

文章编号:1005-0523(2019)03-0001-06

# 半堤半堑路况上横风下高速列车气动特性研究

杨超,李灵飞,杨晓霞

(华东交通大学机电与车辆工程学院,江西 南昌 330013)

**摘要:**为研究在半堤半堑过渡段上行驶的高速列车在横风下的气动特性,以3编组高速列车作为研究对象,结合SST  $k-\omega$  两方程湍流方程,采用流体仿真软件Fluent对行驶速度分别为250,300 km/h和350 km/h,横风风速分别为15,20,25 m/s下半堤半堑路况上高速列车的气动特性进行了仿真研究。研究表明,在相同风速与相同车速下,头车受到的侧向力和倾覆力矩最大,中间车受到的气动升力最大;随着车速与风速的增大,各列车的气动特性值均有不同程度的增大;风速对列车侧向力和倾覆力矩的影响大于车速的影响。

**关键词:**高速列车;气动特性;半堤半堑;横风

**中图分类号:**U270.11;U271.91

**文献标志码:**A

高铁列车被定义为行驶速度超过200 km/h的列车。随着列车速度的不断提升,列车行驶时的气动特性变得更加复杂,尤其当行驶的列车受到横向风作用时,列车的稳定性、安全性等大幅度下降,极大增加了列车发生侧翻的机率。不同路况上高速列车的气动特性也存在较大差异,许多学者采用数值分析、风洞实验等方法对不同路况上高速列车的气动特性进行了研究,获得了一系列成果。彭栋<sup>[1]</sup>采用数值分析方法对横风下桥堑、桥隧、桥堤3种过渡段上高速列车气动特性的差异进行了研究,得到了不同风速和车速下高速列车气动特性变化的规律。王中强<sup>[2]</sup>通过对路堑路况下高速列车的动力学特性进行仿真研究,并与平地路况进行对比,得到了高速列车的气动特性和动力学性能的变化规律。任鑫等<sup>[3]</sup>数值模拟了横风下不同行车路况上高速列车的气动特性,并对不同车速、风速和路堤高度对机车的气动特性产生的影响进行了分析。宋琛<sup>[4]</sup>针对强横风下曲线桥梁路况上高速列车的行车安全性进行了研究,研究表明列车的行车安全性受到气动力与曲线超高的影响。李振<sup>[5]</sup>研究分析了横风作用下复线路堤上高速列车的气动特性与行驶安全性问题,得到了高低两种路堤上不同的安全临界车速。张业等<sup>[6]</sup>通过分析强横风下不同路基上高速列车的气动特性的差异性,为保证列车的行车安全提供了参考。

目前,针对横风下路堤、路堑、桥梁等路况上列车的气动特性的研究较多,但是对于特殊路况上高速列车的气动特性研究还较少,如半堤半堑路况。半堤半堑路况因同时存在堑坡和堤坡两种特殊结构使得高速列车在半堤半堑路况上行驶时的气动特性不同于路堤和路堑路况上高速列车的气动特性;因此,对半堤半堑路况上高速列车的气动特性进行研究是十分必要的。本文将采用数值模拟的方法,对不同横风风速和车速下半堤半堑路况上高速列车的气动特性进行研究。

## 1 基本理论与数值方法

### 1.1 流体基本理论

当列车最大行驶速度为350 km/h时,换算为马赫数大约等于0.286,小于0.3马赫,认为高速列车附近

收稿日期:2018-12-17

作者简介:杨超(1969—),男,教授,博士,研究方向为高速列车气动特性、故障诊断与健康评估。

的空气流场是不可压缩流场;因此,最大行驶车速不超过 350 km/h 时,列车附近的空气流场都按此处理。湍流流场则选用在近壁处有较好表现的 SST  $k-\omega$  两方方程进行模拟。总之,采用三维、不可压缩、定常的流体基本控制方程与 SST  $k-\omega$  两方方程对流场进行求解。不可压缩流基本控制方程如下<sup>[7]</sup>:

质量守恒方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: $u, v, w$  分别为 3 个坐标方向上的速度分量; $x, y, z$  为坐标分量。

