

人工智能技术在城市轨道交通智能运维中的应用研究

雷方舟

天津轨道交通咨询有限公司 天津 南开 300000

摘 要:城市轨道交通设备分布范围广,损耗诱因错综复杂,传统运维会受作业窗口、人员经验带来多重制约,故障隐患容易发生遗漏。本文围绕智能感知采集、多源数据加工、异常辨识、业务适配改造梳理技术落地逻辑,结合线路、车辆、车站机电、任务统筹说明实际应用方向,探讨数据体系构建、模型迭代、人机协同、体系优化的推进方式,让人工智能融入运维流程,提升轨道交通现场设备运维的作业质量。

关键词:城市轨道交通;智能运维;人工智能;设备巡检;人机协同

引言:城市轨道交通线网持续向外拓展,土建、车载、机电各类设备长期承受持续载荷,构件劣化会随运营时间逐步显现。夜间检修窗口成为现场处置的主要时段,依靠人力巡检很难完整捕捉设备刚刚萌生的细微缺陷。运维业务需要接纳新的技术手段,依托智能感知与数据分析挖掘设备运行信号里潜藏的异常线索。新技术介入会改变原有作业流转形式,适配现场复杂工况,缓解传统模式暴露出的各类现实矛盾。

1 城市轨道交通运维作业的现实运行特征

1.1 轨道交通设备运维作业的业务构成

城市轨道交通系统包含线路土建、车辆本体、供电单元、信号通信等多类设备,不同设备对应差异化的运维工作内容。线路土建运维主要针对轨道构件、隧道结构、站台附属设施,重点处理构件损耗、结构形变等问题。车辆本体运维围绕列车车载部件开展,完成走行部位、车载控制单元、客室配套装置的检查与部件更换工作。供电单元承担全线电能供给保障,需要定期对接触网、变电装置开展现场排查^[1]。信号通信系统负责传输列车运行指令,板卡、传输链路的状态检测会占用大量作业时长。各板块作业内容相互独立,设备分散布置在隧道、车辆段、车站等区域,运维人员需要依照设备分布点位,分区域开展现场作业。

1.2 设备持续运行带来的运维作业压力

轨道交通线路长期处于高频载客运营状态,各类设备持续投入运行。列车反复启停会加速走行部件磨损,钢轨不断承受车轮碾压,构件损耗会逐步累积。隧道内部环境密闭,温湿度持续波动,容易造成金属构件锈蚀老化。供电、信号设备跟随行车周期不间断工作,元器件会随运行时间出现性能衰减。运营时段设备不允许停机拆解检修,

绝大多数检测、部件更换工作只能安排在夜间有限的封锁窗口期。有效作业时间被大幅压缩,工作人员需要在限定时长内完成点位巡检与故障处理,而设备损耗仍在持续发生,待处理的运维工作量会不断叠加。

1.3 传统运维作业模式存在的固有限局

传统运维主要依靠人员现场实地作业,设备状态判定多依赖人工观测。人工检测容易受视线、现场环境干扰,深埋、隐蔽位置的设备缺陷很难被及时发现。缺陷识别效果高度取决于作业人员实操经验,不同工作人员对同类异常的判定标准存在差异。设备状态依靠纸质表单、本地文档记录,各类资料分散保存,调取历史运行数据需要查阅大量存档文件。故障发生后才开展处置工作,缺陷萌芽阶段得不到有效干预,部分微小损伤持续发展,最终演变为处置难度更大的设备故障。

1.4 运维作业开展过程中的各类现实约束

线路运营管理规则明确划定作业时间边界,非封锁时段隧道及轨行区禁止人员进入作业。部分设备安装空间狭小,大型检测仪器无法进场布设,现场仅能依靠小型工具完成检修。全线车站与设备点位分布跨度大,故障点位之间距离较远,人员转场会消耗本就有限的作业时长。所有现场操作都必须落实安全确认流程,保障行车运行安全。同时,同一条线路内存在多批次投产设备,设备型号版本并不统一,故障表现形式各不相同,进一步加大现场运维处置难度。

2 人工智能适配轨道交通运维的技术落地方向

2.1 设备状态信息的智能化获取途径

轨道交通设施分布范围广,大量设备布置在隧道内部、轨行区沿线以及列车车体上。传统人工巡检模式会受

作业窗口、现场环境多重条件制约。将智能感知设备部署在线路沿线以及列车车载位置,直接采集目标构件的运行信号。光学采集设备记录钢轨、车体部件的外观变化,传感装置采集振动、温度等运行参数。采集范围覆盖轨道构件、接触网部件、车载机电单元,把设备构件的物理变化转化为可读取的数字信号^[2]。数据采集可伴随列车运行、设备运转同步进行,不再完全依靠人员到现场开展人工查看。即便处于隐蔽位置的构件,其状态变化也能够持续被捕捉,拓宽设备状态数据的获取渠道。

