

基于最小二乘法和 SSA 算法的行星齿轮箱 微弱振动故障探测

严峰军

(西安思源学院, 西安 710038)

摘要: 行星齿轮箱是一种常用于工业机械和车辆传动系统中的重要装置, 其长期运转和负荷导致行星齿轮箱存在着微弱振动故障的风险, 通过研究行星齿轮箱微弱振动故障的特征和变化趋势, 可以提前发现潜在故障迹象, 提高齿轮箱的安全性; 然而, 行星齿轮箱微弱振动信号具有复杂的时域和频域特征, 且其振动信号非常微弱, 并富含大量噪声, 为行星齿轮箱的故障探测工作带来较大难度; 为此, 提出基于最小二乘法和 SSA 算法的行星齿轮箱微弱振动故障探测方法; 模拟行星齿轮箱工作与振动流程, 根据不同故障下齿轮箱的工作特征, 设置微弱振动故障探测标准; 采集行星齿轮箱微弱振动信号, 利用最小二乘法降低行星齿轮箱微弱振动信号中的噪声含量; 利用 SSA 算法提取行星齿轮箱微弱振动信号特征, 根据提取特征与设置标准的匹配, 得出故障类型和故障参数的探测结果; 通过性能测试实验得出结论: 所提方法探测行星齿轮箱微弱振动信号的信噪比明显降低, 故障探测范围扩大了 353.94 mm², 具有较好的探测能力。

关键词: 最小二乘法; SSA 算法; 行星齿轮箱; 微弱振动; 故障探测

Weak Vibration Fault Detection of Planetary Gearbox Based on Least Squares Method and SSA Algorithm

YAN Fengjun

(Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Planetary gearbox is an important device commonly used in industrial machinery and vehicle transmission system, its long-term operation and load will lead to the risk of weak vibration failure, by studying the characteristics of planetary gearbox weak vibration fault and changing trends, the potential signs of failure can be found in advance to improve the safety of the gear box. However, the weak vibration signal of planetary gearbox has complex time domain and frequency domain characteristics, and its vibration signal is very weak, and rich in a large amount of noise, which brings great difficulty to the fault detection work of planetary gearbox. Therefore, a weak vibration fault detection method based on a least squares method and an SSA algorithm is proposed. Simulate the working and vibration process of planetary gearbox, and set the weak vibration fault detection standard according to the operating characteristics of the gearbox under different faults. Collect the weak vibration signal of the planetary gearbox and reduce the noise content of the planetary gearbox by least squares method. The SSA algorithm is used to extract the weak vibration signal features of the planetary gearbox, and obtain the detection results of fault types and fault parameters according to the matching between the extracted features and the setting standard. Through the performance test experiment, the conclusion is that the proposed method effectively reduces the signal-to-noise ratio of the weak vibration signal of the planetary gearbox, the fault detection range is expanded by 353.94 mm², with a good detection ability.

Keywords: least squares method; SSA algorithm; planetary gearbox; weak vibration; fault detection;

0 引言

行星齿轮箱采用多个相同的行星齿轮围绕一个中心太阳齿轮旋转的方式, 实现多对齿轮的同时啮合, 从而改变传动比并成比例地增大电机的扭矩。行星齿轮箱的核心功能在于动力传递和变速, 广泛应用于工业运输与生产的各个领域。在运行过程中, 行星齿轮同时与太阳齿轮和齿圈啮合, 形成多种啮合副。此外, 行星齿轮在自转的同时, 还会随着行星架围绕太阳齿轮公转。行星齿轮箱工作过程

中, 由于齿轮磨损、过载运行、润滑不良、制造或安装误差以及长期在恶劣环境下工作导致的腐蚀或疲劳断裂等原因, 影响行星齿轮箱的正常运行, 甚至引发故障。行星齿轮箱内部如齿轮磨损、轴承故障或不正确的装配等, 都是可能导致振动增加的潜在因素。通过振动故障探测, 可以预测和防止潜在故障的发生, 避免设备损坏和生产中断。为此, 需要研究一种行星齿轮箱微弱振动故障探测方法。

现阶段发展较为成熟的故障探测方法主要包括: 文献[1]提出的基于连续小波变换和无模型元学习的行星齿轮

收稿日期: 2024-03-18; 修回日期: 2023-05-29。

作者简介: 严峰军(1979-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 严峰军. 基于最小二乘法和 SSA 算法的行星齿轮箱微弱振动故障探测[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 56-62, 71.

箱故障探测方法、文献 [2] 提出的基于变分模态分解的行星齿轮箱故障探测方法、文献 [3] 提出的基于振动和磨粒分析的行星齿轮箱故障探测方法以及文献 [4] 提出的基于离散小波变换的行星齿轮箱故障探测方法。其中文献 [1] 提出方法利用连续小波变换将行星齿轮箱的振动信号转化为时频图像, 从而精确地描绘出其非平稳性特征。随后, 借助 MAML 的“学会学习”能力, 针对少量的时频图像样本进行训练, 实现对“未见”的行星齿轮箱故障类型的有效探测。文献 [2] 提出方法确定变分模态分解的分解层数, 通过对振动信号进行 VMD 分解, 得到多个本征模态函数分量。随后, 计算每个 IMF 分量与原始信号的归一化互信息值, 并筛选出那些归一化互信息值超过预设阈值的 IMF 分量。利用这些分量重构信号, 并计算重构信号的 DE 差异能量特征值。最后, 将 DE 特征值输入粒子群优化支持向量机模型以识别行星齿轮的故障模式。文献 [3] 提出方法构建了一个多特征融合的相关向量机模型, 该模型采用了创新的特征提取方法, 专门用于诊断行星齿轮箱的劣化状态。此外, 还开发了一个新的在线磨屑监测指标, 用以评估行星齿轮的磨损演变情况, 由此能够准确探测出行星齿轮箱的故障。而文献 [4] 提出方法在故障位置测量过程中, 机器振动通过信号处理技术展现出了关于不同操作条件下故障的丰富信息。综合应用离散小波分析方法, 研究不同小波族在 8 个分解级别上的细节系数的均方能量, 并将其视为一个关键特征。此外, 采用 J48 算法来选择这些特征, 以形成分类器的输入, 从而更有效地识别并分类故障。然而上述故障探测方法主要针对的是行星齿轮箱的明显振动故障, 其应用到微弱振动故障探测过程中的探测精度还需进一步加强。

