

# 复杂侧风环境下高速列车隧道内不等速交会的气动特性分析

于朋池

大连交通大学机车车辆工程学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年3月31日; 录用日期: 2026年4月14日; 发布日期: 2026年6月22日

## 摘要

随着高速铁路网络的不断扩展, 隧道内列车交会所引发的气动干扰问题, 尤其在复杂侧风环境下, 已成为影响运行安全与舒适性的关键因素。文章基于三维可压缩非定常Reynolds平均Navier-Stokes方程, 采用滑移网格方法, 在300 km/h与400 km/h高速列车不等速交会过程中, 对不同风速(10~25 m/s)及风向角(0°、30°、60°)下的气动响应进行了数值模拟研究。研究表明: 在交会过程中, 车体与隧道壁面出现典型的双峰压强波结构, 隧道断面压强呈现显著非对称分布。慢速列车在压缩波和膨胀波耦合作用下, 气动扰动更强且恢复更缓。侧风进一步增强了波系间的非线性耦合效应, 导致压力波动幅度加剧、传播特性更加复杂。研究揭示了速度差与侧风共同作用下隧道-列车系统的气动演化机制, 为高风速区域高速列车的结构优化与气动安全设计提供了理论依据和工程参考。

## 关键词

高速列车, 不等速交会, 复杂侧风, 气动特性

## Aerodynamic Characteristics Analysis of High-Speed Trains Passing at Unequal Speeds in Tunnels under Complex Crosswind Conditions

Pengchi Yu

School of Railway Vehicles Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

Received: March 31, 2026; accepted: April 14, 2026; published: June 22, 2026

## Abstract

With the continuous expansion of high-speed railway networks, the aerodynamic interference induced by trains passing in tunnels, particularly under complex crosswind conditions, has become a critical factor affecting operational safety and passenger comfort. In this study, three-dimensional compressible unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) equations coupled with a sliding mesh approach are employed to numerically investigate the aerodynamic responses of high-speed trains passing at unequal speeds (300 km/h and 400 km/h) under varying crosswind speeds (10~25 m/s) and wind angles (0°, 30°, and 60°). The results indicate that a characteristic double-peaked pressure wave structure appears on both the train surfaces and tunnel walls during the passing process, and the tunnel cross-sectional pressure exhibits a pronounced asymmetric distribution. The slower train experiences stronger aerodynamic disturbances and slower recovery due to the combined effects of compression and expansion waves. Crosswinds further enhance the nonlinear coupling of wave systems, leading to intensified pressure fluctuations and more complex propagation characteristics. This study reveals the aerodynamic evolution mechanism of the tunnel-train system under the combined influence of speed difference and crosswind, providing theoretical insights and engineering references for structural optimization and aerodynamic safety design of high-speed trains operating in high-wind regions.

## Keywords

High-Speed Train, Unequal-Speed Passing, Complex Crosswind, Aerodynamic Characteristics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 高速铁路建设不断完善, 铁路线路越来越复杂, 列车之间的交会频率也显著增加。在地形复杂、气候多变的线路区域, 出于对高速列车运营安全以及乘坐舒适度考虑, 高速列车在隧道内交会时所产生的气动干扰问题逐渐引起人们的重视。文献[1]-[3]多项研究表明, 列车结构参数如编组长度与线间距是影响隧道内交会压力波传播强度与空间分布特性的关键因素。文献[4]-[6]分析了列车风与风环境干扰对交会气动响应的影响, 发现风压分布、横向气动载荷及乘客舒适性均受到显著改变。文献[7]-[9]中发现, 当列车存在速度差或非对称交会时, 会放大流场扰动, 引起车体振动增强、压力峰值增加同时产生压力叠加效应。文献[10]从简化力学模型角度出发, 揭示了列车运行中各参数变化与隧道内压力振荡响应之间存在的耦合关系。文献[11]则从结构安全性方面出发, 指出隧道衬砌在周期性压力波激励下存在疲劳损伤风险, 且与列车运行载荷密切相关。在实际运营中, 列车交会常伴随复杂侧风, 环境风与列车运行产生的气动效应相互耦合, 使流场结构更加复杂。因此, 不等速交会与侧风扰动叠加, 会显著改变压强波传播路径与气动力分布, 进一步加剧气动干扰。相比等速交会, 不等速交会在压力波特性、气动力响应及倾覆力矩变化方面呈现出更强的非对称性与复杂性。

目前, 国内外关于列车交会气动特性的研究主要集中在静风条件或等速交会场景, 针对复杂侧风条件下不等速交会的系统研究仍相对较少。本文采用数值模拟方法, 基于三维非定常可压缩雷诺时均 N-S 方程与  $k-\varepsilon$  两方程湍流模型建立数学模型。数值求解时采用压力-速度耦合的 SIMPLE 算法: 动量方程以二阶迎风格式离散, 湍流动能与湍流耗散率以一阶迎风格式离散。在此基础上, 设定多组风速、风向

角及交会速度的组合工况并进行系统性对比，分析隧道内列车交会时的压强波动、阻力变化与倾覆力矩响应。

本文的研究不仅有助于提升对高速列车隧道交会气动特性的理解，也为未来高速铁路车辆的结构安全设计、隧道通风布置与侧风防护系统的优化提供理论参考。

## 2. 数值计算模型

### 2.1. 列车和隧道模型

计算模型采用头车 + 中间车 + 尾车的编组形式，以列车高度作为特征长度基准( $H = 3.90\text{ m}$ )，头尾车长度为  $6.85 H$ ，中间车长度为  $6.74 H$ ，如图 1 和图 2 所示。模型忽略一些对气动特性影响较小的结构如风挡、转向架、受电弓等。

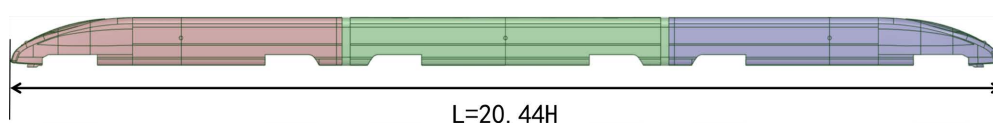


Figure 1. Front view  
图 1. 主视图

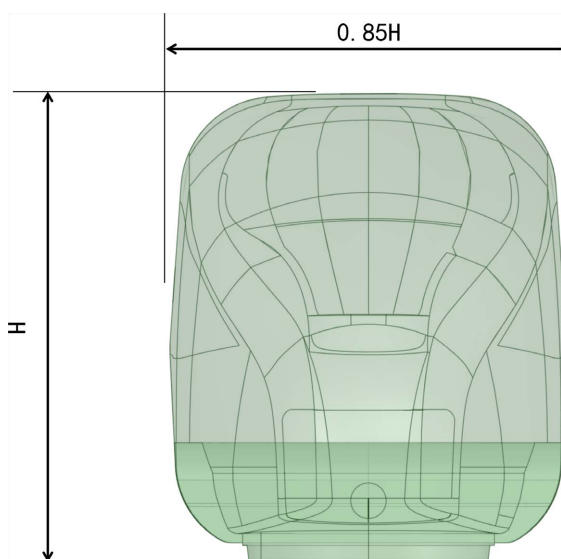


Figure 2. Top view  
图 2. 俯视图

本文的隧道模型如图 3 所示，为了方便计算从而去除隧道内的复杂结构。隧道半径为  $6.87\text{ m}$ ，长度为  $250\text{ m}$ ，以半圆基础纵向延伸  $1.91\text{ m}$ ，轨道线间距为  $5\text{ m}$ 。

### 2.2. 流体域以及边界条件

两组三编组动车组，初始位置均距离隧道口  $50\text{ m}$ ，以不同的速度相向而行。隧道和地面采用无滑移壁面，外流域均为压力出口，在复杂风环境下采用速度入口，如图 4 所示。

### 2.3. 计算网格以及监测点

本研究采用滑移网格。由于列车表面以及隧道结构复杂，因此采用四面体网格进行离散。车体表面

网格尺寸为 0.15 m，设置边界层进行局部加密，层数为 8 层，第一层雅各比设为 20，增长率为 1.2，车体流域以及外流域采用六面体网格，网格数量约为 500 万。

