

基于渐进结构优化法的碟式聚光器轻量化研究

程自然, 颜 健, 彭佑多

(湖南科技大学机械设备健康维护省重点实验室, 湘潭 411201)

摘 要: 采用多层次的优化策略, 提出一种碟式太阳能聚光器桁架结构的优化设计方法。首先, 基于渐进结构优化方法(ESO)建立聚光器机架的拓扑优化模型, 针对拓扑优化中的棋盘格问题给出一种过滤消除方法。其次, 根据机架结构的拓扑优化结果, 提出一种桁架拓扑结构的特征线提取方法, 将拓扑优化结果转换为可供截面优化的线单元。最后, 对聚光器中桁架结构的截面尺寸进行优化。以 38 kW 碟式-斯特林太阳能发电系统为例, 面向工程制造桁架结构开展轻量化优化设计。结果表明, 自重下单件新型桁架和原有桁架的最大变形相同时, 重量减轻了 34.4%, 优化策略为面向工程制造的桁架结构设计提供了新思路。

关键词: 太阳能; 碟式聚光器; 拓扑优化; 桁架结构; 渐进结构优化方法(ESO)

中图分类号: TH11

文献标志码: A

0 引 言

碟式-斯特林太阳能热发电系统被认为是一种具有广阔应用前景的高品位太阳能热利用装备^[1]。聚光器是其中重要的聚光集热装置, 主要由镜面单元及其支撑他的桁架结构组成, 镜面单元和桁架支撑结构在自身载荷作用下必然会产生空间位移^[2-4], 这就可能导致光斑部分落靶或热流分布不均等现象^[5-6]。因此, 桁架结构具有良好的刚度性能是保障系统高效运行及发电总量的重要条件。桁架结构具有大尺度和大质量等特点, 尤其是随着系统功率的增加, 其太阳能集热场的尺度增大(38 kW 聚光器半径为 8.85 m), 占总成本的比例(42%)会更高^[7], 因此聚光器桁架的设计不仅影响系统的光学性能, 而且还影响系统的经济性能。综上所述, 以聚光器结构的刚度性能为约束, 进行轻量化设计是碟式-斯特林太阳能热发电系统整体生产、制造成本降低的主要方面, 同时也是将来碟式-斯特林太阳能热发电系统商业化应用设计的基础。

对于结构优化而言, 拓扑结构优化相对于形状优化和尺寸优化能更有效提高材料利用率, 改变结构的构型, 从而真正达到优化的目的。针对连续体拓扑优化问题, 谢忆民等^[8-12]首先提出并发展了渐进结构优化

方法(简称 ESO), 之后王栋, 张卫红等^[13]将 ESO 方法推广到了桁架结构的优化设计中, 黄冀卓等^[14]通过结合遗传算法和渐进结构优化设计对支撑钢架结构进行了离散化拓扑优化设计。面向太阳能发电领域, 徐宁等^[15]利用光学软件对太阳能汇聚器进行了优化, 优化结果提高了系统光能量接收效率。王林军等^[16]对碟式太阳能网架振动特性进行了研究和优化, 优化结果改善了聚光器网架的结构刚度和振动特性。孔祥兵等^[17]对槽式太阳能聚光器支架结构进行了优化设计, 优化结果有效提高了支架结构的性能。

目前面向碟式太阳能聚光系统桁架结构轻量化的优化设计研究报道较少, 本文在上述研究基础上建立面向工程制造的碟式聚光器机架结构多层次优化的流程和方法, 得到满足工程制造实际需求的新型设计结构。该优化设计流程可为拓扑优化在面向工程制造方面的研究提供参考和依据, 也可为中国今后碟式太阳能热发电技术的工程轻量化提供重要参考。

1 物理模型

38 kW 碟式-斯特林太阳能热发电系统位于湘电集团厂内, 如图 1 所示, 主要由聚光器、斯特林热机、双轴跟踪系统、支撑桁架和支撑立柱等构成, 其中上装总成

收稿日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(51641504); 湖南省自然科学基金(2016JJ2052); 湖南省研究生科研创新项目(CX2016B549)

通信作者: 彭佑多(1964—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事机械系统动力学, 新能源技术与装备等方面的研究。
ydpeng1964@163.com

