

采用非线性频谱的重载工业机器人故障机理分析

陈乐瑞, 曹建福, 胡河宇

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对重载机器人故障机理分析问题, 利用非线性频谱分析重载机器人系统故障特性。考虑重载机器人系统中存在的柔性关节, 在重载机器人刚柔耦合动力学模型基础上, 利用递推法建立重载机器人关节的前4阶基于输出频率响应函数的非线性输出频率响应函数(NOFRF)频谱计算模型, 得到不同疲劳故障程度下的NOFRF频谱; 利用NOFRF频谱对关节发生机械疲劳时高次谐波成分和亚共振现象进行分析解释, 并进行了故障诊断实验。结果表明: NOFRF频谱对关节疲劳故障很敏感, 能够较好地解释重载机器人因关节机械疲劳故障产生抖动现象的机理; 与利用系统输出频域和时频域信号进行故障诊断的方法相比, 所提采用NOFRF频谱作为故障特征的方法在重载机器人的诊断准确率分别提高了19.38%和6.88%, 达到了93.13%。

关键词: 重载机器人; 非线性输出频率响应函数; 机理分析; 故障诊断

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202105011 **文章编号:** 0253-987X(2021)05-0092-10



OSID 码

Fault Mechanism Analysis for Heavy-Load Industrial Robot with Nonlinear Spectrum

CHEN Lerui, CAO Jianfu, HU Heyu

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this approach, a novel fault mechanism analysis method based on nonlinear spectrum is proposed for heavy-load industrial robot. In view of high speed and large load of the heavy-load industrial robot, a rigid-flexible coupling dynamics model of the heavy-load robot is established considering the joint flexibility in the system, where one of the joints is selected to construct the first 4-order nonlinear output frequency response functions (NOFRF) spectrum model of the system by recursive method, and the fatigue fault of the robot joint is taken as an example to obtain the NOFRF spectrum with different fault levels. The NOFRF spectrum is adopted to analyze and explain the high-order harmonic components and sub-resonance phenomena when fatigue fault occurs in the robot joint, and a fault diagnosis test is also carried out. The results indicate that NOFRF spectrum is very sensitive to robot joint fatigue fault, which can explain the mechanism of heavy-load robot jitter phenomenon caused by joint fatigue. Compared with the fault diagnosis methods based on system output in frequency domain and time-frequency domain signals, the accuracy of fault diagnosis using NOFRF spectrum as fault feature achieves 93.13% with the improvements of 19.38% and 6.88%, respectively.

收稿日期: 2020-12-28。 作者简介: 陈乐瑞(1985—), 男, 博士生; 曹建福(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1306901); 陕西省重点科技项目(2019ZDLGY01-01-02); 佛山市科技项目(2016AG101813)。

网络出版时间: 2021-02-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210201.2006.004.html>

Keywords: heavy-load industrial robot; nonlinear output frequency response functions; mechanism analysis; fault diagnosis

重载机器人一般是指末端有效负载在 100 kg 以上、负载自重比在 1:2~1:8 之间的工业机器人^[1],该类机器人系统具有负载能力大、重复精度高和运行速度快等优点,在智能制造、抢险救灾和建筑施工等生产过程中发挥着重要作用。该类机器人长时间在重载工况下连续运行,关节很容易因机械疲劳故障产生抖动的症状,再加上系统具有非线性、时变性和耦合性等特点,如何实现重载作业机器人故障的快速、准确诊断成为了当前机器人研究的热点问题之一^[2]。从控制角度看,机器人是非线性闭环系统,故障发生时呈现强烈非线性特性变化。为了能对故障进行准确诊断,对系统故障机理进行分析非常必要。

目前,有关重载机器人的研究主要侧重于系统结构设计^[3-4]、动力学特性分析^[5-6]和动态控制^[7-8]等方面。有关重载机器人故障诊断研究比较少。文献[9]建立重载机器人功率消耗模型,通过监测系统功耗来实现机器人故障诊断;文献[10-11]将工业机器人在不同工况下的振动信号作为故障分析的原始数据,结合相应的分类器完成了系统故障诊断;文献[12]提出基于声发射信号的机器人用 RV 减速器故障监测方法,通过提取系统故障时声发射信号故障特,获得 RV 减速器不同故障的声发射信号变化规律。这些研究是通过采集机器人发生故障时的某种类型信号,并以此作为故障特征加以提取,然后结合相应分类器实现故障类型输出。虽然能够对机器人系统进行故障诊断,但是所选择的故障信号都是单一输出信号,并没有考虑工业机器人内部存在的强烈非线性耦合关系,忽略了系统的非线性特性对故障诊断结果的影响,可能导致不同故障之间特征差异不明显。针对这方面的缺陷,文献[13]充分考虑工业机器人减速器内部的非线性特性,利用基于输出频率响应函数的非线性频谱提取系统的故障特征,通过设计 SVM 分类器实现系统故障诊断。与传统基于输出信号的故障诊断方法相比,该方法得到的故障特征区分度明显,诊断效果有很大提升,但是该研究是基于数据驱动的,有关故障参数与非线性频谱之间映射规律等机理问题有待进一步深入研究。

