

地铁曲线波浪型磨耗的机理分析

沈 钢¹, 张学华², 郭满鸿²

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2 南京地下铁道有限责任公司运营分公司, 江苏 南京 210012)

摘要: 建立了单轮对的粘滑振动数学模型, 考虑了轮对的弹性体模态、轮轨间的蠕滑力—蠕滑率关系在大蠕滑时的负梯度特性、轨道的横向弹性和转向架的一系悬挂特性, 分析了多种因素对粘滑振动的影响, 研究了波浪型磨耗与粘滑振动之间的关系, 通过现场测试获得了与理论分析的一致性。

关键词: 轮轨粘滑振动; 波浪型磨耗; 地铁线路; 曲线轨道
中图分类号: U 260.11; TP 391.9 **文献标识码:** A

Theoretical Study on Rail Corrugation on Curved Track of Metro Systems

SHEN Gang¹, WZHANG Xuehua², GUO Manhong²

(1. Research Institute of Railway and Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Nanjing Metro Company Limited Affiliated Company of Operation, Nanjing 210012, China)

Abstract: Based on a detailed theoretical model of a single wheelset, a study is carried out on the relationship between rail corrugation on curved track in metro system with detailed analysis on possible factors contributing to stick-slip vibration considering flexible mode of wheelset, negative characteristics of creep force versus creepage and primary suspension.

Key words: stick-slip vibration; rail corrugation; metro line; curved track

为了从轮轨接触机理上弄清曲线波浪型磨耗形成的机理, 在调研了国内外相关成果的基础上^[1-7], 建立了细化的单轮对曲线通过数学模型。该模型考虑了轮对的弹性体模态和钢轨的各向刚度和阻尼, 采用了与实际情况等效的轮轨蠕滑特性曲线, 对多种可能引起轮轨滑动的参数, 包括轮对弯曲刚度、扭转刚度、钢轨横向刚度、轮轨粘着水平、运行速度、曲

线半径和曲线超高等进行了全面的分析。采用 Matlab/Simulink 建立了单轮对的曲线通过模型。仿真再现了圆曲线上的轮轨粘滑振动现象。

1 轮对曲线运行的特性

对于构架式的转向架而言, 为了保证一定的蛇形运动稳定性, 需要将前后轮对用足够的一系定位刚度与构架相连。当这种转向架通过较小半径的曲线轨道时, 过大的定位约束刚度使得轮对很难利用不大的左右轮径差依靠轮轨间的蠕滑导向力使轮对以合理的冲角通过曲线。往往导向轮对以较大的正冲角和较大的横移量以挤压曲线外轨的方式通过曲线, 造成轮轨的磨耗。如图 1 所示为一导向轮在通过曲线时的受力示意图, 力的大小和方向与通过小半径曲线时导向轮对的实际情况相符合。虽然采用目前的磨耗型踏面两点接触的可能性很小, 但随着轮轨的磨耗, 仍然在曲线上容易发生两点接触, 或出现共形接触现象, 因此示意图中将左轮与外轨的接触看作两点接触, 一点在踏面上, 另一点在轮缘上。若不考虑回转蠕滑力矩, 左侧踏面接触点有两个方向的蠕滑力 F_{cyL} 和 F_{cxL} , 还有一个正压力 N_L 。左侧轮缘接触点也有两个方向的蠕滑力 F_{cylF} 和 F_{cxF} , 还有一个正压力 N_{LF} 。右侧踏面接触点有两个方向的蠕滑力 F_{cyR} 和 F_{cxR} , 还有一个正压力 N_R 。左侧轮缘正压力的水平分力远大于左轮上的横向蠕滑力合力, 且方向相反。

本文为了研究波磨机理, 仅以单个有一系定位的轮对作为研究对象。以图示力的方向为正方向, 根据轮对在纵、横向的静力平衡得:

$$F_{cyL} + F_{cylF} \cos \beta - N_{LF} \sin \beta - N_L \sin \theta_L + F_{cyR} + N_R \sin \theta_R = -F_{syspy} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-11-30

第一作者: 沈 钢(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道车辆动力学。E-mail: elsg@sh163.net

$$-F_{\text{CXL}} + F_{\text{CXLf}} + F_{\text{CXR}} = F_{\text{SYSPX}} \quad (2) \quad (4) \text{ 为}$$

若不计较小的踏面接触角,式(1)和式(2)即为

$$F_{\text{CYR}} = N_{\text{LF}} \sin \beta - F_{\text{CYL}} - F_{\text{CYLF}} \cos \beta - F_{\text{SYSPY}} \quad (3)$$

$$F_{\text{CXR}} = F_{\text{CXL}} - F_{\text{CXLf}} + F_{\text{SYSPX}} \quad (4)$$

