

基于拓扑优化方法的蒙皮加筋结构优化设计研究

强 博

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710069

【摘 要】蒙皮加筋结构是飞机结构设计的典型结构，在飞机结构上广泛应用。本文选取飞机发动机舱侧壁区域蒙皮加筋结构，通过常规设计方案和拓扑优化方案对比对蒙皮加筋结构设计方法进行研究，探寻最优的蒙皮结构优化设计流程和方法。其中拓扑优化方案优化目标为刚度最大化，以优化结果中的材料分布来进行筋条布局优化。后期再对加筋薄板结构进行二级尺寸优化，并综合考虑其制造工艺性，开展工程化设计，以提升结构工艺性、维修性和经济性。

【关键词】蒙皮加筋结构；拓扑优化；布局优化；尺寸优化；工程化设计

1.引言

蒙皮结构在航空航天领域广泛应用，由于其刚度、强度、屈曲、振动等力学性能较差，在实际应用中一般都采用加筋结构的形式，对蒙皮结构进行加筋，可以在不显著增加结构重量的前提下，大幅度提高板的抗弯刚度，改善蒙皮结构力学特性。蒙皮加筋结构具有质量轻、刚度大、材料利用率高等特点，能够合理地提高结构的承载效率，从而达到减轻结构重量的效果。如飞机机翼壁板、发动机舱舱壁、机身舱壁、航天飞机的外部燃料箱等都属于典型的加筋结构。

结构轻量化是飞机设计的永恒追求之一，因此研究蒙皮加筋结构的优化设计方法具有重要意义。采用拓扑优化、几何与尺寸优化等计算机辅助有限元方法进行结构设计，再结合先进的材料和制造工艺技术，可使得飞机结构重量系数从二代飞机 34% 下降到四代飞机 28%。这是现代飞机设计的高性能、轻量化、低成本以及越来越短的研制周期需求情况下的必然趋势。

2.设计难点和研究思路

采用蒙皮加筋结构的优点是结构的总体弯曲刚度大，结构重量特性好。蒙皮加筋结构特点是外表面覆盖着硬质的蒙皮，蒙皮下面布置纵向或纵横向筋条，为了保证加筋板的总体弯曲刚度，在加筋板下布置横向隔板或肋板。蒙皮加筋结构的设计特点是要根据壁板承受的载荷大小，合理分配蒙皮和筋条之间的刚度比例。

蒙皮加筋结构中筋条的布局、尺寸与形状直接影响着结构的重量与性能。如何实现薄壳加筋结构的加筋布局最优化设计、提高材料利用率和结构承载能力一直是航空结构轻量化设计的一个挑战性课题，是本次蒙皮加筋结构优化设计研究中的重点及难点。

本文以飞机发动机舱前部侧壁结构为例，针对蒙皮

加筋结构的特点，采用传统结构加强和拓扑优化两套方案对比的方法对两种不同设计模式进行研究。充分发挥拓扑布局优化和尺寸优化优势，实现结构重量和刚度之间的最佳平衡，探寻最优的蒙皮结构优化设计流程和方法。

3.结构初步分析

选取飞机发动机舱前部侧壁结构，对几何模型建立二维单元网格有限元模型。采用二维壳单元模型，单元尺寸为 $10 \times 10\text{mm}$ ，网格数量为 38513，各零件之间的连接以铆接为主。有限元二维网格模型如图 1 所示。

发动机舱侧壁连接的机翼前缘上下翼面所受的气动力方向不同，在蒙皮与机翼前缘连接处形成的力偶对蒙皮产生剪切效应。在飞行过程中，受发动机振动和气流环境的综合影响，产生交变载荷。强度计算后，最大位移位于前端下部，位移值为 5.054mm ；最大应力位于中部连接处，应力值为 124.38MPa 。

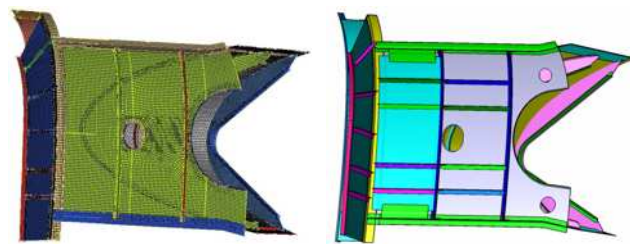


图 1 二维有限元网格模型 图 2 常规结构设计改进后结构

4.结构常规设计方法

4.1.结构优化改进

基于传统设计经验，从两个方向进行设计改进：

(1) 蒙皮厚度从前向后逐步降低，使应力平缓扩散，在前部增加加强板。

(2) 原结构的两个立筋间距过大，增加横向立筋

提高传力连续性。

改进后结构如图 2 所示。蒙皮前部增加等厚度加强板，并增加横向立筋，增加重量 1.742Kg。改进后的结构最大位移为 1.4mm；最大应力为 61.8MPa。

5. 结构拓扑优化设计方法

5.1. 初步设计

一般把拓扑优化、自由尺寸优化、形貌优化称为概念设计优化，用于结构初步设计。拓扑优化是指在满足给定约束的前提下，针对目标函数在给定设计空间寻找最优材料布局的优化方式。选取蒙皮区域作为设计变量，优化目标为刚度最大。拓扑优化结果如图 3 所示。可以看出，靠近前框区域蒙皮材料保留较多，并在前部出现梗状材料聚集。