主要由桁架构件组成,在 38 kW 碟式太阳能系统中所占的比重最大。

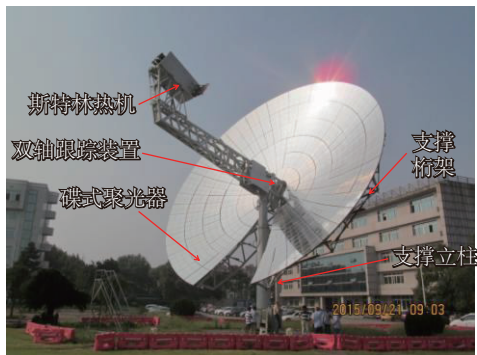


图1 38 kW 碟式-斯特林太阳能热发电系统

Fig. 1 38 kW solar dish-Stirling system

38 kW 太阳能发电系统聚光器的抛物曲面采光口半径 $R=8850$ mm, 焦半径 $f=9490$ mm。大型太阳能碟式聚光器在设计时通常会采用较大的经验安全系数,其整体支撑结构依然存在着较大的富余,因此有较大的减重空间。由于高度-方位角视日跟踪需要避免聚光器俯仰运动时聚光器与支撑立柱发生机械干涉,聚光器下方的扇形区域内立柱处需要开出一个 30° 缺角,如图 2 所示。



图2 机架背部图

Fig. 2 Frame back diagram

基于 38 kW 碟式太阳能系统大功率特性及碟式太阳能整机结构的复杂性,将在承载和传力特性一致的基础对其进行简化并建立聚光器拓扑优化模型,本文中选定的单块桁架结构拓扑优化初始区域如图 3 所示。

根据整机的载荷传递分析可知^[2],碟式机架主要承受桁架自身重量,且机架结构在 90° 高度角时(聚光器焦轴指向天空)承载性能不甚影响,因此在本文的研究中假设桁架只承受自身的重量且以 90° 高度角为典型工况对其进行分析研究。湘潭地区常年风压较小,风

载荷较低,大风情况下会停机避险,因此在本文的分析中不考虑风载荷对系统的影响以简化优化模型。结合连续体拓扑优化的经验,考虑到结构自身特殊的 30° 缺角,建立碟式太阳能整体机架结构拓扑优化模型如图 4 所示。

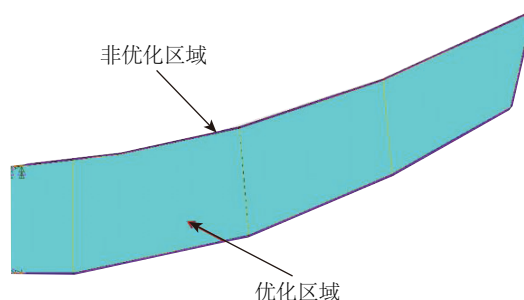


图3 单根桁架拓扑优化初始区域

Fig. 3 Single truss topology optimization initial area

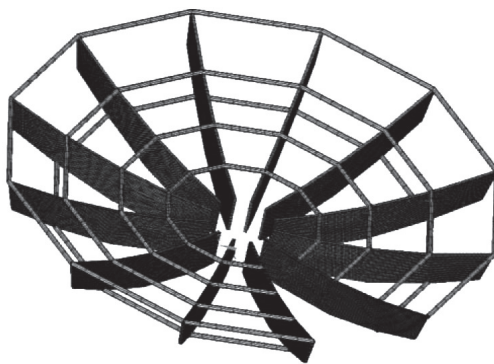


图4 碟式聚光器拓扑优化模型

Fig. 4 Topology optimization model of dish concentrator

2 理论与方法

聚光器桁架结构多层次结构优化流程如图 5 所示。首先,确定优化区域和优化参数,对结构进行有限元分析和结构拓扑优化设计,得到初步的拓扑优化构型和最大位移等参数;然后,基于桁架特征线提取后处理模型和节点二次优化模型对桁架结构进行形状优化,得到桁架的特征线总体布局;最后,对其进行截面尺寸二次优化,得到面向工程实际制造优良的拓扑优化构型。聚光器桁架结构拓扑优化是基于连续体拓扑优化 ESO 理论,将结构离散为有限元单元,引入优化条件去改变微观单元的密度(0 或 1),通过将无效或低效的材料逐步的删除,即本文中刚度灵敏度较低的材料单元,从而使结构逐渐趋于最优的拓扑构型。

