

# 基于 NURBS(非均匀有理 B 样条)的第三轨端部弯头优化\*

阮杰<sup>1</sup> 钟卓林<sup>1</sup> 王柄钦<sup>1</sup> 李红梅<sup>2</sup> 徐鸿燕<sup>2</sup> 阎晓晖<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 430070, 武汉; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司电化院, 430063, 武汉; 3. 武汉地铁运营有限公司, 430035, 武汉)

**摘要** [目的] 为改善靴轨系统端部弯头的碰撞性能、提升受流质量,有必要开展基于 NURBS(非均匀有理 B 样条)的第三轨端部弯头优化研究。[方法] 以武汉某地铁线路的端部弯头为例,基于参数化设计及多目标优化理念对其进行优化设计。根据列车运行速度为 120 km/h 工况下的靴轨系统端部弯头碰撞仿真,确定靴轨系统高速工况受流质量评价指标;通过 NURBS 建立端部弯头截面拉伸曲线;通过 ANSYS 参数化设计语言,建立一种曲线型端部弯头有限元模型;以截面拉伸曲线的控制点坐标为设计变量,通过主效应分析选取优化目标,明确设计变量的取值范围;基于 NSGA-II(非支配排序遗传算法 II)建立曲线型端部弯头的多目标优化模型,并通过非支配排序法与最小最大后悔值法选取最优解。[结果及结论] 根据主效应分析结果,选取入弯碰撞力、出弯碰撞力、总离线时间、最大冲击加速度为优化目标,单次最大离线时间、碰撞次数为约束条件。优化后,靴轨系统的端部弯头受流质量有所改善,当列车运行速度为 120 km/h 时,总离线时间和单次最大离线时间优化效果显著,分别降低了 80.77% 和 89.96%;入弯碰撞力与出弯碰撞力分别降低了 32.26% 和 44.03%;当列车运行速度为 40 km/h、80 km/h 时,各项指标均降低了 20% 以上。

**关键词** 地铁;端部弯头;非均匀有理 B 样条;多目标优化  
**中图分类号** U264.34

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.037

## Optimization of Third Rail End Elbow Based on NURBS

RUAN Jie<sup>1</sup>, ZHONG Zhuolin<sup>1</sup>, WANG Bingqin<sup>1</sup>, LI Hongmei<sup>2</sup>, XU Hongyan<sup>2</sup>, YAN Xiaohui<sup>3</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, 430070, Wuhan, China; 2. Electrification Design and Research Institute, China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China; 3. Wuhan Metro Operation Co., Ltd., 430035, Wuhan, China)

\* 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(N2019G048)

**Abstract** [Objective] In order to improve the collision performance of the end elbow of the shoe-rail system and enhance the current collection quality, it is necessary to carry out the optimization research on the third-rail end elbow based on NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline). [Method] Taking the end elbow of a certain metro line in Wuhan as example, an optimization design for the end elbow is carried out based on the concepts of parametric design and multi-objective optimization. According to the collision simulation of the end elbow of the shoe-rail system under the working condition of 120 km/h train running speed, the evaluation indicators of the current collection quality of the shoe-rail system under high speed working conditions are determined. The cross-section stretching curve of the end elbow is established through NURBS. A finite-element model of the curved end elbow is established by using the ANSYS Parametric Design Language. Taking the control point coordinates of the cross-section stretching curve as design variables, the optimization objectives are selected through main effect analysis, and the value range of the design variables is clarified. Based on NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), a multi-objective optimization model of the curved end elbow is established, and the optimal solution is selected through the non-dominated sorting method and the min-max regret value method. [Result & Conclusion] According to the results of the main effect analysis, the bending-in collision force, bending-out collision force, total offline time, and the maximum impact acceleration are selected as the optimization objectives, and the maximum single offline time and the number of collisions are taken as the constraint conditions. After optimization, the current collection quality of the end elbow of the shoe-rail system is improved. When the train running speed is 120 km/h, the total offline time and the maximum single offline time are significantly optimized, with a reduction of 80.77% and 89.96% respectively.

The corner entry impact force and the corner exit impact force are reduced by 32.26% and 44.03% respectively. When the train running speeds are 40 km/h and 80 km/h, all indicators are reduced by more than 20%.

**Key words** metro; end elbow; NURBS; multi-objective optimization

## 0 引言

目前,靴轨系统(受流器与第三轨系统)以其易维护、成本低等特点,在城市轨道交通领域获得了广泛应用。针对靴轨系统受流质量的提升问题,已有学者进行了大量研究。文献[1]研究了在第三轨振动特性下造成的结构损坏,对第三轨下垂及靴轨动态特性的影响。文献[2]基于 ANSYS 与 SIMPACK 软件建立了受电弓-刚性接触轨耦合模型,通过研究不同参数对耦合模型的影响规律,提出一种性能更优的导电轨悬挂装置形式。文献[3-4]针对第三轨膨胀接头与不平顺问题进行了仿真研究,提出了第三轨跨距、不平顺高度差的优化方向。文献[5]基于 MATLAB/Simulink 软件,建立了靴轨系统端部弯头仿真模型,研究了受流器与第三轨相关参数对受流质量的影响。文献[6]基于 NURBS(非均匀有理 B 样条)设计了 3 种形式的靴轨系统端部弯头,并结合 ADAMS 软件优化端部弯头的几何形状。

