

# 明线会车、隧道会车及过隧道时的高速列车动力响应<sup>1)</sup>

张 敏\* 吴 晗<sup>†,2)</sup> 赖 姜\*\* 曾晓辉<sup>†</sup> 孙振旭<sup>†</sup>

\*(中车青岛四方机车车辆股份有限公司科技发展部, 山东青岛 266111)

<sup>†</sup>(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

\*\* (中国核动力研究设计院, 成都 610213)

**摘要** 明线会车、隧道会车和过隧道工况下的气动压力波对高速列车的动力响应和运行安全产生很大影响, 本文建立了三辆编组的高速列车动力学模型, 通过数值仿真得到了列车在三种工况下的车体所受的气动力, 基于数值积分分析了列车的动力响应和脱轨系数。研究发现: 明线会车和隧道会车工况相比, 车辆的侧向运动相反。明线会车和过隧道时, 气动载荷对列车的脱轨系数影响较小, 而隧道会车时, 气动载荷作用对尾车的安全性影响较大。

**关键词** 高速列车, 脱轨系数, 明线会车, 过隧道, 隧道会车

中图分类号: U270.1+1 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-18-196

## DYNAMIC RESPONSE OF HIGH SPEED TRAIN MEETING IN OPEN AIR, MEETING IN TUNNEL AND PASSING TUNNEL<sup>1)</sup>

ZHANG Min\* WU Han<sup>†,2)</sup> LAI Jiang\*\* ZENG Xiaohui<sup>†</sup> SUN Zhenxu<sup>†</sup>

\*(Science & Technology Planning Department, CRRC Qingdao Sifang Co. Ltd., Qingdao 266111, Shandong, China)

<sup>†</sup>(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

\*\* (Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

**Abstract** The pressure wave owing to meeting in open air, meeting in tunnel and passing tunnel will generate effect on dynamic response and operation safety of high speed train. A high speed model including three vehicles is presented. Aerodynamic loads are obtained by CFD simulation. Dynamic response and derailment coefficient under the three aerodynamic condition are obtained by Runge-Kutta method. Comparison and analysis show that the trains mutually repulsing when meeting in the open air and mutually repulsing attracting when meeting in tunnel. The aerodynamic load owing to meeting in open air and passing tunnel has little effect on derailment coefficient. Nevertheless, the aerodynamic load owing to meeting in tunnel will clearly affect derailment coefficient and safety performance.

**Key words** high speed train, derailment coefficient, meeting in open air, passing tunnel, meeting in tunnel

2018-05-18 收到第 1 稿, 2018-05-30 收到修改稿。

1) 中科院战略先导科技专项 (XDB22020101)、信息化专项 (XXH13506-204) 和国家自然科学基金 (11672306, 51490673) 资助项目。

2) 吴晗, 助理研究员, 主要研究方向为轨道车辆动力学。E-mail: wuhan@imech.ac.cn

**引用格式:** 张敏, 吴晗, 赖姜等. 明线会车、隧道会车及过隧道时的高速列车动力响应. 力学与实践, 2018, 40(5): 503-509

Zhang Min, Wu Han, Lai Jiang, et al. Dynamic response of high speed train meeting in open air, meeting in tunnel and passing tunnel. *Mechanics in Engineering*, 2018, 40(5): 503-509

随着高速列车运行速度的提高,气动载荷对其动力响应与安全性的影响不容忽视。高速列车运行时会遇到多种复杂的气动工况,包括明线会车、过隧道以及隧道会车等工况。明线会车、过隧道以及隧道会车情况下产生的压力波,对车体是一种瞬态冲击作用<sup>[1]</sup>,这种冲击作用会降低乘坐舒适性,增大车辆的脱轨系数等安全性指标。

