基于表面微结构的列车气动阻力被动控制研究

刘　斌[1,2]，张　雷[1]，张卫华[3]

（1．中车唐山机车车辆有限公司 产品研发中心，河北 唐山 064000；2．西南交通大学 机械工程学院，四川 成都 610031；
3．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）

摘要：为降低高速列车气动阻力，基于仿生学原理，选取球形凹坑表面微结构作为研究对象，凹坑直径为 20mm、深度 10mm、中心距离 40mm。采用数值模拟、风洞试验与工程应用相结合的方法，研究其在转向架舱端板及风挡区域的减阻效果与机理。结果表明，凹坑内部形成的“二次涡”可将高速气流与壁面隔开，降低壁面剪切应力，将滑动摩擦转为滚动摩擦，同时降低湍流粘度延迟流动分离，以及涡量抵消降低压差阻力。三编组列车转向架舱端板和风挡布置凹坑后，整车减阻分别为 2.79%和 0.82%，且压差阻力降低幅度大于摩擦阻力；八编组列车在转向架舱端板和风挡区域协同布置时，估算减阻率可达 5.34%；1:8 缩尺风洞试验中，转向架舱端板满布凹坑的减阻率为 4.2%，与数值模拟趋势一致。该表面微结构已应用于某型高速列车转向架舱端板，增加成本较低，可为高速列车节能降碳提供一种可靠的被动减阻方案。未来需进一步研究复杂曲面微结构流动机理，并开展气动减阻与噪声控制协同的多学科优化。

关键词：仿生学；表面微结构；气动阻力；减阻机理；转向架舱

中图分类号：U238；U266.2　　**文献标志码：**A

Research on Passive Control of Train Aerodynamic Resistance Based on Surface Microstructure

Liu Bin[1,2]; Zhang Lei[2]; Zhang Weihua[3]

(1. College of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China；2. CRRC Tangshan Co., ltd., Tangshan 064000, China；3. State Key Laboratory of Rail Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To reduce aerodynamic drag of high-speed trains, a biomimetic surface microstructure featuring spherical dimples was investigated, with dimple diameter of 20 mm, depth of 10 mm, and center-to-center spacing of 40 mm. A combined approach involving numerical simulation, wind tunnel testing, and engineering application was employed to study the drag reduction performance and mechanisms on bogie compartment end plates and fairing regions. Results show that the "secondary vortices" formed inside the dimples can separate high-speed airflow from the wall surface, reducing wall shear stress by converting sliding friction into rolling friction. Additionally, they lower turbulent viscosity, delay flow separation, and reduce pressure drag through vortex cancellation. When dimples were applied to the bogie compartment end plates and fairings of three-carriage trains, overall drag reductions reached 2.79% and 0.82%, respectively, with pressure drag reduction exceeding friction drag reduction. For eight-carriage trains, when dimples were synergistically arranged on both the bogie compartment end plates and fairings, estimated drag reduction reached up to 5.34%. In a 1:8 scale wind tunnel test, the drag reduction rate achieved by fully covering the bogie compartment end plate with dimples was 4.2%, consistent with numerical simulation trends. This surface microstructure has been implemented on the bogie compartment end plates of a certain high-speed train model, offering low additional cost and providing a reliable passive drag reduction solution for energy conservation and carbon emission reduction in high-speed trains. Future work should focus on further investigating flow mechanisms over complex curved surfaces and conducting multidisciplinary optimization integrating aerodynamic drag reduction with noise control.

Key words: Biomimetics; surface microstructure; aerodynamic drag; drag reduction mechanism; bogie area

收稿日期：2026−07−24

基金项目：国家重点研发计划项目（轻量化低阻力低振动低噪声等多目标车体系统设计及研制 2022YFB4301104）；国家重点研发计划项目（时速 400 公里高速列车工程化技术研究与 CR450 高速动车组研制 2022YFB4301103）

随着高速铁路的飞速发展，列车行驶速度越来越高，空气动力学问题日益凸出，列车运行速度 400km/h 及以上时，气动阻力占总阻力的比例可达 90%~95%。由此可见，列车气动阻力的大小直接影响列车的运行能耗、最高速度及运营经济性，有效降低列车的气动阻力已成为提升列车综合性能的关键研究方向。经过多年的发展，列车外形已进行了持续的优化和改进，因此利用传统方法挖掘气动外形的潜力已经非常有限。目前降低列车气动阻力的研究及工程应用主要围绕着宏观尺度进行，实际上运动物体的气动性能优化也可以从微观角度考虑。自然界的一些生物表面具有非光滑特性，如鱼类、鸟类等，仿生学中的表面微结构为高速列车气动性能优化提供了新思路。

