

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.019

基于遥测力学环境参数的飞行器横向响应载荷辨识方法

刘学,李冬,徐洪洲,胡健

(中国人民解放军91550部队,辽宁 大连 116023)

摘要:针对潜射飞行器水下力学环境的复杂性导致理论动力学模型与实际情况误差较大的问题,提出一种基于遥测力学环境参数的飞行器出水横向响应载荷辨识方法。以结构动力学理论为基础,采用自然环境激励技术联合特征系统实现算法对飞行器出水段的遥测力学环境参数进行模态参数辨识;利用变分模态分解方法对关键截面的振动响应进行自适应分解获取其低阶模态响应分量;根据模态叠加原理和模态正交理论,利用辨识的模态参数和低阶模态分量求取其模态坐标,结合模态剪力和模态弯矩进行横向响应载荷识别。实测算例验证了该方法的有效性。

关键词:力学环境参数;自然环境激励技术;特征系统实现算法;变分模态分解;载荷辨识

中图分类号:V421;TU311.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)03-0095-05

Identification Method for Aircraft Lateral Response Loads Based on Telemetry Mechanical Environmental Parameters

LIU Xue, LI Dong, XU Hongzhou, HU Jian

(Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: Given the big error between the theoretical dynamic model and the actual situation caused by the complexity of the underwater mechanical environment of the submarine-launched aircraft, this paper proposes an identification method for lateral response loads of aircraft during water egress based on telemetry mechanical environment parameters. Based on the theory of structural mechanics, this method, first, identified the modal parameters of the telemetered mechanical environment parameters of the water-egress phase of the aircraft by combining the natural environment excitation technique with the eigensystem realization algorithm. Then, the vibration response of the key section was decomposed adaptively by the variational mode decomposition method to obtain the low-order modal response components. Finally, according to the principle of modal superposition and modal orthogonality theory, the modal coordinates were obtained by using the identified modal parameters and the low-order modal components. Also, the lateral response load was identified through the combination of the modal shear force and the modal bending moment. The actual measurement example verified the validity of the method.

Keywords: mechanical environment parameters; natural excitation technique; eigensystem realization algorithm; variational mode decomposition; load identification

0 引言

出水载荷设计是潜射飞行器结构设计的关键环节。为了使结构能适应复杂的水下力学环境的影响而安全稳定地工作,必须对飞行器各结构部位的强度、刚度和稳定性提出设计要求^[1]。现实中难以用实验手段模拟真实的水下力学环境,导致采用理论分析、有限元建模和缩比试验等方法获得的动力学模型与实际情况差别较大。此外,由于缺少工作模态下水横纵向响应载荷辨识,无法直接获得结构各阶模态对其出水载荷的贡献比例,很难准确验证载荷设计的有效性。

通过系统结构动力学特性和实测响应来估计系统所受外激励称为载荷辨识,它是结构动力学的第二类反问题^[2]。主流的载荷识别方法主要分为频域和时域两类方法。与频域法相比,时域法不受信号采集方式及频域转换的影响,它有效避免了由于信号截断而引起能量泄露、旁瓣、分辨率降低对参数辨识精度的影响,适用性较强。如吴邵庆和尹健等^[3-4]开展了基于结构加速度的卫星基础激励和星-箭连接界面动载荷反演识别方法,实现了服役状态下的卫星振动载荷环境预测。祁泉泉和王洪波等^[5-6]采用特征系统实现算法成功应用于火箭等大型航天器的工作模态参数辨识,

基金项目:国家自然科学基金项目(61801482);中国博士后科研基金特别资助项目(2020T130772)

第一作者简介:刘学(1983—),男,黑龙江大庆人,高级工程师,博士后,研究方向为信号与信息处理,liuxue002@163.com。

有效避免了实验室条件下人为施加激励带来复杂性及不确定性的影响。WU 等^[7]提出了含不确定性参数卫星结构的随机动载荷识别方法,为星箭界面随机动载荷识别提供技术支持。AUCEJO 等^[8]提出基于小波分解和经验模态分解的工作模态参数辨识及载荷识别方法,将非稳态环境激励下响应信号进行多尺度分解,利用低阶模态参数辨识方法进行载荷识别。