频域法具有计算简单、物理意义直观等明显优势,频域诊断方法一直受到国际上的高度关注。基于 Volterra 级数的非线性频谱可以很好地描述非

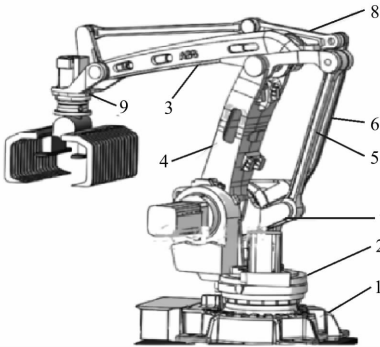
线性系统特性,这种方法在非线性的系统的频谱特性分析及诊断方面已显示出优势。理论和实验表明,系统状态模式发生变化会引起非线性频谱特性的变化^[14-16],因此可用非线性频谱特性进行复杂系统故障机理分析。到目前为止,以基于广义频率响应函数(GFRF)和基于非线性输出频谱响应函数(NOFRF)为代表的非线性频谱研究逐渐被广泛应用故障诊断领域。文献[17]将 GFRF 频谱作为故障特征,实现了机器人驱动系统的故障诊断;文献[18]和[19]分别采用 NOFRF 频谱对工业机器人驱动系统和液压制动器系统故障特征进行提取,以此实现系统故障诊断。在这两种频谱模型中,由于 NOFRF 频谱模型简单,计算量小,被广泛应用于非线性频谱研究中。

有鉴于此,本文在重载机器人刚柔耦合数学模型基础上,采用非线性频谱递推法推导出了系统前 4 阶 NOFRF 频谱模型。针对系统运行过程中出现的关节疲劳故障,利用获取到的 NOFRF 频谱对不同状态下的故障参数与非线性频谱之间的映射关系和频谱变化规律进行分析,解释了重载机器人抖动症状发生的机理。故障诊断实验验证了非线性频谱表征系统故障信息的有效性。

1 重载机器人结构及动力学模型

1.1 重载机器人结构组成

重载机器人是一种全新连杆式机器人,其结构主要包括底座、回转轴、曲柄连杆、平行连杆、大臂、小臂、辅助臂和末端执行器等,具体结构见图 1。以



1—固定底盘;2—回转支架;3—小臂;4—大臂;5—平行连杆;
6—驱动连杆;7—曲柄连杆;8—三角臂;9—末端支架。

图 1 重载机器人结构

Fig. 1 The structure of heavy-load robot

ABB-IRB 型号重载机器人为例,该机器人本体结构采用多组平行四边形结构。其中:大臂、平行连杆、回转支架和三角臂构成一组平行四边形;小臂、驱动连杆、三角臂和末端支架构成另外一组平行四边形。这两组平行四边形结构传动,分散了重载机器人整体受力,保证了系统整体稳定性。ABB-IRB 型重载机器人主要结构参数如表 1 所示。

表 1 ABB-IRB 型重载机器人主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of ABB-IRB heavy-load robot

部件	杆长 /mm	质量 /kg	刚度 /(N·m·rad ⁻¹)
腰部基座		600	
大臂摆动结构	1 300	550	
小臂摆动结构	1 400	240	
手腕摆动结构	450	95	
腰部关节			6.7×10^4
大臂关节			2.7×10^4
小臂关节			2.9×10^4
手腕关节			3.2×10^4

1.2 重载机器人刚柔耦合动力学模型

经典多刚体系统动力学认为:当物体处于低速运动时,结构的弹性变形对于系统动态特性影响可以忽略,为了降低计算复杂度,通常忽略结构弹性变形,将物体视为刚体进行动态特性研究^[20]。因此,轻载、低速机器人动力学研究都是采用刚性假设,忽略机构受力时微小变形。这种刚性假设可以简化动力学问题,在方程建立和求解时变得简单,但是其数值解精度较低,与实际应用要求差距较大。特别是对于重载、高速机器人,采用刚性假设建立的动力学模型已不能满足实际工业生产需求。机械臂连续负载运行会造成机器人结构衔接处产生疲劳故障,轻则产生抖动影响系统运行精度,重则导致关节断裂。为了解决这一问题,应考虑重载机器人关节部位的柔性效应。

