

数据驱动的大型运载火箭加筋圆锥壳多保真度近似建模优化

陈超磊¹ 王志祥² 雷勇军^{2,3} 王 婕⁴

(1. 中国人民解放军63768部队, 西安710600)

(2. 国防科技大学空天科学学院, 长沙410073)

(3. 空天任务智能规划与仿真湖南省重点实验室, 长沙410073)

(4. 北京宇航系统工程研究所, 北京100076)

摘要: 为提高大型运载火箭加筋圆锥壳舱段结构轴压承载效率,开展了数据驱动加筋圆锥壳多保真度近似建模轻量化设计。针对单保真度近似建模优化方法效率不高、精度不足等问题,搭建了基于变可信度期望改进(Variable-Fidelity Expected Improvement, VF-EI)加点准则的数据驱动多保真度近似建模优化框架,并据此开展加筋圆锥壳结构轻量化设计。综合利用不同网格规模的加筋圆锥壳有限元模型,建立了加筋圆锥壳极限承载的Co-Kriging多保真度近似模型;优化迭代中,利用VF-EI加点准则生成多保真度采样点,以此序列提升Co-Kriging多保真度近似模型的全局和局部近似精度。典型数值和工程算例验证了上述方法的有效性,相比径向基函数近似模型和Kriging模型,Co-Kriging多保真度近似建模优化方法的效率和精度更高,获得了相比初始设计减重11.5%的优化加筋圆锥壳结构,具有一定的工程应用价值。

关键词: 加筋圆锥壳; 多保真度近似建模; 序列近似优化方法; 轻量化设计; VF-EI加点准则

中图分类号: V421.3 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.04.018

0 引言

运载火箭加筋圆锥壳是典型的薄壁结构,由蒙皮和桁条组成,相比于非加筋圆锥壳结构,具有更高的轴压承载效率^[1]。开展加筋圆锥壳舱段结构轻量化设计对提高运载能力、降低发射成本具有极其重要的意义^[2]。在分析加筋圆锥壳结构后屈曲状态时,会面临有限元分析模型规模大、计算耗时长等问题,同时针对加筋圆锥壳结构开展轻量化设计会面临结构设计参数众多、连续变量和离散变量共存、优化求解困难的难题。目前针对大型火箭加筋圆锥壳结构轻量化设计的研究相对较少,而且随着尺度的增大,对结构有限元后屈曲分析效率提出了更高的要求^[3],亟须发展一套更加完备的结构轻量化设计方法。

针对加筋板壳结构轻量化设计,主要的研究方式是采用基于近似模型的轻量化设计方法。近似模型亦称为代理模型或元模型,目前常用的基于单保真度样本数据信息的近似模型主要包括多项式响应面模型、径向基函数(Radical Basis Function, RBF)模型和Kriging近似模型等^[4-5]^[6]^[3197-3225]。展铭^[7]基于近似模型对L型双加筋板结构开展轻量化设计,并通过试验验

证了优化结果。针对航天器上的加筋柱壳结构,巩萃颖^[8]基于改进近似模型对结构的几何尺寸和筋条数目进行轻量化设计。王博等^[9-10]基于径向基函数近似模型建立开口加筋板结构设计框架,得到双层蒙皮网格加筋结构,相比传统网格加筋结构具有高轴压承载力的优点。王志祥等^[11-12]通过建立大型运载火箭圆柱壳模型,提出采用基于近似模型和组合优化算法的序列近似方法对运载火箭蒙皮桁架结构开展轻质化研究。杨丽平等^[13]^[208-215]采用一种结合径向基函数和自适应模拟退火算法的基于高保真度动态近似模型的全局优化算法,解决了某高维卫星结构优化问题,最终优化结果的预测误差仅为0.65%,且时间成本降低了50%以上。

虽然通过使用基于单保真度样本信息的近似模型能够较准确地拟合出结构参数-极限载荷的输入-输出非线性映射关系,但是在面对大型复杂加筋圆锥壳轻量化设计问题时,往往需要精细的有限元模型描述结构的力学响应,此时采用单保真度样本信息的近似模型会导致计算量大、优化周期长的问题。多保真度近似模型可以通过大量低保真度样本点建立近似模型,得到真实模型响应的特征趋势,再通过少量高保真度样本点信息对构建的近似模型进行修正,得到具

收稿日期: 2023-08-13 修回日期: 2023-09-01

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2020JJ5650)

作者简介: 陈超磊,男,2000年生,江西宜春人,助理工程师; 主要研究方向为结构优化; E-mail:2290669225@qq.com。

王志祥(通信作者),男,1992年生,江苏宿迁人,讲师; 主要研究方向为结构分析与优化设计; E-mail:wangzhixiangaad@163.com。

引用格式: 陈超磊,王志祥,雷勇军,等. 数据驱动的大型运载火箭加筋圆锥壳多保真度近似建模优化[J]. 机械强度,2025,47(4):148-157.

CHEN Chaolei, WANG Zhixiang, LEI Yongjun, et al. Data driven multi-fidelity approximate modeling optimization of stiffened conical shell for large launch vehicle[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(4): 148-157.

有较高精度的近似模型^{[13]208-215}。田阔^{[14]62-74}综合利用等效模型的高效率和精细模型的高精度,建立了一种基于多保真竞争抽样的多级圆柱壳近似模型的后屈曲优化方法。为了进一步降低结构优化的成本,保证模型的准确性,李大帅^{[15]48-67}提出了一种降维多保真 Kriging 模型的优化算法。在构建多保真度近似模型过程中,如何根据已观测信息合理选定新增样本点,从而提高模型的近似精度,是需要进一步解决的问题。基于 Kriging 近似模型,谢延敏等^[16]提出了一种基于改善期望(Expected Improvement, EI)加点准则的改进并行加点策略,可以显著提高近似模型精度。高月华等^{[17]90-95}从同时考虑预测响应值及其不确定性角度出发,明确了一种多点加点准则,并提出了采用该加点准则基于 Kriging 近似模型的序列近似优化方法。高伟等^{[18]121-128}则是基于最大最小距离准则(Max-Min Distance, MD)和最小化近似模型预测准则(Minimize the Predictor, MP)提出另外一种使用所有近似模型的多点加点准则,同时兼顾了算法的全局搜索能力和局部开发能力。围绕基于数值模拟的优化问题,武泽平^[19]通过分析现有黑箱函数优化函数的不足,提出了数值模拟-优化搜索协同迭代近似论方法,实现样本点数据的高效利用,显著提升了优化效率。王志祥^[20]提出了基于搜索空间重构的多保真度序列采样方法,并在重型运载火箭集中力扩散舱段中取得良好的减重效果。圆锥壳相比于圆柱壳,在承受轴压载荷作用时传力路径有所不同,对于筋条会产生附加力矩,结构抗失稳能力变弱,开展结构优化设计更为复杂。国内外学者主要围绕加筋圆柱壳结构开展相关研究,而鲜有针对加筋圆锥壳结构优化的文章。本文将针对加筋圆锥壳结构,采用基于 Co-Kriging 多保真度近似模型^{[6]3197-3225}序列优化方法开展轻量化设计研究。

