

涡轮泵典型故障仿真与辨识系统设计

姚尚鹏¹, 黄 红², 赵佳敏³, 苏 越¹

- (1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710129;
2. 西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100;
3. 中国运载火箭技术研究院 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要 涡轮泵是液体火箭发动机的关键部件, 工作环境恶劣, 故障率较高。特别是复杂高温、高压燃料冲击的转子系统, 极易发生不平衡、不对中和叶片掉块故障。迫切需要探究涡轮泵转子常见的故障机理, 阐明故障特征, 建立典型故障的辨识系统。通过分析故障力模型, 分别建立了考虑转子不平衡、不对中和叶片掉块的动力学模型, 确定涡轮泵转子振动特征, 明确转子时域、频域信号以及轴心轨迹。进一步搭建基于 Matlab GUI 平台的涡轮泵典型故障仿真与辨识系统, 并对测试数据开展处理。研究表明, 不平衡故障时域波形为正弦曲线, 1 倍频占优, 椭圆形轴心轨迹; 不对中故障时域波形由 2 组不同的正弦曲线组成, 2 倍频占优, “内 8”形轴心轨迹; 叶片掉块时域波形存在突变现象, 1 倍频占优, 轴心轨迹在掉块发生前稳定, 掉块发生后较为杂乱。结果表明, 信号频域特征是故障辨识的关键, 辅以时域特征, 能准确辨识出 3 种典型故障, 该系统能够为涡轮泵转子故障辨识设计提供技术支撑。

关键词 涡轮泵; 故障机理; 故障辨识; 转子动力学; 有限元法

中图分类号 V434. 21 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)03-0096-09

Typical fault simulation and identification system design for turbopump

YAO Shangpeng¹, HUANG Hong², ZHAO Jiamin³, SU Yue¹

- (1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;
2. Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an Aerospace Propulsion Institute,
Xi'an 710100, China; 3. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering,
China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract Turbine pump is a key component of liquid rocket engine, with harsh working environment and high failure rate. Especially, the rotor system with complex high temperature and high pressure fuel impact is highly prone to unbalance, misalignment and blade drop block failures. It is urgent to explore the common fault mechanism of turbopump rotor, clarify the fault characteristics and establish the identification system of typical failures. In this paper, by analyzing the failure force model, the dynamics mod-

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12102348)

作者简介: 姚尚鹏 (1999—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机故障诊断及健康管理。

els considering the rotor unbalance, misalignment and blade dropout are established respectively, to determine the vibration characteristics of the turbine pump rotor and clarify the rotor time domain and frequency domain signals as well as the axial trajectory. Further, a typical fault simulation and identification system of turbine pump based on Matlab GUI platform is built and the test data are processed. The research shows that the time domain waveform of the unbalanced fault is a sine curve with 1 frequency dominance and elliptical axis trajectory; the time domain waveform of the misalignment fault is composed of two different sets of sine curves with 2 frequency dominance and "inner 8" shaped axis trajectory; the time domain waveform of the blade block drop has abrupt changes with 1 frequency dominance, and the axis trajectory is stable before the block drop occurs but more chaotic after the block drop occurs. The above research results show that the signal frequency domain characteristics are crucial to fault identification. Supplemented by time domain characteristics, three typical faults can be accurately identified, and the system can provide technical support for the fault identification design of turbine pump rotor.

Key words turbo pump; fault mechanism; fault identification; rotor dynamics; finite element method

0 引言

随着人类对太空的研究需求日益增加,为降低运载成本,可重复使用的运载火箭显得尤为重要^[1-2]。这就对运载火箭的关键部件——液体火箭发动机的使用寿命提出了更高的要求。涡轮泵作为液体火箭发动机重要且复杂的部件之一,由于其工作环境较为恶劣(如高温、高压、高转速、高腐蚀性等),所以其发生故障的概率较高^[3-5]。

涡轮泵典型故障模式是故障机理研究与辨识的基础。故障模式积累不足、故障机理不清晰是制约故障辨识的重要因素,需进一步加强相关的基础研究^[6]。但由于实际试车代价巨大,难以得到典型故障模式的实验数据,因此典型故障仿真就成为一种获取故障数据的重要方法^[7]。

Hong等提出了一种基于占优频率分量均方根和支持向量机的故障检测算法,用于液体火箭发动机涡轮泵的振动故障检测^[8]。Hu等提出了两种检测方法,用于火箭发动机涡轮泵的健康监测^[9]。第一种方法是自适应高斯阈值模型,用于在线监测涡轮泵的振动,第二种方法是一类支持向量机(OCS-VM),用于对历史振动信号进行事后分析。Zhong等提出了一种基于改进小波变换和最小均方误差自适应算法的涡轮泵故障检测算法,并采用振动信号进行了算法验证^[10]。张国渊等建立了考虑不对中因素的联轴器-滚动轴承-双转子动力学分析模型^[11],计算得到了不对中参数对涡轮泵转子动力学

