

故障诊断

基于递推最小二乘法的地铁车辆减振器在线诊断技术

王 雨, 吕 宇, 赵沐华

(株洲中车时代软件技术有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 为保障列车运行安全性并避免减振器过度维修, 文章对地铁车辆在线监测技术进行研究, 针对车辆垂向减振器提出了基于振动数据的递推最小二乘法(RLS)的过程参数评估模型和车辆的“输入-输出”模型, 并通过构建地铁车辆的多体动力学模型以提取模型计算的输入/输出参数, 从而实现减振器参数的识别; 借助FMECA分析方法研究地铁车辆悬挂部件的失效模式和部件之间的可靠性框图, 分析各悬挂部件失效模式之间的关联关系。诊断结果表明, RLS算法在进行减振器在线参数辨识时具有比较好的跟踪收敛效果。

关键词: 地铁车辆悬挂部件; 减振器; FMECA; RLS; 在线诊断

中图分类号: U269.32⁺2

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2018)03-0068-06

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2018.03.200

On-line Diagnosis Technology for the Shock Absorbers on Subway Vehicle Based on RLS

WANG Yu, LYU Yu, ZHAO Muhua

(Zhuzhou CRRC Times Software Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: To ensure the safety of train operation and avoid excessive maintenance of shock absorbers, based on the vibration data, a process parameter evaluation model of the recursive least squares (RLS) and a input-output model were presented according to the research of the metro vehicle on-line monitoring technology. By means of computer simulation, a multi-body dynamics model of metro vehicle was constructed, and input parameters and output parameters of the model were extracted to identify the parameters of the shock absorber. By means of FMECA analysis method, the failure mode of subway suspension components and the block diagram of reliability between parts were studied, and the correlation between failure modes of suspension components was analyzed. Diagnostic results show that the RLS algorithm has better tracking convergence effect in the shock absorber online parameter identification.

Keywords: suspension parts of subway bogie; shock absorber; FMECA; RLS; on-line diagnosis

0 引言

轨道车辆转向架的减振器作为列车各部分的链接结构, 主要用来传递力并起到减缓振动的作用^[1-2]。随着产品可靠性的提高, 现在车辆减振器出现故障的概率与列车运行里程的关联度已越来越小, 传统的车辆定期维修方式已经无法满足列车运行要求, 将视情维修方式引入到车辆的全生命周期管理引起越来越多的关注, 因此需要开展车辆运动过程状态参数诊断的研究。

在列车投入运营两至三年后车辆减振器的减振性能

有所衰减, 因此开展基于状态实时监测的列车故障预测与健康管理的(prognostic and health management, PHM)对保障列车运行安全性很有必要: 一方面对列车减振器部件的故障进行早期预测, 可避免由于严重的部件性能衰退而影响列车运行的稳定性和安全性; 另一方面, 通过对减振器部件的性能监测, 使以可靠性为中心的部件状态修成为可能, 从而避免减振器定期维修和定期更换所造成的过度维修损失。

现在对于车辆悬挂参数的辨识方法主要有扩展卡尔曼滤波法、边缘粒子滤波、灰箱辨识方法和递推最小二乘法等。本文借助于Simpack和Matlab仿真软件研究含有遗忘因子 λ 的递推最小二乘法在减振器阻尼值辨识方面的应用, 同时构建了用于车辆减振器阻尼值辨识的

收稿日期: 2017-12-29

作者简介: 王雨(1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为轨道交通信息化与智能运维。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1200401)

“输入-输出”模型，利用车辆模型提取“输入-输出”模型中所需要的输入状态数据和输出观测数据，最终实现减振器阻尼值的参数辨识。

1 减振器失效分析

PHM 融合了传感技术及在线监测、部件健康监控、集成状态评估、诊断与预计工具等理念和技术，利用现有的数据采集和处理技术，具备故障诊断、隔离、预测及寿命追踪等能力，现阶段主要应用于飞机、舰船、发动机、传动装置等。工程应用及技术分析表明，PHM 技术可以降低维修保障费用、提高产品完好率和任务成功率^[3-5]。