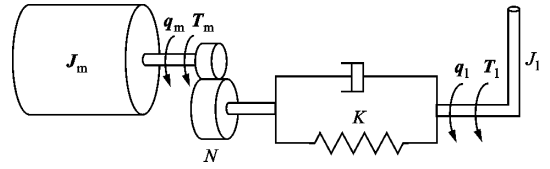
根据文献[21],刚体系统的动力学方程为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{T} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为连杆惯量矩阵; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为哥氏力和离心力矩阵; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 为重力矩阵; $\mathbf{T}$ 为输出力矩。

根据 Spong 提出的柔性关节模型^[22],可以将机器人柔性关节等效为线性扭簧模型,机器人柔性关节等效模型如图 2 所示。

根据机器人关节转矩平衡关系,可得



J_m —电机转子惯量; q_m —电机侧角度矩阵; T_m —电机侧输出

力矩; N —减速比; K —关节刚度; q_l —连杆侧角度矩阵;

T_l —连杆侧输出力矩; J_l —连杆侧输出惯量。

图 2 柔性关节等效模型

Fig. 2 Equivalent model of flexible joint

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{T}_m &= \mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{N}^{-1} \mathbf{T}_l \\ \mathbf{T}_l &= \mathbf{K}(\mathbf{N}^{-1} \mathbf{q}_m - \mathbf{q}_l) + \mathbf{B}(\mathbf{N}^{-1} \dot{\mathbf{q}}_m - \dot{\mathbf{q}}_l) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

消去中间变量,得到重载机器人最终刚柔耦合模型

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q}_l) \ddot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{C}(\mathbf{q}_l, \dot{\mathbf{q}}_l) \dot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{G}(\mathbf{q}_l) - \mathbf{K} \mathbf{D} &= \mathbf{T}_l \\ \mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{K} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{D} + \mathbf{B} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{D} &= \mathbf{T}_m \\ \mathbf{D} &= \mathbf{N}^{-1} \mathbf{q}_m - \mathbf{q}_l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)模型涉及多个自由度矩阵计算,运算量比较大。由于重力项对模态影响较小,可以暂时忽略不计,因此重载机器人刚柔耦合动力学模型可以简化为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q}_l) \ddot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{C}(\mathbf{q}_l, \dot{\mathbf{q}}_l) \dot{\mathbf{q}}_l - \mathbf{K} \mathbf{D} &= \mathbf{T}_l \\ \mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{K} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{D} + \mathbf{B} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{D} &= \mathbf{T}_m \\ \mathbf{D} &= \mathbf{N}^{-1} \mathbf{q}_m - \mathbf{q}_l \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

1.3 含关节疲劳故障机器人振动模型的建立

疲劳理论认为:疲劳破坏是由位错运动引起的,位错经过运动最终聚集在一起,形成了初始的疲劳裂纹,称为微裂纹,在微裂纹形成后,不断扩展,相互贯通,形成较大的裂纹,其长度可达到肉眼可见范围,称为宏观裂纹^[23]。

对于重载机器人,关节产生机械疲劳的实质是零部件长时间连续负荷运行,在弯曲应力作用下,使得关节连接处无法承受该应力作用而产生微裂纹^[24]。按照裂纹出现的时间和状态,可将其分为开闭型裂纹和全开型裂纹两种形式。研究表明:大多数旋转设备出现的裂纹以开闭型裂纹为主,即裂纹会随负载变化和运动状态处于连续的开闭状态,这种状态的变化会引起系统某种参数变化,继而影响系统的动力学特性^[25]。当裂纹关节处于拉伸状态时,关节上的裂纹则完全张开,此时关节的刚度取决于裂纹截面形状和尺寸;当裂纹部件处于压缩侧时,关节上的裂纹则完全闭合,此时部件的刚度与无裂纹时的刚度相同。在高速和重载运行环境下,关节

裂纹始终处于开闭耦合状态,此时的关节刚度完全取决于裂纹张开时其截面变化引起的刚度变化,而且裂纹截面和尺寸幅度变化越大,引起的刚度变化就越明显。

实际机器人系统结构复杂,而且各个关节相互耦合,无法在式(4)模型基础上直接进行分析。根据瑞利阻尼假设理论,模型中矩阵 C 可以表示为

$$C = \eta_1 M + \eta_2 K \quad (5)$$

第 j 阶模态振型的阻尼比可以写成

$$\xi_j = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{\omega_j} + b \omega_j \right) \quad (6)$$