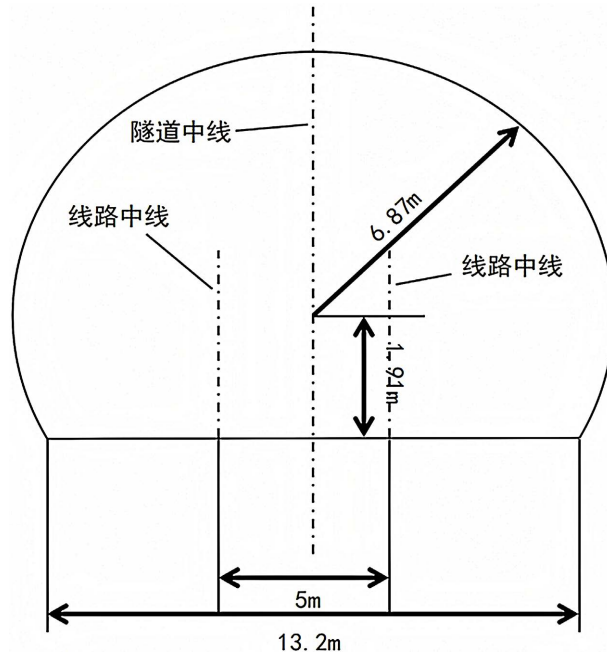


Figure 3. Tunnel section  
图 3. 隧道截面

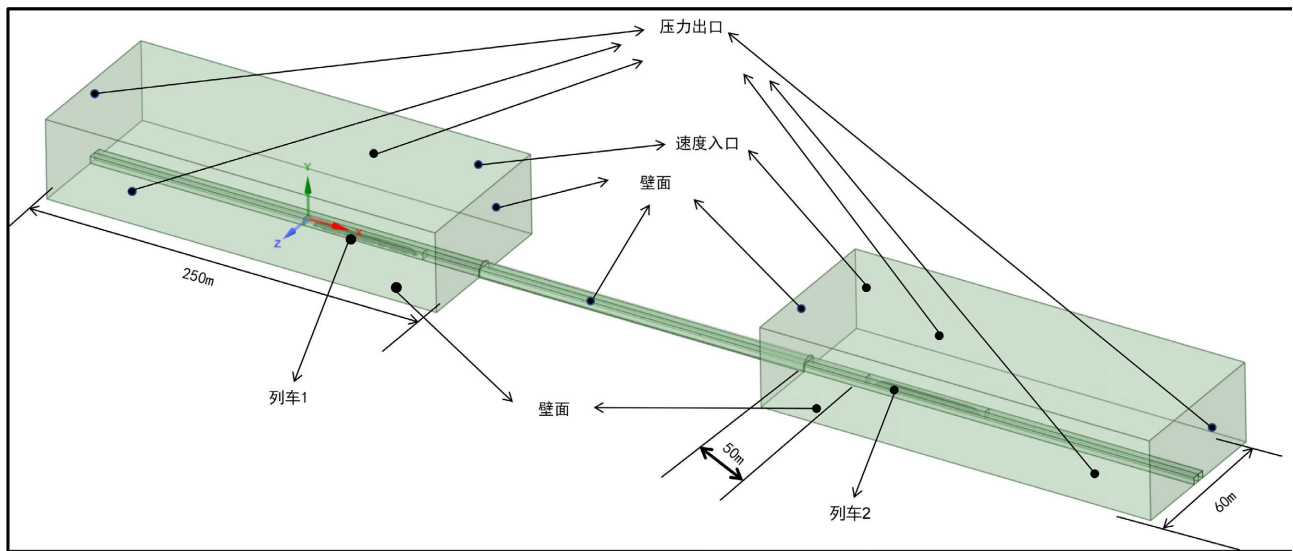


Figure 4. Computational domain and boundary conditions  
图 4. 计算域及边界条件

图 5 为较高速度的三编组列车的头车、中间车、尾车的监测点布置，分别为 4 个、3 个、4 个监测点，两列车结构以及监测点位置完全一致，因此较低速度列车监测点用 1\* 等对应代替。图中括号内测点位于同一截面内的非相交侧表面。隧道监测点共 9 个，如图 6、图 7 所示，其中 1、2、3 号和 7、8、9 号测点为距离洞口一倍车长处且对称分布，测点 4、5、6 号位于隧道中间位置且处于同一截面上。

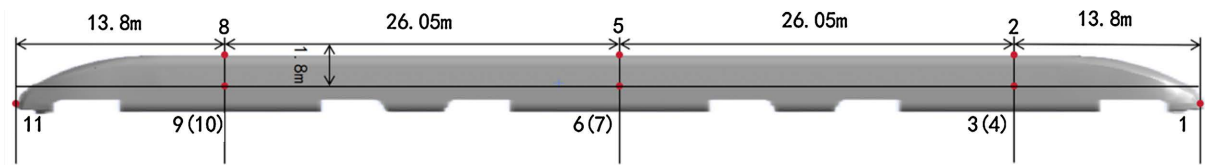


Figure 5. Monitoring points on the vehicle body surface

图 5. 车体表面监测点

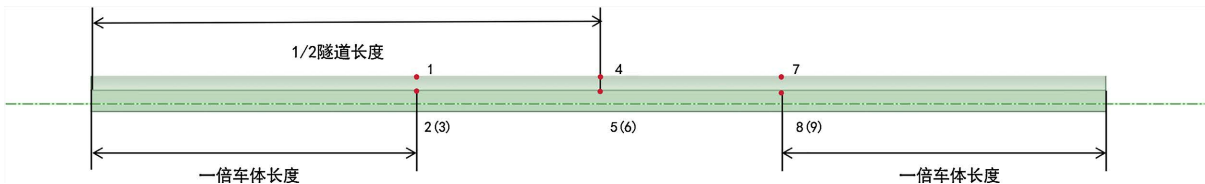


Figure 6. Monitoring points on the tunnel surface

图 6. 隧道表面监测点

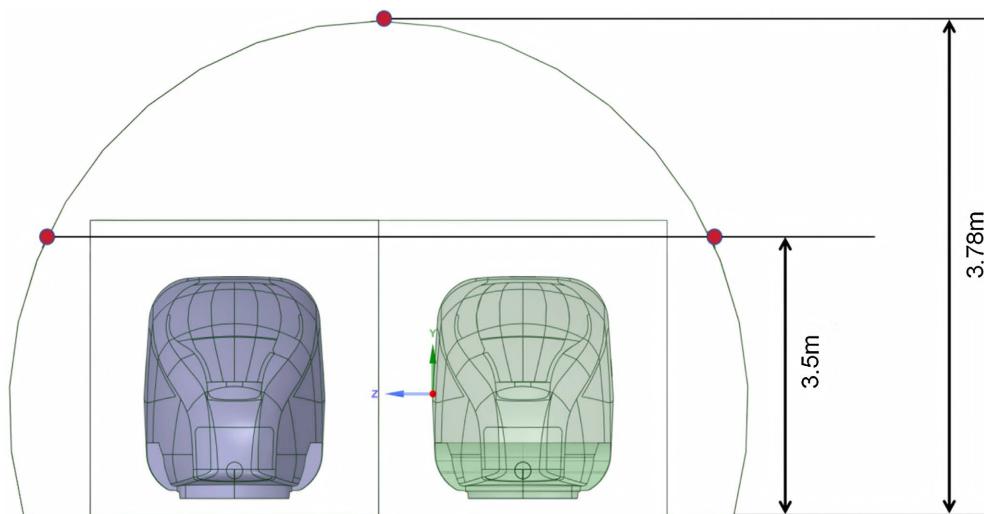


Figure 7. Schematic diagram of monitoring points in tunnel cross-section

图 7. 隧道截面监测点示意图

### 3. 数值模拟方法以及验证

#### 3.1. 数值计算方法

本文采用非定常、黏性和可压缩的 N-S 方程求解列车隧道交会时的流场。利用 SIMPLE 算法求解速度和压力的耦合方程，选择二阶迎风格式求解对流项和扩散项。

#### 3.2. 数值验证

为验证本研究数值模拟结果的可靠性，将模型数据与中南大学轨道交通安全教育部重点实验室关于 400 km/h 动车组在 247.3 m 隧道中等速交会的相关成果进行对比。分析时间步长设置为 0.02 s，迭代步数为 20 步。

图 8 和图 9 分别表示 3 编组的两辆列车在隧道内交会过程中，隧道中点处监测点和车头顶点处监测点的压力时程曲线。将曲线的起点和终点所对应的横坐标设置为列车车头刚刚进入隧道和列车车尾完全离开隧道的时刻。具体对比表明，本文计算结果与动模型实验数据的最大正压幅值相差不超过 12.5%，负

压幅值相差不超过 3.72%，压力峰 - 峰值差异不超过 5.72%。导致存在一定误差的主要原因可能为列车和隧道几何参数的细微差异，例如列车长度差异约为 2.37 m，隧道长度差异约为 7.2 m。

