

doi:10.3788/gzxb20184707.0712004

# 平板型太阳能聚光器的静力分析和模态分析

刘欣然,张宁,徐熙平,尹鹏

(长春理工大学 光电工程学院,长春 130022)

**摘 要:**为了解决平板型太阳能聚光器因受力不均匀导致的聚光效率下降的问题,提出了以 9 块阵列透镜作为聚光模组的装配方式.设定聚光模组阵列与光波导板之间的空气间隙为 2 mm,通过 ANSYS 软件对聚光器进行线性静力分析和模态分析.设定风速为 18 m/s,高于指标等级 14 m/s,聚光器的模态分析基频为 0.038 s,满足结构刚度无需考虑动态影响的条件.讨论了结构组件在受到极限静风载的情况下,聚光模组与光波导板结构之间的位移变化和对应的前 6 阶的模态系数.结果表明:静力分析情况下聚光模组结构与光波导板之间的空气间隙最大位移为 0.049 mm,满足设计精度要求;在 5 种角度工况下,前 6 阶模态振型与施加预应力的模态振型相差在 1% 以内,且对应振型图形态类似,证明风载荷对于振型无影响.

**关键词:**太阳能聚光器;震动特性;有限元;聚光模组;模态参数;预应力;静力分析

**中图分类号:** TB121;TB122

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2018)07-0712004-11

## Static Analysis and Modal Analysis of Planar Solar Concentrator

LIU Xin-ran, ZHANG Ning, XU Xi-ping, YIN Peng

(College of Photoelectrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the drop of the condenser efficiency caused by the non-uniform force of the flat panel solar concentrator, an assembly method using nine array lenses as the condenser module was proposed. The air gap between the condenser module array and the optical waveguide board was set to 2 mm. Linear static analysis and modal analysis of flat solar concentrators were performed using ANSYS software. The set wind speed was 18 m/s, which was higher than the index level of 14 m/s, and the modal analysis fundamental frequency of the concentrator was 0.038 s. It is not necessary to take into account the dynamic influence conditions for the structural rigidity. The displacement of the concentrator and the optical waveguide plate structure under the condition of extreme static wind load and the modal coefficients of the first six orders in the corresponding case were discussed. The results show that the maximum displacement of the air gap between the concentrator and the optical waveguide plate structure is 0.049 mm, meeting the accuracy requirement. In the five kinds of the angle condition, the difference between the front 6 modes modal shape prestressed and processing mode shape is within 1%, and the corresponding shape patterns are similar. It is proved that the wind load has no effect on the mode shape.

**Key words:** Solar concentrator; Vibration characteristics; Finite element; Spotlight module; Modal parameters; Prestress; Static analysis

**OCIS Codes:** 120.4640; 120.7280; 350.4600

基金项目:吉林省科技发展项目(No.20170204048GX)资助

第一作者:刘欣然(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为光机结构设计.Email:1244469566@qq.com

导 师:徐熙平(1969-),男,教授,博士,主要研究方向为光电信号监测、图像处理.Email:xyp@cust.edu.cn

通讯作者:张宁(1979-),女,副教授,博士,主要研究方向为光电检测技术.Email:custzn@126.com

收稿日期:2018-01-05;录用日期:2018-04-17

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

作为一种可再生的绿色清洁能源,太阳能具有辐射量大、覆盖面广、蕴含量高的特点,已经普遍应用于人们的日常生活中,其中太阳能光伏发电能够有效缓解能源危机和减少环境污染,具有广阔的应用前景,已成为近年来能源领域的研究重点<sup>[1-2]</sup>.太阳能聚光器可接收并聚集太阳能量,大风是影响太阳聚光器安全性和稳定性的主要自然因素,为确保太阳能电站的安全、可靠和高效运行,需要对与聚光器进行静力分析和模态分析<sup>[3]</sup>.

陈明等<sup>[4]</sup>运用 ANSYS 软件对 20 kW 双轴太阳跟踪器进行了结构动力学分析,讨论了其跟踪器前 6 阶的模态参数,计算了太阳跟踪器在冲击载荷作用下的振动响应特性.孔祥兵等<sup>[5]</sup>运用有限元软件 Hyperworks,以柔顺度为目标,以体积为约束条件,对槽式太阳能聚光器单工况下的支架结构进行优化设计.ZOU Q 等<sup>[6]</sup>在文献[5]的优化基础上对槽式太阳集热器进行了模态分析,计算结果和实验结果相一致,证明了有限元模型的正确性.李正农等<sup>[7]</sup>对定日镜结构进行了杠件优化设计研究,采用均匀设计法对某定日镜进行风荷载作用下的近似优化,得到目标与参数之间的近似关系.李正农等<sup>[8]</sup>还对槽式聚光器结构进行了优化,通过 Lanczos 模态计算方法进一步提高了聚光效果和降低成本.此外,梁笑寒等<sup>[9]</sup>基于文献[7]的均匀设计法,对定日镜结构进行了模态及静力优化分析,结果表明现有的定日镜结构的风致响应远小于设计容许值,存在很大的优化空间.鄂加强等<sup>[10]</sup>对碟式太阳能热发电系统进行了流固耦合模态分析,结果表明聚光器上边缘以及 4 个悬挂梁靠近电机的部分最容易受到破坏,故应提高此部位的刚度.尹喜等<sup>[11]</sup>以 25 kW 小型碟式太阳能聚光器网架结构的研究为基础,探索了对大型网架结构建模的一般方法.尹喜等<sup>[12]</sup>还通过对系统的聚光器网架建立有限元模型,分析了它在额定状况和校验载荷作用下的静强度,获得了一系列的应力和变形云图.许立晓等<sup>[13]</sup>也对碟式太阳能聚光器进行了结构分析与风荷载数值模拟,得到了聚光器在风荷载作用下不同工况的位移变形和应力分布,确定了聚光器最差和最优的工况状态.PFAHL 等<sup>[14]</sup>对定日镜镜面在不同雷诺兹数下的风荷载进行了研究.卢鑫等<sup>[15]</sup>设计了一种基于聚光型光伏模组的太阳能跟踪器,并对其结构和散热进行了分析.王莺歌<sup>[16]</sup>对太阳能定日镜结构进行了风振响应分析,为定日镜结构的抗风设计提供了参考依据.目前,很少有学者对平板型聚光器进行风载分析和模态分析,由于聚光模块是阵列姿态,并且聚光模块和光波导板之间的空气距离变化会严重影响聚光效率,所以对外界载荷和本身固有频率振动的影响进行分析是目前迫切需要研究的问题<sup>[17]</sup>.

