

城轨车辆设备悬挂点的振动测试及特性分析

丁 杰, 尹 亮

(湖南文理学院 机械工程学院, 湖南 常德 415000)

摘要:为获得城轨车辆设备悬挂点的振动特性,以南京地铁宁天线的车辆为研究对象,针对车底悬挂的牵引逆变器、辅助变流器、高压电器箱、扩展供电箱和空心电抗器等设备开展线路运行的振动测试,并与 GB/T 21563—2018 进行对比分析。研究表明,各测点在 GB/T 21563—2018 推荐频率范围内的有效值均在标准值 50% 之内,大部分测点的振动有效值小于标准值的 20%,小部分测点在 0~3 200 Hz 频率范围的有效值超过标准值。牵引逆变器、高压电器箱、扩展供电箱和空心电抗器等设备的振动频谱存在一定的相似性,大致分为低频、中频和高频 3 个区域,而辅助变流器的振动频谱集中在低频和高频 2 个区域。实际线路振动测试获得的设备悬挂点特性可为车辆及设备的结构设计提供指导。

关键词:城轨车辆;悬挂;振动测试;牵引逆变器;辅助变流器

中图分类号: TH113.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095—0373(2021)04—0066—07

城市轨道交通具有安全、节能、环保、运量大、全天候等特点,是大中城市公共交通的骨干。城轨车辆为了实现乘车空间的最大化,尽可能地将设备悬挂在车体底部。车辆运行时,车体受轮轨激励而产生振动,部分车载设备内部包含冷却风机、变压器等激励源,这些振动会传递至车体底梁与设备的悬挂点。因此,设备悬挂点的振动特性对于车辆运行安全至关重要。

李哲豪等^[1]对比分析了某城际列车变压器的弹性吊挂与刚性吊挂对车体地板振动的影响。王云鹏等^[2]利用仿真与振动台试验相结合的方法,分析了车辆吊挂设备刚性连接与弹性连接的振动传递特性。陈翔宇^[3]基于刚柔耦合动力学理论,对车体与车下设备的耦合振动问题进行了仿真分析。徐宁等^[4]分析了车辆与吊挂设备耦合作用下的振动传递及平稳性。王思明等^[5]通过有限元模型分析了地铁车辆设备不同吊挂刚度时的地板振动响应。郭金莹等^[6]建立高速动车组车体与车下设备的垂向动力学模型,分析车下设备对舒适度的影响。王国平等^[7]根据地铁车辆的实际结构,在实验室条件下建立紧固件连接预紧力测试系统,以验证地铁车辆底架吊挂设备连接的可靠性。陈东^[8]根据车辆的动力学工况,编制车下设备吊挂点的载荷谱,并开展车下吊挂点的疲劳强度评估。目前,针对高铁、动车、机车和城轨等车辆的设备开展振动与冲击试验的标准是 GB/T 21563—2018,该标准是在 IEC 61373: 1999 和 IEC 61373: 2010 基础上制定的,功能性振动测试数据来源于 20 多年前铁路运用的问卷调查结果。现场应用情况表明,基于实际线路的运行情况开展振动测试及特性分析是极为必要的^[9]。

以南京地铁 S8 号线(又称宁天线)的列车为测试对象,获得牵引逆变器、辅助变流器、高压电器箱、扩展供电箱和空心电抗器等设备的吊挂点振动特性,并与 GB/T 21563—2018 进行对比分析。通过实际线路振动测试获得的设备悬挂点特性,可为车辆及设备的结构设计提供指导。

收稿日期:2021—07—04 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20210152

基金项目:湖南省自然科学基金(2020JJ4448);湖南省高等学校应用特色学科(湘教通 XJT[2018]469);湖南省高等学校科技创新团队(湘教通 XJT[2019]379);湖南文理学院科技创新团队(校办通[2020]26 号);湖南文理学院博士启动基金(19BSQD26);常德市 2020 年度指导性科技计划项目(2020ZD34)

作者简介:丁杰(1979—),男,正高级工程师,研究方向为轨道交通振动噪声、电力电子器件可靠性。E-mail:dj8083@126.com

丁杰,尹亮.城轨车辆设备悬挂点的振动测试及特性分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(4):66-72.

