

基于理想点法的加筋板屈曲承载力优化

唐其琴, 李伯阳

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 针对加筋板在使用工况中易发生屈曲和结构失稳, 提出一种基于理想点法的屈曲承载力优化设计方法。**方法** 以加筋板的屈曲承载力最大和结构质量最小为目标, 以加筋板的屈曲、最大 von Mises 应力和筋条压损等为约束条件, 并利用理想点法将多目标优化问题转化为单目标优化问题。基于 ANSYS 参数化建模技术, 构建屈曲分析、优化设计一体化分析与设计模型, 并采用单目标优化算法——DOWNHILL SIMPLEX 算法实施了优化分析。**结果** 优化后结构质量从 0.195 kg 增加到 0.24 kg, 增加了 23%, 结构承载力从 129.4 kN 提升到 235.84 kN, 提高了 82%。**结论** 通过优化能够获得结构性能折中的方案, 可为加筋板结构设计应用提供参考。

关键词: 加筋板; 屈曲; 优化设计; 理想点法

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.008

中图分类号: TJ02 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0037-05

Buckling Capacity Optimization of Stiffened Panels Based on Ideal Point Method

TANG Qi-qin, LI Bo-yang

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: Objective To propose a buckling capacity optimal method based on ideal point method in view of the problem that stiffened panels are susceptible to buckling and structural instability in actual conditions. **Methods** The buckling capacity optimal method was established to maximize the buckling capacity and minimize the weight of the structures subjected to constraints on buckling, maximum von Mises stress as well as crippling, and the multi-objective optimization problem was converted to single-objective problem via ideal point method. Based on ANSYS parametric modeling technology, the integration of buckling analysis and optimization design model was constructed. A single-objective optimal algorithm of DOWNHILL SIMPLEX was adopted to implement the optimization analysis. **Results** The weight was raised from 0.195 kg to 0.24 kg, and the structural load-capacity was improved from 129.4 kN to 235.84 kN, with an increase of 23% and 82% respectively. **Conclusion** A compromised design might be achieved by optimization, which may provide a reference for design and applications of the stiffened panel structures.

KEY WORDS: stiffened panels; buckling; optimization design; ideal point method

板壳结构因其简洁的构型和良好的经济性, 已广泛应用于导弹、火箭及船舶等领域, 由于薄壁板壳结构在强度、刚度等方面性能较差, 在实际使用过程中一般都采用加筋的方式增强结构效率, 加筋板结构是一类常用的薄壁板壳结构。加筋板在使用工况中极易

发生屈曲和结构失稳, 而加筋的形状、尺寸与布局直接影响着结构的性能和质量, 合理地布置筋条和设置筋条参数, 便可对加筋板的强度、刚度和稳定性进行优化, 最大限度地提高承载能力和发挥减重潜力, 提升结构综合利用率。

收稿日期: 2018-11-22; 修订日期: 2018-12-17

作者简介: 唐其琴(1985—), 女, 硕士, 主要研究方向为飞行器总体设计、结构优化设计。

为了挖掘加筋板的结构潜力,杨竣博等^[1]针对多设计变量的新型屈曲加筋条壁板优化问题,提出了一种基于 PATRAN 参数化方法,对直/曲加筋条壁板采用 NSGA-板实施了轻量化设计,减轻了结构质量。张柱国等^[2-3]基于试验设计和进化 Kriging 近似模型,提出了一种金属加筋板结构布局优化策略,优化了加筋型式和筋条参数,获得了结构质量减轻效果明显的优化结果。张卫红等^[4]采用拓扑优化方法研究了薄壁结构的加筋布局优化问题,以结构刚度最大为目标,对平面结构和曲面薄壁结构进行了优化,获得了合理的加筋布局。Rikards 等^[5]利用代理模型技术研究了加筋结构的屈曲和后屈曲,进行了加筋结构的优化设计,提高了设计效率。

尽管上述研究对加筋结构在不同条件下的优化问题进行了阐述,但并未将加筋结构的质量和承载力同时作为优化目标,以获取承载力最大化质量较轻的折中方案。文中提出了一种基于理想点法的屈曲承载力优化设计方法,以加筋板的屈曲承载力最大和结构质量最小为目标,以加筋板的屈曲、最大 von Mises 应力和筋条压损等为约束条件,对加筋板进行了结构优化设计。结果表明,可以获得结构性能折中的优化方案。