式中: a 和 b 为比例系数; ω_j 为无阻尼自由振动固有频率。为了使重载机器人模型中各个方程之间相互解耦,采用模态坐标来表示任意向量,即

$$q_1 = \Phi \delta = \delta_1 \phi_1 + \delta_2 \phi_2 + \cdots + \delta_n \phi_n \quad (7)$$

式中: ϕ_i 为结构无阻尼振动归一化处理之后的模态向量; Φ 为 $n \times n$ 阶由 ϕ_i 组成的模态矩阵; δ_i 为参与因子。将式(7)代入(4),两边乘 Φ^T , 可得

$$\Phi^T M \Phi \ddot{\delta} + \Phi^T C \Phi \dot{\delta} + \Phi^T K \Phi \delta = \Phi^T T_1 \quad (8)$$

根据模态矩阵具有正交的性质,可得

$$\begin{aligned} \phi_i^T M \phi_j &= \begin{cases} M_i, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \\ \phi_i^T C \phi_j &= \begin{cases} C_i, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \\ \phi_i^T K \phi_j &= \begin{cases} K_i, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \end{aligned}$$

因此,式(8)可以写成

$$M' \ddot{\delta} + C' \dot{\delta} + K' \delta = T'_1 \quad (9)$$

式中: M' 、 C' 、 K' 分别为广义惯量矩阵、广义阻尼矩阵和广义刚度矩阵; T'_1 为广义驱动力。在模态矩阵的正交作用下,式(9)中的各个矩阵都为对角矩阵,即各变量之间不存在耦合作用,简化后包含刚度的多个单自由度方程为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\delta}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{\delta}_j + \omega_j^2 \delta_j + \sum_{i=1}^3 \omega_j^{i+1} \alpha_i \delta_j^{i+1} &= T_j^* \\ \xi_j &= \frac{c_j}{2\omega_j m_j} \\ c_j &= \eta_1 m_j + \eta_2 k_j \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: c_j 为广义阻尼; ξ_j 为第 j 阶阻尼比; T_j^* 为广义驱动力; $\sum_{i=1}^3 \omega_j^{i+1} \alpha_i \delta_j^{i+1}$ 为非线性补偿项; α_i 为常数项,且 $|\alpha_i| < 1; j=1, 2, 3, 4$ 。

2 基于非线性频谱的重载机器人故障机理分析

2.1 非线性输出频率响应函数

对于连续时变非线性系统,系统输入和输出之间关系^[26]表示为

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) \\ y_n(t) &= \sum_{n=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n) \cdot \\ &\quad \prod_{i=1}^n u(t - \tau_i) d\tau_i \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $u(t)$ 为系统输入; $y_n(t)$ 为系统 n 阶输出; $h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n)$ 为系统 n 阶时的域核,对 $h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n)$ 进行多维傅里叶变换,得到 n 阶频域核

$$\begin{aligned} H_n(j\omega_1, j\omega_2, \cdots, j\omega_n) &= \\ \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n) e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2 + \cdots + \omega_n \tau_n)} \prod_{i=1}^n d\tau_i \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中的 $H_n(j\omega_1, j\omega_2, \cdots, j\omega_n)$ 也被称为 GFRF,它可以描述系统的非线性特性,但是 GFRF 模型复杂,对其求解的计算量比较大。为了简化计算,Bayma 等在 GFRF 模型基础上提出 NOFRF,定义^[27]为

$$\begin{aligned} G_n(j\omega) &= \int_{\omega_1 + \omega_2 + \cdots + \omega_n = \omega} H_n(j\omega_1, j\omega_2, \cdots, j\omega_n) \cdot \\ &\quad \prod_{i=1}^n U(j\omega_i) d(j\omega_i) / \int_{\omega_1 + \omega_2 + \cdots + \omega_n = \omega} \prod_{i=1}^n U(j\omega_i) d(j\omega_i) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $\omega_1 + \omega_2 + \cdots + \omega_n = \omega$ 表示超平面; $U(j\omega_i)$ 表示输入信号 $u(t)$ 的傅里叶变换。

整个非线性系统的输出频率响应过程可以用图 3 表示。

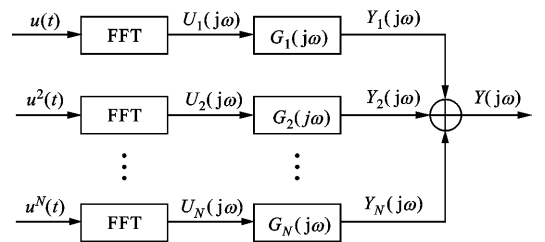


图3 非线性系统的输出频率响应过程

Fig. 3 Output frequency response process of nonlinear system

通过引入 NOFRF, 得到系统输出频谱为

$$Y(j\omega) = \sum_{n=1}^N Y_n(j\omega) = \sum_{n=1}^N G_n(j\omega) U_n(j\omega) \quad (14)$$

