

基于模式识别的地铁列车状态耦合分析系统设计与应用

李兆新^{1,2} 胡林桥³

(1. 华南理工大学电子与信息学院, 510641, 广州; 2. 广州地铁集团有限公司运营事业总部, 510308, 广州;

3. 成都运达科技股份有限公司, 611731, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘要 针对地铁列车部件因状态耦合作用而相互影响的问题,提出了一种基于模式识别的地铁列车状态耦合分析系统设计方法。该方法通过轮轨耦合分析、弓网耦合分析及部件状态特征识别技术,将异常特征进行模式抽取,获取导致异常特征的故障原因。结合某地铁列车,将该方法应用于所开发的服役安全保障系统。应用情况表明,该方法通过工况模式识别和特征耦合分析,可有效地降低干扰并获取异常特征信息,从而能够准确分析故障原因,为快速定位和精准维修提供技术支持。

关键词 地铁列车; 状态耦合分析; 模式识别; 故障分析

中图分类号 U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.04.020

Design and Application of Metro Train State Coupling Analysis System Based on Pattern Recognition

LI Zhaoxin, HU Linqiao

Abstract Aiming at the state of subway train components interacts due to coupling, a design method of metro train state coupling analysis system based on pattern recognition is proposed. The method extracts the anomalous features through wheel-rail coupling analysis, bow-net coupling analysis and component state feature recognition technology, and acquires the faults caused abnormal features. Combined with the train of a subway company, the service security system is designed and developed. The research results show that the method can obtain the anomaly features information through the condition pattern recognition and feature coupling analysis, and effectively reduce the interference by obtaining the anomalous features to analyze the fault causes, so as to lay the foundation for rapid positioning and accurate maintenance.

Key words metro train; state coupling analysis; pattern recognition; failure analysis

First-author's address School of Electronics and Information, South China University of Technology, 510308, Guangzhou, China

目前,国内外学者对地铁列车运行状态方面已有广泛的研究。文献[1]基于轮轨接触理论对车辆动力学性能进行了详细分析;文献[2]开展了城市轨道交通列车走行部滚动轴承运行可靠性分析方法的研究;文献[3]开展了受电弓/接触网系统动力学模型及特性研究;文献[4]开展了一种城市轨道交通列车转向架故障预测与视情维修方法研究。

上述研究集中在列车零部件故障特征或单一特征方面,无法满足复杂环境下列车运行特征相关性分析和故障定位的要求。基于此,本文通过城市轨道交通系统安全与运维保障国家工程实验室的车辆服役安全保障技术研究平台(以下简称“国家工程实验室车辆平台”),搭建基于列车实景运行状态数据获取与实景数字化模型的研究环境,分析列车异常特征出现时工况和运行模式,通过状态分析与特征匹配,实现列车异常特征的分析、故障诊断、状态预测。

1 地铁列车状态分析系统结构

1.1 地铁列车状态耦合分析方法

地铁列车是一个复杂的机电综合系统,在列车运行过程中,各种状态特征的产生大多是复杂环境(轨道条件、弓网关系、轮轨关系)下耦合作用的结果。因此,地铁列车状态耦合分析需要将上述信息进行对标耦合,在突发性阈值和一致性异常特征出现时,通过多次多车运行状态特征提取分析进行异常特征的故障定位。

