

DOI:10.11918/202207009

大风区段开孔式挡风墙对正馈线气动特性的影响

张友鹏¹, 冯强¹, 赵珊鹏^{1,2}, 王思华¹

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室(兰州交通大学), 兰州 730070)

摘要: 兰新高速铁路常年遭受风灾, 挡风墙的修建虽有效防止了列车倾覆, 但加剧了接触网正馈线的舞动。针对大风区段既有挡风墙“防车不防网”的不足, 通过设计一种开孔式挡风墙, 基于流体力学理论建立计算域模型, 对挡风墙的防风效果进行评估, 并仿真分析挡风墙孔隙率及开孔角度对于正馈线气动特性响应的规律。结果表明: 挡风墙设置一定孔隙率后, 会冲击挡风墙后形成的旋涡流场, 使流场趋于平稳; 随着孔隙率的增大挡风墙尾流接触网正馈线位置处气流增速区范围大幅减小, 且正馈线气动力系数呈明显降低趋势; 当挡风墙孔隙率为 0.3 时, 挡风墙背风侧风速残余系数为 0.46~0.69, 此时正馈线升、阻力系数下降率分别超过 41.56% 和 24.59%; 在孔隙率为 0.3, 且挡风墙设置 150° 开孔角度时, 正馈线气动力系数相较于其他角度降幅明显, 从而对于正馈线的舞动可以起到进一步的抑制作用。研究成果可为兰新高铁大风区段接触网正馈线舞动防治及挡风墙优化提供一定的理论参考。

关键词: 兰新高铁; 挡风墙; 防风效果; 正馈线; 气动特性

中图分类号: U225.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)03-0143-11

Influence of perforated wind-break wall on the aerodynamic characteristics of positive feeder in gale areas

ZHANG Youpeng¹, FENG Qiang¹, ZHAO Shanpeng^{1,2}, WANG Sihua¹

(1. School of Automatic & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory of Gansu Province(Lanzhou Jiaotong University), Lanzhou 730070, China)

Abstract: The Lanzhou-Urumqi high-speed railway has suffered from wind disasters all year round. The construction of wind-break wall not only ensures the safety of train operation, but also intensifies the galloping of catenary positive feeder. In view of the deficiency of existing wind-break wall in gale areas that “only prevents trains but not catenary”. In this paper, a kind of perforated wind-break wall was designed, and a computational domain model was established based on the theory of fluid mechanics. The wind protection effect of the wind-break wall was evaluated, and the response laws of the porosity and opening angle of the wind-break wall to the aerodynamic characteristics of the positive feeder was analyzed by simulation. The results show that after the wind-break wall was set with a certain porosity, it will impact the vortex flow field behind the wind-break wall, making the flow field tend to be stable. With the increase of the porosity of wind-break wall, the range of the airflow growth zone at the positive feeder of the catenary decreases significantly, and the aerodynamic coefficient of the positive feeder shows a significant downward trend. When the porosity of the wind-break wall was 0.3, the residual coefficient of wind velocity at the leeward side of the wind-break wall was 0.46–0.69. At the same time, the drop rate of lift and drag coefficient of the positive feeder were more than 41.56% and 24.59%, respectively. When the porosity of the wind-break wall was 0.3 and the opening angle was 150°, the aerodynamic coefficient on the positive feeder decreases significantly compared with other angles, which can play a certain role in restraining the galloping of the positive feeder. The research results can provide a certain theoretical reference for the galloping prevention of the catenary positive feeder in gale areas of the Lanzhou-Urumqi high-speed railway.

Keywords: Lanzhou-Urumqi high-speed railway; wind-break wall; windproof effect; positive feeder; aerodynamic characteristics

兰新高速铁路全长 1 776 km, 横穿甘肃至新疆境内的安西风区、烟墩风区、百里风区、三十里风区

和达坂城风区, 是世界上一次性建成通车里程最长、攻克技术难题最多的高速铁路^[1]。风区内大风频

收稿日期: 2022-07-04; 录用日期: 2022-08-02; 网络首发日期: 2024-03-15

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240315.0839.004>

基金项目: 国家自然科学基金(51867013); 甘肃省自然科学基金(23JRR850); 中国铁路北京局集团有限公司科技研究开发计划项目(202AGD03)

作者简介: 张友鹏(1965—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 赵珊鹏, zsp@mail.lzjtu.cn

繁,风力强劲,瞬间破坏性大,致使列车脱轨、倾覆等事故频发,对铁路的运营、养护和运输造成了严重的危害^[2-3],为此在铁路沿线修建了挡风墙防风工程^[4]。挡风墙的设立虽然可以防止列车遭受风袭、线路沙埋,却加剧了靠近挡风墙背风侧正馈线的舞动,使得线索、金具疲劳磨损,甚至会造成线间放电、掉线等事故发生,严重威胁高速列车运行的安全性。

目前,国内外学者对于输电线路舞动已经进行了大量研究,而对于兰新高铁接触网正馈线舞动研究相对较少。针对覆冰输电导线舞动,Den Hartog等提出垂直舞动激发机理^[5];Nigol等^[6-7]在垂直激发机理的基础上,提出扭转舞动激发机理;Yu等^[8-9]提出了偏心惯性耦合失稳机理。在兰新高铁大风区挡风墙防风研究方面,文献[10-12]对大风区高速铁路沿线不同形式挡风墙的防风效果进行了研究。李燕飞等^[13]对比分析了挡风墙不同开孔形式及排列方式对于列车所受气动力以及倾覆力矩的影响,对于挡风墙结构变化影响下的接触网正馈线气动特性未做进一步研究。李鲲^[14]针对既有挡风墙难以同时满足防止列车倾覆、保护接触网安全等要求,提出一种新型防风设施即防风走廊。在接触网附加导线舞动研究方面,李长波^[15]通过分析兰新高铁附加线舞动原因,提出了相关导线防舞措施。王玉环^[16]对挡风墙增速效应及线索同阶次共振频率进行了研究,并提出了正馈线恒张力补偿设计方案。赵珊鹏等^[17-19]分析了挡风墙尾流下附加导线的舞动机制,提出采用新型绝缘防舞装置、低风压导线等防舞措施。综上所述,兰新高铁既有沿线挡风墙的设立大多只考虑了列车防风安全问题,而忽略了接触网正馈线处的风速激增情况。在同时兼顾高速列车运行安全和接触网正馈线稳定性时,挡风墙势必较高,此时从列车角度来说已处于过保护状态,并且造价过高,经济性较差。因此,需要在风、墙、网等方面开展新的系统研究,并基于挡风墙结构设计行之有效的正馈线防舞方案。

本文在现有挡风墙的结构基础上,设计一种新型开孔式挡风墙,通过分析挡风墙的防风效果、周围流场特征变化以及不同开孔方式下正馈线气动特性的变化规律,以得到合理的挡风墙孔隙率和开孔角度,从而为兰新高铁大风区段接触网正馈线舞动防治提供更加合理、有效的解决方法。

