面向工程臂架系统的高维全局参数优化设计方法

李梦聪[1,4] 李 鹏[1,2,3,4] 高荣芝[2,3] 庞 勇[1,4] 郭正刚[1,4]
宋学官[1,4] 阚子云[1,4*]
1.大连理工大学机械工程学院,大连,116024
2.起重机械关键技术全国重点实验室,长沙,410013
3.中联重科股份有限公司,长沙,410013
4.高性能精密制造全国重点实验室,大连,116024

摘要:针对参数化几何模型稳定性不足、仿真精度与效率难以兼顾以及高维代理模型精度损失等问题,提出面向工程臂架系统的高维全局参数优化方法。该方法以自适应参数化几何建模拓展设计空间,以系统级响应重构兼顾有限元计算精度与效率,并通过代理信息迁移融合径向基函数(RBF)与Kriging模型,构建SITFO代理辅助优化算法。以59 m混凝土泵车臂架系统为例,优化后质量减小18.46%,最大变形量减小10.6%,验证了该方法对高维机械系统优化的适用性。

关键词:臂架系统;参数化建模;代理模型;结构优化
中图分类号:TH122
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.012 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

High-dimensional Global Parameter Optimization Design Methodology for Engineering Boom Systems

LI Mengcong[1,4] LI Peng[1,2,3,4] GAO Rongzhi[2,3] PANG Yong[1,4] GUO Zhenggang[1,4]
SONG Xueguan[1,4] KAN Ziyun[1,4*]
1.School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116024
2.State Key Laboratory of Crane Technology, Changsha, 410013
3.Zoomlion Heavy Industry Science and Technology Co., Ltd., Changsha, 410013
4.State Key Laboratory of High-Performance Precision Manufacturing, Dalian, Liaoning, 116024

Abstract: A high-dimensional global parameter optimization method was proposed for engineering boom systems to address unstable parametric geometry, the trade-off between simulation accuracy and efficiency, and accuracy loss in high-dimensional surrogate modeling. Adaptive parametric geometry modeling expanded the design space; system-level response reconstruction improved finite element efficiency while retaining accuracy; and the surrogate information transfer-based optimization (SITFO) algorithm integrated radial basis function (RBF) and Kriging models. For a 59 m concrete pump truck boom system, the optimized design reduces mass by 18.46% and maximum deformation by 10.6%, demonstrating the method's applicability to high-dimensional mechanical-system optimization.

Key words: boom system; parametric modeling; surrogate model; structural optimization

0 引言

工程臂架系统是混凝土泵车、起重机和挖掘机等重型工程机械的关键承载与执行部件,具有多部件、强耦合和结构复杂等特点,其分析与优化已受到广泛关注[1-5]。

分析方面,REN等[6]建立了CPT长臂有限元与输送管激励模型;WANNER等[7]提出高效的臂架集中参数模型;李鹏等[8]编制了数据驱动疲劳载荷谱,为优化提供了仿真基础。优化方面,张攀峰等[9]开展代理模型降维优化;孙武和等[10-11]、闫海涛等[12]开发了参数计算程序并进行多学科优化;陈泽等[13]、赵远等[14-15]分别优化了局部臂节及铰点。现有降维和多学科方法的优化范围及幅度仍受限制,上述研究多面向局部结构或简化模型,尚难实现系统级全局优化。

近年研究开始通过更新代理模型和优化算法应对高维问题。YANG等[16]提出基于知识的编码模型并用于动臂结构优化;LIN等[17]提出面向叉车臂架的闭环迁移学习多目标代理建模方法;BAI等[18]构建了考虑多重约束的薄壁复合材料臂

收稿日期:2025-02-14
基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3406900);国家自然科学基金(12372040);中央高校基础研究基金(DUT24RC(3)069)

架多目标优化框架；李鹏等[19]基于多保真代理模型实现销轴高效轻量化设计。然而，这些研究尚未给出臂架系统高维、全局的最优参数组合，主要受参数化几何模型稳定性不足和高维优化计算代价高两方面制约。

针对上述问题，本文从几何建模、有限元分析和代理辅助优化3个层面提出全流程方法，并以59 m混凝土泵车臂架系统为例验证其性能。优化后系统质量减小18.46%，最大变形量减小10.6%，并与传统优化流程进行了比较。

1　参数化几何模型

多臂节工程臂架系统通常采用板材构成的空心箱型梁，并包含筋板、管道及销轴孔等复杂特征（图1）。基准尺寸大幅变化易引发几何干涉和模型生成失败，使优化往往局限于板厚等不依赖几何实体的参数。为此，本文提出适用于箱型板壳结构的自适应参数化几何建模方法（adaptive parametric geometry modeling，APGM），以提高模型稳定性并拓展设计域。

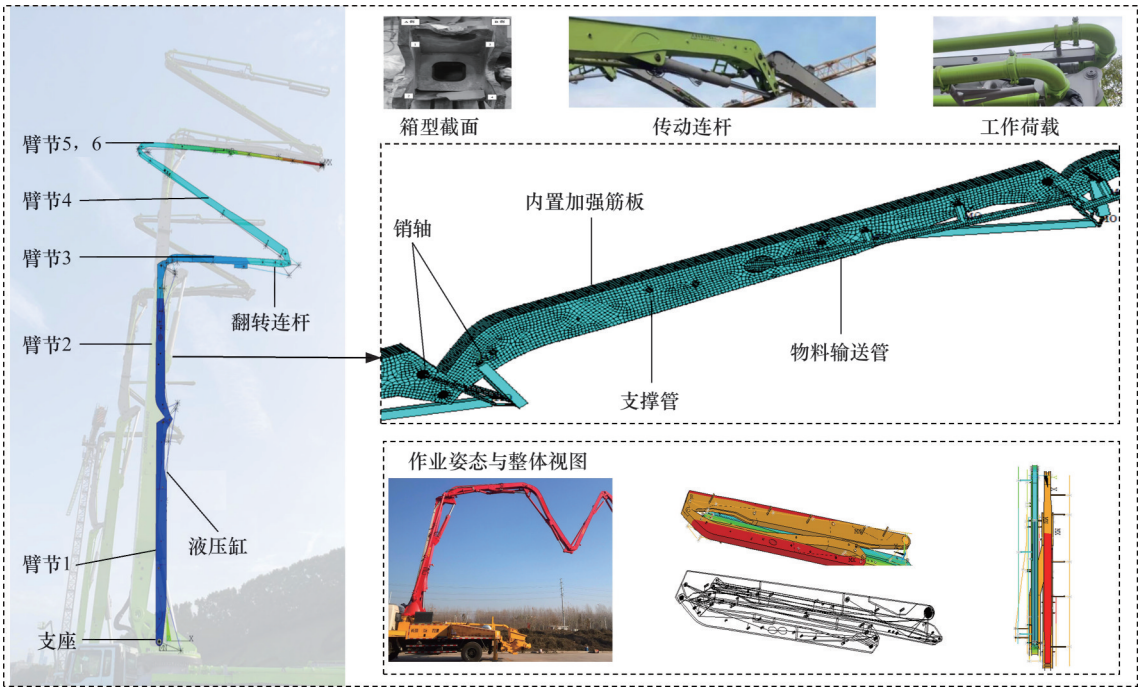


图1　工程多臂节臂架系统常见结构

Fig.1　Common structures of multi-section boom systems in engineering

1.1　参数化几何建模概述

工程臂架系统参数化模型的常见控制方法是选择臂节上尺寸无突变的平稳过渡段，将其截面宽、高和侧板长度作为基准尺寸和控制参数，来控制其余所有关键点坐标$\boldsymbol{P}_0=(x_0,y_0,z_0)$的变化：

$$\boldsymbol{\rho}=(\rho_{\mathrm{L}},\rho_{\mathrm{H}},\rho_{\mathrm{W}})=\left(\frac{L_{\mathrm{c}}}{L_0},\frac{H_{\mathrm{c}}}{H_0},\frac{W_{\mathrm{c}}}{W_0}\right)$$

