



轮轨激励与气动载荷对高速列车转向架结构载荷的分量贡献研究

袁征¹, 陈贤佳², 纪占玲³, 李岑⁴, 罗为⁵, 李强^{5*}, 孙守光¹, 杨国伟^{3,6*}, 魏宇杰^{2,6*}

1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044;
2. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190;
3. 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;
4. 中国铁道科学院集团有限公司机车车辆研究所, 北京 100081;
5. 北京交通大学智慧高铁系统前沿科学中心, 北京 100044;
6. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049

* E-mail: qli3@bjtu.edu.cn; gwyang@imech.ac.cn; yujie_wei@lnm.imech.ac.cn

收稿日期: 2023-05-18; 接受日期: 2023-10-23; 网络版发表日期: 2024-06-07

中央高校基本科研业务费专项资金科技领军人才团队项目(编号: 2022JBQY007)和国家自然科学基金基础科学中心项目(批准号: 11988102)资助

摘要 准确认知高速列车的结构载荷来源是开展疲劳可靠性设计的基础, 本文聚焦于厘清高速列车转向架结构载荷中来自轮轨激励与气动作用的分量贡献。首先通过气动-多体动力学耦合计算, 得到了单列车明线运行和单列车通过隧道工况不同外载作用下的高速列车转向架结构载荷, 进而通过计算不同外载作用下的结构载荷特征差异分析了外部载荷等因素对结构载荷特征的影响。研究表明来自轮轨的激励是决定转向架结构载荷幅值的主因, 而气动载荷是引起结构载荷均值变化的关键。本文进一步通过信号分析理论中的时域贡献网络求解方法量化了不同载荷来源对结构载荷的分量贡献, 发现轮轨激励在明线和隧道工况下都是转向架结构载荷的主要分量贡献; 同时也注意到隧道工况下, 气动载荷对结构载荷的贡献显著上升。本文厘清了不同载荷来源在两种工况下对结构载荷的影响, 相关结论可为高速列车关键结构的抗疲劳设计提供依据。

关键词 高速列车转向架, 结构载荷分量贡献, 轮轨激励, 气动载荷, 气动-多体动力学耦合

1 引言

载荷作为工程结构的重要研究内容, 是进行力学设计的基础, 也是后期性能分析评估的主要依据。对于一个完整的工程系统, 研究人员关注的载荷通常包括将其视为整体时的外部载荷和单独考虑内部重要工

作构件时的结构载荷^[1~3]。不同载荷的作用方式不同, 但对于工程结构的研究都有着重要的意义, 其中内外载荷的关联及贡献有助于厘清关键结构的疲劳破坏原因, 已经成为结构疲劳领域的研究热点之一^[4,5]。

包括汽车、飞机及轨道车辆在内的复杂工程系统, 其整体所承受的外部载荷一般可分为地面载荷与

引用格式: 袁征, 陈贤佳, 纪占玲, 等. 轮轨激励与气动载荷对高速列车转向架结构载荷的分量贡献研究. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 1120–1136
Yuan Z, Chen X J, Ji Z L, et al. Fractional load contributions from wheel-rail excitations and aerodynamics to the high-speed train bogie structure (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 1120–1136, doi: 10.1360/SST-2023-0165

气动载荷. 这些外载往往难以精确获得, 但由于其决定着整个系统的工作方式和使用寿命, 研究人员发展了大量的科学手段对其进行测试或模拟, 如汽车道路谱^[6]、列车轨道谱^[7]、空气动力学计算^[8]等. 对于地面载荷, 汽车道路谱和列车轨道谱的获取和应用方式是类似的, 测试手段和参考标准相对完备. 国内采用的典型轨道谱一般包括中国既有线谱、武广高铁轨道谱和中国高速铁路无砟轨道谱, 它们提供了不同线路等级和有效波长范围的轨道不平顺拟合公式^[9]. 这些标准轨道谱是根据较短路段的实测不平顺数据, 对所属的整条线路轨道特征的统一归纳, 无法给出线路具体位置的精确轮轨激励信息. 在现有的复杂结构空气动力学研究中, 获得气动载荷是比较基础的研究方法, 但人们通常关注的是结构表面的气动压力分布^[8,10]、气动外形的优化^[11]或气动环境中各体系的交互^[12]等方面, 关于气动载荷进一步对结构内部的影响研究较少. 综上所述, 无论是地面载荷还是气动载荷, 它们在数据测试上面临相同的问题, 即欠缺外部载荷和结构载荷并行获取的方法. 通过行业标准拟合或物理模型计算得到的外载, 通常无法和真实情况下测得的内部结构载荷匹配, 也就难以建立系统各层面的载荷关联及贡献.

考虑到类似工程系统的复杂程度, 其动辄上千万的自由度数和多物理场的介入使得建立精细统一的可应对不同科学问题的整体系统模型十分困难, 且一定会造成大量计算资源耗费^[13]. 突破这一困境的方式主要有两种: 一种是建立多个用于不同物理场分析的单学科模型, 借助数据信息在不同模型间的来回传递实现多物理场耦合, 并通过调整耦合的紧密程度控制计算成本, 例如机电耦合^[14]、刚柔耦合动力学^[15,16]、气动-结构动力学耦合^[17]等; 另一种是将工程系统的内部结构单独取出, 考虑其自身的边界条件和工作状态, 这样更容易理解边界条件对结构的作用, 也更方便开展测试等工作^[18,19]. 然而对结构件的载荷, 研究往往只能对测试得到的数据进行分析, 然后结合有限元方法或疲劳理论, 进一步分析结构件应力或疲劳损伤^[20]. 一般无法做到反演结构载荷的来源或分析系统外部载荷的贡献, 对外载-结构载荷的关系理解并不充分. 例如, 文献^[21]得到了结构载荷幅值和均值独立分布的结论, 但二者独立是否受到不同外载的影响无法依靠数据给出. 综上, 本文选用第一种方法, 以实现同一系

统下不同外载和结构载荷并行处理的研究目标, 量化系统外部载荷对内部结构载荷的贡献.

对于高速列车这一复杂工程系统, 众多学者研究了不同运行工况下气动载荷对列车运行平稳性^[22,23]、运行安全性^[24]以及结构动强度^[25,26]等动力学性能的影响, 分析方法包括空气动力学计算^[24]、有限元分析^[25]、动模型试验^[27]以及本文中采用的气动-多体动力学耦合方法^[22,23]等. 然而, 大多数研究只考虑了气动载荷这一种外载, 研究对象多为车体, 较多关注不同工况下的动力学性能差异, 并未给出外载对各动力学性能指标的量化贡献. 本文考虑高速列车单列车明线运行和单列车通过隧道的两种典型工况以及轮轨激励和气动载荷这两种最重要的外部载荷^[28], 通过气动-多体动力学耦合计算, 获得不同外载作用下高速列车关键结构——转向架的结构载荷, 以期厘清外部载荷对转向架结构载荷的影响规律, 从而为类似工程结构系统的力学设计提供参考和依据.

2 计算模型和方法

2.1 非定常气动载荷求解

采用三维、黏性、可压缩的Navier-Stokes方程来描述高速列车周围的空气流动^[29]. 在笛卡儿坐标系中, 如果忽略惯性力, 保守的Navier-Stokes方程可以写成如下向量形式:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial(\mathbf{E}-\mathbf{E}_v)}{\partial x} + \frac{\partial(\mathbf{F}-\mathbf{F}_v)}{\partial y} + \frac{\partial(\mathbf{G}-\mathbf{G}_v)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

其中, \mathbf{U} 为守恒变量, \mathbf{E} , \mathbf{F} 和 \mathbf{G} 分别为 x , y 和 z 方向上的对流量, \mathbf{E}_v , \mathbf{F}_v 和 \mathbf{G}_v 分别为 x , y 和 z 方向上的黏性通量, 如下所示:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (\rho e + p)u \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (\rho e + p)v \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho wu \\ \rho wv \\ \rho w^2 + p \\ (\rho e + p)w \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}_v &= \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x \end{pmatrix}, \\
 \mathbf{F}_v &= \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - q_y \end{pmatrix}, \\
 \mathbf{G}_v &= \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zz} \\ u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} - q_z \end{pmatrix},
 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, u , v 和 w 为空气速度的方向分量, ρ , p 和 e 分别为空气密度、空气压力和空气内能. 式(3)中的应力分量 τ 和热流密度 q 分别为

$$\begin{aligned}
 \tau_{xx} &= 2\mu u_x - \frac{2}{3}\mu(u_x + v_y + w_z), \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu(u_y + v_x), \\
 \tau_{yy} &= 2\mu v_y - \frac{2}{3}\mu(u_x + v_y + w_z), \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu(v_z + w_y), \\
 \tau_{zz} &= 2\mu w_z - \frac{2}{3}\mu(u_x + v_y + w_z), \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu(u_z + w_x),
 \end{aligned} \quad (4)$$

和

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (5)$$

其中, μ 为黏度系数, k 和 T 分别为空气热传导系数和空气温度. 空气内能 e 以每单位质量空气的总能量表示:

$$e = \frac{p}{(\gamma-1)\rho} + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}, \quad (6)$$

其中, γ 为比热比. 为了使Navier-Stokes方程封闭, 还需要补充完整的气体状态方程:

$$p = \rho RT. \quad (7)$$

本文以某型高速动车组三编组列车为研究对象, 考虑单列车明线运行和单列车通过隧道两种典型工况, 分别建立了如图1所示的气动计算模型. 需要说明的是, 单列车明线运行工况下列车的编组长度对其气动特性影响较小, 而单列车通过隧道工况下, 现有研究已经明确给出了不同编组长度对列车表面气动载荷的影响^[30,31], 三编组的分析结果可以用来推断其他编组长度的情况, 以有效节省成本、减小计算量. 网格划分时, 采用trim和prism layer的体网格类型. 在整个空间计算域采用较大尺寸的网格, 在流场变化大的区域则进行网格细化, 包括车身周围及尾流等区域, 从细网格到粗网格采用逐层过渡的方案. 在车体表面及地面处设置了6层边界层网格, 增长比取1.2, 首层厚度的选择原则是计算得到的 Y^+ 值在30~100范围内, 以保证壁面函数应用于边界层模拟的准确性. 单列车明线运行和单列车通过隧道两种工况下的气动模型分别包含约1200万网格和1800万网格, 均模拟列车以