1 数值分析与模型建立

兰新高铁接触网正馈线舞动可简化为二维圆柱绕流问题,采用二维模型研究导线舞动时不仅可以降低对于计算机硬件的要求、提高计算效率,并且得

到的结果也是偏安全的^[20],因此本文基于流体力学理论以实际尺寸建立二维模型进行研究。

1.1 基本控制方程

由于本文研究主要为低空气动力,可忽略空气流动过程中的密度变化,所以流动可看成不可压缩流动,对于不可压缩流体,其控制方程如下:

连续方程(质量守恒定律):

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

动量方程(动量守恒定律):

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为不同气压的空气密度, μ 为空气动力黏度, u 为 x 轴方向的风速, v 为 y 轴方向的风速, p 为压力。

1.2 湍流模型及计算域的确定

在湍流模型选取方面,Transition SST模型是在SST $k-\omega$ 模型基础上增加了两个运输方程及相关的经验公式,成为四方程模型,该模型避免了一般情况下对平均场进行积分的过程,具有计算要求低、计算周期短的优点。同时相关学者通过实验验证了采用Transition SST模型模拟得到的压力和摩擦力系数与实验结果更为相符,其可以更为准确地模拟圆柱绕流背风面压力和摩擦力的变化情况^[21]。本文将兰新高铁接触网正馈线舞动简化为二维圆柱绕流问题,因此采用Transition SST模型对于正馈线气动特性研究具有更好的优越性。

为保证计算模型和结果更加贴近实际,模型与现场尺寸保持一致,设置为23.8 m × 15 m。迎风侧路堤高度为2 m,挡风墙距路肩面高3.5 m,宽0.4 m,距轨道中心5.7 m,正馈线直径取23.76 mm,距路肩面7.2 m,与挡风墙水平距离为1.05 m。计算域整体网格为100万,如图1所示。

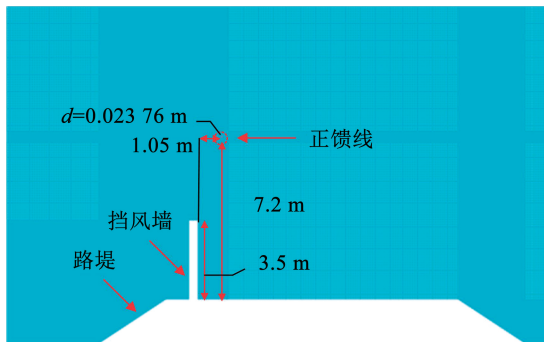


图1 挡风墙下流体计算域整体网格

Fig. 1 The mesh of entire fluid computational domain under the condition of wind-break wall

流体计算过程中,正馈线周围网格尺寸大小会直接影响到计算结果的准确性。由于离正馈线截面远近不同时流体流动参数梯度不同,正馈线近处的梯度比较大,所以正馈线截面附近的网格划分密一些,而离正馈线截面较远处的网格可以稀疏一些,对各个边线采用渐疏性节点分布。以无量纲的参数 $\gamma^+ \sim 1$ 来估算湍流情况下正馈线近壁面处网格的第1层厚度,并利用网格划分软件对整体网格进行加密,正馈线周围网格如图2所示。

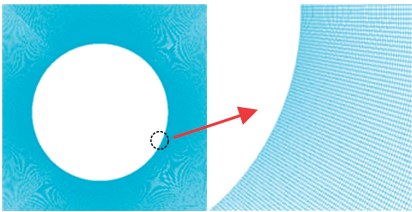


图 2 正馈线近壁面网格

Fig. 2 Mesh of the positive feeder near-wall

1.3 边界条件设置

计算域左侧边界设置为风速入口 (velocity-inlet),空气速度垂直于边界进入流场,计算域右侧边界设置为压力出口 (pressure-outlet),上、下边界、挡风墙、路堤均设置为壁面 (wall),正馈线表面设置为无滑移边界。时间步长选定为 0.005 s,计算 1 000 步,压力速度耦合算法选择 SIMPLEC,压力方程采用二阶精度离散方程,动量方程采用二阶迎风格式。

2 挡风墙对正馈线气动特性影响分析

2.1 正馈线受力分析

导线舞动的过程中流体流过其表面时会产生不

均匀的压力分布,此时单位导线会受到一个与风速方向垂直的升力和一个与风速方向水平的阻力^[22-23],如式(3)、(4)所示,其中二者所对应的无量纲系数 C_L 、 C_D 分别称为升力系数、阻力系数。导线的升、阻力系数可以在一定程度上反映正馈线的受力状况,这是分析接触网正馈线舞动的重要前提条件。正馈线所受气动力如图3所示。

$$f_L = \frac{1}{2} \rho v^2 D C_L \tag{3}$$

$$f_D = \frac{1}{2} \rho v^2 D C_D \tag{4}$$

式中: ρ 为标准气压时空气密度, v 为导线位置处风速, D 为正馈线直径。

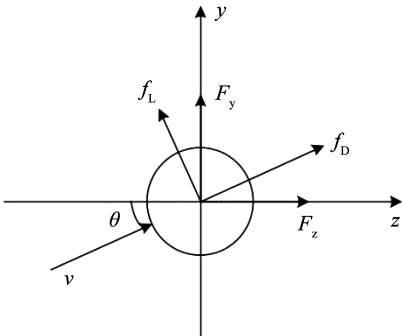


图 3 正馈线截面所受气动力示意图

Fig. 3 Aerodynamic force of positive feeder section

2.2 有、无挡风墙下正馈线气动特性分析

据现场观测兰新高铁大风区段最大风速可达 60 m/s 以上,相当于 17 级大风,但这种极端情况出现的次数并不多见,大风区段风力常年为 7、8 级,因此本文选择风速 1~30 m/s 时分析接触网正馈线气动特性。图4为有、无挡风墙下正馈线风速云图。

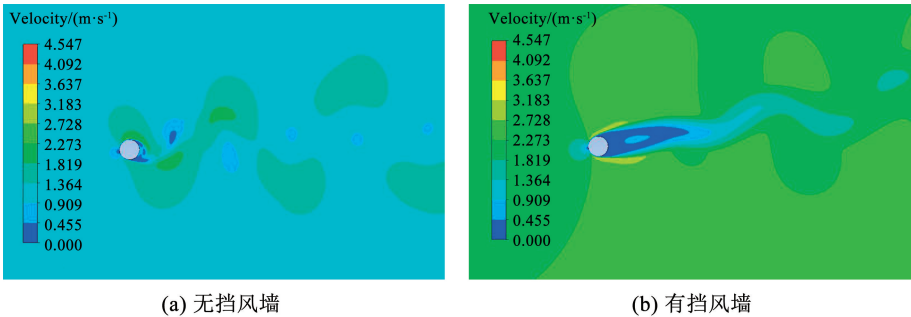


图 4 有、无挡风墙下正馈线风速云图

Fig. 4 Wind velocity cloud of positive feeder with and without wall

从图4可以看出,无墙条件下气流在绕过正馈线时,同传统的圆柱绕流一样,在正馈线两侧会周期性的脱落出旋转方向相反的旋涡,它们互相干扰,互相吸引,形成卡门涡街现象。随着正馈线后方旋涡的上下交替不断脱落,使得正馈线表面压力发生一

