

光热成像技术在城市轨道交通车辆智能运维中的应用研究^{*}

张建华

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安)

摘 要 [目的] 目前,城市轨道交通列车在日常运行中缺少对轴箱、齿轮箱、牵引电机等关键部件运行状态的监测手段,无法实现关键部件的故障预警和跟踪,难以满足列车精准维修的要求,为适应车辆智能运维技术发展需要,需研究解决列车关键部件运行状态监测及故障预警问题。[方法] 结合铁路车辆综合监测技术应用现状,提出在线路轨旁设置基于光热成像技术和声学诊断的综合监测设备,采集列车运行中关键部件的温度和噪声等信息,通过建立故障判定模型,实现对列车关键部件的动态监测和故障诊断。[结果及结论] 光热成像技术具有探测部位多、探测覆盖范围大、车型适应性强、探测准确、探测结果直观等特点,与声学诊断等技术相结合,可实现列车关键部件运行状态实时监测和故障诊断,为列车实施精准维修提供技术支撑。

关键词 城市轨道交通; 车辆; 智能运维; 光热成像; 故障诊断

中图分类号 U442.55

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.042

Research on Application of Photothermal Imaging Technology in Urban Rail Transit Vehicle Intelligent Operation and Maintenance

ZHANG Jianhua

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China)

Abstract [Objective] At present, the lack of monitoring means for the operation status of key components such as axle boxes, gearboxes, and traction motors in the daily operation of urban rail transit trains, makes it impossible to realize the fault early warning and tracking of the key components, and meet the requirements of precise maintenance of the trains. To adapt to the demands of intelligent operation and maintenance technology development, it is necessary to study and solve problems of the operation status monitoring and the fault early warning of key components. [Method] In view of the current application status of comprehensive monitoring technology for

railway vehicles, it is proposed to set up a track side comprehensive monitoring equipment of the line based on photothermal imaging technology and acoustic diagnosis to collect the temperature and noise information of the key components during train operation. Dynamic monitoring and fault diagnosis of the train key components is realized by establishing a fault judgment model. [Result & Conclusion] Photothermal imaging technology characterizes its detection as multi-points, large coverage, strong vehicle model adaptability, accuracy, and visual results. When combined with acoustic diagnosis and other technologies, it can realize real-time monitoring and fault diagnosis for the train key component operation status, providing technical support for precise maintenance of trains.

Key words urban rail transit; vehicle; intelligent operation and maintenance; photothermal imaging; fault diagnosis

截至 2023 年底,中国大陆地区(不含港澳台)共有 59 个城市开通城市轨道交通运营线路 338 条,运营线路总长度 11 224.54 km,累计投运车辆段和停车场共计 523 座^[1]。

在信息技术、产业政策、生产需要等多重因素推动下,智能运维已成为城市轨道交通行业技术创新的重要前沿,其中车辆运维智能化、数字化是城市轨道交通智能运维体系的重要组成部分。

当前,车辆智能运维在数据采集手段上主要有车载监测和轨旁在线监测两种方式。其中,轨旁在线监测技术应用较为广泛的有 360 图像监测、受电弓在线检测和轮对尺寸在线检测,该监测手段在车辆外观、受电弓和轮对外形图像识别和数据采集方面发挥了重要作用。但现有的监测手段覆盖面不足,缺少对列车关键部件(比如轴箱、齿轮箱、牵引电机等)运行状态的动态监测,不能满足当前智能运维业务发展的需要,需进一步研究和补充新的数据采集手段。

^{*} 陕西省重点研发计划项目(2022GY-268)

铁路行业的车辆运行安全监控系统是应用较为成熟的一种在线监测系统,该系统通过温度测量、图像识别、声学诊断等技术实现了运行车辆的全方位探测和故障早期诊断。该系统中的轴温探测技术曾在轨道交通中有一定的应用,但因其采用的“点测”方式不适应城市轨道交通车辆的走行部结构,并未大范围推广。本文针对现有列车轨旁在线监测技术无法实现牵引电机、齿轮箱等关键部件的动态监测和故障报警问题,提出了一种基于光热成像技术的综合监测方法,该方法通过在轨旁设置监测设备,采集列车运行过程中关键部件的温度和噪声数据,建立故障判定模型,实现列车关键部件故障早期诊断。本研究可为列车开展精准维修提供技术支撑,对发展车辆智能运维,逐步实现状态修具有较大的实用价值。