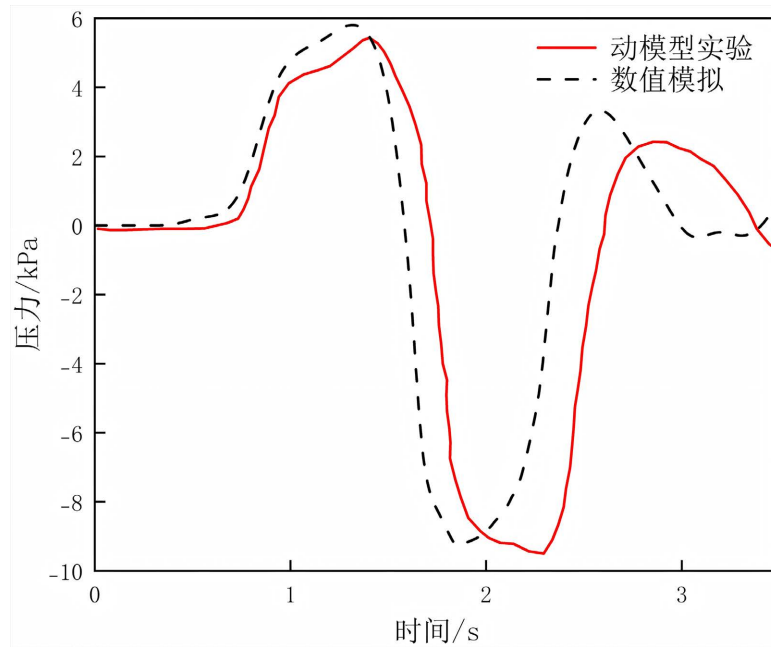


Figure 8. Pressure time-history on the tunnel wall  
图 8. 隧道壁面压力时程图

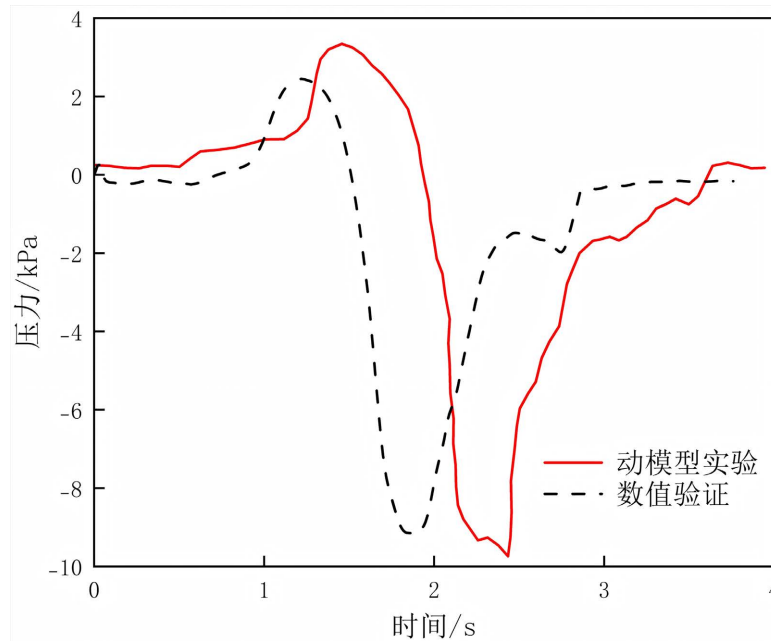


Figure 9. Time history diagram of vehicle body surface pressure  
图 9. 车体表面压力时程图

列车由明线驶入隧道的瞬间，边界条件的突变诱发了复杂的非定常三维流场，受隧道壁面约束(活塞效应)及空气可压缩性的双重影响，车头剧烈挤压前方空气产生初始压缩波并以声速前传，而车尾进洞后

则因局部负压及尾涡脱落诱发膨胀波；随着列车在隧道内继续行驶，这两类波系在隧道端口及壁面间反复干涉与叠加，导致隧道内及车表压力场发生剧烈波动，直至列车驶出且波能量因粘性耗散后流场方恢复平衡。为了清晰揭示隧道内压力波(压缩波、膨胀波)的产生、传播、反射及叠加的基本物理机制，以单列车 300 km/h 通过隧道为例进行马赫波原理图示分析，如图 10 所示。双车交会工况实质上是两列单车波系的线性或非线性叠加，其基本传播规律遵循单车原理。

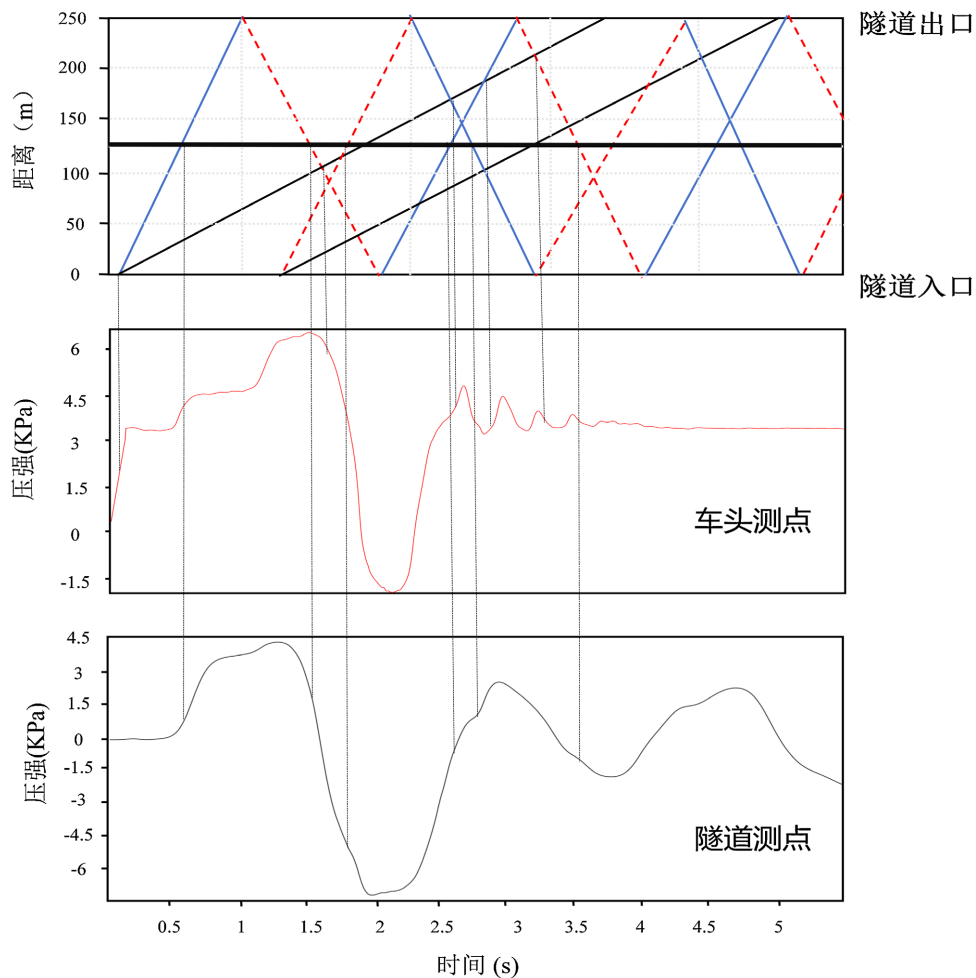


Figure 10. Schematic of Mach wave propagation

图 10. 马赫波传播示意图

## 4. 结果分析

### 4.1. 无风环境下列车组以及隧道表面压力分析

如图 11 和图 12 所示，当两列车分别以 400 km/h 和 300 km/h 的速度在长度为 250 m、横截面积为 100 m<sup>2</sup> 的隧道内不等速交会时，同一列车各监测面上的压强时程曲线趋势基本一致，且交会侧的压力峰值高于非交会侧。为精简文章内容，本文着重分析对列车影响较大的交会侧。

为研究无风条件下不等速交会对列车表面气动加载特性的影响，本文选取两个典型监测点进行压强时程分析：监测点 4 和 4\* 分别位于高速列车和低速列车头车的中部交会侧对称位置，监测点 7 和 7\* 分别位于中间车的中部交会侧对称位置。如图 13 和图 14 所示，在头车位置的监测点 4 处，列车交会时引发

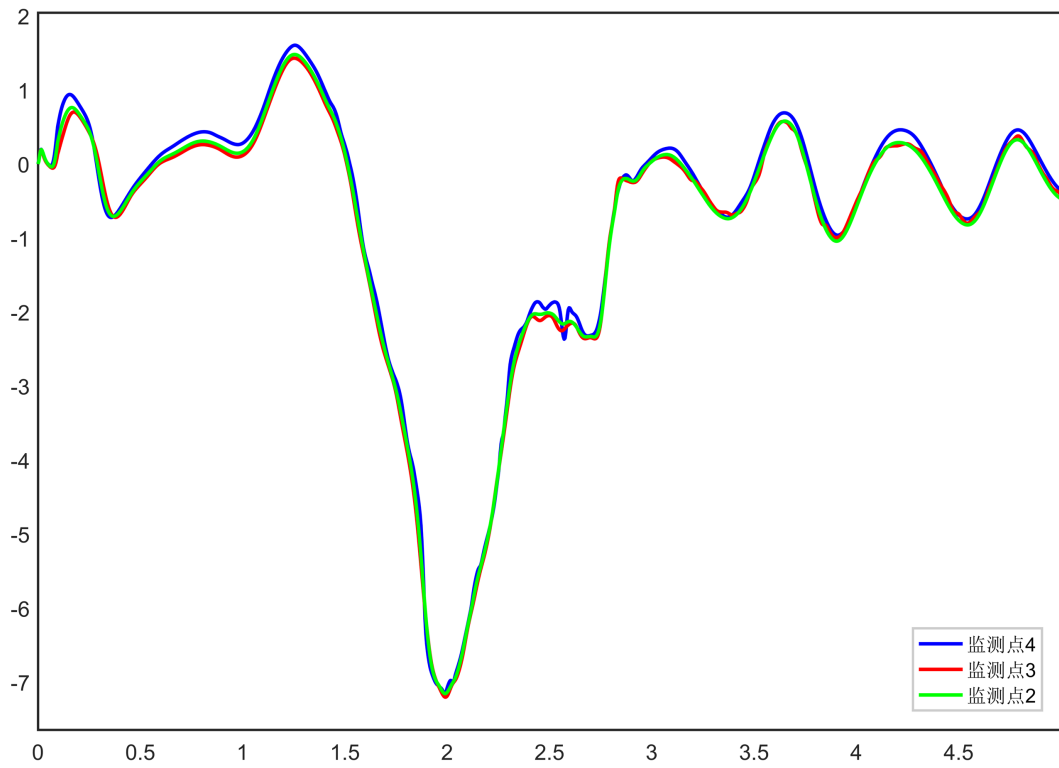


Figure 11. Pressure time-history of symmetric monitoring points on the 400 km/h leading train  
图 11. 400 km/h 列车头车对称监测点压力时程图

