面向海外使用场景的不同货箱形式轻型货车空气动力学仿真研究

陈存福　胡金蕊　费洪庆　胡阔亮　文跃霖

（一汽解放青岛汽车有限公司，青岛 266000）

【摘要】为满足海外用户对轻型货车的多样化使用场景需求，选取典型海外市场的用户使用场景，系统研究了不同货物高度和货箱形式轻型货车的空气动力学特性。基于计算流体力学（CFD）方法建立某轻型货车整车外流场数值模型，在90 km/h车速工况下开展仿真，对比分析了不同货箱形式对整车气动阻力、表面压力分布及尾部涡流结构的影响规律。结果表明，驾驶室与货箱的高度差是压差阻力的主要影响因素，加装导流罩是改善高速燃油经济性的重要手段。最后，提出了在平均车速较低的地区优先采用高承载栏板货箱，在高速公路网发达的欧洲及中东地区采用经空气动力学优化的封闭式厢体方案的建议。

关键词：轻型货车　空气动力学　货箱形式　计算流体力学　海外使用场景

中图分类号：U461.1　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.20104/j.cnki.1674-6546.20260074

Numerical Study on the Aerodynamics of Light-Duty Trucks with Various Cargo Box Configurations under Overseas Operating Conditions

Chen Cunfu, Hu Jinrui, Fei Hongqing, Hu Kuoliang, Wen Yuelin

(FAW Jiefang Qingdao Automobile Co., Ltd., Qingdao 266000)

【Abstract】To address the diverse usage scenarios of light-duty trucks for overseas users, the study selects typical user usage scenarios in representative overseas markets and systematically investigates the aerodynamic characteristics of light-duty trucks with different cargo heights and body styles. A numerical model of the external flow field of a light-duty truck is established based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) method, and simulations are carried out under the operating condition of 90 km/h. The effects of different body styles on the overall aerodynamic drag, surface pressure distribution, and rear wake vortex structures are comparatively analyzed. The results indicate that the height difference between the cab and the cargo body is a primary factor influencing pressure drag, and the installation of an air deflector is an important means of improving high-speed fuel economy. Finally, it is recommended that high-capacity drop-side cargo bodies be prioritized in regions with lower average vehicle speeds, while aerodynamically optimized enclosed van body configurations be adopted in European and Middle Eastern regions with well-developed highway networks.

Key words: Light-duty truck, Aerodynamics, Cargo body configuration, Computational Fluid Dynamics (CFD), Overseas operating condition

【引用格式】陈存福, 胡金蕊, 费洪庆, 等. 面向海外使用场景的不同货箱形式轻型货车空气动力学仿真研究[J]. 汽车工程师, 2026(8): 36-42+48.

CHEN C F, HU J R, FEI H Q, et al. Numerical Study on the Aerodynamics of Light-Duty Trucks with Various Cargo Box Configurations under Overseas Operating Conditions[J]. Automotive Engineer, 2026(8): 36-42+48.

1　前言

2025年，中国商用车出口规模达到106万辆，同比增长17.2%。其中，轻型货车凭借其灵活机动、载货适应性强的特点，在东南亚、拉丁美洲、中东等新兴市场表现出强劲的增长潜力。然而，中国轻型货车在海外市场的本土化适配仍面临多重挑战。一方面，不同区域用户对货箱形式存在差

异化需求：东南亚市场偏好高栏式货箱以适配农产品运输，拉丁美洲市场常用篷布式货箱兼顾防晒与装载灵活性，中东市场对平板式货箱有较高需求以承载多种货物。另一方面，货箱形式直接影响整车空气动力学特性，进而影响燃油经济性、续驶里程及高速行驶稳定性。在海外市场普遍注重总体拥有成本（Total Cost of Ownership，TCO）的背景下，气动阻力的优化成为提升产品竞争力的关键技术点。