本文对新型平板型太阳能聚光器进行了风荷载静力分析和预应力模态分析.对平板施加风荷载观察其聚光器与光波导板结构中间空气间隙的位移变化,计算了聚光器前 6 阶模态参数随高度角和是否有预应力的前提的变化规律,分析了预应力对于振型的影响情况.

## 1 原理

### 1.1 模态分析原理

模态分析在结构设计中主要目的是避免共振,对于多自由度系统的振动特性,通常采用有限元法运用模态分析获得系统的模态参数.一般是先系统建立一个数学模型,并对方程进行变换,用变换后的方程来描述一个系统.

$n$  个自由度无阻尼线性振动系统震动的微分方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

考虑有振动情况,  $\mathbf{f}(t) = 0$ , 式(1)变为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = 0 \quad (2)$$

特征值方程为

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\boldsymbol{\varphi} = 0 \quad (3)$$

式中  $\omega$ 、 $\boldsymbol{\varphi}$  为图阻尼振动的固有频率和振型,  $\boldsymbol{\varphi}$  为非零向量.矩阵  $(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})$  行列式为零,即

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0 \quad (4)$$

令  $\lambda = \omega^2$ , 则

$$\mathbf{K} - \lambda \mathbf{M} = 0 \quad (5)$$

式(6)为多自由度系统的频率方程,求解可得关于 $\lambda$ 的 $n$ 次方程,可得到 $\lambda$ 的 $n$ 个根, $\omega$ 的 $n$ 个值,系统固有频率 $\omega_1\omega_2\cdots\omega_n$ .假设所有固有频率是互相可逆的,把 $\omega=\omega_i$ 带入式(3),得

$$(\mathbf{K}-\omega_i^2\mathbf{M})\boldsymbol{\varphi}_i=0 \quad (6)$$

式中, $\omega_i$ 与 $\boldsymbol{\varphi}_i$ 分别为固有频率和振型.根据式(6)可求得太阳聚光器的固有频率和模态振型.

## 1.2 等效静力风载荷计算

目前,等效静力风载荷的计算方法有阵风因子法、惯性风荷载法、荷载响应相关法.《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001)<sup>[18]</sup>及《户外广告设施钢结构技术规程》CECS148:2003<sup>[19]</sup>里明确指出:当结构的基频 $T<0.25$  s时,结构有足够的刚度,风振一般不大,在不考虑风振影响的情况下也不会对结构的抗风安全性构成影响.而本文所设计的平板型太阳能聚光器经过模态分析基频为0.038 s,符合其要求.故作用于聚光镜结构上的风荷载标准值可按《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001)<sup>[18]</sup>中式7.1.1-2计算,即

$$\omega_k=\beta_{gz}\mu_{sl}\mu_z\omega_0 \quad (7)$$

式中, $\beta_{gz}$ 、 $\mu_z$ 分别为阵风系数和风压高度变化系数, $\omega_0$ 为该地区的基本风压, $\mu_{sl}$ 为镜面板的局部风压体型系数.表1位为阵风系数和风压高度变化系数.

表1 阵风系数和风压高度变化系数  
Table 1 Gust wind pressure coefficient and height coefficient of variation

$H/m$	$\beta_{gz}$	$\mu_z$
9.76	1.785	1
8.64	1.807	1
7.53	1.829	1
6.41	1.852	1
5.29	1.874	1
4.18	1.880	1
3.06	1.880	1
1.94	1.880	1

基本风压 $\omega_0$ ,可由伯努力方程求得

$$\omega_0=\frac{1}{2}\rho\nu_0^2 \quad (8)$$

式中, $\rho$ 为空气密度, $\nu_0$ 为我国研究规划中规定的正常设计使用风速,大小为14 m/s.为了保证其稳定性,现设定风速为8级风,大小为18 m/s.

## 1.3 平板型聚光系统设计

本文选取的透镜是基于全内反射聚光模组和光波导板的基础上做出优化的结构透镜.优化过程如图1所示.通过图1(a)所示的外抛物线方程,将透镜修改为双抛物面结构如图1(b),其表达式为

$$y=az^2 \quad (z\geq 1/2a) \quad (9)$$

式中 $a$ 为抛物线任意系数.两个抛物面之间的距离为 $1/2a$ ,为了防止光线直接从抛物面结构下平面漏出,故需要计算抛物面结构的下限,即

$$h_{\min}=\frac{3}{4a} \quad (10)$$

为满足聚光器的设计要求,也为满足光线从光波导板的入射角大于临界角,即高度上限的公式为

$$h_{\max}=\frac{2\sqrt{\frac{n_1+\sqrt{n_1^2-1}}{n_1-\sqrt{n_1^2-1}}}-1}{4a} \quad (11)$$

式中, $n_1$ 为聚光模组的材料折射率.由于柱形透镜相比于球面镜,节约了俯仰方向的追踪同时也较容易实现透镜阵列化,故将双抛物面结构修剪为柱形透镜如图1(c).为防止阵列透镜与底部光波导板接触导致漏光,将聚光器修为球面,球心位于外抛物面焦点处如图1(d),图中球半径 $R$ 的最大值表示公式为

$$R_{\max}=\sqrt{h^2-\frac{h+\sqrt{\frac{4h}{a}+a^{-2}}}{2a}+\frac{17}{16a^2}} \quad (12)$$

式中  $h$  为聚光器高度.如图 1(e)所示,为最终得到的聚光模组的设计结构.

