

地铁曲线段钢轨非对称性廓形研究

林凤涛¹ 李志和^{1,3} 胡伟豪¹ 刘保臣² 朱韶光²

(1. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 330013, 南昌; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 100081, 北京;

3. 中国铁路南昌局集团有限公司鹰潭机务段, 330013, 南昌//第一作者, 教授)

摘要 提出多弧段钢轨廓形拟和方法:以圆弧半径以及圆弧相切点横坐标为设计变量,以轮轨接触点横向分布密度函数、轮轴横向力最小为目标函数,采用统计方法设定参数边界条件,建立非对称性钢轨廓形设计模型,并运用遗传算法对该模型进行求解,得到地铁曲线段外轨非对称性钢轨廓形。建立车辆系统动力学及轮轨接触力学模型,对设计的非对称钢轨廓形进行动力学性能评价以及磨损分析。结果表明,与采用TB60型面钢轨廓形相比,非对称性钢轨廓形基本不影响车辆动力学性能;同时,非对称性钢轨廓形改善了轮轨接触关系;钢轨顶面横坐标为0~25 mm区间内的轮轨接触斑分布密度为86.18%,非对称性廓形钢轨较TB60型面增加了35.21%;在通过车次分别为 5.0×10^5 次和 1.0×10^6 次的条件下,非对称性廓形钢轨的磨损深度最大位置较TB60型面向轨顶中心移动5 mm,降低了钢轨的非正常磨损。

关键词 地铁;曲线段;钢轨;非对称钢轨廓形

中图分类号 U213.4⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.015

Study of Asymmetrical Rail Profile in Metro Curve Section

LIN Fengtao, LI Zhihe, HU Weihao, LIU Baochen, ZHU Shaoguang

Abstract In this paper, the multi-arc rail profile fitting method is proposed, which regards the arc radius and the abscissa of arc tangent point as the design variables, the horizontal distribution density function of the wheel-rail contact point and the minimum axle lateral force as the objective functions. Then, by determining the parametric boundary conditions through statistical approach, an asymmetric rail grinding design model is established. The genetic algorithm is used to solve the rail profile design model so as to obtain the asymmetric grinding profile of the outer curve of metro curve section. Next, through the establishment of vehicle system dynamics and wheel-rail contact mechanics model, the dynamic performance evaluation and the wear analysis of the designed asymmetric rail profile are carried out. The results show that the asymmet-

ric grinding profile does not affect the vehicle dynamic performance compared with the TB60 rail profile grinding method, at the same time, the former improves the wheel-rail contact relationship. In the range of 0~25 mm on the rail top surface, the distribution density of wheel-rail contact spot is 86.18%, while that of the asymmetric grinding profile is 35.21% higher than TB60. Under the condition of passing train number being 5.0×10^5 and 1.0×10^6 respectively, the maximum wear depth of the asymmetric grinding profile rail moves 5 mm towards the rail top center than TB60 rail, which effectively reduces the abnormal rail wear.

Key words metro; curve section; rail; asymmetric rail profile

First-author's address State Key Laboratory of Vehicle and Equipment, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China

因城市轨道交通建设空间范围限制,其线路采用了较多的小半径曲线。在城市轨道交通运营过程中,由于载客量大、通过车次多、车辆类型单一、轴重一致、运营速度固定等因素,将导致线路曲线段外股轨道产生严重侧磨,致使钢轨寿命缩短,甚至影响列车的行车安全。为了研究地铁曲线段钢轨的磨损影响因素及其造成的影响,文献[1]从钢轨材料本身及其使用环境进行了研究,发现钢轨硬度、轨距、打磨、踏面涂油都会影响钢轨磨损速率。文献[2]发现钢轨廓形异常磨损会导致轮轨匹配不良,从而引起车体异常抖动;钢轨磨损加快,对行车安全构成极大的影响;钢轨打磨可以有效地解决轮轨的异常磨损。文献[3]提出了一种特殊的钢轨打磨方法,针对钢轨不同部位磨损程度进行个性化打磨,延缓了钢轨磨损。文献[4]对钢轨局部廓形进行优化设计,优化后其轮轨匹配性能增加。文献[5]对朔黄铁路曲线段内、外轨打磨廓形进行非对称设计,优化后的钢轨廓形可以缓减钢轨接触疲

劳,延长钢轨的使用寿命。文献[6]指出钢轨的非对称打磨对车辆的动力学性能无影响,但改变了钢轨的几何特征,有利于减缓钢轨的斜裂纹的萌生与扩展。文献[7]以踏面跳跃点横向间距作为道岔优化控制条件,降低了道岔钢轨的磨耗速率以及轮轨接触应力最大值。文献[8]以滚动圆半径差为优化目标对钢轨廓形进行设计,增加了列车的曲线通过能力。文献[9]采用遗传算法对曲线段钢轨廓形进行优化,实现了降低钢轨磨耗的目标。

