DOI: 10.3901/JME.2020.24.173

地铁列车-嵌入式轨道系统动力学性能 II: 轨道参数对动力学性能影响*

韩 健¹ 肖新标² 杨 刚³ 温泽峰² 金学松²

- (1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;
2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;
3. 成都市新筑路桥机械股份有限公司 成都 611430)

摘要: 嵌入式轨道在地铁减振降噪方面具有广阔的应用前景,但仍然需要保证嵌入式轨道具备较好的动力学性能,因此开展其结构和材料参数对地铁列车-嵌入式轨道系统的动力学性能影响研究具有重要意义。基于建立的地铁列车-嵌入式轨道系统的动力学模型,分析承轨槽内填充材料特性、轨道板几何尺寸、轨道板下支承材料特性对系统动力学性能的影响,确定基于动力学性能的轨道参数优选范围。结果表明:填充材料垂向刚度的合理取值范围是每米 80~110 kN/mm,填充材料横向刚度的合理取值范围是每米 30~50 kN/mm,轨道板下支承刚度的合理取值范围是每平方米 1~5 MN/mm。还分析了轨道板几何尺寸的合理取值范围。研究成果为地铁嵌入式轨道设计和参数选取提供了依据,从动力学角度为嵌入式轨道在地铁中应用提供了理论支撑。

关键词: 嵌入式轨道; 地铁列车; 动力学性能; 刚度; 阻尼; 几何尺寸

中图分类号: U211; U491

Dynamic Behaviour of Metro Train and Embedded Track System II: Effect of Track Parameters on Dynamic Behaviour

HAN Jian¹ XIAO Xinbiao² YANG Gang³ WEN Zefeng² JIN Xuesong²

- (1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;
2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;
3. Chengdu Xinzhu Road & Bridge Machinery Co., Ltd., Chengdu 611430)

Abstract: Embedded track has broad application prospect in vibration and noise reduction of metro. However, it is still necessary to ensure that the embedded track has good dynamic performance. Therefore, embedded track is of great significance to study the effect of track structure and material parameters on the dynamic behavior of the metro train and embedded track system. Based on the developed dynamic model of the metro train and embedded track system, the effect of the filling material characteristics, the geometric dimensioning of the slab and the supporting material characteristics under the slab on the system dynamic behaviour to determine the optimal range of track parameters are analyzed. The results show that the reasonable value range of the vertical stiffness of the filling material is 80-110 kN/mm per meter, the reasonable value range of the lateral stiffness of the filling material is 30-50 kN/mm per meter, and the reasonable value range of the supporting stiffness of the track plate is 1-5 MN/mm per square meter. In addition, the reasonable range of geometric dimension of slab is also analyzed. Is provided The basis is provided for the design and parameter selection of metro embedded track and theoretical support is provided for the application of embedded track in metro from the perspective of dynamics.

Key words: embedded track; metro train; dynamics behaviour; stiffness; damping; geometric dimensioning

0 前言

目前,嵌入式轨道的动力学行为主要针对有轨

电车系统开展, OOSTERMEIJER 等^[1]在 2000 年利用名称为“rail”的计算模型来模拟嵌入式轨道结构,模型中考虑了弹簧和阻尼单元对梁的连续支承作用。然而该模型在轨道的具体结构方面考虑较为粗略,例如没有充分考虑嵌入式轨道槽内结构的影响,轨道板的贡献等。OOSTERMEIJER 等基于建立的

* 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201103)。20200307 收到初稿, 20200830 收到修改稿

