

DOI : 10.3901/JME.2018.04.186

# 典型路基结构对高速列车横风气动特性影响分析\*

张 业<sup>1,2</sup> 孙振旭<sup>1</sup> 姚永芳<sup>1,2</sup> 刘 雯<sup>1,2</sup> 杨国伟<sup>1,2</sup> 郭迪龙<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所流固耦合与系统力学重点实验室 北京 100190 ;

2. 中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

摘要：由于地域及环境的限制，高速铁路采用多种路基结构如平直地面、不同高度路堤、高架桥等，当列车运行在路堤及高架桥上时，车体周围的绕流流场比平直地面更加复杂。在强横风的作用下，不同的路基结构上的高速列车横风气动特性存在明显差异，不合理的路基结构将影响列车的横风安全性。同时列车结构复杂，转向架、受电弓等都对列车的流场特性有重要作用，过于简化的短编组列车外形不能够精细反映列车的真实气动特性。为研究典型路基结构对高速列车横风气动特性的影响，以 9 编组动力集中型高速列车实车为研究对象，考虑风挡、转向架、受电弓等细节特征，对列车运行速度为 200 km/h，横风速度分别为 20 m/s、30 m/s、35 m/s、40 m/s，路基结构分别为平直地面、3 m 路堤、6 m 路堤、高架桥等四种场景下的高速列车空气动力学性能进行了仿真计算和对比，分析了不同路基地面条件下列车的横风气动特性的差异及规律，为横风条件下复杂路基结构的列车运行安全控制提供了参考。

关键词：路基；高架桥；高速列车；横风；空气动力学；运行安全；动力集中型

中图分类号：O357

## Influence of Typical Subgrade Structures on Aerodynamic Characteristics of High Speed Trains in Cross wind Conditions

ZHANG Ye<sup>1,2</sup> SUN Zhenxu<sup>1</sup> YAO Yongfang<sup>1,2</sup> LIU Wen<sup>1,2</sup> YANG Guowei<sup>1,2</sup> Guo Dilong<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract : Due to geographical and environmental constraints, high-speed railways use a variety of roadbed structures such as flat ground, different height embankments, viaducts, etc. When trains run on embankments and viaducts, the flow around the car body is more complex than the flat ground. Under the action of crosswind, there are obvious differences in the cross-wind aerodynamic characteristics of high-speed trains on different subgrade structures. The unreasonable subgrade structure will affect the cross-wind safety of the train. At the same time, the structure of the train is complex, the bogie and pantograph have an important role on the flow field characteristics of the train, and the over simplified profile of the short train cannot accurately reflect the true aerodynamic characteristics of the train. In the present paper, in order to study the influence of typical roadbed structure on the aerodynamic characteristics of high speed trains, a real high-speed train with 9 carriages at the speed of 200 km/h was taken for case study, and the details of windshields, bogies and pantographs were taken into consideration. The cross wind velocities were chosen as 20, 30, 35 and 40 m/s. The aerodynamics performance of the high-speed train under the four conditions of plane ground, 3m-embankment, 6m-embankment and viaduct were simulated and compared, and the differences and regularities in the aerodynamic characteristics under cross wind conditions on different subgrade were analyzed. The results provide a reference for train safety control on complex subgrade structures under cross wind condition.

Key words : subgrade structures; viaduct; high-speed train; cross wind; aerodynamics; operational safety; power concentrated

## 0 前言

高速运行的列车在遇到强横风时，列车空气动力性能发生显著改变，运行稳定性恶化，列车倾覆或脱轨的危险性大大增加<sup>[1]</sup>。对于一些复杂的横风环境，如不同高度的路堤、高架桥等，列车的绕流流场改变更加显著，列车侧向力、倾覆力矩明显增大，当强横风风速超过列车临界倾覆风速时，会造成列车倾覆，严重影响行车安全<sup>[2-3]</sup>。国内外许多学

\* 国家重点研发计划先进轨道交通重点专项资助项目(2016YFB1200601-B13)。20170216 收到初稿，20171220 收到修改稿

者都对横风条件下的列车气动特性进行了研究：SUZUKI 等<sup>[4]</sup>通过风洞试验研究了横风下不同桥型和路堤对列车周围流场的影响，讨论了横风不同攻角和车型状况下流场的区别。DIEDRICHS 等<sup>[5]</sup>对在路堤上运行的高速列车横风稳定性进行了研究。BOCCIOLONE 等<sup>[6]</sup>通过试验测试了横风下三种不同的列车模型在不同的基础设施、不同的湍流强度和不同的雷诺数下的空气动力特性。国内郝艳红等<sup>[7]</sup>研究了高速列车在平直地面上以不同行驶速度在不同风速横风中运行时的气动特性，给出了横风作用下高速列车的最大安全运行速度限值与横风风速之间的关系；李田等<sup>[8]</sup>研究了横风条件下列车通过不同高度挡风墙的气动性能，提出了挡风墙的改进方法。张亮等<sup>[9-10]</sup>基于空气动力学和多体系统动力学理论，分析了高速列车车体以及不同位置受电弓所受非定常气动力的时域特性、频域特性及列车周围非定常流动结构。缪炳荣等<sup>[11]</sup>根据车辆动力学参数、轨道不平顺特征以及沿线瞬时最大风速等建立整车多体动力学模型并施加气动载荷激励，研究了高速列车在风致载荷工况作用下的列车运行安全性；何旭辉等<sup>[12]</sup>研究了风屏障对典型车桥组合状态下列车的风压分布和各方面气动力分布特征的影响，分析了风屏障的气动影响机理；罗建斌等<sup>[13]</sup>研究了路堤倾角变化对高速列车侧风运行气动特性的影响。

目前已有的横风特性的研究大多针对不同车型、不同横风风速下列车的安全性问题，但是在研究不同路基地面的影响问题，尤其是全面系统地分析各种路基地面条件下列车的横风流场结构方面，无论是国内还是国外相关的工作仍然较少。本文在上述文献工作的基础上，针对九编组动力集中型高速列车，系统研究了列车在平直地面、3 m 路堤、6 m 路堤及高架桥等四种典型路基结构运行场景下的横风气动特性。

## 1 计算模型与网格

### 1.1 列车模型

高速列车在横风条件下运行时，背风侧会出现复杂的涡脱落现象。不同程度的简化模型均会对涡结构造成很大影响，为了尽量避免由于模型简化带来的各种问题，本文的列车计算模型采用头车+7节中间车+尾车的真实高速列车外形，同时考虑了风挡、转向架及受电弓等细节特征，列车的整体外形如图 1 所示。头车长度为 20.54 m，尾车长度为 27.50 m，中间车单节长度为 25.75 m，因此列车总长度为

