

文章编号:1671-1637(2025)02-0340-11

动车组涡激振动比例模型风洞试验与数值仿真研究

秦 汀¹, 姚 远^{*1}, 宋亚东¹, 范晨光²

(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 力学与航空航天学院, 四川 成都 610031)

摘 要:针对 CR200J 动力集中型动车组在单线隧道内列尾持续晃车现象, 为了探究其形成机理与气动特征, 本文以 1 : 25 缩尺比例的 CR200J 动车组尾部动力车为研究对象, 通过风洞试验对单自由度车体的横向振动进行测试, 然后采用大涡模拟方法建立了风洞模型的流固耦合数值仿真平台, 并通过风洞试验对仿真结果进行了验证; 对比分析了是否考虑流固耦合振动 2 种工况时的车体尾涡结构及气动响应。研究表明: 假设车体固定不考虑流固耦合振动时, 横向气动力频率(涡激频率)与风速线性相关, 横向气动力大小与车体气动外形和风速有关; 考虑流固耦合振动时, 车体横向振动幅值与风速正相关, 由于涡激振动锁频效应, 横向气动力频率与车体横向固有振动频率锁定, 此时车体出现了涡激共振, 其横向振动加剧; 相较于非流固耦合仿真工况, 车体横向振动导致尾流高涡量区域和边界层分离点后移, 更靠近车头鼻尖位置, 使得因漩涡脱落产生的横向力的作用力臂增大, 进而增大车体受到的摇头力矩, 加剧振动。可见, 流固耦合会改变气动载荷的大小和频率, 进而影响车体动态响应, 故尾车晃车的分析需采用车辆动力学与空气动力学相结合的流固耦合振动分析方法。

关键词:动力集中型动车组; 横向晃车; 流固耦合振动; 涡激振动; 尾涡结构; 风洞试验

中图分类号: U266.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19818/j.cnki.1671-1637.2025.02.022

Wind tunnel test and numerical simulation for vortex-induced vibration of EMUs using scaled model

QIN Ting¹, YAO Yuan^{*1}, SONG Ya-dong¹, FAN Chen-guang²

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031,

Sichuan, China; 2. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: In view of the sustained swaying of the train tail of the CR200J power-centralized electric multiple unit (EMU) in a single-track tunnel, a 1 : 25 scaled train model for the CR200J EMU was constructed to explore the generation mechanism and aerodynamic characteristics of train tail swaying. The lateral vibration of a single-degree-of-freedom carbody was measured by a wind tunnel test. A fluid-structure coupling numerical simulation platform for a wind tunnel model was established by the large eddy simulation (LES) method, and the simulation results

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52372403, U2268211); 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0034); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(N2023J071)

作者简介: 秦 汀(2000-), 男, 四川成都人, 西南交通大学工学博士研究生, 从事列车空气动力学和车辆系统动力学研究。

* 导师简介: 姚 远(1983-), 男, 安徽宿松人, 西南交通大学研究员, 工学博士。

引用格式: 秦 汀, 姚 远, 宋亚东, 等. 动车组涡激振动比例模型风洞试验与数值仿真研究[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(2): 340-350.

Citation: QIN Ting, YAO Yuan, SONG Ya-dong, et al. Wind tunnel test and numerical simulation for vortex-induced vibration of EMUs using scaled model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(2): 340-350.

were verified by the wind tunnel test. Under the conditions with and without the fluid-structure coupling vibration, the wake vortex structure and aerodynamic response were analyzed. Research results show that the lateral aerodynamic force frequency (vortex-induced frequency) is linearly related to the wind speed when the carbody is assumed to be fixed and the fluid-structure coupling vibration is not considered. Meanwhile, the size of the lateral aerodynamic force is related to the aerodynamic shape of the carbody and the wind speed. When the fluid-structure coupling vibration is considered, the lateral vibration amplitude is positively correlated with the wind speed. The lateral aerodynamic force frequency is locked to the lateral natural vibration frequency of the carbody due to the frequency locking effect of vortex-induced vibration. In this case, the carbody is subject to the vortex-induced resonance, and the lateral vibration is aggravated. Additionally, in contrast to the conditions of non-fluid-structure coupling simulation, the lateral vibration of the carbody results in a backward displacement of the high vorticity region and the separation point of the boundary layer and causes them to be closer to the nose tip. This causes an increase in the force arm of the lateral force generated by the vortex shedding, which further amplifies the yaw moment of the carbody and aggravates the vibration. The fluid-structure coupling can change the size and frequency of the aerodynamic load and further affect the dynamic response of the carbody. Therefore, the fluid-structure coupling vibration method combining train dynamics and aerodynamics is necessary for the analysis of the train tail swaying.

Keywords: power-centralized EMU; lateral swaying; fluid-structure coupling vibration; vortex-induced vibration; wake vortex structure; wind tunnel test

Funding: National Natural Science Foundation of China (52372403, U2268211); Natural Science Foundation of Sichuan Province (2022NSFSC0034); Science and Technology Research and Development Program of China Railway Group Co., Ltd. (N2023J071)

* **Corresponding author:** YAO Yuan (1983-), male, research fellow, PhD, yyuan8848@163.com.

0 引言

自2019年1月时速160 km动力集中型动车组CR200J投入运营以来,部分动车组出现了在通过小截面单线隧道时尾车明显的周期性晃车现象,其振动主频范围在1~2 Hz,动力车司机室横向平稳性指标达到3.2。因动力车和控制车头型基本一致,由此判断该晃车现象可能是由列车尾部气流扰动引起^[1]。

列车尾流是一个包含剪切层、卡门涡街类似的涡脱落、分离和再附着区以及一对旋向相反流向涡组成的非定常流动,具有复杂、高湍流强度和三维分离的特点^[2-4]。列车的尾流结构反映了全列车各部分分离状态和相互作用的综合效果,在近尾流区域,湍流涡旋结构对气动问题发挥着重要的影响作用。在列车侧面会发生类似卡门涡街的脱落涡,同时这些涡相互融合和干涉,进而在时变的尾流中形成周期性展向振荡的一对涡旋,对气动问题产生着重要的影响^[5-7]。Chiu等^[8]通过试验发现,当雷诺数足够高到使剪切层的流动呈完全湍流时,在剪切层中

