



群组列车小间距运行下的前车尾流影响研究

宋宗莹¹, 商雯斐^{2,3}, 吕 军¹, 刘 操^{2,3}, 王兴中¹

(1. 中国神华能源股份有限公司, 北京 100011;

2. 中南大学 重载快捷大功率电力机车全国重点实验室, 湖南 长沙 410075;

3. 中南大学 轨道交通列车安全保障技术国家地方联合工程研究中心, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 重载列车群组运行已成为未来铁路运输的潜在发展方向。相比于单车运行列车, 低间距运行群组列车存在后车头部抵近前车尾部运行的情况, 从而导致后方列车气动特性随之发生改变。文章基于某典型型号机车与敞车构成的“五车编组”简化模型, 采用 SST $k-\omega$ 湍流模型与基于 SST $k-\omega$ 的 IDDES 湍流模型的稳态、瞬态计算组合方法, 分别针对 80 km/h 条件下单车运行和 200 m 间距群组运行的重载列车进行了有无前车的气动性能对比研究。研究表明, 相比于单车运行, 列车群组运行可有效降低群组中次位列车及其后方列车的气动阻力。在 80 km/h 车速下, 后方列车整车气动阻力降低 8.30%, 其中头车气动阻力降幅达 9.05%, 尾车气动阻力降幅达 7.91%; 群组运行列车中前车尾部存在明显的长距离尾流拖曳区, 并在向下游延伸过程中在后方列车头车前部与后方列车附面层汇合, 形成联结前后列车的低速区域; 后方列车头部受高速气流冲击得到明显的减弱。此外, 群组运行次位列车前侧正压区同样出现压力小幅减弱的现象, 这说明前车尾流可有效减小后方列车运行时受气流冲击形成的正压分布区。车身表面压力分布也体现相似特征, 头车表面冲击气流形成的强正压区得到了一定缓解。因此, 构建列车群组可有效改善列车运行过程中气动特性, 进一步降低重载列车开行能耗, 提升重载列车开行效率。

关键词: 群组运行; 重载列车; 尾流; 行车间距; 数值模拟; 虚拟连挂; 重载铁路

中图分类号: U270.1¹

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)02-0034-09

0 引言

列车群组运行是铁路运输领域重要的发展趋势^[1], 旨在提高铁路系统的运输效率和容量, 优化运输网络的利用率。这种运行模式通过将多列列车按照一定的方式编组并同时行驶, 以实现更高效的运输效率, 减少拥堵和延误, 降低能耗, 提升运输系统的可靠性和安全性^[2]。群组运行虚拟连挂列车在运行过程中能自主动态灵活解编^[3], 该特点具有显著的优势, 并面临潜在的挑战。通过不断的技术创新和经验总结, 可以进一步推动列车群组运行的发展, 提升铁路运输系统的整体效率和服务水平。目前, 地铁群组运行的最小间距

可低至 40 m^[4]。

重载列车具备全天候运输^[5]、低污染、大载重等明显优势, 行业普遍开行 5 000 t 列车 (单元小列) 和 10 000 t 列车 (万吨大列)^[6]。我国铁路重载运输始于 20 世纪 80 年代, 发展晚于国际, 但凭借广阔的国土空间与丰富的物产资源, 展现出强劲的发展势头和巨大的市场潜力。国内首条双线电气化重载铁路“大秦线”的开通, 使得重载列车逐渐形成两种模式的在线运营^[7]。随着我国矿产资源开采量的增加, 对铁路运输能力要求更高, 亟待进一步推广重载运输技术, 而重载列车的群组运行可以大幅缓解运能紧张问题。因此, 准确掌握面向虚拟连挂的重载列车群组运行气动性能影响规律, 可以为虚拟连挂技术在重载铁路群组运行

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (2300-K1220003); 国家能源集团重点科技专项 (〔2022〕127 号/GJNY-22-7/2300-K1220053)

通信作者: 商雯斐, 男, 博士, 从事列车空气动力学研究; E-mail: shang.w.f@csu.edu.cn

引用格式: 宋宗莹, 商雯斐, 吕军, 等. 群组列车小间距运行下的前车尾流影响研究[J]. 机车电传动, 2025(2): 34-42.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.108.

Citation: SONG Zongying, SHANG Wenfei, LYU Jun, et al. Research on the influence of wake effects within train groups operating at small spacing [J]. Electric drive for locomotives, 2025(2): 34-42.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.108.

的推广应用提供有力的决策支撑, 为列车安全运行提供评估与保障。

目前, 针对列车群组运行的研究多聚焦于行车逻辑层面^[8-11], 文献[12]在1999年首次提出群组运行的概念, 通过“车-车通信”实现虚拟连挂两列列车之间的协同控制运行。文献[13]提出群组运行由于其编组特性, 可以使运输效率获得较大提升, 具有非常广泛的应用前景。文献[14]采用元胞自动机理论建立了城市轨道交通列车虚拟连挂运行的监测仿真系统, 通过该模型对轨道交通列车的集群化追踪运行特性进行了深入分析。文献[15]针对高速列车编组运行中的能量效率与乘坐舒适性优化问题, 提出了协同控制方法。该方法通过动态调节列车虚拟连挂间距, 实现了列车群组运行过程中能源消耗与乘客舒适度的双重优化目标。文献[16]分析了列车虚拟编组应用需求和解编过程。文献[17]研究反向采用群组运行方式的列车可以使线路的通过能力得到进一步提高。