1 光热成像机理及技术特点

1.1 光热成像的机理

物体在非绝对零度状态均会发出不同波长的红外辐射,物体的温度越高,则红外辐射越强。

地铁列车的轴承、齿轮箱、牵引电机等部件在工作中均会因做功发热,在异常状态下时,各部件间的摩擦加剧,物体温度比正常状态下要高。借助现代热成像装置,可以对物体发出的不可见红外波进行捕捉(波长通常为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$),从而产生一个实时的物体热像图,将物体热像图与光学图像叠加,不可见的热辐射波进而转变为人眼可见的、清晰的图像。借助光热图像上的颜色可以清晰地看

到不同部件、不同部位的温度分布情况,结合特定的算法,可以实现对车辆部件异常状态的实时监测。

1.2 光热成像技术特点

光热成像技术有别于传统的单点测温方式,它可以实现对物体的面域探测,在城市轨道交通列车运行监测中具有更明显的技术优势。

1) 探测覆盖面大、探测部位多,能精准覆盖列车关键部件:通过集成红外线热成像、光学成像等传感器阵列,再辅助以光纤微振动传感器,可以实现对地铁列车的轴箱、轮对、制动盘、牵引电机箱、大/小齿轮箱、联轴节和车底外露电缆等部位的综合监测,实时获取列车关键部件在运行过程中的动态数据,为列车入段后的检修策略提供指导。

2) 适应性强、探测精度更高:采用特定的热成像探头角度,可以适应各种车型、车速,并对列车蛇形摆动和车轮弹跳有较大的容忍范围。相较传统单点测温方式,热成像测温误差可以控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内。以某地 2 套探测设备所探测的 246 组样本数据分析可知,热成像与单点测温测得的轴承外圈最高温度有 154 组数据一致,另外 92 组中热成像系统测得温度均高于单点测温测得的温度,与预设温度更接近;同理可得轴承端盖处的温度对比情况,详见表 1。通过对比可知,在对外圈温度的测试中,热成像方式有 92 组样本的最大温度值高于单点测温,占样本总数的 37.4%;在对端盖温度的测试中,热成像方式有 116 组样本最大轴温值高于单点测温,占样本总数的 47.2%,从高温的准确率方面,热成像方式的准确率更高。

表 1 最大轴温一致性对比表

Tab.1 Comparison table of maximum shaft temperature consistency

项目	样本总数/组	最大轴温一致样本数/组	一致性比例/%	最大轴温不一致样本数/组	不一致比例/%
外圈温度	246	154	62.6	92	37.4
端盖温度	246	130	52.8	116	47.2

3) 探测结果直观,应用场景更广泛:城市轨道交通列车具有固定编组、单一交路、循环使用的特点,监测系统可以对列车进行持续监测,分析其变化趋势,并结合趋势特征预测故障,对重点部件形成检修策略,使现场检修从盲目全面检查改成针对性的重点检查。光热成像探测数据经过清洗、分析,形成供决策的清晰热像图(见图 1),便于检修人员判断部件运行情况。

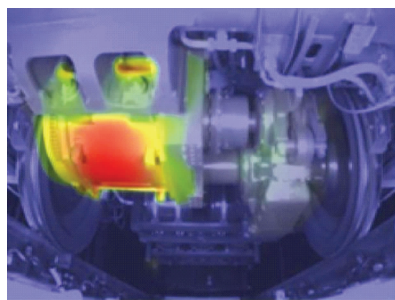


图 1 牵引电机热像图

Fig.1 Thermal image of a traction motor

2 故障诊断方法研究

地铁列车的牵引电机、齿轮箱、联轴节、轴箱等部件的组成都较为复杂,在列车运行过程中,只监测部件的温度特征难以实现对复杂部件运行状态的精准诊断,为了保证故障诊断的准确性,还需增加对部件运行噪声的监测,通过温度和噪声两个维度的监测实现故障诊断。