228.29 m。列车的高度为 3.82 m，升弓和降弓安装在头车上，头车的外形如图 2 所示。



图 1 列车整体模型



图 2 头车外形

### 1.2 运行场景模型

高速列车运行场景复杂多样，路基结构也有较大差异，明线运行时常见的典型路基地面结构有：平直地面、不同高度的路堤、高架桥等。本文系统选择了平整地面、3 m 路堤、6 m 路堤及高架桥四类路基结构进行横风气动特性的研究，这四种路基结构涵盖了明线运行常见的典型情况，能够反映因为路基不同带来的影响。不同场景的计算模型如图 3 所示，列车距离轨面高度为 0.176 m。

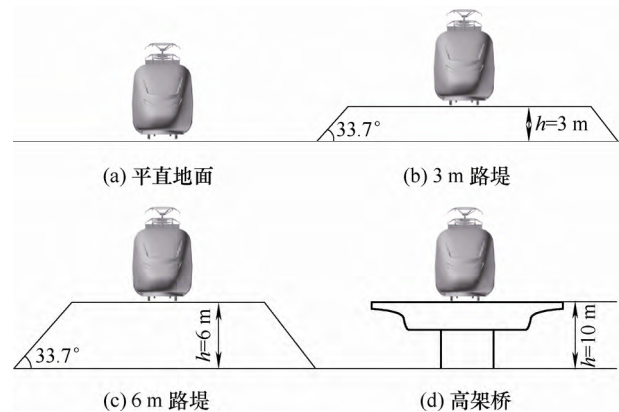


图 3 不同运行场景示意图

### 1.3 计算方法

本文研究的列车运行速度为 200 km/h，马赫数小于 0.3，因而控制方程选用三维非定常不可压缩雷诺平均 N-S 方程，流场计算方法采用目前工程上应用最为广泛的流场计算方法-压力耦合方程组的半隐式方法(SIMPLE 算法)，湍流模型采用  $k-\omega$  SST 模型<sup>[14]</sup>，为控制物面处的边界层网格数量并保证流场计算精度，在壁面处使用了标准壁面函数。

$k-\omega$  SST 模型可描述为

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j k - (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \tau_{ij} S_{ij} - \beta^* \rho \omega k \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] =$$

$$P_\omega - \beta\rho\omega^2 + 2(1-F_1)\frac{\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega}\frac{\partial k\partial\omega}{\partial x_j\partial x_j} \quad (2)$$

式中,  $t$  为时间,  $\rho$  为密度,  $k$  为湍动能,  $x_j$  为方向坐标,  $j=1,2,3$ , 依次表示长、宽、高方向;  $u_j$  为气流速度分量,  $\sigma_\omega$ 、 $\sigma_{\omega 2}$ 、 $\sigma_k$ 、 $\beta$ 、 $\beta^*$ 、 $\gamma$  为经验常数,  $\omega$  为湍流比耗散率,  $F_1$  为开关函数,  $\mu_t$  为涡黏性系数。

## 2 计算条件与网格分布

### 2.1 计算条件

流场计算域如图 4 所示, 远场压力取为 1 个大气压, 温度为  $T=288\text{ K}$ , 参考面积取列车最大横截面面积。远场边界为无反射边界条件。流入边界、流出边界和顶部边界均为远场边界条件, 车体为无滑移固壁边界条件。为模拟地面效应的影响, 将地面设置为移动壁面, 移动速度与来流速度相等。

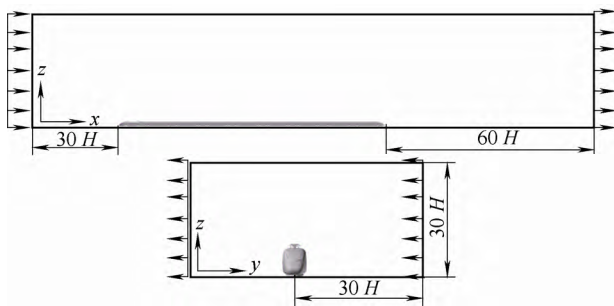


图 4 计算域

### 2.2 网格分布

网格的划分和网格质量对计算结果的计算效率、收敛性和精确性尤其重要。本文使用 CFD 软件 STAR-CCM+ 进行模拟计算。空间体网格采用六面体网格, 同时在车体表面及地面处生成边界层网格, 边界层总厚度为 30 mm,  $y^+$  值在 30~100。加密尾流、列车表面和受电弓等对流场影响比较大的区域的网格。空间网格分布和车体表面网格如图 5 和图 6 所示。

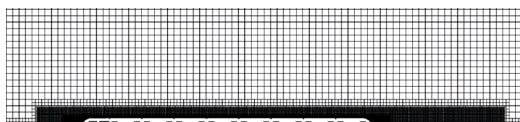


图 5 空间网格分布

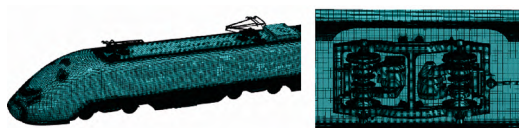


图 6 车体特征部位面网格

### 2.2 网格无关性

为了验证网格布置方案对计算精度的影响, 对三编组列车模型, 采用 Trim 网格和边界层 Prism 网格相结合的方式, 在第一层网格高度满足壁面函数要求的前提下, 使用 STAR-CCM+ 划分四套网格, 网格数量分别为 1 800 万、2 200 万、3 100 万、4 800 万, 分别进行计算验证。结果如图 7 所示。

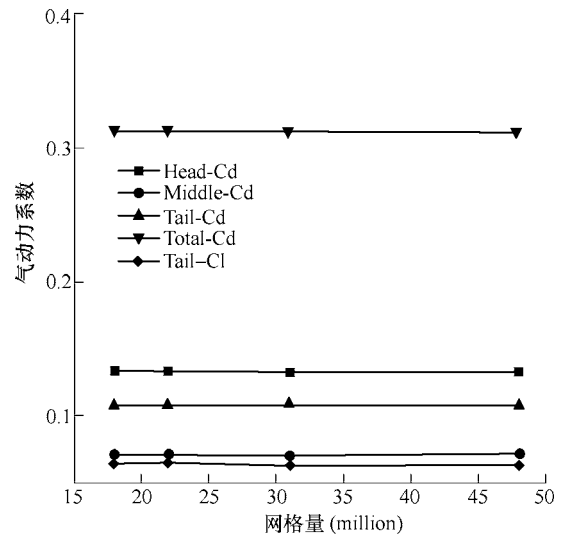


图 7 网格无关性特征曲线

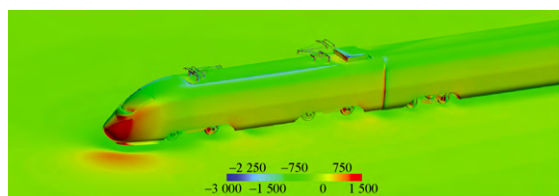
从图 7 中可以看出, 在网格尺寸合理的情况下, 不同的网格布置方案对各节车气动系数的计算结果影响不大。在保证计算精度的前提下, 同时兼顾计算效率, 对于本文研究的九编组真实列车外形, 选用 5 000 万网格量级的网格布置。

