

# 基于互相关的列车悬挂系统的性能监测

任宁、付敏跃

1. 浙江大学 控制系, 杭州 310027

E-mail: [violet2000x@163.com](mailto:violet2000x@163.com)

2. 浙江大学 控制系, 杭州 310027

E-mail: [minyue.fu@newcastle.edu.au](mailto:minyue.fu@newcastle.edu.au)

**摘要:** 作为保障列车安全运行的卫士, 悬挂系统的性能监测技术近年来受到了广泛的关注。它能定量分析悬挂系统的性能, 从而为列车的性能维护和预检修提供更多的信息。这不仅提高了列车的稳定性和安全性, 还降低了列车的运营成本。本文研究并改善了基于互相关的性能监测方法, 利用前后悬挂加速度的互相关指标实现了对弹簧刚度和阻尼器阻尼系数的定量分析。而且仿真实验结果表明, 改进后的互相关方法能够定量分析悬挂系统的性能参数, 并保持非常高的精度(5%以内)。

**关键词:** 悬挂系统, 弹簧, 阻尼器, 互相关

## Condition Monitoring Of Train Suspension Systems Using a Cross-correlation Technique

*Ning Ren and Min Yue Fu*

Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

E-mail: [violet2000x.163.com](mailto:violet2000x.163.com)

**Abstract:** In the recent years, condition monitoring of the train suspension system draws a lot of attention because it acts as the guardian to ensure the safety of the train and provides more information for the overhaul. Meanwhile, it makes the train runs steadily and reduces the operating costs. This article focuses on the identification of the train suspension parameters using a cross-correlation technique. We show that the new method can effectively estimate the coefficients of both the spring and the damping coefficients. Simulation results are presented to show the effectiveness of this method.

**Key words:** Train suspension, cross-correlation technique, parameter estimation.

### 1 引言

在运营过程中, 列车的检修维护遵照一个标准的时间表来进行<sup>[1]</sup>。在很多时候它们是冗余的, 带来了不必要的时间开支和经济成本。更重要的是, 传统的故障检测手段和预防性维护不能很好地应对列车悬挂系统的性能退化问题, 而忽视某些元件(一系悬挂、二系悬挂或者抗蛇形减振器)出现的轻度故障可能会带来昂贵和灾难性的后果<sup>[2]</sup>。因此建立针对列车悬挂系统的监测机制, 对于及时掌握元件的状态, 弥补预防性维护的空缺具有非常重要的现实意义。

对于铁路部门, 建立列车悬挂系统的性能监测机制不但能及时辨识出元件的工况, 协助列车员做出更加科学的决策, 保障列车安全准时运行, 而且有利于维护人员科学地调整相应的预防性维护计划, 避免多余的检修带来的时间开支, 从而减少误点的发生。

近年来提出的监测方法主要有状态估计和参数估计两种。前者利用卡尔曼滤波估计状态量, 再确定反映悬挂系统性能的指标。后者直接利用滤波算法估计悬挂系统性能参数(弹簧刚度和阻尼系数)。

对于互相关，以前的研究要求垂向悬挂系统中只有阻尼器出现故障，弹簧必须正常工作。并且研究局限于对故障做定性分析，而不能定量地描述故障程度<sup>[3]</sup>。本文继续以互相关为工具探讨了弹簧与者阻尼器故障时定量分析悬挂系统性能参数的方法。

## 2 列车垂向悬挂系统的建模和故障研究

### 2.1 垂向悬挂系统的建模

列车的悬挂系统是车轮对、转向架、车体三者之间传递耦合作用力装置的总称，主要作用是抵消列车因轨道不平顺信号输入而产生的振动，提高列车的平稳性和安全性<sup>[4]</sup>。

分析半车模型的运动模式，车轮对的只有垂向振动，转向架的运动是垂向振动和点头运动，而车体的运动主要是垂向振动<sup>[5]</sup>。三自由度模型描述的垂向悬挂系统结构如图1所示。

