DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2026.06.404

裙板距轨面高度对城际动车组气动性能影响研究

房　明[1]，黄　思[1]，陈　睿[1]，许　彬[2,3]，刘堂红[2]
（1.中车南京浦镇车辆有限公司，江苏 南京 210032；
2.中南大学 交通运输工程学院，湖南 长沙 410075；
3.国家高速列车青岛技术创新中心，山东 青岛 266111）

摘　要：安装动车组裙板可有效削弱车下设备所受气流冲击，降低列车运行气动阻力。从车体轻量化、制造与维护成本角度考量，小尺寸裙板更具工程应用价值，因此需对裙板尺寸对列车气动性能的影响规律进行系统研究，以支撑裙板结构优化设计。文章采用三维数值模拟方法，对比分析8种不同裙板距轨面高度工况及设备舱全封闭工况下的列车气动特性。结果表明：设备舱全封闭结构减阻效果显著，最大减阻率达15.8%；非全封闭工况下，裙板尺寸与减阻效果正相关。综合减阻性能、结构质量与经济性，建议采用头尾车配置大尺寸裙板、中间车配置小尺寸裙板的组合设计方案。研究结果可为城际动车组气动优化设计提供理论依据与工程指导。

关键词：城际动车组；裙板；气动阻力；涡流；风洞试验；数值模拟

中图分类号：U270.1；U238　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2026)04-0137-11

0　引言

轨道交通凭借运输速度高、载客量大的优势，适合我国地广人多的基本国情，是我国重要的运输方式之一[1]。轨道交通主要包括高速列车、城际列车、城轨列车等，其中城际列车具有较高的运行速度，通常为160～200 km/h，多用于邻近城市间的运行。目前，城际列车主要向智能化、轻量化、节能化发展，造价较低，具有短流线型、开放式设备舱及间隙风挡等特征。与高速列车的减阻设计目标不同，城际动车组的减阻优化需综合考虑成本、维护便捷性等约束条件，因此其减阻设计不能仅关注气动性能的提升。目前，城际动车组的车下设备多直接悬挂于车体底部，无设备舱防护，会产生较大的气动阻力。若额外设计裙板或设备舱，则会增加动车组的制造成本，提升维护难度。因此，研究动车组裙板防护范围，对城际动车组优化设计具有参考价值。

在高速列车领域，由于车辆对减阻性能要求极高，其车下设备普遍采用裙板与底板全包覆的防护结构[2]。目前，学者们主要针对转向架裙板、转向架舱构型等开展研究，其中转向架裙板距轨面高度是影响整车气动阻力的关键参数[3]。文献[2]对不同裙板安装高度下转向架的气动阻力、积雪结冰特性开展研究，通过风洞试验验证：低位裙板可更好地保护转向架，将列车阻力降低约10%，且减阻效果在横风工况下更明显[4-8]。这是因为裙板缓解了车体侧面气流对转向架区域的冲击[9-10]，减弱了气流对转向架后端板的撞击强度，从而降低了后端板正压区的压力[11]。从气动影响规律来看，裙板主要降低头车与尾车的气动阻力，对中间车的气动性能影响较小[12]。在工程实际应用中，从减小空气阻力角度出发，应尽可能扩大裙板对转向架外露部分的包覆范围[13]，同时可安装转向架底板，进一步保护转向架区域，降低列车气动阻力[14-18]。综上所述，高速列车普遍采用全包覆设备舱，通过最大化转向架裙板包覆面积，实现转向架区域气动性能的有效提升。

通信作者：许　彬，男，博士，主要从事高速列车空气动力学、流动控制方面的研究；E-mail: bin_xu@csu.edu.cn

引用格式：房明, 黄思, 陈睿, 等. 裙板距轨面高度对城际动车组气动性能影响研究[J]. 机车电传动, 2026(4): 137-147.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.06.404.

Citation：FANG Ming, HUANG Si, CHEN Rui, et al. Influence of skirt board height above rail surface on aerodynamic performance of intercity EMUs [J]. Electric drive for locomotives,2026(4): 137-147.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.06.404

上述全包覆设计的工程合理性，建立在高速列车300 km/h及以上运营速度的基础上：该速度等级下列车气动阻力占总运行阻力的比例超70%，减阻带来的能耗收益可完全覆盖结构增重、制造成本上升与检修复杂度提高的额外代价。但对于运营速度多集中于160~250 km/h的城际列车，二者设计约束存在本质差异：其一，城际列车气动阻力占总阻力的比例显著降低，全包覆结构的减阻边际收益大幅收缩；其二，城际列车编组短、站间距小、启停频繁，车体轻量化对牵引能耗的影响更为突出，过度增重反而会抵消减阻收益；其三，城际线路运营密度大、车下设备检修频次高，设备的可达性与维护便利性是核心设计指标，全包覆结构会大幅提升运维成本与检修难度。因此，高速列车的全包覆方案无法直接套用于城际列车，需在减阻效果、结构重量与运维成本之间寻求平衡。

城际列车车下设备通常为外露式布置，仅采用有限高度的裙板进行局部防护。文献[19]表明，以设备舱的形式封装车下设备仅能优化头尾车气动阻力，整车阻力降幅约3.7%，减阻效果较弱；文献[20]测试了城际列车半包式裙板的减阻效果，研究显示该结构可实现整车减阻7.5%。两种方案减阻效果的差异性，主要源于两车外形结构与运行环境不同。裙板可有效抑制城际列车底部涡流的形成，改善车体底部流场结构，实现气流的平滑过渡，显著降低列车运行阻力[21-22]。因此，在兼顾轻量化与检修便利性的前提下，为尽可能优化裙板结构尺寸，本文将研究裙板安装高度对城际列车气动阻力的影响规律，以此确定裙板距轨面的最优设计高度。

1 数值方法

为系统揭示裙板距轨面高度对城际列车气动性能的影响规律，研究团队以某型城际列车为研究对象，设计了多组不同裙板高度的数值计算工况，建立了满足气动模拟精度要求的计算域，并采用高精度空间离散方案完成网格划分。为保障计算结果的可信度，研究团队首先开展了网格无关性验证，排除网格密度对计算精度的干扰；随后将数值模拟结果与风洞试验数据进行对比，验证了所采用数值方法的准确性与可靠性。

1.1 几何模型

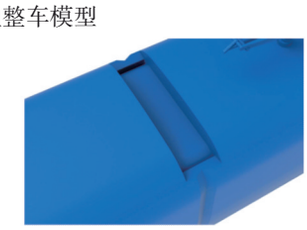
本研究以160 km/h城际动车组为研究车型，计算模型如图1所示。列车采用4车编组，从头车至尾车依次命名为1车、2车、3车、4车。模型保留受电弓、空调导流罩等设备，可较好地还原列车侧面和车顶的整体外形轮廓特征。整车共布置两组受电弓，模型设置2车受电弓为降弓状态，3车受电弓为升弓状态。模型包括外风挡和内风挡，可真实反映流体在此处的分离情况。转向架结构保留了主体外形与关键特征，并根据BS EN 14067-6:2018+A1:2022[23]，对尺寸小于100 mm的细节特征做简化处理。160 km/h城际动车组长度为102.8 m，宽度为3.3 m，特征高度H=4.15 m。为避免轮轨接地引发计算奇异性，根据BS EN 14067-6:2018+A1:2022，研究团队将列车模型抬高至距离轨面235 mm的高度。



