

基于数据驱动的CRH高速列车悬挂系统早期故障检测

苏宇¹, 吴云凯^{1†}, 付俊², Gorjan Nadzinski³

(1. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212100; 2. 东北大学 流程工业综合自动化
国家重点实验室, 沈阳 110004; 3. Ss Cyril and Methodius University, Faculty of Electrical
Engineering and Information Technologies, Skopje, N. Macedonia)

摘要: 作为CRH (China railway high-speed) 高速列车的重要组成部分, 悬挂系统的可靠性对列车的安全运行和乘坐舒适性具有重要意义, 为此, 利用悬挂系统传感器数据, 提出一种基于数据驱动的早期故障检测方法. 首先, 根据系统动态搭建列车悬挂系统 Sumpack 模型, 其中作动器的主动控制力作为系统输入, 轨道不平顺由不平顺功率谱模拟产生激励信号, 并作为系统的扰动信号; 然后, 在悬挂系统离散模型的基础上, 通过传感器的输出构建数据模型, 并构造输入输出数据矩阵; 最后, 通过数据矩阵构造残差量, 并依照离线和在线的故障检测方案, 实现对故障的指示. 仿真结果表明, 所提出的故障检测方案对悬挂系统执行器和传感器的早期故障具有较高的灵敏度.

关键词: 数据驱动; 高速列车; 悬挂系统; 传感器; 执行器; 早期故障; 故障检测

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1557

引用格式: 苏宇, 吴云凯, 付俊, 等. 基于数据驱动的CRH高速列车悬挂系统早期故障检测[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 982-988.

Data-driven design based incipient fault detection for CRH suspension system

SU Yu¹, WU Yun-kai^{1†}, FU Jun², Gorjan Nadzinski³

(1. School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies, Ss Cyril and Methodius University, Skopje, N. Macedonia)

Abstract: As an important part of CRH (China railway high-speed) trains, the reliability of the high-speed train suspension system is of critical importance to the safety of the entire trains. A data-driven based incipient fault detection scheme is proposed based on the sensor data of a suspension system. Firstly, a suspension system simpack model is established using system dynamics, where the active force of an actuator is acted as the system input, and the track irregularity is regarded as the system disturbance. Then, based on the discrete model of suspension system, the data model and input/output data matrices are constructed by using the sensor measurements. Finally, the off-line and on-line detection scheme are proposed based on the residual constructed by data matrices. The simulation results show that the proposed scheme has high sensitivity on incipient actuator and sensor faults of high-speed train suspension systems.

Keywords: data-driven; high-speed train; suspension systems; actuator; sensor; incipient fault; fault detection

0 引言

悬挂系统作为CRH (China railway high-speed) 高速列车的重要组成部分, 起到支撑车体和转向架的作用, 同时隔离车轮处轨道不平顺产生的力, 保证列车

在高速行驶时的稳定性和安全性^[1]. 高速列车运行环境恶劣, 运行工况复杂, 增加了执行器和传感器失效的概率. 因此, 为了避免影响列车的行车安全, 针对高速列车悬挂系统早期故障检测的研究迫在眉睫.

收稿日期: 2020-11-11; 录用日期: 2021-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61803185); 江苏省自然科学基金项目(BK20201451); 中国-北马其顿科技合作委员会第6届例会人员交流项目6-3.

责任编辑: 姜斌.

†通讯作者. E-mail: wuyunkaischolar@just.edu.cn.

近年来,列车悬挂系统的故障检测和诊断一直是研究热点.文献[2]提出了一种基于卡尔曼滤波器的多模型轨道列车悬挂系统故障检测方法,利用车载测量数据估计轨道车辆系统的模态概率和状态.文献[3]提出了一种基于RBPf(Rao-Blackwellized particle filter)的参数估计方法用于轨道列车悬挂系统的状态监控.针对具有参数不确定的轨道车辆悬挂系统,文献[4]提出了一种基于自适应的轨道列车悬挂系统故障检测策略.上述方法依赖于精确的悬挂系统模型,然而,在很多情况下,列车悬挂系统的精确数学模型无法获得.因此,基于数据驱动的悬挂系统故障诊断近年来成为热门研究领域.文献[5]提出了一种结合多尺度排列熵和线性局部切线空间对准的数据驱动方法用以诊断车辆悬挂系统的故障.文献[6]提出了一种基于MSVR (multi-output support vector regression)的数据驱动方法,通过测量列车振动信号监测高铁悬挂系统的健康状况.文献[7]对基于模型和数据驱动的悬挂系统故障检测方法进行了研究比较,结果表明基于数据驱动的方法在对故障的敏感性、响应速度等方面均优于基于模型的方法.受PCA (principal component analysis)和SIM (subspace identification methods)等故障检测方法研究的启发,文献[8]提出了一种子空间辅助数据驱动故障检测方案,其基本思想为利用收集到的输入输出数据直接构建故障检测和隔离方案.基于这一方案,文献[9]提出了一种用于风力涡轮机的鲁棒数据驱动故障检测方案.

