文章编号:1671-4598(2018)02-0027-05　DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2018.02.008　中图分类号:TP242　文献标识码:A

轨道车辆故障诊断算法参数优选和故障监测部位确定

蒋永亮[1]，周　炯[2]，尧辉明[3]
(1. 上海工程技术大学，上海　201620；2. 上海地铁维护保障有限公司，上海　200233
3. 上海工程技术大学，上海　201620)

摘要：转向架作为轨道车辆的重要部件，其弹性部件与阻尼部件的安全对车辆的安全有着重要影响；对轨道车辆转向架的故障种类、故障状态以及故障诊断方法中参数的选择进行了研究；对车辆的故障产生后果和现实情况进行了分析；为实现转向架故障诊断算法的输入参数优选和对应故障敏感部位的确定，提出P指标进行评判；利用Matlab对车体、转向架以及转向架与轮对之间的弹性部件和阻尼部件建模，建立轨道车辆一系悬挂、二系悬挂的故障模型以及部件性能衰退的故障模型；用P作为评价故障前后统计参数改变程度的指标；实现车辆故障诊断算法输入参数的优选和对应故障敏感部位的确定；经过仿真实验可以利用指标P对故障诊断算法的参数输入做出优选，对故障的监测部位有明确定位。

关键词：车辆故障模型；故障统计特征分析；参数优选；仿真分析

Parameter Selection of Fault Diagnosis Algorithm and the Location of Fault Department on Rail Vehicles

Jiang Yongliang[1]，Zhou Jiong[2]，Yao Huiming[1]
(1. Shanghai University of Engineering Science，Shanghai　201620，China；
2. Shanghai Rail Transit Maintenance Support Co.，Ltd.，Shanghai　200233，China)

Abstract：Bogie is an important part of railway vehicles，which has elastic components and damping components that have important influence on the safety of the vehicle. The types of the faults，the state of the faults and the selection of the parameters in the fault diagnosis methods for the bogies of rail vehicles are studied. The consequences of vehicle failure and the actual situation are analyzed. In order to realize the selection of the input parameters of the fault diagnosis algorithm and the determination of the corresponding fault location，the P index is proposed. Using the Matlab models the car body and the bogie，a fault model of a vehicle suspension system is established. At the same time，fault model of the elastic components and damping components is established. The simulation of fault model can provide the data . P is used to evaluate the degree of change of statistical parameters before and after fault. At last realize the selection of the statistical parameter for the vehicle real time director diagnosis algorithm and the determination of the largest part of the vehicle vibration change. After the simulation experiment，the index P can be used to optimize the parameter input of the fault diagnosis algorithm，and determine the location of the fault.

Keywords：vehicle fault model；statistical characteristic analysis on fault model；parameter selection；simulation analysis

0　引言

转向架作为轨道车辆重要部件，在实际运营中受到摩擦、振动、冲击和腐蚀等因素的损耗影响，当损耗达到一定限度时就会发生故障，危及行车安全。因此有必要对列车进行在线安全预警和故障诊断。面对列车实时安全监测的迫切需求，发掘故障特征已成为目前的研究热点[1-4]。文献中只对故障特征进行分析并没有提取出判别方法和指标。文献［5-6］中提出了轨道车辆走行部的监测方案和检测方法。文献［3，7］提出故障评价的指标 P，可并没有系统的仿真和分析。文献［8］对轨道走行部安全监测预警的算法和理论进行了研究，选取了方差和均方根值等作为故障诊断算法的参数输入，建立了二系悬挂动态系统神经网络模型、聚类算法模型。该方法具有较高的故障识别率，但无法说明故障对应的监测部位和参数选择的标准。

轨道车辆是一个整体，当某一故障发生时，车辆每个部位的振动都会发生变化，如何确定一故障发生后，车辆反应敏感的部位。应用故障诊断算法诊断故障时输入参数的确定。以往靠经验确定故障部位和故障诊断算法的参数输入。本文通过仿真实验解决了这一问题。建立轨道车辆故障模型，获取车辆故障前后各部位加速度绝对值的均值、方差、均方根值、峰态、偏态的统计参数，提出指标 P 对参数在故障前后的变化程度进行评判。利用评判结果得出适合作为故障诊断算法的输入参数和故障后对应车辆敏感的部位的确定。

