

智能化与控制

基于压力信号的船用柴油机共轨系统 高压油泵典型故障诊断研究

秦慈伟^{1,2}, 金江善^{1,2}, 董晓露^{1,2}, 桑晓琳^{1,2}, 汪冰吉^{1,2}

(1. 七一一研究所, 上海 201108; 2. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 201108)

摘要: 基于 AMESim 液力仿真平台搭建高压油泵仿真模型, 对 2 种高压油泵典型故障进行仿真分析。采用小波变换方法将压力信号分解为低频波动信号和高频脉动信号, 提取高频脉动信号无量纲参数波形因子为故障特征, 建立高压油泵故障诊断模型。结合仿真和柴油机台架试验的高压油泵故障数据, 验证了该诊断方法的有效性。

关键词: 高压油泵; 故障; 诊断; 波形因子; 小波变换

中图分类号: TK423.8⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)03-0016-06

Fault Diagnosis for High-Pressure Pump of Marine Diesel Engine with Common Rail System Based on Pressure Signal

Qin Ciwei^{1,2}, Jin Jiangshan^{1,2}, Dong Xiaolu^{1,2}, Sang Xiaolin^{1,2}, Wang Bingji^{1,2}

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

2. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Shanghai 201108)

Abstract: A high-pressure pump simulation model was built using the AMESim hydraulic simulation platform, and two typical faults of the high-pressure pump were simulated and analyzed. Based on the wavelet transform, the pressure signals were decomposed into low-frequency fluctuation signals and high-frequency pulsation signals, and the dimensionless parameter waveform factor of high-frequency pulsation signals was extracted as the fault feature, and the diagnosis model of high-pressure pump was established. The effectiveness of the diagnosis method was verified by simulation test and the fault data of high pressure pump by the diesel engine bench test.

Key words: high-pressure pump; fault; diagnosis; waveform factor; wavelet transform

0 引言

高压共轨技术是 20 世纪末兴起的一项新技术^[1], 被认为是解决柴油机环保和节能双重压力问题的最有效技术之一^[2]。高压油泵是高压共轨系统的核心部件, 其对计量过的低压燃油进行压缩, 建立高压, 并向共轨管输送, 是高压共轨系统的液动力源。一旦高压油泵出现故障, 轨压无法正常建立, 柴油机的高效、稳定运行就无法得到保

障。因此, 对高压油泵进行在线故障诊断, 实时检测高压油泵工作状态, 对于保障柴油机高效、稳定运行十分必要。

国内关于高压共轨系统高压油泵的在线故障诊断的研究鲜见报道。借鉴其他领域的研究成果: 如燕山大学的吴胜强、姜万陆以振动信号为特征信号, 提取了时域和时频域特征向量, 提出了一种基于证据理论多源多特征融合的故障诊断方法, 对液压系统的液压泵进行故障诊断。试验验证表明: 多

收稿日期: 2018-11-27; 修回日期: 2019-01-04

作者简介: 秦慈伟(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柴油机高压共轨技术及智能化控制技术, 1003292008@qq.com。

源数据较单源数据,更具有冗余互补性,能提高诊断的可靠性和准确性^[3]。华中科技大学的刘安宁、轩建平等针对车用柱塞泵,提取了泵壳上方的振动加速度信号,利用小波包分解,提取各个频段内的能量向量作为特征向量,建立 FuzzyARTMAP 神经网络模型,实现了对柱塞泵的故障诊断,取得了较好的诊断准确率^[4]。

现有的诊断方法大多以油泵的振动信号为特征信号^[5-6],来实现油泵的状态识别和故障诊断,而振动信号易受到环境的干扰。对柴油机而言,振动激励源众多,以振动信号为特征信号进行故障诊断,诊断的准确性无法得到保障。高压油泵的蓄压腔压力信号与油泵的结构及工作状态直接相关,包含了丰富的工作和故障信息,且容易测取。因此,本文基于蓄压腔压力信号进行高压油泵故障诊断,主要过程如下。

