

龙卷风作用下高速铁路 全封闭声屏障风荷载特性研究

李玉学^{1,2,3}, 耿春帅¹, 董 阳¹

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要:高速铁路全封闭声屏障作为典型的长距离线状风敏感结构,其遭遇龙卷风袭击的几率较大。为深入理解龙卷风作用下结构的风荷载特性,以深茂铁路某 2 km 全封闭声屏障为工程背景,基于 Ward 型龙卷风模拟器原理建立龙卷风场模型,分析龙卷风距离声屏障中心不同距离 r 、龙卷风不同移动角度路径和不同地面植被覆盖面积比 η 下全封闭声屏障结构风荷载特性。结果表明,龙卷风作用下,全封闭声屏障表面风荷载以风压力为主, 0° 移动路径下、 $\eta=0$ 时,结构表面风压整体较大,在 $r=0$ 处结构表面出现最大负风压系数 -1.13 ,阻力系数 C_{F_x} 和升力系数 C_{F_z} 出现最不利值,分别为 0.27 和 -0.49 ;在 $r/R_m=1$ (R_m 为龙卷风场涡核半径)处结构表面出现最大正风压系数 2.91 ,力矩系数 C_{M_y} 及 C_{M_z} 出现不利值,分别为 0.44 和 0.39 ;全封闭声屏障进行抗龙卷风设计时需要考虑断面的环向压差,建议在结构迎风侧、背风侧和顶部分别取最大正风压极值的 60% 、 40% 和最大负风压极值的 70% 进行组合。

关键词:龙卷风荷载;全封闭声屏障;风压分布;风力系数;体型系数

中图分类号: U213.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)02-0071-09

0 引言

龙卷风作为空气强烈对流运动引发的极端天气现象,具有破坏性强、生消迅速的特点。根据气象灾害资料统计^[1],中国平均每年发生的龙卷风灾情高达 73 次,多分布在东南沿海地区,这些区域铁路网络密集。与此同时,随着近年来人们对铁路噪声问题的广泛关注,长距离全封闭声屏障在高速铁路建设中得到了广泛应用^[2],其作为典型的长距离线状风敏感结构,遭遇龙卷风袭击的几率较大,一旦遭到破坏,不仅造成经济损失,影响铁路运营安全,还会带来不良的社会影响,因此准确获取龙卷风作用下高速铁路全封闭声屏障风荷载,成为进行全封闭声屏障结构抗龙卷风设计的关键。

目前,人们对龙卷风场的研究主要集中在现场实测、风洞试验和数值模拟。WEN^[3] 基于实测龙卷风数据提出了龙卷风场的半经验公式,简称 Wen 模型。汤卓等^[4] 依据 Wen 模型,发展了龙卷风压力场模型。1972 年 WARD^[5] 在近地面设置环形阵列的导流叶片以产生涡旋气流,并在顶部设置蜂窝管挡板,去除上升气流的竖向涡量。在此基础上,HAAN et al^[6] 又基于 Ward 的龙卷风模型,扩大装置规模,实现了对建筑表面龙卷风风压的测量。随着计算仿真技术的发展,计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的数值模拟方法也被越来越多地应用到龙卷风研究工作中。一些学者借助 CFD 数值模拟研究了高铁连续梁桥^[7]、高层建筑^[8]、大跨柱面棚顶^[9]、输电线^[10] 等多种结构的龙卷风荷载特性。

针对高速铁路全封闭声屏障这一风敏感结构,人们对其常态风作用下的风荷载特性开展了不少研

收稿日期:2023-11-16 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20230308

基金项目:国家自然科学基金(51278314);河北省自然科学基金(E2019210031);中央引导地方科技发展资金项目(206Z5401G);北京交通大学“结构风工程与城市风环境北京市重点实验室”开放课题(2023-1)

作者简介:李玉学(1978—),男,副教授,研究方向为桥梁风工程。E-mail:liyuxue2000@163.com

李玉学,耿春帅,董阳.龙卷风作用下高速铁路全封闭声屏障风荷载特性研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(2):71-79.

究。韩旭等^[11]通过节段模型风洞试验对全封闭声屏障风力系数和表面风压进行了测试,给出了设计用近似风压曲线。郑史雄等^[12]通过数值模拟对全封闭声屏障的风荷载体型系数进行了研究,发现全封闭声屏障高度对其体型系数影响明显。XIANG et al^[13]通过数值模拟方法得到了列车风作用下声屏障瞬态风荷载。李玉学等^[14]通过数值模拟方法研究了列车运行导致的高速铁路全封闭声屏障的气动荷载特性。

可见,目前对声屏障风荷载特性研究主要集中在常态风,专门针对龙卷风作用的相关研究尚处于起步阶段。以深茂铁路某 2 km 全封闭声屏障为工程背景,按照 Ward 型龙卷风模拟器原理构建龙卷风场数值模型,据此分析龙卷风距离声屏障中心距离、龙卷风移动角度路径和地面植被覆盖面积比对结构表面风荷载特性的影响规律,为类似高速铁路全封闭声屏障结构抗龙卷风设计的荷载合理选取提供参考。

