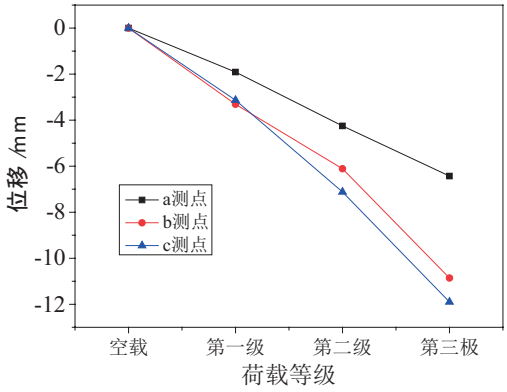

图13　下弦檩条挠度测点荷载–位移曲线

从图中可以看出随着荷载的增加，各个测点的竖向位移值成线性比例增长，表明该檩条在弹性范围内工作。檩条跨中实测最大挠度为11.90mm小于规范规定的l/250=28mm(l=7200mm)。

3.2.2　应力测试与理论数据分析

选取葡萄架上的主梁最不利荷载布置的位置粘贴应变片，通过实测数据绘制不同工况下31#、32#和33#测点的应力与荷载变化曲线，见图14。从图中曲线可以得到应力随荷载成线性变化，葡萄架处于弹性范围内。实测最大应力为13.56MPa远小于材料屈服强度，满足要求。

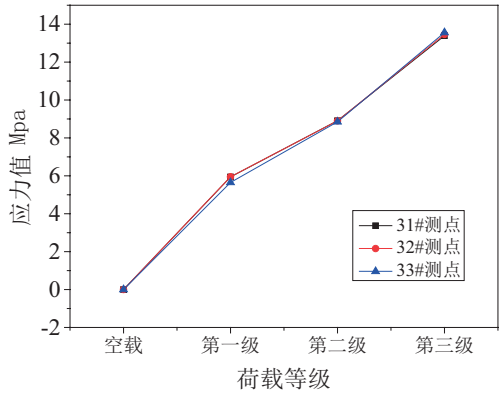

图14　葡萄架各测点应力与荷载变化曲线

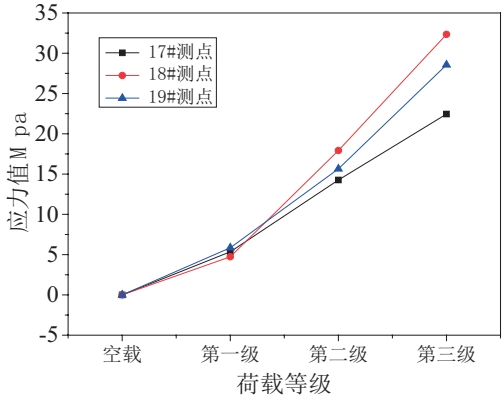

图15　下弦檩条测点应力与荷载变化曲线

选取最不利荷载布置的3根檩条，分别在跨中檩条的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

上表面和两侧面粘贴应变片，通过处理不同工况下14#~22#测点的应变中选择檩条上具有代表性的17#~19#测点进行理论与实测的应力值比较，并绘制不同工况下的实测应力与荷载变化曲线，如图15。

从图中曲线可以得到应力随荷载成线性变化，下弦檩条处于弹性范围内。实测最大应力为37.91MPa，理论最大应力经计算为66.82MPa，均小于材料屈服强度，满足要求。

在主要受荷载面积区域选取12根吊杆通过粘贴应变片进行受力分析，其中5#测点和13#测点位于同一根吊杆相同位置两侧处，主要目的是测量吊杆在最大工况下同一位置两侧受力大小是否相同，以判断吊杆中是否有弯矩作用存在。通过实测数据，选取具有代表性的测点2#、5#、8#和13#绘制不同工况下应力与荷载变化曲线，见图16。从图中曲线可以得到应力随荷载成线性变化，吊杆处于弹性范围内。实测应力最大为57.76MPa，理论最大应力为58.51MPa，均远小于材料屈服强度，满足要求。

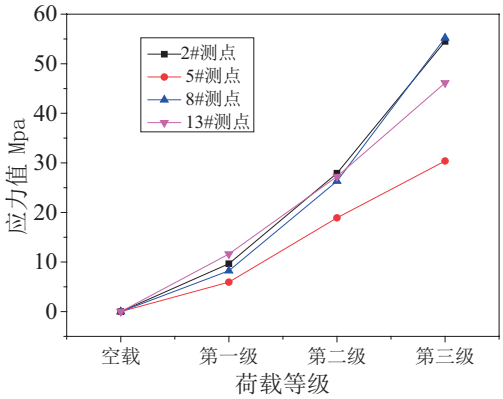

图16　吊杆中应力与荷载变化曲线

通过实测数据，选取桁架中具有代表性的测点23#、24#、29#、和30#绘制不同工况下的桁架中各测点实测应力与荷载变化曲线，见图17。从图中曲线可以得到应力随荷载成线性变化，桁架下弦檩条处于线弹性范围内。实测最大应力为61.23MPa远小于材料屈服强度，满足要求。

