基于受电弓状态感知的弓网安全监测系统研究与探讨

周宁^{1*}, 杨文杰¹, 刘久锐¹, 谭梦颖¹, 张卫华¹, 贾步超², 景所立², 张鹏²

1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031;

2. 中车青岛四方股份有限公司, 青岛 266111

* E-mail: zhouning@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2019-08-13; 接受日期: 2020-02-07; 网络版发表日期: 2020-04-26

国家重点研发计划(编号: 2017YFB1201201-07)资助项目

摘要 我国电气化铁路运营的里程日益增长, 服役的车辆越来越多. 作为车辆大系统关键装备之一的弓网系统, 如何提高其服役检测水平, 在确保安全运行的同时, 降低维护检修的成本, 这是弓网系统安全监测及故障诊断需要解决的关键问题. 从系统的研制流程、整体架构、功能模块、故障诊断以及监测方案等几个方面, 对弓网安全监测系统进行介绍和讨论. 最后以具体的两个弓网故障为例, 介绍如何通过对受电弓的状态感知, 规划相应的安全监测方案.

关键词 弓网, 受流, 安全监测, 故障诊断

1 引言

我国电气化铁路运营的里程日益增长, 服役的车辆越来越多. 作为车辆大系统关键装备之一的弓网系统, 如何提高其服役检测水平, 在确保安全运行的同时, 降低维护检修的成本, 这是弓网系统安全监测及故障诊断需要解决的关键问题.

弓网系统安全监测与常规的动态及受流检测不同, 前者是以评估系统服役安全状态为目标, 针对不同的弓网故障类型和缺陷形式制定其监测方案, 选择相应的监测设备、安装方式和故障诊断方法, 辨识系统的实时运行状态. 从测试角度而言, 属于长期的跟踪

性测试; 后者是以评估当前系统动态及受流性能为目标, 依据现有的弓网检测标准, 对涉及的特征参数进行测试, 并结合相应的标准判断是否达到要求^[1-4], 属于短期的考核性测试.

就车辆系统走行部而言, 关于安全监测方面的研究开展较早^[5-7], 目前已开发相应的安全监测系统在车辆走行部中得到应用. 而对于故障率较高, 同时与运行安全也紧密相关的弓网系统而言, 这方面的研究相对比较滞后. 我国的高速铁路供电安全检测监测系统(6C系统)近年来才开始逐步得到应用^[8], 但该系统偏重于供电接触网, 对受电弓系统的状态感知不足, 同时由于需在接触网或轨旁增加相应的监测设备, 这给

引用格式: 周宁, 杨文杰, 刘久锐, 等. 基于受电弓状态感知的弓网安全监测系统研究与探讨. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 23-34

Zhou N, Yang W J, Liu J R, et al. Investigation of a pantograph-catenary monitoring system using condition-based pantograph recognition (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 23-34, doi: 10.1360/SST-2019-0282

广泛应用增加了一定的难度。

由此, 本文从弓网安全监测系统的研制流程、整体架构、功能模块、故障诊断以及监测方案等几个方面, 对研究的现状、进展和发展趋势进行探讨。最后以具体的两个弓网故障为例, 简要介绍如何通过对受电弓的状态感知, 设计相应的安全监测方案。

