

文章编号:1674-8190(2016)04-433-06

基于二级优化技术的襟翼导轨设计方法研究及应用

李倩

(中国飞机强度研究所 十室,西安 710065)

摘要: 结构质量对飞机的各项性能具有至关重要的影响,为了有效降低飞机结构质量,合理布置材料,提高材料的利用效率,发展一种二级优化设计技术。以外襟翼平面导轨结构为研究对象,将优化设计问题分解成两个易于求解的子问题——顶层优化设计和底层优化设计,顶层优化设计采用拓扑方法确定腹板的加筋形式,底层优化设计采用尺寸优化确定襟翼导轨的厚度分布;通过两层优化,在结构质量最小化的基础上,使得结构形式最优化。结果表明:在保证应力和位移水平的前提下,二级优化设计技术可以快速有效地减轻结构质量,具有一定的工程应用价值。

关键词: 二级优化;拓扑优化;尺寸优化;襟翼导轨

中图分类号: V214.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2016.04.006

Research and Application of Flap Guide Rail Design Based on Two-step Optimization Method

Li Qian

(The Tenth Department, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: The structure weight is of an important influence on the performances of the aircraft. In order to reduce the weight of the wing, distribute materials reasonably and improve utilization rate of materials, two-step optimization method is proposed for flap structure optimization design. Taking the structure of flap guide rail as research object, the complex optimization design problem is analyzed by top-layer and low-layer optimization design as two basic events. The top-layer is topology optimization that determines the web stiffener forms and low-layer is size optimization that determines the thickness distribution of the flap guide rail. Through this two-step optimization, the best structure form base on minimize structure weight is determined. Results show that the method presented is feasible and correct, and is of a significant value in accelerating the engineer realization of the structure optimization.

Key words: two-step optimization; topology optimization; size optimization; flap guide rail

0 引言

飞机的质量,尤其是结构质量,对飞机的各项性能具有至关重要的影响。近年来,结构优化技术发展迅速,将该技术应用于飞机结构设计领域,可以取得明显的减重效果,因此,该技术在飞机设计中得到了广泛应用^[1]。结构优化一般由设计变量、

目标函数和约束条件三要素组成,根据设计变量的不同可以将结构优化分为尺寸优化、形状优化和拓扑优化三个层次^[2-4]。

经过多年的研究,针对不同层次的结构优化,已发展出了许多优秀的算法。对于拓扑优化,最具代表性的算法有渐进结构优化算法(Evolutionary Structural Optimization,简称 ESO)^[5]和基于准则的变密度法等;对于形状和尺寸的优化,发展较为成熟的算法包括遗传算法(Genetic Algorithm,简称 GA)、蚁群算法(Ant Colony Optimization,简称 CO)和粒子群算法(Particle Swarm Optimization,

简称 PSO)等。关于结构优化算法的应用方面, Ji Shen 等^[6]采用解析法求得某特定载荷下机翼盒段的最佳翼梁位置;邓扬晨等^[7]提出了一种多级优化策略,即先采用拓扑优化求出机翼的最佳翼梁数目和位置,再使用尺寸优化进行详细设计,将机翼的结构优化层次上升为形状优化层次;王伟等^[8]提出了一种可用于机翼结构布局问题的二级三层拓扑、形状与尺寸优化方法,第一级为拓扑优化,采用拓扑优化手段得到机翼结构的翼梁数目与大致位置,第二级为形状与尺寸综合优化,在第一级优化的基础上,使用形状优化手段在一定范围内调整、修正翼梁位置,同时进行尺寸优化。

工程应用实践表明,上述优化算法已在不同领域取得了较好的优化效果。但针对平面导轨综合优化的研究还相对较少,本文基于 Optistruct 平台,以某型飞机外襟翼平面导轨结构为研究对象,发展一种二级优化设计方法,优化分两步进行:首先采用拓扑优化,求出结构的最优材料分布和构型;然后,在拓扑优化的基础上进行尺寸优化,得到结构的厚度分布。