动量守恒方程(也可称为 Navier-Stokes 方程,简称 N-S 方程)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

式中: $u_i$  为速度在 3 个坐标方向上的速度分量; $x_i, x_j$  为坐标分量; $\rho$  为空气密度; $\mu$  为空气动力粘度。

在不可压缩流中,流体的能量守恒方程与质量守恒方程存在不耦合现象;因此在不可压缩流中一般不涉及能量方程。

## 1.2 列车与路况模型

选择某 CRH3 型列车作为研究对象,因实际车体中包含有受电弓、车门、转向架等结构,在建立三维模型时若将这些结构考虑在内,则在后续网格划分中使得网格数量急剧增大,从而增加计算时间,甚至导致现有工作站不能求解<sup>[8]</sup>。需将列车做如下简化:将实际多节车体简化为三节车厢,包括头车、中间车和尾车;忽略受电弓、车门、车窗、转向架等结构<sup>[9]</sup>。简化之后的车体总长 78 m,宽 3.38 m,高 3.7 m,三维模型如图 1 所示。



图 1 列车三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of train

单线半堤半堑路况的施工断面如图 2 所示。为保证后续划分网格时得到高质量网格(网格质量大于 0.4),需对排水沟结构进行简化,即将排水沟结构简化为与路基持平的地面结构,但简化排水沟结构可能会使得迎风侧高速列车的外流场发生改变,可能影响到列车的气动特性。对排水沟等结构进行简化之后的半堤半堑路况模型如图 3 所示,列车距离路堤面高度为 0.4 m。

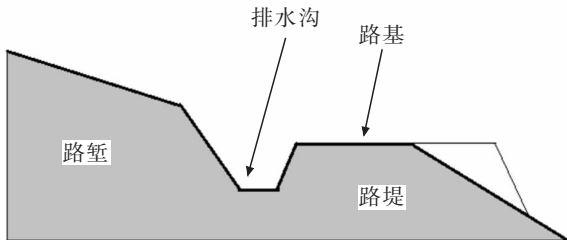


图 2 半堤半堑路况施工断面图

Fig.2 Construction sectional drawing for the road condition of part cut and part fill section

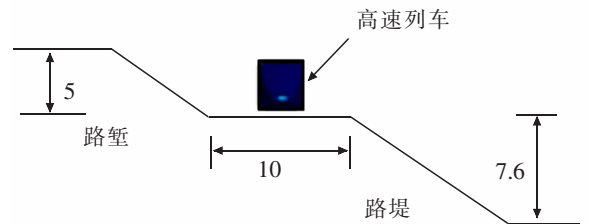


图 3 半堤半堑路况简化模型(单位:m)

Fig.3 Simplified road condition model of part cut and part fill section(Unit:m)

## 1.3 计算区域及边界条件

为保证列车在设定的计算域中阻塞率低于 5%,计算域的长、宽、高的设定遵循以下要求:计算域的长度不小于列车模型总长度的 5 倍,宽度不小于列车模型宽度的 20 倍,高度不小于列车模型高度的 16 倍;因此设置计算域长为 500 m,宽为 100 m,高为 60 m,如图 4 所示。

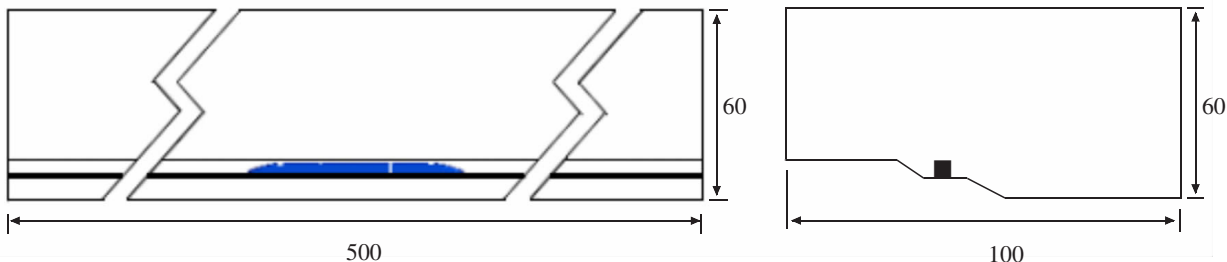


图 4 计算域尺寸(单位:m)

