

高铁接触网悬吊线索疲劳寿命研究进展

何凡¹, 孙娟¹, 陈立明²

1. 北京建筑大学理学院, 北京 102612

2. 中国铁道科学研究院标准计量研究所, 北京 100015

摘要 由于列车速度的不断提高,接触网悬吊线索的振动幅度也随之增大,对列车的安全行驶造成了不良的影响。接触网悬吊线索疲劳寿命与列车安全行驶密切相关。分析了接触网悬吊线索在材料疲劳、弓网关系等方面的性能,并在已有研究成果的分析与总结的基础上,指出了目前接触网悬吊线索疲劳性能研究中存在的接触网部件变形、弓网空气动力学、研究方法等问题,展望了接触网和环境风场之间的双向流固耦合、接触网实测数据的维度等方面的研究与趋势。

关键词 高铁接触网;悬吊线索;疲劳性能

近年来,由于高铁技术发展迅速,对接触网的安全性问题的关注也越来越高,在设计电气化铁路的标准中,接触网的疲劳寿命是必须考虑的。列车运行速度越快,接触网的波动幅度就会越大,就要求对接触网的疲劳寿命进行估算,以确保列车的安全运营。接触网主要由接触线、承力索、弹性吊索、整体吊弦等柔性线索组装连接。因此,保证列车安全运行的前提是接触网的安全可靠性。

随着列车速度逐渐提高,高速铁路安全性在保障列车的安全行驶中意义重大。在电气化铁路中,吊弦的破损情况比较常见,它对铁路交通中断会产生不容忽视的影响。列车在行驶过程中,接触网在

给受电弓传输电能的同时会经受较高的动应力作用,使得接触网容易发生疲劳断裂,然而这种疲劳断裂属于脆性断裂,最重要的特点是在断裂之前结构的外观仍然不会发生明显的变化,因此,研究接触网的疲劳破坏、预测接触网的疲劳寿命就显得格外重要。近年来结构部件都向大型化的方向发展,由于接触网疲劳破坏而导致事故发生的频率越来越高,疲劳问题变得越来越重要。

高速铁路的安全运营对接触网悬吊线索的装备水平、安全可靠性提出了较高的要求,评价接触网悬吊线索疲劳性能的指标有外界环境因素、接触网的材料、线路条件、弓网关系、零部件损坏变形

收稿日期:2018-11-19;修回日期:2019-03-25

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(2017J010-A)

作者简介:何凡,副教授,研究方向为工程力学,电子信箱:hefan@bucea.edu.cn

引用格式:何凡,孙娟,陈立明. 高铁接触网悬吊线索疲劳寿命研究进展[J]. 科技导报, 2019, 37(20): 84-93; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.20.009

等,但是接触网材料、弓网关系在导致接触网故障方面占很大比重,此外,不同研究方法适用于不同工况,因而本文主要从材料特性、弓网关系、研究方法这3个方面进行分析。

1 材料疲劳特性研究进展

高速铁路接触网的任务是向列车提供源源不断的电能,它的导线材质是由铜芯铝绞线制成,接触导线、承力索及线夹等材质是铜合金,因此铜的疲劳性能研究在导线材料疲劳性能研究中非常重要。对于镀锡铜膜的拉伸和疲劳特性中,Huh^[1]通过考察镀锡铜膜所承受的应力幅水平与该应力幅下发生疲劳破坏时所经历的应力循环次数的关系曲线($S-N$ 曲线),研究3种(0.05、0.3、0.5)载荷比 R (R 表示对镀锡铜膜循环加载时的最小载荷与最大载荷之比)的影响,通过用扫描电子显微镜观察其断裂表面,发现测试断面的横截面在膜厚方向会发生收缩,且在断裂面出现了一些可延展的韧窝,在载荷循环作用下,铜膜的速断裂是以穿晶断裂模式进行的。Nasution^[2]用有限元法对300 mm²铜导线的疲劳强度进行试验研究,开发了一个新的分析模型——有限元模型,并进行了验证,有限元模型是基于梁和梁接触单元,采用简化的接触建模过程,通过对试验数据的校准获得摩擦系数,并通过敏感性研究不同大小和数量的元素模型,对于有限元模型分析,获得导体的预测与试验疲劳强度是一致的。在低循环疲劳、恒应变振幅下,多晶铜的错位结构演化是显而易见的,Huang^[3]利用扫描电子显微镜反散射成像技术,对铜材料进行了错位结构疲劳研究,由于超大晶粒具有无氧高传导率的性质,可以用扫描电镜和透射电镜对多晶铜的显微组织进行研究,结果表明:在低应变振幅下, $S-N$ 曲线显示软化硬化后在初始阶段并且达到断裂,不会发生二次硬化;在超大晶粒中,可以观察到有一种特殊的微结构,它的胞壁嵌入定向结构。

