

专题——振动环境下疲劳问题研究

高速列车隧道会车流场的CFD分离涡数值模拟

张德文^{1a}, 卢耀辉^{1,2}, 李望^{1a}, 毕伟^{1a}

(1. 西南交通大学 a. 机械工程学院; b. 先进驱动节能技术教育部工程研究中心, 成都 610031;
2. 西南交通大学 唐山研究院, 河北 唐山 063000)

摘要: **目的** 研究高速列车隧道会车压力波及列车尾流特性。**方法** 建立某型高速列车三节车模型, 采用脱体涡方法数值模拟两列车以 350 km/h 在隧道内等速会车的流场。数值模拟的空间离散化压力项、密度项及修正的湍流黏度项使用二阶迎风格式, 动量项使用有界中心差分格式, 时间离散采用预处理二阶精度差分格式, 用壁面函数处理隧道壁, 使用雷诺时均法作方法对比。计算列车车头、侧墙及尾车等部位的压力时间历程, 然后使用傅里叶变换对尾车测点进行频谱分析, 最后对尾流中不同位置的湍流强度进行分析。**结果** 头车所受压力波动最为剧烈, 中间车次之, 尾车最小。列车侧墙同一垂向位置不同高度压力变化相差不大。列车尾涡主频在 3.85 Hz 附近, 其可能对列车横向振动有一定的影响。**结论** 尾涡是两个不断向后发展的中等强度涡旋, 在充分发展段, 其湍流强度会有一个较为明显的抬升, 之后逐渐减弱。会车侧涡流由于横向发展较为迅速, 导致其强度较小且减弱速度较快。

关键词: 隧道会车; 压力波; 分离涡模拟; 频谱分析; 傅里叶变换

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.11.001

中图分类号: U271.91 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)11-0001-07

CFD Detached-eddy Numerical Simulation of High Speed Train Intersecting in Tunnel

ZHANG De-wen^{1a}, LU Yao-hui^{1,2}, LI Wang^{1a}, BI Wei^{1a}

(1. a. School of Mechanical Engineering; b. Engineering Research Center of Advanced Driving Energy-saving Technology, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Graduate school of Tangshan, Southwest Jiaotong University, Tangshan 063000, China)

ABSTRACT: Objective To study the pressure fluctuation and wake flow characteristics of high-speed train tunnels intersecting in tunnel. **Methods** A three-car model of a high-speed train was established and the flow field of two trains intersecting in a tunnel at 350 km/h was simulated by the detached eddy method. The spatial discretization pressure term, density term and the modified turbulent viscosity term were simulated by the second-order upwind; the momentum term was simulated by the bounded central difference, the time discretization was simulated by the second-order precision difference; and the tunnel wall was treated with a wall function and Reynolds time-averaged method was also used for comparison. The pressure time history of the front, side wall and tail of the train was calculated. Then the spectrum of the measured points of the tail car was analyzed by Fourier transform. Finally, the turbulence intensity at different positions in the tail flow was analyzed. **Results** The pressure fluctuation of the front car was the most violent, that of the middle car was the second, and that of the rear car was the smallest. The pressure variation of the side wall of the train at the same vertical position and at different heights was not significant. The main frequency of wake vortex was around 3.85 Hz, which may have some influence on the lateral vibration of train. **Conclu-**

收稿日期: 2019-01-30; 修订日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(51275428); 四川省科技厅国际合作项目(2018HH0072)

作者简介: 张德文(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高速列车空气动力学及强度可靠性。

通讯作者: 卢耀辉(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为车辆结构强度可靠性。

tion The wake vortices are two moderately strong vortices which develop backward continuously. In the fully developed stage, the turbulence intensity will increase obviously and then decrease gradually. Because of the rapid development of the lateral eddy current, the strength of eddy in meeting-side is small and its weakening speed is fast.

