DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.06.007

铁道机车车辆

城际动车组隧道压力波及车内压力波动研究

宋军浩，刘加利，姚拴宝，陈大伟

（中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛 266111）

摘 要：城际动车组大载客量需求使得列车头型变短，城际线路小隧道断面需求使得列车隧道运行阻塞比增大，列车隧道压力波和车内压力波动问题突出，影响乘客舒适性。文章着重研究大阻塞比条件下的城际动车组隧道压力波及车内压力波动特性，基于三维瞬态可压缩RANS方程和SST *k-ω* 湍流模型，利用滑移网格技术建立城际动车组隧道压力波数值计算方法，研究不同车速、不同隧道直径下的列车隧道压力波特性。通过经验公式，计算不同动态密封指数下的车内压力波动。计算结果表明，隧道压力波主要由车速和阻塞比决定，且车速的影响更为显著。随着车速的增加，客室区和司机室区的车内压力波动显著增大，司机室区的车内压力波动大于客室区的车内压力波动。在车速160 km/h、隧道直径7.2 m和7.4 m条件下，动态密封指数5 s时，客室区和司机室区的车内压力波动达到良好标准；在车速200 km/h隧道直径7.2 m和7.4 m条件下，动态密封指数8 s时，客室区和司机室区的车内压力波动达到良好标准。

关键词：城际动车组；压力波；车内压力波动；阻塞比；动态密封指数

中图分类号：U292.91+4；U266.2　　**文献标识码**：A

文章编号：1000-128X(2022)06-0044-07

Study on the pressure wave and interior pressure fluctuation of the intercity EMU passing through the tunnel

SONG Junhao, LIU Jiali, YAO Shuanbao, CHEN Dawei

(CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: The demand for large passenger capacity of intercity EMU leads to a shorter streamlined train head, the demand for small cross section of the intercity/suburban line tunnel leads to a larger blockage ration of the train passing through the tunnel. The pressure wave and interior pressure fluctuation of the train passing through the tunnel are the prominent problems, which affect the comfort of the passengers. This paper mainly focuses on the pressure wave and interior pressure fluctuation of the intercity EMU passing through the tunnel under the condition of large blockage ratio. Based on the three-dimensional transient compressible RANS equation and the SST *k-ω* turbulence model, the numerical calculation method of pressure wave of the intercity EMU passing through the tunnel was established using the slip grid technology. The pressure wave characteristics of the train passing through the tunnel were studied for different train speeds and different tunnel diameters. The empirical formula was used to calculate the interior pressure fluctuation under different dynamic tightness coefficients. The computational results show that the pressure wave of the intercity EMU passing through the tunnel is mainly determined by the train speed and the blocking ratio, and the influence of the train speed is more significant. With the increase of the train speed, the interior pressure fluctuations of the passenger compartment area and the driver's cab area are significantly in-

收稿日期：2021-09-01；修回日期：2022-10-26
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200504-F)；中国中车股份有限公司科技研究开发计划项目(2020CCB152，2020CYB110)
通信作者：刘加利（1985—），男，正高级工程师，主要从事列车空气动力学方面的研究；E-mail: liujiali@cqsf.com

creased. The interior pressure fluctuation of the driver's cab area is greater than that of the passenger compartment area. When the train speed is 160 km/h, the interior pressure fluctuations of the passenger compartment area and driver's cab area reach the good standard when the dynamic tightness coefficient reaches 5 s, for the tunnel diameters of 7.2 m and 7.4 m. When the train speed is 200 km/h, the interior pressure fluctuations of the passenger compartment area and driver's cab area reach the good standard when the dynamic tightness coefficient reaches 8 s, for the tunnel diameters of 7.2 m and 7.4 m.

