

基于功率谱密度的两瓶组车载供氢系统随机振动分析

刘智勇, 李晓峰, 朱冰冰, 岳增柱

(北京天海工业有限公司, 北京 101109)

摘要: **目的** 为了确保氢能源汽车的使用安全性, 研究氢能源汽车在行驶过程中, 由路面凹凸不平和无规律性振动对能源供给装置的包装件-供氢系统随机造成的影响。**方法** 通过 Ansys Workbench 有限元分析软件, 采用模态叠加法, 并输入 GB/T 4857.23—2012 中的功率谱密度激励, 对供氢系统进行随机振动分析。**结果** 获得了在 1σ , 2σ , 3σ 下的应力与位移分布, 得知最大应力发生在系统鞍座, 而最大位移发生在系统框架。**结论** 证明了氢系统的使用安全性, 同时为今后的研究以及更多运输包装系统的 PSD 随机振动提供了依据和保障。

关键词: 供氢系统; 模态分析; 随机振动; 功率谱密度

中图分类号: TB485.3; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)01-0069-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.01.010

Random Vibration Analysis of Two-component Vehicle Hydrogen Supply System Based on Power Spectral Density

LIU Zhi-yong, LI Xiao-feng, ZHU Bing-bing, YUE Zeng-zhu
(Tianhai Industry, Beijing 101109, China)

ABSTRACT: The work aims to study the random influence of uneven road surface and irregular vibration on the hydrogen supply system (package of the power supply system) when the hydrogen vehicle is driving, in order to ensure the safe use of hydrogen vehicle. Based on Ansys Workbench (finite element analysis software), the random vibration analysis of the hydrogen supply system was carried out by using the modal superposition method and inputting the power spectral density excitation in GB/T 4857.23—2012. The stress and displacement distributions of 1σ , 2σ and 3σ were obtained, the maximum stress occurred in the system saddle, while the maximum displacement occurred in the system frame. It is proven that the hydrogen system can be used safely and provides a basis and guarantee for the future research and PSD random vibration of more transportation packaging systems.

KEY WORDS: hydrogen supply system; modal analysis; random vibration; power spectral density

随着环境问题越来越被人们所重视以及燃油成本的不断升高^[1-2], 氢气因具有无污染、可再生、储量充足等优点而备受关注, 氢能源汽车也应运而生。供氢系统作为氢能源汽车上的能源供给系统, 是安装在氢能源汽车上的由氢气瓶、框架、绑带、鞍座、输送管路等共同组成的一套运输包装系统。车载供氢系

统在运输过程中会因为汽车的颠簸而振动^[3], 在一些特殊场合, 系统本身的振动可以引起很大的惯性力载荷, 导致产生动应力和位移振动^[4], 这对系统强度提出了更苛刻的要求。

氢系统中大多数零部件的失效由路面不平引起的随机振动造成^[5-6], 虽然振动加速度不大, 但对系

收稿日期: 2018-08-02

基金项目: 北京市科委重大课题资金 (D171100005417002)

作者简介: 刘智勇 (1982—), 男, 工程师, 主要研究方向为车载气瓶的开发。

统中零部件的影响并不小,一旦系统发生振动失效,可能会造成氢气的泄露和结构的强度或刚度失效^[7],甚至引起爆炸,危及人们生命、财产的安全,因此要求车载供氢系统具有良好的抗振性能。

大连交通大学孙玮光对高速车车体进行了随机振动频率响应分析,获得了结构动态响应位移振动分布情况^[8]。西华大学巫发茂等对某飞机武器系统的机载电子设备进行了模态分析和随机振动分析,并将计算结果与实验进行对比,有较好的吻合性^[9]。曾庆平以电机转轴为研究对象,对其进行功率谱密度(PSD)分析,验证了电机转轴能够承受寿命周期内的振动并正常工作^[10]。张馨以车体关键部位加速度为分析对象,发现车辆关键部位加速度对 2~3 Hz 频率比较敏感^[11]。李如忠对某安装架结构进行了动力学仿真分析,提出了结构的改进方案^[12]。Peng 等考虑梁的随机振动与疲劳,改进了设计方法^[13]。余志武基于概率密度演化方法,分析了列车参数随机性对车桥耦合系统响应的影响^[14]。

