

# 航空发动机附件管路卡箍松动故障诊断方法

李全坤<sup>1,2</sup>, 武琛舒<sup>1,2</sup>, 黄宇灵<sup>1,2</sup>, 马瑞贤<sup>1,2</sup>, 王四季<sup>1,2</sup>, 丁小飞<sup>1,3</sup>

(1. 西北工业大学动力与能源学院, 陕西 西安 710129; 2. 轻型涡轮动力全国重点实验室, 北京 100190;  
3. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

**摘要:** 为有效识别和定位航空发动机附件管路中的卡箍松动等振动故障, 本文提出了基于附件管路动力学响应和传递函数的诊断方法。根据结构相近和动力学相似原则建立了故障附件管路的动力学模型和方程, 其中故障的影响通过作用于管路相应位置的附加非线性力模拟。通过结构动力学分析, 推导并确定了动力学响应与故障出现及其位置的对应关系, 提出了基于传递函数的故障诊断方法, 并归纳了方法的具体操作流程。通过试验测试案例验证了所提故障诊断方法的有效性和实用性。理论分析和测试结果表明, 所提故障诊断方法可以准确地识别和定位航空发动机中附件管路卡箍松动故障是否出现以及出现后的具体位置。同时, 该诊断方法适用于附件管路中单个卡箍松动故障以及多个卡箍松动故障的情况。

**关键词:** 航空发动机; 附件管路; 卡箍松动; 传递函数; 故障诊断

**中图分类号:** V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)06-1183-07

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.06.006

## Diagnosis of clamp loosening faults in aero engine accessory pipes

LI Quankun<sup>1,2</sup>, WU Chenshu<sup>1,2</sup>, HUANG Yuling<sup>1,2</sup>, MA Ruixian<sup>1,2</sup>, WANG Siji<sup>1,2</sup>, DING Xiaofei<sup>1,3</sup>

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;  
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Light-Duty Gas-Turbine, Beijing 100190, China;  
3. Shenyang Aero Engine Research Institute, Aero Engine Research Institute of China, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** To effectively detect and localize vibration faults such as clamp loosening in aero engine accessory pipes, this paper proposes a novel diagnosis method based on dynamic responses of accessory pipes and transmissibility functions. The dynamic model and equation of the faulty pipe are established based on the principle of structural similarity and dynamic similarity, where the impact of the fault is simulated as an additional nonlinear load acting on related position of the pipe. Through the analysis of structural dynamic characteristics, the relationship between dynamic responses and fault occurrence and location is derived and analyzed, a fault diagnosis method based on transmissibility function is then proposed, and the operating process of the method is summarized as well. The accuracy and practicality of the proposed fault diagnosis method are verified through multiple experimental examples. Theoretical analysis and testing results show that the diagnostic method proposed in this paper can accurately detect and localize the existence and position of the clamp loosening fault. Meanwhile, this diagnostic method is suitable for single and multiple clamp loosening faults in aero engine accessory pipes.

**Keywords:** aero engine; accessory pipe; clamp loosening; transmissibility function; fault diagnosis

作为航空发动机的重要组成部分, 附件管路主要用于空气、滑油和燃油等介质的输送, 因此被称为航空发动机的“心血管”。附件管路与管路之间以及管路与机匣之间的固定主要通过带垫卡箍实现。由于航空发动机在工作过程中不可避免地存在转子振动、流体脉动、振荡燃烧和热流循环等复杂载荷, 附件管路中卡箍松动等振动故障问题一直以来都十分突出和棘手<sup>[1-2]</sup>。

卡箍松动故障会诱发管路疲劳裂纹和断裂失

效, 严重破坏附件管路系统的完整性, 影响航空发动机整体结构的可靠性。因此, 对航空发动机附件管路中的卡箍松动故障进行及时识别和精准定位, 可在附件管路发生断裂失效之前消除安全隐患, 保障发动机的稳定运行。

考虑航空发动机附件管路的结构形式、振动特性和卡箍位置, 管路的动力学模型往往被简化为两端支承的梁状结构。因此, 管路中卡箍松动故障的诊断相应地转化为梁状结构中松动连接的辨识<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2025-04-30; 修订日期: 2025-06-11

基金项目: 陕西自然基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0561); 国家自然科学基金资助项目(52472456)

基于振动特性的松动故障诊断方法的主要原理是故障会改变结构的几何和物理属性,进而影响整个结构的振动特性。因此,通过分析结构振动特性的变化可反向判断故障是否产生(故障识别)和故障发生位置(故障定位)<sup>[4]</sup>。常见的振动特性主要包括结构的模态参数(固有频率和模态振型)、频响函数和传递函数。相比于其他振动特性,传递函数(结构不同位置输出频谱的比值)具有明显的优越性<sup>[5]</sup>。例如,传递函数只由输出响应计算得到,从而避免了复杂的结构模态分析和输入激励测量;传递函数消去了结构极点,只依赖于结构零点,对故障引起的结构局部参数变化更加敏感。