目前,为便于制造,靴轨系统的端部弯头采用简单的斜坡形式,但在高速工况下,其靴轨碰撞性能难以满足要求。针对端部弯头的优化主要从降低坡度、提升变轨点平滑性角度出发,但这些优化措施将增加端部弯头的布置空间。

本文以武汉某地铁线路的靴轨系统端部弯头为例,基于 NURBS 建立一种参数化曲线型端部弯头,采用多个碰撞性能评价指标对其进行多目标优化,获得高速工况下优化效果均衡的靴轨系统端部弯头结构形式。本文研究可为靴轨系统端部弯头的优化提供借鉴。

## 1 靴轨系统端部弯头耦合模型

### 1.1 靴轨系统耦合模型建立及验证

根据文献[7]中的标定方法获取受流器各阶等效参数,为模拟靴轨接触,建立考虑滑靴实际形貌的受流器集中质量模型。参照靴轨系统端部弯头尺寸建立有限元模型,通过弹簧、质量单元模拟绝

缘支撑结构。通过罚函数法处理靴轨接触。基于武汉某地铁线路的实际工况,采用 APDL(ANSYS 参数化设计语言)建立坡度为 1:50 的靴轨系统端部弯头耦合模型,如图 1 所示。

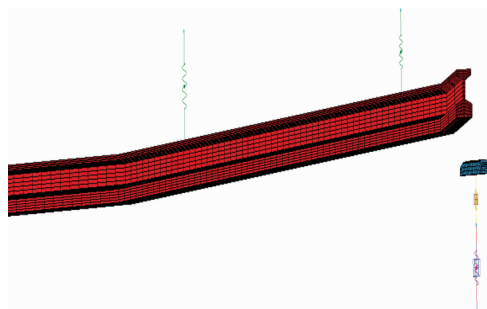


图 1 靴轨系统端部弯头耦合模型

Fig. 1 Coupled model of the end elbow of the shoe-rail system

基于靴轨系统端部弯头耦合模型,设置仿真初始条件为:列车运行速度为 30 km/h、靴轨静态接触压力为 135 N。根据线路实测获取的靴轨系统动态接触力数据,对比靴轨系统动态接触力仿真与实测数据,结果如图 2 所示。选取最大碰撞力、离线时间为验证指标,相同工况下,动态接触力指标统计结果如表 1 所示。

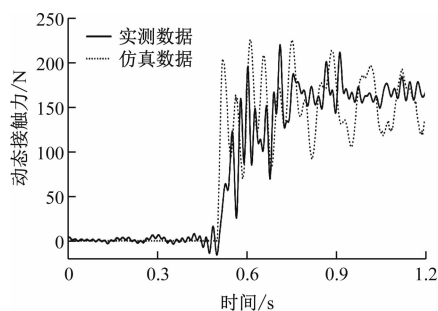


图 2 靴轨系统动态接触力仿真与实测数据对比

Fig. 2 Comparison between simulation and measured data of the dynamic contact force of the shoe-rail system

表 1 相同工况下动态接触力指标统计

Tab. 1 Statistics of dynamic contact force indicators under the same working conditions

数据	最大碰撞力/N	离线时间/ms
实测	219.94	0
仿真	225.44	0

注:受流器与第三轨(包含端部弯头)分离时即为离线状态,离线状态总时间即为离线时间;仿真值相对于实测值的误差为 2.5%。

由图 2 可知:受流器滑入端部弯头前,动态接触力仿真结果为 0;但在实际测试中,由于受流器惯性

振动导致动态接触力有所波动;受流器与端部弯头碰撞后,动态接触力升至峰值,随后开始衰减并趋于稳定。由表 1 可知:仿真数据与实测数据的最大碰撞力仅相差了 2.5%。由此可知,相同工况下,靴轨系统端部弯头耦合模型能较好地反映实际碰撞特性,可用于端部弯头的结构优化。

## 1.2 靴轨碰撞特性

基于靴轨系统端部弯头耦合模型,设置仿真初始条件为:列车运行速度为 120 km/h、静态接触压力为 135 N。靴轨系统端部弯头碰撞仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知:当受流器滑入端部弯头时产生了较大的碰撞力,受流器与端部弯头多次碰撞,发生离线现象。

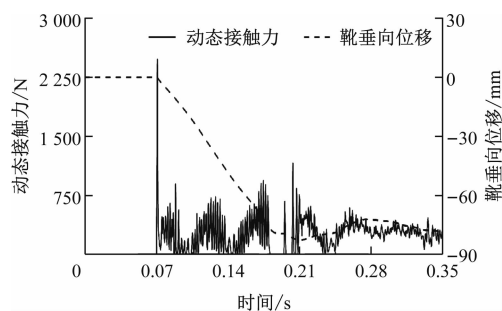


图 3 靴轨系统端部弯头碰撞仿真结果

Fig. 3 Collision simulation results of the end elbow of the shoe-rail system

由于当前端部弯头轨面曲线在变轨点处的曲率半径不连续,受流器在该位置会产生较大的碰撞与离线。为准确描述靴轨碰撞特性,引入评价指标:①入弯碰撞力  $F_{in}$ ——受流器滑入端部弯头时的最大碰撞力;②出弯碰撞力  $F_{out}$ ——受流器离开变轨点时的最大碰撞力;③总离线时间  $t_{off}$ ——靴轨分离状态总时间;④最大冲击加速度  $a_{max}$ ——靴轨碰撞过程中的最大垂向加速度;⑤单次最大离线时间  $t_{offsin}$ ——靴轨单次分离状态中最长持续时间;⑥碰撞次数  $M$ ——滑靴与轨面碰撞次数。

