

# 地铁9号道岔侧向通过速度提升可行性研究

蔡文锋<sup>1</sup> 汤铁兵<sup>2</sup> 徐井芒<sup>3</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都; 2. 中铁山桥集团有限公司, 066205, 秦皇岛;

3. 西南交通大学, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 为提高地铁9号道岔侧向过岔能力, 提出将9号道岔侧向通过速度提升至50 km/h, 为此设计了5种道岔平面线型方案。基于车辆-道岔耦合动力学理论, 分析不同的道岔平面线型方案对地铁车辆运行平稳性、安全性的影响。经方案比选可得: 地铁9号道岔尖轨采用相离半切线型, 尖轨尖端理论厚度增加至2 mm, 尖轨冲击角取 $0.014\ 1 \sim 0.015\ 3\ \text{rad}$ , 既可提高尖轨的整体耐磨性, 也可保证过岔较好的乘坐舒适性; 导曲线半径采用350 m, 有利于降低列车经过导曲线时未被平衡的离心加速度, 提高列车过岔舒适性。

**关键词** 地铁; 道岔线型; 侧向通过速度; 动力学性能

**中图分类号** U213.6

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.06.016

## Feasibility Study of No.9 Turnout Lateral Passing Speed Acceleration

CAI Wenfeng, TANG Tiebing, XU Jingmang

**Abstract** In order to improve the turnout lateral passing capacity of No.9 metro turnout, five design schemes are put forward aiming to accelerate the speed to 50 km/h. Based on vehicle-turnout coupling dynamics theory, the influence of different plane alignment schemes on the running stability and safety of metro vehicle is analyzed. A scheme is selected through comparison, by adopting the half-tangent alignment, the switch rail end thickness is 2 mm, the impact angle is  $0.014\ 1 \sim 0.015\ 3\ \text{rad}$ . This scheme could improve the wear resistance of the switch rail and guarantee the riding comfort, because the 350 m mediated curve is favorable for the reduction of centrifugal acceleration that is not balanced when the vehicle passes through the mediated curve, thus the turnout passing comfort is improved.

**Key words** metro; turnout alignment; lateral passing speed; dynamics characteristics

**First author's address** China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

改进道岔的平面线型是提高道岔通过速度的有效途径<sup>[1-4]</sup>。文献[5]通过改进道岔平面线型和尺

寸, 可提高道岔的直向通过速度。文献[6]基于车辆-轨道耦合动力学分析了车辆侧向通过12号道岔的容许速度。文献[7]研究了9号单开道岔尖轨平面线型设计方案。文献[8]从满足高速铁路运营的角度, 研究了道岔侧向最高允许通过速度。

本文提出了5种9号道岔平面线型方案。基于车辆-道岔耦合动力学理论, 对比分析了不同平面线型对地铁车辆运行平稳性、安全性的影响, 并经综合选择后推荐相对较优的道岔线型方案。

## 1 车辆-道岔耦合动力学模型

### 1.1 车辆子模型

本文以地铁车辆结构为原型, 根据其结构特点, 采用不考虑旁承、摇枕及摇动台的转向架, 建立了四轴机车车辆动力学模型(见图1)。该模型包含4个轮对、2个转向架和1个车体, 各部件均简化为刚体, 连接转向架与轮对, 车体与转向架的一、二系悬挂由弹簧阻尼单元模拟。模型中除轮对不考虑点头运动外, 其余各刚体均考虑横移、侧滚、沉浮、点头和摇头等5个自由度, 共计7个刚体、31个自由度。

### 1.2 道岔子模型

如图2所示, 9号道岔子模型由转辙器、连接部分和辙叉等3部分组成。模型中考虑所有钢轨的参振, 钢轨采用点支承基础上双向可弯欧拉梁模拟, 其中尖轨、可动心轨及翼轨为变截面梁, 其他钢轨为等截面梁。每一钢轨节点存在4个自由度: 竖向位移、竖向偏角、横向位移、横向偏角。