1994年,英国谢菲尔德大学的学者们结合传递函数和人工神经网络算法训练了线性松动故障的识别模型<sup>[6]</sup>。之后,基于传递函数的诊断方法开始得到广泛的关注和应用。ZHU等<sup>[7]</sup>研制了移动激励和测量系统,通过对数化的传递函数相对变化量估计了梁状结构中的松动故障。为减少计算量,ZHOU等<sup>[8]</sup>运用主成分分析提取了基于传递函数的特征量,通过距离相似性判别法诊断了网状钢架结构中螺栓的连接状态。除了傅里叶变换频谱,LUO等<sup>[9]</sup>还运用小波变换频谱定义传递函数,通过约束性最小二乘算法辨识了钢架结构中连接松动位置。JOHNSON等<sup>[10]</sup>通过模拟连接松动故障为含有三次刚度非线性的内部力,定义了非线性传递函数,并判断了梁状多自由度结构中松动的连接位置。为消除外部激励和噪声对故障识别因子灵敏度的干扰,LI等<sup>[11]</sup>利用输出响应加权系数放大了松动结构和健康结构之间非线性传递函数的差异。为避免非线性输出频率响应函数的分解和计算,ZHAO等<sup>[12]</sup>直接利用高阶非线性输出频谱定义传递函数,提出了可区分故障数量的诊断方法。为有效提高故障识别因子的灵敏度和定位因子的准确度,学者们开展了大量的研究工作。文献[13]中,基于二阶输出谱的传递函数被用来识别卫星结构中的螺栓松动故障。LI等<sup>[14]</sup>考虑并消除了结构中固有材料和边界非线性的影响,提高了卫星结构中多个螺栓松动故障的识别灵敏度。结合基于二阶输出谱的传递函数和局部调整法,LI等<sup>[15]</sup>提出了可准确识别一维环形结构中螺栓松动故障的局部故障指示因子,并且提供了更加详细的故障位置信息。考虑复杂结构中可能存在不同程度的故障,LI等<sup>[16]</sup>提出了可同时准确辨识轻微故障和严重故障的系统性方法。最近,学者们以复杂机械结构中基本的I-type和T-type子结构为对象,通过理论分析和试验测试提出了基于子结构非线性传递函数的故障诊断特征<sup>[17]</sup>。

上述基于传递函数的方法在诊断松动故障时大

多只考虑单频的载荷激励,结构动力学行为相对简单,振动特性分析相对容易。但是,实际航空发动机为多转子系统,每个转子系统具有不同的转速,对应不同的激励频率<sup>[3]</sup>。因此,附件管路通过接头和带垫卡箍与机匣相连,往往承受多频载荷激励,并且各个频率下激励幅值和相位不同。在多频载荷激励下,管路结构非线性振动机理更加复杂,输出响应成分更加丰富且相互耦合,这些都会间接影响现有方法应用于管路故障诊断的准确性和有效性。

因此,本文以航空发动机附件管路为研究对象,分析多频载荷下故障管路的非线性动力学特性,推导基于附件管路动力学响应和传递函数的诊断新方法,为航空发动机附件管路的断裂失效预警和结构优化设计提供技术支撑。

## 1 管路非线性动力学特性

根据航空发动机附件管路(见图1)的结构形式和振动特征,其力学模型往往被简化为考虑两端支承的梁状结构,管路故障的诊断相应地转化为梁状结构中松动故障的识别<sup>[3]</sup>。



图1 航空发动机附件管路

Fig. 1 Aero engine accessory pipe

### 1.1 动力学模型和方程

如图2所示,航空发动机附件管路结构可被简化为包含多个质量-阻尼-弹簧单元的多自由度动力学模型<sup>[3]</sup>。结构两端同样为阻尼-弹簧单元,以模拟管路和航空发动机机匣的连接边界条件。假设所有的质量点具有水平方向振动,位移用坐标 $x_i (1 \leq i \leq n)$ 表示,单个多频激振力 $u_n(t)$ 作用于结构右端质量点,以模拟管路所受到的载荷。图2中, $m_i$ 、 $c_i$ 和 $k_i$ 分别为第 $i$ 个质量系数、阻尼系数和刚度系数。

运用拉格朗日方程法<sup>[16]</sup>,图1中模型的动力学方程可表示为:

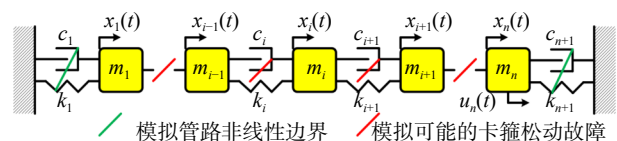


图2 多自由度动力学模型

Fig. 2 Multi-degree-of-freedom dynamic model

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_n \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_i(t) + \\
 & \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \cdots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & c_n + c_{n+1} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_i(t) + \\
 & \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & k_n + k_{n+1} \end{bmatrix} \mathbf{x}_i(t) = \\
 & \mathbf{u}_i(t) + \mathbf{l}_i(t), \quad 1 \leq i \leq n \quad (1)
 \end{aligned}$$

或者:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_i(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_i(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{u}_i(t) + \mathbf{l}_i(t), \quad 1 \leq i \leq n \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵;  $\ddot{\mathbf{x}}_i(t)$ 、 $\dot{\mathbf{x}}_i(t)$ 和 $\mathbf{x}_i(t)$ 分别为结构的加速度、速度和位移向量;  $\mathbf{u}_i(t)$ 和 $\mathbf{l}_i(t)$ 分别为结构的输入激励和故障所引起的非线性力向量。

由于结构输入激励只作用于右端质量点, 所以输入激励向量 $\mathbf{u}_i(t)$ 中, 只有元素 $u_n(t)$ 的值不为零, 其余项均为零。同时, 由于假设卡箍松动故障存在于结构中, 非线性力向量 $\mathbf{l}_i(t)$ 中部分元素的值可能不为零, 其余项为零。另外, 卡箍松动故障通常对结构的阻尼和刚度影响较大, 非线性力向量 $\mathbf{l}_i(t)$ 中元素一般可以表示为对应速度和位移的多项式函数<sup>[16]</sup>:

$$\begin{aligned}
 l_i(t) = & - \sum_{g=2}^G [nc_{i,g}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})^g + nk_{i,g}(x_i - x_{i-1})^g] - \\
 & \sum_{g=2}^G [nc_{i+1,g}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})^g + nk_{i+1,g}(x_i - x_{i+1})^g], \\
 & 1 \leq i \leq n \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中,  $G$ 为非线性项的最大阶次;  $nc_{i,g}$ 、 $nc_{i+1,g}$ 和 $nk_{i,g}$ 、 $nk_{i+1,g}$ 分别为故障引起的非线性阻尼和刚度系数。

式(3)中非线性力 $l_i(t)$ 可以模拟绝大多数故障对管路结构阻尼和刚度的影响。当某个质量点附近无故障存在时, 对应的非线性阻尼和刚度系数为零, 非线性力 $l_i(t)$ 自然也为零。

## 1.2 输出频谱和非线性传递函数

在航空发动机中, 高低压转子系统具有不同的转速, 对应不同频率的不平衡简谐激励<sup>[3]</sup>。因此, 假设机匣上管路所受到的多频输入激励为:

$$\begin{aligned}
 u(t) = & \sum_{v=1}^2 A_v \cos(\omega_v t + \varphi_v); \\
 & A_1 \neq A_2, \quad \omega_2 = 2\omega_1, \quad \varphi_1 \neq \varphi_2 \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中,  $A_v$ 、 $\omega_v$ 和 $\varphi_v$ 分别为第 $v$ 个输入激励的幅值、角频率和相位。

将式(4)代入式(2)并做傅里叶变换, 相应的频域动力学方程可表示为:

$$\begin{aligned}
 & (-\Omega^2 \mathbf{M} + j\Omega \mathbf{C} + \mathbf{K}) \mathbf{X}_i(j\Omega) = \\
 & \begin{cases} \mathbf{U}_i(j\Omega) + \mathbf{L}_i(j\Omega); & a=0, b=1; a=1, b=0 \\ \mathbf{L}_i(j\Omega); & \text{其他} \end{cases}; \\
 & \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中,  $\Omega$ 为角频率;  $\mathbf{X}_i(j\Omega)$ 为输出频谱向量;  $\mathbf{U}_i(j\Omega)$ 为频域输入激励向量;  $\mathbf{L}_i(j\Omega)$ 为频域故障所引起的非线性力向量;  $a$ 和 $b$ 为频率系数, 值为零或正整数。

定义频响函数矩阵 $\mathbf{H}(j\Omega)$ 为系数矩阵 $\mathbf{A}(j\Omega)$ 的逆矩阵:

$$\mathbf{H}(j\Omega) = \mathbf{A}^{-1}(j\Omega) = (-\Omega^2 \mathbf{M} + j\Omega \mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} \quad (6)$$

因此, 输出频谱可由式(4)和(5)计算得到:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{X}_i(j\Omega) = \\
 & \mathbf{H}(j\Omega) \begin{cases} \mathbf{U}_i(j\Omega) + \mathbf{L}_i(j\Omega); & a=0, b=1; a=1, b=0 \\ \mathbf{L}_i(j\Omega); & \text{其他} \end{cases}; \\
 & \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \quad (7)
 \end{aligned}$$