本文在运载火箭轻量化设计的背景下,以运载火箭加筋圆锥壳级间段为研究对象。首先,介绍了基于 Co-Kriging 多保真度近似模型的近似建模方法,并通过算例测试说明建模方法的可行性;然后,为了改善基于增强 Co-Kriging 多保真度近似模型局部区域近似精度,采用变可信度期望改进(Variable-Fidelity Expected Improvement, VF-EI)加点准则进行序列采样;最后,通过基于多保真度近似模型的序列近似优化方法开展加筋圆锥壳结构轻量化设计。

1 加筋圆锥壳结构轻量化设计问题描述

1.1 结构模型建立及分析

如图 1 所示,加筋圆锥壳结构由上下端框、桁条、蒙皮以及中间框构成。在加筋圆锥壳的蒙皮内侧,沿高度方向等间距安装 3 个“几”形截面中间框,顶部和

底部安装 2 个“L”形截面端框,蒙皮外侧沿圆锥结构环向均匀分布数个“工”形截面的纵向桁条。图 2 展示了端框、中间框、桁条的截面构型。

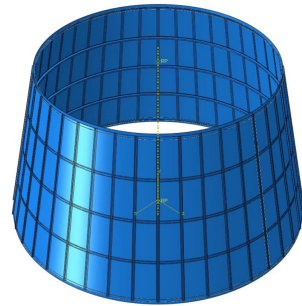


图 1 加筋圆锥壳几何构型

Fig. 1 Geometry configuration of stiffened conical shell

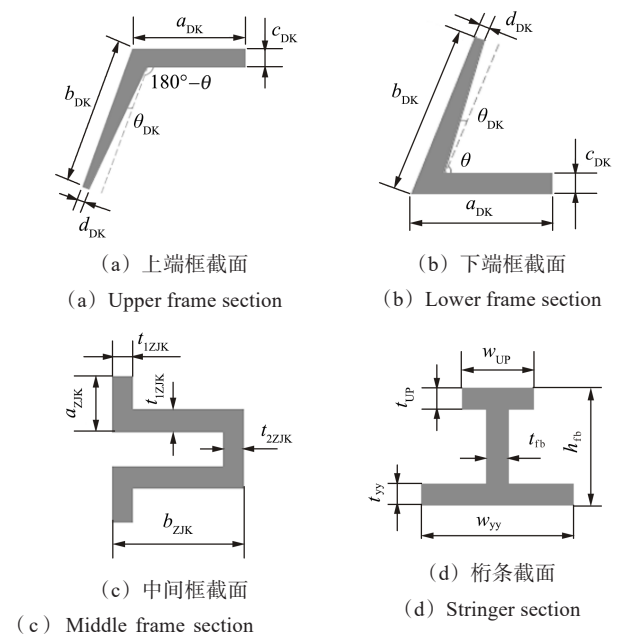


图 2 端框、中间框以及桁条截面构型

Fig. 2 End frame, middle frame and stringer section configuration

针对加筋圆锥壳结构本文设置如下边界条件及加载条件:在加筋圆锥壳模型的顶部弹性边界面和底部弹性边界面的中心分别确定 1 个参考点,将 2 个参考点分别与对应边界面设为刚性耦合。此外,固定约束下参考点;约束上参考点除轴向位移的其余自由度,同时在上参考点匀速施加 35 mm 轴压位移。加筋圆锥壳的结构参数如表 1 所示,其中, R_1 为加筋圆锥壳顶部半径; R_2 为加筋圆锥壳底部半径; n_{HT} 为桁条的数量; t_{mp} 为蒙皮厚度。

在开展结构后屈曲分析时,讨论中间框与纵向桁条间的方格划分不同网格密度对有限元分析的影响,从而得到图 3 不同网格规模载荷位移曲线图^[21]。由图 3 曲线图中各曲线峰值(即结构的极限载荷),可以看出网格数量与结构的极限载荷成反相关:网格划分越密,结构的极限载荷越小。结合表 2 中计算耗时以

及载荷误差,选取方格内网格数 10×20 的圆锥壳网格为高保真度模型,选择方格内网格数 5×10 的圆锥壳网格为低保真度模型。

表1 加筋圆锥壳结构参数表

Tab. 1 Structure parameters table of the stiffened conical shell

变量 Variable	初始值 Initial value	变量 Variable	初始值 Initial value	变量 Variable	初始值 Initial value
R_1/mm	4 750.0	$\theta_{\text{DK}}/(\text{^\circ})$	4.0	h_{b}/mm	40.0
R_2/mm	3 750.0	a_{ZJK}/mm	25.0	t_{b}/mm	8.0
$\theta/(\text{^\circ})$	11.3	b_{ZJK}/mm	80.0	w_{yy}/mm	80.0
a_{DK}/mm	46.0	$t_{\text{1ZJK}}/\text{mm}$	2.0	t_{yy}/mm	15.0
b_{DK}/mm	75.0	$t_{\text{2ZJK}}/\text{mm}$	2.0	t_{mp}/mm	1.5
c_{DK}/mm	6.0	w_{UP}/mm	50.0	n_{HT}	40
d_{DK}/mm	2.0	t_{UP}/mm	6.0	—	—

为进一步缩短低保真度模型分析时长,经过多次验算,可将低保真度全模型简化为半模型,施加相同的轴向位移,半模型承受载荷为全模型的一半。根据多保真度模型与低保真度模型有限元计算时间,确定低保真度样本点数量为多保真度样本点数量的3倍。

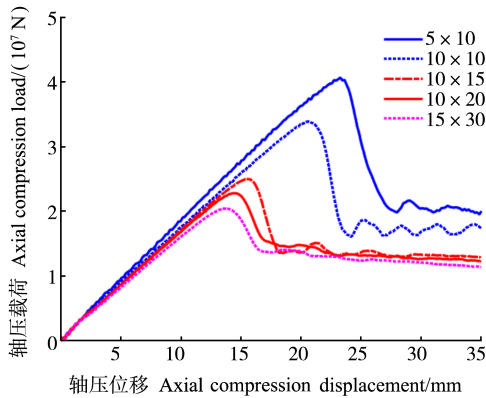


图3 不同规模网格载荷位移曲线

Fig. 3 Load displacement curves of different scale grids

表2 筋格内不同规模网格计算结果

Tab. 2 Calculation results of different scale grids in the reinforcement

计算结果 Calculation result	筋格内网格数 Number of grids in the reinforcement				
	5×10	10×10	10×20	15×20	15×30
计算耗时 Computing time/h	0.58	0.61	0.74	0.92	1.03
耗时比 Time consuming ratio	0.56	0.59	0.72	0.89	1
极限载荷 Ultimate load/N	4.07×10^7	3.39×10^7	2.28×10^7	2.15×10^7	2.04×10^7
载荷误差 Load error/%	99.51	66.18	11.76	5.39	0

