

船用柴油机振动水平评级测试分析

许春晓,徐传燕*,陈美宏,李光胜

山东交通学院 汽车工程学院,山东 济南 250357

摘要:为了评定某型号船用柴油机的振动水平和振动烈度,结合我国船舶行业中船用柴油机振动评级和评价标准,以某船用柴油发动机缸体为研究对象,基于振动测试试验分析发动机振动水平,评定其振动烈度级,研究不同工况下台架振动烈度;通过测试确定柴油机振动烈度等级和频率分布特性,分析柴油机缸体振动随转速、负荷的变化规律。试验结果表明:振动加速度随转速的升高而增大,最大振动加速度出现在发动机空载工况、转速为700 r/min时的缸体左前中测点;缸体在679~934 Hz存在宽频固有频率,振动烈度级为11级。该研究可为柴油机减振优化提供参考。

关键词:柴油机;振动评级;振动加速度;振动烈度

中图分类号:TK421

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)04-0081-06

引用格式:许春晓,徐传燕,陈美宏,等.船用柴油机振动水平评级测试分析[J].内燃机与动力装置,2022,39(4):81-86.

XU Chunxiao, XU Chuanyan, CHEN Meihong, et al. Analysis of vibration level rating test of marine diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(4): 81-86.

0 引言

随着对船舶舒适度认证要求的提高,船用柴油机的振动噪声控制越来越受到重视^[1]。研究表明,较大的振动噪声是引起机械故障的原因之一。柴油机在安装之前需要评定其振动烈度级,确定柴油机振动符合要求,减小后期某些故障发生的概率。

文献[2]通过试验对比柴油机安装二阶往复惯性力平衡机构前、后3个方向的振动特性,证明该平衡机构有一定的减振效果;文献[3]基于性能和实践的需求,比较了不同指标和标准之间的差异,提出对现有标准的改进建议;文献[4]利用ADAMS软件搭建了4120SG柴油机的配气系统动力学模型,得到柴油机的振动响应,对比仿真与试验结果,分析摇臂座处振动频谱,得出柴油机的0.5谱次振动与配气机构有关;文献[5]采用了HHT(Hilbert-Huang transform)方法对柴油机缸盖振动的时域和频域响应进行了分析,研究表明振动信号的频率分量由局部冲击的高频振动和有调频调幅的低频振动组成,通过试验证明了振动信号主要集中在高频区域;文献[6]利用快速傅里叶变换与均方根方法,研究得到液化石油气双燃料发动机气缸体的振动频率主要分布在较窄的频率区域内,相较于相同运行条件下柴油发动机,双燃料发动机的振动水平较低;文献[7]利用试验分析了不同工况下柴油机的振动响应频率分量;文献[8]利用相干分析方法,只保留气缸燃烧过程中产生的振动信号,对燃烧过程特征点进行识别,测试调整后的喷油器喷射参数和发动机参数,研究了气缸缸内压力与缸体加速度的关系;文献[9]对柴油机振动的机理

收稿日期:2022-05-18

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020ME126)

第一作者简介:许春晓(1997—),女,山东日照人,硕士研究生,主要研究方向为机械设备故障诊断,E-mail:1033125745@qq.com。

***通信作者简介:**徐传燕(1981—),女,山东临沂人,工学博士,副教授,主要研究方向为机械设备故障诊断,E-mail:xcy@sdjtu.edu.cn。

研究,提出了对柴油机局部振动和噪声的有效控制方法,减少柴油机因振动引起的故障发生概率;文献[10]根据试验得到汽油发动机振动加速度信号,研究振动产生的机理,提出了用 2 向(即 y, z 方向)总加速度评价发动机振级的方法;文献[11]研究了某装甲车柴油发动机不同弹性支撑下、不同工况的振动特性,结果表明机体振动随转速、负荷的增大而增大,为选择合适的隔振元件提供了依据。LMS 公司在边界条件分析方面取得了很多成果,采用软件仿真得出的结果与实际系统具有很高的相似性。

