DOI: 10.3901/JME.2020.04.193

单列高速列车通过隧道空气阻力数值模拟研究*

贾永兴 景 璟 梅元贵

(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: 应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, 研究中国标准动车组 CR400AF 单列车通过隧道时的空气阻力。详细分析高速列车通过隧道时空气阻力与列车周围空气压力、空气流速及压缩波和膨胀波传播叠加三者间的关系, 揭示高速列车通过隧道时空气阻力的变化特征。研究隧道长度、阻塞比、车速及列车长度对高速列车通过隧道(尤其长大隧道)时空气阻力的影响规律。结果表明, 研究高速列车隧道压力波时, 只需要考虑列车驶入驶出隧道诱发的压缩波和膨胀波的反射和叠加; 而在研究列车空气阻力和列车周围空气流速时还必须同时考虑压缩波和膨胀波的传播方向。单列车通过隧道的空气阻力均随隧道长度、阻塞比、车速和列车长度增大而增大。特长隧道时, 各因素按其影响程度由大到小排列依次为车速、列车长度、阻塞比和隧道长度。其中, 平均空气阻力与车速的 2 次方、与阻塞比的 0.60~0.79 次方、与隧道长度的 0.02 次方近似成正比。

关键词: 空气阻力; 高速列车; 隧道; 一维流动模型; 特征线法

中图分类号: U451; V211

Numerical Simulation on Air Resistance of High-speed Train Passing through Tunnel

JIA Yongxing JING Jing MEI Yuangui

(Gansu Province Engineering Laboratory of Rail Transit Mechanics Application,
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070)

Abstract: Using one-dimensional(1D) compressible unsteady non-homentropic flow model and the method of characteristics of generalized Riemann variables, air resistance of a CR400AF passing through a tunnel is studied. The relationship among air resistance, pressure changes and air velocity around the train, and the reflection and intersection of the compression wave and expansion wave is analyzed in detail. And the characteristics of air resistance is revealed. The effects of tunnel length, blockage ratio, train velocity and train length on air resistance of the train passing through a tunnel(especially long tunnel) were studied. Results show that only the reflection and intersection of the compression wave and expansion wave induced by the train entering or exiting the tunnel is needed in studying the pressure wave. However, the propagation directions of compression wave and expansion wave must be considered simultaneously when studying the air resistance and air velocity around the train. The air resistance increases with tunnel length, blockage ratio, train velocity and train length. According to the degree of influence on air resistance in long tunnel case, train velocity, train length, blocking ratio and tunnel length is for the descending order. The average air resistance is approximately proportional to 2 power of train velocity, 0.67-0.79 power of blocking ratio, and 0.02 power of tunnel length.

Key words: air resistance; high-speed train; railway tunnel; one-dimensional flow model; method of characteristics

0 前言

截至 2015 年底, 中国已运营和在建设计速度 300 km/h 及以上的高速铁路隧道 1 743 座, 累计长度

为 2 870 km^[1], 其中 3 km 以上长隧道总长高达 64.36%。高速列车通过隧道时, 90%的能量用于克服空气阻力^[2]。因此, 可以说高速列车空气阻力事关最高运营速度及列车牵引计算等一系列问题。虽然我国现有高速铁路均采用双线隧道型式, 但高速列车在隧道内交会概率较小^[3], 加之“一带一路”沿线国家高速铁路隧道环境各异, 研究单列车通过隧道(尤其双线长大隧道)的空气阻力仍具有现实意义。