列车要正常运行,就要求接触网在任何条件下都能安全供电,因此接触网材料的疲劳特性与列车的安全运营密切相关。通过以上文献分析,可以看

到铜材料的拉伸和疲劳行为以及在拉伸和弯曲载荷作用下的疲劳机理及疲劳强度方面做了很多研究,进一步的研究将集中在全截面铜导体的疲劳问题。目前,中国接触网使用铜合金材料系列仍然借鉴欧洲和日本等国家的经验,随着电气化铁路建设进程的加快,对铜合金材料的需求也越来越大,只有不断的探索研究,才能开发出耐磨、抗疲劳的铜材料。

2 弓网关系研究进展

弓网关系是接触网与受电弓之间的关系,即接触网从变电所获得电能之后,通过与受电弓的接触将电能传输给列车,从而保证列车能够正常运营。

在实际运营中,受电弓对接触线会产生很大的应力,使得接触网极易发生疲劳断裂。刘方林^[4]在对接触线疲劳可靠性分析的基础上,提出了一种评估方法,基于弓网动态仿真的接触线疲劳可靠性。王伟^[5]为了研究当列车通过时接触网的振动情况以及疲劳机理,仿真模拟了高速铁路接触网,发现受电弓对吊弦产生的最大动态力可以达到吊弦静态力的2~3倍,且受电弓是反复作用于接触线,提高了吊弦发生疲劳破坏的可能性。何凡课题组^[6]基于有限差分方法研究了激励频率、振动幅度和作用力对吊弦疲劳寿命的影响,结果表明:吊弦疲劳寿命的对数值随着的激励频率、振动幅度和作用力的增加基本都呈现出线性降低的趋势。为了提高接触网的疲劳寿命,在普通吊弦存在的缺陷的基础上,可以对既有的吊弦优化结构,采用的吊弦线的抗弯折能力要强,通过改进压接的技术,研制出了一种新型的耐疲劳整体吊弦^[7],新型的耐疲劳整体吊弦无论是在材料的选择上,还是在拉伸强度试验以及模拟振动试验上都比既有载流整体吊弦的各项性能有优势^[8]。

当列车通过时,接触网会在受电弓的作用下向上抬升,导致弓网授流受到影响,使列车行驶的安全性受到威胁。随着列车行驶速度的加快,继续深入研究弓网之间的关系对列车的安全行驶越来越重要。弓网之间的关系包括弓网之间的接触压力、

弓网电弧及弓网空气动力学研究。

2.1 弓网接触压力

接触网与受电弓系统之间的授流过程并不是一个静态的过程,郭奇章^[9]研究发现列车运行速度越快,弓网间的直接接触就越难实现,这样直接影响到接触网对受电弓的授流质量,如果速度不在系统所允许的范围内,不仅影响弓网之间的授流质量,甚至会造成列车的正常运行。因此解决好弓网之间的关系,更好地改善它们之间的关系,对提高接触网的授流质量,加快列车运行的速度非常重要。当弓网之间的接触压力太小的情况下,它们之间就会产生电弧,接触压力过大时,受电弓弓头和接触线的磨损加剧,可以用弓网之间的接触压力反映接触线的不平顺状态。目前对接触线不平顺波长分析的研究刚刚开始,接触压力时频特性有两种状态,分别是正常情况下和接触线复杂不平顺时,这两种状态都需要用ZAMD(Zhao-Atlas-Mark Distribution)分析,这为弓网之间的接触压力的评估开拓了新的思路^[10]。

2.2 弓网电弧试验装置

列车速度在不断加快,弓网之间会频繁发生电弧,为确保弓网之间能够正常授流,需要分析造成弓网之间发生电弧的原因。其中,有两个突出的因素加剧了受电弓和接触线的磨损,严重破坏了电流的采集质量和安全等问题:受电弓通过时,接触网会产生振动;受电弓引起接触网振动的次数。因此,研究弓网电弧是很有必要的。Wu^[11]根据接触网与受电弓之间的动态关系,对受电弓与接触网之间的直接接触进行仿真,建立了弓网电弧试验装置,用来研究弓网电弧的电气参数和动态接触时的电阻,他根据弓网的电接触特性,研制了一套新的弓网电弧测试装置,这个新的弓网电弧测试装置不仅可以模拟柔性直接接触,而且受电弓的Z字形和垂向运动,接触线的张力也可以调节,因此,可以利用它来研究弓网系统的基础问题。陈乐瑞^[12]分析了产生弓网电弧的原因和机理,当受电弓滑板 and 接触线之间从接触到分开时,如果被断开的电流和电压分别超过0.25~1 A和12~20 V,则在间隙中会产生电弧,可以根据电弧的特点判断弓网间隙是否产

