

文章编号: 0258-2724 (2008) 06-0762-05

# 机车打滑时传动系统的自激扭转振动

姚 远, 张红军, 陈 康, 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:** 为研究机车发生打滑时传动系统扭转振动, 针对机车单轮对传动系统, 考虑轮对以及电机与轮对间的扭转刚度, 建立了简化的机车传动系统扭转振动方程. 当轮轨间的平均蠕滑率超过临界蠕滑率时, 产生了传动系统扭转振动极限环, 表明传动系统产生了自激振动. 对不同工况下传动系统扭转振动频率的计算结果表明, 当自激振动发生时, 系统的扭转振动频率与其扭转固有频率一致. 因此, 检测轮对的扭转振动频率可以判断车轮是否打滑.

**关键词:** 机车; 传动系统; 自激扭转振动; 车轮打滑; 空转检测

**中图分类号:** U260.11 **文献标识码:** A

## Self-Excited Torsional Vibrations of Drive System of Locomotive under Slippage

YAO Yuan, ZHANG Hongjun, CHEN Kang, JIN Dingchang

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

**Abstract** A simplified model for torsional vibrations of a single wheel-set drive system was used to study torsional vibrations of a locomotive under slippage. In the model, torsional stiffness of the shaft of a wheel set and that between the traction motor and the wheel-set were taken into account. The phase trajectories of the torsional vibrations are a set of stable limit cycles, signifying self-excited vibrations when the average wheel-rail creepage is over the critical value. Frequencies of torsional vibrations with different operating modes were calculated. The results show that the vibration frequency is in accordance with the natural frequency of the drive system when self-excited vibrations happen. Therefore, analyzing the vibration frequency of wheel-sets is a measure to identify wheel-rail slippage.

**Key words** locomotive; drive system; self-excited torsional vibration; wheel slippage; slippage measure

在一定的条件下, 机车传动系统扭转振动是不稳定的自激振动, 当轮对有大的滑动时, 轮轨间的粘着系数降低. 粘着系数随滑动速度增大而减小, 以上特点已有相关试验的报道<sup>[1,2]</sup>. 轮轨粘着特性曲线负斜率引起传动系统不稳定的自激振动会导致传动系统较大的动态载荷, 降低机车的粘着系数, 导致轨道表面出现周期性的磨耗<sup>[3]</sup>. 机车驱动动力学研究表明, 这种自激振动是传动系统的扭转振动和轮轨之间的摩擦非线性特性耦合作用而引起<sup>[4]</sup>. 当前机车驱动动力学主要侧重于轮轨粘着控制策略研究, 这些控制策略多数是基于轮轨蠕滑率的判断, 但现有的测量技术很难得到精确的轮轨蠕滑率. 另外, 由于轨面状况的不确定性, 基于轮轨蠕滑率控制策略很难在实际工程中应用<sup>[5]</sup>.

本文建立了简化的机车传动系统扭转振动模型, 研究了机车轮对打滑时传动系统扭转振动频率.

收稿日期: 2008-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50875219); 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (IRT0452)

作者简介: 姚远 (1983 - ), 男, 博士研究生, 研究方向为机车驱动动力学, 电话: 028-87600660, E-mail: yyuan8848@163.com

## 1 传动系统扭转振动模型

为了便于分析,将动车传动系统简化为图 1 所示的三自由度模型.考虑传动系统和轮对的扭转弹性,假设大齿轮与左侧车轮之间的扭转刚度较大,认为电机力矩直接驱动轮对的左侧车轮.图中  $J_m$  为电机转子惯量等效到轮对上的当量转动惯转动;  $J_l$  和  $J_r$  分别为轮对左侧和右侧转动惯量;  $c_d$  和  $c_w$  分别为传动系统和轮对的扭转阻尼;  $k_d$  为电机与轮对之间的当量扭转刚度;  $k_w$  为轮对扭转刚度;  $M_m$  为电机输出力矩,设  $M_m$  为常数;  $T_l$  和  $T_r$  分别为钢轨对左右轮对的反作用力矩;  $\theta_m$  为电机转子角位移.