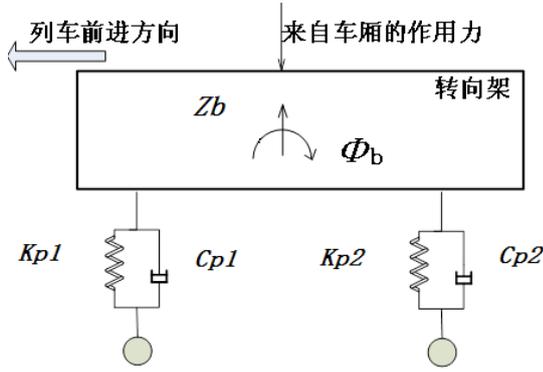


图1 半车模型的垂向悬挂系统

包含车体、轮对和转向架的振动以及转向架点头运动的半车模型方程如下：

$$m_b \ddot{z}_b + 2(C_{p1} + C_{p2})\dot{z}_b + 2(K_{p1} + K_{p2})z_b + L_{bx}(C_{p1} - C_{p2})\dot{\phi}_b + L_{bx}(K_{p1} - K_{p2})\phi_b = C_{p1}\dot{z}_{t1} + C_{p2}\dot{z}_{t2} + K_{p1}z_{t1} + K_{p2}z_{t2} + F_d \quad (1)$$

$$I_b \ddot{\phi}_b + 2L_{bx}^2(C_{p1} + C_{p2})\dot{\phi}_b + 2L_{bx}^2(K_{p1} + K_{p2})\phi_b + L_{bx}(C_{p1} - C_{p2})\dot{z}_b + L_{bx}(K_{p1} - K_{p2})z_b = L_{bx}(C_{p1}\dot{z}_{t1} - C_{p2}\dot{z}_{t2}) + L_{bx}(K_{p1}z_{t1} - K_{p2}z_{t2}) \quad (2)$$

$$F_d = 2C_{py}(\dot{z}_b - \dot{z}_{bd}) + 2K_{py}(z_b - z_{bd}) \quad (3)$$

式中的 $z_b$ 是转向架的垂向位移， $z_{ti}(i=1,2)$ 是车轮对的垂向位移， $\phi_b$ 是转向架的转角， $L_{bx}$ 是前后车轮对距离的一半， $I_b$ 是车轮的转动惯量， $K_{p1}$ 和 $K_{p2}$ 分别是前后两个弹簧的弹性系数， $C_{p1}$ 和 $C_{p2}$ 分别是前后两个阻尼器的阻尼系数， $F_d$ 是车厢和转向架之间的二系悬挂的作用力。从这三个方程很难直接找到能反映故障程度的指标，因此还需要对它们进行改进。

前后悬挂的位移方向相反会使转向架作点头运动，位移方向相同会使转向架垂向振动。把式(1)和

(2)分别相加和相减后并整理得到新模型方程如下：

$$(m_b \ddot{z}_b + I_b \ddot{\phi}_b / L_{bx}) + 2C_{p1}(\dot{z}_b + L_{bx}\dot{\phi}_b) + 2K_{p1}(z_b + L_{bx}\phi_b) = 2C_{p1}\dot{z}_{t1} + 2K_{p1}z_{t1} + F_d \quad (4)$$

$$(m_b \ddot{z}_b - I_b \ddot{\phi}_b / L_{bx}) + 2C_{p2}(\dot{z}_b - L_{bx}\dot{\phi}_b) + 2K_{p2}(z_b - L_{bx}\phi_b) = 2C_{p2}\dot{z}_{t2} + 2K_{p2}z_{t2} + F_d \quad (5)$$

在没有发生故障时，那么 $K_{p1} = K_{p2}, C_{p1} = C_{p2}$ ，式(4)和(5)结构上是相似的。又因为半轴距 $L_{bx}$ 和车速 $v$ 都是不变的，根据 $T_s = 2L_{bx}/v$ ，所以前轮对和后轮对的输入在时间上具有一定的相关性。在没有故障时，上述方程的对称性使得前后悬挂的运动状态存在相关性，这是运用互相关的前提。

### 2.2 垂向悬挂系统的故障研究

英国铁路安全与标准委员会(The U.K. Rail Safety and Standards Board, RSSB)对十年内(1992-2001)列车脱轨以及各种事故进行研究并归类，指出了悬挂系统故障在列车自身故障引发的脱轨事故里(弹簧和阻尼器故障)是罪魁祸首<sup>[6]</sup>。报告的结论部分还强调了监测悬挂系统性能的重要性。因此，从列车安全性的角度考虑，建立悬挂系统的监测机制意义重大。

对于悬挂系统，故障的直接表现就是弹簧的刚度和阻尼器的阻尼系数变小，而列车状态评定是根据各元件的故障叠加来确定的。如果至少三个元件发生故障，那么平稳性会急剧下降，此时列车就需要全面整修<sup>[7]</sup>，性能监测也就没有必要了。因此，研究的重点是故障元件个数不多于两个的情况。