微结构减阻，属于流动被动控制范畴。一般直观认为，表面光滑的物体相对于表面粗糙的物体空气阻力小。但人们在实践中观察发现，仿生学中的表面微结构是自然界动植物为了适应生存环境经过万年的进化而来，为了减阻的共同目的，不同生物接触流体的表面进化出了不同的结构。

表面微结构减阻的成功应用案例为鲨鱼皮泳衣、高尔夫球和汽车表面，合适的表面微结构能够有效降低流体绕过物体表面所产生的阻力。本文突破传统宏观外形优化的局限，从仿生微观结构角度切入，选取典型球形凹坑非光滑结构为研究对象，聚焦高速列车转向架、风挡等关键阻力区域，通过数值模拟与风洞试验相结合的方法，系统揭示凹坑结构的减阻作用机理，量化不同布置方案的工程降阻效果，形成低成本、易落地的被动减阻应用方案，为高速列车节能降碳与气动性能升级提供可靠的技术支撑。

1 表面微结构的类型

自然界的生物根据自身不同的生存环境，表面形态具有显著差异。体表为凹坑和凸起较为明显的生物是蜣螂和黄缘真龙虱，见图 1 所示，在显微镜下表面微结构十分明显。上述这些非光滑结构使其在空气中和水中均具有良好的减阻效果。



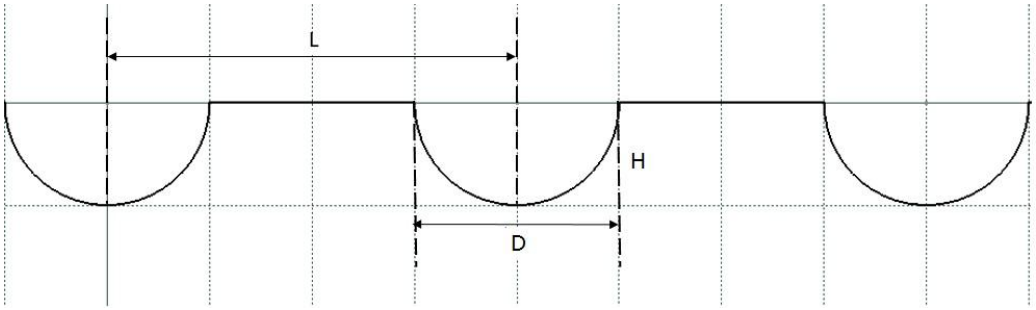
（a） 黄缘真龙虱及其表面微结构　　（b） 蜣螂及其头部的凸起微结构

图 1 自然界非光滑表面

Fig.1 Natural non-smooth surfaces

通过借鉴自然界和海洋生物进化的物理现象，参考其非光滑表面，提取典型特征，形成仿生结构。本文内容为圆球体与表面相交产生凹坑结构。

凹坑尺寸及形态如图 2 所示，几何尺寸选择为直径 D=20 mm，深度为半径 H=10 mm，球心位于车体转向架表面，间距为 40 mm。



D：凹坑结构直径；H：深度为半径，球心位于车体表面；L：球心距离

图 2 凹坑结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of pit structure

2 高速列车应用部位与方案

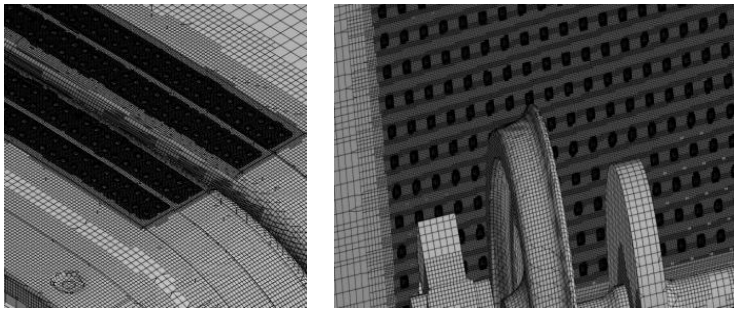
结合高速列车气动阻力分布特征，本文选择转向架舱端板和风挡区域进行表面微结构布置。三辆编组计算模型中，转向架舱端板凹坑布置位置如图 3 所示，局部网格如图 4 所示。



