

文章编号: 0258-2724(2011)05-0826-05 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2011.05.019

驱动工况单轮对横向稳定性

姚远, 张红军, 罗赞, 金鼎昌

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 为了解驱动工况下轮对横向稳定性,建立了考虑驱动力矩的简化单轮对动力学模型,针对不同轮轨的黏着特性,研究了弹性定位单轮的横向蛇行稳定性.结果表明:驱动工况下,轮对横向稳定性优于惰行工况,对于弹性定位动力单轮对,当平均蠕滑率为0.8%时,横向非线性临界速度为惰行时的1.1倍;驱动时,轮轨黏着饱和导致轮对摇头力矩减小,有利于横向稳定性,但纵向切向力增加使得横向切向力减小,对轮对横向稳定性不利.

关键词: 横向稳定性; 驱动; 轮对; 轮轨黏着饱和

中图分类号: U260.11 **文献标志码:** A

Lateral Stability of Single Wheelset under Traction

YAO Yuan, ZHANG Hongjun, LUO Yun, JIN Dingchang

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A simplified dynamic model of single wheelset under traction was established to study its lateral stability. The hunting stability was analyzed on different adhesion conditions between wheel and rail. The results show that a single wheelset has a better lateral stability under traction than under idle running, and that when the average creep is 0.8% the nonlinear critical speed of an elastically positioned single wheelset under traction is 1.1 times of that under idle running. Wheel/rail adhesion saturation results in a decrease in wheelset yaw torque, and a decrease in driving torque causes an increase in lateral creep force, both of which are in favor of wheelset stability.

Key words: lateral stability; traction; wheelset; wheel/rail adhesion saturation

轨道车辆临界速度满足实际运行要求一直是动力学设计目标之一.临界速度计算有多种方法^[1-3],文献[4]中的研究表明,驱动工况下,由于轮轨切向力的饱和特性,驱动力矩对机车曲线通过不利.文献[5]中研究了驱动工况下机车径向转向架轮对径向能力,提出了一种轮轨大滑动量下轮轨切向力的计算方法,结果表明,随着牵引力的增大,轮对径向能力减弱.文献[6-8]中研究了驱动工况下,机车驱动轮对黏滑振动及稳定性,分析了机车传动系统扭转及轮对纵向振动规律,提出高黏着性能机车、低动作用力驱动系统的设计原则.文献[9]中提出了机车防空转控制策略.目前关于驱动工况下轮对横向稳定性研究的报道较少.本文中

研究驱动工况下,弹性定位单轮对的横向稳定性,讨论轮轨纵向牵引力对单轮对横向稳定性的影响,并讨论其影响机理.

1 驱动工况下单轮对蛇行运动

当轮对在轨道上存在初始横动量时,由于存在轮轨接触等效踏面锥度,使得左右车轮滚动半径不一致,半径较大的车轮侧相对半径较小侧有向前运动的趋势,即其轮轨纵向切向力大于车轮半径较小侧所受到的纵向切向力,形成摇头力矩,轮对产生摇头运动,使得左右两侧车轮滚动半径发生改变并形成周期性的横向运动.若横向振动能量还没有衰减到0时,左右两侧车轮滚动半径将交替变化,引

收稿日期: 2009-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075339)

作者简介: 姚远(1983-),男,讲师,博士,研究方向为机车车辆系统动力学,电话: 028-87600660, E-mail: yyuan8848@163.com

起轮对蛇行运动. 自由轮对由于运动中存在惯性力, 且重力刚度与重力角刚度很小, 由滚动形成的轮轨切向力无法平衡惯性力, 因此, 自由轮对不稳定. 弹性定位轮对, 当运行速度达到一定值时, 横向振幅会增大并趋于某个稳定的值, 即横向运动失稳. 轮对蛇行运动过程中, 左右两侧车轮方向相反并交替变化, 纵向切向力形成的摇头力矩, 这是使得轮对蛇行运动的主要原因. 若两侧车轮不存在相反并交替变化的纵向切向力, 就不会出现蛇行运动现象, 如独立轮对.

对于驱动轮对直线运行, 左右侧车轮同时承担方向向前的纵向牵引力, 在此基础上, 左右两侧车

轮交替变化纵向切向力提供摇头力矩, 使轮对产生蛇行运动. 不同工况下轮轨切向力分布如图1所示, 图1(a)中, 当轮对横向位移为 y 时, 右侧车轮滚动圆半径 r_R 大于左侧车轮滚动圆半径 r_L , 左右侧车轮受到不同方向的纵向力, 形成力偶, 轮对产生摇头角 φ , φ 使得轮对产生横向蠕滑并形成横向蠕滑力, 使轮对回到轨道中心线. 图1(b)中, 驱动力矩使轮对左右侧车轮产生前进方向的牵引力, 并叠加轮对蛇行产生的纵向力. 由于轮轨黏着力的饱和特性, 限制了轮对纵向力和横向力的分布, 因此, 需要着重分析轮轨黏着特性.

