DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.022

吊弦故障影响下的接触网锚段区域动态行为研究

姜鸿鹏[1]，徐　焱[1]，刘振东[2]，张士奎[2]，隋明君[3]
（1.昆明理工大学 交通工程学院，云南 昆明 650504；
2.中国铁道科学研究院集团有限公司，北京 100081；
3.国家高速列车青岛技术创新中心，山东 青岛 266000）

摘　要：锚段关节是高速铁路接触网系统的重要组成部分，其动态行为直接影响高速运行工况下的弓网受流性能。目前，吊弦断裂等吊弦故障频繁出现在高速铁路接触网锚段区域，并对高速铁路弓网系统的运行稳定性产生了显著威胁。研究吊弦故障影响下的接触网锚段关节区域的动态行为对确保弓网系统受流性能有着重要意义。文章以某高速铁路接触网系统的锚段区域为研究对象，采用有限元方法建立了完整的三维锚段关节模型，并进一步搭建了包含锚段关节区间的“受电弓–接触网”耦合模型；基于该模型仿真分析了不同运行速度对弓网耦合接触力的影响，并进一步研究了锚段关节处吊弦故障影响下的锚段区域动态行为。由仿真计算结果可见，建立的锚段关节模型能够准确描述其动态行为，锚段关节处吊弦故障会显著恶化弓网受流性能和邻近区域的吊弦动力学行为，增加吊弦断裂风险，因此有必要在接触网巡检时对锚段关节处的吊弦状态进行仔细检查。

关键词：锚段关节；弓网受流性能；受电弓–接触网系统；吊弦故障；吊弦断裂；仿真；高速铁路

中图分类号：U225　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)03-0182-08

0　引言

电气化铁路已成为我国铁路的主要发展模式，并保持着持续发展的态势，预计未来全国80%以上的铁路将为电气化铁路[1]。弓网系统作为电气化铁路的重要组成部分，其动态耦合行为直接影响到系统的受流质量，进而对电气化铁路系统的整体运行有着决定性的影响[2]。在弓网系统中，锚段系统作为连接接触网相邻区段的关键结构，其动态行为更是对弓网系统整体动态耦合行为有着不可忽视的影响，并在一定程度上直接决定了系统的最高运行速度[3]。因此，为了确保弓网系统的稳定可靠运行，有必要对弓网系统中的锚段区域动态行为进行研究。

为了进一步提升电气化铁路运行速度并确保弓网系统运行质量，研究人员对弓网系统锚段区域的动态行为进行了大量研究，并取得了一定的研究成果。文献[4]分析了高速铁路非绝缘锚段关节关键参数对锚段区域弹性吊索动力学响应的影响，并给出了解决方案。文献[5]建立了高速铁路4跨锚段关节动力学仿真模型，并基于仿真结果对锚段关节结构进行了优化设计。文献[6]基于有限元仿真软件ANSYS建立了4跨绝缘锚段关节模型，分析了锚段关节的防风性能，给出了增加锚段关节防风性能的结构设计方案。文献[7]通过动力学仿真分析得到反映弓网系统动态性能的接触压力与抬升位移等数据，进而对受电弓在通过锚段关节、刚

基金项目：山东省重点研发计划资助项目(2021ZDPT02)；国家自然科学基金项目(12302048)；云南省基础研究计划项目(202301BE070001-042)；中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题（2021YJ117）
通信作者：徐　焱，男，博士，讲师，硕士生导师，主要从事车辆系统动力学方面的研究；E-mail: xuyanswjtu@outlook.com
引用格式：姜鸿鹏, 徐焱, 刘振东, 等. 吊弦故障影响下的接触网锚段区域动态行为研究[J]. 机车电传动, 2024(3): 182-189.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.022.
Citation: JIANG Hongpeng, XU Yan, LIU Zhendong, et al. Study on dynamic behaviors of catenary overlap section under the impact of dropper failure [J]. Electric drive for locomotives,2024(3): 182-189.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.022.

柔过渡段时的动力学行为及其规律进行探讨与研究。文献[8]基于有限元方法和绝对节点坐标法建立了3跨锚段关节模型，分析了不同锚段关节关键参数对整体动力学响应的影响。

由上述研究可见，目前对于弓网系统锚段关节区域动态行为的研究已经较为深入。但是，针对弓网系统锚段关节区域动态行为的研究主要集中在整体动力学特性上，对于弓网系统锚段区域吊弦动态行为的研究还相对较少。随着高速铁路系统运行速度的进一步提升，锚段区域吊弦的异常断裂问题越发明显。为了确保高速铁路弓网系统的安全高效运行并快速定位吊弦故障，有必要对吊弦裂纹和断裂影响下的锚段区域吊弦动态行为进行深入研究。本文以某型高速铁路弓网系统为基础，基于ANSYS建立锚段关节模型，在初步分析不同车速和锚段抬升高度影响下的锚段关节动态行为的基础上，研究了不同位置吊弦断裂故障对锚段关节动态行为的影响。本文的研究可为高速铁路弓网系统锚段区域吊弦故障的快速诊断提供有效参考。

