

文章编号:1006-1355(2024)01-0296-07

高寒动车组牵引变流器的振动测试及分析

丁杰^{1,2}

(1. 湖南文理学院 机械工程学院, 湖南 常德 415000; 2. 湖南文理学院 国际学院, 湖南 常德 415000)

摘要:针对我国西北部地区恶劣天气和老化线路影响高寒动车组安全可靠运行的问题,开展实际线路运行时振动测试及分析。根据即墨至乌鲁木齐的车辆运行速度和地形特征,划分青岛—济南、济南—西安、西安—兰州、兰州—乌鲁木齐4个区间,对比分析不同区间内的振动有效值。结合IEC 61373标准,对比分析实测振动有效值、冲击峰值与标准值的差异。通过振动频谱分析牵引变流器不同部件的振动特性,利用统计容差法编制不同部件的实测载荷谱,并利用有限元方法分析中频和低频振动对牵引变流器结构的影响。结果表明,济南—西安区间内的振动高于其他区间,西安—兰州区间内的冲击高于其他区间;柜体吊耳和控制箱的振动主要体现在垂向与纵向,而横向较小,且以中频段和低频段为主;冷却风机的振动集中在低频段,来自于风机转频;功率模块振动以横向和纵向为主,中频段和高频段的振动远大于低频段。

关键词:振动与波;高寒动车组;牵引变流器;线路;振动测试;载荷谱

中图分类号:U260.14'3

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2024.01.045

Vibration Test and Analysis of the Traction Converter of Alpine Electric Multiple Units

DING Jie^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, Hunan, China;

2. International College, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, Hunan, China)

Abstract: In view of the problem that bad weather and aging lines in Northwest China affect the safe and reliable operation of alpine electric multiple units, the vibration test and analysis of actual line operation are carried out. According to the train operating speed and topographic characteristics of the line from Jimo to Urumqi, the line is divided into four sections, such as Qingdao - Jinan, Jinan - Xi'an, Xi'an - Lanzhou and Lanzhou - Urumqi. The vibration effective values of different sections are compared and analyzed. According to IEC 61373 standard, the differences of measured vibration effective values, shock peak values and standard values are compared and analyzed. The vibration characteristics of different parts of the traction converter are analyzed through the vibration spectrum. The measured load spectrum of different parts is compiled by means of the statistical tolerance method. And the influence of medium and high frequency vibration on the structure of the traction converter is analyzed by means of the finite element method. The results show that the vibration of Jinan - Xi'an section is higher than that of the other sections, and the shock of Xi'an - Lanzhou section is higher than that of the other sections. The vibration of the lifting lug of the cabinet and the control cabinet is mainly reflected in the vertical and longitudinal directions, while the horizontal vibration is small, and mainly in the medium and low frequency band. The vibration of the cooling fan is concentrated in the low frequency band, which comes from the rotation frequency of the fan. The vibration of power module is mainly in the transverse and longitudinal directions, and the vibration in the medium and high frequency band is much greater than that in the low frequency band.

Key words: vibration and wave; alpine electric multiple units; traction converter; line; vibration test; load spectrum

动车组具有轴重轻、加速性能好、运用灵活等特点,在我国轨道交通中得到广泛应用。与此同时,动

车组高速运行中受到各种因素的激励而产生振动,对车辆运行的安全性和稳定性产生较大影响,因此,动车组的振动问题受到人们的高度关注。

宋志坤等^[1]针对动车组车轮多边形化问题,将磨耗模型与车辆/轨道耦合动力学模型相结合,利用仿真方法分析动车组运行过程中的车轮多边形发展历程。宫岛等^[2]通过车轮踏面测试、车体与构架振动测试以及车体模态测试,发现动车组车体异常振动原因并提出改进措施。王鹏等^[3]利用有限元方法计算不同质量条件下的某高速动车组车体振动模态。郭

收稿日期:2022-08-01

基金项目:湖南省自然科学基金面上资助项目(2020JJ4448);

湖南省教育厅科学研究重点资助项目(21A0416);

湖南文理学院科技创新团队资助项目(校办通

[2020]26号)