式中：$\boldsymbol{\rho}$为当前输入控制参数和原模型基准尺寸的比值；ρ_{L}、ρ_{H}、ρ_{W}分别为长度、截面高度和截面宽度的量纲一缩放系数；L_{c}、H_{c}、W_{c}为当前尺寸，L_0、H_0、W_0为对应基准尺寸。

几何模型的各关键点$\boldsymbol{P}$可表示为

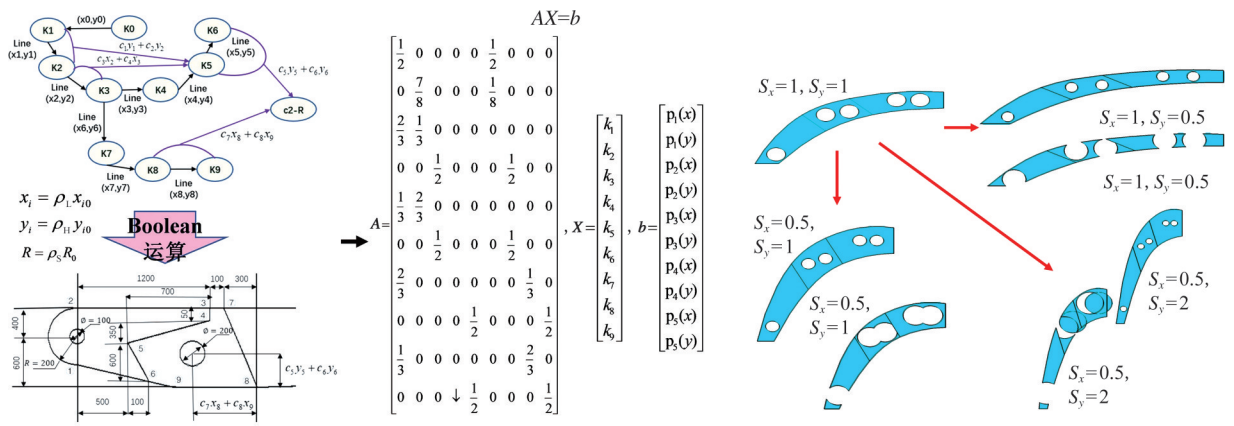
$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}\rho_{\mathrm{L}} & 0 & 0\\ 0 & \rho_{\mathrm{H}} & 0\\ 0 & 0 & \rho_{\mathrm{W}}\end{bmatrix}\boldsymbol{P}_0$$

臂架上的销轴、筋板、支撑管等结构被定义为从属几何特征。这些特征不直接参与优化过程，但对系统有重要影响。拓扑区域边界变化时，从属几何结构容易脱离拓扑区域，导致图素编号混乱和几何生成错误。隐式参数化建模方法则通过建立大量线性方程组加强了模型稳定性，例如，SHI[20]基于SFE Concept软件实现了白车身数百个组件的隐式全参数化CAE建模，快速调整形状、尺寸完成优化设计。

隐式参数化建模方法依赖复杂方程组定位内部特征。图2a、图2b以基准点和线性方程组定位从属几何，图2c（S_x、S_y分别表示沿x、y轴的缩放比例）显示其局限：方程复杂，剧烈缩放仍可能发生边界或特征间碰撞，且按比例缩放会削弱制造指导性，例如孔洞过小会无法容纳满足力学规格的销轴。因此需自适应调整从属几何属性，以避免干涉并降低建模成本。

1.2　自适应参数化几何建模

自适应参数化几何建模方法（APGM）包括几何干涉判别、从属几何位置或尺寸自适应调整以及原始模型先验信息保留，流程见图3。



(a)隐式参数化建模逻辑　(b)线性方程组定位示例　(c)放缩引发潜在几何干涉问题

图2　隐式参数化建模常见方式及弊端

Fig.2　Approaches and drawbacks of implicit parametric modeling

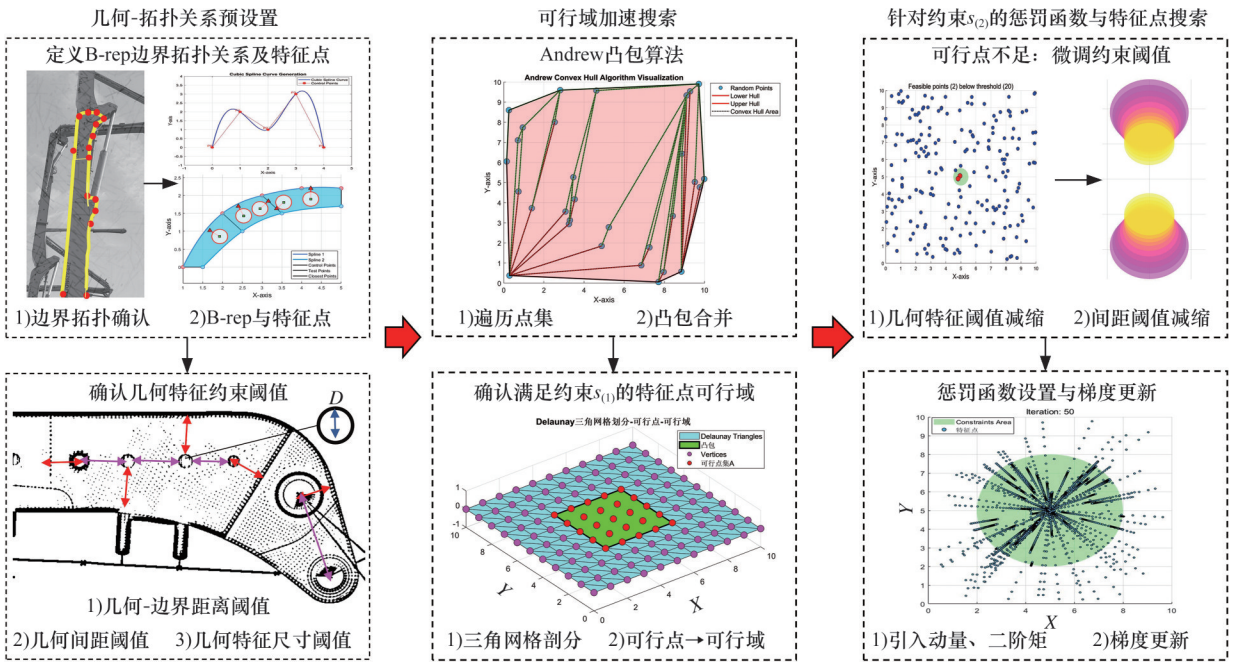


图3　自适应参数化建模方法流程

Fig.3　Process of adaptive parametric modeling method

模型线条由三次样条曲线生成，控制方程为

$$S_i(x)=a_i+b_i(x-x_i)+c_i(x-x_i)^2+d_i$$

$$x_i<x<x_{i+1}\qquad i=0,1,\cdots,n$$

式中：$S_i(x)$为第i样条段的函数；a_i、b_i、c_i、d_i为样条系数；x_i为第i段边界点。

区域内任意点p_i与任意边界点连线的距离、最近距离点的位置和与其他特征点的距离可基于投影法计算：

$$d_{\text{line}}(p_i,c_j)=\frac{|(p_i-c_j)(c_{j+1}-c_j)|}{\|c_{j+1}-c_j\|}$$

$$d_{\text{point}}(p_i,p_j)=\|p_i-p_j\|$$

$$C=c_j+\frac{(p_i-c_j)(p_{j+1}-c_j)}{\|c_{j+1}-c_j\|^2}(c_{j+1}-c_j)$$

式中：d_{line}、d_{point}为距离计算函数；C为边界上最近点坐标。

对各特征点位置定义约束如下：

$$s_{(1)}:\min_{P_i\in P,c_i\in c}(d_{\text{line}}(p_i,c_j))\geqslant s_1=\Delta+O_{(Z1)}$$

$$s_{(2)}:\min_{P_i\in P,c_i\in c}(d_{\text{point}}(p_i,p_j))\geqslant s_2=\delta+O_{(Z2)}$$

