

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.05.016

## 高速受电弓多动力学参数的优化分析

刘洋<sup>1</sup>, 吴孟臻<sup>2</sup>, 鲁文<sup>1</sup>, 吴枝根<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

**摘要:**为提高高速弓网耦合系统动力学性能,文章以 DSA380 型高速受电弓和大西线高速铁路弹性链式悬挂接触网系统为研究对象,利用有限元法建立弓网耦合系统动力学模型;基于遗传算法理论和弓网系统动态仿真平台,依次研究受电弓三参数联合变化对单、双受电弓与接触网系统间动力学性能的影响,并根据弓网系统动态性能评价标准对受电弓三参数进行优化,得到高速受电弓三参数最佳匹配组合,给出了适用于高速情况下的单、双受电弓设计优化方案。研究表明,相较于 DSA380 型受电弓原设计方案,单、双受电弓设计优化方案均有效地提升了单、双受电弓受流情况下的弓网耦合系统动力学性能。研究成果可为高速受电弓结构参数设计提供参考和建议。

**关键词:**弓网关系;双受电弓运行;动力学仿真;遗传算法;参数优化

**中图分类号:**U264.34 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)05-0670-08

### Multiple dynamics parameters optimization analysis of high-speed pantograph

LIU Yang<sup>1</sup>, WU Mengzhen<sup>2</sup>, LU Wen<sup>1</sup>, WU Zhigen<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to improve the dynamic performance of high-speed pantograph-catenary coupling system, this paper takes DSA380 high-speed pantograph and elastic chain suspension catenary system of Datong-Xi'an high-speed railway as research objects, and establishes the dynamic model of pantograph-catenary coupling system by the finite element method. Based on the genetic algorithm theory and the dynamic simulation platform of pantograph-catenary system, the influence of joint changes of three parameters of pantograph on the dynamic performance between single/double pantograph and catenary system is studied in turn. According to the dynamic performance evaluation standard of pantograph-catenary system, the optimization of three parameters of pantograph is carried out, the best matching combination of three parameters is obtained, and the design optimization scheme of single and double pantograph is presented. The research results show that, compared with the original design scheme of DSA380 pantograph, the design optimization scheme of single and double pantograph can effectively improve the dynamic performance of pantograph-catenary coupling system under the condition of single and double pantograph current collection. The research achievements can provide reference and suggestions for structural parameter design of high-speed pantograph.

**Key words:** pantograph-catenary interaction; double-pantograph operation; dynamic simulation; genetic algorithm; parameter optimization

收稿日期:2021-08-01;修回日期:2021-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572108)

作者简介:刘洋(1997—),男,安徽六安人,合肥工业大学硕士生;

吴枝根(1965—),男,安徽芜湖人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

## 0 引言

弓网关系是高速电气化铁路安全运行的三大核心关系之一<sup>[1]</sup>,良好的弓网系统动力学性能是确保高速列车可靠、安全运行的基本条件<sup>[2]</sup>。受电弓弓网系统动力学性能是一个复杂的问题,而受电弓系统结构参数又是影响弓网系统动力学性能的重要因素,研究受电弓结构参数有助于提高弓网系统动力学性能。当高速列车使用双受电弓高速行驶时,由于前受电弓沿接触线表面高速滑动会引起接触网结构剧烈振荡,影响后受电弓与接触网系统之间的接触性能,从而导致后受电弓的受流质量恶化<sup>[3]</sup>。双受电弓与接触网系统间动力学问题较单受电弓复杂,因此研究双受电弓与接触网系统间的动态特性对使用双受电弓高速列车的安全、稳定运行具有实际应用价值。

弓网系统动力学性能优化是弓网动力学仿真研究的热点之一。文献[4]基于灵敏度分析法筛选出对弓网接触力标准差敏感程度高的受电弓归算质量模型参数,结合响应面分析法和差分演化算法对受电弓参数进行优化以降低接触力标准差。结果表明,优化后的受电弓在整个速度范围内比原始受电弓提供了更稳定的动态受流性能。文献[5]利用高速弓网系统动力学仿真和灵敏度分析法确立了受电弓动力学参数的敏感度等级,研究了弓头等效刚度与等效阻尼联合变化对弓网耦合系统动力学性能的影响,发现弓头双参数联合优化比单参数优化具有更好的弓网耦合性能。文献[6]基于正交试验法研究了受电弓结构参数多水平、多因素组合变化对双受电弓-接触网系统动态性能的影响规律,并对影响前、后受电弓动力学性能的受电弓结构参数进行敏感性排序,给出了受电弓结构参数的优化方案。该优化方案虽然提升了后受电弓的受流质量,却降低了前受电弓与接触网间动态受流性能。文献[7]建立了不同速度等级下的弓网动态仿真模型,利用控制变量法依次研究了双受电弓作用下弹性吊索截面积、张力和长度对弓网动态特性的影响,确定了弓网动态性能较优的弹性吊索参数组合优化方案。该方案的不足是仅考虑了单个弹性吊索参数独立变化对弓网系统动态特性的影响,还需要综合考虑多个弹性吊索参数联合变化对弓网动态性能的影响。文献[8]分析了双受电弓受流时弓网耦合系统的动态行为,探讨了双弓间距、受电弓归算质量变化对弓网接触力的影响,指出选择恰当的双弓