1 振动测点布置

南京地铁宁天线的一期工程从泰山新村站至金牛湖站,全长 45.2 km,其中地下段 12.2 km、高架段 33 km,列车采用宽体鼓形 B 型列车 4 节编组,最高运行速度为 120 km/h。南京地铁宁天线桥隧结合,车辆的载容量大、运行速度高,因此,线路及车辆具有典型性。为了获得城轨车辆设备悬挂点的振动特性,以南京地铁宁天线 051 号列车为振动测试对象。将三向加速度传感器布置在牵引逆变器、辅助变流器、高压电器箱、扩展供电箱和空心电抗器等设备的吊耳上,测点编号为 N1~N10,如图 1 所示。三向加速度传感器的纵向、横向和垂向分别与列车的长度、宽度和高度方向对应。在吊装牵引逆变器和辅助变流器的车体边梁上各布置一个单向加速度传感器,测点编号为 N11 和 N12,用于采集车体边梁垂向的振动加速度数据。测试时车厢内使用沙袋模拟地铁车辆超员载荷 9 人/m² 的 AW3 工况,测试的线路区间为金牛湖站—泰山新村站,振动测试最大频率取 3 200 Hz。振动测试现场如图 2 所示。

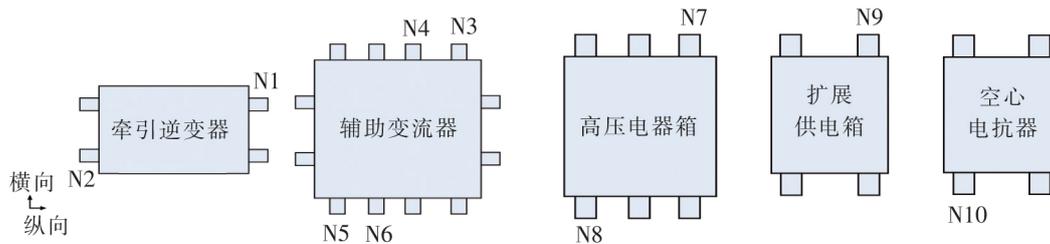


图 1 设备悬吊振动测点位置示意



图 2 振动测试现场

2 振动时域特性分析

城轨车辆在实际线路中运行时,存在启动加速、匀速行驶和减速停车等工况,牵引逆变器、辅助变流器、高压电器箱、扩展供电箱和空心电抗器等设备的运行状况也会不同,因此,不同工况下各测点的振动大小及振动频谱存在较大的差异。本节针对不同的运行工况首先从时域角度对各测点的振动情况进行分析,并与 GB/T 21563—2018 标准进行对比。

2.1 各工况振动有效值对比

城轨车辆在实际线路中匀速行驶的速度主要与站间距、牵引加速度、制动减速度和列车牵引策略等因素有关^[10],因此,城轨车辆匀速行驶的速度通常小于列车的设计最高时速,且不同站点间的匀速行驶速度有差别。通过对南京地铁宁天线的运行情况进行分析,发现车辆大部分运行时间的匀速行驶速度在 77 km/h 左右,极少数运行时间的匀速行驶速度达到 96 km/h。对设备在停车工况以及 77 km/h 与 96 km/h 匀速行驶工况下,各测点在 0~3 200 Hz 频率范围的垂向振动有效值进行对比分析,如图 3 所示。可以看出:(1)除辅助变流器的测点在停车和运行时的振动有效值接近外,其余测点在运行工况下的振动远大于在停车工况下的振动,这是由于列车停止时,辅助变流器仍在工作中,而牵引逆变器、高压电器