为了充分研究路基结构在不同横风强度下对列车气动性能的影响, 对本文研究的四种路基结构, 分别对列车运行速度为 200 km/h, 横风速度为 20、30 m/s、35 m/s、40 m/s, 风向角为  $90^\circ$  条件下的 16 个组合工况进行气动性能的仿真计算。

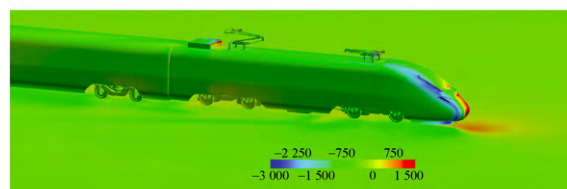
## 3 结果分析

### 3.1 列车表面及空间压强分布

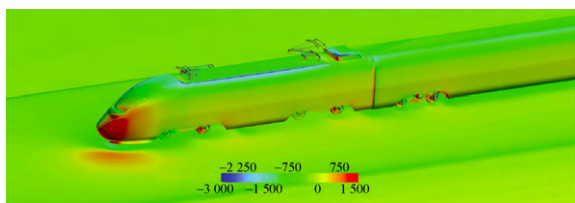
高速列车的流场结构决定了列车的气动性能, 列车在横风条件下气动性能恶化, 与平直地面相比, 复杂路基结构如桥梁、路堤等将显著改变列车的周围流场从而影响列车的气动特性。其中, 列车表面的压力分布对整车气动力分布至关重要, 直接影响列车各个部分气动力的大小, 与列车运行安全性息息相关。以横风风速为 20 m/s 为例, 图 8、图 9 分别给出了不同路基结构下头尾车的表面压力分布情况。



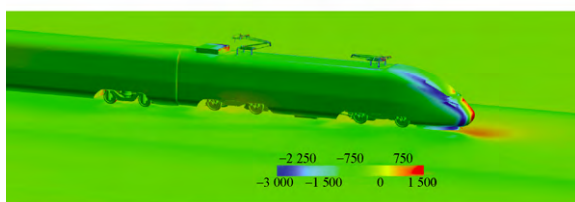
(a) 平直地面 - 头车迎风侧



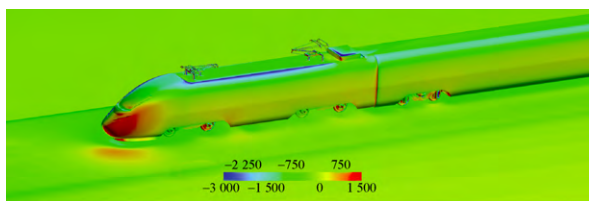
(b) 平直地面 - 头车背风侧



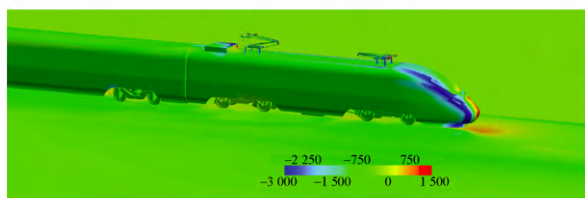
(c) 3 m 路堤 - 头车迎风侧



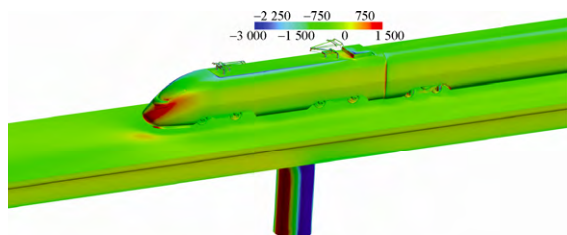
(d) 3 m 路堤 - 头车背风侧



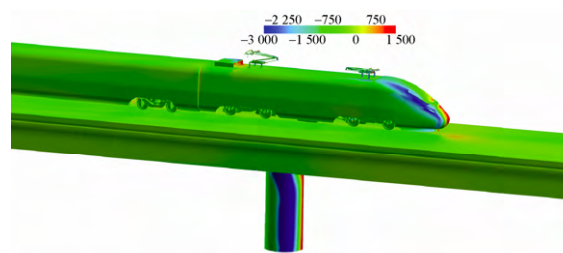
(e) 6 m 路堤 - 头车迎风侧



(f) 6 m 路堤 - 头车背风侧

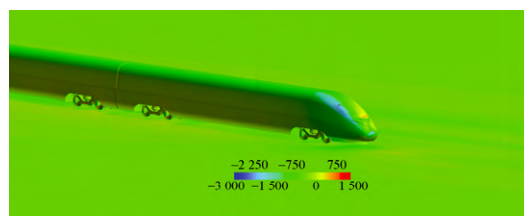


(g) 高架桥 - 头车迎风侧

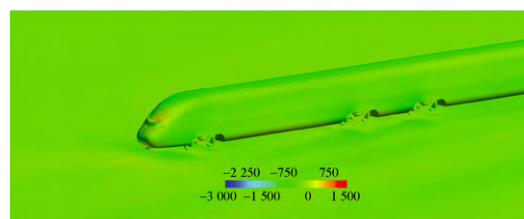


(h) 高架桥 - 头车背风侧

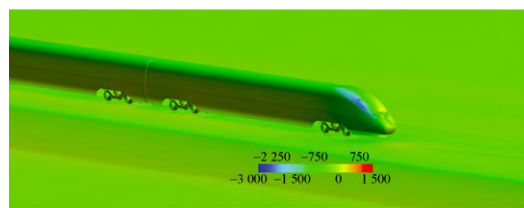
图8 头车迎风侧及背风侧压力云图(Pa)