生了电弧,如果在间隙中有一团温度极高、能够发出强光的圆柱形气体产生,就证明在弓网之间产生了电弧,要采取相应的措施来减轻电弧带来的危害,比如可以降低接触电阻、优化接触网结构等。王万岗^[13]分析了弓网滑动授流过程,研制了一套弓网电弧试验系统,该系统能够模拟弓网柔性平直接触、滑板“z”字形运动及垂向沉浮运动等弓网运动状态,并且可以利用该系统对弓网接触电阻和电弧电气参数、形貌特征进行试验验证,这些系统自身具有的特点决定了它可以反映实际运行状态的弓网电弧,可为弓网电弧的研究提供试验基础。

Gao^[14]提出了弓网起弧模型,在该模型中考虑了列车速度对消弧功率的影响,结果表明:列车运行速度对起弧电压、起弧持续时间以及过零时间有显著影响,还介绍了电弧平均功率与列车速度的定性关系,并将现场试验数据与计算结果进行比较,结果验证了所建立模型的正确性。受电弓与接触网之间的动态相互作用影响着授流质量,特别是当两个受电弓用于授流时,第二个受电弓受到第一个受电弓通过时在架空线路上产生的干扰,这会导致集电弓的劣化,在这些条件下,连续火花、接触损耗、电弧的发生都会导致接触线和集电条磨损增加。为了研究电弧对驱动电机和信号系统等车载电气系统产生的干扰,Bucca^[15]提出了一种将电流采集质量与电干扰水平相关联的方法,此方法可以应用于实际情况中双弓采集电流的情况。Gao^[16]采用数值模拟的方法研究了受电弓降弓过程中弓网电弧的动态特性,基于经典磁流体力学理论,考虑了弓网电弧动力学的时间演化,建立了弓网电弧动力学模型,通过对受电弓降弓过程中温度场和流场的分析,在悬链线下方发现了两个有趣的漩涡,在受电弓运动过程中,由于特殊的气流运动,涡流向相反的方向旋转,气体流动对电弧柱产生了热夹点效应,对电弧等离子体的下一步行为有着重要的影响。受电弓与接触网之间的反复分离,越来越多的起弧事件加剧了弓网系统的损伤程度,为了研究这种损伤的机理,Zhu^[17]通过求解一组电弧等离子体守恒方程来确定电弧中的温度分布,并讨论了不同试验条件对弓网电弧特性及温度分布的影响,将仿

真结果与高速摄像机拍摄的真实电弧图像进行了比较,得到了较好的一致性。Huang^[18]基于图像处理的弓网电弧检测能够快速检测受电弓接触网系统的状态,从而能判定系统中是否存在电弧,与传统的检测方法相比,根据图像信息的使用情况,将其分为红外线、紫外线和可见光三种,这是在总结近年来各种非接触式电弧检测方法的基础上提出来的。为了保证列车在电弧作用下的安全,Gao^[19]根据电磁辐射信号,选择了自行设计的四阶希尔伯特分形天线进行电弧检测,考虑了信号的时间、频率和联合时频域分析方面,并在不同的电流和电极间隙下进行了多次试验,研究了不同时刻的电磁脉冲,结果表明:电磁辐射脉冲和电弧放电过程中电压的突变相对应,且所有特征频率均处于相同的值。Peng^[20]基于 Matlab/Simulink 仿真电源系统工具箱提供的通用模块,建立了牵引供电系统产生电弧的模型,分析了弓网在不同影响因素下的电压、电流变化规律,主要包括功率因数和牵引电流。研究发现,弓网电弧能量指数随牵引电流的增大而增大,随功率因数的增大而减小。利用弓网灭弧试验系统,研究了不同功率因数和电流下弓网电流和电压的变化规律,证明了上述仿真方法的有效性和正确性。朱光亚^[21]为了分析列车在车站启动或者制动时受电弓-接触网接触材料的烧蚀情况,研究了受电弓升、降过程中电弧的特性,利用磁流体动力学理论,建立了弓网电弧等离子体的有限元模型,在求解电弧动力学方程和麦克斯韦方程的基础上,得到了不同接触网和受电弓片间隙值下的电弧温度场分布,通过对仿真结果与试验结果进行比较,验证了仿真模型的正确性。综上所述,许多学者研究了弓网电弧,为弓网电弧提供了更多的理论依据,随着中国电气化铁路进程的加快,对弓网电弧研究的现实意义越明显。

2.3 弓网空气动力学

在试验台上,Johann^[22]对受电弓的运动进行了演示,得到接触网与受电弓的接触力,发现该接触力与原铁路数据吻合很好,通过对接触力的标准变化与铁路线路实验结果比较,不仅可以用来判断动态质量,而且每个优化步骤的结果也可以快速确

