

高速弓网系统动力学参数敏感度分析及优化¹⁾

吴孟臻 ^{*,†} 刘洋 [†] 许向红 ^{†,2)}

^{*}(天津大学机械工程学院, 天津 300354)

[†](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 随着高速列车运行速度的提升, 弓网关系这一基础力学问题备受关注。良好的弓网关系是确保列车安全高效运行、稳定可靠受流、降低接触线与受电弓滑板磨耗等的基本前提。其中, 受电弓和接触网的动力学参数对弓网耦合作用起至关重要的作用。本文采用弓网接触力随机统计特征作为优化目标函数, 进行受电弓动力学参数的敏感度分析和优化设计。首先, 建立了二维弹性链悬挂接触网—三质量块受电弓动力学模型, 根据 EN50318: 2018 标准验证了动力学建模和分析结果的正确性。然后, 基于高速弓网系统的动力学仿真, 进行了 DSA380 型高速受电弓三质量块参数的动力学敏感度分析, 确定了 9 个动力学参数的敏感度级别, 弓头等效质量敏感度评级最高, 下框架等效阻尼次之, 下框架等效质量和上框架等效阻尼第三。最后, 研究了弓头等效刚度和等效阻尼联合变化对弓网耦合动力学性能的影响, 给出了提升弓网耦合性能的弓头双参数优化方案, 建议同时减小弓头等效阻尼和增大弓头等效刚度, 能够实现比单参数优化更好的弓网耦合性能。

关键词 弓网系统, 受流质量, 敏度分析, 参数优化

中图分类号: U264.3⁺⁴, U225, O39 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-20-207

SENSITIVITY ANALYSIS AND OPTIMIZATION ON PARAMETERS OF HIGH SPEED PANTOGRAPH-CATENARY SYSTEM¹⁾

Wu Mengzhen^{*,†} Liu Yang[†] Xu Xianghong^{†,2)}

^{*}(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

[†](State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract With the improvement in the speed of high-speed trains, the dynamic interaction between pantograph and catenary, a basic mechanical problem, has attracted more attention. Good pantograph-catenary relationship is a basic premise to ensure the security and efficiency of the train operation, the stability and reliability of the current collection and reduce the wear of the contact line and pantograph slide. The coupling performance of the pantograph-catenary system mainly depends on its kinetic parameter. In this paper, the stochastic statistical characteristics of the contact force of the pantograph-catenary system are adopted as the optimization objective function, and the sensitivity analysis and optimization design of pantograph dynamic parameters are carried out. Firstly, a dynamic model of 2D stitched catenary and three lumped parameter pantograph is established, and the validation of dynamic analysis of the model is verified according to

2020-06-16 收稿, 2020-08-06 录用, 2020-08-06 网络版发表。

1) 国家自然科学基金(11672297)和中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB22020000)资助项目。

2) 许向红, 副研究员。主要研究领域: 受电弓力学特性与结构优化、仿生微结构设计及 3D 打印。E-mail: xxh@lnm.imech.ac.cn

引用格式: 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. 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. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 75-83

British Standard EN50318:2018. Secondly, based on dynamic simulation of the high-speed pantograph-catenary system, a dynamic sensitivity analysis on three lumped nine dynamic parameters of DSA380 high-speed pantograph is carried out, and the sensitivity level of the parameters is determined. The sensitivity level of the equivalent mass of the pantograph head is the highest, followed by the equivalent damping of the lower frame and the equivalent mass of lower frame and the equivalent damping of the upper frame are the third. Finally, the effect of joint variation in equivalent stiffness and equivalent damping of the pantograph head on the pantograph-catenary coupling dynamic performance is studied, and a dual-parameter optimization scheme of equivalent stiffness and equivalent damping of the pantograph head is proposed to improve the current collection quality pantograph-catenary system. It is suggested to reduce the equivalent damping of pantograph head and increase the equivalent stiffness of pantograph head at the same time, and the dual-parameter optimization scheme can achieve a better quality of the pantograph-catenary system than the single parameter optimization scheme.

Key words pantograph-catenary system, current collection quality, sensitivity analysis, parameter optimization

引言

高速列车速度的大幅提升,给高速受电弓与接触网关系提出了更高的技术要求^[1-2]。受电弓安装于列车顶部,在升弓装置作用下与接触网耦合,为列车运行提供电能。当列车高速运行时,受电弓弓头滑板与接触网动态接触,此时受电弓作用到架空接触网上会产生垂向的弓网接触力^[3-4]。弓网接触力是弓网间耦合作用的直接反映。弓网接触力过大,会加剧弓头滑板、接触线等部件的机械磨损,降低弓网系统的使用寿命;接触力过小,会增大接触电阻,造成电能浪费,甚至产生离线和电弧烧损。

良好的弓网关系是确保列车稳定可靠受流、降低接触线与受电弓滑板磨耗的基本前提。在线路实测和仿真分析中,采用平均接触力 F_m 和标准差 σ 作为受流质量的主要评价指标^[3-6]。其中, F_m 表征弓头碳滑板与接触线间作用力水平,当列车运行速度 $v > 200 \text{ km/h}$ (AC) 时,需满足 $F_m < 70 + 0.00097 v^2$; σ 表征接触力的振荡程度,需满足 $\sigma < 0.3F_m$. F_m 越小, 碳滑板与接触线间的机械磨损越轻; σ 越小, 弓网接触力涨落越小, 弓网接触性能越优良。因此,良好的弓网关系要求满足 F_m 的前提下 σ 尽可能小, 这也是弓网耦合动力学参数优化的主要目标。在进行弓网动力学优化研究时,采用上述接触力随机统计特征作为优化目标函数,是相关问题研究的挑战。

弓网耦合性能主要取决于受电弓和接触网的动力学参数。近年来,进行受电弓模型参数优化以期提升弓网耦合性能,成为弓网动力学仿真研究的重要方向之一。基于 DSA250, DSA380 和 CX 等受电弓现

