DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.021

高速铁路接触网导线动态抬升量研究

唐　阳
（中铁建电气化局集团南方工程有限公司，湖北 武汉 430000）

摘　要：为了通过高速铁路线路整体接触导线抬升量数据研究弓网系统动态性能，文章建立了4种典型高铁线路的接触网模型和3种高速受电弓的三自由度归算参数模型，并利用罚函数法模拟弓网关系，建立弓网耦合模型，仿真计算接触线定位器抬升量在不同运行速度、不同运行方向下的变化。随后，文章提出一种基于随机森林算法的定位点智能识别分类方法，将接触线拉出值拐点作为定位点，结合现有的接触网几何参数检测数据，采用随机森林算法，将投票结果作为最终定位点判断标准，建立分类模型，优化定位点数据，并对接触线抬升量动态静态实测数据进行预处理、定位点优化、数据空间同步后，得到连续的接触线抬升量。研究结果表明，在速度170~350 km/h内4种典型线路定位器最大抬升量随列车运行速度的提升而增大；在300 km/h开口运行条件下，SSS400+受电弓的定位器动态最大抬升量小于法维莱CX-018与DSA380受电弓，最大抬升量在61.17~81.44 mm；在接触网参数确定的前提下，受电弓闭口方向运行时接触线平均抬升量要高于开口方向运行。

关键词：高速铁路；接触网；导线抬升；数据采集；弓网耦合；高速列车；有限元法

中图分类号：U238；U225　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)04-0171-10

0　引言

为确保电气化铁路的稳定运营、保证弓网安全接触与有效取流，除了必须按照相应的技术规范与标准设计规范进行设计和实施外，还应按照“重检慎修”的原则，通过试验检测、理论分析等方法提前进行预测和预防，为接触网运营维护提供数据支撑，以确保其时刻处于良好的服役状况，保证弓网动态受流质量保持良好。

接触网几何参数与动态参数检测是接触网检测的重要任务[1]，近年来国内外学者在接触网检测方面展开了许多研究。日本的S. Kusumi[2]设计了一种接触线监测装置，用它可以快速准确地监测接触线导高等参数，具有较高的测量精度。瑞士的ELAG公司[3]研发了一种基于三角测距原理的弓网测量系统，采用扫描仪实时测量接触线动态抬升量，根据传感器所测量的列车倾角和中心偏移距，实现测量数据的可视化。为检测受电弓的静态与动态应变，文献[4]提出在受电弓上预先安装光纤传感器，基于迈克尔干涉仪实现受电弓局部应变测量。意大利的TECNOGAMMA公司[5]采用接触线方位和接触线磨耗量监测装置，通过检测得到数字图像后采用图像处理技术计算接触网抬升量，并根据车厢振动进行修正。文献[6]提出了一种基于深度学习的方法实现燃弧检测，通过卷积神经网络实现对图像特征的识别与提取，测试精度可以达到97.5 %以上。文献[7]介绍了一种基于单片机模块的接触网综合检测系统，可以实现接触网动态抬升量与振动频率的检测。文献[8]基于二维图像直线标定的方法，提出了一种基于图像处理技术的接触网几何参数检测方案，并通过实际检测证明了方法的有效性。文献[9]通过改进YOLO v3算法，提出一种接触线抬升量的非接触式检测方法，具有良好的环境适应性和准确性。文献[10]采用图像语义分割算法，提出一种接触网开口销状态识别算法，对不同状态下开口销的图像识别率具有很高的准确度。

基金项目：国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目（N2023G057）；中国铁建股份重大课题（2021-A01）
通信作者：唐　阳，男，高级工程师，主要从事电气化铁路牵引供电方面的研究；E-mail: 345050200@qq.com
引用格式：唐阳. 高速铁路接触网导线动态抬升量研究[J]. 机车电传动, 2024(4): 171-180.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.021.
Citation：TANG Yang. Research on dynamic uplift of contact wires in high-speed railway[J]. Electric drive for locomotives,2024(4): 171-180.DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.021.

为研究高速列车弓网系统的动力学响应，国内外学者做了大量研究。文献[11]首次将车辆与轨道作为整体建立“车辆–轨道”垂向统一模型，并提出了“车辆–轨道”耦合动力学理论。文献[12]建立了多种接触网类型的弓网系统动力学仿真模型与数值仿真软件，并研究了弓网系统各部分的振动特性。文献[13]研究了接触网驰度对弓网接触受流的影响，并提出接触线表面不平顺的概念。文献[14]推导了受电弓非线性模型的运动微分方程，并利用泰勒级数展开对非线性模型进行线性化，在此基础上建立“受电弓–接触网”垂向耦合动力学模型研究机车、轨道激扰影响下弓网系统的动态性能。文献[15]利用振型叠加法计算接触网瞬态响应与动应力，分析了接触网动应力随着受电弓沿接触网锚段运行时间的变化情况。文献[16]利用接触单元模拟了弓网之间的动态相互关系，并采用直接积分法对动力学耦合方程进行求解。文献[17]通过AR模型与接触网结构参数反演Davenport顺向风速谱和Panosfsky垂向风速谱，建立了随时间与空间变化的接触网脉动风场，并分析了脉动风速、攻角等对弓网接触压力的影响。文献[18]构建了包含刚性、柔性和刚柔过渡段的接触网动力学模型，对其动力特性（包括接触力和抬升量等）进行研究。文献[19]为研究弓网系统结构参数对动态接触压力的影响，建立了刚性接触网模型并进行模态分析。文献[20]通过有限元法建立弓网耦合模型，对比了2种接触网布置形式动态性能的差异。文献[21]利用京津铁路的实际设计参数建立有限元模型，研究了弓网系统动态性能，并考虑了受电弓弹性变形的影响。

综上所述，当前对接触网几何参数的检测研究主要以静态测量、固定监测和基于模型的仿真计算为主，而且在研究接触网动态特性时，通常基于有限元模型计算弓网接触力等典型动态性能参数，以及对有限元模型进行改良方面，对接触网抬升量等参数研究较少，并且接触网静态检测、固定监测等测试结果体现的是个体特征，其结果与监测点的选取密切相关，不能对接触线整体抬升量有具体体现，无法全面评价高铁线路的弓网匹配度。