2.2 运维多源业务数据的加工处理模式

感知设备采集得到原始信号中混杂着环境干扰带来的无效数据,无法直接用于运维工作,必须完成预处理。过滤环境扰动造成的失真采样,剔除设备启停带来的信号跳动干扰。对多来源数据进行分类整理,区分感知采样数据、作业记录、现场处置台账。挖掘不同类型数据之间的内在关联,提取能够真实反映设备工况的有效信息,剔除不具备分析价值的冗余片段,保留可以体现构件损耗演化规律的信号样本。处理后的数据转换为标准化格式,为后续特征挖掘提供支撑。整套流程减少人工整理录入的工作量,规避人为处理带来的数据偏差。

2.3 设备异常特征的智能辨识实现路径

经过预处理的数据完整记录设备运行过程中的各类状态改变,构件发生损伤时,会在信号层面产生对应的特征变化。智能辨识技术对海量信号样本开展解析,筛选出偏离正常工况的信号片段。通过比对设备正常运行的基准信号,捕捉构件逐步劣化产生的信号偏移。针对不同设备建立专属识别逻辑,区分轨道磨损、车载部件损耗、供电构件劣化各自对应的信号特征。把信号异常和实际物理点位相互映射,定位发生变化的具体设备构件。辨识工作可以捕捉缺陷早期微弱信号,在故障萌芽阶段输出提示,为现场运维提供参考依据。

2.4 运维业务场景下 AI 技术的适配改造

通用人工智能算法无法直接落地轨道交通运维现场,需要结合业务场景完成优化调整。依据轨交设备的运行特点优化解析逻辑,匹配设备独有的劣化发展规律。围绕现场巡检、部件检修、现场处置等实际业务优化功能模块,调整输入输出形式,适配运维体系现有的信息流转模式。打通算法输出结果和现场业务流程的数据通路,降低复杂现场环境造成的误判概率。改造后的智能模块嵌入现有运维流程,直接服务于设备排查与故障处置工作。

3 人工智能在轨道交通运维场景下的具体应用

3.1 轨道线路基础设施巡检当中的应用

轨道线路基础设施包含钢轨、扣件、道床以及隧道衬砌,线路整体跨度大,大部分区段处于地下封闭环境。传统巡检依靠工作人员夜间进入轨行区目视检查,作业效率受夜间窗口期限限制。夜间作业人员体力下降,长时间近距离观测容易出现视觉疲劳,细小裂纹、扣件微小移位等隐患极易被直接忽略。巡检车体搭载图像采集设备,在线路行进过程中采集钢轨表面、扣件、隧道壁面影像。人工智能算法解析影像资料,识别钢轨擦伤、扣件松动脱落、衬砌开裂剥落等病害。识别结果绑定线路里程信息,精准定位病害实际位置^[3]。针对隧道内部光线不足、粉尘雾气干扰成像等问题,对解析模型做专项适配。病害提示直接推送至作业端,运维人员按照定位信息前往现场开展处理。该模式弥补人工目视巡检的疏漏,将影像资料转化为可执行的巡检线索,完成线路基础设施状态排查。

3.2 列车车辆系统运维环节当中的应用

列车车辆构件数量繁多,走行部、制动单元、车载电气部件持续承受行车冲击,构件损耗会随运行里程不断累积。车辆回库之后,传感与图像采集装置针对车体关键部件完成数据采集,覆盖轮对磨损、转向架连接件、制动器件、车载电气箱体。库内检修工位任务集中,短时间内要完成多台车辆检查,单纯依靠人工很难捕捉部件内部隐性损伤。人工智能解析振动、温度以及图像数据,识别轮对擦伤、紧固件松动、器件外观损伤等特征。同时调取车载运行记录开展综合分析,挖掘行车过程中不易察觉的部件劣化趋势。分析结果指向具体故障部件,为检修人员提供明确排查方向。检修人员无需对全车构件开展无差别拆解,重点针对提示点位核查。减少盲目拆解耗费的工时,检修工作聚焦已经显现劣化苗头的部件。

3.3 车站机电配套设备运维当中的应用

车站布设通风空调、给排水、扶梯、消防等机电装置,保障站点正常运营。站点机电设备点位分散,分布在站厅、站台、设备夹层等空间,不少设备布置在夹层狭小区域,人工巡检需要消耗大量往返时间。部分设备远离客流可视区域,故障初期不会直接影响客运服务,人工周期巡检模式下很容易错过最佳处置时机。在机电设备周边布设感知装置,持续采集振动、温度、声响信号。人工智能从连续采样数据中识别器件老化、传动部件卡滞带来的信号偏移,完成扶梯传动部件、空调风机、给排水泵体的状态分析。识别出的异常线索标注设