本文中以某船用柴油机为研究对象,通过试验测量发动机在空载稳速和推进工况时的缸体振动加速度信号,分析加速度信号的频谱和传递函数,确定频率范围,得到不同转速下各测点振动烈度级与转速的关系,为进一步分析柴油机的振动提供参考。

1 船用柴油机振动评级

振动烈度是最大值、平均值、均方根或其他描述振动参数的一个或一组数据,涉及多个瞬态值或多个平均值^[12]。振动烈度等级应该从每台机器主结构上测点处测量的位移、速度、加速度的最大总均方根值得到,按照 3 个总均方根结果得到 3 个振动烈度级^[13]。本测试试验中选取加速度均方根作为评级标准。

根据文献[13],由频率为 2~10 Hz 时得到的稳定位移计算位移总振级,位移总振级均方根

$$D_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [D(t)]^2(t) dt}, \quad (1)$$

式中: $D(t)$ 为振动位移随时间变化的函数; T 为测量周期,s。

根据文献[13],由频率为 10~250 Hz 时得到的稳定速度计算速度总振级,速度总振级均方根

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2(t) dt}, \quad (2)$$

式中: $v(t)$ 为振动速度随时间变化的函数。

根据文献[13],由频率为 250~1000 Hz 时得到的稳定加速度计算加速度总振级,加速度总振级均方根

$$A_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [a(t)]^2(t) dt}, \quad (3)$$

式中: $a(t)$ 为振动加速度随时间变化的函数。

本文中使用加速度传感器测量加速度信号,用加速度均方根对柴油机振动烈度级进行评价。

2 柴油机振动测试试验

2.1 试验测试设备

测试所需试验仪器设备如表 1 所示。

表 1 测试试验仪器

设备名称	设备参数	作用
LMS SCADAS 信号采集器	42 通道,最大采样频率 204.8 kHz	信号采集
PCB 三向加速度传感器	测量范围 50g,频率 0.5~5000 Hz	获取响应信号
PCB 高温单向加速度传感器(260 ℃)	测量范围 2000g	获取响应信号
PCB 高温单向加速度传感器(480 ℃)	测量范围 1000g	获取响应信号

注: g 为自由落体加速度。

振动测试试验采用数据采集分析系统 SCANDAS 动态数据采集仪和 LMS Test. lab 数据采集分析软件^[14],采集柴油机表面的振动加速度,分析其空载稳速及推进工况时的振动特性并评价其振动烈度级。

SCANDAS 动态数据采集仪包括 40 通道振动噪声信号输入、2 通道转速输入、2 通道信号输出,每个通道最大采样频率为 204.8 kHz,测试系统配置振动噪声工作中常用的高温单向传感器、振动加速度传感器,能够满足绝大部分试验测试任务。LMS Test. lab 系统提供振动噪声以及相关信号的测试、分析、评价等全方位的解决方案^[14]。

2.2 测点布置

根据该型号柴油机测试需求,在机体表面布置测点测试评定该机振动烈度级,具体测点位置和测试方向如表 2 所示(x 方向为横向, y 方向为轴向, z 方向为垂向),各测点的具体布置位置如图 1 所示。

表 2 空载稳速工况测点位置和方向

传感器	位置	方向
1 [#]	缸体左前上	$+x/+y/+z$
2 [#]	缸体左前中	$+x/+y/+z$
3 [#]	缸体左前下	$+x/+y/+z$
4 [#]	缸体右前上	$+x/+y/+z$
5 [#]	缸体右前中	$+x/+y/+z$
6 [#]	缸体右前下	$-x/+y/-z$