性能的影响规律。金路等建立了轴套结构内摩擦的动力学模型,通过仿真计算得到了涡轮泵转子失稳的振动特征,分析得到了各参数对转子失稳特征的影响规律^[12]。Jiang等结合相似部件的数据和专家估计,提出了贝叶斯方法用于涡轮泵及其部件可靠性评估^[13]。Vartha等开展了针对液体火箭发动机涡轮泵中深沟球轴承故障导致异常振动原因分析,并给出了此类预防故障的建议^[14]。Aiswarya等通过提取统计时域特征来分析涡轮泵的振动,并采用支持向量机分类器检测涡轮泵中存在的故障^[15]。杨懿等采用Hilbert-Huang变换分析方法对本征模态函数进行重构后的时间-幅值图能在时域和频域内自适应精确分析液氧涡轮泵振动数据,对涡轮泵的故障进行诊断与分析^[16]。杨硕提出了基于时域特征和快速支持向量机的涡轮泵故障检测算法以及基于频域特征和模糊分类支持向量机的涡轮泵故障检测算法^[17]。文献[18]等为了解决转速波动情况下涡轮泵故障诊断的问题,提出了在变换域中提取特征频率的方法,该方法可以消除转速波动对振动信号频率的影响。文献[19]提出了一种在涡轮泵启动过程的振动故障检测方法,利用支持向量回归方法建立振动特征与转速的非线性关系模型。Yin等提出了一种将E-Bayesian估计方法和等效数据融合相结合的涡轮泵装置可靠性分析新方法^[20]。

上述学者针对液体火箭发动机涡轮泵故障仿真与故障诊断开展了大量研究工作,然而大多为数

据驱动下的故障诊断,鲜有从故障动力学机理出发进行典型故障的诊断。本文将建立动力学模型,在模型基础上施加故障力,然后求得故障动力学响应,总结典型故障特征,提出辨识准则,建立故障辨识方法。

1 典型故障力模型

1.1 不平衡故障

涡轮泵中,材料不均匀、结构不对称以及加工或装配过程中的误差都可能造成转子质量偏心从而导致转子不平衡,不平衡故障会诱发涡轮泵其他故障,如转静碰摩、叶片掉块等故障。

转子不平衡激振力来源于偏心质量在旋转过程中产生的离心力,该离心力与不平衡故障总偏心质量 m 、偏心距离 e 以及旋转速度 ω 有关,可表示为 $F_1 = me\omega^2$ 。不平衡故障力在 x 和 y 方向的分力表达式为

$$\begin{cases} F_{x1} = m_1 e \omega^2 \cos(\omega t + \varphi_1) + m_0 e \omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0) \\ F_{y1} = m_1 e \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_1) + m_0 e \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m_1 e \omega^2$ 为转子系统故障不平衡量; $m_0 e \omega^2$ 为转子系统初始不平衡量; φ_0 为初始不平衡量相位; φ_1 为故障不平衡量相位。在故障仿真时,将式(1)中的故障力加到模拟涡轮盘位置处,以此模拟不平衡故障。

1.2 不对中故障

不对中故障会导致涡轮泵轴与轴承之间产生轴向与径向的作用力。转子旋转过程中,交变作用力会使得转子和支承产生异常振动,造成轴疲劳损伤以及轴承磨损乃至轴承失效,导致转子系统的失稳。

不对中故障通常表现为综合不对中。综合不对中包含平行不对中与角度不对中,当套齿联轴器存在综合不对中时, Δy 为平行不对中量, ΔL 为两联轴器端面中心间距, $\Delta \alpha$ 为角度不对中量。令 $\Delta E = \Delta y + \Delta L \tan(\Delta \alpha / 2)$ 为当量不对中量,套齿质心运动轨迹可表示为

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2} \Delta E \sin(2\omega t - \varphi_2) \\ y = \frac{1}{2} \Delta E \cos(2\omega t - \varphi_2) \end{cases} \quad (2)$$

综上,当转子处于不对中故障时,径向振动特征频率为旋转基频的 2 倍;轴向振动频率与旋转基频相等。转子每旋转一周,振动信号变化两个周期,因此轴心轨迹表现出双环椭圆的特征。

仿真时以综合不对中情况下的受力情况作为故障力。通过对式(2)套齿质心运动轨迹进行两次求导可得套齿质心加速度方程为

$$\begin{cases} \ddot{x} = -2\Delta E \omega^2 \sin(2\omega t - \varphi_2) \\ \ddot{y} = -2\Delta E \omega^2 \cos(2\omega t - \varphi_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中 φ_2 为不对中量相位。令套齿联轴器质量为 m_i ,可以得到套齿联轴器在水平方向与竖直方向所受的激振力为

$$\begin{cases} F_{x2} = m_i \Delta E \omega^2 \sin(2\omega t - \varphi_2) + m_0 e \omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0) \\ F_{y2} = m_i \Delta E \omega^2 \cos(2\omega t - \varphi_2) + m_0 e \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) \end{cases} \quad (4)$$

