基于 ANSYS 的智能温室雾化装备悬臂支架的结构优化

潍坊科技学院 苏建民 翟彦春

为了在保证智能温室雾化装备悬臂支架的整体刚度的基础上实现结构的轻量化，利用 ANSYS 建立了支架的有限元分析模型，首先对悬臂支架模态分析，提取了前六阶的结构固有频率及振型图；其次，根据悬臂支架的实际工作情况，对支架进行特性的分析，并获取最差的工况位置，其次根据分析结果对其进行形状拓扑优化、设计变量尺寸敏感度分析、MOGA 多目标多尺寸的优化设计。然后对优化后的智能温室雾化装备悬臂支架进行了实际温室条件工况下的动静态特性分析，分析结果表明优化后的智能温室悬臂支架在保持原有特性的基础上，其质量优化到原来的 86%。

一．引言

悬臂支架是作为温室大棚中雾化装备和温室钢结构支撑部分的关键部件，其静动态特性直接影响雾化装备和温室钢结构的稳定性和抗振性以及精度。在雾化装备工作使用过程中，雾化装备负重左右移动，雾化装备悬臂梁结构，这时喷雾装置形成一个悬臂结构刚度较差。因此，对雾化装备悬臂支架进行实际温室内工况的静动态特性分析及多目标优化设计具有非常重要的实际意义和工程意义。本文利用 NX8.5 建立了雾化装备悬臂支架的有限元三维实体模型，以承受最大载荷时作为载荷边界条件，根据实际情况同时为雾化装备悬臂支架添加约束边界条件，对其进行静动态特性有限元分析、敏感参数相应面分析和多目标多尺寸的优化设计。

二、优化设计

优化设计的基本原理就是利用数学工具，将实际的工程问题转化成数学方程，利用优化设计理论进行反复求解，最终寻找到一种最优的设计方案。以原始设计方案为作为迭代计算的初始条件，迭代计算的结束条件是设定条件超过限定范围。优化设计的数学模型可表示为如下形式。

目标函数： $f=f(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n)$

设计变量限制范围：$\min(x_i)<x_i<\max(x_i)(i=1,2,\ ,N)$

约束条件：$\min(g_j)<g_j<\max(g_j)(j=1,2,\cdots\cdots,M)$

1．雾化装备悬臂支架三维实体模型

雾化装备主要由水箱、电机、喷头、雾化器、支架等部件组成。在工作使用过程中，雾化装置沿轨道运行，悬臂支架是关键的支撑和连接部件，悬臂支架结构能够在减轻重量的同时抵抗大力作用下产生的变形。

为了保证有限元分析结果的准确性、可靠性，同时提高分析的效率，对悬臂支架部件进行形状简化，去掉所有的小倒角、圆角等特征。悬臂支架其材料为 45 号钢，弹性模量：210000Gpa，密度：7850kg/m^3。

2．网格划分

划分网格是建立有限元模型的一个重要环节，它要求考虑的问题较多，需要的工作量较大，所划分的网格形式对计算精度和计算规模将产生直接影响。因此要对悬臂支架在计算数据变化梯度较大的部位（如应力集中处），为了较好地

反映数据变化规律，需要采用比较密集的网格，而在计算数据变化梯度较小的部位，为减小模型规模，则应划分相对稀疏的网格。以保证计算结果的准确性。悬臂支架网格划分单元数为 15270，节点数为 72560。

3. 边界条件

利用 ANSYS Workbench 有限元方法进行静动态特性分析，最重要的是确定约束边界条件和载荷边界条件。悬臂支架安装在雾化装置与支出部分的支撑部分，图 1 上两个圆孔进行 fixed support 约束，上表面施加 5MPa 压力。

