

# 发动机吊挂梁结构优化设计与分析

卢 昊 和欣辉 田仕雄 黎振勃 王 斌

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

**【摘 要】：**随着飞机对经济性和安全性的提高，拓扑优化技术与减重的联系日趋紧密。在此简要论述了拓扑优化技术在航空领域的应用，在两种不同工况下，对现有发动机吊挂梁进行静强度分析，论证了现有结构存在减重空间。在现有的结构基础上，对吊挂梁进行拓扑优化、尺寸优化，结合实际工程经验和需求进行细节建模。对优化后的模型进行强度、变形、屈曲、模态分析，结果表明优化后的发动机吊挂梁结构合理可行，能有效地实现减重。

**【关键词】：**发动机吊挂梁；拓扑优化；尺寸优化；结构优化

## Optimization Design and Analysis of Engine Suspension Beam Structure

Hao Lu, Xinhui He, Shixiong Tian, Zhenbo Li, Bin Wang

AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co. Ltd. Shaanxi Xi'an 710089

**Abstract:** With the improvement of aircraft economy and safety, the relationship between topology optimization technology and weight reduction is becoming more and more close. This paper briefly discusses the application of topology optimization technology in aviation field. Under two different working conditions, the static strength analysis of the existing engine suspension beam is carried out, and it is proved that the existing structure has weight reduction space. On the basis of the existing structure, the topology optimization and size optimization of the hanging beam are carried out, and the detailed modeling is carried out according to the actual engineering experience and requirements. The strength, deformation, buckling and modal analysis of the optimized model are carried out. The results show that the optimized structure of the engine suspension beam is reasonable and feasible, and can effectively reduce the weight.

**Keywords:** Engine suspension beam; Topology optimization; Size optimization; Structure optimization

### 前言

飞机发动机吊挂梁将航空发动机固定在飞机上，是动力装置中非常重要的组成零件，其结构的形式、强度、重量和安全性是影响飞机性能的重要因素<sup>[1]</sup>。飞机梁类结构的典型形式主要有：组合腹板梁、桁架腹板梁、薄板弯曲成形腹板梁、波纹板腹板梁、整体腹板梁、整体桁架腹板梁<sup>[2]</sup>。

传统的吊挂梁类设计主要依靠设计者的经验进行结构形式的选择和参数的确定，通过多次反复的“设计-分析-再设计”过程，才能得到一个较为满意的方案<sup>[3]</sup>。传统方法缺乏定性分析，精确度难以保证，以耗费巨大的人力、物力、财力来接近获得最优结构设计方案。随着对经济性要求不断提高，在设计飞机结构时，飞机减重成为重要课题。合理的结构设计是飞机减重的主要手段之一<sup>[4]</sup>。

随着现代拓扑优化技术的日趋成熟，依据设计要求进行概念设计，以及对现有结构进行优化设计，在航空领域产生了巨大的经济效益。拓扑优化技术也成为飞机减重的主要方法。2008年，王伟等人将概念设计与细节设计相结合的两级三层优化技术应用于飞机机翼的布局优化设计<sup>[5]</sup>。同年，杨军刚等人将拓扑优化技术引入到飞机发动机吊挂设计中，建立了拓扑优化问题的数学模型，优化迭代求解，得到了最优化模型<sup>[6]</sup>。2013年，Sleesongsom S等人采用部分拓扑优化方法设计飞机变形翼，提出了新颖的设计方法合成变形翼的内部结构布局<sup>[7]</sup>。2014

年，刘文斌将变密度法的拓扑优化技术应用到起落架结构，并对优化后的模型进行分析计算，较大幅度的减轻了结构重量<sup>[8]</sup>。同年，牛东镇等人用概念设计（拓扑优化）和细节设计（尺寸优化）相结合的方法，大大减轻了地板支撑结构的重量，并获得了最佳支撑结构形式<sup>[9]</sup>。利用拓扑优化技术，结合工程实际经验，以减重为目标，对发动机吊挂梁进行优化设计和分析。

## 1 发动机吊挂梁静力学分析

### 1.1 吊挂梁结构分析

发动机吊挂梁结构形式如图1所示，是典型的机加腹板梁整体梁，其理论重量为85.620kg，材料属性见表1。吊挂梁上共设置4个加载点，2个连接位置（螺栓固定连接）。吊挂梁结构在工作时需满足如下设计要求：所承受的应力不超过材料拉伸强度极限，结构不出现总体失稳；吊挂梁X方向最大变形不超过6mm，Y方向最大变形不超过4.5mm，Z方向最大变形不超过3mm。

