

# 山区高海拔大坡度单线隧道内列车车外压力波动特性

范宇浩, 王 露, 梅元贵

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年2月5日; 录用日期: 2026年2月14日; 发布日期: 2026年3月6日

## 摘 要

以川藏铁路拉林段为背景研究高海拔、大坡度与特长隧道群耦合作用下动车组车外压力波动特性, 基于一维可压缩非定常流动模型, 对时速160公里动车组单车通过川藏铁路拉林段典型隧道开展全参数数值模拟。结果表明, 线路坡度是影响压力强度的关键因素, 坡度增大导致车外压力峰峰值显著上升, 而海拔升高对压力峰值具有削弱效应; 短隧道内压力变化剧烈, 以初始压缩波与膨胀波为主, 长隧道则呈现压力梯度累积, 中后段持续负压环境明显。隧道坡型与长度组合共同决定压力极值分布, “大坡度 + 长隧道”组合易引发最大压力峰峰值与尾部负压。研究结论可为川藏铁路高海拔隧道断面优化与列车气密性设计提供直接依据。

## 关键词

单车, 车外压力波动, 160 km/h, 高海拔, 大坡度, 单线隧道

# External Pressure Fluctuations of a Train Inside a High-Altitude, Steep-Gradient, Single-Track Mountain Tunnel

Yuhao Fan, Lu Wang, Yuanguai Mei

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: February 5, 2026; accepted: February 14, 2026; published: March 6, 2026

## Abstract

Based on a one-dimensional compressible unsteady flow model, a comprehensive parametric numerical simulation was conducted for a single 160 km/h Electric Multiple Unit (EMU) train passing

through typical tunnels in the Lhasa-Linzhi section of the Sichuan-Tibet Railway. The results indicate that the line gradient is a key factor affecting pressure intensity. An increase in gradient leads to a significant rise in the peak-to-peak value of the external pressure, whereas increased altitude has a mitigating effect on the pressure peak. Pressure changes are acute in short tunnels, dominated by initial compression and expansion waves, while long tunnels exhibit cumulative pressure gradients, with a pronounced sustained negative pressure environment in the middle and rear sections. The combination of tunnel gradient type and length jointly determines the distribution of pressure extremes. The “steep gradient + long tunnel” combination is prone to induce the maximum peak-to-peak pressure and tail negative pressure. The research conclusions provide direct guidance for the optimization of high-altitude tunnel cross-sections and the design of train air-tightness for the Sichuan-Tibet Railway.

## Keywords

Single Train, External Pressure Fluctuation, 160 km/h, High Altitude, Steep Gradient, Single-Track Tunnel

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

西部山区部分隧道沿线海拔高、地形起伏大，桥梁和隧道比例极高，列车需要频繁穿行于高海拔、大坡度的长大隧道中。动车组在隧道内运行时会引起复杂的空气动力学效应，产生强烈的压力波动[1]。与平原地区的隧道不同，高海拔导致的低空气密度与大坡度带来的显著高程差相互耦合，使得该区段隧道内的气动环境具有独特的复杂性，隧道内空气动力学问题可能更加恶劣[2]。因此，系统研究高海拔、大坡度隧道内的压力波特征具有重要的理论价值与工程意义。

在隧道空气动力学领域，国内外学者已开展了广泛研究。早期工作主要集中在列车通过单一平直隧道时的基本压力波特性和一维数值模拟方法，为理论分析奠定了基础[3]。随着高速铁路的发展，研究重点逐渐扩展到压力波[4]、微气压波[5]和列车空气阻力[6]的预测与缓解措施。近年来，针对特定复杂环境的研究也逐渐增多，例如高海拔隧道[7][8]、大坡度线路[9]等，这些研究指出，线路坡度会显著改变压力梯度，而海拔变化则通过影响大气环境参数对压力幅值产生影响。现有研究主要针对单一影响因素或标准工况展开，缺乏对于像川藏铁路拉林段这样同时具备“高海拔、大坡度、特长隧道”多因素耦合场景下，车外压力的演变规律和关键影响因素的系统性研究。