（a）改形位置　　（b）局部放大

图 3 表面改形分布位置

Fig.3 Surface modification distribution location



(a)风挡　　(b)转向架

图 4 不同区域的凹坑网格结构

Fig.4 Pit grid structures in different regions

3 数值模拟方法

3.1 计算域与边界条件

采用三编组高速列车模型进行数值模拟。计算域为长方体：列车前方取 60 m，后方取 120 m，侧向取 30 m，高度取 30 m。入口采用速度入口，速度 v=111.1 m/s,，对应 400 km/h；入口湍流强度去 1%，湍流粘度比为 10；出口采用压力出口，表面压力为 0 Pa；车体表面为无滑移壁面，地面为移动壁面，移动速度与

来流一致，顶部和侧面采用滑移壁面。

3.2 网格与无关性验证

采用六面体网格与边界层棱柱相结合的划分方式，车体表面边界层层数为 15 层，第一层网格高度为 0.26 mm，增长比为 1.5，三编组网格总量约为 7 000 万。为了验证网格无关性，分别划分粗网格 4 000 万、中网格 7 000 万和细网格 1.05 亿三套网格，计算得到整车阻力系数分别为 0.363、0.359、0.3581，粗网格与细网格的偏差为 1.37%，中网格与细网格的偏差为 0.25%，为平衡计算代价与结果精度，本文选择在保证目标精度前提下网格数量较少的中网格进行后续计算。

3.3 求解设置

湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型，压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法，空间离散采用二阶迎风格式，收敛判据为各方程残差低于 10^{-5}，且总阻力系数在连续 50 步迭代内波动小于 0.2%。

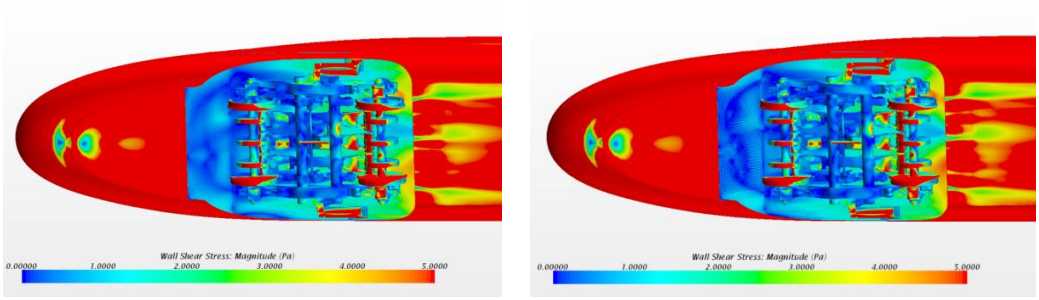
4 机理分析

通常认为表面越粗糙，接触面积越大，摩擦阻力越大，而对于列车实际运行工况，尤其是非定常流动，层流转化为湍流之后，气流在边界层内横向上有能量与动量的交换，而这些交换势必会引起表面阻力的变化。此外，列车表面流动复杂，引起的流动的分离和再附着等现象也会对表面阻力有很大的影响。本章节从机理层面分析表面改形结构的减阻问题。

4.1 剪切应力

流体沿着分布有凹坑的表面流动时候，由于凹坑的尺度比较小，而凹坑相互之间的距离比较接近，在表面形成的高速流动只和凹坑的顶部发生接触，不会在凹坑中产生高速流动，因此只在凹坑顶部小面积区域有较高的剪切力，而凹坑壁上的剪切力比较小。同时，凹坑内部的流动为低速流动，速度梯度非常小，因此阻力相对于平板流动较小。

图 5 为头车转向架区域剪切应力对比。改形后的表面剪切应力发生了变化，从局部放大的图 6 中可以看出凹坑内部的颜色为深蓝色，剪切应力非常低。表面剪切力云图的对比说明，凹坑结构带来了剪切应力数值的大面积降低，使得整体气动阻力降低，实现减阻目的。图 7 的速度矢量图上可以看出，表面凹坑结构内部形成了“二次涡”，涡的旋转方向是向着有利于外流场流动的方向，基本每个表面凹坑结构都形成了这样的二次涡，大量的二次涡构成了“二次涡群”。二次涡群把车体表面高速流动气流与底部流动隔开，如图 8 对比所示，一方面减少了高速气流与车体表面的直接接触摩擦，将流体-固体表面滑动摩擦转变为了流体之间的滚动摩擦，类似微型的滚动轴承，而滚动摩擦阻力小于滑动摩擦阻力；另一方面保持二次涡群下方的流动处于非常低速的状态，如图 8 所示，使得流动更加稳定；并且低速流动与凹坑底部表面所产生的滑动摩擦力也相应减小。通过在车体表面上，大量布置同样几何和分布的凹坑结构，整体达到了降低表面阻力的效果，使整车的气动阻力出现了降低。数值分析的结果解释了虽然表面积增大，但是气动阻力出现了减小的现象，可以为高速列车带来创新的减阻方案。中间车和尾车与头车一致。