式中：Δ为边界距离阈值；δ为几何间距阈值。

为限制特征点间及特征点到边界的距离，设$O_{(Z1)}$，$O_{(Z2)}$为几何特征补偿，对于半径为R的圆形孔洞，其值分别为R和$2R$。为了加速搜索可行点，使用凸包算法Andrew和基于Bowyer-Watson算法的Delaunay三角剖分网格快速分割区域。网格用于获得各特征点在区域内满足约束$s_{(1)}$的可行点集A，凸包算法在网格划分稀疏导致可行点数量偏少时，将可行点集A转化为可行域Ω，拓展搜索空间。通过确定特征点到其对应凸包上的最近点进行初步调整，而后在凸包内面向约束$s_{(2)}$依次调整各特征点位置。首先定义惩罚函数P以

惩罚不满足约束的情况。

$$P_i=(\max(0,s_2-d_{\text{point}}(\boldsymbol{p}_i,\mathrm{p}_j)))^2$$

然后引入动量$\boldsymbol{m}_t$和二阶矩$\boldsymbol{v}_t$，逐步更新惩罚函数梯度：

$$\nabla P_i=\left[\frac{\partial \boldsymbol{P}_i}{\partial x_i}\quad\frac{\partial \boldsymbol{P}_i}{\partial y_i}\right]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{m}_t=\beta_1\boldsymbol{m}_{t-1}+(1-\beta_1)\nabla P_i$$

$$\boldsymbol{v}_t=\beta_2\boldsymbol{v}_{t-1}+(1-\beta_2)\nabla P_i^2$$

$$\hat{\boldsymbol{m}}_t=\frac{\boldsymbol{m}_t}{1-\beta_1^t}\qquad\hat{\boldsymbol{v}}_t=\frac{\boldsymbol{v}_t}{1-\beta_2^t}$$

式中：∇P_i为惩罚函数梯度；β_1，β_2为动量衰减率；t为迭代步数；$\hat{\boldsymbol{m}}_t$、$\hat{\boldsymbol{v}}_t$为修正后动量、二阶矩。

动量用于控制梯度变化幅度，令优化过程更加平稳。为了消除初始步数的偏置，对动量$\boldsymbol{m}_t$和二阶矩$\boldsymbol{v}_t$进行偏置修正，确保算法收敛性并最终更新特征点$\boldsymbol{p}_i$的坐标：

$$\boldsymbol{p}_i^{t+1}=\boldsymbol{p}_i^t-\alpha\frac{\hat{\boldsymbol{m}}_t}{\sqrt{\hat{\boldsymbol{v}}_t}+\varepsilon}$$

式中：α为预设的学习率；ε为防止除零错误的平滑常数。

特别地，在更新某一特征点，迭代达到最大步数但可行点集A中的点数少于阈值D_1时，以较小的步长削减初始设定的从属几何尺寸：

$$r_t=\begin{cases}\alpha_2 r_{t-1} & |A|\leqslant D_1\\ r_{t-1} & \text{其他}\end{cases}$$

式中：r_t为削减后的从属几何尺寸。

当它也达到预设的最小阈值D_2时，调整几何间距阈值：

$$\delta_{\text{new}}=\begin{cases}\alpha_2\delta_{t-1} & r<D_2\\ \delta_t & \text{其他}\end{cases}$$

式中：r_t、δ_{new}为削减后的从属几何尺寸和几何间距阈值；α_2为削减步长，根据具体的违约情况设置。

采用APGM方法对图2模型进行缩放，结果见图4。该方法在满足约束的前提下优先保留初始相对位置，仅在可行点不足时调整约束阈值，模型缩放区间可达[−50%，50%]，从而拓展设计空间。

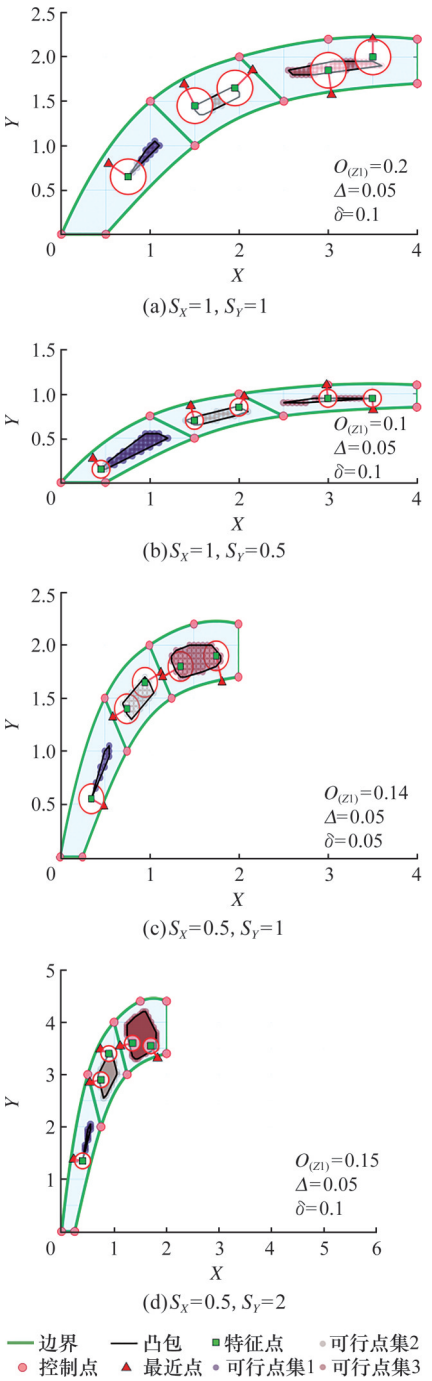


图4　相同条件下自适应参数化几何建模的效果

Fig.4　Effect of adaptive parametric geometry modeling under the same conditions

2　多尺度有限元模型

2.1　系统级响应重构

在有限元分析中以低阶单元替代高阶单元可提高计算效率，但局部单元与材料参数通常依赖理论推导或经验估计，通用性和精度均受限制。

本文基于径向基函数(RBF)神经网络与优化算法提出系统级响应重构方法，使低阶单元能够等效表征高阶单元对系统力学响应的影响，并以销轴支承验证结构参数变化时的有效性。

如图5所示，该方法包括三步：①建立可信的高保真模型；②以低阶单元替换目标部件并采用最优拉丁超立方抽样(OLHS)计算；③基于RBF神经网络拟合与优化等效参数。

以销轴部件为算例说明该方法的作用：用1D单元BEAM188等效某直径130 mm、材料为42CrMo的臂节首端销轴，建立简化的节臂基体和销轴实体作为模型1，并以SHELL63和SOLID187单元划分网格进行高保真度计算和校准，记录最大位移值$U_{\max 0}$与最大等效应力$\sigma_{\max 0}$。在模型2中，用无质量的蜘蛛网状BEAM188单元替代销轴，单元截面设置为直径10 mm的圆管。设BEAM单元相关材料属性为设计变量$\boldsymbol{X}$，构建