考虑岔枕偏心受载和弯曲变形, 以钢轨作用点为节点, 将岔枕结构离散化。岔枕在竖向视为连续支承上单向可弯的欧拉梁, 在横向视为刚性质量块。每一岔枕节点有竖向位移、竖向偏角和横向位移3个自由度, 并考虑岔枕参振。扣件和枕下基础简化为弹簧阻尼单元。

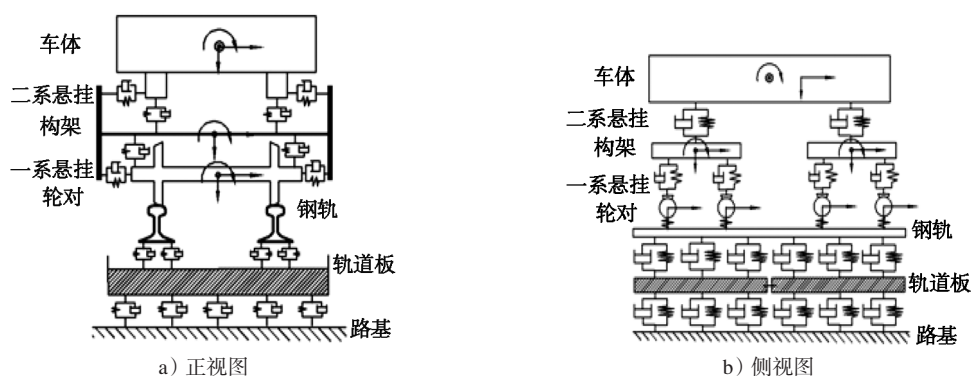


图1 车辆动力学子模型

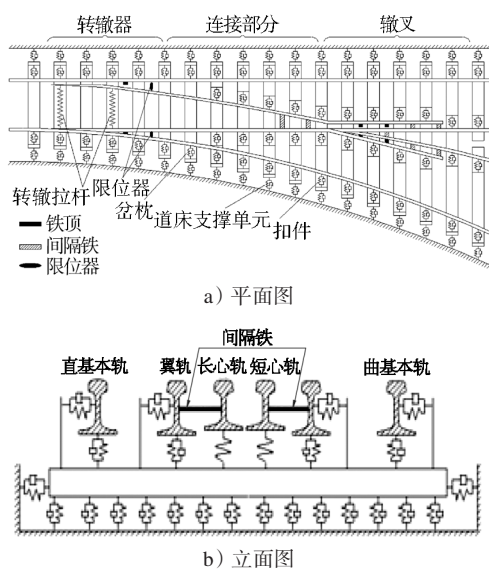


图2 道岔子模型示意图

### 1.3 岔区轮轨接触

道岔区轮轨接触关系较区间线路要复杂得多,轮轨间会出现多种接触状态。本文考虑踏面与钢轨

的一点接触、踏面和轮缘与钢轨的两点接触、踏面和轮背与两钢轨的两点接触等3种情况。道岔区轮轨接触几何关系根据迹线法原理进行求解,竖向耦合关系通过赫兹非线性接触弹簧进行计算,根据车轮与不同钢轨间的弹性压缩量来分配多点轮轨垂向力;横向耦合关系采用 Kalker 线性蠕滑理论进行求解,根据车轮与不同钢轨间的蠕滑率来分配多点轮轨蠕滑力。由此得到车辆-道岔耦合动力学模型。

## 2 道岔平面线型设计方案及计算参数

### 2.1 道岔平面线型设计方案

为将9号道岔侧向通过速度提升至50 km/h,将尖轨尖端厚度增加至2 mm,尖轨与基本轨的贴靠方式为垂直藏尖式结构,藏尖深度为3 mm。其优点有:①减小尖轨尖端冲击角;②增加尖轨尖端耐磨性;③保护尖轨尖端不被扎伤,并使尖轨在动载荷作用下保持良好的竖向稳定性。在此基础上设计了5种道岔平面线型方案的参数(见表1)。