1　考虑锚段的弓网耦合动力学模型

1.1　非锚段接触网模型

本文所建立的接触网模型基于简链接触网建立，该简链接触网主要由接触线、承力索、吊弦、定位管吊弦、带定位器的定位杆和接触网悬挂组成，如图1所示。其中，吊弦为非载流式吊弦[9]。接触网每跨长度为60 m, 每跨包含6根吊弦，其余参数参见表1~表3。接触网吊弦位置参数如图2所示。

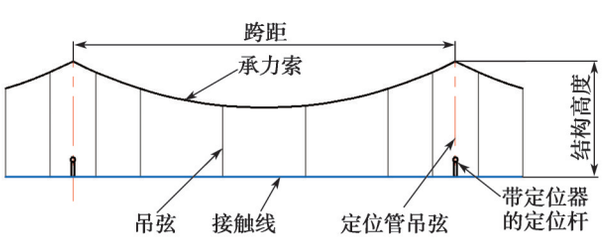


图1　接触网结构示意图

Fig. 1　Schematic of the catenary structure

表1　接触线和承力索参数

Table 1　Parameters of the contact and messenger wires

部件	材料	弹性模量/($\times10^{11}$ Pa)	线材料密度/(kg·m^{-3})	张力/kN	横截面积/mm^2
承力索	JTMH120	1.2	8 815	21	120
接触线	CTMH120	1.2	8 940	27	150

表2　接触网关键几何参数

Table 2　Key geometric parameters of the catenary system

参数名称	跨数/个	跨距/m	结构高度/m	单跨吊弦数目/根
参数值	18	50	1.6	6

表3　吊弦间隔参数

Table 3　Parameters of the dropper interval　　m

区段	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
吊弦间距	2.500	5.625	11.250	11.250	11.250	5.625	5.000

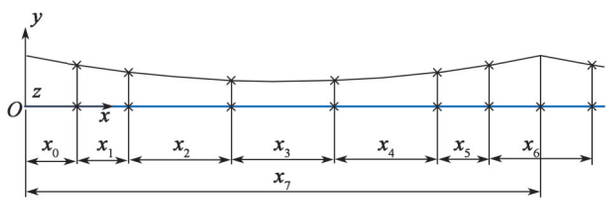


图2　接触网吊弦位置示意图

Fig. 2　Schematic of the dropper location

本文采用有限元仿真软件ANSYS建立接触网模型。在建模过程中，对不同的部件选择不同的单位类型，其中接触线采用BEAM4欧拉梁单元，承力索采用LINK8杆单元，吊弦采用LINK10杆单元，定位器和夹钳采用MASS21集中质量单元。接触网系统基于其稳态构型确定各个节点位置，并进行单元网格划分，并通过向各个关键节点施加作用力实现张力和预紧力的施加。为了充分模拟弓网耦合系统，本文所建立的接触网系统长度为750 m，由15跨组成。由ANSYS可以导出得到接触网模型的动力学方程为

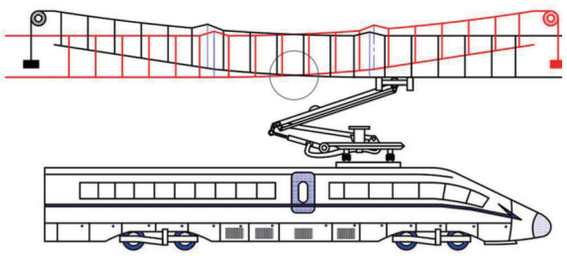
$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{c}}\ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}\boldsymbol{q}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{Q}_{\mathrm{Fc}} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{M}_{\mathrm{c}}$为接触网质量矩阵；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}}$为接触网阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}$为接触网刚度矩阵；$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{Fc}}$为包括弓网接触力在内的外力对接触网作用产生的广义力。

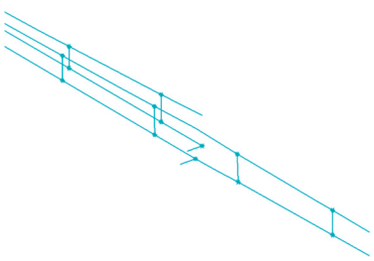
1.2　锚段模型

本文所建立的锚段关节模型是基于3跨锚段关节系统建立，如图3(a)所示。锚段关节处接触网由2段并行的接触网组成，其中第一段接触网在锚段第二跨区域开始上升，并最终在滑轮处终止，而第二段接触网从滑轮处开始下降，并在第三跨区域达到原接触网高度。2段接触网在第二跨相交，相交点的高度即为锚段关节高度。由于滑轮结构相对复杂，建立完整的滑轮模型将会大幅增加模型的复杂程度，因此本文将滑轮结构简化为弹簧阻尼单元，并在承力索和接触线端点施加纵向约束。锚段关节其余结构建模方法与非锚段关节结构一致。基于ANSYS所建立的锚段关节模型如图3(b)所示，其中承力索、接触线和吊弦的关键部件的建模方法与前文建模方法一致。

