

接触网覆冰工况下城市轨道交通线路弓网关系研究*

赵海波 周佳明 张 帅

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春)

摘 要 [目的]在接触网表面因冰冻天气形成冰层的工况(以下简称“覆冰工况”)下,列车受电弓的正常受流受到影响,严重时会在接触网与受电弓之间产生拉弧现象,进而造成接触线严重磨损、受电弓碳滑板烧伤等问题。为保证列车在冬季冰冻环境下可靠运行,需要探究覆冰工况下列车运行速度对弓网系统动态特性的影响规律。[方法]基于有限元理论,建立了接触网覆冰工况下城市轨道交通线路弓网动力学模型。选取覆冰厚度 5 mm、10 mm、15 mm 和 20 mm 四种情况,得到了接触线驰度的仿真计算结果。在此基础上,对覆冰工况下弓网系统动态特性(接触力变化、定位点振动)的影响进行了分析。[结果及结论]随着覆冰厚度的增大,接触线的驰度变大,接触网的整体形状不规则度也随之增加。覆冰厚度越大,弓网接触力的振幅越大。

关键词 城市轨道交通; 列车; 弓网受流; 接触网覆冰工况; 弓网动态特性

中图分类号 U255; U264.34

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.018

Pantograph-Catenary Relation of Urban Rail Transit Lines under Catenary Iced Condition

ZHAO Haibo, ZHOU Jiaming, ZHANG Shuai

(National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] Under the condition of ice forming on catenary surface (hereinafter referred to as 'iced condition'), the normal current collection of train pantograph is disrupted. In severe cases, arcing may occur between the pantograph and the catenary, leading to severe catenary wear and pantograph carbon slide strip damages. To ensure reliable train operation in frozen winter environments, it is essential to investigate the influence of train operating speed on the dynamic characteristics of the PC (pantograph-catenary) system under iced conditions. [Method] Based on finite element theory, a dynamic model of the PC system for urban rail transit lines under catenary iced conditions is developed. Simulation calcula-

tion results of catenary sagging conditions are obtained in four selected scenarios with ice thicknesses of 5 mm, 10 mm, 15 mm, and 20 mm. On this basis, the impact of PC system dynamic characteristics (contact force variation, vibration at positioning points) under iced conditions are analyzed. [Result & Conclusion] As the ice thickness increases, the sagging of catenary becomes more pronounced, and the overall irregularity of the catenary shape intensifies; hereby larger ice thickness values result in greater amplitudes of the contact force in PC system.

Key words urban rail transit; train; current collection of pantograph-catenary; catenary iced condition; dynamic characteristics of pantograph-catenary system

接触网是城市轨道交通供电系统的重要组成部分。接触网通过与受电弓滑动接触,为列车提供电能,因此,接触网的动态运行质量对线路的安全运营至关重要。

在冬季冰冻、高寒、潮湿的环境下,接触网表面容易形成冰层。在接触网表面形成冰层工况(以下简称“覆冰工况”)下,受电弓正常受流会受到影响,进而对列车的供电质量产生影响^[1-2],严重时会在接触网与受电弓之间产生拉弧现象,造成接触线严重磨损、受电弓碳滑板烧伤等问题^[3-4],影响城市轨道交通线路的正常运营^[5]。例如,2010年沈阳地铁1号线、2016年大连地铁3号线和2018年武汉地铁6号线均因接触网结冰引起供电故障,导致列车晚点,甚至引起线路部分区段停运。

为保证列车在各种气候条件下均能可靠运行,需要探究覆冰工况下列车运行速度对弓网系统动态特性的影响规律。本文基于有限元理论,建立了接触网覆冰工况下城市轨道交通线路弓网关系的动力学模型,研究冰层对接触网驰度及弓网动态特性的影响,以期今后城市轨道交通线路接触网覆

* 中国中车股份有限公司重大科研项目(2024CCA167)

