文章编号：1001-4632（2025）06-0199-11

引用格式：张可新，王铭铭，潘利科．基于自适应代理模型的高速铁路弓网系统关键参数优化[J]．中国铁道科学，2025，46(6)：199-209.

Citation：ZHANG Kexin，WANG Mingming，PAN Like. Adaptive Surrogate Model-Based Optimization of the Key Parameters of High-Speed Railway Pantograph-Catenary System [J]. China Railway Science，2025，46 (6)：199-209.

基于自适应代理模型的高速铁路弓网系统关键参数优化

张可新[1]，王铭铭[1]，潘利科[2]

（1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道科学技术研究发展中心，北京 100081；
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 标准计量研究所，北京 100081）

摘 要：高速铁路弓网系统关键参数间的强非线性关系，使基于仿真的弓网系统关键参数适配难以实现全局迭代优化。为提升弓网系统关键参数匹配度，在构建包括受电子系统模型、接触网子系统模型的弓网系统仿真模型基础上，采用部分工况下的仿真和试验实测数据构建弓网系统动态接触力自适应代理模型，准确刻画弓头质量、接触线张力与弓网系统动态接触力的非线性耦合关系；以弓头质量和接触线张力为设计变量，以弓网系统动态接触力标准差最小化为优化目标，建立考虑受流质量的高速铁路弓网系统关键参数优化模型，并采用差分进化算法实现弓网系统关键参数全局迭代优化求解；以DSA380型受电弓和简单链式悬挂接触网为研究对象，针对400 km·h^{-1}速度运行工况对其参数进行迭代优化，验证基于自适应代理模型的弓网系统关键参数优化方法的正确性和有效性。结果表明：构建的代理模型对弓网系统动态接触力平均值和标准差的预测精度分别达到99.99%和98.72%，400 km·h^{-1}速度运行工况下弓头质量和接触线张力最优设计值分别为4.22 kg和34.25 kN，优化方法有效减少了弓网仿真计算次数，提高了弓网系统设计效率。

关键词：高速铁路；弓网系统；自适应代理模型；弓头质量；接触线张力；参数优化

中图分类号：U238；U225 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1001-4632.2025.06.20

高速铁路受电弓-接触网系统（简称弓网系统）为动车组高速运行提供稳定、持续、可靠的电能，是高速铁路安全、高速运行的核心设备之一[1]。弓网系统参数间不匹配严重影响弓网系统的受流质量，危及行车安全[2-3]，尤其400 km·h^{-1}运行工况下弓网系统面临着弓网稳定接触更加困难的挑战[4]。因此，弓网系统关键参数匹配对更高速度铁路系统设计具有重要意义。

弓网系统动态接触力能够很好地反映动车组的受流质量[5-6]，也是动车组受电弓稳定持续受流的关键评价参数。在实际线路试验和仿真分析过程中，通常采用弓网系统动态接触力的最大值、最小值、平均值和标准差作为弓网关系的主要评价指标[7]。良好的弓网关系要求在满足弓网系统动态接触力平均值的前提下标准差越小越好[8]，这是弓网系统关键参数优化的主要目标。

近年来，大多数研究通过仿真方法优化弓网系统关键参数，提升弓网系统受流质量。在对受电弓弓头质量优化设计研究中，吴孟臻等[2]采用有限元仿真方法分析指出弓头质量对弓网系统受流质量的影响最大，并以弓网系统动态接触力随机统计特征量为优化目标，优化设计了受电弓弓头质量。姜静等[5]通过建立弓网系统仿真模型研究受电弓弓头质量对弓网系统动态接触力标准差的影响，减少

收稿日期：2024-04-09；修订日期：2025-05-19

基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题（N2023T011-A(JB)）；中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题（2023YJ277）

第一作者：张可新（1985—），女，天津人，副研究员，博士。E-mail：18618142082@163.com

通讯作者：王铭铭（1993—），男，河南濮阳人，副研究员，博士。E-mail：mingmingwangcn@163.com

受电弓弓头质量能有效降低弓网系统动态接触力的波动，并改善弓网受流质量。Kim 等[9]采用受电弓归算质量仿真模型，通过优化弓头质量等受电弓参数减少弓网振动，提高弓网受流性能。Pombo 等[10]通过构建弓网系统的有限元分析模型和多刚体模型，探究弓头质量等受电弓参数对弓网系统动态接触力的影响，随弓头质量的增加，弓网系统动态接触力标准差越大，弓网系统受流性能也越差。Ambrósio 等[11]和 Lee 等[12]以弓网系统动态接触力标准差最小化为优化目标，通过优化受电弓参数改善弓网系统受流质量。

早期研究表明接触线张力对弓网系统受流质量影响较大[13−14]。张宗芳等[6]在构建弓网有限元仿真模型的基础上，基于响应面法分析接触网线张力对弓网系统受流质量的影响。关金发等[8]以维持弓网良好动态相互作用为设计目标，以弓网系统受流质量为评价指标，采用仿真方法开展弓网系统设计。薛卫星等[15]通过仿真分析提出增大接触线张力可限制受电弓的动态抬升量，降低接触网弹性不均匀度，从而改善弓网系统受流质量。为改善高速运行条件下弓网受流性能，部分学者通过建立弓网系统仿真模型研究指出通过增大接触线张力提高接触网波动传播速度，可有助于提高弓网受流质量[16−17]。

仿真模型虽能够一定程度表征系统物理机理，但需要依赖精确物理方程、难以处理复杂非线性边界条件，仿真计算成本也较高。此外，单次仿真计算量大、效率低，使基于仿真模型的全局迭代优化弓网系统参数难以完成。现阶段代理模型在耦合系统领域已得到广泛应用，可运用于系统分析和设计中代替计算复杂且费时的仿真模型，能够极大提高优化设计效率[18−19]。

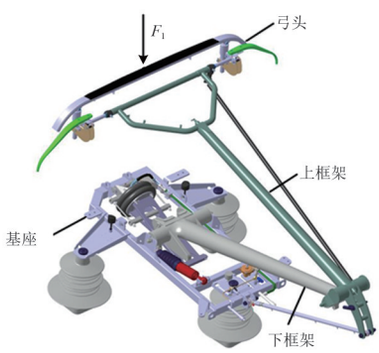
本文基于弓网系统仿真数据，构建弓网系统动态接触力自适应代理模型，基于代理模型建立弓网系统关键参数优化模型；根据优化模型非线性特点，采用差分进化算法求解，优化计算弓网系统弓头质量和接触线张力最优值，完成基于自适应代理模型的高速铁路弓网系统关键参数优化。

