

# 某大型装备液冷机组振动测试及减振优化

王晓红<sup>1,2</sup>, 彭超<sup>1</sup>

(1.中国电子科技集团公司第三十八研究所,合肥 230088; 2.国家级工业设计中心,合肥 230088)

**摘要:** **目的** 了解大型装备液冷机组振动情况; 评估工作环境人员舒适性; 采取合理措施, 降低大型装备的液冷机组振动对装备可靠性及装备中工作人员的身体健康的影 响。**方法** 对某大型装备的液冷机组开展振动测试及舒适性评估工作, 并依据振动分析结果对原有减振方案进行减振优化。**结果** 对比原有减振方案和优化方案对应测点的振动响应, 发现优化方案的振动响应明显减小, 最大衰减 5.55 dB。减振优化后, 振动量值从 0.555 m/s<sup>2</sup> 下降到 0.295 m/s<sup>2</sup>, 根据国家标准 GB/T 13441.1-2007 中的规定, 人员在此环境工作时, 不会感到不舒适, 人员舒适性满足标准要求。**结论** 工作环境人员舒适性满足相关标准要求, 减振优化方案效果明显。装备服役后, 使用情况良好, 进一步证明了减振优化的有效性。

**关键词:** 液冷机组; 振动控制; 测试分析; 性能评估; 隔振

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.08.014

**中图分类号:** TH137 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)08-0091-06

## Vibration Test and Isolation Optimization of Large-scale Liquid Cooling System

WANG Xiao-hong<sup>1,2</sup>, PENG Chao<sup>1</sup>

(1. The 38<sup>th</sup> Research Institute of CETC, Hefei 230088, China; 2. National Industrial Design Center, Hefei 230088, China)

**ABSTRACT:** The work aims to find out the vibration of the large-scale liquid cooling system, assess the comfort of personnel in working environment and reduce the influence of vibration of large-scale liquid cooling system on the equipment reliability and personnel health with reasonable measures. Vibration test and comfort assessment were carried out to some large-scale liquid cooling system and the original isolation scheme was optimized based on the vibration analysis results. By comparing the vibration of the corresponding points of the original isolation scheme and the optimized isolation scheme, it was found that the vibration of the optimized scheme significantly reduced and the maximum attenuation was 5.55 dB. After the optimization of isolation, the vibration value reduced from 0.555 m/s<sup>2</sup> to 0.295 m/s<sup>2</sup>. According to the standard GB/T 13441.1-2007, personnel might not feel uncomfortable when working in this environment, so the comfort met the requirements of relevant standards. Personnel comfort meets the requirements of relevant standards and the isolation optimization is effective. The equipment is in good condition after delivery, which further proves the effectiveness of the isolation optimization.

**KEY WORDS:** liquid cooling system; vibration control; test and analysis; performance evaluation; vibration isolation

液体冷却是目前解决装备总热量和热流密度都较高的散热问题的有效热控制方式之一<sup>[1-3]</sup>, 大型装

备往往采用液冷机组作为附属保障设备<sup>[4]</sup>。液冷机组冷却和循环系统内包含了一些大功率旋转运动设备,

收稿日期: 2020-03-25; 修订日期: 2020-08-06

Received: 2020-03-25; Revised: 2020-08-06

作者简介: 王晓红(1976—), 女, 黑龙江人, 高级工程师, 主要研究方向为雷达系统力学仿真和试验技术。

**Biography:** WANG Xiao-hong(1976—), Female, from Heilongjiang, senior engineer, Research focus: mechanical simulation and experiment of radar system.