1 结构优化的设计模型

优化设计包含三要素,即设计变量、目标函数和约束条件^[9]。设计变量为在优化过程中发生改变从而提高性能的一组参数;目标函数为要求最优的设计性能,是关于设计变量的函数;约束条件为对设计的限制,是对设计变量和其他性能的要求。优化设计的数学模型可表述为

$$\text{最小化: } f(\mathbf{X}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

约束条件:

$$\begin{cases} g_j(\mathbf{X}) \leq 0 & (j=1, \dots, m) \\ h_k(\mathbf{X}) = 0 & (k=1, \dots, m_h) \\ x_l \leq x_i \leq x_u & (i=1, \dots, n) \end{cases}$$

式中: \mathbf{X} 为设计变量, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; $h(\mathbf{X})$ 为等式约束函数; $g(\mathbf{X})$ 为不等式约束函数;下标 u 和 l 分别表示上、下限。

在 Optistruct 中,目标函数 $f(\mathbf{X})$ 、约束函数 $g(\mathbf{X})$ 、 $h(\mathbf{X})$ 均为从有限元分析中获得的结构响应。设计变量 \mathbf{X} 是一个向量,其选择依赖于优化类型。在拓扑优化中,设计变量为单元的密度;在尺寸优化(包括自由尺寸优化)中,设计变量为结构单元的属性。

2 优化方法

目前,在连续体拓扑优化中较为成熟的优化方法有均匀法、变密度法、渐进结构优化法等^[10],本文采用变密度法来进行拓扑优化。变密度法是由均匀化方法发展而来的一种优化方法,其基本思想是引入一种假想的密度值在 $[0, 1]$ 之间的密度可变材料,将连续结构体离散为有限元模型,以每个单元的密度为设计变量,将结构的拓扑优化问题转化为单元材料的最优分布问题。变密度法可以将结构质量作为优化目标函数,克服了均匀法无法处理多目标问题的缺点。但是采用变密度法得到的拓扑优化结果是密度等值分布图,其中密度中间值所对应的区域为假想的人工材料,在实际工程中无法实现,因此,在得到最优拓扑图形后,要对这些区域进行人工处理以适应实际工程的需要。

3 优化流程

为了能够同时分析所有因素对结构的影响,采用有效的多级优化设计方法。多级优化技术可以用最短的运算时间实现外襟翼平面导轨结构的综合优化设计。该技术将优化问题的设计空间分成几个子空间,在每个子空间中设计变量和约束条件的数量均大幅减少,有效降低了优化问题的复杂性。多级优化通过各个子空间之间的迭代获得最优解,其实施过程如图 1 所示。

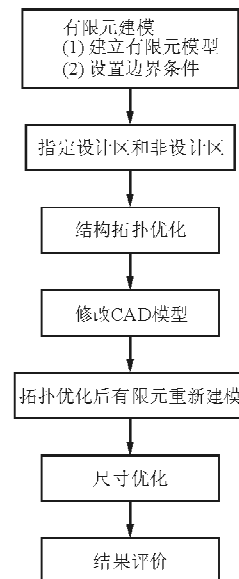


图 1 综合优化流程

Fig. 1 Integration optimization process

4 襟翼平面导轨优化

导轨材料为 Ti-6Al-4V, 弹性模量 $E = 120 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.31$, 密度 $\rho = 4.4 \text{ g/cm}^3$ 。导轨的 CAD 模型如图 2 所示, 将其划分为 8 个区域 (如图 3 所示), 各个区域的厚度如表 1 所示。导轨的受载形式如图 4 所示, 并对与翼盒连接的区域 2 和区域 7 进行固定约束。对初始结构进行分析, 其位移云图和应力云图分别如图 5~图 6 所示。

