

# 飞机大开口升降式光电吊舱结构优化设计

和欣辉 苗志桃 宋波涛

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

**【摘要】**：本文基于结构灵敏度分析及序列线性/二次规划方法，采用 MSC.Nastran 有限元分析软件对光电吊舱进行优化设计。文章叙述了优化模型的确定、载荷工况及边界条件的选取；在多载荷工况和多种约束限制条件下，以结构重量为目标函数，进行了吊舱结构尺寸优化，使机身开口区刚度达到要求，新设计光电吊舱结构满足强度设计要求。结果表明，优化设计方法能够提高产品的刚度质量比，为光电吊舱设计提供了理论依据，同时，该设计思想对其他类型结构设计也可起到借鉴作用。

**【关键词】**：吊舱；优化设计；刚度；多工况；序列线性规划

## Structural Optimization Design of Aircraft Large Opening Lifting Photoelectric Pod

Xinhui He, Zhitao Miao, Botao Song

Avic Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd. Shaanxi Xi'an 710089

**Abstract:** Based on structural sensitivity analysis technology and sequential linear / quadratic programming method, msc Nastran finite element analysis software is used to optimize the design of photoelectric pod. This paper describes the determination of the optimization model, the selection of load cases and boundary conditions; Under multiple load conditions and various constraints, taking the structural weight as the objective function, the structural size of the pod is optimized, so that the stiffness of the opening area of the fuselage meets the requirements, and the newly designed photoelectric pod structure meets the strength design requirements. The results show that the optimization design method can improve the stiffness mass ratio of products, and provide a theoretical basis for the design of photoelectric pod. At the same time, the design idea can also be used for reference for other types of structural design.

**Keywords:** Pod; Optimization design; Rigidity; Multiple working conditions; Sequential linear programming

### 引言

结构优化设计的目的在于寻求一种经济合理的结构形式，包括结构形貌、尺寸等。对于试图产生超出设计者经验的最优的新型结构来说，优化设计是一种很高效的结构分析技术。优化的目标通常是求解结构在一定的约束条件下，满足指定的力学特性，并且具有最小重量的结构形态。

飞机光电吊舱位于中后机身下部，开口区域沿纵向与后登机门位置相同。机身在使用过程中要承受弯曲、扭转等多种载荷作用，如果刚度不足，会引起机体窗框、门框、吊舱升降开口区域等地方大变形，导致窗沿密封不严而渗水、登机门卡死、吊舱升降装置卡死等问题，因此对吊舱及开口区强度设计十分重要。

本文使用 MSC.Patran/NASTRAN 有限元分析软件，对光电吊舱结构进行优化设计。以结构重量为目标函数；以吊舱舱壁、隔板、隔框腹板、附近蒙皮厚度以及舱壁加强型材、缘条截面积为设计变量，使结构满足强度及刚度要求。

## 1 光电吊舱结构模型

### 1.1 模型简述

光电吊舱是飞机用来满足图像采集及空地传输系统安装而设计。在对原机进行改装时，在机身蒙皮上进行开口，切断相关隔框、长桁和右侧座椅导轨梁，在开口周围布置由纵向梁

和横向隔板组成加强口框。在加强口框上布置光电吊舱转塔舱，光电吊舱转塔舱位于地板以上。如图 1 所示。根据飞机机身实际结构以及改装结构图纸，建立了改装区域的机身结构有限元模型。

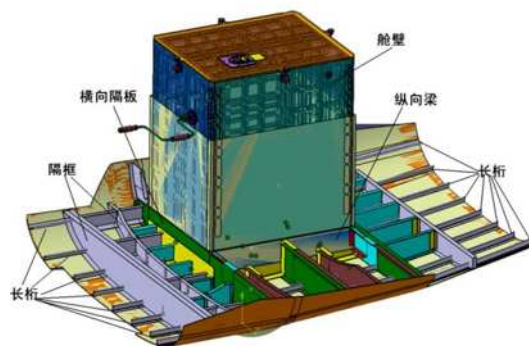


图 1 光电吊舱改装结构示意图

### 1.2 载荷及边界条件

机身结构主要受到气密压力以及机身切面的剪力、弯矩以及扭矩。机身轴向载荷  $N_x$  较小，忽略不计，分别考虑气密压力、机身切面的纵向剪力、横向剪力、侧向弯矩、纵向弯矩以及扭矩等 6 种计算工况，载荷见表 1，剪力  $Q_z$ 、 $Q_y$ 、弯矩  $My$ 、 $Mz$  及扭矩  $Mx$  作用在机身前部端框截面刚心。有限元计算时，在机身后部框平面简支约束。

表1 机身结构载荷工况

工况	载荷名称	载荷值
1	气密压力	43.5kPa
2	Qz	-100000N
3	Qy	100000N
4	Mx	100000N.m
5	My	-100000N.m
6	Mz	100000N.m

## 2 结构优化策略

### 2.1 优化方法介绍

优化算法选用序列线性规划 (SLP) 和序列二次规划 (SQP), 并采用了自适应运动极限控制、近似一维搜索、可行域调整、目标规划法处理多目标、设计变量连接等技术, 保证优化算法的稳定性收敛。

