

高海拔隧道对动车组车内压力变化影响研究

陶林¹ 张杰² 王晓红¹ 孙传铭¹ 王宗昌^{1,2} 孙继星^{3*}

1 中车青岛四方机车车辆股份有限公司·技术中心

2 兰州交通大学甘肃省轨道交通力学应用工程实验室

3 北京交通大学

DOI:10.32629/etd.v7i6.21031

[摘要] 针对川藏铁路雅林段高海拔大坡度特长隧道,为研究动车组车内压力变化特性并明确乘员耳感舒适性主控因素,本文采用一维可压缩非定常流动特征线法与车内连续换气模型建立车内外压力耦合计算方法,对单列车通过和中央等速交会工况(隧道长度10~50km、坡度10‰~30‰)进行模拟,并以1s、3s、10s、60s最大压力变化量及全程平均压力变化率 Δp_{ave} 作为评价指标。结果表明:车内压力整体变化主要受沿程大气压降低控制,中央等速交会引起的局部扰动对压力峰峰值的影响不足1%;全部工况下短时压力指标均未超出铁路限值,冗余充足;但在10km短隧道和30‰大坡度工况下, Δp_{ave} 超过民航舱压变化率参考限值(16Pa/s),表明持续大气压变化是高原大坡度隧道乘员耳感不适的主要来源。因此,高原大坡度隧道车内压力舒适性评价应将 Δp_{ave} 等长时间尺度指标纳入体系,并据此优化压力控制策略,为川藏铁路动车组车内环境设计提供参考。

[关键词] 川藏铁路雅林段;车内外压力变化;高海拔大坡度线路;特长隧道

中图分类号: U45 **文献标识码:** A

Research on the Impact of High-Altitude Tunnels on the Pressure Changes Inside EMU Cars

Lin Tao¹ Jie Zhang² Xiaohong Wang¹ Chuanming Sun¹ Zongchang Wang^{1,2} Jixing Sun^{3*}

1 Qingdao Sifang Railway Machinery Co., Ltd.

2 Gansu Railway Traffic Mechanics Application Engineering Laboratory of Lanzhou Jiaotong University

3 Beijing Jiaotong University

[Abstract] For the high-altitude and long-gradient special tunnels in the Yali section of the Sichuan-Tibet Railway, in order to study the pressure change characteristics inside EMU cars and clarify the main controlling factors of the occupants' auditory comfort, this paper uses the one-dimensional compressible unsteady flow characteristic line method and the continuous ventilation model inside the car to establish a coupling calculation method for the pressure inside and outside the car. The simulation is carried out for single train passage and central constant-speed meeting conditions (tunnel length 10–50 km, slope 10‰–30‰), and the maximum pressure change within 1s, 3s, 10s, and 60s and the average pressure change rate Δp_{ave} over the entire journey are used as evaluation indicators. The results show that the overall pressure change inside the car is mainly controlled by the decrease of the surrounding atmospheric pressure, and the local disturbance caused by the central constant-speed meeting has an impact of less than 1% on the pressure peak-to-peak value; under all working conditions, the short-term pressure indicators do not exceed the railway limit values, and the redundancy is sufficient; however, in the 10 km short tunnel and 30‰ large slope working conditions, Δp_{ave} exceeds the reference limit value of the pressure change rate in civil aviation cabins (16 Pa/s), indicating that the continuous change of atmospheric pressure is the main source of ear discomfort for occupants in high-altitude and large-gradient tunnels. Therefore, the evaluation of pressure comfort inside the car in high-altitude and large-gradient tunnels should include Δp_{ave} and other long-term scale indicators in the system, and based on this, optimize the pressure control strategy, providing a reference for the interior environment design of EMU cars on the Sichuan-Tibet Railway.