式中

$$U_n(j(-n+2k)\omega_e) = \frac{1}{2^n k!} \frac{n!}{(n-k)!} |U|^n e^{j(-n+2k)\beta}$$

$$G_n(j(-n+2k)\omega_e) = \underbrace{H_n(j\omega_e, \dots, j\omega_e, \underbrace{-j\omega_e, \dots, -j\omega_e}_{n-k})}_{k=0,1,\dots,n}$$

若 $H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$ 是关于 ω 的对称函数, 此时第 n 阶 $G_n(j\omega)$ 在输出频率 $\omega = \{(-n+2k)\omega_e, k=0, 1, \dots, n\}$ 处等于 $H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$ 在 $\omega_1 = \dots = \omega_k = \omega_e, \omega_{k+1} = \dots = \omega_n = -\omega_e$ 的值。如果仅考虑系统前 4 阶 NOFRF, 则非线性系统输出频谱可以表示为

$$Y(j\omega) = G_1(j\omega)U_1(j\omega) + G_3(j\omega)U_3(j\omega) \quad (15)$$

$$Y(j2\omega) = G_2(j2\omega)U_2(j2\omega) + G_4(j2\omega)U_4(j2\omega) \quad (16)$$

$$Y(j3\omega) = G_3(j3\omega)U_3(j3\omega) \quad (17)$$

$$Y(j4\omega) = G_4(j4\omega)U_4(j4\omega) \quad (18)$$

2.2 重载机器人非线性输出频谱响应函数频谱计算

重载机器人系统得到如式(10)所示的多个单自由度振动系统模型以后, 以其中一个关节为例进行分析, 其模型为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\delta}_j(t) + 2\delta_j\omega_j\dot{\delta}_j(t) + \omega_j^2\delta(t) + \alpha_1\omega_j^2\delta_j^2(t) + \alpha_2\omega_j^3\delta_j^3(t) + \alpha_3\omega_j^4\delta_j^4(t) &= T_j^*(t) \\ \xi_j &= \frac{c_j}{2\omega_j m_j} \\ c_j &= \eta_1 m_j + \eta_2 k_j \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: 广义驱动力 $T_j^*(t)$ 视为输入; 模态参与因子 $\delta_j(t)$ 视为输出。

按照文献[28-29]中提出的递推算法思想, 本文对重载机器人单个关节各阶 NOFRF 频谱模型进行推导, 具体过程如下。

(1) 求系统第一阶广义频率响应函数 $H_1(j\omega)$ 。设激励信号为 $u(t) = e^{j\omega t}$, 将其代入式(11)得 $y_{p1}(t) = H_1(j\omega)e^{j\omega t}$, 将 $y_{p1}(t)$ 代入式(19), 利用两边 $e^{j\omega t}$ 系数相等, 求得第一阶广义频率响应函数为

$$H_1(j\omega) = \frac{1}{(j\omega)^2 + 2\xi_j\omega_j(j\omega) + \omega_j^2} \quad (20)$$

(2) 利用递推公式, 分别求出第 2~4 阶广义频率响应函数

$$\begin{aligned} H_2(j\omega_1, j\omega_2) &= \\ -\alpha_1\omega_j^2 H_1(j\omega_1)H_1(j\omega_2)H_1(j\omega_1 + j\omega_2) & \quad (21) \\ H_3(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3) &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\frac{2}{3}(\omega_j^2\alpha_1 + \alpha_2\omega_j^3)[H_1(j\omega_1)H_2(j\omega_2, j\omega_3) + \\ H_1(j\omega_2)H_2(j\omega_1, j\omega_3) + H_1(j\omega_3)H_2(j\omega_1, j\omega_2)] \cdot \\ H_1(j\omega_1 + j\omega_2 + j\omega_3) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} H_4(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3, j\omega_4) &= \\ -\omega_j^2 H_1(j\omega_1 + j\omega_2 + j\omega_3 + j\omega_4) \cdot \\ [\alpha_1 H_{42}(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3, j\omega_4) + \\ \alpha_3 H_{44}(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3, j\omega_4)] \end{aligned} \quad (23)$$