备编号与安装位置,同步推送至运维业务模块。检修人员根据提示开展现场核查,优先处理已经出现劣化趋势的设备。

3.4 运维任务统筹与作业管控当中的应用

轨道交通运维需要处理线路、车辆、车站多来源的缺陷线索,待处置任务持续产生,不同线索的发生时间、风险等级、作业条件各不相同。各类缺陷线索会在短时间批量涌入,依靠人工判别风险等级,容易出现任务错排、高风险问题延后处置的情况。人工智能解析缺陷点位、设备类型、现场作业限制等信息,结合轨行区封锁计划、车辆段检修窗口、人员在岗情况拆解各项任务。按照缺陷风险划分处置优先级,确定任务执行顺序。输出的任务方案贴合现场客观条件,避开运营时段无法进场的区域。作业开展过程中同步接收现场反馈,跟踪任务执行进度;遇到作业受阻的情况,自动调整剩余任务排布。辅助管理人员梳理海量待办条目,降低人工统筹带来的疏漏。

4 人工智能技术落地智能运维的推进路径

4.1 运维业务数据体系的搭建思路

运维业务数据体系搭建需要面向轨道交通现场实际作业场景展开。采集来源覆盖车载设备、轨道土建、供电信号各类装置产生的运行记录。做好原始数据的甄别筛选,剔除现场环境干扰带来的无效采样内容。梳理不同业务环节的数据来源,理顺各类数据的获取渠道^[4]。完成数据格式的统一处理,消除不同设备输出格式不一致带来的读取阻碍。拓展数据获取范围,把现场检修留存的作业记录也纳入数据处理范畴。规范数据采集点位布设,避开强电磁干扰区域,保障采集得到的内容具备实际参考价值。做好数据存储管理,保障后续模型调用阶段可以顺利调取对应内容。

4.2 运维场景下 AI 模型的迭代调整方式

AI 模型投入轨道交通运维场景,不能直接沿用通用场景下的成型版本。模型初始状态需要结合轨道交通设备运行特征完成适配改造。依托现场积累的业务素材完成模型适配训练,让模型可以读懂轨道运维相关的设备状态信息。接收现场持续产出的新样本,逐步修正模型内部识别逻辑。捕捉现场出现的新型设备异常,把对应样本补充进训练素材。观察模型输出内容和现场实际状态之间的偏差,针对偏差点完成局部调整。避开大规模重训练带来的资源消耗,采用局部微调的方式优化识别能力。

4.3 人机协同开展运维作业的实施模式

人工智能输出的各类分析结果,需要和现场运维人员的作业流程相互衔接。AI 输出设备状态相关提示,交由运维人员完成现场核验确认。划分机器分析与人工作业各自负责的业务边界。机器承担海量数据的解析工作,减轻人员处理大量信息带来的负担。人员负责现场实地处置,结合自身业务经验判断 AI 输出内容的可信程度。调整原有检修流程,把智能分析输出的提示嵌入作业执行环节。改变完全依靠人员经验排布检修任务的旧有模式。不把机器输出结果当做直接执行的唯一依据,经过人员确认之后再落实后续检修动作。

4.4 智能运维体系运行过程中的优化调整

智能运维体系投入使用之后,各类运行条件会持续发生改变。线网设备会出现更新替换,设备型号与运行特性随之改变。原有体系的处理逻辑需要跟随设备变化做出改动。跟踪体系在现场的实际运转表现,找出业务流转当中存在的阻滞环节。针对设备更新、作业流程改动带来的变化,对体系内部各个模块做针对性修改。观察分析输出内容对现场检修工作的实际支撑作用,处理支撑薄弱的环节。顺着现场运维业务的变动,改动整套智能运维相关的处理环节,满足线网设备更新迭代带来的业务要求。

结束语

轨道交通智能运维建设需要贴合现场业务逐步推进。感知采集、信号解析、线索输出构成技术应用基础,线路、车辆、车站多场景落地实现技术价值释放。数据资源积累、模型持续调校、人机相互配合保障业务平稳运转。线网设备持续更迭,运维业务状态动态变化,智能运维相关模块也需要同步打磨调整,以此适配轨道交通运维不断变化的现实作业环境。

参考文献

- [1] 周波,梁家伟.人工智能在轨道交通智能运维中的应用[J].模型世界,2026(4):13-15.
- [2] 彭畅,王田天,牛步钊,等.轨道车辆人工智能技术研究及应用:进展、挑战与展望[J].中国科学基金,2026,40(1):139-156.
- [3] 宋春丽.人工智能赋能城市轨道交通管理的创新实践与发展前瞻[J].人民公交,2025(18):125-127.
- [4] 林禾苒.基于人工智能的轨道交通故障预测与维修[J].人民公交,2025(6):160-162.