

交通运输

定常横风作用下高速列车的安全性分析

刘玉标 张营营 邢云林 孙振旭 杨国伟

(中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 基于空气动力学理论,建立高速列车空气动力学模型,计算不同运行速度下高速列车在明线运行和明线横风场景下的气动荷载。同时采用多体系统动力学理论,建立车辆多体动力学仿真模型。将气动荷载导入车辆仿真模型,计算在无横风和有横风条件下,列车以不同速度行驶时的车辆动力学响应及其安全性指标。获得在无横风和有横风条件下高速列车运行安全性随速度的变化规律。研究表明,横风作用将对列车的安全运行构成极大的威胁。参照有关高速列车运行安全性评定标准,给出 15 m/s 横风风速下高速列车安全运行的速度限值。

关键词 高速列车 明线 横风 气动荷载 速度限值 安全性

中图分类号 U271.91; **文献标志码** A

随着运行速度的提高,高速列车受到的气动荷载逐渐增强,同时由于其结构向轻量化方向发展,气动荷载对列车运行安全性的影响越来越显著。其中,横风对列车行驶安全性的影响在众多列车空气动力学问题中占有十分重要的地位。横风作用下,列车受到的气动力可能使其失稳、脱轨、甚至倾覆。世界各国因大风导致的铁路行车安全事故时有发生^[1],给人们的生命财产造成严重威胁。针对强侧风,日本、德国、法国以及英国等国家已经开展多项侧风对高速列车运行安全的影响研究,并开发出可根据风速大小对列车运行车速实施同步调节的侧风预警系统。在我国,高速铁路建设已经全面展开。为确保横风作用下列车能安全、平稳和舒适运行,有必要开展横风下高速列车运行安全性研究,为研制侧风预警系统,合理设定侧风环境下运行速度限值提供科学依据。

各国学者对强风环境下作用在车体上的气动力特性进行广泛的研究。C. J. Baker 通过全尺寸实车试验和风洞试验研究横风作用在各种不同类型车辆上的稳态和瞬态气动力^[2-4];StePhalle Sanquer 发展了一种基于压力场测量的新的试验方法来研究作用在高速列车上的侧风,此方法能测定车辆每一个部分所受的气动力^[5];田红旗等利用数值模拟方法,分析在不同车速和风速条件下各种列车的气动力,并研究气动力与车速和风速的关系^[6]。鉴于对列车安全性的分析评估最终应归结到车辆动力学上。

Christian Wetzel 结合多体动力学理论,利用阵风特性曲线对列车侧风稳定性进行概率分析,并研究车体质量、悬挂刚度等参数对列车侧风稳定性的敏感性^[7]。A. Carrarini 采用车辆多体动力学模型分析在横风作用下的列车运行稳定性,并利用线性面元法和 SIMPACK 软件结合对列车流固耦合振动进行研究^[8]。

综合考虑国内外对高速车辆横风安全性的研究方法,本文建立 3 节车编组的高速列车空气动力学模型和车辆系统动力学模型。通过单向非耦合方法传递两模型之间气动力,仿真出列车在明线运行以及明线横风(15 m/s)场景下的动力学响应。计算确定不同运行速度下的运行安全性指标,并给出明线横风环境(15 m/s)下高速列车运行速度限值。

1 列车空气动力学数值模拟

高速列车是复杂的细长结构,其模型的准确程度影响到列车空气动力学计算的可靠性,进而影响列车的安全性分析。由于列车中间段截面外形保持不变,气流在经过车头一段距离后已趋于平稳,气动力仿真结果表明,中间段长度对头尾车气动荷载影响不大。因此,本文根据国内某 CRH 型高速动车组的几何外形,采用三辆编组形式(头车 + 中间车 + 尾车)进行建模与分析工作。列车头车与尾车外形一致,其中模型中使用真实的转向架、风挡外形如图 1 所示。

根据能量守恒定律,建立列车外流场控制方程为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

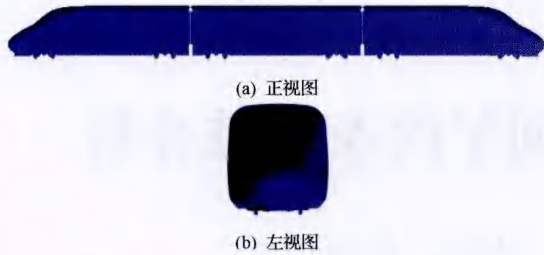


图1 高速列车气动计算模型

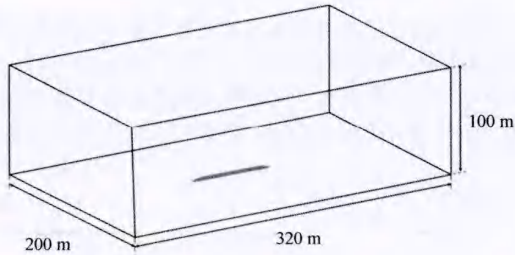


图2 计算区域

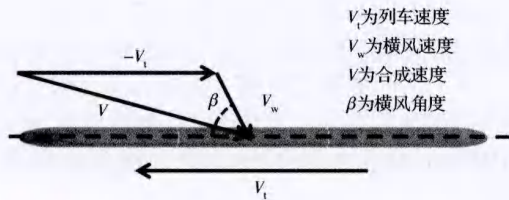


图3 速度三角形

在控制体上,建立外流场积分控制方程为

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_S [\rho \varphi u - \Gamma_\varphi \text{grad} \varphi] dS = \int_V S_\varphi dV \quad (2)$$