## 2 构建曲线型端部弯头参数化模型

### 2.1 NURBS 设计方法

1991 年,国际标准化组织将 NURBS 作为定义工业产品几何形状的唯一数学方法。NURBS 可通过较少的控制点创建完整的曲线。一条  $k$  次 NURBS 可以表示为一个分段有理多项式函数  $p(u)$ ,其定义为:

$$p(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}, \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (1)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u), \quad k \geq 1 \quad (2)$$

式中:

$u_i$ ——第  $i$  个节点矢量;

$d_i$ ——曲线第  $i$  个控制点坐标;

$\omega_i$ ——曲线第  $i$  个控制点权因子;

$N_{i,k}(u)$ ——基函数;

$u$ ——取值于节点矢量,当  $u$  取遍节点矢量中所有值时,即可形成曲线。

NURBS 可通过改变控制点或权因子生成一族曲线,可用于参数化建模与数据传递,适用于端部弯头设计,故本文采用 NURBS 构建端部弯头截面拉伸曲线,并完成实体建模。

### 2.2 建立曲线型端部弯头模型

利用 MATLAB 软件编写曲线生成脚本,以控制点为可变输入,各控制点权因子为定值,实现 3 次 NURBS 的程序化生成,通过 APDL 读入曲线数据,并完成曲线型端部弯头建模工作。

结合 1:50 端部弯头尺寸,忽略最末端预弯段,以端部弯头变轨点、倾斜轨上端点为固定边界点,设曲线凹凸性过渡点为控制点 2。经控制点 2 所作的曲线切线与经变轨点所作的曲线切线的交点设为控制点 1,与经倾斜轨上端点所作的曲线切线的交点设为控制点 3。

根据确定的 3 个控制点,生成端部弯头曲线示意图如图 4 所示,所建立的端部弯头有限元模型如图 5 所示。

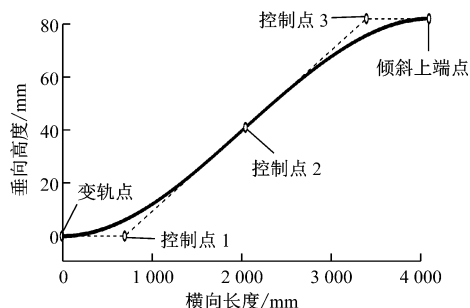


图 4 端部弯头曲线

Fig. 4 End elbow curve

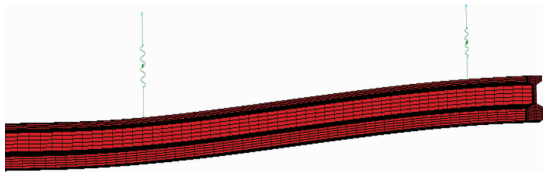


图5 曲线型端部弯头有限元模型

Fig.5 Finite element model of curved end elbow

分析曲线型端部弯头仿真结果与原始 1:50 端

部弯头仿真结果,当列车运行速度为 120 km/h、静态接触压力为 135 N 时,两者的仿真结果评价指标对比如表 2 所示。由表 2 可知:该曲线型端部弯头工况下的靴轨碰撞力、离线时间均获得了改善,但碰撞次数和最大冲击加速度有所增加。试算结果表明,部分评价指标有减小的趋势,因此可对该型曲线型端部弯头进行进一步优化。

表2 原始端部弯头与曲线型端部弯头试算结果评价指标对比

Tab.2 Comparison of evaluation indicators for the trial calculation results of the original end elbow and the curved end elbow

项目	$F_{in}/N$	$F_{out}/N$	$t_{off}/ms$	$a_{max}/(m/s^2)$	$t_{offsin}/ms$	$M/次$
原始弯头	2 476.58	1 158.00	23.14	1 284.70	13.35	9
曲线弯头	2 082.95	714.22	14.68	1 410.40	3.12	17
增幅/%	-15.89	-38.32	-36.56	9.78	-76.63	88.89

