

铁道科学与工程学报 Journal of Railway Science and Engineering ISSN 1672-7029,CN 43-1423/U

《铁道科学与工程学报》网络首发论文

题目:	高速铁路接触网弹性吊索失效机理分析
作者 :	袁远,纪占玲,陈立明,张海波,潘利科,杨才智
DOI:	10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20232022
收稿日期:	2023-12-12
网络首发日期:	2024-02-29
引用格式:	袁远,纪占玲,陈立明,张海波,潘利科,杨才智. 高速铁路接触网弹性吊
	索失效机理分析[J/OL]. 铁道科学与工程学报.
	https://doi.org/10.19713/j.cn/i 43-1423/u T20232022



www.cnki.net

网络首发:在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国 学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。 收稿日期: 2023-12-12

基金项目:中国国家铁路集团有限公司科研项目(N2023G065);中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2021YJ297) 通信作者:袁远(1984-),男,江苏东台人,高级工程师,博士,从事铁道牵引供电及高性能铜合金研究; E-mail:yyzj2003@163.com。

DOI: 10.19713/j.cnki.43–1423/u.T20232022

高速铁路接触网弹性吊索失效机理 分析

袁远¹,纪占玲²,陈立明¹,张海波¹,潘利科¹,杨才智¹

(1. 中国铁道科学研究院标准计量研究所,北京 100081;2. 中国科学院力学研究所,北京 100190)

摘要:随着高铁列车运行速度的不断提升和开行数量的增加,高速铁路接触网弹性吊索的服役环境变得更加复杂、恶劣, 进而导致其在服役过程中易于发生疲劳断裂。本文基于高速铁路接触网弹性吊索的服役工况,结合失效分析和动力学仿真, 对弹性吊索进行了失效机理分析。首先采用扫描电子显微镜(SEM)表征了吊索断口处的微观组织形貌,并通过能谱 (EDS)对断口处的成分进行分析,系统研究了吊索的断裂机制;然后基于动力学理论构建了"车-弓-网"空气动力学模 型和弓网刚柔耦合多体动力学模型,采用流-固耦合方法,实现气动与多体动力学的耦合;最后结合吊索服役工况,对明线 与隧道、以及隧道内不同张力条件下弹性吊索振动及受力的影响进行了仿真模拟。结果表明:线夹紧固时引起弹性吊索的 横向压痕,在弓网振动引起的疲劳交变应力作用下导致弹性吊索发生弯曲疲劳断裂,含有 S、CI 离子的大气腐蚀环境加速 了断裂进程。隧道内受电弓气动抬升力的变化,导致弹性吊索的动态张力、振幅、弯折角度大幅增大,是造成隧道内弹性 吊索过早疲劳失效的根本原因;同时张力的松弛导致振幅增大也进一步缩短了弹性吊索的寿命。建议优化弹性吊索与线夹 的连接方式,降低连接时的弯曲应力,从而提高弹性吊索的使用寿命。 关键词:弹性吊索;失效分析;动力学分析;接触网;弯曲疲劳

中图分类号: U225.4 文献标志码: A

文章编号: 1672-7029 (XXXX) XX-0001-11

Failure mechanism analysis for the elastic suspension cable of high-speed railway catenary

YUAN Yuan¹, JI Zhanling², CHEN Liming¹, ZHANG Haibo¹, PAN Like¹, YANG Caizhi¹

China Academy of Railway Sciences Group Standard Metrology Research Institute, Beijing 100081, China;
 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: With the continuous improvement of high-speed train running speed and the increase of the number of operations, the service environment of high-speed railway catenary elastic suspension cables has become more complex and harsh, which led to their susceptibility to fatigue fracture during service. Based on the service conditions of elastic suspension cables for high-speed railway catenary, combined with failure analysis and dynamic simulation, the failure mechanism of elastic suspension cables was analyzed. Firstly, the fracture mechanism of the sling was systematically analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS), which was used to characterize the microstructure and analyze the components of the sling fracture. Then, based on the dynamic theory analysis, the "motor-pantograph-net" aerodynamic model and the pantograph-net rigid-flex coupling multibody dynamics model were constructed respectively. Through the finite element simulation and the fluid-solid coupling method, the coupling between the aerodynamic and multibody dynamics was realized. Finally, combined with the service conditions of the suspension cable, the effects of the open line, the tunnel and the tension changes in the tunnel on the vibration and force of the elastic sling were simulated. The results show that the lateral indentation of the elastic suspension cable caused by the tightening of