针对上述方法中存在的问题, 为了确定任意行星齿轮箱对象是否存在微弱振动故障, 并针对存在故障的行星齿轮箱, 进一步探测其故障位置, 综合应用最小二乘法和 SSA 算法, 对行星齿轮箱微弱振动故障探测方法进行优化设计。模拟行星齿轮箱的工作流程以及振动产生原理, 根据工作流程的模拟结果, 针对不同振动故障下行星齿轮箱的工作特征, 并设置行星齿轮箱微弱振动故障的探测标准, 以此可以快速地通过比较实际振动信号与标准特征判断是否存在故障。采集行星齿轮箱的实时运行振动信号, 在最小二乘法的支持下, 对初始采集的微弱振动信号进行处理, 利用 SSA 算法去除信号中的噪声干扰, 准确提取行星齿轮箱微弱振动信号特征。基于 SSA 算法, 从时域和频域两个方面提取行星齿轮箱微弱振动信号的运行特征, 提高搜索过程的灵活性, 由此判断当前行星齿轮箱探测对象是否存在微弱振动故障并确定其故障类型, 进行特征融合后完成行星齿轮箱微弱振动故障探测工作。通过优化设计方法, 以期能够提升故障探测方法的探测精度, 保证行星齿轮箱的工作安全。

1 行星齿轮箱微弱振动故障探测总体方案设计

分析行星齿轮箱内部各组件 (如太阳轮、行星轮、齿

圈和行星架) 之间的相互作用和运动关系, 识别齿轮啮合过程中啮合齿数的交替变化对齿轮箱振动的影响, 以便准确地预测齿轮箱在各种工作条件下的性能。分析产生故障的情况下, 行星齿轮箱产生的振动信号特征, 并识别不同故障特征的频率, 以便快速地通过比较实际振动信号与标准特征判断是否存在故障。通过在行星齿轮箱上设置测点, 并安装振动传感器设备, 设定振动信号的采集频率, 采集不同工作状态下的行星齿轮箱微弱振动信号数据, 采用最小二乘法减少噪声对信号质量的干扰。将麻雀种群的搜索能力应用于振动信号中, 基于 SSA 算法从时域和频域两个方面高效获取行星齿轮箱微弱振动信号的运行特征。从行星齿轮箱的微弱振动信号中提取关键特征, 如峭度、偏斜度系数和平均能量指标等, 将这些特征分量进行融合, 形成一个综合的特征向量, 以便后续与故障探测标准进行比较。

2 行星齿轮箱微弱振动故障探测方法设计

2.1 模拟行星齿轮箱工作与振动流程

行星齿轮箱机构主要有太阳轮、行星轮、齿圈和行星架。其中, 每一个行星轮都以相等的间距排列, 并由行星架固定。行星轮和齿圈互相啮合, 并固定于箱体上。行星架一般连接着低速轴, 用来将各个齿轮固定在一个位置上, 而太阳轮则连接在高速轴上。行星齿轮箱的功率传输采用行星传动, 各齿轮副分担负载。行星轮数量越多, 载重能力越强。因为每一级行星传动一般由多个齿轮副组成, 所以, 合理地选取各齿轮的主要参数, 可获得较高的传动比, 并提高其承载能力。行星轮有两个转动轴, 一个是太阳轮的中轴, 另一个是它本身的中轴, 它的运行模式与行星的运行模式相似, 所以它的自转轴也有周期性的改变。在行星齿轮箱中, 每一对齿轮副啮合点的位置都具有一定的周期性。行星轮轴承支承着行星轮进行行星运行, 内环与行星轮轴不动, 且随行星轮转动而转动。外环仅随着行星架的转动而转动, 但是滚动体除了自身的自转之外, 还与保持架、行星架同步旋转。这样, 行星齿轮箱中由固定传感器采集到的齿轮与轴承的振动信号均呈现时变特性。行星齿轮箱的工作原理如图 1 所示。

行星齿轮箱工作的动力学方程可以表示为:

$$J(t) = Mx'' + \mu x' + g(t)x \quad (1)$$

式中, x 为行星齿轮箱内部两齿轮沿啮合线方向上的相对位移, x' 和 x'' 分别表示的是相对位移 x 的一阶导数和二阶导数, M 和 μ 对应的是齿轮箱的当量质量和副啮合阻尼, $g(t)$ 为 t 时刻齿轮箱的啮合刚度, $J(t)$ 为当前时刻的外界激励总量。在齿轮啮合的过程中, 啮合齿数会随着轮齿的进出啮合状态而发生交替变化^[5]。行星齿轮箱的工作振动是齿轮啮合过程中刚度周期性变化所导致的, 即使是最精确无误的齿轮在啮合时也会产生, 是行星齿轮箱运行过程中不可避免的振动现象。通过确定行星齿轮箱结构参数和工作参数, 完成对行星齿轮箱工作流程和振动机理的模拟。