KEY WORDS: intersect in tunnel; pressure wave; detached eddy simulation; spectrum analysis; fourier transform

高速列车隧道会车会引起三维、非定常的湍流流动,产生的气动压力波对高速列车行车安全及乘坐舒适性影响显著^[1-3]。我国的武广、郑西等高铁线上隧道占比接近线路总长的20%^[4],列车在隧道内会车频繁,作用于车体的气动载荷可能会对高速列车铝合金焊接车体产生不利影响,故使用数值模拟研究列车会车流场的变化规律可以为高速列车强度、振动及气密设计提供参考。目前,列车空气动力学中的湍流模拟方法、流场压力波消减问题及流、固耦合动力学是研究的热点。梅元贵^[5-6]采用流体流动理论结合广义黎曼变量特征线法,对高速列车隧道内会车的压力波进行了研究,通过与国内外试验数据对比,发现设置喇叭型洞口可以缓减压力波。田红旗等^[7-8]利用实车试验和数值模拟相结合,研究气动载荷压力波的影响因素,并对车体外形进行优化设计。刘堂红^[9]使用滑动网格技术计算了列车通过隧道和两列车在隧道中交会的瞬时压力,分析了气动载荷作用下车身的动态响应。结果表明,在两列车隧道交会时,气动载荷使得底架和侧墙的横向和垂向位移显著增加。赵晶^[3]基于k-ε两方程紊流模型模拟了高速列车的等速交会过程,得到了列车所受气动侧向力、侧翻力矩及偏转力矩的变化情况,结果表明:隧道内列车交会过程使列车受到较大的力及力矩,气动力与力矩的大小是车速的函数。李田^[10]建立了基于列车空气动力学和系统动力学的研究方法,实现了流、固耦合的联合仿真。这些研究发现列车受到的气动力对整车振动、车体侧墙强度以及行车安全性均有较为明显的影响,模拟计算多采用雷诺时均法(Reynolds Average Navier-Stokes, RANS),通过对动量方程采取时间平均,忽略了与流动状态相关的瞬态脉动细节,无法计算远离壁面的湍流脉动频谱^[11]。雷诺时均法——大涡模拟法(Large Eddy simulation, LES)耦合方法^[12]在近壁面区域使用RANS方法求解,在占主体的外流区域中用大涡模拟法(LES)求解,可以得到优于RANS的模拟结果^[13]。一些学者^[14]逐渐开始将其运用到列车空气动力学研究中来,得到了较为理想的结果。

本文采用三维可压缩的分离涡方法(Detached Eddy Simulation, DES)和雷诺时均两种方法模拟高速列车隧道会车流场,分析了列车不同测点的压力变化规律。然后对尾车主要测点的数据进行了频谱分析,最后计算了列车尾流的湍流强度,并讨论了其湍流流动的特性,以期对高速列车振动、强度及气密设计提供参考。

1 列车隧道会车的数值模拟

1.1 控制方程

列车以350 km/h的速度在隧道内交会,相对速度超过0.3马赫。流体运动遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律,具体表现为连续方程、动量方程和能量方程。如果流动处于湍流状态,还要遵循湍流输运方程。

由质量守恒定律推导出的可压缩流体的连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) &= \text{div}(\mu \cdot \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_{Mx} \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) &= \text{div}(\mu \cdot \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_{My} \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) &= \text{div}(\mu \cdot \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_{Mz} \end{aligned} \tag{2}$$

能量守恒方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \end{aligned} \tag{3}$$

式中: u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度分量, S_{Mx} 、 S_{My} 、 S_{Mz} 是广义源项; μ 是动力黏度; C_p 是比热容; T 为温度; k 为传热系数; S_T 为内热源或者由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分。

流体状态方程为:

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

SST $k-\omega$ 的 k 方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + u_i \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_i} = \\ P_k - \frac{\rho k^{3/2}}{l_{k-w}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \end{aligned} \tag{5}$$

ω 方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + u_i \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x_i} = C_\omega P_\omega - \beta_\omega \rho \omega^2 + \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2\rho [1 - F_1] \frac{1}{\sigma_\omega} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \tag{6}$$

涡粘系数方程由式(7)确定：

$$\mu_t = \min\left(\frac{\rho k}{\omega}, \frac{a_1 \rho k}{\Omega F_2}\right) \quad (7)$$

式中： P_k 和 P_ω 为湍流生成项。脱流尺度参数 $l_{k-\omega}$ 的表达式为：

$$l_{k-\omega} = k^{1/2} / (\beta^* \omega) \quad (8)$$

RANS 和 LES 的分辨尺度由式(9)确定：

$$l_{DES} = \max(l_{k-\omega}, C_{DES} \Delta) \quad (9)$$

式中： $C_{DES} = 0.65$ ， Δ 是网格尺度。对于非均匀网格有 $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。