上述研究促进了钢轨打磨理论和方法的完善,但大多研究因设计目标复杂造成运算工作量加大。同时,大多数钢轨廓形设计未基于实测钢轨廓形,通过计算得到的打磨廓形并不一定具有通用性。针对目前地铁曲线段钢轨打磨廓形缺乏科学合理的设计方法,本文基于地铁实际运营线路,提出基于圆弧参数变量的外轨廓形设计方案。在考虑磨耗钢轨廓形的基础上,将钢轨廓形生成模块与车辆动力学模型进行关联,以轮轨接触斑分布特性作为优化目标来实现外轨廓形设计,最终为非对称钢轨预打磨方案设计提供指导。

1 钢轨磨耗廓形数据采集

本文采用 Miniprof 型面测量仪对北京某地铁曲线段的钢轨磨耗廓形进行跟踪测试。图 1 为北京某地铁现场钢轨实测廓形图。由图 1 可以看出,钢轨长期存在异常侧磨的现象,且轮轨接触光带大部分分布在钢轨的内侧区域。



图 1 北京某地铁现场钢轨实测廓形图

Fig. 1 Field rail measurement profile drawing of Beijing metro

图 2 为外轨磨耗统计图。由图 2 可知:

- 1) 根据磨耗程度以及磨耗位置,将外轨划分为轨头中心侧 d_1 和轨距角 d_2 等 2 个区域;
- 2) d_2 区域内钢轨磨耗程度明显较 d_1 区域更为严重,且在钢轨型面横坐标 x 为 25 mm 处钢轨磨耗

深度最大。一方面,列车通过曲线段时,由于轮对横移作用,导致钢轨轨侧与轮缘接触,造成了钢轨的侧磨;另一方面,钢轨在该区间内的曲率单一性等因素导致轮轨匹配不良,产生磨耗集中现象。

为了减缓外轨 d_2 区域磨耗,本文采用多弧段对 x 在 $[0, 36]$ mm 范围内的外轨廓形进行设计。

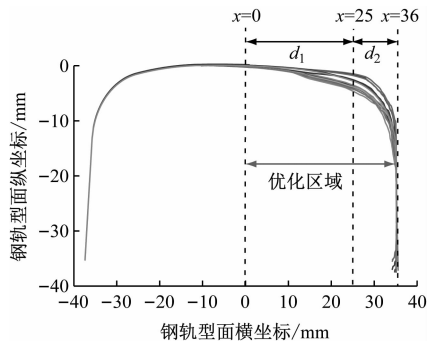


图 2 外轨磨耗统计图

Fig. 2 Statistics chart of outer rail wear

2 钢轨型面设计

钢轨工作边分别由 3 段圆弧与 1 段直线相切组成。其中,钢轨轨头中心点及直线端点为固定点,弧段之间相互内切。以钢轨轨顶为原点,钢轨中心线为 y 轴,垂直于钢轨中心线为 x 轴,建立坐标系。钢轨廓形如图 3 所示。

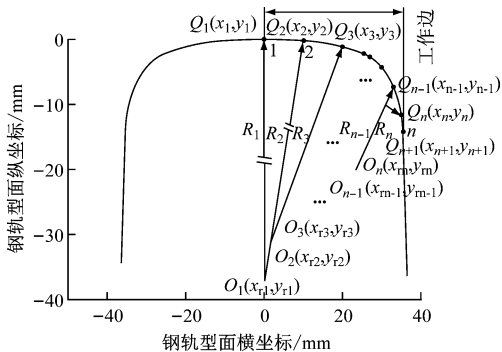


图 3 钢轨廓形描述图

Fig. 3 Rail profile description diagram

采用段圆弧对钢轨工作边进行表示。设圆弧切点分别为 $Q_1(x_1, y_1), Q_2(x_2, y_2), \dots, Q_n(x_n, y_n), Q_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$, 其中, Q_1, Q_{n+1} 为固定端点。

- 1) 第 1 段圆弧确定。根据 TB 10082—2017《铁路轨道设计标准》, Q_1 处的切线斜率 $k_1 = 0$, 且 $Q_1(x_1, y_1), Q_2(x_2, y_2)$ 在 $\widehat{Q_2Q_3}$ 上, 则第 1 段圆弧表达式为:

$$y_{i=1} = \sqrt{R_1^2 - (x - x_1)^2} + y_1 - R_1, \\ x_1 \leq x \leq x_2 \quad (1)$$

2) 第2段弧确定。 $\widehat{Q_1Q_2}$ 与 $\widehat{Q_2Q_3}$ 2段圆弧相互内切,因此 O_1, O_2, Q_2 3点共线,又因 $Q_2(x_2, y_2)$, $Q_3(x_3, y_3)$ 在 $\widehat{Q_2Q_3}$ 上,则第2段圆弧表达式:

$$y_{i=2} = \sqrt{R_2^2 - \left(x - x_2 - \frac{k_2 R_2}{\sqrt{k_2^2 + 1}}\right)^2} + y_2 - \frac{R_2}{\sqrt{k_2^2 + 1}}, \\ x_2 \leq x \leq x_3 \quad (2)$$