1.2 地铁列车状态耦合分析框架

地铁列车状态耦合分析框架包括数据源、数据处理、异常识别、基于工况的模式识别、失效特征分析、检修策略制定等,如图1所示。

1) 数据源。地铁列车状态分析、故障诊断及预测的原始数据,包括线路弯道坡度、轨道状态信息、

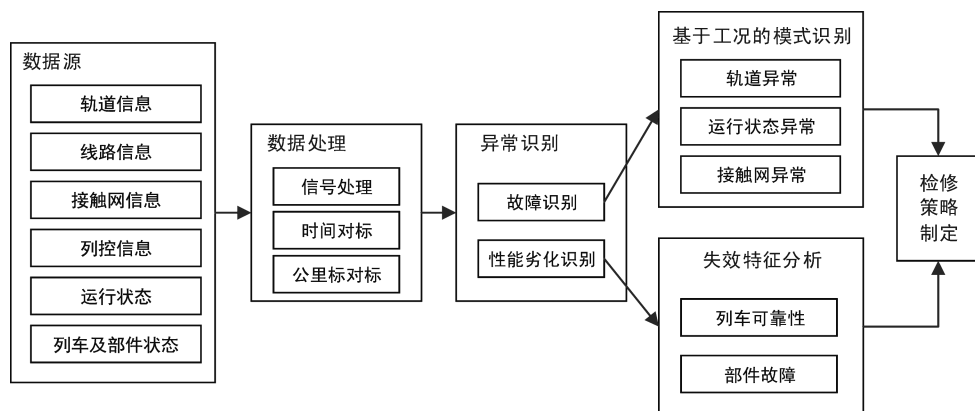


图1 地铁列车状态耦合分析框架

接触网信息、列控信息、运行状态信息、列车及部件状态数据等。

2) 数据处理。原始数据的清洗,保证用于分析数据的有效性和归一化。

3) 异常识别。根据列车检修和适运标准,对整车运行可靠性指标及各部件功能性能指标进行标定,达到预定阈值时系统即开展异常识别分析。

4) 基于工况的模式识别。列车运行过程中出现功能性能指标超过设定值时的分析,通过多次多车的对比分析,确定导致异常特征出现的原因。

5) 失效特征分析。通过长时间跟踪对比分析,对表现异常的功能性劣化进行分析,确定导致失效的原因。

6) 检修策略制定。对部件性能变化过程进行跟踪,结合工况预测部件性能劣化速度以及对列车运行状态的影响。

2 地铁列车状态分析方法

2.1 地铁列车状态耦合分析原理

列车状态监测及数据采集是实现状态分析及故障诊断预测的基础,作为可独立运行的地铁列车,其列控系统中包含有大量运行和控制信息。另外,在传感装置对列车状态识别过程中,由于轮轨、弓网、车体与转向架等多种相对运动,因此可利用其耦合关系开展特征传递分析。

预先在地铁列车上安装状态感知与数据采集装置,在列车运行过程中对状态数据进行采集,获取地铁列车运行状态信息和列控信息,建立状态数据与环境数据的耦合关系。当某一项状态数据出现预警报警时,直接调取工况数据和耦合关系模型,确定异常特征的出现是否由轨道环境、接触网

环境、操控过程或列车部件性能变化等因素造成。

2.2 地铁列车状态耦合分析流程

地铁列车状态耦合分析流程如图2所示,具体步骤如下:

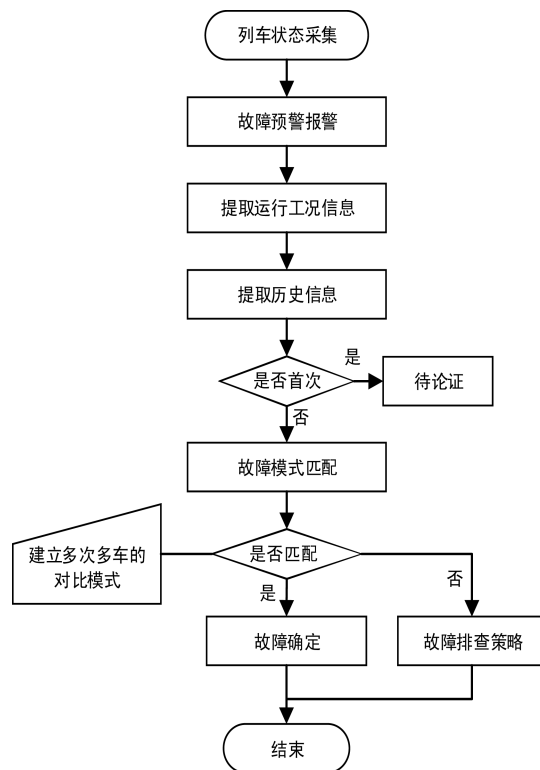


图2 列车状态耦合分析流程

步骤一 状态数据采集——启动列车状态数据采集,通过边缘计算,得到部件健康状态。

步骤二 异常特征提取,工况及历史数据获取——计算部件健康指数,当健康指数特征值达到阈值时,进行报警,同时获取列车运行状态下线路数据、运行数据、列控数据、接触网数据等。

步骤三 模式识别与匹配——根据步骤二的工况信息,建立故障样本,形成故障模式数据组。

步骤四 故障耦合诊断——根据数据组特征,通过多维度耦合分析,诊断故障原因(线路环境、车辆故障、车辆性能劣化等)。

3 应用实例

3.1 系统架构

为了验证上述方法的正确性和有效性,本文在某地铁公司列车上进行了系统验证试验。系统通过监测和采集列车动力学状态、应力状态变化、悬挂位移变化

及多功能列车总线(MVB)等的样本数据,获取列车状态数据,如图3所示。

系统包括运行状态实时传感车载系统、车地数据传输系统、数字化实验中心3个部分。运行状态实时传感车载系统实现动力学状态数据监测,即轴箱振动、构架振动、车体振动、构架应力、悬挂扰度、受电弓振动、受电弓应力等的监测;车地数据传输系统进行数据集成、预处理、存储和传输,同时通过电气系统接口获取MVB状态数据;数字化实验中心实现动力学数据监测、分析和展示,实现数据驱动的3D可视化仿真。

