

文章编号: 1000-4750(2013)04-0052-07

# 定常气动载荷作用下高速铁路车辆的蛇行运动稳定性

曾晓辉, 赖 姜

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘 要:** 随着高速列车运行速度的提高, 气动载荷会对车辆蛇行运动稳定性带来不利影响, 现有文献对此研究很少。为此, 考虑沿列车反向运动高速气流以及侧风的作用, 研究了定常气动载荷下高速铁路车辆横向运动的线性稳定性。分析中计入了气动载荷改变轴重、使各轮法向支反力各不相同; 以及使重力刚度、重力角刚度、轮对蠕滑系数等发生变化的效应。给出了计及气动影响的 17 个自由度铁路车辆蛇行运动分析模型, 编制了相应的计算程序并进行了算例验证。进而, 计算了在不同风速条件下, 各个方向定常气动力和气动力矩单独以及共同作用时车辆运动稳定性特征值, 并求出临界速度。结果表明: 气动载荷会降低车辆临界速度; 临界速度随横风风速增加而单调降低; 与其他方向气动载荷相比, 点头力矩和升力对临界速度的影响更大。

**关键词:** 高速铁路车辆; 蛇行运动; 线性稳定性; 定常气动载荷; 临界速度

中图分类号: U270.2; O32 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.12.0886

## HUNTING STABILITY OF HIGH-SPEED RAILWAY VEHICLE CONSIDERING THE ACTIONS OF STEADY AERODYNAMIC LOADS

ZENG Xiao-hui, LAI Jiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** With the enhancement of the speed of trains, the aerodynamic loads will deteriorate the hunting stability of motion of railway vehicles. There is seldom study on this problem. For this reason, the hunting stability of a high-speed railway vehicle is studied, considering the steady aerodynamic loads resulting from the actions of crosswind and airflow in the opposite advancing direction of train. The effects of variations of axle loads, creep coefficients, gravitational stiffness and angular stiffness due to actions of aerodynamic loads are taken into account. A mathematical model for hunting stability analysis of vehicle with 17 degrees of freedom is presented, in which the effects of aerodynamic loads are incorporated. A program based on the presented model is written and verified. And then, in different wind velocities, with cases for each component of aerodynamic force and moment acting individually and collectively being considered, the eigenvalues of hunting stability of vehicle are calculated. Furthermore, the critical velocities are obtained. It is shown that, aerodynamic loads can decrease the critical velocity of vehicle; the critical velocity decreases monotonously as the velocity of beam wind increases; the influences of pitch moment and lift force on critical velocity are larger than that of other components of aerodynamic loads.

**Key words:** high-speed railway vehicle; hunting; linear stability; steady aerodynamic loads; critical speed

收稿日期: 2011-12-27; 修改日期: 2012-04-01

基金项目: 国家 973 计划项目(2011CB711100); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJXC2-EW-L01, KJXC2-EW-L03)

通讯作者: 曾晓辉(1972—), 男, 湖南新化人, 副研究员, 博士, 主要从事工程结构动力响应和流固耦合研究(E-mail: zzh@imech.ac.cn).

作者简介: 赖 姜(1983—), 男, 四川内江人, 博士生, 主要从事工程结构动力响应和流固耦合研究(E-mail: laijiang@imech.ac.cn).

列车运动稳定性是制约铁路车辆能否高速运动的关键指标之一。一旦车辆在高速运行中出现蛇行失稳,不仅会恶化列车动力响应特性从而影响车辆正常运营状态,甚至还可能会导致安全事故。因此,铁路车辆蛇行运动稳定性是高速列车设计中必须要考虑的一个重要指标,国内外学者对此开展了不少研究。随着铁路列车运行速度的不断提高,对车辆运动稳定性的研究也愈发深入,不过至今该问题仍然是各国学者的一个工作重点。Kim、Jung、Seok<sup>[1]</sup>研究了一系悬挂参数与蛇行运动临界速度的关系,并通过特征值分析研究了线性系统下,各模态特征值的变化情况。Zboinsk 和 Dusza<sup>[2]</sup>分析了铁路车辆过曲线时的物理特性及现象。Cheng、Lee、Chen<sup>[3]</sup>分别建立 6-DOF、14-DOF 和 20DOF 的车辆模型,研究了不同自由度车辆模型在过曲线时运行稳定性。曾京<sup>[4]</sup>深入地研究了非线性车辆系统蛇行运动的 Hopf 分叉及极限环数值计算。罗仁和曾京<sup>[5]</sup>分析了多编组列车系统蛇行运动稳定性。池茂儒、张卫华、曾京等<sup>[6]</sup>通过数值仿真研究了车辆横向平稳性指标与蛇行共振速度的关系。鲜荣、张卫华、王开文<sup>[7]</sup>利用 SIMPACK 建立 6 轴机车车辆模型,模拟滚动振动试验台 6 轴机车试验,分析轨道轮半径、车轮踏面斜率对机车车辆蛇行运动稳定性的影响。刘宏友、曾京等<sup>[8]</sup>分析了轨道整体刚度和阻尼、圆曲线半径和外轨超高及转向架悬挂参数等因素对铁路车辆 Hopf 分叉速度的影响。张卫华和沈志云<sup>[9]</sup>分析了车辆非线性系统的周期运动稳定性。