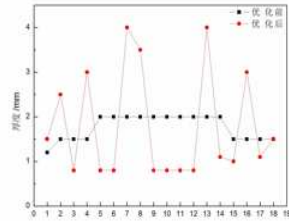
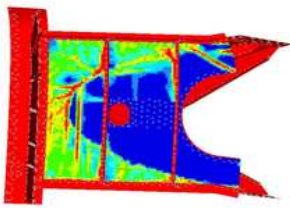


图 3 拓扑优化结果 图 4 优化前后目标厚度对比折线图

5.2. 工程化设计

参考结果中材料聚集进行筋条布置，并简化筋条数量以提升工艺性，确定出布局优化后结构。相比原结构，共增重 1.765Kg。经计算，优化后最大位移为 0.9mm；最大应力为 61MPa。

5.3. 详细设计及强度分析

尺寸优化是将如壳单元厚度、梁截面面积、单元刚度等数字字段作为设计变量。往往在确定这些参数时，已经进入产品设计的中后期，故尺寸优化多用于详细设计阶段的方案改进。

为与原结构、结构常规优化后结构作对比，设计三个尺寸优化方案：

(1) 变形量最小，探究该结构的最大刚度下的最小结构重量；(2) 与常规优化后位移和应力数据一致，对比与常规优化方法的重量差异；(3) 工程化设计后强度约束，研究尺寸优化前后立筋厚度尺寸的变化规律。

5.3.1. 方案

要求变形最小，结构重量最小，优化目标均设为离散设计变量。计算后对结果进行尺寸圆整。优化前后优化目标厚度尺寸对比如图 4 所示。

从优化结果可知，原蒙皮和加强板蒙皮的厚度均有

不同程度的加强，下部连接板的厚度增加一倍。与常规设计改进后增重相比增重 0.533Kg。相比优化前结构增重 2.98Kg。尺寸优化后，最大位移为 0.6mm，变形分布较为均匀，刚度分布好。最大应力降低至 53MPa，整体应力水平降低。

5.3.2. 强度的尺寸优化

要求最大位移不超过 1.4mm，最大应力不超过 61.8MPa。根据优化结果，在与同强度的前提下，加强板蒙皮、连接板、加强筋和连接角片的厚度均降至最低许用初始值。与常规设计改进后增重相比减重 0.972Kg。相比优化前结构，共增重 0.77Kg。

5.3.3. 化结果的尺寸优化

以工程化后强度作为约束，优化目标设为离散设计变量，并对优化后厚度进行尺寸圆整。优化后与常规优化后增重相比减重 0.362Kg。相比优化前结构，共增重 1.38Kg。

6. 方案对比

基于原蒙皮加筋结构，共进行了一种结构常规设计和三种结构拓扑优化设计，其重量、刚度、强度均有不同程度的变化，优化数据如表 1 所示。

表 1 结构优化数据

序号	名称	重量变化 /Kg	最大位移 /mm	最大应力 /MPa
1	原结构	0	5.054	124.38
2	常规设计	1.742	1.4	61.8
3	拓扑优化一	2.98	0.6	53
4	拓扑优化二	0.77	1.4	61.8
5	拓扑优化三	1.38	0.9	61

重量方面，常规设计改进后结构增重 1.742Kg。与之相比，拓扑优化二方案在与常规设计等强度、等刚度的前提下，在原结构基础上增加的重量为 0.77Kg，重量降低 55.8%。可以看出，拓扑优化方法相比常规设计在减重方面具有更大优势。

刚度控制方面，常规设计改进后结构最大位移为 1.4mm。与之相比，拓扑优化方案一的方案可将最大位移降低之至 0.6mm，刚度提升 57%。刚度提升的代价是重量的增加，拓扑优化一方案重量增加 2.98，在所有优化方案中重量最高。

强度方面，常规设计将最大应力值降低了约一半，

拓扑优化后的应力结果与常规设计相当。这个结果与所采取的拓扑优化方法有关，由于本次采用的是刚度最大的优化目标，优化结果在最大程度上提高了蒙皮加筋结构的稳定性，提升了抵抗屈曲的能力，为排除应力因素对对比研究造成的影响，在最大应力方面未进行控制。

拓扑优化三的结果表明，相对于常规设计，拓扑优化方案在立筋布局方面更加合理，能够消除局部的应力集中，提高稳定性；在立筋厚度分布方面，通过厚度的尺寸优化，使变形更加均匀的传递至结构各处，有利于应力的传递和扩散，结构效率较高。

7. 结构优化总结

本文主要针对飞机发动机短舱前端侧壁区域的蒙皮加筋结构进行了常规设计和拓扑优化设计，并将两种设计方法进行对比研究。重点分析了蒙皮加筋结构拓扑优化设计方案。

结构拓扑优化设计在原结构基础上增加的重量为 0.77Kg，相比结构常规设计重量降低 55.8%；结构拓扑

优化设计可将最大位移降低之至 0.6mm，相比结构常规设计刚度提升 57%。通过常规设计和拓扑优化设计的对比，发现拓扑优化设计在结构减重、结构布局优化、结构尺寸优化方面具有很大优势，可以实现产品结构、强度、刚度、稳定性、重量及工艺等多方面的优化统一。拓扑结构优化技术与科研型号的结合应用，可以有效减少方案迭代及强度校核的次数，极大缩短研制周期，降低研发成本，使设计效率、经济性和产品安全性得到很大提升。

【参考文献】

- [1]张胜兰.基于 HyperWorks 的结构优化设计技术.北京:机械工业出版社,2017:170-276.
- [2]方献军.OptiStruct 及 HyperStudy 优化与工程应用.北京:机械工业出版社,2021:13-20.
- [3]张卫红.薄壁结构的加筋布局优化设计.航空学报第 30 卷第 11 期,2009:2126-2131.