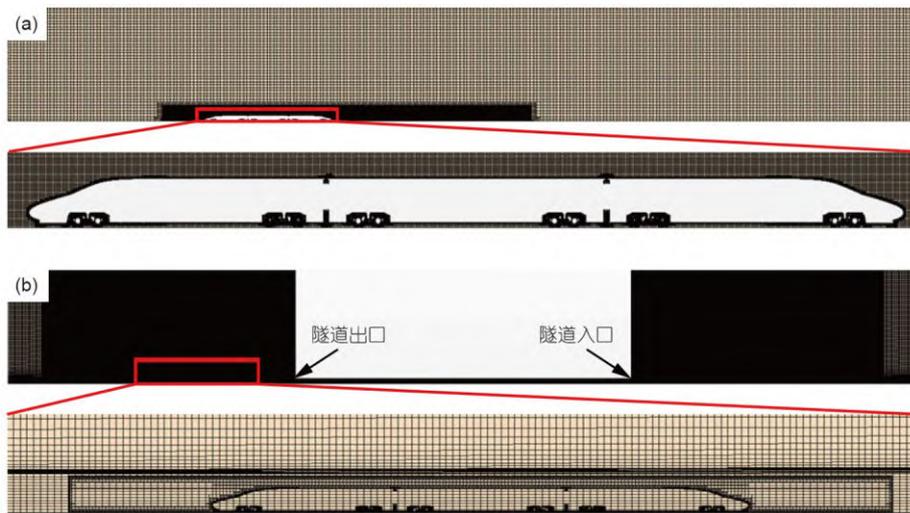


图1 (网络版彩图)三编组高速列车全尺寸空气动力学模型. (a) 单列车明线运行工况; (b) 单列车通过隧道工况

Figure 1 (Color online) Full-size aerodynamic model of the three-trainset high-speed train. (a) Single-train operation in open-air; (b) single-train passing through tunnel.

350 km/h的速度直线运行, 时间步长为0.001 s. 在明线工况中, 列车本身保持静止, 通过在速度入口施加与列车运行速度大小相同、方向相反的来流速度来模拟列车的运行. 列车表面采用无滑移固定壁面, 地面设置为与来流同速的移动壁面以等效列车与地面间的相对运动. 与速度入口相对的出口边界设为压力出口条件, 出口压力取单位标准大气压强, 其他外边界设为压力远场. 在隧道工况中, 采用重叠网格技术实现列车相对隧道的运动, 隧道壁、地面和列车表面均采用无滑移固定壁面. 本文考虑一般条件下的隧道长度, 避开单列车通过隧道时的最不利隧道长度(根据EN 14067-5标准^[32]及文献^[33]计算得到), 并参考武广高铁线部分隧道的实际长度, 设置其为505 m. 计算区域的外边界设定为压力出口条件, 出口压力取单位标准大气压强. 两种工况下, 流场介质均为空气, 湍流模型都采用SST

$k-\omega$ 模型^[34], 利用STAR-CCM+软件^[35]提供的非定常求解器来计算列车的气动载荷-时间历程.

2.2 多体动力学模型

选取中间车为研究对象, 利用Simpack软件^[36]建立了如图2所示的多体动力学模型, 包括一节中间车车体、两个动车转向架及四组轮对. 每个刚体结构有6个自由度, 包括伸缩 x 、横移 y 、浮沉 z 、侧滚 θ 、点头 φ 和摇头 ψ , 以向量 \mathbf{u}_1 表示. 单个转向架存在19个连接件, 其中一系悬挂有3种连接件, 向下连接到轮对, 二系悬挂有4种连接件, 向上连接到车体. 连接件通过两种模型简化: 开尔文模型和麦克斯韦模型, 每个连接件有2或3个自由度, 包括伸缩 x 、横移 y 和浮沉 z , 以向量 \mathbf{u}_2 表示. 该动力学模型由如下运动方程描述:

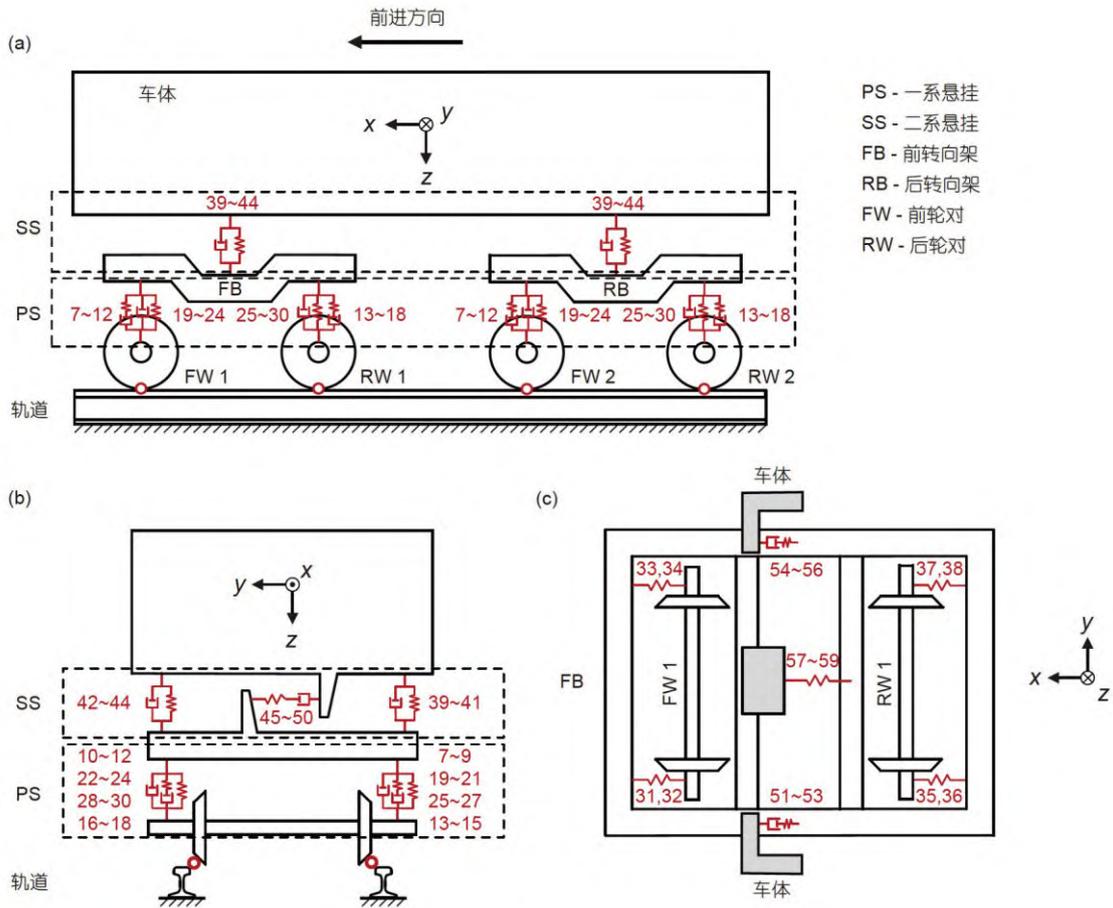


图 2 (网络版彩图)高速列车中间车多体动力学模型. (a) 侧视图; (b) 正视图; (c) 前转向架俯视图

Figure 2 (Color online) Multi-body dynamics model for a middle trainset of the high-speed train. (a) Side view; (b) front view; (c) top view of the front bogie.

$$\mathbf{M} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_1 \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} + \mathbf{C} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{u}}_1 \\ \dot{\mathbf{u}}_2 \end{pmatrix} + \mathbf{K} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \end{pmatrix} = \mathbf{P}_c + \mathbf{P}_f, \quad (8)$$

其中, \mathbf{M} , \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别为模型的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, \mathbf{P}_c 和 \mathbf{P}_f 分别表示轮轨作用力和气动载荷^[37]. 表1列出了单个转向架的结构载荷类型、形式和自由度, 各连接件载荷的序号与图2一一对应. 序号1~6为转向架质心加速度, 7~38为一系悬挂结构载荷, 39~59为二系悬挂结构载荷, 空间位置如图3所示. 多体动力学模型的主要结构参数和悬挂参数同实车一致, 详见表2.

2.3 气动-多体动力学耦合计算

本文考虑轮轨激励和气动载荷两种外部载荷, 通过气动-多体动力学耦合计算获得外载作用下的转向架结构载荷. 考虑到不同耦合方式下的结构动态响应差异有限^[38], 为提高计算效率, 采用单向耦合方式. 非

定常气动求解得到的载荷以已知形式加载到多体动力学模型的车体质心处, 忽略车辆运动对高速列车周围流场的扰动. 多体动力学选用的气动载荷-时间历程长度为6.9 s, 隧道工况中列车进、出隧道的时刻分别为0.6和5.8 s. 图4和5分别给出了明线和隧道工况下中间车6个气动载荷分量的时间历程. 由图可知, 隧道工况下的气动力和力矩幅值要明显大于明线工况, 且在进、出隧道时部分气动载荷(如阻力、升力和点头力矩)的均值发生了明显变化. 轮轨激励取自线路试验测得的武汉-广州高铁线典型区段的轨道不平顺, 包含左右轨的垂向和横向不平顺^[39], 如图6所示, 直接施加在多体动力学模型的轮轨接触位置.

