

DOI: 10.3901/JME.2022.16.309

川藏铁路隧道长度对动车组通过隧道压力波的影响*

张 亮¹ 田洪雷¹ 杜 健¹ 焦京海¹ 王延庆¹ 梅元贵²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司技术中心 青岛 266111;

2. 兰州交通大学甘肃省轨道交通力学应用工程实验室 兰州 730070)

摘要: 为研究川藏铁路隧道长度对动车组通过隧道时压力波的影响,采用一维可压缩非定常不等熵流动模型和广义黎曼变量特征线法,对列车在上坡或下坡隧道内运行时车外压力波进行数值计算,得到列车通过不同长度隧道时头尾车压力波特性。详细分析隧道长度对列车通过隧道时头尾车压力波峰值的影响规律。结果表明,列车上坡通过隧道时,隧道长度超过 1 km 后头车最大正压值基本保持不变,隧道长度对尾车最大正压值影响较小;头尾车最大负压幅值和最大压力峰峰值随隧道长度增加而增大,且隧道长度超过 4 km 后呈线性增大趋势;列车下坡通过隧道时,头尾车最大正压值和最大压力峰峰值基本随隧道长度的增加而增大,且隧道长度超过 4 km 后呈线性增大趋势;头尾车最大负压幅值随隧道长度增加先增大后减小,隧道长度超过 20 km 后,头尾车最大负压值基本保持不变。研究结果可为川藏铁路动车组气密性及乘客压力舒适度设计提供参考。

关键词: 隧道长度; 动车组; 压力波; 一维流动模型; 上/下坡

中图分类号: U451

Influence of Sichuan-Tibet Railway Tunnel Length on Pressure Wave of EMU Train Passing through Tunnels

ZHANG Liang¹ TIAN Honglei¹ DU Jian¹ JIAO Jinghai¹ WANG Yanqing¹ MEI Yuanguai²

(1. Research and Development Center, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd, Qingdao 266111;

2. Gansu Province Engineering Laboratory of Rail Transit Mechanics Application,

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070)

Abstract: To study the influence of the Sichuan-Tibet railway tunnel length on the pressure wave of the EMU train passing through tunnels, the one-dimensional compressible unsteady non-homentropic flow model and the method of characteristics of generalized Riemann variables are used to numerically calculate the external pressure wave of the train travelling in the uphill or downhill tunnel. The pressure wave characteristics of the head coach and the tail coach of the train passing through tunnels with different lengths are obtained. The influence law of the tunnel length on the peak values of the pressure wave of the train passing through tunnels is analyzed in detail. Results show that for the train travelling in the uphill tunnel, the maximum positive pressure of the head coach basically keeps unchanged when the tunnel length exceeds 1 km. The tunnel length has less effect on the maximum positive pressure of the tail coach. The maximum negative pressure amplitudes and the maximum peak-to-peak pressures of the head coach and the tail coach increase with the tunnel length, and the increase tends to be linear when the tunnel length exceeds 4 km. For the train travelling in the downhill tunnel, the maximum positive pressures and the maximum peak-to-peak pressures of the head coach and the tail coach basically increase with the tunnel length, and the increase tends to be linear when the tunnel length exceeds 4 km. The maximum negative pressure

* 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划“高原铁路长大隧道列车空气阻力预测方法和变化规律研究”(N2021T011)和中国中车股份有限公司科技研究开发计划“川藏铁路动车组关键技术研究”(2020CDB195)资助项目。20210825 收到初稿, 20220620 收到修改稿

amplitudes of the head coach and the tail coach firstly increase and then decrease with the tunnel length. When the tunnel length exceeds 20 km, the maximum negative pressures of the head coach and the tail coach basically keep unchanged. The results can provide a reference for the design of the airtightness and the passenger pressure comfort of the Sichuan-Tibet railway EMU train.

Key words: tunnel length; EMU train; pressure wave; one-dimensional flow model; uphill and downhill

0 前言

川藏铁路东起四川省成都市,向西终到西藏自治区拉萨,线路依次经过四川盆地、川西高山峡谷区、川西高山原区、藏东南横断山区、藏南谷地区 5 个地貌单元。川藏铁路线路山高谷深,穿七江跨八山,沿线桥隧众多,雅安至林芝段共有隧道 72 座,隧道长度占线路长度的 84.43%,且长大隧道较多,长度 15 km 以上隧道 23 座,最长的易贡隧道长约 42 km^[1]。川藏铁路长大紧坡段占比较大,最大限制坡度 30‰^[2]。列车在长大坡度隧道中运行时,海拔高度随之发生变化,而海拔高度的变化对隧道内列车的气动效应有重要影响^[3-4]。线路坡度相同的情况下,隧道长度会导致隧道进出口海拔高度差异,因此,研究隧道长度对列车通过长大坡度隧道气动性能的影响具有重要意义。

国内外学者对隧道内列车空气动力学效应研究主要集中在平直隧道^[5-7]。王一伟等^[8]对不同长度隧道内列车交会气动性能进行仿真计算,验证了仿真得到的最不利隧道长度与理论分析结果一致。何德华等^[9]对高速列车通过不同长度的隧道压力波实车试验数据进行分析,发现列车车外压力波峰峰值总体呈随隧道长度的增加而增加然后趋于稳定的趋势。CHU 等^[10]采用三维数值模拟方法对列车在不同长度隧道内交会时的气动性能进行仿真计算,发现隧道长度对列车气动阻力最大值、车体表面压力波最大值和最小值的影响较大,对列车侧向力最大值的影响较小。LIU 等^[11]对高速列车通过不同长度隧道时的车内压力变化进行了实车试验研究,结果表明车内最大压力峰峰值随隧道长度的增加而单调增大。FU 等^[12]对列车经过不同长度双线隧道时引起的隧道内列车风进行数值计算,结果表明隧道长度对列车风最大值的影响较小。贾永兴等^[13]采用一维流动模型和特征线方法对列车通过不同长度隧道时的空气阻力进行了研究,发现列车平均空气阻力随隧道长度增大而增大,且其增大趋势逐渐变缓。梅元贵等^[14]对列车通过隧道时的车内外压力波进行数值模拟,得到了隧道长度对车内压力变化最大值的影响规律。