Keywords: intercity/suburban EMU; pressure wave; interior pressure fluctuation; blockage ratio; dynamic tightness coefficient

0　引言

随着城市群的快速发展，都市圈内城市间的交流日益增多，来往主城区和卫星城的通勤、通学客流急剧增多，建设占地省、能耗低、容量大、效率高的城际轨道交通已成战略选择。随着城市群的快速崛起，城际轨道交通应运而生。城际轨道交通高密度、小编组、公交化的运营特点对城际动车组提出了不同于高速动车组的高效经济中短途运输能力需求，要求列车具有编组灵活、载客量大、快起快停、快速运行、综合舒适度高等特点。“互联互通”和“四网融合”要求城际动车组具有对客运专线、城际线和既有线运营的普适性。城际线和既有线隧道断面小、线间距小、曲线半径小等特点对城际动车组设计提出很大挑战。城际动车组大载客量需求要求列车头型应尽可能短，头型长度变短，列车气动性能恶化[1-2]。城际线路小隧道断面特征使得城际动车组隧道运行阻塞比显著增大，列车通过隧道时将产生很大的压力波，并导致车内压力波动增大，影响乘客的舒适性[3-4]。因此，在城际动车组设计过程中，开展大阻塞比条件下的城际动车组隧道压力波及车内压力波动特性研究具有重要的意义。

目前对高速列车隧道压力波及车内压力波动已开展了大量的研究工作，其主要研究方法包括实车试验[5-6]、模型试验[7-8]和数值仿真。在数值研究方面，高速列车隧道压力波计算主要是采用一维模型。贾永兴采用一维流动模型对高速列车隧道通过及隧道交会气动性能进行数值模拟，研究列车速度和阻塞比对车外压力波的影响特性[9]。周朝晖对一维流动模型进行发展，建立了多竖井、多横通道以及竖井、横通道和隧道截面变化耦合下的隧道压力波计算方法[10]。随着计算机水平的不断发展，越来越多的学者开展采用二维或三维模型开展隧道压力波研究。王一伟建立了二维的高速列车隧道交会数值模拟方法，对不同长度隧道内的列车交会特性进行研究[11]。李人宪采用三维动态数值计算方法，开展高速列车隧道通过压力波问题分析，得到隧道通过时隧道内最大正压及最大负压发生的可能位置，并给出最大正压值和最大负压值与车速的关系式[12]。对于车内压力波动的计算，通常是从列车气密性的角度出发，在得到车外压力波情况的基础上，通过经验公式来计算车内压力波动[13]。梅元贵对特长隧道和中长隧道两种条件下的车外瞬变压力和车内压力波动特性进行研究，归纳了隧道长度、列车速度和气密性指数对车内压力变化的影响特性[14]。以上研究主要是针对高速列车通过隧道，而关于城际动车组通过隧道的研究工作还比较少。高速列车流线型头型长，高速铁路隧道断面面积大，而城际动车组流线型头型短，城际铁路隧道断面面积小，高速动车组关注的是小阻塞比下长大头型的隧道气动性能，城际动车组关注的是大阻塞比下短钝头型的隧道气动性能，两者之间存在较大差异。为此，本文将建立城际动车组隧道通过计算模型及车内压力波动计算模型，研究车速、隧道直径对列车隧道压力波及车内压力波动特性的影响，并基于车内压力波动要求，提出不同车速、不同隧道直径下的动态密封指数要求，为城际动车组设计研发提供指导。

1　计算方法

1.1　控制方程

当研究列车进出隧道问题时，需要考虑空气压缩性的影响。列车隧道通过气动性能计算需要采用可压缩非定常流动，其控制方程为三维瞬态可压缩 RANS 方程[15]：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho u_j\right)}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

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

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j h)}{\partial x_j}=\operatorname{div}(k \operatorname{grad} T)+\frac{\partial\left(u_i \tau_{ij}\right)}{\partial x_j} \tag{3}$$

$$p=p(\rho, T) \tag{4}$$

式中：ρ 为流体密度；t 为时间；$x_i\,(i=1,2,3)$ 为直角坐标分量；u_i 为流体速度分量；p 表示压力；e 为内能；k 为热传导系数；T 为温度；τ_{ij} 为粘性应力张量；h 为焓。