近年来,大量学者对高速列车在运行工况下的气动力、动力学响应和稳定性做了研究工作。田红旗等<sup>[2]</sup>采用求解三维可压缩非定常 N-S 方程的方法,对列车交汇时的流场特性进行了数值模拟。梅元贵等<sup>[3-4]</sup>提出了高速列车隧道会车压力波的物理模型,研究了高速列车隧道会车压力波的数值分析方法。周朝晖<sup>[5]</sup>对复杂结构铁路隧道压力波进行了数值模拟方法研究。Howe 等<sup>[6]</sup>提出了列车隧道压力波的快速计算方法。陶泽平等<sup>[7]</sup>研究了侧风风场对列车交会气动压力的影响。冯志鹏等<sup>[1]</sup>对比分析了高速列车在隧道内和明线上交会时气动性能。Huang 等<sup>[8]</sup>和李雪冰等<sup>[9-10]</sup>研究了高速列车明线会车时的安全性和舒适性。Sun 等<sup>[11]</sup>对 CRH3 列车在明线和隧道会车工况下所受气动载荷以及车辆响应情况进行了数值分析。曾晓辉等<sup>[12]</sup>和 Zeng 等<sup>[13-14]</sup>考虑气动载荷对列车系统内部参数的影响,研究了气动载荷对高速列车蛇行运动稳定性的影响规律。

目前,将空气动力学与车辆系统动力学结合的研究较少,且目前将两者结合的研究中,仅把气动力作为强迫力,并未考虑气动力对车辆振动系统的影响;另外,当前研究在分析气动条件下的车辆响应和安全性问题时,考虑轨道不平顺因素较少,轨道不平顺因素在车辆响应和安全性分析时不可或缺。

本文考虑气动载荷对高速列车轮轨接触力的实时影响,建立三辆编组高速列车动力学模型。基于数值仿真得到了明线会车、过隧道及隧道会车的气动力数据,考虑轨道不平顺因素,对高速列车在这 3 种工况下的动态响应和安全性进行了分析。

## 1 高速列车系统计算模型

以三辆编组的高速列车为研究对象,如图 1 所示,车与车之间由车钩和车间减振器链接。每列车由车体、构架和轮对组成,共 17 个自由度,即:轮对横摆  $y_w$  与摇头  $\psi_w$ (四个轮对),构架横摆  $y_t$ 、摇头  $\psi_t$  和侧滚  $\phi_t$ (两个构架),车体横摆  $y_c$ 、摇头  $\psi_c$  和侧滚  $\phi_c$ ,三节车统一表示为  $\mathbf{Y}_1$ 。除此以外,二系横向减

振器和抗蛇行减振器视为弹簧和阻尼器串联,每个减振器存在 1 个节点自由度,因此每节车还有 6 个节点自由度,三节车节点自由度统一表示为  $\mathbf{Y}_2$ 。三辆编组共 69 个自由度。

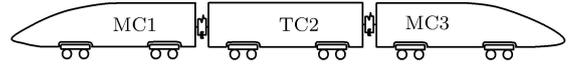


图 1 高速列车系统动力学模型

列车动力学方程可以概括写为如下形式

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{\mathbf{Y}}_1 + C\dot{\mathbf{Y}}_1 + K\mathbf{Y}_1 &= \mathbf{F} \\ C_1\dot{\mathbf{Y}}_2 + K_1\mathbf{Y}_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中,  $M$ ,  $C$ ,  $K$  分别为列车系统刚体自由度运动方程的惯量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,  $C_1$ ,  $K_1$  分别为减振器节点自由度运动方程的阻尼矩阵和刚度矩阵,  $\mathbf{F}$  表示气动力和力矩。

当高速列车在明线会车、过隧道及隧道会车时,通过数值仿真计算,可以得到车体所受到的气动力和力矩,即:气动升力  $F_z$ 、气动阻力  $F_x$  和气动横向力  $F_y$ ,以及点头力矩  $F_y$ 、摇头力矩  $F_z$  和倾覆力矩  $F_x$ 。不仅考虑了气动力对列车的直接作用,还考虑了气动力对列车运动系统内部参数如下几点影响<sup>[12-14]</sup>:(1) 气动升力、气动阻力和点头力矩改变轴重,从而使得轮轨法向力发生变化;(2) 气动升力、气动阻力和点头力矩改变轮轨法向力后还将会改变轮轨蠕滑系数;(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。