1 弓网系统仿真模型构建

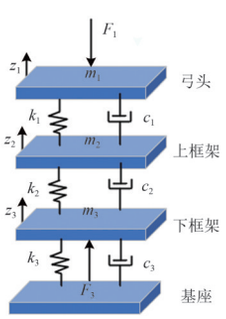
为构建高精度的弓网系统代理模型，基于仿真准确性较高的弓网系统仿真模型产生弓网系统响应数据。

1.1 受电弓子系统模型

弓网系统仿真模型中将受电弓子系统视为由弓头、上框架、下框架和基座组成，采用集中质量块模型刻画受电弓子系统，构建受电弓子系统三质量块模型。受电弓子系统模型如图 1 所示。图中：m_1为弓头质量；m_2为上框架质量；m_3为下框架质量；k_1，k_2，k_3和c_1，c_2，c_3分别为弓头与上框架、上框架与下框架、下框架与基座之间的等效刚度和阻尼；z_1和z_2，z_3分别为弓头和上下框架的垂向位移；F_1为弓网系统动态接触力；F_3为施加在下框架上的抬升力。



(a) 受电弓子系统结构



(b) 受电弓子系统三质量块模型

图 1 受电弓子系统模型

采用质量-阻尼-弹簧组合系统有限元模型描述受电弓子系统的运动状态，则受电弓子系统三质量块模型的运动微分方程为

$$\begin{cases} m_1\ddot{z}_1+c_1(\dot{z}_1-\dot{z}_2)+k_1(z_1-z_2)=-F_1 \\ m_2\ddot{z}_2+c_1(\dot{z}_2-\dot{z}_1)+c_2(\dot{z}_2-\dot{z}_3)+ \\ \qquad k_1(z_2-z_1)+k_2(z_2-z_3)=0 \\ m_3\ddot{z}_3+c_2(\dot{z}_3-\dot{z}_2)+c_3\dot{z}_3+ \\ \qquad k_2(z_3-z_2)+k_3z_3=F_3 \end{cases} \tag{1}$$

为表征方便，采用向量形式表示为

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{p}}\ddot{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{p}}\dot{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{z}_{\mathrm{p}}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{p}} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{M}_{\mathrm{p}}$，$\boldsymbol{C}_{\mathrm{p}}$和$\boldsymbol{K}_{\mathrm{p}}$分别为受电弓子系统的质量、等效阻尼和等效刚度矩阵；$\ddot{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{p}}$，$\dot{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{p}}$和$\boldsymbol{z}_{\mathrm{p}}$分别为受电

弓子系统的加速度、速度和垂向位移向量；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{p}}$为受电弓子系统所受的载荷向量。

1.2　接触网子系统模型

采用有限元法构建简单链式悬挂接触网子系统动力学仿真模型，如图2所示。图中：L为锚段长度；F_{A}和F_{B}分别为承力索张力和接触线张力；k_{T}为立柱刚度；m_{AT}为立柱质量；m_{BT}为定位器质量；m_{D1}和m_{D2}为吊弦质量；k_{D1}和k_{D2}为吊弦刚度；c_{D1}和c_{D2}为吊弦阻尼；y为横向；z为垂向。

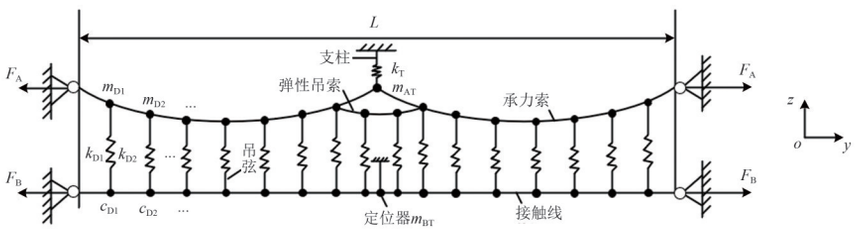


图2　简单链式悬挂接触网子系统有限元仿真模型

将接触线、承力索和弹性吊索等效为细长杆模型[20−21]，将吊弦等效为具备抗拉刚度的弹簧模型[22]。定位器承担提拉接触线的作用，同时接触线承担定位器部分重力，因此可构建为弹簧-质量点组合模型。在此基础上，获得接触网子系统动力学方程为

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{c}}\ddot{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}\dot{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}\boldsymbol{z}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{M}_{\mathrm{c}}$为接触网的质量矩阵；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}$为接触网阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}$为接触网刚度矩阵；$\boldsymbol{z}_{\mathrm{c}}$为接触网上接触点的位移向量；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}$为接触网子系统上接触点的外载荷向量。

采用具有高刚度的弹簧模型描述弓网系统动力学行为，依据文献［23］弹簧模型刚度取值为50 kN·m^{-1}。采用罚函数法求解弓网系统动态接触力为

$$F_1=\begin{cases}\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}(z_1-z_{\mathrm{c}}) & z_1-z_{\mathrm{c}}\leqslant 0\\ 0 & z_1-z_{\mathrm{c}}>0\end{cases} \tag{4}$$

式中：z_{c}为接触网上接触点的位移。

1.3　弓网系统模型

根据图（2）中坐标系，将接触线定义为$z=0$的直线，y轴为其长度方向，接触线起点o为坐标原点。联立受电弓子系统和接触网子系统运动微分方程即式（2）和式（3），得弓网系统动力学方程为

$$\begin{pmatrix}\boldsymbol{M}_{\mathrm{p}} & 0\\ 0 & \boldsymbol{M}_{\mathrm{c}}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\ddot{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{p}}\\ \ddot{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{c}}\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\boldsymbol{C}_{\mathrm{p}} & 0\\ 0 & \boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{p}}\\ \dot{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{c}}\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\boldsymbol{K}_{\mathrm{p}} & 0\\ 0 & \boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\boldsymbol{z}_{\mathrm{p}}\\ \boldsymbol{z}_{\mathrm{c}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{F}_{\mathrm{p}}\\ \boldsymbol{F}_{\mathrm{c}}\end{pmatrix} \tag{5}$$

采用向量形式表示为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{z}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{z}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{z}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{s}} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{M}$，$\boldsymbol{C}$和$\boldsymbol{K}$分别为弓网系统的质量、等效阻尼和等效刚度矩阵；$\ddot{\boldsymbol{z}}$，$\dot{\boldsymbol{z}}$和$\boldsymbol{z}$分别为弓网系统的加速度、速度和垂向位移向量；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{s}}$为弓网系统的外载荷向量。

