高速铁路与城轨交通弓网系统磨损特性差异及机理

赵艳红
（中铁建电气化局集团康远新材料有限公司）
DOI：10.65285/GCJSYGL.V2I5.006

摘　要：弓网系统的动态接触行为与磨损特性直接制约着列车的受流质量和运行安全，电气化列车本身无动力，列车受电弓通过接触网取流，为列车提供稳定电能，保证列车平稳安全运行。高速铁路在接触网悬挂方式、供电方式、线材材质、运行工况等诸多方面与城轨交通存在较大差异，导致两者弓网耦合动力学特征和磨损机理分化明显，线材寿命也存在较大差异。本文系统对比两类交通弓网关系的差异，从接触网结构动力学、供电载流特性、列车运行方式、磨损机理和环境耦合效应等维度，揭示摩擦副在不同工况下的振动特性及磨损演变规律。　分析显示：以机械均匀磨损为主的高速铁路柔性链形悬挂，磨损速率低、服役寿命长；城轨交通刚性悬挂在大直流电流、短站距高频启停、密闭隧道环境的共同作用下，叠加了机械、电气、腐蚀等多重损伤因素，异常磨耗频繁发生，线材更换频率远高于高铁。进一步的，对近年来多场耦合仿真、耐电弧材料研发及差异化寿命模型等领域的研究进行了梳理，旨在为两类不同电气化系统的设计选型和智能运维提供理论支撑，针对工程优化提出针对性的建议和未来研究方向。
关键词：弓网系统；高速铁路；城轨交通；刚性悬挂；弹性链形悬挂；载流磨耗；电弧侵蚀；弓网动力学

Differences in Wear Characteristics and Mechanisms of Pantograph-Catenary Systems between High-Speed Railways and Urban Rail Transit

Yanhong Zhao
China Railway Construction Electrification Bureau Group Kangyuan New Materials Co., Ltd.

Abstract: The dynamic contact behavior and wear characteristics of pantograph-catenary systems directly affect the current collection quality and operational safety of trains. Electrified trains have no built-in power supply. The pantograph draws current from the catenary to supply stable electric power and guarantee smooth and safe train operation. High-speed railways differ greatly from urban rail transit in catenary suspension type, power supply mode, conductor material and operating conditions, which leads to obvious distinctions in pantograph-catenary coupled dynamic features and wear mechanisms, as well as notable gaps in conductor service life. This paper systematically compares the pantograph-catenary interaction of the two transport modes. From the perspectives of catenary structural dynamics, current-carrying characteristics, train operation modes, wear mechanisms and environmental coupling effects, it reveals the vibration characteristics and wear evolution rules of friction pairs under different working conditions. The analysis indicates that the flexible catenary suspension of high-speed railways is dominated by uniform mechanical wear, featuring a low wear rate and long service life. For the rigid suspension used in urban rail transit, the combined action of large DC current, frequent start-stop cycles over short station intervals and enclosed tunnel environments introduces multiple damage factors including mechanical, electrical and corrosive effects. This triggers frequent abnormal wear, and the conductor replacement frequency is much higher than that for high-speed railways. Furthermore, this paper reviews recent research on multi-field coupling simulation, arc-resistant material development and differentiated life models. It intends to offer theoretical support for design selection and intelligent operation and maintenance of the two electrification systems, and put forward targeted suggestions for engineering optimization together with future research directions.
Keywords: pantograph-catenary system; high-speed railway; urban rail transit; rigid suspension; elastic catenary suspension; current-carrying wear; arc erosion; pantograph-catenary dynamics

前言：

电气化铁路中弓网系统通过受电弓滑板与接触线的持续滑动接触实现电能传输，是典型的载流摩擦副[1]。高速铁路“八横八纵”建设逐步完成，轨道交通规模化发展，城市轨道交通线路日益增多，百姓出行更加便捷，弓网异常磨耗问题日益突出。广州城轨交通 3 号线一度出现碳滑板磨耗率骤升至 56mm/ 万公里的极端情况[2]，而时速 350 公里 / 小时及以上的高速铁路则面临着弓网耦合振动加剧、离