2.1 故障诊断方法

温度异常诊断利用光热一体相机采集部件表面温度热学图,计算确定区域温度矩阵,求取该区域最高温度、平均温度以及高温聚集区域集中度等数值,最后进行同列相同部件求异对比,确定温度指数,实现故障判别。

声音异常诊断需采集部件运行中的声音信号,利用小波包分析算法提取真实信号特征向量作为样本集,结合 BP (反向传播) 神经网络建立模型,实现故障判别。

2.2 故障指数模型

为了实现部件的故障预警,需要为每个部件设定一个故障指数:

$$F_L = \sum_{i=1}^n \alpha_i T_{L_i} + \sum_{i=1}^n \beta_i C_{L_i}$$

式中:

F_L ——部件的故障指数;

α_i ——区域 i 的温度指数权重;

β_i ——区域 i 的噪声指数权重;

T_{L_i} ——部件区域 i 的温度指数;

C_{L_i} ——部件区域 i 的噪声指数。

分别计算温度指数和噪声指数,通过试验和数据分析确定不同部件的指数权重,就可以建立判别故障的基准,实现故障分级预警。

以某地铁场段列车检测数据为例,地铁列车不同部件故障判别指数如表 2 所示。

表 2 不同部件故障判别指数

Tab.2 Fault discrimination indices for different components

项目	故障判别指数	
	预警级别	报警级别
牵引电机	≥ 1.0	≥ 2.0
接线器		≥ 2.6
轴箱	≥ 0.6	≥ 3.0

3 应用实例分析

3.1 牵引电机故障监测

牵引电机轴承发生电蚀或绕组故障时,电机表面工作时温度会异常升高,并会产生异常噪声。通过电机表面温度和运行噪声监测两个维度,可以判断电机运行状态。如图 2 所示,该电机温度指数 9.20、噪声指数 0.94,利用故障指数模型得到故障指数为 3.20,且历史故障报警次数 2 次,属于电机故障。

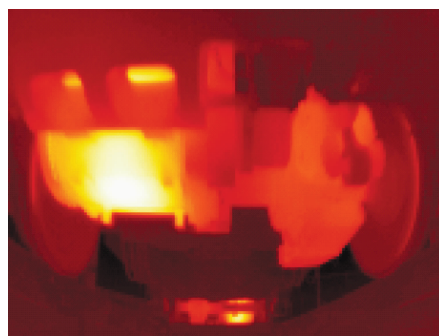


图 2 电机故障报警热像图

Fig.2 Thermal image of motor fault alarm

通过跟踪牵引电机检测数据,可以按照时间维度形成故障指数跟踪图,通过预测故障指数发展趋势可以预判牵引电机故障可能出现的时间,从而对部件进行健康管理。

3.2 接线器故障监测

电机接线器为高压电气连接器,位于两辆车的车钩连接部。日常使用中会出现大电流烧毁故障,可通过监测其表面温度变化实现故障报警。如图 3 所示,该部位连接器温度指数为 3.40,故障指数为 0.89,属于正常状态。

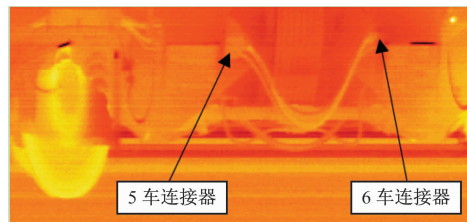


图 3 电机接线器热像图

Fig.3 Thermal image of motor connector

同理,通过建立故障指数跟踪图,也可以预判连接器故障发生的时间,实现健康管理。

3.3 轴箱故障监测

轴箱故障是一个由量变到质变的过程。一般情况下要经过振动、噪声、发热、失效等 4 个状态。

当轴承发生故障,首先表现在运转时产生振动,内部冲击变大,并逐渐出现异常噪声及异常磨损;机械部件异常磨损又会导致轴承温度上升,轴箱发热,内部润滑油由于温度上升出现润滑性能下降,异常磨损加剧,如此恶性循环直至失效。

