

文章编号: 1005—0523(2006)01—0040—03

单个轮对通过曲线轨道混沌现象的研究

罗文俊¹, 雷晓燕²

(华东交通大学 1. 基础科学学院; 2. 校长办公室, 江西 南昌 330013)

摘要:通过分析传统车辆横向振动建模的不足, 提出了建立轮对横向振动的非线性动态模型. 给出了应用于单个轮对数字建模的具体实例, 并提供了相应算例及仿真结果, 分析了系统的准周期解及混沌.

关 键 词: 轮对; 横向振动; 混沌
中图分类号: U270 **文献标识码:** A

1 概述

上世纪 60 年代以来, 随着世界各国高速铁路的建设和高速列车的研制, 许多国家的铁路部门和高等院校对机车车辆动力学领域中的横向动力学问题着重进行了探讨. 车辆系统通过曲线轨道时, 在最不利的情况下, 可能由于轮缘爬轨或线路外涨而导致脱轨, 甚至会造成车辆颠覆等重大事故. 同时车辆在运行中, 其过大的横向力也能造成车轮和钢轨的磨耗加剧. 因此, 通过曲线轨道时车辆的横向运动稳定性的研究一直受到高度重视. 早期对车辆在曲线轨道上的横向稳定研究主要是基于线性理论的基础上的, 即认为车辆踏面具有线性斜率及蠕滑力和蠕滑率之间维持线性关系, 且不考虑轮缘力的影响, 因此这一理论只能在轮对相对曲线中心的横向位移不大时且不发生滑行或轮缘接触的条件下方能适用. 但经验证明, 线性理论只能用于曲线半径较大(例如 2 000 米以上)的范围. 这在[2]中有详细的说明. 关于早期的曲线通过的经典理论只能用于曲线半径极小(例如 150 米)的情况, 这中间的空白现在被 Elkins 和 Gosting 等人提出的新理论所填补. 新理论实质上是在线性理论的基础上发展起来的, 但它包含了非线性斜率、非线性接触刚度(轮

缘力)等因素, 并且考虑了蠕滑力的逐步饱和情况. 考虑到机车车辆系统所固有的许多非线性因素, 现代分叉理论已应用于研究轮对的曲线轨道失稳问题[3]. 但应用于曲线轨道只有少数国外学者[4]进行了简单分析, 国内尚无人涉及.

2 单个轮对通过曲线轨道的横向振动运动方程的建立

本文考虑大蠕滑和横向位移较大, 以及轮轨接触的极端情况, 建立轮对在通过曲线轨道时的非线性数学模型, 研究采用 Johnson 非线性蠕滑理论来模拟轮轨蠕滑力, 在轮轨接触的极端情况下, 将轮缘力模拟为一根线性弹簧轨条的弹力, 同时考虑重力刚度和重力角刚度的影响, 每个轮对在水平平面内有两个自由度, 即每个轮对的横摆与摇头, 座标系设置如下图, 建立单个自由轮对的横向运动方程[1]为:

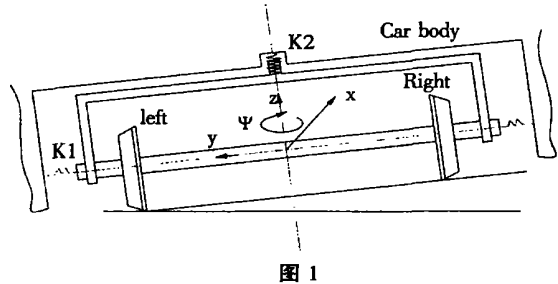
$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + 2K_1 y + 2F_y + F_{ly} + K_g y - W_a V^2 / (gR) + C_{y1} \frac{dy}{dt} + W_a h / 1500 = 0 \tag{1}$$

$$I \frac{d^2 \Psi}{dt^2} + 2K_2 b_1^2 \Psi - 2bF_x - C_g \Psi + C_{y1} b_1^2 \frac{d\Psi}{dt} = 0 \tag{2}$$

以上(1)式为轮对的横摆振动微分方程, (2)式

收稿日期: 2005—07—20
作者简介: 罗文俊(1979—), 女, 黑龙江省哈尔滨人, 华东交通大学讲师, 硕士.