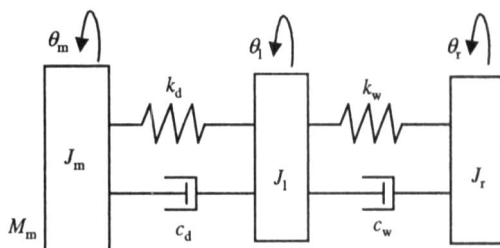


图 1 传动系统简化模型

Fig 1 Simplified model of drive system

假设  $J_l = J_r$ , 令:

$$c = (J_l / J_m) c_d + c_d,$$

$$k = (J_l / J_m) k_d + k_d.$$

传动系统扭转振动微分方程<sup>[6]</sup>为

$$\begin{bmatrix} J_l & 0 \\ 0 & J_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_l \\ \ddot{\theta}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c_l \\ -c_l & 2c_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_l \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k_l \\ -k_l & 2k_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_l \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{l0} - T_l \\ T_l - T_{l0} - T_r - T_{r0} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式 (1)中:

$T_{l0}$ 和  $T_{r0}$ 分别为电机力矩作用下力矩平衡时轨道对左右轮的反作用力矩;

$\theta_l$ 和  $\theta_r$ 分别为左轮和右轮角位移 (3 个位移量分别减去主动力矩引起的平衡角位移).

式 (1)的等效阻尼方程为

$$\begin{bmatrix} F_l(\theta) \\ F_r(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & -c_l \\ -c_l & 2c_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_l \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_{l0} - T_l \\ T_l - T_{l0} - T_r - T_{r0} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

## 2 轮轨粘着曲线

由于轮轨的摩擦热及钢轨表面的粗糙度,较大的蠕滑率引起轮轨粘着系数降低,即粘着曲线的负斜率特性.根据实际测量的轮轨粘着曲线<sup>[7]</sup>,在不同轨面条件下的最大粘着系数、最大粘着系数对应的蠕滑率 (称为临界蠕滑率)、靠近原点线性段斜率和滑动时曲线负斜率不同,将这 4 项定义为粘着曲线 4 要素.

将轮轨动摩擦系数  $f$  作为随滑动速度变化的函数<sup>[8]</sup>,则有

$$f = \frac{f_s}{1 + Fv}, \quad (3)$$

式 (3)中:

$f_s$ 为静摩擦系数;

$F$ 为动摩擦影响系数;

$v$ 为滑动速度.

根据式 (3)修正 Kalker 简化理论中的 Fastsim 程序,并改变 Kalker 权重系数  $K$ <sup>[7]</sup>,得到 4 种粘着曲线,如图 2 所示,图 2 也体现粘着曲线 4 要素.

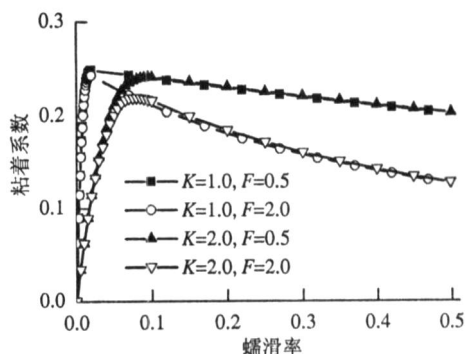


图 2 轮轨粘着曲线

Fig 2 Curves of adhesion between wheel and rail

3 扭转振动数值仿真

3.1 振动相图

当系统受到初始激励后,若平均蠕滑率小于临界蠕滑率,即  $s_0 < s_c$  时,则传动系统和轮对扭转运动相轨迹为趋向原点  $(0, 0)$  的曲线,振动系统趋向李雅普诺夫意义下的运动稳定点,系统受到正阻尼作用,没有发生自激振动.若轮对滑动量较大,  $s_0 > s_c$  时,图 3(a), (b)分别为传动系统及轮对扭转振动相轨迹曲线,图中  $\omega$  为轮轴转动角速度.由图 3 可见,相轨迹逐渐离开初始原点,并趋近于相平面内的封闭曲线,是庞加莱意义下的轨道稳定极限环.可见,由于粘着特性曲线为负斜率,传动系统产生稳定的自激扭转振动.

