

# 高速铁路隧道内接触网空气动力学影响因素研究

彭龙虎<sup>1</sup>, 李向东<sup>2</sup>, 李文斌<sup>3</sup>, 王小兵<sup>2</sup>, 刘春浩<sup>2</sup>

(1. 中铁建电气化局集团南方工程有限公司, 武汉 430070; 2. 北京铁科英迈技术有限公司, 北京 100080;  
3. 青岛大学 机电工程学院, 山东 青岛 266071)

**摘要:**为了探究高速铁路隧道内接触网空气动力学的影响因素,基于有限体积法,建立动车组通过不同隧道的空气动力学模型,并采用流体力学软件数值模拟接触网空气的三维外流场。从仿真结果中得到不同工况条件下的风荷载极值,分析计算接触网线索的基本风偏移。研究表明:隧道内接触网风荷载的主要影响因素为隧道净空断面积与车速。动车组在隧道内通过和交会时,接触网线索的最大风偏移值随着隧道净空断面积的增大而减小,随着速度的增大呈非线性的方式增加。为保证安全,可考虑减小接触网的跨距长度或增大线索的水平张力来减少接触网线索的风偏移。

**关键词:**隧道;净空断面积;数值模拟;风荷载;风偏移

**DOI:**10.15938/j.jhust.2023.03.019

**中图分类号:** U225.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2023)03-0149-10

## Study on Aerodynamic Factors of Overhead Catenary in High-speed Railway Tunnel

PENG Longhu<sup>1</sup>, LI Xiangdong<sup>2</sup>, LI Wenbin<sup>3</sup>, WANG Xiaobing<sup>2</sup>, LIU Chunhao<sup>2</sup>

(1. China Railway Construction Electrification Bureau Group South Engineering Co., LTD, Wuhan 430070, China;  
2. Beijing IMAP Technology Co., LTD, Beijing 100080, China;  
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** In order to explore the influencing factors of catenary aerodynamics in high-speed railway tunnels, based on the finite volume method, the aerodynamics models of train-set passing through different tunnels were established, and the three-dimensional outflow field of catenary air were numerically simulated by using fluid dynamics software. The extreme values of wind load under different working conditions were obtained from the simulation results, and the basic wind migration of catenary clues was analyzed and calculated. The results show that the main factors affecting the wind load of the catenary in the tunnel are tunnel clearance area and vehicle speed. When the train-set passes and crosses in the tunnel, the maximum wind offset value of the catenary clues decreases with the increase of the tunnel clearance area, and increases in a nonlinear way with the increase of the speed. In order to ensure safety, the wind deviation of catenary can be reduced by reducing the span length of catenary or increasing the horizontal tension of catenary.

**Keywords:** tunnel; clearance area; numerical simulation; wind load; wind drift

## 0 引言

接触网系统是高速铁路的“生命线”,影响着我国铁路运输安全。接触网多沿铁路线露天架设,其

工作环境十分复杂。随着动车组运营速度不断提升,强气流扰动导致接触网产生大幅非线性强振动,刮弓、断网等事故的发生几率增大。特别是在动车组通过隧道和在隧道内交会时,由于膨胀波和压缩波在隧道壁面和列车车头、车尾反射,系列的波不断

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2019PEE011)。

作者简介: 彭龙虎(1983—),男,高级工程师;

李向东(1980—),男,高级工程师。

通信作者: 李文斌(1997—),男,硕士研究生, E-mail: 401007532@qq.com.

进行干扰和重叠,使隧道内的空气压力不断变化,呈现非常强的非定常特性风荷载,导致接触网可能发生低频率、大振幅的舞动现象,从而导致受电弓不能正常取流,造成运营中断。

目前,国内外学者对弓网的空气动力学问题已开展一些研究工作并取得显著成果<sup>[1-3]</sup>。于万聚等<sup>[4]</sup>对高速运行的弓网系统动态受流特性进行仿真研究,结果表明受流质量随着速度的提高而下降。王玉玉<sup>[5]</sup>分析了风速取值的影响因素以及接触网结构风载荷的影响,建议接触网的结构设计考虑其固有自振周期避开风振周期。J. Pombo<sup>[6-7]</sup>等建立接触网和受电弓仿真模型,仿真结果表明横风会增加受电弓的抬升力,使接触压力波动更为剧烈。赵飞等<sup>[8]</sup>运用谐波合成法模拟风场,研究表明随机风场对接触网风振响应和弓网的动态性能影响很大。刘长利<sup>[9]</sup>采用非线性有限元法对接触网风致响应特性及弓网运行安全问题分析。李瑞平等<sup>[10]</sup>建立与时间和空间相关的接触网脉动风场,研究表明接触网设计需采用脉动风荷载进行接触网的风偏和强度设计。刘志刚等<sup>[11]</sup>采用多种方法进行脉动风速时程的模拟,结果表明用谐波合成法模拟接触网风场速度较为合适。Kerstin S 等<sup>[12]</sup>对弓网系统动力学仿真展开研究,其结果为弓网系统的稳定受流提供重要的技术支撑。

为研究隧道内接触网风荷载随隧道长度、净空断面积、线间距等因素的变化规律,本文基于有限体积法,采用流体动力学软件 FLUENT 并结合动滑移网格技术,建立动车组通过不同长度、净空断面积、线间距隧道的空气动力学模型<sup>[13]</sup>,模拟动车组在隧道内通过和交会时隧道内接触网的空气三维外流场,并结合实车试验进行了模型验证,获得了不同工况条件下风荷载极值,并将其作为接触网线索所受的风荷载,结合理论计算公式,分析计算接触网线索的基本风偏移极值。

## 1 风荷载仿真计算

接触悬挂的水平负载主要指风负载,它是指风吹到接触线、承力索、支柱上所产生的压力,即为风压。风压以恒定风速垂直吹到单位面积上所形成的压力为理论风压,其表达式为

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

式中: $q$  为理论风压,  $\text{kN/m}^2$ ;  $\rho$  为空气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $v$  为风速,  $\text{m/s}$ 。

动车组在隧道内通过和交会时,由于膨胀波和压缩波在隧道壁面和列车车头、车尾反射,系列的波不断进行干扰和重叠,使隧道内的空气压力不断变化,呈现出非常强的非定常特性的风荷载。车型横截面形状及隧道结构的不同也会导致接触网四周压力分布不均匀。由于接触网线索的电压为高压电,无法通过现场实测得到接触网线索的风荷载数值。因此,本文采用流体力学软件 FLUENT 对隧道内接触网周围三维空气外流场模型来数值模拟计算获取风荷载。