式中

$$\begin{aligned} H_{42}(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3, j\omega_4) &= \\ \frac{1}{2}[H_1(j\omega_1)H_3(j\omega_2, j\omega_3, j\omega_4) + \\ H_1(j\omega_2)H_3(j\omega_1, j\omega_3, j\omega_4) + \\ H_1(j\omega_3)H_3(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_4) + \\ H_1(j\omega_4)H_3(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3)] + \\ \frac{1}{3}[H_2(j\omega_1, j\omega_2)H_2(j\omega_3, j\omega_4) + \\ H_2(j\omega_1, j\omega_3)H_2(j\omega_2, j\omega_4) + \\ H_2(j\omega_1, j\omega_4)H_2(j\omega_2, j\omega_3)] \\ H_{44}(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3, j\omega_4) &= \\ H_1(j\omega_1)H_1(j\omega_2)H_1(j\omega_3)H_1(j\omega_4) \end{aligned}$$

(3) 根据式(15)~(18), 前 4 阶 NOFRF 表示为

$$G_1(j\omega) = H_1(j\omega) = \frac{1}{(j\omega)^2 + 2\xi_j\omega_j(j\omega) + \omega_j^2} \quad (24)$$

$$G_2(j2\omega) = H_2(j\omega, j\omega) = -\alpha_1\omega_j^2 H_1^2(j\omega)H_1(j2\omega) \quad (25)$$

$$\begin{aligned} G_3(j3\omega) &= H_3(j\omega, j\omega, j\omega) = \\ 2(\omega_j^4\alpha_1^2 + \alpha_1\alpha_2\omega_j^5)H_1^3(j\omega)H_1(j2\omega)H_1(j3\omega) & \quad (26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_4(j4\omega) &= H_4(j\omega, j\omega, j\omega, j\omega) = \\ -\omega_j^2 H_1(j4\omega)[\alpha_1 H_{42}(j4\omega) + \alpha_3 H_{44}(j4\omega)] &= \\ -\alpha_1^3\omega_j^6 H_1^4(j\omega)H_1(j2\omega)H_1(j4\omega)[4H_1(j3\omega) + \\ H_1(j2\omega)] - \alpha_3\omega_j^2 H_1^4(j\omega)H_1(j4\omega) & \quad (27) \end{aligned}$$

2.3 故障发生时非线性频谱变化分析

由于疲劳故障影响关节刚度, 且不同疲劳程度对应的关节刚度是不同的, 因此引进参数 $\beta = k'_j/k_j$ 表示疲劳故障程度, k'_j 表示疲劳故障时的关节刚度, k_j 表示无故障时的关节刚度。当关节无疲劳故障时, $\beta = 1$; 当关节发生疲劳故障时, $\beta < 1$ 。本小节就重载机器人系统正常状态和不同疲劳故障状态下的非线性频谱变化规律进行分析。

(1) 对于一阶 NOFRF 频谱, 其频谱幅值 $|G_1(j\omega)| = 1/[(\omega^2 + \omega_j^2)^2 + 4((\alpha_1 m_j + \alpha_2 \beta k_j)/2m_j)\omega^2\omega_j]^{1/2}$ 。正常状态下, 随着频率 ω 增大, $|G_1(j\omega)|$ 呈先增大后减小趋势, 当且仅当频率 ω 等

于系统无阻尼自由振动固有频率,即 $\omega = \omega_j$ 时, $|G_1(j\omega)|$ 取得峰值;故障状态下,一阶 NOFRF 频谱幅值 $|G_1(j\omega)|$ 整体呈先增大后减小趋势,但是随着 β 逐渐减小,一阶 NOFRF 频谱幅值 $|G_1(j\omega)|$ 逐渐增大,而且故障程度越严重, $|G_1(j\omega)|$ 就越大。

(2) 对于二阶 NOFRF 频谱,其频谱幅值 $|G_2(j\omega)| = \alpha_1 \omega_j^2 |G_1(j\omega)|^2 |G_1(j2\omega)|$ 。整体上 $|G_2(j\omega)|$ 会呈现幅值增大和减小交叉出现趋势,当且仅当 $\omega = \omega_j, 2\omega = \omega_j$, 即 $\omega = \omega_j, \omega = \frac{1}{2} \omega_j$ 时, $|G_2(j\omega)|$ 取得峰值。正常状态下, β 较大, $|G_1(j\omega)|^2$ 和 2 倍频频谱 $|G_1(j2\omega)|$ 都取得最小值,因此二阶 NOFRF 频谱值 $|G_2(j\omega)|$ 取得最小值。随着 β 减小, $|G_1(j\omega)|^2$ 和 2 倍频频谱 $|G_1(j2\omega)|$ 都逐渐增大,因此故障状态下的 $|G_2(j\omega)|$ 比正常状态下的 $|G_2(j\omega)|$ 大。值得注意的是,由于 $|G_2(j\omega)|$ 中基频成分比谐波成分大,所以基频点处的峰值对 β 变化更敏感,即随着 β 减小,基频点幅值变化比 2 倍频点处幅值变化明显。

