文章编号:1672-3961(2024)06-0130-09 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.209

兰新高铁大风区减档距防舞器有效性分析

李彦哲[1],周成熙[1*],赵珊鹏[1],杨义盟[2]
(1.兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2.北京和利时系统工程有限公司, 北京 100083)

摘要:为解决兰新高铁大风区段接触网正馈线在大风天气下发生剧烈舞动问题及线夹运动致金具磨损问题,提出一种减档距防舞器。建立正馈线有限元模型,施以导线自重荷载及风速 22.14 m/s(9 级风)的气动荷载,获得安装减档距绝缘子前后正馈线舞动响应。分析表明,9 级风速下,未安装防舞器前,正馈线舞动强劲,垂直、水平位移峰值分别为 3.061、2.468 m;安装减档距长度 3.0 m 的防舞器后,导线舞动抑制效果最佳,垂直、水平位移峰值分别为 1.940、1.541 m,分别降低 36.62%、37.56%,安装后的正馈线最大张力由 113.042 kN 降至导线设计破坏张力之下,张力波动减小。线夹运动最大磨损角从 40.53°降至防舞器安装后的 8.23°。研究结果表明,减档距长度 3.0 m 的防舞器能够有效抑制导线舞动,减小线夹运动磨损。

关键词:兰新高铁;大风区;接触网正馈线;减档距防舞器;舞动抑制
中图分类号:TM93 **文献标志码**:A
引用格式:李彦哲,周成熙,赵珊鹏,等. 兰新高铁大风区减档距防舞器有效性分析[J]. 山东大学学报(工学版),2024,54(6):130-138.
LI Yanzhe, ZHOU Chengxi, ZHAO Shanpeng, et al. Analysis of the effectiveness of anti-dancer with the reduced pitch in high wind area of the Lanzhou-Urumqi high speed railway[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(6):130-138.

Analysis of the effectiveness of anti-dancer with the reduced pitch in high wind area of the Lanzhou-Urumqi high speed railway

LI Yanzhe[1], ZHOU Chengxi[1*], ZHAO Shanpeng[1], YANG Yimeng[2]
(1. School of Automatic & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Beijing Hollysys System Engineering Co., LTD., Beijing 100083, China)

Abstract: To solve the problem of violent dancing of contact network positive feeder in the windy section of the Lanzhou-Urumqi high speed railway and tear of fittings caused by the movement of wire clamps, a kind of anti-dancer with the reduced pitch was proposed. A finite element model was established for the positive feeder, and the aerodynamic load of 22.14 m/s wind speed (ninth wind speed) was applied to obtain the dance response of the positive feeder before and after the installation of the anti-dancer with the reduced pitch. The analysis showed that before the installation of anti-dancer with the reduced pitch, the positive feeder under the ninth wind speed danced strongly, and the peak vertical and horizontal displacements were 3.061 m and 2.468 m. After the installation of the anti-dancer with the reduced pitch length of 3.0 m, the conductor danced with the best suppression effect, and the vertical and horizontal displacements were 1.940 m and 1.541 m, which were reduced by 36.62% and 37.56%. After the installation of the positive feeder, the maximum tension of the installed positive feeder was also reduced from 113.042 kN to below the designed destructive tension of the conductor, and the tension fluctuation was reduced at the same time. The maximum wear angle of the wire clip movement was reduced from 40.53° to 8.23° after the installation of the anti-dancer with the reduced pitch. The results of the study showed that the anti-dancer with the reduced pitch length of 3.0 m could effectively suppress wire dance and reduce the wear of wire clip movement.

Keywords: Lanzhou-Urumqi high speed railway; windy section; contact network positive feeder; anti-dancer with the reduced pitch; suppression of wire dance

收稿日期:2023-11-20
第一作者简介:李彦哲(1966—),女,河北承德人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为铁道电气化、高电压与绝缘技术。E-mail:1732805049@qq.com
*通信作者简介:周成熙(1997—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,主要研究方向为铁道电气化。E-mail:1437408567@qq.com

0　引言

兰新高铁途经新疆境内四大风区和甘肃安西风区，风区路段约 580 km，占线路总长约 33%[1]。新疆区段大风频发，最大风速超过 60 m/s，风速 8 级以上时间超过百天，加大了铁路安全事故的发生率。兰新高铁设计时速超 200 km/h，为保证行车安全，大风路段建设挡风墙等防风设施，有效降低了列车倾覆事故[2]。但挡风墙的设置导致气流大量汇聚于挡风墙后，使挡风墙后方形成一定的尾流增速区，导致正馈线发生非覆冰舞动[3]。正馈线大幅舞动导致线索悬挂结构严重磨损，断线、掉线等事故频发，严重影响列车安全运行。

在输电导线舞动方面，国内外学者已取得诸多成果：文献[4]对覆冰导线舞动进行研究，提出垂直激发机理；文献[5]考虑覆冰导线重心偏移对舞动的影响，提出扭转激发机理；文献[6]在考虑空间曲梁理论后，基于抗弯刚度对扭转的影响，提出导线节点 6 自由度模型；文献[7]进行导线扭转试验，确定导线拉扭耦合对导线舞动扭转的影响；文献[8]针对风沙区导线舞动问题，研究风沙流对导线气动特性的影响，得出含沙风会增大导线气动系数；文献[9]考虑随机风荷载对塔线体系的影响，用谐波合成法模拟风荷载，为跨江塔线体系振动研究提供基础；文献[10]研究风向角对导线舞动影响，通过流场数值模拟并进行风洞试验验证，得出不同风向角对导线气动特性的影响。

上述结论是针对覆冰导线舞动得出的，但大风区正馈线舞动处于非覆冰条件且档距小，其舞动机理不同于覆冰导线。对于正馈线舞动及防舞动，很多学者也做出一定研究：文献[11]考虑多档导线之间舞动的影响，研究发现悬垂线夹会传递舞动波，加剧导线舞动；文献[12]根据悬挂结构的磨损情况，提出一种带可调节斜拉绝缘子的 V 型悬挂结构并进行三维流场仿真，证明该结构可减小导线舞动造成的金具磨损；文献[13]提出一种斜拉绝缘子防舞结构，通过有限元分析证明该结构可以降低导线舞动的幅值。

