

基于序列径向基函数的运载火箭蒙皮桁条结构轻质优化*

王志祥¹, 欧阳兴², 王斌², 张大鹏¹, 雷勇军¹

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要:以我国大型运载火箭薄壁加筋结构轻量化设计为研究背景, 针对轴压下大直径大载荷蒙皮桁条结构开展后屈曲轻质优化研究。基于 Python 语言建立蒙皮桁条结构参数化模型, 为确定结构的极限承载能力, 开展蒙皮桁条结构后屈曲分析。针对蒙皮桁条结构轻质优化涉及离散的拓扑和连续的尺寸优化问题, 提出基于近似模型和组合优化算法的序列近似优化方法, 并利用近似最优解加速算法收敛, 确定蒙皮桁条结构最优设计方案。工程算例结果表明, 所提序列近似优化方法使大直径大载荷运载火箭蒙皮桁条结构减重效果明显, 验证了方法的有效性。

关键词:蒙皮桁条; 后屈曲分析; 灵敏度分析; 轻质优化; 近似模型

中图分类号: V214.4; O344.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2021)01-057-09

Lightweight optimization of skinned purlin structure in launch vehicle based on sequential radial basis function

WANG Zhixiang¹, OUYANG Xing², WANG Bin², ZHANG Dapeng¹, LEI Yongjun¹

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Taking the lightweight optimization of skinned purlin structure in large-scale launch vehicle as the research background, the post-buckling lightweight optimization of large-diameter and large-loaded skinned purlin structure was carried out. In order to achieve ultimate bearing capacity of the structure, the post-buckling behavior of skinned purlin structure was analyzed based on the parametric model established by Python code. Considering that discrete topology and continuous size variables were involved in the lightweight optimization of skinned purlin structure, sequence approximate optimization method based on the surrogate model and combinatorial optimization algorithm was proposed. What's more, approximate optimal solution was used to accelerate algorithm convergence, which can obtain the final design scheme of skinned purlin structure. The results of engineering examples show that the sequence approximate optimization method propose in this paper make the weight loss effect of skinned purlin structure obvious, and verifies the effectiveness of the method.

Keywords: skinned purlin structure; post-buckling analysis; sensitivity analysis; lightweight optimization; surrogate model

薄壁加筋圆柱壳在飞行器结构中得到了广泛的应用, 现有的运载火箭型号有 80% 的箭体舱段采用整体加筋和桁条加强的薄壁壳体结构, 如运载火箭的级间段蒙皮桁条和贮箱等结构^[1-2]。作为运载火箭主要承力部件, 薄壁加筋柱壳轻量化设计可大幅提高火箭运载能力和节约发射成本, 但目前我国箭体加筋柱壳结构的设计手段仍以工程手册和经验设计为主, 再辅以有限元校核分析及地面试验, 缺乏具有针对性的高效优化设计方法^[2-4]。特别地, 对于我国目前正在研制的长征九号重型运载火箭, 其箭体舱段直径达 9.5 m, 起飞质量达 4 000 t 级, 起飞推力达 5×10^7 N

级^[5-6], 大直径大载荷的结构特点将给箭体结构轻量化设计带来严峻挑战。

对于承受轴向载荷的薄壁加筋圆柱壳结构, 整体失稳往往先于结构强度破坏发生, 是结构破坏的主要形式, 这就使得轴压稳定性成为设计该类结构的重点^[7]。Donnell 等^[8-9]从求解非线性大挠度方程出发, 针对薄壳柱壳结构后屈曲分析方法开展了相关研究。李庆亚等^[10-11]从理论上对比研究了隐式弧长法、隐式动力学、显式动力学三种常用分析后屈曲问题的数值方法, 并基于显式动力学方法对轴压作用下薄壁圆柱壳结构开展后屈曲分析研究。王博等^[12-17]采用非线性显式

* 收稿日期: 2019-08-21

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0306200)

作者简介: 王志祥(1992-), 男, 江苏宿迁人, 博士研究生, E-mail: wangzhixiangaad@163.com;

张大鹏(通信作者), 男, 讲师, 博士, E-mail: zhangdapenghui@126.com

动力学分析方法,对 5 m 及以下直径运载火箭中的加筋壳结构进行分析,并基于代理模型和等效刚度模型进行优化设计。范书群等^[4]基于非线性显式算法对蒙皮桁条结构的中间框尺寸进行了优选设计,理论分析结果与实验结果一致性较好,验证了该分析方法的有效性。从公开文献来看,目前主要是针对 5 m 及以下直径的运载火箭薄壁加筋柱壳开展研究,当直径达 10 m 级甚至以上时,薄壁加筋柱壳径厚比将是以往结构 2~3 倍,其带来的稳定性问题将更为突出,针对该问题的研究尚少。蒙皮桁条结构设计变量众多,涉及离散的拓扑和连续的尺寸优化,其轻质优化问题是典型的混合整数非线性规划问题,且随着结构尺寸的跨越式提高,大直径蒙皮桁条结构后屈曲分析与优化效率将受到极大挑战^[17],因此亟须针对大直径蒙皮桁条结构开展轻质优化设计研究。