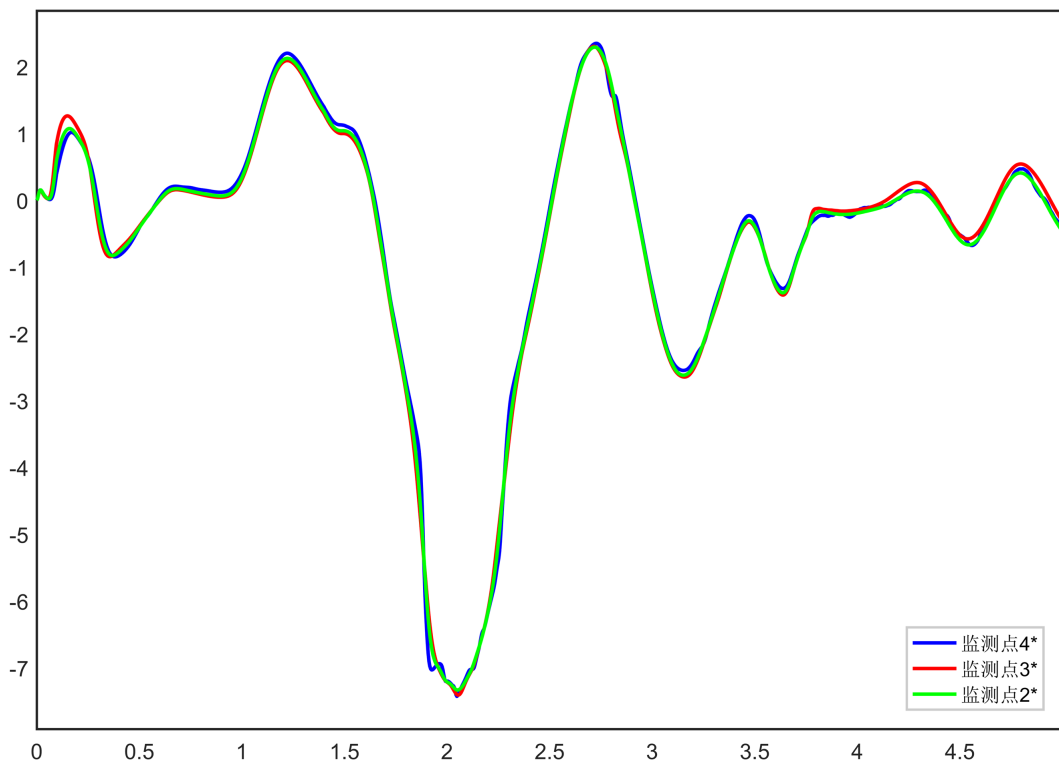


Figure 12. Pressure time-history of symmetric monitoring points on the 300 km/h leading train  
图 12. 300 km/h 列车头车对称监测点压力时程图

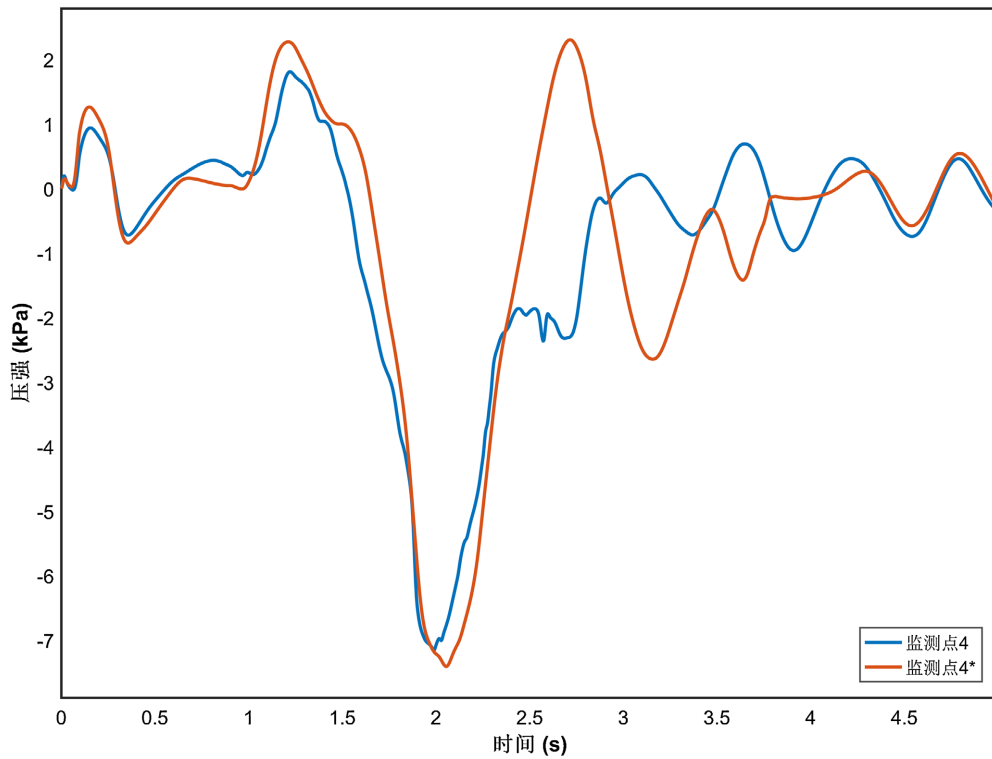


Figure 13. Time history diagram of pressure at monitoring points 4 and 4\* of the locomotive head train  
图 13. 列车头车 4 号和 4\*号监测点压力时程图

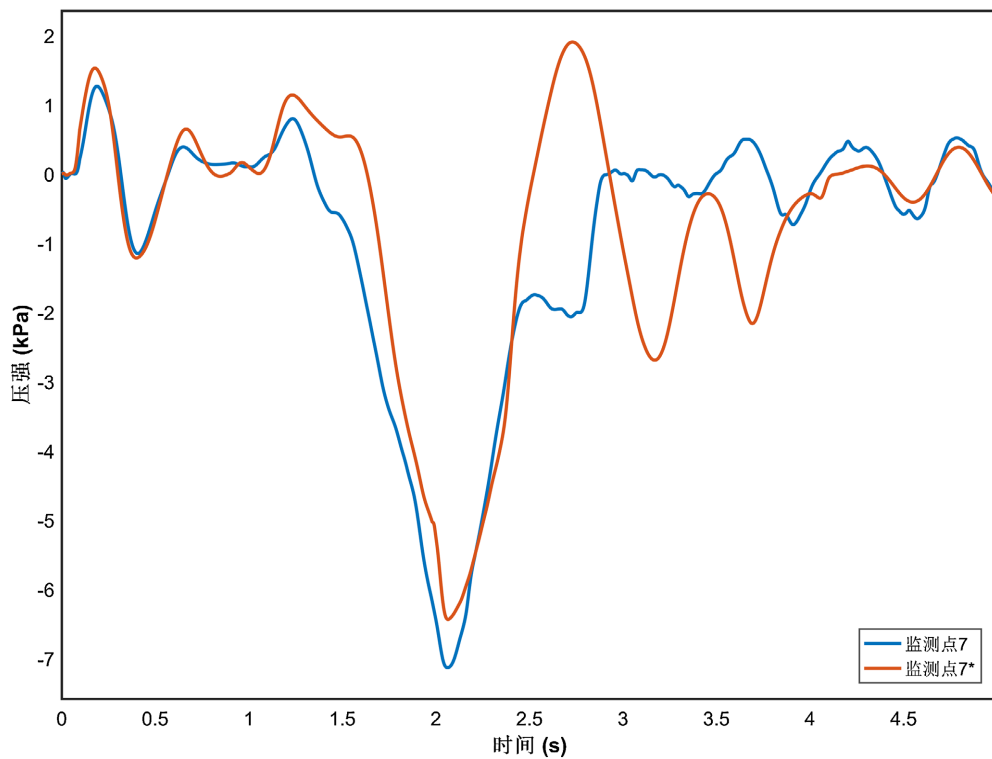


Figure 14. Pressure time-history at monitoring points 7 and 7\* of middle train  
图 14. 列车中间车 7 号和 7\*号监测点压力时程图

明显的压强扰动且趋势都是先增加再降低,最后振荡并恢复初始状态。列车前缘气流被压缩形成压缩波,使压力在 1.8 s 处出现正峰值,其中车速较慢的监测点 4\*最大值为 2.4 kPa,略高于监测点 4 的 2.2 kPa。虽然速度较快的列车相对流场变化更大,但是由于快车先产生压缩波,导致压缩波在慢车表面叠加更充分,因此慢车压力峰值较大。随后监测点 4 和 4\*压力迅速下降,在 2 s 左右处达到负压谷值,分别为-7.0 kPa 和-7.2 kPa。两车在交会时产生的膨胀波,同样先作用于慢车且更完整叠加在列车表面,谷值相对更低。列车完成交会后,两个对称监测点的压强响应时程曲线出现明显分化,主要是因为列车开始交会直到结束过程中较快列车尾部产生的流场扰动更强,扰动主要作用于尾部以及其身后隧道区域,对自身影响较小。慢车位于快车尾流区域内,同时受到膨胀波与湍流扰动叠加作用,导致压力曲线恢复速度更慢,波动更剧烈。在监测点 7 和 7\*的压力时程图中,同样观察到由压缩波和膨胀波引起的典型特征,但是相比于监测点 4 和 4\*,波动幅度明显减弱,主要是因为中间车受到车头与尾部扰动影响较小。