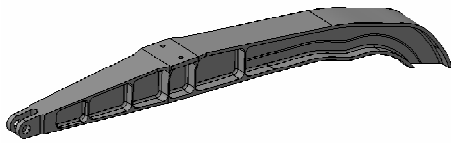


图 2 襟翼导轨 CAD 模型

Fig. 2 CAD model of flap guide rail

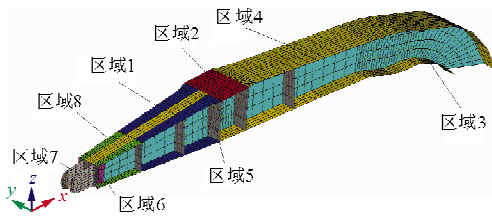


图 3 襟翼导轨有限元模型

Fig. 3 Finite element model of flap guide rail

表 1 厚度分布

Tabel 1 Thickness distributing

设计区域	厚度/mm	设计区域	厚度/mm
区域 1	6.00	区域 5	3.75
区域 2	11.00	区域 6	27.50
区域 3	3.00	区域 7	12.00
区域 4	7.00	区域 8	5.00

单位: N

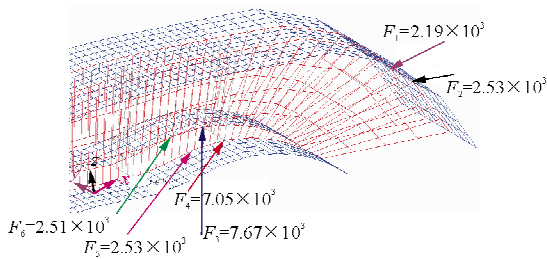


图 4 导轨的受载形式

Fig. 4 Load format of flap guide rail

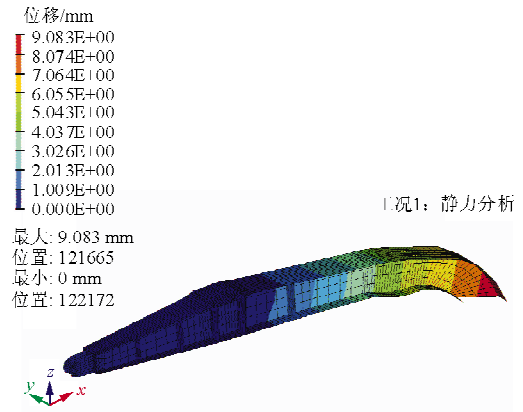


图 5 初始模型的位移云图

Fig. 5 Displacement contour of initial model

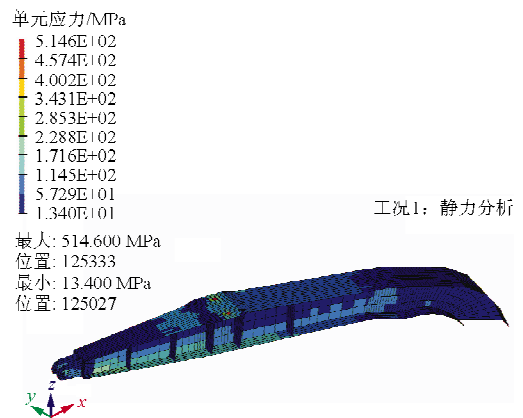


图 6 初始模型的应力云图

Fig. 6 Stress contour of initial model

4.1 拓扑优化

基于襟翼导轨的特殊性, 选定区域 3 和区域 5 作为设计空间, 拓扑优化的设计变量为设计区域所有单元的密度, 以最小体积作为优化目标, 并参考初始结构的位移, 对导轨位移进行约束。

拓扑优化前后结构形式的对比如图 7 所示, 拓扑优化后的结构整体模型如图 8 所示, 优化模型的位移云图和应力云图分别如图 9~图 10 所示。优化前后的结构质量、位移和应力的对比如表 2 所示。

