移动龙卷风作用下高铁接触网风振响应分析

郎天翼[1]，王 浩[1]，刘震卿[2]，张 寒[1]，徐梓栋[1]，郜 辉[1]

（1.东南大学混凝土与预应力混凝土结构教育部重点实验室，江苏 南京 210096；
2.华中科技大学土木与水利工程学院，湖北 武汉 430074）

摘要：为探究龙卷风作用下高速铁路接触网的动力响应，以简单链形接触网为研究对象，基于Wen模型模拟三维移动龙卷风场，开展了移动龙卷风作用下的接触网风振响应分析，研究了龙卷风级别及移动速度等关键参数对接触网动力响应的影响。结果表明，接触线横向位移响应幅值发生在龙卷风场中心到达结构之前；龙卷风移动速度的增加在一定范围导致接触线横向振动响应更加剧烈，然而当移动速度过大时，接触线横向位移响应幅值下降。在研究所选F1及F2级龙卷风作用下，接触线各跨间最大横向位移响应幅值均在规范的许用范围之内；而F3级龙卷风作用下，接触线振动响应接近甚至超过规范限值，应当引起关注。

关键词：风振响应；移动龙卷风；接触网；数值模拟
中图分类号：U441.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1004-4523(2022)04-0969-07
DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.04.021

引 言

接触网是高速铁路的重要附属设施，具有跨度大、柔度高的特点，属于风敏感结构，是抗风中最薄弱的环节[1]。接触网作为无备用供电设施，出现故障时需投入大量人力物力更换维修，造成经济损失并延误铁路运营。为确保接触网结构安全可靠以及弓网系统对高速列车有效输电，国内外学者对接触网的风致振动开展了大量研究：Stickland等[2]通过实验获取了接触线的气动系数；Pombo等[3]采用多体动力学方法分析了脉动风对弓网受流质量的影响，指出风荷载有增大受电弓和增大接触力的趋势；赵飞等[4]分析了脉动风作用下接触网振动响应特性和弓网接触压力的变化规律，发现了风向定位器的第一吊弦退出工作时间随风速增大而延长；宋洋等[5-6]探究了接触网动态受流特性以及覆冰对接触线气动系数的影响，结果表明脉动风激励主要影响接触压力的高频区域，覆冰将改变接触线的振动形式。

然而，在接触网抗风研究中，关于特异风（特别是龙卷风）的研究鲜有报道。龙卷风是一种破坏力强大的小尺度空气涡旋，由观测数据及灾害调研可知，其核心风速可高达100～200 m/s，平均移动速度为15 m/s，最快达到70 m/s，路径多为直线型，持续时间在几分钟到几十分钟不等[7-8]。2016年江苏阜宁发生龙卷风袭击事件导致了大量房屋及基础设施毁坏，生命财产遭到严重损失[9]。在对龙卷风的研究中，Wen[10]基于实测风场提出了应用最为广泛的龙卷风半经验公式，简称Wen模型。汤卓等[11]依据Wen模型，发展了龙卷风压力风场模型。此外，Liu等[12]利用计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）和试验手段开展了龙卷风作用下冷却塔抗风安全分析，发现了龙卷风中次涡成分与冷却塔涡脱产生的双涡效应对结构振动响应的显著影响。Hamada等[13]基于有限元方法研究了龙卷风对输电塔的影响，结果表明结构响应峰值与龙卷风涡核半径和袭击角度密切相关。王新等[14]利用CFD技术模拟了移动龙卷风冲击高层结构，得出了多漩涡及建筑尾涡相互作用与耦合是导致更大冲击效应的重要力学机制。Hao等[15]采用Wen模型分析了龙卷风袭击桥梁结构所产生的振动响应，认为龙卷风荷载的非均匀性和局部性对长大跨桥梁的振动特性影响较大。总体上，龙卷风作用下工程结构的风效应分析更为常见，而对高速铁路接触网等关键附属设施的研究则有待进一步开展。中国地域辽阔，气候条件复杂，部分高速铁路沿线存在龙卷风的潜在威胁，尤其在东南、华南等龙卷风多发地区，高速

收稿日期：2021-02-19；**修订日期：**2021-05-04
基金项目：中国铁路总公司科技研究开发计划重大课题（2018T007）；中央高校基本科研业务费（2242020k1G013）；国家“万人计划”青年拔尖人才资助项目（W03070080）。

