

文章编号: 1674—8247(2018)02—0009—05

高速铁路路堤大风测站合理布置研究

苏延文 曾永平 徐昕宇 励吾千

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:为了探究高速铁路路堤周围大风监测站横向与高度方向合理的布置位置,针对典型双线路堤结构形式,采用流体计算软件 FLUENT 建立路堤无车与路堤有车两类分析模型,分别对四种不同坡度形式的路堤线路周围的流场分布进行数值模拟。研究结果表明:路堤无车时,背风侧的风环境优于迎风侧,大风监测站横向布置建议安装在迎风侧距路堤中心线 4~7 m 处,高度方向布置在距轨面 1~3 m 范围内;路堤有车模型中风速沿路堤的横向与高度的二维分布与无车模型呈现相同规律;列车的不同气动力随路堤坡度、风向角的变化趋势各不相同。

关键词:高速铁路;路堤;风速仪;合理布置;计算流体力学

中图分类号:U270.11 **文献标志码:**A

Study on Rational Location of Wind Anemometer on High Speed Railway Embankment

SU Yanwen ZENG Yongping XU Xinyu LI Wuqian

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to investigate rational location of wind anemometer in lateral and altitude-direction on high speed railway embankment, for typical double embankment structures, the fluid calculation software was adopted to establish two kinds of analysis model, including embankment structures with vehicle and without vehicle, the flow field distribution of embankment with four different slope forms was numerically simulated respectively. The research results show that when there is no vehicle on the embankment, wind environment of leeward side is better than that of the windward side, the transverse location of wind anemometer is recommended to install at 4~7 m away from the center line of embankment on the windward side, and the height direction is located at 1~3 m away from the rail surface. The wind speed two-dimensional distribution along the lateral and height of the embankment shows the similar law for both models with vehicle and without vehicle. The different aerodynamic forces of the train vary with the slope of embankment and the wind direction.

Key words: high speed railway; embankment; wind anemometer; rational location; computational fluid dynamics

铁路周围环境对列车气动性能的影响显著,路堤、高架桥、地形过渡段等特殊地段常发生由大风引起的事故^[1-2]。例如,我国兰新铁路百里风区路段,大风不仅经常引起风沙掩埋线路,堵塞涵渠,还造成过列车被吹翻、脱轨等重大交通事故^[3]。

为减少事故发生率,许多研究者对列车在路堤、路堑等地段上的运行安全性能进行了研究。Martin 等人^[4]对路堤结构上列车的气动性能进行了分析;苗秀娟等人^[5]针对普通路堤、半路堤路堑的详细结构参数对其上运行的列车气动性能的影响进行了研究。而列

收稿日期:2017-06-22

作者简介:苏延文(1985-),男,博士,工程师。

基金项目:国家自然科学基金高铁联合基金项目(U1334201)

引文格式:苏延文,曾永平,徐昕宇,等.高速铁路路堤大风测站合理布置研究[J].高速铁路技术,2018,9(2):9-13.

SU Yanwen, ZENG Yongping, XU Xinyu, et al. Study on Rational Location of Wind Anemometer on High Speed Railway Embankment[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(2): 9-13.

车所受气动荷载的模拟计算,需要大风监测站提供的风速作为指导。由于监测点的安装位置不同,所测风速结果将有较大差异。张洁^[6]提出了不同条件下高速铁路两侧挡风墙前测风点的合理位置,以及高速列车存在时对不同路况下测风点的影响;苗秀娟^[7]模拟了峡谷桥梁的风场分布,根据列车的气动性能,建议将测风站安装在隘口中心位置以避免安装误差引起的测量误差。由上可见,监测站所测风速的合理性是列车安全行车的重要保障。然而,目前我国 TB 10621 - 2014《高速铁路设计规范》中规定风速风向监测点在桥梁、路堤等区段设置间距宜为 5 ~ 10 km^[8],而对监测点在轨道横向与高度方向的布置位置并未有明确的说明。

为此,本文针对高速铁路不同坡度的路堤结构形式,采用数值模拟方法对风区路堤上无车时的风速分布以及路堤上有车时的列车气动性能进行了讨论。研究结果对风区路堤上大风监测站的合理布置以及保障高速列车安全运行具有重要的工程实际意义。

