

文章编号:1005-0523(2013)01-0032-05

轨道车辆走行部机械故障预警方案研究

吴 误, 沈 钢

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要:介绍了轨道车辆走行部机械故障监测及预警方面的发展情况,分析了列车振动特殊性,提出适用于轨道车辆的基于振动信息的SLFD(self-learning-fault-detection)故障诊断方案,并考虑影响故障预警的两大因子即运行速度和线路条件。通过仿真分析,验证了此方法的可行性。通过设计与轨道车辆走行部等效的机械试验装置,进一步验证该方法的有效性。

关键词:轨道车辆;机械故障;预警;监测;自学习;试验台

中图分类号:U279.5

文献标志码:A

铁路在现代经济发展中有着举足轻重的作用,也给人们带来了巨大便利。与此同时由列车故障引发的事故也带来了巨大人员和经济损失,如德国ICE884次高速列车脱轨事故,当时一节拖车的轮毂发生破裂,发出剧烈的摩擦声,但司机毫不知情,最后导致101人死亡,88人重伤^[1]。铁路运输的快捷与安全需要一种有效的故障预警系统能及时将列车运行状态反馈给司机。

轨道车辆振动系统的故障检测属于机械振动故障检测范畴,但两者又有明显区别,主要如下:

- 1) 传统的机械故障模式是固定的,而轨道车辆的故障是难以预知的;
- 2) 传统的机械振动故障诊断系统是针对单一故障系统,而轨道车辆不需要确切的故障信息,更重要的是能预判重大故障,并将信息反馈给司机;
- 3) 传统的机械系统工况相当稳定,而轨道车辆的振动随运行速度及线路条件的变化很大,并且轨道和车辆还存在耦合作用^[2];
- 4) 传统机械系统没有相当运动的轨道,而轨道车辆的轨道是随着运行地点和时间而变化的。

基于以上轨道车辆振动的特殊性分析可知,轨道车辆故障诊断严格意义上不是故障诊断,而是振动异常预警,并及时将信息反馈给司机。因此,故障检测方法也不同于传统的机械故障诊断方法,而需要根据实际对象、振动特点和相应的信息处理方法,同时还要考虑到不同的运行速度和线路条件,研究出适合轨道车辆的故障预警系统。

目前轨道车辆的机械故障诊断系统主要分为地面和车载两大类。地面的检测系统只针对轮对或车轴故障,而且只限于局部固定区域,不具备列车运行过程中的实时预警功能,而实时预警功能正是故障监测系统的重要要求^[3-4]。目前道旁探测系统包含了热轴探测器、热轮探测器、轴承声学探测器、车轮冲击载荷探测器、货车性能探测器等。技术最成熟的车载机械故障诊断系统是轴温监测,已得到大量应用^[5-6]。西方国家还有应用声纳探测系统进行轴承振动噪声监测^[7]。戴津等^[8]利用绝对评判与相对评判方法结合,对转向架性能采用整列车横向对比和单车历史对比的方式,直观有效地分析了转向架运行的振动情况和性能的变化趋势,属于理论研究。影响列车走行部故障诊断最大的是监测环境千变万化,不同的线路、不同的运行速度、不同的工况,这使得故障信息极易被掩盖。为此,提出了基于振动信息的、采用自学习特性的模

收稿日期:2012-12-22

作者简介:吴误(1988—),男,硕士研究生,研究方向为轨道车辆动力学及故障诊断。

糊控制诊断概念(SLFD),并且考虑不同线路及不同速度来进行轨道车辆走行部机械故障预警。

1 走行部机械故障预警方案

已知被检测的车辆数为 n ,在每一车辆上轴箱、构架、车体上设置的测点信号为 N 个,在机车或第一节车辆上安装一套测速定位装置。在每一被测车辆上设一从机及采样分析系统,控制信号的采样、数据分析和特征量的提取,并将特征等参数提交列车数据交换总线。在每一列车上设一列车层次的分析报警系统,能根据列车的速度、运行地点和各被测车辆上传的特征信息及时作出最终的判断及故障识别。同时在每一车厢还设置了显示模块,供乘客和技术人员了解本车厢状况,且在司机室还有主显示模块,可以显示整列车的运行状态,如速度、位置、各车厢运行状态等。当列车有重大故障隐患时,能进行文字、语言提示。视故障预警级别而定,特别严重情况下,甚至可以采取紧急停车。方案示意图如图1所示。