列车周围流场是典型的湍流流场，在开展列车隧道通过气动性能计算时，需要进行湍流流动的模拟。本文计算时采用的湍流模型是 SST κ-ω 湍流模型。SST κ-ω 湍流模型是在边界层内部采用标准 κ-ω 湍流模型，在边界层外部采用高雷诺数的 κ-ε 湍流模型，且在边界层内部和外部能够逐渐过渡。SST κ-ω 湍流模型在广泛的流动领域中有更高的精度和更高的可信度，其控制方程为[16]：

$$\rho\frac{\partial(\kappa u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\kappa\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_\kappa-Y_\kappa \tag{5}$$

$$\rho\frac{\partial(\omega u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right)+G_\omega-Y_\omega+D_\omega \tag{6}$$

式中：κ为湍流动能；ω为湍流频率；Γ_κ为湍流动能的扩散率；Γ_ω为湍流频率的有效扩散率；G_κ、G_ω为湍流生成项；Y_κ、Y_ω为湍流耗散项；D_ω为交叉扩散项。

1.2 滑移网格法

列车隧道通过计算时，需要模拟动车组与隧道之间的相对运动，本文采用滑移网格法开展列车隧道通过仿真。图1给出了计算区域分区示意图。图1中区域①为贴近地面的固定区域，利用结构网格进行划分。区域②、③为滑移区域，按照列车速度进行滑移，区域③为列车周围的网格加密区域，利用非结构网格进行划分，区域②靠近列车的位置也应进行网格加密。区域④、⑥为隧道外的固定区域，利用结构网格进行划分。区域⑤为贴近隧道壁面的固定区域，利用结构网格进行划分。



图1 动车组隧道通过计算区域分区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the EMU tunnel passing through the computational domain zoning

数值计算时，区域②、③按照列车速度进行滑移，而区域①、④、⑤、⑥是固定的。滑移区域和固定区域的边界面为交换面，并通过交换面进行信息交换。不同网格区域之间的信息交换如图2所示，可以看出：区域②、⑤相对滑移时分别形成交换面*ABC*、*DEF*，相互切割形成公共面*a-d-b-e-c*，则单元4的边界信息可以通过公共面*d-b-e*，由单元1、2、3差值获得。

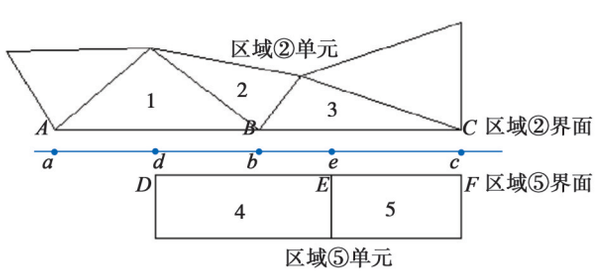


图2 交换面信息交换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interface information exchange

1.3 车内压力波动计算方法

在车内压力计算时，假设车体为刚性，且忽略空调系统进排风的影响，则车外压力向车厢内部的传播主要取决于车辆的气密性，车内压力计算公式为[13-14]

$$\frac{\mathrm{d}p_i}{\mathrm{d}t}=-\frac{1}{\tau}\left(p_\mathrm{i}-p_\mathrm{e}\right) \tag{7}$$

式中：p_i为列车内部压力；p_e为列车外部压力；τ为动态密封指数。

本文中，动态密封指数τ取值3 s、5 s、6 s、8 s共4种情况。如果不考虑经济因素，密封指数越大越好；考虑经济成本，那么选择合适的密封指数，使车厢内部的压力变化小于800 Pa/3 s（良好标准）或1 250 Pa/3 s（合格标准）即可。

2 计算模型

2.1 列车及隧道模型

借用某城际动车组几何外形，建立列车三维几何模型，采用“头车+中间车+尾车”3车编组模型，并考虑转向架、受电弓、车端风挡、车顶空调等，其外形如图3所示。

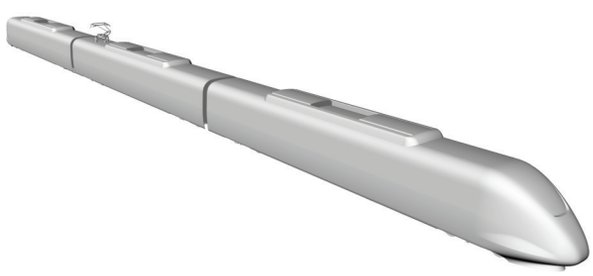


图3 列车几何模型

Fig. 3 Train model

隧道断面采用圆形断面，其外形如图4所示。图4中D_o为隧道外轮廓直径，D_i为隧道内轮廓直径，内外轮廓直径相差300 mm。本文共研究2种隧道断面，隧道内轮廓直径分别为7 200 mm，7 400 mm，简记为∅7.2 m，∅7.4 m。