定变化。有墙条件下,由于挡风墙对气流的汇聚作用,在正馈线后方无明显旋涡脱落。入口风速 15 m/s 时有、无挡风墙下正馈线气动力系数变化如图5所示。

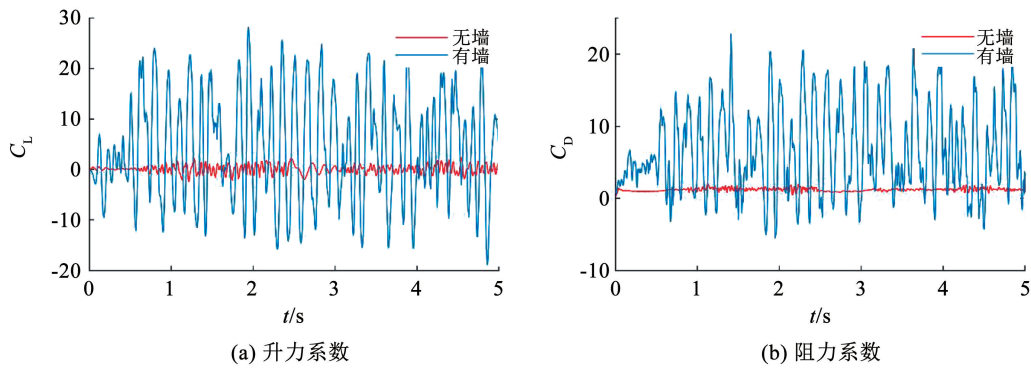


图 5 有、无挡风墙下正馈线气动力系数变化时程图

Fig. 5 Time history diagram of aerodynamic coefficient variation of positive feeder with and without wall

由图 5 可知,有、无挡风墙下正馈线升、阻力系数均呈交替变化,且有墙条件下正馈线升、阻力系数幅值远大于无墙时,说明挡风墙对于正馈线气动特性具有重要的影响。考虑到正馈线升力系数曲线在正负区域内交替变化明显,而阻力系数曲线变化大部分位于正区域内,故对升力系数取其均方根值来表示,阻力系数取其平均值来表示。不同入口风速时有、无挡风墙下正馈线气动力系数如表 1 和图 6 所示。

表 1 无墙、有墙下正馈线升、阻力系数
Tab. 1 Positive feeder lift and drag coefficient without and with wind-break wall

入口风速/(m·s ⁻¹)	升力系数 C _L 均方根		阻力系数 C _D 平均值	
	无墙(C _{L1})	有墙(C _{L2})	无墙(C _{D1})	有墙(C _{D2})
1	1.64	4.21	1.82	4.63
5	0.37	8.70	1.17	6.14
10	0.55	10.24	1.13	6.31
15	0.82	11.31	1.12	6.63
20	1.08	7.50	1.26	5.44
25	1.21	6.89	1.21	5.16
30	1.34	5.28	1.35	5.27

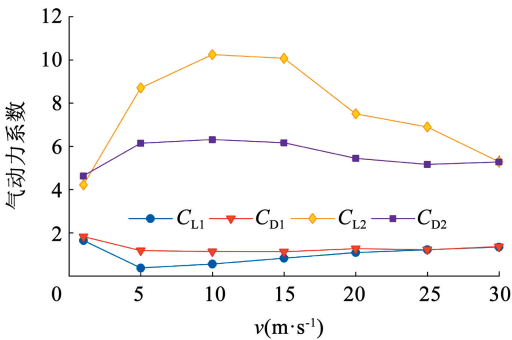


图 6 正馈线气动力系数随风速变化趋势
Fig. 6 The variation trend of aerodynamic coefficient of positive feeder with wind velocity

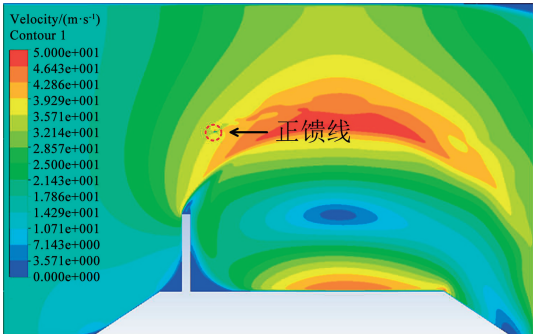


图 7 入口风速 15 m/s 时计算域风速云图

Fig. 7 Velocity cloud of computational domain at the inlet wind velocity of 15 m/s

由图 6 和表 1 可知,随着风速的不断增大,有墙条件下正馈线气动力系数呈现先增大后减小的变化趋势,且在风速 15 m/s 时正馈线升、阻力系数均达到峰值,而无墙条件下正馈线气动力系数变化范围整体较小。由于挡风墙对于气流的汇聚作用致使正馈线位置处风速明显加剧,从而形成“风涌”现象,如图 7 所示,这是导致正馈线发生大幅舞动的直接原因。

2.3 风洞试验

与动力特性相似,只考虑整体模型的几何相似即可^[24]。根据几何相似比设计并制作的风洞试验模型如图 8 所示,对挡风墙后的风速测量装置如图 9 所示。

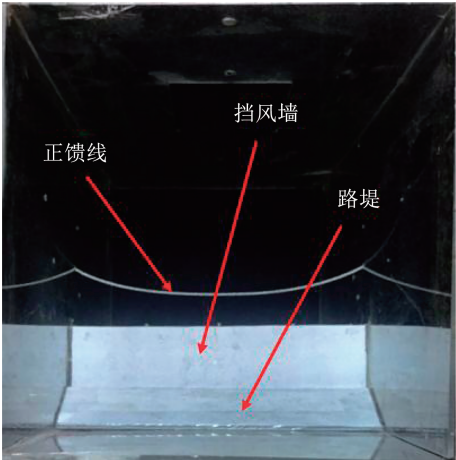


图 8 风洞试验模型

Fig. 8 Wind tunnel test model



图 9 风速测量仪

Fig. 9 Wind velocity measuring instrument

通过风机调频控制,模拟不同入口风速,利用风速测量仪在挡风墙后方正馈线位置处对增速后的气流进行监测,其同比例模型下的试验结果与仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同入口风速下试验结果与仿真计算对比
Tab. 2 Comparison of test results and simulation calculation under different inlet wind velocities of anemometer

入口风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	挡风墙后正馈线位置处风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		相对误差/%
	试验测量值	仿真模拟值	
5.26	9.89	9.91	-0.20
10.14	18.29	18.70	-2.24
16.75	31.71	30.50	3.82
20.40	38.50	37.00	3.90
24.12	47.35	45.39	4.13
28.47	55.48	53.05	4.38

