

Research on the Effect of Tread Wear on Vertical Load Characteristics of High-Speed Train Bogie Frame

Xiqiao Li, Zhiming Liu, Fuquan Zhang, Zunsong Ren, Weigang Hu*

School of Mechanical, Electronic and Control Engineering Beijing Jiaotong University, Beijing
Email: *12116322@bjtu.edu.cn, lixiqiao@126.com

Received: Aug. 18th, 2017; accepted: Sep. 1st, 2017; published: Sep. 7th, 2017

Abstract

A vertical load test method for high-speed trains was presented in this paper, the loads, under the new state and worn state of the profile, were achieved through experiments. The test data of typical working conditions of high speed trains through straight lines, turnouts, passing in and out stations were analyzed both in the time domain and in the frequency domain in order to evaluate the effect of profile wear on load characteristics of bogie frame and the load spectrum of vertical load was established.

Keywords

High-Speed Train, Tread Wear, Bogie Frame, Load Characteristics

踏面磨耗对高速列车转向架构架垂向载荷特性影响研究

李习桥, 刘志明, 张福全, 任尊松, 胡伟钢*

北京交通大学, 机械与电子控制工程学院, 北京
Email: *12116322@bjtu.edu.cn, lixiqiao@126.com

收稿日期: 2017年8月18日; 录用日期: 2017年9月1日; 发布日期: 2017年9月7日

摘要

本文提出了一种高速列车垂向载荷测试方法, 通过运行线路测试, 获得了踏面磨耗前后的垂向载荷时间*通讯作者。

历程。从时域和频域分别分析了高速列车通过直线、道岔、进出车站等典型运用工况下的垂向载荷特性,进而编制了高速列车转向架构架垂向谱。

关键词

高速列车, 踏面磨耗, 构架, 载荷特性

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高速列车运营一段时间后, 钢轨和踏面都会有不同程度的磨耗, 轮轨接触关系将发生改变, 作用在构架上的载荷其特性在踏面磨耗前后也将有所改变[1] [2]。对转向架构架在使用状态下和运用规定时间后的载荷特性进行研究, 能全面地掌握构架载荷变化, 更准确地评价构架结构强度和运用安全性。同时, 载荷特性研究也可以为制定合理的镟轮周期提供依据。

2. 垂向载荷测试方法

转向架构架基本载荷之一是轴箱弹簧承受的垂向载荷[3] [4] [5], 准确全面获取垂向载荷是研究构架载荷特性, 评价构架结构强度和疲劳可靠性的基础工作。

2.1. 转向架构架垂向载荷测试方案

本文采用直接测试轴箱弹簧垂向载荷的方式, 将轴箱弹簧标定为力传感器(图 1)。力传感器能够连续记录任意时刻轴箱弹簧载荷变化引起的电压信号输出, 该方法实现了对垂向载荷的连续和直接测试。为确保测试结果的准确性和可靠性, 测力用轴箱弹簧采用冗余设计, 每一组弹簧上有两个测试通道, 通过选择测点, 使得同一组弹簧上的两个测试通道的测试结果一致。为了全面获取高速列车转向架构架垂向载荷时间历程, 在一个动力转向架的 4 个轴箱弹簧安装了 8 个测力传感器, 测试转向架轴位及编号如图 2 所示。

2.2. 垂向载荷线路测试

2016 年 7 月, 北京交通大学结构强度检测实验室测试系统采用安捷伦 E1401B 多通道数据采集系统对某型高速列车转向架在新踏面状态下连续测试了 10 天, 总测试里程约为 8000 公里。2016 年 12 月, 又对该车在进行车轮镟轮前连续测试了 2 天。两次测试的数据均从车库发车到回到车库, 实现全程连续数据采集, 获得了动车组在各种运营工况如高速、低速、曲线、道岔以及进出车站和车库等大量而全面的测试数据。