有参数,通过弓网动力学仿真分析,研究者们提出了三质量块参数的许多优化建议。对弓头的等效质量和等效阻尼、上框架等效阻尼这 3 个参数,学者们基本达成共识,认为减小弓头等效质量^[7-12],或增大弓头等效阻尼^[9,13]、上框架等效阻尼^[9,13],均可以降低接触力标准差。然而,关于弓头等效刚度等 5 个三质量块参数的研究结果差别较大。为了实现降低接触力标准差,文献 [7-9, 11] 认为应增大弓头等效刚度,他们给出的弓头等效刚度的最优值较为分散,覆盖 $7860 \sim 23\,380 \text{ N/m}$;文献 [10, 12-14] 则认为减小弓头等效刚度。文献 [7, 10, 12] 认为减小上框架等效质量,唐周林^[15]认为应保持上框架等效质量不变。文献 [10, 12-13] 认为应减小上框架等效刚度,但周宁^[16]认为应增大上框架等效刚度。Lee 等^[7]和 Wang 等^[12]认为减小下框架等效质量,而 Kim 等^[10]认为应该增大下框架等效质量。文献 [7-8, 12] 认为需增大下框架等效阻尼, Kim 等^[10]认为应该保持下框架等效阻尼不变。此外,下框架等效刚度的研究较少,Wang 等^[12]认为应增大下框架等效刚度。需要注意的是,同一参数在不同文献中的优化范围大多不同,例如,弓头刚度的优化范围众多,取原参数的 $0.9 \sim 1.1$ 倍^[7], $0.017 \sim 1.65$ 倍^[14]、 $1 \sim 3.98$ 倍^[11] 等;联合优化的参数个数也不同,涵盖 1 个^[8,11,13-14] 到 7 个^[12] 不等。事实上,受电弓动力学特性对弓网耦合性能的影响,与敏感度分析时的参数起点和变化范围、多参数联合优化时的参数个数等都密切相关。这也是已有报道的研究结果较为分散甚至完全相反的原因之一。

本文利用有限元法建立了二维弹性链悬挂接触网-三质量块受电弓动力学模型,依据 EN50318 规

范结果校验了动力学分析结果的正确性。以实验测得的 DSA380 型高速受电弓在 1600 mm 工作高度下的三质量块参数为基础, 根据工程设计可行性确定模型参数的实现范围, 进行了 350 km/h 时速下受电弓三质量块参数的敏感度分析, 确定了在 DSA380 现有基础上的参数敏感性级别。研究了当弓头等效刚度与等效阻尼联合变化时, 弓网耦合系统动力学关系的变化, 结果表明弓头双参数优化相比于单参数优化, 能够实现更高的弓网耦合性能。

1 弓网耦合动力学模型

1.1 受电弓动力学方程

受电弓底座安装于列车顶部, 弓头滑板与接触线接触。图 1 所示的三质量块受电弓模型的动力学方程如下^[13,17-18]

$$\begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_3 \\ \ddot{z}_2 \\ \ddot{z}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_3 & -c_3 & 0 \\ -c_3 & c_3 + c_2 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_3 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 & 0 \\ -k_3 & k_3 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3 \\ z_2 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_c \\ F_2 \\ F_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, m_i , k_i , c_i 和 z_i ($i = 3, 2, 1$) 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。施加在质量块 m_2 和 m_1 上的抬升力分别为 F_2 和 F_1 ; 接触力为 F_c 。

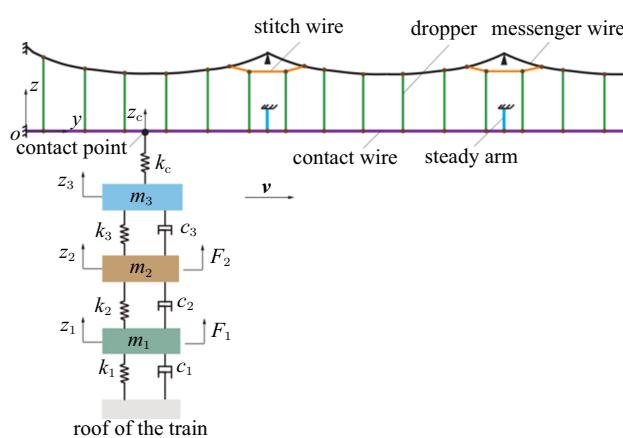


图 1 高速弓网系统示意图

Fig. 1 Illustration of high speed pantograph-catenary system

1.2 接触网动力学方程

忽略接触网拉出值和接触线横向运动, 建立包括接触线、承力索、弹性吊索、吊弦和定位器的二维弹性悬挂接触网模型(图 1)^[19-21]。其中, 接触线、承力索和弹性吊索的长度远大于其截面尺寸, 由弯曲变形引起的弯曲应力远小于预张力引起的拉伸应力, 弯曲应力对 50 Hz 以下动态接触力的影响很小^[22-23], 故接触线、承力索和弹性吊索简化为细长杆模型^[20,24-27]。吊弦是只能承受拉力的细长绳索, 主要发生轴向伸缩运动, 简化为只具有抗拉刚度的弹簧模型^[7,13,28]。定位器呈一定角度斜向提拉接触线, 接触线上下振动会引起拉力方向改变, 且接触线承担定位器的部分重力, 可将定位器简化为弹簧-质量点组合模型, 取定位器质量一半与定位线夹质量之和为质量点质量, 弹簧刚度为 213 N/m^[7,29]。在上述模型简化前提下, 可得接触网动力学方程

$$\mathbf{M}_c \ddot{\mathbf{z}}_c + \mathbf{C}_c \dot{\mathbf{z}}_c + \mathbf{K}_c \mathbf{z}_c = \mathbf{P} \quad (2)$$