铁路网分布密集,一旦铁路设施遭受龙卷风袭击,将造成难以预计的灾难性后果。因此,开展龙卷风作用下接触网风振响应分析具有重要意义。

为探究龙卷风作用下高速铁路接触网的动力响应,本文利用Wen模型构建三维移动龙卷风场,开展了龙卷风作用下接触网的风振响应分析,着重研究了龙卷风级别及移动速度等关键参数对结构响应的影响,以期为高速铁路接触网的抗风研究及相关设计规范的完善提供有益参考。

1 接触网有限元建模

接触网是铁路电气系统中复杂的架空线路,如图1所示,接触网主要由接触线、承力索和吊弦组成。其中承力索和接触线具有较大张力,列车顶部的受电弓通过与带电的接触线搭接从而向列车供电。

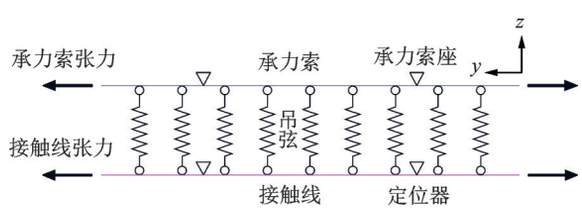


图1 接触网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of catenary

采用有限元分析软件ANSYS建立了如图2所示接触网模型。接触网共有8跨,单跨长度为50 m;单跨吊弦个数为5根,各跨吊弦采用5 m+10 m×4+5 m的布置方式;线路采用之字形架设,拉出值为0.3 m;接触网的结构高度为1.6 m(承力索座与接触线定位器间距)。建模过程中,承力索、接触线采用具有抗弯刚度的梁单元建模,吊弦采用仅承受拉力作用的杆单元建模,吊弦与承力索、接触线采用铰接方式连接;为模拟张力补偿装置,承力索补偿侧施加恒力21 kN,接触线补偿侧施加恒力27 kN[16]。在边跨固定节点施加三向位移约束,其余承力索座和接触线定位器处释放y向自由度。表1列出了接触网有限元模型的主要参数。

在接触网的风振响应计算中,同时考虑计算效率和精度,在每根吊弦与承力索和接触线的连接处设置为一个风场模拟点,如图2所示。在风荷载计算时,将线荷载等效为集中荷载施加在接触网上,风荷载作用点与风荷载模拟点保持一致。

表1 接触网的主要参数

Tab. 1 Main parameters of catenary

部件	杨氏模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	截面积/mm^2	材料
接触线	120	0.33	9130	120	银铜
承力索	120	0.33	9016	120	青铜
吊弦	120	0.33	9356	10	青铜

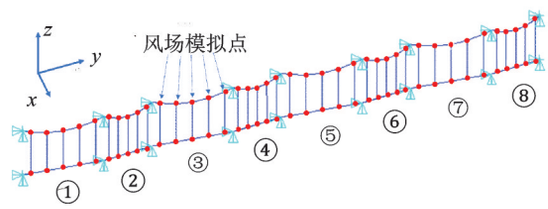


图2 接触网有限元模型及风场模拟点

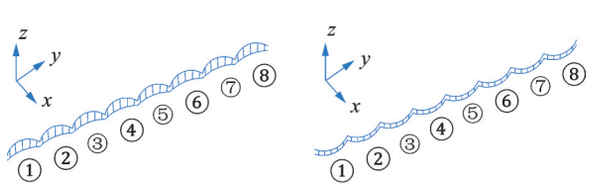
Fig. 2 Finite element model and wind field simulation points of catenary

基于上述有限元模型,采用瞬态动力学方法分析了由承力索、接触线和吊弦组成的接触网动力特性,模态频率结果如表2所示。由于吊弦的存在增加了模型y-z平面内的刚度,导致模型平面内的各阶频率均高于平面外的各阶频率。接触网在平面外及平面内的1阶振型如图3所示。

表2 接触网的模态频率/Hz

Tab. 2 Modal frequency of catenary/Hz

模态阶数	平面外	平面内
1阶模态	0.45	0.61
2阶模态	0.73	1.07
3阶模态	1.03	1.44



(a) 平面外 (b) 平面内

(a) Out-of-plane (b) In-plane

图3 接触网平面外和平面内1阶振型

Fig. 3 First order mode shape of catenary in and out of plane

2 龙卷风荷载模拟

2.1 龙卷风参数

根据改良的藤田级数规定[17]:最大风速在29~37 m/s, 38~49 m/s, 50~61 m/s, 62~74 m/s, 75~89 m/s范围的龙卷风级别分别为F0级、F1级、F2级、F3级和F4级。为研究龙卷风特征参数对接触网风振响应的影响,计算了如表3所示的5种工况下的接触网风振响应。其中,V_{max}为龙卷风场中最大风速,V_c为最大切向风速,r_c为龙卷风场核心半径,即最大切向风速V_c发生处的中心距,V_t为龙卷

