DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.129

环境温度对地铁刚性接触网弹性与弓网受流质量影响研究

杨　岗，吕　琨，孔国伟，沈　鑫，李　芾
（西南交通大学 机械工程学院，四川 成都 610031）

摘　要：近年来全国地铁大面积发生弓网异常磨耗事件，特别是冬季异常磨耗已然成为常态，2022年全国有30余条地铁线路出现此现象，经济损失达数亿元。为了研究环境温度对弓网关系的影响，文章首先建立了某地铁线路刚性接触网有限元模型，计算得到环境温度–20~20 ℃下接触网刚度曲线，并分析了环境温度对接触网刚度影响规律；然后，构建地铁变刚度弓网耦合动力学模型，依据EN 50119等标准验证了其准确性，并计算了环境温度（–20~20 ℃）、列车运行速度（40~90 km/h）、受电弓静抬升力（70~160 N）、定位线夹卡滞工况下的弓网接触力，着重分析了环境温度对弓网接触力、弓网受流质量的影响规律。结果表明：环境温度与弓网接触力、受流质量具有强正相关性，当环境温度低于0 ℃时，弓网受流指标将严重恶化；线夹卡滞会对弓网接触力、受流质量带来恶劣影响，而且行车速度越高影响越大。

关键词：刚性接触网；环境温度；接触网刚度曲线；弓网接触力；受流质量；弓网耦合动力学

中图分类号：U231　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-128X（2024）01-0152-14

0　引言

截至2023年，国内已有48座城市开通地铁线路。架空刚性接触网以其结构紧凑简单、施工方便、工程造价低、安全可靠、可维护性高、供电间距长、适应速度较高等优点，成为当前我国地铁线路主要的接触网形式[1]。虽然刚性接触网具有诸多优点，但由于刚性接触网弹性差、地铁列车供电电流大、线路条件复杂、列车频繁加减速等特点，相比于柔性网更易发生弓网关系异常的情况。

弓网相对滑动并接触取电，必然存在接触副（碳滑板与接触线）磨耗现象，在正常情况下碳滑板的磨耗量为1 mm/万km左右，但是从已开通的地铁线路来看，大部分存在严重的弓网异常磨耗现象[2]。特别是近年来，季节性异常磨耗——冬季异常磨耗已成为常态，但至今没有明确其发生原因，也没有提出有效的解决方法。2020年12月，某城市地铁4号线运行的碳滑板出现严重的磨耗异常现象，磨耗量达36 mm/万km，甚至出现碳滑板磨穿引发降弓的事件，致使碳滑板更换周期从每年变为每周，而每根碳滑板的费用高达数千元，从事故发生的12月到次年1月，更换碳滑板及打磨接触网的费用超过500万元。据不完全统计，2022年全国有30余条地铁线路出现弓网异常磨耗情况，年经济损失高达数亿元。

地铁弓网磨耗与接触网拉出值、导高、碳滑板材料、弓网接触力、弓网摩擦因数、电流、接触温度、电弧等诸多物理量有关，其中弓网接触力是最关键的因素，接触力太大会增加弓网机械磨耗，太小又会加剧电气磨耗，同时接触力也直接影响接触温度、电流、电弧等。

环境温度低是冬季地铁刚性接触网工作环境的主

基金项目：国家重点研发计划（2020YFB1200300ZL）；四川省重点研发项目（2023YFG0063）
通信作者：杨　岗(1973—)，男，博士，硕士研究生导师，研究方向为交通设备故障诊断及控制工程、人工智能与大数据分析、弓网动力学与主动控制；E-mail: yanggang@swjtu.cn
引用格式：杨岗, 吕琨, 孔国伟, 等. 环境温度对地铁刚性接触网弹性与弓网受流质量影响研究[J]. 机车电传动, 2024(1): 152-165.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.129..

Citation：YANG Gang, LYU Kun, KONG Guowei, et al. Influence of environmental temperature on the elasticity of rigid catenary and pantograph-catenary current collection quality of subway lines[J]. Electric drive for locomotives,2024(1): 152-165.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.129.

要特征，因此通过动力学仿真手段研究环境温度对弓网接触力的影响规律是研究并解决弓网冬季异常磨耗的有效思路。

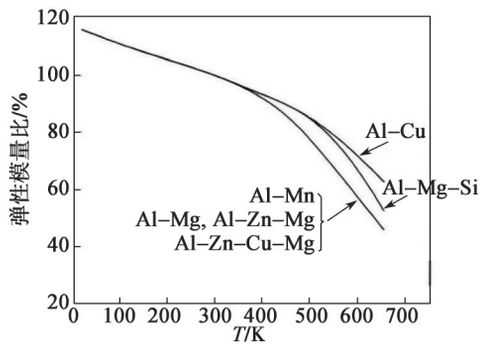
国内外学者针对刚性接触网建模、刚度研究与弓网动态性能分析已有一定的研究。文献[3]依据弹性势能和动能相等原理建立刚性接触网等效模型和弓网耦合动力学模型，但具有建模复杂、计算效率较低等特点。文献[4-6]采用刚性接触网变刚度弹簧模型，进行了地铁弓网耦合动力学仿真。文献[7]研究跨距分布、悬挂机构的刚度和静态抬升力等对弓网接触压力的影响。文献[8]讨论了材料弹性模量、跨距布置对弓网接触力的影响，分析表明当材料选用较小弹性模量（即刚度较小）时，弓网受流质量较优，接触力的变化幅度较小。针对环境温度变化对弓网系统的影响研究，大多集中在高铁柔性接触网领域。文献[9]通过改变温度变化范围和悬挂点卡滞位置，模拟汇流排在定位线夹卡滞时温度应力对刚性悬挂的影响，模拟结果表明汇流排温度变化程度的增大会影响悬挂系统的稳定可靠性。文献[10]建立了环境温度对柔性接触网系统影响的扩展数学模型，研究了环境温度对接触线张力和位移的影响，分析表明环境温度对接触线纵向位移的影响是显著的。文献[11]研究了在不同垂跨比和激励幅值条件下温度对悬索线性和非线性振动特性的影响，分析表明温度的变化会定性地改变结构的非线性自由和强迫振动特性。

综上所述，弓网接触力是影响弓网关系和磨耗的重要因素，但目前尚没有文献系统地研究冬季温度降低对地铁弓网接触力的影响。本文首先计算地铁刚性接触网刚度曲线，并分析其随环境温度的变化规律；然后利用地铁弓网变刚度弹簧弓网耦合动力学模型研究环境温度对弓网接触力和弓网受流质量的影响规律，这对于探明地铁弓网冬季异常磨耗的机理有十分重要的意义。

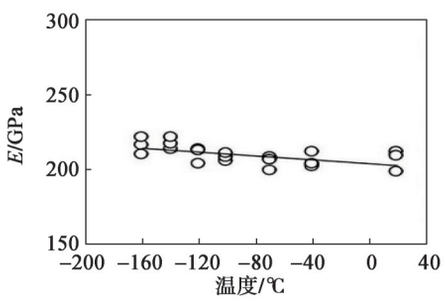
1　环境温度对材料弹性模量的影响

材料的性能和结构参数决定了材料在受力情况下的变形量，文献[8]通过理论推导得出，材料的刚度由材料的弹性模量、横截面积和厚度决定。材料的弹性模量反映了材料抵抗变形的能力，是描述构件刚度性能的重要参数，而温度的变化是引起弹性模量参数变化的重要因素。刚性接触网构件主要由结构钢、铝合金和陶瓷材料组成，其材料的弹性模量随着温度变化趋势如图 1 所示[12-14]。

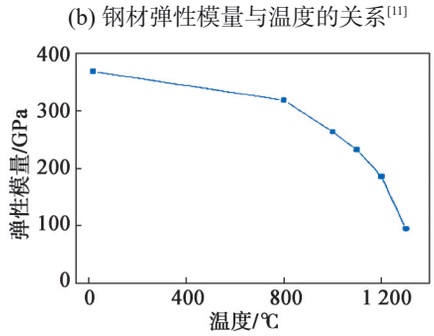
由图 1 曲线形态随温度变化可知，结构钢、铝合金和陶瓷的弹性模量均呈现随着温度的降低而增加的趋势。基于此本文分别设置温度工况为 −20 ℃、−10 ℃、0 ℃、10 ℃、20 ℃，对应工况下材料弹性模量数据如表 1 所示。



(a) 铝合金在不同温度下弹性模量与室温下的比值[10]



(b) 钢材弹性模量与温度的关系[11]



(c) 不同温度下陶瓷的弹性模量[12]

图 1　材料弹性模量随温度变化曲线

Fig. 1　Curve of change in material elastic modulus with temperature

表 1　各温度工况下材料的弹性模量

Table 1　Elastic modulus of materials under various temperatures conditions　　GPa

材料	温度/ ℃				
	−20	−10	0	10	20
结构钢	205.48	205.04	204.12	203.69	203.15
铝合金	69.99	69.79	69.20	68.60	68.60
陶瓷	371.69	371.01	370.32	369.64	370.60

