

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.014

金属加筋薄壁圆台结构二级布局优化设计方法

孙志彬¹ 葛萌萌² 王英玉² 王海清³

(1. 中航工业沈阳飞机设计研究所结构部, 沈阳, 110035;

2. 南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京, 210016;

3. 中航工业陕西飞机工业(集团)有限公司飞机设计研究院, 汉中, 723213)

摘要:提出了一种金属加筋薄壁圆台结构的二级布局优化方法。该方法首先采用试验设计选取结构布局变量的样本点, 然后对每个样本点相应的加筋薄壁结构进行强度和稳定性约束下的尺寸优化, 获得对应的目标响应值; 其后用布局变量样本点和对应的响应面构造 Kriging 近似模型; 最后用遗传算法对近似模型进行优化, 得到了加筋薄壁圆台的最优解。算例结果表明, 该方法简单且优化效率高。

关键词:加筋薄壁圆台; 二级优化; 试验设计; 遗传算法

中图分类号: TU333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2015)04-0566-05

Two-Level Layout Optimization Method for Metal Stiffened Thin-Walled Cone

Sun Zhibin¹, Ge Mengmeng², Wang Yingyu², Wang Haiqing³

(1. Structure Branch, AVIC Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang, 110035, China;

2. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

3. Aircraft Design Institute, AVIC Shaanxi Aircraft Industry (Group) Corporation LTD., Hanzhong, 723213, China)

Abstract: A two-level layout optimization method for metal stiffened thin walled cone is proposed. The sample points of layout variables are created by design of experiment (DOE). Then for each stiffened thin-walled structure corresponding to each sample point, the size optimization is performed under the constraints of strength and stability, therefore the corresponding target response value is obtained. Then the Kriging approximation model is built based on the layout variable sample points and the corresponding response surface. Finally, the approximation model is optimized by using the genetic algorithm and the optimal solution of the stiffened thin-walled cone is presented. The example results show that the method is simple and has high optimization efficiency.

Key words: stiffened thin-walled cone; two-level layout optimization; design of experiment; genetic algorithm

加筋薄壁曲板被广泛地应用于各种工程结构, 如运载火箭的箭体结构舱段是加筋薄壁圆柱结构和圆台结构。结构轻量化是飞行器设计的永恒追求之一, 因此研究加筋薄壁圆台结构的布局优化设计方法具有重要意义。

目前加筋板结构优化设计已有不少研究。Liu 等^[1-2]研究了 Z 型筋条复合材料加筋板的优化设计问题。Venkataraman 等^[3-4]采用可行方向法, 对航天器燃料箱体上的复合材料加筋板结构进行了分析及优化。赵群等^[5]提出一种以结构的承载效率

基金项目:国家自然科学基金(11202098)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2014-12-04; **修订日期:**2015-01-14

通信作者:孙志彬,男,研究员, E-mail:377499226@qq.com。

作为优化目标的设计方法。张柱国等^[6]借助于更新 Kriging 近似模型,提出了一种金属加筋板结构布局优化策略。张铁亮等^[7]针对复合材料加筋壁板的结构布局优化采用二级优化的方法进行优化。Wodesenbet 等^[8]对不同参数的复合材料加筋圆柱壳进行研究,得出最佳配置。Alinia^[9]采用有限元分析软件得到了从整体屈曲向局部屈曲转化时的临界点来设计加强筋的最优几何特性。Abouhamze 等^[10]采用遗传算法和神经网络算法,研究了薄壁圆柱壳几何特性的多目标优化问题。Wang 等^[11]采用蚁群算法对筒支复合材料加筋板进行了优化设计。Bagheri 等^[12]基于遗传算法建立优化设计模型,对环向加筋圆柱壳进行了多目标优化设计。赵斌^[13]对受轴压作用下的薄壁加筋圆柱壳进行稳定性分析,建立了加筋圆柱壳等体积下屈曲承载力最大的优化设计模型。

本文以火箭箭体圆台薄壁结构的轻量化设计为背景,给出了圆台薄壁结构模型,并提出了一种二级布局优化方法,给出了一个算例,结果表明该方法思路清晰、适应性强、优化效率高,具有一定的工程应用价值。