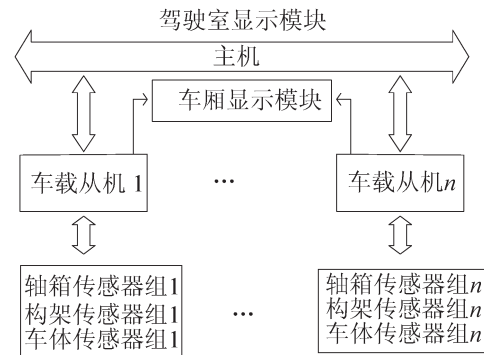


图1 走行部机械故障预警方案示意图
Fig.1 Schematic diagram of mechanical fault forecast system for the running gear

2 SLFD 系统介绍

SLFD系统是一种不需要针对具体故障建立复杂模态来识别故障的方法,具有自学习特性,特别适用于机械结构及运行状况及其复杂的轨道车辆走行部机械故障诊断,可以运用成本低、运算速度快的单片机有效及时地反馈信息。利用系统的自学习特性,在不同速度、特定线路长时间的运行下记录正常状态下应有的特征参数,并以此作为判断故障与否的依据。

考虑速度及线路的数据库建立示意图如图2所示。设时刻 t 第 w 节车辆的 m 维的特征参数向量 $u(t)$ 已知,对应的车速为 v ,对应的线路公里数为 s 。设已将速度分为若干个段,标记为: (v_i, v_{i+1}) , $i=1, \dots, I$;设线路里程已分为若干区段,标记为: (s_j, s_{j+1}) , $j=1, \dots, J$ 。根据 v 和 s 确定所落速度区间号 i 和里程区段号 j 。如图2所示, $i=3$; $j=4$ 。即可依据速度、里程区建立特征信息矩阵。

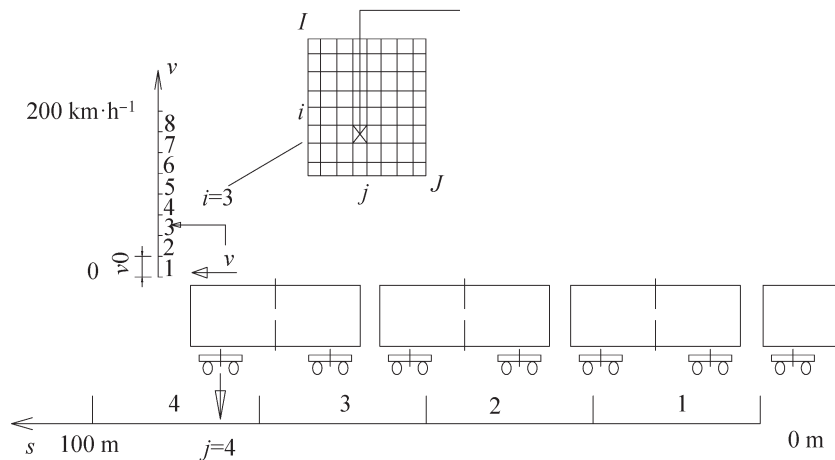


图2 关于速度及线路的特征信息矩阵形成示意图

Fig.2 Formation schematic diagram of feature information matrix concerning speed and road

因此定义关注的检测特征量的值域 U 为图2所示范围内。 U 由许多集合 P_{ij} 组成,每一集合 P_{ij} 对应特定的速度和里程区间 (i, j) ,集合中的元素 u 是检测特征向量。根据以上的分类,首先应建立一原始的数据

库 U_0 , 并使其各个集合具有足够的元素集 $\{u_{0w}\} \in (i, j)$, 然后根据元素集提取特征向量的统计参数 $u_{1w} \in (i, j)$ 。因此得到含有特征向量的统计参数的原始数据库 U_1 , 其中的元素是统计参数 u_{1w} , 仍对应特定的速度和里程区间 (i, j) 。

数据库的记录项有车辆号, 速度段号, 里程段号, 特征向量, 记录时间等。车辆号是列车的唯一代码, 每种型号的列车对应唯一的车辆号, 它们有共同或类似的机械结构, 可以认为在正常工况下具有相同的特征量。根据车载速度传感器可以实时掌握列车当前运用速度, 并归入指定的速度区间。利用计时器结合速度信息或者道旁装置可以知道车辆运行区间。从而车载主机运算得到的特征量就可以唯一确定, 形成原始数据库。

利用SLFD系统, 在列车正常情况下采用系统自记忆方式记录。假设各转向架及其车体处于正常状态。当线路有异常时, 数据中将包含线路的影响; 当车辆异常时, 可以采用适当的方法将数据筛选掉。

当 U_0 中子集的元素量达到最低要求时, 可以生成一个统计参数数据库 U_1 。每一个特征量可以有一组统计参数, 各个特征量的统计参数个数可以不同。比如可以有均值、方差、标准差等。判断不同的故障需要提取不同的特征值参量, 可以是一个, 也可以是一组。

