

工况条件下地铁列车受电弓弓头位移可靠性分析

谢洁¹,殷浩²,刘思文²,曹阳³

(1. 常州地铁集团有限公司,江苏 常州 213004; 2. 中车齐齐哈尔车辆有限公司,黑龙江 齐齐哈尔 161002;
3. 中车南京浦镇车辆有限公司,江苏 南京 210031)

摘要:为分析实际运用载荷与运行里程对地铁列车受电弓弓头位移可靠性的影响规律,提出一种基于动力学联合可靠性理论的弓头位移可靠性评估方法。根据实际受电弓结构拓扑关系建立其归算质量模型;基于动力学原理构建外载作用下的弓头动力学方程,在此基础上结合可靠性理论,建立考虑参数不确定性条件下的弓头位移可靠性评估模型;以某线路实际运行受电弓为例,对其开展弓头位移可靠性分析。分析结果表明:弓头位移可靠性指标随运行里程的增加不断降低,且弓网接触力越大,可靠性指标降低幅度更加显著。

关键词:地铁列车;受电弓;碳滑板;磨损;可靠性;动力学方程

中图分类号:U264.3⁺4 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)05-0240-04

Reliability Analysis of Pantograph Collector Head Displacement of Metro Train under Operating Conditions

XIE Jie¹, YIN Hao², LIU Siwen², CAO Yang³

(1. Changzhou Metro Group Co., Ltd., Changzhou 213004, China; 2. CRRC Qiqihar Rolling Stock Co., Ltd., Qiqihar 161002, China; 3. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing 210031, China)

Abstract: In order to analyze the influence of practical load and running mileage on the reliability of collector head displacement of metro train, a reliability evaluation method of collector head displacement based on dynamic joint reliability theory is proposed. The reduced mass model is established according to the topological relationship of the actual pantograph structure. Based on the dynamic principle, the dynamic equation of collector head under external load is constructed. On this basis, combined with the reliability theory, the reliability evaluation model of collector head displacement considering parameter uncertainty is established. Taking the actual running pantograph of a line as an example, the reliability analysis of collector head displacement is carried out. The analysis results show that the reliability index of collector head displacement decreases continuously with the increase of running mileage, and the greater the pantograph catenary contact force, the more significant the reduction of reliability index.

Keywords: metro train; pantograph; carbon contact strip; wear; reliability; kinetic equation

0 引言

受电弓碳滑板与接触网接触受流是目前轨道交通车辆重要的动力传输途径,碳滑板与接触网间的相互作用不仅影响受电弓的动力学性能,而且会直接影响电能的传输质量,进而影响列车运行的安全性及稳定性。因此探究碳滑板与接触网间相互作用对受电弓的影响规律具有十分重要的实际意义。

目前,国内外大量学者对弓网间相互作用与受电弓动力学响应的内在规律开展了大量研究。文献[1]研究了受电弓在多种运行工况下的固有频率,为受电弓结构的改进及弓网共振的规避提供了重要的参考价值;文献[2]充分考虑了受电弓组成参数的非线性行为,并对受电弓质量块模型进行了重构,进而采用非线性求解方法对弓网间的动态性能进行分析,研究结果可为弓网关系的精确研究提供借鉴;文献[3]采用快速解析方法对接触网系统进行模拟,同时采用模态分析方法对弓网动力学行为进行了分

析,在保证分析精度的同时提升了分析效率;文献[4]将动力学原理与有限元方法进行结合,构建了接触网与不同结构形式受电弓的动力学仿真模型,并通过实验验证了模型的合理性,为弓网动力学的进一步研究打下了基础;在传统弓网动力学性能分析的基础上,将热力学原理引入弓网关系建模之中,分析了载流温度分布对弓网关系的影响规律,为深入挖掘运行条件下的弓网关系提供了坚实的基础;文献[5]基于接触网及受电弓底架的几何轨迹,提出了一种曲线条件下的弓网动力学行为分析方法,并结合实际案例对弓网动力学表现进行了深入研究,研究结果表明曲线和直线条件的弓网关系存在明显差异;文献[6]提出了一种基于卷积神经网络的碳滑板磨损检测方法,并基于大量样本数据构建了碳滑板磨损识别模型,为滑板磨损条件下的弓网性能分析打下了基础;文献[7-8]基于自制弓网滑动接触试验平台,分析了波动载荷条件下的弓网动力学响应,并构建了弓网动态载流摩擦力模型,为弓网的动态性能分析提供了更加深入的指导。由于制造水平的差异,传统基于结构