采用纽马克（Newmark）法，以时间t为步长积分迭代仿真计算弓网系统接触点的动态接触力和垂向位移，计算式为

$$\begin{cases}z_{t_0+t}=z_{t_0}+\dot{z}_{t_0}t+\left[(0.5-\beta)\ddot{z}_{t_0}+\beta\ddot{z}_{t_0+t}\right]t^2\\ \dot{z}_{t_0+t}=\dot{z}_{t_0}+\left[(1-\alpha)\ddot{z}_{t_0}+\alpha\ddot{z}_{t_0+t}\right]t\end{cases} \tag{7}$$

式中：z_{t_0}和z_{t_0+t}分别为t_0和t_0+t时刻接触点垂向位移；$\dot{z}_{t_0}$和$\dot{z}_{t_0+t}$分别为t_0和t_0+t时刻接触点垂向速度；$\ddot{z}_{t_0}$和$\ddot{z}_{t_0+t}$分别为t_0和t_0+t时刻接触点垂向加速度；α和β均为积分参数，分别为0.50和0.25。

2　弓网系统动态接触力自适应代理模型构建

为提升精细化弓网系统仿真模型计算效率，利用代理模型代替弓网仿真模型，为弓网系统参数优化中减少模型计算时间。选取对弓网受流质量影响较大的弓头质量和接触线张力作为弓网系统关键参数，基于试验实测和仿真数据，采用Kriging与K近邻方法，构建弓网系统动态接触力的代理模型。

考虑弓头质量m_1和接触线张力F_1的设计变量$\boldsymbol{X}=(m_1\ \ F_1)^{\mathrm{T}}$，建立弓网系统动态接触力的响应函数$Y(\boldsymbol{X})$代理模型。在设计空间内进行合理均匀抽样，所有样本点和响应函数值构成样本数据集$(\boldsymbol{X}_i,\ Y(\boldsymbol{X}_i))$，$i\in\{1,\ 2,\ \cdots,\ n\}$，其中$i$为样本索引，$n$为样本点数量。在此数据集上构建弓网系统动态接触力的代理模型。

2.1 Kriging代理模型

将数据分为已知响应样本$\boldsymbol{X}_i$和未知响应样本$\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q}$（其中$q$为未知响应样本的索引）。未知响应样本$\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q}$的估计值$\hat{Y}(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q})$可采用其已知邻居样本点观测值$Y(\boldsymbol{X}_i)|i=1,2,\cdots,n$的加权处理和误差计算，为

$$\hat{Y}(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q})=\sum_{i=1}^{n}\omega_i Y(\boldsymbol{X}_i)+\varepsilon(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q}) \tag{8}$$

式中：ω_i为已知邻居样本点观测值的回归系数，表示设计空间已知样本点$\boldsymbol{X}_i$处的观测值对未知样本点估计值的贡献程度，表征估计值的整体趋势；$\varepsilon(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q})$为未知样本点$\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q}$的误差，其服从$N(0,\sigma^2)$的正态分布，反映估计值的局部波动偏差。

不同未知样本点$\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},i}$和$\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},j}$估计值的误差值$\varepsilon(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},i})$和$\varepsilon(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},j})$具有一定相关性，相关函数为

$$f(\varepsilon(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},i}),\varepsilon(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},j}))=\exp\left(-\sum_{l=1}^{2}\theta_l\left|x_{\mathrm{u},i,l}-x_{\mathrm{u},j,l}\right|^2\right) \tag{9}$$

式中：θ_l为设计变量第l个分量的相关系数；$x_{\mathrm{u},i,l}$和$x_{\mathrm{u},j,l}$分别为未知响应样本$\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},i}$和$\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},j}$的第$l$个分量。

综上所述，可获得未知样本点$\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q}$的无偏最优估计值$\hat{Y}(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q})$为

$$\hat{Y}(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q})=\beta+g^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q})\boldsymbol{R}^{-1}(Y(\boldsymbol{X}_i)_{i=1,2,\cdots,n}-\beta I) \tag{10}$$

其中，

$$I=(1\ \ 1\ \ \cdots\ \ 1)^{\mathrm{T}}$$

$$\beta=(I^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{-1}I)^{-1}I^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{-1}Y(\boldsymbol{X}_i)$$

$$g(\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q})=(f(\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q})\cdots f(\boldsymbol{X}_n,\boldsymbol{X}_{\mathrm{u},q}))^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}f(\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_1)\cdots f(\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_n)\\ \vdots\qquad\qquad\vdots\\ f(\boldsymbol{X}_n,\boldsymbol{X}_1)\cdots f(\boldsymbol{X}_n,\boldsymbol{X}_n)\end{pmatrix}$$

对式（10）采用极大似然估计求解相关系数θ_l，得

$$\theta_l=\mathrm{e}^{-\frac{n\ln\zeta^2+\ln|\boldsymbol{R}|}{2}} \tag{11}$$

其中，

$$\zeta^2=\frac{\left(Y(\boldsymbol{X}_i)_{i=1,2,\cdots,n}-\beta I\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{-1}\left(Y(\boldsymbol{X}_i)_{i=1,2,\cdots,n}-\beta I\right)}{n}。$$

采用全局搜索算法求解式（11）的最大值，获得最优相关系数θ_l。

2.2 基于K近邻的弓网系统动态接触力自适应代理模型

Kriging代理模型假设数据误差服从正态分布，这使得Kriging代理模型具有一定拟合误差，存在一定局限性。于是将Kriging代理模型无法描述的非线性不确定误差输入K近邻代理模型，构建误差数据的K近邻代理模型。通过融合Kriging模型和K近邻模型构建弓网系统动态接触力自适应代理模型。