## 2 轨道不平顺的时域模拟

用如下功率谱密度函数来表达轨道谱特征<sup>[15-17]</sup>

$$S(f) = \frac{A(f^2 + Bf + C)}{f^4 + Df^3 + Ef^2 + Ff + G} \quad (2)$$

其中,  $S(f)$  为轨道不平顺功率谱;  $f$  为空间频率;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$ ,  $G$  为谱特征参数。通过查表得到不同的谱特征参数,对应我国不同线路的轨道不平顺功率谱。

将轨道不平顺视为各态历经随机过程,其平均值为零的平稳高斯过程,采用三角级数模型,模拟

得到轨道不平顺的时域结果。

$$x^d(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (3)$$

其中,  $\varphi_k$  是  $0 \sim 2\pi$  范围的均匀分布的随机变数, 并且是互相独立的。 $a_k$  是平均值为零、标准差为  $\sigma_k$  的高斯随机变数, 由下式给出。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\omega &= (\omega_u - \omega_l)/N \\ \omega_k &= \omega_l + \left(k - \frac{1}{2}\right) \Delta\omega \quad (k = 1, 2, \dots, N) \\ \sigma_k^2 &= 4S_x(\omega_k) \Delta\omega \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中,  $\omega_u$  和  $\omega_l$  分别是频率的上限值和下限值。根据式 (2) ~ 式 (4), 可得到任意轨道谱的时域解。用上述方法得到速度为 300 km/h 时, 空间频率为 0.01~50 cycle/m 的横向随机不平顺的信号, 如图 2 所示。

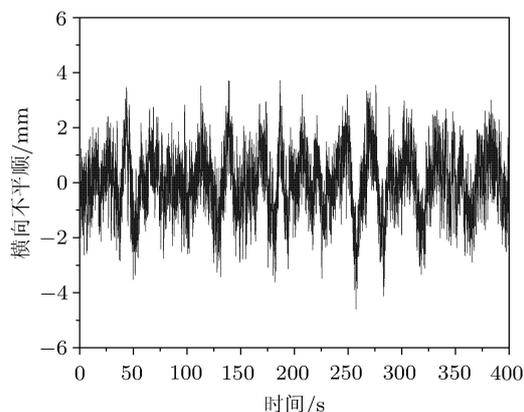
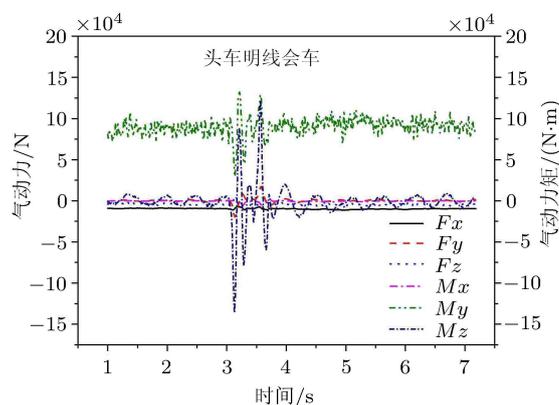