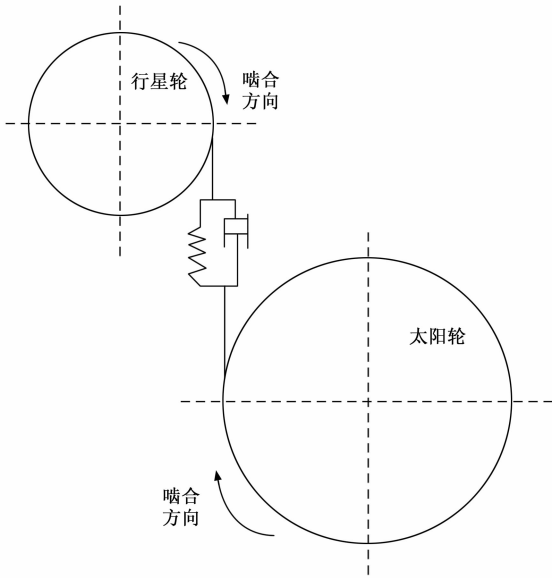


图 1 行星齿轮箱工作原理图

2.2 设置行星齿轮箱微弱振动故障探测标准

行星齿轮箱的主要故障包括太阳轮故障、行星轮故障、齿轮故障、轴承故障、传动轴故障和啮合故障等，其中太阳轮和行星轮故障状态下行星齿轮箱微弱振动故障的标准特征可以表示为：

$$\begin{cases} \tau_{b-Sun\ gear} = [1 - \cos(2\pi f_a t)][1 + A\cos(2\pi f_s t + \varphi)] \\ \quad \cos[2\pi f_m t + B\sin(2\pi f_s t + \varphi) + \theta] \\ \tau_{b-Planetary\ gear} = [1 - \cos(2\pi f_a t)][1 + A\cos(2\pi f_p t + \varphi)] \\ \quad \cos[2\pi f_m t + B\sin(2\pi f_p t + \varphi) + \theta] \end{cases} \quad (2)$$

式中， f_a 、 f_s 、 f_m 、 f_p 和 f_c 分别对应的是太阳轮绝对旋转频率、故障频率、啮合频率以及行星架旋转频率和故障频率， B 表示的是故障状态下的振动幅值， φ 、 φ 和 θ 对应的是太阳轮、行星轮和齿轮的角频率^[6]。齿轮故障具体包括齿面磨损、齿面胶合擦伤、齿根裂纹、齿面点蚀、断齿等多种类型，经过长时间的运转，轮齿之间的啮合作用次数增加，导致齿面存在一定程度的磨损。磨粒磨损是指在齿面接触到粉尘或其他金属微粒时，产生的一种磨损形式。另外，当润滑油粘度下降或油量不够时，接触界面间不能形成有效的油膜保护，同样会造成严重的磨损故障。当轮齿啮合时，由于受外力的影响，齿面“焊合”后发生了相对移动，造成了齿面上的金属剥落或向其他齿面传递，这一现象被称为胶合^[7]。胶合是高速或重载齿轮箱中经常会出现的一种严重的磨损形式。在高温高压环境下，油膜被破坏，齿面瞬间温升较高，从而使齿间产生粘结。齿轮在啮合过程中，因载荷不稳或载荷太大，轮齿会受到较大的应力而产生弯曲、变形。齿轮在交变载荷作用下，运行到一定时间后，轮齿会发生疲劳破坏，并逐步出现裂纹。另外，负荷太大时，还会引起齿根部开裂，直到齿面断裂，且在加工中对齿轮进行淬火，或者是在加工中进行了磨削，都会使

齿轮出现裂纹。在交变切应力和较高载荷的作用下，齿轮根部会逐步产生疲劳裂纹，如不被及时检测，裂纹会继续扩展。如果负荷超过了残余的齿轮所能承受的负荷，就会使其断裂^[8]。如果不加以控制，在不降低载荷的情况下，或者长期承受高强度的冲击，就会导致最大的断齿。在行星齿轮箱轴承故障中，外环失效的典型特征为：

$$\tau_{b-bearing-w} = c(t) + r(t) + z(t) + n(t) \quad (3)$$

其中： $c(t)$ 、 $r(t)$ 、 $z(t)$ 和 $n(t)$ 分别表示的是冲击振动、啮合振动、正常旋转振动和随机噪声因素。按照上述方式可以得出不同故障下对应振动信号的标准特征，以此作为行星齿轮箱微弱振动故障的探测标准。

2.3 利用最小二乘法处理行星齿轮箱微弱振动信号

通过 2.1 小节描述了行星齿轮箱的工作原理以及在工作过程中可能产生的振动现象，包括齿轮啮合导致的振动特征；通过 2.2 小节分析了行星齿轮箱微弱振动故障探测标准，针对太阳轮和行星轮故障状态下的标准特征进行了描述。结合上述两个小节的分析，方便获取到不同工作状态下的振动信号数据。在行星齿轮箱微弱振动信号的采集过程中，在待探测的行星齿轮箱上设置测点，将振动传感器设备安装在设置的测点位置上，并设定振动信号的采集频率，具体的设定情况如下：

$$f_{gather} = \frac{n_{vibrate} \tau_{b-Planetary\ gear} \tau_{b-bearing-w}}{TJ(t)} \quad (4)$$