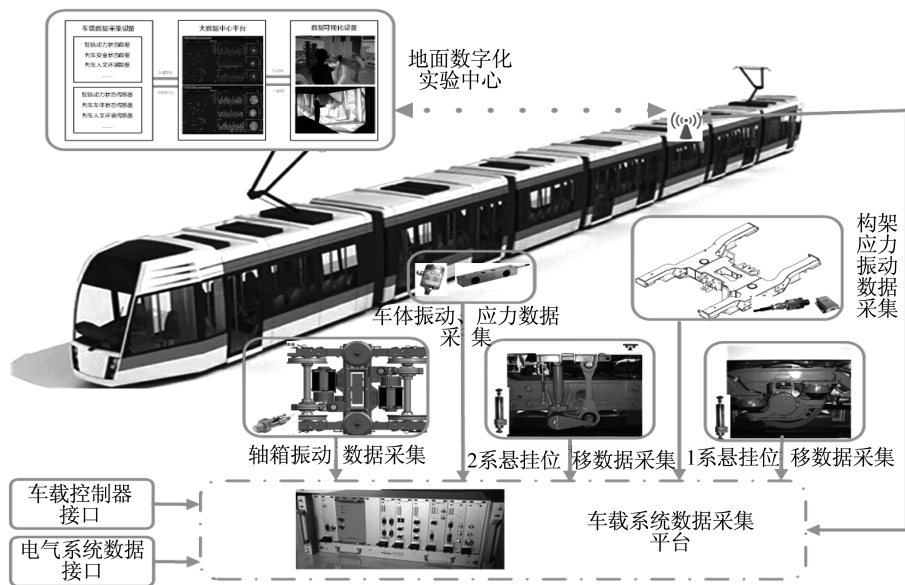


图3 地铁列车状态耦合分析系统数据拓扑结构

3.2 耦合关系分析

3.2.1 轮轨耦合关系平稳性分析

1) 平稳性计算方法。平稳性指标利用装在车体的振动传感器进行数据采集并计算,计算公式如下:

$$W = \sqrt[10]{\sum_{i=1}^n W_i^{10}} = 7.08 \sqrt[10]{\frac{A_i^3}{f_i} F(f_i)} \quad (1)$$

式中:

W ——平稳性指标;

W_i ——第 i 个频率分量的平稳性指标;

A ——振动加速度, g ;

f_i ——第 i 个频率分量的振动频率, Hz ;

$F(f_i)$ ——第 i 个频率分量的频率修正系数

(见表1)。

根据式(1)求出的平稳性指标,其实际应用效果如图4所示。

表1 平稳性计算的频率修正系数

竖向振动		横向振动	
f_i/Hz	$F(f_i)$	f_i/Hz	$F(f_i)$
0.5~5.9	$0.325 f_i^2$	0.5~5.4	$0.800 f_i^2$
5.9~20.0	$400.000/f_i^2$	5.4~26.0	$650.000/f_i^2$
>20.0	1.000	>26.0	1.000

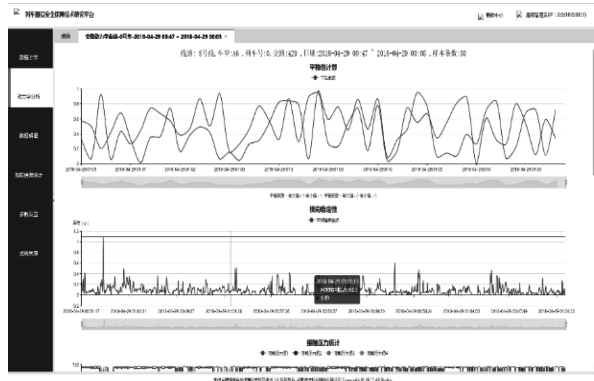


图4 轮轨耦合关系平稳性分析曲线

2) 列车运行平稳性异常耦合识别。前述研究了单传感器数据的平稳性计算方式。为了快速寻找造成列车运行平稳性异常的多因素耦合关系,定义平稳性状态及异常原因识别公式如下:

$$M_{\text{平}} = \begin{cases} M_{\text{平, 车辆故障}} & \sum_{q=1}^n H(W_q - \bar{W}_q - 3\delta_{w_q}) \geq 1 \\ M_{\text{平, 轮轨耦合故障}} & \sum_{j=1}^n H(W_j - \bar{W}_j - 3\delta_{w_j}) \geq 1 \\ M_{\text{平, 车辆性能劣化}} & \sum_{k=1}^n H(W_k - \bar{W}_k - 3\delta_{w_k}) \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$H(x_1 - x_2) = \begin{cases} 0 & x_1 - x_2 \leq 0 \\ 1 & x_1 - x_2 > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$M_{\text{平}}$ ——列车平稳性异常因素;