对于潜射飞行器而言,受水下力学环境的复杂性的影响及结构空间的限制(测点数目有限且只能在有限空间进行布置),遥测振动传感器获取的响应信息不完备,无法获取结构任意位置的动态响应信号,而出水载荷受流固耦合作用的影响位置和幅值是随时间动态变化的,这就导致模态分析和载荷识别这一反问题的不适应性。针对这些问题,本文提出了基于遥测力学环境参数的潜射飞行器横向响应载荷辨识方法,基于试验中获取的遥测力学环境参数,实现飞行器出水横向响应载荷的准确识别。

1 模态辨识理论

1.1 NExT 法

对于 n 自由度线性时不变结构,当系统 k 点受到外激励 $f_k(t)$ 时, j 点的响应函数可表示为 $x_{jk}(t)$,则 i 和 j 两测试点响应的互相关函数可表示为^[9]

$$R_{ijk}(\tau) = \sum_{r=1}^{2n} \sum_{s=1}^{2n} \varphi_r^i \varphi_s^j a_r^k a_s^k \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{t+\tau} e^{-\xi_r \omega_r (t+\tau-p)} \cdot e^{-\xi_s \omega_s (t-\varepsilon)} E[f_k(p) f_k(\varepsilon)] dp d\varepsilon \quad (1)$$

由于 $f_k(t)$ 的自相关函数满足 $E[f_k(p) f_k(\varepsilon)] = a_k \delta(p-\varepsilon)$, a_k 表示仅与激励点 k 有关的常数项,代入上式可得

$$R_{ijk}(\tau) = \sum_{r=1}^{2n} \sum_{s=1}^{2n} \varphi_r^i \varphi_s^j a_r^k a_s^k \left(\frac{e^{-\xi_r \omega_r \tau}}{\xi_r \omega_r + \xi_s \omega_s} \right) = \sum_{r=1}^{2n} b_r^j \varphi_r^i e^{-\xi_r \omega_r \tau} \quad (2)$$

$$a_r^k = \frac{\varphi_r^k \int_{-\infty}^t e^{-\xi_r \omega_r (t-\tau)} f_k(\tau) \sin \omega_r (t-\tau) d\tau}{M_r \omega_r^d \int_{-\infty}^t e^{-\xi_r \omega_r (t-\tau)} f_k(\tau) d\tau} \quad (3)$$

式中: $\omega_r^d = \omega_r \sqrt{1-\xi_r^2}$ 为有阻尼模态频率; φ_r 为第 r 阶模态阵型; ω_r 、 ξ_r 和 M_r 分别为第 r 阶模态频率、阻尼比和模态质量; b_r^j 为仅与参考测试点 j 和系统第 r 阶模态有关的常数项。

1.2 ERA 算法

根据最小实现理论,ERA 从 k 时刻系统脉冲响应函数矩阵 $H(k)$ 求最小阶次的特征系统矩阵 A 、矩阵 B 、矩阵 C 。 $H(k)$ 与系统矩阵之间关系为 $H(k) = CA^{k-1}B$,由 $H(k)$ 构造 Hankel 分块矩阵 $\tilde{H}(k-1)$

$$\tilde{H}(k-1) = PA^{k-1}Q \quad (4)$$

式中 P 和 Q 分别为可观性和可控性矩阵。当 $k=1$ 时, $\tilde{H}(0) = PQ$, 对其进行奇异值分解 $\tilde{H}(0) = U \Sigma V^T$, $\tilde{H}(0)$ 的秩即为系统的阶次,用 $E_L^T = [I_L, 0_L, \dots, 0_L]_{L \times L\alpha}$ 和 $E_P^T = [I_P, 0_P, \dots, 0_P]_{P \times P\beta}$ 对式(4)分别进行左乘和右乘运算,可得

$$\tilde{H}(k) = E_L^T P A^{k-1} Q E_P = E_L^T U^T \sum^{0.5} \left(\sum^{-0.5} U \tilde{H}(1) V^T \sum^{0.5} \right)^{k-1} \sum^{0.5} V E_P \quad (5)$$