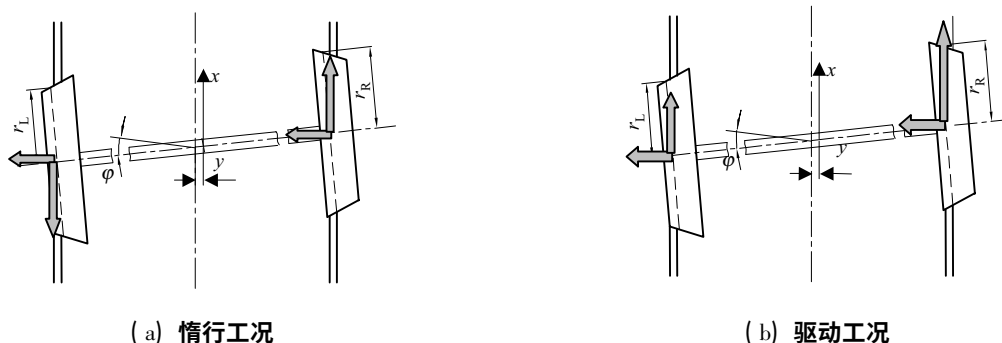


图1 不同工况下轮轨切向力分布

Fig. 1 Comparison of tangential forces under different running conditions

2 轮轨黏着特性

由于轮轨摩擦热及钢轨表面粗糙度的原因^[8-9], 轮对滑动较大时, 轮轨切向力系数降低, 轮轨黏着特性曲线出现负斜率特征. 根据文献^[4], 在不同的轨面条件下, 轮轨切向力系数曲线不同, 这些不同包括最大切向力系数、最大切向力系数对应的蠕滑率(临界蠕滑率)、靠近原点线性段的斜率和曲线不稳定区的负斜率.

将轮轨动摩擦因数 f_d 作为接触斑滑动速度的函数^[4], 则有

$$f_d = \frac{f_s}{1 + Ev_c}, \quad (1)$$

式中:

f_s 为静摩擦因数;

E 为动摩擦影响系数;

v_c 为接触斑滑动速度.

根据式(1)修改小自旋非线性轮轨切向力计算程序, 改变 E 及Kalker权重系数 K ^[10-11], 得到不同的轮轨切向力系数曲线, 如图2所示, 图中: U 为轮轨切向力系数; ν_a 为蠕滑率.

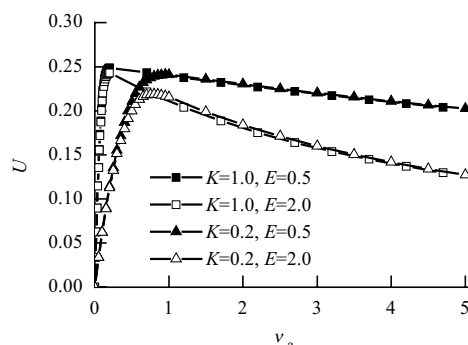


图2 轮轨切向力系数曲线

Fig. 2 Tangential force coefficients between wheel and rail

3 轮对横向蛇行稳定性

3.1 弹性定位单轮对模型

建立简化的弹性定位单轮对模型, 模型参数见表1. 考虑轮对的横移 y 和摇头 φ 两个自由度, 构架与轮对运动速度一致, 考虑一系纵向和横向定位刚度, 弹性定位单轮对模型如图3所示, 图中:

l 为左右车轮接触斑距离的1/2, 设为定值;

b 为轮对一系定位距离一半.

对弹性定位单轮对模型作如下简化:

性. 对于弹性定位动力单轮对, 当平均蠕滑率为 0.8% 时, 横向非线性临界速度为惰行时的 1.1 倍.