参数确定性分析所获取的结果具有一定局限性,为了提升传统弓网动力学分析结果的普适性,开展参数不确定性条件下的弓网动力学响应可靠性分析是十分必要的。

本文以某型号受电弓为研究对象,在分析其拓扑组成关系并构建归算质量模型的基础上,结合动力学及可靠性分析理论,建立弓头位移响应函数,从而构建弓头位移可靠性模型,并根据所收集的碳滑板磨损数据,分析了不同运行里程及弓网接触力条件下的弓头位移可靠性,分析结果可为受电弓的运用及维护提供参考。

1 受电弓归算质量模型的建立

实际受电弓主体结构是由弓头、弓头支架、框架部分、底架及附属结构组成,如图1所示。在工作过程中,框架部分会受到力矩的作用而产生运动,从而带动弓头支架产生垂向位移,进而使弓头与接触网接触受流。

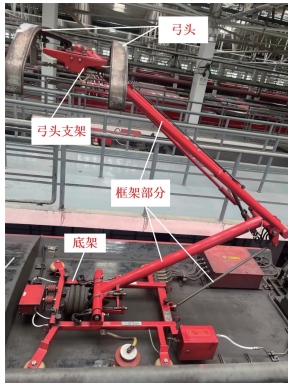


图1 实际受电弓结构

受电弓归算质量模型是根据实际结构参数组成,并针对不同类型问题或研究对象构建的简化模型^[9]。其构建基本思想为根据实际分析问题,将研究对象进行离散化处理,赋予其相应的等效质量,并通过相应的弹性元件将各离散部件进行连接,以确保模型拓扑关系的合理性。

考虑到本文研究对象为弓头滑板与垂向位移之间的关系,因此将受电弓弓头进行离散,作为质量块 m_1 与 m_2 ,并通过弹簧阻尼系统与弓头支架连接;将受电弓框架部分作为质量块 m_3 ,并通过弹簧阻尼系统与底架连接,建立好的受电弓质量块模型如图2所示。

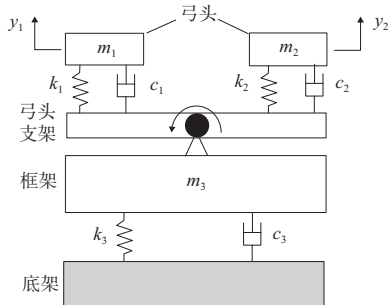


图2 受电弓归算质量模型

2 结构动力学方程的建立

为了完成结构动力学响应分析及可靠性分析之间桥

梁的搭建,需在受电弓质量块模型基础上结合结构动力学分析理论,构建弓头动力学响应模型。考虑到受电弓实际运行工况为弓网频繁接触引起的弓头受迫振动,同时考虑到弓头与弓头支架连接处为刚性连接,可将该处阻尼系数进行忽略,因此将弓头动力学响应分析问题简化为单自由度无阻尼受迫振动问题,该类型问题通常可描述为:

$$y'' + \omega^2 y = F(t)/m \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad (2)$$

$$F(t) = F \sin \theta t \quad (3)$$

式中: y 为结构质量元件位移响应; y'' 为结构质量元件加速度响应; k 为刚度参数; m 为结构质量; ω 为频率; F 为外部载荷赋值; θ 为外部载荷频率; t 为时间参量。

由式(1)可知,弓头位移响应与系统结构参数存在明显微分关系,为了确保后续分析的顺利开展,结合微分方程求解思想,设其通解为

$$y(t) = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t + A \sin \theta t \quad (4)$$

