

## 槽式聚光器结构模态实测研究

徐 阳<sup>1</sup>, 吴红华<sup>1</sup>, 匡 尧<sup>2</sup>, 胡佳星<sup>1</sup>, 邹 琼<sup>1</sup>, 李正农<sup>1</sup>

(1. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082; 2. 东南大学能源与环境学院, 南京 210096)

**摘 要:** 通过研究槽式聚光器结构的模态,进而分析其动力特性。首先,对槽式聚光器结构进行现场原型实测,测试聚光器竖向角为0°、30°、45°、60°和90°等5种工况,得到相关实测数据,并通过优泰软件分析得到其模态参数。然后,将实测结果与有限元软件 Midas Gen 得到的模态分析结果进行频率、振型等方面的对比,发现两者的结果吻合得较好。

**关键词:** 太阳能聚光器; 模态; 实测; 有限元

**中图分类号:** TU399

**文献标识码:** A

### 0 引 言

聚光型太阳能热发电技术是大力开发太阳能的一种有效技术手段,其按照太阳能采集方式可分为太阳能槽式发电、太阳能塔式发电、太阳能碟式发电3种形式。槽式太阳能聚光器系统是近年来国际上最主流的太阳能聚光系统,也是本文的研究对象,其早已投入使用,实现了商业化运作,拥有十分广阔的发展前景。国外学者 Thecharis 等<sup>[1]</sup>和 García-Rodríguez 等<sup>[2,3]</sup>已对槽式聚光器结构进行了很多研究。但目前国内对于槽式聚光器结构的研究还相对较少,邹 琼等<sup>[4]</sup>曾做过槽式聚光器结构的风洞试验,研究其风压分布;宫 博等<sup>[5]</sup>对槽式聚光器结构进行边界层风特性和风荷载的实测;李 明等<sup>[6]</sup>对槽式聚光器结构的真空管建立了数学模型,研究其理论解。对于槽式聚光器结构模态实测方面还很少有人研究,本文的研究团队为弥补这方面的缺失,对张家港某地的槽式聚光器结构进行实测,主要是为得到该结构的模态参数(固有频率、阻尼比和模态振型等),为进一步的抗风研究做好铺垫。槽式聚光器结构的主要形式如图1所示。



图1 槽式聚光器

Fig. 1 Trough concentrator

### 1 模态实测的原理

模态实测即对现场实物结构原型进行动态信号实测,然后通过数据分析获取结构的模态参数,得到结构真实的动力特性。其主要原理是通过试验得到激励和响应的2个时间历程,再使用数字信号处理技术得到振动结构的频域函数。接下来通过参数识别,得到结构的模态参数。从模态试验中获取模态的方法可分为2种:1)从纯模态中提取;2)从已知激励与响应关系(频响函数)中提取。直接提取结构的纯模态需让结构只产生某一阶固有振型的振动,剩余振型不振动,那么在响应结果中这一阶的固有模态是主要模态,一定程度上可看作

收稿日期: 2015-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(51278190; 51478179)

通信作者: 吴红华(1967—),女,硕士、副教授,主要从事结构抗震、抗风方面的研究。wuliyy@126.com

是一个纯模态的响应。然而需要面对的一个事实是在模态试验中很难激励出纯模态的振动响应,实际振动响应一般都是若干个模态振动响应的叠加。因此,较常用的是从频响函数中提取模态。频响函数

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} = \sum_{r=1}^M \frac{1}{k_r - \omega^2 m_r + j\omega c_r} \begin{bmatrix} \phi_{1r} \\ \phi_{2r} \\ \vdots \\ \phi_{nr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{1r} & \phi_{2r} & \cdots & \phi_{nr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $H$  ——频响函数;  $n$  ——测点数;  $M$  ——所取模态数;  $k$  ——刚度;  $m$  ——质量;  $c$  ——阻尼;  $\omega$  ——频率;  $r$  ——阶数;  $\phi$  ——振型;  $j$  ——虚部单位。