[Key words] Yali Section of the Sichuan-Tibet Railway; Pressure Changes Inside and Outside the Car; High-Altitude and Long-Gradient Lines; Long-Term Tunnel

引言

川藏铁路雅林段穿越青藏高原东南缘,隧道比例高、海拔高、坡度大,部分隧道轨面高程超过3000 m,最大坡度接近30%^[1]。列车运行中,车外压力受隧道头尾波及反射引起的瞬变扰动,并随线路高程持续变化,经车体气密和通风系统传入车内,影响乘员耳压舒适性^[2];压力变化过剧时,可致耳闷、耳鸣甚至气压损伤^[2]。为此,国内外通常采用1 s、3 s、10 s、60 s等短时窗最大压力变化量作为舒适性指标^[3-4]。然而,对于高海拔大坡度隧道,车内压力还叠加了沿程大气压缓慢升降的影响,其特点类似民航起降阶段舱压变化,仅靠铁路瞬变压力限值可能难以全面评估耳感风险。

针对该问题,Palmero等^[5]指出隧道高程变化会改变车内外压力演化并影响耳部舒适性;王志钧等^[6]基于实车数据分析了变海拔大坡度隧道的压力舒适性;骆建军^[10]与万有财等^[7]通过数值计算探讨了海拔、坡度和隧道长度对压力波特性的影响。既有研究为高原隧道压力舒适性提供了基础,但对“隧道压力波—沿程大气压变化—车内连续换气”耦合机制的系统分析仍较缺乏,现行限值在高原变海拔线路中的适用性也待明确。

鉴于此,本文以川藏铁路雅林段高原大坡度特长隧道为对象,结合动车组主动压力保护方案^[8],建立车外一维非定常流动与车内连续换气耦合的计算模型,设置单列车通过和中央等速交会两种工况,研究隧道长度(10~50 km)、坡度(10‰~30‰)及高静压风机对车内压力响应的影响。评价方面,除常规的 Δp_{1s} 、 Δp_{3s} 、 Δp_{10s} 、 Δp_{60s} 外,引入全程平均压力变化率 Δp_{ave} ,并参考民航舱压变化率限值^[9]进行综合评价,以揭示高原大坡度隧道乘员耳感不适的主控因素,为川藏铁路动车组车内压力控制策略优化提供依据。

1 研究方法

1.1 车外—车内压力耦合计算模型

列车通过高海拔、大坡度隧道时,车外压力变化主要由隧道压力波传播、列车运动诱导气流扰动以及沿程海拔变化共同决定。对于长大隧道,线路纵向尺度远大于断面水力直径,隧道同一横断面上的压力分布可近似认为均匀。因此,本文将隧道内气体运动等效为一维可压缩非定常非等熵流动,计算中考虑壁面摩擦、换热和隧道坡度作用,并采用黎曼变量特征线法求解车外压力变化,具体控制方程及求解过程见文献^[9]。

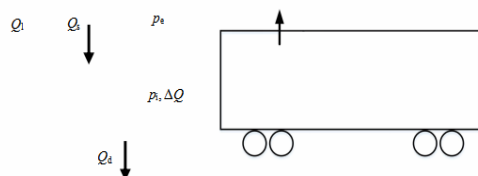


图1 车内压力计算模型

车内压力计算时,将新风机流量、排风机流量以及车体等效泄漏面积产生的泄漏流量共同纳入质量交换过程。单节车厢可简化为图1所示模型,其中 p_e 为车外压力, p_i 为车内压力, Q_n 为新风机流量, Q_s 为排风机流量, Q_l 为车体泄漏流量。车内外压力差决定泄漏流量方向,并进一步影响车内压力变化。

$$p_e - p_i \begin{cases} > 0 \Rightarrow \Delta Q = Q_s - Q_d + Q_l \\ = 0 \Rightarrow \Delta Q = Q_s - Q_d \\ < 0 \Rightarrow \Delta Q = Q_s - Q_d - Q_l \end{cases} \quad (1)$$

车体泄漏流量按孔口流动模型计算:

$$Q_l = \alpha_l S \sqrt{2|\Delta p| \rho(t)} \quad (2)$$

式中, α_l 为孔口流量系数, S 为车体等效泄漏面积, ρ 为空气密度。考虑高海拔条件下空气密度变化对风机性能的影响,风机静压按空气密度进行修正;在风机转速不变时,不同海拔位置的风机静压近似满足:

$$\frac{P_{s1}}{P_{s2}} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (3)$$