风移动速度。上述工况中，龙卷风级别由最大切向风速控制。工况 1～3 中龙卷风的核心半径及移动速度相同，最大切向风速不同，反映了龙卷风级别对接触网风振响应的影响。工况 3～5 中龙卷风的核心半径和最大切向风速相同，移动速度不同，反映了移动速度对接触网风振响应的影响。

表 3　龙卷风特征参数

Tab. 3　Tornado characteristic parameters

工况	等级	V_{max}/(m·s^{-1})	V_c/(m·s^{-1})	r_c/m	V_t/(m·s^{-1})
1	F1	45	30	50.0	15
2	F2	55	40	50.0	15
3	F3	65	50	50.0	15
4	F3	67.5	50	50.0	17.5
5	F3	70	50	50.0	20

2.2　龙卷风场模型

龙卷风作用下接触网的风振响应与龙卷风的风速分布、尺度、移动速度等特征参数有关，为构建一个合理的龙卷风模型，本节根据 Wen 所提出的半经验公式建立柱坐标系下的龙卷风场[10]。Wen 模型作为描述龙卷风基本特征参数（涡核尺寸、风速分布）的三维模型，一定程度上便于数值模拟的计算。其中边界层将龙卷风分为上下两部分，边界层计算公式为：

$$\delta(r')=\delta_0(1-\mathrm{e}^{-0.5r'^2}) \tag{1}$$

$$r'=r/r_c \tag{2}$$

式中　δ_0为远场边界层厚度，取值为 425 m；r为模拟点中心距。

边界层上部，各方向气流速度分量表示为：

$$\begin{cases} T(z',r')=f(r')=1.4V_c(1-\mathrm{e}^{-1.256r'^2})/r' \\ R(z',r')=0 \\ W(z',r')=93r'^3\mathrm{e}^{-5r'}V_c \end{cases} \tag{3}$$

边界层下部，各方向气流速度分量表示为：

$$\begin{cases} T(z',r')=f(r')[1-\mathrm{e}^{-\pi z'}\cos(2b\pi z')] \\ R(z',r')=f(r')\{0.672\mathrm{e}^{-\pi z'}\sin[(b+1)\pi z']\} \\ W(z',r')=93r'^3\mathrm{e}^{-5r'}V_c[1-\mathrm{e}^{-\pi z'}\cos(2b\pi z')] \end{cases} \tag{4}$$

式中　T为切向风速；R为径向风速；W为竖向风速；z为模拟点绝对高度，$z'=z/\delta(r')$，$b=1.2\mathrm{e}^{-0.8r'^2}$。

Wen 模型所建立的龙卷风场如图 4 所示，在此基础上附加水平移动速度 V_t，可得到基于 Wen 模型的三维移动龙卷风场。

由于有限元建模和风荷载计算在笛卡尔坐标系下进行，需将上述公式进行坐标转换。笛卡尔坐标系下，龙卷风中心坐标为(x_0,y_0)，模拟点处坐标为

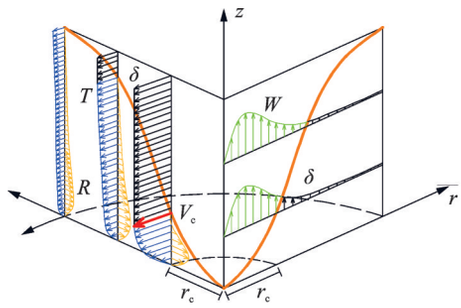


图 4　Wen 模型龙卷风场结构图

Fig. 4　Tornado structure diagram of Wen model

(x,y)，模拟点处风速可表示为：

$$\alpha_0=\arctan[(y-y_0)/(x-x_0)] \tag{5}$$

$$V_x=\begin{cases} T\sin\alpha_0+R\cos\alpha_0+V_t\cos\beta, & x\leqslant x_0 \\ -T\sin\alpha_0-R\cos\alpha_0+V_t\cos\beta, & x>x_0 \end{cases},$$

$$V_y=\begin{cases} -T\cos\alpha_0+R\sin\alpha_0-V_t\sin\beta, & x\leqslant x_0 \\ T\cos\alpha_0-R\sin\alpha_0-V_t\sin\beta, & x>x_0 \end{cases},$$

$$V_z=W \tag{6}$$

式中　α_0为模拟点至龙卷风中心的方位角，即龙卷风中心至模拟点连线与x轴的夹角；β为龙卷风袭击角，即龙卷风的移动路径与x轴的夹角。

2.3　风速时程求解

为模拟龙卷风袭击的全过程中接触网处风速时程，以八跨接触网中点为中心，考虑了 600 m 的行程范围，袭击过程反映了龙卷风涡核从接近、完全作用到分离的各个阶段。如图 5 所示，龙卷风中心沿x轴方向袭击接触网，并穿过接触网。

