

山区高海拔大坡度单线隧道内动车组车内压力波动特性

范宇浩, 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13日; 发布日期: 2026年3月12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多因素耦合作用下动车组车内压力的波动特性, 基于一维可压缩非定常流动理论, 建立了列车通过隧道时的外气动压力计算模型, 并结合车辆动态密封性能的时间常数(τ)模型, 构建了车内压力计算分析方法。通过对时速160公里动车组单车通过拉林段典型隧道进行全参数数值模拟, 系统研究了密封等级($\tau = 20$ s)对车内压力关键参数的影响。结果表明, 压力沿车厢纵向呈规律性分布: 最大正压极值通常出现于头车, 而最大负压与压力峰峰值则自头车向尾车递增。隧道结构参数中, 线路坡度是加剧压力波动的关键, 大坡度会显著提升压力幅值; 海拔升高产生的低密度效应则对压力峰值有一定削弱。隧道长度影响波动模式, 短隧道内压力变化剧烈, 长隧道则呈现压力梯度累积与持续负压环境。研究发现, “大坡度”与“超长隧道”的组合最易诱发极端车内压力值, 是风险最高的工况。本研究结论可为高海拔山区铁路的列车气密性设计、隧道断面与洞口结构的空气动力学优化提供直接的理论依据与数据支撑。

关键词

单车, 车内压力波动, 160 km/h, 高海拔, 大坡度, 单线隧道

Interior Pressure Fluctuation Characteristics of EMUs in High-Altitude, Steep-Gradient, Single-Track Mountain Tunnels

Yuhao Fan, Yuangui Mei

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: February 5, 2026; accepted: February 13, 2026; published: March 12, 2026

Abstract

Taking the Lhasa-Nyingchi section of the Sichuan-Xizang Railway as the research background, this study investigates the pressure fluctuation characteristics inside EMU carriages under the coupled effects of high altitude, steep gradient, and extra-long tunnel groups. Based on the one-dimensional compressible unsteady flow theory, an external aerodynamic pressure calculation model for trains passing through tunnels is established. Combined with a time constant (τ) model representing the dynamic sealing performance of the vehicle, an analytical method for calculating interior pressure was developed. Through full-parameter numerical simulation of a single 160 km/h EMU passing through typical tunnels in the Lhasa-Nyingchi section, the influence of sealing class ($\tau = 20$ s) on key interior pressure parameters was systematically investigated. The results indicate that pressure distribution along the train length follows a clear pattern: the extreme maximum positive pressure typically occurs in the leading car, while the maximum negative pressure and the peak-to-peak value increase progressively from the leading car toward the trailing car. Among the tunnel structural parameters, the line gradient is the key factor exacerbating pressure fluctuations. Large gradients significantly increase the pressure amplitude. In contrast, the low-density effect resulting from high altitude somewhat mitigates pressure peaks. Tunnel length influences the fluctuation mode: pressure changes are acute in short tunnels, while long tunnels exhibit cumulative pressure gradients and a pronounced sustained negative pressure environment. The study finds that the combination of “large gradients” and “extra-long tunnels” most readily induces extreme interior pressure values, representing the highest-risk operational condition. The conclusions of this research provide direct theoretical basis and data support for the air-tightness design of trains, as well as for the aerodynamic optimization of tunnel cross-sections and portal structures on high-altitude mountain railways.

Keywords

Single Train, Internal 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

随着我国铁路不断向西部艰险山区拓展, 列车运行环境日益复杂。在山区铁路建设中, 为克服巨大高差、优化线路走向, 往往需要修建密集的长大隧道群。这些隧道通常具有两个典型特征: 一是为适应地形爬升而采用的大纵坡, 二是因穿越崇山峻岭所带来的高海拔问题。列车在此类隧道中运行会激发显著的气动效应, 引发车内外剧烈的压力波动[1]。车内压力波动是评估旅客乘坐舒适性的关键指标, 过快的压力变化速率或过大的压力幅值极易导致乘客耳部胀痛等不适反应。“高海拔、大坡度、特长隧道”多因素相互耦合, 使得气动环境尤为特殊[2][3]。因此, 系统揭示该复杂环境下车内压力的响应规律, 对提升山区铁路运营品质、保障行车安全以及指导车辆与隧道工程的气动设计, 具有重要的理论意义和工程应用价值。

隧道空气动力学研究经过长期发展, 已建立起较为完善的理论与实验体系。早期工作主要集中于列车通过平直隧道时的基本压力波特性和一维非定常流动数值方法[4], 为领域发展奠定了重要基础。随着