定。接触网在受电弓的循环作用下,容易发生疲劳断裂,尤其当动力学与磨损耦合的时候,其疲劳现象更为复杂^[23]。如今高速列车运行速度不断提升,空气动力导致弓网在垂直方向发生振动、竖直方向有较大的冲击、水平方向发生摆动,严重影响了接触线与受电弓的接触质量,因此,授流质量也会受到影响。研究弓网空气动力学的方法主要有3种,分别是数值仿真计算、风洞试验和线路试验^[24]。目前,关于该方面的研究还不能完全确定接触网的摆动机理,在建立环境风场时,常用的方法是通过功率谱密度函数经验公式,但是这与实际的环境状况还有一定的差距。今后必须继续对弓网空气动力学进行研究,进一步完善弓网系统动态特性的研究体系,保证列车的安全运营。

2.4 随机风场对弓网耦合关系的影响

风场是影响高铁接触网动态性能主要因素之一。特别是强风地区,由于风场对接触网的作用,在接触网定位点、吊弦点处极易形成应力集中,接触线容易发生疲劳的地方往往就是应力存在的地方,所以在强风地区,对接触线定位点和吊弦点处应重点维护和保养^[25]。

随机风场的模拟其实是实现对脉动风的模拟,目前模拟风速的方法主要有4种,分别是:基于线性滤波法自回归(AR)模型法^[26]、谐波合成法^[27]、小波重构法^[28]、随机 Fourier 谱法^[29]。这4种方法模拟风速时程的功率谱密度中,与目标值差别较大的方法是基于 AR 模型法和小波重构法;谐波合成法与随机 Fourier 谱法是模拟风速的几种方法中与目标谱最一致的。谐波合成法是模拟风速的几种方法中最适合模拟接触网空间风场的。

随着风速的增加,水平风会增大接触线特征点的垂直振幅,但是水平风不会增大接触线特征点幅值,对接触线振动特性的影响也很小^[30]。静风载荷对接触网和受电弓的相互作用影响很小,当风速增大时,接触线和受电弓之间的磨损会增大,接触损失也会增加,静风扰动和摩擦耦合会影响接触网的电流采集质量^[31]。为了提高高速受电弓接触网在强随机风场下的电流采集质量,Song^[32]提出了一种基于比例导数滑模面的高速主动受电弓滑模控制

器,采用非线性有限元方法建立有限元模型,用经验谱法模拟接触网脉动风速,适当确定比例导数滑动面,保证滑动面接近零时,受电弓头部在接触力主导频率下的机械阻抗减小。Zhu^[33]研究了铁路接触网在风致条件下的动力学响应,用有限元软件建立了接触网的有限元模型,基于该模型对接触网系统进行了分析,采用谐波综合法,对风场进行了模拟,并在模拟风载荷作用下进行了动态响应仿真,与现场试验数据比较,研究了接触网在风振响应下的特性。宋洋^[34]对接触网的空气动力参数进行了结冰分析,分别推导和模拟了静风荷载和脉动风荷载,并将静风荷载和脉动风荷载引入到有限元分析中,研究表明:高速铁路接触网风致振动主要是由风的波动引起的,风的增加对接触网风振响应影响较大。

3 悬吊线索疲劳寿命的研究方法进展

悬吊线索的疲劳寿命应该按可靠性三要素处理,即在规定的基准期内,在规定的条件下,完成规定的功能。在研究悬吊线索疲劳寿命时,先确定其设计工况,再按设计工况进行疲劳等效试验,获取悬吊线索的疲劳寿命。

3.1 雨流计数法

雨流计数法是分析接触线的疲劳应力时程特征最普遍的一种方法。雨流计数法计数时,需要将循环载荷进行离散,计数结果用应力幅值、应力均值表示。

雨流计数法实现的过程如下:模拟出弓网动态系统,可以将得到的接触线每个单元的应力时程,作为接触线单元的疲劳应力谱;用雨流计数法对接触线单元的疲劳应力谱进行统计处理,模拟出接触线的疲劳;估算接触线疲劳寿命的基本步骤就可以得知,用已知的参数计算接触线每一跨能够安全运行的次数,从而接触线疲劳寿命的不利位置就可以知道。

毕继红^[35]利用雨流计数法经过分析得到:在接触线每一单元的应力时程中,都会出现一个应力最

大值,其他时刻的应力值都比这个应力值要小,但是定位点右侧和吊弦点右侧附近单元不仅有一个最大应力值,其他的应力值也是不能被忽视的;在定位点和吊弦点右侧由于应力集中的存在,会导致这些位置的接触线疲劳寿命最低,所以在维护接触网的时候,这些位置附近的接触线需要着重保护;影响接触线疲劳寿命的因素有很多,接触线预张力、承力索预张力、车速、跨距、吊弦数目是关键的因素。

3.2 名义应力法

在估算材料疲劳寿命时,相较于雨流计数法,名义应力法是比较传统的一种方法。在对材料进行安全疲劳寿命估算的方法中,名义应力法估算疲劳寿命的步骤为:确定构件的易疲劳部位时,应该综合考虑应力集中大小和应力集中系数;将实际测得的疲劳应力载荷谱转化为试验应力谱;建立S-N曲线时要与各应力谱相对应;选取较为适合的累积损伤理论和疲劳寿命的分散系数^[36]。