当然在实际测试中的响应曲线是有误差的,需要进一步消除或减小误差,而这一过程可通过曲线拟合来实现,进而确定结构的各项模态参数。

本次模态实测后采用优泰软件进行模态分析,而软件采用峰值拾取法。峰值法是基于结构自振频率在其频率响应函数上会出现峰值,峰值的出现成为特征频率的良好估计。峰值法使用半功率带宽法识别系统阻尼。系统的功率谱在对应的第  $i$  阶特征频率  $\omega_i$  处出现峰值,其幅值为  $A$ ,  $\omega_a$  和  $\omega_b$  分别为特征频率  $\omega_i$  前后幅值  $A/\sqrt{2}$  的频率值,称为半功率点,此时系统的功率为峰值功率的一半。可求得系统的该阶模态的阻尼比为:

$$\xi_i = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_i} \quad (2)$$

同有限元软件进行的模态分析计算结果相比,通过实测得到的结果具有更充分的结构振动特征,而有限元分析则得不到阻尼比等模态参数,在做进一步的计算分析时就会导致偏差和局限性。同时实际结构庞大而复杂,有限元分析时有些边界条件和参数设置可能难以完全反映实际结构的状况,其计算分析的结果不一定精确和可靠。这时就需要将有限元计算结果与实测结果进行对比,进而对有限元模型进行修正。

## 2 模态实测的步骤

通常进行模态实测包括以下步骤:

### 1) 确定测点以及布置传感器

合理布置测点有利于提高模态参数的识别精度,减少模态丢失。要确保测点在每个重要的响应点上。一般选择传感器的原则是动态范围和工作

是指系统输出与输入的傅里叶变换之比。已知频响函数与模态参数的关系由式(1)给出,要取得全部的模态信息,只需测量频响函数矩阵中的一行或一列即可。

频段要宽、灵敏度和线性度要好、体积和质量要小、抗干扰能力还要强。布置传感器时应注意不要增加结构的质量,确保实际测量方向与规定测量方向一致。

### 2) 选择激励方式

常见的激励方式有人为激励和环境激励。人为激励一般需要的设备较简单,操作性强,适合于现场测试一些简单的结构。但对于大型结构而言,其形式复杂,受各种因素影响,人为激励通常不能达到想要的效果。而环境激励作为一种天然激励,无需多余的激励设备,是一种较好的激励方式。

### 3) 进行模态实测

对结构进行现场模态试验,首先在确定好的测点上布置传感器,接着将传感器与数据采集仪器连接,并通过电脑上的数据采集软件来控制采集过程,接着选择合适的方式对结构进行激励,最后得到不同工况下的数据采集结果。

### 4) 识别模态参数

对模态参数进行识别是模态实测中的关键一步,其识别以模态参数模型为基础,从整体上反映结构的动态特性,它是模态分析的主要任务。主要可通过频域方法和时域方法来获取。

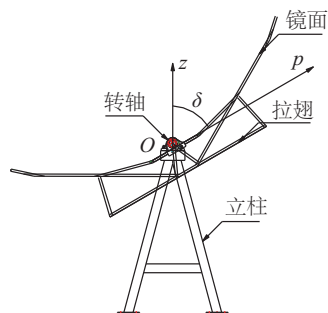
### 5) 验证模态参数

模态实测的最后一步是验证模态参数,主要是为了检验模态参数识别结果的正确性。通常把模态实测的结果与有限元模型模拟的结果进行对比,通过比较频率和振型,从而判断上一步模态参数识别正确与否。

## 3 测点布置方案

文献[7]曾做过塔式太阳能定日镜结构的现场实测,参考其测试方案,在实际测试中,对聚光器上部结构和立柱分别进行模态测试。选择相

同工况,即分聚光器竖向角分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  共 5 种工况。其中竖向角  $\delta$  为抛物镜面在转轴处的切线与竖直线的夹角,  $\delta$  的具体表示如图 2 所示。