本文中的接触网锚段关节高度设计如图4所示，具体的高度设计值如表4所示。其中，接触网锚段两侧接触线起始高度均为0 m，终止处高度均为0.24 m，中间段交叉点高度为0.06 m；承力索起始高度为1.60 m，终止处高度为1.84 m。



(a) 锚段关节系统示意图



(b) 锚段关节系统有限元模型

图3 接触网锚段关节及其有限元模型

Fig. 3 Catenary overlap section and its finite element model

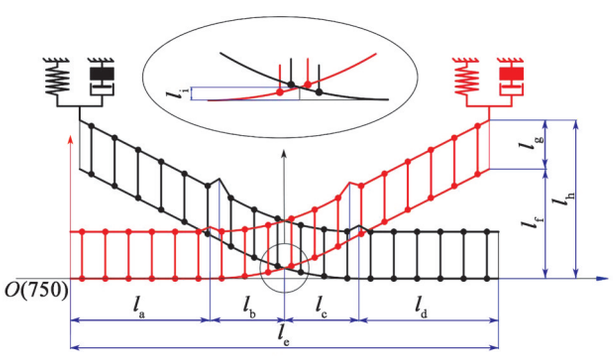


图4 锚段关节高度设计值

Fig. 4 Design value of overlap height

表4 锚段关节参数

Table 4 Parameters of the overlap section m

参数名称	参数值	参数名称	参数值
l_a	50.00	l_f	0.24
l_b	25.00	l_g	1.60
l_c	25.00	l_h	1.84
l_d	50.00	l_i	0.06
l_e	150.00		

1.3 受电弓模型

在本文中，受电弓被视为三质量块模型，模型中的各质量块间通过弹簧阻尼单元相互连接，而各质量块的质量及其弹簧阻尼单元的刚度和阻尼参见文献[10]。上述参数能够让三质量块模型的频率响应与真实受电弓一致。在ANSYS中，上弓臂和下弓臂对应的质量块采用MASS21集中质量单元建立；为准确仿真弓头与接触线的相互运动，弓头采用BEAM4单元划分，并确保弓头的质量和对应质量块质量一致即可。本文所建立的ANSYS受电弓模型如图5所示，受电弓系统的动力学方程为

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{P}}\ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{P}}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{P}}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{P}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{P}}\boldsymbol{q}_{\mathrm{P}}=\boldsymbol{Q}_{\mathrm{cP}} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{M}_{\mathrm{P}}$为受电弓质量矩阵；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{P}}$为受电弓阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{P}}$为受电弓刚度矩阵；$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{cP}}$为包括弓网接触力和受电弓抬升力在内的外力对接触网作用产生的广义力。

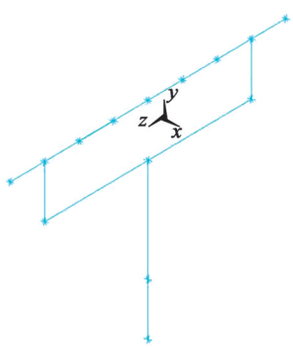


图5 受电弓系统有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the pantograph

1.4 弓网接触力计算

在弓网系统中，弓网接触是受电弓与接触网间相互动态耦合的根本所在。本文基于罚函数方法计算弓网接触力，其计算公式为

$$F_{\mathrm{c}}=\begin{cases}k_n d_{\mathrm{r}}, & d_{\mathrm{r}}\geqslant 0\\ 0, & d_{\mathrm{r}}<0\end{cases} \tag{3}$$

式中：k_n为接触刚度，取k_n=50 000 N/m[11]；d_{r}为接触线与受电弓弓头接触点间的相对位移。

在ANSYS软件中，弓网接触由CONTA176和TARGET170单元实现，其中CONTA176单元划分在弓头上，而TARGET170划分在接触线上。CONTA176单元的实常数中接触刚度设为50 000 N/m。

1.5 考虑锚段关节的弓网耦合动力学模型

基于接触网和受电弓动力学模型和弓网接触模型，可以得到考虑锚段关节的弓网耦合动力学模型，该模型的动力学方程为

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_{\mathrm{c}} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{M}_{\mathrm{P}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{c}}\\ \ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_{\mathrm{c}} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{P}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{c}}\\ \dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_{\mathrm{P}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{q}_{\mathrm{c}}\\ \boldsymbol{q}_{\mathrm{p}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q}_{\mathrm{Fc}}\\ \boldsymbol{Q}_{\mathrm{cP}}\end{bmatrix} \tag{4}$$

在锚段关节处，由于2段接触网的接触线均存在TARGET170单元，因此当受电弓通过锚段关节区域时，ANSYS将通过实时计算接触点相对位移的方法来判断受电弓与哪一段接触网发生了接触，进而实现锚段关节的过渡效果。