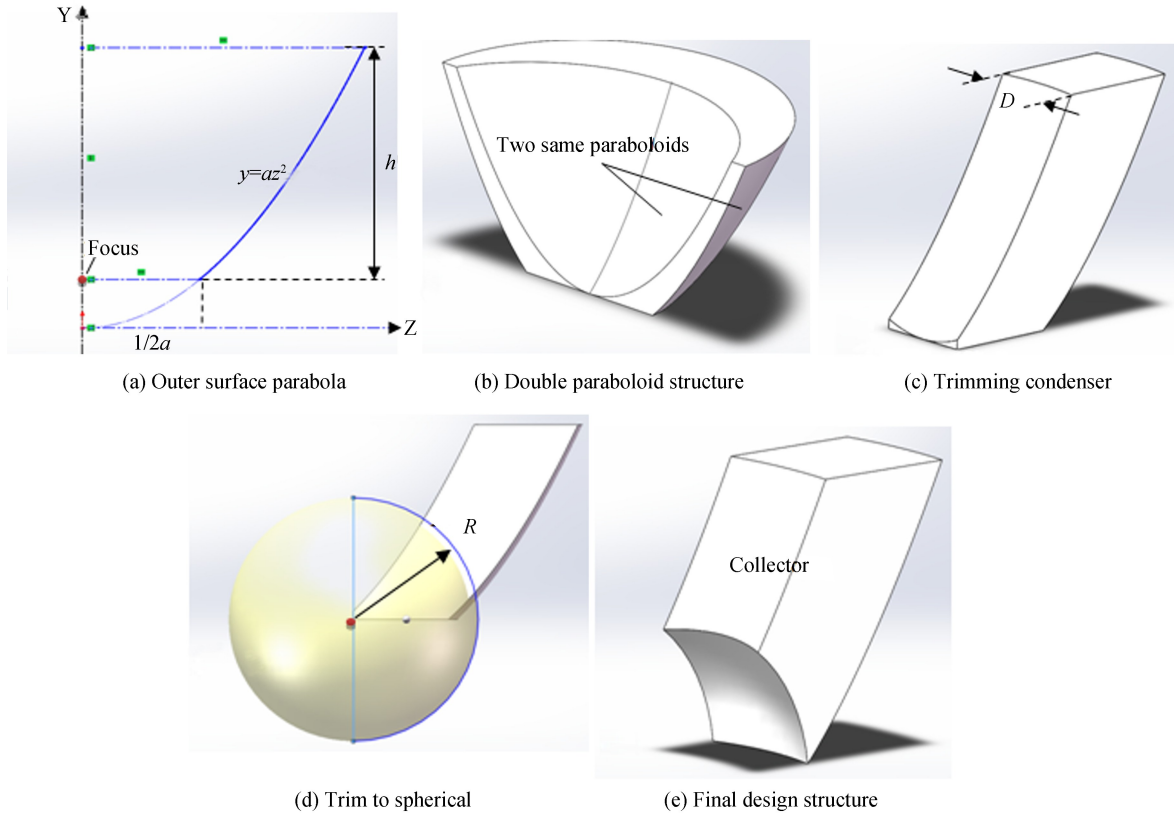


图 1 主聚光器的修剪过程示意图

Fig.1 Pruning process schematic of the main condenser

如图 2 所示,将新型聚光器叠加阵列,严格水平放置于光波导板表面高度 2 mm 上,为新型平板型聚光系统.光线从聚光模块上方入射,在透镜内部经过反射,从透镜下方出射,最终光线经过半球耦合结构进入光波导板上进行内全反射.

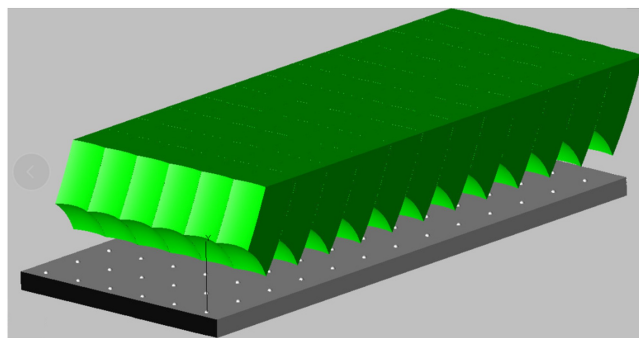


图 2 平板型聚光系统

Fig.2 Planar condenser system

## 2 平板型聚光器仿真模型

平板型聚光器由平板型聚光系统、支撑圆管、组件支撑结构、立柱、回转电机等几部分构成.所有组件与组件支撑结构安装于固定在地面的立柱上,聚光器聚光区域长 1 000 mm,宽 700 mm,面积为  $0.7 \text{ m}^2$ ,聚光区由 9 个在同一平面的聚光模块阵列组成.聚光模块结构长 15 mm,宽 20 mm,高 25 mm,每一块阵列长 300 mm,宽 200 mm,面积为  $0.06 \text{ m}^2$ ,如图 3(a).透镜下方与光波导板之间的空间距离设计为 2 mm.建立聚光器的几何模型如图 3(b).

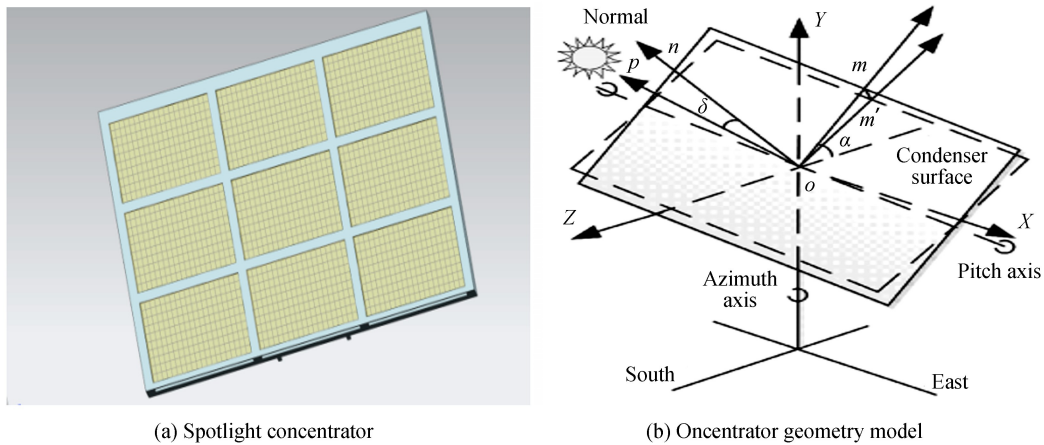


图3 聚光器物理模型

Fig.3 Concentrator physical model

采用 ANSYS 软件对聚光器几何模型进行风载荷静力分析和模态分析,计算了聚光器结构与光波导板之间的空气间隙的位移情况和前 6 阶的模态振型并提取了不同高度角下聚光器 187 476 个节点的位移、速度、加速度曲线,聚光器有限元模型如图 4.有限元模型中,承担重量的立柱、支架为 Q235 刚,光伏组件为铝合金,聚光器和光波导板为聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate,PMMA),材料如表 2 所示.聚光器立柱底座固定在地面,立柱底座所有自由度都被约束.

