

基于 MOMS(微光机系统)传感技术的地铁弓网关系实时监测系统

吴迅奇

(宁波正业自动化科技有限公司,315103,宁波//高级工程师)

摘要 目的:当行车线路上接触线存在硬点、弓网间接触力异常、弓网间发生燃弧等接触不良的状况时,其会影响地铁的正常运营。因此,需研究能够正确找出弓网间接触力异常的区段,以及定位接触线硬点在运营线路上位置的方法。方法:介绍了现有传感技术和 MOMS(微光机系统)传感技术;提出一种基于 MOMS 传感技术的地铁弓网关系实时监测系统;分析了接触线存在硬点、弓网间接触力和弓网间燃弧现象的监测结果。结果及结论:当列车运行速度为 80 km/h 时,通过 MOMS 接触力传感器监测到的动态弓网接触力约为 $120\text{ N} \pm 10\text{ N}$;通过 MOMS 加速度传感器能够捕捉到接触线硬点对受电弓弓头的瞬时振动冲击,其垂向加速度由 $-200g$ 变为 $120g$ (g 为重力加速度);通过弓网间相互作用的波动程度,可以间接评估弓网间的燃弧现象。

关键词 地铁;微光机系统;弓网关系

中图分类号 U225;U264.34

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.044

Real-time Monitoring System for Metro Pantograph-catenary Relation Based on MOMS Sensing Technology

WU Xunqi

Abstract Objective: Adverse conditions such as hard points on the overhead line of operating routes, abnormal PC (pantograph-catenary) contact force and PC arcing can affect metro normal operation. Therefore, it is necessary to study methods that can accurately identify sections with abnormal PC contact force and locate overhead line hard points along the operating route. Method: Existing sensing technology and MOMS (micro-opto-mechanical systems) sensing technology are introduced. A real-time monitoring system for metro PC relation based on MOMS sensing technology is proposed. Monitored results of overhead line hard points, PC contact force and PC arcing are analyzed. Result & Conclusion: When the train operating speed is 80 km/h, the dynamic PC contact force monitored by the MOMS contact force sensors is approximately $120\text{ N} \pm 10\text{ N}$. The MOMS accelerometers capture the instantane-

ous vibration impact on the pantograph head caused by overhead line hard points, with the vertical acceleration changing from $-200g$ to $120g$. The fluctuation level of the PC interaction can indirectly evaluate the occurrence of PC arcing.

Key words metro; MOMS; pantograph-catenary relation

Author's address Ningbo Geantech Automation Technology Co., Ltd., 315103, Ningbo, China

地铁具有运量大、出行便捷、运行速度较快等优点,已逐渐成为城市居民出行的首选交通工具。但与此同时,这也为地铁的运营安全,尤其是弓网间正常的工作状态带来了严峻的挑战。当列车运行时,若行车线路上的接触线存在硬点、弓网间接触力异常或弓网间发生燃弧等接触不良的状况,则会影响地铁的正常运营。MOMS(微光机系统)传感器具有无源、抗振动和抗电磁干扰等优点,能够用于监测受电弓与接触线之间是否拥有良好的受流关系。本文提出一种基于 MOMS 传感技术的地铁弓网关系实时监测系统(以下简称“弓网关系监测系统”),在不改变受电弓结构的基础上,通过在受电弓弓头上加装 MOMS 加速度传感器和弓网接触力传感器,实时监测受电弓与接触线之间压力的动态变化,同时还能检测出由接触线硬点撞击受电弓弓头所产生的振动冲击。本文研究可为地铁的安全运营和智能维护提供数据支撑和工程经验,具有一定的实用价值。

1 现有传感技术

目前,用于地铁弓网关系监测的主要技术有电子传感技术和视觉成像技术。电子传感技术属于接触式测量,其通过有源探测的方式采集信号,但所采集到的信号受电磁干扰严重,后续数据分析较为困难。此外,电子传感技术的信号传输电缆存在安全隐患,易引发严重的电气绝缘事故,对车内乘

客的生命安全造成严重威胁。因此该技术没有广泛应用于城市轨道交通领域。视觉成像技术属于非接触式测量,不能针对弓网间的动力学特性(如硬点、弓网接触力等)进行有效探测和反馈。对于大部分受电弓和弓网关系运行参数仅仅起到事后视频查阅和事故追溯的作用。因此,从采购成本、运维成本和实际监测效果等方面综合考量,将视觉成像技术用于监测地铁弓网系统的运行状态不是最佳方案。

