

轮轨粗糙度对地铁车辆噪声影响试验分析*

黄文杰¹ 贾小平¹ 周劲松² 解建坤¹

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司技术中心, 210031, 南京; 2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 正高级工程师)

摘要 针对地铁车辆运行噪声较大的现象,对车轮不圆度及线路上不同位置的钢轨粗糙度进行测试。分析了轮轨粗糙度变化对车辆噪声的影响。研究发现:该测试线路的钢轨粗糙度显著高于国际标准 ISO 3095:2013 的限值,且曲线上钢轨粗糙度更高,是该地铁噪声较大的主要原因;在车轮镟修后,受镟修操作及工艺的影响,Tc(带司机室的拖车)与Mp(有受电弓的动车)的车轮轮周低阶多边形及长波粗糙度下降,但其表面短波粗糙度均显著增大,且Mp车粗糙度增加更大,导致镟轮后车辆噪声急剧升高。因而,合理的轮轨粗糙度维护策略和效果,才可降低地铁车辆噪声。

关键词 地铁车辆; 轮轨粗糙度; 车轮不圆度; 车轮镟修; 车辆噪声

中图分类号 U270.1⁺6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.045

Experimental Analysis of Wheel/Rail Roughness Influence on Metro Vehicle Noise

HUANG Wenjie, JIA Xiaoping, ZHOU Jinsong, XIE Jiankun

Abstract Targeting the phenomenon of metro vehicle large noise during operation, the wheel out-of-roundness and the rail roughness at different positions on track are measured and analyzed. Research discovers that the test line rail roughness is significantly higher than the limit value in international standard ISO 3095:2013, and the higher rail roughness on curve is the main reason for larger metro noise. After wheel reprofiling, due to the reprofiling operation and process influence, the low-order polygon and long-wave roughness of the wheels of the Tc (trailer car with cabin) car and Mp (motor car with pantograph) car decrease, while the surface roughness at short-wave increases significantly, and the wheel roughness of the Mp car becomes worse even more, resulting in sharp increase of vehicle noise. Therefore, only reasonable wheel/rail roughness maintenance strategies and effects can reduce metro vehicle noise.

Key words metro vehicle; wheel/rail roughness; wheel out-of-roundness; wheel reprofiling; vehicle noise

First-author's address CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd. Technical Center, 210031, Nanjing, China

随着车辆的持续运行、轮轨间的相互作用,车轮会出现不圆顺现象,其表现形式有剥离、扁疤、和车轮轮周多边形等;同时,钢轨会出现波磨等情况。这是目前较为棘手的问题。车轮不圆顺与钢轨的粗糙度会引起轮轨相互作用力增大,从而导致车辆结构的动态振动及噪声响应增加。这将对车辆各部件的使用寿命造成影响,同时也降低了乘客的乘坐舒适度,严重时可能威胁到行车安全。

随着我国城市轨道交通系统迅速发展,人们对其振动与噪声相关的舒适度提出了更高要求。地铁车辆运行时,其噪声源主要包括轮轨滚动噪声、牵引与辅助设备噪声等。对于地铁列车而言,运行速度通常为 60~120 km/h,在该速度级下,轮轨滚动噪声为车辆运行的主要噪声源^[1]。而轮轨滚动噪声的激励则来自于轮轨表面粗糙度。车轮的不圆顺与钢轨波磨现象使得轮轨表面的粗糙度增大,从而引起较高的轮轨噪声及车内噪声。目前,国际标准 ISO 3095:2013^[2]对于轨道交通车辆噪声测试时的钢轨粗糙度标准限值进行了规定,然而尚无关于车轮粗糙度的标准,因此往往采用与钢轨相同的标准进行评价。

随着越来越多的地铁车辆发生不同程度的车轮不圆顺与钢轨波磨现象,许多专家学者对其形成、发展机理进行了研究。文献[3]采用声源识别手段,确定车内噪声来源为结构振动辐射噪声,并研究了车轮不圆顺与振动噪声间的相互作用及影响关系。文献[4]采用数值模型结合线路实车测试结果,分析了不同条件下轮轨粗糙度与轮轨噪声之

* 上海市自然科学基金项目(21ZR1467100)