在商用车空气动力学研究领域，国内外学者已开展了大量工作。张炳力等[1]对某轻型货车外流场进行数值模拟，分析了货箱加装井字形格栅对气动阻力的影响，并采用响应面模型进行参数优化，有效降低了整车气动阻力。程华扬等[2]通过对驾驶室顶部加装气动附加装置（导流罩和井字型格栅）后的模型进行数值模拟，采用拉丁超立方试验设计方法设计试验，得到最优导流罩模型的气动阻力。杨小龙等[3]对厢式货车尾部导流板的减阻效果进行了数值模拟，验证了尾部结构优化对降低压差阻力的有效性。针对导流罩减阻，丁乐芳、于翰林等[4-5]采用数值模拟方法研究了货车流场结构与气动阻力的关联机制，揭示了流场结构对压差阻力的主导作用，研究了不同导流罩形式对整车气动阻力的影响，为工程实践提供了优化方法参考。黄传海等[6]研究了某微型货车侧导流板、前轮阻风板及机舱下护板对整车流场的影响，并实现了气动阻力系数的降低，提升了燃油经济性。宗奕彤等[7]研究了新能源轻型货车侧导流板、货箱圆角、箱体凸包及尾部平板对整车气动阻力的影响，并对高压区、气流分离区和尾涡区进行了结构优化。

然而，现有相关研究多局限于单一货箱结构的局部气动优化，缺乏对多种货箱形式的系统性横向对比分析，且研究场景多聚焦国内道路工况，缺少结合海外市场多元化使用环境开展产品适配性分析的气动阻力特性研究。本文以典型海外目标市场用户实际使用工况为基础，选取面向海外市场正向开发的轻型货车为研究载体，依托计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）仿真方法，系统开展9种不同货箱形式及典型载货状态下的整车气动阻力特性研究。通过解析整车表面压力分布、车身流场及尾涡演化规律，揭示不同货箱形式下整车气动阻力差异的内在形成机理，并提出适配海外市场应用工况的货箱选型方案与空气动力学优化策略。

2　车辆模型的建立

2.1　研究对象

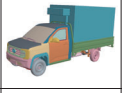
为了准确评估不同货箱状态对整车气动阻力的影响，本文以某款轻型货车为基础，匹配传统燃油发动机和栏板式货箱，建立了包含驾驶室、底盘、轮胎、货箱的全尺寸三维几何模型。在保证计算精度的前提下，对车身表面及底盘进行了适当的几何清理与简化，去除了对宏观流场影响极小的微小孔洞、螺栓及细微管线，保留了前格栅、保险杠面罩、外后视镜、龙门架等对流场起决定性作用的关键部件。整车三维模型如图1所示。



图1　某轻型货车三维模型

结合海外市场的实际调研数据，本文设定了9种典型的货箱及载货工况，如表1所示：1~4号车主要代表栏板式货箱在不同低高度载货状态下的工况；5~8号车代表不同高度、不同顶部倾角及前凸结构的厢式/高载货工况；9号车代表在货箱前端顶部增加了制冷装置的冷藏车载货工况。

表1　不同货箱形式及载货工况方案

编号	状态	对应车型	编号	状态	对应车型
1			6		
2			7		
3			8		
4			9		
5					

2.2　模型建立及网格处理

采用商用软件STAR-CCM+对模拟的流体域进行网格离散，为了精确捕捉车身表面的流动分离、再附着以及尾流区的涡脱落现象，对前格栅、A柱、外后视镜、货箱前端及尾流区等流场梯度变化剧烈

的区域进行了局部网格加密。在车身表面近壁区域采用具有几何增长率的棱柱层网格来解析车辆表面区域的湍流边界层流动，车体表面设置3层边界层，总厚度为2 mm，增长率为1.2；为求解车身表面的流动分离和车身后部的尾流，对局部进行加密处理。图2所示为中截面（Y=0 mm）网格，体网格总数为2 583×10^{4}个。

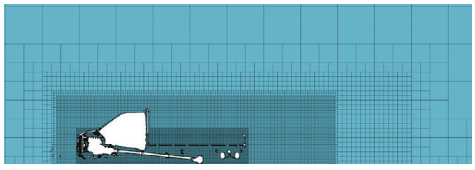


图2　中截面网格

3　湍流模型与物理模型的建立

3.1　湍流模型

在流动计算中，考虑到商用车外部流场存在强烈的逆压梯度和大规模流动分离，本文选取在分离流预测方面具有优势的剪切应力输运（Shear Stress Transport，SST）k-ω湍流模型，该模型在原始k-ω湍流模型的基础上引入非守恒的交叉扩散项，同时使用混合函数耦合来流远场处的k-ε湍流模型和近壁处的k-ω湍流模型。该模型对来流边界条件的敏感度更低，可以更好地预测流动分离，并且在逆压梯度解析中具有良好的表现，因而在汽车空气动力学领域广泛应用[8]。近壁面采用全y^+壁面处理（All y^+ Wall Treatment）模型，作为一种连续混合式壁面处理方法，其核心优势在于引入了平滑混合函数（Blended Function），可实现近壁面首层网格中心到壁面的无量纲距离y^+全域范围内的自适应计算，有效消除了传统壁面函数在y^+处于5~30范围的缓冲层时产生的计算误差，自动完成粘性底层与对数律层的平滑过渡。