会周期性地产生小漩涡,其会对大漩涡产生影响从而会影响列车尾流结构;Weise等^[9]利用油流和烟雾流动显示方法对不同的列车尾车形状进行了风洞试验研究,发现列车尾流区域会形成对称性的分离气泡或出现涡流脱落现象;潘永琛等^[10]发现高涡量的强漩涡主要分布在尾车附近,同时在此处的漩涡具有较高的湍动能,随着尾流逐渐向下游发展,湍动能逐渐耗散。此外,高速列车运行的稳定性往往与气动特性关系密切,其中与尾涡相关的气动力是不容忽视的^[11]。姚拴宝等^[11-12]认为由于列尾漩涡的生成和脱落对压差阻力的影响较为明显,因此,对头型的优化设计能较好地降低阻力;田红旗^[13]研究表明漩涡主要形成于具有复杂突变和大曲率的表面,漩涡密集分布于列车底部(转向架)、列车尾部及尾流区域,这些漩涡的存在对列车蛇行运动稳定性产生了显著的负面影响;Hemida等^[14]使用大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)方法研究了不同车头长度和不同偏航角的横风对列车周围空气的时间平均和瞬时流动的影响,发现LES适用于预测列车

周围空气的流动结构。

随着列车运行速度的提高,以气动效应为主引起的列车振动问题愈发频繁,国内外学者针对该问题进行了大量研究。Fujimoto 等^[15]分析了日本新干线列车的试验观测数据,发现在隧道内尾车的横向振幅明显大于其他车厢;Diedrichs 等^[16-17]采用 LES 方法研究了德国 ICE2 高速列车和日本 S300 新干线列车在隧道中的尾车振动,将通过 LES 获得的空气动力学载荷直接施加到车体上,发现尾车振动与列车尾部头型和车体质量有关;Hemida 等^[18-20]发现列车尾流区大型漩涡结构的脱落对列车所受到的非定常气动力会产生较大影响,且漩涡脱落所产生的气动力振荡频率和列车本身固有振动频率十分接近,加剧了列车横向振动;马静等^[21-22]分别使用二维和三维 LES 研究了列车在横风下的空气非定常流动特性和非定常空气动力特性,发现涡流的主频与列车系统本身结构的固有频率比较接近;鲍龙^[23]通过 LES 研究发现了列车由明线进入隧道后,车体两侧压力存在差值,车体周围受到严重的流场影响,气动特性非常剧烈,诱发车体产生横向振动,从而影响列车在隧道内的安全运行。而随着计算机技术的提升,高速列车流固耦合动力学研究也已取得较大进展^[24]。李田^[25]考虑了列车在气动载荷作用下的车体运动姿态的改变,建立了列车流固耦合动力学模型,解决了传统的列车空气动力学和车辆-轨道耦合动力学单独研究与客观实际存在较大差异的问题;姚远等^[26]将涡激振动理论引入列车尾流研究,发现当列尾脱涡频率与车体横向振动频率接近时,出现锁频现象,即列尾涡激频率与车体横向振动频率一致,发生涡激共振,进一步加剧了列车车体的横向振动幅值;崔涛等^[27]建立了高速列车流固耦合振动研究方法,发现考虑流固耦合后,列车在侧风和交会情况下的安全性会进一步降低,这也进一步表明,流固耦合计算更具现实性、科学性和准确性;Ji 等^[28]在考虑轨道横向和垂向不平顺情况下,研究了高速列车通过隧道时的流固耦合特征,发现列车通过隧道时升力和横向加速度会产生明显变化,车体横向位移的频率主要取决于轨道的垂直不平顺和车体自身的固有频率。

本文以 CR200J 动力集中型动车组动力车头型的简化列车模型为研究对象,首先通过风洞试验测得了车体尾部的横向加速度,接着采用大涡模拟方法建立了双向流固耦合振动模型,并结合风洞试验的结果对气动横向力、横向加速度及其频率进行了

讨论,探究了晃车对列尾脱涡频率的影响,最后对列车在固定不动和流固耦合振动 2 种工况下的尾流场的特性进行了研究。

1 风洞试验

1.1 试验模型

对于气动特性的研究,风洞试验是一种有效的方法。试验在西南交通大学力学与航空航天学院的风洞实验室进行,该风洞最高来流速度为 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,湍流度不均匀性小于 0.4%。本文开展的比例模型风洞试验的意义在于:一方面,是为了研究列尾晃动时的车体涡激振动特征;另一方面,通过对比车体横向振动加速度的响应,来验证下一节中建立的数值仿真模型的准确性。根据文献^[19],采用缩比为 1:25 的简化列车模型,将一个长度为 $6.0H$ (车辆高度 H 为特征长度,取值为 $4/25 \text{ m}$) 的头车和长度为 $1.3H$ 的尾车进行组合,如图 1 所示,形成一个长度为 $7.30H$ 、宽度为 $0.82H$ 、高度为 H 的双头车模型。在不影响准确度的前提下对外形进行简化处理,不考虑受电弓、车窗及车门等细节。

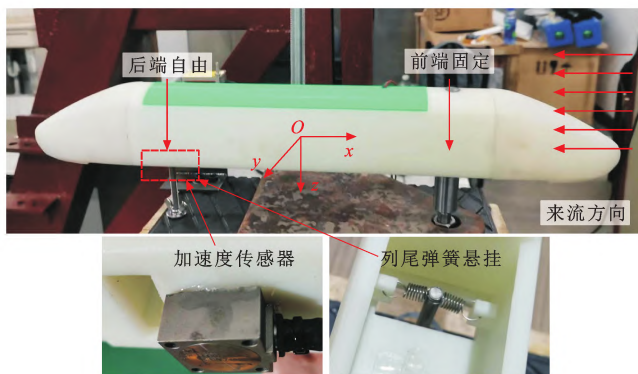


图 1 CR200J 动力集中型动车组风洞试验简化模型
Fig. 1 Simplified model for wind tunnel test of
CR200J power-centralized EMU

本文主要研究列车的横向振动问题,而在实际试验当中,要使模型单纯的横向运动较为困难,因此,如图 2 所示,将列车模型前端通过轴承固定,后端通过弹簧弹性连接,从而使车体可以在受到气动载荷后绕 z 轴(垂向)转动,以此来模拟车体尾部沿 y 轴(横向)的横向摆动,整个模型具有一个摇头自由度。另外,受试验条件和比例模型的限制,当车体