若轮对以平衡速度通过,可以认为 $F_{\text{SYSPY}} = 0$, 则式(3)为

$$F_{\text{CYR}} = N_{\text{LF}} \sin \beta - F_{\text{CYL}} - F_{\text{CYLF}} \cos \beta \quad (5)$$

若不计制动与牵引工况,可以认为 $F_{\text{SYSPX}} = 0$, 则式

$$F_{\text{CXR}} = F_{\text{CXL}} - F_{\text{CXLf}} \quad (6)$$

即右侧轮子踏面上的横向蠕滑力为左侧轮缘正压力和蠕滑力在横向方向的合力;右侧的纵向蠕滑力等于左侧踏面与轮缘纵向蠕滑力的合力,大小相等,方向相反.可见右侧轮子上的蠕滑力与左侧轮子上的侧压力和蠕滑力有关;同时右侧轮子上的蠕滑力的合力又受轮轨粘着规律及条件的控制. ψ_w 为轮对的冲角.

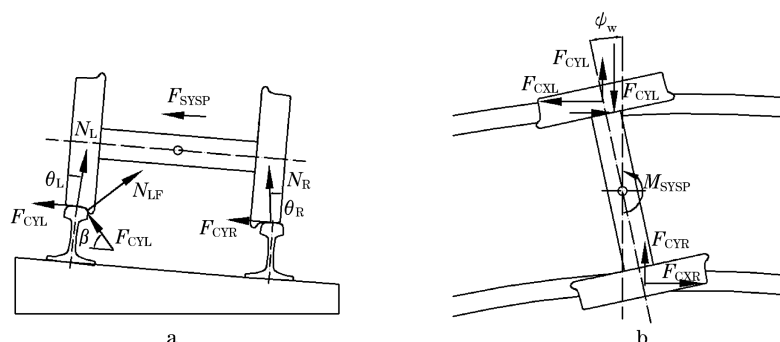


图 1 曲线通过时导向轮对的受力情况示意图

Fig.1 Illustration of forces acting on a wheelset against the track

2 轮轨间的粘滑振动

轮轨间的蠕滑力是蠕滑率的函数,如图 2 所示.当蠕滑率很小时,它们之间呈线性关系;当蠕滑率较大时,蠕滑力呈饱和特征;当蠕滑率进一步增大时,蠕滑力反而下降,出现负梯度段.当曲线半径较小,而转向架导向性能不良时,左右轮轨接触点很有可能处于这个负梯度段区域.从力学上看,这一负梯度段的作用相当于一负刚度.根据数学分析,这是一个不稳定的系统,即会发生振动发散,由于轮轨蠕滑的

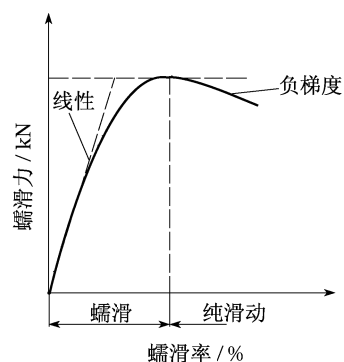


图 2 蠕滑力与蠕滑率的关系

Fig.2 The relationship between creep force and creepage

强非线性因素,将出现振荡现象.左侧轮子由于轮缘的接触,不可能在轮轨间发生横向的运动,而右侧的轮子处于弹性运动的自由状态,轮轨间有较大的横向间隙和纵向转动弹性体自由度.据此,建立了考虑轮对两种柔体振型的单轮对的动态仿真模型,如图 3 和图 4 所示.模型中还考虑了多种可能参与耦合振动的因素,包括轮对弯曲刚度、扭转刚度、钢轨横向刚度、轮轨粘着水平、运行速度、曲线半径和曲线超高等.采用 Matlab/Simulink 建立了单轮对的曲线通过模型.等效的轮轨蠕滑特性曲线图 5 所示的曲线表达.

如图 6 所示.在特定条件下可以模拟出如图 6 所示的轮轨间的粘滑振动现象.图 7 和图 8 为右侧轮子上的纵横向蠕滑力.一般该振动在缓和曲线的后半段开始发生,在圆曲线上出现稳定的振荡,到出缓和曲线的后半段消失.不同的负梯度,开始出现振动的半径会不同.不同的轨道刚度和粘着水平对振动的产生也有很大影响.通过大量计算分析表明,该粘滑振动的发生规律与现场出现的波磨发生规律相吻合,即这种振动容易出现在曲线内轨的圆曲线上、容易出现在曲线半径较小的区段、容易出现在轮轨粘着条件较好的地下洞内的轨道上、容易

出现在轨道刚度较大的整体道床上.表1为仿真时采用的参数.图9为现场曲线内轨上测量得到的有波磨区段的横向加速度信号,可见具有明显的周期振动成份.