式中， $n_{vibrate}$ 和 T 分别表示的是所需采集的行星齿轮箱微弱振动信号量以及信号的采集周期。在采集频率的驱动下，得出行星齿轮箱微弱振动信号的采集结果为：

$$u(t) = f_{gather} \cdot \sum_{m=0}^{n_{sum}} A_m [1 + a_m(t)] \cos[2\pi m f_m t + \varphi_0 + y_\varphi(t)] \quad (5)$$

式中， A_m 和 $a_m(t)$ 分别表示的是 m 阶谐波分量和第 m 阶的幅值调制函数， φ_0 为初始相位， $y_\varphi(t)$ 表示的是相位调制函数^[9]。重复上述操作，对处于运行状态行星齿轮箱产生的实时微弱信号进行采集，以此作为探测齿轮箱振动故障的操作对象。

采集的行星齿轮箱微弱振动信号中存在噪声干扰现象，利用最小二乘法对行星齿轮箱微弱振动信号进行去噪处理。去噪处理后，如果 SNR 有明显提升，说明去噪方法有效，信号质量得到了改善。以初始采集的行星齿轮箱微弱振动信号为处理对象，采用最小二乘法程序运行流程对微弱振动信号进行预处理，如图 2 所示。

最小二乘法的迭代公式如下：

$$x^{(k+1)} = u(t)x^{(k)} - [\nabla^2 \mathbf{H}(x^{(k)})]^{-1} \cdot \nabla \mathbf{H}(x^{(k)}) \quad (6)$$

其中： $\nabla \mathbf{H}$ 为 Hessian 矩阵，公式 (6) 表示的最小二乘法必须要计算二阶导数矩阵，当只有一阶导数能计算时，对非线性函数 $y(x)$ 进行线性化处理，用线性最小二乘问题的解逼近非线性最小二乘问题的解^[10]。在行星齿轮箱微弱振动信号预处理过程中，将采集的振动信号 $u(t)$ 赋值给 $x^{(k)}$ 代入到公式 (6) 中，通过反复迭代和最小值求解，得出行

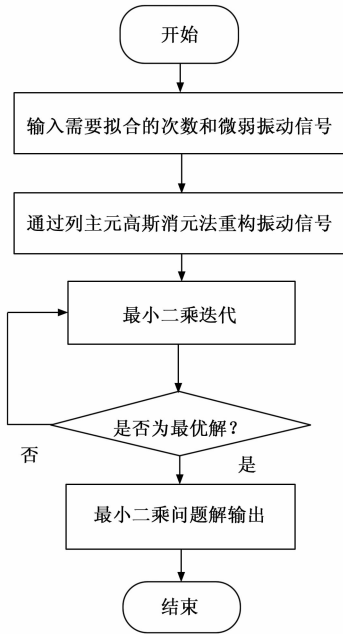


图 2 最小二乘法程序执行流程图

星齿轮箱微弱振动信号的预处理结果^[11]。除最小二乘处理外，为提升微弱振动信号质量，降低初始采集信号中包含的噪声量，降噪处理结果为：

$$u_n(t) = u(t) \left[\sum (\psi_{j,k} \times n_{\text{filtering}}) + \sum (x^{(k+1)} \times \sigma) \right] \quad (7)$$

式中， ψ 为尺度系数， σ 为小波系数， $n_{\text{filtering}}$ 表示的是行星齿轮箱微弱振动信号的滤波次数。按照上述操作方式，对实时采集的行星齿轮箱微弱振动信号进行循环处理，得出满足质量要求的振动信号。

2.4 利用 SSA 算法提取行星齿轮箱微弱振动信号特征

在 SSA (麻雀搜索算法) 中，适应度函数是评估麻雀个体 (即算法中的解) 优劣的关键。对于行星齿轮箱微弱振动信号的特征提取问题，适应度函数需要能够反映信号中关键特征的信息量，如峭度、偏斜度系数、平均能量等，这些特征能够表征齿轮箱的工作状态和健康程度。通过 SSA 算法，能够提高特征提取的准确性和稳定性，从而更有效地分析行星齿轮箱的微弱振动信号特征，发现潜在故障问题。在 SSA 算法的支持下，基于提取的行星齿轮箱微弱振动信号特征，从时域和频域两个方面提取行星齿轮箱微弱振动信号特征，从时域和频域两个方面提取行星齿轮箱微弱振动信号特征，时域特征提取的目的是确定行星齿轮箱振动信号随时间的变化特征，而频域特征则是比对行星齿轮箱不同位置上微弱振动信号的变化规律，为故障定位工作提供参考数据^[12]。图 3 表示的是 SSA 算法的运行流程。

SSA 算法的基本运行原理为：依据麻雀的行为特征，可以将它们划分为探索者和追随者两类。探索者的核心职责是搜寻食物，同时为追随者指明食物所在的方向。追随者则跟随探索者的引导进行觅食。在此过程中，部分追随者为了获取更多食物，可能会尝试夺取探索者的食物，一