将车外压力、风机静压特性、系统阻力和泄漏流量关系联立求解,即可获得高静压风机连续换气条件下的车内压力响应。

1.2 计算工况与主要参数

本文设置单列车通过和中央等速交会两类运行工况,列车速度取200km/h,并选取不同隧道长度、坡度和风机参数开展对比计算。主要计算参数见表1。

1.3 车内压力舒适性评价指标

《中国民用飞机环境控制系统通用要求》(HB7489-2014)^[9]规定了我国民用飞机舱内压力舒适性相关的压力变化限值,其范围为16~27Pa/s。由于飞机起降阶段舱内压力一般近似呈线性升降,本文将该限值转化为平均压力变化率指标,并结合大坡度隧道中车内压力的演化特点,按式(4)计算:

$$\Delta p_{ave} = \frac{\Delta p_{max}}{\Delta t} \quad (4)$$

式中, Δp_{ave} 为列车完成隧道通过过程对应的车内平均压力变化率; Δp_{max} 表示车内压力最大峰峰值,可由车内压力时程直接统计,并与式(4)中 Δp_{ave} 、 Δt 的折算结果相互对应; Δt 表示列车通过隧道的总时间。

结合铁路领域UIC复合型舒适性标准和民航舱内平均压力变化率限值,本文将车内1s、3s、10s、60s最大压力变化量以及全程平均压力变化率共同作为压力舒适性评价参数,分别记为 Δp_i ($i=1s、3s、10s、60s$)和 Δp_{ave} 。各指标对应限值取 $\Delta p_{1s}=500\text{Pa}$ 、 $\Delta p_{3s}=800\text{Pa}$ 、 $\Delta p_{10s}=1000\text{Pa}$ 、 $\Delta p_{60s}=2000\text{Pa}$ 、 Δp_{ave}

表 1 主要计算参数		
类别	参数	取值
隧道参数	净空面积/m ²	单线 52.9/双线 81.2
	净空面周长/m	单线 27.3/双线 31.9
	长度/km	10、20、30、40、50
	进口端局部阻力系数	0.5
	壁面沿程摩擦系数	0.005
	坡度/%	10、15、20、25、30
	入口海拔/km	1、2、3、4
列车参数	横截面积/m ²	11.9
	横截面周长/m	12.8
	编组数	8
	速度/(km/h)	200
	车长/m	200
	车头压力损失系数	单线 0.0198/双线 0.0084
	车尾压力损失系数	单线 0.0848/双线 0.0296
风机 1	工作静压、风量、阻力系数	4151.2Pa, 30.5m ³ /min, 4.57
风机 2	工作静压、风量、阻力系数	2386.0Pa, 30.5m ³ /min, 2.02

ave=16Pa/s。进一步地, 本文以标准限值与计算结果之差占标准限值的比例定义舒适性冗余量 r , 其计算公式如下:

$$r = \frac{\Delta p_{lim} - \Delta p_{cal}}{\Delta p_{lim}} \times 100\% \quad (5)$$

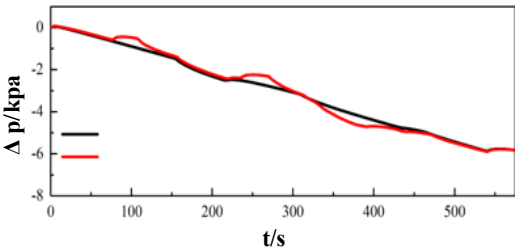
式中, Δp_{lim} 为限值, Δp_{cal} 为计算值。当 $r>0$ 时满足限值, $r\leq 0$ 时存在超限风险。

2 结果和分析

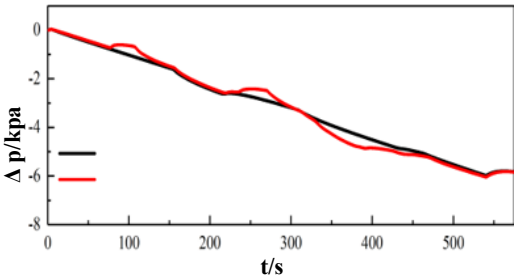
2.1 单列车通过与交会工况压力响应对比

为明确列车交会对车内压力舒适性的影响, 首先选取典型高海拔、大坡度隧道工况进行对比分析。计算条件为: 隧道入口海拔2000m, 隧道长度30km, 坡度20%, 列车速度200km/h, 列车沿上坡方向运行, 两种工况均按双线隧道考虑。

