

重大工程装备

某车载油箱在随机振动环境下的疲劳寿命研究

唐元章^{1,2}, 杨智荣², 马殿国², 高海波¹, 杨再明^{1,2}, 林治国¹, 杜勤³

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 武汉 430063; 2. 中国特种设备检测研究院 国家市场监督管理总局特种设备安全与节能重点实验室, 北京 100029; 3. 北京北方车辆集团有限公司, 北京 100072)

摘要: **目的** 针对某车载油箱高周疲劳寿命难以预测问题, 研究该设备在随机载荷环境下的疲劳寿命。**方法** 首先通过模态试验得到油箱固有频率及振型, 然后利用 Solidworks 建立该车载油箱的仿真模型, 在 ANSYS Workbench 软件中进行模态分析、随机振动分析、谐响应分析。最后利用 ANSYS Workbench 软件中的 nCode SN Vibration (DesignLife) 模块, 在随机振动疲劳寿命频域分析法基础上, 通过 nCode 模块中的 Narrowband 法进行油箱在多个加速度功率谱密度下的疲劳寿命研究。**结果** 该油箱在约束模态试验和仿真分析下所表现的动力学特性基本相同, 油箱纵向为振动严酷方向。在已知加速度功率谱密度下, 油箱疲劳寿命随低阶固有频率处功率谱密度幅值的增加而降低, 但油箱薄弱部位始终保持不变。**结论** 建立的仿真模型准确, 可为油箱优化设计及后续油箱疲劳试验提供参考。

关键词: 高周疲劳; 模态试验; 模态分析; 谐响应分析; 固有频率; 随机振动疲劳寿命频域分析法

中图分类号: TU130

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)07-0100-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.07.013

Fatigue Life of a Vehicle Tank Under Random Vibration

TANG Yuan-zhang^{1,2}, YANG Zhi-rong², MA Dian-guo², GAO Hai-bo¹, YANG Zai-ming^{1,2}, LIN Zhi-guo¹, DU Qin³

(1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Key Laboratory of Special Equipment Safety and Energy Saving of State Administration for Market Regulation, China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China; 3. Beijing North Vehicle Group Co., Ltd., Beijing 100072, China)

ABSTRACT: The working environment of fuel tank is complex and changeable. The paper aims at the problem that it is difficult to predict the high cycle fatigue life of a vehicle fuel tank and to study the fatigue life of the equipment under random load environment. Firstly, the natural frequency and mode shape of vehicle tank are obtained by modal test, and the simulation model of the vehicle fuel tank is established by SolidWorks. Modal analysis, random vibration analysis and harmonic response analysis

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-05-24

Received: 2021-03-31; Revised: 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1709215); 国家自然科学基金(51579200); 中央高校基本科研业务专项资金资助项目(2018 III 053GX)

Fund: Key Projects of National Natural Science Foundation of China (U1709215); the National Natural Science Foundation of China (51579200); Special Fund Support Project for Basic Scientific Research Business of Central University (2018 III 053GX)

作者简介: 唐元章(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为振动在线监测与故障识别。

Biography: TANG Yuan-zhang (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: on-line vibration monitoring and fault identification.

通讯作者: 杨智荣(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为工程力学。

Corresponding author: YANG Zhi-rong (1975-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: engineering mechanics.

引文格式: 唐元章, 杨智荣, 马殿国, 等. 某车载油箱在随机振动环境下的疲劳寿命研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 100-107.

TANG Yuan-zhang, YANG Zhi-rong, MA Dian-guo, et al. Fatigue Life of a Vehicle Tank Under Random Vibration[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 100-107.

are carried out in ANSYS Workbench. Finally, through the nCode SN vibration (DesignLife) module of ANSYS Workbench software, the fatigue life of fuel tank under multiple acceleration power spectral density is studied by using the narrowband method of nCode module based on the frequency domain analysis method of random vibration fatigue life. The results show that the natural frequency and mode shape of modal test and simulation are basically the same, the longitudinal direction of the tank is severe. Fatigue life of the tank decreases with the increase of power spectral density amplitude at the lower natural frequency under known power spectral density spectrum, but the weak part of the tank remains unchanged. The established simulation model is accurate, this study can provide a reference for the optimization design of fuel tank and the subsequent fatigue test of fuel tank.

KEY WORDS: high cycle fatigue; modal test; modal analysis; harmonic response analysis; natural frequency; frequency domain analysis of random vibration fatigue life

油箱是由薄板材通过焊接工艺接成的大型薄壁容器,薄板焊缝间涂有密封胶,工作时在内压力和外部多向振动载荷,以及潮湿、腐蚀气体等复杂因素的作用下,若设计、制造不当或过度使用等,便会引发安全事故和损失^[1],因此对油箱寿命评估十分重要。近年来,为提高油箱可靠性及寿命,有许多研究人员对各类油箱进行了相关研究,其研究可大致分为以下 2 类。