间距并减小受电弓归算质量可有效提升弓网系统动态性能。

从现有研究状况可见,关于受电弓与接触网系统间的动态性能的优化工作主要集中于单受电弓结构参数的优化<sup>[4-6]</sup>,对双受电弓-接触网系统间动态特性的研究有接触网系统结构参数<sup>[6-7]</sup>、双弓间距<sup>[8]</sup>等方面的工作,有关双受电弓结构多参数优化分析涉及较少。本文以 DSA380 高速受电弓和大西线高速铁路弹性链式悬挂接触网系统为研究对象,建立弓网耦合系统动力学仿真计算模型,基于遗传算法理论和高速弓网系统仿真平台,对弓网系统动态受流质量分别进行单、双受电弓三参数联合优化,给出了适用于高速情况下的单、双受电弓设计优化方案。

## 1 弓网耦合系统动力学模型

### 1.1 模型建立

受电弓系统是高速列车从接触网获取电能的电气设备,安装在高速列车车顶。DSA380 型单臂受电弓主要包括底架、升弓气囊、阻尼器、下框架、上框架、平衡杆、拉杆和弓头等结构。本文采用三质量块模型<sup>[5]</sup>等效实体受电弓,来反映受电弓真实运动时的频率特性,三质量块模型如图 1 所示。在有限元分析软件 ANSYS 中,将实体受电弓等效成三自由度质量-阻尼-弹簧组合系统有限元模型,其中质量块采用质量单元,阻尼-弹簧采用弹簧单元,三质量块模型等效参数采用实测数据,由 DSA380 型高速受电弓在 1 600 mm 工作高度下实验测得。受电弓三质量块模型运动微分方程<sup>[9-11]</sup>为:

$$\mathbf{M}_p \ddot{\mathbf{z}}_p + \mathbf{C}_p \dot{\mathbf{z}}_p + \mathbf{K}_p \mathbf{z}_p = \mathbf{F}_p,$$

$$\mathbf{M}_p = \begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_p = \begin{bmatrix} c_3 & -c_3 & 0 \\ -c_3 & c_3 + c_2 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_p = \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 & 0 \\ -k_3 & k_3 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{M}_p$ 、 $\mathbf{C}_p$ 、 $\mathbf{K}_p$  分别为受电弓系统的质量、阻尼、刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{z}}_p = [\ddot{z}_3 \quad \ddot{z}_2 \quad \ddot{z}_1]^T$ 、 $\dot{\mathbf{z}}_p = [\dot{z}_3 \quad \dot{z}_2 \quad \dot{z}_1]^T$ 、 $\mathbf{z}_p = [z_3 \quad z_2 \quad z_1]^T$ 、 $\mathbf{F}_p = [-P \quad F_2 \quad F_1]^T$  分别为受电弓系统的加速度、速度、位移和载荷向量; $m_j$ 、 $k_j$ 、 $c_j$ 、 $z_j$  ( $j=3,2,1$ ) 分别为弓头、上框架和

下框架的等效质量、等效刚度、等效阻尼和垂向位移;  $F_1$ 、 $F_2$  分别为施加在  $m_1$ 、 $m_2$  上的静态抬升力;  $P$  为弓网接触力。

接触网系统是电气化铁路的主要构成部分之一,是沿铁路轨道线路上空架设的向高速列车供电的高压输电线路。单受电弓-接触网耦合系统示意图如图 1 所示。

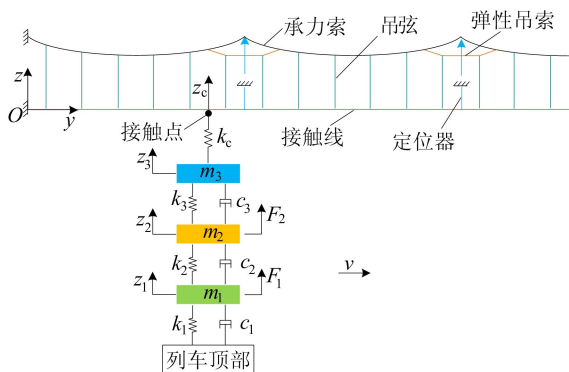


图 1 单受电弓-接触网耦合系统示意图

基于有限单元法的思想,可建立图 1 中接触线、承力索、弹性吊索、吊弦和定位器在内的二维弹性链式悬挂接触网系统有限元模型<sup>[12-14]</sup>。在建立接触网系统动力学模型过程中,由于受电弓沿接触线高速滑动时所产生的振幅相比于跨距很小,接触线、承力索因变形产生的非线性行为可忽略不计<sup>[15]</sup>,因此采用杆单元等效接触线、承力索和弹性吊索,仅考虑它们的垂向运动<sup>[16-18]</sup>。采用质量、弹簧单元等效定位器,简化为附加于接触网上的集中质量单元;采用仅受拉的弹簧单元等效吊弦;采用集中质量单元等效附属线夹<sup>[19-20]</sup>。在接触网自身重力和线索张力共同作用下,利用负弛度法<sup>[21-22]</sup>寻找初始平衡位置处的接触网有限元模型,接触网模型运动微分方程<sup>[23-24]</sup>为:

$$M_c \ddot{z}_c + C_c \dot{z}_c + K_c z_c = F_c \quad (2)$$

其中:  $M_c$ 、 $C_c$ 、 $K_c$  分别为接触网系统的质量、阻尼和刚度矩阵;  $\ddot{z}_c$ 、 $\dot{z}_c$ 、 $z_c$ 、 $F_c$  分别为接触网系统节点处的加速度、速度、位移和载荷向量。