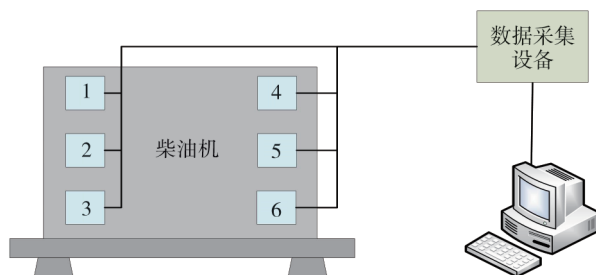


图 1 缸体空载稳速工况测点

2.3 测试工况

本次试验测试的工况为空载稳速,柴油机的测试转速为 400~1000 r/min,每间隔 50 r/min 递增,根据企业提供资料,800~850 r/min 为重点关注转速,每间隔 10 r/min 递增。转速稳定后采集各测试位置的振动加速度,每个稳速工况下测试 2 组数据。为满足其他研究要求,设置数据测试带宽为 0~6400 Hz,设置频率分辨率为 0.25 Hz。通常采用振动加速度均方根评定振动烈度级,根据文献[13]要求,其分析频率范围为 250~1000 Hz。

3 测试数据处理与分析

按照文献[13]规定的空载稳速工况及测点(1[#]~6[#]测点)要求进行测试,计算各测点 250~1000 Hz 的振动加速度,各测点在 x 、 y 、 z 方向的振动加速度如图 2 所示, x 、 y 、 z 不同方向各测点的振动加速度对比如图 3 所示。

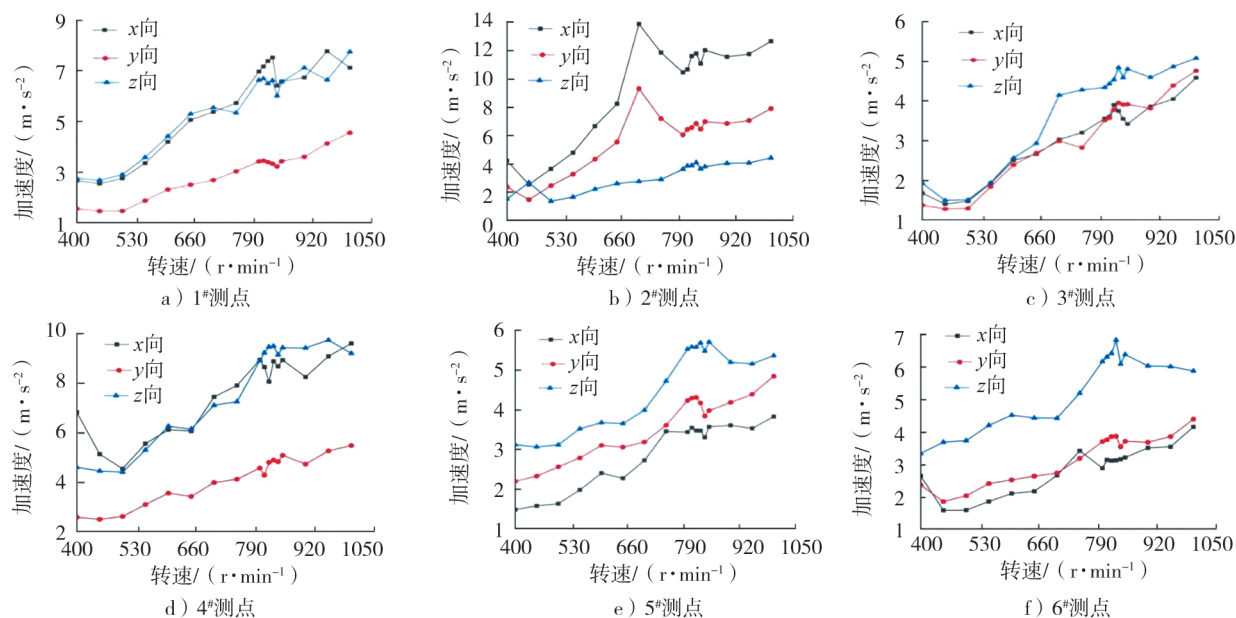
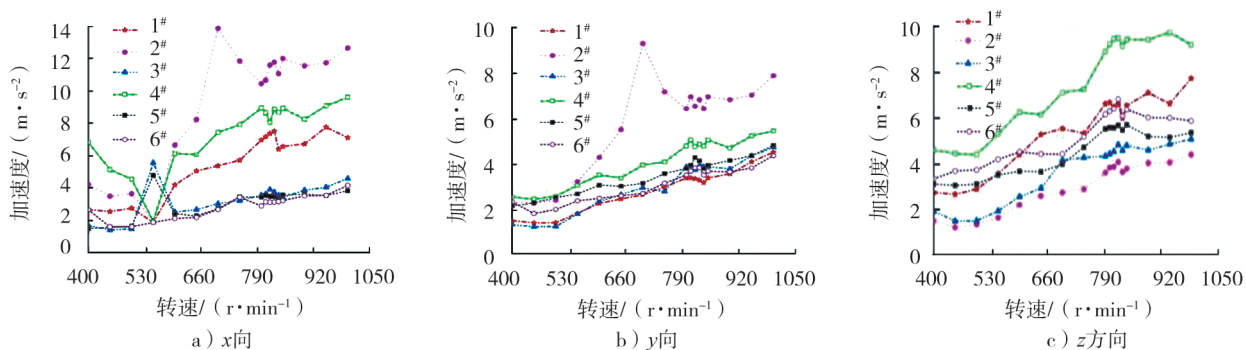