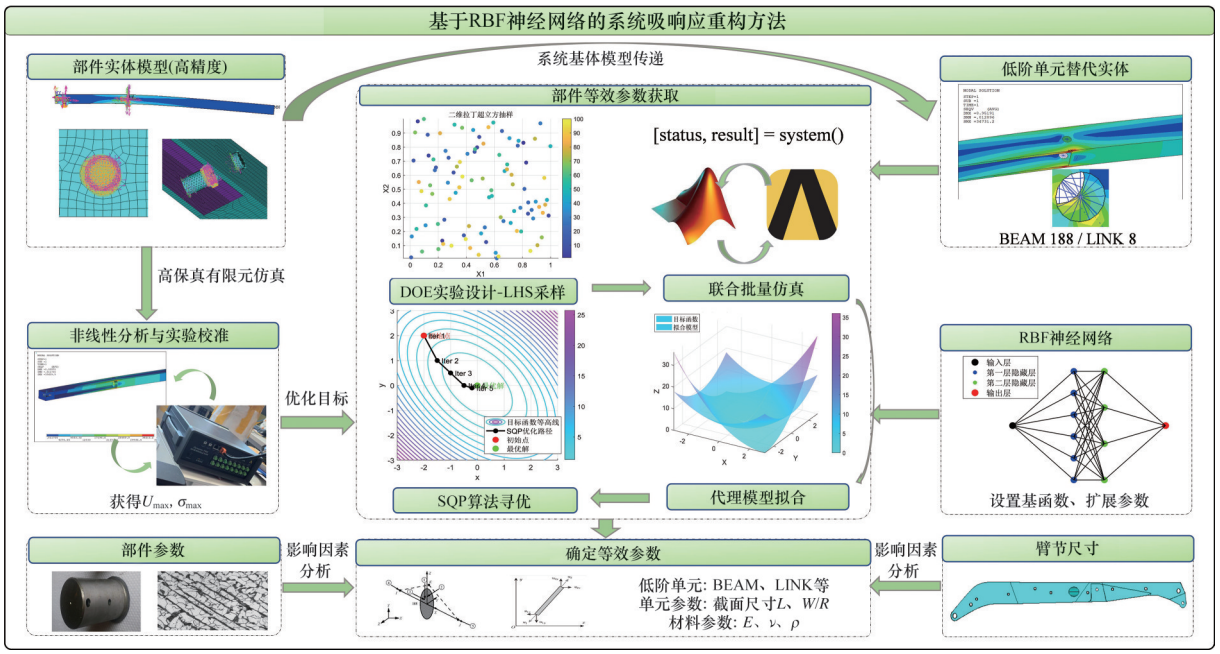


图5 系统级响应重构方法原理及流程

Fig.5 Principle and process of system-level response reconstruction method

二维优化问题如下：

$$\begin{aligned}&\text{find}\quad \boldsymbol{X}=[\,E\quad \nu\,]\\&\text{target}\quad U_{(x)}=U_{\max 0}\\&\text{target}\quad \sigma_{(x)}=\sigma_{\max 0}\\&\text{s.t.}\quad 2.08\times10^{5}\ \text{Pa}\leqslant E\leqslant 2.08\times10^{9}\ \text{Pa}\\&\qquad 0.2\leqslant\nu\leqslant 0.4\end{aligned}$$

采用OLHS方法获得100个样本点，以1D单元替代目标部件进行批量仿真，并以高保真模型的最大位移和von Mises应力为响应，基于RBF神经网络拟合代理模型并开展多目标寻优，得到等效参数：弹性模量E=1200 GPa，泊松比ν=0.29。

以赋予该材料属性的蜘蛛网状梁单元替代销轴实体，从系统层面和部件层面出发，分析以下因素对响应重构精度的影响：①臂架基体尺寸；②销轴尺寸。具体见图6、图7。

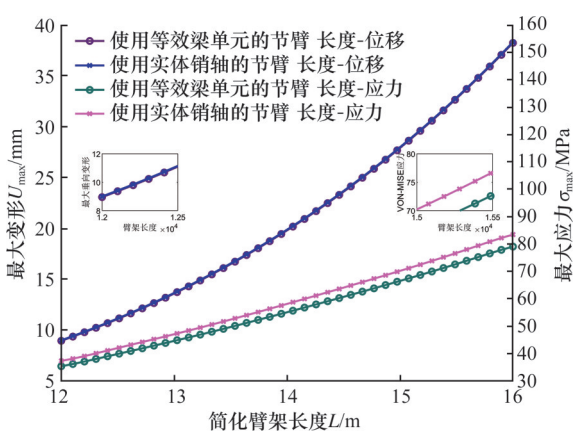


图6 系统参数对响应重构精度的影响

Fig.6 Effect of system parameters on response reconstruction accuracy

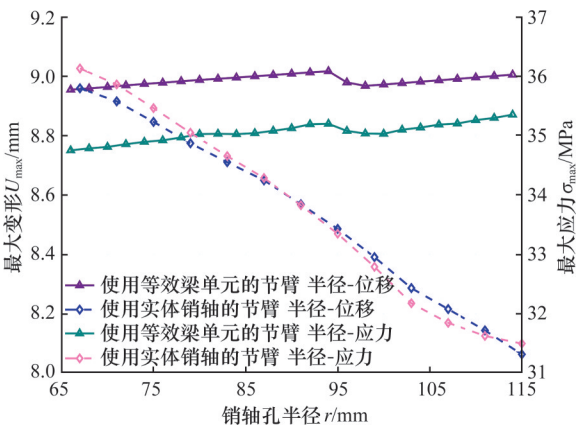


图7 部件参数对响应重构精度的影响

Fig.7 Effect of component parameters on response reconstruction accuracy

由图6、图7可知，系统层级发生尺寸变化时，基于响应重构方法设置的简化模型精度稳定，其中反映二者整体刚度的曲线几乎完全重合。但部件层级的变化影响较大，由图7可见，随着销轴半径的变化，等效模型的响应值变化趋势与高保真模型相反，且在r=95 mm处出现阶跃。这是因为实体销轴刚度和半径正相关，而梁单元刚度却和长度负相关。此外，随着尺寸增加，销轴孔边缘自由网格划分会产生更多的节点。因此，系统层级的变动对重构精度影响较小，但部件层级变动影响较大。本文在第1节中提出的自适应隐式几何建模方法能够避免销轴半径的大幅变化，从而间接确保多尺度模型的计算精度。

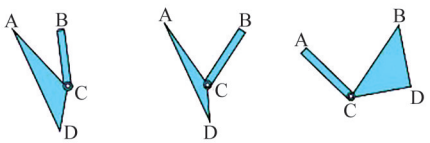
2.2 动态部件装配

对于混凝土泵车臂架等复杂多臂节系统，建

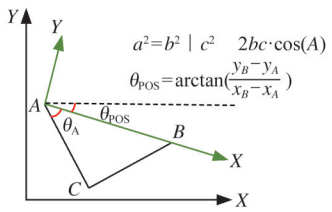
立有限元模型时需要进行繁琐的部件装配工作，反复设置接触关系及单元。对此，本文基于系统级响应重构方法，提出了一种动态部件装配方法，以简化部件装配过程并提高计算效率，如图8所示。



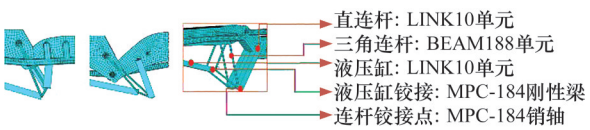
(a)真实连杆模型



(b)简化几何模型



(c)连杆顶点计算



(d)连杆有限元模型(自动生成)

图8　动态部件自动定位-建模方法

Fig.8　Dynamic component auto-localization and modeling method

多节臂系统的各臂节运动学关系为

$$\boldsymbol{R}_k=\begin{bmatrix}\cos(\theta_{dk}) & -\sin(\theta_{dk}) & 0\\ -\sin(\theta_{dk}) & \cos(\theta_{dk}) & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$P_k=P_{k-1}+\boldsymbol{R}_{k-1}\cdot(L_{Tk},0,0)^{\mathrm{T}}$$

式中：$\boldsymbol{R}_k$为第k节臂的旋转矩阵；θ_{dk}为各节臂倾角(与x轴夹角)；θ_{ik}为节臂间夹角；L_{Tk}为各节臂长度；P_k为第k臂节末端销轴中心坐标。