式中: C_1 及 C_2 为弓头自由振动系数; A 为弓头强迫振动幅值。

由式(4)可知,弓头位移响应存在自由振动(前两项)及受迫振动(第三项)两种阶段,考虑到受电弓在实际运行过程中的弓网频繁接触,弓头自由振动所占时间比例极小。因此为简化问题,对弓头自由振动加以忽略。在此基础上,联立式(1)一式(4)求取弓头位移响应为

$$y(t) = \frac{F}{k - \theta^2 m} \sin \theta t \quad (5)$$

据此,为便于后续弓头偏转可靠度模型的构建,同时利于分析结果的合理性,将式(5)与弓头受迫振动特解进行对比,得到弓头在受迫振动条件下的位移幅值为

$$A = \frac{F}{k - \theta^2 m} \quad (6)$$

由式(6)可知,可根据结构及外部载荷参数开展受迫振动条件下的弓头位移计算及后续分析。

3 弓头位移可靠度模型的建立

在受电弓的实际制造及加工过程中,由于加工技术水平的限制,导致实际结构参数会产生一定的偏差,同时考虑到受电弓运行工况的多变性,外部载荷参数亦存在一定波动性,从而引起弓头位移的不确定性。为了量化不确定性因素对弓头位移的影响,从而利于后续弓头位移的可靠性分析,需先根据可靠性分析理论,构建弓头位移功能函数为

$$G = [A] - A \quad (7)$$

式中:[A]为弓头允许位移; A 为弓头实际位移。当 $G > 0$ 时,说明弓头位移处于可靠状态;当 $G = 0$ 时,说明弓头位移处于极限状态;当 $G < 0$ 时,说明弓头位移处于失效状态。

为了实现对功能函数的求解,进而获取不确定性因素作用下的弓头位移可靠度指标,从而实现对弓头位移可靠性的全面评估,赋予[A]及 A 相应的概率分布特征,并根据应力-强度干涉模型,构建弓头位移可靠性指标表达式为

$$\beta = \frac{\mu_{[A]} - \mu_A}{\sqrt{(\sigma_{[A]})^2 + (\sigma_A)^2}} = \frac{\mu_{[A]} - \mu_A}{\sqrt{(c_1 \mu_{[A]})^2 + (c_2 \mu_A)^2}} \quad (8)$$

式中: $\mu_{[A]}$ 与 μ_A 分别为[A]与 A 的均值; $\sigma_{[A]}$ 与 σ_A 分别为

[A]与A的标准差; c_1 与 c_2 分别为[A]与A的变异系数。

综上,本文考虑碳滑板磨损的弓头位移可靠性分析技术流程如图3所示。

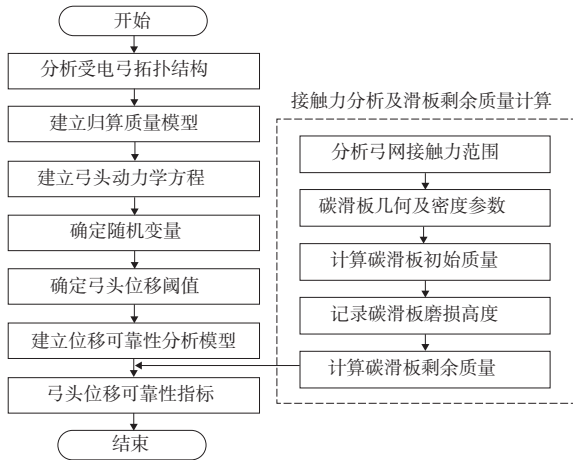


图3 考虑碳滑板磨损的弓头位移可靠性分析技术流程图

4 工程实例分析

为验证所建立的可靠性分析模型在工程上的实际应用价值,根据某线路实际受电弓参数组成情况,对其开展离散化处理,并构建其归算质量模型,同时根据该型号受电弓质量及弹性悬挂元件参数分布情况,赋予质量块模型相应的参数特征,如表1所示。

表1 受电弓归算质量模型参数特征

参数	数值
m_1/kg	3.326 4
m_2/kg	3.326 4
$k_1/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	200
$k_2/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	200
$c_1/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	0
$c_2/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	0

在此基础上,为确保分析结果合理性的同时提升其参考价值,根据TB/T 3271—2011相关标准,确定弓网接触力 F 取值范围为60~300N,并取弓网接触力频率 θ 为20Hz^[10-11]。

根据模型参数特征及外部载荷作用规律,为验证所提方法能够对实际运营条件下的地铁列车受电弓弓头位移进行合理分析,进而为后续弓头位移可靠性的合理评估奠定基础,以表1所示数据为前提,利用MATLAB平台编写相关程序,对受电弓归算质量模型进行数值仿真分析,得到仿真及试验数据条件下的弓头垂向位移幅值对比结果如图4所示。