式中, \mathbf{M}_c 为接触网的质量矩阵, \mathbf{C}_c 为接触网阻尼矩阵, \mathbf{K}_c 为接触网刚度矩阵, \mathbf{z}_c 为接触网上节点的位移向量, \mathbf{P} 为接触网上节点的外载荷向量。

1.3 弓网耦合关系模型

受电弓与接触网之间通过接触力形成耦合动力学系统, 可用罚函数法模拟弓头滑板与接触线的耦合行为以求解接触力^[30]

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

式中, z_3 为弓头垂向位移, z_c 为接触位置接触线上的节点垂向位移; 取接触刚度 $k_c = 50\,000 \text{ N/m}$ ^[27,31]。

2 耦合动力学方程的数值方法及校验

2.1 耦合动力学方程的数值方法

按照几何参数建立接触网初始几何构型。接触网的高度 H_C 方向为 z 向、长度方向为 y 向。接触线位于 $z = 0$ 的直线上, 其左端起点为坐标原点 $(0, 0)$; 承力索和弹性吊索位于 $z = H_C$ 的直线上。

采用有限单元法对结构进行离散。接触网模型中的接触线、承力索和弹性吊索采用杆单元, 单元长度

均为 0.2 m。吊弦采用只承拉的弹簧单元, 每根吊弦只划分一个单元。定位器采用质量块与弹簧的组合单元。三质量块模型中的质量点和弹簧分别采用质量单元和弹簧单元。弓网耦合模型中, 采用 Conta175 和 Targe169 单元分别覆盖弓头质量点和接触线下表面, 二者形成接触对。接触线、承力索两端施加全约束, 承力索每一跨的节点上施加 z 方向平动约束, 在定位器端部施加全约束, 在各质量块上施加只释放 z 方向平动的约束。

对各个部件进行弹性模量、泊松比、结构阻尼、质量、预张力等参数赋值。利用负驰度法^[23,32]计算接触网的初始平衡状态, 使得在重力和预张力作用下接触线保持水平。联立方程(1)~(3)可得接触网和受电弓动力学平衡方程

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

式中, M 为整体质量矩阵、 C 为整体阻尼矩阵、 K 为整体刚度矩阵、 z 为节点位移向量、 F 为节点的外载荷向量。采用 Newmark 法进行时间积分计算, 引入如下假设

$$z_{t+\Delta t} = z_t + \dot{z}_t \Delta t + [(0.5 - \beta)\ddot{z}_t + \beta\ddot{z}_{t+\Delta t}] \Delta t^2 \quad (5)$$

$$\dot{z}_{t+\Delta t} = \dot{z}_t + [(1 - \alpha)\ddot{z}_t + \alpha\ddot{z}_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (6)$$

式中, z_t 为 t 时刻节点位移向量、 Δt 为时间积分步长、 $z_{t+\Delta t}$ 为 $t + \Delta t$ 时刻节点位移向量、 α 和 β 为时间积分参数, 计算时选取 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.25$ 。

联立方程(4)~(6)即可求解弓网耦合动力学方程。在数值计算中, 最大时间积分步长 0.001 67 s, 结

果输出时间间隔 0.005 s, 接触网跨数 30, 受电弓起始位置为 $y = 0$, 运行速度 $v = 350$ km/h。

首先, 进行动力学计算、迭代, 确定质量块 m_2 和 m_1 上的抬升力 F_2 和 F_1 , 使得接触力均值 F_m 达到目标值 $70 + 0.00097v^2 = 189$ N。然后, 计算弓网系统的接触力、抬升位移等参数。在具体仿真计算过程中, 采用 ANSYS 商用软件实现。

2.2 EN 50318:2018 标准算例校验

基于二维弹性链悬挂接触网-三质量块受电弓动力学模型, 针对 EN 50318:2018 给定的接触网-双受电弓参数^[4], 进行弓网接触力动力学计算, 统计 10~20 跨内前、后受电弓与接触网之间的接触力标准差 σ 、平均值 F_m 、实际最大值 F_{\max} 和实际最小值 F_{\min} , 以及接触点垂向位移范围 RVPPC 和定位器处最大抬升量 MUS (图 2)。当受电弓运行速度 $v = 275$ km/h 和 320 km/h 时, 仿真计算结果均位于 EN 50318:2018 规定的范围。因此, 本文建立的二维弹性链悬挂接触网-三质量块受电弓动力学模型计算结果可信。

3 弓网耦合参数分析及优化

基于二维弹性链悬挂接触网-三质量块受电弓动力学模型, 计算 DSA380 型高速受电弓在大西线上运行的动力学行为。针对 DSA380 型高速受电弓在

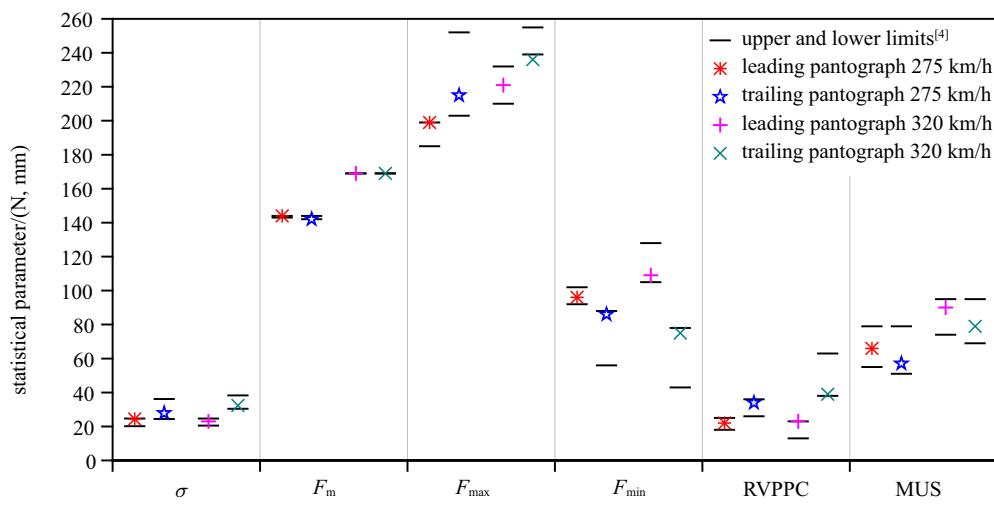


图 2 EN 50318 接触网-双受电弓模型的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of catenary-twin pantographs system in EN 50318

