

Study on Aerodynamic Characteristics of Overtaking Process of Van Truck

Yonghui Liu, Lili Tao, Qi Jia

Shandong Jiaotong University, Ji'nan Shandong
Email: lyh1981@139.com

Received: Jul. 5th, 2019; accepted: Jul. 19th, 2019; published: Jul. 29th, 2019

Abstract

Aerodynamic characteristics of overtaking process of van truck are very important for driving stability and safety. In this paper, the overtaking process of van truck is studied by combining experimental and numerical simulation methods. The distribution characteristics of external flow field of overtaking process of van truck are obtained through smoke tunnel experiments, and the calculation model of van truck is established. Through numerical simulation calculation, the overtaking process of van truck is studied. Distribution characteristics of resistance and lateral force of van truck in overtaking process are obtained. The research of this project can provide a theoretical basis for the safety research of van truck transportation.

Keywords

Van Truck, Smoke Tunnel Experiment, Numerical Simulation, κ - ε Model

厢式货车超车过程的气动特性研究

刘永辉, 陶莉莉, 贾琪

山东交通学院, 山东 济南
Email: lyh1981@139.com

收稿日期: 2019年7月5日; 录用日期: 2019年7月19日; 发布日期: 2019年7月29日

摘要

厢式货车超车过程的气动特性对于行驶稳定性与安全性非常重要, 本文研究采用实验和数值模拟计算相结合的方法对厢式货车的超车过程进行研究, 通过烟风洞实验获得厢式货车超车过程的外流场分布特性, 建立厢式货车的计算模型, 通过数值模拟计算获得厢式货车超车过程的阻力、侧向力分布特性。本项目

研究可以为厢式货车运输安全研究提供一定的理论依据。

关键词

厢式货车, 烟风洞实验, 数值模拟计算, κ - ε 模型

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

厢式货车是公路运输的重要工具, 在我国交通运输行业起到举足轻重的作用。当车辆在高速公路上行驶与其他车辆发生会车、超车时, 它们之间产生气动干扰现象, 会形成瞬态的气动力脉动作用在汽车上, 严重影响汽车的气动特性, 并对汽车的操纵稳定性和安全性产生很大影响, 甚至造成交通事故。相比其他车型, 厢式货车的气动造型受空气阻力影响较大, 特别是在超车过程中, 受外界作用产生较大的气动力脉动将会使阻力、升力和侧向力产生较大的变化, 影响其行车稳定性与安全性。因此, 迫切需要展开对厢式货车超车过程行驶稳定性与安全性的研究, 获得其超车过程的气动特性, 提高厢式货车的行车安全性。

国内外很多学者对汽车空气动力学特性展开研究, 例如 Kenji、Okumura [1] [2] [3] 等人采用数值模拟的方法对会车工况进行研究, 说明汽车的操纵稳定性和安全性会受到严重影响, Jaeho Hwang [4] [5] 等人提出了一种三维非粘性数值模拟的计算方法, C. J. Baker [6] 等人将稳态数值计算和瞬态数值计算进行对比, 研究了高速列车的气动特性; 国内学者例如杜广生 [7] [8] 等人采用数值计算和实验的方法研究了厢式货车的减阻特性, 傅立敏 [9] [10] 等采用风洞实验和数值模拟相结合的方法, 研究了汽车造型, 张英朝 [11] 等人采用数值模拟计算的方法研究了会车过程的气动变化规律, 李莉 [12] 等研究了车辆行驶速度、车型以及道路条件对超车过程的影响, 总结了不同工况和外界条件的改变对汽车进入隧道时气动特性的影响规律。

综上所述, 厢式货车超车过程相互之间的干扰更加明显, 其流场变化规律、气动特性更加复杂, 目前研究较少, 因此, 本文研究采用风洞实验和数值模拟计算的方法对厢式货车超车过程的气动特性展开研究, 获得其流场分布及气动特性。

2. 数值模拟计算模型

2.1. 物理模型

本文研究采用厢式货车模型如图 1 所示。为了计算方便对模型进行了一定的简化, 去除各种附加件, 如雨刮器、车门、车灯等, 箱货表面取光滑面, 厢式货车模型在研究中用作超车车辆, 被超车模型采用长方体模型。

2.2. 网格处理

以车宽为特征长度 L , 计算域取前 $7L$, 后 $8L$, 左右上面分别取 $5L$ 的流动计算区域; 网格划分采用非结构网格, 为了更好的模拟流动特性, 采用区域划分网格的方法, 近车域采用加密网格, 向外发展逐步变稀。网格处理模型如图 2 所示。

