

城市客车行驶状态车身表面污染仿真与优化

罗雪香, 许 哲, 李宏锋, 邱鸿毅

(厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361023)

摘 要:针对某城市客车车身表面尘土污染问题,基于空气外流场耦合尘土颗粒进行仿真分析,并进行试验验证,进而提出相应的防污优化措施,取得较好的效果。

关键词:城市客车; 车身表面; 尘土污染; 空气流场

中图分类号:U469.13

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2022)05-0028-05

Simulation and Optimization of Body Surface Pollution for City Bus Driving State

LUO Xuexiang, XU Zhe, LI Hongfeng, QIU Hongyi

(Xiamen King Long United Automotive Industry Co., Ltd., Xiamen 361023, China)

Abstract: Aiming at the problem of dust pollution on the body surface of a city bus, this paper does the simulation analysis based on the coupling dust particles in the external air flow field, and does the test verification, then proposes the corresponding anti-polluting optimization measures, which procure good results.

Key words: city bus; body surface; dust pollution; air flow field

作为城市主要交通工具之一的城市客车,其表面美观性直接影响城市容貌和乘客体验感,其后视镜及各种电子摄像头的清晰度直接影响驾驶安全性。国外对车身表面污染问题研究较早,尤其对雨水污染研究较多^[1-3]。国内在这方面的研究起步较晚^[4],针对客车表面污染的研究更少。本文采用 CFD 方法仿真分析某城市客车在行驶时其表面尘土污染分布规律,并提出相应的优化措施,改善车身受污染程度。

车宽,高为 5 倍车高,如图 1 所示。

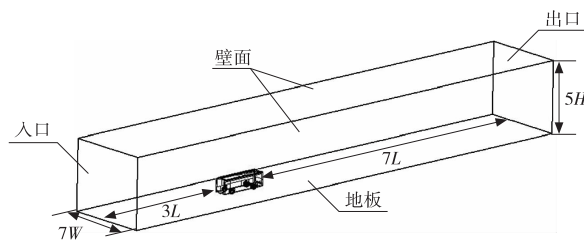


图 1 车辆几何模型及外流场计算域

1 仿真模型建立

本文基于 Star-CCM+ 软件对某城市客车车身表面尘土污染机理进行仿真分析。软件中采用 SST $k-\omega$ 模型分析计算空气外流场;在此基础上采用欧拉-拉格朗日方法^[5-9]求解污染物颗粒的运动轨迹及其在车身表面的分布规律。

1.1 模型网格划分

首先建立包含车身、车轮、后视镜及其他覆盖件的 1:1 几何模型。然后建立外流场计算域,入口距车前端 3 倍车长,出口距车后端 7 倍车长,宽为 7 倍

计算网格划分如图 2 所示。保证网格没有自由边,没有重复单元,最小角度大于 20° ,且所有网格单元法向保持一致。

1) 车体表面采用三角形面网格划分,网格尺寸为后视镜 4 mm, A 柱 10 mm, 轮胎 10 mm, 其他区域 25 mm。

2) 车体外计算域第一层网格,基于车体表面网格向外拉伸出高度为 1.5 mm 的三棱柱体网格。

3) 车体外计算域第二层网格,在第一层三棱柱网格基础上按 1.2 倍增长比拉伸出高度为 1.8 mm 的三棱柱网格。

收稿日期:2022-01-13。

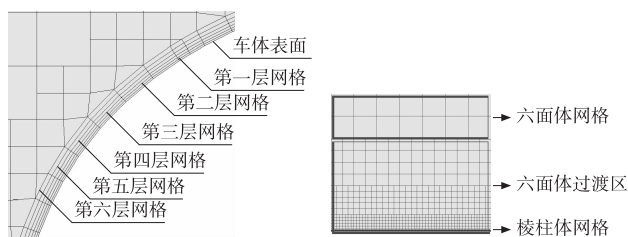
第一作者:罗雪香(1986—),女,硕士;工程师;从事客车空气动力学研究工作。E-mail:luoxx@mail.king-long.com.cn。

4) 车体外计算域第三层网格, 在第二层三棱柱网格基础上按 1.2 倍增长比拉伸出高度为 2.16 mm 的三棱柱体网格。

5) 车体外计算域第四~六层网格, 分别在上一层三棱柱体网格基础上都按 1.2 倍增长比拉伸出相应高度(分别为 2.59 mm、3.11 mm、3.73 mm)的三棱柱体网格。