## 3 悬挂系统性的性能监测

### 3.1 互相关方法的推导

以 $T$ 为周期采样，连续采样 $N$ 组数据。第 $j$ 次采样得到垂向振动的输入和输出信号如表1所示。

表1 垂向振动的输入和输出信号

转向架状态			
前悬挂加速度	$U_a^j$	后悬挂加速度	$V_a^j$
前悬挂速度	$U_v^j$	后悬挂速度	$V_v^j$
前悬挂位移	$U_s^j$	后悬挂位移	$V_s^j$
转向架加速度	$z^j$	转向架角加速度	$\phi^j$
信号输入			
前车轮速度	$Z_{v1}^j$	前车轮位移	$Z_{s1}^j$
后车轮速度	$Z_{v2}^j$	后车轮位移	$Z_{s2}^j$
新指标			
$(m_b z^j + I_b \phi^j / L_{bx})$	$z_p^j$	$(m_b z^j - I_b \phi^j / L_{bx})$	$z_q^j$

根据模型特性，在表 1 中新加入了指标  $(m_b z^{i+j} + I_b \phi^{i+j}/L_{bx})$  和  $(m_b z^j - I_b \phi^j/L_{bx})$ ，它们的互相关与故障情况有关。首先根据式(4)和(5)，写出在第  $i+j$  ( $i = T_s/T$ ) 点和第  $j$  点的离散模型方程如下：

$$(m_b z^{i+j} + \frac{I_b \phi^{i+j}}{L_{bx}}) + 2C_{p1} U_v^{i+j} = 2C_{p1} Z_{v1}^{i+j} + 2K_{p1} Z_{s1}^{i+j} - 2K_{p1} U_s^{i+j} + F_d^{i+j} \quad (6)$$

$$(m_b z^j - \frac{I_b \phi^j}{L_{bx}}) + 2C_{p2} V_v^j = 2C_{p2} Z_{v2}^j + 2K_{p2} Z_{s2}^j - 2K_{p2} V_s^j + F_d^j \quad (7)$$

设采样的数据共有  $N$  组，而计算互相关只需要前  $(N-i-1)$  组。当  $k > 0$  时可以得到：

$$\sum_{j=0}^{N-i-1} U_{i+j+k} V_{j+k} - \sum_{j=0}^{N-i-1} U_{i+j} V_j = 0 \quad (8)$$

对于同一段钢轨，前后轮对的轨道不平顺输入在  $i$  点的互相关是一个定值，并且输入信号在  $(k+i)$  点的互相关都是  $0$  ( $k \neq 0$ )。

$$\sum_{j=0}^{N-i-1} Z_{s1}^{i+k+j} Z_{s2}^j = 0 \quad (9)$$

更重要的是，因为输入的互相关非  $i$  点的取值都是  $0$ ，所以前后悬挂的状态量的互相关在非  $i$  点取值也是  $0$ 。又根据欧拉离散化得到各状态量的关系如下：

$$\begin{aligned} & \sum_{j=0}^{N-i-1} U_a^{i+j} V_a^j \\ &= \sum_{j=0}^{N-i-1} (U_v^{i+j+1} - U_v^{i+j})(V_v^{j+1} - V_v^j)/T^2 \\ &= (2/T^2) \sum_{j=0}^{N-i-1} (U_v^{i+j} V_v^j) \end{aligned} \quad (10)$$

$$m_b z^j + I_b \phi^j/L_{bx} = (m_b + I_b/L_{bx}^2) U_a^j/2 + (m_b - I_b/L_{bx}^2) V_a^j/2 \quad (11)$$

$$m_b z^j - I_b \phi^j/L_{bx} = (m_b + I_b/L_{bx}^2) V_a^j/2 + (m_b - I_b/L_{bx}^2) U_a^j/2 \quad (12)$$

各状态量的自相关在  $k$  点 ( $k \neq 0$ ) 都等于  $0$ 。

$$\sum_{j=0}^{N-k-1} V_{k+j} V_j = 0 \quad (13)$$

根据互相关的定义，把式(14)和(15)的左边和右边分别相乘，并从  $0$  到  $(N-i-1)$  求和，推出在  $i$  点的互相关的表达式。根据式(10)-(13)，表达式的左边可以写成：

$$\begin{aligned} & \sum_{j=0}^{N-i-1} (m_b z^{i+j} + \frac{I_b \phi^{i+j}}{L_{bx}} + 2C_{p1} U_v^{i+j}) \times \\ & (m_b z^j - \frac{I_b \phi^j}{L_{bx}} + 2C_{p2} V_v^j) = \sum_{j=0}^{N-i-1} Z_p^{i+j} Z_q^j - \\ & (\frac{(C_{p1}+C_{p2})(m_b + \frac{I_b}{L_{bx}^2})}{T} + 4C_{p1} C_{p2}) \frac{T^2}{2} \sum_{j=0}^{N-i-1} U_a^{i+j} V_a^j \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)中除性能参数  $C_{p1}$  和  $C_{p2}$  外的互相关都已知。

