

高速列车明线运行流场结构与阻力特征研究

刘 祥

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年2月17日; 录用日期: 2025年2月28日; 发布日期: 2025年3月24日

摘 要

随着我国高速列车运行速度的持续提升, 空气动力学问题对列车动力性能及能耗的影响日益显著。本研究基于IDDES湍流模拟方法, 结合三维CFD软件, 针对350 km/h高速列车在明线条件下的空气动力学特性展开数值模拟, 重点解析其流场演变规律与阻力分布特征。通过构建1:1标准动车组模型, 分析了列车周围速度场、压力场及涡结构的分布规律, 并探讨了各车厢与部件的阻力贡献。结果表明: 列车压差阻力占总阻力的80%; 各车厢中, 头、尾车阻力占比最大(分别为21.73%和16.06%); 各部件中车体和转向架空气阻力所占比例较高。研究揭示了高速列车空气阻力的分布机制, 为气动减阻设计与能耗优化提供了理论依据。

关键词

三维数值计算, 高速列车, 流场结构, 阻力

Research on the Flow Field Structure and Resistance Characteristics of High-Speed Trains Operating in Open Air

Xiang Liu

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 17th, 2025; accepted: Feb. 28th, 2025; published: Mar. 24th, 2025

Abstract

With the continuous improvement of the operating speed of high-speed trains in China, the impact of aerodynamic problems on the power performance and energy consumption of trains is becoming increasingly significant. This study is based on the IDDES turbulence simulation method, combined with the three-dimensional CFD software STAR CCM+, to numerically simulate the aerodynamic

characteristics of a 350 km/h high-speed train under open track conditions, with a focus on analyzing its flow field evolution and resistance distribution characteristics. By constructing a 1:1 standard high-speed train model, the distribution patterns of velocity field, pressure field, and vortex structure around the train were analyzed, and the resistance contributions of each carriage and component were explored. The results show that the differential pressure resistance of the train accounts for 80% of the total resistance; Among the carriages, the head and tail cars have the highest proportion of resistance (21.73% and 16.06% respectively); The proportion of air resistance in the body and bogie of each component is relatively high. The study reveals the distribution mechanism of air resistance in high-speed trains, providing a theoretical basis for aerodynamic drag reduction design and energy consumption optimization.

Keywords

3D Numerical Calculation, High-Speed Train, Flow Field Structure, Resistance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2004 年我国系统引进德日法等国高速列车核心技术, 至 2007 年第六次铁路大提速期间, 成功实现 CRH 系列动车组(运营时速 300 公里)的自主化生产, 这标志着我国轨道交通装备技术体系正式迈入国际领先行列。随着复兴号电力动车组的成功研制和运营, 我国高速列车的运行速度不断提高, 导致出现诸多空气动力学问题, 包括列车周围的流场变化及空气阻力的变化。

高速列车运行过程中, 由于滑流引起的列车风和尾流变化引起一系列空气动力学问题, 国内外学者针对这一问题进行了大量研究。Schulte-Werning [1] 等人研究 ICE2 尾车表面流动结构和流动分离特征; 刘雯[2] 等人通过 POD 方法对 CRH380A 列车尾流区的非定常流动进行了降阶分析, 确立了高速列车尾涡脱落频率与运行速度的线性关系。

随着高铁技术的持续进步和运行速度的显著提高, 列车所受到的空气阻力对其动力表现及能源消耗的影响日益凸显。因此, 精确测定高铁列车的空气阻力, 对于优化列车设计和降低能耗具有关键作用。空气阻力的测算是一个涉及流体力学和空气动力学等多个学科的复杂且关键的问题。以往的研究主要依赖于实车测试或风洞实验来估算列车的空气阻力, 然而这些方法通常耗时且成本高昂。鉴于此, 本文将运用数值模拟技术, 对高速列车在明线上的流场特性及空气阻力进行深入分析。

国内外研究学者针对高速列车的空气动力学问题进行分类归纳[3]。王雷[4] 等人指出, 实验数据显示, 当列车时速从 350 km 提升至 400 km 时, 总阻力增幅达 28.8%, 其中气动分项贡献度达 92%。在更高速工况下, 气动阻力优化已成为列车节能技术攻关的核心方向。运行列车受到的气动阻力与列车运行速度平方成正比, 并随着列车运行速度提升及气动外形的系统性优化, 其空气动力学特性将呈现显著改变。余以正[5] 等学者通过对比分析普速与高速列车气动阻力在车体各部位的分布特征发现: 相较于传统列车, 高速列车得益于优化的头尾流线型构造与表面平整化处理, 实现了两项关键改进——其车体表面突出物比例趋近于零值状态, 同时头尾车厢在整体气动阻力中的贡献度亦呈显著下降态势。