经济和社会发展的要求推动高速列车运行速度不断提高。2007 年 4 月法国 TGV 列车达到了 574.8km/h 的超高瞬时速度,2010 年 12 月,中国和谐号动车组 CRH380A 最高时速达到了 486.1km/h。不仅短时间最高速度大幅增加,高速列车的持续运营速度也有明显提高,我国京津、武广、郑西高铁线路曾长时间以 350km/h 的速度进行商业运行。考虑到普通民航飞机在时速 300km/h 左右就可以在气动作用下离地起飞,显然有必要探讨气动载荷对高速列车性能的影响。其中一个重要问题就是:在高速等级空气流作用下,列车的蛇行运动稳定性会如何发生改变?由于高速气流作用下气动载荷比低速时迅速增加,有必要对气动载荷作用下高速铁路车辆的运动稳定性进行定量研究。目前还缺乏关于这一问题的研究。本文研究高速列车在定常气动升力、阻力、横向力、倾覆力矩和点头力矩作用下

的运动稳定性,给出相应分析方法,并进行了编程计算;进而分析气动载荷对列车蛇行运动临界速度的影响,其中考虑了不同风速侧风作用。

## 1 考虑气动载荷的高速铁路车辆蛇行运动稳定性运动方程

本文在分析高速铁路车辆蛇行运动稳定性时,考虑车辆的 17 个自由度,即:轮对横摆  $y_w$  与摇头  $\psi_w$ (4 个轮对),构架横摆  $y_i$ 、摇头  $\psi_i$  和侧滚  $\varphi_i$ (2 个构架),车体横摆  $y_c$ 、摇头  $\psi_c$  和侧滚  $\varphi_c$ 。各运动自由度可统一表示为:

$$\mathbf{Y} = [y_{w1} \ y_{w2} \ y_{w3} \ y_{w4} \ \psi_{w1} \ \psi_{w2} \ \psi_{w3} \ \psi_{w4} \ y_{i1} \ \psi_{i1} \ \varphi_{i1} \ y_{i2} \ \psi_{i2} \ \varphi_{i2} \ y_c \ \psi_c \ \varphi_c]^T \quad (1)$$

其中:  $y_{wi}$  和  $\psi_{wi}$  ( $i=1,2,3,4$ ) 分别表示第  $i$  个轮对的横摆和摇头角;  $y_{ii}$ ,  $\psi_{ii}$  和  $\varphi_{ii}$  ( $i=1,2$ ) 分别表示第  $i$  个构架的横摆、摇头角和侧滚角。随着列车运行速度增加,作用于车辆上高速气流所产生的气动力也按速度平方规律增大。本文考虑定常气动载荷的作用,分析下列因素对车辆产生的影响: 1) 气动升力、阻力和点头力矩改变轴重,从而使重力刚度和重力角刚度发生变化; 2) 气动升力、阻力和点头力矩改变轴重后还将会改变轮对蠕滑系数; 3) 气动横向力和倾覆力矩会使作用于同一轮对中各个轮上的法向支反力互不相同,从而使轮对中各轮的蠕滑系数变得不同; 4) 摇头力矩不影响各个轮上的法向支反力。考虑定常气动载荷的上述影响后,车辆蛇行运动稳定性的运动微分方程可写为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{C}(C_L, C_D, C_C, C_{M_x}, C_{M_y}, \mathbf{U}, \mathbf{V})\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K}(C_L, C_D, C_C, C_{M_x}, C_{M_y}, \mathbf{U}, \mathbf{V})\mathbf{Y} = \mathbf{0} \quad (2)$$

