Dynamical Systems and Control 动力系统与控制, 2025, 14(4), 420-427
Published Online October 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/dsc
https://doi.org/10.12677/dsc.2025.144042

Hans汉斯

接触线波磨损伤下刚性接触网结构参数对弓网动力学性能影响研究

王伟杰[1]，陈　曦[2*]

[1]成都轨道交通集团有限公司，四川 成都
[2]成都轨道交通产业技术研究院有限公司，四川 成都

收稿日期：2025年9月11日；录用日期：2025年10月1日；发布日期：2025年10月15日

摘　要

随着城市轨道交通系统的不断发展，刚性接触网作为电力传输系统的重要组成部分，其运行稳定性直接影响列车的动力系统和安全性。接触网波磨现象对弓网系统的受流质量和列车运行稳定性产生了重要影响。针对这一问题，本研究基于考虑波磨的弓网耦合动力学模型，探讨了刚性接触网的关键结构参数(跨距、抗弯刚度和线密度)对弓网系统动力学性能的影响。研究结果表明，跨距、抗弯刚度和线密度的变化对弓网系统的受流质量具有显著影响，接触线跨距为8 m时，弓网间的受流质量最佳，随着跨距增大，波磨对弓网受流质量的影响逐渐加剧；接触线线密度为7 kg/m时，弓网的动态受流质量较好，随着线密度增大，波磨对弓网受流质量的影响愈加显著；接触线抗弯刚度增大时，波磨对弓网受流质量的影响呈减小趋势。本研究为优化刚性接触网设计及提高弓网系统的运行性能提供了理论依据。

关键词

受电弓，刚性接触网，波磨，动力学

Study on the Influence of Rigid Catenary Structural Parameters on Pantograph-Catenary Dynamics Performance under Contact Wire Corrugation Wear

Weijie Wang[1], Xi Chen[2*]

[1]Chengdu Rail Transit Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

[*]通讯作者。

文章引用: 王伟杰, 陈曦. 接触线波磨损伤下刚性接触网结构参数对弓网动力学性能影响研究[J]. 动力系统与控制, 2025, 14(4): 420-427. DOI: 10.12677/dsc.2025.144042

[2]Chengdu Rail Transit Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: September 11, 2025; accepted: October 1, 2025; published: October 15, 2025

Abstract

With the continuous development of urban rail transit systems, the rigid catenary, as a critical component of the power transmission system, has a direct impact on the train's propulsion system and operational safety. The phenomenon of contact wire corrugation significantly influences the current collection quality of the pantograph-catenary system and the stability of train operation. To address this issue, this study investigates the effects of key structural parameters of the rigid catenary (span length, bending stiffness, and linear density) on the dynamic performance of the pantograph-catenary system, based on a coupled dynamics model that accounts for corrugation. The findings reveal that variations in span length, bending stiffness, and linear density have a notable impact on current collection quality. When the contact wire span length is 8 m, the current collection quality between the pantograph and catenary is optimal. As the span length increases, the influence of corrugation on current collection quality becomes more pronounced. At a contact wire linear density of 7 kg/m, the dynamic current collection performance is favorable. However, as linear density increases, the adverse effects of corrugation intensify. An increase in the contact wire's bending stiffness mitigates the negative impact of corrugation on current collection quality. This study provides a theoretical foundation for optimizing rigid catenary design and enhancing the operational performance of pantograph-catenary systems.

Keywords

Pantograph, Rigid Catenary, Corrugation, Dynamics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

全球城市轨道交通正经历“高速化、高密度化、重载化”三重技术变革。根据国际公共交通协会(UITP) 2024 年报告，全球地铁年均客运量已达 3000 亿人次，中国占比超过 60%。这种高强度运营模式对供电系统提出极限挑战，特别是占线路总长 35%~50%的地下区段。刚性接触网因其独特的结构优势，在隧道环境中逐步取代柔性接触网成为主流。东京地铁的实践表明，刚性接触网可将接触线寿命延长至柔性系统的 1.8 倍。然而，接触网在长期运行过程中会出现波磨现象，这不仅影响接触网的几何形状和电气性能，还对弓网的受流质量和列车的运行稳定性产生显著影响。就刚性接触网波浪形磨耗的产生原因而言，Koyama 和 Aboshi [1]对架空刚性接触网的接触线表面状况以及受电弓的动态行为进行了探究，认为接触线波磨是由受电弓的动态特性导致的机械磨损，特别是受电弓的抗共振特性在这一过程中起到了关键作用。在实际运行中，由于受电弓本身振动以及其他因素，导致受电弓上存在着一定数量的波磨点或间隙。受电弓的弓头间距与接触线波磨的波长密切相关。盛良等[2]基于地铁线路的观测数据和运营工区的统计资料，从磨损的分布和形态两个角度对某地铁线路的接触网磨损特性进行了总结，发现刚性接触网波浪形磨耗通常发生在列车的加速取流段，且情况相当严重。同时也指出：弓网间压力不均匀导致接触线中