图 2 空载稳速工况各测点在 x 、 y 、 z 方向的振动加速度

图3 空载稳速工况 x 、 y 、 z 方向各测点振动加速度

由图2可知: x 向(即横向)加速度幅值最大, y 向(即轴向)幅值最小, z 向(即垂向)幅值接近 x 向,总体呈现总加速度随转速升高而增大的趋势。由图3可知:5#、6#测点在各个方向的振动加速度基本一致,2#测点 x 、 y 方向的幅值变化趋势基本一致,但幅值不同;3#、5#、6#测点在转速为700 r/min后基本稳定,结合图2、3分析,3#、5#、6#测点的 z 向加速度幅值最大,与其他测点相比,该位置处2#测点的幅值小于其他位置测点,原因可能是该测点距离燃烧室较远。

3.1 空载稳速振动烈度评级

根据文献[13],所有测点处的最大振动烈度级为该机器振动烈度级。由测试数据计算结果和参考文献[13]振动烈度级,空载、稳速工况各测点的最大振动加速度及振动烈度评级如表3所示。

表3 空载稳速工况下各测点最大振动加速度及振动烈度评级

转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	测点	方向	最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	评级	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	位置	方向	最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	评级
400	4#	+x	6.820	4.5	810	2#	+x	10.660	7.1
450	4#	+x	5.130	4.5	820	2#	+x	11.600	11.0
500	4#	+x	4.538	4.5	830	2#	+x	11.780	11.0
550	4#	+x	5.553	4.5	840	2#	+x	11.070	7.1
600	2#	+x	6.651	4.5	850	2#	+x	12.010	11.0
650	2#	+x	6.229	4.5	900	2#	+x	11.550	11.0
700	2#	+x	13.870	11.0	950	2#	+x	11.740	11.0
750	2#	+x	11.850	11.0	1000	2#	+x	12.650	11.0
800	2#	+x	10.450	7.1					

由表3可知:空载稳速工况时各转速最大振动加速度均为+x方向,转速为700 r/min时缸体左前中测点最大振动加速度为13.87 m/s^2 ,振动烈度级为11.0级;振动加速度基本随转速的升高而增大,各转速下最大加速度大部分出现在2#测点,今后应进一步探究该测点处振动加速度大的原因。

3.2 推进工况振动烈度评级

由于空载稳速工况下不足以得出有效的结论,因此在2#测点进行缸体推进试验,推进工况及振动评级如表4所示。由表4可知:柴油机在推进工况下振动加速度随转速和负荷的增大而增大,最高速且满载(1000 r/min、100%负载)时振动加速度最大,为14.967 m/s^2 ,振动烈度级为11.0级。

表4 推进工况测试参数及振动烈度评级

工况	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	负荷率/%	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	评级	工况	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	负荷/%	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	评级
1	400	6.4	5.071	4.5	4	909	75	11.930	11.0
2	630	25	8.8420	7.1	5	965	90	13.810	11.0
3	794	50	11.050	7.1	6	1000	100	14.967	11.0