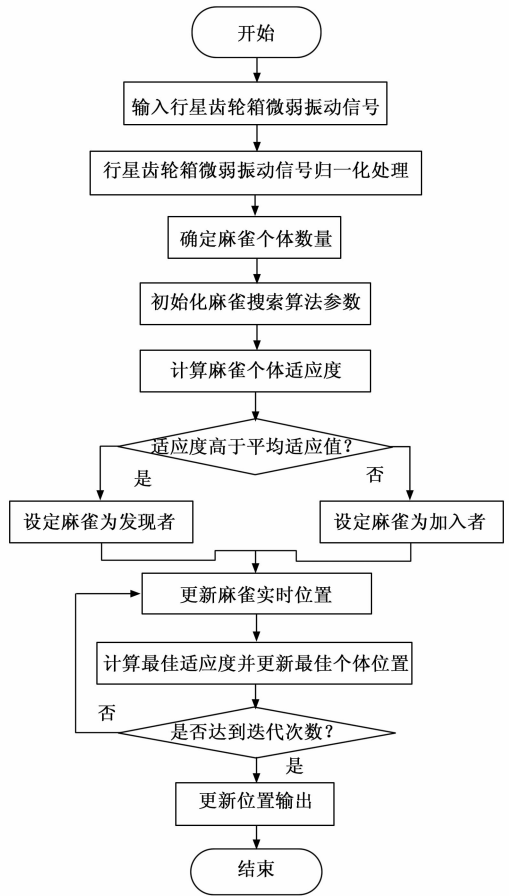


图 3 SSA 算法执行流程图

旦成功，该追随者就会转变为新的探索者，但探索者与追随者的比例依然保持不变^[13]。为了防范捕食者，麻雀群体中总会有一部分担任警戒角色。一旦它们察觉到危险，就会发出警报叫声，以提醒周围的麻雀，并共同转移到新的觅食地点。在实际的 SSA 算法执行过程中，首先利用公式 (8) 对麻雀种群进行初始化，即随机生成一组初始解，作为麻雀种群的起始种群。

$$Q = \begin{bmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & \cdots & \cdots & q_{1,d} \\ q_{2,1} & q_{2,2} & \cdots & \cdots & q_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{n_q,1} & q_{n_q,2} & \cdots & \cdots & q_{n_q,d} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， $q_{i,j}$ 为任意一个麻雀个体， n_q 和 d 分别对应的是初始种群中麻雀的数量和优化维度，由此可以得出种群中所有麻雀的适应度值，适应度值较高的麻雀享有更高的优先级，这些麻雀为发现者，而适应度值较低的麻雀则被称为追随者^[14]。在寻找最优解的过程中，发现者负责引导追随者，其搜索范围相较于追随者更为广泛。发现者实时位置的更新结果为：

$$W_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} W_{i,j}^t \cdot \exp\left(\frac{-i}{\gamma_1 \cdot \gamma_{\max}}\right) & \text{if } \beta < \zeta \\ Q_{n_q}(t)W_{i,j}^t + \gamma_2 \cdot E & \text{if } \beta \geq \zeta \end{cases} \quad (9)$$

式中， $W_{i,j}^t$ 为任意麻雀在第 t 次迭代时的位置数据， γ_1 和 γ_2

分别为 (0, 1] 区间和服从正态分布的随机数, \mathbf{E} 是一个所有元素均为 1 的单元矩阵, β 和 ζ 对应的是报警值和安全阈值。跟随者在探索其他空间时, 能够收集能量以增强其适应度值^[15]。此外, 它们还可以选择跟随发现者, 并尝试从发现者那里夺取能量, 以进一步提升自身能量水平。跟随者位置更新公式如下:

$$\omega_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} W_{i,j}^{t+1} \gamma_2 \cdot \exp\left(\frac{\omega_c^t - \omega_{i,j}^t}{i^2}\right) & \text{if } i > \frac{n_p}{2} \\ \omega_z^{t+1} + |\omega_{i,j}^t - \omega_z^{t+1}| \cdot \mathbf{E}^2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

其中: ω_c 和 ω_z 分别为当前全局最差位置和发现者占据的最优位置。在行星齿轮箱微弱振动信号特征的提取过程中, 设置发现天敌的预警麻雀数量, 并对其位置进行实时更新, 更新结果如下:

$$\omega_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} W_{\text{best}}^i + l \cdot |W_{i,j}^i - W_{\text{best}}^i| & \text{if } \lambda_i > \lambda_g \\ \omega_{i,j}^i + \gamma_3 \cdot \left(\frac{|\omega_{i,j}^i - \omega_c^i|}{(\lambda_i - \lambda_w) + \gamma_{\min}}\right) & \text{if } \lambda_i = \lambda_g \end{cases} \quad (11)$$

式中, λ_i , λ_g 和 λ_w 对应的是当前麻雀的适应度值、适应度值的最优值和最差值, γ_3 为区间 [-1, 1] 内的随机数, γ_{\min} 为最小常数系数, l 为补偿控制系数, 主要用来表示麻雀的移动方向^[16]。根据上述 SSA 算法的执行流程, 将麻雀种群设置到采集的行星齿轮箱微弱振动信号中, 得出信号时域、频域特征分量的具体取值, 时域特征分量中峭度、偏斜度系数的提取结果为:

$$\begin{cases} \tau_{\text{kurtosis}} = \omega_{i,j}^{t+1} \left(\frac{K(u - \bar{u})^4}{\delta^4}\right) \\ \tau_{\text{skewness}} = \omega_{i,j}^{t+1} \left(\frac{1}{n_{\text{vibrate}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{vibrate}}} (|u - \bar{u}|)^3\right) / u_{\text{rms}}^3 \end{cases} \quad (12)$$