为探索列车节能降耗的新途径, 从空气动力学特性出发为群组列车的运行策略优化提供新的研究方向。与单车运行不同, 低间距运行的群组列车存在后车头部抵近前车尾部的情况。在这种运行模式下, 后方重载列车可能驶入前方列车的尾流区, 导致周围流场受到扰动并发生变化, 进而影响后方列车的气动特性。目前, 关于群组列车运行的研究主要集中在汽车领域。例如, Fred Browand 等人^[18]进行了2辆货车队列行驶的道路试验, 当间距为3 m和4 m时, 前车油耗减少了9%, 后车油耗减少了11%, 队列行驶的平均油耗减少了10%。Richard Ramakers 等人^[19]在没有增加高速公路辅助设施的情况下, 在德国高速公路上进行了4辆间距为10 m的货车队列行驶数千公里的道路试验, 队列行驶车辆的燃油消耗降低了约10%。米珂等人^[20]以Ahmed车体模型为研究对象, 探究了汽车队列行驶时的气动特性, 发现当车辆纵向间距较小时, 车体阻力系数显著降低。文献[21]基于自动驾驶技术研究了多辆车之间的联动式减阻问题, 发现汽车群组运行不仅能减小行驶阻力, 还能保证行驶稳定性。文献[22]通过计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 分析了侧风和车辆间距对队列行驶货车的影响。结果表明, 两车和三车队列行驶的平均油耗分别降低了8.93%和15.01%。基于这些研究, 有必要进一步探讨低间距群组运行条件下重载列车气动阻力的变化趋势, 为研究提升重载列车群组运行的经济性指标提供参考。

针对列车空气动力学特性的研究方法, 国内外学者主要采用以下3种技术路径: 现场试验、风洞模拟和数值仿真^[23]。目前, 关于重载列车空气动力学特性的研究主要集中于单列车运行工况, 而对列车群组运行状态下的气动特性研究相对匮乏。因此, 本文基于某典型型号机车与敞车构成的“五车编组”缩比简化模

型, 采用SST $k-\omega$ 湍流模型与基于SST $k-\omega$ 的IDDES湍流模型的稳态、瞬态计算组合方法, 分别针对80 km/h条件下单车运行和200 m间距群组运行的重载列车进行有无前车的气动性能对比研究。这一研究成果能够为列车群组运行智能化辅助控制系统的研发工作提供借鉴和参考。

1 数值模拟方法

1.1 简化重载模型

在实际运输作业中, 载重量达到20 000 t的重载货运列车通常采用动力集中式编组方式, 即由若干台大功率机车牵引多节货运车辆组成完整的列车单元。当气流流经列车顶部约1个车厢长度后, 车体表面边界层的湍流结构及其相关气动力参数会达到相对稳定的状态^[24-25], 本文研究重点在于探究列车群组间距对气动特性的影响规律, 因此对实际运营的重载列车编组进行合理简化。将完整重载列车编组缩减为由5节车辆组成的典型单元 (1节机车+4节货车), 采用1列编组列车和2列编组列车进行对比分析, 同时简化列车的一些细微结构, 如管路系统、线路和缝隙等, 以减少计算资源, 便于网格划分。该模型由机车 (长 $4.55H$) 和4节货车 (长 $3.03H$) 共同组成, 其中列车高度 H 为特征长度, $H=4.69$ m, 5节编组列车模型总长度为 $16.67H$ 。作者研究团队以往研究成果表明^[26], 当群组运行间距为200 m时, 编组列车气动性能较优, 进一步减小间距并不会明显改善气动性能, 同时会增加安全隐患, 因此本文选取车距为200 m, 具体如图1所示。

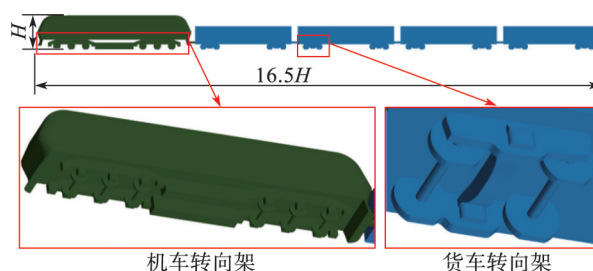


图1 简化重载列车模型

Fig. 1 Simplified model of heavy-duty train

1.2 仿真计算域与边界条件

为确保数值模拟结果能够准确反映高速列车周围的流场特征, 同时最大限度地降低边界效应带来的计算误差, 本研究对计算区域和边界条件进行设置 (如图2所示)。具体参数设置如下: 计算区域采用长方体结构, 列车头部距入口边界 $9H$, 尾部距出口边界 $18H$, 左右两侧各延伸 $7H$, 顶部边界距地面 $10H$ 。为便于网格划分, 在车轮底部与地面之间预留 $0.05H$ 的间隙。在数值模拟方法的选择上, 采用相对运动法进行求解, 即保持列车静止, 通过设置与列车运行速度相匹配的

来流速度模拟列车运行状态。边界条件的设置如下：计算区域前端（ABCD面）设为速度入口边界，来流速度 $U_{inf}=22.22$ m/s（对应列车运行速度 80 km/h）；后端（EFGH面）设为压力出口边界，静压值为 0 Pa（相对环

境大气压而言）；底面（BCGF面）设置为移动地面边界，移动速度与来流速度保持一致；列车表面设置为无滑移壁面边界；其余表面均设为对称边界条件。在群组运行工况下，两列列车之间的间距设置为 200 m。

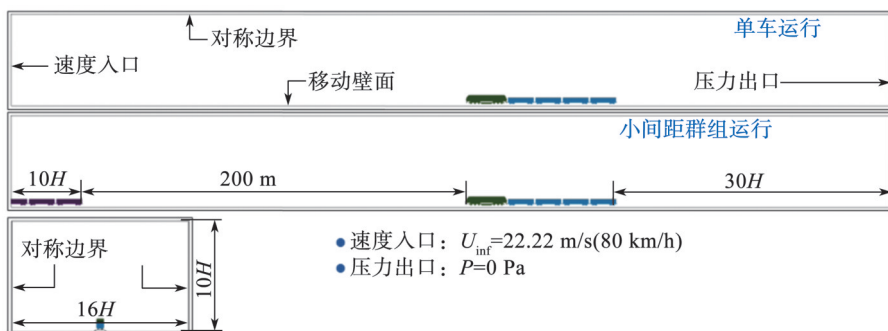


图2 群组运行计算域

Fig. 2 Computing domain for group operation

1.3 网格划分

本研究采用商业计算流体力学软件STAR-CCM+进行网格划分，选用以六面体网格为主的笛卡儿混合网格结构。为提高计算精度，对列车周围区域进行了多级网格加密处理，具体加密区域划分如图3所示。网格参数设置如下：列车主体表面网格尺寸为 12 mm，转向架区域由于几何结构复杂，采用更精细的 3 mm 网格尺寸。为准确捕捉近壁面流动特征，在列车表面设置了 10 层棱柱层网格，网格增长率控制在 1.5，其中第一层网格高度为 0.03 mm。该网格配置确保了近壁面 y^+ 值小于 1，满足所选湍流模型的精度要求。