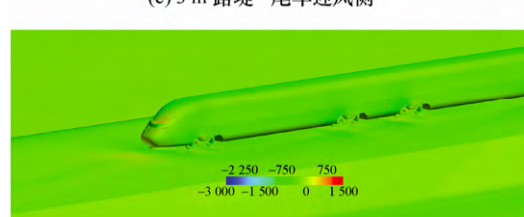
(a) 平直地面 - 尾车迎风侧



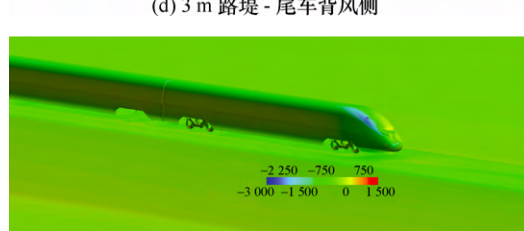
(b) 平直地面 - 尾车背风侧



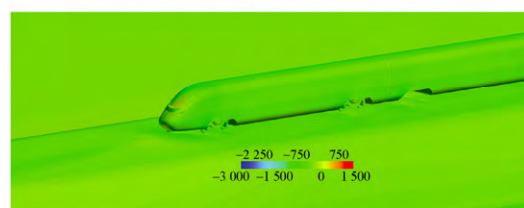
(c) 3 m 路堤 - 尾车迎风侧



(d) 3 m 路堤 - 尾车背风侧



(e) 6 m 路堤 - 尾车迎风侧



(f) 6 m 路堤 - 尾车背风侧

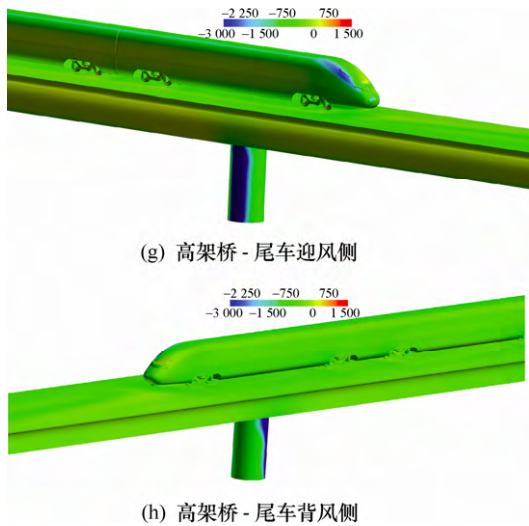
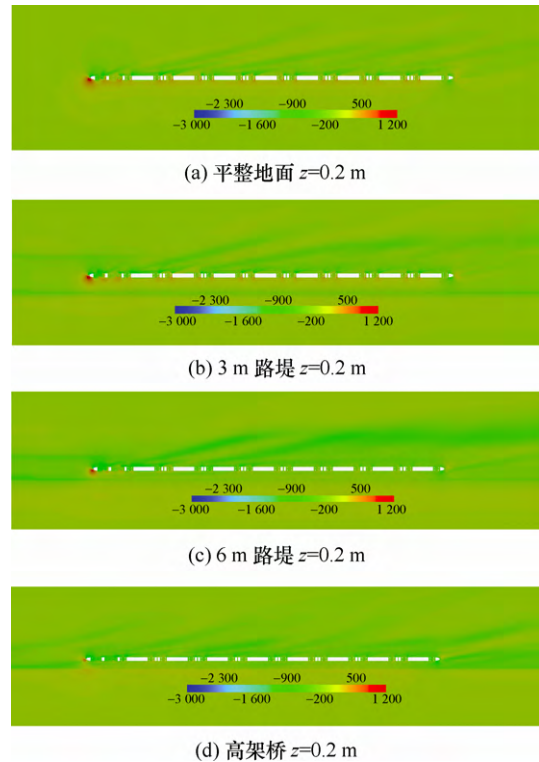
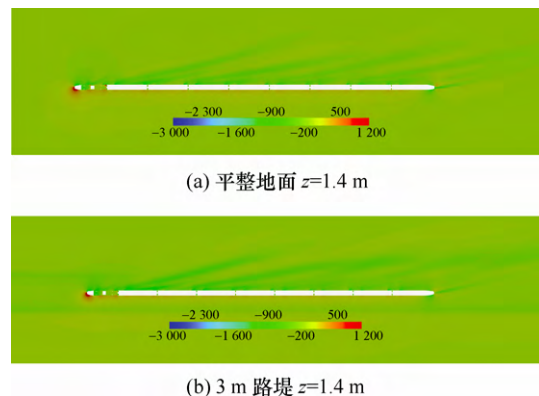


图 9 尾车迎风侧及背风侧压力云图

横风效应使列车承受压力分布呈现出非常强的非对称性。如头车压力云图所示,鼻锥正前方的滞止区域向横风迎风侧发生了比较明显的偏移。在受电弓、转向架的侧风迎风侧也出现了比较明显的正压区域。而在横风背风侧,由于大量涡系的产生、发展和脱落,背风侧出现大面积的负压区,车身基本为负压。在受到横风作用时,列车迎风面宽度增加,会有更多的气流流向车身底部与地面之间的空隙,造成车身底部结构承受阻力增大。尾车鼻锥在迎风一侧压强为负,负压值较高,鼻锥背风一侧压强接近 0 Pa,司机室玻璃附近区域压强为正,正压值较小。

高速列车行进过程中存在明显的地面效应,地面与列车之前存在显著的相互影响,例如头车鼻锥迎风面前的一部分地面为明显的正压区,越接近鼻锥,地面的压强越高。然而,路基结构的差异会明显影响着地面的压力分布。在相同的列车运行速度和横风速度下,高架桥和 6 m 路堤的地面正压区影响面积要明显小于平整地面和 3 m 路堤的正压区。这是因为在平直地面横风直接作用于列车的鼻锥,而对于路堤结构,气流在底部受到路堤结构的阻挡,减弱了对车体的直接作用;对于高架桥结构,气流不仅可以从上方也可以从桥面以下绕流,因此比平直地面的直接冲击要小。反映在头车阻力系数上,可以预测高架桥及 6 m 路堤的头车阻力系数应略小于平直地面和 3 m 路堤的阻力系数。从图中同时可以看出,头车背风侧高架桥及 6 m 路堤的鼻锥负压强度要高于平直地面及 3 m 路堤,这是因为气流在路基迎风一侧有抬升的趋势,垂直方向速度分量增加。尾车鼻锥的背风面一侧地面压强为正,但正压值较小。高架桥对应的尾车鼻锥负压强度要明显强于其他三种情况,这与高架桥的结构下部悬空,加剧车体尤其是后半部分车体附近的涡系发展有关。

列车的空间流场压力分布对于列车周围建筑物及铁路工作人员的安全有重要影响<sup>[15]</sup>。图 10 和图 11 给出了横风速度为 20 m/s 时,  $z=0.2$  m 及  $z=1.4$  m 高度处的空间压力分布。从流场结构上来,这两个高度分别对应转向架区域出现的小尺度脱落涡系和车体带来的大尺度脱落涡系;从安全性上来讲,这两个高度对应了放置在地面的行李高度和人体高度,获得这两个高度的压力分布对安全性具有重要的指导意义。可以看出 6 m 路堤的背风侧负压区面积明显大于平整地面及 3 m 路堤的负压区,同时高架桥的尾流区负压值与前三种工况相比更大,与头尾车压力分布的原因相类似,带有路堤结构时,气流在路堤迎风侧底部受到阻挡,被迫向上抬升,气流在垂向速度分量增加,在路基底部发展出较小的涡结构,同时加剧了列车在背风侧的涡系的发展,因此列车背风侧的负压强度增大。