冰工况下解决方案的制定提供参考。

1 覆冰工况下弓网动力学模型的建立

1.1 覆冰工况下的接触网仿真模型

采用直接建模法建立了覆冰工况下的接触网仿真模型,如图 1 所示。

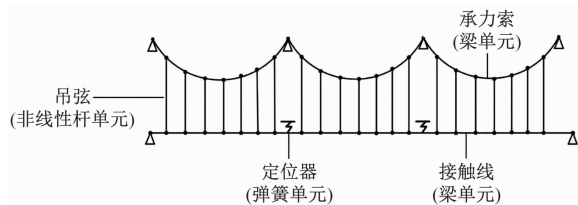


图 1 覆冰工况下的接触网仿真模型

Fig. 1 Simulation model of catenary under iced condition

首先将接触网结构进行简化。接触网主要由接触线、承力索、吊弦、定位器等部件组成,分别通过梁单元、非线性杆单元、弹簧单元来模拟接触网中的关键部件。

根据接触网结构,组合接触网各单元的刚度矩阵,进而可得到接触网全局刚度矩阵 K_c 。计算式为:

$$K_c = \sum K_{e,i} \quad (1)$$

式中:

K_c ——整体刚度矩阵;

$K_{e,i}$ ——第 i 个单元的刚度矩阵。

将接触网有限元分析模型的刚度矩阵 K_c 、质量矩阵 M_c 和阻尼矩阵 C_c 组合起来,得到外力矢量作用下接触网的动力学方程为:

$$M_c a_c + C_c v_c + K_c u_c = f(t) \quad (2)$$

式中:

u_c ——节点的位移矩阵;

v_c ——节点的速度矩阵;

a_c ——节点的加速度矩阵;

t ——节点运动的某一时刻;

$f(t)$ ——节点 t 时刻的载荷向量。

采用集中质量法模拟接触网覆冰工况下的受力情况,如图 2 所示。算出模拟覆冰工况下冰层质量所需要的集中力 F ,最后将 n 个集中力(力值均为 F/n)分别等距离地分布在导线上。

仿真计算时,冰层的参数设定如下:①导线的重力加速度为 g ;②密度为 900 kg/m^3 ;③静态模量为 10 GPa ;④泊松比为 0.3 。以等厚度圆形截面导线为例,该导线覆冰工况下质量的计算式为:

$$G = \frac{\pi}{4} \rho (D^2 - d^2) \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中:

G ——覆冰工况下每根导线在单位长度上的质量,单位 kg ;

ρ ——覆盖在导线上的冰层的密度,单位 kg/m^3 ;

d ——导线的直径,单位 mm ;

D ——导线覆上冰层后的直径,单位 mm 。

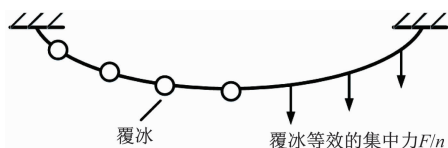


图 2 接触网覆冰工况下的受力示意图

Fig. 2 Force diagram of catenary under iced condition

本文所建模型的接触网覆冰工况及冰层参数与文献[6]中的接触网小比例模型试验完全一致。提取本文所建模型中接触网第 3 跨的驰度最大值、驰度最小值,与文献[6]中接触网小比例模型试验中的驰度最大值、驰度最小值进行对比,其结果如图 3 所示。