本文以我国未来大型或超大型运载火箭薄壁加筋结构设计为背景,针对大直径大载荷蒙皮桁条结构开展结构轻量化研究。基于 Python 语言建立蒙皮桁条结构全参数化模型,研究了不同加载速度对大直径蒙皮桁条结构后屈曲行为的影响规律。针对蒙皮桁条结构轻质优化涉及离散的拓扑和连续的尺寸优化问题,将该优化问题转化成含非线性性能约束的参数优化问题,提出了基于径向基近似模型和多岛遗传算法加非线性二次规划算法的混合优化策略求解转化后的优化问题,获得了可行的优化解。

1 轴压后屈曲分析及优化问题描述

1.1 非线性显式后屈曲分析

对于一个显式动力学分析,运动方程如式(1)所示。

$$M\mathbf{a}_i = \mathbf{F}_i^{\text{ext}} - \mathbf{F}_i^{\text{int}} - C\mathbf{V}_i - K\mathbf{U}_i \quad (1)$$

式中, M 为质量矩阵, C 为阻尼矩阵, K 为刚度矩阵, \mathbf{a}_i 为节点加速度矢量, \mathbf{V}_i 为节点速度矢量, \mathbf{U}_i 为节点位移矢量, t 为时间, $\mathbf{F}_i^{\text{ext}}$ 为外力矢量, $\mathbf{F}_i^{\text{int}}$ 为内力矢量。

采用中心差分法对控制方程进行显式的时间积分,应用一个增量步的动力学条件去计算下一个增量步的动力学条件。

$$\mathbf{a}_i = (\mathbf{U}_{i-\Delta t} - 2\mathbf{U}_i + \mathbf{U}_{i+\Delta t})/\Delta t^2 \quad (2)$$

$$\mathbf{V}_i = (\mathbf{U}_{i+\Delta t} - \mathbf{U}_{i-\Delta t})/(2\Delta t) \quad (3)$$

其中, Δt 为时间增量。

将式(2)和式(3)代入式(1)中,则原运动方程可改写成:

$$\left(\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t}\right)\mathbf{U}_{i+\Delta t} = \mathbf{F}_i^{\text{ext}} - \mathbf{F}_i^{\text{int}} + \left(\frac{2M}{\Delta t^2} + K\right)\mathbf{U}_i - \left(\frac{M}{\Delta t^2} - \frac{C}{2\Delta t}\right)\mathbf{U}_{i-\Delta t} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,增量步结束时的状态仅取决于该增量步开始时的位移、速度和加速度,在时间上“显式地”向前计算位移、速度和加速度,因此不存在收敛性问题。

典型加筋柱壳结构轴压位移-载荷曲线如图 1 所示,随着载荷逐步增大,结构可能呈现出线性前屈曲-非线性后屈曲-压溃破坏行为,结构进入线性前屈曲后仍可继续承载,直至整体压溃破坏,压溃破坏后结构承载力急剧下降后趋于稳定^[18]。相比于弧长法和隐式动力学方法,显式动力学方法可以稳健地跟踪轴压薄壁结构的后屈曲及后压溃路径及行为,并能与试验结果吻合较好^[19]。

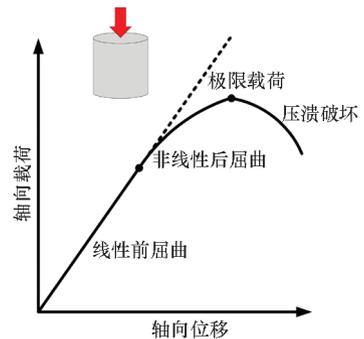


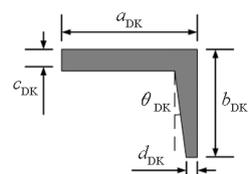
图 1 典型加筋柱壳轴压位移-载荷曲线

Fig. 1 Schematic of load versus end-shortening curve for typical stiffened shell

1.2 蒙皮桁条结构有限元建模及其极限载荷计算

作为运载火箭典型的加筋柱壳承力结构,蒙皮桁条结构主要由端框、中间框、桁条和蒙皮组成。蒙皮内侧沿高度方向等间距对称分布 4 个“Ω”形截面的中间框,2 个“L”形截面的端框,同时,蒙皮外侧沿环向均匀分布“工”形截面的竖向桁条,端框、中间框及桁条截面形式如图 2 所示。

蒙皮桁条结构主要通过桁条来提高结构轴压承载能力,而蒙皮的作用主要是锥形和支持桁条。且蒙皮在较小的载荷下会局部失稳和局部进入塑性状态,结构仍能继续承载,直至结构发生整体压溃破坏,其极限承载力由结构整体失稳和后屈曲状态决定。



(a) 端框

(a) End frame

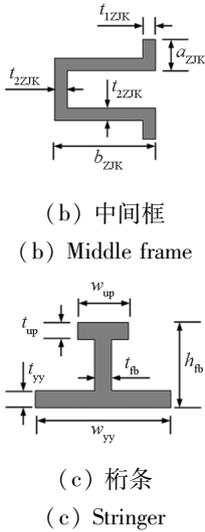


图 2 蒙皮桁条结构组件截面尺寸

Fig. 2 Section dimension of the components of skinned purlin structure

本文基于 Python 语言对蒙皮桁条结构进行参数化建模^[2]。由于蒙皮桁条结构常使用较薄的蒙皮和桁条,结构上体现为板壳特性,为了能够准确模拟桁条局部截面平动和转动,采用壳单元划分网格,且桁条腹板高度方向划分两层单元^[20]。模型边界条件及加载条件如下:模型上下端面中心点各建立一个参考点,并分别与上下端面节点进行刚性耦合,在下参考点处进行固支约束,在上参考点处约束除轴向位移外的其余自由度,轴向匀速施加 35 mm 强迫位移。模型选用铝合金材料,弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.3,密度为 2.78×10^{-6} kg/mm³,屈服应力 440 MPa,强度极限为 550 MPa,延伸率为 6%。参照以往火箭蒙皮桁条结构设计方法,通过初步结构优化设计,确定蒙皮桁条结构初始设计结构参数,如表 1 所示。