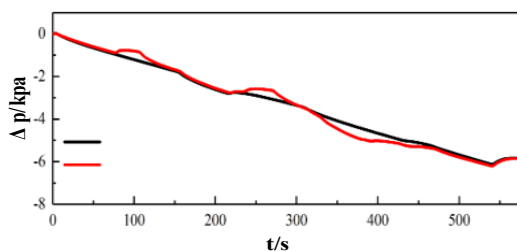
图2给出了风机2条件下单列车通过与中央等速交会时各车厢车内压力变化过程。可以看出, 两类工况下车内压力整体均随运行时间呈下降趋势, 说明在大坡度上坡隧道中, 沿程海拔升高引起的环境大气压降低是车内压力全过程变化的主要来源。交会工况下, 车内压力在列车相遇前后出现更明显的局部扰动, 但扰动主要集中在短时间范围内, 并未改变车内压力随海拔变化整体下降的趋势。



(a) 车头



(b) 中间车



(c) 尾车

图2 单列车通过与中央等速交会工况下车内压力变化对比

从幅值上看, 交会工况对车内压力峰峰值的影响较小。与单列车通过相比, 中央等速交会时头车、中间车和尾车车内压力峰峰值仅分别增加0.06%、0.95%和0.26%。这表明, 在本文所研究的高海拔、大坡度长隧道条件下, 列车交会虽然会增强局部瞬时压力扰动, 但并不是决定车内压力舒适性风险的主控因素。后续分析因此重点关注隧道长度和坡度对车内压力连续变化及关键舒适性指标的影响。

2.2 隧道长度对车内压力舒适性的影响

在隧道入口海拔2000m、坡度20‰、列车速度200km/h条件下, 进一步分析隧道长度由10km增至50km时车内压力舒适性指标的变化。考虑到 $\Delta p1s$ 、 $\Delta p3s$ 等短时间窗口指标相对限值冗余量较大, 而 Δp_{ave} 和 $\Delta p60s$ 更接近舒适性约束, 图3重点给出了 Δp_{ave} 和 $\Delta p60s$ 随隧道长度变化的规律。

— 风机1头车 — 风机2头车 — 风机1中间车
— 风机2中间车 — 风机1尾车 — 风机2尾车

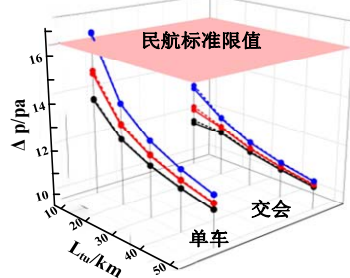
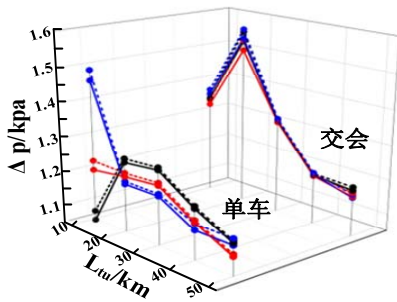
(a) Δp_{ave} 随隧道长度变化(b) $\Delta p60s$ 随隧道长度变化

图3 车内压力关键舒适性指标随隧道长度变化规律

由图3可知, 单列车通过工况下, 随着隧道长度由10km增加至50km, 头车、中间车和尾车的 Δp_{ave} 整体呈下降趋势。需要指出的是, Δp_{ave} 降低并不意味着车内压力全过程变化量同步减小。在坡度一定时, 隧道长度增加会增大列车通过过程中的总高差, 车内压力峰峰值仍可能维持在较高水平; 但由于列车通过时间随隧道长度近似线性增加, 单位时间内的平均压力变化率反而降低。根据车内压力时程统计, 长隧道工况下车内压力全过程峰峰值可达到10kPa量级, 说明沿程海拔变化引起的持续压力变化已成为高原大坡度隧道中不可忽略的压力舒适性来源。因此, 短隧道工况下虽然全过程压力峰峰值未必最大, 但由于通过时间较短, 车内平均压力变化率更容易接近限值。计算结果显示, 隧道长度为10km时, 两种风机条件下尾车 Δp_{ave} 均超出民航舱压变化率参考限值, 超出幅度约为1.6%; 头车和中间车虽然未超限, 但冗余量也仅约为15%和7%, 表明短隧道仍存在较高耳感不适风险。

与 Δp_{ave} 相比, $\Delta p60s$ 随隧道长度变化表现出一定非单调特征。单列车通过工况下, 头车和中间车 $\Delta p60s$ 在10~20km范围内有所增大, 随后随隧道长度继续增加而逐渐降低; 交会工况下, $\Delta p60s$ 也存在先增大后减小的趋势。其原因在于, $\Delta p60s$ 反映的是任意连续60s内车内压力的最大变化量, 不同隧道长度会改变该评价窗口覆盖的压力变化区段。当60s窗口覆盖的区段包含更剧烈的压力下降过程时, $\Delta p60s$ 可能出现局部增大。因此, 长度变化对车内压力舒适性的影响并非简单单调关系。