线电弧烧蚀的严峻挑战 [3]。

虽然城轨交通与高速铁路弓网系统具有相同的功能，但在接触网结构、受电弓参数、车辆牵引特性、线路状况和悬挂方式等方面存在着根本性的差异，高铁采用 25KV 交流电为高铁供电，运行时速覆盖 200 ~ 350Km/h，90% 以上接触网采用柔性链式悬架；城轨交通大多采用直流 750/1500 V 供列车使用，运行速度通常在 80 ~ 120km/h，在地下区间普遍采用汇流排夹持接触线的刚性悬挂 [5]。这些差异直接导致了两种弓网系统在弓网接触力、载流密度、磨损机制和失效方式等方面呈现出明显的分化特征 [4-5]。

截至 2025 年，我国高速铁路运营里程超 4.6 万公里、城市轨道交通运营线路达 1.2 万多公里，接触网设备保有量大，既有研究多聚焦于单一制式的弓网磨损问题，缺乏对两类系统多因素耦合作用的系统性横向对比 [6-8]。本文综合多项研究的实测数据和理论成果，构建“悬挂式供电运行环境”多维对比框架，重点分析交 / 直流电弧损伤、柔 / 刚性结构冲击磨损、露天 / 隧道介质腐蚀三大差异因素，为不同系统接触网优化设计、线材选型、差异化运维提供工程参考。

一、接触网悬挂方式与结构动力学特性

（一）高速铁路：全补偿弹性链形悬挂

由承力索、接触线、吊弦、张力补偿装置等组成的高速铁路接触网，一般采用简单的链形或弹性链形悬挂 [9]，接触线保持 15 ~ 30 kN 恒定张力，跨度 50 ~ 65 米，弦距 6 ~ 8 米，并在定位点加装弹性吊索，以均衡跨内刚度；同时引入“预驰度”设计，使静态接触线呈中央略高、悬挂点略低的倒拱形，以补偿高速运转时因电弓升力而产生的上拱变形 [10-11]。

由波动传播速度表征系统核心动态特性 [12]：

$$c = 3.6\sqrt{\frac{T}{m}} \quad \cdots\cdots (1)$$

其中，T ——接触线张力（N），m ——单位长度线质量（kg/m）。

按照 EN 50119 和 TB 10009 规范，列车最高运行速度 v 与波动传播速度 c 的比值 $\beta = v/c$ 应不超过 0.7，否则弓网振动将明显加剧，离线率和燃弧率将大幅攀升 [12-13]，线材磨耗将明显加快。以京沪高铁为例，接触线张力取 31.5 ~ 40kN，波动传播速度约为 550 km/h，可满足 350 ~ 380 km/h 的运行需求 [14]。柔性悬吊弹性不均系数需控制在 10% 以内，跨中弹性均匀化可通过优化吊弦布置或增加弹性吊索的方式实现 [15]。

刚度特性：全跨刚度梯度平缓，弓网动态接触力标准差≤ 18N，离线率 0.05% 以下，发生燃弧的机率极低。拉出值按 ±200 ~ 250mm 正弦波排布，保证滑板的全宽均匀摩擦；柔性结构对振动冲击起到有效的缓冲作用，硬点少，接触线面磨损相对均匀，周期性波磨缺陷不明显 [16]。

（二）城轨交通：刚性悬挂

城轨交通隧道内广泛采用架空刚性接触网，其结构紧凑，不存在断线风险，如 PAC110 为 II 型铝合金汇流排夹的接触线 [17]，接触线直接卡在汇流排燕尾槽内，无承力索、无轴向预张力，跨距仅 6 ~ 12 米，且悬挂点、接头、分段绝缘器等处均为刚性突变硬点 [18]。

刚性悬挂算得上是“无张力梁”，它的起伏传递速度决定于梁的弯曲刚度 [19]：

$$c_w = \frac{1}{l} \times \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad \cdots\cdots (2)$$

式中，EI 为抗弯刚度，l 为跨距。传统的刚性接触网最高运行速度可满足 120 公里 / 小时的运行需求，通过优化跨距、加装弹性线夹等措施可扩展到 250km/h[19]。