文中使用 Ansys Workbench,对两瓶组供氢系统施加 GB/T 4857.23—2012《运输包装件基本实验》第 23 部分“随机振动实验方法”中的 6 种功率谱密度激励,进行 PSD 分析,得到系统在 1σ , 2σ , 3σ 下的应力解与位移解,以期系统的安全使用提供依据与保障,也为更多运输包装系统的 PSD 随机振动分析提供参考。

1 有限元建模

1.1 参数设置

1.1.1 材料参数

文中研究对象为两瓶组卧式供氢系统,主要组成部分包括氢气瓶、框架、鞍座、衬垫、绑带、销轴和螺栓等,见图 1,且使用的材料各不相同。氢系统各组成部分材料及其性能参数(弹性模量、泊松比和密度)见表 1。

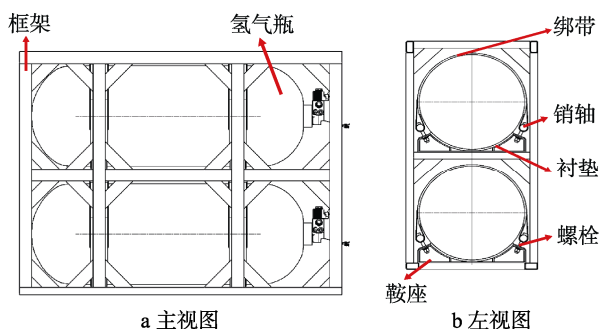


图 1 供氢系统整体结构

Fig.1 Overall structure of hydrogen supply system

1.1.2 设计工况参数

文中对氢系统进行 PSD 随机振动分析,需要对

氢系统施加 PSD 激励, GB/T 4857.23—2012 中给出的不同路面、不同车辆和不同负载下的 6 种 PSD 激励见图 2,计算分析时分别施加 A—F 等 6 种激励。

表 1 材料参数
Tab.1 Material parameter

部件	材料	弹性模量/ GPa	泊松比	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
气瓶	铝+碳纤维	210	0.3	1970
框架	6063 铝	69	0.33	2700
鞍座	铝合金	71	0.33	2770
衬垫	橡胶	0.0061	0.49	1000
绑带	不锈钢	193	0.3	7750
销轴	45 钢	200	0.3	7850
螺栓	35 钢	192	0.31	7850

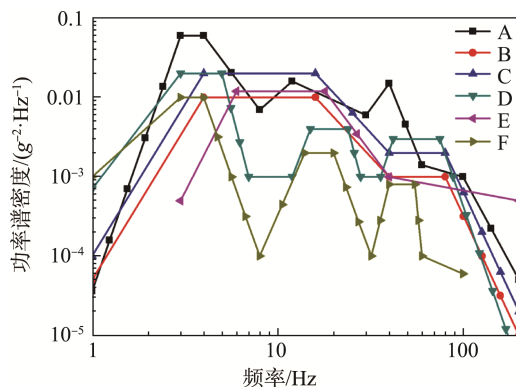


图 2 随机振动 PSD 曲线

Fig.2 PSD curve of random vibration

1.2 分析模型

文中所研究的两瓶组氢系统组件较多,模型较复杂,需要校核的关键部位有框架、鞍座和连接螺栓,因此对这 3 个部位进行网格细化来保证分析时的求解精度,而对于并非分析部位的气瓶采用粗略划分,厚度方向仅划分 1 层网格即可。氢系统整体几何模型见图 3,氢系统整体的有限元网格模型见图 4,采用 Solid 185 进行划分,单元的边长为 5~10 mm,雅克比数值在 0.9 左右,网格数量为 500 633,节点数量为 2 462 961。

整个系统中框架与鞍座、框架与框架均通过焊接进行连接,为了给分析结果留出安全富裕量,建模时省去焊缝的建立。在鞍座、绑带、螺栓等部位的连接均为接触连接,振动分析时软件将所有接触均视为绑定接触处理。在对两瓶组氢系统进行 PSD 分析时,主要校核部位为框架与鞍座,忽略气瓶内部结构的影响,因此可将 2 组气瓶视为刚体,网格划分时粗略划分。