(a) 4编组整车模型



(b) 转向架模型



(c) 内风挡与外风挡

图1 160 km/h城际动车组模型

Fig. 1 Model of 160 km/h intercity EMU

基于仿真经验与工程需要，研究团队共设计了8种裙板距轨面高度及裙板底板全包覆工况，各工况三维模型如图2所示（展示为4车视角）。8组裙板距轨面高度分别为254 mm、298 mm、371 mm、444 mm、517 mm、590 mm、663 mm、736 mm。随着裙板距轨面高度的增大，车下设备裸露范围逐渐增加，对设备侧面的防护效果持续减弱。

设备舱全封闭和不封闭的底部结构模型如图3所示。在未封闭模型中，车下设备完全暴露于流场，仅依靠车体两侧裙板提供一定的气动防护。

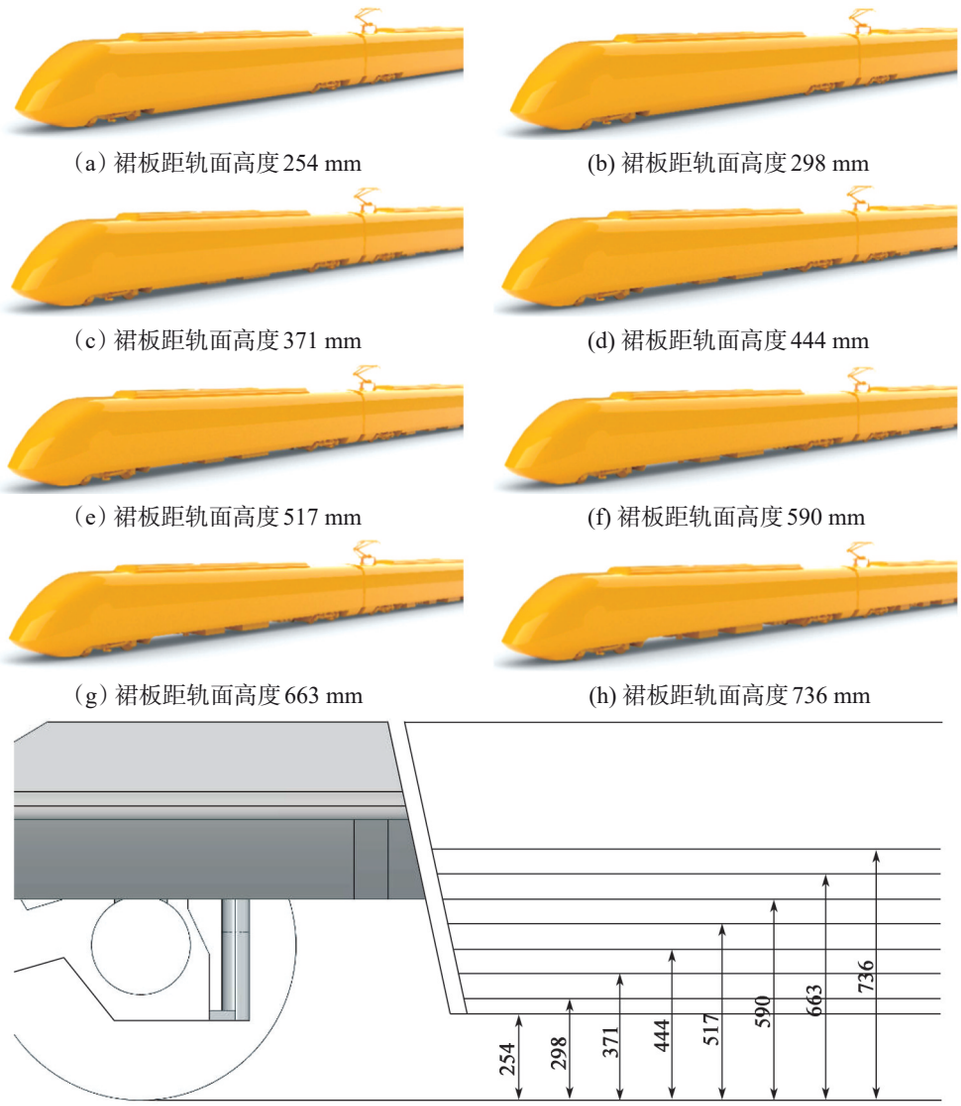
1.2 计算域、边界条件及网格

计算域尺度及各边界条件的属性如图4所示。为避免边界条件干扰流场，同时兼顾网格数量，应使边界尽可能远离列车。根据BS EN 14067-6:2018+A1:2022，列车上游边界距离车体大于8H，下游边界距离车体大于16H。本文模型上游计算域长度设为10H，以保证正压区不受速度入口影响；下游设为20H，以充分发展尾流并避免反流现象[24]。计算域宽度设置为20H，高度设置为10H，计算可得阻塞率约为0.38%，远低于5%，无须对空气动力系数进行修正。根据特征高度H估算雷诺数为

$$Re=\rho u_{\infty}H/\mu=1.6\times10^{6} \tag{1}$$

式中：ρ为在15 ℃、1个标准大气压下的空气密度，取1.225 kg/m^3；μ为动力黏度，取1.78×10^{-5} N·s/m^2；u_{∞}为列车速度，取44.44 m/s。

根据各参数取值可得，Re=1.6×10^6 > 2.5×10^5，表明



（a）裙板距轨面高度 254 mm　(b) 裙板距轨面高度 298 mm

（c）裙板距轨面高度 371 mm　(d) 裙板距轨面高度 444 mm

（e）裙板距轨面高度 517 mm　(f) 裙板距轨面高度 590 mm

（g）裙板距轨面高度 663 mm　(h) 裙板距轨面高度 736 mm

（i）整体视图

图 2　不同裙板距轨面高度列车模型视图

Fig. 2　Model views of trains with different skirt plate heights above rail surface



（a）设备舱全封闭

(b) 裙板距轨面 254 mm

图 3　设备舱封闭与不封闭模型仰视三维视图

Fig. 3　Bottom 3D model views for enclosed and non-enclosed equipment compartment configurations