其中:  $C_L$ 、 $C_D$ 、 $C_C$ 、 $C_{M_x}$ 、 $C_{M_y}$  分别是气动升力系数、气动阻力系数、气动横向力系数、倾覆力矩系数和点头力矩系数;  $\mathbf{U}$  是侧风风速;  $\mathbf{V}$  是车辆运行速度;  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$  分别为车辆系统惯量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\mathbf{K}(C_L, C_D, C_C, C_{M_x}, C_{M_y}, \mathbf{U}, \mathbf{V})$ ,  $\mathbf{C}(C_L, C_D, C_C, C_{M_x}, C_{M_y}, \mathbf{U}, \mathbf{V})$  表示刚度阵和阻尼阵包含气动载荷的影响。从中可以看出,考虑气动载荷后,车辆蛇行运动方程与通常不考虑气动载荷的情况相比发生明显变化。现有文献对车辆蛇行运动的分析不考虑气动载荷影响,为了对比,列出其运动方程如下(例如可参考文献[10]):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{C}(\mathbf{V})\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K}\mathbf{Y} = \mathbf{0} \quad (3)$$

从式(3)可看出,矩阵  $\mathbf{C}(\mathbf{V})$ 、矩阵  $\mathbf{K}$  中不包含气动

载荷有关的项,故无法分析气动载荷对蛇行运动稳定性的影响。

引入变量  $\mathbf{X} = [\dot{\mathbf{Y}} \ \mathbf{Y}]^T$ , 可将式(2)降阶为如下

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}(C_L, C_D, C_C, C_{Mx}, C_{My}, \mathbf{U}, \mathbf{V}) & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}(C_L, C_D, C_C, C_{Mx}, C_{My}, \mathbf{U}, \mathbf{V}) \\ \mathbf{I} & \mathbf{O} \end{bmatrix}$$

式中:  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\mathbf{O}$  为零矩阵。

由运动稳定性理论可知,当矩阵  $\mathbf{A}$  所有特征值实部均为负,则上式所表示的系统运动稳定;当矩阵  $\mathbf{A}$  至少有一个实部为正的的特征值,则式(2)所表示的系统运动不稳定<sup>[10]</sup>;当矩阵  $\mathbf{A}$  无带正实部的特征值,但有零实部特征值,则为临界情况,此时对应的速度即为系统的临界速度。

形式:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} \tag{4}$$

其中:

## 2 定常气动载荷作用下高速铁路车辆蛇行运动线性稳定性分析方法

车辆动力学模型如图 1 所示,  $O$  为车体质心;  $x$  轴正方向表示车辆前进方向;车体与构架之间由二系悬挂连接;构架与轮对之间由一系悬挂连接。

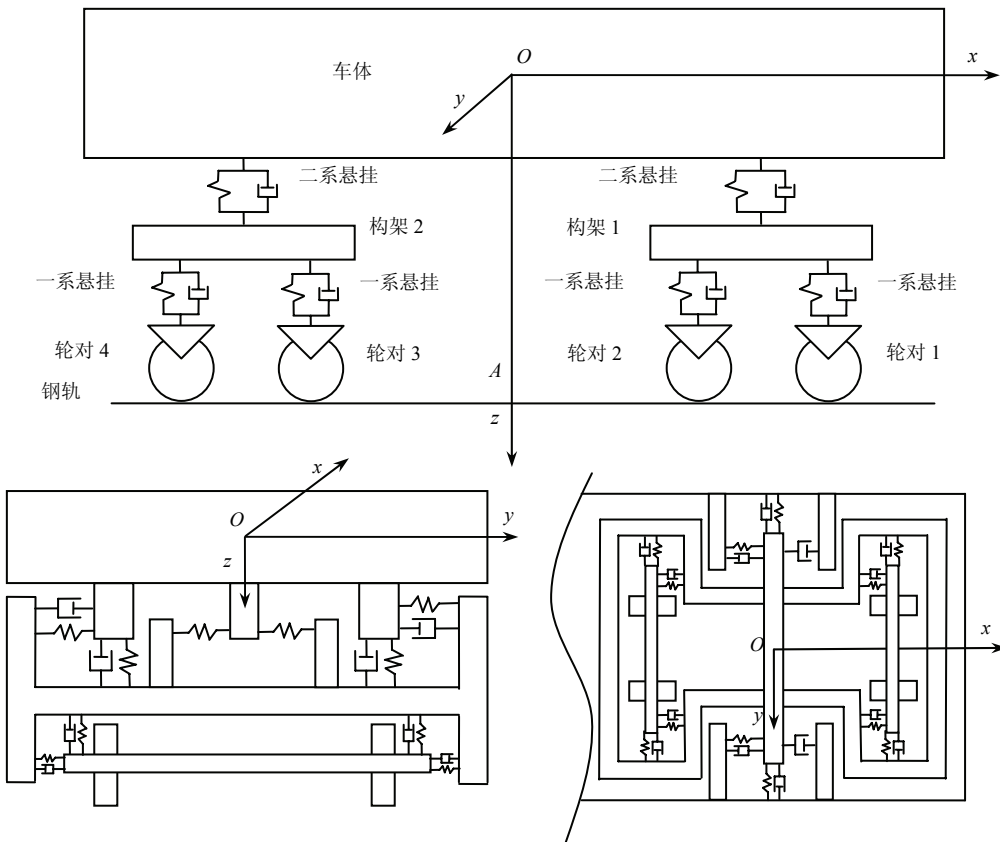


图 1 铁路车辆动力学模型示意图

Fig.1 Dynamics model of a railway vehicle

在侧风以及沿列车反向运动高速气流的共同作用下,铁路车辆将会受到气动升力、阻力、横向力、倾覆力矩、点头力矩和摇头力矩的作用。在本文研究的情况下,除摇头力矩外,其他气动载荷都将使轮轨法向接触力发生变化进而改变蠕滑力。此外,气动载荷还会改变轴重,从而使重力刚度和重力角刚度发生变化。在考虑气动载荷引起的上述因素作用下,高速运行铁路车辆的蛇行运动稳定性会发生明显改变。

根据 Kalker 线性蠕滑理论模型<sup>[11]</sup>, 轮轨纵、横向蠕滑系数为:

$$\begin{aligned} f_{11} &= Gmn \left( \frac{3\pi N(1-\sigma^2)}{2E(A+B)} \right)^{2/3} C_{11}, \\ f_{22} &= Gmn \left( \frac{3\pi N(1-\sigma^2)}{2E(A+B)} \right)^{2/3} C_{22}, \\ (A+B) &= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{r_r} + \frac{1}{r_w} \right) \end{aligned} \tag{5}$$

其中,  $N$ 、 $R_w$ 、 $r_w$ 、 $r_r$ 、 $G$ 、 $C_{ij}$ 、 $m$ 、 $n$  分别为轮轨接触斑法向力、轮对滚动圆半径、车轮踏面横断面外形半径、轨头横断面外形半径、剪切弹性模量、无因次的 Kalker 系数、与  $A$  和  $B$  有关的系数。

当不考虑气动载荷的影响、不计轮对上的动载荷、悬挂力、蠕滑力并略去高阶微量时, 轮轨接触斑法向力为:

$$N = \frac{W}{2} \quad (6)$$

轮对的重力刚度和重力角刚度为:

$$\begin{cases} K_g = \frac{W\lambda}{b} \\ C_g = W\lambda b \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $W$ 、 $\lambda$ 、 $b$  分别为轴重、车轮踏面等效锥度和轮对滚动圆距离之半。

式(5)~式(7)是通常不考虑气动作用的情况; 在考虑气动载荷的条件下, 式(5)~式(7)中会出现含气动载荷(该载荷是车辆运行速度和侧风速度的函数)的项, 从而改变轮轨接触力、蠕滑系数、重力刚度和重力角刚度, 进而影响车辆运动稳定性。

在有侧风作用的情况下, 列车运行时的车辆表面分布压力和切应力沿纵向、横向和垂向形成 3 个方向的合力  $F_i$ , 分别称为车辆气动阻力, 横向气动力和气动升力; 以及绕  $x$  轴的倾覆力矩, 绕  $y$  轴的点头力矩和绕  $z$  轴的摇头力矩  $M_i$ <sup>[12]</sup>, 可分别表示为:

$$\begin{cases} F_i = \frac{1}{2}\rho AC_i |V+U|^2, & i=1,2,3 \\ C_1 = C_D, C_2 = C_C, C_3 = C_L \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} M_i = \frac{1}{2}\rho ALC_{Mi} |V+U|^2, & i=1,2,3 \\ C_{M1} = C_{Mx}, C_{M2} = C_{My}, C_{M3} = C_{Mz} \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $\rho$ 、 $A$ 、 $C_L$ 、 $C_D$ 、 $C_C$  分别为空气密度、参考面积、气动阻力系数、横向气动力系数和气动升力系数;  $L$ 、 $C_{Mx}$ 、 $C_{My}$ 、 $C_{Mz}$  分别为参考长度、倾覆力矩系数、点头力矩系数和摇头力矩系数。

