文章编号：1001-4632（2012）增-0033-06

高速列车通过隧道时气动阻力特性的CFD仿真分析

王一伟，杨国伟，黄晨光

（中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室，北京 100190）

摘 要：基于可压缩流体的纳维—斯托克斯方程和RNG k—ε 模型，以由头车、中间车和尾车3辆车编组的某高速列车1∶8风洞试验模型为研究对象，采用计算流体动力学软件（CFD），建立包括车体和走行部的三维非结构化列车表面离散网格模型和列车与隧道、列车与明线空间的组合计算网格模型，研究高速列车通过隧道时气动阻力的时变特性和规律。结果表明：高速列车在车尾刚进入隧道入口时其气动阻力达到最大值，为同样工况下明线运行时的2.5倍；高速列车完全进入隧道后，其气动阻力在一段时间内处于相对平稳期，为明线运行时的1.8倍；之后在隧道压力波的作用下，高速列车的气动阻力会发生准周期变化，变化幅度接近明线运行时的60%；在隧道长度大于高速列车长度的前提下，高速列车通过不同长度隧道时，其进入隧道时的气动阻力最大值均比较接近，而且在隧道内运行时的气动阻力变化特征和幅值也基本相同。

关键词：高速列车；通过隧道；空气动力学；气动阻力

中图分类号：U266；U451.3　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1001-4632.2012.S1.06

高速列车气动阻力占常规运行阻力的最主要方面[1-2]，是高速列车运行的重要指标，也是车速和能耗的主要制约因素。高速列车在明线运行时，气动阻力通常与速度的平方成正比，并且变化较小；但在通过隧道时，类似活塞进入气缸的情况，空气对高速列车的阻碍作用明显增强，并会产生一系列的压力波在隧道内传播和反射，导致高速列车气动阻力大大增加，并呈现随时间变化的特征。因此，研究高速列车通过隧道过程中气动阻力的变化特性，对于高速列车的设计以及隧道区间的运行图编制等都具有重要的意义。

对高速列车隧道空气动力学的研究主要可以采用理论分析、实车试验、动模型试验以及数值计算等多种方法[3-4]。目前，对于高速列车通过隧道形成的压力波特别是初始压缩波和微气压波的研究较多[5-7]，对于隧道气动阻力的分析相对较少。王韦等[8]建立了非恒定流活塞风计算公式和适用于非恒定流的空气阻力计算方法，讨论了不同隧道断面的阻力系数；魏鸿等[9]采用水流模型模拟气流原型，形成隧道中高速列车的空气阻力计算方法，并最终提出沉管隧道列车空气阻力参数；许唯临等[10]针对简化的高速列车外形，计算了隧道中高速列车定常流动的空气阻力并分析了相关参数的影响；王一伟等[11]基于LBM方法和活塞风修正，研究了3节高速列车模型在无限长隧道中的准定常流动的空气阻力系数。

以上研究大都基于高速列车外形被简化且在无限长隧道中运行的基础上，得出了定常流动的空气阻力近似解，但对于高速列车通过隧道过程中的气动阻力演化情况，未做进一步研究。本文采用基于动态网格技术的三维CFD数值计算方法，针对投入运营的某高速列车3节风洞试验模型，进行高速列车通过隧道的气动阻力演化研究，分析整个过程中气动阻力的形成原因和变化规律。

1 数值计算方法

1.1 主控方程

针对高速列车通过隧道的气动阻力问题，需要准确分析列车周围与隧道空间内流场随时间的演化过程，因此针对流体的动力学行为，采用可压缩流体的纳维—斯托克斯（Navier—Stokes）方程作为基本控制方程，则有

收稿日期：2011-11-10；修订日期：2012-02-10

基金项目：国家科技支撑计划项目（2009BAG12A03）；国家重点基础研究发展计划项目（2011CB71100）

作者简介：王一伟（1983—），男，河北卢龙人，助理研究员，博士研究生。

万方数据

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l})]+\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u'_i u'_j}) \tag{2}$$

式中：ρ 为空气密度；u 为空气速度；x 为空间坐标；i，j 为方向下标；δ_{ij} 为克罗内克函数；u_i' 和 u_j' 为空气在 i 方向和 j 方向的脉动速度。

式（2）中最右边的 $-\rho\overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力项，该项需要采用一定的湍流模式与流场平均量联系起来，才能将方程组封闭。根据 Boussinesq 假设有

$$-\rho\overline{u'_i u'_j}=\mu_t(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})-\frac{2}{3}(\rho k+\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_j})\delta_{ij} \tag{3}$$