吊挂梁受力形式复杂，在本次研究中选取垂向和航向2种严重重载工况进行分析与优化计算。

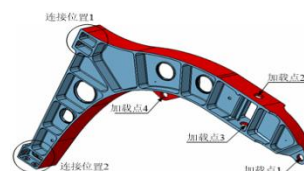


图1 吊挂梁原结构形式

表1 材料属性

| 弹性模量<br>/MPa | 泊松比<br>$\mu$ | 密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 拉伸强度极限<br>/MPa | 屈服强度极限<br>/MPa |
|--------------|--------------|-------------------------|----------------|----------------|
| 196000       | 0.3          | 7.75                    | 1080           | 835            |

## 1.2 静力分析

### 1.2.1 模型简化与网格划分

原始三维模型在面面的交界处有圆角、倒角，在腹板处存在弯边减轻孔、工艺孔，上述局部特征对受力及变形影响不大，但对网格划分及网格质量有较大影响。因此，对三维模型需要进行几何特征的简化与清理，清理后划分网格如图2所示：

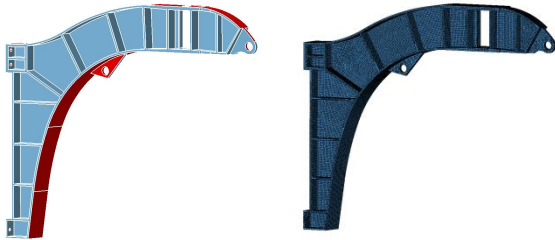


图2 模型简化与网格划分

### 1.2.2 材料属性定义

吊挂梁由 30CrMnSiA 厚板整体机加而成，弹性模量  $E=71600\text{MPa}$ ，泊松比  $\mu=0.3$ ，密度  $7.75\text{g/cm}^3$ ，单元类型 PSOLID。

### 1.2.3 载荷与约束

载荷：按 2 种工况在各加载点上施加载荷。

约束：连接位置 1 和连接位置 2 的 10 个螺栓孔分别约束 6 个自由度。

### 1.2.4 分析

对模型添加材料属性、单元类型，施加载荷和约束后，创建工况，进行静力分析，分析所得结果如图3、图4所示：

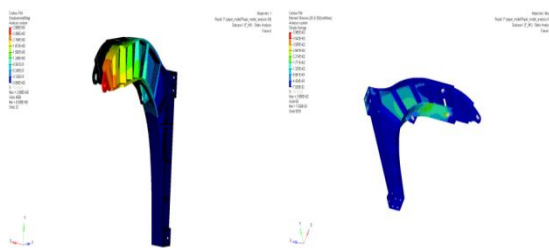


图3 工况1 位移及应力云图

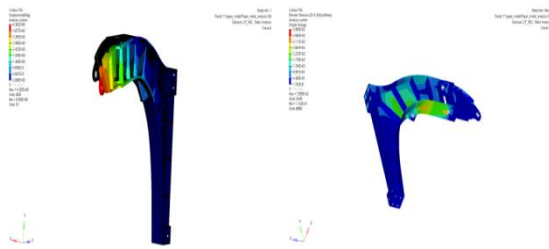


图4 工况2 位移及应力云图

在不同工况下的最大应力、最大合位移、各方向的位移分量如下表2所示。

表2 原模型静力分析结果

| 工况 | 最大位移分量 (mm) |        |       | 最大合位移 (mm) | 最大应力 (MPa) |
|----|-------------|--------|-------|------------|------------|
|    | X           | Y      | Z     |            |            |
| 1  | -2.474      | -1.121 | 0.897 | 2.808      | 398.5      |
| 2  | -2.867      | -3.220 | 1.107 | 4.362      | 399.9      |

从静力分析结果可知，吊挂梁结构在 2 种不同的工况下变形、应力都存在很大的余量，因此可在满足约束条件的前提下，以结构重量最轻为优化目标，对吊挂梁结构进行拓扑优化设计。

## 2 吊挂梁优化设计

### 2.1 拓扑优化模型

对原始模型去除凹槽，进一步简化得到优化设计的基模型，在 hyper mesh 中进行网格划分，网格单元尺寸为 8mm，如图5所示。为保证零件的原位装配关系，黄色区域为优化区域，白色区域为非优化区域。为保证模型边界外形，在模型边界外围区域增加 8mm 的非设计区域。

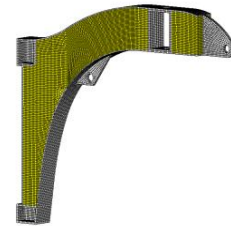


图5 基模型网格划分

材料属性、单元类型，载荷大小、约束条件、子工况，均与静力分析时保持一致。建立吊挂梁拓扑优化模型的三关键要素为：

- 目标函数：体积最小；
- 约束条件：X方向位移为 $\pm 6\text{mm}$ ，Y方向位移为 $\pm 4.5\text{mm}$ ，Z方向位移为 $\pm 3\text{mm}$ ；应力上限为  $835\text{MPa}$ ；
- 设计变量：设计空间单元密度。