本文以西部山区动车组单车通过全线隧道为研究对象，采用经过试验数据验证的一维可压缩非定常流动模型，对时速 160 公里的动车组通过全线 48 座隧道的往返运行工况开展全参数数值模拟，探究高海拔、大坡度与隧道长度耦合作用下的车外压力波动特性，系统地分析沿线隧道长度、坡度及海拔差异对车外压力波动幅值的定量影响，阐明压力波沿车厢纵向的分布规律以及坡度与海拔因素对压力幅值的影响。研究结果为高海拔山区铁路的隧道断面优化、列车气密性设计及运营舒适性评估提供的理论依据和数据支持。

## 2. 计算模型与计算方法

### 2.1. 车外压力计算模型

列车通过隧道，由于周围空气流动受限，类似于管道流动，且隧道直径远小于长度，列车直径也远

小于长度，基于这一特性，可将列车过隧道引发的空气流动看为一维流动。所以将隧道压力波问题合理简化为一维可压缩不等熵非定常流动[10]。

利用质量守恒、动量定理和能量守恒定理，可以建立描述控制体内流体流动的基本方程。

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u'}{\partial x} + u' \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + u' \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G + g \sin \theta = 0 \quad (2)$$

能量方程：

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u' \frac{\partial p}{\partial x} - \alpha^2 \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u' \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \rho(\kappa - 1)(q - \xi + u'G) \quad (3)$$

式中： $p$ 、 $u'$ 和 $\rho$ 分别为空气压力、流速(相对地面)和密度； $\theta$ 为隧道入口端与水平地面夹角； $\kappa$ 为空气比热比； $\alpha$ 为空气声速； $G$ 为空气与壁面的摩擦项； $q$ 为空气与壁面的传热项； $\xi$ 为空气与列车车壁的摩擦功； $g$ 为重力加速度； $t$ 为时间。

列车通过隧道整个过程可将隧道空间分为车前/后隧道空间和环状空间，车前/后隧道空间和环状空间内空气与壁面的摩擦项 $G$ 、空气与壁面的传热项 $q$ 和空气与列车车壁的摩擦功 $\xi$ 三项取值不同，以下分别针对不同空间给出上述方程中的 $G$ 、 $q$ 和 $\xi$ 三项的计算式。

(1) 车前/后隧道空间

$$G = \frac{1}{2F_{TU}} f_{TU} u' |u'| S_{TU} \quad (4)$$

$$q = \frac{1}{2F_{TU}} \frac{\kappa R}{\kappa - 1} f_{TU} S_{TU} |u'| (T_{TU} - T) \quad (5)$$

式中， $S_{TU}$ 为隧道横截面周长； $F_{TU}$ 为隧道横截面面积； $f_{TU}$ 为隧道壁面摩擦系数； $T_{TU}$ 隧道壁面温度； $T$ 为隧道内空气温度。

(2) 单列车通过隧道时含一列列车的环状空间

$$G = \frac{1}{2F_{AN}} [f_{TU} u' |u'| S_{TU} + f_{TR} u |u| S_{TR}] \quad (6)$$

$$q = \frac{1}{2F_{AN}} \frac{\kappa R}{\kappa - 1} [f_{TU} S_{TU} |u'| (T_{TU} - T) + f_{TR} S_{TR} |u| (T_{TR} - T)] \quad (7)$$

$$\xi = \frac{S_{TR}}{2F_{AN}} f_{TR} V_{TR} u |u| \quad (8)$$

式中， $F_{AN}$  ( $F_{AN} = F_{TU} - F_{TR}$ )为环状空间面积； $F_{TR}$ 、 $S_{TR}$ 、 $f_{TR}$ 、 $V_{TR}$ 分别表示列车横截面面积、周长、壁面摩擦系数和速度； $u'$ 和 $u$ 分别为空气相对地面流速和相对列车流速； $T_{TR}$ 表示列车壁面温度。