本文利用罚函数法建立弓网耦合系统动力学模型,在 ANSYS 中通过将接触单元施加在弓头质量块上、目标单元施加到接触线上来实现接触网与受电弓之间的耦合动力学行为。在弓头滑板与接触线之间的接触部位检验两者是否发生穿透,当两者发生穿透时,通过弓头垂向位移、接触线和弓头滑板接触位置处节点垂向位移以及所取接触刚度计算确定弓网接触力  $P$ ; 当两者未发生穿透时,  $P$  默认取 0。因此,弓网接触力  $P$  的数学

表达式<sup>[25-27]</sup>为:

$$P = \begin{cases} k_c(z_3 - z_c), & z_3 > z_c; \\ 0, & z_3 \leq z_c \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $z_c$  为接触线和弓头滑板接触位置处节点垂向位移;  $k_c$  为接触刚度,参考文献<sup>[28]</sup>,取  $k_c = 50 \text{ kN/m}$ 。

## 1.2 数值计算

联立受电弓和接触网系统运动微分方程(1)式、(2)式,可得弓网耦合系统动力学方程,即

$$M \ddot{z} + C \dot{z} + K z = F, \quad (4)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_p & 0 \\ 0 & C_c \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} K_p & 0 \\ 0 & K_c \end{bmatrix}$$

其中:  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为弓网系统结构节点的质量、阻尼和刚度矩阵;  $\ddot{z} = [\ddot{z}_p \quad \ddot{z}_c]^T$ 、 $\dot{z} = [\dot{z}_p \quad \dot{z}_c]^T$ 、 $z = [z_p \quad z_c]^T$ 、 $F = [F_p \quad F_c]^T$  分别为弓网系统结构节点的加速度、速度、位移和载荷向量。

考虑整个系统的非线性行为,采用 Newmark 法来求解弓网耦合系统动力学方程。假设在任意时间间隔  $\Delta t$  内,则有<sup>[29-31]</sup>:

$$\dot{z}_{n+1} = \dot{z}_n + [(1 - \gamma)\ddot{z}_n + \gamma\ddot{z}_{n+1}]\Delta t \quad (5)$$

$$z_{n+1} = z_n + \dot{z}_n \Delta t + \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{z}_n + \beta \ddot{z}_{n+1} \right] \Delta t^2 \quad (6)$$

其中:  $\ddot{z}_{n+1}$ 、 $\dot{z}_{n+1}$ 、 $z_{n+1}$  分别为  $t_{n+1}$  时刻的弓网系统结构节点加速度、速度和位移向量;  $\ddot{z}_n$ 、 $\dot{z}_n$ 、 $z_n$  分别为  $t_n$  时刻的节点加速度、速度和位移向量;  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ ;  $\gamma$ 、 $\beta$  均为时间积分参数,取  $\gamma = 0.5$ ,  $\beta = 0.25$ 。

联立(4)~(6)式,进行迭代积分运算求解弓网耦合系统动力学方程。在整个数值计算过程中,设定列车行驶速度  $v = 350 \text{ km/h}$ ,受电弓初始时刻位于坐标原点处,接触网高度、跨距分别为  $1.8$ 、 $55.0 \text{ m}$ ,接触线、承力索和弹性吊索的预张力分别为  $30.0$ 、 $21.0$ 、 $3.5 \text{ kN}$ ,接触网总跨数为 25 跨,最长时间积分步长为  $0.00167 \text{ s}$ ,输出结果时间间隔为  $0.00500 \text{ s}$ 。在上述设定基础上进行计算和迭代,确定质量块  $m_1$ 、 $m_2$  上的静态抬升力  $F_1$ 、 $F_2$ ,使弓网接触力平均值  $F_m$  达到目标值  $189 \text{ N}$ 。最后,计算得到弓网接触力和接触点垂向位移时程曲线,统计 10~20 跨中间区段内的弓网接触力数据,即可得弓网接触力平均值  $F_m$ 、标准差  $\sigma$  等统计值。

## 2 单受电弓三参数联合优化

### 2.1 优化问题

从工程设计角度考虑,选择弓头等效刚度  $k_3$ 、上框架等效刚度  $k_2$ 、下框架等效阻尼  $c_1$  进行单受电弓三参数联合优化。将优化参数  $k_3$ 、 $k_2$ 、 $c_1$  作为决策向量  $\mathbf{X}=[k_3 \ k_2 \ c_1]$ ,以降低弓网接触力标准差  $\sigma$  为目标,目标函数为 0~20 Hz 频段内  $\sigma$  取最小值,决策向量  $\mathbf{X}$  中参数定义域考虑在工程设计可行性范围内。优化问题具体数学模型为:

$$\begin{aligned} & \min \sigma(\mathbf{X}), \\ & \mathbf{X} = [k_3 \ k_2 \ c_1]; \\ & \text{s. t.} \begin{cases} 4\ 000 \text{ N/m} \leq k_3 \leq 14\ 000 \text{ N/m}, \\ 8\ 000 \text{ N/m} \leq k_2 \leq 20\ 000 \text{ N/m}, \\ 10 \text{ N} \cdot \text{s/m} \leq c_1 \leq 240 \text{ N} \cdot \text{s/m} \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