2　地铁接触网刚度计算

2.1　某地铁刚性接触网

国内地铁接触网主要采用架空刚性接触网形式，其主要由悬挂机构、汇流排和接触线构成，如图 2 所示。

“π”型汇流排具有弹性较好，施工与维修成本低等特点，在地铁线路得到广泛应用。门型结构是悬挂的主要形式，其断面结构如图2所示，包括T型螺栓、悬吊槽钢、绝缘子、定位线夹等部件，如图3所示。



(a) 地铁刚性接触网总体



(b) 刚性接触网悬挂机构

图2 地铁架空刚性接触网

Fig. 2 Subway overhead rigid catenary

本研究基于某地铁运营线路中一个长度为203.9 m的锚段进行，建立其有限元模型，并进行接触网刚度计算，图4为锚段平面布置图的一部分。悬挂点指定位线夹作用于汇流排的夹持点，本文统称其为定位点，而相邻定位点间的距离称为跨距。接触网跨距和拉出值均会随接触网位置不同而发生变化，拉出值变化范围为±250 mm。基于跨距分布形式，将接触网分为悬

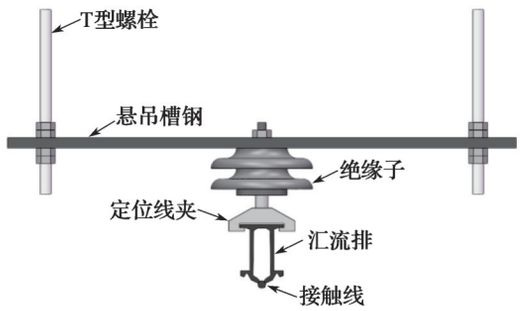


图3 架空刚性接触网截面图

Fig. 3 Section of overhead rigid catenary

臂跨、过渡跨和标准跨3部分，本研究的锚段跨距分布形式如表2所示。

表2 接触网跨距分布

Table 2 Distribution of rigid catenary span m

分布形式	跨距	分布形式	跨距
悬臂跨1	1.8+2	过渡跨2	7×4+6+5
过渡跨1	5+6×2+6.5+7×2	悬臂跨2	2+1.8
标准跨	8×14+7.8		

2.2 地铁接触网有限元模型

为获取前文选取的接触网锚段的刚度曲线，建立其有限元计算模型，同时也考虑节省算力，做如下假设：①由于接触线与汇流排夹持固定在一起，并且在受力接触线变形时相比于汇流排形变要小得多，因此建模时将汇流排与接触线进行固结，视为一体；②接触网的横向变形或位移对弓网接触压力影响较小，故本文只考虑接触网垂向变形和垂向刚度。

依据实际结构尺寸参数建立悬挂机构、汇流排、接触线三维实体模型，装配得到整锚段接触网三维模型，然后导入ANSYS有限元软件中进行网格划分。

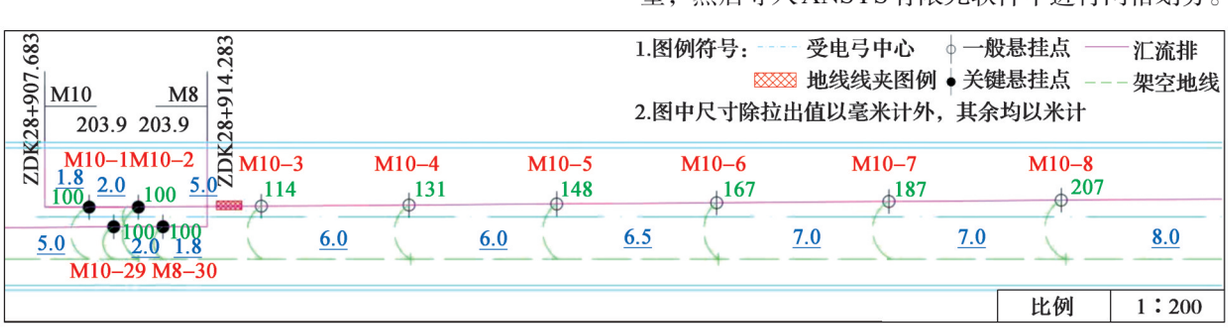


图4 刚性接触网平面布置图

Fig. 4 Layout plan of rigid catenary

划分步骤：①汇流排和接触线实体采用Hexa Dominat六面体的多区域网格，单元大小4 mm；槽钢采取面网格划分，网格大小为10 mm，并与数量为10的边分区相结合，其余部分均采取网格划分策略。②对模型材料进行配置：T型螺栓和螺母采用结构钢材料；悬吊槽钢、定位线夹和汇流排采用铝合金材料；针式绝缘子采用陶瓷材料。③设置边界条件，选取所有T型螺栓顶部为固定支撑约束，对所有部件加载重力场。④依次设置模型接触对：螺栓与螺母、绝缘子与螺母、定位线夹与绝缘子，接触对类型为绑定接触；线夹与汇流排的接触对类型为摩擦接触，并设置摩擦因数为0.3。

环境温度对接触网刚度影响的本质原因为：①温度改变了材料的弹性模量；②温度变化引起的结构收

缩导致了定位线夹卡滞汇流排。因此，本研究通过改变材料弹性模量和设置卡滞来研究温度对接触网刚度的影响。

2.3　接触网刚度计算与分析

刚性接触网刚度计算参照 EN 50119[15]标准进行，计算公式为

$$K=\frac{P}{Y(x)}=\frac{P}{Y_{\mathrm{GT}x}-Y_{\mathrm{FT}x}} \tag{1}$$

式中：K为接触网在接触网位置x处的刚度值；P为施加在接触线上的抬升力；$Y(x)$为在抬升力下接触线在位置x处的相对抬升量；$Y_{\mathrm{GT}x}$为在环境温度T下由重力作用引起的接触网产生的垂向位移；$Y_{\mathrm{FT}x}$为在环境温度T下施加抬升力F后接触网产生的垂向位移。

在接触网刚度曲线计算过程中，选取特定位置计算刚度样点，然后经样条插值法得到整锚段刚度曲线。本次研究选择了343个取样点，其中多数在定位点处和跨中处。首先，设置边界条件，得到纯重力下各取样点的垂向位移；然后，计算若干个抬升力作用下的接触网取样点处的垂向位移，依据式(1)计算得到取样点刚度值；最后，通过样条插值法得到接触网整锚段的刚度曲线。

2.3.1　不同抬升力作用下的接触网刚度

设置环境温度为20 ℃，并依次设置抬升力为100 N、200 N、300 N、400 N、500 N、600 N，分别计算相应的接触网刚度曲线。为对比各抬升力下刚度曲线变化趋势，使用接触网刚度比例系数进行表征，其计算公式为

$$K_{\mathrm{F}i}=\frac{G_i}{G_{100}} \tag{2}$$

式中：G_i为相应抬升力下的接触网刚度；G_{100}为100 N抬升力下的接触网刚度值；$i=1, 2, 3, 4, 5$，分别对应200 N、300 N、400 N、500 N、600 N抬升力工况。

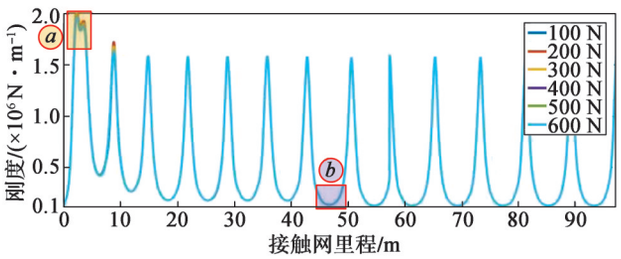
图5(a)为不同抬升力作用下的接触网刚度曲线，图5(b)为不同抬升力作用下接触网刚度比例系数曲线。由图5可知，抬升力对接触网刚度的影响主要集中于前3个和最后3个定位点处，并且影响较小。

为分析抬升力对定位点处接触网刚度的影响规律，选取图5(a)中a处和b处进行局部放大，如图6所示。由图6(a)可知，在抬升力分别为200 N和300 N时，接触网刚度出现激增，但随着抬升力继续增加，刚度值则逐渐减小并趋于稳定。但由图6(b)可知，接触网跨中刚度值则没有明显变化。

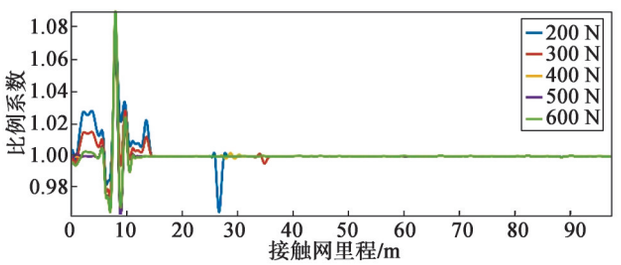
综上所述，一定范围内的接触网的抬升力对接触网刚度影响较小。

2.3.2　定位点跨距与拉出值对接触网刚度影响分析

由图4可知，刚性接触网不同位置的拉出值及其跨距分布都有所不同，为研究其对于接触网刚度值的影响，设置环境温度为20 ℃、抬升力为100 N，由式(1)计算得到整锚段刚性接触网刚度曲线，其如图7所示。