而二系悬挂的作用力  $F_d^j$  和  $F_d^{i+j}$  远小于其他项，与其他项在时间点  $i = T_s/T$  不相关。并且轨道不平

顺信号是随机过程，与转向架状态量都不相关。再根据式(9)，互相关表达式的右边可以写成：

$$\begin{aligned} & \sum_{j=0}^{N-i-1} (2C_{p1} Z_{v1}^{i+j} + 2K_{p1} Z_{s1}^{i+j} - 2K_{p1} U_s^{i+j}) \times \\ & (2C_{p2} Z_{v2}^j + 2K_{p2} Z_{s2}^j - 2K_{p2} V_s^j) \\ &= (C_{p1} C_{p2}/T^2 + (K_{p1} - C_{p1}/T)(K_{p2} - C_{p2}/T)) \times \\ & 4 \sum_{j=0}^{N-i-1} Z_{s1}^{i+j} Z_{s2}^j + 4K_{p1} K_{p2} \sum_{j=0}^{N-i-1} U_s^{i+j} V_s^j \end{aligned} \quad (15)$$

因为采样周期  $T$  远小于  $1$ ，又根据式(10)可知  $\sum_{j=0}^{N-i-1} U_s^{i+j} V_s^j$  很小，故将其略去。结合式(14)和(15)重新写出方程如下：

$$\begin{aligned} & \sum_{j=0}^{N-i-1} Z_p^{i+j} Z_q^j - (\frac{(C_{p1}+C_{p2})(m_b + \frac{I_b}{L_{bx}^2})}{T} + 4C_{p1} C_{p2}) (\frac{T^2}{2}) \\ & \times \sum_{j=0}^{N-i-1} U_a^{i+j} V_a^j = (\frac{C_{p1} C_{p2}}{T^2} + (K_{p1} - \frac{C_{p1}}{T})(K_{p2} - \\ & \frac{C_{p2}}{T})) \times 4 \sum_{j=0}^{N-i-1} Z_{s1}^{i+j} Z_{s2}^j \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)中的互相关  $\sum_{j=0}^{N-i-1} Z_p^{i+j} Z_q^j$  与  $\sum_{j=0}^{N-i-1} U_a^{i+j} V_a^j$  是已知的。如果输入信号的互相关  $\sum_{j=0}^{N-i-1} Z_{s1}^{i+j} Z_{s2}^j$  已知，那么参数关系是可以直接计算出来的，再利用多组数据联立方程可以计算参数  $C_{p1}, K_{p1}, C_{p2}, K_{p2}$  的大小。但是输入信号的随机性决定了互相关的不确定性[8]，而且目前的传感器技术还难以测量轮对位移[9]，因此还需要在此基础上改进互相关方法。

### 3.2 互相关方法的改进

尽管轨道不平顺输入信号不可测，但如果性能监测时列车行驶的测试轨道固定不变<sup>[10]</sup>，那么前后车轮对的输入是一定的(对应的互相关也是一定的)。这一特点是新的监测方法的突破口。

在正常情况下时，把悬挂系统参数设为  $C_{p10}, K_{p10}, C_{p20}$  和  $K_{p20}$ ，那么  $C_{p10} = C_{p20}, K_{p10} = K_{p20}$ 。

第一步：测定正常情况下的互相关。确定测试轨道，列车以速度  $v$  匀速行驶，用两组车载传感器分别以  $T_1, T_2$  为周期对转向架的加速度和角加速度进行采样得到两组数据，记为  $E_1, E_2$ 。再利用  $E_1$  分别求出前悬挂加速度  $(z^j + L_{bx} \phi^j)$  和后悬挂加速度  $(z^j - L_{bx} \phi^j)$ ，并计算它们的互相关  $A_1$ 。然后求出新指标的  $z_p^j$  和  $z_q^j$  的互相关  $B_1$ 。同理计算数据  $E_2$  对应的互相关  $A_2$ ，并计算数据新指标  $z_p^j$  和  $z_q^j$  的互相关  $B_2$ 。

第二步：故障定位。在列车运行时，根据传感器测得的实时数据对悬挂系统的性能作定性分析。若悬挂系统的元件发生了一定程度的故障，那么测量数据及其均方根会很直观地表现出来。而且以前的研究已经对故障定位做了比较具体的分析<sup>[11]</sup>。