进入自模拟区后，采用 1:8 的缩比模型进行数值模拟具有合理性。

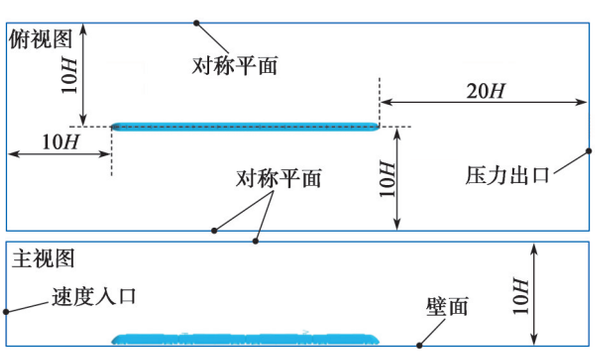


图 4　计算域尺寸及其边界条件

Fig. 4　Computational domain dimensions and boundary conditions

计算域两侧面及顶面均设置为对称边界；速度入口的湍流强度为 1%，以模拟风洞试验低湍流水平自由流；计算域下游边界定义为压力出口；地面设置切向速度，以模拟列车和地面的相对运动，消除上游地面

附面层对气动性能的影响。

研究团队采用切割体网格对计算区域进行离散，该网格适用于外流场仿真场景，有利于减小计算误差，提高精度。对车体面网格进行细化，并在车体壁面生成y^+为20~40的棱柱层，y^+均值为30，以正确预测壁面剪切应力，保证摩擦阻力计算的准确性，列车壁面y^+云图如图5所示。整车网格单元总量约为2 100万个，能够精确捕捉列车下游尾涡与转向架区域的气流分离特征，并准确模拟列车表面压力分布，保障压差阻力的计算精度。车体面网格与体网格如图6所示。

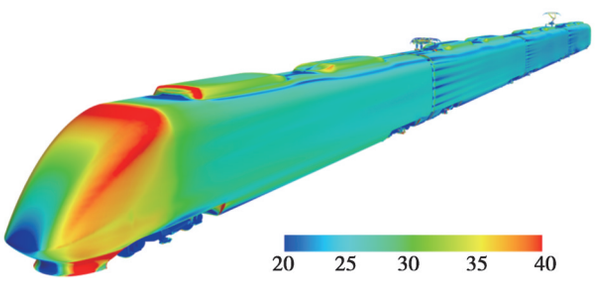


图5 列车壁面y^+云图

Fig. 5 y^+ contour plot of train wall

1.3 算法及验证

本文数值计算采用三维不可压缩定常雷诺平均方程，选取SST k-ω湍流模型，对流项为二阶迎风格式；速度-压力耦合方程采用SIMPLE求解，通过迭代校正压力使速度场满足连续性方程约束。为验证数值模拟的准确性，研究团队设计了粗糙、中等、精细3种不同离散精度的网格，如表1所示。各相邻精度网格参数差异为两倍，由于采用各向同性网格，因此Δx^+与Δz^+取值相同。研究团队统一网格离散方案，未调整棱柱层参数，仅对近壁面区域体网格参数进行差异化处理。

不同精度网格的计算结果如表2所示，中等网格与精细网格的阻力系数最大偏差为1.1%，粗糙网格与精细网格的阻力系数最大偏差为3.5%，且中等网格与精细网格的总阻力系数偏差仅为0.1%，表明采用中等网格满足仿真计算要求[23]。

表1 不同精度网格的无量纲参数

Table 1 Dimensionless parameters for different mesh refinement levels

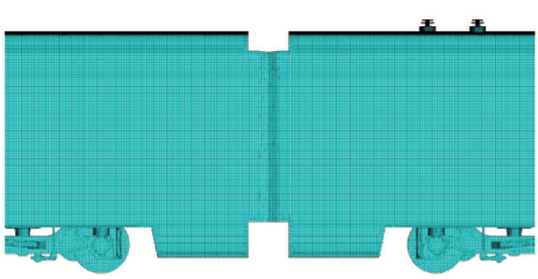
网格精度	Δx^+	y^+	Δz^+	网格数
粗糙	1 300	30	1 300	1 200万
中等	650	30	650	2 100万
精细	325	30	325	7 600万

表2 不同精度网格的计算结果

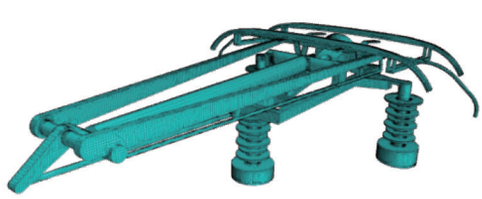
Table 2 Computational results for different mesh refinement levels

网格精度	1车阻力系数	2车阻力系数	3车阻力系数	4车阻力系数	总阻力系数
粗糙	0.160 6	0.117 6	0.106 4	0.188 4	0.573 0
中等	0.162 5	0.119 4	0.109 4	0.193 1	0.584 4
精细	0.163 8	0.119 0	0.110 2	0.191 1	0.584 1

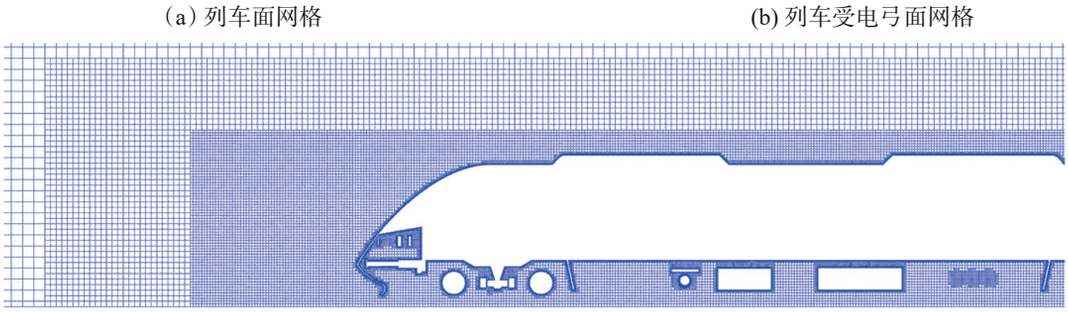
为进一步验证数值模拟的可靠性，研究团队开展风洞试验对照验证。风洞试验在中南大学风洞实验室完成，试验模型比例为1∶20，包含轨道路基结构，模型由头车和半截中间车组成，设置全包覆和裙板距轨面254 mm两种对照工况，如图7所示。数值模拟与风洞试验的数值对比如表3所示，数值计算得到的1车阻力系数略高于试验值，这可能是因为试验模型的空调导流罩经过气动导流优化。全包覆工况数值与试验结果偏差为3.5%，无包覆工况偏差仅为2.6%，可见数值