其中:

$$k_2 = \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1 + R_1}$$

3) 第 $n-1$ 段圆弧确定。 $\widehat{Q_{n-2}Q_{n-1}}$ 与 $\widehat{Q_{n-1}Q_n}$ 2段圆弧相互内切,因此 $O_{n-2}, O_{n-1}, Q_{n-1}$ 3点共线,又因 $Q_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1})$, $Q_n(x_n, y_n)$ 在 $\widehat{Q_{n-1}Q_n}$ 上,则第 $n-1$ 段圆弧表达式为:

$$y_{i=n-1} = \sqrt{R_{n-1}^2 - \left(x - x_{n-1} - \frac{k_{n-1} R_{n-1}}{\sqrt{k_{n-1}^2 + 1}}\right)^2} + \\ y_{n-1} - \frac{R_{n-1}}{\sqrt{k_{n-1}^2 + 1}}, x_{n-2} \leq x \leq x_{n-1} \quad (3)$$

其中:

$$k_{n-1} = \frac{x_{n-2} - x_{n-1} + k_{n-2} (R_{n-2} / \sqrt{k_{n-2}^2 + 1})}{y_{n-1} - y_{n-2} + R_{n-2} / \sqrt{k_{n-2}^2 + 1}}$$

4) 第 n 段弧确定。 $\widehat{Q_{n-1}Q_n}$ 与 $\widehat{Q_nQ_{n+1}}$ 2段圆弧相互内切,因此 O_{n-1}, O_n, Q_n 3点共线,又因 $Q_n(x_n, y_n)$, $Q_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$ 在 $\widehat{Q_nQ_{n+1}}$ 上,则第 n 段圆弧表达式为:

$$y_{i=n} = \sqrt{R_n^2 - \left(x - x_n - \frac{k_n R_n}{\sqrt{k_n^2 + 1}}\right)^2} + y_n - \frac{R_n}{\sqrt{k_n^2 + 1}}, \\ x_{n-1} \leq x \leq x_n \quad (4)$$

其中:

$$k_n = \frac{x_{n-1} - x_n + k_{n-1} (R_{n-1} / \sqrt{k_{n-1}^2 + 1})}{y_n - y_{n-1} + R_{n-1} / \sqrt{k_{n-1}^2 + 1}}$$

综上,钢轨的工作边廓形表达式为:

$$g(R_i, x_i) = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{R_n^2 - \left(x - x_n - \frac{k_n R_n}{\sqrt{k_n^2 + 1}}\right)^2} + \right. \\ \left. y_n - \frac{R_n}{\sqrt{k_n^2 + 1}} \right), n \geq 2 \quad (5)$$

其中:

$$y_n = \sqrt{R_{n-1}^2 - \left(x_n - x_{n-1} - k_{n-1} \left(\frac{R_{n-1}}{\sqrt{k_{n-1}^2 + 1}} \right) \right)^2} + \\ x_{n-1} - x_n + k_{n-1} \left(\frac{R_{n-1}}{\sqrt{k_{n-1}^2 + 1}} \right) \\ y_{n-1} - \frac{R_{n-1}}{\sqrt{k_{n-1}^2 + 1}} k_n = \frac{y_n - y_{n-1} + \frac{R_{n-1}}{\sqrt{k_{n-1}^2 + 1}}}{\sqrt{k_{n-1}^2 + 1}}$$

式中:

R_n, x_n, y_n, k_n ——分别为对应圆弧段半径,圆弧段切点横、纵坐标,以及圆弧段切点斜率。

由式(5),若已知端点 $Q_1(x_1, y_1)$, $Q_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$,则可通过 R_1, R_2, \dots, R_{i-1} 以及 x_2, x_3, \dots, x_{i-1} 等参变量描述钢轨廓形。

3 钢轨廓形求解流程设计

采用圆弧参数对TB60钢轨廓形进行描述,确定轨头廓形的参变量。本文根据北京某地铁线路实际运营车辆参数,建立车辆-轨道耦合动力学模型,对轮轨匹配以及车辆动力学特性进行计算。以建立的轮轨接触斑分布函数作为钢轨优化目标 $f_{j, \min}(y_i)$,以车辆动力学特性、边界几何作为其约束函数 f_j 。设置遗传算法计算参数,对父代钢轨廓形参变量 $g(R_i, x_i)$ 进行迭代求解,产生子代钢轨型面 $g(R_i, x_i)$,从而实现收敛;如不收敛,迭代结束后输出全局最优解。车辆动力学与遗传算法耦合进行钢轨廓形求解流程如图4所示。

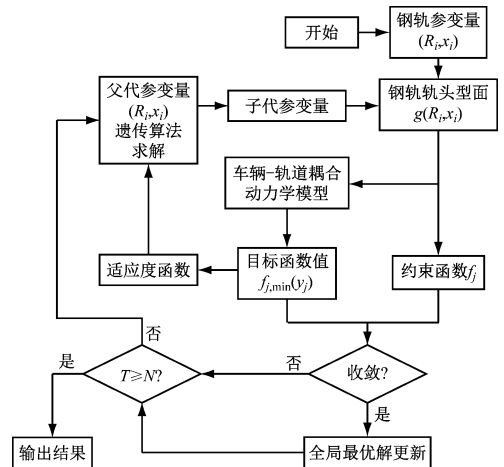


图4 车辆动力学与遗传算法耦合求解钢轨廓形流程

Fig. 4 Process of vehicle dynamics and genetic algorithm coupling to solve the rail profile