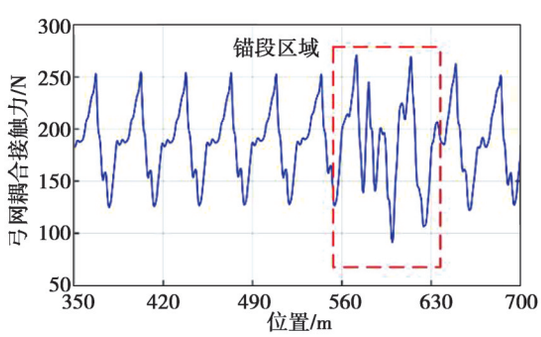
1.6　模型验证

本文所建立的弓网耦合动力学模型来源于文献[12]，该模型已经过EN 50318: 2018标准验证，并入选为国际弓网耦合动力学模型验证benchmark的参考模型之一，因此在本文中不再进行重复验证。

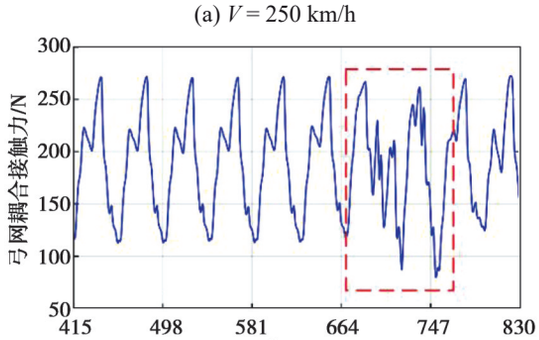
2　不同典型工况下的锚段关节弓网耦合动力学特性仿真研究

2.1　不同速度对弓网耦合动力学特性的影响

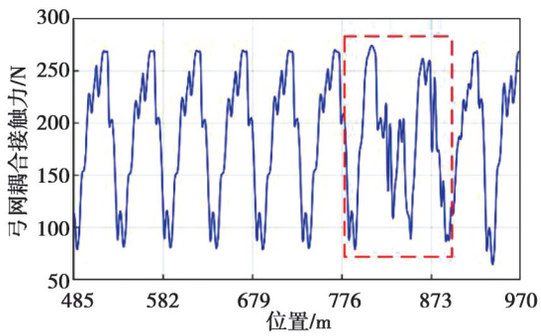
基于前述考虑锚段关节的弓网耦合动力学模型，本文首先对某高速弓网系统锚段关节在不同典型运行工况下的弓网耦合动力学特性进行分析。首先，本文对不同车辆运行速度影响下的弓网耦合动力学特性进行仿真分析。根据线路条件，本文主要考虑250 km/h、300 km/h、350 km/h、400 km/h这4种运行速度。由于弓网耦合接触力直接反映了弓网耦合动态行为，因此本文以弓网耦合接触力为基础分析弓网耦合动力学特性。不同运行速度影响下的弓网耦合接触力时程曲线如图6所示，而不同车速对应的弓网耦合接触力最小值和平均值如7所示。由仿真计算结果可见，随着车速由250 km/h提升到400 km/h，非锚段区域的弓网耦合接触力的振荡程度快速增加，其最小接触力由125.4 N减小到81.2 N，而平均值由176.4 N下降到158.7 N，但是锚段区域的接触力并未随车速增加而产生明显变化；随着车速由250 km/h增加到400 km/h，锚段区域的最小接触力由85 N增大到102 N，呈现缓缓上升的趋势。这表明该锚段结构具备较好的适应性，能够在不同速度下实现受电弓的平稳过渡。