在靠近物面的边界层中， $l_{k-\omega} \ll \Delta$ ，该模型相当于 SST $k-\omega$ 湍流模型。在远离物面时， $l_{k-\omega} \gg \Delta$ ，该模型相当于 LES 模型。

1.2 计算模型、计算区域及计算网格

建立三节车的流场模型，其中列车总长 76.4 m，最大横截面积 11.2 m，隧道横截面上隧道中线间距 5 m，隧道横截面积 100 m²，阻塞比 0.112。简化列车外部复杂突出细节，去掉了门把手、车灯、受电弓及风挡部分，假设列车表面为光滑曲面，列车及部分网格如图 1 所示。假设隧道内为平直线路，忽略隧道壁和底面水沟、电缆沟等细节结构。隧道采用的是单孔复线隧道，其长为 600 m。初始时刻两列车分别在隧道外 30 m 处。为了比较准确地模拟列车 A 与列车 B、列车与隧道之间的相对运动，采用滑移网格和动网格结合的方法对其进行模拟。流场边界条件如图 2 所示。列车的运动通过用户自定义函数实现 (UDF)，设置两列车的速度分别为 x 方向的 97.2 m/s 和 -97.2 m/s。列车表面设置 10 层边界层，第一层厚度为 0.4 mm，增长率为 1.2。流场最小网格为 0.04 m。基本单元包括四面体、六面体、三棱柱。列车运行

速度为 350 km/h 时，使用车高作为特征长度 h 计算的雷诺数 Re 超过 10^6 ，流场处于湍流状态。采用 DES 模型模拟会车流场，其中的 RANS 模型选择 SST $k-\omega$ 模型。采用基于压力的分离式隐式方法 SIMPLE 求解。空间离散化压力项、密度项及修正的湍流黏度项使用二阶迎风格式，动量项使用有界中心差分格式。

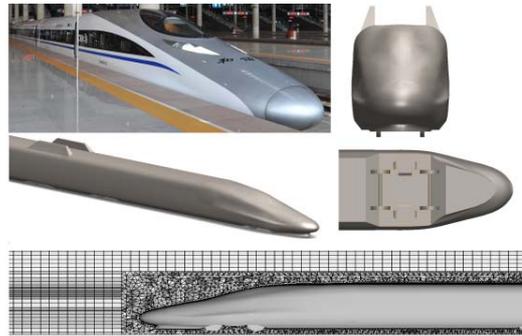


图 1 模型及网格

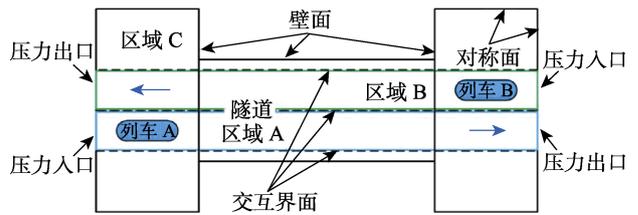


图 2 边界条件

1.3 测点布置

为了精确记录列车会车压力波变化情况，在列车会车侧设置 19 个测点，如图 3 所示。其中测点 1、2、17、19 位于列车中轴线，其余测点分布于车头、侧墙。此外，非会车侧设置 15 个与会车侧对称分布的测点，中间车车底设置一处测点。

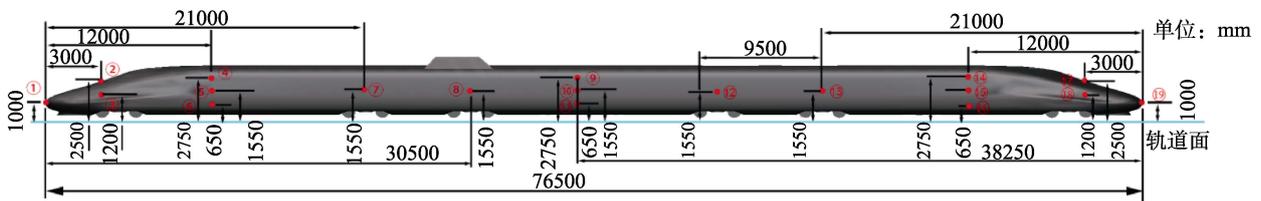


图 3 列车表面测点分布

2 结果分析及讨论

高速列车隧道会车的压力波动比较复杂，隧道内压力波传播如图 4 所示。当车 A 头进入隧道入口时，突然的空间变化会形成压缩波，这种压缩波以声速向前传播，在隧道出口，一部分微气压波向外扩散，一部分以膨胀波的形式向隧道入口传播。当车 A 尾进