1 龙卷风场模拟

1.1 龙卷风场模拟方法

龙卷风场模拟基于 Ward 型龙卷风模拟器,其底部半径 $R_0 = 5.1$ m,上升风孔半径 $r_0 = 2$ m,入流面高度 $h_0 = 2$ m,模型总高度 $H = 5.96$ m,如图 1(a)所示。在数值建模时保持其与物理构型相同,采用 KUAI et al^[15]提出的缩放方法,缩放比 250 : 1,利用入流面和出流面分别代替导流板入口、排风扇和蜂窝管挡板出口,其他壁面采用无滑移壁面,以此实现与龙卷风模拟器相同的流动方式,如图 1(b)所示。采用自适应性较好的四面体非结构化网格对计算区域进行网格划分,并对近地面网格进行加密处理,最小网格尺寸为 0.02 m,最终划分网格数约为 2×10^6 ,所建立的龙卷风场模型网格划分如图 2 所示。

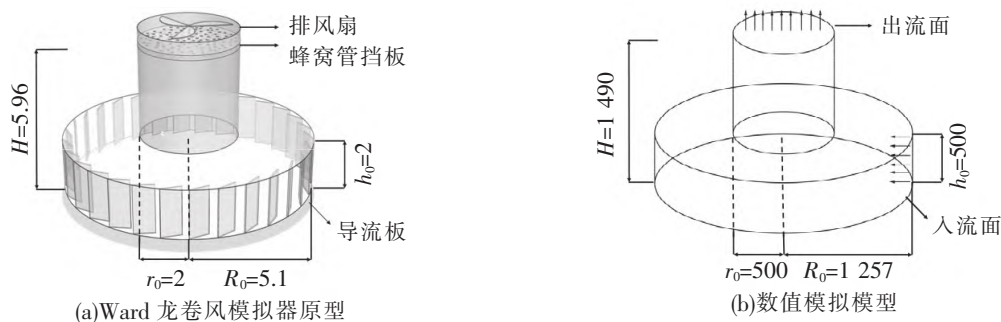


图 1 模拟器与数值模型示意图(单位:m)

龙卷风流场应遵守流场运动控制方程,其表达式为

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho V\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi) + S \quad (1)$$

式中, t 为时间; ρ 为空气密度; Φ 为通用变量; V 为速度矢量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

龙卷风场为三维、非定常、黏性、不可压缩流,考虑其强旋转特性,兼顾计算效率和计算精度,采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型^[16],包括湍动能方程和耗散率方程,压力梯度采用 Green-Gauss Cell Based 格式,压力插值采用 PRESTO! 格式,离散格式采用一阶迎风格式,采用 SIMPLEC 算法用于求解离散方程。

湍动能方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}\left(\rho V k - \frac{\mu}{\sigma_k} \text{grad} k\right) = G - \rho \epsilon + S \quad (2)$$

耗散率方程为

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}\left(\rho V \epsilon - \frac{\mu}{\sigma_\epsilon} \text{grad} \epsilon\right) = \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) + S \quad (3)$$

式中, G 为湍动能生成项; C_1 、 C_2 为常数,分别取 1.44、1.92; σ_k 、 σ_ϵ 为湍动能(k)、耗散率(ϵ)对应的普朗特数,分别取 1.0、1.3。

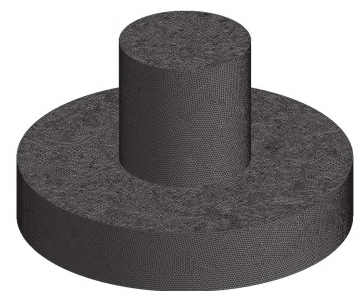


图 2 龙卷风场网格布置图

考虑地面粗糙程度的影响,根据 MOCHIDA et al^[17] 推荐的模型,分别在式(1)、式(2)和式(3)中添加动量源项 S_u 、湍动能源项 S_k 和耗散率源项 S_ϵ ,其表达式分别为

$$S_u = -\eta C_f \alpha V \sqrt{V^2} \tag{4}$$

$$S_k = VS_u \tag{5}$$

$$S_\epsilon = \frac{\epsilon}{k} C_{\epsilon 1} S_k \tag{6}$$

式中, η 为地面植被覆盖面积比,根据常规地表植被情况^[18]分别取 0、12.5%和 25%; C_f 为植被阻力系数,取 0.8; α 为叶片疏密程度,取 0.05; $C_{\epsilon 1}$ 为模型系数,取 1.8。

1.2 风场模拟结果合理性验证

在龙卷风场中,旋转的风速产生指向龙卷风场中心的压力梯度,表现为切向速度,其为造成结构破坏的主要因素,作为龙卷风速度分量中的重要部分,也是衡量所模拟的龙卷风场是否可行的关键指标。根据 1.1 节模拟方法和建立的模型,计算得到了相应的龙卷风场,取距地面高度 $z = 0.1h_0$ 处的半侧风场切向速度 $V_t(z, R)$ (R 为风压测点到龙卷风中心的水平距离) 分布见图 3。同时根据不同地面植被覆盖面积比 η (η 分别取 0、12.5%和 25%) 计算得到龙卷风场切向速度 $V_t(z, R)$,将其处理为无量纲值 $\frac{V_t(z, R)}{V_m(z)}$ ($V_m(z)$ 为高度 z 处的最大切向速度),取 z 为 $0.1h_0$ 和 $0.3h_0$ 的计算结果,分别与同一高度处试验结果^[19] 和 Rankine 涡理论模型^[20] 结果对比,见图 4。