4 地铁车辆动力学模型与线路模型的建立

本文主要对圆曲线段外轨与车轮的接触状态进行研究。当列车通过圆曲线时,分别对曲线段外轨与车轮的接触特性进行分析。

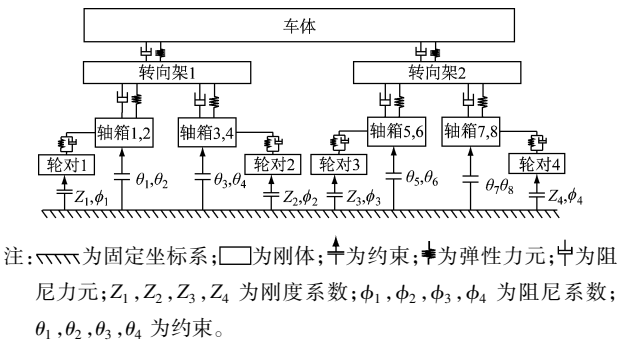
4.1 地铁车辆模型的建立

为了更加具体地分析钢轨型面变化对地铁车辆各项动力学性能和指标的影响。基于地铁 B 型车车辆参数^[10],在动力学软件 UM 中建立车辆动力学模型。地铁车辆通过曲线时速度大小不变,因此可忽略车厢之间的相互作用,只取单节车厢,并考虑轮轨接触几何、轮轨蠕滑特性、车辆悬挂等非线性因素对其进行仿真计算分析。地铁 B 型车车辆参数如表 1 所示。其动力学模型拓扑图如图 5 所示。该模型由 1 个车体、2 个转向架、8 个轴箱及 4 对轮对组成。

表 1 地铁 B 型车车辆参数

Tab.1 Part of type B vehicle parameters

参数	取值
车体质量/kg	40 800
构架质量/kg	3 188
轮对质量/kg	1 640
车轮半径/mm	0.42
车辆定距/m	12.6
轴距/m	2.2
车体质心高度/m	1.677



注:为固定坐标系;为刚体;为约束;为弹性力元;为阻尼力元; Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 为刚度系数; $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ 为阻尼系数; $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 为约束。

图 5 地铁 B 型车车辆动力学模型拓扑图

Fig.5 Topological diagram of metro type B vehicle dynamics model

4.2 地铁线路模型的建立

建立地铁线路仿真模型。其中,线路前、后直线总长 60 m,缓和曲线长 20 m;曲线半径为 600 m,长度为 300 m;外轨超高为 0.05 m,轨底坡为 1/40,轨距为 1 435 mm。车辆实际运行速度为 50 km/h,

钢轨廓形分别采用 TB60 与优化廓形,轨道激励为美国 5 级谱,车轮型面为 LM,轮轨摩擦系数为 0.3。

5 钢轨廓形优化模型的建立

5.1 TB60 型面钢轨廓形初始坐标变量的设定

TB60 钢轨由 $R_1 = 300\text{ mm}$, $R_2 = 80\text{ mm}$ 和 $R_3 = 13\text{ mm}$ 3 段圆弧组成,固定端点坐标为 $(0, 0)$, $(36, -34)$ 。根据钢轨型面的磨耗规律,以 TB60 型面为原型,采用 4 段圆弧对横坐标在 $[0, 36]\text{ mm}$ 区间内的钢轨廓形进行设计,对该区间内的圆弧段进行等份划分。初始变量坐标设定如表 2 所示。

表 2 TB60 型面钢轨廓形初始坐标变量设定表

Tab.2 Initial variable coordinate setting table for TB60 surface rail profile

端点编号 i	圆弧端点横坐标 x_i/mm	圆弧半径 R_i/mm
1	0	300
2	9	300
3	18	80
4	27	13
5	36	13

5.2 目标函数的建立

5.2.1 接触斑分布密度函数的建立

车辆沿轨道运行过程中,由于轮对横移作用,导致轮轨接触点位置随时间发生变化。为了计算接触斑分布函数,将钢轨横坐标 $[0, 36]\text{ mm}$ 区间分成 k 个长度为 1 mm 的小区间。根据轮轨接触斑中心 x 所在的区间,取采样频率为 200 Hz,统计落在相应区间内的接触斑数目。得到每个区间内的接触斑数目 n_k 以及接触斑的总数 N 。则第 k 个区间内接触点分布的密度 $p\{x = x_k\}$ 为:

$$p\{x = x_k\} = \frac{n_k}{N}, k = 1, 2, 3, \dots, 36 \quad (6)$$

接触点的分布函数 $F(x_k)$ 为:

$$F(x_k) = p(x \leq x_k) = \sum_{x \leq x_k} \frac{n}{N}, k = 1, 2, 3, \dots, 36 \quad (7)$$