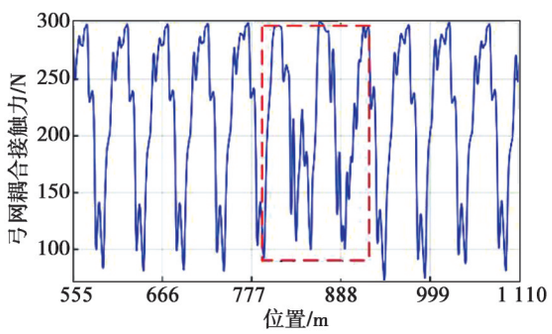
(a) V = 250 km/h



(b) V = 300 km/h



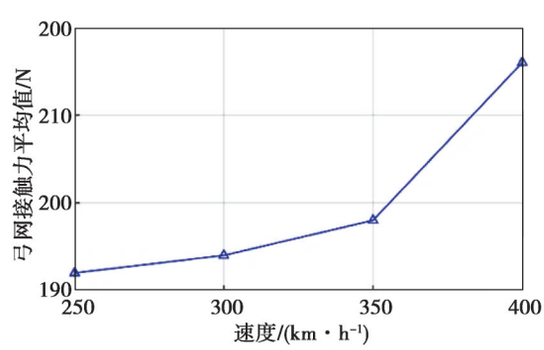
(c) V =350 km/h



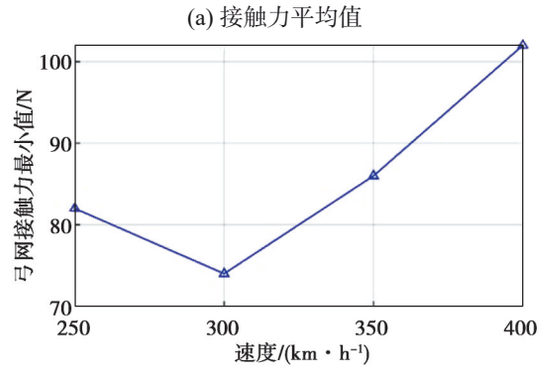
(d) V = 400 km/h

图6　不同车速下车辆通过锚段区域时的弓网耦合接触力时程曲线

Fig. 6　Time histories curve of the pantograph-catenary coupling contact force at overlap section with respect to various train passing speeds



(a) 接触力平均值



(b) 接触力最小值

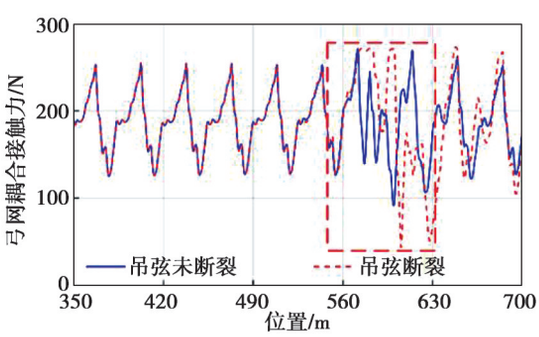
图7　锚段关节处弓网耦合接触力平均值和最小值随车速的变化

Fig. 7　Variations of mean and minimum pantograph-catenary coupling contact forces at overlaps with respect to various train speeds

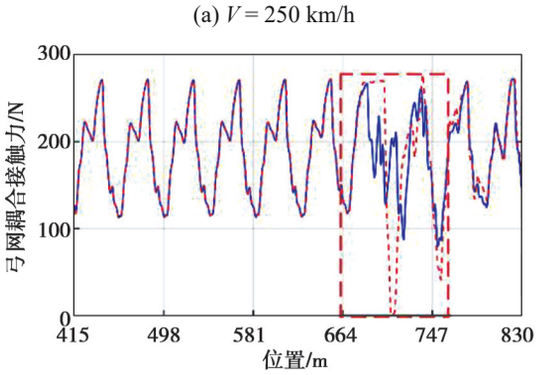
2.2　锚段区域吊弦断裂对弓网耦合动力学特性的影响

吊弦是承载接触线的关键部件，其服役状态直接

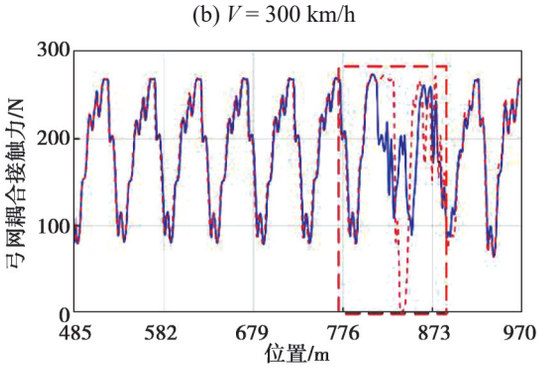
影响接触网系统的整体服役状态，并对弓网耦合动力学特性有明显影响。但是由于弓网长期的耦合作用，大风、覆冰、霜雪、雷电、暴晒等复杂气候环境和本身结构缺陷等因素的存在，吊弦不可避免地会出现异常断裂[13]问题，并对弓网耦合动力学特性产生明显影响，进而破坏系统的正常受流[14-15]。在前述锚段区域动力学特性分析的基础上，本文进一步对锚段区域吊弦断裂影响下的弓网耦合动力学特性进行分析。基于现有某高速铁路接触网吊弦断裂事故，本文假设锚段交叉点附近的2根吊弦断裂。在ANSYS模型中，吊弦断裂建模为该处吊弦取消连接。吊弦断裂时不同车速下的弓网耦合动力学响应如图8所示，而对应的弓网耦合接触力平均值和最小值如图9所示。由图8和图9可知，吊弦断裂对弓网耦合动力学响应有明显影响，当吊弦断裂时，受电弓通过锚段区域时的弓网耦合接触力有着明显的下降；当车速大于等于300 km/h时，弓网耦合接触力甚至直接下降到0 N，并出现接触脱离。为了确保弓网稳定受流，必须严格防止锚段区域出现吊弦断裂故障。