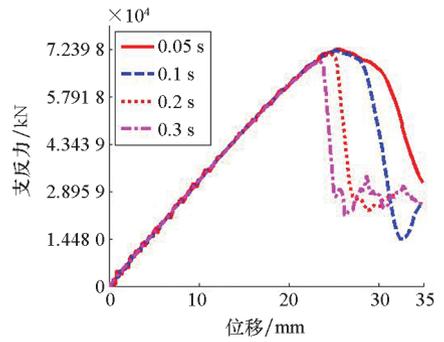
表 1 蒙皮桁条结构初始设计结构参数^①

Tab. 1 Initial design parameters of skinned purlin structure

变量	初始值	变量	初始值
a_{DK}/mm	57.38	h_{fb}/mm	63.21
b_{DK}/mm	76.24	t_{fb}/mm	8.41
c_{DK}/mm	2.09	N_{HT}	103
d_{DK}/mm	2.95	a_{ZJK}/mm	49.74
$\theta_{DK}/(^{\circ})$	4.01	t_{1ZJK}/mm	3.33
w_{yy}/mm	85.59	b_{ZJK}/mm	83.24
t_{yy}/mm	14.24	t_{2ZJK}/mm	4.67
w_{up}/mm	33.84	t_{MP}/mm	1.37
t_{up}/mm	5.84		

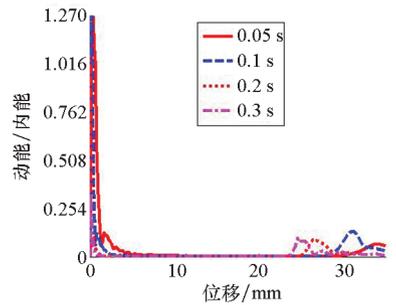
①表格中 N_{HT} 表示桁条数量,其余设计变量含义如图 2 所示。

采用显式非线性屈曲算法求解该结构极限承载能力时,失稳载荷和失稳模态均与加载速度相关,因此分别采用不同的加载速度对该模型进行分析,并观察结构内部动能与内能的比值,确保加载过程为准静态加载。计算采用 4 核 2.9 GHz 主频 CPU 及 8 GB 内存的计算机。图 3 和表 2 分别给出了加载速度为 600 mm/s、300 mm/s、150 mm/s、100 mm/s (即分别在 0.05 s、0.1 s、0.2 s、0.3 s 内将位移值从 0 mm 施加到 30 mm) 时的载荷位移曲线、动能与内能的比值随加载位移的变化曲线、结构失稳位移云图、极限载荷以及计算耗时。



(a) 载荷位移曲线

(a) Load-displacement curves



(b) 动能与内能比值曲线

(b) Curve of the ratio between kinetic-energy and internal-energy

图 3 不同加载速度下的载荷位移曲线及动能/内能随加载位移的变化曲线

Fig. 3 Load-displacement curves and curve of the ratio between kinetic-energy and internal-energy varying with displacement in different loading speed

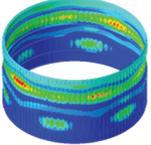
从图 3(b) 可以看出,对于不同的加载速度,结构内部动能与内能的比值在加载过程中均小于 5%,加载之初的峰值是由结构从无载荷状态突然进入到有载荷状态引起的,随着加载继续,该峰值逐渐减小,曲线趋于平稳;加载后期的峰值是由载荷达到结构承载极限后,结构突然发生整体失稳引起的,可以认为是准静态加载。从图 3(a) 及

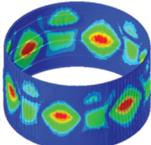
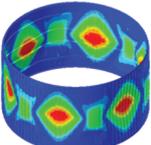
表 2 可以看出,随着加载速度变小,结构极限承载能力(曲线的峰值)逐渐减小,对应的加载位移值也逐渐减小,且加载速度越小,峰值点后载荷位移曲线越陡,说明结构达到极限载荷后便迅速发生整体失稳。

经大量试算可知,当加载速度小于 150 mm/s 时,减小加载速度对极限载荷的影响小于 4%,结构失稳波形相同,但计算耗时成倍增长。因此,综合考虑计算精度和计算效率,在后续优化中加载速度可取 150 mm/s。

表 2 不同加载速度下结构整体失稳情况

Tab.2 Overall instability in different loading speed

项目	加载速度	
	600 mm/s	300 mm/s
位移云图		
极限载荷/kN	7.240×10^4	7.172×10^4
耗时/h	0.58	1.16

项目	加载速度	
	150 mm/s	100 mm/s
位移云图		
极限载荷/kN	7.088×10^4	6.867×10^4
耗时/h	2.23	3.93

1.3 蒙皮桁条结构优化问题描述

通常,结构设计优化包含拓扑、形状和尺寸优化。蒙皮桁条结构优化同时涉及拓扑优化和尺寸优化。其中,拓扑优化与桁条数量相关,不同桁条数量决定了蒙皮桁条结构的拓扑形式,属于离散结构拓扑优化;端框、中间框、桁条截面尺寸以及蒙皮厚度是在结构拓扑形式和形状固定的情况下,搜索最优的截面尺寸,属于结构尺寸优化。