如风机、水泵、压缩机等，工作时这些设备产生的振动会传递给安装平台和连接管路，给装备可靠性和安装平台上工作人员的舒适性带来负面影响<sup>[5-6]</sup>。如何减少这些不利影响，是液冷机组设计和使用时必须解决的问题。

笔者以某大型装备的液冷机组为研究对象，对装机液冷机组工作状态进行振动测试，并对振动测试数据进行分析，评估其对安装平台上工作区域人员舒适性的影响。测试结果表明，测试工况下工作区域人员舒适性不满足相关标准要求。根据现场条件，对机组现有减振措施进行优化，降低机组振动对工作区域的影响。减振优化后，再次进行振动测试与分析，验证减振优化设计的有效性。

### 1 液冷机组概况

某大型装备的液冷机组，主要由1个增压单元、6个制冷单元、1个储液单元、多组液冷管网及相关附件组成，安装在钢制装备平台的两侧，见图1。该液冷机组在工作时，其内部增压泵、制冷压缩机的不平衡转动、风机的气动、以及液冷管道内部的流体脉动都会产生振动，这些振动将会通过液冷机组安装面，传递到装备平台上，引起平台振动。为减小振动对平台上工作区域人员的舒适性的影响，在前期设计时采取了相应的减振降噪措施，如选用振动性能好的品牌电机、压缩机与风机等，减小振源强度<sup>[7-8]</sup>；选用隔振垫，进行被动隔振<sup>[9-10]</sup>，减少液冷机组传递到平台上的振动。

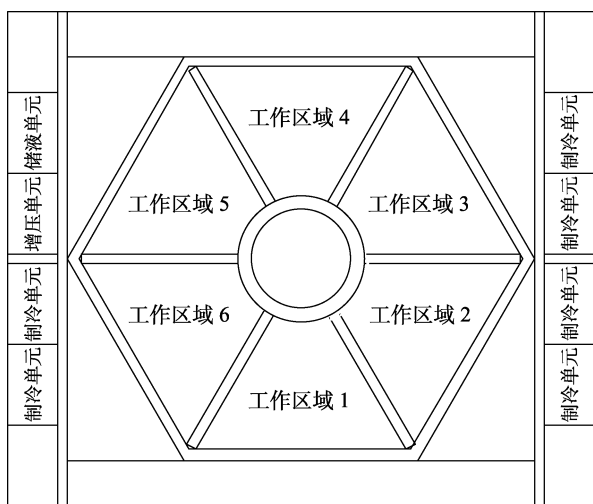


图1 液冷机组布置简图

Fig.1 Location diagram of the liquid cooling system

制冷单元和增压单元中所有设备均采用焊接或法兰连接安装在尺寸为4.5 m(长)×2.438 m(宽)×2.75 m(高)的方舱内，每个单元总质量约10 500 kg，其中电机转速为2970 r/min。单元方舱底部与安装平台之间铺设橡胶隔振垫，衰减传递到平台上的振动。

## 2 振动测试及分析

装备安装调试阶段，现场工作人员反应液冷机组开机时，安装平台振感明显。为了解液冷机组振动情况，并进一步对工作人员的健康影响和工作舒适性进行评估，对液冷机组开展振动响应测试，获取其振动响应量级的大小、主要峰值频率等信息，评估其工作舒适性。

### 2.1 振动测试系统及测点

振动测试系统由动态数据采集设备、三向加速度传感器、安装数据采集与分析软件的笔记本工作站及若干信号线缆组成<sup>[11]</sup>。

根据现场安装状态，并考虑液冷机组可测试工况、测试周期，选择在增压单元和靠近增压单元的重点工作区域5和区域6进行布点测试。

增压单元与安装平台间有6个安装点，在增压单元底部安装点处的主梁和对应的安装平台位置上各取6个测点，共计12个测点，见图2。主梁测点(UP i)和平台测点(DOWN i)一一对应，两者之间隔着隔振垫。主梁测点主要测试增压单元增压泵传递到主梁的振动响应；平台测点主要测量振动经由主梁和隔振垫后传递到平台上的振动响应。每个测点测试X、Y、Z三个方向。