1.2 优化模型建立

在满足加筋圆锥壳结构极限承载性能的前提下,

使得结构质量更轻,将优化模型描述为

$$\begin{cases} \text{find } \boldsymbol{x} \\ \min M(\boldsymbol{x}) \\ \text{s.t. } F_{\text{cr}}(\boldsymbol{x}) \geq F_{\text{cr}}^* \\ \boldsymbol{x}_{\min} \leq \boldsymbol{x} \leq \boldsymbol{x}_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中, \boldsymbol{x} 为加筋圆锥壳结构的17项设计参数,由连续变量和整数变量构成,其中桁条数量 n_{HT} 为整数变量,其余结构参数为连续变量,优化求解为典型的混合整数优化。 $M(\boldsymbol{x})$ 、 $F_{\text{cr}}(\boldsymbol{x})$ 分别为加筋圆锥壳结构的结构质量和极限载荷; F_{cr}^* 为加筋圆锥壳结构的最小极限承载力,为 5×10^7 N; \boldsymbol{x}_{\max} 、 \boldsymbol{x}_{\min} 分别为结构设计参数的上、下边界取值,上、下边界取值基于工程经验和大量试算结果,如表3所示。

表3 加筋圆锥壳结构参数取值范围

Tab. 3 Value range of the reinforced conical shell structure parameters

变量 Variable	上限 Upper limit	下限 Lower limit
a_{DK}/mm	45.0	80.0
b_{DK}/mm	60.0	90.0
c_{DK}/mm	3.0	10.0
d_{DK}/mm	3.0	10.0
$\theta_{\text{DK}}/(\text{^\circ})$	4.0	5.0
a_{ZJK}/mm	20.0	40.0
b_{ZJK}/mm	75.0	100.0
n_{HT}	40	100
$t_{\text{1ZJK}}/\text{mm}$	3.0	10.0
$t_{\text{2ZJK}}/\text{mm}$	3.0	10.0
w_{UP}/mm	30.0	60.0
t_{UP}/mm	3.0	15.0
h_{b}/mm	30.0	100.0
t_{b}/mm	3.0	15.0
w_{yy}/mm	50.0	100.0
t_{yy}/mm	3.0	15.0
t_{mp}/mm	1.2	1.5

2 数据驱动的 Co-Kriging 多保真度近似建模优化方法

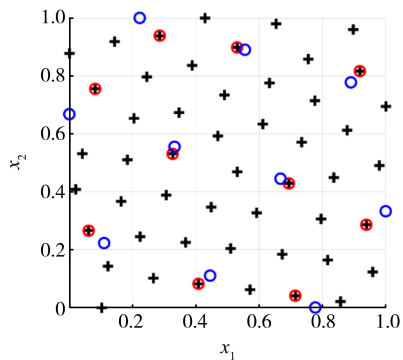
基于多保真度近似模型开展结构轻量化设计综合利用不同保真度信息,提高优化效率,并采用 VF-EI 加点准则进行序列采样,提高优化精度,能够在极大程度上减少精细有限元模型的调用,显著缩短计算时间、提高优化效率。由于样本数量的限制,多保真度近似模型的精度受到限制,容易陷入局部最优。为了充分挖掘高/低精度模型之间的差异信息以及其他相关信息等,本文采用基于 Co-Kriging 多保真度近似模型的序列近似优化方法对加筋圆锥壳结构开展轻量化设计。

2.1 多保真度样本采样

面向多保真度近似模型的初始样本集的选取方法按照高低保真度样本点关系一般来说分为两种:高/低保真度样本点非嵌套和高/低保真度样本点嵌套,即高保真度样本点是否为低保真度样本点的子集^[22]。本文选取高/低保真度样本点嵌套的样本集作为多保真度初始样本集。

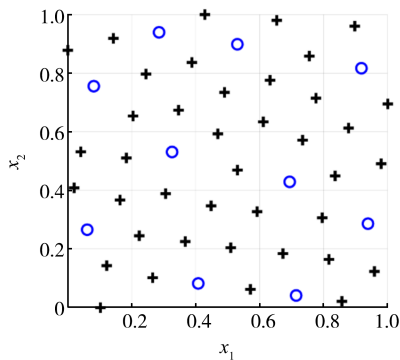
为了确保高/低保真度样本点之间满足嵌套的关系,PARK等^[23]提供了一种移动高保真度样本点的最近邻域采样方法,以保证高保真度样本点是低保真度样本点的子集。首先,采用优化拉丁超立方设计(Optimal Latin Hypercube Sampling Design, OLHSD)方法,分别生成 200 组高保真度样本点和 600 组低保真度样本点;然后,对每一组高保真度样本 \mathbf{x}_i^{HF} 从 600 组低保真度样本点中选取距离 \mathbf{x}_i^{HF} 最近的样本点 \mathbf{x}_j^{LF} ;最后,将高保真度样本点 \mathbf{x}_i^{HF} 移动至对应低保真度样本点 \mathbf{x}_j^{LF} 处。

图 4 展示了在二维 0~1 空间内产生 40 组低保真度样本点和 10 组高保真度样本点的流程。图 4(a) 为在 40 组低保真度样本点(十字图案)中找到与 10 组高保真度样本点(圆圈图案)对应距离最近的 10 组样本点(圆圈十字组合图案);图 4(b) 为将 10 组高保真度样本



(a) 寻找最近邻低保真度样本点

(a) Find the nearest neighbor low-fidelity sample points



(b) 替换最近邻低保真度样本点

(b) Replace the nearest neighbor low-fidelity sample points

图 4 最近邻域采样方法示意图

Fig. 4 Diagram of the nearest neighbor sampling method

点(圆圈图案)移动并替换掉对应距离最近的 10 组样本点,即为最终的多保真度初始样本集。

2.2 Co-Kriging 多保真度近似模型

Co-Kriging 近似模型作为 Kriging 近似模型的拓展,继承了 Kriging 模型的优点,进一步建立了高/低保真度模型之间的联系,在航空航天等工程科学领域逐渐得到重视^{[14]62-74[15]48-67[24-26]}。基于加法标度的多保真度模型可表示为

$$y_{\text{HF}}(\mathbf{x}) = \rho y_{\text{LF}}(\mathbf{x}) + \delta(\mathbf{x}) \quad (2)$$

式中, $y_{\text{HF}}(\mathbf{x})$ 为高保真度模型; $y_{\text{LF}}(\mathbf{x})$ 为低保真度模型; ρ 为高保真度模型与低保真度模型之间的缩放系数; $\delta(\mathbf{x})$ 为高保真度模型与低保真度模型间的偏差模型。