$M_{\text{平, 车辆故障}}$ ——车辆故障导致平稳性异常因素;

$M_{\text{平, 轮轨耦合故障}}$ ——轨道条件劣化导致平稳性异常因素;

$M_{\text{平, 车辆性能劣化}}$ ——车辆性能劣化导致平稳性异常因素;

W_q ——相同线路第 q 辆车的平稳性值(对于地铁列车,不同列车在线路相同位置的运行速度相同);

W_j ——线路 j 中同列车以相同速度范围通过相同线路半径和相同坡度时不同位置的平稳性值;

W_k ——同列车 k 时刻通过该位置的平稳性值;

$\bar{W}_q, \bar{W}_j, \bar{W}_k$ ——分别为 W_q, W_j, W_k 的平均值;

$\delta_{w_q}, \delta_{w_j}, \delta_{w_k}$ ——分别为 W_q, W_j, W_k 的标准差;

x_1, x_2 ——分别为变量1与变量2。

3.2.2 构架累计疲劳寿命分析

1) 构架疲劳寿命计算。根据Miner损伤累积法则,假定每一个循环所造成的平均损伤为 $1/N$, n 次恒幅载荷所造成的损伤等于其循环比,则该方法可以表达为:

$$D_{\text{恒}} = n/N \quad (4)$$

其中 $D_{\text{恒}}$ 为总损伤, $D_{\text{恒}}$ 大于1则失效发生。

变幅载荷的损伤 $D_{\text{变}}$ 等于其循环比之和,可以表达为:

$$D_{\text{变}} = \sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

Palmgren-Miner 损伤累积法则的基本理论说明,结构疲劳失效在总的损伤超过1时,即当 $D_{\text{变}} > 1$ 时,结构疲劳失效就发生。

2) 构架疲劳寿命耦合分析。通过线路和车辆耦合因素分析车辆结构疲劳寿命异常原因,定义耦合计算公式如下:

$$M_{\text{耦}} = \begin{cases} M_{\text{耦, 车辆故障}} & \sum_{q=1}^n H(D_q - \bar{D}_q - 3\delta_{D_q}) \geq 1 \\ M_{\text{耦, 线路条件劣化}} & \sum_{j=1}^n H(D_j - \bar{D}_j - 3\delta_{D_j}) \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$M_{\text{耦}}$ ——疲劳寿命异常因素;

$M_{\text{耦, 车辆故障}}$ ——车辆故障导致疲劳寿命因素;

$M_{\text{耦, 线路条件劣化}}$ ——线路劣化导致疲劳寿命异常因素;

D_q ——相同线路第 q 辆车的损伤度;

D_j ——线路 j 中同服役年限同车型车辆的损伤度;

\bar{D}_q, \bar{D}_j ——分别为 D_q, D_j 的损伤度平均值;

$\delta_{D_q}, \delta_{D_j}$ ——分别为 D_q, D_j 的标准差。

4 结论

1) 提出了一种基于模式识别的地铁列车状态耦合分析系统设计方法,将列车运行数据、环境数据和状态数据进行耦合,反映列车部件之间的状态特性传递和相互关联作用,用于故障排查与预测。

2) 构建了广州地铁国家工程实验室车辆服役安全保障技术研究平台,对未监测列车运行状态和部件状态的可靠性评估提供了重要参考依据,大大节省了监测设备的成本消耗;另外,为基于工况对部件劣化进行高加速试验提供重要支撑。

3) 通过广州地铁国家工程实验室车辆服役安全保障技术研究平台的系统设计和实现,将其成果应用于线网列车状态分析,可大大提高列车状态分析的可靠性和有效性。

参考文献

- [1] SHEVTSOV I Y, MARKINE V L, ESVELD C. Optimal design of wheel profile for railway vehicles[J]. Wear, 2005, 258(7/8):1022.
- [2] 云婷. 城轨列车走行部滚动轴承运行可靠性分析方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [3] 梅桂明, 张卫华. 受电弓/接触网系统动力学模型及特性研究[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(1):20.
- [4] 秦勇, 贾利民, 史婧轩, 等. 一种城轨列车转向架的故障预测与视情维修方法:CN104239694B[P], 2016-11-23.

(收稿日期:2019-08-02)