数值模拟计算区域共分为 6 个子区域<sup>[14-15]</sup>,其中:区域①为近地面空气区域,该区域和地面连接,用靠近地面的网格模拟边界层,同时该区域狭长,纵横比非常大,可用结构网格生成网格;区域②为动车组前后的空气区域,其包含隧道内空气区域,形状接近隧道断面,随动车组一起运动(可与动车组定义为一个运动区域),在动车组周边区域的网格密集,在远离动车组区域的网格稀疏;区域③为动车组周围一个较小的空气区域,该区域随动车组一起运动,动车组车壁附近的流场复杂,要求网格非常密,因此,该区域不宜太大,以减小网格的规模;区域④为包含远场边界在内的隧道外的大部分区域,即隧道两端的空气外域,为了不影响计算准确度,该区域长、宽宜为动车组长、宽的 5 倍左右,该区域比较规整,可用结构化网格,距离区域⑤较近的地方,网格需密集;区域⑤为靠近隧道壁的空气区域,该区域网格划分要求模拟边界层,由于该区域狭长,纵横比较大,可用结构网格生成网格;区域⑥同区域④。具体区域划分如图 1 所示。

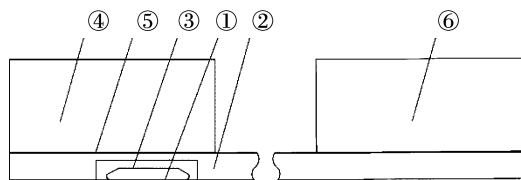


图 1 列车过隧道计算域分区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of computing domain partition for train passing tunnel

### 1.1 计算模型

1 号动车组、2 号动车组、3 号动车组的尺寸参数如表 1 所示。在不改变动车组横截面面积及车头纵向长度的情况下,对列车车顶设备(包括空调及其导流装置、受电弓及其导流装置)、转向架及其外风挡、车窗等进行了简化。动车组三维模型如图 2 所示。

表 1 动车组主要参数  
Tab. 1 Main parameters of EMU

| 车型  | 车宽/<br>m | 车高/<br>m | 横截面积/<br>m <sup>2</sup> | 长度/<br>m |
|-----|----------|----------|-------------------------|----------|
| 1 号 | 3. 380   | 3. 700   | 11. 124                 | 203. 000 |
| 2 号 | 3. 380   | 3. 700   | 11. 124                 | 201. 400 |
| 3 号 | 3. 265   | 3. 890   | 11. 500                 | 200. 300 |

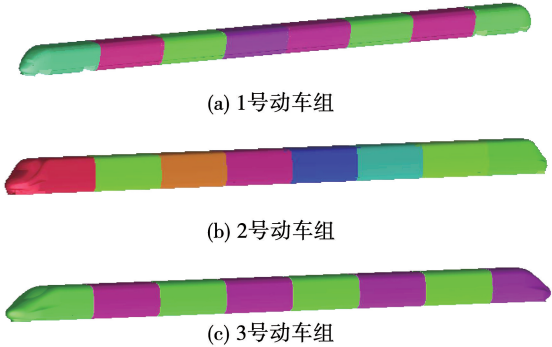


图 2 动车组三维实体模型  
Fig. 2 3D solid model of EMU

隧道计算模型主要选择 4 种断面。净面积分别为  $72\text{ m}^2$ 、 $81.37\text{ m}^2$ 、 $92\text{ m}^2$ 、 $100\text{ m}^2$ ，线间距分别为  $4.6\text{ m}$ 、 $4.8\text{ m}$ 、 $5.0\text{ m}$ 、 $5.2\text{ m}$ ，长度选用  $0.5\sim10\text{ km}$ ，隧道结构均采用单洞双线断面。

为了保证计算扰动的稳定性和准确性，隧道两边计算外域长度应为车长的  $4\sim5$  倍，因此，本研究选择的计算外域长  $800\text{ m}$ ，隧道内交会的空气动力学模型如图 3 所示。

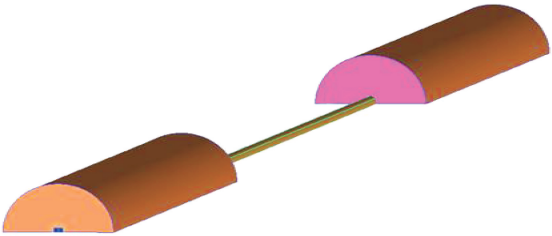


图 3 隧道内交会空气动力学模型  
Fig. 3 Aerodynamic model of tunnel rendezvous

1.2 计算网格与方法

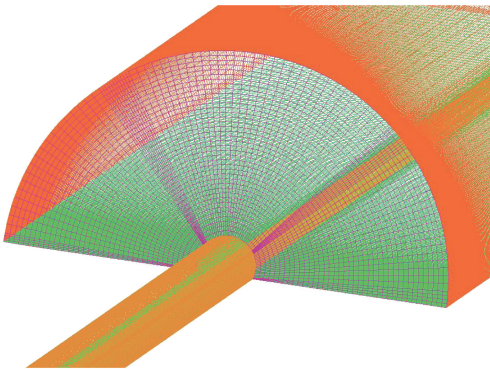
动车组在隧道内通过和交会时的空气动力学问题属于非定常问题<sup>[16-17]</sup>，为了模拟动车组与隧道、动车组与动车组之间的相对运动，本文的仿真计算中将动网格和滑移网格两种方式结合起来，即利用滑移面分割区域，在被分割的区域内采用动网格技术。动车组前后区域采用动网格技术，动车组区域与其他区域的连接设置为刚性运动边界，分别以相应列车车速

运动边界为滑移边界。通过设置，去除了滑移网格中的滑移墙部分，不必每步运行时重新计算网格，可以有效地降低计算工作量，进而提高计算效率。

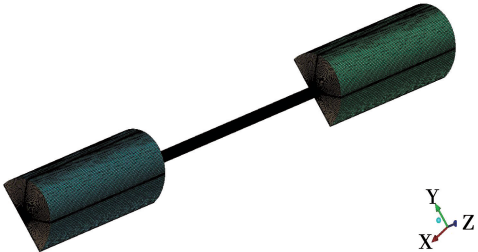
计算区域采用分区对接网格技术，隧道和地面用六面体结构化网格离散，各分区之间的数据交换通过公共滑移界面进行。计算模型离散后的网格总数均在 2 000 万左右。2 号动车组头车模型有限元网格如图 4 所示（单车网格数为 250 万左右）。隧道空气动力学模型网格如图 5 所示。