1　车辆动力学模型的建立

参考文献［9-11］为简化模型只研究车辆的垂向振动，

收稿日期:2017-07-21；　**修回日期**:2017-07-21。
基金项目:十三五国家重点研发计划子课题(2016YFC0802505)；上海市地方科委能力建设(15590501400)；上海申通地铁集团有限公司项目(JS-KY14R016)。
作者简介:蒋永亮(1990-)，男，江苏徐州人，硕士研究生，主要从事轨道车辆安全预警和故障诊断方向的研究。

建立轨道车辆 6 自由度的模型。模型有车体、构架、以及一系悬挂和二系悬挂。该车辆模型是被模拟成一个速度为 V 运行于轨道结构上的多钢体系统，完整的反应了车体质量 M_b，及其点头惯量 I_b，前后转向架质量 M_t，及其点头惯量 I_t，以及一系悬挂刚度 K_{zs} 和阻尼 C_{zs}，二系悬挂刚度 K_{zp} 和阻尼 C_{zp}。转向架轴距为 $2L_a$；前后转向架中心距为 $2L_s$。为了便于区分一系悬挂和二系悬挂的弹簧和阻尼，把弹簧和阻尼分别命名为 $K_1 \sim K_6$，$C_1 \sim C_6$（具体分布见图 1）。运用刚度关联矩阵法获得系统的刚度矩阵，阻尼矩阵，质量矩阵。应用组装矩阵的方法可以得到系统的动力学方程。

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\boldsymbol{q}}\} + [\boldsymbol{C}]\{\dot{\boldsymbol{q}}\} + [\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{q}\} = \{\boldsymbol{Q}\} \tag{1}$$

式中，$[\boldsymbol{M}]$ 为质量矩阵；$[\boldsymbol{C}]$ 为阻尼矩阵；$[\boldsymbol{K}]$ 为刚度矩阵；$\{\boldsymbol{q}\}$ 为广义坐标向量；$\{\boldsymbol{Q}\}$ 为激励的列矩阵。建立刚度矩阵时，取弹簧受压为正，受拉为负。建立阻尼矩阵时取阻尼受压为正，受拉为负。车辆的具体参数见表 1。

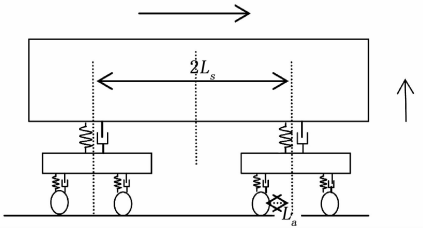

图 1 客车垂向分析模型

表 1 车辆具体参数

某地铁车辆动力学计算参数

序号	名称	代号	数值	单位
1	构架质量	M_t	4060	kg
2	构架点头转动惯量	I_t	3044	kg·m^2
3	车体质量	M_b	23	t
4	车体点头转动惯量	I_b	928	kg·m^2
5	二系垂向阻尼系数	C_{zs}	11	KNs/m
6	二系垂向刚度系数	K_{zs}	0.27	MN/m
7	二系外侧垂向减振器纵向间距之半	L_s	7.85	m
8	一系垂向阻尼系数	C_{zp}	5	KNs/m
9	一系垂向刚度系数	K_{zp}	1.5	MN/m
10	一系垂向减震器纵向间距之半	L_a	1.25	m

考虑我国城市轨道交通的钢轨状况和运行速度，选取美国 6 级轨道谱在 50 km/h 速度下转换成时域位移谱作为激励。轨道谱转换，选取的轨道的波长为 0.5～50 m，所以选取 100 m 的轨道长度作为一个标准统计区间段。