其中，$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$

式中：μ_t 为湍流黏度系数，C_μ 为常数 0.0845；k 为湍动能；ε 为湍流耗散率。

基于 RNG k—ε 模型增加关于湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的输运方程，即可将方程封闭[12]。

1.2 求解方法和计算参数

对于上述主控方程，采用有限体积法进行离散求解，具体计算方法和参数取值见表1。

表1 主控方程求解时计算参数

方法和参数	求解和取值
求解方式（Simulation type）	非定常（Unsteady）
时间离散格式（Temporal scheme）	一阶隐式（1st —order implicit）
空间离散格式（Spatial scheme）	二阶迎风（2nd—order upwind）
压力插值格式（Pressure Interpolation Schemes）	交错压力方式（PREssure STaggering Option，PRESTO!）
湍流模式（Turbulence model）	RNG k—ε
时间步长（Time step）	1 ms

1.3 计算模型和工况

为便于将通过隧道工况与明线运行工况对比，计算模型选取某投入运营的高速列车1∶8风洞试验模型的头部、中部和尾部3辆车厢编组作为研究的物理对象，采用计算流体动力学软件（CFD），进行列车表面、车厢连接处、转向架等部位的数值计算和风洞测力试验对比分析。

进行三维CFD数值模拟前，对计算模型进行非结构化网格离散。为了较为准确的描述高速列车气动阻力情况，对车体、转向架等复杂的几何结构也予以保留并划分了网格，在高速列车表面处划分棱柱型的边界层网格对其边界层进行模拟，保证边界第一层网格位于湍流边界层内。整个计算区域约700万个单元。其中，车头附近表面离散网格如图1所示；车厢编组表面离散网格如图2所示。

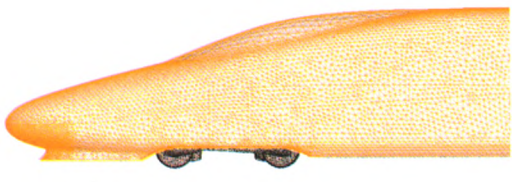

图1 车头附近表面离散网格

图2 车厢编组表面离散网格

此外，由于要考虑高速列车与隧道和明线地面的相对运动，因而计算网格采用多块划分的办法，即每列车厢周围建立一个长方形空间生成网格，再建立其与明线空间和隧道的组合计算网格（本文中隧道采用截面积实际尺寸为70 m² 的单线隧道）。利用滑移网格来实现不同块之间的相对运动，同时利用层状网格方法维持网格大区域的不变性。列车与隧道组合网格如图3所示，列车与明线空间组合网格如图4。

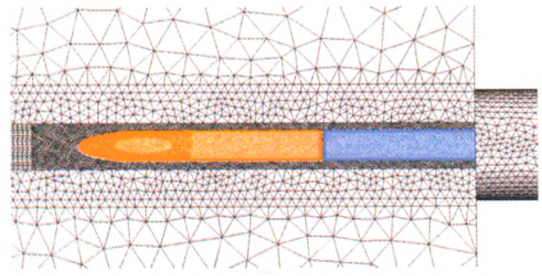

图3 通过隧道时列车与隧道的组合计算网格

万方数据

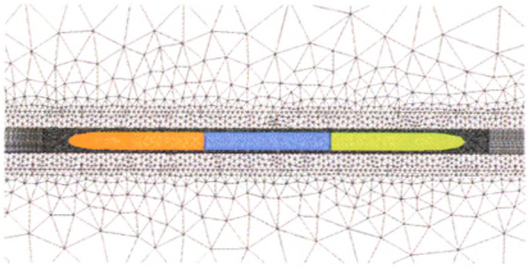

图 4　明线运行时列车与明线空间的组合计算网格

计算过程中，采用地面和隧道壁面不动，高速列车以真实速度运行的方式设定计算条件。计算时高速列车设为运动壁面，以车速 216 km·h^{-1}运行并同时进入隧道；地面及隧道壁面为固定无滑移壁面；远场给定压力为 1 个大气压，分别在头车、中间车厢和尾车处分块记录阻力变化情况。