建立高压油泵仿真模型,通过平台试验数据校正模型,确保模型仿真精度;仿真分析高压油泵常用工况的故障特征;建立高压油泵诊断模型,对高压油泵故障进行诊断;依据仿真数据和柴油机台架试验故障数据,验证诊断模型的有效性。以期为高压油泵的在线故障诊断提供一种可行的方法。

1 高压油泵工作原理及其典型故障

1.1 高压共轨系统简介

本文研究的高压油泵所在的电控共轨系统如图 1 所示。由两台高压油泵(以下简称为 A 泵、B 泵)为共轨系统提供高压燃油,经压缩后的高压燃油首先供给分配块,然后经高压油管供给共轨管。由于两台泵的出口直接连接分配块,压力脉动在管路传播,导致两台泵的压力信号存在反窜现象,对各泵蓄压腔的压力信号造成一定的干扰,给高压油泵的故障诊断带来困难。

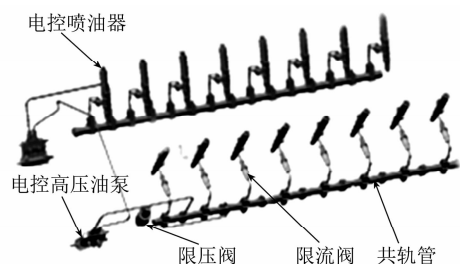


图 1 高压共轨系统

受高压油泵自身的固有结构、流体的惯性及可压缩性等综合因素的影响,正常状态下,高压油泵蓄压腔的压力信号就存在一定的脉动,而且这种脉

动会沿管路传播。当高压油泵发生故障时,又会激发新的压力脉动,如何将固有的压力脉动和故障激励的压力脉动分离是高压油泵故障诊断的一大难点。

1.2 高压油泵工作原理及其典型故障

本文研究的高压油泵为电控 4 柱塞直列泵,其功能如图 2 所示。进油电磁阀对进油流量计量,计量后的燃油经由柱塞组件和进出油阀组件构成的泵油系压缩至蓄压腔组件,最后被输送至高压油管。凸轮、滚轮组件驱动柱塞组件泵油。凸轮为 2 桃头结构,凸轮轴每转动 1 周,油泵泵油 8 次。电控高压油泵为升速泵,油泵转速和柴油机曲轴转速比固定。压力传感器测量高压油泵蓄压腔内的瞬时压力。