(3) 对于 3 阶 NOFRF 频谱,其频谱幅值 $|G_3(j\omega)| = 2(\omega_j^4 \alpha_1^2 + \alpha_1 \alpha_2 \omega_j^5) |G_1(j\omega)|^3 |G_1(j2\omega)| \cdot |G_1(j3\omega)|$ 。相比二阶 NOFRF 频谱,该频谱幅值中出现 3 个倍频点,当且仅当 $\omega = \omega_j, \omega = \frac{1}{2} \omega_j, \omega = \frac{1}{3} \omega_j$ 时,频谱幅值 $|G_3(j\omega)|$ 取得峰值。相比较正常情况,疲劳故障发生时,随着 β 的减小,基频频谱幅值 $|G_1(j\omega)|^3$ 、2 倍频频谱幅值 $|G_1(j2\omega)|$ 、3 倍频频谱幅值 $|G_1(j3\omega)|$ 都逐渐变小,因此 3 阶 NOFRF 频谱 $|G_3(j\omega)|$ 值逐渐增大。另外,该频谱中基频成分比 2 倍谐波和 3 倍谐波成分大,所以相对于高次谐波幅值,基频处幅值对 β 变化比较敏感。

(4) 相比于前 3 阶 NOFRF 频谱,第 4 阶 NOFRF 频谱幅值非线性特性变化更复杂。频谱值 $|G_4(j\omega)|$ 中出现 4 个倍频点,当 $\omega = \omega_j, \omega = \frac{1}{2} \omega_j, \omega = \frac{1}{3} \omega_j, \omega = \frac{1}{4} \omega_j$ 时,4 阶 NOFRF 频谱值 $|G_4(j\omega)|$ 取得峰值,此时系统有 4 个共振点,即 $\omega_j, \frac{1}{2} \omega_j, \frac{1}{3} \omega_j, \frac{1}{4} \omega_j$ 。正常状态下,基频频谱幅值 $|G_1(j\omega)|^4$ 、2 倍频频谱幅值 $|G_1(j2\omega)|$ 、3 倍频频谱幅值 $|G_1(j3\omega)|$ 、4 倍频频谱幅值 $|G_1(j4\omega)|$ 较小,因此 $|G_4(j\omega)|$ 数值不大。随着故障严重程度加剧,高次谐波幅值增大,导致 $|G_4(j\omega)|$ 随 β 减小而增大。同时,由于 $|G_4(j\omega)|$ 是多个谐波频谱幅值乘积形式,所

以其幅值对 β 变化较前 3 阶 NOFRF 频谱更敏感。

3 实验分析

3.1 重载机器人非线性频谱特性分析

本文实验选用的重载机器人按照表 1 中参数进行装配,对于得到的多个单自由度振动系统模型,以大臂关节为例,对大臂关节机械疲劳故障进行非线性频谱分析和验证。其中,大臂长度 $l=1\ 300\text{ mm}$,质量 $m=550\text{ kg}$,非线性系数 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=0.001$,正常状态下大臂关节刚度 $k_j=2.7 \times 10^4\text{ N} \cdot \text{m/rad}$,当发生疲劳故障时, $\beta=0.7, 0.5, 0.3$ 。利用式 (24)~(27) 计算出的关节不同程度疲劳故障下重载机器人系统的前 4 阶 NOFRF 频谱幅值 $|G_1(j\omega)|$ 、 $|G_2(j2\omega)|$ 、 $|G_3(j3\omega)|$ 、 $|G_4(j4\omega)|$ 如图 4~7 所示,具体数据见本文首页 OSID 码中的开放科学数据。

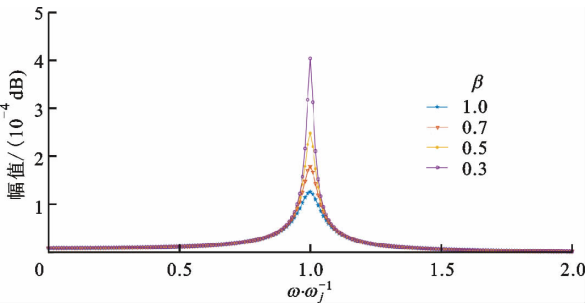


图 4 关节不同疲劳程度下系统 1 阶 NOFRF 频谱
Fig. 4 The first-order NOFRF spectrum of joint with different fatigue degrees