高速列车悬挂系统采用的闭环控制结构会对故障产生补偿作用,当早期故障发生时,由于故障

特征微弱,极容易产生故障的漏报^[10].文献[11]提出了一种基于改进型ToMFIR (total measurable fault information residual)的高速列车悬挂系统早期故障检测与估计方法.文献[12]设计了一种基于广义估计器的早期故障估计方案,为早期故障的检测和诊断提供了新的思路.虽然上述方法都在各自应用领域取得了较好的诊断效果,但上述研究中都没有针对基于数据驱动的高速列车悬挂系统早期故障检测进行相应的研究.

在本文的研究中,首先建立了Simpack和Matlab/Simulink联合仿真环境,所设置的物理参数参见文献[1],与真实的CRH₂型动车组列车以1:1等比例仿真.Simpack端模拟产生列车悬挂系统正常/故障工况下的输入输出数据,Matlab/Simulink端完成算法的集成以实现故障的检测.基于悬挂系统的离散化模型,通过传感器数据构建数据模型.根据已知的输入输出数据矩阵,引入正交投影矩阵设计基于数据驱动的残差以实现悬挂系统执行器和传感器早期故障发生与否的表征.此方案有如下优点:

- 1) 适用于任意编组结构的悬挂系统;
- 2) 残差的生成避免了参数辨识;
- 3) 通过对正交投影矩阵进行递归更新,能够实现故障的在线检测.

1 悬挂系统

1.1 高速列车悬挂系统建模

“动-拖-动”编组结构(两辆动车和一辆拖车)如图1所示.每节车体有浮沉、点头两个自由度,每个转向架有浮沉一个自由度,构造一个9自由度的悬挂动态系统.

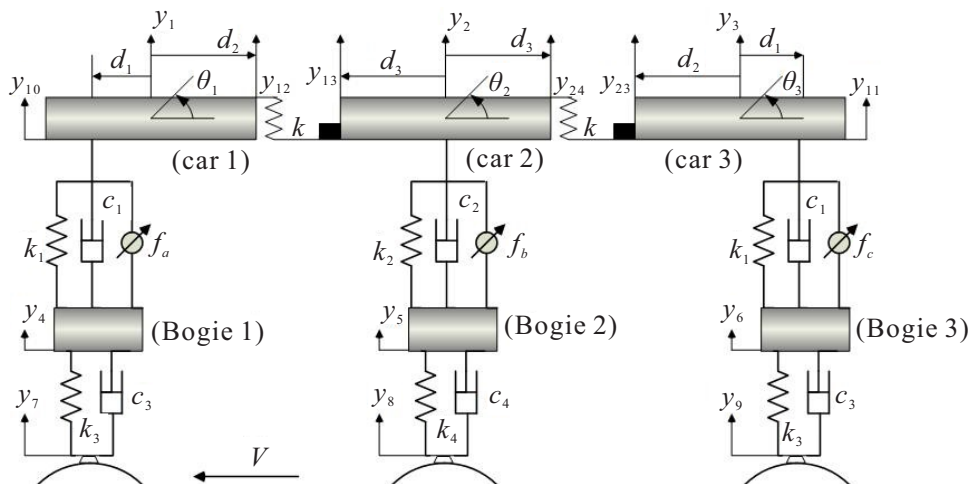


图1 “动-拖-动”编组悬挂系统模型

car 1 (第1辆动车)

$$\begin{aligned}
 m_p \ddot{y}_1 = & -c_1(\dot{y}_{10} - \dot{y}_4) - k_1(y_{10} - y_4) + f_a - \\
 & k(y_{12} - y_{13}), \\
 I_p \ddot{\theta}_1 = & d_1 c_1(\dot{y}_{10} - \dot{y}_4) + d_1 k_1(y_{10} - y_4) - \\
 & d_1 f_a - d_2 k(y_{12} - y_{13}), \\
 m_{pb} \ddot{y}_4 = & c_1(\dot{y}_{10} - \dot{y}_4) + k_1(y_{10} - y_4) - f_a - \\
 & c_3(\dot{y}_4 - \dot{y}_7) - k_3(y_4 - y_7).
 \end{aligned} \tag{1}$$

car 2 (拖车)

$$\begin{aligned}
 m_t \ddot{y}_2 = & k(y_{12} - y_{13}) - c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_5) - \\
 & k_2(y_2 - y_5) + f_b + k(y_{23} - y_{24}), \\
 I_t \ddot{\theta}_2 = & -d_3 c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_5) - d_3 k_2(y_2 - y_5) + \\
 & d_3 f_b + d_3 k(y_{23} - y_{24}), \\
 m_{tb} \ddot{y}_5 = & c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_5) + k_2(y_2 - y_5) - f_b - \\
 & c_4(\dot{y}_5 - \dot{y}_8) - k_4(y_5 - y_8).
 \end{aligned} \tag{2}$$