(a) 试验环境



(b) 试验台

图2 列车比例模型风洞试验台

Fig. 2 Wind tunnel test bench for scaled train model

发生横向摆动时,很难实现对车体受到的气动力进行直接测量,因此,通过获得在该气动力下车体尾部的横向加速度响应来展现车体受到的气动涡激力特征。使用采样频率为 1 000 Hz、采样范围为 2g 的加速度传感器测量列车模型后端的横向振动加速度。列车模型的受力示意如图 3 所示,图中:列车行驶方向为 x 轴正向(纵向); y 轴垂直于列车行驶方向;垂直于轨道向下为 z 轴正向; γ 为车体的摇头角; F_y 为作用在车体上的气动横向力; m 为列车模型质量,经过测量 $m=0.2 \text{ kg}$; k 和 c 分别为模型的等效横向刚度和阻尼。该模型等效为有阻尼的单自由度振动系统。

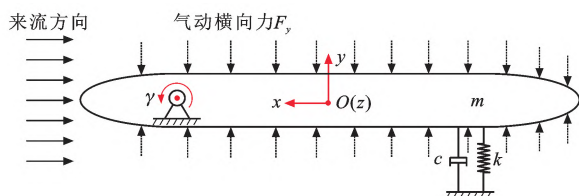


图3 列车模型受力分析

Fig. 3 Force analysis of train model

其运动方程为

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_y \quad (1)$$

对模型尾部施加轻微激励,其横向振动加速度衰减如图 4 所示,由 1~2 s 内的波形图可得列车横向固有频率 f 约为 8 Hz。

分别计算等效横向刚度 k 、相对阻尼系数 ζ 、等效横向阻尼 c 为

$$\begin{cases} k = (2\pi f)^2 m \\ \zeta = \frac{\ln(A_1/A_{i+1})}{\sqrt{4\pi^2 i^2 + [\ln(A_1/A_{i+1})]^2}} \\ c = 2\zeta \sqrt{mk} \end{cases} \quad (2)$$

式中: A_i 为第 i 个振动周期的振幅。

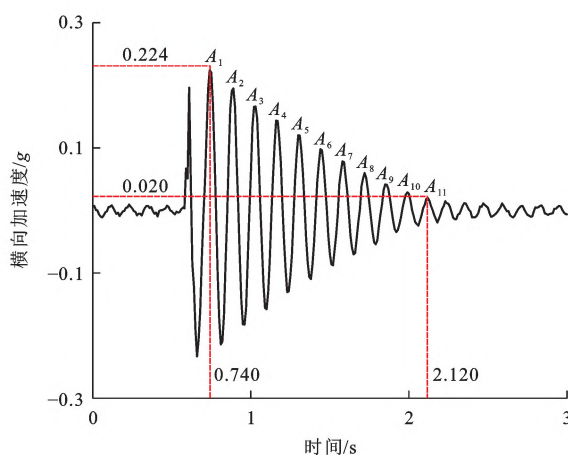


图4 车体尾部动态响应测量

Fig. 4 Dynamic response measurement of carbody tail

可得 $k = 505.3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, $\zeta = 0.039$, $c = 0.784 \text{ N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ 。

1.2 试验结果分析

当风速从 0 逐渐增加至 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后再逐渐降低到 0 时,得到车体测点横向加速度如图 5 所示。由图 5(a)可知,横向加速度随着风速的增加而增加,风速降低时减小,峰值约为 $0.55g$ 。对横向加速度进行频域分析,结果如图 5(b)所示,试验过程中车体振动频率主要为其横向固有振动频率 8 Hz;当速度超过 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,车体以 8 Hz 频率的振动更为明显。

2 数值仿真计算

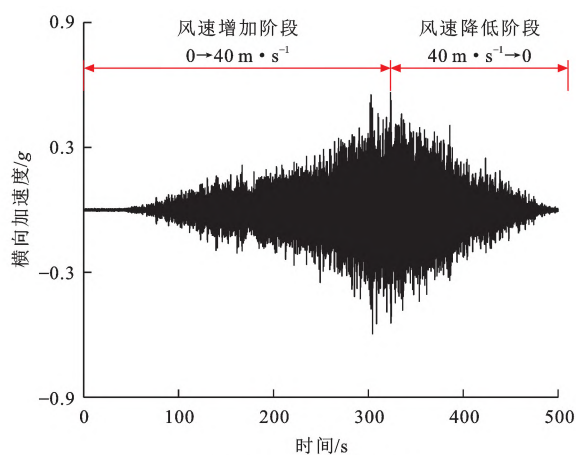
2.1 仿真模型

2.1.1 列车简化模型

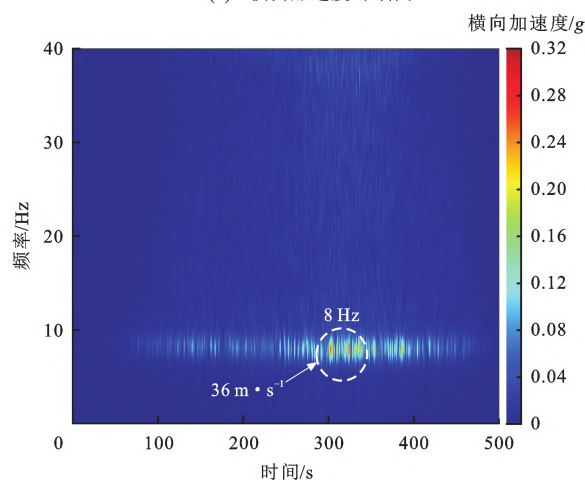
针对 1:25 缩比模型建立空气动力学仿真计算模型,如图 6 所示。

2.1.2 计算域和边界条件

本文对列车在没有侧风的平坦地面上直线运行



(a) 横向加速度时域图



(b) 横向加速度频域图

图 5 车体测点横向加速度

Fig. 5 Lateral acceleration of carbody measurement point

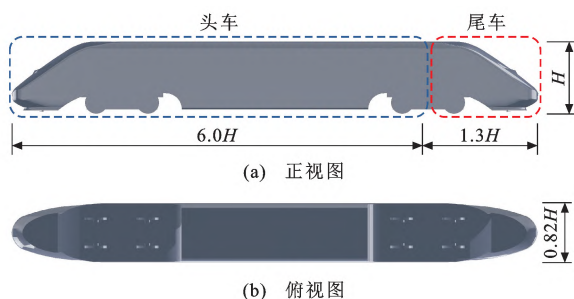


图 6 CR200J 动力集中型动车组数值计算简化模型

Fig. 6 Simplified numerical calculation model for CR200J power-centralized EMU

的工况进行数值仿真,其计算域和边界条件如图 7 所示。计算域长度设置为 $61.0H$,宽度为 $20.0H$,高度为 $12.0H$,入口距离车头鼻尖 $15.0H$,出口距离车尾鼻尖 $38.7H$,两侧距离列车 $5.59H$,从而保证列车周围流场能得到充分发展^[29]。入口边界设置为速度入口,出口边界设置为压力出口,静压为 0。为降低边界对仿真结果的影响,侧面和顶面设置为周期边界,地面设置为使用非平衡增强壁面函数的