实际上, Co-Kriging 模型可理解为两类 Kriging 模型的融合。首先,基于低保真度训练样本集建立低保真度真实模型的 Kriging 模型 $\hat{y}_{\text{LF}}(\mathbf{x})$; 然后,在高保真度样本点处计算高保真度真实模型和低保真度真实模型的偏差,并建立该偏差模型的 Kriging 模型 $\hat{\delta}(\mathbf{x})$ 。从而可以将 Co-Kriging 模型表示为

$$\hat{y}_{\text{MF}} = \rho \hat{y}_{\text{LF}} + \hat{\delta} \quad (3)$$

根据 Kriging 模型,可以将低保真度真实模型 y_{LF} 及真实偏差模型 δ 写为高斯随机过程的形式,为

$$y_{\text{LF}} = \beta_{\text{LF}} + Z_{\text{LF}}(\mathbf{x}) \quad (4)$$

$$\delta = \beta_{\delta} + Z_{\delta}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

式中, β_{LF} 、 β_{δ} 分别为高斯随机过程 y_{LF} 、 δ 的期望; $Z_{\text{LF}}(\mathbf{x})$ 、 $Z_{\delta}(\mathbf{x})$ 为均值为 0、方差分别为 σ_{LF}^2 与 σ_{δ}^2 的高斯随机过程。

通过 R^2 关系数值衡量近似模型近似精度评估指标,其中 R^2 越接近 1 模型精度越高^[27]。 R^2 为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

式中, n 为样本总数; y_i 为真实响应值; \hat{y}_i 为近似模型预测值; \bar{y} 为真实响应值的均值。

2.3 数据驱动的 Co-Kriging 多保真度近似建模优化框架

序列近似优化方法在采用初始样本点集建立得到近似模型后,通过加点准则对样本集更新,进而构建新的近似模型,然后逐次迭代得到精度更高的最优解。其中,最核心的部分是选用何种加点准则,不同的加点准则对下一步新构造的近似模型精度有显著影响^{[17]90-95[18]121-128}。

多保真度序列近似优化方法流程如图 5 所示。首

先,构建优化问题的数学模型,确定设计参数、优化约束、设计空间以及优化指标;其次,采用最近邻域的采样方法,选取初始多保真度样本集,计算样本点对应的目标函数和约束函数的响应值;然后,构造近似模型并计算全局最优解,判断不满足收敛条件时,采用加点准则确定新增样本点,计算新样本点的目标函数

值以及约束函数值,并更新训练样本集;最后,反复迭代直到满足式(7)的收敛条件,并输出优化结果。

$$\begin{cases} \left| \frac{\hat{f}_{\text{out}} - f_{\text{out}}}{f_{\text{out}}} \right| \leq \delta \\ \text{s.t. } 1 \leq N \leq N_{\text{max}} \end{cases} \quad (7)$$

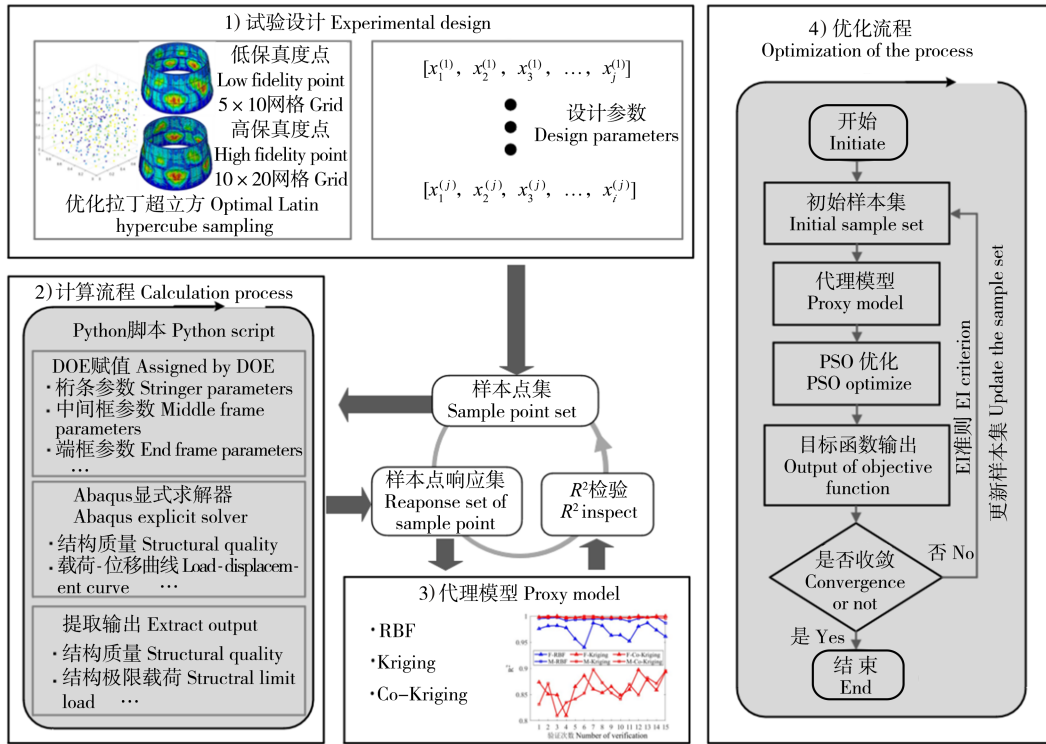


图5 序列近似优化方法流程图

Fig. 5 Flow chart of the sequence approximate optimization method

式中, \hat{f}_{out} 为近似模型的当前最优解; f_{out} 为当前最优解处的真实响应; N 为当前迭代步数; N_{max} 为设置的最大迭代步数; δ 为最大容许误差, 取 0.1%。

在序列加点优化方法中,最小化近似模型预测准则、改善期望准则、改善概率准则 (Probability of Improvement, PI) 等加点准则被广泛运用于搜索并产生新的样本点^[28]。EI 加点准则是 JONES 等^[29]提出的一种近似模型模型加点准则, 又称高效全局优化方法。该准则较好地平衡了局部探索与全局开发之间的权重, 具有良好的全局寻优能力。在 EI 加点的基础上, 如式(8)所示的 VF-EI 加点准则 $[E_{\text{VF-EI}}(\mathbf{x}, l)]$ 被提出运用到多保真度近似模型序列优化中^[30]。

$$E_{\text{VF-EI}}(\mathbf{x}, l) = \begin{cases} (y_{\min} - \hat{y})\Phi\left[\frac{y_{\min} - \hat{y}}{s(\mathbf{x}, l)}\right] + \\ s(\mathbf{x}, l)\phi\left[\frac{y_{\min} - \hat{y}}{s(\mathbf{x}, l)}\right], s(\mathbf{x}, l) > 0 \\ 0, s(\mathbf{x}, l) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, l 为不同保真度的样本点 (高保真度或低保真度); y_{\min} 为当前最优的高/低保真度模型响应值; \hat{y} 为