## 2.2. 方法验证

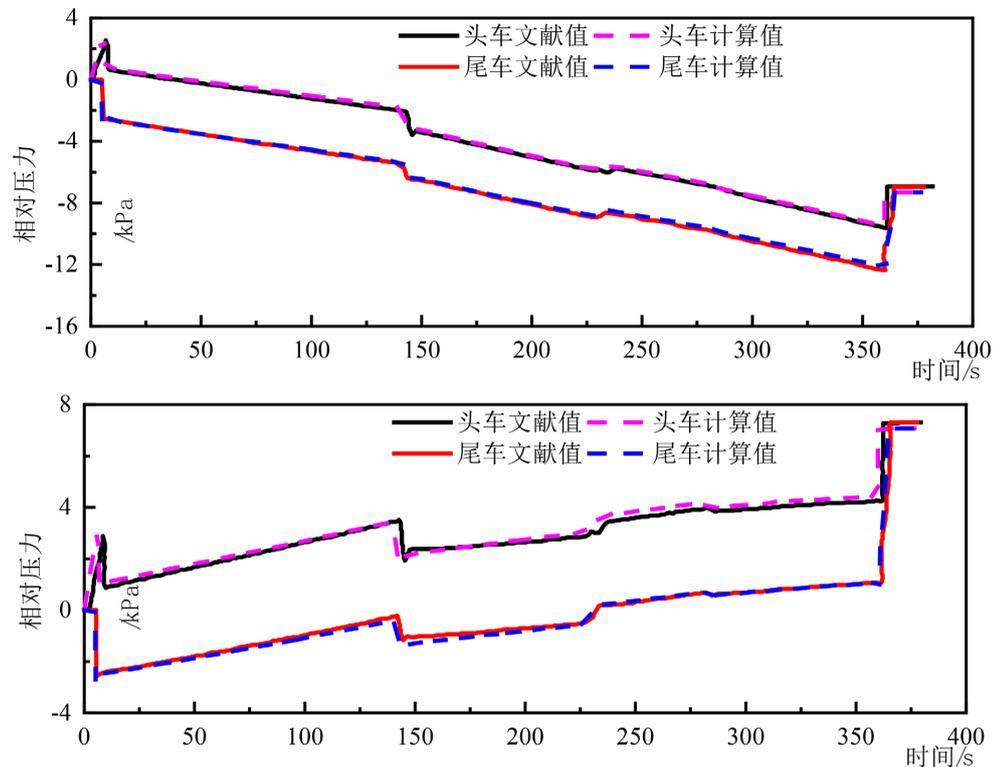
借助文献[11]里的数值模拟数据，来检验本文中模拟车外压力所使用的方法以及对应的源代码程序是否正确。列车和隧道基本参数见表1。图1给出了文献的车外压力与本报告一维程序计算得到的车外

压力变化曲线对比。

**Table 1.** Validation case parameters

**表 1.** 验证基本参数

类别	长度/m	截面积/m <sup>2</sup>	坡度/‰	车速/(km·h <sup>-1</sup> )
列车	400	12		300
隧道	30000	50	±20	



**Figure 1.** Comparison results of the external pressure time history curves

**图 1.** 车外压力时间历程曲线对比结果

### 2.3. 计算参数

本文主要研究列车通过川藏铁路拉林段上典型隧道时车外压力，列车速度为 160 km/h，隧道净空面积为 42 m<sup>2</sup>。

## 3. 计算结果分析

### 3.1. 最大正压值

图 2 表示列车通过单线典型隧道时不同车厢外最大正压值的变化特征。由图 2 可知：

(1) 计算发现，多数隧道因列车下坡运行且隧道坡型复杂，导致通过时头车与尾车所处局部空气动力学环境不同，车外压力差异显著。当单列车通过隧道时，车身测点遇压缩波压力升高、车身测点遇膨胀波压力下降，列车在隧道内运行时车外的压力波动是压缩波和膨胀波共同作用的结果；列车上坡运行时，隧道内的初始气压自隧道进口端至出口端逐渐降低，导致列车通过隧道整个过程的车内外压力呈下降趋