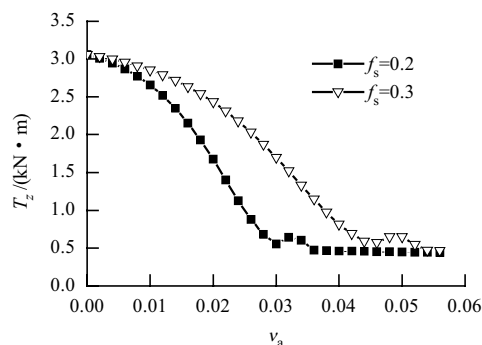


图6 摇头力矩随平均驱动蠕滑率变化曲线
Fig. 6 Yaw torque of wheelset versus average creep

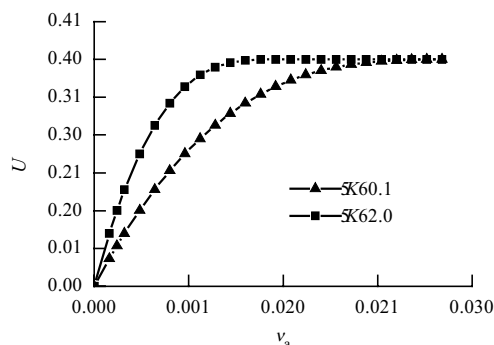


图7 不同 K 对应的切向力系数
Fig. 7 Tangential force versus creep under different K

4 单轮对横向线性稳定性

为了验证以上分析结果, 对弹性定位单轮对动力学模型进行线性化, 利用稳定性理论求解线性临界速度, 分析轮轨平均驱动蠕滑力对单轮对横向稳定性的影响. 利用 Kalker 线性理论求解轮轨蠕滑力, 其动力学方程为^[13]

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{y} + k_y y + 2f_\eta \left(\frac{1}{v} \dot{y} - \varphi \right) &= 0, \\ I\ddot{\varphi} + b^2 k_x \varphi + 2f_\xi \left(\frac{l\lambda_e}{r} y + \frac{l^2}{v} \dot{\varphi} \right) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: f_ξ 、 f_η 分别为纵向和横向蠕滑系数.

式(4)可写成矩阵形式

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX, \quad (5)$$

式中: M 、 C 和 K 分别为质量、阻尼和刚度矩阵; X 、 $\dot{X}$ 、 $\ddot{X}$ 分别为位移、速度和加速度向量.

根据振动理论, 当式(5)在状态空间中的复特征值全部具有负实部时, 传动系统是稳定的; 当某特征值具有正实部时, 系统是不稳定振动^[11,14]的.

将式(5)可写成状态空间形式

$$\dot{Y} = AY, \quad (6)$$

式(6)中:

$$Y = \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_n & E_n \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: E_n 为 n 阶单位对角矩阵.

现在求解 A 的特征根. 随着速度增大, 特征根实部由负值变为正值, 对应的速度为轮对临界速度, 对应特征根的虚部为蛇行振动频率. 为了讨论纵向和横向蠕滑力对轮对横向稳定性的影响, 分别在 f_ξ 、 f_η 前乘以纵向和横向权重系数 K_x 和 K_y . 图8为不同 K_x 对应的根轨迹. 图9为不同 K_x 和 K_y 对应的临界速度. 当纵向蠕滑力减小, 即轮对摇头力矩减小时, 轮对临界速度增大. 但是当 K_y 减小, 即横向蠕滑力减小时, 轮对稳定性降低. 当纵向蠕滑力接近饱和时, 横向蠕滑力很小, 有可能出现当平均驱动蠕滑率很大时引起横向稳定性减小的情况.

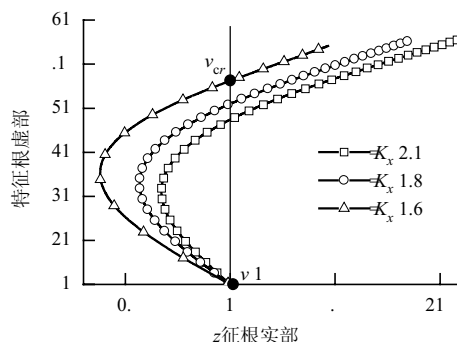


图8 不同 K_x 对应的根轨迹

Fig. 8 Root locus under different lateral weight coefficient K_x

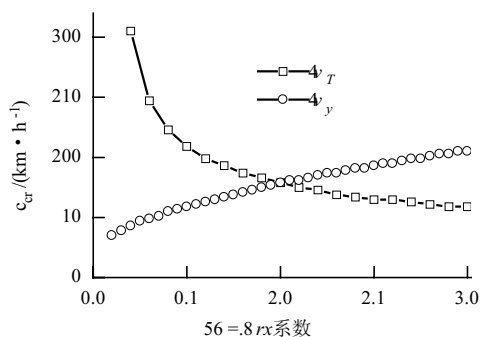


图9 不同 K_x 和 K_y 对的应临界速度

Fig. 9 Critical speed under different tangential weight coefficient K_y and lateral weight coefficient K_x

5 结论

(1) 轮对横移时, 轮轨纵向切向力形成轮对摇

头力矩,使轮对蛇行,随着驱动力矩的增加,轮轨黏着饱和特性使得轮对摇头力矩减小,有利于轮对横向稳定性;(2) 驱动时纵向切向力增加使得横向切向力减小,对轮对横向稳定性不利;(3) 对于弹性定位动力单轮对,当平均蠕滑率为0.8%时,横向非线性临界速度为惰行时的1.1倍。