1 计算模型和网格

基于三维不可压缩 N - S 方程,选择常用的两方程湍流模型对路堤线路周围的流场进行数值模拟计算,对应的流场控制方程^[9-10]如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \text{div}(\rho U u) = \text{div}[(\mu + \mu_t) \text{grad} u] + S_{my} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \text{div}(\rho U v) = \text{div}[(\mu + \mu_t) \text{grad} v] + S_{mx} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \text{div}(\rho U w) = \text{div}[(\mu + \mu_t) \text{grad} w] + S_{mz} \quad (4)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \text{div}(\rho U h) + \text{div}\left[\left(k + \frac{\mu_t c_p}{\sigma_t}\right) \text{grad} T\right] + S_e \quad (5)$$

湍流动能方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho U k) + \text{div}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \text{grad} k\right] + S_k \quad (6)$$

湍流动能耗散率方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \text{div}(\rho U \varepsilon) + \text{div}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \text{grad} \varepsilon\right] + S_\varepsilon \quad (7)$$

式中: u, v, w ——速度分量;

μ ——动力粘性系数;

p ——压强;

ρ ——空气密度;

e ——内能;

μ_t ——湍流粘性系数, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$;

k ——湍流动能, $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$;

ε ——湍流动能耗散率, $\varepsilon = v \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}$ 。

上述方程组中,取 $\sigma_t = 0.9$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 、 $C_\mu = 0.09$ 。可求解出 8 个未知数: $u, v, w, p, T, k, \varepsilon, \rho$ 。

本文以某高速铁路普通双线路堤结构形式为例进行研究,高度取为 5 m,计算模型如图 1 所示。从图中可以看出,在无车模型的计算流域中,为保证计算区域不对计算结果造成影响,计算域的高度取 150 m,迎风向距路堤的距离取 112 m。为避免尾流影响,背风向距路堤的距离取 162 m。出口设为压力边界条件,静压取为 0。流域顶面及两侧面均设定为对称面,地面、路堤两侧面采用无滑移的壁面边界条件。

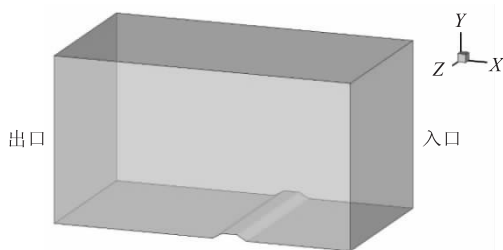


图1 路堤无车模型计算域

在路堤无车模型的基础上,添加 CRH3 列车模型,建立路堤有车模型。列车模型采用头车 - 中间车 - 尾车三节车的编组形式,其中头车和尾车的形状相同。为避免网格过多,列车简化为光滑曲面构成的几何体,不考虑受电弓、转向架、门把手等细部特征。列车表面设置为无滑移壁面边界条件。

采用结构网格进行离散。由于路堤无车模型与有车模型相差一个车体,仅给出有车模型的网格图。车体、路堤的网格划分如图 2 所示,流场的网格划分如图

3所示。路堤及车体附近网格大小为0.05 m,网格单元总数约为200万个。

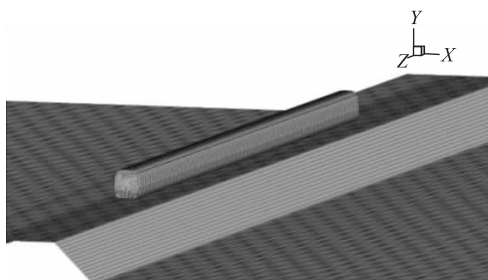


图2 路堤有车模型及路堤网格

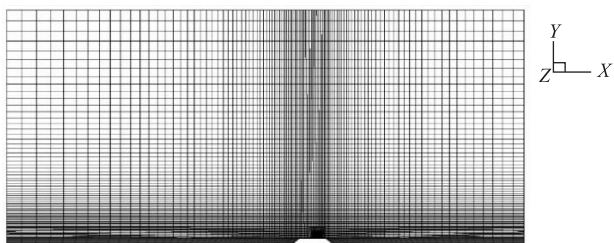


图3 路堤有车模型全局网格

2 路堤线路计算结果分析

不同的路堤坡度对线路周围风场影响不同,从而影响测风点的布置位置。本文考虑了1:1、1:1.5、1:1.75以及1:2 4种坡度。同时,为探讨风向对路堤周围风场的影响,取垂直于路堤延伸方向 0° 风向角以及 $\pm 15^\circ$ 风向角分别进行讨论。

2.1 路堤无车模型

坡度1:1时路堤周围的速度流线如图4所示,来流从右侧吹向左侧。从图中可以看出,流线较为平滑,表明计算域并未对计算结果造成影响。气流在路堤上方有明显的提升,而在背风侧,由于存在漩涡,靠近地面的风速变化剧烈,风速分布不稳定。因此,建议将风速仪安装在流速较为平稳的轨面上方位置。

