

Structural Analysis of Solar Concentrator Based on ABAQUS

Xiaoyi Shao¹, Xiao'an Chen¹, Yu Feng¹, Guoyang Wu²

¹The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing

²Material Engineering Institute, Panzhihua University, Panzhihua

Email: xiaoyishao@foxmail.com, xachen@cqu.edu.cn

Received: Apr. 15th, 2012; revised: Apr. 27th, 2012; accepted: Apr. 28th, 2012

Abstract: Solar concentrator is the key component of Concentrating Solar Power (CSP), which has great impact of the wind load and production cost. The wind load can make the condenser move thus deviating from the theoretical position and affecting its efficiency. The efficiency and cost are the most important factors to be considered in the process of building a Solar Thermal Power Plant (STPP). The main research of this paper is to optimize the concentrator structure with ABAQUS Finite Element analysis software on given wind load with different places and structure in order to reduce the displacement of concentrator, make full use of the material and reduce the cost. This article is to calculate the wind load value of the concentrator by simulating the system with the liquid software then obtains the displacement of the concentrator and analyzes the force of key parts. Therefore, we can adjust its arrangement and design to achieve the optimization purpose.

Keywords: Concentration; Structural Optimization; ABAQUS; Wind Load

基于 ABAQUS 的太阳能聚光器结构分析

邵晓义¹, 陈小安¹, 冯煜¹, 吴国洋²

¹重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆

²攀枝花学院材料工程学院, 攀枝花

Email: xiaoyishao@foxmail.com, xachen@cqu.edu.cn

收稿日期: 2012 年 4 月 15 日; 修回日期: 2012 年 4 月 27 日; 录用日期: 2012 年 4 月 28 日

摘要: 聚光器是聚光型太阳能热发电系统的核心部件, 其结构对风载荷的影响是十分敏感的。风载荷使聚光器结构产生位移, 偏离理论的位置, 从而对聚光效率产生影响; 同时聚光器结构的设计直接影响生产成本。聚光效率、生产成本正是太阳能热电站建设的决定性因素。因此本文提出了风载荷下基于 ABAQUS 有限元软件优化聚光器结构的实现方法, 通过此方法可以因地制宜的对不同形式的聚光器结构进行优化设计, 从而达到减小聚光器对风载荷的位移, 并实现结构材料的最优使用, 降低生产成本。文章首先通过流体仿真计算出聚光器的风载荷值, 然后将此值施加到聚光器上, 计算出聚光器的位移以及关键部位的受力情况, 调整结构与布置, 从而达到优化目的。本文的方法为工程设计及验证提供了仿真计算优化模型, 缩短设计周期, 降低前期设计成本。

关键词: 聚光器; 结构优化; ABAQUS; 风载荷

1. 引言

可再生能源和新能源是我国能源发展战略的三大支柱之一。太阳能是最主要的可再生能源, 太阳能经聚光后可广泛应用在光-热利用(发电、制冷)、光

- 伏发电等许多领域^[1,2]。其中太阳能光-热利用即热发电技术又是太阳能应用中最具发展潜力的, 然而阻碍太阳能热发电技术快速发展的主要问题是效率及太阳能热电站的建设、运营成本。

太阳能热发电系统主要由聚光集热子系统、换热子系统、发电子系统、蓄热子系统和辅助能源子系统组成^[3]。本文主要研究太阳能聚光器，是聚光集热子系统的核心部件，下文简称聚光器。大多数太阳能发电厂都是建立在太阳能资源比较丰富的荒漠地区，这些地方一般风沙较大，风载荷对大型抛物面或平面聚光器的强度以及刚度设计往往起着决定性的作用^[4]。因此，文章对风载荷作用下的太阳能聚光器结构进行优化分析，设计出仿真计算模型，使电站的建设达到成本与效益的最大化。