考虑到蒙皮桁条结构中桁条沿环向分布的对称性,本文分别将拓扑优化变量和尺寸优化变量转化成整数变量和连续变量,从而将离散拓扑优化和尺寸优化问题转化成混合整数非线性规划问题。因此,蒙皮桁条结构优化问题可以描述为:

$$\begin{aligned}
 & \text{find } \mathbf{x} = [\mathbf{x}_c, x_d] \\
 & \text{min } f(\mathbf{x}) \\
 & \text{s. t. } g(\mathbf{x}) \leq 0 \\
 & \quad \mathbf{x}_c = [\mathbf{x}_{c_i} \mid \mathbf{x}_{c_i}^L \leq \mathbf{x}_{c_i} \leq \mathbf{x}_{c_i}^U, i = 1, 2, \dots, n] \\
 & \quad x_d^L \leq x_d \leq x_d^U, x_d \in \mathbf{N}
 \end{aligned} \tag{5}$$

式中, \mathbf{x}_c 表示 n 个连续变量的向量集合。在蒙皮桁条结构优化中, \mathbf{x}_c 表示连续的截面尺寸变量,而 x_d 表示桁条数目变量。

2 基于径向基函数近似模型的序列近似优化方法

2.1 径向基函数近似模型方法

径向基函数(Radial Basis Function, RBF)近似模型^[21-22]是由三层结构构成的前向神经网络:第一层为输入层,节点个数等于输入的样本点个数;第二层为隐含层,节点个数取决于问题的复杂程度;第三层为输出层,节点个数等于输出变量的维数。径向基函数网络模型结构如图 4 所示。

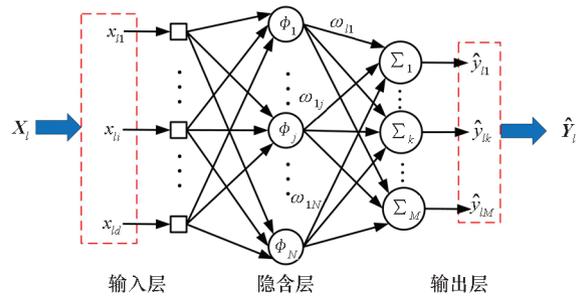


图 4 RBF 网络模型结构

Fig.4 Model structure of radial basis function

基本径向基函数的数学模型为:

$$\hat{\mathbf{Y}}^{(k)}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N \omega_{ik} \phi_i(\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_i\|) \tag{6}$$

式中: \mathbf{X} 为输入值; $\hat{\mathbf{Y}}^{(k)}(\mathbf{X})$ 为径向基函数网络模型预测值的第 k 个分量; \mathbf{X}_i 为第 i 个样本点; $\phi_i(\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_i\|)$ 为基函数; ω_{ik} 为对应预测值第 k 个分量的基函数权值。

研究表明^[22-25], Gauss 分布函数在全局近似能力方面优势明显。因此将采用 Gauss 分布函数作为基函数,其表示如式(7)所示。

$$\phi_i(r) = \exp(-r^2/c_i^2) \tag{7}$$

式中, c_i 为第 i 个基函数的核宽度, $r = \|\mathbf{X} - \mathbf{X}_i\|$ 为样本点 \mathbf{X} 与 \mathbf{X}_i 之间的欧式距离。

为了训练径向基函数网络,令 $\hat{\mathbf{Y}}_i = \mathbf{Y}_i, i = 1, 2, \dots, N$, 且将 N 个样本点的输入输出 $[\mathbf{X}_i \mid \mathbf{Y}_i], i = 1, \dots, N$ 代入式(6)中,得到如式(8)所示的关于权系数矩阵 $\boldsymbol{\omega}$ 的矩阵方程。

$$\omega = \Phi^{-1} Y \quad (8)$$

2.2 基于近似模型和组合优化算法的序列近似优化方法

空间均布性及填充性高的样本点能够以更大的概率捕获近似对象的特征信息,提高近似模型的近似精度^[26]。基于优化拉丁超立方试验设计方法选取初始样本点,由于初始样本点难以保证近似模型对最优解的准确预测,因此在优化的过程中需要通过加入新的采样点对近似模型进行更新,逐步提高近似模型的近似精度。

提出的基于径向基函数近似模型的序列优化方法如图 5 所示。首先利用有限元计算模型获得初始样本点输出值,形成训练样本点集,然后基于训练样本点集构造 RBF 近似模型并开展优化。基于代理模型和组合优化算法的序列近似优化设计分为:内层迭代优化和外层迭代优化。在内层优化中,采用多岛遗传算法(Multi-Island Genetic Algorithm, MIGA)和非线性二次规划(Non-Linear Programming by Quadratic Lagrangian Programming, NLPQLP)算法对 RBF 近似模型进行寻优,收敛后进入外层优化;在外层优化中,将内层优化获得的近似最优解作为新的采样点,并调用有限元计算模型进行非线性后屈曲分析,如果有限元计算结果与 RBF 网络预测的误差满足收敛条件,即小于 0.1%,则优化结束,否则将该采样点及有限元计算结果加入样本点集中,更新近似模型,提高近似模型的局部近似能力,并再次进入内层优化,直至内外两层都收敛。