刚性缺陷：悬吊点形成刚性硬点，接触力标准差达 40 ~ 70N，是高铁的 2 ~ 4 倍 [20]，列车通过时接触力振荡剧烈，频繁离线。受隧道空间限制，拉出值范围窄，滑板中部长期承受集中摩擦，易诱发单侧偏磨和周期性波磨（波长 50 ~ 200mm）[19]。此外，列车在隧道内行驶时轮轨振动直接传递到汇流排，机械磨损量在同等里程下比高速铁路的磨损量提高 60% 以上 [19]。

（三）悬挂系统参数对比

表 1

对比项	高铁弹性链形悬挂	城轨交通刚性悬挂	磨耗影响分析
接触线张力	15 ～ 30 kN（恒定）[14]	无预张力，汇流夹持 [17]	高铁线材抗疲劳、抗变形能力更强
标准跨距	50 ～ 65 m[10]	6 ～ 12 m[18]	城轨交通硬点数量倍增，冲击磨损加剧
跨内刚度分布	平缓渐变，弹性吊索缓冲 [15]	突变剧烈，硬点密集 [20]	城轨交通接触力波动幅度为高铁 2 ～ 4 倍
离线率	＜ 0.05%[14]	启停区段高频离线 [19]	城轨交通电弧磨损占总损耗 40% 以上
拉出值范围	±200 ～ 250 mm（正弦）	窄幅受限 [19]	城轨交通滑板局部集中摩擦，形成深沟槽偏磨

二、供电方式与载流特性差异

（一）高速铁路交流供电

高铁供电方式为单相工频交流 25kV/50Hz 供电，牵引变电站采用 AT(自耦变压器) 方式向接触网馈电，每隔约 10km 并联接入 AT，将供电电压升至 55kV，接触网对钢轨的电压保持 27.5kV 不变，机车在受电弓处的电压为 25KV[21]。

载流特点：

高电压，电流比较小，单弓电流 200 ~ 400A；

受电弓静态接触压力一般设定为 60 ~ 90N；

多采用单弓受流，使用双弓时需满足间距要求，以避免波动耦合；

交流电每半周期过零，电弧自然熄灭；列车在长区间匀速运行，牵引电流平稳，焦耳热轻微积累 [22]。

电气磨损仅占总磨损的 10% ~ 15%，烧蚀痕迹呈浅表

点状分布。

（二）城轨交通直流供电

城轨交通采用直流 1500V（或 750V）供电，牵引变电所直接向接触网馈电，其电臂长度相对较短（通常为 2 ~ 3km）[23]。

载流特点：

供电电流可达 1500A 左右，低电压，大电流 [24]；

受电弓静态接触压力一般为 120N ± 5N（如洛阳地铁 1 号线、天津地铁等）[25]；

城轨交通车辆常采用 2 ~ 3 架受电弓同时升弓运行，以满足大电流需求 [24]；

直流无过零点，离线后电弧持续燃烧，接触线局部瞬时高温可超过 1500℃ [22]；

出站加速时峰值电流可达 2000 ~ 3000A，高温使材料硬度明显下降 [26]。

接触线表面损伤的主要因素是电气磨损，占总磨损的 35% ~ 50%[19]。

（三）关键差异

城轨交通弓网接触面的电流密度比高铁高得多，焦耳热和电弧烧蚀作用更加剧烈，接触压力 (120N vs 70 ~ 90N) 更高，直接加剧了机械磨损 [27]。相对于柔性接触线系统而言，刚性悬吊单根接触线所承受的机械负荷与电流密度大幅增加，使磨耗状况进一步恶化 [4]。载流摩擦试验显示，在 400A 直流工况下，受电弓滑板磨损量可达无电流工况的 53 倍 [28]。

表 2

系统类型	供电制式	静态接触压力标准	动态接触力范围	电弧磨损占比
高速铁路	AC 25 kV	60 ～ 90 N[15]	70 ～ 120 N	10% ～ 15%
城轨交通	DC 1500 V	120±5 N[25]	100 ～ 140 N[20]	35% ～ 50%[19]