注:  $O_p$  表示镜面在转轴处的切线方向;  $O_z$  表示竖直方向

图2 聚光器竖向角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vertical angle of concentrator

在每种工况中,对上部镜面板进行垂直于镜面方向的测试,对底部立柱进行水平面内的 2 个方向的测试。每组测试时间约为 2 min。

具体的测点布置方案:在实际测试中,选择了 1 个测点作为参考点,并使位于参考点位置处的传感器不动,多次移动其他测点处的传感器,从而达到测试全部测点处数据的目的。为了使测得的模态数据更加准确,同时避免丢失部分模态,需尽可能多地正确布置测点,文献[8]中提到测点是能够反映结构真实挠曲形状位移向量的节点。对每块镜面板,选择在镜面板背面中心处布置 1 个测点,如图 3 所示,该位置有一定代表性,振幅相对较大,有利于形成明显的振型图。共有 72 块镜面板,所以布置了 72 个测点,如图 4 所示。底部支撑方面,理论上认为立柱底部完全固定于地面,所以每根立柱上共有 3 个测点,分别位于其顶部和两斜边的中点,其中立柱如图 5 所示。一共有 4 根立柱,共布置 12 个测点。整个结构为 84 个测点。



图3 镜面板测点示意图

Fig. 3 Measuring points of schematic diagram of mirror board

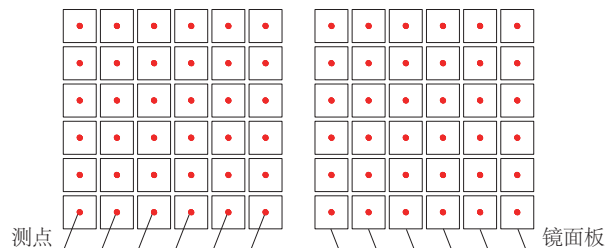


图4 镜面板测点整体布置图

Fig. 4 Overall layout of schematic diagram of mirror board

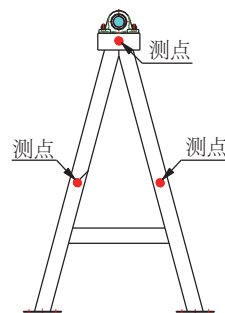


图5 立柱示意图

Fig. 5 Column diagram

## 4 模态实测结果

以下为各工况下模态实测结果与有限元模拟结果的对比,其中有限元模拟主要通过 Midas Gen 软件进行。 $0^\circ$  竖向角为镜面板风荷载作用最不利的工况,也是重点研究工况,其他工况主要给出阻尼比、频率等方面的对比。

### 4.1 $0^\circ$ 竖向角下的模态实测结果及其与有限元结果对比

表 1 为该模型  $0^\circ$  竖向角下实测结果与有限元模拟结果前 8 阶的阻尼比、频率和相对误差。图 6 为功率谱图,图 7 为该模型  $0^\circ$  竖向角下实测结果与有限元模拟结果的振型图。

由图 7 和表 1 可知,实测第 1 阶主要是结构绕横轴转动,第 2、第 3 阶主要是结构扭转。实测阻尼比最小为 0.100%,最大为 3.227%,较为合理。现场模态测试得到的频率与有限元模拟得到的频率差距较小,最大的相对误差为 -7.862%,结果吻合较好。有限元结果 1 阶和 2 阶、3 阶和 4 阶、5 阶和 6 阶、7 阶和 8 阶的模态频率每组两阶之间非常接近,成对出现,且每组振型图包含 1 个正对称 1 个反对称。由图 6 可知,实测结果的频率未成对出现是因为在第 1、第 2、第 3 阶频率附近的其他频率在有