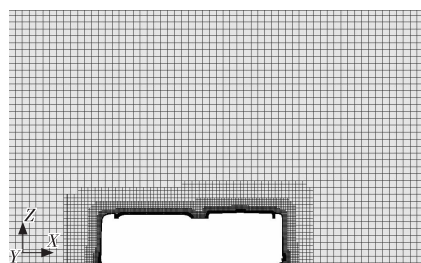
6) 在第六层网格基础上向外层计算域生成六面体过渡区, 以 2 倍增长速率增长 4 次, 直至网格尺寸达到 400 mm, 共生成 15 层网格。

7) 在过渡区外边界与外层计算域边界之间的区域采用 400 mm 六面体网格进行单元划分。



(a) 6层棱柱体网格

(b) 六面体过渡区



(c) 整个计算域网格

图2 计算域纵向中心对称截面网格示意图

1.2 边界条件

本文考察客车行驶过程中轮胎卷起的尘土颗粒在前方空气来流的作用下沿着侧围运动并粘附在侧围和后围上的情况。仿真分析分两步进行: 首先对空气连续相进行稳态计算, 为瞬态计算提供稳定的初始流场, 提高收敛性; 再基于稳态流场加入颗粒相进行瞬态计算, 获得污染颗粒运动轨迹及其在车身表面的沉积分布。

1) 空气相的入口边界设为速度入口, 其值为 60 km/h; 出口边界设为压力出口, 其值设为 0 Pa; 地面为移动边界, 速度与车速相同, 方向相反; 轮胎壁面设为旋转壁面, 转速为 397 r/min(用车速 60 km/h 换算

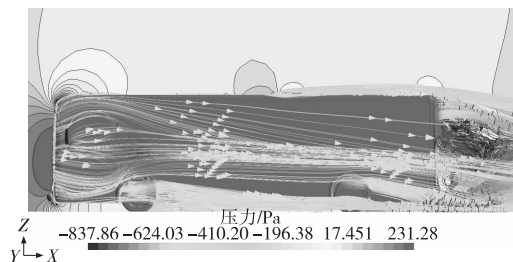
得到轮胎转速); 其他壁面均设为不可移动边界。

2) 在空气相稳态计算达到收敛的基础上, 通过喷射器将尘土颗粒导入求解域, 继续瞬态计算。本文将轮胎胎面作为尘土颗粒入射源; 颗粒设为球形, 颗粒直径符合 Rosin-Rammler 分布^[10-11], 最大直径为 0.6 mm, 中等直径尺寸为 0.165 mm, 最小直径尺寸为 0.025 mm; 尘土颗粒入射速度为轮胎旋转时的胎面线速度 19.7 m/s。颗粒相在计算域入口的边界设为逃逸, 在车身壁面处的边界设为粘附。

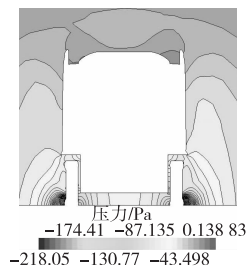
2 仿真结果及验证

2.1 侧围污染仿真结果

根据 1.1 节仿真模型和 1.2 节边界条件建立的客车行驶时空气相流场(前方来流在车身周围形成的流场)如图 3 所示。客车行驶时车轮卷起的尘土颗粒在该空气流作用下沿着侧围的运动轨迹如图 4(a)所示; 此运动中的尘土颗粒在图 3 中的空气相压力梯度作用下粘附在侧围上的情况如图 4(b)所示。