三、列车运行工况与弓网动态相互作用

（一）运行速度与气动效应

高速铁路 (200 ~ 350Km/h) 受电弓具有显著的空气动力学效应，弓网接触力受到气动抬升力和空气阻力的直接影响 [29]。当列车以 350km/h 速度通过隧道时，受电弓气动升力受隧道内的压力波动影响发生突变，使弓网接触关系突然恶化 [30]。DSA350S 型受电弓空气阻力及动力损耗与列车速度变化不是线性关系，而呈现非线性增长 [31]。高速气流有利于界面磨屑的及时清除、接触副的强制冷却、黏着损伤的抑制，弓网磨损以均匀微切削为主，摩擦面光滑平整 [32]。

城轨交通 (40 ~ 120km/h) 的空气动力效应较弱 [33]，但隧道内活塞风和温度、湿度的变化对弓网关系具有独特影响 [34]。低速状态下气流不畅，磨屑易堆积形成磨粒层；电弧停留时间延长；频繁启停和变速导致黏着、磨粒与电弧三种磨损机制相互叠加 [35]。

（二）停靠频次与启停特性

高速铁路站间距长 (20 ~ 60 km)，列车约 90% 的里程处于匀速巡航状态，一般情况下弓网接触力稳定，磨损过程平稳，启停里程占比不到 5%[36]。

城轨交通站间隔较短（一般 0.8 至 2 km），列车每小时启停 30 至 40 次 [37]。出站阶段启动加速度大，牵引电流瞬间激增（峰值 2000 ~ 3000A），造成接触面温度剧烈波动，使弓网系统电气磨损加快 [26]，频繁加减速还导致受电弓惯性力变化，动态接触力波动增大；进出站时的大电流拉弧集中于区间两端，形成不对称磨损分布，“两头重，中间轻”[38]。Montserrat 等对刚性接触网线接触磨损情况模拟分析，在高电流且支柱间距均匀的情况下，磨损随速度增加而减少 [39]。

（三）受电弓配置与接触压力

高铁一般是单弓取流，静态接触压力 70 ~ 90N，宽滑板配合大拉出值，实现全域均匀摩擦 [15]。

城轨交通常采用双弓同步受流，总接触压力叠加；为降低离线率，静压力可提升至 90 ~ 160 N[25]；隧道内净空间有限，拉出值较小，滑板有效摩擦宽度有限，长期定点滑动导致局部深度磨损突出 [24]；纯碳滑板虽质地较软，但在与刚性硬点撞击时易碎裂剥落，裸露的铜基体或金属颗粒会反嵌至接触线表面，进一步加剧弓网系统的磨粒磨损 [40]。

三、接触线磨损机理与失效特征对比

（一）磨损类型分类

弓网系统磨损是机械磨损和电气磨损耦合作用的结果 [35]。

机械磨损包括磨粒磨损（硬粒颗粒犁沟效应）、粘着磨损（金属直接接触造成材料转移）、疲劳磨损（循环应力引起的裂纹萌发和扩展）[36-38]；

电气磨损包括电弧烧蚀（高温熔融气化）[35]、电离子转移（电场驱动材料迁移）[22] 和氧化磨损（高温氧化膜形成与剥落）[28]。

（二）高速铁路磨损特征

高速铁路弓网磨损以机械磨损为主，电气磨损次之。高速铁路接触网设计时考虑拉出值，“之”字形拉出布局保证滑板全宽度磨耗均衡，弓网高速滑动摩擦使接触线表面均匀减薄 [16]。磨损率与车速并非完全呈正相关，车速在 300km/h 时磨损比低于 250km/h，350km/h 磨耗比明显增大 [39]。接触线材质主要为铜镁合金（CuMg0.4 ~ 0.6）或铜锡合金（CuSn0.3 ~ 0.8），成品抗拉强度≥ 500MPa，导电率≥ 65%IACS，具有优异的耐磨性能 [14][41]。列车上的受电弓滑板多为浸金属碳滑板或粉末冶金滑板，其承载电流密度可达 20A/mm2[42]。