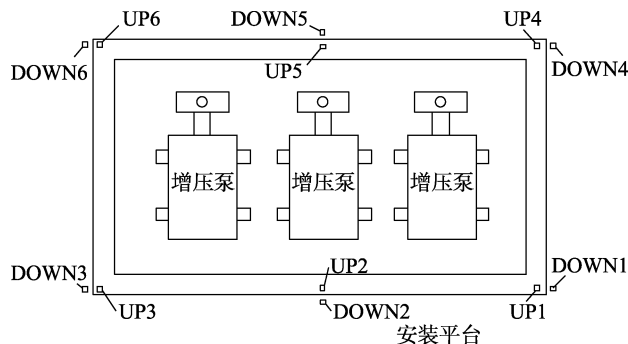


图2 增压单元测点

Fig.2 Measuring points of the pressurized unit

在靠近增压单元的重点工作区域5和区域6选择5个有代表性的位置布置响应测点，其中G5-D1在工作区5内部的平台底板梁上，G5-U1为与G5-D1对应的正上方的架高地板上；G6-D1、G6-D2在工作区6内部的平台底板梁上，G6-U1和G6-U2为与G6-D1和G6-D2对应的正上方的架高地板上。部分测点详图见图3。

### 2.2 测试数据分析

处理分析测试数据，部分测试曲线见图4。可以看出增压单元主梁上测点的振动能量主要集中在49.5、99.8、148.5、248.5、298.5、595.0 Hz附近，其它频率处峰值不明显。

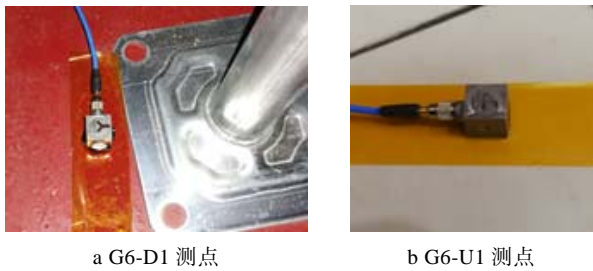


图 3 部分测点详图

Fig.3 Detail of some measuring points:  
(a) G6-D1 measuring point; (b) G6-U1 measuring point

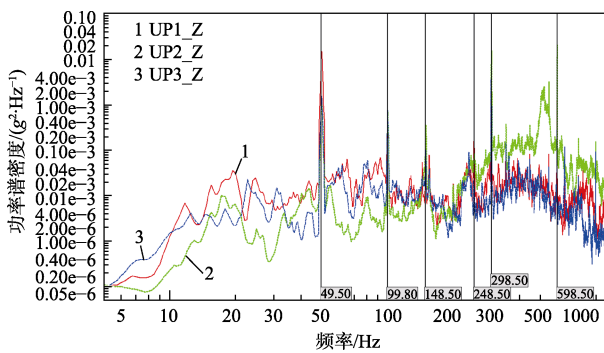


图 4 增压单元测试曲线

Fig.4 Test curves of the pressurized unit

增压单元中的主要动力源为增压泵，计算其转频<sup>[12]</sup>：

$$f_{\text{增压泵}} = \frac{n}{60} = 49.5 \text{ Hz} \quad (1)$$

式中： $n$  为增压泵转速，r/min。

分析发现振动能量集中的频率与增压泵的转动频率及其倍频吻合。结合其它频率处峰值不明显的特征，得出如下结论：增压单元底部主梁的振动主要由增压泵引起，增压单元箱板等结构振动的影响较小。