本文将 PHM 技术引入到现有轨道交通系统中，对列车减振器部件开展健康评估研究，以提高设备的可靠性、可用性和维修性。

1.1 减振器阻尼特性

根据工作状态，可以把减振器的性能描述成静态阻尼特性和动态阻尼特性，并通过阻尼力和活塞速度间的关系来描述。

(1) 静态阻尼特性。当减振器的液压缸以大幅值、小频率运动时，可以忽略结构与液体的刚度的影响，认为力和速度之间没有相位角，减振器示功图如图 1 所示。

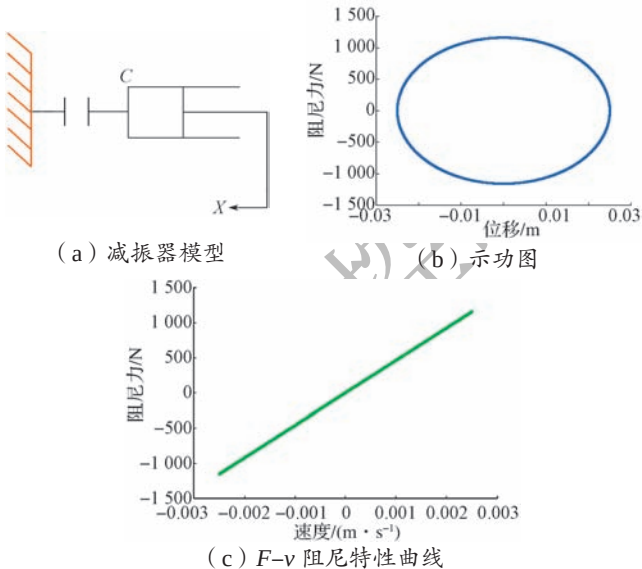


图 1 静态时减振器模型和阻尼特性
Fig.1 Model and damping characteristics of static shock absorber

假设输入位移为 $x=A\sin(\omega t)$ (其中: x 表示活塞位移, ω 表示活塞加载的角速度, A 是减振器加载位移幅值), 减振器的阻尼为 C , 则减振器的阻尼力为 F 。

$$F=Cx'=AC\omega\cos(\omega t)$$
 (1)

将位移计算式代入到式 (1) 中, 根据三角函数计算可得

$$\left(\frac{F}{AC\omega}\right)^2+\left(\frac{x}{A}\right)^2=1$$
 (2)

(2) 减振器动态阻尼特性。当减振器的活塞以大频率、小幅值的位移扰动工作时, 需要考虑油液的动态液压刚度 K_{oil} 、减振器两端连接处橡胶节点的串联刚度 K_{rubber} 以及安装座刚度 K_{seat} 对减振器特性的影响。这 3 类动态刚度是串联关系, 其串联刚度用 K 表示。此时, 阻尼力和活塞速度之间会产生相位变化。由于减振器内部阀结构特殊, 在速度较快时会出现卸荷现象, 可以起到保护减振器的效果, 避免了出现阻尼力较大的问题, 从而使减振器表现出非线性阻尼特性 (图 2)。将减振器模型简化成 Maxwell 模型 (图 2(a)), 由一个线性阻尼 C 和一个线性刚度 K 串联在一起, 阻尼力和阻尼速度间会产生一个相位角, 出现滞后的现象^[6-8]。

串联刚度:
$$K=\frac{K_{seat}K_{rubber}K_{oil}}{K_{seat}K_{rubber}+K_{seat}K_{oil}+K_{rubber}K_{oil}}$$

减振器两端相对位移激励: $x=A\sin(\omega t)$
减振器模型的动力学微分方程为
$$K\times(x_0-x)+Cx'_0=0$$
 (3)

将位移激励代入式 (3), 可以得到减振器之阻尼器的输入位移方程:

$$x_0=\frac{K^2A}{K^2+C^2\omega^2}\sin\omega t-\frac{C\omega KA}{K^2+C^2\omega^2}\cos\omega t$$
 (4)