张志超等^[15]对高速磁浮列车单车通过隧道时的车外压力波进行数值模拟,初步揭示了隧道长度对车外压力的影响规律。

综上,以上文献对不同长度隧道中运行的列车空气动力学效应研究大多集中在平直隧道,未考虑隧道坡度引起的海拔高度变化对列车空气动力学性能的影响。本文基于一维可压缩非定常不等熵流动理论,建立隧道内运行的列车空气动力学计算模型,采用广义黎曼变量特征线法对列车通过不同长度的大坡度隧道时的压力波进行数值计算。研究隧道长度对列车通过大坡度隧道时车外压力波的影响规律,为川藏铁路列车及隧道设计提供参考。

1 列车隧道空气动力学计算模型

1.1 隧道压力波计算模型

隧道长度一般远大于隧道断面水力直径,列车长度也远大于列车与隧道所形成环状空间横截面的当量水力直径。列车进出隧道引起的压力波动以当地声速在隧道内传播,且压力波动波及隧道横断面的时间远小于在隧道长度和列车长度方向上的传播时间。因此,列车通过隧道所引起的三维流动可简化为一维可压缩非定常流动^[13-14]。

本文采用一维可压缩非定常不等熵流动模型计算列车通过隧道时的车外空气压力波动,其中描述流动的控制方程如下^[16]。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{u}{F} \frac{dF}{dx} = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - c^2 \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} \right) = (\kappa - 1) \rho (q - \zeta + uG) \quad (3)$$

式(1)~(3)中, ρ 为空气密度; t 为时间; u 为隧道内空气流速; F 为空气流道横截面面积; x 为空间坐标,

其坐标原点位于隧道入口端,坐标轴沿隧道中轴线,正方向与列车运行方向相同; p 为隧道内空气压力; G 为空气与壁面的摩擦项; θ 为隧道长度方向的倾斜度; c 为空气声速; κ 为空气比热比; q 为空气与壁面的传热项; ξ 为空气与列车车壁的摩擦功。

式(1)~(3)为一阶拟线性偏微分方程,本文采用广义黎曼变量特征线法求解,将方程组转化成无量纲广义黎曼变量 λ 、 β 和衡量空气质点熵量 A_a 表示的无量纲形式的特征方程,按广义黎曼变量特征线方法求解特征方程^[16]。

1.2 三维数值计算模型

由于缺少实车试验数据,采用三维数值仿真数据反推得到一维流动模型所需的关键空气动力学系数(车头压力损失系数 ζ_N 、车尾压力损失系数 ζ_T 和车壁摩擦因数 f_w),其基本思想是通过地面监测点测得的典型压力增量 Δp_N 、 Δp_{fr} 和 Δp_T 计算 ζ_N 、 f_w 和 ζ_T ,其中 Δp_N 、 Δp_{fr} 和 Δp_T 分别表示由列车头部进入隧道压缩空气引起的第一次压力增加、由列车主体进入隧道的摩擦效应引起的第二次压力增加、列车尾部进入隧道引起的压力下降。关键空气动力学系数的计算公式具体参见文献[17]。参考标准 EN 14067-5,本文选取隧道内距入口 350 m 处的监测点得到典型压力增量^[18]。

列车模型采用 8 节编组,即头车+6 节中间车+尾车,保留风挡、转向架等结构。列车总长度为约 209 m,车体高度 H 为 4.05 m,车体横截面积为 11.95 m^2 。隧道采用单线无砟隧道,隧道截面积为 52 m^2 。采用 STAR-CCM+ 软件中的 Trim 网格对列车及隧道周围流场区域进行网格划分。列车表面划分边界层网格,边界层网格第一层网格厚度为 0.5 mm,层数为 10 层,增长率为 1.2,满足壁面函数要求 $30 \leq y^+ \leq 150$ 。为精确捕捉列车周围的流场结构,在列车车身、转向架、风挡周围分别设置网格加密区,其加密区体网格尺寸分别为 0.06 m、0.03 m、0.03 m。三维数值仿真采用的列车几何模型和网格模型分别如图 1 和图 2 所示。

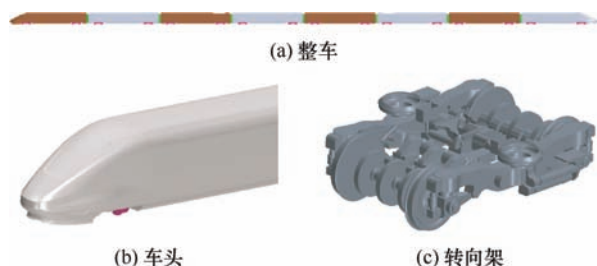


图 1 列车几何模型

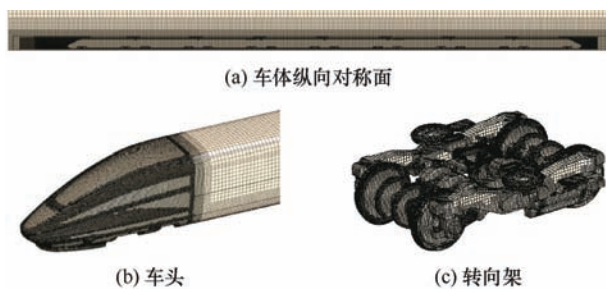


图 2 列车周围网格模型

采用重叠网格方法实现列车与隧道之间的相对运动。重叠网格方法包括一个包含整个求解区域的背景区域和包裹列车周围流场的重叠区域。重叠网格方法中,将网格单元分类为活动单元、非活动单元、插值单元。活动单元是离散方程组求解用的网格单元,非活动单元则不参与求解任何方程组,但这类非活动单元将会随着重叠区域的移动,而可能重新被归类为活动单元。插值单元分离背景区域里的活动单元和非活动单元,并被用来耦合两个重叠在一起的网格的求解计算。图 3 给出了背景区域和重叠区域的插值单元示意图。图 3 中两个用空心“O”表示的网格单元所在的虚线网格即为插值单元。背景网格(或重叠网格)中贡献单元的变量值通过插值方法传递到重叠网格(或背景网格)的插值单元上,贡献单元定义为最接近插值单元的活动单元,贡献单元和插值单元分别归属于背景网格(或重叠网格)和重叠网格(或背景网格)。列车运行过程中,随着列车周围重叠区域的移动,STAR-CCM+ 软件使用挖洞程序决定耦合求解时每个相关单元的状态,判断为活动单元或非活动单元。

