

高速列车地面效应数值模拟研究

孙振旭, 郭迪龙, 姚 远, 杨国伟

(中国科学院力学研究所 流固耦合系统动力学重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 采用定常 RANS 方法对高速列车的地面效应进行分析, 研究地面效应影响下高速列车气动力的变化规律. 研究地面效应对不同侧偏角下高速列车气动力的影响, 发现地面效应对 0° 侧偏角下的气动力影响最大, 并随着侧偏角的增大地面效应的影响逐渐变小; 研究当列车与地面相对高度发生变化时高速列车气动力的变化规律, 数值模拟结果揭示了高速列车气动升力存在的升力翻转效应, 并对不同高度下列车底面的压力脉冲变化规律进行分析.

关键词: 地面效应; 湍流模式; 侧偏角; 高速列车气动力; 升力翻转

中图分类号: U238

文献标识码: A

0 前言

高速列车作为地面高速运行的细长体, 行驶中受到列车底部和地面之间气流的干扰. 始终存在地面效应, 是列车空气动力学区别于飞机空气动力学的主要学科特点之一, 也是影响高速列车气动力预测的关键因素之一. 高速列车地面效应主要指地面对列车底部复杂流动的干扰, 进而影响高速列车的气动力特性. 由地面带来的边界层效应是高速列车地面效应研究的一个重要方向.

当前地面效应研究多集中于飞机起飞、降落时的地面效应、地效飞行器研究等, 另外在汽车工业方面也有相关的地面效应研究. 而关于高速列车的地面效应研究则较少, 国内和国际上的研究也多集中于试验研究方面^[1-6]. 地面对列车外流场特征和列车气动力、气动力矩等性能具有重要影响, 甚至影响了常规试验中对这些参量的测量. 风洞试验作为高速列车气动力性能研究的一个手段, 在早期研究中受到了地面效应的严重阻碍, 影响了测量精度. 针对高速列车的风洞试验在国内开始得比较早, 到现在为止已经积累了大量的数据, 对高速列车的研发起到了非常重要的作用. 但是, 这些风洞试验依然存在一个关键问题, 即这些风洞试验多采用了没有边界层控制的固定地板来模拟地面, 地面效应没有进行边界层修正. 采用边界层理论修正方法极为困难, 因为它随模型而异, 而且列车底部流场又极其复杂. 列车模型在进行风洞试验时, 来流在固定地板表面形成的边界层顺着流向不断增厚, 使模型气动力和底部压力分布测量产生较大误差. 这种风洞试验给不出精确的气动预测结果, 虽然在一定程度上仍然可以辅助预测高速列车气动力, 但是依然不够完美, 在当今对气动力预测需要越来越严谨的环境下, 需要进一步研究地面效应对气动力预测的影响.

为了修正地面效应的影响, 当前一些风洞已经采用了诸如切向吹气法、边界层吸气法和移动带法等先进技术, 以消除在列车车体附近的地面边界层. 在国外, 均匀抽吸地板和移动带地板技术到目前为止都是最先进的地板边界层控制技术. Wulf 曾研制了一块均匀抽吸地板^[7], 该地板被用来研究飞机起降的地面效应问题, 取得了较好的效果. Tyll 等采用移动带的方法研究了磁悬浮列车在有无地面效应时的气动力差别^[8], 另外也研究了轨道存在与否则对列车气动力的影响. 同样, Pulliam 等也曾做过类似实验比较^[9]. Sardou 等人利用移动带地板对车辆模型的地面效应问题进行过研究^[10]. 研究发现, 边界层对模型气动力的影响因模型而异. 对于某些汽车模型, 边界层的消除可能会使风洞试验模型气动阻力增大约 40% 之多, 而负向升力和俯仰

收稿日期: 2012-03-26; 修回日期: 2012-08-01

基金项目: 国家科技支撑计划(2009BAG12A03)和973计划(2011CB711101)资助项目

作者简介: 孙振旭(1983-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究计算流体力学和高速列车空气动力学, E-mail: sunzhenxu@imech.ac.cn

力矩可能增加更多. 这说明, 对列车模型进行风洞试验时, 如果不考虑地面边界层的影响, 会使测量数据严重不可靠. 这两种技术, 尤其是移动带地板技术虽然有许多优点, 但它结构复杂, 造价昂贵, 而且亦有自身的不足. 在当前国内这种地板目前尚不多见, 固定地板依然是最常用的风洞试验方法.

本文采用数值模拟的方法针对高速列车运行时的地面效应展开研究. 首先研究地面边界层对高速列车气动力的影响. 列车与地面之间是否存在相对运动对列车气动力有较大影响, 本文对气动力的变化趋势进行分析. 另外, 考虑到风洞试验中有可能进行列车的横风研究, 本文研究不同侧偏角下地面效应对列车气动力的影响, 比较不同侧偏角下地面效应影响的大小. 最后, 研究列车与地面之间相对高度变化对列车气动力的影响, 对升力随相对高度的变化进行分析.