在侧风环境下, 由于气动阻力, 横向气动力和气动升力三个方向的气动力及倾覆力矩和点头力矩的作用, 各个轮轨间法向力将发生改变, 不计动载荷并略去高阶微量, 可由下列平衡关系求出轮轨法向力的改变量  $F_{wLi}$  和  $F_{wRi}$ :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 (F_{wRi} + F_{wLi}) + F_{C_L} = 0 \\ \sum_{i=1}^4 (r_{Ri} \times F_{wRi} + r_{Li} \times F_{wLi}) + r_{C_L} \times F_{C_L} + r_{C_D} \times F_{C_D} + \\ r_{C_C} \times F_{C_C} + r_x \times F_x + r_y \times F_y + M = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $F_{wLi}$ 、 $F_{wRi}$ 、 $r_{Li}$ 、 $r_{Ri}$ 、 $F_{C_L}$ 、 $r_{C_L}$ 、 $F_{C_D}$ 、 $r_{C_D}$ 、 $F_{C_C}$ 、 $r_{C_C}$ 、 $F_x$ 、 $r_x$ 、 $F_y$ 、 $r_y$ 、 $M$  分别为气动载荷引起的各轮对左右轮轨法向力变化量及其对应的矢径、气动升力及其矢径、气动阻力及其矢径、横向气动力及其矢径、平衡气动阻力的牵引力及其矢径、由横向气动力引起的轮轨横向作用力及其矢径、气动力矩。

因此, 当定常气动载荷作用时, 轮轨法向力为:

$$\begin{cases} N_{Li} = \frac{W}{2} - \frac{1}{16}\rho A \left( C_L + \frac{Z_{OA}C_C}{d_0} \pm \frac{Z_{OA}C_D}{l_c} + \frac{LC_{Mx}}{l_c} \pm \frac{LC_{My}}{d_0} \right) |V+U|^2 \\ N_{Ri} = \frac{W}{2} - \frac{1}{16}\rho A \left( C_L - \frac{Z_{OA}C_C}{d_0} \pm \frac{Z_{OA}C_D}{l_c} - \frac{LC_{Mx}}{l_c} \pm \frac{LC_{My}}{d_0} \right) |V+U|^2 \end{cases} \quad i=1,2,3,4 \quad (11)$$

其中:  $N_{Li}$  和  $N_{Ri}$  分别为左右轮轨法向力;  $Z_{OA}$ 、 $d_0$  和  $l_c$  分别为  $OA$  的长度、车轮滚动圆横向跨距、转向架中心距(车辆定距); 当  $i=1,2$  时, 取正号; 当  $i=3,4$  时, 取负号。考虑气动载荷的情况下, 在求蠕滑系数时就需要采用式(11)来计算轮轨接触斑法向力。

考虑气动载荷后, 重力刚度和重力角刚度变为:

$$\begin{cases} K_{gi} = \left( W - \frac{1}{8}\rho A \left( C_L \pm \frac{Z_{OA}C_D}{l_c} \pm \frac{LC_{My}}{l_c} \right) |V+U|^2 \right) \frac{\lambda}{b} \\ C_{gi} = \left( W - \frac{1}{8}\rho A \left( C_L \pm \frac{Z_{OA}C_D}{l_c} \pm \frac{LC_{My}}{l_c} \right) |V+U|^2 \right) \lambda b \end{cases} \quad i=1,2,3,4 \quad (12)$$

其中:当 $i=1,2$ 时,取正号;当 $i=3,4$ 时,取负号。将上述各个考虑气动载荷影响的表达式代入到式(4)中,就可以进一步数值计算,从而求出矩阵 $A$ 的特征值,当特征值的实部等于零时,即可求出气动载荷作用下高速铁路车辆的临界速度。

### 3 不同工况气动载荷作用下车辆运动稳定性计算实例及分析

根据前面的理论分析,本文编制了 Fortran 程序,并用该程序计算了定常气动载荷作用下高速铁路车辆蛇行运动稳定性的特征值,进而获得了不同气动载荷工况下车辆的临界速度。