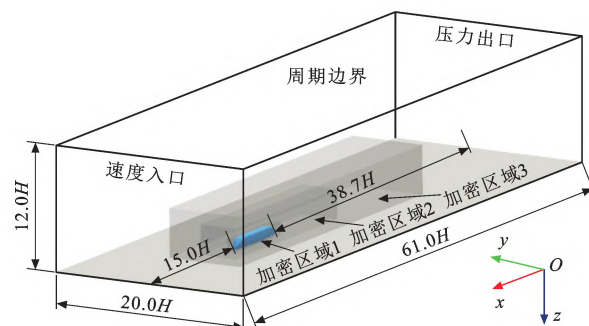


图 7 计算域与边界条件

Fig. 7 Computational domain and boundary conditions

移动壁面,移动速度与来流速度保持一致,以模拟列车的实际运行。

此外,列车表面的壁面模型设置为非平衡增强壁面函数,计算雷诺数 R_e 如下

$$R_e = \frac{\rho v H}{\mu} \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度,取 $1.205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; v 为来流速度,取 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; μ 为空气运动黏度,取 $1.809 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

计算可得雷诺数 $R_e = 4.26 \times 10^5$ 。

2.1.3 数值算法

本文通过计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件 XFlow 进行仿真计算,其采用基于粒子的拉格朗日动力学算法和格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method, LBM)。LBM 是一种基于微观粒子动力学的计算流体力学方法,它通过在空间网格上模拟分子碰撞和传输过程来描述流体的宏观运动^[30]。与传统的基于有限差分法、有限体积法的 CFD 计算方法相比,LBM 具有计算效率高、并行性好、适应复杂边界条件等优点^[31],因此,在流体力学领域得到了广泛的应用,LBM 已经广泛地被认为是描述流体运动与处理工程问题的有效手段^[32-33]。

与传统的网格模拟方法相比,基于粒子法的 XFlow 的主要特点是便于模拟运动部件和流固耦合相互作用的条件,其自适应尾流细化功能可以在流体发展过程中动态跟踪尾流。LES 湍流模型在很长一段时间内没有被广泛使用,因为其使用 Navier-Stokes 解算器的 RANS 模型相比,计算量相对较高。而 LBM 可以在较低计算量下使用 LES 湍流模型。作为一种相对先进的研究方法,LES 湍流模型擅长于高湍流和分离流的瞬态模拟,而 RANS 模型大多局限于稳态分析。近年来大涡模拟被有效地应用于列车的空气动力学瞬态分析当中^[14,18,34-35]。

2.1.4 粒子划分

XFlow 会根据输入的几何结构生成由 D3Q27 晶格结构组成的八叉树结构网格。列车模型周围网格的空间分布如图 8 所示,为了获得列尾流场的漩涡结构,对车身周围及尾流区进行了图 7 所示的网格加密,因此,总共设置了 6 个八叉树结构级别的网格,级别 1~6 粒子的分辨率分别为 $0.003\ 9H$ 、 $0.007\ 8H$ 、 $0.015\ 6H$ 、 $0.031\ 2H$ 、 $0.062\ 4H$ 和 $0.012\ 5H$,其中级别 3~5 为 3 个矩形加密区域,粒子总数量约 5 700 万个。模型的准确性将在下文的结果讨论中进行验证。

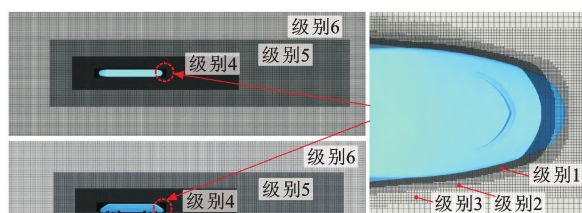


图 8 数值计算粒子

Fig. 8 Numerical computation particle

2.1.5 仿真工况设置

为保证流动充分发展,时间步长 Δt 设置为 $0.05\ \text{ms}$ 。在标准大气压 $101.325\ \text{kPa}$ 、温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ 的条件下,设定空气密度为 $1.205\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。仿真时间设置为 $20\ \text{s}$,在此时间内,速度在前 $10\ \text{s}$ 从 0 逐渐增大到 $40\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,然后逐渐减小到 0,即以 $4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度线性变化。仿真工况如表 1 所示,在工况 1 中,列车模型车体固定。

表 1 数值计算工况说明

Table 1 Interpretation of numerical computation conditions

工况类型	说明
工况 1	车体横向固定
工况 2	摇头单自由度(固有频率为 $8\ \text{Hz}$)

在工况 2 中,建立 XFlow 与 SIMPACK 的联合仿真模型,如图 9 所示。XFlow 计算得出列车车身气动横向力并将其输入 Simpack 中,Simpack 计算列车的横向位移反馈到 XFlow 中。列车车体受到的涡激力与横向位移和横向速度有关^[26],在本文的耦合仿真计算中,只向 XFlow 实时传递了车体的横向位移 y ,并没有直接传递横向速度,是因为横向位移的时域求导就是横向速度,因此,也间接考虑了横向速度的影响。在 Simpack 中,列车质量与风洞试验中列车质量 $m=0.2\ \text{kg}$ 一致,横向刚度和阻尼设置为风洞试验中计算出的等效刚度 $k=505.3\ \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 和阻尼 $c=0.784\ \text{N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ 。

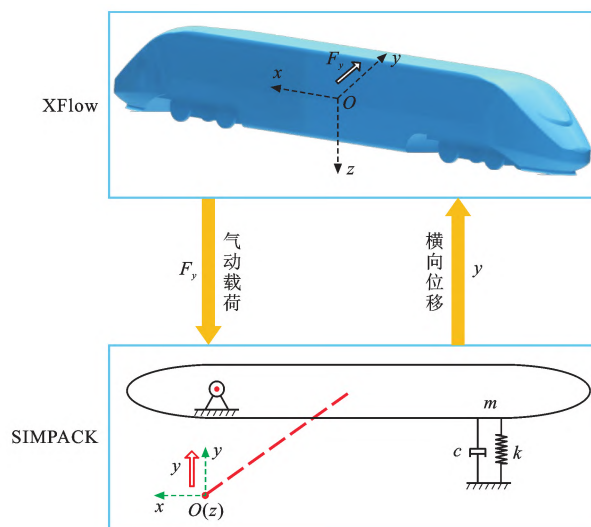


图 9 联合仿真流程

Fig. 9 Co-simulation process

2.2 数值计算结果与讨论

2.2.1 脱涡力分析

列尾附近的漩涡强度大,其从列尾鼻尖处成对脱落并向下游发展,类似于卡门涡街脱落。列车尾流是一种具有明显非定常特征的湍流流动,列尾附近的高强度漩涡从尾鼻尖处成对脱落并向下游发展,类似于卡门涡街。尾涡周期性的产生、演化和脱落产生的气动脱涡力直接作用于尾车,从而影响力学性能^[36-37]。