1 计算方法

本文采用 RANS 方法进行高速列车地面效应研究, 如何选取合适的湍流模式对能否正确预测列车的气动力变得非常关键. 双方程模式中, 如 $k-\varepsilon$ 模式^[11], 可以较好地模拟远离壁面充分发展的湍流流动, 但是在近壁面附近会对湍流的输运作用估计过度, 使流动分离延迟或者不发生流动分离, 从而降低了求解存在逆压梯度和流动分离问题的精度. 而 Wilcox 的经典 $k-\omega$ 双方程模式^[12]在求解壁面边界层流动以及自由剪切流方面具有非常良好的性能, 可以更为广阔地应用于各种压力梯度下的边界层问题. 但是该模式却对自由来流中的 ω 值过度敏感, 而 $k-\varepsilon$ 模式却不存在这种问题. 为了集合两种模型的特点, 本文采用了由 Menter 提出的 $k-\omega$ SST 模式^[13], 它是一种在工程上得到广泛应用的混合模式, 在近壁面保留了原始 $k-\omega$ 的模型, 在远离壁面的地方应用 $k-\varepsilon$ 模型.

在本文工况下, 流场的可压缩性与热传导效应均可以忽略, 因而流动方程可以写成

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad (2)$$

其中 ρ , μ_t , p 分别是密度、速度和压强. μ_t 为涡粘系数, 在 $k-\omega$ SST 中模型中其表达式可以写为

$$\mu_t = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}, \quad a_1 = 0.31. \quad (3)$$

$k-\omega$ SST 模式的两个输运方程形式为

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu_t + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \bar{\rho} \beta_k k \omega, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu_t + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \gamma \frac{\omega}{k} P_k - \bar{\rho} \beta_\omega \omega^2 + \frac{2\bar{\rho}(1-F_1)\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}. \quad (5)$$

$k-\omega$ SST 模型中的常数 φ 可以表示为

$$\varphi = F_1 \varphi_1 + (1-F_1) \varphi_2. \quad (6)$$

F_1 在近壁面区域趋近于 1, 模型近似于 $k-\omega$ 模型; 远离壁面时 F_1 趋近于 0, 模型转化为 $k-\varepsilon$ 模型, 这样可以将两种模型取长补短. 其中

$$\sigma_{k1} = 0.85, \quad \sigma_{\omega 1} = 0.5, \quad \beta_1 = 0.075, \quad \beta^* = 0.09, \quad \gamma_1 = 0.553;$$

$$\sigma_{k2} = 1.0, \quad \sigma_{\omega 2} = 0.856, \quad \beta_2 = 0.0828, \quad \beta^* = 0.09, \quad \gamma_2 = 0.440.$$

开关函数 F_1 、 F_2 定义为到壁面最小距离的函数

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right]^4 \right\}, \quad (7)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\}, \quad (8)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(\frac{2\bar{\rho}\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20} \right), \quad (9)$$

$$P_k = \min\left(\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, 20\beta^* k\omega\right), \quad (10)$$

其中 y 表示到物面的最小距离。

为了便于分析, 定义无量纲系数即列车气动阻力系数 C_D 、气动升力系数 C_L 和侧向力系数 C_S 为

$$C_D = 2F_x / (\rho V^2 S_x), \quad C_L = 2F_z / (\rho V^2 S_x), \quad C_S = 2F_y / (\rho V^2 S_x),$$

式中 F_x 为列车空气阻力, F_z 为列车气动升力, F_y 为列车侧向力, ρ 为空气密度, V 为列车运行速度, S_x 为参考面积, 这里取 0° 侧偏角下列车最大迎风面积, 计算中取为 0.1738 m^2 。为了方便比较, 其他侧偏角下也采用相同的参考面积。

2 计算模型与计算条件

本文计算模型来自于风洞试验。模型包括三编组, 模型尺寸与实际运行列车相比, 缩比为 $1:8$ 。但因为计算工况较多, 又对风洞模型进行了一定程度的简化, 但简化模型仍然包含了风挡、排障器、裙板等复杂结构。相对于校验模型, 用于地面效应计算的模型忽略了转向架一项。列车置于专用地板上, 地板前后缘均做成流线型以减小对来流的扰动。地板上置有模型轨道, 列车在轨道上通过三个支架进行固定。计算外场即风洞壁面, 长度尺度为 $8 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ 。风洞壁面固定, 侧偏角通过旋转放置在列车模型底面的圆盘来实现。