图 2 高压油泵功能框图

实际应用表明:高压油泵柱塞卡滞和出油阀卡滞是高压油泵最主要的故障。因此针对这两种典型故障开展故障诊断研究对提高高压油泵的可靠性具有重要意义。

2 基于仿真的高压油泵故障态压力波分析

2.1 高压油泵仿真模型

由于缺乏高压油泵故障样本,为了开展高压油泵故障分析研究,本文基于 AMESim 仿真平台,搭建高压油泵仿真模型,如图 3 所示。

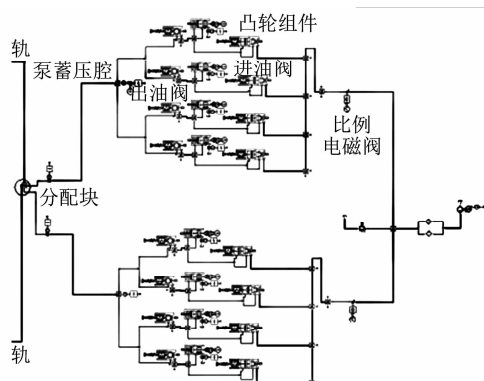


图 3 高压油泵仿真模型

在燃油试验台架上搭建测试系统,如图 4 所

示。对典型工况下的高压油泵蓄压腔压力信号进行采集。



图4 燃油测试台架

根据台架试验结果对仿真模型进行标定, 结果见图5。仿真结果和试验台架测试结果吻合度较高, 表明建立的仿真模型可用于高压油泵故障特征研究。

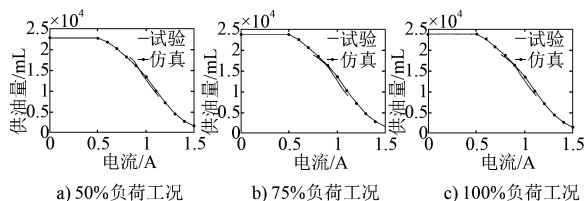


图5 50%、75%、100%负荷下标定结果

图中的横轴代表控制电流, 纵轴代表高压油泵的供油量。在不同工况下, 高压油泵的转速不同, 供油能力随控制电流的变化而变化。

2.2 高压油泵故障态压力波分析

通常情况下, 同一时刻两台泵同时发生故障的可能性比较小, 因此, 本文仅研究单台油泵故障情况。通过在 AMESim 仿真模型中向其中一台泵注入故障的方式, 对高压油泵出油阀卡滞、柱塞卡滞两种典型故障进行仿真研究。

(1) 出油阀卡滞故障

出油阀卡滞主要影响出油阀的及时打开或落座。在 AMESim 中分别模拟 50%、75%、100% 工况下出油阀卡滞故障, 得到正常和故障情况下蓄压腔压力变化如图 6~8 所示。

(2) 柱塞卡滞故障

柱塞卡滞导致油泵不能将低压燃油压缩为高压燃油。在 AMESim 中分别模拟 50%、75%、100% 工况下单柱塞卡滞故障, 得到其蓄压腔压力变化如图 9 所示。

由仿真结果可知: 与正常状态相比, 当发生出油阀卡滞和柱塞卡滞故障时, 两泵的蓄压腔压力脉动幅度变大。这是由于 A 泵发生故障, 供油不足,

为保证总的供油量不变, 两泵的控制电流会调整, 使两泵的供油量增加, 从而使蓄压腔的压力增大。由于 A 泵故障, 相同控制电流下, B 泵的供油量大于 A 泵, 从而使 B 泵的压力信号会有一部分反窜到 A 泵。还可发现: 较正常状态, 故障状态下两泵蓄压腔压力脉动频率下降, 这可能是由于一些固有脉动信号被淹没在由故障所激发的脉动信号中所致。