即系统矩阵 $A = \sum^{-0.5} U \tilde{H}(1) V^T \sum^{0.5}$, 系统的模态参数可由其特征值和特征向量来辨识^[10], 对 A 进行特征值分解得到

$$A \Phi = \Phi Z \quad (6)$$

其中 $Z = \text{diag}(z_1, z_2, \dots, z_{2n})$ 为特征值矩阵, Φ 为特征向量, 对角阵元素 z_r 为特征值, 系统矩阵 A 的特征值 $z_r = z_r^R + jz_r^I$ 与系统特征值 $\lambda_r = \lambda_r^R + j\lambda_r^I$ 之间的关系如下

$$z_r = e^{\lambda_r \Delta t}, r=1, 2, \dots, 2n \quad (7)$$

由系统特征值可求得模态频率 $\omega_r = \sqrt{(\lambda_r^R)^2 + (\lambda_r^I)^2}$ 、阻尼比 $\xi_r = \lambda_r^R / \omega_r$ 和模态振型矩阵 $C \Phi$ 。

2 变分模态分解

VMD 采用频域递归迭代求解的方式自适应搜寻变分模型最优解来确定每个调频分量的中心频率及带宽, 自适应的实现信号各分量的分离^[11]。对于多分量信号 $f(t)$, VMD 假设其由 k 个中心频率为 $\omega_k = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K\}$ 有限带宽的本征模态函数 $u_k \in \{u_1, u_2, \dots, u_K\}$ 组成, 约束变分模型为

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (8)$$

约束项为 S.T. $\sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t)$, 为求取该约束变分问题, 定义增广拉格朗日乘子和二次惩罚项将上式转化为如下的无约束模型

$$L(u_k, \omega_k, \lambda) = \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \rangle \quad (9)$$

式中: α 为惩罚参数; λ 为拉格朗日乘子。采用 ADMM 求解上述的约束变分问题, 对各 IMF 分量 $u_k(t)$ 及其中心频率 ω_k 进行交替更新

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \hat{\lambda}(\omega)/2}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (10)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^{+\infty} \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^{+\infty} |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (11)$$

3 横向响应载荷辨识方法

3.1 模态坐标计算

采用低频振动参数对复杂结构进行载荷识别, 潜射飞行器从头至尾径向上布置了 14 个低频振动传感器, 为进行较为精确的载荷识别, 应选择包含的频率分量要涵盖飞行器主要低阶的响应的测量数据。这就要求低频测点应处于飞行器结构相对刚硬部位, 测点的振型应该是结构整体振型的主要成份, 局部振型应占相对较小成份, 这样识别的模态坐标才能代表结构的整体运动, 才能用于分析飞行器结构的整体载荷。经测试和分析, 选择了级间段上的低频振动数据用于载荷识别。

假定低频传感器安装处第 r 阶几何位移是正弦函数, 则其位移与加速度的关系为

$$\ddot{x}_r(x_g) = -\omega_r^2 A_r(x_g) \sin \omega_r t = -\omega_r^2 x_r(x_g) \quad (12)$$

式中: $\ddot{x}_r(x_g)$ 为低频振动传感器安装处 x_g 的第 r 阶几何位移加速度; $A_r(x_g)$ 为低频振动传感器安装处 x_g 第 r 阶几何位移振幅。联立式 (2) 和式 (12), 可得模态坐标

$$q_r(t) = -\frac{\ddot{x}_r(x_g)}{\omega_r^2 \phi_r(x_g)} \quad (13)$$

3.2 算法流程

横向响应载荷辨识方法的主要思想: 根据变分模态分解方法良好的模态分解能力, 对代表结构整体的级间段响应信号进行自适应分解获取其低阶模态响应分量, 根据模态叠加原理和模态正交理论, 利用辨识的模态参数和低阶模态分量求

取其模态坐标, 再结合模态剪力和模态弯矩进行横向载荷识别。算法流程如图 1 所示:

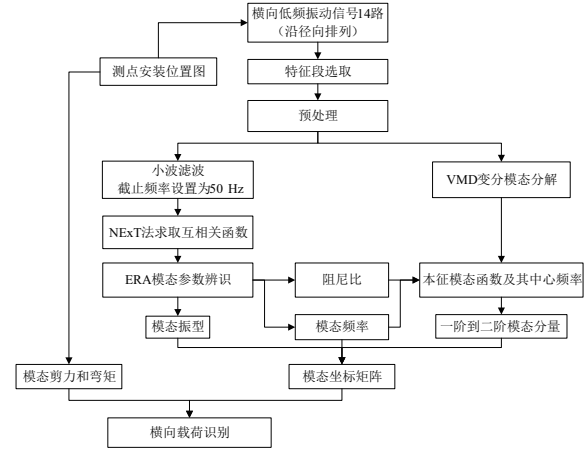


图1 载荷辨识方法流程图

1) 对 14 路低频振动传感器测得的振动信号按头到尾罩进行排列, 将各低频振动信号进行时间对齐, 截取点火到尾罩分离之间的特征段数据, 若相邻指令时刻间隔较近, 可按前一特征段最大幅值能量的 10% 进行截取; 若重叠部分超过 50%, 则将相邻两特征段合并处理, 对所选特征段进行预处理, 根据 GJB 2238A—2004《遥测数据处理》的规范进行零漂修正, 趋势项去除, 野值剔除等。

2) 低频滤波: 通过对低频振动信号以及对飞行器横向载荷工程数值计算结果的分析, 参考 NASA-STD-5002《航天器与有效载荷的载荷分析》标准, 可知低频响应的频率分量在 50 Hz 以内。采用小波滤波对低频振动信号进行处理, 截止频率设置为 50 Hz。

3) 采用 NExT 法得到各特征段降噪后的振动信号的互相关函数作为输入, 运用 ERA 算法进行模态参数识别, 模态频率 ω_r 、阻尼比 ξ_r 和模态振型矩阵 $C\Phi$; 采用识别得到的阻尼比 ξ_r 和 MAC 判断辨识模态的真伪, 一般而言 ξ_r 大于 20% 或小于 1%, 则可以认定为虚假模态。对于潜射飞行器弹射出这一流固耦合问题的横向载荷辨识, 各外力各振形所起的作用是不同的, 模态频率最低的振形贡献最大, 高价模态的贡献则趋向减小, 工程上通常选择一阶到二阶低阶模态作为主要分析模态即可满足需要;

4) 采用 VMD 法对级间段上的低频振动特征段振动信号进行变分模态分解, 得到本征模态函数 $u_k \in \{u_1, u_2, \dots, u_K\}$ 及其中心频率 $\omega_k = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K\}$, 将各本征模态函数中心频率与模态频率 ω_i 进行对比和互校验, 得到级间段测点位置

x_g 处的第 r 阶几何位移加速度 $\ddot{x}_r(x_g), r=1,2$;

5) 将所有 r 阶的模态分量按测点位置编组成第 r 阶几何位移加速度矩阵 $\ddot{x}_r$, 结合第 3 步辨识到的模态振型矩阵 $C\Phi$, 采用最小二乘法对式(13)进行求解得到模态坐标 $q_r(t)$, 模态坐标乘以测点处的模态剪力和弯矩, 就可得到潜射飞行器出水过程的剪力和弯矩, 完成载荷识别。

4 算例验证

为验证所提方法的有效性, 采用振动传感器采集的 14 个通道遥测低频振动信号进行处理验证, 由于横向载荷主要由低阶模态决定, 因此, 参考 NASA-STD-5002《航空器与有效载荷的载荷分析》标准, 采用 sym8 小波进行滤波, 截止频率设置为 50 Hz, 滤波结果如图 2 所示:

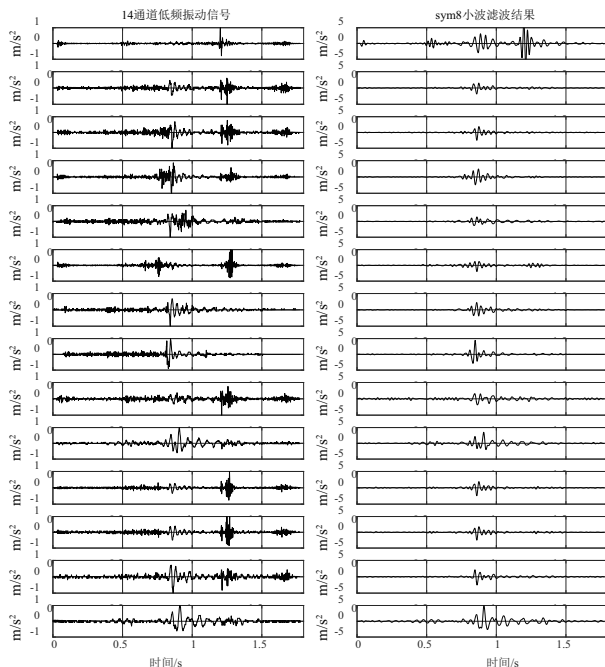


图 2 14 路低频振动信号及其滤波结果

图 2 中所有的实测信号均进行了归一化处理显示, 对降噪后的 14 通道低频振动信号采用 NExT 法得到各特征段降噪后的振动信号的互相关函数, 然后采用 ERA 模态辨识方法对飞行器的工作模态进行辨识, 模态频率和振型的辨识结果如表 1 所示:

表 1 模态频率分析对比

模态阶数	频率/Hz			阻尼比/%	MAC 值/%
	计算	VMD	辨识		
一阶	13.80	13.45	13.89	11.28	92.16
二阶	22.56	21.27	21.75	8.59	88.92

采用自适应 VMD 方法对级间段上的低频振动信号进行自适应分解, 得到五阶本征模态分量(IMF), 如图 3 所示。可以看出 IMF1 和 IMF2 与计算和辨识出的低阶模态频率最大相差 5.72%, 满足工程需要, 从而互相验证了计算模型、VMD 方法和辨识结果的准确性。

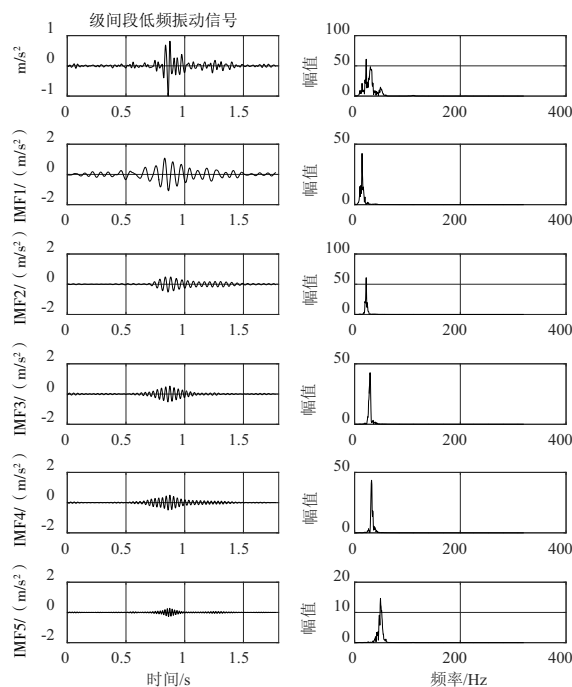


图 3 级间段低频振动信号 VMD 分解结果

图 4 给出了辨识振形与理论计算振形对比图, 可以看出一阶振形和二阶振形满足模态振型正交性, 但辨识振形的幅值略小于计算振形; 在测点 8 级间段测点位置上, 模态振形的辨识结果与理论计算结果基本一致, 吻合较好。这也验证了级间段振型是飞行器结构整体振型的主要成分, 识别的模态坐标能代表结构整体运动, 可用于分析结构的整体载荷。

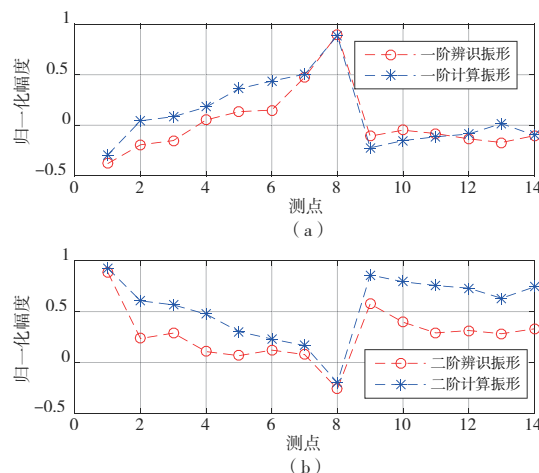


图 4 辨识振形和理论计算振形对比

图5为采用VMD分解到的本征模态分量IMF1和IMF2作为几何位移加速度,结合辨识的模态振形采用最小二乘法求解得到一阶、二阶模态坐标,可以看出模态坐标也满足正交性要求。