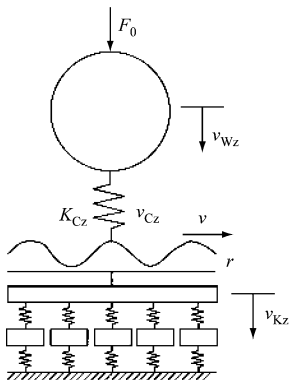
间的关系。文献[5]分析了钢轨粗糙度对车内噪声的影响及控制方法。

本文针对国内某地铁车辆线路运行噪声较大的现象,以其 Tc(带司机室的拖车)和 Mp(有受电弓的动车)为研究对象,在车内与转向架区域布置传声器,对某运行区段内不同位置处采集车轮镟修前后的噪声进行研究,为今后地铁车辆减振降噪提供参考。

1 轮轨粗糙度分析

1.1 轮轨联合粗糙度

理想情况下,轮轨表面是光滑的,而现实中轮轨表面存在不同程度的粗糙度。粗糙度是车轮与钢轨表面对于轮轨相互作用的法向激励,是导致产生轮轨高频振动噪声的主要原因。在轮轨粗糙度 r 的激励下,车辆与轨道结构产生振动并向外辐射噪声^[6],如图1所示。



注: F_0 为垂向载荷; v_{Wz} 为车轮垂向速度; K_{Cz} 为垂向接触刚度; v_{Cz} 为接触弹簧两端相对速度; v 为运行速度; v_{Kz} 为轨道垂向振动速度。

图1 轮轨粗糙度激励模型

Fig. 1 Wheel/rail roughness excitation model

而分布在轮轨表面随机粗糙度是以波长为变量来表征的,其主要采用自功率谱描述其频域特性。将车轮与钢轨的粗糙度谱叠加,得到轮轨联合粗糙度谱,用作轮轨振动噪声的激励。波数域下的轮轨联合粗糙度谱的计算公式如下:

$$r_b(k) = r_w(k) + r_r(k) \quad (1)$$

式中:

$r_b(k)$ ——轮轨联合粗糙度;

$r_w(k)$ ——车轮表面粗糙度;

$r_r(k)$ ——钢轨的表面粗糙度;

k ——粗糙度波数。

一般情况下,轮轨间的接触压力使得轮轨接触

斑呈现为椭圆状。当轮轨粗糙度谱中波长小于或等于轮轨接触斑椭圆长、短半轴长度时,该波长的粗糙度引起的轮轨振动弱化,该现象被称为接触滤波效应。因此,需引入接触滤波函数 $H(k)$,对得到的轮轨联合粗糙度加以滤波,以表征粗糙度谱中短波的噪声激励特性。对于轮轨接触斑,滤波函数公式如式(2):

$$|H(k)|^2 = \frac{4}{\alpha(ka)^2} \int_0^{\arctan \alpha} [J_1(ka \sec x)]^2 dx \quad (2)$$

式中:

$J_1(x)$ ——一阶柱贝塞尔函数;

a ——接触斑等效圆半径,mm;

α ——在给定波数下,接触斑宽度范围内粗糙度直接相关程度,一般来说,其值的大小与轮轨表面粗糙度的相关度成反比。

该滤波函数可近似简化为式(3)^[10]:

$$|H(k)|^2 = \left(1 + \frac{\pi}{4}(ka)^3\right)^{-1} \quad (3)$$

结合式(2)及式(3),得到接触滤波后的轮轨联合粗糙度 $r(k)$ 如式(4):

$$r(k) = |H(k)| r_b(k) = |H(k)| [r_w(k) + r_r(k)] \quad (4)$$

粗糙度波数 k 与波长 λ 间的转换关系如下:

$$k = 2\pi/\lambda \quad (5)$$

结合粗糙度引起的激励频率与粗糙度波长的关系与式(5),可以得到波数 k 与频率 f 的转化关系式为:

$$f = \frac{vk}{7.2\pi} \quad (6)$$

1.2 轮轨粗糙度测试及分析方法

根据英国标准 BS EN 15610:2009^[7] 的测试规范,采用德国米勒贝姆振动与声学系统有限公司的轨道检测小车与轨道交通车辆车轮测试装置,分别对相应运营线路区段的钢轨粗糙度、运行地铁车辆车轮粗糙度进行测量。车轮不圆顺及钢轨粗糙度测试现场,如图2所示。