Fig.4 Computational domain size (Unit: m)

边界条件的设置如图 5 所示,ABCD 面与 ABGH 面设置为速度入口边界;CDEF 面和 E-FGH 面为压力出口边界;底面 BCFG 为滑移边界,滑移速度与列车行驶速度相同,方向相反;顶面 ADEH 为对称边界;列车设置为无滑移壁面边界条件<sup>[10]</sup>。

1.4 网格划分

本文采用非结构网格对模型进行划分,列车车体和计算域外表面选用三角形网格,计算域的内部空间选用四面体网格。为保证能真实模拟列车行进过程中周围空气的流动,在靠近列车表面处添加边界层网格,同时对列车周围部分区域进行网格加密。加密之后的网格模型如图 6 所示,网格总数约为 665 万。

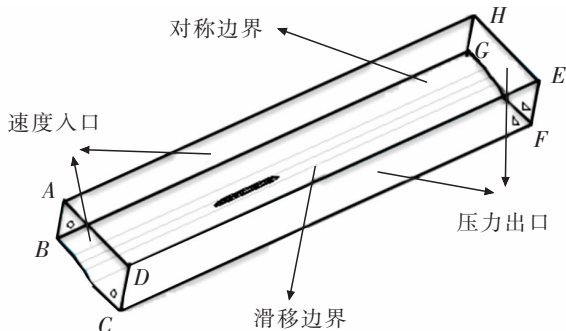


图 5 计算域边界条件

Fig.5 Boundary conditions in computational domain

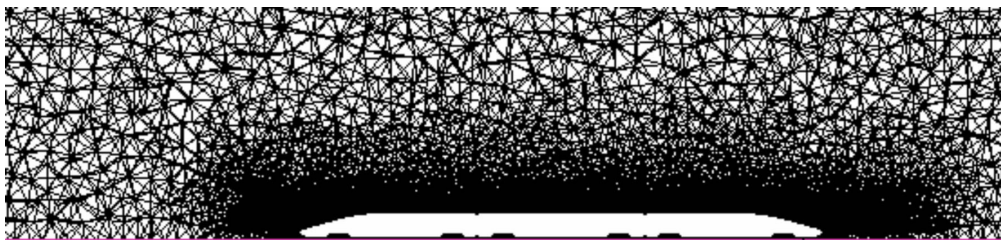


图 6 加密后网格模型

Fig.6 Mesh model after encryption

2 高速列车气动特性分析

在列车空气动力学中,横风被定义为风前进方向与列车前进方向呈 90°夹角时的侧向风。横风对行进中的列车有较大影响,尤其是当车速较高时,列车的稳定性、安全性受到极大的威胁。本文选用基于有限体积法的计算流体力学软件 Fluent,选用 SIMPLE 算法和二阶迎风离散格式,对 15,20 m/s 和 25 m/s 3 种风速及 250,300 km/h 和 350 km/h 3 种车速下高速列车在半堤半堑路況上行驶时的气动特性进行研究,主要包括侧向力、气动升力和倾覆力矩。

表 1 所示为列车以 250,300 km/h 和 350 km/h 速度行驶时,分别受到 15,20 m/s 和 25 m/s 3 种不同横风风速影响下各车的侧向力值和升力值。对比表 1 中的数据,对于侧向力可得以下结论:① 当车速一定时,随着风速的增加,各车所受到的侧向力也快速增大。例如,车速为 350 km/h 时,头车在 25 m/s 风速下受到的侧向力是 20 m/s 风速下的 1.36 倍,是 15 m/s 风速下的 1.9 倍。② 当风速一定时,随着车速的增加,各车所受侧向力也增大,但增大的幅度较小。例如,风速为 20 m/s 时,350 km/h 车速下头车所受侧向力比 300 km/h 车速下头车所受侧向力增大 9.35%,比 250 km/h 车速下头车所受侧向力增大 26.23%。③ 风速和车速一定时,