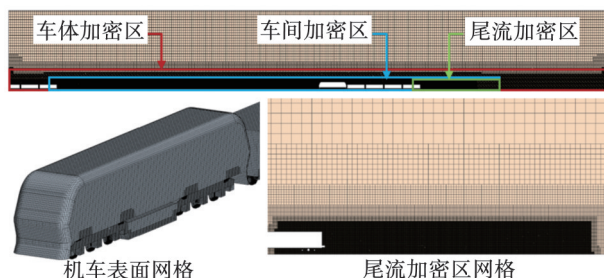


图3 计算域与车体网格

Fig. 3 Computing domain and carbody mesh

2 数值方法与网格无关性验证

本研究采用商业计算流体力学软件STAR-CCM+进行数值模拟计算。求解器选用基于压力的求解方法，其中对流项离散采用二阶迎风格式，“压力-速度场”的耦合通过SIMPLE算法实现。考虑到列车运行速度为 80 km/h（对应马赫数约为 0.065），在此低速流动条件下，空气的压缩性影响可以忽略不计，因此采用三维不可压缩 N-S 方程作为控制方程。数值模拟首先采用 RANS 计算初始化列车周围流场，然后激活采样平均，

进行非稳态仿真，仿真时间步长设置为 0.5 ms，同时在每个时间步长内迭代 12 次，非稳态计算总时长 2 s。根据列车运行参数计算得到的雷诺数 $Re=8.87 \times 10^5$ ，该值明显超过了临界雷诺数 2.5×10^5 [27]。这一结果表明，列车周围的流场已经进入自模化区域，此时流场结构对雷诺数的变化不再敏感 [28]。

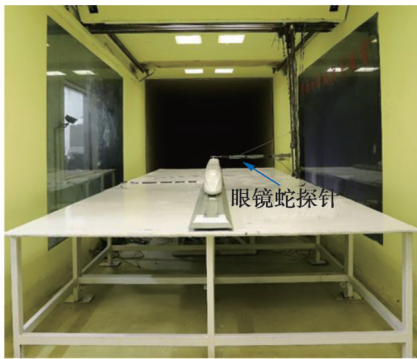
2.1 算法验证

为验证本文数值计算方法的正确性，选取在中国空气动力与研究发展中心开展的大型高速风洞试验结果（风速 $v=15$ m/s）进行比对，试验模型如图 5 所示。试验中采用 1:20 缩比模型，试验段尺寸为 15 m（长） $\times$ 3 m（宽） $\times$ 3 m（高），能够在湍流强度低于 0.5% 的情况下实现 94 m/s 的最大风速。在风洞中放置了一个测试台，以最大限度地减少地面边界层对列车模型的影响。为获取列车表面压力分布与气动阻力，在试验过程中采用安装在可移动桁架上眼镜蛇探针获取列车模型鼻尖前端 0.2 m（车高）处，高度间距 0.05 m 的多个测点位置的气流速度，探头的采样频率设置为 2 000 Hz，每次采样持续时间不少于 20 s。图 5 对比了数值仿真与列车风洞试验结果。由图 5 可知，对于列车中心线上的气流速度，在 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25 m 高度处的数值仿真结果与风洞试验结果的误差分别为 2.06%、0.48%、0.15%、0.42%、0.70%；对于头尾车气动阻力，头尾车气动阻力误差分别为 4.28% 和 2.64%。这表明数值仿真结果与风洞试验结果吻合较好，误差均在 5% 以内。由此可知，本文采用的数值仿真方法能保证较高的准确性和可靠性。图 5(b) 中气动阻力系数为无量纲值 C_d ，定义为

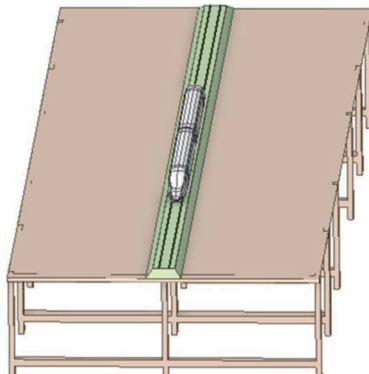
$$C_d = \frac{F_d}{0.5\rho v^2 S} \quad (1)$$

式中： F_d 为气动阻力； ρ 为参考密度， $\rho=1.225$ kg/m³； v 为参考速度，取 $v=15$ m/s； S 为参考面积，即列车横

截面积。



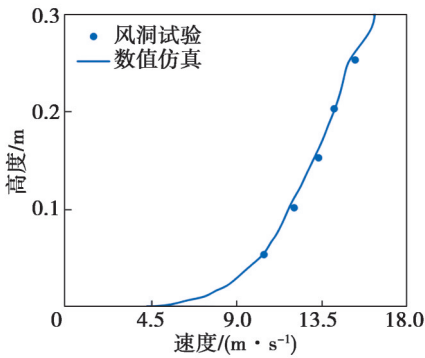
(a) 风洞试验布置



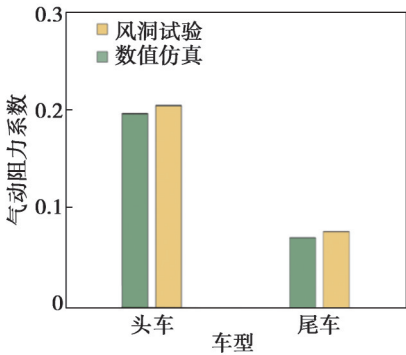
(b) 数值仿真模型

图4 风洞试验与数值仿真模型

Fig. 4 Wind tunnel experiment and numerical simulation model



(a) 速度分布



(b) 气动阻力系数

图5 风洞试验验证

Fig. 5 Wind tunnel experimental verification

2.2 网格无关性验证

为评估网格尺度对数值模拟结果的影响，构建了3种不同精度的网格——粗网格（3 745万单元）、中等网格（6 766万单元）和精细网格（9 640万单元），各网格划分的关键参数如表1所示。通过对比分析不同网格精度下的头车气动阻力系数（如图6所示）与货车气动阻力系数（如表2所示），发现粗网格计算结果存在较大偏差，而中等网格与精细网格的气动阻力计算结果差异小于5%，两者均呈现出良好的收敛性。考虑到计算效率与精度的平衡，中等精度的网格系统既能保证计算结果的可靠性，又能显著降低计算资源消耗，因此其被选定为后续数值模拟研究的基准网格方案。