通过对轴箱表面温度监测和运行噪声监测两个维度,可以诊断轴箱轴承运行状态正常或异常,并根据故障指数进行报警。同时,根据监测数据形成轴箱故障指数跟踪图,进行轴箱故障趋势预测,实现健康管理。如图4所示,该轴箱温度指数7.2、噪声指数0.35,利用故障指数模型得到故障指数为0.52,轴箱状态正常。

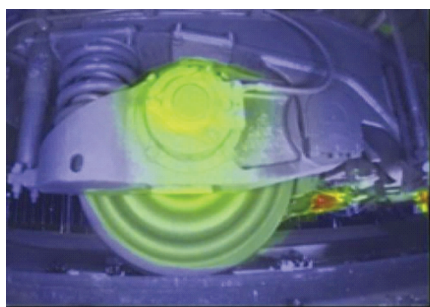


图4 轴箱光热图

Fig. 4 Photothermal image of the axle box

3.4 应用前景分析

光热成像技术可实现局部面探测,具有探测适应性强、探测部位多、车型及环境适应能力强等优点,结合噪声诊断等技术,可广泛应用于城市轨道交通领域。

3.4.1 跨线运营列车的实时监测

多网融合模式存在列车跨线运行的需求,要实现跨线列车的实时监测需解决检测设备兼容多种车型的问题。光热成像技术的面探测优势具备更好的适应性,同时,通过在运营线路上布设探测设备,可实现跨线列车的成网追踪和监测,有利于提高线网层面的资源共享度。

3.4.2 对长交路运营列车的监测

城际及市域(郊)铁路具有线路长、站间距大、列车速度快、快慢车运输等特点,列车运行工况复杂。光热成像技术环境适应能力强,在运营线路上按照一定间距布设轨边探测设备,可实现列车运行状态的实时追踪,为列车运行安全保驾护航,同时探测数据也可科学制定列车检修策略提供支撑。

3.4.3 作为智能运维系统的列车检测手段

利用机检代替人检,压缩检修用时,提高列车上线率是智能运维的重要目标。光热成像技术的

探测结果更为直观,在实际应用中,与360图像检测、受电弓与轮对图像检测等技术融合,可为智能运维系统提供更全面、更准确的数据支持,进一步完善智能运维系统的数据采集手段。

4 结语

光热成像技术具有探测范围大、探测部位多、适应性强、探测准确等特点,与声学监测等其他监测技术结合,可对列车运行安全进行全方位监测,是实现智能运维目标不可缺少的技术手段。

随着多网融合的不断推进,在列车运行工况日趋复杂的情况下,以光热成像技术为代表的车辆监测手段可以实现跨线列车的实时追踪监测,保证列车运行安全,并为车辆运维的智能化、科学化和车辆健康管理奠定基础。

充分发挥光热成像监测技术在轨道交通车辆运行监测和智能运维中的支撑作用,还需进一步从线网层面进行深入研究,并在工程实践中不断对故障预测和诊断模型进行验证和完善。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2023年度统计和分析报告[R]. 北京:中国城市轨道交通协会,2024.
China Urban Rail Transit Association. 2023 Annual Statistics and Analysis Report of Urban Rail Transit[R]. Beijing: China Urban Rail Transit Association, 2024.
- [2] 应博, 范琳. 城市轨道交通车辆故障诊断方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 271.
YING Bo, FAN Lin. Urban rail transit vehicle fault diagnosis method[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 271.
- [3] 赵明, 高明亮, 高珊, 等. 城市轨道交通车辆轨旁智能运维技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 123.
ZHAO Ming, GAO Mingliang, GAO Shan, et al. Research of trackside intelligent operation and maintenance technology for urban rail transit vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(2): 123.
- [4] 刘元林, 梅晨, 唐庆菊, 等. 红外热成像检测技术研究现状及发展趋势[J]. 机械设计与制造, 2015(6): 260.
LIU Yuanlin, MEI Chen, TANG Qingju, et al. Research status and development trend of infrared thermal imaging detection technology[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(6): 260.

· 收稿日期:2023-11-16 修回日期:2024-05-30 出版日期:2025-01-10

Received:2023-11-16 Revised:2024-05-30 Published:2025-01-10

· 通信作者:张建华,正高级工程师,tyy65954@126.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license