磨耗特征：年均磨损量为 0.008 ~ 0.012 mm^2/ 万弓架次，更换周期 8 ~ 15 年 [43]。异常磨损主要表现为“波浪形磨耗”，与跨内弹性不均匀及弓网谐振相关。

（三）城轨交通磨损特征

城轨交通弓网磨损表现为典型的机械 – 电气耦合特征，常发生非正常磨损 [19]。广州地铁 3 号线异常磨耗的案例显示，冬季低湿环境下碳滑板表面铜浸渍层不均，在电弧作用下

与接触线发生熔焊，导致磨耗率急剧上升 [2][44]。

刚性悬挂特有损伤机制：

膨胀元件冲击：长期振动导致吊柱螺栓力矩衰减，悬吊倾斜，导高几何参数漂移，当滑板磨耗廓形与膨胀元件的空间位置不匹配时将产生持续冲击和烧蚀，磨耗量急剧上升 [45]；

锚段关节偏磨：隧道内净空间受限，设计拉出值（正弦或“八”字型）小，造成滑板磨损不均，中部磨损严重而两头磨损轻，形成凹槽 [19]；

硬点冲击：在汇流排拼接接头、分段绝缘器、定位支座等位置，由于台阶与刚度突变而形成固有的硬点，硬点处的接触力达到静态值的 2 ~ 3 倍，造成局部剧烈磨损 [20][46]。

损耗特点：年均磨损量为 0.015 ~ 0.020 mm^2/ 万弓架次，约为高铁的 1.8 倍，更换周期约为 3.5 ~ 5 年 [43]。磨损集中于汇流排接头、分段绝缘器导流板及弯道区段，表现为“深沟槽”或“锯齿边”，局部截面损耗可达 20% ~ 30%[47]。

（四）四种磨损机理对比

表 3

磨损机理	高速铁路	城市轨道
黏着磨损	高速微量材料转移 [37]	高压低速黏着效应更强，伴随沟槽损伤 [48]
磨粒犁削	沙尘偶发三体磨损，程度较轻 [36]	隧道粉尘及金属磨粒形成硬质磨料，犁削严重 [38]
接触疲劳	跨间交变应力产生鱼鳞剥落 [38]	硬点周期性冲击形成凹坑群 [20]
电弧烧蚀	浅层点状损伤，伴“彩虹纹” [22]	大面积熔融、晶界氧化，严重削弱强度 [35]

四、环境影响与运维策略

（一）环境因素影响

温湿度：磨耗量明显受到城轨隧道内温湿度变化的影响。广州地铁研究显示，接触界面在相对湿度低于 30% 时无法形成有效吸附水膜，铜颗粒与磨屑附着导致黏着磨损加剧，且湿度低使接触电阻增大，间隙放电和电弧烧蚀形成恶性循环 [2][44]。碳润滑膜在冬季低湿环境下失效，磨耗急剧增加，而夏季高温高湿环境则易诱发化学腐蚀 [49–51]。

高铁 90% 以上是露天环境，受风雨冰雪影响，覆冰会使接触线截面和弹性发生变化，大风可造成横向摆动和气动不稳定 [51]，从而造成弓网系统受电不稳甚至拉弧，对磨耗产生重大影响；但良好的通风条件有助于带走摩擦热和磨屑，使碳润滑膜保持稳定，雨水能对表面粉尘进行冲刷 [33]，使磨耗降低。

（二）运维策略差异

高铁采用“状态修 + 周期修”模式，依靠接触网检测车动态监测 [52]，重点关注接触线残余厚度、波浪磨耗及吊弦疲劳，设计寿命为 250 万弓架次以上（约 20 年）[41]，当接触线均匀减薄至最小剩余截面积 80 mm^2 时应统一更换 [14]。

城轨交通持续监测碳滑板残厚（<25mm 报警），需特别关注膨胀元件、锚段关节等结构匹配性 [46]，加强冬季低湿时的巡检和预防性打磨 [2]。隧道恒湿控制可降低 90% 的滑板消耗，柔性启动策略可使峰值电流下降 30%，有效减缓进出站区段磨耗 [39][55]。