在故障仿真时,将式(4)所得故障力施加于联轴器套齿位置处,以此来仿真不对中故障。

1.3 叶片掉块故障

在涡轮泵中,由于涡轮叶片、诱导轮叶片上本身材料的缺陷以及叶片裂纹,在转子高速旋转过程中,叶片所承受的交变载荷会导致疲劳破坏,甚至产生断裂。而断裂的叶片极有可能打坏其他叶片,导致涡轮泵瞬间失效。

由于叶片掉块是瞬间发生的,因此其故障力为

$$\begin{cases} F_{x3} = m_0 e \omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0) \\ F_{y3} = m_0 e \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) \end{cases} \quad t < t_s$$

$$\begin{cases} F'_{x3} = m_0 e \omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0) + m_s e \omega^2 \cos(\omega t + \varphi_3) \\ F'_{y3} = m_0 e \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) + m_s e \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_3) \end{cases} \quad t \geq t_s \quad (5)$$

式中: φ_3 为叶片掉块相位; m_s 为叶片掉块质量; t_s 为叶片掉块故障发生时刻。当 $t < t_s$ 时,叶片掉块未发生,此时故障力为初始不平衡故障力;当 $t \geq t_s$ 时,叶片掉块故障发生,产生突加不平衡力 $m_s e \omega^2$,此时故障力为初始不平衡故障力与突加不平衡力的合力。在故障仿真时,故障力施加于转子有限元模型的模拟涡轮盘位置处,以此来仿真叶片掉块故障。

2 仿真分析

本部分内容建立单转子有限元模型,在单转子有限元模型的基础上进行了不平衡、不对中、叶片掉块故障的仿真,并通过数据处理得到了转子振动响应时域波形、频域谱图以及轴心轨迹图,对转子振动响应分析得出 3 种典型故障的故障特征。

2.1 转子有限元模型

建立 3 支点模拟涡轮泵转子模型进行故障仿真,该转子模型结构以及有限元节点划分如图 1 所示。该转子模型由模拟涡轮盘结构、轴套结构、支承结构、轴段结构组成。

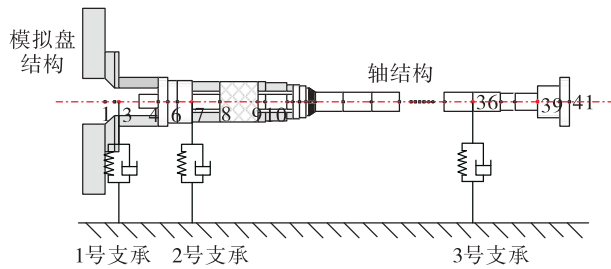


图 1 模拟涡轮泵转子模型

Fig.1 Model of simulating turbine pump rotor

该转子模型共划分为 41 个节点,其中 1 节点为模拟涡轮盘结构,3 节点、7 节点、36 节点为支承结构。表 1 为刚性盘参数,表 2 为支承参数。主干节点材料密度 $\rho = 7\,875\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 201\text{ GN/m}^2$ 。

表 1 刚性盘参数

Tab.1 Parameters of rigid disk

节点	极转动惯量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	直径转动惯量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	质量/kg
1	1.15	0.85	15.5

表 2 支承参数

Tab.2 Support parameters

节点	支点编号	$k_{xx}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$c_{xx}/[\text{N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}]$
3	1	340	100
7	2	110	100
36	3	350	100

各支点刚度与阻尼大小根据实际涡轮泵参数

给定。根据上述涡轮泵单转子模型,使用有限元法计算其动力学特性,图 2 为转子坎贝尔图。

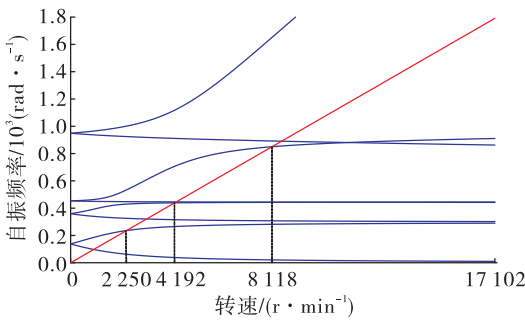


图 2 坎贝尔图

Fig.2 Campbell diagram

由坎贝尔图可知,该转子一阶临界转速为 2 250 r/min,二阶临界转速为 4 192 r/min,三阶临界转速为 8 118 r/min。

在以上 3 支点有限元转子模型的基础上进行故障仿真。根据第 1 节中提出的 3 种典型故障力学模型,分别将不平衡故障力施加于模拟盘位置,不对中故障力施加于轴段位置,叶片掉块故障力施加于模拟盘位置然后计算得到典型故障振动响应,再对振动数据进行处理,得到振动时域图、频域图以及轴心轨迹。