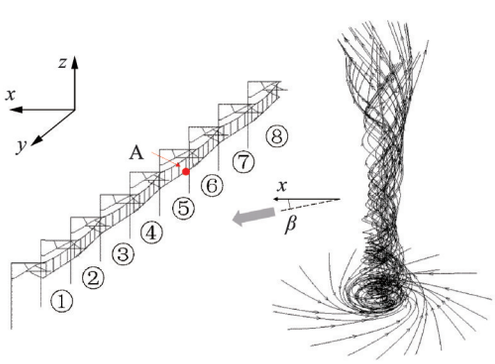


图 5　龙卷风袭击接触网示意图

Fig. 5　Schematic diagram of catenary attacked by tornado

以如下参数为例，对基于 Wen 模型的移动龙卷风场进行模拟。龙卷风最大切向风速 V_c = 30 m/s，移动速度 V_t = 5 m/s，龙卷风核心半径 r_c = 50 m，袭击角 β = 0°。选取第五跨接触线上的其中一风场模拟点 A。由式(6)可以得到笛卡尔坐标系下 A 点处的风速时程曲线，如图 6 所示。

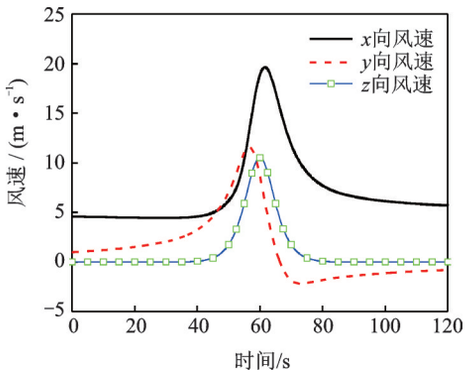


图 6 风场模拟点 A 风速时程曲线

Fig. 6 Wind speed time history curve of wind field simulation point A

2.4 风荷载计算

由于在接触网中吊弦的截面及长度均相对较小，吊弦受到的风荷载可忽略不计，仅考虑作用在接触线与承力索上的风荷载。将非平稳风荷载依据准定常理论进行简化计算，接触网所受风荷载可由平均风引起的静风荷载和脉动风引起的抖振力叠加组成，但在三维移动龙卷风场中的平均风是时变的，风场模拟点不同时刻的风速、风向不同，考虑到缺少龙卷风的脉动风谱，本研究借用 Kaimal 谱模拟了风场中的顺风向和横风向的脉动成分。

实验中龙卷风的湍流强度在涡核附近达到最大，涡旋核心半径区域的压力波动表现为非高斯过程[18]。工程上为模拟脉动龙卷风对结构的作用，对高频脉动成分进行了简化处理，文献[19]中基于大气边界层湍流风场得到的风荷载参数，对龙卷风作用下的结构进行了风振响应分析。本文亦采用相同的简化处理方式研究龙卷风作用下接触网的动力响应。

脉动风场模拟时，离地面 10 m 处的 U_{10} 设置为龙卷风最大风速，截至频率为 8π rad/s，频率等分数为 1024，地面粗糙度 0.01 m。考虑高速铁路路线中多采用高架简支梁桥[20]，接触网悬挂高度不宜小于 5.3 m[21]，桥墩、桥梁断面及接触网的悬挂导致接触网有一定离地高度，因此研究时接触线和承力索的高程分别取 19.4 m 和 20.0 m，并忽略线索垂度带来的高程变化。

由于接触线-承力索的截面较小，得到的扭矩系数的数量级非常小，计算时扭矩忽略不计，仅分析线索的升力和阻力[22]。平均风荷载作用下单位长度线索结构所受阻力和升力可表示为：

$$\begin{cases} D_0 = \dfrac{1}{2}\rho U(t)^2 B C_D[\alpha_0(t)] \\ L_0 = \dfrac{1}{2}\rho U(t)^2 B C_L[\alpha_0(t)] \end{cases} \tag{7}$$

式中 ρ 为空气密度；$U(t)$ 为时变平均风速；$U(t)=[V_x^2(t)+V_z^2(t)]^{1/2}$；$\alpha_0(t)$ 为时变的风攻角；$\alpha_0(t)=V_z(t)/V_x(t)$；$B$ 为线索直径；$C_L[\alpha_0(t)]$ 和 $C_D[\alpha_0(t)]$ 为升力系数和阻力系数。