对测试数据采用机车车辆结构载荷专用数据处理软件, 对实测信号进行了去除零漂、排除干扰、提高信噪比并将电信号转换为载荷值等处理方式, 以获得准确的测试结果。

3. 踏面磨耗前后垂向载荷特性分析

3.1. 踏面磨耗前后垂向载荷典型工况抽样

该型高速列车运用范围是往返北京动车库至天津动车库之间, 两次测试数据覆盖里程长, 典型工况



Figure 1. Force spring

图 1. 测力弹簧



Figure 2. Number of bogie axle-housing spring

图 2. 转向架轴箱弹簧轴位编号

多，因此测试结果具有很好的重复性和代表性。为了确认不同工况下垂向载荷和定位转臂横向载荷的动态变化特性，这里针对典型的运用工况进行了抽样，这些工况主要包括高速直线、道岔、进出车站以及车库等。

高速直线工况从亦庄到武清的京津线正线区间的载荷时间历程中提取，高速道岔工况抽样从进出亦庄、永乐和武清车站的载荷时间历程中抽取，低速进出车站工况从列车进出北京南站或天津站载荷时间历程中抽取。

3.2. 踏面磨耗前后垂向载荷时域特性分析

3.2.1. 低速出站载荷特性

从北京南站到京津线的正线，线路等级低，曲线半径小，道岔多，因此弹簧载荷幅值的变化较大。其中，图 3 为新轮状态出站，转向架内侧和外侧弹簧载荷时间历程，图 4 为磨耗状态出站，转向架内侧和外侧弹簧载荷时间历程。

与曲线工况相对应，内外侧弹簧载荷具有增减载现象；与低速通过道岔工况对应，弹簧载荷在短时间内有频率高幅值大的载荷出现。表 1 中 D3 和 D4 分别表示转向架 3 位和 4 位弹簧载荷。

表 1 给出了出站 60 秒时间内的载荷值统计，弹簧载荷的最大值达到了 60 KN，数据的离散性较大，标准差最大为 1.29。结合图 3、图 4 和表 1 可以得出在进出站线路条件较差的情况下，踏面磨耗对垂向载荷的影响并不明显，可以说踏面磨耗的影响完全被线路条件湮没。

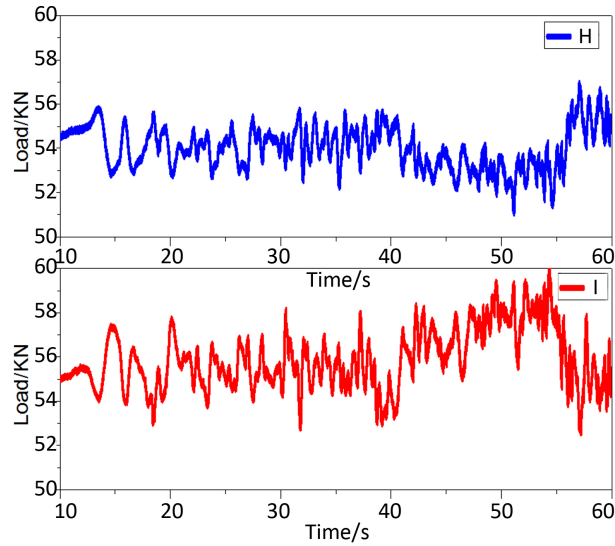


Figure 3. Spring load time history of new-wheel outbound condition

图 3. 新轮状态出站弹簧载荷时间历程

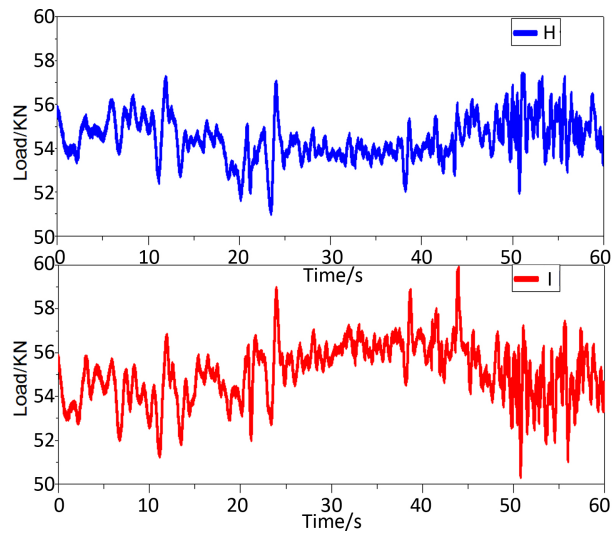


Figure 4. Spring load time history of worn-wheel outbound condition

图 4. 磨耗状态出站弹簧载荷时间历程

Table 1. Statistical load of outbound
表 1. 出站载荷统计值

日期	通道	最大值(kN)	最小值(kN)	均值(kN)	标准差
磨耗前	D3	57.36	51.04	54.42	0.94
	D4	59.84	50.37	55.09	1.29
磨耗后	D3	56.97	51.05	53.89	0.94
	D4	60.25	52.56	55.93	1.25