图1给出了 0° 侧偏角下整体计算域和列车模型。

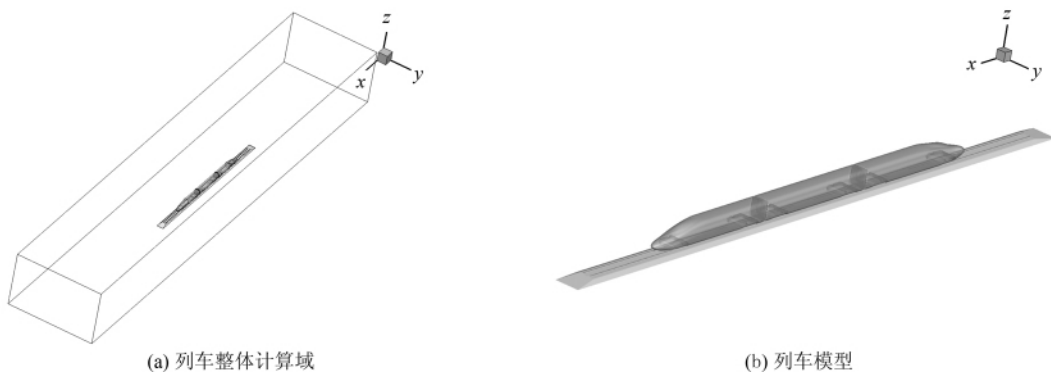


图1 计算域与计算模型

Fig. 1 Computational domain and model

计算域的外场空间选择与风洞壁面完全一致, 在边界条件设定时, 计算域左右与上下两侧均为风洞壁面, 故在计算中也采用了固壁条件。来流速度为 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 为典型的不可压缩流动, 所以来流入口设定为速度入口边界, 而来流出口设定为压力出口边界。在列车正下方存在着路基和轨道两种结构。在计算时地面、路基和轨道视研究内容的差异设置成移动壁面或者静止壁面两类。选择移动壁面可以消除列车下方地面边界层的影响, 由此可以研究地面边界层对列车气动力的影响。当采用移动壁面时, 设置移动速度与列车正向来流相同。本文使用基于格心格式的有限体积方法对 NS 方程进行离散, 对流项离散格式采用二阶迎风格式, 粘性项离散格式为二阶中心差分格式。

较好的网格尺寸布局, 较高的网格质量是数值模拟精准的一个必要条件。本文网格均在网格生成软件 ICEM CFD 中生成, 网格布局采用了与验证算例相似的布置, 在轨道、鼻锥、风挡等位置均进行了加密, 以更好地捕捉这些未知的流动细节。研究侧偏角计算工况时, 因为列车轴向与来流方向存在一定侧偏角, 所以在网格划分时这两套网格均在列车周围相当大区域内建立了密度体以对列车周围进行网格局部加密。两套网格均采用混合网格, 在列车壁面附近建立边界层网格以更好的捕捉列车壁面附近的边界层流动, 近壁面第一层网格厚度按照壁面函数对 y^+ 值的要求进行设定, y^+ 值基本处于 $30 \sim 100$ 之间。本文重点考察地面对列车气动力的影响, 因而在列车与地面之间的区域也进行了局部加密, 以满足不同离地高度下的需求。图2

给出了列车头部附近网格.

3 结果分析

3.1 数值校验

在进行地面效应研究之前,首先利用完整的风洞列车模型对计算方法进行数值校验,以保证网格规模和计算方法在后续求解时的精度.风洞试验列车与地面相对静止,并没有消除地面边界层效应,在数值计算时亦采用相同方法.风洞试验流速为 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,包含了各种侧滑角,从 0° 一直到 30° 左右.本文仅取其中侧滑角为 8.77° 的工况作为验证算例,模型计算网格约为 1 500 万左右,在首尾车鼻锥、风挡、转向架等位置均进行了局部加密以更好地捕捉流场细节.下面主要从气动力的角度将计算结果与试验结果进行比对,包括气动阻力、升力和侧向力,比对的对象包括各节车厢和整体列车.

气动阻力、升力和侧向力的计算与试验比较,如图 3 所示.

