

基于域动网格技术的列车外形 对气动性能的影响研究*

栾飞舟, 陈丽华*

(浙江大学 航空航天学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为解决隧道与列车相对运动的问题,将域动网格技术应用到列车隧道效应研究中。通过建立高速列车隧道物理模型,采用有限体积法求解三维可压缩非定常流动模型以及双方程湍流模型,开展了高速列车穿越隧道时的非定常流场的数值模拟。研究了列车头型对列车尾涡的影响,列车头型对列车车身表面压力的影响,车长对列车摩擦阻力和列车压差阻力的影响。在计算结果的基础上对高速列车的头型和车长进行了评价。研究表明:列车头型的流线化程度越高,列车的气动阻力越小,列车尾涡涡心越低;列车长度对列车的压差阻力影响不大,对列车的摩擦阻力影响较大;通过数值计算得到的结果可以为列车头型的设计提供理论依据,为列车车长的定型和列车减阻提供参考。

关键词: 高速列车;非定常流场;列车尾涡;数值模拟;气动阻力

中图分类号: O335;U266;TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)06-0658-04

Study on effect of train's shape on aerodynamic performance by moving zone

LUAN Fei-zhou, CHEN Li-hua

(Institute of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problems of the relative movement about the train and tunnel, the moving zone was investigated. The unsteady flow of train passing through the tunnel was studied by computation of the compressible Navier-stokes equations and equations based on the physical model. The effects of the head-shape on the vortex around tail of train and the pressure on train body were studied, and the effects of the length of the train towards the friction drag and pressure drag of the train were researched. The head-shape and train's length were evaluated based on the results. The results indicate that the higher the streamline shape is, the smaller the aerodynamic drag is, and the lower the vortex around the tail of the train is. The length of the train has little effect on the pressure drag, but has great influence on the friction drag. The conclusions based on the research could provide a theoretical basis about the design of the head-shape of the train. Meanwhile, it could provide a reference for the design of the length of the train and the drag reduction.

Key words: high speed train; unsteady flow; vortex around tail of train; computer simulation; aerodynamic drag

0 引言

随着列车速度的不断提高,也带来了一连串的空气动力学问题,如空气阻力、列车交会以及穿越隧道产生的空气压力变化、气动噪声以及对周围环境的影响等,均与列车外形的流线程度有关。为此,必须进

一步优化车体外形,以减小空气阻力、交会压力波等对列车的影响。高速列车在穿越隧道过程中,隧道内空气压力会在极短时间内产生剧烈变化,形成空气压力波,空气压力波会影响到行车安全以及乘客的舒适性。同时,列车高速运行时受到的阻力也会增加,导致列车能耗增大。因此从20世纪60年代开始,日、

收稿日期:2011-11-13

基金项目:国家科技支撑计划重大资助项目(2009BAG12A03D)

作者简介:栾飞舟(1986-),男,河南周口人,主要从事高铁隧道效应方面的研究。E-mail:luanfeizhou@163.com

通信联系人:陈丽华,女,副教授,博士,硕士生导师。E-mail:mecclh@zju.edu.cn

英、法、德等国开始进行了隧道空气动力学系统的研究。与国外相比,中国对该问题的研究起步较晚,一直到20世纪90年代中期才开展了隧道空气动力学问题的研究。这类问题的研究方法主要有:模型实验、现场实测、数值模拟。其中,数值模拟具有研究周期短、耗费低等优点,越来越多地被应用到高速列车隧道效应的研究中来。过去由于计算机硬件的限制,主要采用一维数值模拟^[1-2],随着计算机和计算方法的快速发展,二维和三维数值模拟逐步被采用,主要数值方法包括有限体积法、有限差分法、有限元法和面元法等^[3-4]。三维数值模拟^[5-9]可以得到列车在隧道内运行时列车断面上的流速和压力分布的详细信息,因此成为了研究该类问题的主要方法。毛军等学者^[10]对侧风风场特征对高速列车气动性能作用进行了研究。马梦林等人^[11]对空调导流罩对列车气动阻力影响进行了研究。苗秀娟等人^[12]对峡谷风对桥梁上列车气动性能的影响进行了研究。张经强等人^[13]对高速列车外形的气动性能进行了数值计算和头部外形的改进,针对列车气动外形存在的问题,对列车头部外形进行了改进,并提出了列车头部外形改进方案且分别对其进行数值模拟研究。陈喜红^[14]对高速列车外形及发展趋势进行了总结,指出必须寻求最佳列车外形以降低列车的空气阻力和能耗。梁习锋等人^[15]分析了高速列车外形计算机辅助设计的方法,介绍了一种自主研发的用来进行高速列车头尾部流线外形方案设计的计算机辅助几何造型软件。