3.2.2. 直线载荷特性

京津线正线是中国高速线路等级较高的商业运营线路，正线线路轨道激扰非常小，线路条件本身的影响小，因此高速列车在直线轨道上高速运行将最能体现车轮踏面磨耗对垂向弹簧载荷的影响。

图 5 和图 6 为高速列车在直线轨道上以 350 km/h 运行时的弹簧载荷时间历程抽样波形，对载荷最值的统计列于表 2。

由图和表可见，弹簧静载值在踏面磨耗前后均为 53 kN 左右，弹簧载荷的动态变化幅值较小，新踏面状态下，垂向载荷变化幅值为 3 kN 左右；踏面磨耗后，垂向载荷的变化幅值增加到 7 kN 左右，动态载荷幅值较新踏面状态下变化明显。

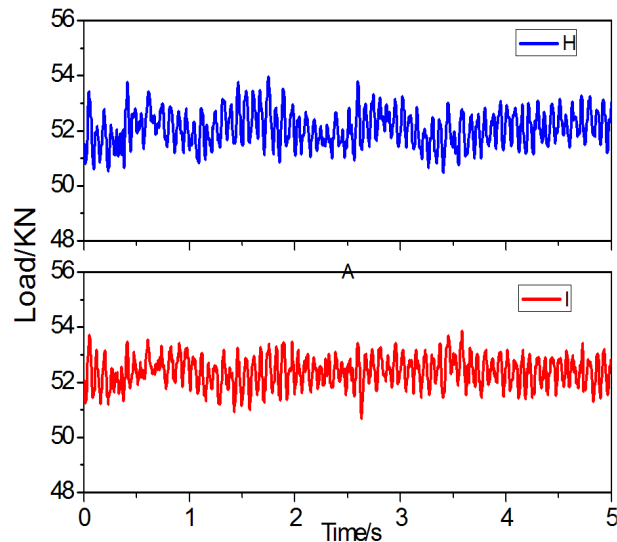


Figure 5. Spring load time history of worn-wheel outbound condition

图 5. 磨耗状态出站弹簧载荷时间历程

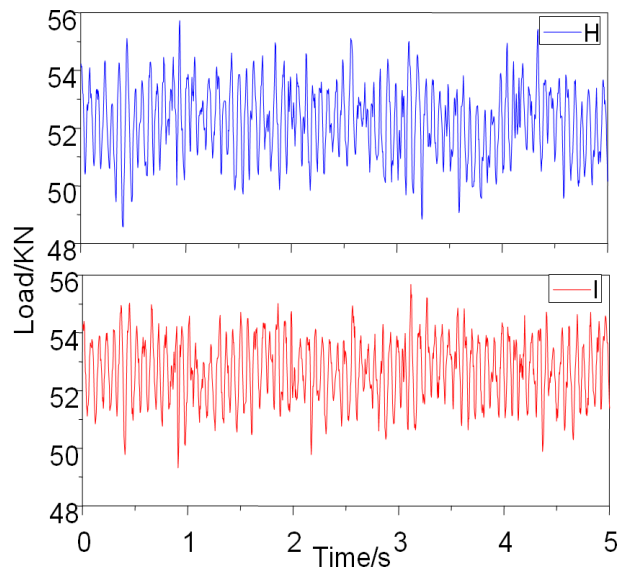


Figure 6. Spring load time history of worn-wheel outbound condition

图 6. 磨耗状态出站弹簧载荷时间历程

这可以得到以下两点结论:

1) 京津线线路条件较好,即使在 350 km/h 的高速运行状态下,在新踏面状态下高速列车垂向载荷动态幅值变化小,表现出优良的垂向动力学性能。

2) 车辆运营一段时间后造成车轮踏面磨耗对垂向载荷具有明显的影响,垂向载荷动态变化量越增加到新踏面状态下的 2 倍,轮轨作用恶化,垂向载荷幅值变大。

3.2.3. 直向过道岔载荷特性

动车组高速直向通过道岔时,在辙叉区域,车轮的滚动迹线不连续,产生了车轮与辙叉之间剧烈的垂向冲击现象,极短时间内出现多次激振现象,轮轨冲击力将通过轮对传递至轴箱弹簧,轴箱弹簧振动频率增加,垂向载荷出现最大值。当车辆驶离辙叉进入直线后,轮轨垂向力将逐渐恢复到平稳状态,垂向轴箱弹簧载荷也将恢复到平稳状态。

图 7 和图 8 分别是高速列车在新轮状态高速过道岔和磨耗状态高速过道岔的载荷时间历程。通过道岔的载荷统计值列于表 3。

通过道岔时,刚进入转辙区和离开辙叉区时,轮轨间出现高频的激烈作用,因此垂向载荷将有两次冲击峰值出现。图 7 与图 8 表现出明显的车辆道岔通过特征。踏面磨耗前后,垂向载荷动态幅值变化不大,约为 6 kN 左右,约为直线运行时动态载荷幅值的 2 倍。

3.3. 踏面磨耗前后垂向载荷频域特性分析

线路实测得到的信号为时域信号,为了通过所测得的信号了解载荷的动态行为,还需要频域信息,这就要施行频谱分析。频谱分析能将实测的复杂工程信号分解成简单的频率分量来研究,描述信号的频率结构。对于非周期性的随机信号,常采用功率谱密度函数描述信号能量和功率分布情况[6] [7] [8]。

3.3.1. 出站工况功率谱分析

图 9 给出踏面磨耗前后动车弹簧在出站时的功率谱密度曲线。功率谱密度曲线表明:垂向载荷的作用频率在踏面磨耗前后没有明显的变化,垂向载荷的作用主频均低于 5 Hz,这说明作用于构架的垂向载

Table 2. Statistical load of straight line condition

表 2. 直线工况载荷统计值

日期	通道	最大值	最小值	均值	标准差
磨耗前	D3	53.84	51.45	52.62	0.39
	D4	53.23	51.66	52.67	0.23
磨耗后	D3	55.72	48.57	52.32	1.23
	D4	55.68	49.35	52.75	1.09

Table 3. Statistical load of high speed passing turnout condition

表 3. 高速过道岔载荷统计值

日期	通道	最大值	最小值	均值	标准差
磨耗前	D3	55.84	49.03	52.81	0.75
	D4	55.53	49.99	53.13	0.96
磨耗后	D3	56.30	51.18	53.23	0.99
	D4	56.75	51.11	53.52	0.79