作者简介:丁杰(1979—),男,湖南常德市人,博士,正高级工程师,专业方向为振动噪声与电力电子器件可靠性。

E-mail: dj8083@126.com

金莹等^[4]通过建立高速动车组垂向动力学模型,分析车下设备对车体舒适度指标的影响。徐宁等^[5]从时域和频域角度分析高速动车组在武广客运专线运行时的振动响应和振动传递特性。我国西北部地区具有高温、高寒、强风沙等复杂的气候和线路老化等恶劣条件,对动车组的运行提出了严苛的要求。李国栋等^[6]针对动车组在兰新客运专线由200 km/h提速至250 km/h后的动力学指标明显恶化问题,通过仿真分析与振动测试提出改善措施。高阳等^[7]针对我国西北部运行的高速动车组开展车轮多边形随里程变化的发展规律研究。张志昂等^[8]对某高寒动车组进行线路运行测试,获得牵引变流器的振动和温度数据。

以高寒动车组的关键设备牵引变流器为测试对象,开展动车组在从即墨至乌鲁木齐实际线路上运行时的振动测试,从时域和频域角度分析牵引变流器柜体吊耳及其内部安装部件的振动特性,利用结构仿真分析中频和低频振动对牵引变流器的影响。

1 线路运行条件的振动测试

为获得高寒动车组牵引变流器在实际线路运行条件下的振动特性,选取乌鲁木齐铁路局的CRH2G型2421号高寒动车组开展振动测试,在3号车底部悬挂的牵引变流器及其内部的功率模块、冷却风机和控制箱等部件,以及牵引变流器上方对应的车厢地板布置三向加速度传感器,如图1所示。三向加速度传感器的纵向、横向和垂向分别对应车体的长度、宽度和高度方向。

测试车辆从即墨出发,途经济南、徐州、郑州、西安、兰州和西宁,最后到达乌鲁木齐,全程近4 000 km。考虑到测试线路距离长,将B&K振动噪声测试系统的分析频率设置为3 200 Hz。测试过程中,列车以多种运行速度驶过各类地形的线路区间。总体上,青岛—济南区间的运行速度为200 km/h,主要地形为平原和丘陵;济南—西安区间的运行速度为250 km/h,主要地形为平原和山地;西安—兰州区间的运行速度为100~150 km/h,主要地形为山地和高原;兰州—乌鲁木齐区间的运行速度为200 km/h,主要地形为高原、丘陵和冲积平原。

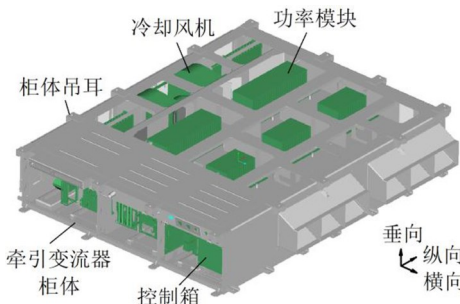
2 振动时域特性分析

2.1 不同区间的振动有效值对比

高寒动车组在不同路段行驶过程中,运行速度与运行工况均有差异。表1为高寒动车组各振动测点在不同区间下0~3 200 Hz频率范围的振动加速度有效值对比。



(a) 牵引变流器在车底的位置



(b) 牵引变流器结构

图1 牵引变流器在车底的位置示意

可以看出:

(1) 在不同线路区间,各测点的振动加速度有效值趋势基本一致,牵引变流器内部元件的振动普遍偏大,而牵引变流器柜体吊耳处的振动较小;

表1 各测点在不同区间的振动有效值对比(0~3 200 Hz)
(单位:m/s²)

测点	方向	青岛— 济南	济南— 西安	西安— 兰州	兰州— 乌鲁木齐
柜体吊耳	垂向	0.20	0.21	0.15	0.19
	横向	0.14	0.15	0.11	0.14
	纵向	0.27	0.32	0.22	0.26
逆变模块	垂向	0.73	0.67	0.50	0.67
	纵向	0.98	1.05	0.66	1.04
冷却风机	横向	1.15	1.22	0.75	1.21
	垂向	0.76	0.83	0.70	0.75
	纵向	0.47	0.53	0.42	0.48
控制箱	横向	0.47	0.47	0.42	0.44
	垂向	0.28	0.31	0.23	0.26
	纵向	0.34	0.36	0.32	0.33
车厢地板	垂向	0.54	0.59	0.49	0.53
	纵向	0.35	0.40	0.31	0.35

(2) 在4个区间段中,济南—西安区间的运行速度最高,振动高于其他区间,说明高寒动车组各主要测点的振动大小主要与车速相关,车速越高,各测点振动越大。

2.2 振动有效值与标准的对比

IEC 61373标准是机车车辆设备振动和冲击试

验的标准。振动试验的类别根据设备在车上的安装位置,可分为1类(车体安装)、2类(转向架安装)和3类(车轴安装),其中1类又分为A级(车体直接安装的柜体、组件、设备和部件)和B级(车体直接安装的柜体内部的组件、设备和部件)。振动试验的加速度功率谱密度上下限频率需要根据设备的质量来确定^[9]。牵引变流器柜体吊耳和车厢地板均属于1类A级,频率范围为2~60 Hz;牵引变流器内部的功率模块、冷却风机和控制箱均属于1类B级,频率范围为5~150 Hz。