为了减缓地铁曲线段外侧钢轨侧磨,使轮轨接触斑分布在轨顶部分 d_1 区域($x \in [0, 25]\text{ mm}$)的密度不低于 80%, d_2 区域($x \in [25, 36]\text{ mm}$)的密度不大于 20%。则接触斑密度函数 $f_{1,\min}(y_i)$ 为:

$$\begin{cases} f_{1,\min}(y_i) = F(x_k) \geq 80\%, k = 25 \text{ 时} \\ f_{1,\min}(y_i) = 1 - F(x_k) < 20\%, k = 25 \text{ 时} \end{cases} \quad (8)$$

5.2.2 轮轴横向力最小目标函数

轮轴横向力最小目标函数 $f_{2,\min}(y_i)$ 为:

$$f_{2,\min}(y_i) = \max(|Q_L|) \tag{9}$$

式中:
 $|Q_L|$ ——轮轴横向力。

5.3 约束函数的建立

采用 4 段圆弧对钢轨廓形进行拟合,对设计钢轨型面的几何条件、弧段之间进行约束;同时为了保证设计后的钢轨型面车辆动力学性能的安全特性,对车体运行时的振动加速度及脱轨系数进行约束。

5.3.1 钢轨的参变量几何约束

选取该曲线段磨损深度最大的钢轨廓形和 TB60 廓形作为上、下边界。

$$C_{\text{down}}(R_i) \leq R_i \leq C_{\text{up}} \quad i \in (1, 2, 3, 4) \tag{10}$$

式中:
 $C_{\text{down}}(R_i)$ 、 C_{up} ——分别为磨损钢轨型面和 TB60 型面的边界条件。

5.3.2 车辆动力学性能约束

Opti-60 型面对应的车体横向振动加速度有效值 $a_{\text{opti-60,rms}}$ 较 TB60 型面对应的车体横向振动加速度有效值 $a_{\text{TB60,rms}}$ 要小,即:

$$f_2 = a_{\text{opti-60,rms}} - a_{\text{TB60,rms}} \leq 0 \tag{11}$$

5.3.3 脱轨系数约束条件

根据公式,车辆的脱轨约束条件为:

$$\begin{cases} f_d = \frac{Q}{P} \leq \frac{\tan \alpha - \mu}{1 + \tan \alpha} \\ f_3 = f_{d,\text{opti-60,rms}} - f_{d,\text{TB60,rms}} \leq 0 \end{cases} \tag{12}$$

式中:
 Q ——轮轨间的横向力;
 P ——轮轨间的垂向力;
 α ——轮缘角;
 μ ——摩擦系数。

$f_{d,\text{opti-60,rms}}$ 、 $f_{d,\text{TB60,rms}}$ ——分别表示廓形优化后钢轨的脱轨系数有效值和标准轨的脱轨系数有效值。

6 钢轨廓形求解与结果分析

本文采用遗传算法^[11]对曲线段钢轨廓形优化模型进行求解。整个算法迭代次数为 200,种群大小设置为 100。采用实数型编码方式对变量 R_i, x_i 进行编码^[17],设置其变异概率为 0.08、交叉概率为 0.7,根据个体的适应度大小确定选择因子。

经过 200 次迭代后,所得最优钢轨廓形如图 6

所示。由图 6 可知,Opti-60 型面位于 TB60 型面下方,在钢轨侧面($x \in [0, 20]$ mm),Opti-60 型面与 TB60 型面变化基本一致;钢轨横坐标位置在 $[20, 35]$ mm 范围内,Opti-60 型面轨距角部分更圆滑,曲线斜率变化稍快。

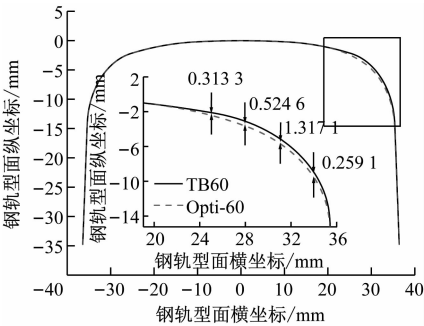


图 6 外轨廓形优化结果图

Fig. 6 External rail profile optimization results

表 3 为钢轨廓形优化前后纵坐标差值。由表 3 可知,当钢轨型面横坐标为 31 mm 时,其优化前后的型面纵坐标差值最大,达到了 1.317 1 mm。

表 3 钢轨廓形优化前后纵坐标差值
Tab. 3 Corresponding ordinate differences before and after rail profile optimization

横坐标/mm	纵坐标差值/mm
25	-0.313 3
28	-0.524 6
31	-1.317 1
34	-0.259 1

图 7 为地铁通过曲线段时,外轨与 LM 型面车轮匹配的接触斑分布密度图。由图 7 可知,钢轨型面横坐标在 $[0, 25]$ mm 区间内,TB60 型面与 LM 型面轮轨接触斑分布密度为 50.97%,Opti-60 型面与 LM 型面轮轨匹配的接触斑分布密度为 86.18%,