对比表 2 数据可知,风洞试验测量值与仿真模拟值虽然存在一定的偏差,但其相对误差均小于 5%,

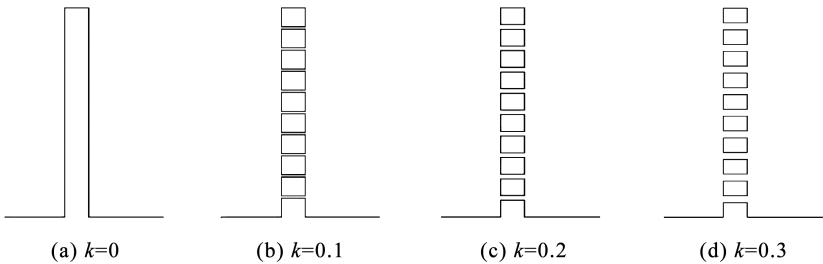


图 10 不同孔隙率挡风墙模型

Fig. 10 Model of wind-break wall with different porosity

3.2 挡风墙防风效果分析

在数值计算时分别在挡风墙迎风侧路肩 1 m 处(测点 1)和挡风墙内轨道中心位置 5.7 m 处(测点 2)设置风速监测点,如图 12 所示。通过对比各孔隙率挡风墙迎风侧和背风侧不同高度处风速变

化,对挡风墙的实际防风效果进行评估。挡风墙的防风效果可以用风速残余系数(计算风速与入口风速之比)表示,风速残余系数越小,防风效果越好。入口风速 15 m/s 时计算结果见表 3、4。

3 新型挡风墙优化设计研究

在前文的基础上选用 3.5 m 高度挡风墙进行研究,孔隙率是开孔高度与墙体总高度之比,用 k 表示。孔隙率的变化直接影响挡风墙后方及接触网正馈线位置处流场变化,考虑到兰新高铁大风区实际情况,故选择挡风墙孔隙率分别为 0.1、0.2、0.3 进行研究。根据相关研究得出,在开孔数为 9 时防风效果最佳^[25],各孔隙度挡风墙模型如图 10 所示。

3.1 计算域流场特征变化

挡风墙的设立对于正馈线位置处气流速度和周围流场会产生重要的影响,为了更好地分析挡风墙孔隙率的变化对于计算域流场特征的影响,计算入口风速 15 m/s 时不同孔隙率挡风墙下计算域整体及正馈线周围风速云图如图 11 所示。

由图 11(a)、11(b)可知,来风在经过路堤和挡风墙阻挡之后,在挡风墙尾流区域风速急剧增大,且在挡风墙背风侧形成了明显的旋涡,使得挡风墙尾流风速分布出现一定的梯度效应。对比图 11(c)、11(d)可以看出此时挡风墙背风侧无明显涡流区,且在挡风墙孔隙率为 0.3 时,挡风墙尾流失稳的斜上方气流增速区范围大幅减少,在挡风墙后方气流变化也相对平稳,从而可以缓和挡风墙增速效应所导致的正馈线尾流驰振现象。

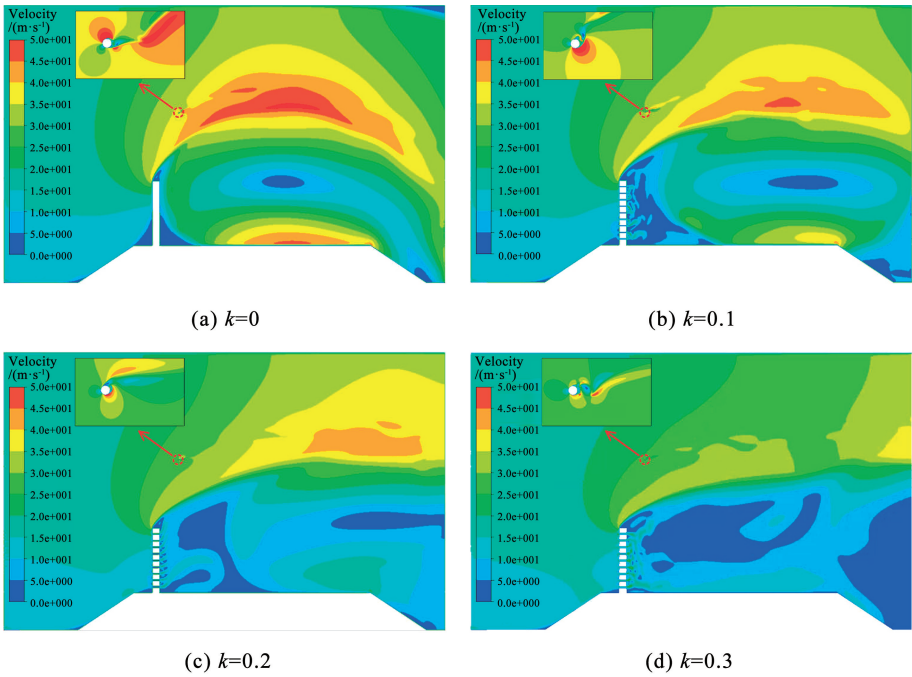


图 11 不同孔隙率挡风墙下计算域及正馈线处风速云图

Fig. 11 Velocity cloud chart of calculation domain and positive feeder under wind-break wall with different porosity

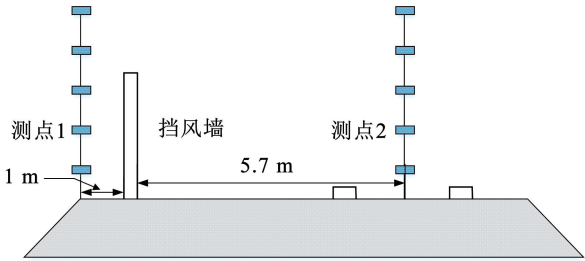


图 12 挡风墙内、外风速监测点

Fig. 12 Wind velocity monitoring points inside and outside the wind-break wall

表 3 不同孔隙率挡风墙周围流场风速

Tab. 3 Wind velocity around wind-break wall with different porosity

高度 h/m	$k=0$		$k=0.1$		$k=0.2$		$k=0.3$	
	测点 1	测点 2	测点 1	测点 2	测点 1	测点 2	测点 1	测点 2
1	11.64	4.62	12.38	4.91	13.75	5.71	15.19	6.87
2	15.08	5.27	14.80	5.86	15.01	6.49	15.55	8.04
3	20.75	5.98	19.51	6.77	18.49	7.68	18.08	9.14
4	25.98	6.71	24.30	7.36	22.60	8.57	21.49	9.92
5	27.41	7.53	25.49	8.57	23.74	9.82	22.15	10.37

表 4 不同孔隙率挡风墙周围流场风速残余系数

Tab. 4 Residual coefficient of wind velocity around wind-break wall with different porosity