头车所受到的侧向力最大。例如,风速为 25 m/s、车速为 350 km/h 时,头车受到的侧向力比中间车受到的侧向力高 124.38%,比尾车受到的侧向力高 693.87%。对于升力可得以下结论:①当车速相同时,随着风速的增大,各车所受气动升力也增大。例如,车速为 300 km/h 时,25 m/s 风速下中间车所受气动升力是 20 m/s 风速下中间车的 1.3 倍。②当风速相同时,各车所受气动升力随车速的增加而减小。例如,风速为 25 m/s 时,350 km/h 车速下尾车所受气动升力比 300 km/h 车速下的气动升力减小 33%,比 250 km/h 车速下的气动升力减小 49.22%。③风速和车速一定时,中间车所受到的气动升力最大,尾车受到的气动升力最小。例如,风速为 20 m/s、车速为 350 km/h 时,中间车所受气动升力比头车高 16.71%,比尾车所受气动升力高 241.12%,头车比尾车高 192.29%。

表 1 不同风速和车速下各列车侧向力和升力

Tab.1 Lateral forces and aerodynamic lifts of each carriage at different wind speeds and vehicle speeds

风速/(m/s)	车速/(km/h)	侧向力/N			升力/N		
		头车	中间车	尾车	头车	中间车	尾车
15	250	26 438	10 403	-1 080	5 776	6 249	3 507
	300	30 941	11 315	-3 592	6 400	11 719	3 555
	350	34 170	10 290	-4 787	6 269	10 946	3 053
20	250	38 528	18 080	-1 975	10 411	10 944	5 535
	300	44 472	18 680	-5 398	11 151	13 038	5 375
	350	48 633	18 606	-6 828	10 505	12 260	3 594
25	250	51 806	26 132	-3 247	15 466	15 959	11 963
	300	59 106	28 191	-7 035	15 245	15 900	9 069
	350	64 931	28 939	-8 179	14 955	15 072	6 075

表 2 为不同风速和车速下各列车的倾覆力矩。对比表 2 中的数据,可得以下结论:①当车速相同时,随着风速的增加,各车所受倾覆力矩也快速增大。例如,车速为 250 km/h 时,25 m/s 风速下中间车所受倾覆力矩是 20 m/s 风速下中间车所受倾覆力矩的 1.42 倍,是 15 m/s 风速下中间车所受倾覆力矩的 2.39 倍。②当风速一定时,随着行车速度的增加,各车所受倾覆力矩也增大,但增加的幅度较小。例如,风速为 20 m/s 时,350 km/h 车速下头车所受倾覆力矩比 300 km/h 车速下头车所受的倾覆力矩高 8%,比 250 km/h 车速下尾车所受的倾覆力矩高 21.76%。③风速和车速一定时,头车所受倾覆力矩高于其余两车的倾覆力矩,尾车所受倾覆力矩最小。例如,风速为 25 m/s、车速为 350 km/h 时,尾车所受倾覆力矩占比达 61.98%,中间车所受倾覆力矩占比为 34.23%,头车所受倾覆力矩占比最小,为 3.79%。

表 2 不同风速和车速下各列车的倾覆力矩

Tab.2 Overturning moments of each carriage at different wind speeds and vehicle speeds

风速/(m/s)	车速/(km/h)	头车/(N·m)	中间车/(N·m)	尾车/(N·m)
15	250	-39 095.47	-19 213.89	-2 511.47
	300	-45 053.23	19 305.48	-3 086.08
	350	-48 887.15	-19 415.78	-4 740.19
20	250	-59 413.41	-32 419.36	-2 124.49
	300	-66 977.85	-33 989.78	-2 577.07
	350	-72 339.61	-34 422.97	-3 530.27
25	250	-81 548.07	-45 880.45	-4 731.046
	300	-91 006.38	-50 249.84	-5 564.95
	350	-99 023.63	-52 523.19	-5 935.12