在考察定常气动载荷对高速铁路车辆运行稳定性的影响之前,首先验证了自编程序。为此,我们计算了文献[3]的一个无气动载荷算例,并与已有结果进行了对比。该文献选取轮对横摆 $y_w$ 与摇头 $\psi_w$ (4个轮对)、构架横摆 $y_t$ 和摇头 $\psi_t$ (2个构架)、车体横摆 $y_c$ 和摇头 $\psi_c$ 共14个自由度,及轮对横摆 $y_w$ 与摇头 $\psi_w$ (4个轮对)、构架横摆 $y_t$ 、摇头 $\psi_t$ 、侧滚 $\phi_t$ 和沉浮 $z_t$ (2个构架)、车体横摆 $y_c$ 、摇头 $\psi_c$ 、侧滚 $\phi_c$ 和沉浮 $z_c$ 共20个自由度这两种模型进行计算。我们将自编程序的计算结果(17个自由度)与文献[3]的结果曲线进行了对比,对比情况如图2所示(图2表示的是车辆临界速度随一系纵向刚度改变而变化的关系)。从图2中可以看出,用本程序求解得到的曲线与文献[3]用20个自由度求得的曲线基本吻合,临界速度最大差别不超过3.8%。

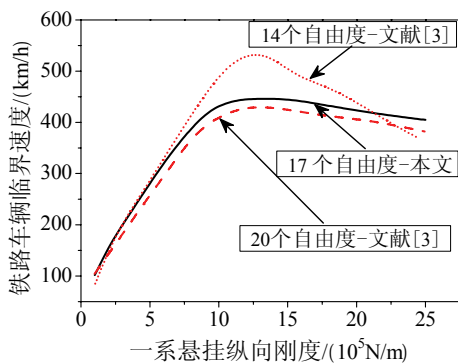


图2 铁路车辆临界速度对比情况

Fig.2 The comparisons of the critical velocity of railway vehicle

在对计算程序进行验证之后,下面考察沿列车反向运动高速气流和侧风对铁路车辆蛇行运动稳定性的影响。以下分析中分别选取了横风风速为5.4m/s、10.7m/s和15m/s的3种工况,气动载荷系数由中国科学院力学研究所杨国伟研究员领导的

高速铁路气动载荷研究组提供。我们针对某型铁路车辆,采用本文前面两节给出的方法,分别计算了气动升力、阻力、横向力、点头力矩和倾覆力矩单独以及共同作用时,车辆蛇行运动稳定性的特征值,并求出临界速度。

我们计算了上述3种工况,在计算时不仅考虑了侧风,还考虑了沿列车反向运动高速气流的影响。在这3种工况条件下,气动载荷对特征值的影响趋势类似,此处仅列出其中一种工况的曲线。图3和图4显示的是,当横风风速为10.7m/s时,单独(图3)以及同时(图4)考虑各方向定常气动力和气动力矩时,失稳模态特征值实部的变化情况(其他各模态特征值实部在计算的速度范围内均小于零,就不在图3和图4中列出),由此可以得到车辆的临界速度。3种工况下,沿列车反向运动高速气流和侧风产生的气动载荷对车辆蛇行运动临界速度的具体影响列在表1中。

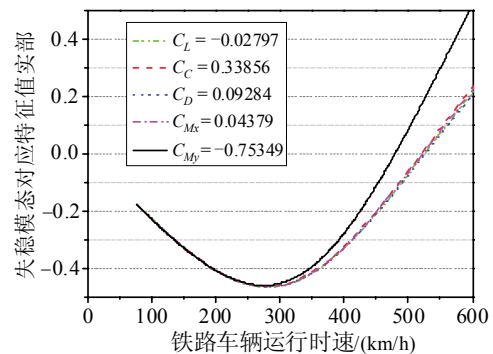


图3 各方向气动载荷单独作用时(横风风速10.7m/s),失稳模态特征值实部

Fig.3 The real part of the eigenvalues corresponding to the instability modal as each component of the aerodynamic loads acting individually  
(The velocity of the crosswind is 10.7m/s)