为准确捕捉商用车外部强烈的逆压梯度和复杂的流动分离现象，本文对车身附面层进行了精细化控制。图3所示为车身表面y^+分布云图，由图3可知：车身绝大部分区域的y^+小于30，大面积区域处于y^+小于10的粘性底层，仅在A柱边缘等极少数气流剧烈加速区y^+升高至50~100。面对整车复杂流场导致y^+分布跨度极大，且不可避免地部分落在缓冲层的情况，全y^+壁面处理模型发挥了其独特的优势，确保了壁面切应力及分离点预测的准确性。这种网格控制策略高度契合了SST k-ω模型的求解特性，充分保证了本文气动力计算结果的可靠性。

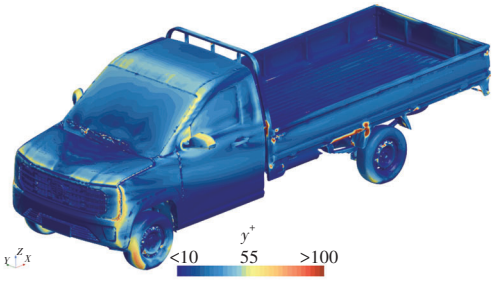


图3　车身表面y^+分布云图

3.2　物理模型与边界条件

图4所示为计算域和边界条件设置情况，计算域入口与车头的距离为3倍车长，计算域出口与车尾的距离为4.5倍车长，计算域侧边壁面到车身侧边的距离为3倍车宽，计算域顶部到车顶的距离为6.42倍车高，阻塞率为1.78%，根据阻塞比理论，数值模拟的阻塞比小于5%即可[9-12]。该计算域足够大，可有效避免边界效应对车身周围流场的干扰。

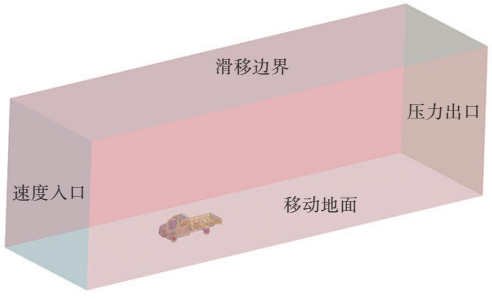


图4　计算域和边界条件示意

计算域入口设置为速度入口边界，模拟车辆在海外公路行驶时的典型巡航速度，大小为90 km/h，入口来流湍流强度为1%；计算域出口设置为压力出口边界，与大气压的相对压力设为0 Pa；计算域侧壁和顶部壁面均设置为滑移壁面，以消除壁面附面层的影响；为了真实模拟车辆行驶时的地面效应，计算域底部壁面设置为移动壁面，壁面移动方向和移动速度均与来流保持一致。

3.3　仿真结果验证

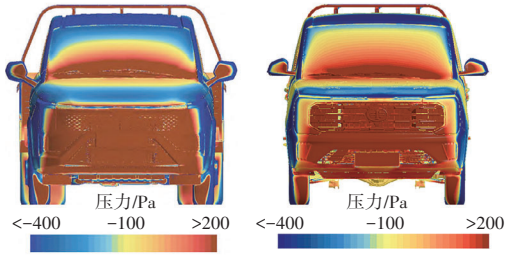
由于本文研究车型暂未开展实车风洞试验，为验证SST k-ω湍流模型及数值仿真方法的可靠性，从网格无关性及文献与工程经验多维度开展验证。

在计算域设置不同配置的网格方案，并计算采用不同方案时的整车相对气动阻力，结果如表2所示。随着计算域体网格数量的增加，稳态计算得到的相对气动阻力变化趋于平稳，当体网格数量大于2 583×10^{4}个后，计算域网格数量的增加对相对气动阻力的影响甚微，验证了网格无关性。为了平衡计算精度和计算效率，采用方案3的网格配置。

表2　网格无关性分析

方案	网格数量/×10⁴ 个	相对气动阻力
1	1 490	1.037
2	1 812	1.017
3	2 583	1.006
4	2 995	1.002
5	4 038	1.000