表 1  $0^\circ$  竖向角下特征值Table 1 The eigenvalue in  $0^\circ$  vertical angle

阶数	阻尼比/%	频率/Hz		相对误差/%
		实测	模拟	
1	0.736	1.875	1.995	-6.015
2			2.035	-7.862
3			3.842	-4.008
4	3.227	3.688	3.906	-5.581
5			4.788	—
6			4.797	—
7	0.100	5.563	5.540	0.415
8			5.541	0.397

限元结果中并无对应振型。实测由于条件有限,存在一定误差,只能测出部分正对称的振型图,在第 5 阶和第 6 阶还出现了模态丢失。另外,实测结果的振型图与有限元模拟结果的振型图相似度较高,振型变化基本一致,两者结果得到了相互论证。

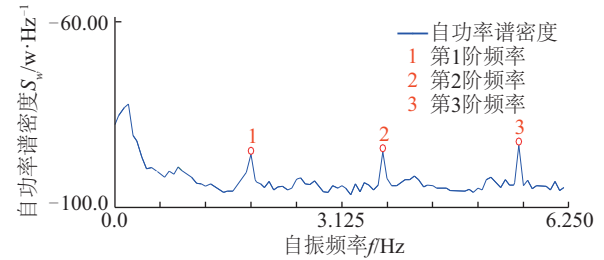


图 6 功率谱图

Fig. 6 Power spectrum

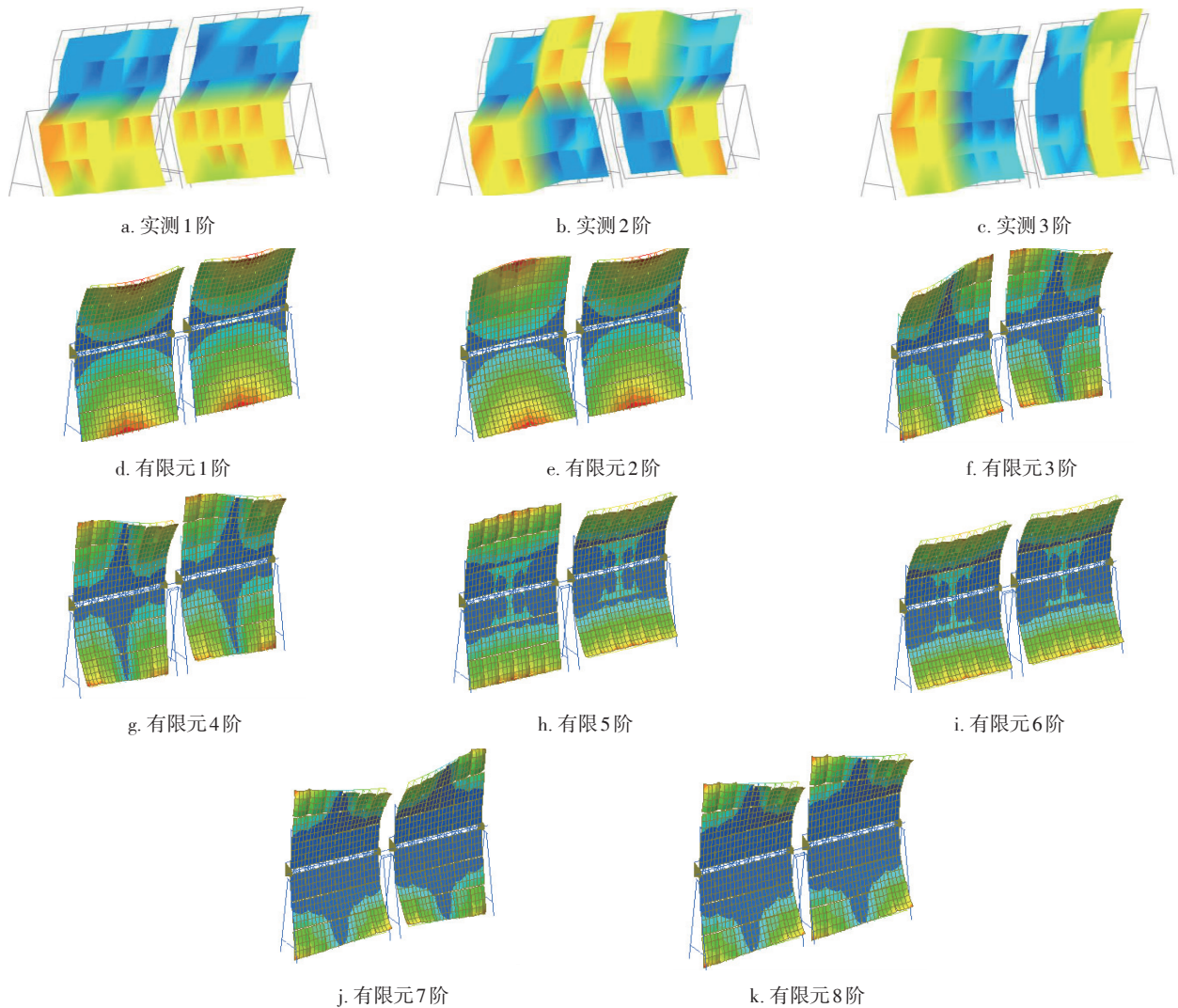


图 7 实测前 3 阶与有限元前 8 阶振型图

Fig. 7 The vibration mode shapes of first three order of field measurement and first eight order of finite element

4.2 在 30°、45°、60°和 90°竖向角下的模态实测结果及其与有限元结果对比

表 2~表 5 为其他 4 个竖向角下实测结果与有限元结果前 8 阶的阻尼比、频率和相对误差：

表 2 30°竖向角下特征值