为了考察外载对结构载荷的影响, 分别计算了轮轨激励和气动载荷共同和单独作用时的结构载荷. 图7~9分别给出了明线和隧道工况下中间车前后转向架部分结构载荷的时间历程及对应的功率谱密度(power spectral density, PSD)^[40]. 可以看到, 轮轨激励和气动载

表1 转向架结构载荷

Table 1 Structural loads on the bogie

序号	悬挂位置	类型	载荷形式	位	自由度
1~6	—	质心	加速度	—	$x, y, z, \theta, \varphi, \psi$
7~9	一系悬挂	垂向减振器	力	一位	x, y, z
10~12	一系悬挂	垂向减振器	力	二位	x, y, z
13~15	一系悬挂	垂向减振器	力	三位	x, y, z
16~18	一系悬挂	垂向减振器	力	四位	x, y, z
19~21	一系悬挂	钢弹簧	力	一位	x, y, z
22~24	一系悬挂	钢弹簧	力	二位	x, y, z
25~27	一系悬挂	钢弹簧	力	三位	x, y, z
28~30	一系悬挂	钢弹簧	力	四位	x, y, z
31, 32	一系悬挂	定位转臂	力	一位	x, y
33, 34	一系悬挂	定位转臂	力	二位	x, y
35, 36	一系悬挂	定位转臂	力	三位	x, y
37, 38	一系悬挂	定位转臂	力	四位	x, y
39~41	二系悬挂	空气弹簧	力	一位	x, y, z
42~44	二系悬挂	空气弹簧	力	二位	x, y, z
45~47	二系悬挂	横向减振器	力	一位	x, y, z
48~50	二系悬挂	横向减振器	力	二位	x, y, z
51~53	二系悬挂	抗蛇行减振器	力	一位	x, y, z
54~56	二系悬挂	抗蛇行减振器	力	二位	x, y, z
57~59	二系悬挂	牵引拉杆	力	—	x, y, z

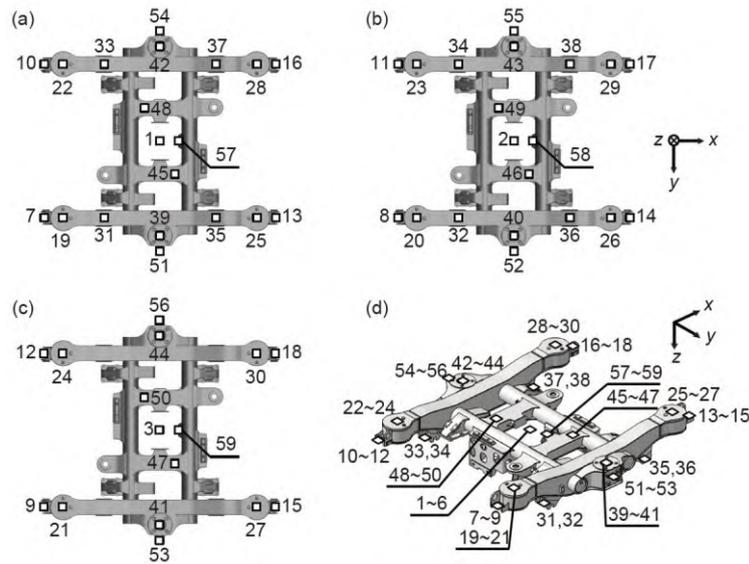


图 3 转向架结构载荷位置示意图. 纵向(a)、横向(b)和垂向(c)载荷俯视图; (d) 全部载荷三维视图
Figure 3 Schematic diagram of the position of structural loads on the bogie. Top views of longitudinal (a), lateral (b), and vertical (c) loads; (d) three-dimensional view of all loads.

荷共同作用下的结构载荷并非单独作用下的结构载荷线性叠加. 结构载荷的产生不是简单的线性过程, 系统的非线性因素也会引起结构载荷的变化.

3 结构载荷特征分析

为了明晰转向架结构载荷的形成机理, 本节将探讨轮轨激励和气动载荷对结构载荷幅值和均值的影响规律, 并对转向架前后位置及不同气动载荷分量对结构载荷特征的影响进行分析. 本文采用均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 表征不同情况下结构载荷参量的差异, 计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}, \tag{9}$$

其中, N 为总体例数, y_i 为基准值, \hat{y}_i 为对比值, RMSE 越小, 认为两者的差异越小.

3.1 幅值和均值的影响因素

将计算获得的转向架结构载荷-时间历程编制为载荷谱, 通过比较不同外载下的结构载荷谱来分析外载对结构载荷幅值的影响. 载荷谱是对结构动态载荷的一种统计描述, 被广泛应用于各类工程结构的疲劳

试验和疲劳强度评估, 是结构疲劳可靠性设计的基础^[41]. 在轨道车辆领域, 大量线路实测的载荷谱被用于转向架等关键部件的疲劳设计和校核^[42,43]. 近年来, 将机器学习方法引入载荷谱研究成为一个新的热点, 为高速列车关键部件载荷谱的高效精准预测等开辟了新的途径^[44].

利用雨流计数法将轮轨激励和气动载荷共同和单独作用时结构载荷-时间历程编制成反映载荷幅值-循环次数统计信息的载荷谱. 在编谱时, 每个载荷谱的最大幅值由三种外载作用下载荷谱幅值的最大值确定, 最小幅值为0, 载荷谱级数设为64级. 将式(9)用于载荷谱的比较, $N=64$, y_i 为两种外载共同作用时的结构载荷谱第 i 级循环数, \hat{y}_i 为轮轨激励或气动载荷单独作用时的结构载荷谱第 i 级循环数, 统一按照两种外载共同作用时的载荷谱归一化. 图10给出了转向架结构载荷幅值在两种外载单独与共同作用时的RMSE情况. 可以看到, 除了隧道工况下的前转向架一位抗蛇行减振器垂向力(序号: 53), 所有的结构载荷幅值在轮轨激励单独作用时与两种外载共同作用的误差更小. 隧道相比明线工况, 两种RMSE的差异减小, 如前转向架一位垂向减振器横向力(序号: 8), 差异由明线工况的0.37减小到隧道工况的0.06, 证明了隧道工况下气动载荷对幅值的影响增大. 但无论在单列车明线运行还是单

表 2 动力学模型主要参数

Table 2 Main parameters of the dynamic model

符号	参数	值
d_0	轨距	1.435 m
l_b	轴距	2.5 m
R_0	车轮滚动圆半径	0.43 m
l_c	车辆定距	17.5 m
m_w	轮对质量	1780 kg
I_{wx}	轮对侧滚转动惯量	949 kg m ²
I_{wy}	轮对点头转动惯量	118 kg m ²
I_{wz}	轮对摇头转动惯量	967 kg m ²
m_t	构架质量	3300 kg
I_{tx}	构架侧滚转动惯量	2673 kg m ²
I_{ty}	构架点头转动惯量	1807 kg m ²
I_{tz}	构架摇头转动惯量	3300 kg m ²
m_c	车体质量	34934 kg
I_{cx}	车体侧滚转动惯量	113200 kg m ²
I_{cy}	车体点头转动惯量	1711800 kg m ²
I_{cz}	车体摇头转动惯量	1615300 kg m ²
d_{zx}	一系悬挂横向跨距	2.0 m
k_{px1}	一系钢弹簧纵向刚度	1000 kN/m
k_{py1}	一系钢弹簧横向刚度	1000 kN/m
k_{pz1}	一系钢弹簧垂向刚度	1276 kN/m
c_{pz1}	一系垂向阻尼	15 kN s/ms
k_{pdz}	一系垂向减振器接头刚度	4900 kN/m
k_{px2}	轴箱转臂节点纵向刚度	14000 kN/m
k_{py2}	轴箱转臂节点横向刚度	7000 kN/m
d_{kh}	二系悬挂横向跨距	2.46 m
k_{sx}	空气弹簧纵向刚度	173 kN/m
k_{sy}	空气弹簧横向刚度	173 kN/m
k_{sz}	空气弹簧垂向刚度	290 kN/m
c_{sz}	空气弹簧垂向阻尼	20 kN s/m
k_{rx}	牵引拉杆纵向刚度	10000 kN/m
k_{dy}	横向减振器节点刚度	36000 kN/m
k_{sdx}	抗蛇行减振器节点刚度	17000 kN/m

列车通过隧道条件下, 轮轨激励都是决定转向架结构载荷幅值的主因。

接下来, 讨论轮轨激励和气动载荷对转向架结构载荷均值的影响. 本文利用小波分析方法从结构载荷-时间历程中提取均值-时间历程. 小波分析基于滤波原理实现信号的分解与重构, 在时域和频域均具有较高

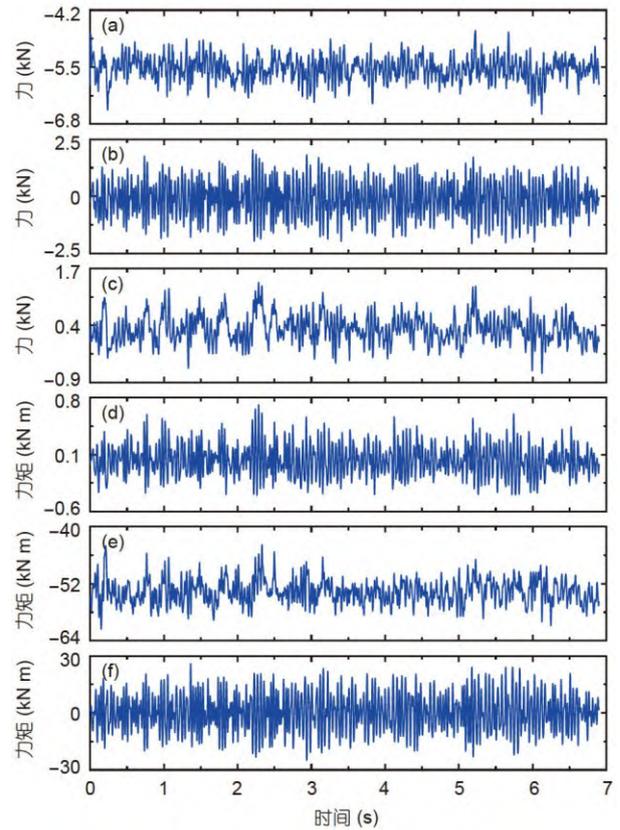


图 4 (网络版彩图)明线工况车体质心处气动载荷. (a) 阻力; (b) 侧力; (c) 升力; (d) 侧滚力矩; (e) 点头力矩; (f) 摇头力矩

Figure 4 (Color online) Aerodynamic loads at the center of mass of the car body under the open-line condition. (a) Drag force; (b) side force; (c) lift force; (d) rolling moment; (e) pitching moment; (f) yawing moment.

的分辨率. 但与固定窗的Fourier分析相比可以灵活地选取小波基函数, 通过伸缩和平移等运算功能对信号进行多尺度的细化分析, 从信号中提取不同的有效信息^[45]. 有限时间序列的小波变换公式为

$$\begin{cases} W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \\ \varphi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right), \end{cases} \quad (10)$$

其中, a 为尺度因子, 控制小波函数的伸缩; b 为时间平移因子, 控制小波函数的平移. $f(t)$ 为原始信号, $\varphi_{a,b}(t)$ 为小波基或小波母函数, $W_f(a,b)$ 为小波变换后的各频段分量.