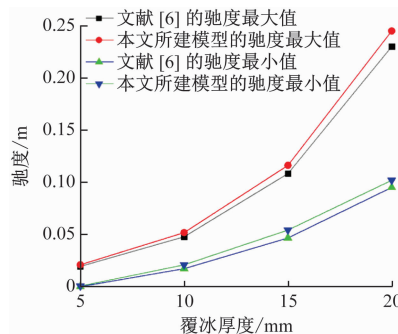


图 3 本文所建模型与文献[6]的驰度最大值、驰度最小值对比

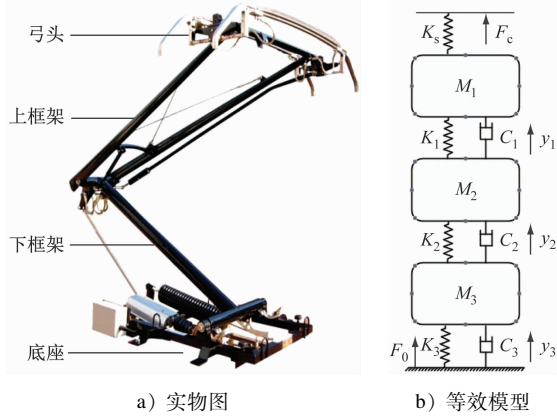
Fig. 3 Comparison of the maximum and minimum sag values between the model established in this paper and the literature[6]

由图 3 可知:二者最大值、最小值的差值均在 10% 以内,因此可认为本文建立的接触网覆冰工况下模型具有正确性和有效性。

1.2 覆冰工况下的弓网动力学模型

目前,对于受电弓结构的分析大多采用集中质量块的方法。本文将受电弓模型等效为三元质量块,并对受电弓进行建模。定义定位点的 x 向为接触线沿列车运动方向(x 向位移以朝列车前进方向

移动为正), y 向为接触线沿竖直向下重力方向(y 向位移以朝竖直向下移动为正), z 向为接触线向外拉出方向(z 向位移以朝接触线向外拉出方向移动为正)。受电弓三元质量块等效模型如图4所示。



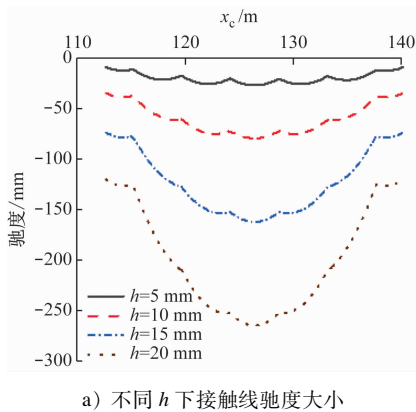
注: F_0 —受电弓的静态抬升力; F_c —弓网接触力; M_1 —弓头的等效质量; M_2 —上框架的等效质量; M_3 —下框架的等效质量; C_1 —弓头的等效阻尼; C_2 —上框架的等效阻尼; C_3 —下框架的等效阻尼; K_1 —弓头的等效刚度; K_2 —上框架的等效刚度; K_3 —下框架的等效刚度; K_s —受电弓弓头与接触线作用时二者间的接触刚度; y_1 —弓头在 y 向的抬升位移; y_2 —上框架在 y 向的抬升位移; y_3 —下框架在 y 向的抬升位移。

图4 受电弓三元质量块等效模型

Fig. 4 Three-mass block equivalent model of pantograph

建立受电弓的力学平衡方程, 其计算式为:

$$\begin{cases} M_1 a_{y_1} + C_1 (v_{y_1} - v_{y_2}) + K_1 (y_1 - y_2) = -F_c(x_c, t) \\ M_2 a_{y_2} + C_1 (v_{y_2} - v_{y_1}) + C_2 (v_{y_2} - v_{y_3}) + K_1 (y_2 - y_1) + \\ K_2 (y_2 - y_3) = 0 \\ M_3 a_{y_3} + C_2 (v_{y_3} - v_{y_2}) + C_3 v_{y_3} + K_2 (y_3 - y_2) + \\ K_3 y_3 = F_0 \end{cases} \quad (4)$$



a) 不同 h 下接触线弛度大小

式中:

x_c —— x 向上测试点与接触线起始点的距离;
 v_{y_1} —— y 向上受电弓弓头抬升速度;
 v_{y_2} —— y 向上受电弓上框架抬升速度;
 v_{y_3} —— y 向上受电弓下框架抬升速度;
 a_{y_1} —— y 向上受电弓弓头抬升加速度;
 a_{y_2} —— y 向上受电弓上框架抬升加速度;
 a_{y_3} —— y 向上受电弓下框架抬升加速度。