表1 3种网格关键参数

Table 1 Key parameters under three mesh conditions			
项目参数	粗糙网格	中等网格	精细网格
最小单元尺寸/mm	6	3	3
加密区数量	3	3	4
第一层高度/mm	0.03	0.03	0.03
网格数量	3 745 万	6 766 万	9 640 万

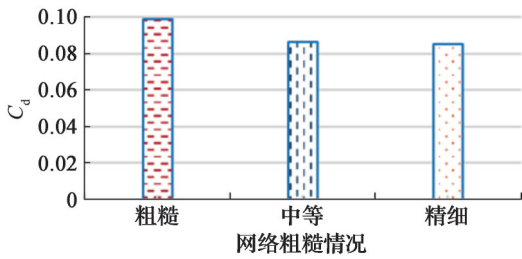


图6 不同网格精度下头车气动阻力系数 C_d 对比

Fig. 6 Comparison of aerodynamic drag coefficients (C_d) for head car with different mesh accuracy

表2 3种网格下货车气动阻力系数 C_d

Table 2 Aerodynamic drag coefficient (C_d) for trailer under three mesh conditions			
车辆	粗糙网格	中等网格	精细网格
货车1	0.008 4	0.006 0	0.006 1
货车2	0.012 3	0.011 4	0.011 3
货车3	0.015 2	0.014 1	0.013 8
货车4	0.032 0	0.031 6	0.031 5

3 结果与讨论

3.1 气动力对比分析

表3为在80 km/h车速下列车群组运行工况中后车所受气动阻力与单车运行工况所受气动阻力的对比。由表3可知，群组运行工况下后方列车整车气动阻力降低8.30%。列车气动阻力主要集中在头尾车处，单车运行工况下头车气动阻力系数为0.083 9，尾车阻力系数为0.031 6，而在群组运行工况下，后车头车气动阻力

系数为0.076 3, 尾车气动阻力系数为0.029 1。其中, 头车气动阻力降幅达9.05%, 尾车气动阻力降幅达7.91%。两种工况下在“车2”处的气动阻力变化最为明显, 降幅达到了13.33%, 但“车2”所受气动阻力的大小在整列列车中较低, 不到整体气动阻力的5%。

表3 不同运行工况下列车气动阻力系数 C_d 对比

Table 3 Comparison of aerodynamic drag coefficient (C_d) for train under different operating conditions

工况	车1	车2	车3	车4	车5	合计
单车运行	0.083 9	0.006 0	0.011 4	0.014 1	0.031 6	0.147 0
群组运行	0.076 3	0.005 2	0.011 1	0.013 1	0.029 1	0.134 8
气动阻力变化/%	-9.056	-13.33	-2.63	-7.14	-7.91	-8.30

对气动阻力进行摩擦阻力与压差阻力分解, 分解结果如图7和图8所示。由图7和图8可知: ①头车所受摩擦阻力和压差阻力最大, “车2”所受摩擦阻力和压差阻力最低, 并且随着“车2”至“车5”延长而缓慢升高; ②群组运行的后车“车1”至“车5”的摩擦阻力和压差阻力均低于单车运行工况下的“车1”至

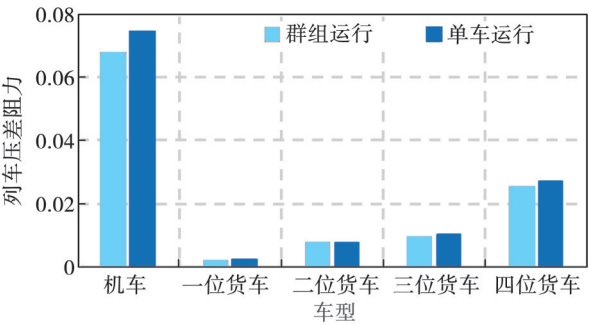


图7 不同运行条件下列车压差阻力分布

Fig. 7 Pressure differential resistance distribution of train under different operating conditions

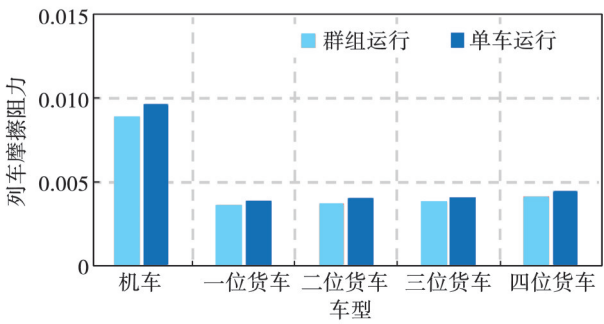


图8 不同运行条件下列车摩擦阻力分布

Fig. 8 Friction resistance distribution of train under different operating conditions

“车5”; ③对比两种工况可知, 头尾车压差阻力和摩擦阻力差异最大, 其中头车压差阻力和摩擦阻力分别降低9.8%和8.3%, 尾车压差阻力和摩擦阻力分别降低7.4%和7.6%。头尾车气动阻力变化主要由压差阻力部分造成, 摩擦阻力仅占整体气动阻力的10%左右。

3.2 流场分析

图9为 Q 准则中 $Q=100\text{ s}^{-2}$ 情况下列车周围流动分离情况。由图9(a)可知, 在编组运行工况下, 前车在尾部发生强烈的流动分离, 群组运行工况下的前方列车形成的涡旋延续至后方列车机车上方, 并对下游货车产生连续影响。同时, 对比图9(b)和图9(c)可知, 群组运行列车后车前端流动分离区域显著大于单车运行工况, 因此当重载列车进行群组运行时, 后车的气动性能势必发生改变。