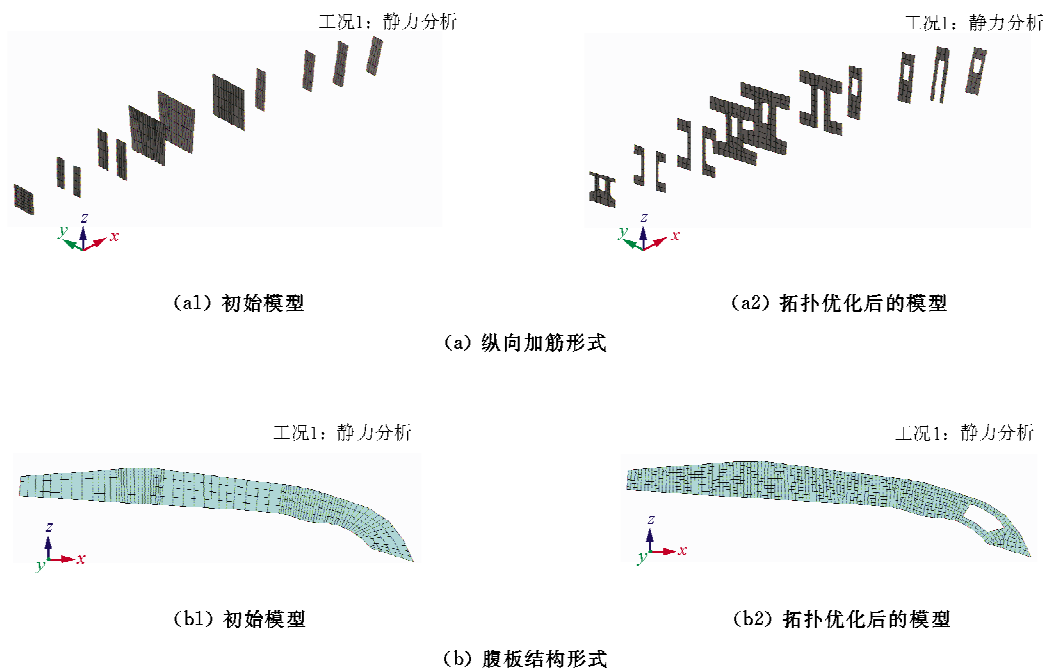


图 7 拓扑优化前后结构形式对比图

Fig. 7 Comparison of structure form before and after topology optimization

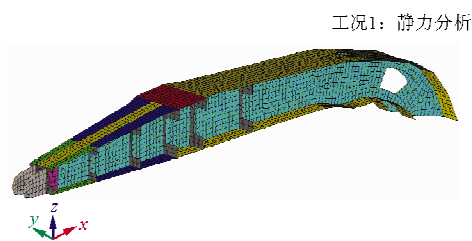


图 8 拓扑模型

Fig. 8 Topology model

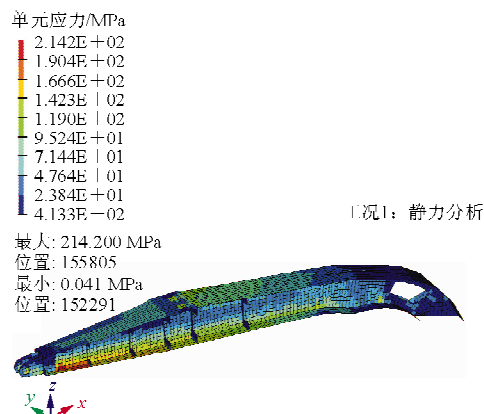


图 10 拓扑模型应力云图

Fig. 10 Stress contour of topology model

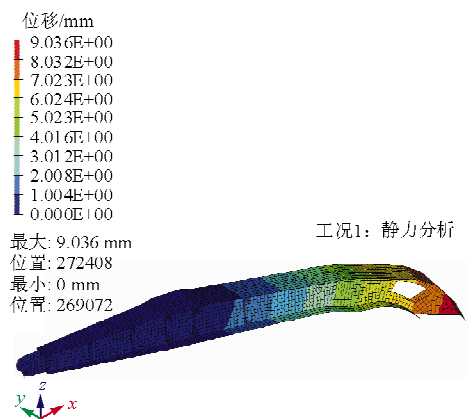


图 9 拓扑模型位移云图

Fig. 9 Displacement contour of topology model

表 2 拓扑优化前后各指标对比

Table 2 Comparison of performance parameters before and after topology optimization