car 3 (第2辆动车)

$$\begin{aligned}
 m_p \ddot{y}_3 = & -k(y_{23} - y_{24}) - c_1(\dot{y}_{11} - \dot{y}_6) - \\
 & k_1(y_{11} - y_6) + f_c, \\
 I_p \ddot{\theta}_3 = & d_2 k(y_{23} - y_{24}) - d_1 c_1(\dot{y}_{11} - \dot{y}_6) - \\
 & d_1 k_1(y_{11} - y_6) + d_1 f_c, \\
 m_{pb} \ddot{y}_6 = & c_1(\dot{y}_{11} - \dot{y}_6) + k_1(y_{11} - y_6) - f_c - \\
 & c_3(\dot{y}_6 - \dot{y}_9) - k_3(y_6 - y_9).
 \end{aligned} \tag{3}$$

其中

$$\begin{aligned}
 y_{10} = y_1 - d_1 \theta_1, \quad y_{12} = y_1 + d_2 \theta_1, \\
 y_{13} = y_2 - d_3 \theta_2, \quad y_{24} = y_2 + d_3 \theta_2, \\
 y_{23} = y_3 - d_2 \theta_3, \quad y_{11} = y_3 + d_1 \theta_3.
 \end{aligned}$$

其余参数的物理表述参见文献[11]. 选取状态变量 $x(t) = [y_1, y_2, y_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3, y_4, y_5, y_6, \dot{y}_1, \dot{y}_2, \dot{y}_3, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{y}_4, \dot{y}_5, \dot{y}_6]^T$, 输入 $u(t) = [f_a, f_b, f_c]^T$ 和扰动变量 $d(t) = [y_7, y_8, y_9, \dot{y}_7, \dot{y}_8, \dot{y}_9]^T$, 可得悬挂系统的状态

空间描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \tilde{A}x(t) + \tilde{B}u(t) + \tilde{D}d(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \tag{4}$$

矩阵 $\tilde{A} \in R^{18 \times 18}$, $\tilde{B} \in R^{18 \times 3}$, $C \in R^{9 \times 18}$ 和 $\tilde{D} \in R^{18 \times 6}$ 可由上述微分方程导出, $d(t)$ 为轨道垂向不平整引起的车轮垂向速度和位移.

2 故障检测方案

2.1 数据建模

基于悬挂系统状态空间描述(4), 将采样周期设为 T , 可得如下所示的离散状态空间描述:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Dd(k) + w(k), \\ y(k) = Cx(k) + v(k). \end{cases} \tag{5}$$

其中 $A = e^{\tilde{A}T}$, $B = \int_0^T e^{\tilde{A}t} \tilde{B} dt$, $D = \int_0^T e^{\tilde{A}t} \tilde{D} dt$.

采用函数 $f(t) = \beta(t - t_f)\theta(t)$ 表征可能发生的早期故障. 时间函数 $\beta(t - t_f)$ 用于描述 t_f 时刻所发生故障的变化趋势, 其形式可以表示如下:

$$\beta(t - t_f) = \begin{cases} 0, & t < t_f; \\ 1 - e^{-\alpha_0(t - t_f)}, & t \geq t_f; \end{cases} \tag{6}$$

其中 α_0 表征故障衍变速率. 当 α_0 取值较小时, 可以用来表征故障的缓变特性, 即可以用于表示早期微小故障; 当 α_0 取值较大时, $\beta(t - t_f)$ 趋近于阶跃函数, 此时可以用来表示突变故障^[13-15]. 故障函数 $\theta(t)$ 用于表征故障频率、幅值等其他特性.

考虑可能发生的执行器和传感器故障, 悬挂系统状态空间方程可以描述为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Dd(k) + \\ \quad F_1 f_1(k) + w(k), \\ y(k) = Cx(k) + F_2 f_2(k) + v(t). \end{cases} \tag{7}$$

其中: F_1, F_2 为未知故障矩阵, $f_1(k)$ 为执行器故障, $f_2(k)$ 为传感器故障.