1 圆台薄壁结构模型

1.1 结构模型

圆台结构外形见图 1。圆台上底直径为 d ,下底直径为 D ,高为 H 。沿圆台母线有 n 个纵向加筋等距分布,有 m 个周向加筋(称之为“节”)等距分布。圆台壁板上端受到轴向线分布载荷 F 作用。圆台周向及纵向剖面图见图 2。

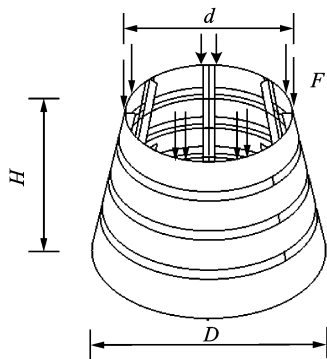


图 1 圆台结构示意图

Fig. 1 Diagram of cone structure

1.2 设计变量

针对上述圆台薄壁结构进行布局优化设计,设计变量按类别分为布局设计变量和尺寸设计变量。

布局设计变量主要是筋条的型式与个数,包括纵向加强筋型式 s_n ,周向加强筋型式 s_m ,纵向筋条

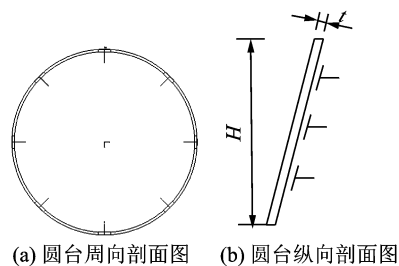


图 2 圆台剖面图

Fig. 2 Cross-section of cone

个数 n ,周向筋条个数 m 。本文设定筋条的型式为 L 型,T 型,Z 型和工型,分别用 1,2,3,4 来表示,如图 3 所示。

尺寸设计变量主要包括蒙皮厚度 t ,纵向筋条腹板高度 b_{1w} 、纵向筋条腹板厚度 t_{1w} 、纵向筋条缘条宽度 b_{1f} 、纵向筋条缘条厚度 t_{1f} 、周向筋腹板高度 b_{2w} 、周向筋腹板厚度 t_{2w} 、周向筋缘条宽度 b_{2f} 及周向筋缘条厚度 t_{2f} 。

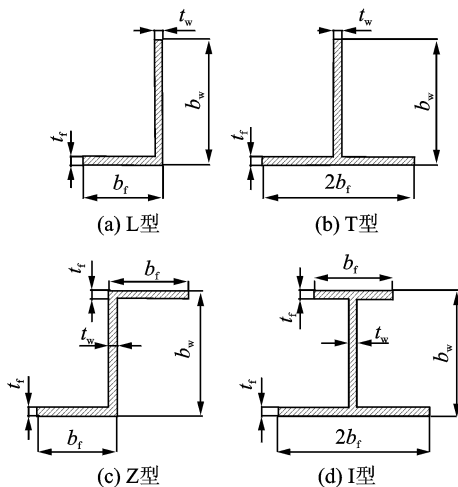


图 3 加强筋型式

Fig. 3 Four patterns of stiffened rib

2 二级布局优化方法

2.1 优化数学模型

以质量最小为目标函数,以强度、稳定性为约束,再加上其他的常规约束,该问题的优化模型可以表述为

$$\begin{cases}
 \text{Find} & X = (s_n, n, s_m, m) \\
 & Y = (t, b_{1w}, t_{1w}, b_{1f}, t_{1f}, b_{2w}, t_{2w}, b_{2f}, t_{2f}) \\
 \text{min} & W = f(X, Y) \\
 \text{s. t.} & \sigma \leq \sigma_b \\
 & X_{iL} \leq X_i \leq X_{iU} \\
 & Y_{iL} \leq Y_i \leq Y_{iU} \\
 & \lambda \geq [\lambda]
 \end{cases} \quad (1)$$