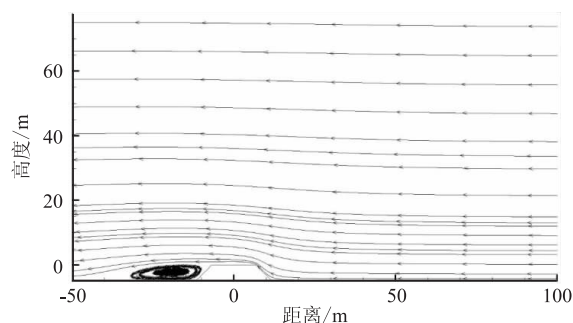


图4 1:1路堤横截面流线图

风向垂直时轨面上方迎风侧的流速分布如图5所

示。在路堤迎风侧0~3 m高度范围内,路堤坡度越陡,迎风侧风速越小;而在3~10 m高度范围内,坡度越陡,风速越大。路堤背风侧垂直高度的风速与路堤迎风侧有相同分布规律,且相同高度处风速大小低于迎风侧风速。由图5可知,不同坡度路堤工况的风速最大值出现在1~5 m高度范围内,且风速在此范围内变化非常显著。因此,将监测点布置于轨道面上方最不利位置,下文对比讨论1~5 m高度范围内的风速沿路堤横截面方向的分布。

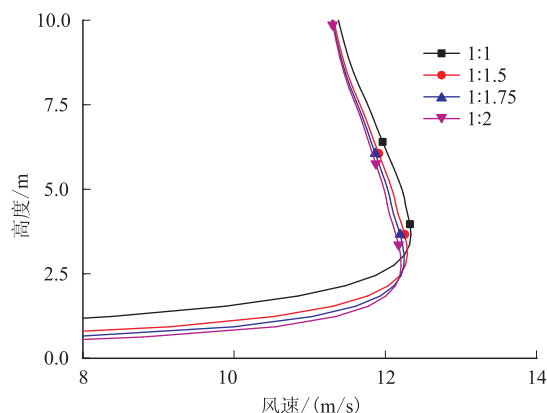


图5 迎风侧轨面上方风速

同一坡度时轨面上方不同高度处风速沿路堤的横向变化规律如图6(a)~(d)所示。图中标注的迎风侧与背风侧对应双线轨面位置。由图6可知,4种坡度的风速横向分布曲线走势基本一致。各曲线在距路堤中心线来流方向4~7 m处出现风速驻点,之后风速逐渐下降,即轨面位置处的风速小于驻点风速,且驻点处风速变化率为零,监测点位置微小的坐标变化并不会导致风速发生较大变化。因此,建议在此位置处安装测风点。此外,还可以看出,除高度1 m对应的曲线,迎风侧和背风侧的风速均大于远场来流风速,这说明以远场测风站所测风速对车速进行监测预警会影响列车的安全运行。

对比不同高度位置的驻点风速极值,可以看出,距轨面1~3 m高度处的风速大于4~5 m处的风速。因此,建议将监测点布置在轨面以上1~3 m高度范围内。

2.2 路堤有车模型

当高速列车通过路堤时,车体将改变轨面上方的流场分布,强风速监测点的布置位置需进一步论证。根据上节路堤无车结果,迎风侧范围风速高于背风侧风速,因此,在路堤有车模型中列车应位于迎风侧一侧。