图 10 不同运行场景  $z=0.2$  m 高度截面压力云图

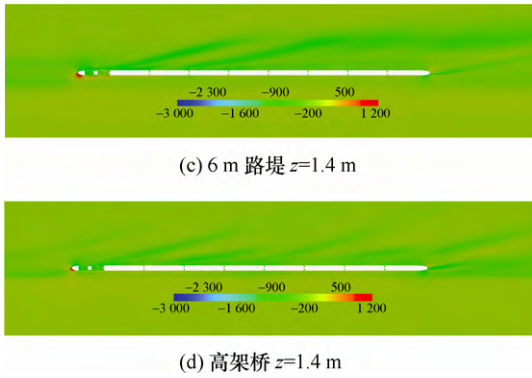


图 11 不同运行场景  $z=1.4\text{ m}$  高度截面压力云图

### 3.2 背风侧涡结构

横风条件下，列车背风涡的强度及数量对列车的气动力性能、稳定性以及气动噪声等都有很大影响，因而需要更为精细地研究。为此，从头车至尾车取 5 个截面，研究不同位置处涡系的发展。图 12 给出了截面的位置示意图。

图 13 以横风风速  $20\text{ m/s}$  为例给出了上述 5 个

不同位置处的横截面流线图，可以看出从头车附近到尾车附近旋涡结构的发展变化。可以看出，对于四种路基堤面工况，背风涡的发展有明显的相似之处：在  $x=-100\text{ m}$  附近，背风区旋涡  $V_1$  的位置靠近车体，在  $x=-50\text{ m}$  处，旋涡结构的位置向车体外侧移动且影响范围也随之增大，此时在离车体较远的位置发展出了第二个新的旋涡  $V_2$ ，对于  $x=50\text{ m}$ 、 $100\text{ m}$  的情况，离车尾越近，旋涡发展离车体侧面越远，旋涡的切面面积也越大。对于  $6\text{ m}$  路堤和高架桥的情况，不仅在背风区存在涡结构，在迎风侧车底部附近同样发展出了一个小的旋涡结构  $V_3$ ，可以看出，对于路堤较高或高架桥的情况，气流从车体迎风侧较远的区域首先跃上路堤/桥面，随之遇到车体侧面的阻挡，靠近车体底部的部分气流方向发生剧烈变化产生了小的旋涡结构。

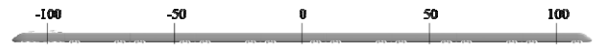
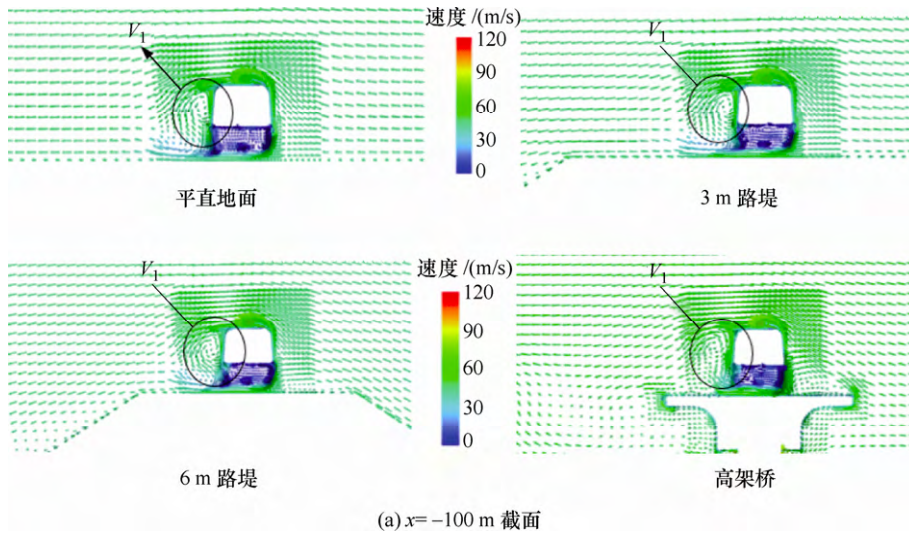
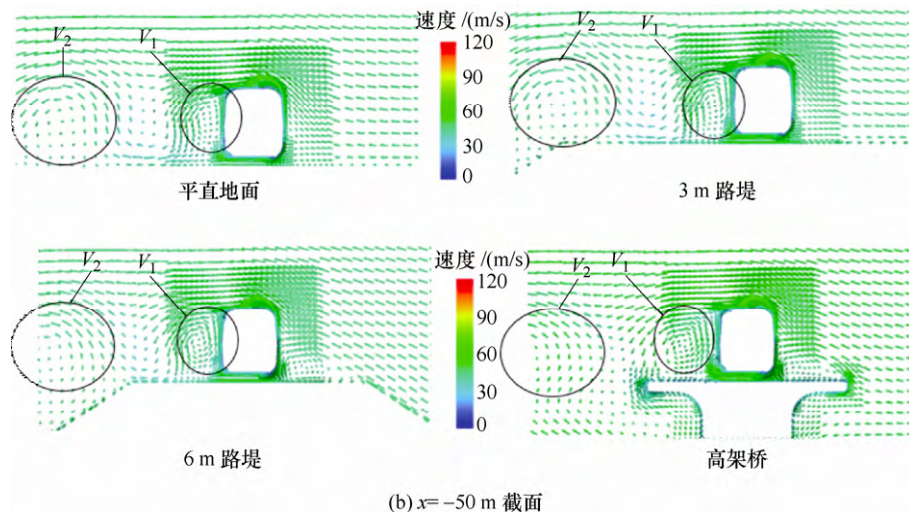