the wire clamp, the bending fatigue fracture of the elastic suspension cable resulted in by the fatigue alternating stress caused by the pantograph-catenary vibration, and the atmospheric corrosion environment containing S and Cl ions accelerate the fracture process. The change in aerodynamic lifting force of the pantograph inside the tunnel leads to a significant increase in the dynamic tension, amplitude, and bending angle of the elastic suspension cable, which is the fundamental cause of premature fatigue failure of the elastic suspension cable inside the tunnel. At the same time, the decrease in tension of the elastic suspension cable further intensifies the fluctuation of the elastic suspension cable, resulting in a further shortened service life of the elastic suspension cable. Therefore, it is suggested to optimize the connection method between elastic suspension cable and clamp to reduce bending stress during connection and improve the service life.

Key words: elastic suspension cable; failure analysis; dynamic analysis; catenary; bending fatigue

作为高速铁路三大基本关系(即弓网关系、轮轨关系和流一固关系)之一,弓网系统是维持高速列 车持续可靠供电的关键,它包含两个主要部件一接触网和受电弓^[1-2]。其中,接触网是电气化铁路中架设

在铁路沿线上方给电力机车提供电能的大型输电系统^[3-5], 250 km/h 及以上速度等级的高速铁路接触网一

般采用弹性链型悬挂[6~7],如图 1 所示。作为主要承载部件,弹性吊索的主要作用是通过弹吊吊弦来控制

接触线的弛度,改善接触网的弹性和相邻跨距内的接触网平顺性。当高铁列车高速通过时,受电弓会对接触线带来较大的冲击,而定位点处的接触线通过弹吊吊弦将接触线自重及所受冲击引起的振动传递到 弹性吊索上,从而降低接触网的弹性不均匀度,提升受流质量^[8-9]。随着高铁列车运行速度的提升和开行

数量的增加,弹性吊索的服役环境变得更加复杂、恶劣^[10-12]。据王培等^[13]报道,武广高铁发现多处弹性 吊索出现断丝、断股现象,从缺陷发生位置看,隧道内占比为 95.83%,可见隧道内复杂的气动效应加速

了弹性吊索的疲劳损伤。杨伟超等[14-15]揭示了高速铁路隧道列车风对接触网悬挂件的疲劳耐久性和安全

性所产生的不利影响。根据 TB/T 2075.8-2020 规定^[16],弹性吊索装置由弹性吊索线夹、弹吊吊弦和弹性 吊索等组成,组成型式见图 2,初始安装张力 3.5 kN。通过对武广高铁发生断丝的弹性吊索进行统计发现, 长时间运行后有 78.24%的弹性吊索不满足张力要求^[13],而张力的松弛对于弹性吊索运行的影响也尚不清 楚。由于隧道内弹性吊索的振动谱采集困难,因此,开展隧道内列车风载下弹性吊索振动特性仿真,对 于判定弹性吊索的失效机理,改进弓网振动,延长设备使用寿命有着重要的参考意义。



1一弹性吊索线夹; 2一弹性吊索(截面积为 35 mm2); 3一弹吊吊弦。

图 2 弹性吊索装置示意图 Fig. 2 Schematic diagram of elastic suspension device

1 弹性吊索失效分析

失效分析采用的弹性吊索服役条件为时速 300~350 km,服役于武广高铁新南岭隧道。图 3 为弹性吊 索断裂照片,从图中可以看出发生断裂的位置位于弹性吊索与线夹连接处,其中 5 根单线发生断裂,仅 有两根单线与线夹进行连接。对弹性吊索结构参数进行测量,弹性吊索总长为 14.05 m,张力 2.38 kN, 线夹处承力索与弹性吊索角度约为 3°,弹吊吊弦分别距离定位器 3.79 m 和 4.15 m。图 4 为 Leica DVM6 体式显微镜下弹性吊索断口的宏观形貌。从图中可以看到,断裂的单丝各断口宏观形貌特征大致相同, 为典型疲劳断口,起始区和扩展区均较平坦,放射状扩展花样显示,断裂一侧表面起裂后向对侧扩展, 扩展约 1.1~1.5 mm 后发生斜向瞬断。