2. 聚光器的风载荷分析

2.1. 载荷的分类与组合

太阳能聚光器所受的载荷大致可以归纳为以下几种类型：1) 风载荷；2) 冰雪载荷；3) 自重；4) 聚光器运动时的惯性载荷；5) 温度载荷；6) 其它载荷。其中风载荷以及自重是聚光器结构设计中重点考虑的载荷。此外，聚光器的支撑钢结构是具有一定跨度的，因此聚光器结构的自重对刚度设计也是一种主要载荷。

在结构设计过程中，应当考虑各种可能的载荷组合，以保证聚光器结构具有必要的强度和一定的刚度。如：1) 强度计算：除自重外，必须能经受当地的最大风速及一定的冰雪载荷；2) 刚度计算：除自重外，还有工作时的一般风载荷。具体计算中涉及的风速及冰雪载荷依据建站当地气象记录数据取值。

2.2. 风载荷的理论计算与 Flunt 模拟

对于太阳能聚光器的风载荷计算这一类问题，还没有明确的理论公式，因此此类问题的风载荷计算只能参考一些相关结构的理论经验公式。

聚光器结构与天线结构十分相似，都是由抛物面聚光镜或者平面定日镜以及支撑钢结构组成，二者的风力主要是形状阻力或者称为涡流阻力。因此本文在计算聚光器的风载荷时引入天线结构的风载荷计算原理，并利用已有公式进行计算。文章还将应用 Flunt 软件来进行风场的模拟计算，并将计算结果与理论计算以及已有的相关风洞试验^[5]做对比，综合给出有限元软件计算所需要的风载荷值。

2.2.1. 载荷计算理论

聚光器结构所受的风载荷主要作用形式可简化

为风力和风力矩^[6]。

风力的计算公式为

$$F = C_F A q \quad (1)$$

式中 C_F 称为风力系数，它与物体的形状及雷诺系数有关，又称为形状系数； $q = 0.5 \rho v^2$ (v : 风速)称为动压， A 为物体特征面积。

按风轴坐标系，风力在一般情况下可分解为三个分量：阻力、升力、侧向力，由于我们假设聚光器结构对于风是左右对称的，因此，在此处不讨论侧向力。

$$\text{阻力: } F_D = C_D A q \quad (2)$$

其中 C_D 为阻力系数；

$$\text{升力: } F_L = C_L A q \quad (3)$$

其中 C_L 为阻力系数；

风力矩的计算公式：

$$M = C_M A q D \quad (4)$$

式中 C_M ：风力矩系数； D ：与风转轴垂直的尺寸。

2.2.2. Flunt 流体仿真分析

在利用上述理论计算聚光器结构所受的风载荷时，只能得到聚光器整体的风载荷情况，并不能反映出聚光器每一小区域的真实受力情况，因此本文通过计算流体力学(CFD)理论建立计算模型，对太阳能聚光器在不同角度、不同风速下的风载荷进行计算，这样得到的计算风载荷值可以精确到每一个所划分的小区域中，然后再将计算出来的小区域的风载荷值通过有限元软件施加到聚光器的相应位置，从而得出了相对准确的计算结果。

利用计算流体力学(CFD)即流体仿真分析软件 Flunt 计算，方便于对不同地区的不同风速，不同工作角度进行计算。如图 1 所示为利用 Flunt 软件计算的 8×2.5 m 抛物面槽式太阳能聚光器结构，在风速 13.6 m/s、俯仰角介于 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间典型工况的整体风力(阻力、升力)及风力矩值。