2.2 不平衡故障仿真及数据处理结果

令转子系统初始不平衡量 $U_0 = 2\text{ g} \cdot \text{cm}$,转子系统故障不平衡量 $U_1 = 5\text{ g} \cdot \text{cm}$;初始不平衡相位 $\varphi_0 = 60^\circ$,故障不平衡相位 $\varphi_1 = 60^\circ$;当转速 $\omega = 3\,000\text{ r/min}$ 时,不平衡故障时域波形如图 3 所示,不平衡故障频谱图如图 4 所示,不平衡故障轴心轨迹如图 5 所示。

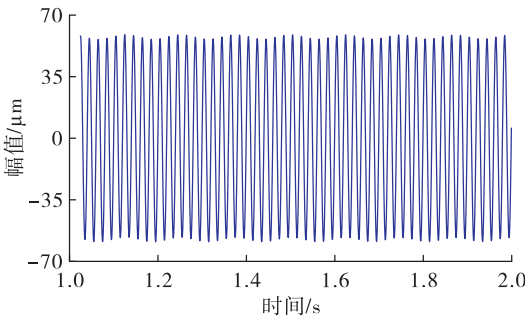


图 3 不平衡故障时域波形

Fig.3 Time domain waveform of unbalanced fault

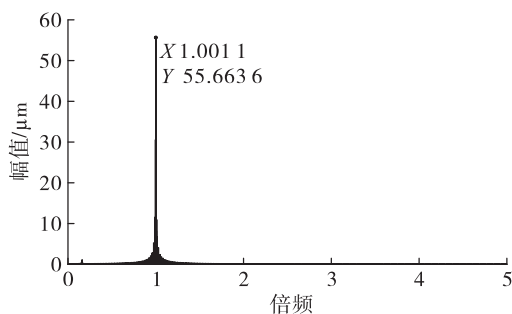


图 4 不平衡故障频谱图

Fig. 4 Spectrum diagram of unbalanced fault

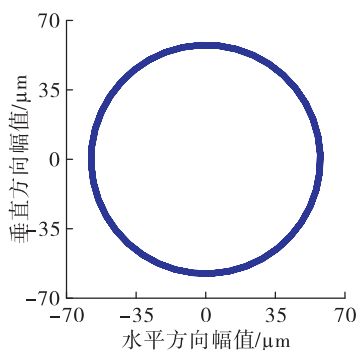


图 5 不平衡故障轴心轨迹

Fig. 5 Axis track of unbalanced fault

不平衡故障下,振动幅值明显增大;振动时域波形近似为正弦曲线波形,振幅变化比较平缓;在频谱图中可以看到是旋转基频 1 倍频占优。由于不考虑刚度异性,轴心轨迹呈现出一个圆形。

2.3 不对中故障仿真及数据处理结果

令平行不对中量 $\Delta y = 1.8 \text{ mm}$;半联轴器端面中心间距 $\Delta L = 0.04 \text{ m}$;角度不对中 $\Delta \alpha = 0.005^\circ$;套齿质量 $m_i = 1.2 \text{ kg}$ 。当转速 $\omega = 3\,000 \text{ r/min}$ 时,不对中故障时域波形如图 6 所示,不对中故障频谱图如图 7 所示,不对中故障轴心轨迹如图 8 所示。

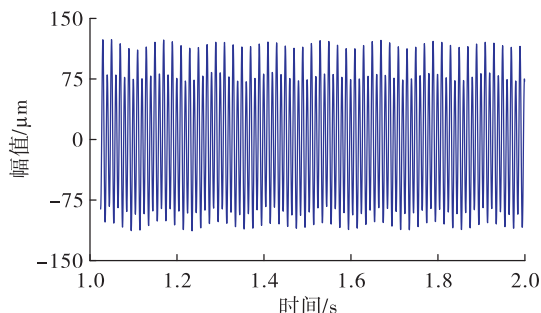


图 6 不对中故障时域波形

Fig. 6 Time domain waveform of misaligned fault

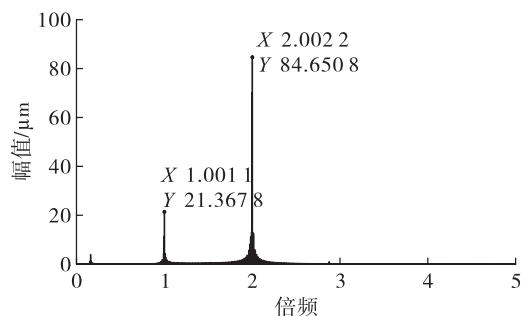


图 7 不对中故障频谱图

Fig. 7 Spectrum diagram of misaligned fault

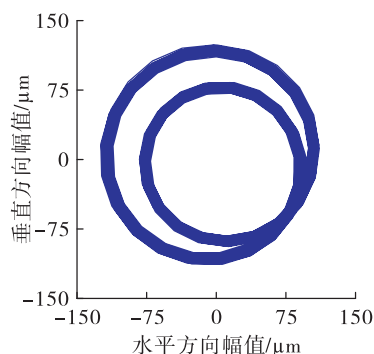


图 8 不对中故障轴心轨迹

Fig. 8 Axis track of misaligned fault

不对中故障下,振动幅值明显增大。振动时域波形可近似为两组不同幅值的正弦曲线组成。从频谱图可以看出,不仅存在 1 倍频,还存在由于不对中故障产生的 2 倍频,且倍频成分的幅值比较大。轴心轨迹比较特殊,呈现出一个“内 8”形状。