为轮对摇头的微分方程. 其中 y 为轮对横摆位移; Ψ 为轮对摇头位移; K_1 一系弹簧横向定位刚度; K_2 一系弹簧纵向定位刚度; C_{y1} 为一系横向阻尼; m 为每一轮对质量; I 为每一轮对摇头转动惯量; F_y 、 F_x 分别为横向、纵向蠕滑力; b 为轮对两滚动圆间距离的一半; b_1 为一系悬挂横距的一半; F_{ty} 为轮轨接触时的轮缘力; K_g 、 C_g 分别为轮对的重力刚度 and 重力角刚度; W_a 为轴重; h 为外轨超高; t 为仿真时间.



由于轮对横向运动方程具有高度非线性、强耦合和时变性的特点, 求解此类问题通常采用龙格—库塔法. 本研究借助于 MATLAB 软件系统中的 ode (45)[5]函数来解决此问题. 方程中蠕滑力及重力刚度、重力角刚度的算法参考[1]中的计算. 轮缘力参照[2]中的算法.

3 算例及仿真结果分析

选取 ICE 高速拖车的基本参数来进行仿真计算. 选取半径为 $R=600\text{ m}$ 曲线轨道, 取外轨超高为 120 mm .

本文中采用横向位移的时间历程图、相平面图、Poincare 映射图以及功率谱图来研究自由轮对通过准周期运动的途径到达混沌的过程. 图 2、图 3 分别表示当 $v=130\text{ km/h}$ 、 137 km/h 、 140 km/h 时轮对横向振动的位移时间历程图和相平面图. 在图 2 中可以看到, 在曲线轨道上的轮对横向运动是振动和滑动相间的. 这符合在静力分析中, 踏面斜率不小于 0.05 时, 车轮滑行均发生在轮缘接触钢轨之前的结论[2]. 而且振动的平衡位置是偏向曲线外侧的, 在半径不变的情况下, 速度越大偏离越厉害. 在速度一致的情况下, 半径越小偏离越多.

由图 2、图 3、图 4 可以看出在 $v=130\text{ km/h}$ 和 $v=137\text{ km/h}$ 时均为有规律的准周期运动, 在 $v=137\text{ km/h}$ 时轮对的一侧轮缘开始撞击曲线轨道的内侧, 但仍为稳定的运动, 当速度继续增大到 $v=140\text{ km/h}$ 时, 轮对的横向运动转为貌似随机运动的混沌. 由相平面投影图可以看到, 准周期运动为一条封闭的曲线, 所有的点均在位于这一曲线上, 而混沌则为一些杂乱的曲线. 图 4 为 $v=130$ 、 137 、 140 km/h 的轮对横向振动的 Poincare 映射图. $v=130$ 、 137 km/h 时 Poincare 映射为一些点组成的闭合曲线, 可判断运动是准周期的, 当计算时间取得足够长有足够的映射点时, 此曲线将是完全封闭的. 而当 $v=140\text{ km/h}$ 时的 Poincare 映射一侧为一片杂乱无章的密集点, 因此可以判断这时轮对出现了混沌运动.