采用主流 CFD 软件 STAR-CCM+ 进行数值模拟。湍流模型采用标准两方程湍流模型,从而流场计算的数学模型为定常不可压缩粘性的 $k-\varepsilon$ 两方程模型。在模拟中,采用 RANS 方法以及 SST $k-\omega$ 模式进行湍流输运量的求解。计算运行速度最大值为 400 km/h, 对应来流马赫数为 0.32, 采用基于密度的可压缩方法进行求解。计算区域设置为 320 m × 200 m × 100 m 的长方体, 如图 2 所示。采用 trim + prism layer 的体网格类型。在整个空间计算区域设置较大尺寸的网格, 而在车身周围、尾流、列车风挡等流场变化大的区域将网格进行细化。车体表面及地面处生成总厚度为 30 mm 边界层网格。为了和体网格更好的衔接, 保证网格质量, 共设置 6 层边界层网格, 增长比为 1.2。网格的厚度以及与列车表面的正交性与贴体性, 保证壁面函数应用于边界层模拟的准确性。整个网格量控制在 7 800 万左右。

明线运行场景进行求解时, 将参考坐标系取在列车表面。假定列车静止, 周围远场与来流边界均

给定自由来流条件, 限定来流马赫数。列车高速运行时地面效应影响比较明显, 为将此地面效应准确地反映在数值模拟中, 将地面与轨道均设定为移动固壁边界条件, 移动速度与来流速度大小相同。明线横风场景的模型和网格选取与明线运行场景完全相同, 区别在于明线横风场景下的外场边界设置。在明线横风场景下, 外场来流设置为均匀风, 速度取为由列车车速和横风风速组成的速度三角形, 横风角度为 90° , 如图 3 所示。本文计算明线运行和明线横风 15 m/s 下 8 个工况, 车速分别为 250 km/h、300 km/h、350 km/h 和 400 km/h。

2 高速列车多体系统动力学模型

假定车体、构架和轮对均为刚体, 不考虑其弹性变形。利用 SIMPACK 软件建立 CRH3 高速列车的三编组多体系统动力学模型如图 4 所示。编组模型由头车、中间车、尾车组成。每节车共有 50 个自由度。除质量外, 头车、中间车和尾车在自由度选取、各部件的连接与约束关系、结构及悬挂参数一致。整车模型共 150 个自由度。车与车之间采用车钩、缓冲器以及车间减振器连接。通过 Lagrange 原理建立列车多体系统动力学方程为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F_r + F_a \quad (3)$$

式(3)中, M 、 C 、 K 、 X 分别为车辆系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵和位移矩阵。 F_r 为轨道激励的广义力矢量, F_a 为作用在车体质心的等效气动载荷的广义矢量。



图4 高速列车多体系统动力学仿真模型

选取车体质心为简化中心, 将作用于车体表面上的分布压力积分, 得到作用于车体质心的等效集中力和力矩。即气动阻力 F_x 、横向气动力 F_y 、气动升力 F_z 、倾覆力矩 M_x 、点头力矩 M_y 和摇头力矩 M_z , 分别表示为:

$$F_x = C_x \frac{1}{2} \rho A V^2 \quad (4)$$

$$F_y = C_y \frac{1}{2} \rho A V^2 \quad (5)$$

$$F_z = C_z \frac{1}{2} \rho A V^2 \quad (6)$$

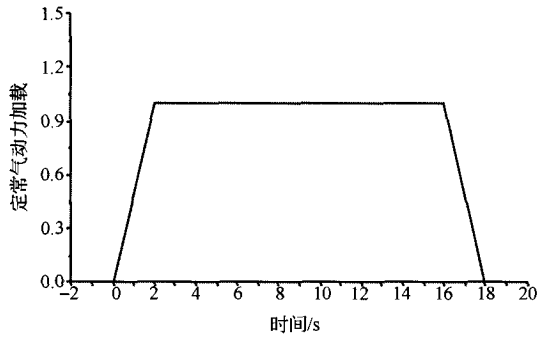


图5 定常气动力的加载方式

$$M_x = C_{M_x} \frac{1}{2} \rho A L V^2 \quad (7)$$

$$M_y = C_{M_y} \frac{1}{2} \rho A L V^2 \quad (8)$$

$$M_z = C_{M_z} \frac{1}{2} \rho A L V^2 \quad (9)$$

式中, ρ 、 A 、 C_x 、 C_y 和 C_z 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_{M_x} 、 C_{M_y} 、 C_{M_z} 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。其中,式(3)中 F_a 可表示为