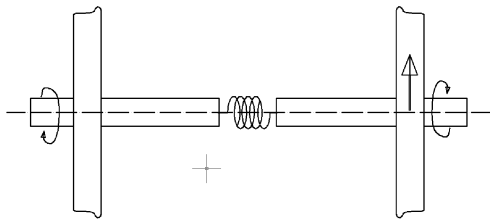


图3 轮对的一阶扭转振型
Fig.3 Torsion mode of wheelset

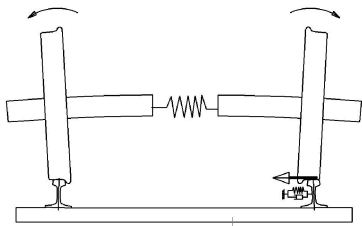


图4 轮对的一阶弯曲振型
Fig.4 Bending mode of wheelset

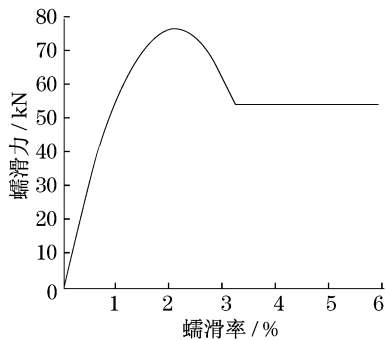


图5 仿真计算用的曲线
Fig.5 The function used in simulation

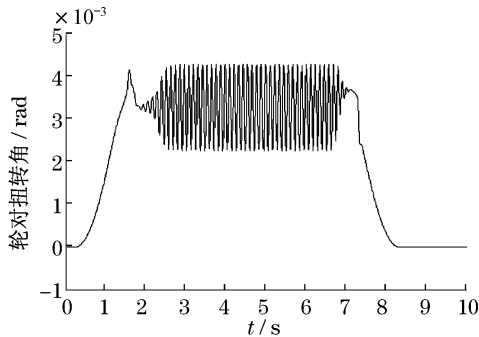


图6 在圆曲线上的轮对粘滑振动
Fig.6 Simulation results of stick-slip oscillations on curved track

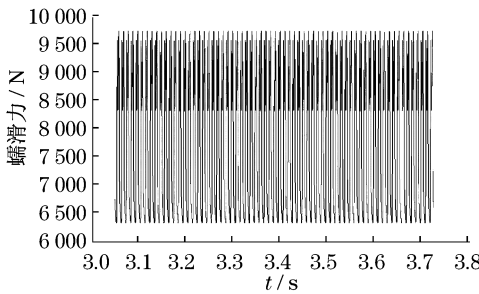


图7 右轮的纵向蠕滑力时间历程
Fig.7 Longitudinal creep force on right wheel contact point

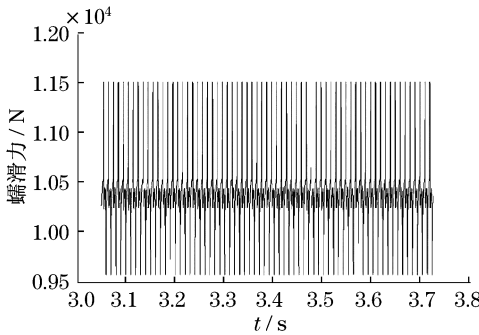


图8 右轮横向蠕滑力时间历程
Fig.8 Lateral creep force on right wheel contact point

表1 仿真模型计算所用参数

Tab.1 Parameters of wheelset and track used for simulation

参数名	轴重/kg	左右轮扭转刚度/ (Nm·rad ⁻¹)	左右轮弯曲刚度/ (Nm·rad ⁻¹)	钢轨横向刚度/ (MN·m ⁻¹)	轮对质量/ kg	轮对扭转惯量/ kg·m ²	轮对一阶弯曲惯量/ kg·m ²
数值	12 178	300 000	2 000 000	10~100	1 670	1 000	2 000

3 影响粘滑振动的因素

采用仿真软件对几个主要因素进行了多方案的定性分析.主要结果有:影响粘滑振动的首要因素是蠕滑率和蠕滑力之间的负梯度特性,对粘滑振动形

成与否有着决定性作用.当蠕滑力饱和后若蠕滑力-蠕滑率特性曲线的负斜率不同,可能产生轮对的粘滑振动的频率也不同.蠕滑力饱和后如特性曲线无下降,无论其它条件如何,均不会发生粘滑振动.其次是轨道的横向刚度和轮对的扭转和弯曲刚度,轨道的刚度低到一定程度就会使耦合振动消失.调查