Co-Kriging 多保真度近似模型或低保真度近似模型的预测响应值; $s(\mathbf{x}, l)$ 为 Co-Kriging 多保真度近似模型或低保真度近似模型在 \mathbf{x} 处的预测标准差; $\Phi(\cdot)$ 、 $\phi(\cdot)$ 分别为标准正态分布累积分布函数和标准正态分布概率密度函数。在最大化 $E_{\text{VF-EI}}(\mathbf{x}, l)$ 处新增采样点可有效平衡算法的开发和探索性能^[31-33], 因此新增样本点 \mathbf{x}_{new} 表述为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{\text{new}} = \underset{\mathbf{x} \in \mathbb{U}^d}{\operatorname{argmax}} E_{\text{VF-EI}}(\mathbf{x}, l) \\ \text{s.t. } F_{\text{cr}}(\mathbf{x}) \geq F_{\text{cr}}^* \end{cases} \quad (9)$$

2.4 算例测试

选用式(10)给出的一维函数作为测试对象, 在 $[0, 1]$ 区域内均匀选取 21 个样本点作为低保真度样本集 $W_{\text{LF}} = \{0: 0.05: 1\}$, 以该样本集建立低保真度近似模型, 同时在低保真度样本集中选取 4 个样本点作为高保真度样本点集, 为

$$W_{\text{HF}} = \{0.1, 0.3, 0.7, 0.9\} \quad (10)$$

$$\begin{cases} f_{\text{HF}}(x) = 6(x - 2)^2 \sin(12x - 4) \\ f_{\text{LF}}(x) = 0.5f_{\text{HF}}(x) + 10(x - 0.5) - 10 \end{cases} \quad (11)$$

图 6(曲线 f_{Act}^{LF} 与 $y_{Kriging}^{LF}$ 重合)中, f_{Act}^{HF} 表示高保真度真实模型; $y_{Co-Kriging}^{MF}$ 表示采用多保真度初始样本集建立的多保真度 Co-Kriging 近似模型; f_{Act}^{LF} 表示低保真度真实模型; $y_{Kriging}^{LF}$ 表示采用低保真度样本集建立的 Kriging 近似模型;箭头指向的点表示多保真度近似模型优化计算得到的最优点。而且经计算,多保真度近似模型的近似精度指标 R^2 为 0.884 71,表明建立的多保真度近似模型具有较高的全局近似精度,然而由算例测试结果图 6 可知其局部近似精度显然不足。

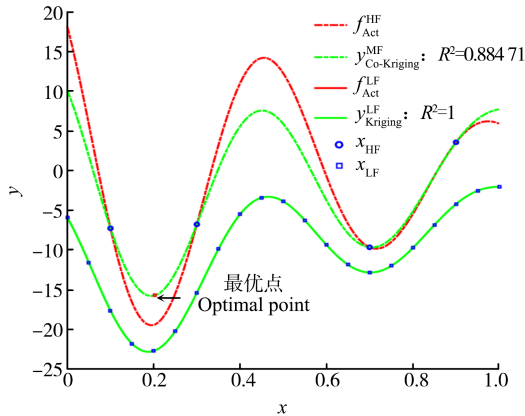


图 6 算例测试结果

Fig. 6 Example of test results

由图 7(曲线 f_{Act}^{HF} 与 $y_{Co-Kriging}^{MF}$ 重合及曲线 f_{Act}^{LF} 与 $y_{Kriging}^{LF}$ 近乎重合)可以看出,对建立的多保真度近似模型通过一次 VF-EI 加点,将多保真度近似模型的近似精度指标从 0.884 71 提高至 1,即多保真度近似模型非常接近真实响应函数。因此,通过 VF-EI 加点可以提高多保真度近似模型的局部近似精度,得到更加精确的全局近似最优解。

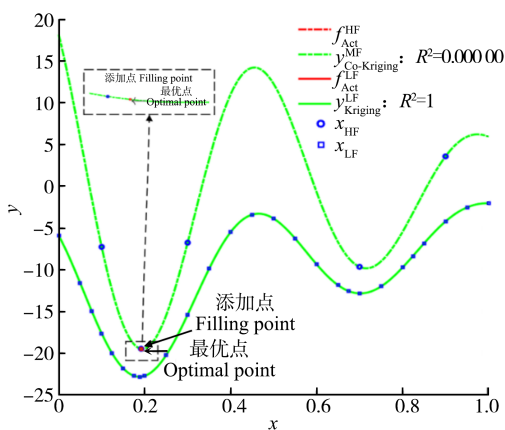


图 7 加点后相关函数图像

Fig. 7 Correlation function image after filling point

3 基于多保真度近似优化方法的加筋圆锥壳轻量化设计

本文采用 400 组样本点作为基于 RBF 和 Kriging 近似模型序列近似优化的初始样本集,考虑优化效

率,采取 200 组高保真度样本点及 600 组低保真度样本点作为基于 Co-Kriging 多保真度近似模型序列近似优化的初始样本集。

3.1 近似模型精度分析

针对 Co-Kriging 多保真度近似模型,在多保真度初始样本集中的 200 组高保真度样本点集和 600 组低保真度样本点集中,分别随机选取 190 组高保真度样本点和 570 组低保真度样本点,构建多保真度近似模型和单保真度近似模型,用剩余 10 组高保真度样本点和 30 组低保真度样本点对近似模型的全局近似精度进行检验;针对 Kriging 和 RBF 单保真度近似模型,在 400 组高保真度样本点集中随机选取 380 组高保真度样本点构建单保真度近似模型,用剩余的 20 组高保真度样本点检验近似模型的全局近似精度。为避免偶然因素的影响,采取 15 次重复试验,统计模型的近似精度评估指标如图 8 所示。图 8 中, F_RBF 表示基于 RBF 模型建立的加筋圆锥壳模型的极限载荷近似精度评估指标; M_RBF 表示基于 RBF 建立的加筋圆锥壳模型的结构质量近似精度评估指标,其他以此类推。

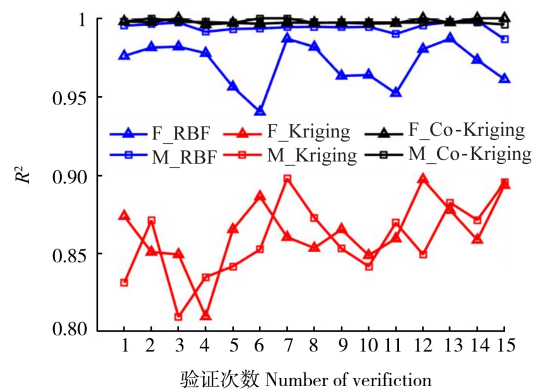


图 8 RBF 近似模型、Kriging 近似模型及 Co-Kriging 近似模型近似精度

Fig. 8 RBF approximation model, Kriging approximation model and Co-Kriging approximation model