本文采用Daubechies(dbN)小波系中的db6小波基

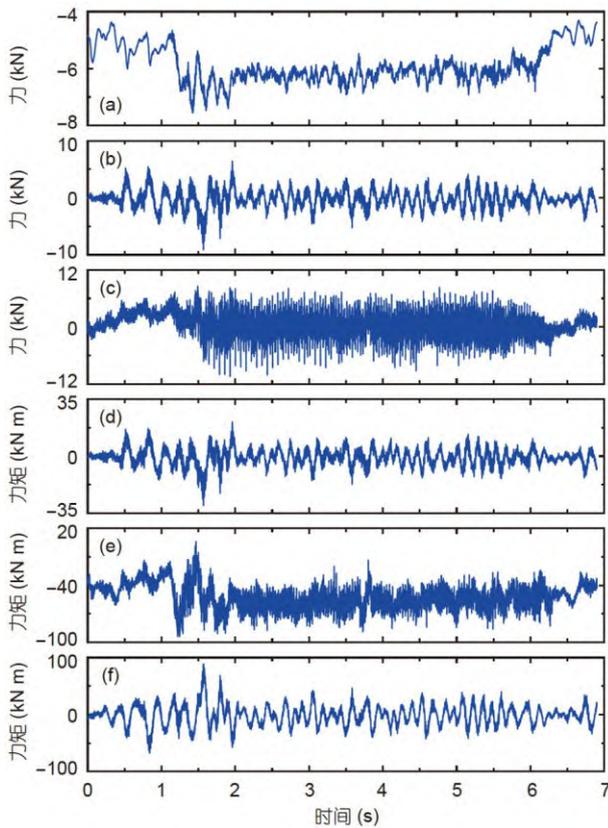


图 5 (网络版彩图)隧道工况车体质心处气动载荷. (a) 阻力; (b) 侧力; (c) 升力; (d) 侧滚力矩; (e) 点头力矩; (f) 摇头力矩
Figure 5 (Color online) Aerodynamic loads at the center of mass of the car body under the tunnel condition. (a) Drag force; (b) side force; (c) lift force; (d) rolling moment; (e) pitching moment; (f) yawing moment.

函数, 通过多层小波分解获得结构载荷-时间历程的近似(低频)成分和细节(高频)成分. 其中, 近似成分对应于时域中的载荷均值-时间历程, 如图11(a)所示. 列车进入隧道($t=0.6$ s), 气动载荷单独作用时钢弹簧垂向力的均值时域曲线产生了明显的波动, 相似的波动反映在两种外载共同作用的情况, 而轮轨激励单独作用时均值曲线基本围绕在 -40 kN左右, 没有大的变化. 列车模型在进入隧道之后产生了压缩波, 压缩波到出口后返回膨胀波, 膨胀波经过中车时压力下降^[46]. 车体受到压力作用后产生了一个低频的振动, 从而导致了与车体连接的转向架的结构载荷均值发生变化. 图11(b)~(e)进一步给出了转向架结构载荷均值在两种外载单独与共同作用时的RMSE情况. 此时, 式(9)中 $N=6901$, y_i 为两种外载共同作用时的结构载荷第 i s 均值, \hat{y}_i 为轮轨激励或气动载荷单独作用时的结构载荷

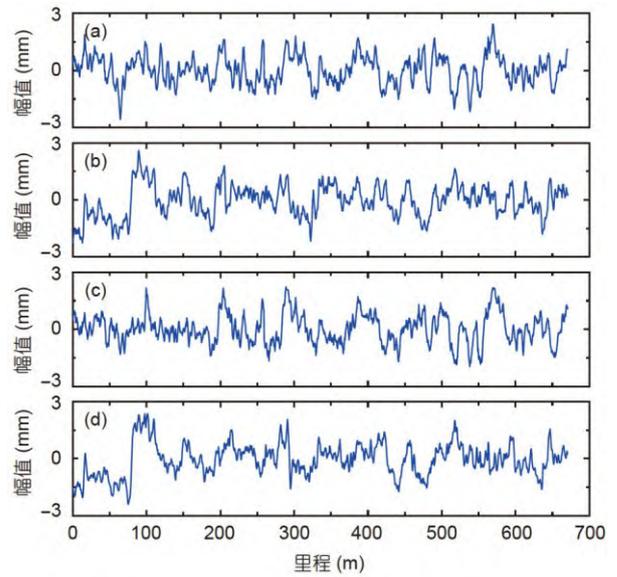


图 6 (网络版彩图)轨道不平顺. (a) 左轨垂向; (b) 左轨横向; (c) 右轨垂向; (d) 右轨横向
Figure 6 (Color online) Track irregularity. (a) Vertical direction of the left rail; (b) lateral direction of the left rail; (c) vertical direction of the right rail; (d) lateral direction of the right rail.

第 i s 均值, 统一按照两种外载共同作用时的结构载荷-均值时间历程归一化. 结果可见, 大部分转向架结构载荷均值-时间历程在气动载荷单独作用时更接近于两种外载共同作用, 这一特征在气动载荷出现较大波动的隧道工况更为明显. 轨道不平顺作用下的高速列车转向架载荷均值通常为0, 一般不会引起结构载荷均值的大幅波动^[5]. 因此, 在轮轨激励和气动载荷共同作用时, 后者是引起转向架结构载荷均值变化的关键因素. 最新的高速列车转向架结构载荷和应力测试表明: 在隧道或明线工况的列车交会时刻, 无论是载荷测点还是应力测点, 动态响应的幅值均没有明显的变化, 但部分测点的动态响应均值发生了波动; 对比隧道和明线工况, 载荷和应力的大部分测点在隧道交会时的幅值比明线交会略高^[47]. 这与本文计算得到的结论一致, 即气动载荷对转向架结构载荷幅值的影响较小; 轮轨激励引起的轮轨作用力通过一系悬挂向上传递, 从而导致了转向架的高频振动, 是转向架结构载荷幅值的主要来源.

3.2 转向架位置的影响

观察图7~9中前后转向架的载荷-时间历程可以看

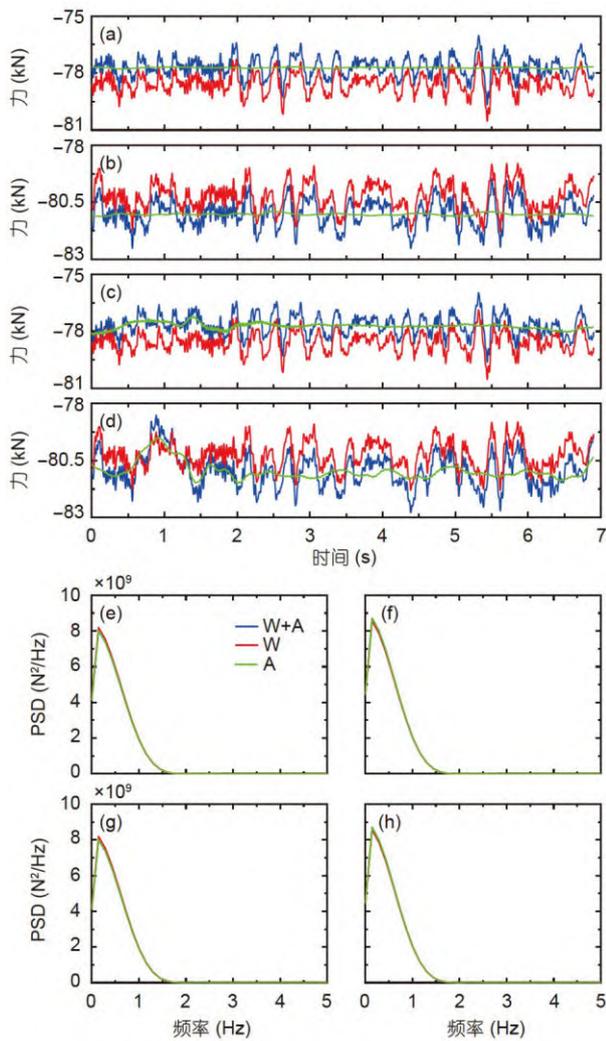


图7 (网络版彩图)一位钢弹簧纵向力。明线工况下前(a)、后(b)转向架的载荷-时间历程; 隧道工况下前(c)、后(d)转向架的载荷-时间历程; 明线工况下前(e)、后(f)转向架的载荷PSD; 隧道工况下前(g)、后(h)转向架的载荷PSD。图中, W和A分别表示轮轨激励和气动载荷(下同)

Figure 7 (Color online) Longitudinal forces of the first steel spring. Load-time histories for front (a) and rear (b) bogies in the open-line condition, and front (c) and rear (d) bogies under the tunnel condition; load PSDs for front (e) and rear (f) bogies in the open-line condition, and front (g) and rear (h) bogies under the tunnel condition. Here, W and A denote the wheel-rail excitation and aerodynamic load, respectively (the same below).

到, 前后转向架同一载荷存在特征差异。首先, 根据车辆定距为17.5 m, 列车前后转向架通过相同位置的时间差为0.18 s, 因此后转向架的结构载荷滞后于前转向架, 如图8(a)和(b)所示。其次, 车体的存在使得前后转向架承受了不同的惯性力, 当轮轨激励单独作用时, 前

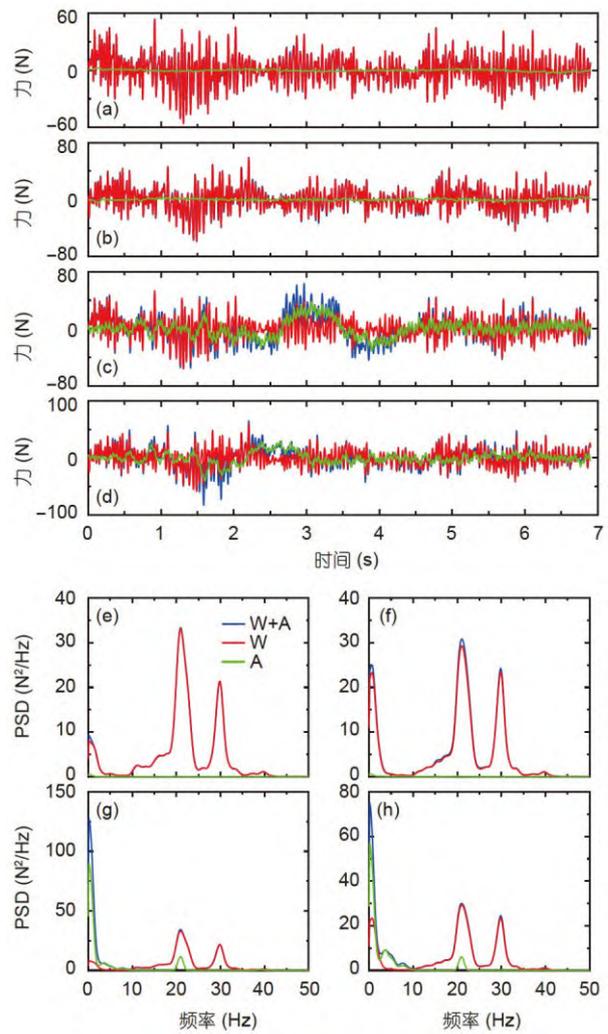


图8 (网络版彩图)二位横向减振器纵向力。明线工况下前(a)、后(b)转向架的载荷-时间历程; 隧道工况下前(c)、后(d)转向架的载荷-时间历程; 明线工况下前(e)、后(f)转向架的载荷PSD; 隧道工况下前(g)、后(h)转向架的载荷PSD

Figure 8 (Color online) Longitudinal forces of the second lateral damper. Load-time histories for front (a) and rear (b) bogies in the open-line condition, and front (c) and rear (d) bogies under the tunnel condition; load PSDs for front (e) and rear (f) bogies in the open-line condition, and front (g) and rear (h) bogies under the tunnel condition.