2 *P* 指标的确立

故障诊断首先确定对故障反应最敏感的部位，然后确定反应最敏感的参数。敏感部位的选择，影响对某一故障反应的灵敏性。算法的输入参数的差异性，影响算法的精确性。车辆故障诊断方法有模式识别、小波变换、Hilbert－Huang 变换、故障树分析、神经网络，参数估计等等，而对算法参数的选择却很少。因此提出指标 P 对故障前后车辆各部位统计参数的变化程度做指导。

$$P = (N - D)/N \tag{2}$$

其中：N 和 D 都是车辆各部位加速度绝对值的统计参数。车辆在正常状态和故障状态下各部位的振动加速度值无规律地在一定范围内波动。加速度值始终围绕 0 上下波动。为避免 N 接近 0，导致指标 P 极大的情况，取所测加速度的绝对值用于指标 P 的计算。计算车辆各部位加速度绝对值的均值、均方根值、方差、峰态、偏态在故障前后的变化程度。车辆垂向振动取决于轨道不平顺和车辆本身情况。可以把车辆看成受轨道激励的受迫振动。假定轨道状况在一定时间内保持不变，车辆保持一定速度，当弹簧或阻尼器出现故障时，车辆的振动情况就会发生变化，从而导致统计参数的变化。振动情况变化的大小可以在 P 指标上显示。车辆在正常状态下，P 的绝对值趋近于 0。车辆在故障状态下，P 可以为正，也可以为负。当 P 为正时，说明故障后的统计参数小于正常状态下的统计参数。当 P 为负值时，说明故障后的统计参数要大于正常状态下的统计参数。P 绝对值的大小说明了故障前后加速度统计参数的变化程度。

3 车辆故障库建立

轨道车辆实时安全预警的目标是在最短的时间内实现对车辆故障进行预警。弹簧和阻尼的故障可由刚度系数和阻尼系数的变化来表明。考虑系数的范围，故障可以分为轻微故障、中等故障和严重故障。轻微故障表示刚度系数和阻尼系数衰减的范围是 0%～25%，中等故障为 26%～60%，严重故障为 26%～60%[12]。因为轨道车辆严格的保养维修程序，所以把车辆在途故障看成小概率事件。随着时间的推移，在途故障又是必然事件。因此，假设轨道车辆在运行时不会同时出现两个故障。这既符合现实情况又可简化车辆的故障模型，利于实时故障诊断算法参数优选和车辆故障对应监测部位的确定。

当车辆出现一系悬挂或者二系悬挂失效故障时，对应悬挂的弹簧刚度会急剧增加，所以取对应悬挂的弹性元件的有效刚度值为原来的 20 倍进行模拟仿真。当车辆出现元件老化、性能减退故障时，弹性元件和阻尼元件取原来有效值的 90%，80%，70%，60%作为有效值进行模拟仿真。建立车辆故障库，仿真故障得出 P 指标在标准段内不同故障状态的变化情况以及在 100 秒行程内 P 指标的动态变化图。为避免延迟的误差，取最大延后再进行统计。

4 仿真结果分析

4.1 悬挂失效故障 *P* 指标分析

当一系悬挂失效时，取 K_3、K_4 和 K_5、K_6 分别为原来 20 倍有值进行仿真。如图 2 为车辆各部位 P 指标变化图。从图中可以看出在标准段内，故障后对应转向架的垂向、点头、车体点头的 P 指标变化较大。

图 3 为弹簧 K_5，K_6 变为原来 20 倍有效值时后构架垂向 P 指标在 100 秒行程内的移动变化曲线。K_3，K_4 失效仿真结果与 K_5，K_6 类似。仿真时，偏态出现非常大的值且没有任何规律，就舍去偏态指标的移动变化曲线。从图 3 中可以看出方差、均值、均方根值 P 指标小于 0，峰态指标在 0 附近变化且无明显规律。方差 P 的波动比均值和均方根值的都要大，但波动规律一致。P 值的波动说明轨道不平顺的变化，因此可以运用自学习，自适应的算法把轨道自身条件与车辆本身联系起来进行故障诊断。P 指标的变化可以说明方差、均方根值及均值是表现故障前后的良好参数指标。对应一系悬挂失效故障监测部位详见表 2。