表1 5种设计方案的道岔平面线型参数

参数	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
尖轨尖端线型	正割 50 mm	相离 5 mm	相离 5 mm	相离 5 mm	相离 5 mm
导曲线半径/m	350	300	300	350	350
道岔前长/m	14.283	14.943	16.015	18.632	17.497
道岔后长/m	15.730	16.385	16.385	16.168	16.168
道岔全长/m	30.013	31.328	32.400	34.800	33.665
尖轨冲击角/rad	0.029 3	0.021 0	0.015 3	0.014 1	0.019 4
导曲线终点距辙叉理论尖端/m	6.521	3.938	3.938	7.128	7.128
动能损失/(km <sup>2</sup> /h <sup>2</sup> )	2.138	1.097	0.582	0.499	0.941
离心加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.55	0.64	0.64	0.55	0.64
离心加速度增量/(m/s <sup>2</sup> )	0.425	0.496	0.496	0.425	0.496

### 2.2 道岔参数

本文中道岔计算模型中仅考虑道岔平面线型差异及固有结构不平顺的影响,未考虑几何与刚度的不平顺。另外,为使计算结果具有可比性,各工况下

的道岔子模型,除线型参数外,其他参数取值均一致。其中:钢轨和岔枕弹性模量分别为  $2.06 \times 10^5$  MPa 和  $3.65 \times 10^4$  MPa,泊松比分别为 0.30 和 0.15;轨下垫板厚度为 5 mm,刚度为 200 kN/mm;扣件弹

条扣压力为 10 kN, 弹程为 10 mm, 刚度为 1 kN/mm; 非共用铁垫板下的胶垫(标准长度)刚度为 25 kN/mm, 共用垫板下的胶垫刚度则根据其长度以标准垫板为基数线性增加; 轨下基础为整体道床。道岔基本轨采用 60 kg/m 钢轨, 尖轨采用 60AT 轨, 护轨采用 UIC 33 槽型钢, 各种钢轨截面参数如表 2 所示。车辆侧向过岔速度均为 50 km/h。

表 2 道岔采用的各种钢轨截面参数

轨型	截面积/ cm <sup>2</sup>	截面高/ mm	垂向惯性矩/ cm <sup>4</sup>	横向惯性矩/ cm <sup>4</sup>
60kg/m 轨(基本轨)	77.45	176	3 217.00	524.00
60AT 轨(尖轨)	104.94	152	2 553.00	908.00
UIC 33 槽型钢(护轨)	42.00	93	296.91	83.33

### 3 计算结果分析

分析上述道岔线型设计方案对列车侧向通过道岔转辙器区的行车安全性、平稳性和轮轨磨损特性的影响, 以地铁车辆第一轮对为例, 分析其在不同位置的轮轨力、脱轨系数、减载率及车体竖、横向加速

度, 评价指标采用 GB 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》, 具体计算结果如下。

#### 3.1 轮轨力

列车逆向通过不同道岔平面线型设计方案下的转辙器区时, 尖轨、基本轨侧轮轨的垂向力分布见图 3, 横向力分布见图 4, 横向力以车辆前进方向右侧为正方向。结果显示, 各方案下尖轨侧轮轨力均大于基本轨侧, 这是由于车轮逆向进入转辙器, 尖轨侧存在结构不平顺且车轮对尖轨存在撞击。

由图 3~4 可知, 方案三、四尖轨侧轮轨力较其他方案要小, 这是由于其尖轨冲击角较小, 列车过岔时产生的轮轨冲击随之也较小。两个方案的尖轨侧垂向力最大值分别为 69.05 kN 和 68.75 kN, 横向力最大值分别为 42.45 kN 和 43.41 kN。由于基本轨侧不存在结构不平顺, 且轮轨作用力主要表现为减载, 所以各方案基本轨侧轮轨垂向力最大值基本为轮重, 差异不大, 横向力最大值有一定差异, 其中: 方案五最大, 为 19.26 kN; 方案三最小, 为 14.07 kN。