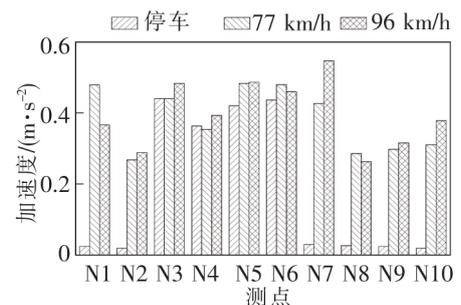


图 3 不同速度下的各测点 0~3 200 Hz 垂向振动有效值对比

箱、扩展供电箱和空心电抗器等设备并非完全工作;(2)速度对振动有效值有一定的影响,然而由 77 km/h 增大至 96 km/h,测点的振动并没有明显的增大趋势。

考虑到车辆大部分运行时间的匀速行驶速度为 77 km/h,图 4 为该工况下各测点在 0~3 200 Hz 频率范围的纵向、横向和垂向振动有效值对比。可以看出各测点 3 个方向的振动大小没有统一的趋势。具体的特征将结合相关标准进行分析。

2.2 测试有效值与标准值对比

GB/T 21563—2018 标准根据设备在车体上的安装位置分为 1 类车体安装、2 类转向架安装和 3 类车轴安装。其中,1 类车体安装又可分为 A 级车体直接安装的柜体组件、设备和部件,B 级车体直接安装的柜体内部的组件、设备和部件。按照标准分类,本次测试的设备均属于 1 类 A 级。

标准规定的功能振动试验加速度有效值量级 A_{rms} 是 20 多年前通过英国、法国、奥地利、韩国等国家铁路运用的问卷调查获得的。1 类 A 级的加速度有效值量级问卷调查结果如表 1 所示。 A_{rms} 是平均量级 A_{avg} 与标准偏差 A_{std} 之和,由此确定 1 类 A 级的纵向、横向和垂向的加速度有效值分别为 0.50、0.37 和 0.75 m/s^2 。

表 1 1 类 A 级的加速度有效值量级问卷调查结果

方向	最大量级 $A_{max}/(m \cdot s^{-2})$	平均量级 $A_{avg}/(m \cdot s^{-2})$	标准偏差 $A_{std}/(m \cdot s^{-2})$	该值次数
纵向	0.82	0.30	0.20	8
横向	0.43	0.29	0.08	15
垂向	1.24	0.49	0.26	19

标准规定了如图 5 所示的加速度功率谱密度 (acceleration spectral density, ASD) 形式及频率范围。1 类 A 级的纵向、横向和垂向的 ASD 量级标称值分别为 0.007 3、0.004 1、0.016 6 $(m/s^2)^2/Hz$, 频率范围 f_1 和 f_2 与设备质量 M 有关。当 $M \leq 500$ kg 时, $f_1 = 5$ Hz, $f_2 = 150$ Hz; 当 500 kg $< M < 1$ 250 kg 时, $f_1 = (1$ 250/ $M) \times 2$ Hz, $f_2 = (1$ 250/ $M) \times 60$ Hz; 当 $M \geq 1$ 250 kg 时, $f_1 = 2$ Hz, $f_2 = 60$ Hz。牵引逆变器、高压电器箱、扩展供电箱和空心电抗器的质量分别为 294、413、55、465 kg, 频率范围是 5~150 Hz。辅助变流的质量为 1 650 kg, 频率范围是 2~60 Hz。

以标准中根据设备的质量推荐的有效值计算频率范围,得到 77 km/h 匀速行驶工况下,各测点的纵向、横向和垂向振动有效值对比如图 6 所示。可以看出各测点在标准推荐频率范围内的有效值都在标准值 50% 之内,大部分数值都小于标准值的 20%。结合图 4 来看,仅有 3 个测点部分方向(N2 横向、N5 纵向和 N7 横向)在 0~3 200 Hz 的有效值超出了标准值,各测点 3 个方向的振动有效值接近,而 GB/T 21563—2018 中规定的标准值,垂向 > 纵向 > 横向,横向仅为垂向的 50%。0~3 200 Hz 频率范围的有效值大于 5~150 Hz 或 2~60 Hz 频率范围的有效值,这是由于设备悬挂点具有较大的中高频振动,可以从频域角度作进一步分析。一般