本文将建立“接触网–受电弓”动力学耦合模型，结合我国高铁线路实际运行和检测情况，仿真计算4条典型线路在不同速度、不同受电弓和不同运行方向下的弓网接触力与定位器抬升量，并开展接触网抬升量测试试验，在已有的实际运行列车几何参数检测数据基础上，提出一种基于随机森林算法的定位点分类识别方法，通过进行数据预处理、定位点优化、数据空间同步后，获取整条线路接触网导线抬升量数据，结合仿真数据分析接触网导线抬升量与运行速度、受电弓类型、运行方向之间的关系。

1 仿真模型建立

1.1 接触网模型

接触网模型常见的建模方法包括有限元法、模态分析法、集中质量法等方法。本文分别使用ANSYS仿真软件和ANCF梁单元来构建接触网模型，两者都可以很好地模拟接触线在出现大幅度变形时的几何非线性和弯曲刚度，然后使用形态优化的方法计算接触网的初始形态和确定吊弦高度，最后采用非线性有限元法进行求解。结合目前我国高铁线路实际运行和检测情况[22-23]，选取4条典型线路进行弓网动力学仿真分析，线路参数如表1所示[24]。

表1 典型线路接触网参数

Table 1 Parameters of overhead contact systems in typical railways

参数名称	京沪高铁	京津城际（京津段）	京广高铁（郑武段）	徐兰高铁（郑西段）
设计运行速度/(km·h^{-1})	380	350	350	350
标称跨距/m	50	50	50	50
吊弦数量/根	6	6	6	6
第一吊弦距定位点距离/m	5	5	5	5//6//7
拉出值/mm	200	200	250//250	200//300
接触线张力/kN	31.5（低速） 33.0（高速）	27.0	30.0	28.5
接触线线密度/(kg·m^{-1})	1.350	1.082	1.350	1.350
接触线型号	CTMH150	Rim120	CTMH150	CTMH150
承力索张力/kN	20	21	21	23
承力索线密度/(kg·m^{-1})	1.065	1.065	1.065	1.065
承力索型号	JTMH120	BzII120	JTMH120	JTMH120
弹性吊索张力/kN	18		14	18
弹性吊索长度/m	3.5		3.5	3.5

采用有限元法建立接触网的有限元模型，其中接触线单元长度设置为1 m，仿真步长0.1 m，模型长度为2个半锚段(900 m+900 m)，锚段关节位于模型中部。以京沪线为例，接触网模型如图1所示，长度1 600 m，

锚段关节位于700 m→900 m区间。其中，接触力统计范围为300 m→1 300 m，以去除前后边界效应影响，并进行0~20 Hz的低通滤波去除高频杂波影响。

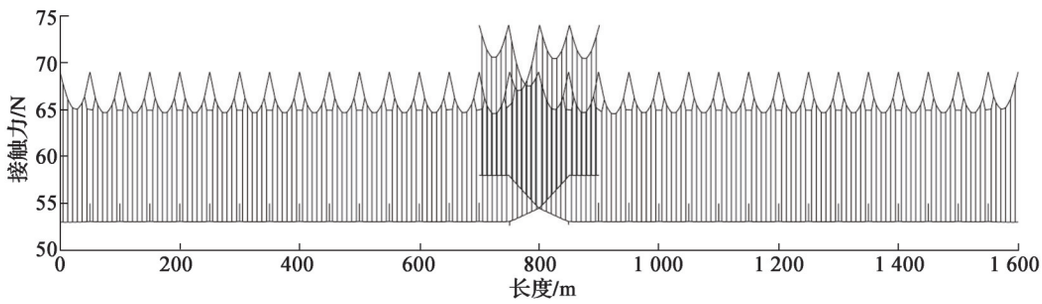


图1　接触网有限元模型

Fig. 1　Finite element model of overhead contact system

1.2　受电弓模型

在列车运行过程中，受电弓通过弓头碳板与接触线的接触滑行取电，但随着运行速度的提升，两者之间会产生强烈的动态效应。因此，为了保证高速铁路的安全运行，必须确保受电弓与接触线在行驶过程中的接触稳定性。

本文采用常见的三自由度归算参数模型模拟受电弓，将受电弓分成弓头、上框架、下框架3部分，并将其简化为只有等效质量的集中质量单元，在相邻单元之间使用“弹簧–阻尼”系统模拟彼此之间的柔性特征，如图2所示。

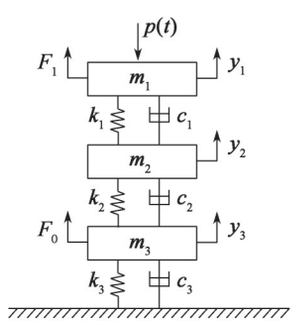


图2　三自由度归算参数模型

Fig. 2　Three-degree-of-freedom model with reduction parameters

结合图2建立三自由度归算参数模型的运动微分方程，具体如下：

$$\left.\begin{aligned} &m_1\ddot{y}_1+c_1(\dot{y}_1-\dot{y}_2)+k_1(y_1-y_2)+F_1=p(t)\\ &m_2\ddot{y}_2+c_1(\dot{y}_2-\dot{y}_1)+k_1(y_2-y_1)+c_2(\dot{y}_2-\dot{y}_3)+k_2(y_2-y_3)=0\\ &m_3\ddot{y}_3+c_2(\dot{y}_3-\dot{y}_2)+k_2(y_3-y_2)+c_3\dot{y}_3+k_2y_3=-F_0 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中：$p(t)$为弓网的动态作用力，即弓网接触力；F_1为气动抬升力；F_0为静态抬升力；m_i、k_i、c_i（i=1, 2, 3）分别为受电弓弓头、上框架和下框架的等效质量、刚度和阻尼；y_i（i=1, 2, 3）为各质量块的垂向位移。

结合我国高速铁路受电弓服役现状，将共计3种类型受电弓纳入数值仿真分析中，包括DSA380、SSS400+和法维莱CX-018，受电弓模型等效参数如表2所示[24]，最后采用罚函数法描述弓网之间的耦合关系。

表2　受电弓模型相关参数

Table 2　Parameters of pantograph model

型号	质量/ kg			刚度/(N·m^{-1})			阻尼/(N·(m·s^{-1})$^{-1}$)		
	m_1	m_2	m_3	k_1	k_2	k_3	c_1	c_2	c_3
法维莱CX-018	5.00	9.98	9.00	6 000	8 971	0.500	5	5	350.0
DSA380	6.00	7.12	5.80	9 430	14 100	0.010	0	0	70.0
SSS400+	6.05	6.40	14.00	5 813	13 600	0.001	0	0	64.9