2.4 叶片掉块故障仿真及数据处理结果

令叶片掉块发生时的突加不平衡大小 $U_2 = 20 \text{ g} \cdot \text{cm}$,叶片掉块发生的相位 $\varphi_3 = 30^\circ$ 。初始不平衡大小 $U_0 = 2 \text{ g} \cdot \text{cm}$,初始不平衡相位 $\varphi_0 = 60^\circ$ 。当转速 $\omega = 3\,600 \text{ r/min}$ 时,叶片掉块故障时域波形如图 9 所示,叶片掉块故障频谱图如图 10 所示,叶片掉块故障轴心轨迹如图 11 所示。

叶片掉块故障下,振动幅值发生突变。振动幅值在突增后又缓缓降至某一稳定值,时域图中振幅突变的位置就是叶片掉块发生的时刻。从频谱图可以看出,叶片掉块故障特征频率为 1 倍频。轴心轨迹特征为:掉块故障发生之前轴心轨迹比较稳定、掉块之后轴心轨迹也比较稳定、掉块时的短时

间内轴心轨迹比较杂乱。

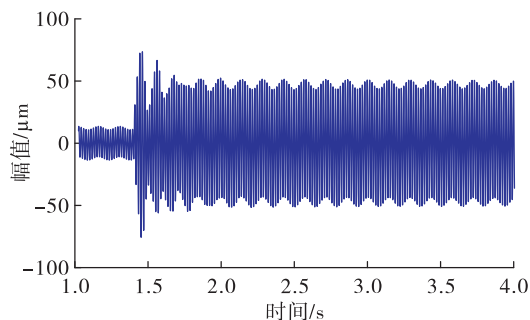


图9 叶片掉块故障时域波形

Fig.9 Time domain waveform of blade falling fault

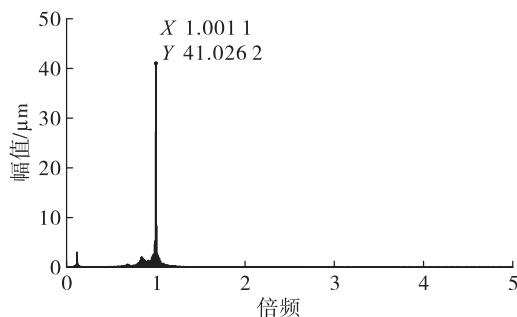


图10 叶片掉块故障频谱图

Fig.10 Spectrum diagram of blade falling block fault

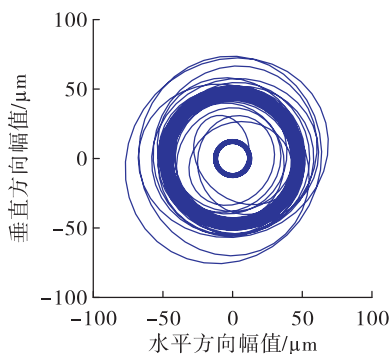


图11 叶片掉块故障轴心轨迹

Fig.11 Axis track of blade falling block

3 故障辨识

针对以上3种典型故障建立了故障辨识的流程与方法。通过将故障数据进行处理,利用时域特征与频域特征来辨别出故障的类别,建立故障辨识方法。

3.1 辨识流程

故障辨别有两种思路:一是建立动力学模型,然后进行数值求解,得到转子响应后研究振动规律;二是采用信号处理的方法,对信号分析得到时域和频域图,从中提取振动特征。本文将采用第二种方法,对数据进行信号处理,得到其时域特征与频域特征,以此来判断故障类别。故障辨识流程如图12所示。