本研究提出一种减档距防舞器，构建正馈线及防舞器有限元模型，模拟防舞器安装前后正馈线及线夹末端的位移时程，分析防舞器的防舞效果，研究结果可为大风区接触网正馈线舞动治理提供更合理、有效的方案。

1　减档距防舞器

兰新高铁正馈线悬挂于田野侧，位置处于挡风墙之后的气流增速区，在大风天气下易大幅舞动，高铁兰新线百里风区现场正馈线舞动图如图 1 所示。导线大幅舞动会带动正馈线悬挂结构处悬垂线夹往复运动，引起金具磨损。



(a) 正馈线舞动最低点



(b) 正馈线舞动最高点

图 1　高铁兰新线百里风区现场正馈线舞动图

Fig.1　Dance animation diagram of the positive feeder in Baili wind area of the Lanzhou-Urumqi high speed railway

本研究结合正馈线空间位置、环境等特点提出一种减档距防舞器，减档距防舞器安装示意图如图 2 所示。防舞器主体结构采用轻质复合绝缘子，高压端与正馈线铰接，避免导线舞动时应力集中引起导线断股等问题。高压端与导线铰接位置不可移动，该位置与悬垂线夹挂点存在一定水平距离，进而减小档距。防舞器低压端通过柔性线索连接金具，固定于挡风墙顶部，位置平行于接触网支柱。减档距防舞器结构如图 3 所示，防舞器减档距长度为 a，其中轻质复合绝缘子由伞裙和芯棒构成，柔性线索用于减轻设备疲劳。每档导线需安装一对防舞器，总档距减小 $2a$。

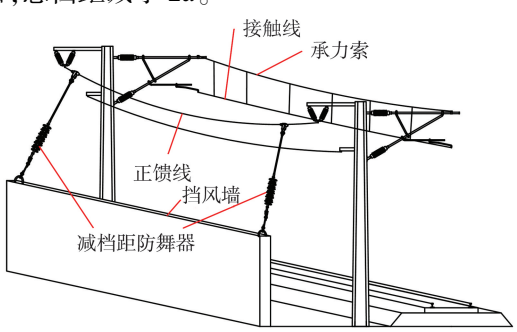


图 2　减档距防舞器安装示意图

Fig.2　Schematic diagram of the installation of the anti-dancer with the reduced pitch

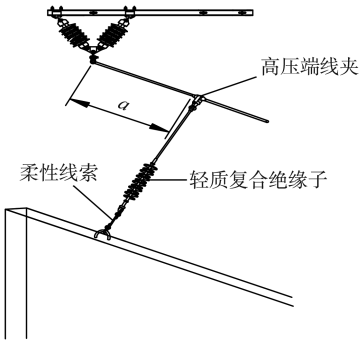


图 3 减档距防舞器结构

Fig.3 Structure of the anti-dancer with the reduced pitch

2 气动特性仿真及风洞试验验证

2.1 气动特性仿真

使用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)软件按现场工况建立二维计算域,网格划分采用线加密。整体计算域网格如图 4 所示,计算域左侧设为速度入口,入口风速分别设置为 5、10、15、20、25 m/s,右侧设为压力出口,导线表面采用无滑移面。为更好模拟正馈线近壁面的流动特征,仿真计算中选用 Transition SST 转捩模型[14],导线近壁面网格如图 5 所示。

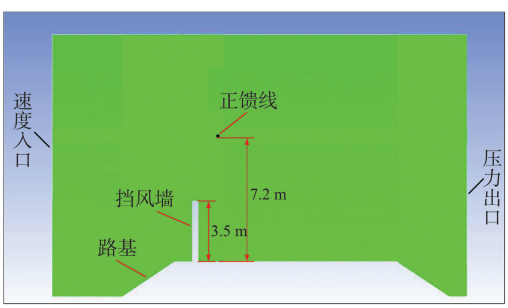


图 4 整体计算域网格

Fig.4 Overall computational domain grid

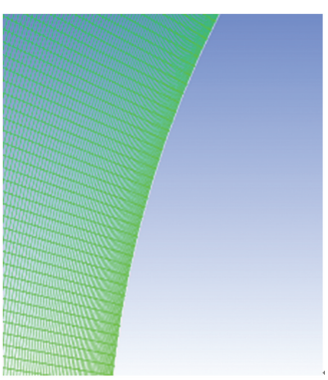


图 5 导线近壁面网格

Fig.5 Guide wire near wall surface grid

第一层网格高度

$$y_1 = Dy^+\sqrt{74Re}, \quad (1)$$

式中:D 为导线的特征长度;y^+ 为无量纲数,其值约为 1;Re 为雷诺数,$Re=\rho UD/u$,其中 ρ 为流体密度,U 为流体速度,u 为流体的黏性系数。

入口速度为 15 m/s 时的风速云图如图 6 所示,雷诺数约为 47 700,超过临界雷诺数,流体呈湍流状态,挡风墙使部分来流风沿墙面攀升并在挡风墙上方汇聚加速,使墙后正馈线处风速约为入口风速的 2.25 倍,挡风墙对来流风的加速作用是导线剧烈舞动的直接原因。