一类是研究油箱本身,对其进行分析,获得油箱相关特性,进而改进优化油箱材料及结构,提高其可靠性和寿命。例如文献[2]研究了汽车油箱材料本身对疲劳特性的影响。文献[3]采用试验法对挖掘机油箱进行了加速振动疲劳试验,获得了各种谱型,并建立了试验分析方法及流程。虽然试验方法的可信度较大,但容易产生误差,且耗时耗力。在保证计算准确的前提下,计算机仿真可避免试验法的缺点。如今,有许多文献^[4-10]利用计算机软件对油箱进行分析。

另一类是研究油箱支架,通过改进油箱支架达到提高油箱整体可靠性的目的。例如刘崇利^[11]借助有限元方法对重型牵引车油箱支架进行了时域响应分析及疲劳寿命预测。王东^[12]在实测道路谱基础上,对某重型牵引车油箱支架进行了疲劳可靠性分析。赵玉龙等^[13]通过编制的随机疲劳载荷谱开展了机翼副油箱挂架的疲劳寿命分析及优化研究。吴昊^[14]先通过有限元法对某轻型货车油箱支架进行了强度分析,后利用集成优化平台对支架的结构参数进行了轻量化设计,得到了较好的设计结果。赵卫艳等^[15]通过仿真,分析了油箱支架的疲劳寿命。

目前,很少有文献在约束模态试验的基础上对车载油箱在随机振动情况下的疲劳寿命进行仿真研究。针对某车载油箱疲劳寿命问题,在约束模态试验基础上进行有限元仿真分析,通过与约束模态试验对比来验证仿真分析的准确性。随后在有限元法确定油箱振动严酷方向基础上,根据所建立的有限元模型,通过随机振动疲劳寿命频域分析法,利用 ANSYS Workbench 软件中 nCode SN Vibration (DesignLife)模块对多个 PSD 谱型下油箱寿命进行了评估,为之后油箱

优化设计及油箱疲劳试验提供理论依据。

1 模态试验及仿真分析

1.1 模态分析理论

有限元模态分析可得出不同载荷作用下结构的振动形式,从而指导结构的设计,使其避免共振^[16]。油箱模型通过有限元划分,可离散为 n 个自由度的系统。其动力平衡方程为^[17]:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: $\{F(t)\}$ 为力矩阵; $\{x\}$ 为位移矩阵; $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩; $[K]$ 为刚度矩阵。

现实工程问题中,阻尼对结构固有频率和振型影响很小,因此可以忽略不计,从而获得无阻尼自由振动方程^[18]:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (2)$$

由式(2)可得到振型方程:

$$\{[K] - \omega_n^2[M]\}\{X\} = \{0\} \quad (3)$$

式(3)中: $\{X\}$ 称为特征矢量,且 $\{X\}$ 不全为 0。故式(3)方程可简化为:

$$\left| [K] - \omega_n^2[M] \right| = 0 \quad (4)$$

式(4)的解 $\omega_i (i=1,2,\dots,n)$ 便是结构的第 i 阶自振频率,将其代入式(3)可得到对应的振型^[19]。

1.2 模态试验

试验设计为约束模态试验,采用力锤作为激励源,具体实验装置如图 1 所示。试验内容包括油箱整体结构固有频率测试与模态振型参数测量。为使油箱结构的各阶模态更接近真实情况,采用 7 通道并行测试,通道 1 为力通道,沿表面均匀分布的 243 个测点为力锤信号输入点,测点分布如图 2 所示。通道 2—7 为输出通道,对应 6 个加速度所在的响应点,分别位于测点 164、188、42、83、237、67,各响应点依次命名为 A、B、C、D、E、F。其中响应点 E 处布置上下方向加速度传感器,响应点 F 处布置左右



图1 实验装置
Fig.1 Test device

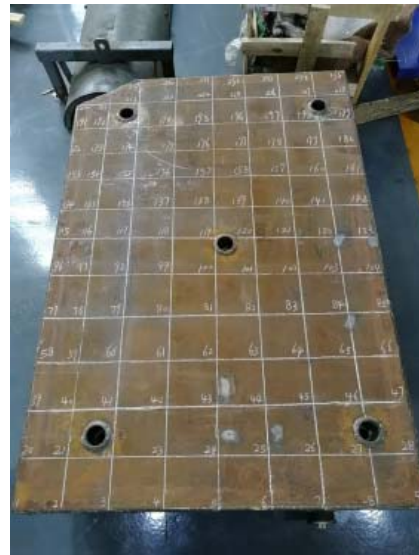
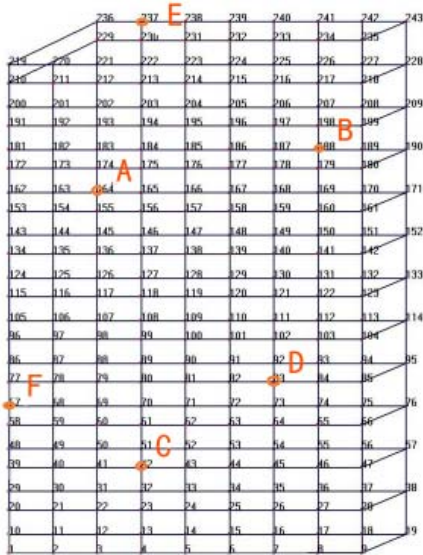