1.3　模型验证

1.3.1　接触网初始状态验证

为了证实本文建立的接触网模型初始状态是否准确，将计算结果与文献[25]总结的各种弓网仿真方法计算结果进行比较，对比结果如图3所示。由图3可知，模型计算结果与各种仿真方法得出的结果基本相同。

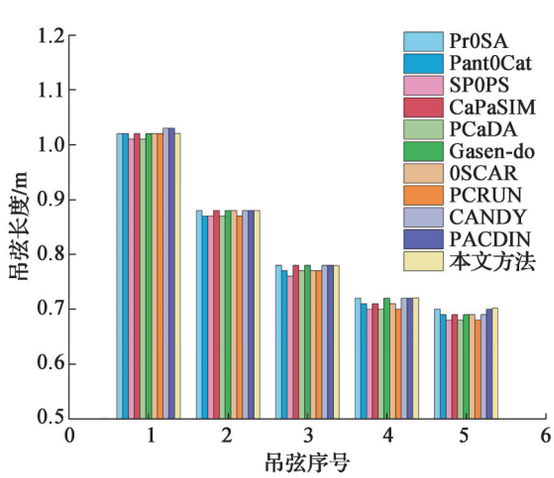


图3　接触线吊弦初始长度计算结果

Fig. 3　Calculation results of initial length of dropper

1.3.2　弓网动态仿真验证

为验证本文建立的弓网耦合模型是否合理，选取欧标EN 50318:2018中的参数建立双受电弓类型的“接

触网–受电弓”模型，将275 km/h和320 km/h的列车运行速度作为仿真工况，得到弓网接触力仿真结果，并通过低通滤波去除高频信号影响，低通滤波频率设置为0~20 Hz，对比结果如表3所示[26]。由表3可知，计算结果均在标准的规定范围内。

表3 弓网动态模型验证

Table 3 Model verification of pantograph-catenary dynamic behaviors N

参数名称		275 km/h		320 km/h	
		前受电弓	后受电弓	前受电弓	后受电弓
平均接触力	范围	141.5~146.5	141.5~146.5	166.5~171.5	166.5~171.5
	仿真结果	143.1	144.4	169.4	168.8
接触力标准差	范围	31.9~34.8	50.0~54.5	49.5~62.9	30.2~43.8
	仿真结果	33.3	51.6	53.7	42.3
0~5 Hz接触力标准差	范围	26.4~28.9	41.2~45.4	38.7~44.4	14.3~23.3
	仿真结果	27.2	42.8	40.1	19.0
5~20 Hz接触力标准差	范围	16.2~22.4	25.2~34.7	29.0~46.2	29.0~46.2
	仿真结果	19.3	29.3	35.7	37.9
最大接触力	范围	211.9~244.0	241.0~290.0	295.0~343.0	252.0~317.0
	仿真结果	222.9	260.4	295.0	269.5
最小接触力	范围	71.0~86.0	14.0~50.0	55.0~82.0	51.0~86.0
	仿真结果	85.8	34.5	60.0	59.7

2 弓网抬升量实测数据采集与计算方法

抬升量计算的实质是计算动、静态接触网几何参数检测数据中接触线高度的差值，但是由于动态与静态数据来源、测量原理与技术不同，因此在这2组数据之间进行计算的前提是保证两者在数据空间上是同步的，这就需要根据几何参数数据特征，通过模式匹配和数据相关分析等方法实现。

2.1 弓网抬升量数据采集方法

高速综合检测列车动态几何参数检测系统可以实现车轮速度脉冲信号触发的等距采样，可以输出包括接触线高度、拉出值、速度等动态检测参数，检测原理如图4所示。检测时，通过2个或多个线阵相机获取的测量对象像素坐标，基于三角测量原理，并结合事先在测量范围内均匀分布的标定点信息计算得出正常运行时的接触线高度、拉出值等参数。

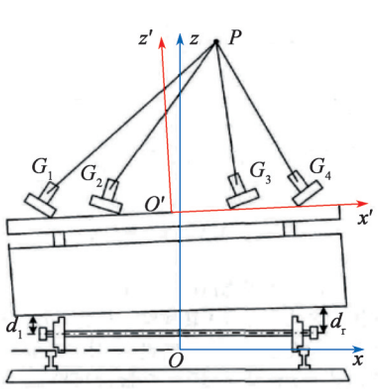


图4 高速综合检测列车(动态参数)测量原理图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement (dynamic parameters) by comprehensive inspection train for high-speed railway

高铁接触网检测车静态几何参数检测系统可以实现等时采样，但在输出时可以转换为等距采样，可以输出含接触线高度、拉出值等静态检测参数，检测原理如图5所示。通过线激光器发出的高强度激光垂直照射到接触线底面，然后拍摄反射光的轮廓，根据接触线、相机安装位置与角度构建出的测量坐标系，并结合已有的标定信息计算出静态接触线高度与拉出值。

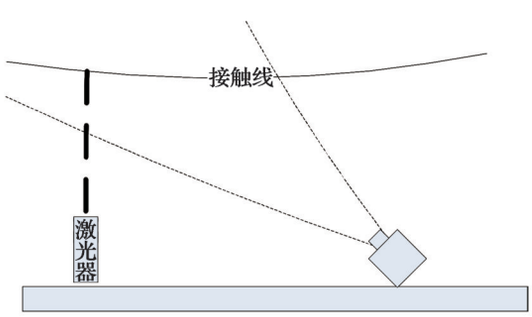


图5 高铁接触网检测车(静态参数)测量原理图

Fig. 5 Schematic diagram of measurement (static parameters) by overhead contact system inspection vehicle for high-speed railway

2.2 弓网抬升量数据计算方法

2.2.1 数据预处理

目前，静态数据来源包括来自于高铁接触网检测车的非升弓状态下的静态检测结果，由于其采样点比较多，而且数据格式与自定义的wave波形并不相同，因此在使用前需要进行格式转换。转换结果保留了原来的采样点数，可以用波形软件打开，查看转换效果，起到过程效果判定作用。此外，由于动态、静态检测数据采样点数仍然不一样，故要对数据进行简化，目标是转换为同一种采样模式的数据。