第三步：分单故障和双故障两种情况监测悬挂系统的性能。

故障情况 1：单个元件发生故障的情况。研究假设只有一个阻尼器发生了20%的性能退化，其它元件正常，即 $C_{p11} = 0.8C_{p10}, C_{p21} = C_{p20}, K_{p11} = K_{p10} = K_{p21} = K_{p20}$ 。

把正常情况下预先测得的前后悬挂加速度的互相关设为 $A_{11}$ 。而把相应的新指标 $z_p^j$ 和 $z_q^j$ 的互相关设为 $B_{11}$ 。那么 $A_{11} = A_1, B_{11} = B_1$ 。

在性能监测时，列车以速度 $v$ 在测试铁轨上行驶，再次以 $T_1$ 为周期对转向架的加速度和角加速度采样，并计算出对应的前悬挂加速度和后悬挂加速度的互相关 $C_{11}$ ，同理计算出新指标 $z_p^j$ 和 $z_q^j$ 的互相关 $D_{11}$ 。

$$\text{设 } W_{11} = \frac{4C_{p10}C_{p20}}{T_1^2} + 4(K_{p10} - \frac{C_{p10}}{T_1})(K_{p20} - \frac{C_{p20}}{T_1}), R_{11} = \frac{4C_{p11}C_{p20}}{T_1^2} + 4(K_{p10} - \frac{C_{p11}}{T_1})(K_{p20} - \frac{C_{p20}}{T_1}),$$

$$Q_{11} = (\frac{(m_b + I_b/L_{bx}^2)(C_{p20} + C_{p10})}{T_1} + 4C_{p10}C_{p20})T_1^2/2,$$

$$P_{11} = (\frac{(m_b + I_b/L_{bx}^2)(C_{p20} + C_{p11})}{T} + 4C_{p11}C_{p20})T_1^2/2,$$

由式(16)可以得到：

$$\frac{B_{11} - Q_{11}A_{11}}{W_{11}} = \frac{D_{11} - P_{11}C_{11}}{R_{11}} \quad (17)$$

$$\text{设 } M_1 = \frac{(B_{11} - Q_{11}A_{11})}{W_{11}}, M_2 = K_{p10}K_{p20} - \frac{K_{p10}C_{p20}}{T_1},$$

$$M_3 = \frac{2C_{p20}}{T^2} - \frac{K_{p20}}{T}, \text{由式(17)解得:}$$

$$C_{p11} = \frac{(D_{11} - 4M_1M_2 - C_{11}C_{p20}(m_b + I_b/L_{bx}^2)T_1/2)}{(4M_1M_3 + ((m_b + I_b/L_{bx}^2)T_1/2 + 2C_{p20}T^2)C_{11}} \quad (18)$$

故障情况 2：两个元件发生故障的情况。研究假设两个弹簧都发生故障，阻尼器正常。具体就是：

$$K_{p12} = 0.5K_{p10}, K_{p22} = 0.9K_{p20}, C_{p12} = C_{p10} = C_{p22} = C_{p20}。$$

把正常情况下以 $T_1$ 为周期预先测得的前后悬挂加速度的互相关设为 $A_{12}$ 。而把相应的新指标 $z_p^j$ 和 $z_q^j$ 的互相关设为 $B_{12}$ 。同理把正常情况下以 $T_2$ 为周期预先测得的前后悬挂加速度的互相关设为 $A_{22}$ 。而把相应的新指标 $z_p^j$ 和 $z_q^j$ 的互相关设为 $B_{22}$ 。那么有 $A_{12} = A_1, B_{12} = B_1, A_{22} = A_2, B_{22} = B_2$ 。

在性能监测的时候，让列车在测试轨道上行驶，分别以 $T_1, T_2$ 为周期采样得到的数据求出前后悬挂加速度并计算它们的互相关，得到的两个互相关设为 $C_{12}, C_{22}$ 。同理，分别计算出新指标 $z_p^j$ 和 $z_q^j$ 的互相关，设为 $D_{12}, D_{22}$ 。

$$\text{设 } W_{i2} = \frac{4C_{p10}C_{p20}}{T_i^2} + 4(K_{p10} - \frac{C_{p10}}{T_i})(K_{p20} -$$

$$\frac{C_{p20}}{T_i}), R_{i2} = \frac{4C_{p10}C_{p20}}{T_i^2} + 4(K_{p11} - \frac{C_{p10}}{T_i})(K_{p22} - \frac{C_{p20}}{T_i}),$$

$$P_{i2} = (\frac{(m_b + I_b/L_{bx}^2)(C_{p20} + C_{p10})}{T_i} + 4C_{p10}C_{p20})T_i^2/2, i = 1, 2. \text{由式(16)可以得到:}$$