（a）原型车　　（b）表面改形

图 5 头车剪切应力对比图

Fig.5 Comparison of Shear Stress in the Front Vehicle

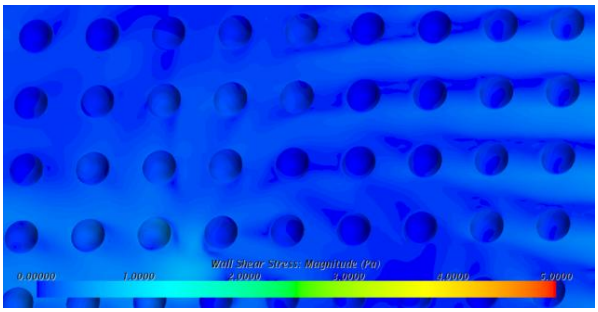


图 6 凹坑内部剪切应力云图

Fig.6 Shear stress contour map inside the pit

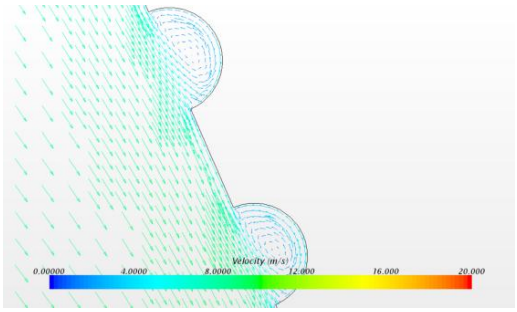
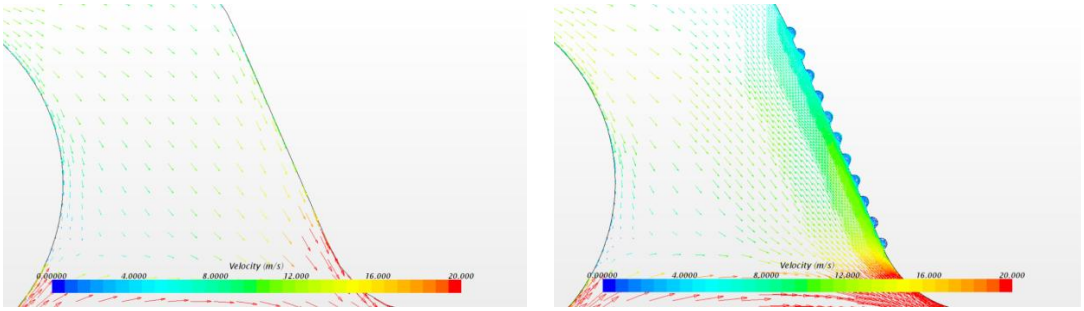


图 7 凹坑内部二次涡

Fig.7 Secondary vortex inside the pit



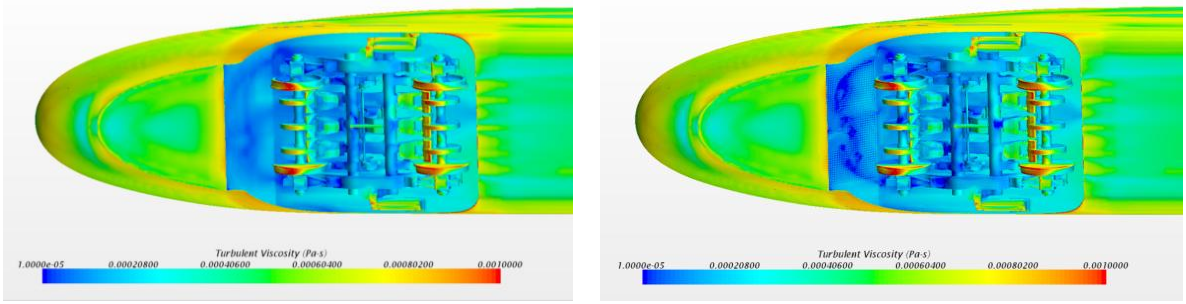
（a）原型车　　（b）表面改形

图 8 剪切速度矢量对比图

Fig.8 Shear velocity vector comparison diagram

4.2 湍流粘度

图 9 显示了头车转向架区域表面的湍流粘度分布。对比原型车在转向架区域里的湍流粘度，改形后湍流粘度出现了很大程度的降低。之前在凹坑同样区域的平面流动，湍流粘度很高，而改为凹坑之后，凹坑内部表面的湍流粘度显示深蓝色，表明湍流粘度很低，流动的涡流脉动很小。这使得流动的脉动和分离得到了延迟和阻止，降低粘性力和压差阻力。



