文章编号：1006-1355(2014)04-0010-04+23

车轮非圆化对高速列车振动噪声的影响

韩光旭，温泽峰，张 捷，肖新标，金学松

（西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，成都 610031）

摘 要：对运营中的高速列车进行车内振动与噪声现场测试，分析高速列车车内振动和噪声特性，明确车内振动与噪声的水平及频谱特性，同时对车轮表面粗糙度进行同步测试，分析车轮非圆化特征，研究车轮径跳幅值及车轮多边形阶次对高速列车车内振动与噪声的影响。结果表明，车轮第20阶多边形是使车内振动和噪声偏大，并形成580 Hz显著频率的主要原因，相关结果可为高速列车车内振动与噪声控制及指导车轮镟修提供参考。

关键词：振动与波；高速列车；车内振动；车内噪声；车轮非圆化

中图分类号：TB53；U238；U270.1⁺.6； **文献标识码**：A DOI编码：10.3969/j.issn.1006-1335.2014.04.003

Influence of Out-of-roundness of Wheels of High-speed Trains on Interior Vibration and Noise

HAN Guang-xu, WEN Ze-feng, ZHANG Jie, XIAO Xin-biao, JIN Xue-song

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

Abstract : The interior vibration and noise of a high-speed train are measured. Their characteristics are analyzed and the sound pressure/vibration level and the spectra are obtained. Meanwhile, the out-of-roundness of the wheel is also measured simultaneously to study its influence on the interior vibration and noise. The effects of the high-order polygonal wear and radial run-out of the wheel are analyzed. It is found that the 20 th order polygonal wear of the wheel, corresponding to the passing frequency of about 580 Hz, plays a significant role in the high interior vibration and noise. The data shown in this work provides a significant contribution for design of the low-noise trains and improvement of wheel's re-profile techniques.

Key words : vibration and wave ; high-speed train ; interior vibration ; interior noise ; out-of-roundness wheel

为了改善高速列车车内振动和噪声环境，世界各国政府以及科研机构都做了大量工作，同时制定了车内噪声测试和限值标准[1]。

现有研究表明，当列车运行速度达到300 km/h时，轮轨激励及其产生的振动噪声是车内振动噪声的主要来源[2, 3]。轮轨激励受钢轨和车轮表面粗糙度（包括波磨和擦伤等轮轨伤损因素）的影响，随着列车运营里程增加，车轮磨耗会不断加剧，轮轨行为越发复杂，车轮会表现出非圆化特性。

国内外针对车辆振动噪声和车轮非圆化问题，开展了不少研究。Poission等[2]对法国TGV高速列车噪声进行了分析，明确了TGV列车不同区域噪声的频谱特性。Atsushi等[3]研究了汽车车内异常噪声问题，提出量化识别汽车车内异响的手段；雷晓燕等[4]参考国外铁路噪声控制方法，通过适当修正后，将其应用于我国客运专线、高速铁路环境噪声预测和评价，并根据实测数据，对修正的有效性进行验证。刘岩等[5]使用多通道振动噪声采集系统，分析了不同速度下的车内噪声主频带分布。范蓉平[6]在对高速列车车厢振动与噪声进行综合测试后，分析和评价了高速列车车内噪声特性，得到车厢降噪频率范围，研究了不同阻尼减振降噪材料装车后对高

收稿日期：2013-10-10

基金项目：国家863计划(2011AA11A103-2-2/4-2)；
教育部创新团队(IRT1178)；
牵引动力国家重点实验室自由探索自主研究课题(2011TPL_T05)

作者简介：韩光旭(1989-)，男，吉林镇赉人，硕士研究生，目前从事高速列车振动与噪声研究。
E-mail: hanguangxu_2000@163.com.cn