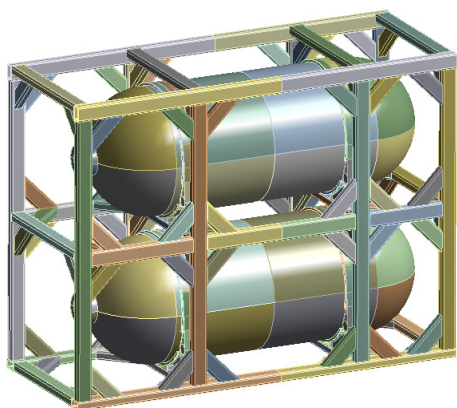


图 3 氢系统的几何结构
Fig.3 Geometric construction of hydrogen system

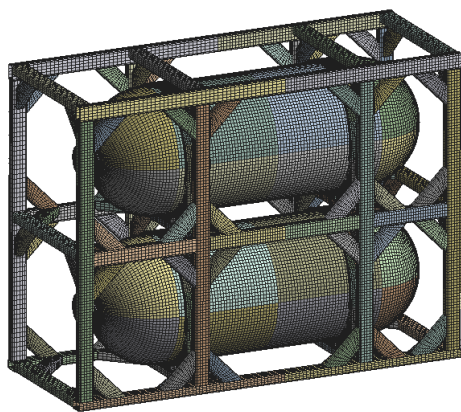


图 4 氢系统有限元网格模型
Fig.4 Hydrogen system finite element mesh model

1.3 边界条件及载荷

PSD 分析时主要有 3 个步骤,分别是螺栓预紧的静力场分析、考虑预应力场的模态分析以及叠加模态后的 PSD 随机振动分析。氢系统框架以焊接的方式与汽车车架相连,各分析情况下的边界条件与载荷情况如下所述。

1) 静力场分析。在 8 个连接螺栓圆柱面施加扭矩为 100 N·m 的螺栓预紧力;在框架底面施加固定约束。

2) 模态分析。读入静力求解的预应力场;设定模态分析的频率范围为 1~200 Hz;在框架底面施加固定约束。

3) PSD 分析。读入模态分析的模态解;在固定约束表面施加竖直向上的 PSD 功率谱密度的振动激励。

2 结果分析与讨论

2.1 有预应力场的模态分析结果

静力分析得到的等效应力强度云图见图 5。由图

5 可知,施加预紧力后,绑带受到来自螺栓的拉力而伸长,在绑带直边段有较大的应力分布,气瓶受到绑带向下的力被固定在鞍座上。

完成静力场求解后,将结果作为预应力场导入模态分析,在频率 1~200 Hz 范围内,总共得到 15 阶态结果,各阶模态的合位移云图见图 6。从模态结果可以看出,氢系统发生较大变形的固有频率主要集中在 100 Hz 以上,最大变形发生在 14 阶模态,固有频率为 178.3 Hz,最大变形量为 23.089 mm,低频范围内发生共振产生的影响较小。

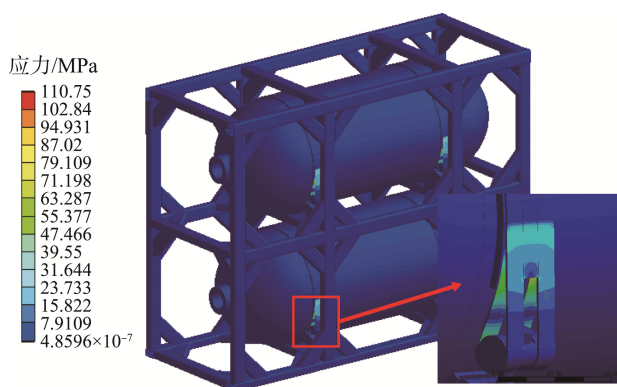


图 5 静力分析应力云图
Fig.5 Stress nephogram of static analysis

2.2 PSD 随机振动分析结果

由 PSD 随机振动分析可以得到在某功率谱密度下相应的位移解和应力解,结果表示统计学范畴下的概率解,可分为 1σ , 2σ , 3σ 解。各个解的分布见图 7,可知 1σ 解的发生概率为 68.2%, 2σ 解的发生概率为 27.1%, 3σ 解的发生概率为 4.33%^[15],所有结果发生的概率和为 1。