五、国内外研究进展与现存不足

（一）高铁弓网磨损研究

张卫华、吴积钦等的研究为国内高铁接触网设计提供了重要依据，量化了张力和速度对波磨的影响，建立了高速弓网耦合动力学模型 [6][36]；陈光雄团队通过交流载流试验，证实交流电过零熄弧可减少 30% 以上的电磨耗 [28]；国铁集团 2024 年发布干线弓网评估报告，明确了不同时速区段的磨耗基准值 [52]；国外 Collina、Bruni 等建立了弓网耦合数值模型 [54]，Bucca 等提出磨损预测程序 [55]，IEC 62486–2017 国际标准规范了高速受流判断指标 [56]。

（二）城轨交通刚性悬挂磨损研究

西南交通大学通过在 400A 直流载流试验平台的连续试验验证，明确了城轨交通线材剧烈磨损的核心诱因是直流电弧 [28]，北京、重庆、天津等地的运维实践表明，隧道恒湿调控和柔性启动可使磨耗明显降低 [39][53]，罗健、陈唐龙等对汇流排接头磨耗机理进行了深入分析 [49]，Ding 等完成了直流碳 – 铜摩擦微观损伤试验 [48]。

（三）现有研究短板

1. 缺乏一体化综合仿真模型，可兼顾温湿度、粉尘、轮轨振动等多场耦合 [57]。

2. 面向城轨交通大电流直流电弧工况的新型耐电弧铜合金线材开发不足 [58]；

3. 尚未建立区分柔性与刚性体系的差异化寿命预测公式 [59]；

4. 横向对比类综述较少，多数文献只针对单一制式展开 [8]；

5. 虽然 IEC 62486–2017 国际标准规定了弓网相互作用的一般准则，但未区分交直流、柔性与刚性体系的差异化磨损规律 [56]。

结语：

1. 悬挂方式决定机械磨损基底：高铁弹性链形悬挂张力恒定、刚度平缓，冲击小，磨损以均匀减薄为主；城轨交通刚性悬挂硬点多、接触力波动大（标准差为高铁的 2 ~ 4 倍），导致冲击磨损与异常磨耗风险显著升高 [15][19][20]。

2. 供电制式主导电蚀损伤程度：高铁交流电弧过零自灭，电蚀占比低于 15%，主要磨损方式为机械磨损 [22]；城轨交通直流无过零点，出现燃弧则持续时间长，持续燃蚀使电蚀磨损占比达到 35% ~ 50%，成为线材失效的主因 [19][28]。

3. 运行工况放大磨损差异：高铁准恒速运行，站间距长（20 ~ 60km），匀速行驶路段占 90%，磨损均匀；城轨交通短站距（0.8 ~ 2km）、高频启停（30 ~ 40 次 /h）、多弓大电流叠加，单位里程摩擦能量是高铁的 2 倍以上，加上隧道密闭、高粉尘、高湿环境，异常磨耗频发 [26][35][37][49]。

4. 磨损形貌与服役周期分化明显：高铁年均磨损 0.008 ~ 0.012mm2/ 万弓架次，更换周期 8 ~ 15 年[43]；城轨交通年均磨损 0.015 ~ 0.020mm2/ 万弓架次（约为高速铁路的 1.8 倍），局部区段快速失效，更换周期约 3.5 ~ 5 年[43][47]。

5. 工程运维须差异化施策：高铁要以优化张力和弹性吊索为重点，关注疲劳和磨耗均匀性；城轨交通应重点改造汇流排刚度、抑制大电流冲击、调控隧道环境并选用耐电弧线材，重点解决碳滑板偏磨、膨胀元件匹配及环境诱发的异常磨耗[2][45][46][53]。

在接触网设计、线材选型及日常运维中，应针对高铁与城轨交通两套系统分别制定降低磨损的方案，从结构、电气、环境多源头协同控制磨损，以延长接触网服役周期，降低全生命周期成本。

参考文献：

[1]Holm R. Electric contacts handbook[M]. Berlin: Springer, 1958.

[2] 邱伟明，等 . 弓网异常磨耗分析及解决方案 [J]. 城市轨道交通研究 ,2025,3,276-279,285.