图 8 中 Co-Kriging 近似模型的近似精度指标 R^2 均在 0.975 以上,显著高于 Kriging 近似模型和 RBF 近似模型。3 种近似模型的近似精度指标都大于 0.8,表明以上 3 种近似模型均具有较好的全局近似能力,可用于结构序列近似优化。

3.2 优化结果分析

基于 Co-Kriging 多保真度近似模型的序列近似优化方法,采用 Co-Kriging 多保真度近似模型,初始样本集为 200 组高保真度样本及 600 组低保真度样本,通过 VF-EI 准则选取 1 个高保真度样本点以及 1 个低保真度样本点,优化过程最大迭代 25 次;在基于 RBF 和 Kriging 近似模型的序列近似优化方法,初始样本集都为 400 组高保真度样本,均通过选取最优点作为新增

样本点,优化过程最大迭代 25 次。

采用基于 Co-Kriging 多保真度近似模型以及两种单保真度近似模型的序列近似优化方法,对加筋圆锥壳结构开展计算与研究,优化迭代历程如图 9、图 10 所示。图 9、图 10 中,下标 opt 表示优化后数值。为了在最大程度上利用已知信息,提高近似模型精度以及算法收敛效率,在每次迭代算出近似模型最优解真实响应后,将最优点也加入初始样本集。基于多保真度近似模型的序列近似优化方法,经过 18 次迭代后,加筋圆锥壳结构在满足极限承载力为 5.0×10^7 N 的约束条件下,得到加筋圆锥壳的结构质量为 2 892.99 kg,与迭代前的初始结构质量相比减重 11.5%,优化参数结果见表 4。而采用基于 Kriging 及 RBF 近似模型的序列近似优化方法分析得到加筋圆锥壳结构质量最优分别为 3 149.87 kg 及 2 963.37 kg,相比迭代前的初始结构质量相比分别减重 3.70% 及 9.40%。采用基于 Co-Kriging 多保真度近似模型的序列近似优化方法的减重效果要显著优于基于 Kriging 近似模型及 RBF 近似模型的序列近似优化方法。

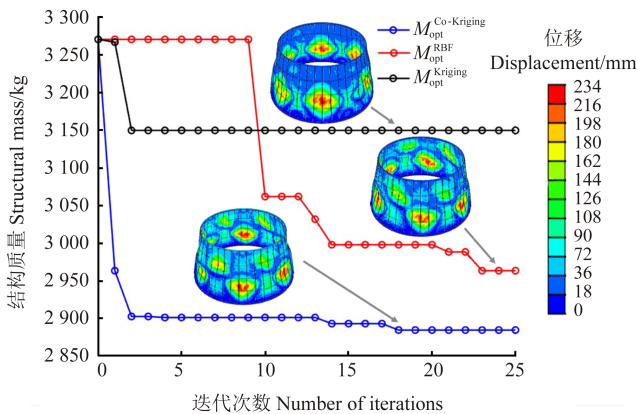


图 9 加筋圆锥壳结构质量迭代历程及位移云图

Fig. 9 Mass iteration history and displacement nephogram of reinforced conical shell structure

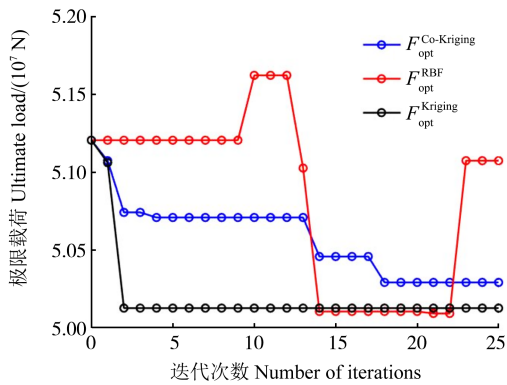


图 10 加筋圆锥壳结构极限载荷迭代历程

Fig. 10 Ultimate load iteration history of reinforced conical shell structure

采用基于 Co-Kriging 代理模型的序列近似结构优化方法优化得到了加筋圆锥壳结构,对应的轴压位移-

载荷曲线以及径向位移云图如图 11 所示。在对加筋圆锥壳结构加载至 25.56 mm 时,结构达到了承载极限 5.006×10^7 N,结构底部没有发生大的径向变形,中间部分区域有最大向圆锥壳内部的径向位移,随着位移的继续加载,结构轴向载荷迅速降低,结构发生整体的压溃破坏。对应结构的应力云图以及等效塑性应变云图如图 12 所示。优化后的加筋圆锥壳结构的最大应力达到 1.41×10^3 MPa,最大塑性应变为 13.1%,发生在“工”字形截面桁条的上翼缘与腹板位置,位于加筋圆锥壳下两个中间框之间的部分,在承受极限轴压载荷时桁条发生弯曲和扭转组合形式的破坏。

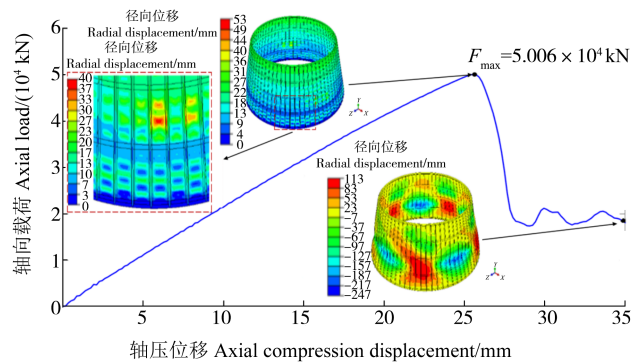
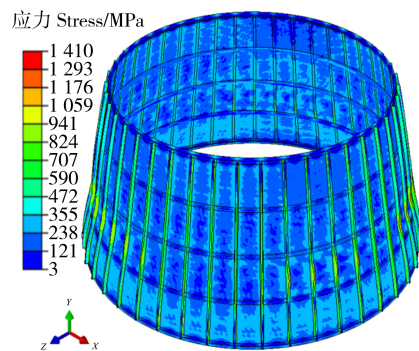


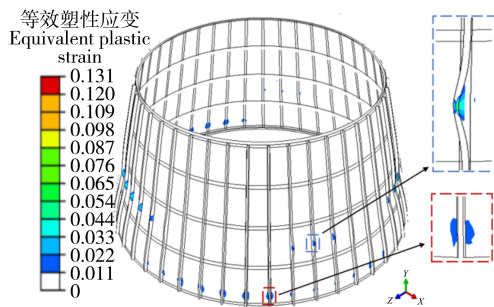
图 11 加筋圆锥壳优化结构位移-载荷曲线图 (基于 Co-Kriging 代理模型)

Fig. 11 Displacement-load curve of reinforced conical shell optimized structure (based on Co-Kriging proxy model)