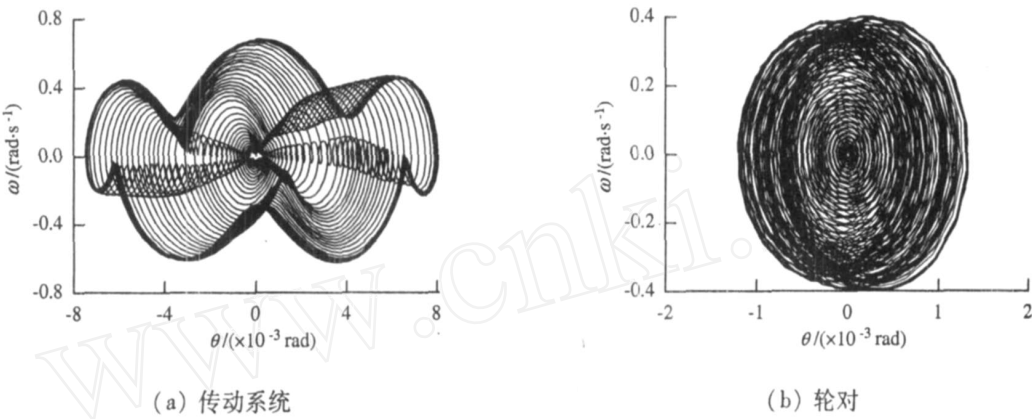


图 3  $s_0 > s_c$  工况下扭转振动相轨迹  
Fig. 3 Phase trajectories of torsional vibrations when  $s_0 > s_c$

3.2 不同工况传动系统扭转频率

改变轨道粘着条件,对不同工况进行仿真,计算传动系统和车轴扭转振动频率.由于左右侧钢轨表面粘着系数可能不一致,通过改变粘着曲线 4 要素可得不同的轮轨粘着条件.为了模拟轨道激励对传动系统振动的影响,对系统施加频率频带很宽的白噪声作为外激励.

不考虑系统阻尼,由式 (1) 计算特征值得到传动系统及轮对扭转固有频率分别为 10 Hz 和 70 Hz 表 1 为不同工况及仿真得到对应的主频率,其中:稳定指  $s_0 < s_c$ ;失稳指  $s_0 > s_c$ ;无表示无主频率.

表 1 不同工况对应的主频率  
Tab 1 Primary frequencies of different operating modes Hz

| 工况 | 粘着条件    |      |      | 主频率  |    |
|----|---------|------|------|------|----|
|    | 左右侧粘着曲线 | 左侧车轮 | 右侧车轮 | 传动系统 | 轮对 |
| 1  | 相同      | 稳定   | 稳定   | 无    | 无  |
| 2  | 相同      | 失稳   | 失稳   | 10   | 70 |
| 3  | 不同      | 稳定   | 稳定   | 无    | 无  |
| 4  | 不同      | 稳定   | 失稳   | 无    | 70 |

工况 1,左右侧车轮粘着系数相同,且稳定,粘着系数对应于粘着曲线上升段,没有发生自激振动,如图 4 所示.  $\varepsilon$  为论车转动的角加速度,  $\nu$  为主频率.图 4 中,传动系统及轮对扭转振动频带宽与白噪声激励一致,没有主频率.

工况 2,左右侧车轮粘着系数相同,且均失稳,粘着系数对应于粘着曲线下降段,两侧都发生自激振动,如图 5 所示,主频率 10 Hz 和 70 Hz 分别表示传动系统及轮对扭转振动频率,与用式 (1) 计算的固有频率相同.

工况 3,左右侧车轮粘着系数不同,且都稳定,没有因为左右侧车轮粘着条件不一致而发生自激扭转振动,仿真结果与图 4 类似.

工况 4,左右侧车轮粘着系数不同,左侧车轮没有超过轮轨粘着临界蠕滑率,右侧超过,传动系统扭转振动如图 4(a) 所示,传动系统振动频带宽,没有主频率.轮对扭转振动如图 5(b) 所示,轮对扭转振动主频率与其固有频率一致.

不同工况仿真结果表明,通过检测轮对扭转振动频率可判断任意一侧车轮是否发生打滑.