模型, 通过将嵌入式轨道与有砟轨道对比发现嵌入式钢轨具有更好的轨道动态特性、钢轨衰减率以及车辆轨道相互作用, 这使得钢轨磨损低、噪声小, 并且保证更高乘坐舒适性。MARKINE 等^[2]在 2000 年建立了垂向高速车辆和双层梁嵌入式轨道的耦合模型, 其中嵌入式轨道系统简化为两层结构, 钢轨和轨道板均被视作梁模型, 钢轨和轨道板下部采用弹簧阻尼单元模拟弹性支承, 但未考虑槽内填充材料的惯性效应。基于该模型, MARKINE 等利用基于响应面拟合的多点逼近方法“MARS”, 对不同速度下的轨道结构进行了优化, 以获取较优的轮轨力。SHAMALTA 等^[3]于 2002 年建立了移动载荷激励下嵌入式轨道的一维和二维动力学模型。该篇文章所指的一维模型是一个垂向动力学模型, 二维模型是一个考虑垂向和横向的动力学模型, 一维模型中钢轨和轨道板视作弹性梁, 钢轨和轨道板之间、轨道板与地基之间用连续弹簧阻尼单元连接来分别模拟填充材料和土壤, 而对于二维模型, 钢轨的模拟与一维模型一致, 利用基尔霍夫板来模拟轨道板, 梁板以及板下的支承模拟与也与一维模型类似。通过将建立的一维和二维动力学模型与已有的有限元模型计算获取的轨道动力学相应进行对比可以发现, 一维模型的精度对于工程应用是可以接受的, 同时一维模型的计算速度更为快速。SHAMALTA 等^[4]利用建立的动力学模型, 在频率-波数域下进行了频散特性分析, 在此基础上获得了同相位和反相位下载荷的临界速度, 并分析了钢轨和轨道的位移以及轨道板的应力与载荷速度和频率的关系。ZOU 等^[5]于 2005 年建立了考虑有轨电车的移动载荷作用于嵌入式轨道结构的动力学模型, 模型中将钢轨和轨道板模拟为 Euler 梁, 钢轨与轨道板之间、轨道板以下支承均使用弹簧阻尼单元模拟, 并利用 Newmark 积分方法求解运动方程。分析了移动载荷下钢轨和轨道板的位移响应, 并调查了速度条件, 钢轨重量和钢轨支承刚度对钢轨和轨道板位移的影响, 其中调查发现移动速度增大, 轨道位移增大, 钢轨质量增大, 轨道位移减小。该文将车辆简化为载荷, 同时轨道模型仍然采用两层梁结构, 改进较少。DANIELS^[6]建立了多层嵌入式轨道的动力学模型, 用来分析嵌入式轨道的轨道板寿命、基础土层承载力等长期行为, 结果表明, 弹性体提供的钢轨支承刚度在 $70 \sim 105 \text{ kN/mm}$ ($4 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5 \text{ lb/in}$) 范围较为合理, 超过 175 kN/mm ($1 \times 10^5 \text{ lb/in}$) 的钢轨支承刚度会对混凝土轨道板造成损伤。LING 等^[7]建立了有轨电车和嵌入式轨道的相互作用模型, 模型采用多刚体来模拟车辆, 钢轨的模拟与传统轨道

一致, 填充材料采用弹簧和阻尼来近似模拟。嵌入式道床板底部的致密混凝土底座及路基简化为等效的弹簧-阻尼单元。数值结果表明, 有轨电车嵌入式轨道系统与有轨电车扣件式轨道系统相比, 嵌入式轨道可以减少动态轮轨力, 轨道部件的振动水平。邓永权等^[8]利用该模型, 基于安全性指标分析了焊接接头不平顺的限值, 并分析了有轨电车-嵌入式轨道动力学性能, 调查了典型轮轨磨损形式对车辆动力学行为的影响, 并以动力学性能为优化目标, 对嵌入式轨道结构参数进行了优化^[9]。胥燕军^[10]建立了有轨电车和嵌入式轨道的相互作用模型, 分析了刚度对轨道动态特性的影响。结果表明道床板垂向位移相较于钢轨垂向位移对于刚度的变化要更加敏感。韩健等建立了较为完整的地铁列车-嵌入式轨道系统动力学模型, 并基于试验对动力学模型进行了验证^[11-12]。