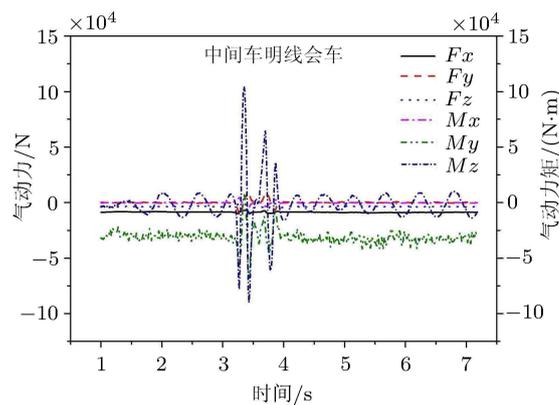
图 2 横向随机不平顺信号

### 3 气动力和力矩

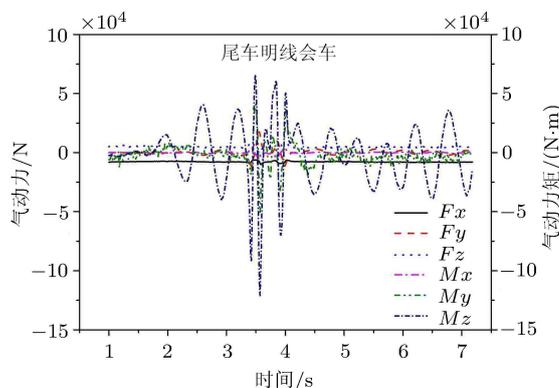
基于数值仿真计算列车在明线会车、过隧道和隧道会车时的气动载荷, 隧道截面面积  $100\text{m}^2$ , 长度 390 m, 列车运行速度 300 km/h, 传统数值方法不适用于本研究, 考虑车辆的运动特征, 本研究采用了滑移网格技术开展数值仿真, 详细计算模型与分析条件见作者此前的研究<sup>[11]</sup>。3 种工况的气动力和力矩的时间历程曲线如图 3 ~ 图 5 所示。其中图 3 显示的是明线会车工况的气动载荷, 图 4 显示的是单车过隧道的气动载荷, 图 5 显示的是隧道会车的气动载荷。气动力和力矩的方向与车体运动坐标系方向一致, 并且已将数据进行转化, 使力的作用点和矩心处于车体质心。