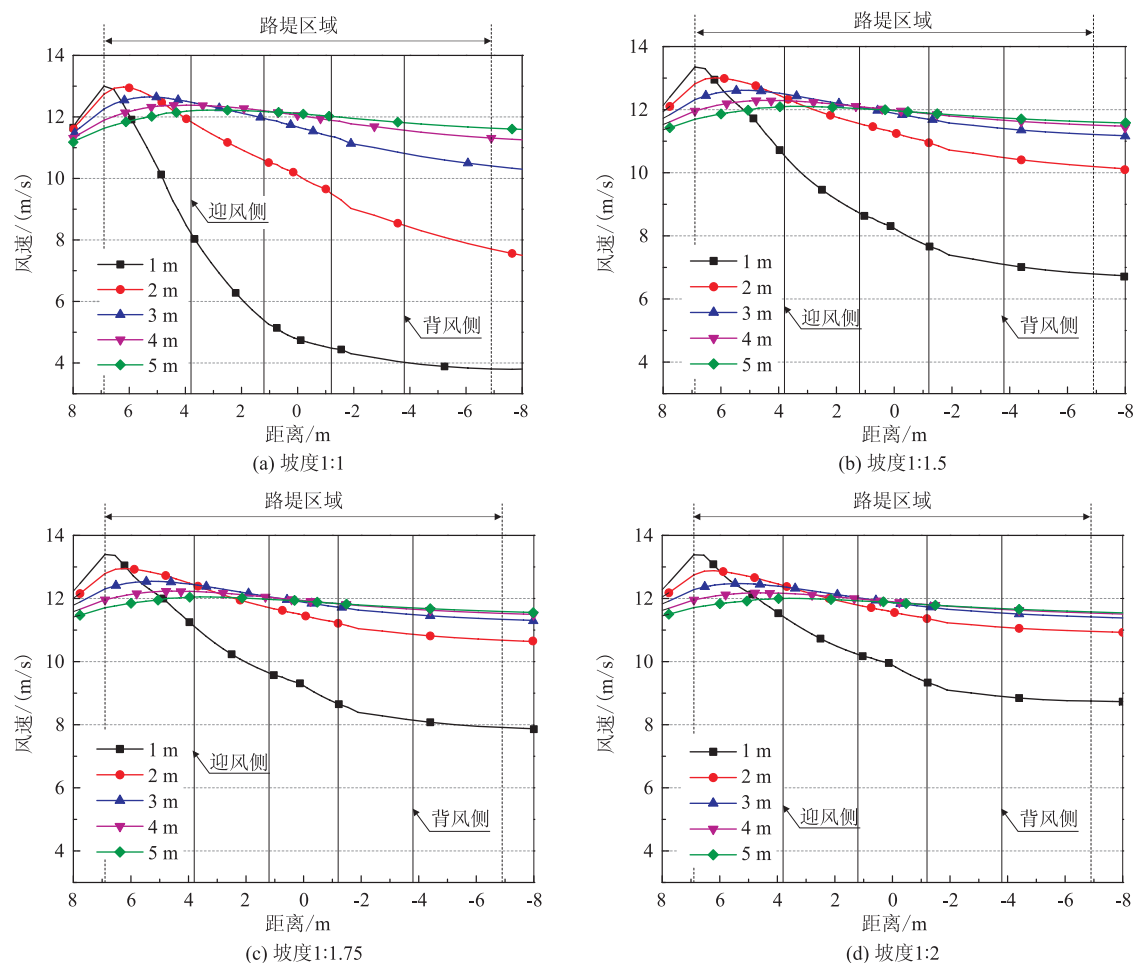


图6 不同坡度路堤上方1~5 m高度处风速对比(风向垂直于路堤)

首先,分别对上述4种不同坡度形式路堤上的列车气动力性能进行了讨论。由于4类不同坡度路堤流线分布图的规律一致,仅示出坡度为1:1时路堤有车模型的速度流线分布,如图7所示。与无车模型的流场分布相比,远场来流在列车背风面形成了较大的负压区,但在整个流场中并没有产生较大的涡流。

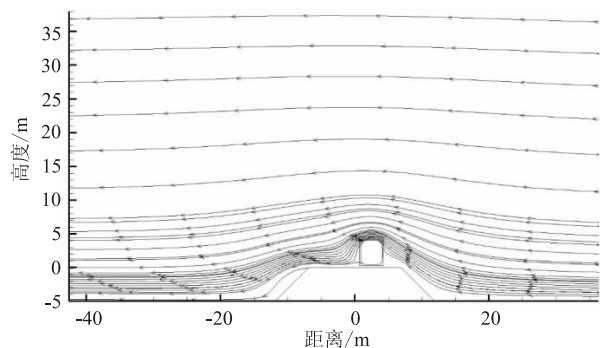


图7 1:1坡度路堤有车横截面流线图

其次,对风荷载引起列车气动力随路堤坡度与风

向角的变化规律进行说明。以列车头车为例,不同来流方向、不同坡度路堤工况下列车的升力、阻力和侧向力结果如图8所示。由图8(a)可知,列车头车的升力在来流风向垂直于路堤时最大,且升力的大小随着坡度的放缓而逐渐减小;由图8(b)可知,当空气流向偏向列车运动相反一侧时(即算例中风向角为 -15°),列车头车所受的阻力大于其它来流方向的阻力,且阻力的大小随坡度的放缓而减小;由图8(c)可知,对于侧向力当来流风向垂直于路堤时,列车头车所受的侧向力最大,且侧向力随坡度的放缓而增大,这是由于坡度越缓,来流经过路堤时竖直方向风速越小,水平方向的风速越大。