高度 h/m	$k=0$		$k=0.1$		$k=0.2$		$k=0.3$	
	测点 1	测点 2	测点 1	测点 2	测点 1	测点 2	测点 1	测点 2
1	0.78	0.31	0.83	0.33	0.92	0.38	1.01	0.46
2	1.01	0.35	0.99	0.39	1.00	0.43	1.04	0.54
3	1.33	0.40	1.30	0.45	1.23	0.51	1.21	0.61
4	1.67	0.45	1.62	0.49	1.51	0.57	1.43	0.66
5	1.83	0.50	1.70	0.57	1.58	0.65	1.48	0.69

对比表 3 数据可知,由于来风在经过路堤和挡风墙阻挡后,挡风墙背风侧区域风速得到明显降低,随着墙内各点高度上升,风速也逐渐增大;同时挡风墙背风侧各点风速残余系数明显低于迎风侧,说明挡风墙有效地遮蔽了来风。通过对比挡风墙不同孔隙率下迎风侧和背风侧不同高度处风速残余系数可以发现,无孔挡风墙时轨道中心位置风速残余系数在 0.31 ~ 0.50 之间;而挡风墙孔隙率为 0.3 时,风速残余系数在 0.46 ~ 0.69 之间,说明开孔式挡风墙保持了较好的防风效果。挡风墙孔隙率的变化也会直接影响接触网正馈线位置风速,入口风速 15 m/s 时不同孔隙率挡风墙下正馈线位置处平均风速变化如图 13、表 5 所示。

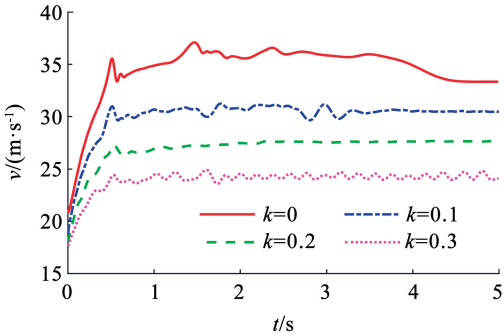


图 13 不同孔隙率挡风墙下正馈线位置风速变化

Fig. 13 Variation trend of wind velocity at the positive feeder under wind-break wall with different porosity

由图 13 可知在挡风墙影响下,正馈线位置处风速随着时间的变化逐渐增大并趋于稳定值,同时挡风墙孔隙率的增大使得各风速呈现明显降低趋势。

从表 4 可以看出,正馈线位置风速以水平分量为为主,且存在一定竖直方向分量,结合图 3 正馈线受力分析,说明正馈线的舞动受来流风水平分量的影响更大。

表 5 不同孔隙率下挡风墙下正馈线位置处风速
Tab.5 Wind velocity at the positive feeder under the wind-break wall

孔隙率 k	正馈线位置处 平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	正馈线位置处 水平风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	正馈线位置处 竖直风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
0	34.52	30.17	16.83
0.1	30.05	28.23	10.02
0.2	27.01	25.89	7.46
0.3	23.96	23.38	5.21

在原有挡风墙的高度、厚度和距离列车的位置都固定的前提下,在挡风墙上有规律地设定一部分开孔,定义开孔高度与墙体总高度之比为挡风墙的孔隙率。通过分析挡风墙不同孔隙率下列车周围流场特性,进一步明确挡风墙孔隙率的设置对于列车的影响。

图 14、15 分别为列车在不同孔隙率挡风墙作用

下的风速流线图及压力分布云图,从图中可以看出列车在挡风墙结构变化后的流场特征差异较为明显。当来流风遇到路堤和挡风墙阻挡后,挡风墙的迎风侧压力变大,同时背风侧压力减小,受回旋气流的影响,气流在挡风墙背风侧形成了较大的漩涡;当气流从挡风墙背风侧(即列车迎风侧)流经列车,列车背风面气流分离较严重,基本处于尾流漩涡之中(见图 14(a)),形成了一定的负压区。当挡风墙设置一定的孔隙率后,气流大部分还是绕过挡风墙后在列车周围形成旋涡。由于有一小部分气流从挡风墙的孔隙流过,因此绕过挡风墙在列车周围形成旋涡的气流一定程度上减少,所以旋涡也会随之变小(见图 14(b)),在列车周围负压区范围呈现降幅,同时从孔隙中流过的气流会对形成旋涡的流场进行冲击,使流场趋于平稳。但是并非挡风墙孔隙率越大,对于列车及正馈线处气流影响越大,随着挡风墙孔隙率的增大,直接作用在列车表面的气流会之间逐渐增多,压力分布不均匀也会越来越明显,因此只要挡风墙孔隙率设置合适,列车运行不会受到较大影响。

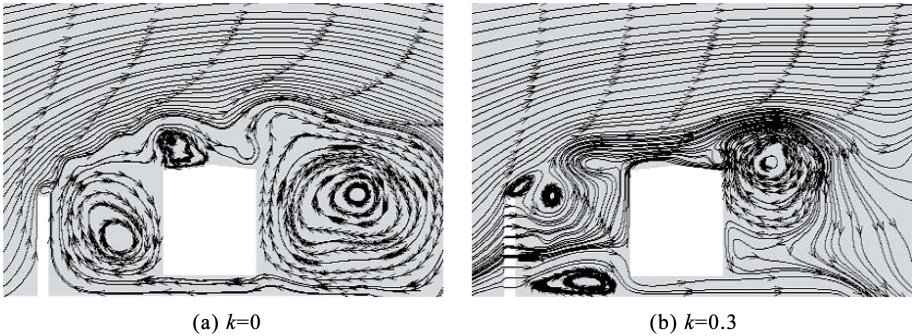


图 14 不同孔隙率挡风墙下列车周围风速流线图

Fig. 14 Flow line around the train under different porosity of the wind-break wall

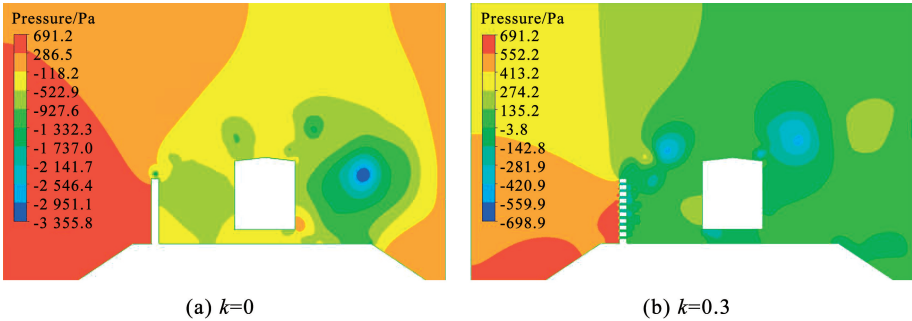


图 15 不同孔隙率挡风墙下列车周围压力分布云图

Fig. 15 Pressure distribution around the train under different porosity of the wind-break wall