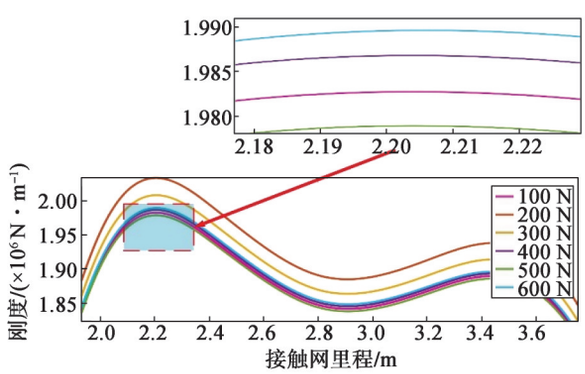
(a) 不同抬升力作用下的接触网刚度曲线(20 ℃)



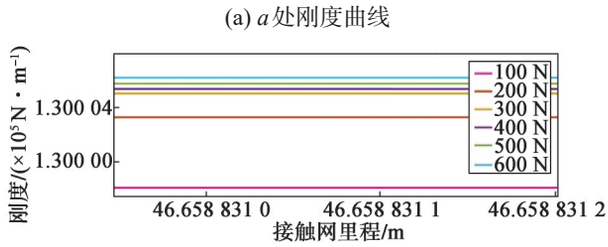
(b) 不同抬升力作用的接触网比例系数(20 ℃)

图5　不同抬升力作用下的接触网刚度曲线和比例系数

Fig. 5　Stiffness curve and ratio coefficient of catenary under various lifting forces



(a) a处刚度曲线



(b) b处刚度曲线

图6　a处和b处刚度曲线局部放大图

Fig. 6　Partial enlarged view of stiffness curve at a and b

由图7可知，过渡跨和标准跨的接触网刚度呈现准周期变化趋势，定位点处的刚度最大，跨中刚度最小，二者相差较大，其差值达到了1.4×10^5 N/m，而且整跨刚度变化率大；悬臂跨受制于跨距过小，接触网刚度较之过渡跨和标准跨更大，其最大值发生在定位点附近，并且刚度曲线呈现局部双峰现象；过渡跨的跨中刚度随着跨距增大而减少。

综上所述，接触网刚度受跨距的影响较大，跨距

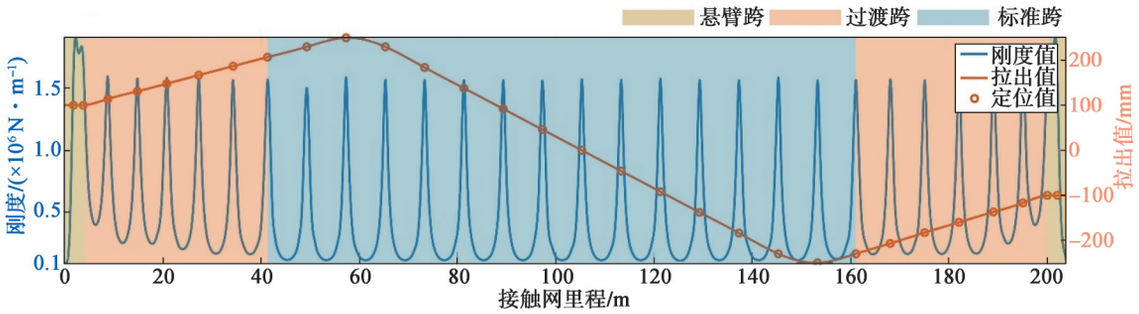


图7 刚性接触网刚度曲线

Fig. 7 Stiffness curve of rigid catenary

越大，则定位点处与跨中的刚度差越大，刚度分布均匀度越差。

标准跨跨距一致，但由于拉出值不同，每跨的刚度稍有不同。表3为标准跨的若干定位点处刚度与拉出值的对应关系数据，表4为标准跨的若干个跨中刚度值与拉出值的对应关系数据。

由表3和表4可知，随着拉出值的增加，定位点处刚度和跨中刚度均呈现小幅增加趋势。这是由接触网“之”字形结构引起的，但是相比于跨距其影响程度较小。

表3 标准跨定位点处的刚度值与拉出值

Table 3 Stiffness value and stagger value at the standard span positioning point

接触网里程/m	刚度/(×10⁶N·m⁻¹)	拉出值/mm
57.3	1.604 6	250
73.3	1.583 5	184
89.3	1.581 0	92
105.3	1.578 6	0
121.3	1.582 3	−92
137.3	1.591 9	−184
153.3	1.599 2	−250

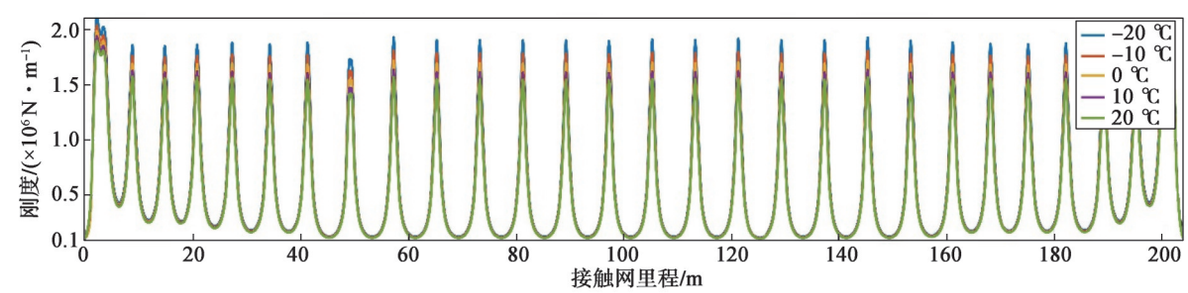
表4 标准跨跨中刚度值与拉出值

Table 4 Standard mid span stiffness and stagger values

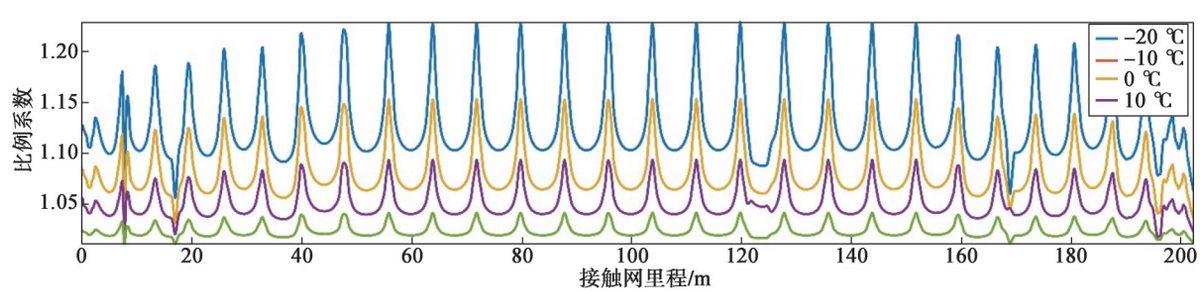
接触网里程/m	刚度/(×10⁶N·m⁻¹)	拉出值/mm
61.3	1.204 6	245
77.3	1.204 1	161
93.3	1.203 7	69
109.3	1.202 4	−22
125.4	1.203 1	−115
141.3	1.204 3	−207
149.4	1.210 2	−245

2.3.3 不同温度下接触网刚度

为获得−20 ℃、−10 ℃、0 ℃、10 ℃、20 ℃环境温度下的接触网刚度曲线，在有限元模型中设置与上述温度对应的悬挂、汇流排、线夹、绝缘子材料的弹性模量，进行数值计算，并拟合得到对应温度下的接触网刚度曲线，如图8(a)所示。



(a) 100 N下各温度刚度曲线



(b) 比例系数图

图8 各温度下刚度曲线及比例图

Fig. 8 Stiffness curves and scale diagrams at various temperatures

为研究温度对接触网刚度的影响，使用接触网刚度温度比例系数进行表征，接触网刚度温度比例系数计算公式为

$$K_{Tj}=\frac{G_j}{G_{20}} \tag{3}$$

式中：G_j为相应温度下的接触网刚度；G_{20}为20 ℃下接触网刚度；$j=1, 2, 3, 4, 5$，分别对应环境温度−20 ℃、−10 ℃、0 ℃、10 ℃、20 ℃。

计算得到接触网刚度温度比例系数曲线，如图8(b)所示。

由图8(a)可知，接触网刚度的准周期分布规律并没有随温度改变而变化。由图8(b)可知，接触网刚度随温度降低而逐渐增加，定位点处刚度受温度影响最大，而对跨中刚度的影响不明显；相比于过渡跨和悬臂跨，标准跨的刚度曲线受温度影响更大。

2.3.4　线夹卡滞时接触网刚度计算与分析

刚性接触网的汇流排和接触线通过定位线夹与隧道顶部槽钢等装置固定连接，在设计安装时考虑到汇流排在长时间运行过程中会出现轻微位移，所以定位线夹与汇流排之间留有一定间隙。而温度变化引起的汇流排热胀冷缩，使得相对间隙减少，甚至消失，从而引发线夹卡滞情况，如图9所示。线夹卡滞会导致接触网刚度局部骤增，从而严重影响弓网关系[16]。