本文使用罚函数法处理弓网之间的接触力, 以实现二者的耦合。设弓网间接触力为 F_c , 则 t 时刻 x 向作用点处的弓网间接触力函数 $F_{c,xd}(x, t)$ 的计算式为:

$$F_{c,xd}(x, t) = \begin{cases} K_s(y_1 - y_{c,xd}), & y_1 \geq y_{c,xd} \\ 0, & y_1 < y_{c,xd} \end{cases} \quad (5)$$

式中:

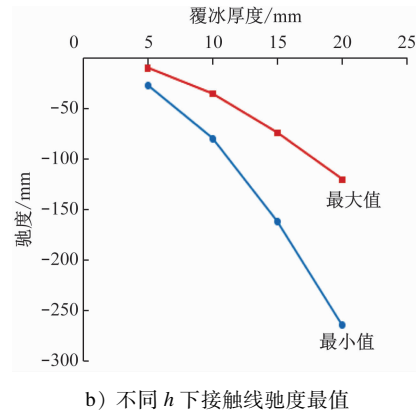
$y_{c,xd}$ ——作用点处接触线在 y 向的抬升位移。

2 覆冰工况对接触网弛度的影响

基于接触网覆冰工况下的仿真模型, 接触网中接触线、承力索、吊弦等部件均被施加了均匀的覆冰工况载荷, 以研究覆冰工况对接触网弛度的影响。接触网承力索、接触线的主要技术参数如下: 弹性模量均为 $1.05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 截面积均为 100 mm^2 。

仿真计算时, 设 h 为覆冰厚度, 设定 $h = 5 \text{ mm}$ 、 $h = 10 \text{ mm}$ 、 $h = 15 \text{ mm}$ 和 $h = 20 \text{ mm}$ 四种情况, 得到接触线弛度仿真计算结果, 如图5所示。

1) 由图5 a) 可知: 在均匀覆冰工况下, 接触线形状仍符合悬链线的数学模型; 随着 h 的增大, 接触线弛度增大(即接触网不平整度增加)。其中, 位于



b) 不同 h 下接触线弛度最大值

图5 不同 h 下接触线弛度的仿真计算结果

Fig. 5 Simulation calculation results of catenary wire sagging with different h values

跨度中间处吊弦之间的接触线弛度明显大于位于跨度两端处吊弦之间的接触线弛度。

2) 由图 5 b) 可知:相同跨度(28 m)情况下, h 增加,接触线弛度最大值、最小值的差值随之增加,即 h 越大,接触线的不规则度越大。

3 覆冰工况对弓网系统动态特性的影响

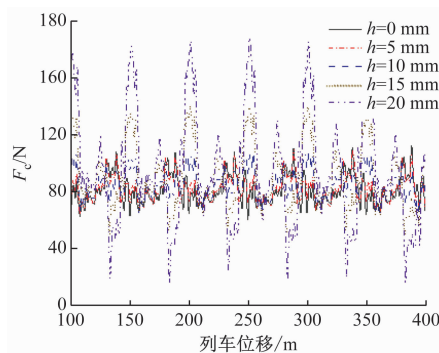
3.1 覆冰工况对弓网系统接触力的影响

保持接触网参数不变,受电弓的主要技术参数如表 1 所示。 F_c 是列车行驶过程中受电弓通过相对静止的接触网时,受电弓与接触网之间的相互作用力。 F_c 过小,易造成受电弓弓头与接触线的脱离,进而导致弓网离线并产生电弧; F_c 过大,则易使