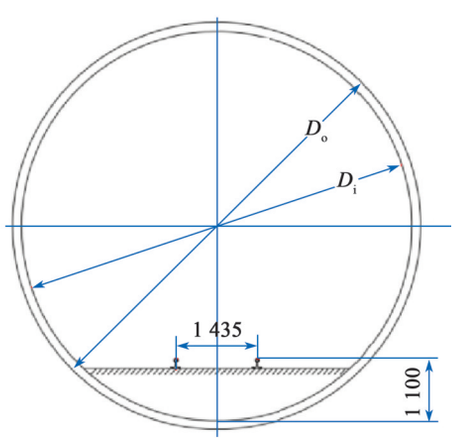


图4 隧道模型

Fig. 4 Tunnel model

隧道长度取最不利长度，根据铁路设施空气动力学中的第五部分：隧道中空气动力学测试的要求及步骤（BS EN 14067-5: 2006）标准，动车组隧道通过时，导致最大负压峰值的临界隧道长度可以通过下式近似计算：

$$L_{\mathrm{tu,crit}} \approx \frac{L_{\mathrm{tr}}}{4}\frac{c}{v_{\mathrm{tr}}}\left(1+\frac{c}{v_{\mathrm{tr}}}\right) \tag{8}$$

式中：$L_{\mathrm{tu,crit}}$为最不利隧道长度；L_{tr}为列车长度；v_{tr}为列车速度；c为声速。

由此可知，对于固定的列车编组，最不利隧道长度主要由列车速度决定，列车速度不同，则最不利隧道长度也不相同。本文研究的列车速度分别为 160 km/h，200 km/h，隧道通过计算时，隧道长度取相应列车速度下的最不利隧道长度。

2.2　计算域及边界条件

计算区域如图 5 所示（图中数值单位为 m）。为真实模拟列车在进入隧道前形成稳定明线流场，设置列车头部距离隧道口 50 m 作为初始运动点。列车车体表面设定运动边界条件：列车沿 x 方向运行，x 方向速度值等于指定的列车运行速度 v_{tr}。计算区域底面和隧道壁面给定无滑移边界条件，外场区域两个侧面和顶面定为压力出口边界条件，相对大气压强为 0。进口给定压力进口边界条件，相对大气压强为 0，出口设置为压力远场边界条件。

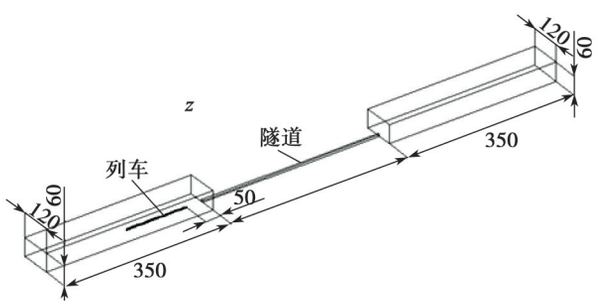


图 5　计算区域

Fig. 5　Computational domain

为计算列车与隧道之间存在相对运动的非定常流场，计算网格采用分区结合技术，其中隧道和地面形成的静止空间区域采用六面体结构化网格离散；列车周围的运行空间外形曲面复杂，采用四面体非结构化网格离散。为体现列车隧道两者的相对运动，在两种网格间有用于数据交换的公共交互面，对单线隧道为一方形面，如图 6 所示。各种工况所用计算模型经离散后，其体网格总数均在 1 000 万左右。