* 中国铁路总公司科技研究开发计划课题资助项目(2016T004-F)。
20190402 收到初稿, 20191210 收到修改稿

对列车运行阻力的研究源自 20 世纪初,但多集中于列车明线运行阻力及明线运行空气阻力,对列车隧道运行空气阻力的研究相对较少。实车试验方面,可见到对新干线列车和 ICE/V^[4]通过隧道时空气阻力的实车测试研究。陶伟明^[5]结合非恒定流模型计算方法,在隧道内惰行试验“特定有限区间”采样,进而测算隧道附加空气阻力。但实车试验易受环境干扰,只限于已建成线路,且组织困难,费用高昂。缩尺模型试验方面,动模型试验常用于研究隧道压力波问题,仅见到 YANG 等^[6]给出一种确定动模型列车通过隧道时空气阻力系数的方法。三维数值模拟方面,张亮等^[7]以明线运行空气阻力为控制目标对列车头型进行了优化分析。刘加利等^[8]对真空管道内以 600~1 000 km/h 运行高速列车的空气阻力进行了研究。其他多研究高速列车在 1 km 以下隧道运行时的空气阻力^[9-11]。三维数值模拟成本大幅下降,但仍受当前计算机硬件条件限制,只能研究较短隧道时的列车空气阻力,且多用于机理分析。理论分析计算方面,20 世纪 60 年代出现恒定流理论,随后向非恒定流理论发展。恒定流模型假设列车通过隧道时列车周围压力和流速恒定不变,再计算列车通过隧道时的空气阻力^[12-14]。非恒定流模型考虑了活塞风的非恒定变化^[15-16],史宪明等^[17]还额外考虑了车头、车尾处的压差阻力变化。基于一维非定常流动模型^[18-20]及本国列车特点,已可描述列车通过隧道时空气阻力的时间历程。

综上,上述研究均针对特定车型和隧道,且目前只有一维流动模型适用于高速列车通过长大隧道时空气阻力的计算分析。中国标准动车组 CR400AF 气动外形与我国 CRH 系列车型存在较大差异,需要有针对性地开展研究。本文拟基于一维可压缩非定常不等熵流动模型^[21],耦合求解隧道压力波动、空气流速和列车空气阻力,以 CR400AF 及我国高速铁路隧道为背景分析单列高速列车通过隧道时空气阻力的影响因素。

1 隧道压力波计算模型

高速列车通过隧道会引起伴随流动分离和传热的三维、非定常、可压缩湍流流动。一般而言,隧道长度远大于隧道当量水力直径,以当地声速传播的压力波会迅速波及整个隧道横断面。而隧道压力波的一维特性也已经过实车试验验证^[22]。因此,本文将隧道内的空气流动简化为一维流动是合理的。

本文研究的隧道为不设置通风竖井等辅助坑道的等截面水平隧道;考虑空气与隧道壁面、列车表

面之间的摩擦和传热等不可逆因素的影响;假设车辆绝对密封,隧道内的空气为理想气体,则一维可压缩非定常不等熵流动模型的控制方程^[23]如下

连续性方程

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

式中, ρ 为空气密度; u 为隧道内气流速度; t 为时间; 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,正方向与列车前进方向相同。

动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G = 0 \quad (2)$$

式中, p 为空气压力; G 表示摩擦力项,详见文献^[23]。

能量方程

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

式中, κ 为空气比热比; a 为当地声速; w 为列车壁面对空气所做的功; q 为空气与壁面传热项。此外,隧道端口及列车端部边界条件可用一维准定常不等熵流动模型描述,详见文献^[23]。

用特征线法求解式(1)~(3)组成的一阶拟线性双曲型偏微分方程组时,首先将方程组转换为关于 u 、 p 和 ρ 的特征方程,再将其转换为关于广义黎曼变量 λ 、 β 和表示空气质点熵值的 A_A 的方程组后求解,最后由 λ 、 β 及 A_A 反求 u 、 p 和 ρ ^[23]。

2 高速列车隧道空气阻力计算方法

计算列车通过隧道全过程空气阻力时,将整个过程划分为列车驶入隧道、隧道内运行和列车驶出隧道三个过程。计算列车驶入和驶出隧道的空气阻力时不仅要考虑隧道内运行部分车身的空气阻力,还要考虑明线运行剩余部分车身的空气阻力。

图 1 表示列车通过隧道三个过程中计算空气阻力的流动控制体示意图,截面 1-1、2-2、3-3 和 4-4 分别位于车前隧道空间、环状空间车头附近、环状空间车尾附近和车后隧道空间。

(a) 列车驶入隧道过程

图 1 列车通过隧道全过程示意图

2.1 空气阻力计算公式

图 1 中 F_N 和 F_T 为车头和车尾对空气的作用力。列车通过隧道时空气阻力 R_{AE} 的计算公式如下。

明线运行

$$R_{AE} = \frac{1}{2} \rho V^2 (C_{DN} + C_{DT}) E_{TR} + \frac{1}{2} \rho V^2 S_{TR} f_{TRO} L_{TRO} \quad (4)$$

