

文章编号:1671-1637(2015)04-0043-09

## 钢弹簧故障状态的车辆动力学性能

刘国云, 曾京

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:**考虑了车辆导向轮对一侧轴箱钢簧出现失效的四种工况:钢簧内外圈均断裂、外圈断裂、内圈断裂和钢簧“冻死”,建立了钢簧失效工况下的车辆系统动力学模型,分析了钢簧失效对车辆动力学性能的影响。仿真结果表明:钢簧失效后,轮对的平衡位置偏离轨道中心线,全断裂工况下偏离最大,约为3 mm;车辆的临界速度降低,全断裂工况下降低最大,约为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;失效弹簧所在轮对的轮载差变化较大,全断裂工况下轮载差最大,约为50 kN;转向架断裂弹簧处及其斜对角轴箱悬挂垂向力将减小,另一对角处的轴箱悬挂垂向力将增大,从而使转向架承受较大的扭曲载荷;钢簧失效很容易使脱轨系数和轮重减载率等安全性指标超过限定值,增加了车辆运行安全的隐患,在直线上 $200 \sim 300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度范围内和曲线(半径为7 000 m)上 $100 \sim 300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度范围内,全断裂工况下的减载率都超过0.8;钢簧失效对车辆横向平稳性影响不大,但钢簧“冻死”会使垂向平稳性变差,相对于正常工况,在 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时增加约0.1。

**关键词:**高速列车;钢弹簧故障;动力学模型;动力学性能

**中图分类号:**U270.11      **文献标志码:**A

## Vehicle dynamic performance under steel spring failure conditions

LIU Guo-yun, ZENG Jing

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** Four failure cases of axlebox steel spring for one side of leading wheelset were considered, namely: the inner and outer rings of steel spring both fractured; just the outer ring fractured; just the inner ring fractured; the whole spring frozen. Then vehicle dynamics model considering the failure cases was set up, and the influence of spring failure on vehicle dynamics performance was analyzed. Simulation result indicates that when the spring is in failure conditions, the equilibrium positions of wheelsets deviate from track center line, the critical speeds of vehicle reduce, the deviation and decrease are largest when the inner and outer rings of steel spring both fracture, and their largest values are about 3 mm and  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  respectively. The wheelset with failure spring has larger wheel unloading, the value is largest in the both fractured case and is about 50 kN. For the bogie, the vertical suspension forces decrease at the positions of failure spring and its diagonal axle box, while the vertical suspension forces increase at the positions of another diagonal axle boxes, which results in large torsion force acting on the bogie. Spring fracture more easily brings the safety indexes (such as derailment coefficient and wheel unloading rate) to exceed their limit values, which greatly increases the safety risk of vehicle operation. When the ranges of speed are  $200 \sim 300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  on straight track and  $100 \sim 300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  on

收稿日期:2015-03-06

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAG10B01);国家863计划项目(2012AA112001);国家自然科学基金项目(61134002)

作者简介:刘国云(1989-),男,湖南邵阳人,西南交通大学工学博士研究生,从事车辆系统动力学研究。

导师简介:曾京(1963-),男,湖南涟源人,西南交通大学教授,工学博士。

curved track with radius 7 000 m, wheel unloading rates in both fractured case are greater than 0.8. The spring failure has little influence on the lateral riding performance of vehicle, but spring frozen failure will worsen the vertical riding performance of vehicle, and it increases by 0.1 when vehicle speed is  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  compared with normal vehicle. 3 tabs, 19 figs, 23 refs.

**Key words:** high-speed train; steel spring failure; dynamics model; dynamics performance

**Author resumes:** LIU Guo-yun(1989-), male, doctoral student, +86-28-86466021, lgymale@163.com; ZENG Jing(1963-), male, professor, PhD, +86-28-86466021, zeng@swjtu.edu.cn.

## 0 引 言

随着列车运行速度的提高与运输市场的要求,铁路运输安全性问题已成为令人瞩目的重大课题。从铁路安全事故<sup>[1-4]</sup>可以清楚地看到,它不仅会影响到铁路的正常运营,而且关系到旅客的生命和财产安全。由于转向架结构的复杂性、工作条件的恶劣性及其他不确定因素的影响,列车在运行时难免出现故障<sup>[5]</sup>。针对车辆故障,李忠继等研究了扁疤冲击引起的轴箱振动的 HHT 谱特征,根据轴箱加速度的 HHT 谱特征可以识别扁疤车轮<sup>[6]</sup>;朴明伟等定性分析并验证了抗蛇行减振器失效对转向架稳定性的影响程度,进而确定了构架振动报警识别的可行性<sup>[7]</sup>;秦娜等针对故障发生时高速列车转向架振动信号的特点,提出了一种用于高速列车转向架故障状态识别的特征提取方法<sup>[8]</sup>。

目前,车辆一系悬挂大多采用的是双卷螺旋钢弹簧,作为连接轮对和构架的弹性元件,起着缓和轮轨之间的相互动态作用,隔离轮轨激扰向构架的传递,并使车辆质量与载荷比较均衡地传递给各轮轴。但是在长时间的高速重载运行条件下,由于线路的不平顺与其他激扰,运行过程中弹簧的受力复杂,因此,弹簧出现断裂故障的情况时有发生<sup>[9-13]</sup>。弹簧断裂后,该处的刚度将发生变化,车体、构架等将发生倾斜,造成整个车辆系统力的分配发生变化,影响车辆运行平稳性和舒适性,并给车辆安全运行带来隐患。凌坤坤等运用力学原理分析了不同空簧支撑方式下一系发生故障后,前后转向架和车体静平衡状态的侧滚角<sup>[14]</sup>;魏瑞轩等以真实的车辆悬挂系统为主体,分析了减振弹簧失效前后的广义频率响应函数的变化<sup>[15]</sup>;王朝晖等利用包络法对比分析了气阀弹簧失效前后的包络谱<sup>[16]</sup>;Kumbhalkar 等针对印度 WAG-9 型电力机车中间轴一系钢弹簧内圈频繁发生断裂,通过有限元法分析了弹簧内外圈在直线和曲线轨道上的受力情况<sup>[17]</sup>;Priyanka 等采用