(a) 列车面网格



(b) 列车受电弓面网格

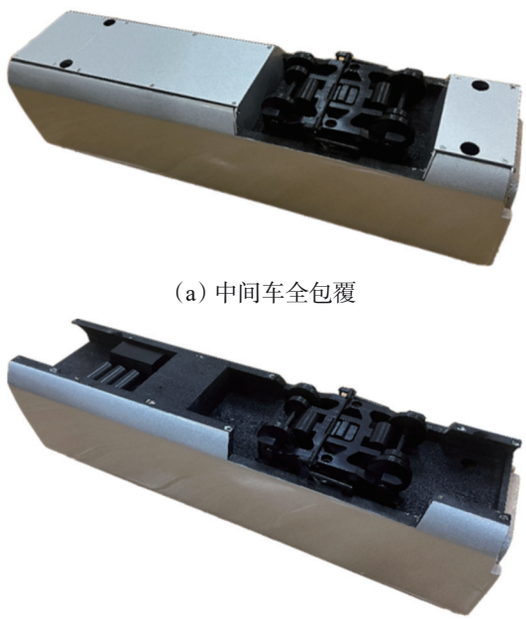


(c) 体网格纵剖面

图6 网格示意

Fig. 6 Mesh diagram

模拟结果与风洞试验数据较为接近，从而验证了数值方法的准确性。



（a）中间车全包覆

(b) 中间车无包覆

图 7　列车风洞模型底部

Fig. 7　Bottom view of train/wind tunnel model

表 3　数值模拟与风洞试验气动力系数及其差异

Table 3　Aerodynamic coefficients from numerical simulations and wind tunnel experiments and their differences

工况	1 车数值计算阻力系数	1 车试验阻力系数	绝对差异	相对差异/%
全包覆	0.162 5	0.157 0	0.005 5	3.5
无包覆	0.167 2	0.163 0	0.004 2	2.6

2　结果分析

研究团队采用前述经风洞试验验证的数值方法，对所有设计工况开展数值模拟，获取各工况下的列车气动载荷与三维流场数据。首先对比分析不同裙板距轨面高度下的列车气动阻力特性，系统揭示裙板高度参数对整车及各车厢气动载荷的影响规律；在此基础上，通过对比车体表面及车下设备的压力分布特征，阐释不同工况间气动力差异的内在形成机理；进一步结合速度场、涡量场及 Q 判据的空间分布结果，对列车底部复杂流动结构进行多维度可视化分析，厘清车底区域的典型流动形态与涡流演化特征。

2.1　气动力系数

不同裙板距轨面高度工况下的列车阻力系数如表 4 所示，根据表中数据绘制的点线图如图 8 所示。图 8 中横线表示列车设备舱全封闭、裙板全包覆工况下各节车阻力系数及总阻力系数：黑色横线表示全封闭工况下 1 车阻力系数，数值为 0.162 5；红色横线表示全封闭工况下 2 车阻力系数，数值为 0.119 4；蓝色横线表示全封闭工况下 3 车阻力系数，数值为 0.109 4；绿色横线表示全封闭工况下 4 车阻力系数，数值为 0.193 1；紫色横线表示全封闭工况下总阻力系数，数值为 0.584 4。

表 4　不同裙板距轨面高度下各车阻力系数及总阻力系数

Table 4　Drag coefficients and the total resistance coefficient for individual cars with different skirt heights above rail surface

裙板距轨面距离/mm	1 车阻力系数	2 车阻力系数	3 车阻力系数	4 车阻力系数	总阻力系数
全包覆	0.162 5	0.119 4	0.109 4	0.193 1	0.584 4
254	0.167 2	0.129 9	0.126 2	0.190 2	0.613 5
298	0.173 2	0.134 6	0.129 4	0.191 1	0.628 3
371	0.178 4	0.136 4	0.131 9	0.191 2	0.638 0
444	0.187 6	0.139 7	0.130 4	0.189 1	0.646 7
517	0.193 4	0.139 1	0.130 7	0.189 6	0.652 8
590	0.197 0	0.140 2	0.131 3	0.190 8	0.659 2
663	0.196 9	0.138 5	0.127 1	0.189 5	0.652 0
736	0.203 7	0.140 3	0.149 6	0.200 1	0.693 7

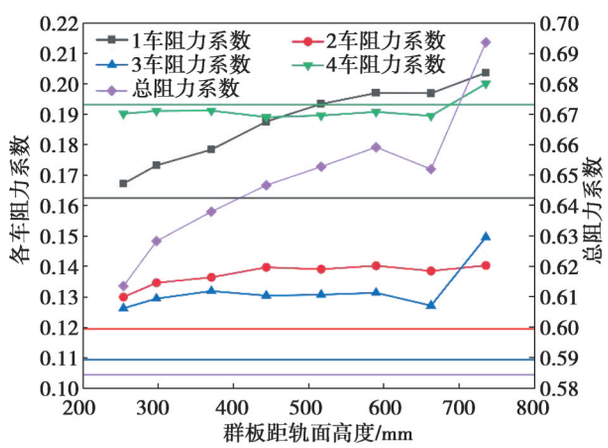


图 8　不同裙板距轨面高度下各车阻力系数及总阻力系数折线图

Fig. 8　Drag coefficients and the total resistance coefficient line graph for individual cars with different skirt heights above rail surface

当裙板距轨面高度为 663 mm 与 736 mm 时，列车阻力系数变化规律与其余工况存在较大差异，这是因为裙板距轨面 590 mm 时，车体裙板与 1 车第 1 个转向架裙板平齐；高度达到 663 mm 时，车体裙板高于 1 车第 1 个转向架裙板；高度达到 736 mm 时，车体裙板与其他所有转向架的裙板距轨面高度相同。

1 车阻力系数随着裙板距轨面高度的增大呈显著上升趋势，且数值始终大于全封闭工况下的阻力系数。其中，裙板距轨面高度 254 mm 时差值最小，阻力增幅约 3%；裙板距轨面 736 mm 时差值最大，阻力增幅约 25%。全封闭工况相较裙板距轨面 736 mm 工况阻力降低 15.8%。2 车和 3 车的阻力系数较小，虽随裙板距轨面高度变化产生小幅波动，但仅在高度 371 mm 以下变化较明显。除裙板距轨面 736 mm 外，其余工况下 2 车、

3 车阻力系数与全封闭工况的差值分别为 9%～17% 和 15%～21%，可见设备舱未全封闭会显著增大中间车辆气动阻力。3 车阻力系数在裙板距轨面 736 mm 时骤然增大，相较于全封闭工况增幅接近 37%，这是因为裙板距轨面高度过高并与转向架裙板齐平，设备舱失去气流防护作用，进而造成阻力大幅上升。4 车阻力系数变化规律与其他车辆不同，在裙板距轨面高度 736 mm 之前，其阻力系数始终小于全封闭工况，整体在 0.19 附近波动，直至裙板距轨面 736 mm 时阻力系数大幅上升，数值超过全封闭工况。

在裙板距轨面高度低于 590 mm 时，总阻力系数变化主要由 1 车阻力系数主导，变化规律与 1 车相近，近似呈线性增长；高度超过 590 mm 后，受 3 车阻力系数骤然上升影响，总阻力系数变化规律发生改变，逐渐趋近于 3 车阻力系数的变化趋势。除裙板距轨面 736 mm 外，其余工况的总阻力系数相较于全封闭工况增幅为 5%～13%，736 mm 工况增幅达 19%。在裙板距轨面高度为 663 mm 时总阻力系数下降，这可能源于设备舱裙板距轨面高度略高于转向架裙板，导致阻力系数变化规律改变，而设备舱裙板距轨面高度为 590 mm 时，转向架裙板距轨面高度与设备舱裙板距轨面高度平齐。