提取各测点的均方根加速度，其中增压单元各测点的均方根加速度见表 1。从表 1 可以看出，测点 DOWN $i$  的量值均小于对应测点 UP $i$  的量值，表明振动经过隔振垫后得到了衰减。根据 GB/T 13441.1-2007 标准，计算工作区域各测点的振动量值，见表 2。由表 2 可以看出，工作区域测点的振动量值最大为 0.627 m/s<sup>2</sup>，出现在 G6-D1 测点的 Y 向；工作区域架高地板上的振动量值的最大值为 0.555 m/s<sup>2</sup>，出现在 G6-U1 测点的 Z 向。GB/T 13441.1-2007 规定，当振动量值小于 0.315 m/s<sup>2</sup> 时，人员感觉不到不舒适；当振动量值大于 0.315 m/s<sup>2</sup> 且小于 0.63 m/s<sup>2</sup> 时，人员感觉有点不舒适；当振动量值大于 0.5 m/s<sup>2</sup> 且小于 1 m/s<sup>2</sup> 时，人员感觉相当不舒适<sup>[13]</sup>；工作区域地板上测点的振动量值最大为 0.555 m/s<sup>2</sup>，处于相当不舒服区间，当人员在此工作区域内工作时，会感觉到相当不舒适。

表 1 增压单元各测点的响应

Tab.1 Response of each measuring point in pressurized unit

测点	均方根加速度/g		
	X	Y	Z
UP1	0.1673	0.3386	0.1965
UP2	0.1298	1.0824	0.4827
UP3	0.1787	0.2135	0.1495
UP4	0.2447	0.3119	0.2785
UP5	0.1466	0.9681	0.4770
UP6	0.2001	0.2640	0.1949
DOWN1	0.0150	0.0102	0.0212
DOWN2	0.0255	0.0261	0.2123
DOWN3	0.0101	0.0128	0.0897
DOWN4	0.0239	0.0185	0.2390
DOWN5	0.0162	0.0258	0.2060
DOWN6	0.0180	0.0092	0.0693

表 2 工作区内各测点的振动量值

Tab.2 Vibration magnitude of each measuring point in workspace

测点	振动量值/(m·s <sup>-2</sup> )		
	X	Y	Z
G6-U1	0.175	0.125	0.555
G6-U2	0.120	0.105	0.360
G6-D1	0.190	0.627	0.225
G6-D2	0.170	0.130	0.470
G5-U1	0.165	0.135	0.345
G5-D1	0.175	0.525	0.200

### 3 减振优化

基于工作区域振动量值偏大，影响人员舒适性的问题，对机组现有减振措施进行优化，降低机组振动对工作区域的影响。

振动控制是在结构的特定部位设置某种装置、结构或施加外力，改变或调整结构的动力学特性或动力作用，使结构的动力响应得到合理的振动控制效果，确保结构本身和结构中的人员、仪器、设备等正常工作。振动控制主要可以分为主动控制、半主动控制和被动控制三类。

主动控制是由外部提供控制所需要的能源，驱动作动器加载与结构振动方向相反的控制力来进行结构的振动控制。主动控制明显的缺点是使用成本和维护成本比较高。

半主动控制不需要外部能源输入控制力，是通过改变系统中性能可调的元器件（智能元器件）的实时性能来实现减振。其缺点是可调元器件的动力学性能有本质的强非线性，需要单独开发复杂的控制器。

被动控制是通过改变结构的阻尼、质量和刚度等动力特性来重新构造结构，或者通过在结构上安装特

殊的装置吸收和消耗振动能量来实现减振。被动隔振技术简单、性能可靠,对高频振动减振效果明显。

大型装备液冷机组的增压单元和制冷单元自重达 10 t,采用主动控制和半主动控制使用成本很高,且技术复杂;而被动隔振结构简单、易于实现、可靠性高且不需要额外消耗外界能源<sup>[14]</sup>,更适用于大型机组的减振控制。

原减振方案采用的是被动隔振技术,在制冷单元和增压单元方舱底部四周主梁下面铺设橡胶隔振垫(见图 5),其具有价廉、结构简单、隔振效果较好等优点<sup>[15]</sup>。然而,被动隔振技术也有一定的局限,根据振动理论<sup>[16]</sup>,只有振动频率大于隔振系统固有频率 $\sqrt{2}$ 倍时,隔振系统才会产生隔振效果<sup>[17-18]</sup>。因此在进行被动隔振设计时,需要特别关注频率比设计。原减振方案采用的隔振垫为 WJ-60 型船用隔振垫,其具体参数见表 3。