2 MOMS 传感技术

MOMS 传感技术的探测端具有无源、宽温、微型化、抗电磁干扰、轻便、易组网和免维护等特性,可用于对被测物体或环境的长期精准测量,降低智慧运维系统的复杂度和投资成本。与 MOMS 传感器搭配的高速传感解调模块由多片 FPGA(现场可编程门阵列)级联构成高速并行总线式实时处理器阵列,其数据处理能力可以达到 10 Gibit/s,不仅保证了多个测量通道彼此并行独立,还能够以高达 1~100 kHz 的扫描频率同步解调动态波长信号。以 MOMS 传感技术为基础的传感器和高速传感解调模块非常适用于实时监测列车运行速度为 80 km/h 的地铁,甚至是列车运行速度为 350 km/h 高铁的弓网关系。

3 弓网关系监测系统

所提弓网关系监测系统由 4 个 MOMS 接触力传感器、2 个 3 轴 MOMS 加速度传感器和 1 台高速 MOMS 传感查询仪组成。MOMS 传感器在受电弓弓头的安装位置示意图如图 1 所示。所选用的受电弓为地铁用双碳滑板弹簧箱式受电弓。4 个具有温度补偿功能的 MOMS 接触力传感器以垫片的形式集成嵌入在弹簧箱内;2 个 3 轴 MOMS 加速度传感器安装于受电弓弓头,使该加速度传感器的 3 个轴分别平行于地铁线路的垂向、横向和纵向。高速 MOMS 传感查询仪置于地铁车厢的电气柜内,该查询仪内的激光器扫描频率为 2 500 Hz,可以对所有光学通道进行同步扫描探测并采集数据。对于列车运行速度为 80 km/h 的地铁,其线路上的空间分辨率可以达到 8.9 mm。

4 监测结果及分析

4.1 接触线存在硬点

通过受电弓弓头上的加速度传感器能监测接

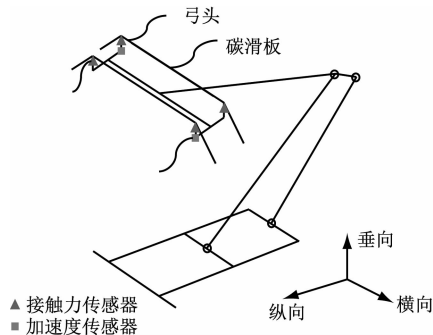


图 1 MOMS 传感器在受电弓弓头的安装位置示意图

Fig. 1 Diagram of MOMS sensor mounting position on pantograph head

触线的硬点。一般情况下,当列车运行时,受电弓弓头沿垂向上下振动,根据列车运行速度及接触线高度与类型的不同,受电弓弓头的振动加速度在一定范围内波动,如 $\pm 10g$ (g 为重力加速度)。若受电弓弓头撞上接触线上的硬点,将会瞬间产生 100g 至 200g 的振动加速度。MOMS 加速度传感器采集到的受电弓弓头垂向加速度如图 2 所示。由图 2 可知,当列车运行至约 72.6 min 时,受电弓弓头垂向加速度瞬时值从 $-200g$ 变为了 $120g$,说明此处的受电弓弓头振动冲击值非常大,可能由接触线上的硬点所导致。

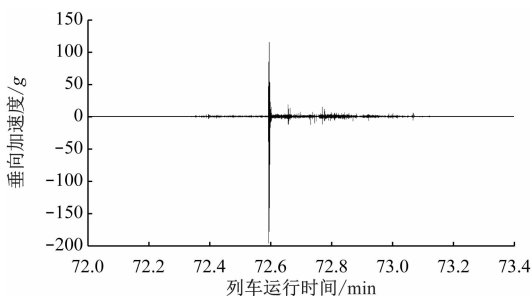


图 2 MOMS 加速度传感器采集到的受电弓弓头垂向加速度

Fig. 2 Pantograph head vertical acceleration collected by MOMS accelerometers

通过受电弓弓头上的接触力传感器也能监测接触线的硬点。当受电弓弓头撞上接触线的硬点时,受到硬点冲击的受电弓弓头会瞬间脱离接触线,此时弓网间由于相互分离而没有力的传递,因此接触力传感器探测到的接触力值趋向于 0。然后,受电弓弓头和接触线会向各自反方向回弹,并再次相撞式接触,此时接触力传感器监测到的弓网间接触力值会异常高,这也可以视作判断接触线硬点的依据。由 MOMS 接触力传感器采集到的不同

列车运行时间下的接触力如图3所示。由图3可知,当列车运行至约72.6 min时,接触力瞬时值从10 N变为了200 N,波动幅度约为190 N。此处接触力异常可能是由于接触线上的硬点对运动中的受电弓碳滑板造成的冲击所致。