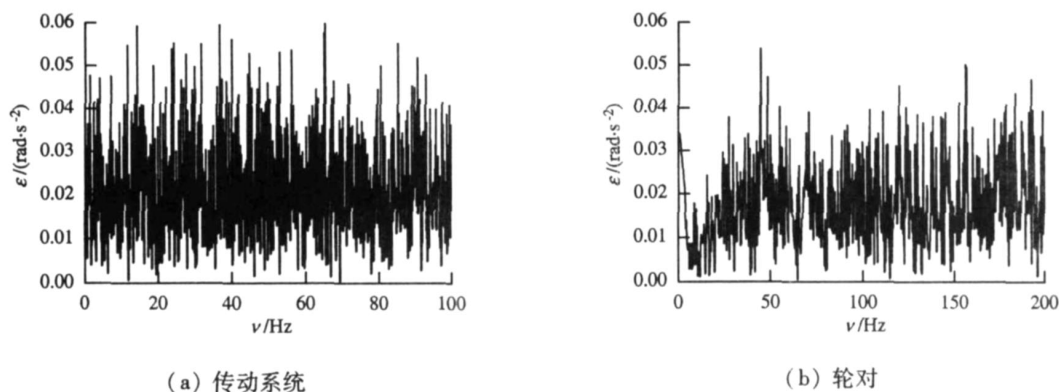


图 4  $s_0 < s_e$  工况下扭转振动频谱  
Fig. 4 Torsional vibration spectrum when  $s_0 < s_e$

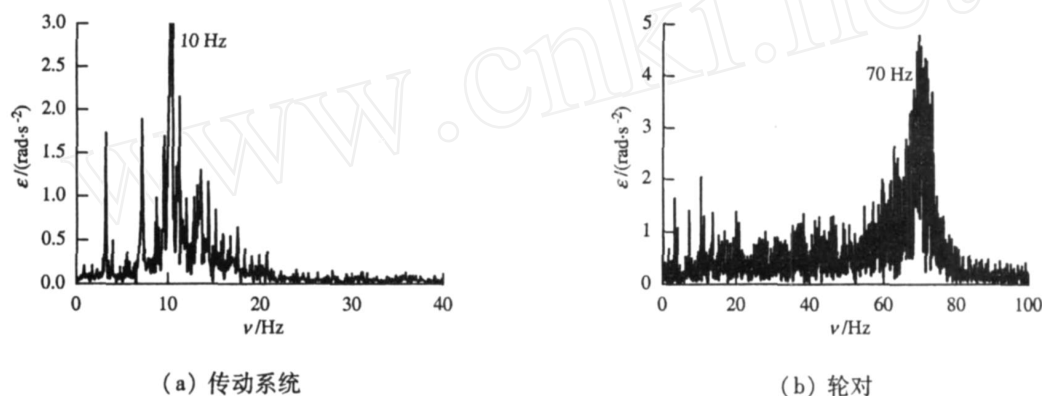


图 5  $s_0 > s_e$  工况下扭转振动频谱  
Fig. 5 Torsional vibration spectrum when  $s_0 > s_e$

## 4 结 论

(1) 对机车传动系统扭转振动的数值计算结果表明,机车发生打滑时,传动系统产生自激扭转振动.不同组合工况计算表明,发生自激振动时,传动系统扭转振动频率与其固有频率一致;否则,传动系统扭转振动频率与外界激励相同.

(2) 当任意一侧车轮出现打滑时,主振动频率与轮对扭转振动固有频率一致,可判断轮对发生了打滑现象.通过检测轮对扭转振动频率可判断轮对是否发生打滑现象,可作为检测轮对是否空转的方法.

牵引动力国家重点实验室开放课题资助项目.