通信作者：金学松，男，教授，博士生导师。
E-mail: xsjin@home.swjtu.edu.cn

速列车的降噪效果。Kalousek等[7]较早报道了车轮多边形情况，并对其进行了研究，提出可以通过修正车轮型面改善轮轨磨耗。Johansson等[8]通过试验与理论分析相结合的手段，研究了车轮粗糙度对车辆振动的影响；陈光雄等[9]分析了车轮多边形磨耗的形成机理，并指出相应的控制策略。张雪珊等[10]研究了车轮1阶非圆化对车辆运行稳定性的影响。但是，现有研究主要侧重在车内振动噪声或车轮非圆化，而有关车轮非圆化对车内振动噪声影响的研究较少。

本文对个别车厢车内噪声水平偏大的列车进行现场实测后，分析车内振动及噪声特性，结合车轮非圆化同步测试得到的数据，探寻造成个别车厢车内振动和噪声水平偏大的原因，由此提出改善车内振动及噪声环境、优化车轮镟修的相关建议。

1　测试方案

某型高速列车运行时，在头、尾两车表现出振动和噪声偏大的现象。为了解车内振动及噪声特性及其偏大的原因，首先对该型高速列车进行运营情况下的振动和噪声测试，列车运行区段为高架、无砟轨道，最高运行速度300 km/h。同时，对车轮表面粗糙度进行同步测试，测试地点选在列车检修库内。

1.1　振动及噪声测试方案

图1所示为车内振动和噪声测点布置示意图。测试分析系统采用传声器B&K 4190、振动加速度传感器B&K 4508及数据采集前端B&K NORTA，声学采样频率25.6 kHz，振动采样频率6.4 kHz。车内测点布置依次为车体地板加速度垂向、车体侧墙加速度横向及对应区域噪声1.5 m标准测点，图中①表示振动测点，②表示噪声测点。

1.2　车轮表面粗糙度测试方案

车轮表面粗糙度测试采用ODS-RRM01车轮粗糙度测量装置完成，测试时要求缓解车轮制动，使车

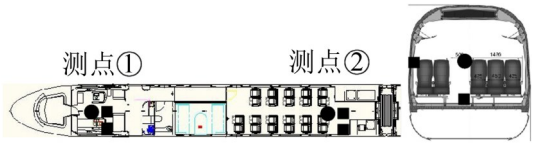


图1　车内振动和噪声测点布置示意图

轮可绕车轴中心自由旋转。测试装置如图2所示，位移传感器①与车轮踏面垂直接触，记录车轮踏面名义滚动圆及内外10 mm位置处的车轮非圆化信息，传感器②记录车轮周长信息，以便确定传感器①所测车轮非圆化的相位信息。

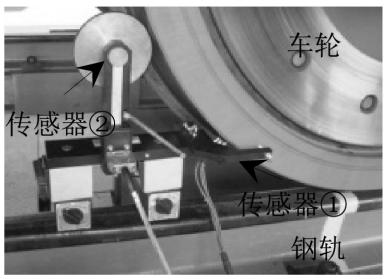


图2　车轮表面粗糙度实测照片

传感器①测得车轮旋转一周的非圆化数据实际为车轮各相位处的半径波动量，定义车轮平均半径幅值为“零”参考值，在非圆化幅值图上，比平均半径大时标为正值，小则为负值，其值大小代表车轮半径偏离程度。

2　测试结果分析

2.1　车内振动及噪声特性

对该型高速列车头车振动和噪声进行测试，图3为列车加速过程下车内测点①的A计权声压级总值及振动总值随列车加速时间的变化情况。如无特殊说明，加速度级均以1.0 m/s²为参考值。