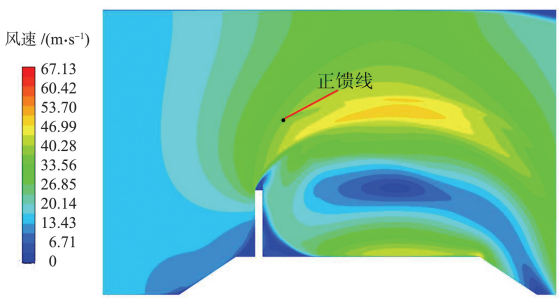


图 6 入口速度为 15 m/s 时的风速云图

Fig.6 Wind speed cloud at inlet velocity of 15 m/s

2.2 风洞试验验证

考虑到场地大小及模型的合理性,确定试验模型与现场的几何相似比为 1∶59[15],实际尺寸与模型尺寸如表 1 所示,风洞试验模型如图 7 所示。风洞试验全貌如图 8 所示,通过风机输送不同速率匀速风,测量不同入口风速下正馈线处风速,测量数据与仿真数据对比验证仿真模型的合理性。利用 CFD 软件对实际尺寸仿真模型中正馈线位置处风速进行模拟,仿真与试验结果对比如表 2 所示。

表 1 实际尺寸与模型尺寸

Table 1 Actual size vs model size

单位:mm

类型	挡风墙距路面高度	路堤高度	路堤宽度	导线高度	挡风墙宽度
试验模型尺寸	59.18	33.82	50.84	155.93	6.78
实际尺寸	3 500	2 000	3 000	9 200	400

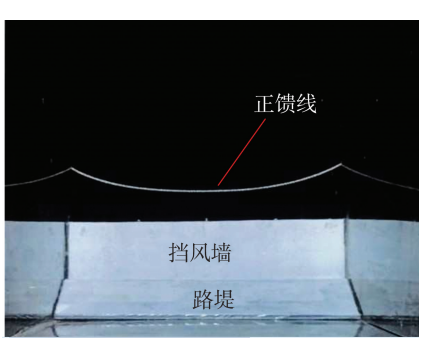


图 7 风洞试验模型

Fig.7 Wind tunnel test model

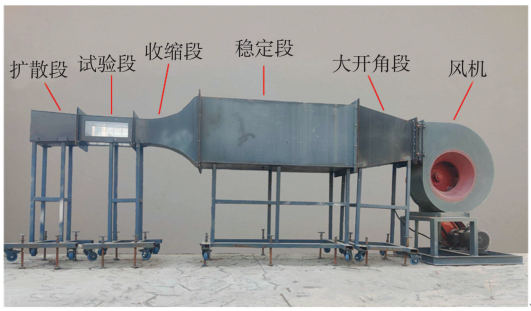


图 8　风洞试验全貌
Fig.8　Full view of wind tunnel test

表 2　风洞试验风速与仿真风速
Table 2　Wind tunnel test wind speed and simulated wind speed

单位:m/s

入口风速	正馈线档中处风速	
	试验	仿真
5.23	9.93	9.88
7.62	13.82	13.96
10.14	18.44	18.76
13.06	23.96	24.13
16.42	31.25	30.62
19.75	41.13	40.75

由表 2 可知,试验结果与仿真结果存在较小误差,考虑到试验模型的密封性等因素,该误差在允许范围内。试验结果与仿真结果均为入口风速的 2 倍左右,表明大风情况下正馈线处于挡风墙后的气流加速区,证明流场仿真的可行性,为正馈线气动特性研究提供可靠依据。气动特性仿真得出的风攻角变化图如图 9 所示,风攻角呈先增大后稳定趋势,在入口风速 15 m/s 后趋于稳定,接近 30°。入口风速 10 m/s 时正馈线处的气动力系数如图 10、11 所示,升力系数、阻力系数曲线振荡,振荡周期无规律,振幅呈一定随机性,不同于低风速下导线后方出现的卡门涡街现象导致的系数正弦振荡。