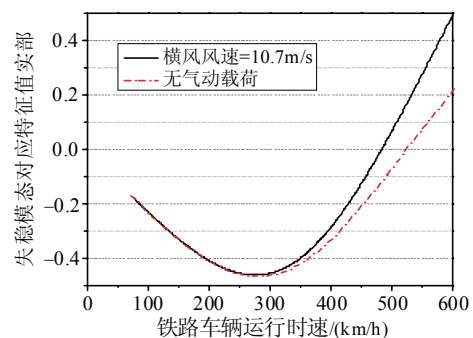


图4 风速为横风10.7m/s,各方向气动载荷共同作用时,失稳模态特征值实部

Fig.4 The real part of the eigenvalues corresponding to the instability modal as all components of the aerodynamic load acting collectively  
(The velocity of the crosswind is 10.7m/s)

表 1 横风作用下车辆临界速度  
Table 1 The critical velocity of the vehicle with the actions of crosswind

	不考虑气动力	气动升力	气动阻力	气动横向力	倾覆力矩	点头力矩	各方向气动载荷共同作用
工况 1 横风风速 5.4m/s							
气动载荷系数		-0.10082	0.09004	0.1358	0.01717	-0.74366	
临界速度/(km/h)	523	530	527	523	523	480	486
与不考虑气动力情况的差别百分比/(%)		1.3	0.8	0.0	0.0	-8.2	-7.1
工况 2 横风风速 10.7m/s							
气动载荷系数		-0.02797	0.09284	0.33856	-0.1194	-0.75349	
临界速度/(km/h)	523	525	525	521	520	479	481
与不考虑气动力情况的差别百分比/(%)		0.4	0.4	-0.4	-0.6	-8.4	-8.0
工况 3 横风风速 15m/s							
气动载荷系数		0.31234	0.10657	0.68654	0.08797	-0.88573	
临界速度/(km/h)	523	500	528	513	518	472	455
与不考虑气动力情况的差别百分比/(%)		-4.4	0.1	-1.9	-1.0	-9.8	-13.0

分析以上结果可知: 1) 沿列车反向运动高速气流和侧风产生的气动载荷对铁路车辆蛇行运动稳定性有影响, 在横风风速为 5.4m/s、10.7m/s 和 15m/s 的环境下, 考虑气动载荷(气动升力、阻力、横向力、倾覆力矩和点头力矩)后, 车辆蛇行运动临界速度分别降低 7.1%、8.0%和 13.0%。2) 在气动载荷各分量中, 点头力矩和升力对临界速度的影响比其他方向载荷的影响大。

## 4 结论

本文研究了在沿列车反向运动高速气流和侧风产生的定常气动载荷作用下, 高速铁路车辆的横向运动线性稳定性问题。分析中考虑了气动载荷改变轴重、使各轮法向支反力各不相同; 以及使重力刚度、重力角刚度、轮对蠕滑系数等发生变化的效应。通过理论分析, 给出了上述问题的分析方法。

以该方法为基础编制了车辆运动线性稳定性计算程序, 并进行了算例验证。采用本文方法, 分析了某型铁路车辆在不同横风环境下的运动稳定性。分析结果表明:

(1) 沿列车反向运动高速气流和侧风产生的气动载荷对铁路车辆蛇行运动稳定性有影响, 气动载荷会降低车辆临界速度(在本文计算的工况中可降低 13%)。

(2) 随着横风风速增加, 车辆临界速度单调降低。

(3) 点头力矩和升力对临界速度的影响比其他方向气动载荷的影响大。

根据上述分析, 建议在分析高速列车横向运动稳定性时适当考虑气动载荷的影响。

## 参考文献:

- [1] Kim P, Jung J, Seok J. A parametric dynamic study on hunting stability of full dual-bogie railway vehicle [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(3): 505—519.
- [2] Zboinski K, Dusza M. Self-exciting vibrations and Hopf's bifurcation in non-linear stability analysis of rail vehicles in a curved track [J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2010(29): 190—203.
- [3] Cheng Y C, Lee S Y, Chen H H. Modeling and nonlinear hunting stability analysis of high-speed railway vehicle moving on curved tracks [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009(324): 139—160.
- [4] 曾京. 车辆系统的蛇行运动分叉及极限环的数值计算 [J]. *铁道学报*, 1996, 18(3): 13—19.  
Zeng Jing. Numerical computations of the hunting bifurcation and limit cycles for railway vehicle system [J]. *Journal of the China Railway Society*, 1996, 18(3): 13—19. (in Chinese)
- [5] 罗仁, 曾京. 列车系统蛇行运动稳定性分析及其与单车模型比较 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(4): 184—188.  
Luo Ren, Zeng Jing. Hunting stability analysis of train system and comparison with single vehicle model [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(4): 184—188. (in Chinese)
- [6] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 金学松, 朱旻昊. 蛇行运动对铁道车辆平稳性的影响 [J]. *振动工程学报*, 2008, 21(6): 639—643.  
Chi Maoru, Zhang Weihua, Zeng Jing, Jin Xuesong, Zhu Minhao. Influence of hunting motion on ride quality of railway vehicle [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2008, 21(6): 639—643. (in Chinese)
- [7] 鲜荣, 张卫华, 王开文. 机车车辆在滚动振动试验台上蛇行运动稳定性计算 [J]. *铁道车辆*, 2005, 43(3): 16—19.  
Xian Rong, Zhang Weihua, Wang Kaiwen. Calculation