$$\frac{B_{12} - P_{12}A_{12}}{W_{12}} = \frac{D_{12} - P_{12}C_{12}}{R_{12}} \quad (19)$$

$$\frac{B_{22} - P_{22}A_{22}}{W_{22}} = \frac{D_{22} - P_{22}C_{22}}{R_{22}} \quad (20)$$

$$\text{设 } M_4 = \frac{W_{12}(D_{12} - P_{12}C_{12})}{(B_{12} - P_{12}A_{12})} - 2C_{p10}C_{p20}/T_1^2,$$

$$M_5 = \frac{W_{22}(D_{22} - P_{22}C_{22})}{(B_{22} - P_{22}A_{22})} - 2C_{p10}C_{p20}/T_2^2, \text{化简式(19)}$$

和(20)得：

$$-\frac{C_{p10}(K_{p22} + K_{p12})}{T_1} + K_{p12}K_{p22} = M_4 \quad (21)$$

$$-\frac{C_{p10}(K_{p22} + K_{p12})}{T_2} + K_{p12}K_{p22} = M_5 \quad (22)$$

$$\text{设 } M_6 = \frac{T_1T_2(M_4 - M_5)}{C_{p10}(T_1 - T_2)}, M_7 = \frac{M_4T_1 - M_5T_2}{T_1 - T_2}, \text{求解式}$$

(21)和(22)可得：

$$K_{p12}, K_{p22} = \frac{M_6 \pm \sqrt{M_6^2 - 4M_7}}{2} \quad (23)$$

但是，当前悬挂和后悬挂的两个弹簧同时发生故障时，还是难以区分二者哪个发生的故障更加严重，而加速度的均方根可以解决这个问题。

### 3.3 模型仿真

互相关诊断方法的仿真研究对图 1 所示的半车模型进行建模，依据动力学方程(3)和(4)在SIMULINK 搭建仿真模型如图 2 所示[12]。输入信号是根据轨道空间谱密度函数 $A_{rv}/f_t^2$ 生成。

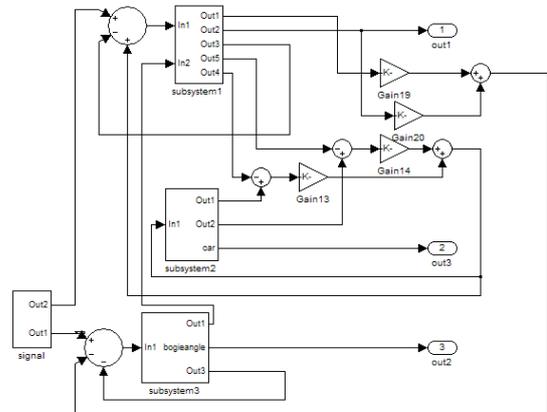


图 2 SIMULINK 仿真模型

第一步：测定正常情况下的互相关。先以采样周期 $T_1, T_2$ 分别采样得到两组数据，记为 $E_1, E_2$ 。再利用 $E_1$ 求出前悬挂和后悬挂加速度的互相关 $A_1 = 5363.5044$ ，新指标的互相关 $B_1 = 5.1706 \times 10^9$ 。同理分别计算出数据 $E_2$ 对应的前悬挂和后悬挂加速度的互相关 $A_2 = 684.6135$ ，新指标的互相关 $B_2 = 6.6446 \times 10^8$ 。

第二步：故障定位。模型仿真得到的前悬挂的加速度变化曲线如图2所示，粗实线表示加速度的均方根。在第5秒时前悬挂的阻尼器发生了故障( $C_{p11} = 0.8C_{p10}$ )。可以看出，第5秒后前悬挂的振动加剧。因此加速度及其均方根的数据监测可以帮助工程人员判定故障是否发生以及发生在前悬挂还是后悬挂。

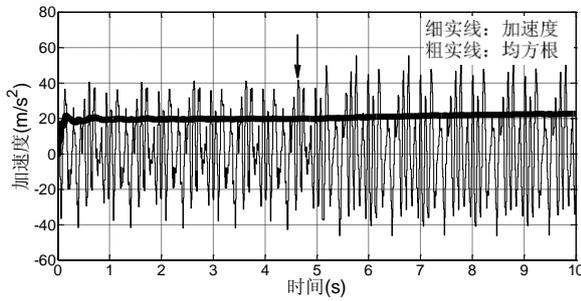


图2 前悬挂的加速度(箭头表示发生了故障)