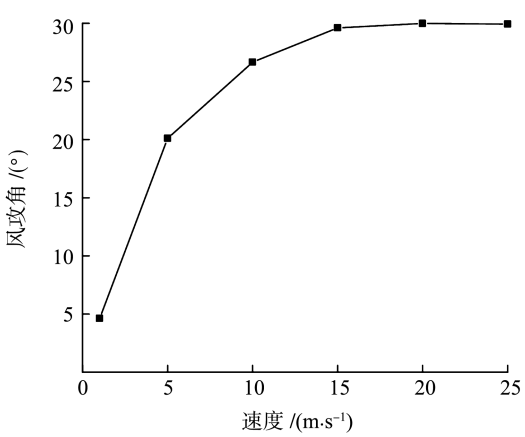


图 9　风攻角变化图
Fig.9　Wind angle change plot

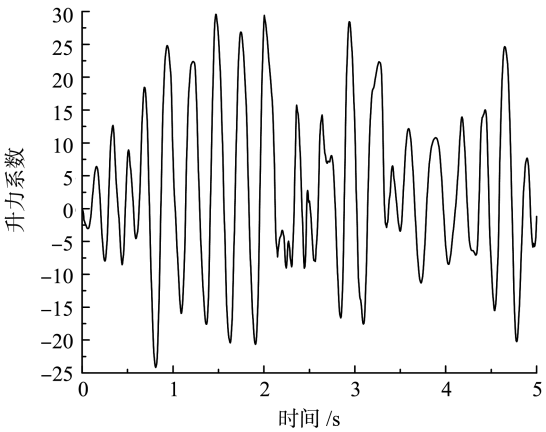


图 10　升力系数时程图
Fig.10　Lift coefficient time history graph

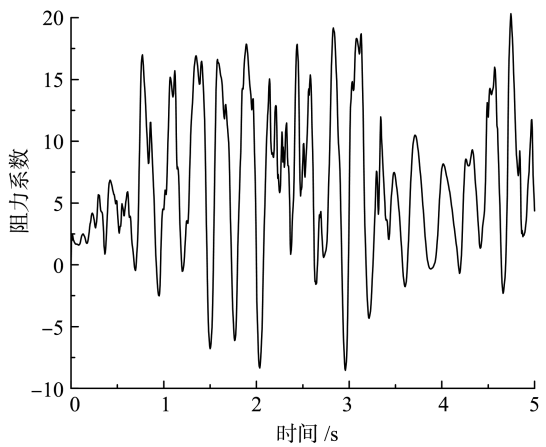


图 11　阻力系数时程图
Fig.11　Drag coefficient time history plot

3　减档距防舞器效果分析

3.1　有限元建模

兰新高铁接触网正馈线采用铝包钢芯铝绞线,型号为 LGJ-300/25,导线参数如表 3 所示。大风区正馈线档距为 50 m,正馈线在自重下的弧垂为 0.95 m。利用 APDL 软件对正馈线进行建模,在力学计算中将正馈线视为柔性悬索,不能受压、抗弯,也忽略沿线方向的阻尼,所以选用非线性单元 LINK10 模拟正馈线,单元划分为 200 个。考虑到悬垂线夹会对多档导线之间舞动产生影响,需建立三档带悬垂线夹的导线,悬垂线夹用 BEAM188 单元模拟。悬垂线夹结构如图 12 所示,线夹长 0.32 m,保留悬垂线夹上端的一个转动自由度,以模拟线夹摆动。复合绝缘子的芯棒是荷载承受部位,所以选用 COMBIN14 单元模拟,忽略伞裙对力学性能的影响。安装防舞器后三档导线有限元模型如图 13 所示,三档导线共安装 3 对减档距防舞器。

表 3 正馈线参数

Table 3 Positive feeder parameters

导线型号	综合拉断力/N	截面积/mm^2	线质量/(kg·km^{-1})	弹性模量/GPa	密度/(kg·m^{-3})
LGJ-300/25	84 570	333.31	1 058	66.0	3 076.12

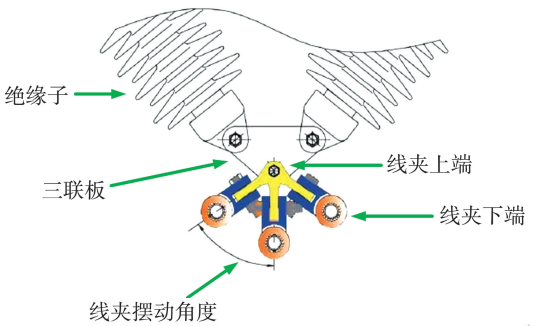
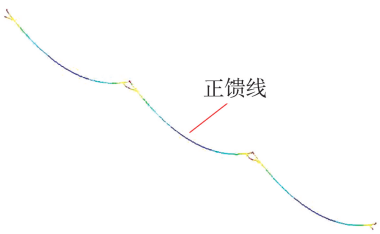
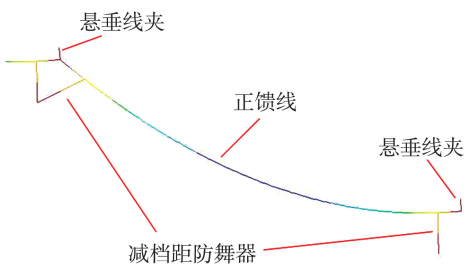


图 12 悬垂线夹结构

Fig.12 Overhang clamp structure



(a) 三档导线及防舞器有限元模型



(b) 局部有限元模型

图 13 安装防舞器后三档导线有限元模型

Fig.13 Finite element modeling of three-position conductor after installation of anti-dancer

3.2 正馈线力学方程及受力分析

正馈线力学方程为:

$$\boldsymbol{Z}\mathrm{d}^2q/\mathrm{d}t+\boldsymbol{C}\mathrm{d}q/\mathrm{d}t+\boldsymbol{K}q=\boldsymbol{F}(t), \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{M}$ 为单元质量矩阵,$\boldsymbol{K}$ 为单元刚度矩阵,$\boldsymbol{C}$ 为结构阻尼矩阵,q 为导线位移,$\boldsymbol{F}(t)$ 为单元的荷载向量。

结构阻尼矩阵

$$\boldsymbol{C}=\alpha\boldsymbol{M}+(\beta+\beta_{\mathrm{c}})\boldsymbol{K}+\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{m}}}\left[\left(\beta_j^{\mathrm{m}}+\frac{2}{\Omega}\beta_j^{\xi}\right)\boldsymbol{K}_j\right]+\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{e}}}C_k+\boldsymbol{C}_{\zeta}, \tag{3}$$

式中,α 为质量阻尼系数,β 为刚度阻尼系数,β_{c} 为变刚度阻尼系数,N_{m} 为材料数,β_j^{m} 为材料的刚度矩阵阻尼系数,Ω 为与材料阻尼相关的激振力频率,β_j^{ξ} 为材料的常刚度矩阵阻尼系数,N_{e} 为单元阻尼的单元数,$\boldsymbol{K}_j$ 为材料 j 的刚度矩阵,C_k 为单元刚度阻尼,$\boldsymbol{C}_{\zeta}$ 为与频率相关的阻尼矩阵。

导线舞动过程中受静荷载和动荷载的作用,静荷载为导线自身重力,动荷载为随时间变化的气动力。本研究施加的风荷载为匀速风,因此风攻角采用气动特性仿真得出的固定风攻角,导线处的风速采用经挡风墙放大后正馈线处风速。正馈线受力图如图 14 所示,其中气动升力 f_{L}、气动阻力 f_{D} 分别为:

$$f_{\mathrm{L}}=\rho U^2DC_{\mathrm{L}}d/2, \tag{4}$$

$$f_{\mathrm{D}}=\rho U^2DC_{\mathrm{D}}d/2, \tag{5}$$

式中:C_{L} 为升力系数;C_{D} 为阻力系数;d 为微分段长度,每档导线划分 200 个单元,故 d=0.25 m。

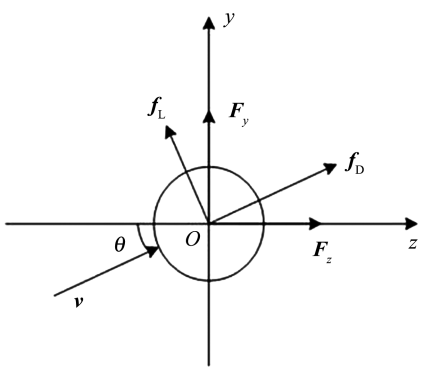


图 14 正馈线受力图

Fig.14 Positive feeder force diagram

在正馈线舞动有限元分析中,将气动升力、气动阻力分解为水平方向和竖直方向上的分力,通过集中荷载的形式施加。水平方向上导线所受升阻力的合力为 F_z,$F_z=f_{\mathrm{D}}\cos\theta-f_{\mathrm{L}}\sin\theta$,其中 θ 为风攻角;竖直方向上导线所受升阻力的合力为 F_y,$F_y=f_{\mathrm{D}}\sin\theta+f_{\mathrm{L}}\cos\theta$。