致谢:牵引动力国家重点实验室自主研究课题(2011TPL_T01)和西南交通大学青年教师百人计划(SWJTU11BR050)项目资助。

参考文献:

- [1] 黄成荣,詹斐生. 机车非线性横向稳定性分析的数值分叉方法[J]. 铁道学报,1994,16(2): 1-5.
HUANG Chengrong, ZHAN Feisheng. The numerical bifurcation method of nonlinear lateral stability analysis of a locomotive[J]. Journal of the China Railway Society, 1994, 16(2): 1-5.
- [2] 曾京,徐涛. 客车系统非线性横向稳定性的分叉方法研究[J]. 西南交通大学学报,1994,29(3): 316-322.
ZENG Jin, XU Tao. Nonlinear lateral stability analysis of passenger coach system using bifurcation method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1994, 29(3): 316-322.
- [3] 王开云,翟婉明,封全保. 机车牵引状态下曲线通过导向特性研究[J]. 中国铁道科学,2006,27(2): 71-76.
WANG Kaiyun, ZHAI Wanming, FENG Quanbao. Study on the steering characteristics of curve negotiation under locomotive traction[J]. China Railway Science, 2006, 27(2): 71-76.
- [4] POLACH O. Influence of locomotive tractive effort on the forces between wheel and rail[J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 35(Sup.): 7-22.
- [5] 孙翔. 高粘着利用机车的系统设计[J]. 西南交通大学学报,1994,29(3): 235-247.
SUN Xiang. The locomotive system design of high adhesion performance[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1994, 29(3): 235-247.
- [6] 姚远,张红军,罗赞,等. 粘滑振动理论及其在铁路机车中的应用[J]. 机械工程学报,2010,46(7): 75-82.
YAO Yuan, ZHANG Hongjun, LUO Yun, et al. The theory of stick-slip vibration and its application in locomotive[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 45(7): 75-82.
- [7] 姚远,张红军,罗赞,等. 基于虚拟样机的机车粘着控制研究[J]. 铁道学报,2010,32(6): 96-100.
YAO Yuan, ZHANG Hongjun, LUO Yun, et al. Adhesion control of locomotive based on virtual prototype[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(6): 96-100.
- [8] ERTZ M, KNOTHE M. Thermal stresses and shakedown in wheel/rail contact[J]. Archive of Applied Mechanics, 2003, 72(10): 1521-1533.
- [9] 金学松,张立民. 高速机车单轮对牵引力矩数值分析[J]. 机械工程学报,1999,35(6): 56-60.
JIN Xuesong, ZHANG Limin. Numerical analysis of the driving torque applied to a single wheelset of locomotive with high speed[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(6): 56-60.
- [10] 姚远,张红军,陈康. 机车打滑时传动系统的自激扭转振动[J]. 西南交通大学学报,2008,43(6): 762-766.
YAO Yuan, ZHANG Hongjun, CHEN Kang. Self-excited torsional vibrations of drive system on locomotive under slippage[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(6): 762-766.
- [11] 姚远,张红军,罗赞. 机车传动系统扭转与轮对纵向耦合振动稳定性分析[J]. 交通运输工程学报,2009,9(1): 24-29.
YAO Yuan, ZHANG Hongjun, LUO Yun. Torsional-longitudinal coupling vibration analysis of drive system on locomotive[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(1): 24-29.
- [12] 姚远,张红军,罗赞,等. 机车打滑时轮对纵向振动研究[J]. 机械工程学报,2009,45(4): 56-60.
YAO Yuan, ZHANG Hongjun, LUO Yun. Longitudinal vibration analysis of wheel set on locomotive under slippage[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 56-60.
- [13] 陈泽深,王成国. 铁道车辆动力学与控制[M]. 北京:中国铁道出版社,2004: 106.
- [14] 池茂儒,张卫华,金学松,等. 轮对安装误差对铁道车辆行车安全性的影响[J]. 西南交通大学学报,2010,45(1): 12-16.
CHI Maoru, ZHANG Weihua, JIN Xuesong, et al. Influences of wheelset misalignment on running safety of railway vehicles[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(1): 12-16.
- [15] 池茂儒,张卫华,金学松,等. 轮对安装形位偏差对车辆系统稳定性的影响[J]. 西南交通大学学报,2008,43(5): 621-625.
CHI Maoru, ZHANG Weihua, JIN Xuesong, et al. Influence of shape misalignment of wheelsets on stability of vehicle system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(5): 621-625.

(中文编辑:秦瑜 英文编辑:刘斌)