图 12 截面示意图



(a)  $x=-100\text{ m}$  截面



(b)  $x=-50\text{ m}$  截面

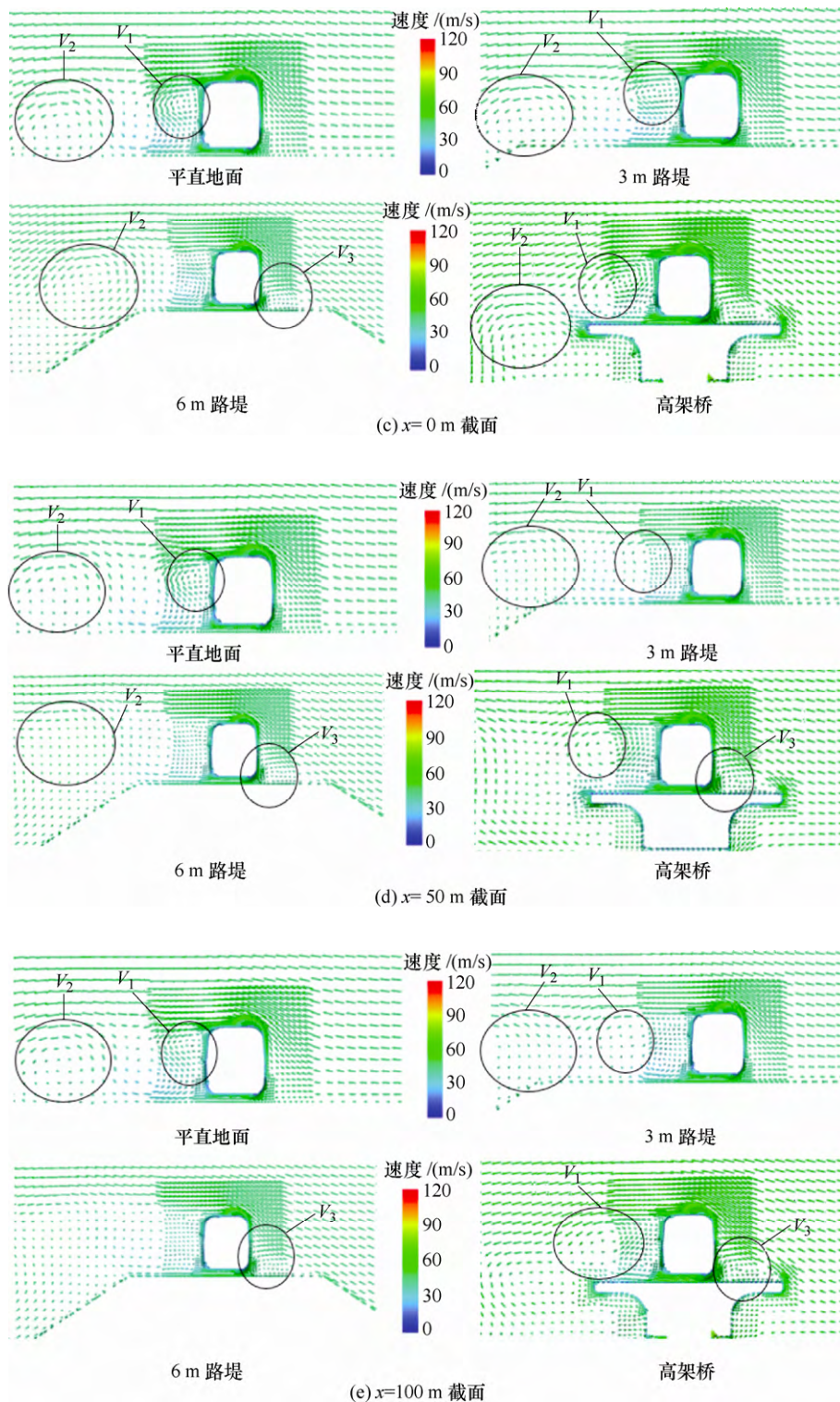


图 13 不同截面处涡系的发展

### 3.3 尾流区涡结构

列车的尾流场结构尤其是尾涡的发展对列车尾车升力及运行稳定性有很大影响。图 14 给出了不同运行场景下列车的等  $Q$  图。可以看出,尾车鼻锥处的主要涡结构有 1 个,通过等  $Q$  图中可以大体判断出旋涡的脱落位置在鼻锥司机室侧面附近,根据表面流线的分布可以看出尾涡的脱落位置在司机室迎风侧拐角附近。同时,尾车的底部及背风侧有若干

小的旋涡,这些小的旋涡结构集中在转向架舱、风挡等外形复杂的区域。高架桥场景下,不仅在车身附近存在大量的旋涡结构,可以看到在桥的侧面、桥的立柱等结构附近也发展出了大量涡结构,这些旋涡的存在会影响周围流场从而影响列车的气动力性能。图 15 给出了尾车的表面流线图,从车体表面流线来看,平直地面及 3 m 路堤的尾涡分离线在鼻锥司机室玻璃附近,6 m 路堤和高架桥的分离

线更靠近鼻锥底部，在司机室玻璃下方区域附近。另外，6 m 路堤和 3 m 路堤在车体底部转向架附近的背风涡强度要小于平直地面的背风涡强度，这

是由于迎风侧气流在路堤底部被迫抬升，气流流经堤面对车底部的直接作用减弱，因而背风涡的强度减小。

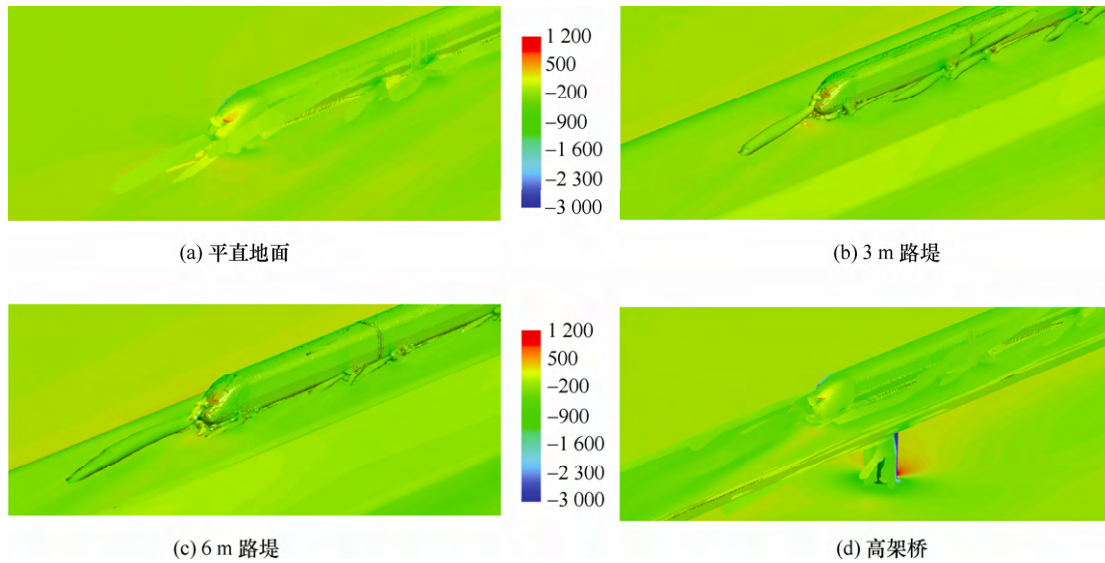


图 14 尾车等  $Q$  图( $Q=100$ )及表面流线图(Pa)