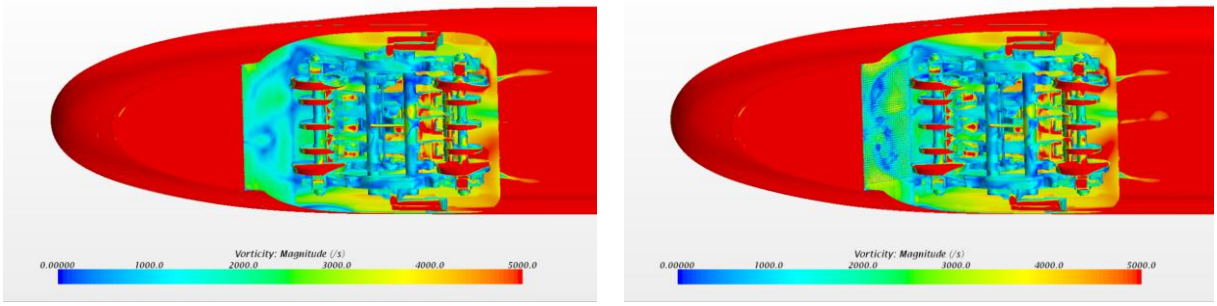
（a）原型车　　（b）表面改形

图 9 头车湍流粘度对比图

Fig.9 Comparison of turbulent viscosity for the head vehicle

4.3 涡量

图 10 显示了头车的表面涡量对比。可以看出，表面改形后的表面涡量分布更加紊乱，因此涡相互产生了抵消作用，从而降低了压差阻力。



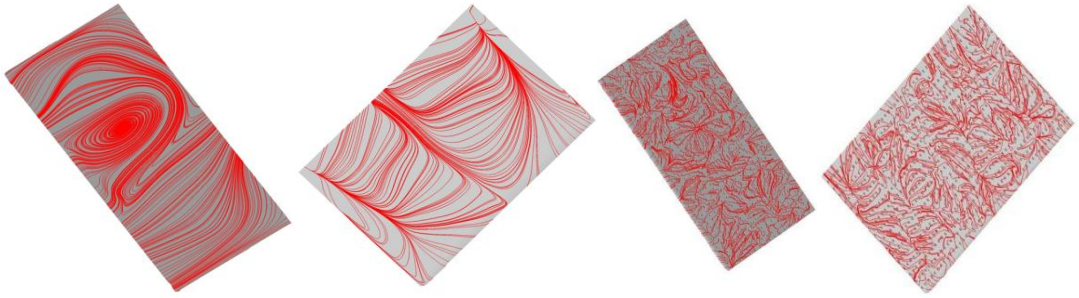
（a）头车原型车　　（b）头车表面改形

图 10 涡量对比图

Fig.10 Comparison of wake vorticity

4.4 局部对比

下面对比凹坑局部的物理量改变，改形前后的表面流线如图 11 所示。表面改形后，流动出现了极大的分离，整个流动呈现出紊乱状态，导致了表面正负压力的分布出现一种混乱的状态，使得压差阻力减小。