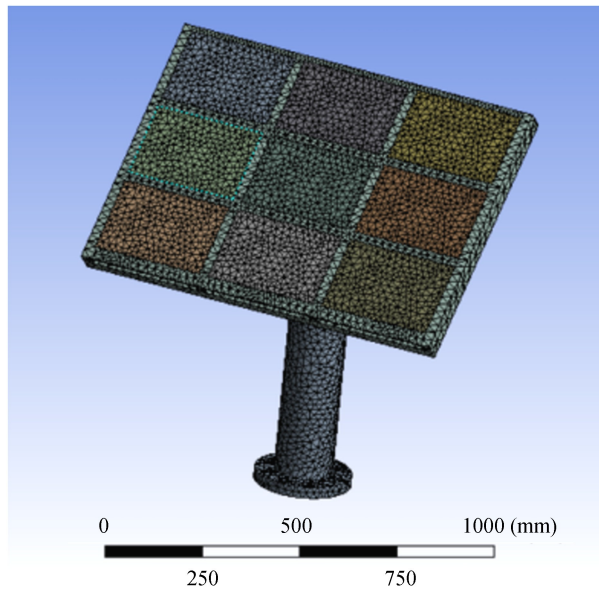


图4 聚光器有限元模型

Fig.4 Concentrator finite element model

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

Material	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Yield strength/MPa
Q235 Steel	200	0.30	7850	235
Aluminum alloy	71	0.33	2770	160
PMMA	3	0.32	1180	—

### 3 聚光器仿真与分析

由于聚光器仰角及风向的不确定性,使其结构变得异常复杂,相关角度定义如图 2、3.根据文献[16]可知,仰角  $\alpha$  及风向角  $\beta$  越小(即图 3(b)中的  $\alpha$  和  $\beta$ ),镜面板的静风压系数越高,即所受风载荷越大.首先考虑

到聚光器正常工作时候的角度多处于  $45^\circ$  附近,其次是限于篇幅的关系,本文取载荷较大的  $\alpha = 30^\circ, \delta = 0^\circ$  的聚光器进行静力分析,不但偏于安全性,且具有代表性.

假设风力等级为 8,风速为 18 m/s,根据式(7)和(8)计算出风压,得出的静力分析结果如图 5 及表 3 所示.

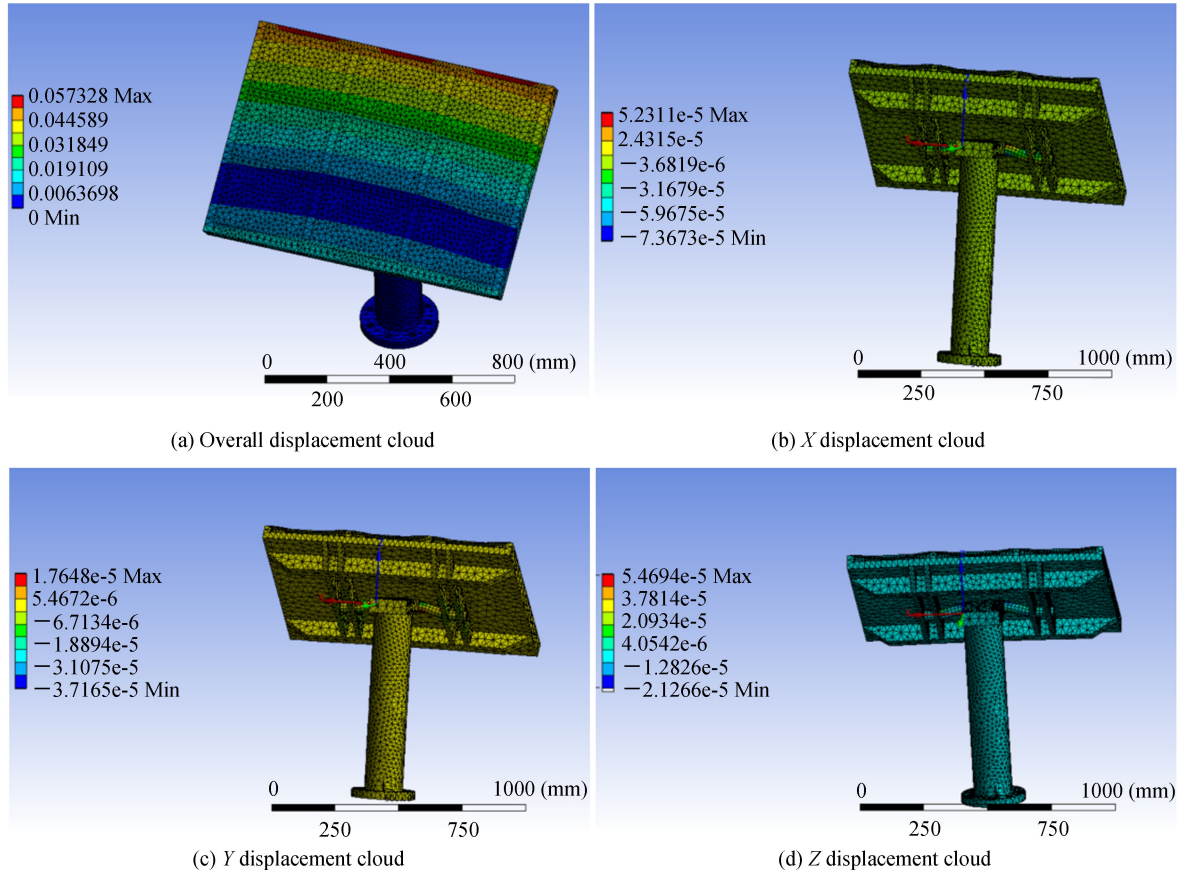


图 5 聚光器位移云图

Fig.5 Condenser displacement cloud

图 5 给出了聚光器在自重及风载荷情况下的位移及应力分析结果.表 3 给出了各方向最大位移值.