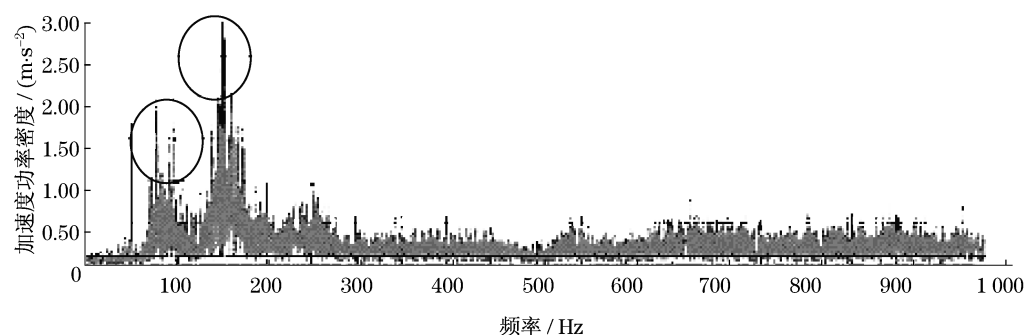


图 9 曲线上有波磨处的横向振动频谱图

Fig.9 PSD diagram of acceleration measured on curved track

也发现采用木枕的道岔上没有这种波磨,而整体道床的道岔上有严重的波磨.同样轮对扭转和弯曲刚度的减小也会使耦合振动消失.轮轨间的粘着水平对粘滑振动的发生也有影响,计算分析表明,当粘着水平下降时,作用在轮踏面上的合成蠕滑力不容易达到负梯度段,因而粘滑振动不会发生.曲线半径越小会使轮轨蠕滑率越大,使轮轨接触进入负梯度段,发生粘滑振动.现场的调研发现 500 m 以上的曲线基本没有波磨现象.车辆的一系定位刚度对粘滑振动基本无影响.整车仿真模型的计算也表明,二系悬挂参数对波磨发生也没有影响,因此采用单一轮对研究波磨的是合理的.

4 粘滑振动与波浪型磨耗的关系

若所有的车辆具有极好的一致性,且运行速度一致,则容易在所经过的曲线上,特别是在圆曲线上形成有规律的振动,这种振动往往使右侧轮子与内轨间发生大的滑动,当轮轨接触面的切向力足以破坏轨道顶面的金属材料时,或使其发生低周疲劳,则波磨就会产生.因此在一定外界条件共同作用下的粘滑振动是地铁曲线波浪型磨耗发生的重要原因.任何一个外界条件的消失,都能够使波磨消失.

5 结语

在考虑轮对的弹性体扭转和弯曲振动的情况下,模拟了在曲线上可能产生粘滑振动的事实,并分

析了不同的影响因素,包括钢轨的横向定位刚度、轮轨间的粘着水平、弹性体的刚度、曲线半径,初步定性了这些因素对粘滑振动的影响规律.并通过进一步的现场调研,证实了计算结果与实际现象的一致性.

参考文献:

- [1] Akira Matsumoto, Yasuhiro Sato, Hiroyuki Ono, et al. Formation mechanism and countermeasures of rail corrugation on curved track[J]. Wear, 2002, 253: 178.
- [2] Saulot A, Descartes S, Desmyter D, et al. A tribological characterization of the "damage mechanism" of low rail corrugation on sharp curved track[J]. Wear, 2006, 260: 984.
- [3] Annika Igeland, Heike Llias. Rail head corrugation growth predictions based on non-linear high frequency vehicle/track interaction[J]. Wear, 1997, 213: 90.
- [4] Jin X S, Wen Z F, Zhou Z R, et al. Three-dimensional train-track model for study of rail corrugation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293: 830.
- [5] 张波, 刘启跃. 钢轨波浪形磨损的研究分析[J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(5): 500.
ZHANG Bo, LIU Qiyue. Analysis on the rail corrugations [J]. Journal of South West Jiaotong University, 2001, 36(5): 500.
- [6] 刘启跃, 王夏秋, 周仲荣. 钢轨表面波浪形磨损研究[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(4): 337.
LIU Qiyue, WANG Xiaqiu, ZHOU Zhongrong. Study on the rail surface corrugation [J]. Tribology, 1998, 18(4): 337.
- [7] 张立民. 轮轨接触应力与钢轨波磨分析[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(1): 34.
ZHANG Limin. Wheel/Rail contact and rail corrugation [J]. Journal of South West Jiaotong University, 2003, 38(1): 34.