在研究弹性链型悬挂接触网的疲劳寿命时,王晓阳^[37]首先采用直接积分法,再用有限元软件对接触网进行仿真分析,并通过名义应力法对材料进行疲劳分析,预测出接触线能够安全使用的次数,可以进一步得知接触线容易发生疲劳的位置,分析得到:接触线在定位点和吊弦点这两个地方容易发生疲劳。

3.3 简化载荷谱法

相较于雨流计数法、名义应力法,简化载荷谱法实现起来比较简单,分为3个步骤:简化接触线单元的应力时程,从而得到一个最大的应力循环;Goodman直线进行修正,它的限界是屈服极限,基础是Goodman提出的线性经验公式,用直线替代实际疲劳极限应力线后,得到的一种简化疲劳极限;通过S-N曲线获得接触线各单元的疲劳寿命^[38]。对于如何确定接触线疲劳寿命的不利位置的方法:首先需要用简化载荷谱法分析接触线不利位置的应力时程特征,确定接触线单元的疲劳寿命值后,再比较接触线单元的疲劳寿命值,就可以得出接触线疲劳寿命的不利位置。

估算接触线在最大的应力循环下的疲劳寿命

时,雨流计数法和简化载荷谱法得到接触线的最终寿命差别并不大,但是简化载荷谱法只取应力谱的最大和最小值,使其不能准确预测接触网的疲劳寿命。陈花丽^[39]首先对弓网动态系统进行了模拟,然后通过使用 APDL 语言编制程序,估算了柔性悬挂接触网的疲劳寿命,分析了接触线上不利位置的具体部位,认为采用雨流计数法比简化载荷谱法更为精确。

3.4 不同研究方法的优缺点

本文分析了估算接触网疲劳寿命的3种方法:雨流计数法、名义应力法和简化载荷谱法,从疲劳角度对接触网悬吊线索的寿命研究方法进行了总结,在实际应用时应根据接触网悬吊线索疲劳失效准则的不同来选择不同的估算方法,以达到疲劳寿命预测相对准确的目的。通过对接触网悬吊线索疲劳寿命估算方法的分析,得出这3种方法的优缺点及适用范围。

1) 简化载荷谱法的不足是在应力时程中,只取最大的应力幅值,忽视其他应力幅值,所以得到的疲劳寿命的结果会比实际的要高;优点是在计算接触线每跨的最终寿命时,若只取一跨内各单元的寿命最小值作为最终寿命,则简化载荷谱法和雨流计数法这两种算法所得疲劳寿命差别很小,所以只考虑每跨的最终疲劳寿命时,用简化载荷谱法就可以^[40];简化载荷谱法适用于估算其他单元附近接触线的疲劳寿命值。

2) 雨流计数法的不足是虽然计数过程与材料真实应力-应变特性相符,但其技术条件偏于复杂,从而使计算需要大量时间;优点是载荷-时间历程的每一部分都参与计数,且只计数一次,一个大的幅值所引起的损伤不受截断它的小循环的影响,截出的小循环迭加到较大的循环和半循环上去,因此可以据累计损伤理论,将等幅实验得到的 S-N 曲线和雨流法的处理结果输入计算机,进行接触网悬吊线索的疲劳寿命估算便能得到较满意的结果;雨流计数法适用于估算定位点和吊弦点附近的接触线单元的疲劳寿命。

3) 名义应力法的不足是在弹性范围内研究疲劳问题,所以会忽略缺口处的变形,而且标准试样、

结构之间的关系与结构的形状、载荷作用的方式、结构的大小、材料等许多因素都有关系,所以很难确定他们之间的关系;优点是它以结构的名义应力作为试验和寿命估算的基础,结合材料的 S-N 曲线,按线性累积损伤理论估算结构疲劳寿命,简单易行;名义应力法的适用范围比较小,只适用于计算应力水平较低的高周疲劳和无缺口结构的疲劳寿命。

4 高铁接触网悬吊线索疲劳寿命研究中存在问题

随着电气化铁路的快速发展,目前在接触网材料的选择上、弓网耦合关系上,对接触线疲劳寿命的分析上都进行了较为深入的研究,使得接触网能尽可能满足各个方面的要求,这对列车的安全行驶做出了很大的贡献。但同时也应该注意到在接触网材料、弓网关系和接触网疲劳寿命方面还存在一些问题需要进一步探讨。

1) 材料方面存在的问题。选择好接触网材料是高铁接触网悬吊线索疲劳寿命研究所面临的挑战。目前,对接触网材料的研究大部分是对其整个结构的分析,关于接触网材料的内部结构分析较少。接触网部件长期使用会发生变形,尤其是车速加快,导致接触网部件已经成为最需要维护的零件之一,如果其部件发生变形,弓网的授流质量会变差,影响行车安全,接触网零部件的可靠性分配存在问题导致高铁接触网的悬吊线索疲劳寿命达不到预期。因此,为保证列车的安全运营,选择的接触网材料就要满足零件的使用要求,根据材料的基本性能指标,正确选择锻件的原材料。