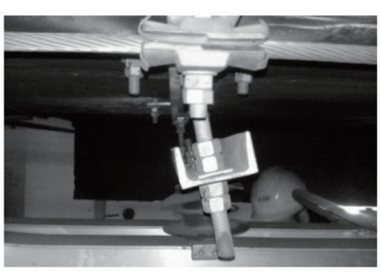


图9　定位线夹卡滞现场图

Fig. 9　Scene pictures of stuck clamps

当卡滞发生时，汇流排和定位线夹可近似等同于固定接触，为研究定位线夹卡滞对接触网刚度的影响，在仿真软件ANSYS中将对应卡滞处的定位线夹与汇流排接触对类型设置为绑定接触。

在本文涉及的卡滞研究中，选择环境温度为0 ℃和10 ℃，卡滞点的位置设置如图10所示。

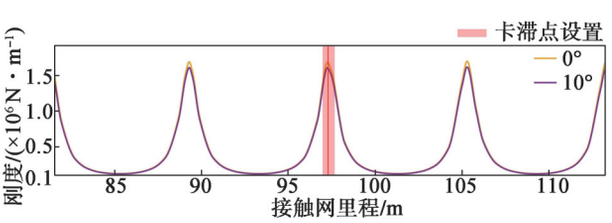
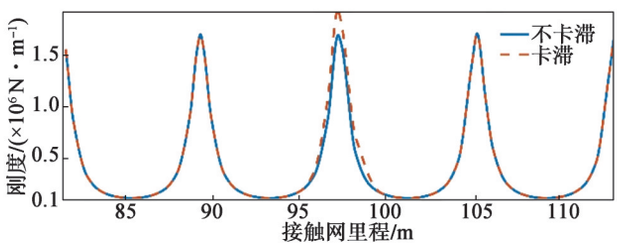


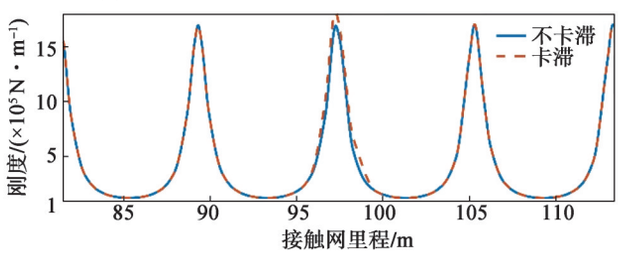
图10　卡滞点设置

Fig. 10　Sticking point setting

分别计算得到在0 ℃和10 ℃环境条件下线夹发生卡滞和不卡滞情况下的接触网刚度曲线，如图11所示。由图11可知，当线夹发生卡滞时，在定位点附近接触网刚度会产生突变：在0 ℃时定位点处的刚度增加了14.46%，而在10 ℃时定位点处的刚度增加了6.28%。这表明线夹卡滞会对刚性接触网刚度产生重要影响，并且影响程度随着温度降低而加剧，可能对弓网受流质量产生恶劣影响。



(a) 线夹卡滞与否的接触网刚度曲线(0 ℃)



(b) 线夹卡滞与否的接触网刚度曲线(10 ℃)

图11　0 ℃和10 ℃线夹卡滞与否的接触网刚度曲线

Fig. 11　Stiffness curves of rigid catenary with and without stuck clamps at 0 °C and 10 °C

3　地铁弓网动力学模型及验证

3.1　弓网动力学模型

弓网系统是十分复杂的非线性动力学系统，为便于研究，可将接触网视为变刚度弹簧，受电弓则被简化为二元质量模型，从而得到图12所示的弓网耦合动力学模型[17]。

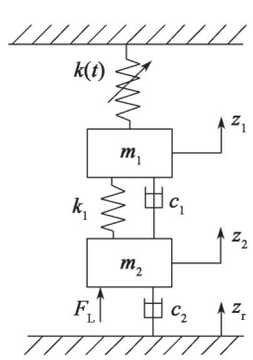


图12　弓网耦合模型

Fig. 12　Coupling model of pantograph and rigid catenary

在图12中，m_1、m_2分别代表受电弓弓头和框架等效质量；c_1代表受电弓弓头与框架间阻尼；c_2代表框架与弓座间阻尼；F_L为施加在受电弓上的静态抬升力；k_1为受电弓弓头与框架间刚度；z_1、z_2分别为受

电弓弓头和框架的位移；z_r为车体激扰信号。由此可得到弓网动力学方程为

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1+c_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} k_1+k(\mathrm{t}) & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ F_L+c_2\dot{z}_r \end{bmatrix} \tag{4}$$

弓网接触力$F_C(t)$可表示为

$$F_C(t)=k(t)\cdot z_1 \tag{5}$$

式中：$k(t)$为地铁刚性接触网刚度。

受电弓参数则参照文献[17]，取$m_1=8$ kg，$m_2=12$ kg，$c_1=120$ N·s/m，$c_2=30$ N·s/m，$k_1=10$ kN/m，z_r为限幅0.01 m的白噪声信号。

3.2 模型验证

接触力是影响弓网关系的关键因素，弓网仿真计算的正确性可由计算得到的接触力的分布情况进行验证。相关国际铁路标准规定了不同列车运行速度下弓网接触压力统计值范围，本研究以此作为仿真模型计算结果的验证依据。

基于MATLAB软件建立弓网耦合动力学仿真计算模型，设置环境温度为20 ℃、列车速度为70 km/h，进行数值计算，从而得到弓网接触压力时域响应，其接触力指标包括接触力平均值F_m、接触力标准差σ、接触力最大值F_{max}、接触力最小值F_{min}、接触力不均匀系数c、$F_m-3\sigma$、$0.3F_m-\sigma$，结果如表5所示。

表5 弓网接触压力计算指标仿真结果

Table 5 Simulation results of pantograph-catenary contact pressure calculation index N

指标	数值	指标	数值
F_m	119.998	F_{min}	97.536
σ	2.570	$F_m-3\sigma$	112.288
F_{max}	142.589	$0.3F_m-\sigma$	33.429

由表5可知，$F_m-3\sigma>0$，$F_{max}<300$ N，$F_{min}>0$，这说明本文建立仿真模型满足EN 50119: 2009的要求；$0.3F_m-\sigma>0$，这说明仿真模型满足EN 50367: 2006的要求；$F_m-3\sigma>0.1F_m$，这说明仿真模型满足欧盟铁路互操作性技术规范TSI的要求。由此证明了本文建立的弓网耦合模型的正确性。

4 环境温度对弓网受流质量影响分析

弓网系统通过弓网间的相对滑动接触取电，弓网接触力波动异常会导致弓网受流质量变差和受电弓碳滑板异常磨耗，本章基于F_{max}、F_{min}、F_m、σ、c等指标以及箱线图，分析环境温度对弓网受流质量的影响。其中，接触力不均匀系数c的计算公式为

$$c=\frac{1}{F_m}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(F_i-F_m)}{n-1}} \tag{6}$$

式中：n为接触力采样点数；F_i为第i个采样时刻的弓网接触力。

4.1 环境温度对弓网接触力影响分析

基于前文建立的−20 ℃、−10 ℃、0 ℃、10 ℃、20 ℃环境温度下的接触网刚度曲线和弓网动力学仿真模型，设置列车运行速度为70 km/h，进行数值计算，得到5挡环境温度下的弓网接触力时域响应。由于箱线图可以直观地反映数据序列的中位数、尾长、异常值、离散程度、分布区间等形状信息，为了准确观察接触力波动情况，绘制各温度下的弓网接触力箱线图，如图13所示。

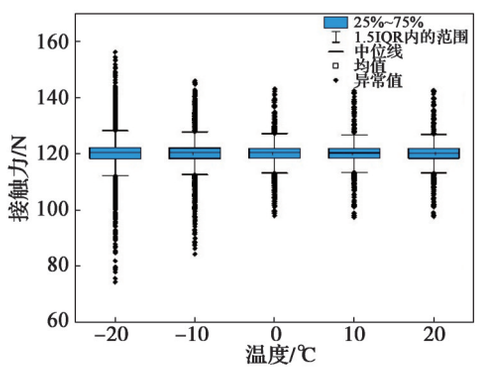


图13 各温度下弓网接触力箱线图

Fig. 13 Box plot of pantograph-catenary contact force at various temperatures

由图13可知，随着环境温度的降低，弓网接触力的离散程度变大，但当环境温度高于0 ℃时，离散程度趋于稳定。

为量化评价环境温度对弓网受流质量的影响，统计不同温度条件下弓网接触力指标F_{max}、F_{min}、F_m、σ、c等，如表6所示。

表6 不同温度下接触压力统计值

Table 6 Statistical values of contact pressure at different temperatures

参数名称	参数值				
	$T=-20$ ℃	$T=-10$ ℃	$T=0$ ℃	$T=10$ ℃	$T=20$ ℃
F_m/N	120.001	120.001	120.005	119.999	120.000
σ/N	4.630	3.965	2.935	2.702	2.575
F_{max}/N	156.301	145.992	143.109	142.847	142.589
F_{min}/N	74.255	84.190	97.863	96.983	97.536
c	0.038 6	0.033 0	0.024 5	0.022 5	0.021 5