最后,针对有车工况下风速监测点的布置进行说明。路堤有车工况下不同高度的流场变化与无车路堤表面上方1 m、2 m、3 m高度处风速规律相一致。表明了路堤轨面上方1~3 m高度的风速大小可定性衡量列车的气动力水平,而路堤表面上方4~5 m高度的风速大小会低估列车所受气动力的大小。

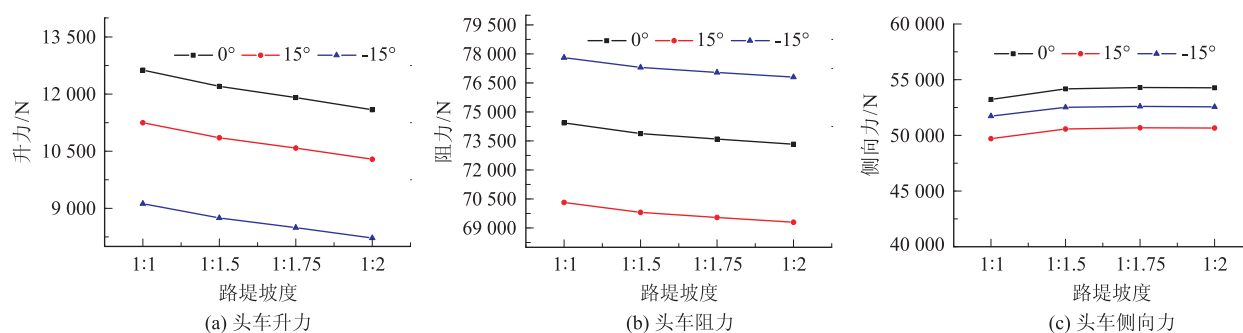


图8 各工况下头车的受力

3 结论

(1)路堤无车时,背风侧的风环境优于迎风侧,大风监测站横向布置建议安装在迎风侧距路堤中心线4~7 m处,高度方向布置在距轨面1~3 m范围内。

(2)路堤有车时,列车升力随坡度放缓而逐渐减小,当来流风向垂直于路堤时最大;列车阻力随坡度放缓而逐渐减小,当空气流向偏向列车运动相反一侧时最大;列车侧向力随坡度的放缓而增大,当来流风向垂直于路堤时最大。

(3)路堤有车模型中风速沿路堤横向与高度的二维分布与无车模型呈现相同规律,路堤有车计算结果进一步验证了测风站布置位置的合理性。

参考文献:

- [1] Andersson E, Haggstrom J, Sima M, et al. Assessment of Train-overturning Risk Due to Strong Cross-winds[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218(3): 213-223.
- [2] 徐影, 谢俊, 栾立宸. 东南沿海高速铁路沿线环境风特性研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(5): 1-7.
XU Ying, XIE Jun, LUAN Lichen. Research of Environmental Wind Characteristics of Southeast Coastal High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(5): 1-7.
- [3] 高广军, 田红旗, 姚松, 等. 兰新线强横风对车辆倾覆稳定性的影响[J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 36-40.
GAO Guangjun, TIAN Hongqi, YAO Song, et al. Effect of Strong Cross-wind on the Stability of Trains Running on the Lanzhou-Xinjiang Railway Line [J]. Journal of the China Railway Science, 2004, 26(4): 36-40.

- [4] Martin S, Marco W, Alexander O, et al. Wind Tunnel Investigation of an ICE 3 End Car on Three Standard Groundscenarios[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6/7): 345-352.
- [5] 苗秀娟, 田红旗, 高广军. 线路环境对路堤上列车气动性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 2028-2034.
MIAO Xiujuan, TIAN Hongqi, GAO Guangjun. Effect of Railway Environment of Aerodynamic Performance of Train on Embankment [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(5): 2028-2034.
- [6] 张洁. 高铁线路测风点距线路合理位置研究[D]. 湖南, 中南大学, 2011.
ZHANG Jie. Research on Optimum Setting on Anemology Station Distance From High-speed Railway [D]. Hunan: Central South University, 2011.
- [7] 苗秀娟. 峡谷桥梁铁路周围测风站选址[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(7): 1332-1337.
MIAO Xiujuan. Wind Anemometer Location Determination on Railway Bridge in Valley [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(7): 1332-1337.
- [8] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
WANG Fujun. Analysis of computational fluid dynamics: Theory and its application of CFD software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [10] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
TIAN Hongqi. Train aerodynamics [M]. Beijing: China Railway Press, 2007.

(编辑: 车晓娟 苏玲梅)