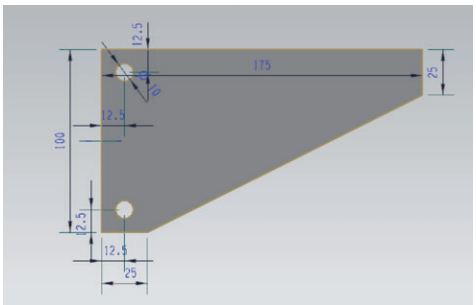

图 1 悬臂支架实体模型

4. 悬臂支架静力学分析

悬臂支架静力分析是在不变载荷持久作用下计算悬臂支架的位移、应变、应力，它不考虑阻尼和惯性因素的影响，所以静力学分析为悬臂支架静力分析是在固定不变载荷作用下计算悬臂支架的位移、应力，为悬臂支架拓扑结构优化提供非常重要的参考。施加力后，利用 Ansys 静力学分析模块对悬臂支架进行静学力分析。通过分析我们获得悬臂支架最大位移处位于悬臂支架上端的前部，最大位移为 4.4995×10^{-5}mm。悬臂支架承受来自雾化装置压力，变形主要发生在悬臂支架上端的前部位置，此处刚性偏弱，造成悬臂支架上端的前部位移最大，悬臂支架的最 5.5992×10^{-2}MPa，位于悬臂支架上端的前部位置。

5. 悬臂支架模态分析

对悬臂支架进行模态分析用于确定悬臂支架固有频率和振型等振动特性。模态分析反映了悬臂支架的力学性能，与载荷无关，因此它能更加全面地体现悬臂支架的结构特性，显示其缺点所在，为悬臂支架的优化设计提供理论支持和方向指导。模态分析前处理与静力学分析不相同，且不施加载荷，表 1 为悬臂支架前六阶固有频率，图 2 为前六阶振型图。对悬臂支架进行优化设计，尽量避免因产生共振造成损失。

表 1 悬臂支架前六阶固有频率（HZ）

阶数	1	2	3	4	5	6
频率	420.46	1938.7	2599.6	3084.8	4852.6	6330.3

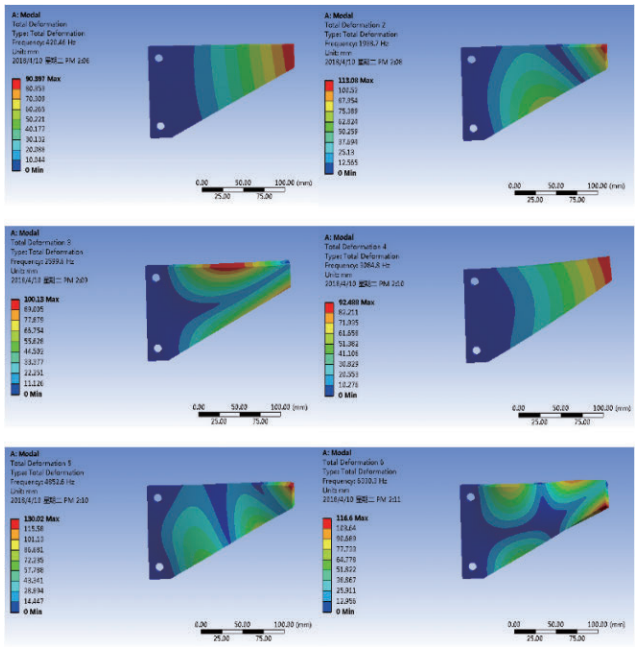

图 2 优化前的悬臂支架前 6 阶固有频率和振型

6. 悬臂支架优化设计及设计参数敏感度分析

针对悬臂支架的薄板结构，选取如图 1 所示的进行拓扑形状优化。通过基本拓扑形状优化，在保证满足最大应力、位移的前提条件下，改变零件的局部形状，对悬臂支架结构进行设计变量尺寸修改，但不会改变悬臂支架整体尺寸，因此符合优化设计的指导思想。另一方面，这些悬臂支架的尺寸是参数化建模获得的，变量尺寸之间相互依赖关系，优化过程中模型随着尺寸的变化相应变化，不会导致原有模型再生失败，因此可以实现悬臂支架形状优化如图 3 所示。