Table 2 The eigenvalue in 30° vertical angle

阶数	阻尼比/%	频率/Hz		相对误差/%
		实测	模拟	
1	2.107	1.875	1.997	-6.109
2			2.035	-7.862
3	0.241	3.688	3.844	-4.058
4			3.908	-5.629
5	—	—	4.799	—
6	—	—	4.803	—
7	3.184	5.563	5.542	0.379
8			5.545	0.325

表 3 45°竖向角下特征值

Table 3 The eigenvalue in 45 ° vertical angle

阶数	阻尼比/%	频率/Hz		相对误差/%
		实测	模拟	
1	0.883	1.875	1.997	-6.109
2			2.036	-7.908
3	3.620	3.688	3.845	-4.083
4			3.908	-5.629
5	—	—	4.811	—
6	—	—	4.812	—
7	0.247	5.563	5.545	0.324
8			5.550	0.234

表 4 60°竖向角下特征值

Table 4 The eigenvalue in 60° vertical angle

阶数	阻尼比/%	频率/Hz		相对误差/%
		实测	模拟	
1	1.511	1.875	1.998	-6.156
2			2.036	-7.908
3	3.180	3.688	3.846	-4.108
4			3.908	-5.629
5	—	—	4.821	—
6	—	—	4.824	—
7	1.860	5.500	5.548	-0.865
8			5.554	-0.972