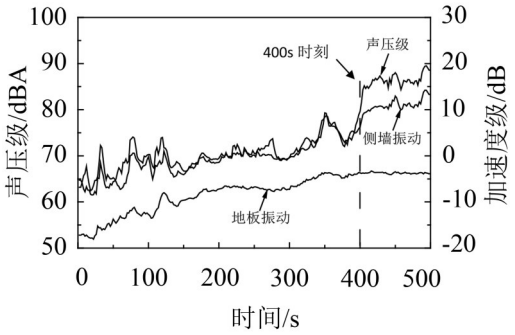


图3　加速过程下车内振动噪声总值

根据测试时行车速度记录，在400 s时刻附近，列车完成加速过程，速度达到300 km/h，开始匀速运行。图3表明，在400 s时刻之前，车内振动和噪声随行车速度增加而逐步平稳增加（个别峰值为列车出站过道岔时的冲击造成），其中侧墙振动加速度级与噪声声压级总值相关性更强。在400 s时刻之后，列车以300 km/h速度等级匀速运行，虽然列车运行速度变化很小，但图3中可见，该时刻侧墙振动和车内噪声出现了较显著的跃升，其中车内声压级由80 dBA左右跃升至89 dBA左右，侧墙振动加速度级由5 dB跃升至14 dB左右，均有将近10 dB的增加。根据声压级合成原理，声压级每升高3dB，噪声能量提高一倍，可见车内振动和噪声环境急剧恶化。

图4给出车内噪声测点①的1/3倍频程及窄带FFT频谱图。

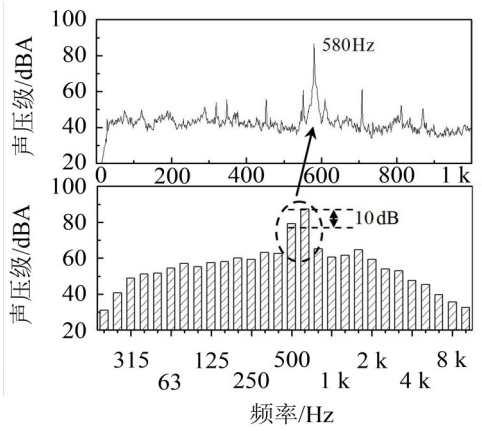


图4 车内噪声频谱

根据独立声源叠加原理，相差10 dB的两个声源叠加，较小的声源对总声压级的影响可忽略不计。对图4中下方子图1/3倍频程中噪声显著的500 Hz～630 Hz频段，进行细化FFT分析，可清楚知道车内噪声主导频率为580 Hz。且图3中振动和噪声总值分析结果表明，振动、噪声总值存在关联性，车内主频是否由对应位置处车内部件的振动造成？图5给出车内振动FFT频谱。

在噪声偏大的区域，车体的振动同样表现出显著的580 Hz主频，由此可见，车内噪声表现异常显著主要是由车体振动及其声辐射造成的。

图6以Contour图给出了列车加速过程下车内振动的时频特性，进而分析580 Hz的异常振动噪声频率是由什么原因所引起。图中，左侧纵轴表示列车0～500 s的加速历程时间，横轴表示振动频率，图中色标动态范围为35 dB。

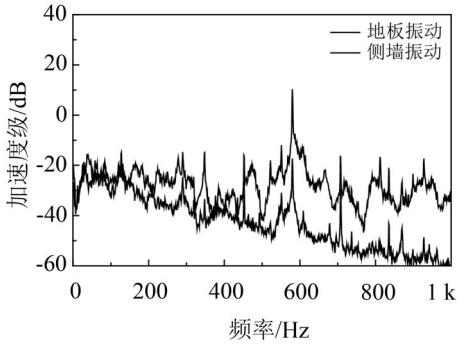


图5 车内振动频谱

由图6可见，580 Hz的振动频率随行车速度变化显著，与旋转部件有关。而高速列车最大的旋转部件为车轮，在车轮出现异常磨耗后，会在车轮圆周方向上产生短波不平顺，简称车轮非圆化。当列车以特定速度运行时，不同的非圆化特征会产生不同的轮轨振动冲击，会通过车辆结构向上层部件传递振动，对车内振动、噪声产生影响。

