

高速列车过隧道、明线会车及隧道会车工况下的动力响应研究

赖 姜, *曾晓辉, 孙振旭, 杨国伟

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 建立了头尾车为动车, 中间车为拖车的三辆编组、51 个自由度的高速列车动力学模型, 通过多体动力学计算得到了列车在明线会车、过隧道及隧道会车工况下的动力学响应。并对列车在此三种工况下的动力学响应进行了分析讨论。研究发现: 气动力对列车系统动力学行为的影响非常明显, 使列车振动加剧, 其中头车和尾车相对剧烈。其中, 隧道会车对列车系统动力学行为的影响更为明显。

关键词: 高速列车; 明线会车; 过隧道; 隧道会车; 动力学响应

THE DYNAMIC RESPONSES OF HIGH-SPEED TRAINS PASSING TUNNEL, PASSING BY EACH OTHER ON OPEN TRACK AND INSIDE TUNNEL

LAI Jiang, *ZENG Xiao-hui, SUN Zhen-xu, YANG Guo-wei

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

Abstract: A mathematical model of high-speed railway with 51 degrees of freedom is established. Considering the effects of aerodynamics, the dynamic response is analyzed for a high-speed train passing tunnel, passing by each other inside the tunnel or on an open track. It is found that the aerodynamic loads have obvious effects on the vehicle system, which cause apparent vibration of the train, especially for the head and tail cars. The aerodynamic effects on the dynamic responses of high-speed train passing by each other inside tunnel are more serious.

Key words: high-speed train; passing tunnel; passing on open track; passing inside tunnel; dynamic responses

高速列车在行驶过程中会经常面临明线会车、过隧道以及隧道会车等复杂的运行工况。这些特殊的运行工况不仅会恶化列车动力响应特性, 甚至还可能会导致安全事故。因此, 随着高速列车运行时速不断的提高, 不可忽略气动力对列车振动的影响, 特别是列车在明线会车、过隧道及隧道会车等工况下的动力学响应成为一个必须要考虑的问题。近年来, 大量学者对高速列车在特殊运行工况下的气动力及动力学响应做了大量的研究工作。田红旗^[1]等研究了高速列车交会压力波三维数值计算。梅元贵^[2]等研究了高速列车隧道会车压力波的数值分析方法。Howe^[3]等列车隧道压力波的快速计算方法。Jaeho 和张卫华等^{[5][6]}研究了高速列车明线会车时的安全性和舒适性。冯志鹏^[7]等研究了高速列车在隧道内和明线上交会时气动性能的对比分析研究。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, 本文考虑了气动力对轴重、各轮对蠕滑系

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

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);

*曾晓辉(1972-), 男, 湖南新化人, 副研究员, 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);

孙振旭(1983-), 男, 山东高密人, 助理研究员, 主要从事高速列车空气动力学和气动噪声研究(E-mail: sunzhenxu@imech.ac.cn);

杨国伟(1967-), 男, 湖南邵阳人, 研究员, 主要从事气动弹性和高速列车空气动力学研究(E-mail: gwyang@imech.ac.cn)。

数、重力刚度和角刚度等的影响。

1 计算模型

本文以三辆编组的高速列车为研究对象，如图 1 所示，其中头车和尾车为动车，中间车为拖车，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 ψ_w (四个轮对)，构架横摆 y_t 、摇头 ψ_t 和侧滚 φ_t (两个构架)，车体横摆 y_c 、摇头 ψ_c 和侧滚 φ_c 。三辆编组共 51 个自由度。

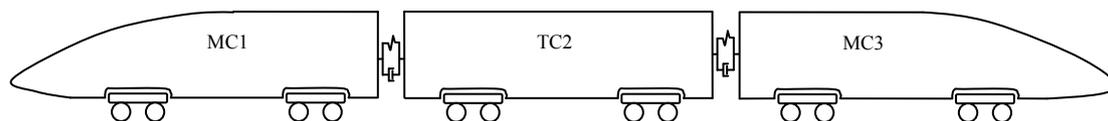


图 1 高速列车明动力学模型

当高速列车在明线会车，过隧道及隧道会车时，通过 CFD 的仿真计算，可以得到车体所受到的三个方向的力和力矩，即：气动升力、阻力和横向力，点头力矩、倾覆力矩和侧滚力矩。本文不仅考虑了气动力对列车的直接作用，还考虑了如下几点影响：1) 气动升力、阻力和点头力矩改变轴重，从而使得轮轨力法向力发生变化；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。考虑气动力的上述影响后，列车的运动微分方程可写为：

$$M\ddot{Y} + C(V,t)\dot{Y} + K(V,t)Y = F(t) \quad (0)$$

其中， M 、 C 、 K 分别为车辆系统惯量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵； $K(V, t)$ 、 $C(V, t)$ 表示刚度阵和阻尼阵包含气动力的影响； $F(t)$ 表示气动力； Y 表示三辆编组列车的 51 个自由度。在列车系统运动微分方程中，考虑了轮轨接触几何关系，蠕滑力的计算采用 Kalker 的线性理论。