表 5 90°竖向角下特征值

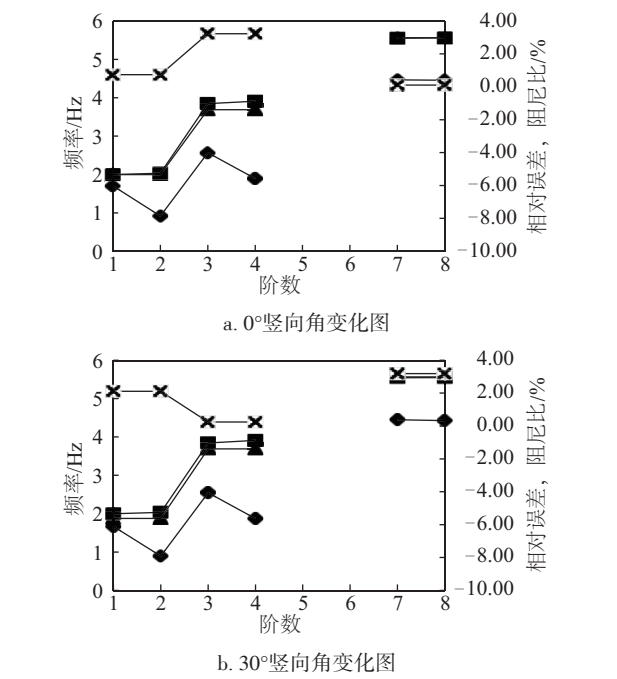
Table 5 The eigenvalue in 90° vertical angle

阶数	阻尼比/%	频率/Hz		相对误差/%
		实测	模拟	
1	1.363	2.000	1.998	0.100
2			2.036	-1.768
3	0.100	3.688	3.847	-4.133
4			3.908	-5.629
5	—	—	4.831	—
6	—	—	4.837	—
7	1.861	5.563	5.551	0.216
8			5.559	0.072

结合表 2~表 5 可看出,在其他 4 个竖向角下,实测阻尼比最小分别为 0.241%、0.247%、1.511%和 0.100%,最大分别为 3.184%、3.620%、3.180%、1.861%,较为合理。现场模态测试得到的频率与有限元模型得到的频率最大的相对误差分别为 -7.862%、-7.908%、-7.908%和 -5.629%,其他规律与 0°竖向角下基本一致,总体上结果吻合较好,两者得到了相互论证。

4.3 5 种不同工况下的实测阻尼比变化和实测与有限元的自振频率及其误差变化

图 8a~图 8e 为该模型在 5 种不同工况下实测阻尼比变化和实测结果与有限元模拟结果的自振频率及其相对误差变化图。



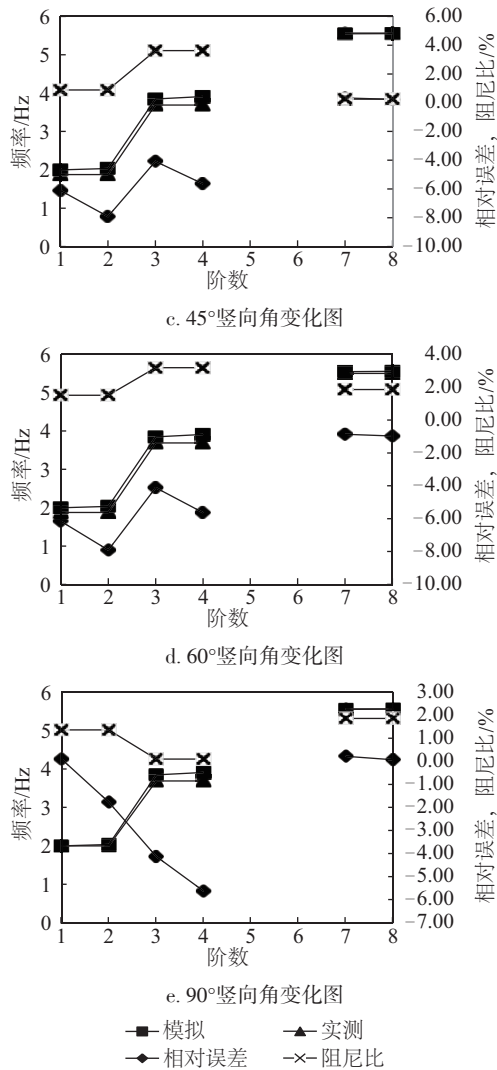


图8 5种不同竖向角下阻尼比和自振频率变化图

Fig. 8 The change graph of damping ratio and natural frequency in five different vertical angles