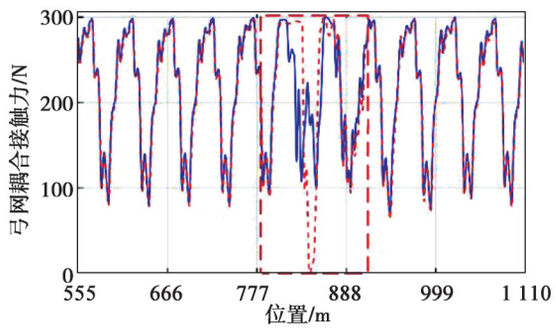
(a) V = 250 km/h



(b) V = 300 km/h



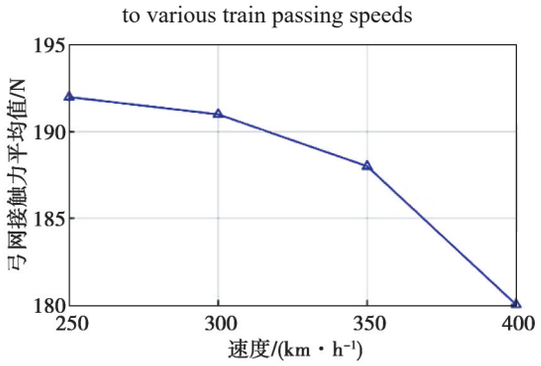
(c) V = 350 km/h



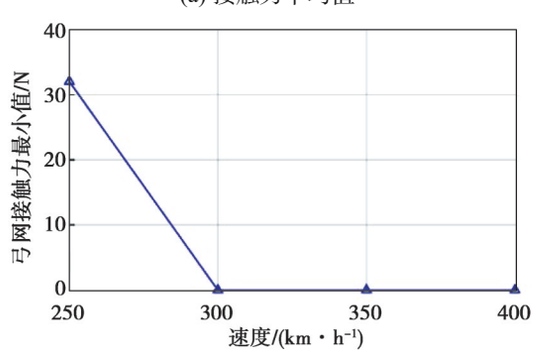
(d) V = 400 km/h

图8　不同车速下车辆通过吊弦断裂锚段区域时的弓网耦合接触力时程曲线

Fig. 8　Time histories of the pantograph-catenary coupling contact force at overlap section with dropper breakage with respect to various train passing speeds



(a) 接触力平均值



(b) 接触力最小值

图9　吊弦断裂锚段关节处弓网耦合接触力平均值和最小值随车速的变化

Fig. 9　Variations of mean and minimum pantograph-catenary coupling contact forces at overlaps with dropper breakage with respect to various train speeds

2.3　锚段区域吊弦刚度变化对弓网耦合动力学响应的影响

在锚段区域中，吊弦除了断裂故障外，还会因恶劣环境条件和弓网系统电弧灼烧等因素造成吊弦绞线磨损或断裂，进而导致吊弦绞线的横截面积减少，并使得对应吊弦等效刚度下降。本文在前述模型的基础上分析了吊弦刚度变化对弓网耦合动力学响应的影响，并进一步分析了吊弦刚度变化对相邻吊弦吊弦力的影响，以此为基础分析吊弦刚度变化影响下的吊弦故障演化规律。

2.3.1　吊弦刚度变化对弓网耦合动力学响应的影响

基于前述弓网耦合动力学模型，本文首先分析了吊弦刚度变化对弓网耦合动力学响应的影响。吊弦刚度变化位置为锚段区域中间吊弦，如图3所示。根据实际测量结果，吊弦刚度变化取为原刚度的0.8倍、0.5倍和0.1倍。0.8倍刚度下的弓网耦合动力学响应如图10所示。由图10可知，吊弦刚度变化对弓网耦合动力学响应有明显影响，当吊弦刚度由1倍下降到0.8倍时，弓网耦合接触力在受电弓通过锚段区域时即出现了明显的下降，最小接触力达到了0.8 N，并在刚度进一步下降时下降到0 N，出现接触脱离，显著影响到受流特性。

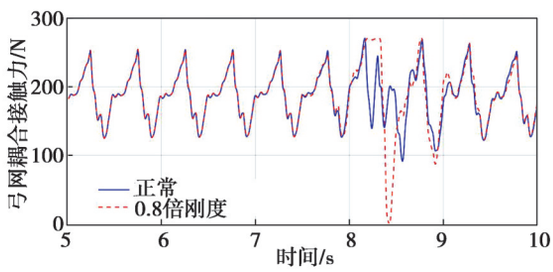


图10　刚度0.8倍下的弓网耦合接触力时程曲线

Fig. 10　Time histories curve of the pantograph-catenary coupling contact force with 0.8 times stiffness

2.3.2　吊弦刚度变化对相邻吊弦动力学响应的影响

下面分析不同的吊弦刚度对相邻吊弦动力学响应的影响，其中吊弦力被用来反映吊弦的动力学响应。吊弦刚度变化为原刚度0.1倍时的相邻吊弦动态吊弦力变化如图11所示，而不同吊弦刚度影响下的平均吊弦力和最大吊弦力如图12所示。由图11和12可知，吊弦刚度变化会对相邻吊弦的动力学响应产生一定的影响，当列车速度为250 km/h、吊弦刚度由0.8倍下降到0.1倍时，相邻吊弦的平均吊弦力由236.0 N下降到235.1 N，而最大吊弦力则保持在241.2 N；但当车速提升到400 km/h时，吊弦刚度下降到0.1倍时的相邻吊弦的最大吊弦力快速上升到312.6 N。这表明单根吊弦的故障在高速运行工况下会明显影响到邻近吊弦，并增加其余吊弦的故障风险，而这一风险随着单根吊弦的故障程度提升而显著提升。因此，为了确保高速铁路弓网系统的运行稳定性，有必要防止锚段区域吊弦出现故障并导致吊弦刚度下降。