ADAMS/Rail 对货运机车的双卷弹簧的失效进行了动态分析<sup>[18]</sup>;Dakhore 等通过有限元法分析了机车钢弹簧过早失效的原因<sup>[19]</sup>;Kumar 等采用 Pro/E 软件对机车一系钢弹簧进行了静力分析<sup>[20]</sup>。这些研究大多是从静力学、有限元与金属材料方面分析了弹簧断裂后的相关问题,而很少分析弹簧故障状态下车辆的动力学性能。当列车在一系钢弹簧故障状态下运行时,车辆的动力学性能会发生变化,总结故障对应的动力学特征,就可在转向架相关位置处设置加速度传感器,对运行中的车辆进行实时监测,及时发现可能出现的故障与排除安全隐患,确保列车的安全运行具有重要意义。本文通过建立一系钢弹簧失效的车辆动力学模型,分析了钢弹簧失效对车辆动力学性能的影响,为列车运行状态的监测提供方法和依据。

## 1 一系钢簧故障的影响

虽然车辆在实际线路上运行时,断裂了的弹簧可能还会产生一定的作用,但与进行完整全拆后的试验有一定差异,完整全拆后的工况会比实际线路上运行时出现弹簧断裂更恶劣,因此,为了更好地研究一系钢弹簧故障,针对某型动车组,在滚振试验台上做了原车和第一位轮对左侧钢弹簧全拆(图 1)方案的试验,试验结果见图 2~4。从图 2 可以看出,2 种方案下的横向和垂向平稳性指标相差不大;从图 3 可以看



图 1 钢弹簧全拆方案

Fig. 1 Demolition scheme of steel spring

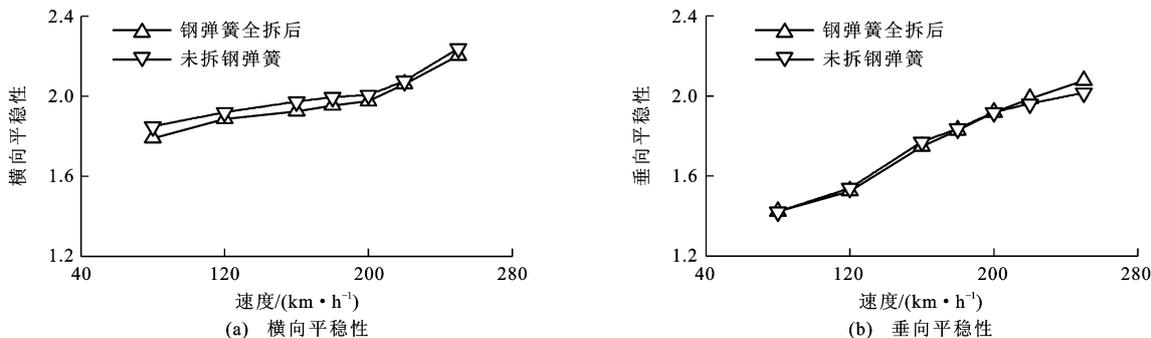


图 2 车辆平稳性对比

Fig. 2 Vehicle stationarity comparison

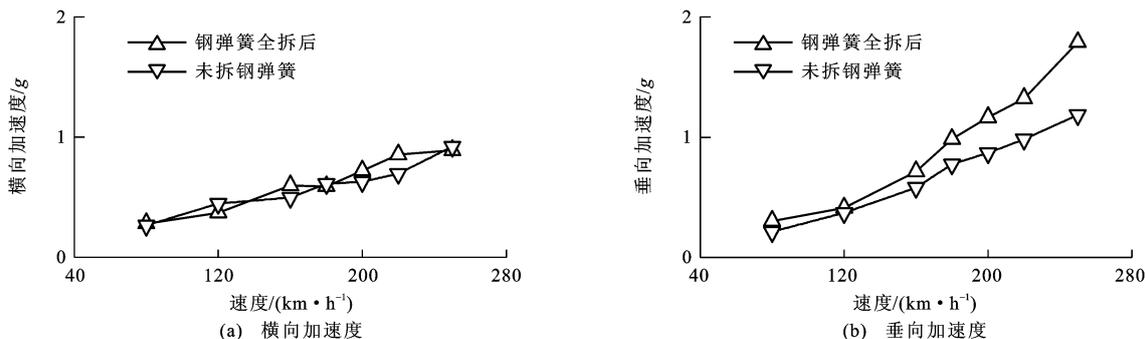


图 3 构架加速度对比

Fig. 3 Acceleration comparison of bogie frame

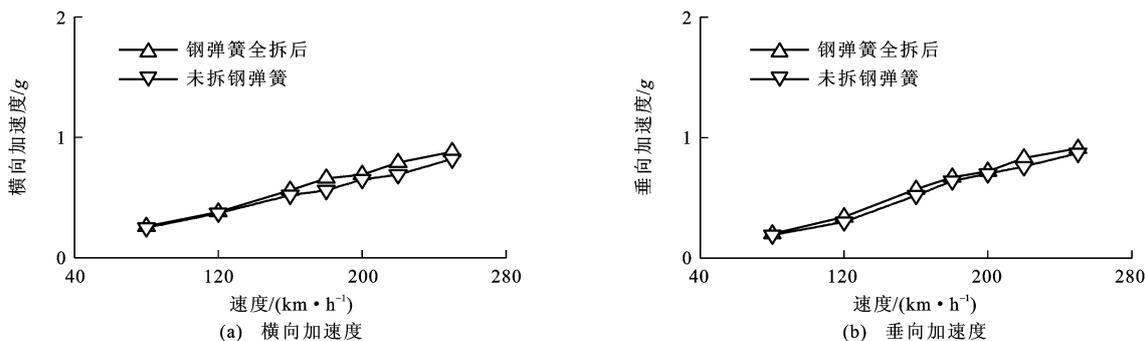


图 4 车体加速度对比

Fig. 4 Acceleration comparison of carbody

出,钢弹簧全拆后,对应位置处的构架端部垂向加速度幅值变大,而横向加速度基本无差异;从图 4 可以看出,2 种方案下的车体加速度相差不大。可见,钢弹簧全拆故障对车辆的平稳性影响不大,但会使构架垂向振动加速度幅值增大。