式(7)表明, 结构输出频谱是结构线性参数(质量、阻尼和刚度系数)、输入载荷和故障引起的非线性力的函数。如果结构处于健康状态, 非线性力向量为零, 结构只存在线性的输出频谱。如果结构处于故障状态, 非线性力向量使得结构产生非线性输出频谱(高倍频的输出频谱)。因此, 应用不同质量点位置的非线性输出频谱, 非线性传递函数可定义为<sup>[16]</sup>:

$$T_{s,h}(j\Omega) = \frac{X_s(j\Omega)}{X_h(j\Omega)}; \quad 1 \leq s, h \leq n, \quad \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \quad (8)$$

式中,  $X_s$ 为质量点 $ms$ 处的输出频谱;  $X_h$ 为质量点 $mh$ 处的输出频谱。

## 2 基于传递函数的诊断方法

如图3所示, 仅考虑图2中与松动故障位置相关的子模型, 其非线性动力学方程可从式(5)中提取并表示为:

$$\begin{aligned}
 & [-\Omega^2 m_i + j\Omega(c_i + c_{i+1}) + (k_i + k_{i+1})] \mathbf{X}_i(j\Omega) - \\
 & (j\Omega c_i + k_i) \mathbf{X}_{i-1}(j\Omega) - (j\Omega c_{i+1} + k_{i+1}) \mathbf{X}_{i+1}(j\Omega) = \mathbf{L}_i(j\Omega); \\
 & 2 \leq i \leq n-1, \quad \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \quad (9)
 \end{aligned}$$

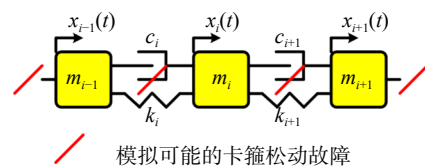


图3 多自由度动力学子模型

Fig. 3 Multi-degree-of-freedom dynamic sub-model

结合式(8)中传递函数的定义, 式(9)可进一步改写为:

$$\begin{aligned} & \left[ -\Omega^2 m_i + j\Omega(c_i + c_{i+1}) + (k_i + k_{i+1}) \right] - \\ & (j\Omega c_i + k_i) \frac{X_{i-1}(j\Omega)}{X_i(j\Omega)} - (j\Omega c_{i+1} + k_{i+1}) \frac{X_{i+1}(j\Omega)}{X_i(j\Omega)} = \frac{L_i(j\Omega)}{X_i(j\Omega)}; \\ & 2 \leq i \leq n-1, \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \end{aligned} \quad (10a)$$

或者:

$$\begin{aligned} & \left[ -\Omega^2 m_i + j\Omega(c_i + c_{i+1}) + (k_i + k_{i+1}) \right] - \\ & (j\Omega c_i + k_i) T_{i-1,i}(j\Omega) - (j\Omega c_{i+1} + k_{i+1}) T_{i+1,i}(j\Omega) = \frac{L_i(j\Omega)}{X_i(j\Omega)}; \\ & 2 \leq i \leq n-1, \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \end{aligned} \quad (10b)$$

式中,  $T_{i-1,i}(j\Omega)$  和  $T_{i+1,i}(j\Omega)$  为传递函数。因为只考虑结构非线性输出响应, 式(10)中只包含松动故障相关的非线性力向量  $L_i(j\Omega)$ 。现改变式(4)中输入激励的幅值和相位:

$$u(t) = \sum_{v=1}^2 B_v \cos(\omega_v t + \varphi_v); \quad B_1 \neq B_2, \quad \omega_2 = 2\omega_1, \quad \varphi_1 \neq \varphi_2 \quad (11)$$

结构的振动响应将发生变化, 可得到与式(10b)相似的方程为:

$$\begin{aligned} & \left[ -\Omega^2 m_i + j\Omega(c_i + c_{i+1}) + (k_i + k_{i+1}) \right] - \\ & (j\Omega c_i + k_i) T_{i-1,i}^B(j\Omega) - (j\Omega c_{i+1} + k_{i+1}) T_{i+1,i}^B(j\Omega) = \frac{L_i^B(j\Omega)}{X_i^B(j\Omega)}; \\ & 2 \leq i \leq n-1, \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \end{aligned} \quad (12)$$