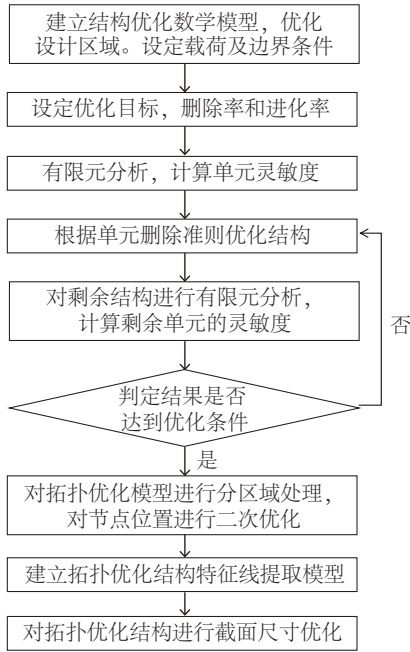


图5 桁架结构的多层次优化流程图

Fig. 5 Hierarchy optimization flow chart of truss structure

2.1 拓扑优化模型及刚度灵敏度

拓扑优化是在给定载荷和边界约束的条件下,以桁架结构的总体积作为优化目标函数,材料单元密度作为设计变量,结构的整体刚度作为优化的约束条件对结构进行优化,数学模型可描述为:

$$\begin{cases} \text{find} & x \in E^n \\ \text{min} & V(x) \\ \text{s.t.} & k(x) - k^* \leq 0 \\ & 0 \leq x_i \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $V(x)$ ——结构的总体积, m^3 ; k^* ——结构整体刚度要求; N/mm , x_i ——第 i 个单元密度, kg/m^3 ; 此单元密度在 ESO 算法中代表着微观结构中单元的存在或删除,即通常所说的(0 或 1)状态。

ESO 方法是通过删除结构中刚度灵敏度较低的单元,保证在轻量化的同时最终优化出来的结构刚度最大化,实现对原有桁架结构的优化,其结构整体刚度矩阵方程表达为:

$$[K][u] = [F] \quad (2)$$

式中, $[K]$ ——整体刚度矩阵; $[u]$ ——结构总位移量矩阵; $[F]$ ——节点外载荷总向量。而一般情况下外载荷与设计变量无关,因此对设计变量求偏导数为:

$$\frac{\partial K}{\partial x_i} u + K \frac{\partial u}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

式中, x_i ——第 i 号设计变量。因此可得到位移对设计

变量的偏导数为:

$$\frac{\partial u}{\partial x_i} = -K^{-1} \frac{\partial K}{\partial x_i} u \quad (4)$$

ESO 算法将连续化的结构拓扑变量过滤为了离散的 0-1 变量,于是考虑从一个由 n 个单元组成的结构移除第 i 个单元,此时整体结构的平衡方程为:

$$([K] + [\Delta K])([u] + [\Delta u]) = [F] + [\Delta F] \quad (5)$$

式中, $[\Delta u]$ ——第 i 个单元移除后产生的节点位移向量; $[\Delta F]$ ——第 i 个单元移除后产生的载荷向量。考虑到一般情况下移除单元不会对载荷向量产生影响,同时移除略去二次高阶项 $[\Delta F][\Delta K]$,式(5)可变为:

$$[\Delta u] = -[K]^{-1}[\Delta K][u] \quad (6)$$

代入结构的单元应变能:

$$C = [F]^T [u] / 2 \quad (7)$$

由于刚度矩阵 $[K]$ 为对阵矩阵,可以得到单元的刚度灵敏度为:

$$\Delta C = -[F]^T [K]^{-1}[\Delta K][u] / 2 = [u]^T [K][u] / 2 \quad (8)$$

2.2 棋盘格问题的消除

棋盘格效应是连续体拓扑优化设计中的一种常见数值不稳定现象^[18],渐进结构优化法中微观单元密度只有离散的 0 和 1 这 2 种状态,因此会导致实体材料和空洞材料的交替出现,使其结构表现为一种棋盘状的构型,如图 6 所示。可以看出,棋盘格现象的出现严重影响了拓扑结构的加工制造性能。因此,为了得到结构清晰且符合加工制造要求的拓扑优化构型就必须消除棋盘格效应。

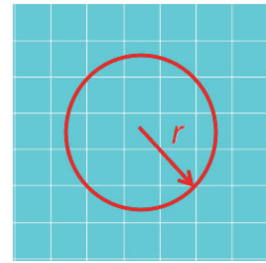


图6 删除率为15%时的桁架结构
(出现棋盘格现象)

Fig. 6 Optimization result when deletion rate is 15%
(checkerboard phenomenon)

单元灵敏度过滤技术^[19]可有效抑制棋盘格的出现,本文中以单元中心过滤半径范围内的各单元灵敏度的加权平均值来代替该单元的灵敏度,如图 7 所示,通过建立名义单元应变能来消除棋盘格效应,通过对单元灵敏度的重新分配对结构进行重新优化,构造的