轮轨表面粗糙度等级计算公式如下:

$$L_r = 10 \lg \left(\frac{r_{rms}}{r_0} \right)^2 \quad (7)$$

式中:

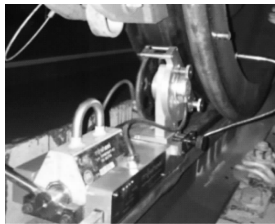
L_r ——粗糙度级,dB;

r_{rms} ——表面粗糙度的均方根值, μm ;

r_0 ——参考值,为 $1 \mu\text{m}$ 。



a) 钢轨粗糙度测试



b) 车轮粗糙度测试

图2 轮轨粗糙度测试示意图

Fig. 2 Display of wheel/rail roughness test

国际标准 ISO 3095:2013 给出了轨道交通车辆进行噪声型式试验时,对应的钢轨粗糙度水平上限。

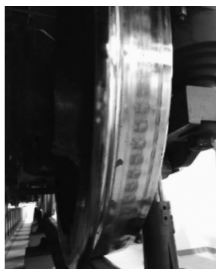
2 轮轨粗糙度测试

2.1 车轮不圆顺测试

采用车轮粗糙度测量仪检测车轮的不圆顺状况。车轮镟修前、后表面状况如图3所示。由图3可见,镟修前车轮表面存在微弱的粗糙度,而镟修后车轮表面呈现肉眼可见的周期性粗糙度。



a) 镟修前

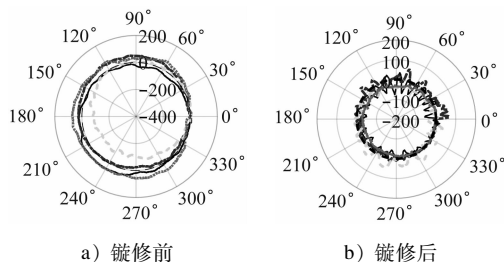


b) 镟修后

图3 车轮镟修前、后表面状况

Fig. 3 Surface conditions of wheels before and after reprofiling

对测试的同一个转向架上的4个车轮进行车轮粗糙度的极坐标分析,结果如图4所示。由图4可见,镟修前车轮轮周具有不同程度的偏心与椭圆等



a) 镟修前

b) 镟修后

注: ——1 车轮; ----2 车轮; -.-3 车轮;4 车轮。

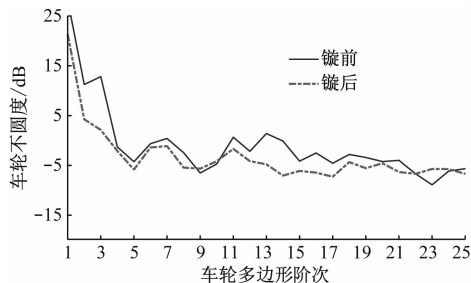
图4 车轮镟修前、后轮表面粗糙度极坐标图

Fig. 4 Polar graphs of wheel surface roughness before and after wheel reprofiling

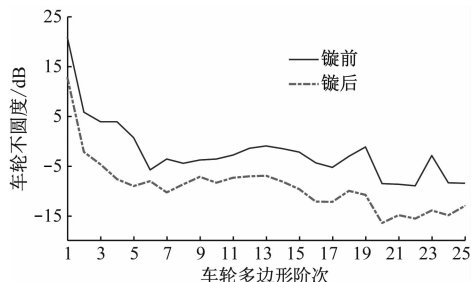
状况,镟修后车轮轮周的对中性较好,然而却出现了沿着车轮周向十分显著的短波粗糙度。

2.2 车轮不圆顺测试结果

分别对 Tc、Mp 的转向架上 4 个车轮镟修前、后的不圆顺结果进行测试分析,取其不圆度的平均值,结果如图5 a)、图5 b)所示。由图5 a)、图5 b)可见,与上述极坐标图相同,车轮具有显著的低阶不圆顺,包括偏心(1阶)、椭圆(2阶)等。镟修后 Tc、Mp 车轮在 25 阶内的不圆度幅值,均有不同程度的下降。其中,Mp 车的不圆度经镟修后,下降更为显著;而 Tc 车的 25 阶内的车轮不圆度幅值下降较为微弱。



a) Tc 车



b) Mp 车

图5 车轮镟修前、后不圆度结果比较

Fig. 5 Comparison of wheel out-of-roundness results before and after wheel reprofiling