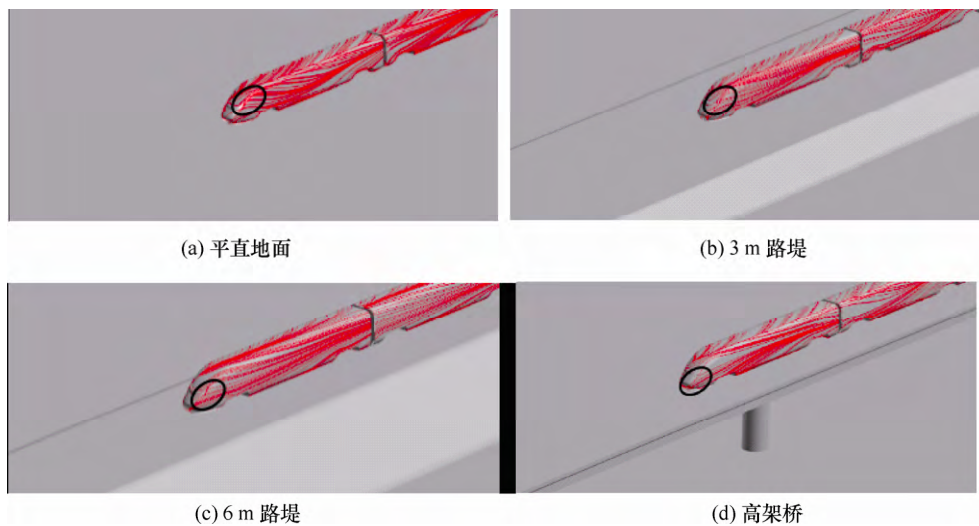


图 15 尾车表面流线图

### 3.4 气动力影响分析

列车的横风气动性能不仅受到横风速度大小的影响，同时在不同运行场景下气动性能也存在较大的差别，本文对四种运行场景分别进行了横风速度分别为 20 m/s、30 m/s、35 m/s、40 m/s 的数值计算，得到了列车各部分的气动阻力、升力、侧向力等气动力系数。

图 16 给出了不同运行场景下列车各节车气动阻力随横风速度的变化。平直地面的气动阻力系数随横风速度的增大而增加，其中头车阻力系数随横风速度增大而减小，对于 6 m 路堤和高架桥的情况，在较大横风速度下头车阻力系数出现负值，其原因是由于列车速度一定时，横风速度增大导致侧偏角增大同时列车头车背风区的负压增

大，对头车的合力形成往后拉的趋势。在 20 m/s 时，头车的阻力系数以平直地面最大，3 m 路堤和 6 m 路堤次之，高架桥最小，这与前面头车压力分布云图的分析结果一致。尾车阻力系数随横风速度增加主要表现为增加的趋势。对于平直地面和有路堤的情况，中间车的阻力系数基本相差不大，高架桥场景下，中间车阻力系数差别较为明显，这反映了在高架桥上行驶的列车，除头尾车外，其他车厢所受的气动力分配更加不均匀，造成这种现象的主要原因是高架桥桥面以下悬空，气流可以通过下方绕流，在桥面上下方都存在复杂的涡系结构，沿着车体长度方向流场的差异性更大，因而造成中间车的受力差异加剧，气动力分布的不均匀性更加明显。



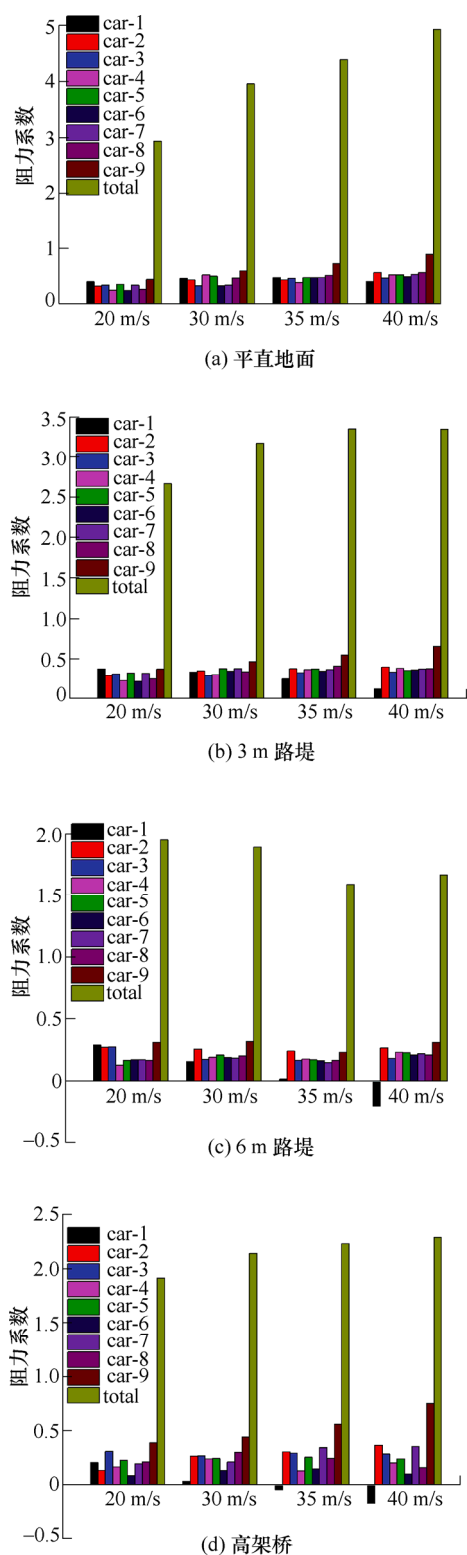


图16 气动阻力系数随横风速度的变化

列车在横风环境中行驶,头车侧向力系数是影响列车运行稳定性的重要参考量,图17给出了不同横风速度下头车的侧向力系数。可以看出,在四种场景下,所有头车侧向力系数都随着横风速度的增大而增大,6 m路堤的头车侧向力系数高于3 m路堤,四种横风条件下高架桥的头车侧向力系数最小,这是因为由于高架桥桥面以下与地面之间存在较大