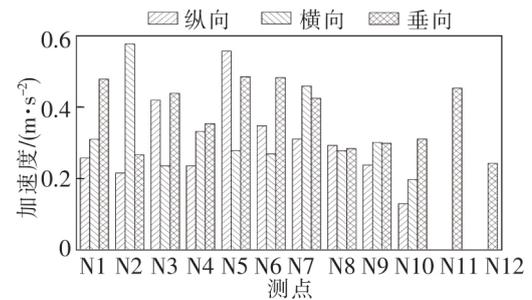


图 4 匀速行驶工况的各测点 0~3 200 Hz 振动有效值对比

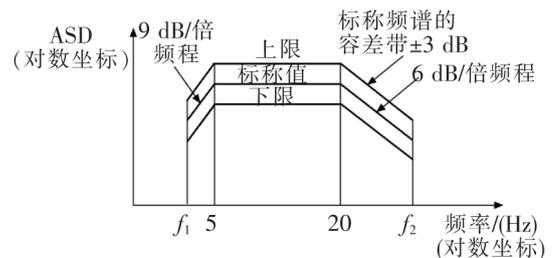


图 5 标准规定的 ASD 频谱

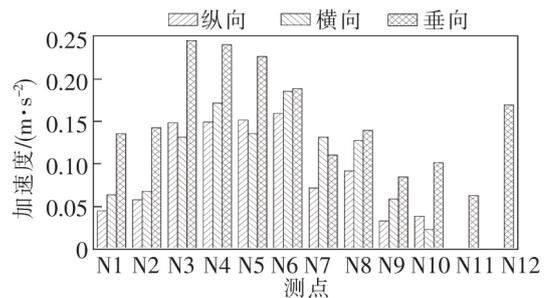


图 6 匀速行驶工况的各测点标准频率范围振动有效值对比

而言,低频振动对设备的结构疲劳寿命产生较大影响,而高频振动主要导致电子产品的故障,对设备的结构失效影响较小^[11]。GB/T 21563—2018 主要从结构可靠性以及 20 多年前的振动试验技术水平角度考虑,只采用了低频段的 ASD 频谱,未考虑中高频振动的影响。

2.3 测试峰值与标准值对比

根据 GB/T 21563—2018 关于冲击试验的规定,需要对设备施加持续时间为 30 ms 的脉冲谱,其中横向和垂向峰值为 30 m/s^2 ,纵向峰值为 50 m/s^2 。提取测试过程中各测点的峰值,得到如图 7 所示的冲击峰值对比。由图 7 可知,各测点的冲击峰值均远低于标准值,除 N2 测点横向冲击峰值为 14.5 m/s^2 ,是标准冲击峰值的 48.3%,大部分测点的冲击峰值在标准冲击峰值的 30% 以下。标准规定的冲击试验是沿纵向、横向和垂向的正反方向分别进行 3 次,一共 18 次冲击,以此检验设备经受冲击试验后是否出现螺栓松动、结构断裂等故障现象。从城轨车辆运行过程中的设备振动测试数据提取出的冲击峰值来看,每天经受的冲击次数为数十次,按设计的结构寿命 30 a 累计,设备经受的冲击次数显著,因此,振动测试的冲击峰值应明显小于标准冲击峰值,才能确保设备的结构可靠性。