表2为高寒动车组各振动测点在不同区间下标准推荐频率范围的振动加速度有效值对比。

表2 各测点振动有效值与标准值对比(推荐频率范围)
(单位: m/s^2)

测点	方向	青岛— 济南	济南— 西安	西安— 兰州	兰州— 乌鲁木齐	标准值
柜体吊耳	垂向	0.11	0.12	0.07	0.12	0.75
	横向	0.07	0.06	0.05	0.06	0.37
	纵向	0.08	0.13	0.05	0.08	0.50
逆变模块	垂向	0.15	0.18	0.11	0.16	1.00
	纵向	0.09	0.15	0.06	0.08	0.70
	横向	0.07	0.06	0.05	0.05	0.45
冷却风机	垂向	0.58	0.66	0.54	0.59	1.00
	纵向	0.32	0.36	0.29	0.34	0.70
	横向	0.24	0.22	0.23	0.22	0.45
控制箱	垂向	0.18	0.21	0.13	0.16	1.00
	横向	0.09	0.09	0.06	0.07	0.45
	纵向	0.11	0.18	0.08	0.10	0.70
车厢地板	垂向	0.11	0.12	0.07	0.11	0.75

结合表1和表2可以得出:

(1) 在标准推荐频率范围内,所有测点各方向的振动有效值均小于标准值;

(2) 表1列出的各测点在0~3 200 Hz全频段内,1类A级测点各方向振动加速度有效值均小于标准值,而1类B级中的功率模块和冷却风机存在超过标准值的情况,例如功率模块的横向振动均超过标准值,而功率模块的纵向振动在车速超过200 km/h的区间也均超标,冷却风机的横向振动在不同区间在标准值附近上下浮动;

(3) 通过对比不同频率范围内的有效值,功率模块和控制箱的高频振动贡献明显,而冷却风机振动主要集中在低频。

2.3 冲击峰值与标准的对比

高寒动车组在全路段的运行相对平稳,没有明显的振动异常路段,不过也存在一些明显的周期性

冲击信号(约10 min一次),既有来自轮轨和车体的冲击,也有车体内部电气元件的冲击。表3为高寒动车组各振动测点冲击峰值与标准的对比。可以看出:

(1) 各测点的冲击峰值均小于标准值,说明高寒动车组一系、二系悬挂及内部减振措施效果好;

(2) 高寒动车组在西安—兰州区间的运行速度虽然最低,然而由于在该区间的行驶线路为原有陇海线,非动车组客运专线,且线路设施相对老旧,弯道多,加减速频繁,冷却风机和控制箱等测点的冲击峰值普遍高于其他区间的冲击峰值。

表3 各测点冲击峰值与标准值对比(单位: m/s^2)

测点	方向	青岛— 济南	济南— 西安	西安— 兰州	兰州— 乌鲁木齐	标准值
柜体吊耳	垂向	6.45	6.08	7.20	5.34	30
	横向	6.26	5.73	7.73	7.21	30
	纵向	9.86	10.57	8.99	15.46	50
功率模块	垂向	5.19	4.44	4.46	4.74	30
	横向	10.05	10.22	7.16	10.87	50
	纵向	7.90	9.49	6.00	9.17	30
冷却风机	垂向	13.73	17.78	22.01	8.73	30
	横向	16.90	17.03	20.70	8.02	50
	纵向	14.75	16.97	19.25	11.54	30
控制箱	垂向	4.94	5.02	4.59	3.44	30
	横向	13.49	11.49	14.46	9.95	30
	纵向	9.17	10.89	11.84	9.51	50
车厢地板	垂向	9.85	2.51	2.04	10.41	30

3 振动频域特性分析

3.1 各测点的振动频谱

经过3个方向的振动频谱对比可知,柜体吊耳在4个区间内的振动特征十分相似,只是在振动大小和峰值上有所差异。3个方向在低频段、中频段和高频段均存在丰富的振动峰值,其中垂向振动以低频为主,横向与垂向除了低频段的振动,在高频段也存在相对较大的振动。以济南—西安区间的柜体吊耳振动频谱为例进行分析,如图2所示。