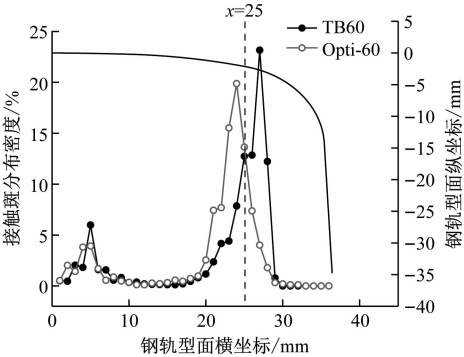


图 7 轮轨接触斑分布密度

Fig. 7 Distribution density of wheel and rail contact spots

较 TB60 型面增加了 35.21%。同时, Opti-60 型面轮轨接触斑分布最大密度值较 TB60 型面向轨头中心前移了 5 mm, 该变化使轮轨接触点分布在轨顶密度变大, 减缓了钢轨轨距角磨损。

6.1 不同型面钢轨廓形下轮轨接触点变化

图 8 为 TB60 型面与 Opti-60 型面轮轨接触点几何分布图。由图 8 可知, Opti-60-LM 型面轮轨接触点在轨顶的分布较 TB60-LM 型面更为均匀。当车轮横移 10 ~ -10 mm 时, Opti-60-LM 型面接触主要分布在钢轨偏内区域, 靠近钢轨轨头中心; TB60-LM 型面轮轨接触点均匀分布在钢轨的轨头与轨肩位置。该变化减少了轨距角与轮缘的磨损。

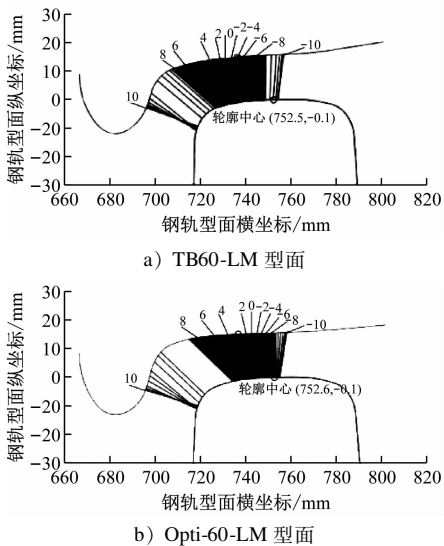


图 8 轮轨接触点几何分布图

Fig. 8 Wheel and rail contact point distribution

6.2 不同型面钢轨廓形对车轮踏面等效锥度的影响

本文采用 klingel 算法分别对 Opti-60-LM 型面和 TB60-LM 型面车轮踏面的等效锥度进行计算, 结果如图 9 所示。当轮对横移量为 1 ~ 7 mm 时, LM 型面车轮踏面等效锥度在 0.075 ~ 0.100 范围内缓慢增长; 当轮对横移量大于 4 mm 时, LM 型面与 Opti-60 型面匹配的车轮踏面等效锥度比 TB60 型面略小, 且均出现加速上升的趋势, 曲线通过能力都大幅增大。总体而言, 两者等效锥度变化幅度相差不大。

6.3 不同型面钢轨廓形对脱轨系数的影响

由图 10 的 Opti-60 型面与 TB60 型面钢轨的脱轨系数对比可知, 将 TB60 型面换成 Opti-60 型面后, 一位轮对外侧车轮的脱轨系数小幅度减小, 其有效值由 0.079 7 减小至 0.069 5, 降低了 12.79%。

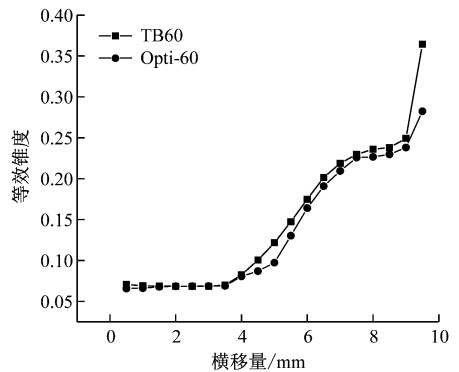


图 9 不同型面车轮踏面等效锥度与轮对横移量关系图

Fig. 9 Relationship between the equivalent taper of the wheel tread and the lateral displacement of the wheel pair