对表6数据进行分析可知，随着温度的降低，σ、c、F_{max}不断增加，而且c在环境温度低于0 ℃时急剧增加。这说明弓网受流质量与环境温度有很强的正相关性，当环境温度低于0 ℃时，温度的降低会导致受流质量急剧恶化。

4.2　车速/环境温度对弓网接触力影响分析

为研究列车运行速度和环境温度双因素对弓网受流质量的影响，基于前文建立的接触网刚度曲线和弓网动力学仿真模型，针对列车运行速度40 km/h、50 km/h、60 km/h、70 km/h、80 km/h、90 km/h，环境温度为−20 ℃、−10 ℃、0 ℃、10 ℃、20 ℃工况进行数值计算，计算结果如图14所示。

由图14可知，随着列车运行速度的提高，弓网接触力的波动程度逐步加剧。

表7为当环境温度为−20 ℃和列车运行速度为40~90 km/h时对应的弓网接触力指标F_{max}、F_{min}、F_m、σ、c数值。

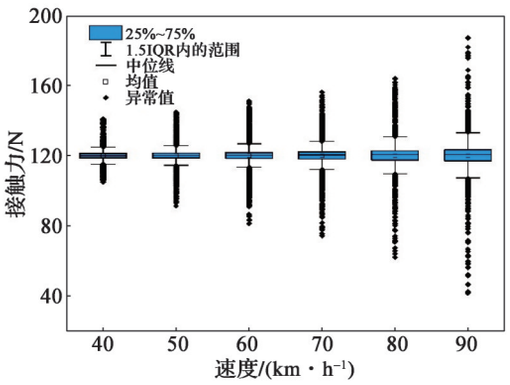


图14　不同列车速度下接触力箱线图(−20 ℃)

Fig. 14　Box plot of contact force at various train speeds at an ambient temperature of −20 °C

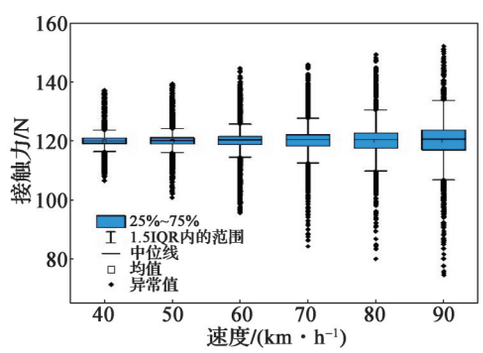
表7　不同速度下接触压力统计值

Table 7　Statistical values of contact pressure at different speeds

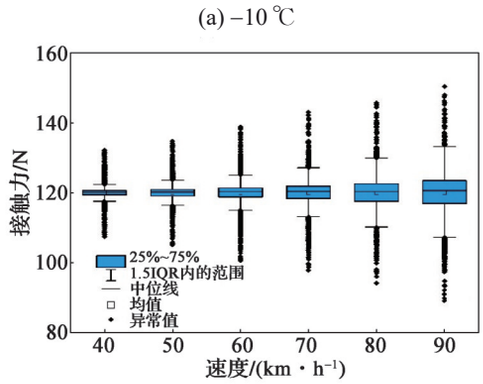
参数名称	参数值					
	v=40 km/h	v=50 km/h	v=60 km/h	v=70 km/h	v=80 km/h	v=90 km/h
F_m/N	120.000	120.000	120.000	120.001	120.000	120.006
σ/N	2.632	3.680	4.386	4.630	5.150	6.937
F_{max}/N	140.982	144.900	151.311	156.301	158.819	187.285
F_{min}/N	105.032	91.262	81.329	74.255	63.295	41.483
c	0.021 9	0.030 7	0.036 6	0.038 6	0.042 9	0.057 8

对表7进行分析可知，随着列车运行速度的提高，F_{min}变小，σ、c、F_{max}变大。这说明随着速度的增加，弓网间接触压力波动程度增大，弓网受流质量变差。

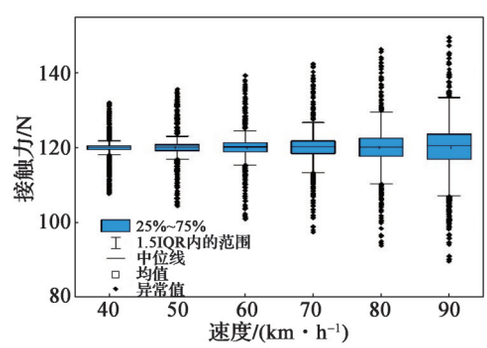
图15为当环境温度分别为−10 ℃、0 ℃、10 ℃、20 ℃和列车运行速度为40~90 km/h时对应的弓网接触力箱线图。



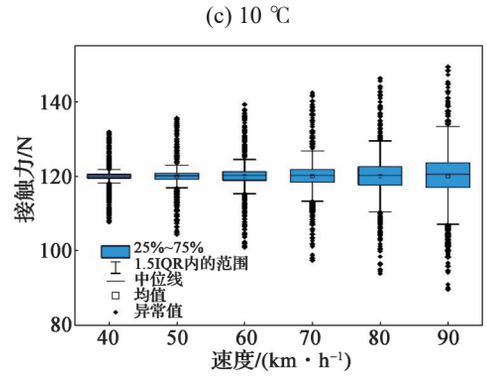
(a) −10 ℃



(b) 0 ℃



(c) 10 ℃



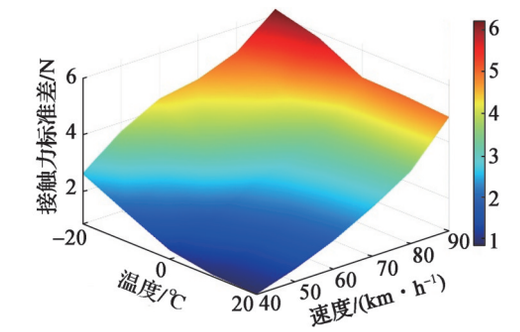
(d) 20 ℃

图15　不同温度与不同速度对应的接触力箱线图

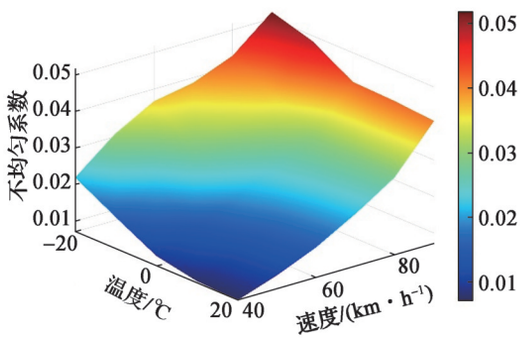
Fig. 15　Box plots of contact force at various speeds and temperatures

对图15进行分析可知，在不同的环境温度下，列车运行速度提高都会导致弓网接触力波动加大，二者具有正相关性。

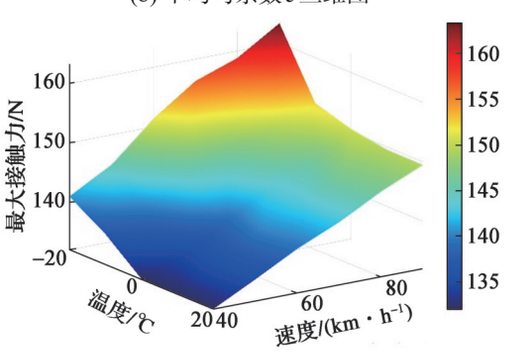
为观察环境温度和列车运行速度双因素对弓网接触力的影响，绘制弓网接触力标准差σ、不均匀系数c、最大接触力F_{max}、最小接触力F_{min}三维图，如图16所示。



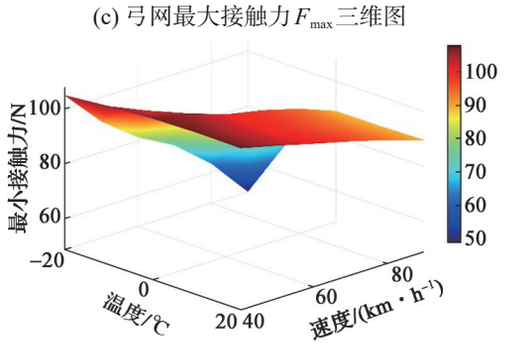
(a) 接触力标准差σ三维图



(b) 不均匀系数c三维图



(c) 弓网最大接触力F_{max}三维图



(d) 弓网最小接触力F_{min}三维图

图16 接触力指标与温度、运行速度三维图

Fig. 16 Three dimensional diagram of contact force index, temperature and operating speed