由图2可以看出:

(1) 柜体吊耳的振动在低频、中频和高频均有体现,其中低频主要体现在1 Hz、12~13 Hz、25 Hz、36~37 Hz,既有来自轮轨和车体的冲击,也有来自冷却风机的基频振动;

(2) 中频部分的振动主要在288和622 Hz处,高频部分振动主要在1 042 Hz处,以及2 600 Hz前后有丰富的电磁激励振动峰值。

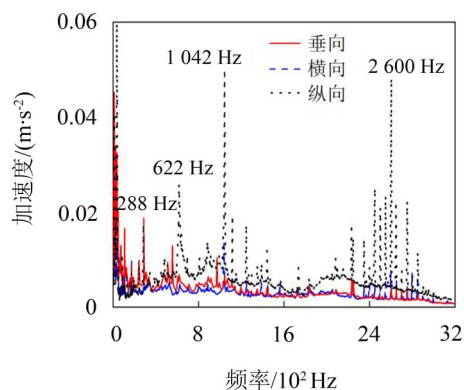


图2 济南—西安区间的柜体吊耳振动频谱

通过4个区间的功率模块振动频谱对比,发现功率模块的振动主要集中在受电磁激励影响的中频段和高频段,不同区间的振动频谱趋势基本一致,而在青岛—济南区间的振动频谱1 641 Hz附近和兰州—乌鲁木齐区间的振动频谱1 739 Hz附近都出现一段较大的宽频振动,高寒动车组在这两个区间的运行速度均为200 km/h,频谱差异可能与这两个区间的线路工况差异性有关。由于功率模块在济南—西安区间的振动有效值最大,仍以该区间的功率模块振动频谱为例进行分析,如图3所示。

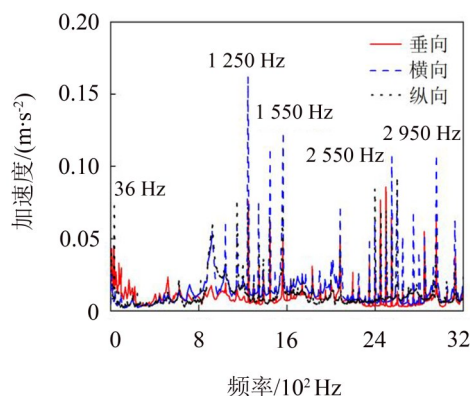


图3 济南—西安区间的功率模块振动频谱

由图3可以看出功率模块在低频段主要在36 Hz有来自轮轨冲击的振动峰值,而振动较大的频率则集中在高频段,主要有1 250、1 550、2 550 Hz和2 950 Hz附近的呈50 Hz倍数的高频点,这些振动主要来自电磁激励和冷却风机的振动输入。

冷却风机在4个区间内的振动频谱几乎一样,只是存在振动峰值的差异。济南—西安区间的冷却风机振动频谱如图4所示。冷却风机本身作为牵引变流器的一个内部振源,转速为1 500 r/min,基频为25 Hz,叶片数目为60个,因此,叶片通过频率超过1 000 Hz,通过频率及其倍频的振动较难被激发,而基频25 Hz及其倍频与电源频率存在耦合,因此,50 Hz及整数倍的某些频率可能会被激发。

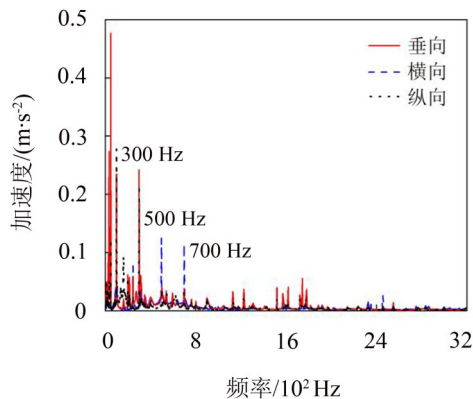


图4 济南—西安区间的冷却风机振动频谱

由图4可以看出,冷却风机振动主要集中在低频,其中在32~36 Hz有来自轮轨和车体的振动冲击,而在50、100、300、700 Hz等以50 Hz及其多倍频的频率处存在较大的振动峰值,其与冷却风机基频、电源频率两者的倍频相互耦合有关,也可能为电磁振动。