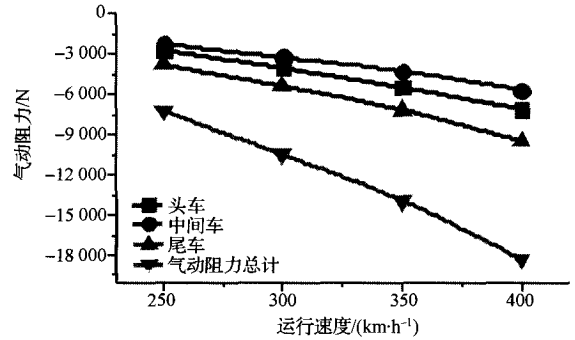
$$F_a^T = (F_x^T, F_y^T, F_z^T, M_x^T, M_y^T, M_z^T) \quad (10)$$

为保障计算稳定性,加载气动载荷历程如图5所示。其中0~2s不施加任何气动力和力偶,让车辆系统运行趋于稳定。2~4s线性加载到气动力值。4~14s为气动力作用时间,然后线性卸载到0。考虑到轨道不平顺的影响,轨道激励采用京津线实测轨道谱。

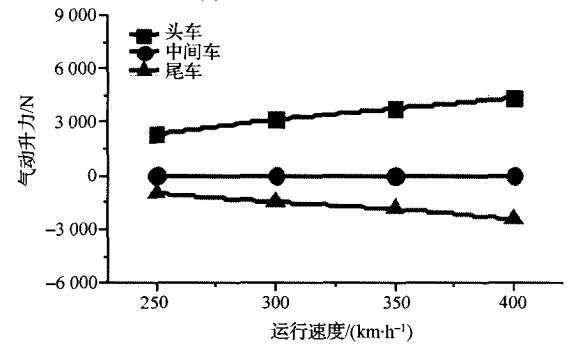
3 气动力载荷分析

明线运行条件下,列车承受的气动力主要是气动阻力。其它气动力分量相对于阻力均为小量,文中仅给出各节车承受阻力、升力的比较,如图6所示。列车头车、中间车和尾车气动阻力分布有所不同。头车气动力主要是受正面来流的冲击;中间车受到压差阻力影响较小,受到摩擦阻力较大;尾车处气动阻力主要受到列车尾涡的影响。列车气动阻力的变化与列车行驶速度的平方成正比。无横风作用时,头车受到向下的压力,而中间车和尾车受到向上的升力。

横风作用下,列车的升力、阻力、侧向力、倾覆力矩、俯仰力矩、侧偏力矩均有大幅提升,尤其以升力和侧向力的幅值提高最大,如图7。横风下的气动升力分布同无横风作用相比发生了较大变化。图6(b)中,无横风作用时,头车受到的升力向下。横风影响下,头车升力变成向上。头车承受的侧向力是



(a) 明线运行气动阻力



(b) 明线运行气动升力

图6 明线运行气动阻力(a)和气动升力(b)

所有车厢中最大的,且头车和中间车侧向气动力均为顺风向的。随着行车速度提高,头车和中间车的侧向气动力增大,尾车横向气动力方向发生改变。从各节车厢承受的倾覆力矩可以发现,头车气动环境最为恶劣,其承受的倾覆力矩占整车倾覆力矩的一半以上。综上所述,横风作用下,列车各节车厢的六分量气动力均有较大增长,其中以头车的气动力增长最为显著。

4 车辆动力学响应

图8给出不同速度级下明线横风以及明线运行下车体的横向和垂向位移。与明线运行相比,明线横风下车体向背风侧偏移。随着风速增加,车体的横向位移增大。明线横风下,车体有垂直向的位移,这主要是由于车体受到向上的升力作用。图9表示在400 km/h速度下,明线运行、明线横风迎风侧的轮轨接触横向力和垂向力时程曲线。横风作用在车辆上时,迎风侧轮轨接触点向斜率较大的踏面区偏移,背风侧轮轨接触点向斜率较大的轮缘区偏移。迎风侧轮轨垂向力减小,背风侧轮轨垂向力会增大来平衡横风对车辆产生的倾覆力矩,轮轨垂向力波动幅度较明线运行时大。明线横风下轮轨横向力和轮轨垂向力均比无横风时大。