2 系统整体构建及功能模块

2.1 研制流程

弓网安全监测系统的研制基本遵循以下流程。

(1) 故障调研: 详细考察当前弓网系统的故障类型, 系统相关性, 安全性级别, 故障的频次, 以及故障原因初步分析等。

(2) 状态辨识和故障诊断: 通过理论推演、故障状态仿真再现以及试验验证等手段, 对故障状态和原因进行甄别, 提出故障诊断方法。

(3) 安全监测方案: 基于上述诊断和分析结果制定相应的安全监测方案, 包括监测故障类型、方法、设备、安装方式等。

(4) 系统搭建: 监测系统的软硬件设备开发和搭建。

(5) 试验验证: 通过地面和线路试验进行系统的调试和验证。

(6) 系统完善, 装车运行: 完善监测系统, 考核并装车运行。

2.2 系统整体构建及功能模块

由于设计的目标及具体应用情况不同, 各个国家安全监测系统的架构略有差异, 图1分别给出了两种系统整体架构图^[9]。总体而言, 安全监测系统通常包括车载系统和地面系统两个子系统。车载系统由安装在司机室和受电弓所在车厢的监测设备组成, 主要负责数据的采集、传输、分析和存储, 以及运行状态的辨识、评估和预警等。地面系统可通过网络与车载系统进行通信, 用于接收从车载系统发送的数据信息, 并进行后续的大数据分析和处理, 同时地面的监测终端可随时调看弓网以及车载系统自身的运行状态。

车载系统作为整个安全监测系统的核心之一, 通常主要包含如下的功能模块。

(1) 传感器及数据采集模块: 负责前端数据的采集

和数据的前置处理和分析, 数据应尽可能由前置处理器及时处理分析和辨识, 保证数据的时效性, 提炼关键数据, 避免大量的无用数据向服务器传输, 造成数据的拥堵。

(2) 数据传输模块: 用于将数据传输到后端车载的服务器进行相应的处理和分析, 数据传输可基于临时铺设的网络线缆、无线网络和车辆现有的网络。系统测试运行的前期尽量采用临时铺设的网络线缆, 避免干扰列车现有的网络影响行车。经过实际运行验证后, 再将临时的网络与列车现有的网络融合, 形成稳定的数据传输模块。无线网络传输速率和带宽有限, 应根据系统自身的数据量进行选择使用。

(3) 速度及定位模块: 用于给出车辆系统当前的运行速度和位置信息。当弓网系统存在故障时, 该模块可及时给出所在线路的位置和运行工况等信息, 便于后续的检修和维护。如果车辆系统自身能给出这类信息是最佳的, 由此该模块也可以省略。当不能提供这些信息时, 目前主要有如下几种方式: 一种是纯GPS导航(卫星定位导航)或INS导航(惯性导航), 但由于精度和可靠性的问题, 用于高精度的检测是不可取的。采用GPS/INS组合导航, 利用陀螺仪、加速度计, 采用GPS和IMU(惯性测量单元)紧耦合技术, 提供比纯GPS导航或纯惯性导航系统更高精度的三维位置、速度和姿态信息, 但成本较高, 限制了其广泛应用; 由此, 目前采用较多的是基于车辆系统提供的速度信息, 然后通过运行速度及时间得到相应的里程, 进而得到车辆系统的位置信息。然后通过应答器系统、电子标签或到站时的开关门信号等, 同步校准其位置信息。干线铁路定位采用较多的应答器系统以及电子标签定位可以较好地保证其定位精度, 而基于开关门信号的定位主要应用在城轨系统, 因为线路长度以及各个车站的间隔相对较短, 可以及时提供校准信息。

(4) 显示存储服务器模块: 用于接受前端的测试和分析数据, 并进一步对数据进行处理和辨识, 及时将弓网系统的运行状态给车辆操控人员, 同时将相应的特征数据进行显示和存储。系统测试运行阶段也应该作为附加的系统独立运行, 避免与车辆系统形成干扰, 通过验证后, 可与列控系统(列车控制系统)进行融合, 作为车辆系统的一部分, 便于故障发生时可以及时做出相应的处理, 避免事故发生。

(5) 无线通信模块: 采用无线传输与远程终端管理

图 1 (网络版彩图)安全监测系统整体架构. (a) 意大利; (b) 中国

Figure 1 (Color online) Overall architecture of the safety monitoring system. (a) Italy; (b) China.

技术, 将车载系统的数据和状态信息发送到远程地面系统, 使运营管理人员在管理这些数据和设备时更方便地进行远程操作、监视, 减轻人员劳动强度, 实现设备维护工作的自动化、提高运营管理水平. 同时通过地面终端监测此类系统的“运行”“报警”等状态, 使弓网系统的安全性管理更可靠.