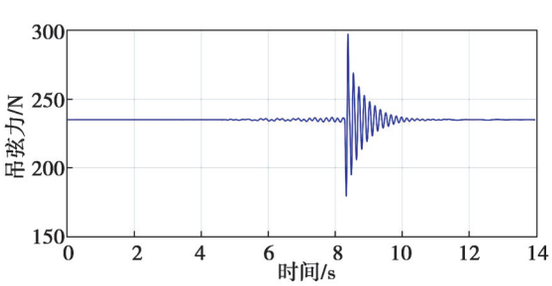
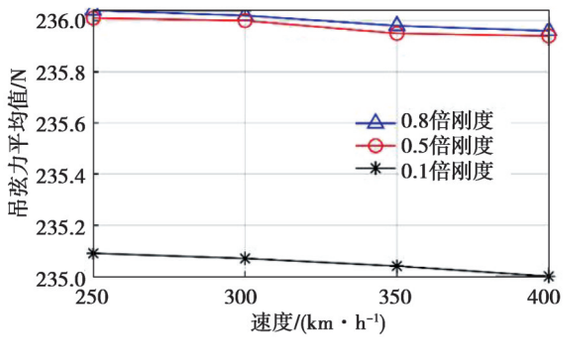
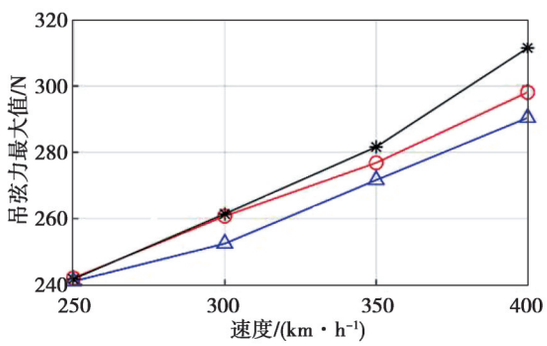


图11　刚度0.1倍下的临近吊弦的吊弦力时程曲线

Fig. 11　Time histories curve of the adjacent dropper force with 0.1 times stiffness



(a) 吊弦力平均值



(b) 吊弦力最大值

图12　吊弦刚度下降锚段关节处吊弦力平均值和最大值随车速的变化

Fig. 12　Variations of mean and maximum dropper forces at overlaps with decreased dropper stiffness with respect to various train passing speeds

3　结束语

锚段关节是电气化铁路接触网系统的重要组成部分，其动态行为直接影响到弓网耦合系统的整体动力学特性，进而决定系统是否能在车辆高速运行情况下稳定运行。近年来，锚段关节处的吊弦断裂故障时有发生，但是其对锚段关节动力学特性的影响还没有得到深入研究。本文基于某高速铁路弓网系统对锚段关节区域吊弦故障下的弓网系统耦合动力学特性进行了分析。本文使用仿真软件ANSYS建立了包含锚段关节在内的弓网系统耦合动力学模型，分析了不同锚段关节关键参数影响下的动力学特性，并在此基础上建立了不同类型的吊弦故障模型，仿真分析了不同吊弦故障对弓网耦合动力学特性的影响。

由仿真计算结果可知，本文所建立的锚段区域弓网耦合动力学模型能够准确反映锚段区域的动力学行为，而且锚段区域吊弦故障会对锚段区域弓网耦合动力学响应带来显著影响。当吊弦刚度下降到原刚度的0.8倍以下时，弓网耦合接触力就会发生明显波动，并造成弓网接触脱离；当吊弦刚度下降到原刚度的0.1倍时，临近吊弦的吊弦力会出现明显的上升。因此，为了确保高速铁路弓网系统的运行稳定性，必须严格防止在锚段区域由于吊弦出现故障而导致的吊弦刚度下

降，而在对接触网系统进行巡检时也必须时刻关注锚段区域吊弦状态。本文的研究能够为弓网系统吊弦故障诊断和结构优化设计提供有效参考。

参考文献：

[1] 黄国胜, 司福强, 乔桢, 等. 电气化铁路接触网覆冰预警及监测关键技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2023(11): 1-3.
HUANG Guosheng, SI Fuqiang, QIAO Zhen, et al. Research on key technologies for ice warning and monitoring of overhead contact system in electrified railways[J]. Railway construction technology, 2023(11): 1-3.

[2] 牟观汇. 高铁接触网受流特性影响因素研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
MOU Guanhui. Study of factors influencing current collecting characteristics of high-speed railway[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.