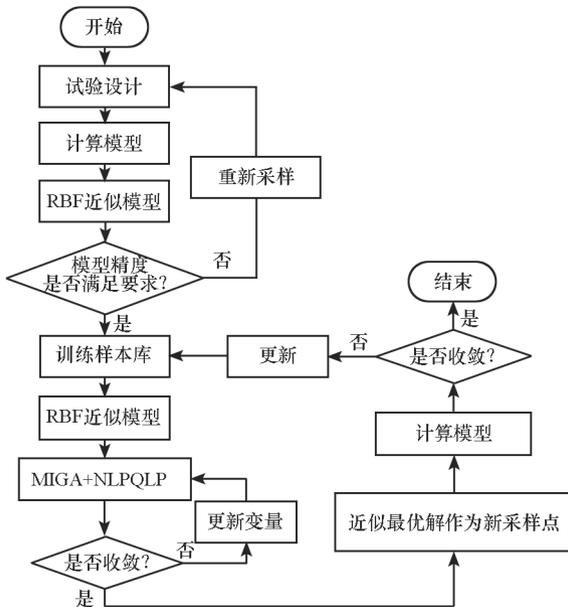


图 5 基于径向基函数近似模型优化流程

Fig. 5 Flowchart of sequence approximate optimization method based on RBF model

在基于近似模型的优化研究中,主要耗时集中在初始样本点的计算上,利用银河超级计算机对构建近似模型的初始样本点进行多节点并行计算,近似模型的构建和基于近似模型优化的耗时仅为单次后屈曲分析的 1/10 左右,这意味着不仅允许选取更多的初始样本点以提高近似模型全局近似精度,而且可以进行后续采样以更新近似模型,提高其局部近似精度,大大缩短了优化设计周期。

3 蒙皮桁条结构轻质优化设计

3.1 结构参数灵敏度分析

蒙皮桁条结构轻质优化设计影响因素众多,为了从中找出影响结构质量和极限载荷的主要因素,进而实现设计空间缩减并指导后续优化设计,针对蒙皮桁条结构进行参数灵敏度分析。采用优化拉丁超立方实验设计方法选取 2 400 个初始样本点,利用并行计算资源对不同结构参数下蒙皮桁条结构进行后屈曲分析。设计变量取值范围见表 3,图 6 为样本点在结构质量和极限载荷空间内的分布散点图。

表 3 设计变量取值范围

Tab. 3 Design spaces of design variables

变量	下限	上限
a_{DK}/mm	45	80
b_{DK}/mm	75	120
c_{DK}/mm	5	15
d_{DK}/mm	5	10
$\theta_{DK}/(^{\circ})$	4	5
w_{yy}/mm	50	100
t_{yy}/mm	2	15
w_{up}/mm	20	50
t_{up}/mm	2	15
h_{fb}/mm	50	150
t_{fb}/mm	2	15
N_{HT}	85	105
t_{MP}/mm	1.2	1.5
a_{ZJK}/mm	22	50
t_{1ZJK}/mm	2	10
b_{ZJK}/mm	80	200
t_{2ZJK}/mm	2	10

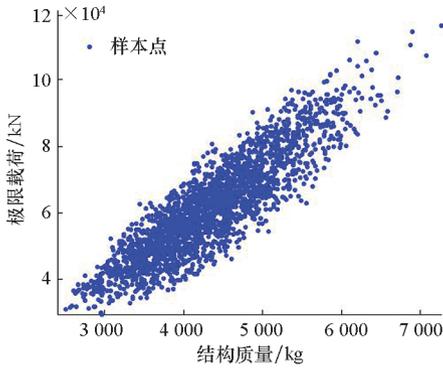


图 6 初始样本点分布散点图

Fig. 6 Distribution scatter diagram of initial sample points

根据上述 2 400 个样本点的计算结果,首先将各个变量归一化到 $[-1, 1]$ 中,然后基于最小二乘法建立二次回归模型。

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_j x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

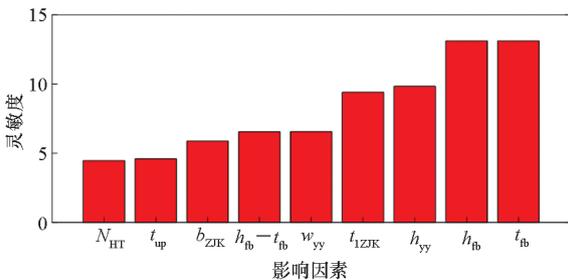
式中: $\beta_0, \beta_i, \beta_j$ 和 β_{ij} 分别为对应项系数。