进一步对比车辆中间截面处采样时段内的时均流向速度, 图10为两种工况下列车周围流向速度云图。由图10可知, 速度来流首先冲击列车头部, 在机车车体上端发生流动分离, 形成一个高速气流区域, 在机车下端受到车体强烈阻挡作用, 流速减缓。在列车底

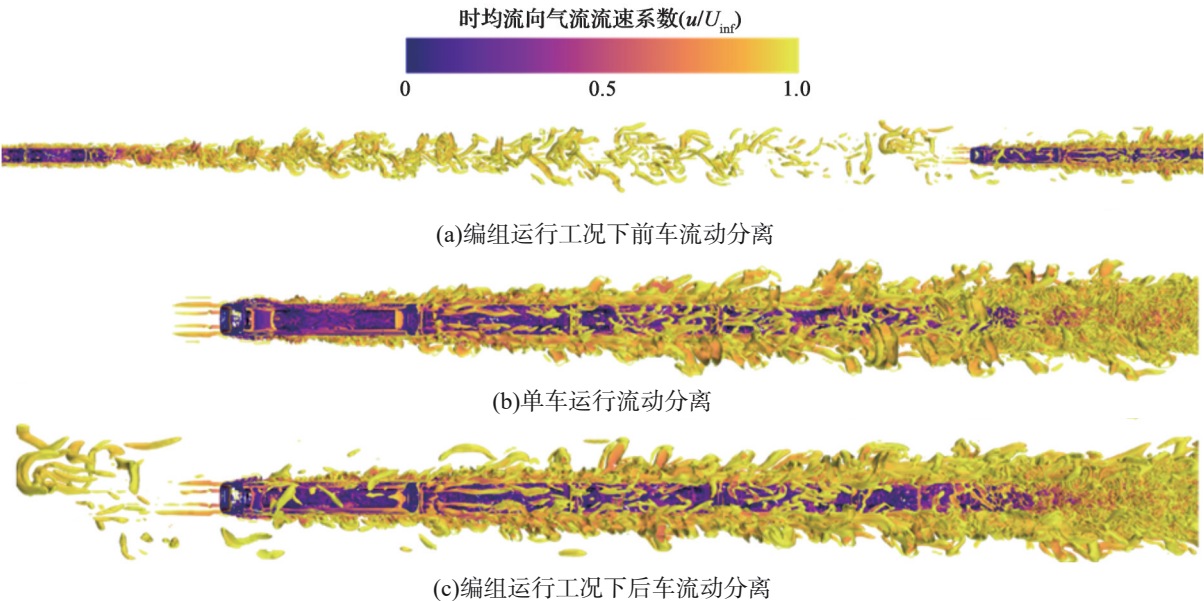


图9 $Q=100\text{ s}^{-2}$ 情况下列车周围流动分离

Fig. 9 Flow separation around train at $Q=100\text{ s}^{-2}$

部由于受到排障器的影响, 在底部形成一个狭长高速气流区, 而在后端空气流速较低。对比图 10(a)和图 10(b)两种工况下的重载列车前端速度分布可以发现, 相比于单车运行列车, 群组运行列车中前车尾部存在明显长距离尾流拖曳区, 并在向下游延伸过程中在后方

列车头车前部与附面层汇合, 形成联结前、后列车低速气流区域, 并且其头车后方和车尾处低流速气流区域也更大, 后方列车头部受高速气流冲击明显减弱。由此可见, 群组运行会对后方列车周围流场产生影响。

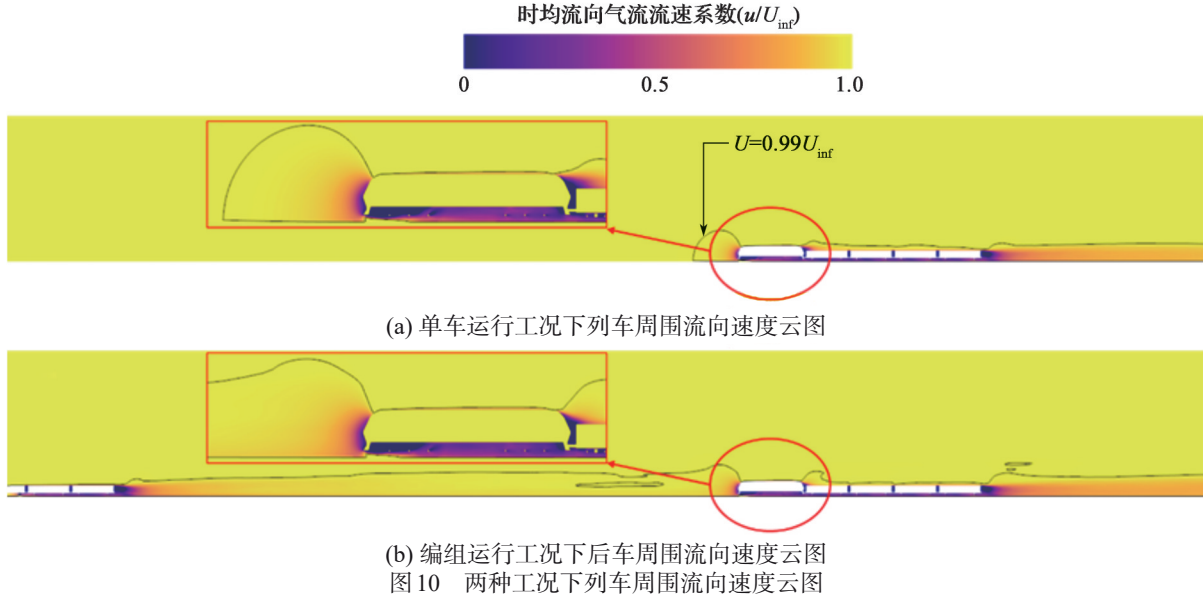


Fig. 10 Contour plot of flow velocity around train under two modes

3.3 压力分析

列车前后表面的压差是列车气动阻力的主要来源, 本节对头车表面及其周围的压力分布进行分析。图 11 为两种工况下列车周围压力分布云图与压力系数 C_p 等值线。其中, C_p 定义为