1 加筋板模型描述

文中讨论的加筋板,其结构特点是由基板和直加筋条两部分组成,其中加筋条在高度和宽度方向上远小于其长度,加筋条的高度大于基板的厚度,如图 1 所示。基板长为 200 mm,宽为 100 mm,厚度为 3 mm,加筋条的长度与基板的长度一致。 l 表示加筋条与基板边缘的距离、 h 表示加筋条的高度、 k 表示加筋条的厚度、 m 表示两根加筋条之间的间距。加筋条数量、长度和基板长度、宽度为非优化设计变量,优化变量为加筋条的设计参数和基板厚度。加筋板材料采用硬铝合金,杨氏模量 E 为 70 GPa,泊松比 ν 为 0.33,密度 ρ 为 2.8 g/cm³。考虑加筋板四边简支^[6](即约束四边 z 方向的线自由度),结构底端约束 y 方向线自由

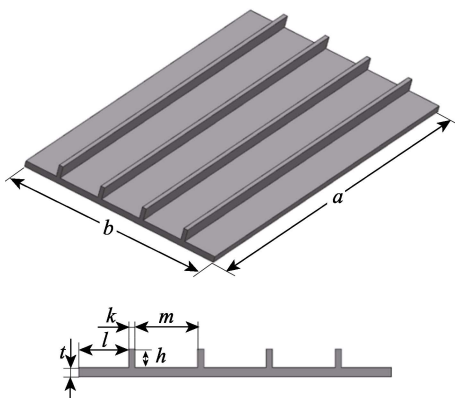


图 1 加筋板几何模型

度,底边中点处约束 x 方向的线自由度,结构顶端施加均匀压力载荷,如图 2 所示。

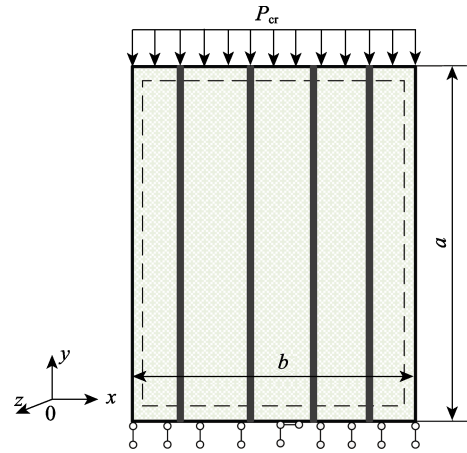


图 2 加筋板载荷与约束

2 加筋板优化模型构建

2.1 优化问题数学描述

多目标优化问题的数学描述为:

$$\begin{cases} \min f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_s(x))^T, \\ x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{s.t. } h_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \\ x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 为目标函数,由 s 个单目标组成; $h_j(x)$ 为不等式约束函数; m 为不等式约束的个数; n 为设计变量个数; x_i^L 和 x_i^U 分别为设计变量 x_i 的下限和上限。

基于加筋板轻量化设计理念,选择结构的质量最小为优化目标,记为 $f_1^0(x) = W(x)$, $W(x) = \rho a(bt + 4kh)$ 。为确保加筋板在受压工况下的承载性能,同时选取结构的屈曲承载力最大为优化目标,并转化优化目标为屈曲承载力的倒数最小,记为 $f_2^0(x) = 1/T(x)$ 。因此,文中研究的是一个典型的多目标优化问题,两个单目标之间相互矛盾,难以同时达到各自的最优值,求解时需在两个单目标之间进行协调权衡和折中处理,以求得对每一个设计目标都比较满意的折衷方案^[7]。

2.2 目标函数单一化

求解多目标优化问题的一个最简单的方法是构造原多目标问题的一个单值评价函数,将多目标优化问题化为单目标优化问题^[8-11],这个评价函数的最优解就是原多目标优化问题的一个有效解。由于两个目标函数数量纲不一,数值可以相差很大,为避免给优化带来数值困难,在构造多目标优化函数前,对它们进行无量纲化和归一化处理。分别考虑优化约束,对单