列车驶入隧道

$$R_{AE} = E_{AN} (p_2 + \rho_2 u_2'^2) - E_{TU} (p_1 + \rho_1 u_1'^2) + \frac{1}{2} S_{TR} \left[\rho V^2 f_{TRO} (L_{TR} - x_{TR}) + \bar{\rho} u_2'^2 f_{TR} x_{TR} \right] + \left(\frac{1}{2} \rho V^2 C_{DT} - p_A \right) E_{TR} \quad (5)$$

列车全部车身在隧道内运行

$$R_{AE} = E_{AN} (p_2 + \rho_2 u_2'^2) - E_{TU} (p_1 + \rho_1 u_1'^2) + \frac{1}{2} \bar{\rho} u_2'^2 S_{TR} f_{TR} L_{TR} + E_{TU} (p_4 + \rho_4 u_4'^2) - E_{AN} (p_3 + \rho_3 u_3'^2) \quad (6)$$

列车驶出隧道

$$R_{AE} = \left(\frac{1}{2} \rho V^2 C_{DN} + p_A \right) E_{TR} + \frac{1}{2} S_{TR} \left[\rho V^2 f_{TRO} (L_{TR} - x_{TR}) + \bar{\rho} u_2'^2 f_{TR} x_{TR} \right] + E_{TU} (p_4 + \rho_4 u_4'^2) - E_{AN} (p_3 + \rho_3 u_3'^2) \quad (7)$$

式中, C_D 为阻力系数, 下标 “N”、“T” 和 “O” 分别表示车头、车尾和明线; V 为列车速度; E 为横截面积, 下标 “TR”, “TU” 和 “AN” 分别表示列车、隧道和环形空间; S 为横截面湿周, f 为壁面摩擦系数, L 为长度。 U' 为空气相对流速, $\bar{\rho}$ 为环状

空间空气平均密度。下标 “1”, “2”, “3” 和 “4” 分别表示各截面处的流动参数; C_{DN} 、 C_{DT} 和 f_{TRO} 通过三维数值模拟得到的压力采用下式计算

$$C_{DN} = \frac{\int_{E_{TR}} p_N dA - p_A E_{TR}}{\frac{1}{2} \rho V^2 E_{TR}} \quad C_{DT} = \frac{p_A E_{TR} - \int_{E_{TR}} p_T dA}{\frac{1}{2} \rho V^2 E_{TR}} \quad (8)$$

式中, p_N 和 p_T 分别为作用于高速列车头和车尾端微元 dA 上的压力, 参数中下标 “A” 表示大气环境。

$$f_{TRO} = R_{TRO} / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S_{TR} L_{TRO} \right) \quad (9)$$

2.2 验证

一维可压缩非定常不等熵流动模型预测隧道压力波和空气流速的准确性已经过多方验证^[21, 23]。单列车通过双线隧道时的空气流动与其通过左右对称的单线隧道时有所不同。但模型试验已证明, 列车在隧道内偏心运行时, 偏心距并非影响隧道压力波及压力梯度的重要因素^[24]。

如前所述, 目前暂未见到实车试验测得的高速列车隧道运行空气阻力时间历程, 暂以文献^[25]中计算结果验证本文一维流动模型预测列车空气阻力的准确性, 如图 2 所示。由图 2 可知, 基于隧道压力波的一维流动模型可准确模拟列车以 249 km/h 通过 DENAWA 隧道时的空气阻力变化规律, 本文计算结果与文献计算结果吻合良好。统计发现, 列车通过隧道时平均空气阻力误差为 1.16%, 空气阻力的最大值和最小值误差分别为 1.57% 和 -5.27%, 满足工程要求。

图 2 一维计算方法验证

此外, 本文用于计算列车明线运行时车头、车尾端压差阻力系数和车体壁面摩擦因数时使用的三维数值模拟方法的准确性验证见文献^[26]。

3 列车隧道空气阻力时间历程特征

图 3 表示了 8 编组高速列车以 350 km/h 通过净空面积 100 m² 的 2 km 隧道时空气阻力、车头前总压和车头前流速时间历程(车头前流速时间历程采用列车参考系, 正方向与列车前进方向相同), 同时