下面以施加图 2 中功率谱密度 A 的分析结果进行说明。应力最大点出现在鞍座,因此对鞍座进行强度校核,鞍座在功率谱密度 A 的激励下,PSD 随机振动的 3σ 应力解见图 8。位移最大点出现在框架,因此对框架进行刚度校核,框架在功率谱密度 A 的激励下,PSD 随机振动的 3σ 位移解见图 9。

鞍座上应力解的最大值有 99.73% 的概率小于 34.467 MPa,小于氢系统所使用铝合金材料的许用极限 71 MPa,因此鞍座相对安全。框架上位移解的最大值有 99.73% 的概率不超过 0.049 mm,远小于刚度要求的 10 mm,因此框架也相对安全。

对氢系统施加 A—F 等 5 种功率谱密度激励,得到的 3σ 概率的鞍座应力解以及框架位移解见表 2,应力与位移最大值发生的位置仍为图 8—9 所示的位置。根据 6 种功率谱密度激励下的结果,在功率谱密度 E 下出现最大应力和最大位移。最大应力出现在鞍座,最大位移出现在框架,在随机振动时,供氢系统鞍座以及框架都比较安全。

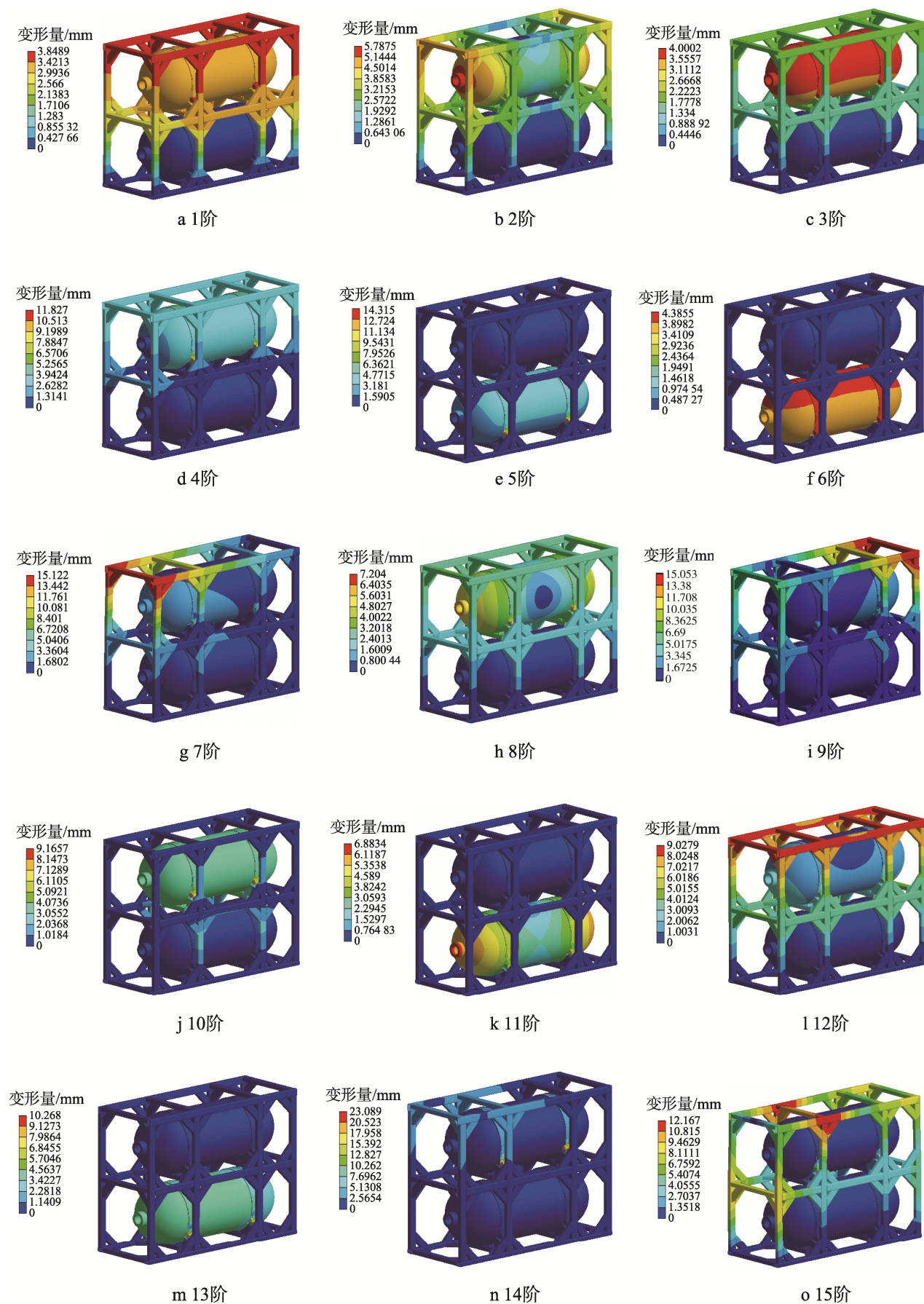


图6 各阶模态解
Fig.6 Modal solution of each order

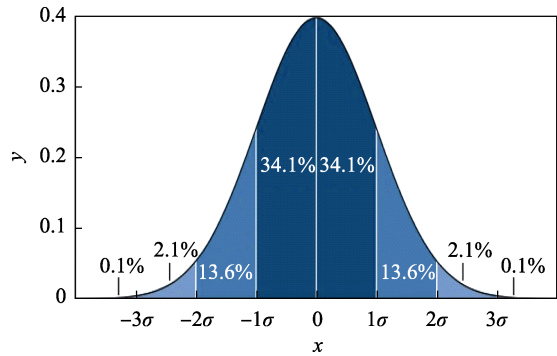


图 7 3σ 正态分布
Fig.7 Normal distribution of 3σ

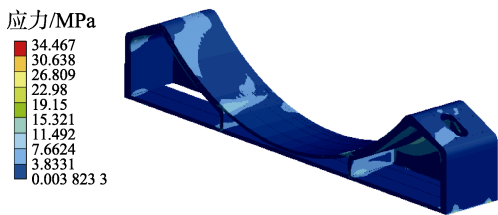


图 8 鞍座 3σ 应力解
Fig.8 3σ stress solution of saddle

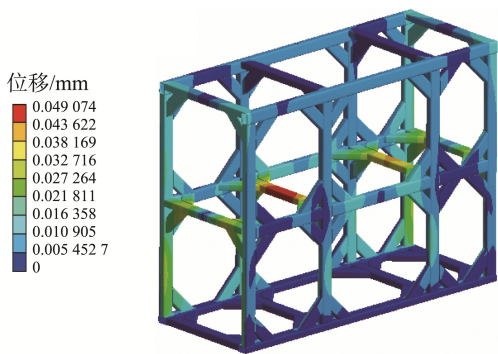