在此基础上,对车轮进行不同波长下的粗糙度结果分析,如图6所示。镟修后,Tc 车在波长为 0.100~0.008 m 范围内粗糙度较大,而 Mp 车在小于 0.050 m 的波长范围内粗糙度显著增大。Mp 车在镟修后在波长为 0.025 m 时,出现了特别高的粗糙度值,远超出国际标准 ISO 3095:2013 的标准限值,这将引起轮轨噪声与车内噪声增大。通过对典型运行速度范围内进行分析,可利用 f 与 λ 的换算关系式:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (8)$$

当运行速度在 80 km/h 时,上述粗糙度波长,会引起 Tc 车噪声在 222~2 778 Hz 范围内,Mp 车

在高于 444 Hz 频率的噪声会显著增大。

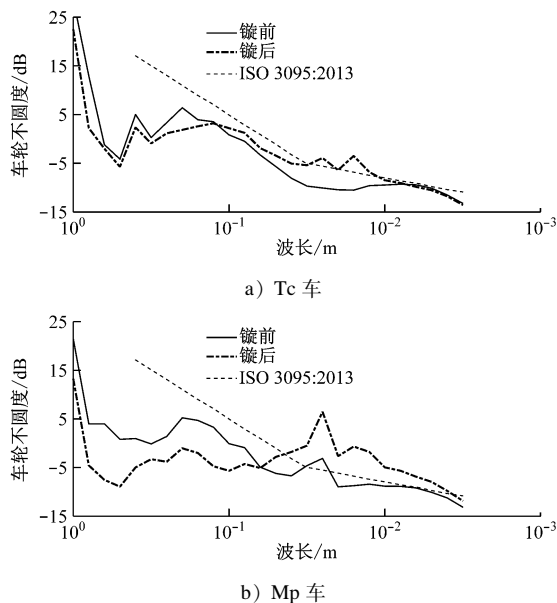


图6 车轮镟修前后不圆度波长结果比较

Fig. 6 Comparison of wheel out-of-roundness wave length results before and after wheel reprofiling

对比图 6 a) 与图 6 b) 可见:在长波范围内,经镟修后的 Mp 车轮不圆度下降较为显著;在其短波范围内, Mp 车轮不圆度在镟修后剧烈增大,并在波长 0.025 m 处,超出 ISO 3095:2013 中限值要求高达 12 dB,使得 Mp 车整体车轮不圆度显著高于 Tp 车车轮不圆度;Tp 车的短波不圆度在镟修后也升高至标准限值之上。

2.3 钢轨粗糙度测试分析

选取运行时某噪声较高的两站之间的线路,进行钢轨粗糙度测试,同时包含直线与曲线区间。测试现场钢轨状况,如图 7 所示。轨道光带情况较正常,钢轨表面存在较为粗糙的情况,且曲线区间钢轨表面情况较直线段差,且波长为 30 ~ 40 mm 的短波波磨较为显著。

图 8 所示为该区间的钢轨粗糙度级测试结果,曲线区段钢轨粗糙度级在全波长范围内均高于直线区间,且两者均高于 ISO 3095:2013 标准中的限值要求,会对轮轨及车内噪声产生显著影响。