函数如下:

$$a_{ij} = \sum_{i=1}^M w_i a_i \quad (9)$$

$$w_i = \begin{cases} 1, & r_{ij} = 0 \\ \frac{1}{r_{ij}}, & r_{ij} \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, a_{ij} ——单元 i 的名义应变能, J; a_i ——单元 i 的应变能, J; M ——与节点 j 相连单元的总数; r_{ij} ——节点 j 和单元 i (与节点 j 相连的单元) 中心之间的距离, mm; w_i ——单元 i 的应变能所占的权重, %。

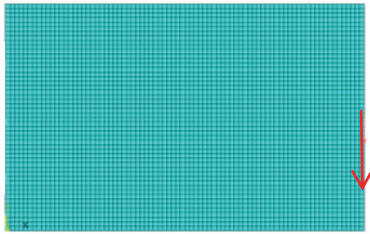


图7 单元过滤示意图

Fig. 7 Unit filter diagram

2.3 桁架结构的特征线提取方法

为了使桁架结构拓扑优化结果能面向工程制造, 关键是获取桁架拓扑优化结果的特征线(中心线或截面特征线), 而后应用此特征线进行桁架杆件的截面优化, 进而可以实现桁架结构的可制造性拓扑优化。

桁架结构特征线提取方法是在 ESO 连续体拓扑优化结果的基础上, 基于桁架结构的直杆形状及总体布局特征对拓扑区域进行分区, 建立各区域的中心线提取模型。根据区域中心点进行一元线性回归即可得到最为逼近的桁架杆件线性方程, 通过线性方程即可确定桁架拓扑结构的中心线和各区域的相交节点。而后以各杆件偏离特征线的角度最小值作为优化目标, 建立杆件两两之间的连接节点位置二次优化模型。使优化前后特征线位置偏离程度(偏转角)最小, 根据最优节点位置拟合便可以得到最终拓扑优化桁架结构特征线模型, 其节点二次优化的数学模型为:

$$\begin{cases} \text{find } X = (X_1, X_2)^T \\ \text{Min } \Delta\theta = \sum_{i=1}^n |\Delta\theta_i(X_1, X_2)| \\ \text{s.t. } 0 \leq X_1, 0 \leq X_2, 0 \leq d_{\min} \leq d_i \leq d_{\max} \leq R_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, X_1 ——优化后交点的 x 坐标; X_2 ——优化后交点的 y 坐标; $\Delta\theta$ ——优化后中心线与优化前中心线总偏转角, ($^\circ$); $\Delta\theta_i$ ——中心线与优化前中心线偏转角, ($^\circ$); d_i ——优化后交点与优化前各交点的距离, mm。

2.4 桁架截面尺寸优化

桁架截面尺寸优化是以位移和应力作为约束条件, 以结构重量为目标函数, 以各杆的截面积作为设计变量, 通过迭代求解^[20], 收敛判定, 最终实现桁架截面尺寸的优化, 截面积尺寸优化问题为:

$$\begin{cases} \text{find } x \in E^n \\ \text{min } W(x) = \sum_{i=1}^n \rho_i L_i A(x_i) \\ \text{s.t. } 0 \leq u_i \leq u^* \\ 0 \leq \sigma_i \leq \sigma^* \\ 0 \leq x_i \leq x_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $W(x)$ ——结构质量, kg; ρ_i ——桁架杆单元的材料密度, kg/m³; L_i ——杆单元的长度, mm; $A(x_i)$ ——截面面积, mm²; u_i ——杆件位移, mm; σ_i ——杆件的许用应力, Pa; x_i ——截面尺寸控制变量, mm。

3 方法验证

在 ANSYS14.0 中对该方法进行验证, 图 8 所示为一典型悬臂梁 ESO 优化的初始设计区域^[21], 初始设计区域的尺寸为 80 mm×50 mm, 板厚 $t=0.1$ mm, 泊松比 $\nu=0.3$, 材料密度 $\rho=1$, 弹性模量 $E=2.0 \times 10^5$ Pa, 左端施加约束, 在悬臂梁右边自由端中心施加一个竖直向下的力 $F=10000$ N, 结构有限元分析网格划分为 80×50 的正方形单元, 取单元进化率为 0.1%, 删除率为 15%, 其优化后结果如图 6 所示, 其中白色区域为材料已被删除区域。