当列车运行时, 影响列车空气阻力的因素有很多, 比如运行速度、各车辆的外部尺寸、隧道等。在研究列车空气阻力问题时, 可以先研究静态绕流等特定条件下单列稳态行驶的列车作为研究对象, 再进行非稳态或者列车运动及列车交会工况。列车空气阻力由列车空气摩擦阻力(列车运行时的切应力)和列

车空气压差阻力(列车运行时的表面压力)组成[6]。研究学者不仅使用三维流体仿真软件进行数值模拟,也有学者使用一维程序数值模拟,邓虹[7]等人使用一维可压缩非定常不等熵流动模型特征线模拟隧道压力波,进而计算列车通过高原高铁隧道时隧道长度、坡型、坡度、海拔和列车速度对列车平均空气阻力、最大空气阻力以及隧道平均空气阻力因子、最大空气阻力因子4个空气阻力指标的影响规律。

由此可见,尽管国内外学者在高速列车空气动力学领域已开展了广泛研究,但针对高速列车的非定常CFD模拟及其流动分离机制的探讨仍较为有限。为此,本文使用改进的延迟分离涡模拟方法(IDDES),在平衡计算精度与效率的前提下,通过数值模拟手段系统性探讨高速列车外流场结构特征与气动阻力分布特征。

2. 计算方法

本文采用基于有限体积法的流体仿真软件 STAR CCM+进行高速列车空气阻力的数值模拟。采用列车静止、给定来流速度的方法模拟列车运行的流动特征,分析了高速列车明线运行时的空气阻力基本特征。

2.1. 列车模型

本研究针对某型高速列车明线运行工况下的气动阻力特性展开分析,选取我国标准动车组 1:1 实车模型构建数值计算模型(如图1所示)。实验模型采用八编组列车,考虑到受电弓及风挡装置对气动阻力的影响,完整保留了两者的结构特征。列车采用四动四拖混合编组模式,各车厢按运行方向自头车至尾车依次编号为1~8号。受电弓分别安装在3号与6号车厢顶部。在转向架区域两侧加装裙板结构实现半包覆设计,形成完整的气动外形特征。实验设定车体特征高度 H (地面至车顶垂直距离)为10.82 m,测得列车横截面积为11.93 m²。



Figure 1. Train aerodynamic model
图1. 列车气动模型

2.2. 计算区域及其边界条件

计算域尺寸为 $74.3H$ (长) $\times 20H$ (宽) $\times 11H$ (高),来流距离车头鼻尖 $15H$,出口距离尾车鼻尖 $40H$,见图2,计算域包含路堤和轨道板,不含轨道(但预留轨道所需空间)。定义列车中心为 $x=0$, $y=0$,轮轨接触点为 $z=0$ 。定义空气流动方向为 x 轴正方向,竖直方向为 z 轴正方向, y 轴正方向可由右手定则确定。

本节采用列车静止、给定来流速度的方法模拟列车运行的流动特征。数值模型边界条件设置如下:顶部及两侧采用滑移边界条件;车体结构表面应用无滑移静止壁面条件。为准确模拟列车运行产生的地面效应,特别将轨道系统(含地面基础、路基结构及轨道板)构建为移动壁面边界,其速度矢量与来流方向保持同步,同时满足无滑移条件。

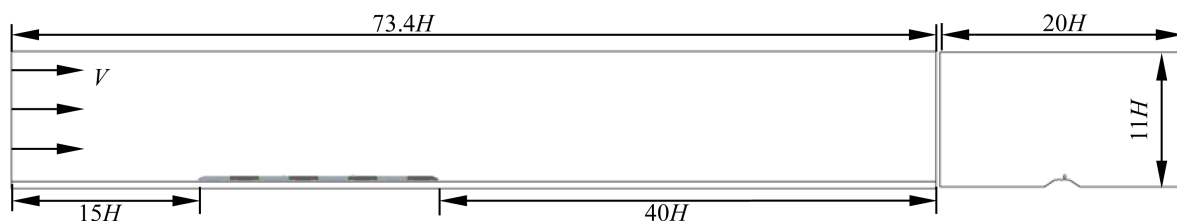


Figure 2. Schematic diagram of computational domain
图2. 计算域示意图

2.3. 网格划分

本文使用流体仿真软件 STAR CCM+进行网格划分，计算区域网格采用切割体 Trimmer 网格，壁面采用棱柱层 Prism 网格，总网格数为 2120w。列车纵断面和车头及其部分部件表面网格见图 3。为准确捕获车头、车尾的流动特征，对相应区域实施局部网格加密处理。针对转向架区域、受电弓装置及车厢连接处的风挡结构等关键部位，考虑到其流场存在显著流动梯度变化且易产生涡旋现象的特点，专门设计了符合空气动力学特性的加密策略。其中车尾因尾流结构较为复杂，特别采用了多层级加密方案进行精细化模拟。