图2 测点分布
Fig.2 Measuring point distribution

方向加速度传感器,其他响应点布置前后加速度传感器。具体测试时,对243个测点逐一进行锤击试验,每测点处重复敲击3次,在不出现连击且各通道信号正常情况下依次进行试验测试。

模态试验所用软硬件设备如图3所示。采集仪采集力锤力信号及加速度信号,然后将数字信号传至DASP模态分析软件。

1.3 仿真模态分析

利用Solidworks软件根据油箱尺寸及实物(如图4a所示)创建加约束夹具的有限元模型。为节省分析时间,忽略油箱外部相关螺母及孔隙,仅保留安装孔,使油箱为标准多面体。将建立的仿真模型导入ANSYS Workbench软件,在其材料库中设置油箱材料为结构钢BS4360 40B,密度为7850 kg/m³,杨氏

模量为2×10⁵ MPa,泊松比为0.3。采取四面体网格划分方法,并控制网格大小,最终得到的网格如图4b所示,网格节点数为269 003,单元数为135 155。最后将油箱安装面及夹具底部施加固定支撑约束,求解油箱前20阶模态特性。

1.4 结果对比

通过对比模态试验结果与有限元分析计算结果,可验证有限元分析模型与结果是否精确^[20]。提取对油箱运动起核心作用的1—6阶仿真及试验模态固有频率,见表1。仿真一阶振型、试验模态一阶振型分别如图5、图6所示。