参 数	初 值	优化值	减小百分比/%
质量/kg	9.373	8.980	4.20
最大应力/MPa	514.6	214.2	58.40
最大位移/mm	9.08	9.04	0.44

从表 2 可以看出:对初始模型进行拓扑优化后,结构质量减少了 4.2%,且最大应力和最大位移并没有因为质量的减少而增大,达到了优化的目的。下一步将在拓扑优化的基础上进行尺寸优化,

以期进一步减重。

4.2 尺寸优化

尺寸优化的设计区为导轨的全部区域,设计变量为设计区所有单元的厚度,以最小体积作为优化目标,约束条件为:导轨的最大位移和最大应力不增大。各个区域厚度的变化范围如表 3 所示。

表 3 设计变量的变化范围

Tabel 3 The range of design variables

设计区域	厚度变化范围/mm	设计区域	厚度变化范围/mm
区域 1	4.00~7.00	区域 5	1.00~4.00
区域 2	8.00~12.00	区域 6	22.00~29.00
区域 3	1.98~4.00	区域 7	9.00~13.00
区域 4	4.00~8.00	区域 8	2.00~6.00

通过尺寸优化得到新的厚度分布,优化模型的位移云图和应力云图分别如图 11~图 12 所示。

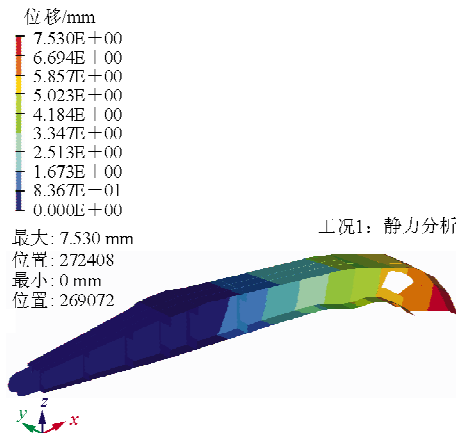


图 11 尺寸优化模型位移云图

Fig. 11 Displacement contour of size optimization model

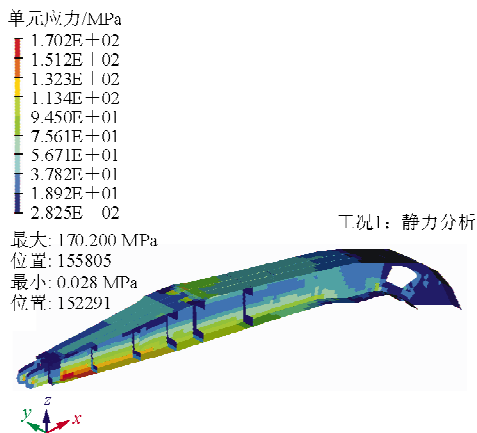


图 12 尺寸优化模型应力云图

Fig. 12 Stress contour of size optimization model

设计变量的优化结果如表 4 所示,拓扑和尺寸综合优化的结果如表 5 所示。

表 4 设计变量的优化结果

Tabel 4 Optimization results of design variables

设计区域	优化后的厚度/mm	设计区域	优化后的厚度/mm
区域 1	7.00	区域 5	1.45
区域 2	12.00	区域 6	22.00
区域 3	4.00	区域 7	9.69
区域 4	8.00	区域 8	6.00

表 5 导轨综合优化结果对比

Tabel 5 Comparison of optimization results of flap guide rail

参 数	初值	拓扑优化值	拓扑和尺寸优化值	总减小百分比/%
质量/kg	9.373	8.980	8.440	9.95
最大应力/MPa	514.60	214.20	170.20	66.96
最大位移/mm	9.08	9.04	7.53	17.00

从表 5 可以看出:在拓扑优化的基础上再进行尺寸优化,优化后的结构质量、最大应力和最大位移进一步降低;综合优化减重效果明显,接近 10%;最大应力的优化效果最好,降低了 66.96%;最大位移也有显著降低。优化结果表明,本文采用的多级优化技术达到了优化目的。