在冬季寒冷地区,尤其是冰雪天气过后,动车组在运行过程中会发生转向架冰雪附着和车底结冰现象<sup>[21-23]</sup>,会出现一系钢簧结冰“冻死”。针对某型动车组的长期跟踪试验,在同一铰轮周期内,选取一动车在某月不同两天内(分别用第 1 天和第 2 天表示)以相同运行方向通过某一区段时的车体和构架垂向振动加速度作为分析对象,运行速度为 200 km · h<sup>-1</sup>。

两天的天气状况见表 1,车体和构架的垂向加速度的最大值分别见图 5、6。从表 1 可以看出,相比第 1 天,第 2 天气温较低,动车组转向架会冻得更厉害。从图 5、6 可以看出,与第 1 天相比,第 2 天的构架与车体的垂向振动加速度幅值变大,因此,在极冷的冰雪天气下,一系钢簧结冰“冻死”会使车体与构架的振动加速度幅值增大。

表 1 天气状况

Tab. 1 Weather conditions

第 1 天	第 2 天
-9 °C ~ -14 °C	-20 °C ~ -25 °C
晴	多云/阵雪

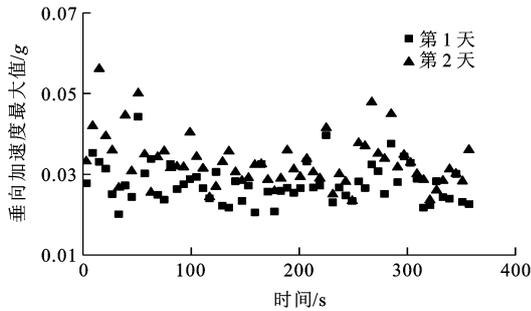


图5 基于40 Hz低通滤波的车体垂向振动加速度对比  
Fig. 5 Comparison of carbody vertical accelerations based on 40 Hz low-pass filter

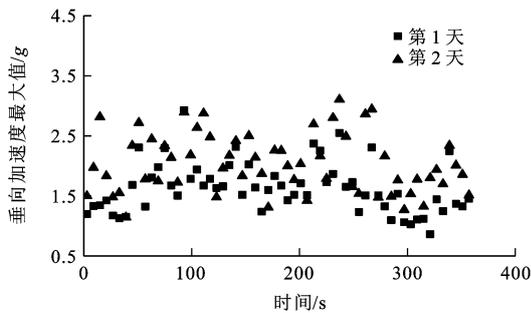


图6 基于80 Hz低通滤波的构架垂向振动加速度对比  
Fig. 6 Comparison of bogie frame vertical accelerations based on 80 Hz low-pass filter

## 2 动力学模型建立

一系悬挂见图7,包括钢弹簧内外圈、橡胶垫和一系上、下止挡销等,其中一系上、下止挡销的间隙 $\delta$ 约为40 mm。假设只有一位轮对左轮处的钢弹簧发生故障,其他位置的钢弹簧都正常,考虑的一系钢弹簧故障包括:工况1,一系钢弹簧完全断裂,构架与轴箱的一系止挡销互相接触,即轴箱通过止挡销支撑着构架上方的重力;工况2,一系钢弹簧外圈断裂,内圈正常;工况3,一系钢弹簧内圈断裂,外圈正常;工况4,一系钢弹簧因结冰而卡死(“冻死”)。

应用SIMPACK仿真软件建立了高速客车原车和一系钢弹簧故障状态的整车动力学模型,车辆系统由车体(1个)、构架(2个)、轴箱(8个)和轮对(4个)组成。轴箱只有1个绕轮对旋转的自由度,车体和构架分别有6个自由度,轮对有4个独立自由度(纵向、横向、点头与摇头),合计42个自由度。车辆采用转臂式定位,一系悬挂由钢弹簧和垂向减振器组成,二系悬挂包括横向减振器、抗蛇行减振器、横向止挡、空气弹簧、牵引拉杆和抗侧滚扭杆等,空簧采用四点支撑方式。

对于一系止挡销的接触,在运行过程中可能有黏着、滑移和脱离3种状态,因此,采用了非线性的

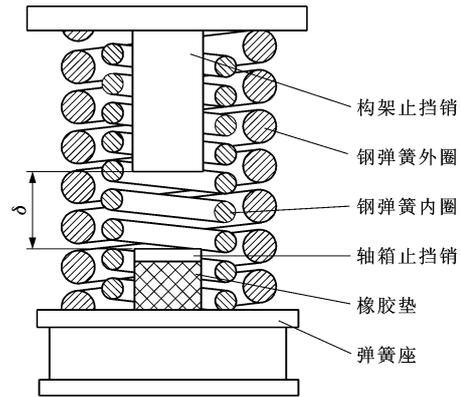


图7 一系悬挂

Fig. 7 Primary suspension

黏滑接触模型来模拟这种状态,黏滑接触模型见图8。在图8中: $P_1$ 、 $P_2$ 和 $P_3$ 分别为构架止挡销、轴箱止挡销和弹簧座; $\mu$ 为一系止挡销之间的摩擦因数; $K_1$ 为橡胶垫的垂向刚度; $C_1$ 为橡胶垫的垂向阻尼; $K_2$ 为橡胶垫的横向刚度; $C_2$ 为橡胶垫的横向阻尼。一系悬挂的部分仿真参数见表2。