给出了列车车头、车尾运行轨迹和波反射叠加图。车尾静压和车尾后流速变化规律与车头类似,限于篇幅,不再列出。

图 3 单列高速列车通过 2 km 隧道时空气阻力及车头前总压和气流流速变化特性

图 3a 中“N”和“T”代表车头和车尾,粗实线和粗虚线分别表示列车车头和车尾运行轨迹,细实线和细虚线分别表示压缩波和膨胀波传播轨迹。“C”和“E”分别表示压缩波和膨胀波,下标“I”和“O”分别表示列车驶入和驶出隧道端口时刻。图 3b 为区分压缩波和膨胀波对车头端和车尾端的影响,在“-”后加“N”和“T”以示区分。单列高速列车通过隧道时空气阻力时间历程变化规律可归纳如下。

(1) 车头驶入隧道瞬间,车头前空气受到挤压加速向前运动,由于隧道壁面和列车壁面限制,压力急剧升高;空气流速急剧增大,气流方向与列车运行方向相同;空气阻力急剧增大。

(2) 随着列车车身逐渐驶入隧道,车头前总压

线性缓慢增大,车前空气受挤压继续向前运动;列车受到的空气阻力继续缓慢增大。

(3) T_I 时刻,车尾驶入隧道形成的膨胀波使车尾附近形成负压区,列车空气阻力急剧增大。

(4) E_{T-N} 时刻,列车车尾驶入隧道诱发的膨胀波传至车头,使车头前方空气具有反向运动趋势,列车空气阻力急剧下降。 E_{T-N} 时刻,列车空气阻力达到最大值。

(5) E_{N-N} 时刻前,即车头再次遭遇膨胀波前,列车再未受到压缩波或膨胀波干扰,车头前压力、流速以及空气阻力维持不变。

(6) E_{N-N} 、 E_{N-T} 、 C_{T-N} 和 C_{T-T} 分别对应车头遭遇膨胀波、车尾遭遇膨胀波、车头遭遇压缩波和车尾遭遇压缩波时刻。压缩波和膨胀波与车头或车尾相遇对空气压力、流速和列车空气阻力的影响,详见表 1。表中“正向”指压缩波或膨胀波传播方向与列车运行方向相同,“气流”栏中“同”指压缩波或膨胀波使气流具有与列车同向运行趋势;“↑”表示压力、流速或阻力增大。“反向”、“反”和“↓”含义相反。

表 1 空气阻力与列车附近压力和流速变化的关系

波的传播方向	车前		空气	车后		空气
	压力	气流		压力	气流	
压缩波反向传播	↑	↓反	↑	↑	↓反	↓
压缩波同向传播	↑	↑同	↑	↑	↑同	↓
膨胀波反向传播	↓	↑同	↓	↓	↑同	↑
膨胀波同向传播	↓	↓反	↓	↓	↓反	↑

(7) N_O 时刻,列车车头驶出隧道,空气阻力反而略有上升。这可能是由于车头驶出隧道前,膨胀波 E_{T1} 使隧道出口端附近空气压力低于隧道外大气压力引起的。

(8) C_{NO-T} 时刻,车头驶出隧道诱发压缩波与车尾相遇,致使车尾附近负压力减小,列车空气阻力减小。

容易发现,仅在压缩波或膨胀波与车头端或车尾端相遇时,才引起列车空气阻力的剧烈变化。可见,高速列车通过隧道诱发的压缩波和膨胀波在隧道内的反射和叠加,不仅影响列车周围空气压力和流速,也影响列车空气阻力。

图 3 通过 2 km 的中长隧道分析了高速列车通过隧道时空气阻力的变化规律。在长度大于 3 km 的长隧道,尤其 10 km 以上特长隧道条件下,采用三维流动模型进行相关研究几乎是无法实现的。图 4 表示了高速列车通过 20 km 特长隧道时的空气阻力和列车运行轨迹及压缩波和膨胀波反射叠加图。与图 3