3. 聚光器的有限元模型设计

3.1. 模型建立

本文的模型建立方法对塔式太阳能热发电和槽式太阳能热发电是通用的。下文介绍槽式太阳能热发电聚光器在 ABAQUS 有限元里的建模方法。

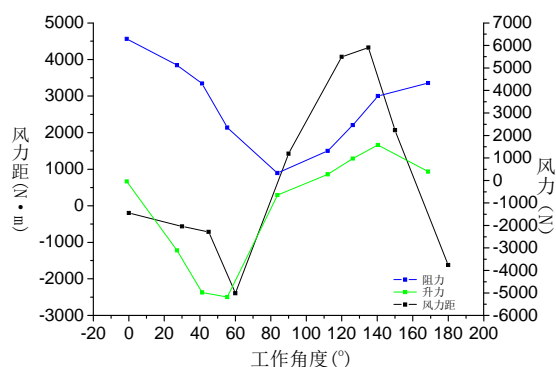


Figure 1. The values of wind and wind torque under typical working conditions
图 1. 典型工况的风力及风力矩值

槽式太阳能聚光器主要由聚光镜以及支撑钢结构组成，其中聚光镜的作用就是将太阳光反射聚焦到集热管接收器上，同时聚光镜本身是最大的风载荷载体。支撑结构是聚光镜的承载、连接机构，包括支架、侧板、扭力管(扭管型支架)，它的主要作用是支撑聚光镜和集热管并使抛物面聚光镜保持理论几何抛物面，因此支架要有良好的刚度(使聚光镜在工作状态时受到风载荷的作用后变形尽量小，以保持理论抛物面)、强度(使聚光镜在避险状态受到极端风载时，不会变形过大，以致破坏)、抗疲劳耐久(保证电站长期运行，减少维护成本)^[7]。

本文主要讨论风载荷下扭矩框型槽式太阳能聚光器的有限元分析与应用问题，因此建立聚光器的有限元模型时，只考虑聚光镜以及支撑钢结构的设计，故建立的有限元模型包括聚光镜、支架、侧板等。

3.2. 模型材料性能参数

聚光镜材料为低铁超白玻璃-LISG (Low Iron Solar Glass)，支架、侧板均为 Q235A 钢，其材料力学性能参数^[8]如表 1 所示。

表中强度对于 Q235A 钢为屈服强度，对于低铁超白玻璃为折断模数。将所需的相应数据值输入到 ABAQUS 软件材料属性的相应位置。

3.3. 单元选择与网格划分

聚光镜的厚度一般在 3.5~4 mm，而其跨度尺寸大多在 1000~4000 mm，两者之比远小于 1/15，因此聚光镜是典型的薄壳结构；一个聚光器单元内，聚光镜的数量多、规模大，考虑对于风载的位移是几何线性的，

Table 1. The mechanical properties of Q235A and LISG
表 1. Q235A 和 LISG 的材料力学性能参数

材料	密度 g/cm ³	弹性模量 Gpa	强度 MPa	泊松比
Q235A	7.85	206	235	0.3
LISG	2.5076	73.1	41.4	0.2

所以在 ABAQUS 中将聚光镜定义为线性、薄壳单元 S4R5。该单元为完全积分的四边形壳单元，既有弯曲能力又具有膜力，可以承受平面内的载荷和法向载荷，并且对于规模非常大仅经历线性行为的模型，使用此单元更加节约计算成本^[9]。此外，支架的侧板也属于壳结构，并且其受载情况和聚光镜比较接近，既有面内作用又有垂直面的载荷，因此也采用 S4R5 来模拟。

聚光器中的支架结构，都是由角钢、矩形钢管、方形钢管、槽钢等组合而成的，其长度方向尺寸与截面尺寸比值远小于 1/15，并且结构既受轴向力，又有剪力和弯矩，所以支架结构都用三维梁单元来模拟。本文采用三维、二次线性梁单元 B32 来模拟支架机构，B32 梁单元是建立在 Timoshenko 梁分析理论基础上的，计入了剪切效应和大变形效应，因此其既适用于模拟剪切变形起重要作用的深梁，又适用于模拟剪切变形不太重要的细长梁^[9]。