式中, 上标“B”表示第二次输入激励。

对比分析式(10)和(12)发现, 结构的线性参数(质量、阻尼和刚度系数)保持不变, 但故障引起的非线性力、传递函数和输出频谱发生了变化。通过式(10)减去式(12), 可得:

$$\begin{aligned} & - (j\Omega c_i + k_i) \left[ T_{i-1,i}(j\Omega) - T_{i-1,i}^B(j\Omega) \right] - \\ & (j\Omega c_{i+1} + k_{i+1}) \left[ T_{i+1,i}(j\Omega) - T_{i+1,i}^B(j\Omega) \right] = \left[ \frac{L_i(j\Omega)}{X_i(j\Omega)} - \frac{L_i^B(j\Omega)}{X_i^B(j\Omega)} \right]; \\ & 2 \leq i \leq n-1, \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \end{aligned} \quad (13)$$

通过式(13), 新的故障特征量  $\beta_i(j\Omega)$  可以定义为:

$$\begin{aligned} \beta_i(j\Omega) &= \frac{\frac{L_i(j\Omega)}{X_i(j\Omega)} - \frac{L_i^B(j\Omega)}{X_i^B(j\Omega)}}{\left[ T_{i+1,i}(j\Omega) - T_{i+1,i}^B(j\Omega) \right] - (j\Omega c_i + k_i)} \\ &= \frac{(j\Omega c_{i+1} + k_{i+1}) \left[ T_{i-1,i}(j\Omega) - T_{i-1,i}^B(j\Omega) \right]}{(j\Omega c_i + k_i) \left[ T_{i+1,i}(j\Omega) - T_{i+1,i}^B(j\Omega) \right]}; \\ & 2 \leq i \leq n-1, \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \end{aligned} \quad (14)$$

如果结构处于健康状态(无松动故障), 非线性力向量 ( $L_i(j\Omega)$  和  $L_i^B(j\Omega)$ ) 为零, 式(14)变为:

$$\begin{aligned} \beta_i^r(j\Omega) &= - \frac{j\Omega c_{i+1} + k_{i+1}}{j\Omega c_i + k_i}; \\ & 2 \leq i \leq n-1, \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \end{aligned} \quad (15)$$

式中, 上标“r”表示健康结构。

如果结构处于故障状态(有松动故障), 非线性力向量 ( $L_i(j\Omega)$  和  $L_i^B(j\Omega)$ ) 不为零, 式(14)变为:

$$\begin{aligned} \beta_i^d(j\Omega) &= \frac{\frac{L_i(j\Omega)}{X_i(j\Omega)} - \frac{L_i^B(j\Omega)}{X_i^B(j\Omega)}}{\left[ T_{i+1,i}(j\Omega) - T_{i+1,i}^B(j\Omega) \right] - (j\Omega c_i + k_i)} - \frac{j\Omega c_{i+1} + k_{i+1}}{j\Omega c_i + k_i}; \\ & 2 \leq i \leq n-1, \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \end{aligned} \quad (16)$$

式中, 上标“d”表示故障结构。

对比分析式(15)和(16)发现, 故障结构中特征量明显不同于健康结构中特征量。因此, 新的故障诊断因子  $\zeta_i(j\Omega)$  可以定义为相应故障特征量的相对变化量:

$$\begin{aligned} \zeta_i(j\Omega) &= \left| \frac{\beta_i^d(j\Omega) - \beta_i^r(j\Omega)}{\beta_i^r(j\Omega)} \right| \times 100; \\ & 2 \leq i \leq n-1, \Omega = a\omega_1 + b\omega_2 \end{aligned} \quad (17)$$

对于实际的附件管路结构, 由于固有非线性或数据误差的影响, 非线性力的值在结构处于健康状态(无松动故障)时可能不会为零, 而是趋近于零的小量。因此, 将结构处于健康状态(无松动故障)对应的故障诊断因子作为参考值。如果某次测量和计算得出的新故障诊断因子值为趋近于零或相对较小的量, 说明此时结构处于健康状态。与之相反, 如果新故障诊断因子值明显偏大, 说明此时结构处于故障状态。

另外, 从式(14)中同样可以看出, 相应的特征量可由传递函数计算得出。因此, 式(17)中的故障诊断因子只依赖于测试数据, 这在实际故障诊断过程中非常方便。特征量推导过程中的重要参数如表1所示。

表 1 重要参数

Tab. 1 Key parameters

参数	含义	参数	含义
$M$	质量矩阵	$T_{s,h}(j\Omega)$	传递函数
$C$	阻尼矩阵	$\Omega$	转速/角频率
$K$	刚度矩阵	$\beta_i^r(j\Omega)$	参考特征
$\ddot{x}_i(t)$	时域加速度向量	$\beta_i^d(j\Omega)$	诊断特征
$\dot{x}_i(t)$	时域速度向量	$\zeta_i(j\Omega)$	诊断因子
$x_i(t)$	时域位移向量	$X_i(j\Omega)$	输出频谱
$u_i(t)$	时域激励向量	$U_i(j\Omega)$	频域激励向量
$l_i(t)$	时域故障向量	$L_i(j\Omega)$	频域故障向量