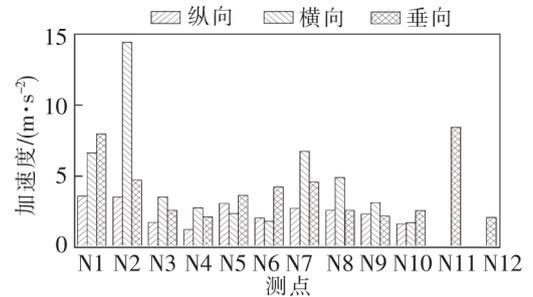


图 7 各测点的冲击峰值对比

3 振动频域特性分析

为进一步对比分析各设备的振动特性,下面从频域角度开展不同工况下各测点的振动特性分析。

3.1 匀速行驶工况下的振动频谱

图 8 为城轨车辆 77 km/h 匀速运行时各设备吊耳测点的三向振动频谱。由图 8 可以看出:(1)牵引逆变器、高压电器箱、扩展供电箱和空心电抗器等设备的振动频谱存在一定的相似性,大致分为低频(200 Hz 以下)、中频(400~800 Hz)和高频(2 800~3 000 Hz)3 个区域,这些设备的测点基本包含 2、10、18、25、51、103、618、2 882 Hz 等频率的振动峰值;(2)辅助变流器的振动频谱集中在低频(100 Hz 以下)和高频(2 400~3 200 Hz)2 个区域,其中 100 Hz 及高频的振动是由辅助变流器内部的变压器电磁振动引起的。

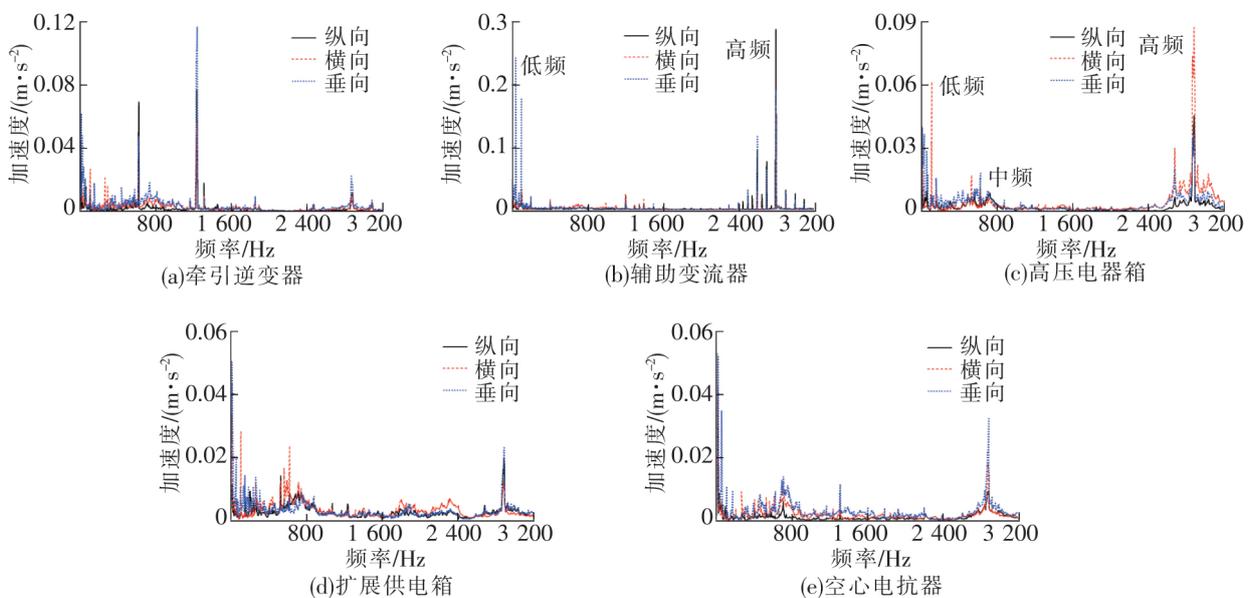


图 8 匀速行驶时各设备的振动频谱对比

将辅助变流器吊耳测点的 100 Hz 振动有效值以及靠近辅助变流器吊耳的边梁 100 Hz 振动有效值列出,如图 9 所示。可以看出辅助变流器吊耳测点中,N3 和 N4 的 100 Hz 振动较大,而 N5 和 N6 的 100