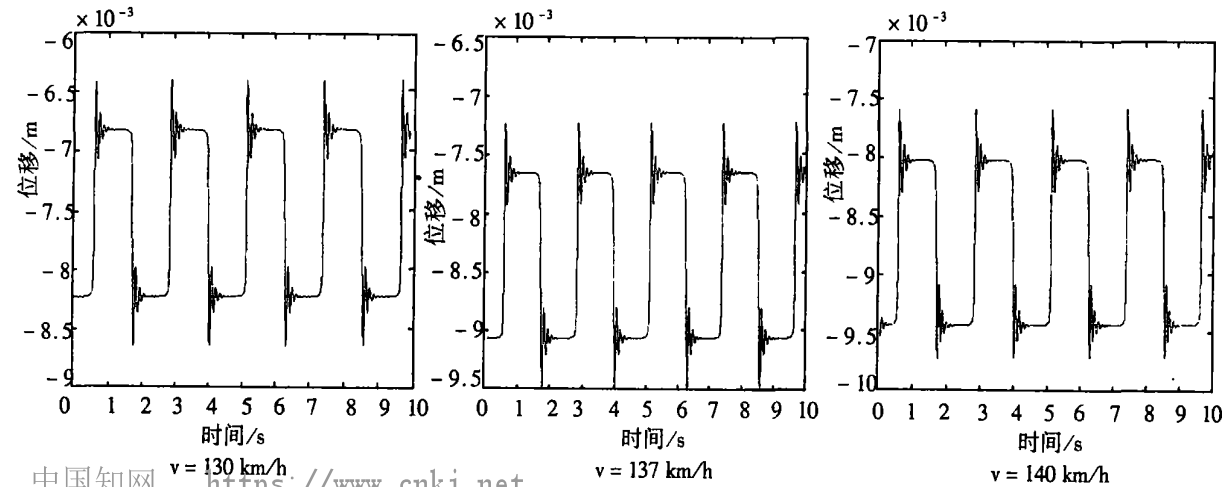


图 2 轮对横向振动时间历程图($R=600\text{ m}$)

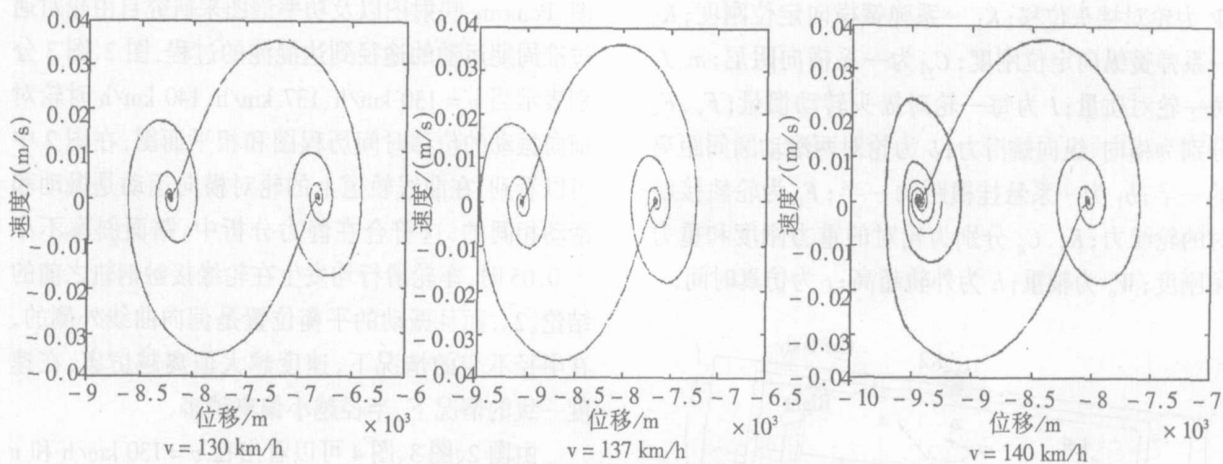


图 3 轮对横向振动相平面投影图(R=600 m)