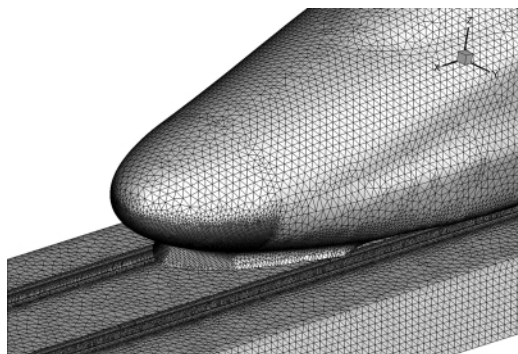


图 2 列车头部网格

Fig. 2 Mesh around a streamline

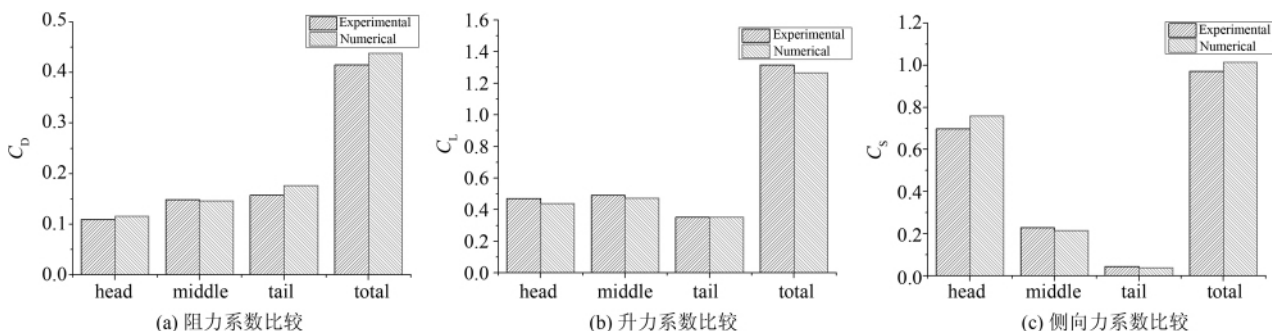


图 3 气动力系数计算值与试验值比较

Fig. 3 Aerodynamic coefficients in numerical results and experimental results

可以发现,在本文网格尺度和计算规模下,采用定常 RANS 的计算结果与实验值拟合均非常好,最大误差控制在 10% 以内.在侧偏角为 8.77° 的条件下,列车所受气动阻力、升力与侧向力比无侧偏角工况下的气动力均有较大幅度提高,其中以尾车所受阻力、中间车厢所受升力、头车所受侧向力为最大值.

数值计算结果表明,本文计算方法和网格模型具有较高的精度,数值结果具有较高的可信度.采用相同的网格尺度,可以保证后续地面效应计算的准确性.

3.2 地面边界层效应

高速列车在高速行驶时,列车与地面之间存在相对运动,在地面附近不会形成速度边界层.然而在当前的风洞试验中,参考系选择为高速列车,列车静止不动,在风洞入口采用自由来流的方式来进行试验.如果风洞地面为静止地板或者没有采用地面边界层消除技术,那么在列车下方地面上将会形成一层比较厚的速度边界层,对列车气动力的预测以及列车底面压力分布预测带来很大误差.然而在数值模拟中却不存在这种困难,通过设置地面边界条件为移动固壁可以很容易消除掉地面附近边界层.本节以 8.77° 侧偏角工况的计算为例,分别考虑地面静止与地面移动两种工况,研究地面边界层对列车气动力的影响.

8.77° 侧偏角下高速列车不同部位在不同地面条件下的计算影响如图 4 和图 5 所示.

可以看出,地面边界层存在与否对列车气动力的影响主要表现在高速列车的气动阻力上.相对于静止地面,移动地面条件下的阻力有较大幅度增加.通过各节车厢的受力分析可以看出,阻力增加的来源主要是尾车,头车也有一定幅度增大,而中间车厢增加不大.通过对尾车上每个部件的受力可以发现,压差阻力是尾车阻力增加的一个重要来源.而压差阻力的增加主要表现在尾部转向架上的底罩中.地面边界层消除后,因为空气是有粘性的,当地面运动时地面会带动空气一起向列车相反方向运动,而这运动的空气会给列车带来附

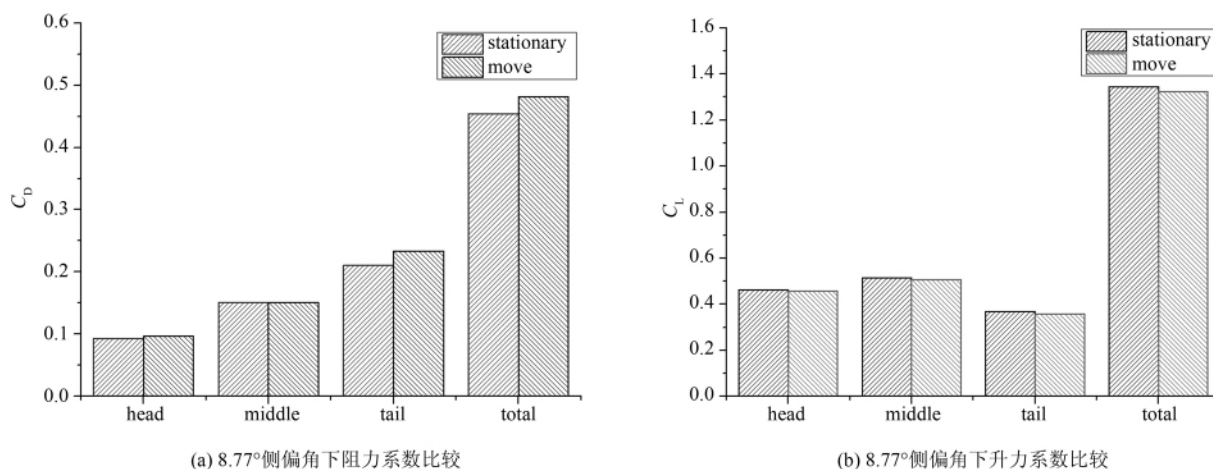


图 4 8.77°侧偏角下由边界层效应带来的气动系数比较

Fig. 4 C_d and C_L due to ground effect at a yaw angle of 8.77°

加的阻力. 因为列车底面的不平整, 在存在凹腔的位置, 加速后的空气将会碰撞到凹腔上, 增加了列车的额外阻力. 图 5 给出了存在地面边界层和消除地面边界层后尾车转向架底罩的表面压力分布曲线.