工况 1 下车体受到的脱涡力,包括气动横向力、侧滚力矩和摇头力矩如图 10 所示。可以发现,作用在尾车车体上的侧滚力矩、摇头力矩和横向力的时频变化基本一致,主要受列车尾流涡脱落频率的影响。此外,车体受到的脱涡力大小与速度相关,脱涡力频率随着列车运行速度的增加而线性增大,当风速最大时,气动横向力约为 $1.4\ \text{N}$,频率约为 $50\ \text{Hz}$ 。

在流体力学研究中,通常使用无量纲频率 S_t (斯特劳哈尔数)将涡激频率、流速和模型特征尺寸联系起来,计算如下

$$S_t = \frac{f_v H}{v} \quad (4)$$

式中: f_v 为静止物体的涡激频率。

当风速为 $36\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,气动横向力频率约为 $43\ \text{Hz}$, S_t 约为 0.194 ,而全尺寸列车列尾气动横向力频率约为 $1.7\ \text{Hz}$ ^[1],其 S_t 约为 0.188 ,两者较为接近,表明列车尾流的涡脱落频率仅与列车的气动外形和运行速度有关。另外,全尺寸列车列尾的气动横向力频率与其蛇行频率接近,会引起共振进而加剧列尾车体晃动。

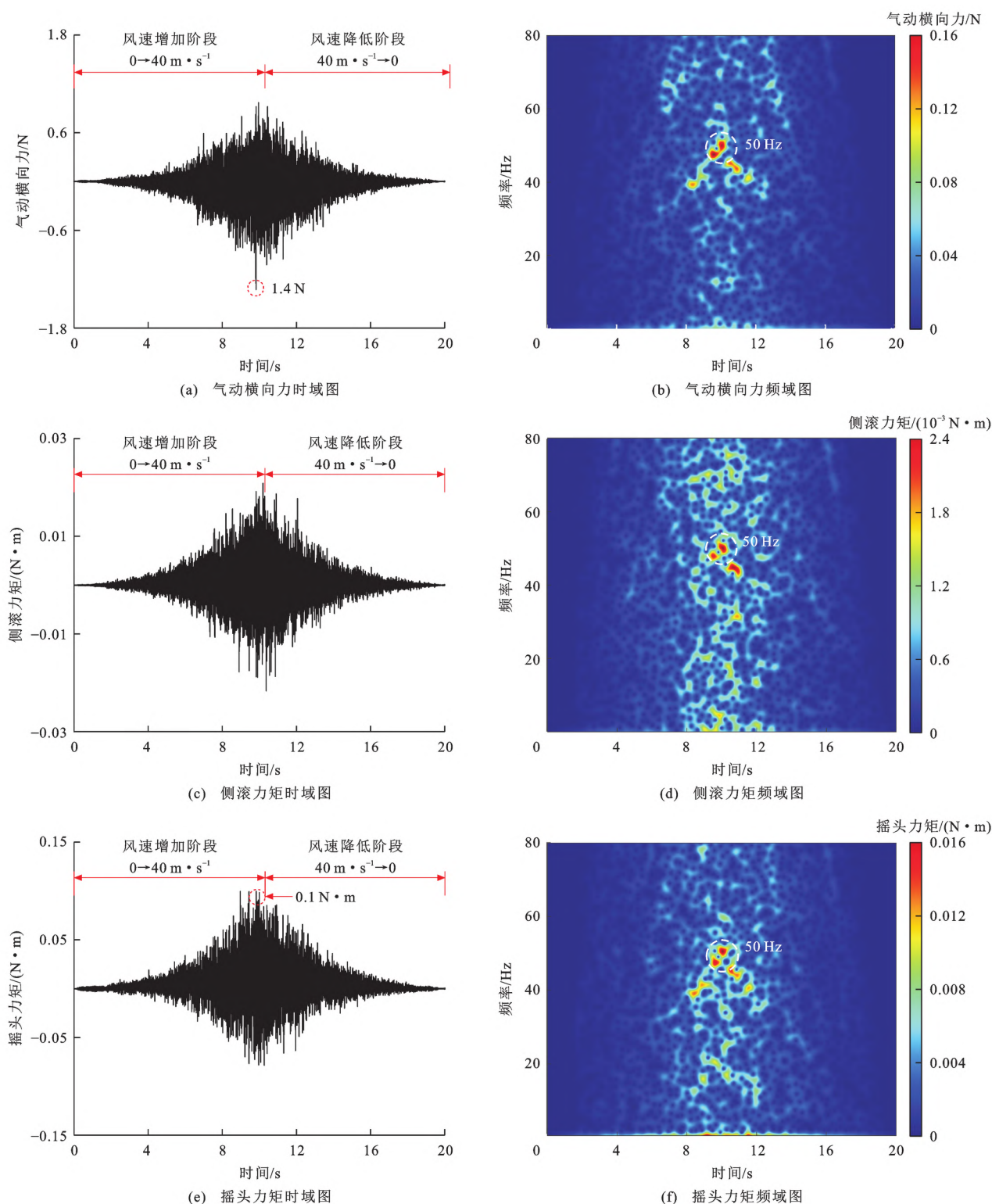


图 10 工况 1 下车体气动特征

Fig. 10 Aerodynamic characteristics of carbody under condition 1

工况 2 下气动横向力和横向加速度的变化规律如图 11 所示。横向气动力峰值与工况 1 近似,为 1.4 N,车体横向加速度的峰值约为 0.53g,横向位移幅值约为 1.7 mm。当风速达到 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,横向加速度约为 0.3g,与图 5(a) 风洞试验结果对应,

验证了模型的准确。结合图 10 进行分析,发现流固耦合后气动横向力的结果明显不同,表明周期性的横向气动力作用在车体上形成摇头与侧滚力矩,使车体发生周期性的晃动,即发生了涡激振动,进而改变了漩涡脱落频率,若列车行驶在单线隧道等气动