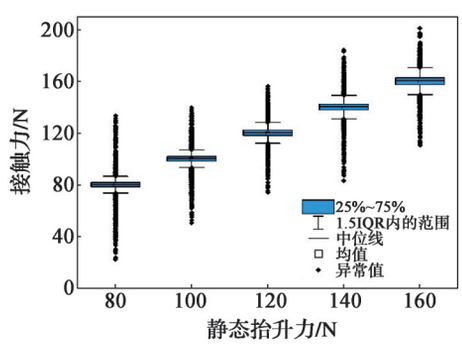
由图16可知，接触力标准差σ和不均匀系数c均随着环境温度降低和列车运行速度提高而增加，弓网最大接触力F_{max}随着环境温度的降低和列车运行速度的提高而增加，弓网最小接触力F_{min}随着环境温度的降低和列车运行速度的提高而减小。这表明当环境温度降低和列车运行速度提高时，弓网动态耦合性能变差，弓网受流质量下降。这是由于温度降低会使刚性接触网刚度变大，列车运行速度提高会导致弓网间冲击剧烈，从而引发弓网振动加剧。

4.3 静态抬升力/温度对弓网接触力影响分析

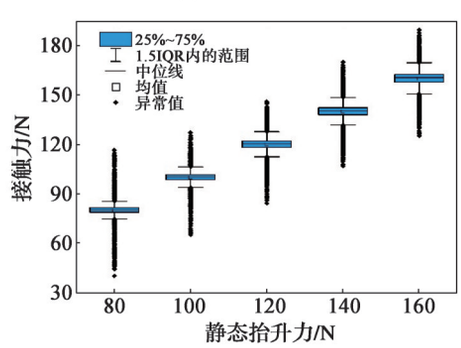
基于前文建立的接触网刚度曲线和弓网动力学仿真模型，设置受电弓工况的静抬升力F_L分别为80 N、100 N、120 N、140 N、160 N，地铁列车运行速度v为70 km/h，进行数值计算，得到弓网接触力时域响应。

绘制不同环境温度（−20 ℃、−10 ℃、0 ℃、10 ℃、20 ℃）和不同受电弓静态抬升力的弓网接触力箱线图，如图17所示。

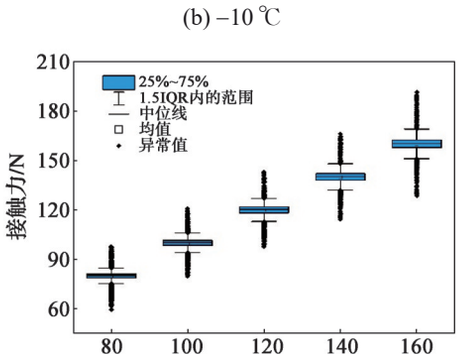
由图17可知，当环境温度为−20 ℃、受电弓静态抬升力为120 N时，弓网接触力离散程度最小，异常值最少；当环境温度为−20 ℃和−10 ℃、受电弓静态抬升力小于120 N时，弓网接触力离散程度高、异常值多，而受电弓静态抬升力不小于120 N时，异常值则有明显



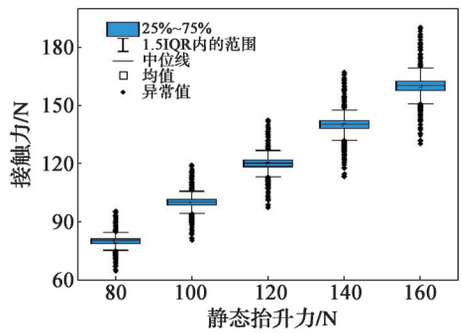
(a) −20 ℃



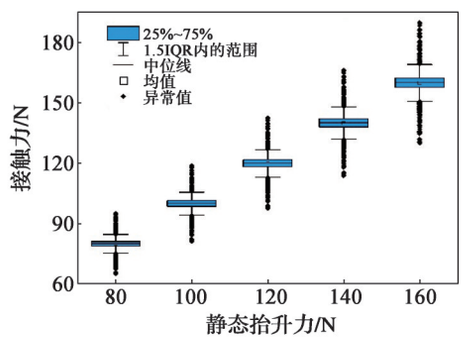
(b) −10 ℃



(c) 0 ℃



(d) 10 ℃



(e) 20 ℃

图 17　各速度在各温度工况下接触力箱线图

Fig. 17　Box plot of contact force at various speeds and temperature conditions

改善；在环境温度为 0 ℃、10 ℃和 20 ℃的条件下，弓网接触力离散程度与受电弓静态抬升力相关性不明显。

表 8~表 12 为受电弓静抬升力分别为 80 N、100 N、120 N、140 N、160 N 时，不同环境温度下的 F_{max}、F_{min}、F_m、σ、c。

表 8　不同静态抬升力对应的接触力统计值(−20 ℃)

Table 8　Statistical values of contact force under different static lifting forces at −20 ℃

参数名称	参数值				
	F_L = 80 N	F_L = 100 N	F_L = 120 N	F_L = 140 N	F_L = 160 N
F_m/N	79.987	100.006	120.001	140.005	160.001
σ/N	5.079	4.620	4.630	5.304	5.525
F_{max}/N	133.454	139.906	156.301	184.373	201.072
F_{min}/N	22.338	50.521	74.255	83.190	110.611
c	0.063 5	0.046 2	0.038 6	0.037 9	0.034 5

表 9　不同静态抬升力对应的接触力统计值(−10 ℃)

Table 9　Statistical values of contact force under different static lifting forces at −10 ℃

参数名称	参数值				
	F_L = 80 N	F_L = 100 N	F_L = 120 N	F_L = 140 N	F_L = 160 N
F_m/N	79.989	100.001	120.001	140.003	160.000
σ/N	3.656	3.438	3.965	4.122	4.500
F_{max}/N	116.554	127.226	145.992	170.166	189.594
F_{min}/N	40.179	65.085	84.190	106.855	125.260
c	0.045 7	0.034 4	0.033 0	0.029 4	0.028 1

表 10　不同静态抬升力对应的接触力统计值(0 ℃)

Table 10　Statistical values of contact force under different static lifting forces at 0 ℃

参数名称	参数值				
	F_L = 80 N	F_L = 100 N	F_L = 120 N	F_L = 140 N	F_L = 160 N
F_m/N	79.991	100.002	120.005	140.001	160.000
σ/N	2.345	2.613	2.935	3.239	3.737
F_{max}/N	97.846	120.851	143.109	166.234	191.657
F_{min}/N	59.550	79.818	97.863	114.370	128.758
c	0.029 3	0.026 1	0.024 5	0.023 1	0.023 4

表 11　不同静态抬升力对应的接触力统计值(10 ℃)

Table 11　Statistical values of contact force under different static lifting forces at 10 ℃

参数名称	参数值				
	F_L = 80 N	F_L = 100 N	F_L = 120 N	F_L = 140 N	F_L = 160 N
F_m/N	79.992	100.000	119.999	140.000	160.000
σ/N	1.825	2.242	2.702	3.104	3.506
F_{max}/N	95.716	119.423	142.847	167.220	190.371
F_{min}/N	64.608	80.458	96.983	113.319	130.173
c	0.022 8	0.022 4	0.022 5	0.022 2	0.021 9

表 12　不同静态抬升力对应的接触力统计值(20 ℃)

Table 12　Statistical values of contact force under different static lifting forces at 20 ℃

参数名称	参数值				
	F_L = 80 N	F_L = 100 N	F_L = 120 N	F_L = 140 N	F_L = 160 N
F_m/N	80.002	100.003	119.998	140.004	160.004
σ/N	1.721	2.151	2.570	3.011	3.442
F_{max}/N	95.060	118.824	142.589	166.354	190.119
F_{min}/N	65.024	81.280	97.536	113.791	130.047
c	0.021 5	0.021 5	0.021 4	0.021 5	0.021 5

由表 8~表 12 可以看出，在所有环境温度工况下，随着静态抬升力的增大，F_{max}、F_{min}、F_m、σ均出现增大趋势，但是 c 呈现减小趋势；在环境温度 −20 ℃和 −10 ℃下，c 会随着静态抬升力的增加而有明显的改善，尤其在静态抬升力不大于 120 N时，但是当静态抬升力继续增加，不均匀系数 c 则趋于稳定，而在环境温度为 0 ℃、10 ℃和 20 ℃时，静态抬升力的增加对不均匀系数 c 的影响则相对较小。

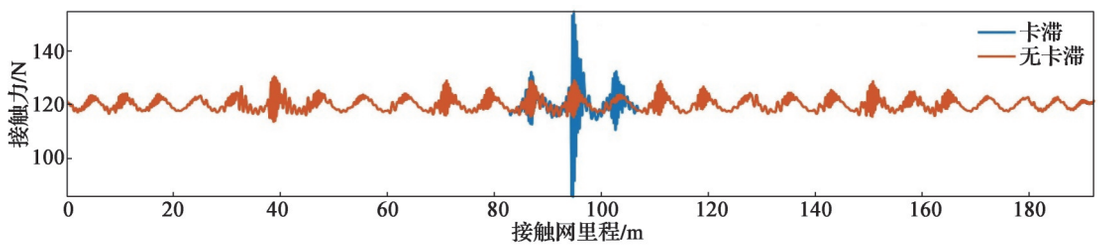
一方面，由于受电弓静抬升力的提高会导致弓网接触力增加，进而导致弓网磨耗加剧；另一方面，静抬升力太小又会导致弓网接触力小而引发电气磨耗加剧。因此，基于以上分析，建议在地铁运营中受电弓静抬升力的最优取值为 120 N。