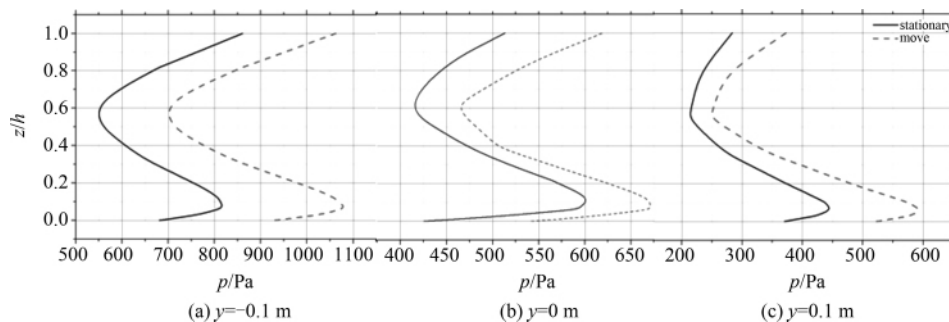


图 5 不同截面下转向架底罩压力分布曲线比较

Fig. 5 Pressure coefficients along different sections of the surface of a bogie cover

可以看到, 在三个 y 等值面上消除地面边界层后在转向架底罩下游壁面上压力明显增大. 因为消除地面边界层后引起列车转向架底罩阻力的增加, 阻力系数在头车增加了约 0.007 3, 在中间车增加了约 0.005 6, 在尾车增加了约 0.012 7.

在气动升力上, 地面边界层的消除将会使列车承受升力减小. 同气动阻力相比, 地面移动引起的升力变化对车体上各个部件的影响都是相同的, 各个部件均有不同程度的升力下降. 为了研究在两种状态下列车地面上的压力变化, 下面首先给出路基与列车底面之间不同特征位置, 从路基地面开始一直到列车底面的速度型. 图 6 给出了三个特征位置的示意, 为了视图方便, 在示意图中没有画出路基上的轨道. 三个位置对应的速度型如图 7 所示.



图 6 特征位置示意

Fig. 6 Schematic of three locations

图 7(a) 给出的是在 $x = -4.58 \text{ m}$ 位置的速度型曲线, 该位置位于头车流线型下方, 第一个转向架前方, 该位置列车与路基之间的相对高度最低, 因而无论是存在地面边界层还是消除地面边界层, 该位置对应的速度曲线都是最大的. 图 7(b) 给出的是在 $x = -3.375 \text{ m}$ 位置轨面上方的速度型曲线, 该位置位于头车流线型的根部, 流线型与头车车体连接部位的正下方. 图 7(c) 给出的是在 $x = 0 \text{ m}$ 位置轨面上方的速度型曲线, 该位置位于中间车厢的正中间位置. 通过比较可以看出, 从列车头部开始, 列车与地面之间空隙内的流速沿流向逐渐降低. 通过比较两种状态下的速度型曲线, 可以看出消除地面边界层后的速度曲线明显比存在地面边界层的速度要高. 地面的移动提高了列车与地面之间空隙内的流速. 因而, 消除地面边界层后列车下壁面的压力降低, 有效降低了列车的升力. 另外, 由于地面移动引发的气流也会使得列车上壁面的流动状态发生改变. 消除地面边界层后, 列车上表面车体承受负压增大, 在整体升力变化上起到了增大的作用. 整体升力变化是列车上下壁面压力变化的综合效果, 显然, 下壁面负压的增大对整体升力降低起到了决定作用.

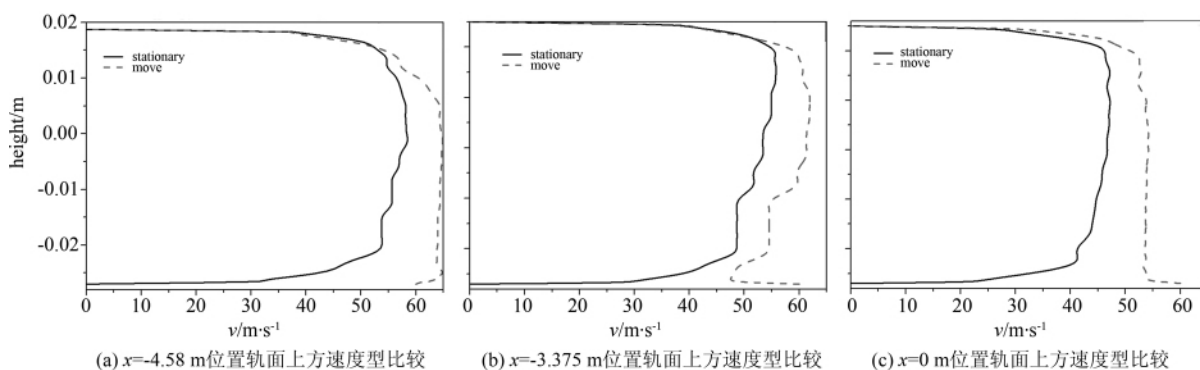


图 7 不同位置轨面上方速度型比较

Fig. 7 Velocity profiles at three locations

3.3 不同侧偏角下地面效应变化规律

在风洞实验中, 实现地面与高速列车之间的相对运动难度本来就比较大, 然而当列车与来流方向存在一定侧偏角时, 即考虑横风效应时, 实现这种相对运动难度则更大. 为了研究不同侧偏角下地面效应对气动影响的变化规律, 本节将就不同侧偏角下的气动系数变化进行比较. 本节进行了三种侧偏角度工况的计算, 分别为 0° , 5.87° 和 8.77° . 图 8 给出了不同偏角下列车在有无地面边界层下的气动阻力和气动升力的比较.