在上述悬挂系统离散模型中, 输入信号 $u(k)$ 、输出信号 $y(k)$ 为可测信号. 依次定义堆栈矩阵 $u_{l_f}(k)$ 、 $y_{l_f}(k)$ 与 $d_{l_f}(k)$ 为

$$\begin{aligned}
 u_{l_f}(k) &= [u^T(k) \quad \dots \quad u^T(k + l_f)]^T, \\
 d_{l_f}(k) &= [d^T(k) \quad \dots \quad d^T(k + l_f)]^T, \\
 y_{l_f}(k) &= [y^T(k) \quad \dots \quad y^T(k + l_f)]^T.
 \end{aligned} \tag{8}$$

当悬挂系统无故障时, 由式(7)可得

$$\begin{aligned}
 y_{l_f}(k) &= \Gamma_{l_f} x(k) + H_{u, l_f} u_{l_f}(k) + H_{d, l_f} d_{l_f}(k) + \\
 & H_{w, l_f} w_{l_f}(k) + v_{l_f}(k).
 \end{aligned} \tag{9}$$

其中

$$\begin{aligned} \Gamma_{l_f} &= [C \ CA \ \dots \ CA^{l_f}]^T, \\ H_{u,l_f} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ CB & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ CA^{l_f-1}B & \dots & CB & 0 \end{bmatrix}, \\ H_{d,l_f} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ CD & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ CA^{l_f-1}D & \dots & CD & 0 \end{bmatrix}, \\ H_{w,l_f} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ C & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ CA^{l_f-1} & \dots & C & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

式(9)含有状态变量 $x(k)$, 为消除 $x(k)$, 可引入堆栈矩阵 $u_{l_p}(k) = [u^T(k-l_p) \ \dots \ u^T(k)]^T$. 由式(7)可得到

$$\begin{aligned} x(k) &= A^{l_p}x(k-s_p) + Q_u^T u_{l_p}(k) + \\ & \quad Q_d^T d_{l_p}(k) + Q_w^T w_p(k). \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} Q_u^T &= [A^{l_p-1}B \ \dots \ AB \ B], \\ Q_d^T &= [A^{l_p-1}D \ \dots \ AD \ D], \\ Q_w^T &= [A^{l_p-1} \ \dots \ A \ I]. \end{aligned}$$

将式(10)代入(9), 化简得

$$\begin{aligned} y_{l_f}(k) &\approx H_{u,l_p,l_f} u_{l_p,l_f}(k) + H_{d,l_p,l_f} d_{l_p,l_f}(k) + \\ & \quad H_{w,l_p,l_f} e_{l_p,l_f}(k). \end{aligned} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} H_{u,l_p,l_f} &= [\Gamma_{l_f} \ Q_u^T \ H_{u,l_f}], \quad u_{l_p,l_f}(k) = \begin{bmatrix} u_p(k) \\ u_l(k) \end{bmatrix}, \\ H_{d,l_p,l_f} &= [\Gamma_{l_f} \ Q_d^T \ H_{d,l_f}], \quad d_{l_p,l_f}(k) = \begin{bmatrix} d_p(k) \\ d_l(k) \end{bmatrix}, \\ H_{w,l_p,l_f} &= [\Gamma_{l_f} \ Q_w^T \ H_{w,l_f} \ I], \quad w_{l_p,l_f}(k) = \begin{bmatrix} w_p(k) \\ w_l(k) \\ v_l(k) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

考虑时间间隔为 N , 依次定义堆栈矩阵 $Y_{k,l}$ 、 U_{k,l_p,l_f} 与 D_{k,l_p,l_f} 为

$$\begin{aligned} Y_{k,l} &= [y_{l_f}(k) \ \dots \ y_{l_f}(k+N-1)]^T, \\ U_{k,l_p,l_f} &= [u_{l_p,l_f}(k) \ \dots \ u_{l_p,l_f}(k+N-1)]^T, \\ D_{k,l_p,l_f} &= [d_{l_p,l_f}(k) \ \dots \ d_{l_p,l_f}(k+N-1)]^T. \end{aligned} \quad (12)$$

由式(11)可得

$$\begin{aligned} Y_{k,l} &= H_{u,l_p,l_f} U_{k,l_p,l_f} + H_{d,l_p,l_f} D_{k,l_p,l_f} + \\ & \quad H_{w,l_p,l_f} E_{k,l_p,l_f}. \end{aligned} \quad (13)$$

悬挂系统的输入输出数据模型如式(13)所示, 数据模型隐含悬挂系统的输入输出关系, 且在实际应用中数据矩阵 U_{k,l_p,l_f} 与 $Y_{k,l}$ 可知.

2.2 基于输入输出数据的残差设计

为了得到基于输入输出数据的残差, 引入正交投影矩阵

$$\Pi_{U_{k,l_p,l_f}}^\perp = I - U_{k,l_p,l_f}^T (U_{k,l_p,l_f} U_{k,l_p,l_f}^T)^{-1} U_{k,l_p,l_f}.$$