入隧道时，形成的膨胀波以声速传播，在隧道出口以压缩波的形式折返回来。车 B 进入隧道同样会形成压缩波、膨胀波。压缩波使得流场压力升高，膨胀波使得流场压力降低，所以高速列车在压缩波与膨胀波来回传播的流场中行驶，流场波动明显。图 4 中阴影区域表示两车交会，实线表示压缩波，虚线表示膨胀波。可以看出，在两车交会前，有 4 次压缩波扫掠过车 A，1 次膨胀波。会车时刻，2 次压缩波扫掠过车 A。会

车后,车 A 遭遇 2 次压缩波、2 次膨胀波。使用雷诺时均法与脱体涡模拟法计算所得压力波对比如图 5 所示,可以发现两者所得压力波数据差别很小。

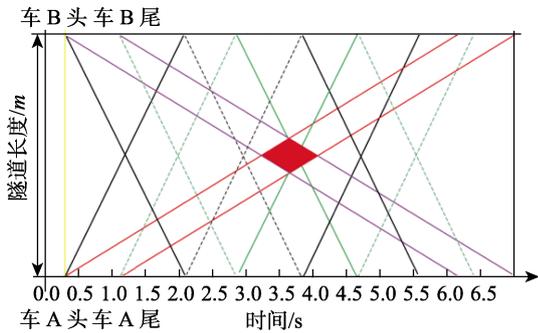


图 4 隧道内压力波传播

文中记录了共 34 个测点的压力变化,测点 4、5、6,测点 9、10、11,测点 14、15、16 三组均位于同一纵向位置,其压力曲线如图 6a、b、c 所示。可以发现,曲线在 1.5 s 以后均有一个明显的上扬过程,这是因为车 B 的第一轮压缩波扫掠过车 A。经过这个压缩波之后,在会车之前,车 A 一直经受膨胀波扫掠,整个曲线连续下降至最低点。图 6a、b、c 最大负压

分别接近 5500、4500、4000 Pa,说明车头测点经受了最为强烈的压力波冲击。图 6c 在 3.5~4.0 s 时程内的曲线与图 6a、b 有明显不同,车头通过测点后形成的负压降小于车尾经过测点的负压降,最大负压也产生于车尾通过测点时。这是因为两车尾交会形成一个短暂的负压区域,对车尾测点数据形成比较大的影响,而车头与中间车测点因为距离车尾较远,负压区影响不显著。

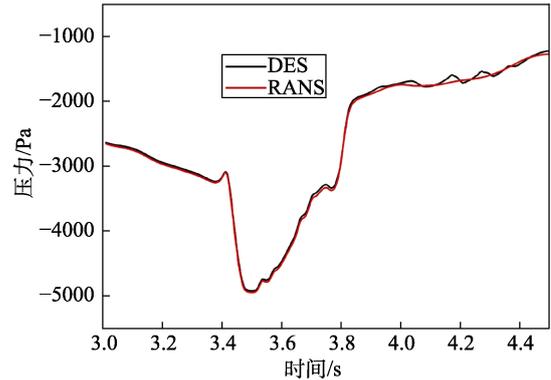
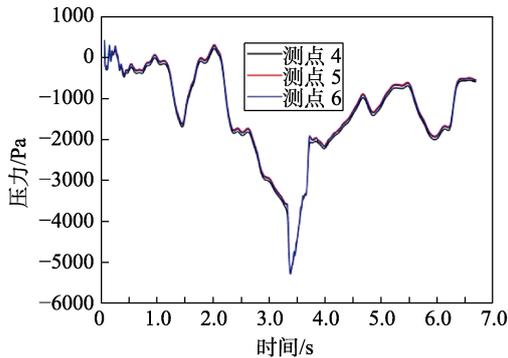
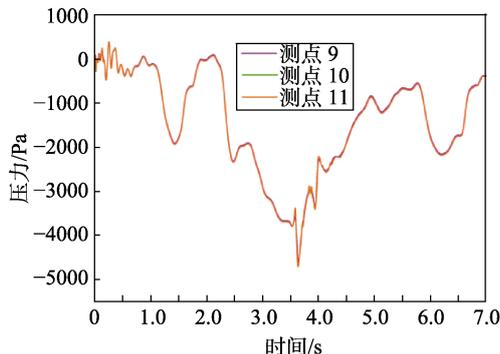