势；列车下坡运行时，初始气压逐渐升高，相应车外压力呈上升趋势，所以隧道坡度增大导致大气压力减小从而车外最大正压值降低。

(2) 各隧道最大正压值差异体现在数值大小和车厢分布两方面：在中长隧道中，最大正压值相对较低，且沿车厢分布较为均匀；在特长隧道中，压力整体水平升高，同时不同车厢间的压力开始呈现明显的梯度差异；而在下坡隧道中，最大正压值达到最高，且沿列车长度的压力梯度最为陡峭。综合分析表明，这种分布规律并非由单一因素决定，而是隧道长度与线路坡度耦合作用的结果。

(3) 最大正压值出现在 42 号隧道，该隧道长度约 12 km，该隧道为单面坡，第 1 节车厢最大正压值为 3.522 kPa。

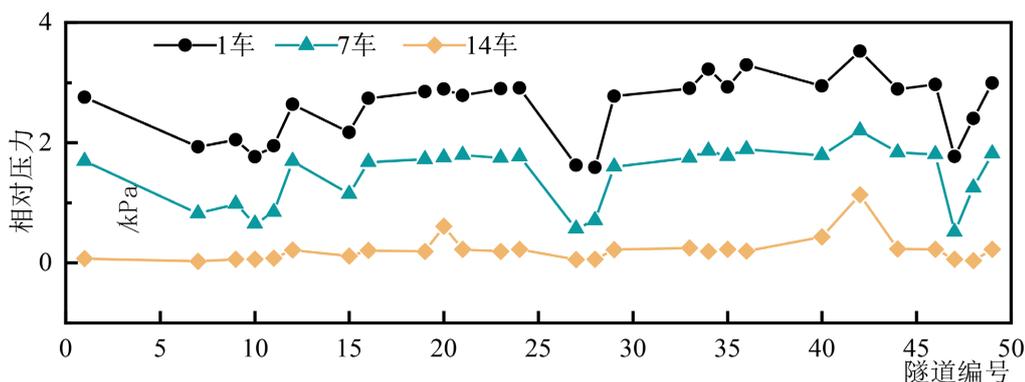


Figure 2. Peak positive external pressure on different carriages during train passage through a typical single-track tunnel  
图 2. 列车通过单线典型隧道时不同车厢车外压力最大正压值

### 3.2. 最大负压值

图 3 表示列车通过单线典型隧道时不同车厢外最大负压值的变化特征。由图 3 可知：

(1) 列车通过川藏铁路拉林段典型隧道时，最大负压值均呈现从车头至车尾逐渐增大的规律。这是因为单列车通过隧道时，车身测点遇压缩波压力升高、车身测点遇膨胀波压力下降，列车在隧道内运行时车外的压力波动是压缩波和膨胀波共同作用的结果；列车上坡运行时，隧道内的初始气压自隧道进口端至出口端逐渐降低，导致列车通过隧道整个过程的车外压力呈下降趋势；列车下坡运行时，初始气压逐渐升高，相应车外压力呈上升趋势，所以隧道坡度增大导致大气压力减小从而车外最大负压值增大。

(2) 各隧道最大负压值差异体现在数值大小和车厢分布两方面：在中长隧道中，最大负压值相对较低，

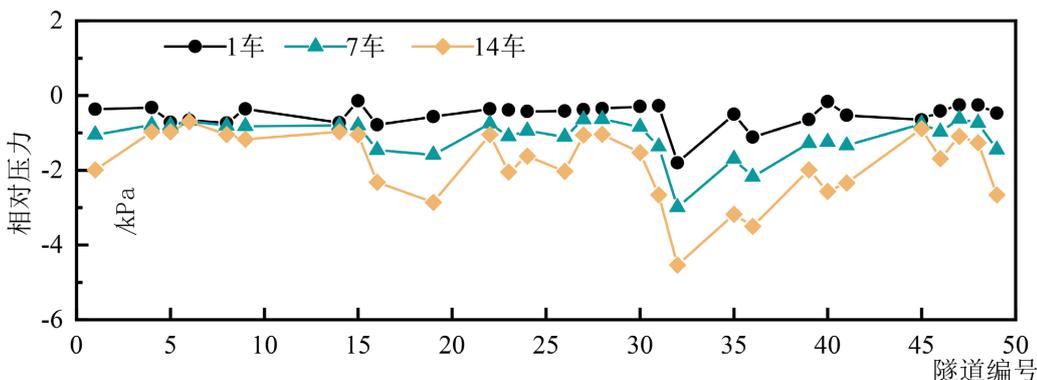


Figure 3. Peak negative external pressure on different carriages during train passage through a typical single-track tunnel  
图 3. 列车通过川藏铁路拉林段单线典型隧道时不同车厢车外压力最大负压值