选取同级别轻型货车公开文献结果[6]进行对比，本文仿真得到的车身表面压力分布与文献[6]的一致性较好，如图5所示。



（a）文献[6]　　（b）本文车型

图5　文献[6]与本文车型正面压力云图对比

4　不同货箱形式下的整车空气动力学特性分析

4.1　整车气动阻力对比

整车空气动力学阻力通常由压差阻力和摩擦阻力组成，其中压差阻力在商用车中占据主导地位（占比超过80%）。为直观比较不同工况下的阻力变化情况，本文对气动阻力进行了归一化处理，以整车平板货箱空载状态（1号车）的气动阻力作为基准。

图6所示为不同货箱形式及载货状态下的归一化气动阻力对比结果。由图6可知，当货箱形式为栏板箱时，在空载（1号车）及货物高度不高于驾驶室高度（2~4号车）的情况下，整车的相对气动阻力分别为1.00、0.98、1.04和1.11。可以看出，当货箱位置被驾驶室尾流的气动区域遮蔽时，整车气动阻力无明显差异（波动范围在±10%左右）。这也是计算轻、微型货车气动阻力时，工程上通常仅在空载状态下计算的原因。

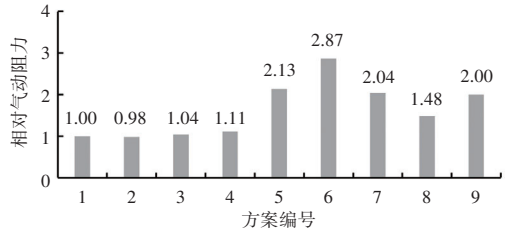


图6　不同货箱形式下整车相对气动阻力

由图6中5~9号车数据可知，当货物或货箱的高度明显超过驾驶室的高度时，整车气动阻力急剧上升。随着货箱高度的增加，整车迎风面积扩大，气动阻力呈非线性增长趋势。在极端工况下（如5号车厢式货箱），气动阻力达到空载栏板状态的2.87倍。

货箱顶部的微观几何形状对气动阻力也有决定性影响。对比7号车和8号车，7号车因货物/货箱前凸导致气动阻力急剧升高，而8号车（具有一定的货箱顶部后倾斜角）较7号车气动阻力降低了约27%。这说明合理的货箱前缘倾斜或倒角设计能够大幅削弱气动阻力。9号车和5号车货箱总高度相同，9号车由于在货箱前端顶部增加了制冷装置（冷藏机组），其相对气动阻力从2.13下降至2.00。这一结果表明，体积适中的前置冷藏装置在流场中充当了导流罩，起到了引导气流、改善前端流场、抑制大规模流动分离的作用，从而使整车气动阻力显著降低。

4.2　表面压力分布特征对比

汽车表面的压力分布是压差阻力产生的直接原因。图7所示为1~9号车整车正面压力系数云图。

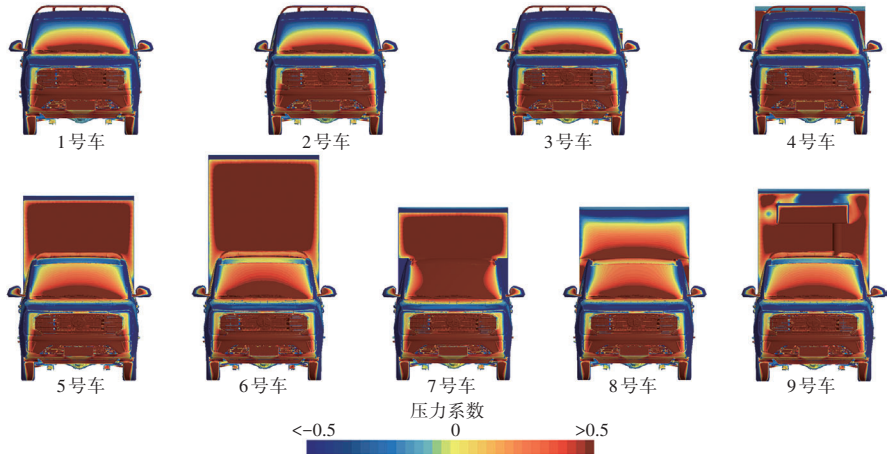


图7　不同状态下整车正面压力系数云图

由图7可知，在迎面气流的冲击下，1~9号车的前保险杠面罩、前格栅、轮胎前侧迎风面、龙门架前部、前风窗玻璃下部以及外后视镜内侧均形成了显著的驻点区，受到极大的正压冲击。由于1~4号车的货物高度并未超过驾驶室高度，其前风窗玻璃及前格栅的压力大小与位置分布高度相似，驻点压力维持在常规水平。