图 9 框架 3σ 位移解
Fig.9 3σ displacement solution of frame

表 2 PSD 随机振动分析结果
Tab.2 Results of PSD random vibration analysis

PSD	鞍座 3σ 应力解/MPa	许用极限/ MPa	框架 3σ 位移解/mm	许用 位移/mm
A	34.467		0.049	
B	18.152		0.043	
C	25.671	71	0.039	10
D	19.771		0.028	
E	38.84		0.059	
F	8.002		0.014	

3 结语

利用 Ansys Workbench 对北京天海工业有限公司

设计的车载氢气系统进行了 PSD 随机振动分析，获得了在不同功率谱密度激励下，鞍座的 1σ，2σ，3σ 应力解分布以及框架的 1σ，2σ，3σ 位移解分布，可以得到以下结论。

1) 随机振动时最大应力出现在鞍座，6 种 PSD 激励下 3σ 应力解最大值为 38.84 MPa，在功率谱密度 E 激励时发生。

2) 随机振动时最大位移出现在框架，6 种 PSD 激励下 3σ 位移解最大值为 0.059 mm，仍在功率谱密度 E 激励时发生。

3) 车载供氢系统在正常运输情况下比较安全。

以上分析方法和结论可为今后更多运输包装系统的 PSD 随机振动分析提供参考。

参考文献：

[1] KUMAR S, KWON H T, CHOI K H, et al. LNG: An Eco-friendly Cryogenic Fuel for Sustainable Development[J]. Applied Energy, 2011, 88(12): 4264—4273.