3 构建端部弯头曲线参数多目标优化模型

3.1 主效应分析

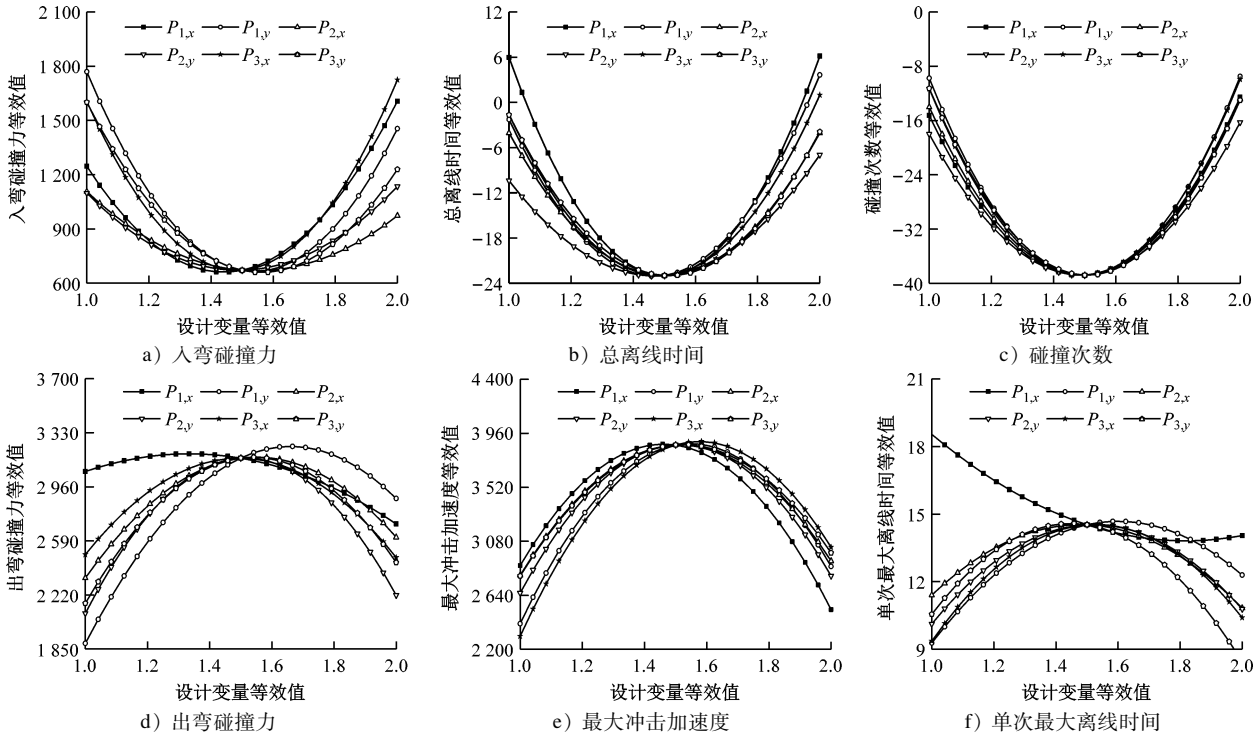
由于控制点对评价指标的影响规律未知,各评价指标间的制约关系尚不明确,因此需通过主效应分析筛选控制点设计范围,选取合适的评价指标作为优化目标。以 3 个控制点的横、纵坐标为设计变量,各控制点横、纵坐标取值范围如表 3 所示。采用最优拉丁超立方方法生成设计样本,并进行仿真。设

计变量对各评价指标的主效应分析如图 6 所示。

表3 各控制点横、纵坐标取值范围

Tab.3 Value ranges of the horizontal and vertical coordinate for each control point

控制点	横坐标/mm	纵坐标/mm
控制点 1	(400,1 000)	(0,10)
控制点 2	(1 750,2 350)	(36,46)
控制点 3	(3 100,3 700)	(72,82)



注: $P_{1,x}$ 、 $P_{2,x}$ 、 $P_{3,x}$ 为各控制点横坐标; $P_{1,y}$ 、 $P_{2,y}$ 、 $P_{3,y}$ 为各控制点纵坐标;图中横轴为控制点横纵坐标等效值,纵轴为评价指标等效值,均为量纲为一的量;总离线时间等效值及碰撞次数等效值为负表示设计量取值变化对两者存在负效应。

图6 设计变量对评价指标的主效应分析

Fig.6 Main effect analysis of design variables on evaluation indicators



各设计变量对评价指标的影响是非线性的。设计变量取值的增加使入弯碰撞力、总离线时间、碰撞次数先减后增;除控制点 1 的横坐标外,其余设计变量取值的增加使出弯碰撞力、最大加速度、单次最大离线时间先增后减。评价指标随设计变量的变化趋势说明了部分评价指标间存在制约关系。

靴轨端部弯头碰撞产生较大的瞬态冲击和碰撞力,导致受流器产生离线电弧,离线较大时可能损坏受流器。为降低碰撞冲击,且保证优化目标间存在制约关系、避免后续优化陷入局部最优,根据主效应分析结果,选取入弯碰撞力、出弯碰撞力、总离线时间、最大冲击加速度作为优化目标,选取单次最大离线时间、碰撞次数作为约束条件。

### 3.2 建立端部弯头曲线参数优化模型

端部弯头曲线的参数优化是多约束、多目标的优化问题,优化目标之间存在制约关系,难以共同达到最优。由于设计变量是非连续的,在优化求解过程中需确保足够的搜索范围和精度。NSGA-II (非支配排序遗传算法 II) 是一种基于分级的快速非支配解排序方法,能够降低计算复杂度,同时引入拥挤度和精英保留机制,以保留优良个体,并提升进化水平<sup>[8]</sup>。因此,本文采用 NSGA-II 进行曲线型端部弯头的参数优化工作。

#### 3.2.1 设计变量

以控制点 1、控制点 2、控制点 3 的横、纵坐标作为设计变量  $P$ ,可以表示为:

$$P = \{P_{1,x}, P_{1,y}, P_{2,x}, P_{2,y}, P_{3,x}, P_{3,y}\} \quad (3)$$

基于主效应分析中获得的各设计变量对评价指标的影响规律,对设计变量的取值范围进行适当缩减。缩减后的各设计变量取值范围如表 4 所示。

表 4 缩减后各设计变量的取值范围

Tab.4 Value ranges of each design variable after reduction

设计变量	取值范围/mm
$P_{1,x}$	(600, 1 000)
$P_{2,x}$	(1 850, 2 250)
$P_{3,x}$	(3 200, 3 600)
$P_{1,y}$	(0, 6)
$P_{2,y}$	(38, 44)
$P_{3,y}$	(75, 82)

#### 3.2.2 优化目标

根据主效应分析选取入弯碰撞力、出弯碰撞力、总离线时间和最大冲击加速度为优化目标,则

该优化问题可进行如下定义:

$$\min G(P) = \min \begin{cases} F_{in}(P) \\ F_{out}(P) \\ t_{off}(P) \\ a_{max}(P) \end{cases} \quad (4)$$