出现凹坑是影响线路波磨发生的另一个重要原因；波磨的产生是由电流、动态接触力以及电弧之间的互动所导致的；由于接触线波磨亮暗带间的磨损程度有所不同，这将导致接触线的不规则性增加，并可能成为受电弓的新的振动源，从而进一步恶化弓网的接触状况。Yamashita 等[3]通过研究发现，接触线的不规则性是影响受电弓与架空刚性接触网之间相互作用的关键因素，而滑动表面上的波浪形磨损可能是造成接触损耗的主要原因之一。余永康[4]认为波磨是由接触网与碳滑板中心的拉出值设置不当所导致的。由于碳滑板表面存在严重缺陷，造成碳层厚度不均。如果接触网与碳滑板中心的拉出值设置不恰当，碳滑板的工作面可能会出现不均匀的磨损。这种情况会导致地铁在运行过程中的动态接触力出现波动，尤其是在高速行驶的情况下，动态接触力的波动幅度可能会扩大。Aboshi 等[5]对受电弓在实际使用中的线路磨损特性进行了深入的研究，并进行了相应的激励实验。在此基础上提出了一种新的模型来预测在弓网运动时接触力的动态行为，并对其作用机制作了分析。接触网的结构参数，如跨距、抗弯刚度和线密度，是影响波磨形成及其对弓网系统影响的重要因素[6] [7]，但目前对这些参数在波磨情况下的作用机制研究尚不充分。

为了解决这一问题，本研究基于弓网耦合动力学模型，探讨了刚性接触网的跨距、抗弯刚度和线密度等关键结构参数对接触网波磨后弓网系统动力学性能的影响。通过仿真分析，研究了不同参数配置下接触网波磨对弓网受流质量的影响。

2. 弓网耦合动力学模型

2.1. 弓网系统模型及参数

刚性接触网由接触线、汇流排与悬挂机构等组成。将接触线和汇流排等效为欧拉梁模型，悬挂机构简化为弹簧质量系统，如图 1 所示，而接触网的拉出值采用正弦型函数定义，并赋予刚性接触网一个垂向的周期性不平顺以模拟接触线波磨的状态。本文建立 50 跨的接触网模型，其中跨距为 8 m，具体参数见表 1。

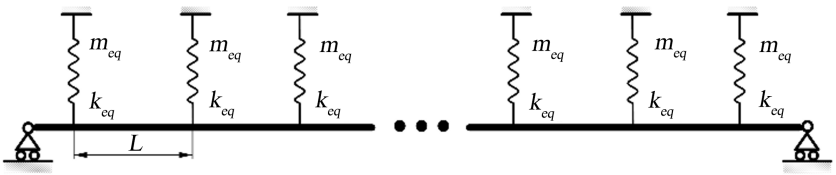


Figure 1. Schematic diagram of rigid catenary
图 1. 刚性接触网示意图

Table 1. Parameters of rigid catenary
表 1. 刚性悬挂接触网参数

部件名称	材料	密度/(t·mm^{-3})	杨氏模量(MPa)	泊松比
汇流排	铝合金	2.7×10^{-9}	69,000	0.33
接触线	铜银合金	8.9×10^{-9}	13,000	0.3

受电弓主要由底架、拉杆、下臂杆、上臂杆、平衡杆、平衡臂、弓头等部件组成，如图 2 所示。本文以受电弓三维实体为原型，建立受电弓的系统动力学模型，并模拟实际工况进行了升降弓加载和运算。在下臂杆上施加一定的升弓力矩，可以实现弓头的运动和上升，使碳滑板与接触线相接触，完成升弓运动。在达到升弓高度后，弓头可以保持位置不变。碳滑板在平衡杆和接触线的作用下始终保持水平，从而与接触线良好接触。