- of the hunting motion stability of locomotives and rolling stock on the roller testing rig [J]. *Rolling Stock*, 2005, 43(3): 16—19. (in Chinese)
- [8] 刘宏友, 曾京, 吕可维. 高速客车蛇行运动 Hopf 分叉的研究[J]. *工程力学*, 2005, 22(6): 224—228.  
Liu Hongyou, Zeng Jing, Lü Kewei. A study of hopf bifurcation of hunting motion for high-speed passenger cars [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 224—228. (in Chinese)
- [9] 张卫华, 沈志云. 车辆系统非线性运动稳定性研究[J]. *铁道学报*, 1996, 18(1): 29—34.  
Zhang Weihua, Shen Zhiyun. Nonlinear stability analysis of railway vehicle system [J]. *Journal of the China Railway Society*, 1996, 18(1): 29—34. (in Chinese)
- [10] 王福天. 车辆动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1981: 87—100.  
Wang Futian. *Dynamics of vehicle* [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1981: 87—100. (in Chinese)
- [11] Kalker J J. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact [M]. The Netherlands: Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1990: 47—95.
- [12] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 310—328.  
Tian Hongqi. *Train aerodynamics* [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007: 310—328. (in Chinese)

(上接第 46 页)

- [5] 李建波, 陈健云, 林皋. 非网格重剖分模拟宏观裂纹体的扩展有限单元法(I: 基础理论)[J]. *计算力学学报*, 2006, 23(2): 207—213.  
Li Jianbo, Chen Jianyun, Lin Gao. Extended finite element method for modeling cracks without remeshing (I: Basic theory) [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2006, 23(2): 207—213. (in Chinese)
- [6] 方修君, 金峰, 王进廷. 用扩展有限元方法模拟混凝土的复合型开裂过程[J]. *工程力学*, 2007, 24(增刊 I): 46—52.  
Fang Xiujun, Jin Feng, Wang Jinting. Simulation of mixed-mode fracture of concrete using extended finite element method [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(Suppl I): 46—52. (in Chinese)
- [7] 余天堂. 模拟三维裂纹问题的扩展有限元法[J]. *岩土力学*, 2010, 31(10): 3280—3285.  
Yu Tiantang. Extended finite element method for modeling three-dimensional crack problems [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3280—3285. (in Chinese)
- [8] 乔华, 陈伟球. 基于 ARLEQUIN 方法和 XFEM 的结构多尺度模拟[J]. *工程力学*, 2010, 27(增刊 I): 29—33.  
Qiao Hua, Chen Weiqiu. Multi-scale simulation of structures based on ARLEQUIN method and XFEM [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(Suppl I): 29—33. (in Chinese)
- [9] Khoei A R, Anahid M, Shahim K. An extended arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for large deformation of solid mechanics [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2008, 44(6/7): 401—416.
- [10] Zi G, Belytschko T. New crack-tip elements for XFEM and applications to cohesive cracks [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2003, 57(15): 2221—2240.
- [11] Ventura G, Budyn E, Belytschko T. Vector level sets for description of propagating cracks in finite elements [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2003, 58(10): 1571—1592.
- [12] Crisfield M. Non-linear finite element analysis of solids and structures (Volume 1) [M]. Chichester: John Wiley & Sons Inc, 2000: 286—290.
- [13] 解德, 钱勤, 李长安. 断裂力学中的数值方法及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 14—18.  
Xie De, Qian Qin, Li Chang'an. *Computational Method in Fracture Mechanics and its engineering application* [M]. Beijing: Science Press, 2009: 14—18. (in Chinese)