基于K近邻的弓网系统动态接触力自适应代理模型构建流程如图3所示。

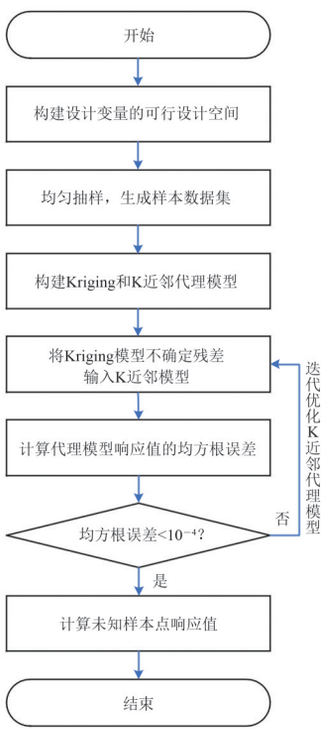


图3 基于K近邻的弓网系统动态接触力自适应代理模型构建流程

由图3可知，构建弓网系统动态接触力自适应代理模型的步骤如下。

步骤1：基于弓头质量和接触网张力的取值范围，构建可行设计空间；

步骤2：基于可行设计空间，采用拉丁方方法进行合理均匀抽样，获取代理模型的样本数据集；

步骤3：基于样本数据集，采用Kriging和K近邻方法同时建立弓网系统动态接触力的代理模型；

步骤4：将Kriging代理模型的不确定非线性残差部分输入K近邻代理模型；

步骤5：计算样本点观测值与代理模型响应值之间均方根误差，并以其最小化为目标，不断迭代优化K近邻代理模型；

步骤6：若均方根误差小于10^{-4}，结束迭代过程，获得基于K近邻的弓网系统动态接触力自适应代理模型，并计算出未知样本点代理模型响应值；否则返回步骤4。

3　基于动态接触力自适应代理模型的弓网系统关键参数优化

3.1　弓网系统关键参数优化模型建立

根据现行 TB 10761—2013《高速铁路工程动态技术验收规范》对弓网系统的要求，弓网系统动态接触力指标需满足以下条件。

$$F_{\mathrm{mean}} \leqslant 0.000\,97v^2 + 70 \tag{12}$$

$$F_{\max} \leqslant F_{\mathrm{mean}} + 3F_{\sigma} \tag{13}$$

$$F_{\sigma} \leqslant 0.3F_{\mathrm{mean}} \tag{14}$$

$$F_{\min} \geqslant 20 \tag{15}$$

式中：F_{mean}，$F_{\max}$，$F_{\min}$和F_{σ}分别为弓网系统动态接触力的平均值、最大值、最小值和标准差，N；v为列车运行速度，km·h^{-1}。

为整体衡量列车运行过程中弓网系统的受流质量，采用弓网系统动态接触力标准差最小化作为弓网系统关键参数优化目标，以弓网系统动态接触力平均值、最大值、最小值和标准差满足条件为约束，基于弓网系统动态接触力自适应代理模型，构建400 km·h^{-1}弓网系统关键参数优化模型，为

$$\psi = \min F_{\sigma}(m_1, F_1) \tag{16}$$

s. t.

$$F_{\mathrm{mean}}(m_1, F_1) \leqslant 0.000\,97 \times 400^2 + 70 \tag{17}$$

$$F_{\max}(m_1, F_1) \leqslant F_{\mathrm{mean}}(m_1, F_1) + 3F_{\sigma}(m_1, F_1) \tag{18}$$

$$F_{\sigma}(m_1, F_1) \leqslant 0.3F_{\mathrm{mean}}(m_1, F_1) \tag{19}$$

$$F_{\min}(m_1, F_1) \geqslant 20 \tag{20}$$

$$4 \leqslant m_1 \leqslant 15 \tag{21}$$

$$28.5 \leqslant F_1 \leqslant 40 \tag{22}$$

式中：ψ为优化目标函数；$F_{\max}(m_1, F_1)$，$F_{\min}(m_1, F_1)$，$F_{\mathrm{mean}}(m_1, F_1)$和$F_{\sigma}(m_1, F_1)$分别为弓网系统动态接触力最大值、最小值、平均值和标准差的代理模型。

式（17）—式（20）为现行 TB 10761—2013《高速铁路工程动态技术验收规范》对弓网系统的要求；式（21）—式（22）为设计变量的可行域。

3.2　弓网系统关键参数优化模型求解

弓网系统关键参数优化模型含有隐式代理模型，因此采用差分进化算法求解群体中个体对应问题的解向量，通过个体变异、杂交和选择操作，在问题可行域空间全局高效地搜索问题最优解。差分进化算法关键操作如下。

1）个体初始化操作

基于弓网系统关键参数优化模型设计变量的取值范围，采用随机选取的方法初始化个体，获得第0代个体$\boldsymbol{X}_h(0)$为

$$\boldsymbol{X}_h(0) = \boldsymbol{X}_{h,\mathrm{L}} + \mathrm{rand}(0,1)(\boldsymbol{X}_{h,\mathrm{U}} - \boldsymbol{X}_{h,\mathrm{L}}) \tag{23}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{h,\mathrm{L}}$和$\boldsymbol{X}_{h,\mathrm{U}}$分别为第$h$（$h \leqslant N$）个个体设计变量取值的上下边界；rand(0，1)为产生[0，1]之间的随机数的函数。

2）变异操作

选择2个父代个体$\boldsymbol{X}_{s1}(e)$和$\boldsymbol{X}_{s2}(e)$，对其解向量做差生成差分矢量，另外选择1个个体$\boldsymbol{X}_{s3}(e)$与差分矢量求和生成中间变异个体$\boldsymbol{X}_i'(e+1)$为

$$\boldsymbol{X}_h'(e+1) = \boldsymbol{X}_{s3}(e) + w(\boldsymbol{X}_{s1}(e) - \boldsymbol{X}_{s2}(e)) \tag{24}$$

式中：$s1$，$s2$，$s3$为互不相等的随机整数，不等于h且不超过种群规模N；e为个体进化代数；w为缩放因子，一般在[0，2]之间选择，其值影响算法的全局寻优能力。

3）交叉操作

设置交叉概率p_{co}，若其大于rand(0，1)时，将变异操作后产生的中间变异个体复制给子代个体；否则将父代个体$\boldsymbol{X}_h(e)$直接复制给子代个体，获得子代个体$\boldsymbol{X}_h(e+1)$为

$$\boldsymbol{X}_h(e+1) = \begin{cases} \boldsymbol{X}_h'(e+1) & \mathrm{rand}(0,1) \leqslant p_{\mathrm{co}} \\ \boldsymbol{X}_h(e) & \text{其他} \end{cases} \tag{25}$$

4）选择操作

采用优化模型目标函数的相反数作为个体适应度函数，计算每个个体的适应度函数值，采用贪婪选择的策略，选择每代适应度函数值最优的个体$\hat{\boldsymbol{X}}_h(e+1)$为

$$\hat{\boldsymbol{X}}_h(e+1) = \begin{cases} \boldsymbol{X}_h(e+1) & \gamma(\boldsymbol{X}_h(e+1)) \geqslant \gamma(\boldsymbol{X}_h(e)) \\ \boldsymbol{X}_h(e) & \text{其他} \end{cases} \tag{26}$$