（a）原型车　　（b）表面改形

图 11 表面流线示意图

Fig.11 Surface streamline diagram

5 工程应用方案分析与测试

5.1 仿真分析

原型车、转向架舱端板和风挡区域改形的气动力结果，如表 1 所示。

表1　气动力计算结果统计表

Tab.1　Aerodynamic Calculation Results Summary Table

原型车/N						
	压差阻力	Cd	摩擦阻力	Cd	总阻力	Cd
头车	7368.1	0.082	2989.7	0.033	10357.8	0.115
中车	9852.2	0.109	2703.7	0.030	12555.9	0.139
尾车	7190.2	0.080	2275.5	0.025	9465.7	0.105
整车	24410.5	0.270	7968.8	0.088	32379.4	0.359
变化%						
转向架区域/N						
	压差阻力	Cd	摩擦阻力	Cd	总阻力	Cd
头车	7227.0	0.080	2957.5	0.033	10184.5	0.113
中车	9243.9	0.102	2654.7	0.029	11898.7	0.132
尾车	7140.6	0.079	2253.3	0.025	9393.8	0.104
整车	23611.5	0.262	7865.5	0.087	31477.0	0.349
变化/%	-3.27		-1.30		-2.79	
风挡区域/N						
	压差阻力	Cd	摩擦阻力	Cd	总阻力	Cd
头车	7379.8	0.082	2986.8	0.033	10366.6	0.115
中车	9658.3	0.107	2686.7	0.030	12345.1	0.137
尾车	7130.3	0.079	2272.0	0.025	9402.3	0.104
整车	24168.4	0.268	7945.5	0.088	32113.9	0.356
变化/%	-0.99		-0.29		-0.82	

由表 2 可知，转向架区域改形同时带来了头车、中车和尾车三个部分气动阻力同时减小，整车气动阻力比原型车减小 2.79%，压差阻力和摩擦阻力均降低，压差阻力降低 3.27%高于摩擦阻力降低 1.3%。风挡区域改形使中车和尾车气动阻力略微减小，整车总气动阻力减小 0.82%。

根据三编组数值模拟结果来估算八编组原型车阻力系数。估算方法以三编组 CFD 得到的头车、中间车、尾车阻力系数为基础，按八编组车辆顺序扩展，3 车和 6 车为受电弓车，附加阻力系数取 0.034；2 车和 7 车为中间车；4 车和 5 车在两受电弓车之间；八编组列车气动阻力系数如表 2 所示。

表2　八编组列车气动阻力系数

Tab.2　Aerodynamic drag coefficient of an eight-car train set

	阻力系数 Cd				
	头车 1	中间车 2	受电弓 3	中间车 4	中间车 5
原型车	0.116	0.087.	0.121	0.06	0.06
转向架 D20mm, R40mm 凹坑	0.115	0.077	0.117	0.0579	0.0579

风挡 D20mm, R40mm 凹坑	0.117	0.0785	0.121	0.0591	0.0591
转向架+风挡 D20mm, R40mm 凹坑	0.116	0.0763	0.115	0.0574	0.0574

	阻力系数 Cd				
	受电弓 6	中间车 7	尾车 8	总计	变化/%
原型车	0.121	0.087	0.095	0.747	-
转向架 D20mm, R40mm 凹坑	0.117	0.077	0.095	0.7138	-4.45
风挡 D20mm, R40mm 凹坑	0.121	0.0785	0.095	0.7301	-2.26
转向架+风挡 D20mm, R40mm 凹坑	0.115	0.0763	0.0932	0.7071	-5.34

由表 3 可知，八编组减阻趋势与三编组一致。在转向架舱端板布置直径 20mm，深度 10mm，间距 40mm 凹坑结构能降低气动阻力，较原型车减阻 4.45%。

5.2 风洞实验测试

5.2.1 实验设备与模型

风洞试验在中国空气动力学研究与发展中心 8m×6m 低速风洞中进行，该风洞为闭口直流式低速风洞，实验段截面尺寸为 8 米宽 6 米高，实验段长度 15 米，最大风速为 110m/s，湍流度不大于 0.5%。本实验风速为 60m/s，以列车模型高度为特征长度的雷诺数约为 2.3×10^7，满足高速列车风洞试验雷诺数自模拟要求。

列车模型采用 1:8 缩比三编组模型，由头车、中间车和尾车组成，模型总长约 10m，宽约 0.42m，高约 0.5m。模型包含转向架舱、风挡、受电弓等关键区域，车辆模型置于单线路基轨道。转向架舱端板设计为可更换结构，原型端板为平直端板，凹坑方案端板在表面布置直径 D=20mm、深度 H=10mm、中心间距 L=40mm 的球形凹坑。端板通过螺栓与模型底架连接，更换后测量端板与车体之间的间隙，保证各方案安装状态一致。

气动力测量采用高精度六分量应变天平，天平安装在模型内部支撑机构上，采样频率为 100Hz，试验侧偏角为-12°~29°，每个侧偏角重复测量 3 次，取平均值作为该工况的气动力结果。

5.2.2 模型安装与测试方式

列车模型在风洞中的安装与测试方式如图 12 所示。模型通过底部四组支撑与六分量天平连接，天平固定在风洞转盘上，通过转盘转动实现侧偏角变化。模型底部轨道模拟装置与风洞地板齐平，以减小地面边界层对转向架区域流动的干扰。