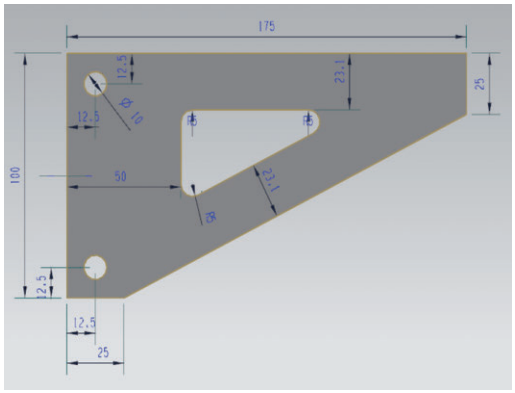

图 3 拓扑形状优化后模型

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

如图 2 所示，模型中包含 14 个特征参数尺寸（除去长度 175、宽度 100），建立相应优化参数太多。在做试验设计方案时导致候选点过多、计算量庞大，所以我们需要通过合理的参数敏感度筛选分析，进行设计变量参数筛选优化。从而通过相应面优化和实验设计来降低优化设计点数量。通过参数敏感度分析筛选出对相应目标影响较明显参数，剔除对相应目标影响小的参数。我们以质量、位移、应力为目标函数进行设计尺寸参数筛选如图 4 所示。

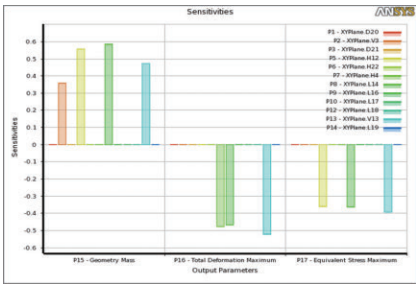

图 4 设计尺寸对质量、位移、应力敏感度影响

MOGA 方法（多目标遗传算法）是基于受控精英主义概念的非支配排序遗传算法 (NSGA−II) 的变体。它支持多个目标和约束条件，旨在寻找全局最优解。基于 MOGA 多目标优化的基本原则，通过利用全局变量控制的方法来确定哪些尺寸对悬臂支架的确定目标函数有较大影响，以便完成全局灵敏度分析。通过多次迭代，4 个尺寸对悬臂支架的质量、变形和应力目标函数影响因子如图 4 所示。

图 4 中参数尺寸的敏感度柱状图为正值，说明当这个尺寸增大时，Mass、Deformation、Tress 目标函数的值会相应的增大。同样的，尺寸的敏感度柱状图为负值，表示当这个尺寸减小时，Mass、Deformation、Tress 目标函数的值会相应的减小。通过迭代 P2、P5、P8、P13 4 个尺寸对悬臂支架的质量影响较大，P7、P8、P13 3 个尺寸对悬臂支架的变形影响较大，P5、P8、P13 3 个尺寸对悬臂支架的应力影响较大。