$$C_p = \frac{P - P_0}{0.5\rho v^2} \quad (2)$$

式中: P 为压力; P_0 为初始压力, 取 $P_0=0$ Pa。

由图 11 可知, 在头车下端, 由于受到来流气流的

直接冲击作用, 其附近出现大范围高正压区, 而在头车顶部流线型位置末端出现流动分离现象, 存在一个高负压区; 同时, 在头车一位端转向架结构内部, 由于排障器等零部件的影响也存在一个大范围负压区。对比两种工况下的重载列车前端压力分布可知, 当重载列车群组运行时, 由于前车的流动分离作用改变了后车前端周围压力分布特性, 后车前端的高正压区压力略有降低, 列车周围压力波动情况得到有效抑制, 这将有效减小后车头车所受到的气动阻力。

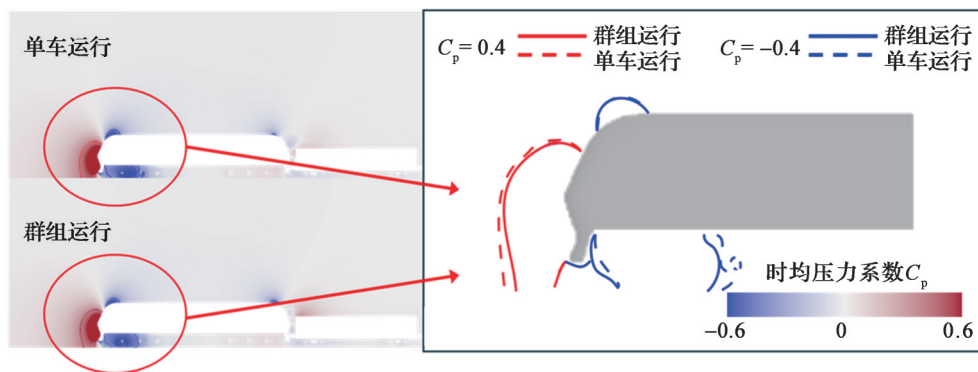


图 11 两种工况下列车周围压力分布云图

Fig. 11 Contour plot of pressure distribution around train under two modes

图 12 为两种工况下头车表面压力分布云图。由图 12 可知, 在头车下端, 受到来流气流的直接冲击作用, 头车表面出现大范围高正压区, 而在头车顶部流线型位置末端出现流动分离, 头车前端顶部存在一个高负压区, 同时在头车一位端转向架结构两侧表面存在大

范围的低负压区。

图 13 为单车运行列车头车表面压力与群组运行后车头车表面压力差值的分布特性。由图 13 可知, 单车运行工况下头车底部的高正压区压力明显大于列车群组运行后车头车底部的压力, 这是由于当列车群组运

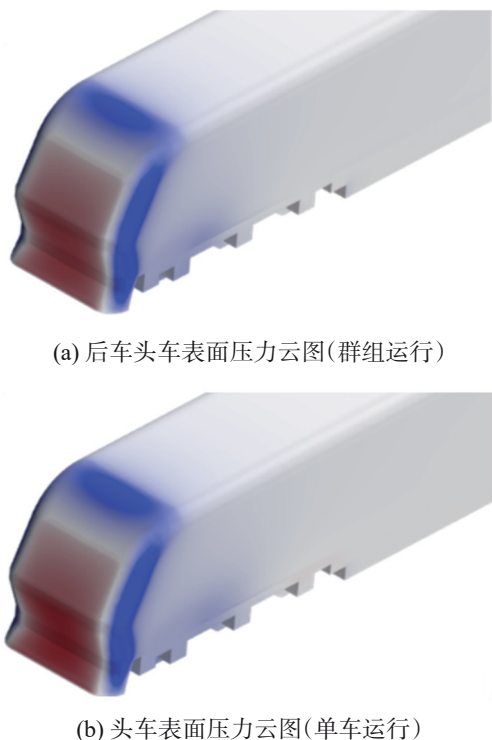


图 12 两种工况下头车表面压力分布云图

Fig. 12 Contour plot of surface pressure distribution on head car under two modes

行时, 前车的流动分离作用改变了后车前端流场特性; 同时, 相较于群组运行工况, 单车运行工况下头车在流线型末端与两侧的低负压区压力更低, 在一位端转向架中部和两端的压力分布显著恶化。因此, 构建列车群组可有效改善列车运行过程中的气动特性, 进一步降低重载列车开行能耗, 提升重载列车开行效率。

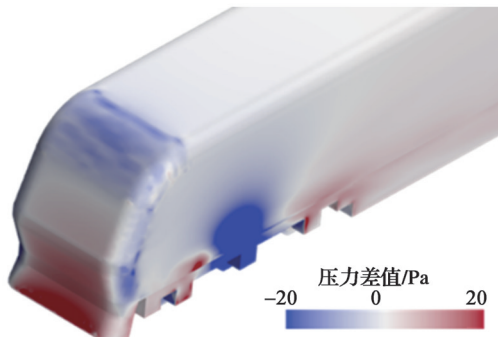


图 13 单车运行列车头车表面压力与群组运行后车头车表面压力差值分布特性

Fig. 13 Distribution characteristics of difference between surface pressure on the head car in single train operation and surface pressure of the head car of following train in group operation

图 14 为两种运行工况下车体表面纵向对称线的压力系数分布, 其中横坐标表示测点与列车模型鼻尖点的距离。由图 14 可知, 相较于单车运行工况, 群组运行工况下鼻尖点的正压较小, 原因是前车对气流的阻碍, 起到“破风”作用, 减小了后车受到的空气阻力。在列车群组运行工况下, 气流经过车体流线型区域时产生的流动分