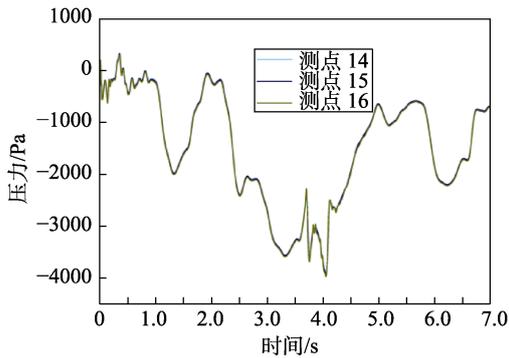
图 5 会车时刻压力波对比



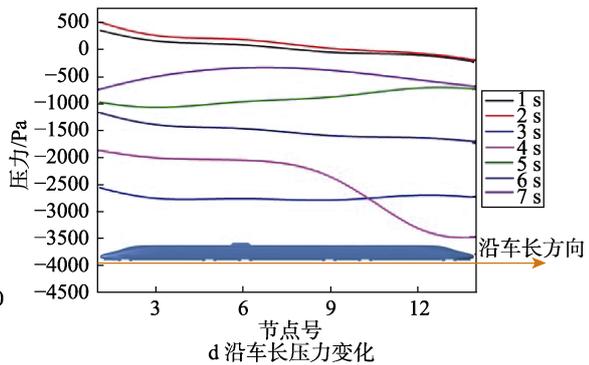
a 测点 4、5、6



b 测点 9、10、11



c 测点 14、15、16



d 沿车长压力变化

图 6 测点压力变化

由图 6a、b、c 可以发现,同一纵向尺寸不同高度的测点压力变化几乎一致,并且头车测点压力最大,尾车测点压力最小。测点 4、5、6 位于头车变截面车头之后,最大负压超过 5500 Pa。中间车测点压力变化曲线(见图 6b)在 3.5~4.0 s 内显示出车头、车尾交会而形成的双波峰、双波谷曲线。图 6d 为从

头车测点开始沿车身的测点,在不同会车时刻的压力曲线,可以看出,在会车时刻 3 s 和 4 s,整个会车侧测点承受了最大的负压力,并且 4 s 时,整个曲线呈现明显下降的趋势,测点 12 的压力值接近 3500 Pa。在其余非会车时刻,纵向的测点压力变动不剧烈。

列车交会是一个动态过程,所以列车周围流场随

时间不断发生变化。为了比较详细地展示不同时刻列车周围压力的分布，此处提取 3.3~4.3 s 的完整会车过程压力云图，如图 7 所示。为了清楚显示列车周围压力的变化，每个时刻云图的最大最小基准不同，其中最大负压为 7881 Pa，最大正压为 6087 Pa。一般来说，车头在向前行驶过程中必须排开静止的空气，使

车头前方附近区域为正压区，车头变截面后，车身压力逐渐减弱为负压，车尾区域处于较大负压区。因此当车头通过对向列车的测点时，会使测点压力瞬时升高，车尾通过测点会使测点压力瞬时降低。3.7 s 时刻，两列车尾车之后的涡旋最为剧烈，可以清楚地看出涡旋在车后延伸。