对比表1中提取的油箱固有频率,可以看到试验及仿真固有频率的误差小于10%。由于试验与仿真之间本身存在测量误差、数值误差等多种复杂因素导致

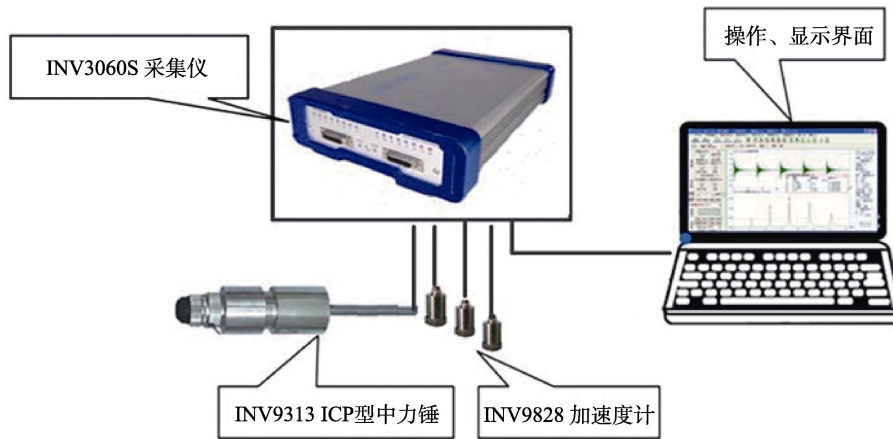


图 3 模态试验所用软件及硬件
Fig.3 Software and hardware used in modal test

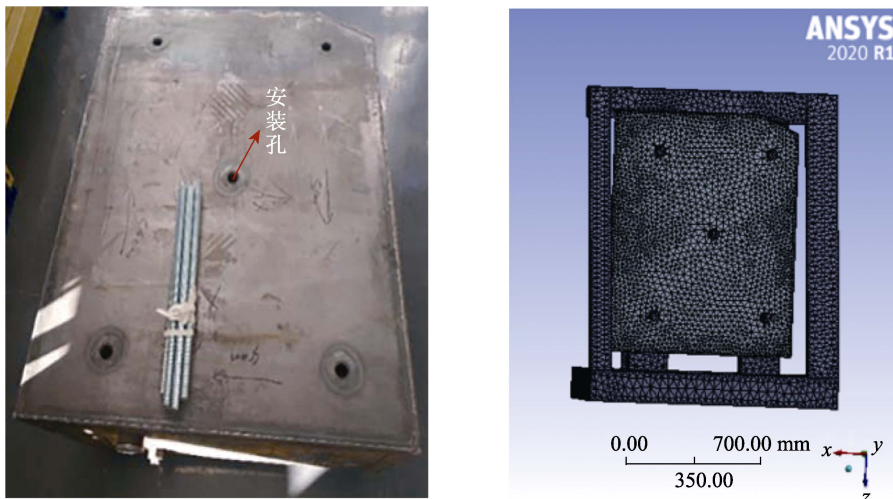


图 4 油箱实物及有限元模型网格划分
Fig.4 Physical drawing and grid drawing of fuel tank

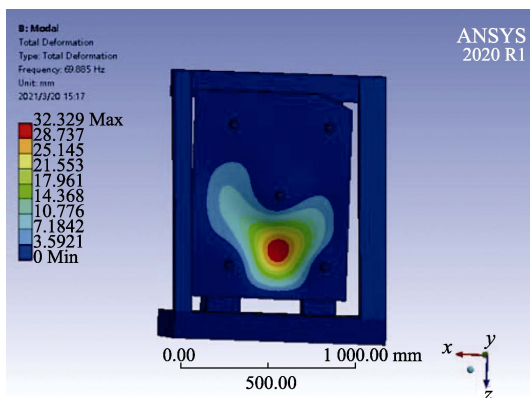


图 5 仿真一阶振型
Fig.5 Simulation of the first order mode

的误差, 因此一般工程实践中认为该误差范围可接受。将图 6 试验振型与图 5 对比可知, 两者变形严重位置基本一致, 但变形微弱位置有差距, 这可能与真实油箱材料中添加有未知合金有关。总体有限元仿真结果与模态试验结果误差在可接受范围, 验证说明

了该数值仿真的正确性, 可利用此模型进行后续油箱振动疲劳寿命分析。

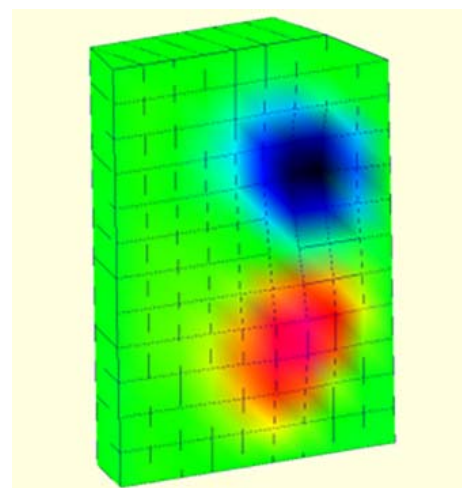


图 6 试验一阶振型
Fig.6 Test mode of the first order

表 1 频率对比
Tab.1 Frequency comparison

阶数	仿真频率/Hz	试验频率/Hz	误差/%
1	69.885	68.161	2.53
2	75.252	76.683	1.87
3	82.751	86.162	3.96
4	105.61	99.012	6.67
5	110.96	102.4	8.36
6	124.51	113.632	9.57

2 随机振动分析

进行振动疲劳仿真分析前,需确定油箱振动严酷

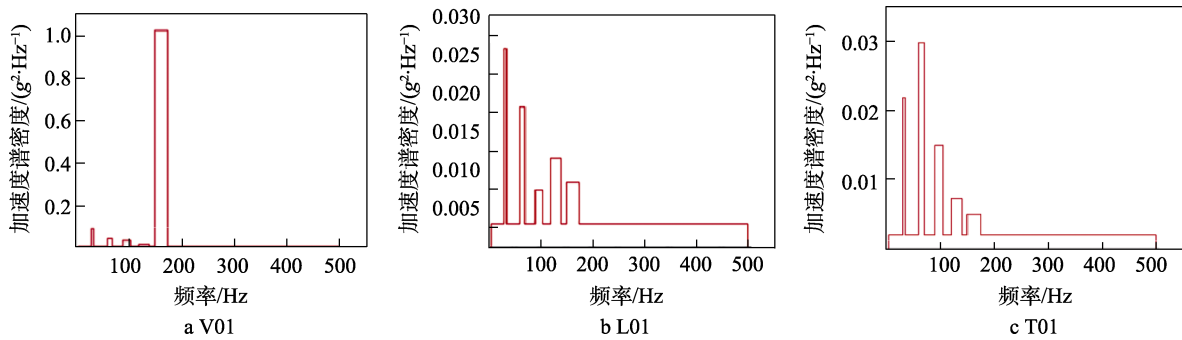


图 7 随机振动加速度谱密度
Fig.7 Acceleration spectral density of random vibration

表 2 3 个方向随机振动下频域应力
Tab.2 Stress in frequency domain under random vibration in 3 directions

加速度谱密度	方向	频域应力/MPa		
		1σ	2σ	3σ
V01	X	8.281	16.561	24.842
	Y	64.553	129.110	193.660
	Z	6.706	13.413	20.120
L01	X	5.260	10.521	15.781
	Y	44.325	88.651	132.980
	Z	5.327	10.655	15.982
T01	X	5.644	11.288	16.932
	Y	24.158	48.316	72.474
	Z	4.250	8.500	12.751

由表 2 可知,对于 V01、L01、T01 这 3 个轴向,油箱的纵向(Y)所受频域应力均大于横向(X)及垂直方向(Z),即油箱纵向为振动严酷方向。

3 振动疲劳分析

3.1 疲劳寿命频域分析法

采用频域法进行疲劳分析最主要的是概率密度函数 $p(S)$ 。对于窄带, Bendat 等^[25]指出:

方向,以确定后续振动仿真的高效有序进行^[21]。根据 Steinberg 的基于高斯分布^[22]和 Miner 线性累计损伤定律的三区间法^[23],应力分布的 3 个主要区间分别是:分布概率为 68.3%的 1σ 区间;分布概率为 27.1%的 2σ 区间;分布概率为 4.33%的 3σ 区间;其余区间可忽略^[24]。利用该方法分别计算油箱 3 个方向对应的 3 个区间应力分布,以此确定振动严酷方向。采用 GJB 150.16A—2009《军用设备环境试验方法》中履带车随机振动数据,通过 ANSYS 随机振动模块,利用 V01(垂直轴向)、L01(纵轴向)、T01(横轴向)加速度谱密度(见图 7)进行油箱横向(X)、纵向(Y)、垂直方向(Z)随机振动仿真,仿真结果见表 2。

$$p(S) = \frac{S}{\sigma_{RMS}^2} e^{-\frac{S^2}{2\sigma_{RMS}^2}} \quad (5)$$

式中: s 为应力幅值; σ_{RMS} 为应力随机过程的均方根。 σ_{RMS} 的表达式为:

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\int_0^{+\infty} G(f)df} = \sqrt{m_0} \quad (6)$$

式中: $G(f)$ 为单边谱密度; m_0 为第 0 阶谱矩。由 Miner 线性累积损伤理论,结构疲劳损伤为^[26]:

$$D = \sum_{i=1}^{+\infty} D_i = \sum_{i=1}^{+\infty} [n(S_i) / N(S_i)] \quad (7)$$

式中: $n(S_i)$ 表示应力幅值为 S_i 时的实际应力循环次数; $N(S_i)$ 表示应力幅值为 S_i 时 $S-N$ 曲线下对应的寿命循环值。 $n(S_i)$ 的表达式为:

$$n(S_i) = vTp(S_i)\Delta S_i \quad (8)$$

联立式 (7) 和 (8), 可得连续分布应力状态下时间 T 内的疲劳损伤 D :

$$D = T \int_0^{+\infty} \frac{p(S)}{N(S)} dS \quad (9)$$

联立式 (5)、(9), 并结合疲劳寿命曲线 $S^m N = C$ 可得窄带过程下疲劳损伤结果:

$$D^{NB} = \frac{vT}{C\sigma^2} \int_0^{+\infty} S^{m+1} \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2}\right) dS \quad (10)$$

D 大于或等于 1 时, 结构被损坏。 $D=1$ 时, 结构

被破坏的临界时间为:

$$T = \frac{C\sigma^2}{v \int_0^{+\infty} S^{m+1} \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2}\right) dS} \quad (11)$$

3.2 谐响应分析

油箱疲劳寿命分析前需进行谐响应分析, 考虑分析效率, 谐响应分析方法采用模态叠加法。参照模态试验得到的阻尼, 油箱结构的阻尼设定为 0.01。扫频范围设定最小为 0 Hz, 最大扫频频率为模态分析时最大模态频率值的 2/3。如果最大值超过该计算值, ANSYS 系统便会出现警告。模态分析第 20 阶频率为 205.28 Hz, 通过计算可取最大扫频频率为 130 Hz。求解间隔设定为 13, 在油箱 Z 方向施加单位加速度为 9.8 m/s² 的激励。同时使用 ANSYS 抑制功能抑制

夹具及螺栓, 解出油箱结构在扫频频率范围内的响应特性, 为疲劳寿命分析作准备。谐响应分析所得油箱应力及位移随频率的变化如图 8 所示。

由图 8 可知, 油箱在频率为 70 Hz 左右产生的应变最大。在图 8a 中, 应力极大值为 1.859 4×10⁻³ MPa, 与之对应频率为 120 Hz, 接近油箱第 6 阶固有频率。在图 8b 中, 位移极大值为 1.140 9×10⁻³ mm, 对应频率为 70 Hz, 接近油箱 1 阶固有频率, 故谐响应分析有效。为避免油箱发生共振, 应使其振动频率错开固有频率及其倍频。