3 故障诊断及安全监测方案

3.1 弓网常见故障

弓网故障的分类方法较多, 这里基于故障的表现形式将其分为三类: 结构失效、参数退化和受流性能

不达标. 结构失效故障是指弓网结构出现裂纹、松脱和破坏, 以及机构运转不正常导致的故障, 主要包括: 零部件裂纹或破坏; 固定件、联接件出现松脱; 受电弓运动机构、升弓机构故障等. 具体如受电弓碳条裂纹或脱块, 弓头支架、臂杆、导流板裂纹或断裂, 固定螺栓松脱, 运动机构卡滞等; 接触网电连接线脱落、定位器和吊弦线夹松脱; 如图2所示.

参数退化故障是指弓网设计参数的退化导致的故障. 主要包括: 受电弓弓头悬挂系统参数退化; 接触线和碳滑板截面尺寸参数退化(异常磨耗); 受电弓气路参数退化; 绝缘性能参数退化; 接触网结构高度、张力参数退化等.

图 2 (网络版彩图)弓网常见故障. (a) 接触网故障; (b) 受电弓故障

Figure 2 (Color online) Common failures of the pantograph-catenary system. (a) Catenary failures; (b) pantograph failures.

受流性能不达标是指弓网系统不能满足受流性能标准要求的故障. 主要包括: 硬点冲击、抬升超限以及燃弧严重等. 这类故障是弓网性能的表现, 并非针对具体的故障对象. 通常弓网系统投入运行之前, 需通过严格的考核检测, 避免这类故障的发生, 因此这类故障这里不做详细讨论.

3.2 故障诊断方法

故障诊断通常可分为三个阶段: 获取故障信息, 建立故障信息库; 故障现象分级, 确定需要监测的故障现象; 故障原因识别, 建立故障诊断模型.

3.2.1 故障信息库建立

基于实际的线路服役数据, 建立弓网系统服役过程的故障信息档案, 包括对象的身份信息(车辆、线路及受电弓信息等)、服役的基本信息(日期、时间、走行里程以及运行方向等), 故障现象描述、故障来源(运行途中、运用故障及库内检修等)、处置措施(现场、后续及最终的处理情况等).

3.2.2 故障现象分级

从故障对运行安全的影响程度, 对故障等级进行分类, 确定哪些故障现象是属于安全监测的范围. 首先, 对于弓网系统的结构失效故障是需要重点监控的, 因为这类故障导致的结构失效大多与运行安全直接相关; 其次, 参数退化故障主要是由于设计参数的变化影响性能指标的退化, 这类故障通常表现为弓网的动态

及受流性能的下降, 与运行安全间接相关, 也就是说, 只有当性能参数退化到一定程度后, 才可能与运行安全相关. 因此, 对于这类故障可结合具体的需求选择性进行监控.

另一方面, 虽然故障对运行安全的影响程度是故障等级分类的根本, 但同时也要考虑故障率的问题. 普遍性、多发性的故障是安全监测的重点, 而偶发性、随机性的故障不一定是安全监测的对象. 从故障发生的频次上, 对故障进行分类, 甄别什么是普遍性、多发性的故障, 从而来确定重点监测的故障对象也是非常重要的.

对于故障现象的等级划分并不是完全孤立的, 但保证安全运行的原则是根本, 同时也需兼顾考虑故障频次、监测技术和方法, 并综合考量目标、方法、效率和成本的问题.

3.2.3 故障诊断模型建立

(1) 辨识故障与物理性能之间的关系

弓网系统作为列车受流的关键设备之一, 同时涉及力、电、热、材料等多个学科, 其性能与多个物理场性能密切相关. 由此, 建立弓网故障诊断模型首先应明确弓网故障涉及的相关学科, 识别故障现象与物理性能的归属关系, 如图3所示. 一些故障现象可能与几个学科的物理性能有关. 由此, 判断并掌握故障现象与物理性能之间的内在联系和映射关系是非常重要的. 如, 对于弓网零部件断裂失效故障, 首先应该分析并明确该故障是结构强度设计的问题, 还是材料缺陷

图 3 (网络版彩图)故障现象与物理性能之间的关系

Figure 3 (Color online) Relationship between failure and physical performance.