图 3 弹性吊索断裂现象 Fig. 3 Elastic suspension fracture phenomenon



Fig. 4 Macro morphology of fracture surface

为分析弹性吊索的损伤特征和机理,采用 Sirion 场发射扫描电子显微镜对断裂的单丝表面进行损伤形 貌分析,并采用附带的能谱仪对断口表面进行微观化学成份分析。通过扫描电镜观察到,断裂单丝的疲 劳源从表面起裂并向对侧扩展,源区附近未见明显腐蚀和大尺寸的夹杂缺陷,如图 5a 所示;在裂纹扩展 区发现较清晰的与疲劳扩展方向垂直的疲劳辉纹(图 5b)。对源区断口的腐蚀产物进行分析(图 5c), 发现腐蚀产物中主要含 Cu、O、C、S、Cl等,表明弹性吊索服役工况中含有的腐蚀性气体,但是由于隧 道内潮湿、通风条件差,弹性吊索无雨水冲刷、无日照,腐蚀介质粘附在弹性吊索表面,导致弹性吊索 因腐蚀加速疲劳损伤断裂。

在 Leica DM2500M 金相显微镜下观察到组织形貌如图 6 所示,可见断裂起源于表面横向压痕缺陷处 (图 6a、b),从与附近其他缺陷尺寸(宽约 0.6 mm,深度 80 μm~100 μm)对比分析来看,源区位置 (距压痕边缘约 0.4 mm)大致位于压痕底部。源区和扩展区断口表层(图 6c、d)有轻微变形,表明在 循环载荷作用下,裂纹的发展会伴随着微小的变形和位移,这些变形和位移会导致材料内部晶粒发生滑 移和位错运动,从而产生应力集中,促进裂纹的扩展。瞬断区(图 6e)可见明显斜向剪切形变,表明裂 纹扩展到一定长度后,应力集中越来越严重,导致材料的局部发生明显变形,最终导致材料断裂。材料 内部组织较均匀,晶粒沿拉伸方向延长,呈纤维状(图 6f),为典型拉拔形变后组织形态。







(a)表面横向压痕缺陷 (b)表面横向压痕缺陷(c)源区 (d)扩展区 (e) 瞬断区 (f)断口处微观组织

图6 断口剖面金相形貌

Fig. 6 Metallographic morphology of fracture section

通过失效分析可以发现,弹性吊索在线夹处发生疲劳断裂,并且疲劳源在材料的一侧。通过分析可 以发现,无受电弓通过时,弹性吊索的载荷主要为安装时的初始张力,在线夹处使其弯曲并产生弯曲应 力。当受电弓通过时,由于接触线的抬升带动弹吊吊弦的向上运动,从而引起弹性吊索动态张力及位移 的变化,进而造成线夹处弹性吊索弯曲应力及角度的变化。并且这种弯曲应力导致材料的一侧受拉应力, 另一侧为压缩应力。因此,线夹处弹性吊索弯曲应力及弯曲角度均发生变化,共同构成了疲劳交变应力, 如图 7 所示。



图 7 弹性吊索受力分析 Fig. 7 Force analysis of elastic suspension cable

弹性吊索的弯曲疲劳可分为裂纹萌生、扩展和断裂三个阶段,在实际使用过程中,线夹紧固时产生的横向压痕,其内部晶粒组织在弯折应力的作用下形成微裂纹,并在弯曲载荷反复作用下不断扩展,导致弹性吊索单丝的实际承载面积不断减小,直到有效载荷面积不能承受载荷时,发生突然断裂。同时,含有 S 离子、Cl 离子的大气腐蚀环境加速了线索的疲劳进程。根据 TB/T 2075.8-2020 规定^[16],弹性吊索技术要求应符合 TB/T 3111 规定,而 TB/T 3111-2017^[17]标准中仅对轴向疲劳性能指标进行了规定,未对弯曲疲劳试验性能指标进行考核。