3.3 防舞效果分析

通过现场观测,接触网正馈线舞动多为一阶,导线档中处舞动位移最大,单档正馈线舞动示意图如图 15 所示。舞动波在多档导线之间传递,在大风条件下,导线舞动加剧。通过对正馈线有限元模型施加自重荷载,得到正馈线在自重下的初始状态,对安装减档距长度 a 分别为 1.5、2.0、2.5、3.0 m 防舞器后导线舞动响应进行瞬态分析。

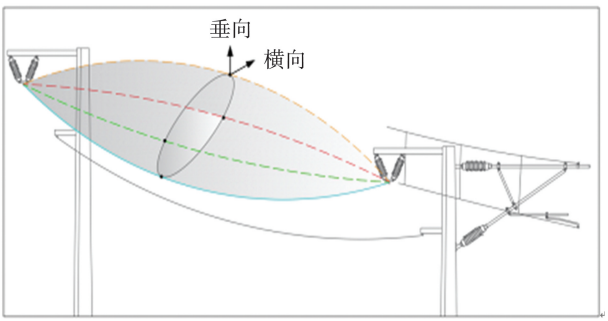


图 15　单档正馈线舞动示意图

Fig.15　Single-speed positive feeder dance schematic

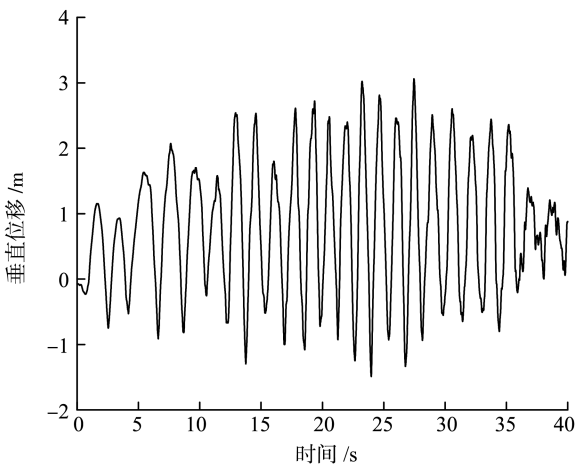
风区大风多为 8 级以下，入口风速 10 m/s 经挡风墙加速后达到 22.14 m/s，风速等级为 9 级，属于烈风。为验证防舞器效果，仿真中风速采用 22.14 m/s，采用入口风速 10 m/s 下检测到的正馈线气动力系数。导线舞动涉及非线性问题中的大变形、大应变，采用完全法进行瞬态分析。仿真时长为 40 s，每个时间步为 0.001 s，以保证结果收敛性。对于气动特性仿真中得到的气动升力系数、气动阻力系数，在有限元软件中采用表数组的方式读入，以便准确模拟导线所受气动力变化，得到精确的舞动结果。

防舞动效果可以用峰值降低率评估[16]，峰值降低率

$$\lambda=\frac{A_b-A_a}{A_b}\times 100\%, \tag{6}$$

式中，A_b 为安装减档距防舞器前的导线位移峰值，A_a 为安装减档距防舞器后的导线位移峰值。

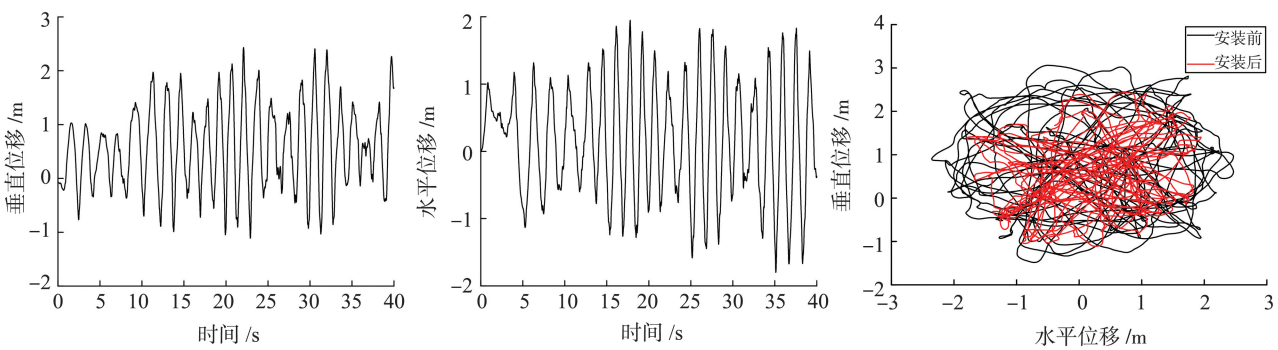
安装防舞器前导线垂直、水平位移时程图如图 16 所示，垂直位移峰值为 3.061 m，水平位移峰值为 2.468 m，导线舞动剧烈。安装减档距长度 a 为 1.5、2.0、2.5、3.0 m 防舞器后导线位移时程图及舞动轨迹对比图如图 17~20 所示。防舞器安装前，导线舞动轨迹处于椭圆范围内；防舞器安装后，舞动轨迹收敛，在 a=3.0 m 时防舞器舞动抑制效果最佳。不同减档距防舞器安装后导线位移如表 4 所示，在减档距长度 3.0 m 时，水平位移峰值降低率最大，为 37.56%，垂直位移峰值降低率同样最大，为36.62%，防舞效果最佳。