3 车辆噪声与粗糙度相关性分析

3.1 车辆噪声测试与标准

结合上述轮轨粗糙度分析结果,对地铁在相应区段运行时的噪声特性进行测试分析,两站间采用最高运行速度 80 km/h 进行匀速运行,分析轮轨粗

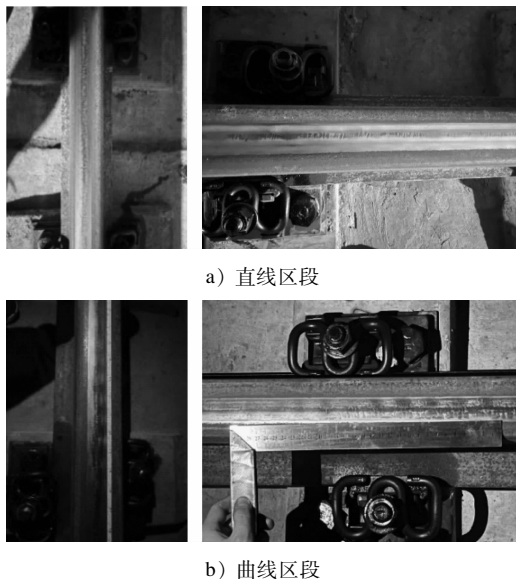


图7 测试现场钢轨不同位置的表面状态

Fig. 7 Surface condition of rails at different locations on testing site

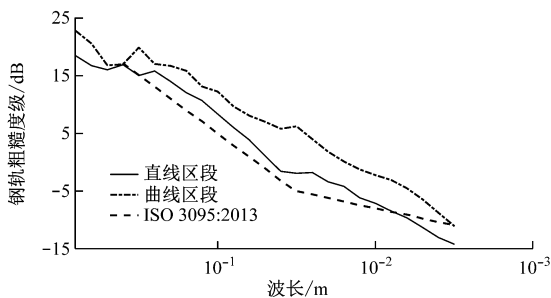


图8 不同位置钢轨粗糙度级对比

Fig. 8 Comparison of rail roughness level at different locations

糙度与车辆噪声响应的影响以及车内噪声较高的原因。

根据国家 GB 3449—2011《声学-轨道车辆内部噪声测量》标准^[8],在 Tc 车与 Mp 车的车内中部噪声测点布置在距地板 1.5 m 处(见图 9 a))。同时为了分析对轮轨噪声的影响,在 Tc 与 Mp 车的转向架区域分别安装了传声器,如图 9 b)所示。

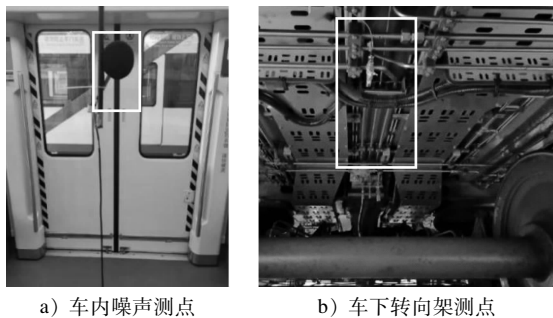


图9 车辆噪声测点现场

Fig. 9 Vehicle noise measurement positions on site

根据国家标准 GB 14892—2006《城市轨道交通列车噪声限值 and 测量方法》^[9] 对城市轨道交通系统中地铁和轻轨噪声等效声级的最大容许限值应符合要求,如表 1 所示。以测点处实测值计算出的连续等效 A 计权声压级为最终结果。

表 1 车内噪声 A 计权声压级最大容许值

Tab.1 Maximum permissible A-weighted sound pressure level of interior noise

车辆类型	运行线路区域	位置	噪声限值/dB(A)
地铁	地下	司机室内	80
		客室内	83

3.2 车辆噪声时域分析

地铁列车在某两站之间的线路运行,选取站间运行速度为 80 km/h 的工况进行噪声测试,并且结合上述轮轨粗糙度进行分析。在镟修前后工况下,车辆噪声比较如图 10 所示(其中直线段选取:50 ~ 70 s 时间段;曲线段选取:90 ~ 110 s 时间段进行分析)。