3.3 疲劳寿命分析

疲劳寿命分析必须施加随机振动载荷, GJB150.16A—2009《军用设备环境试验方法》中已提供履带车相关程序数据, 并且第 2 节中已通过 ANSYS

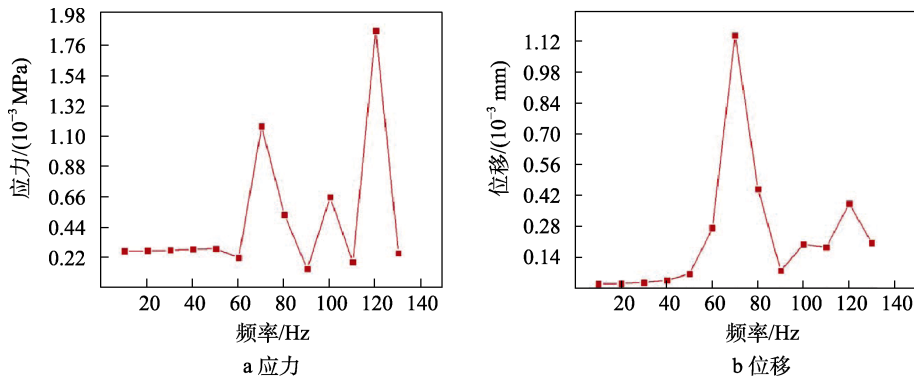


图 8 应力及位移变化
Fig.8 Stress and displacement diagram

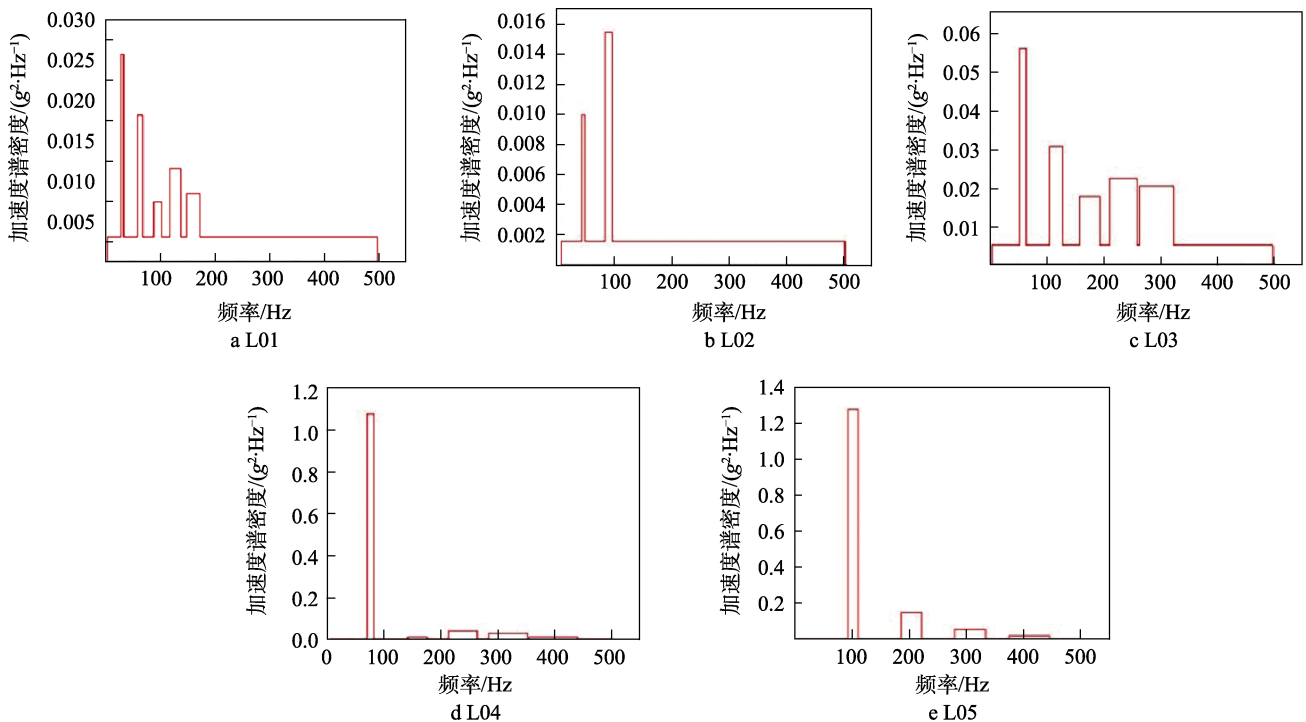


图 9 L01—L05 加速度谱密度
Fig.9 L01—L05 acceleration spectral density

Workbench 随机振动分析模块确定油箱纵向为振动严酷方向,因此该分析采用 GJB 150.16A—2009《军用设备环境试验方法》履带车程序数据中 L01—L05 纵向加速度功率谱密度(见图 9)进行仿真寿命分析。

将谐响应分析结果导入 ANSYS Workbench 软件中

nCode SN Vibration (DesignLife)模块,并通过该模块中的 Narrowband 方法,计算 L01—L05 加速度谱密度对应的油箱疲劳寿命。由于 L01、L02 加速度谱密度幅值偏低而导致该软件无法得出对应寿命,因此只列举 L03—L05 功率谱密度寿命计算结果,如图 10 所示。