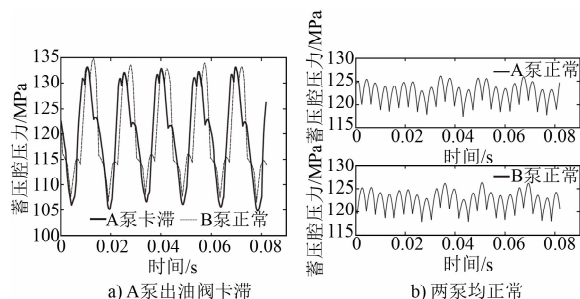


图6 50%工况下 A 泵出油阀卡滞及两泵均正常下的蓄压腔压力变化

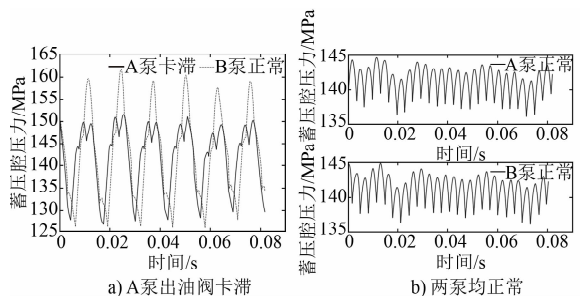


图7 75%工况下 A 泵出油阀卡滞及两泵均正常下的蓄压腔压力变化

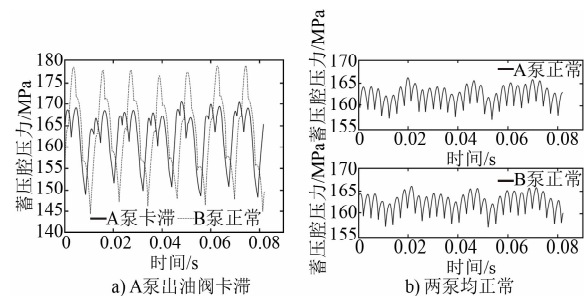


图8 100%工况下 A 泵出油阀卡滞及两泵均正常下的蓄压腔压力变化

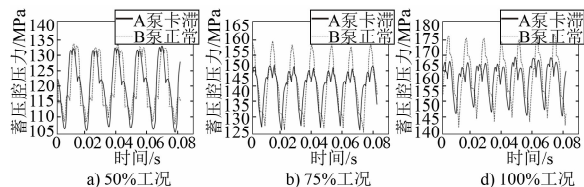


图9 50%、75%、100%工况下 A 泵柱塞卡滞的蓄压腔压力变化

3 基于小波分解的高压油泵故障诊断

3.1 高压油泵故障特征提取

综合上述对高压油泵 2 种典型故障的分析可知：当两台泵中的一台发生故障时，两泵的蓄压腔压力信号的脉动频率和幅度均会发生变化，有明显的故障特征。但由于两台泵的压力信号都发生了变化，如何区分故障泵和正常泵是难点所在。

本文采用小波分解法将蓄压腔的压力信号分解为低频波动项和高频脉动项，从而实现蓄压腔压力信号的剥离。低频脉动项由小波分解的最底层近似部分进行重构得到；高频脉动项由原始信号减去低频波动项得到。

采用 db13 小波函数对两泵均正常、一泵出油阀卡滞、一泵柱塞卡滞时的两泵蓄压腔压力信号进行分解。分解后的低频波动项和高频脉动项如图 10~12 所示。

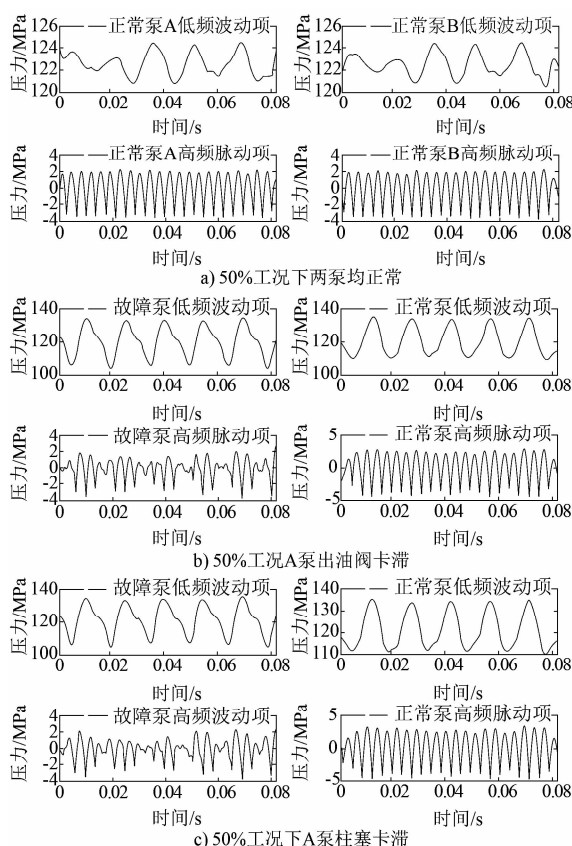


图 10 50%工况下两泵均正常、A 泵出油阀卡滞、A 泵柱塞卡滞情况下的小波分解结果

低频波动项表征压力信号的稳态部分，理论上是平稳的，但由于压力脉动，造成压力波动。高频脉动项与柱塞泵的自身状态相关，包含了高压油泵的固有脉动信号和故障激励的高频脉动信息，当泵发生故障时，高频脉动项会发生相应变化。