[3] 刘峰涛, 孙少南. 刚性接触网锚段关节布置研究[J]. 电气化铁道, 2022, 33(3): 1-6.
LIU Fengtao, SUN Shaonan. Research on the joint arrangement of rigid contact network anchor section[J]. Electric railway, 2022, 33(3): 1-6.

[4] 张一平. 高速铁路接触网非绝缘锚段关节参数调整分析与研究[J]. 电气化铁道, 2023, 34(增刊 1): 126-128.
ZHANG Yiping. Analysis and research on parameter adjustment of non insulated anchor section joint of high speed railway contact network[J]. Electric railway, 2023, 34(Suppl 1): 126-128.

[5] 关金发, 吴积钦. 高速铁路接触网四跨锚段关节结构优化研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(7): 159-164.
GUAN Jinfa, WU Jiqin. Optimization of 4-span overlap section on high-speed contact line system[J]. Railway standard design, 2017, 61(7): 159-164.

[6] 王迎波, 邓斌, 秦剑, 等. 结构参数对锚段关节防风性的影响分析[J]. 机械制造与自动化, 2012, 41(4): 176-178.
WANG Yingbo, DENG Bin, QIN Jian, et al. Analysis of influence of structural parameters on windproof of the sections [J]. Machine building & automation, 2012, 41(4): 176-178.

[7] 杨艺, 周宁, 李瑞平, 等. 基于有限元法的弓网过渡段处动态性能仿真分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(18): 71-75.
YANG Yi, ZHOU Ning, LI Ruiping, et al. Dynamic performance analysis of different sections of overhead catenary based on finite element model[J]. Journal of vibration and shock, 2016, 35(18): 71-75.

[8] SONG Yang, LIU Zhigang, WANG Hongrui, et al. Nonlinear modelling of high-speed catenary based on analytical expressions of cable and truss elements[J]. Vehicle system dynamics, 2015, 53(10): 1455-1479.

[9] 吴积钦. 受电弓与接触网系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
WU Jiqin. Pantograph and contact system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010.

[10] 罗群. 基于绝对节点坐标法的弓网动力学特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
LUO Qun. Research on dynamics characteristics of pantograph-catenary system based on the absolute nodal coordinate formulation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.

[11] 皋金龙. 不同受电弓对刚性接触网锚段关节的适应性研究[J]. 电气化铁道, 2021, 32(2): 57-60.
GAO Jinlong. Studies on adaptability of different pantographs to rigid catenary overlap section[J]. Electric railway, 2021, 32(2): 57-60.

[12] LIU Zhendong, JÖNSSON P A, STICHEL S, et al. Implications of the operation of multiple pantographs on the soft catenary systems in Sweden[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2016, 230(3): 971-983.

[13] 王正日. 高铁吊弦断裂行为影响因素研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
WANG Zhengri. Research on the factors of affecting fracture behavior of droppers in high-speed railway[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.

[14] 张志奇, 吴孟臻, 燕永钊, 等. 高速受电弓下框架等效阻尼的实验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(3): 425-431.
ZHANG Zhiqi, WU Mengzhen, YAN Yongzhao, et al. Experimental study on equivalent damping of the lower frame of a high speed pantograph[J]. Journal of experimental mechanics, 2020, 35(3): 425-431.

[15] 李胜东. 中国高铁弓网系统标准体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
LI Shengdong. Study on the standard system of the Chinese pantograph-catenary system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

Study on dynamic behaviors of catenary overlap section under the impact of dropper failure

JIANG Hongpeng[1], XU Yan[1], LIU Zhendong[2], ZHANG Shikui[2], SUI Minjun[3]

(1. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650504, China;
2. China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing, 100081, China;
3. National Innovation Center of High Speed Train, Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: Overlaps serve vital components of the overhead contact system (OCS) on high-speed railways, and their dynamic behaviors directly affect the current-collecting performance of the pantograph-catenary systems in the high-speed operational conditions of trains. Instances of dropper breakage and other failures have been prevalent in overlap sections along high-speed railways, directly threatening the operational stability of the pantograph-catenary systems. Studying the dynamic behaviors of overlap sections under the influence of dropper failures holds important significance in guaranteeing the current-collecting performance of the pantograph-catenary systems. This study focused on the overlap sections within the catenary system of a high-speed railway. Based on a three-dimensional overlap model created using the finite element method, a pantograph-catenary coupling model incorporating the overlap sections was established. This model was utilized to analyze the influence of various operating speeds on the pantograph-catenary coupling contact force, and to delve into the dynamic behaviors of the overlap sections under the influence of dropper failures. The results from simulation calculations indicate the efficacy of the established model in accurately representing the dynamic behaviors. Dropper failures at the overlaps significantly degrade the current-collecting performance and the dynamic behaviors of neighboring droppers, elevating the risk of dropper breakage. Therefore, assessing the condition of droppers at overlaps is necessitated during the OCS patrol inspections.

Keywords: overlap; current-collecting performance; pantograph-catenary system; dropper failure; dropper breakage; simulation; high-speed railway

收稿日期：2023-12-20；修回日期：2024-02-07