2 列车动力学响应

本文采用数值积分方法求解方程(0)，具体计算通过自编 Fortran 程序进行。分别计算了高速列车在明线会车、过隧道及隧道会车三种工况下的动力学响应。本文考虑了三种工况：1) 两列相同的列车以 300km/h 的速度进行明线交会；2) 一列车以 300km/h 的速度进入隧道；3) 两列相同的列车以 300km/h 的速度在隧道中交会。其中，隧道长度为 390m，截面面积为 100m²，两轨道之间距离为 5.2m。通过 CFD 计算得到气动力，如图 2 所示。

将列车在明线会车、过隧道及隧会车三种工况下的气动力分别作用在车体上，对式(0)进行仿真计算就可以分别得到列车在明线会车、过隧道及隧道会车工况下的动力学响应。图 3-5 分别显示的是列车在明线会车、过隧道及隧道会车工况下车体横摆、摇头和侧滚自由度的动力学响应，表 1-3 分别显示的是车体横摆、摇头和侧滚自由度在三种工况下的响应最大值。

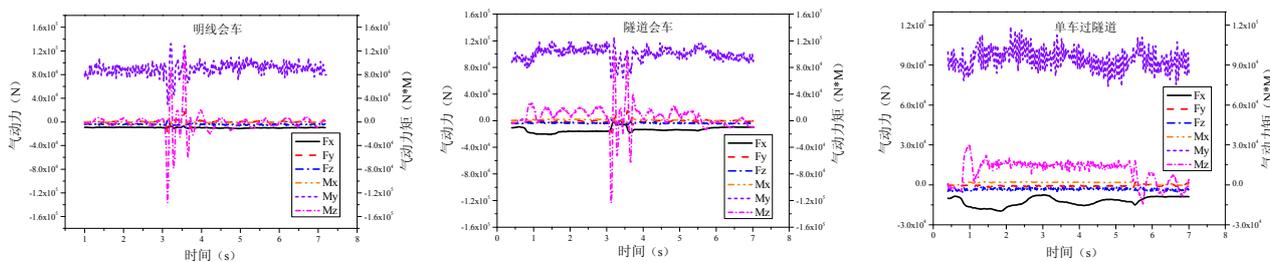


图 2 高速列车明线会车、过隧道及隧道会车时的气动力和气动力矩

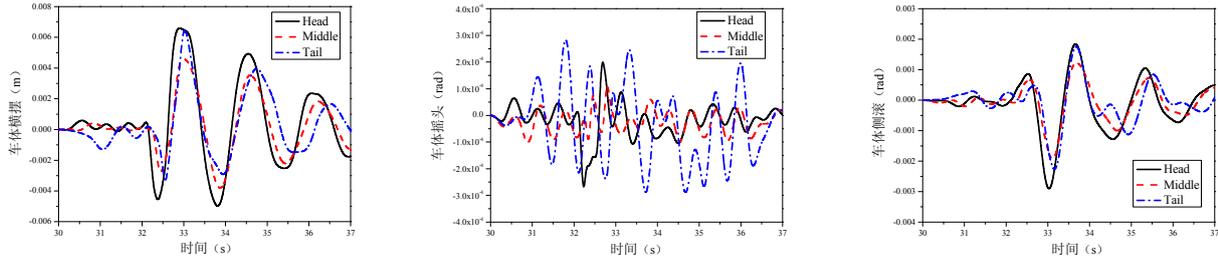


图3 高速列车明线会车时,车体动力学响应

表1 高速列车明线会车时,车体自由度动力学响应最大值

	头车(Head)	中间车(Middle)	尾车(Tail)
车体横摆/mm	6.7	4.6	6.5
车体摇头/rad	2.7×10^{-4}	1.1×10^{-4}	2.8×10^{-4}
车体侧滚/rad	2.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}	2.3×10^{-3}