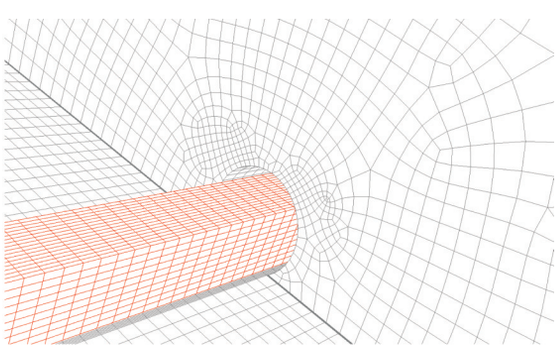


图 6　隧道口网格示意图

Fig. 6　Mesh distributions on tunnel portal

2.3　数值计算方法验证

为验证本文数值计算方法的准确度，利用中国科学院力学研究所的高速列车双向动模型试验平台测试列车通过隧道时的压力波试验数据[17]，进行相同工况的数值仿真计算。试验模型采用 1:8 的 3 编组缩比模型。图 7 为列车以速度 200 km/h 通过 60 m 长双线隧道时，列车表面压力变化仿真数据与动模型试验数据结果对比。

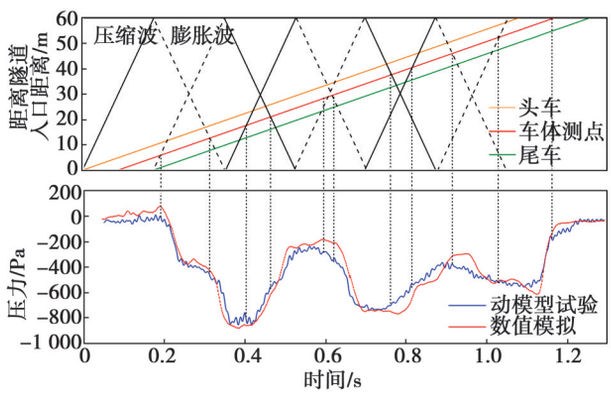


图 7　列车车体表面压力随时间的变化曲线

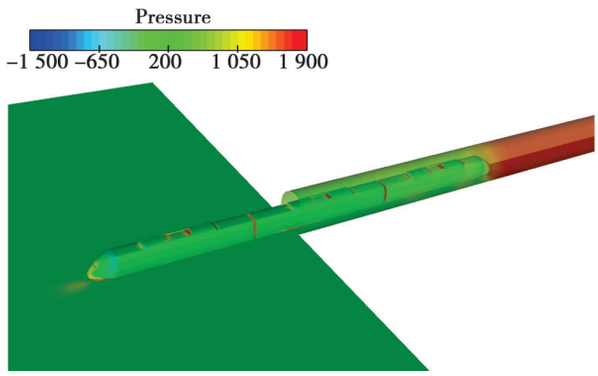
Fig. 7　Time histories of train body surface pressure

由图 7 可以看出，列车表面测点压力在车身进入隧道过程中缓慢增加，尾车进入隧道产生的膨胀波传播至车体表面引起压力第一次下降，之后，压缩波和膨胀波在隧道内多次的传播反射叠加至车身，引起车体表面发生剧烈的压力波动且位于负压状态。数值计算结果与试验数据的压力波曲线基本一致，动模型试验的压力波负压值为−849 Pa，数值计算得到的压力波变化负压值为−880 Pa。对比试验结果可见，数值计算得到的流场压力变化曲线趋势和试验规律基本一致，幅值相对误差在 5% 以内，说明本文采用的数值计算方法能够较为准确地模拟列车通过隧道时的压力变化。

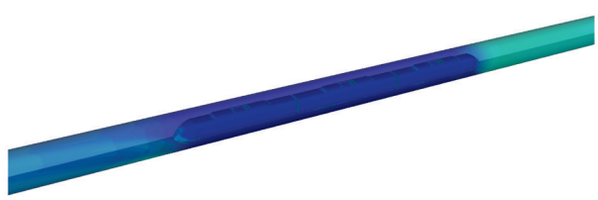
3　计算结果分析

图 8 给出列车在通过隧道过程中，列车车体及隧道表面的压力变化云图。由图 8 可以看出，列车头部进入隧道时，因隧道壁面及车体壁面的限制，在列车前部形成压缩波，该波沿隧道向出口以声速传播；而当列车尾部进入隧道时，又产生一膨胀波并同样以声速在隧道内传播；列车在隧道内运行过程中，列车车身表面压力基本处于负压状态。