减振器阻尼力为阻尼器的速度与其阻尼的乘积, 即

$$\left. \begin{aligned} F=Cx'_0 &= \frac{\omega k c A}{\sqrt{K^2+C^2\omega^2}} \sin[\omega t+\varphi] \\ F &= \frac{\omega K^2 C A}{K^2+C^2\omega^2} \sqrt{1-\left(\frac{x}{A}\right)^2} + \frac{\omega^2\omega^2 K}{K^2+C^2\omega^2} x \end{aligned} \right\}$$
 (5)

式中: φ ——阻尼力与阻尼速度间相位角, $\varphi=\arctan\frac{K}{C\omega}$ 。

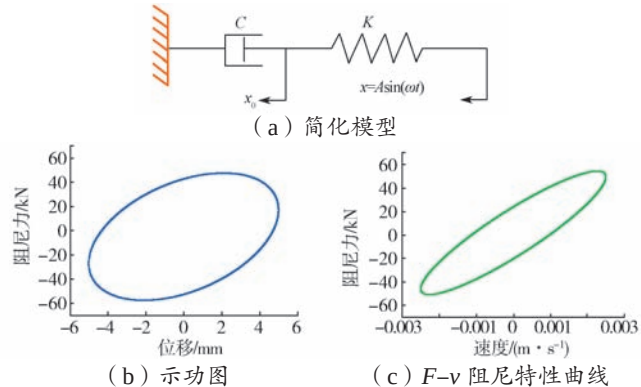


图 2 动态时减振器模型和阻尼特性
Fig.2 Model and damping characteristics of dynamic shock absorber

1.2 减振器失效模式

故障模式影响及危害性分析 FMECA(failure mode, effects and criticality analysis) 是根据每一种故障模式的严重程度和发生概率开展的一种归纳分析方法, 定性地研究全寿命周期内影响部件可靠性的缺陷和薄弱环节,

为部件的维修维护提供参考依据。

下面介绍减振器几种常见的故障模式。

(1) 液压油问题

减振器的液压油问题可以分成两类：一类是减振器漏油，此类故障在日常检修中出现的频次最高，需根据漏油的等级采取不同的维护措施；另一类是液压油油品问题，即使用时间久了液体中的空气容易使液压油出现乳化现象，导致减振器阻尼特性不稳定，如图3所示。

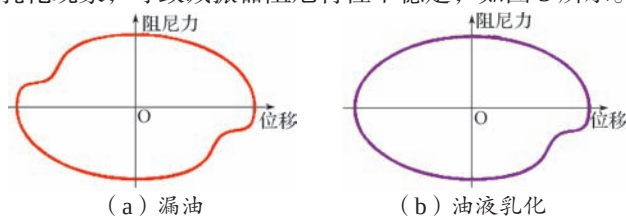


图3 液压油对减振器示功图的影响

Fig.3 Influence of hydraulic oil on indicator diagram

(2) 橡胶节点故障

橡胶节点主要分布在减振器两端，用来缓冲活塞杆往返运动产生的转动扭矩，同时可以吸收部分振动，使减振器不仅表现出阻尼特性。当橡胶节点出现老化、裂纹或损坏时，其刚度增大，表现为示功图中的阻尼力与位移之间的相位角 θ 减小，更接近纯阻尼器的特性，如图4所示，其中虚线表示正常的减振器，实线表示出现橡胶节点老化的减振器。

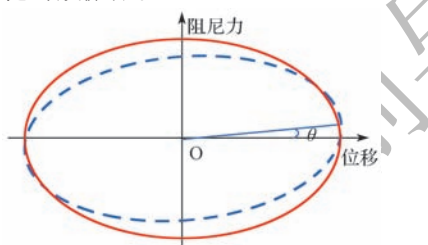


图4 节点刚度对减振器示功图的影响

Fig.4 Influence of node stiffness on indicator diagram

(3) 阻尼力超标

在使用减振器时，经验值约束其阻尼力不得超出标准的 $\pm 15\%$ 。出现减振器阻尼力超标，多因其结构调节不当或出现了部件的磨损所致。在出现这类故障时，可以通过调节减振器的调节阀来调整减振器的阻尼力，如图5所示。