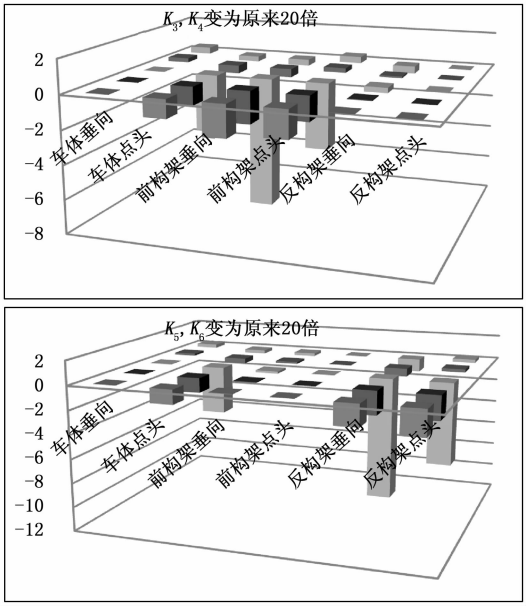

图 2　一系悬挂失效图

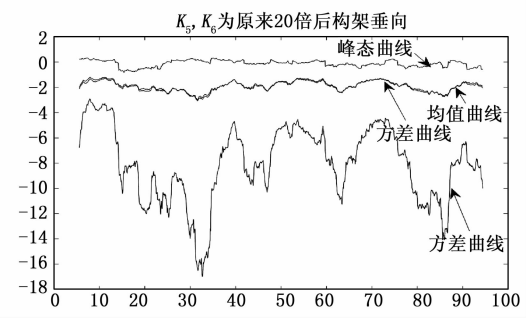

图 3　后构架失效故障图

当二系悬挂失效故障发生时，取 K_1，K_2 为原来有效值的 20 倍。如图 4 是车辆二系悬挂失效故障时，各部位 P 指标的变化图。从图中可以看出，车体垂向加速度 P 指标变化最大。其中车体垂向加速度 P 的值达到－33。而其他部位变化相对微小。

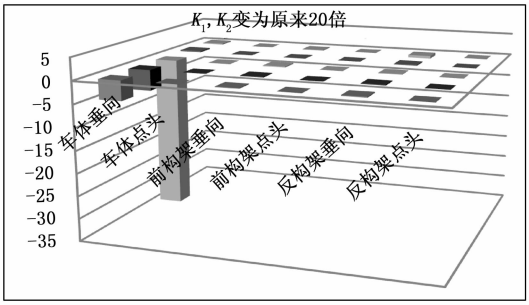

图 4　二系悬挂失效图

图 5 为 K_1，K_2 变为原来 20 倍时车体垂向 P 指标在 100 秒行程内的变化图。仿真实验中，车体垂向方差、均值、均方根 P 指标变化较大，其他部位 P 指标变化在－0.5～0.5 之间。

当一系悬挂发生问题时，如弹簧断裂、减振器失效时，会使垂向高频输入直接传递至构架，造成构架的剧烈振动，影响

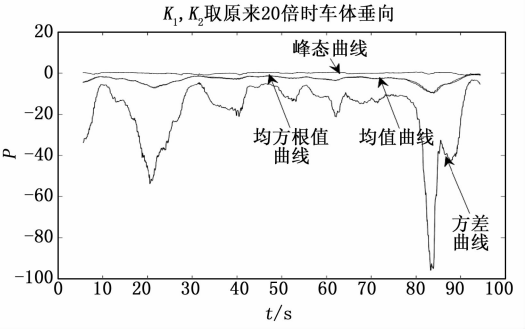

图 5　二系悬挂失效图

行车的安全。当二系悬挂故障时，车体的振动加速度加大，造成舒适度指标下降，影响行车安全。根据仿真实验当发生悬挂失效故障时的参数优选和监测部位见表 2。因为均值与均方根值几乎相同，所以均值与均方根值任选其一都可以。