#### 3.2.3 约束条件

参照弓网系统一次离线持续时间的等级划分标准,制定靴轨系统单次最大离线时间等级标准如表 5 所示<sup>[9]</sup>。

表 5 靴轨系统单次最大离线时间等级标准<sup>[9]</sup>

Tab.5 Rating criteria for the maximum single offline time of the shoe-rail system<sup>[9]</sup>

一次离线持续时间/ms	等级	产生原因
< 10	小离线	滑板微振动与接触磨损
10 ~ 100	中离线	接触轨面高度变化
> 100	大离线	滑板与接触轨分离或承受硬点冲击

对靴轨系统单次最大离线时间和碰撞次数作如下约束:

$$\begin{cases} t_{offsin} < 15 \text{ ms} \\ M < 20 \text{ 次} \end{cases} \quad (5)$$

### 3.3 端部弯头曲线参数优化

采用 MATLAB 软件编写 NSGA-II 主控程序,联合 ANSYS 软件进行端部弯头模型优化。输入设计变量至 MATLAB 软件,生成弯头曲线并输出曲线数据点文本文件;由 ANSYS 软件读取文本文件,并完成靴轨系统的建模与仿真;由 LS-Prepost 软件处理仿真结果并输出信息存储文件;由 MATLAB 软件读入信息存储文件、计算优化目标和约束条件,并递交至 NSGA-II 主控程序,实现自动循环与迭代寻优功能。参数优化流程示意图如图 7 所示。

## 4 曲线优化结果分析

### 4.1 优化过程

为加快计算收敛,设置 NSGA-II 算法参数为:种群数为 4,迭代次数为 30 次,总计 120 组计算;交叉概率为 0.9,变异概率为 0.08,交叉分布指数为 10,变异分布指数为 20。优化过程中,设计变量及优化目标的进化趋势如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可知:整个迭代过程中,各设计变量均实现了收敛;除  $P_{1,x}$ 、 $P_{2,y}$  在小范围内上下波动外,其余设计变量几乎收敛至一条直线,说明通过 NSGA-II 算法能够获得端部弯头曲线的合理优化结果。

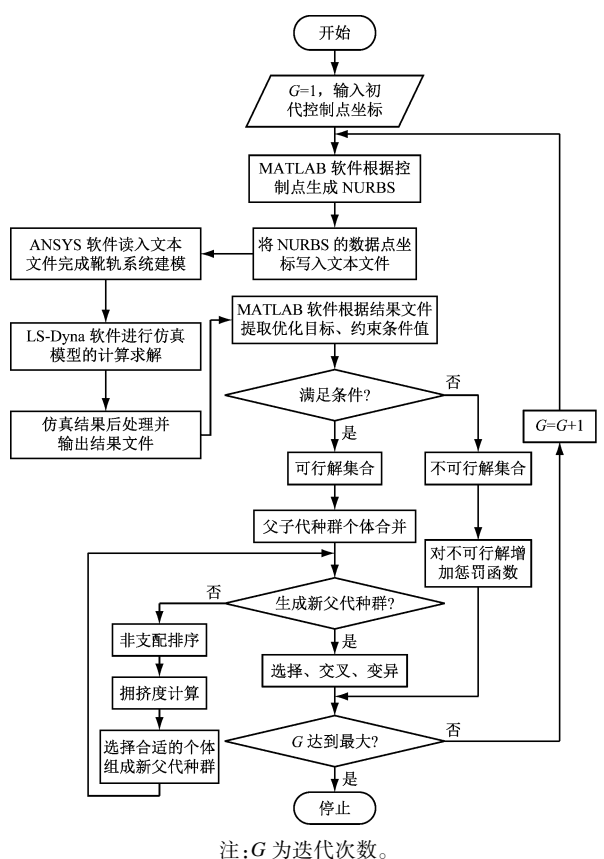
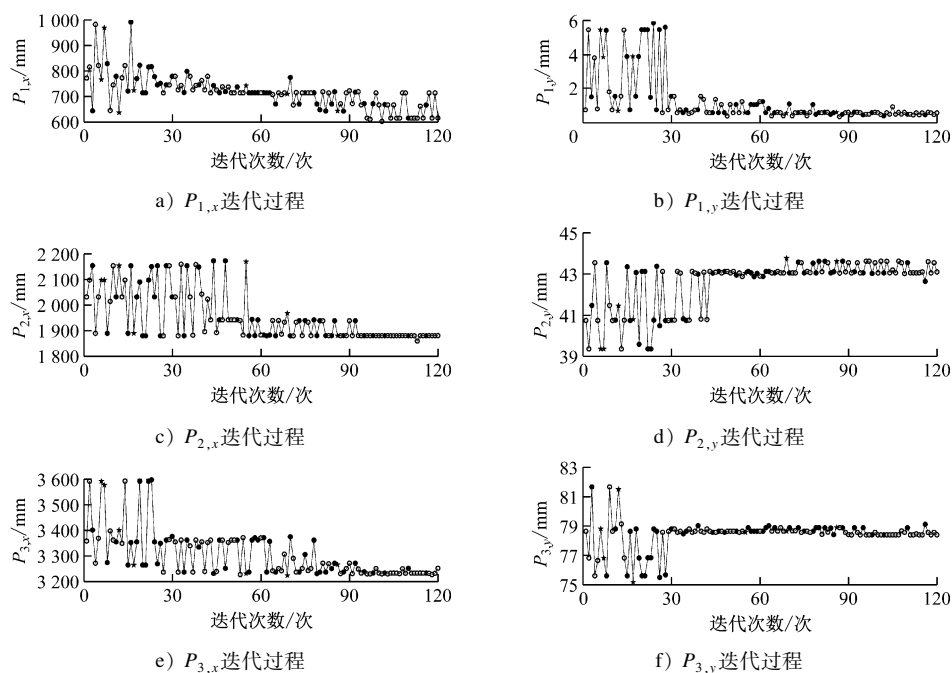