### 2.2 拓扑优化结果

在对模型进行求解时，不仅需要约束其应力和变形，还需要考虑零件加工制造的工艺性，减少材料堆积和消除细小传力路径。因此在对模型进行优化计算前，还需要添加拔模方向，最小、最大成员尺寸等约束。优化计算迭代 39 次后收敛，控制密度输出阈值为 0.16，其输出结果如图6所示。

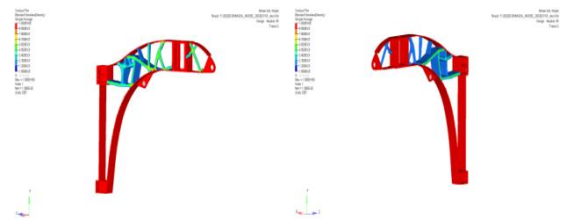


图6 拓扑优化结果

### 2.3 工程化建模

参考拓扑优化的结果, 结合实际机加制造工艺, 将从以下方面进行初步建模。

**材料布置:** 在主传力路径上布置较多材料, 去掉次要路径, 整体上采用“隔板+立筋”的桁架式结构。

**下部结构设计:** 因连接位置1的螺栓被约束6个自由度, 拓扑优化结果呈现出的材料分布不包含下部结构。为保持机加工艺的连贯性, 下部结构设计同样采用“隔板+立筋”的桁架式结构。

**工艺性和经济性:** 考虑降低零件加工的夹持次数, 隔板和立筋的分布关于零件对称面具有对称性。加工简单, 筋条传力路线简单直接, 减少应力集中点数量。

基于以上思路, 吊挂梁拓扑优化后初步建立的三维模型如下图7所示。

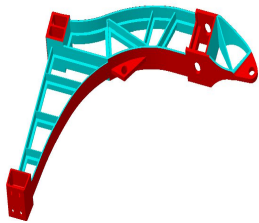


图7 吊挂梁初步设计

### 2.4 尺寸优化

#### 2.4.1 几何简化

体单元尺寸优化难度较大。采用几何简化的方法, 将其转化成板壳单元, 但保留三维单元特征。为保证精度, 将二维网格单元尺寸为 $2 \times 2 \text{mm}^2$ 。

#### 2.4.2 优化设置

**目标函数:** 结构重量最小; **设计变量:** 设计区域隔板和立筋的板厚, 共设置12个设计变量; 初始厚度为4mm, 变量取值区间(2,10); **约束条件:** 节点变形、单元应力均与拓扑优化设置相同, 屈曲因子为(1.05,1.15)。

#### 2.4.3 优化结果

尺寸优化计算共迭代8轮, 优化区域各部分板厚如下图8所示:

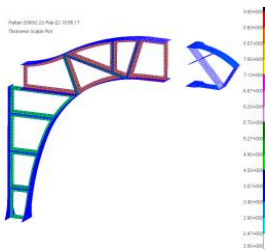


图8 尺寸优化结果

### 2.5 结构细节设计

按照尺寸优化的结果对相应的立筋厚度进行更改, 得到优化后的细节设计模型, 如图9所示, 优化后模型重量为45.147kg。

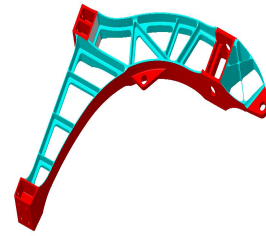


图9 吊挂梁细节设计

## 3 结果分析与评估

对优化后的吊挂梁模型进行变形、模态、稳定性、强度分析, 分析结果如图10-图16所示。

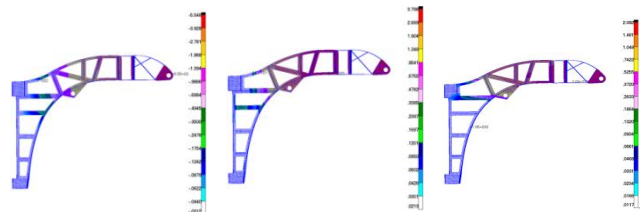


图10 工况1情况下X、Y、Z分量方向位移

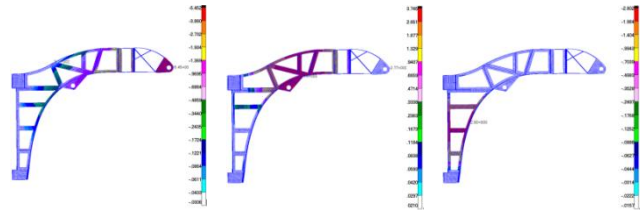


图11 工况2情况下X、Y、Z分量方向位移

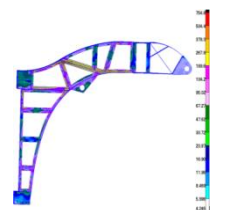


图12 工况1应力云图

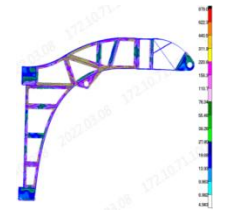


图13 工况2应力云图

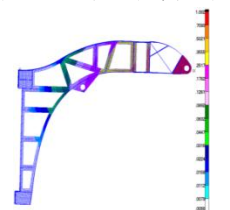


图14 工况1屈曲云图

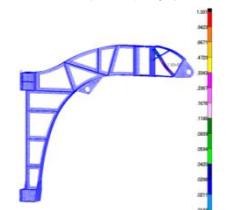


图15 工况2屈曲云图

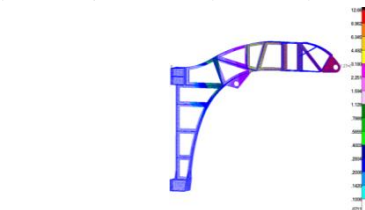


图16 结构1阶模态云图

拓扑优化前后的吊挂梁在不同工况下的最大应力、各方向的位移分量、屈曲因子、模态如下表3所示。

表3

| 项目        |   | 设计要求  | 原结构    | 优化结构  |        |       |
|-----------|---|-------|--------|-------|--------|-------|
|           |   |       | 工况1    | 工况2   | 工况1    | 工况2   |
| 变形        | X | <6    | 2.474  | 2.867 | 5.548  | 5.452 |
|           | Y | <4.5  | 1.121  | 3.220 | 3.798  | 3.745 |
|           | Z | <3    | 0.897  | 1.107 | 2.092  | 2.802 |
| 应力 (MPa)  |   | ≤1080 | 398.5  | 399.9 | 754.8  | 879.0 |
| 屈曲因子      |   | >1    | 1.13   | 1.1   | 1.002  | 1.131 |
| 一阶模态 (Hz) |   | /     | 25.4   |       | 22.2   |       |
| 重量 (Kg)   |   | /     | 85.620 |       | 45.147 |       |

从表3知，优化后的吊挂梁在两种工况下最大应力为

879MPa，小于设计要求值，静强度满足要求；两种工况下的位移分量均符合设计要求；原结构与优化后的结构屈曲因子和模态相接近，均符合设计要求，在两种工况下不会发生屈曲失稳；在各项指标满足要求的情况下，结构重量由85.620kg减重至45.147kg，重量减少47%，减重效果明显。

#### 4 结论

本文对已有发动机吊挂梁进行静力分析，论证了现有结构存在减重空间。将拓扑优化技术应用到发动机吊挂梁改进设计中，得到了最佳传力路径。结合实际工程需求和经验，对发动机吊挂梁进行尺寸优化，建立了优化后的发动机吊挂梁模型。变形、模态、稳定性、强度分析的结果表明，优化后的结构形式合理可行，能满足各项约束条件，有效地实现飞机发动机吊挂梁的减重。

#### 参考文献:

- [1] 杨华保.飞机原理与构造[M].西北工业大学出版社,2002.
- [2] 《飞机设计手册》总编委会.飞机设计手册[M].航空工业出版社,2000.
- [3] 赖宗辉,顾立强,张勇.纯电动客车车身结构分析与优化设计[J].传动技术,2017(12):35-39.
- [4] 王哲.现代飞机结构设计的发展[J].航空科学技术,2000.
- [5] 王伟,杨伟,赵美英.大展弦比飞翼结构拓扑形状与尺寸综合优化设计[J].机械强度,2008:596-600.
- [6] 杨军刚,章胜冬,张红卫.拓扑优化在发动机吊挂结构设计中的应用[J].机械制造,2009:21-24.
- [7] Slesongsom S,Bureeraat S,Tai K.Aircraft morphig wing design by using partial topology optimization [J].structural and multidisciplinary optimization.2013,48(6):1109-1128.
- [8] 刘文斌,张明,陈玉红.某型无人机起落架结构拓扑优化[J].机械科学与技术,2014:1753-1757.
- [9] 牛东振,赵雅欣,晏明生,等.飞机地板支持结构优化设计研究[C].第四届中国航空学会青年科技论坛.中国北京,2014.