表 2　悬挂失效总结表

故障类型	监测位置	参数选择	方差 P 范围	均值 P 范围
二系悬挂失效	车身垂向	方差，均方值或均值	[－95.6，－3.19]	[－9.77，0.64]
一系悬挂前构架失效	前构架垂向	方差，均方值或均值	[－17.4，－3.36]	[－2.83，－0.91]
	前够架点头	方差，均方值或均值	[－16.96，－2.89]	[－3，－1.25]
	车身点头	方差，均方值或均值	[－5.78，－0.99]	[－1.72，－0.23]
一系悬挂后构架失效	后构架垂向	方差，均方值或均值	[－17.70，－4.75]	[－3.14，－1.01]
	后构架点	方差，均方值或均值	[－16.97，－2.90]	[－3，－1.25]
	车身点头	方差，均方值或均值	[－1.69，－0.18]	[－1.7，－0.18]

4.2　车辆部件性能衰退故障 P 指标分析

4.2.1　弹性部件

如图 6 为 K_1 弹性系数变为原来的 90%～60%时，车辆各部位的 P 指标的变化情况。图 6 的横轴表示部件性能衰退的程度。图中可以看出车辆各部分的 P 都大于 0，P 指标变化程度小于悬挂失效故障的变化程度，符合实际情况。当 K_1 出现性能衰退故障时，车体垂向方差的 P 指标变化最大，其他部位 P 指标变化较小。从理论上分析当弹簧弹性刚度系数变小，阻尼系数不变时，给予同样的振动，物体的振动幅值会减小。K_2 在性能衰退故障状态时与 K_1 表现类似。

如图 7 是 K_1 取原来有效值的 80%时 P 在 100 秒行程内的动态变化图。经过仿真实验，K_2 与 K_1 的仿真结果类似。弹簧性能衰退程度的不同，反应为 P 指标整体的上下移动。而 P 指标的变化趋势则反应了车辆与轨道结合的情况。因此轨道不平顺决定了 P 指标的变化趋势，性能衰退的程度决定了 P 指标的大小。可以看出峰态的变化没有任何规律。方差，均值，均方根值 P 指标保持相同的变化趋势。P 指标在性能减退的变化明显小于故障失效的变化。具体指标选择和监测部位见表 3。

车辆模型的转向架有两个。分别独立分析转向架弹簧老化

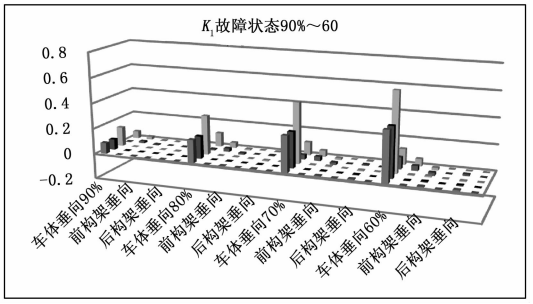

图 6 K_1 弹性系数变为原来的 90%～60%的情况

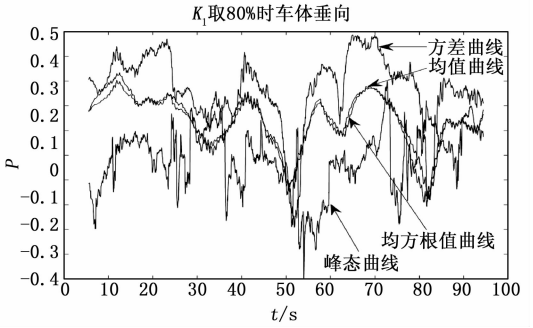

图 7 K_1 为原来 80%时 P 移动变化图

后的故障。经过仿真发现 K_5 与 K_3 类似，K_6 与 K_4 类似，所以只详细分析 K_3 和 K_4 性能衰退的故障。如图 8 是弹簧 K_3 和 K_4 取原来 90%～60%有效刚度值时 P 指标变化的过程。K_3 是一系弹簧前构架的前弹簧。轨道激励经过一系弹簧传递给转向架再通过转向架传递给二系弹簧和车体。当 K_3 出现故障时，车辆各部件的振动都会改变。从图中可以看出弹簧 K_3 的刚度系数改变时，前构架垂向、车体点头、后构架垂向这 3 个指标值变化明显。随着性能衰退程度加深，前构架的垂向、后构架垂向、车体点头 P 指标变化越来越大。K_5 与 K_6 在弹性部件性能衰退时有类似的表现。