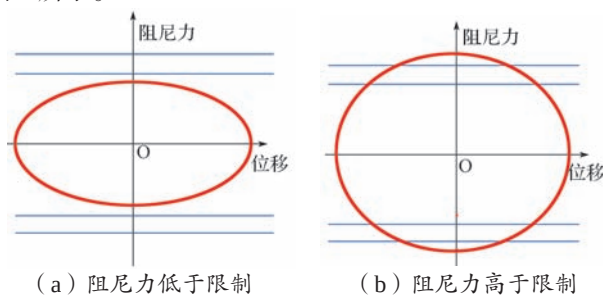


图5 阻尼力超出标准对示功图的影响

Fig.5 Influences of damping force beyond the standard on the indicator diagram

(4) 阀系故障

在活塞杆的往复过程中，当出现内部调节阀不能正常开合时，活塞杆会出现一小段空程，使减振器的阻尼力出现了突变现象。如补偿阀在压缩过程中出现滞后现象，活塞下部油腔里的油直接经补偿阀流进储油腔，导致减振器出现一段时间阻尼力为零的现象；在补偿阀关闭后，其阻尼力再次恢复正常状态，如图6所示。

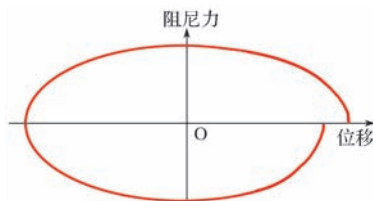


图6 补偿阀故障对示功图的影响

Fig.6 Effect of compensation valve fault on the indicator diagram

这些故障多表现为减振器阻尼力的减小。若在车辆运行过程中减振器阻尼力下降，将引起由车辆振动机械能转化减振器内部热能的减少，从而影响减振器减振的效果。因此需开展车辆减振器阻尼系数的在线检测研究。

2 地铁车辆减振器阻尼系数的在线诊断

现有的地铁监测设备缺乏对车辆轮对、构架、车体的振动监测，本文借助于计算机仿真技术来构建地铁车辆模型，对地铁车辆走行部中垂向减振器的阻尼值进行过程评估诊断。通过分别获取减振器两端的相对速度及空气弹簧两端的相对位移、钢簧两端的相对位移等振动信号，利用最小递推二乘法的相关算法对采集到的数据进行过程评估辨识处理，最终获得在整个运行过程中的过程参数。实际运行过程中，由于速度信号难以获取，可以利用位移信号微分得到。为了减小采样频率对振动信号的影响，在进行参数辨识前需要对采集的信号进行50 Hz的低通滤波，以避免在采样频率过高时噪声信号对有效信号的干扰。

2.1 递推最小二乘法 RLS (Recursive Least Square)

利用数值算法来评估系统服役过程中的状态参数，需要考虑算法的稳定性、是否会收敛和收敛的效率等问题。其中收敛性反应了所求的数值解理论上是否应该无限地接近准确值；稳定性反应了在收敛的基础上，实际计算过程中得到的参数评估结果是否控制在有效的误差范围内。最小二乘法是系统参数辨识中较基础的算法，其通过构建模型输出参数标量和实际观测输出标量之间的误差平方和最小的方法来构建最小二乘法参数评估模型，具有算法简单、计算量小、收敛性好、运用领域广等特点。

(1) 模型误差

$$e(k)=Y(k)-X^T(k)\theta \tag{6}$$

式中： $e(k)$ ——模型误差； $Y(k)$ ——系统输出量； $X(k)$ ——系统输入量； θ ——模型参数； k ——采样点。

(2) 性能指标

$$J = \sum_{i=1}^k e^2(i) = \sum_{i=1}^k [Y(i) - X^T(i)\theta]^T \times [Y(i) - X^T(i)\theta] \tag{7}$$

式中： J ——性能指标。

若误差平方和最小，则有 $\partial J / \partial \theta = 0$ ，求解式(7)得

$$\left. \begin{aligned} 2X(k)[Y(k)-X^T(k)\theta] &= 0 \\ \theta &= [X(k) \times X^T(k)]^{-1} \times X(k) \times Y(k) \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