图 15 展示了无风工况下,隧道入口处靠近车速较高列车处对称布置的监测点 2 与监测点 3 的压力时程曲线。两点整体压力变化趋势一致,表明在无横风干扰的条件下,列车对隧道断面的压力扰动具有较好的对称性。其中,监测点 2 和 3 的第一个正压峰值分别为 3.30 kPa 和 3.90 kPa,第二个正压峰值分别为 3.51 kPa 和 3.35 kPa。两次峰值之间的时序与幅值差异主要由测点相对于列车头部与尾部的瞬时位置差异引起。通过对比两个监测点在两次压力峰值处的绝对差值可以发现,车速较高的列车在经过测点时引发的压缩波更强,对隧道壁面产生更显著的扰动。此外,由于无风工况下隧道内部无横向气流干扰,压缩波与膨胀波沿隧道轴向传播表现出良好的单向性,验证了本工况下流场结构的对称性与稳定性。

图 16 是无风工况下,隧道入口处靠近低速列车侧的对称监测点 8 和 9 的压力时程曲线。两曲线波动

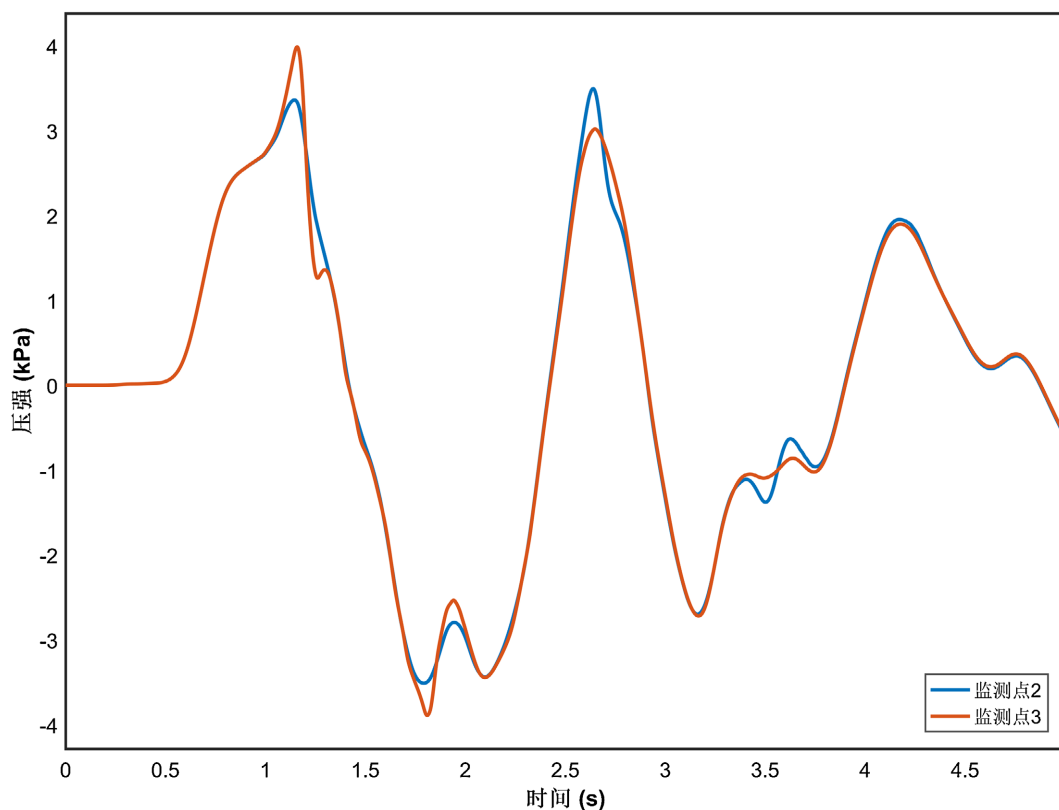
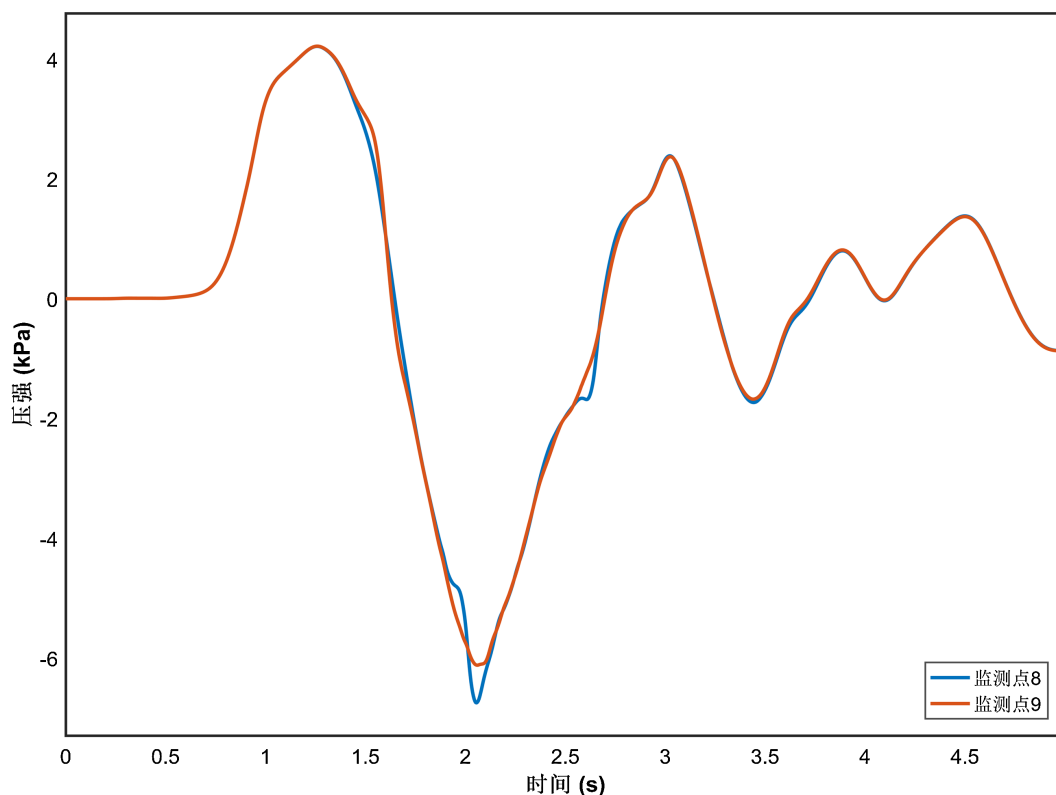


Figure 15. Pressure time-history at monitoring points 2 and 3 for the 400 km/h train

图 15. 400 km/h 列车 2 号和 3 号监测点压力时程图



**Figure 16.** Pressure time-history at monitoring points one train length away from the tunnel entrance  
**图 16.** 隧道一倍车长处监测点压力时程图

趋势几乎一致且波峰波谷出现时刻同步、波形高度相近。第一个正压峰值分别为 4.1 kPa 和 4.3 kPa，差值仅为 0.2 kPa。负压谷值分别为 -6.5 kPa 和 -6.3 kPa，相差小于 3%。后续震荡波动也基本一致，同样表明隧道末端扰动具有良好的对称性。

图 17 是无风工况下隧道中部监测点 5 和 6 的压力时程曲线，两点压力变化趋势基本一致。监测点 5 的两个正压峰值分别为 4.79 kPa 和 3.40 kPa，略高于监测点 6 的 4.16 kPa 和 3.23 kPa，表明靠近高速列车一侧隧道壁面所受气动扰动更强。值得注意的是，监测点 6 相较于监测点 5 存在明显延迟，且负压谷值更深，这是由于不等速交会过程中，快车侧压力扰动先于慢车侧到达，使得监测点 5 提前受到压力波和膨胀波作用，同时慢车侧膨胀波会与前期扰动叠加，引发更强烈的负压效应，从而出现监测点 6 波谷显著低于监测点 5。

#### 4.2. 不同速度横风环境下列车组以及隧道表面压力分析

图 18 展示了在 10 m/s 的横风速度下，较高速列车车身迎风侧监测点 7 和背风侧监测点 6 的压力时程图。两监测点趋势几乎一致，迎风侧波动较背风侧明显，因此本文着重分析迎风侧监测点。

图 19 和图 20 展示了不同速度横风条件下高速列车表面监测点 7 和 7\* 的压力时程图，可以观察到不同风速下两列车表面压力变化规律大致相同。在横风介入后，波动明显加剧。随着风速增加，波动越剧烈，正压峰值和负压谷值增大，波形越复杂且恢复稳定状态所需要的时间越长。通过对比两监测点可以发现，在同一横风速度下，其对慢车表面压力影响较大，这是因为较慢的列车相对于横风的相对速度越大，扰动更强，同时慢车在干扰区内时间更长导致扰动叠加。此外，慢车自身动压较低，横风扰动占比更高，使得压力响应更敏感，综合表现为比快车更显著的波动。另外在 2.7s 附近，快车和慢车压力差值