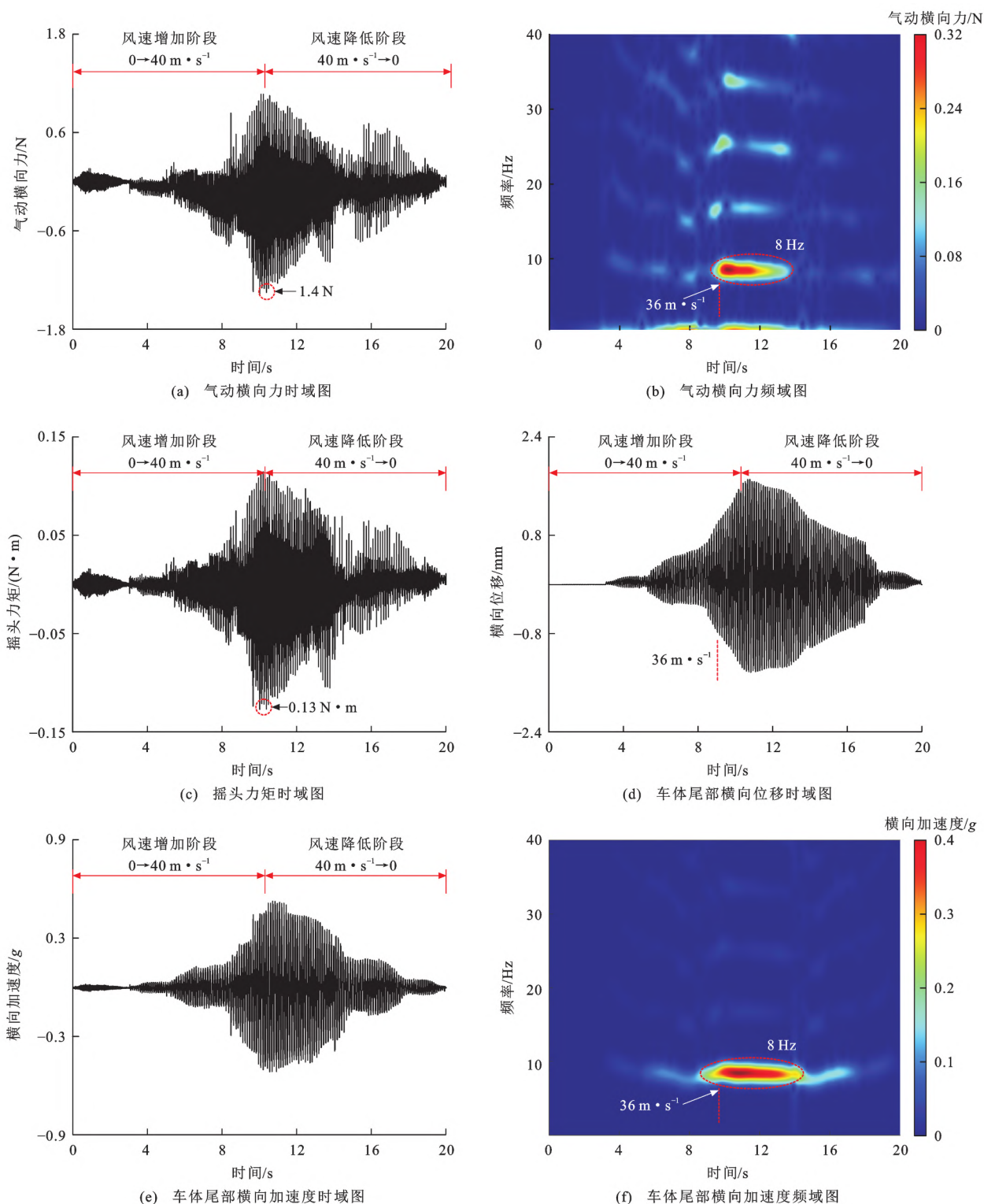


图 11 工况 2 下车体气动响应

Fig. 11 Aerodynamic responses of carbody under condition 2

效应明显的工况下时,由涡激振动引起的动车组尾车晃动会更为显著。另外,在 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度下,气动横向力频率与列车固有频率 8 Hz 一致,发生了锁频现象,且车体以 8 Hz 的主频大幅横向摆动,表明当气动横向力频率与车体横向固有频率接近时会发

生锁频现象,使涡激频率与车体横向固有频率保持一致,形成涡激共振进而加剧振动。

由图 5 和图 11(e)、(f)可以发现:风洞试验采集到的结果与数值模拟得到的列车车体振动加速度时域和频域结果基本吻合,且两者振动加速度峰值的

偏差小于 5%，振动主频均为列车固有频率，证明本文的研究选用的数值方法是可靠且准确的。

2.2.2 尾流分析

列车尾流呈现强非定常流动，尾涡结构的主要特点是成对且反向旋转的流向漩涡，漩涡的脱落呈现一定的周期性，不同时刻漩涡脱落的状态也不同。本节对工况 1 和 2 进行定风速计算，设置风速为 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，并对尾流场进行瞬态分析。

得到鼻尖处垂直截面下的尾涡涡量和车体表面涡量，如图 12 所示，可知：2 种工况下的尾流流

向规律基本一致，靠近车体表面的涡量较高，涡量强度随着尾涡向下游的扩散而逐渐降低；工况 1 的高涡量区域出现位置距离鼻尖为 H ，尾部的上表面和侧面均出现了较大面积的高涡量区域。由图 11(d) 可知，在工况 2 中车体横向振幅约为 1.4 mm ，此时高涡量区域出现位置距离鼻尖分别为 $0.36H$ ，更靠近鼻尖附近，同时高涡量区域面积相较工况 1 大幅降低。结果发现，尾流涡量与车体表面涡量规律一致，即车体振动会使高涡量分离位置后移。