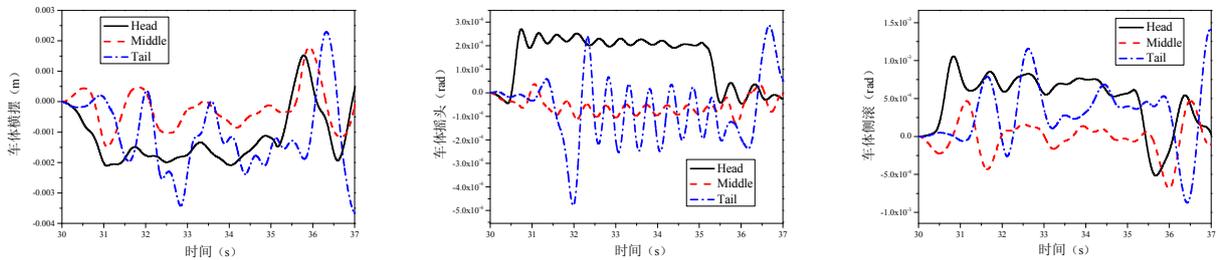


图4 高速列车过隧道时,车体动力学响应

表2 高速列车过隧道时,车体自由度动力学响应最大值

	头车(Head)	中间车(Middle)	尾车(Tail)
车体横摆/mm	1.6	1.8	2.3
车体摇头/rad	2.7×10^{-4}	0.4×10^{-4}	4.8×10^{-4}
车体侧滚/rad	1.1×10^{-3}	0.7×10^{-3}	1.4×10^{-3}

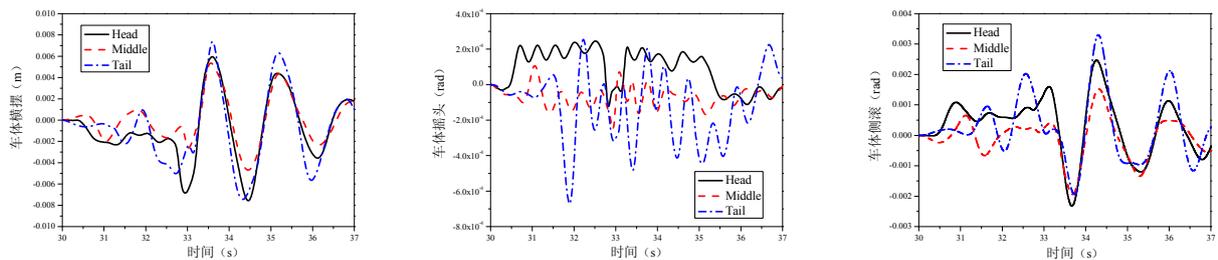


图5 高速列车隧道会车时,车体动力学响应

表3 高速列车隧道会车时,车体自由度动力学响应最大值

	头车(Head)	中间车(Middle)	尾车(Tail)
车体横摆/mm	6.1	5.5	7.5
车体摇头/rad	2.5×10^{-4}	2.5×10^{-4}	6.7×10^{-4}
车体侧滚/rad	2.5×10^{-3}	1.9×10^{-3}	3.4×10^{-3}

3 结论

本文建立了三辆编组的高速列车系统多体动力学模型,并编制了相应的计算程序,分别研究了列车在

明线会车、过隧道及隧道会车三种工况下的动力学响应问题。分析结果表明:

- (1) 高速列车在明线会车、过隧道及隧道会车时, 气动力对列车动力学响应有明显的影响;
- (2) 气动力作用下, 头车和尾车的振动比中间车强烈;
- (3) 列车明线会车和隧道会车时, 车体的振动均比过隧道强烈;
- (4) 列车隧道会车与明线会车相比, 气动力增大了中间车和尾车的振动, 头车的振动略微降低。

参考文献:

- [1] 田红旗, 贺德馨. 列车交会压力波三维数值计算[J]. 铁道学报 2001, 23(3) 18-22
- [2] 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[J]. 铁道学报 2002, 24(2) 21-25
- [3] Howe M S, Iida M, Maeda T, et al. Rapid Calculation of the Compression Wave Generated by a Train Entering a Tunnel with a Vented Hood [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 297:267-292
- [4] Jaeho HWANG, Tae Seok YOON, Dong ho LEE, Soogab LEE. Numerical Study of unsteady Flow field around High Speed Trains Passing by Each Other [J]. JSME International Journal, Series B, 2001, 44(3) 451-464
- [5] 李雪冰, 侯传伦, 张曙光, 张继业, 张卫华. 高速列车交会时的风致振动研究[J]. 振动与冲击 2009, 28(4) 81-84
- [6] 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[J]. 铁道车辆 2009, 47(12) 9-12
- [7] 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[J]. 铁道车辆 2010, 48(12) 1-5