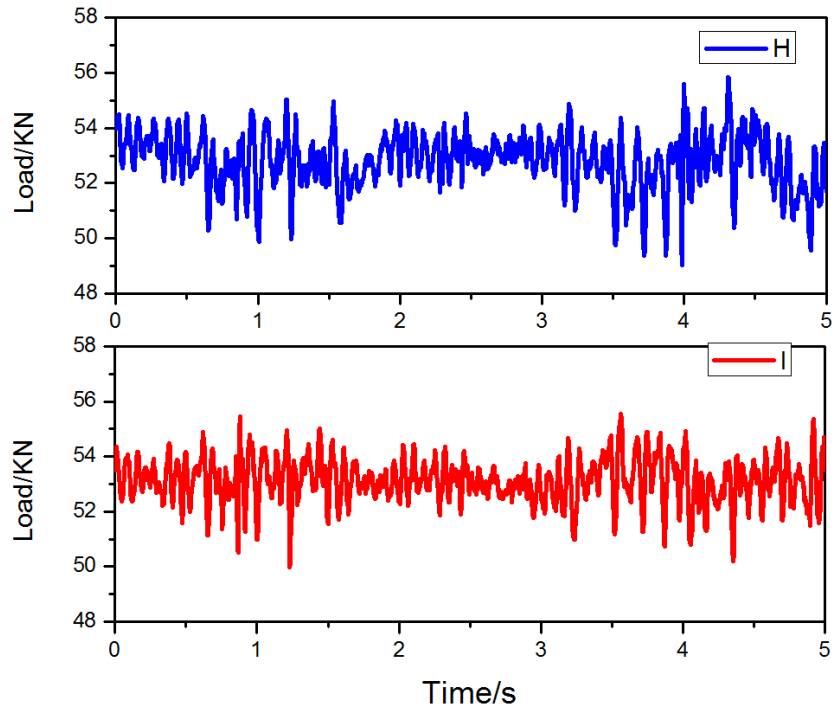


Figure 7. Spring load time history of new wheel for high speed passing turnout condition

图 7. 新轮状态高速过道岔载荷时间历程

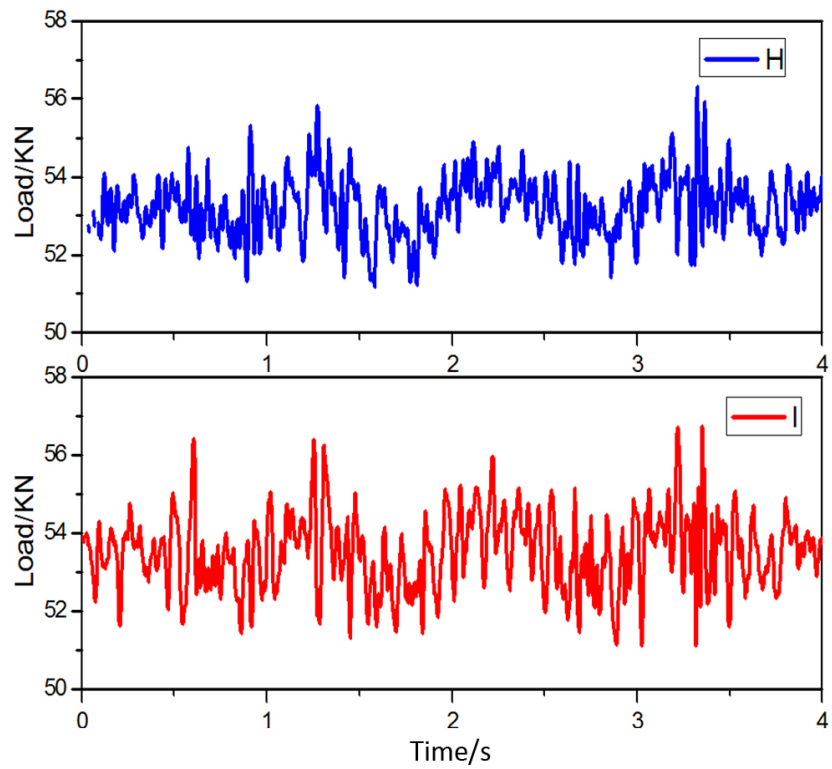


Figure 8. Spring load time history of worn wheel for high speed passing turnout condition