根据数值模拟结果，对转向架舱端板进行表面改形处理，布置球形凹坑结构。图 13 为转向架舱端板安装位置示意图；图 13(a)为无改形结构的平直端板，图 13(b)为端板凹坑改形结构。试验时，仅更换转向架舱端板，其余模型状态保持不变，以保证原型端板与凹坑端板对比结果的可比性。



图 12 列车模型在风洞中

Fig.12 The train model is placed in a wind tunnel



（a）平直端板无改形　　（b）凹坑方案

图 13 转向架舱端板微结构测试方案

Fig.13 Microstructure Testing Scheme for Bogie End Plate

5.3 测试方案与结果

风洞试验测试方案有 3 种：方案 1 为头尾车司机室下方转向架舱端板凹坑，方案 2 为除头尾车司机室下方转向架舱外的其他转向架舱端板凹坑，方案 3 为全部转向架舱端板凹坑。侧偏角从-12°到 29°，取各个角度对应的减阻效果平均值，三编组各减阻方案较原型车的减阻率如表 3 所示。

表3　转向架端板改形方案的减阻率

Tab.3　Reduction rate of the bogie partition wall modification scheme

方案	方案说明	风洞试实验减阻率/%
1	头尾车司机室下方转向架舱端板凹坑	3.2
2	中间转向架舱端板凹坑	3.2
3	全部转向架舱端板凹坑	4.2

由表 4 可知，全部转向架舱端板凹坑时减阻效果最为明显，风洞实验减阻率为 4.2%。

5.4 工程应用

根据仿真及风洞实验结果，可知表面微结构位于转向架舱端板减阻效果较好，因此将此方案推广应用至某型高速列车上，考虑其工程实施性及可操作性，样件微结构如图 14 所示。端板样件采用 2mm 厚不锈钢板，凹坑直径 20mm、深度 10mm、中心间距 40mm，通过冲压成型后螺栓固定于转向架舱端面。

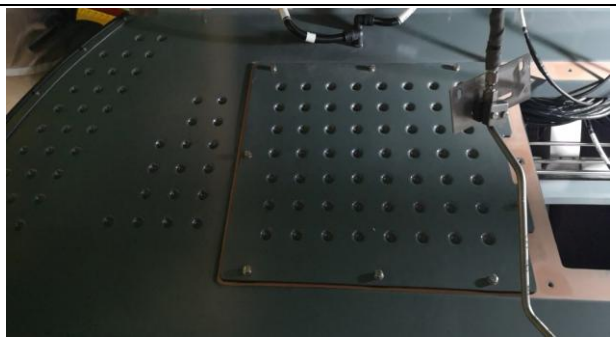


图 14 转向架端板表面改形微结构

Fig.14 Bogie cabin end panek surface-modified microstructure

6 结论

采用机理分析、仿真计算、样件试验、实车工程应用相结合的技术路线，对基于表面微结构的列车气动阻力被动控制进行了研究，得出以下结论：

1）以运动生物非光滑表面为仿生原型，提取球形凹坑结构，确定凹坑直径 D=20mm、深度 H=10mm、中心间距 L=40mm。该结构形式简单，易于加工，适合高速列车转向架舱端板工程化布置。

2）数值模拟揭示了球形凹坑的减阻机理：凹坑内部形成二次涡，将高速气流与壁面隔开，减少高速气流与车体表面的直接摩擦，将滑动摩擦转化为滚动摩擦；同时降低壁面剪切应力和湍流粘度，抑制涡流脉动与流动分离；凹坑还改变了近壁区涡量分布，增强涡量抵消，降低压差阻力。转向架区域和风挡区域改形后，压差阻力和摩擦阻力均降低，且压差阻力降低幅度大于摩擦阻力。

3）三辆编组列车数值模拟结果表明：转向架舱端板布置 D20-L40 凹坑时，整车总阻力降低 2.79%，其中压差阻力降低 3.27%，摩擦阻力降低 1.3%；仅风挡区域布置时，整车总阻力降低 0.82%。转向架区域因更迎向来流、改形面积更大，减阻效果优于风挡区域。

4）基于三编组 CFD 结果对八编组列车进行估算：转向架舱端板单独布置 D20-L40 凹坑时减阻约 4.45%，风挡单独布置时减阻约 2.26%，转向架舱端板与风挡协同布置时减阻率最高，达到 5.34%。说明多区域协同布置可进一步发挥凹坑微结构的减阻潜力。