5~9号车的表面压力分布结果表明，随着货箱高度超过驾驶室高度并不断增大，气流在跨越驾驶室顶盖后受阻。这一强烈的阻流效应导致前风窗玻璃及车顶受到的正压区域向四周明显扩大，整车气动阻力急剧恶化。特别是5~7号车的正面压力系数云图清晰显示，较高的货箱前壁面直接暴露在来流中，承受了极高的正压力。货箱前壁面形成的巨大正压区是此类工况气动阻力大幅增加的最主要原因。

将5号车（普通高平顶货箱）与9号车（带前置制冷装置）的正面压力进行对比可以发现，在货箱总高度相同的工况下，9号车制冷装置的流线型外壳改变了气流的驻点位置，引导气流更平顺地向上方及两侧偏转。这种流动有效减小了货箱前壁面的高压区面积，证实了制冷装置对前端流场的改善作用。

7号车与8号车的对比进一步印证了表面压力对造型的敏感性。7号车的货箱存在前凸结构，导致气流在驾驶室顶部与货箱前凸部位之间形成局部高压气穴。前风窗玻璃上方及货箱前凸部位的正压区面积显著增加，导致压差阻力大幅提高。

侧面流场的压力分布同样对总阻力具有重要贡献。图8所示为1~9号车侧面压力系数分布情况。由图8可知，1~4号车、7号车和8号车侧面压力分布趋势基本一致。在前格栅侧边缘（A柱及保险杠面罩拐角）处，由于空间几何形状的急剧收缩，气流加速，根据伯努利原理，流速的急剧增加导致局部静压骤降，形成明显的负压区；随着流动沿车门向后持续，附面层逐渐发展，压力逐渐恢复。

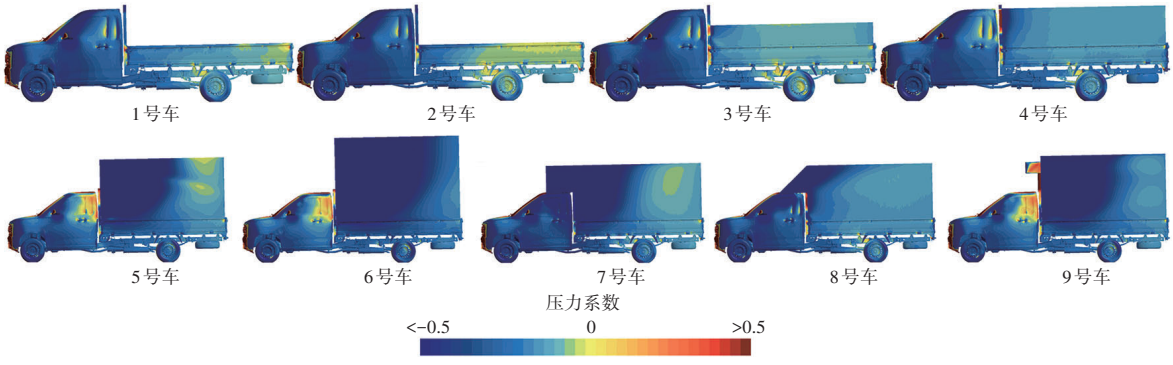
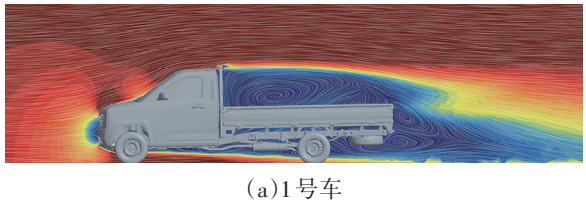


图8　不同状态下整车侧面压力系数云图

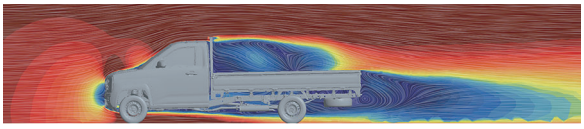
对于高箱体的4~9号车，随着货箱体积和迎风面积的增加，气流在越过A柱和驾驶室顶盖后发生严重的流动分离。图8表明，货箱侧面遭受的负压区面积随着货箱高度的增加逐渐增大。这种大面积负压区产生的原因是气流在货箱前端直角处无法保持贴体流动而发生分离，产生了强烈的剥离漩涡。漩涡的形成和演化消耗了流场的大部分动能，转化为热能耗散，宏观上表现为侧壁压差阻力的增加。同时，5号车、6号车、9号车的驾驶室后部（即驾驶室与货箱的间隙区）压力有所增加，预示着货箱的存在对驾驶室尾部的流场产生了强烈的回堵干涉影响。