Hz 振动较小,这与 N3、N4 测点靠近辅助变流器内部的变压器有关,变压器在电源频率 50 Hz 的激励下,因磁致伸缩效应而产生以 100 Hz 为基波,其倍频为谐波的电磁力波^[12],振动经过变压器的安装支撑传递至辅助变流器柜体吊耳,再经车体边梁传递至车厢地板。根据大量的测试及数据统计获得的经验表明,变压器的振动导致辅助变流器柜体吊耳处的 100 Hz 振动加速度超过 0.35 m/s²,极易引起车辆地板局部区域的振动过大,造成乘客脚感发麻^[13]。从 100 Hz 的振动加速度数值来看,该变压器的振动较小,不会引发地板振动过大的问题。

3.2 停车和行驶工况的振动频谱对比

图 10 为停车和匀速行驶工况下,高压电器箱和辅助变流器吊耳测点的垂向振动频谱。由图 10(a)所示的 0~3 200 Hz 频率范围的振动频谱可以看出,高压电器箱吊耳的振动频谱在停车工况集中在 150 Hz 以下,行驶工况下在整个频率范围内振动明显增大。由图 10(b)所示的 0~200 Hz 频率范围的振动频谱可以看出,行驶工况下,辅助变流器吊耳在 37 Hz 以下的低频振动有所增大,电磁振动几乎没有变化,37 Hz 的振动在 2 种工况下幅值相同,这是由辅助变流器内部冷却风机转频造成的。

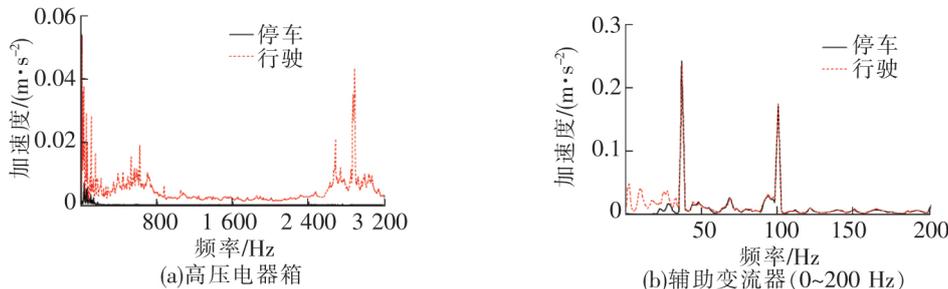


图 10 停车和行驶工况的垂向振动频谱对比

3.3 启动过程分析

城轨车辆达到匀速行驶的速度较高,此时的振动频谱差别不明显,城轨车辆停车时的振动频谱与匀速行驶工况有较大差异,因此,下面利用如图 11 所示的时间-频率-振动幅值色谱图对城轨车辆启动过程中各测点的振动频谱进行分析,以了解各测点的频谱特点。