本研究通过求解非定常、可压缩黏性 Navier-Stokes 方程以及 $\kappa-\varepsilon$ 两方程湍流模型,采用动网格方法,对 CRH3 型的高速列车隧道系统进行三维数值模拟。针对不同列车外形进行计算,得到相应流场和列车阻力随时间的变化规律,为高速列车的设计提供参考。

1 计算模型

1.1 控制方程

高速列车通过隧道引起的空气流动是三维可压缩非定常流动,流动遵守 $N-S$ 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{W} dV + \oint [F - G] \cdot dA = \int_V H dV \quad (1)$$

其中,矢量 $\mathbf{W}$ 、 $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{G}$ 分别为:

$$\mathbf{W} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho v u + p i \\ \rho v v + p j \\ \rho v w + p k \\ \rho v E + p v \end{Bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: ρ, v, E, p —流体的密度、速度、单位质量的总能量以及压力; τ_{ij} —粘性应力张量; q —热流量。

1.2 边界条件和与初始条件

隧道壁面采用无滑移边界条件,即流体的法向速度为零。为得到列车驶入和驶出隧道时空气流动特征,本研究在隧道出口和入口处各增加一段空气域,空气域分别设置为出口、入口边界,出口、入口压力设置为环境大气压 101 325 Pa。列车及列车周围区域设置为运动域,运动速度等于车速 120 m/s。时间步长取为 0.001 s。

1.3 网格划分

整个计算区域分为静止区域和运动区域,静止区域内的网格始终保持不变,运动区域内的网格随着列车的运动进行合并和分裂。静止区域和运动区域通过滑移交界面连接,交界面两侧为非正则网格,数据传递通过差值来实现。划分网格之前,本研究首先对列车模型进行必要的简化,忽略门把手、受电弓和转向架等对隧道内压力、列车气动阻力影响,把车体看作是一个具有光滑外形的几何体。不考虑隧道的坡度、道衬砌壁和路面的细部结构,把隧道壁面和地面作为光滑表面来处理。

2 计算方法

本研究结合局部网格重组法和动态分层法的优点,采用域动网格技术对高速列车穿越隧道进行数值模拟,域动网格技术只需要对简单边界处进行分层差值运算,这加快了网格更新速度,从而保证了仿真计算的高效性和稳定性。

本研究通过求解非定常可压缩流动的 RANS 方程和 Realizable $\kappa-\varepsilon$ 二方程湍流模型,对隧道-列车系统的流场进行数值模拟。用有限体积法离散方程,动量、能量和方程中的对流项采用二阶迎风格式离散,时间项采用一阶隐式格式,压力速度耦合采用耦合算法。