将各节臂模型根据P_k导入全局坐标系进行装配，用连杆机构进行连接。传动连杆的一般形式和建模方法如图8所示。由于各连杆机构可由多个三角形基元描述，且关键点A、B坐标可由臂节基体位置确定，所以容易借助余弦定理和方位角公式建立模型：

$$(\mathrm{d}x,\mathrm{d}y)=(x_B,y_B)-(x_A,y_A)$$

$$l_{AB}=\sqrt{\mathrm{d}x^2+\mathrm{d}y^2}$$

$$\theta_A=\arccos\frac{l_{AC}^2+l_{AB}^2-l_{BC}^2}{2l_{AC}l_{AB}}$$

式中：l_{AC}、l_{BC}为可调的连杆长度；θ_A见图8。

设置判别函数：

$$\mathrm{sgn}(\mathrm{d}x)=\begin{cases}1 & \mathrm{d}x>0\\ -1 & \mathrm{d}x<0\\ \eta & \mathrm{d}x=0\end{cases}$$

式中：η为防止除零的平滑常数，通常为10^{-8}。

该判别函数令点C的位置始终处于局部坐标系的第四象限，保证系统构型变化时连杆装配无误。由此可以确定三角形顶点C的坐标：

$$\theta_{POS}=180^\circ\times\frac{1-\mathrm{sgn}(\mathrm{d}x)}{2}+\arctan\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}$$

$$\theta_{AC}=\theta_{POS}-\theta_A$$

$$\begin{pmatrix}x_c\\ y_c\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}x_A\\ y_A\end{pmatrix}+l_{AB}\begin{pmatrix}\cos\theta_{AC}\\ \sin\theta_{AC}\end{pmatrix}$$

式中：θ_{POS}、θ_{AC}分别为边AB、AC在整体坐标系下与X轴的夹角即方位角。

根据上述公式，确定所有连杆顶点的坐标，并通过杆、梁单元进行连接，从而快速自动生成连杆机构。将各臂节间的连杆机构视为局部子结构，采用本文第2节提出的系统级响应修正方法计算需赋予的材料属性。该方法只需输入连杆长度常数即可完成自动装配，并能够准确还原优化所需的系统层级力学响应，从而简化了传统的工作流程，同时支持最危险优化工况的确定。

3　高维工程问题和代理信息迁移与融合高维昂贵优化算法(SITFO)

3.1　代理模型与高维工程问题

代理模型(响应面模型)可以构建系统输入和输出间的映射关系，替代机理模型以降低计算成本。常见代理模型包括RBF、Kriging、多项式响应曲面(PRS)等[21]。

均值项为常数的Kriging模型可表示如下：

$$y_K(x)=\mu+Z(x)$$

式中：$Z(x)$为高斯过程；μ代表所用多项式为0阶。

Kriging模型的超参数数量与设计变量维度成正比，因此面对高维问题难以进行超参数寻优，性能不佳。而RBF模型存在多种类型的基函数，比如薄板样条(TPS)、多面体(MQ)、高斯过程(GP)等。其中高斯基函数如下：

$$R_i(x)=\exp(-\frac{\|x-c_i\|}{2\sigma_i^2})$$

其中，σ为扩展常数，通常基于偏扩展常数算法计算：

$$\sigma=\frac{d_{\max}}{\sqrt{2n}}$$

式中：$d_{\max}$为训练点间最大距离；n为训练点数量。

由于仅存在一个超参数，RBF-GP模型超参数寻优难度较低，因此能准确预测高维映射，并应用于后续的SITFO算法中。代理模型的预测精度受数据维度数量、非线性程度、模型内置超参数等多种因素影响。随着维度的增加，任何代理模型都需要增加样本点以支持拟合精度。有研究表明，对于n维问题，需要$5n$或$10n$的样本点数[22]。

然而，这一设置仅适用于低维或非线性程度较低的映射拟合。在高维工程优化问题中，所需的样本点数通常随着维度的增加呈非线性增长。基于n为66的3000个训练点训练代理模型时，RBF-GP模型拟合耗时为1.6～2.1 s，精度能够支持优化，Kriging模型拟合耗时约4 min且精度低于RBF模型。

敏感度降维虽可降低代理建模成本，却可能遗漏潜在最优解。SITFO通过迁移敏感度信息，在保留全部设计变量的同时降低求解成本。

3.2 SITFO算法原理

SITFO算法[23]结合RBF-GP对高维映射的预测能力与Kriging基于不确定性的序列加点能力，以降低计算代价并实现全局优化，流程见图9。

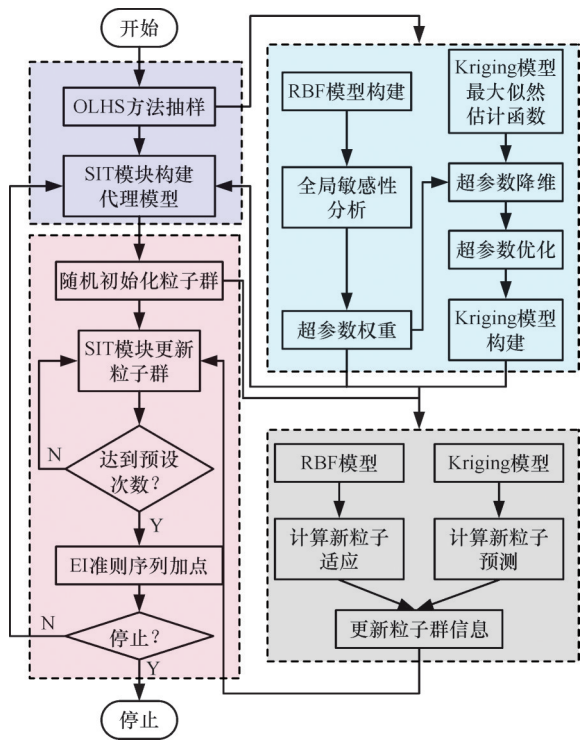


图9 SITFO算法原理及流程

Fig.9 Principle and process of SITFO algorithm

SITFO算法的输入包括初始样本量N_S、最大昂贵样本量$F_{E\max}$、加点时粒子群的最大迭代次数$t_{\max}$、Kriging模型判别阈值ε_{th}和目标函数收敛容差ϵ。该算法通过LHS方法生成训练样本，然后基于代理信息迁移(SIT)模块构建初始的RBF、Kriging代理模型。由于Kriging模型超参数与设计变量全局敏感度具有一致性，SIT模块基于RBF模型计算敏感度信息并迁移到Kriging模型中实现超参数降维和优化，提高其对高维映射的预测性能，输出预测方差并以期望改进(EI)加点准则为优化目标，采用内点法局部搜索，每次迭代增加1个新样本点。为减少灵敏度分析的计算成本，该模块设计了阈值ε_{th}用于判断前一次迭代中Kriging模型是否构建成功(预测方差是否存在明显差异)，若成功则无需重新执行SIT模块。

为弥补Kriging预测精度与RBF模型的差距，代理信息融合(SIF)模块将两者融入改进的PSO，即Kriging预测方差及其梯度引导粒子向高不确定性区域移动，RBF模型负责估计粒子适应度。因此，Kriging提供不确定性信息而RBF保持预测精度，可降低高维优化的计算成本。

4 59 m混凝土泵车臂架系统参数优化

以59 m混凝土泵车臂架系统为例验证所提方法。该系统包含6个臂节，结构与力学要求较复杂。各臂节材料分布可沿X轴划分为三部分，各部分顶板厚度基本一致，侧板和底板具有相似分布趋势(图10)。