或加工工艺的问题. 如果是后者, 则可以通过对材料的改性或工艺的改良进行研究以避免此类故障; 而如果是结构强度设计的问题, 则需进一步明确是疲劳断裂问题还是瞬时冲击破坏问题, 以及相应的负载和边界条件等, 才能对故障原因进行深入的分析, 直至探明故障现象的真实原因.

(2) 辨识物理性能与特征参数的关系

针对确定的故障现象所属的物理场问题, 建立物理性能与特征参数之间的联系, 如图4所示. 针对弓网系统, 不同的物理性能有其对应的特征参数. 如, 弓网系统的力学性能涉及接触压力、气动力、振动加速度、应变以及接触网抬升位移和结构高度等. 特征参数总体可分为两类: 一类是基本的特征参数, 包括接触力、振动加速度、抬升位移和燃弧等; 另一类则是

基本参数之外的特征参数, 这里称之为非标参数, 如应变、气动力、温度、磨损等. 弓网系统的特征参数较多, 如何根据故障现象选择合适的特征参数, 以确保故障现象的唯一性, 降低误报率这是研究的重点.

(3) 选择合理的特征参数检测方法

确定相应物理场对应的特征参数后, 则可以进一步确定相应的检测方法. 弓网系统涉及的检测参数较多, 同时相对于车辆其他子系统而言, 自身质量相对较小, 特别是弓头, 使得附加质量的影响较大, 并且异形结构较多, 结构尺寸比例失调, 以及高电压大电流的测试环境, 从而造成传感器的安装困难, 测试难度大, 测试环境恶劣. 以下将简单介绍目前采用较多的三类检测方法.

传统检测方法: 基于传统的电测方法, 如较为常用

图4 (网络版彩图)物理性能与特征参数和检测方法之间的关系

Figure 4 (Color online) Relationship between physical properties, characteristic parameters and detection methods.

的力传感器、加速度传感器以及应变片、位移传感器等,对相应的特征参数直接进行检测,这方面先前的研究也介绍较多,可参见文献[10,11].

光纤检测:针对弓网系统恶劣的测试环境,由于光纤传感器具有抗干扰、绝缘等优势,近些年在弓网检测中得到了一定的应用和推广,并取得了较为理想的测试效果^[12~14].目前,这类传感器主要用于振动加速度、力、应变以及温度等特征参数的检测.

光学检测:可见光相机检测主要用于捕捉测试对象标记点的运行轨迹(平面或空间几何位置),进而通过相关的图像识别及处理技术,从而被确定.其主要测试参数包括:接触网导线高度、不平顺、磨损、定位点抬升位移以及弓网接触力(通过测得标记点的位移,然后计算弓头相互作用力和振动加速度,进而确定惯性力及接触力)等^[15].紫外相机和红外相机主要用于弓网电弧和温度分布的检测,而激光器主要用于位置检测或断面扫描,如接触线高度及磨损等^[16].

(4) 状态辨识并建立故障诊断模型

获取反映故障现象相关特征参数的实时数据后,如何辨识是否处于故障状态,并由此建立故障诊断模

型,这是故障诊断系统的关键技术之一.通常,不同的故障现象其故障诊断模型是不同的,但建立故障诊断模型的方法基本一致.首先是针对输入的特征参数实时数据,通过理论推演、故障状态仿真再现以及试验验证等手段,选择适合于该类故障现象的数据信号处理方法,以提炼反映故障状态的特征量(可以是特征参数,或者是基于特征参数的导出量),并确定相应的评判准则(或阈值),对实时状态进行判别.其中,如何选择合理的数据信号处理方法,并得到能真实反映故障状态的特征量对建立故障诊断模型是非常重要的.以下介绍几种常用的针对振动信号的数据处理方法.