### 2.2 优化步骤

为了快速而有效地搜索到全局最优解,本文考虑采用遗传算法来优化弓网动力学性能。遗传算法是一种全局优化概率搜索算法,以概率方式生成每一代种群的决策向量,随着计算代数的增加,可得逐步接近全局最优解的决策向量。利用遗传算法进行单受电弓三参数联合优化的具体步骤<sup>[32-33]</sup>如下:

(1) 确定决策变量、约束条件。将  $k_3$ 、 $k_2$  在其变化区间内平均分成 15 份,将  $c_1$  在其变化区间内平均分成 7 份,即在整个参数空间范围内一共可以生成  $2^{11}$  个参数组合,每一个参数组合形成一个决策变量  $\mathbf{X}$ 。

(2) 建立优化模型。目标函数为  $\sigma$  取最小值,在全参数空间范围内进行决策变量的迭代。

(3) 选取编码方法。在整个参数空间范围内,随机分布 50 组决策变量,进而组成第 1 代种群。基于弓网系统动力学模型,针对每个决策变量进行弓网接触力动力学计算,得到接触力标准差  $\sigma$ 。

(4) 定义解码方法。定义种群内个体基因型  $k_3$ 、 $k_2$ 、 $c_1$  到个体表现型  $\mathbf{X}$  的变换方法或者对应关系。

(5) 规定变量评级。根据  $\sigma$  大小决定每一个决策变量的评分, $\sigma$  越小决策变量的评分越高。

(6) 设计遗传操作。选择算子采用轮盘赌选择法,决策变量的评分越高,被选中的机会越大,交叉算子采用单点交叉的方式,变异算子会导致决策变量发生变异,每一代都保留上一代中评分

最高的 2 组决策变量。

(7) 设定运行参数。初步设定种群规模为 50、迭代次数为 10、交叉概率为 0.99、变异概率为 0.005 等参数。

### 2.3 优化结果

每代种群决策向量的接触力标准差  $\sigma$  随遗传代数的演化如图 2 所示。图 2 中,每代种群的最小  $\sigma$  间的连线即为种群最优解随遗传代数的演化曲线。由图 2 可知,当遗传代数为 1~3 代时,种群最优解随着遗传代数的增加而减小;当遗传代数为 3~10 代时,种群最优解已经达到收敛状态,未发生变化。因此,第 3~10 代种群的最小  $\sigma$  均为弓网接触力标准差全局最优解,此时最优解  $\sigma=29.75 \text{ N}$ ,与之对应的优化参数值为  $k_3=13\ 333 \text{ N/m}$ 、 $k_2=8\ 000 \text{ N/m}$ 、 $c_1=240 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

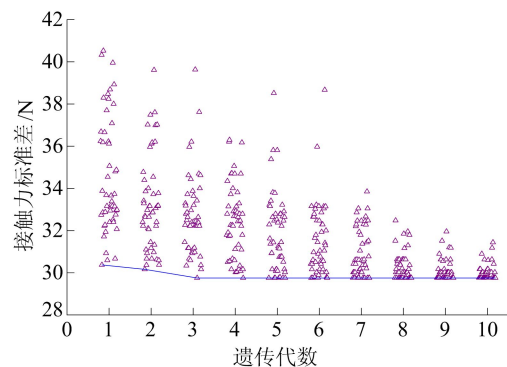


图2 接触力标准差随遗传代数的演化

通过在运行速度  $v=350 \text{ km/h}$  情况下以降低  $\sigma$  为目标函数的  $k_3$ 、 $k_2$ 、 $c_1$  三参数联合优化,确定了单受电弓三参数的最优解为  $\mathbf{X}_{350}^*$ :  $k_3=13\ 333 \text{ N/m}$ 、 $k_2=8\ 000 \text{ N/m}$ 、 $c_1=240 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。基于最优解  $\mathbf{X}_{350}^*$  计算得到的  $\sigma$  为  $29.75 \text{ N}$ ,相比于采用原设计方案计算得到的  $\sigma=35.72 \text{ N}$  减少了  $5.97 \text{ N}$ 。计算结果表明,单受电弓三参数联合优化提高了弓网耦合系统动力学性能,减小了弓网间振荡,优化效果显著。

## 3 双受电弓三参数联合优化

### 3.1 优化问题

高速列车使用双受电弓运行时的示意图如图 3 所示。图 3 中:前、后受电弓均固定于列车顶部,双弓间距为  $200 \text{ m}$ ;  $m_{ij}$ 、 $k_{ij}$ 、 $c_{ij}$ 、 $z_{ij}$  ( $i=L, T$ ;  $j=3, 2, 1$ ) 分别为弓头、上框架、下框架的等效质量、等效刚度、等效阻尼和垂向位移;下标 L、T 分别为前、后受电弓;  $F_{i1}$ 、 $F_{i2}$  分别为施加在  $m_{i1}$ 、 $m_{i2}$  上的静态抬升力;  $F_{ic}$  为弓网接触力。