式中, \bar{u} 和 δ 分别表示微弱振动信号的均值和标准差, u_{rms} 表示的是振动信号的均方根值, K 为期望值。另外频域特征分量中平均能量指标的提取结果为:

$$\tau_{\text{energy}} = \omega_{i,j}^{t+1} \left(\frac{\sum_{t=1}^K u(t)}{K}\right) \quad (13)$$

将麻雀位置更新结果代入到公式 (12) 和 (13) 中, 即可确定行星齿轮箱微弱振动信号特征分量的具体取值, 同理可以得出其他时频特征分量的提取结果。

2.5 实现行星齿轮箱微弱振动故障探测

采用提取行星齿轮箱微弱振动信号特征与设置振动故障探测标准相匹配的方式, 确定当前行星齿轮箱是否存在微弱振动故障并进一步确定故障类型^[17]。在故障类型识别过程中, 首先需要对提取的特征分量进行融合, 将融合结果标记为 τ_{con} , 则特征匹配度计算结果为:

$$\chi = \frac{\tau_{\text{con}} \cdot \tau_b}{\|\tau_{\text{con}}\| \cdot \|\tau_b\|} \quad (14)$$

将提取、融合的振动信号特征和设置的故障探测标准代入到公式 (14) 中, 即可得出特征匹配度的计算结果。若公式 (14) 的计算结果高于阈值 χ_0 , 则判定当前行星齿轮箱存在微弱振动故障, 选择匹配度取值最大值对应的故障

类型作为当前行星齿轮箱微弱振动故障类型的探测结果^[18]。除了故障状态和故障类型外, 还需要对其微弱振动故障量进行统计探测, 探测结果为:

$$N_{\text{fault}} = \sum n_m \quad (15)$$

其中: n_m 为判定为故障的微弱振动信号量。根据行星齿轮箱的实时运行情况, 对信号特征和振动信号量进行更新, 通过公式 (14) 和公式 (15) 的计算, 得出行星齿轮箱微弱振动故障的探测结果, 并将故障类型、故障频率和故障信号量等探测数据以可视化的形式输出。

3 实验与分析

为了验证优化设计基于最小二乘法和 SSA 算法的行星齿轮箱微弱振动故障探测方法的故障探测性能, 设计性能测试实验。此次实验的执行原理为: 选择任意型号的行星齿轮箱作为故障探测对象, 采用人工控制的方式设定选择行星齿轮箱对象的故障状态, 以此作为故障探测方法性能测试的比对标准。启动处于故障状态的行星齿轮箱, 生成微弱振动信号作为实验处理数据, 通过优化设计振动故障探测方法的开发与运行, 得出行星齿轮箱样本微弱振动故障的探测结果, 并与设定的故障状态进行比对, 得出反映探测性能的测试结果。

3.1 选择实验对象

此次实验选择型号为 NGW11 的单级行星齿轮箱作为研究对象, 主要由太阳轮、行星轮、齿圈和内齿圈等关键部件构成, 行星轮围绕太阳轮旋转, 同时齿圈也参与转动, 形成一个行星运动系统。这种结构特点使得 NGW11 单级行星齿轮箱具有较大的传动比和较高的承载能力。此外, NGW11 单级行星齿轮箱还具备优良的抗冲击和振动性能, 能够满足不同领域对动力传输的需求, 为各种机械设备提供稳定、可靠的动力支持。该行星齿轮箱的传动比为 12.23, 太阳轮、行星轮和齿圈的齿数分别为 13 个、64 个和 148 个, 行星轮个数为 3 个。为保证实验结果的可信度, 共准备 50 个行星齿轮箱, 且齿轮箱型号与内部组成结构均相同。

3.2 设定行星齿轮箱故障状态

采用人为控制的方式, 通过行星齿轮箱的重复运行将选择的齿轮箱调整至故障状态, 部分行星齿轮箱故障状态的设置情况如表 1 所示。

表 1 行星齿轮箱故障状态设定表

行星齿轮箱编号	故障类型	故障频率/Hz	故障信号量/MB
1	太阳轮故障	25.15	28.9
2	行星轮故障	4.86	29.4
3	齿轮故障	20.66	26.2
4	轴承故障	6.78	31.9
5	传动轴故障	15.28	37.6
6	啮合故障	21.44	35.5
7	太阳轮故障	23.51	34.2
8	行星轮故障	8.98	27.3

按照上述方式可以得出选择所有行星齿轮箱对象的故障状态设定结果, 并以此作为验证微弱振动故障探测性能的对比数据标准。

3.3 生成微弱振动信号样本

将准备的行星齿轮箱通过导线连接到供电电源上, 并将其切换至工作状态, 设置行星齿轮箱的工作频率为 25 Hz。设置微弱振动信号的采样频率为 5 120 Hz, 数据长度取 10 240 点。图 4 表示的是 1 号行星齿轮箱对象在某一工作时段微弱振动信号样本的生成结果。

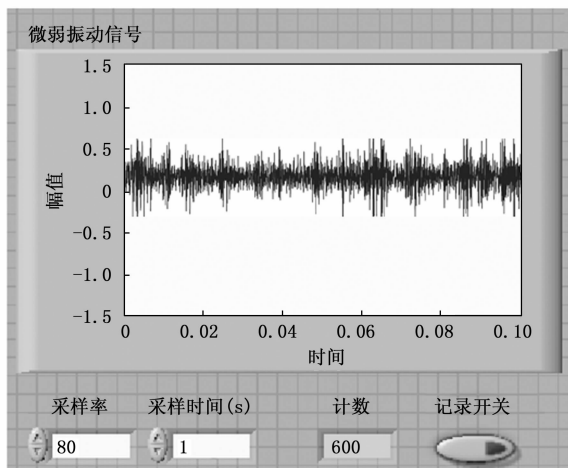


图 4 微弱振动信号波形图

行星齿轮箱微弱振动信号的生成与采集环境中存在噪声因素, 未特殊安装信号屏蔽装置, 最大程度的模拟行星齿轮箱的实际运行状态。重复上述操作, 得出所有行星齿轮箱样本在故障状态下微弱振动信号的生成结果。