列车的运动使用自定义函数进行控制。

3 计算结果

3.1 不同时刻列车表面等压分布

不同时刻列车及隧道壁面等压分布如图 1 所示。

由图 1 可以看出:在不同时刻,列车头部的压力始终较大,列车肩部存在较大的低压区,这对行车阻力会产生较大影响,因此通过合理设计列车头部形状可以减少列车阻力。

3.2 列车头型对尾涡的影响

列车头型示意图如图 2 所示。

其中, $\gamma = b/a$ 称为列车头型的长细比, b 为列车

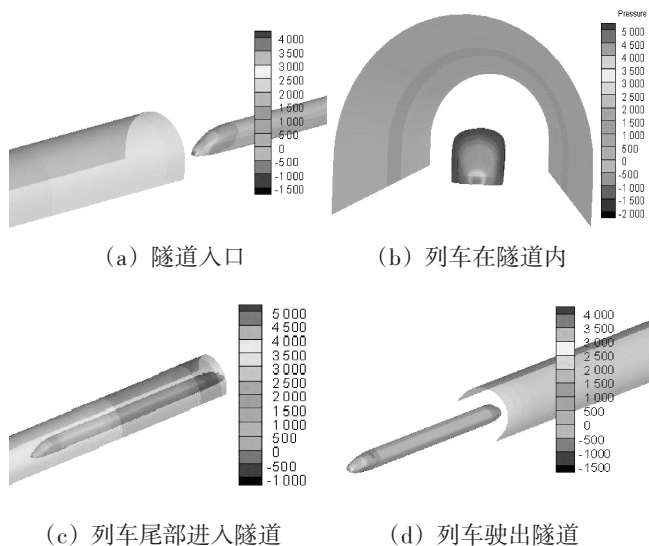


图1 不同时刻列车及隧道壁面等压分布

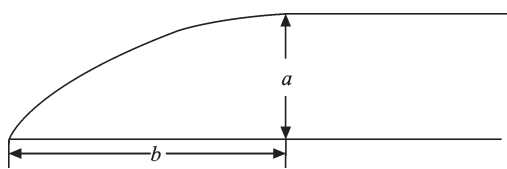


图2 列车头型示意图

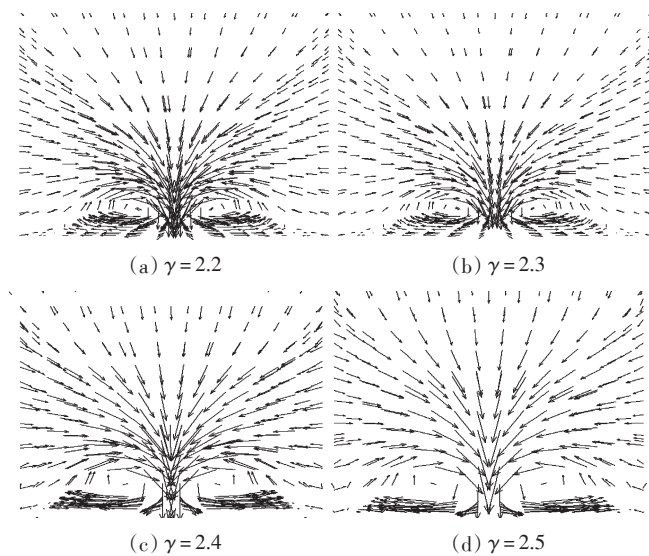


图3 不同列车头型的列车尾涡图

车头的长度, a 为列车车头的最大高度, γ 可以用来代表列车的流线化程度。

不同列车头型的列车尾涡图如图3所示。

本研究选取了长细比为 $\gamma=2.2, 2.3, 2.4, 2.5$ 的列车头型分别进行了列车尾涡的分析。由图3可以看出, 在列车尾部的横截面上产生了一对对称的涡流, 涡心较低。随着车头长细比的增加, 涡心降低, 涡核外移, 能量降低, 列车阻力减小。