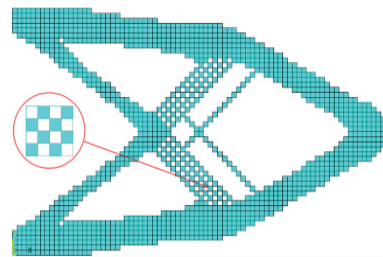


图8 悬臂梁结构设计区域

Fig. 8 Design area of cantilever beam

使用上述棋盘格消除方法进行拓扑优化, 结构有限元网格同样划分为 80×50 的正方形单元, 单元进化率为 0.1%。过滤半径 $r=1.5$ mm, 当删除率为 15% 和 20% 时的拓扑优化结构如图 9a 与图 9b 所示, 可看出优化结果与如 8 相比不存在棋盘格现象和细枝结构, 具有很好的制造加工性能, 同时验证了该棋盘格消除方法的有效性。

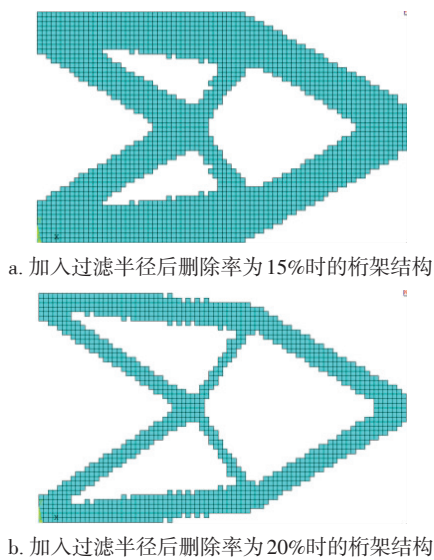


图9 悬臂梁拓扑优化结果

Fig. 9 Optimization result of cantilever beam

对优化结果进行特征线提取后建立的模型如图 10 所示,可看出,该提取结果可有效指导实际生产加工。

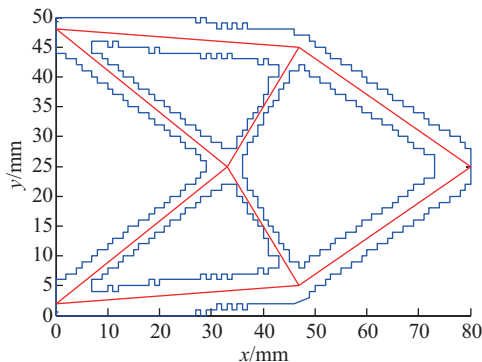


图10 悬臂梁拓扑优化结果特征线提取

Fig. 10 Feature line extraction result of optimization result

4 碟式聚光器优化

以典型的 38 kW 碟式聚光器结构为例进行拓扑优化研究,取 90°高度角典型工况来分析机架的受力变形。碟式机架结构既有一般空间桁架的特点,又有其作为聚光器本身的特殊性。具体表现为桁架上表面安装有聚光器反射镜面^[22],同时为了满足生产制造需求,桁架的下端也需要保持特定的形状,因此在拓扑优化过程中对碟式太阳能的桁架结构设定了非优化区域如图 3 所示,即在拓扑优化的过程中会一直保持其桁架上下表面原有的形状,以满足生产加工实际需求。

4.1 拓扑优化结果

在 90°高度角的典型工况下,对太阳能碟式整体桁

架结构进行拓扑优化设计。根据 38 kW 太阳能碟式系统设计实际,在 ANSYS14.0 中进行仿真分析,取弹性模量 $E=2.0 \times 10^{11}$ Pa,泊松比 $\nu=0.3$,密度 $\rho_c=7850$ kg/m³,拓扑单元大小为 20 mm×20 mm,板厚为 100 mm,桁架板件被考虑成二维板件,采用 PLANE42 单元,连接面板采用 SHELL163 壳单元,整个结构被划分成了 64220 个单元和 66617 个节点。对整体施加自重载荷,结构的约束施加在桁架中心顶端部位,单块桁架约束及加载如图 3 所示,考虑到碟式太阳能桁架结构的圆周对称性,同时对整体 12 根桁架梁施加相同的载荷和中心支撑立柱约束。

基于渐进优化法刚度约束对上述模型进行拓扑优化,设定优化的删除率为 0.15,进化率为 0.001,经拓扑优化得到结果如图 11a 所示,结构中最大变形为 3.99 mm。38 kW 太阳能碟式机架结构有限元分析结果如图 11b 所示,结构中最大变形为 1.88 mm,可看出两者之间的变形无太大差异。目前的优化结果只是简单的拓扑分布构型,因此,还需进一步优化使其满足实际工程制造的要求。