[3] 周宁，等 . 电气化铁路弓网系统摩擦磨损性能研究进展 [J]. 西南交通大学学报 ,2024,59(5),990-1005,1022.

[4] 李阳，等 . 地铁刚性接触网弓网关系及优化策略分析 [J]. 大众文摘 ,2024(42),0093-0095.

[5] 关金发，等，刚性接触网的研究综述及展望 [J]. 都市快轨交通 ,2016,12(29):37-39.

[6] 张卫华 . 高速列车耦合大系统动力学理论与实践（第二版）[M]. 北京：科学出版社 ,2022.

[7] 王亚春，等 . 高速铁路弓网关系模拟试验研究 [J]. 中国铁道科学 ,2018,3:79-85.

[8] 支兴帅，等 . 弓网接触副磨耗演变规律及其对动力学性能影响研究 [J]. 机械工程学报 ,2025,36(18):288-298.

[9] 于万聚 . 高速电气化铁路接触网 [M]. 成都：西南交通大学出版社 ,2003.

[10] 王勋，电气化铁路概论 [M]. 北京：中国铁道出版社 ,2009.

[11]Kiebling, 等 . 电气化铁道接触网规划设计施工 [M]. 中铁电气化局集团译. 北京：中国电力出版社 ,2004.

[12] 高仕斌，等 .400km/h 高速铁路接触网系统研究展望 [J]. 高速铁路技术 ,2021,2:11-16.

[13] 刘仕兵，等 . 高速铁路弓网系统建模与动态性能研究 [J]. 华东交通大学学报 ,2019,5:16-21.

[14] 京沪高速铁路建设总结·技术卷 [M]. 北京：中国铁道出版社 ,2015.

[15] 刘永红，等 . 高速铁路受电弓概况 [J]. 电力自动化设备 ,2002,22(11),16-19.

[16] 曾纯昌 . 刚性悬挂拉出值布置对受流质量的影响 [J]. 都市快轨交通 ,2013,1:68-70.

[17] 刘长利，地铁隧道内 120km/h 刚性接触网技术研究 [J]. 城市轨道交通研究 ,2012,6,45-48.

[18] 陈泽彬 . 试论弓网机械磨耗的数学模型 [J]. 应用物理 ,2023,10:395-406.

[19] 盛良，等 . 地铁架空刚性接触网弓网系统运行特征分析 [J]. 现代城市轨道交通 ,2019,8:63-69.

[20] 杨岗 . 面向线路异常激扰的地铁受电弓前馈与反馈主动控制研究 [J]. 机车电传动 ,2024,6:163-175.

[21] 胡静，等 . 高速动车组供电技术研究 [J]. 机电信息 ,2025,5:85-88.

[22] 高国强 . 轨道交通弓网系统电接触：理论与应用 [M]. 成都：西南交通大学出版社 ,2018.

[23] 城市轨道交通供电系统运营技术规范（试行）[S]. 交通运输部 ,2025.

[24] 张士宇，等 . 地铁车辆受电弓异常磨耗研究 [J]. 机车电传动 ,2023,4:124-130.

[25] 王亮，等 . 洛阳地铁 1 号线列车受电弓碳滑板异常磨耗分析与改进研究 [J]. 城市轨道交通研究 ,2024,6:286-290.

[26] 黄崇炼，地铁弓网磨损机理及寿命预测研究 [J]. 工程技术研究 ,2024,6：26-28.

[27] 张昱航，等 . 城市轨道交通弓网燃弧研究进展与展望 [J]. 城市轨道交通研究 ,2025(3):25-28.

[28] 梅桂明 . 刚性接触网 - 受电弓载流磨损性能的试验研究 [J]. 西南交通大学学报 ,2021,55(6):1305-1310.

[29] 张卫华 . 高速列车耦合大系统动力学理论与实践 [M]. 科学出版社 ,2013.

[30] 李瑞平，等 . 高速列车过隧道对弓网动力学影响分析 [J]. 振动与冲击 ,2013,6:33-37.

[31] 方岩，欧洲高速铁路弓网系统标准体系 [J]. 中国铁路 ,2010(10):67-70.