通过将系数归一化,得到不同项对响应的贡献率百分比,即对响应的灵敏度。

$$N_i = 100S_i / \sum S_i \quad (10)$$

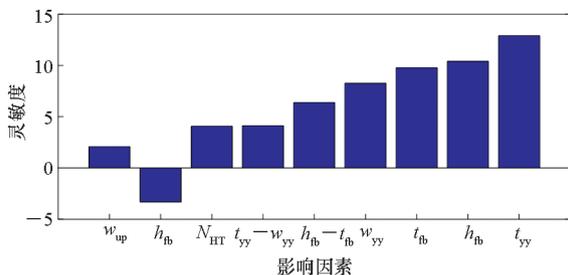
式中: S_i 为对应项系数,且 $\sum N_i = 100$ 。

基于上述灵敏度分析方法和工程设计经验,对结构质量和极限载荷影响较大的前 9 个因素分别如图 7 所示。由结果可知,桁条截面参数以及



(a) 结构质量灵敏度

(a) Sensitivity analysis of the structural mass



(b) 极限载荷灵敏度

(b) Sensitivity analysis of the collapse load

图 7 结构参数灵敏度分析

Fig. 7 Results of the structure sensitivity analysis

部分中间框参数对结构极限载荷影响较大,在后续结构优化设计中应重点考虑。

3.2 基于序列近似优化方法的蒙皮桁条后屈曲轻质优化

本节将基于如第 2 节所述的序列近似优化方法对蒙皮桁条结构进行后屈曲轻质优化。根据 3.1 节分析结果,并综合工程设计经验,选取如式(1)所示的参数作为优化变量,其他设计变量均取如表 1 所示的初始设计值,开展蒙皮桁条结构轻质优化设计。蒙皮桁条结构轻质优化数学模型可表示为:

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{x} \\ & \text{min } M \\ & \text{s. t. } F_{cr} \geq F_{cr}^* \\ & \mathbf{x}_{\min} < \mathbf{x} < \mathbf{x}_{\max} \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $\mathbf{x} = [w_{yy}, t_{yy}, w_{up}, t_{up}, h_{tb}, t_{tb}, N_{HT}, t_{1ZJK}, b_{ZJK}]$, 变量含义如图 2 所示,取值范围如表 3 所示。优化目标为结构质量 M ; F_{cr}^* 为目标极限载荷,为 7×10^7 N。

为求解如式(11)所示的优化问题,拟采用 2.2 节所述的基于近似模型和组合优化算法的序列近似优化方法进行研究。通过优化拉丁超立方试验选取 1 000 个样本点,并调用并行资源计算,获得相应的结构质量和极限载荷。为验证所选样本点空间均匀性及径向基函数代理模型全局近似能力,分别从 1 000 个样本点中随机选取 980 个样本点构建径向基函数代理模型,并用剩余的 20 个样本点对代理模型全局近似能力进行检验,该过程独立重复 10 次,分别评估每次近似精度指标 R^2 值^[23,26],计算结果如图 8 所示。由计算结果可知,极限载荷和质量的 R^2 值均接近于 1,表明所选样本点具有较好的均匀性,且构建的径向基函数代理模型具有较高的全局近似能力,可用于后续的结构轻质优化研究。

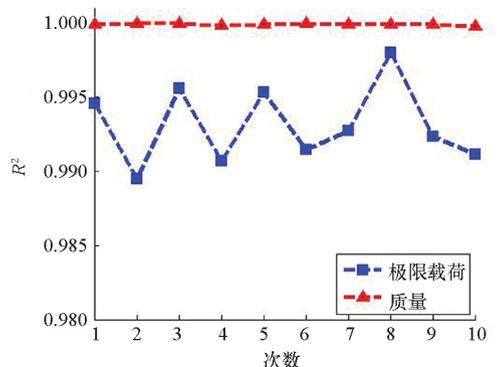


图 8 径向基函数代理模型近似精度

Fig. 8 Approximate accuracy of RBF model

基于序列近似模型的优化平台如图 9 所示,其中,经多次试算分析,为提高多岛遗传算法种群多样性和收敛速度,多岛遗传算法中设置岛数为 20、每个岛种群数为 20,进化代数数为 40,交叉率为 1.0,变异率为 0.01,迁徙率为 0.01;为提高 NLPQLP 收敛精度,非线性规划算法设置最小步长为 10^{-4} ,最大迭代次数为 50。

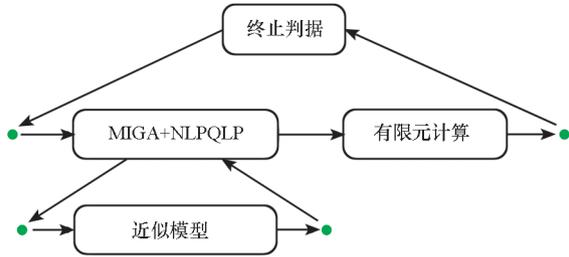


图 9 基于序列近似模型的优化平台

Fig.9 Optimization platform based on sequence surrogate model

3.3 结果分析

图 10 为优化后样本点在结构质量和极限载荷空间内的分布散点图,可以看出,每次迭代后近似最优点的极限载荷均在目标极限载荷附近,且结构质量逐渐减小。

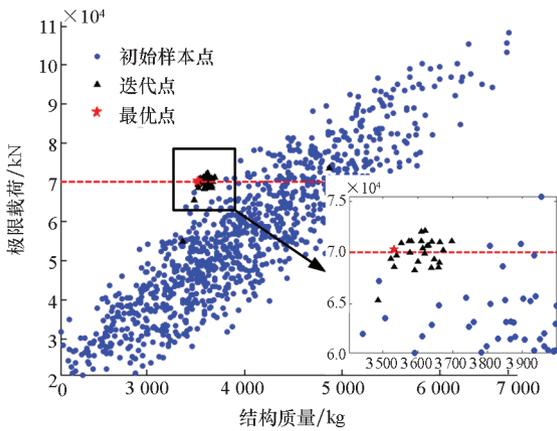
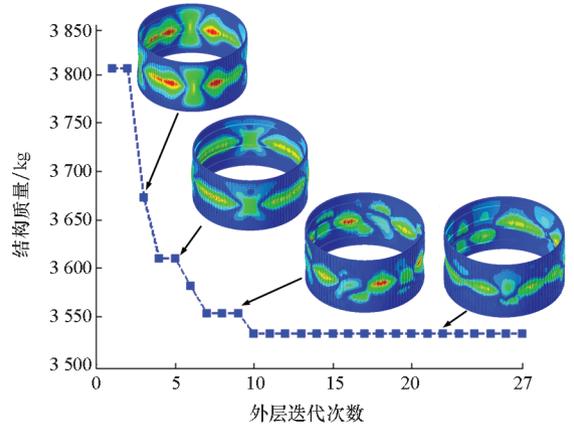