第三步：下面对单元件故障和双元件故障这两种情况下的性能监测进行仿真研究。

故障情况1：假设前方悬挂的阻尼器发生故障( $C_{p11} = 0.8C_{p10}$ )，其它弹簧和阻尼器均正常工作。

正常情况下，以 $T_1 = 0.001s$ 为周期采样并计算出的前悬挂和后悬挂加速度的互相关设为 $A_{11}$ ，而把新指标 $z_p^j$ 和 $z_q^j$ 的互相关设为 $B_{11}$ ，则 $A_{11} = A_1, B_{11} = B_1$ 。

在性能监测的时候，让列车在测试轨道上行駛。以 $T_1 = 0.001s$ 为周期采样转向架的加速度和角加速度并计算出它们的互相关 $C_{11} = 4042.6524$ 。同理求出新指标 $z_p^j$ 和 $z_q^j$ 的互相关 $D_{11} = 4.0950 \times 10^9$ 。

利用公式(18)可以计算出此时前悬挂的阻尼系数的数值 $C_{p11} = 15973.3984$ ，再求得故障程度： $15973.3984/20000 = 79.8670\%$ ，与设定的80%的故障程度非常接近。而性能监测的相对误差是0.1663%。可见在单故障下，该算法具有较高的精度。

故障情况2：前悬挂和后悬挂的两个弹簧都发生故障，即 $K_{p12} = 0.5K_{p10}, K_{p22} = 0.9K_{p20}$ 。此时阻尼器是正常的。

正常情况下，以 $T_1 = 0.001s$ 为周期采样得到前悬挂加速度和后悬挂加速度的互相关设为 $A_{12}$ ，而

把新指标 $z_p^j$ 和 $z_q^j$ 的互相关设为 $B_{12}$ 。同理把以 $T_1 = 0.002s$ 为周期采样并计算出前悬挂加速度和后悬挂加速度的互相关设为 $A_{22}$ ，而把新指标 $z_p^j$ 和 $z_q^j$ 的互相关设为 $B_{22}$ ，那么 $A_{12} = A_1, B_{12} = B_1, A_{22} = A_2, B_{22} = B_2$ 。

在性能监测的时候，让列车在测试轨道上行駛。重复上述步骤，以 $T_1 = 0.001s, T_2 = 0.002s$ 为周期采样转向架的加速度和角加速度，记录数据。分别计算出对应的前后悬挂加速度的大小，并求出互相关 $C_{21} = 5444.0380, C_{22} = 704.2403$ 。同理，分别计算出新指标 $z_p^j$ 和 $z_q^j$ 的互相关 $D_{21} = 5.2447 \times 10^9, D_{22} = 6.8345 \times 10^8$ 。

利用式(23)可以计算出前后弹簧的参数分别为： $K_{p12} = 877444.8006, K_{p22} = 452167.6636$ 或者 $K_{p22} = 877444.8006, K_{p12} = 452167.6636$ 。故障程度是 $K_{p12}/K_{p10} = 92.3623\%, K_{p22}/K_{p20} = 47.5696\%$ ，与真实值比较接近。诊断出的参数相对误差分别为2.6251%和4.8068%。

从前后悬挂的加速度变化去考虑哪个阻尼器损坏更严重的判断问题。分别画出前悬挂加速度和后悬挂加速度的动态曲线如图3和4所示，故障发生在图中箭头的位置。可以看出，故障发生前后悬挂的加速度及其均方根(RNS)变化有明显区别。前悬挂的加速度变化幅度明显小于后悬挂的加速度，可以判断出前悬挂损害得较为严重[13]。

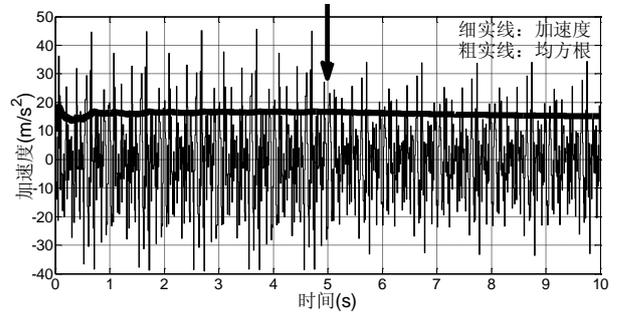


图3 后悬挂的加速度(箭头表示发生了故障)

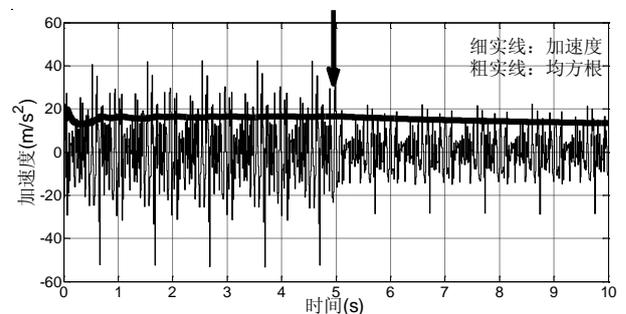


图4 前悬挂的加速度(箭头表示发生了故障)