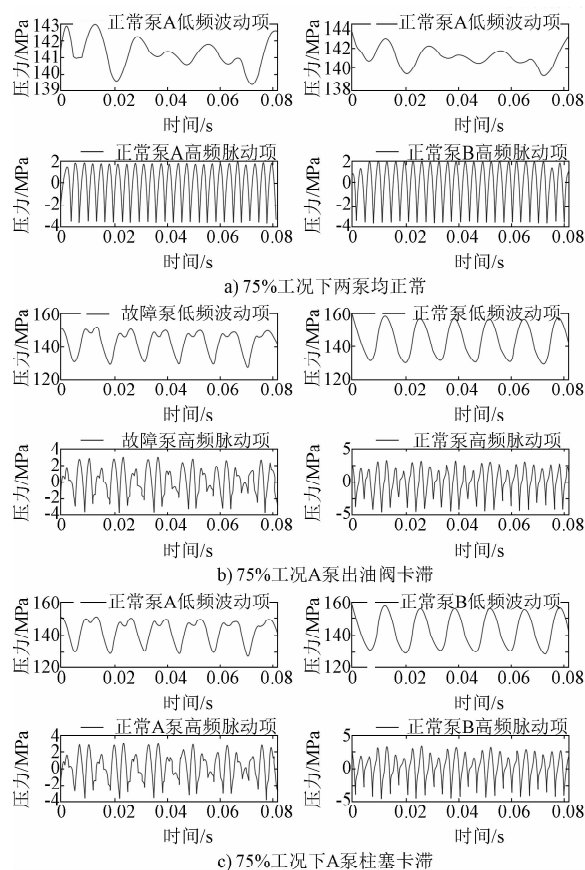


图 11 75%工况下两泵均正常、A 泵出油阀卡滞、A 泵柱塞卡滞情况下的小波分解结果

由分解结果可以明显看到：当有一台泵发生故障时，其高频脉动项与两泵均正常的高频脉动项存在较大差异，表现出了明显的故障特征；正常泵与两正常泵的高频脉动项存在较大相似性。低频部分虽然也存在一定差异，但差异比较微弱。基于此，本文不考虑低频信号，只基于高频信号进行高压油泵的故障诊断，提取高频脉动项的波形因子作为故障特征。波形因子是无量纲波形参数，对工况的敏感度低。故障状态下和正常状态下的波形因子变化如图 13~15 所示。

由图可知：当两台泵中的一台泵发生故障时，正常泵高频脉动信号的波形因子与故障泵的相比存在较大差异；与两台泵均正常的情况相比，系数几乎相同。因此，选择高频脉动信号的波形因子作为故障特征。