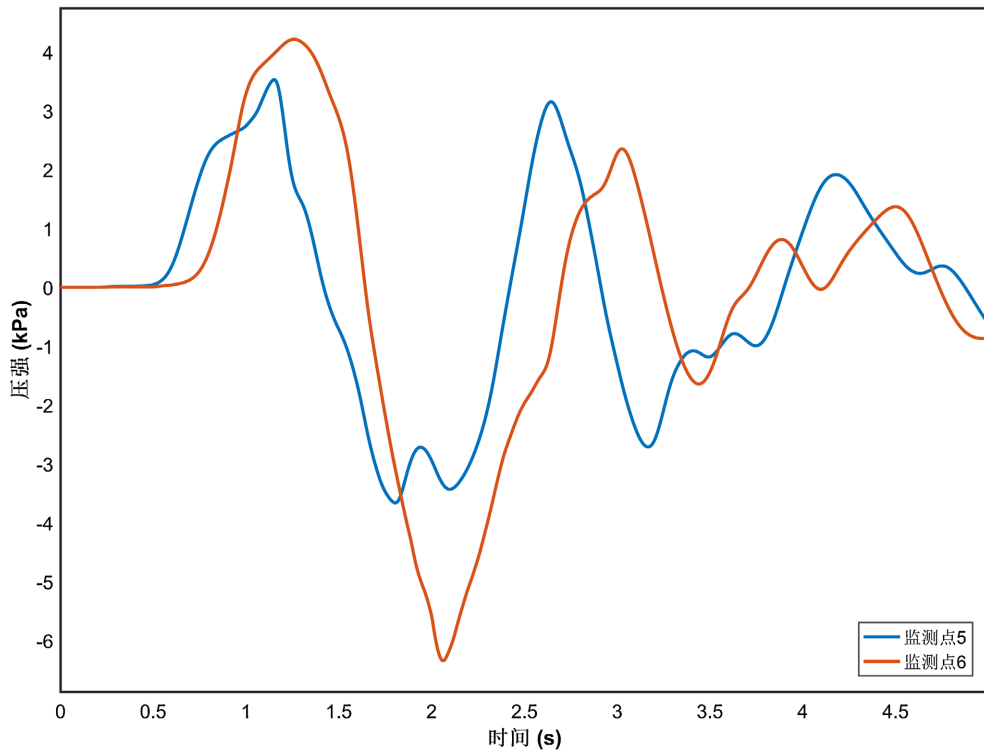


Figure 17. Pressure time-history of symmetric monitoring points at the tunnel midpoint  
图 17. 隧道中点处对称监测点压力时程图

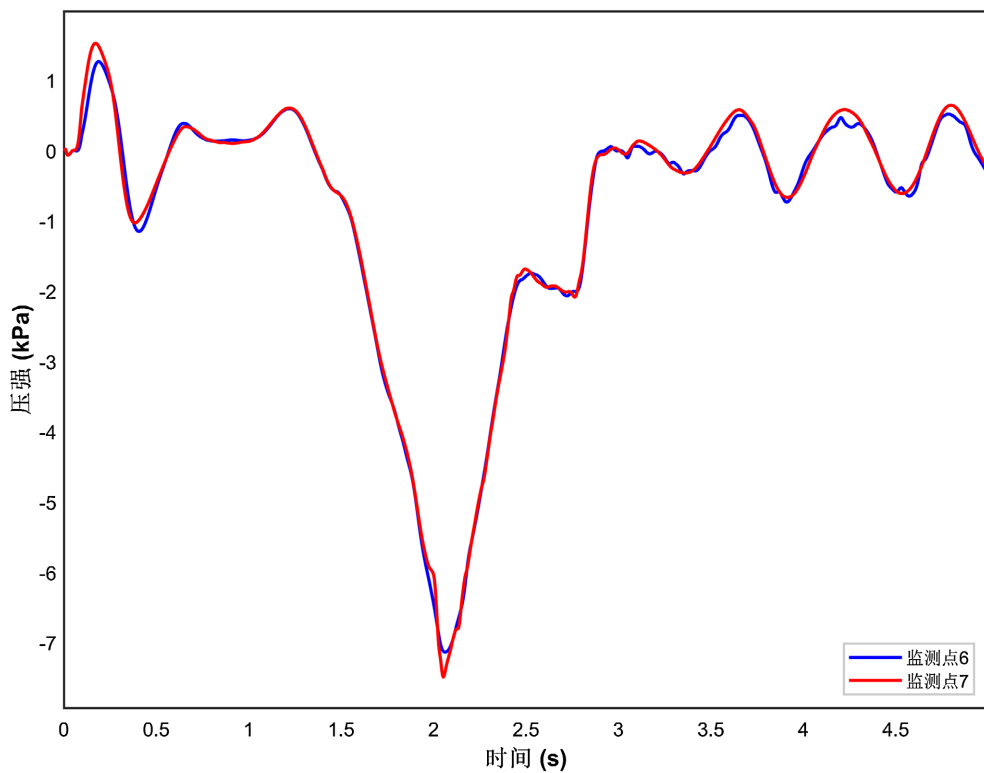


Figure 18. Pressure time-history of monitoring points on the 400 km/h middle train body  
图 18. 400 km/h 列车中间车车身监测点压力时程图

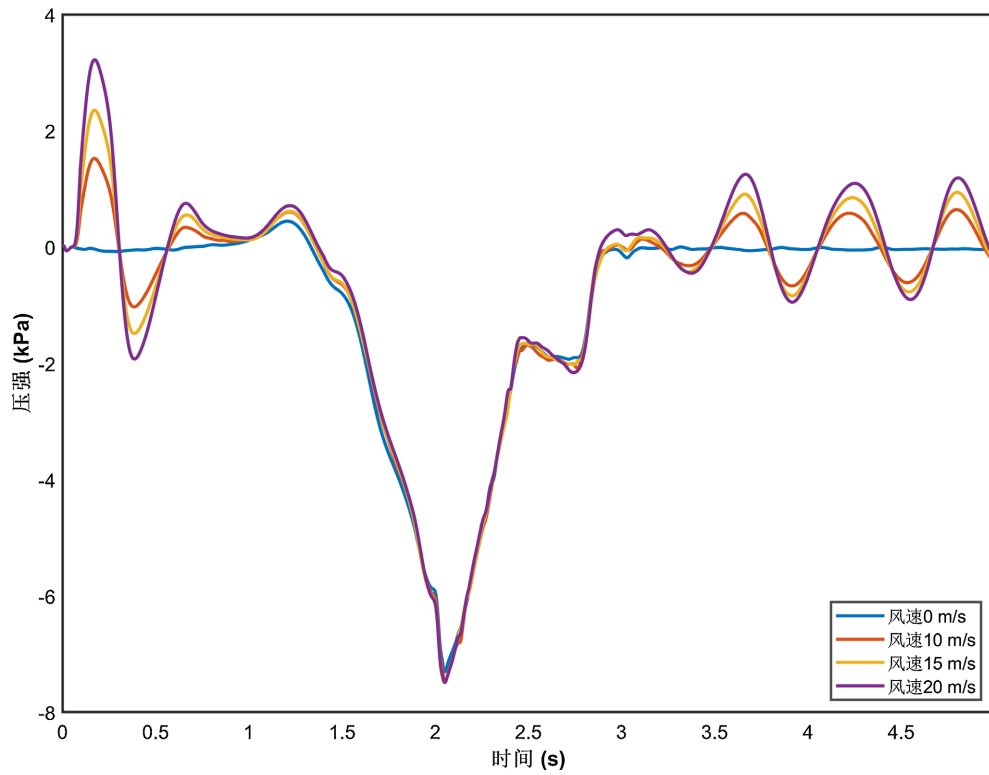


Figure 19. Pressure time-history of monitoring point 7 at different wind speeds

图 19. 列车 7 号监测点在不同风速下的压力时程图

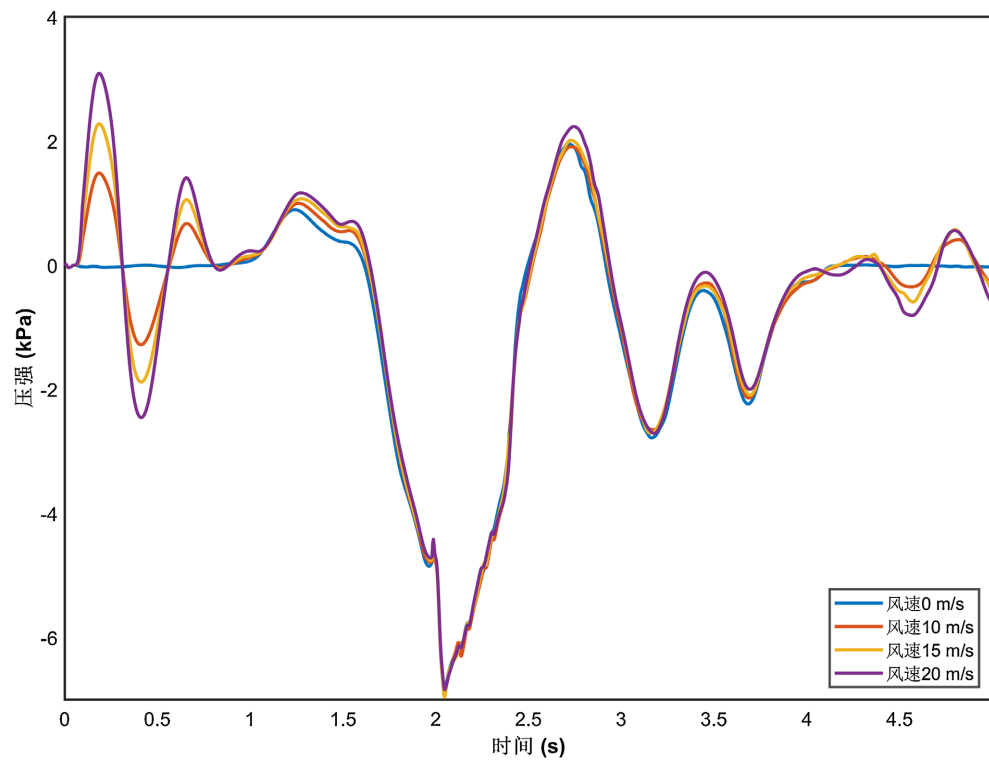


Figure 20. Pressure time-history of monitoring point 7\* at different wind speeds