式中: X 表示布局设计变量; Y 表示尺寸设计变量; W 为加筋圆台的质量; σ, σ_b 为结构的应力和许用应力; X_{iL}, X_{iU} 为布局设计变量的下限和上限; Y_{iL}, Y_{iU} 为尺寸设计变量的下限和上限; λ 为屈曲因子; $[\lambda]$ 为稳定性许用因子。

2.2 二级优化模型

针对式(1)所示的优化问题, 本文提出了一种二级布局优化方法。首先定义布局和形状设计变量集 $\tilde{X} = \{X, b_{1w}, b_{1f}, b_{2w}, b_{2f}\}$ 和厚度设计变量集 $\tilde{Y} = \{t, t_{1w}, t_{1f}, t_{2w}, t_{2f}\}$ 。

“内层级”优化是针对给定的 \tilde{X} , 寻找满足约束的 \tilde{Y} 最优解。厚度尺寸的优化直接采用 Nastran 自带的优化程序, 可以获得 \tilde{Y} 最优解的值和对应的目标响应值 $W(\tilde{Y}|\tilde{X})$;

“外层级”优化是将样本点 \tilde{X} 与对应的响应值 W 构造 Kriging 近似模型, 采用多岛遗传算法对 Kriging 近似模型进行优化得到结构的最优解。为检验近似模型的精度, 将最优解代回到有限元模型中校核, 若不满足精度, 将该最优解加入到样本点中更新近似模型; 若满足精度, 则是满足条件的最优解。优化方法流程图见图4。

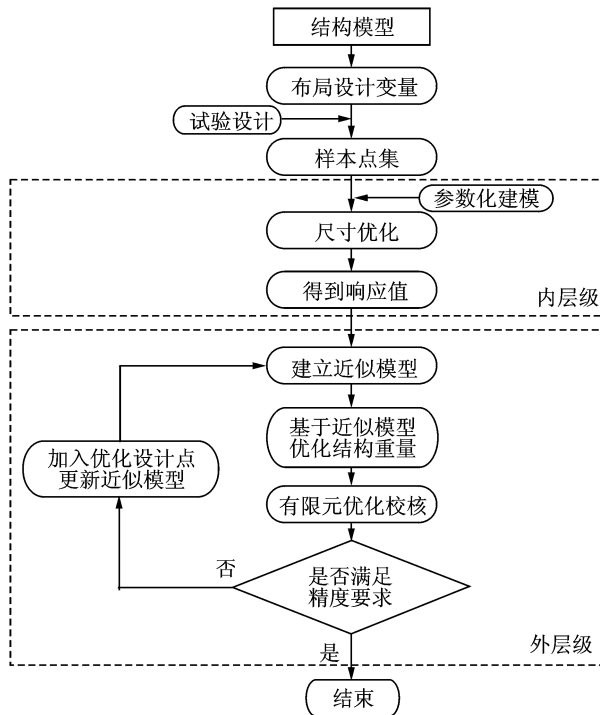


图4 优化方法流程图

Fig. 4 Flowchart of optimization method

2.3 关键技术简述

在二级优化模型具体实施过程中, 需要解决下述3个技术问题:

(1) 试验设计: 试验设计方法是研究如何合理

而有效地获得数据资料的方法。主要内容是讨论如何合理地安排试验、取得数据, 然后进行综合地科学分析。本文采用拉丁方试验设计方法, 它是一种修正的蒙特卡洛方法, 能够有效地进行空间填充, 是应用广泛的现代试验技术之一。

(2) 近似模型方法: 近似模型方法是通过数学模型的方法逼近一组输入变量(独立变量)与输出变量(响应变量)的方法。目前使用较多的近似模型有响应面近似模型、Kriging 近似模型、径向基函数模型及神经网络模型等^[14], 本文采用 Kriging 近似模型, 它又被称空间局部插值法, 是以变异函数理论和结构分析为基础, 在有限区域对区域化变量进行无偏估计的一种方法。

(3) 参数化建模: 参数化建模可以避免重复建模, 大大地减小工作量, 提高效率。本文采用了基于 Patran 二次开发的 PCL 语言, 分别对4种加强筋型式(L型、Z型、T型、工型)编写了对应的 PCL 程序, 从而方便对每个样本点进行有限元分析。