3.3 列车头型对列车表面压力的影响

列车头型对列车表面压力的影响如图4所示。

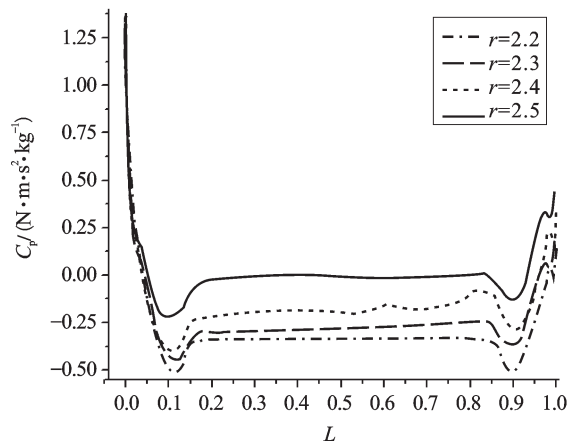


图4 列车头型对列车表面压力的影响

图4中: L —无量纲车长; $c_p = 2F/\rho v^2$; F —列车空气阻力, N; ρ —空气密度, kg/m^3 ; v —列车速度, m/s。

由图4可以看出, 不同长细比的列车头型, 列车表面压力分布规律类似, 在列车车身部位的压力相差不大, 但在列车头部和尾部的相差较大。随着列车头型长细比的增加, 列车的表面压力减小。

3.4 车长对空气阻力的影响

列车在运行过程中受到的空气阻力包括摩擦阻力和压差阻力两部分。

车长对压差阻力影响如图5所示。

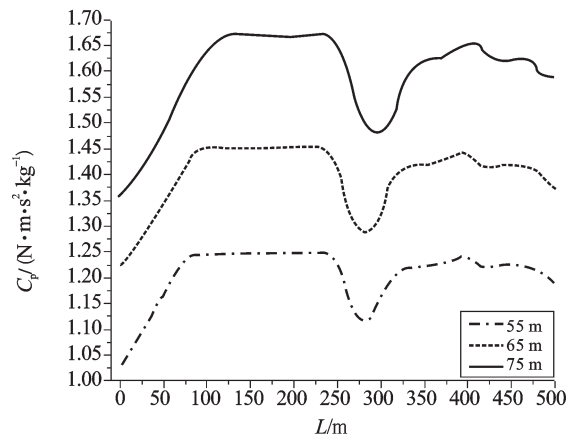


图5 车长对压差阻力影响

图5中: L —车长; p_f —压力系数, $p_f = 2F_f/\rho v^2$; F_f —压差阻力, N; ρ —空气密度, kg/m^3 ; v —列车速度, m/s。

由图5可以看出, 随着列车长度对压差阻力影响不大, 随着列车长度的增大, 在压差阻力的波峰处压差阻力稍有增大, 在压差阻力波谷处, 压差阻力稍有减小。

车长对摩擦阻力的影响如图6所示。

图6中: L —车长; p_p —压力系数, $p_p = 2F_p/\rho v^2$; F_p —压差阻力, N; ρ —空气密度, kg/m^3 ; v —列车速度, m/s。

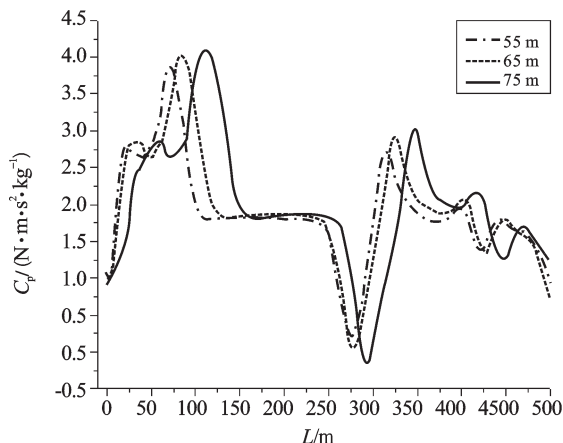


图6 车长对摩擦阻力影响

由图6可以看出,随着列车长度的增加,列车摩擦阻力显著增加。

列车长度是影响列车摩擦阻力的一个重要因素,合理缩短列车长度可以有效地减小列车的空气摩擦阻力,从而减小列车总阻力。

4 结束语

本研究对不同列车长度、头型的长细比进行了数值计算,分析了头型对列车尾涡以及对列车表面压力的影响,同时开展了列车长度对空气阻力的影响研究。最后,得到了以下主要结论:

(1) 列车头型对列车尾涡的影响较大,当列车头型的长度较大时,列车的尾涡的强度减小,涡心较低,阻力较小。

(2) 列车的头型的长细比对列车表面压力也有影响,当列车头型的长细比较大时,列车的表面压力减小,尤其对车头和车尾的效果更为明显。

(3) 列车车长对列车的摩擦阻力影响较大,对列车的压力阻力影响较小,合理地减小列车的长度,可以有效地减小列车的行车阻力。

由以上结论可以看出,列车头型的长细比与列车阻力和列车的表面压力有关,对列车的行车安全和寿命都有影响,列车设计过程中可以通过合适地增加头

型长细比来实现列车减阻。

参考文献(References):

- [1] WOODS W A, POPE C W. Secondary Aerodynamic effects in rail tunnels during vehicle entry [C]. Proceeding 2nd ISAVVT, BHRA, Paper C5, 1976.
- [2] VARDY A. E. The use of airshafts for the alleviation of pressure transients in railway tunnels [C]. Proceeding 2nd ISAVVT, BHRA, Paper C4, 1976.
- [3] STEINBEUER J. Calculation of Unsteady Pressures during Passing and Tunnel Entrance of Trains [C]. ASME Aerodynamics of Transportation, 1979.
- [4] AITA S. CFD Aerodynamics of the French High-speed Train [N]. SAE, 1992, 10. 4271/920343.
- [5] 骆建军, 高波, 王梦恕. 高速列车突入隧道时的三维非定常流的数值模拟 [J]. 中国铁道科学, 2005, 26(1): 15-19.
- [6] 王东屏, 兆文忠, 马思群. CFD数值仿真在高速列车设计中的应用 [J]. 铁道学报, 2007, 29(5): 64-68.
- [7] 周朝晖, 梅元贵, 许建林. 高速列车通过截面突变隧道时压力波的数值模拟研究 [J]. 铁道学报, 2007, 29(5): 34-39.
- [8] 李人宪, 赵晶, 张曙光. 高速列车风对附近人体的气动作用影响 [J]. 中国铁道科学, 2007, 28(5): 98-104.
- [9] 田红旗. 列车空气动力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [10] 马梦林, 邓海, 王东屏, 等. 空调导流罩对列车气动阻力影响的研究 [J]. 中国铁道科学, 2011, 49(3): 5-6.
- [11] 毛军, 郝艳红, 杨国伟. 侧风风场特征对高速列车气动性能作用的研究 [J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 23-29.
- [12] 苗秀娟, 田红旗, 高广军. 峡谷风对桥梁上列车气动性能的影响 [J]. 铁道学报, 2010, 31(6): 63-67.
- [13] 张经强, 梁习锋. 高速列车外形的气动性能数值计算和头部外形的改进 [J]. 计算力学学报, 2003, 20(3): 631-635.
- [14] 陈喜红. 高速列车外形及发展趋势 [J]. 电力机车技术, 1997(3): 1-4.
- [15] 梁习锋. 高速列车外形计算机辅助设计的方法 [J]. 国防科技大学学报, 1996, 18(2): 43-48.

[编辑: 罗向阳]

(上接第 657 页)

- [8] LEE A Y, MARRIOTT A T, LE N T. Variable Dynamic Tested Vehicle: Dynamics Analysis [N]. SAE Paper, 1997-05-60.
- [9] HUBERT K, KUMAR A. Anti-roll Stability Suspension Technology [N]. SAE Paper, 2005-01-3522.
- [10] 姜立标, 侯文超, 谷方德. 汽车稳态回转性能仿真与正交试验研究 [J]. 汽车技术, 2011(2): 43-46.
- [11] 刘喜东, 刘应东. 考虑转向速度的汽车操纵稳定性分析 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 95-100.
- [12] 董益亮, 吴俊刚. 汽车转向响应灵敏度分析及其在新产品开发中的应用 [C]. 2007 年 MSC. Software 中国用户论文集, 2007.

[编辑: 罗向阳]