2　明线运行时数值计算与试验结果对比

利用前述的动网格技术和三维 CFD 数值计算方法，进行明线运行时的动态网格计算，得到明线阻力随时间变化的时程曲线如图 5 所示。

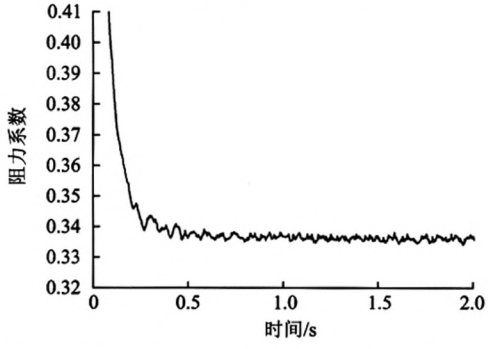

图 5　明线运行时气动阻力系数随时间变化曲线

阻力系数定义为

$$C_d = \frac{2F_x}{\rho v^2 A} \tag{4}$$

式中：F_x 为列车运行反方向所受合力；v 为列车运行速度；A 为运行方向列车投影面积。

明线运行条件下，计算得到列车的稳定平均阻力系数为 0.336，与相同工况进行风洞试验得到的稳定平均阻力系数 0.326 相比，误差约为 3%，验证了所用数值计算方法的正确性和准确性。

明线运行时头车、中间车厢、尾车和转向架等部位气动阻力比例分布如图 6 所示。由图 6 看出：3 节车厢车体的气动阻力相差不大，三者之和占全车气动阻力的 85%以上，是列车气动阻力的最重要组成部分。

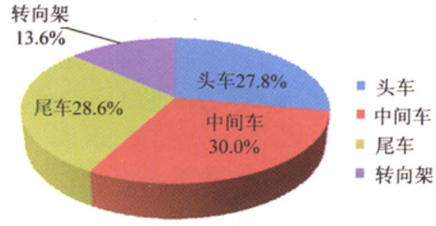

图 6　明线运行时气动阻力分布

3　通过隧道时数值计算与分析

3.1　典型工况气动阻力变化规律

采用与明线运行工况相同的计算方法，进一步计算通过典型长度隧道（即波动影响较显著的隧道长度[3,13]，本文计算中采用长度为 13 倍车长的隧道）工况高速列车流场以及气动阻力情况。计算中，列车通过隧道断面阻塞比为 0.156，得到高速列车通过典型隧道时气动阻力系数时程曲线如图 7 所示。图中：高速列车运行方向为由左至右；1—9 为与高速列车运行情况对比后归纳得出的气动阻力典型特征阶段序号。

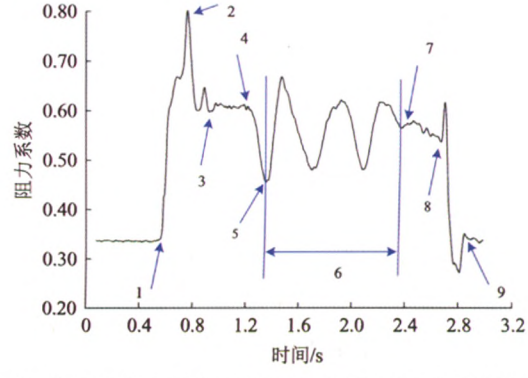

图 7　高速列车通过典型隧道时气动阻力系数时程曲线

阶段 1：高速列车在即将进入隧道之前（t=0.5 s），其和地面压力分布如图 8（a）所示。此时，高速列车气动特性与明线运行时基本相同，气动阻力也与明线运行时非常接近。当高速列车车头进入隧道入口时（t=0.7 s），产生初始压缩波并向隧道出口方向传播，车头迎风面压力快速持续升高，因而导致气动阻力迅速升高。进入隧道初始过程压力分布如图 8（b）所示。由图 8（b）可见：列车前方高压压缩波已经形成，隧道内部压力达到 1 000 Pa，此时车尾压力分布与明线运行时接近。

阶段 2：高速列车车尾进入隧道入口时（t=0.75 s），产生初始膨胀波并向车头及隧道出口方

万方数据

向传播，隧道壁面最低压力达到－600 Pa；同时列车壁面压力逐渐下降，列车壁面最低压力达到－800 Pa，而气动阻力也将随之下降，在此时气动阻力取极大值。此时高速列车表面压力分布如图8（c）所示。

阶段3：初始膨胀波到达高速列车车头位置并继续传播，之后在没有新的压力波产生影响之前，高速列车气动阻力进入一个平稳期，平稳期内高速列车表面压力分布分别如图8（d）和（e）所示。由图8（d）和（e）可见：t=0.9和1.1 s时，高速列车表面压力分布非常接近，由于此时高速列车处在封闭空间内，因此气动阻力仍显著高于明线运行时，接近于无限长隧道内高速列车运行阻力的结果。