(a) 加筋圆锥壳结构应力云图

(a) Stress nephogram of reinforced conical shell structure



(b) 加筋圆锥壳等效塑性应变云图

(b) Equivalent plastic strain nephogram of reinforced conical shell

图 12 加筋圆锥壳结构应力云图与等效塑性应变云图

Fig. 12 Stress nephogram and equivalent plastic strain nephogram of reinforced conical shell structure

表 4 加筋圆锥壳结构优化结果

Tab. 4 Optimization results of reinforced conical shell structure

变量 Variables	初始设计参数 Initial design parameter	RBF	Kriging	Co-Kriging
a_{DK}/mm	71.32	62.20	61.93	62.37
b_{DK}/mm	82.71	78.49	72.96	78.66
c_{DK}/mm	4.63	4.93	3.00	4.99
d_{DK}/mm	4.33	3.86	6.26	3.85
$\theta_{DK}/(^{\circ})$	4.06	4.58	4.44	4.57
a_{ZJK}/mm	30.88	33.27	28.10	32.82
b_{ZJK}/mm	92.29	91.91	83.61	91.71
n_{HT}	68	44	70	43
t_{1ZJK}/mm	3.56	3.03	4.83	3.03
t_{2ZJK}/mm	5.32	6.81	5.75	6.87
w_{UP}/mm	34.51	48.37	41.66	47.75
t_{UP}/mm	5.38	7.30	6.78	7.31
h_{fb}/mm	75.09	97.46	77.84	97.05
t_{fb}/mm	3.51	4.85	4.14	4.88
w_{yy}/mm	81.70	74.33	70.95	74.29
t_{yy}/mm	11.15	14.75	9.12	14.43
t_{mp}/mm	1.48	1.23	1.31	1.23
M/kg	3 270.84	2 963.37	3 149.87	2 892.99
F_{cr}/kN	51 204.5	51 072.9	50 125.7	50 457.2
迭代次数 Number of iterations	—	23	2	18

4 结论

针对基于单保真度近似模型开展加筋圆锥壳结构轻量化设计过程中优化效率不高、精度不足等问题,提出了采用基于多保真度近似模型的序列近似优化方法,开展了系列研究,得出以下结论:

1)充分挖掘高/低精度模型之间的差异信息及其他相关信息,能够显著缩短计算时间、提高结构优化效率。

2)建立加筋圆锥壳结构模型并开展后屈曲分析,综合考虑网格密度对计算耗时和载荷误差的影响,将方格内划分 10×20 和 5×10 网格数的加筋圆锥壳模型作为高保真度和低保真度模型,构建了混合整数优化模型,设计了数据驱动 Co-Kriging 多保真度近似建模优化框架。

3)基于 Co-Kriging 多保真度近似模型对加筋圆锥壳结构开展轻量化设计,得到相比于初始结构减重 11.5% 的优化结果,显著优于基于 Kriging 和 RBF 单保真度近似模型序列优化方法分别减重 3.70%、9.40% 的结果,验证了采用基于多保真度近似模型的序列近似优化方法对大型运载火箭加筋圆锥壳结构轻量化设计的有效性。

参考文献 (References)

- [1] 韩涵. 运载火箭加筋壳结构稳定性分析[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005:1-2.
HAN Han. Buckling analysis of the stiffened shell for the launch vehicle[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005:1-2. (In Chinese)
- [2] 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,2015:1-2.
LI Qingya. Post-buckling analysis of thin-walled stiffened shells [D]. Nanjing: Southeast University, 2015:1-2. (In Chinese)
- [3] 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)
- [4] 陈浩然,项忠珂,程文明,等. 基于响应面和遗传算法的C型梁确定性多目标轻量化设计[J]. 机械强度,2021,43(3):636-642.
CHEN Haoran, XIANG Zhongke, CHENG Wenming, et al. Deterministic multi-objective lightweight design of C-beam based on response surface and genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(3):636-642. (In Chinese)
- [5] 肖乾,罗超,欧阳志许,等. 基于RBF神经网络代理模型的车辆/轨道参数多目标优化[J]. 机械强度,2021,43(2):319-326.
XIAO Qian, LUO Chao, OUYANG Zhixu. Multi-objective optimization of vehicle /track parameters based on RBF neural network surrogate model[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(2):319-326. (In Chinese)
- [6] 韩忠华. Kriging模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报,2016,37(11):3197-3225.
HAN Zhonghua. Kriging surrogate model and its application to design optimization: a review of recent progress[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11):3197-3225. (In Chinese)
- [7] 展铭. 基于代理模型的L型双加筋板结构动力学优化设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2015:44-63.
ZHAN Ming. Structural dynamics optimization design based on surrogate model of panel with two L stiffeners [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015:44-63. (In Chinese)
- [8] 巩萃颖. 基于改进近似模型航天器结构可靠性优化设计[D]. 大连:大连理工大学,2017:31-44.
GONG Cuiying. Reliability-based design optimization of spacecraft structure based on improved surrogate model [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017:31-44. (In Chinese)
- [9] 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):208-227.
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):208-227. (In Chinese)