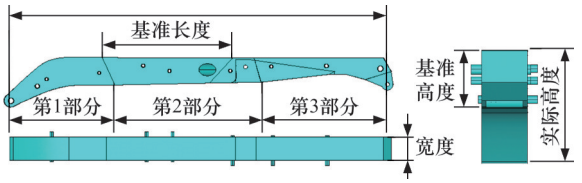


图10 混凝土泵车臂架系统臂节主要参数

Fig.10 Main parameters of boom sections in concrete pump truck boom system

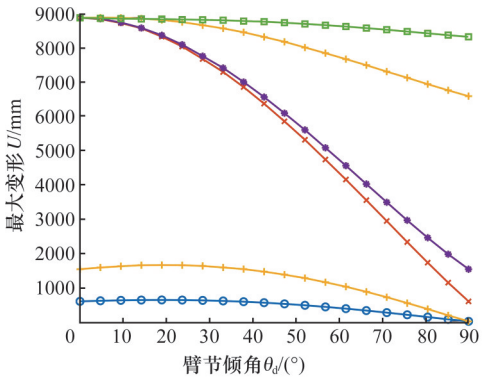
4.1 建模计算

泵车臂架基体板材以SHELL63单元划分网格，材料为Q890钢材，弹性模量为206 GPa，泊松比为0.3，许用应力为580 MPa。替代砼管的单元材料密度与实际混凝土质量相等效，动载系数设为1.3。各油缸、销轴、三角连杆、直连杆、混凝土管支承管端口以及臂架末端软管的质量则基于实测质量，以MASS21单元的形式均匀赋予等效单元的节点。各臂节的不同位姿(倾角)组合即可视为泵车臂架系统的工况。臂架系统作业的6种典型工况见表1。对表1中工况进行扫掠分析，间隔角度为5°，选取了最大变形和臂节1、4、6的主焊缝邻近区域应力(图11)。由图可见，最危险的工

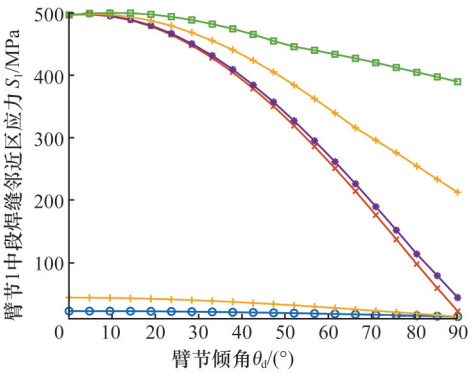
表1 6节臂泵车臂架系统典型工况

Tab.1 Typical operating conditions of a 6-section boom concrete pump truck system

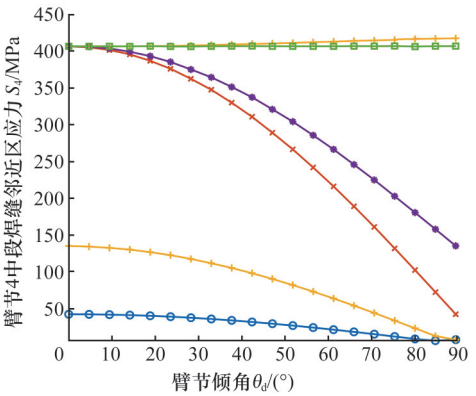
工况序号	工况内容
1	臂节1～5垂直，臂节6从0°～90°
2	臂节1～5展开从0°～89°，臂节6右水平
3	臂节1～4展开垂直，臂节5～6直展开，0°～90°
4	臂节1～4展开0°～90°，臂节5～6水平
5	臂节1～2从0°～90°，臂节3～6右水平
6	臂节1从0°～90°，臂节2～6右水平



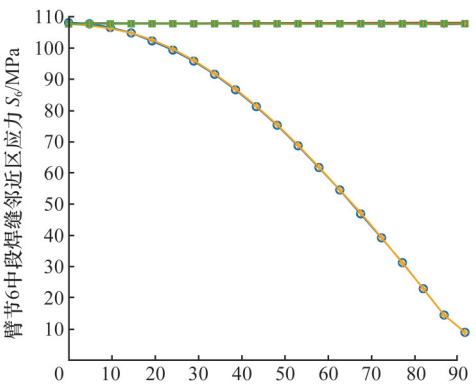
(a)各典型工况下系统最大变形



(b)各典型工况下臂节1应力



(c)各典型工况下臂节4应力



(d)各典型工况下臂节6应力

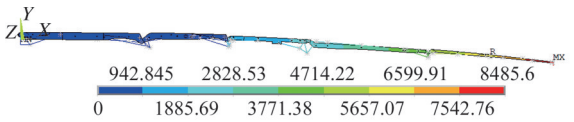


图 11　基于变形和应力的工况扫掠分析

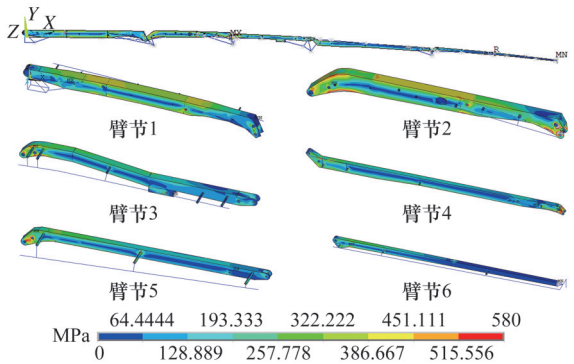
Fig.11　Operating condition sweep analysis based on deformation and stress

况是各臂节倾角均为0°，即臂架系统水平展开。将59 m臂架系统的初始参数输入模型，并基于该工况进行静力分析。

图12展示了臂架系统整体变形和各臂节的von Mises应力分布。该结构为串联机械臂，臂节首端、尾端的4条主焊缝应力均较高，而侧板中部应力则相对较低。各臂节的整体应力分布与板厚呈现明显的区域性，其中部分区域的应力已接近屈服应力$[\sigma]$=580 MPa。另外，结构改变时，各臂节最大von Mises应力点的位置也相应发生改变，在设计变量X和力学响应值间形成了强非线性关系，增加了代理模型的预测难度。



(a)59 m混凝土泵车臂架系统变形



(b)59 m混凝土泵车臂架系统整体及各臂节von Mises应力

图 12　59 m泵车臂架系统静力学分析结果

Fig.12　Static analysis results of the 59 m concrete pump truck boom system

4.2　模型验证

有限元模型验证分为网格无关性验证和精度验证。网格无关性验证指随着网格逐渐加密，其力学计算结果应趋于收敛，且变化幅值最终小于某一容差，此时计算结果可信。维持边界条件不变，将模型主要单元SHELL63的尺寸z_w由70 mm向20mm调整。以归一化处理的收敛率r_i表征网格密度变化时部分计算结果的变化幅度：

$$r_i=\frac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}x_i}=\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}$$

$$\hat{r}_i=\frac{r_i}{\max(|r_1|,|r_2|,\cdots,|r_n|)}$$

式中：x_i、y_i为数据点坐标；r_i为曲线变化率；$\hat{r}_i$为归一化处理的变化率。

绘制随网格密度变化的计算结果曲线和变化率曲线见图13。

设变化率收敛阈值为0.2，当z_w＞57 mm时，计算结果出现了明显振荡，20 mm＜z_w＜48 mm

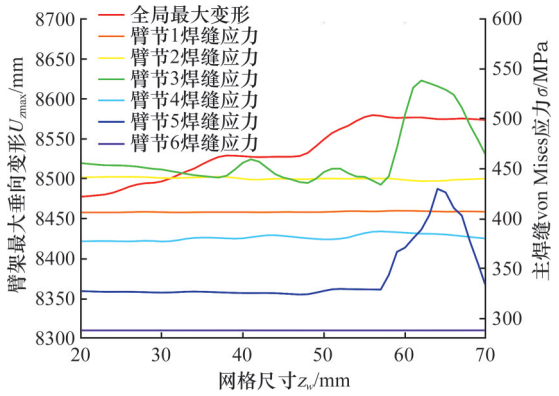


图13 有限元模型网格密度对计算结果的影响

Fig.13 Effect of mesh density in finite element model on computational results

时，变化率则处于收敛阈值内，此时计算结果较为可信（图14）。考虑计算精度、效率，最终选择$z_w=40$ mm作为网格尺寸，对应的参数化有限元模型网格总数为46 672，单次计算时间约150～170 s。采用映射方式划分网格，控制板材边缘节点数量保证计算精度。