式中：$\gamma(\boldsymbol{X}_h(e))$和$\gamma(\boldsymbol{X}_h(e+1))$分别为个体$\boldsymbol{X}_h(e)$和个体$\boldsymbol{X}_h(e+1)$的适应度函数值。

基于差分进化算法的弓网系统关键参数优化模型求解步骤总结如下。

步骤1：初始化。初始化差分进化算法参数：种群规模N用于限制种群中个体数量，个体进化总代数E用于限制进化求解代数；设置当前进化代$e=0$（初代）；根据式（23）设置初代种群中个体的解向量。

步骤2：当前代种群根据式（24）和式（25）进行变异和交叉操作，并根据式（26）进行选择

操作，形成下一代种群。

步骤3：判断进化代数e是否达到进化总代数E或相邻2代种群最优适应度函数值的绝对误差值小于10^{-4}，若满足其中1个条件则结束差分进化迭代过程，否则种群进入步骤2。

4 算例计算

以高速铁路DSA380型受电弓和简单链式悬挂接触网为例，对其在400 km·h^{-1}运行工况下进行弓头质量和接触线张力参数优化。采用弓网系统仿真及现场试验数据构建代理模型的样本数据集。弓网系统仿真模型采用的DSA380型受电弓子系统参数见表1，简单链式悬挂接触网子系统参数见表2。

表1 DSA380型受电弓子系统基本参数

参数	取值
弓头质量m_1/kg	7.12
上框架质量m_2/kg	6.00
下框架质量m_3/kg	5.80
弓头与上框架间等效阻尼c_1/(N·(m·s^{-1})$^{-1}$)	0.00
上框架与下框架间等效阻尼c_2/(N·(m·s^{-1})$^{-1}$)	0.00
下框架与基座间等效阻尼c_3/(N·(m·s^{-1})$^{-1}$)	70.00
弓头与上框架间等效刚度k_1/(N·m^{-1})	9 430
上框架与下框架间等效刚度k_2/(N·m^{-1})	14 100
下框架与基座间等效刚度k_3/(N·m^{-1})	0.10

基于上述弓网系统基本参数建立弓网系统仿真模型，以400 km·h^{-1}工况为边界条件仿真获得弓网系统动态接触力，并对比现场试验数据，结果见表3。由表3可知：仿真模型计算得到的弓网系统动态接触力标准差误差为6.03%，小于弓网仿真国际验证标准要求的20%[24]，验证了所构建弓网系统仿真模型的有效性。

表2 接触网子系统基本参数

参数	型号或取值
接触线类型	CTMH150
接触线张力/kN	30
接触线弹性模量/GPa	120
结构高度/m	1.80
弹性吊索型号	JTMH35
吊弦弹性模量/GPa	113
弹性吊索张力/kN	3.50
承力索型号	JTMM120
承力索张力/kN	21
接触线弹性模量/GPa	105
接触网跨距/m	55
吊弦型号	JTMH10
吊弦泊松比	0.33
弹性吊索长度/m	14

表3 弓网系统动态接触力仿真与实测数据对比

项点	仿真值/N	实测值/N	误差/%
最大值	361.38	405.00	−10.77
最小值	148.75	200.00	−25.63
平均值	269.68	270.10	−0.16
标准差	34.99	33.00	6.03

4.1 基于自适应代理模型的弓网系统动态接触力计算

设定弓头质量和接触线张力的取值范围分别为[4，15] kg和[28.5，40] kN，弓网系统其他参数不变。采用拉丁方抽样，随机生成不同弓头质量和接触线张力组合，基于弓网系统仿真模型生成不同参数组合的弓网系统动态接触力，获得400 km·h^{-1}运行工况下的弓头质量、接触线张力及弓网系统动态接触力最大值、最小值、平均值和标准差的样本数据集见表4，为构建弓网系统动态接触力自适应代理模型提供了有效的样本数据。