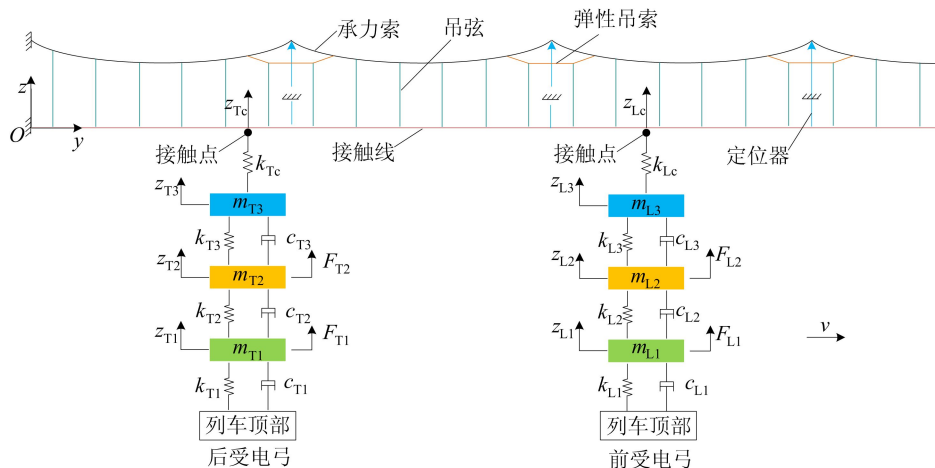


图 3 双受电弓-接触网耦合系统示意图

列车使用双受电弓运行时,前受电弓与接触网系统间的动态相互作用会引起接触线大幅度振荡,并在接触线上以振动波的形式向外传递,影响后受电弓与接触线之间的正常接触,从而导致后受电弓与接触网系统间的动态受流性能恶化<sup>[34]</sup>。因为前受电弓受流质量一般优于后受电弓,所以在受电弓设计中优先考虑满足后受电弓动态性能要求<sup>[35]</sup>。在单受电弓三参数联合优化的基础上,对后受电弓与接触网间的动态性能进行优化,以降低后受电弓接触力标准差 $\sigma_T$ 。

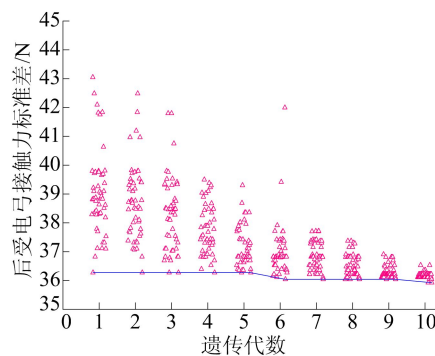
前受电弓采用单受电弓三参数联合优化的最优解为 $\mathbf{X}_{350}^*$ ,后受电弓选择 $k_{T3}$ 、 $k_{T2}$ 、 $c_{T1}$ 作为优化参数,即决策向量 $\mathbf{X}_T = [k_{T3} \ k_{T2} \ c_{T1}]$ ,目标函数为 0 ~ 20 Hz 频段内 $\sigma_T$ 取最小值,决策向量 $\mathbf{X}_T$ 中参数定义域在考虑工程设计可行性范围内。优化问题数学模型为:

$$\begin{aligned} & \min \sigma(\mathbf{X}_T), \\ & \mathbf{X}_T = [k_{T3} \ k_{T2} \ c_{T1}]; \\ & \text{s. t. } \begin{cases} 4\ 000 \text{ N/m} \leq k_{T3} \leq 14\ 000 \text{ N/m}, \\ 8\ 000 \text{ N/m} \leq k_{T2} \leq 20\ 000 \text{ N/m}, \\ 10 \text{ N} \cdot \text{s/m} \leq c_{T1} \leq 240 \text{ N} \cdot \text{s/m} \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

### 3.2 优化过程

利用遗传算法优化后受电弓与接触网间的动力学性能,具体优化步骤同 2.2 节的单受电弓一致。每代种群决策向量的 $\sigma_T$ 随遗传代数的演化如图 4 所示。图 4 中,每代种群的最小 $\sigma_T$ 间的连线即为种群最优解随遗传代数的演化曲线。由图 4 可知,当遗传代数为 1~5 代时,种群最优解未发生变化;当遗传代数为 5~6 代时,种群最优解随着遗传代数的增加而减小;当遗传代数为 6~9 代时,种群最优解未发生变化;当遗传代数为 9~10 代时,种群最优解随着遗传代数的增加而减

小。因此,第 10 代种群的最小 $\sigma_T$ 即为接触力标准差全局最优解,此时最优解 $\sigma_T = 35.93 \text{ N}$ ,与之对应的优化参数值为 $k_{T3} = 14\ 000 \text{ N/m}$ 、 $k_{T2} = 8\ 000 \text{ N/m}$ 、 $c_{T1} = 240 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

图 4 后受电弓接触力标准差 $\sigma_T$ 随遗传代数的演化

### 3.3 结果分析

以 $\sigma_T$ 最小为目标函数的 $k_{T3}$ 、 $k_{T2}$ 、 $c_{T1}$ 三参数联合优化,得到的后受电弓三参数的最优解为 $\mathbf{X}_{T350}^*$ : $k_3 = 14\ 000 \text{ N/m}$ 、 $k_2 = 8\ 000 \text{ N/m}$ 、 $c_1 = 240 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。为了明晰双受电弓三参数联合优化的优化效果以及是否影响前受电弓受流质量,设计如下 3 种工况对比验证:

(1) 工况 1。前、后受电弓均采用 DSA380 型高速受电弓在 1 600 mm 工作高度下 $k_3$ 、 $k_2$ 、 $c_1$ 的实验数据,即均采用原设计方案 $\mathbf{X}_{\text{DSA380}}^*$ : $k_3 = 6\ 650 \text{ N/m}$ 、 $k_2 = 13\ 181 \text{ N/m}$ 、 $c_1 = 67.41 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

(2) 工况 2。前、后受电弓均采用经单受电弓三参数联合优化后的 $k_3$ 、 $k_2$ 、 $c_1$ ,即均采用 $\mathbf{X}_{350}^*$ : $k_3 = 13\ 333 \text{ N/m}$ 、 $k_2 = 8\ 000 \text{ N/m}$ 、 $c_1 = 240 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

(3) 工况 3。前、后受电弓分别采用经单、双受电弓三参数联合优化后的 $k_3$ 、 $k_2$ 、 $c_1$ ,即前受电

弓采用  $\mathbf{X}_{350}^*$ :  $k_3 = 13\ 333\ \text{N/m}$ 、 $k_2 = 8\ 000\ \text{N/m}$ 、 $c_1 = 240\ \text{N} \cdot \text{s/m}$ , 后受电弓采用  $\mathbf{X}_{T350}^*$ :  $k_3 = 14\ 000\ \text{N/m}$ 、 $k_2 = 8\ 000\ \text{N/m}$ 、 $c_1 = 240\ \text{N} \cdot \text{s/m}$ 。

基于上述 3 种工况计算得到的前、后受电弓接触力和接触点垂向位移时程曲线如图 5 所示。3 种工况下的前、后受电弓的弓网接触力和接触点垂向位移时程曲线具有相同的振荡趋势,其中,工况 1 的时程曲线振荡幅度明显大于工况 2、工况 3。

3 种工况下前、后受电弓接触力统计数据见表 1 所列。由表 1 可知,工况 2、工况 3 的前受电弓接触力标准差  $\sigma_L$  均为 29.85 N,与工况 1 相比均下降了 6.01 N,表明双受电弓后弓三参数联合优化并未影响前弓受流质量;工况 2、工况 3 的后受电弓接触力标准差  $\sigma_T$  分别为 36.15、35.93 N,与工况 1 相比分别下降了 3.04、3.26 N,说明双受电弓三参数联合优化的优化效果比单受电弓三参数联合优化更好,提高了后受电弓与接触网间的动态性能,减小了弓网间接触力振荡程度。综上所述,双受电弓三参数联合优化不会影响前受电弓受流质量,提高了后受电弓-接触网系统间的动态特性,减小了弓网间振荡,优化效果更好。

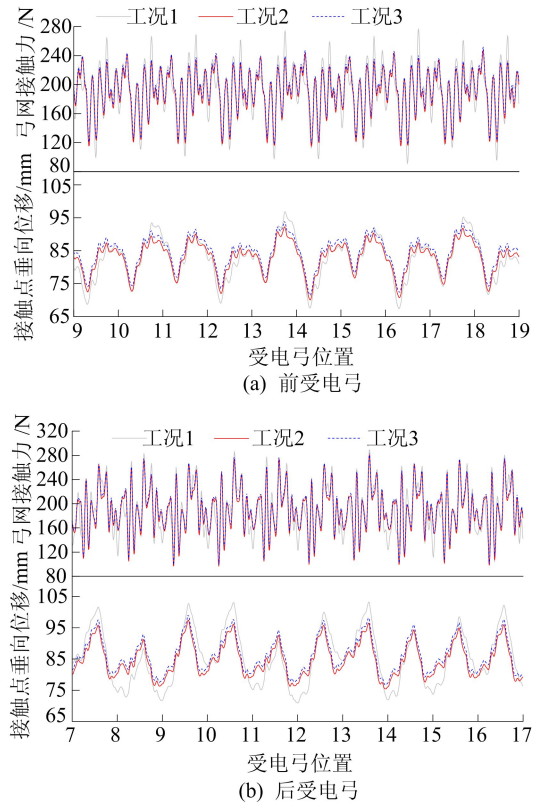


图 5 3 种工况下前、后受电弓的弓网接触力和接触点垂向位移时程曲线

表 1 前、后受电弓接触力数据统计

单位: N

参数	工况 1		工况 2		工况 3	
	前受电弓	后受电弓	前受电弓	后受电弓	前受电弓	后受电弓
$F_m$	192.36	192.38	192.46	192.38	192.46	192.39
$\sigma$	35.86	39.19	29.85	36.15	29.85	35.93
$F_{max}$	280.03	297.10	251.67	284.40	251.69	283.67
$F_{min}$	93.67	106.88	117.84	99.03	117.87	99.05

双受电弓三参数联合优化,确定了更好的双受电弓三参数最优方案,即前受电弓  $\mathbf{X}_{350}^*$ :  $k_3 = 13\ 333\ \text{N/m}$ 、 $k_2 = 8\ 000\ \text{N/m}$ 、 $c_1 = 240\ \text{N} \cdot \text{s/m}$ , 后受电弓  $\mathbf{X}_{T350}^*$ :  $k_3 = 14\ 000\ \text{N/m}$ 、 $k_2 = 8\ 000\ \text{N/m}$ 、 $c_1 = 240\ \text{N} \cdot \text{s/m}$ 。前、后受电弓接触力平均值分别为 192.46、192.39 N,标准差分别为 29.85、35.93 N,均满足文献[36]中  $\sigma < 0.3F_m$  的规定。与前、后受电弓均采用原设计方案相比,优化后的前、后受电弓接触力平均值变化很小,接触力标准差相对偏差  $\Delta\sigma$  分别为 -6.01、-3.26 N,  $\sigma$  的降低可提高弓网系统动力学性能,减小弓网间接触力波动;接触力最大值相对偏差  $\Delta F_{max}$  分别为 -28.34、-13.43 N,  $F_{max}$  的降低会减小受电弓碳滑板与接触线之间的机械磨耗,延长受电弓与接触网的使用寿命;接触力最小值相对偏差  $\Delta F_{min}$  分别为 24.20、-7.83 N,其中  $F_{min}$  的增大会降低