个目标函数进行单目标优化，可以得到质量和屈曲承载力的最优值 f_1^* 、 f_2^* 。可将原多目标优化问题改写为归一化形式：

$$\min \bar{f} = (f_1 / f_1^*, f_2 / f_2^*)^T \quad (2)$$

对于双目标优化问题，结合文中优化目标函数的特点，采用重构目标法中的理想点法构造单目标优化函数，表达式为：

$$\min f(x) \left[\alpha_1 \left(\frac{f_1 - f_1^*}{f_1^*} \right)^2 + \alpha_2 \left(\frac{f_2 - f_2^*}{f_2^*} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$$\alpha_1 \geq 0, \alpha_2 \geq 0, \alpha_1 + \alpha_2 = 1$$

式中： α_1 、 α_2 为权系数，表示了两个单目标的相对重要程度。考虑取质量和屈曲承载力的重要程度相同，可令其权系数相同，则 α_1 、 α_2 均取值为 0.5。对于单目标优化问题，可采用常规的单目标优化求解方法进行求解。

2.3 约束条件

根据文献[1]，约束条件考虑为：加筋板的屈曲约束、筋条压损约束、von Mises 应力约束，为了消除各响应数值大小对约束函数的影响，对约束函数进行了归一化处理，用归一化形式表示为：

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda_1} - 1 \leq 0 \\ \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} - 1 \leq 0 \\ \frac{\sigma_{st}}{\sigma_c} - 1 \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： λ_1 为加筋板的一阶屈曲特征值； σ_{\max} 和 σ_n 分别为加筋板的最大 von Mises 应力和许用应力； σ_{st} 为加筋条的最小负主应力（代表加筋条中沿主应力方向的最大压缩应力）； σ_c 为加筋条承受的临界压损应力。

$$\sigma_c = \begin{cases} \sigma_n, 0.615 \cdot 25 \left(\frac{h\sqrt{\sigma_n/E}}{k} \right)^{-0.783 \cdot 87} > 1 \\ 0.615 \cdot 25 \sigma_n \left(\frac{h\sqrt{\sigma_n/E}}{k} \right)^{-0.783 \cdot 87} \\ 0.615 \cdot 25 \left(\frac{h\sqrt{\sigma_n/E}}{k} \right)^{-0.783 \cdot 87} \leq 1 \end{cases}, \quad (5)$$

2.4 优化模型建立

在优化设计过程中，需多次重复进行轴压屈曲稳定性分析，为保证计算过程的连续性，建立参数化模型以实现有限元分析的实时调用。采用 ANSYS 提供的 APDL 语言构建结构有限元参数化几何模型，并对几何模型进行参数化网格自动划分，自动加载荷载边界条件。基于理想点法构建单目标优化函数，并采用

参数化建模和有限元分析及优化一体化方法实施并求解优化问题^[12]。通过该方法设计加筋板的基板板厚 t 、筋条厚度 k 、筋条高度 h 、筋条位置 l ，以加筋板的一阶屈曲特征值 λ_1 、最大 von Mises 应力 σ_{\max} 、压损应力 σ_c 为约束，以使结构屈曲承载力最大化和质量最小化。将式（3）—（5）所描述的目标函数和约束条件整理，则优化问题可描述为：

$$\begin{cases} \text{Find } x = (t, k, h, l)^T \\ \min f(x) \\ \text{s.t. } \frac{1}{\lambda_1} - 1 \leq 0 \\ \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} - 1 \leq 0 \\ \frac{\sigma_{st}}{\sigma_c} - 1 \leq 0 \\ x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

3 优化求解与结果分析

优化设计流程如图 3 所示。首先输入三维 APDL 有限元模型，驱动 ANSYS 对输入模型进行计算分析。再基于优化算法对计算结果进行分析评测，判断是否满足目标函数结果要求。如果不满足要求，则调整结构参数，更新模型并进行下一轮迭代分析；如果满足要求，则运算结束。设计变量初始取值为 $t=3.0$ mm， $k=2.0$ mm， $h=6.0$ mm， $l=16.0$ mm。考虑优化效率和优化结果精确性，优化算法采用 DOWNHILL SIMPLEX 算法，该算法适合中等规模设计变量和中度非线性的优化问题，其优点是收敛速度快、优化效率高。