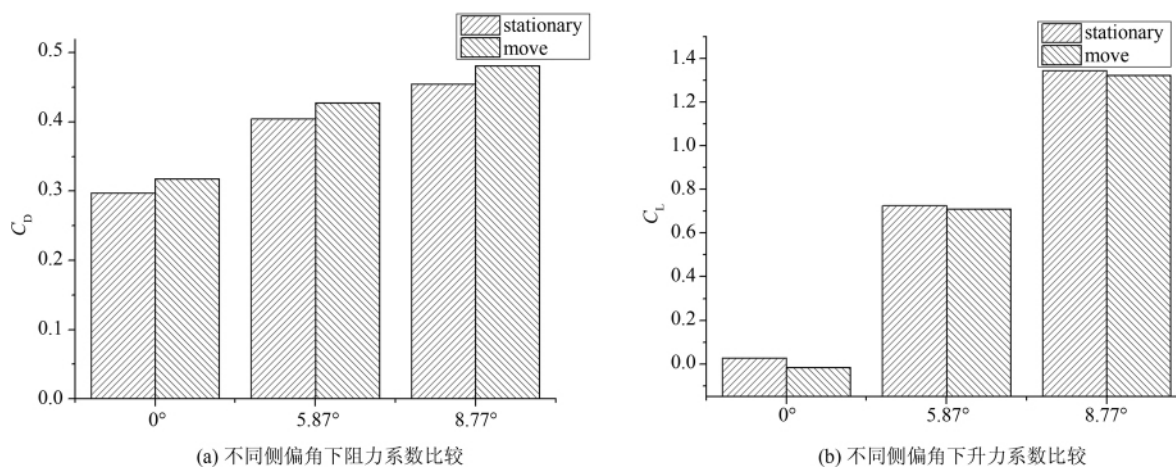


图 8 不同侧偏角下气动系数比较

Fig. 8 Aerodynamic coefficients at different yaw angles

从图 8(a) 可以看出 0° 偏角阻力系数提升约 0.021, 5.87° 偏角阻力系数提升约由 0.024, 8.77° 偏角阻力系数提升约 0.026, 分别提升了约 7%, 5.9%, 5.7%. 三种侧偏角下阻力系数提高幅值比较接近, 说明消除

地面边界层后阻力系数增大幅值与侧偏角关系不大,基本保持为固定值。但是因为 0° 侧偏角下气动阻力基数较小,所以其提升百分比相对较高。即地面效应在阻力系数上对 0° 侧偏角的影响最大。

观察图8(b)可以发现,三种侧偏角下总体气动升力系数均有一定降低, 0° 侧偏角下升力系数降低约0.0429, 5.87° 侧偏角升力系数降低约0.016, 8.77° 侧偏角升力系数降低约0.023,分别降低了约161%, 2.2%, 1.7%。可以看到 0° 侧偏角在消除地面效应后,整车承受升力由正升力变为负升力,升力系数降低幅值也是所有侧偏角中最大值。这说明,地面效应在升力系数上对 0° 侧偏角的影响最大。

综上所述可以看出,在不同偏角下考虑地面效应时气动阻力的增加量与气动升力的降低量在量级上接近一致,但是因为不同侧偏角下气动阻力系数和气动升力系数基数的差异,地面效应对气动力的影响也产生了差异。因为 0° 侧偏角下气动阻力系数和升力系数均为不同偏角下的最小值,因而,地面效应对该角度下气动力的影响也是最大的。侧偏角越大,地面效应的影响也越小,这对实际风洞实验而言是有利的,要消除存在侧偏角下的地面边界层在风洞实验中实现难度较大,但是因为侧偏角下地面效应对气动力的影响较小,所以在一定偏角下进行风洞实验时可以忽略地面边界层的影响。相反的,在进行无侧偏角风洞实验时,地面效应的影响较大,此时应该尽量实现地面与高速列车之间的相对运动。

3.4 列车与轨面相对高度变化影响

地面效应对高速列车气动力的影响还体现在列车与地面之间相对高度的变化上。当列车与地面之间相对高度发生变化时,列车承受气动阻力、升力均有较大变化。

本节重点研究高速列车车体与轨面之间相对距离发生变化时,高速列车承受气动力发生变化的情况。以 0° 侧偏角为例进行研究,同时保证列车与地面之间的相对运动,以消除地面边界层。原始模型中,列车与轨面最高位置间距约为23.75 mm,在本文计算中重新设定了几个相对距离,分别为33.75 mm, 13.75 mm 以及一个更窄的6.75 mm,分别命名为 normal, wide, narrow 和 narrower。下面给出不同相对高度下列车承受气动阻力和尾车气动升力情况,如图9所示。