1600 mm 工作高度情形, 实测的弓头、上框架和下框架的等效质量分别为 7.94 kg, 8.22 kg 和 5.90 kg, 等效刚度分别为 6650 N/m, 13 181 N/m 和 74.0 N/m, 等效阻尼分别为 85.31 N·s/m, 11.90 N·s/m 和 67.41 N·s/m。大西线接触网的高度 1.8 m、跨距 55 m、吊弦间距 9.4 m; 接触线、承力索和弹性吊索的杨氏模量分别为 120 GPa, 105 GPa 和 113 GPa, 预张力分别为 30 kN,

21 kN 和 3.5 kN。取接触网跨数 30、受电弓起始位置 $y = 0$ 、运行速度 $v = 350 \text{ km/h}$, 计算得到弓网接触力和接触点垂向位移的时程曲线(图 3), 统计 10~20 跨稳定段内的数据, 得到 $F_m = 189.02 \text{ N}$, $\sigma = 35.44 \text{ N}$, $F_{\max} = 269.69 \text{ N}$ 和 $F_{\min} = 97.96 \text{ N}$ 。下文的仿真计算中, 保持所有受电弓参数情形的静态接触力均为 80 N。

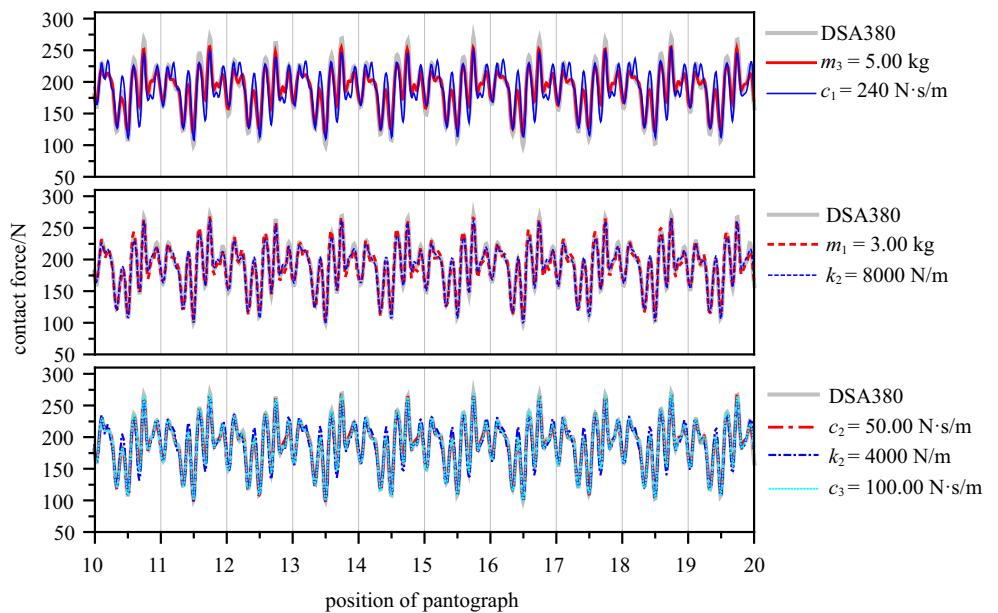


图 3 弓网接触力时程曲线

Fig. 3 Time history curves of contact force

3.1 三质量块参数的敏感度分析

假设 9 个三质量块参数相互独立, 以控制变量法计算单个归算参数在取值区间内变化时, 弓网接触力的平均值、标准差、最大值和最小值相对于 DSA380 归算参数时的变化量 ΔF_m , $\Delta\sigma$, ΔF_{\max} 与 ΔF_{\min} 。根据工程设计的可行性, 确定 m_3 、 m_2 和 m_1 的取值范围分别为 5~11 kg, 5~20 kg 和 3~20 kg; k_3 , k_2 和 k_1 的取值范围分别为 4000~14 000 N/m, 8000~20 000 N/m 和 0~200 N/m; c_3 , c_2 和 c_1 的取值范围分别为 0~100 N·s/m, 0~50 N·s/m 和 10~240 N·s/m。

图 4 给出了三质量块参数变化对 ΔF_m 的影响。将每个归算参数 x_i 除以其取值上限 x_{\max} , 得到无量纲量 x_i/x_{\max} 。其中, 当改变下框架等效刚度 k_1 时, 接触力均值 F_m 的变化显著, 当 k_1 从 0 N/m 增大到 200 N/m 时, $\Delta F_m = -15.78 \text{ N}$ 。这表明, 如果 k_1 发生变化, 则需要调整受电弓的静态接触力, 以使得线路运行的接触力均值达到预期。当改变其他 8 个参数时,