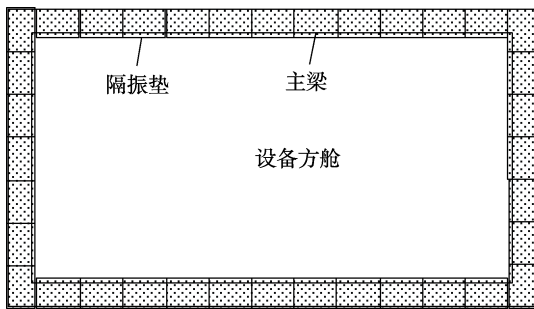


图 5 原减振方案隔振垫铺设示意

Fig.5 Diagram of cushion in original isolation scheme

表 3 WJ-60 型隔振垫参数

Tab.3 Parameters of WJ-60 vibration isolation cushion

参数	数值
规格尺寸	360 mm×240 mm×18 mm
承载能力	2~4 kg/cm <sup>2</sup>
相应的垂直单位额定 载荷下的变形	5 kg/cm <sup>2</sup> 时(4.2±0.5) mm
自振频率	(13.8±1) Hz
极限静负载	50 kg/cm <sup>2</sup>
阻尼比	>0.06

原减振方案隔振垫总承载面积为:

$$A_1 = [450 + (243.8 - 48)] \times 24 \times 2 = 30998.4 \quad (2)$$

单位面积载荷为:

$$P_1 = \frac{G}{A_1} = 0.34 \text{ kg/cm}^2 \quad (3)$$

式中:  $G$  为增压单元质量, kg。

隔振系统频率为:

$$f_1 = f_0 \times \sqrt{\frac{P_0}{P_1}} = 52.9 \text{ Hz} \quad (4)$$

式中:  $f_0$  为自振频率, Hz;  $P_0$  为相应的垂直单位额定载荷, kg/cm<sup>2</sup>。

频率比:

$$\lambda_1 = \frac{f}{f_1} = 0.93 \quad (5)$$

根据振动传递率曲线<sup>[19-21]</sup>,当 $\lambda < \sqrt{2}$ 时,传递率大于 1,这时振动不仅不会被减弱,反而会被放大。既原减振方案中,隔振垫对液冷机组的第一个振动峰没有起到衰减作用,但对频率大于 70 Hz 的振动起到衰减作用,减振方案存在减振优化空间。原减振方案隔振系统频率偏高,导致减振效果不理想,因此需要降低隔振频率。降低频率的主要方法是增加系统质量或降低系统刚度,对于此项目的大型液冷机组,降低隔振系统刚度是最简单、有效的降低隔振系统频率的方法。原方案中在增压单元和制冷单元底部垫有 36 块隔振垫,则隔振系统刚度为 36 块隔振垫的刚度总和,为降低刚度,降低隔振系统频率,需要在保证隔振垫承载能力的前提下,减少隔振垫的个数,采用 6 块隔振垫进行减振,隔振垫布置见图 6。

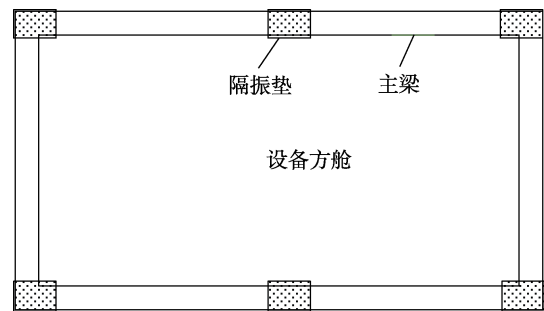


图 6 减振优化方案隔振垫铺设示意

Fig.6 Diagram of vibration isolation cushion in isolation

此时,隔振垫总承载面积为:

$$A_2 = 36 \times 24 \times 6 = 5184 \text{ cm}^2 \quad (6)$$

单位面积载荷为:

$$P_2 = \frac{G}{A_2} = 2.03 \text{ kg/cm}^2 \quad (7)$$

隔振系统频率为:

$$f_2 = f_0 \times \sqrt{\frac{P_0}{P_2}} = 21.7 \text{ Hz} \quad (8)$$

频率比:

$$\lambda_2 = \frac{f}{f_2} = 2.28 \quad (9)$$

根据振动传递率曲线,当 $\lambda > \sqrt{2}$ 时,传递率小于 1,且随着频率比的不断增加,传递率减小,隔振效果也更好。优化方案的频率比为 2.28,大于 $\sqrt{2}$ ,说明振源振动可以得到有效衰减。针对改进方案,再次进行振动测试,评估优化效果。分析测试数据,计算工作区域测点的振动量值,见表 4。

对比表 2 和表 4,发现减振优化后工作区域各测点的振动响应明显减小。工作区域架高地板上的振动

表 4 减振优化后工作区内各测点的振动量值  
Tab.4 Vibration magnitude of each measuring point in workspace after isolation optimization

测点	振动量值/(m·s <sup>-2</sup> )		
	X	Y	Z
G6-U1	0.115	0.081	0.295
G6-U2	0.080	0.065	0.192
G6-D1	0.130	0.357	0.133
G6-D2	0.105	0.085	0.275
G5-U1	0.101	0.090	0.201
G5-D1	0.110	0.295	0.135

量值的最大值出现在 G6-U1 测点的 Z 向，量值为 0.295 m/s<sup>2</sup>，小于 0.315 m/s<sup>2</sup>，根据 GB/T 13441.1-2007 标准，当人员在此工作区域内工作时，不会使人感觉到不舒适。

为进一步量化衰减效果，计算减振优化方案与原有减振方案下对应测点的衰减量，见表 5。

表 5 优化方案与原有方案对应测点的衰减量  
Tab.5 Attenuation of the corresponding measuring point between optimized scheme and original scheme

测点	衰减/dB		
	X	Y	Z
G6-U1	-3.65	-3.88	-5.49
G6-U 2	-3.52	-4.17	-5.55
G6-D1	-3.30	-4.89	-4.76
G6-D2	-4.19	-3.69	-4.66
G5-U1	-4.35	-3.52	-4.74
G5-D1	-4.03	-5.00	-3.41

从表 5 可以看出，优化方案相比原减振方案，工作区内各测点的振动响应有了明显衰减，最大衰减达到 5.55 dB。图 7 给出 G6-U2 测点在两种减振方案下的振动响应比较曲线。其中幅值较大的曲线为原减振方案下测得的加速度功率谱密度曲线，幅值较小曲线为优化方案下测得相应测点的加速度功率谱密度曲线。从功率谱密度曲线上也能清楚地看到优化方案相比原减振方案，振动响应明显减小。

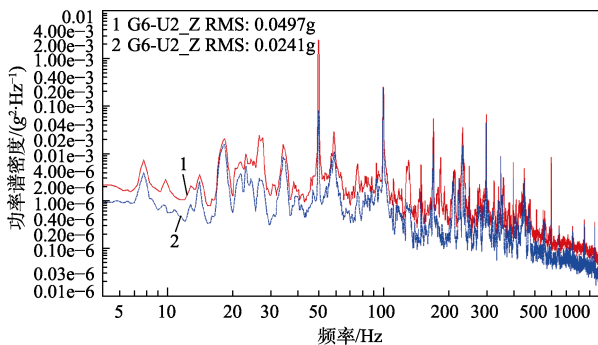


图 7 两种方案 G6-U2 测点的 Z 向振动响应

Fig.7 Vibration response of G6-U2 measuring point in Z direction in two schemes

## 4 结语

对大型装备液冷机组开展振动测试、减振优化及舒适性评估工作，减振优化后工作区域减感减弱，振动量值减小，最大量值减小到 0.295 m/s<sup>2</sup>，小于 0.315 m/s<sup>2</sup>，根据相关标准，当人员在此工作区域内工作时，不会感觉到不舒适，满足装备舒适性指标要求。