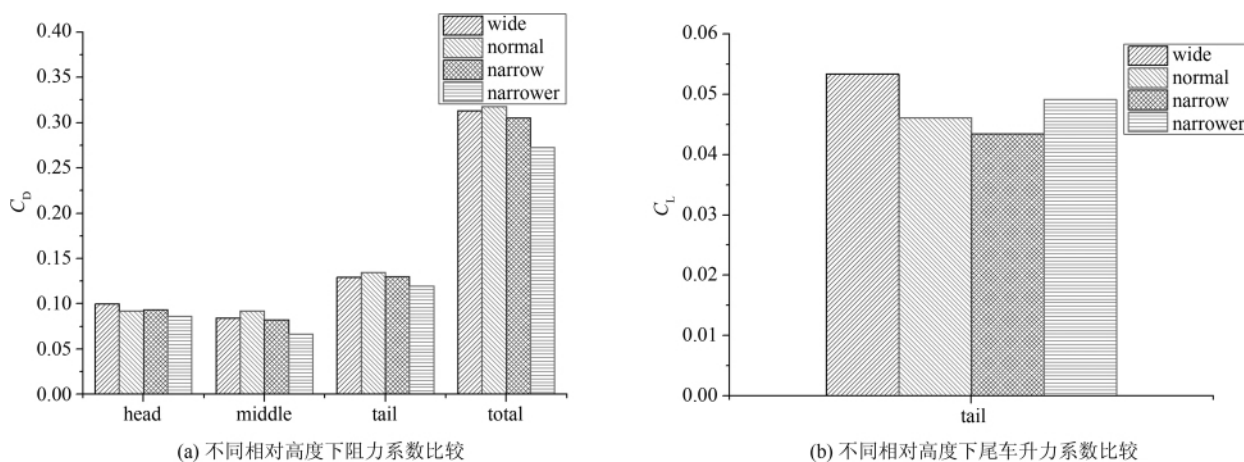


图9 不同相对高度下气动力系数比较

Fig. 9 Aerodynamic coefficients with different spacings

通过研究尾车气动升力的变化可以观察到一个有趣的现象,即升力翻转现象。从相对高度最高的开始,气动升力首先不断降低,当降低到一定程度之后,又开始回升,如图9(b)所示。随着列车与轨面之间相对高度的减小,流道面积也在不断变小,流速增大,因而列车底面的压力变低,导致向下的压力增大,整体升力变小,这段范围内即为著名的文托里效应。此时主要是无粘力的作用。当列车与轨面之间距离进一步减小时,升力开始回升, Bearman 将这种升力翻转现象描述为粘性力和无粘力共同作用的结果^[14]。此时粘性作用已经开始影响到车体表面上的压力分布, Tyll 在文[15]中提到,在钝体与地面相对高度低于一定限值时,粘性作用会使列车表面的滞止点和分离点改变位置,会使钝体绕流中下分离点前移并且使上分离点向后移动。若钝体存在比较尖锐的尾缘,升力翻转甚至会引发新的流动分离。分离点和滞止点的变化造成车身压力重新布局,形成更大的升力。

Wide、narrower 和 narrow 三种工况下列车头车和尾车底面上的压力系数变化曲线如图 10 所示.

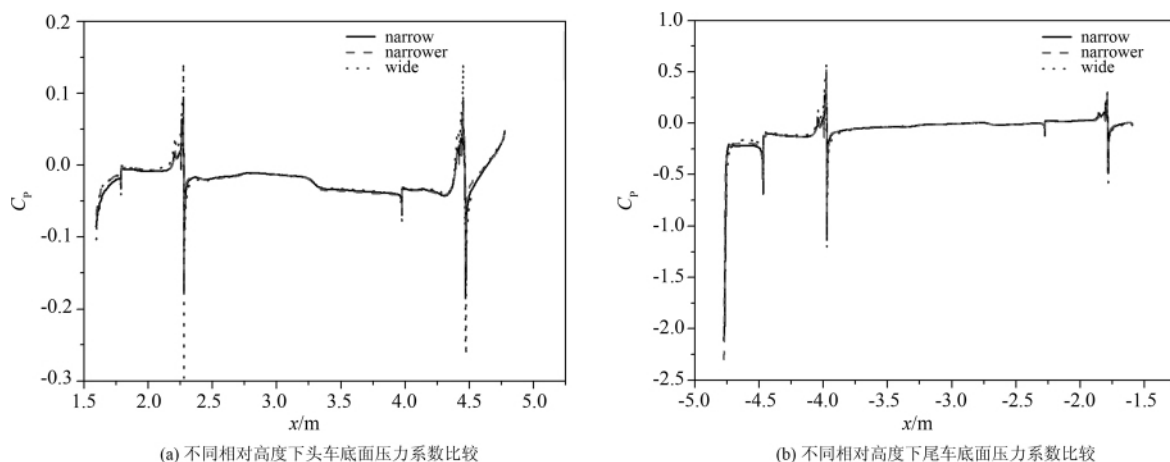


图 10 不同相对高度下首尾车底面压力系数比较

Fig. 10 Distributions of pressure coefficient along bottom surface of leading and trailing car

从图 10 可以看出,即列车与轨面之间相对高度越高,在转向架底罩等位置产生的压力突变就越大;列车与轨面之间相对高度越窄,这些位置产生的压力突变就越小.这说明,列车底部狭窄流道可以使流道内气流对部件的冲击作用变缓和,降低底部构件承受的压力突变,起到保护作用.