如图 9 是 K_3 取原来 80%时 P 在 100 秒行程内的变化图。

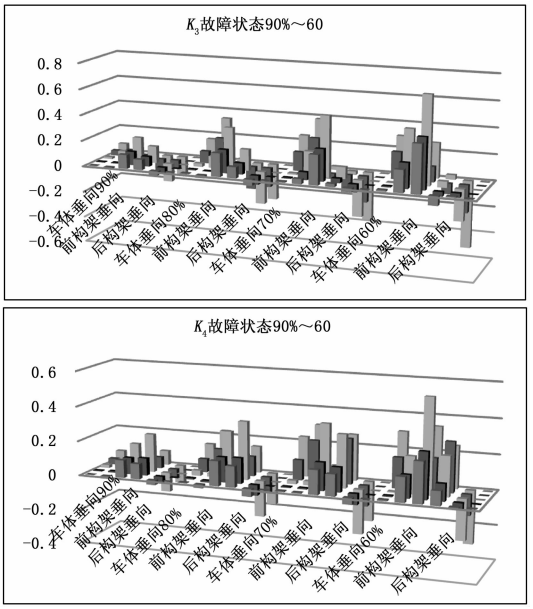

图 8 K_3、K_4 弹簧系数故障图

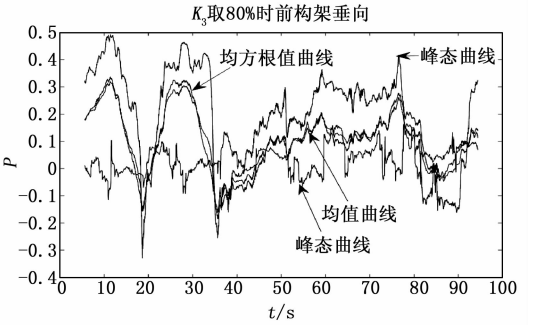

图 9 K_3 性能衰退图

经过仿真实验，K_3、K_4、K_5、K_6 的仿真结果类似。弹簧性能衰退程度不同，P 指标值整体的上下移动，而 P 指标的变化趋势并不改变。从图中可以看出方差，均值，均方根值 P 指标保持相同的变化趋势。方差 P 指标的绝对值大于均方根值、均值的 P 值绝对值。具体监测部位和选择见表 3。

当弹性元件出现性能衰退故障时，与弹性元件相对应的垂向和点头部位以及车体的点头可作为监测部位。实时故障诊断算法可选择对应部位的方差、均方根值或均值作为参数输入。具体结果见表 3。

表 3 弹性部件性能衰退总结表

故障类型	监测位置	参数选择	方差 P 范围	均值 P 范围
K_1 性能衰退故障	车体垂向	方差,均值	[−0.29,−0.49]	[−0.21,0.33]
K_2 性能衰退故障	车体垂向	方差,均值	[−0.29,−0.49]	[−0.21,0.33]
K_3 性能衰退故障	车身点头	方差,均值	[−0.46,0.40]	[−0.21,0.21]
	前构架垂向	方差,均值	[−0.33,0.49]	[−0.18,0.33]
	前构架点头	方差,均值	[−0.1,0.16]	[−0.11,0.19]
K_4 性能衰退故障	车身点头	方差,均值	[−0.49,0.37]	[−0.20,0.18]
	前构架垂向	方差,均值	[−0.32,0.45]	[−0.19,0.31]
	前构架点头	方差,均值	[0.03,0.43]	[0.03,0.22]
K_5 性能衰退故障	车身点头	方差,均值	[−0.22,0.46]	[−0.09,0.22]
	后构架垂向	方差,均值	[−0.34,0.48]	[−0.17,0.29]
	后构架点头	方差,均值	[−0.21,0.27]	[−0.11,0.19]
K_6 性能衰退故障	车身点头	方差,均值	[−0.33,0.43]	[−0.11,0.22]
	后构架垂向	方差,均值	[−0.50,0.43]	[−0.21,0.24]
	后构架点头	方差,均值	[0.07,0.43]	[−0.03,0.22]