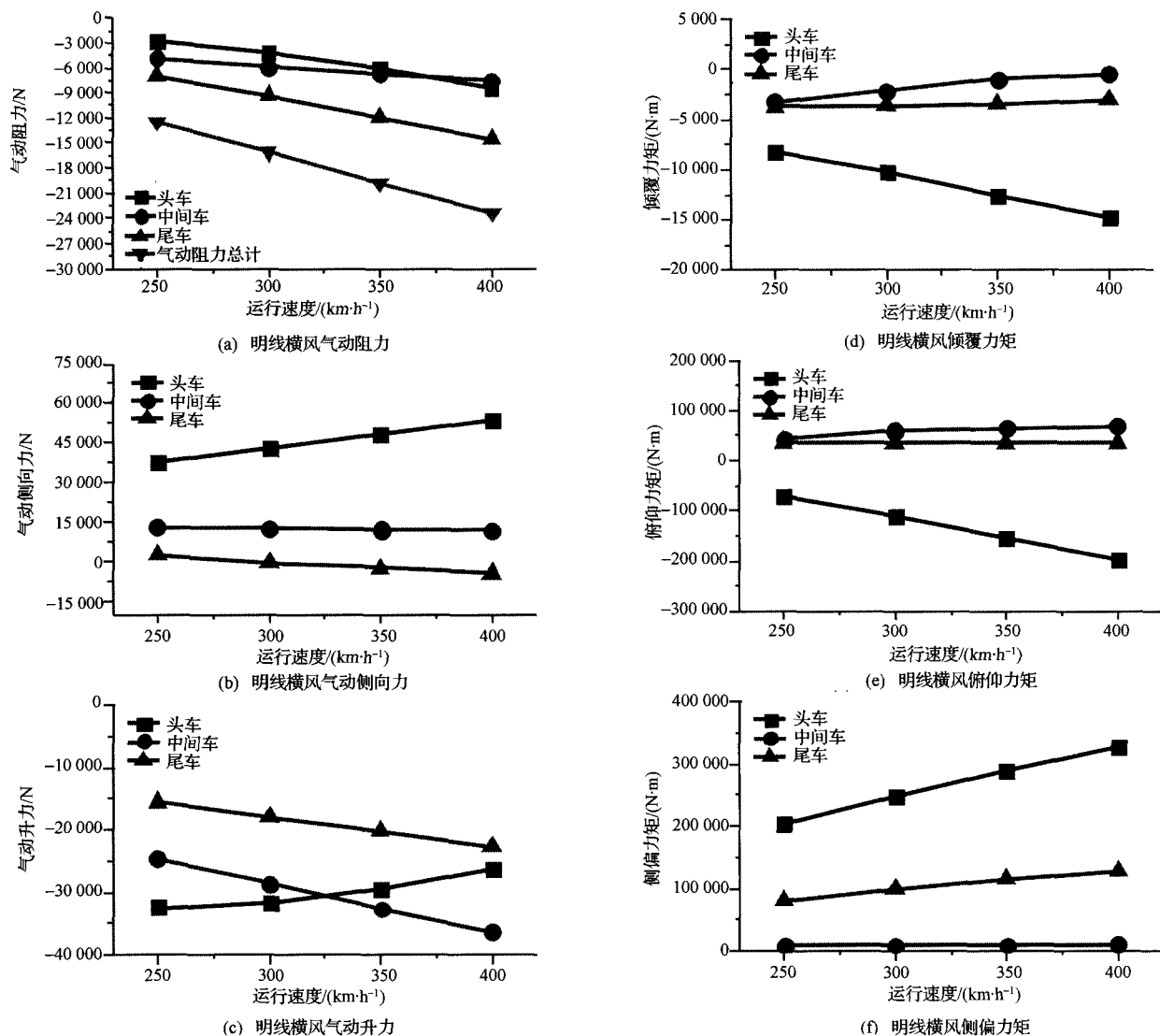


图7 明线横风气动力

4 明线运行下安全性指标

通过列车车辆动力学响应分析,得到列车的安全性指标为:轮轴横向力 Q 、轮轨垂向力 P 、脱轨系数 Q/P 、轮重减载率 $\Delta P/P$ 。数理,在计算上述安全指标时,采用其 \bar{X} (平均值) $+3\sigma$ (标准差)的数值统计的方法。

轮对是高速列车的重要部件,也是列车安全性分析中重点研究对象。按轮对位置,将每辆车迎风侧轮对标记为1、3、5、7,背风侧轮对标记为2、4、6、8。如图10所示。明线运行(250 km/h)下头车、中间车和尾车安全性指标如图11所示。最大脱轨系数、最大轮重减载率、最大轮轴横向力和最大轮轨垂向力均出现在头车第四位轮对。高速列车在明线运行场景下,头车运行安全性最低,尾车其次,中间车

最安全。

车辆运行安全性指标随列车运行速度而改变。图12表示不同行驶速度下列车脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力和轮轨垂向力。列车行驶速度上升时,列车脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力和轮轨垂向力都明显提高,列车安全性逐渐降低,且头车安全性较中间车和尾车差。列车车速达到400 km/h时,脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力和轮轨垂向力分别达到0.10、0.36、12 652 N、10 578 N。参考《高速列车整车试验规范》运行安全指标限值:脱轨系数 $Q/P < 0.8$,轮重减载率 $\Delta P/P < 0.8$,轮轨最大横向力 < 52.4 kN,轮轨最大垂向力 < 170 kN。计算表明,明线运行场景都符合安全标准。