根据故障诊断的一般流程<sup>[3]</sup>, 本文提出的基于传递函数的诊断方法的操作流程如图4所示。

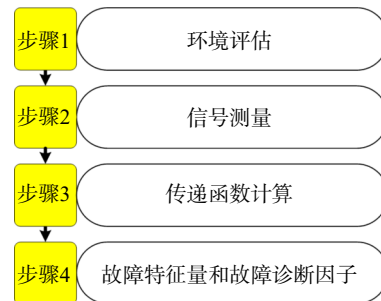


图 4 诊断方法的操作流程

Fig. 4 Operational process of the diagnosis method

由图4可知, 方法主要包括4个步骤。在步骤1

中, 确定好待测量的附件管路和卡箍位置后安装振动传感器和激振器。在步骤 2 中, 采集传感器振动信号。在这个步骤中, 结构需要被不同幅值和相位的激振力激励两次。在步骤 3 中, 通过预处理和后处理计算两次激励试验的输出频谱和对应的传递函数。在步骤 4 中, 计算相应的故障特征量和故障诊断因子, 并通过其数值判断故障出现的具体情况和位置。

### 3 试验测试案例

本节通过多个试验测试案例验证所提故障诊断方法的准确性和有效性。

#### 3.1 测试对象和试验设置

参考文献 [17] 中梁状结构、测试对象和试验设置介绍如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 两端简支梁状结构由钢条和螺栓连接而成, 螺栓连接状态模拟管路中卡箍松动故障。共有 5 个质量点分别用于安装加速度传感器。激振力由模态激振器提供并作用于最右端质量点。梁两端分别连接于固定的试验台, 模拟管路两端的边界条件。测试过程中所使用的加速度传感器、信号发生器、功率放大器和模态激振器的具体参数取值如表 2 所示。

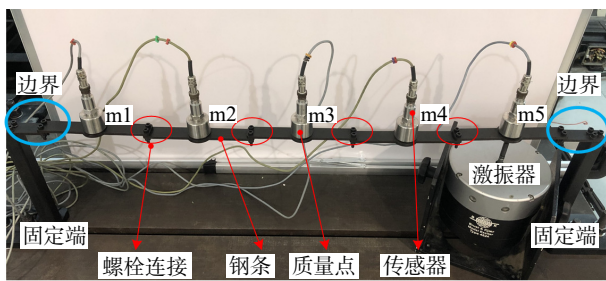


图 5 螺栓连接梁状结构

Fig. 5 Beam-like structure with bolted connections

表 2 测试设备参数

Tab. 2 Parameters of test equipments

设备	参数	取值
加速度传感器	测量范围/g	±40
	共振频率/kHz	35±3
	灵敏度/(mV·g <sup>-1</sup> )	100
信号发生器	采样率/(MSa·s <sup>-1</sup> )	500
	最大频率/MHz	100
功率放大器	频率范围/kHz	DC-150
	最大电压增益/dB	17
模态激振器	频率范围/Hz	DC-5000
	最大载荷/N	100

卡箍松动故障主要通过拧松梁状结构中钢条连接处的螺栓来模拟, 对应的螺栓拧紧力矩从大约 3 N·m 下降到大约 1 N·m。总共考虑 3 组试验案例, 具体的案例设置如图 6 所示。在案例 1 中, 梁状结构处于健康状态, 不存在卡箍松动故障, 对应的故障特征量会作为参考值; 在案例 2 中, 梁状结构处于故障状态, 单个卡箍松动故障位于梁状结构中质量点 m1 和 m2 之间; 在案例 3 中, 梁状结构同样处于故障状态, 一个卡箍松动故障位于梁状结构中质量点 m1 和 m2 之间, 另外一个卡箍松动故障位于梁状结构中质量点 m4 和 m5 之间。