后转向架同一结构载荷的幅值或均值差异体现出了不同惯性力对转向架的影响(去掉车体, 则前后转向架的载荷必然一致)。以图7(a)和(b)所示的一位钢弹簧纵向力为例, 在轮轨激励单独作用时, 前转向架载荷均值(绝对值, 下同)较后转向架减小了约2 kN, 最大幅值则增加了约0.7 kN。利用式(9)计算了轮轨激励单独作用时前后转向架上各结构载荷-时间历程的RMSE, 此时

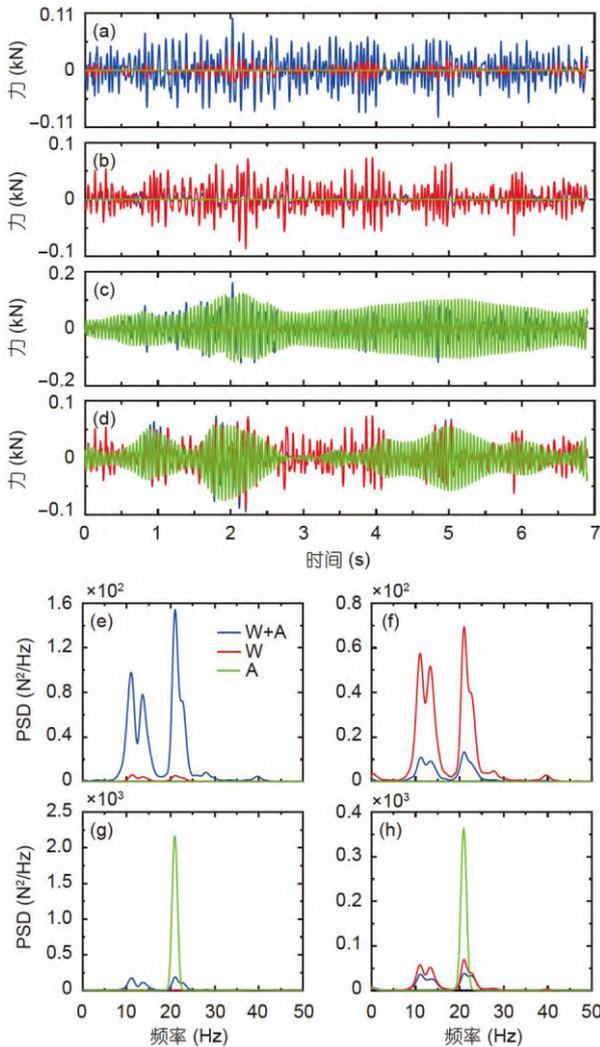


图9 (网络版彩图)一位抗蛇行减振器垂向力。明线工况下前(a)、后(b)转向架的载荷-时间历程;隧道工况下前(c)、后(d)转向架的载荷-时间历程;明线工况下前(e)、后(f)转向架的载荷PSD;隧道工况下前(g)、后(h)转向架的载荷PSD

Figure 9 (Color online) Vertical forces of the first anti-yaw damper. Load-time histories for front (a) and rear (b) bogies in the open-line condition, and front (c) and rear (d) bogies under the tunnel condition; load PSDs for front (e) and rear (f) bogies in the open-line condition, and front (g) and rear (h) bogies under the tunnel condition.

$N=6721$ (消除时间差), y_i 和 \bar{y}_i 分别为前后转向架结构载荷第*i* s的值, 统一按照前转向架结构载荷-时间历程归一化。表3给出了RMSE大于0.1, 即受转向架前后位置影响较大的结构载荷情况, 可见大多来自于二系悬挂。其中, 前后转向架上的一系悬挂钢弹簧纵向力, 二系悬挂空气弹簧纵向力、空气弹簧垂向力、抗蛇行减振器垂向力和牵引拉杆横向、垂向力的差异最为显著。

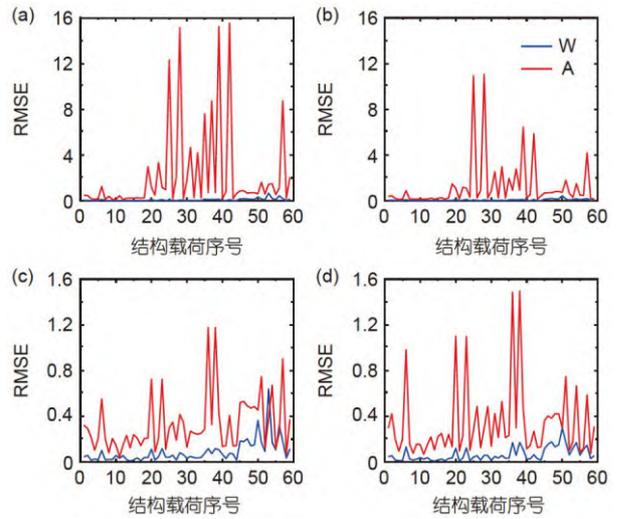


图10 (网络版彩图)轮轨激励或气动载荷单独与共同作用时结构载荷幅值差异。明线工况下前(a)、后(b)转向架;隧道工况下前(c)、后(d)转向架

Figure 10 (Color online) Difference of the amplitude of structural loads when the wheel-rail excitation or aerodynamic load is applied individually compared with that when the two are applied jointly. Front (a) and rear (b) bogies in the open-line condition; front (c) and rear (d) bogies under the tunnel condition.

3.3 气动载荷分量引起的特征变化

当增加气动载荷作用后, 部分结构载荷的特征发生了变化, 如相比轮轨激励单独作用时前后转向架同一结构载荷表现出均值或幅值变化的对称性。如图7和9所示, 两种外载共同作用时相比轮轨激励单独作用时, 前转向架一位钢弹簧纵向力均值减小, 而后转向架增大; 前转向架一位抗蛇行减振器垂向力幅值增大, 而后转向架减小。此外, 也有前、后转向架均值或幅值变化一致的载荷, 如牵引拉杆垂向力、二位横向减振器垂向力和抗蛇行减振器横向力。表4列出了两种外载共同作用下载荷特征较轮轨激励单独作用时变化显著的结构载荷, 可见基本都是纵向力和垂向力, 且和部分受转向架前后位置影响大的结构载荷重合, 可能是气动载荷的作用加剧了位置造成的载荷差异。

为了厘清引起结构载荷变化的气动载荷来源, 本节给出了轮轨激励和不同气动载荷(全气动载荷、单一气动载荷分量)共同作用时的上述结构载荷。以二位空气弹簧垂向力为例, 图12和13分别展示了其在明线和隧道工况下承受不同外载作用下的时间历程。两种工况下阻力、侧力和摇头力矩对该结构载荷几乎无影响, 点头力矩则分别导致前后转向架均值显著减小和

表 3 受转向架前后位置影响显著的结构载荷

Table 3 Structural loads significantly affected by the front and rear positions of the bogie

序号	悬挂位置	方向	结构载荷	RMSE
19	一系悬挂	纵向	一位钢弹簧力	0.474
21	一系悬挂	垂向	一位钢弹簧力	0.109
22	一系悬挂	纵向	二位钢弹簧力	0.500
24	一系悬挂	垂向	二位钢弹簧力	0.221
35	一系悬挂	纵向	三位定位转臂力	0.120
37	一系悬挂	纵向	四位定位转臂力	0.141
39	二系悬挂	纵向	一位空气弹簧力	0.394
40	二系悬挂	横向	一位空气弹簧力	0.175
41	二系悬挂	垂向	一位空气弹簧力	0.415
42	二系悬挂	纵向	二位空气弹簧力	0.273
43	二系悬挂	横向	二位空气弹簧力	0.175
44	二系悬挂	垂向	二位空气弹簧力	0.414
50	二系悬挂	垂向	二位横向减振器力	0.183
51	二系悬挂	纵向	一位抗蛇行减振器力	0.121
52	二系悬挂	横向	一位抗蛇行减振器力	0.196
53	二系悬挂	垂向	一位抗蛇行减振器力	0.396
54	二系悬挂	纵向	二位抗蛇行减振器力	0.125
55	二系悬挂	横向	二位抗蛇行减振器力	0.247
56	二系悬挂	垂向	二位抗蛇行减振器力	0.420
57	二系悬挂	纵向	牵引拉杆力	0.186
58	二系悬挂	横向	牵引拉杆力	0.407
59	二系悬挂	垂向	牵引拉杆力	2.09

表 4 轮轨激励和气动载荷共同作用下特征变化显著的结构载荷

Table 4 Structural loads whose characteristics vary significantly under both wheel-rail excitations and aerodynamic loads

序号	悬挂位置	方向	结构载荷	特征	前后转向架变化趋势	来源气动载荷分量
19, 22, 25, 28	一系悬挂	纵向	钢弹簧力	均值	相反	点头力矩
31, 33, 35, 37	一系悬挂	纵向	定位转臂力	均值	相反	点头力矩
57	二系悬挂	纵向	牵引拉杆力	均值	相反	点头力矩
21, 24, 27, 30	一系悬挂	垂向	钢弹簧力	均值	相反	点头力矩
41, 44	二系悬挂	垂向	空气弹簧力	均值	相反	点头力矩
59	二系悬挂	垂向	牵引拉杆力	均值	一致	点头力矩
53, 56	二系悬挂	垂向	抗蛇行减振器力	幅值	相反	点头力矩
50	二系悬挂	垂向	二位横向减振器力	幅值	一致	点头力矩
52, 55	二系悬挂	横向	抗蛇行减振器力	幅值	一致	侧力