4.4 线夹卡滞对弓网接触力影响分析

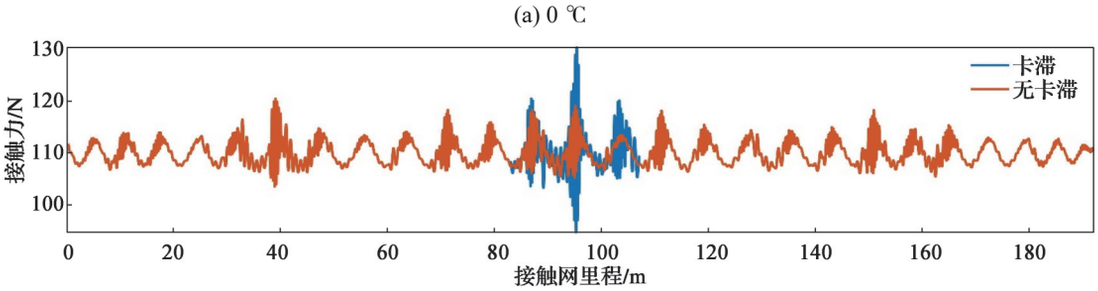
环境温度的降低可能会导致线夹卡滞汇流排，为研究卡滞对弓网受流性能的影响，基于前文已获得的线夹卡滞与无卡滞条件下的接触网刚度曲线和已建立的弓网动力学仿真模型，设置环境温度为0 ℃、10 ℃，列车运行速度为40 km/h、50 km/h、60 km/h、70 km/h、80 km/h、90 km/h，进行数值计算，得到线夹卡滞与无卡滞条件下的弓网接触力时域响应。

4.4.1 线夹卡滞对弓网受流质量影响分析

以列车运行速度70 km/h为例，分析线夹卡滞对弓网受流质量的影响。图18为当列车运行速度为70 km/h时，无线夹卡滞与有线夹卡滞条件下的整锚段弓网接触力时域响应图。由图18可知，线夹卡滞对弓网接触力的影响非常大，在环境温度分别为0 ℃和10℃的条件下发生线夹卡滞，会导致弓网接触力的突变增幅分别达到30%和15%以上，从而对弓网受流质量造成巨大影响。线夹卡滞附近处弓网接触力的局部放大如图19所示。



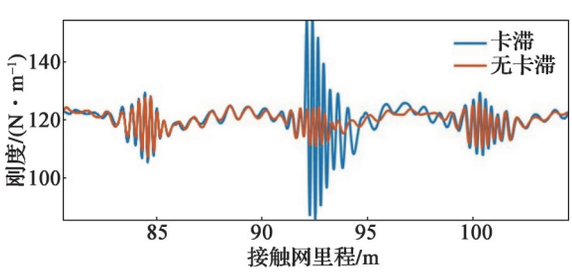
(a) 0 ℃



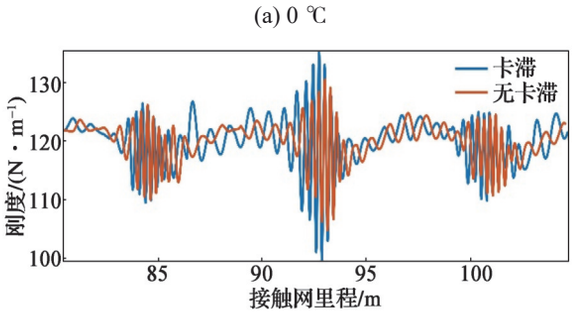
(b) 10 ℃

图18 不同环境温度下整锚段卡滞与不卡滞的弓网接触力对比图（v=70 km/h）

Fig. 18 Comparison diagram of pantograph-catenary contact force under stagnation and non stagnation of the entire anchor section at various environmental temperature (v=70 km/h)



(a) 0 ℃



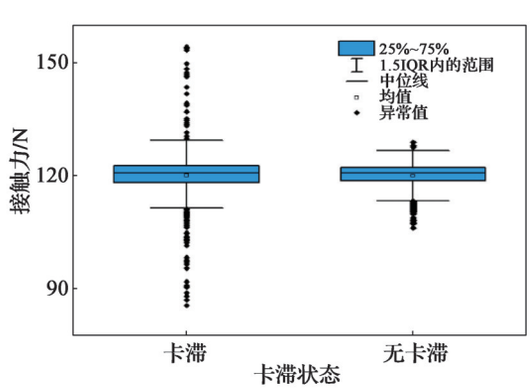
(b) 10 ℃

图19 不同环境温度下线夹卡滞处局部放大图（v=70 km/h）

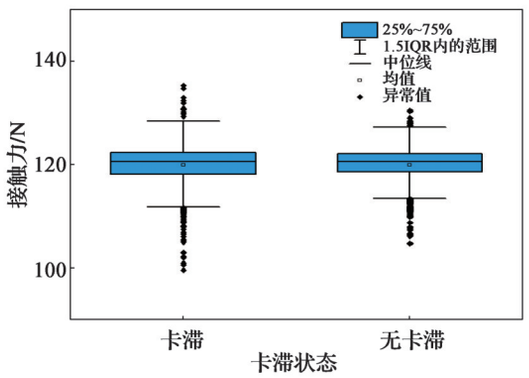
Fig. 19 Partial enlarged view of clamp sticking at various environmental temperatures (v=70 km/h)

对图19分析可知，由于线夹卡滞处刚性接触网的刚度发生突变，从而导致当受电弓经过刚度突变的硬点时，弓网接触力发生剧烈变化，弓网受流质量急剧恶化，而在列车经过卡滞线夹后，弓网接触压力波动逐渐减弱。

卡滞与无卡滞条件下的弓网接触力箱线图如图20所示。由图20可知，卡滞情况下的弓网接触力异常值相较于无卡滞情况有明显增加，这表明卡滞对弓网接触力的波动程度影响较大，并且随着温度的降低影响程度增大。



(a) 0 ℃



(b) 10 ℃

图20　不同环境温度下卡滞与否的弓网接触力箱线图（0 ℃和10 ℃）

Fig. 20　Box plot of pantograph-catenary contact force with and without stuck clamps at various environmental temperatures (0 °C and 10 °C)

基于线夹卡滞与否的条件，统计卡滞位置局部区域的弓网接触力，数据如表13所示。由表13可知，卡滞造成了弓网接触力标准差σ和不均匀系数c急剧增加，从而导致弓网受流质量急剧恶化；在环境温度分别为0 ℃和10 ℃时，弓网接触力不均匀系数增加了68.23%和23.02%。

表13　卡滞与否的弓网接触力统计值

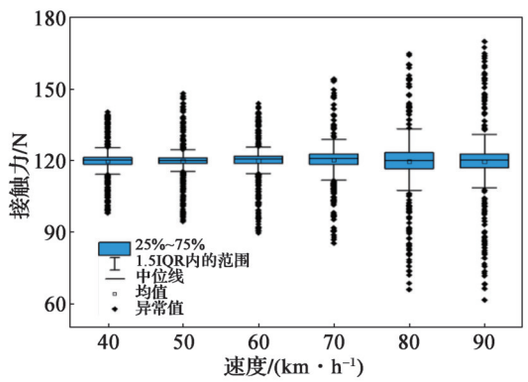
Table 13　Statistical values of pantograph-catenary contact force with and without stuck wire clamps

工况	F_m/N	σ/N	F_{max}/N	F_{min}/N	c
工况1	120.038	6.036	154.291	85.431	0.050 3
工况2	120.007	3.589	128.855	106.152	0.029 9
工况3	119.981	4.099	135.359	99.591	0.034 2
工况4	119.987	3.341	130.564	104.762	0.027 8

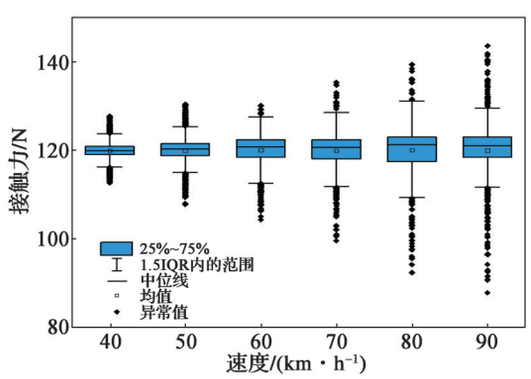
注：工况1——0 ℃卡滞；工况2——0 ℃无卡滞；工况3——10 ℃卡滞；工况4——10 ℃无卡滞。

4.4.2　列车运行速度与线夹卡滞对弓网受流质量影响分析

利用前文建立的接触网刚度曲线和弓网耦合动力学仿真模型，计算得到列车运行速度为40~90 km/h和线夹卡滞工况下的弓网接触力时域响应，并绘制弓网接触力箱线图，如图21所示。由图21可知，随着列车速度的提高，线夹卡滞引起的弓网接触力离散程度越来越大，异常值迅速增加，并且增加趋势随着温度降低而加强。



(a) 0 ℃



(b) 10 ℃

图21　不同环境温度下卡滞工况的弓网接触力箱线图

Fig. 21　Box plot of pantograph-catenary contact force under the stuck condition at various environmental temperatures