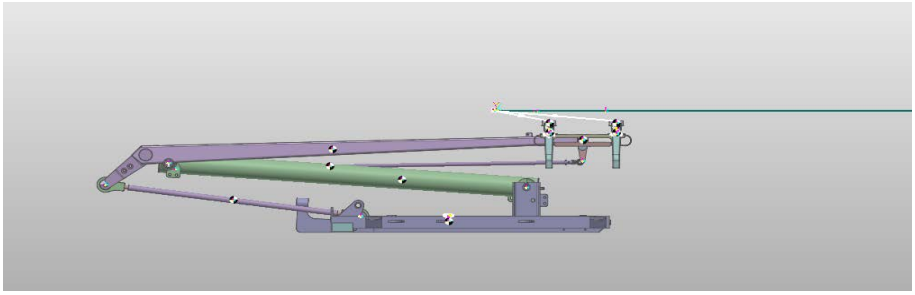


Figure 2. Dynamic model of pantograph-catenary system
图 2. 弓网耦合系统动力学模型

在建立的接触网和受电弓模型的基础上，将接触网和受电弓组合到一起，并基于罚函数法描述弓网之间的接触行为，如式 3 所示，从而构建考虑接触线波磨的弓网耦合系统动力学模型，如图 2 所示。

$$F_c = \begin{cases} k_s\left[y_1 - y\left(x_c\right)\right], & y_1 \geq y\left(x_c\right) \\ 0, & y_1 < y\left(x_c\right) \end{cases} \tag{3}$$

式中，y_1 为弓头垂向位移，$y(x_c)$为接触网在接触点处垂向位移，k_s 为接触刚度[8]。

2.2. 接触线波磨的数学描述

本文参考钢轨波磨的建模方法，将接触线波磨考虑成波长和波深较小的接触线不平顺，提出了一种针对接触线波浪形磨损的接触线建模方法，建立了考虑接触线波磨的弓网耦合动力学模型。

针对于钢轨波磨，为了模拟波浪形磨损的不规则性，通常参照文献[9]周期不规则性的方法，周期不规则性的表达式为：

$$Z_0\left(t\right) = \frac{1}{2}a\left[1 - \cos\left(\omega t\right)\right] \tag{1}$$

式中 a 为波幅，ω 为角频率。

根据上述波磨周期不规则性的表达式，将接触网波浪型磨耗描述为一个垂向的周期性不平顺，其表达式为：

$$Z\left(x\right) = \frac{1}{2}A\left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)\right] \tag{2}$$