为解析车身近壁面流动信息，采用 Prism 网格。壁面共设置 6 层 Prism 网格，第一层网格对应的无量纲数 y^+ 均落在标准壁面函数最佳适用范围之内($y^+ = 30\sim150$)，具体数据见表 1。

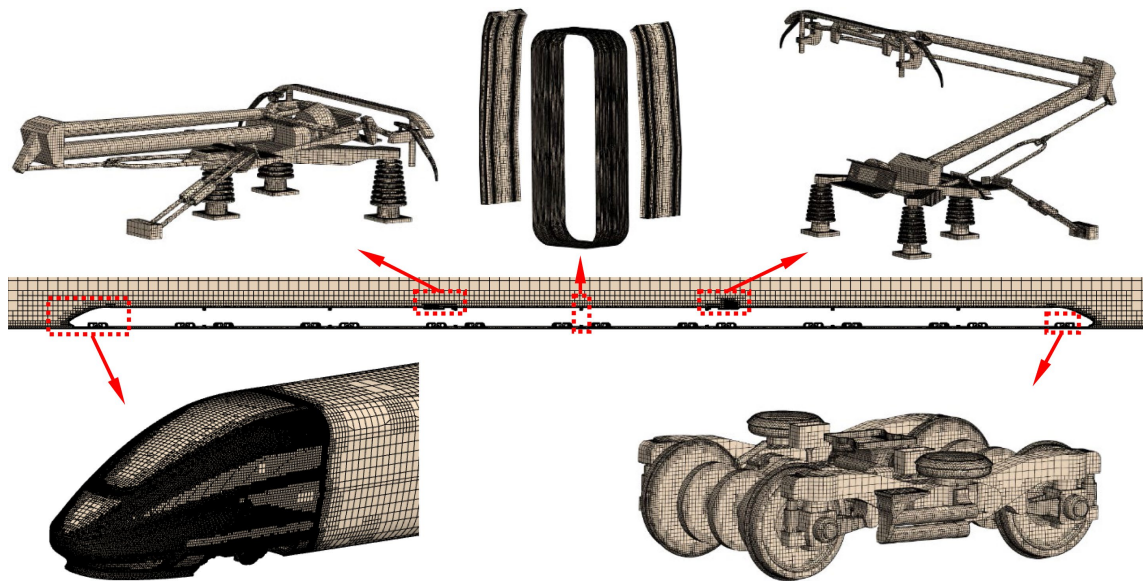


Figure 3. Grid display
图 3. 网格展示

Table 1. Prism layer mesh design
表 1. 棱柱层网格设计

Prism 网格	壁面 y^+	拉伸比	拉伸层数
头车	50	1.2	6
其余车	40	1.2	6
地面	90	1.5	6
路基	80	1.5	6

2.4. 数值求解方法

本模型采用静态绕流方式进行，为使流场得到初始解，先使用 RANS 进行计算，待计算稳定后，再使用分离涡模拟方法进行续算非定常流场[8]，时间步选取 $2E-3$ ，最大内部迭代为 8。

本文设定列车运行速度为 350 km/h (对应马赫数为 0.29)，计算采用三维可压缩 N-S 方程组作为控制方程。通过分别运用基于 SST $k-\omega$ 两方程湍流模型的 RANS 方法和 DES 分离涡模拟技术，对明线工况下

高速列车气动阻力特性展开对比研究。数值求解过程中，壁面边界处理选用全 $y+$ 壁面函数策略，方程组求解采用 SIMPLE 压力 - 速度分离求解算法完成计算迭代。