图 4 2 号动车组头车模型网格图  
Fig. 4 Grid diagram of head car model of NO. 1 EMU



(a) 隧道模型局部网格图



(b) 隧道模型整体网格图

图 5 隧道空气动力学模型网格图  
Fig. 5 Grid diagram of tunnel aerodynamics model

本文采用计算流体力学软件 FLUENT 进行求解，由于高速动车组运行速度在  $300\text{ km/h}$  以上，流场雷诺数  $Re > 10^5$ ，流动处于湍流状态，所以本文采用 RNG  $k-\varepsilon$  两方程湍流模型，壁面处理采用标准壁面函数法<sup>[18]</sup>。高速动车组进入隧道后将隧道内原有的部分空气排开，由于空气黏性和隧道内壁、列车外表面摩擦阻力的存在，被排开的空气不能像明线空气那样及时、顺畅地沿列车周侧形成绕流，同时隧道壁面限制了空气向外扩散流通，空气是可压缩气体，列车穿越隧道时隧道内会发生很大的压力瞬变，这一瞬变被称作压力波动，因此流场计算按可压缩

情况处理。压力速度耦合采用 SIMPLIC 算法,并选用二阶精度的迎风格式,求解三维可压缩的湍流流场的封闭方程。

1.3 网格无关性验证

在正式计算前进行了网格无关性验证,其中 1 号动车组以 300 km/h 速度级在隧道净空断面积为 100 m<sup>2</sup> 的隧道内运行的情况下,在网格划分时,从网格边界层底层进行划分,对隧道壁面和地面边界层进行设置分别为 0.1 mm、1 mm、10 mm、50 mm 及 100 mm,整体网格数量随着边界层加密进行均匀过渡,通过验证车体表面压力极值来评估最佳边界层厚度,验证结果见表 2。

表 2 网格无关性验证结果

| Tab. 2 Grid independence verification results |                |            |           |          |
|-----------------------------------------------|----------------|------------|-----------|----------|
| 分组<br>编号                                      | 边界层网格<br>厚度/mm | 网格总数/<br>万 | 风压/<br>Pa | 误差/<br>% |
| 1                                             | 0.1            | 4 000      | 2 636     | 0        |
| 2                                             | 1              | 2 000      | 2 617     | 0.75     |
| 3                                             | 10             | 1 250      | 2 578     | 2.25     |
| 4                                             | 50             | 800        | 2 515     | 4.83     |
| 5                                             | 100            | 500        | 2 457     | 7.28     |

由表 2 可知,隧道壁面和地面网格边界层为 0.1 ~ 100 mm 时,随着边界层加大,计算结果偏差越大,1 mm 边界层误差和 0.1 mm 误差仅有 1% 以内的差别,即在随着边界层厚度的变化计算数据结果不再发生较大变化,在误差许可范围之内,所以考虑网格在整体计算中的时间和计算成本,本次计算选择 1 mm 的网格尺度。

1.4 计算结果验证

为了验证动车组在隧道内通过和交会时空气动力学模型的正确性,将京广高铁、赣龙铁路实车试验数据,隧道净空断面积分别为 100 m<sup>2</sup>、81 m<sup>2</sup>,长度分别为 585 m、815 m、828 m、853 m、863 m、1 907 m、1 915 m、1 950 m,选取第 7 节车厢的车窗位置处监测点数据,监测位置示意图如图 6 所示。相同工况条件下,将仿真计算结果和实车试验结果<sup>[19-20]</sup> 进行对比分析,对比结果见表 3。



图 6 监测点示意图

Fig. 6 Schematic diagram of monitoring point

表 3 实车试验数据与仿真计算结果对比

| Tab. 3 Comparison between the real vehicle test data and simulation results |                       |     |           |     |             |       |        |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----|-----------|-----|-------------|-------|--------|
| 工况                                                                          | 隧道净空面积/m <sup>2</sup> |     | 速度/(km/h) |     | 车体表面压力极值/Pa |       |        |
|                                                                             | 试验                    | 仿真  | 试验        | 仿真  | 试验          | 仿真    | 误差     |
| 1 号动车组<br>通过隧道                                                              | 100                   | 100 | 300       | 300 | 2 646       | 2 617 | -1.10% |
|                                                                             | 100                   | 100 | 351       | 350 | 3 791       | 3 620 | -4.51% |
|                                                                             | 100                   | 100 | 300       | 300 | 2 726       | 2 617 | -4.00% |
| 1 号动车组<br>隧道内交会                                                             | 100                   | 100 | 350       | 350 | 3 628       | 3 620 | -0.22% |
|                                                                             | 81                    | 81  | 300       | 300 | 4 286       | 4 270 | 0.37%  |
| 2 号动车组<br>隧道内交会                                                             | 100                   | 100 | 296       | 300 | 6 072       | 6 584 | 7.78%  |
|                                                                             | 100                   | 100 | 350       | 350 | 8 630       | 9 056 | 4.70%  |
| 3 号动车组<br>通过隧道                                                              | 100                   | 100 | 293       | 300 | 2 210       | 2 432 | 9.13%  |

由表 3 可知,仿真计算数据与实验数据相对误差大值分别为 7.78% 和 9.13%,且都是仿真数据大于试验数据,主要是由于试验动车组车速分别

为 296 km/h、293 km/h,低于动车组仿真计算车速 300 km/h,其余误差在 5% 以内,结果吻合较好,仿真计算方法能够比较准确地反映动车组在隧道内通

过和交会时的压力波变化规律。

1.5 风荷载影响因素分析

为探究隧道内接触网风荷载随隧道长度、净空断面面积、线间距等因素的变化规律,建立动车组通过不同长度、净空断面面积、线间距隧道的空气动力学模型,模拟动车组在隧道内通过和交会时接触网的空气三维外流场,从而分析不同工况下的风荷载。