为了避免最小二乘法中对 $X(k) \times X^T(k)$ 的 n 阶矩阵求逆的计算负担，将递推的方法引入到最小二乘法的算法中，即递推最小二乘法 (recursive least square, RLS)。递推最小二乘法的收敛速度更快，用于系统的参数评估具有更强的参数跟踪能力^[9-11]。为了在迭代的过程中强调新进状态数据的作用，逐渐忘记前期数据的影响，在算法中引入了遗忘因子 ($0 < \lambda \leq 1$)，以此来影响评估过程参数的收敛性^[11-13]。较小的遗忘因子表示更快的遗忘速度，当 $\lambda=1$ 时，所有模型误差求和没有任何遗忘功能。引入遗忘因子后的性能指标 J 为

$$J = \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} e^2(i) = \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} \times [y(k) - X^T(k)\theta]^2 \tag{9}$$

利用递推最小二乘法对系统的参数进行评估的流程如下：

(1) 模型输出状态的进一步预测

$$y(k+1) = X^T(k+1) \times \hat{\theta}(k) \tag{10}$$

(2) 模型误差

$$e(k+1) = y(k+1) - X^T(k+1) \times \hat{\theta}(k) \tag{11}$$

式中： $e(k)$ ——实际观测值 $y(k)$ 与估计模型计算值 $y=X^T(k) \times \hat{\theta}(k)$ 之间的偏差，即模型误差； $\hat{\theta}(k)$ —— k 时刻获得的模型参数的估计值； $X^T(k+1)$ —— $k+1$ 时刻检测的模型输入量； λ 的取值通常在 0.9 到 1 范围内。

(3) 引入基于输入协方差矩阵来校正增益矢量

$$G(k) = \frac{P(k) \times X(k+1)}{\lambda + X^T(k+1) \times P(k) \times X(k+1)} \tag{12}$$

式中： $G(k)$ ——增益矢量； $P(k)$ ——误差方差阵预测。

(4) 误差方差阵预测

$$P(k+1) = \frac{1}{\lambda} [I - G(k) \times X^T(k+1)] \times P(k) \tag{13}$$

式中： I ——单位矩阵。

(5) 参数矩阵估计

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + G(k) \times e(k+1) \tag{14}$$

其中，参数矩阵 θ_0 可以设为零矩阵。

令采样频率为 K ，则采样间隔 $\Delta t = \frac{1}{K}$ ，采样点 k 对

应的时间为 $t(k) = t_0 + k \times \Delta t = t_0 + \frac{k}{K}$ 。

2.2 车辆构架的动力学方程

为了简化车辆模型，本文引入了“输入-输出”动力学方程模型来取代车辆的状态空间方程，避免了车体、构架、轮对 6 个方向自由度之间的耦合关系。“输入-输出”模型的输入量包括了 4 个钢簧两端相对位移、4 个一系减振器两端相对速度、2 个空簧两端相对位移、2 个二系减振器两端相对速度；输出量包含构架中心的振动加速度，其通过对构架 4 个端点的振动加速度信号取平均而获得。所构建的动力学模型只考虑了地铁车辆垂向的动力学模型，同时对减振器的模型进行了简化。本文所研究的这款地铁车辆车体、构架和轮对之间的悬挂部件主要包括轴箱一系钢簧、一系减振器、二系减振器和二系空簧，车辆各部分连接的拓扑关系如图 7 所示。