式中 A 为不规则性的峰谷值，λ 为不规则性的波长，x 为位置。

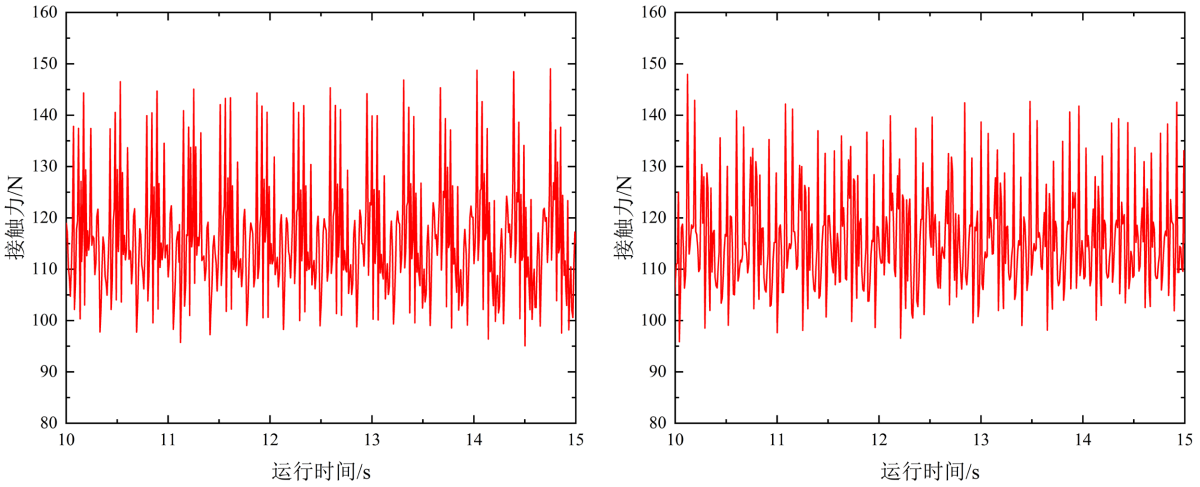
3. 仿真结果及分析

刚性接触网的结构参数包括跨距、抗弯刚度、抗拉刚度、线密度、等效截面面积等。本节选取跨距、抗弯刚度和线密度作为接触网的关键结构参数，忽略接触网的抗拉刚度。针对接触网的跨距，抗弯刚度以及线密度对接触线出现波磨后的弓网系统受流质量的影响进行了分析与比较。

3.1. 不同跨距的影响

通常，刚性接触网的跨距调整范围大多都在 6~12 m 之间，为了研究刚性接触网在不同跨距下接触线波磨对弓网系统动力学性能的影响，将刚性接触网的跨距分别设置为 6 m、8 m、10 m、12 m，地铁列车的运行速度设置为 60 km/h，仿真结果如下。

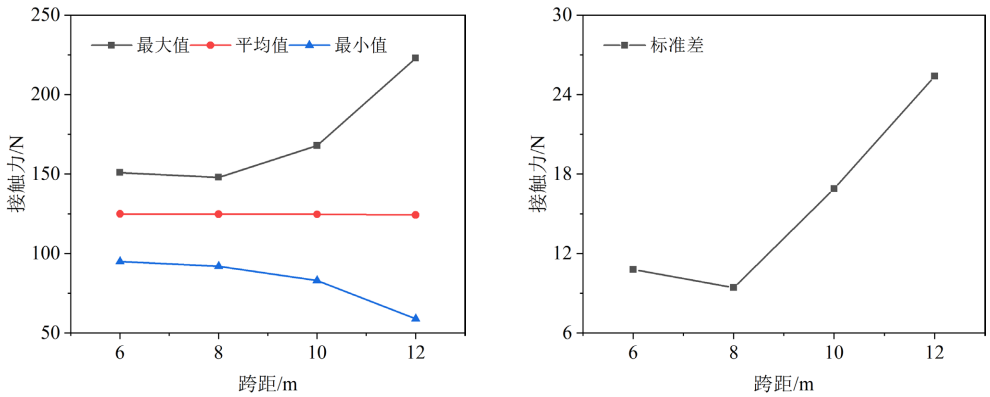
图 3 地铁运行速度为 60 km/h 的情况下，刚性接触网的跨距为 6~8 m 的仿真结果。



(a) 6 m 弓网接触力时程曲线　　(b) 8 m 弓网接触力时程曲线

Figure 3. Contact force time history curves under different spans
图 3. 不同跨距下弓网接触力时程曲线

从图中可以看出，在接触线出现波磨时，当刚性接触网的跨距为 6 m 时，弓网接触力绝大部分在 95~150 N 之间；当刚性接触网的跨距为 8 m 时，弓网接触力绝大部分在 100~140 N 之间；可以看出，当接触线出现波磨时刚性接触网的跨距为 8 m 时，弓网间接触压力的变化幅度最小，动态受流质量更好(图 4)。