由于 $e_{l_p,l_f}(k)$ 与 $u_{l_p,l_f}(k)$ 相互独立, $E_{k,l_p,l_f} \Pi_{U_{k,l_p,l_f}}^\perp = E_{k,l_p,l_f}$, 式(13)两边同时右乘 $\Pi_{U_{k,l_p,l_f}}^\perp$ 可得

$$\begin{aligned} Y_{k,l} \Pi_{U_{k,l_p,l_f}}^\perp &= \\ & \quad H_{d,l_p,l_f} D_{k,l_p,l_f} \Pi_{U_{k,l_p,l_f}}^\perp + H_{w,l_p,l_f} E_{k,l_p,l_f}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $Y_{k,l} \Pi_{U_{k,l_p,l_f}}^\perp$ 为故障检测残差. 进一步地, 为消除系统噪声对残差量的影响, 引入与 e_{l_p,l_f} 独立的辅助变量 z_k , 可得

$$Y_{k,l} \Pi_{U_{k,l_p,l_f}}^\perp Z_k^T = H_{d,l_p,l_f} D_{k,l_p,l_f} \Pi_{U_{k,l_p,l_f}}^\perp Z_k^T. \quad (15)$$

令 $\widehat{D}_{k,l_p,l_f} = D_{k,l_p,l_f} \Pi_{U_{k,l_p,l_f}}^\perp Z_k^T$, 可得对称矩阵

$$\begin{aligned} R &= Y_{k,l_f} \Pi_{U_{k,l_p,l_f}}^\perp Z_k^T (Y_{k,l_f} \Pi_{U_{k,l_p,l_f}}^\perp Z_k^T)^T = \\ & \quad H_{d,l_p,l_f} \widehat{D}_{k,l_p,l_f} \widehat{D}_{k,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f}^T. \end{aligned} \quad (16)$$

明显地, 矩阵 R 的变化可以用来表征故障的发生与否. 由于非恒定矩阵的置信域的确定存在困难, 判断矩阵的变化非常复杂. 在实际中, 通常使用标量测度来评估矩阵的变化. 由于过程模型未知, 构造评价指标如下:

$$\begin{aligned} J &= \text{tr}(H_{d,l_p,l_f} \widehat{D}_{k,l_p,l_f} \widehat{D}_{k,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f}^T) = \\ & \quad \text{tr}(\widehat{D}_{k,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f} \widehat{D}_{k,l_p,l_f}), \end{aligned} \quad (17)$$

即通过矩阵的逆运算来表征矩阵 R 的变化. 假设 $\text{tr}(R)$ 有界, 且边界值为一个未知常数, 将其定义为阈值 J_{th} . 在训练数据足够的情况下, 可以通过离线分析来估计阈值. 当系统无故障时满足 $J < J_{th}$.

当执行器发生故障时, 由式(13)和(15)可得

$$\begin{aligned} J &= \text{tr}(\widehat{D}_{k,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f} \widehat{D}_{k,l_p,l_f} + \\ & \quad \widehat{F}_{1,k,l_p,l_f}^T H_{f_{1,l_p,l_f}}^T H_{f_{1,l_p,l_f}} \widehat{F}_{1,k,l_p,l_f}) = \\ & \quad \text{tr}(\widehat{D}_{k,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f} \widehat{D}_{k,l_p,l_f}) + \\ & \quad \text{tr}(\widehat{F}_{1,k,l_p,l_f}^T H_{f_{1,l_p,l_f}}^T H_{f_{1,l_p,l_f}} \widehat{F}_{1,k,l_p,l_f}). \end{aligned} \quad (18)$$

当传感器发生故障时, 由式(13)和(15), 可得

$$J = \text{tr}(\widehat{D}_{k,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f} \widehat{D}_{k,l_p,l_f} +$$

$$\begin{aligned} & \widehat{F}_{2,k,l_f}^T F_2^T F_2 \widehat{F}_{2,k,l_f} = \\ & \text{tr}(\widehat{D}_{k,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f}^T H_{d,l_p,l_f} \widehat{D}_{k,l_p,l_f}) + \\ & \text{tr}(\widehat{F}_{2,k,l_f}^T F_2^T F_2 \widehat{F}_{2,k,l_f}). \end{aligned} \quad (19)$$

其中

$$\begin{aligned} \widehat{F}_{1,k,l_p,l_f} &= F_{1,k,l_p,l_f} \Pi_{k,l_p,l_f}^\perp Z_k^T, \\ \widehat{F}_{2,k,l_f} &= F_{2,k,l_f} \Pi_{k,l_p,l_f}^\perp Z_k^T. \end{aligned}$$

当 $H_{f_1,l_p,l_f} \widehat{F}_{1,k,l_p,l_f}$ 或 $F_2 \widehat{F}_{2,k,l_f}$ 不为零时, $J > J_{th}$, 即指示故障的发生.