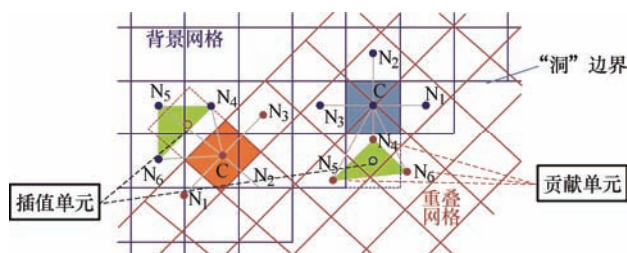


图 3 重叠网格方法插值单元示意图

列车通过隧道流场的计算区域和边界条件如图 4 所示,其中列车表面、隧道壁面、地面均采用无滑移壁面边界,计算区域顶面、两侧面和前后面均为自由流边界,车身周围重叠区域为重叠网格边界。本文计算的列车运行速度为 200 km/h,通过三维非定常可压缩的 N-S 方程对列车通过隧道时的流场进行数值计算,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型,流动控制方程采用 SIMPLE 算法求解。非定常计算的时间步长为 0.005 s,略小于文献[19]中采用的时间步长。

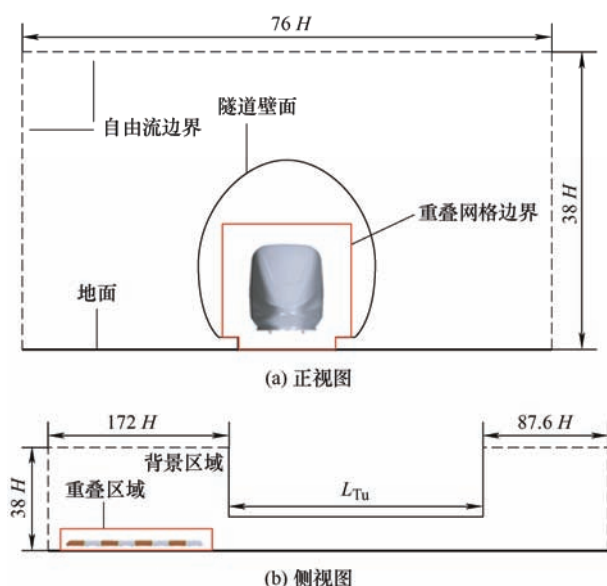


图4 计算区域和边界条件

1.3 大气参数计算

列车在上下坡隧道内运行时,海拔高度随之发生变化,大气参数也随之变化。本文参考航空航天学科中对流层($0 < h < 11 \text{ km}$)的大气温度、压力、密度和海拔高度之间的理论计算公式得到不同海拔高度下的大气参数,分别表示如下^[20]

$$T_h = T_0 - \alpha h \quad (4)$$

$$p_h = p_0 \left(1 - \frac{h}{44\,330} \right)^{\frac{g}{\alpha R}} \quad (5)$$

$$\rho_h = \rho_0 \left(1 - \frac{h}{44\,330} \right)^{\frac{g}{\alpha R} - 1} \quad (6)$$

式中, T_h 表示高度 h 处的大气温度; p_h 表示高度 h 处的空气压力(Pa); ρ_h 表示高度 h 处的空气密度(kg/m^3); h 表示海拔高度(m); g 表示重力加速度, $g=9.81 \text{ m/s}^2$; α 表示年平均温度直减率, $\alpha=0.0065 \text{ }^\circ\text{C/m}$; R 表示气体常数, $R=287 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$; 海平面处的大气温度 $T_0=15 \text{ }^\circ\text{C}$ (288.15 K), 空气压力 $p_0=101\,325 \text{ Pa}$, 空气密度 $\rho_0=1.225 \text{ kg/m}^3$ 。

2 计算方法验证

2.1 三维数值计算方法验证

采用国内某车型实车试验数据进行三维数值计算方法的验证,数值验证采用的列车模型和编组长度、列车速度、隧道断面和长度与实车试验相同。数值验证采用的计算方法和网格划分方案与第1.2节中相同,列车运行速度为 250 km/h ,隧道为 565 m 长的双线隧道,隧道净空面积为 100 m^2 。图5中给

出数值计算得的头车车体中部监测点压力时程曲线与实车试验数据对比。由图5中可知:数值计算结果与实车试验数据吻合较好,数值计算得到的压力波最大值、最小值和峰峰值与实车试验数据相差10%以内,满足工程精度要求,说明本文采用的三维数值计算方法具有较好的可靠性。