综上所述, 目前嵌入式轨道的动力学性能研究主要针对有轨电车系统, 较少在地铁系统中研究嵌入式轨道动力学性能及轨道参数影响, 本文基于文献[11]中建立的地铁列车-嵌入式轨道耦合系统的动力学性能分析模型, 系统地分析承轨槽内填充材料特性、轨道板几何尺寸、轨道板下支承材料特性对系统动力学性能的影响, 确定基于动力学性能的轨道参数优选范围。

1 动力学性能约束目标

选取列车运行安全性、平稳性以及轨道动态响应作为参数影响调查的约束目标, 以便较好地开展嵌入式轨道参数对动力学性能的影响, 以下分别给出各关键动力学性能约束目标的具体指标。

本节开展的动力学分析主要基于文献[11]中建立的地铁列车-嵌入式轨道系统动力学性能模型。动力学模型共包含三个部分: ①由钢轨、填充材料、轨道板、板下支承组成的柔性轨道系统模型; ②6 节编组 76 自由度的多刚体地铁列车系统模型; ③3 维轮轨相互作用及车辆/轨道耦合界面激励模型。

1.1 运行安全性

运行安全性能是车辆系统关键动力学性能之一, 参考国标 GB 5599—1985^[13]和 UIC 518—2005^[14]对车辆安全性的评定标准, 常用的列车曲线通过安全指标主要包括脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力、轮轨横向力和轮轨垂向力。

1.1.1 脱轨系数

根据 UIC518 规定, 车辆脱轨系数应符合以下条件

$$L/V \leq 0.8 \quad (1)$$

式中, L 为轮轨横向力; V 为轮轨垂向力。

1.1.2 轮重减载率

根据国标 GB 5599—1985 规定, 轮重减载率应符合以下条件

$$\Delta V/V \leq 0.6 \quad (2)$$

式中, ΔV 为轮重减载量; V 为增载侧和减载侧车轮的平均轮重。

1.1.3 轮轴横向力

根据国标 GB 5599—1985 规定并参考 UIC 518 对轮轴横向力评定标准。轮轴横向力 H 的限值如式(3)所示

$$H \leq 10 + \frac{P_0}{3} \quad (3)$$

式中, P_0 为静轴重。对于本文所用地铁列车, 空载时动车和拖车的静轴重分别为 90 kN 和 81 kN, 满载时动车和拖车的静轴重分别为 135 kN 和 132 kN, 其轮轴横向力 H 的限度值由式(3)计算可得, 如表 1 所示。