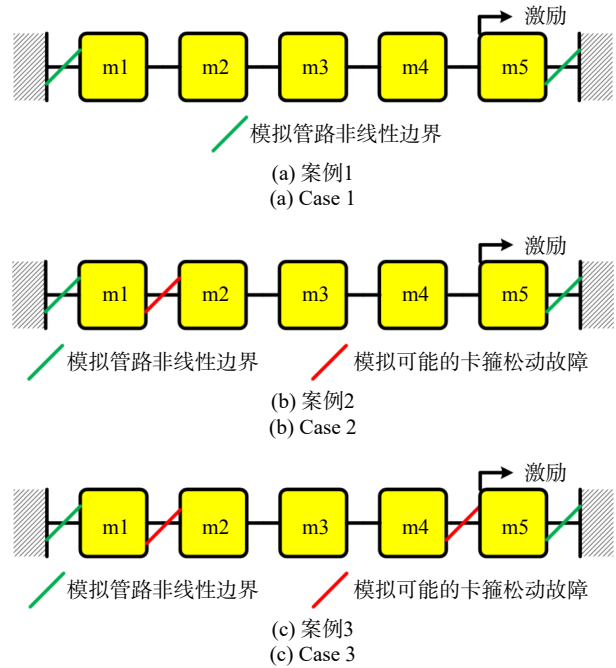


图 6 仿真案例设置

Fig. 6 Setup of simulation cases

#### 3.2 数据采集和结果分析

在测试过程中, 原始时域振动信号的采样频率和采样时间分别为 8192 Hz 和 14 s。平均后的数据通过软件中傅里叶变换算法转化为频域数据以计算传递函数、故障特征量和故障诊断因子。

试验中, 结构需要被激励两次, 每次使用的余弦输入激励的频率相同 ( $\omega_2 = 2\omega_1 = 32$  Hz), 但幅值和相位不同, 分别对应式 (4) 和 (11)。输入激励具体的幅值和相位如表 3 所示。

表 3 输入激励参数

Tab. 3 Parameters of input excitation

激励	幅值1/V	相位1/(rad·s <sup>-1</sup> )	幅值2/V	相位2/(rad·s <sup>-1</sup> )
1	5.98	2.54	0.63	2.75
2	9.97	-1.51	2.0884	-1.48

以案例 1 中激励 1 和质量点 m1 的输出响应为例, 对应的时域和频域数据如图 7 所示。

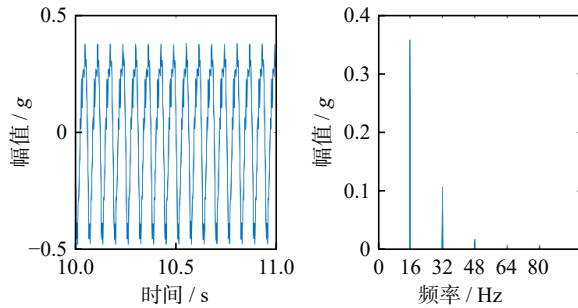


图7 案例1中质量点m1在激励1下的输出响应

Fig. 7 Output responses of mass point m1 under the excitation 1 in case 1

从图7中可以看出,输出响应除了在激励频率(16和32 Hz)处具有明显峰值外,在其他高倍频(48、64和80 Hz)处也具有明显的峰值。这个结果说明,结构即使处于健康状态(无松动故障),结构中的非线性边界条件也使得结构处于非线性状态。

按照图4所示的故障诊断方法操作流程,测试案例的结果如表4和图8所示。因为案例1中特征量将作为参考值,所以图8只呈现案例2和3的故障诊断结果。

表4 故障诊断特征和因子

Tab. 4 Features and factors of fault diagnosis

案例	特征	质量点m2	质量点m3	质量点m4
1	参考特征	1.9615	5.3917	8.7926
2	故障特征	3.3079	5.6931	8.8833
	诊断因子	68.64%	5.59%	1.03%
3	故障特征	2.6324	5.2248	9.8477
	诊断因子	34.20%	3.10%	11.99%

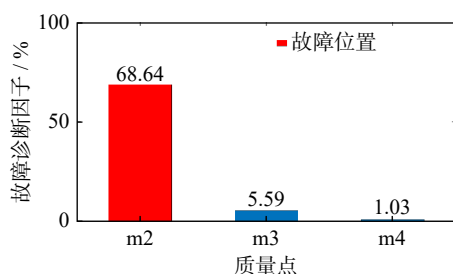
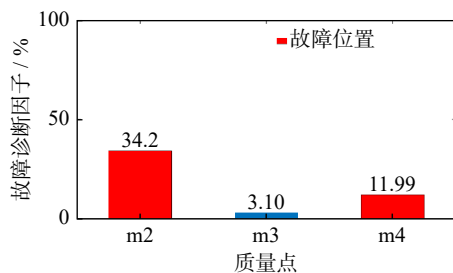
(a) 案例2  
(a) Case 2(b) 案例3  
(b) Case 3

图8 试验诊断结果

Fig. 8 Test diagnosis results

在案例2中,诊断因子在质量点m2处取得相对较大值,而在质量点m3和m4处都取得趋近于零的小量,说明案例2中松动故障最可能位于质量点m2附近,其他位置无故障。在案例3中,诊断因子在质量点m2和质量点m4处取得相对较大值,只在质量点m3处取得趋近于零的小量,说明案例3中松动故障可能同时位于质量点m2和m4附近,而质量点m3附近无故障。

对比诊断结果和图6中的案例设置情况后发现,所提诊断方法准确地识别和定位了管路结构中的单个松动故障和多个松动故障。因此,试验测试案例充分地验证了本文所提诊断方法的正确性和有效性。