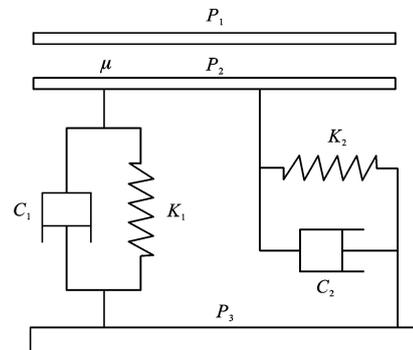


图8 黏滑接触模型

Fig. 8 Stick-slip contact model

表2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

刚度/(MN·m <sup>-1</sup> )	垂向刚度	横向(纵向)刚度
弹簧外圈	0.784	0.653
弹簧内圈	0.392	0.327
橡胶垫	2.000	0.800

对于工况1,构架与轴箱的一系止挡销互相接触,一系的刚度由橡胶垫提供。

对于工况2,若一系止挡销未发生接触,一系的刚度由弹簧内圈提供;若一系止挡销发生接触,一系的刚度由弹簧内圈和橡胶垫提供。

对于工况3,若一系止挡销未发生接触,一系的刚度由弹簧外圈提供;若一系止挡销发生接触,一系的刚度由弹簧外圈和橡胶垫提供。

对于工况4,一系钢弹簧“冻死”后,钢弹簧的刚

度大大增加,并忽略其给钢弹簧所带来的高度变化。

### 3 仿真结果分析

一系钢弹簧发生故障后,车辆系统的静平衡位置将发生变化。在仿真时,假设只有一位轮对左轮处的钢弹簧发生故障,其他位置的钢弹簧都正常,且轨道谱采用武广高速线路谱。

#### 3.1 一系悬挂作用力

图 9~12 分别为车辆以 80~300 km·h<sup>-1</sup> 速度在直线轨道上运行时,各工况下一系悬挂的垂向力和横向力最大值。由图 9、10 可以看出:当一位轮对左侧的钢弹簧发生断裂后,车辆各一系悬挂作用力

都将发生变化,其中一位轮对的左右一系悬挂垂向力相差最大,从而导致一位轮对的轮载差最大;一位轮对右侧和二位轮对左侧的一系悬挂垂向力增大,而一位轮对左侧和二位轮对右侧的一系悬挂垂向力减小。可见,钢弹簧出现断裂故障后,各轮对的轮载差将发生变化,且弹簧断裂处所对应的轮对的轮载差变化最大;同时,在转向架中,位于断裂弹簧处的同一侧和同一轮对的 2 个钢弹簧的垂向力将增大。如果在运行过程中,一系钢弹簧出现断裂未及时发现并更换,将容易导致位于断裂弹簧处的同一侧和同一轮对的 2 个钢弹簧发生断裂,继而使整个转向架的钢弹簧发生断裂。