表 1 轮轴横向力限值

车型	动车空载	动车满载	拖车空载	拖车满载
轮轴横向力/kN	40	55	37	54

1.1.4 轮轨横向力

目前, 我国还没有针对轮轨横向力的评价标准。参考欧美铁路及日本新干线试验, 一般以轴重的 40% 作为横向力 Q 的允许限度, 如式(4)所示

$$Q \leq 0.4P_0 \quad (4)$$

对于本文所用地铁列车, 其轮轨横向力 Q 的限度值由式(4)可计算可得, 如表 2 所示。

表 2 轮轨横向力限值

车型	动车空载	动车满载	拖车空载	拖车满载
轮轨横向力/kN	36	54	33	53

1.1.5 轮轨垂向力

轮轨垂向力 P 评价标准为

$$P \leq 90 + P_{st} \quad (5)$$

式中, P_{st} 为静轮重, 为轴重 P_0 的一半。对于本文所用地铁列车, 其轮轨垂向力 P 的限度值由式(5)可计算可得, 如表 3 所示。

表 3 轮轨垂向力限值

车型	动车空载	动车满载	拖车空载	拖车满载
轮轨垂向力/kN	135	157.5	130.5	156

1.2 运行平稳性

(1) 车体振动加速度。根据 UIC-518 标准, 车体横向和垂向加速度最大限值均为 2.5 m/s^2 。

(2) 平稳性指标。采用横、垂向平稳性指标进行评定, 我国铁道车辆运行平稳性指标 W 采用 Sperling 指标, 计算式如下

$$W = 7.08 \left[\frac{A^3}{f} F(f) \right]^{0.1} \quad (6)$$

式中, A 为车体振动加速度; f 为振动频率; $F(f)$ 为频率修正系数^[12]。

国标 GB 5599—1985 中关于车辆的平稳性等级见表 4, 其中垂向和横向平稳性采用相同的评定等级。

表 4 车辆平稳性评定等级

平稳性等级	车辆
优	<2.5
良好	2.5~2.75
合格	2.75~3.0

1.3 轨道动力响应特性

为了更好地衡量系统的动力学性能, 除了选择标准规定的列车运行安全性和平稳性, 还选择了轨道的动力响应特性, 包括钢轨位移和加速度、轨道板位移和加速度。

2 轨道参数对动力学性能影响分析

对地铁用嵌入式轨道的参数影响分析中, 综合考虑了三种工况, 分别为随机不平顺激励(美国五级谱)下列车以 60 km/h 运行速度的直线工况, 随机不平顺激励(美国五级谱)下列车以 50 km/h 运行速度的曲线工况(曲线半径 $R=300 \text{ m}$), 以及冲击型谐波不平顺(波长为 0.1 m , 幅值为 0.3 mm)下列车以 60 km/h 运行速度的直线工况。通过以上工况, 以地铁列车-嵌入式轨道的安全性、平稳性以及轨道的动力响应为评价指标, 由于评价指标较多, 且各指标变化趋势并不一致, 因此对各评价指标进行归一化处理, 如式(7)所示

$$f_i(X) / \sum_{i=1}^m f_i(X) \quad (7)$$

式中, X 表示优化参数, $f_i(X)$ 表示各动力学性能指标; 将归一化后随着优化参数变量增大而减小的指标定义为 $f_{1i}(X)$, 随着参数变量增大而增大的指标定义为 $f_{2i}(X)$, 然后根据分目标乘法, 确定一个优化目标函数 $U(X)$, 如式(8)所示, 最终由优化目标函数确定轨道材料参数和结构的最优取值范围

$$U(X) = \sum_{i=1}^m f_{1i}(X) \cdot \sum_{j=m+1}^n f_{2j}(X) \quad X = (x_1, x_2, \dots, x_{r-1}, x_r) \quad (8)$$

本节调查的参数包括承轨槽填充材料的垂向刚

度和横向刚度,轨道板结构几何尺寸以及板下支承刚度,嵌入式轨道结构如图1所示^[1]。

图1 嵌入式轨道结构

2.1 承轨槽内填充材料特性影响

2.1.1 填充材料垂向刚度

填充材料垂向刚度主要由高分子材料的材料特性(包含浇注料、降噪块和轨下垫板的弹性模量、泊松比等)决定。本节计算了定义的三种不平顺激励情况下填充材料垂向刚度变化对动力学性能及嵌入式轨道结构动力特性的影响规律,具体指标包括脱轨系数、轮重减载率、轮轨垂向力、轮轨横向力、轮轴横向力、车体垂向加速度、车体平稳性指标、钢轨垂向加速度、钢轨垂向位移、轨道板垂向加速度、轨道板垂向位移,由于结果表现为填充材料垂向刚度对轮轨横向力、轮轴横向力、车体垂向最大加速度、车体平稳性指标、轨道板垂向位移影响较小,因此图2仅列出了影响相对显著的指标。

图2 填充材料垂向刚度对动力学性能影响

由图2可知,钢轨垂向加速度和位移表现为随着承轨槽填充材料垂向刚度的增大而减小;脱轨系数、轮重减载率、轨道板垂向加速度、轨道板垂向位移表现为随着承轨槽填充材料垂向刚度的增大而增大。综合考虑直线运行、曲线运行以及冲击激励三种工况下填充材料垂向刚度对各项动力学指标及轨道动态响应的影响,根据分目标乘除法,综合优化目标函数与填充材料垂向刚度的关系如图3所示。由图3可见,填充材料垂向刚度取值在每米80~110 kN/mm(相当于扣件系统0.625 m轨枕间距的刚度50~78 kN/mm)范围较为合理。