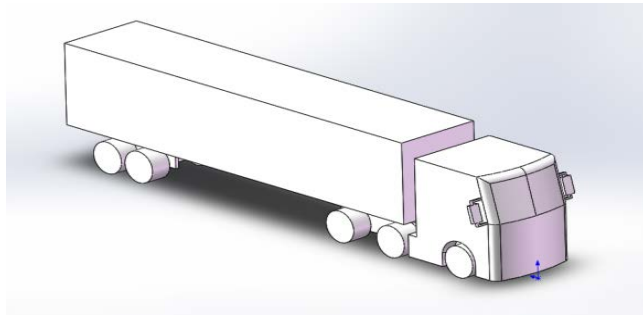


Figure 1. Van truck model

图 1. 厢式货车模型

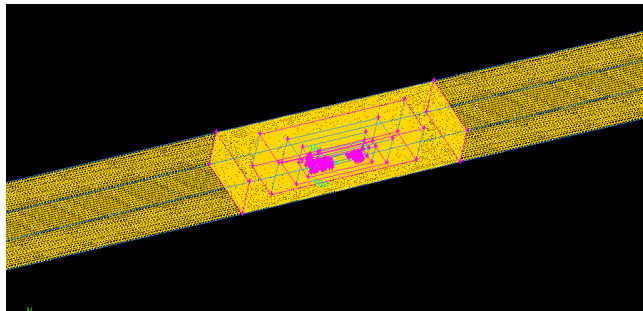


Figure 2. Mesh model

图 2. 网格处理模型

2.3. 数学模型

数值模拟计算采用标准 κ - ε 方程的方法对流动区域进行计算，所采用的方程如下：

1) 连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho \partial (u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

2) 动量方程

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad (2)$$

在上面两式中， ρ 为流体密度， t 为时间， p 为流体的静压强， u_i 为速度在某一方向上的分量， x_i 为坐标分量， F_i 为 i 方向的体积力， τ_{ij} 为粘性应力张量，可以用下式表示：

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3}\mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \quad (3)$$

上式中 μ 为层流粘性系数，变形率张量 $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ ； $\delta_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases}$ ，为 kerodiler 函数。

3) 标准 κ - ε 方程

k 方程：

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S \quad (4)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

式中, G_k 表示由平均速度梯度所产生的紊流动能; G_b 是由浮力产生的紊流动能; Y_M 代表引起可压缩紊流中过度扩散率的脉动作用; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为常系数; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 系数和 ε 系数的紊流普朗特数; S_k 和 S_ε 为用户自定义的源项。

对于可压缩流体才考虑浮力产生的紊流动能 G_b 及其相关系数 $C_{3\varepsilon}$ 。当流体为不可压, 且不考虑用户自定义的源项时, $G_b = 0$, $Y_M = 0$, $S_k = 0$, $S_\varepsilon = 0$ 。方程组中所引入的常系数 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 及 σ_k , σ_ε 的值分别为: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

2.4. 边界条件

入口边界采用速度入口, 为了达到自准区, 本文研究取 30 m/s 的速度[12]; 出口采用自由出流; 左侧面、右侧面和顶面采用对称边界条件, 其余采用 wall 边界条件。