图7 参数优化流程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of parameter optimization work flow



注: ● 为可行解, ○ 为 Pareto 解, ★ 为不可行解; 余类同。

图8 设计变量进化趋势

Fig. 8 Evolutionary trend of design variables

由图9可知:由于优化前已缩减设计变量的取值范围以便于更快寻优,因此整个迭代过程中,各优化目标值均在一定范围内稳定波动。

## 4.2 最优解选取原理

多目标优化问题获得的解是由众多 Pareto 解组成的最优解集,当前常用的最优解选取方法为按需选取,或通过分配目标权重值选取,均存在一定的主观性。本文结合非支配排序法与最小最大后悔值法选取最优解。

### 4.2.1 非支配排序法

非支配排序法通过解的支配关系,对最优解集中的各个解进行支配层排序,支配层越低的解,越靠近 Pareto 最优前沿。

若存在两组可行解  $X_1$  与  $X_2$ , 二者的目标函数分别为  $G_n(X_1)$ 、 $G_n(X_2)$  ( $n=1,2,\dots,m$ ), 假定目标函数均以取得最小值为优化目标。

当  $X_1$  对  $X_2$  为支配关系时,第  $\alpha$  个目标函数及第  $\beta$  个目标函数满足如下关系式:

$$\begin{cases} \forall \alpha \in \{1,2,\dots,m\}, G_\alpha(X_1) \leq G_\alpha(X_2) \\ \exists \beta \in \{1,2,\dots,m\}, G_\beta(X_1) < G_\beta(X_2) \end{cases} \quad (6)$$

当  $X_1$  对  $X_2$  为非支配关系时,满足如下关系式:

$$\begin{cases} \exists \alpha \in \{1,2,\dots,m\}, G_\alpha(X_1) < G_\alpha(X_2) \\ \exists \beta \in \{1,2,\dots,m\}, G_\beta(X_1) > G_\beta(X_2) \end{cases} \quad (7)$$

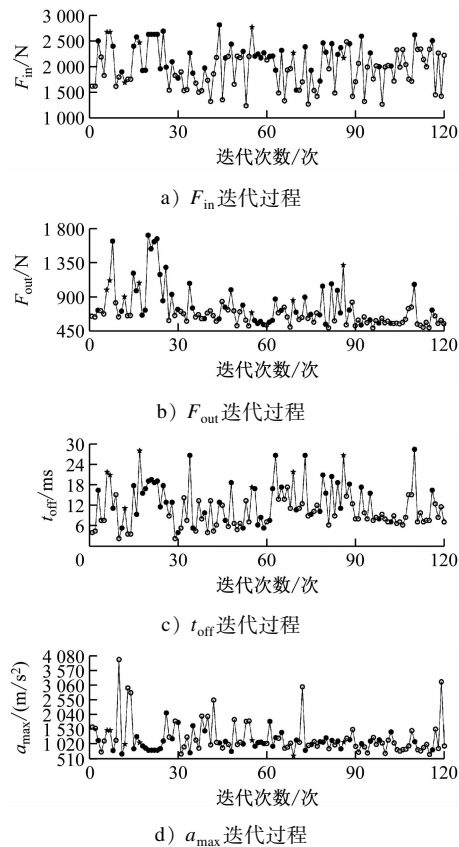


图9 优化目标进化趋势

Fig. 9 Evolutionary trend of optimization objectives

#### 4.2.2 最小最大后悔值法

最小最大后悔值法的原理是计算 Pareto 解各目标值与单目标最优值的差值,即后悔值;获取每组 Pareto 解的最大后悔值,选取最大后悔值最小的一组 Pareto 解作为最优解。

假设最优解集中解的个数为  $s$ 、目标数为  $r$ ,则 Pareto 解对应的目标值为  $G_j(l)$  ( $j=1,2,\dots,r;l=1,2,\dots,s$ )。

单目标最优值为  $G_{j,best}$  ( $j=1,2,\dots,r$ ),则 Pareto 解的最大后悔值  $Re(l)$  为:

$$Re(l) = \max |G_{j,best} - G_j(l)| \quad (8)$$

选择最大后悔值最小的一组 Pareto 解  $l^*$  作为该  $r$  维目标优化问题的最优解,该组解满足如下关系式:

$$Re(l^*) = \min \{ \max |G_{j,best} - G_j(l)| \} \quad (9)$$

通过上述分析,最优解选取流程为:对 114 组可行解进行非支配排序,获取支配层 1 的所有 Pareto 解,共 35 组;为避免单组 Pareto 解中存在过大或过小的目标值影响后续筛选,对支配层 1 的 Pareto 解各目标值进行量纲一化处理;计算支配层 1 中 35 组