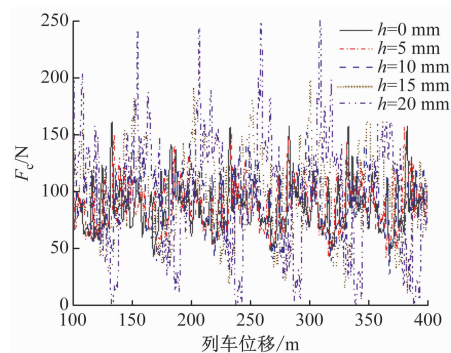
受电弓弓头滑板和接触线间的磨耗增大,严重时可能会造成弓网事故。考虑到列车运行开始和结束时弓网受流不稳定的情况,本文仅选取列车启动后位移为 100 ~ 400 m 所对应的 F_c 数据进行分析。设 v 为列车运行速度,图 6 为 $v = 40$ km/h、 $v = 120$ km/h 下不同 h 对 F_c 的影响。

表 1 受电弓的主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of pantograph			
部位	质量/kg	刚度/(N/m)	阻尼/(Ns/m)
弓头	13.52	15 005.45	113.770 0
上框架	7.56	6 769.20	9.531 5
下框架	8.66	8 547.10	57.680 0



a) $v = 40$ km/h



b) $v = 120$ km/h

图 6 2 个 v 值下不同 h 对 F_c 的影响

Fig. 6 Effect of different h on F_c with two v values

1) 如图 6 a) 所示, $v = 40$ km/h 时,随着 h 的增加, F_c 的振幅越来越大。这是由于 h 越大,接触网弛度越大所致。

2) 如图 6 b) 所示, $v = 120$ km/h 时, F_c 的周期性振动变差,振幅明显变大,且在 $h = 20$ mm 时出现了 $F_c = 0$ 的情况。当 $F_c = 0$ 时,受电弓脱离接触网,此时必须考虑降速运行,列车有可能需要停运。

3.2 覆冰工况对弓网系统定位点振动的影响

在覆冰工况下,弓网动力学模型设置了不同的 v 和 h 取值,以探究 v 和 h 对定位点振动的影响。设列车运行时间为 $t_{\text{列车}}$,图 7 为列车在 $v = 120$ km/h 工况下不同 h 对定位点 y 向位移和 z 向位移的影响。由图 7 可知: $h = 5$ mm 时,对定位点振动几乎没有影响; $h = 10$ mm 时,弓网振动仍然保持周期性; $h = 15$ mm 时,振动波形的周期性变差; $h = 20$ mm 时,振动波形几乎没有周期性。

由图 7 还可以看出: $t_{\text{列车}} = 3.45$ s 时,定位点的

y 向和 z 向均出现了最大的振幅,这是因为 $v = 120$ km/h 工况下,在 $t_{\text{列车}} = 3.45$ s 时受电弓刚好经过定位点,并在该点产生了冲击力,由此产生了较大的振动。而在 $t_{\text{列车}} < 3.45$ s 和 $t_{\text{列车}} > 3.45$ s 后,定位点的振动是由接触网前后波的传递引起。由此可认为:列车以同一速度经过定位点后, h 增加,会导致定位点振幅增加。

4 结语

本文利用有限元方法,建立了接触网覆冰工况下城市轨道交通线路弓网关系的动力学模型,并利用所建模型探究了覆冰工况对接触网弛度和弓网系统接触力的影响规律,得到以下结论:

1) 覆冰工况下,覆冰厚度 h 增加,会导致接触线弛度增大;随着 h 的增大,接触线 1 个跨度范围内弛度最大值与最小值的差值增大,接触线的整体不规则度随之增加。