(a) 头车

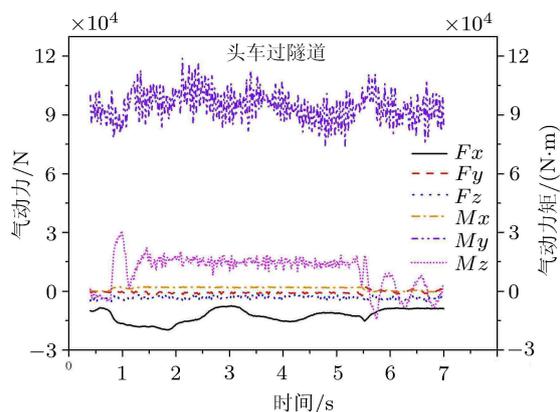


(b) 中间车

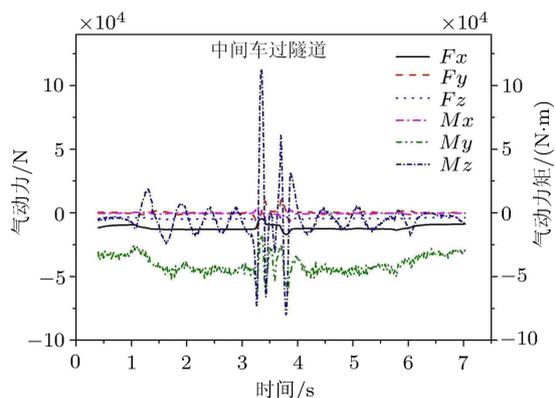


(c) 尾车

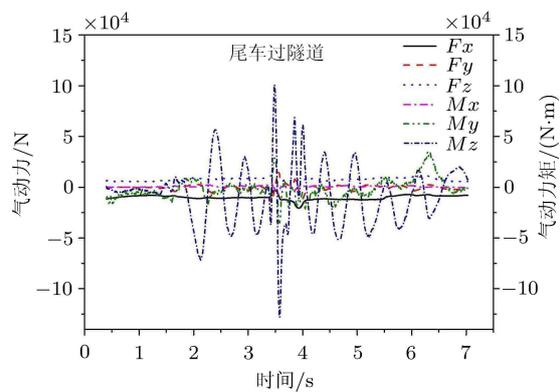
图 3 高速列车系统明线会车气动力和力矩



(a) 头车

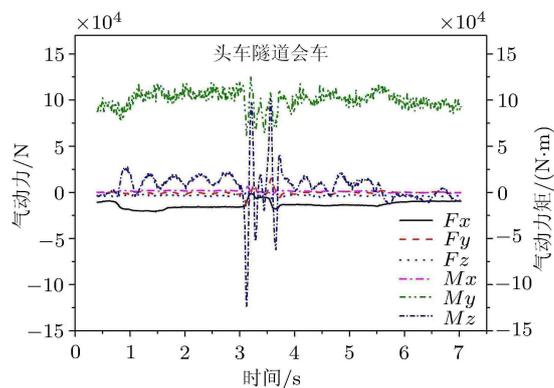


(b) 中间车

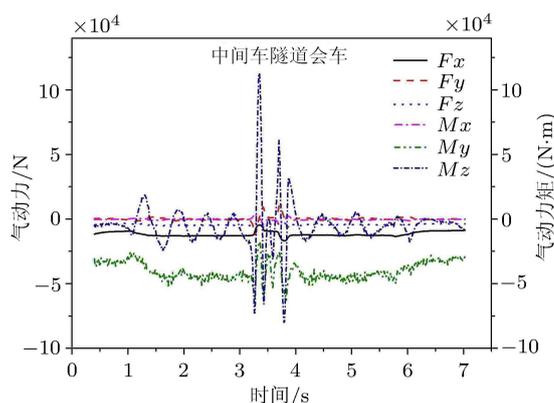


(c) 尾车

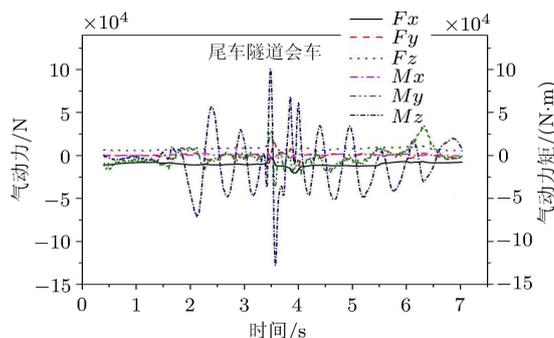
图4 高速列车系统单车过隧道气动力和力矩



(a) 头车



(b) 中间车



(c) 尾车

图5 高速列车系统隧道会车气动力和力矩

#### 4 车辆动力响应与安全性

将车辆动力学参数、气动力和力矩以及轨道不平顺数据代入高速列车动力学理论模型,通过四阶 Runge-Kutta 法求解高速列车动力学方程,可以得到车辆的动力响应。高速列车动力学方程求解是基于自编程序实现的。车辆主要悬挂参数为:一系横向刚度  $k_{py} = 5.49 \times 10^6 \text{ N/m}$ ,一系纵向刚度  $k_{px} = 1.37 \times 10^7 \text{ N/m}$ ,一系垂向刚度  $k_{pz} = 1.176 \times$

$10^6$  N/m, 一系垂向阻尼  $c_{pz} = 19600$  N·s/m; 二系横向刚度  $k_{ty1} = 1.597 \times 10^6$  N/m, 二系纵向刚度  $k_{tx1} = 1.597 \times 10^6$  N/m, 二系垂向刚度  $k_{tz1} = 9.9 \times 10^5$  N/m, 二系横向减振器刚度  $k_{ty2} = 3.43 \times 10^7$  N/m 和阻尼  $c_{ty2} = 1.176 \times 10^5$  N·s/m, 抗蛇行减振器刚度  $k_{sx} = 8.82 \times 10^6$  N/m 和阻尼  $c_{sx} = 2.89 \times 10^5$  N·s/m。计算中所采用的列车质量、结构参数等详见作者此

前研究 [18]。

本文算例中, 高速列车以时速 300 km/h 运行, 前 30 s, 列车在平直的, 有横向轨道不平顺的轨道上行驶。从 30 s 开始, 列车系统开始分别经历过隧道、明线会车和隧道会车这三种工况。图 6 ~ 图 8 分别是列车在明线会车、过隧道和隧道会车工况时三节车的横摆响应时间历程曲线。