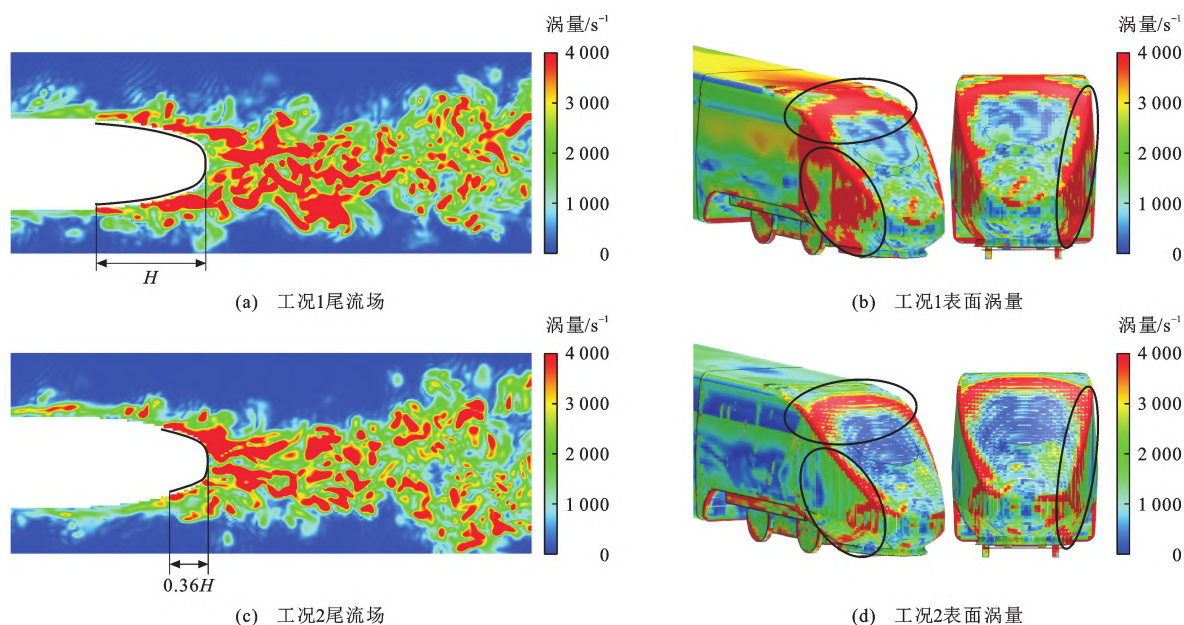


图 12 尾流场与车体表面涡量

Fig. 12 Vorticities of wake field and carbody surface

由于边界层等高剪切量区域同样会引起高涡量区域的产生，为了说明漩涡的演变及脱落过程，将涡量标注流向进行下一步的分析，如图 13 所示，可以发现，在标注点之前的涡量流向是紧贴车体表面的，即这一区域的高涡量是由于边界层的高剪切量引起的，而在标注点之后的涡量流向逐渐开始远离车体表面，即在此点发生了边界层的

分离，开始了漩涡的产生。这表明，相较于车体固定时，车体进行振动后，边界层分离点也发生了后移。结合图 10(c) 和 (e) 进行分析，工况 2 下摇头力矩峰值 $0.13 \text{ N} \cdot \text{m}$ 大于工况 1 下摇头力矩峰值 $0.10 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，即边界层分离点的后移使得因漩涡脱落产生的横向力的作用力臂增大，进而增大车体受到的摇头力矩，加剧振动。

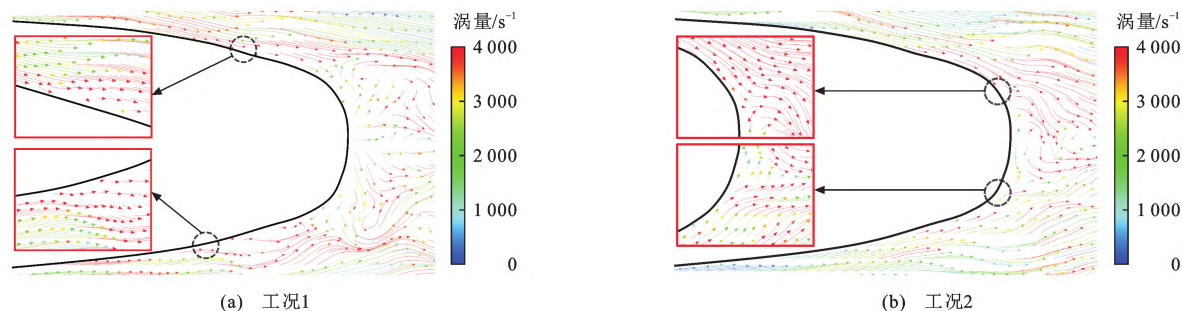


图 13 尾流场涡量流向

Fig. 13 Vorticity flow directions of wake field

3 结 语

(1)动车组尾部气流交替脱落形成周期性横向气动力,对于实际运行车体形成更为复杂的摇头与侧滚力矩引起尾车晃车,称之为涡激振动,单线隧道气动效应明显因而形成显著的动车组尾车晃车现象。

(2)试验与仿真表明涡激频率与动车组运行速度线性相关,但当涡激频率与车体横向固有振动频率(如蛇行或车体摇头频率)接近时产生锁频现象,该速度区域内涡激频率与车体横向固有振动频率一致,形成涡激共振,导致振动加剧。

(3)考虑到车体流固耦合振动,相较于车体横向固定假设计算工况,车体受到的涡激力幅值变化不大,尾涡结构不发生明显改变,但边界层分离点后移,横向力作用力臂加大增大车体摇头力矩。

(4)动车组流固耦合振动主要影响由车体尾涡分离引起的涡激力的作用频率,涡激共振导致系统振动加剧,因而尾车晃车空气动力学分析需采用车辆动力学与空气动力学相结合的流固耦合振动分析方法。

(5)本文的试验和仿真仅探究了简化的列车比例模型的流固耦合特征,后续将建立全尺寸多车编组的列车流固耦合模型,进一步研究气动外形、轨道激励、隧道截面积等关键因素对流固耦合振动的影响,揭示列车在隧道内的流固耦合振动机理。

参 考 文 献 :

References :

- [1] SONG Y D, QIN T, YAO Y, et al. Investigation on aerodynamic fluid-structure coupling vibration of 160 km/h EMU tail in single-track tunnels[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2024, 24(18): 2450197.
- [2] BAKER C. The flow around high speed trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6/7): 277-298.
- [3] HEMIDA H, BAKER C, GAO G J. The calculation of train slipstreams using large-eddy simulation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2014, 228(1): 25-36.
- [4] BELL J R, BURTON D, THOMPSON M C, et al. Moving model analysis of the slipstream and wake of a high-speed train[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 136: 127-137.
- [5] BELL J R, BURTON D, THOMPSON M C, et al. Dynamics of trailing vortices in the wake of a generic high-speed train[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 65: 238-256.
- [6] BELL J R, BURTON D, THOMPSON M C, et al. Flow topology and unsteady features of the wake of a generic high-speed train[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 61:

168-183.