(a) 最大值、平均值及最小值　　(b) 标准差

Figure 4. Contact force statistic under different spans
图 4. 不同跨距下接触力统计值

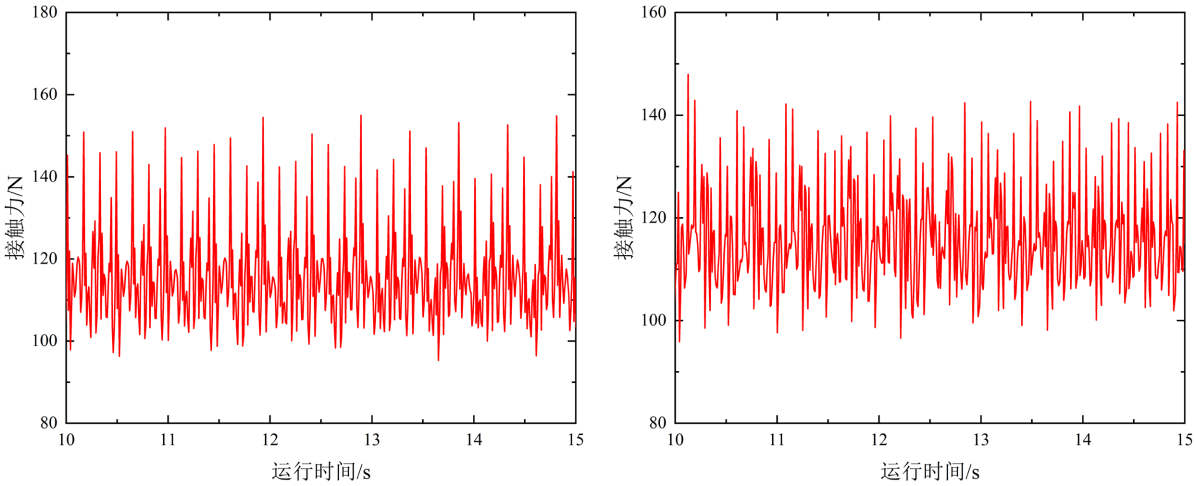
从图中弓网接触力的变化趋势可知，在接触线波磨激励下，弓网系统的动态性能显著受接触网跨距的调制。该现象源于跨距变化从根本上改变了接触网的动力特性。具体表现为：随跨距增大，接触力最大值先减后增，最小值先增后减，其标准差在跨距为 8 m 时达到最小，而后急剧增大。尤其在跨距增至 12 m 时，标准差曲线斜率骤增，表明系统动态性能发生质变，受流质量急剧恶化。

3.2. 不同线密度的影响

在中国的城市轨道交通系统中，架空刚性接触线主要是由铜或铜银合金构成的材料。因此，在不同种类的接触线材料中，接触线的密度表现出一定的差异性。为了研究刚性接触网在不同线密度下接触线

波磨对弓网系统动力学性能的影响，将刚性接触网的线密度分别设置为 6 kg/m、7 kg/m、8 kg/m、9 kg/m，地铁列车的运行速度设置为 60 km/h，仿真结果如下。

图 5 地铁运行速度为 60 km/h 的情况下，刚性接触网的线密度为 6~7 kg/m 的仿真结果。

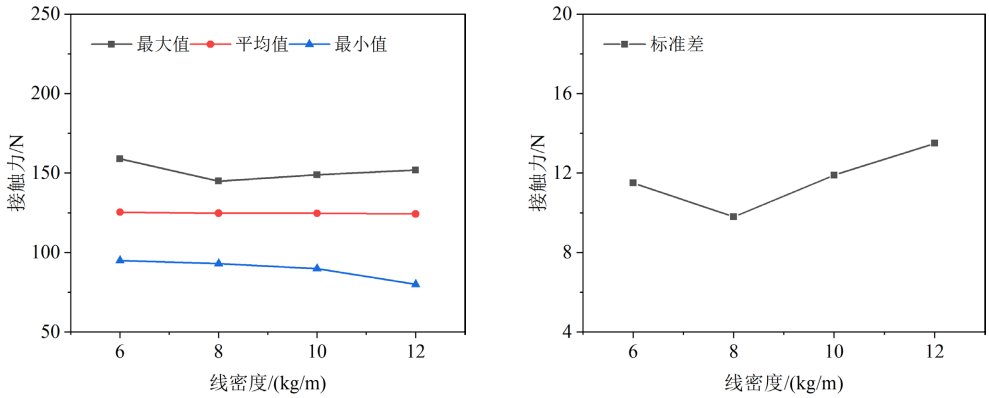


(a) 6 kg/m 弓网接触力时程曲线　　(b) 7 kg/m 弓网接触力时程曲线

Figure 5. Contact force time history curves under different linear density
图 5. 不同线密度下弓网接触力时程曲线

由图中结果可知，在接触线波磨激励下，接触线的线密度是影响弓网接触力动态特性的关键参数。当线密度由 6 kg/m 增加至 7 kg/m 时，接触力的波动范围从 95~160 N 收窄至 95~150 N，其波动幅值显著降低。这表明，**在线密度为 7 kg/m 时，弓网接触压力的变化幅度最小，系统表现出更优的动态受流质量。**