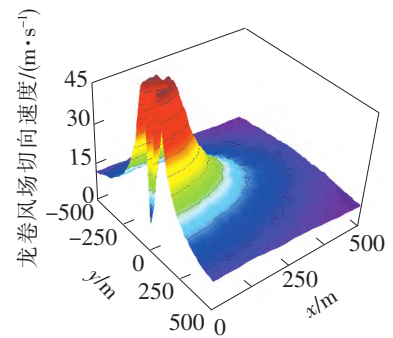


图 3 龙卷风场切向速度水平分布

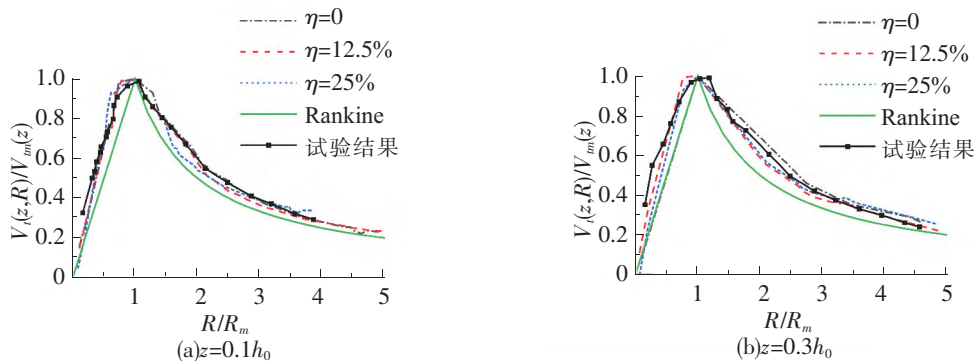


图 4 龙卷风场切向速度归一化分布对比图

Rankine 涡理论模型能够较好反映龙卷风场切向速度沿径向变化的整体趋势,其表达式为

$$V_t(R) = \begin{cases} \frac{R}{R_m} V_m & 0 \leq R \leq R_m \\ \frac{R_m}{R} V_m & R \geq R_m \end{cases} \tag{7}$$

式中, $V_t(R)$ 为龙卷风场 R 处切向速度; V_m 为最大切向速度,取值为 50 m/s; R_m 为涡核半径,取最大切向速度处到风场中心的距离为 50 m。

由图 3 可知,模拟所得风场横断面切向速度分布具有明显的对称性,且随龙卷风场中心距离 R 的增加先增大后减小。由图 4 可知,在 $z = 0.1h_0$ 和 $z = 0.3h_0$ 高度处,当 $R \leq R_m$ 时, $\eta = 0$ 、 $\eta = 12.5\%$ 和 $\eta = 25\%$ 的龙卷风场中心处切向速度均趋近于 0,并随着 R 增加而增大,与试验结果和 Rankine 涡理论结果吻合较好;当 $R > R_m$ 时, $\eta = 0$ 的龙卷风场切向速度分布和试验数据基本一致, $\eta = 12.5\%$ 和 $\eta = 25\%$ 的龙卷风场切向速度分布略低于试验数据,最大误差为 4.5%,且全部与 Rankine 涡理论模型走势相同。总体而言,数值模拟结果与实验结果吻合较好,最大误差不超过 5%,并能较好地满足 Rankine 涡理论模型所刻画的风场变化趋势,验证了所模拟龙卷风场的合理性。

2 全封闭声屏障龙卷风荷载模拟

2.1 全封闭声屏障体系建立及表面测点布置

选取深茂铁路某总长度为 2 km 全封闭声屏障为工程背景,该全封闭声屏障由立柱和吸声板组成,其中立柱包括 3 段圆弧,结构横断面宽 $b=11.95$ m、高 $h=8.725$ m,简化计算模型见图 5(a)。考虑龙卷风场出流面半径 $r_0=500$ m,选取长度 $l=500$ m 全封闭声屏障节段模型置于 1.1 节所建立的龙卷风场地面处见图 5(b),保持龙卷风场模型位置不变,沿结构中心与龙卷风场中心连线方向,通过相对移动的方式实现龙卷风冲击效应,其余龙卷风场边界条件定义以及求解设置等均与 1.1 节相同。将全封闭声屏障沿长轴方向以 2 m 为节段划分监测单元,在监测单元中线位置逆时针每 20° 布置一个测点,见图 5(c)。

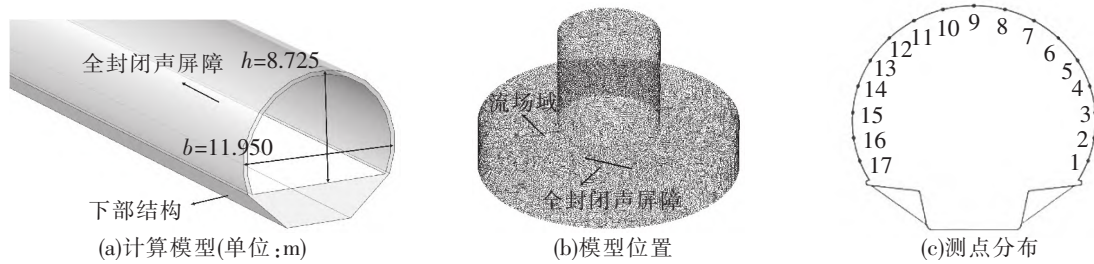


图 5 全封闭声屏障结构与测点分布示意图

2.2 定义风荷载分区及龙卷风路径

为便于分析龙卷风作用下全封闭声屏障表面不同区域风荷载分布特性,借鉴文献[21],将全封闭声屏障表面划分为 A、B、C 3 个区,并定义龙卷风掠过结构的角速度路径,如图 6 所示。