5 明线横风场景的列车安全性分析

高速列车在横风下运行时,车辆安全性指标将

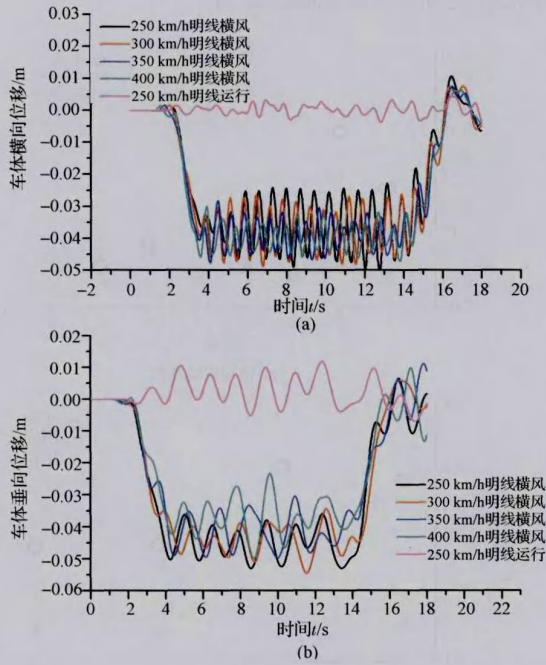


图8 车体的横向(a)和垂向(b)位移

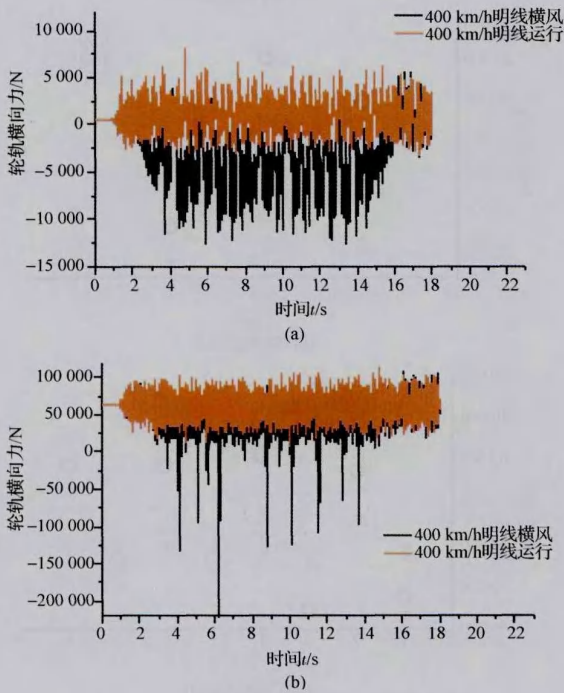


图9 轮轨接触横向力(a)和垂向力(b)

发生变化。图13为车速250 km/h、横风15 m/s下头车、中间车和尾车的安全性指标。从图中不难看出,横风下列车的安全性指标急剧增加,头车安全性低于尾车和中间车,且背风侧轮对安全性指标大于迎风侧轮对,其他速度级亦有相同规律。因此在多节编组的列车中,以头车受到的气动荷载最大,头车

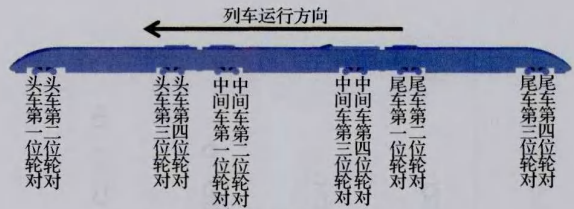
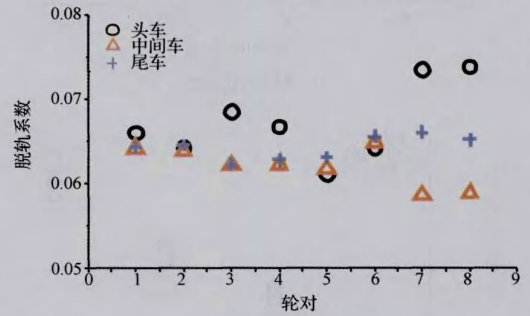
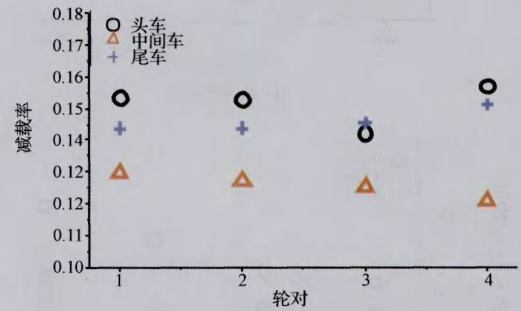