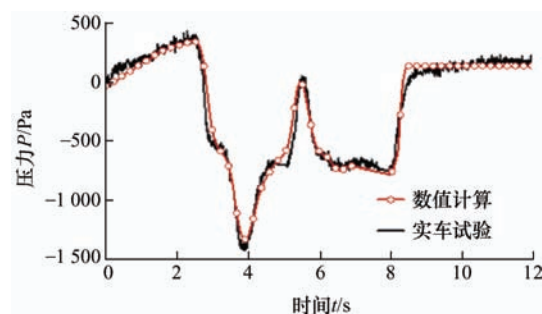


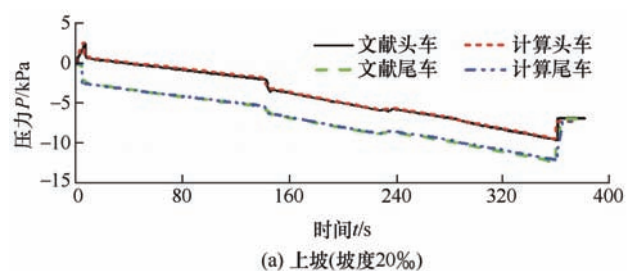
图5 数值计算与实车试验得到的头车监测点压力对比

2.2 一维流动模型方法验证

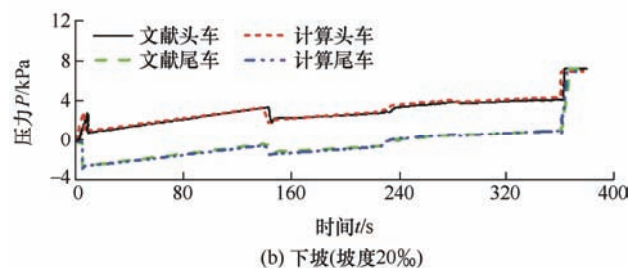
本文通过与国外文献中数值模拟结果进行对比以验证一维流动模型程序的准确性。文献[21]中给出的隧道及列车参数如表1所示,将隧道及列车参数输入到一维流动模型中进行数值计算,得到单列车上坡和下坡通过隧道过程中头尾车车外压力变化,与文献[21]中结果进行对比如图6所示。由图6可

表1 数值验证采用的隧道及列车参数

参数	隧道	列车
长度/m	30 000	400
横截面积/ m^2	50	12
速度/(km/h)	—	300
坡度(‰)	20	—
摩擦因数	0.003	—



(a) 上坡(坡度20‰)



(b) 下坡(坡度20‰)

图6 上下坡通过隧道时车外压力计算结果与文献结果对比

知: 本文一维流动模型车外压力波计算结果与文献计算值吻合较好。由于文献中未能完全给出一维流动模型计算所需的空气动力学参数, 这可能是本文计算结果相比文献结果产生差异的原因。由此可见, 本文采用的一维流动模型计算具有较高的精度。

3 计算结果分析

首先采用三维数值计算方法反推得到一维流动模型计算所需的关键空气动力学参数, 然后采用一维流动模型对列车通过不同长度的大坡度隧道时的车外空气压力波进行数值计算, 得到隧道长度对列车通过隧道车外压力波的影响。根据文献[22], 隧道按其长度可分为: 长度 500 m 及以下的短隧道, 长度 500 m 以上至 3 000 m 的中长隧道, 长度 3 000 m 以上至 10 000 m 的长隧道, 长度 10 000 m 以上的特长隧道。本文计算采用的隧道长度为 0.5~50 km, 其中 1~4 km 以 1 km 为间隔, 4~10 km 以 2 km 为间隔, 10~50 km 以 10 km 为间隔, 共 12 种隧道长度。计算中考虑 0 km、2 km、4 km 共三种海拔高度, 线路坡度都为 30‰, 考虑上坡和下坡两种坡型。

3.1 关键空气动力学系数确定

采用验证通过后的三维数值计算方法对列车通过隧道时的压力波进行仿真计算, 得到隧道内监测点的压力变化, 然后反推得到一维流动模型计算所需的关键空气动力学系数如表 2 所示。

表 2 关键空气动力学系数

关键空气动力学系数	数值
车头压力损失系数	0.019 8
车壁摩擦因数	0.006 0
车尾压力损失系数	0.084 8

3.2 上下坡运行的影响分析

分析列车平直道、上坡、下坡通过不同海拔高度下不同长度的长大隧道时的头尾车车外压力波时程曲线, 发现头尾车车外压力波变化趋势基本相同。以列车通过海拔高度 2 km、长度 20 km 的隧道为例, 图 7 中给出了列车平直道和上下坡通过隧道时的头尾车车外压力时程曲线, 压力基准值取隧道入口处的当地大气压。由图 7 可知: 列车上坡通过隧道时头尾车车外压力整体呈下降趋势, 列车下坡通

过隧道时头尾车车外压力整体呈上升趋势。由式(5)可知大气压随海拔高度的上升而减小, 随海拔高度的下降而增大。列车在带有坡度的隧道中上坡或下坡运行时, 海拔高度连续变化, 导致列车所处海拔高度处大气压的连续变化, 同时叠加列车在隧道内运行引起的压缩波和膨胀波在隧道内的来回传播效应, 从而导致列车上坡通过隧道时车外压力基本呈下降趋势, 列车下坡通过隧道时车外压力基本呈上升趋势, 只是在与压缩波或膨胀波相遇时出现小幅波动。

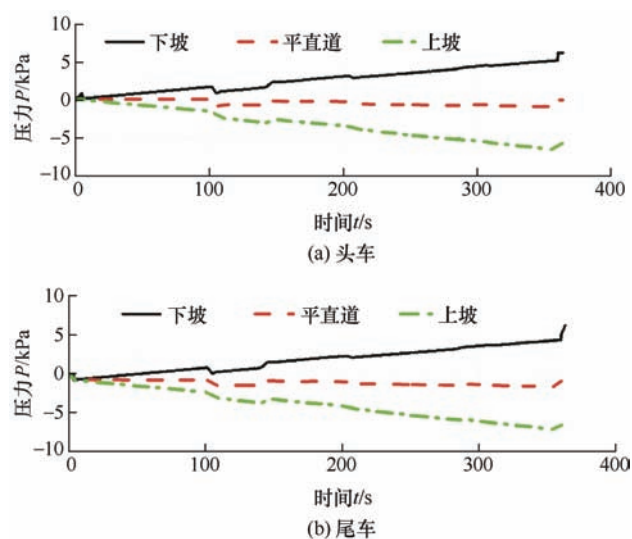


图 7 列车通过隧道时的头尾车压力时程曲线

图 8 中给出了头车压力变化与马赫波传播对应关系图。列车头车进入隧道产生压缩波, 尾车进入隧道产生膨胀波, 压缩波到达隧道出入口返回产生膨胀波, 膨胀波到达隧道出入口返回产生压缩波, 压缩波和膨胀波以声速在隧道内来回传播。图 8 中黑色实线表示头车所处位置, 黑色双点划线表示尾车所处位置, 红色实线表示压缩波, 蓝色虚线表示膨胀波。当列车遇到压缩波时压力上升, 如图 8 中编号③、④、⑦、⑧、⑪时刻; 当列车遇到膨胀波时压力下降, 如图 8 中编号①、②、⑤、⑥、⑨、⑩时刻。压缩波和膨胀波在隧道内传播过程中与列车、隧道壁面、地面摩擦以及在隧道出入口时的能量释放, 导致压缩波和膨胀波的能量逐渐减小, 因此, 在列车进入隧道后期的⑧、⑨、⑩、⑪时刻引起的压力波动不明显。列车驶出隧道后车外压力恢复到隧道出口处大气压水平, 列车上坡和下坡驶出隧道后隧道出口海拔高度较隧道入口相差较大, 这是列车上坡和下坡驶出隧道时车外压力相差较大的原因。