根据 Davenport 准定常理论[23]，抖振力模型表示如下：

$$\begin{cases} D_b = \dfrac{1}{2}\rho U(t)^2 B\left[2C_D\dfrac{u(t)}{U(t)}+(C_D'+C_L)\dfrac{w(t)}{U(t)}\right] \\ L_b = \dfrac{1}{2}\rho U(t)^2 B\left[2C_L\dfrac{u(t)}{U(t)}+(C_L'+C_D)\dfrac{w(t)}{U(t)}\right] \end{cases} \tag{8}$$

风轴坐标系下的接触网所受龙卷风荷载可由下式计算：

$$\begin{cases} D = D_0 + D_b \\ L = L_0 + L_b \end{cases} \tag{9}$$

在体轴坐标系，式(9)可进一步转换为：

$$\begin{cases} F_x = L\cos\alpha_0 + D\sin\alpha_0 \\ F_y = D\cos\alpha_0 - L\sin\alpha_0 \end{cases} \tag{10}$$

参照文献[6,16]中基于 CFD 求得的接触线及承力索气动力系数，利用式(10)得到接触线和承力索风场模拟点的风荷载。图 7 为模拟点 A 处的龙卷风荷载时程曲线。

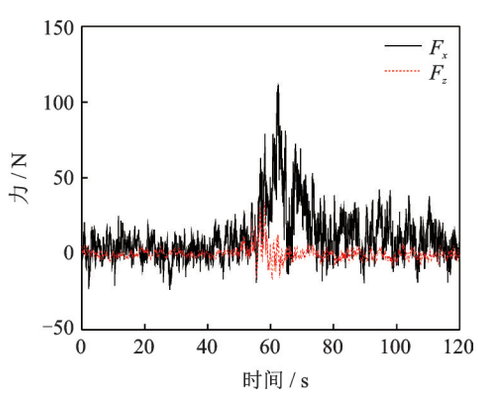


图 7 风场模拟点 A 风荷载时程曲线

Fig. 7 Wind load time history of wind field simulation point A

3 接触网风振响应分析

3.1 风振响应分析

基于接触网有限元模型及表 3 工况下风场模拟点的风荷载时程数据，计算得到了接触网的动力时程响应。图 8 所示为 F1 级龙卷风作用下，接触线各跨间中点的横向位移时程曲线，由图 8 可知，最大横向位移幅值为 0.25 m，小于《高速铁路设计规范》[24]中的限值(《高速铁路设计规范》规定接触线在风荷载作用下的最大偏移值不宜大于 0.45 m)，说明 F1 级龙卷风作用下接触线振动幅值未超限，接触网处于安全服役状态。此外，接触线横向振动最大幅值发生在龙卷风场中心到达接触网之前，而龙卷风核心区域作用于结构

时，接触线横向位移响应幅值下降。此外，龙卷风作用下接触线边跨（第1跨、第8跨）与中间跨（第4跨、第5跨）位移响应幅值并不遵循一定规律，这是由于接触网各跨间定位处沿长度方向即z向振动导致的。

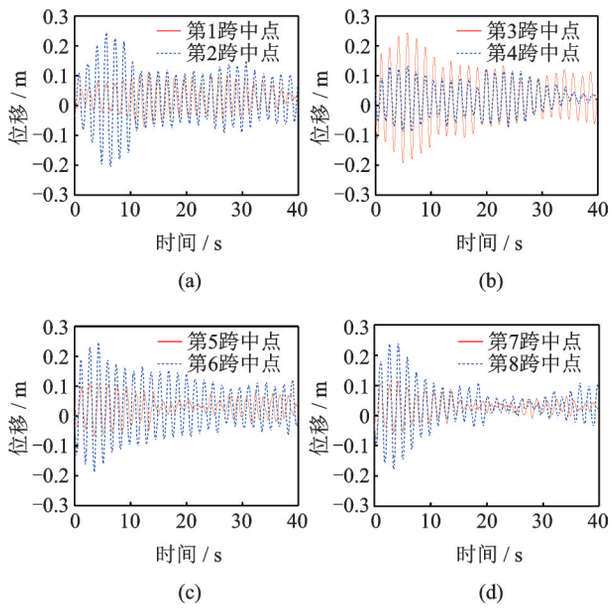


图 8　接触线中点横向振动响应时程

Fig. 8　Transverse vibration response diagram of contact wire midpoint

图 9 为接触线定位处纵向位移响应，龙卷风作用下，各跨间定位处在龙卷风作用下发生纵向位移响应，且位移响应不同步，即具有一定的相位差，说明各跨间纵向线索的长度随时间变化，影响了各跨间的振动响应。