4.2.2 阻尼部件

如图 10 为 C_1 阻尼系数取原来的 90%～60%时，车辆各部位指标 P 的变化情况，以及在 C_1 取有效值的 80%时，P 在 100 秒行程内的动态图。从图中可以看出当阻尼 C_1 出现性能衰退故障时，车体垂向和点头的 P 指标变化最大。与弹性刚度系数性能衰退相比，阻尼系数性能衰退时，车辆各部位 P 指标变化要小很多，且主要是负向变化。这说明故障后的加速度绝对值的统计值大于正常状态下的统计值。从理论上分析，弹簧作为储能元件，阻尼作为耗能元件。给予弹簧的振动是固定的，当阻尼系数变小时，同种弹簧刚度情况下物体振动的幅值会增大。C_1 性能衰退故障时也会对车体前构架垂向和后构架垂向有很小的影响。经过仿真，C_2 阻尼器性能衰退故障时 P 指标变化与 C_1 非常基本相同。因此不再叙述。

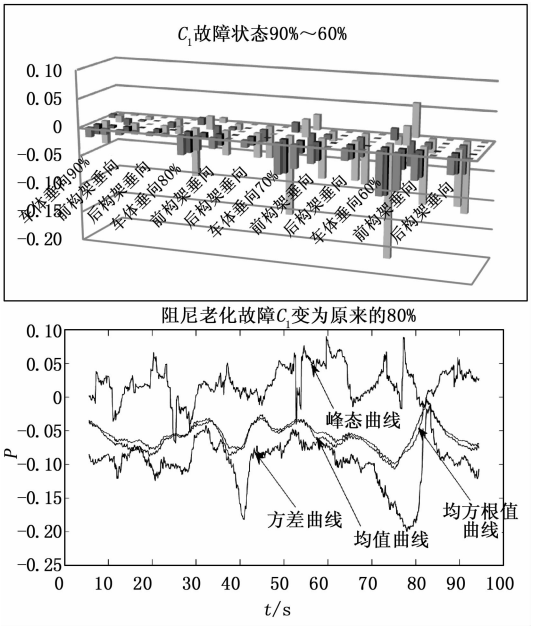

图 10　C_1 性能衰退图

一系悬挂有前后两个转向架，对转向架的阻尼分别仿真。如图 11 是阻尼器 C_3 和 C_4 在性能衰退故障下，车辆各部位 P 指标的变化图。当阻尼出现故障时，P 指标有正有负，主要的变化是负向变化。当 C_3 出现故障时，车体的前构架垂向和前构架点头的 P 指标变化最大，是反应故障程度的良好部位。当阻尼器 C_4 出现故障时，车辆前构架点头 P 指标变化最大。

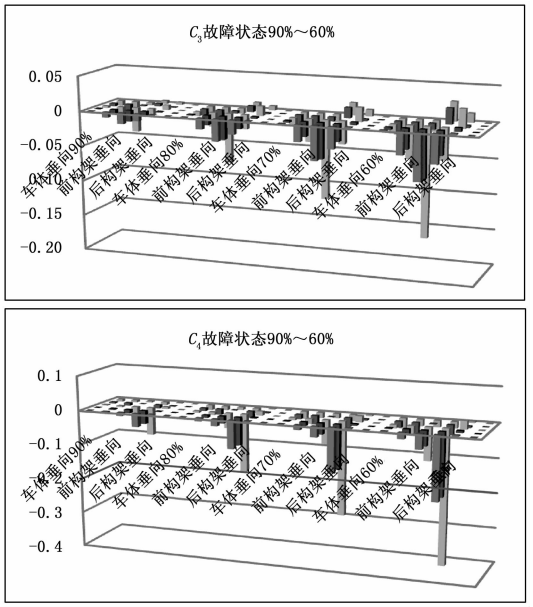

图 11　C_3、C_4 90%～60%故障状态图

如图 12 是 C_3 变为原来 80%时 P 在 100 秒行程内的移动变化图。从图中可以看出阻尼器性能减退故障与弹簧性能衰退故障的指标相对变化类似。都是方差、均方根值、均值 P 指标变化最大。不同的是变化趋势以及阻尼故障时要比弹簧故障时 P 的绝对值小很多。经过仿真实验 C_3 和 C_4 与 C_5 和 C_6 的 P 指标变化情况类似。