综上所述，随着裙板距轨面高度的增大，1 车阻力系数持续增加，2 车和 3 车阻力系数未随高度增大显著上升，仅在裙板距轨面高度较小时涨幅较大。此外，过大的裙板距轨面高度会导致阻力系数大幅上升，如裙板距轨面 736 mm 工况。

阻力系数随裙板距轨面高度变化的增长值和增长率如图 9 所示。由图 9 可见设备舱由封闭转为开放后，阻力系数增大明显，随着裙板距轨面高度的增加，阻力系数增长速率逐渐减缓，直至裙板距轨面高度达到 736 mm，设备舱裙板面积大幅减小且高度远超转向架裙板，阻力系数显著提升。

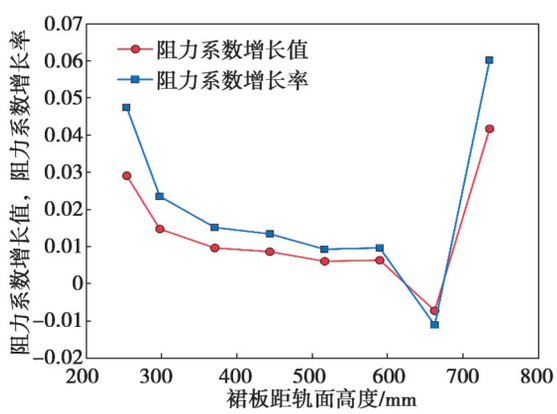


图 9　不同裙板距轨面高度总阻力系数增长值及增长率

Fig. 9　Total drag coefficient increases and growth rates for different skirt heights above rail surface

2.2　表面压力分布

1 车阻力系数对裙板距轨面高度变化敏感度较高，为明确阻力变化的主要作用区域，研究团队绘制不同裙板距轨面高度下 1 车表面压力云图，如图 10 所示。由于车体底部区域压力差异较小，研究团队采用高对比度颜色条增强云图显示效果，便于直观对比压力差异。

设备舱全封闭工况，车体底部光滑，压力无明显突变区域，压力差异主要集中在转向架位置。设备舱未封闭工况三维视图标注出 4 个主要的压力变化高压区，分别位于第 1 个转向架后端板、第 1 个设备模块前端面、第 2 个设备模块前端面以及第 2 个转向架前端板，并在图中用虚线框进行突出显示。由于裙板长度较大，保护效果较好，因此裙板距轨面 254 mm 的 1 车高压区压力较小，仅高压区 1 压力偏大且数值较小，最终使得整车阻力系数增幅较小。

随着裙板距轨面高度持续增加，列车排障器上游表面压力基本保持稳定，差异主要集中于高压区。当裙板距轨面高度为 444 mm 时，高压区 2 和高压区 3 的正压特征清晰显现，高压区 1 压力大小与作用范围未随裙板距轨面高度不同而发生改变。由于高压区 1 位于设备舱裙板上游，受裙板高度变化影响微弱，其压力变化仅由转向架裙板结构决定。当裙板距轨面高度达到 736 mm 时，高压区 4 出现一定范围的正压区域，但压力强度低于高压区 2 和高压区 3。这是因为高压区 4 上游设备为非对称布置，压力分布不均匀，正压主要集中于车辆行驶方向的第 2 个转向架前端板左侧。

综上所述，裙板距轨面高度变化主要影响设备模块前端面的流场压力，即高压区 2 和高压区 3，高压区 4 受影响程度较小，高压区 1 压力特性仅由转向架裙板结构决定。

为研究裙板距轨面高度较大时 3 车阻力系数突增机理，研究团队进一步分析 3 车表面压力云图，结果如图 11 所示。3 车压力集中于转向架端板和设备模块前端面，与 1 车分布规律相似。二者不同之处在于，3 车第 1 个设备模块与第 1 个转向架前端板距离较近，形成利于涡发展的凹腔结构，该区域气流速度较大，压力降低，从而形成低压区。

对比裙板距轨面 736 mm 的工况与其他工况可知，流场主要差异体现在负压区压力数值上。该工况下两个负压区产生较大负压，分别为上述凹腔区域与第 2 个转向架区域，而设备模块前端面正压区与其他工况压力分布相似，未出现明显升压现象。

研究团队进行气动力分析发现，全包覆模型 4 车阻力系数普遍高于其他模型，具有深入分析的价值。由于 4 车气动力差异较小，全包覆工况与裙板距轨面高度 254 mm 工况下 4 车阻力系数差值仅约 1.5%，直接对比压力云图难以精准判定流场差异，因此研究团队采用数据映射方法，将 254 mm 高度工况压力场信息映射至全包覆工况模型，计算两类工况压力差值，结果如图 12 所示。