图5为济南—西安区间的控制箱振动频谱。

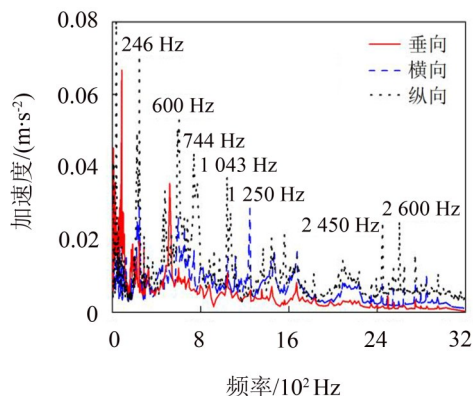


图5 济南—西安区间的控制箱振动频谱

由图5可以看出控制箱的低频振动主要集中在12~13、36~37和82~86 Hz等频段,为轮轨和车体的振动输入,而在246、600 Hz中频段也存在振动峰值,其中在744 Hz附近存在一段较大的宽频振动,高频振动主要集中在1 043、1 250、2 450 Hz和2 600 Hz等频率附近。

通过不同区间的车厢地板垂向振动频谱曲线对比,可知车厢地板的垂向振动主要集中在中频和低频,且振动频谱趋势一致,时速最快的济南—西安区间的振动普遍比其他区间大一些。图6为济南—西安区间的车厢地板垂向振动频谱。

由图6可以看出车厢地板的振动传递路径较多,垂向振动在中频和低频较为丰富,除了12~36 Hz的来自轮轨和车体的振动冲击,还有210~214 Hz的宽频振动,以及246、288和608 Hz的单频峰值振动。

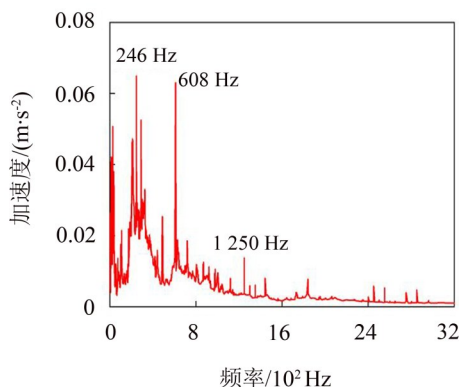


图6 济南—西安区间的车厢地板垂向振动频谱

3.2 加速工况分析

选取柜体吊耳、功率模块和车厢地板进行高寒动车组的加速工况分析。图7为100~250 km/h加速过程中的柜体吊耳纵向振动、功率模块横向振动和车厢地板垂向振动的时频图,其他方向的结果未列出。由图7可以得出:

- (1) 行驶速度对柜体吊耳的横向和纵向振动影响较大,对柜体吊耳的垂向振动影响较小;
- (2) 加速过程对柜体吊耳和功率模块的中频和低频影响较大,对车厢地板的高频振动影响不大;
- (3) 加速过程对柜体吊耳和车厢地板的振动影响主要集中在600~1 100 Hz频率段。

从高寒动车组的振动测试结果来看,各测点振动环境都不太恶劣,且与标准值对比都较小,然而IEC61373标准规定的1类A级和1类B级振动频率范围分别属于2~60和5~150 Hz的低频段,实际运行过程中,某些部件(如功率模块)在中频段和低频段的振动远大于低频段,因此对于高寒动车组及其零部件的振动环境评估不应仅局限于低频振动,还需要基于载荷谱开展中频和低频振动的影响研究^[10-11]。

4 中频和低频振动的影响分析

4.1 时域统计指标

时域统计指标是振动判断的重要依据之一,可

以用于判断振动是否属于高振振动,还可以用于振动台评估试验的输入,从而使控制试验对象更接近于实际工况。

表4为各测点在实际运行过程中的峭度和偏斜度。峭度大于3表示概率分布曲线比高斯分布陡峭,峭度小于3表示概率分布曲线比高斯分布扁平。偏斜度为正值表示分布正偏,偏斜度为负值表示分布负偏。从表4中的数据可以看出各测点均表现出超高斯随机过程。

表4 各测点的时域统计指标

测点位置	方向	峭度	偏斜度
柜体吊耳	垂向	3.920	0.006
	横向	7.455	-0.0132
	纵向	4.658	-0.006
功率模块	垂向	3.391	0.044
	横向	3.341	0.014
	纵向	3.484	0.045
冷却风机	垂向	5.337	-0.001
	横向	4.423	0.010
	纵向	3.460	-0.006
控制箱	垂向	3.137	0.008
	横向	3.968	-0.004
	纵向	3.281	-0.006