2.5. 数值验证

为验证本文模型设置的合理性与正确性，使用三编组高速列车风洞试验进行验证。列车模型放置于 $8\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的风洞试验室内，采用前端吹风的形式来模拟列车运动，列车模型采用三编组，无受电弓等细节结构，但保留了列车转向架和风挡，来流风速为 60 m/s ，采用 1:8 缩尺试验，遵循缩尺试验的相似原理 [9]，数值模拟计算区域见图 4。表 2 为风洞试验数值模拟结果，其中将头车阻力系数试验值进行归一化处理，其余系数依此进行加密处理。可以看到头车、中间车和尾车对阻力的捕捉能力较好，证明该数值模拟方法和网格划分是合理的。

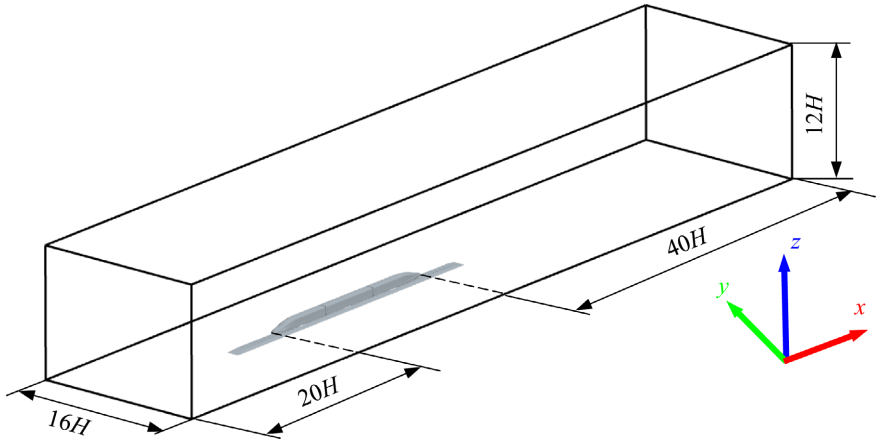


Figure 4. Schematic diagram of wind tunnel test calculation domain
图 4. 风洞试验计算域示意图

Table 2. Simulation results
表 2. 仿真结果

车厢	试验值	仿真阻力系数结果	相对误差/%
头车	1	0.9399	-6.03
中间车	0.6563	0.6314	-3.76
尾车	0.9567	0.9071	-5.16

3. 计算结果和分析

3.1. 高速列车外部流动特征

本节对高速列车外部空气流动特点进行分析，当列车速度为速度 350 km/h 时，揭示速度场和压力场的分布特征与列车外形之间的关系。

3.1.1. 速度场

图 5 为高速列车模型处在时速 350 公里来流区域下的 $y = 0\text{ m}$ 平面的速度云图，(a)、(b)分别为车体周围速度分布和尾车鼻尖附近的速度分布。由图 5(a)详细表示了各个关键部件附近的流场形态，由于头车鼻尖和排障器区域对空气流动造成阻碍，使该区域流速趋于零，进而使该处压力增大。受到阻碍影响的流体沿车头向上和沿车底向下发展，向上发展的流体同时向车头两侧流动，向下发展的流体受到转向

架区域的影响, 流速有所降低。流体在通过列车肩部以后, 沿车体壁面向后传播, 并形成边界层, 越靠近列车壁面的流体, 速度越低, 远离列车表面的流体逐渐恢复到来流速度。随着列车运动, 车尾形成的边界层最厚, 但在经过风挡和受电弓等结构时, 边界层会发生紊乱, 同时在列车受电弓区域形成较为复杂的涡旋流动区域, 使该处的流体流速降低, 由于该模型采用全风挡结构, 故在该处只形成单一的涡旋结构。