2) 弓网关系存在的问题。在风场作用下,接触网动态仿真研究主要还是单向流固耦合。一般情况下,单向流固耦合只是考虑了流场对固体变形的影响,这种仿真方法无法实现精度要求。在实际工况中,其情况更为复杂,接触网悬吊线索的设计工况需要仿真预测,而目前由于投入的人力物力不够,仿真结果并不准确。在以往的弓网空气动力学的研究中,还存在着以下问题:没有把弓网的振动

与周围流场的相互耦合作用考虑在内;通常采用功率谱密度函数经验公式来构建环境风场,实测采集较少;目前对接触网在极端气象条件下的振动现象研究较少;对于受电弓空气动力学研究主要考虑由于高速运行引起的强气流影响,对于接触网空气动力学研究主要考虑环境风的影响,这些研究还不能完全揭示高速弓网动态特性的影响因素和演变规律。随着列车运行的速度越来越快,周围流场造成弓网耦合振动的幅度也越来越大,从而引发列车离线的次数越来越频繁,授流质量进一步恶化。

3) 研究方法存在的问题。通过归纳对接触网悬吊线索疲劳寿命预测方法的优缺点以及适用范围,目前的研究方法还存在着以下问题:目前大部分的研究都是针对接触网悬吊线索的整个系统,单独对吊弦的研究比较少;大部分的理论研究结果只是预测了接触网悬吊线索的疲劳寿命,并没有通过试验验证其结果的准确性;目前对接触网悬吊线索的评估方法比较单一,还没有形成完善的接触网评估系统;有限元模型是分析接触网悬吊线索疲劳寿命最常用的模型,该模型在使用时需要做单元剖分,为了理论计算能够接近实际情况,这就需要对单元剖分精细,但是这样会大大降低求解效率,加大计算量。

5 结论

分别从接触网悬吊线索材料、弓网关系、研究方法3个方面分析和总结了接触网悬吊线索疲劳寿命的研究成果,分别从弓网接触压力、弓网电弧、弓网空气动力学、随机风场对弓网耦合关系的影响方面分析与总结弓网关系的研究成果,介绍了3种较常用的疲劳寿命预测的方法,并指出了目前对接触网悬吊线索疲劳寿命的预测仍然存在着一些不足。

在实际情况中,处理疲劳问题更加复杂,要想理论研究尽可能地接近实际情况,预估接触网的疲劳寿命就非常重要,如果要分析接触网的疲劳问题,就要全面的考虑各种因素对接触网疲劳寿命造成的不利影响,例如接触网材料的内部结构、风速、

列车行驶的速度、弓网接触压力等,针对目前在研究接触网疲劳特性方面存在的问题。因此,今后研究中应考虑以下4个方面:1) 考虑将接触网和环境风场之间的双向流固耦合引入到接触网的动态仿真中;2) 在今后的仿真验证中,增加对接触网实测数据的维度,结合实测数据建立模型;3) 针对实际高铁线路构建相应的评估系统,使得该评估系统能指导实际高速接触网的运营维护;4) 精确分析载荷是如何作用于接触网的,再结合试验数据,准确地预测接触网的疲劳寿命值。

参考文献 (References)

- [1] Huh Y H, Kim D I, Kim D J, et al. An investigation of fatigue characteristics of copper film[J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(7): 1033-1038.
- [2] Nasution F P, Saevikk S, Berge S. Experimental and finite element analysis of fatigue strength for 300 mm² copper power conductor[J]. *Marine Structures*, 2014, 39(39): 225-254.
- [3] Huang H L, Mao S W, Gan D, et al. The strain amplitude controlled fatigue behavior of pure copper with ultra large grain size[J]. *Material Science & Engineering A*, 2013, 559(1): 170-177.
- [4] 刘方林, 张静, 杨红梅, 等. 高速接触线动态疲劳可靠性研究[J]. *机械科学与技术*, 2016, 35(10): 1618-1623.
Liu Fanglin, Zhang Jing, Yang Hongmei, et al. Investigation on dynamic fatigue reliability of high-speed contact line[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2016, 35(10): 1618-1623.
- [5] 王伟, 吴积钦, 关金发, 等. 高速铁路接触网吊弦疲劳实验台[J]. *高速铁路技术*, 2014, 5(3): 22-25.
Wang Wei, Wu Jiqin, Guan Jinfa, et al. A fatigue test rig of high-speed railway catenary dropper[J]. *High Speed Railway Technology*, 2014, 5(3): 22-25.
- [6] Chen L M, Peng P H, He F. Fatigue life analysis of dropper used in pantograph-catenary system of high-speed railway[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(5): 1-10.
- [7] 杨广英. 高速铁路接触网整体吊弦断裂分析及改进效果验证[J]. *铁道技术监督*, 2016, 44(9): 21-23.
Yang Guangying. Analysis of the overall suspension chord fracture of the contact network of high-speed railway and its improvement effect verification[J]. *Railway Technical*