时域分析方法:利用数据信号的时域波形参数,如均方根值、方差、峭度、偏度、波形因子等,并结合相应的解调技术对时域信号进行处理,以判断系统存在故障与否.

频域分析方法:以傅里叶变换为核心的频域分析方法在机械系统故障诊断中发挥着巨大的作用,这些方法包括频谱分析、阶比谱分析、相关分析、细化谱分析、时间序列分析、倒频谱分析、包络分析等.通常,基于频域的信号处理技术要求所分析的信号具有

平稳性或者近似平稳性; 当信号具有较强的非平稳特性, 谱分析的结果将缺乏相应的物理意义。

时-频分析方法: 针对数据信号的非平稳特性和非线性特征, 时-频分析方法是一种有效的分析方法, 其主要优势在于能够实现信号在时间尺度和频率尺度上的局部化。典型的时-频分析方法包括短时傅里叶变换、小波变换、Wigner-Ville分布、经验模态分解等。

除此之外, 为提高诊断精度, 大量的现代信号处理技术, 如盲源分离技术, 基于ARMA(自回归滑动平均)的现代谱分析技术等被应用于机械系统的故障诊断和识别。近年来, 随着人工智能技术的发展和日趋成熟, 诸如神经网络、遗传算法、粒子群算法、模糊逻辑等智能算法^[17]被广泛应用于故障诊断领域, 用于实现故障的智能诊断和识别。

3.3 安全监测系统方案

结合故障分析的结果以及建立的故障诊断模型, 则可以针对性地制定系统的安全监测方案, 包括监测故障类型、方法、设备和安装方式等。其中, 就设备选型而言, 尽可能选用稳定、可靠和尽量少的设备去监测更多的故障现象。原因在于, 弓网系统的服役环境较为恶劣, 稳定、可靠的设备可以减少系统本身的故障率; 同时附加质量对受电弓弓体的动态性能有一定的影响, 从而应尽量选择少的测点, 减小加装设备的影响。另外, 在设备安装方面, 也需通过前期现场调研、仿真计算和实验验证, 从而制定详细的安装方案, 包括工装设计、布线图、监测主机固定方式、供电模式等。

在制定的安全监测系统方案基础上, 进行相应的软硬件设备开发和系统搭建, 并通过地面和线路试验进行系统的调试和验证, 提升监测系统的可靠性, 考核通过后装车运行。

4 安全监测应用案例

4.1 接触网故障

4.1.1 故障描述

接触网系统的接触线在理想状态下应该是保持一种平直的状态。当受电弓通过时以及在环境自然风的作用下, 接触网会产生振动。随着服役时间的累积, 这种振动易于造成接触网零部件处于一种松动的状态,

使得接触网在某些位置的导线高度发生一定的变化。同时, 由于设计及施工的偏差也会使得接触网自身存在一定的缺陷, 特别是膨胀接头、关节和定位器等处, 从而在受电弓通过时造成硬点、火花等受流问题, 更严重的造成冲击破坏。因此, 有必要根据其缺陷特征, 设置有效的监测方案和诊断方法来诊断并定位故障, 保证列车的安全运行。

4.1.2 监测方案

由于在接触网系统安装监测设备限制较多, 而且也很不方便, 这里采用在受电弓滑板安装光纤应变传感器, 通过对受电弓状态的感知以间接的方式去识别接触网的这类缺陷^[18]。将4个光纤应变传感器分成两组, 1号和2号传感器为一组, 3号和4号传感器为另一组。将每组的两个传感器沿滑板中心线对称地埋入到滑板的铝托架表面, 间距为250 mm。用于测量受电弓滑板应变的光纤传感器尺寸为20 mm×5 mm×1 mm, 体积小; 质量为10 g, 重量轻, 对弓网间动态作用的影响可以忽略。光纤应变传感器的测量频率高达25 kHz, 测量范围为±2000 με, 灵敏度系数为0.8 με/pm, 测量范围宽, 精度高。这里, 以500 Hz的采样频率采集信号并将其解调为应变数据, 如图5所示。