2 动力学分析

高速列车周围的流场为三维、粘性、可压缩、非稳态湍流流场。流场介质设定为空气,湍流模型是 SST 模型。运行速度为 350 km/h,受电弓开口运行。隧道通过时,外场总长度 1520 m,隧道长度 500 m, 隧道横截面积 100 m²,外场宽度和高度分别是 200 m 和 100 m。明线运行时,外场长、宽和高分别是 720 m、200 m 和 100 m。隧道通过、明线运行按照列车运动、地面静止真实工况模拟,车、弓和网表面、隧 道壁、地面设定为有固定壁面,计算区域的外围边界设定为压力出口条件,出口压力取一个标准大气压 强。明线与隧道外相比,列车动力学模型和列车空气动力学模型相同,流场宽度和高度相同,但是流场 长度、头车和尾车距离流场两个端面的长度不同。为了列车运行稳定后进入隧道,设置隧道外部流场, 隧道内外列车和接触网模型、张力相同。

2.1 弓网流固耦合方法及模型建立

为分析列车高速通过隧道时弹性吊索的振动特性,采用动力学分析手段对弹性吊索进行仿真分析。 研究思路为:首先,构建"车-弓-网"空气动力学模型;其次,建立接触网有限元模型,然后导入多体动 力学,构建接触网柔性动力学模型[18-19];构建受电弓多刚体动力学模型,实现弓网的动态交互作用仿真;

采用流固耦合方法(见图 8),实现气动与多体动力学的耦合;最后,计算明线运行和隧道通过时弹性吊 索位移、线夹夹处承力索与弹性吊索夹角、弹性吊索动态张力等振动特性。流固耦合过程如下:在空气 动力学中,读取多体动力学计算获取的位移文件,更新各组件位置,计算"车-弓-网"空气动力学模型, 获取物面上各单元压力,然后计算各构件气动力和气动力矩,并保存至文件;在多体动力学中,读取空 气动力学计算获取的气动载荷文件,作用至各构件,计算"弓-网"刚柔耦合多体动力学模型,并将各构 件位移保存至文件,不断循环,直至整个计算过程结束。



(1)

t 是时间, *ρ* 为空气密度, *u*、*v*、*w* 分别为气体速度的三个方向分量, *p*、*T*、*k* 和 *e* 分别表示气体的压强、温度、热传导系数和内能, *τ*为不同平面内的剪应力。

受电弓由底架、上臂、下臂、上拉杆、下拉杆、滑板和弓头支架等组成。各构件均为刚体,下臂和 底架之间通过弹簧力元连接,将受电弓升起,弓头滑板与弓头之间通过弹簧力元两者之间的相互作用, 其他各构件之间通过旋转副连接。受电弓各杆件动力学方程为

 $mu + cu + ku = F_n + F_t + F_A + F_{link}$

(2)

式中, *m* 为各杆件质量, *c* 为各杆件阻尼, *k* 为各杆件刚度, *u* 为各杆件质量速度, 可为沿 *x*、 y 或 *z* 轴方向, *F_n*为滑板受到的接触线的垂向接触压力, *F_t*为滑板受到的接触线的小摩擦力, 对于除滑板外的杆件, *F_n* = 0, *F_t* = 0, *F_A*为气动载荷, *F_{link}*为相连的其他杆件的作用力。

在实际运行线路上,测试了受电弓在同一长度隧道内 350km/h 运行时,弓网接触力最大值、最小值 和平均值,分别为 273.0 N、124.3 N和 184.1 N。采用提出的耦合方法,进行了运行速度 350 km/h 隧道内 运行时的受电弓仿真分析,弓网接触力最大值、最小值和平均值,分别为 293.8 N、104.5 N和 184.8 N, 仿真结果的平均压力与实测值较为接近,但最大值和最小值与实测数据相比呈现出一定的误差,主要由 于实测接触力极值属于瞬态响应,受到实际复杂随机因素(如环境风、随机硬点等)影响较多,而这些 因素未能考虑在仿真模型中,同时受电弓模型参数、接触网实际几何偏差,外界环境干扰、测量的系统 性偏差等仿真的输入数据也是造成仿真与实测数据误差的主要原因。通过计算可知实测值标准差为 28.2 N,与仿真值标准差 30.7 N相比,两者误差仅为 8.86%,满足 EN 50318-2018 标准^[20]20%以内的要求,表 明所建立的模型和提出耦合方法有效。