图 20. 列车 7\*号监测点在不同风速下的压力时程图

显著增大，这主要源于车速差导致的膨胀波传播时序差异：快车尾部膨胀波先传播至监测点，而慢车尾部膨胀波尚未到达，在列车运行扰动叠加效应影响下压力持续上升。

图 21 展示了隧道中点处对称位置监测点的压力时程曲线。结果表明，隧道壁面与车体表面的压力变化趋势高度一致，说明列车运行过程中的气动扰动在隧道内具有明显的对称传播特性。同时也表明，横风显著影响了隧道内部的整体流场结构，无论是作用于车体表面还是隧道壁面，均呈现出相似的压力响应特征。

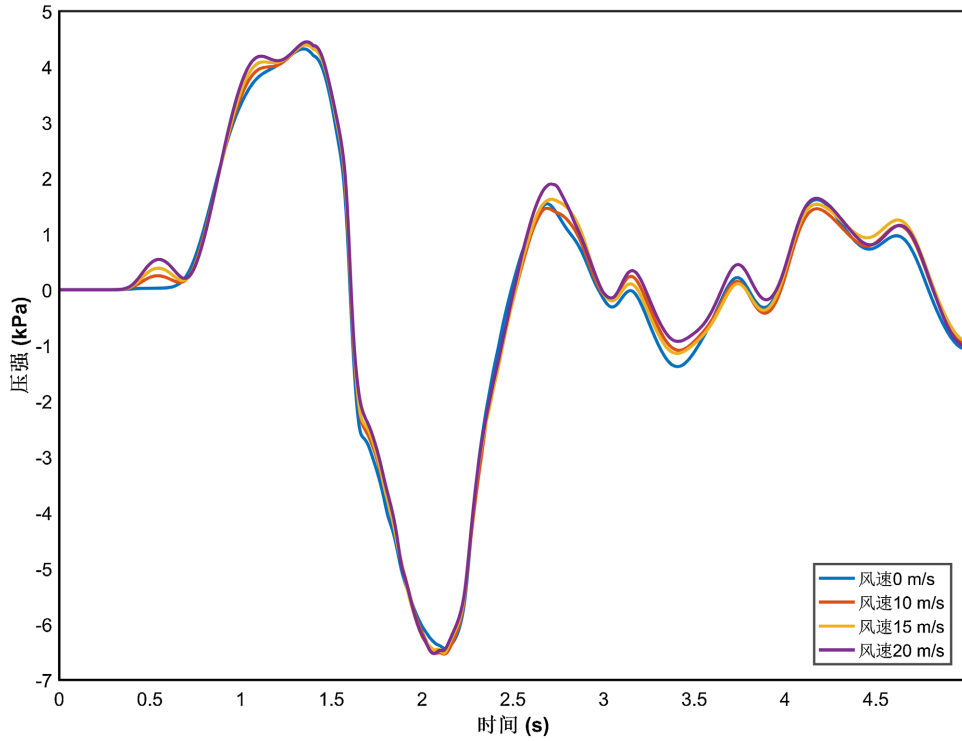


Figure 21. Pressure time-history of symmetric monitoring points at the tunnel midpoint at different wind speeds

图 21. 隧道中点处对称监测点在不同风速下的压力时程图

#### 4.3. 不同风向角 25 m/s 的侧风环境下列车组以及隧道表面压力分析

侧风角定义如图 22 所示。图 23 和图 24 展示了在速度为 25 m/s，风向角分别为 0°、30°和 60°的侧风

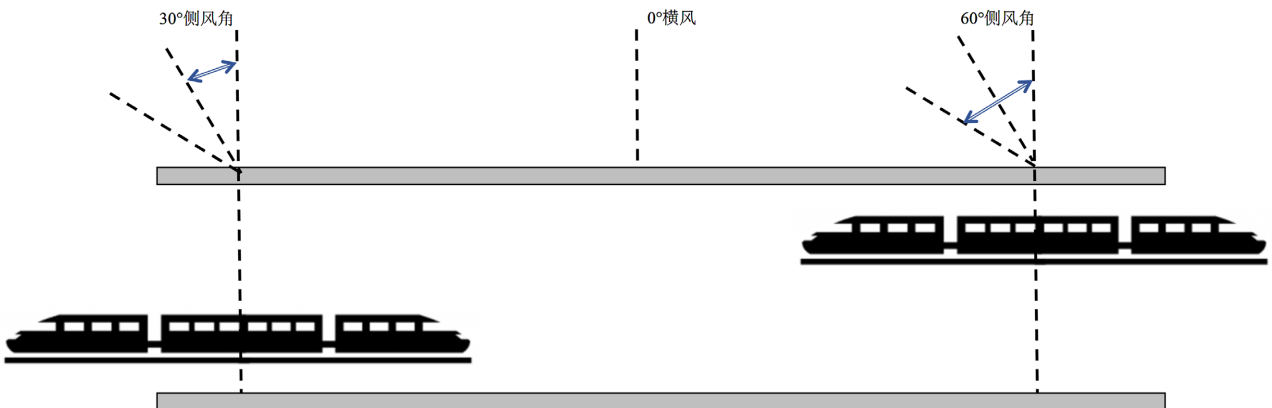


Figure 22. Definition of crosswind angle

图 22. 侧风角定义图

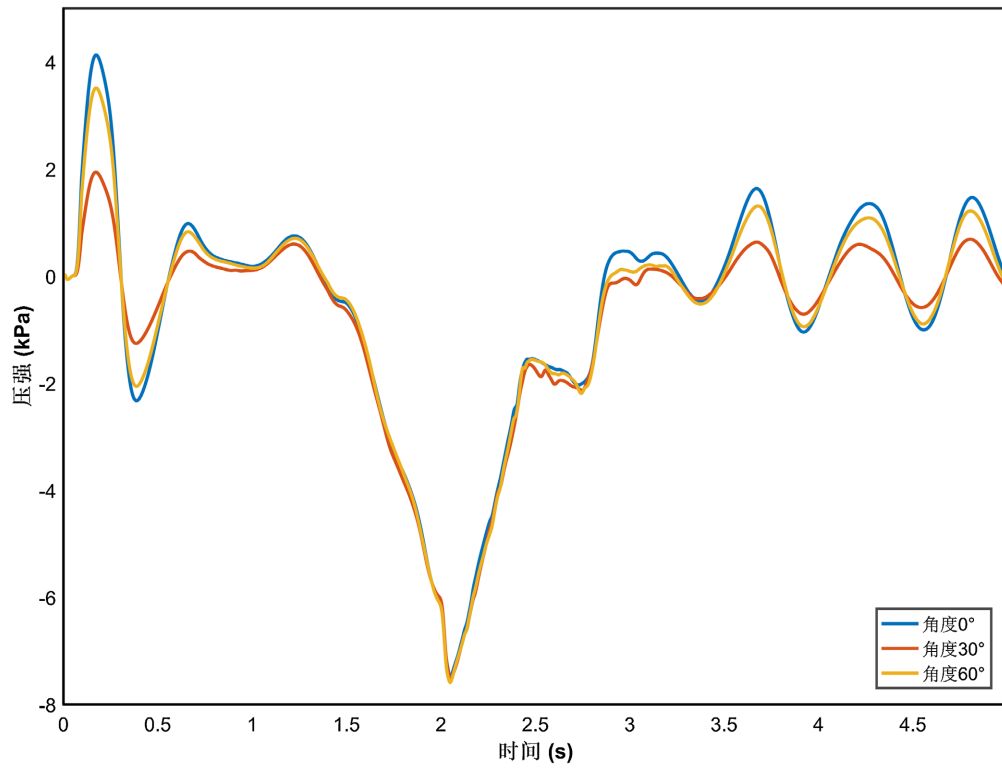


Figure 23. Pressure time-history of monitoring point 7 on the 400 km/h train at different wind angles  
图 23. 400 km/h 列车 7 号监测点在不同风向角下的压力时程图

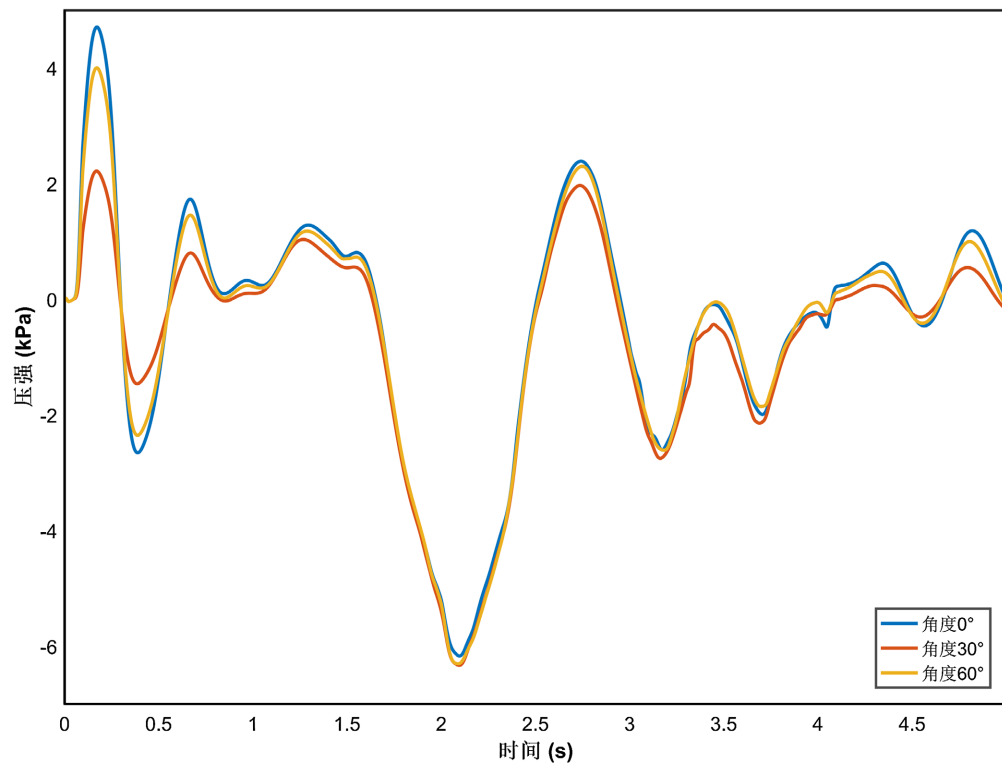


Figure 24. Pressure time-history of monitoring point 7\* on the 300 km/h train at different wind angles  
图 24. 300 km/h 列车 7\*号监测点在不同风向角下的压力时程图