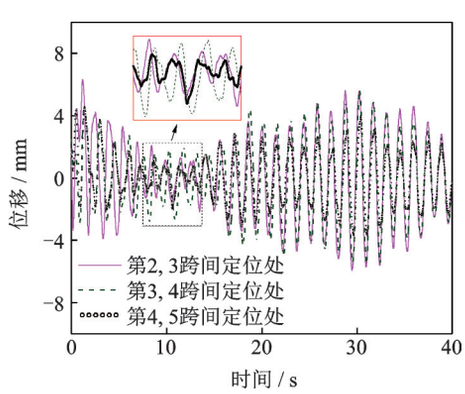


图 9　定位处纵向位移响应

Fig. 9　Longitudinal displacement response of positioning position

工况 1～3 中龙卷风作用下，接触线各跨间横向位移响应幅值如图 10 所示，随着龙卷风级别增大，横向位移响应幅值依次增大，在所给定参数的F3级龙卷风作用下，横向位移响应幅值在第 3 跨中处达到了 0.53 m，超过了《高速铁路设计规范》[24]困难环境条件的允许值（0.5 m），说明此时接触网已处于非安全状态。

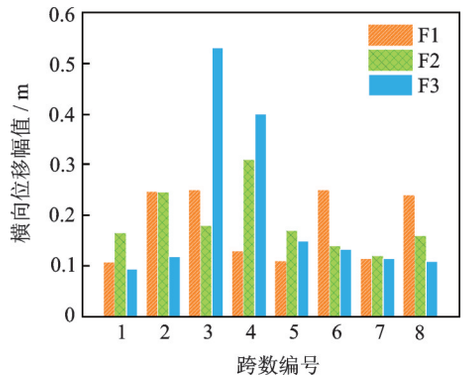


图 10　接触线各跨间响应幅值

Fig. 10　Response amplitude of each span of contact wire

工况 3～5 中龙卷风作用下，各跨间横向位移响应幅值如图 11 所示，龙卷风移动速度由 15 m/s 增加到 17.5 m/s 时，接触线横向位移响应幅值从 0.53 m 增加到 0.54 m，仍然超过允许值。当移动速度为 20 m/s 时，横向位移响应幅值下降到 0.45 m。说明在一定范围内提高龙卷风的移动速度，将增大接触线的横向位移响应；而龙卷风移动速度过快，其作用时间变短，接触线的横向位移响应将下降。虽然移动速度过快将导致接触线横向振动幅值下降，但在F3级龙卷风作用下，接触线振动响应均接近甚至超过规范限值。

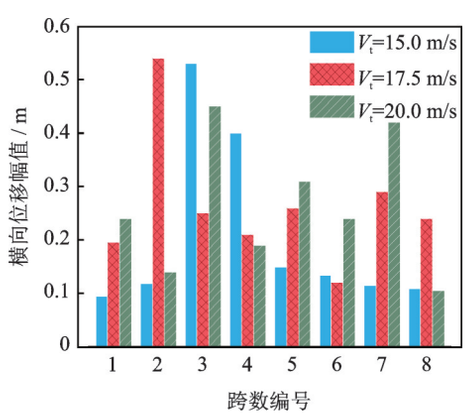


图 11　接触线各跨间响应幅值

Fig. 11　Response amplitude of each span of contact wire

3.2　支座反力分析

由 3.1 节分析可知，工况 3 中 F3 级龙卷风作用下，接触线的横向位移幅值将超限。此时承力索和接触线的横向支座反力在第 4 跨和第 5 跨之间的定位处达到最大，两个支座处的横向反力时程如图 12 所示。承力索定位处横向支座反力最大值为 1162 N，接触线定位处横向支座反力最大值为 394 N，而承力索处最大横向工作荷载为 6 kN，接触网定位线夹最大横向工作荷载为 3 kN，均处在正常工作强度范围内[21]。

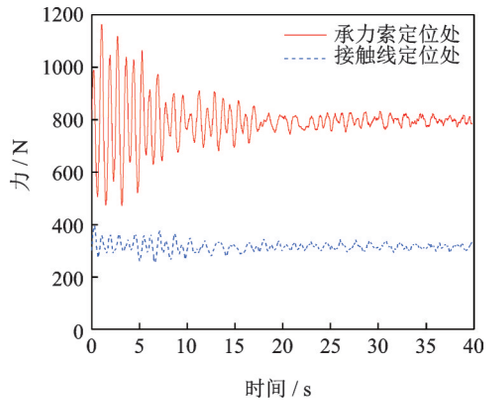


图 12 接触线定位处横向支座反力

Fig. 12 Horizontal reaction force on supporting location of catenary

3.3 轴力响应分析

图 13 给出了接触线在第 4 跨和第 5 跨之间定位处的轴力结果，由于接触线上存在 27 kN 的预应力，因此轴力结果围绕在该值附近波动。在 F1～F3 级龙卷风作用下，接触线定位处轴力幅值分别为 27512，27519 和 27552 N。因此随着龙卷风级别的增大，接触线轴力响应幅值逐渐增大。