3. 计算结果分析

本文计算采用时间片段法对厢式货车超车过程进行数值模拟计算, 分别取超车前、中、后三个时间片段展开研究, 分析其流场速度分布、压力分布及阻力和侧向力系数变化规律。

3.1. 超车前的气动特性

超车前的时间片段取厢式货车车头到达被超车尾部的时刻, 其流场特性如图 3 所示。其中, 图 3(a) 为速度分布图, 图 3(b) 为压力分布云图。

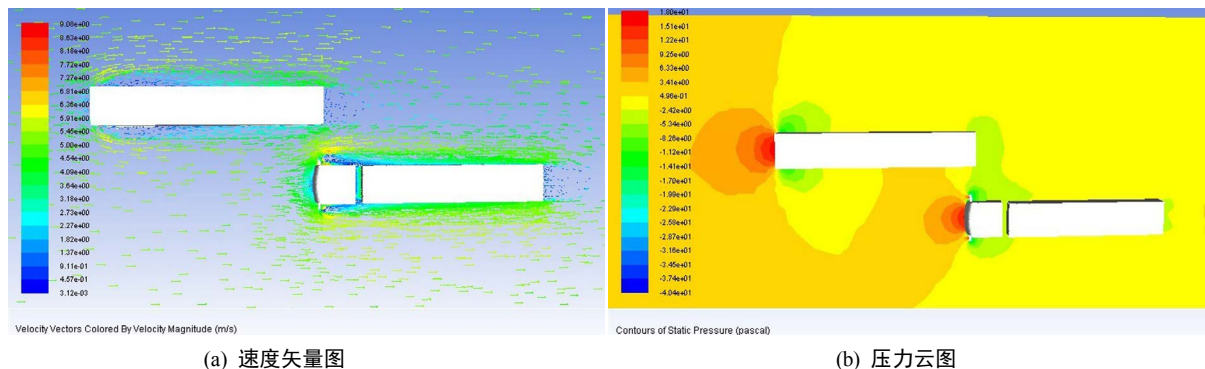


Figure 3. Flow field characteristics before overtaking

图 3. 超车前流场特性

由图 3 可以看出, 厢式货车的车头处于被超车的车尾部, 此时受被超车尾部负压区的影响, 使厢式货车迎风面的正压区减小, 因而减小了厢式货车的压差阻力, 阻力系数变小, 通过数值计算获得厢式货车的阻力系数为 0.61。受被超车尾部负压区的影响, 厢式货车车头部位左右两侧压力不平衡, 厢式货车产生向右的侧向力, 但此时作用面积只局限于厢式货车车头的区域, 因此使厢式货车产生横摆力矩, 影响其行驶稳定性。

3.2. 超车中的气动特性

超车中的时间片段取厢式货车车头到达被超车距离车头 $1L$ 的时刻, 其流场特性如图 4 所示。

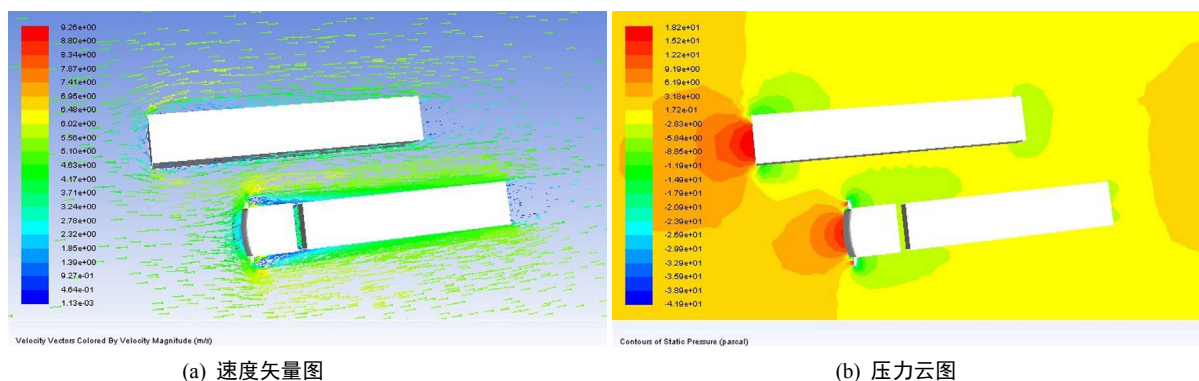


Figure 4. Flow field characteristics in overtaking
图 4. 超车中流场特性

随着厢式货车超车过程的进行, 车头迎风面逐步脱离被超车尾部的负压区, 从被超车头部扰流到左侧的气流叠加到厢式货车的迎风面, 使正压区增大, 从图 4(b)的压力云图可以明显看出, 被超车的正压区已经覆盖到厢式货车的正迎风面, 导致压力阻力增大, 从而使厢式货车的阻力系数变大。计算结果表明此刻的阻力系数为 0.82。两车从车头绕流的气流在侧面产生边界层分离, 使两车之间产生负压区, 产生吸力, 使两车产生相互靠近的趋势, 影响行驶安全。由于厢式货车右侧收到负压区的面积增大, 使横摆力矩变小, 横摆趋势减弱。