离线率,后受电弓的  $F_{min}$  虽然有所减小,但也远大于离线情况时的弓网接触力。总之,采用双受电弓三参数最优方案可显著提升前、后受电弓的弓网动态性能。

#### 4 结 论

本文基于遗传算法理论和弓网系统动态仿真平台,研究了 DSA380 型高速受电弓三参数联合变化对单、双受电弓与接触网系统间动力学性能的影响,结论如下:

(1) 高速情况单受电弓三参数联合优化的最优解为  $c_1 = 240\ \text{N} \cdot \text{s/m}$ 、 $k_3 = 13\ 333\ \text{N/m}$ ,与原设计方案相比分别增加了 255.8%、100.5%;  $k_2 = 8\ 000\ \text{N/m}$ ,降低了 39.3%。单受电弓三参数联合优化计算得到的弓网接触力标准差  $\sigma = 29.75\ \text{N}$ ,相较于原设计方案降低了 16.7%,有效

提升了弓网耦合系统动力学性能,减小了弓网间接触力振荡,优化效果明显。

(2) 对于双受电弓受流情况,确定了能更好地在高速情况下运行的双受电弓三参数最优方案,即前受电弓采用单受电弓三参数联合优化的最优解  $\mathbf{X}_{350}^*$ :  $k_3 = 13\ 333\ \text{N/m}$ 、 $k_2 = 8\ 000\ \text{N/m}$ 、 $c_1 = 240\ \text{N} \cdot \text{s/m}$ ;后受电弓采用双受电弓三参数联合优化的最优解  $\mathbf{X}_{T350}^*$ :  $k_3 = 14\ 000\ \text{N/m}$ 、 $k_2 = 8\ 000\ \text{N/m}$ 、 $c_1 = 240\ \text{N} \cdot \text{s/m}$ 。双受电弓三参数联合优化计算得到的前、后受电弓接触力标准差分别为  $\sigma_L = 29.85\ \text{N}$ 、 $\sigma_T = 35.93\ \text{N}$ ,比优化前双受电弓受流情况分别下降了 16.8%、8.3%,优化效果显著。

优化结果表明,DSA380 型高速受电弓经单、双受电弓三参数联合优化后,对弓网动态受流性能均有较大幅度的提高。

### [参 考 文 献]

- [1] 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(1):217-460.
- [2] 李文豪,罗健,张倩,等. 高速铁路受电弓与接触网关系评价综述[J]. 电气化铁道,2009(4):40-44.
- [3] POMBO J, AMBROSIO J. Environmental and track perturbations on multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains[J]. Computers and Structures, 2013, 124:88-101.
- [4] 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(10):3253-3260.
- [5] 吴孟臻,刘洋,许向红. 高速弓网系统动力学参数敏感度分析及优化[J]. 力学学报,2021,53(1):75-83.
- [6] 唐周林. 基于正交试验法的高铁弓网动态性能优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [7] 关金发,田志军,张学武. 接触网弹性吊索参数对弓网动态性能影响[J]. 西南交通大学学报,2019,54(3):1-8.
- [8] 吴燕,吴俊勇,郑积浩,等. 高速受电弓-接触网动态受流性能及双弓距离的研究[J]. 铁道学报,2010,32(4):38-43.
- [9] PARK T J, HAN C S, JANG J H. Dynamic sensitivity analysis for the pantograph of a high-speed rail vehicle[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266(2):235-260.
- [10] KIM J W, CHAE H C, PARK B S, et al. State sensitivity analysis of the pantograph system for a high-speed rail vehicle considering span length and static uplift force[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303(3/4/5):405-427.
- [11] 张坚. 高速铁路弓网离线特性及弓网参数敏感度分析研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- [12] 张卫华,沈志云. 接触网动态研究[J]. 铁道学报,1991,13(4):26-33.
- [13] 张卫华,曹新文. 高速受电弓:接触网系统的动力学研究[J]. 西南交通大学学报,1991(1):105-111.
- [14] 于万聚. 高速接触网-受电弓系统动态受流特性研究[J]. 铁道学报,1993,15(2):16-27.
- [15] 刘志刚,宋洋,韩焯,等. 高速铁路接触网研究进展[J]. 西南交通大学学报,2016,51(3):495-518.
- [16] LEVY S, BAIN J A, LECLERC E J. Railway overhead contact systems, catenary-pantograph dynamics for power collection at high speeds[J]. Journal of Engineering for Industry, 1968, 90(4):692-699.
- [17] HARELL P, DRUGGE L, REIJM M. Study of critical sections in catenary systems during multiple pantograph operation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2005, 219(4):203-211.
- [18] 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.
- [19] 阮杰,颜伏伍,李红梅. 电气化高速铁路接触网静态模型的建立[J]. 铁道学报,2012,34(8):20-25.
- [20] 胡艳,黄盼盼,马然,等. 简单链形悬挂接触网整体吊弦瞬态动力学性能研究[J]. 振动与冲击,2021,40(8):131-136.
- [21] 李瑞平,周宁,梅桂明,等. 初始平衡状态的接触网有限元模型[J]. 西南交通大学学报,2009,44(5):732-737.
- [22] 周宁,李瑞平,张卫华. 基于负弛度法的接触网建模与仿真[J]. 交通运输工程学报,2009,9(4):28-32.
- [23] 吴天行. 弓网高速动态受流仿真研究[J]. 铁道学报,1996,18(4):55-61.
- [24] 王世轩,吕青松,李瑞平,等. 二维和三维弓网耦合动力学模型适用性分析[J]. 铁道机车车辆,2014,34(3):130-135.
- [25] 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.
- [26] 周宁,张卫华. 基于受电弓弹性体模型的弓网动力学分析[J]. 铁道学报,2009,31(6):26-32.
- [27] 关金发,吴积钦. 受电弓与接触网动态仿真模型建立及其确认[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(11):2444-2451.
- [28] European Committee for Electrotechnical Standardization. Railway applications-current collection systems-validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line; EN 50318[S]. London: British Standards Institution,2018:1-87.
- [29] NEWMARK N M. A method of computation for structural dynamics[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1959, 85(3):67-94.
- [30] 户川隼人. 振动分析的有限元法[M]. 殷荫龙,陈学源,译. 北京:地震出版社,1985.
- [31] ZHOU N, ZHANG W H. Investigation on dynamic performance and parameter optimization design of pantograph and catenary system[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2011, 47(3):288-295.