高速铁路技术的进步, 研究范围不断拓展, 深入至压力波的产生与传播机理[5]、隧道出口微压波的预测与控制[6]、列车气动阻力[7] [8]等多个方面。近年来, 针对特定复杂环境的气动问题研究逐渐增多。例如, 高海拔环境因空气稀薄, 会改变压力波的传播特性, 对波幅产生削弱效应; 大坡度线路则因显著的高程变化, 会形成沿隧道纵向的静压梯度, 从而影响压力波动形态。此外, 隧道群内列车连续通过时压力波的叠加与干扰机制也受到关注[9]。然而, 现有研究多侧重于单一影响因素或理想化隧道模型的分析, 对于实际工程中普遍存在的、由“高海拔、大坡度、特长隧道”多重极端条件深度耦合构成的复杂场景, 相关研究尚不充分, 尤其是针对车内压力动态响应的系统性探索仍有欠缺。

为此, 本文以典型的艰险山区铁路环境为背景, 聚焦于“高海拔、大坡度、特长隧道”耦合作用下的车内压力问题, 旨在深入揭示其动态响应特性与机理。本研究基于一维可压缩非定常流动理论, 并结合车辆动态密封性能的时间常数(τ)模型, 构建了车内压力波动的分析。通过对一列时速 160 公里的动车组, 往返通过 48 座具有不同长度、坡度及海拔的隧道工况进行全参数数值模拟, 系统分析了车辆密封等级($\tau = 20$ s)下车内最大正压、最大负压及压力峰峰值的变化规律。重点定量剖析了隧道长度、线路坡度、海拔差异等关键参数对车内压力波动的影响, 明确了易诱发极端压力值的风险隧道结构组合。本研究结果有望为艰险山区铁路的列车气密性设计、隧道断面及缓冲结构的空气动力学优化, 以及运营舒适性评估, 提供理论依据与数据支撑。

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[2]。

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 ρ 分别为空气压力、流速(相对地面)和密度; θ 为隧道入口端与水平地面夹角; κ 为空气比热比; α 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; ξ 为空气与列车车壁的摩擦功; g 为重力加速度; t 为时间。

2.2. 车内压力计算模型

时间常数法是用于评估列车气密性能的重要方法之一, 在车辆静态气密性能试验测试中, 静态气密指数 τ_{stat} 数值上等于车内外压差由初始值减少到初始值 37% 所用的时间。动态气密指数 τ_{dyn} 表示的是真实情形下车-隧系统对列车气密性的要求, 动态气密指数的定义式表示如下[10]:

$$\tau = \frac{|\Delta p|}{dp_{in}/dt} \tag{4}$$

其中: $\Delta p(t)$ 指的是在 t 时刻时的车内外压差, $\Delta p(t) = p_{ext}(t) - p_{int}(t)$;

$p_{ext}(t)$ 指的是在 t 时刻时列车外部受到的压力;

$p_{int}(t)$ 指的是在 t 时刻时列车内部受到的压力。

采用时间常数模型计算车内压力时, 上述定义假设车辆采用了压力截止阀保护装置, 略去车辆进排风口的影响。将气密指数定义式变换为表述列车内外压力的波动关系式, 同时进行积分后得到最后的式子:

$$p_{int}(t_2) = p_{int}(t_1)e^{-(t_2-t_1)/\tau_{dyn}} + \frac{p_{ext}(t_2) - p_{ext}(t_1)}{t_2 - t_1} \left(t_2 - t_1 - \tau_{dyn} \left(1 - e^{-(t_2-t_1)/\tau_{dyn}} \right) \right) + p_{ext}(t_1) \left(1 - e^{-(t_2-t_1)/\tau_{dyn}} \right) \tag{5}$$

2.3. 方法验证

借助文献[2]里的西成高铁试验数据, 来检验本文中模拟车内压力所使用的方法以及对应的源代码程序是否正确。图 1 给出了文献[2]的车内压力与本报告一维程序计算得到的车内压力变化曲线对比。

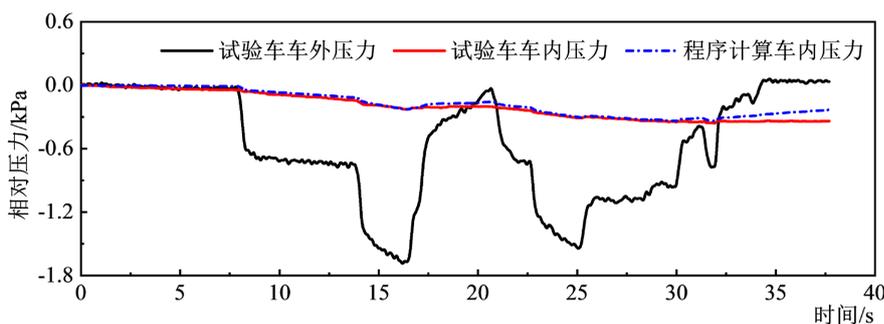


Figure 1. Comparison results of the internal pressure time history curves
图 1. 车内压力时间历程曲线对比结果