由图4可知,试验及仿真条件下获取的弓头垂向位移幅值结果变化趋势一致,具有良好的一致性,同时二者误差均处于0.16%~0.32%之间,处于工程上允许误差范围之内,该结果表明所提方法能够对实际运行条件下的弓头垂向位移结果进行合理分析,同时亦能反映出不同接触力对

弓头垂向位移的影响规律,确保了该方法在不同接触力条件下的实用性,可为后续位移可靠性分析奠定良好的基础。

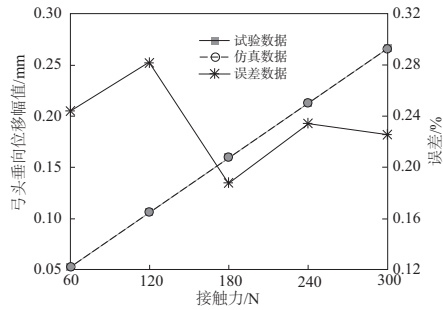


图4 弓头垂向位移幅值结果对比

在验证所提方案合理性的基础上,根据构建的弓头位移可靠性分析模型,计算不同接触力条件下的位移可靠性指标,得到结果如图5所示。其中,为了保证受电弓运行的平稳性,减缓弓网冲击,设弓头允许下移量[A]为1mm,变异系数取0.05。

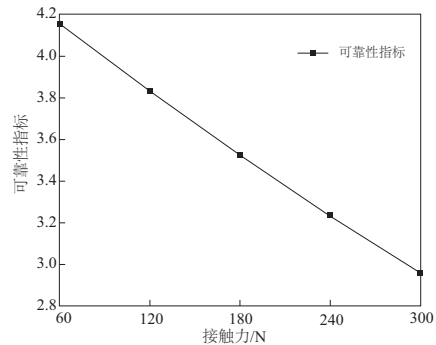


图5 不同接触力下的弓头位移可靠性指标

由图5可知,随着接触力的增加,弓头的位移可靠性指标逐渐自4.1561降低至2.9552,其原因在于随着外部接触力的提升,导致弓头的位移响应不断增加,同时在受电弓结构参数不确定性的影响下,导致实际位移与允许位移的相交区域不断变大,最终引起受电弓弓头的位移可靠性指标不断降低。

在此基础上,为了进一步深入研究碳滑板的磨损效应对弓头位移可靠性的影响,在车辆检修时,利用游标卡尺检测弓头碳滑板剩余高度,并记录该车次运行里程。

根据长期跟踪检测所收集的数据,计算碳滑板在一定间隔运行里程下的损失高度,同时为了简化碳滑板损失质量的计算流程,将碳滑板损失高度在沿其长度方向进行等效处理,并结合碳滑板几何及密度参数开展后续可靠性分析,其中碳滑板相关参数如表2所示。

表2 碳滑板几何及密度参数

参数	数值
长度/mm	1 050
宽度/mm	60
初始高度/mm	22
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.4

根据表 2 所示的碳滑板相关参数,计算其初始质量,进而结合碳滑板损失高度数据,计算固定间隔运行里程下的碳滑板磨损质量,并将其与滑板初始质量之差作为滑板剩余质量,从而利于后续可靠性指标计算,得到结果如图 6 所示。

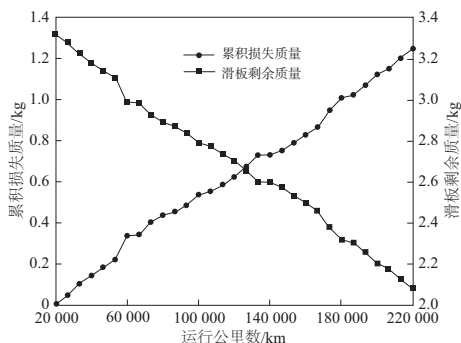


图 6 碳滑板累积损失质量

由图 6 可知,随着运行里程的增加,碳滑板的累积损失质量逐渐从 0.007 9 kg 增加至 1.248 8 kg,滑板剩余质量逐渐自 3.318 5 kg 降低至 2.077 6 kg,其原因在于碳滑板在运行过程当中始终与接触网处于滑动接触状态,且在弓网接触力的作用下,碳滑板与接触网间会产生较大的摩擦力,进而导致滑板表面元素逐渐耗散至空气中,同时在磨损的累积效应作用下,造成滑板的损失质量不断增加,剩余质量不断降低。