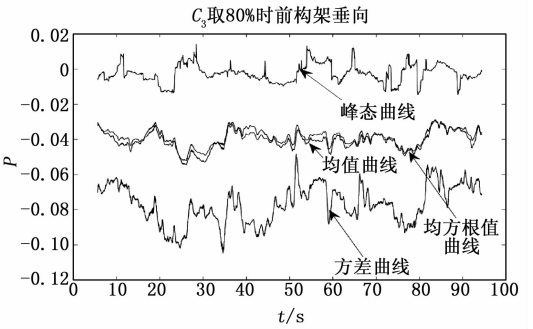

图 12　C_3 取原来 80%时动态图

从阻尼故障的 P 指标来看。当阻尼出现故障时，P 指标有正有负，而主要的变化是负向变化。阻尼器性能衰退故障下 P 指标比同样比例的弹性部件性能衰退故障的 P 指标绝对值小很多。因此相对刚度性能减退故障，阻尼性能减退故障对车辆振动影响较小，不易被发现。阻尼器故障时对应转向架的垂向和点头 P 指标会有很大的变化可作为监测部位，对应的方差、均方根值可作为故障诊断算法的参数输入。详细结果见表 4。

表 4　阻尼部件性能衰退表

故障类型	监测位置	参数选择	方差 P 范围	均值 P 范围
C_1 性能衰退故障	车身垂向	方差,均值	[−0.2,−0.01]	[−0.1,−0.02]
	车身点头	方差,均值	[−0.07,0.09]	[−0.04,0.023]
C_2 性能衰退故障	车身垂向	方差,均值	[−0.20,−0.01]	[−0.03,−0.11]
	车身点头	方差,均值	[−0.10,0.05]	[−0.03,0.03]
C_3 性能衰退故障	车身点头	方差,均值	[−0.07,0.09]	[−0.04,0.023]
	前构架垂向	方差,均值	[−0.05,−0.012]	[−0.028,0.004]
	前构架点头	方差,均值	[−0.052,0.006]	[−0.028,−0.001]
	后构架垂向	方差,均值	[−0.015,0.03]	[−0.005,0.013]
C_4 性能衰退故障	车身点头	方差,均值	[−0.062,0.0053]	[−0.022,0.0014]
	前构架垂向	方差,均值	[−0.082,−0.026]	[−0.04,−0.017]
	前构架点头	方差,均值	[−0.2,−0.061]	[−0.107,−0.04]
C_5 性能衰退故障	车身点头	方差,均值	[−0.083,0]	[−0.461,−0.0150]
	后构架垂向	方差,均值	[−0.105,−0.05]	[−0.06,−0.02]
	后构架点头	方差,均值	[−0.052,0.012]	[−0.030.001]
C_6 性能衰退故障	车身点头	方差,均值	[−0.069,0.009]	[−0.037,−0.008]
	后构架垂向	方差,均值	[−0.07,0.02]	[−0.047,−0.011]
	后构架点头	方差,均值	[−0.2,−0.063]	[−0.107,−0.04]

5　结束语

基于故障模型获取车辆各部位在故障前后的振动数据。利用 P 指标对车辆故障前后振动变化程度进行评判，得出对某一故障反应最明显的部位，并在故障对应最明显的部位中选择统计参数变化最大的参数实现故障诊断算法输入参数的优选。仿真实验结果表明方差、均值或均方根值在同样的故障状态下有更大的区别度可以作为故障诊断算法的输入参数。对二系悬挂失效故障可选取车身垂向作为监测部位，对一系悬挂失效故障可选取对应转向的垂向和点头以及车体的点头作为监测部位。对一系弹簧的性能衰退故障可选取车身垂向，对二系弹簧的性能衰退可选择对应转向架的垂向和点头以及车身的点头。对于一系悬挂的阻尼性能衰退故障可选取车身的垂向和点头，对于二系阻尼器性能衰退故障可选取对应转向架的垂向和点头

（下转第 35 页）