- Supervision, 2016, 44(9): 21-23.
- [8] 鲁敏, 韩兰贵. 高速铁路接触网耐疲劳载流整体吊弦的研发与比较[J]. 铁道工程技术与经济, 2017, 32(3): 1-4.
Lu Min, Han Langui. Research and comparison of fatigue resistant current carrying integral hanging string for high speed railway contact network[J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2017, 32(3): 1-4.
- [9] 郭奇章. 高速电气化铁路弓网关系[J]. 中国铁路, 2012(7): 45-47.
Guo Qizhang. The arch network relationship of high speed electrified railway[J]. Chinese Railways, 2012(7): 45-47.
- [10] 汪宏睿, 刘志刚, 宋洋. 基于ZAMD的高速铁路弓网接触压力及接触线不平顺时频分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(1): 41-47.
Wang Hongrui, Liu Zhigang, Song Yang. The time frequency analysis of the contact pressure and the contact line irregularity of the high-speed railway based on ZAMD[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(1): 41-47.
- [11] Wu J, Wu G N, Gao G Q, et al. Pantograph-catenary arc test apparatus for high-speed railway[J]. Instrumentation, 2014, 1(2): 60-66.
- [12] 陈乐瑞, 潘秋萍. 电气化铁路弓网电弧现象研究[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(9): 144-145.
Chen Lerui, Pan Qiuping. Research on arc phenomenon between pantograph and catenary in electrified railway [J]. Industrial Control Computer, 2016, 29(9): 144-145.
- [13] 王万岗, 吴广宁, 高国强, 等. 高速铁路弓网电弧试验系统[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 26-31.
Wang Wan'gang, Wu Guangning, Gao Guoqiang, et al. The pantograph-catenary arc test system for high-speed railway[J]. Railway Transaction, 2012, 34(4): 26-31.
- [14] Gao G Q, Zhang T T, Wei W F, et al. A pantograph arcing model for electrified railways with different speeds [J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2017: 1-10.
- [15] Bucca G, Collina A, Manigrasso, et al. Analysis of electrical interferences related to the current collection quality in pantograph-catenary interaction[J]. Rail and Rapid Transit, 2015, 225: 483-499.
- [16] Gao G Q, Hao J, Wei W F, et al. Dynamics of pantograph-catenary arc during the pantograph lowering process[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(11): 2715-1723.
- [17] Zhu G Y, Gao G Q, Wu G N, et al. Modeling pantograph-catenary arcing[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(7): 1687-1697.
- [18] Huang S Z, Zhang F, Yu L L, et al. Overview of non-contact pantograph-catenary arc detection based on image processing[C]//International Symposium for Intelligent Transportation & Smart City. Shanghai: Springer, 2017: 279-289.
- [19] Gao G Q, Yan X, Yang Z F, et al. Pantograph-catenary arcing detection based on electromagnetic radiation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 99: 1-7.
- [20] Peng K S, Gao G Q. The fluence of power factor and traction current on pantograph-catenary arc energy[C]. IEEE 2016 International Conference on High Voltage Engineering and Application(ICHVE)Chengdu, 2016: 1-4.
- [21] 朱光亚, 吴广宁, 高国强, 等. 高速列车静态升降弓电弧的磁流体动力学仿真研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 642-649.
Zhu Guangya, Wu Guangning, Gao Guoqiang, et al. MHD simulation and analysis of pantograph-catenary arc in the process of pantograph raising and lowering [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 642-649.
- [22] Johann Deml, Wilhelm Baldauf. A new test bench for examinations of the pantograph-catenary interaction[C]. Proceedings World Conference on Railway Research. 2001: 1-5.
- [23] Massat J P, Nguyen-Tajan T M L, Maitournam H, et al. Fatigue analysis of catenary contact wires for high speed trains[C]. The 9th World Congress on Railway Research, 2014: 1-11.
- [24] 张静, 刘志刚, 鲁小兵, 等. 高速弓网空气动力学研究进展[J]. 铁道学报, 2015, 37(1): 7-15.
Zhang Jing, Liu Zhigang, Lu Xiaobing, et al. Study on aerodynamics development of high-speed pantograph and catenary[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(1): 7-15.
- [25] 宋洋, 刘志刚, 汪宏睿, 等. 随机风场下高速铁路接触线风振疲劳分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(7): 20-25.
Song Yang, Liu Zhigang, Wang Hongrui, et al. Analysis on influence of stochastic wind field on wind vibration fatigue of high speed railway catenary[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7): 20-25.
- [26] 高洪波, 宋东升, 黄宇立. 基于AR模型的脉动风速时程模拟[J]. 山西建筑, 2015, 41(27): 33-35.