1)隧道内不同位置处的风荷载分析

为了分析隧道内不同位置处的风荷载,以某动车组在 350 km/h 速度级下单车通过长度分别为 0.5 km、1.0 km、1.5 km、2.0 km 的隧道时隧道内的风荷载为例进行研究。动车组通过 2 km 长度隧道时隧道内不同测点的风荷载如图 7 所示。

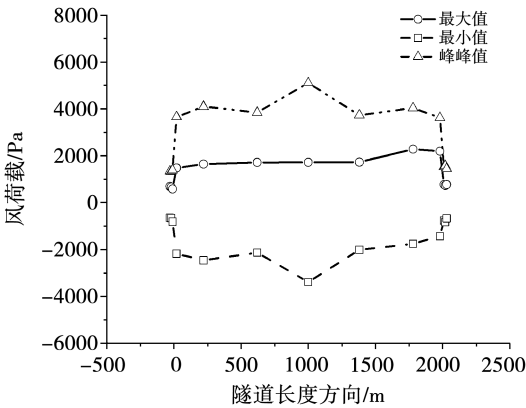


图7 隧道长度 2.0 km 隧道内的风荷载散点图  
Fig. 7 Tunnel length 2.0 km wind load scatter plot in the tunnel

由图 7 可知,动车组在通过隧道时,隧道内的风荷载极值随长度的变化而变化,风荷载极值较大区域较为集中,但峰峰值最大值均发生在隧道中部,具体数据见表 4。

表 4 单车通过时隧道内的风荷载的峰峰值最大值  
Tab. 4 Peak-to-peak maximum value of wind load in the tunnel when a bicycle passes through

| 速度级      | 隧道长度/km | 峰峰值最大值/Pa |
|----------|---------|-----------|
| 350 km/h | 0.5     | 5 185     |
|          | 1.0     | 6 386     |
|          | 1.5     | 5 334     |
|          | 2.0     | 5 109     |

由图 7 和表 4 可知,当动车组以 350 km/h 通过 0.5 ~ 2.0 km 长的隧道时,由于不同长度隧道中压缩波和膨胀波波系来回反射路径比较复杂,因此不同长度隧道内产生风荷载峰值点的地点不同,以

2 km 为例,可以看出,峰值点在隧道中部,当隧道长度为 1 km 时,压缩波和洞口反射压缩波叠加,膨胀波和洞口反射膨胀波叠加,因此隧道内的风荷载最大。后续动车组通过隧道产生风荷载对接触网风偏移影响分析选用 1 km 长隧道。

分析相同型号动车组以 350 km/h 速度级分别在长度为 0.5 km、1.0 km、1.5 km、2.0 km、3.0 km、5.0 km、7.0 km、10.0 km 的隧道内交会时不同测点隧道内的风荷载。其中相同型号动车组分别在长度为 1.0 km、5.0 km、10.0 km 的隧道内交会时隧道内的不同测点风荷载如图 8 所示,峰峰值最大值见表 5。

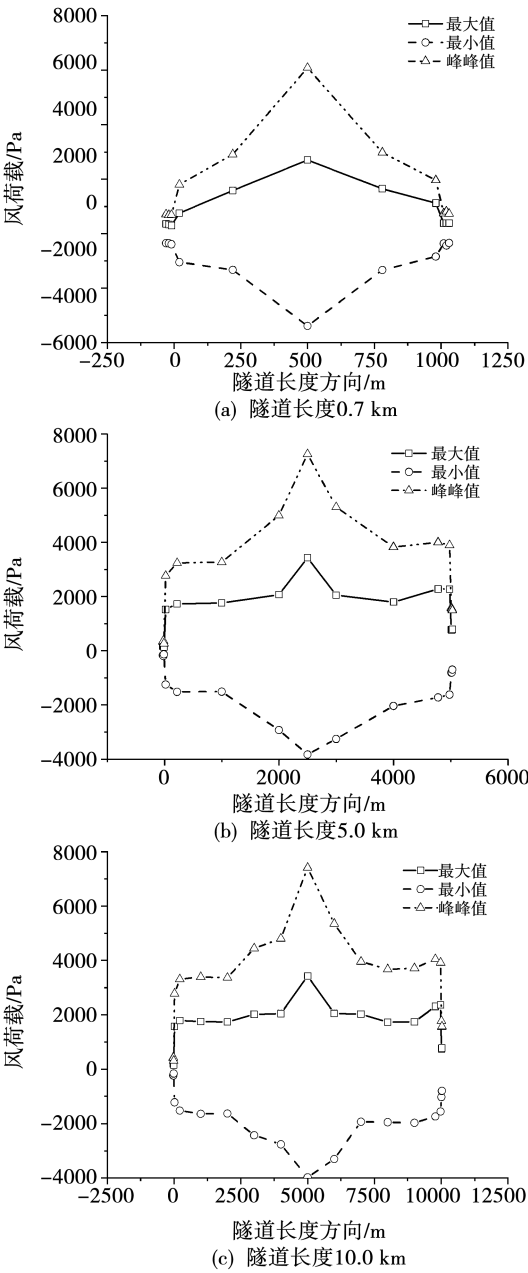


图 8 隧道内的风荷载散点图

Fig. 8 Scatter plot of wind load in tunnel

表 5 隧道内交会时隧道内的风荷载峰峰值最大值  
Tab. 5 The peak to peak value of wind load in the tunnel is the maximum value when crossing in the tunnel

| 速度级      | 隧道长度/km | 峰峰值最大值/Pa |
|----------|---------|-----------|
| 350 km/h | 0.5     | 4 318     |
|          | 0.7     | 12 169    |
|          | 1.5     | 10 559    |
|          | 2.0     | 10 556    |
|          | 3.0     | 7 418     |
|          | 5.0     | 7 268     |
|          | 7.0     | 7 459     |
|          | 10.0    | 7 406     |

由图 8 和表 5 可知,相同型号动车组在长度为 0.5~10.0 km 隧道内交会时,隧道内的风荷载极值随着长度变化而变化,当长度接近风荷载极值临界长度,即 0.7 km 时风荷载极值最大;由于两动车组在隧道内交会时,是同时进入隧道两端,因此在隧道中心点压缩波和洞口反射压缩波会准确叠加,因此,风荷载最大值的发生位置基本在隧道中心。后续动车组在隧道内交会产生风荷载对接触网风偏移影响分析选用 0.7 km 长隧道。

