

基于 OptiStruct 飞机装配型架框架结构的优化设计

Structure Optimized Design Based on OptiStruct Aircraft Assembly Jig Framework

中航工业贵州云马飞机制造厂 李凯旋

[摘要] 建立了飞机装配型架框架优化设计的数学模型;首先对型架框架进行拓扑优化,确定框架的拓扑结构;然后对框架进行截面尺寸优化,确定梁的最终截面尺寸。通过与初始结构的对比,证明了优化设计所取得的效果。

关键词: 飞机装配型架框架 优化设计 数学模型 拓扑优化 尺寸优化

[ABSTRACT] The mathematic model of the optimization design for the aircraft assembly jig framework is set up. First, the topology optimization of the jig framework is performed to determine the topology structure of framework, and then the optimization of the framework sectional dimensions is performed to determine the final sectional dimensions of beam. The advantages of the optimization design are proved through comparing it with the initial structure.

Keywords: Aircraft assembly jig framework Optimization design Mathematic model Topology optimization Dimension optimization

飞机装配型架是飞机制造过程中的重要工艺装备。框架是型架的基体支撑结构,所有定位器都连于其上,产品在上面装配,需要靠框架来支撑,以确保飞机产品的定位安装精度。框架结构的好坏是决定型架设计是否合理、成功的关键因素。

在目前的型架设计过程中,框架设计主要依赖设计经验,所设计的框架经常出现刚性过强或过弱、结构布局不甚合理等现象。本文基于某型架框架的设计,引入优化设计方法,以 OptiStruct 为平台进行型架框架的结构优化设计,在提高框架刚性、改善框架结构布局的同时节省了框架的用料。

1 优化设计的数学模型

1 初始模型与受力简图

根据技术要求和总体设计方案,确定框架结构的初始模型和受力简图(图1)。

框架初始截面为 180mm × 150mm × 9mm 的矩形

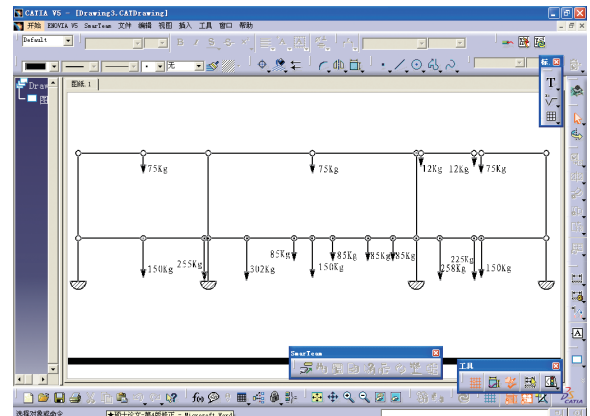


图1 框架结构的初始模型和受力简图

Fig.1 Initial model and stress of framework structure

管,材料密度 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$,弹性模量 $E = 200 \text{GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$ 。框架的初始质量为 1247kg,对初始结构进行受力分析,分析各节点位移,结果如图2所示。

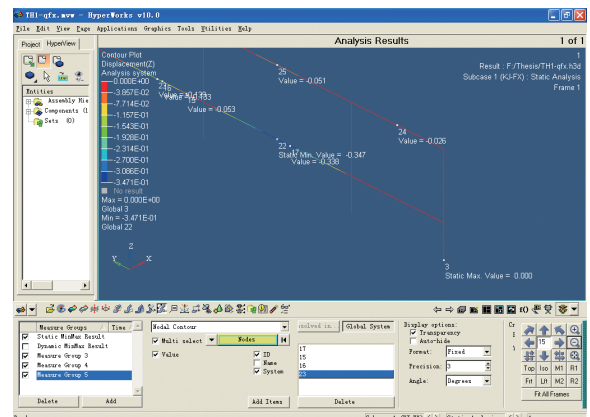


图2 框架初始结构受力分析

Fig.2 Stress analysis of initial structure of framework

最大节点位移为 0.347mm,产品安装精度对型架框架的最大节点位移要求为不大于 0.1mm,初始结构不能满足框架的刚性要求。

1.2 目标函数与设计变量

以框架的重量最轻为最优设计目标,优化的目标函数如下:

$$\min W = \sum_{i=1}^M \rho_i A_i a_i l_i ,$$

式中, M 为框架的杆件数量, i 为为杆件编号, ρ_i 为杆件材料密度, A_i 为杆件横截面积, l_i 为杆件长度, a_i 为拓扑设计变量。

由于框架采用同种材料,各杆件的密度为常量,重量最轻等价于体积最小,同时,杆件截面为矩形管,截面变量为 H (长)、 W (宽)、 t (厚),目标函数可写为:

$$\min V = \sum_{i=1}^M [H_i W_i - (H_i - 2t_i)(W_i - 2t_i)] a_i .$$

式中设计变量包括: 拓扑设计变量 a_i , 截面设计变量 H_i 、 W_i 、 t_i 。

1.3 约束条件

型架设计为刚度设计,主要力学指标是材料的节点位移不超过允许值。对框架而言,约束条件为:

$$\delta_i (S_j, a_i) \leq \bar{\delta} \quad (i=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,ND),$$

$$S_j = \{H_i, W_i, t_i\},$$

$$a_i = \{0, 1\}.$$

式中, $\bar{\delta}$ 为结构的许用挠度,为保险起见,本框架取 0.05, δ_i 为指定的节点位移, S_j 为杆件的截面设计参数, ND 为需要进行位移约束的节点数量, S_j 为拓扑设计参数。

2 框架结构的拓扑优化

框架结构的拓扑优化是确定框架支撑梁的数量与合理的位置分布,因此,需要在初始结构基础上,将所有可能出现的最佳分布位置的支撑梁都增加出来,形成框架拓扑优化的结构模型。框架拓扑优化的结构模型如图 3 所示。

图 3 中,铁红色的梁为不需要进行拓扑优化设计的梁,墨绿色的梁组成了需要进行拓扑优化的设计空间。

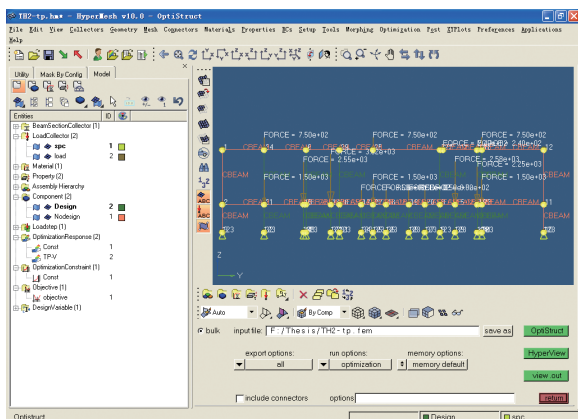


图3 框架拓扑优化的结构模型

Fig.3 Structure model of topology optimized framework

按表 1,在 OptiStruct 中建立拓扑优化设计模型。

表1 框架的拓扑优化设计模型

设计变量	变量名称	对象类型	对应属性		
	JXG-2	PBARL	JXG-2		
响应	响应名称	响应类型	响应对象	响应自由度	
	JXG-2V	Volume	全局响应		
	C1H~C12H	Static displacement	力作用点	Total disp	
	C1M~C16M	Static displacement	力作用点	Total disp	
约束条件	约束名称	对应响应	上限	下限	对应加载
	C1H~C12H	C1H~C12H	+0.05	-0.05	JXG-1
	C1M~C16M	C1M~C16M	+0.05	-0.05	JXG-1
目标函数	对应响应	类型			
	JXG-2V	min			