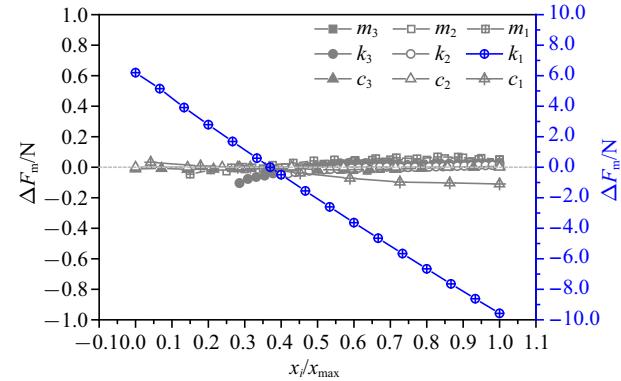
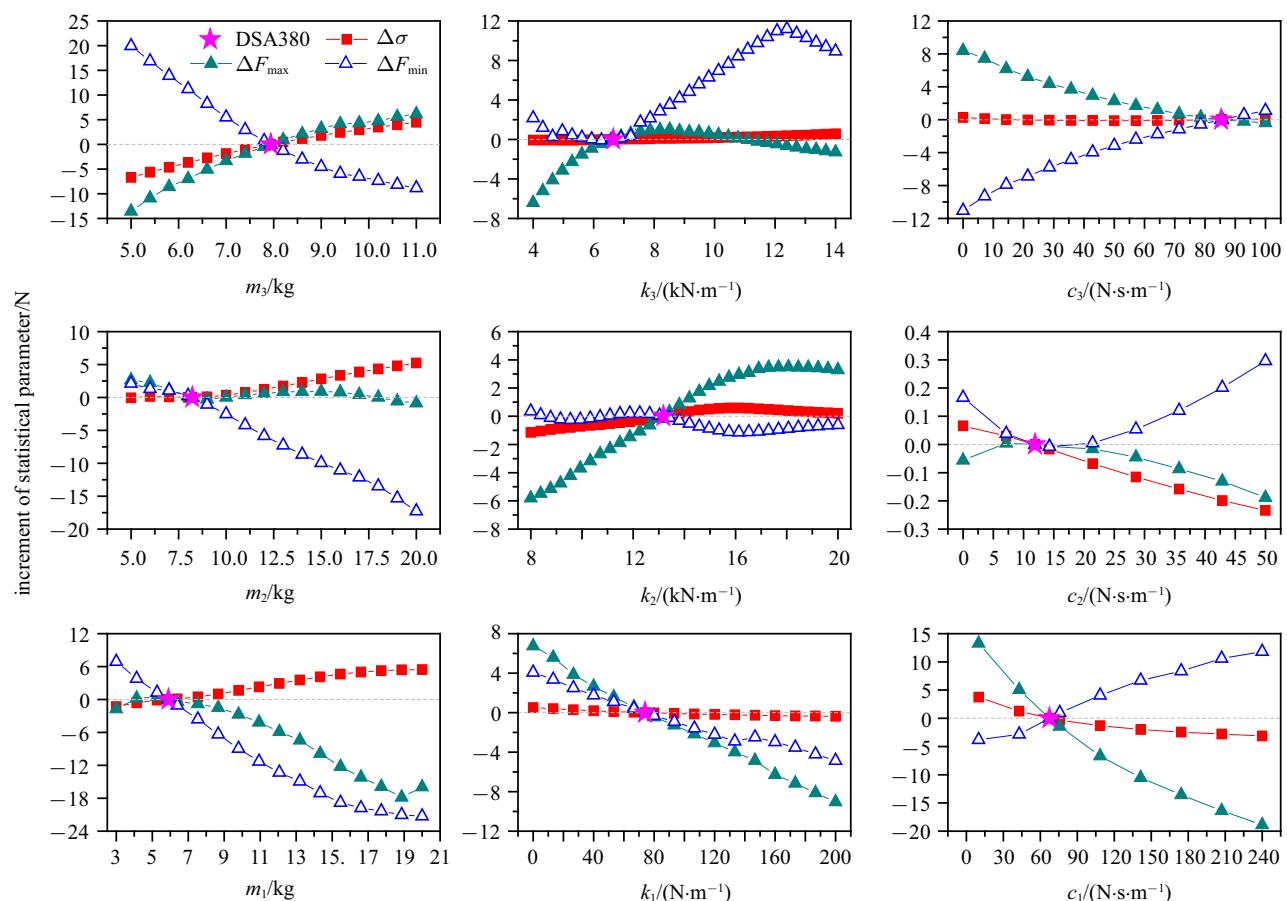


图 4 三质量块参数对 ΔF_m 的影响

Fig. 4 ΔF_m versus normalized three lumped mass parameters

F_m 几乎不变, 在这 8 个参数的整个参数变化区间内, $|\Delta F_m|$ 不高于 0.11 N, 即保证静态接触力相等, 可以保证运行过程中的 F_m 恒定。

图 5 给出了三质量块参数变化对 $\Delta\sigma$, ΔF_{\max} 与 ΔF_{\min} 的影响。以 DSA380 参数为基准, 关注引起

图 5 三质量块参数对 $\Delta\sigma$, ΔF_{\max} 与 ΔF_{\min} 的影响Fig. 5 $\Delta\sigma$, ΔF_{\max} and ΔF_{\min} versus normalized three lumped mass parameters

$\Delta\sigma < 0$ 的参数变化范围;若 $\Delta\sigma \approx 0$, 则考察 $\Delta F_{\max} < 0$ 且 $\Delta F_{\min} > 0$ 的参数区间。可以看出, 减小弓头或下框架等效质量、或弓头或上框架等效刚度, 或增大 3 个等效阻尼, 都可以有效提升弓网耦合性能, 即在降低接触力标准差 σ 的同时, 降低接触力最大值 F_{\max} 、且增大接触力最小值 F_{\min} 。然而, 对下框架等效刚度 k_1 和上框架等效质量 m_2 , 当其改变使得 $\Delta\sigma < 0$ 时, 却会引起 F_{\max} 增大或 F_{\min} 减小, 建议维持不变。