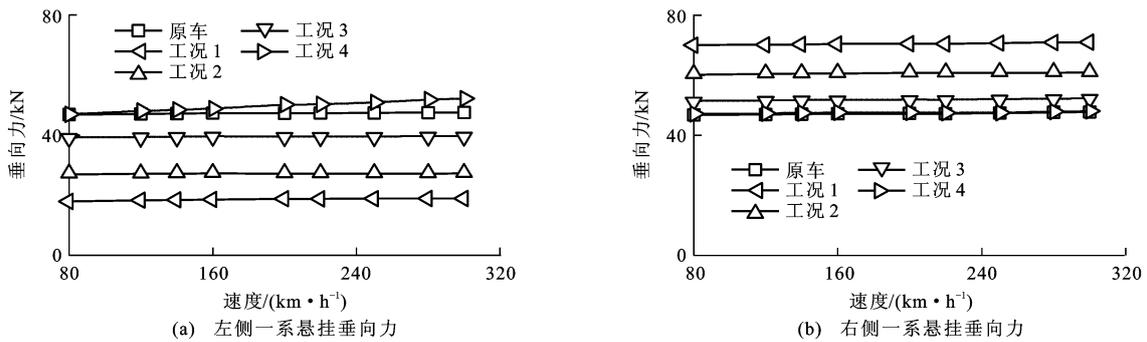


图 9 一位轮对两侧一系悬挂垂向力

Fig. 9 Primary suspension vertical forces on both sides of leading wheelset

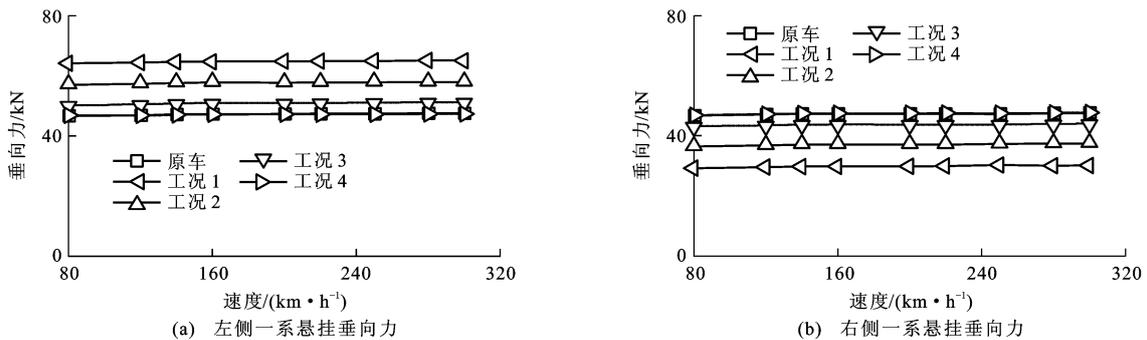


图 10 二位轮对两侧一系悬挂垂向力

Fig. 10 Primary suspension vertical forces on both sides of trailing wheelset

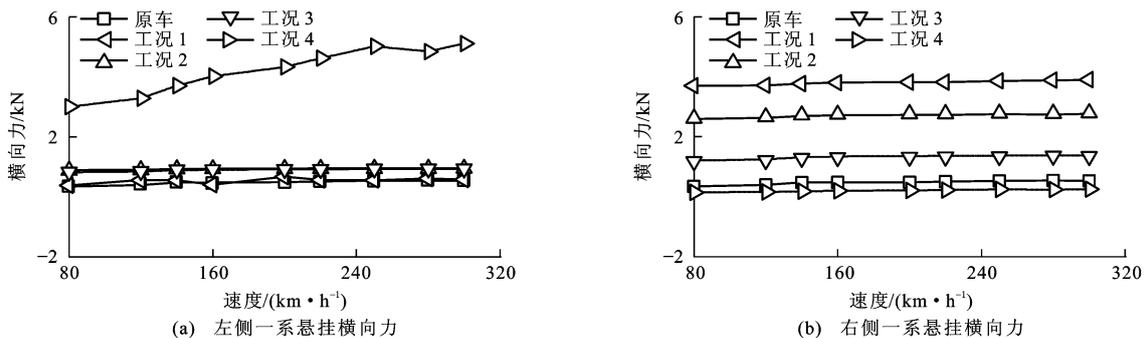


图 11 一位轮对两侧一系悬挂横向力

Fig. 11 Primary suspension lateral forces on both sides of leading wheelset

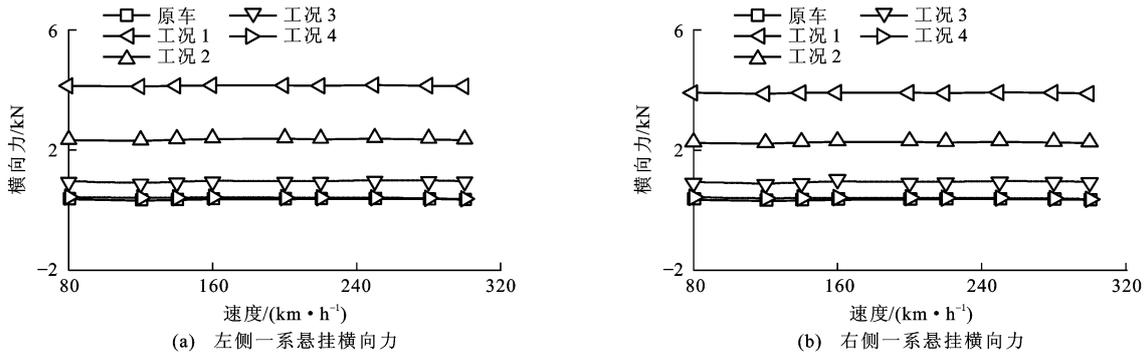


图 12 二位轮对两侧一系悬挂横向力

Fig. 12 Primary suspension lateral forces on both sides of trailing wheelset

从图 11、12 可以看出,若一系钢弹簧出现“冻死”,该处的钢弹簧所受的横向力将增大,而其他位置处的钢弹簧所受的横向力与原车相差不大;若一系钢弹簧出现断裂故障,一系钢弹簧的横向力都将增大,且工况 1 下的钢弹簧所受的横向力最大。

### 3.2 蛇行运动临界速度

图 13、14 为轮对横向位移计算结果,临界速度

比较结果见表 3,可以看出,车辆一系弹簧出现故障后,临界速度会降低,工况 1(全断裂)下的临界速度最低。通过计算还发现,当一系弹簧出现故障后,整车的 4 个轮对的平衡位置都偏离轨道中心线,工况 1(全断裂)偏离最大,如图 14 所示达到失稳临界状态时约为 3 mm。可见,一系弹簧故障使轮对的平衡位置偏离轨道中心线,导致左右轮轨接触状态出现不对称造成车辆临界速度降低。