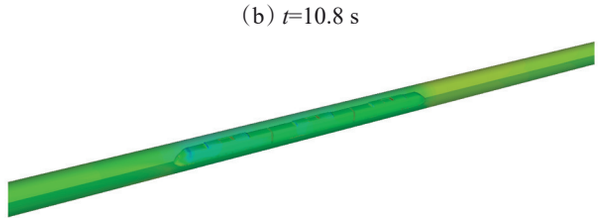
图 9 给出不同列车速度、不同隧道直径下，客室区及司机室区的车外压力波峰峰值。由图 9 可以看出，列车隧道通过压力波主要依赖于阻塞比和列车速度，车速增加、隧道直径减小，都会导致隧道压力波增大，且车速对隧道压力波的影响更为显著。当列车速度由 160 km/h 增大到 200 km/h 时，通过直径 7.2 m 隧道，客室区隧道压力波增大 52.3%，司机室区隧道压力波增大



（a）t=2.7 s



（b）t=10.8 s



（c）t=13.5 s

图 8　隧道中运行压力变化云图

Fig. 8　Pressure distribution in the tunnel

56.2%；而通过直径 7.4 m 隧道，客室区隧道压力波增大 52.2%，司机室区隧道压力波增大 55.9%。当隧道直径由 7.2 m 增大到 7.4 m 时，车速 160 km/h、200 km/h 下，客室区隧道压力波分别降低 7.9%、8.0%，司机室区隧道压力波分别降低 8.2%、8.4%。此外，司机室区隧道压力波大于客室区隧道压力波，且列车速度越大、隧道直径越小时，这种差异越显著。当列车速度为 160 km/h 时，隧道直径 7.2 m、7.4 m 下，司机室区隧道压力波较客室区分别增大 4.2%、3.8%。当列车速度为 200 km/h 时，隧道直径 7.2 m、7.4 m 下，司机室区隧道压力波较客室区分别增大 6.8%、6.3%。

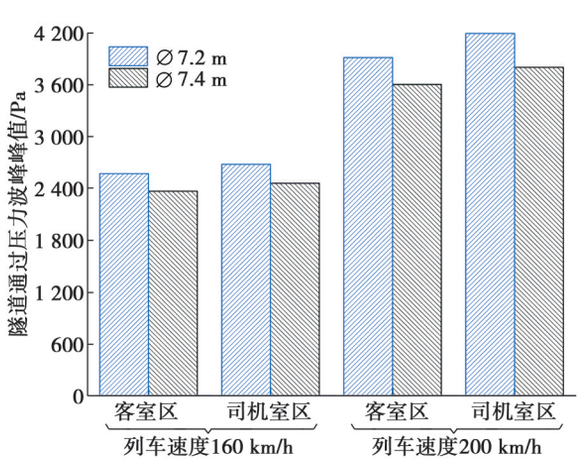


图 9　隧道压力波峰峰值变化规律

Fig. 9　Peak change law of tunnel pressure wave

图 10 给出车速 160 km/h 时，不同动态密封指数下客室区及司机室区的车内压力波动。由图 10 可以看出，随着动态密封指数的增大，客室区及司机室区的车内压力波动均明显降低。司机室区的车内压力波动要大于客室区的车内压力波动，这主要是由于司机室区隧道压力波要大于客室区的隧道压力波。当动态密封指数为 3 s 时，隧道直径 7.2 m、7.4 m 下，客室区和司机室区的车内压力波动小于 1 250 Pa/3 s，车内压力波动达到合格标准。当动态密封指数为 5 s 时，隧道直径 7.2 m、7.4 m 下，客室区和司机室区的车内压力波动小于 800 Pa/3 s，车内压力波动达到良好标准。