增大, 即引起载荷均值出现相反的变化趋势. 在隧道工况下, 升力和侧滚力矩只在进隧道阶段对该结构载荷有较明显的影响. 因此, 两种外载共同作用下部分结构载荷的特征变化由特定方向的气动载荷分量造成,

我们将变化特征的来源列入表4中, 可见点头力矩是前后转向架上纵向和垂向结构载荷均值或幅值变化的主要原因. 本文的计算中没有考虑曲线以及横风作用, 这是车体运动主要发生在 $x-z$ 平面的原因, 但根据文献

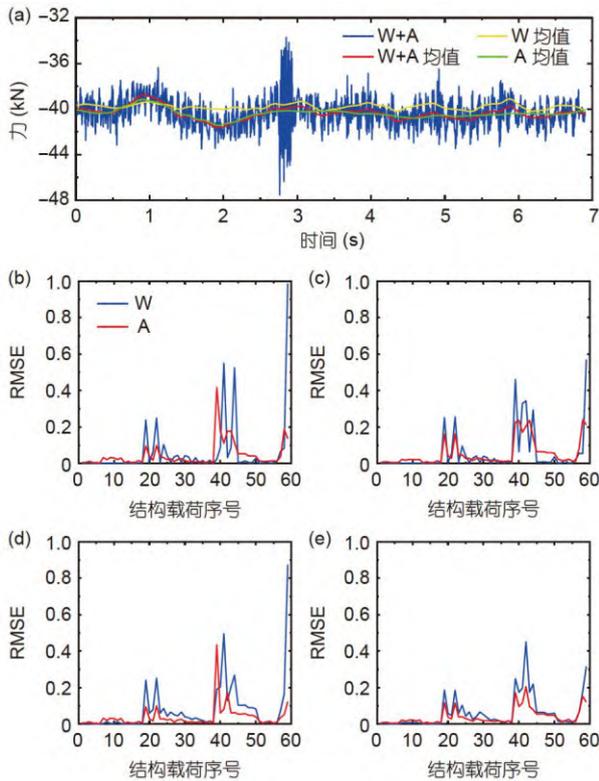


图 11 (网络版彩图)外载对转向架结构载荷均值的影响。(a) 隧道工况轮轨激励和气动载荷共同作用下后转向架四位钢弹簧垂向力-时间历程及不同外载作用下的该载荷均值-时间历程。两种外载单独与共同作用时结构载荷均值差异: 明线工况下前(b)、后(c)转向架; 隧道工况下前(d)、后(e)转向架
Figure 11 (Color online) Effects of external loads on mean values of structural loads on bogies. (a) Vertical force-time history of the fourth steel spring of the rear bogie under both wheel-rail excitations and aerodynamic loads for the tunnel condition, and the mean value-time history of this load under different external loads. Difference of the mean value of structural loads when the wheel-rail excitation or aerodynamic load is applied individually compared with that when the two are applied jointly: Front (b) and rear (c) bogies in the open-line condition; front (d) and rear (e) bogies under the tunnel condition.

[48], 列车在横风的作用下进隧道时, 中间车的点头力矩依然有一个明显的波动, 这证明该力对列车动态特征有较大的影响, 因此本文的结论在有横风的情况下也是适用的。

4 外载对结构载荷的分量贡献

在时域上计算输入对输出的贡献可依靠信号分析理论中的网络求解法^[49], 通过对输入信号 \mathbf{X} 和输出信号 \mathbf{Y} 做互相关分析, 衡量前者对后者均方值 r_{yy} , 即信号

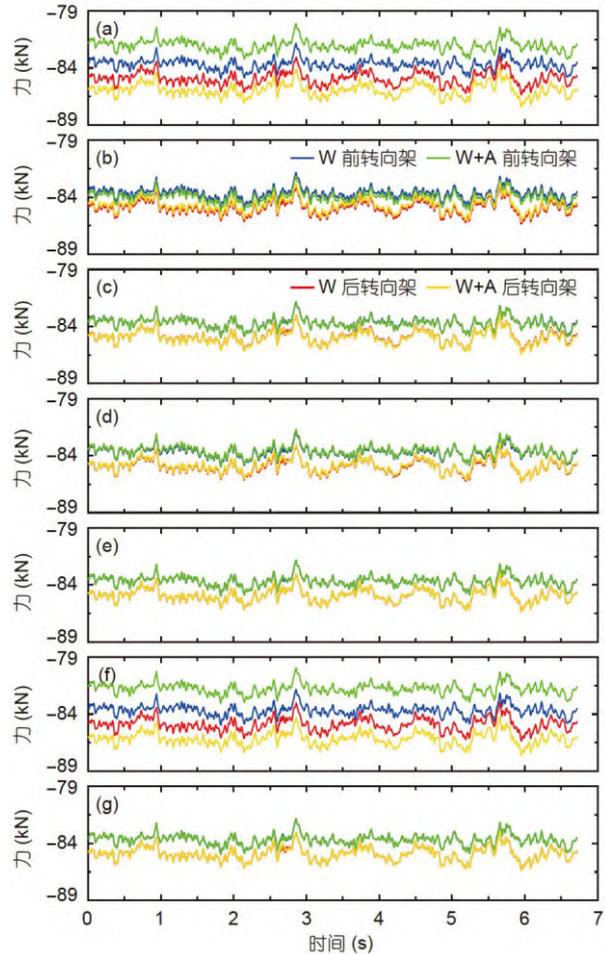


图 12 (网络版彩图)明线工况轮轨激励和不同气动载荷共同作用下的二位空气弹簧垂向力-时间历程。(a) 全气动载荷; (b) 阻力; (c) 侧力; (d) 升力; (e) 侧滚力矩; (f) 点头力矩; (g) 摇头力矩
Figure 12 (Color online) Vertical force-time histories of the second air spring under the combined effect of wheel-rail excitations and different aerodynamic loads in the open-line condition. (a) Full aerodynamic loads; (b) drag force; (c) side force; (d) lift force; (e) rolling moment; (f) pitching moment; (g) yawing moment.

平均功率的贡献。计算公式如下:

$$r_{yy} = E(\mathbf{Y}^2) = \sum_{i=1}^n r_{iy} h_{iy} + r_o = \mathbf{R}_y^T \cdot \mathbf{H} + r_o, \quad (11)$$

其中, n 为输入的数量, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n]^T$, $\mathbf{x}_i = [x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(s)}]$, s 为时间步的个数。 r_{iy} 为输入输出协方差, h_{iy} 为输入输出传递系数, r_o 为其他贡献, 输出默认只有一个, 故 $\mathbf{Y} = [y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(s)}]$ 。 \mathbf{R}_y 为输入输出互相关矢量, \mathbf{H} 为输入输出传递矩阵, 如下所示:

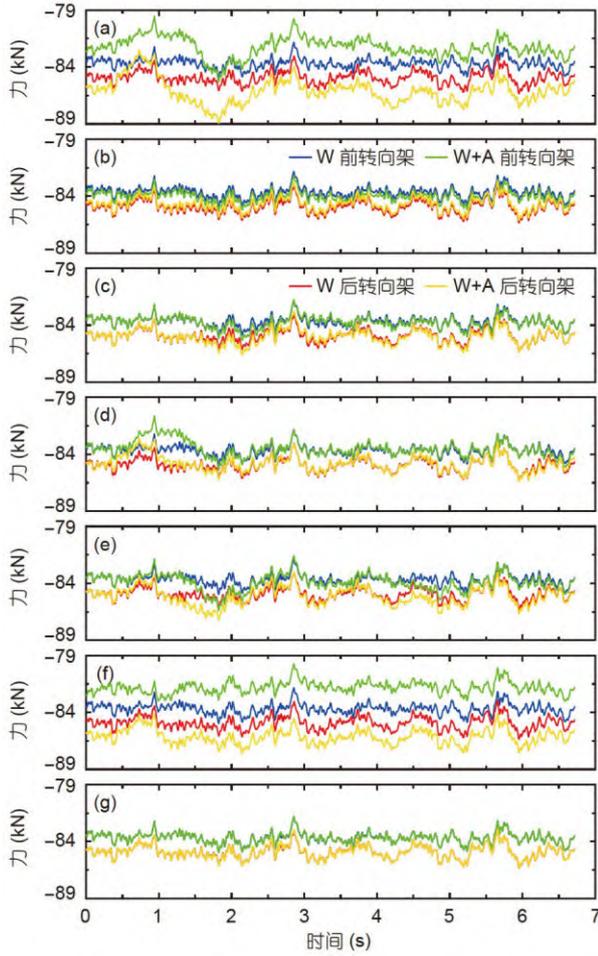


图 13 (网络版彩图)隧道工况轮轨激励和不同气动载荷共同作用下的二位空气弹簧垂向力-时间历程。(a) 全气动载荷; (b) 阻力; (c) 侧力; (d) 升力; (e) 侧滚力矩; (f) 点头力矩; (g) 摇头力矩

Figure 13 (Color online) Vertical force-time histories of the second air spring under the combined effect of wheel-rail excitations and different aerodynamic loads for the tunnel condition. (a) Full aerodynamic loads; (b) drag force; (c) side force; (d) lift force; (e) rolling moment; (f) pitching moment; (g) yawing moment.

$$\mathbf{R}_y = \begin{pmatrix} r_{1y} \\ r_{2y} \\ \vdots \\ r_{ny} \end{pmatrix}, \mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{1y} \\ h_{2y} \\ \vdots \\ h_{ny} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$r_{iy} = \text{cov}(\mathbf{x}_i, \mathbf{Y}) = E[(\mathbf{x}_i - E(\mathbf{x}_i))(\mathbf{Y} - E(\mathbf{Y}))], i = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

其中, $\text{cov}(\mathbf{x}_i, \mathbf{Y})$ 为输入与输出的协方差, $E(\mathbf{x}_i)$ 和 $E(\mathbf{Y})$ 为二者各自的数学期望。输入输出传递矩阵 \mathbf{H} 一般是

未知的, 可由如下公式解出:

$$\mathbf{R}_y = \mathbf{R}_{xx} \cdot \mathbf{H}, \quad (14)$$

其中, $\mathbf{R}_{xx} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix}$ 为输入的协方差矩阵, 则

式(11)可写作:

$$r_{yy} = \mathbf{R}_y^T \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{R}_y + r_o. \quad (15)$$