2) 不同净空断面隧道的风荷载分析  
为了分析隧道净空断面积对隧道内风荷载的影响,分析不同类型动车组均以 350 km/h 速度级通过净空断面积为 81.37 m<sup>2</sup>、92 m<sup>2</sup>、100 m<sup>2</sup> 的隧道时仿真计算得到的隧道内的风荷载。不同净空断面积下隧道中心位置的隧道内的风荷载最大值、最小值及峰峰值见表 6。3 号动车组隧道内的风荷载散点图如图 9 所示。

表 6 不同净空断面积下隧道中心隧道内的风荷载  
Tab. 6 Wind load in the central tunnel under different headroom sectional areas

| 工况     | 隧道断面积<br>/m <sup>2</sup> | 最大值<br>/Pa | 最小值<br>/Pa | 峰峰值<br>/Pa |
|--------|--------------------------|------------|------------|------------|
| 1 号动车组 | 81.37                    | 3 298      | -4 000     | 7 298      |
|        | 92                       | 2 996      | -3 573     | 6 568      |
|        | 100                      | 2 860      | -3 423     | 6 283      |
| 2 号动车组 | 81.37                    | 3 368      | -3 900     | 7 270      |
|        | 92                       | 3 060      | -3 483     | 6 543      |
|        | 100                      | 2 921      | -3 337     | 6 259      |
| 3 号动车组 | 81.37                    | 3 228      | -4 107     | 7 334      |
|        | 92                       | 2 940      | -3 586     | 6 526      |
|        | 100                      | 2 825      | -3 467     | 6 292      |

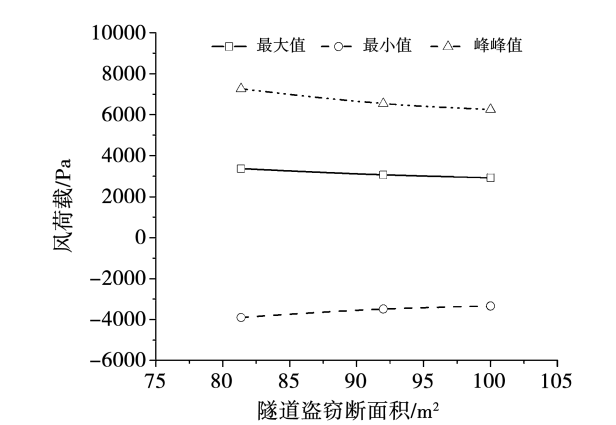


图 9 隧道内的风荷载散点图  
Fig. 9 Scatter plot of wind load in tunnel

由表 6 和图 9 可知,3 种动车组以 350 km/h 速度级通过隧道时,隧道净空断面积由 100 m<sup>2</sup> 减小到 92 m<sup>2</sup>,或由 100 m<sup>2</sup> 减小到 81.37 m<sup>2</sup>,隧道内的风荷载的最大值及峰峰值都有不同程度的增加,这是由于隧道净空断面积减小,动车组和隧道的阻塞比增加,对空气的压缩程度增加。即隧道内的风荷载随着隧道净空断面积的增加不断减小,且通过绘制回归曲线发现,风荷载最大值、最小值及峰峰值与隧道净空断面积成幂指数关系,表达式为  $y = ax^b$ ,其中 3 号动车组的幂指数约为 -0.70~-0.77,1 号、2 号动车组的幂指数分别约为 -0.66~-0.84,-0.60~-0.80。忽略不同车型的影响,隧道内的风荷载与隧道净空断面积成幂指数关系,幂指数约为 -0.73。

3) 不同线间距隧道的风荷载分析  
为了探究线间距对隧道内风荷载的影响,分析当隧道断面积与动车组速度一定时,两相同型号动车组在线间距分别为 4.8 m、5.0 m、5.2 m 的隧道中部交会时隧道中心处的风荷载。不同线间距下隧道中心位置的风荷载最大值、最小值及峰峰值见表 7。

表 7 不同线间距下隧道中心的风荷载  
Tab. 7 Wind load in tunnel center with different line spacing

| 工况      | 线间距<br>/m | 最大值<br>/Pa | 最小值<br>/Pa | 峰峰值<br>/Pa |
|---------|-----------|------------|------------|------------|
| 在隧道中部交会 | 4.8       | 6 156      | -6 814     | 12 971     |
|         | 5.0       | 6 169      | -6 848     | 13 017     |
|         | 5.2       | 6 170      | -6 856     | 13 028     |

由表 7 可知,动车组以相同速度级在隧道内交会,线间距分别由 5.0 m 减小为 4.8 m,由 5.2 m 减小为 4.8 m 时,隧道内的风荷载极值变化很小,变化

幅度均小于1%,即线间距的变化对隧道内风荷载的影响可忽略不计。

4) 不同车速下隧道内风荷载分析

为探究车速对隧道内风荷载的影响,分析隧道断面面积一定,某动车组通过隧道的速度不同时隧道中心处的风荷载。动车组以不同车速通过隧道时隧道中心位置的风荷载如图10所示。

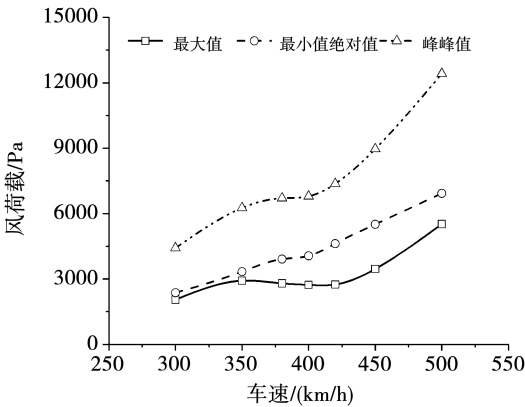


图10 隧道中心位置的风荷载的散点图  
Fig. 10 Scatter plot of wind load at the center of the tunnel

由图10可知,隧道中心处的风荷载的最大值、最小值绝对值与峰峰值的变化规律基本相似,即隧道中心处的风荷载随着速度的增加而非线性增加。当隧道净空断面积为 $100\text{ m}^2$ 时,动车组通过隧道时隧道内的风荷载与速度的 $1.58\sim 2.05$ 次方成正比。忽略其他因素的影响,通过隧道时隧道内的风荷载约与速度的 $1.82$ 次方成正比。