2.2.2　定位点优化

经过数据预处理后，数据已经具备空间同步的预备条件。定位点是判断是否实现空间同步的主要特征，因此以同样的定位点识别算法对2组数据的定位点进行优化。

为了应对现有定位点识别技术计算量大、实时性要求高和隧道内易误判等缺点，本文提出了一种基于随机森林算法的定位点识别方法：①将实测的接触网定位点拉出值数据转化为方便提取目标特征的黑白图像，并进行变换降噪处理，提高图像质量和清晰度。②基于滑动矩形的角点检测方法，筛选出候选定位点，提取特征属性向量，并通过训练出的分类模型验证有效性。采用随机森林算法搭建训练分类模型，并验证数据样本集中的样本，随机抽取部分接触线拉出值预留作为测试集，代替交叉验证；然后，采用bootstrap的抽样方法构造训练集，并且训练集中的样本与测试集没有交集；训练集建好之后，随机从中抽取部分属性，基于SPRINT方法的决策树模型[27]对训练集进行基分类器训练，并以投票的方式决定最优分类。③利用波形软件对2组数据进行初步分析，确立同步起点，其准则是对当前距离准起点最近的支柱空间同步，并将这2个起点的公里标作为输入，代入下一步操作。

2.2.3　数据空间同步

确立了同步的起点后，由于不同检测系统之间的波形数据会由于采样点数的差异和不均匀，导致波形无法很好地实现同步。因此，在实现特征匹配后，就要对其进行重采样，使近似同一空间位置下的数据实现对齐。以同步特征点（也就是定位点）为小节，对2个同步特征点之间的区段在保证采样点均匀的前提下统一实施重采样，最后生成同时包含动、静态检测数据和抬升量数据的波形。

2.3　定位点识别分类方法有效性验证

为验证方法的有效性，使用现有的检测数据进行训练测试并验证。虽然根据接触线的布置特性，角点可以被识别出来，但是由于某些特殊区段的存在，并不能消除同样符合条件的错误角点，如图6所示（标记为圆形的角点为定位点，标记为方形的角点为符合条件的错误角点），但是利用本文提出的方法搭建训练模型，可以去除特殊区段的错误角点。

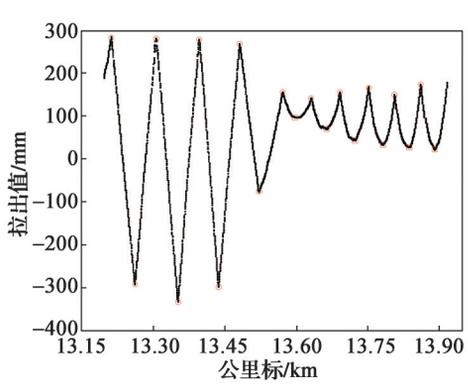


图6　特殊区段定位点分布示意图

Fig. 6　Distribution diagram of locating points in special sections

模型属性向量由特征属性向量定义生成，本例生成的模型属性向量有9个维度，按照无放回的随机抽样方法抽取3种属性，模型训练结果如表4所示。

表4　模型训练结果

Table 4　Model training results

决策树	分类属性			分类错误率	
				单棵决策树	随机森林
模型1	属性5	属性6	属性8	0.110	0.110
模型2	属性1	属性4	属性6	0.094	0.072
模型3	属性3	属性6	属性9	0.081	0.072
模型4	属性4	属性7	属性9	0.087	0.067
模型5	属性4	属性5	属性9	0.096	0.063
模型6	属性3	属性4	属性9	0.166	0.063
模型7	属性2	属性3	属性4	0.112	0.036
模型8	属性1	属性6	属性9	0.081	0.038
模型9	属性6	属性8	属性9	0.083	0.040
模型10	属性2	属性4	属性7	0.072	0.038
模型11	属性3	属性4	属性5	0.094	0.036
模型12	属性1	属性4	属性5	0.072	0.040
模型13	属性1	属性6	属性9	0.081	0.038
模型14	属性2	属性4	属性5	0.085	0.036
模型15	属性3	属性4	属性6	0.090	0.037
模型16	属性5	属性6	属性8	0.094	0.036
模型17	属性2	属性4	属性5	0.072	0.036
模型18	属性1	属性4	属性9	0.081	0.036
模型19	属性1	属性3	属性5	0.088	0.037
模型20	属性4	属性5	属性8	0.083	0.036
模型21	属性2	属性4	属性5	0.079	0.038
模型22	属性2	属性6	属性7	0.091	0.036
模型23	属性1	属性3	属性4	0.092	0.038
模型24	属性3	属性4	属性5	0.081	0.037
模型25	属性2	属性6	属性8	0.083	0.037

由表4可知，单棵决策树的分类效果会根据分类属性的不同而出现较大的差异，正是由于这种不稳定性，导致需要引入集成模型。对比之下，随机森林的分类效果更加良好且稳定，即使随机森林中单棵决策树的分类错误率较高，对集成模型总体效果的影响也比较微弱。根据训练结果绘制决策树数量和分类错误率关系图，如图7所示。

由图7可知，分类错误率随着决策树数量的增长有明显的下降，特别是在决策树数6与7之间有较大幅度的下降，但增长到某个极限处会趋于稳定，当集成模型中采用的决策树数量在8～10棵时，准确性已经可以得到很好的保证。

综上所述，基于随机森林的定位点识别方法不仅可提高定位点的识别精度，而且可通过选取合理的决策树数量应用于接触网几何参数的实时检测系统。

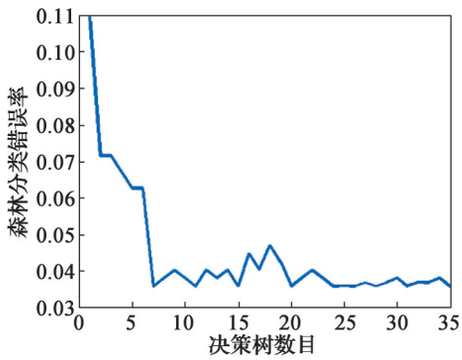


图7　决策树数量和分类错误率关系图

Fig. 7　Relationship between the number of decision trees and classification error rate