3.3. 超车后的气动特性

超车后的时间片段取厢式货车尾部与被超车头部间隔 $1L$ 的位置。其流场特性如图 5 所示。

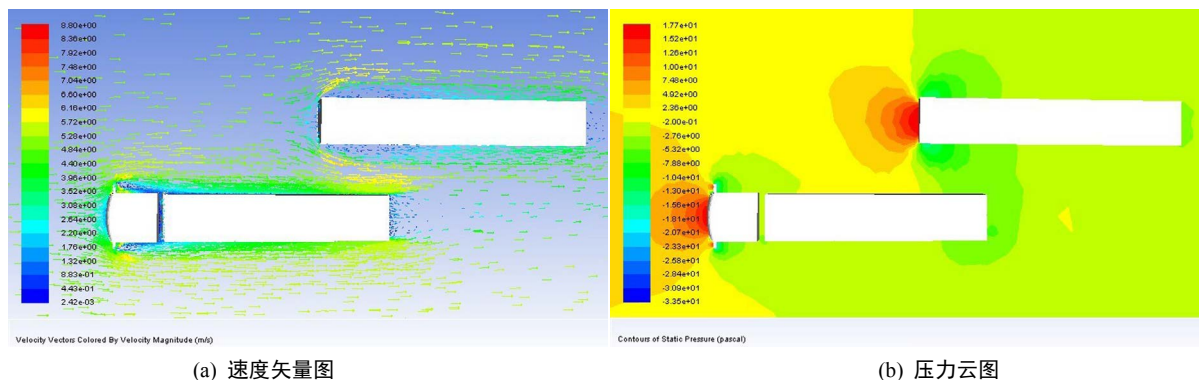


Figure 5. Flow field characteristics after overtaking
图 5. 超车后流场特性

厢式货车已经脱离被超车侧面的负压区, 货车的正迎风面不受影响, 但尾部受被超车侧面负压区的影响, 使压差阻力变大, 此时的阻力系数为 0.72。被超车正迎风面的正压区作用在厢式货车的右侧, 使厢式货车右侧的压力大于左侧压力, 从而产生排斥力, 厢式货车产生向左侧的侧向力。由于作用位置靠近后部, 使其产生反方向的横摆力矩。

3.4. 横向距离、车速对超车过程气动特性的影响

将两车之间的横向距离增大一倍, 计算超车前、中、后三个时刻的气动特性, 并与之前的计算对比, 数据如表 1 所示。

Table 1. Effects of lateral distance and vehicle speed on aerodynamic characteristics of overtaking
表 1. 横向距离和车速对超车的气动特性的影响

系数	阻力系数				侧向力系数			
	横向距离	单倍		两倍		单倍		两倍
车速	30 m/s	40 m/s	30 m/s	40 m/s	30 m/s	40 m/s	30 m/s	40 m/s
超车前	0.61	0.63	0.64	0.66	-0.15	-0.16	-0.14	-0.15
超车中	0.82	0.79	0.79	0.76	-0.21	-0.19	-0.19	-0.18
超车后	0.72	0.7	0.69	0.65	0.3	0.31	0.26	0.28

不同横向距离、车速工况下，厢式货车收到的阻力系数和侧向力系数如表 1 所示。从表 1 中数据可以看出，当横向距离增大一倍的情况下，阻力系数超车前增大，其余均变小，由于横向距离的增大，超车前厢式货车正迎风面受到被超车尾涡的影响减小，压差阻力增大，因此阻力系数有所增大。当超车中、后的时刻厢式货车迎风面受被超车正压力区域以及尾涡区受被超车侧面负压区作用减弱，压差阻力减小，因此阻力系数减小；侧向力系数在横向距离增大一倍的工况下，超车前、中、后均减小。另外，当车速增大至 40 m/s 的速度下，阻力系数在超车前有所增大，超车中、后减小；侧向力系数在超车前、后增大，中减小，但整体变化不大。

综上分析可知，在超车过程中，厢式货车受到的阻力系数由小变大，之后再变小，在超车过程存在最大值；侧向力由负变正，两车先产生吸力，后产生排斥力；横摆力矩由负方向逐渐变大，后变为正方向的规律。

4. 厢式货车超车过程的烟风洞实验

本文的实验设备采用山东交通学院的 500 × 500 × 1500 mm 的低速风洞，在入口段产生烟流。烟风洞主超车实验模型为蓝色厢式货车，其尺寸与数值计算的一致；被超车模型为一辆白色 SUV。烟风洞实验将模拟厢式货车超越白色车辆的过程，利用白色的烟丝，将两车的外流场可视化，观察外流场的分布情况，从而研究厢式货车在超车过程中所受的气动特性。



Figure 6. Flow field atlas of flue gas and wind tunnel experiments
图 6. 烟风洞实验流场图谱