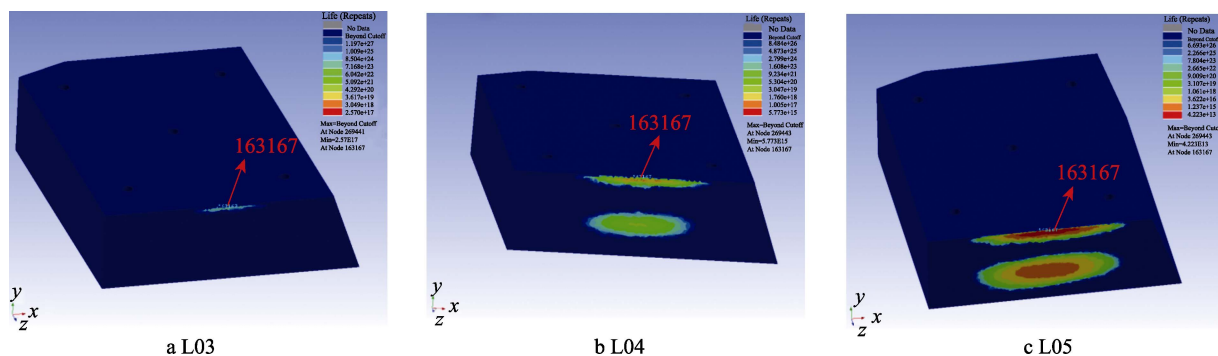


图 10 L03-L05 寿命计算结果
Fig. 10 L03-L05 life calculation results

由图 9 及图 10 可知,油箱寿命随 L03—L05 低阶固有频率所对应的加速度功率谱密度幅值的增加而逐渐减小,其寿命依次为 2.570×10^{17} 次、 5.773×10^{15} 次、 4.223×10^{13} 次,但油箱最薄弱位置不变,位于节点 163167 处。

4 结语

采用试验方法预测油箱寿命难度较大,需耗费大量财力、物力及时间。本文首先利用 Solidworks 创建了车载油箱模型,其次通过模态仿真及约束模态试验验证了所建立的有限元模型准确性,然后利用 ANSYS Workbench 随机振动分析模块确定振动严酷方向,再通过 ANSYS Workbench 软件中 nCode SN Vibration (DesignLife)模块预测油箱寿命。结果表明,油箱纵向为振动严酷方向,在已知加速度功率谱密度下,油箱疲劳寿命随低阶固有频率处加速度功率谱密度的增加而减小,油箱薄弱部位位于下部。此分析结果可为油箱后续疲劳试验、使用、设计及改进提供参考。

参考文献:

- [1] 陶峰, 欧阳祖行, 刘正坝. 用模糊综合评判法评估薄壁容器的寿命[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(3): 299-304.
TAO Feng, OUYANG Zu-xing, LIU Zheng-xun. Evaluation for Life on Laminal Vessel Using Fuzzy Comprehensive Decision Process[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2000, 32(3): 299-304.
- [2] 张益龙, 刘景佳, 王自荣. 退火方式及化学成分对汽车油箱用 IF 钢疲劳性能的影响[J]. 轧钢, 2019, 36(5): 43-46.
ZHANG Yi-long, LIU Jing-jia, WANG Zi-rong. Effects of

Annealing Mode and Chemical Composition on Fatigue Property of IF Steel Used for Fuel Tank[J]. Steel Rolling, 2019, 36(5): 43-46.

- [3] 张少波, 孙树磊, 雷丽妃, 等. 基于等效损伤的挖掘机油箱加速振动疲劳试验工况分析研究[J]. 工程机械, 2019, 50(12): 21-27.
ZHANG Shao-bo, SUN Shu-lei, LEI Li-fei, et al. Analysis and Research on Excavator Tank under Accelerated Vibration Fatigue Test Condition Based on Equivalent Damage[J]. Construction Machinery and Equipment, 2019, 50(12): 21-27.
- [4] 赵卫东, 俞松松, 刘剑, 等. 挖掘机液压油箱应力分析和疲劳寿命预估[J]. 建筑机械, 2021(1): 59-63.
ZHAO Wei-dong, YU Song-song, LIU Jian, et al. Stress Analysis and Fatigue Life Prediction of Hydraulic Oil Tank for Excavator[J]. Construction Machinery, 2021(1): 59-63.
- [5] 刘建军, 金焱, 杨立恒, 等. 大型变压器油箱含缺陷焊缝疲劳寿命研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(3): 145-149.
LIU Jian-jun, JIN Yan, YANG Li-heng, et al. Study on Fatigue Life of Welds with Defects in Large Transformer Tank[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(3): 145-149.
- [6] 程贤福, 李晶, 程安辉. 某轻型货车燃油箱振动疲劳分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(1): 93-98.
CHENG Xian-fu, LI Jing, CHENG An-hui. Vibration Fatigue Analysis of a Light Truck Fuel Tank[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(1): 93-98.
- [7] 方治华, 贾宏玉. 矿用自卸车燃油箱系统的等效应力和疲劳强度分析[J]. 内蒙古科技大学学报, 2020, 39(2): 100-102.
FANG Zhi-hua, JIA Hong-yu. Equivalent Stress and Fatigue Strength Analysis of Fuel Tank System of Mine Dump Truck[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2020, 39(2): 100-102.
- [8] 赵磊, 张昭, 王松, 等. 燃油箱吊座焊缝的强度和疲劳有限元分析[J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(1): 7-11.