横风作用下列车车体截面的气动性能一般用气动力系数来表示,根据在横风作用下车辆稳定性研究,倾覆力矩是衡量车辆横向稳定性的重要指标。由于本文在数值模拟时假定列车静止时受横风影响的倾覆系数,其中倾覆力矩系数的定义如下:

$$C_M = \frac{2M_T}{\rho v^2 HB}$$

(5)

式中: C_M 表示倾覆力矩系数; M_T 为列车受到的倾覆力矩; ρ 表示空气密度,取 1.225 kg/m^3 ; v 表示来流风速; B 表示列车宽度,取 $3\,257\text{ mm}$; H 表示列车高

度,取 3 890 mm。

通过对挡风墙有、无开孔情况下列车气动特性进行仿真分析可知,随着挡风墙结构的变化,列车受到的气动力呈现一定变化。结合列车周围流场变化可知,由于挡风墙设置一定孔隙率后,从挡风墙缝隙中穿过的气流会扰乱挡风墙背风侧流场的分布,但部分气流会直接作用在列车上,从而使得列车所受倾覆力矩出现一定变化。其中挡风墙无孔情况下,列车所受倾覆力矩为 $-1\ 013\ \text{N}\cdot\text{m}$,当挡风墙孔隙率设置为 0.3 时,列车所受倾覆力矩为 $-1\ 278\ \text{N}\cdot\text{m}$,

列车所受气动力没有太大的变化。因此在挡风墙对高速列车防风研究中,挡风墙孔隙率的合理设置,不仅可以节约材料,还可以在保障列车运行安全的同时能够抑制正馈线的舞动。

3.3 不同孔隙率下正馈线气动特性分析

对入口风速 1 m/s、5 m/s、10 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s 及 30 m/s 有孔挡风墙下正馈线气动特性进行仿真分析,并对比无孔挡风墙下正馈线气动力系数变化情况,其中入口风速 15 m/s 时有孔挡风墙下正馈线气动力系数变化如图 16 所示。

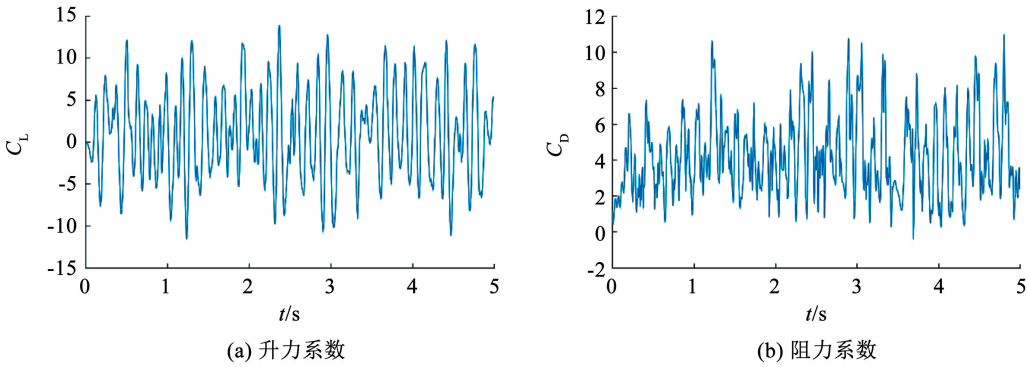


图 16 有孔挡风墙下正馈线气动力系数变化

Fig. 16 Variation of aerodynamic coefficients of positive feeders under perforated wind-break wall

从图 16 可以看出,有孔挡风墙下正馈线气动力系数的曲线变化同样周期复杂且呈无规律性,但其幅值相比无孔挡风墙时有所下降。其中正馈线升力系数下降明显,在正区域内下降到 15 以下,负区域内下降到 10 以下;而阻力系数降幅程度相对较小,

且几乎均位于正区域内,说明挡风墙孔隙率的变化对于正馈线气动特性有着重要的影响。不同入口风速下不同孔隙率挡风墙下正馈线气动力系数变化如图 17 所示。

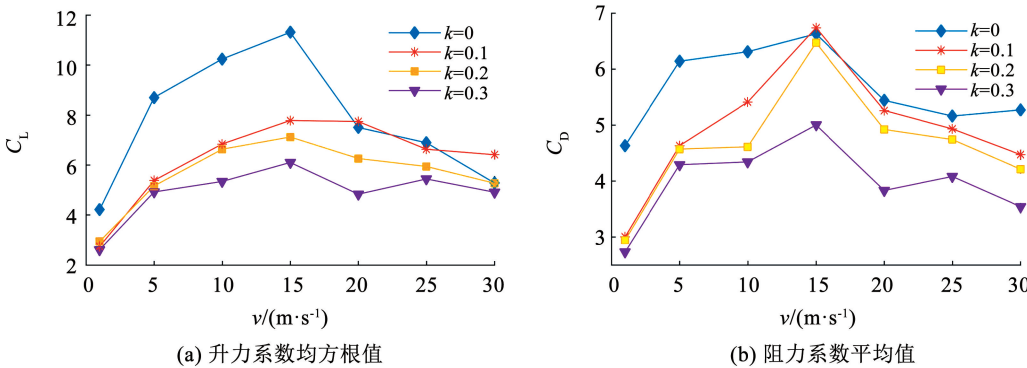


图 17 不同孔隙率挡风墙下正馈线气动力系数随风速变化趋势

Fig. 17 Variation trend of positive feeder aerodynamic coefficient with wind velocity under wind-break wall with different porosity

从图 17 中可以看出,不同孔隙率挡风墙下正馈线升、阻力系数整体变化趋势基本相同,都是随着风速先增大后减小,并且在风速 15 m/s 时达到峰值。在挡风墙孔隙率为 0.3 时,正馈线气动力系数降幅最为明显,其中升力系数相较无孔挡风墙降低了 41.56%,阻力系数降低了 24.59%。说明挡风墙孔隙率的设置可以在一定程度上改善正馈线的气动特性。

3.4 最佳开孔角度的确定

根据上述研究,在挡风墙孔隙率为 0.3 时,正馈线气动力系数降幅程度明显。考虑到挡风墙开角度的变化对于正馈线气动特性也会存在一定影响,因此在挡风墙孔隙率为 0.3 的基础上,进一步研究挡风墙开孔角度对于正馈线气动特性响应的规律,图 18 为不同开孔角度挡风墙模型。

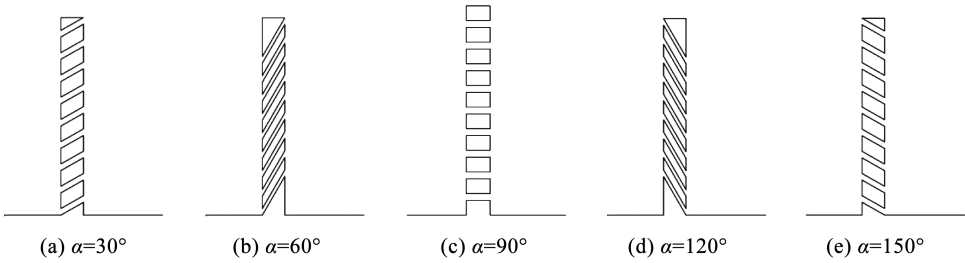


图 18 不同开孔角度挡风墙模型

Fig. 18 Model of wind-break wall with different opening angles

分别对挡风墙不同开孔角度下的接触网正馈线气动特性进行仿真分析,并对比挡风墙开孔角度对于正馈线升、阻力系数变化的影响。同样,升力系数取其均方根值表示,阻力系数取其平均值表示,其中入口风速 15 m/s 时挡风墙不同开孔角度下正馈线气动力系数变化如图 19 所示。图 20 为挡风墙开孔角度分别为 30°和 150°时计算域整体风速云图。