## 参考文献:

- [1] MULLER S, KOGEL R. Numerical simulation of roll-slip oscillations in locomotive drives[J]. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 2001, 81 (Suppl): 61-64
- [2] KOANK B, KEJIK, TSUNAMITSU N. An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling-sliding wheel/rail contacts under dry-wet conditions[J]. Wear, 2007, 263 (1): 169-179
- [3] 刘学毅,印洪. 钢轨波形磨损的影响因素及减缓措施[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37 (5): 10-14  
LU Xueyi, YN Hong. Rail corrugations: influencing factors and retarding measures[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37 (5): 10-14
- [4] HIROTSU T. Self-excited vibration during slippage of parallel cardan drives for electric railcars[J]. JSME International Journal, 1987, 30 (266): 1 304-1 310

- [5] MEI T X, YU J H, W L S O N D A. Wheelset dynamics and wheel slip detection[C] // Proc. of 2006 International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev System. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006: 229-235.
- [6] 任少云,包继华,张建武,等. 牵引车在大负荷拖载工况下传动系自激振动建模与仿真研究[J]. 振动与冲击, 2005, 24(6): 95-101.
- REN Shaoyun, BAO Jiahua, ZHANG Jianwu, et al Modeling and simulation of the self-excited torsional vibration of driveline for SZG 4031 towing tractor under heavy load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(6): 95-101.
- [7] POLACK O. Influence of locomotive tractive effort on the forces between wheel and rail[J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 35(Suppl): 7-22.
- [8] 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 L in 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.

(中文编辑:秦瑜 英文编辑:刘斌)

## 《西南交通大学学报》投稿须知

《西南交通大学学报》是国内外公开发行的综合性自然科学学术刊物. 主要刊登理工类以及运输和经济管理等学科的基础理论研究、应用研究、实验研究、学术讨论等方面的学术论文以及科技信息报道. 读者对象主要为国内外科技工作者、工程技术人员、高等院校理工科教师和学生等.

《西南交通大学学报》为全国核心期刊、中国科技论文统计源期刊和中国科学引文数据库来源期刊. 另据不完全统计,《西南交通大学学报》已被德国数学文摘、美国数学文摘、美国工程信息公司(Ei Compendex), 以及中国数学、力学、岩土工程、机械工程、无线电等众多文摘作为引文源.

### 1 来稿要求

1.1 论点明确、数据可靠、逻辑严谨、文字精炼, 标点符号使用正确. 文中不得涉及保密内容. 每篇稿件一般不超过 4 页(A4,版心尺寸 25.4 cm ×16.7 cm).

1.2 必须包括以下项目(按顺序): 题目(一般不超过 20 字)、作者姓名(不超过三位作者)、作者单位(包括地址及邮编)、中文摘要(100~300 字左右,一般应包括目的、方法、主要结果和结论)、关键词(3~8 个)、中图分类号(此项可由编辑部填写)、文献标识码、正文、参考文献(详见 1.8 节)、英文题目、作者英文姓名(汉语拼音)、作者单位(英文)、英文摘要(可比中文摘要稍详细,且符合英文语法和表达习惯)、英文关键词(与中文关键词一一对应).

1.3 在首页地脚处注明第一作者简历(姓名、出生年、性别、职称、学位),如属于省部级以上各种基金资助项目,也在文稿首页地脚处注明(包括项目编号).

1.4 必须使用规范的中文简化字. 容易混淆的外文字母、数码、符号(如矢量、向量、张量等)、特殊运算符和函数等,应在第一次出现处,用铅笔标注清楚. 上下角标的字母、数码和符号位置应明显.

1.5 各级标题均左顶格书写. 标题的序号均用阿拉伯数字,一级标题为“1”,二、三级标题编号数字间用下圆点相隔,例如,“1.1”,“1.1.1”. 前言不排标题序号,也不加“前言”二字.

1.6 图和表随文出现. 工程图应符合制图规范,照片应为反差较大的黑白片. 表格请制成三线表(表内无斜线、竖线). 图和表中的量和单位请参考有关标准,一般用符号(字母)表示,量的单位用量与单位的比值表示,例:  $l/\text{mm}$  ( $l$  表示长度,单位为  $\text{mm}$ ). 图题和标题请用中、英文两种语言书写,其格式如下:

图题: 图 1 1990 年 12 月至 2001 年 4 月上证综合指数

Fig 1 Shanghai Index from Dec 1990 to Apr 2001

表题: 表 1 R/S 分析结果及统计检验

Tab 1 Result of R/S analysis and statistic test

(下转第 822 页)