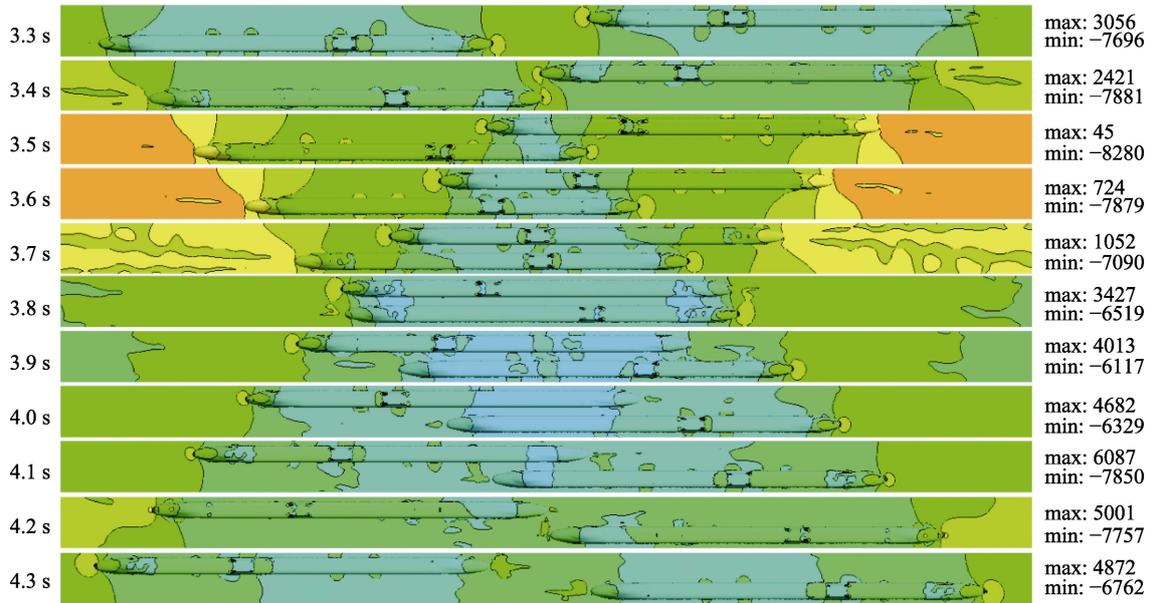


图 7 列车交会压力分布随时间的变化

高速列车周围流场随时间波动，并且车尾会形成螺旋状的涡旋不断破裂，向列车后方扩散，形成具有一定规律的涡流结构。由于列车并不位于隧道中心，故尾涡并不对称，靠近隧道中心的涡旋会逐渐向隧道另一侧移动，涡旋逐渐增大，但强度衰减，最终消散。对于涡旋的识别方式，常用的有涡旋强度和 Q 判据。涡旋强度为速度梯度张量 \bar{J} (见式 (10)) 复特征值的虚部，当判别式为正且其值代表局部中心周围的旋转运动强度时，它是正的^[15-16]。

$$\bar{J} = \nabla \bar{u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (10)$$

负值旋转强度代表局部旋涡运动，局部最小值代表涡旋核心。当负值旋转强度的绝对值越大，内部循环越强。

Q 判据即速度梯度 (\bar{J}) 张量的第二不变量判别式，定义为^[17]：

$$Q = \frac{1}{2}(u_{i,j}^2 - u_{i,j}u_{j,i}) = \frac{1}{2}(\|\omega\|^2 - \|s\|^2), \quad (11)$$

$$\|\omega\| = [\text{tr}(\omega)^T]^{1/2}, \quad \|s\| = [\text{tr}(s)^T]^{1/2}$$

式中： s 和 ω 分别为速度梯度 ∇u 的对称和反对称部分； Q 为剪切应变和涡量之间的局部平衡^[18]。图 8 为 3.65 s 时刻 Q 准则尾涡示意图，颜色深浅表示压力

幅值的大小，与雷诺时均法计算所得数据相比，脱体涡模拟可以较好地地区分出列车尾流中脉动的涡旋。以频率为横轴，功率谱密度 (PSD) 为纵轴，在图 9 给出了尾车测点 18 的频域分析。数据显示，最大峰值位于 $f=3.85$ Hz，其为能量最为集中的频段，其可能对列车运行时的横向振动产生影响，列车设计需要考虑其影响，避开共振。

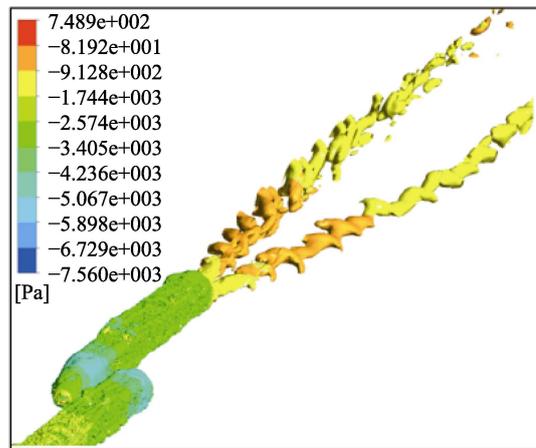


图 8 Q 准则尾涡示意 ($t=3.65$ s)