— 风机1头车 — 风机2头车 — 风机1中间车
— 风机2中间车 — 风机1尾车 — 风机2尾车

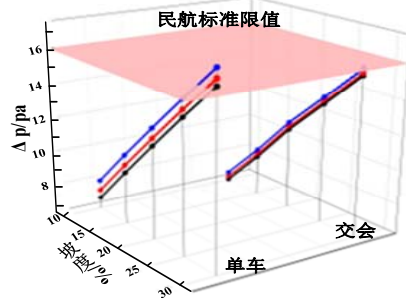
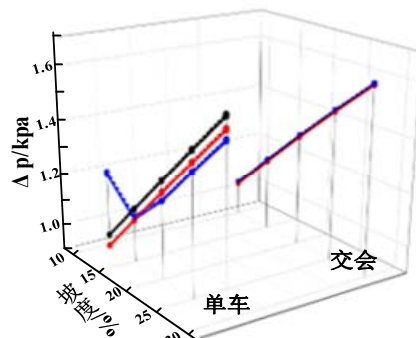
(a) Δp_{ave} 随坡度变化(b) $\Delta p60s$ 随坡度变化

图4 车内压力关键舒适性指标随隧道坡度变化规律

表 2 关键舒适性指标限值校核结果概述

指标	限值	计算结果特征	舒适性控制作用
Δp_{1s}	500Pa	各工况均未超限, 冗余量较大	非控制指标
Δp_{3s}	800Pa	各工况均未超限, 冗余量较大	非控制指标
Δp_{10s}	1000Pa	各工况均未超限, 部分工况冗余量下降	辅助指标
Δp_{60s}	2000Pa	未超限, 但冗余量较小	次主控指标
Δp_{ave}	16Pa/s	短隧道、大坡度工况下接近或超过参考限值	主控指标

不同隧道长度下, Δp_{1s} 、 Δp_{3s} 、 Δp_{10s} 和 Δp_{60s} 均未超出铁路限值, 但舒适性冗余随评价时间窗增大而明显降低, 其中 Δp_{60s} 虽未超限但已接近约束; Δp_{ave} 在10km短隧道工况下则超过民航舱压变化率参考限值。可见, Δp_{ave} 和 Δp_{60s} 能更敏感地反映隧道长度对车内压力舒适性的控制特征。两种风机方案的计算结果差异平均约2.5%, 对结论影响不大。综合而言, 短隧道工况的乘员耳感舒适性风险更为突出, 主要控制指标为 Δp_{ave} , 其次为 Δp_{60s} 。

2.3 隧道坡度对车内压力舒适性的影响

在隧道入口海拔2000m、隧道长度30km、列车速度200km/h条件下, 进一步考察坡度由10%增至30%时车内压力舒适性指标的变化。隧道长度一定时, 坡度增大会直接增大列车通过隧道过程中的高程变化量, 从而增强沿程大气压变化对车内压力的持续作用。图4给出了 Δp_{ave} 和 Δp_{60s} 随坡度变化的规律。

由图4可知, 单列车通过工况下, 头车、中间车和尾车的 Δp_{ave} 随隧道坡度增大呈近似线性增大趋势。当坡度由10%增至30%时, 各车厢 Δp_{ave} 增幅约为55%; 头车和中间车 Δp_{60s} 也随坡度增大而明显上升, 增幅约为41%。当坡度达到30%时, 头车、中间车和尾车 Δp_{ave} 均超过本文引入的民航舱压变化率参考限值, 超出幅度约为1.4%~7.4%。这说明在固定隧道长度条件下, 坡度增大带来的持续大气压变化会显著削弱车内压力舒适性。

中央等速交会工况下, Δp_{ave} 和 Δp_{60s} 同样随坡度增大而升高。当坡度由10%增至30%时, 头车、中间车和尾车 Δp_{ave} 增幅约为60%, Δp_{60s} 增幅约为36%; 坡度30%时, Δp_{ave} 最接近舒适性限值, 最小冗余量仅约为0.6%。虽然交会工况下局部压力波动更明显, 但其主要影响仍体现在短时间范围内, 整体舒适性风险仍由沿程海拔变化引起的持续压力变化控制。