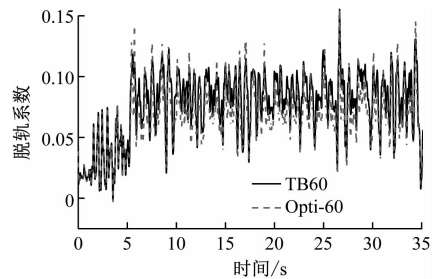


图 10 不同型面钢轨的脱轨系数对比

Fig. 10 Derailment coefficient comparison of different rail profiles

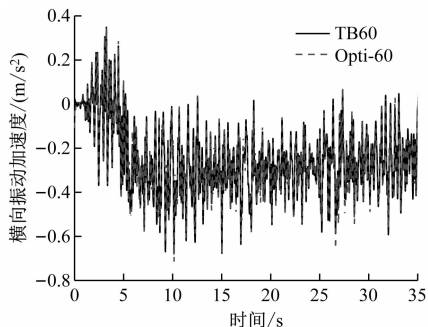
总体而言, Opti-60 型面对提升列车脱轨系数有一定程度帮助。

6.4 不同型面钢轨廓形下车体平稳性分析

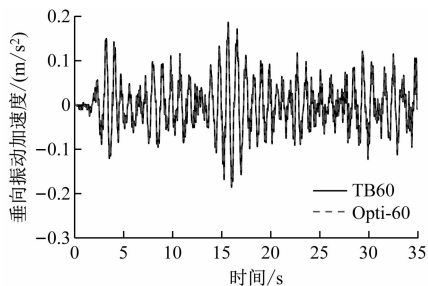
振动加速度是衡量铁道车辆运行平稳性最直接的指标。图 11 为钢轨打磨前后车体横、垂向振动加速度时域波形图。由图 11 可知, 将 TB60 型面换成 Opti-60 型面后, 其横向加速度有效值由 0.291 2 减小至 0.279 6, 降低了 3.97%; 垂向加速度有效值由 0.056 8 减小至 0.054 5, 降低了 4.49%。由此可见, 小幅度提升了车辆通过曲线时的平稳性。

6.5 不同型面钢轨磨耗特性分析

图 12 为 Opti-60 型面与 TB60 型面在通过不同车次时钢轨的累计磨耗量。由图 12 可知, Opti-60 型面与 TB60 型面的磨耗分布区域大致相同, 但 Opti-60 型面磨耗深度最大位置较 TB60 型面往前移动 5 mm; 当通过车次为 5.0×10^5 次时, Opti-60 型面横坐标在 $[0, 25]$ mm 区间内磨耗量占总区间磨耗量的 78.3%, 而 TB60 型面为 75.4%; 当通过车次为 1.0×10^6 次时, Opti-60 型面横坐标在 $[0, 25]$ mm 区间内的磨耗量占总区间磨耗量的 82.5%, 而 TB60 为 79.4%。因此, Opti-60 型面集中磨耗较



a) 横向振动加速度



b) 垂向振动加速度

图 11 车体横、垂向振动加速度时域波形图对比

Fig. 11 Comparison of the car body transverse and longitudinal vibration acceleration

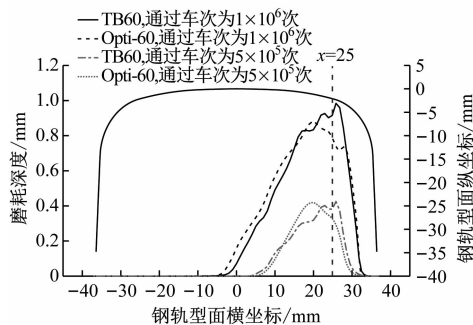


图 12 Opti-60 型面与 TB60 型面的外轨累计磨耗量对比

Fig. 12 Comparison of the outer rail accumulative wear between Opti-60 and TB60

TB60 型面有往钢轨中心移动的趋势,有利于减少钢轨轨距角磨耗。

7 结论

1) 以 TB60 型面为原型,采用弧段半径及弧段之间相切点横坐标作为参变量对钢轨廓形进行设计,将车辆动力学模型与钢轨廓形生成模块与圆弧半径算法进行结合。应用数理统计法得到外轨的轮轨接触斑分布规律,建立钢轨廓形设计目标函数,最终指导钢轨非对称廓形的生成。

2) 钢轨非对称廓形设计改变了轮轨几何接触

特性,使外轨接触点分布在轨顶 $[0, 25]$ mm 区间内的密度达到 86.18%,较 TB60 型面增加了 35.21%。

3) 采用 Opti-60 型面后,其动力学性能有了小幅度提升,脱轨系数有效值降低了 12.79%;横、垂向振动加速度有效值分别降低了 3.97% 和 4.49%;在通过车次相同的情况下,钢轨的磨耗深度最大位置较 TB60 型面向轨头中心方向移动 5 mm,减缓了钢轨轨距角磨耗,延长了钢轨更换周期。

参考文献

- [1] 颜怡嵩. 广州地铁 5 号线小半径曲线钢轨磨耗分析[J]. 城市轨道交通研究, 2011(6): 55.
YAN Yizhu. Analysis of sharp curve rail wear of subway Line 5 [J]. Urban Mass Transit, 2011(6): 55.
- [2] 崔利通, 宋春元, 王安国, 等. 跨线运行动车组异常振动问题研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019(4): 67.
CUI Litong, SONG Chunyuan, WANG Anguo, et al. Abnormal vibration problems of EMU train in the cross-line operation [J]. Urban Mass Transit, 2019(4): 67.
- [3] 王军平, 单连琨, 丁军君, 等. 个性化钢轨廓形打磨方法分析[J]. 铁道建筑, 2015(11): 137.
WANG Junping, SHAN Liankun, DING Junjun, et al. Analysis of individualized rail profile grinding methods [J]. Railway Construction, 2015(11): 137.
- [4] PLU J, BONDEUX S, BOULANGER D, et al. Application of fracture mechanics methods to rail design and maintenance [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(17): 2602.
- [5] 贾晋中, 司道林. 朔黄铁路小半径曲线轨道钢轨打磨目标型面研究[J]. 中国铁道科学, 2014(4): 15.
JIA Jinzhong, SI Daolin. Research on grinding target profile of small radius curved track rails of Shuozhou-Huanghua Railway [J]. China Railway Science, 2014(4): 15.
- [6] 黄育斌, 王文健, 郭俊, 等. 钢轨非对称打磨对车辆运行性能影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2015(2): 264.
HUANG Yubin, WANG Wenjian, GUO Jun, et al. Effect of asymmetrical rail grinding on running performance of vehicles [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015(2): 264.
- [7] 宗聪聪, 张让, 周云飞, 等. 道岔尖轨段打磨目标廓形优化研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019(1): 138.
ZONG Congcong, ZHANG Rang, ZHOU Yunfei, et al. Optimization of grinding profile in switch point rail section [J]. Urban Mass Transit, 2019(1): 138.
- [8] LIU Y, LIU X. Railway wheel profile optimization design based on nurbs curve [C] // IEEE. 2010 Second International Conference on Computer Modeling & Simulation. New York: IEEE, 2010.
- [9] CHOI H Y, LEE D H, SONG C Y, et al. Optimization of rail profile to reduce wear on curved track [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(4): 619.