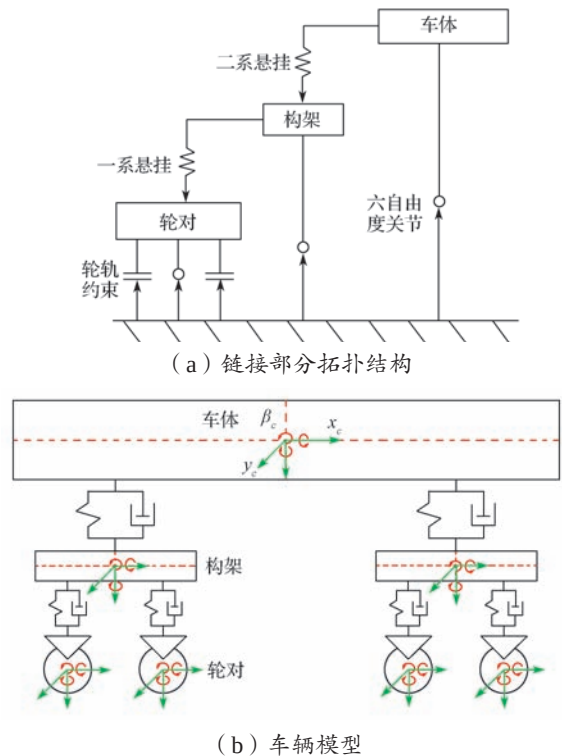


图 7 地铁车辆的模型结构

Fig.7 Structure model of metro vehicle

借助于递推最小二乘法，利用参数识别的方法对减振器阻尼值进行求解：

(1) 构建构架的垂向动力学方程, 即多输入单输出动力学模型

$$M_f A_f(t) = \sum_{i=1}^4 C_{pi} V_{pi}(t) + \sum_{i=1}^4 K_{pi} D_{pi}(t) + \sum_{j=1}^2 C_{sj} V_{sj}(t) + \sum_{j=1}^2 K_{sj} D_{sj}(t) + F_{exz}(t) \quad (15)$$

式中: K_{sj} ——二系悬挂垂向刚度 ($j=1,2$, 分别表示转向架左侧和右侧); C_{sj} ——二系悬挂垂向阻尼; K_{pi} ——一系悬挂垂向刚度 ($i=1,2,3,4$, 分别表示转向架 1 轮对左侧和右侧和 2 轮对左侧和右侧); C_{pi} ——一系悬挂垂向阻尼; F_{exz} ——建模误差; M_f ——构架的质量; $A_f(t)$ ——输出观测向量构架振动加速度; D_{pi} ——一系垂向减振器两端相对位移; D_{sj} ——二系垂向减振器两端相对位移; V_{pi} ——一系垂向减振器两端相对速度; V_{sj} ——二系垂向减振器两端相对速度。

(2) 状态观测向量为

$$X^T(t) = [V_{p1}, V_{p2}, V_{p3}, V_{p4}, D_{p1}, D_{p2}, D_{p3}, D_{p4}, V_{s1}, V_{s2}, D_{s1}, D_{s2}] \quad (16)$$

(3) 待估计的参数向量为

$$\theta^T(t) = [C_{p1}, C_{p2}, C_{p3}, C_{p4}, K_{p1}, K_{p2}, K_{p3}, K_{p4}, C_{s1}, C_{s2}, K_{s1}, K_{s2}] \quad (17)$$

(4) 输出观测向量, 即构架振动加速度 $A_f(t)$ 。

2.3 在线监测及测点分布

为了监测减振器的状态, 需通过在轮对、构架、车体安装振动传感器来获取模型中输入状态信息和输出观测信息; 同时, 通过仿真计算, 可以获得到一系、二系垂向减振器两端的相对速度及钢簧和空簧两端的相对位移。在实际运行过程中, 部件振动加速度的信息获取方便且经济, 但在输入模型之前需要对检测的数据进行进一步的积分或微分处理。共需要 12 个传感器来对构架的垂向减振器参数进行过程评估^[14], 其中 4 个加速度传感器安装在轮对轴箱 A', B', C', D' 处, 4 个加速度传感器安装在转向架构架 A, B, C, D 处, 2 个加速度传感器安装在车身二系悬挂的底座上, 2 个加速度传感器安装在构架二系悬挂的底座 E' 和 F' 处, 如图 8 所示。

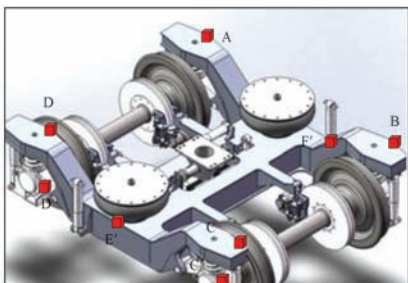


图 8 传感器的安装位置

Fig.8 Installation locations of sensors

2.4 基于仿真数据的辨识结果

利用 RLS 算法评估的转向架一系垂向减振器和二系垂向减振器阻尼系数如图 9 和图 10 所示, 将减振器参数的过程评估结果和给定的原始阻尼值进行比较, 可以看出, 过程参数值最终都收敛于仿真模型给定的阻尼值。