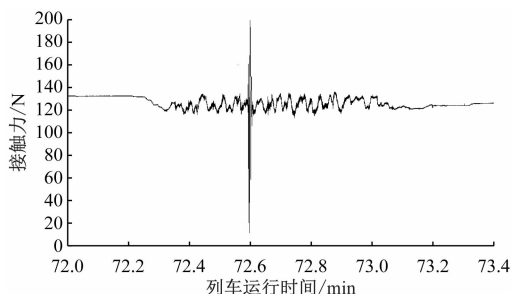


图3 MOMS 接触力传感器采集到的列车不同运行时间下的接触力

Fig. 3 Contact force under different operation times of train collected by MOMS contact force sensors

4.2 弓网间接触力

当列车运行时,为了让受电弓能够从接触线上正常受流,弓网间必须保持一定的接触力,接触力的大小视不同结构的受电弓及列车行驶速度而定。本文所选用的受电弓弓网间接触力为120 N时,可正常受流。若受电弓和接触线之间的接触力过大,则会给碳滑板造成过多的机械磨损,且弓网间不稳的相互接触也会导致冲击振动异常,严重时会出现弓拉断网或网撞飞弓的事故。若受电弓和接触线之间的接触力过小,则会出现受电弓受流不良及弓网间产生燃弧现象,而频繁发生燃弧现象会给碳滑板造成过多的电气磨损。

单个接触力传感器采集到的弓网间接触力值如图4所示。由图4可知:当列车停车时,单个碳滑板上每个接触力传感器的测量值是不变的,其时域曲线是平坦的;当列车行驶时,单个碳滑板上每个

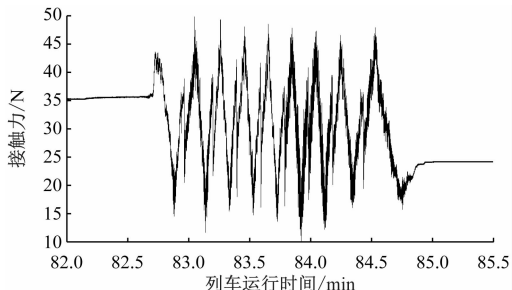


图4 单个接触力传感器采集到的弓网间接触力值

Fig. 4 PC contact force value collected by one contact force sensor

接触力传感器的测量值是变化的,其时域曲线是锯齿形的。因此,就同一根碳滑板的两端接触力传感器而言,其各自的测量值呈Z字形变化,测量值与接触线在线路上的拉出值保持一致。

受电弓弓头与接触线间的接触力值如图5所示。由图5可知:当列车停车时,静态的接触力值基本保持在120 N左右;当列车行驶时,动态的接触力值基本维持在100~140 N。受电弓的跟随性均随着弓网间相互作用频率的增大而变差^[1]。

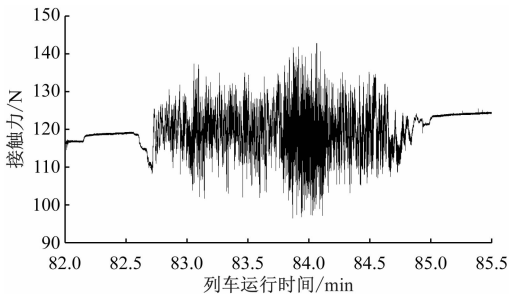


图5 受电弓弓头与接触线间的接触力值

Fig. 5 Contact force value between pantograph head and overhead lines

4.3 弓网间的燃弧现象

弓网间的燃弧现象是列车在运行过程中由于弓网接触不稳定导致的接触线和受电弓弓头相互脱离,使得空气间隙被击穿而引起的放电现象,同时伴随瞬间高温和高频电磁脉冲现象的产生。燃弧现象是一种接触线和受电弓弓头在机械上分离,但在电气上相连的状态,故通过集成安装在受电弓弓头上的MOMS加速度传感器和接触力传感器可以间接地评估弓网间的燃弧程度。弓网间的冲击越大,产生燃弧的强度就越高;弓网间的冲击频次越频繁,产生燃弧现象的概率就越大。

5 结语

通过在受电弓弓头上安装MOMS加速度传感器和接触力传感器,实时监测受电弓的振动状态,以及受电弓和接触线之间的动态接触力值,为地铁线路上接触线的定点维护和车辆上受电弓的及时维护提供数据支撑。在国家对信息技术的不断投入下,与铁路技术密切相关的人工智能和新技术正在缔造一种新的劳动力,这也将是智慧化铁路的发展方向之一。

(下转第243页)