3 软件算法实现

机械振动的实质是能量的传递, 而为了获得良好的乘坐舒适度, 振动需要经过多层过滤, 即弹簧和阻尼元件, 能量也就得到消耗。将机车结构视为一个输入为轨道不平顺性, 输出为乘客感知到的舒适度的系统, 设想如果系统出现故障, 能量的传递规律势必将发生变化, 从而可依次判断故障。根据文献[9], 振动能量特征可以用速度均方差来表示。由安装在轴箱、构架、车体上的加速度传感器获取加速度模拟信号, 经A/D电路输入DSP处理器, 将加速度谱转换为速度谱。经软件处理得到轮对、转向架、车体的振动速度方差向量 $\sigma_a^2, \sigma_b^2, \sigma_c^2$, 并保存为参考向量 $\sigma_{ar}^2, \sigma_{br}^2, \sigma_{cr}^2$, 引入能量传递参数 $P_1, P_2, \sigma_b^2 = P_1 \cdot \sigma_a^2, \sigma_c^2 = P_2 \cdot \sigma_b^2$, 软件记录 $\sigma_{ar}^2, \sigma_{br}^2, \sigma_{cr}^2, P_1, P_2$, 并综合此参数进行故障预警。

4 仿真分析

在Simuliink中建立17自由度的轨道车辆, 以实测轨道数据作为激励。车辆仿真速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 工况如下: ① 正常车辆, 正常轨道不平顺性; ② 正常车辆, 较差轨道不平顺性; ③ 空气弹簧故障, 正常轨道不平顺性。仿真分析结果如图3。利用Matlab计算振动均方差及传递参数结果如表1。

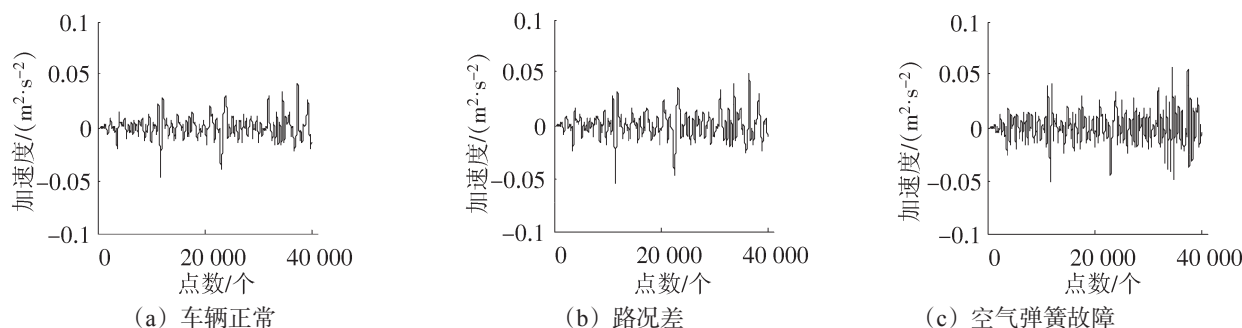


图3 不同情况下车体垂向振动速度谱

Fig.3 Velocity spectrum of body under normal conditions

从表1中可知, 在较差路况下, 因轨道输入加大, 车辆轮对、构架和车体的振动明显增加, 甚至轮对的振动超过了发生空气弹簧故障时的振动, 但传递参数并没有发生显著变化, 说明能量传递规律并没有改变, 这是因为车辆结构完好无损, 仍然保持原有的能量传递特性。而当车辆发生空气弹簧故障时, 系统机械结构发生变化, 必然导致能量传递规律相应随之改变, 从表中明显发现构架与车体间的传递参数发生了较大

的变化。故能量传递参数可以很好体现轨道车辆走行部悬挂系统机械故障,并且可以排除由单纯线路条件变化引起的振动异常误报为故障的情况,是一种有效可行的故障诊断方法。

表1 不同工况下速度方差及传递参数

Tab.1 Velocity mean square deviation and transfer parameters under different modes

工况	速度均方差/($\times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)			传递参数	
	轮对	构架	车体	构架/轮对	车体/构架
正常	1.738 0	1.423 5	0.831 4	0.819 0	0.584 1
较差路况,正常车辆	2.409 6	1.958 0	1.177 6	0.812 6	0.601 5
正常轨道,空气弹簧故障	1.748 3	1.470 3	1.748 3	0.846 0	1.057 4

5 试验验证

前期已经完成仿真分析,并提出了故障诊断的算法,即基于能量特征传递参数,利用SLFD系统生成特征参数数据库。现阶段需要做实验对以上算法的有效性和可行性加以验证,并对算法进行相应的改善。目前已初步完成试验装置方案设计,如图4所示。