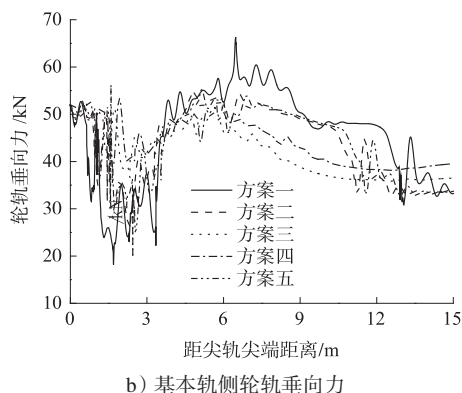
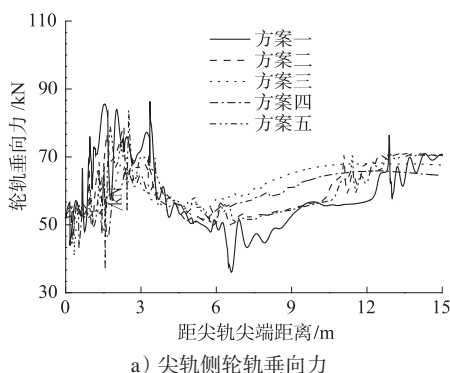


图 3 轮轨垂向力

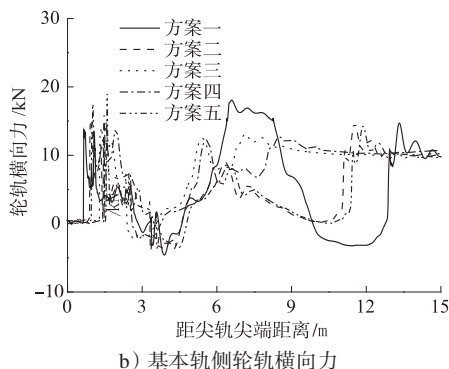
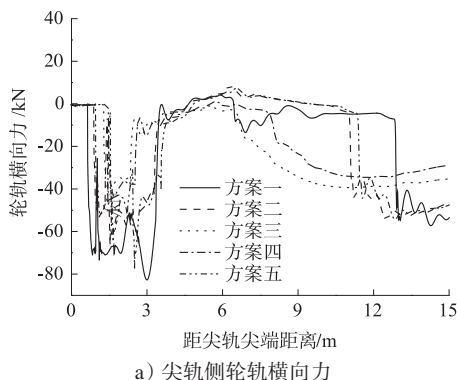


图 4 轮轨横向力

#### 3.2 脱轨系数与减载率

列车逆向通过不同道岔平面线型设计方案下的转辙器区时, 尖轨、基本轨侧车轮脱轨系数和减载率

最大值如表 3 所示。方案一和方案五的最大脱轨系数分别为 1.38 和 1.20, 超过了安全性评价指标的危险限度 1.2, 列车过岔时容易发生脱轨; 方案二最大

脱轨系数为 1.08, 超过安全性评价指标中的允许限度 1.0, 列车过岔时存在发生脱轨的可能性; 方案三和方案四的最大脱轨系数分别为 0.88 和 0.94, 在安全性评价标准中的允许限度以内。5 种方案的最大减载率均在安全性评价标准 0.8 以内。

表 3 5 种方案转辙器区脱轨系数和减载率最大值

方案	最大脱轨系数		最大减载率	
	尖轨侧	基本轨侧	尖轨侧	基本轨侧
一	1.38	0.34	0.15	0.65
二	1.08	0.35	0.16	0.50
三	0.88	0.32	0.22	0.30
四	0.94	0.33	0.17	0.25
五	1.20	0.35	0.29	0.62

### 3.3 平稳性

列车逆向通过不同道岔平面线型设计方案转辙器区时, 车体竖向和横向振动加速度最大值如表 4 所示。不同方案下列车经过转辙器区时车体竖向振动加速度最大值差异不大, 横向加速度差异明显。方案一的车体横向振动加速度最大值为  $1.26 \text{ m/s}^2$  ( $0.129 g$ ), 超过舒适性评价指标  $0.1 g$  的限值; 方案二、方案五的车体横向振动加速度也较明显, 最大值分别为  $0.75 \text{ m/s}^2$  和  $0.8 \text{ m/s}^2$ , 但未超过舒适性指标限值; 方案三、方案四的车体横向加速度较小, 最大值分别为  $0.54 \text{ m/s}^2$  和  $0.55 \text{ m/s}^2$ 。