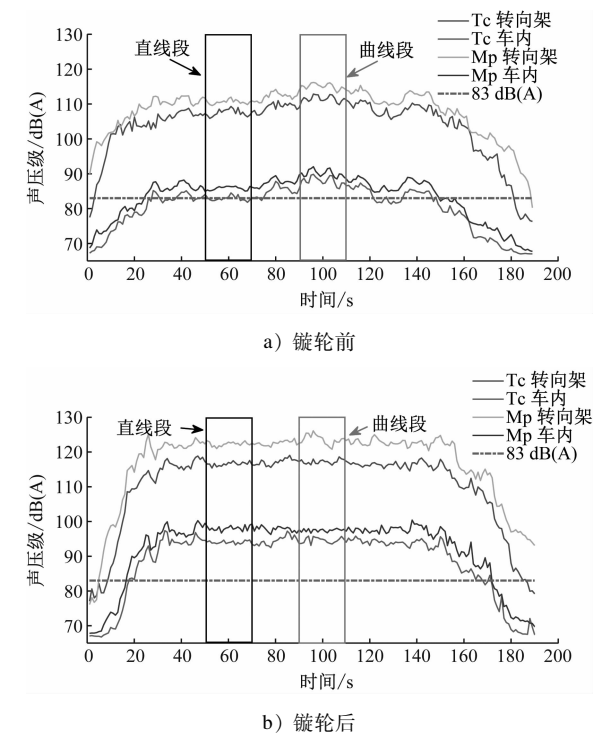


图 10 镟修前后车辆噪声比较

Fig. 10 Comparison of vehicle noise before and after wheel reprofiling

车辆在车速 80 km/h 时,通过比较轮轨噪声与车内噪声时域结果可知,镟轮引起了轮轨噪声与车内噪声提高,增加高达 10 dB(A) 以上。这与经镟

修后两车的车轮短波粗糙度增大有关。同时对比地铁在直线段与曲线段上的运行噪声,镟修前曲线上的车辆噪声显著高于直线,而镟修后两者由于线路差异引起的噪声差值减小,表明随着车轮粗糙度的增大,此时钢轨粗糙度对噪声的影响显著降低。

3.3 车辆噪声频域分析

针对上述线路噪声测试中直线与曲线区间,分别进行转向架区域轮轨噪声与车内噪声的频谱分析。车轮镟修前后,两节车在直线与曲线区间,其转向架区域噪声频谱结果如图 11 所示。

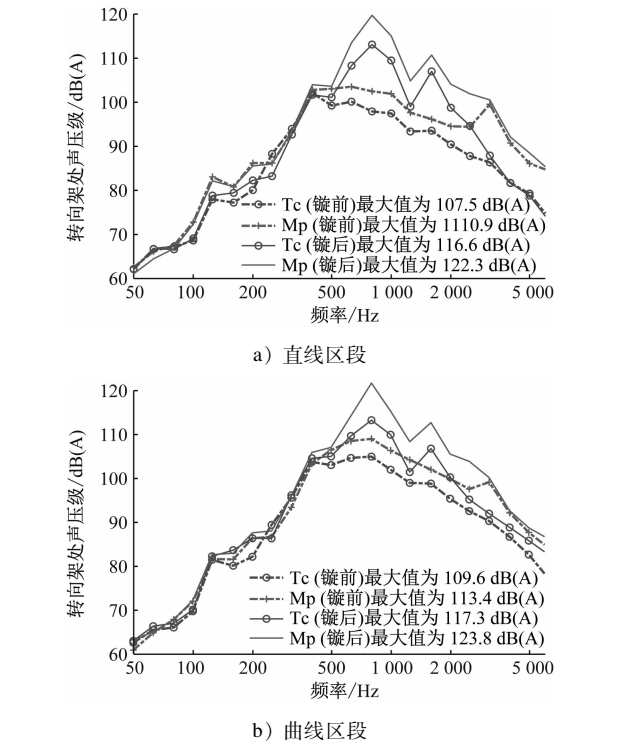


图 11 镟轮前后转向架处噪声频谱

Fig. 11 Spectrum of bogie noise before and after wheel reprofiling

两车运行在直线与曲线位置的转向架处噪声声压级结果列于表 2。结合噪声频谱可知,Mp 车除轮轨噪声外,由于电机与齿轮箱噪声源,其转向架区域噪声显著高于 Tc 车 3.0 ~ 6.5 dB(A),且主要集中在 500 Hz 以上的高频区域,低频区域由于车轮粗糙度未产生增加,因而差异较小。两节车均因镟修原因,引起转向架区域噪声增大 5 dB(A) 以上,且 Mp 车轮粗糙度增加更为显著,因而出现 Mp 车转向架区域噪声比 Tc 车增加更大的情况。

镟修前,由于曲线粗糙度较高,车辆在曲线线路上运行噪声比直线上高约 4 dB(A);镟修后由于

车轮粗糙度增大,线路的影响相对降低,在直线与曲线上的噪声差值降低至 1 dB(A)左右。

表 2 转向架处噪声声压级

Tab.2 Sound pressure level of bogie noise

单位: dB(A)

工况	Mp 车声压级			Tc 车声压级		
	直线段	曲线段	差值	直线段	曲线段	差值
镟前	110.9	115.1	4.2	107.5	111.6	4.1
镟后	122.3	123.8	1.5	116.6	117.3	0.7
差值	-11.4	-8.7		-9.1	-5.7	