3.2 高压油泵故障诊断模型建立

综合上述分析，本文建立高压油泵故障诊断模型如图 16 所示。以高频脉动信号的无量纲特征参数波形因子作为故障特征，选取合适的阈值，实现高压油泵的故障诊断。

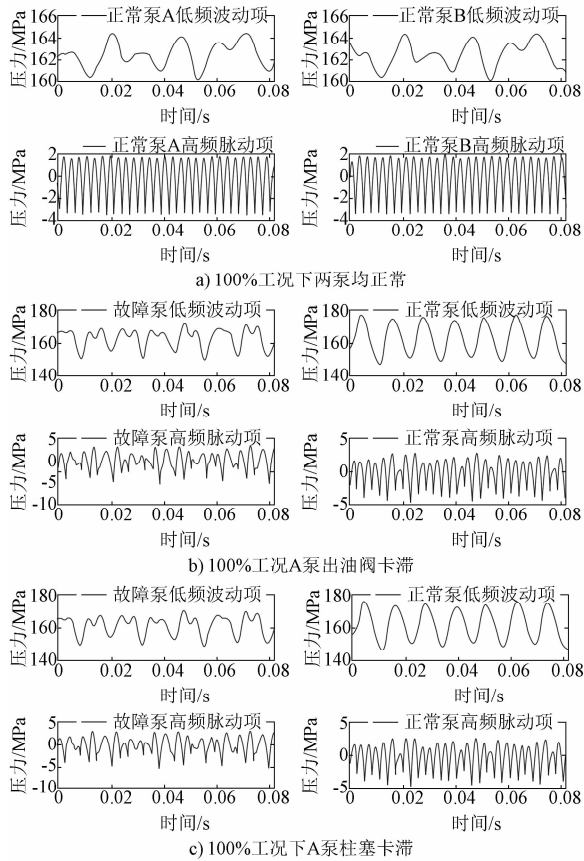


图12 100%工况下两泵均正常、A泵出油阀卡滞、A泵柱塞卡滞情况下的小波分解结果

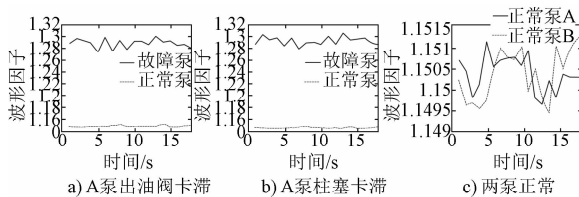


图13 50%工况下A泵出油阀卡滞、A泵柱塞卡滞、两泵正常的波形因子

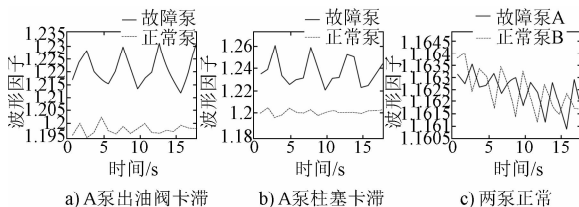


图14 75%工况下A泵出油阀卡滞、A泵柱塞卡滞、两泵正常的波形因子

4 仿真及试验验证

由图13~15可知:若选取波形因子阈值为1.21,可以实现50%以上工况下高压油泵柱塞卡滞和出油阀卡滞两种典型故障的诊断。为了进一步验证本文的诊断模型是否适用于其他故障模式,在

仿真模型中注入进油阀卡滞故障,对50%、75%、100%工况下该故障进行诊断;同时利用故障试验数据对诊断模型进行验证。

在50%、75%、100%工况下,进油阀卡滞的蓄压腔压力信号如图17所示。分别对故障泵及正常泵的压力信号进行小波分解,提取波形因子,如图18所示。

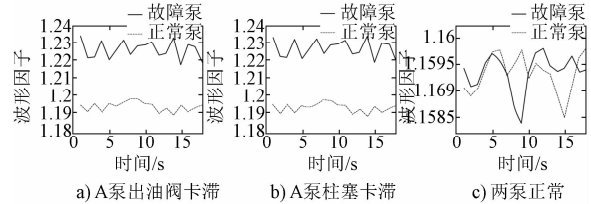


图15 100%工况下A泵出油阀卡滞、A泵柱塞卡滞、两泵正常的波形因子

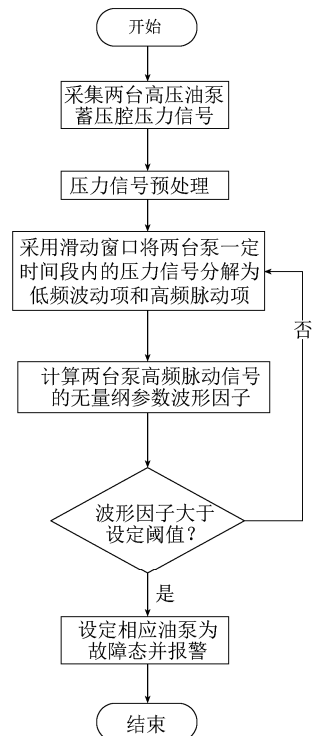


图16 高压油泵故障诊断模型

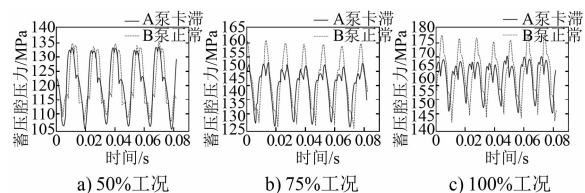


图17 50%、75%、100%工况下A泵进油阀卡滞

由图可知:选定波形因子阈值为1.21的情况下,可以实现对50%以上工况下进油阀卡滞故障的诊断。

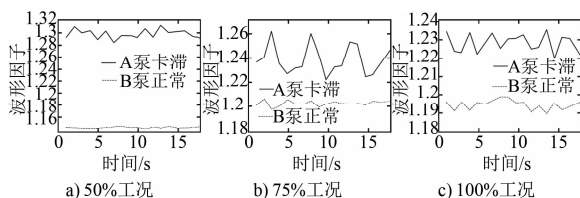


图 18 50%、75%、100% 工况下

A 泵进油阀卡滞的波形因子

在某柴油机耐久试验中,某日高压油泵 A 疑似出现故障。经拆检,确认故障为进油阀开裂,一缸柱塞停止工作。在 50% 工况下,通过高速数据采集设备采集该状态下两台高压油泵工作数据,采样频率 10 kHz。两台泵的蓄压腔压力信号如图 19 所示。