2.3 数据处理方法及结构表面风压模拟结果合理性

为表示方便,将计算所得全封闭声屏障表面风压值转化为无量纲的风压系数 C_p ,其中,定义风压指向结构表面为正压,表现为风压力,远离结构表面为负压,表现为风吸力。

$$C_p = \frac{P - P_0}{0.5\rho V_m^2} \quad (8)$$

式中, P 为结构表面风压; P_0 为远离龙卷风场且不受其影响的大气静压; V_m^2 为最大切向速度的平方。

将结构表面风压对面积积分得到阻力 F_x 、升力 F_z 、力矩 M_y 和力矩 M_z 4 个风力分量(见图 7),转化为无量纲的风力系数为

$$C_{F_x} = \frac{F_x}{0.5\rho V_m^2 hl} \quad (9)$$

$$C_{F_z} = \frac{F_z}{0.5\rho V_m^2 hl} \quad (10)$$

$$C_{M_y} = \frac{M_y}{0.5\rho V_m^2 hbl} \quad (11)$$

$$C_{M_z} = \frac{M_z}{0.5\rho V_m^2 hbl} \quad (12)$$

为验证结构表面风压计算结果的合理性,将节段模型置于直线风场中,结构附近网格划分与 2.1 节相同。保证入口风速与风洞试验^[11]风速一致,其余直线风场边界条件定义以及求解设置等均与 1.1 节相同。提取结构表面测点风压并由式(8)处理为无量纲的风压系数,与风洞试验结果^[11]对比如图 8 所示。由图 8

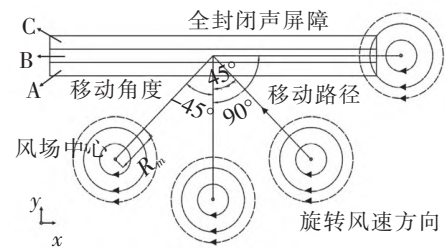


图 6 结构表面分区及龙卷风场移动角度路径

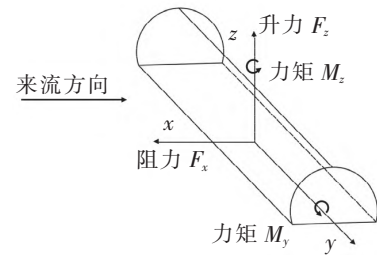


图 7 风力分量示意图

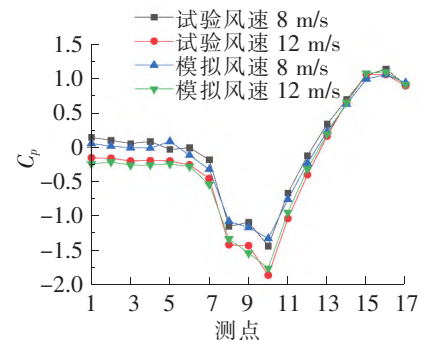


图 8 测点风压系数

可见,模拟结果与试验结果最大误差(以试验结果为基准)为 4.1%,不超过 5%,二者吻合较好,较好再现了直线风场中结构表面测点风压系数的变化趋势,验证了所模拟结构模型表面风压结果的合理性。

3 全封闭声屏障表面风压分布

3.1 龙卷风场中心与全封闭声屏障结构中心距离对结构表面风压分布特性影响

为了解龙卷风场中心与全封闭声屏障结构中心距离对结构表面风压分布特性的影响规律,选取 0° 角路径下,地面植被覆盖面积比 $\eta = 0$,龙卷风场中心与全封闭声屏障结构中心距离 r 分别为 $2R_m$ 、 R_m 和 0 这 3 个代表性距离时结构表面风压分布,并由式(8)处理为无量纲的风压系数,如图 9 所示。

由图 9 可知,当 $r = 2R_m$ 时,结构远离风场中心,结构表面风压系数全部为正值,呈现出全封闭声屏障中部和迎风面左端部

数值大,背风面右端部数值小的特征,最大值 2.56 出现在迎风断面和路径中心线上;当 $r = R_m$ 时,结构迎风面左端最大值增大为 2.91,结构顶端中部最小值减小为 1.58;当 $r = 0$ 时,受风场中心竖直向上的风吸力影响,结构表面风压系数整体减小,迎风面左端最大值减小为 2.2,结构顶端中部风压由正值减小为负值,最大负值绝对值为 1.13。综合来看,不同径向距离时结构表面迎风面的风压系数最大,原因可能在于 0° 角路径下,龙卷风场的整体移动与气流顺时针旋转产生的撞击效应叠加产生最大正风压。

3.2 龙卷风移动角度路径对结构表面风压分布特性影响

为了解龙卷风移动角度路径对结构表面风压分布特性影响规律,选取 $r = R_m$ 时,(由 3.1 节分析结果发现,此距离处结构表面正风压系数最大),地面植被覆盖面积比 $\eta = 0$,龙卷风移动角度路径分别 -45° 、 0° 、 45° 、 90° 这 4 个角度时结构表面风压分布,并由式(8)处理为无量纲的风压系数,如图 10 所示。