3 算例

3.1 优化对象

本文以阿里安火箭973型支架^[15]为参考模型确定算例的基本参数: 顶部直径 $d=1\ 000$ mm, 底部直径 $D=1\ 400$ mm, 高 $H=1\ 000$ mm。材料为铝合金, 弹性模量 $E=7 \times 10^4$ MPa, 强度极限 $\sigma_b=480$ MPa, 密度 $\rho=2.7 \times 10^{-6}$ kg/mm。外载荷 $F=360$ N/mm。

3.2 尺寸优化结果

首先按照参考模型, 设圆台有纵向加筋为T型的共20个, 周向加筋为T型的共3个。对其进行结构尺寸的优化, 在满足强度及稳定性要求下, 结构质量为20.30 kg。尺寸变量的优化结果见表1。

表1 尺寸优化设计结果

Tab. 1 Dimension optimization results

变量	范围	最优解
蒙皮厚度 t /mm	0.8~2.0	1.4
纵向筋腹板高度 b_{1w} /mm	30~65	59.18
纵向筋腹板厚度 t_{1w} /mm	0.2~1.0	0.5
纵向筋缘条宽度 b_{1f} /mm	30~65	58.43
纵向筋缘条厚度 t_{1f} /mm	1.0~2.5	1.57
周向筋腹板高度 b_{2w} /mm	30~65	51.22
周向筋腹板厚度 t_{2w} /mm	0.2~1.0	0.5
周向筋缘条宽度 b_{2f} /mm	30~65	58.7
周向筋缘条厚度 t_{2f} /mm	1.0~2.5	1.47
最大应力 σ_{max} /MPa	≤ 480	261
屈曲因子 λ	≥ 1	0.95
质量 W /kg		20.30

3.3 布局优化结果

采用本文的二级布局优化方法进行布局和尺寸的同时优化,设计变量的初值、范围和优化结果

见表2。由表2可知布局使结构质量由20.30 kg降为14.411 kg,圆整后的质量为14.49 kg,质量减轻了28.6%,优化效果明显。

表2 布局及尺寸同时优化设计结果

Tab. 2 Layout and dimension optimization results

项目	变量	初值	范围	优化结果	圆整后结果
布局变量	纵向加强筋型式 s_n	2	{1,2,3,4}	2	2
	纵向筋条个数 n	20	{15~30}	21	21
	周向筋条型式 s_m	2	{1,2,3,4}	1	1
	周向筋条个数 m	3	{2,3,4,5,6,7}	6	6
尺寸变量	蒙皮厚度 t/mm	1.4	0.8~2.0	1.029	1.0
	纵向筋腹板高度 b_{1w}/mm	59.18	30~65	30	30
	纵向筋腹板厚度 t_{1w}/mm	0.5	0.2~1.0	0.395	0.4
	纵向筋缘条宽度 b_{1f}/mm	58.43	30~65	49.7	50
	纵向筋缘条厚度 t_{1f}/mm	1.57	1.0~2.5	1.306	1.3
	周向筋腹板高度 b_{2w}/mm	51.22	30~65	42.24	45
	周向筋腹板厚度 t_{2w}/mm	0.5	0.2~1.0	0.31	0.3
	周向筋缘条宽度 b_{2f}/mm	58.7	30~65	44.08	45
约束	周向筋缘条厚度 t_{2f}/mm	1.47	1.0~2.5	1.399	1.4
	最大应力 σ_{\max}/MPa	261	≤ 480	336	344
	屈曲因子 λ	0.95	≥ 1	0.997	0.995
目标	质量 W/kg	20.30		14.411	14.49

考虑到工程应用的实际,对优化结果进行圆整。厚度尺寸圆整到0.1 mm,四舍五入;其他尺寸圆整到5 mm,向上看齐。圆整后,进行了设计约束的校核,本算例结果满足工程设计要求。