3　弓网抬升量分析

3.1　不同速度的动态抬升量分析

为研究不同速度下的定位器抬升量变化，选取京沪、京津、京广、徐兰4条设计速度达到350 km/h的高速铁路为研究对象，计算工况均采用DSA380受电弓、开口运行方向，结合实际设计参数建立耦合模型，以30 km/h的间隔分别计算速度170~350 km/h内的弓网接触力与定位器抬升量，得到如图8所示的结果。

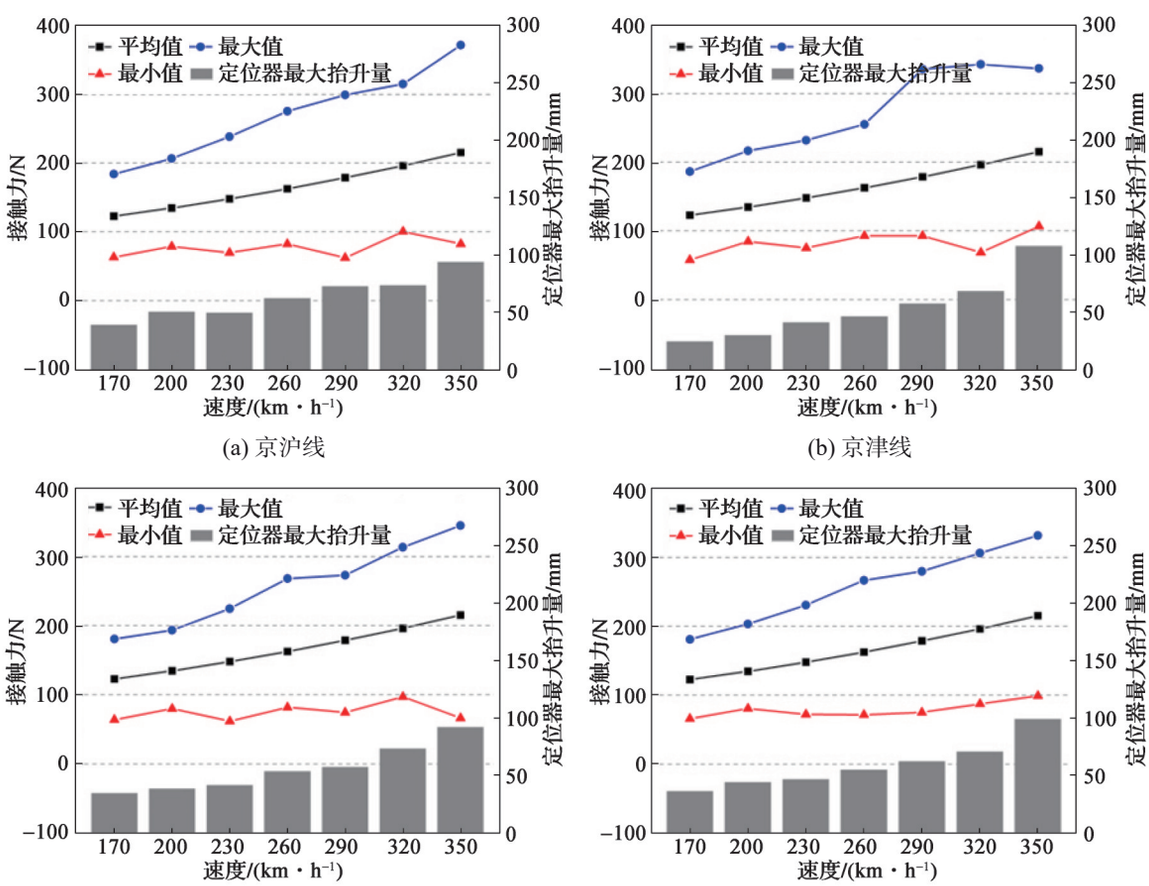
由图8可知，在运行速度170~350 km/h内4条典型线路的定位器最大抬升量都会随着运行速度的提升而增大，而且弓网接触力也呈现出相同的变化趋势。这表明随着列车速度提升，弓网系统的动态特性加剧，导致定位器最大抬升量变大。

以京沪线上下行线300 km/h和350 km/h下的抬升量为研究对象，实测上下行线非锚段关节处的抬升量分布，测量结果如图9~图12所示。

由图9~图12可知，虽然线路抬升量随着速度等级的提升有所升高，但是从总体的跨内抬升量分布波形来看，接触线抬升变化并不剧烈，平顺性较好。300 km/h和350 km/h这2个速度等级下跨内平均抬升量的极差都只有约10 mm，而且在2个运行速度等级下，跨内抬升量分布波形呈现出类似的特点，即除了第2根吊弦附近的抬升量较低外，跨内其余位置抬升量较为一致。

3.2　不同受电弓的动态抬升量分析

为研究不同类型受电弓运行条件下定位器抬升量的变化，研究团队选取京沪、京津、京广、徐兰4条设计速度达到350 km/h的高速铁路为研究对象，以350 km/h开口运行为运行工况，基于实际设计参数分别建



(a) 京沪线　(b) 京津线

(c) 京广线　(d) 徐兰线

图8　4条典型线路不同速度下接触力与抬升量计算结果

Fig. 8　Calculation results of contact force and uplift for four typical railways at different speeds

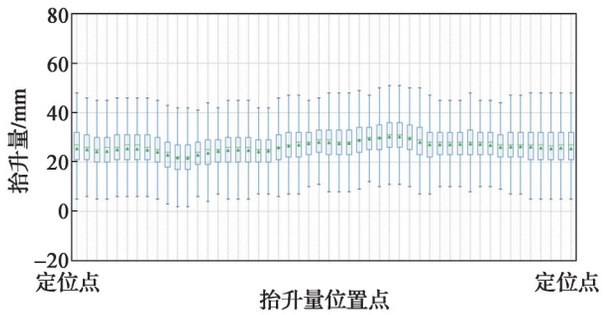


图 9　京沪高铁上行非锚段关节的抬升量分布(300 km/h)

Fig. 9　Distribution of uplifts at uninsulated overlaps in Beijing-Shanghai high-speed railway in up traffic direction (300 km/h)

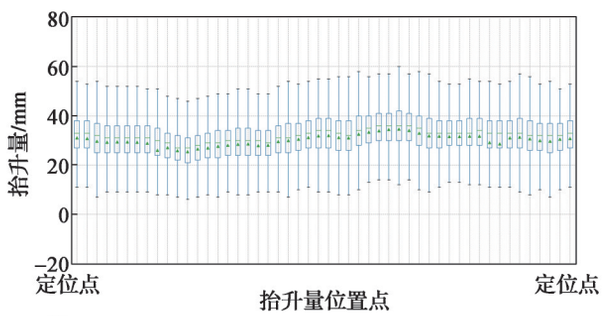


图 10　京沪高铁下行非锚段关节抬升量分布(300 km/h)