进一步地, 基于敏感度分析得到的单参数最优情形的 $\Delta\sigma$, ΔF_{\max} 和 ΔF_{\min} (图 6 和表 1), 给出 DSA380 型高速受电弓三质量块参数的敏感度评级。其中, m_3 敏感度评级为 1, 当 m_3 减至 5.00 kg 时, $\Delta\sigma = -6.70$ N, $\Delta F_{\max} = -13.54$ N, $\Delta F_{\min} = 19.94$ N。 c_1 敏感度评级为 2, 当 c_1 增至 240 N·s/m 时, $\Delta\sigma$ 为 m_3 情形的 1/2, 其 F_{\max} 降低更为显著, ΔF_{\max} 约为 m_3 情形的 1.5 倍。 m_1 , k_2 敏感度评级为 3, 相应参数变化会使得 $\Delta\sigma$ 下降 1.14 N 以上, 二者相比, m_1 减小侧重于增大 F_{\min} , 而 k_2 减小倾向于降低 F_{\max} 。 c_2 , k_3 , c_3 敏感度评级为 4, 它们引起

的接触力标准差改变量接近于 0。 k_1 和 m_2 敏感度评级为 5。

因此, 如果只进行 DSA380 型高速受电弓单参数优化, 建议参数为 $m_3 = 5.00$ kg, $m_2 = 8.22$ kg, $m_1 = 3.00$ kg, $k_3 = 4000$ N/m, $k_2 = 8000$ N/m, $k_1 = 74.0$ N/m, $c_3 = 100.00$ N·s/m, $c_2 = 50.00$ N·s/m 和 $c_1 = 240.00$ N·s/m。

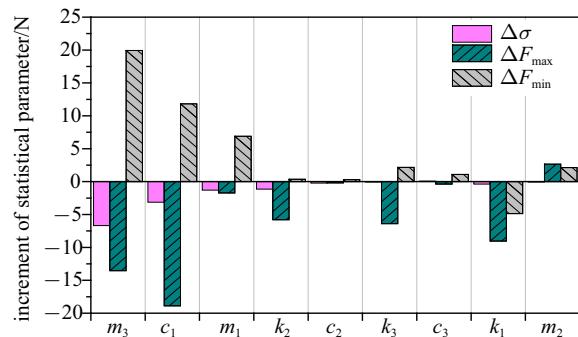
图 6 单参数变化取最优值时的 $\Delta\sigma$, ΔF_{\max} 与 ΔF_{\min} Fig. 6 Optimal values of $\Delta\sigma$, ΔF_{\max} and ΔF_{\min} under single parameter variation

表 1 三质量块参数敏度分析

Table 1 Sensitivity analysis of three lumped mass parameters

Item	$\Delta\sigma/N$	$\Delta F_{\max}/N$	$\Delta F_{\min}/N$	Suggest	Grade
$m_3 = 5.00 \text{ kg}$	-6.70	-13.54	19.94	decrease	1
$c_1 = 240.00 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$	-3.13	-18.88	11.82	increase	2
$m_1 = 3.00 \text{ kg}$	1.30	-1.73	6.90	decrease	3
$k_2 = 8000 \text{ N}/\text{m}$	-1.14	-5.80	0.35	decrease	3
$c_2 = 50.00 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$	-0.23	-0.19	0.30	increase	4
$k_3 = 4000 \text{ N}/\text{m}$	-0.07	-6.40	2.17	decrease	4
$c_3 = 100.00 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$	0.08	-0.38	1.09	increase	4
$k_1 = 200.0 \text{ N}/\text{m}$	-0.37	-9.04	-4.86	maintain	5
$m_2 = 5.00 \text{ kg}$	-0.06	2.65	2.12	maintain	5

3.2 弓头等效刚度和等效阻尼耦合作用

相比于框架归算参数, 改变弓头等效参数从工程设计角度更容易实现。但 3.1 节的敏度分析结果表明, 弓头等效刚度和等效阻尼的敏度评级较低, 在取值范围内单独改变 k_3 或 c_3 几乎对接触力标准差没有影响。

图 7(a) 为 k_3 和 c_3 联合变化情形的 $\Delta\sigma$ 云图。两条粗实线范围内均有 $\Delta\sigma < 0$, 比 DSA380 (图中符号 \star) 的接触力标准差低。当 $k_3 = 10575 \text{ N}/\text{m}$, $c_3 = 0.00 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ 时, $\Delta\sigma$ 取最小值 -1.58 N , σ 取最优值 33.87 N (图中符号 $\star\star$)。由此可见, 弓头等效刚度和等效阻尼双参数优化结果明显高于单参数变化情形。