以風速 25 m/s、車速 350 km/h 下高速列車的氣動特性為例進行分析,圖 7 和圖 8 分別為高速列車上距離頭車鼻尖 13 m(頭車)、39 m(中間車)和 65 m(尾車)的 3 個不同位置的截面壓力雲圖及外流場圖。從圖 7 可以看到,頭車和中間車迎風側大部分區域為正壓,背風側大部分區域為負壓,且正負壓差相差較大,頭車迎風側的正壓區域明顯大於中間車,頭車最大壓差要大於中間車,頭車受到的側向力和傾覆力矩最大,增加了頭車側翻的可能性。尾車迎風側和背風側大部分區域為負壓,壓差較小,受到的側向力和傾覆力矩較小。由圖 8 可得,列車在迎風側均無漩渦,而在背風側存在漩渦,但數量、形狀和大小均不同。頭車背風側存在一個漩渦且靠近列車右下角;中間車背風側存在 2 個漩渦,一個靠近列車右下角,形態較小,另一個靠近列車中部,形態明顯;尾車背風側存在 3 個漩渦,右上角的漩渦形態較小,靠近列車右側和堤坡上的 2 個漩渦形態較明顯。一般漩渦所在的位置,負壓也較大。對比圖 7 和圖 8 發現:由於頭車頂部的最大負壓區域較小,頭車頂部和底部的壓差較小,受到的氣動升力小。對於中間車來說,由於其周圍最大的漩渦靠近列車中部偏上,再加上頂部原有的負壓,中間車中部以上的負壓值大於底部負壓,列車受到正的气動升力,且氣動升力較大。尾車頂部的最大負壓區雖然較大,但是和底部的負壓值相差不大,因而氣動升力也較小。

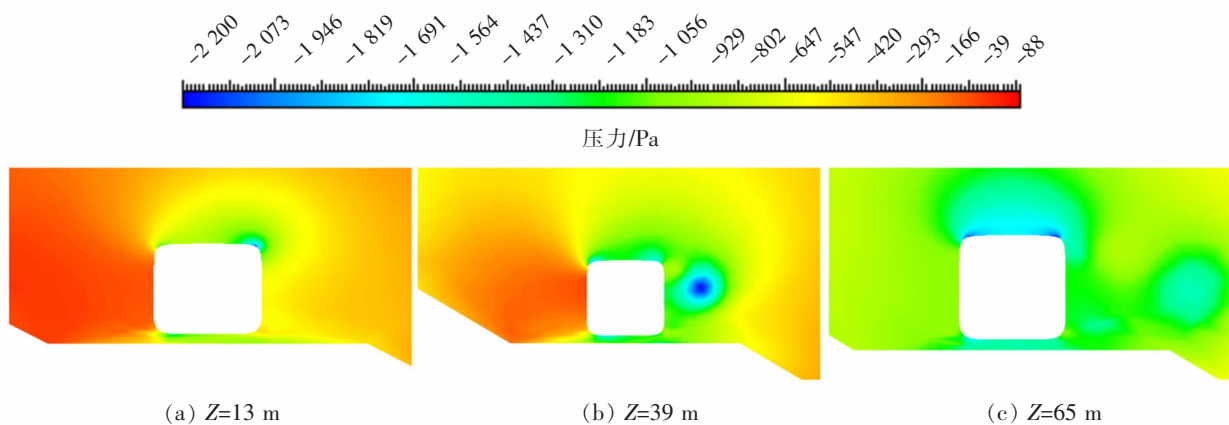


圖 7 風速 25 m/s, 車速 350 km/h 下各車壓力雲圖

Fig.7 Pressure cloud of three carriages at wind speed of 25 m/s and vehicle speed of 350 km/h