[32]Qun Luo, 等 . Wear performance of pantograph - overhead catenary system: a review[J] Railway Engineering Science.2026.

[33] 济南地铁聚力技术攻坚让接触网“会说话”[N]. 腾讯新闻 ,2026-05-14.

[34] 杨岗，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.

[35] 刘新龙，等 . 不同电流下的电弧侵蚀对浸铜碳滑板 / 铬锆铜接触线磨损机理的影响 [J]. 摩擦学学报（中英文），2024,2:189-199.

[36] 吴积钦 . 受电弓与接触网系统 [M]. 成都：西南交通大学出版社 ,2018.

[37] 石红国等 . 城市轨道交通牵引计算算法 [J].《交通运输工程学报》,2004,3:30-33.

[38] 邹栋等 . 城轨交通弓网系统异常磨损现状分析与防治技术研究 [J]. 机械工程学报 ,2023,10:152-178.

[39]Montserrat Simarro, 等 . Influence of main operating conditions on contact wire wear of rigid catenary lines[J]. Tribology International, 2024(196):1-17.

[40] 宋冬利，等 . 滑板磨耗对受电弓系统服役性能的影

响研究 [J]. 西南交通大学学报 ,2017,52(3):450-457.

[41]TB/T2809-2017 电气化铁路用铜及铜合金接触线 [S]. 北京 : 中国铁道出版社 ,2017.

[42] 吴广宁等，受电弓滑板材料研究进展及展望 [J]. 机车电传动 ,2023,(6):1-10.

[43] 袁群虎 . 关于刚性接触网导线磨耗分析 [J]. 科学技术创新 ,2024(8):176-179.

[44] 刘雪萍 , 等 . 国内某线路地铁碳滑板异常磨耗分析 [J]. 高速铁路新材料 ,2025,5:40-44.

[45] 盛良 , 等 . 基于弓网检测数据的地铁刚性接触网膨胀元件烧蚀原因分析 [J]. 铁路技术创新 ,2016,6:101-105.

[46] 陈显志 , 等 . 减小架空刚性悬挂接触弓网磨耗的措施 [J]. 现代城市轨道交通 ,2013(1):21-24.

[47] 龚兆丰 , 等 . 一种刚性接触网异常磨损检测与自动处理装置的研究 [J]. 光学与光电技术 ,2025,23(5):71-79.

[48]Ding T, 等 . Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds[J]. Tribology International, 2011, 44(4): 437-444.

[49] 张栋梁 , 等 . 城市轨道交通弓网磨耗异常研究及优化措施 [J]. 铁道勘测与设计 ,2021(1):27-29.

[50] 邹栋等 , 城轨交通弓网系统异常磨损现状分析与防治技术研究 [J]. 机械工程学报 ,2023(10):152-178

[51] 李瑞平 , 等，横风环境中弓网动力学性能分析 [J]. 振动与冲击，2014(24)39-44.

[52] 中国国家铁路集团有限公司 . 高速铁路弓网系统运行评估报告 [R]. 北京 : 国铁集团 ,2024.

[53] 城市轨道交通供电系统运营技术规范 [S]. 交通运输部 ,2020.

[54]Collina A, Bruni S. Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 38(4): 261-291.

[55]Bucca G, Collina A. A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph - catenary system[J]. Wear, 2009, 266(1-2): 46-59.

[56]IEC 62486:2017. Railway applications-current collection systems-technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access)[S]. 2017.

[57] 黄玉萍 , 等 . 基于 LSSVM 的地铁弓网系统广义动态建模与仿真 [J]. 机车电传动 ,2017,(5):83-87.

[58] 王远东 . 不同工况下轨道交通用铜合金接触线的磨损性能 [J]. 材料热处理学报 ,2026(3):135-147.

[59] 徐文文 , 等 . 基于支持向量回归的地铁受电弓滑板磨耗趋势预测模型研究 [J]. 铁路计算机应用 ,2020,(1):77-81.

作者简介：赵艳红（1984 年 8 月 -）、女、江苏无锡江阴人、专科、研究方向：铜合金线材。