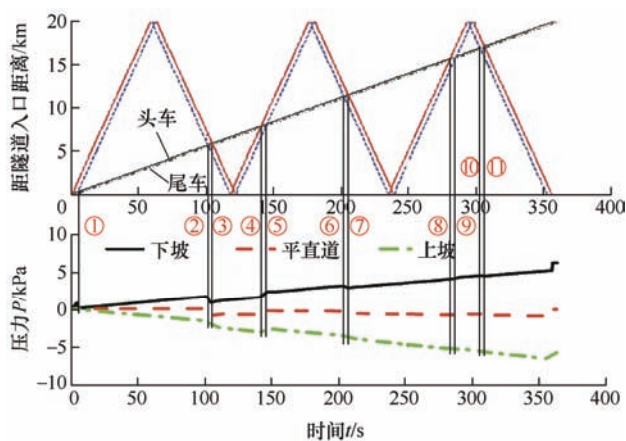


图8 头车压力变化与马赫波传播对应关系图

3.3 上坡运行时压力波结果分析

图9~11分别为海拔高度0 km、2 km、4 km时列车上坡通过不同长度隧道时头尾车车外压力最大值随隧道长度的变化规律。压力基准值取隧道入口处的当地大气压。由图9~11可知,列车上坡通过不同长度隧道时,隧道长度超过1 km后头车最大正压值基本保持不变,隧道长度对尾车最大正压值影响较小;随着隧道长度的增加,头尾车最大负压幅值和最大压力峰峰值随之增大,且隧道长度超过4 km后,头尾车最大负压幅值和最大压力峰峰值随隧道长度增加呈线性增大趋势。