2.2 明线运行与隧道通过振动特性比对

为了分析 350 km/h 隧道内外接触网弹性吊索的振动特性,对明线及隧道内的弹性吊索振动特性进行 仿真。由图 9 可以看出受电弓通过时弹性吊索垂向、横向和纵向位移情况。弹性吊索振动以垂向振动为 主,横向振动和纵向振动为辅。明线运行时弹性吊索垂向、横向、纵向三个方向位移变化范围分别是-23.8 mm~60.1 mm、-10.1 mm~10 mm、-2.4 mm~1.05 mm,最大波动幅值分别为 83.8 mm、20.1 mm 和 3.5 mm;而隧道内通过时,垂向、横向、纵向位移变化范围分别是-31.3 mm~75.6 mm、-10.1 mm~11.4 mm、-2.6 mm~2.8 mm,最大波动幅值达到了 106.9 mm、22.5 mm 和 5.4 mm;与明线运行相比,隧道内垂向振 幅增大了 27.6%,横向振幅增大了 12%,纵向振幅增大了 54%。





图 9 明线运行和隧道通过时位移随时间的变化曲线

Fig.9 Variation curves of displacement statistics during the passage of open lines and tunnels with time 如图 10 为弹性吊索在线夹处振动时的弯曲变化情况,可以看出,线夹处承力索与弹性吊索夹角初始 值是 3.1°,明线运行时,角度变化范围是 2.2°~4.3°,隧道通过时,角度变化范围是 2.1°~4.7°,较明线运 行时大幅提高。图 11 显示 350 km/h 明线运行时,弹性吊索最小动态张力为 3300 N,最大动态张力为 3858 N,张力变化量为 558 N; 350 km/h 隧道通过时,弹性吊索最小动态张力是 3087 N,最大动态张力 为 3881 N,张力变化量为 794 N,与明线相比增大了 42%。





2.3 隧道内不同张力下振动特性比对

图 12 列出了隧道内弹性吊索在 2.3 kN 和 3.5 kN 两种张力下受电弓通过时垂向、横向和纵向的位移情况,可以看出,当张力为 3.5 kN 时,弹性吊索垂向、横向和纵向三个方向位移变化范围分别是-43.8 mm~62 mm、-4.0 mm~3.4 mm、-2.5 mm~3.4 mm,垂向最大波动幅值为 105.8 mm;当张力降低至 2.3 kN 时,弹性吊索的垂向、横向和纵向位移变化范围分别是-45 mm~77 mm、-3.8 mm~3.2 mm、-4.2 mm~2.3 mm,垂向最大波动幅值达到了 122.0 mm;与 3.5 kN 相比,张力松弛至 2.3 kN 时垂直振动幅度增大了 15%。



图 12 不同张力下位移随时间的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of displacement under different tensions with time

图 13 所示不同张力下弹性吊索动态张力变化情况,当弹性吊索安装张力为 3.5 kN 时,最小动态张力为 2985 N,最大动态张力为 3880 N,张力变化量为 895 N;当弹性吊索张力下降至 2.3 kN 时,最小动态张力为 1952 N,最大动态张力为 2930 N,张力变化量为 978 N,说明张力的松弛也导致张力波动幅值的 增大。



图 13 不同张力下动态张力随时间的变化曲线

Fig. 13 Variation curves of tension changes under different tensions with time

根据文献^[21-22],受到隧道内风压、气动效应等因素的影响,受电弓在通过隧道时,会遇到不同于明 线环境的气动力突变,且气动抬升力较明线运行大,从而导致接触线抬升位移的增大,弓网振动加剧。 通过明线、隧道内弹性吊索的动力学仿真可以发现,弹性吊索弯折角度由明线的 2.2°4.3°提升至 2.1°4.7°,张力变化也增大了 42%,加剧了弹性吊索的振动幅值和张力波动;通过隧道内 2.3 kN 和 3.5 kN 两种张力下弹性吊索的动力学仿真发现,虽然 2.3 kN 下弹性吊索的动态张力较 3.5 kN 小,但是张力下 降将导致弹性吊索的振幅增大,2.3 kN 下的垂向振幅较 3.5 kN 增大了 15%。通过失效分析可知,弹性吊 索靠近承力索一侧总是受到拉应力,相关研究表明^[23-25],拉应力越大、弯曲角度越大,出现疲劳破坏越 早,寿命越短。因此,隧道内弹性吊索的动态张力、振幅、弯折角度增大,是造成了隧道弹性吊索寿命 的大幅缩短的根本原因,张力的松弛导致振幅增大也进一步缩短了弹性吊索的寿命。为保证弹性吊索在 实际使用时的安全性,弹性吊索的安装张力应满足"标准值 3.5 kN,施工误差 5%以内"的要求^[5];其次 建议通过改变弹性吊索与线夹的连接方式,如取消夹板咬合连接方式,改用铰接结构进行弹性吊索和线 夹之间的连接,降低弯曲应力,从而改善弹性吊索的使用寿命。