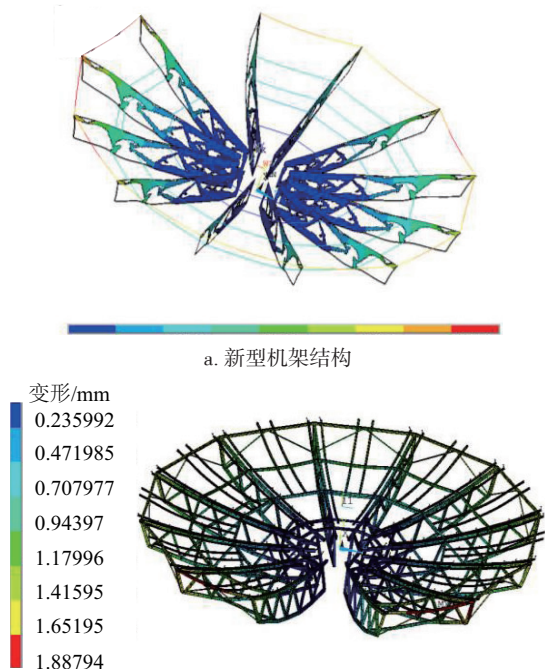


图11 机架有限元分析

Fig. 11 Finite element analysis of frame structure

4.2 桁架特征线的提取

基于上述拓扑优化结果,考虑到太阳能碟式桁架结构的圆周对称性,取单块新型桁架区域进行特征线提取。考虑到桁架的上表面安装有聚光反射镜面,在

结合工艺要求和设计经验的基础上,在桁架末端拓扑优化区域中增添中心梁以增强其稳定性,保证其桁架末端形变不会过大。对上述优化结果进行桁架特征线提取和节点位置二次优化后建立的新桁架模型如图 12 所示。由于仅确定了桁架结构的空布置形式,还需对结构进行进一步的截面尺寸优化。

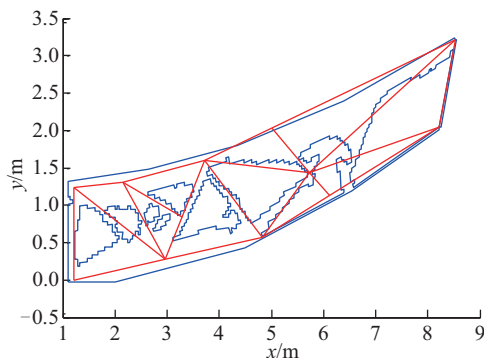


图 12 新型桁架结构特征线提取

Fig. 12 Feature line extraction result of new truss structure

4.3 单块桁架截面尺寸优化与对比

38 kW 太阳能碟式单块桁架结构在 ANSYS14.0 中的静力学有限元分析如图 13 所示,从图中可知结构中最大变形为 0.758 mm。

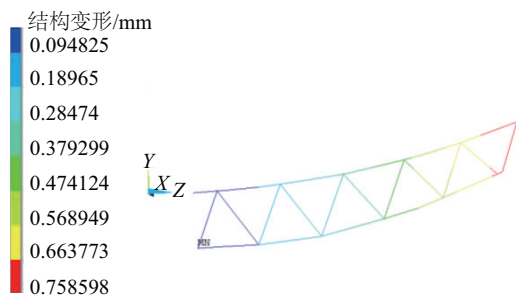


图 13 原有桁架结构有限元分析

Fig. 13 Finite element analysis of primary truss

新型桁架结构采用槽型钢作为主要的结构形式,其设计初始尺寸如图 14a 所示,高度 B 为 200 mm,长度 W 为 200 mm,厚度 H 为 10 mm。在有限元分析中桁架单元采用 BEAM188,泊松比 $\nu=0.3$,材料密度 $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=2.0 \times 10^{11} \text{ Pa}$,左端定在中心圆柱上,对其施加约束和桁架自重载荷。基于工程实际要求,以桁架的截面尺寸长度和厚度作为设计变量,以位移和应力作为状态变量,以桁架的体积作为目标函数。以原有单块桁架结构中最大变形 0.758 mm 作为单块新型桁架位移约束,截面尺寸的优化迭代结果如图 14b 所示,根据优化结果将截面长度 W 取为 90 mm,高度 B 取为 65 mm,厚度 H 取为 4 mm。