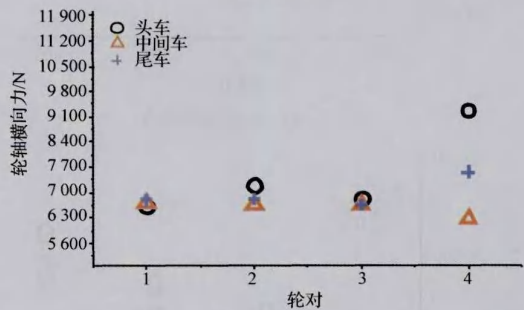
图10 轮对排列



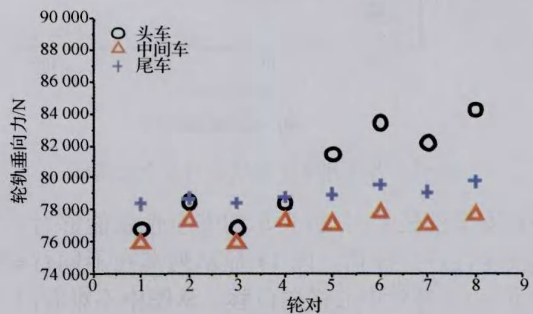
(a) 轮对脱轨系数



(b) 轮对减载率



(c) 轮轴横向力



(d) 轮轴垂向力

图11 250 km/h 明线运行安全性指标

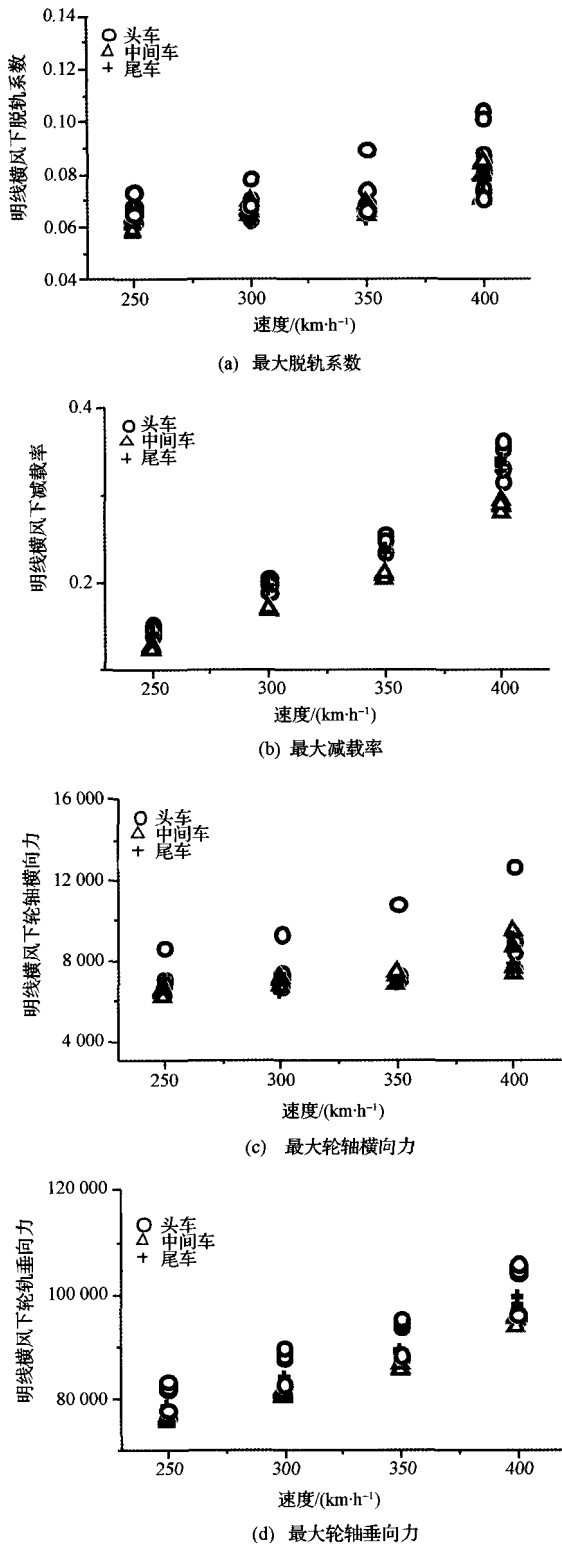


图 12 各个速度下明线运行安全性指标

运行安全性最差,分析头车的安全性就能够对整车的安全性进行评估。图 14 显示列车在不同行驶速度下,头车各轮中心横向位移。从图中不难看出,列车头车第二位轮对的中心横向位移要明显大于第三、四位轮对的。说明在横风场景下,列车头车第二