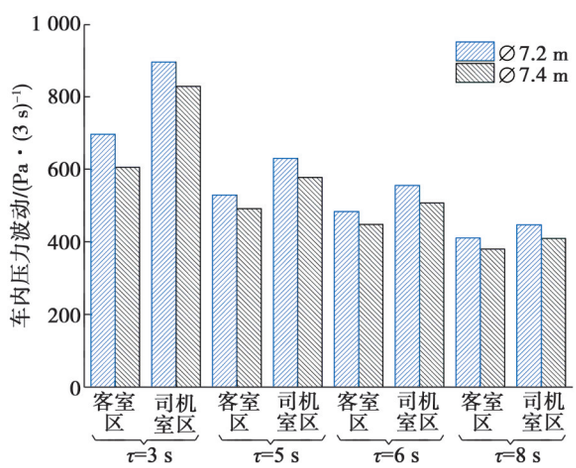


图 10　车速 160 km/h 下车内压力波动

Fig. 10　Pressure fluctuations in the car at a speed of 160 km/h

图 11 给出车速 200 km/h 时，不同动态密封指数下客室区及司机室区的车内压力波动。由图 11 可以看出，当车速提高到 200 km/h，不同动态密封指数下的车内压力波动明显增大。当动态密封指数为 5 s 时，隧道直径 7.2 m、7.4 m 下，客室区和司机室区的车内压力波动都小于 1 250 Pa/3 s，车内压力波动达到合格标准。当动态密封指数为 8 s 时，隧道直径 7.2、7.4 m 下，客室区和司机室区的车内压力波动都小于 800 Pa/3 s，车内压力波动达到良好标准。

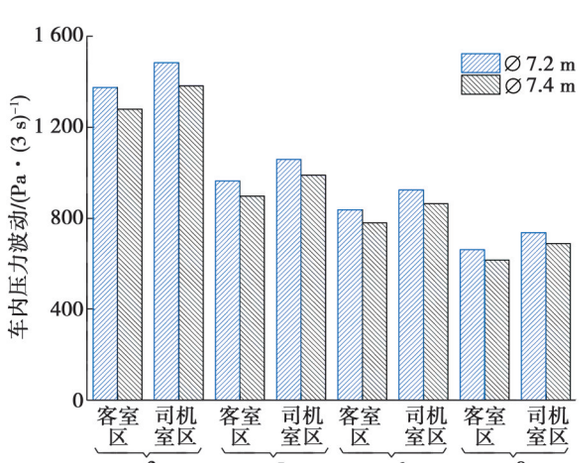


图 11　车速 200 km/h 下车内压力波动

Fig. 11　Pressure fluctuations in the car at a speed of 200 km/h

4　结论

对城际动车组通过隧道时的压力波和车内压力波动采用数值模拟方法进行了不同速度和不同隧道断面条件下计算分析，得到结果表明：

①列车在隧道内运行，车体表面受压力波的影响，车体表面受压力波动剧烈且车体表面基本处于负压状态。列车速度增加、隧道直径减小时，隧道压力波显著增大。司机室区隧道压力波压力大于客室区，且列车速度越大、隧道直径越小时，这种差异越显著。

②车内压力波动主要由车外压力波及车辆气密性决定。随着动态密封指数的增大，客室区及司机室区的车内压力波动均明显降低。司机室区的车内压力波动要大于客室区。

③当车速为 160 km/h，隧道直径为 7.2 m 和 7.4 m 时，动态密封指数 5 s 下的客室区和司机室区的车内压力波动达到良好标准；动态密封指数 3 s 下的客室区和司机室区的车内压力波动达到合格标准。

④当车速为 200 km/h，隧道直径为 7.2 m 和 7.4 m 时，动态密封指数 8 s 下的客室区和司机室区的车内压力波动达到良好标准；动态密封指数 5 s 下的客室区和司机室区的车内压力波动达到合格标准。

参考文献：

[1] 安翼, 莫晃锐, 刘青泉. 高速列车头型长细比对气动噪声的影响[J]. 力学学报, 2017, 49(5): 985-996.
AN Yi, MO Huangrui, LIU Qingquan. Study on the influence of the nose slenderness ratio of high-speed train on the aerodynamic noise[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(5): 985-996.

[2] 李明, 李明高, 李国清, 等. 参数化驱动的高速列车头型气动外形优化设计[J]. 铁道学报, 2013, 35(11): 14-20.
LI Ming, LI Minggao, LI Guoqing, et al. Optimized design of parameteric-driven aerodynamic shape of high-speed EMU head-type[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 14-20.