表 3 聚光器各方向最大位移值

$u_x / \text{mm}$	$u_y / \text{mm}$	$u_z / \text{mm}$	$u_{\text{sum}} / \text{mm}$
$5.2311 \times 10^{-5}$	$1.7648 \times 10^{-5}$	$5.4694 \times 10^{-5}$	0.049

由图 5 及表 3 可以看出(笛卡尔坐标系改变, $Y$  为顺风向, $Z$  为垂直向), $X$  向的最大位移为  $5.2311 \times 10^{-5}$  mm.位移最大处在支撑圆管处,大部分结构的位移均很小,立柱的位移普遍小于  $50 \mu\text{m}$ ;镜面顺风向  $Y$  向位移,镜面横梁支撑处位移稍小,支撑圆柱为最大位移处,大小为  $1.7648 \times 10^{-5}$  mm,聚光镜最上边组件支撑结构变形较大,呈现上部形变大,下部形变小的情况; $Z$  向的最大位移依然是在支撑圆管处为  $5.4694 \times 10^{-5}$  mm,聚光器最上边组件支撑结构变化明显;结构的整体变形图,呈现上部大,下部小的趋势,最大值为 0.049 mm,分布在上部镜面的边缘位置.总得来说,上部结构部分的变形要大于下半部分.

聚光模块结构和光波导板之间的空间位移变化会影响是否漏光,精度要求小于 0.1 mm,其变形程度远小于规定的限值.以上结果证明了符合其精度要求.

### 3.2 模态分析仿真

为了验证振型与是否施加预应力有关,分别对模型施加预应力前后进行了模态分析.

#### 3.2.1 不施加预应力的模态分析

对固有频率的分析,表 4 为高度角  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  工况下太阳聚光器的前 6 阶固有频率.由表 4 数据可以得出不同高度角下固有频率的变化规律,如图 6 所示.

表 4 聚光器前 6 阶固有频率  
Table 4 Concentrator first 6 natural frequencies

Order	0°	30°	45°	60°	90°
1	26.265	26.217	26.251	26.312	26.482
2	45.395	46.044	46.806	47.818	50.314
3	56.897	55.349	54.469	53.542	51.935
4	76.148	77.997	78.131	77.527	75.014
5	95.219	96.728	96.865	96.518	94.579
6	142.37	134.83	132.49	131.82	135.31

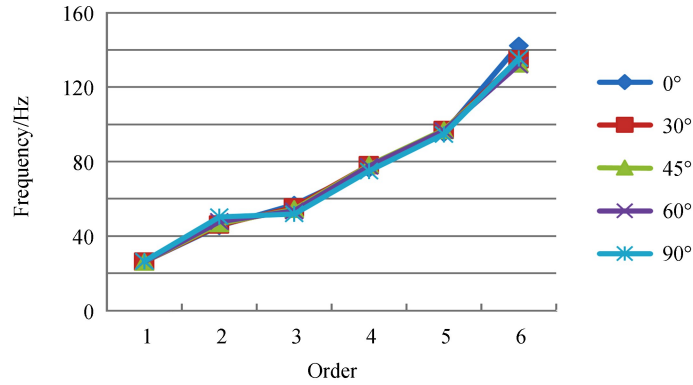
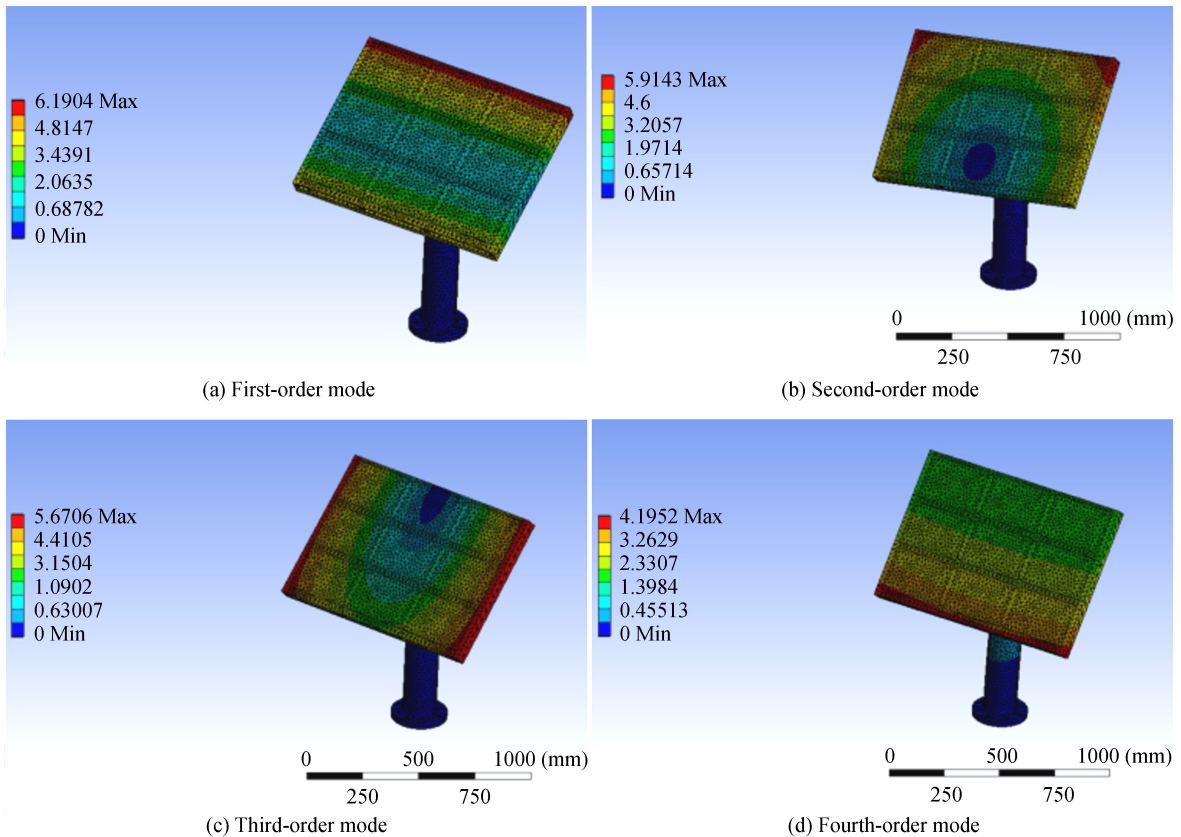


图 6 聚光器不同高度角前 6 阶固有频率

Fig.6 Concentrator's first 6 natural frequencies at different height angles

从表 4 和图 6 可以看出,各角度固有频率都很密集,2、3 阶呈趋势相反的梯度分布,前 6 阶频率都呈现随着阶数的增大而呈逐渐上升的趋势.其中,2~3 阶频率值变化不大,在 45~60 Hz 之间,且呈现反对称趋势,在同一激励下会发生多种模态叠加的状态.第 6 阶固有频率增幅明显.前 6 阶固有频率中,最小的固有频率是 26.217 Hz,最大的固有频率是 142.37 Hz.