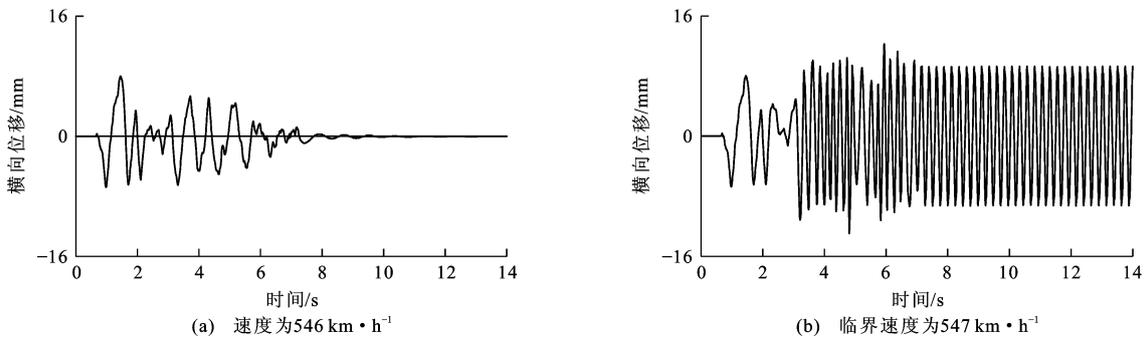


图 13 原车轮对横向位移

Fig. 13 Lateral displacements of wheelset for original vehicle

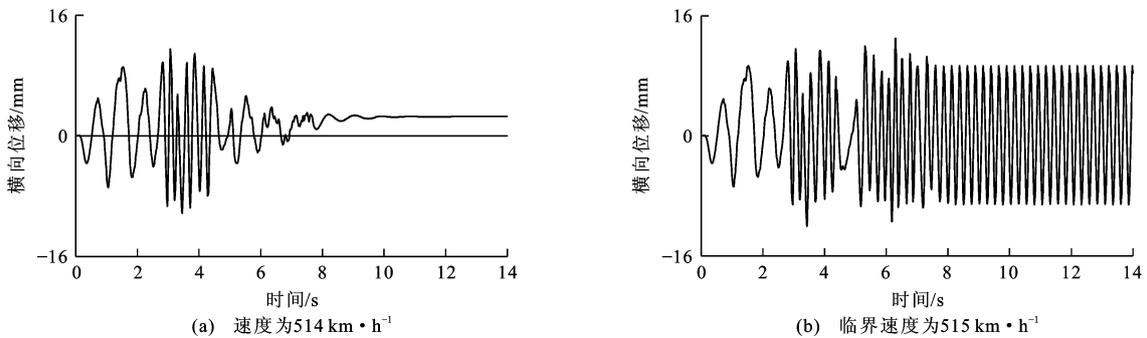


图 14 工况 1 轮对横向位移

Fig. 14 Lateral displacements of wheelset in case 1

### 3.3 运行平稳性分析

图 15~17 为不同工况下车辆在直线轨道上运行时的振动响应,可以看出,工况 4 的构架和车体的横向与垂向振动加速度显著增加,其他故障工况对

车体与构架的振动加速度幅值影响不大。从图 17 可以看出,各故障工况对车体横向平稳性影响不大;对于车体垂向平稳性,工况 4 会使平稳性变差,其他工况与原车相差不大。

表 3 临界速度比较

Tab. 3 Comparison of critical speeds  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

原车	547
工况 1	515
工况 2	523
工况 3	534
工况 4	533

### 3.4 运行安全性分析

在钢弹簧故障状态下,分别计算了车辆在直线和曲线上的运行安全性能,其中的曲线轨道半径为 7 000 m,超高为 150 mm,缓和曲线长度为 400 m,计算结果分别见图 18、19。

从图 18 可以看出,当车辆一系弹簧出现故障后,直线轨道上车辆的脱轨系数和减载率比原车偏大,特别是工况 1,在 200~300  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,减载率