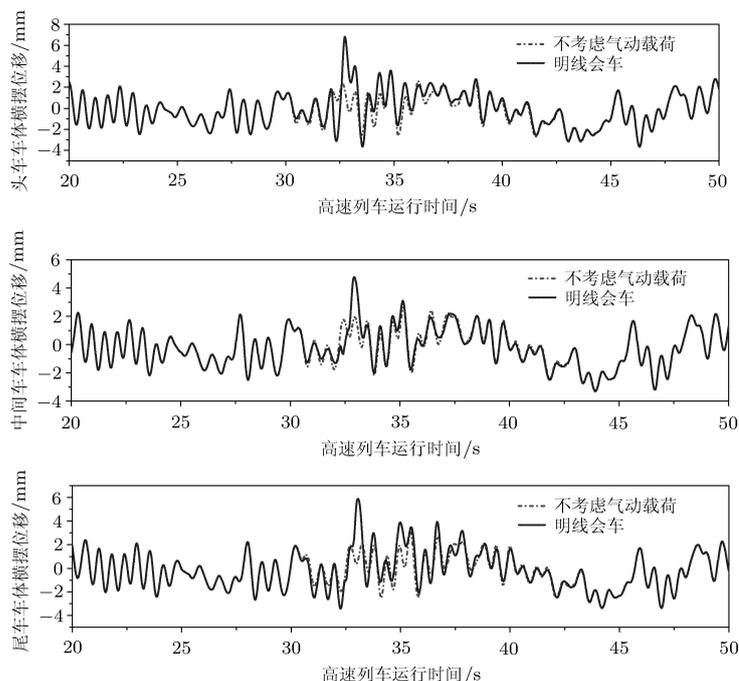


图 6 高速列车系统明线会车动力响应

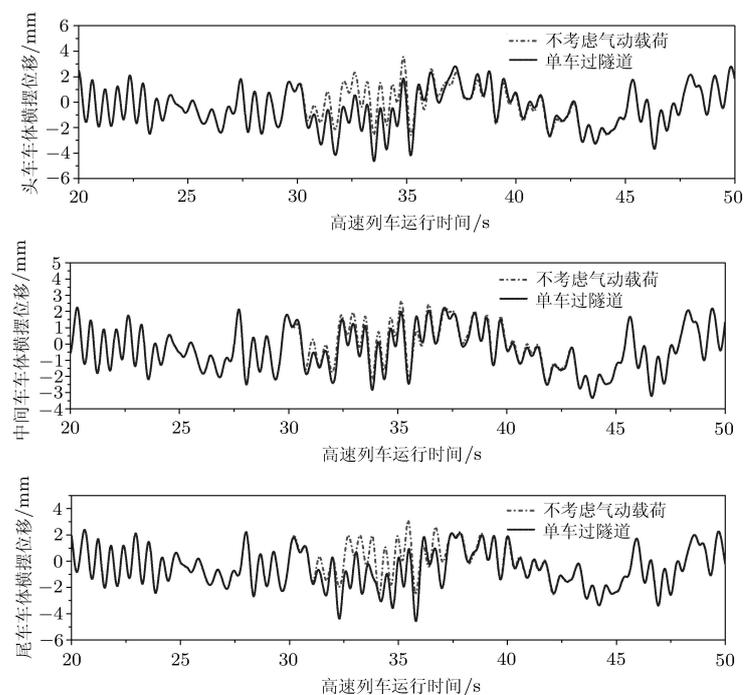


图 7 高速列车系统单车过隧道动力响应

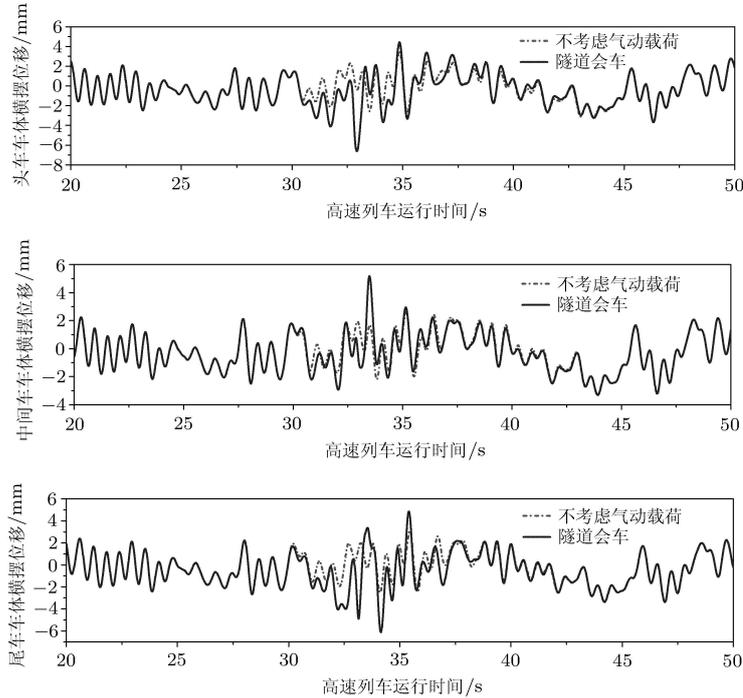


图8 高速列车系统隧道会车响应

通过图6~图8结果发现,列车系统在运行到30s时,开始受到气体压力波的作用。各列车横摆位移发生一定的变化,当气体压力波作用结束以后,经过3s左右,其对列车振动的影响逐渐消失。

图6结果表明,当车辆在明线会车过程中,相对于不考虑气动载荷情况,三节车的横向位移大体上是正向增大的;而图8的结果表明,当车辆在隧道会车过程中,相对于不考虑气动载荷情况,三节车的横向位移大体上负向减小。两种工况情况对比,列车在气动力作用下横向运动方向相反。

脱轨系数是衡量列车安全性能的重要指标,下面考察以上3种工况下,气体压力波对列车系统脱轨系数的影响。图9给出了3种工况下,各列车的

脱轨系数与不考虑气动载荷时的对比情况。

图9中的横坐标1、2、3和4分别对应的是不考虑气动载荷、单车过隧道、明线会车和隧道会车4种工况。对比发现,对于过隧道和明线会车两种工况各列车的脱轨系数与不考虑气动载荷基本一样。而隧道会车工况,尾车的脱轨系数明显增大,列车安全性显著恶化。

### 5 结论

本文通过建立考虑轨道横向不平顺的三辆编组高速列车系统模型,针对列车实际运行中经常遇到的明线会车、过隧道和隧道会车气动工况,在考虑气动效应影响下,分析了列车系统的振动响应以及气动载荷对列车系统脱轨系数的影响,得出以下结论:

过隧道、明线会车和隧道会车时的气体压力波会对列车系统的振动响应造成一定的影响,不同气动工况的影响不同,明线会车和隧道会车两种气动条件导致的车辆横向运动方向相反。

过隧道和明线会车时,气动载荷对列车的脱轨系数影响较小;而隧道会车时,尾车脱轨系数显著增大,气动载荷对列车的安全性产生较大影响,但仍处于安全范围内。

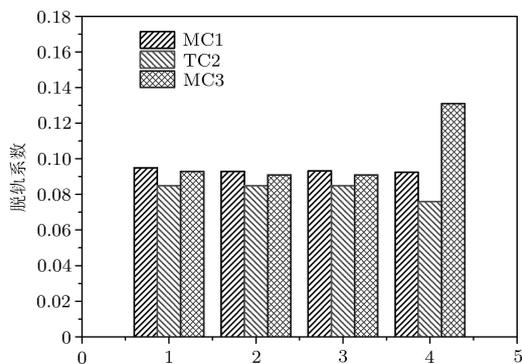


图9 高速列车系统脱轨系数对比情况

## 参 考 文 献

- 1 冯志鹏, 张继业, 张卫华. 高速列车在隧道内和明线上交会时气动性能对比分析. 铁道车辆, 2010, 48(12): 1-5
- 2 田红旗, 贺德馨. 列车交会压力波三维数值的计算. 铁道学报 2001, 23(3): 18-22
- 3 梅元贵, 赵海恒, 刘应清. 隧道内高速列车会车压力波的数值模拟方法. 兰州铁道学院学报, 1996(1): 1-6
- 4 梅元贵, 余南阳, 赵海恒. 高速列车隧道会车压力波的数值分析方法. 铁道学报, 2002, 24(2): 21-25
- 5 周朝晖. 复杂结构铁路隧道压力波效应数值模拟研究. [博士论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2016
- 6 Howe MS, Iida M, Maeda T, et al. Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 297: 267-292
- 7 陶泽平, 杨志刚, 陈羽. 侧风风场特征对高速列车交会的影响研究. 力学与实践, 2013, 35(2): 22-28
- 8 Huang J, Yoon T-S, Lee D-H, et al. Numerical study of unsteady flow field around high speed trains passing by each other. *JSME International Journal, Series B*, 2001, 44(3): 451-464
- 9 李雪冰, 侯传伦, 张曙光等. 高速列车交会时的风致振动研究. 振动与冲击, 2009, 28(4): 81-84
- 10 李雪冰, 张继业, 张卫华. 高速列车交会时气流诱发振动的仿真研究. 铁道车辆, 2009, 47(12): 9-12
- 11 Sun ZX, Zhang YY, Guo DL, et al. Research on running stability of CRH3 high speed trains passing by each other. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2014, 8(1): 140-157
- 12 曾晓辉, 赖姜. 定常气动载荷作用下高速铁路车辆的蛇行运动稳定性. 工程力学, 2013, 30(4): 52-58
- 13 Zeng XH, Wu H, Lai J, et al. Influences of aerodynamic loads on hunting stability of high-speed railway vehicles and parameter studies. *Acta Mechanica Sinica*, 2014, 30(6): 889-900
- 14 Zeng XH, Wu H, Lai J, et al. Hunting stability of high-speed railway vehicles on a curved track considering the effects of steady aerodynamic loads. *Journal of Vibration and Control*, 2016, 22(20): 4159-4175
- 15 钱雪军. 轨道不平顺的时域模拟法. 铁道学报, 2000, 22(4): 94-98
- 16 张立伟, 冯军和. 轨道不平顺随机过程的数值模拟. 世界地震工程, 2008, 24(1): 103-109
- 17 练松良, 刘扬, 杨文忠. 沪宁线轨道不平顺谱的分析. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(10): 1342-1346
- 18 Zeng XH, Wu H, Lai J, et al. The effect of wheel set gyroscopic action on the hunting stability of high-speed trains. *Vehicle System Dynamics*, 2017, 55(6): 924-944

(责任编辑: 胡 漫)

(上接第 494 页)

- 60 Hu B, Hu NH, Li Y, et al. Multi-scale numerical simulations on piezoresistivity of CNT/polymer nanocomposites. *Nano Research Letters*, 2012, 7: 402
- 61 Theodosiou TC, Saravanos DA. Numerical investigation of mechanisms affecting the piezoresistive properties of CNT-doped polymers using multi-scale models. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(9): 1312-1320
- 62 Wang Z, Ye X. A numerical investigation on piezoresistive behaviour of carbon nanotube/polymer composites: mechanism and optimizing principle. *Nanotechnology*, 2013, 24(26): 265704
- 63 Matos MAS, Tagarielli VL, Baiz-Villafranca PM, et al. Predictions of the electro-mechanical response of conductive CNT-polymer composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018, 114: 84-96
- 64 Jin L, Chortos A, Lian F, et al. Microstructural origin of resistance-strain hysteresis in carbon nanotube thin film conductors. *Processing of the National Academy of Sciences of the USA*, 2018, 115(9): 1986-1991
- 65 Wang J, Wang W, Zhang C, et al. The electro-mechanical behavior of conductive filler reinforced polymer composite undergone large deformation: a combined numerical-analytical study. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 133: 185-192

(责任编辑: 胡 漫)