阶段4：初始压缩波传播到隧道出口反射为膨胀波，然后又传回高速列车表面，造成车头迎风面压力下降为负压，约为－200 Pa，从而使气动阻力相应持续下降。此过程中高速列车表面压力分布如图8（f）所示。由图8（f）可见：t=1.3 s左右，车前压力明显低于图8（d）和（e），此时高速列车前方压力处在下降过程的最低点。

阶段5：初始膨胀波到对面隧道出口反射为压缩波，然后传回到列车表面，造成车头迎风面压力升高，因此气动阻力开始增加。

阶段6：高速列车在隧道内持续运行，由于压力波的不断传播和反射，列车气动阻力呈现出周期性变化规律。

阶段7：高速列车运行至接近隧道出口区域，由于此处接近开放空间，压力波的作用不明显，并且压力波在隧道口反射后形成的反射波与入射波对壁面压力的作用相反，存在一定的中和作用，因此高速列车气动阻力变化幅度趋于减小，其数值略小于阶段3（平稳期），此时高速列车表面压力分布如图8（g）所示。

阶段8：高速列车车头驶出隧道，隧道口效应使气动阻力发生波动，随后迅速下降，此时列车驶出隧道部分表面压力分布与明线运行情况接近。这一阶段高速列车表面压力分布如图8（h）所示。

阶段9：高速列车车尾使出隧道时，气动阻力发生一定波动后保持稳定，之后其表面压力分布恢复至明线运行时，此时高速列车表面压力分布如图8（i）所示。

基于以上分析可以看出，气动阻力大小满足如下规律：高速列车车头进入隧道口后气动阻力迅速增加，并在车尾进入时达到最大值，同样工况下达到明线运行时气动阻力的2.5倍；高速列车完全进入隧道后，气动阻力存在一段时间的平稳期，同样工况下平稳期的气动阻力约为明线运行时的1.8倍；之后在隧道压力波的作用下，高速列车气动阻力会发生准周期性变化，变化幅值接近明线运行的60%，周期与压力波在隧道内的传播时间接近；高速列车接近到达隧道出口时，气动阻力进入第2个平稳期，数值与第1个平稳期接近；高速列车车头行驶出隧道后，其气动阻力迅速下降，并伴随有一定波动，最后恢复至明线运行时的气动阻力。