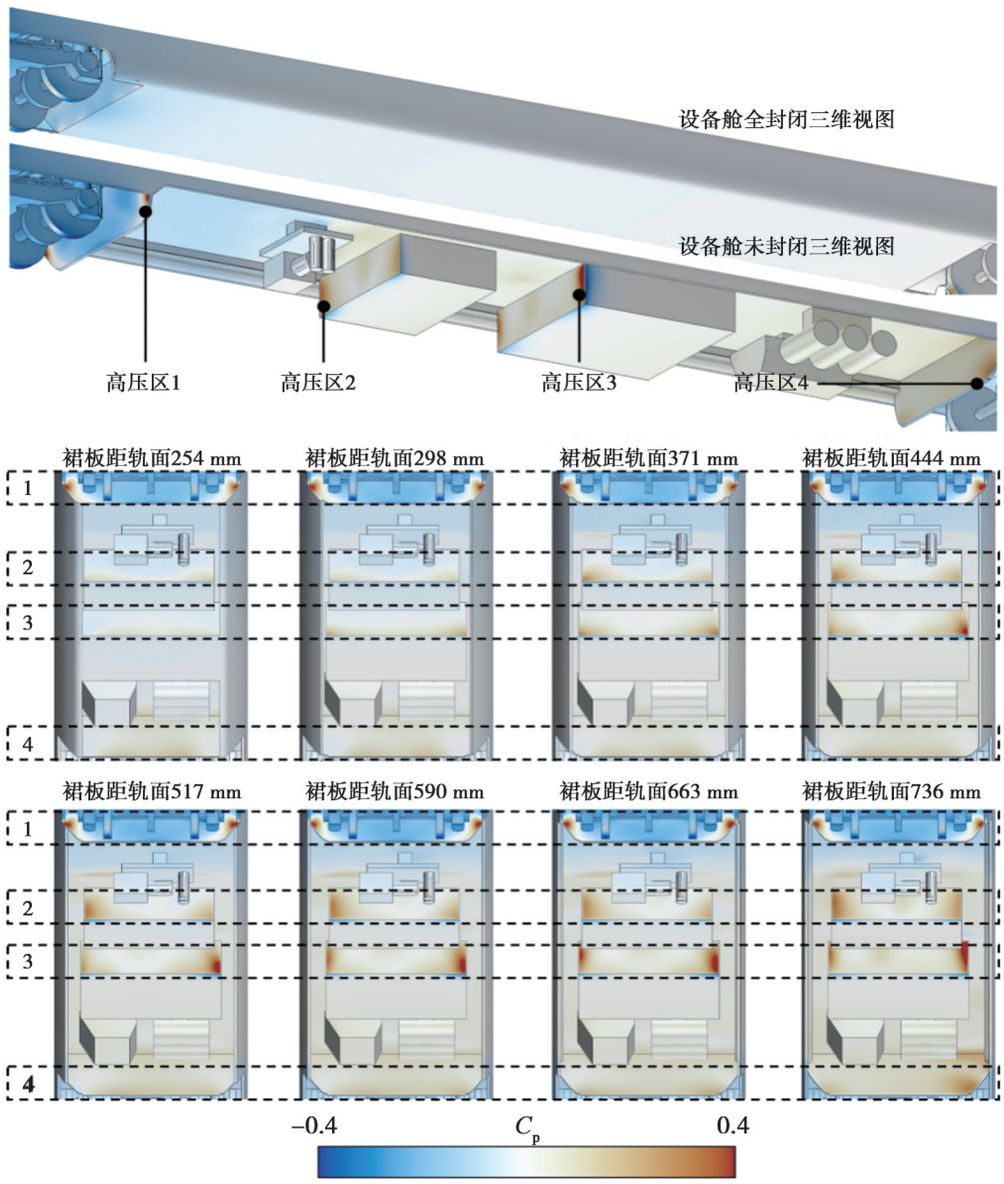


图 10　不同裙板距轨面高度下的 1 车底部平均压力云图

Fig. 10　Average underside pressure contour plots for car 1 with different skirt heights above rail surface

图 12 中，正值表示裙板距轨面高度 254 mm 工况的压力系数更高，负值则表示该工况压力系数更低。

分析可知，4 车流线型车体两侧压力明显上升，有利于降低空气阻力系数；而等截面部分压力基本无变化，仅转向架裙板附近存在压力差异。其中，上游转向架压力差异较小，下游转向架迎风面出现大范围降压，显著降低转向架阻力；下游转向架裙板两侧同样呈现降压特征，靠近流线型区域后压力有所回升。车体侧面压力下降对气动阻力系数影响较小，而流线型区域升压有利于降低阻力系数。由此可推测，未完全包覆裙板结构可削弱底部气流对下游转向架的冲击，放缓气流流速，促使气流在流线型车体表面完成流动再附着，从而提升压力恢复效率，实现流线型区域压力提升。

2.3　流场结构特征

为探究裙板距轨面高度 736 mm 工况下负压区压力大幅下降的原因，研究团队对该区域气流旋涡进行捕捉，采用与速度旋度表达式一致的涡量指标量化流场旋转强度，3 个方向分量分别为：

$$\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \tag{2}$$

$$\omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \tag{3}$$

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \tag{4}$$

上述 3 个公式可简写为 $\nabla \times \boldsymbol{U}$，其中 ∇ 为哈密顿算子，$\boldsymbol{U}$ 为速度矢量，其分量为 u、v 和 w。由于涡量可表征简单剪切流动，易造成地面边界层与车体近壁面的剪切流动被误判，该问题难以避免。作为初代涡识别方法，其虽存在上述缺陷，但凭借直观的表达形式与简单的物理意义，仍被诸多学者广泛应用。其中，涡量为流体局部流动角速度的两倍。

裙板距轨面高度 663 mm 与 736 mm 时 3 车纵剖面

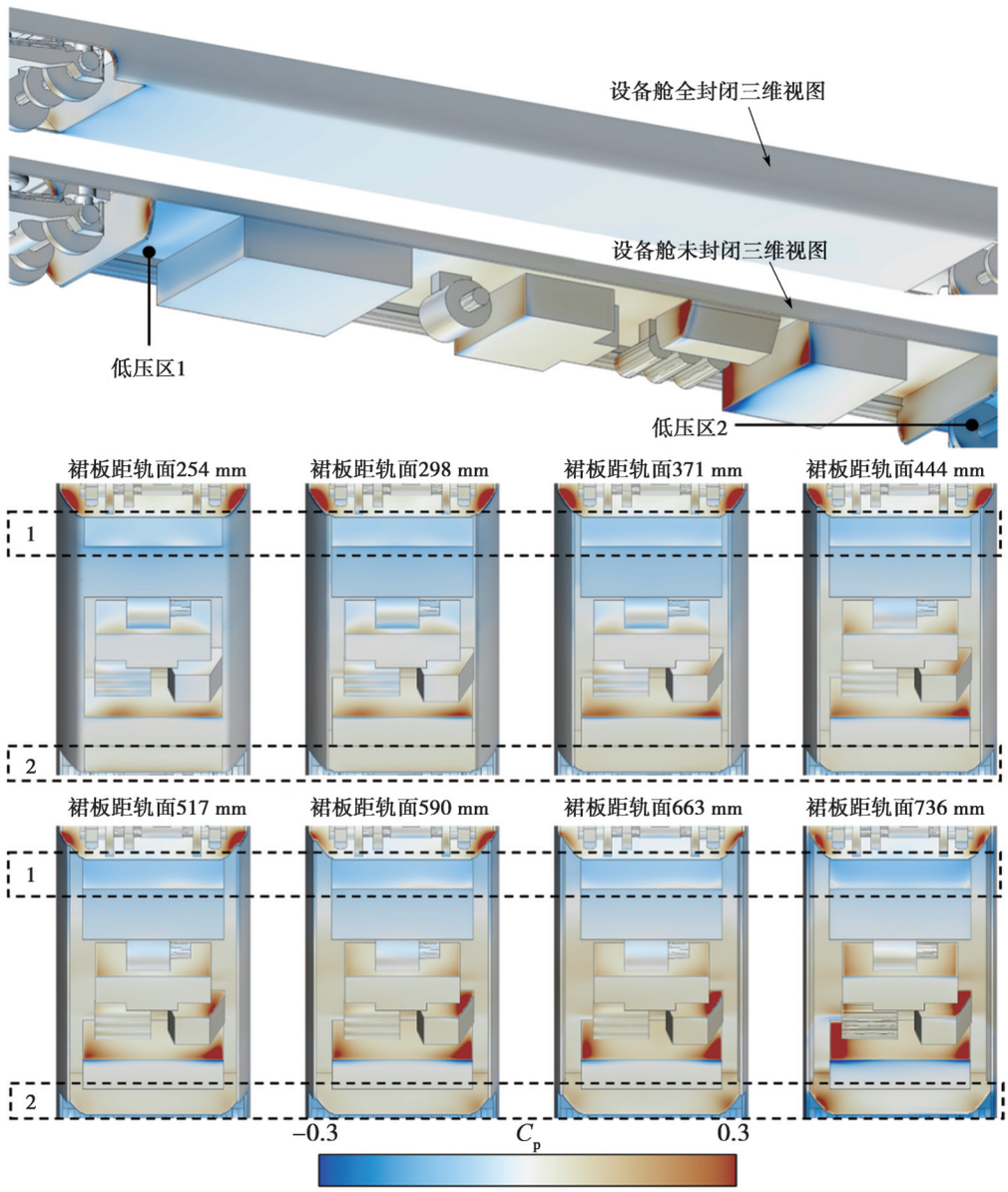


图 11　不同裙板距轨面高度下的 3 车底部平均压力云图

Fig. 11　Average underside pressure contour plots for car 3 with different skirt heights above rail surface