2.4. 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的车内压力, 列车速度为 160 km/h, 隧道净空面积 42 m²。

3. 计算结果分析

3.1. 最大正压值

图 2 表示时间常数为 20 s 下, 列车通过单线典型隧道时不同车厢内最大正压值的变化特征。由图可知:

1) 单列车通过隧道时, 隧道坡度增大导致大气压力减小, 从而使得车外和车内最大正压值降低。从整体上看, 在时间常数为 20 s 下, 列车通过单线典型隧道时各车厢车内最大正压值分布相对均匀。

2) 各隧道车内最大正压值的差异主要体现在数值大小方面。特长隧道在车辆密封下各车厢正压值保持稳定。这种差异主要由隧道长度、坡度特征与车辆密封共同决定。

3) 在时间常数为 20 s 下, 列车通过单线典型隧道时, 车内最大正压值出现在 42 号隧道第 1 节车厢, 该隧道长度约 12 km, 最大正压值达 2.861 kPa。

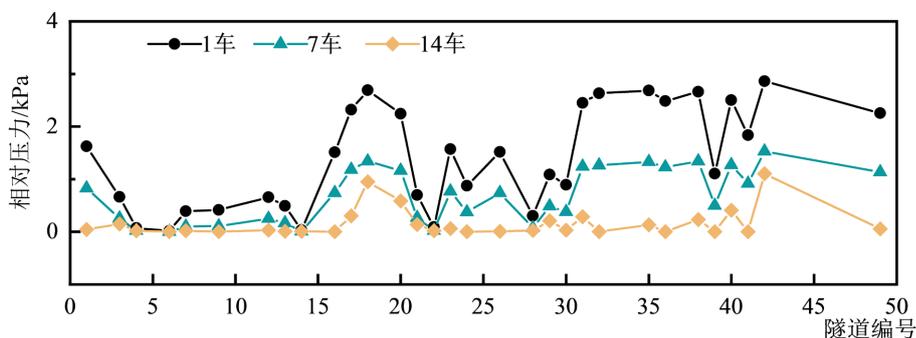


Figure 2. Peak positive interior pressure per carriage ($\tau = 20$ s) during train passage through a typical single-track tunnel

图 2. 时间常数为 20 s 下, 列车通过单线典型隧道时不同车厢内压力的最大正值

3.2. 最大负压值

图 3 表示时间常数为 20 s 下, 列车通过单线典型隧道时不同车厢内最大负压值的变化特征。由图可知:

1) 从整体趋势分析, 随着时间常数的增大, 列车通过单线典型隧道时车内最大负压值呈现下降规律。
2) 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, 导致列车通过隧道的整个过程中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, 相应车内外压力呈上升趋势; 车内压力的波动趋势与车外一致, 隧道坡度增大导致大气压力减小, 从而使得车外和车内最大负压值增大。列车通过单线典型隧道时各车厢内压力最大负压值都随时间常数的增大而减小, 即时间常数越小, 最大负压值越大; 时间常数越大, 最大负压值越小, 沿着车尾方向, 不同车厢内最大负压值依次增加, 均在尾车取得较大的负压值。

3) 时间常数为 20 s 下, 列车通过单线典型隧道时, 最大负压出现在 32 号隧道第 14 节车厢, 该隧道长度约 18 km, 为人字坡, 最大负压值 -4.202 kPa。

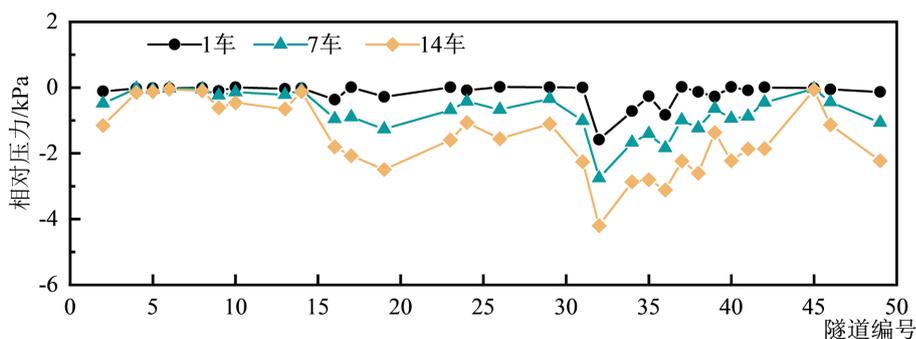


Figure 3. Peak negative interior pressure per carriage ($\tau = 20$ s) during train passage through a typical single-track tunnel