Fig. 10　Distribution of uplifts at uninsulated overlaps in Beijing-Shanghai high-speed railway in down traffic direction (300 km/h)

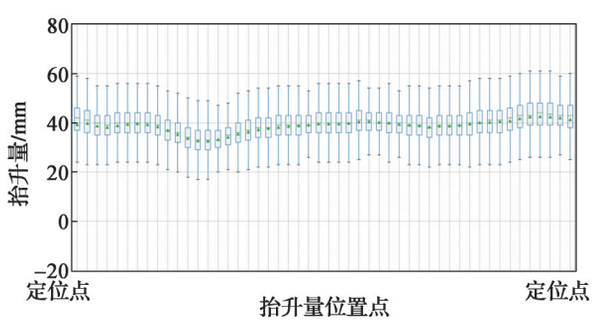


图 11　京沪高铁上行非锚段关节抬升量分布(350 km/h)

Fig. 11　Distribution of uplifts at uninsulated overlaps in Beijing-Shanghai high-speed railway in up traffic direction (350 km/h)

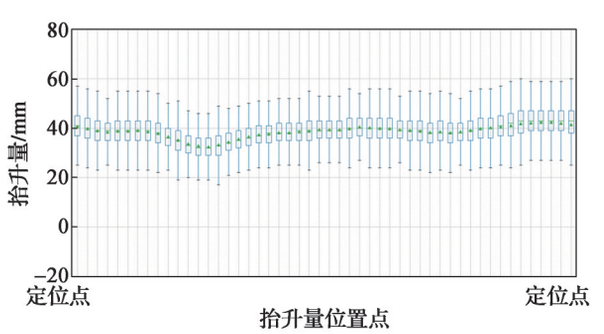


图 12　京沪高铁下行非锚段关节抬升量分布(350 km/h)

Fig. 12　Distribution of uplifts at uninsulated overlaps in Beijing-Shanghai high-speed railway in down traffic direction (350 km/h)

立 DSA380、SSS400+与法维莱 CX-018 等 3 种受电弓的弓网耦合有限元仿真模型，计算不同受电弓的弓网接触力与定位器抬升量，得到如图 13 所示的结果。

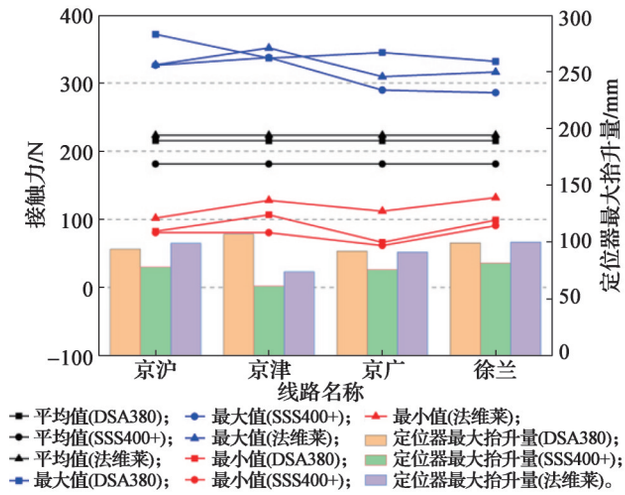


图 13　4 条典型线路不同受电弓的接触力与抬升量变化

Fig. 13　Changes in contact force and uplift of different pantographs in four typical railways

对比 4 条线路的计算结果，由图 13 可知，当列车以 350 km/h 开口运行时，SSS400+受电弓的定位器动态最大抬升量低于其他 2 种受电弓，其中 SSS400+受电弓的定位器动态最大抬升量为 61.17~81.44 mm，法维莱 CX-018 受电弓的定位器动态最大抬升量为 73.87~100.05 mm，DSA380 受电弓的定位器动态最大抬升量为 92.04~106.84 mm。

3.3　不同受电弓运行方向的动态抬升量分析

为研究不同运行方向影响下的定位器抬升量变化，研究团队选取 4 条典型线路为研究对象，以 DSA380 受电弓、运行速度 350 km/h 为运行工况，基于实际设计参数建立弓网耦合有限元仿真模型，仿真计算受电弓开口、闭口运行方向下的弓网接触力与定位器抬升量，计算结果如图 14 所示。

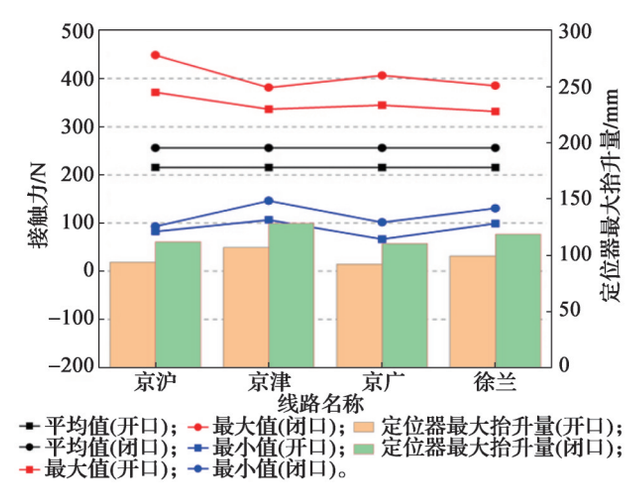


图 14　4 条典型线路不同开闭口运行方向的接触力与抬升量变化

Fig. 14　Changes in contact force and uplift in opening/closing operating directions of four typical railways

由图 14 可知，4 条典型线路均呈现出闭口运行时的定位器最大抬升量大于开口运行，这主要是由于受电弓在闭口运行时其前、后弓头碳滑板的受力差距较大，导致弓头与接触线之间的接触力作用不均匀，使得平均弓网接触力偏大，进而导致接触网定位器的最大抬升量偏大。