吊舱优化设计可以描述为:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ s.t. g_j(x) \leq 0, j = (1, 2, \dots, m) \\ x_{il} \leq x_i \leq x_{iu}, i = (1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

其中  $f(x)$  为结构质量;  $g(x)$  为约束函数, 该优化问题中选择结构在外载荷下的位移和应力;  $x_i$  为设计变量, 即结构尺寸。

线性规划假定优化问题已经取得一个相当好的初始设计  $x^{(0)}$ 。在  $x^{(0)}$  点将目标函数  $f(x)$  与约束函数  $g(x)$  作泰勒展开

$$\begin{aligned} f(x) &\approx f(x^{(0)}) + \nabla^T f(x^{(0)})(x - x^{(0)}) \equiv f^{(0)}(x) \\ g^i(x) &\approx g^i(x^{(0)}) + \nabla^T g^i(x^{(0)})(x - x^{(0)}) \equiv g^{i(0)}(x) \end{aligned}$$

其中,  $\nabla^T f(x^{(0)})$  和  $\nabla^T g^i(x^{(0)})$  分别为目标函数  $f(x)$  与约束函数  $g(x)$  的梯度函数。

利用泰勒展开可以建立如下线性规划问题:

$$\begin{cases} \min f^{(0)}(x) \\ s.t. g^{i(0)}(x) \leq 0, j = (1, 2, \dots, m) \\ x_{il} \leq x_i \leq x_{iu}, i = (1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

求解线性规划 (3) 式得到最优解  $x^{(1)}$ , 为改进解的近似程度, 在当前点  $x^{(1)}$  对目标函数  $f(x)$  与约束函数  $g(x)$  作泰勒展开, 然后求解新的线性规划问题, 得到进一步的近似解  $x^{(k)}$ , 直到满足收敛性要求, 即  $g^i(x^{(k)}) \leq \varepsilon_1$  或  $|x^{(k)} - x^{(k-1)}| \leq \varepsilon_2$ , 其中  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  为指定小量。可见, 序列线性规划算法是通过求解一系列线性规划为题来求解原非线性规划。

序列二次规划算法中, 约束函数仍是设计变量的线性函数, 目标函数可以是二次的, 在每个指定的当前设计点将约束

函数线性化, 对目标函数进行泰勒展开并截断到二次项:

$$f(x) \approx f(x^{(0)}) + \nabla^T f(x^{(0)})(x - x^{(0)}) + \frac{1}{2}(x - x^{(0)})^T \nabla^2 f(x^{(0)})(x - x^{(0)})$$

将一个非线性规划问题转化为一个二次规划为问题, 可用兰姆克 (Lemke) 方法对二次规划求解得到新的设计点, 重复以上过程直至得到最优设计。与序列线性规划算法相比, 由于目标函数近似精度高, 收敛更快, 但工作量较大。

在序列线性规划和二次规划算法中, 灵敏度分析是必不可缺少的。目前灵敏度分析的常用算法有有限差分法、半解析法等。吊舱的优化设计中设计变量包括舱壁板厚度及开口区蒙皮框腹板厚度、加强型材、缘条截面积, 对结构厚度和截面积而言, 单元刚度矩阵的微分形式是显式的, 微分形式写为:

$$\frac{dK^e(x_i)}{dx_i} \approx \frac{dK^e(x_i + \Delta x_i) - dK^e(x_i)}{\Delta x_i}$$

对于尺寸优化, 半解析法具有较高的计算效率及数值分析精度。

### 2.2 优化技术路线

本次研究主要采用了结构参数优化设计, 在满足约束条件下寻求一组最优的设计参数。其过程实际就是采用优化方法通过数值迭代, 求出在给定条件下的最优解。结构优化的流程如图2所示。

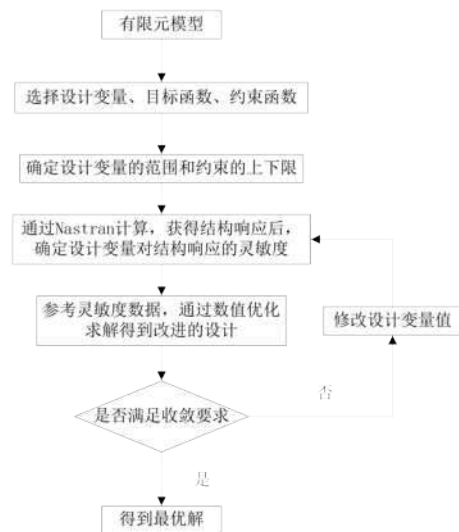


图2 优化设计流程图

### 2.3 优化控制

吊舱结构为新设计结构, 设计变量为吊舱舱壁、隔板、隔框腹板以及附近蒙皮厚度以及舱壁加强型材、缘条截面积。根据结构受力及材料强度极限确定约束条件, 控制蒙皮应力小于 100MPa, 舱壁、隔板、隔框应力小于 380MPa。为了光电转塔安全升降, 需要控制开口区变形, 选取对应节点控制其相对变形小于 5mm。以结构重量作为设计目标。