2.2.1 在线更新正交投影矩阵

为了在线辨识故障, 需要计算正交投影矩阵, 调用正交投影矩阵时只需要计算伪逆

$$W_1 = (U_{k,l_p,l_f} U_{k,l_p,l_f}^T)^{-1} U_{k,l_p,l_f}.$$

当获得一组新样本数据后, $U_{k,l_p,l_f} = [c_1, c_2, \dots, c_N]$ 插入一个新的列并且删掉第1列, 得到更新后的输入矩阵 $U_{l_p,l_f,u} = [c_2, c_3, \dots, c_{N+1}]$, 计算伪逆

$$W_2 = (U_{l_p,l_f,u} U_{l_p,l_f,u}^T)^{-1} U_{l_p,l_f,u}.$$

最后计算正交投影矩阵 $\Pi_{U_{l_p,l_f,u}}^\perp = I - U_{l_p,l_f,u} W_2$, 达到在线更新正交投影矩阵的目的.

2.2.2 故障检测方案

该方案由离线设计和在线检测两部分组成. 在离线设计部分中, 主要包括利用采集到的无故障数据构造残差信号、建立评价指标体系, 以及根据训练数据估计阈值 J_{th} . 在线检测部分利用在线测量值对正交矩阵进行更新, 然后根据计算出的评价指标与阈值进行比较, 作出故障判定.

离线部分:

- 1) 收集数据 y_{l_f}, u_{l_p,l_f} 和 z , 构造 $Y_{k,l} \Pi_{U_{k,p,s}}^\perp Z_k^T$;
- 2) 计算性能指标 J ;
- 3) 通过训练数据得到阈值 J_{th} .

在线部分:

- 4) 收集在线数据 $y_{l_f}(k), u_{l_p,l_f}(k)$;
- 5) 循环更新正交投影矩阵;
- 6) 通过增加新数据列和删除数据列的方式构造

Y_{k,l_f} 和 Z_k ;

7) 故障检测判定逻辑

$$\begin{cases} J > J_{th}, \text{故障;} \\ J \leq J_{th}, \text{无故障.} \end{cases}$$

2.3 扩展

在上述研究中, 提出了“动-拖-动”结构的悬挂系统故障检测方案, 该方案可以推广到其他编组模式下的列车悬挂系统. 本文将以“动-托”编组悬挂系统为例进行说明.

“动-拖”编组(一辆动车和一辆拖车)模型选取图1中前两节列车. 每节车体有浮沉、点头两个自由度, 每个转向架有沉浮一个自由度, “动-拖”编组悬挂系统为6自由度. 动车垂向动力学方程与方程(1)相似, 拖车垂向动力学方程与方程(3)相似. 选取状态变量 $\bar{x}(t) = [y_1, y_2, \theta_1, \theta_2, y_3, y_4, \dot{y}_1, \dot{y}_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{y}_3, \dot{y}_4]^T$, 输入变量 $\bar{u}(t) = [f_a, f_b]^T$ 和扰动变量 $\bar{d}(t) = [y_5, y_6, \dot{y}_5, \dot{y}_6]^T$. 可得“动-拖”编组悬挂系统的状态空间描述如下:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{B}\bar{u}(t) + \bar{D}\bar{d}(t), \\ \bar{y}(t) = \bar{C}\bar{x}(t). \end{cases} \quad (20)$$

其中: 矩阵 $\bar{A} \in R^{12 \times 12}, \bar{B} \in R^{12 \times 2}, \bar{C} \in R^{6 \times 12}$ 和 $\bar{D} \in R^{12 \times 4}$ 可由系统动力学方程导出, $d(t)$ 为轨道垂向不平顺引起的车轮垂向速度和位移.

与模型(4)相比, 上述“动-拖”编组模型除系统的维数不同外, 具有相同的模型结构. 在保证悬挂系统稳定性的前提下, 依照2.1和2.2节中的方法构造数据模型及残差, 本文所提出的故障检测方案也适用于“动-托”编组悬挂系统. 同理, 进一步推广, 也适用于其他编组模式的悬挂系统.

3 仿真实证

构造基于 Simpack-Matlab/Simulink 的 CRH 动车组高速列车“动-拖-动”编组悬挂系统的联合仿真环境(见图2). 通过 Matlab/Simulink 与 Simpack 的接口将 Simpack 端产生的正常/故障工况下的输入输出数据传输到 Matlab/Simulink 端进行故障的检测.

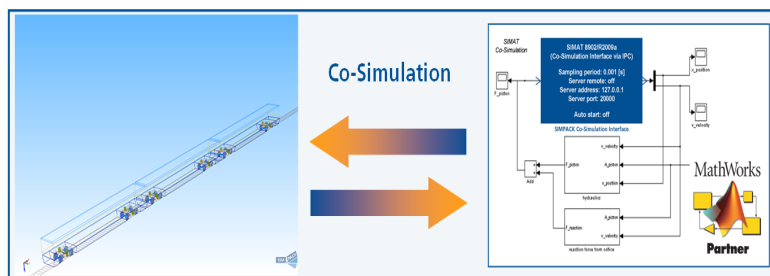


图2 Simpack-Matlab/Simulink 联合仿真

3.1 仿真设置

悬挂系统的主动控制力设置为

$$\begin{aligned} f_a &= k_1(y_{10} - y_4) + c_1(\dot{y}_{10} - \dot{y}_4), \\ f_b &= k_2(y_2 - y_5) + c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_5), \\ f_c &= k_1(y_{11} - y_6) + c_1(\dot{y}_{11} - \dot{y}_6)^{[11]}. \end{aligned}$$

轨道不平顺信号选用我国高速铁路无砟轨道不平顺谱.