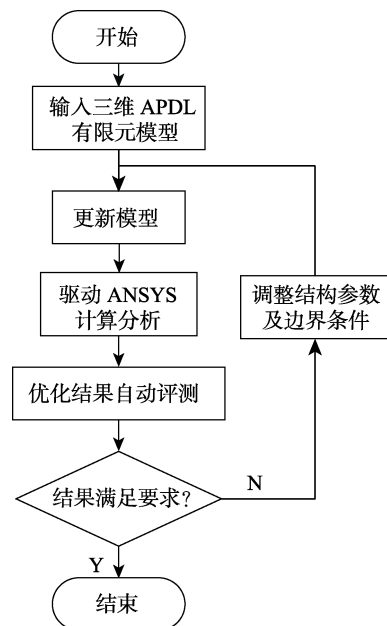


图 3 优化设计流程

加筋板结构优化参数和优化结果见表1。从表1中可以看出,优化设计出的结构承载力为235.84 kN、结构质量为0.24 kg,此时对应的基板厚度 $t=3.5$ mm,加筋条厚度 $k=2.47$ mm,加筋条高度 $h=8.0$ mm,加筋条位置 $l=9.61$ mm。相比初始设计,结构屈曲承载力提高了82%,代价是结构质量增加了23%。通过表1还可以看出,加筋板质量最小和屈曲承载力最大分别作为单目标优化函数时,得到的优化结果比对情况。单目标优化质量最小为

0.141 kg,对应的屈曲承载力为57.856 kN;而单目标优化屈曲承载力最大为329.755 kN,对应的质量为0.28 kg。表明质量小则承载力小、承载力大则质量大,结构质量最小和屈曲承载力最大是一对相互制约的优化因素,多目标优化时将得到二者的折中方案。此外,对比表1中的优化前后参数可知,对设计变量 t 、 k 、 h 、 l 在设计范围内的合理取值,可以获得满足最大屈曲承载力和最小质量的折中的加筋板结构方案。

表1 优化参数及优化结果

	优化参数	初始值	下限	上限	优化值 W_{\min}	优化值 T_{\max}	优化值
设计 变量	加筋板厚度 t/mm	3.0	2.0	4.0	2.0	3.91	3.5
	筋条厚度 k/mm	2.0	1.5	3.5	2.39	3.49	2.47
	筋条高度 h/mm	6.0	4.0	8.0	5.48	7.71	8.0
	筋条位置 l/mm	16.0	6.0	20	19.98	7.08	9.61
约束 条件	一阶屈曲特征值 λ_1	371.9	1.0	—	229.23	661.32	549.69
	最大 von Mises 应力 σ_{\max}/MPa	217.1	0	250.0	151.60	249.74	249.42
	最小负主应力 $\sigma_{\text{st}}/\text{MPa}$	105.84	0	σ_c	125.22	178.31	128.85
目标 函数	结构屈曲承载力 F_{cr}/kN	129.4	—	—	57.856	329.755	235.84
	质量 m/kg	0.195	—	—	0.141	0.28	0.24

由加筋板的结构特点和受力特征可知,中间两根加筋条的中部顶点附近将是应力较高的区域。初始设计、优化设计后,加筋板结构的 von Mises 应力、最小负主应力云图如图4、图5所示。可以看出,初始设计中,结构最大 von Mises 应力为217.1 MPa,最小负主应力为-105.84 MPa,发生在左侧第二根加筋条的中部顶端位置;优化设计后,结构最大 von Mises 应力为249.42 MPa,最小负主应力云图为-128.85 MPa,发生在左侧第三根加筋条的中部顶端位置。说明在线性加载下,加筋板的结构变形呈线性特征,优化设计后的结构薄弱点仍然位于中间两根加筋条的中部顶端附近。

4 结语

文中提出了一种基于理想点法的屈曲承载力优化设计方法,以加筋板的屈曲承载力最大和结构质量最小为目标,以加筋板的屈曲、最大 von Mises 应力和筋条压损等为约束条件,构建了单目标优化模型,并采用单目标优化算法对加筋板结构进行了优化设计。数值算例结果表明,优化后结构质量从0.195 kg增加到0.24 kg,增加了23%;而结构承载力从129.4 kN提升到235.84 kN,提高了82%。表明通过