4.1.3 故障诊断方法

膨胀接头、关节和定位器等位置的缺陷在结构上表现为结构的不连续, 可造成受电弓的异常冲击振动。因此, 这类故障在信号中往往表现为异常值和离群点。可见, 对实测信号中突变信号点的识别成为诊断接触网故障的关键。从工程应用角度出发, 结合数字滤波与标准差可有效监测信号的局部畸变。

通过对初始应变数据进行温度补偿和20 Hz的低通滤波, 得到4个光纤传感器实际应变的时程数据。为识别应变信号中的冲击成分, 在移动时间窗口中直接计算应变信号的标准偏差(standard deviation, STD)以及移动标准偏差(mobile standard deviation, MSTD):

$$\text{MSTD}\left(i + \frac{\text{win}}{2} - 1\right) = \text{STD}_i^{i+\text{win}-1} \quad (1)$$

$$(1 \leq i \leq N - \text{win} + 1),$$

其中, N 代表采样点数量, win 为移动窗口大小, 计算结果如图6所示。以移动Pauta准则(红色曲线)为基准, 利

图5 受电弓滑板光纤传感器布置
Figure 5 Fiber optic sensor arrangement of pantograph slide.

图6 4个滑板的应变信号和移动标准偏差. (a) 前滑板; (b) 后滑板
Figure 6 Strain signals and moving standard deviations of the four contact strips. (a) Front contact strip; (b) rear contact strip.

用MSTD(黑色曲线)超出基准线作为冲击识别依据, 可以基于应变数据有效地检测实际的接触网膨胀接头、关节以及定位器等缺陷, 如图6中的1, 2, 3, 4, 5和7.

为了使得相邻两个区段的拉出值保持平稳的过渡, 膨胀接头通常都安装在拉出值为零的位置. 基于这

样的特征, 当左右两侧测得的应变值为零时, 则有助于定位膨胀接头的位置. 当在相邻两个区段的膨胀接头有缺陷时, 势必产生应变数据的异常冲击信号. 可见, 图6中在2, 3, 4, 5和6位置有异常的冲击, 同时有接近零的拉出值, 由此则可以进一步辨识为膨胀接头的缺陷.

类似地, 结合传感器测得的应变的变化规律和冲击信号的特征, 可以识别关节、定位器等位置的缺陷. 目前该方法已通过实际线路的对比验证, 效果较好.

4.2 受电弓故障

4.2.1 故障描述

受电弓拉杆的故障在实际服役过程中也有发生, 较为严重的如球铰轴承外套扯裂、预应力螺栓断裂等. 图7给出了拉杆与上框架联接处的球铰轴承外套断裂引起的受电弓故障. 当此类故障发生时, 由于轴承外套断裂, 受电弓拉杆与上框架脱开, 整个框架将在下臂杆的带动下发生翻转, 上下臂关节处直接与接触网接触. 此时不仅受电弓本身发生失稳和破坏, 同时也会导致更为严重的刮网事故.

4.2.2 故障诊断及监测方案

受电弓的拉杆通常被考虑为二力杆, 强度及疲劳可靠性设计主要依据轴向的载荷. 正常运行状态下, 如果仅有轴向载荷存在, 拉杆的强度是足够的. 也就是说, 此时这类故障是不应该发生的. 进而, 通过对故障的理论分析和仿真计算, 得知拉杆上关节处(与上框架连接处)弯曲载荷的存在是造成此类故障的重要原因. 针对该故障原因, 提出如下的监测方案(图8).