图3 填充材料垂向刚度综合优化目标函数

2.1.2 填充材料横向刚度

填充材料横向刚度主要由高分子材料的材料特性(包含浇注料、降噪块的弹性模量和泊松比等)、承轨槽的几何尺寸共同决定。与垂向刚度类似,仅选取了影响相对显著的指标,如图4所示。

由图4可知,钢轨横向位移和直线工况下的横向加速度表现为随着承轨槽填充材料横向刚度的增大而减小;轮轨横向力、轮轴横向力、曲线工况下的钢轨横向加速度表现为随着承轨槽填充材料横向刚度的增大而增大。综合考虑直线运行、曲线运行

(a) 轮轨横向力

(b) 轮轴横向力

(c) 钢轨横向加速度

(d) 钢轨横向位移

图4 填充材料横向刚度对动力学性能影响

以及冲击激励三种工况下填充材料横向刚度对各项动力学指标及轨道动态响应的影响,根据分目标乘除法,综合优化目标函数与填充材料横向刚度的关系如图5所示,由图可见,填充材料横向刚度取值在每米30~50 kN/mm(相当于扣件系统0.625 m轨枕间距的刚度19~31 kN/mm)范围较为合理。

2.2 轨道板几何尺寸影响

2.2.1 轨道板长度

图6列出了轨道板长度对动力学性能影响相对显著的指标影响规律。

图5 填充材料横向刚度综合优化目标函数

图6 轨道板长度对动力学性能影响

(a) 轮重减载率

(b) 轮轨垂向力

(c) 钢轨垂向加速度

由图6可知,轮重减载率、轮轨垂向力、钢轨垂向加速度和轨道板垂向加速度表现为随着轨道板长度的增大而减小。综合考虑直线运行、曲线运行以及冲击激励三种工况下轨道板长度对各项动力学指标及轨道动态响应的影响,根据分目标乘法,综合优化目标函数与轨道板长度的关系如图7所示,由图可见,轨道板长度表现为越长越好,但考虑嵌入式轨道板为预制板,长度过长会影响运输和进入隧道,因此取值在4.75(原尺寸)~6 m范围较为合理。

图7 轨道板长度综合优化目标函数

2.2.2 轨道板厚度

通过计算,轨道板整体厚度对各项指标影响均较小,因此轨道板整体厚度可保留原方案尺寸350 mm,或者在满足结构强度、施工等其他要求基础上适当减薄。而轨道板中央厚度的改变仅对轨道板垂向加速度有一定影响,如图8所示,表现为中央板厚越大越优,调查范围内中央板厚可在原尺寸基础上略微增厚,即选用175~225 mm。

2.2.3 承轨槽尺寸

通过计算,承轨槽宽度和深度的改变均仅对轨道板垂向加速度有一定影响,分别如图9和图10

图 8 轨道板中央厚度对轨道板加速度的影响

所示, 表现为承轨槽宽度越小越优, 在分析范围内, 承轨槽宽度取值在 180~210 mm 较为合理, 但因为钢轨轮缘一侧限界的存在, 承轨槽宽度取值为 200 mm 较为合理。而承轨槽深度表现为承轨槽深度越小越优, 承轨槽深度取值在 170~175 mm 较为合理。

图 9 承轨槽宽度对轨道板加速度的影响

图 10 承轨槽深度对轨道板加速度的影响

2.3 轨道板下支承材料动力特性影响

嵌入式轨道的轨道板下支承材料主要由 CA 砂

浆或者具有一定弹性的垫板支承, 从而为嵌入式轨道提供一个二级减振的功能。本节重点分析轨道板下支承材料的刚度特性对嵌入式轨道结构的振动特性及地铁列车的动力学性能的影响, 支承刚度的取值范围为单位面积 0.005~5 MN/mm。