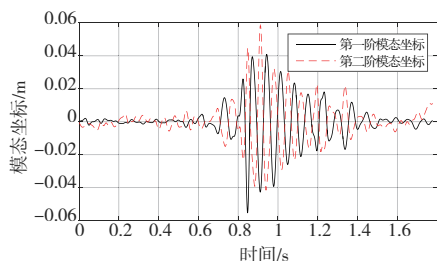


图5 辨识的工作模态坐标

图6和图7给出了某型飞行器试验任务两个关键截面弯矩的辨识结果,图中给出的是归一化弯矩,即辨识和实测弯矩除以二者弯矩绝对值的最大值,可以看出辨识弯矩绝对值的最大值与实测弯矩绝对值的最大值量级相当,最大相差8.4%,两者相位较为一致,辨识精度满足工程应用需要,验证了所提方法的有效性。

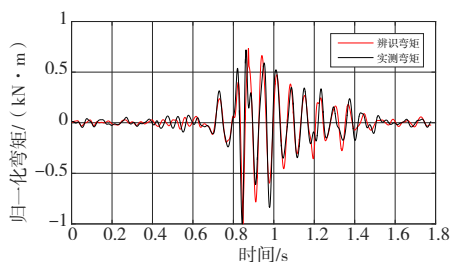


图6 关键截面1 辨识弯矩与实测弯矩对比

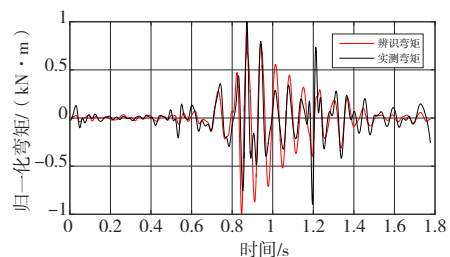


图7 关键截面2 辨识弯矩与实测弯矩对比

5 结语

针对潜射飞行器水下力学环境的复杂性导致理论动力学模型与实际情况误差较大的问题,结合结构动力学理论,本文提出一种基于遥测力学环境参数的飞行器横向出水载荷辨识方法。采用

NExT和ERA相结合的方法对结构的低阶模态进行辨识,再利用VMD对关键截面的振动响应进行自适应分解,获取其低阶模态响应分量;结合模态叠加原理和模态正交理论,获取各时刻飞行器的低阶模态坐标;利用辨识的模态参数和低阶模态坐标,结合模态剪力和模态弯矩完成横向载荷识别。实测算例采用遥测振动传感器采集的14通道低频振动信号对结构关键截面弯矩进行了辨识,辨识结果与实测结果量级相当,相位一致,辨识精度满足工程应用需要,可为潜射飞行器出水横向载荷评估和设计提供方法支撑。

参考文献:

- [1] 韩增尧,邹元杰,朱卫红,等. 航天器力学环境分析与试验技术研究进展[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2019,49(2):6-22.
- [2] 尹云玉. 固体火箭横向响应载荷识别方法[J]. 宇航学报,2009,30(6):2135-2139.
- [3] 吴邵庆,尹健,何子豪,等. 卫星结构基础加速度激励及界面力识别试验研究[J]. 宇航学报,2022,43(3):319-327.
- [4] 尹健,吴邵庆,陈树海. 星箭连接界面处环形分布动载荷识别[J]. 宇航学报,2019,40(12):1393-1402.
- [5] 祁泉泉,辛克贵,崔定宇. 扩展特征系统实现算法在结构模态参数识别中的应用[J]. 工程力学,2011,28(3):29-34,40.
- [6] 王洪波,赵长见,廖选平,等. 基于飞行工作模态分析的飞行器动载荷识别研究[J]. 动力学与控制学报,2017,15(2):178-183.
- [7] WU S Q, ZHENG Y, SUN Y W, et al. Identify the stochastic dynamic load on a complex uncertain structural system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147:107114.
- [8] AUCEJO M, DE SMET O. A multiplicative regularization for force reconstruction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 85:730-745.
- [9] 高永武,金波,侯钢领,等. 基于环境激励的ERA方法在网架结构振动测试中的应用研究[J]. 地震工程与工程振动,2013,33(4):176-182.
- [10] DRAGOMIRETSKIY K, ZOISSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3):531-544.
- [11] 刘尚坤,唐贵基,王晓龙. 基于改进变分模态分解的旋转机械故障时频分析方法[J]. 振动工程学报, 2016, 29(6):1119-1126.

收稿日期:2024-03-05