3 结论

1) 通过对隧道内弹性吊索进行失效分析发现,线夹紧固时引起线索的横向压痕,在弓网振动引起的 疲劳交变应力作用下导致的弹性吊索弯曲疲劳断裂,含有 S、Cl离子的大气腐蚀环境加速了断裂进程。

2) 通过动力学仿真发现,隧道内受电弓气动抬升力的变化,导致弹性吊索的动态张力、振幅、弯折角度大幅增大,是造成隧道内弹性吊索过早疲劳失效的根本原因。张力的松弛导致振幅增大也进一步缩短了弹性吊索的寿命。

3) 建议优化弹性吊索与线夹的连接方式,降低连接时的弯曲应力,从而提高弹性吊索的使用寿命。

参考文献:

- [1] YANG H J, CHEN G X, GAO G Q, et al. Experimental research on the friction and wear properties of a contact strip of a pantograph – catenary system at the sliding speed of 350 km/h with electric current[J]. Wear, 2015, 332/333: 949–955.
- [2] WU Guangning, WEI Wenfu, GAO Guoqiang, et al. Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph catenary system[J]. Journal of Modern Transportation, 2016, 24(2): 132–138.
- [3] 杨晓彬,林国松,李原,等. 接触网周围流体流动及传热特性的数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(2): 537-545.
 YANG Xiaobin, LIN Guosong, LI Yuan, et al. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer characteristics around the catenary[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(2): 537-545.
- [4] 池瑞, 邱国龙, 曾庆森, 等. 高速铁路接触网系统维修决策优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 53-62.
 CHI Rui, QIU Guolong, ZENG Qingsen, et al. Optimization of maintenance decision for catenary system of high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 53-62.
- [5] 陈俊卿, 刘继冬, 关金发, 等. 高速铁路接触网弹性吊索张力非接触测量方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(8): 2824-2834.
 CHEN Junqing, LIU Jidong, GUAN Jinfa, et al. Non-contact measurement method for tension of elastic sling of high-speed railway catenary[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(8): 2824-2834.
- [6] 陈维荣,李文豪,张倩,等. 几种高速受电弓/接触网系统性能的比较[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(3): 354-359.
 CHEN Weirong, LI Wenhao, ZHANG Qian, et al. Comparison of dynamic performances of several pantograph/catenary systems for high-speed railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3): 354-359.
- [7] 关金发, 吴积软. 受电弓与接触网动态仿真模型建立及其确认[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11): 2444-2451.
 GUAN Jinfa, WU Jiqin. Building and confirmation for dynamic simulation model of pantograph and catenary[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(11): 2444-2451.
- [8] 孙传铭,陈星,杨泽锋,等.时速 400km 高速铁路弓网参数优化设计[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(6): 172-179.
 SUN Chuanming, CHEN Xing, YANG Zefeng, et al. Optimal design of pantograph-catenary parameters for 400 km/h high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(6): 172-179.
- [9] 梅桂明,张卫华,刘红娇.不同结构类型接触网动态特性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 27-31.
 MEI Guiming, ZHANG Weihua, LIU Hongjiao. Dynamic performances of different structural catenary[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(2): 27-31.
- [10] ZHANG Weihua, SHEN Zhiyun, ZENG Jing. Study on dynamics of coupled systems in high-speed trains[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(7): 966–1016.