- [7] BELL J R, BURTON D, THOMPSON M C, et al. The effect of tail geometry on the slipstream and unsteady wake structure of high-speed trains[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 83: 215-230.
- [8] CHIU T W, SQUIRE L C. An experimental study of the flow over a train in a crosswind at large yaw angles up to 90°[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 45(1): 47-74.
- [9] WEISE M, SCHÖBER M, ORELLANO A. Slipstream velocities induced by trains[C]//WSEAS. Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics. Agios Nikolaos: WSEAS, 2006: 26-28.
- [10] 潘永琛,姚建伟,刘涛,等.基于涡旋识别方法的高速列车尾涡结构的讨论[J].力学学报,2018,50(3):667-676.
PAN Yong-chen, YAO Jian-wei, LIU Tao, et al. Discussion on the wake vortex structure of a high speed train by vortex identification methods[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(3): 667-676.
- [11] 姚拴宝,郭迪龙,杨国伟.基于径向基函数网格变形的高速列车头型优化[J].力学学报,2013,45(6):982-986.
YAO Shuan-bao, GUO Di-long, YANG Guo-wei. Aerodynamic optimization of high-speed train based on RBF mesh deformation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(6): 982-986.
- [12] 姚拴宝,郭迪龙,杨国伟,等.高速列车气动阻力分布特性研究[J].铁道学报,2012,34(7):18-23.
YAO Shuan-bao, GUO Di-long, YANG Guo-wei, et al. Distribution of high-speed train aerodynamic drag[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 18-23.
- [13] 田红旗.中国高速轨道交通空气动力学研究进展及发展思考[J].中国工程科学,2015,17(4):30-41.
TIAN Hong-qi. Development of research on aerodynamics of high-speed rails in China[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(4): 30-41.
- [14] HEMIDA H, KRAJNOVIĆ S. LES study of the influence of the nose shape and yaw angles on flow structures around trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(1): 34-46.
- [15] FUJIMOTO H, MIYAMOTO M. Lateral vibration and its decreasing measure of a shinkansen train (decrease of train vibration with yaw damper between cars)[J]. Vehicle System Dynamics, 1996, 25(S1): 188-199.
- [16] DIEDRICHS B, BERG M, STICHEL S, et al. Vehicle dynamics of a high-speed passenger car due to aerodynamics inside tunnels[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2007, 221(4): 527-545.
- [17] DIEDRICHS B, KRAJNOVIĆ S, BERG M. On the aerodynamics of car body vibrations of high-speed trains cruising inside tunnels[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2008, 2(1): 51-75.

- [18] HEMIDA H, KRAJNOVIĆ S. Exploring flow structures around a simplified ICE2 train subjected to A 30° side wind using LES[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2009, 3(1): 28-41.
- [19] HEMIDA H. Large-eddy simulation of the flow around simplified high-speed trains under side wind conditions[D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2006.
- [20] HEMIDA H, BAKER C. Large-eddy simulation of the flow around a freight wagon subjected to a crosswind[J]. *Computers and Fluids*, 2010, 39(10): 1944-1956.
- [21] 马 静, 张 杰, 杨志刚. 横风下高速列车非定常空气动力特性研究[J]. *铁道学报*, 2008, 30(6): 109-114.
MA Jing, ZHANG Jie, YANG Zhi-gang. Study on the unsteady aerodynamic characteristics of a high-speed train under cross wind[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2008, 30(6): 109-114.
- [22] 杨志刚, 马 静, 陈 羽, 等. 横风中不同行驶工况下高速列车非定常空气动力特性[J]. *铁道学报*, 2010, 32(2): 18-23.
YANG Zhi-gang, MA Jing, CHEN Yu, et al. The unsteady aerodynamic characteristics of a high-speed train in different operating conditions under cross wind[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, 32(2): 18-23.
- [23] 鲍 龙. 隧道内高速列车外部绕流大涡模拟初探[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
BAO Long. A preliminary large eddy simulation research on the external flow of high-speed train inside tunnel[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013.
- [24] KHAYRULLINA A, BLOCKEN B, JANSSEN W, et al. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 139: 100-110.
- [25] 李 田. 高速列车流固耦合计算方法及动力学性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
LI Tian. Approaches and dynamic performances of high-speed train fluid-structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [26] 姚 远, 许振飞, 宋亚东, 等. 基于涡激振动的动车组隧道内列尾横向晃动机理[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(5): 114-124.
YAO Yuan, XU Zhen-fei, SONG Ya-dong, et al. Mechanism of train tail lateral sway of EMUs in tunnel based on vortex-induced vibration [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(5): 114-124.
- [27] 崔 涛, 张卫华, 孙帮成. 高速列车流固耦合振动的研究方法及其应用[J]. *铁道学报*, 2013, 35(4): 16-22.
- CUI Tao, ZHANG Wei-hua, SUN Bang-cheng. Research method and application of fluid-solid coupling vibration for high-speed train[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(4): 16-22.
- [28] 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 [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2022, 22(16): 2250185.
- [29] CHEN G, LI X B, LIU Z, et al. Dynamic analysis of the effect of nose length on train aerodynamic performance[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 184: 198-208.
- [30] 尹亚星, 王 彤, 王承彦, 等. 基于格子 Boltzmann 的混合过程建模与流致振动特性[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2023, 57(11): 2217-2226.
YIN Ya-xing, WANG Tong, WANG Cheng-yan, et al. Mixing process modeling and flow-induced vibration characteristics based on lattice Boltzmann method[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2023, 57(11): 2217-2226.
- [31] KUZNIK F, OBRECHT C, RUSAOUEN G, et al. LBM based flow simulation using GPU computing processor[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2010, 59(7): 2380-2392.
- [32] KERIMO J, GIRIMAJI S S. Boltzmann-BGK approach to simulating weakly compressible 3D turbulence: comparison between lattice Boltzmann and gas kinetic methods [J]. *Journal of Turbulence*, 2007, 8: N46.
- [33] SBRAGAGLIA M, BENZI R, BIFERALE L, et al. Generalized lattice Boltzmann method with multirange pseudopotential[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2007, 75(2): 026702.
- [34] NAKADE K. Numerical simulation of flow around railway vehicle in turbulent boundary layer over flat terrain [J]. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 2014, 55(4): 249-254.
- [35] ÖSTH J, KRAJNOVIĆ S. A study of the aerodynamics of a generic container freight wagon using large-eddy simulation[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, 44: 31-51.
- [36] YAO S B, SUN Z X, GUO D L, et al. Numerical study on wake characteristics of high-speed trains[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, 29(6): 811-822.
- [37] SCHULTE-WERNING B, HEINE C, MATSCHKE G. Unsteady wake flow characteristics of high-speed trains[J]. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 2003, 2(1): 332-333.