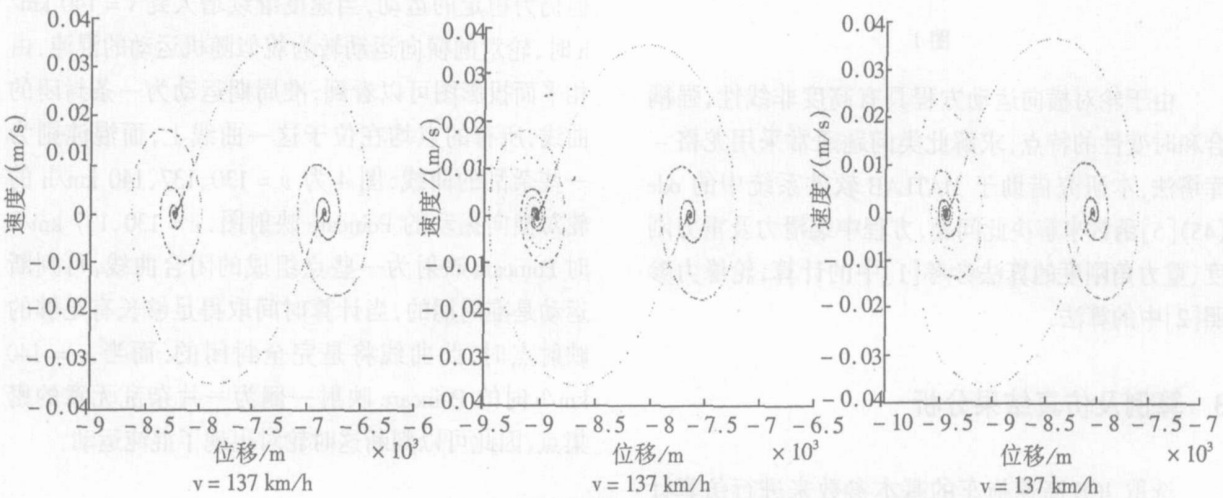


图 4 轮对横向振动 Poincare 映射图(R=600 m)

4 结 论

1) 关于车辆的曲线通过理论在早期的研究中采用了一系列的假设,认为在离心力的作用下,轮对的外缘均与曲线上的外轨接触,但经验证明,这种假定是不符合实际情况的.从以上的分析中可以得出,在一定的速度内,利用车轮踏面和钢轨顶部接触面产生的蠕滑力导向,则可避免车轮脱轨,减少轮缘、踏面和钢轨的磨耗,延长其使用寿命,并能减小作用于轮对上的侧向力,使轮对圆滑地通过曲线线路,提高车辆通过曲线的动力性能.

2) 当某一车型通过一段特定的曲线轨道时,当速度大于特定的数值时,就会发生轮轨相撞的情

况,但此时的振动仍为准周期运动,当速度进一步增大时,横向运动发展为混沌.在实际中应避免此种情况的发生.

参考文献:

[1] 雷晓燕.轨道力学与工程新方法[M].中国铁道出版社,2002.

[2] 王福天.车辆系统动力学[M].中国铁道出版社,1994.

[3] 曾 京,王 勇.货车系统的非线性动力学分析[J].西南交通大学学报,Vol. 35, No4,2000.

[4] Y. Nath and K. Jayadev, Influence of Yaw Stiffness on Non-linear Dynamics of Railway Wheelset, Communications in Non-linear Science and Numerical Simulation[J]. (2003).

[5] 尚 涛,石端伟,等.工程计算可视化与 MATLAB 实现[M].武汉大学出版社,2002.

Hunting Chaos of Railway Wheelset on Curved Track

LUO Wen-jun, LEI Xiao-yan

(School of Basic Science, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: A new method for establishment of non-linear wheelset lateral vibration model is proposed by analysis of traditional model shortage. The paper shows relevant example and simulation result, Analyses the hunting stability behaviors of the system including quasi-periodic solutions and chaos.

Key words: wheel set; lateral vibration; chaos

(上接第 39 页)

参考文献:

[1] 张卫民, 陈兰云, 凌道盛. 边坡稳定安全系数影响因素的探讨[J]. 铁道建筑, 2005, (2): 52~54.

[2] 张卫民. 极限平衡法确定土坡稳定安全系数的影响因素分析. [硕士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[3] 时卫民, 郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报. 2004. 3. (3): 76~80.

[4] 汪益敏, 陈页开, 韩大建, 莫海鸿. 降雨入渗对边坡稳定影响的实例分析[J]. 岩石力学与工程学报. 2004, 4. 23 (6): 920~924.

[5] 赵明阶, 何光春, 王多根. 边坡工程处治技术[M]. 北京: 人民交通出版社. 2003. 6: 19~59.

An Analysis For The Reinforcement of a High Slope Slide and Its Effect

ZHANG Wei-min, ZHOU Min

(Jinhua College of Profession and Ttechnology Architechure Engineering Branch, Jinhua 321017, China)

Abstract: A slope locates at the right bank of a reservoir above highroad, its soil composed by weak sandstone and pulpy rock. The age-old slope is affected by the drape, zone of fracture and ground water. The rock of surface layer is airslaked, discharged and made weak. The slope will slide again. Through analysis the reinforcement of the high slope slide and its effect, the result shows that after reinforcement the slope incline to stability.

Key words: slope; theory of limit equilibrium; safety factor of stability