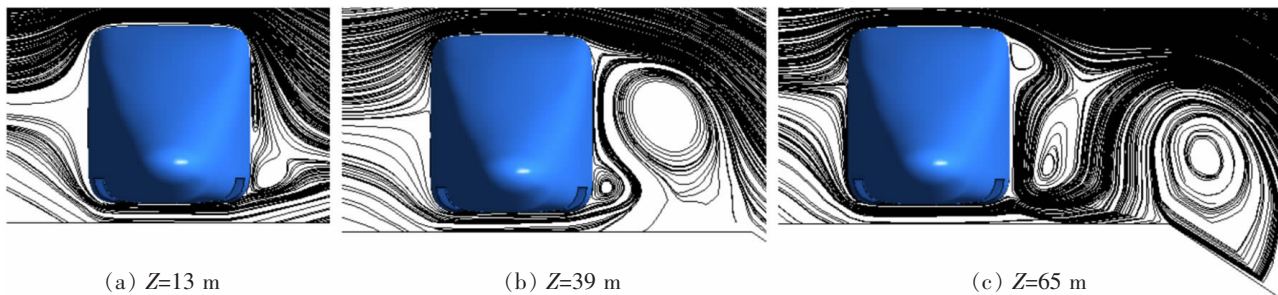


圖 8 風速 25 m/s, 車速 350 km/h 下各車外流場

Fig.8 Diagram of external flow field of three carriages at wind speed of 25 m/s and vehicle speed of 350 km/h

### 3 結論

以某 CRH3 系列高速列車為研究對象,針對列車在半堤半堑過渡段上行駛時的氣動特性進行了仿真研究與分析,得出如下結論:

1) 車速一定時,隨著風速的增加,各車所受到的側向力快速增大;當風速一定時,各車的側向力隨車速的提高而增大,但是幅度較小。風速對列車側向力的影響要大於車速的影響。在風速和車速一定時,頭車所

受到的侧向力最大。

2) 车速相同时,随着风速的增大,各车所受气动升力增大;风速相同时,随着车速的提高,各车气动升力在减小。当两者都一定时,中间车所受到的气动升力最大,尾车受到的气动升力最小。

3) 车速相同时,随着风速的增加,各车所受倾覆力矩快速增大;风速一定而车速不同时,随着车速的提高,各车受到的倾覆力矩也增大,但增幅较小。风速和车速都一定时,头车所受倾覆力矩高于其余两车的倾覆力矩,尾车所受倾覆力矩最小。

#### 参考文献:

- [1] 彭栋. 桥梁与其它类型线路过渡段车辆气动特性及优化措施[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [2] 王中强. 路堑环境下高速列车气动性能[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [3] 任鑫,梁习锋,杨明智,等. 横风作用下高速机车的气动性能[J]. 铁道科学与工程学报,2012,9(2):84-88.
- [4] 宋琛. 横风下高速列车曲线通过的安全性[J]. 大连交通大学学报,2018,39(2):29-34.
- [5] 李振. 横风中复线路堤上高速列车气动性能和运行安全性研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [6] 张业,孙振旭,姚永芳,等. 典型路基结构对高速列车横风气动特性影响分析[J]. 机械工程学报,2018,54(4):186-195.
- [7] 张师帅. CFD 技术原理与应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2016:6-7.
- [8] 刘伟,金新灿,贾晔松. 不同路况侧风对高速列车运行安全性影响研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(3):103-107.
- [9] 宋莎嘉. 不同线路类型对车辆横风荷载及行车安全性的影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [10] 张成玉. 明线上高速列车外部流动非定常特性研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.

## Study on Aerodynamic Characteristics of High-Speed Train Running at Part-Cut and Part-Fill Railway Section under Crosswind

Yang Chao, Li Lingfei, Yang Xiaoxia

(School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to study the aerodynamic characteristics of high-speed train (HST) running at part-cut and part-fill railway transition section under crosswind, 3-group HST was taken as the study object. Based on the SST  $k-\omega$  two-way turbulence equations, FLUENT was used to study the aerodynamic characteristics of HST running at the speeds of 250, 300 km/h and 350 km/h, under crosswind action with speeds of 15, 20 km/h and 25 m/s, respectively. The study results showed that, with the same wind speed and same vehicle speed, the head-vehicle suffered maximum lateral force and overturning moment, and the middle-vehicle suffered maximum aerodynamic lift; with the increase of vehicle speed and wind speed, the aerodynamic characteristics of trains increased; the influence of wind speed on HST's lateral force and the overturning moment is greater than that of vehicle speed.

**Key words:** high speed train; aerodynamic characteristics; part-cut and part-fill section; crosswind