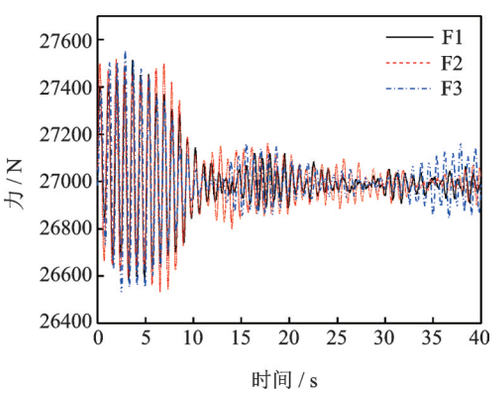


图 13 接触线轴力响应

Fig. 13 Axial force response of contact wire

4 结 论

本文基于 Wen 模型构建了三种级别的移动龙卷风场，采用有限元方法建立了多跨接触网模型，开展了接触网在龙卷风作用下的动态响应分析，本研究所得的主要结论如下：

(1) 龙卷风具有明显的三维特性，其核心附近结构所受风荷载较大，接触线横向振动响应位移幅值发生在龙卷风场中心到达结构之前。

(2) 在一定范围内，接触网风振响应随龙卷风移动速度增大而变得更加剧烈，当龙卷风移动速度过快，其作用时间变短，接触线的横向位移响应幅值下降。

(3) 在本研究所选的 F1 和 F2 级龙卷风作用下，接触网处于安全服役状态，而 F3 级龙卷风作用下，接触线横向位移响应已接近甚至超过规范限值，将对接触网结构安全造成威胁，应给予重点关注。

尽管本文对龙卷风作用下接触网振动响应开展了关键参数分析，但龙卷风作用下接触网风振响应分析中仍存在诸多问题值得进一步研究，包括基于实测参数的精细化风场模拟、龙卷风-结构耦合作用机理等。

参考文献：

[1] 于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都：西南交通大学出版社，2002.
Yu W J. Catenary of High-speed Electrified Railway [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2002.

[2] Stickland M T, Scanlon T J. An investigation into the aerodynamic characteristics of catenary contact wires in a cross-wind[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, 215(4): 311-318.

[3] Pombo J, Ambrosio J, Pereira M, et al. Influence of the aerodynamic forces on the pantograph-catenary system for high-speed trains[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(11): 1327-1347.

[4] 赵飞，刘志刚，韩志伟，等. 随机风场对弓网系统动态性能影响研究[J]. 铁道学报，2012，34(10)：36-42.
Zhao F, Liu Z G, Han Z W, et al. Simulation study on influence of stochastic wind field to dynamic behavior of pantograph-catenary system [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10): 36-42.

[5] 宋洋，刘志刚，鲁小兵，等. 计及接触网空气动力的高速弓网动态受流特性研究[J]. 铁道学报，2016，38(3)：48-58.
Song Y, Liu Z G, Lu X B, et al. Study on characteristics of dynamic current collection of high-speed pantograph-catenary considering aerodynamics of catenary [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(3): 48-58.

[6] 宋洋，刘志刚，汪宏睿. 高速铁路覆冰接触线气动系数研究与风振响应分析[J]. 铁道学报，2014，25(9)：20-27.
Song Y, Liu Z G, Wang H R. Study on aerodynamic parameters and wind vibration responses of iced contact wires of high-speed railways[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 25(9): 20-27.

[7] 纪文君，刘正奇，郭湘平，等. 龙卷风生成机制的探讨[J]. 海洋预报，2003，20(1)：14-19.
Ji W J, Liu Z Q, Guo X P, et al. Discussion on the formation mechanism of tornado [J]. Marine Forecasts, 2003, 20(1): 14-19.

[8] 郑峰，谢海华. 我国近 30 年龙卷风研究进展[J]. 气象科技，2010，38(3)：295-299.
Zheng F, Xie H H. Progress in tornado researches in China in recent 30 years[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(3): 295-299.