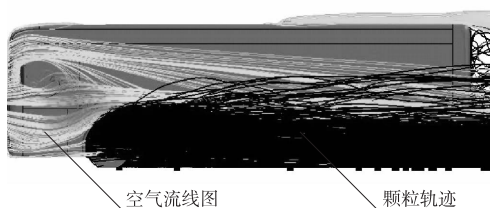


(a) 车身周围空气流线

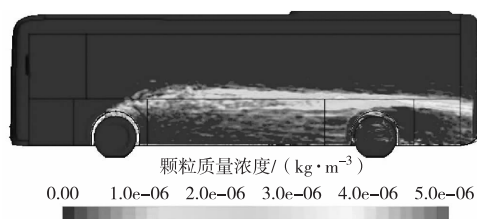


(b) 前轮中心横截面压力

图3 空气相流场



(a) 侧围颗粒运动轨迹



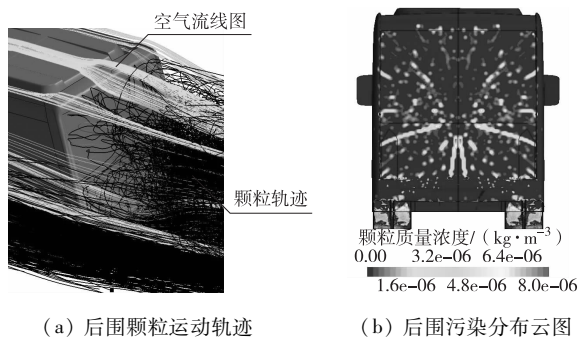
(b) 侧围污染分布云图

图4 车身侧围污染示意图

从图4(b)可以看出,侧围污染区域主要集中在前后轮之间以及后轮上后方。为衡量污染程度,通过定义侧围污染面积占整个侧围面积的比例进行判定。该比值可通过计算侧围污染区域图像像素与整个侧围图像像素之比得到^[12],即侧围的污染面积占比 = $S_{污}/S_{侧} = P_{污}/P_{侧} = 33\ 997/99\ 698 = 34.1\%$ 。

2.2 后围污染仿真结果

同样,客车行驶过程中轮胎卷起的尘土颗粒沿侧围和底盘运动至车尾后,在图3所示的尾部气流场作用下,在后围上的运动轨迹如图5(a)所示。这些运动的尘土颗粒在尾部空气相压力梯度作用下沉积在后围上的情况如图5(b)所示。



(a) 后围颗粒运动轨迹

(b) 后围污染分布云图

图5 车身后围污染示意图

从图5(b)可以看出,其后围中下部舱门的污染程度比其上部挡风玻璃更严重,污染物由后围中间区域呈发射状分散至四周。按照2.1中侧围污染区域面积占比算法计算得到后挡风玻璃污染面积占比为 $S_{玻污}/S_{玻} = P_{玻污}/P_{玻} = 24\ 325/55\ 936 = 43.5\%$,后舱门污染面积占比为 $S_{舱污}/S_{舱门} = P_{舱污}/P_{舱门} = 61\ 671/90\ 720 = 68\%$ 。

2.3 测试验证

测试车辆外形及边界条件与仿真分析一致,选择平坦且具有一定湿度的脏污郊区路进行测试。车辆

以60 km/h匀速通过路面,试验结束后观察车轮溅起的泥污在车身表面的分布并拍摄记录。试验结果如图6所示,与图4(b)、图5(b)仿真结果污染物分布情况基本相同。由于测量条件有限,难以对路试结果进行定量标定,因此路试结果仅作为定性对比验证,只要污染物分布趋势相同即可。由于路试过程中无法完全排除外界环境影响,且实车表面材质状态与仿真模型表面状态也不完全一致以及摄像效果受光线影响,测试结果和仿真结果存在一定差异。



(a) 侧围实测结果

(b) 后围实测结果

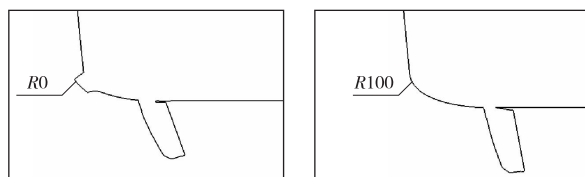
图6 试验结果

3 防污优化措施与结果分析

3.1 防污优化措施

客车的空气相流场特性影响尘土颗粒相的运动轨迹与沉积分布,而车身基本形状直接影响空气相流场。因此可通过优化车身造型改善空气相流场分布,进而改善车身污染情况。本文采取以下三项优化措施,如图7所示:

- 1) 磨平A柱尖锐凸棱并将过渡圆弧半径 R 由0 mm增大至100 mm,削弱气流分离。
- 2) 轮翼板下缘与轮胎胎面的垂向距离 d 由150 mm减小到50 mm,降低轮腔内的压力。
- 3) 取消后顶盖凸台,平滑连接顶盖与后围,减小尾涡。