4 结论

地面效应是影响高速列车气动力预测的一个关键因素,也是限制风洞试验精度的一个重要原因.数值校验计算结果与实验结果拟合良好,说明本文采用方法和网格规模能够保持计算结果的精度,可以用于后续地面效应的研究.本文研究主要得到以下结论:

1) 消除地面边界层后,列车气动阻力有较大幅值增大,阻力增加的主要来源是尾车的转向架底罩区域.消除地面边界层后,列车表面压力发生较大变化,底部负压明显增大,头车车窗位置负压增大,而尾车车窗位置的正压增大.消除地面边界层后的气动升力略有降低,这是由列车底部负压的增大造成的.

2) 地面效应对 0° 侧偏角气动力的影响最大,随着侧偏角的增大,地面效应对气动力的影响越来越小.体现在风洞试验中,在研究大侧偏角下横风效应时可以适当放宽地面效应的要求,而研究 0° 侧偏角高速列车气动力时则必须考虑地面效应的影响.

3) 随着相对高度的减小,高速列车气动升力存在升力翻转效应,即列车承受的升力首先随高度降低而减小,当降低到一定限值后升力则又有所提升.对列车下壁面的压力分布研究发现,相对较小的高度下在转向架底罩等位置处的压力突变变小,流动对列车底部构件的冲击力降低,狭窄流道对这些部件起到了保护作用.

参 考 文 献

- [1] Baker C J, Brockie N J. Wind tunnel tests to obtain aerodynamic drag coefficients: Reynolds number and ground simulation effects[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1991, **38**(1): 23–28.
- [2] Baker C J, Humphreys N D. Aerodynamic forces and moments on containers on flat wagons in cross winds from moving model tests[R]. Dep Civ Eng Nottingham Univ, Nottingham, UK, FR 91019, 1991.
- [3] Chiu T W, Souire L C. An experimental study of the flow over a train in a crosswind at large yaw angles up to 90° [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, **45**(1): 47–74.
- [4] Ahmed S R, Gawthorpe R G. Aerodynamics of road and rail vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 1985, **14**: 319–392.
- [5] Gawthorpe R G. Aerodynamics in railway engineering, Part 1: Aerodynamics of trains in the open air[J]. Railway Engineer International, 1978, **3**(3): 7–12.

- [6] Schetz J A. Aerodynamics of high-speed trains[J]. Annu Rev Fluid Mech ,2001 ,**33**:371 – 414.
- [7] Wulf R. Investigation on a plate with uniform boundary layer suction for ground effects in the 3m* 3m low speed wind tunnel of DFVLR-AVA[R]. AGARD Wind Tunnel Design and Testing Tech ,1976.
- [8] Tyll J S , Liu D , Schetz J A , et al. Experimental studies of maglev aerodynamics[J]. AIAA Journal ,1995:95 – 1917.
- [9] Pulliam W J , Marshakov A , Tyll J S , et al. Aerodynamics of the AMT maglev train design[J]. AIAA Journal ,1996:96 – 2476.
- [10] Sardou M. The sensitivity of wind tunnel data to a high speed moving ground for different types of road vehicles[R]. S A E , 880246.
- [11] Launder B E , Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering ,1974 ,**3**(2) :269 – 289.
- [12] Wilcox D C. Multi-scale model for turbulent flows[R]. In AIAA 24th Aerospace Sciences Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics ,1986.
- [13] Menter F R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows[J]. AIAA Paper 1993 – 2906 ,1993.
- [14] Bearman P W. Bluff body flows applicable to vehicle aerodynamics[J]. Journal of Fluids Engineering ,1980 ,**102**(3) :265 – 274.
- [15] Tyll J S , Schetz J A , Mook D T. Low-order methods for two dimensional bluff bodies in ground effect[J]. AIAA Paper 1998: 98 – 426.

Numerical Study on Ground Effect of High Speed Trains

SUN Zhenxu , GUO Dilong , YAO Yuan , YANG Guowei

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems , Institute of Mechanics ,
Chinese Academy of Science , Beijing 100190 , China)

Abstract: A steady RANS approach is adopted to investigate ground effect of high speed trains. Variation of aerodynamic forces due to ground effect is studied. Comparisons of aerodynamic forces on high speed train at different yaw angles and with different ground boundary conditions are performed. It reveals that aerodynamic forces at a yaw angle of 0° are severely affected by the ground effect. As the yaw angle increases , however , influence on aerodynamic forces due to ground effect gets weaker. Influence of height between bottom of the train and the ground is carefully studied. It shows that lift reversal phenomenon exists at different heights and pressure wave on bottom surface of the train takes a linear relation with heights.

Key words: ground effect; turbulence model; yaw angle; aerodynamic forces; lift reversal