为了得到对振型影响较大的具体模态参数,以高度角 45°为例,分析了聚光器的振型图,如图 7 所示.



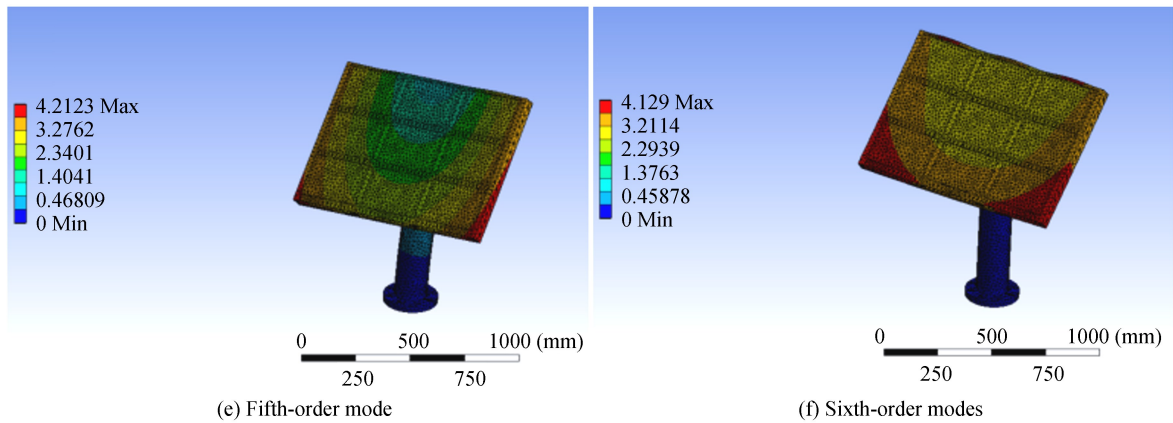


图7 聚光器前6阶模态振型  
Fig.7 Concentrator 6th mode modal shape

从图7中可以看出,聚光器本身的对称性决定其概率分布密集,呈一定的台阶型.其振型的主要特点为:第1阶是绕X轴的扭转,第2阶是绕Y轴扭动及X、Z轴方向上的平动,第3阶是绕Y、Z轴的扭转;第4阶是聚光板平面绕X轴方向的扭转及立柱在Y、Z轴上的平动;第5阶主要为聚光器整体变形,沿X轴方向平动及Y、Z轴方向转动;第6阶为聚光器和支撑圆柱沿Y、Z轴发生的转动.

### 3.2.2 施加预应力的模态分析

对施加预应力的模型进行模态分析,计算出聚光器前6阶0°、30°、45°、60°、90°五种工况的固有频率,由表5数据可以得出不同高度角下固有频率的变化规律,如图8所示.

表5 施加预应力的前6阶固有频率

Table 5 Pre-stressing the first 6 natural frequencies

Order	0°	30°	45°	60°	90°
1	26.26	26.21	26.243	26.306	26.477
2	45.393	46.042	46.804	47.815	50.311
3	56.897	55.348	54.467	53.54	51.933
4	76.146	77.995	78.129	77.524	75.011
5	95.216	96.725	96.862	96.515	94.576
6	142.37	134.83	132.49	131.81	135.31

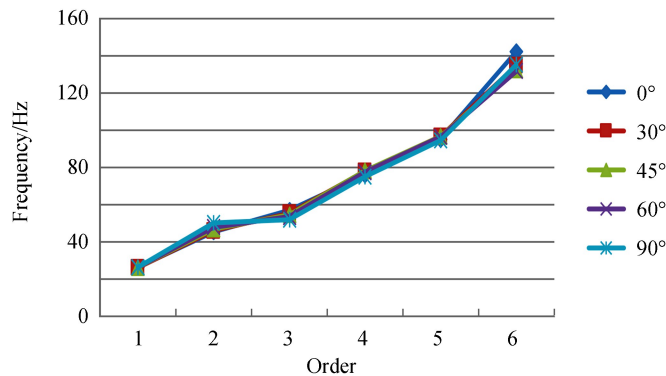


图8 施加预应力的前6阶固有频率  
Fig.8 Pre-stressing the first 6 natural frequencies

从表5和图8的数据中可以看出,因为结构本身的对称性,各角度固有频率都很密集,若干阶模态具有对称或反对称性,前6阶频率都呈现随着阶数的增大而呈逐渐上升的趋势.在45~60 Hz之间,2、3阶呈趋势相反的梯度分布,第6阶固有频率增幅明显.前6阶固有频率中,最小的固有频率为26.21 Hz,最大固有频率为142.37 Hz.图9为施加预应力前6阶模态振型.