由图 20 可知随着挡风墙开孔角度的增大,正馈线升、阻力系数均呈现先增大后减小的趋势,说明挡风墙的开孔角度对于正馈线气动特性存在一定的影响。对比图 18 挡风墙不同开孔角度下计算域周围流场特征变化可以发现,在开孔角度小于 90°时,气流在流经挡风墙时会吹向斜上方接触网正馈线区域,从而会使得正馈线舞动加剧,导致正馈线升、阻力系数随着开孔角度的增大呈现上升趋势。在开孔角度大于 90°时,随着挡风墙结构对于风速导向的改变,会降低对接触网正馈线处的气流的影响,

此时正馈线气动升力、阻力系数呈现递减趋势。同样,分析其他入口风速下挡风墙开孔角度对于正馈线气动特性影响,其中不同开孔角度挡风墙下正馈线气动力系数随风速变化趋势如图 21 所示。

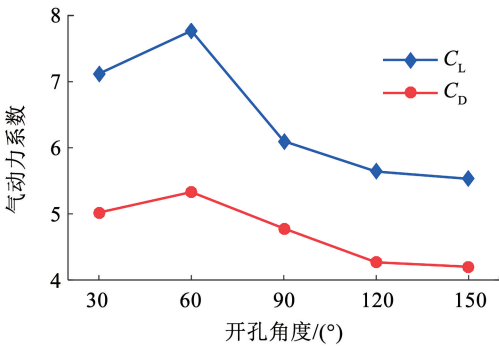


图 19 入口风速 15 m/s 时不同开孔角度挡风墙下正馈线气动力系数变化

Fig. 19 Variation of aerodynamic coefficient of positive feeder under different opening angles of wind-break wall

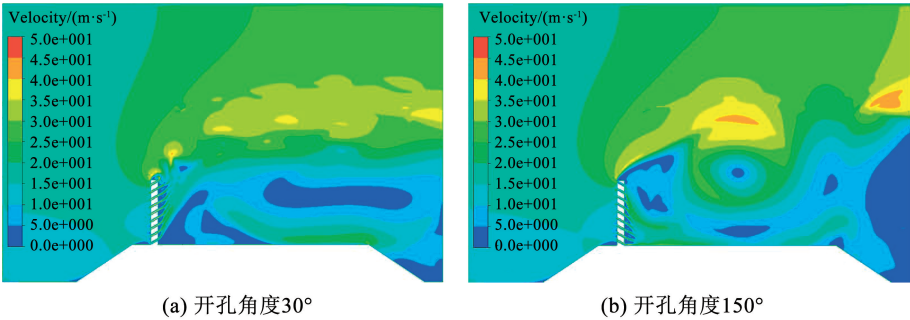


图 20 不同开孔角度挡风墙下计算域风速云图

Fig. 20 Velocity cloud of calculation domain under different opening angles of wind-break wall

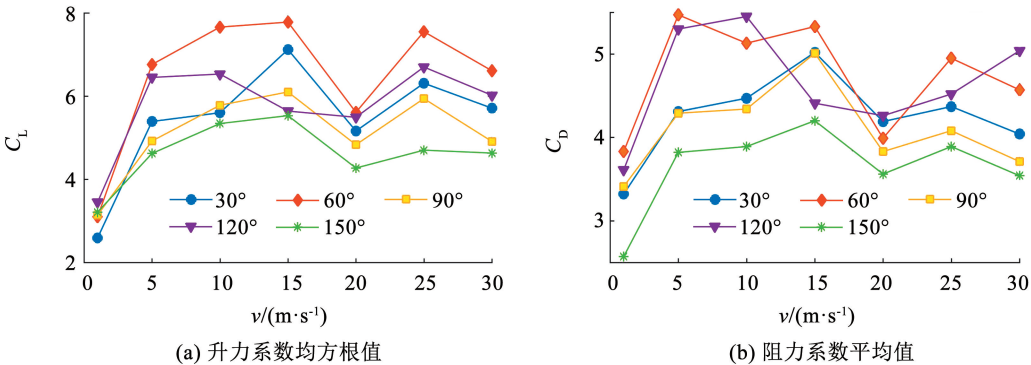


图 21 不同开孔角度挡风墙下正馈线气动力系数随风速变化

Fig. 21 Variation of positive feeder aerodynamic coefficient with wind at different openings angles of wind-break wall

由图 21 可知,随着风速的不断增大,不同开孔角度挡风墙下正馈线升力系数和阻力系数的变化趋势基本一致,但各自对应的峰值均不同。其中升力系数在 15 m/s 时达到峰值;阻力系数在挡风墙开孔角度小于 90°入口风速为 5 m/s 下达到峰值,开孔角度大于等于 90°入口风速为 15 m/s 下达到峰值。对比不同风速下正馈线气动力系数变化可以看出,挡风墙开孔角度为 150°时正馈线升、阻力系数幅值明显低于其他开孔角度,说明在兼顾挡风墙的开孔角度时,正馈线气动特性会得到进一步的改善。

4 结 论

本文通过设计一种新型开孔式挡风墙,对挡风墙的防风效果进行评估,并仿真分析挡风墙孔隙率及开孔角度对于正馈线气动特性响应的影响规律,得出以下结论:

1)随着挡风墙孔隙率的增大,在挡风墙尾流失稳的斜上方区域气流增速区范围大幅减少,正馈线位置处风速也逐渐减小并趋于稳定值;且挡风墙设置一定孔隙率后,会冲击挡风墙后形成的旋涡流场,使流场趋于平稳,列车所受倾覆力矩变化不大,从而列车运行不会受到较大影响。

2)不同孔隙率挡风墙下正馈线气动力系数变化周期依然复杂且呈无规律性,但其幅值相较无孔挡风墙降幅明显,且在挡风墙孔隙率为 0.3 时,升力系数下降了 41.56%,阻力系数下降了 24.59%,说明挡风墙孔隙率的设置在一定程度上可以明显改善正馈线的气动特性。

3)在同时考虑挡风墙孔隙率及开孔角度对于正馈线气动特性的影响时,挡风墙孔隙率取 0.3 且开孔角度为 150°时正馈线气动力系数降幅显著,此时在垂直和水平方向上正馈线所受气动力也随之减小,从而可以有效抑制正馈线的舞动,提高兰新高铁牵引供电系统运行的安全可靠性能。