以京沪线上下行线 350 km/h 速度等级下不同运行方向的抬升量为研究对象，实测上下行线非锚段关节处的抬升量分布，测量结果如图 15~图 16 所示。

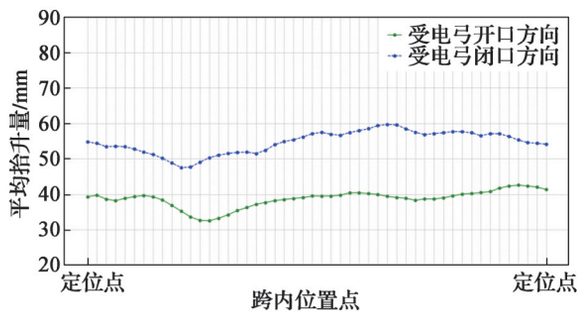


图 15　京沪高铁上行非锚段关节开口方向抬升量对比图（350 km/h）

Fig. 15　Comparison of uplifts at uninsulated overlaps in pantograph opening direction on Beijing-Shanghai high-speed railway in up traffic direction (350 km/h)

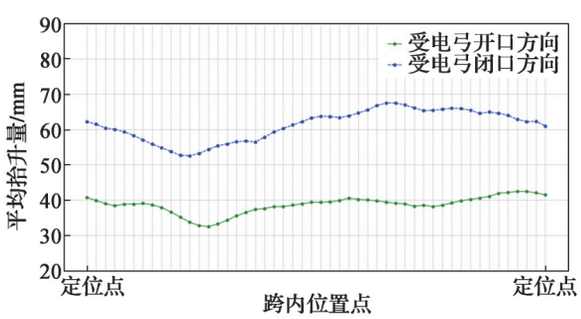


图 16　京沪高铁下行非锚段关节开口方向抬升量对比图（350 km/h）

Fig. 16　Comparison of uplifts at uninsulated overlaps in pantograph opening direction on Beijing-Shanghai high-speed railway in down traffic direction (350 km/h)

由图 15~图 16 可知，在同一速度等级下，受电弓闭口运行时的线路平均抬升量要明显高于开口运行时的测量结果。但是，对于京沪高铁的研究区段，受电弓开口运行和闭口运行时呈现出的接触线平均抬升量波形特征比较接近，抬升量的最小值都是出现在第 2 根吊弦附近；仅在吊弦间接触线的抬升有微小差别，闭口运行时的吊弦悬挂点特征较为明显，接触线抬升明显受到了限制。

4　结论

本文在接触线连续抬升量特性基础上确立特征提取、特征匹配和配准重采样的数据同步流程，采用智能识别定位点为主要特征进行空间同步，计算并分析了不同工况下接触线的抬升量，建立了“受电弓–接触网”动力学耦合仿真模型，仿真不同工况下的定位器抬升量变化，主要结论如下：

①4 条典型线路的定位器最大抬升量在运行速度 170~350 km/h 内都会随着运行速度的提升而增大，而且接触线抬升量随着运行速度增加有所升高，但是从总体的跨内抬升量分布波形来看，接触线抬升变化并不剧烈，平顺性较好，京沪线上下行线 300 km/h 和 350 km/h 这 2 个速度等级下跨内平均抬升量的极差都约为 10 mm。

②在 300 km/h 开口运行条件下，SSS400+受电弓的定位器动态最大抬升量为 61.17~81.44 mm，法维莱 CX-018 受电弓的定位器动态最大抬升量为 73.87~100.05 mm，DSA380 受电弓的定位器动态最大抬升量为 92.04~106.84 mm。

③在同一速度等级下，闭口运行时的接触线平均抬升量要高于开口运行。但是不论是受电弓开口运行，还是闭口运行，两者所呈现出的接触线平均抬升量波形特征都比较接近，抬升量最小值均出现在第 2 根吊弦附近，仅在吊弦间的接触线的抬升有微小差别，闭口运行时的吊弦悬挂点特征较为明显，接触线抬升明显受到了限制。

参考文献：

[1] 龙鹏 . 基于视频图像处理的接触线动态抬升量测量方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
LONG Peng. Research on measurement method of dynamic lifting of contact line based on video image processing[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.

[2] KUSUMI S, NEZU K, NAGASAWA H. Overhead contact line inspection system by rail-and-road car[J]. Quarterly report of RTRI, 2000, 41(4): 169-172.

[3] 凌朝清 . 弓网动态参数图像检测系统设计[D]. 天津: 天津大学, 2014.
LING Chaoqing. Image detection system design for dynamic parameters of pantograph-catenary system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[4] BOFFI P, CATTANEO G, AMORIELLO L, et al. Optical fiber sensors to measure collector performance in the pantograph-catenary interaction[J]. IEEE sensors journal, 2009, 9(6): 635-640.

[5] CERNIGLIA D, GARCIA G, KALAY S, et al. Application of laser induced ultrasound for rail inspection[EB/OL]. (2015-07-13) [2024-04-18]. https://www. researchgate. net/publication/267771450_Application_of_Laser_Induced_Ultrasound_for_Rail_Inspection.

[6] KARADUMAN G, KARAKOSE M, AKIN E. Deep learning based arc detection in pantograph-catenary systems[C]// IEEE. 2017 10th International Conference on Electrical and

Electronics Engineering. Bursa: IEEE, 2017: 904-908.

[7] 李宗荫, 郭迎庆. 基于单片机的接触网参数检测控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(8): 17-21.
LI Zongyin, GUO Yingqing. Design of control system for catenary parameters detection based on single chip microcomputer[J]. Electronic measurement technology, 2020, 43(8): 17-21.

[8] 孔龙飞, 韩通新, 刘寅秋. 基于二维图像直线标定的接触网几何参数测量方法[J]. 电气化铁道, 2019, 30(增刊 1): 42-46.
KONG Longfei, HAN Tongxin, LIU Yinqiu. Measurement methods of OCS geometric parameters by linear staking based on two-dimensional images[J]. Electric railway, 2019, 30(Suppl 1): 42-46.

[9] 胡碟, 金炜东, 唐鹏. 基于双尺度特征的铁路接触网吊弦检测[J]. 电工技术, 2020(15): 64-68.
HU Die, JIN Weidong, TANG Peng. Detection of railway dropper based on double scale features[J]. Electric engineering, 2020(15): 64-68.

[10] 闵锋, 郎达, 吴涛. 基于语义分割的接触网开口销状态检测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 77-81.
MIN Feng, LANG Da, WU Tao. The state detection of split pin in overhead contact system based on semantic segmentation[J]. Journal of huazhong university of science and technology(nature science edition), 2020, 48(1): 77-81.