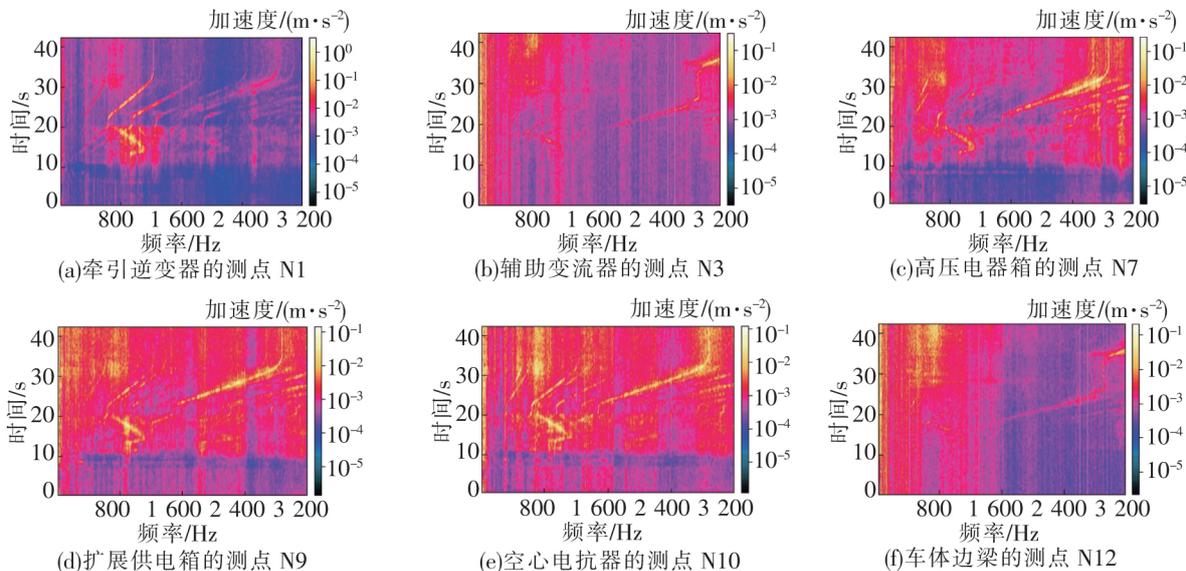


图 11 不同测点的时间-频率-振动幅值色谱图

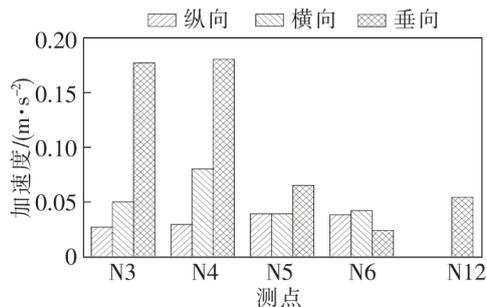


图 9 辅助变流器各测点及车体边梁的 100 Hz 振动有效值

由图 11 可以看出:

(1)牵引逆变器、高压电器箱、扩展供电箱和空心电抗器的色谱图具有一定的相似性,各测点 400 Hz 以下的低频振动几乎不随速度变化,由于车轮非圆化引起的振动随速度变化的特征较明显,可以排除车轮非圆化对低频振动的影响,各测点共同包含的 10、18、25、51、103 Hz 等振动频率是由车体的固有特性引起的^[14]。

(2)牵引逆变器吊耳在 600~1 200 Hz 的频率范围内振动较大,振动有效值远大于其他测点在该频率范围内的有效值,与牵引逆变器在该频率范围内模态密集有关。

(3)辅助变流器测点在整个启动过程中都包含了明显的电磁振动特征,且电磁振动的大小在启动过程中变化不大。

(4)将图 11(f)与图 11(b)进行对比,车体边梁的测点 N12 因靠近辅助变流器,其色谱图与辅助变流器的测点 N3 基本相同,说明辅助变流器的振动通过柜体吊耳传递至车体边梁,N12 与 N3 的色谱图差异是由于车体边梁振动还受到车体其他设备的影响。

(5)从色谱图表现出不同时间和频谱下对应的振动幅值特性,与 GB/T 21563—2018 给出的振动有效值相比,提供的信息更加丰富,由于城轨车辆对设备的轻量化设计要求高,设备可根据实际线路振动测试数据开展针对性的结构设计,较 GB/T 21563—2018 针对高铁、动车、机车和城轨车辆设备均采用相同的数值会更加合理,基于实际线路振动测试的方法可为车辆及设备的结构设计提供指导。

4 结论

通过对南京地铁宁天线城轨车辆线路运行时设备悬挂点的振动测试及数据分析,可以得到以下结论:

(1)各测点在 GB/T 21563—2018 推荐频率范围内的有效值均在标准值 50% 之内,大部分测点的振动有效值小于标准值的 20%,小部分测点在 0~3 200 Hz 频率范围的有效值超过标准值,GB/T 21563—2018 标准未考虑中高频振动的影响。