2号动车组在隧道内交会时,隧道中心处的风荷载时程曲线如图11所示。

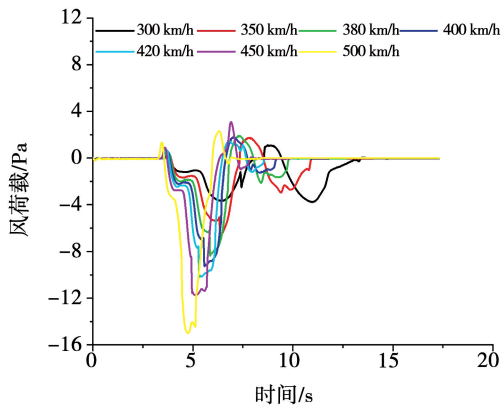


图11 隧道中心处的风荷载时程曲线  
Fig. 11 Wind load time history curve at the center of the tunnel

由图11可知,2号动车组在隧道内交会时,随着速度的增加,隧道内的风荷载不断增加,其中风荷载由正-负交替的压力构成,随着速度的增加,规律不变。

同理,对某相同型号动车组在隧道内交会时隧道中心处的风荷载极值等仿真计算数据进行分析,得到与通过隧道时的规律相似的隧道中心处的风荷载散点图及其回归曲线。相同型号动车组在隧道内交会时,隧道中心处的风荷载随着速度的增加不断增加,隧道中心处的风荷载最大值、最小值及峰峰值与速度的 $1.70\sim 2.40$ 次方成正比,函数表达式为 $y = cv^d$ 。忽略其他因素的影响,隧道交会时隧道内的风荷载约与速度的 $2.05$ 次方成正比。

2 隧道内接触网线索风偏移量分析

接触网四周的压力随着隧道净空断面积、动车组尺寸参数及车速的不同而变化,甚至动车组通过或交会时风荷载的急剧变化也会造成接触网四周压力分布不均匀,从而使得接触网线索产生了偏移量。目前尚未掌握接触网线索受到风荷载的运动规律,但其基本风偏移量可在一定假设条件下采用静力学分析法求得。假设条件包括:

- 1) 不考虑风对线索的动态作用;
- 2) 不考虑补偿装置对线索弛度和张力的影响;
- 3) 不考虑线索的弹性伸长。

根据以上假设,可得出接触网线索的风偏移计算模型,考虑到接触网线索直径及其风载体型系数的影响,可得线索单位风负载的表达式:

$$P = qKd \times 10^{-6} \tag{2}$$

式中, $K$ 为风载体型系数,线索链形悬挂取 $1.25$ ;  $d$ 为线索直径,取 $14.8\text{ mm}$ 。

当风水平作用在线索上时,线索从沿竖方向偏移,在自身重力 $g_j$ 、水平风力 $P_j$ 以及悬挂点支持力作用下处于动态平衡状态。根据相似三角形原理,有:

$$\frac{b_j}{y_x} = \frac{P_j}{q_v} \tag{3}$$

由导曲线方程可知:

$$y_x = \frac{q_v x(l-x)}{2T_j} \tag{4}$$

将式(4)代入式(3),可得线索基本风偏移的计算公式:

$$b_{jx} = \frac{p_j x(l-x)}{2T_j} \tag{5}$$

式中:  $b_{jx}$  为接触网线索的基本风偏移值, mm;  $P_j$  为接触网线索所承受的风荷载, kN/m;  $x$  为研究点距离定位点的距离, m;  $l$  为跨距长度, 一般取 50 m;  $T_j$  为接触网线索的水平张力, 取 30 kN。

将  $x = l/2$  代入式(5), 可得接触网线索的最大风偏移值:

$$b_{j\max} = \frac{P_j l^2}{8 T_j} \quad (6)$$

根据式(6)可知, 接触网线索的最大风偏移值与接触网线索所承受的风荷载、跨距长度成正比关系, 与水平张力成反比关系。

本研究将1节中仿真计算输出的隧道内的风荷载极值作为接触网风荷载极值, 代入上述计算公式, 计算不同工况下接触网线索的基本风偏移最大值。

3组动车在不同隧道净空断面积的隧道内通过与交会时最大风偏移的变化曲线, 如图12所示。

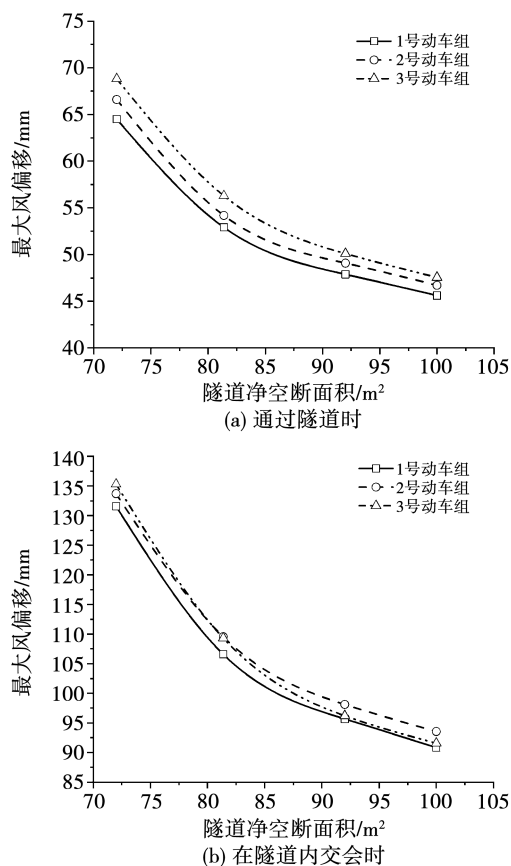


图12 最大风偏移变化曲线

Fig. 12 Maximum wind drift curve

由图12可知, 相同型号动车组以相同速度在隧道内通过与交会时, 随着隧道净空断面积的增大, 接触网线索的最大风偏移值均减小。动车组以350 km/h速度级在净空断面积为72 m²的隧道内通过和交会时接触网线索的风偏移最大, 单车与交会

的最大风偏移分别为68.82 mm、135.30 mm。忽略动车组类型的影响, 数据经拟合后, 可得到两条二次多项式曲线函数  $y = 2.51x^2 - 19.027x + 82.889$  与  $y = 5.338x^2 - 41.12x + 170.86$ , 且拟合度均达到99%以上。