- [11] ZHANG Wei. The development of China's high-speed railway systems and a study of the dynamics of coupled systems in high-speed trains[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2014, 228(4): 367–377.
- [12] WU Guangning, DONG Keliang, XU Zhilei, et al. Pantograph catenary electrical contact system of high-speed railways: recent progress, challenges, and outlooks[J]. Railway Engineering Science, 2022, 30(4): 437–467.
- [13] 王培.关于武广高铁弹性吊索断股缺陷的分析及整治建议[C]. 第三届中国铁路发展论坛学术论文集. 北京:中国铁道出版 社, 2022: 606-612.
 WANG Pei. Analysis and Improvement Suggestions on the Broken Strand Defects of Elastic Suspension Ropes on the Wuhan-Guangzhou High-speed Railway[C]. Academic Papers Collection of the 3rd China Railway Development Forum. Beijing: China Railway Press, 2022: 606-612.
- [14] 杨伟超, 何川, 彭立敏, 等. 隧道结构内列车风荷载下接触网系统的风致振动响应[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2):

276-284.

YANG Weichao, HE Chuan, PENG Limin, et al. Vibrating response of overhead contact system(OCS) under loading of slipstreams induced of high speed train(HST) traveling through tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018,

15(2): 276-284.

[15] 施成华,杨伟超,彭立敏,等. 高速铁路隧道列车风作用下接触网安全性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(9): 3652-3658.

SHI Chenghua, YANG Weichao, PENG Limin, et al. Analysis of catenary's safety under train wind action in high-speed railway tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(9): 3652–3658.

- [16] 国家铁路局. 电气化铁路接触网零部件 第8部分:弹性吊索装置: TB/T 2075.8-2020[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2021. National Railway Administration of the People's Republic of China. Fittings for overhead contact system in electrification railway-Part 8:Connection clamp for stitch wire: TB/T 2075.8-2020[S]. Beijing: China Railway Press, 2021.
- [17] 国家铁路局. 电气化铁路用铜及铜合金绞线: TB/T 3111-2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017. National Railway Administration of the People's Republic of China. Copper and copper alloy stranded conductors for electric railway: TB/T 3111-2017[S]. Beijing: China Railway Press, 2017.
- [18] 彭龙虎,李向东,李文斌,等. 高速铁路隧道内接触网空气动力学影响因素研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2023, 28(3): 149-158.
 PENG Longhu, LI Xiangdong, LI Wenbin, et al. Study on Aerodynamic factors of overhead catenary in high speed railway

PENG Longhu, LI Xiangdong, LI Wenbin, et al. Study on Aerodynamic factors of overhead catenary in high speed railway tunnel[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2023, 28(3): 149-158.

[19] 关金发, 田志军, 张学武. 接触网弹性吊索参数对弓网动态性能影响[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(3): 659-665.

GUAN Jinfa, TIAN Zhijun, ZHANG Xuewu. Influence of catenary stitch wire parameters on dynamic performance between pantograph and catenary[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(3): 659–665.

- [20] Railway applications Current collection systems Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line: DS/EN 50318: 2018[S]. Danish Standards [ds], 2018.
- [21] 李瑞平,周宁,张卫华,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, 32(6): 33-37.

LI Ruiping, ZHOU Ning, ZHANG Weihua, et al. Influence of high-speed trains passing through tunnel on pantograph-catenary dynamic behaviors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(6): 33–37.

- [22] JI Zhanling, GUO Yi, GUO Dilong, et al. Coupling effects between pantograph of high-speed train and tunnel[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(11): 3830–3847.
- [23] 彭培火,陈立明,王伟,等. 吊弦振动频率及幅度对疲劳寿命的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(2): 471-477.
 PENG Peihuo, CHEN Liming, WANG Wei, et al. The effect of frequency and amplitude of dropper on its fatigue life[J].
 Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 471-477.
- [24] 张驰航. 钢丝绳弯曲疲劳特性及其试验系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016: 17-25.

ZHANG Chihang. Research on bending fatigue characteristics of wire rope and test system[D].Harbin: Harbin Engineering University, 2016: 17–25.

[25] 张钫, 张平萍. 影响钢丝绳弯曲疲劳试验因素的分析[J]. 金属制品, 2006, 32(3): 46-47.

ZHANG Fang, ZHANG Pingping. Analysis of effect factors on bend and fatigue test of steel wire rope[J]. Steel Wire Products, 2006, 32(3): 46–47.