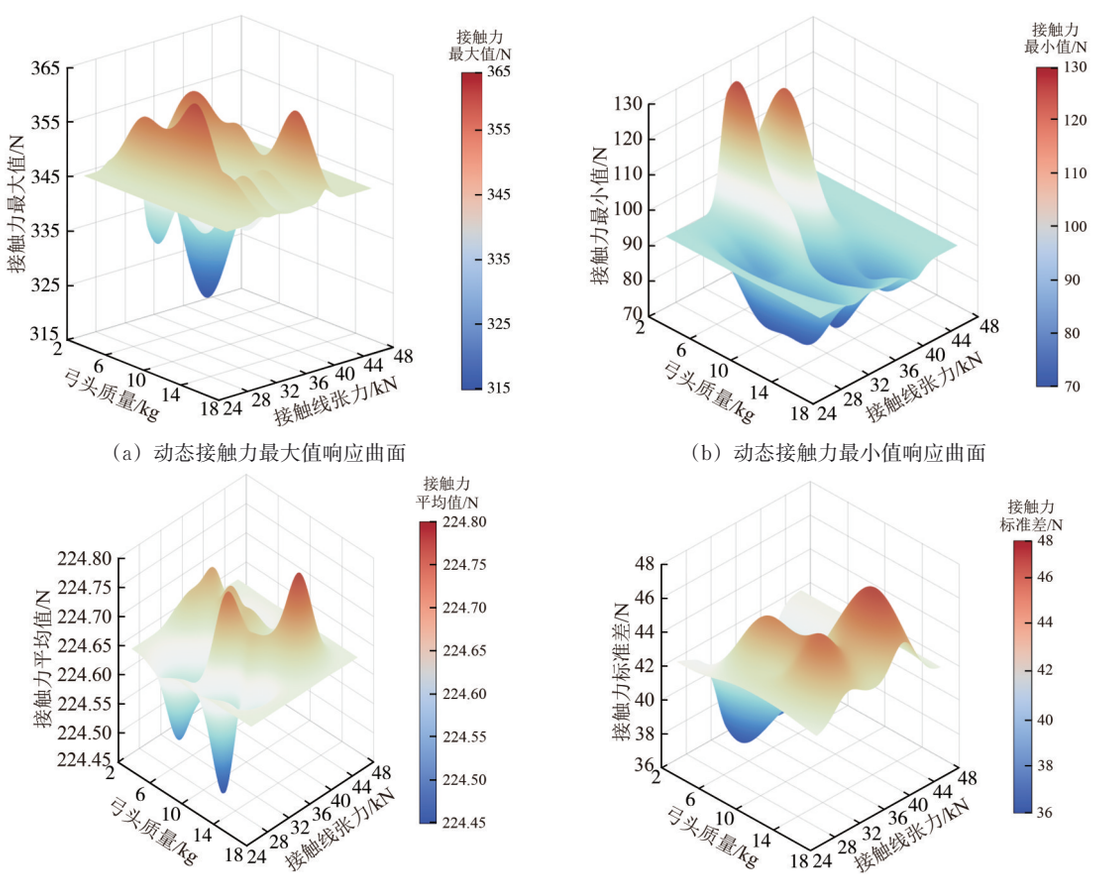
表4 高速铁路弓网系统动态接触力样本数据集

样本编号	拉丁方抽样组合结果		弓网系统动态接触力仿真结果			
	弓头质量/kg	接触线张力/kN	最大值/N	最小值/N	标准差/N	平均值/N
1	8.18	32.41	338.90	94.20	41.90	224.60
2	11.26	30.57	357.80	86.20	45.20	224.50
3	10.82	31.03	347.50	88.50	45.50	224.60
4	5.54	37.01	330.00	110.10	37.60	224.70
5	4.22	34.25	333.40	128.10	36.40	224.70
6	9.06	32.87	337.70	101.70	41.80	224.70
7	14.78	38.85	359.90	82.10	47.50	224.80
8	8.62	36.55	354.90	97.60	40.90	224.70
9	10.38	35.17	340.00	83.70	41.70	224.70
10	5.98	39.31	323.20	113.80	38.50	224.60

续表

样本编号	拉丁方抽样组合结果		弓网系统动态接触力仿真结果			
	弓头质量/kg	接触线张力/kN	最大值/N	最小值/N	标准差/N	平均值/N
11	12.14	31.49	342.00	90.60	45.40	224.60
12	7.30	37.93	333.90	119.00	39.00	224.70
13	9.50	37.47	354.00	98.50	42.00	224.70
14	11.70	33.33	345.00	87.80	43.40	224.70
15	13.46	35.63	349.00	77.60	44.90	224.70
16	14.34	29.65	351.80	76.40	46.10	224.60
17	9.94	29.19	357.00	75.00	44.40	224.60
18	4.66	34.71	344.80	120.30	36.80	224.70
19	5.10	38.39	320.20	123.60	37.40	224.70
20	7.74	39.77	333.90	99.20	40.20	224.60
21	13.02	30.11	353.80	76.00	45.40	224.60
22	6.86	36.09	357.00	98.10	39.00	224.70
23	12.58	33.79	340.10	77.60	43.90	224.70
24	6.42	28.73	357.10	88.10	43.30	224.50
25	13.90	31.95	349.30	90.50	45.80	224.60
26	5.40	30.00	356.00	136.00	33.10	232.60
27	5.40	31.50	428.00	218.00	35.40	291.20
28	6.30	30.00	302.00	94.00	37.50	225.00
29	6.30	31.50	358.00	93.00	33.90	191.00

在上述样本数据集的基础上，基于K近邻的弓网系统动态接触力自适应代理模型构建流程，建立弓网系统动态接触力最大值、最小值、平均值和标准差的代理模型，弓头质量、接触线张力与弓网系统动态接触力最大值、最小值、平均值和标准差的响应曲面如图4所示。



（a）动态接触力最大值响应曲面　　（b）动态接触力最小值响应曲面

（c）动态接触力平均值响应曲面　　（d）动态接触力标准差响应曲面

图4　弓网系统动态接触力代理模型响应曲面

由图4可知：弓头质量、接触线张力与受电弓接触力指标之间呈现很强的非线性关系，难以使用确定的精确解析模型描述其相互关系；弓网系统动态接触力最大值主要受接触线张力的影响，随接触线张力的增大，弓网系统动态接触力最大值先减小后增大；弓网系统动态接触力最小值主要受弓头质量的影响，随弓头质量的减小，弓网系统动态接触力最小值呈现增加的趋势；弓网系统动态接触力平均值受接触线张力和弓头质量的共同影响，随接触线张力和弓头质量的增大，弓网系统动态接触力平均值呈现增大的趋势；弓网系统动态接触力标准差受接触线张力和弓头质量的共同影响，随弓头质量的增大呈现增大趋势，而随接触线张力的增大呈现先减小后增大的起伏变化。

4.2 自适应代理模型精度评估

采用交叉验证法中的留一法，以均方根误差、相关系数和预测精度作为指标，评估构建的弓网系统动态接触力代理模型预测精度，相关评估参数为

$$R_{\mathrm{MSE}}=\sqrt{\frac{1}{\Theta}\sum_{\ell=1}^{\Theta}(y_{\ell,\mathrm{pre}}-y_{\ell,\mathrm{act}})^2} \tag{27}$$

$$R^2=1-\frac{\sum_{\ell=1}^{\Theta}(y_{\ell,\mathrm{pre}}-y_{\ell,\mathrm{act}})^2}{\sum_{\ell=1}^{\Theta}(\bar{y}-y_{\ell,\mathrm{act}})^2} \tag{28}$$

$$R_{\mathrm{acc}}=1-\frac{1}{\Theta}\sum_{\ell=1}^{\Theta}\frac{|y_{\ell,\mathrm{pre}}-y_{\ell,\mathrm{act}}|}{y_{\ell,\mathrm{act}}} \tag{29}$$

式中：R_{MSE}为均方根误差；R^2为相关系数；R_{acc}为预测精度；$y_{\ell,\ \mathrm{pre}}$和$y_{\ell,\ \mathrm{act}}$分别为第ℓ个样本的预测值和实际值；$\bar{y}$为样本实际值的均值；Θ为验证样本数量。

基于K近邻与Kriging方法建立的弓网系统动态接触力代理模型的相关参数和精度见表5。由表5可知：构建的弓网系统动态接触力代理模型预测精度均达到93%以上，尤其动态接触力最大值、平均值和标准差代理模型的预测精度达到98%以上，满足设计精度要求。

表5 基于K近邻与Kriging方法建立的弓网系统动态接触力代理模型参数及精度

参数	均值$\hat{\beta}$	方差$\hat{\sigma}^2$	相关参数向量$\hat{\theta}$	R_{acc}/%	R_{MSE}	R^2
最大值	345.84	136.14	(0.92 1.94)	98.26	7.08	0.58
最小值	93.15	215.59	(0.73 1.66)	93.57	7.21	0.78
平均值	224.65	0.006 7	(1.60 1.50)	99.99	0.06	0.99
标准差	42.70	7.84	(0.67 1.19)	98.72	0.90	0.92

