

槽式太阳能聚光器支架结构的拓扑优化设计

摘要

聚光器组由反射镜、支架结构、跟踪驱动系统等部分组成，其中聚光器支架结构是整个太阳能热发电系统的主要承载部件，它起到连接、支撑各部件的作用，同时也承受着传给它的各种力与力矩，必须有足够的强度和刚度以保证结构的可靠性和寿命。此外，支架的重量要尽量减轻，以减轻整体的重量，从而降低成本。鉴于此，本文在聚光器的支架结构设计过程中引入拓扑优化设计，以便设计出合理的支架结构，主要取得了如下研究成果和结论：

首先，介绍了几种典型的聚光器支架结构，分析各自的结构特点，并选择其中一种作为本文研究的基础模型，然后对这个结构进行了静态分析，其结果作为优化后的性能对比做准备。

其次，利用HyperWorks的优化模块，以结构的柔度最小为目标，优化后的体积为约束，建立了基于变密度法的聚光器支架拓扑优化的数学模型，经过多次拓扑优化计算，得到了一些重要的结论。在此基础上根据可制造化处理原则结合制造工艺要求对优化结果进行了可制造化处理，并得到了一个新的支架结构。

最后，对可制造化处理后的新结构进行了有限元分析，其强度和刚度都得到了提高，随后对支架的截面尺寸又进行了优化，取得了较好的轻量化效果，从而进一步说明了拓扑优化设计的准确性、可靠性及现实意义。

本文的研究成果不仅可以为企业的产品设计、优化和改造提供实际的参考和指导，解决企业的实际问题，更重要的是说明了如何利用拓扑优化方法对典型的聚光器支架进行轻量化设计，同时对其他产品轻量化设计提供了有价值的参考，具有良好的经济价值和社会效益。

关键词：槽式太阳能，聚光器，拓扑优化，有限元分析

一、结构优化设计的发展及现状

现代设计方法是随着计算机的广泛使用而发展起来的一门新学科。在工程设计中，使设计效果达到最佳，或使设计最优化是设计师一直追求的目标。目前优化方法在很多领域都得到了广泛的应用，例如航空、国防、机械、建筑、电子、交通、冶金、石油、造船、化工及管理设计领域，而且也取得了比较显著的经济、技术效果。从数学上将，所谓优化常指函数的极大值或极小值，对于结构优化而言，是指在满足约束条件情况下，按一定的评价指标寻求最佳的设计方案，评价指标可以是结构的重量、造价等。

二、聚光器支架结构优化方案的确定

以图3.2(c)为基础模型进行研究，反射镜的抛物线

$$z = \frac{x^2}{4f}$$

方程为

开口距离为2.5m，焦距为0.85m，每个聚光器单元长度为4.3m，共6片聚光镜。每组镜子由6块镜子通过连接支架连接到扭矩管上，连接到采用弧形板，其截面尺寸为30mm*30mm*3mm，扭矩管直径为133mm，实体模型如图3.3所示。



1、总体优化方案的确定

制定总体优化方案之前，首先要确定优化方法。优化方法有尺寸优化、形状优化和拓扑优化三大类。拓扑优化具有尺寸优化和形状优化所不具有的特性，应用于轻量化方面的优化潜力远大于尺寸优化和形状优化，所以本文选定拓扑优化方法来对聚光器结构进行轻量化设计。

在选定了优化方法之后，就要确定优化设计的研究对象，进而建立拓扑优化模型，但在建立拓扑优化模型前需要先确定镜子和支架的连接位置，镜子支撑位置不同，结构的受力分布就不同，对优化结果会产生重要的影响，为了使优化结果可靠，需要先优化镜子支点的位置。拓扑优化模型建立后，通过拓扑优化设计得到拓扑优化结果，然后需要根据一定的原则对优化结果进行可制造化处理，随后再进行尺寸优化，从而得到新的支架结构，并分析优化前后结构的刚度、强度，评价其优化结果的优劣。

2、拓扑优化数学模型的建立

本文选用变密度法进行拓扑优化设计，优化空间个单元的相对密度为设计变量，优化后的体积作为约束条件，且要求体积分数小于0.3（体积分数=（当前迭代的总体积-非设计域体积）/初始设计体积）。为了使聚光器支架具有较大的刚度（即反射镜变形较小），选择聚光器结构的柔度为目标函数，优化目标为支架的柔度最小，即支架的刚度最大，则聚光器支架结构拓扑优化的数学模型为：

$$\begin{array}{ll} \text{求} & X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}^T \\ \text{min:} & C = F^T U \\ \text{s.t:} & \begin{cases} V_1/V_0 \leq k \\ 0 \leq X_i \leq 1 \\ F = KU \end{cases} \end{array}$$

其中， X_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为设计变量（这里为每个微单元的相对密度）； C 为结构的柔度； F 为载荷矢量； U 为位移矢量； K 为剩余材料的百分比； V_1 为优化后剩余材料的总体积； V_0 为设计区域的体积； K 为刚度矩阵。

1、聚光器的风载荷分析及优化工况的选择

3.1 本文为了真实反映聚光器所受到的风载荷情况，通过计算流体力学理论建立计算模型，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风载荷值通过有限元软件施加到聚光器的相应位置，从而可以模拟相对准确的计算模型。

3.2 首先要对基础模型图3.3进行有限元建模，本文中聚光器支架主要采用两种材料，反射镜的材料为LISG,其他的都定义为钢材，主要是Q235钢，由于进行优化时材料基本为弹性变形，所以只需要在软件中定义材料的弹性模量、泊松比和密度即可。

2、聚光器支架结构三维拓扑优化

4.1 有限元网格的划分

划分网格时如何确定单元的大小尺寸相当重要。一般的原则是：在满足网格质量和计算精度的情况下，尽量选用较大尺寸的单元，从而减少单元数目，降低计算规模，提高计算速度。单元的形狀对网格质量和计算精度也有较大的影响，对板壳单元来说，矩形单元的计算精度较高但它的适应性不好，在一些细微的脚骨方面如果用矩形单元质量就很难保证，而三角形单元虽然计算精度不如矩形单元，但三角形单元的适应性好，一般复杂的结构都是采用矩形单元和三角形单元结合来进行网格划分。

4.2 载荷的处理及优化参数的设置

在本文中，目标函数为一个单值目标函数，要求结构的柔顺度最小，约束条件为体积百分比小于0.3.还需要设置优化迭代中止的条件，也就是设置目标容差，迭代过程中只要连续两次计算的优化目标值相差的绝对值不超过目标容差时即可中止迭代。

4.3 拓扑优化计算机结果分析

在HyperMesh中设置好拓扑优化参数之后，需要提交到Optistruct模块中才能进行拓扑优化计算。拓扑优化结束后，首先要分析拓扑优化结果，如果拓扑优化结果是合理的，就要对拓扑优化结果进行可制造化处理。如果拓扑优化结果

不合理，就需要重新确定优化区域改变优化参数进一步优化。

三、结论

首先建立了拓扑优化的数学模型，确定设计变量，约束条件和目标函数。然后对聚光器的优化空间进行了集合模型，其中包括反射镜支点位置的优化和设计空间。接着又讨论了聚光器的载荷（风载荷），通过对基础模型的有限元分析，确定了聚光器所处的最不利位置，并把此位置作为优化工况。最后重点对模型进行了三维拓扑优化，主要包括：有限元网格的划分，载荷的处理及优化参数的设置，拓扑优化计算机结果的分析讨论。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/99165.html>