此外，使用壳单元、梁单元来模拟聚光器结构非常便于材料尺寸优化，无论是壳单元的厚度选择，还是梁单元的截面形状尺寸选择，都只需修改参数既可达重新选择的目的，并且在计算过程中节约计算资源，不像实体单元那样需要花费更多的时间去重新建立模型和计算，这样选择大大的提高了优化效率，缩短设计周期。

对聚光器结构进行有限元离散如图 2 所示。网格选择中性轴算法 Medial axis，自由(Free)网格划分技术。经过多种单元尺寸的计算与对比分析，本文选择了既能保证计算精度又能满足计算机计算能力的最优单元网格尺寸：聚光镜、侧板的壳单元网格尺寸为 15 mm，支架梁单元网格尺寸 10 mm。经过有限元离散后，得到壳单元和梁单元共 207,330 个，节点 610,128 个。

3.4. 分析步骤与边界条件

根据槽式太阳能热发电系统的实际工作条件，本文要模拟无风载荷和有风载荷两种情况，在有限元

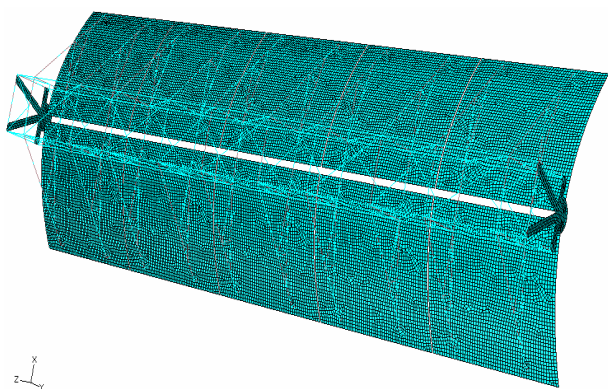


Figure 2. Finite element model and meshing
图 2. 有限元模型及网格划分

计算过程中创建了两个分析步，加上原始分析步，共三个分析步，分别是 initial、step 1、step 2。

聚光器的转动中心为整个结构的重心，在工作状态时，聚光器的一端为转动驱动(低速转动，为方便分析，将其假设为固定)，另一端为自由转动；在避险状态时，转动驱动端为固定端，另一端仍然为自由转动。因此，在施加约束边界条件 Boundary Conditions 时本文将驱动端设定为全约束，自由转动端只留一个绕轴旋转的自由度。此边界条件在原始分析步 initial 中创建，并延续 Propagated 到后续分析步中。

聚光器的载荷组合形式有两种：第一种，重力；第二种，重力 + 风载荷。因此，在第一个分析步 step 1 中，只加载重力载荷，创建重力 Gravity，方向竖直向下与风的作用方向垂直，并延续 Propagated 到后续分析步。第二个分析步 step 2 中，加载风载荷，本文将风载荷以体力 Body force 的形式加载到聚光镜上，相比于面力 Surface traction、压力 Pressure 等，体力的加载形式更加接近于计算风载荷的阻力、升力，尤其对于有遮挡的面受载时，体力更便于加载与计算。

4. 聚光器结构的有限元优化步骤

将 Flunt 软件计算得出的风载荷值，施加到建立的聚光器有限元模型上，利用 ABAQUS 有限元软件计算得到聚光器模型中每一个单元的位移以及应力。如图 3 所示的聚光镜最大位移趋势图，从图中可以看到风速 13.6 m/s 时，在俯仰角 60°的工作位置，聚光镜的位移最大即聚光器的最不利工况。因此，本文以图 2 所示结构模型在俯仰角 60°时的工作位置为基础，对其进行有限元结构优化设计。

图 2 所示聚光器结构主要由聚光镜、支臂、扭力框以及侧板组成，优化项目主要包括结构优化以及尺寸优化，如聚光镜的厚度以及支点位置优化、扭力框基本尺寸以及杆件布置优化、支臂布置方式优化、侧板形状以及厚度、所有梁结构的截面形状与尺寸优化^[10]。优化方式即通过改变有限元模型的相关尺寸形状参数，然后对其加载计算，得出位移值；再对其对比分析，得出相对较合理模型。本文对图 2 所示聚光器结构进行了完整的有限元优化设计，但篇幅有限，因此，下文只详细列出支臂布置方式优化。