(a) 增大A柱过渡圆弧半径

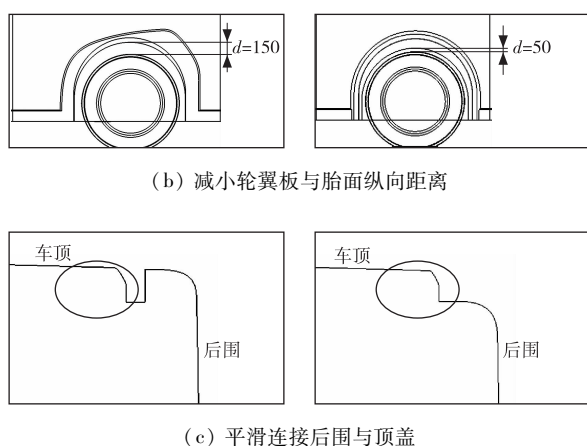


图7 优化措施示意图

3.2 优化结果分析

3.2.1 优化后空气流场特性仿真结果

同时采取以上三项优化措施后,再次进行仿真分析,分析结果显示车身周围的空气相流场更加贴体顺畅,局部区域涡流减弱甚至消失。

1) 优化前、后的侧围气流场如图8所示。可以看出,优化前气流由前围绕过A柱时会发生严重分离,在侧围形成上下相反的两个涡流区,导致侧围前半部分空气相流速较小;优化后侧围涡流区消失,且流速明显增大。顺畅的、流速大的气流有利于冲刷掉粘附在侧围的泥污。

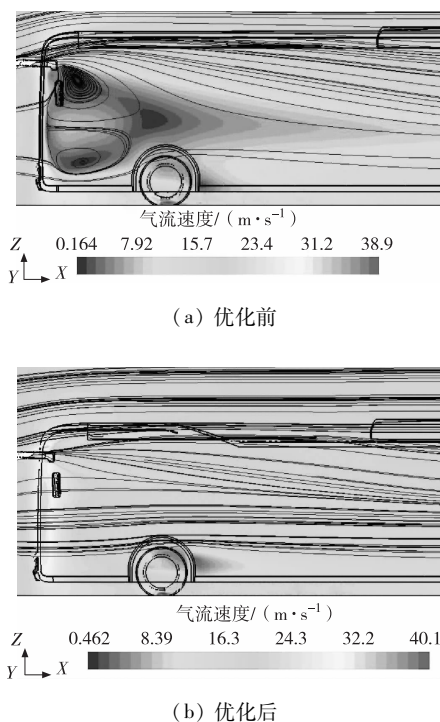


图8 侧围纵截面流场对比

2) 优化前、后的前轮轮腔内外压力变化如图9所示。优化前轮腔内2#监测点压力值为 -88 Pa ,轮口处6#监测点的压力为 -45 Pa 。优化后轮腔内2#监测点的压力下降了 13.6% ,轮口处6#监测点的压力上升了 9.3% 。即优化后轮腔内外压差增大,可在一定程度上减少轮腔内污秽物逸出。