- [10] 王博,杜凯繁,郝鹏. 轴压双层蒙皮加筋结构优化设计[C]//中国力学学会. 中国力学大会-2015论文摘要集. 北京:中国力学学会,2015:337.
WANG Bo, DU Kaifan, HAO Peng. Optimal design of axial compression double skin reinforced structure[C]//The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics-2015 Collection of Abstracts. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2015:337. (In Chinese)
- [11] 王志祥,武泽平,王婕,等. 大型运载火箭加筋柱壳近似建模方法[J]. 宇航学报,2020,41(10):1267-1279.
WANG Zhixiang, WU Zeping, WANG Jie, et al. Approximation modeling method for cylindrical stiffened shells in large launch vehicles [J]. Journal of Astronautics, 2020, 41 (10) : 1267-1279. (In Chinese)
- [12] 王志祥,欧阳兴,王斌,等. 基于序列径向基函数的运载火箭蒙皮桁条结构轻质优化[J]. 国防科技大学学报,2021,43(1):57-65.
WANG Zhixiang, OUYANG Xing, WANG Bin, et al. Lightweight optimization of skinned purlin structure in launch vehicle based on sequential radial basis function [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43 (1) : 57-65. (In Chinese)
- [13] 杨丽丽,孔祥龙,李文龙,等. 基于高保真度代理模型的卫星结构优化[J]. 振动与冲击,2021,40(23):208-215.
YANG Lili, KONG Xianglong, LI Wenlong, et al. Satellite structure optimization based on high fidelity surrogate model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40 (23) : 208-215. (In Chinese)
- [14] 田阔. 基于多保真度建模的多层级筒壳屈曲分析及优化方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2018:62-74.
TIAN Kuo. Research on buckling analysis and optimization methods of hierarchical cylindrical shells based on multi-fidelity modeling [D]. Dalian : Dalian University of Technology, 2018 : 62-74. (In Chinese)
- [15] 李大帅. 基于多保真度Kriging代理模型的结构可靠度分析方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021:48-67.
LI Dashuai. A structural reliability analysis method based on multi-fidelity Kriging surrogate model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021:48-67. (In Chinese)
- [16] 谢延敏,张飞,潘贝贝,等. 基于并行加点Kriging模型的拉延筋优化[J]. 机械工程学报,2019,55(8):73-79.
XIE Yanmin, ZHANG Fei, PAN Beibei, et al. Optimization of drawbeads based on parallel infilling strategy and kriging models [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (8) : 73-79. (In Chinese)
- [17] 高月华,王希诚. 基于Kriging代理模型的多点加点序列优化方法[J]. 工程力学,2012,29(4):90-95.
GAO Yuehua, WANG Xicheng. A sequential optimization method with multi-point sampling criterion based on Kriging surrogate model [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (4) : 90-95. (In Chinese)
- [18] 高伟,谷海涛,孙原,等. 基于序列近似优化方法的水下航行器水动力外形优化设计[J]. 舰船科学技术,2022,44(2):121-128.
GAO Wei, GU Haitao, SUN Yuan, et al. Hydrodynamic shape optimization of underwater vehicle based on sequential approximate optimization [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44 (2) : 121-128. (In Chinese)
- [19] 武泽平. 基于数值模拟的序列近似优化方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2018:17-26.
WU Zeping. Study on numerical simulation based sequential approximate optimization [D]. Changsha : National University of Defense Technology, 2018 : 17-26. (In Chinese)
- [20] 王志祥. 重型运载火箭加筋圆柱壳舱段结构优化与试验[D]. 长沙:国防科技大学,2021:19-49.
WANG Zhixiang. Optimization design and experiment of stiffened cylindrical shells in heavy-lift launch vehicle [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021 : 19-49. (In Chinese)
- [21] 陈超磊,王志祥,雷勇军,等. 基于序列近似优化方法的加筋圆锥壳结构优化设计[J]. 载人航天,2023,29(3):362-371.
CHEN Chaolei, WANG Zhixiang, LEI Yongjun, et al. Structure optimization design of stiffened conical shells based on sequential approximate optimization method [J]. Manned Spaceflight, 2023, 29(3):362-371. (In Chinese)
- [22] 周奇,杨扬,宋学官,等. 变可信度近似模型及其在复杂装备优化设计中的应用研究进展[J]. 机械工程学报,2020,56(24):219-245.
ZHOU Qi, YANG Yang, SONG Xueguan, et al. Survey of multi-fidelity surrogate models and their applications in the design and optimization of engineering equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(24) : 219-245. (In Chinese)
- [23] PARK C, HAFTKAR T, KIM N H. Remarks on multi-fidelity surrogates [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2017, 55:1029-1050.
- [24] 郭峰. Co-Kriging代理模型在压气机叶栅气动优化中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019:2-10.
GUO Feng. Application study of Co-Kriging surrogate model in compressor cascade [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019:2-10. (In Chinese)
- [25] 黄礼铿,高正红,张德虎. 基于变可信度代理模型的气动优化[J]. 空气动力学学报,2013,31(6):783-788.
HUANG Likeng, GAO Zhenghong, ZHANG Dehu. Aerodynamic optimization based on multi-fidelity surrogate [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2013, 31(6) : 783-788. (In Chinese)
- [26] 韩忠华,许晨舟,乔建领,等. 基于代理模型的高效全局气动优化设计方法研究进展[J]. 航空学报,2020,41(5):30-70.
HAN Zhonghua, XU Chenzhou, QIAO Jianling, et al. Recent progress of efficient global aerodynamic shape optimization using surrogate-based approach [J]. Acta Aeronautica et Astronautica

- Sinica, 2020, 41(5):30-70. (In Chinese)
- [27] 李增聪,田阔,赵海心. 面向多级加筋壳的高效变保真度近似模型[J]. 航空学报, 2020, 41(7):623435.
- LI Zengcong, TIAN Kuo, ZHAO Haixin. Efficient variable-fidelity models for hierarchical stiffened shells[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(7):623435. (In Chinese)
- [28] VU K K, AMBROSIO C D, HAMADI Y, et al. Surrogate-based methods for black-box optimization[J]. International Transactions in Operational Research, 2017, 24(3):393-424.
- [29] JONES D R, SCHONLAU M, WELCH W J. Efficient global optimization of expensive black-box functions[J]. Journal of Global Optimization, 1998, 13(4):445-492.
- [30] ZHANG Y, HAN Z H, ZHANG K S, et al. Variable-fidelity expected improvement method for efficient global optimization of expensive functions[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58:1431-1451.
- [31] HAO P, FENG S, LI Y, et al. Adaptive infill sampling criterion for multi-fidelity gradient-enhanced kriging model[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 62(1):353-373.
- [32] LIU Y, CHEN S, WANG F, et al. Sequential optimization using multi-level cokriging and extended expected improvement criterion[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(3):1155-1173.
- [33] HAO P, FENG S, ZHANG K, et al. Adaptive gradient-enhanced Kriging model for variable-stiffness composite panels using isogeometric analysis[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(1):1-16.

Data driven multi-fidelity approximate modeling optimization of stiffened conical shell for large launch vehicle

CHEN Chaolei¹ WANG Zhixiang² LEI Yongjun^{2,3} WANG Jie⁴

(1. Unit 63768 of the People's Liberation Army of China, Xi'an 710600, China)

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

(3. Hunan Key Laboratory of Intelligent Planning and Simulation for Aerospace Missions, Changsha 410073, China)

(4. Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to improve the load-bearing efficiency of the stiffened conical shell in large launch vehicle, the lightweight design of the stiffened conical shell was carried out via a data-driven multi-fidelity approximate modeling optimization method. Aiming at the problems such as low efficiency and insufficient accuracy of the single fidelity approximate modeling optimization method, a data-driven multi-fidelity approximate modeling optimization framework was built based on variable-fidelity expected improvement (VF-EI) point criterion, and accordingly the optimization design of stiffened conical shell structure was carried out. Based on the finite element models of stiffened conical shells with different mesh sizes, a Co-Kriging multi-fidelity approximate model for the collapse load of stiffened conical shells was established. In the optimization iteration, multi-fidelity sampling points were generated by using VF-EI point criterion, and the global and local approximation accuracy of Co-Kriging multi-fidelity approximation model was improved sequentially. Moreover, the optimization efficiency and accuracy of the proposed method were demonstrated by comparing with radial basis function approximation model and Kriging model. Besides, 11.5% weight reduction of the optimized stiffened conical shell structure is obtained compared with the initial design, which has certain engineering application value.

Key words: Stiffened conical shell; Multi-fidelity approximate modeling; Sequence approximate optimization method; Lightweight design; VF-EI point criterion

Corresponding author: WANG Zhixiang, E-mail: wangzhixiangaadt@163.com

Fund: Natural Science Foundation of Hunan (2020JJ5650)

Received: 2023-08-13 Revised: 2023-09-01