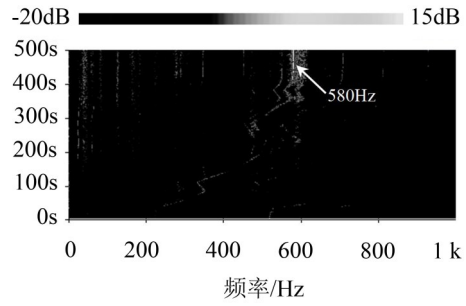


图6 加速过程下振动频谱Contour图

2.2 车轮表面粗糙度特性

衡量车轮粗糙度一般以两个参数决定，一个为车轮径跳幅值，定义为以轮轴为中心，车轮半径方向的最大变化量；另一个为车轮多边形阶次信息，这其中包含了车轮短波不平顺频率信息。通常动车组检修运用部门只以车轮径跳值来判断列车车轮是否应该进行镟修，以修复车轮踏面外形，并认为径跳值处于0.1 mm以内的车轮服役状态良好，0.1 mm至0.2 mm表示车轮状态一般，0.3 mm以上表示车轮状态差，需要马上进行镟修。

表1为试验实测车轮径跳幅值大小，其中1轴左、右轮径跳值超标，其余车轮径跳值未见异常。

表1 实测车轮径跳幅值

车辆编号	车轮编号	径跳	车轮编号	径跳
(1)测点下方	1轴左轮	0.207	1轴右轮	0.135
	2轴左轮	0.070	2轴右轮	0.052
(1)测点下方	3轴左轮	0.036	3轴右轮	0.047
	4轴左轮	0.041	4轴右轮	0.033

图7为车轮非圆化的极坐标表示，图中细线和粗线分别代表径跳值正常的3轴右轮和径跳值偏大的1轴左轮。从图中可以粗略分辨出车轮短波不平顺信息，以图中1轴左轮粗线为例，尖峰处为峰值，凹陷处为谷值，峰峰间距或谷谷间距可以认为是车轮踏面上出现的短波不平顺的波长，可见，在车内振动噪声表现异常位置处的车轮表现出显著的20边形特征。

2.3 车轮表面粗糙度对振动噪声的影响

表2给出的是车内两个测点振动噪声总值与各测点下方最大的车轮径跳值，分析车轮径跳值差异对振动噪声的影响。

测点①的径跳值相比测点②偏大，对应的车内振动噪声水平也偏大，这是由于偏大的车轮径跳值造成的轮轨相互作用更为显著，会对整个车辆系

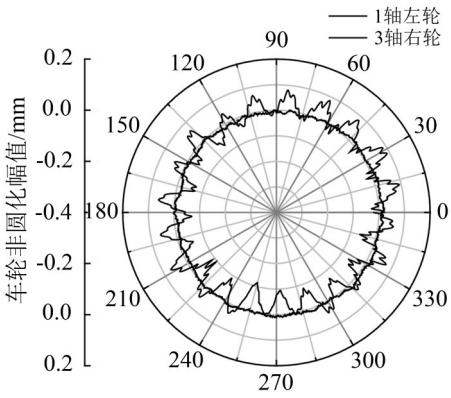


图 7　车轮非圆化极坐标表示

表 2　径跳值对振动及噪声总值影响

测点位置	声压级/dBA	侧墙振动/dB	最大径跳/mm
(1)	89.2	14.0	0.207
(2)	78.5	2.4	0.047

统形成剧烈的振动噪声激励，最终造成车内振动噪声偏大的结果。

理论研究中常用对数形式的车轮非圆化等级 L_r^k 表示车轮非圆化特征，定义如算式(1)所示，单位为 dB 。

$$L_r^k = 10 \times \log_{10}(\tilde{r}_k^2 / r_{ref}^2) \tag{1}$$

式中 $\tilde{r}_k^2$ 是车轮表面粗糙度 $r(x)$ 的均方值在1/3倍频程 k 中的量化。参考值 r_{ref} 取 1 μm 。国际标准单位中定义频带中心波长为

$$\lambda_k = 0.01 \times 10^{k/10},\ k = -10, -9, \cdots, 14, 15 \tag{2}$$

通过HHT黄变换，同时参考轮轨接触滤波，将图7中车轮周向不平顺测试数据换算到波数域上，可以得到图8所示的车轮非圆化阶次图。与图7相对应，异常磨耗轮主要表现出显著的第20阶非圆化特征，正常磨耗车轮的非圆化特征则以低阶为主。