作用下，两列车迎风侧监测点的压力时程图。可以看出，风向角对初始正压峰值影响最显著，即列车即将进入隧道时刻。风向角越小，压力峰值越高，在 $0^\circ$ 时两车正压峰值分别为 $4.2\text{ kPa}$ 和 $4.6\text{ kPa}$ ， $30^\circ$ 时降低至 $3.8\text{ kPa}$ 和 $4\text{ kPa}$ 附近，风向角继续增加到 $60^\circ$ 时，压力降低至约 $1.8\text{ kPa}$ 和 $2.2\text{ ka}$ 。在 $1.5\text{ s}\sim 2.2\text{ s}$ 内，负压谷值几乎不受影响，说明该阶段压力变化主要由列车和隧道耦合作用主导。在后续过程中，随着风向角增大，波动幅度和频率均减弱，曲线更为平缓，响应更滞后，这是由于膨胀波与压缩波传播受侧风偏折方向的影响，也可能是风向角增大导致扰动传播路径发生变化引起的。

图 25 展示了在风速为 $25\text{ m/s}$ 的横风、不同风向角条件下，隧道中点处对称监测点的压力时程图。可以看出随着风向角增加，隧道壁面压力波动趋势以及正压峰值和负压谷值几乎一致，说明隧道内部压力波动由列车和隧道耦合作用主导，受侧风角度影响较小。

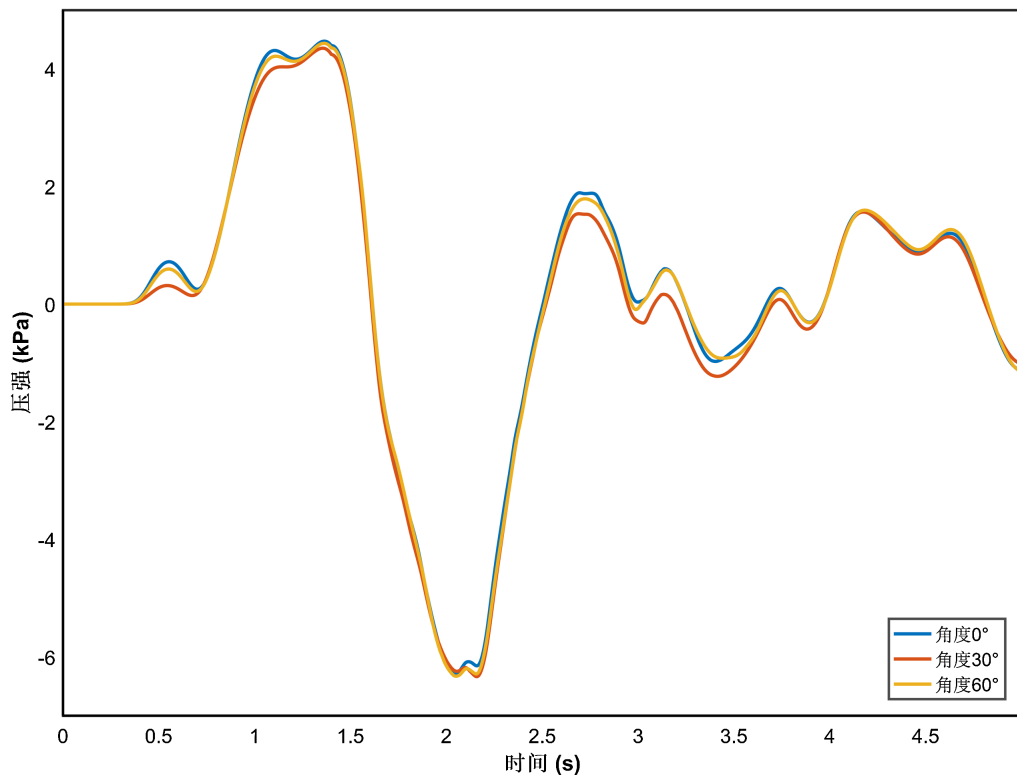


Figure 25. Pressure time-history of symmetric monitoring points at the tunnel midpoint at different wind angles  
图 25. 隧道中点处对称监测点在不同风向角下的压力时程图

## 5. 结论与讨论

本文围绕高速列车在双线隧道中不等速交会工况下的气动特性，详细开展了不同风速、风向角条件下的瞬态流动分析。通过建立基于滑移网格与动态边界条件的三维非定常可压缩流模型，揭示了列车交会过程中压力波的传播机理以及横风扰动对车体与隧道流场的不对称调控效应，主要得出以下结论：

1) 列车交会过程中，压缩波和膨胀波的相互作用构成了压力扰动的主导机制。由于列车不等速交会，波的传播速度与列车运行速度的不匹配影响了流畅的对称性，使得慢速车在尾流扰动与前向膨胀波的叠加影响下，产生更剧烈的气动响应，且压力波响应的时滞现象明显，表明速度差是引发非对称扰动加剧的核心因素。

2) 在横风环境中，随着风速和风向角的变化，流场结构表现出显著的侧向偏移、波形拉伸与局部回

流现象。尤其在强侧风与大风向角条件下，快车迎风侧车体及隧道壁面监测点产生明显的双压力峰值结构和压缩波放大现象，展现出压力扰动与列车速度、风向风速和波传播之间的高度非线性耦合关系。

3) 交会侧与非交会侧、不同速度车辆所引起的压强波动幅度、梯度变化趋势均呈现出速度主导、侧风扰动修饰的组合特征。尤其在隧道入口与中段处，监测点所记录的压力时程曲线表现出复杂的峰谷交替和非对称波系，验证了压缩波、膨胀波与横风扰动三者在交会过程中耦合的非均匀叠加机制。

本研究采用的多组工况模拟方法不仅展现了典型不等速交会条件下的气动扰动特征，还构建了一套可用于评估列车-隧道-风环境复合作用机制的数值模拟框架，为高速铁路在复杂环境下的安全运行评估、列车外形优化以及基础设施耐压设计等提供了一条分析路径。

## 参考文献

- [1] 钟沙, 钱博森, 杨明智, 等. 400 km/h 速度下编组长度对高速列车隧道交会压力波的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 1978-1985.
- [2] 周丹, 贾丽荣, 牛纪强. 编组长度对高速列车表面交变压力载荷的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(1): 1-7.
- [3] 胡啸, 孔繁冰, 梁永廷, 等. 线间距对高速列车隧道内交会压力波影响的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 79-88.
- [4] 胡啸, 骆建军, 李飞龙. 高速列车过双线隧道气动效应及列车风特性[J]. 哈尔滨工业大学报, 2021, 53(9): 43-52.
- [5] 熊小慧, 张朵朵, 耿语堂, 等. 400 km/h 高速列车过隧道时列车风特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 106-115.
- [6] Sun, B., Qin, D., Li, T. and Li, Y. (2025) Effect of Railway Spacing on Aerodynamic Performance of 600 km/h Maglev Trains Passing Each Other. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, **21**, 371-385. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2024.055519>
- [7] 李红梅, 杨飞, 张骞, 等. 高速列车隧道内等速交会对车辆动力学性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 64-70.
- [8] 赵凡, 齐琛, 李伟斌, 等. 高速列车不等速明线交会时压力波幅值与车速之间的关系研究[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(4): 15-20.
- [9] Du, J.M., Fang, Q., Zhang, X. and Wang, H. (2024) Comparative Analysis between Single-Train Passing and Double-Train Intersection in a Tunnel. *Journal of Zhejiang University-Science A*, **25**, 429-442. <https://doi.org/10.1631/jzus.a2300339>
- [10] Miyachi, T., Noguchi, Y. and Yamauchi, Y. (2024) One-Dimensional Analysis of Pressure Variations Induced by Trains Passing Each Other in a Tunnel. *Journal of Fluid Mechanics*, **988**, A45. <https://doi.org/10.1017/jfm.2024.403>
- [11] Liu, T.H., Wang, L., Li, L., Yang, F., Chen, Z.W. and Liu, H.K. (2021) Pressure Waves Acting on Wall of a Tunnel and Their Impact on the Tunnel's Structural Safety. *Journal of Central South University*, **28**, 3223-3237. <https://doi.org/10.1007/s11771-021-4823-6>