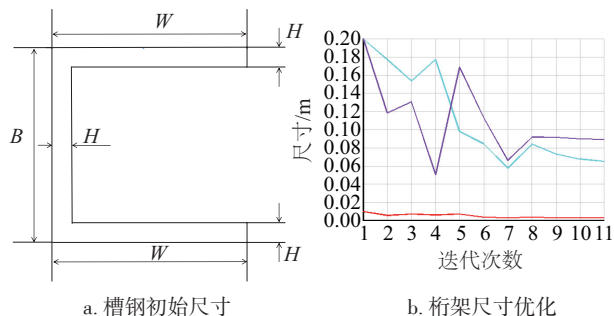


图 14 截面尺寸优化

Fig. 14 Section size optimization

在 ANSYS14.0 中对优化后单块新型桁架结构进行静力学有限元分析验证如图 15 所示。可看出,在自重载荷下,单块新型桁架结构产生的最大变形为 0.758 mm,和原有单块桁架结构相同。

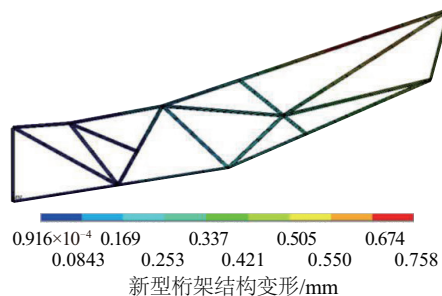


图 15 新型桁架结构有限元分析

Fig. 15 Finite element analysis of new truss

图 15 中单块新型桁架结构质量为 286.9 kg,图 13 中原有单块桁架结构质量为 416.5 kg,对比可看出,在结构最大变形相同时,单块新型桁架结构与原有单块桁架结构相比质量减轻了 34.4%,结果证明了该优选的设计方案能够提高材料的利用率、优化整体布局、降低重量,达到生产制造轻量化要求。同时说明该拓扑优化设计流程能够适用于聚光器桁架结构,可实现桁架结构的轻量化生产。

4 结 论

1) 针对碟式太阳能聚光器轻量化生产的要求,建立桁架结构多层次优化设计方法和流程,以典型 38 kW 太阳能碟式机架结构为例,对其进行结构拓扑优化,特征线提取和截面尺寸优化,得到最终面向工程制造的新型轻量化机架结构;

2) 有限元分析结果表明,在自重载荷下新型结构拓扑优化构型与原有整体结构中最大变形分别为 3.99 mm 和 1.88 mm,无太大差异,拓扑优化结构为后续桁架截面优化提供了基础;

3)有限元分析结果表明,自重载荷下单块新型桁架结构与原有单块桁架结构中最大变形同为 0.758 mm, 结构质量减轻了 34.4%。

[参考文献]