- ZHAO Lei, ZHANG Zhao, WANG Song, et al. Finite Element Analysis on Weld Strength and Fatigue of Fuel Tank Bracket[J]. Computer Aided Engineering, 2015, 24(1): 7-11.
- [9] 张金亮. 飞机蓄压油箱的振动疲劳寿命分析[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
ZHANG Jin-liang. Analysis on Vibration Fatigue Life of Airplane Oil Pressure Reservoirs[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016.
- [10] 顾浩洋. 机背油箱振动疲劳寿命预测与优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
GU Hao-yang. Vibration Fatigue-Life Prediction and Optimization for the back Fuel Tank of Aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [11] 刘崇利. 重型牵引车油箱支架时域响应分析及疲劳寿命预测[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
LIU Chong-li. Time Domain Response Analysis and Fatigue Life Prediction of Fuel Tank Bracket of Heavy Tractor[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [12] 王东. 基于实测道路谱的某重型牵引车油箱支架疲劳可靠性分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
WANG Dong. Fatigue Reliability Analysis of the Fuel Tank Bracket of a Heavy Tractor under the Measured Road Spectrum[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [13] 赵玉龙, 赵翔, 王峰会, 等. 随机载荷作用下机翼副油箱挂架的疲劳寿命分析及优化[J]. 航空制造技术, 2016, 59(7): 66-68.
ZHAO Yu-long, ZHAO Xiang, WANG Feng-hui, et al. Fatigue Analysis and Detail Optimization for Wing Pylons of Auxiliary Fuel Tanks under Random Loading[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(7): 66-68.
- [14] 吴昊. 某轻型货车油箱支架强度分析与轻量化设计[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(2): 71-74.
WU Hao. Strength Analysis and Lightweight Design of a Light Truck Oil Tank Bracket[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(2): 71-74.
- [15] 赵卫艳, 谷雪松, 王可, 等. 商用车油箱支架疲劳寿命仿真分析[J]. 重型汽车, 2010(6): 19-21.
ZHAO Wei-yan, GU Xue-song, WANG Ke, et al. Simulation for Fatigue Life of Commercial Vehicle Fuel Tank Bracket[J]. Heavy Truck, 2010(6): 19-21.
- [16] 牟能, 陶伟琪, 吉礼超. 某型车体结构预应力模态分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(1): 59-60.
MU Neng, TAO Wei-qi, JI Li-chao. Research on Pre-Stressed Modal Analysis of a Car Body Structure[J]. Automation & Instrumentation, 2021(1): 59-60.
- [17] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
FU Zhi-fang, HUA Hong-xing. Theory and Application of Modal Analysis[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000.
- [18] 胡林翼. 考虑阻尼影响的多自由度体系振动分析[J]. 湖南交通科技, 2013, 39(2): 100-104.
HU Lin-yi. Vibration Analysis of Multi Degree of Freedom System Considering Damping Effect[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2013, 39(2): 100-104.
- [19] 吴上生, 胡岳霖, 何国胜. 基于有限元理论的瓦楞纸箱印刷滚筒的结构分析与仿真[J]. 机电工程技术, 2019, 48(11): 101-103.
WU Shang-sheng, HU Yue-lin, HE Guo-sheng. Structural Analysis and Simulation of Corrugated Box Printing Roller Based on Finite Element Theory[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(11): 101-103.
- [20] 林枝强, 卢祥林, 陈振雷. 柴油机有限元模态分析及其减振优化研究[J]. 机电工程, 2020, 37(11): 1351-1355.
LIN Zhi-qiang, LU Xiang-lin, CHEN Zhen-lei. Finite Element Modal Analysis and Vibration Reduction Optimization of a Diesel Engine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(11): 1351-1355.
- [21] 李晶. 基于实测路谱的轻型货车燃油箱疲劳分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020.
LI Jing. Fatigue Analysis of a Light Truck Tank Based on Measured Road Spectrum[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.
- [22] 左泽敏, 武瑞娟, 郭斌. 某型航空发动机高温总压探针基础激励疲劳寿命研究[J]. 机械强度, 2015, 37(2): 355-359.
ZUO Ze-min, WU Rui-juan, GUO Bin. The Fatigue Life of Aero Engine Total Pressure Probe on the Base Excitation[J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37(2): 355-359.
- [23] 钟全飞. 概率疲劳寿命预测方法及可靠性分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
ZHONG Quan-fei. Probability of Fatigue Life Prediction Method and Reliability Analysis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [24] 白永明, 邱恩举, 王宏建. 基于 ANSYS 的连接件随机振动疲劳寿命分析及优化设计[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 178-182.
BAI Yong-ming, QIU En-ju, WANG Hong-jian. Random Vibration Fatigue Life Analysis and Optimization Design of Connector Based on ANSYS[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(11): 178-182.
- [25] 林明, 谢里阳. 疲劳寿命预测频域方法分析与比较[J]. 失效分析与预防, 2016, 11(5): 265-269.
LIN Ming, XIE Li-yang. Analysis and Comparison of Frequency-Domain Approaches of Fatigue Life Prediction[J]. Failure Analysis and Prevention, 2016, 11(5): 265-269.
- [26] 张方, 周凌波, 姜金辉, 等. 基于频域法的随机振动疲劳加速试验设计[J]. 振动测试与诊断, 2016, 36(4): 659-664.
ZHANG Fang, ZHOU Ling-bo, JIANG Jin-hui, et al. Random Vibration Fatigue Accelerated Test Design Based on Frequency Domain Methods[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(4): 659-664.