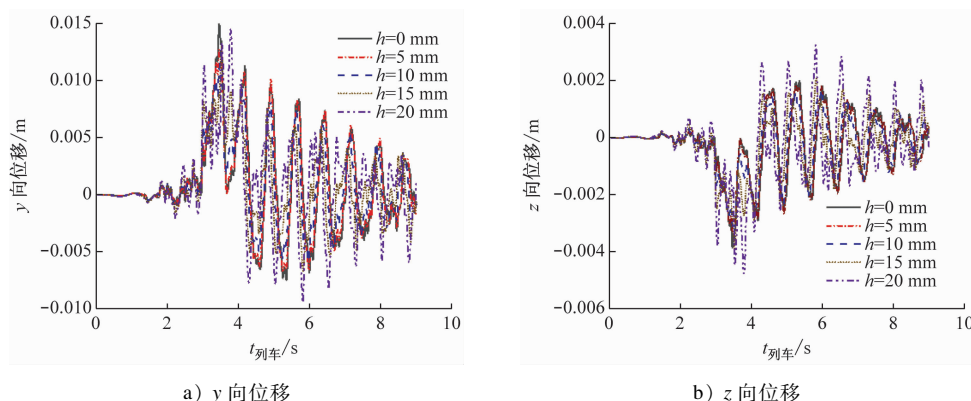


图7 $v = 120 \text{ km/h}$ 工况下不同 h 对定位点 y 向位移和 z 向位移的影响

Fig. 7 Effect of different h values on the displacement of locating points in the y and z directions under $v = 120 \text{ km/h}$ working condition

2) 随着 h 的增加,弓网接触力的振幅越来越大。当列车运行速度 v 提高到 120 km/h 时,弓网接触力的振动周期性变差,振幅明显变大。

3) 当 $v = 120 \text{ km/h}$,定位点振幅随 h 的增大而增大。当 $h = 20 \text{ mm}$ 时,振动几乎没有周期性。

参考文献

- [1] 宋洋, 刘志刚, 汪宏睿. 高速铁路覆冰接触线气动系数研究与风振响应分析[J]. 铁道学报, 2014, 36(9): 20.
SONG Yang, LIU Zhigang, WANG Hongrui. Study on aerodynamic parameters and wind vibration responses of iced contact wires of high-speed railways[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(9): 20.
- [2] 谢强, 王巍, 张昊, 等. 高速铁路接触线覆冰后气动特性风洞试验研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(1): 78.
XIE Qiang, WANG Wei, ZHANG Hao, et al. Wind tunnel test on aerodynamic force characteristics of ice coating contact wire for high speed railway [J]. China Railway Science, 2014, 35(1): 78.
- [3] SONG Y, LIU Z, WANG H, et al. Analysis of the galloping behaviour of an electrified railway overhead contact line using the non-linear finite element method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(10): 2339.
- [4] 段甫川, 刘志刚, 宋洋, 等. 计及覆冰和空气阻尼的弓网动态受流特性[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(1): 177.
DUAN Fuchuan, LIU Zhigang, SONG Yang, et al. Influences of ice load and air damping on dynamic current collection of pantograph-iced catenary [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(1): 177.
- [5] XU Z, SONG Y, LIU Z. Effective measures to improve current collection quality for double pantographs and catenary based on wave propagation analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6299.
- [6] 谢将剑, 王毅, 刘志明, 等. 覆冰工况下接触网的有限元仿真及其小比例模型试验[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 185.
XIE Jiangjian, WANG Yi, LIU Zhiming, et al. Finite element simulation and small scale model experiment of catenary icing[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 185.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
· 通信作者:赵海波,正高级工程师,013200019995@ccrcgc.cc
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

广深地铁单日客运量均创历史最高纪录

广州地铁和深圳地铁 2024 年 12 月 31 日的总客运量双双刷新单日客运量历史最高纪录。其中,广州地铁线网当日总客运量达 1 220.20 万人次,此前最高纪录为 2019 年 12 月 31 日的 1 156.94 万人次;深圳地铁线网当日总客运量首次突破 1 100 万人次,进站量首次突破 660 万人次,单日客运量刷新历史最高纪录。此外,广东城际轨道交通的当日客运量为 12.98 万人次。

(摘编自 20250101《南方日报》)