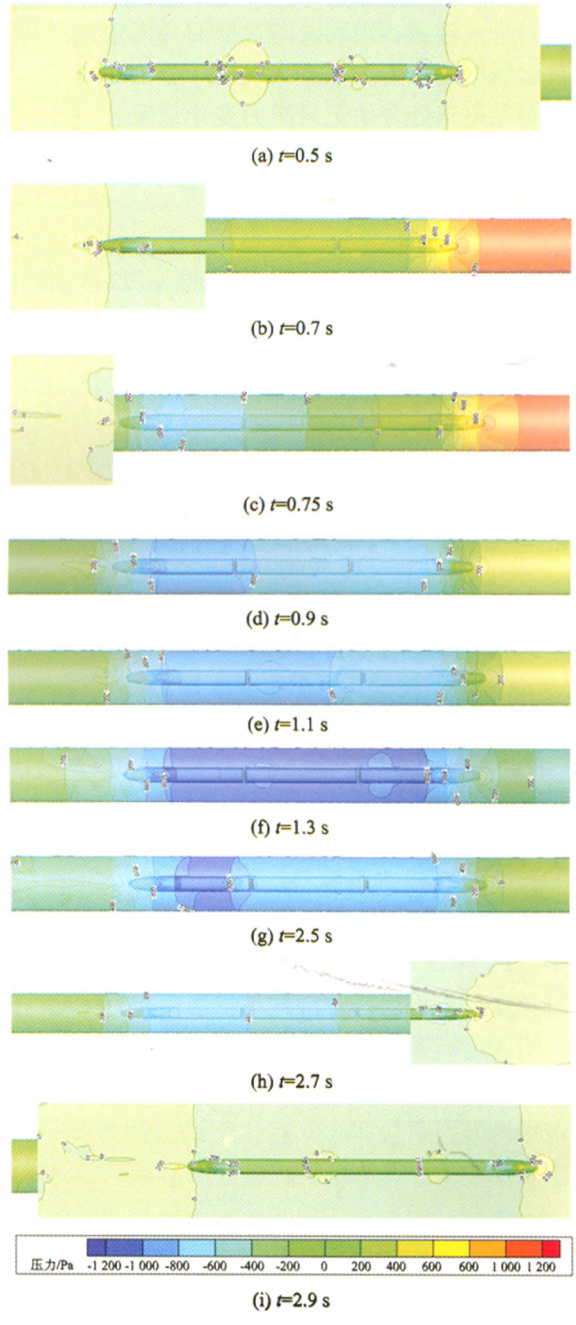

图8 通过典型隧道时高速列车表面压力分布（单位：Pa）

万方数据

3.2　隧道长度对气动阻力变化规律的影响

基于上述典型隧道长度的气动阻力分析，又分别对高速列车通过长度为 10 倍车长的中隧道和 6.5 倍车长的短隧道气动阻力进行分析。为了便于对比分析，将曲线的时间轴统一到相同位置，得到高速列车通过不同长度隧道时气动阻力系数时程曲线，如图 9 所示。

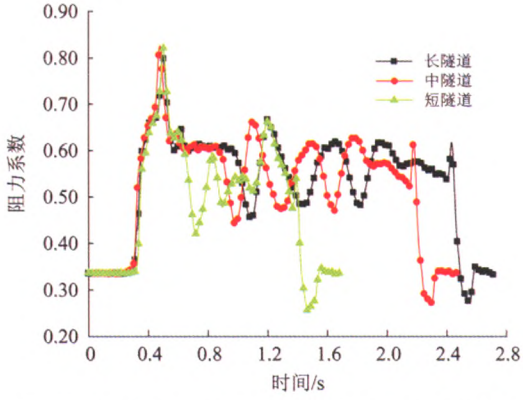

图 9　高速列车通过不同长度隧道时气动阻力系数时程曲线

由图 9 可见：中隧道与长隧道相比，气动阻力的变化规律和量值基本相同，仅在变化的时间周期上有所差别，中隧道的气动阻力变化周期较长隧道短。

高速列车通过短隧道时的气动阻力变化情况与长隧道基本相同，均在列车完全进入隧道时刻取最大值。但由于短隧道反射时间较短，没有阻力相对稳定期。另外，由于高速列车的最大气动阻力和变化幅度主要由初始压缩波和压缩波决定，而在列车速度和阻塞比不变的情况下，入射波的强度基本不变，因此高速列车通过短隧道时气动阻力变化的幅值与长隧道也比较接近。

通过以上分析，可以得到不同工况下稳定平均阻力系数见表 2。

由此，也可进一步推知高速列车通过其他长度隧道时的气动阻力变化规律：对于更长隧道，列车进出隧道时阻力变化与上述典型隧道分析应基本相同，且随着隧道长度的增长，隧道内气动阻力稳定期和波动周期也会随之加长，最终趋近于无线长隧道的气动阻力分析结果；对于更短隧道，当隧道长度缩短甚至小于列车长度时，高速列车气动阻力提高过程会变得不充分，相当于上述分析中的进入隧道过程和驶出隧道过程的叠加。

表 2　不同工况下稳定平均阻力系数

工况	阻力系数
明线运行时风洞试验	0.326
明线运行时数值计算	0.336
通过长隧道时数值计算	0.564
通过中隧道时数值计算	0.563
通过短隧道时数值计算	0.533
刚进入隧道时阻力最大值（不同长度平均）	0.818
隧道内运行时阻力最大值（不同长度平均）	0.664

4　结论

（1）高速列车在车尾刚进入隧道入口时气动阻力达到最大值，在同样工况下达到明线运行时的 2.5 倍。

（2）高速列车完全进入隧道后，在隧道口附近阻力变化平稳，平稳期气动阻力约为明线运行时的 1.8 倍，在隧道内运行时高速列车在压力波作用下气动阻力会发生准周期变化，变化幅度接近明线运行阻力的 60%。

（3）高速列车通过隧道长度大于列车长度的不同隧道时，其进入隧道时的气动阻力最大值均比较接近，在隧道内运行时气动阻力的变化特征和幅值也基本相同。

（4）基于本研究，结合高速列车进入隧道初始压缩波的研究结果，可以进一步探讨高速列车隧道运行时气动阻力最大值和变化幅度与列车运行速度、阻塞比等参数的关系。

参　考　文　献

[1] JOSEPH A Schetz. Aerodynamics of High-Speed Trains [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2001, 33: 371-414.