试验装置由安置基座、轴承座、滚动轴承、摇臂、摇臂支撑弹簧、振动电机、弹簧、质量块等构成。4台振动电机运转后,带动摇臂振动,从而将激励传递给弹簧质量系统。振动电机可以用来模拟轨道的不平顺,左右两横向质量块可以用来模拟轮对,H型质量块则可以看作构架。通过控制振动电机的转速,可以对弹簧质量系统输入不同频率、不同振幅的外激励,从而研究轮对及构架的振动特性。

通过合理布置加速度传感器,经过一系列信号处理,最终获得需要的特征参数值。根据振动电机不同的转速、不同的激振力划分不同的区间,然后将获得的参数值填入相应的矩阵,不断的循环试验,已获得正常状态下系统应有的特征量,这一过程就是系统自主学习过程。然后人为设置机械故障,如弹簧故障,重新试验,以验证该系统能否准确及时地预报。

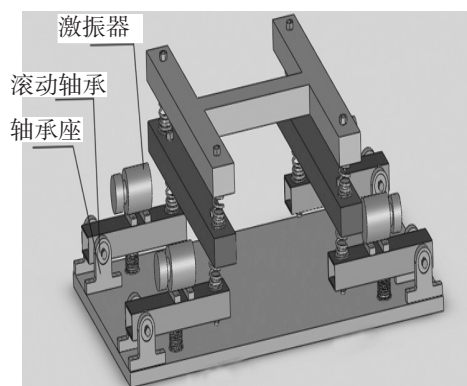


图4 试验装置三维效果图
Fig.4 3D effect graph of test bed

6 结论

1) 提出了基于振动信息,利用SLFD系统进行轨道车辆机械故障预警的方案。具有自学习特性的SLFD系统可以记录车辆在特定线路、不同速度长期正常运行下应具有的特征信息,并按预先设定好的速度区间和线路区间存入相应的矩阵,从而构成参考数据库。

2) 利用Simulink建立17自由度轨道车辆,模拟3种不同工况,并分析统计数据特征,得出能量特征传递参数能较好的表征轨道车辆走行部悬挂系统机械故障,并且可以排除由单纯线路条件变化引起的振动异常误报为故障的情况,是一种有效可行的故障诊断方法。

3) 设计了与轨道车辆走行部等效的机械试验装置,能对走行部的轮对、构架和悬挂系统进行振动分析。在后期工作中,需要进行各零部件选型、参数优化等,并进行不断调试和试验,以验算故障预警的有效性。

4) 需要做更多的试验验证,并结合现实轨道车辆和线路做进一步的研究,以改进故障预警理论,形成具体、高效、可行的技术方案。

参考文献:

- [1] 丁福焰,杜永平. 机车车辆故障诊断技术的发展[J]. 铁道机车车辆,2004(4):23-26.
- [2] 陈松,雷晓燕,房建,等. 客运专线车-线-桥垂向耦合系统振动的特性[J]. 华东交通大学学报,2011,28(5):41-45.
- [3] 冯庚斌,王澜,许慰平,等. 机车车辆滚动轴承故障振动诊断技术[J]. 中国铁道科学,1994,15(3):41-55.
- [4] 张兵. 列车关键部件安全监测理论与分析研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
- [5] TSUNASHIMA H. Condition monitoring and fault detection of railway vehicle suspension using multiple-model approach [R]. Seoul:IFAC,2007.
- [6] WILLIAM C V. 故障探测技术的发展趋势[J]. 国外铁道车辆,1999(3):16-20.
- [7] JOSEPH E B. 采用声学技术检测损伤的滚柱轴承[J]. 国外铁道车辆,1990(4):33-37.
- [8] 戴津,刘峰,董孝卿,等. 基于同一转向架历史对比与同一列车横向对比的转向架状态监测[J]. 铁道机车车辆,2010(2):32-35.
- [9] 李杰,陈建兵. 随机振动理论与应用新进展[M]. 上海:同济大学出版社,2009:18-34.

Research on Mechanical Fault Forecast System for the Running Gear of Rail Vehicles

Wu Wu, Shen Gang

(The Urban Mass Transit Railway Research Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the literature review about mechanical fault monitoring and forecasting technology and the analysis of vibration particularity of rail vehicles, this paper puts forward a new mechanical fault detection system named SLFD (Self-Learning-Fault-Detection) in consideration of the running speed and track quality, the two important factors for mechanical fault forecast. Simulation analysis is carried out for verifying the proposed system feasibility. And a mechanical test-bed which is equivalent to the rail vehicles running gear is designed to further test the effectiveness of the mechanical fault forecast system.

Key words: railway vehicles; mechanical faults; forecast; monitoring; self-learning; test-bed