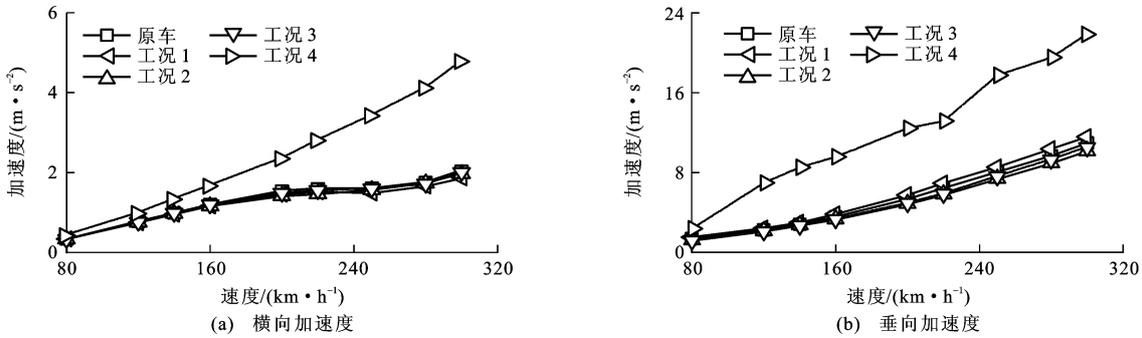


图 15 各工况下构架振动加速度比较

Fig. 15 Comparison of bogie frame vibration accelerations in different cases

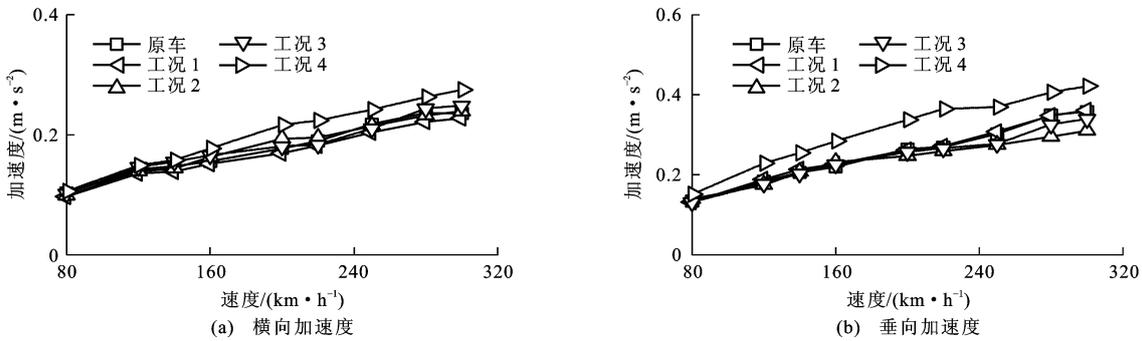


图 16 各工况下车体振动加速度比较

Fig. 16 Comparison of carbody vibration accelerations in different cases

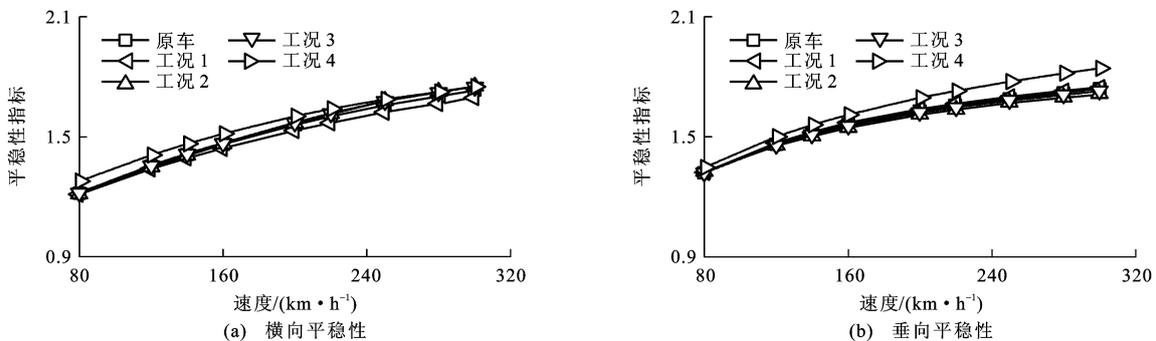


图 17 各工况下平稳性指标比较

Fig. 17 Comparison of riding indexes in different cases

超过 0.8 的限定值,这增加了车辆运行安全的隐患,且工况 1 的减载率指标最大。

从图 19 可以看出,在 100~220  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度范围内,工况 1 的脱轨系数远大于其他 4 种情况,这是由于在工况 1 下,一位轮对左轮处的一系钢弹簧出

现断裂故障,导致一位左轮的轮轨垂向力只有 20 kN 左右,通过曲线时,其轮轨垂向力还要减小(例如,以 100  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  速度通过时,轮轨垂向力只有 9 kN),因此,脱轨系数会变得很大;在 100~300  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度范围内,工况 1 的减载率最大,超过 0.8。

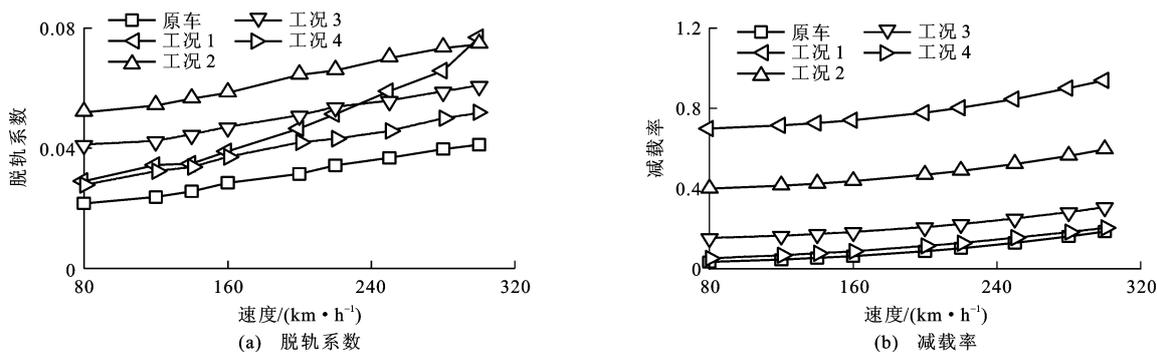


图 18 直线运行安全性指标

Fig. 18 Safety indexes on straight track

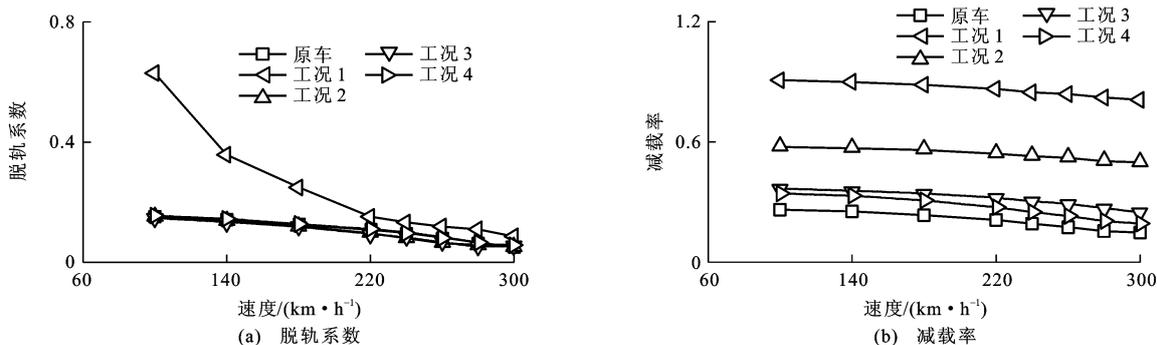


图 19 曲线通过安全性指标

Fig. 19 Safety indexes on curved track

## 4 结 语

(1) 弹簧出现断裂故障后,各轮对的轮载差将发生变化,且弹簧断裂处所对应的轮对的轮载差变化最大;同时,在转向架中,位于断裂弹簧处的同一侧和同一轮对的 2 个钢弹簧的垂向力将增大,而断裂弹簧及其斜对角处的一系悬挂垂向力将减小。

(2) 若一系钢弹簧出现“冻死”,该处的钢弹簧所受的横向力将增大,而其他位置处的钢弹簧所受的横向力与原车相差不大;若一系钢弹簧出现断裂故障,一系钢弹簧的横向力都将增大,且工况 1(全断裂)下的钢弹簧所受的横向力最大。