- [1] 纪军, 何雅玲. 太阳能热发电系统基础理论与关键技术战略研究[J]. 中国科学基金, 2009(6): 331-336.
JI J, HE Y L. Strategic research on basic theory and key technology of solar thermal power generation system[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2009(6): 331-336.
- [2] 颜健, 彭佑多, 易陈斐. 碟式太阳能光热发电系统机架结构风振响应的时域分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 177-185.
YAN J, PENG Y D, YI C F. Time-domain analysis for wind-induced response of a dish solarthermal power generation system's frame structure[J]. Journal of vibration and shock, 2016, 35(7): 177-185.
- [3] YAN J, PENG Y D, CHENG Z R, et al. Design and implementation of a 38 kW dish-Stirling concentrated solar power system[J]. IOP Conference series: earth and environmental science, 2017, 93: 012052.
- [4] 颜健, 彭佑多, 龙东平, 等. 大型碟式太阳能钢构机架平均风荷载及绕流特性研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(24): 45-53.
YAN J, PENG Y D, LONG D P, et al. Average wind load and flow around characteristics of steel frame of a large solar energy dish[J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(24): 45-53.
- [5] 颜健, 彭佑多, 余佳焕, 等. 碟式太阳能光热系统光机-热多场耦合建模及其聚光性能预测应用[J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 138-151.
YAN J, PENG Y D, YU J H, et al. Research on thermal-structural-optical multi-field coupling modeling and concentrating performance predication of solar dish system[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2015, 51(14): 138-151.
- [6] 颜健, 彭佑多, 程自然, 等. 碟式聚光器镜面单元聚焦光斑与位姿误差的关联特性[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 241-253.
YAN J, PENG Y D, CHENG Z R, et al. Correlative characteristics between focal spot of solar dish concentrator mirror unit and posture error[J]. Acta optica sinica, 2016, 36(11): 241-253.
- [7] 杜凤丽, 原郭丰, 常春, 等. 太阳能热发电技术产业发展现状与展望[J]. 储能科学与技术, 2013(6): 551-564.
- [8] 谢忆民, 杨晓英, STEVEN G P. 渐进结构优化法的基本理论及应用[J]. 工程力学, 1999, 16(6): 70-81.
XIE Y M, YANG X Y, STEVEN G P. The theory and application of evolutionary structure optimisation method[J]. Engineering mechanics, 1999, 16(6): 70-81.
- [9] XIE Y M, STEVEN G P. Evolutionary structural optimization[M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.
- [10] LIANG Q Q, XIE Y M, STEVEN G P. Topology optimization of strut-and-tie models in reinforced concrete structures using an evolutionary procedure[D]. American Concrete Institute, 2000.
- [11] LIANG Q Q, XIE Y M, STEVEN G P. Optimal topology selection of continuum structures with displacement constraints[J]. Computers & structures, 2000, 77(6): 635-644.
- [12] LIANG Q Q, XIE Y M, STEVEN G P. A performance index for topology and shape optimization of plate bending problems with displacement constraints[J]. Structural and multidisciplinary optimization, 2001, 21(5): 393-399.
- [13] WANG D, ZHANG W H, JIANG J S. Truss shape optimization with multiple displacement constraint[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2002, 191: 3597-3612.
- [14] 黄冀卓. 有支撑钢框架离散型拓扑优化设计[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 43-49.
HUANG J Z. Discrete topology optimization design of steel braced frames[J]. Journal of building structures, 2011, 32(3): 43-49.
- [15] 徐宁, 杨庚, 冷逢春. 太阳能会聚器的优化设计[J]. 能源工程, 2003(1): 1-3.
XU N, YANG G, LENG F C. Optimization of solar concentrator[J]. Energy engineering, 2003(1): 1-3.
- [16] 王林军, 许立晓, 张东, 等. 基于 APDL 的碟式太阳能聚光器网架模态分析与结构优化[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(8): 176-181.
WANG L J, XU L X, ZHANG D, et al. Modal analysis and structure optimization of dish solar concentrator grid based on APDL[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2016, 37(8): 176-181.
- [17] 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..
- KONG X B, CHEN X A, WU G Y, et al. Topological optimization design of trestle structures based on parabolic trough solar concentrator [J]. Modern manufacturing engineering, 2013(2): 121-126..
- [18] BENDSOE M P, SOKOLOWSKI J. Shape sensitivity analysis of optimal compliance functionals[J]. Journal of structural mechanics, 1995, 23(1): 35-58.
- [19] SIGMUND O, PETERSSON J. Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima[J]. Structural and multidisciplinary optimization, 1998, 16(1): 68-75.
- [20] 隋允康, 乔志宏, 叶宝瑞. 桁架结构截面优化满应力设计方法[C]//第十二届全国结构工程学术会议论文集, 2003, 第Ⅲ册.
- SUI Y K, QIAO Z H, YE B R. Optimization of truss structure section based on full stress design method[C]//The 12th National Structure Engineering academic Conference proceedings, 2003, the first Ⅲ copies.
- [21] 王敏捷. 渐进结构优化法的实现及其在泵车轻量化中的应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2011.
- WANG M J. Realization of evolutionary topology optimization and its application on lightweight design of concrete boom pump truck [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2011.
- [22] 颜健, 彭佑多, 程自然, 等. 太阳能聚光器镜面单元的支撑-调节结构和位姿校准[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 262-273.
- YAN J, PENG Y D, CHENG Z R, et al. Solar concentrator mirror unit supporting- adjusting structure and posture alignment[J]. Acta optica sinica, 2017, 37 (5): 262-273.

LIGHTWEIGHT DESIGN OF SOLAR DISH CONCENTRATOR BASED ON EVOLUTIONARY STRUCTURE METHOD

Cheng Ziran, Yan Jian, Peng Youduo

(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment of Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The optimal design method of the truss structure in solar concentrator system is presented by hierarchy optimization strategy. First of all, the topology optimization model of the concentrator frame is established based on the method of evolutionary structure optimization (ESO). Next, according to the topology optimization of the frame structure, a feature line extraction method is presented to transform the topological optimization result into line unit. Then the truss section size is optimized based on the feature line extraction result. Finally, the optimization of the section size of the truss structure in the concentrator is completed. Taking the 38 kW dish-Stirling solar system as an example, a lightweight optimization design has been carried out for the truss structure in the concentrator system. The result shows that the weight of the single new truss is reduced by 34.4% when the new truss and the original truss has the same maximum deformation. This optimization strategy could provides fundamental for the lightweight design of truss structure.

Keywords: solar energy; dish concentrator; topology optimization; truss structure; evolutionary structure optimization (ESO)