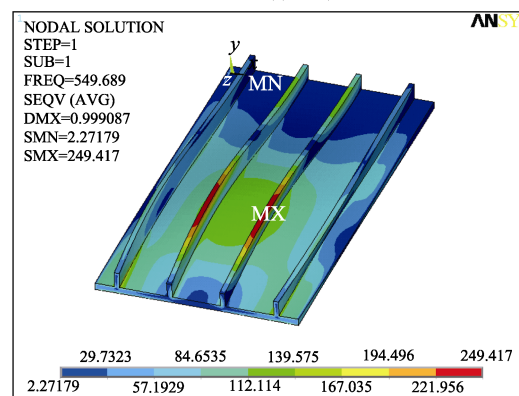
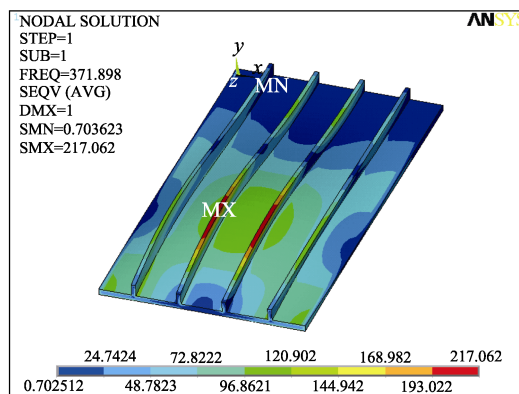


图4 von Mises 应力云图

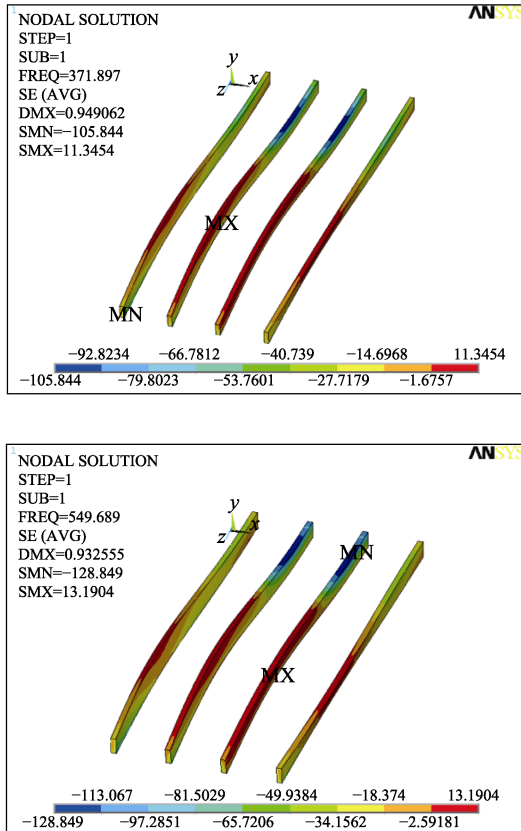


图 5 最小负主应力云图

优化，能够获得结构性能折中的方案。文中提供的加筋板多目标优化方法简单易行、优化效果明显，可为加筋板结构设计应用提供参考。

参考文献：

- [1] 杨竣博, 宋笔锋, 钟小平. 曲加筋条壁板优化设计研究[J]. 机械强度, 2014, 36(6): 904-910.
- [2] 张柱国, 姚卫星, 刘克龙. 基于进化 Kriging 模型的金屬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.
- [3] 张柱国. 基于代理模型的加筋板结构布局优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [4] 张卫红, 章胜冬, 高彤. 薄壁结构的加筋布局优化设计[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2126-2131.
- [5] RIKARDS R, ABRAMOVICH H, KALNINS K, et al. Surrogate Modeling in Design Optimization of Stiffened Composite Shells[J]. Composite Structures, 2006, 73: 244-251.
- [6] 李洋. 薄壁加筋结构屈曲分析及优化设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [7] 叶红玲, 魏旭豪, 郑小龙, 等. 基于理想点法的液体静压支承系统多目标参数优化设计[J]. 计算力学学报, 2011, 28(S1): 117-121.
- [8] 程耿东. 工程结构优化设计基础[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2012: 1-9.
- [9] 李明轩, 苏小平. 三轿车后副车架多目标拓扑优化方法研究[J]. 机械设计与制造, 2016, 6: 130-134.
- [10] 金浩, 向宇, 蒋红华, 等. 轿车前保险杠碰撞性能多目标优化[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(6): 943-949.
- [11] 李骁, 马艳龙, 李映辉. 框架结构多目标优化方法[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(S1): 284-289.
- [12] 唐其琴, 李伯阳, 石运国, 等. 热力复合作用下的典型弹箭结构优化设计[J]. 机械强度, 2016, 38(6): 1229-1236.