由于直接对球铰的弯矩或应力进行监测是很困难的, 因而在截面1-1和2-2上下表面处, 分别布置两个应变传感器. 通过测得4个应变值 ε_{t1} , ε_{b1} 和 ε_{t2} , ε_{b2} , 基于分离体A的受力分析可得到截面1-1和2-2处的轴向力 F_{n1} , F_{n2} 和弯矩 M_1 , M_2 . 然后, 针对分离体B, 进一步可推得

其球铰所在处截面3-3处的弯矩 M_3 以及相应的应力 σ_3 等, 如式(2)所示.

$$\begin{aligned} M_3 &= M_2 - F_{v2}L_{23}, \\ \sigma_3 &= \frac{F_{v2}L_{23} - M_2}{W_{z3}} + \frac{F_{n2}}{A_3}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, F_{v2} 是截面2-2处的剪切力, F_{n2} 是截面2-2处的轴向力, 这两个力也可以通过测得的应变推导得到; A_3 和 W_{z3} 分别是截面3-3处的截面积和弯曲截面系数; L_{23} 是截面2-2和3-3之间的距离.

4.2.3 故障诊断方法

图9给出了确定的截面3-3球铰处的轴向力、弯矩以及应力等. 拉杆的破坏主要是由轴向力和弯矩的共同作用引起的. 在约580 s时, 受电弓的工作高度从刚性段变为架空线的柔性段, 在拉力中产生断点. 通过应变监测得到轴向力和弯矩. 通过材料的应力极限和历史大数据设定阈值, 识别并判断损伤热点处的轴向应力、弯曲应力和正应力. 并对拉杆的疲劳强度和使用寿命进行评估. 此外, 还可以对拉杆的工作状态进行诊断, 从而对易发故障的高危区域实现重点监控和预警.

5 结论

本文基于受电弓的角度, 针对弓网安全监测系统, 从系统的研制流程、整体架构、功能模块、故障诊断以及监测方案等几个方面, 对弓网安全监测技术研究的现状、进展和发展趋势进行探讨, 并以两个具体的弓网故障为例, 简要介绍如何通过感知受电弓的实时

图7 (网络版彩图)拉杆球铰轴承故障
Figure 7 (Color online) Pull rod ball bearing failure.

图 8 (网络版彩图)受电弓拉杆监测方案及受力分析

Figure 8 (Color online) Monitoring scheme and force analysis of pull rod.

图 9 监测的截面3-3球铰处的轴向力(a)、弯矩(b)和应力(c)

Figure 9 Axial forces (a), bending moments (b), and stresses (c) at the ball joints monitored at section 3-3.

状态以制定安全监测方案. 通过该研究及探讨, 对于如何建立故障诊断模型并构建安全监测系统, 以保证弓

网系统的安全运行,提高其服役性能,降低维护检修的成本具有积极的指导意义和助推作用.