4.1. 支臂布置方式优化

优化前支臂结构如图 3(a)所示，本文称之为 A 型支臂结构，对 A 型支臂结构的聚光器做有限元计算分析，聚光器无论是在风载荷正面作用还是背面作用时，矩形框的两臂结构中的 a、b 梁，都是主要受到拉应力的作用，相对于受压变形会大一些，并且反光镜的三个支点不在同一根梁上，这样不利于安装精度的保证。因此调整 a、b 梁的结构形式，伸长 a 梁，缩短 b 梁，做出了 b 型支臂结构，如图 3(b)所示。

此时若受到正吹时 b 梁会受到压应力，并且聚光镜的两个支点都在 a 梁上，这样更加容易保证镜面的

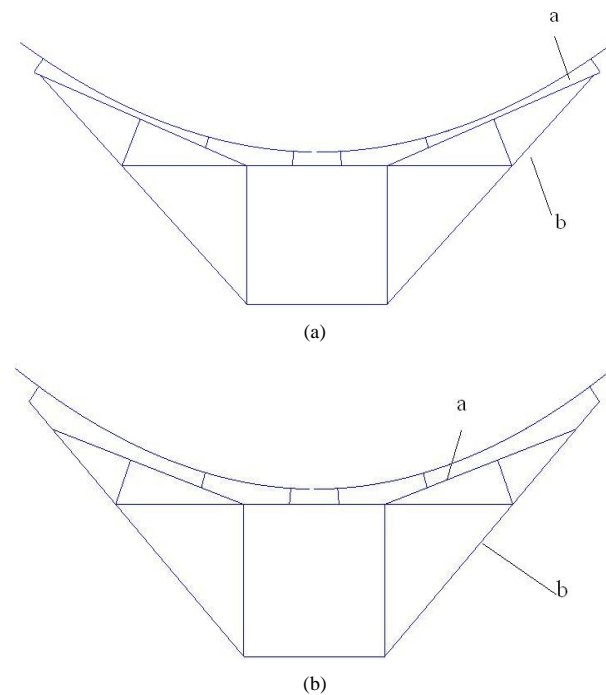


Figure 3. Arms structure: (a) Type A arm; (b) Type B arm
图 3. 支臂结构: (a)A 型支臂; (b)B 型支臂

安装精度。经过 13.6 m/s 的风载荷正吹与被吹有限元计算，结果见下表 2。

经计算，优化的 B 型支臂结构达到了预期的优化目的，可以作为优化的方案实施。

4.2. 优化后聚光器计算结果

对图 2 所示聚光器结构进行支点位置优化、扭力框基本尺寸以及杆件布置优化、支臂布置方式优化、侧板形状以及厚度优化、梁结构的截面形状与尺寸优化。对优化后的聚光器结构进行计算分析，将优化前后的镜面位移云图做对比，如图 4 所示。

图 4(a)优化前的聚光器结构镜面最大位移为 3.7 mm，图 4(b)优化后的镜面最大位移为 2.83 mm，位移减小了 24%。此外，(a)图中的红色区域范围大于(b)图红色区域，也就是说(b)图的整体位移也要小于(a)图。由于位移越大，聚光效率越低，因此从计算结果可以看出优化后的聚光器的聚光效率要高于优化前的结构。

5. 结论与展望

本文设计了一种太阳能聚光器的有限元仿真计算模型，并提出了优化设计的方法步骤。利用此模型以及优化方法，对图 2 所示聚光器结构进行了仿真计算优化。经优化后的结构重量减轻约 47 kg (8%)，聚光镜最大位移为从 3.71 mm 减少到 2.83 mm，减少比例约为 24%。文中提出优化方法达到了降低生产制造成本，提高聚光效率的目的。为太阳能热电站的设计提供了方法与数据的参考，具有重要的工程指导意义。