离现象得到了一定缓解, 车头和车头连接处的负压分布绝对值小于单车运行工况。因此, 群组运行可有效改善列车表面压力分布, 从而实现减阻节能。

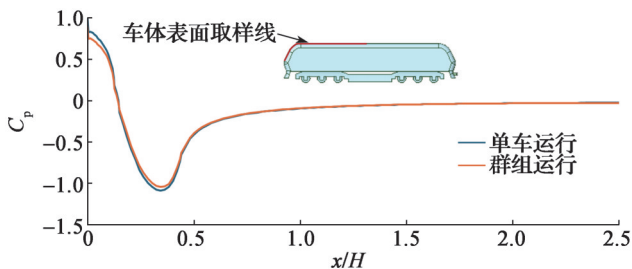


图 14 单车运行与群组运行头车纵向对称线上压力系数分布
Fig. 14 Distribution of pressure coefficient on longitudinal symmetrical line of the head car in single train operation and group operation

4 结论

本文基于某典型型号机车与敞车构成的“五车编组”缩比简化模型, 采用 SST $k-\omega$ 湍流模型与基于 SST $k-\omega$ 的 IDDES 湍流模型的稳态、瞬态计算组合方法, 分别针对 80 km/h 条件下单车运行和 200 m 间距群组运行的重载列车进行了有无前车的气动性能对比研究。结论如下:

①相较于单车运行, 列车群组运行可有效降低群组中次车及其后方列车的气动阻力。在 80 km/h 车速下, 后方列车整车气动阻力降低 8.30%, 并主要集中在头尾车处。其中, 头车气动阻力降幅达 9.06%, 尾车气动阻力降幅达 7.91%。对气动阻力进行摩擦阻力与压差阻力分解, 可以发现头尾车气动阻力变化主要来源于压差阻力部分。

②在列车编组运行工况下, 前车在尾部发生强烈的流动分离, 脱离的尾涡将会影响后车流场。相比于单车运行列车, 群组运行列车中前车尾部存在明显的长距离尾流拖曳区, 并在向下流延过程中在后方列车头车前部与附面层汇合, 形成联结前后列车的低速气流区域, 后方列车头部受高速气流冲击明显减弱。

③对比压力分布可以发现, 单车运行工况下头车底部的高正压区压力明显大于群组运行后车车头底部; 同时, 相较于群组运行工况, 单车运行工况下头车在流线型末端与两侧的低负压区压力更低, 在一位端转向架中部和两端的压力分布显著恶化。因此, 构建列车群组可有效改善列车运行过程中的气动特性, 进一步降低重载列车开行能耗, 提升重载列车开行效率。

参考文献:

- [1] 王大龙. 重载列车技术应用热点分析[J]. 价值工程, 2022, 41(33): 143-145.
WANG Dalong. Analysis of hot spots in heavy haul train technology application[J]. Value engineering, 2022, 41(33): 143-145.

- [2] 蒋辉. 基于铁路现代化体系建设的科研管理模式创新与实践[J]. 中国铁路, 2024(1): 1-6.
JIANG Hui. Innovation and practice of scientific research management mode based on railway modernization system construction[J]. China railways, 2024(1): 1-6.
- [3] 曾庆文, 彭其渊. 考虑多编组的城轨列车跨线运营开行方案研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(3): 878-889.
ZENG Qinweng, PENG Qiyuan. Cross-line train plan in urban rail transit considering the multi-group train[J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20(3): 878-889.
- [4] 北京新闻. 首列智慧地铁列车来了! 发车间隔可缩减到65秒, 两车间距降至40米![EB/OL]. (2021-10-11)[2024-05-09]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA3OTg1NTAzNw==&mid=2651088609&idx=1&sn=184dc7f8e18033fcbad49f5f5ea255e3&chksm=845dea33b32a632524b27f5595e93161c0d9bcc2bf4fb527e7e5b2a8fd9a891a8d03d489e21c&scene=27.
- [5] 周杰. 关于宁静铁路发展万吨重载运输的思考[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(7): 157-159.
ZHOU Jie. Reflections on the development of 10,000-ton heavy duty transportation in Ningjing railway[J]. Inner Mongolia coal economy, 2022(7): 157-159.
- [6] 王志美, 于凌志. 考虑车辆资源的重载铁路重空列协同运输组织[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(12): 4971-4982.
WANG Zhimei, YU Linzhi. Heavy-haul railway cooperative transportation organization considering the utilization of vehicle resources[J]. Journal of railway science and engineering, 2024, 21(12): 4971-4982.
- [7] 夏胜利, 杨浩, 张进川, 等. 我国重载铁路发展模式研究[J]. 铁道运输与经济, 2011, 33(9): 9-13.
XIA Shengli, YANG Hao, ZHANG Jinchuan, et al. Research on heavy-haul railway development mode in China[J]. Railway transport and economy, 2011, 33(9): 9-13.
- [8] STANDER T, DREWES J, Braun I, et al. Operational and safety concepts for railway operation with virtual train-sets[J]. IFAC proceedings volumes, 2006, 39(12): 261-266. DOI: 10.3182/20060829-3-NL-2908.00046.
- [9] MEO C D, VAIO M D, FLAMMINI F, et al. ERTMS/ETCS virtual coupling: Proof of concept and numerical analysis[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2020, 21(6): 2545-2556. DOI: 10.1109/TITS.2019.2920290.
- [10] FELEZ J, KIM Y, BORRELLI F. A model predictive control approach for virtual coupling in railways[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2019, 20(7): 2728-2739. DOI: 10.1109/TITS.2019.2914910.
- [11] 荀径, 陈明亮, 宁滨, 等. 虚拟重联条件下地铁列车追踪运行性能衡量[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 96-103.
XUN Jin, CHEN Mingliang, NING Bin, et al. Train tracking performance measurement under virtual coupling in subway[J]. Journal of Beijing jiaotong university, 2019, 43(1): 96-103.
- [12] BOCK U, BIKKER G. Design and development of a future freight train concept: virtually coupled train formations[J]. International federation of accountants proceedings volumes, 2000, 33(9): 395-400. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)38176-4.
- [13] AOUN J, QUAGLIETTA E, GOVERDE RMP. Investigating market potentials and operational scenarios of virtual coupling railway signaling[J]. Transportation research board, 2020, 2674(8): 799-812. DOI: 10.1177/0361198120925074.
- [14] 张英贵, 赵明慧, 张云丽. 面向虚拟连挂的城轨列车群组追踪运行仿真研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(1): 199-209.
ZHANG Yinggui, ZHAO Minghui, ZHANG Yunli. Simulation research on train group tracking operation with virtual coupling for urban mass rail transit[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2024, 24(1): 199-209.
- [15] 王平平. 高速列车群的能效与舒适度联合优化协同控制策略研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
WANG Pingping. Research on cooperative control strategy for joint optimization of energy efficiency and comfort of multiple high-speed trains[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [16] 纪玉清, 欧冬秀, 常鸣, 等. 列车虚拟编组应用需求及关键技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(11): 57-61.
JI Yuqing, OU Dongxiu, CHANG Ming, et al. Research on application requirements and key technologies of train virtual formation[J]. Urban mass transit, 2022, 25(11): 57-61.
- [17] 曹源, 温佳坤, 马连川. 重大疫情下的列车动态编组与调度[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 120-128.
CAO Yuan, WEN Jiakun, MA Lianchuan. Dynamic marshalling and scheduling of trains in major epidemics[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2020, 20(3): 120-128.
- [18] BROWANDF, MCARTHUR J, RADOVICH C. Fuel saving achieved in the field of two tandems trucks: UCB-ITS-PRR2004-20[R]. UC Berkeley: California partners for advanced transportation technology, 2004.
- [19] RAMAKERS R, HENNING K, GIES S, et al. Electronically coupled truck platoons on German highways[C]. IEEE international conference on systems, man and cybernetics. San Antonio: IEEE, 2009. DOI: 10.1109/ICSMC. 2009. 5346393.
- [20] 米珂. 汽车队列行驶的气动特性及间距优化研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2022.
MI Ke. Aerodynamic characteristics and spacing optimization in vehicle platooning[D]. Liuzhou: Guannxi University of Science and Technology, 2022.
- [21] 龚晓岩. 风雨环境下自动驾驶队列的气动特性及稳定性研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2023.