(2)牵引逆变器、高压电器箱、扩展供电箱和空心电抗器等设备的振动频谱存在一定的相似性,大致分为低频(200 Hz 以下)、中频(400~800 Hz)和低频(2 800~3 000 Hz)3 个区域,而辅助变流器的振动频谱集中在低频(100 Hz 以下)和高频(2 400~3 200 Hz)2 个区域,100 Hz 及高频振动来源于辅助变流器内部的变压器电磁振动,需要重点关注。

(3)与 GB/T 21563—2018 给出的振动有效值和仅关注低频振动相比,实际线路振动测试获得的设备悬挂点特性提供的信息更加丰富,可为车辆及设备的结构设计提供指导。

参 考 文 献

- [1]李哲豪,周劲松,刘国漪. 城际列车车下变压器弹性吊挂刚度设计[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(6): 7-12.
- [2]王云鹏,徐聪,汤劲松,等. 吊挂方式对铁道车辆设备模态和传递特性的影响[J]. 铁道车辆, 2018, 56(12): 1-4.
- [3]陈翔宇. 车体与车下设备耦合振动响应及减振控制研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
- [4]徐宁,任尊松,李响,等. 车辆与吊挂设备耦合作用垂向系统振动传递及平稳性研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(6): 965-975.
- [5]王思明,张立民. 某型地铁车辆设备吊挂刚度与车体模态匹配研究[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(4): 116-118, 130.
- [6]郭金莹,石怀龙,邬平波,等. 动车组车下设备对舒适度的影响分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 227-236.
- [7]王国平,孟鹤,施江泳,等. 地铁车辆底架吊挂设备连接紧固件特性研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2019, 42(5): 25-28.
- [8]陈东. 服役条件下动车组车下吊挂局部疲劳强度研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
- [9]丁杰,张平,王鹏. 机车车辆设备振动试验标准与实测数据的分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(22): 129-137.
- [10]贺广宇,郝新军,李一楠,等. 基于列控车载设备制动曲线的高速列车牵引计算平台[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 108-114.
- [11]姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京:科学出版社, 2018.

- [12]丁杰,张平,尚敬,等. 地铁辅助变流器用变压器电磁振动计算与减振分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(3): 59-66.
- [13]王永胜,丁杰,臧晓斌,等. 车载设备对地铁车厢地板振动影响及评估方法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(7): 775-780.
- [14]高国川,张建超,郭文武. 基于刚柔耦合模型的动车组齿轮箱箱体振动特性研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(2): 73-80.

Vibration Test and Characteristic Analysis of Mass Transit Vehicle Equipment Suspension Point

Ding Jie, Yin Liang

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Art and Science, Changde 415000, China)

Abstract: In order to obtain the vibration characteristics of mass transit vehicle equipment suspension points, the vehicle of Nanjing Metro Ningtian line was taken as the research object. The vibration test of line operation was carried out for traction inverter, auxiliary converter, high voltage electrical box, extended power supply box and air core reactor suspended under the vehicle, and compared with GB/T 21563—2018. The research results show that the effective values of each measuring point in the frequency range recommended by GB/T 21563—2018 are within 50% of the standard value, the vibration effective values of most measuring points are less than 20% of the standard value, and the effective values of a small number of measuring points in the frequency range of 0~3 200 Hz exceed the standard value. The vibration spectrum of traction inverter, high-voltage electrical box, expansion power supply box and air core reactor is similar, which can be roughly divided into three regions: low frequency, medium frequency and high frequency, while the vibration spectrum of auxiliary converter is concentrated on two regions: low frequency and high frequency. The characteristics of equipment suspension points obtained from the actual line vibration test can provide guidance for the structural design of vehicles and equipment.

Key words: mass transit vehicle; suspension; vibration test; traction inverter; auxiliary converter