图 8. 磨耗状态高速过道岔载荷时间历程

荷属于低频作用力。

结合前面时域分析可知进出车站时弹簧垂向载荷的作用特点：幅值变化明显，作用频率低，这主要是由列车在进出站时运行速度较低，轮轨作用相对不激烈造成的。

3.3.2. 高速直线工况功率谱分析

图 10 为在高速直线工况下，踏面磨耗前后弹簧载荷功率谱密度曲线。由图可见，在新踏面状态下，

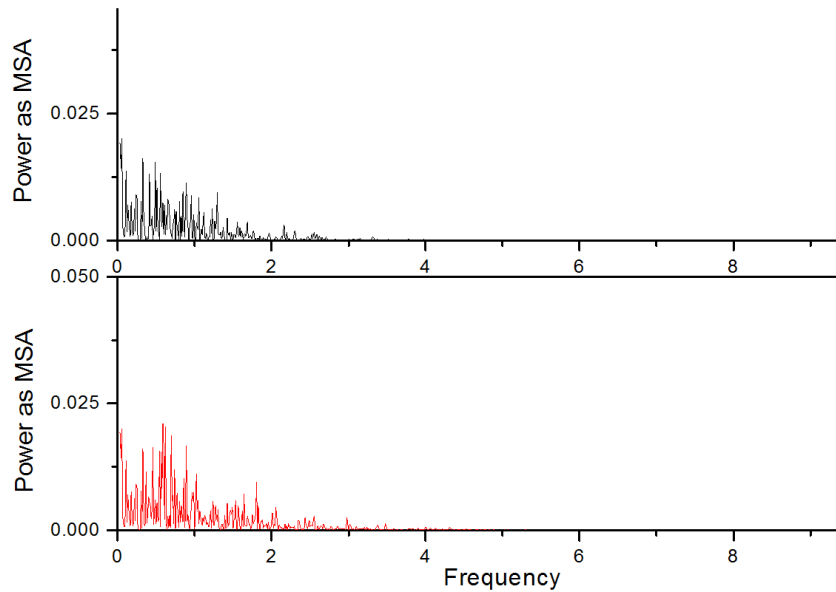


Figure 9. Power spectrum of outbound condition

图 9. 出站功率谱

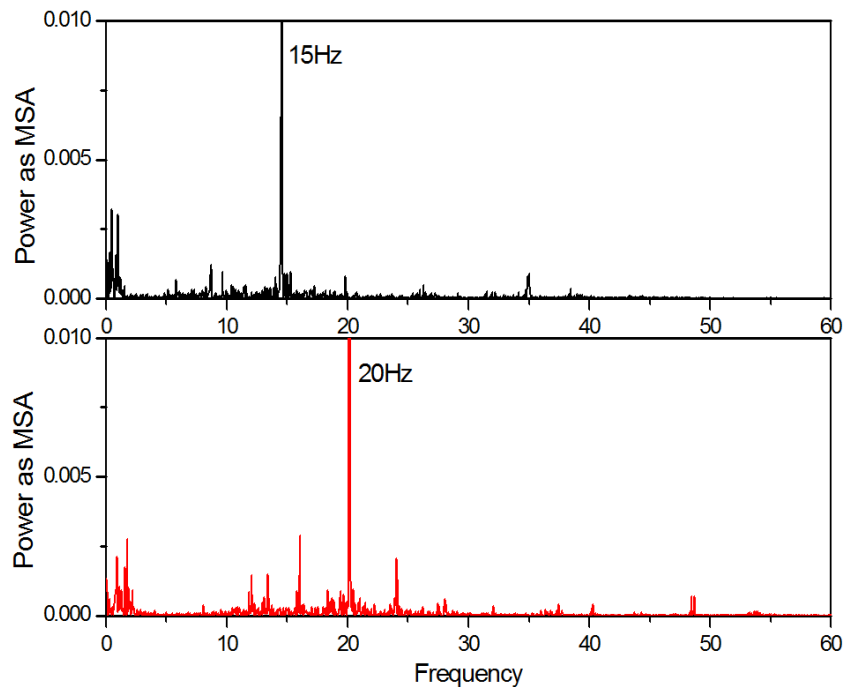


Figure 10. Power spectrum of straight line condition

图 10. 直线功率谱

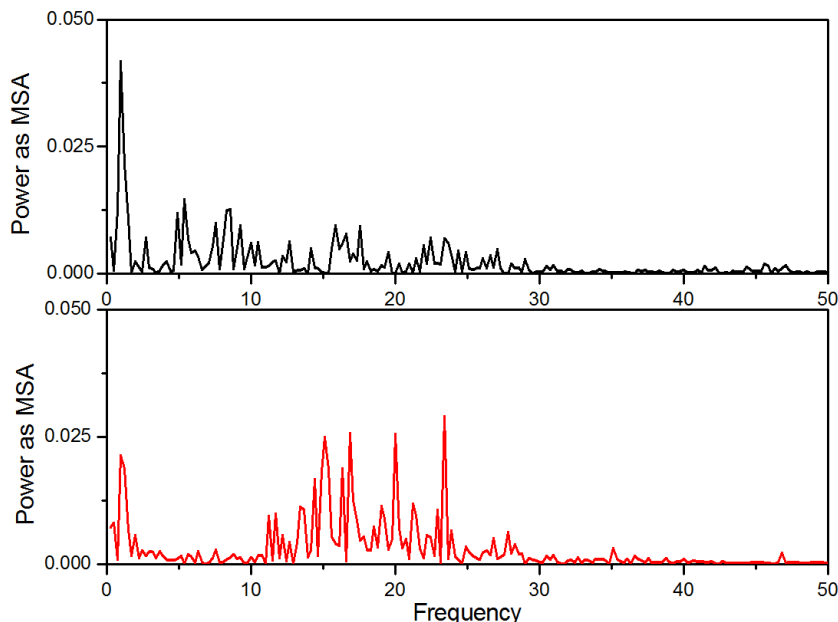


Figure 11. Power spectrum of passing turnout condition
图 11. 过道岔功率谱

垂向载荷有两个比较明显的主频段：1 Hz 左右和 15 Hz 左右的两个频段。踏面磨耗后，20 Hz 左右频段作用频率占据主导。这说明踏面磨耗后，轮轨作用加剧，弹簧垂向载荷作用频率增加。从功率谱谱密度值来看，踏面磨耗前后，谱密度值均比进出站时要小，这也说明在直线上高速运行时，弹簧载荷的振动幅值要比进出站时小。

3.3.3. 高速直向过道岔工况功率谱分析

图 11 为在高速直向通过道岔工况下，踏面磨耗前后弹簧载荷功率谱密度曲线。由功率谱密度图可以看到在高速过道岔工况下，新踏面状态下，垂向载荷振动频率分布在 1 Hz 到 30 Hz 之间，频带分布较宽，但以 1 Hz 为主；磨耗状态下，垂向载荷主要作用频率明显地分为两个频段，1 Hz 左右的低频段和 10 到 25 Hz 的中频段，说明中频段的振动分量占主导，且踏面磨耗后中频段的谱密度值增加较多，弹簧载荷的振动幅值增大。

4. 踏面磨耗前后垂向载荷谱编制

4.1. 载荷谱编制方法

载荷谱不仅反映了载荷的大小，而且反映了载荷的作用频次，因而能够更为全面和准确地反映载荷的本质；为方便室内疲劳加载试验，这里将识别出的动态载荷进行编谱。本文编制一维载荷谱采用广泛应用的“波动中心”法，将载荷谱简化为一元随机变量，并以波动中心作为载荷循环的静载荷分量，幅值作为载荷循环的动载荷分量，将幅值叠加于波动中心之上[9]。