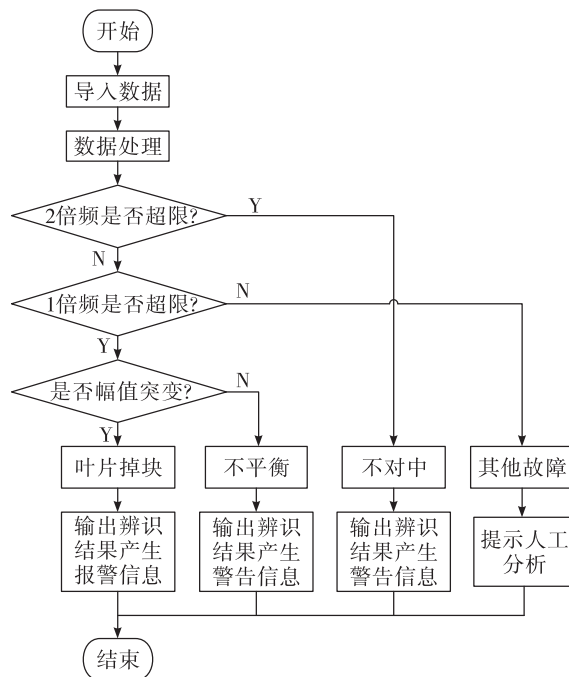


图12 故障辨识流程图

Fig.12 Flow chart of fault identification

首先导入故障数据并对其进行数据处理得到时域波形图以及频谱图。然后开始寻找故障特征,当频谱图中存在2倍频以及1倍频时,此时判定为不对中故障发生,由于不对中故障对涡轮泵影响较小,因此需要产生警告信息;当频谱图中1倍频占优且时域波形图中振幅发生突变时,此时判定为叶片掉块故障发生,由于叶片掉块故障后果严重,因此需要产生报警信息;当频谱图中1倍频占优且时域波形图中没有出现振幅突变现象,此时判定为不平衡故障,由于不平衡故障对涡轮泵影响较小,故只需产生警告信息即可。

根据上述流程,在MatlabGUI平台的基础上,建立故障仿真与辨识系统。该系统可以设置故障参数,仿真3种典型故障的动力学响应,还可导入故障

数据,然后自动提取故障特征,给出故障辨识结果。

3.2 系统展示

图 13 为系统初始界面,初始界面分为两部分,即故障仿真模块以及故障辨识模块。用户可以根据需求选择不同的功能。

图 14 为故障仿真界面,在选择故障类型后,可以选择转速大小以及不平衡量大小,以模拟不同的

故障程度。根据第 2 节仿真分析部分所述的流程进行故障模拟。仿真结果依次为:水平方向时域波形、竖直方向时域波形、轴心轨迹、频谱图。

图 15 为故障辨识界面,点击导入实验器不平衡与不对中故障数据,选择数据文件,依据图 12 所示的辨识规则进行故障类别辨识,即可得到故障辨识结果,以及故障时频域特征展示:时域波形、频谱图。