(a) 垂直位移时程　　(b) 水平位移时程

图 16　安装防舞器前导线位移时程图

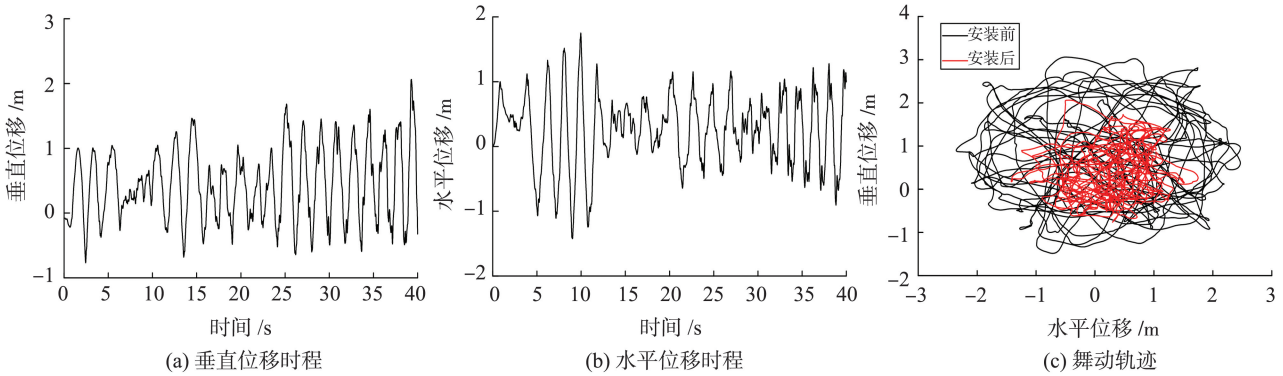
Fig.16　Diagram of the displacement of the front wire of the installation of the anti-dancer with the reduced pitch



(a) 垂直位移时程　　(b) 水平位移时程　　(c) 舞动轨迹

图 17　安装 1.5 m 减档距防舞器后导线位移时程图

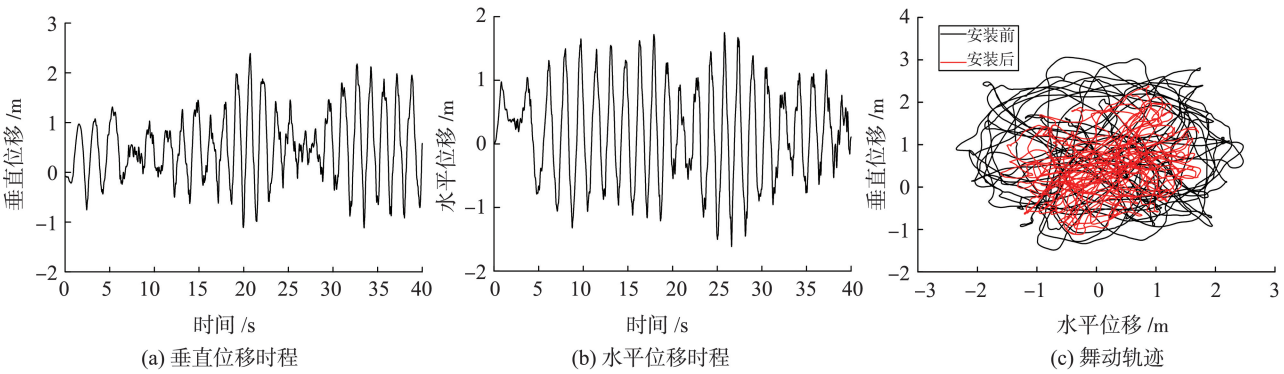
Fig.17　Diagram of wire displacement after installing anti-dancer with the reduced pitch length of 1.5 m



(a) 垂直位移时程 (b) 水平位移时程 (c) 舞动轨迹

图 18 安装 2.0 m 减档距防舞器后导线位移时程图

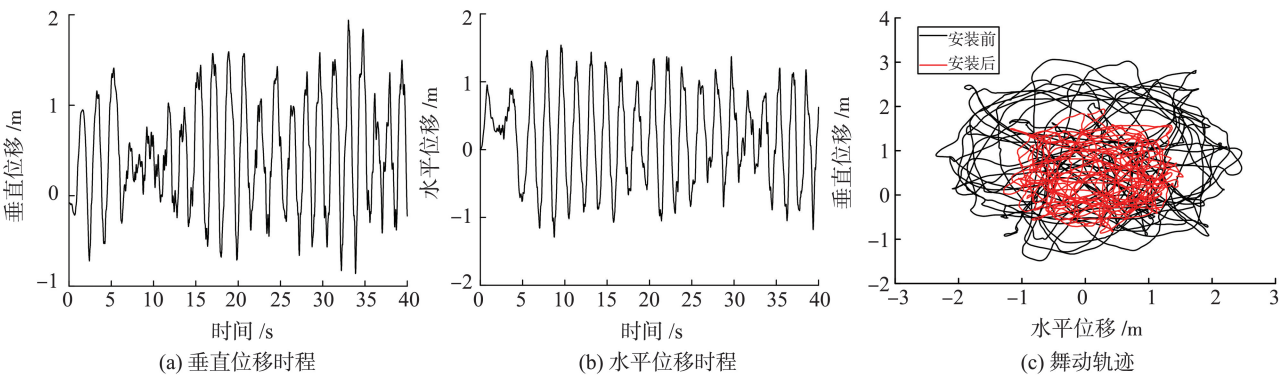
Fig.18 Diagram of wire displacement after installing anti-dancer with the reduced pitch length of 2.0 m



(a) 垂直位移时程 (b) 水平位移时程 (c) 舞动轨迹

图 19 安装 2.5 m 减档距防舞器后导线位移时程图

Fig.19 Diagram of wire displacement after installing anti-dancer with the reduced pitch length of 2.5 m



(a) 垂直位移时程 (b) 水平位移时程 (c) 舞动轨迹

图 20 安装 3.0 m 减档距防舞器后导线位移时程图

Fig.20 Diagram of wire displacement after installing anti-dancer with the reduced pitch length of 3.0 m