且沿车厢分布较为均匀；在特长隧道且坡度较大中，最大负压值整体上升，同时不同车厢间的压力开始呈现明显的梯度差异。这种差异主要由隧道长度与坡度组合决定。

(3) 最大负压值出现在 32 号隧道第 14 节车厢，该隧道长度约 18 km，该隧道为人字坡，最大负压值达  $-4.541$  kPa。

### 3.3. 最大压力峰峰值

图 4 表示列车通过单线典型隧道时不同车厢外最大压力峰峰值的变化特征。由图 4 可知：

(1) 列车通过川藏铁路拉林段典型隧道时，最大压力峰峰值均呈现从车头至车尾逐渐增大的规律。特长和大坡度隧道中列车经历了较大高程差，导致隧道进口两端大气压力差距较大，两个方向的变化趋势一致但极值出现的隧道不同。这是因为单列车通过隧道时，车身测点遇压缩波压力升高、车身测点遇膨胀波压力下降，列车在隧道内运行时车外的压力波动是压缩波和膨胀波共同作用的结果；列车上坡运行时，隧道内的初始气压自隧道进口端至出口端逐渐降低，导致列车通过隧道整个过程的车外压力呈下降趋势；列车下坡运行时，初始气压逐渐升高，相应车外压力呈上升趋势，所以隧道坡度增大导致大气压力减小从而车外最大压力峰峰值增大。

(2) 各隧道压力峰峰值差异显著：32 号隧道等大坡度长隧道的压力峰峰值数值较高，6 号隧道的压力峰峰值数值相对较低。这种差异主要源于隧道长度和坡度组合对大气压力分布的影响。

(3) 最大压力峰峰值出现在 32 号第 14 节车厢，该隧道长度约 18 km，该隧道为人字坡，峰峰值达  $4.764$  kPa。

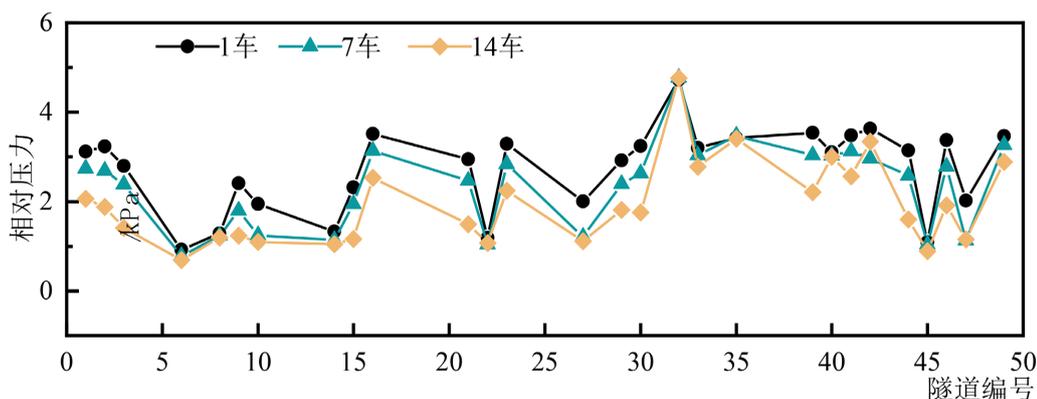


Figure 4. Peak-to-peak exterior pressure on different carriages during train passage through a typical single-track tunnel  
图 4. 列车通过川藏铁路拉林段单线典型隧道时不同车厢车外压力最大压力峰峰值