为了评价尾车尾流特性，定义湍流强度为：

$$I = 0.16(Re)^{\frac{1}{8}} \quad (12)$$

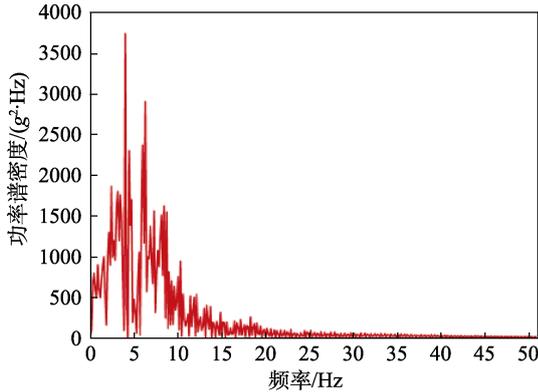


图9 测点压力功率谱密度

以车高为特征长度 h ，对变量进行无量纲化。选择列车会车时刻 3.65 s 为研究时刻，则根据模型在计算域中的位置，车底面 $z=0$ ；隧道中点 $x=0$ 且 $y=0$ 。确定垂向 $z=0.05h$ 、 $0.15h$ 、 $0.25h$ 时，平面上不同横向位置 ($y=0.5h$ 、 $0.75h$ 、 $0.85h$) 处湍流强度沿直线的变化曲线如图 10。

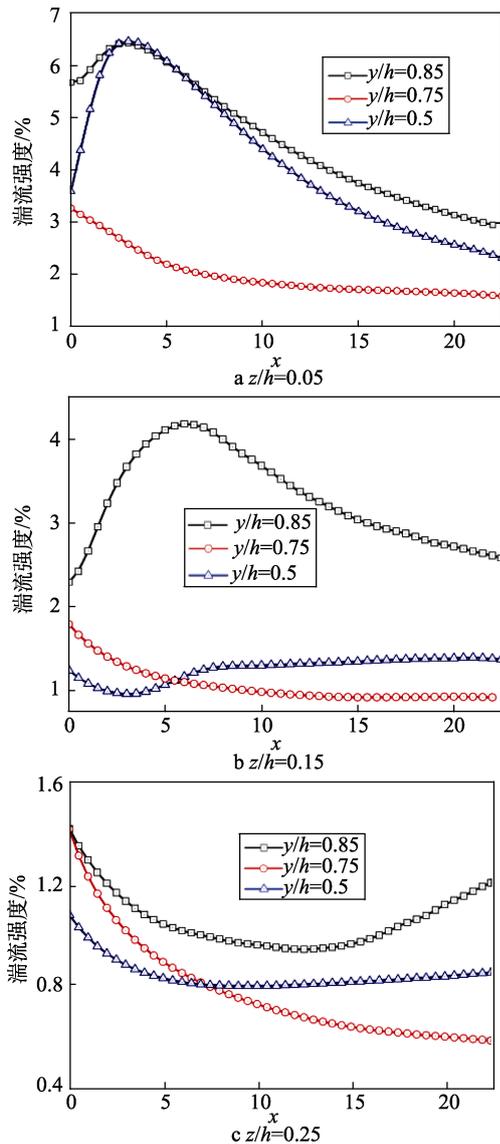


图 10 不同位置处湍流强度沿流向变化曲线

由图 10 可见， z 为 $0.05h$ 时，湍流强度最大，最大值接近 0.065。随着垂向平面的抬升，湍流强度减弱， z 为 $0.25h$ 时，湍流强度小于 0.016。从沿流向的变化规律看，当 $z=0.05h$ 、 $0.15h$ 时，湍流强度在在 $y=5h$ 附近会有一个明显的增强，之后持续减弱，这可能与涡流横向移动、会车压缩波及膨胀波复杂作用有关。从横向分布来看， y 为 $0.85h$ 的一侧靠近隧道壁面，其湍流强度较大。在会车一侧的涡流横向发展较快，导致其湍流强度较小，减弱速度较快。总的来看，湍流强度在流向是成减弱趋势，涡流携带的能量不断减小，在 20h 以后逐渐减弱为低湍流强度流动。