图 6 给出了刚性接触网线密度由 6 kg/m 提升至 9 kg/m 时弓网接触力的统计值。



(a) 最大值、平均值及最小值　　(b) 标准差

Figure 6. Contact force statistic under different linear density
图 6. 不同线密度下接触力统计值

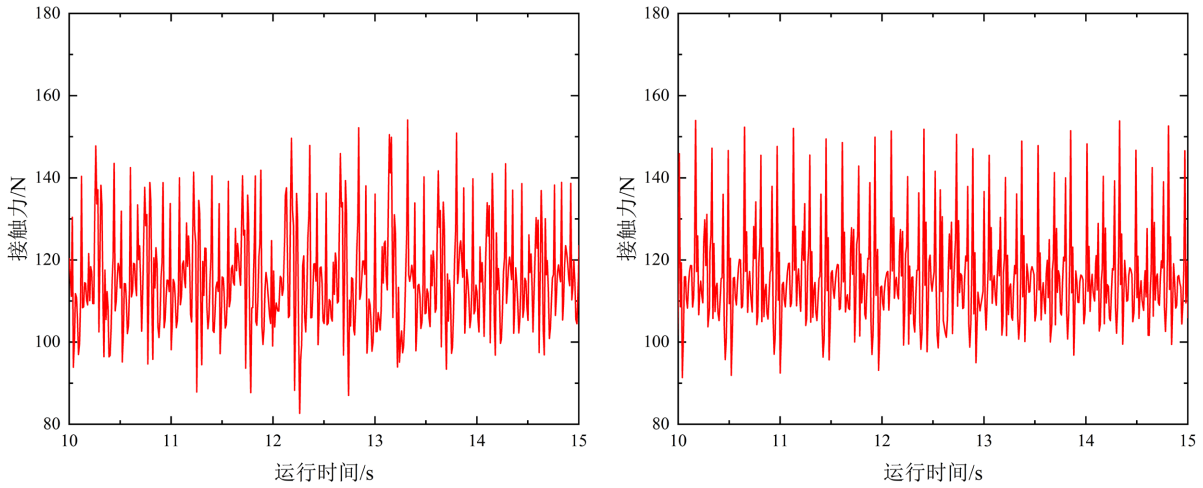
从图中结果可以看出，在接触线波磨激励下，接触网线密度对弓网系统的动态响应具有显著影响。具体表现为：随着线密度增大，弓网接触力的最大值先减小后增大，最小值先增大后减小，而表征接触力波动强度的标准差则先减小后增大。在线密度为 7 kg/m 时，系统性能达到最佳，接触力标准差最小；而当线密度增至 9 kg/m 时，接触力标准差急剧增大至 12 N，约为最优工况(7 kg/m)下的 3 倍，表明弓网

受流质量严重恶化。

3.3. 不同抗弯刚度的影响

接触线的结构参数除了接触线的跨距、线密度之外，还有接触线的抗弯刚度。对于不同的接触线材料，接触线的抗弯刚度也会有所差异。为了研究刚性接触网在不同抗弯刚度下接触线波磨对弓网系统动力学性能的影响，将刚性接触网的抗弯刚度分别设置为 1×10^5 N/m、2×10^5 N/m、3×10^5 N/m、4×10^5 N/m，地铁列车的运行速度设置为 60 km/h，仿真结果如下。

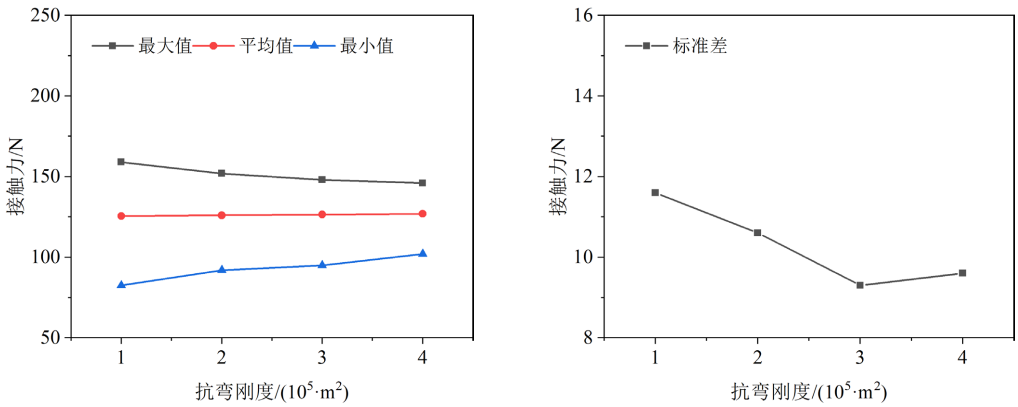
图 7 地铁运行速度为 60 km/h 的情况下，刚性接触网的抗弯刚度为 1×10^5 N·m^2~2×10^5 N/m 的仿真结果。