## 4. 结论

本文通过一维特征线法构建了单列车通过隧道时的车外压力计算模型，针对川藏铁路拉林段高海拔、大坡度及特长隧道并存的复杂工况，模拟了动车组以  $160$  km/h 速度通过典型隧道的运行场景，系统研究了车外压力的动态变化特性，得出以下主要结论：

(1) 压力波动沿车厢分布呈现明确规律：车外最大正值通常于列车车头车达到极值；而最大负压值与压力峰峰值则自车头至车尾呈递增趋势。

(2) 隧道长度对压力波动的影响具有差异性：短隧道内压力变化剧烈且瞬态特征明显。长隧道中压力波动趋于平缓，但负压累积效应显著，导致列车尾部承受更大负压。

(3) 线路坡度是车外压力赋值大小的关键因素之一：坡度增大显著加剧车外压力波动。列车下坡运行

时, 在坡度较大的 42 号隧道, 头车最大正压值为 3.522 kPa, 为最高值。

(4) 高海拔环境对压力峰值产生削弱效应: 研究表明, 随着海拔升高, 空气密度降低, 车外压力峰值呈现系统性减弱趋势, 这为高海拔山区铁路的气动载荷评估提供了重要依据。

(5) 隧道坡型与长度组合共同决定压力极值分布: “大坡度 + 长隧道”的组合易产生最大的压力峰值与尾部负压; 而“缓坡 + 短隧道”组合的压力波动幅值则相对较小。

## 参考文献

- [1] Sturt, R., Lynch, P., Burns, R., *et al.* (2022) Aerodynamic Assessment and Mitigation—Design Considerations for High-Speed Rail. Department of Transportation, Federal Railroad Administration.
- [2] 田红旗. 中国高速轨道交通空气动力学研究进展及发展思考[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 30-41.
- [3] Woods, W.A. and Pope, C.W. (1981) A Generalised Flow Prediction Method for the Unsteady Flow Generated by a Train in a Single-Track Tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7, 331-360. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(81\)90057-X](https://doi.org/10.1016/0167-6105(81)90057-X)
- [4] Ricco, P., Baron, A. and Molteni, P. (2007) Nature of Pressure Waves Induced by a High-Speed Train Travelling through a Tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, 781-808. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.01.008>
- [5] Ozawa, S. (1979) Studies of Micro-Pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit. Japanese National Railways.
- [6] 李东, 梅元贵, 胡啸. 明线运行时全包覆式转向架对高速列车气动阻力特征研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 1-14. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=L9QYEmxDei3T3kQNjU3ixlks1DX8\\_IHDSGSIXS-AVzPE3Js8xGBZB7QM0rjfwRr\\_Q-x7LPczo-XFny8Yp9JOYqT0k6apSXAAbWe8jnuhvBqriOH754yQWPt-DrtYzss6UtpzSXIT9nX3bGBjdPLUeSRsy-hdELM-0NA5cpuujarBy7AqWqpNXEg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2026-01-29](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=L9QYEmxDei3T3kQNjU3ixlks1DX8_IHDSGSIXS-AVzPE3Js8xGBZB7QM0rjfwRr_Q-x7LPczo-XFny8Yp9JOYqT0k6apSXAAbWe8jnuhvBqriOH754yQWPt-DrtYzss6UtpzSXIT9nX3bGBjdPLUeSRsy-hdELM-0NA5cpuujarBy7AqWqpNXEg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2026-01-29).
- [7] 万有财, 周新喜, 梅元贵. 高速列车通过高海拔大坡度隧道车内外压力波特性[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(1): 167-176.
- [8] 梅元贵, 万有财, 邓虹. 高原高速铁路长大隧道列车交会空气阻力特性数值模拟研究[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(5): 149-161.
- [9] 杜权, 杜迎春, 杨瑞, 等. 大坡道长大隧道及隧道群环境下高速列车车内外压力波特性的实车试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(7): 1454-1464.
- [10] 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.
- [11] Palmero, N.M. and Vardy, A. (2014) Tunnel Gradients and Aural Health Criterion for Train Passengers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228, 821-832. <https://doi.org/10.1177/0954409713490684>