图 3. 时间常数为 20 s 下, 列车通过单线典型隧道时不同车厢内压力的最大负压值

3.3. 最大压力峰峰值

图 4 表示时间常数为 20 s 下, 列车通过单线典型隧道时不同车厢内最大压力峰峰值的变化特征。由图可知:

1) 单列车通过隧道时, 隧道坡度增大导致大气压力减小, 从而使得车外和车内最大压力峰峰值增大。

列车通过单线典型隧道时, 车内最大压力峰峰值呈现从车头至车尾逐渐增大的分布规律, 这一趋势与车外压力变化保持一致。但由于车辆密封, 车内压力峰峰值较车外压力减小, 且随着时间常数的增大, 车内压力波动会进一步下降。

2) 各隧道车内最大压力峰峰值的差异特征与车外压力相似, 但数值减小。特长隧道和大坡度隧道仍然表现出较高的压力峰峰值, 而较短隧道和坡度较缓的隧道数值相对较低。

3) 时间常数为 20 s 下, 列车通过单线典型隧道时, 最大压力峰峰值出现在 32 号隧道第 14 节车厢, 该隧道长度约 18 km, 最大压力峰峰值达 4.204 kPa。

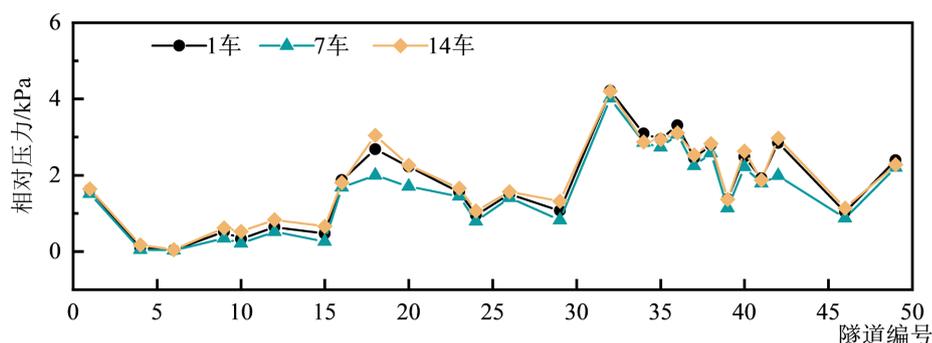


Figure 4. Peak-to-peak interior pressure in each carriage ($\tau = 20$ s) during train passage through a typical single-track tunnel

图 4. 时间常数为 20 s 下, 列车通过单线典型隧道时不同车厢车内压力的最大压力峰峰值

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内压力计算模型, 针对山区高海拔、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 速度通过拉林段典型隧道的运行场景, 系统研究了车内压力的动态变化特性, 得出以下主要结论:

1) 车内压力波动沿车厢纵向呈规律性分布。最大正压极值通常出现在头车, 而最大负压与压力峰峰值则沿列车行进方向自头车至尾车递增, 在尾车达到最大。

2) “坡型 - 长度”组合效应: “大坡度 + 超长隧道”的组合最容易出现最大的车内压力峰峰值与尾部极端负压值。

3) 高海拔环境对压力峰值产生削弱效应。计算结果表明, 随着海拔升高、空气密度降低, 车外压力的作用呈现减弱趋势。

参考文献

- [1] 朱文浩. 高速列车气密性指标及车内压力舒适性数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [2] 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.
- [3] 骆建军. 高海拔地区高速铁路隧道空气动力学特性[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(4): 607-614.
- [4] 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)
- [5] 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>
- [6] Ozawa, S. (1979) Studies of Micro-Pressure Wave Radiated from a Tunnel Exit. Japanese National Railways.

- [7] 邓虹, 万有财, 梅元贵. 高原高铁特长和超长隧道单列车通过时空气阻力变化规律研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(7): 1491-1501.
- [8] 宋军浩, 郭迪龙, 杨国伟, 等. 高速列车隧道通过中的气动效应模型实验研究[J]. 实验流体力学, 2017, 31(5): 39-45.
- [9] 杜权, 杜迎春, 杨瑞, 等. 大坡道长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] Johnson (1999) Cost-Effectiveness of Pressure-Sealed Coaches. ERRI, 1-7.