对于高速列车整体系统, 直观上输入应为轮轨激励和气动载荷, 输出为内部转向架的结构载荷, 但由于载荷传递的滞后性和高速列车的空间非线性, 该输入、输出难以在时域上求解贡献。轮轨激励和气动载荷分别作用在轮对和车体上, 转向架承受其作用存在时间差, 再加上高速列车内部阻尼元件的耗散作用, 转向架承受输入作用的时间可能比输入自身的时间要长, 进一步导致二者时间轴上的不对等。为了解决这一问题, 我们为网络求解法确定的输入为某一结构载荷在轮轨激励或气动载荷单独作用时的时间历程, 输出为该结构载荷在两种外载共同作用下的时间历程, 这保证了输入、输出在时间轴上的一致性。此时, 网络求解法得到的贡献实际为结构载荷(一种外载单独作用)对结构载荷(两种外载共同作用)的贡献, 贡献值越大, 表明这一种外载单独作用下的结构载荷与两种外载共同作用时相似性越高, 我们就认为该外载对结构载荷的贡献越大, 将这个贡献值直接看作外载对结构载荷的贡献。

因此, 对于任意结构载荷, 输入的数量 $n=2$, 即轮轨激励和气动载荷单独作用时的时间历程, 时间步数 $s=6901$ 。具体计算流程为首先对输入矩阵求协方差矩阵

$$\mathbf{R}_{xx} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix},$$

再计算输入与输出的互相关矢量 $\mathbf{R}_y = \begin{pmatrix} r_{1y} \\ r_{2y} \end{pmatrix}$, 根据式(14)求出输入输出传递矩阵

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{1y} \\ h_{2y} \end{pmatrix}$$

之后, 即可确定两种输入分别对输出的贡献 $r_{1y}h_{1y}$ 和 $r_{2y}h_{2y}$, 以及其他贡献 r_o 。考虑到高速列车结构间的非线性连接, 两种外载共同作用下的结构载荷并非单独作用时的线性叠加, r_o 可以用来表征系统非线性

的影响。

利用式(15)计算得到输入对输出均方值 r_{yy} 的贡献之后, 归一化给出不同工况下中间车前后转向架每种外载对结构载荷的分量贡献, 如图14所示。在单列车明线运行工况下, 轮轨激励是结构载荷的主要贡献, 气动载荷的贡献可以忽略不计, 部分结构载荷受到一定的系统非线性影响。在隧道直线通过工况下, 气动载荷对结构载荷的分量贡献显著上升, 如前后转向架的空气弹簧横向力、二位空气弹簧垂向力、牵引拉杆横向力以及后转向架的牵引拉杆垂向力, 气动载荷对这些结构载荷的贡献都超过了轮轨激励。此外, 系统非线性对结构载荷的影响同样增大, 如前后转向架的抗蛇行减振器横向力以及后转向架的二位抗蛇行减振器垂向力, 系统非线性的贡献超过了轮轨激励与气动载荷的贡献之和。但总体来看, 轮轨激励仍是大部分结构载荷的主要贡献。这与两种外载对转向架结构载荷特征的影响一致, 轮轨激励是转向架结构载荷幅值的主要来源, 从疲劳可靠性的角度来说, 幅值最终决定了结构的疲劳损伤, 因此决定幅值的外载贡献更大。综上, 两种工况下, 轮轨激励都是转向架结构载荷的主要分量贡献, 但在隧道工况下, 气动载荷与系统非线性的贡献都较明线工况显著上升。

5 结论

本文通过气动-多体动力学耦合计算, 获得了高速列车单列车明线运行和单列车通过隧道两种典型工况下的中间车转向架结构载荷, 定量分析了外部载荷及转向架前后位置等对结构载荷的影响, 给出了不同载荷来源对结构载荷的分量贡献, 得出主要结论如下。

(1) 高速列车的外部载荷中, 轮轨激励是决定转向架结构载荷幅值的主因, 而气动载荷是引起结构载荷均值变化的关键。

(2) 转向架前后位置造成了同一结构载荷的特征

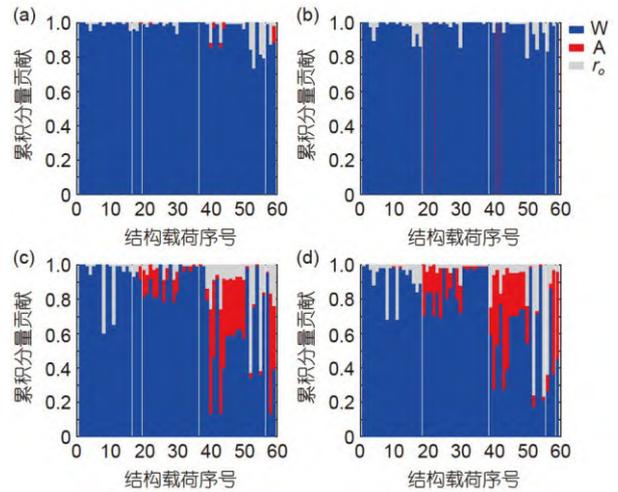


图14 (网络版彩图)轮轨激励和气动载荷对结构载荷的分量贡献。明线工况下前(a)、后(b)转向架; 隧道工况下前(c)、后(d)转向架

Figure 14 (Color online) Fractional contributions from wheel-rail excitations and aerodynamic loads to structural loads. Front (a) and rear (b) bogies in the open-line condition; front (c) and rear (d) bogies under the tunnel condition.

差异, 包括轮轨激励作用的时间差和以二系悬挂载荷为主的部分结构载荷幅值和均值的差异; 特定方向的气动载荷分量使结构载荷的特征发生了显著变化, 其中点头力矩是前后转向架上部分纵向和垂向载荷特征变化的主要原因。

(3) 两种工况下, 轮轨激励都是转向架结构载荷的主要分量贡献, 但在隧道工况下, 气动载荷对结构载荷的贡献较明线工况显著上升。

本文厘清了不同工况下外部载荷及结构分布对高速列车转向架结构载荷特征的影响规律, 相关结论可为高速列车转向架结构的疲劳优化设计提供依据。这种同一体系下不同外载和结构载荷并行处理的研究方法可以适用于任何面对疲劳问题的复杂工程系统, 可以帮助研究人员了解外界输入的传递过程与内部载荷变化的原因。

参考文献

- Wei L, Zeng J, Gao H, et al. On-board measurement of aerodynamic loads for high-speed trains negotiating transitions in windbreak walls. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2022, 222: 104923
- Jiao J L, Ren H L, Soares C G. A review of large-scale model at-sea measurements for ship hydrodynamics and structural loads. *Ocean Eng*, 2021, 227: 108863

- 3 Handojo V. Investigation of load alleviation in aircraft pre-design and its influence on structural mass and fatigue. *Aerosp Sci Tech*, 2022, 122: 107405
- 4 Cai C B, Zhu S Y, Liu X B, et al. Dynamic analysis of fatigue check load for ballastless track in high-speed railway (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 707–713 [蔡成标, 朱胜阳, 刘秀波, 等. 高速铁路无砟轨道疲劳检算轮载的动力学分析. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 707–713]
- 5 Ji C X, Sun S G, Li Q, et al. A novel method for the general application of measured load spectra to different high-speed train bogie frames based on virtual track irregularity. *Measurement*, 2022, 198: 111369
- 6 Xie F, Duan H M, Ma Y, et al. Development and application of typical road spectrum database in China (in Chinese). *J Vib Shock*, 2010, 29: 160–164, 260 [谢飞, 段虎明, 马颖, 等. 中国典型道路谱数据库的开发与应用. 振动与冲击, 2010, 29: 160–164, 260]
- 7 Kang X, Liu X B, Li H Y, et al. PSD of ballastless track irregularities of high-speed railway (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 687–696 [康熊, 刘秀波, 李红艳, 等. 高速铁路无砟轨道不平顺谱. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 687–696]
- 8 Wang L, Luo J J, Li F L, et al. Aerodynamic performance and flow evolution of a high-speed train exiting a tunnel with crosswinds. *J Wind Eng Ind AeroDyn*, 2021, 218: 104786
- 9 Tian G Y, Gao J M, Zhao C F. Progress in the research on the railway track irregularity power spectral density (in Chinese). *J Railway Eng Soc*, 2016, 9: 35–40, 81 [田国英, 高建敏, 赵春发. 铁路轨道不平顺谱研究进展. 铁道工程学报, 2016, 9: 35–40, 81]
- 10 Gao H R, Liu T H, Gu H Y, et al. Full-scale tests of unsteady aerodynamic loads and pressure distribution on fast trains in crosswinds. *Measurement*, 2021, 186: 110152
- 11 Wu P, Yuan W Y, Ji L L, et al. Missile aerodynamic shape optimization design using deep neural networks. *Aerosp Sci Tech*, 2022, 126: 107640
- 12 Guo W W, Wang Y J, Xia H, et al. Wind tunnel test on aerodynamic effect of wind barriers on train-bridge system. *Sci China Tech Sci*, 2015, 58: 219–225
- 13 Kou L, Fan W H, Song S. Multi-agent-based modelling and simulation of high-speed train. *Comput Electrical Eng*, 2020, 86: 106744
- 14 Guo F, Wu S C, Liu J X, et al. A time-domain stepwise fatigue assessment to bridge small-scale fracture mechanics with large-scale system dynamics for high-speed maglev lightweight bogies. *Eng Fract Mech*, 2021, 248: 107711
- 15 Liu Y Q, Ren Z S. Research on the transference characteristics of loads frequencies of high-speed vehicle (in Chinese). *J Vib Eng*, 2013, 26: 687–692 [刘永乾, 任尊松. 高速列车载荷频率传递特性研究. 振动工程学报, 2013, 26: 687–692]
- 16 Liu G Y, Zeng J, Zhang B. Influence of rail corrugation on high-speed vehicle vibration performances (in Chinese). *J Vib Shock*, 2019, 38: 137–143 [刘国云, 曾京, 张波. 钢轨波磨对高速车辆振动特性的影响. 振动与冲击, 2019, 38: 137–143]
- 17 Wu J, Zhang Z, Hou A P, et al. Dynamic aerodynamic load and structural characteristics of inflatable reentry reducer (in Chinese). *J Astronaut*, 2020, 41: 287–297 [吴杰, 张章, 侯安平, 等. 充气式再入减速器动态气动载荷与结构特性研究. 宇航学报, 2020, 41: 287–297]
- 18 Qin Z W, Qiang S G, Zhang M M, et al. Design and structural responses of a 38-meter sectional wind turbine blade under extreme static loads. *Compos Struct*, 2022, 290: 115487
- 19 Wu W K, Xu M Q, Wang S Q, et al. Structural damage detection of offshore platforms considering environmental variations (in Chinese). *J Vib Shock*, 2021, 40: 294–302 [吴文开, 徐明强, 王树青, 等. 考虑环境因素影响的海洋平台结构损伤检测研究. 振动与冲击, 2021, 40: 294–302]
- 20 Wang B J, Xie S Q, Li Q, et al. Fatigue damage prediction of metro bogie frame based on measured loads. *Int J Fatigue*, 2022, 154: 106532
- 21 Gao Y K, Xu C M, Fang J G. Study on the programed load spectrum of the body fatigue bench test (in Chinese). *J Mech Eng*, 2014, 50: 92–98 [高云凯, 徐成民, 方剑光. 车身台架疲劳试验程序载荷谱研究. 机械工程学报, 2014, 50: 92–98]
- 22 Li H M, Yang F, Zhang Q, et al. Influence of intersection by same speed of high speed trains in tunnel on vehicle dynamic performance (in Chinese). *Chin Railway Sci*, 2020, 41: 64–70 [李红梅, 杨飞, 张骞, 等. 高速列车隧道内等速交会会对车辆动力学性能的影响. 中国铁道科学, 2020, 41: 64–70]
- 23 Sun W J, Tian C, Zhou J S, et al. Dynamics performance of high-speed train with aerodynamic brake under crossing (in Chinese). *J Tongji Univ: Nat Sci*, 2014, 42: 1401–1407 [孙文静, 田春, 周劲松, 等. 高速列车空气动力制动会车动力学性能. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42: 1401–1407]
- 24 Huang J Y, Yao S, Cao Y H, et al. Study on the overturning stability of double-deck high-speed EMU under crosswind (in Chinese). *J Railway Sci Eng*, 2023, 20: 1160–1170 [黄经宇, 姚松, 曹月昊, 等. 双层高速动车组横风倾覆稳定性研究. 铁道科学与工程学报, 2023, 20: 1160–1170]
- 25 Lu Y H, Feng Z, Chen T L, et al. Evaluation method of fatigue strength for carbody of high-speed train under influence of aerodynamic loads (in Chinese). *J Traffic Transp Eng*, 2014, 6: 44–50 [卢耀辉, 冯振, 陈天利, 等. 气动载荷影响下的高速列车车体疲劳强度评估方法. 交通运输工程学报, 2014, 6: 44–50]