图 10 优化后样本点分布散点图

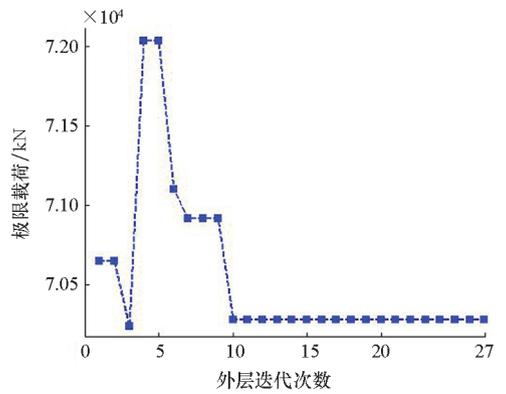
Fig.10 Distribution scatter diagram of optimal sample points

经过 27 次迭代,优化结果趋于收敛,目标函数及性能约束的外层迭代优化曲线分别如图 11(a)及图 11(b)所示,每轮迭代后结构整体失稳模态如图 11(a)所示。优化后结构质量为 3 530 kg,极限载荷为 7.028×10^4 kN,相比于初始设计结构,在承载力满足设计要求的情况下,结构减重 273 kg。优化前后结构尺寸如表 4 所示。



(a) 结构质量迭代曲线

(a) Iteration curve of structural mass



(b) 极限载荷迭代曲线

(b) Iteration curve of limit load

图 11 外层优化迭代曲线

Fig11 Iteration curve of outer optimization

表 4 初始设计与优化结果

Tab.4 Comparison of initial design and optimal variables

变量	初始值	优化值
w_{yy}/mm	85.59	94.33
t_{yy}/mm	14.24	14.26
w_{up}/mm	33.84	24.27
t_{up}/mm	5.84	8.03
h_{fb}/mm	63.21	76.89
t_{fb}/mm	8.41	4.82
N_{HT}	103	97
t_{1ZJK}/mm	3.33	2.38
b_{ZJK}/mm	83.24	97.62
M/kg	3 803	3 530
F_{\max}/kN	7.172×10^4	7.056×10^4

4 结论

本文以大型运载火箭结构轻质设计为研究背景,针对大直径大载荷蒙皮桁条结构开展后屈曲轻质优化研究。

基于 Python 语言对运载火箭级间段蒙皮桁条结构建立参数化模型,为获得结构极限承载能力,采用显式动力学方法对蒙皮桁条结构进行后屈曲分析计算,并分析加载速度对计算精度和效率的影响,确定用于后续优化分析的加载速度。

针对轴压作用下蒙皮桁条结构优化变量多、计算量大的问题,首先,基于优化拉丁超立方实验设计方法对结构参数灵敏度进行了分析,根据灵敏度分析结果,合理地选择了对结构极限承载能力及质量影响显著的设计变量,有效缩减了优化变量维数;然后,提出基于近似模型和多岛遗传及非线性二次规划算法的序列近似优化方法,并对蒙皮桁条结构开展后屈曲轻质优化,获得了工程可行的较优的蒙皮桁条结构设计方案。优化结果表明:相对于初始设计结构,优化后的结构有效减重 273 kg,验证了方法的有效性。