通过计算, 轨道板下支承刚度对脱轨系数、轮重减载率、轮轨垂向力、轮轨横向力、轮轴横向力、车体垂向加速度、车体平稳性指标、钢轨垂向加速度、轨道板垂向加速度影响较小, 因此图 11 仅列出了影响相对显著的指标。

图 11 轨道板下支承刚度对轨道结构动力特性的影响

由图 11 可知, 钢轨垂向位移和轨道板垂向位移表现为随着轨道板下支承刚度的增大而减小。综合考虑直线运行、曲线运行以及冲击激励三种工况下轨道板下支承刚度对各项动力学指标及轨道动态响应的的影响, 根据分目标乘除法, 综合优化目标函数与轨道板下支承刚度的关系如图 12 所示, 由图可见, 轨道板下支承刚度取值在每平方米 1~5 MN/mm 的范围较为合理。

图 12 轨道板下支承刚度综合优化目标函数

3 结论

(1) 填充材料垂向刚度的合理取值范围是每米 80~110 kN/mm, 填充材料横向刚度的合理取值范围是每米 30~50 kN/mm。

(2) 轨道板长度表现为越长越好, 考虑施工便捷性, 建议取值在 4.75~6 m 范围较为合理。轨道板整体厚度对各项指标影响均较小。中央板厚的合理取值范围是 175~225 mm。承轨槽宽度的合理取值为 200 mm。承轨槽深度的合理取值范围是 170~175 mm。

(3) 轨道板下支承刚度的合理取值范围是每平方米 1~5 MN/mm。

以上基于动力学性能得出的嵌入式轨道参数范围为地铁嵌入式轨道设计和参数选取提供依据和理论支撑。

参 考 文 献

- [1] OOSTERMEIJER K H, KOK A W M. Dynamic behaviour of railway superstructures[J]. Heron, 2000, 45(1): 25-34.
- [2] MARKINE V L, MAN A P, ESVELD C. Optimization of an embedded rail structure using a numerical technique[J]. Heron, 2000, 45(1): 63-74.
- [3] SHAMALTA M, METRKINE A V. Comparison of the dynamic response of one- and two-dimensional models for an embedded railway track to a moving load[J]. Heron, 2002, 47(4): 243-262.
- [4] SHAMALTA M, METRKINE A V. Analytical study of the dynamic response of an embedded railway track to a moving load[J]. Archive of Applied Mechanics, 2003, 73: 131-146.
- [5] ZOU Jinhua, WANG Ronghui, WEI Demin. Analysis of dynamic response of an embedded railway track under a moving light-rail train[C]// Proceedings of 2005 International Conference on Construction & Real Estate Management, December 12, 2005, Penang, Malaysia. 2005: 40-43.
- [6] DANIELS L E. Embedded track design and behaviour [C]//9 th National Light Rail Transit Conference, 16-18, November, Portland, US, 2003: 437-458.
- [7] LING L, HAN J, XIAO X, et al. Dynamic behavior of an embedded rail track coupled with a tram vehicle[J]. Journal of Vibration and Control, 2017, 23: 2355-2372.
- [8] 邓永权, 凌亮, 肖新标, 等. 嵌入式轨道钢轨焊接不顺顺安全限值研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016(5): 30-34, 39.
- [9] 邓永权. 有轨电列车-嵌入式轨道动态相互作用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [10] 胥燕军. 现代有轨电车埋入式轨道结构参数优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [11] 韩健, 李志辉, 肖新标, 等. 地铁列车-嵌入式轨道系统动力学性能研究 I: 理论建模、试验分析及验证[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 148-158.
- [12] 韩健. 地铁列车-嵌入式轨道系统动力学性能及振动噪声特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [13] 中国国家标准化委员会. GB 5599-85 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
- [14] International Union of Railways. UIC 518-2005 testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior—Safety—Track fatigue—Ride quality[S]. Paris: International Union of Railways, 2005.

作者简介: 韩健, 男, 1987 年出生, 助理研究员。主要研究方向为轨道交通振动与噪声控制。
E-mail: super_han@126.com