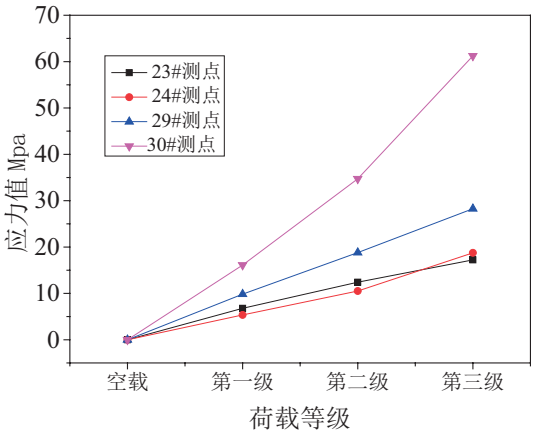

图17　桁架测点应力与荷载变化曲线

3.2.3　理论与实测数据对比

对于下弦檩条的a#测点、b#测点和c#测点实测挠度值与理论挠度值比较可知，理论值偏大且理论和试验吻合度较好，理论跨中最大挠度18.52mm小于规范要求的28.0mm，刚度满足要求。根据实测与理论挠度值，计算出挠度校验系数，其分布范围为0.49～0.97，均小于1.0，实测值和理论值吻合较好。

应力理论和实测值吻合度很好且处于安全范围之内，最大应力为57.76MPa，远小于材料屈服强度，且应力呈线性增长，充分说明材料还处于弹性阶段，结构安全。根据实测的应力值与理论应力值，计算出了应力校验系数，其分布范围为0.25～0.94，均小于1.0，说明葡萄架和檩条及吊杆具有较好的强度和刚度。

4　结论

该试验葡萄架、下弦檩条及吊杆经过荷载效率系数为0.96和0.88的荷载作用以及分析测试结果可得如下结论：

1）根据葡萄架和下弦檩条荷载–位移曲线，曲线呈线性增长，表明该结构处于线弹性范围内；葡萄架最大挠度为4.50mm，下弦檩条最大挠度为11.90mm，小于《钢结构设计规范》（GB 50017—2003）中规定的允许挠度，满足要求；

2）葡萄架最大应力为13.56MPa，下弦檩条最大应力为66.82MPa，拉杆最大应力为58.51MPa，最大值均小于材料屈服强度，满足规范要求；

3）葡萄架和下弦檩条挠度校验系数最大值为0.97，小于1.0，应变（应力）校验系数最大值为0.94，小于1.0，实测值和理论值吻合度很好且均处于安全范围之内，说明葡萄架、下弦檩条以及吊杆的刚度大、强度高、工作性能好，结构安全冗余度高，满足规范要求。

综合分析说明，本次的试验葡萄架、下弦檩条及吊杆具有足够的刚度和强度，满足《建筑结构荷载规范》（GB 50009–2012）要求的承载力极限状态和正常使用极限状态。

参考文献

[1]张掖大剧院结构超限设计可行性报告［R］. 深圳：深圳市建筑设计研究总院有限公司，2014.

[2]周斌，王启文，杨旺华，刘国银，卢郁，李淑娟. 甘肃张掖大剧院抗震性能设计[J]. 建筑结构，2015(15):36–40+16.

[3]郑淳. 桥梁荷载试验理论分析准确性的影响素分析[J]. 建筑监督检测与造价，2009，2(9)：22–25.

[4]方顺中，殷占忠，张晓博，孙向阳，赵阳. 钢桁架张拉式静载试验[C]//绿色建筑与钢结构技术论坛暨中国钢结构协会钢结构质量安全检测鉴定专业委员会第五届全国学术研讨会论文集，2017.

[5]王春平. 某钢桁架桥静载试验研究[J]. 土木工程与管理学报，2011，28(01)：76–79.

[6]]马凯文，吴珊珊，方顺中. 马道静载试验与有限元分析[J]. 中国建材科技，2017，26(05)：76–81.

[7]彭大文，丁文胜. 大型钢管桁架结构的静载试验研究[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版)，2010，10(03)：180–185.

[8]GB 50009–2012，建筑结构荷载规范［S］.

[9]JTGH11–2004，公路桥涵养护规范[S].

[10]GB 50017–2003，钢结构设计规范［S］.

[11]庄茁. 基于ABAQUS的有限元分析和应用[M]. 北京：清华大学出版社，2009.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net