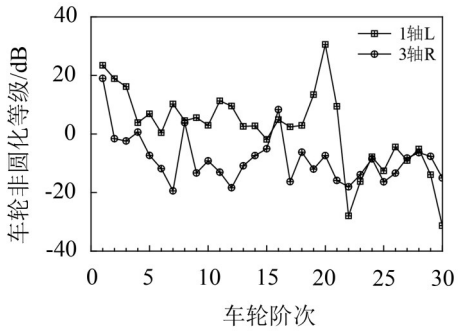


图 8　车轮非圆化阶次图

在车轮沿钢轨滚动的过程中，车轮第 i 阶非圆化所产生的轮轨激励频率可以用算式(3)进行求解

$$f_i = \frac{v \times r_i}{3.6 \times 10^{-3} \times \pi \times D} \tag{3}$$

式中 v 代表车速

r_i 为车轮非圆化阶次

D 为车轮直径，920 mm

当列车以300 km/h速度运行时，车轮第20阶非圆化形成的轮轨激励频率为577 Hz，恰好对应车内振动噪声主频，由此可见，产生车内振动噪声异常现象的最主要原因应该是车轮第20阶非圆化。

通过对车轮非圆化径跳幅值及阶次数据的比较分析可以看出，车轮径跳值偏大则车内振动噪声会偏大，车轮低阶非圆化对振动噪声影响很小，通常仅对列车动力学有影响，而车轮高阶非圆化由于其造成的轮轨激励频率较高，会对振动噪声有很大影响，需要引起注意。当较大的车轮径跳值是由于高阶车轮非圆化造成时，其对车内振动噪声的影响将更加剧烈。

图9为动车组检修运用单位车轮镟修机床现场照片。

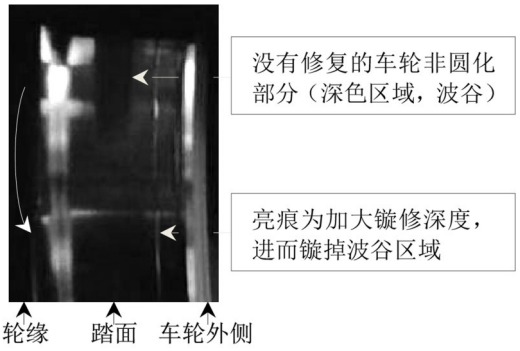


图 9　车轮镟修照片

图中所示车轮已由动车组检修运用单位以车轮径跳值为参考刚镟修完成。在镟修后，车轮径跳值达到要求，小于0.1 mm，但是车轮表面仍然肉眼可见深色没有镟到的区域，表明镟床刀头没有接触到车轮非圆化的波谷部分。如果仍以原有的径跳值为参考，这一车轮镟修后已经达到使用要求，但由于镟修后该车轮高阶非圆化没有得到修复，这样的车轮运行后，短时期内就会重现之前的异常磨耗状态，表现出显著的高阶非圆化特性，对车内振动噪声产生不利影响，影响旅客及司乘人员乘坐舒适性。

在车轮粗糙度测试过程中，将出现的这种情况及时向动车组检修运用单位反映，要求其进行第2次镟修，加大镟修深度，直至修复车轮高阶非圆化。图9中亮痕右侧区域为第2次刚镟修过的部分，左侧为待镟修区域。

3　结 语

本文对出现异常振动、噪声的高速列车进行现

(下转第23页)