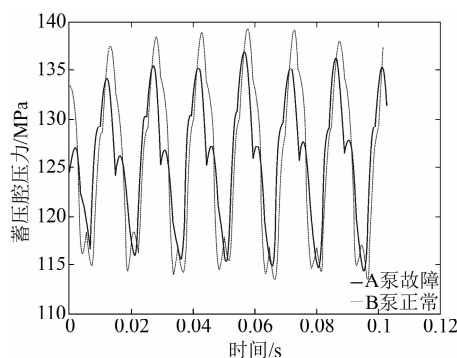


图 19 高压油泵故障试验数据

将两泵压力信号分解为低频波动项和高频脉动项,如图 20 所示。

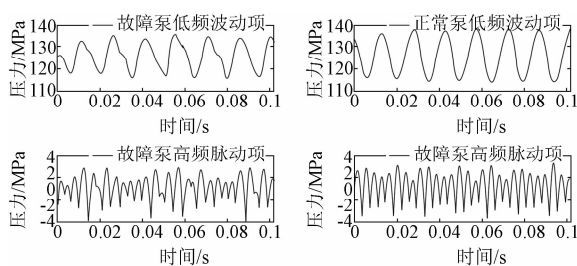


图 20 压力信号分解

提取多个时间片段的高频脉动信号的特征参数波形因子,如图 21 所示。至此,即可诊断出 A 泵为故障泵, B 泵为正常泵。从而实现了高压油泵的故障诊断。

共轨系统中一台高压油泵发生故障的情况下,该泵供油能力下降,考虑到系统运行至 75%、100% 工况时,正常泵承载的负荷将较大,可能导致正常泵也发生故障,造成严重后果。因此未采集

75%、100% 工况下的故障试验数据,并在本文进行论证。但工况越高,故障特征越明显,从理论上讲可以实现高压油泵的故障诊断。

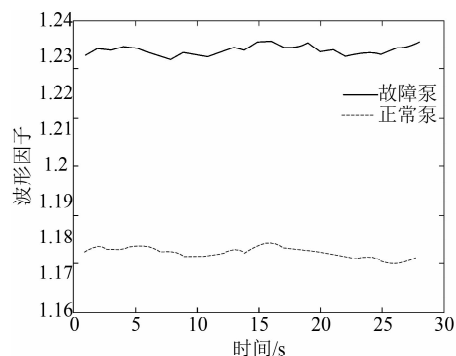


图 21 高频脉动信号波形因子

5 结论

不同于传统的基于振动信号进行高压油泵故障诊断,本文结合船舶柴油机高压共轨系统的特点,基于蓄压腔压力信号开展高压油泵故障诊断。针对故障诊断过程中故障样本缺乏的问题,利用仿真技术,通过注入故障方式获取故障数据,为开展高压油泵故障诊断研究提供了数据支撑。针对两种典型高压油泵故障,基于小波分解方法,实现信号高频成分和低频成分分离,提取波形因子作为故障特征,表征高压油泵运行状态。在此基础上建立了高压油泵故障诊断模型,结合仿真和试验数据验证了诊断方法的有效性。

参考文献

- [1] 王钧效,陆家祥,谭丕强,等. 柴油机高压共轨喷油系统的发展动态 [J]. 柴油机, 2001 (5): 1-11.
- [2] 杨阳. 高压共轨柴油机电控系统分析与研究 [D]. 上海交通大学, 2007.
- [3] 吴胜强,姜万录. 基于证据理论多源多特征融合的柱塞泵故障诊断方法 [J]. 中国工程机械学报, 2011, 9 (1): 98-102.
- [4] 刘安宁,轩建平,高明. 基于小波包能量和神经网络的柱塞泵故障诊断 [J]. 山西建筑, 2011, 37 (8): 227-228.
- [5] 牛慧峰,姜万录,李刚. 内禀模态特征能量法在柱塞泵故障诊断中的应用 [J]. 机床与液压, 2008, 38 (10): 179-183.
- [6] 唐铭. 基于 EMD 及神经网络的柱塞泵故障诊断的方法研究 [D]. 天津大学, 2013.