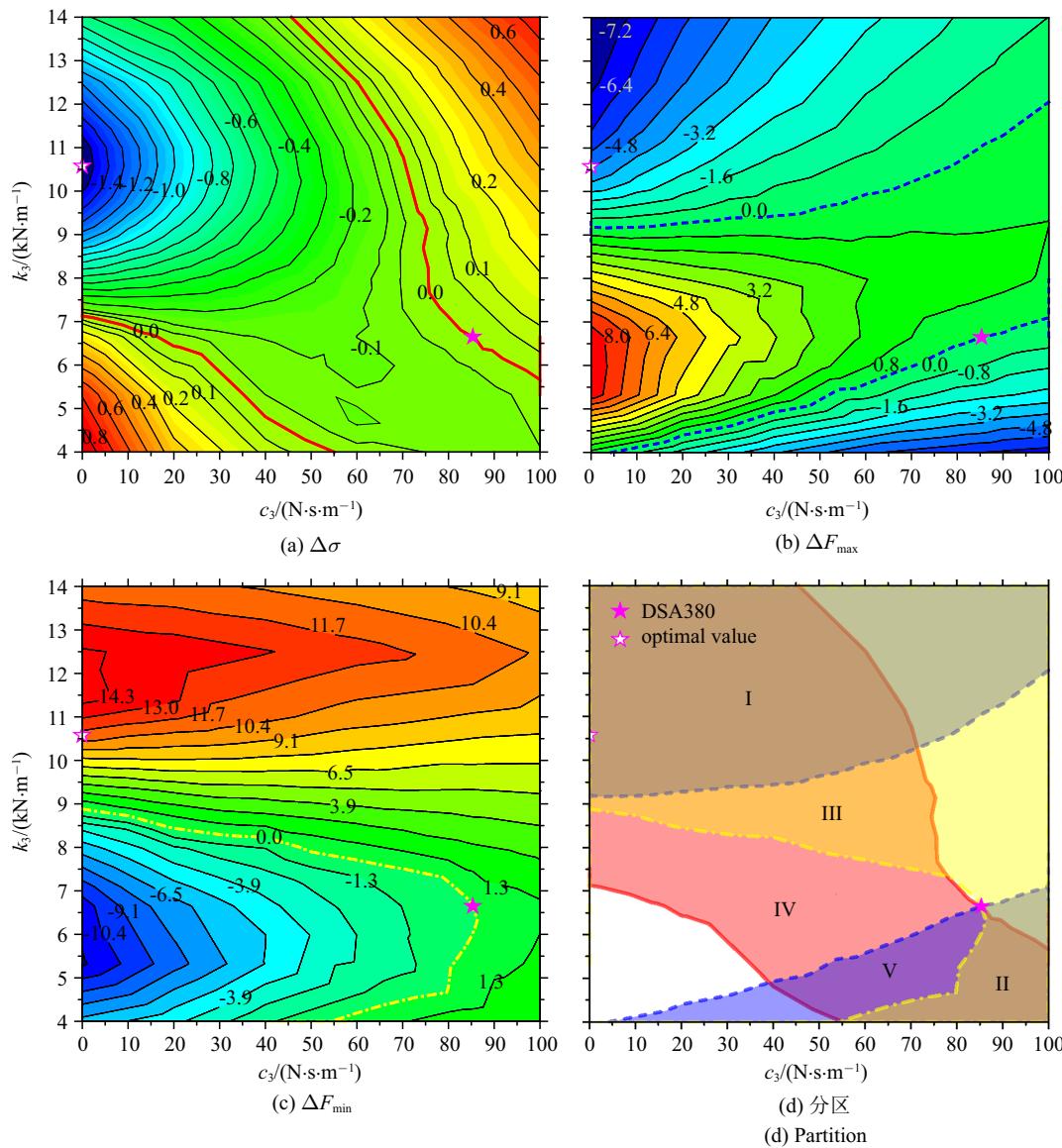


图 7 弓头双参数优化

Fig. 7 Dual-parameter optimization of pantograph head

此外, k_3 不同时, σ 随 c_3 的变化趋势不同。随着 c_3 减小, 当 k_3 较低, $4000 \text{ N/m} \leq k_3 < 7900 \text{ N/m}$ 时, σ 先减小再增大; 当 k_3 较高, $7900 \text{ N/m} \leq k_3 \leq 14000 \text{ N/m}$ 时, σ 单调降低。 c_3 不同时, σ 随 k_3 的变化趋势不同。随着 k_3 减小, 当 c_3 较低, $0 \text{ N}\cdot\text{s/m} \leq c_3 < 90 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 时, σ 先减小再增大; 当 c_3 较高, $90 \text{ N}\cdot\text{s/m} \leq c_3 \leq 100 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 时, σ 单调减小。

综合 $\Delta\sigma$ 、 ΔF_{\max} (图 7(b)) 和 ΔF_{\min} (图 7(c)) 云图, 得到图 7(d), 在优化区域弓头双参数变化时的弓网耦合性能分区。在区域 I-V, 均有 $\Delta\sigma < 0$ 。其中, 在区域 I 和 II 同时有 $\Delta F_{\max} < 0$ 、且 $\Delta F_{\min} > 0$, 为可行的参数优化区, 且 I 区比 II 区更优, 双参数最优值位于 I 区; 然而, 区域 III 的 $\Delta F_{\max} > 0$, 区域 IV 的 $\Delta F_{\max} > 0$, $\Delta F_{\min} < 0$, 区域 V 的 $\Delta F_{\min} < 0$, 不建议参数处于这 3 个区。

4 结 论

在保证静态接触力相同的条件下, 下框架等效刚度变化会对接触力均值有显著影响, 弓头等效质量等其他 8 个参数改变对接触力均值几乎没影响。因此, 在受电弓设计或使用中, 若下框架等效刚度变化较大, 则需要调整静态接触力经验值, 以使线路运行的接触力均值达到预期。

针对 DSA380 型高速受电弓在 1600 mm 工作高度下三质量块参数的敏感度分析结果表明, 减小弓头或下框架等效质量、或弓头或上框架等效刚度, 或增大 3 个等效阻尼, 都可以提升受流质量。其中, 弓头等效质量敏感度评级最高, 下框架等效阻尼次之, 下框架等效质量和上框架等效阻尼第三。

弓头等效刚度与等效阻尼双参数联合变化情形, 呈现与单参数变化时不同的参数优化方案, 建议同时减小弓头等效阻尼和增大弓头等效刚度, 使得联合参数位于 I 区。此外, 在不同的参数区间, 接触力标准差随弓头等效刚度或弓头等效阻尼的变化规律也会发生变化, 这可能是众多已有研究成果存在差异的原因。