3组动车以不同速度级在隧道内通过与交会时最大风偏移的变化曲线, 如图13所示。

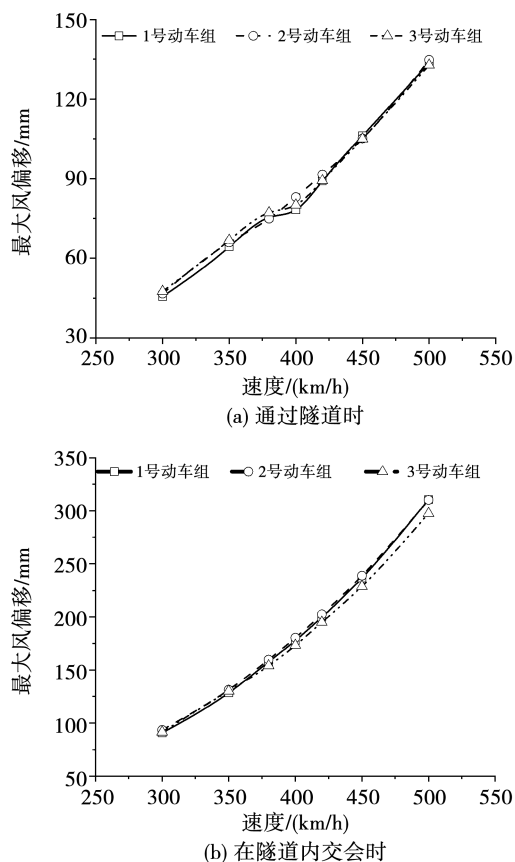


图13 最大风偏移变化曲线

Fig. 13 Maximum wind drift curve

由图13可知, 当隧道净空断面积相同时, 动车组以不同速度级在隧道内通过与交会时, 随着速度的增大, 接触网线索的最大风偏移值以非线性的方式增加, 与隧道内壁面瞬变压力规律一致。忽略动车组类型的影响, 数据经拟合后, 可得到二次多项式曲线函数  $y = 0.973 2x^3 - 10.701x^2 + 44.37x + 13.066$  与三次多项式曲线函数  $y = 1.846 8x^3 - 19.653x^2 + 88.045x + 22.054$ , 且拟合度均达到99%以上。

选用某动车组以350 km/h速度级在长度为1 km的隧道内通过, 在长度为0.7 km的隧道内交会, 通过公式计算得到的基本风偏移最大值的散点图如图14所示。

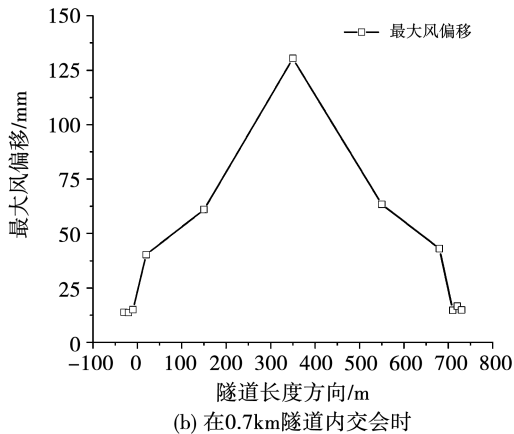
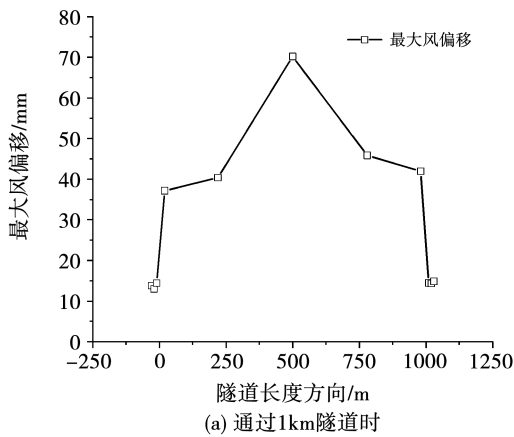


图 14 最大风偏移变化曲线  
Fig. 14 Maximum wind drift curve

由图 14 可知,动车组在隧道内通过和交会时,沿隧道长度方向,接触网线索所受的最大风偏移在隧道中间位置存在峰值,有最大值 65.27 mm 与 123.51 mm,与隧道内的风荷载规律相似。

相同型号动车组以 350 km/h 速度级在不同线间距的隧道中部交会时,通过公式计算得到的基本风偏移最大值如图 15 所示。

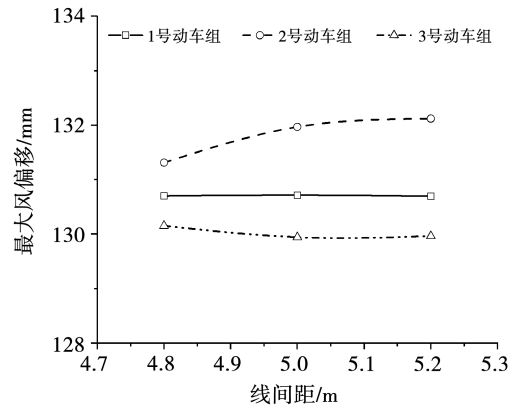


图 15 在隧道内交会时最大风偏移变化曲线  
Fig. 15 Variation curve of maximum wind drift in tunnel intersection

由图 15 可知,在相同条件下,3 个动车组车长和横截面积差别不大,车头流线型略有差异,其中 1 号和 3 号动车组车头流线型较好,因此 2 号动车组的最大风偏移值略大于 1 号与 3 号动车组,2 号动车组以 350 km/h 速度级在线间距为 5.2 m 的隧道内交会时,最大基本风偏移为 132.12 mm。但对于同一动车组,隧道内线间距改变,并不影响动车组进出隧道内产生的压缩波和膨胀波极值,因此线间距对基本最大风偏移量的影响并不大,可忽略不计。

3 结 论

1) 影响隧道内风荷载的主要因素为隧道净空断面积与动车速度。随着净空断面积的增加,隧道内的风荷载以近似幂指数的方式减少;随着速度的增加,隧道内风荷载也在不断增加,约与速度的 2 次方成正比。