(a) 列车运行轨迹线和波反射叠加图

(b) 空气阻力

图 4 单列高速列车通过 20 km 隧道时空气阻力变化特性

对比可以发现, 列车通过特长隧道时空气阻力的变化机理与中长隧道时相同。特长隧道时, 列车受到的空气阻力大部分时间与阻力平均值相当的趋势更加显著。研究特长隧道内列车平均空气阻力具有工程现实意义。

4 主要影响因素分析

本文以平均空气阻力 R_{AVG} 、最大空气阻力 R_{MAX} 和隧道因子 T_{f_AVG} 三个指标衡量列车空气阻力。研究隧道长度、阻塞比、车速和列车长度对中国标准动车组 CR400AF 通过隧道时空气阻力的影响。 T_f 定义为隧道运行空气阻力与明线运行空气阻力的比值。

4.1 隧道长度的影响

图 5 表示 16 编组高速列车分别以 300 km/h 和 350 km/h 通过净空面积 70 m² 单线隧道和 100 m² 双线隧道时, 隧道长度 L_{TU} 对 R_{AVG} 、 R_{MAX} 和 T_{f_AVG} 的影响规律。计算中列车横截面积为 11.93 m², 下同。

从图 5 可知, R_{AVG} 和 T_{f_AVG} 均随 L_{TU} 增大而增大, 但其增大趋势逐渐变缓, 尤其 100 m² 隧道时该规律更加明显。采用 $R_{AVG} = aL_{TU}^b$ 方式对平均空气阻力与速递长度的关系进行拟合, 发现高速列车以 350 km/h 通过双线隧道时的平均空气阻力与隧道长度的约 0.02 次方成正比。从图 5b 可知, 超过某一隧道长度后, R_{MAX} 不再增大。本节研究工况下, 16 编组高速列车以 350 km/h 通过隧道时, 取得最大空气阻力的临界隧道长度约为 1 500 m。

从图 5c 可知, 本小节所研究的 300 km/h 和

(a) 平均空气阻力随隧道长度变化规律

(b) 最大空气阻力随隧道长度变化规律

(c) 隧道因子随隧道长度变化规律

图 5 隧道长度对空气阻力的影响

350 km/h 高速列车通过 10 km 以上特长双线隧道的 T_{f_AVG} 约为 1.3, 而单线隧道时 T_{f_AVG} 在 1.6~1.7 范围。说明单列高速列车以 300~350 km/h 通过双线隧道时的空气阻力相比明线增大约 30%, 而其通过单线隧道时空气阻力相比明线增大 60%~70%。

4.2 阻塞比的影响

图 6 表示 16 编组高速列车以 350 km/h 通过 3 km、5 km、8 km 和 20 km 隧道时, 阻塞比 β 对 R_{AVG} 、 R_{MAX} 和 T_{f_AVG} 的影响规律。

从图 6 可以发现, R_{AVG} 、 R_{MAX} 和 T_{f_AVG} 均随阻塞比增大而增大。采用 $R_{AVG} = a\beta^b$ 形式对平均空气阻力与阻塞比的关系进行拟合, 发现隧道长度从 3 km 增大到 20 km 时, 幂指数 b 逐渐从 0.60 增大到 0.79。从图 6 也可以发现, 阻塞比越小, 即隧道净空面积越大时, 高速列车通过不同长度隧道时的平均空气阻力差异越小。因此, 大阻塞比情况下, 需要更加重视空气阻力的变化情况。

图6 阻塞比对空气阻力的影响

图6b中,四种隧道长度下 R_{MAX} 随阻塞比的变化曲线完全重合,这是由于本节研究的四种隧道长度均大于第4.1节中取得最大空气阻力的临界隧道长度,最大空气阻力不再变化。

4.3 车速的影响

图7表示16编组高速列车通过10 km隧道时,车速对 R_{AVG} 、 R_{MAX} 和 T_{f_AVG} 的影响规律。

从图7可以发现, R_{AVG} 和 R_{MAX} 均随车速增大而增大。采用 $R_{AVG}=aV^b$ 形式对平均空气阻力和最大空气阻力与车速的关系进行拟合,发现 R_{AVG} 和 R_{MAX} 均近似与车速的平方成正比。表2列出了单列车通