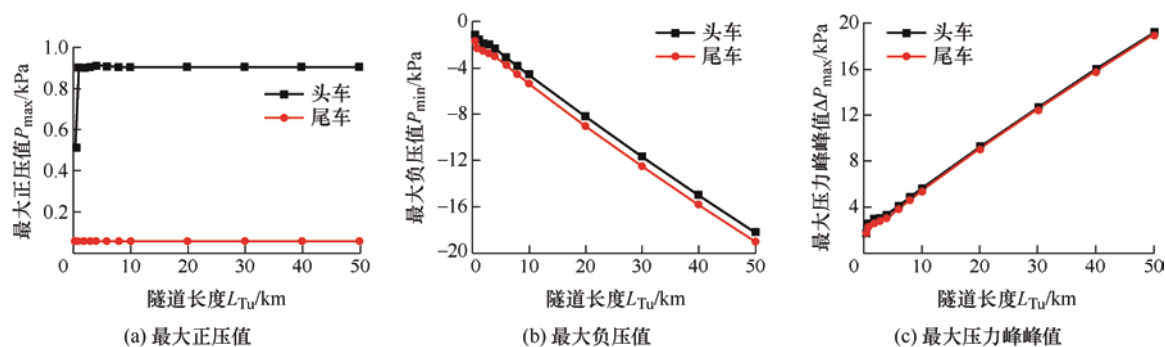


图9 海拔0 km上坡时隧道长度对头尾车车外压力值影响规律

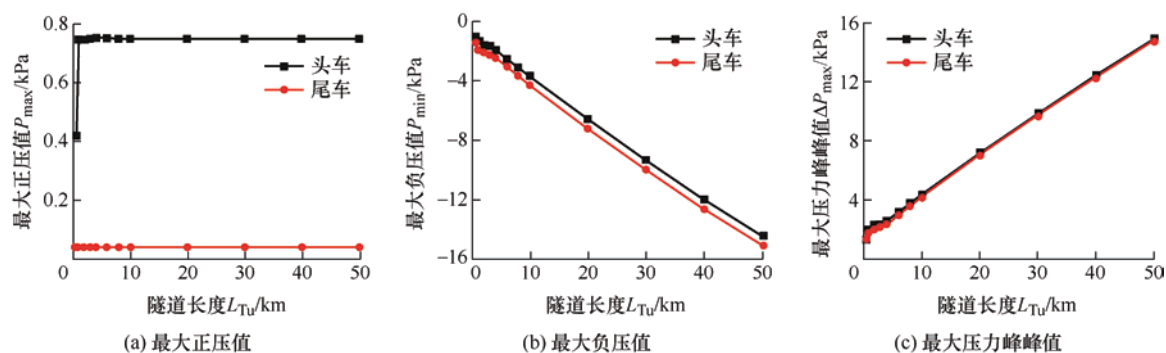


图10 海拔2 km上坡时隧道长度对头尾车车外压力值影响规律

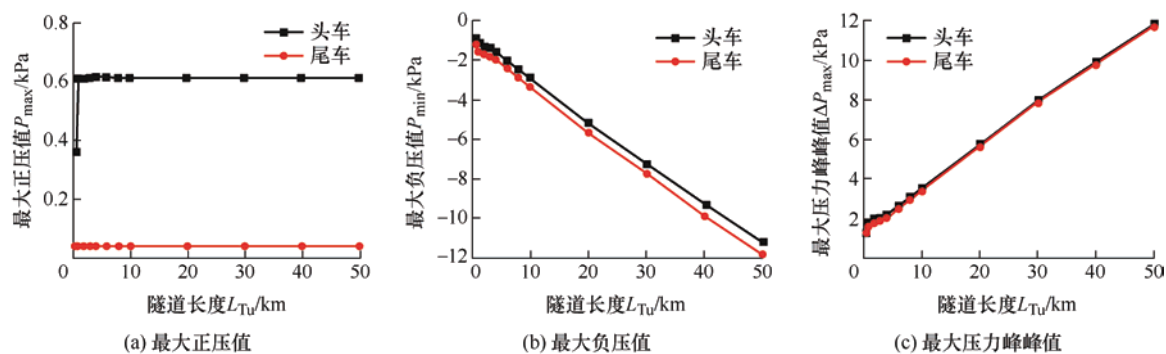


图11 海拔4 km上坡时隧道长度对头尾车车外压力值影响规律

由图7可以看出:列车上坡通过隧道时,头尾车最大正压值分别出现在头尾车驶入隧道时,

最大负压值分别出现在头尾车驶出隧道时。隧道长度对车头和车尾驶入隧道时的空气压缩和膨

胀效应影响较小，因此，隧道长度对头尾车最大正压值影响较小。线路坡度固定时，隧道长度增加，隧道进出口的海拔高差增大，导致隧道出口处的大气压相应降低，因此，头尾车最大负压幅值和最大压力峰峰值都随隧道长度增加呈增大趋势。

表 3 中给出了隧道长度超过 4 km 时列车上坡通

过隧道头尾车车外压力最大负压值 P_{\min} (单位 kPa) 和最大压力峰峰值 ΔP_{\max} (单位 kPa) 与隧道长度 L_{Tu} (单位 km) 之间的拟合关系式。 R^2 为拟合公式回归平方和占总误差平方和的比例，反映拟合精度，其取值范围在 [0,1]， R^2 越趋近于 1，说明拟合公式与离散点的误差越小。表 3 中 R^2 均在 0.99 以上，说明了拟合公式的合理性。

表 3 上坡通过隧道头尾车压力最值与隧道长度的拟合关系式(隧道长度 L_{Tu} : 4~50 km)

海拔/km	监测位置	最大负压值拟合关系式	R^2	最大压力峰峰值拟合关系式	R^2
0	头车	$P_{\min} = -1.182 - 0.346L_{Tu}$	0.999 3	$\Delta P_{\max} = 2.088 + 0.346L_{Tu}$	0.999 3
	尾车	$P_{\min} = -1.868 - 0.347L_{Tu}$	0.998 9	$\Delta P_{\max} = 1.929 + 0.347L_{Tu}$	0.998 9
2	头车	$P_{\min} = -0.977 - 0.273L_{Tu}$	0.999 2	$\Delta P_{\max} = 1.726 + 0.273L_{Tu}$	0.999 2
	尾车	$P_{\min} = -1.554 - 0.275L_{Tu}$	0.998 8	$\Delta P_{\max} = 1.602 + 0.275L_{Tu}$	0.998 8
4	头车	$P_{\min} = -0.789 - 0.212L_{Tu}$	0.999 2	$\Delta P_{\max} = 1.406 + 0.212L_{Tu}$	0.999 2
	尾车	$P_{\min} = -1.296 - 0.213L_{Tu}$	0.998 9	$\Delta P_{\max} = -1.333 + 0.213L_{Tu}$	0.998 9

3.4 下坡运行时压力波结果分析

图 12~14 分别为海拔高度 0 km、2 km、4 km 时列车下坡通过不同长度隧道时头尾车车外压力最值随隧道长度的变化规律。压力基准值取隧道入口处的当地大气压。由图 12~14 可知，列车下坡通过不同长度的隧道时，头尾车车外最大正压值和最大压力峰峰值基本随隧道长度的增加而增大，且隧道

长度超过 4 km 后，头尾车最大正压值和最大压力峰峰值随隧道长度增加呈线性增大趋势；隧道长度超过 4 km 后，头尾车最大正压值相同，都在头尾车驶出隧道口时取得；头尾车最大负压幅值随隧道长度增加呈先增大后减小的趋势，基本都在隧道长度 2 km 时取得最大负压幅值；隧道长度超过 20 km 后，头尾车最大负压值保持不变，头车车外压力全程为正压。