3.4 探测性能测试实验过程分析

此次行星齿轮箱微弱振动故障探测性能测试实验在实验平台上执行, 实验平台由驱动电机、制动器、联轴器、底座、散热装置和传感器等部分组成, 图 5 为实验平台的工作实景。

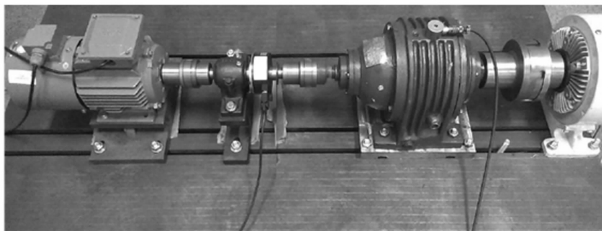


图 5 行星齿轮箱故障探测实景

实验平台中的驱动电机作为实验平台的动力源, 需满足实验所需的变速控制特性, 并能够长时间稳定运行。实验选用了 ABB 公司的高性能变频调速 QABP 系列电机。采用独立的散热结构, 保证了电机在低频率下的散热能力, 以及实验平台的高精度功率输出。根据实验室的电源情况, 确定了电机的功率为 1.5 kW, 同时, 为适应高速运行的需

要, 将电机的极数设为 2 极。最后选定 QABP-90S2A 型号电机, 2 865 rpm 的额定转速, 4.8 N·m 的额定转矩。对于制动器, 选择了磁粉制动器, 可以起到制动的作用, 具有响应快, 结构简单, 无污染, 无噪声等特点, 并可使制动力矩平稳。因此, 磁粉制动器被广泛地用于各种传动设备的负载与制动中。联轴器是连接轴的重要组成部分。在实验平台上安装了 608A11 型振动加速度传感器, 对实验进行了振动监测。该传感器沿壳体的垂直、水平和轴向排列, 并由各自的通道与数据收集器相连, 以便实时记录和分析振动数据。实验选择 MATLAB 软件作为开发工具, 完成行星齿轮箱微弱振动故障探测方法的开发, 并保证最小二乘法和 SSA 算法能够在实验环境中正常运行, 为保证 SSA 算法的正常运行, 需要对该算法的相关运行参数进行设置, 具体包括种群规模、迭代次数、探索因子、警戒阈值和警戒更新步长等, 其中种群规模主要指的是参与搜索的麻雀数量, 该参数设置为 100, 迭代次数和探索因子参数分别设置为 200 和 0.5, 警戒阈值和警戒更新步长参数分别设置为 15 和 3。将行星齿轮箱接入到微弱振动故障探测方法对应的运行程序中, 得出相应的故障探测结果。图 6 表示的是行星齿轮箱微弱振动故障探测方法的输出结果。

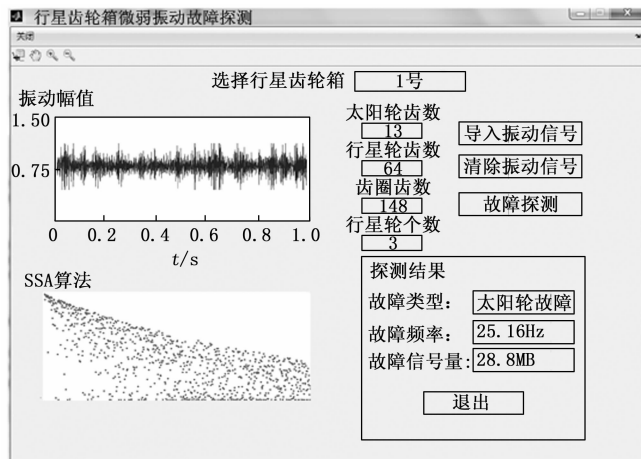


图 6 行星齿轮箱微弱振动故障探测结果

同理可以得出实验中准备所有行星齿轮箱微弱振动故障的探测结果。为体现出优化设计方法在故障探测性能方面的优势, 设置基于连续小波变换和无模型元学习的行星齿轮箱故障探测方法和基于变分模态分解的行星齿轮箱故障探测方法作为实验的对比方法, 在相同的实验环境下完成对比方法的开发, 并得出对应的故障探测结果。

3.5 设置探测性能量化测试指标

实验设置微弱振动信号探测信噪比和行星齿轮箱故障探测面积作为测试指标, 其中探测信噪比指标的计算公式为:

$$\zeta = \frac{P_{\text{weak}}}{P_{\text{noise}}} \quad (16)$$

式中, P_{weak} 和 P_{noise} 分别表示的是探测微弱振动信号功率以及探测结果中噪声信号功率。行星齿轮箱故障探测面积计

算公式为：

$$S_{\text{detection}} = \pi r_{\text{detection}}^2 \quad (17)$$

其中： $r_{\text{detection}}$ 为优化设计方法在行星齿轮箱上能够探测的最大半径值，在实验测试过程中测量探测中心与最远振动信号对应位置之间的距离，即可得出变量 $r_{\text{detection}}$ 的具体取值。最终计算得出微弱振动信号探测信噪比取值越低、行星齿轮箱故障探测面积取值越大，证明对应方法的探测性能越优。