图7 车速对空气阻力的影响

表2 空气阻力与车速的幂次关系

阻塞比	平均空气阻力	最大空气阻力
0.121	1.889	1.730
0.132	1.917	1.739
0.151	1.945	1.783
0.173	1.973	1.814
0.209	2.010	1.847
0.233	1.996	1.841

过20 km隧道时, R_{AVG} 和 R_{MAX} 与车速的幂次关系。而 T_{f_AVG} 基本不随车速变化而变化。

4.4 列车长度的影响

图8表示高速列车以300 km/h、350 km/h和400 km/h通过净空面积100 m²隧道时,不同隧道长度下, R_{16}/R_8 (16编组高速列车平均空气阻力与8编组高速列车平均空气阻力的比值)的分布规律。容易发现,特长隧道条件下,16编组高速列车通过隧道时的平均空气阻力为8编组高速列车的1.65~1.7倍。

图8 R_{16}/R_8 随隧道长度变化规律

综上所述, 单列车通过特长隧道时, 车速对空气阻力的影响最大, 其次为列车长度, 阻塞比次之, 而隧道长度的影响最小。

5 结论

(1) 基于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, 可准确计算高速列车通过隧道诱发的空气压力和流速变化规律, 同时耦合计算空气阻力, 误差小于 6%, 计算精度满足工程要求。该方法尤其适用于长隧道和特长隧道情形。

(2) 单列高速列车通过隧道时空气阻力与列车驶入、驶出隧道诱发的压缩波和膨胀波传播叠加引起的车身附近压力和气流流速变化规律密切相关。

(3) 单列车通过隧道时空气阻力随隧道长度、阻塞比、车速和列车长度的增大而增大。特长隧道情形下, 按影响程度由大到小排列依次为车速、列车长度、阻塞比和隧道长度。16 编组时, R_{AVG} 近似与车速的 2 次方成正比, 与阻塞比的 0.60~0.79 次方成正比, 与隧道长度的 0.02 次方成正比。因此, 应结合运营线路隧道环境对高速列车通过隧道的空气阻力开展研究。

参 考 文 献

- [1] 赵勇, 田四明, 孙毅. 中国高速铁路隧道的发展及规划[J]. 隧道建设, 2017, 37(1): 11-17.
ZHAO Yong, TIAN Siming, SUN Yi. Development and planning of high-speed railway tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(1): 11-17.
- [2] KWON H, PARK Y W, LEE D, et al. Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(13): 1179-1195.
- [3] 王建宇, 万晓燕, 吴剑. 高速铁路隧道内瞬变气压和乘车舒适度准则[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(2): 1-5.
WANG Jianyu, WAN Xiaoyan, WU Jian. Air pressure transient in high speed railway tunnels and passenger comfort criteria[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(2): 1-5.
- [4] PETERS J L. Mesure de la traînée aérodynamique de l'ICE[J]. Revue Générale des Chemins de Fer, 1990, 109(1): 25-31.
PETERS J L. Measurement of aerodynamic resistance of ICE[J]. Review of General Railway, 1990, 109(1): 25-31.
- [5] 陶伟明. 列车通过隧道空气阻力研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- TAO Weiming. Research on air resistance when train passing through tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [6] YANG Mingzhi, DU Juntao, LI Zhiwei, et al. Moving model test of high-speed train aerodynamic drag based on stagnation pressure measurements[J]. Plos One, 2017, 12(1): doi: 10.1371/journal.pone.0169471.
- [7] 张亮, 张继业, 李田, 等. 超高速列车流线型头型多目标优化设计[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 106-114.
ZHANG Liang, ZHANG Jiye, LI Tian, et al. Multi-objective optimization design of the streamlined head shape of super high-speed trains[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 106-114.
- [8] 刘加利, 张继业, 张卫华. 真空管道高速列车气动特性分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 137-143.
LIU Jiali, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Analysis of aerodynamic characteristics of high-speed trains in the evacuated tube[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 137-143.
- [9] 王一伟, 杨国伟, 黄晨光. 高速列车通过隧道气动阻力特性的 CFD 仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(s1): 33-38.
WANG Yiwei, YANG Guowei, HUANG Chenguang. CFD simulation analysis on the aerodynamic drag characteristics of high-speed train running through tunnel[J]. China Railway Science, 2012, 33(s1): 33-38.
- [10] CHEN Xiaodong, LIU Tanghong, ZHOU Xisai, et al. Analysis of the aerodynamic effects of different nose lengths on two trains intersecting in a tunnel at 350 km/h[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 77-90.
- [11] CHOI J K, KIM K H. Effects of nose shape and tunnel cross-sectional area on aerodynamic drag of train traveling in tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 41: 62-73.
- [12] HARA T, OHAKUSHI J, XISHIMURA B. Aerodynamic drag of trains[J]. QR of RTRI, 1967, 8(4): 226-229.
- [13] HARA T. Aerodynamic drag of train in tunnels[J]. QR of RTRI, 1967, 8(1): 229-235.
- [14] SOCKEL H. Formulae for the calculation of pressure effects in railway tunnels[C]// Proceedings of the 11th ISAVVT, July 7-9, 2003, Luzern, Switzerland. Milton Keynes: BHRG, 2003: 581-595.
- [15] 王韦, 王建宇, 陈正林. 隧道中高速列车活塞风及空气阻力的计算[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(1): 9-16.
WANG Wei, WANG Jianyu, CHEN Zhenglin. Computation of piston wind and aerodynamic drag on high-speed train in tunnel[J]. China Railway Science, 1999, 20(1): 9-16.