(a) 4 车前视图



(b) 4 车上游转向架俯视图　　(c) 4 车右视图　　(d) 4 车下游转向架俯视图

图 12　全包覆工况与裙板距轨面高度 254 mm 工况的 4 车压差云图

Fig. 12　Pressure difference contour plot for car 4 comparing fully enclosed configuration with skirt plate height of 254 mm above rail surface

纵向涡涡量图如图 13 所示，图中标注出与图 11 中两个负压区对应的涡。为更加清晰地展示涡形态，研究团队绘制速度矢量线卷积图，如图 14 所示。由图 13 可知，当裙板距离轨面 736 mm 时，涡 1 表现出更强的负旋度，高涡量区域与地面剪切流充分融合，强涡旋直接加剧该区域负压强度；涡 2 旋度同样大幅提升，高涡量覆盖范围更广，该区域是影响整体涡强度的关键部位。由此可见，裙板距轨面 736 mm 工况下，涡 2 对压力下降起主导作用。

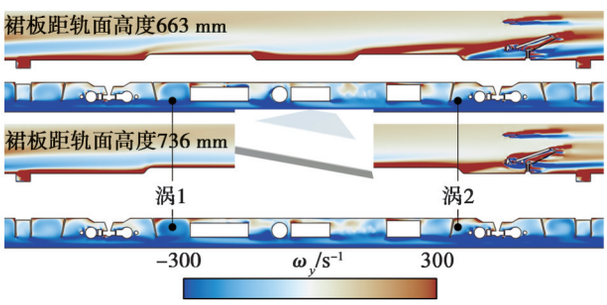


图 13　裙板距轨面高度 663 mm 与 736 mm 时 3 车纵剖面纵向涡涡量图

Fig. 13　Longitudinal vorticity in longitudinal section of car 3 with skirt heights of 663 mm and 736 mm above rail surface

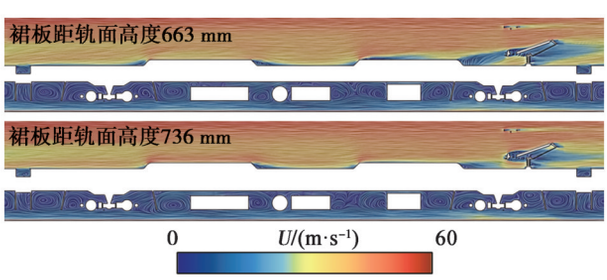


图 14　3 车纵剖面二维速度矢量线卷积图

Fig. 14　Line integral convolution diagram of 2D velocity vector in longitudinal section of car 3

此外，1 车底部涡的分布情况如图 15 所示，研究团队选取设备舱全封闭、大尺寸裙板和小尺寸裙板 3 种工况进行对比。在设备舱全封闭工况下，气流旋涡主要在转向架处生成并脱落，设备舱底部无流向涡；取消设备舱全封闭结构后，气流会在车下设备后缘分离。由于设备舱仅拆除底板，保留上下游端板，因此端板处产生较强的流动加速，在两端板围成的凹腔内部形成大尺度涡系，车辆风挡两侧凹腔处涡尺度尤为突出。

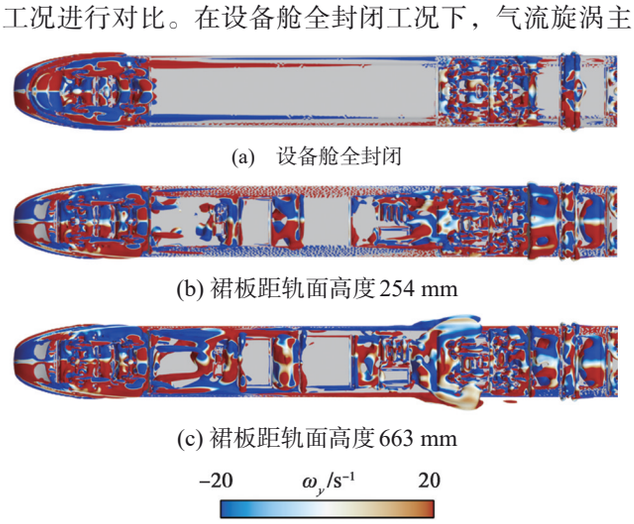


图 15　1 车底部 Q 判据等值面及涡量流向分量

Fig. 15　Q-criterion iso-surface and streamwise vorticity components on underside of car 1

大、小尺寸裙板工况下，涡的整体分布相似，仅局部涡尺度存在较大差异。在上游转向架端板处，随着裙板尺寸的减小，涡尺度有所增大；当下游转向架端板高度低于裙板距轨面高度时，气流可沿车体两侧绕过端板，大量脱落旋涡向车体两侧扩散分离。

3　结论

研究团队通过数值模拟方法，完成 8 种不同裙板距轨面高度工况与设备舱全封闭工况的仿真计算，系统研究了裙板尺寸对城际列车气动阻力的影响规律，主要结论如下：

①随着裙板距轨面高度的增加，气流对车下设备的冲击作用加剧，设备间涡尺度增大，正压区压力上升，负压区压力下降，列车整体阻力系数增大；当裙板距轨面高度超过转向架端板高度后，气流更易沿车体两侧分离并形成拖曳涡，造成列车气动阻力急剧上升。

②设备舱全封闭工况下，整车阻力系数最小；裙板距轨面高度 235 mm 时，整车阻力增幅约 5%，此时裙板尺寸最大；裙板距轨面高度 663 mm 时，整车阻力增幅为 11.6%，此时裙板尺寸较小且列车气动阻力增幅较低；裙板距轨面高度 736 mm 时，整车阻力增幅约 18.7%。列车裙板结构设计需综合考虑车体轻量化和减阻率。

③裙板距轨面高度小幅调整主要影响头车阻力系数，中间车阻力系数更易受设备舱密封状态影响，对裙板距轨面高度变化敏感度较低。因此，建议头尾车采用大尺寸裙板，中间车采用小尺寸裙板。

参考文献：

[1]　李田, 戴志远, 刘加利, 等. 中国高速列车气动减阻优化综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 59-80.
Li Tian, Dai Zhiyuan, Liu Jiali, et al. Review on aerodynamic drag reduction optimization of high-speed trains in China [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 59-80.