(a) 1×10^5 N/m 弓网接触力时程曲线　(b) 2×10^5 N/m 弓网接触力时程曲线

Figure 7. Contact force time history curves under different flexural rigidity
图 7. 不同抗弯刚度下弓网接触力时程曲线

由图中可以看出，接触线的抗弯刚度为 1×10^5 N/m 时，弓网间接触力在 80 N~155 N 之间；接触线的抗弯刚度为 2×10^5 N/m 时，弓网间接触力在 90 N~150 N 之间；图 8 给出了刚性接触网抗弯刚度由 1×10^5 N/m 提升至 4×10^5 N/m 时弓网接触力的统计值。



(a) 最大值、平均值及最小值　(b) 标准差

Figure 8. Contact force statistic under different flexural rigidity
图 8. 不同线密度下接触力统计值

从图中结果可以清晰地看出，在接触线波磨激励下，增大接触网的抗弯刚度能显著改善弓网动态受流性能。具体表现为：随着抗弯刚度的增大，弓网接触力的最大值逐渐减小，最小值逐渐增大，二者共同作用使得接触力的波动范围收窄；同时，**表征波动剧烈程度的接触力标准差也显著降低**。这表明，**更高的抗弯刚度有效抑制了波磨激励引发的振动，使受流质量趋于稳定**。

4. 结论

通过建立考虑波磨的弓网耦合动力学模型，分析了刚性接触网的关键结构参数对弓网系统动力学性能的影响，得到如下结论：

1) 接触线跨距对弓网受流质量具有显著影响，当跨距为 8 m 时，弓网间的受流质量最佳；随着跨距增大，波磨对弓网受流质量的影响逐渐加剧；

2) 接触线线密度为 7 kg/m 时，弓网的动态受流质量较好；随着线密度增大，波磨对弓网受流质量的影响愈加显著；

3) 接触线抗弯刚度的增大会显著减小波磨对弓网受流质量的影响，表明提高抗弯刚度有助于改善弓网系统的动力学性能；

4) 优化刚性接触网的关键结构参数(跨距、抗弯刚度和线密度)是提高弓网系统受流质量和运行稳定性的有效途径。

参考文献

[1] Koyama, T. and Aboshi, M. (2012) Mechanism of Undulating Wear Formation of Overhead Rigid Conductor Line Related to Dynamic Characteristics of Pantographs. *Journal of System Design and Dynamics*, **6**, 641-654. https://doi.org/10.1299/jsdd.6.641

[2] 盛良, 张文轩, 汪海瑛, 等. 刚性悬挂接触线载流磨损特征分析[J]. 中国铁路, 2017, 11(10): 21-27.

[3] Yamashita, K., Nakayama, T., Sugiura, T. and Yabuno, H. (2012) Numerical Bifurcation Analysis of Multimode Impact Oscillations between a Pantograph and a Rigid Conductor Line. *ASME* 2012 *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Illinois, 12-15 August 2012, 955-962. https://doi.org/10.1115/detc2012-70360

[4] 余永康. 架空刚性接触网弓网磨耗异常的原因及解决办法[J]. 技术与市场, 2015, 22(12): 102+104.

[5] Aboshi, M., Nakaya, H. and Shoji, H. (2006) Undulating Wear Mechanism of Overhead Rigid Conductor Line. *IEEJ Transactions on Industry Applications*, **126**, 109-115. https://doi.org/10.1541/ieejias.126.109

[6] 刘智威. 论刚性接触网燃弧的整治[J]. 郑州铁路职业技术学院学报, 2020, 32(1): 32-34.

[7] 赵刚, 周勇. 刚性接触网导线磨耗原因及应对措施[J]. 科技经济导刊, 2017, 14(15): 66-67.

[8] 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.

[9] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.