4.3　尾部涡流结构分析

为了更深入地探究风阻差异的流体力学机制，本文提取了车辆中截面的流线及速度矢量，以及三维空间的总压分布，如图9所示。前方来流直接冲击驾驶室前格栅，在驻点附近，气流一路向上沿着发动机罩、前风窗玻璃流动，另一路向下沿着保险杠面罩下沿向车底流动。上部气流经过驾驶室顶部后，由于后方货箱状态不同，气流的再附着差异巨大。1~4号车由于货箱低矮，气流在经过货箱尾部时，底部气流受后桥和底盘部件的扰动向上翻卷形成上洗流，顶部气流向下偏转，在尾部汇合形成较为规律的尾流漩涡。



（a）1号车



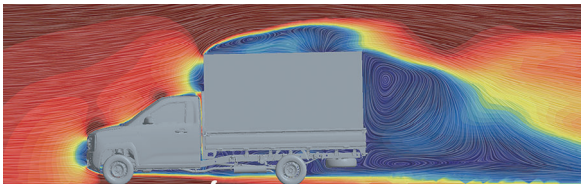
(b)2号车



(c)3号车



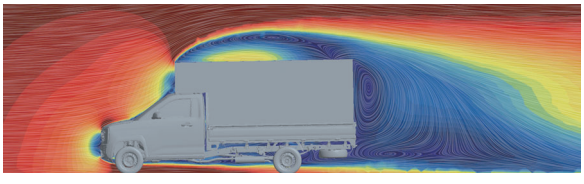
(d)4号车



(e)5号车



(f)6号车



(g)7号车



(h)8号车



(i)9号车

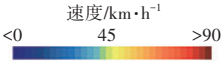


图9　不同状态下整车中截面速度矢量图

由图9e~图9i可知，随着货箱高度的增加，驾驶室后部的流场拓扑结构发生了根本性改变。首先，气流在冲击货箱前直立壁面时发生剧烈分离，在驾驶室与货箱的缝隙中产生了大小不一、不断脱落的驻涡。其次，在较大货箱的尾部，顶部气流发生大尺度剥离，形成强烈的下洗涡，与底部的上洗涡在尾流区发生复杂的相互作用。两个反向旋转的庞大涡流体系在车辆尾部交汇、掺混，形成一个巨大的低压尾涡尾流区。尾迹区的不断扩张和涡流对能量的剧烈消耗，是造成厢式货车气动阻力急剧增加的根本原因。对比5号车与9号车的中截面流线可以看出，9号车货箱前部的冷藏机组充当了物理导流面，改变了驾驶室顶部来流的方向，减弱了气流对货箱直立前壁面的直接冲击，使得气流能够更加贴合货箱顶部向后流动。因此，尾流分离点被向后推移，涡流区域缩小，最终表现为整车气动阻力降低。

为进一步评估流场中由于粘性剪切和涡流耗散导致的能量损失，仿真获得不同车型总压为零的等值面分布情况，如图10所示。由图10可知，除外后视镜、轮腔外侧等常规的局部阻力源外，最大总压损失区集中于驾驶室尾部间隙、货箱前端及尾部大尺度涡流区。对于5~9号高厢车，由于货箱前部造型过于方正，缺乏气动倒角，导致前端产生了严重的三维空间流动分离。分离气流无法再附着于侧面和顶部，形成了向外扩散的管状涡，导致气动阻力急剧增加。