后续将在本文的研究基础上开展基于不同桁条截面形式的蒙皮桁条结构轻质优化研究,并针对最优结构形式开展试验验证研究,为大型运载火箭蒙皮桁条结构工程设计提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 毛佳,江振宇,陈广南,等. 轴压薄壁加筋圆柱壳结构优化设计研究[J]. 工程力学, 2011, 28(8): 183-192.
MAO Jia, JIANG Zhenyu, CHEN Guangnan, et al. Design and optimization research on rib-stiffened thin cylindrical shell under axial loading [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(8): 183-192. (in Chinese)
- [2] 郝鹏. 面向新一代运载火箭的网格加筋柱壳结构优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
HAO Peng. Optimum design of stiffened shell structures for new generation launch vehicle[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [3] 陈献平, 鄢东洋, 姚瑞娟, 等. 轻质箭体结构优化设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2019, 367(2): 17-21, 43.
CHEN Xianping, YAN Dongyang, YAO Ruijuan, et al. Optimization design of the rocket structure[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019, 367(2): 17-21, 43. (in Chinese)
- [4] 范书群, 戴政, 黄诚, 等. 大直径火箭半硬壳结构框-桁匹配性设计[J]. 强度与环境, 2015, 42(3): 34-41.
FAN Shuqun, DAI Zheng, HUANG Cheng, et al. Matching design of frame-stringer for large scale semigrad launch vehicle cylindrical structure [J]. Structure & Environment Engineering, 2015, 42(3): 34-41. (in Chinese)
- [5] 龙乐豪, 郑立伟. 关于重型运载火箭若干问题的思考[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(1): 8-12.
LONG Lehao, ZHENG Liwei. Consideration of some issues on the heavy launch vehicle [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2017, 1(1): 8-12. (in Chinese)
- [6] 何巍, 刘伟, 龙乐豪. 重型运载火箭及其应用探讨[J]. 导弹与航天运载技术, 2011(1): 1-5.
HE Wei, LIU Wei, LONG Lehao. Heavy launch vehicle and its application[J]. Missiles and Space Vehicles, 2011(1): 1-5. (in Chinese)
- [7] 郝鹏, 王博, 李刚, 等. 基于代理模型和等效刚度模型的加筋柱壳混合优化设计[J]. 计算力学学报, 2012, 29(4): 481-486.
HAO Peng, WANG Bo, LI Gang, et al. Hybrid optimization of grid-stiffened cylinder based on surrogate model and smeared stiffener model [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(4): 481-486. (in Chinese)
- [8] DONNELL L H. A new theory for the buckling of thin cylinders under axial compression and bending [J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1934, 56(5): 3083-3086.
- [9] VON KÁRMÁN T, TSIEN H. The buckling of thin cylindrical shells under axial compression[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1941, 8: 303-312.
- [10] 李庆亚, 谭福颖, 乔玲, 等. 薄壁加筋圆柱壳后屈曲分析方法研究[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(4): 541-548.
LI Qingya, TAN Fuying, QIAO Ling, et al. Comparative study on post-buckling analysis method of thin-walled stiffened cylindrical shell [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(4): 541-548. (in Chinese)
- [11] 李庆亚. 薄壁加筋结构后屈曲分析方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
LI Qingya. Post-buckling analysis of thin-walled stiffened shells [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [12] 王博, 杜凯繁, 郝鹏, 等. 考虑几何缺陷的轴压双层蒙皮加筋柱壳结构设计[J]. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2018, 48(1): 95-102.
WANG Bo, DU Kaifan, HAO Peng, et al. Design of sandwich walled cylindrical shell structure with initial imperfections [J]. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2018, 48(1): 95-102. (in Chinese)
- [13] HAO P, YUAN X J, LIU C, et al. An integrated framework of exact modeling, isogeometric analysis and optimization for variable-stiffness composite panels[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 339(1): 205-238.
- [14] HAO P, WANG Y T, LIU C, et al. Hierarchical nondeterministic optimization of curvilinearly stiffened panel with multicuts[J]. AIAA Journal, 2018, 56(10): 1-15.
- [15] HAO P, FENG S J, ZHANG K, et al. Adaptive gradient-enhanced kriging model for variable-stiffness composite panels using Isogeometric analysis[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(1): 1-16.
- [16] 王博, 田阔, 郝鹏, 等. 变截面加筋板尺寸-布局一体化设计[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(2): 208-213.
WANG Bo, TIAN Kuo, HAO Peng, et al. Size-layout integrated optimization of variable cross-section stiffened panels [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2017, 40(2): 208-213. (in Chinese)

- [17] 王博,田阔,郑岩冰,等. 超大直径网格加筋筒壳快速屈曲分析方法[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 178-186.
WANG Bo, TIAN Kuo, ZHENG Yanbing, et al. A rapid buckling analysis method for large-scale grid-stiffened cylindrical shells [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(2): 178-186. (in Chinese)
- [18] 郝鹏,王博,李刚,等. T型截面多级加筋柱壳的缺陷敏感性分析及优化研究[J]. 工程力学, 2015, 32(8): 223-228.
HAO Peng, WANG Bo, LI Gang, et al. Imperfection sensitivity analysis and optimization of hierarchical stiffened shells with T-section stiffeners [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(8): 223-228. (in Chinese)
- [19] 王斌. 结构多性能优化设计及其在航天结构设计中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
WANG Bin. Multi-performance optimization of structures and its application in aerospace structural design [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [20] 张希. 基于显式有限元方法的蒙皮桁条结构稳定性分析方法[C]//北京力学学会第十九届学术年会论文集, 2013: 495-496.
ZHANG Xi. Stability analysis method of skin truss structure based on explicit finite element method [C] // Proceedings of the 19th Annual Academic Meeting of the Beijing Institute of Mechanics, 2013: 495-496. (in Chinese)
- [21] YOSHIAKI K. Simple case study on radius of radial basis function network for sequential approximate optimization[J]. Sice Journal of Control Measurement & System Integration, 2017, 10(6): 551-556.
- [22] ZHANG W J, WEI D F. Prediction for network traffic of radial basis function neural network model based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Neural Computing and Applications, 2018, 29: 1143-1152.
- [23] 武泽平. 序列近似优化方法及其应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
WU Zeping. Study on sequential approximate optimization and its application [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [24] MISHRA P K, NATH S K, KOSEC G, et al. An improved radial basis-pseudospectral method with hybrid Gaussian-cubic kernels [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2017, 80: 162-171.
- [25] WU Z P, WANG D H, OKOLO N P, et al. Unified estimate of Gaussian kernel width for surrogate models [J]. Neurocomputing, 2016, 203: 41-51.
- [26] 龙腾,刘建, WANG G Gary, 等. 基于计算试验设计与代理模型的飞行器近似优化策略探讨[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 79-105.
LONG Teng, LIU Jian, WANG G Gary, et al. Discuss on approximate optimization strategies using design of computer experiments and metamodels for flight vehicle design [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(14): 79-105. (in Chinese)