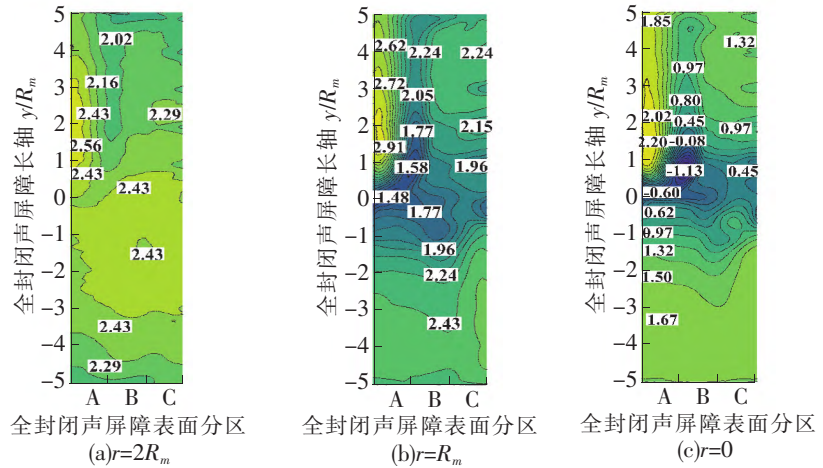


图 9 龙卷风场中心与全封闭声屏障结构中心距离不同时结构表面风压分布(0°)

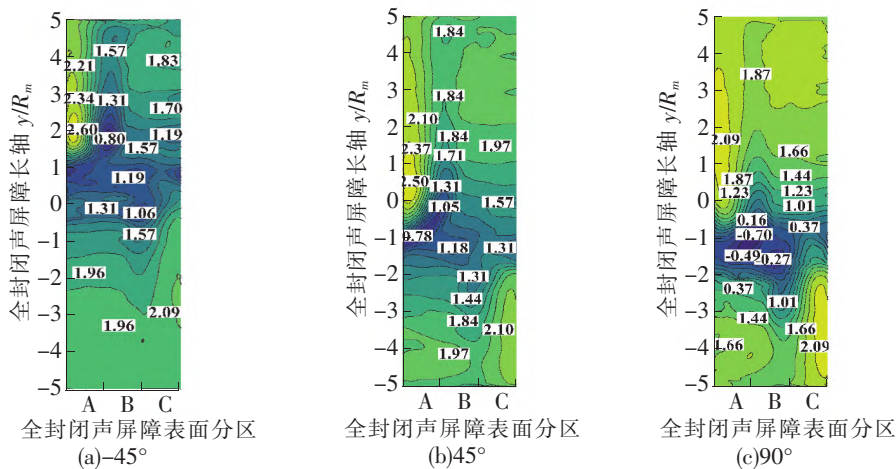


图 10 龙卷风移动路径不同时结构表面风压分布

由图 10 可知,相比于 0° 角路径,其他角度路径下结构表面风压值整体较小。 -45° 和 45° 角路径下,结构表面风压分布形式与 0° 角路径下基本一致,最大风压差位置由 $y/R_m = 1$ 处分别移动到 $y/R_m = 2$ 和 $y/R_m = 0$ 处,迎风面左端风压最大值由 2.91 分别减小为 2.60 和 2.50,结构中部顶端风压最小值由 1.58 分别减小为 0.80 和 0.78; 90° 角路径下,结构表面风压以 B 区 $y/R_m = -1$ 为中心呈现对称分布,此时结构表面整体风压值最小,结构顶端中部最小值由 0° 角路径下的 1.58 减小为 -0.70 ,迎风面左端最大值由 2.91 减小为 2.09,原因可能在于 90° 角路径下龙卷风场旋转气流方向与整体移动方向垂直,冲击效应对结构表面风压的影响降低。

3.3 地面植被覆盖面积比对结构表面风压分布特性影响

为了解全封闭声屏障周围地面植被覆盖面积比对结构表面风压分布特性影响规律,选取 0° 角路径下, $r = R_m$ 和 $r = 0$,龙卷风场中全封闭声屏障周围地面植被覆盖面积比 η 分别为 0、12.5%、25% 3 个代表性时结构表面风压分布,并根据式(8)处理为无量纲的风压系数,如图 11 所示。