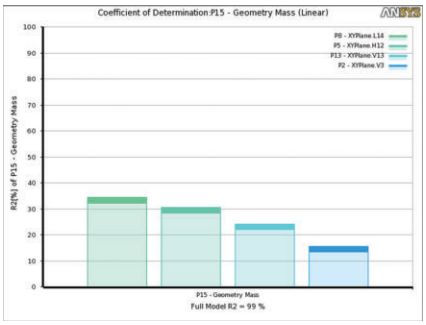

图 5 参数对 Mass 的影响

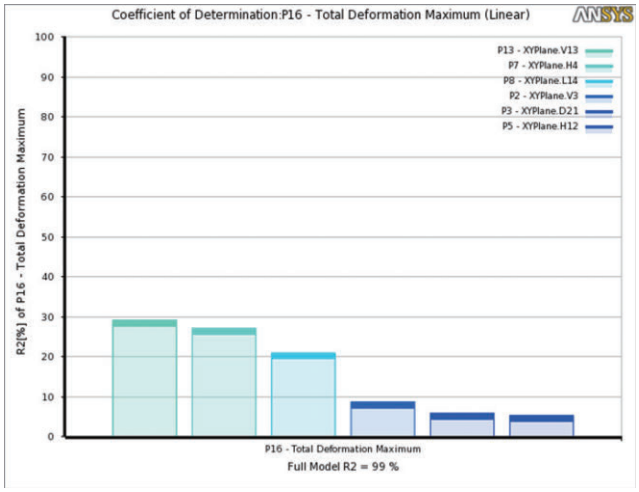

图 6 参数对 Deformation 的影响

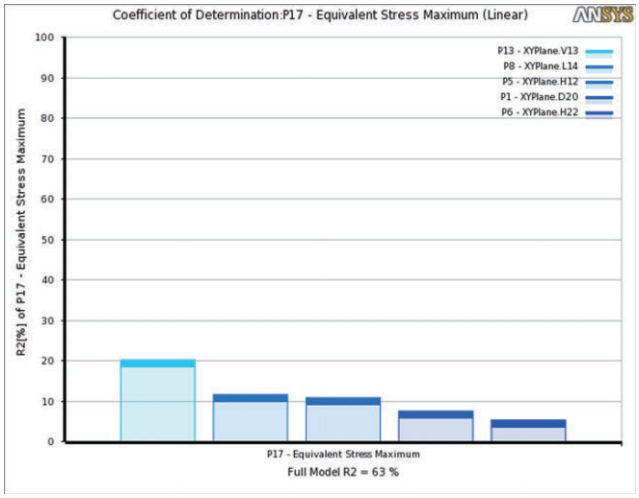

图 7 参数对 Tress 的影响

通过图 4、5、6 Determination Histogram Chart 直方图可以看到输入设计参数（P2、P5、P7、P8、P13）对给定输出参数（Mass、Deformation、Tress）的影响。完整的模型 R2 表示输出参数的可变性，可以用输入参数（P2、P5、P7、P8、P13）和输出参数（Mass、Deformation、Tress）之间的线性（或二次）相关性。这些条的值对应于所选输出相关的每个输入的线性（或二次）确定的影响系数。通过图 4 可以看出完全模型参数可变形性均以达到 15% 以上，其中 P8、P5 对模型 Mass 的影响高达 30% 以上；通过图 5 可以看出完全模型参数 P7、P8、P13 可变形性均以达到 20% 以上，P2、P3、P5 对模型 Deformation 的影响较小在 10% 以下；通过图 6 可以看出完全模型参数 P13 可变形性达到 20% 以上，P1、P5、P6、P8 对模型 Tress 的影响较小在 10% 以下。