从优化过程来看,筋条数目有一个最佳范围。加筋过少,筋格较大,蒙皮先局部失稳;而加筋过多,结构将首先出现整体失稳。当局部失稳和整体失稳同时出现时,加强筋数目是最优的。

4 结束语

二级布局优化方法可以很好地解决圆台类薄壁结构的布局优化设计问题。该方法思路清晰、简单易行、优化效率高而且效果明显。算例表明:PCL参数化建模可以大大地减少重复建模的次数,Kriging近似模型能够很好地代替有限元计算,从而充分地减少了优化所需要的时间,大大地提高了效率,并且也能搜索到全局最优解。

参考文献:

- [1] Liu W, Butler R, Mileham A R, et al. Optimum design, experimental testing and post-buckling analysis of thick composite stiffened panels[R]. AIAA-2005-1826,2005.
- [2] Liu W, Butler R. Optimum buckling design of composite wing cover panels with manufacturing con-

straints[R]. AIAA-2007-2215,2007.

- [3] Venkataraman S. Modeling, analysis and optimization of cylindrical stiffened panels for reusable launch vehicle structures [D]. Gainesville: University of Florida, 1999.
- [4] Lamberti L, Venkataraman S, Haftka R T, et al. Preliminary design optimization of stiffened panels using approximate analysis models[J]. International journal for numerical methods in engineering, 2003, 57(10): 1351-1380.
- [5] 赵群,丁运亮,金海波.基于压弯刚度匹配论则的复合材料加筋板结构优化设计[J].南京航空航天大学学报,2010,42(3):357-362.
Zhao Qun, Ding Yunliang, Jin Haibo. Structural optimization design of composite stiffened panels based on matching regulations of compression and bending stiffnesses [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(3): 357-362.
- [6] 张柱国,姚卫星,刘克龙.基于进化Kriging模型的金属加筋板结构布局优化方法[J].南京航空航天大学学报,2008,40(4):497-500.
Zhang Zhuguo, Yao Weixing, Liu Kelong. Configuration optimization method for metallic stiffened panel structure based on updated Kriging model [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(4): 497-500.
- [7] 张铁亮,丁运亮.复合材料加筋壁板的结构布局优化设

- 计[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(1): 8-12.
- Zhang Tieliang, Ding Yunliang. Structural layout optimization of composite stiffened panel[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(1): 8-12.
- [8] Wodesenbet E, Kidane S, Pang S S. Optimization for buckling loads of grid stiffened composite panels [J]. Composite Structures, 2003, 60(2): 159-169.
- [9] Alinia M M. A study into optimization of stiffeners in plates subjected to shear loading [J]. Thin-Walled Structures, 2005, 43(5): 845-860.
- [10] Banichuk N V, Serra M, Sinitsyn A. Shape optimization of quasi-brittle asymmetric shells by genetic algorithm [J]. Computers and Structures, 2006, 84(29/30): 1925-1933.
- [11] Wang W, Guo S, Chang N, et al. Optimum buckling design of composite stiffened panels using ant colony algorithm[J]. Composite Structures, 2010, 92(3): 712-719.
- [12] Bagheri M, Jafari A A, Sadeghifar M. Multi-objective optimization of ring stiffened cylindrical shells using a genetic algorithm [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 330(3): 374-384.
- [13] 龙连春, 赵斌, 陈兴华. 薄壁加筋圆柱壳稳定性分析及优化[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(7): 997-1003.
- Long Lianchun, Zhao Bin, Chen Xinghua. Buckling analysis and optimization of thin-walled stiffened cylindrical shell [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(7): 997-1003.
- [14] 穆雪峰, 姚卫星, 余雄庆, 等. 多学科设计优化中常用代理模型的研究[J]. 计算力学学报, 2005, 22(5): 608-612.
- Mu Xuefeng, Yao Weixing, Yu Xiongqing, et al. A survey of surrogate models used in MDO [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22(5): 608-612.
- [15] 谢光选. 阿里安运载火箭手册[J]. 国外导弹技术, 1985(增刊): 211-213.
- Xie Guangxuan. Handbook of Ariane Launch Vehicles [J]. Overseas Missile Technology, 1985(S): 211-213.