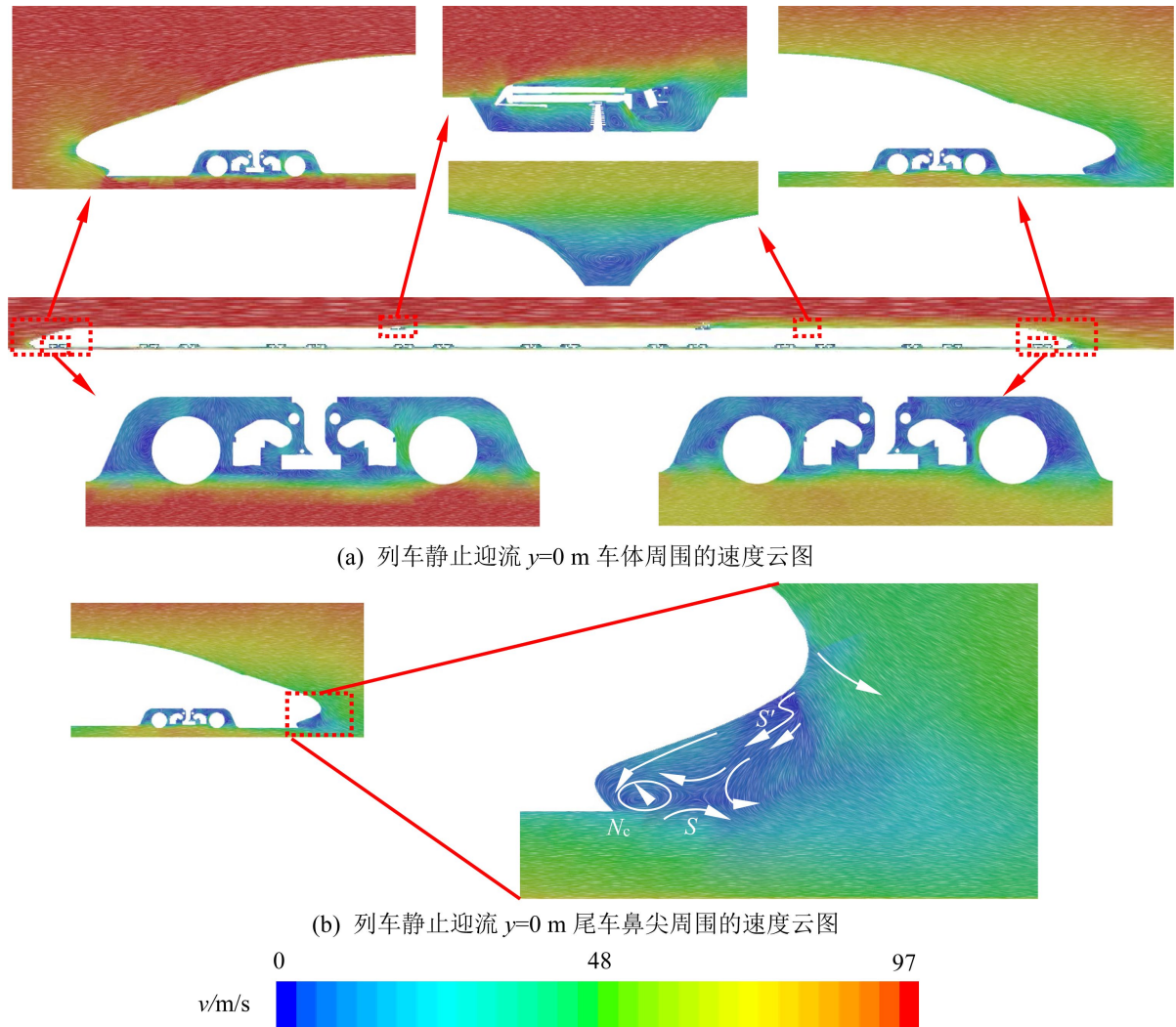


Figure 5. Velocity cloud map of $y = 0$ section

图 5. $y = 0$ 截面的速度云图

在列车底部与轨道板之间, 流动空间较小, 流速较为稳定, 随着气流的向后发展, 流速逐渐降低。在转向架区域的流动过程中, 由于转向架系统结构复杂, 对空气的流动影响较大, 转向架舱的空气流速几乎为零。

由图 5(b)可知, 在流体流经尾车鼻尖处时, 会发生流动分离。首先, 尾车顶面的气流沿着尾车传播, 流体在壁面摩擦力和逆向压差力的双重共同影响下发生流动分离, 形成半鞍点 S' , 一部分流体向尾车后方传播, 另一部分流体向排障器区域发展, 这一部分流体与车底流体汇合, 形成中心点 V_1 和鞍点 S , 最终流体均向列车尾部发展。

3.1.2. 压力场

图 6 为 $y=0$ 截面的压力云图。由图可知, 气流以时速 350 公里的速度运动, 并在列车前端形成一个由气流停滞形成的滞止区, 使该处压力增大, 随着气流沿着列车上表面运动, 在司机室下端出现一个压力变化区域, 这是因为气流在此处形成了一个回流, 在头车肩部形成一个较大范围的负压区。当气流沿着列车上表面流动, 流经风挡和受电弓等部件时, 气流受到干扰, 使压力出现变化, 例如, 受电弓迎流区的滞止区域, 由于流速降低形成正压区, 当流体绕过到达背风区, 形成一个背风区, 压力变为负压。尾车与头车相近, 均出现明显的正负压区域。每个部件单独或者列车整车前后将产生正负压差, 造成了压差阻力, 最终形成列车空气阻力。列车底部压力接近参考值, 在流经转向架区域时会出现较明显的压力变化。