位轮对成为全车最危险的轮对。

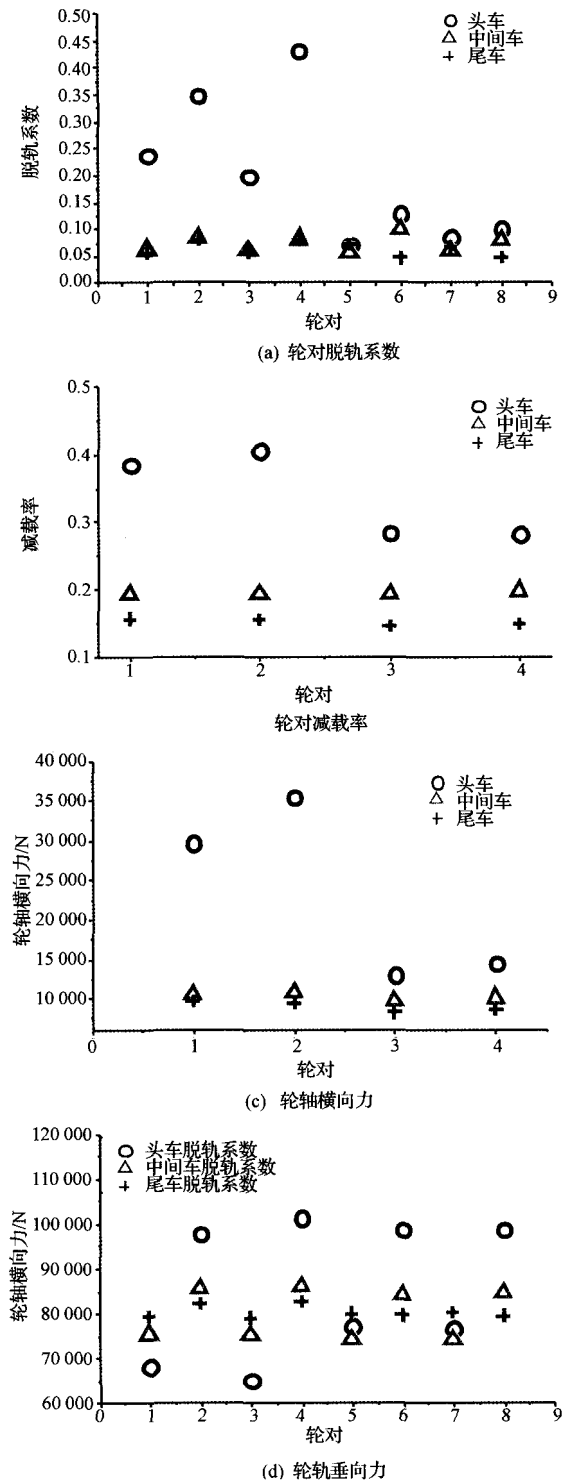


图 13 250 km/h 下明线横风安全性指标

图 15 给出不同行驶速度下列车脱轨系数,轮重减载率、轮轴横向力和轮轴垂向力。图中虚线为《高速铁路整车试验规范》中相应安全评估指标的限定值。该虚线与不同速度下列车安全性指标交点处的速度,即为这一指标确定的列车运行速度最高

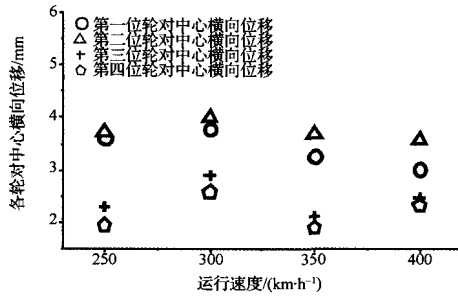


图 14 轮对横向位移

允许值。可以看出,随着速度增长,列车的脱轨系数,轮重减载率,轮轴横向力和轮轨垂向力都明显提高,列车安全性逐渐降低。当列车的车速达到 300 km/h 时,脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力、轮轨垂向力分别达到 0.89、0.62、66 188.63 N、126 899.45 N。根据《高速列车整车试验规范》,脱轨系数超过 0.8 的安全极限;列车轮轴横向力超出 52.4 kN 的安全极限。因此当高速列车以 300 km/h 速度运行,且遭遇 15 m/s 以上的强劲横风时,列车应减速运行。

5 结论

通过数值模拟研究不同行驶速度下,高速列车在明线运行和明线横风两种场景下的行驶安全性。明线运行场景下,列车的各安全性指标随着运行速度的提高而逐渐增大,头车安全性低于尾车和中间车,各安全性指标最大值出现在列车头车第四位轮对。且运行速度达 400 km/h 时,列车各项安全性指标未超出安全规范标准。明线横风场景下,车辆安全各安全性指标最大值一般出现在头车第二位轮对背风侧。列车安全性指标随着列车车速的增加明显提高,列车安全性逐渐降低。当列车以 300 km/h 速度行驶时,脱轨系数和轮轴横向力指标已经超过了安全运行限值。因此,15 m/s 横风条件下,高速列车应以低于 300 km/h 时速运行。后续将进一步进行深入分析与研究,为今后研制侧风预警系统合理设定侧风环境下运行速度限值提供科学依据。

参 考 文 献

- 1 马锡娟,马淑红,李振山.我国客运专线高速列车安全运行大风预警系统研究.铁道工程学报,2009;(7):43—47
- 2 Baker C J, Jones J, Lopez-Calleja F, et al. Measurements of the cross wind forces on trains. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2004; 92 (7—8): 547—563
- 3 Baker C J. Ground vehicles in high cross winds. Part I: steady aerodynamic forces. Journal of Fluids and Structures, 1991; 5 (1): 69—90
- 4 Baker C J. Ground vehicles in high cross winds. Part II: unsteady