大型装备的液冷机组振动测试、评估和减振优化取得了满意的效果。目前，装备已交付使用 1 年有余，实际使用情况表明，液冷机组满负荷工作时，工作区域未感觉到不舒适，这也直接证明减振优化的有效性。

### 参考文献：

- [1] 时海涛. 某型雷达 DAM 液冷通道性能优化分析[J]. 机械与电子, 2019(3): 12-13.  
SHI Hai-tao. Optimization and Analysis of Cooling-Channel Applied to the Radar DAM [J]. Machinery & Electronics, 2019(3): 12-13.
- [2] 王建峰. 大型地面固定式相控阵雷达液冷系统设计及实现[J]. 电子机械工程, 2016(4): 17-18.  
WANG Jian-feng. Design of Liquid Cooling System of Large Ground-fixed Phased Array Radar [J]. Electro Mechanical Engineering, 2016(4): 17-18.
- [3] 胡国高, 王胜. 一种抗腐蚀液冷散热冷板的制备方法[J]. 机械与电子. 2018(8): 21-22.  
HU Guo-gao, WANG Sheng. Preparation Method of Anti-corrosive Liquid Medium Radiator [J]. Machinery & Electronics, 2018(8): 21-22.
- [4] 李旭, 吴勇川, 胡方亮, 等. 航空地面空调液冷综合保障车研制[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017(10): 55-56.  
LI Xu, WU Yong-chuan, HU Fang-liang, et al. Development of Aviation Ground Air-conditioning and Liquid-cooling Support Cart [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2017(10): 55-56.
- [5] 贺小龙, 张立民, 鲁连涛. 多悬挂设备对高速列车乘坐舒适性影响分析[J]. 机械工程学报, 2018(3): 69-70.  
HE Xiao-long, ZHANG Li-min, LU Lian-tao. Impact-Analysis of Multi Hanging Equipment on High Speed Train Ride Comfort [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018(3): 69-70.
- [6] 张飞, 李凯翔, 周江贝. 某型飞机客舱座椅人体振动舒适性评价研究[J]. 强度与环境, 2019(8): 59-60.  
ZHANG Fei, LI Kai-xiang, ZHOU Jiang-bei. Evaluation on Human Body Vibration Comfort of Aircraft Cabin Seat [J]. Structure & Environment Engineering, 2019(8): 59-60.
- [7] RAO S S. Mechanical Vibrations[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2004: 497-512.
- [8] 孟凡明, 庞天照. 一种橡胶隔振器的设计方法[J]. 舰船科学技术, 2013(1): 117-118.  
MENG Fan-ming, PANG Tian-zhao. Research on the