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. 力学进展, 2015, 45(1): 217-460 (Yang Guowei, Wei Yujie, Zhao Guiling, et al. Research of key mechanics problems in high speed train. *Advances in Mechanics*, 2015, 45(1): 217-460 (in Chinese))
- 2 吴积钦. 受电弓与接触网系统. 成都: 西南交通大学出版社, 2010 (Wu Jiqin. Pantograph and Catenary System. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010 (in Chinese))
- 3 EN 50317, Railway applications - current collection systems - requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2012
- 4 EN 50318, Railway applications - current collection systems - validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2018
- 5 EN 50367, Railway applications - current collection systems - technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access). European Committee for Electrotechnical Standardization, 2012
- 6 EN 50119, Railway applications - fixed installations - electric traction overhead contact lines. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2009
- 7 Lee JH, Kim YG, Paik JS, et al. Performance evaluation and design optimization using differential evolutionary algorithm of the pantograph for the high-speed train. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2012, 26(10): 3253-3260
- 8 Pombo J, Ambrósio J. Influence of pantograph suspension characteristics on the contact quality with the catenary for high speed trains. *Computers & Structures*, 2012, 110-111: 32-42
- 9 Ambrósio J, Pombo J, Pereira M. Optimization of high-speed railway pantographs for improving pantograph-catenary contact. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2013, 3(1): 51-57
- 10 Kim JW, Yu SN. Design variable optimization for pantograph system of high-speed train using robust design technique. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2013, 14(2): 267-273
- 11 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. 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 of the pantograph. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(18): 134-139 (in Chinese))
- 12 Wang XY, Nian XH, Chu XY, et al. Research on dynamic performance and parameter optimization of the high-speed pantograph and catenary system//Liu Datong, Wang Shaojun eds. Machine Learning in PHM, Proc. of The 2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin), Harbin, 2017-07-09-12. New Jersey: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. 486-491 (in Chinese))
- 13 Zhou N, Zhang WH. Investigation on dynamic performance and parameter optimization design of pantograph and catenary system. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2011, 47(3): 288-295
- 14 Bobillot A, Massat JP, Mentel JP. Design of pantograph-catenary systems by simulation//In Proceedings of the 9th World Congress on Railway Research, The 9th World Congress on Railway Research, Lille, 2011-05-22-26
- 15 唐周林. 基于正交试验法的高铁弓网动态性能优化研究. [硕士论文]. 成都: 西南交通大学, 2017 (Tang Zhoulin. Study on the dynamics performance optimization of pantograph-catenary based on orthogonal experiment. [Master Thesis]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese))

- 16 周宁. 350km/h 及以上弓网动态行为研究. [博士论文]. 成都: 西南交通大学, 2013 (Zhou Ning. Investigation on dynamic behavior of pantograph and catenary system for the running Speed of 350 km/h or above. [PhD Thesis]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013 (in Chinese))
- 17 Eppinger SD, O'Connor DN, Seering WP, et al. Modeling and experimental evaluation of asymmetric pantograph dynamics. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 1988, 110(2): 168-174
- 18 Massat JP, Laurent C, Bianchi JP, et al. Pantograph catenary dynamic optimisation based on advanced multibody and finite element co-simulation tools. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(sup.1): 338-354
- 19 张卫华, 沈志云. 接触网动态研究. 铁道学报, 1991, 13(4): 26-33 (Zhang Weihua, Shen Zhiyun. Dynamic studies on catenary. *Journal of the China Railway Society*, 1991, 13(4): 26-33 (in Chinese))
- 20 吴天行. 接触网的有限元计算与分析. 铁道学报, 1996, 18(3): 44-49 (Wu Tianxing. Analysis and calculation of catenary by FEM. *Journal of the China Railway Society*, 1996, 18(3): 44-49 (in Chinese))
- 21 吴天行. 弓 - 网高速动态受流仿真研究. 铁道学报, 1996, 18(4): 55-61 (Wu Tianxing. Study of current collection from catenary-pantograph at high speed by simulation. *Journal of the China Railway Society*, 1996, 18(4): 55-61 (in Chinese))
- 22 Poetsch G, Evans J, Meisinger R, et al. Pantograph/catenary dynamics and control. *Vehicle System Dynamics*, 1997, 28(2-3): 159-195
- 23 李瑞平, 周宁, 梅桂明等. 初始平衡状态的接触网有限元模型. 西南交通大学学报, 2009, 44(5): 732-737 (Li Ruiping, Zhou Ning, Mei Guiming, et al. Finite element model for catenary in initial equilibrium state. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2009, 44(5): 732-737 (in Chinese))
- 24 Gilbert G, Davies HEH. Pantograph motion on a nearly uniform railway overhead line. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1966, 9(3): 485-492
- 25 Scott PR, Rothman M. Computer evaluation of overhead equipment for electric railroad traction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1974, IA-10(5): 573-580
- 26 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. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11): 2444-2451 (Guan Jinfa, Wu Jiqin. Buliding and confirmation for dynamic simulation model of pantograph and catenary. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(11): 2444-2451 (in Chinese))
- 27 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. 电气化铁道, 2017(5): 69-74 (Tang Zhoulin, Wu Jiqin, Shen Tao, et al. Study on the dynamics performance optimization of pantograph-catenary based on orthogonal experiment. *Electric Railway*, 2017(5): 69-74 (in Chinese))
- 28 Song Y, Liu ZG, Duan FC, et al. Wave propagation analysis in high-speed railway catenary system subjected to a moving pantograph. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 59: 20-38
- 29 Yong HC. Numerical simulation of the dynamic responses of railway overhead contact lines to a moving pantograph, considering a nonlinear dropper. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 315(3): 433-454
- 30 EN 50318. Railway applications - current collection systems - validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2002
- 31 Gregori S, Tur M, Nadal E, et al. An approach to geometric optimisation of railway catenaries. *Vehicle System Dynamics*, 2018, 56(8): 1162-1186
- 32 周宁, 李瑞平, 张卫华. 基于负弛度法的接触网建模与仿真. 交通运输工程学报, 2009, 9(4): 28-32 (Zhou Ning, Li Ruiping, Zhang Weihua. Modeling and simulation of catenary based on negative sag method. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, 9(4): 28-32 (in Chinese))