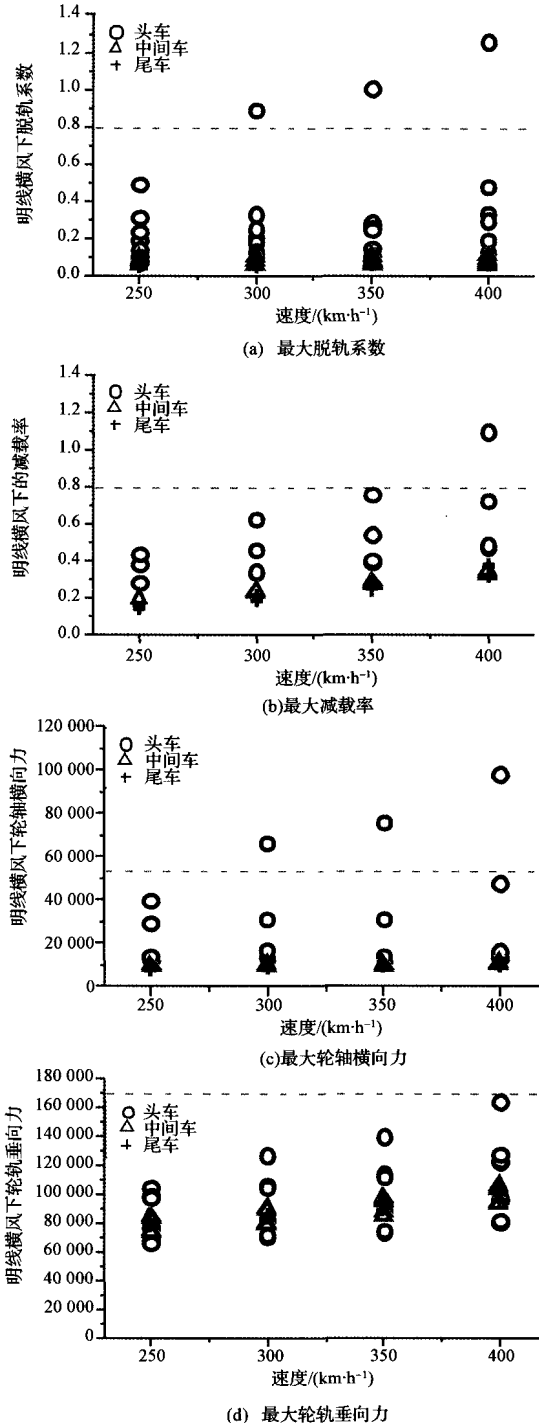


图 15 各个速度下明线横风运行安全性指标

- aerodynamic forces. Journal of Fluids and Structures, 1991; 5 (1): 91—111
- 5 Sanquer S, Barre C, de Virel M D, et al. Effect of cross winds on high-speed trains: development of a new experimental methodology Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004; (92): 535—545
- 6 高广军,田红旗,姚松,等.兰新线强横风对车辆倾覆稳定性的影响.铁道学报,2004;26(4):36—40
- 7 Wetzel C, Proppe C. Probabilistic Assessment of the crosswind stability of railway vehicles. Weimar Optimization and Stochastics, 2007;

1: 1—14

8 Carrarini A. Reliability based analysis of the crosswind stability of

railway vehicles. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007; 95: 493—509

Safety Analysis of the High Speed-train Running under the Steady Aerodynamics Forces of Cross Wind

LIU Yu-biao, ZHANG Ying-ying, XING Yun-lin, SUN Zhen-xue, YANG Guo-wei

Key Laboratory for mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P. R. China)

[**Abstract**] Based on the aerodynamics theory, the aerodynamics model of high-speed train is established to calculate the train aerodynamic loads at different speeds in the open wire condition and in the cross-wind condition. Also the corresponding vehicle system dynamic model of the high-speed train is built respectively using the multi-body system dynamics theory. The aerodynamic loads are imported to the vehicle dynamic model to calculate the vibration response and the safety index of high speed train at different speeds under and without crosswind. Safety index variations with running speed are obtained and compared between the open wire condition and the cross-wind condition. The numerical results show that the cross-wind turns to greatly threaten the train operating safety. The speed limitation for train safety running at 15 m/s cross wind velocity can be obtained reference to the security evaluation standard for high-speed train.

[**Key words**] high-speed train open wire cross-wind aerodynamic loads speed limitation security

(上接第 69 页)

Assessment of Axially Loaded Beam with Damage Section Using Bayesian Estimation Theory

FANG Chang-yu^{1,2}, ZHANG Yao-ting¹, MA Chao¹(School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology¹, Wuhan 430074, P. R. China;Department of Civil Engineering, Guangxi University of Technology², Liuzhou 545006, P. R. China)

[**Abstract**] Approximate solution for free vibration of axially loaded beam with damage section is obtained using half-range function. Bayesian estimate theory was introduced in damage identification utilizing dynamic response consideration of model error and measurement noise. Damage location indexes and damage level ones are constructed based on the first two natural frequencies. The posterior distribution expressions for damage section parameters are realized. Consideration of integral difficulties in multi dimension function of Bayesian formula, Markov chain Monte Carlo sampling technology is used to obtain the sampling chain, and the corresponding numerical statistical characteristic value are obtained too. The methodology presente successfully identified damage location and extent in probability framework in the numerical case study.

[**Key words**] Bayesian estimation damage identification dynamic response axially load beam