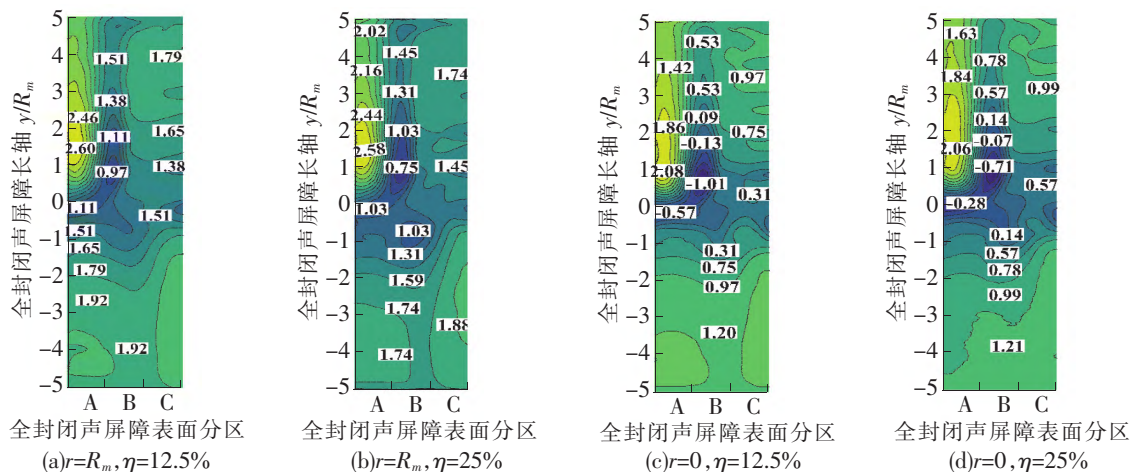


图 11 全封闭声屏障周围不同植被覆盖面积比时表面风压分布

由图 11 可知,相比于地面植被覆盖面积比 $\eta = 0$ 时,其他地面植被覆盖面积比下结构表面风压值整体较小,当 $r = R_m$ 时, $\eta = 12.5\%$ 和 $\eta = 25\%$ 下结构迎风面左端风压最大值由 2.91 分别减小为 2.60 和 2.58,结构顶端中部风压最小值由 1.58 分别减小为 0.97 和 0.75; 当 $r = 0$ 时, $\eta = 12.5\%$ 和 $\eta = 25\%$ 下结构迎风面左端风压最大值由 2.20 分别减小为 2.08 和 2.06,结构中部顶端的最大负风压由 -1.13 分别变为 -1.01 和 -0.71 。结构迎风面左端和顶端中部风压系数绝对值均有减小,说明地面植被覆盖面积比的增加,没有改变结构表面风压分布形式,但减小了风压值。需要说明的是, $\eta = 25\%$ 相比于 $\eta = 12.5\%$, 结构迎风面左端的风压最大值无太大变化,结构顶端中部风压最小值减小 30%。

4 全封闭声屏障表面气动力特性

4.1 龙卷风作用下全封闭声屏障结构整体风力系数特性

为了解龙卷风作用下全封闭声屏障整体风力系数特性,选取地面植被覆盖面积比 $\eta = 0$,龙卷风场移动路径分别为 -45° 、 0° 、 45° 、 90° 这 4 个代表性角度时结构整体风力分量随着龙卷风场中心与全封闭声屏障结构中心距离 r 分布,并根据式(9)一式(12)处理为无量纲的风力系数,如图 12 所示。

由图 12(a)可知,在 -45° 、 0° 、 45° 角路径下,结构表面阻力系数 C_{F_x} 随着龙卷风场中心与全封闭声屏障结构中心距离 r 的增加而减小,当 $r/R_m < 1.0$ 时,阻力系数 C_{F_x} 为正值且变化剧烈,当 $r/R_m > 1.0$ 时,阻力系数 C_{F_x} 变化不大; 在 90° 角路径下,阻力系数 C_{F_x} 全为正值且随 r 的增加呈现出先增加后减小的趋势,在 $r/R_m = 1.0$ 处,阻力系数 C_{F_x} 出现最大值 0.15,当 $r/R_m < 2.0$ 时,阻力系数 C_{F_x} 变化不大,当 $r/R_m > 2.0$ 时,阻力系数变化剧烈,在 $r/R_m = 3.0$ 处,阻力系数 C_{F_x} 出现最小值 0.025。

由图 12(b)可知,在 -45° 、 0° 、 45° 角路径下,结构表面升力系数 C_{F_z} 全为负值且随着龙卷风场中心与全封闭声屏障结构中心距离 r 的增加而增大,当 $r/R_m < 1.0$ 时,升力系数 C_{F_z} 变化不大,绝对值最大值为 0.5; 当 $r/R_m > 1.0$

时,升力系数 C_{F_z} 变化剧烈,相比于 0° , -45° 、 45° 角的升力系数 C_{F_z} 的变化梯度更大;在 90° 角路径下,升力系数 C_{F_z} 全为负值且随 r 的增加呈现出先减小后增大的趋势,在 $r/R_m = 1.5$ 处,升力系数 C_{F_z} 出现绝对值最大值 0.27。

由图 12(c)可知,在 -45° 、 0° 、 45° 角路径下,结构表面力矩系数 C_{M_y} 全为正值且随龙卷风场中心与全封闭声屏障结构中心距离 r 的增加呈现出先增大后减小的趋势,在 $r/R_m = 1.0$ 处,力矩系数 C_{M_y} 在 3 个角度路径下最大值分别为 0.23、0.44、0.24,其分布形态与龙卷风场切向速度分布(图 3)趋势相同,原因可能在于力矩系数 C_{M_y} 主要受到风场切向速度的影响;在 90° 角路径下,结构力矩系数 C_{M_y} 接近 0,说明于龙卷风场的对称性,全封闭声屏障沿 y 轴方向进入风场,龙卷风场对力矩系数 C_{M_y} 影响较小。

由图 12(d)可知,在 -45° 、 0° 角路径下,结构表面力矩系数 C_{M_z} 全部为正值且随龙卷风场中心与全封闭声屏障结构中心距离 r 的增加而减小;在 45° 、 90° 角路径下,力矩系数 C_{M_z} 全为正值且随 r 的增加呈现出先增大后减小的趋势,在 $r/R_m = 0.5$ 及 $r/R_m = 0.8$ 处,力矩系数 C_{M_z} 分别出现最大值 0.33 和 0.39。