镟修前后车内噪声结果如图 12 所示。镟修前,曲线区间车内噪声与直线区间相比,高出 4 dB(A)以上;镟修后,Tc 与 Mp 车内噪声都显著增大,与转向架区域噪声结果相似,直曲线区间差异减小。

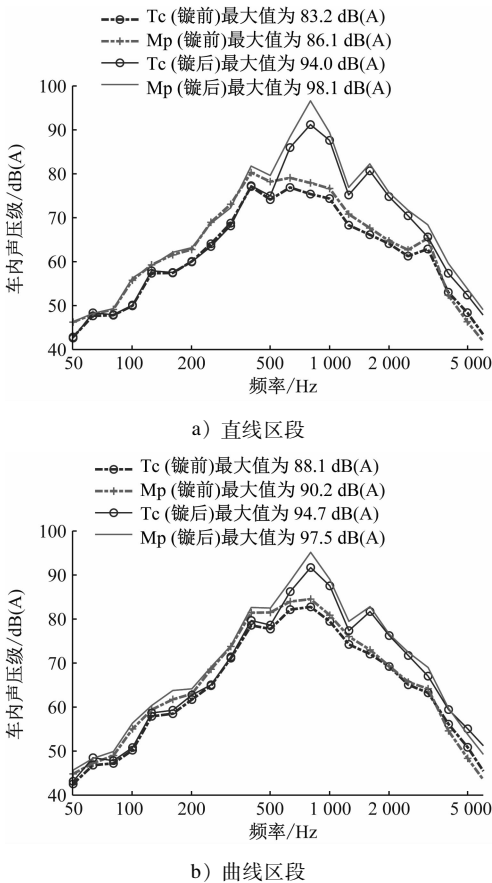


图 12 镟修前后车内噪声频谱

Fig. 12 Spectrum of interior noise before and after wheel reprofiling

表 3 为两节车的车内噪声声压级结果,Mp 车在直线上由于镟轮增大了 12 dB(A),Tc 车在直线上增大了 10.8 dB(A)。

表 3 车内噪声声压级

Tab.3 Sound pressure level of interior noise

单位: dB(A)

工况	Mp 车声压级			Tc 车声压级		
	直线段	曲线段	差值	直线段	曲线段	差值
镟前	86.1	90.2	4.1	83.2	88.1	4.9
镟后	98.1	97.5	-0.6	94	94.7	0.7
差值	-12.0	-7.3		-10.8	-6.6	

4 结语

本文针对国内某地铁车辆运行噪声问题,以 Tc 车和 Mp 车为研究对象,对车轮镟修前后的轮轨与车内噪声进行对比,并测试其车轮不圆度与线路不同位置的钢轨粗糙度,分析车辆噪声与轮轨粗糙度的相关性,主要研究结论如下:

1) 线路上曲线段的钢轨粗糙度比直线段更大,且均显著超出国际标准 ISO 3095:2013 的标准,是该地铁列车运行噪声较大的主要原因。

2) 车轮轮周的低阶多边形幅值较高,车轮镟修后,其低阶车轮轮周多边形及长波不圆度均有所下降,但其高阶多边形与短波粗糙度显著增大,由于该短波粗糙度幅值的增大,引起车辆转向架区域与车内噪声升高达 10 dB(A)以上。

3) 因镟修工艺导致 Mp 车相对于 Tc 车的车轮短波粗糙度增加更大,Mp 车的噪声相对于 Tc 车增加更为显著。车轮粗糙度对噪声的激励贡献增大,而钢轨的影响相对下降,因而曲线段镟轮后噪声相对增幅较小,直线与曲线段上车辆噪声结果相近。建议对车轮再次打磨,消除短波粗糙度,从而降低车辆噪声。

综上所述,本文研究的地铁列车,车轮镟修工艺尚未有针对车轮粗糙度有明确规定的规范要求,在镟修时,由于操作工艺等原因仅降低了低阶的车轮轮周多边形幅值与长波粗糙度等级,但同时大大增加了噪声影响较大的短波粗糙度,引起车辆轮轨噪声与车内噪声的升高。因而,本项目的研究,为轮轨运维过程进一步开展基于车轮粗糙度指标管控的车轮镟修工艺研究提供了方向,为更加科学的智能化运维提供参考依据。

参考文献

[1] THOMPSON D J, JONES C, GAUTIER P E. Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control[M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.

(下转第 249 页)