3 结语

采用脱体涡方法数值模拟研究了两列高速列车在隧道内交会的流场，分析了随时间的变化，列车不同位置的压力分布，并对其进行了频谱分析。计算了尾涡流向不同位置处的湍流强度变化规律，得出以下主要结论。

- 1) 使用脱体涡方法模拟会车流场可以较好地模拟列车流场，在计算精度和计算经济性比较均衡的情况下能够清晰地捕捉会车时产生的涡旋。
- 2) 高速列车会车时车头受到的负压最大，最大值接近 8 kPa，在车体强度设计时应该考虑压力波对强度的影响。
- 3) 经过频谱分析发现，尾车产生的涡旋主频为 3.85 Hz，属于车体的低频振动范围，对高速列车的横向振动和行车安全有影响，为高速列车车体动态设计提供参考。
- 4) 高速列车隧道会车时产生的尾涡是两个不断向后发展的中等强度涡旋，在充分发展阶段，其湍流强度会有一个较为明显的抬升，之后逐渐减弱。会车侧涡流由于横向发展较为迅速，导致其强度较小且减弱速度较快。

参考文献:

- [1] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of High-speed Railway Train[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6): 469-514.
- [2] DIEDRICHS B, KRAJNOVIC S, BERG M. On The Aerodynamics of Car Body Vibrations of High-Speed Trains Cruising Inside Tunnels[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2008, 2(1): 51-75.
- [3] 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.
- [4] 陈厚嫦, 张岩, 何德华, 等. 时速 350 km 高速铁路隧道气动效应基本规律试验研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(1): 55-59.
- [5] 梅元贵, 赵海恒, 刘应清. 高速铁路隧道压力波数值分

- 析[J]. 西南交通大学学报, 1995, 30(6): 667-672.
- [6] 梅元贵, 余南阳, 赵海恒, 等. 高速列车隧道会车压力波的数值分析方法[J]. 铁道学报, 2002, 24(2): 21-25.
- [7] 田红旗, 贺德馨. 列车交会压力波三维数值的计算[J]. 铁道学报, 2001, 23(3): 18-22.
- [8] 李田, 张继业, 李忠继. 基于 Fluent 与 Simpack 的高速列车流固耦合联合仿真[J]. 计算力学学报, 2012, 29(5): 675-680.
- [9] ZHOU D, TIAN H Q, ZHANG J, et al. Pressure Transients Induced by a High-speed Train Passing Through a Station[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 135: 1-9.
- [10] LIU T H, CHEN Z W, CHEN X D, et al. Transient Loads and Their Influence on the Dynamic Responses of Trains in a Tunnel[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2017, 66: 121-133.
- [11] TU Ji-yuan, YEOH Guan-Heng, LIU Chao-qun. 计算流体力学[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2014: 281-282.
- [12] SPALART P R, JOU W H, STRELETS M, et al. Comments on the Feasibility of LES for Wings, and on a Hybrid RANS/LES Approach[C]// 1st Air Force Office of Scientific Research International Conference on DNS/LES. Columbus: Greyden Press, 1997.
- [13] YAO S B, SUN Z X, GUO D L, et al. Numerical Study on Wake Characteristics of High-speed Trains[J]. Acta Mechanica Sinica, 2013, 29(6): 811-822.
- [14] MULDER T W, EFRAIMSSON G, HENNINGSON D S. Wake Characteristics of High-speed Trains with Different Lengths[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2014, 228(4): 333-342.
- [15] ZHOU J, ADRIAN R J, BALACHANDAR S, et al. Mechanisms for Generating Coherent Packets of Hairpin Vortices in Channel Flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1999, 387(10): 353-396.
- [16] XIONG Q Q, CHEN Z, LI S W, et al. Micro-PIV Measurement and CFD Simulation of Flow Field and Swirling Strength during Droplet Formation Process in a Coaxial Micro Channel[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 185: 157-167.
- [17] HUNT J C R, WRAY A A, MOIN P. Eddies, Streams, and Convergence Zones in Turbulent Flows[C]// Studying Turbulence Using Numerical Simulation Databases. United States: NASA, 1988.
- [18] JEONG J J J, HUSSAIN F. On the Identification of a Vortex[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 332(1): 339-363.