[2] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of High-Speed Railway Train [J]. Progress Aerospace Sciences, 2002, 38 (6-7): 469-514.

[3] 田红旗. 列车空气动力学 [M]. 北京：中国铁道出版社，2007.

[4] 梅元贵，周朝晖，许建林．高速铁路隧道空气动力学 [M]. 北京：科学出版社，2009.

[5] RICCO P, BARON A, MOLTENI P. Nature of Pressure Waves Induced by a High-Speed Train Travelling Through

万方数据

a Tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95 (8): 781-808.

[6] 赵晶，李人宪，刘杰．高速列车隧道内等速会车时气动作用力的数值模拟 [J]. 铁道学报，2010，32 (4): 27-32.
(ZHAO Jing, LI Renxian, LIU Jie. Numerical Simulation of Aerodynamic Forces of High-Speed Trains Passing Each Other at the Same Speed through a Tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32 (4): 27-32. in Chinese)

[7] 赵宇，高波，张兆杰．隧道压力波的三维数值模拟 [J]. 路基工程，2007 (4): 12-14.

[8] 王韦，王建宇，陈正林．隧道中高速列车活塞风及空气阻力的计算 [J]. 中国铁道科学，1999，20 (1): 9-16.
(WANG Wei, WANG Jianyu, CHEN Zhenglin. Computation of Piston Wind and Aerodynamic Drag on High Speed Train in Tunnel [J]. China Railway Science, 1999, 20 (1): 9-16. in Chinese)

[9] 魏鸿，吴剑．沉管隧道高速列车空气阻力水力学模型试验研究 [J]. 铁道建筑，2007 (5): 41-45.

[10] 许唯临，廖华胜，王韦．隧道中高速列车空气阻力的数值计算 [J]. 应用力学学报，1998，15 (3): 124-127.
(XU Weilin, LIAO Huasheng, WANG Wei. Numerical Calculation of Aerodynamic Drag of Train in Tunnel [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1998, 15 (3): 124-127. in Chinese)

[11] WANG Y W, WANG Y, AN Y R, et al. Aerodynamic Simulation of High-Speed Trains Based on the Lattice Boltzmann Method [J]. Science China (Series E: Technological Sciences), 2008, 51 (6): 773-783.

[12] WILCOX D C. Turbulence Modeling for CFD [M]. 3rd ed. California: DCW Industries, 2006.

[13] WANG Y W, YANG G W, HUANG C G, et al. Influence of Tunnel Length on the Pressure Wave Generated by High-Speed Trains Passing Each Other [J]. Science China (Series E: Technological Sciences), 2012, 55 (1): 255-263.

CFD Simulation Analysis on the Aerodynamic Drag Characteristics of High-Speed Train Running through Tunnel

WANG Yiwei, YANG Guowei, HUANG Chenguang

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

Abstract: The time-variation characteristics and mechanism of aerodynamic drags of the high-speed train when it runs through a tunnel are investigated, using the Computational Fluid Dynamics (CFD) software based on the Narvier-Stokes equations about compressible fluid and RNG k-ε turbulence model. In the simulations, 3D combination meshes about the 1 : 8 wind-tunnel model of the three-car unit (head car, middle car and tail car) are constructed with the shape details of train bodies and bogies also considered. Results indicate that aerodynamic drag reaches its maximum value just when the tail of the train enters in the tunnel, which is 2.5 times for the condition that the train running in the open air. After the train fully accesses into the tunnel, the aerodynamic drag is stable in a period of time which is 1.8 times for the condition that the train running in the open air. Then the drag changes quasi-periodically by about 60% of the drag in the open-air condition. If the tunnel is longer than the train, the maximum drag, the characteristics and the amplitude of the changes of the drag are almost the same when the train runs through tunnels with different lengths.

Key words: High-speed train; Running through tunnel; Aerodynamics; Aerodynamic drag

(责任编辑 金 燕)

万方数据

高速列车通过隧道时气动阻力特性的CFD仿真分析

万方数据 WANFANG DATA 文献链接

作者： 王一伟， 杨国伟， 黄晨光， WANG Yiwei， YANG Guowei， HUANG Chenguang
作者单位： 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室,北京,100190

刊名： 中国铁道科学 ISTIC EI PKU
英文刊名： China Railway Science
年，卷(期)： 2012,33(z1)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgtdkx2012z1006.aspx