- 26 Miao B R, Tan S F, Wu P B, et al. Research of typical fatigue load spectrum simulation of carbody structure based on non-stationary aerodynamic load (in Chinese). *J Mech Eng*, 2017, 53: 100–107 [缪炳荣, 谭仕发, 邬平波, 等. 非稳态风致载荷下车体结构典型载荷谱仿真研究. 机械工程学报, 2017, 53: 100–107]
- 27 Lu Y B, Wang T T, Zhang L, et al. Aerodynamic loads of trains with different formations passing through and intersecting in tunnels at 400 km/h (in Chinese). *J Central South Univ: Sci Technol*, 2022, 53: 1855–1866 [陆意斌, 王田天, 张雷, 等. 时速400 km不同编组列车通过隧道时的气动载荷. 中南大学学报: 自然科学版, 2022, 53: 1855–1866]
- 28 Ji Z L, Yang G W, Liu Y B, et al. Analysis of vertical vibration characteristics of the vehicle-flexible track coupling system under wind load and track irregularity. *Proc Inst Mech Eng Part F-J Rail Rapid Transit*, 2018, 232: 2444–2455
- 29 Li F L, Luo J J, Wang L, et al. Wave effects of high-speed trains passing through different tunnel lining types. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2022, 224: 104971
- 30 Zhou D, Jia L R, Niu J Q. Numerical simulation of impact of train length on alternating pressure load (in Chinese). *J Railway Sci Eng*, 2018, 15: 1–7 [周丹, 贾丽荣, 牛纪强. 编组长度对高速列车表面交变压力载荷的影响. 铁道科学与工程学报, 2018, 15: 1–7]
- 31 Huang Z X, Chen L, Jiang K L. Influence of length of train formation and vestibule diaphragm structure on aerodynamic drag of high speed train model (in Chinese). *J Exp Fluid Mech*, 2012, 26: 36–41 [黄志祥, 陈立, 蒋科林. 高速列车模型编组长度和风挡结构对气动阻力的影响. 实验流体力学, 2012, 26: 36–41]
- 32 European Committee for Standardization. EN 14067-5: 2006+A1: 2010 Railway Applications-Aerodynamics-Part 5: Requirements and test procedures for aerodynamics in tunnels. Brussels: European Committee for Standardization, 2011
- 33 Wang Z J, Li Y, Wei K, et al. Study on influence of tunnel parameters on pressure load of carbody of 400 km/h EMU (in Chinese). *High Speed Railway Tech*, 2021, 12: 46–51 [王志钧, 李艳, 魏康, 等. 400 km/h动车组车体压力载荷隧道参数影响特征研究. 高速铁路技术, 2021, 12: 46–51]
- 34 Li T, Qin D, Zhang J Y. Effect of RANS turbulence model on aerodynamic behavior of trains in crosswind. *Chin J Mech Eng*, 2019, 32: 85
- 35 Simcenter STAR-CCM+. Version 2021.3. Plano (Tex): Siemens PLM Software. 2021
- 36 SIMPACK 2018. Vélizy-Villacoublay Cedex: Dassault Systèmes SIMULIA. 2018
- 37 Wu H, Zeng X H, Lai J, et al. Nonlinear hunting stability of high-speed railway vehicle on a curved track under steady aerodynamic load. *Vehicle Syst Dyn*, 2020, 58: 175–197
- 38 Ji Z L, Liu W, Guo D L, et al. Analysis of the fluid-structure coupling characteristics of a high-speed train passing through a tunnel. *Int J Str Stab Dyn*, doi: 10.1142/S0219455422501851
- 39 Xue R. Study of vibration characteristics and safety of the high-speed freight EMU at speeds above 250 km/h (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. 55–56 [薛蕊. 时速250公里以上货运动车组振动特性及安全性研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2021. 55–56]
- 40 Sha Y D, Guo X P, Zhang J. Random sonic fatigue life prediction based on stress probability density and power spectral density method (in Chinese). *J Vib Shock*, 2010, 29: 162–165, 244 [沙云东, 郭小鹏, 张军. 基于应力概率密度和功率谱密度法的随机声疲劳寿命预估方法研究. 振动与冲击, 2010, 29: 162–165, 244]
- 41 Yuan Z, Chen X J, Ma L J, et al. A segmented load spectrum model for high-speed trains and its inflection stress as an indicator for line quality. *Int J Fatigue*, 2021, 148: 106221
- 42 Yuan Z, Chen X J, Li C, et al. The influence of operation variables on stress spectrum of high-speed train bogie frames. *Vehicle Syst Dyn*, 2023, 61: 499–512
- 43 Nejad R M, Berto F. Fatigue crack growth of a railway wheel steel and fatigue life prediction under spectrum loading conditions. *Int J Fatigue*, 2022, 157: 106722
- 44 Chen X J, Yuan Z, Li Q, et al. A computational method for the load spectra of large-scale structures with a data-driven learning algorithm. *Sci China Tech Sci*, 2023, 66: 141–154
- 45 Liu X N, Zhao X Z, Liu X A, et al. A load spectrum editing method of time-frequency for rubber isolators based on the continuous wavelet transform. *Measurement*, 2022, 198: 111374
- 46 Wang Y W, Yang G W, Huang C G, et al. Influence of tunnel length on the pressure wave generated by high-speed trains passing each other. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 255–263
- 47 Yang G X. Research project on key technologies of 400 km/h high-speed trains based on the application boundary of existing high-speed railway

lines. Research on vibration and load tracking of key parts of the vehicle body (Bogie part) (in Chinese). Beijing: Structural Strength Testing Laboratory of Beijing Jiaotong University, 2023 [杨广雪. 基于既有高铁线路运用边界的时速400公里动车组关键技术研究项目. 车体关键部位振动与载荷跟踪研究(转向架部分). 北京: 北京交通大学结构强度检测实验室, 2023]

- 48 Yang W C, Deng E, Zhu Z H, et al. Deterioration of dynamic response during high-speed train travelling in tunnel-bridge-tunnel scenario under crosswinds. *Tunnelling Undergr Space Tech*, 2020, 106: 103627
- 49 Zhang B C, Xu X X. Analytical method of time domain for contribution of noise source (in Chinese). *J Ship Mech*, 2001, 5: 54–60 [张宝成, 徐雪仙. 源贡献的时域分析方法. *船舶力学*, 2001, 5: 54–60]

Fractional load contributions from wheel-rail excitations and aerodynamics to the high-speed train bogie structure

YUAN Zheng¹, CHEN XianJia², JI ZhanLing³, LI Cen⁴, LUO Wei⁵, LI Qiang⁵, SUN ShouGuang¹, YANG GuoWei^{3,6} & WEI YuJie^{2,6}

¹ School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

² State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

³ Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

⁴ Locomotive and Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

⁵ Frontiers Science Center for Smart High-speed Railway System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

⁶ School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Understanding the structural load sources of high-speed trains (HSTs) precisely is critical for their fatigue reliability design. In this paper, we identify fractional load contributions from wheel-rail excitations and aerodynamics to the HST bogie structure. To this end, we first determine the structural loads on the bogies of an HST subjected to various external loads under two conditions—single-train operating in the open air and passing through a tunnel—using coupled aerodynamics and multibody dynamics calculations. Further, we analyze the influence of external loads and other factors on the structural load characteristics for calculating the differences in the structural load characteristics under various external loads. This study shows that wheel-rail excitation is the dominant factor determining the amplitude of the structural loads on bogies, while aerodynamic load is the primary factor responsible for changing the mean values of the structural loads. Additionally, we quantify the fractional contributions of different load sources to the structural loads using the network method of time-domain contribution by solving the signal analysis theory and demonstrate that the fractional contribution of the wheel-rail excitation to the structural loads on bogies under open air and tunnel conditions is the most dominant. Furthermore, contributions of the aerodynamic loads to the structural loads increase considerably under the tunnel condition. This paper clarifies the influence of different load sources on the structural loads under two working conditions, and the findings may provide a foundation for designing fatigue-resistant critical structures of HSTs.

high-speed train bogie, fractional load contributions, wheel-rail excitation, aerodynamic load, coupled aerodynamics and multi-body dynamics

doi: [10.1360/SST-2023-0165](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0165)