Pareto 解的最大后悔值,选取最大后悔值最小的一组解作为最优解。

根据最优解选取流程,选取迭代过程中第 36 代解为最优解,各设计变量最优解取值如表 6 所示。

表6 各设计变量最优解取值

Tab. 6 Values of the optimal solutions for each design variable

设计变量	最优解/mm
$P_{1,x}$	778.6
$P_{2,x}$	2 031.6
$P_{3,x}$	3 339.8
$P_{1,y}$	0.5
$P_{2,y}$	40.8
$P_{3,y}$	78.8

#### 4.3 优化前后靴轨系统端部弯头工况动态特性对比

为对比优化后的曲线型端部弯头与初始 1:50 端部弯头的靴轨碰撞性能,分别进行列车运行速度为 40 km/h、80 km/h、120 km/h 工况仿真,靴轨静态接触压力为 135 N。各速度工况下,优化前后的靴轨动态接触力和垂向加速度如图 10 所示。各速度工况下,优化前后的评价指标如表 7 所示。

由图 10 可知:优化后,端部弯头靴轨受流质量有所提升,受流器滑入端部弯头时的最大碰撞力有所减小,滑至变轨点处的最大碰撞力和离线情况获得了改善,滑入平直轨段后的动态接触力更平缓,垂向加速度振幅减弱。

由表 7 可知:当列车运行速度为 120 km/h 时,总离线时间与单次最大离线时间优化效果最为显著,分别比优化前降低了 80.77%、89.96%;当列车运行速度为 40 km/h、80 km/h 时,各评价指标均比优化前降低了 20% 以上。由此可知,在现有列车运行速度范围内,优化后的端部弯头靴轨碰撞特性有所改善。

#### 5 结语

1) 建立了靴轨系统端部弯头耦合模型,并根据列车运行速度为 120 km/h 的仿真结果分析了高速工况下,端部弯头的靴轨碰撞特性。

2) 基于 NURBS 构建了降低受流器滑入坡度、提升变轨点平滑性的曲线型端部弯头,并进行列车运行速度为 120 km/h 的仿真试算。试算结果表明,该曲线型端部弯头能够改善受流质量。

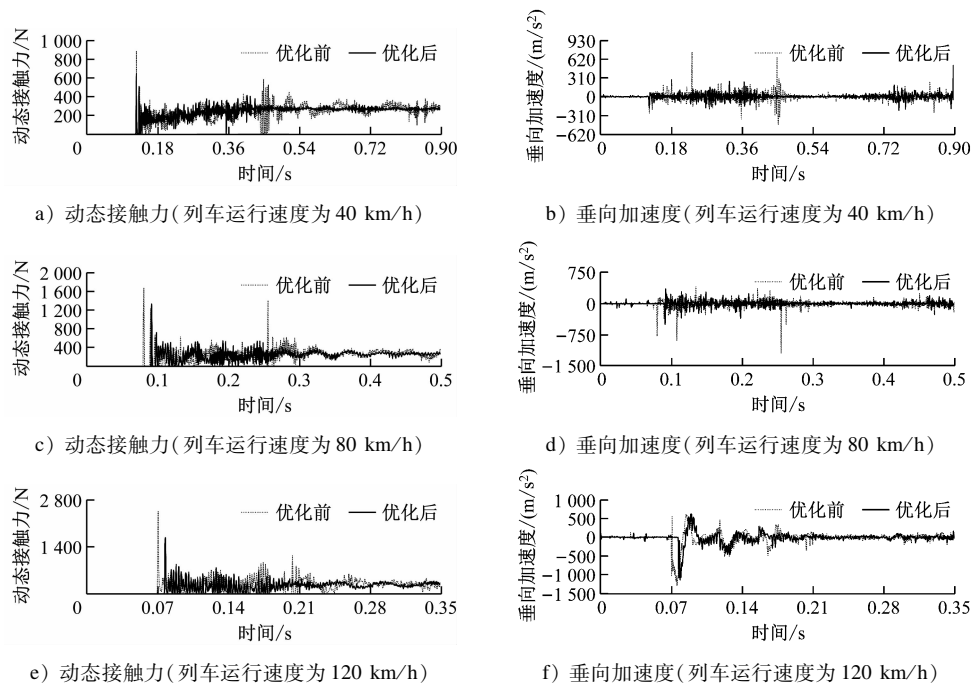


图 10 各速度工况下优化前后的靴轨动态接触力和垂向加速度

Fig. 10 Dynamic contact force and vertical acceleration of the shoe-rail before and after optimization under different speeds

表 7 各速度工况下优化前后的评价指标

Tab.7 Evaluation indicators before and after optimization under different speeds

列车运行速度/( km/h)	优化情况	$F_{in}/N$	$F_{out}/N$	$t_{off}/ms$	$a_{max}/(m/s^2)$	$t_{offsin}/ms$	$M/次$
40	优化前	884.89	588.16	4.69	736.82	3.52	7
	优化后	644.32	414.04	2.34	515.18	2.34	3
80	优化前	1 675.61	1 405.35	28.00	1 196.50	8.27	11
	优化后	1 329.59	542.58	6.36	500.15	3.18	7
120	优化前	2 476.58	1 158.00	23.14	1 284.70	13.35	9
	优化后	1 677.74	648.14	4.45	1 131.20	1.34	15

3) 通过主效应分析确定了端部弯头多目标优化中的设计变量取值范围、优化目标及约束条件。结合非支配排序与最小最大后悔值法,选取端部弯头最优解。该曲线型端部弯头能够显著改善靴轨碰撞特性。

参考文献

[1] PAUDEL M, LIM L J, YAP F F, et al. Vibration analysis of the third rail structure of a mass rapid transit system with structural defects[J]. Applied Sciences, 2021, 11(18): 8410.