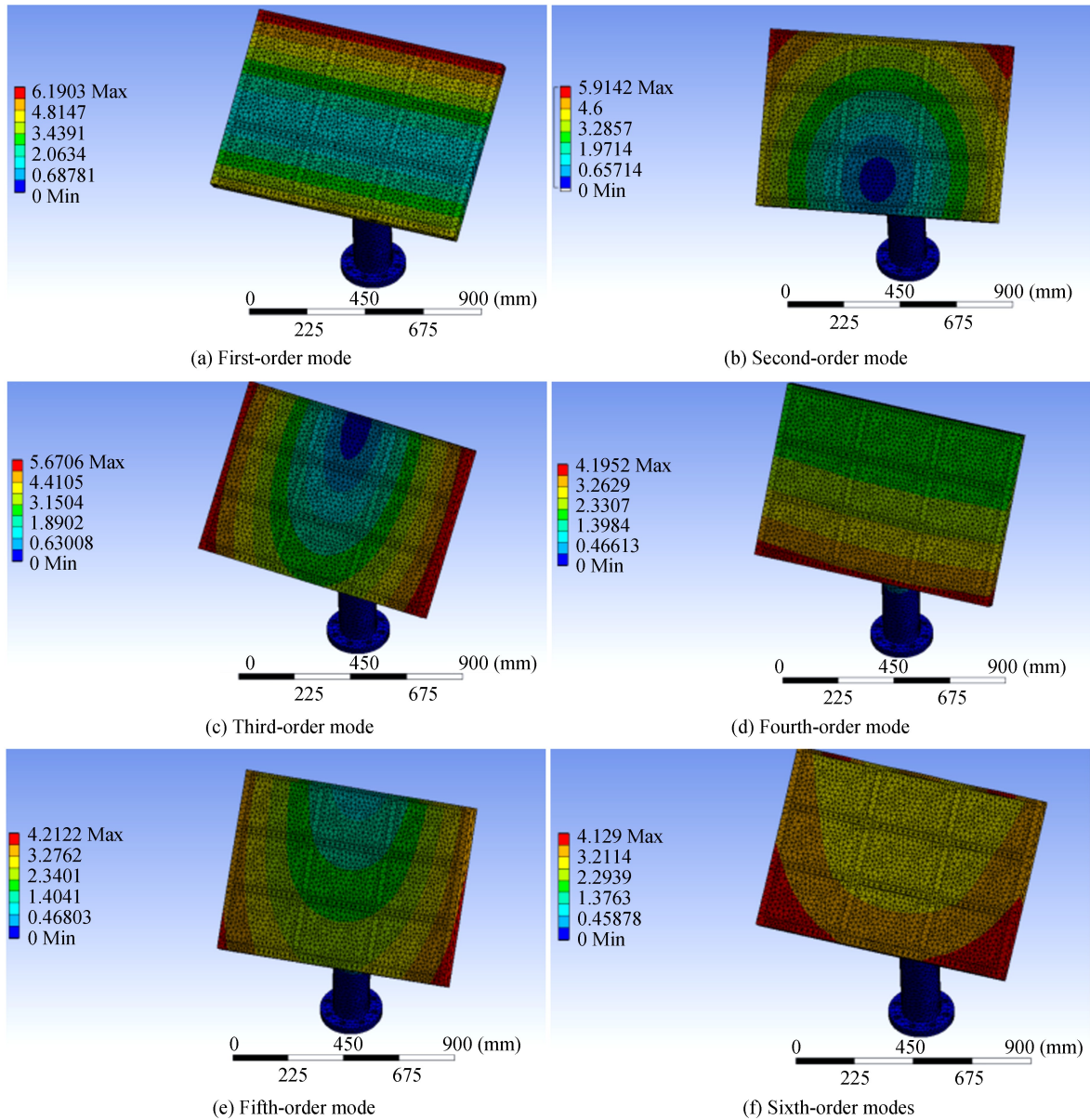


图9 施加预应力前6阶模态振型

Fig.9 6 model modes before applying prestress

从图9中可以看出的其振型的主要特点为:第1阶是绕X轴的扭转;第2阶是绕Y轴扭动及X、Z轴方向上的平动;第3阶是绕Y、Z轴的扭转;第4阶是聚光板平面绕X轴方向的扭转及立柱在Y、Z轴上的平动;第5阶主要为聚光器整体变形,沿X轴方向平动及Y、Z轴方向转动;第6阶为聚光器和支撑圆柱沿Y、Z轴发生的转动。

通过施加预应力前后可以得知,预应力对于结构的固有频率和振型影响很小.这是因为预应力只对式(1)中刚度矩阵 $\mathbf{K}$ 项产生影响,施加预应力前后结构各单元有拉有压,几何矩阵有正有负,刚度增减相互抵消,因此对结构刚度的贡献很小,结构固有频率变化很小。

### 3.2.3 模态结果分析

经表6数据分析,与聚光器的模态振型的变化情况表现一致.其中1、3阶变化较小,在动力学分析的过程中可以忽略这几阶振型的影响.所以在以后优化的时候主要考虑第4阶、第6阶的整体运动以及在X轴有较大有效模态质量比的第5阶.有效模态质量比与预应力无关,所以施加预应力之后的有效模态质量比与施加前相等,故不再赘述。

表 6 有效模态质量比  
Table 6 Effective modal mass ratio

Order	X/%	Y/%	Z/%	ROT-X/%	ROT-Y/%	ROT-Z/%
1	0.00	9.78	2.21	8.10	1.51	4.98
2	19.51	0.00	0.00	0.00	19.07	7.99
3	0.09	0.00	0.00	0.00	1.91	2.49
4	0.02	69.61	33.39	59.41	23.49	34.12
5	70.89	0.02	0.01	0.02	10.04	39.87
6	0.00	20.60	64.40	32.48	43.99	10.55

本文是按照竖向角  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  和  $90^\circ$  五个主要角度来分别计算平板型聚光镜不同工况下的整体模态情况。不同竖向角度下,虽然结构的质量和刚度都没变,但竖向角度不同,结构的质量分布与重心发生了变化,结构的模态中固有频率和振型有一定的变化。不同竖向角工况下,施加预应力和未施加预应力的聚光器的前 6 阶固有频率非常的接近,且模态振型较为相似,第 1 阶到第 6 阶的频率范围都在  $26 \sim 142$  Hz 之间且对应各阶固定频率较接近,对应振型图形态类似。

综上,通过对比聚光器施加预应力前后两次的模态分析,根据 5 种工况下,前 6 阶的固有频率、模态振型都相差在 1% 的范围内,验证了预应力对于模型本身的模态振型无影响。

## 4 结论

本文设计了一种新型平板型太阳能聚光器,并进行了静力分析与模态分析。采用简化模型、处理连接关系及合理处理边界条件等方法对风速为  $18$  m/s,  $\alpha = 30^\circ, \beta = 0^\circ$  工况下的聚光器结构作了不考虑风振效应的等效静力风荷载的计算,并进行了自重及等效静力风荷载作用下的静力分析。分析结果表明:现有结构的变形及应力均远小于设计允许值,空气间隙最大轴向位移为  $0.049$  mm,满足设计要求,但聚光器网架的边缘是其振动的危险区,存在局部刚度不足的问题,可对其进行优化以节约材料,降低成本。通过模态分析,研究了聚光器不同工况下前 6 阶的模态参数随着高度角的变化规律,分析了聚光器在施加预应力前后随着高度角变化的对比情况,发现固有频率和模态振型相差范围在 1% 内,验证了预应力对于聚光器本身频率影响较小,与刚度矩阵验证相同。相比其它分析方法,本文所用的方法原理简单明了,操作方便易行,且结果可靠。后续可以进行动态风载分析,研究其实时变化的风场中的受力变化,进而做出相应的优化。