表 4 5 种方案通过转辙器区时车体振动加速度最大值  $\text{m/s}^2$

方案	车体最大竖向加速度	车体最大横向加速度
一	0.22	1.26
二	0.17	0.75
三	0.16	0.54
四	0.18	0.55
五	0.18	0.80

### 3.4 轮轨接触斑处消耗的功率

轮轨处摩擦功率的消耗, 是车辆速度  $v$  和轮轨接触斑处摩擦功  $W$  的乘积, 在一定程度上反映了钢轨的磨耗程度, 可以用来评估各方案中曲尖轨的使用寿命。列车逆向通过不同道岔平面线型设计方案转辙器区时, 轮轨磨耗功分布如图 5 所示。从图 5 可以看出, 方案三、方案四的磨耗功最小, 表示其曲尖轨的使用寿命较其他方案长。

## 4 结论

(1) 道岔的平面线型是制约其侧向通过速度的主要因素, 本文研究提出了地铁 9 号道岔侧向通过

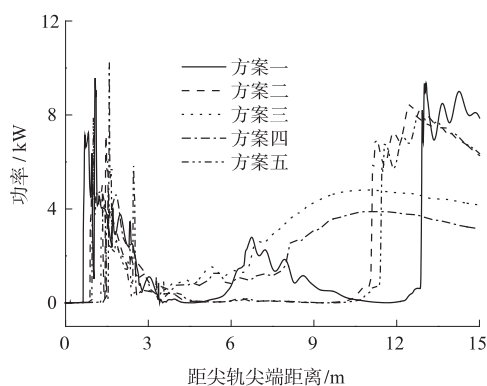


图 5 尖轨侧轮轨接触斑处消耗的功率

速度  $50 \text{ km/h}$  的平面线型设计方案。

(2) 对于地铁常用的 9 号道岔, 尖轨采用相离半切线型、尖轨尖端理论厚度  $2 \text{ mm}$ , 结合尖轨线型的布置, 选择合适的尖轨冲击角, 既可提高尖轨的整体耐磨性, 也可保证过岔时具有较好的乘坐舒适性。

(3) 方案一、方案五不满足车辆运行安全性要求, 不应采用; 方案二中车辆过岔舒适性较差且轮轨磨耗功较大, 不建议采用; 方案三、方案四的车辆行驶安全性、舒适性及轮轨磨耗功等指标均较优, 推荐使用。其中: 方案四导曲线半径为  $350 \text{ m}$ , 有利于降低列车经过导曲线时未被平衡的离心加速度, 提高列车过岔舒适性, 但其道岔较长, 为  $34.8 \text{ m}$ ; 而方案三道岔全长为  $32.4 \text{ m}$ , 可更好地节约道岔铺设用地。因此, 应在应用过程中需根据工程实际要求进行方案选择。

## 参考文献

- [1] 吴祖荣, 姚晓平, 管天保. 提高 12 号道岔侧向过岔速度的有效途径[J]. 铁道学报, 1988(2): 123.
- [2] 王平. 高速铁路道岔设计理论与实践[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011.
- [3] 郭福安. 国外高速铁路的道岔设计[J]. 中国铁路, 2006(2): 48.
- [4] 王树国, 顾培雄. 客运专线道岔技术研究[J]. 中国铁路, 2007(8): 21.
- [5] 刘皓, 袁宝军. 直向通过速度为  $200 \text{ km/h}$  的  $60 \text{ kg/m}$  钢轨 12 号道岔的研制[J]. 铁道建筑, 2006(9): 72.
- [6] 翟婉明, 王开云. 机车车辆侧向通过道岔时的运行安全性评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(3): 382.
- [7] 全顺喜. 9 号单开道岔尖轨平面线型方案研究[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(12): 29.
- [8] 汤奇志, 马大伟, 时颖. 高速铁路对道岔侧向最高允许通过速度的要求[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 109.

(收稿日期: 2018-08-31)