(下转第 85 页)

究其原因主要是该线路穿越上海核心区,征地拆迁费用占比较大,以及线路设置了车辆段和地下停车场。

3 结语

近年来城市轨道交通整体造价指标保持高速增长。预估后续线路造价指标时,可结合以下情况进行修正:①根据“房住不炒”等政策,预计征地拆迁费用将保持平稳,不再高速增长;②参照近几年城镇单位在岗职工年平均工资涨幅,预计人力成本涨幅也将趋缓;③新方法、新工艺、安全环保措施普及后,相应投入将保持平稳,不再大幅增长,且规模效应甚至会带来造价不断降低;④需关注建设交通强国新阶段的新情况对造价的影响,例如:智慧轨道交通建设,国家大力推进装配式施工,推进综合交通枢纽建设等。

部分城市轨道交通项目造价指标已超 10 亿元/km,造价昂贵。为此建议:

1) 建设规划阶段,各地应准确估算城市轨道交通工程项目建设资金需求,有序推进、量力而行,避免给地方政府带来过大的财政压力。同时做好资金平衡测算,确保建设资本金、债务资金得到有力保障。建设资本金占地方一般公共预算收入的比例、政府城市轨道交通出资占城市建设维护资金的比例等应满足相关要求。

2) 建设规划报批前,建议各地配套研究全生命周期资金保障方案,确保拟报批建设规划的全生命周期内资金需求有保障:建设期需保障的资金需求包括资本金以及债务资金,运营期需保障的资金需

求包括还本付息、运营补亏、设备更新及车辆增购等资金。

3) 设计及建设阶段,应运用价值工程、方案比选等手段优化方案以控制投资,将具体线路的造价指标控制在合理范围内。

参考文献

- [1] 前瞻产业研究院. 2019 年 H1 中国内地城市轨道交通行业市场现状及发展前景[R/OL]. (2019-09-30) [2021-06-16]. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/459/190930-11104e1a.html>.
- Prospective Industry Research Institute. H1 market status and development prospect of urban rail transit industry in mainland China in 2019 [R/OL]. (2019-09-30) [2021-06-16]. <https://bg.qianzhan.com/report/detail/459/190930-11104e1a.html>.
- [2] 韩宝明,代位,张红健. 2018 年世界城市轨道交通运营统计与分析[J]. 都市快轨交通,2019(1):9.
- HAN Baoming, DAI Wei, ZHANG Hongjian. Statistics and analysis of world urban rail transit operation in 2018[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019(1):9.
- [3] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2019 年度统计和分析报告[R/OL]. (2020-05-18) [2021-07-09]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/5133>.
- China Association of Metros. Urban rail transit statistics and analysis report in 2019 [R/OL]. (2020-05-18) [2021-07-09]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/5133>.
- [4] 陈海涛. 中国历年房地产销售金额和面积图表[EB/OL]. (2019-01-21) [2021-07-09]. <https://xueqiu.com/8710966224/120088277>.
- CHEN Haitao. Chart of real estate scale s amount and area over the years in China [EB/OL]. (2019-01-21) [2021-07-09]. <https://xueqiu.com/8710966224/120088277>.

(收稿日期:2020-08-27)

(上接第 81 页)

- [10] 梁喜仁,陶功权,陆文教,等. 地铁钢轨滚动接触疲劳损伤研究[J]. 机械工程学报,2019(2):147.
- LIANG Xiren, TAO Gongquan, LU Wenjiao, et al. Study on the rail rolling contact fatigue of subway[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019 (2): 147.
- [11] 陈堂功. 遗传算法及其应用于电磁装置优化设计的研究[D]. 天津:河北工业大学,2006.
- CHEN Tangong. Research on genetic algorithm and its applica-

tion in electromagnetic device optimization design [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2006.

- [12] 林凤涛. 高速列车车轮磨耗及型面优化研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2014.
- LIN Fengtao. Research on wheel wear and profile optimization of high-speed trains[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014.

(收稿日期:2019-11-15)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704