[32] GABRIEL L, ENRIQUE A. Genetic algorithms: theory and real-world applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2011.

[33] 颜雪松, 伍庆华, 胡成玉. 遗传算法及其应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.

[34] 周宁. 350 km/h 及以上弓网动态行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

[35] 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): 69-74.

[36] European Committee for Electrotechnical Standardization. Railway applications-current collection systems-technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access): EN 50367[S]. London: British Standards Institution, 2012: 1-44.

(责任编辑 张 镛)

(上接第 631 页)

表 2 二维 CFAR 检测器硬件资源消耗与对比

算法	FPGA 实现平台	LUTs/10 <sup>3</sup>	Registers/10 <sup>3</sup>	BRAM	最大时钟频率/MHz	平均单点处理周期
本文算法	xc6v1x240t	34	11	23	220	1.1
文献[13]	XCVU440	342	227	19	120	2.7
文献[15]	XC7K325T	38	12	20	137	

#### 4 结 论

本文给出了一种高速可配置兼容 CA、GO、SO、OS CFAR 检测器的硬件加速设计, 设计采用矩形窗, 实现检测器类型、标称化因子、排序值  $K$ 、参考窗口尺寸、保护窗口尺寸可动态配置。对于  $256 \times 2048$  点二维 RDM 数据可在 2.71 ms 内完成 CFAR 检测, 具有高效的检测效率和较小的硬件资源开销。

#### [参 考 文 献]

[1] FINN H M, JOHNSON R S. Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter-level estimates[J]. RCA Review, 1968, 29(3): 414-464.

[2] TRUNK G V. Range resolution of targets using automatic detectors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1978, AES-14(5): 750-755.

[3] HANSEN V G, SAWYERS J H. Detectability loss due to "greatest of" selection in a cell-averaging CFAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, AES-16(1): 115-118.

[4] LONGO M, LOPS M. OS-CFAR thresholding in decentralized radar systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(4): 1257-1267.

[5] LI D J, YU G L. 2D-OS-CFAR detector for cloud clutter suppression[C]//CIE International Conference on Radar Proceedings (Cat No. 01TH8559). [S. l. : s. n. ], 2001: 350-353.

[6] 杨强, 刘永坦. 复杂背景下的二维检测研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(1): 34-37.

[7] 何友, 关键, 彭应宁. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

[8] SHAFIQ M A. Real time implementation and profiling of different CFAR algorithms over DSP kit[C]//Proceedings of 2014 11th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST) Islamabad, Pakistan, 14th-18th. [S. l. : s. n. ], 2014: 466-470.

[9] 任磊, 陈辉, 陈建文, 等. 基于 DSP 的二维 CFAR 检测快速实现[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(7): 1627-1631.

[10] 邓超. 杂波干扰环境下雷达恒虚警处理及其实现技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.

[11] 周忠锦. 二维恒虚警率散发研究及实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.

[12] ZHANG M, LI X. An efficient real-time two-dimensional CA-CFAR hardware engine[C]//2019 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC). [S. l. : s. n. ], 2019: 845-847.

[13] 高巍, 杨昊, 蒋荣堃, 等. 一种动态可配置二维 CFAR 处理器的设计与实现[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(7): 797-802.

[14] 谢春思, 刘志赢, 吴帅, 等. 基于改进二维 CFAR 参考滑窗技术的目标检测研究[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(3): 48-52.

[15] 高巍, 谢芳, 蒋荣堃, 等. 基于 FPGA 的二维双向 CFAR 处理器的设计与实现[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(5): 536-540.

(责任编辑 张 镛)