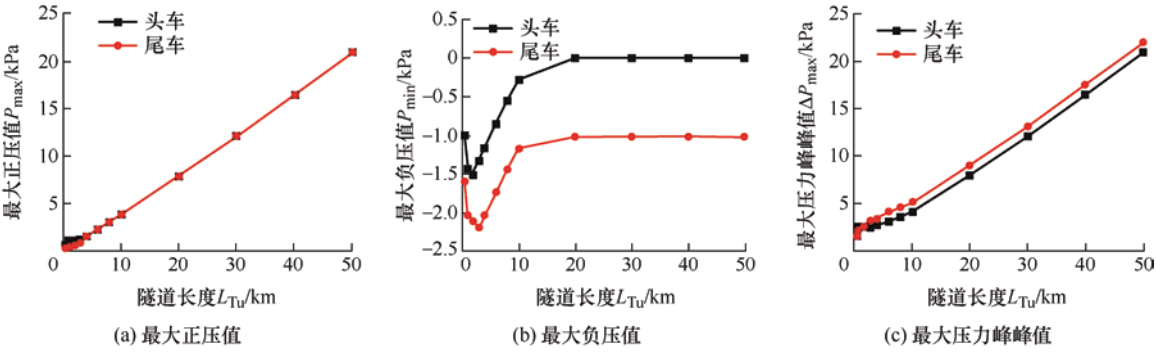


图 12 海拔 0 km 下坡时隧道长度对头尾车车外压力最值的影响规律

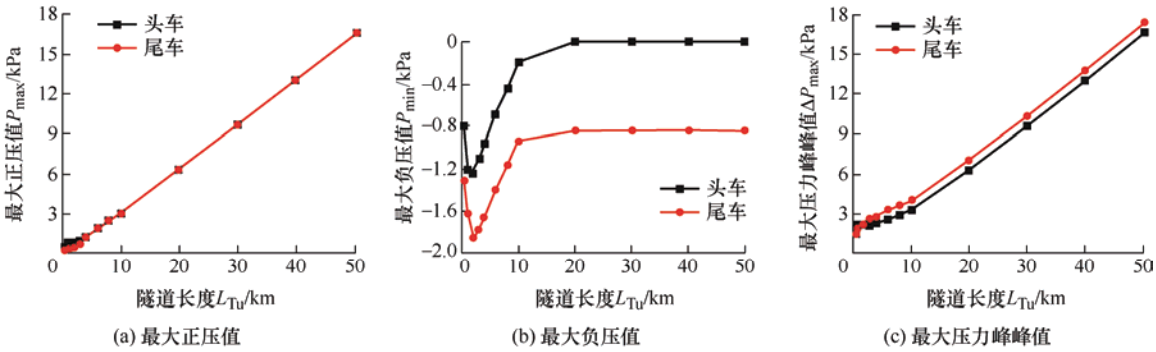


图 13 海拔 2 km 下坡时隧道长度对头尾车车外压力最值的影响规律

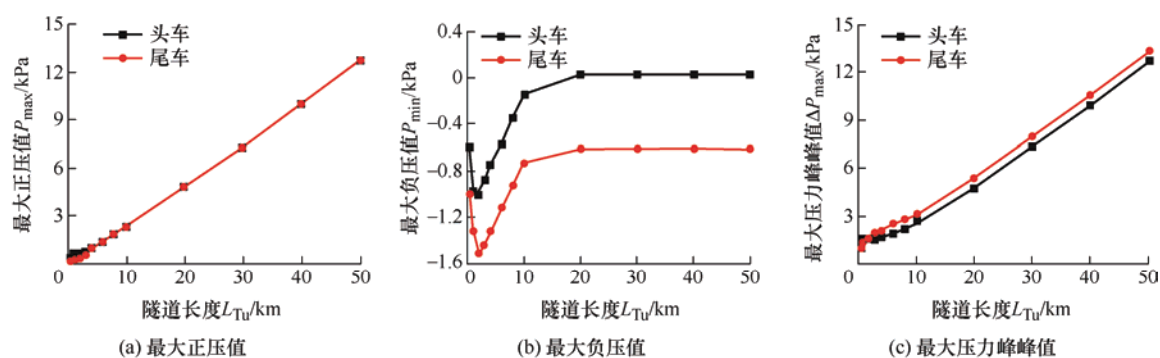


图 14 海拔 4 km 下坡时隧道长度对头尾车车外压力最大值影响规律

列车下坡通过隧道时,头尾车最大负压值主要受头车压缩波返回膨胀波、尾车膨胀波、头车压缩波二次返回压缩波、尾车膨胀波返回压缩波及海拔高度引起的大气压力变化的影响。在 500 m 短隧道内,头车压缩波二次返回压缩波传至头车时间早于尾车膨胀波传至头车时间,因此,头车压缩波返回膨胀波和尾车膨胀波无法在头车处叠加,头车最大负压值由头车压缩波返回膨胀波引起,而尾车最大负压值由尾车膨胀波引起。在 1 000~3 000 m 的中长隧道内,头车压缩波二次返回压缩波传至头尾车时间晚于头车压缩波返回膨胀波传至头尾车时间,头尾车最大负压值都主要由头车压缩波返回膨胀波和尾车膨胀波叠加引起,因此,中长隧道内的头尾车最大负压幅值大于短隧道内的头尾车最大负压幅值。在 4 000~10 000 m 的长隧道内,头尾车最大负压值由头车压缩波返回膨胀波、尾车膨胀波、海拔降低导致的大气压上升共同引起,都出现在尾车膨胀波返回压缩波传到头尾车时,由海拔降低引起的大气压上升小于头车压缩波返回

膨胀波引起的压力下降,且随隧道长度增加,海拔降低引起的大气压上升增加,导致头尾车最大负压幅值减小。在超过 10 000 m 的特长隧道内,尾车膨胀波返回压缩波传到头尾车时,由海拔降低引起的大气压上升大于头车压缩波返回膨胀波引起的压力下降,头尾车最大负压值主要由尾车膨胀波引起,因此,随着隧道长度增大,头尾车最大负压值基本保持不变。头尾车最大正压值都出现在头尾车驶出隧道时,随着隧道长度增加,隧道出口处的海拔降低,隧道出口处的大气压相应升高,因此,头尾车最大正压值随隧道长度增加呈增大趋势。由于头尾车最大正压值要远大于头尾车最大负压幅值,所以头尾车最大压力峰峰值也随隧道长度增加呈增大趋势。

表 4 中给出了隧道长度超过 4 km 时列车下坡通过隧道头尾车车外压力最大正压值 P_{\max} (单位: kPa) 和最大压力峰峰值 ΔP_{\max} (单位: kPa) 与隧道长度 L_{Tu} (单位: km) 之间的拟合关系式。表 4 中 R^2 均在 0.99 以上,说明了拟合公式的合理性。

表 4 下坡通过隧道头尾车压力最值与隧道长度的拟合关系式(隧道长度 L_{Tu} : 4~50 km)

海拔/km	监测位置	最大正压值拟合关系式	R^2	最大压力峰峰值拟合关系式	R^2
0	头车	$P_{\max} = -0.295 + 0.420L_{Tu}$	0.999 4	$\Delta P_{\max} = 0.485 + 0.399L_{Tu}$	0.995 6
	尾车	$P_{\max} = -0.295 - 0.420L_{Tu}$	0.999 4	$\Delta P_{\max} = 1.369 + 0.403L_{Tu}$	0.996 2
2	头车	$P_{\max} = -0.232 + 0.330L_{Tu}$	0.999 4	$\Delta P_{\max} = 0.402 + 0.314L_{Tu}$	0.995 3
	尾车	$P_{\max} = -0.232 + 0.330L_{Tu}$	0.999 4	$\Delta P_{\max} = 1.111 + 0.317L_{Tu}$	0.996 0
4	头车	$P_{\max} = -0.179 + 0.255L_{Tu}$	0.999 4	$\Delta P_{\max} = 0.329 + 0.241L_{Tu}$	0.994 7
	尾车	$P_{\max} = -0.179 + 0.255L_{Tu}$	0.999 4	$\Delta P_{\max} = -0.891 + 0.243L_{Tu}$	0.995 4