2) 动车组通过隧道时,接触网线索受到风荷载影响产生的基本风偏移,与接触网线索所承受的风负载、跨距长度、接触网线索的水平张力有关,其中起主要作用的是风负载。

3) 随着隧道净空断面积的增大,接触网线索的最大风偏移值减小,当隧道净空断面积为 72 m<sup>2</sup> 时,单车与交会工况下接触网线索的最大风偏移为 68.82 mm 与 135.30 mm;随着速度的增大,接触网线索的最大风偏移值以非线性方式增加。

4) 相同型号动车组以较高速度在净空断面积较小的隧道内交会时,接触网线索的最大风偏移值最大,极易发生安全事故,可考虑减小接触网的跨距长度或增大线索的水平张力。

参 考 文 献:

[1] 曹树森,柯坚,邓斌,等. 强风地区接触网动力稳定性分析[J]. 中国铁道科学,2010,31(4):79.  
CAO Shusen, KE Jian, DENG Bin, et al. The Dynamic Stability Analysis of the Catenary Systems in Strong Wind Area[J]. China Railway Science, 2010,31(4):79.  
[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.  
TIAN Hongqi. Development of Research on Aerodynamics of High-speed Rails in China[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2015, 17(4): 30.  
[3] 赵文成,肖明清,高波. 越江铁路隧道空气动力学问题的试验研究[J]. 路基工程,2008(4):3.  
ZHAO Wencheng, XIAO Mingqing, GAO Bo. Experimental Study on Aerodynamics of Cross-river Railway Tunnel

- [J]. Subgrade Engineering, 2008(4): 3.
- [4] 于万聚, 王晓保. 高速接触网-受电弓系统动态受流特性的仿真研究[J]. 铁道学报, 1991(S1): 9.  
YU Wanju, WANG Xiaobao. Emulation Researches on the Dynamic Current-Carrying Characteristics of the Pantograph-Catenary Contact System on High-speed Railway Lines[J]. Journal of Railway, 1991(S1): 9.
- [5] 王石玉. 接触网结构风载的影响分析[J]. 电气化铁道, 2001(3): 21.  
WANG Shiyu. Analysis of Influence of Wind Load on Catenary Structure[J]. Electric Railway, 2001(3): 21.
- [6] POMBO J, AMBROSIO J, PEREIRA M, et al. Influence of the Aerodynamic Forces on the Pantograph-catenary System for High-speed Trains[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(11): 1327.
- [7] POMBO J, AMBROSIO J. Environmental and Track Perturbations on Multiple Pantograph Interaction with Catenaries in High-speed Trains[J]. Computers and Structures, 2013, (124): 88.
- [8] 赵飞, 刘志刚, 韩志伟. 随机风场对弓网系统动态性能影响研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(10): 36.  
ZHAO Fei, LIU Zhigang, HAN Zhiwei. Simulation Study on Influence of Stochastic Wind Field to Dynamic Behavior of Pantograph-catenary System[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10): 36.
- [9] 刘长利. 强侧风下接触网响应特性及弓网运行安全分析[J]. 铁道标准设计, 2013(2): 105.  
LIU Changli. Analysis on Response Characteristic of Overhead Catenary System and Pantograph-catenary Operation Security under the Action of Strong Sidewind[J]. Railway Standard Design, 2013(2): 105.
- [10] 李瑞平, 周宁, 张卫华, 等. 基于 AR 模型的接触网脉动风场与风振响应[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(4): 56.  
LI Ruiping, ZHOU Ning, ZHANG Weihua, et al. Fluctuating Wind Field and Wind-induced Vibration Response of Catenary Based on AR Model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(4): 56.
- [11] 刘志刚, 侯运昌, 韩志伟, 等. 基于风场模拟的高铁接触网动态性能模拟[J]. 铁道学报, 2013, 35(11): 21.  
LIU Zhigang, HOU Yunchang, HAN Zhiwei, et al. Analysis on Dynamic Characteristic of High-speed Railway Catenary Based on Wind Field Simulation[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 21.
- [12] KERSTIN S, WOLFGANG E, MICHAEL K, et al. An Approach to Continuous On-site Monitoring of Contact Forces in Current Collectors by a Fiber Optic Sensing System[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013(51): 172.
- [13] 李国顺. 受电弓结构参数识别及弓—网系统动力学模型的建立[J]. 铁道机车车辆, 1996(1): 56.  
LI Guoshun. Identification of Structural Parameters of Pantograph and Establishment of Dynamic Model of Bow-net System[J]. Railway Locomotive & CAR, 1996(1): 56.
- [14] 刘明昊. 建筑物对小区内风环境影响的 CFD 数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- [15] 杨伟超, 何川, 彭立敏, 等. 隧道结构内列车风荷载下接触网系统的风致振动响应[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 276.  
YANG Weichao, HE Chuan, PENG Limen, et al. Vibrating Response of Overhead Contact System (OCS) under Loading of Slipstreams Induced of High-speed Train (HST) Traveling Through Tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 276.
- [16] 李红梅, 杨飞, 张骞, 等. 高速列车隧道内等速交会车辆动力学性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 64.  
LI Hongmei, YANG Fei, ZHANG Qian, et al. Influence of Intersection by Same Speed of High Speed Trains in Tunnel on Vehicle Dynamic Performance[J]. China Railway Science, 2020, 41(1): 64.
- [17] 王建宇. 列车通过隧道时诱发的空气动力学问题和高速铁路隧道设计参数[J]. 世界隧道, 1995(1): 3.  
WANG Jianyu. Aerodynamic Problems Induced by Trains Passing Through Tunnels and Design Parameters of High-speed Railway Tunnels[J]. World Tunnel, 1995(1): 3.
- [18] 傅德薰, 马延文. 计算流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [19] 马伟斌, 程爱君, 陈厚嫦, 等. 京广高速铁路坪土隧道空气动力学效应试验研究报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014: 206.  
MA Weibin, CHENG Aijun, CHEN Houchang, et al. Experimental Study Report on Aerodynamic Effect of Flat Soil Tunnel of Beijing-Guangzhou High-speed Railway[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014: 206.
- [20] 王立乾, 白鑫, 方兴, 等. 赣龙线高速铁路线间距等速度适应性试验研究报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2016: 58.  
WANG Liqian, BAI Xin, FANG Xing, et al. Test and Research Report on Equal Speed Adaptability of Line Spacing of Gan Long High-speed Railway[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2016: 58.

(编辑: 温泽宇)