- [16] 陈正林, 王建宇. 高速铁路双竖井隧道列车空气阻力计算[J]. 世界隧道, 1998(6): 1-5.
CHEN Zhenglin, WANG Jianyu. Aerodynamic drag calculation of the high-speed trains running in tunnel with double shafts[J]. World Tunnels, 1998(6): 1-5.
- [17] 史宪明, 万晓燕, 吴剑. 单列列车通过无辅助坑道长大铁路隧道时空气阻力计算方法研究[J]. 隧道建设, 2010, 30(5): 522-527.
SHI Xianming, WAN Xiaoyan, WU Jian. Study on method to calculate air resistance caused by single train running through long railway tunnels without auxiliary adit[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(5): 522-527.
- [18] YAMAMOTO A. Aerodynamics of train and tunnels[C]// Proceeding 1st International Conference on Vehicle Mechanics, July 16-18, 1968, Detroit, Michigan. Amsterdam: Swets & Zeitlinger, 1968: 151-163.
- [19] POPE C W. Gas dynamics and thermodynamics of unsteady flow in a railway tunnel[D]. Milton Keynes: Open University, 1986.
- [20] KIM H D. Aerodynamic analysis of a train running in a tunnel(I) Aerodynamics of one train[J]. Journal of Korean Society of Mechanical Engineers(B), 1997, 21(8): 963-972.
- [21] MEI Yuangui. A generalized numerical simulation method for pressure waves generated by high-speed trains passing through tunnels[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(8): 1427-1436.
- [22] SUZUKI M. Aerodynamic force acting on train in tunnel[J]. RTRI Report, 2000, 14(9): 37-42.
- [23] 梅元贵. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
MEI Yuangui. Aerodynamics of high-speed railway tunnel [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [24] 福田傑, 宮地徳蔵, 齊藤実俊, et al. 列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の三次元・軸対称列車模型を用いた実験[J]. 日本機械学会論文集 b 編, 2012, 78(793): 1521-1533.
FUKUDA T, MIYACHI T, SAITO S, et al. Experiments on the compression wave generated by a train entering a tunnel using three-dimensional and axisymmetric train models[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers Part B, 2012, 78(793): 1521-1533.
- [25] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed railway train[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6): 469-514.
- [26] 王慕之, 梅元贵, 贾永兴. 重叠网格法应用于模拟高速列车隧道气动效应[J]. 应用力学学报, 2017, 34(3): 589-595.
WANG Muzhi, MEI Yuangui, JIA Yongxing. Simulation of aerodynamic effects generated by a high-speed train passing through a tunnel with overset grid method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(3): 589-595.

作者简介: 贾永兴, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为列车空气动力学。

E-mail: jia Yongxing2004@163.com

梅元贵(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为列车空气动力学。

E-mail: meiyuangui@163.com