5）1:8 缩尺的风洞实验中，转向架舱端板满布凹坑时减阻率为 4.2%，与数值模拟趋势一致，验证了仿真分析的可靠性。工程应用中将该微结构推广至某型高速列车转向架舱端板，实车应用效果与仿真、风洞试验趋势一致，增加成本较低。

6）本文仍存在不足：八编组结果基于三编组 CFD 估算，而实车线路工况复杂，风洞实验与仿真分析在雷诺数、模型细节和安装状态上存在差异。后续应开展复杂曲面及近壁区边界层湍流机理研究，发展多学科、多物理场耦合的协同设计与多目标优化方法，兼顾气动减阻、噪声控制和工程可实施性，为轨道交通节能降碳提供更多精准的技术支撑。

参考文献：

[1] 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):30-40.

[2] Muhlenberg J D. Resistance of a Freight Train to Forward Motion. FRA/ORD Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ: 78-04. US Fed. Railr. Admin. Washington, DC, 1978

[3] 陈春俊, 王熙茹, 周敏. 特长隧道内列车车内压力波模拟方法分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(8): 3039-3048

[4] 黄志祥, 黄汉杰, 李明, 陈立. 高速列车风洞试验[M]. 国防工业出版社, 2020.8

[5] 郭易, 单东日, 郭迪龙, 等. 高速列车隧道初始压缩波的动模型实验研究[J]. 力学与实践, 2018, 40(5): 495-502. DOI: 10.6052/0459-1879-18-140

[6] 郭易, 郭迪龙, 杨国伟, 等. 长编组高速列车的列车风动模型实验研究[J]. 力学学报, 2021, 53(1): 105-114. DOI: 10.6052/0459-1879-20-226

[7] 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(11): 73-80. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2020.11.011.

[8] 郭迪龙, 刘雯, 杨国伟, 等. 高速列车对腔室耗能型风屏障的气动冲击动模型试验研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18): 147-154. DOI: 10.3901/JME.2020.18.147

[9] 郭迪龙, 刘雯, 张子健, 等. 600km/h高速磁浮动模型气动载荷测试技术[J]. 实验力学, 2022, 37(3): 385-392. DOI: 10.7520/1001-4888-21-246

[10] 王健, 田红旗, 高广军, 等. 高速列车表面仿生微沟槽减阻机理及优化[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(2): 78-85.

[11] 王甜甜, 田红旗, 梁习锋. 高速列车多部件协同气动减阻优化[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(4): 98-106.

[12] 郭易, 郭迪龙, 杨国伟. 高速列车尾部被动流控装置减阻研究[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(3): 112-120.

[13] 王成强, 张茜, 邹连龙. 高速列车“帽型”声子晶体内饰板低频声振特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(3): 118-125.

[14] 刘加利, 杨明智, 张军. 高速列车受电弓平台凹陷结构被动减阻研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(9): 89-96.

[15] Guo D L, Liu W, Zhang Z J. Passive flow control for high-speed maglev trains at 600km/h[J]. Experimental Mechanics, 2022, 37(3): 385-392.

[16] 郭迪龙, 刘雯, 张子健. 600km/h高速磁浮动模型微结构气动减阻测试[J]. 实验力学, 2022, 37(3): 385-392.

[17] 李进平, 陈宏. 凸包型非光滑高速列车减阻机理数值分析[J]. 铁道学报, 2025, 47(8): 98-105.

[18] 郭易, 郭迪龙, 杨国伟. 高速列车表面微肋条减阻与横风稳定性协同优化[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(3): 112-120.

[19] 周丹, 田红旗, 高广军. 高速列车流线型转向架与底部导流板的气动减阻效果研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(10): 2895-2903.

[20] 李付华.TH1004C盒式应变天平静校证书.中国空气动力研究与发展中心低速所, 2019.04

[21] 黄志祥.中国标准动车组风洞试验报告.中国空气动力研究与发展中心低速所, 2016.05

[22] 陈道云, 罗财滢, 祝卫强. 基于熵权-Topsis的车体动应力时域外推方法 [J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(3): 100-109.



第一作者：刘斌（1984—），女，正高级职称，博士，研究向为列车空气动力学。

通信作者：张雷（1975—），男，正高级职称，博士，研究方向为轨道车辆系统集成。

通信作者：张卫华（1961—），男，教授/博士生导师，博士，研究方向为轨道车辆大系统动力学。