(3) 车辆一系钢弹簧出现故障后,车辆的临界速度会降低,且整车 4 个轮对的横向位移平衡位置都偏离轨道中心线,其中工况 1(全断裂)时偏离的距离最大。

(4) 一系钢弹簧失效后,车辆的脱轨系数和减载率变大,大大增加了车辆运行安全隐患。

(5) 一系钢弹簧失效对横向平稳性影响不大,工况 4(弹簧“冻死”)会使垂向平稳性变差,而其他失效工况与原车相差不大。

(6) 与原车相比,一系弹簧出现“冻死”故障后,

车体与构架的振动加速度会变大,其他故障工况对车体与构架的振动加速度幅值影响不大。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] AKKAŞ M, AY D, METİN AKSU N, et al. 10-year evaluation of train accidents [J]. Turkish Journal of Trauma and Emergency Surgery, 2011, 17(5): 440-444.
- [2] MCCOLLISTER G M, PFLAUM C C. A model to predict the probability of highway rail crossing accidents[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2007, 221(3): 321-329.
- [3] LIU Xiang, SAAT M R, BARKAN C P L. Analysis of causes of major train derailment and their effect on accident rates[J]. Transportation Research Record, 2012(2289): 154-163.
- [4] 孙永福.“7·23”旅客列车事故的重要启示[J]. 中国工程科学, 2012, 14(12): 4-9.  
SUN Yong-fu. The important revelation of “7·23” passenger train accident[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(12): 4-9. (in Chinese)
- [5] 秦艳敏. 列车安全监测系统关键技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
QIN Yan-min. Research on key technology of train running safety monitoring system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [6] 李忠继, 魏 来, 戴焕云, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的车轮

- 扁疤识别方法[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(4): 33-41.  
LI Zhong-ji, WEI Lai, DAI Huan-yun, et al. Identification method of wheel flat based on Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(4): 33-41. (in Chinese)
- [7] 朴明伟, 孔维刚, 刘通, 等. 基于抗蛇行减振器失效工况的高速转向架稳定性分析[J]. 大连交通大学学报, 2011, 32(4): 1-5.  
PIAO Ming-wei, KONG Wei-gang, LIU Tong, et al. Stability analyses of high-speed bogie based on anti-hunting damper failures[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2011, 32(4): 1-5. (in Chinese)
- [8] 秦娜, 王开云, 金炜东, 等. 高速列车转向架故障的经验模态熵特征分析[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1): 57-64, 74.  
QIN Na, WANG Kai-yun, JIN Wei-dong, et al. Fault feature analysis of high-speed train bogie based on empirical mode decomposition entropy[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 57-64, 74. (in Chinese)
- [9] 徐石柱, 梁益龙. 地铁弹簧断裂失效分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(6): 224-225, 212.  
XU Shi-gui, LIANG Yi-long. Cracking failure analysis of subway spring[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(6): 224-225, 212. (in Chinese)
- [10] 刘海兰, 陈智江, 王华炜, 等. 机车弹簧断裂原因分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2010, 33(5): 58, 60.  
LIU Hai-lan, CHEN Zhi-jiang, WANG Hua-wei, et al. Fracture reason analysis of locomotive spring[J]. Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles, 2010, 33(5): 58, 60. (in Chinese)
- [11] 赵勇. 转K2转向架弹簧失效分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
ZHAO Yong. Failure analysis of K2 type bogie springs[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [12] DAS S K, MUKHOPADHYAY N K, RAVI KUMAR B, et al. Failure analysis of a passenger car coil spring [J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(1): 158-163.
- [13] 严琰, 赵飞, 任永海, 等. 高速铁路机车用弹簧失效分析[J]. 热加工工艺, 2012, 41(22): 232-234.  
YAN Yan, ZHAO Fei, REN Yong-hai, et al. Failure analysis on spring used in high-speed railway locomotive[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(22): 232-234. (in Chinese)
- [14] 凌坤坤, 李向聪. 悬挂系统故障情况下的车体静平衡分析[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2011, 29(6): 814-816, 823.  
LING Kun-kun, LI Xiang-cong. The static equilibrium analysis of car body under the failure of suspension system[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2011, 29(6): 814-816, 823. (in Chinese)
- [15] 魏瑞轩, 韩崇昭, 王永昌, 等. 减震弹簧失效诊断系统的设计[J]. 弹箭与制导学报, 2003, 23(4): 238-240.  
WEI Rui-xuan, HAN Chong-zhao, WANG Yong-chang, et al. Design of fault diagnosis system for damping spring[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2003, 23(4): 238-240. (in Chinese)
- [16] 王朝晖, 张来斌, 郭存杰, 等. 包络解调法在气阀弹簧失效故障诊断中的应用[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(2): 86-88.  
WANG Zhao-hui, ZHANG Lai-bin, GUO Cun-jie, et al. Application of envelope demodulation method to fault diagnosis of spring invalidation[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2005, 29(2): 86-88. (in Chinese)
- [17] KUMBHALKAR M A, YENARKAR Y L, GROVER A K. Failure analysis of inner suspension spring of railway engine: a case study [C]// AMAE. International Conferences on Advances in Robotic, Mechanical Engineering and Design 2011. Los Angeles: AMAE, 2011: 12-16.
- [18] PRIYANKA G, SHANKAPAL S R, MONISH G M H. Failure investigation of a freight locomotive suspension spring and redesign of the spring for durability and ride index[J]. The Technical Journal of MSRSAS, 2012, 11(2): 23-29.
- [19] DAKHORE M, BISSA B. Failure of locomotive suspension coil spring using finite element analysis [J]. International Monthly Refereed Journal of Research in Management and Technology, 2013, 2: 96-104.
- [20] KUMAR K P, KUMAR S P, MAHESH G G. Static analysis of a primary suspension spring used in locomotive[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2013, 2(4): 430-436.
- [21] 朴明伟, 张山, 刘维玉, 等. 高寒地区高铁运用安全冗余及其转向架优配解决方案[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(6): 28-36.  
PIAO Ming-wei, ZHANG Shan, LIU Wei-yu, et al. Safety redundancy of high speed rail operation in alpine region and optimal bogie configuration solution [J]. Computer Aided Engineering, 2013, 22(6): 28-36. (in Chinese)
- [22] 郑彦涛. 基于层次分析法的CRH380B动车组维修可靠性分析与研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.  
ZHENG Yan-tao. Hierarchy analysis based maintenance reliability for CRH380B series electric motor units[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [23] BETTEZ M. Winter technologies for high speed rail[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2011.