4.2 载荷谱编制

要将线路振动测试的时域数据转换成振动试验台可用的输入数据,还需要基于统计容差法进行实测载荷谱的编制。首先对线路运行振动测试的时域数据进行平稳性检验;然后将时域数据分段,乘以汉宁窗;再通过快速傅里叶变换得到功率谱密度;接着对均方根值进行参数估计和假设检验,形成特征样本;最后进行频段划分,计算平直频段容差上限,得到实测载荷谱^[9]。

编制载荷谱时,将每个测点在全时域数据分成50个样本进行归纳与统计,得到牵引变流器柜体吊耳及其安装部件的载荷谱,并与IEC 61373的标准

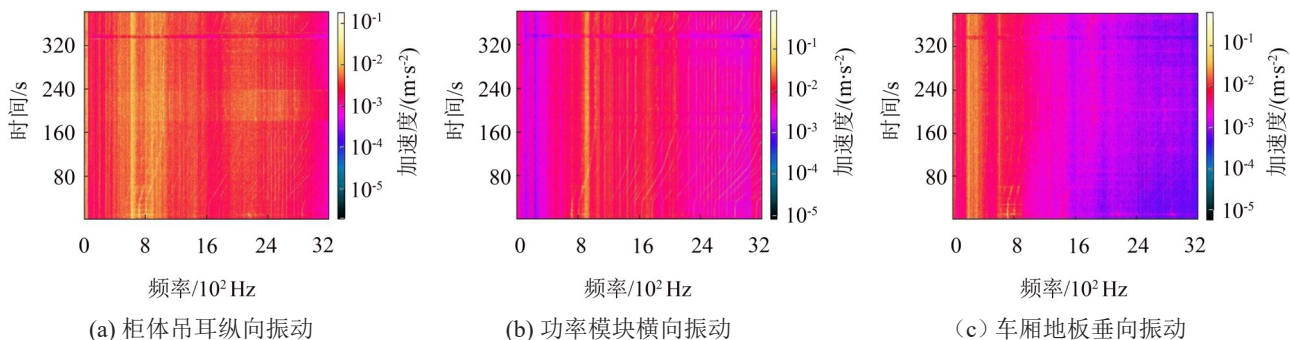


图7 加速过程的振动时频图

载荷谱进行对比,如图8所示。

图8中,实测载荷谱的频谱范围为1~1 000 Hz,横坐标为频率(Hz),纵坐标为谱值($\text{m}^2 \times \text{s}^{-4} \times \text{Hz}^{-1}$)。从实测载荷谱与标准载荷谱的对比,可以看出功率模块垂向实测载荷谱高出标准载荷谱;冷却风机垂向实测载荷谱低频段高出标准载荷谱,3个方向实测载荷谱高频段高出标准载荷谱;控制箱3个方向实测载荷谱高频段高出标准载荷谱。

4.3 牵引变流器的结构仿真

高寒动车组牵引变流器的柜体主要由铝合金型材组焊成框架结构,再通过不锈钢支架安装功率模块、冷却风机和控制箱等电气设备。进行结构仿真时,首先利用 HyperMesh 软件对柜体的框架结构和不锈钢支架抽取中面,划分为以四边形为主、极少数为三角形的壳单元,将电气设备划分为六面体为主、极少数为五面体的实体单元,焊接和螺栓连接通过刚性约束模拟。

图9为牵引变流器的结构仿真部分结果。进行模态仿真时,将柜体吊耳螺栓安装孔处设置为位移约束,通过计算可以得到牵引变流器的模态振型。由于柜体盖板面积较大,刚度低,前几阶的模态频率

的振型均出现在柜体盖板上,第12阶模态频率(49.8 Hz)的振型出现在冷却风机上,说明冷却风机的振动值得关注。进行随机振动仿真时,参照 IEC 61373 标准 1999 年版本的加速比 7.83,将图8(a)所示的柜体吊耳不同方向的实测载荷谱和标准载荷谱分别进行加速处理,通过计算可以分别得到垂向、横向和纵向的1s应力分布。由随机振动仿真结果综合分析可知,最大1s应力主要出现在电气设备的安装支架处,说明电气设备的安装条件值得关注。从总体来看,3个方向的最大1s应力值满足疲劳强度要求,可以满足高寒动车组长期运营的使用条件。

5 结语

(1) 高寒动车组各主要测点在不同区间的振动有效值不同,主要受行驶速度影响,速度越高,振动有效值越大,高寒动车组在济南—西安区间的振动高于其他区间。

(2) 将各区间的振动有效值与 IEC 61373 进行对比,在推荐频率范围内均小于或远小于标准值,而在0~3 200 Hz的全频段范围内,功率模块的横向与纵向,以及冷却风机的横向均出现超过标准的现象。