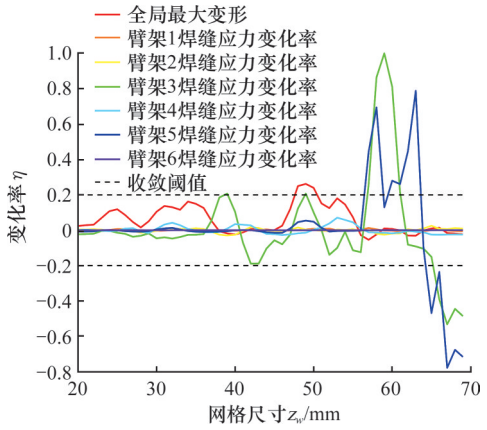


图14 有限元模型网格密度收敛性分析

Fig.14 Convergence analysis of mesh density in finite element model

将参数化有限元模型与59 m臂架系统实测数据比较，指标包括各臂节质量、全局最大变形及臂节1～3首端主焊缝邻近区域应力。如图15所示，采用HBM测试系统（MX1516B-R）采集应变，将应变花贴于板材与焊缝交界处，并以砼管输送水泥加载。各臂节质量和变形误差均小于5%，主焊缝邻近区域应力误差小于15%，满足后续优化的精度要求。



图15 59 m混凝土泵车臂架系统实验测试现场

Fig.15 Experimental testing site of the 59 m concrete pump truck boom system

4.3 优化问题构建与求解

优化目标为59 m泵车臂架系统轻量化，设计变量涵盖各臂节长度、中段截面尺寸和板厚。除臂节6的顶板、侧板和底板厚度整体设置外，其余臂节分别设置区域1～3的顶板、侧板和底板厚度，共形成66维设计变量：

$$\boldsymbol{X}=(L,W,H,T)$$

其中，L、W、H、T分别包含了各臂节长、宽、高和板材厚度信息，具体见表2。

表2 臂架系统设计变量详细设置

Tab.2 Detailed setting of design variables for boom system

尺寸参数（第i臂节，i=1,2,3,4,5,6）	长度	宽度	高度
	$L(i)$	$W(i)$	$H(i)$
板厚参数	区域1	区域2	区域3
顶板厚度	$T(i_1)$	$T(i_2)$	$T(i_3)$
侧板厚度	$T(i_4)$	$T(i_5)$	$T(i_6)$
底板厚度	$T(i_7)$	$T(i_8)$	$T(i_9)$

对臂架系统进行轻量化时，需要对系统总长度、刚度、强度和整车布局尺寸限制进行约束，刚度约束用于保证臂架系统输送物料的稳定性，强度约束则用于防止臂架破坏。此外，还需要限制臂架整体长度不小于原长度，以保证臂架作业半径达标。建立臂架系统全局优化模型如下：

$$\begin{aligned}
&\text{find } \boldsymbol{X}=(L,W,H,T)\\
&\min\ M=M_{(X)}\\
&\text{s.t. } g_1=L_0-L_{(X)}\leqslant 0\\
&\quad g_2=D_{(X)}-D_0\leqslant 0\\
&\quad g_3=S_{(X)}-[\sigma]\leqslant 0\\
&\quad g_4=x_0-L_a+L(1)-S_S\leqslant 0\\
&\quad g_5=L_{(2)}+R+L_a-L_{(1)}\leqslant 0\\
&\quad g_6=x_0-L_a+L_{(1)}-L_{(2)}+L_{(3)}-S_S\leqslant 0\\
&\quad g_7=L_{(6)}-L_{(5)}\leqslant 0\\
&\quad g_8=L_{(4)}-V-L_{(1)}+L_{(2)}-L_{(3)}\leqslant 0\\
&\quad g_9=x_0-L_a+L_{(1)}-L_{(2)}+L_{(3)}-L_{(4)}+\\
&\qquad L_{(5)}-S_S\leqslant 0\\
&\quad g_{10}=H_{(4)}+H_{(5)}+H_{(6)}-H_{(1)}\leqslant 0\\
&\quad g_{11}=H_{(1)}+H_{(2)}+H_{(3)}\leqslant H_a\\
&\quad X^L\leqslant X\leqslant X^U
\end{aligned}$$

式中：X^L、X^U为抽样时定义的设计变量下界和上界；$M_{(X)}$为臂架系统质量；$S_{(X)}$为臂架系统应力响应；$L_{(X)}$为臂架系统各臂节长度总和；$D_{(X)}$为臂架最大变形；L_0、D_0、$[\sigma]$分别为系统原长度、系统原始变形和钢材许用应力；g_1～g_{11}为整车约束，即整车布局对臂架系统参数的限制；x_0为系统回转中心到车头的间距；S_S为臂节1尾端销轴轴线到回转

中心水平距离；R为回转支承外轮廓半径；V为臂节1首端销轴轴线到转台底板上表面垂直距离；L_a为总车长，H_a为臂架系统限高。

对于设计参数变动引发的最大应力点移动产生的强非线性映射，通过以下方式拆解响应值并降低映射非线性：在各臂节首、中、尾端应力较大区域，沿OYZ平面剖切，提取剖切截面顶点上节点的von Mises应力作为约束。对于6节臂系统，共有72个应力点。以臂节2为例在图16中显示应力点选取方法。

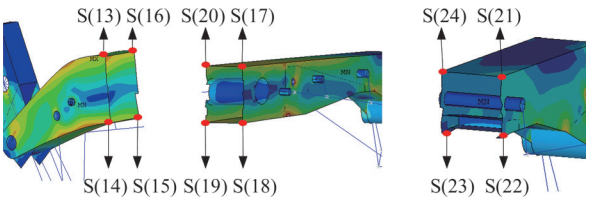


图16　响应值拆解策略对应的应力点选择方式

Fig.16　Stress point selection method corresponding to the response decomposition strategy

综上，系统响应值Y是一个75维的向量：

$$Y=(L_{(X)},M_{(X)},D_{(X)},S_{(X)})$$

这些约束令优化后的臂架布局力学性能合格且满足整车装配需求。设定设计变量的优化区间为

$$0.5L_0<L<1.5L_0 \quad 0.5W_0<W<1.5W_0$$
$$0.5H_0<H<1.5H_0 \quad 3<T<25$$

式中：L_0、W_0、H_0为59 m臂架系统的初始臂节长度及截面尺寸；T受实际库存板材规格限制。

基于SITFO算法求解该问题。

4.4　结果与分析

SITFO算法的终止条件如下：①$F_{\mathrm{E\,max}}$，达到该数量后算法自动终止；②目标函数收敛容差ϵ，作用于改进的PSO优化器中，避免算法陷入局部最优提前终止。本文设置$N_S=50$，$F_{\mathrm{E\,max}}=500$，$\varepsilon_{\mathrm{th}}=1\times10^{-5}$，$t_{\max}=15$，$\epsilon=1\times10^{-5}$。基于LHS方法获取初始的50个样本点拟合RBF、Kriging代理模型，经历450次EI加点和迭代后，适应度函数成功收敛，获得臂架系统的最优结构参数组合。

SITFO的实际迭代次数为最大昂贵样本量和初始样本量之差，即450次。图17中的横线代表在这些迭代步数中，获得的参数组合不满足约束，对应的目标函数值也未记录，仅用于代理建模。在约300次迭代后，寻优结果趋于稳定，最终收敛到最优参数组合。文献[23]基于多个经典维数值案例和一个工程案例对SITFO算法进行性能分析，n维问题下将F_{Emax}均设为n并在算法比较中取得了良好的效果。但本文涉及的高维优化问题映射非线性强度较高，故F_{Emax}可设为$5n$～$10n$，由于参数化有限元模型计算效率较高，此时计算成本约为14 h～27.5 h，在工程上可以接受。该参数组合下，系统总长度维持不变，臂节基体质量在考虑工作负载随动变化的前提下从5953.1 kg减至4854.3 kg，降幅18.46%，在优化工况下的最大变形减小10.6%，一些约束点的von Mises应力值虽然发生增长，但仍远小于钢材许用应力。