5 结 论

(1) 本文发展了二级优化设计技术,将优化设计问题分解成两个易于求解的子问题,在每个子空间中设计变量和约束条件的数量均大幅减少,有效降低了优化问题的复杂性。

(2) 顶层拓扑优化设计出主传力路径,底层尺寸优化得到各个区域的厚度分布。

(3) 从襟翼导轨综合优化的结果来看,满足了约束条件和优化目标,获得了明显的减重效果,表明本文的二级优化设计技术是一种快速、高效、工程适用的结构优化方法。

参考文献

[1] 刘洋,王富生,岳珠峰.大展弦比机翼结构拓扑优化研究[J].机械设计与制造,2010(8):220-222.
Liu Yang, Wang Fusheng, Yue Zhufeng. Topology optimization research of the high aspect wing structure[J]. Manufacturing Design & Manufacturing, 2010(8): 220-222.

- chinery Design & Manufacture, 2010(8): 220-222. (in Chinese)
- [2] 周克民, 李俊峰, 李霞. 结构拓扑优化研究方法综述[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 69-76.
Zhou Kemin, Li Junfeng, Li Xia. A review on topology optimization of structures[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 69-76. (in Chinese)
- [3] 徐飞鸿, 荣见华. 多工况下结构拓扑优化设计[J]. 力学与实践, 2004, 26(3): 50-54.
Xu Feihong, Rong Jianhua. Topology optimization of structures under multiple loads[J]. Mechanics in Engineering, 2004, 26(3): 50-54. (in Chinese)
- [4] 李哲, 安军, 万小鹏. 层级优化技术与壁板结构优化研究[J]. 航空计算技术, 2013, 43(4): 52-55.
Li Zhe, An Jun, Wan Xiaopeng. Level optimization technology and research on panel structure[J]. Aeronautical Computing Technique, 2013, 43(4): 52-55. (in Chinese)
- [5] Xie Y M, Steven G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization [J]. Computers & Structures, 1993, 49(5): 885-896.
- [6] Ji Shen, Ferguson F. Weight reduction through optimal arrangement of force-carrying components within wing box structures[R]. AIAA-2004-4995, 2004.
- [7] 邓扬晨, 詹光, 高彤, 等. 飞机翼面结构布局综合设计方法研究[J]. 飞机设计, 2004(2): 28-35.
Deng Yangchen, Zhan Guang, Gao Tong, et al. Analysis and synthesis based aircraft wing structural layout study [J]. Aircraft Design, 2004(2): 28-35. (in Chinese)
- [8] 王伟, 赵美英, 常楠. 某型机翼内翼结构几何优化设计[J]. 强度与环境, 2006, 33(3): 56-60.
Wang Wei, Zhao Meiyang, Chang Nan. The structure geometrical optimization design of a certain interior wing[J]. Structure & Environment Engineering, 2006, 33(3): 56-60. (in Chinese)
- [9] Zhou M, Pagalapati N, Thomas H L, et al. An integrated approach to topology, sizing, and shape optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(5): 308-317.
- [10] 傅晓锦. 连续体结构综合优化设计[J]. 机械工程学报, 2012, 48(1): 128-134.
Fu XiaoJin. Integration optimization design of continuum structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(1): 128-134. (in Chinese)

作者简介:

李倩(1986—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构分析与优化。

(编辑:马文静)

(上接第407页)

- [20] Photo of model of F110-GE-129 engine and trailer[EB/OL]. [2016-06-20]. http://farm3.staticflickr.com/2546/4212411805_e7d38b2b27_z.jpg.

作者简介:

赵长辉(1972—)男,高级工程师。主要研究方向:飞机及飞机保障设备总体设计和发展研究。

王猛(1983—)男,工程师。主要研究方向:飞机总体设计、气动力设计和飞行力学。

贺美珠(1989—)女,助理工程师。主要研究方向:飞机总体设计、气动力设计和飞行力学。

曲笛(1986—)女,工程师。主要研究方向:飞机总体设计、产品发展和市场。

杨奕明(1989—)男,助理工程师。主要研究方向:飞机总体设计、气动力设计和飞行力学。

(编辑:赵毓梅)