以上的研究主要是依据聚光镜的最大位移优化设计的，虽然能够达到优化的目的，但是优化计算结果还不够精确，聚光镜最大位移与聚光效率的精确关系还没有建立。因此下一步研究的只要方向是聚光镜位移与聚光效率的精确关系，此处的聚光镜位移不只是聚光镜受到风载荷后的位移，还包括镜面本身的制作误差、聚光镜安装误差、聚光镜跟踪误差等造成

Table 2. The arm displacement values of different framework
表 2. 支臂位移

	正吹位移 mm	被吹位移 mm
A 型支臂	3.71	3.63
B 型支臂	3.45	3.26

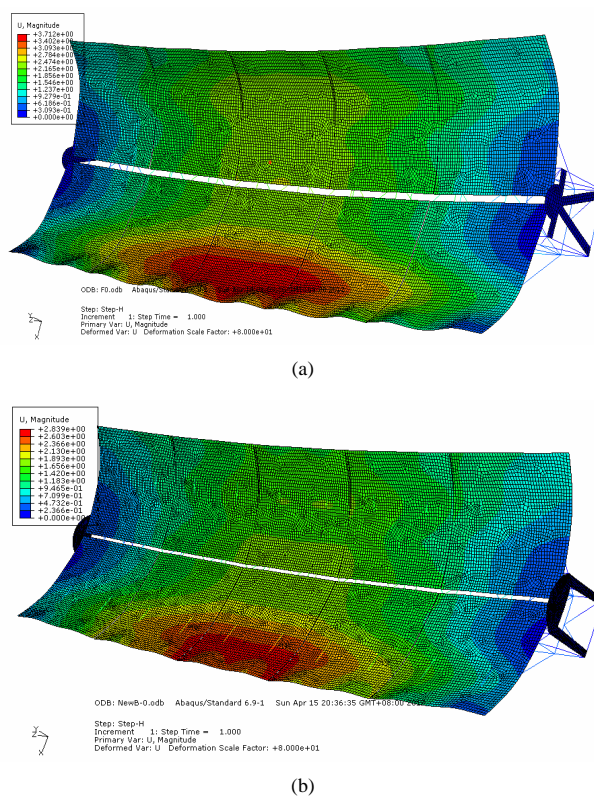


Figure 4. The comparison of the condenser displacement distributions before (a) and after (b) optimization
图 4 优化前后镜面位移对比：(a)优化前镜面位移；(b)优化后镜面位移

的位移，此研究在本文研究的基础之上将具有更进一步的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 杨志勇. 聚光条件下太阳能光热联用途径初探[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003: 15-32.
- [2] B. A. Benson. Acrylic solar energy reflecting film 3M brand ECP-224. Property Solar Energy ASSES, 1993: 501-505.
- [3] 张耀明, 王军, 张文进等. 聚光类太阳能热发电概述[J]. 太阳能, 2006, 1: 39-41.
- [4] 张庆祝, 刘志璋, 齐晓慧等. 太阳能光伏板风载的载荷分析[J]. 能源技术, 2010, 31(2): 93-96.
- [5] 宫博, 李正农, 王莺歌等. 太阳能定日镜结构风载体形系数风洞试验研究[J]. 湖南大学学报, 2008, 35(9): 6-9.
- [6] 张相庭, 叶高辉. 天线结构设计[M]. 西安: 西北电讯出版社, 1988: 83-105.
- [7] 王军, 张耀明, 金保升等. 太阳能热发电中的聚光器[J]. 太阳能, 2007, 9: 30-34.
- [8] 成大先. 机械设计手册第 1 卷(5 版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 3105-3164.
- [9] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 58-64.
- [10] 张胜兰, 郑冬黎. 基于 HyperWorks 的结构优化设计技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 228-260.