从图 8a~8e 可看出,从聚光器竖向角为  $0^\circ$  逐步增大至  $90^\circ$  的过程中,实测结果各阶对应的自振频率几乎没变化,而有限元模拟结果各阶对应的自振频率也仅有微小的增大。同时,在各个竖向角工况下,随着阶数的增大,实测结果和有限元模拟结果的自振频率也逐步增大。聚光器竖向角为  $0^\circ \sim 60^\circ$  这 4 个工况下的自振频率相对误差的变化相似,其中第 1 阶~第 4 阶的误差相对较大,绝对值最小为 4.01%,最大为 7.91%;第 7 阶和第 8 阶的误差较小,绝对值最小为 0.23%,最大为 0.97%。聚光器竖向角为  $90^\circ$  工况下的自振频率相对误差的变化稍有不同,第 1 阶~第 4 阶的误差绝对值逐步增大,为 0.10%至 5.63%,第 7 阶和第 8 阶的误差较小,最小

为 0.07%,最大为 0.22%。聚光器竖向角为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  工况下的各阶阻尼比变化规律相似,其中第 1 阶~第 4 阶逐步增大,最小阻尼比为 0.736%,最大阻尼比为 3.620%;第 7 阶和第 8 阶的阻尼比与第 1 阶和第 2 阶相近,最小阻尼比为 0.100%,最大阻尼比为 1.860%。聚光器竖向角为  $30^\circ$  和  $90^\circ$  工况下的各阶阻尼比变化规律相近,其中第 1 阶~第 4 阶逐步增大,最小阻尼比为 0.100%,最大阻尼比为 2.107%;第 7 阶和第 8 阶的阻尼比与第 1 阶和第 2 阶相近,最小阻尼比为 1.861%,最大阻尼比为 3.184%。

#### 4.4 5 种不同工况下的模态实测结果比较及误差分析

通过比较分析聚光器结构原型在 5 种不同工况下的模态实测结果,可以得出以下结论:

1) 聚光器竖向角为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  这 5 种工况下的前 3 阶振型互相对应,其中第 1 阶主要是结构绕横轴转动,第 2 和 3 阶振型则主要是结构扭转。

2) 模态实测结果的振型都包含在有限元模拟结果的振型中,但实测结果出现部分模态丢失,主要表现在有限元模拟结果的第 5 阶和第 6 阶。

3) 模态实测与有限元模拟对应的频率最大相对误差都控制在 8% 以内,误差较小。

误差分析如下:

1) 实测模态丢失的原因:该聚光器结构左右对称,因此某几阶振型是对称或反对称的,而且这几阶振型的分布相对来说一般较为密集,但实测时只能测出其中的某些振型。比如有限元模拟结果的第 1 和第 2 阶、第 3 和第 4 阶、第 5 和第 6 阶、第 7 阶和第 8 阶相似,而实测只能测出其中的第 1、3、7 阶;在有限元软件中建立的模型是三维模型,而现场实测时是每个方向分别测试,所以有些复杂的模态不能准确测出来;现场实测采用自然激励,有可能某些模态未被成功激发;用数据采集器采集测试信号时,受周边环境振动源的影响,某些模态的振动信号较弱,可能未能被识别。

2) 模态实测结果与有限元模拟结果出现误差的原因:现场实测时周围有大型施工机械在施工,产生的噪音对实测结果会造成影响;在有限元软件中建模时,对某些部位的约束状态进行了一些简化,与实际原型稍有不同;实测仪器精度问题,如传

感器由于使用年限较久,灵敏度方面可能存在一定偏差;信号线和电源线在连接过程中,可能由于材料特性的差异,产生一些误差;现场实测激励方式采用自然激励,可能由于激励不完全,对结果造成影响。

## 5 结 论

本文主要对某聚光器结构原型进行模态实测,并将实测结果与有限元模拟结果进行对比分析,主要有以下结论:

1)聚光器结构在竖向角为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  这 5 种不同工况下的模态结果表明:各工况下的每阶振型互相对应,频率也相差不大,其中 1 阶频率约为 1.9 Hz。

2)通过实测模态结果与有限元模拟结果对比,可发现实测结果出现部分模态丢失,主要表现在有限元模拟结果的第 5 阶和第 6 阶;模态实测结果的振型均包含在有限元模拟结果的振型中;模态实测与有限元模拟对应的频率最大相对误差均控制在 8% 以内,误差较小。同时对实测模态丢失的原因以及模态实测结果与有限元模拟结果出现误差的原因进行分析,提供了进一步改进和研究的参考。

3)5 种不同竖向角工况下实测模态的阻尼比最小为 0.100%,最大为 3.620%,存在一定偏差。这是因为峰值法虽然操作简单、识别速度快,但也有一定不足。

### [参考文献]

- [1] Thecharis T, Vasilis G, Katema M. Technical and economical evaluation of solar thermal power generation [J]. *Renewable Energy*, 2003, 28: 873—886.
- [2] García-Rodríguez L, Palmero-Marrero A I, Gómez-Camacho C. Application of direct steam generation into a solar parabolic trough collector to multieffect distillation [J]. *Desalination*, 1999, 125(1-3): 139—145.
- [3] García-Rodríguez L, Gómez-Camacho C. Thermoeconomic analysis of a solar parabolic trough collector distillation plant [J]. *Desalination*, 1999, 122(2-3): 215—224.
- [4] 邹 琼, 李正农, 吴红华. 槽式聚光镜风压分布的风洞试验与分析研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(6): 227—235.
- [4] Zou Qiong, Li Zhengnong, Wu Honghua. Wind tunnel test and analysis of the wind pressure distribution of curved mirror solar condenser [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(6): 227—235.
- [5] Gong Bo, Wang Zhifeng, Li Zhengnong, et al. Field measurements of boundary layer wind characteristics and wind loads of a parabolic trough solar collector [J]. *Solar Energy*, 2012, 86(6): 1880—1898.
- [6] 李 明, 夏朝凤. 槽式聚光集热系统加热真空管的特性及应用研究 [J]. *太阳能学报*, 2006, 27(1): 90—95.
- [6] Li Ming, Xia Chaofeng. Study on the characteristics and applications of evacuated tube heated by trough concentration system [J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2006, 27(1): 90—95.
- [7] 李正农, 吴卫祥, 梁笑寒, 等. 基于实测的塔式太阳能定日镜动力特性分析 [J]. *太阳能学报*, 2014, 35(11): 2133—2138.
- [7] Li Zhengong, Wu Weixiang, Liang Xiaohan, et al. Dynamic characteristics analysis for a solar power tower heliostat based on the field measurements [J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2014, 35(11): 2133—2138.
- [8] 李正农, 胡尚瑜, 李秋胜. 结构试验测点的二维优化布置 [J]. *工程力学*, 2009, 26(5): 153—158.
- [8] Li Zhengnong, Hu Shangyu, Li Qiusheng. Optimal two-dimensional layout of measuring points for structural experiments [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(5): 153—158.

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE MODAL OF TROUGH CONCENTRATOR STRUCTURE

Xu Yang<sup>1</sup>, Wu Honghua<sup>1</sup>, Kuang Rao<sup>2</sup>, Hu Jiaxing<sup>1</sup>, Zou Qiong<sup>1</sup>, Li Zhengnong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** By studying the modal of trough concentrator structure, the dynamic characteristics are analyzed. First of all, carry out the prototype test of trough concentrator structure, and test the condenser vertical angle of five working conditions, which were  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ , obtain the experimental data, and get the modal parameters by Utekl analysis software. Then, the measured results and the modal analysis results of finite element software Midas Gen are compared between frequency and vibration mode, and find the results better.

**Keywords:** solar concentrators; modal; field measurement; finite element