[3] 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.
MEI Yuangui, ZHOU Chaohui, XU Jianlin. Aerodynamics of high-speed railway tunnel[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[4] 刘伊江. 高速地铁隧道压力波研究及隧道断面的拟定[J]. 铁道标准设计, 2010(增刊2): 119-124.
LIU Yijiang. Discussion on pressure wave in high speed metro tunnel as well as sketches for tunnel cross section[J]. Railway Standard Design, 2010(Suppl 2): 119-124.

[5] 韩运动, 姚松, 陈大伟, 等. 基于实车试验的高速列车隧道压力波影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1404-1412.
HAN Yundong, YAO Song, CHEN Dawei, et al. Influential factors of tunnel pressure wave on high-speed train by real vehicle test[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(5): 1404-1412.

[6] 刘峰, 姚松, 刘堂红, 等. 高速铁路隧道壁面气动压力实车试验分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(10): 2018-2024.
LIU Feng, YAO Song, LIU Tanghong, et al. Analysis on aerodynamic pressure of tunnel wall of high-speed railways by full-scale train test[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(10): 2018-2024.

[7] 宋军浩, 郭迪龙, 杨国伟, 等. 高速列车隧道通过中的气动效应动模型实验研究[J]. 实验流体力学, 2017, 31(5): 39-45.
SONG Junhao, GUO Dilong, YANG Guowei, et al. Experimental investigation on the aerodynamics of tunnel-passing for high speed train with a moving model rig[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2017, 31(5): 39-45.

[8] 牛纪强, 梁习锋, 周丹, 等. 动车组过隧道时设备舱气动效应动模型试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(7): 1258-1265.
NIU Jiqiang, LIANG Xifeng, ZHOU Dan, et al. Equipment cabin aerodynamic performance of electric multiple unit going through tunnel by dynamic model test[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(7): 1258-1265.

[9] 贾永兴, 杨永刚, 梅元贵. 基于一维流动模型的高速列车隧道压力波特性[J]. 机械工程学报, 2014, 50(24): 106-114.
JIA Yongxing, YANG Yonggang, MEI Yuangui. Characters of pressure wave caused by high-speed trains passing tunnels based on 1D non-homentropic flow model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(24): 106-114.

[10] 周朝晖. 复杂结构铁路隧道压力波效应数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
ZHOU Chaohui. Numerical study on pressure waves produced by trains in complex tunnel[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.

[11] 王一伟, 杨国伟, 黄晨光, 等. 隧道长度对高速列车交会压力波的影响研究[J]. 中国科学(技术科学), 2012, 42(1): 82-90.
WANG Yiwei, YANG Guowei, HUANG Chenguang, et al. Influence of tunnel length on the pressure wave generated by high-speed trains passing each other[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2012, 42(1): 82-90.

[12] 李人宪, 袁磊. 高速列车通过隧道时的压力波动问题[J]. 机械工程学报, 2014, 50(24): 115-121.
LI Renxian, YUAN Lei. Pressure waves in tunnels when high-speed train passing through[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(24): 115-121.

[13] 陈春俊, 聂锡成, 唐猛. 车外空气压力作用下的CRH2型动车组车内空气压力传递函数模型[J]. 中国铁道科学,

2013, 34(4): 84-88.
CHEN Chunjun, NIE Xicheng, TANG Meng. Transfer function model of the air pressure inside CRH2 EMU under outside air pressure[J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 84-88.

[14] 梅元贵, 张成玉, 周朝晖, 等. 单列高速列车通过特长隧道时耳感不适问题研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 100-107.
MEI Yuangui, ZHANG Chengyu, ZHOU Chaohui, et al. Research on the aural discomfort when a single train passes through a super long tunnel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(14): 100-107.

[15] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. 2nd ed. Harlow: Pearson Education Ltd., 2007.

[16] COHAN A C, ARASTOOPOUR H. Numerical simulation and analysis of the effect of rain and surface property on wind-turbine airfoil performance[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 81: 46-53.

[17] YANG Qiansuo, Song Junhao, YANG Guowei. A moving model rig with a scale ratio of 1/8 for high speed train aerodynamics[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 152: 50-58.