4 结论

(1) 列车上坡通过隧道时头尾车车外压力整体呈下降趋势,列车下坡通过隧道时头尾车车外压力整体呈上升趋势。

(2) 列车上坡通过不同长度隧道时,隧道长度超过 1 km 后头车最大正压值基本保持不变,隧道长度对尾车最大正压值影响较小;头尾车最大负压幅值和最大压力峰峰值随隧道长度增加而增大,且隧道长度超过 4 km 后呈线性增大趋势。

(3) 列车下坡通过不同长度隧道时,头尾车最

大正压值和最大压力峰峰值随隧道长度的增加而增大,且隧道长度超过4 km后呈线性增大趋势;头尾车最大负压幅值随隧道长度增加呈先增大后减小的趋势,且隧道长度超过20 km后,头尾车最大负压值基本保持不变。

参 考 文 献

- [1] LU C F, CAI C X. Challenges and countermeasures for construction safety during the Sichuan-Tibet railway project[J]. *Engineering*, 2019, 5(5): 833-838.
- [2] 李伟, 毕强, 林世金. 川藏铁路雅安至林芝段最大坡度分析[J]. *高速铁路技术*, 2020, 11(3): 97-100.
LI Wei, BI Qiang, LIN Shijin. Analysis on the maximum slope of Ya'an-Linzhi section in Sichuan-Tibet railway[J]. *High Speed Railway Technology*, 2020, 11(3): 97-100.
- [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.
LUO Jianjun. Aerodynamic effect induced by high-speed train entering into tunnel in high altitude area[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(4): 607-614.
- [4] 杜云超, 陶伟明, 潘朋, 等. 高寒高海拔隧道进出口海拔差下列车内外压力计算方法及应用[J]. *隧道建设*, 2020, 40(8): 1192-1196.
DU Yunchao, TAO Weiming, PAN Peng, et al. Calculation method and application of internal and external pressure of train in tunnel with elevation difference at entrance and exit in cold and high-altitude area[J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(8): 1192-1196.
- [5] WANG H L, LEI B, Bi H Q, et al. Wave front evolution of compression waves propagating in high speed Railway tunnels[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 431(36): 105-121.
- [6] RABANI M, FAGHIH A K. Numerical analysis of airflow around a passenger train entering the tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 45(1): 203-213.
- [7] 杨广雪, 刘志明, 刘秋泽, 等. 基于延迟脱体涡算法高速列车通过隧道时的绕流特性[J]. *中国铁道科学*, 2020, 41(3): 76-85.
YANG Guangxue, LIU Zhiming, LIU Qiuzhe, et al. Characteristics of air flow around train passing through tunnel based on delayed-detached eddy simulation algorithm[J]. *China Railway Science*, 2020, 41(3): 76-85.
- [8] 王一伟, 杨国伟, 黄晨光, 等. 隧道长度对高速列车交会压力波的影响研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2012, 42(1): 82-90.
WANG Yiwei, YANG Guowei, HUANG Chenguang, et al. Influence of tunnel length on the pressure wave generated by high-speed trains passing each other[J]. *Science China Technology Science*, 2012, 42(1): 82-90.
- [9] 何德华, 陈厚嫦, 张超. 高速列车通过隧道压力波特性试验研究[J]. *铁道机车车辆*, 2014, 34(5): 17-20.
HE Dehua, CHEN Houchang, ZHANG Chao. Test study on tunnel pressure wave for EMU[J]. *Railway Locomotive & Car*, 2014, 34(5): 17-20.
- [10] CHU C R, CHIEN S Y, WANG C Y, et al. Numerical simulation of two trains intersecting in a tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 42(3): 161-174.
- [11] LIU T H, CHEN X D, LI W H, et al. Field study on the interior pressure variations in high-speed trains passing through tunnels of different lengths[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 169(7): 54-66.
- [12] FU M, LI P, LIANG X F. Numerical analysis of the slipstream development around a high-speed train in a double-track tunnel[J]. *Plos One*, 2017, 12(3): 1-15.
- [13] 贾永兴, 景璟, 梅元贵. 单列高速列车通过隧道空气阻力数值模拟研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(4): 193-200.
JIA Yongxing, JING Jing, MEI Yuanguai. Numerical simulation on air resistance of high-speed train passing through tunnel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(4): 193-200.
- [14] 梅元贵, 马瑶, 王雷. 山区高速列车车体动态气密性阈值特征的数值模拟研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(12): 196-206.
MEI Yuanguai, MA Yao, WANG Lei. Numerical simulation study on dynamic air-tightness thresholds characteristics of high-speed train body in mountain area high speed railway[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(12): 196-206.
- [15] 张志超, 杜健, 赵汗冰, 等. 高速磁浮单线隧道车体压力载荷特征[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(1): 21-30.
ZHANG Zhichao, DU Jian, ZHAO Hanbing, et al. Pressure load characteristics of high-speed maglev single-track tunnels[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(1): 21-30.
- [16] 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.
MEI Yuanguai, ZHAO Haiheng, LIU Yingqing. The

- numerical prediction of the pressure transient generated by a high-speed train passing through a tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1995, 30(6): 667-672.
- [17] 杜云超. 高速列车通过隧道时关键空气动力学系数确定方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- DU Yunchao. Research on the method of determining the key aerodynamic coefficient of high speed train passing through tunnel[D]. Lanzhou : Lanzhou Jiaotong University, 2019.
- [18] European Committee for Standardization(CEN). Railway applications-Aerodynamics Part5: Requirements and test procedures for aerodynamics in tunnels EN 14067-5[S]. British: CEN, 2010.
- [19] NIU J Q, ZHOU D, LIANG X F, et al. Numerical simulation of the Reynolds number effect on the aerodynamic pressure in tunnels[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 173: 187-198.
- [20] 寿荣中, 何慧珊. 飞行器环境控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- SHOU Rongzhong, HE Huishan. Aircraft environment control[M]. Beijing: Beihang University Press, 2004.
- [21] 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.
- [22] 国家铁路局. TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- State Railway Administration of the People's Republic of China. TB 10003-2016 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.
-
- 作者简介: 张亮(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为高速列车空气动力学及优化设计。
E-mail: zhangliang@cqsf.com