对框架结构进行拓扑优化,优化后删除不必要的支撑梁,得到框架结构的最终布局如图 4 所示。

在此结构下,框架的节点位移如图 5 所示。

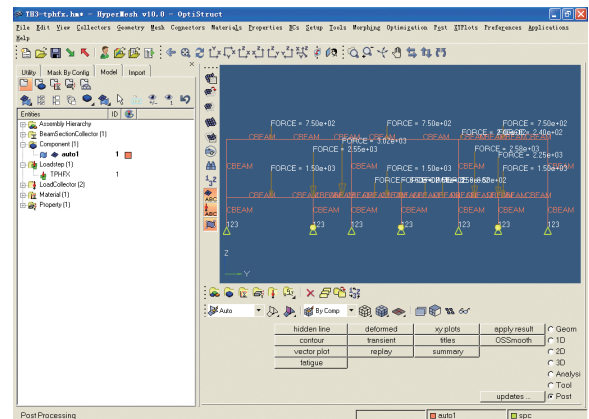


图4 拓扑优化后框架的结构布局

Fig.4 Framework Structural layout after topology optimization

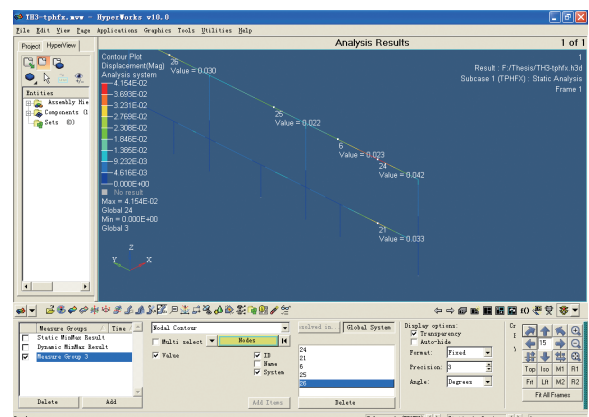


图5 拓扑优化后的节点位移

Fig.5 Joint displacement after topology optimization

经过拓扑优化,最大节点位移为 0.04,框架重量为 1308.5kg。进一步进行截面尺寸优化,减轻结构重量。

3 框架梁的截面尺寸优化

根据框架的结构连接情况,将框架的梁截面分为 4 个类别,同一类别的梁截面参数相同。梁的截面为矩形管,分别对截面的长、宽、高和壁厚尺寸进行优化,图 6 所示为梁的分类情况。

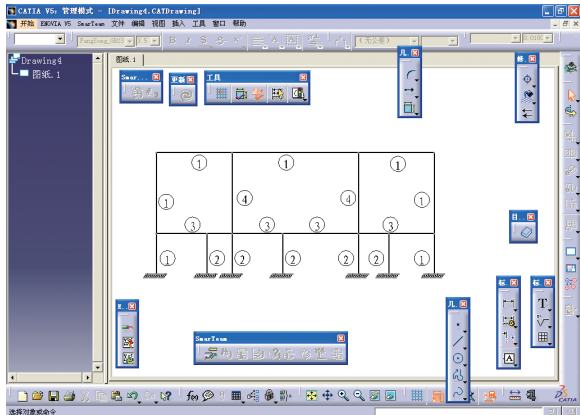


图6 框架截面的分类

Fig.6 Classification of framework sections

在 OptiStruct 中,建立尺寸优化的离散设计变量、尺寸设计变量以及变量与属性的关联,分别如表 2、3、4 所示。

表2 离散设计变量

变量名称	初始值 /mm	下限 /mm	上限 /mm	增量 /mm
H	180	100	300	10
W	140	100	300	10
T	9	4	12	1

表3 尺寸设计变量

变量名称	初始值 /mm	下限 /mm	上限 /mm	离散变量
H1~H4	180	100	300	H
W1~W4	140	100	300	W
T1~T4	9	4	12	T

表4 变量与属性的关联

关联名称	H1~H4	W1~W4	T1~T4	t1~t4
对应属性	JXG1~JXG4	JXG1~JXG4	JXG1~JXG4	JXG1~JXG4
尺寸属性	高度尺寸	宽度尺寸	高度方向壁厚	宽度方向壁厚
设计变量	H1~H4	W1~W4	T1~T4	T1~T4

优化的响应、约束和目标函数与拓扑优化模型相同。优化的最终结果如图 7 所示。

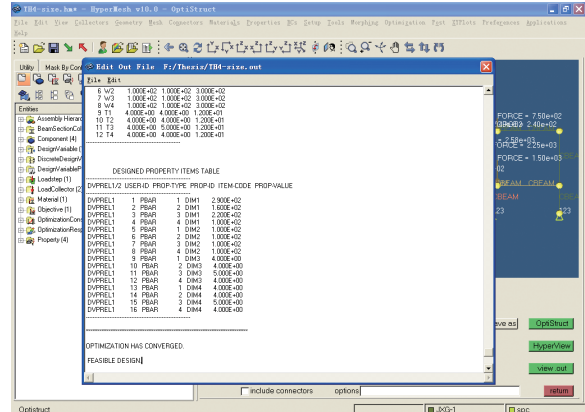


图7 尺寸优化过后梁的截面尺寸

Fig.7 Beam sectional dimensions after dimension optimization

根据优化计算的迭代过程,将结果按梁截面分类进行整理,如表 5、6 所示。

表5 尺寸优化结果的分类整理

优化计算迭代步	梁截面分类	高度尺寸 /mm	宽度尺寸 /mm	壁厚尺寸 /mm	最大节点位移 /mm	结构总重量 /kg
最后一步 (13步)	①	290	100	4	0.049	691.3
	②	160	100	4		
	③	220	100	5		
	④	100	100	4		

表6 尺寸优化结果的惯性矩和截面面积

截面分类	①	②	③	④
中心惯性矩 /mm ⁴	31310778.67		19275833	
截面面积 /mm ²		2016		1536

根据现有矩形钢规格进行选择,得到最终优化结果如表 7 所示。

表7 优化结果与实际截面的对应关系

截面分类	①	②	③	④
对应型号	□ 250 × 150 × 6	□ 100 × 100 × 6	□ 200 × 100 × 8	□ 80 × 80 × 6
框架重量 /kg	998.4			

对最终结果进行节点位移分析,结果如图 8 所示。

(下转第 79 页)