[9] Tao T, Wang H, Yao C, et al. Performance of structures and infrastructure facilities during an EF4 Tornado in Yancheng[J]. Wind and Structures, 2018, 27(2):

137-147.
[10] Wen Y. K. Dynamic tornadic wind loads on tall buildings[J]. Journal of the Structure Division, 1975, 101(1): 169-185.
[11] 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.
Tang Z, Zhang Y, Lü L Y. Study on tornado model and tornado-induced wind loads[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(3): 104-110.
[12] Liu Z Q, Zhang C, Ishihara T. Numerical study of the wind loads on a cooling tower by a stationary tornado-like vortex through LES[J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 81: 656-672.
[13] Hamada A, Damatty A E. Behaviour of guyed transmission line structures under tornado wind loading [J]. Computers and Structures, 2011, 89 (11-12) : 986-1003.
[14] 王新，黄生洪，李秋胜. 龙卷风动态冲击高层建筑风荷载数值模拟[J]. 工程力学，2016，33(9)：195-203.
Wang X, Huang S H, Li Q S. Numerical simulation of dynamic impacting wind loads on high-rise building by tornado [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33 (9) : 195-203.
[15] Hao J, Wu T. Tornado-induced effects on aerostatic and aeroelastic behaviors of long-span bridge[C]. Proceedings of the 2016 World Congress on Advances in Civil Environmental and Materials Research, Jeju, Korea, 2016.
[16] 中铁电气化勘测设计研究院有限公司，中铁电气化局集团有限公司. 铁路电力牵引供电设计规范：TB 10009—2016[S]. 北京：中国铁道出版社，2016.
China Railway Electrification Survey and Design Researcher Co. Ltd., China Railway Electrificationi Burecu Group. Code for design of railway traction power supply: TB 10009—2016 [S]. Beijing: China Railway Press, 2016.
[17] Potter S. Fine-tuning Fujita: after 35 years, a new scale for rating tornadoes takes effect [J]. Weatherwise, 2007, 60(2): 64-71.
[18] Tang Z, Feng C, Wu L, et al. Characteristics of tornado-like vortices simulated in a large-scale ward-type simulator [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2018, 166(2): 327-350.
[19] Baker C J, Sterling M. The calculation of train stability in tornado winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 176: 158-165.
[20] He X H, Zhou Y F, Wang H F, et al. Aerodynamic characteristics of a trailing rail vehicles on viaduct based on still wind tunnel experiments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 135: 22-33.
[21] 罗健. 高速铁路接触网零部件应用与研究[M]. 北京：中国铁道出版社，2018.
Luo J. Application and Research of Catenary Components for High-speed Railway[M]. Beijing: China Railway Press, 2018.
[22] 吴家岚. 高速铁路接触网风致响应分析[D]. 成都：西南交通大学，2011.
Wu J L. The study of wind-induced response for catenary system of high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
[23] Davenport A G. The buffeting of a suspension bridge by storm winds[J]. Journal of Structure Division ASCE, 1962, 88(3): 233-268.
[24] 铁道第三勘察设计院集团有限公司，中铁第四勘察设计院集团有限公司. 高速铁路设计规范：TB 10621—2014[S]. 北京：中国铁道出版社，2014.
The Third Railway Survery and Disign Institute Group Co. Ltd., China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd. Code for design of high speed railway: TB 10624—2014 [S]. Beijing: China Railway Press, 2014.

Wind-induced vibration response of high-speed railway catenary under moving tornado

LANG Tian-yi[1], *WANG Hao*[1], *LIU Zhen-qing*[2], *ZHANG Han*[1], *XU Zi-dong*[1], *GAO Hui*[1]
(1.Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2.School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Eight-span stitched catenaries and a three-dimensional moving tornado field based on the Wen model have been established to investigate the dynamic response of the high-speed railway catenary under tornado loads. The research focuses on the influence of key parameters such as tornado level and moving speed on the dynamic response of the catenary. The results show that the maximum transverse displacement response of the contact wire occurs before the center of the tornado field reaches the catenary. The moving speed of tornado within a certain range leads to the severe vibration response. While the moving speed continues to increase, the contact wire transverse displacement responses decrease. Under the action of the F1 and F2 tornadoes selected of this research, the maximum transverse displacement response of the contact wire is within the allowable range of the specification. However, under the action of the F3 tornado, the vibration response of the contact wire is close to or even exceed the limitation, the issue of which should be concerned.

Key words: wind-induced vibration response; moving tornado; catenary; numerical simulation

作者简介：郎天翼(1992—)，男，博士研究生。电话：17824908297；E-mail：langtianyi@seu.edu.cn。
通讯作者：王　浩(1980—)，男，教授，博士生导师。E-mail：wanghao1980@seu.edu.cn。