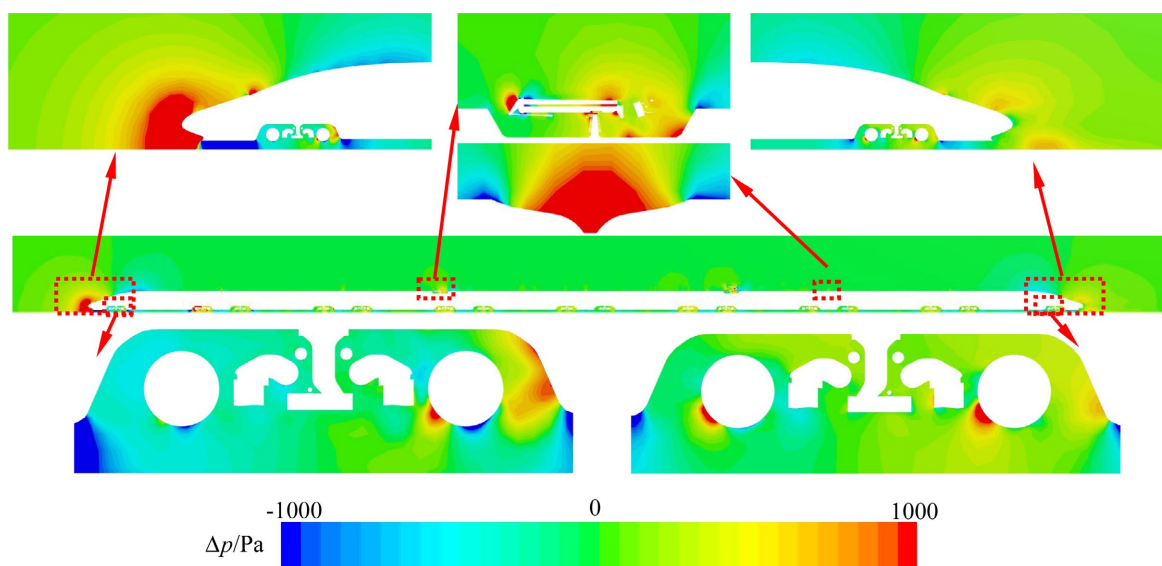


Figure 6. Pressure cloud map of $y=0$ section

图 6. $y=0$ 截面的压力云图

3.1.3. Q 等值面

图 7 为列车车身 Q 等值面, 其中使用涡量幅值对其进行着色。由图可知, 在列车表面存在大量高强度的小涡, 在列车周围区域形成的涡结构强度较小, 但其尺度较大。流体流经列车时, 头车涡结构仅存在车底, 在传至 3 车时, 涡结构已经溢出至车厢中部, 至尾车处, 涡结构已覆盖整个尾车流线型头部, 这些涡结构作用在车身表面时, 造成列车的气动载荷, 影响列车运行稳定性。另外, 流体经过 3 车和 6 车受电弓时, 产生大量高强度、大尺寸的涡结构, 并向后传播。

3.2. 高速列车阻力特征

本节对来流速度为 350 km/h 时, 高速列车车厢及其各部件阻力进行分析, 揭示了单列车明线运行的空气阻力分布特征。

3.2.1. 压力分布特征

图 8 分别给出了列车在定常与非定常流场中沿着车身周围的压力分布。计算结果表明, 列车车身周围压力分布与图 6 所示相同, 车头位置呈现先正后负, 车尾位置呈现先负后正的分布特征, 并且车头位置的正负峰值均比尾车峰值大, 中间车(2~7 车)压力分布趋于 0 Pa, 在 7 个风挡位置出现较大的压力波

动；比较定常流场和非定常流场的压力变化，可以发现，定常与非定常压力峰峰值相近，具有相似的压力分布特征，但非定常流场中靠近尾车的 3 个风挡压力出现波动，这是由于非定常流场中车身周围滑流区域对风挡造成的干扰。