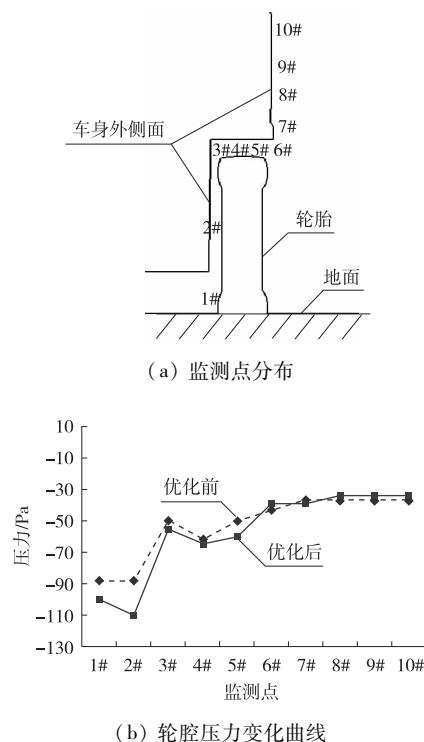


图9 前轮轮腔压力变化曲线

3) 优化前、后的后围气流场如图10所示。优化前顶盖尾部凸台造成气流分离,部分气流呈上飘趋势;优化后气流离开顶部后呈下压趋势,阻碍底部上卷的气流,降低扬尘高度。

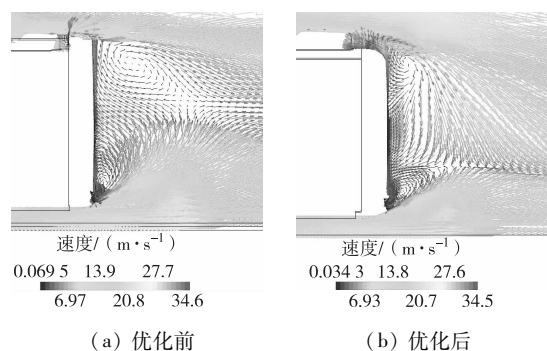


图10 车身尾部流场对比

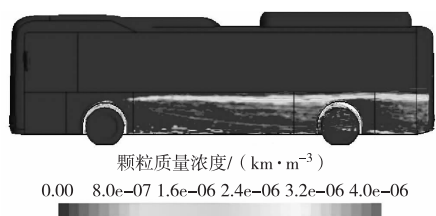
3.2.2 优化后颗粒运动与沉积情况

优化后尘土颗粒运动轨迹和尘土分布如图11、

12所示。可以看出:优化后前轮卷起的尘土颗粒逸出点向下、向后移,且尘土颗粒在侧围上的沉积高度降低;侧围污染面积占比由34.1%下降至18.8%,且浓度云图标尺显示最大浓度值由 $5\text{e-}6\text{ kg/m}^3$ 下降至 $4\text{e-}6\text{ kg/m}^3$ 。



(a) 优化后侧围颗粒轨迹

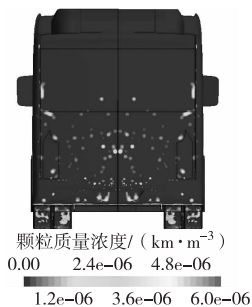


(b) 优化后侧围污染

图11 优化后侧围污染示意图



(a) 优化后后围颗粒轨迹



(b) 优化后后围污染

图12 优化后车身表面尘土沉积分布云图

优化后尘土颗粒在后围扬起高度明显下降,撞击在挡风玻璃中间区域的颗粒数量明显减少;后挡风玻璃污染面积所占比例由43.5%下降到12%,后舱门污染面积比例由68%下降到21.9%,控污效果明显,且浓度云图标尺显示最大浓度值由 $8\text{e-}6\text{ kg/m}^3$ 下降至 $6\text{e-}6\text{ kg/m}^3$ 。

4 结束语

本文针对某城市客车车身表面尘土污染问题,基

于外流场采用欧拉-拉格朗日法仿真分析可再现车身周围尘土颗粒运动轨迹和尘土污染分布,得出车身造型对外流场和污染物分布的影响情况。以此为基础提出增大A柱过渡圆弧半径、减小轮翼板下缘与胎面距离、平滑连接顶盖与后围的优化措施,并进行了仿真分析,结果显示尘土颗粒污染的控制效果明显。

参考文献:

- [1] 廖志涛. 基于车轮飞溅的汽车车身表面污染研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2016.
- [2] Fujimoto T, Miyake N, Watanabe Y, et al. Suppression of mud adhesion to the rear surface a van-type truck[C]. International Congress & Exposition, 1992.
- [3] FOUCAR H, BLAIN E. Water-Flow Simulation on Vehicle Panels by Taking into Account the Calculated Aerodynamic Field[C]. // Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition. January 1, 2005, Chicago, Illinois, USA: 682-688.
- [4] 谷正气,王振,张勇,等. 某轿车车身尘土污染数值仿真与控制[J]. 长安大学学报(自然科学版),2015,35(5):145-152.
- [5] 傅立敏. 汽车设计与空气动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2011:319.
- [6] 金益锋. 基于CFD的某微型客车减阻与尘土污染研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.
- [7] 陈振明. 微型客车外流场数值模拟[D]. 重庆:重庆交通大学,2008.
- [8] 辛俐,兰巍,刘江,等. 汽车涉水车身表面污染仿真及控制[J]. 吉林大学学报(工学版)2019,49(6):1786-1794.
- [9] 辛俐. 重型商用车侧窗区域水污染的ELM-ELFM仿真及均衡化控制研究[D]. 长春:吉林大学,2021.
- [10] 廖磊. 车轮溅水及其对车身表面污染的仿真研究[D]. 长春:吉林大学,2014.
- [11] 王振. 汽车车身尘土污染数值仿真与控制研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2013.
- [12] 崔华威,杨艳丽,黎敬涛,等. 一种基于Photoshop的叶片相对病斑面积快速测定方法[J]. 安徽农业科学,2009,37(22):10760-10762.