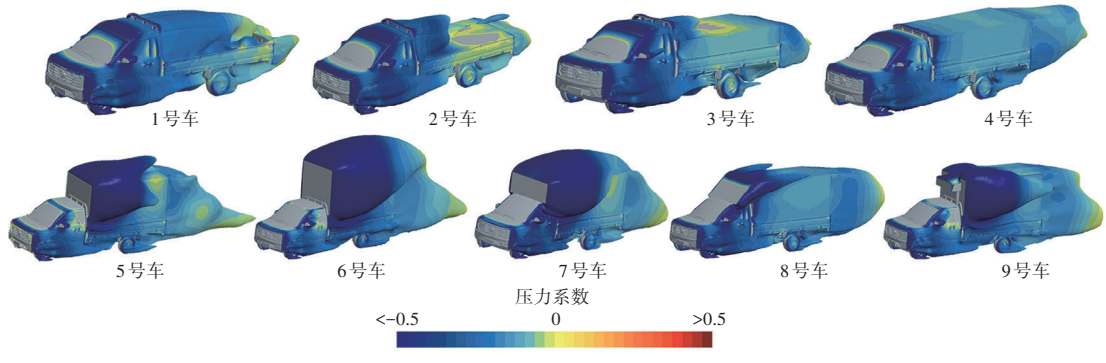


图10　不同状态下总压为零的等值面

5 海外市场轻型货车货箱空气动力学优化与选型建议

基于上述仿真结果，结合不同海外区域市场的实际物流需求特征，本文提出以下差异化的货箱选型与空气动力学优化建议：

a. 关注货箱高度匹配和导流罩的应用。仿真结果表明，驾驶室与货箱的高度差是导致压差阻力呈指数级增大的关键因素。当面临大容积、高厢式货箱的需求时，需进行空气动力学优化，加装车顶导流装置是极具性价比的方案，这对提升车辆的高速燃油经济性至关重要。

b. 注重货箱前端的几何倒角设计。海外本土化改装厂在定制货箱时，基于成本考虑，往往采用方形设计。由仿真结果可知，方正且无倒角的货箱前端会诱发严重的分离流。因此，建议在货箱迎风面的上边缘及左、右边缘引入半径为100~150 mm的圆角或切角设计，以有效抑制前端剥离涡的产生。

c. 针对不同区域路况采取差异化产品设计策略。对于路况较差、平均行驶车速较低的拉丁美洲或非洲部分国家农贸市场环境，气动阻力对燃油消耗量的影响相对较小，可优先推荐承载能力强、成本低的传统栏板货箱，其自身的气动阻力处于较优水平。而对于欧洲或中东具备完善高速公路网、平均车速较高的国家，气动阻力表现直接决定了产品的运营成本，推荐采用经空气动力学优化的厢体方案。

6 结束语

本文开展了面向海外市场的不同货箱形式轻型货车的空气动力学仿真研究，结果表明：货箱形式对整车气动阻力影响显著，厢式货箱气动阻力最大，货箱或货物高度低于驾驶室高度时，气动阻力增加不明显；驾驶室顶盖与货箱间的高度差以及空间间隙是诱发强烈驻涡和分离流、导致压差阻力激增的关键因素，加装导流装置可有效降低厢式货箱的气动阻力，是优化厢式货箱车型空气动力学性能的有效手段。基于此，本文结合海外不同区域用户的运输习惯和路网车速特征提出了差异化货箱选型与空气动力学优化建议。

本文研究结论可为面向海外市场的商用车开发提供参考，后续将进一步探索侧风工况下带有复杂货箱结构的商用车行驶稳定性及侧偏力矩的变化规律。

参 考 文 献

[1] 张炳力，薛铁龙，柴梦达. 轻卡外流场数值模拟及附加井字形格栅优化设计[J]. 合肥工业大学学报（自然科学版），2014, 37(12): 1430-1435.
ZHANG B L, XUE T L, CHAI M D. Numerical Simulation of External Flow Field of a Light Truck and Optimization Design of #-Shaped Fences[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2014, 37(12): 1430-1435.

[2] 程华扬. 某轻卡外流场数值模拟分析及优化研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2014.
CHENG H Y. Numerical Simulation of Flow Field around a Light Truck Analysis and Design Optimization[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.

[3] 杨小龙，邹宏伟，张泽坪. 厢式货车尾部非光滑表面导流板减阻效果研究[J]. 汽车工程，2016, 38(7): 815-821.
YANG X L, ZOU H W, ZHANG Z P. A Study on the Drag Reduction Effects of Rear Deflector with Non-Smooth Surface for a Cargo Van[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(7): 815-821.

[4] 丁乐芳，张宪，官已骏. 基于导流罩优化的轻卡车型节油效果研究[J]. 汽车工程学报，2020, 10(6): 424-430.
DING L F, ZHANG X, GUAN Y J. Research on Fuel Saving Effect of a Light Truck Based on Deflector Optimization[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2020, 10(6): 424-430.

[5] 于翰林，毛洪海，杨杰. 轻型卡车气动特性数值模拟及导流部件优化研究[C]// 2021中国汽车工程学会汽车空气动力学分会学术年会论文集. 重庆：中国汽车工程学会，2021: 200-207.
YU H L, MAO H H, YANG J. Numerical Simulation of Aerodynamic Characteristics of Light Truck and Optimization of Guide Components[C]// Proceedings of the 2021 Academic Annual Conference of the Automotive Aerodynamics Committee of the China Society of Automotive Engineers. Chongqing: China Society of Automotive Engineers, 2021: 200-207.