表 4 不同减档距防舞器安装后导线位移

Table 4 Wire displacement after installation of anti-dancer with the different reduced pitch length

防舞器安装工况	水平位移峰值/m	水平位移峰值降低率/%	垂直位移峰值/m	垂直位移峰值降低率/%
未安装防舞器	2.468		3.061	
减档距长度 1.5 m	1.948	21.07	2.432	20.55
减档距长度 2.0 m	1.748	29.17	2.062	32.64
减档距长度 2.5 m	1.749	29.13	2.393	21.82
减档距长度 3.0 m	1.541	37.56	1.940	36.62

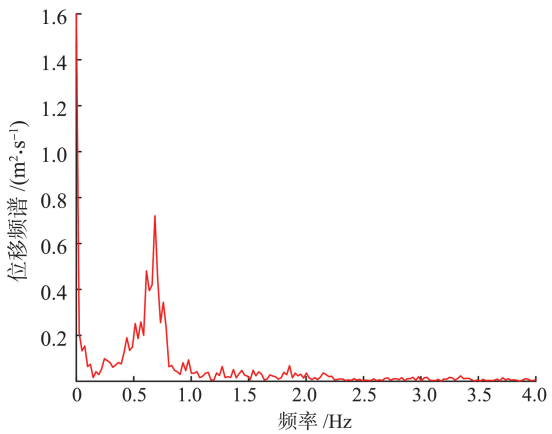
不同减档距防舞器安装后线夹末端水平位移数据如表 5 所示。减档距长度 2.5 m 时,线夹末端最大水平位移及最小水平位移分别为 0.042 7、−0.024 1 m,均为最小行程,说明减档距长度 2.5 m防舞器对线夹运动行程限制最大;减档距长度 3.0 m 时,线夹末端最大水平位移及最小水平位移分别为 0.045 8、−0.029 6 m,行程略大于前者。

表 5　不同减档距防舞器安装后线夹末端水平位移
Table 5　Horizontal displacement of the lower end of the wire clamp after installation of anti-dancer with the different reduced pitch length　单位：m

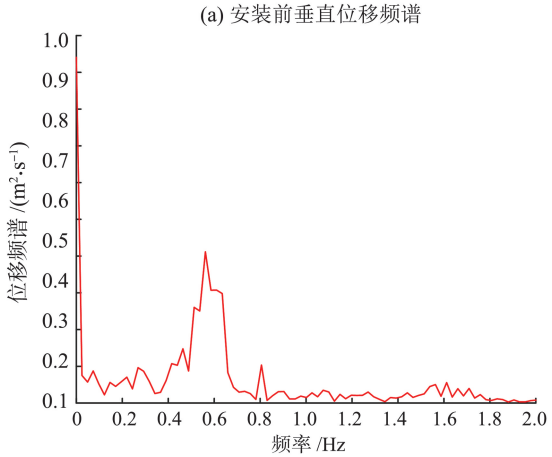
防舞器安装工况	最大水平位移	最小水平位移	绝对平均水平位移
未安装防舞器	0.208 0	−0.143 6	0.028 7
减档距长度 1.5 m	0.060 7	−0.045 3	0.007 9
减档距长度 2.0 m	0.072 4	−0.043 7	0.007 7
减档距长度 2.5 m	0.042 7	−0.024 1	0.006 4
减档距长度 3.0 m	0.045 8	−0.029 6	0.006 7

综合对比，确定安装减档距长度 a 为 3.0 m 的防舞器对导线舞动抑制效果最佳，水平、垂直位移峰值降低率均接近 40%，同时对线夹运动行程有较好的限制作用。

对减档距长度 3.0 m 的防舞器安装前后导线垂直位移数据进行快速傅里叶变换，得到垂直位移频谱如图 21 所示。安装前，主频为 0.683 8 Hz；安装后，由于防舞器分担了导线舞动及悬垂线夹运动中动能的一部分，主频降至 0.561 7 Hz，位移频谱降幅达 43%，说明防舞器使导线舞动频率降低，验证了减档距防舞器可以降低导线位移频率。



(a) 安装前垂直位移频谱



(b) 安装后垂直位移频谱

图 21　安装 3.0 m 减档距防舞器前后导线垂直位移频谱
Fig.21　Spectrum of vertical displacement of conductor before and after installation of the anti-dancer with the reduced pitch length of 3.0 m

减档距长度 3.0 m 防舞器安装前后悬垂线夹末端水平位移对比图如图 22 所示。安装前，线夹末端最大位移为 0.208 0 m，此工况下线夹运动最大磨损角为 40.53°；安装后，线夹位移幅值降至 0.045 8 m，最大磨损角降至 8.23°，线夹末端位移降低率为 77.97%。3.0 m 减档距防舞器能较好限制导线舞动带动的线夹运动，降低悬垂线夹处因舞动引起的金具磨损问题。

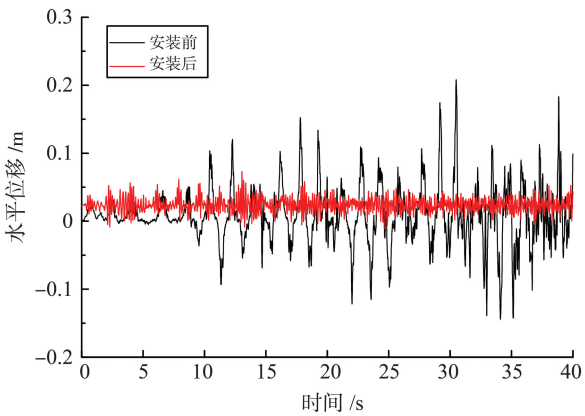


图 22　3.0 m 减档距防舞器安装前后悬垂线夹末端水平位移对比图
Fig.22　Comparison of the horizontal displacement of the end of the pendant wire clamp before and after the installation of the anti-dancer with the reduced pitch length of 3.0 m