在编制一维载荷谱时，先将关于载荷循环的均值和幅值数据文件进行一次扫描，找到载荷幅值的最大值和最小值，再按下式进行分组处理[10]。

$$D = \frac{F_{a\max} - F_{a\min}}{N}$$

式中， D 为组间距， $F_{a\max}$ 、 $F_{a\min}$ 分别为载荷幅值的最大值和最小值， N 为载荷幅值组级数，通常取 8

级、16级、32级。这样，各级载荷幅值组的上、下限值可以分别计算：

$$\begin{cases} D_{iu} = F_{a\min} + i \times D \\ D_{il} = F_{a\min} + (i-1) \times D \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,N)$$

载荷幅值分级后，进行一维载荷谱编制的方法是：先设定 N 个统计载荷幅值发生频数的变量 $P_i (i=1,2,\dots,N)$ 并赋初值为零；然后顺序读取原循环计数结果数据文件，按载荷幅值的 N 个区间逐个判断新读入的载荷幅值 F_a 属于哪一级范围之内，若 $F_{il} < F_a < F_{iu}$ ，则对 P_i 进行加 1 处理；如此循环直至输入数据文件读完为止。为了统计描述上的方便，各级载荷幅值组采用其组中值来表示，按下式计算：

$$F_{ai} = \frac{F_{iu} + F_{il}}{2} \quad (i=1,2,\dots,N)$$

式中 F_{ai} 为第 i 级的组中值， F_{iu} 和 F_{il} 分别为第 i 级的组上限值和组下限值。

4.2. 踏面磨耗前后的垂向载荷谱

表 4 是按照上述方法编制的北京 - 天津一次往返的垂向载荷谱。

对于新踏面运行时的载荷谱，从作用频次上看，第 3 级到第 8 级谱的频次之和为 108 次，而第 2 级谱到第 1 级谱的载荷作用频次急剧增加，从 1024 次增加到 17,101 次。从前面的垂向载荷特性分析可知，高速线路上弹簧载荷动态幅值要比进出车站和通过道岔时小很多，这说明第 1 级和第 2 级载荷主要由高速运行引起，而第 3 级到第 8 级载荷主要进出车站和道岔通过引起。这说明该型高速列车在高速线路正线上，轴箱弹簧垂向力主要以幅值较低的载荷出现且频次高，而幅值较高的载荷出现频次很少。