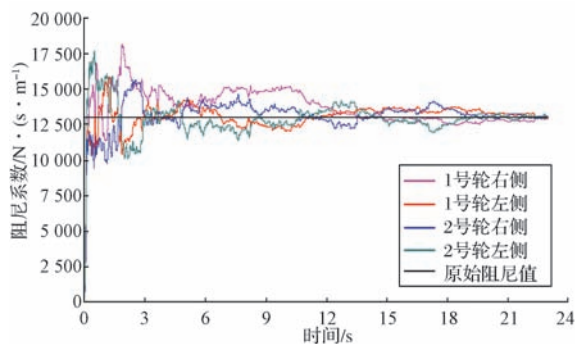


图 9 一系垂向减振器参数的过程评估结果

Fig.9 Process evaluation results of the primary vertical damper

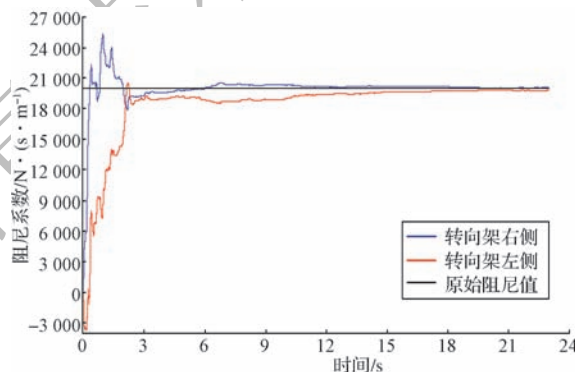


图 10 二系垂向减振器参数的过程评估结果

Fig.10 Process evaluation results of the secondary vertical damper

3 结语

车辆各悬挂部件之间存在串联关系, 当其中一个部件出现故障时, 往往会导致车辆动力学性能出现很大的突变。通过对减振结构的研究发现, 减振器不仅有阻尼元件成分, 同时由于其结构的复杂性, 在列车服役过程中还会表现出动态刚度的特性 (主要来自于橡胶节点、油液刚度以及连接处的刚度), 因此在进行地铁车辆建模时需要引入动态刚度和动态阻尼才能更好地模拟真实的减振器特性, 使车辆模型更有说服力。减振器的故障形式多表现在阻尼力的下降, 使减振器示功图出现异常、单周期内消耗的能量下降, 降低了减振器的减振特性; 同时, 当减振器内部结构损伤或油液品质下降时, 会出现减振器示功图突变, 即其阻尼力随速度变化不再显现出连续变化的趋势, 导致减振器的性能不稳定。

本文利用递推最小二乘法 (RLS) 算法, 根据地铁车辆仿真模型采集到的数据, 研究减振器参数的过程在线评估。根据评估结果可以看出, RLS 算法具有比较好的

参数跟踪性，计算速度快，可为基于振动数据的减振器在线诊断技术研究提供参考。

参考文献：

[1] 李艳. 高速列车动力学参数影响度的研究与应用 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

[2] 任宁. 列车悬挂系统的性能监测 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

[3] 时旺, 孙宇锋, 王自力, 等. PHM 系统及其故障预测模型研究 [J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(10): 29-35.

SHI W, SUN Y F, WANG Z L, et al. A Study of PHM System and Its Fault Forecasting Model [J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(10): 29-35.

[4] 曾声奎, Michael G Pecht, 吴际. 故障预测与健康管理的 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 26(5): 626-632.

ZENG S K, PECHT M G, WU J. Status and Perspectives of Prognostics and Health Management Technologies [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2005, 26(5):626-632.

[5] 李楠. 故障预测与健康管理的 (PHM) 在 ERP 系统中的应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.

[6] 杨晓东. 铁道车辆抗蛇行减振器动态特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

[7] 秦剑生. 基于物理参数的抗蛇行减振器力学模型研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

[8] 贾洪龙, 宋春元, 强锋. 铁道车辆减振器漏油故障与内部特性分析 [J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(6): 32-35.