在正常运行工况下采集2000个无故障样本作为训练数据. 堆栈矩阵大小参数选择 $l_p = 6, l_f = 5, N = 500$, 得到阈值 $J_{th} = 4.8184 \times 10^{-5}$.

悬挂系统执行器和传感器早期故障的模拟详见表1, 每次模拟列车在200 km/h的速度下运行34 s, 总共生成1700个样本. 表中 fault 0 为健康工况; fault 1~fault 6 为早期微小的执行器性能衰减故障; fault 7 为传感器缓变漂移故障. 为方便描述单个执行器发生早期故障, 选取

$$e_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, e_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, e_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

表1 故障参数设置

| 序号 | 故障 | α_0 | t_f/s | $\theta(t)$ | 描述 |
|---------|-----------|------------|---------|---------------|-------------|
| fault 0 | 无故障 | | | | |
| fault 1 | car 1 执行器 | 0.4 | 10 | $0.01e_1u(t)$ | f_a 失效1% |
| fault 2 | car 2 执行器 | 0.4 | 20 | $0.01e_2u(t)$ | f_b 失效1% |
| fault 3 | car 3 执行器 | 0.4 | 30 | $0.01e_3u(t)$ | f_c 失效1% |
| fault 4 | car 2 执行器 | 0.4 | 20 | $0.02e_2u(t)$ | f_b 失效2% |
| fault 5 | car 2 执行器 | 0.4 | 20 | $0.05e_2u(t)$ | f_b 失效5% |
| fault 6 | car 2 执行器 | 0.4 | 20 | $0.10e_2u(t)$ | f_b 失效10% |
| fault 7 | 传感器 | 0.6 | 20 | $\theta_s(t)$ | 漂移偏差故障 |

注: $\theta_s(t) = 0.001(0.15 + 0.02 \sin t + 0.01 \sin(0.2t))^{[4]}$

3.2 仿真结果与分析

故障检测结果如图3~图5所示, 上述模拟故障发生时间10 s、20 s、30 s分别为第500、1000、1500个采样点所对应的时刻. 由于阈值取评价指标 $\text{tr}(R)$ 的边界值, 代表轨道不平顺的最大影响, 预期的误报率为零. 从图3~图5可以看出, 所提出的方法在未发生故障时都能够以零误报率跟踪正常工况下的运行状态.

图3为car 1~car 3执行器分别在第10 s、20 s、30 s发生性能缓慢衰减1%早期故障的检测结果, car 1和car 3的执行器发生故障后, 很快被检测出; car 2由于与car 1和car 3存在结构上的耦合, 发生早期故障后虽然也能被检测出, 但存在一定的滞后. 图4为car 2

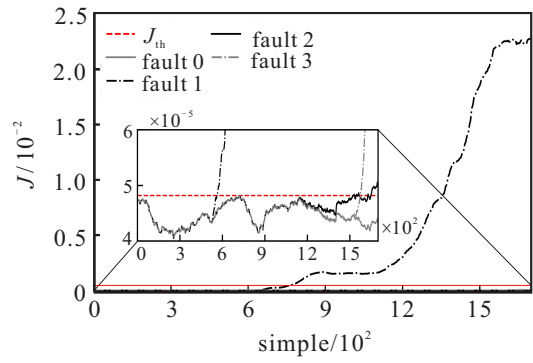


图3 car1~car3执行器早期故障

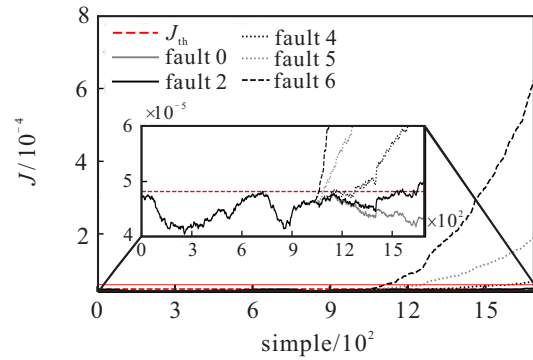


图4 car 2 执行器早期故障(模拟不同失效比例)

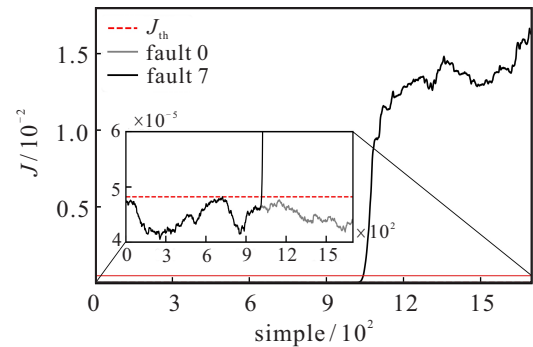


图5 传感器缓变漂移故障

执行器在不同失效比例下的检测结果, 随着执行器失效比例的增大, 检测残差对故障也更加敏感. 图6为传感器发生缓变偏移故障的检测结果, 与执行器故障检测结果类似, 本文所提出的方案可以同时保证传感器故障检测的精确度和灵敏度.