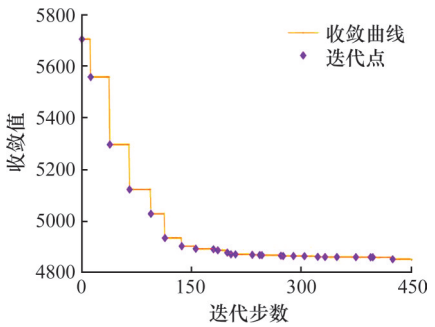


图17　SITFO的最优值收敛曲线

Fig.17　Convergence curve of the optimal value of SITFO

在本案例中，RBF-GP在常用代理模型中精度最高。为比较优化效果，在相同计算成本下以500个LHS样本拟合RBF-GP，并分别采用序列二次规划(SQP)、内点法(IPM)、粒子群优化(PSO)和遗传算法(GA)执行5次优化，取最优结果。各算法最大迭代次数均为1000；PSO初始粒子数为660，GA初始种群数为500，结果见图18。

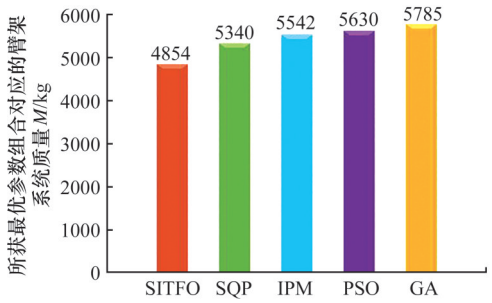


图18　代理模型辅助优化算法效果对比

Fig.18　Comparison of the performance of surrogate model-assisted optimization algorithms

GA和PSO分别耗时约1 h，前者未能减小质量，后者优化幅度较小且部分响应违约。SQP和IPM在3 min内完成优化，但作为局部算法未获得全局最优解，且受训练样本量限制出现违约。SITFO总耗时约18.2 h，优化幅度最大并满足全部约束，约300次迭代后已接近最优解。

设计变量中，24个维度变化超过40%，38个超过20%，仅11个小于5%。各臂节宽度总体减小，臂节1～4高度增加；顶板趋于增厚、侧板趋于

减薄，符合类悬臂梁受力特征。臂节6长度在最优组合中减小，同时提高了系统静刚度，体现了高维全局优化的非直觉特征。

该算例表明：提高参数化模型鲁棒性和计算效率可拓展优化空间；高维全局优化可能产生非直觉但更优的参数组合；代理辅助进化优化可显著降低计算成本并保持优化效果。

5 结论

1)提出适用于臂架系统的自适应参数化几何建模方法，简化建模流程、提高模型稳定性并拓展设计空间。

2)提出系统级响应重构与多臂节动态装配方法，协调有限元模型效率与精度的矛盾，为优化提供可靠数据。

3)采用SITFO代理辅助进化优化算法处理高维强非线性映射，提高全局优化效率。

4)在59 m混凝土泵车臂架系统算例中，质量减小18.46%，最大变形减小10.6%，验证了所提流程的有效性。

所提方法适用于复杂工程臂架系统的结构参数优化。后续将面向多学科优化与制造约束开展研究。

参考文献：

[1] MEIRINGER M, KUGI A, KEMMETMÜLLER W. Modelling and Calibration of a Five Link Elastic Boom of a Mobile Concrete Pump[J]. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 2023, 29(1): 41-68.

[2] REN Wu, LI Zhongwei, BI Yanping, et al. Modeling and Analysis of Truck Mounted Concrete Pump Boom by Virtual Prototyping[J]. Journal of Robotics, 2017, 2017(1): 9182143.

[3] LEE J H, KIM K S. Optimal Design of Boom for Telescopic Boom Type Forklift Truck[J]. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2020, 37(6): 457-464.

[4] CELIK H K, RENNIE A E W, AKINCI I. Design and Structural Optimisation of a Tractor Mounted Telescopic Boom Crane[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(3): 909-924.

[5] KURESANGSAI P, COLE M O T. Kinematic Modeling and Design Optimization of Flexure-jointed Planar Mechanisms Using Polynomial Bases for Flexure Curvature[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 132: 80-97.

[6] REN Yafeng, YANG Weifeng, SUN Xiaohui, et al. Vibration Characteristics of Concrete Pump Trucks with Multiple Postures and Multiple Conditions Based on the Secondary Development of HyperWorks[J]. Processes, 2023, 11(5): 1483.

[7] WANNER J, SAWODNY O. A Lumped Parameter Model of the Boom of a Mobile Concrete Pump[C]//2019 18th European Control Conference (ECC). Naples, 2019: 2808-2813.

[8] 李鹏，王一棠，王佳茜，等. 数据驱动的混凝土泵车臂架疲劳载荷谱编制[J]. 中国机械工程，2024，35(10)：1881-1889.
LI Peng, WANG Yitang, WANG Jiaqian, et al. Data-driven Fatigue Load Spectrum Compiling of Concrete Pump Truck Booms[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(10): 1881-1889.

[9] 张攀峰，成凯，张辉，等. 基于ANSYS的混凝土泵车上车结构刚度灵敏度分析及优化设计研究[J]. 建筑机械，2012(23)：107-111.
ZHANG Panfeng, CHENG Kai, ZHANG Hui, et al. Study of Rigidity Sensitivity Analysis and Optimal Design Based on ANSYS for Upper Structure of Concrete Pump Truck[J]. Construction Machinery, 2012(23): 107-111.

[10] 孙武和. 混凝土泵车臂架结构有限元分析及参数计算程序应用[D]. 长春：吉林大学，2009.
SUN Wuhe. Finite Element Analysis and Parameter Calculation Program Application of Concrete Pump Truck Boom Structure[D]. Changchun: Jilin University, 2009.

[11] 孙武和，周振平，徐怀玉，等. 基于ANSYS的混凝土泵车上车结构自动计算技术[J]. 建筑机械，2013(5)：94-97.
SUN Wuhe, ZHOU Zhenping, XU Huaiyu, et al. Automatically Computing Technology Base on ANSYS for Boom Structure of the Truck-mounted Concrete Pump[J]. Construction Machinery, 2013(5): 94-97.

[12] 闫海涛，成凯，徐怀玉，等. 基于遗传算法的混凝土泵车臂架铰点系统的优化[J]. 建筑机械，2011(8)：84-87.
YAN Haitao, CHENG Kai, XU Huaiyu, et al. The Optimization of the Boom Hinge Point System for the Concrete Pump Truck Based on Genetic Algorithm[J]. Construction Machinery, 2011(8): 84-87.

[13] 陈泽，张剑敏，吴斌兴. 基于拓扑优化的混凝土泵车一臂轻量化设计[J]. 中国工程机械学报，2019，17(3)：238-242.
CHEN Ze, ZHANG Jianmin, WU Binxing. Lightweight Design of Concrete Pump Truck One-boom Based on Topological Optimization[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2019, 17(3): 238-242.

[14] 赵远，张宇乐，陈晓伟. 混凝土泵车臂架机构铰点位置优化研究[J]. 起重运输机械，2024(7)：38-43.
ZHAO Yuan, ZHANG Yule, CHEN Xiaowei. On Optimization of Hinge Point Position of Boom Mechanism of Concrete Pump Truck[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2024(7): 38-43.

[15] 赵远. 混凝土泵车臂架结构性能分析及多目标优化[D]. 太原：太原科技大学，2024.
ZHAO Yuan. Performance Analysis and Multi-objective Optimization of Concrete Pump Truck Boom Structure[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2024.

[16] YANG Shuanqiang, HUANG Xinlong, SHEN Zhenhui, et al. Knowledge-based Structure Optimization Design for Boom of Excavator[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(1): 8869758.

[17] LIN Jingliang, LI Haiyan, HUANG Yunbao, et al. Multi-objective Surrogate Modeling through Transfer Learning for Telescopic Boom Forklift[J]. IEEE Access, 2023, 11: 11629-11641.

（下转第2215页）