[6] 黄传海，周思，柏国杰，等. 某微型货车的风阻分析和优化研究[J]. 客车技术与研究，2024, 46(6): 41-44+53.
HUANG C H, ZHOU S, BAI G J, et al. Study on Wind Resistance Analysis and Optimization of a Mini-Truck[J]. Bus & Coach Technology and Research, 2024, 46(6): 41-44+53.

[7] 宗奕彤，郭磊，石岩，等. 某型新能源轻卡气动阻力分析与研究[J]. 时代汽车，2018(11): 74-78.

（下转第48页）

CHEN J P, CHEN Z J, QUE X C. Numerical Simulation and Experimental Study of the Temperature Field and Air Flow Inside the Air-Conditioned Passenger Compartment [J]. Automotive Engineering, 1999(3): 171-176+133.

[10] 芦克龙, 谷正气, 贾新建, 等. 某重型货车空调系统对乘员舱热舒适性影响的分析与改进[J]. 汽车工程, 2011, 33(2): 162-166.
LU K L, GU Z Q, JIA X J, et al. Analysis and Improvement of the Effects of Air Conditioning System on the Thermal Comfort of Passenger Compartment in a Heavy Truck[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(2): 162-166.

[11] 张文灿, 陈吉清, 兰凤崇. 汽车乘坐空间热环境降温过程动态特性分析研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 116-124.
ZHANG W C, CHEN J Q, LAN F C. Study on Thermal Environment Dynamic Characteristics within a Vehicle Cabin during the Cooling Period[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(14): 116-124.

[12] 缪维跑. 台风环境下风力机流固耦合响应及叶片自适应抗风性研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2019.
MIAO W P. Study of Fluid Structure Interaction Response of Wind Turbine in Typhoon Environments and Wind Resistance of Adaptive Blade[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2019.

[13] WANG B, XU Z F, LI C, et al. Hydrodynamic Characteristics of Forced Oscillation of Heave Plate with Fractal Characteristics Based on Floating Wind Turbine Platform[J]. Ocean Engineering, 2020, 212.

[14] 刘青松, 陈福东, 李春, 等. 柔性弹片控制翼型流动分离的流固耦合研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1954-1963.
LIU Q S, CHEN F D, LI C, et al. Study on Fluid-Structure Interaction for Flow Separation Control of Airfoil with Flexible Flap[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1954-1963.

[15] HINZE J O. Turbulence[M]. New York: McGraw-Hill, 1975.

（责任编辑　弦　歌）

修改稿收到日期为2025年3月31日。

（上接第42页）

ZONG Y T, GUO L, SHI Y. Analysis and Research on Aerodynamic Drag of a New Energy Light Truck[J]. Auto Time, 2018(11): 74-78.

[8] 尚文强, 张风利, 王文江, 等. 湍流模型参数对气动力仿真精度影响研究[J]. 汽车工程, 2025, 47(9): 1752-1762.
SHANG W Q, ZHANG F L, WANG W J, et al. Study on Effect of Turbulence Model Coefficients on Accuracy of Aerodynamic Simulation[J]. Automotive Engineering, 2025, 47(9): 1752-1762.

[9] 余天行. 基于多维协同仿真的商用车尾翼优化及燃油经济性研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2025.
YU T X. Research on the Fuel Economy of Commercial Vehicles Based on Multi-System Simulation and Optimization of Body Attachment Parameters[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2025.

[10] 马德术, 文书涵, 李世强, 等. 基于CFD的新能源商用车续航分析与场景验证[J]. 专用汽车, 2024(6): 29-34.
MA D S, WEN S H, LI S Q, et al. Endurance Analysis and Scenario Verification of New Energy Commercial Vehicles Based on CFD[J]. Special Purpose Vehicle, 2024(6): 29-34.

[11] SAE International. Wind Tunnel Test Procedure for Trucks and Buses: SAE J1252_201207[S]. Warrendale, Pa, USA: SAE International, 2012.

[12] 宋晓东. 队列行驶智能商用车低风阻气动外形优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
SONG X D. Research on Aerodynamic Shape Optimization of Intelligent Commercial Vehicle Platoon with Low Wind Resistance[D]. Changchun: Jilin University, 2024.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2026年5月14日。