空载、发动机转速为 700 r/min 时,缸体 2[#]测点的振动响应频谱和缸体传递函数如图 4、5 所示。

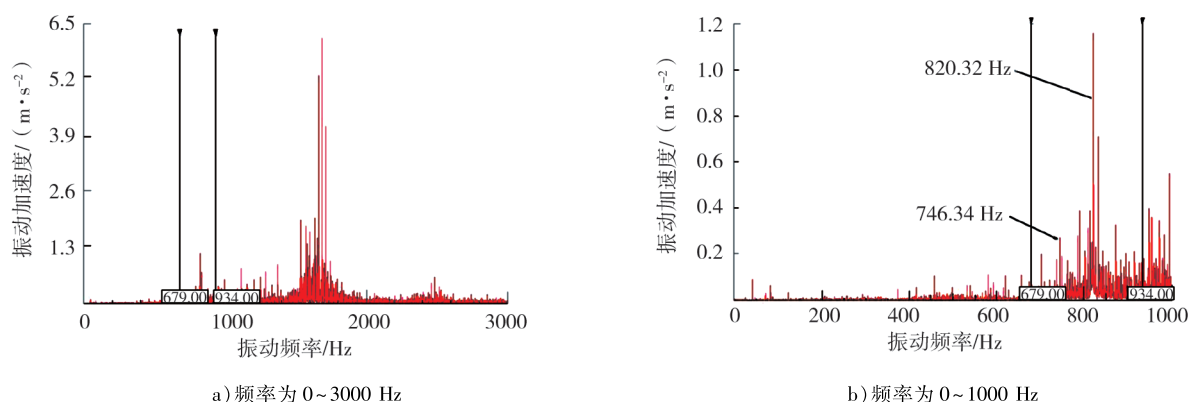


图 4 2[#]测点振动加速度响应

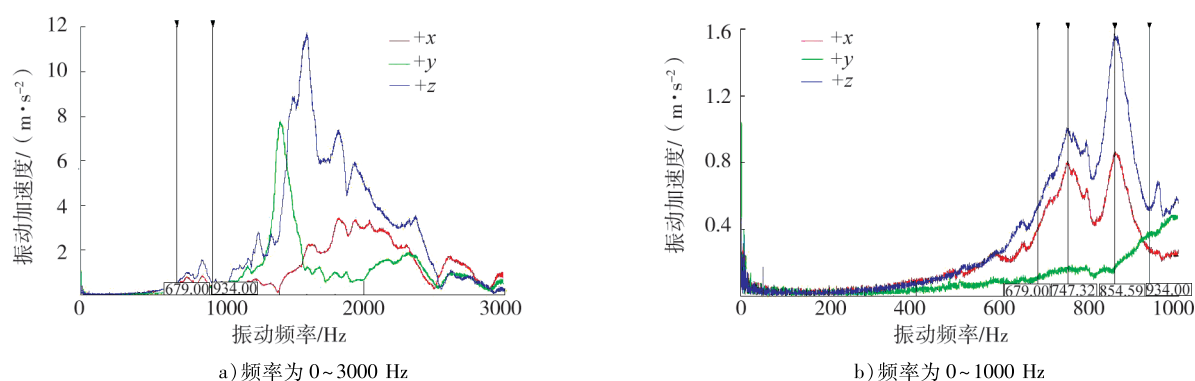


图 5 2[#]测点传递函数

由图 4 可知:频率在 1700 Hz 附近的中频振动有较大的能量分布,但在 250~1000 Hz 内,最大振动加速度的频率约为 820.32 Hz,对应该柴油机 70 倍频处;在低频区域,各频率振幅变化不大,即在空载、转速为 700 r/min 时,激起中频振动,使这个频段内的振动加速度明显增大。

由图 5 可知:振动频率为 679~934 Hz 时缸体存在宽频固有频率,空载、发动机转速为 700 r/min 时,柴油机异常振动激起了某些部件此频段的固有频率振动,引起较小的缸体共振,对应振动加速度增大。