表14和表15为列车运行速度40~90 km/h和线夹发生卡滞时的弓网受流指标。由表14和表15可知，当线夹发生卡滞时，弓网接触力波动系数c、标准差σ、最大值F_{max}随车速提高而明显增加，接触力最小值F_{min}随车速提高迅速下降。这表明当线夹发生卡滞时，弓网受流质量会严重恶化，并且列车运行速度越高和温度越低，恶化程度越严重。

表14　卡滞工况下弓网受流指标（0 ℃）

Table 14　Current collection index of pantograph and catenary under stuck condition at 0 ℃

参数名称	参数值					
	v=40 km/h	v=50 km/h	v=60 km/h	v=70 km/h	v=80 km/h	v=90 km/h
F_m/N	119.929	119.862	119.829	120.038	119.697	119.587
σ/N	4.161	4.766	5.289	6.036	9.439	11.017
F_{max}/N	135.207	140.470	143.998	154.291	156.066	164.900
F_{min}/N	94.588	91.593	89.699	85.431	73.267	65.976
c	0.034 7	0.039 8	0.044 1	0.050 3	0.078 9	0.092 1

表 15　卡滞工况下弓网受流指标（10 ℃）

Table 15　Current collection index of pantograph and catenary under stuck condition at 10 ℃

参数名称	参数值					
	v=40 km/h	v=50 km/h	v=60 km/h	v=70 km/h	v=80 km/h	v=90 km/h
F_m/N	119.917	120.016	120.026	119.981	120.064	120.020
σ/N	1.952	2.846	3.642	4.099	5.124	6.465
F_{max}/N	127.738	130.471	130.089	135.359	139.359	143.590
F_{min}/N	112.708	107.808	104.351	99.591	92.404	87.839
c	0.016 3	0.023 7	0.030 3	0.034 2	0.042 7	0.053 9

5　结论

本文依据某地铁实际布置图建立了整锚段刚性接触网有限元模型，并得到其刚度曲线，探究了环境温度对接触网刚度影响规律，结论如下：

①环境温度对刚性接触网的刚度有较大影响，接触网刚度随环境温度降低而增加，对定位点处附近影响最大。–20 ℃ 的接触网刚度相较于 20 ℃的接触网刚度平均增加了 12.7%，定位点处增加了 22.9%；环境温度对弓网接触力有显著影响，环境温度降低至 0 ℃以下时，导致弓网受流质量严重下降。

②当环境温度在 –20~20 ℃内，受电弓静态抬升力的最佳值为 120 N。

③线夹卡滞会造成弓网接触力剧烈波动，从而导致受流质量急剧恶化，并且行车速度越高影响越大。

参考文献：

[1] 张士宇, 杨岗, 吕琨, 等. 地铁车辆受电弓异常磨耗研究[J]. 机车电传动, 2023(4): 124-130.
ZHANG Shiyu, YANG Gang, LYU Kun, et al. Study on abnormal abrasion of metro pantograph[J]. Electric drive for locomotives, 2023(4): 124-130.

[2] 唐志强, 朱佳栋. 城市轨道交通架空刚性悬挂接触网弓网磨耗及改进措施[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊 1): 108-112.
TANG Zhiqiang, ZHU Jiadong. Pantograph catenary wear of urban rail transit overhead rigid catenary and improvement measures[J]. Urban mass transit, 2021, 24(Suppl 1): 108-112.

[3] 梅桂明, 张卫华. 刚性悬挂接触网动力学研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(2): 24-29.
MEI Guiming, ZHANG Weihua. Study on dynamics of rigid suspension catenary[J]. Journal of the China railway society, 2003, 25(2): 24-29.

[4] ZHANG Weihua, LIU Yi, MEI Guiming. Evaluation of the coupled dynamical response of a pantograph-catenary system: contact force and stresses[J]. Vehicle system dynamics, 2006, 44(8): 645-658.

[5] 吕青松, 王世轩, 周宁, 等. 基于变刚度弹簧模型的弓网动力学分析[J]. 电气化铁道, 2014(5): 25-29.
LYU Qingsong, WANG Shixuan, ZHOU Ning, et al. Dynamic analysis of pantograph based on variable stiffness spring model[J]. Electric railway, 2014(5): 25-29.

[6] 关金发, 吴积钦. 受电弓与刚性接触网动力耦合方程的数值解[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(2): 362-368.
GUAN Jinfa, WU Jiqin. Dynamic coupling equations between pantograph and overhead rigid conductor rail by using numerical method[J]. Journal of railway science and engineering, 2016, 13(2): 362-368.

[7] 孙成. 基于新型吊弦的接触网刚度分布及弓网间接触压力变化的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
SUN Cheng. Study on stiffness distribution of catenary and pantograph-catenary contact force based on new droppers [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

[8] 李鑫. 接触网刚度变化对弓网接触力影响的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
LI Xin. Study on influence of catenary stiffness change on pantograph-catenary contact force[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

[9] 刘煜铖, 徐鸿燕, 单翀皞. 刚性悬挂汇流排卡滞热应力分析[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(6): 119-123.
LIU Yucheng, XU Hongyan, SHAN Chonghao. Thermal stress analysis of the stuck rigid suspension catenary[J]. Railway locomotive & car, 2022, 42(6): 119-123.

[10] LI Kunpeng, FENG Chao, JIN Shoujie, et al. Effect of ambient temperature on catenary system[C]//IOP. 2020 4th International Conference on Energy Material, Chemical Engineering and Mining Engineering. Qingdao: IPO, 2020.

[11] ZHAO Yaobing, PENG Jian, ZHAO Yueyu, et al. Effects of temperature variations on nonlinear planar free and forced oscillations at primary resonances of suspended cables[J]. Nonlinear dynamics, 2017, 89(4): 2815-2827.

[12] 陈鼎, 陈振华. 铝合金在低温下的力学性能[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(4): 1-7.
CHEN Ding, CHEN Zhenhua. Mechanical properties of pure aluminum alloys at cryogenic temperatures[J]. Aerospace materials & technology, 2000, 30(4): 1-7.

[13] 赵雪绮. 超低温环境下预应力混凝土梁结构性能研究[D].

天津: 天津大学, 2018.
ZHAO Xueqi. Research on structural performance of prestressed concrete beams at low temperatures[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
[14] 刘钊, 万德田, 包亦望, 等. 高温和超高温极端环境下陶瓷管材弹性模量评价新技术[J]. 现代技术陶瓷, 2016, 37(2): 107-118.
LIU Zhao, WAN Detian, BAO Yiwang, et al. New evaluation methods for determining the elastic modulus of ceramic tubes at high and ultrahigh temperatures[J]. Advanced ceramics, 2016, 37(2): 107-118.
[15] CENELEC. Railway applications - fixed installations - electric traction overhead contact lines: EN 50119: 2009[S]. Brussels: CENELEC, 2009.
[16] 舒斯龙, 邓桂棠, 谢小春. 地铁 120 km/h 刚性接触网局部磨耗分析及预防措施[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(6): 123-128.
SHU Silong, DENG Guitang, XIE Xiaochun. Local wear analysis and preventive measures for rigid catenary when the metro train runs at the speed of 120 km/h[J]. Urban rapid rail transit, 2019, 32(6): 123-128.
[17] 杨岗, 李苇. 基于LQR的高速受电弓最优半主动控制研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(11): 34-40.
YANG Gang, LI Fu. Semi-active control for high-speed pantograph based on the optimal LQR regulator[J]. Journal of the China railway society, 2011, 33(11): 34-40.

Influence of environmental temperature on the elasticity of rigid catenary and pantograph-catenary current collection quality of subway lines

YANG Gang, LYU Kun, KONG Guowei, SHEN Xin, LI Fu

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: In recent years, there have been large-scale incidents of abnormal wear on subway pantographs and catenaries across China, especially in winter. In 2022, more than 30 subway lines nationwide encountered this issue, resulting in economic losses amounting to hundreds of millions of yuan. In order to study the influence of environmental temperature on the pantograph-catenary relationship, a finite element model of the rigid catenary of a subway line was established. The stiffness curve of the catenary was calculated at ambient temperatures of −20~20 °C. The pattern of influence of environmental temperature on the stiffness of the catenary was analyzed. Then, a dynamic model of subway pantograph-catenary coupling with variable stiffness was established, and its accuracy was verified according to EN 50119 and other standards. The pantograph-catenary contact force was calculated under the conditions of ambient temperatures of −20~20 °C, train running speed of 40~90 km/h, pantograph static lifting force of 70~160 N, and stuck positioning clamps. Furthermore, the influence of environmental temperature on the pantograph-catenary contact force and the pantograph-catenary current collection quality was analyzed. The results show that there is a strong positive correlation between environmental temperature and the pantograph-catenary contact force and current collection quality. When the environmental temperature is below 0 °C, the pantograph-catenary current collection index will seriously deteriorate; stuck wire clamps will have a negative impact on the pantograph-catenary contact force and current collection quality, and the higher the train running speed, the greater the impact will be.

Keywords: rigid catenary; environmental temperature; stiffness curve of catenary; pantograph-catenary contact force; current collection quality; pantograph-catenary coupling dynamics

收稿日期：2023-11-21