[2]　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与展望[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(5): 82-94.
Yu Yizheng, Liu Tanghong, Xia Yutao, et al. Development and prospect of aerodynamic drag-reduction technologies for trains at higher speed (400+ km/h)[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(5): 82-94.

[3] 杨志刚, 毛懋, 陈羽. 高速列车底部结构参数对气动阻力作用规律[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 1055-1064.
Yang Zhigang, Mao Mao, Chen Yu. Influence laws between underbody structure parameters of high speed train and aerodynamic drag[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(7): 1055-1064.

[4] Gao G J, Li F, He K, et al. Investigation of bogie positions on the aerodynamic drag and near wake structure of a high-speed train[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 185: 41-53.

[5] 余以正, 滕万秀, 孙健, 等. 裙板对列车空气动力学阻力及转向架积雪结冰性能的综合影响[J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(2): 84-88.
Yu Yizheng, Teng Wanxiu, Sun Jian, et al. Performance of car aerodynamic drag force and bogie accumulated snow and freeze affected by bogie apron[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2019, 40(2): 84-88.

[6] Guo Z J, Liu T H, Xia Y T, et al. Aerodynamic influence of the clearance under the cowcatcher of a high-speed train[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 220: 104844.

[7] 张业, 尚克明, 杜健, 等. 高速列车转向架舱风洞试验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(4): 659-668.
Zhang Ye, Shang Keming, Du Jian, et al. Experimental study on high-speed train bogie cabins in wind tunnel[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(4): 659-668.

[8] 马胜全, 何思俊, 支锦亦, 等. 高速列车局部外形气动优化设计研究[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(1): 19-23.
Ma Shengquan, He Sijun, Zhi Jinyi, et al. Research on aerodynamic optimization design of some part on high-speed train[J]. Railway Locomotive & Car, 2020, 40(1): 19-23.

[9] 王东屏, 何正凯, 李明高, 等. 动车组气动阻力降阻优化数值研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(10): 15-18.
Wang Dongping, He Zhengkai, Li Minggao, et al. Numerical research on aerodynamic drag reduction optimization of EMU[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33 (10): 15-18.

[10] Zhang J, Adamu A, Gidado F, et al. Flow control for aerodynamic drag reduction of a high-speed train with diversion slots on bogie regions[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(11): 115111.

[11] 邓海, 丁艳思, 向南燊, 等. 外置转向架包覆对高速列车气动阻力影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(1): 26-37.
Deng Hai, Ding Yansi, Xiang Nanshen, et al. Influence of covers for the bogies with external axle boxes on the aerodynamic drag of a high-speed train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(1): 26-37.

[12] 李天亮, 孙健, 徐博雅, 等. 加装转向架裙板对动车组气动载荷的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(2): 89-90.
Li Tianliang, Sun Jian, Xu Boya, et al. Effect of EMU with re-installed bogie fairing on the aerody-namic loads[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(2): 89-90.

[13] 黄志祥, 陈立, 蒋科林. 高速列车减小空气阻力措施的风洞试验研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 16-21.
Huang Zhixiang, Chen Li, Jiang Kelin. Wind tunnel test of air-drag reduction schemes of high-speed trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 16-21.

[14] 王雷, 刘堂红, 张师尚, 等. 400 km/h 高速列车转向架底板的阻力影响数值模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(3): 1201-1217.
Wang Lei, Liu Tanghong, Zhang Shishang, et al. Numerical study on influence of the bogie bottom plate on aerodynamic drag of high speed train running at 400 km/h[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(3): 1201-1217.

[15] Liu W, Ji Z L, Guo D L, et al. Effects of bottom deflectors on aerodynamic drag reduction of a high-speed train[J]. Acta Mechanica Sinica, 2022, 38(5): 321251.

[16] Yao Y F, Sun Z X, Li G B, et al. Aerodynamic optimization using passive control devices near the bogie cabin of high-speed trains[J]. Acta Mechanica Sinica, 2022, 38(9): 321363.

[17] Tian H Q. Review of research on high-speed railway aerodynamics in China[J]. Transportation Safety and Environment, 2019, 1(1): 1-21.

[18] Dai Z Y, Li T, Zhang W H, et al. Investigation on aerodynamic characteristics of high-speed trains with shields beneath bogies[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2024, 246: 105666.

[19] 左雄, 罗意平, 刘冬雪. 城际列车气动阻力组成分析及减阻研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 734-740.
Zuo Xiong, Luo Yiping, Liu Dongxue. The research of aerodynamic drag constitution analysis and its reduction of intercity trains[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(3): 734-740.

[20] 林鹏, 刘冬雪. 城际列车底部结构优化减小气动阻力研究[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(5): 763-773.
Lin Peng, Liu Dongxue. Reduction of aerodynamic drag on intercity railway through car bottom structure optimization [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(5): 763-773.

[21] 洪琪琛, 杨明智, 刘冬雪. 车底设备对城际列车气动特性影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2947-2955.
Hong Qichen, Yang Mingzhi, Liu Dongxue. Influence of the bottom structure on the aerodynamic performance of intercity train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11): 2947-2955.

[22] Wang J B, Gao G J, Li X B, et al. Effect of bogie fairings on the flow behaviours and aerodynamic performance of a high-speed train[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(6): 890-910.

[23] BS EN 14067-6: 2018+A1: 2022 Railway applications-Aerodynamics-part 6: requirements and test procedures for cross wind assessment[S].

[24] Zhang J, Adamu A, Su X C, et al. Effect of simplifying bogie regions on aerodynamic performance of high-speed train [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(5): 1717-1734.

Influence of skirt board height above rail surface on aerodynamic performance of intercity EMUs

FANG Ming[1], HUANG Si[1], CHEN Rui[1], XU Bin[2,3], LIU Tanghong[2]

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210032, China;
2. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;
3.National Technology Innovation Center for High Speed Train, Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: Electric multiple units (EMUs) are equipped with skirt plates to mitigate airflow impact on underfloor equipment and thereby reduce aerodynamic drag. Small-sized skirt plates offer benefits for vehicle lightweighting and lower manufacturing and maintenance costs. To support structural optimization of skirt plate design, systematic research into the influence of skirt plate sizes on train aerodynamic performance is necessary. Based on three-dimensional numerical simulations, this paper comparatively analyzes the aerodynamic characteristics of trains across eight skirt plate heights above the rail surface and the fully enclosed equipment compartment configuration. The results show that the fully enclosed equipment compartment structure remarkably reduces aerodynamic drag by up to 15.8%; for non-fully enclosed configurations, the drag reduction effect is positively correlated with the skirt plate size. A combined design is proposed simultaneously accounting for drag reduction performance, structural mass, and economic efficiency: large-sized skirt plates for head and tail cars, while small-sized skirt plates for middle cars. The research results provide a theoretical basis and engineering guidance for aerodynamic optimization in intercity EMU designs.

Keywords: intercity EMU; skirt plate; aerodynamic drag; vortex; wind tunnel experiment; numerical simulation

收稿日期：2025-03-10；修回日期：2026-06-29
责任编辑：钟　锋