在此基础上,为了进一步探索滑板质量的损失现象对弓头位移可靠性的影响,根据不同接触力作用下的位移可靠性指标求解思想,将不同里程下的滑板剩余质量作为弓头质量块参数,并带入弓头位移可靠性指标求解模型,得到计算结果如图 7 所示。

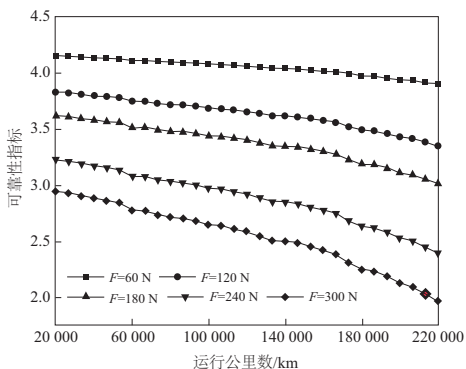


图 7 质量损失下的弓头位移可靠性指标

由图 7 可知,随着运行里程的增加,弓头位移可靠性指标不断降低。在弓网接触力为 60 N 时,弓头最小位移可靠性指标为 3.898 0,降低幅度为 6.19%;在弓网接触力为 300 N 时,弓头最小位移可靠性指标为 1.968 5,下降幅

度为 33.30%。该结果表明碳滑板的质量损失会导致弓头位移的扰动增加,进而引起弓头位移超过允许值的可能性升高,导致其可靠性指标降低。另外,弓网接触力的不断增大,亦会成为弓头位移扰动增加的另一重要因素。

5 结语

1) 结合动力学及可靠性理论,在构建弓头位移响应模型的基础上,建立了弓头位移可靠性模型,并通过实例验证了该模型在工程实际中的应用价值。

2) 弓头的位移可靠性指标随着弓网接触力的增加而不断降低,在接触力自 60 N 增加至 300 N 的过程中,位移可靠性指标逐渐自 4.156 1 降低至 2.955 2。

3) 弓头的位移可靠性指标随着运行里程的增加而不断降低,且接触力越大,降低幅度愈加明显,弓网接触力为 60 N 时,位移可靠性指标下降幅度为 6.19%;弓网接触力为 300 N 时,位移可靠性指标下降幅度为 33.30%。

参考文献:

- [1] 魏向东,焦敬品,吴荣平,等. 高速受电弓固有振动特性的实验研究[J]. 实验力学,2020,35(1):67-72.
- [2] 姜静,刘志刚,宋洋. 考虑受电弓非线性的弓网动态特性仿真研究[J]. 计算机仿真,2015,32(2):170-174.
- [3] VESALI F, REZVANI M A, MOLATEFI H. Simulation of the dynamic interaction of rail vehicle pantograph and catenary through a modal approach[J]. Archive of Applied Mechanics, 2020,90(7):1475-1496.
- [4] 何春天,阳光武. 受电弓-接触网动力学特性的仿真研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(1):80-83,88.
- [5] ANTUNES P, AMBRÓSIO J, POMBO J, et al. A new methodology to study the pantograph-catenary dynamics in curved railway tracks[J]. Vehicle System Dynamics, 2020,58(3):425-452.
- [6] OKARADUMAN G, AKIN E. A deep learning based method for detecting of wear on the current collector strips' surfaces of the pantograph in railways[J]. IEEE Access, 2020(8):183799-183812.
- [7] 曲春利,陈忠华,任仁,等. 波动载荷下弓网摩擦振动特性分析与建模[J]. 电工电能新技术,2021,40(9):29-38.
- [8] 陈忠华,贾利明,时光,等. 波动载荷下弓网载流动态摩擦力模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(1):48-55.
- [9] 鲁小兵,刘志刚,宋洋. 基于磁流变阻尼器的受电弓主动控制分析与验证[J]. 仪器仪表学报,2015,36(1):103-109.
- [10] TB/T 3271—2011,轨道交通 受流系统 受电弓与接触网相互作用准则[S].
- [11] 周宁,蔚超,谭梦颖,等. 弓网系统动态及受流性能测试技术研究及应用[J]. 铁道学报,2020,42(3):47-54.

收稿日期:2022-04-07