[2] 周天送. 车载低温绝热气瓶抗振性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

ZHOU Tian-song. Study on Anti-vibration Performance of Vehicle Cryogenic Insulated Cylinder[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[3] XU L, ZHAI W, GAO J, et al. On Effects of Track Random Irregularities on Random Vibrations of Vehicle-track Interactions[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2017, 50: 25—35.

[4] 曹宾, 王振宏. 基于位移功率谱密度的车架随机振动研究[J]. 新技术新工艺, 2014(6): 87—90.

CAO Bin, WANG Zhen-hong. Research on Random Vibration Characteristics of the Bus Frame Based on Displacement PSD[J]. New Technique and New Process, 2014(6): 87—90.

[5] 李晓刚. 运输包装系统随机振动频域分析[J]. 包装工程, 2012, 33(15): 50—54.

LI Xiao-gang. Random Vibration Frequency Domain Analysis of Transport Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15): 50—54.

[6] 尹辉俊, 黄昶春, 韦志林, 等. 重型车车架的动态特性分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 19—23.

YIN Jun-hui, HUANG Chang-chun, WEI Zhi-lin, et al. Analysis of Dynamic Characteristics of Heavy-duty Truck Frame[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 19—23.

[7] AKIN J E. Finite Elements in Analysis and Design[M]. Salt Lake City: Academic Press, 1994.

[8] 孙玮光. 基于 Ansys 的车体随机振动分析[J]. 科技信息(学术研究), 2008(27): 465—467.

SUN Wei-guang. Random Vibration Analysis of Vehicle Body Based on Ansys[J]. Science and Technology Information (Academic Research), 2008(27): 465—

- 467.
- [9] 巫发茂, 蒋龙, 王健, 等. 基于 Ansys Workbench 某机载电子设备随机振动响应分析[J]. 现代电子技术, 2016, 39(10): 96—99.
WU Fa-mao, JIANG Long, WANG Jian, et al. Random Vibration Response Analysis of an Airborne Electronic Device Based on Ansys Workbench[J]. Modern Electronic Technology, 2016, 39(10): 96—99.
- [10] 曾庆平, 洪育成, 徐皖生. 基于 Ansys Workbench 的电机转轴的随机振动分析[J]. 内燃机与配件, 2018(4): 59—61.
ZENG Qing-ping, HONG Yu-cheng, XU Wan-sheng. Random Vibration Analysis of Motor Shaft Based on Ansys Workbench[J]. Internal Combustion Engine and Accessories, 2018(4): 59—61.
- [11] 张馨, 李会. 基于垂向振动的车体加速度分析[J]. 铁道标准设计, 2011(10): 8—11.
ZHANG Xin, LI Hui. Acceleration Analysis of Vehicle Body Based on Vertical Vibration[J]. Railway Standard Design, 2011(10): 8—11.
- [12] 李如忠. 结构随机振动仿真分析[J]. 机械, 2007(5): 21—23.
LI Ru-zhong. Structural Random Vibration Simulation Analysis[J]. Mechanical, 2007(5): 21—23.
- [13] PENG Li-ping, LIU Chu-sheng, SONG Bao-cheng, et al. Improvement for Design of Beam Structures in Large Vibrating Screen Considering Bending and Random Vibration[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(9): 3380—3388.
- [14] 余志武, 毛建锋, 谈遂, 等. 车辆参数随机的车桥竖向随机振动分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(1): 97—104.
YU Zhi-wu, MAO Jian-feng, TAN Sui, et al. Vertical Random Vibration Analysis of Vehicles with Random Vehicle Parameters[J]. Journal of the Railway, 2015, 37(1): 97—104.
- [15] ZHENG M, SHEN F, LUO P. Vibration Fatigue Analysis of the Structure under Thermal Loading[J]. Advanced Materials Research, 2014, 853: 559—564.