[11] 翟婉明. 车辆-轨道垂向系统的统一模型及其耦合动力学原理[J]. 铁道学报, 1992(3): 10-21.
ZHAI Wanming. Unified model of vehicle-track vertical system and its coupling dynamics principle[J]. Journal of the China railway society, 1992(3): 10-21.

[12] 蔡成标, 翟婉明. 高速铁路受电弓-接触网系统动态性能仿真研究[J]. 铁道学报, 1997(5): 39-44.
CAI Chengbiao, ZHAI Wanming. Study on simulation of dynamic performance of pantograph-catenary system at high speed railway[J]. Journal of the China railway society, 1997, 19(5): 39-44.

[13] 张卫华, 梅桂明, 陈良麒. 接触线弛度及表面不平顺对接触受流的影响分析[J]. 铁道学报, 2000, 22(6): 50-54.
ZHANG Weihua, MEI Guiming, CHEN Liangqi. Analysis of the influence of catenary's sag and irregularity upon the quality of current-feeding[J]. Journal of the China railway society, 2000, 22(6): 50-54.

[14] 梅桂明, 张卫华. 受电弓/接触网系统动力学模型及特性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(1): 20-25.
MEI Guiming, ZHANG Weihua. Dynamics model and behavior of pantograph/catenary system[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2002, 2(1): 20-25.

[15] 刘怡, 张卫华, 梅桂明. 受电弓/接触网垂向耦合运动中接触网动应力研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(4): 23-26.
LIU Yi, ZHANG Weihua, MEI Guiming. Study of dynamic stress of the catenary in the pantograph/catenary vertical coupling movement[J]. Journal of the China railway society, 2003, 25(4): 23-26.

[16] 周宁, 张卫华. 基于直接积分法的弓网耦合系统动态性能仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 71-76.
ZHOU Ning, ZHANG Weihua. Dynamical performance simulation of the pantograph-catenary coupled system based on direct integration method[J]. China railway science, 2008, 29(6): 71-76.

[17] 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 Yang, LIU Zhigang, LU Xiaobing, 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.

[18] 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.

[19] 田珂, 高仕斌, 于金鑫. 基于 ADAMS 的地铁弓网耦合仿真分析[J]. 电气化铁道, 2018, 29(5): 51-54.
TIAN Ke, GAO Shibin, YU Jinxin. Analysis and simulation of ADAMS based subway pantograph-catenary coupling[J]. Electric railway, 2018, 29(5): 51-54.

[20] 吴燕, 吴俊勇, 郑积浩. 基于有限元和空气动力学模型的高速受电弓动态性能仿真[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(6): 855-859.
WU Yan, WU Junyong, ZHENG Jihao. Simulation of high-speed pantograph dynamic performance based on finite element model and aerodynamic pantograph model[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2009, 44(6): 855-859.

[21] 赵飞, 刘志刚, 张晓晓. 基于有限元的高速弓网系统动态性能仿真研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(8): 33-38.
ZHAO Fei, LIU Zhigang, ZHANG Xiaoxiao. Simulation of high-speed pantograph-catenary system dynamic performance based on finite element model[J]. Journal of the China railway society, 2012, 34(8): 33-38.

[22] 国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB 10621—2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
National railway administration of the people's republic of China. Code for design of high speed railway: TB 10621—2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.

[23] 国家铁路局. 城际铁路设计规范: TB 10623—2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
National railway administration of the people's republic of China. Code for design of intercity railway: TB 10623—2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.

[24] 刘志刚, 宋洋. 典型高铁线路弓网关系仿真分析[Z]. 成都: 西南交通大学, 2021.

LIU Zhigang, SONG Yang. Simulation analysis of pantograph catenary relationship on typical high-speed railway lines[Z]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021 .

[25] BRUNI S, AMBROSIO J, CARNICERO A, et al. The results of the pantograph-catenary interaction benchmark[J]. Vehicle system dynamics, 2015, 53(3): 412-435.

[26] 宋洋 . 环境风下高速铁路弓网动态受流特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

SONG Yang. Study on high-speed railway pantograph-catenary current collection quality under environmental wind load[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[27] SHAFER J C, AGRAWAL R, MEHTA M. SPRINT: a scalable parallel classifier for data mining[C]//ACM. Proceedings of the 22th International Conference on Very Large Data Bases. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1996: 544-555.

Research on dynamic uplift of contact wires in high-speed railway

TANG Yang

(China Railway Construction Electrification Bureau Group Southern Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China)

Abstract: This paper aims to study the dynamic behaviors of the pantograph-catenary system for high-speed railway lines, focusing on the overall uplift data of contact wires. To achieve this, models of overhead contact systems (OCS) were established for four typical high-speed railway systems, along with three-degree-of-freedom models with reduction parameters for three types of high-speed pantographs. Moreover, the penalty function method was introduced to simulate pantograph-catenary interactions, leading to the establishment of a pantograph-catenary coupling model that was then utilized to simulate uplift changes of contact wire steady arms under different operating speeds and directions. Subsequently, an intelligent locating point recognition and classification method was proposed, based on the random forest algorithm. By using the inflection points of contact wire staggers as locating points, and leveraging existing detection data for the geometric parameters of the overhead contact systems, the voting results from the random forest algorithm were considered standards for determining the final locating points. Furthermore, a classification model was established to optimize the locating point data. After preprocessing the data obtained from the dynamic and static measurements of contact wire uplift, optimizing the locating points, and performing data spatial synchronization, continuous contact wire uplifts were ultimately generated. The research results indicate that the maximum uplift of the four typical steady arms increases with the increase in train operating speeds within the range of 170 km/h to 350 km/h. Under the conditions of 300 km/h and pantograph opening operation, the dynamic maximum uplift of steady arms for SSS400+ pantographs is smaller than that for the Faiveley CX-018 and DSA380 pantographs. The maximum uplifts ranged from 61.17 mm to 81.44 mm. Under specific OCS parameters, the average uplift of the contact wires during operation in the pantograph closing direction is higher than that during operation in the opening direction.

Keywords: high-speed railway; overhead contact system (OCS); contact wire uplift; data collection; pantograph-catenary coupling; high-speed train; finite element method

收稿日期：2024-01-19；修回日期：2024-04-29