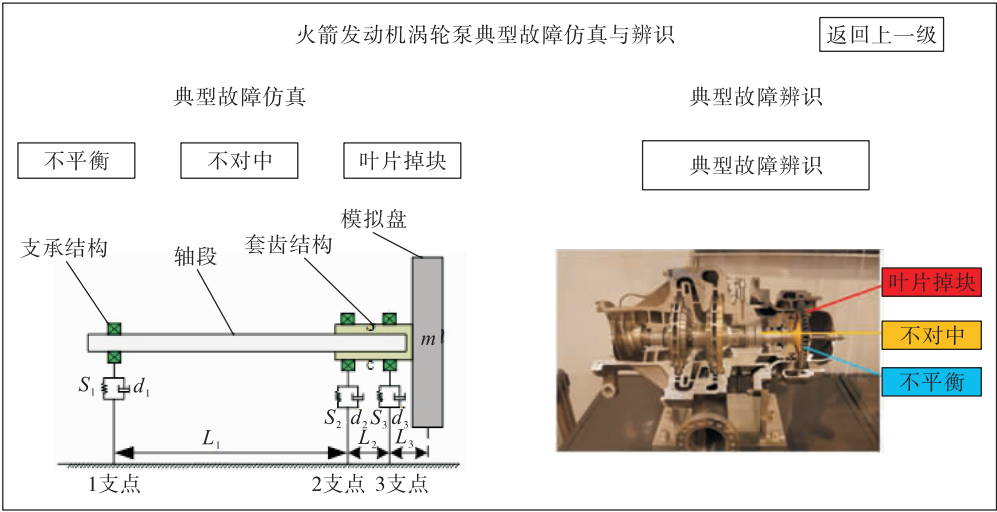


图 13 系统界面

Fig. 13 System interface

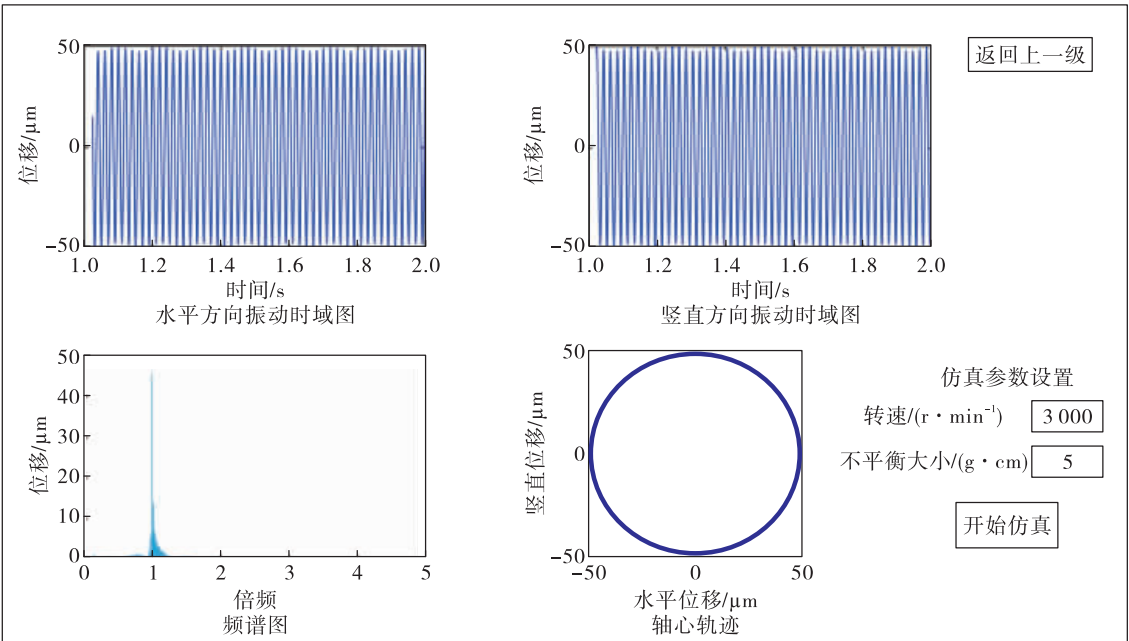


图 14 故障仿真结果

Fig. 14 Simulation results of fault

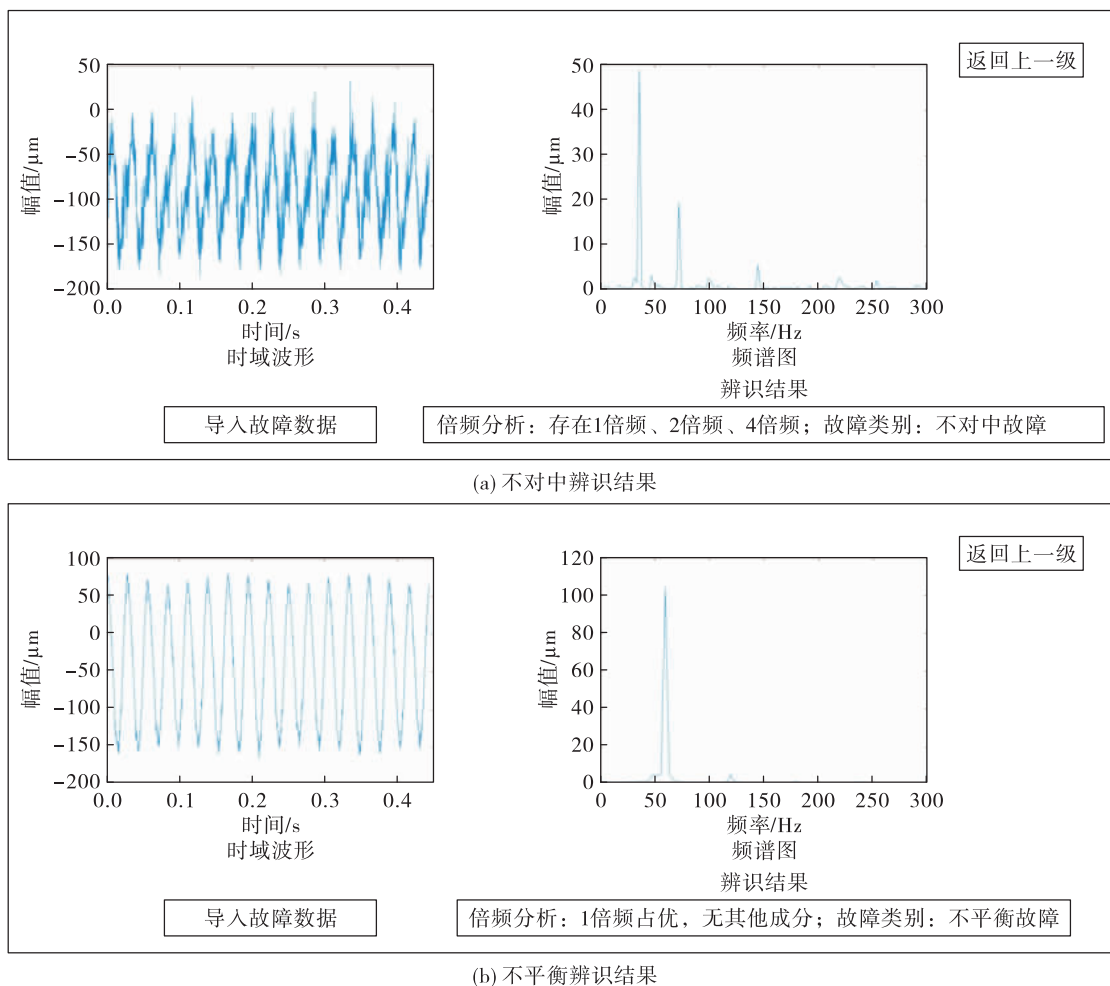


图15 不对中辨识结果和不平衡辨识结果

Fig. 15 Misalignment identification results and unbalance identification results

该系统可以实现典型故障的仿真与辨识,并且由于故障仿真基于动力学模型,后续还可将不同故障的故障力施加于转子模型相应位置处,即可得到该种故障的振动响应并分析得出故障特征。还可以导入故障数据,快速给出故障辨识结果,便于涡轮泵的排故维修。