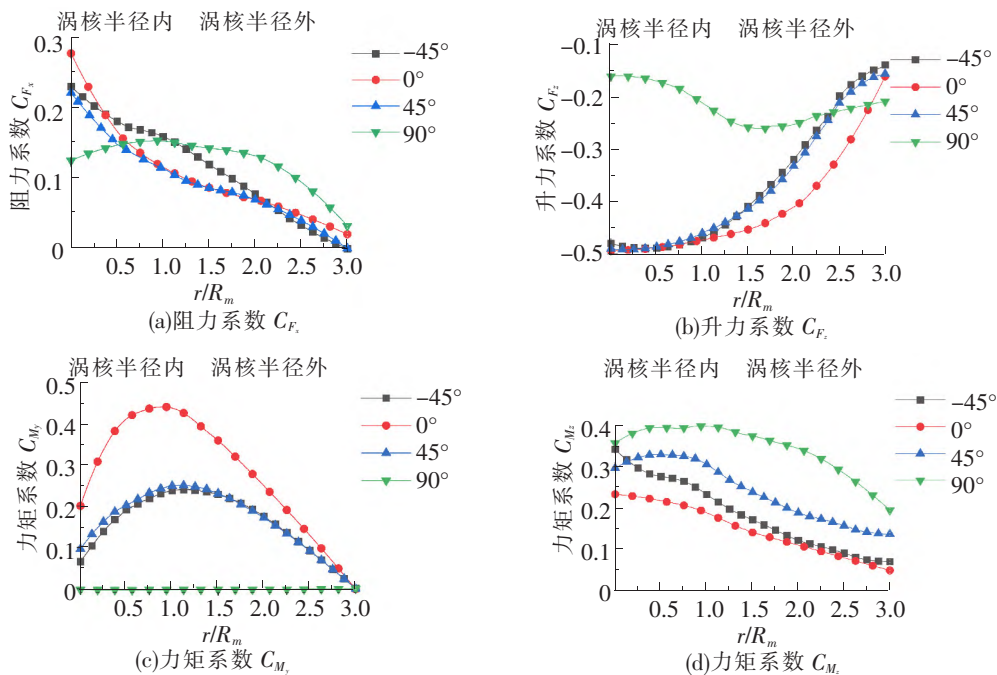


图 12 全封闭声屏障风力系数曲线图

4.2 龙卷风作用下全封闭声屏障结构体型系数

为研究龙卷风作用下全封闭声屏障结构体型系数,根据 2.2 节结构表面分区方法,选取 0° 角路径下,地面植被覆盖面积比 $\eta = 0$ (由 3.2 和 3.3 节分析发现此角度和地面植被覆盖面积比下结构表面整体风压值较大), $r/R_m = 0$ 和 $r/R_m = 1$ (由 4.1 节分析发现结构位于此两处时出现风力分量极值)时结构表面监测单元中线测点的风压系数,并根据式(13)处理为相应单元的体型系数,其沿结构长轴方向分布如图 13 所示。

风荷载体型系数表示为

$$\mu_s = \frac{\sum C_{pi} A_i}{\sum A_i} \quad (13)$$

式中, C_{pi} 为测点 i 处的风压系数; A_i 为测点 i 所属面积。

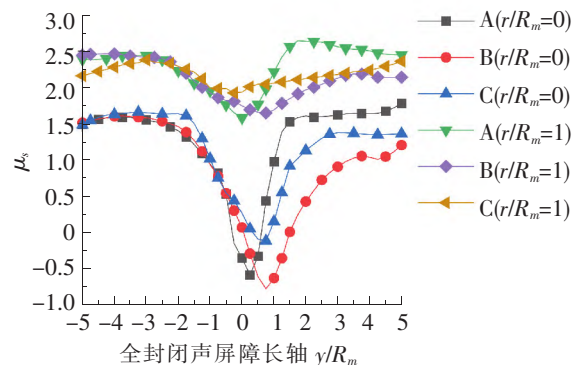


图 13 全封闭声屏障单元体型系数

由图 13 可知,龙卷风作用下全封闭声屏障表面不同分区体型系数沿长轴变化趋势总体一致,

$|2| < y/R_m < |5|$ 间不同分区体型系数变化不大, $y/R_m < |2|$ 间体型系数变化剧烈; 当 $-5 < y/R_m < -2$ 时不同分区的体型系数基本相等, 当 $2 < y/R_m < 5$ 时不同分区体型系数出现明显差别, 原因可能是龙卷风场旋转风速方向与龙卷风场整体移动方向重合产生较大风速, 结构表面流动分离现象增强, 产生较大风压梯度; 当 $r/R_m = 1$ 时, 全封闭声屏障整体承受正压, 结构 A 区 $y/R_m = 1.8$ 处出现最大正体型系数 2.53; 当 $r/R_m = 0$ 时, 全封闭声屏障 $y/R_m = -0.8$ 处全断面为负压, 其中结构 B 区出现负体型系数绝对值最大为 0.72。在 $y/R_m = 1$ 断面处分区间体型系数差值最大, 结构 A、B、C 区对应的体型系数分别为 1.53、-0.5、1.01。

综合来看, 对全封闭声屏障进行抗龙卷风设计时, 建议考虑结构表面龙卷风荷载 3 种工况: ①全封闭声屏障全断面承受正风压, 按最大正风压极值计算; ②全封闭声屏障全断面承受负风压, 按最大负风压极值计算; ③全封闭声屏障承受断面环向压差最大, A 区、C 区和 B 区分别取最大正风压极值的 60%、40% 和最大负风压极值 70%。

5 结论

(1) 龙卷风作用下, 全封闭声屏障表面风荷载以风压力为主, 0° 角路径下、 $\eta = 0$ 时, 结构表面风压整体较大。结构位于 $r = 0$ 时, 受气压降影响结构中部顶端出现负风压系数极值; 结构位于 $r = R_m$ 时, 受切向风速影响结构迎风面左端出现正风压系数极值; 结构位于 $r = 2R_m$ 时, 结构远离龙卷风场中心, 结构表面受切向风速及气压降的作用均减小, 表面风压系数值差别不大。