4.3 弓网系统关键参数优化

基于弓网系统动态接触力代理模型，考虑弓头质量和接触线张力为设计变量，建立400 km·h^{-1}运行工况下弓网系统关键参数优化模型，采用差分进化算法优化弓网系统关键参数。设置种群数量N为50个；进化总代数E为100代；交叉概率p_{co}为0.3；在CPU为Inter（R）Core（TM）i7 10510U、内存16 GB、系统为Windows10的64位笔记本电脑上，采用python 3.6编程实现差分进化算法进行弓网系统关键参数优化计算。

基于上文提出的差分进化算法，求解400 km·h^{-1}运行工况下弓网系统关键参数优化模型，模型目标函数收敛过程如图5所示。由图5可知：随着进化代数的增加，弓网系统动态接触力标准差不断降低；当进化达到26代时，弓网系统动态接触力标准差趋于收敛，最终达到最小值36.4 N，此时优化后弓网系统的弓头质量和接触线张力分别为4.22 kg和34.25 kN。

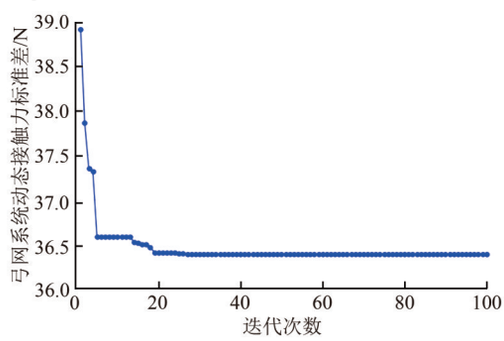


图5 400 km·h^{-1}运行工况下弓网系统目标函数收敛过程

基于弓头质量和接触线张力最优值4.22 kg和34.25 kN，采用弓网系统仿真模型仿真计算获得弓网系统动态接触力最大值、最小值、平均值和标准差分别为333.4，128.1，224.7和36.4 N，满足式（12）—式（15），这与基于自适应代理模型的弓网系统关键参数优化结果一致。因此，上述结果证明了基于自适应代理模型优化弓网系统关键参数的有效性。

5 结 论

（1）建立高速铁路弓网系统动态接触力自适应代理模型，通过实例数据验证自适应弓网系统动态接触力代理模型对弓网系统动态接触力最大值、最小值、平均值和标准差的预测精度分别达到了98.26%，93.57%，99.99%和98.72%，能够精

确地描述弓头质量、线张力与弓网系统动态接触力的非线性相互关系。

（2）基于弓网系统动态接触力自适应代理模型，以受电弓弓头质量和接触线张力为设计变量，以弓网系统受流质量最大化为优化目标，建立400 km·h^{-1}高速铁路弓网系统关键参数优化模型，基于差分进化算法，优化获得400 km·h^{-1}高速铁路弓网系统弓头质量和接触线张力关键参数最优取值分别为4.22 kg和34.25 kN，验证了基于自适应代理模型的弓网系统关键参数优化方法的正确性和有效性。

（3）本文主要针对弓网系统弓头质量和接触线张力2个关键参数进行优化，而实际场景影响弓网系统受流性能因素较多，如承力索张力、弹性吊索张力、环境风等，因此，考虑更为复杂的边界条件，如更高速区段与隧道区段的气动影响，进行更为全面的弓网系统关键参数优化，是下一步重点研究方向。此外，在实际运营场景下，随着弓网系统服役时间的增加，弓网系统受流性能变化规律难以掌握，在服役参数工况下如何基于自适应代理模型的弓网系统受流性能预测也是下一步研究方向。

参　考　文　献

[1] 李德胜.接触网系统对高速铁路行车安全的影响[J].中国铁路,2011(2):34-37.
(LI Desheng. The Influence of Catenary System on High Speed Railway Traffic Safety [J]. Chinese Railways, 2011 (2): 34-37. in Chinese)

[2] 吴孟臻,刘洋,许向红.高速弓网系统动力学参数敏度分析及优化[J].力学学报,2021,53(1):75-83.
(WU Mengzhen, LIU Yang, XU Xianghong. Sensitivity Analysis and Optimization on Parameters of High Speed Pantograph-Catenary System [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53 (1): 75-83. in Chinese)

[3] 朱飞雄.接触网弹性链形悬挂的设计、施工与检测要点[J].铁道标准设计,2008(1):84-87.
(ZHU Feixiong. Design, Construct and Examine the Elastic Part of the Catenary [J]. Railway Standard Design, 2008 (1): 84-87. in Chinese)

[4] 杨国伟,魏宇杰,赵桂林,等.高速列车的关键力学问题[J].力学进展,2015,45:217-460.
(YANG Guowei, WEI Yujie, ZHAO Guilin, et al. Research Progress on the Mechanics of High-Speed Rails [J]. Advances in Mechanics, 2015, 45: 217-460. in Chinese)

[5] 姜静,刘志刚,鲁小兵,等.计及受电弓幅频特性的受电弓参数与吊弦间距匹配研究[J].振动与冲击,2016,35(18):134-139.
(JIANG Jing, LIU Zhigang, LU Xiaobing, et al. Coupling Performance between Pantograph Parameters and Dropper Spacing Considering the Amplitude-Frequency Characteristics the of Pantograph [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35 (18): 134-139. in Chinese)

[6] 张宗芳,刘文正,张坚,等.基于响应面法的高速铁路接触网参数优化研究[J].铁道标准设计,2019,63(9):126-133.
(ZHANG Zongfang, LIU Wenzheng, ZHANG Jian, et al. Research on Parameter Design of High-Speed Railway Catenary Based on Response Surface Method [J]. Railway Standard Design, 2019, 63 (9): 126-133. in Chinese)

[7] 李曼,郭京波,刘尚坤.受电弓动态参数的研究[J].机械工程师,2006(3):101-102.
(LI Man, GUO Jingbo, LIU Shangkun. Research on the Dynamic Parameters of the Pantograph [J]. Mechanical Engineer, 2006 (3): 101-102. in Chinese)

[8] 关金发,田志军,吴积钦.受电弓与接触网系统方案设计方法及其应用[J].铁道标准设计,2020,64(2):158-163.
(GUAN Jinfa, TIAN Zhijun, WU Jiqin. Design Method of Pantograph/Catenary System Scheme and Its Application [J]. Railway Standard Design, 2020, 64 (2): 158-163. in Chinese)

[9] KIM J W, YU S N. Design Variable Optimization for Pantograph System of High-Speed Train Using Robust Design Technique [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14: 267-273.