如图 6(a) 中所示，主超车在被超车(白车)侧面尾行时，迎风面的烟丝遇到车头滞止并在气压作用下紧贴车顶流线流动，而在烟丝流经车尾时，由于边界层的分离，在尾部形成负压区，出现些微下卷涡流；而由于厢式货车的存在，进入尾流负压区的烟丝受到厢式货车头部正压区的影响从而更加紊乱，在厢式货车侧面同样形成负压区，呈现向下流动状态，流线弯曲程度变大；当主超车开始超车到与被超车并行

时,由图 6(b)中可以看出,由于两车的相对距离接近,两车正迎风面的正压区相互影响,气动阻力变大;当厢式货车完全超过白车时,由图 6(c)可知,被超车的正迎风区由于收到厢式货车尾部负压区气流的影响,气流变弱,压力变低,阻力系数变小。

5. 结论

本文研究采用烟风洞试验与数值模拟计算相结合的方法,对厢式货车超车过程的气动特性展开了研究,由于两辆车的外流场相互影响,导致超车过程中车身的压力和阻力系数产生变化,获得的主要结论如下:

1) 数值模拟计算结果表明,被超车的尾部负压区、正迎风面的正压区对厢式货车超车过程的气动特性产生影响,在两车接近时阻力系数先变小,随着两车重合阻力系数逐渐增大,当厢式货车超过被超车时,阻力系数开始变小。

2) 由于两车的外流场相互干扰,使厢式货车产生侧向力及横摆力矩,其规律为超车开始时为负,超车完成之后变为正,横摆力矩由负方向变为正方向,直至完全超车后消失,超车过程的气动特性对车辆行驶的安全性和操作稳定性产生影响。

3) 通过烟风洞实验结果表明,在超车过程中,两车外流场相互干扰,使各自的正迎风面的正压区和尾部的负压区产生影响,从而影响行驶的阻力。

基金项目

山东省交通科技创新计划资助项目 2015B42。

山东省自然科学基金资助项目 ZR2015EL034,山东省高等学校科技计划项目资助项目 J15LB03,山东省重点研发计划资助项目 2016GGX105003,山东省住房城乡建设科学技术项目计划 YK032。

运输车辆检测诊断与维修技术重点实验室支持计划资助。

参考文献

- [1] Okumura, K. (2000) CFD Simulation by Automatically Generated Tetrahedral and Prismatic Cells for Engine Intake Duct and Coolant Flow in Three Days. *SAE World Congress*, Detroit, March 2000. <https://doi.org/10.4271/2000-01-0294>
- [2] Uchida, K., Okumura, K. and Kuriyama, T. (1997) Aerodynamic Simulation by Using Discontinuous Interface Grid and Solution Adaptive Grid Method. *JSAE Review*, **18**, 188. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(97\)84977-6](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(97)84977-6)
- [3] Okumura, K. and Kuriyama, T. (1997) Transient Aerodynamic Simulation in Crosswind and Passing an Automobile. *SAE International Congress and Exposition*, Detroit, Michigan, February 1997. <https://doi.org/10.4271/970404>
- [4] Hwang, J. and Lee, D.H. (2013) Numerical Simulation of Flow Field around High Speed Trains Passing by Each Other. *JSME International Journal. Ser. B Fluids & Thermal Engineering*, **44**, 451-464. <https://doi.org/10.1299/jsmeb.44.451>
- [5] Hwang, J. and Lee, D.H. (2000) Unsteady Aerodynamic Loads on High Speed Trains Passing by Each Other. *KSME International Journal*, **14**, 867-878. <https://doi.org/10.1007/BF03184475>
- [6] Baker, C.J. (2009) The Effect of Unsteady Crosswind Forces on Train Dynamic Behaviour. *EACWE*, Florence, July 2009, 19-23.
- [7] 杜广生, 杨绍华. 厢式货车的气动附加装置及其减阻机理的分析[J]. 汽车技术, 1994(5): 23-28.
- [8] 杜广生, 赵兰水, 刘连山, 等. 厢式载货汽车模型风洞试验技术的研究[J]. 汽车技术, 1996(9): 17-19.
- [9] 傅立敏. 轿车外形参数对空气动力特性参数的影响[J]. 吉林大学学报(工), 1997(4): 11-15.
- [10] 傅立敏. 用空气动力学附加装置降低国产货车气动阻力措施的探讨[J]. 汽车工程, 1994(3): 144-148.
- [11] 张英朝. 汽车空气动力学数值模拟技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [12] 李莉. 特定运动状态下车辆瞬态空气动力学特性的研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2010.