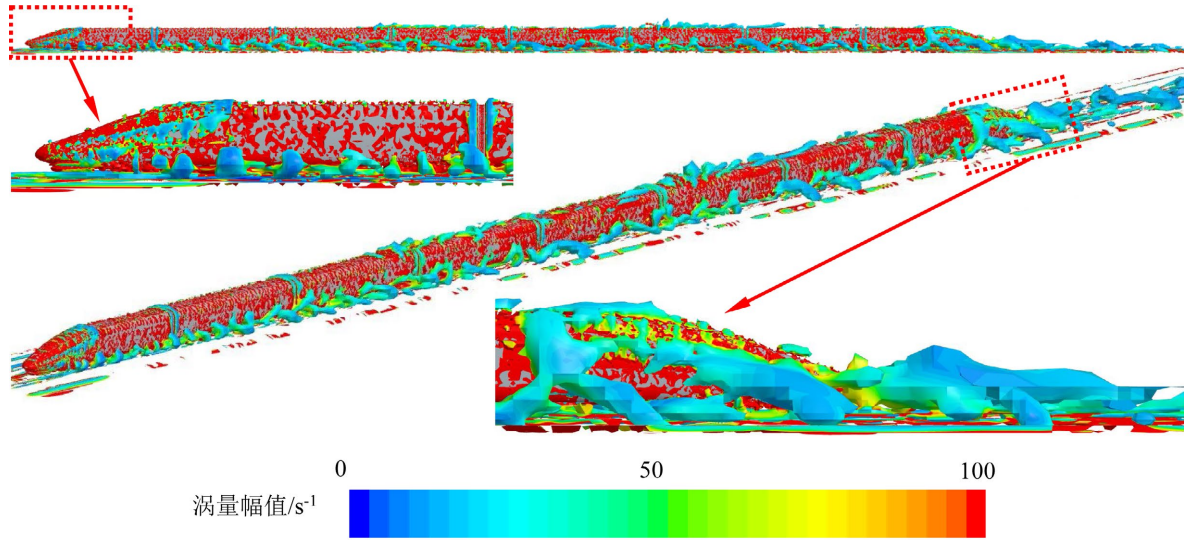


Figure 7. Vortex structure distribution around the vehicle
图 7. 车周涡结构分布

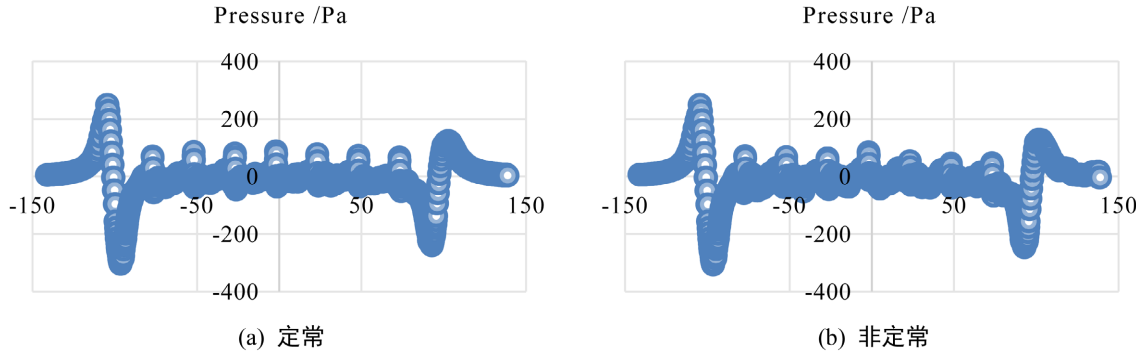


Figure 8. Train flow pressure distribution
图 8. 列车流向压力分布

3.2.2. 阻力分布特征

图 9(a)分别给出了列车以时速 350 公里运行时各车厢空气阻力占总空气阻力的比值情况。由图可知，头车和尾车阻力占比最大，分别占比为 21.73%和 16.06%，对于高速列车气动阻力主要包含为压差阻力和摩擦阻力，压差阻力占比较大，其中压差阻力主要集中在头尾车，故使头尾车空气阻力占比较大。由于 3 车和 6 车带有受电弓系统，其空气阻力占比较大，其余车厢总占比为 36.03%，其中 4 车空气阻力所占比例最少，为 7.41%。图 9(b)为列车空气阻力分量(压差阻力及摩擦阻力)占比，由图可知，高速列车压差阻力占比较大，约占总阻力的 80%。

图 9(c)给出列车各部件空气阻力占比。由图可知，从各部件来看，列车车厢阻力占比较大，为 53.03%；转向架空气阻力比例约占 40%，这主要是由于转向架区域流场结构复杂，导致转向架前后压差较大；受电弓和风挡所占比例较小，两者之和约占 8%。