[10] POMBO J, AMBROSIO J. Influence of Pantograph Suspension Characteristics on the Contact Quality with the Catenary for High Speed Trains [J]. Computers & Structures, 2012, 110: 32-42.

[11] AMBRÓSIO J, POMBO J, PEREIRA M. Optimization of High-Speed Railway Pantographs for Improving Pantograph-

Catenary Contact [J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2013, 3 (1): 013006.

[12] LEE J H, KIM Y G, PAIK J S, et al. Performance Evaluation and Design Optimization Using Differential Evolutionary Algorithm of the Pantograph for the High-Speed Train [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26: 3253-3260.

[13] 蔡成标,翟婉明.高速铁路受电弓-接触网系统动态性能仿真研究[J].铁道学报,1997,19(5):39-44.
(CAI Chengbiao, ZHAI Wanming. Dynamic Performance Simulation Study of High-Speed Railway Pantograph-Contact Wire System [J]. Journal of the China Railway Society, 1997, 19 (5): 39-44. in Chinese)

[14] 蒋先国.秦沈客运专线接触网总体设计[J].铁道标准设计,2003(11):48-52,73.
(JIANG Xianguo. Overall Design of Catenary for Qinhuangdao-Shenyang Dedicated Passenger Railway [J]. Railway Standard Design, 2003 (11): 48-52, 73. in Chinese)

[15] 薛卫星,刘赓然.高速铁路弓网受流质量优化措施[J].铁路技术创新,2013(3):59-62.
(XUE Weixing, LIU Gengran. Measures to Optimize the Current Quality of High-Speed Railway Pantographs [J]. Railway Technical Innovation, 2013 (3): 59-62. in Chinese)

[16] 高鸣.京沪高速铁路先导段接触网原型系统设计[J].电气化铁道,2011,22(5):5-8.
(GAO Ming. Original Model System Design of Overhead Contact Line in Leading Section in Beijing-Shanghai High Speed Railway [J]. Electric Railway, 2011, 22 (5): 5-8. in Chinese)

[17] 李文豪,崔校玉,陈维荣,等.弹性链型悬挂高速接触网参数的选取研究[J].铁道工程学报,2009,26(8):82-87.
(LI Wenhao, CUI Xiaoyu, CHEN Weirong, et al. Research on the Selection of Parameters for the Overhead Contact Line System with Stitch Wire on High-Speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26 (8): 82-87. in Chinese)

[18] 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)

[19] 郭剑峰,柯在田,刘金朝,等.基于数据建模的铁路弓网接触力辨识[J].中国铁道科学,2021,42(4):145-154.
(GUO Jianfeng, KE Zaitian, LIU Jinzhao, et al. Identification of Railway Pantograph-Catenary Contact Force Based on Data Modeling [J]. China Railway Science, 2021, 42 (4): 145-154. in Chinese)

[20] 吴孟臻,刘洋,许向红.高速弓网系统动力学参数敏度分析及优化[J].力学学报,2021,53(1):75-83.
(WU Mengzhen, LIU Yang, XU Xianghong. Sensitivity Analysis and Optimization on Parameters of High Speed Pantograph-Catenary System [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53 (1): 75-83. in Chinese)

[21] 周宁,张卫华.基于直接积分法的弓网耦合系统动态性能仿真分析[J].中国铁道科学,2008,29(6):71-76.
(ZHOU Ning, ZHANG Weihua. Dynamical Performance Simulation of the Pantograph-Catenary Coupled System Based on Direct Integration Method [J]. China Railway Science, 2008, 29 (6): 71-76. in Chinese)

[22] 唐周林,吴积钦,沈涛.基于正交试验法的弓网动态性能优化研究[J].电气化铁道,2017,28(5):6.
(TANG Zhoulin, WU Jiqin, SHEN Tao. Study on Dynamic Performance Optimization of Pantograph Catenary Based on Orthogonal Test [J]. Electric Railway, 2017, 28 (5): 6. in Chinese)

[23] GREGORIA S, TURA M, NADALA E, et al. An Approach to Geometric Optimisation of Railway Catenaries [J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 56 (8): 1162-1186.

[24] EN 50318. Railway Applications - Current Collection Systems - Validation of Simulation of the Dynamic Interaction between Pantograph and Overhead Contact Line [S]. UK, BSI Standards Limited, 2018.

Adaptive Surrogate Model-Based Optimization of the Key Parameters of High-Speed Railway Pantograph-Catenary System

ZHANG Kexin[1], WANG Mingming[1], PAN Like[2]

(1. Railway Science & Technology Research & Development Center, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. Standards & Metrology Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: The strong nonlinear relationships among key parameters of the pantograph-catenary system of high-speed railway make it difficult to achieve global iterative optimization for simulation-based parameter adaptation. To improve the matching degree of key parameters of the pantograph-catenary system, on the basis of constructing a simulation model of the pantograph-catenary system that includes the pantograph subsystem model and the catenary subsystem model, an adaptive surrogate model for the dynamic contact force of the pantograph-catenary system is built using simulation data under partial operating conditions and experimental measured data. This model accurately captures the nonlinear coupling relationships among pantograph head mass, contact wire tension, and the dynamic contact force of the pantograph-catenary system. With pantograph head mass and contact wire tension as design variables and minimizing the standard deviation of the dynamic contact force as the optimization objective, an optimization model for key parameters of the high-speed railway pantograph-catenary system considering current collection quality is established. The differential evolutionary algorithm is employed to achieve global iterative optimization of the key parameters. Taking the DSA380 pantograph and a simple chain suspension catenary as the research objects, iterative optimization of their parameters is conducted for the 400 km/h operating condition to verify the correctness and effectiveness of the key parameter optimization method based on the adaptive surrogate model. The results show that the prediction accuracy of the constructed surrogate model for the mean value and standard deviation of the dynamic contact force of the pantograph-catenary system reaches 99.99% and 98.72%, respectively. Under the 400 km/h operating condition, the optimal design values for pantograph head mass and contact wire tension are 4.22 kg and 34.25 kN, respectively. The optimization method effectively reduces the number of pantograph-catenary simulation computations and improves the design efficiency of the pantograph-catenary system.

Key words: High-speed railway; Pantograph-catenary system; Adaptive surrogate model; Pantograph head mass; Contact wire tension; Parameters optimization

（责任编辑　金　燕）