### 3 结果分析

#### 3.1 优化结果

采用有限元分析软件 MSC.Nastran 优化模块,共进行了 16 轮迭代,各设计变量变化过程曲线见图 3 和图 4,目标函数相对变化过程曲线见图 5。

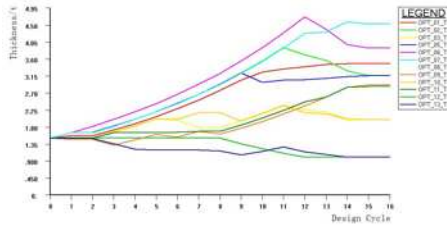


图 3 设计变量（板厚）变化过程曲线

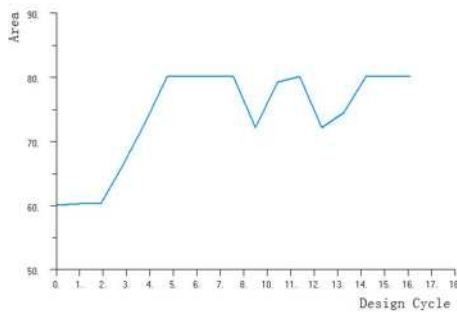


图 4 设计变量（截面积）变化过程曲线

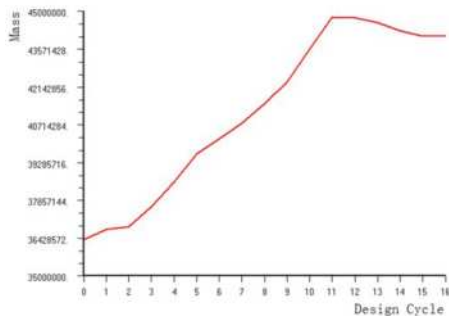


图 5 目标函数（结构重量）变化过程曲线

吊舱壁板厚度以及加强型材、缘条截面积相较优化初始值都增大,机身蒙皮和隔板厚度相较优化初始值减小;整体结构重量较初始重量增大。

#### 3.2 吊舱结构优化后应力分析

在完成优化计算以后,根据工艺性要求对优化后的结构尺寸值进行圆整,在 MSC.Patran/Nastran 软件中赋属性并进行静力分析。结果显示吊舱结构各区域应力以及变形都在优化控制范围内,满足结构强度及刚度要求,各工况下吊舱应力云图见

#### 参考文献:

- [1] 黄国宁,陈海,霍应元.MSC Nastran 优化功能在结构强度设计中的应用[J].计算机辅助工程,2006,15(S1),50-52.
- [2] 郭文杰,聂小华,王立凯,等.大展弦比无人机翼梁结构刚度优化设计[J].航空科学技术,2018,29(12):08-13.
- [3] 郭璐,杨云,王威,等.多工况载荷下驾驶舱结构刚度优化设计与仿真[J].计算机仿真,2015,(10):43-47.

图 6,变形云图见图 7,蒙皮开孔区节点相对变形见表 2。

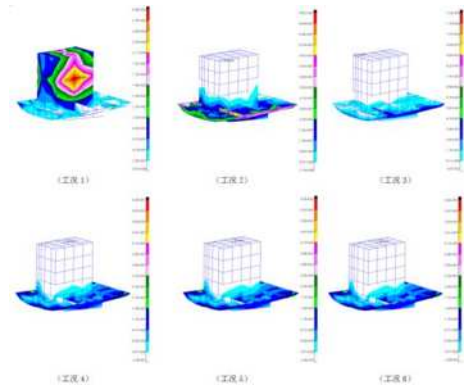


图 6 吊舱区域各工况下应力云图

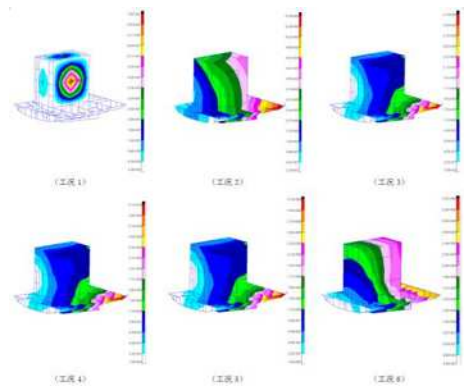


图 7 吊舱区域各工况下位移云图

表 2 蒙皮开孔区最大相对变形

节点	位移	相对位移	工况
2008	0.08	3.31	工况 1
2024	3.39		
1980	2.11	0.27	工况 2
2039	1.85		

### 4 结论

本文首先研究了结构优化设计的方法及数学模型,采用序列线性规划和序列二次规划优化技术,利用 MSC.Patran/Nastran 有限元分析软件,解决了多工况、多约束下吊舱结构设计问题。对优化后的光电吊舱结构进行了应力分析,根据结果可知,优化后的吊舱结构满足设计强度及刚度要求。该优化设计思路和方法可以大大提高设计效率,对其他类型结构尺寸优化也可起到借鉴作用。