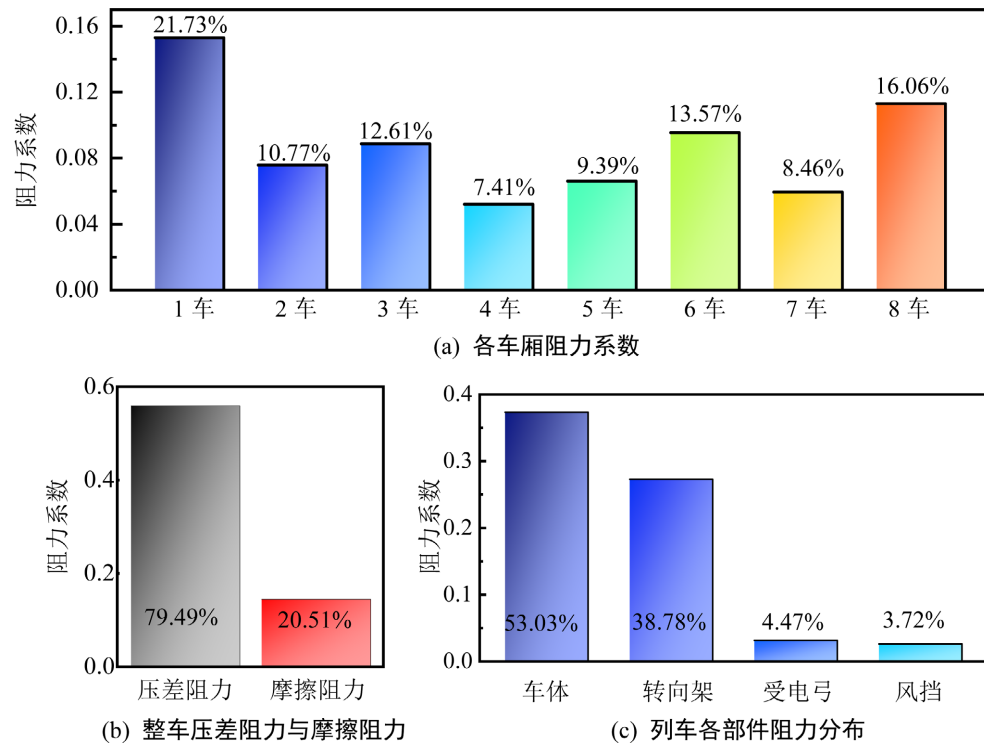


Figure 9. Distribution characteristics of train resistance coefficient

图 9. 列车阻力系数分布特征

4. 结论

本文通过数值模拟系统研究了高速列车明线运行时的流场特性与阻力分布。研究显示：1) 头车与尾车因滞止区与流动分离效应，阻力占比显著高于中间车厢；2) 压差阻力是总阻力的主要来源(占比约 80%)；3) 转向架区域的复杂流场导致其阻力占比达 40%，是优化的重点区域；4) 受电弓与风挡对总阻力影响较小，但仍需关注其局部流动干扰和噪声效应。研究成果为高速列车气动外形优化与减阻设计提供了重要参考，未来可进一步结合交会工况与非定常流动机制深入研究，以提升高速列车能效与运行稳定性。

参考文献

- [1] Schulte-Werning, B., Heine, C. and Matschke, G. (2003) Unsteady Wake Flow Characteristics of High-Speed Trains. *PAMM*, **2**, 332-333. <https://doi.org/10.1002/pamm.200310150>
- [2] 刘雯, 郭迪龙, 张子健, 等. 基于 POD 分解的高速列车尾流动力学特性研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(9): 49-57.
- [3] Raghunathan, R.S., Kim, H. and Setoguchi, T. (2002) Aerodynamics of High-Speed Railway Train. *Progress in Aerospace Sciences*, **38**, 469-514. [https://doi.org/10.1016/s0376-0421\(02\)00029-5](https://doi.org/10.1016/s0376-0421(02)00029-5)
- [4] 王雷, 于东明, 丁勇. 动车组运营速度由 350 km/h 提升至 400 km/h 可行性研究[J]. 机车电传动, 2020(2): 17-22.
- [5] 余以正, 刘堂红, 夏玉涛, 等. 更高速(400+ km/h)列车气动减阻技术发展展望[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(5): 83-94+82.
- [6] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 铁道出版社, 2007: 156-159.
- [7] 邓虹, 万有财, 梅元贵. 高原高铁特长和超长隧道单列车通过时空气阻力变化规律研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(7): 1491-1501.
- [8] 郗艳红, 毛军, 高亮, 等. 横风作用下高速列车转向架非定常空气动力特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 1705-1714.
- [9] 孔珑. 工程流体力学[M]. 第 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2014: 79-96.