[2] VERA C, SUAREZ B, PAULIN J, et al. Simulation model for the study of overhead rail current collector systems dynamics, focused on the design of a new conductor rail[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(8): 595.

[3] 张鹏飞. 中低速磁浮列车靴轨系统优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.

ZHANG Pengfei. Optimization of shoe-rail system of medium and low speed maglev train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[4] 魏国梁. 地铁车辆第三轨/受流器系统动态响应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.

WEI Guoliang. Research on the dynamic response of the third rail/collector shoe system of metro vehicles[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.

[5] 王文娇. 受流器与接触轨端部弯头接触特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(1): 34.

WANG Wenjiao. Analysis on contact characteristics between collector and third rail end[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2014, 31(1): 34.

[6] 郎鹏. 受流器/三轨弯头碰撞动力学研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

(下转第 231 页)



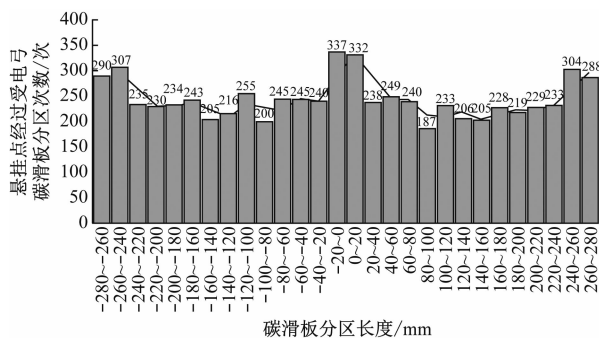


图8 方案6悬挂点经过碳滑板不同位置次数统计结果

Fig. 8 Statistical results of times for the suspension points passing through different positions of the carbon slide plate in Scheme 6

对图5和图8对比分析可知:当锚段关节悬挂点于线路同侧布置时,通过合理控制关节间距和关节处悬挂点拉出值的大小,能够确保相邻两锚段A'-A内悬挂点拉出值扫动频率一致,可以使悬挂点经过受电弓碳滑板不同位置的分布更均匀,使碳滑板磨耗均匀度更好,若配合人工对碳滑板进行打磨维护,则能有效提高碳滑板的使用寿命,减少运营维护成本。这一结论还需通过实际项目进行检验。

### 3 结语

电气磨耗和机械磨耗是影响刚性接触网弓网磨耗的主要原因。可以选用耐磨性更好、导电率相当的接触线材质,以及通过优化列车加速段取流分布来改善电气磨耗。适度增大悬挂点拉出值扫动频率、确保相邻两锚段内悬挂点扫动频率的一致性,有助于改善碳滑板磨耗均匀度。当关节悬挂点布置在线路中心线同侧时,理论上可以使碳滑板磨

耗更均匀。上述研究结论可为改善弓网磨耗、提高碳滑板磨耗均匀度提供参考,也有利于采用AC 25 kV交流供电制式的地下段采用架空刚性接触网的应用推广。

### 参考文献

- [1] 李静,周宁,邹栋,等. 刚性接触网拉出值布置方式对弓网受流性能影响[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(12): 82.  
LI Jing, ZHOU Ning, ZOU Dong, et al. Influence of rigid catenary stagger layout modes on current collection performance of pantograph catenary[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(12): 82.
- [2] 尹魁元. 接触网刚性悬挂拉出值布置方式比较[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(2): 81.  
YIN Kuiyuan. On the stagger layout arrangement of overhead rigid suspension[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(2): 81.
- [3] 陈显志,陈勇,陈建君,等. 刚性接触网平面布置优化结构: CN 102910089A[P]. 2013-02-06.  
CHEN Xianzhi, CHEN Yong, CHEN Jianjun, et al. Optimization of the planar arrangement of rigid overhead contact system structure: CN 102910089A[P]. 2013-02-06.
- [4] 曾纯昌. 刚性悬挂拉出值布置对受流质量的影响[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(1): 68.  
ZENG Chunchang. Current collection quality affected by the rigid catenary stagger arrangement [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(1): 68.

· 收稿日期:2023-06-18 修回日期:2023-10-25 出版日期:2025-05-10

Received:2023-06-18 Revised:2023-10-25 Published:2025-05-10

· 第一作者:陈显志,高级工程师,11986378@qq.com

通信作者:燕振刚,高级工程师,1184230657@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 225 页)

LANG Peng. Study on collision dynamics of current collector/three-rail elbow[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

- [7] 刘子知,孙福臻. 基于受流器参数化模型的靴轨动态接触仿真[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(6): 36.

LIU Zizhi, SUN Fuzhen. Dynamic contact simulation of shoe-rail system based on parametric model of current collector[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2020, 43(6): 36.

- [8] 公茂果,焦李成,杨咚咚,等. 进化多目标优化算法研究[J]. 软件学报, 2009, 20(2): 271.

GONG Maoguo, JIAO Licheng, YANG Dongdong, et al. Research on evolutionary multi-objective optimization algorithms[J]. Journal of Software, 2009, 20(2): 271.

- [9] 宁晓芳. 受流器/第三轨系统受流质量评价指标研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.

NING Xiaofang. Study on current collector/third rail system current collector quality evaluation index[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

· 收稿日期:2023-01-04 修回日期:2023-02-04 出版日期:2025-05-10

Received:2023-01-04 Revised:2023-02-04 Published:2025-05-10

· 通信作者:阮杰,副教授,eric\_ru007@sina.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license