的空间可以允许横风气流一部分通过从而在一定程度上减轻了对车体侧面的直接作用,直接改变了列车的地面效应。

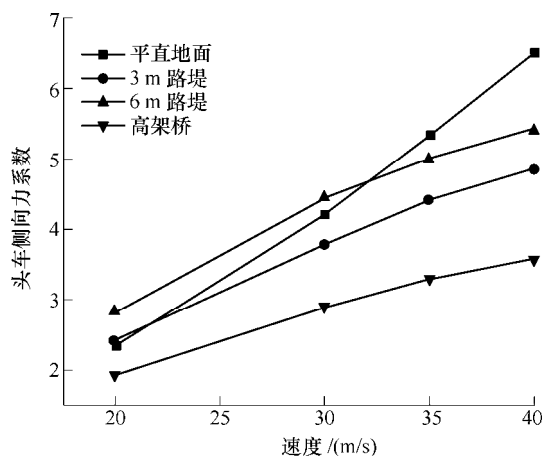


图17 头车侧向力系数随横风速度的变化

列车运行过程中受到的空气升力会影响列车车轮与轮轨之间的作用,使轮轨接触力减小,导致列车运行不稳定,其中比较重要的是列车的尾车升力。图18给出了列车的尾车升力系数在不同运行场景下的大小。可以看到尾车升力系数大小顺序依次为:平直地面 > 3 m路堤 > 高架桥 > 6 m路堤,且随着横风速度的增加,升力系数基本呈现增加的趋势。

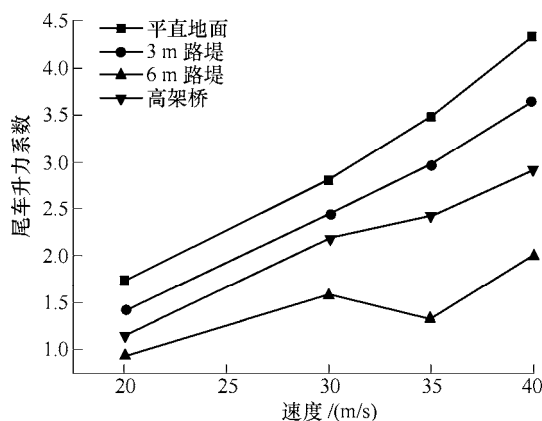


图18 尾车升力系数随横风速度的变化

## 4 结论

本文对平直地面、3 m路堤、6 m路堤以及高架桥等四种路基结构下的列车横风气动特性进行了研究,得到了列车在复杂场景下的横风绕流流场特点及气动特性,主要的结论有:

- (1) 列车横风条件下背风区以负压为主,且3 m路堤及6 m路堤场景下负压区域的面积要大于平直地面的情况。
- (2) 列车的尾部旋涡结构主要有一个由鼻锥拐

角附近发展而来的大涡,列车的转向架风挡等位置存在一系列较小的涡系,在路堤及高架桥上行驶的列车,桥梁及路堤拐角等位置也发展出不同漩涡结构。

(3) 列车从车头到尾车的背风一侧,逐渐发展和形成了靠近车体的旋涡结构和离车体较远的一个旋涡结构,离头车越远,旋涡区域越大,离车体越远。

(4) 列车的侧向力系数及尾车升力系数随着横风强度的增大而表现出增加的趋势。

(5) 列车的头车气动阻力系数随横风的增大而呈现减小的趋势,在6 m路堤及高架桥的情况下,横风达到一定强度头车阻力系数会出现负值;尾车阻力系数随横风增大而增大,中间车阻力系数整体分布较为均匀,但高架桥运行场景下中间各节车厢气动阻力表现出较强的分配不均匀性。

### 参 考 文 献

- [1] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 中国铁道出版社, 2007.  
TIAN Hongqi. Train aerodynamics[M]. China Railway Publishing House, 2007.
- [2] BAKER C J, JONES J, LOPEZ-CALLEJA F, et al. Measurements of the cross wind forces on trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(7): 547-563.
- [3] BAKER C. The flow around high speed trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6): 277-298.
- [4] SUZUKI M, TANEMOTO K, MAEDA T. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1): 209-218.
- [5] DIEDRICHS B, SIMA M, ORELLANO A, et al. Crosswind stability of a high-speed train on a high embankment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2007, 221(2): 205-225.
- [6] BOCCIOLONE M, CHELI F, CORRADI R, et al. Crosswind action on rail vehicles: wind tunnel experimental analyses[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2008, 96(5): 584-610.
- [7] 郗艳红, 毛军, 高亮, 等. 横风作用下高速列车安全运行速度限值的研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 8-14.  
XI Yanhong, MAO Jun, GAO Liang, et al. Research on the limited safe speed of a high-speed train under cross wind[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 8-14.
- [8] 李田, 张继业, 张卫华. 横风下高速列车通过挡风墙动力学性能[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 30-35.  
LI Tian, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Dynamic performance of high-speed train passing windbreak in crosswind[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 30-35.
- [9] 张亮, 张继业, 李田, 等. 横风下高速列车的非定常气动特性及安全性[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 124-135.  
ZHANG Liang, ZHANG Jiye, LI Tian, et al. Unsteady Aerodynamic Characteristics and Safety of High-speed Trains under Crosswinds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 124-135.
- [10] 张亮, 张继业, 李田, 等. 高速列车不同位置受电弓非定常气动特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 147-155.  
ZHANG Liang, ZHANG Jiye, LI Tian, et al. Research on Unsteady Aerodynamic Characteristics of Pantographs in Different Positions of High-speed Trains[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 147-155.
- [11] 缪炳荣, 谭仕发, 邬平波, 等. 非稳态风致载荷下车体结构典型载荷谱仿真研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 100-107.  
MIAO Bingrong, TAN Shifa, WU Pingbo, et al. Research of Typical Fatigue Load Spectrum Simulation of Carbody Structure Based on Non-stationary Aerodynamic Load[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(10): 100-107.
- [12] 何旭辉, 邹云峰, 杜风宇. 风屏障对高架桥上列车气动特性影响机理分析[J]. 振动与冲击, 2015, 3, 66-71.  
HE Xuhui, ZOU Yunfeng, DU Fengyu. Mechanism analysis of wind barrier's effects on aerodynamic characteristics of a train on viaduct[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 3, 66-71.
- [13] 罗建斌, 胡媛媛, 杨建恒, 等. 路堤倾角变化对高速列车侧风运行气动特性影响[J]. 计算物理, 2013(5): 675-682.  
LUO Jianbin, HU Yuanyuan, YANG Jianheng, et al. Effect of Embankment Inclining Angle on Aerodynamic Characteristics of High Speed Train Under Crosswinds[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2013(5): 675-682.
- [14] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [15] GUO D, SHANG K, ZHANG Y, et al. Influences of affiliated components and train length on the train wind[J]. Acta Mechanica Sinica, 2016, 32(2): 191-205.

作者简介:张业,男,1988年出生,博士研究生。主要研究方向为高速列车空气动力学及气动外形优化设计。  
E-mail:lixuezhangyc@126.com  
孙振旭(通信作者),男,1983年出生,博士,副研究员。主要研究方向为高速列车空气动力学、气动噪声分析与控制、气动外形优化设计。  
E-mail:sunzhenxu@imech.ac.cn