4 结论

1) 从稳速工况的振动烈度测试数据可以看出, x 向(即横向)幅值最大, y 向(即轴向)幅值最小, z 向(即垂向)幅值接近 x 向。

2) 根据传递函数可知,缸体在 679~934 Hz 存在宽频固有频率,空载发动机转速为 700 r/min 时激起较小的缸体共振,对应振动总值增大,振动烈度级为 11 级。

3) 总振动加速度基本随转速的升高而增大,缸体共振在特定转速下必然存在,只要振动不超标即可。该测试研究对改进柴油机振动具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 沈建平. 船用柴油机振动噪声性能标准分析[J]. 柴油机, 2020, 42(5): 39-49.
- [2] 贾丽冬. YTA4135 柴油机振动分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2002(6): 24-26.
- [3] 沈建平. 船用柴油机振动噪声性能标准分析[J]. 柴油机, 2020, 42(5): 39-49.
- [4] 李玉军, 杨建国. 柴油机配气机构动力学仿真与分析[J]. 船海工程, 2007(1): 60-63.
- [5] XU H M, YUAN S F, ZONG L. Analysis of the time-frequency characteristics of internal combustion engine vibration signal

- based on Hilbert-Huang transform [C]//2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing. Yantai, China: IEEE, 2010:3400-3404.
- [6] OMAR F K, SELIM M Y E, EMAM S A. Time and frequency analyses of dual-fuel engine block vibration[J]. Fuel, 2017, 203:884-893.
- [7] CARLUCCI A P. Block vibration as a way of monitoring the combustion evolution in a direct injection diesel engine[J]. SAE International Journal of Engines, 2006, 13(13):195-227.
- [8] CHIATTI G, CHIAVOLA O, RECCO E. Combustion diagnosis via block vibration signal in common rail diesel engine[J]. International Journal of Engine Research, 2014, 15(6):654-663.
- [9] 李艳会, 卜林森, 查晓妍. 柴油机的局部振动及噪声控制探析[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4):48-50.
- [10] 徐中明, 马坤, 汪先国等. 发动机振动评价研究[J]. 机械设计, 2014, 31(3):90-94.
- [11] 阎文兵, 樊文欣, 樊江玲. 柴油发动机台架振动烈度试验研究[J]. 内燃机, 2003(4):27-28.
- [12] 孙冰, 张祎伟, 李莹莹. 20RK270 型柴油机隔振器的选型及验证[J]. 柴油机, 2019, 41(3):40-45.
- [13] 全国船用机械标准化技术委员会柴油机分技术委员会. 船用柴油机振动评级:CB/T 3256—2013[S]. 北京:中国船舶工业综合技术经济研究院, 2014.
- [14] 李珊. 汽车高里程 NVH 性能衰减关键特性评价与预测研究[D]. 济南:山东交通学院, 2021.

Analysis of vibration level rating test of marine diesel engine

XU Chunxiao, XU Chuanyan^{*}, CHEN Meihong, LI Guangsheng

School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: In order to evaluate the vibration level and vibration intensity of a certain type of marine diesel engine, combining with the vibration rating and evaluation standards of marine diesel engines in China's shipbuilding industry, the cylinder block of a marine diesel engine is taken as the research object. Based on the vibration test, the engine vibration level is analyzed, the vibration intensity level is evaluated, and the vibration intensity of the underframe under different working conditions is studied. The vibration intensity level and frequency distribution characteristics of the diesel engine are evaluated through testing, and the variation law of the vibration of the diesel engine cylinder with the speed and load is analyzed. The test results show that the vibration acceleration increases with the increasing rotational speed, and the maximum vibration acceleration occurs at the left front middle measurement point of the cylinder block under no-load working condition and the rotational speed of 700 r/min. The cylinder block has a wide-band natural frequency at 679~934 Hz, and the vibration intensity level is 11. This study can provide a reference for the optimization of vibration reduction of diesel engine.

Keywords: diesel engine; vibration rating; vibration acceleration; vibration intensity

(责任编辑:刘丽君)