- Gao Hongbo, Song Dongsheng, Huang Yuli. Wind speed time history simulation of pulsating wind based on AR model[J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(27): 33-35.
- [27] 孙瑛, 林斌, 武岳, 等. 脉动风场数值模拟的POD-谐波合成法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(12): 13-17.
Sun Ying, Lin Bin, Wu Yue, et al. Waws/pod simulation of fluctuating wind field[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(12): 13-17.
- [28] 陈艾荣, 王毅. 基于小波方法的脉动风模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 427-431.
Chen Airong, Wang Yi. Simulation of random fluctuating wind speed based on wavelet method[J]. Journal of Tongji University Science(Natural Science Edition), 2005, 33(4): 427-431.
- [29] 刘志刚, 侯运昌, 韩志伟, 等. 基于风场模拟的高速接触网动态性能分析[J]. 铁道学报, 2013, 35 (11): 21-28.
Liu Zhigang, Hou Yunchang, Han Zhiwei, et al. Dynamic performance analysis of high speed catenary based on wind field simulation[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 21-28.
- [30] Liu Z G, Song Y, Wang Y, et al. The catenary vibration response of high-speed electrified railway considering horizontal wind[C]//Proceedings of the 2013 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation Berlin: Springer, 2014 : 45-54.
- [31] Duan F C, Liu Z G, Song Y. Study on the current collection of high speed pantograph-catenary system considering static wind perturbation and friction coupling[C]. 35th Chinese Control Conference, 2016: 10236-10241.
- [32] Song Y, Liu Z G, Ouyang H J, et al. Sliding mode control with PD sliding surface for high-speed railway pantograph-catenary contact force under strong stochastic wind field[J]. Shock and Vibration, 2017: 4895321.
- [33] Zhu W L, Zhou Q, Luo W. Wind-induced vibration analysis of railway catenary system based on fluctuating wind field simulation[J]. Machinery & Electronics, 2011: 76-78.
- [34] 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): 20-27.
- 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): 20-27.
- [35] 毕继红, 陈花丽, 任洪鹏. 基于雨流计数法的接触线疲劳寿命分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 34-39.
Bi Jihong, Chen Huali, Ren Hongpeng. Analysis on fatigue life of contact wire based on rain flow counting method[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 34-39.
- [36] 董月香, 高增梁. 疲劳寿命预测方法综述[J]. 大型铸锻件, 2006(3): 39-41.
Dong Yuexiang, Gao Zengliang. A review of fatigue life prediction methods[J]. Heavy Casting and Forging, 2006 (3): 39-41.
- [37] 王晓阳, 张卫华, 李瑞平, 等. 基于名义应力法的弹性链型接触网疲劳寿命预测[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(6): 7-12.
Wang Xiaoyang, Zhang Weihua, Li Ruiping, et al. Fatigue life prediction of elastic stitched catenary based on nominal stress method[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(6): 7-12.
- [38] 毕继红, 陈花丽, 任洪鹏. 基于简化载荷谱法与雨流计数法的接触网疲劳寿命对比分析[J]. 铁道标准设计, 2012, 23(4): 116-119.
Bi Jihong, Chen Huali, Ren Hongpeng. Comparative analysis on fatigue life of overhead catenary based on simplified load spectrum method and rain flow counting method[J]. Railway Standard Design, 2012, 23(4): 116-119.
- [39] 陈花丽. 高速铁路接触网的疲劳寿命分析[D]. 天津: 天津大学, 2011.
Chen Huali. The fatigue life analysis of high-speed railway contact system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [40] 毕继红, 任洪鹏, 陈花丽. 基于雨流计数法的弹性链型柔性悬挂接触网疲劳寿命分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(1): 61-67.
Bi Jihong, Ren Hongpeng, Chen Huali. The fatigue analysis on the elastic chain flexible suspension catenary system based on rain flow counting[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(1): 61-67.

Research progress on fatigue life of suspension wires in catenary of high-speed railway

HE Fan¹, SUN Juan¹, CHEN Liming²

1. School of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102612, China

2. Institute of Standards & Metrology Research, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100015, China

Abstract Due to the increased train speed, the vibration amplitude of the suspension wires in the catenary increases, with a bad effect on the safe driving of the train. The fatigue life of the suspension wires is closely related to the safe driving of the train. In this paper, the performance of the catenary suspension wires with respect to the material fatigue and the pantograph-catenary relationship is analyzed, and the existing problems of the catenary component deformation, the pantograph-catenary aerodynamics and the research methods for the study of the fatigue performance of the catenary suspension wires are pointed out, and the future research and development trends in the aspects of the two-way fluid-solid interaction between the catenary and the environmental wind field, the dimensions of the measured data of the catenary are highlighted.

Keywords high speed railway catenary; suspension wires; fatigue properties ●



(责任编辑 卫夏雯)