- Method for designing an rubber isolator[J]. *Ship Science and Technology*, 2013(1): 117-118.
- [9] 马建国, 帅长庚, 李彦. 旋转机械主被动混合隔振虚拟样机技术及实验研究[J]. *振动与冲击*, 2019(9): 285-286.
- MA Jian-guo, SHUAI Chang-geng, LI Yan. Rotating-Machinery's Active-passive Hybrid Vibration Isolation-Virtualprototype Technique and Test Verification [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019(9): 285-286.
- [10] 杜宁, 胡明勇, 毕勇, 等. 一种车载设备的低频水平减振方法[J]. *振动与冲击*, 2017(7): 184-185.
- DU Ning, HU Ming-yong, BI Yong, et al. A low Frequencyhorizontal Vibration Reduction Method for a Vehicle-borne Photo-electric Instrument[J]. *Journal of Vibrationand Shock*, 2017(7): 184-185.
- [11] 孙玉华, 董大伟, 闫兵, 等. 双层隔振系统隔振效果实验分析[J]. *振动测试与诊断*, 2015(6): 548-549.
- SUN Yu-hua, DONG Da-wei, YAN Bing, et al. Experimental Isolation Effect Analysis of Two-StageVibration Isolation System[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015(6): 548-549.
- [12] 朱曾辉, 孟庆芹, 施永柱. 天线转台振动噪声分析与试验研究[J]. *雷达与对抗*, 2018(12): 51-52.
- ZHU Zeng-hui, MENG Qing-qin, SHI Yong-zhu. Analysisand Experimental Study on Vibration and Noise of Antennaturtable [J]. *RADAR & ECM*, 2018(12): 51-52.
- [13] GB/T 13441. 1-2007, 机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第1部分: 一般要求[S].
- GB/T 13441.1-2007, Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-bodyvibration-part 1: General Requirements[S].
- [14] 沈良杰, 范进, 陈彦北, 等. 复合隔振器隔振装置的性能研究[J]. *装备环境工程*, 2017(7): 56-57.
- SHEN Liang-jie, FANG Jin, CHEN Yan-bei, et al. Performance of Vibration Isolation Device for CompositeVibration Isolator [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(7): 56-57.
- [15] 熊志远, 康钟绪, 宋瑞祥, 等. 具有隔吸振双功能减振装置的设计与试验[J]. *噪声与振动控制*, 2018(4): 222-223.
- XIONG Zhi-yuan, KANG Zhong-xu, SONG Rui-xiang, etal. Design and Test of Damping Devices with VibrationIsolation and Vibration Absorption Functions [J]. *Noiseand Vibration Control*, 2018(4): 222-223.
- [16] 倪振华. 振动力学[M], 西安: 西安交通大学出版社. 1989: 156-190.
- NI Zhen-hua. *Vibration Mechanics* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press. 1989: 156-190.
- [17] 孙宁, 左汉文, 颜枫. 低频敏感设备隔振基础设计探讨[J]. *噪声与振动控制*, 2018(4): 307-308.
- SUN Ning, ZUO Han-wen, YAN Feng. A Discuss of the-Isolation Foundation for Low Frequency Sensitive-Equipment [J]. *Noise and Vibration Control*, 2018(4): 307-308.
- [18] 黎瑞和, 王国砚, 吴同, 等. 一类准零刚度橡胶隔振器研究[J]. *噪声与振动控制*, 2018(4): 225-226.
- LI Rui-he, WANG Guo-yan, WU Tong, et al. Research on a Kind of Rubber Isolators with Quasi-zero Stiffness [J]. *Noise and Vibration Control*, 2018(4): 225-226.
- [19] 晏红文, 田红旗, 欧阳华, 等. 大型风力发电机组弹性元件隔振性能分析和试验研究[J]. *振动与冲击*, 2016(5): 212-213.
- YAN Hong-wen, TIAN Hong-qi, OUYANG Hua, et al. Vibration Isolation Performance Analysis of the Elasticement of Large-scale Wind Turbine and its Experimentalstudy[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016(5): 212-213.
- [20] 韩广文. 橡胶减振器动静态性能及寿命预测研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016: 50-60.
- HAN Guang-wen. Research on the Dynamicand Static Performance and Service Life of Rubber Absorber[D]. Qingdao: Qingdao Universityof Science & Technology, 2016: 50-60.
- [21] 朱兰琴, 杨文芳, 李雨. 某机载电子设备机架隔振缓冲系统设计[J]. *振动与冲击*, 2015(11): 186-187.
- ZHU Lan-qin, YANG Wen-fang, LI Yu. Vibration and-Shock Isolation System Design for an Airborne ElectronicDevice Rack [J]. *Journal of Vibration andShock*, 2015(11): 186-187.