### 3.4 与传统互相关方法的比较

以前的研究只涉及阻尼器发生不同程度的故障，并没有把弹簧发生故障考虑在内，这与列车运行的

实际情况不符,从而降低了它的实用性。这是因为列车模型参数的设定使得互相关对弹簧刚度的变化不敏感,但这并不意味着弹簧的刚度变化完全不能用互相关来衡量。改进后的互相关方法就是从模型方程出发在理论上推导了互相关方法的表达式,也使弹簧的故障分析成为可能。

以前的研究局限于对阻尼器的故障作定性分析,给出了固定模型的互相关取值与阻尼器的对应关系,这显然难以满足悬挂系统性能监测的要求。不能定量分析的原因一方面是因为目前的传感器技术还难以精确测量轮对位移<sup>[14]</sup>,另一方面是因为模型的参数设定使得互相关对弹簧刚度的变化不敏感。这也为后续研究提供了思路。本文先从模型方程出发证明了互相关方法的定量表达式,然后针对它的缺陷提出了改进后的互相关方法,比较准确地完成了对性能参数的计算。

仿真实验的结果与理论推导完全一致,而且监测结果保持了较高的精度。作为一种性能监测方法,改进后的互相关方法可以定量反映悬挂系统的实际性能,这极大的增加了互相关方法的可信度和应用范围。

#### 4 结语

本文从列车垂向悬挂系统的机理模型出发,先从理论上证明了互相关方法的合理性,为互相关方法的应用提供了理论依据。然后突破了以前的互相关方法的局限性,对其做出了改进。在不增加测量手段的前提下,使其从定性方法跃变成定量分析方法,并适用于弹簧或者阻尼器发生故障的情况。最后的仿真研究验证了该方法在单故障和双故障情况下对悬挂系统测量是有效的。

因为悬挂系统参数和采样周期的设定,所以在计算过程要求很高的精度,否则很难得到准确的结果,这是由模型的特点所决定的。综上所述,改进后的互相关方法能够准确地监测悬挂系统的性能参数,提高列车运行的安全性和稳定性。

#### 参考文献(References):

[1] 王忠凯, 史天运, 张惟皎, 等. 动车组运用计划和检修计划一体化编制模型及算法. 中国铁道科学, 2012, 33(3): 102-108.

- [2] 蒋贵山. 提高动车组运行安全性的转向架关键检修技术探讨. 铁道车辆, 2013, 51(5): 21-24.
- [3] Mei, T. X., and X. J. Ding. "A model-less technique for the fault detection of rail vehicle suspensions." *Vehicle System Dynamics* 46.S1 (2008): 277-287.
- [4] 王福天, 车辆系统动力学. 中国铁道出版社, 1994.
- [5] 陈泽深, 王成国. 铁道车辆动力学与控制. 中国铁道出版社, 2004.
- [6] Rail Safety and Standards Board Report, Derailment mitigation - categorization of past derailments, 2003.
- [7] 黄采伦, 樊晓平, 陈特放等. 旅客列车在线安全状态监测及故障预警系统. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(4): 36-38.
- [8] Mei, T. X., and H. Li. "Monitoring train speed using bogie mounted sensors—Accuracy and robustness." *Railway Condition Monitoring, 2008 4th IET International Conference on. IET, 2008.*
- [9] Mei, T. X., and H. Li. "Measurement of vehicle ground speed using bogie-based inertial sensors." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 222.2 (2008): 107-116.
- [10] S. Nicks, "Condition monitoring of the train/track interface," *In Proceedings of the IEEE Seminar - Condition Monitoring for Rail Transport Systems, London, 10 November 1998, pp. 7/1 - 7/6.*
- [11] Mei, T. X., and X. J. Ding. "Condition monitoring of rail vehicle suspensions based on changes in system dynamic interactions." *Vehicle System Dynamics* 47.9 (2009): 1167-1181.
- [12] 陈春俊, 王开云. 高速列车横向半主动悬挂系统建模研究及分析. 振动与冲击, 2006, 25(4): 151-154.
- [13] Mei, T. X., and H. Li. "Measurement of vehicle ground speed using bogie-based inertial sensors." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 222.2 (2008): 107-116.
- [14] Mei, T. X., and H. Li. "Measurement of vehicle ground speed using bogie-based inertial sensors." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 222.2 (2008): 107-116.