的检测难度,同时提高了检测效率与准确性,为轨道交通接触网关键部件的故障诊断提供了有效支撑。

参考文献

- [1] 姚兰,肖建. 基于模糊熵和 Hough 变换的受电弓滑板裂纹检测方法[J]. 铁道学报, 2014, 36(5):58.
YAO Lan, XIAO Jian. Pantograph slide cracks detection method based on fuzzy entropy and Hough transform[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(5):58.
- [2] 周靖松,韩志伟,杨长江. 基于三维点云的接触网几何参数检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4):239.
ZHOU Jingsong, HAN Zhiwei, YANG Changjiang. Catenary geometric parameters detection method based on 3D point cloud[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4):239.
- [3] 徐蔚,彭乐乐,钟倩文,等. 基于图像处理和双 BP 神经网络的电气化铁路接触网立柱标识牌识别算法研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(3):81.
XU Wei, PENG Lele, ZHONG Qianwen, et al. Research on the identification algorithm of electric railway catenary pillar signage based on image processing and double BP neural network[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(3):81.
- [4] 杨红梅,刘志刚,韩焯,等. 基于快速鲁棒性特征匹配的电气化铁路绝缘子不良状态检测[J]. 电网技术, 2013, 37(8):2297.

(上接第 234 页)

参考文献

- [1] 张兴宝. 城轨车辆受电弓供电高压母线拓扑结构分析及设计探讨[J]. 电力机车与城轨车辆, 2014, 37(1):61.
ZHANG Xingbao. Analysis and design of high-voltage bus for pantograph power supply for urban rail vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2014, 37(1):61.
- [2] 张望,刘硕研,柴金川. 动车组运行状态智能检测装备[J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(7):70.
ZHANG Wang, LIU Shuoyan, CHAI Jinchuan. Intelligent detection equipment for EMU operating state[J]. Railway Computer Application, 2018, 27(7):70.

(上接第 237 页)

参考文献

- [1] 闫海城,陈志东. 城市轨道交通车辆两种受电弓跟随性试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(2):32.
YAN Haicheng, CHEN Zhidong. Experimental study of pantograph following performance in two driving modes for urban rail

YANG Hongmei, LIU Zhigang, HAN Ye, et al. Defective condition detection of insulators in electrified railway based on feature matching of speeded-up robust features[J]. Power System Technology, 2013, 37(8):2297.

- [5] 余晓宁,顾桂梅,王阳萍,等. 基于 Faster R-CNN 的接触网吊弦故障检测方法[J]. 兰州交通大学学报, 2021, 40(2):58.
YU Xiaoning, GU Guimei, WANG Yangping, et al. Catenary dropper fault detection method based on faster R-CNN[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2021, 40(2):58.
- [6] 罗隆福,叶威,王健. 基于深度学习的高铁接触网顶紧螺栓的缺陷检测[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(3):605.
LUO Longfu, YE Wei, WANG Jian. Defect detection of the puller bolt in high-speed railway catenary based on deep learning[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(3):605.
- [7] 张子健,马吉恩,李旭峰,等. 基于深度学习与 Hu 不变矩的绝缘子故障检测[J]. 铁道学报, 2021, 43(2):71.
ZHANG Zijian, MA Jien, LI Xufeng, et al. Insulator fault detection based on deep learning and hu invariant moments[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(2):71.
- [8] 王彬,王宝丽. 基于卷积神经网络的接触网绝缘子缺陷检测方法[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12):90.
WANG Bin, WANG Baoli. Detection method of catenary insulator defects based on convolutional neural network[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12):90.

(收稿日期:2022-11-04)

- [3] 张兴凯. 地铁牵引供电系统框架保护方案的优化设计[J]. 现代城市轨道交通, 2015(6):1.
ZHANG Xingkai. Optimization design of frame protection scheme for metro traction power supply system[J]. Modern Urban Transit, 2015(6):1.
- [4] 何晔,于江山,王军,等. 应用于城轨车辆辅助电源的交错控制 Boost 变换器电路研究[J]. 现代城市轨道交通, 2021(7):26.
HE Ye, YU Jiangshan, WANG Jun, et al. Research on interleaved control Boost converter applied to auxiliary power supply of urban rail transit vehicles[J]. Modern Urban Transit, 2021(7):26.

(收稿日期:2021-07-04)

transit vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(2):32.

- [2] 戚广枫,寇宗乾,李红梅. 高铁接触网智能建造技术研究[J]. 中国铁路, 2021(2):1.
QI Guangfeng, KOU Zongqian, LI Hongmei. Research on intelligent construction technologies of HSR overhead contact line system[J]. China Railway, 2021(2):1.

(收稿日期:2021-04-09)