导线设计破坏张力

$$T_{ps}=0.95T_{p}, \tag{7}$$

式中 T_p 为导线综合拉断力。3.0 m 减档距防舞器安装前后正馈线张力对比曲线如图 23 所示。安装前后张力如表 6 所示，其中，安装前最大张力为 113.042 kN，超过导线设计破坏张力 80.315 kN，导线易断裂；安装后最大张力降至 62.715 kN，张力标准差降低 52.08%，平均张力减小 34.47%，小于导线设计破坏张力，保证导线正常运行。

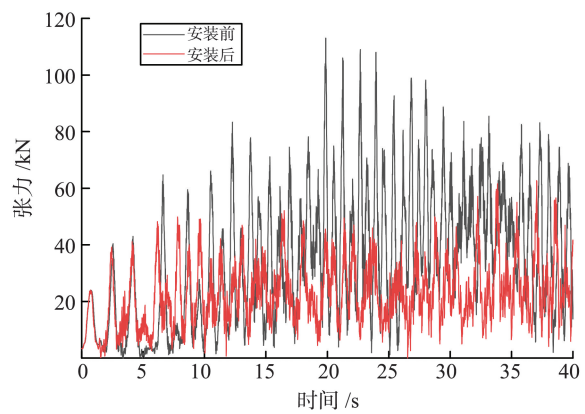


图 23　3.0 m 减档距防舞器安装前后正馈线张力对比图
Fig.23　Comparison of positive feeder tension before and after installing the anti-dancer with the reduced pitch length 3.0 m

表 6 3.0 m 减档距防舞器安装前后张力
Table 6 Tension before and after installing the anti-dancer with the reduced pitch length 3.0 m

单位:kN

条件	平均张力	张力标准差	最大张力
安装前	34.495	22.924	113.042
安装后	22.603	10.984	62.715

4 结论

9 级风速下,未安装减档距防舞器的正馈线舞动幅值较大,垂直位移与水平位移峰值较大,舞动剧烈。正馈线的最大张力超过导线设计破坏张力,易发生导线断裂,造成列车停运。安装不同减档距防舞器后,9 级风速下正馈线舞动位移均明显减小。其中,减档距长度 a 为 3.0 m 的减档距防舞器垂直、水平位移峰值均减小近 40%,抑舞效果最佳。同时,导线最大张力降低至导线设计破坏张力以下;张力标准差降低明显,有效抑制张力波动,降低断线风险,提高了正馈线的运行可靠性。

9 级风速下,安装 3.0 m 减档距防舞器后线夹末端水平位移峰值明显降低,线夹运动最大磨损角由 40.53°降至 8.23°,限制悬垂线夹往复运动,降低金具磨损。

综合对比不同减档距防舞器带来的导线舞动抑制作用及限制线夹运动磨损角的效果,最终确定 3.0 m 为最佳减档距长度。

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): 14-17.
HUANG Shuanglin. Research on the wind break standard of Lanzhou-Urumqi high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(6): 14-17.

[2] 王争鸣. 兰新高铁穿越大风区线路选线及防风措施设计[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(1): 1-6.
WANG Zhengming. Design of route selection and windproof measures for strong wind-hit section of second double line of Lanzhou-Urumqi railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(1): 1-6.

[3] 张友鹏, 王彤, 赵珊鹏, 等. 兰新高铁大风区段挡风墙对接触网正馈线气动特性的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(7): 1628-1636.
ZHANG Youpeng, WANG Tong, ZHAO Shanpeng, et al. Influence of wind-break wall on aerodynamic characteristics of positive feeder of overhead contact line of Lanzhou-Xinjiang high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(7): 1628-1636.

[4] DEN HARTOG J P. Transmission line vibration due to sleet[J]. AIEE Transactions, 1932, 20(51): 1074-1076.

[5] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping part Ⅰ: Den Hartog mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 699-707.

[6] 晏致涛, 黄静文, 李正良. 基于结点 6 自由度的分裂导线有限元模型[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 325-332.
YAN Zhitao, HUANG Jingwen, LI Zhengliang. Finite element model of bundle lines based on 6-DOF node[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 325-332.

[7] 张龙, 黄珏, 钟永力, 等. 钢芯铝绞线的拉扭耦合力学性能[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(4): 889-896.
ZHANG Long, HUANG Jue, ZHONG Yongli, et al. Mechanical properties of tension-torsion coupling in aluminum conductor steel reinforced[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(4): 889-896.

[8] 赵建平, 艾红, 王欣欣, 等. 风沙流对输电导线风荷载的影响[J]. 电工技术, 2018, 467(5): 14-16.
ZHAO Jianping, AI Hong, WANG Xinxin, et al. Effects of wind-sand flow on wind load of conductors[J]. Electric Engineering, 2018, 467(5): 14-16.

[9] 韩枫, 肖正直, 李正良, 等. 1000 kV 汉江大跨越输电塔线体系三维脉动风场模拟[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 999-1004.
HAN Feng, XIAO Zhengzhi, LI Zhengliang, et al. 3D stochastic wind field simulation of 1000 kV Hanjiang long span transmission line system[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 999-1004.

[10] 王侠, 晏致涛. 覆冰导线在斜风下的气动力特性试验和数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(增刊 1): 88-91.
WANG Xia, YAN Zhitao. Numerical simulation of dynamic test of iced conductors under skew wind[J]. Journal of Civil Construction and Environmental Engineering, 2012, 34(Suppl.1): 88-91.

[11] 张友鹏, 王鹏, 赵珊鹏, 等. 大风区段接触网多跨距正馈线舞动特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3612-3623.
ZHANG Youpeng, WANG Peng, ZHAO Shanpeng, et al. Galloping characteristics of catenary multi-span positive feeder in gale areas[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3612-3623.

[12] 王玉环. 兰新高铁大风区接触网正馈线悬挂结构适应性分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(3): 124-127.
WANG Yuhuan. Adaptability analysis of suspended structure of overhead contact line in wind areas along Lanzhou-Urumqi high speed railway[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(3): 124-127.

(下转第 146 页)