其中, 部分短时间窗口指标随坡度变化并非完全单调。例如, 单列车通过工况下, 中间车和尾车的 Δp_{1s} 、 Δp_{3s} 、 Δp_{10s} 可能表现为先减小后增大或逐渐减小, 这主要与压力波传播、反射叠加及评价时间窗口位置变化有关。但从限值校核结果看, 各坡度工况下 Δp_{1s} 、 Δp_{3s} 和 Δp_{10s} 均未超过对应限值, 且 Δp_{1s} 、 Δp_{3s} 相对限值的冗余量整体处于较高水平, 明显大于 Δp_{60s} 和 Δp_{ave} 。因此, 短时压力波动虽会影响局部曲线形态, 但并未成为

本文工况下的主要限制因素。两种风机条件下车内压力变化差异仍较小, 单列车通过工况中两风机舒适性参数平均相差约2.5%, 中央等速交会工况中平均相差约2.4%。

综合隧道长度和坡度两类参数分析可知, 高海拔、大坡度隧道中的车内压力舒适性问题主要受连续大气压变化控制。隧道越短, 列车通过时间越短, 平均压力变化率越大; 坡度越大, 沿程高差越大, 车内压力持续变化越强。因此, Δp_{ave} 和 Δp_{60s} 较短时间窗口指标更能反映高原变海拔线路中的耳感舒适性风险。相比之下, 列车交会和两种高静压风机参数差异对最终舒适性评价结果的影响较小。

3 结论

本文以川藏铁路雅林段高海拔、大坡度隧道为对象, 建立车外压力与车内压力耦合计算模型, 分析了单列车通过、中央等速交会以及不同隧道长度、坡度条件下动车组车内压力舒适性变化规律, 得到如下结论。

(1) 高海拔大坡度隧道中, 车内压力变化受隧道压力波和沿程海拔变化的共同控制; 上坡运行时车内压力整体呈下降趋势, 峰峰值可达10 kPa量级。中央等速交会引起的瞬时扰动对压力峰峰值的贡献不足1%, 并非舒适性风险的主控因素。

(2) 各工况下 Δp_{1s} 、 Δp_{3s} 、 Δp_{10s} 和 Δp_{60s} 均未超出铁路瞬变压力限值, 但舒适性冗余随评价时间窗口增大而明显降低; Δp_{ave} 在10 km短隧道和30%大坡度工况下超出民航舱压变化率参考限值(16 Pa/s), 能更敏感地反映持续大气压变化引起的耳感不适, 应作为高原大坡度隧道压力舒适性评价的关键指标。

(3) 隧道越短(通过时间缩短)或坡度越大(沿程高差增加), 车内平均压力变化率越大, 乘员耳感不适风险越高。既有高静压风机可有效控制短时压力波动, 但对沿程大气压持续变化改善有限, 后续车内压力控制策略应重点围绕 Δp_{ave} 和 Δp_{60s} 等长时间尺度指标进行优化。

[参考文献]

[1]赵勇,石少帅,田四明,等.川藏铁路雅安至林芝段隧道建造面临的主要工程技术难题与对策建议[J].隧道建设(中英文),2021,41(07):1079-1090.
[2]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.

[3]UICCODE779-11.Determinationofrailway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations[S].2nd edition,February,2005.

[4]梅元贵.高速铁路隧道空气动力学[M].北京:科学出版社,2009.

[5]Palmero N M,Vardy A.Tunnel gradients and aural health criterion for train passengers[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part F:Journal of Rail and Rapid Transit,2014,228(7):821-832.

[6]王志钧,梅元贵.高速列车压力舒适性环境特征的实车试验研究[J].空气动力学学报,2021,39(05):170-180.

[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(01):167-176.

[8]陶林,王志钧,王宗昌,等.高原动车组主动压力保护技术分析研究[J].铁道车辆,2023,61(03):132-138.

[9]中华人民共和国工业和信息化部.中华人民共和国航空行业标准:民用飞机环境控制系统通用要求HB7489-2014[S].北京:中国航空综合技术研究所,2014.

[10]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(04):607-614.

作者简介:

陶林(1979—),女,山东省青岛市莱西市人,工学硕士,正高级工程师,主要从事高速动车组整车集成设计方面的研究。