参 考 文 献

- [1] 黄双林. 兰新高铁防风标准研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(6): 14
HUANG Shuanglin. Study on wind protection standard of Lanzhou-Urumqi high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering, 2019, 36(6): 14
- [2] 肖建华, 姚正毅, 屈建军, 等. 兰新铁路百里风区极端风况特征及形成机制[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 130
XIAO Jianhua, YAO Zhengyi, QU Jianjun, et al. Characteristics

and formation mechanism of extreme wind conditions in Baili wind region of Lanzhou-Xinjiang railway [J]. China Railway Science, 2016, 37(3): 130

- [3] 孟祥连, 李鲲, 谢胜波, 等. 兰新高铁大风区风况特征及防风工程设计分区[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 972
MENG Xianglian, LI Kun, XIE Shengbo, et al. Wind condition characteristics and design zoning of wind protection works in strong wind area of Lanzhou-Xinjiang high-speed railway [J]. Chinese Desert, 2018, 38(5): 972
- [4] 葛盛昌, 蒋富强. 兰新铁路强风地区风沙成因及挡风墙防风效果分析[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(5): 1
GE Shengchang, JIANG Fuqiang. Analysis on the causes of wind sand in strong wind area of Lanzhou-Xinjiang railway and the windbreak effect of wind retaining wall [J]. Journal of Railway Engineering, 2009, 26(5): 1
- [5] DEN HARTOG J P. Transmission line vibration due to sleet [J]. AIEE Transactions, 1932, 51(4): 1074
- [6] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping 1: Den Hartog mechanism [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 699
- [7] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping 2: torsional mechanism [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 708
- [8] YU P, POPPLEWELL N, SHAH A H. Instability trends of inertially coupled galloping Part I: initiation [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 183(4): 663
- [9] YU P, POPPLEWELL N, SHAH A H. Instability trends of inertially coupled galloping Part II: periodic vibrations [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 183(4): 679
- [10] 刘磊, 李红梅, 侯福国, 等. 兰新铁路第二双线挡风墙防风效果仿真分析[J]. 铁道建筑, 2015(11): 80
LIU Lei, LI Hongmei, HOU Fuguo, et al. Simulation analysis of wind protection effect of the second double track wind barrier of Lanzhou-Xinjiang railway [J]. Railway Construction, 2015(11): 80
- [11] 李鲲, 梁习锋, 杨明智. 高速铁路挡风墙防风特性风洞试验及优化比选[J]. 中南大学学报, 2018, 49(5): 1297
LI Kun, LIANG Xifeng, YANG Mingzhi. Wind tunnel test and optimization comparison of wind proof characteristics of high-speed railway windbreak [J]. Journal of Central South University, 2018, 49(5): 1297
- [12] 李凯崇, 石龙, 孔令伟, 等. 兰新高铁沿线不同挡沙墙防护效果评价[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(3): 11
LI Kaichong, SHI Long, KONG Lingwei, et al. Evaluation on protective effect of different sand retaining walls along Lanzhou-Xinjiang high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering, 2017, 34(3): 11
- [13] 李燕飞, 田红旗, 刘辉. 高速铁路开孔式挡风墙外形优化研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10): 3207
LI Yanfei, TIAN Hongqi, LIU Hui. Study on shape optimization of

perforated wind retaining wall for high-speed railway[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2011, 42 (10): 3207

[14] 李鲲. 大风区高速铁路新型防风设施研究[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2012, 43 (2): 756

LI Kun. Study on new wind protection facilities for high-speed railway in windy area [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2012, 43 (2): 756

[15] 李长波. 兰新高铁接触网附加线防舞动技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2017 (2): 98

LI Changbo. Research on anti-galloping technology of OCS additional line of Lanzhou-Xinjiang high-speed railway[J]. Railway Construction Technology, 2017 (2): 98

[16] 王玉环. 大风区高速铁路接触网 AF 线抗风研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62 (10): 164

WANG Yuhuan. Study on wind resistance of AF line of high-speed railway catenary in strong wind area[J]. Railway Standard Design, 2018, 62 (10): 164

[17] 赵珊鹏, 张海喜, 张友鹏, 等. 基于流固耦合的大风区接触网正馈线舞动机制分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55 (10): 130

ZHAO Shanpeng, ZHANG Haixi, ZHANG Youpeng, et al. Analysis of catenary positive feeder galloping mechanism in strong wind section based on fluid-structure interaction [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55 (10): 130

[18] 赵珊鹏, 马爱彪, 张友鹏, 等. 大风区接触网正馈线新型绝缘防舞装置有效性研究[J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2023, 50 (10): 20

ZHAO Shanpeng, MA Aibiao, ZHANG Youpeng, et al. Effectiveness study of new insulation and anti-galloping device for OCS positive feeder in the strong wind section [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50 (10): 20

[19] 赵珊鹏, 张永丰, 张友鹏, 等. 兰新高铁大风区低风压正馈线受力特性[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58 (5): 1154

ZHAO Shanpeng, ZHANG Yongfeng, ZHANG Youpeng, et al. Mechanical characteristics of low-wind-pressure catenary positive feeder in gale area of Lanzhou-Urumuqi high-speed railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58 (5): 1154

[20] 孔德怡. 基于动力学方法的特高压输电线微风振动研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009

KONG Deyi. Study on aeolian vibration of UHV transmission line based on dynamic method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009

[21] 雷娟棉, 谭朝明. 基于 Transition SST 模型的高雷诺数圆柱绕流数值研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43 (2): 207

LEI Juanmian, TAN Chaoming. Numerical study of flow around a cylinder with high Reynolds number based on Transition SST model [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43 (2): 207

[22] 王琼, 王黎明, 卢明, 等. 覆冰四分裂导线风洞试验与舞动研究[J]. 高电压技术, 2019, 45 (5): 1608

WANG Qiong, WANG Liming, LU Ming, et al. Wind tunnel test and galloping research of iced four bundle conductor [J]. High Voltage Technology, 2019, 45 (5): 1608

[23] 王黎明, 王琼, 陆佳政, 等. 500 kV 覆冰四分裂导线舞动特性[J]. 高电压技术, 2019, 45 (7): 2284

WANG Liming, WANG Qiong, LU Jiazheng, et al. Galloping characteristics of 500 kV iced four bundle conductor [J]. High Voltage Technology, 2019, 45 (7): 2284

[24] 王文军. 输电线动力系统振幅死亡机理试验研究[D]. 长沙: 湖南科技大学, 2019

WANG Wenjun. Experimental study on amplitude death mechanism of transmission line power system [D]. Changsha: Hunan University of Science and Technology, 2019

[25] 薄天利, 郑晓静. 防沙栅栏风洞实验的数值模拟[J]. 兰州大学学报, 2005 (5): 102

BO Tianli, ZHENG Xiaojing. Numerical simulation of wind tunnel test of sand fence [J]. Journal of Lanzhou University, 2005 (5): 102