## 参考文献

- [1] WANG Xiao, CAO Miao, AN Zhi-yong, *et al.* Design and research of total-internal-reflection solar energy concentrating module[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(10): 1020001.  
王骁,曹杪,安志勇,等.全内反射型太阳能聚光模块设计与研究[J].红外与激光工程,2016, **45**(10): 1020001.
- [2] LIU Yan-hua, BAI Wen-xia, GENG Zhong-rong, *et al.* Near-infrared quantum cutting of  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6 : \text{Tb}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$  phosphors[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, **38**(4): 423-429.  
刘艳花,拜文霞,耿中荣,等.  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6 : \text{Tb}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$  荧光粉的近红外量子剪裁效应[J].发光学报,2017, **38**(4): 423-429.
- [3] ZOU Qiong. Research on wind resistant performance of trough solar collector system[D]. Changsha: Hunan University, 2016.  
邹琼.槽式聚光镜组系统的抗风性能研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [4] CHEN Ming, CHEN Gang, LI Peng, *et al.* Modal parameter and shock response analysis of a large scale dual-axis solar tracker[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2016, **38**(12): 66-72.  
陈明,陈刚,李鹏等.大型双轴太阳跟踪器的模态参数与冲击响应分析[J].武汉理工大学学报,2016, **38**(12): 66-72.
- [5] KONG Xiang-bing, CHEN Xiao-an, WU Guo-yang, *et al.* Topological optimization design of trestle structures based on parabolic trough solar concentrator[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2013 (2): 121-126.  
孔祥兵,陈小安,吴国洋等.槽式太阳能聚光器支架结构的拓扑优化设计[J].现代制造工程,2013 (2): 121-126.
- [6] ZOU Q, LI Z, WU H. Modal analysis of trough solar collector[J]. *Solar Energy*, 2017, **141**: 81-90.
- [7] LI Zheng-nong, LIANG Xiao-han, WU Gong-xiang, *et al.* Research on the optimization design of heliostat structure based on uniform design and linear regression[J]. *Journal of Hunan University*, 2012, **39**(12): 1-6.  
李正农,梁笑寒,吴卫祥,等.基于均匀设计与线性回归的定日镜结构优化设计[J].湖南大学学报,2012, **39**(12): 1-6.
- [8] LI Zheng-nong, LI Lian-jie, WU Hong-hua. Modal analysis of groove type condenser structure based on MIDAS/Gen[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2017, **44**(11): 1-10.

- 李正农,李廉洁,吴红华.基于 MIDAS/Gen 的槽式聚光器结构模态分析[J].湖南大学学报,2017,44(11):1-10.
- [9] LIANG Xiao-han. Analysis of modal and static optimization on heliostat[D].Changsha:Hunan University,2012.  
梁笑寒.定日镜结构的模态及静力优化分析[D].长沙:湖南大学,2012.
- [10] E Jia-qiang, ZHANG Qing-ling, YANG Wen-ming, *et al.* Modal analysis on dish solar thermal power system considering fluid-solid interaction[J].*Journal of Central South University (Science and Technology)*,2015,46(9):3546-3552.  
鄂加强,张庆玲,杨文明等.碟式太阳能热发电系统流固耦合模态分析[J].中南大学学报,2015,46(9):3546-3552.
- [11] YIN Xi, HE Zhi, PENG You-duo, *et al.* Finite element modeling of lattice grid structure of dish solar concentrator by ANSYS[J].*Mechanical Engineering & Automation*, 2012, 42(6): 16-20.  
尹喜,何轶,彭佑多,等基于 ANSYS 的碟式太阳能聚光器网架有限元建模.[J].机械工程与自动化,2012,42(6):16-20.
- [12] YIN Xi, PENG You-duo, LONG Dong-ping, *et al.* Study on the finite element analysis of the concentrator grid strength for dish solar power station[J].*Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2013, 28(1): 29-33.  
尹喜,彭佑多,龙东平.碟式太阳能电站聚能器网架强度的有限元分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(1):29-33.
- [13] XU Li-xiao. The structure analysis and numerical simulation of wind load on dish solar concentrator[D].Lanzhou:Lanzhou University of Technology, 2016.  
许立晓.碟式太阳能聚光器结构分析与风载荷数值模拟[D].兰州:兰州理工大学,2016.
- [14] PFAHL A, UHLEMANN H. Wind load on heliostats and photovoltaic trackers at various Reynolds numbers[J].*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011; 99:964-968.
- [15] LU Xing. The design and performance analysis of the sun-tracking system based on the concentrating photovoltaic modules architecture[D]. Changchun: Changchun University of science and technology, 2010.  
卢鑫.基于聚光型光伏模组的太阳跟踪系统结构设计及性能分析[D].长春:长春理工大学,2010.
- [16] WANG Ying-ge. Research on wind load's characteristics & wind induced response of solar power tower heliostat[D]. Changsha: Hunan University, 2010.  
王莺歌.塔式太阳能定日镜结构风荷载特性及风致响应研究[D],长沙:湖南大学,2010.
- [17] YIN Peng, XU Xi-ping, JIANG Zhao-guo, *et al.* Design and analysis of planar solar concentrator in ray-leakage-free respect[J].*Acta Optica Sinica*, 2017, 46(9): 0923004.  
尹鹏,徐熙平,姜肇国等.平板型太阳能聚光器的无漏光设计[J].光子学报,2017,46(9):0923004.
- [18] Ministry of Construction of the PRC. Building structure load specification (GB50009-2001) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2002:24-45.  
中华人民共和国建设部.建筑结构荷载规范(GB50009-2001)[S].北京:中国建筑工业出版社,2002:24-45.
- [19] China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specifications for Outdoor Billboard Facility Steel Structures(CECS148:2003) [S].Beijing: China Planning Press, 2003,17-24.  
中国工程建设标准化协会标准.户外广告牌设施钢结构技术规程(CECS148:2003)[S].北京:中国计划出版社,2003,17-24.

**Foundation item:** Jilin Province Science and Technology Development Project (No. 20170204048GX)

引用格式:LIU Xin-ran, ZHANG Ning, XU Xi-ping, *et al.* Static Analysis and Modal Analysis of Planar Solar Concentrator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(7):0712004

刘欣然,张宁,徐熙平,等.平板型太阳能聚光器的静力分析和模态分析[J].光子学报,2018,47(7):0712004