(2) 在龙卷风场涡核半径内, 结构位于 $r/R_m = 0$ 时, 全封闭声屏障结构表面阻力系数 C_{F_x} 和升力系数 C_{F_z} 出现最不利值; 结构位于 $r/R_m = 1$ 时, 全封闭声屏障结构表面力矩系数 C_{M_y} 及 C_{M_z} 出现最不利值; 在 3 倍涡核半径外, 风力系数值接近于 0。

(3) 龙卷风作用下, 全封闭声屏障结构体型系数在 $y/R_m < |2|$ 间变化剧烈, 对结构进行抗龙卷风设计时需要考虑断面环向压差影响, 建议在结构 A 区、C 区和 B 区分别取最大正风压极值的 60%、40% 和最大负风压极值 70% 进行组合。

参 考 文 献

- [1] 黄大鹏, 赵珊珊, 高歌, 等. 近 30 a 中国龙卷风灾害特征研究[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(2): 97-101.
- [2] 辛思远, 张世峰, 王晓伟. 京雄城际铁路全封闭声屏障降噪效果研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(6): 163-168.
- [3] WEN Y K. Dynamic tornadic wind loads on tall buildings[J]. Journal of the Structure Division, 1975, 101(1): 169-185.
- [4] 汤卓, 张源, 吕令毅. 龙卷风风场模型及风荷载研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(3): 104-110.
- [5] WARD N B. The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1972, 29(6): 1194-1204.
- [6] HAAN F L, SARKAR P P, GALLUS W A. Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications[J]. Engineering Structures, 2008, 30(4): 1146-1159.
- [7] 张寒, 王浩, 徐梓栋, 等. 高铁连续梁桥龙卷风荷载数值模拟[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 284-290.
- [8] 俞怡恬, 黄生洪, 王新. 龙卷风冲击高层建筑气动力效应数值模拟[J]. 工程力学, 2020, 37(1): 168-174.
- [9] 李玉学, 董阳, 陈铁. 龙卷风作用下大跨柱面煤棚风荷载特性研究[J/OL]. 防灾减灾工程学报[2023-11-04]. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20230520001>.
- [10] 汪大海, 韩少鸿, 黄国庆, 等. 输电线路龙卷风风振响应的参数分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3871-3881.
- [11] 韩旭, 彭栋, 向活跃, 等. 横风作用下高速铁路桥梁全封闭声屏障气动特性的风洞试验研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(7): 151-155.
- [12] 郑史雄, 王林明. 铁路声屏障风荷载体型系数研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 46-50.
- [13] XIANG H Y, LI Y L, WANG B. Aerodynamic interaction between static vehicles and wind barriers on railway bridges exposed to crosswinds[J]. Wind and Structures, 2015, 20(2): 237-247.
- [14] 李玉学, 陈玄焯. 列车运行致高速铁路全封闭声屏障气动荷载研究[J]. 铁道建筑, 2023, 63(6): 81-88.
- [15] KUAI L, HAAN F, GALLUS W, et al. CFD simulations of the flow field of a laboratory-simulated tornado for parameter sensitivity studies and comparison with field measurements[J]. Wind & Structures an International Journal, 2008,

11(2):75-96.

- [16]郭栋鹏. 计算流体力学及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2020:33-35.
- [17]MOCHIDA A, TABATA Y, IWATA T, et al. Examining tree canopy models for cfd prediction of wind environment at pedestrian level[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10/11):1667-1677.
- [18]马杰. 移动龙卷风对低矮建筑物风荷载特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [19]LESLIE L M, HOLLAND G J. On the bogussing of tropical cyclones in numerical models: A comparison of vortex profiles[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1995, 56(1/2):101-110.
- [20]TANG Z, FENG C, WU L, et al. Simulations of tornado-like vortices in a large-scale ward-type tornado simulator [C]//8th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications. Boston, Massachusetts:Northeastern University,2016:1-10.
- [21]中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

Study on Wind Load Characteristics of Fully Enclosed Sound Barrier for High-speed Railway Under Tornado Action

LI Yuxue^{1,2,3}, GENG Chunshuai¹, DONG Yang¹

- (1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;
3. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The fully enclosed sound barrier of high-speed railway is a typical long-distance linear wind-sensitive structure that frequently faces the possibility of tornado attacks. In order to deeply understand the wind load characteristics of the structure under the action of tornadoes, a tornado field model was established based on the Ward-type tornado simulator principle with 2 km fully enclosed sound barrier on the Shenmao Railway as the subject. The structural wind load characteristics of fully enclosed sound barrier were analyzed accordingly under the different distances r of the sound barrier center from the tornado, the different moving angle paths of the tornado, and different ground vegetation coverage ratio η . The results show that wind pressure is the main wind load on the sound barrier's surface. Under a 0° movement path with $\eta = 0$, the structure experiences significant overall wind pressure. The maximum negative wind pressure coefficient of -1.13 occurs at $r = 0$, along with unfavorable drag coefficient C_{F_x} and lift coefficient C_{F_z} values of 0.27 and -0.49 respectively; At $r/R_m = 1$ (where R_m is the vortex core radius of the tornado field), the maximum positive wind pressure coefficient is 2.91 , while the unfavorable moment coefficients C_{M_y} and C_{M_z} are 0.44 and 0.39 respectively; When designing the structure to withstand tornadoes, the circumferential pressure difference of the segment should be taken into account. It is recommended to combine 60% and 40% of the maximum positive wind pressure and 70% of the maximum negative wind pressure on the windward side, lee side and top of the structure, respectively.

Key words: tornado load; fully enclosed sound barrier; wind pressure distribution; wind force coefficient; shape coefficient