## 4 结论

为有效诊断航空发动机附件管路中的卡箍松动故障,本文提出了基于附件管路动力学响应和传递函数的诊断方法。主要结论和展望总结如下:

(1) 通过将故障的影响模拟为作用于管路边界位置的附加非线性力,可建立故障管路的简化动力学模型和方程。

(2) 通过两次激励,可得到两个基于传递函数的故障特征量,其相对值可作为判断故障是否出现以及故障位置的诊断因子。

(3) 三个测试案例的结果表明,所提诊断方法可以有效诊断航空发动机附件管路中单个卡箍松动故障和多个卡箍松动故障情况。

(4) 本文为航空发动机附件管路的断裂失效预警和结构优化设计提供了一定程度的技术支持。在后续研究中,如何扩展本方法并用于其他更复杂的附件管路(L型或U型)还有待进一步探索。另外,本文所提方法以局部结构为对象,每个子模型需要三个传感器。对于实际结构存在多个子模型的情况,需要的传感器数量较多,增加了测试成本和工作量。在后续研究中,如何优化传感器的布局 and 数量以简化测试过程也还需进一步考虑。

## 参考文献:

- [1] 林君哲, 周恩涛, 杜林森, 等. 航空发动机管路系统振动机理及故障诊断研究综述[J]. 机床与液压, 2013, 41(1): 163-164.  
LIN Junzhe, ZHOU Entao, DU Linsen, et al. Literature review on vibration mechanism and fault diagnosis of the pipe system of aero-engine[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2013, 41(1): 163-164.

- [2] 肖伟, 高永丹, 欧阳飞, 等. 发动机滑油管卡箍衬垫故障分析[J]. 失效分析与预防, 2012, 7(4): 248-252.  
XIAO Wei, GAO Yongdan, OUYANG Fei, et al. Failure analysis of clamp of bending tube in engine[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(4): 248-252.
- [3] 付才高. 航空发动机设计手册. 第19册: 转子动力学及整机振动[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.  
FU Caigao. Aeroengine Design Manual. Volume 19: Rotor Dynamics and Whole Machine Vibration[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.
- [4] CHESNÉ S, DERAEMAERKER A. Damage localization using transmissibility functions: a critical review[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 38(2): 569-584.
- [5] YAN W J, ZHAO M Y, SUN Q, et al. Transmissibility-based system identification for structural health monitoring: fundamentals, approaches, and applications[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117: 453-482.
- [6] CHEN Q, CHAN Y W, WORDEN K, et al. Structural fault detection using neural networks trained on transmissibility functions[C]//Presented at the proceedings of the International Conference on Vibration Engineering. Beijing: IEEE, 1994: 456-646.
- [7] ZHU D P, YI X H, WANG Y. A local excitation and measurement approach for decentralized damage detection using transmissibility functions[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, 23(3): 487-502.
- [8] ZHOU Y L, MAIA N M, ABDEL WAHAB M. Damage detection using transmissibility compressed by principal component analysis enhanced with distance measure[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2018, 24(10): 2001-2019.
- [9] LUO J, LIU G, HUANG Z M. Damage detection for shear structures based on wavelet spectral transmissibility matrices under nonstationary stochastic excitation[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24(1): e1862.
- [10] JOHNSON T J, ADAMS D E. Transmissibility as a differential indicator of structural damage[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2002, 124(4): 634-641.
- [11] LI X Z, PENG Z K, DONG X J, et al. A new transmissibility-based indicator of local variation in structure and its application for damage detection[J]. *Shock and Vibration*, 2015, 2015(1): 850286.
- [12] ZHAO X Y, LANG Z Q, PARK G, et al. A new transmissibility analysis method for detection and location of damage via nonlinear features in MDOF structural systems[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(4): 1933-1947.
- [13] LI Q K, JING X J. A second-order output spectrum approach for fault detection of bolt loosening in a satellite-like structure with a sensor chain[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 89(1): 587-606.
- [14] LI Q K, JING X J. Fault diagnosis of bolt loosening in structures with a novel second-order output spectrum-based method[J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19(1): 123-141.
- [15] LI Q K, JING X J, GUO Y Q. The second-order output spectrum-based method for fault localization in ring type structures[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 98(3): 1935-1955.
- [16] LI Q K, JING X J. A systematic second-order output spectrum-based method for fault diagnosis with a local tuning approach[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 475: 115283.
- [17] LI Q K, WANG R, LIAO M F, et al. A novel frequency domain feature-based approach for diagnosis of failure faults in complex structures with interconnected joints[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 173: 109064.

第一作者:李全坤(1988—),男,博士,副教授。

E-mail: quankun\_li@nwpu.edu.cn

通信作者:丁小飞(1987—),男,博士,研究员。

E-mail: dingxiaofei00@163.com