- GONG Xiaoyan. Aerodynamic interaction and dynamic stability analysis for self-driving vehicle platoons under adverse weather conditions[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2023.
- [22] 许香港. 侧向风及车间距对货车列队行驶影响分析[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- XU Xianggang. Impact of side wind and inter-truck spacing on aerodynamic performance in heavy-duty vehicle platooning[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [23] 肖京平, 黄志祥, 陈立. 高速列车空气动力学研究技术综述[J]. 力学与实践, 2013, 35(2): 1-12.
- XIAO Jingpin, HUANG Zhixiang, CHEN Li. Review of aerodynamic investigations for high speed train[J]. Mechanics in engineering, 2013, 35(2): 1-12.
- [24] 郝艳红. 横风作用下的高速列车气动特性及运行安全性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- XI Yanhong. Research on aerodynamic characteristics and operation safety of high-speed trains under cross winds[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [25] KHIER W, BREUER M, DURST F. Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study[J]. Computers & fluids, 2000, 29(2): 179-195. DOI: 10.1016/S0045-7930(99)00008-0.
- [26] 吕军, 项涛, 宋宗莹, 等. 群组列车前后车间距对重载列车气动特性影响[J]. 机车电传动, 2024(5): 75-81.
- LYU Jun, XIANG Tao, SONG Zhongyin, et al. Impacts of inter-train distances on aerodynamic drag reduction in heavy-haul train groups[J]. Electric drive for locomotives, 2024(5): 75-81.
- [27] CEN/TC 256. Railway applications-aerodynamics: part 4: requirements and test procedures for aerodynamics on open track: EN 14607-4: 2024[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2024.
- [28] ZHANG Lei, YANG Mingzhi, LIANG Xifeng. Experimental study on the effect of wind angles on pressure distribution of train streamlined zone and train aerodynamic forces [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2018, 174: 330-343. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.01.024.

Research on the influence of wake effects within train groups operating at small spacing

SONG Zongying¹, SHANG Wenfei^{2,3}, LYU Jun¹, LIU Cao^{2,3}, WANG Xingzhong¹

(1. China Shenhua Energy Company Limited, Beijing 100011, China; 2. State Key Laboratory of Heavy-duty and Express High-power Electric Locomotive, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 3. National & Local Joint Engineering Research Center of Safety Technology for Rail Vehicle, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: The operation of heavy-duty train groups is emerging as a potential development trend for future railway transportation. Compared to single-train operation, trains running in groups at small spacing often result in situations where the front end of a following train approaches to the rear end of the preceding train, leading to changes in the aerodynamic characteristics of the following train. This paper presents a comparative study on the aerodynamic performance of heavy-duty trains with and without a preceding train, focusing on single-train operation versus group operation of trains at a 200 m spacing, both at 80 km/h. Based on a simplified model of a five-car formation consisting of a typical locomotive and open wagons, a calculation method that combines steady and transient states was utilized, leveraging the SST $k-\omega$ turbulence model and the IDDES turbulence model based on SST $k-\omega$. The research results indicate that, compared to single-train operation, the group operation of trains can effectively reduce aerodynamic resistance for trains starting from the second position in the group. At 80 km/h, the aerodynamic resistance to following trains decreased by 8.30%, with reductions of 9.05% for head cars and 7.91% for tail cars. A clear long-distance wake drag zone is identified at the rear end of preceding trains during group operation. This zone extends downstream and merges with the boundary layer of the following trains at the front of their head cars, creating a low-speed area connecting the preceding and following trains. As a result, the impact of high-speed airflow on the front end of the following trains is significantly reduced. In addition, the positive pressure zone at the front of the second train during group operation experiences a slight pressure decrease, indicating that the wake of the preceding train can effectively reduce the positive pressure distribution zone formed by the airflow impact on the following train during operation. The pressure distribution on the carbody surface exhibits similar characteristics, as the strong positive pressure zone created by airflow impact on the head car surface is somewhat alleviated. Therefore, operating train groups can effectively improve aerodynamic characteristics during train operation, offering an option to further reduce energy consumption and enhance the efficiency of heavy-duty train operation.

Keywords: group operation; heavy-duty train; wake; operation spacing; numerical simulation; virtual coupling; heavy-duty railway