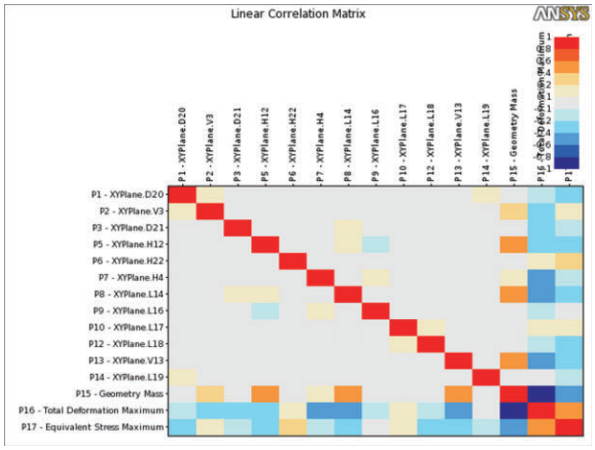

图 8 Determination Matrix- 测定矩阵

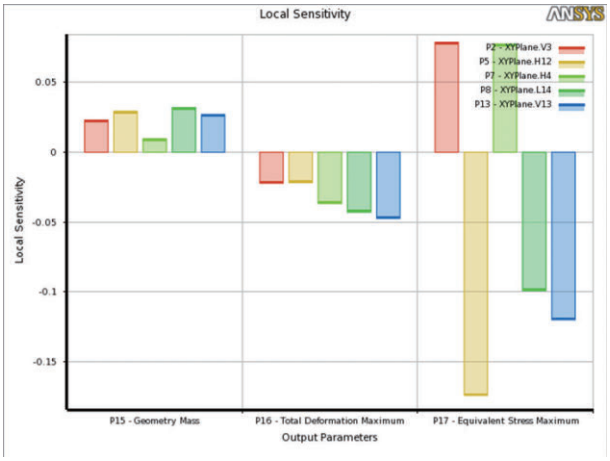

图 9 相应面敏感度

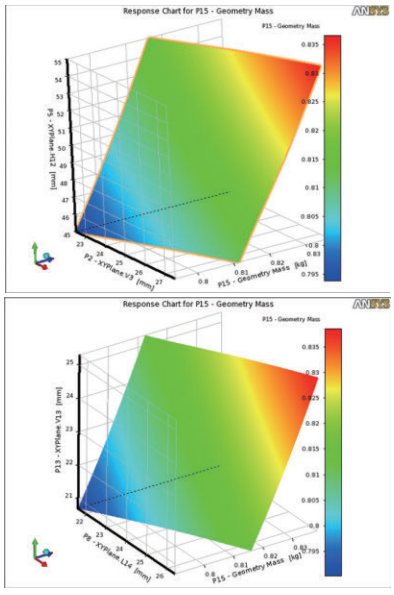

图 10 参数对 Mass 相应面三维模型

基于 Six Sigma 的判定原则，通过图 8、9、10、11、12 测定矩阵、相应面敏感分析，进行一维方差分析、二维方差分析（有或没有重复），部分析因和响应曲面设计分析，得出相应面质量、位移、应力三维模型，进一步确定敏感度设计变量参数，蓝色颜色处为设计最优化位置。通过图 8 相应面敏感度 −Mass 分析我们可以看出 P2、P5、P8、P13 对 Mass 的敏感性影响因子为 0.025 以上；通过图 8 相应面敏感度 −Deformation 分析我们可以看出 P2、P5、P8、P7、P13 对 Deformation 的敏感性影响因子为 0.030 以上；通过图 8 相应面敏感度 −Tress 分析我们可以看出 P2、P5、P7、P8、P13 对 Mass 的敏感性影响因子为 0.10 以上；通过图 10 相应面三维模型 −Mass、图 11 相应面三维模型 −Deformation 我们可以看出三维模型面非常光滑，可以确定我们的敏感参数非常合理。

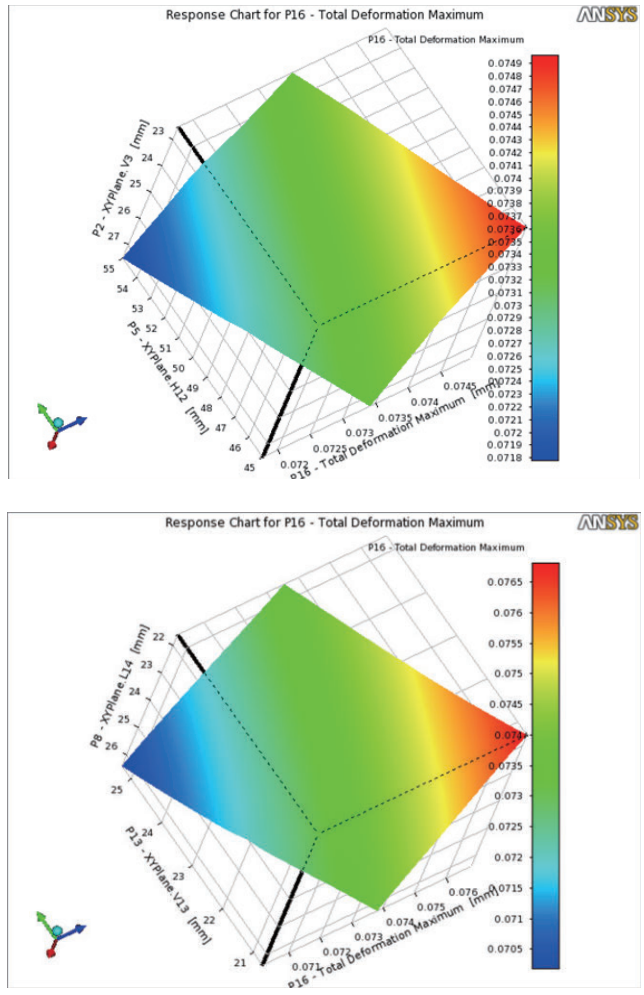

图 11 对 deformation 相应面三维模型

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

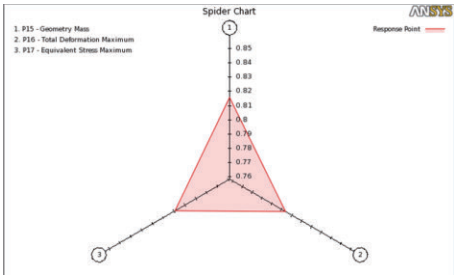

图 12 蛛网图

通过 MOGA 多目标优化的判定原则、Six Sigma 的判定原则、Determination Histogram Chart 直方图、相应面敏感分析等综合分析，因此筛选 P2、P5、P7、P8、P13 这 5 个尺寸对悬臂支架进行优化。