4 结论

本文提出了一种基于数据驱动的高速列车悬挂系统执行器和传感器早期故障检测方法. 首先通过构建 Simpack 动力学仿真环境得到悬挂系统的输入输出数据, 然后引入正交投影矩阵来构造用于监控列车悬挂系统运行状态的残差信号. 此方案适用于任意编组结构的悬挂系统, 且残差的生成避免了参数辨识. 此外, 通过对正交投影矩阵进行递归更新, 可实现故障的在线检测. 仿真结果表明, 该方法对悬挂系统中执行器和传感器的早期故障具有较高的灵敏

度. 解决由于车体之间存在耦合导致的故障检测迟滞以及系统结构中的非线性动态(本文将相关非线性动态作了线性化处理)都将是后续研究的重点.

参考文献(References)

- [1] 张曙光. CRH2型动车组[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008: 89-129.
(Zhang S G. CRH2 train[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008: 89-129.)
- [2] Hayashi Y, Tsunashima H, Marumo Y. Fault detection of railway vehicle suspension systems using multiple-model approach[J]. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 2008, 1(1): 88-99.
- [3] Li P, Goodall R, Weston P, et al. Estimation of railway vehicle suspension parameters for condition monitoring[J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(1): 43-55.
- [4] Dong M, Tao G, Wen L Y, et al. Adaptive sensor fault detection for rail vehicle suspension systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 7552-7565.
- [5] Ye Y G, Zhang Y X, Wang Q B, et al. Fault diagnosis of high-speed train suspension systems using multiscale permutation entropy and linear local tangent space alignment[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 138: 106565.
- [6] Hong N, Li L S, Yao W R, et al. High-speed rail suspension system health monitoring using multi-location vibration data[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(7): 2943-2955.
- [7] Wei X H, Jia L, Liu H, et al. A comparative study on fault detection methods of rail vehicle suspension systems based on acceleration measurements[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(5): 700-720.
- [8] Ding S X. Data-driven design of monitoring and diagnosis systems for dynamic processes: A review of subspace technique based schemes and some recent results[J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24(2): 431-449.
- [9] Yin S, Ding S X, Xie X C, et al. A review on basic data-driven approaches for industrial process monitoring[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(11): 6418-6428.
- [10] 姜斌, 吴云凯, 陆宁云, 等. 高速列车牵引系统故障诊断与预测技术综述[J]. *控制与决策*, 2018, 33(5): 841-855.
(Jiang B, Wu Y K, Lu N Y, et al. Review of fault diagnosis and prognosis techniques for high-speed railway traction system[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(5): 841-855.)
- [11] Wu Y K, Jiang B, Lu N Y, et al. ToMFIR-based incipient fault detection and estimation for high-speed rail vehicle suspension system[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, 352(4): 1672-1692.
- [12] Wu Y K, Jiang B, Lu N Y. A descriptor system approach for estimation of incipient faults with application to high-speed railway traction devices[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(10): 2108-2118.
- [13] Demetriou M A, Polycarpou M M. Incipient fault diagnosis of dynamical systems using online approximators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(11): 1612-1617.
- [14] Zhang X D, Polycarpou M M, Parisini T. A robust detection and isolation scheme for abrupt and incipient faults in nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(4): 576-593.
- [15] Zhang X, Polycarpou M M, Parisini T. Fault diagnosis of a class of nonlinear uncertain systems with Lipschitz nonlinearities using adaptive estimation[J]. *Automatica*, 2010, 46(2): 290-299.

作者简介

苏宇(1995—), 男, 硕士生, 从事高速列车悬挂系统早期故障诊断与预测技术的研究, E-mail: suyu@stu.just.edu.cn;

吴云凯(1989—), 男, 副教授, 博士, 从事高速列车牵引系统早期故障诊断与预测技术等研究, E-mail: wuyunkaischolar@just.edu.cn;

付俊(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 从事动态优化、切换系统等研究, E-mail: junfu@mail.neu.edu.cn;

Gorjan Nadzinski(1988—), 男, 副教授, 博士, 从事非线性系统控制等研究, E-mail: gorjan@feit.ukim.edu.mk.

(责任编辑: 孙艺红)