踏面磨耗后，垂向弹簧载荷谱也具有这样的特点。由此可以推断，高速列车在京津城际高速铁路正线上高速运行时，一般不会出现振动幅值较大的垂向作用力，幅值较大的作用力一般只出现在动车组进、出车站等轨道激励明显较大的线路上，这也进一步说明，高速列车转向架构架垂向动态作用力与线路状态密切相关。

5. 结论

本文对京津线高速列车踏面磨耗前后试验数据从时域和频域比较分析了踏面磨耗在不同工况下对高速列车载荷特性的影响，得到如下结论：

1) 对于低速出站时，垂向载荷动态变化值在 6 kN 左右，垂向载荷作用主频低于 5 Hz；在进出车站工况下，踏面磨耗对垂向载荷的影响不明显。

Table 4. Vertical load spectrum (Mean value: 53 kN)

表 4. 垂向载荷谱(均值 53 kN)

幅值/kN	磨耗前		磨耗后		
	频次	累积频次	幅值/kN	频次	累积频次
0.61	17101	18233	0.73	17326	18677
1.32	1024	1132	1.69	1234	1351
2.04	79	108	2.64	90	117
2.75	17	29	3.60	16	27
3.47	8	12	4.56	5	11
4.18	2	4	5.51	3	6
4.90	1	2	6.47	2	3
5.62	1	1	7.43	1	1

2) 高速直线运行时, 在车轮磨耗后, 垂向动态载荷变化值由 3 KN 增加到 7 KN 左右, 作用主频由 15 Hz 增加到 20 Hz; 因此在高速直线运行工况下, 踏面磨耗对垂向载荷的影响显著。

3) 高速直线通过道岔时, 踏面磨耗前后垂向载荷动态变化值均为 6 KN 左右; 但是踏面磨耗使得垂向载荷的主频发生了改变, 垂向载荷主要作用频率从磨耗前的 1 个低频段明显地分为两个频段, 即 1 Hz 左右的低频段和 10~25 Hz 的中频段, 而且中频段的振动分量占主导。

4) 踏面磨耗前后载荷谱表明, 高速列车在高速线路正线上, 转向架构架垂向载荷主要以幅值较低的载荷出现且频次高, 幅值较大的作用力一般只出现在动车组进、出车站等轨道激励明显较大的线路上, 高速列车垂向动态作用力与线路状态密切相关。

基金项目

科技部重点专项(2016YFB1200501)。

参考文献 (References)

- [1] 练松良, 孙琦, 王午生. 铁路曲线钢轨磨耗及其减缓措施[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [2] 王文静, 王燕, 孙守光, 等. 高速列车转向架载荷谱长期跟踪试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 84-89.
- [3] 王萌, 李强, 孙守光. 基于应力响应的多频率激励载荷识别研究[J]. 铁道学报, 2015(2): 27-33.
- [4] 任尊松, 刘志明. 高速动车组振动传递及频率分布规律[J]. 机械工程学报, 2013, 49(16): 1-7.
- [5] Arnold, J. and Kaiser, I. (2004) How Elastic Wheelsets Influence the Simulation. *Vehicle System Dynamics Supplement*, 4, 242-251.
- [6] 佟德纯, 姚宝恒. 工程信号处理与设备诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [7] 胡广书. 数字信号处理导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [8] Hu, W., Liu, Z., Liu, D., et al. (2017) Fatigue Failure Analysis of High Speed Train Gearbox Housings. *Engineering Failure Analysis*, 73, 57-71. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.12.008>
- [9] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [10] 薛海, 李强, 胡伟钢, 刘文飞. 重载货车车钩疲劳试验载荷谱的编制方法[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(2): 105-110.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3431, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojtt@hanspub.org