JIA H L, SONG C Y, QIANG F. Analysis of Leakage and Internal Characteristics of Railway Vehicle Hydraulic Damper [J]. Railway Locomotive & Car, 2015, 35(6): 32-35.

[9] 石敏, 吴正国, 尹为民. 基于 RLS 算法的时变谐波检测 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 50-53.

SHI M, WU Z G, YIN W M. Time-Varying Harmonic Detection Based on RLS Algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(1): 50-53.

[10] 韩伟, 王大志, 刘震. 基于可变遗忘因子 RLS 算法的谐波电流检测方法 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 70-74.

HAN W, WANG D Z, LIU Z. A Harmonic Current Detection Method Based on Variable Forgetting Factor RLS Algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12):70-74.

[11] 邓自立, 王欣, 高媛. 建模与评估 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[12] 丁建明. 车辆动力学性能参数估计方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.

[13] LIU X Y, ALFI S, BRUNI S. An efficient recursive least square-based condition monitoring approach for a rail vehicle suspension system[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(6):814-830.

[14] 方崇智, 萧德云. 过程辨识 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

(上接第 67 页) 考虑到未来一段时期内 LKJ-15 与 LKJ2000 两代设备并存现象, LKJ-15 数据编制软件可以实现两种数据的相互转换。

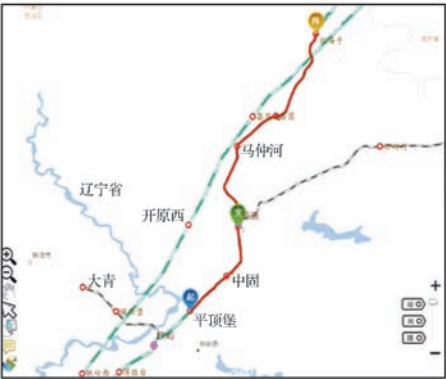


图 6 图形化的数据制作
Fig.6 LKJ infrastructure data editor

为简化跨局数据交接, 建立了局界数据模型并引入工务局界和电务局界要素, 通过数据传输、消息推送等软件技术, 实现了跨局数据自动拼接、对外局数据直接引用, 避免了数据再加工。结合 LKJ 数据中心平台, 使得数据流转更快捷、更安全、更可控。

4 结语

作为伴随中国铁路运输发展成长起来的自主列控系统, LKJ 已发展到第三代产品, 其中 LKJ 列控数据始终是 LKJ 系统技术的精华。LKJ-93 的列控数据是站段式管理和运用, LKJ2000 列控数据是在铁路局范围内集

约式管理运用, 而 LKJ-15 列控数据是全网数据一张网、一个平台的总体架构, 同时在数据结构、编制技术、流转作业以及标准化和规范化方面更先进。在突破当前外局数据取用不方便、数据制作效率低等瓶颈的基础上, 后续将结合无线换装系统和数据中心平台开展进一步研究, 实现数据和控制精准高效、运用和维护便捷可靠。

参考文献：

[1] 杨志刚. LKJ2000 型列车运行监控记录装置 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.

[2] 王瑞峰. 铁路信号运营基础 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.

[3] 中国铁路总公司《技规》条文说明编写组. 铁路技术管理规程 (普速铁路部分) 条文说明 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.

[4] 中国铁路总公司《技规》条文说明编写组. 铁路技术管理规程 (高速铁路部分) 条文说明 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.

[5] 杨志刚, 张子健. 新一代 LKJ 系统研究与应用 [J]. 中国铁路, 2017(9):42-46.

[6] 中国铁路总公司. 列车运行监控装置 (LKJ) 运用维护规则 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.

[7] 中国铁路总公司. 列车运行监控装置 (LKJ) 数据文件编制规范 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.

[8] 中国铁路总公司. 铁路信号产品运用管理办法 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.

[9] 中国铁路总公司. 列车运行监控装置 (LKJ) 控制模式设定规范 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.

[10] 中国铁路总公司. LKJ 车站编码暂行规范 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.