参考文献

- 1 National Railway Administration of the People's Republic of China. Railway Applications—Current Collection Systems—Requirement for and Validation of Measurements of the Dynamic Interaction Between Pantograph and Overhead Contact Line: GB/T32592-2016 (in Chinese). Beijing: Standards Press of China, 2016 [国家铁路局. 轨道交通-受流系统-受电弓与接触网动态相互作用测量的要求和验证: GB/T32592-2016. 北京: 中国标准出版社, 2016]
- 2 European Committee for Electrotechnical Standardization. BS EN 50317 Railway Applications—Current Collection Systems—Requirements for and Validation of Measurements of the Dynamic Interaction Between Pantograph and Overhead Contact Line. British: The British Standards Institution, 2012
- 3 CRRC Zhuzhou Institute. Railway Applications—Current Collection Systems—Technical Criteria for the Interaction Between Pantograph and Overhead Line: TB/T 3271-2011 (in Chinese). Beijing: China Railway Publishing House, 2012 [株洲电力机车研究所有限公司. 轨道交通-受流系统-受电弓与接触网相互作用准则: TB/T 3271-2011. 北京: 中国铁道出版社, 2012]
- 4 British Standard Institution. BS EN50367-2012 Railway Applications—Current Collection Systems—Technical Criteria for the Interaction Between Pantograph and Overhead Line. London: BSI Standards Limited, 2012
- 5 Zhang B. Theory and analysis research of monitoring and detecting the key components of train (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008 [张兵. 列车关键部件安全监测理论与分析研究. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2008]
- 6 Li X. Research on urban rail transit vehicle running GEAR safety assessment methodology (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011 [李熙. 城市轨道交通车辆走行部安全评估方法研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2011]
- 7 Qin Y M. Research on key technology of train running safety monitoring system (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006 [秦艳敏. 列车安全监测系统关键技术的研究. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2006]
- 8 Wang T. Design and implementation of comprehensive data processing center for power supply section 6C system (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 [王涛. 供电段6C系统综合数据处理中心设计与实现. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2017]
- 9 Carnevale M, Collina A, Facchinetti A, et al. Overhead line diagnostic system for high speed pantographs. In: Pombo J, ed. Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Stirlingshire: Civil-Comp Press, 2014
- 10 Ikeda M, Nagasaka S, Takayuki A U. A precise contact force measuring method for overhead catenary system. In: World Congress on Railway Research (WCRR2001). Köln, 2001
- 11 Carnevale M, Collina A. Processing of collector acceleration data for condition-based monitoring of overhead lines. *P I Mech Eng F-J Rail Rapid Transit*, 2016, 230: 472–485
- 12 Schröder K, Ecke W, Kautz M, et al. An approach to continuous on-site monitoring of contact forces in current collectors by a fiber optic sensing system. *Optics Lasers Eng*, 2013, 51: 172–179
- 13 Boccione M, Bucca G, Collina A, et al. Comparison of optical and electrical measurements of the pantograph-catenary contact force. In: (EWOFS'10) Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors. Porto, 2010. 765346
- 14 Tan M, Zhou N, Cheng Y, et al. A temperature-compensated fiber Bragg grating sensor system based on digital filtering for monitoring the pantograph-catenary contact force. *P I Mech Eng F-J Rail Rapid Transit*, 2019, 233: 187–200
- 15 Koyama T, Ikeda M, Kobayashi S, et al. Measurement of the contact force of the pantograph by image processing technology. *QR RTRI*, 2014, 55: 73–78
- 16 Hayasaka T, Shimizu M, Nezu K. Development of contact-loss measuring system using ultraviolet ray detection. *QR RTRI*, 2009, 50: 131–136
- 17 Ali Y H, Rahman R A, Hamzah R I R. Acoustic emission signal analysis and artificial intelligence techniques in machine condition monitoring and fault diagnosis: A review. *J Teknol*, 2014, 69: 121–126
- 18 Tan M, Zhou N, Wang J, et al. A real-time impact detection and diagnosis system of catenary using measured strains by fibre Bragg grating sensors. *Vehicle Syst Dyn*, 2019, 57: 1924–1946

Investigation of a pantograph-catenary monitoring system using condition-based pantograph recognition

ZHOU Ning¹, YANG WenJie¹, LIU JiuRui¹, TAN MengYing¹, ZHANG WeiHua¹, JIA BuChao², JING SuoLi² & ZHANG Peng²

¹ State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

² CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China

In recent years in China, the operating mileage and the number of vehicles in the electrified railway have increased. For the pantograph-catenary system, which is one of the key components of the vehicle system, an urgent problem is how to improve the level of service detection, diagnose faults, and propose safety monitoring to assure safe operation and decrease the cost of maintenance and repair. In this paper, the design process, the overall architecture, the function module, the fault diagnosis method, and the monitoring scheme for a monitoring system based on the pantograph are investigated and discussed. As an example, two specified faults are introduced to describe how to develop a monitoring scheme based on pantograph condition-based recognition.

pantograph and catenary, current collection, safety monitoring, fault diagnosis

doi: [10.1360/SST-2019-0282](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0282)