在不影响悬臂支架性能的前提下确定悬臂支架优化 5 个尺寸的变化范围。悬臂支架优化尺寸的初始值和变化范围如表 2 所示。

表 2 悬臂支架优化尺寸的初始值和变化范围

项目	初始值 mm	优化范围 mm
P2	25	10—25
P5	25	12—25
P7	23.1	10—80
P8	23.1	10—40
P13	50	10—50

7. 悬臂支架尺寸优化及结果分析

以减轻悬臂支架重量（Mass）、最大位移（Deformation）、最大应力（Tress）为目标函数对悬臂支架进行尺寸优化。优化后的尺寸 P2 为 22mm，P5 为 22mm，P7 为 21mm，P8 为 20mm 、P13 为 30mm。按照悬臂支架优化后的尺寸导入 NX8.5 对三维模型进行再生，对再生的三维实体模型进行静动态特性有限元分析，分析结果如图 13、图 14 所示。优化前后悬臂支架静动态特性参数对比如表 3、4 所示。

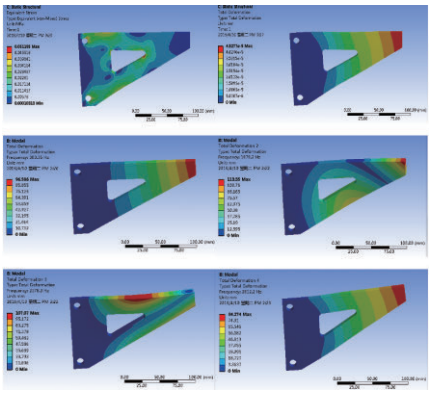

图 13 悬臂支架优化后位移、应力云图

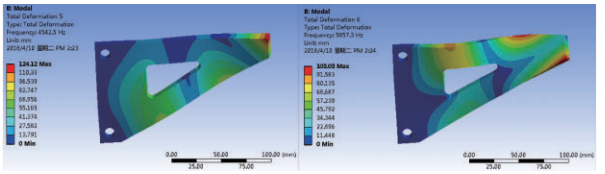

图 14 优化后的悬臂支架前 6 阶固有频率和振型图

悬臂支架最大变形处位于悬臂支架上端的前部，最大变形为 4.5277×10^{-5}mm。悬臂支架承受来自雾化装置压力，变形主要发生在悬臂支架前端位置，此处刚性偏弱，造成悬臂支架右端位移最大。悬臂支架的最大应力为 5.1195×10^{-2}MPa，位于悬臂支架右端位置。

表 3 悬臂支架优化前后固定频率对比（Hz）

阶数	1	2	3	4	5	6
优化前频率	420.46	1938.7	2599.6	3084.8	4852.6	6330.3
优化后频率	383.36	1878.2	2378.3	2812.2	4542.5	5857.3

表 4 悬臂支架优化前后有限元分析结果对比

目标	质量（kg）	最大变形（mm）	一阶固有频率（HZ）	二阶固有频率（HZ）	最大应力（Mpa）
优化前	0.92 kg	4.4995e—005	420.46	1938.7	5.5992e—002
优化后	0.79 kg	4.5277e—005	383.36	1878.2	5.1195e—002
比较	减轻 14%	增加 0.6%	减小 9%	减小 3%	减小 8%

三、结语

（1）通过 MOGA 多目标优化、相应面敏感分析从 14 个设计变量参数中，筛选出了 5 个敏感度较大的设计变量参数。

（2）通过对悬臂支架 5 个关键尺寸的优化设计，减少了悬臂支架的质量，实现了结构的轻量化。

（3）通过结构的静动态特性分析，在保持悬臂支架最大变形变化不大的情况下，降低了悬臂支架的最大应力，降低了悬臂支架固有频率，大幅提高支架的静动态性能，达到了预期效果。