3.6 探测性能测试实验结果与分析

通过相关数据的统计与公式 (16) 的计算，得出不同探测方法下微弱振动信号探测信噪比的测试对比结果，如图 7 所示。

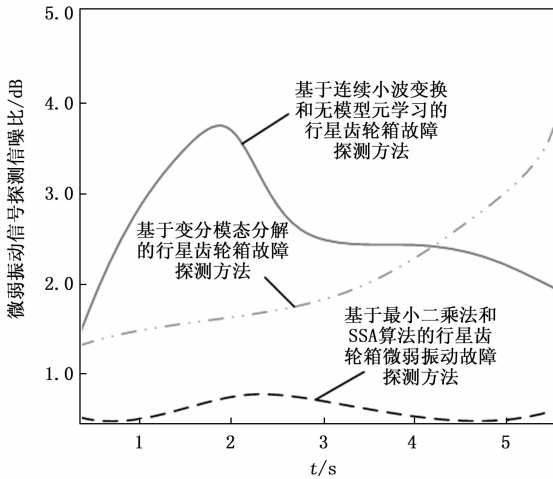


图 7 行星齿轮箱微弱振动故障信号探测信噪比对比曲线

从图 7 中可以直观看出，与两种传统故障探测方法相比，优化设计基于最小二乘法和 SSA 算法的行星齿轮箱微弱振动故障探测方法得出的微弱振动故障信号探测信噪比更低。另外，行星齿轮箱故障探测面积的测试结果，如表 2 所示。

表 2 行星齿轮箱故障探测面积测试数据表

行星齿轮箱编号	基于连续小波变换和无模型元学习的行星齿轮箱故障探测方法的最大探测半径/mm	基于变分模态分解的行星齿轮箱故障探测方法的最大探测半径/mm	基于最小二乘法和 SSA 算法的行星齿轮箱微弱振动故障探测方法的最大探测半径/mm	移除最小二乘法和 SSA 算法的最大探测半径/mm
1	8.3	11.2	14.5	9.5
2	10.5	12.4	13.8	10.2
3	11.7	13.1	16.6	11
4	11.2	14.5	18.2	12.5
5	12.1	13.8	17.9	11.8
6	10.7	12.1	15.4	10.7
7	15.1	16.6	18.3	12.9
8	13.9	15.4	19.0	13.3

将表 2 中的数据代入到公式 (17) 中，为方便计算， π 取值为 3，计算得出两种对比方法的平均故障探测面积分别为 421.35 mm² 和 566.49 mm²，移除最小二乘法和 SSA 算法的最大探测半径为 503.45 mm²，而优化设计方法得出故障探测面积的平均值为 847.86 mm²，表明该方法的探测性能更好。

4 结束语

行星齿轮箱微弱振动故障探测的目的在于及时发现并识别齿轮箱在初期阶段的微小故障，从而预防故障恶化，避免设备损坏和意外停机。其意义在于提高设备的运行可靠性、降低维护成本，并保障生产线的连续稳定运行。然而，微弱振动故障探测面临诸多难点，如故障信号微弱、易受噪声干扰、故障特征难以提取等。因此，开发高效、准确的微弱振动故障探测方法对于保障行星齿轮箱乃至整个机械系统的正常运行具有重要意义。在此次研究中，将最小二乘法与麻雀搜索算法相结合，实现行星齿轮箱微弱振动故障探测方法的优化，不仅有效提高了对微弱振动信号的识别精度，而且显著增强了算法在复杂工况下的鲁棒性。不仅为行星齿轮箱故障探测提供了新的解决思路，也为其他机械装备的振动故障分析提供了有益的参考。

参考文献：

- [1] 卢欣欣, 马骏, 张英聪. 基于连续小波变换和无模型元学习的小样本汽车行星齿轮箱故障诊断 [J]. 机械传动, 2022, 46 (9): 159-164.
- [2] 吴秋梅, 李强, 于艳. 基于变分模态分解的三级行星齿轮箱故障诊断 [J]. 机械设计与研究, 2022, 38 (2): 101-104.
- [3] CAO W, HAN Z, YANG Z Z, et al. Deterioration state diagnosis and wear evolution evaluation of planetary gearbox using vibration and wear debris analysis [J]. Measurement, 2022, 193: 110978.
- [4] SYED S H, MURALIDHARAN V. Feature extraction using discrete wavelet transform for fault classification of planetary gearbox-A comparative study [J]. Applied Acoustics, 2022, 188: 108572.
- [5] 刘晓悦, 张泽明, 赵立国, 等. 基于 CEEMDAN 样本熵和 SSA-ELM 的风机齿轮箱故障诊断 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022, (9): 126-130.
- [6] 樊家伟, 郭瑜, 伍星, 等. 含行星轮局部故障的行星齿轮箱振动仿真及实验研究 [J]. 振动工程学报, 2022, 35 (5): 1270-1277.
- [7] 许家才, 吕亮, 陆崇山, 等. 基于混合特征和 CFOA-GRNN 的行星齿轮箱故障诊断研究 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (6): 186-191.
- [8] 史志远, 滕虎, 马驰. 基于多信息融合和卷积神经网络的行星齿轮箱故障诊断 [J]. 工矿自动化, 2022, 48 (9): 56-62.

(下转第 71 页)