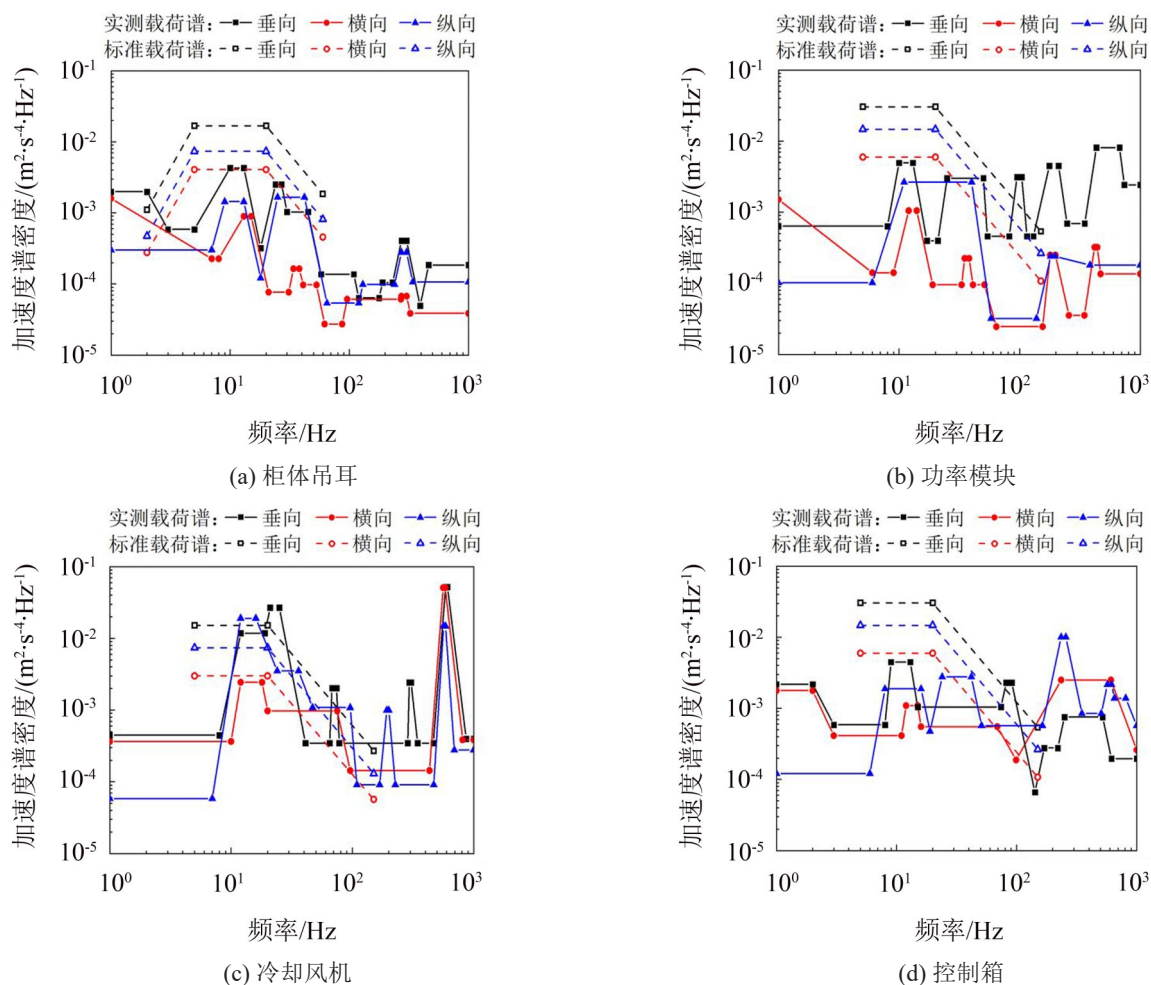


图8 实测载荷谱与标准载荷谱的对比

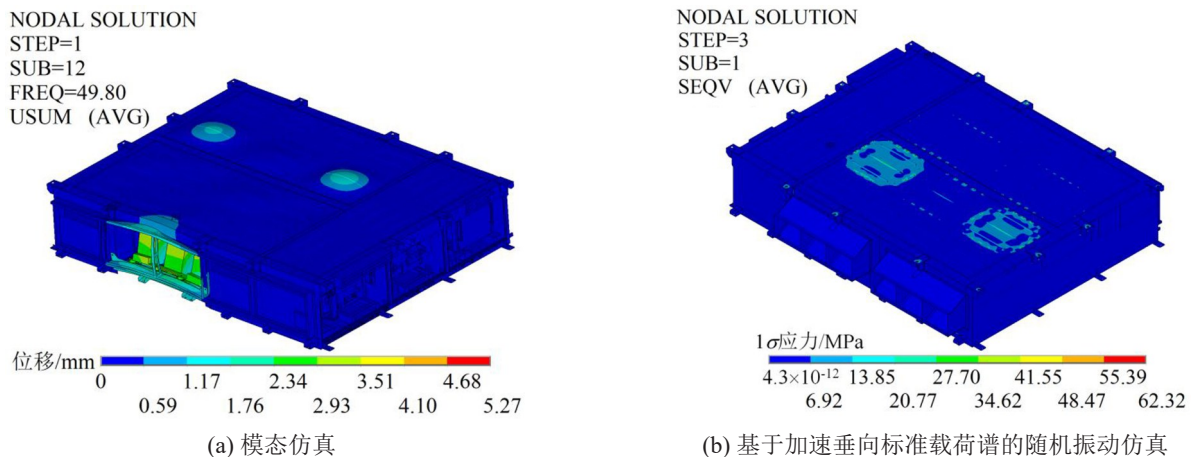


图9 牵引变流器的结构仿真部分结果

(3) 各测点的振动冲击峰值均小于标准值,高寒动车组的一、二系减振效果良好,由于在西安—兰州区间列车在原有陇海线上行驶,线路相对老旧,弯道多,尽管行车速度缓慢,但振动冲击普遍高于其他区间。

(4) 柜体吊耳和控制箱的振动主要体现在垂向与纵向,而横向较小,且以中频段和低频段为主;冷却风机的振动集中在低频段,来自于风机转频;功率模块以横向和纵向振动为主,中频段和高频段的振动远大于低频段;对于高寒动车组及其零部件的振动环境评估不应仅局限于低频振动,还应关注高频振动的影响。

参考文献:

- [1] 宋志坤,任海星,胡晓依,等. 动车组车轮多边形磨耗发展历程模拟及车轮粗糙度的影响[J]. 铁道学报,2021,43(6):23-28.
- [2] 宫岛,刘广宇,周劲松,等. 动车组车体异常振动问题分析及治理研究[J]. 机械工程学报,2021,57(10):95-105+117.
- [3] 王鹏,陈恩利,惠美玲,等. 高速动车组车体模态特性分析[J]. 振动、测试与诊断,2019,39(6):1305-1310.
- [4] 郭金莹,石怀龙,郭平波,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.
- [5] 徐宁,任尊松,薛蕊. 高速动车组时频域响应特征及振动传递特性研究[J]. 铁道学报,2019,41(2):31-40.
- [6] 李国栋,崔利通,王文华,等. 兰新铁路客运专线提速动车组动力学问题分析[J]. 机车电传动,2021,(4):1-7.
- [7] 高阳,于子良,齐洪峰,等. 西北复杂运行条件下车轮多边形发展规律研究[J]. 噪声与振动控制,2020,40(3):118-124.
- [8] 张志昂,丁杰,王永胜,等. 高寒动车组牵引变流器运行环境特性研究[J]. 机车电传动,2019,(4):18-21+26.
- [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] 李博. 高频激励下动车组转向架构架关键部位结构可靠性研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- [11] 张益瑞. 高速动车组载荷谱复现方法及台架试验研究[D]. 长春:吉林大学,2021.

(上接第275页)

- [9] 王艳宁,张兴业,袁有为,等. 沉管隧道有限元与等效质点抗震分析比较[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(5):869-876.
- [10] 张如林,楼梦麟,袁勇. 土-海底沉管隧道体系三维地震响应分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014,41(4):25-32.
- [11] 刘鹏,丁文其,杨波. 深水超长沉管隧道接头及止水带地震响应[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013,41(7):984-988.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51336—2018 地下结构抗震设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [13] ZHUANG H Y, HU, Z H, WANG, X J, et al. Seismic responses of a large underground structure in liquefied soils by FEM numerical modelling[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13: 3645-3668.
- [14] CHEN Z Y, LIANG S B, HE C. Influence of incoherence and wave passage effects on seismic performances of long immersed tunnel[J]. International Journal of Computational Methods, 2017: 1840012.
- [15] 丁文其,谢东武,乔亚飞,等. 车陂路-新滘东路隧道工程-城市复杂环境沉管隧道工程设计计算分析报告[R]. 上海:同济大学,2020.