4 结束语

本文针对液体火箭发动机涡轮泵,首先明确不平衡、不对中、叶片掉块这3种故障力的表达式;其次建立模拟涡轮泵转子动力学模型,将所得故障力施加于模型对应位置处,然后求解得到不平衡、不对中、叶片掉块故障的振动响应,包括时域波形、频谱特征以及轴心轨迹,总结得到了3种典型故障的故障特征;第三,在已得到的故障特征的基础上建

立了一套辨识流程,可以导入故障数据,然后自动给出辨识结果;最后基于上述仿真与辨识流程,采用 MatlabGUI 平台设计了一个典型故障仿真与辨识系统。

该系统可以仿真典型故障的振动响应,而且扩展性良好,可根据不同故障类型给出故障力施加于转子模型相应位置处,得到该故障的故障特征。所得故障特征还可作为新的辨识规则添加进故障辨识模块。该系统对涡轮泵健康状态监控与故障诊断有着积极的意义。

参考文献

- [1] 郑雄,杨勇,姚世东,等. 法尔肯9可重复使用火箭发展综述[J]. 导弹与航天运载技术,2016(2):39-46.
- [2] 康建斌,谢泽兵,郑宏涛,等. 火箭子级垂直返回海上平

- 台制导、导航和控制技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(6):32-35.
- [3] JUE F, KUCK F. Space shuttle main engine (SSME) options for the future shuttle[C]//38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2002.
- [4] ZHANG Y L, WU J J, HUANG M C, et al. Liquid-propellant rocket engine health-monitoring techniques[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5):657-663.
- [5] MARKOU M, SINGH S. Novelty detection: A review. Part 1: statistical approaches[J]. Signal Processing, 2003, 83(12):2481-2497.
- [6] 张振臻, 陈晖, 高玉闪, 等. 液体火箭发动机故障诊断技术综述[J]. 推进技术, 2022, 43(6):20-38.
- [7] 邓晨, 薛薇, 郑孟伟, 等. 大推力氢氧补燃循环发动机故障仿真[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(11):48-53.
- [8] HONG T, LI H. Turbopump fault detection algorithm based on protruding frequency components RMS and SVM[C]//2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. New York: IEEE, 2013.
- [9] HU L, HU N Q, FAN B, et al. Application of novelty detection methods to health monitoring and typical fault diagnosis of a turbopump[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2012, 364:012128.
- [10] ZHONG F L, LI H, WU Q, et al. A fault detection algorithm for turbopump based on lifting wavelet and LMS[C]//2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. New York: IEEE, 2013.
- [11] 张国渊, 梁茂檀, 郭进兴, 等. 不对中齿轮联轴器-轴承-转子系统动力特性[J]. 航空动力学报, 2022, 37(2):225-234.
- [12] 金路, 王俨凯, 王彤, 等. 涡轮泵转子失稳故障分析[J]. 火箭推进, 2020, 46(4):23-30.
- JIN L, WANG Y K, WANG T, et al. Analysis and diagnosis of turbine pump rotor instability[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(4):23-30.
- [13] JIANG P, XING Y Y, WANG B, et al. Reliability evaluation for turbo pump component in two-phase development with no failure data[C]//2019 Prognostics and System Health Management Conference. New York: IEEE, 2019.
- [14] VARTHA V, ARUN KUMAR M S, MATHEW S, et al. Failure analysis of ball-bearing of turbo-pump used in liquid rocket engine[J]. Materials Science Forum, 2015, 830/831:709-712.
- [15] AISWARYA N, SUJA PRIYADHARSINI S, MONI K S. An efficient approach for the diagnosis of faults in turbo pump of liquid rocket engine by employing FFT and time-domain features[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2018, 16(3):163-172.
- [16] 杨懿, 陈文丽, 王永鹏, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的液体火箭发动机涡轮泵故障分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3):540-548.
- [17] 杨硕. 基于支持向量机的涡轮泵故障检测算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [18] 夏鲁瑞, 胡葛庆, 秦国军. 转速波动状态下涡轮泵典型故障诊断方法[J]. 推进技术, 2009, 30(3):342-346.
- [19] 夏鲁瑞, 胡葛庆, 秦国军, 等. 涡轮泵启动过程振动故障检测方法[J]. 航空动力学报, 2010, 25(3):704-708.
- [20] YIN Y C, LIU J F, WU X H, et al. An E-Bayesian estimation for reliability assessment of a success-failure type device[C]//2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. New York: IEEE, 2013.