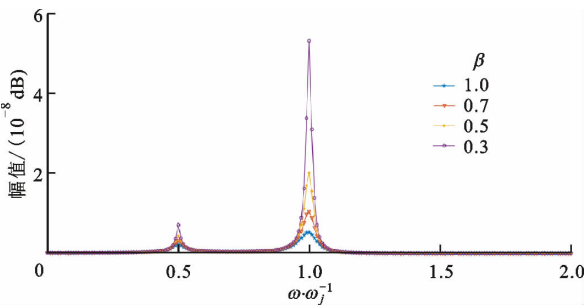


图 5 关节不同疲劳程度下系统 2 阶 NOFRF 频谱
Fig. 5 The second-order NOFRF spectrum of joint with different fatigue degrees

从图 4~7 可以看出,重载机器人系统不但在 ω_j 处出现共振,而且在 $\frac{1}{2} \omega_j, \frac{1}{3} \omega_j, \frac{1}{4} \omega_j$ 处出现亚共振,因此机器人系统在工频 $\frac{1}{2} \omega_j$ 时会出现 2 倍超谐波响应,工频 $\frac{1}{3} \omega_j$ 时会出现 3 倍超谐波响应,工频

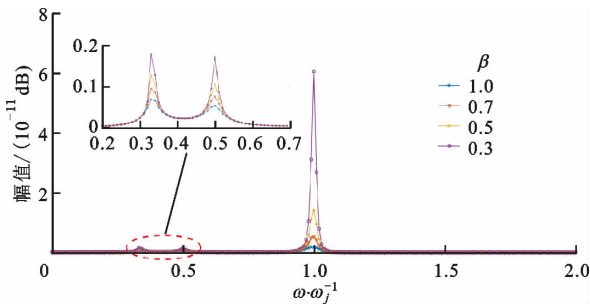


图 6 关节不同疲劳程度下系统 3 阶 NOFRF 频谱
Fig. 6 The third-order NOFRF spectrum of joint with different fatigue degrees

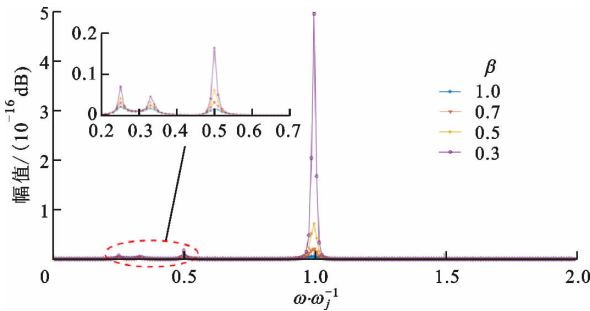


图 7 关节不同疲劳程度下系统 4 阶 NOFRF 频谱
Fig. 7 The fourth-order NOFRF spectrum of joint with different fatigue degrees

$\frac{1}{4}\omega_j$ 时会出现 4 倍超谐波响应。以此类推,工频 $\frac{1}{n}\omega_j$ 时会出现 n 倍超谐波响应。正常状态下,NOFRF 频谱谐波幅值比较小,但是随着故障程度加深,高次谐波的幅值逐渐变大。这些超谐波的存在会使关节在负载运行中出现机身的抖动,严重影响机器人关机的平稳运行。

从图 4~7 还可以看出,NOFRF 频谱对系统疲劳故障很敏感,具体表现为:①系统不同机械疲劳程度的前 4 阶 NOFRF 频谱差异很大,随着疲劳程度加深,对应的 NOFRF 频谱在各个共振点的幅值逐渐增加;②同一种状态下的不同阶次 NOFRF 频谱差异性也很大,相邻阶次的 NOFRF 频谱在各共振点幅值相差 4~5 个量级。

由于重载机器人长期连续运行,再加上末端负重较大,系统难免会出现不同程度的机械疲劳故障,进一步会出现机器人机身抖动现象,对于该现象发生的机理,系统前 4 阶 NOFRF 频谱给出了较好的解释,也给出了具体发生共振的频率点。另外,与当前故障诊断经常采用的 FFT 频域谱或者时频域谱(如连续小波变换)相比,NOFRF 频谱对是在 4 个

维度上表征故障信息,包含的信息量更丰富,如果将 NOFRF 频谱作为故障信息进行特征提取,更有利于分类器的精准识别。

3.2 故障诊断

为了进一步说明 NOFRF 频谱表征重载机器人系统故障特征的优越性,分别采用输出信号的 FFT 频域谱、时频域谱^[30]和 NOFRF 频谱作为故障特征进行故障诊断对比实验。其中,系统输入 $T_j^*(t) = 50\cos(0.5\pi t)$,利用式(19)求出系统输出。

FFT 频域谱样本是通过对系统每种状态下输出进行 100 点傅里叶变换得到的,其数据形式为 1×100 维向量;时频域谱样本是通过对系统每种状态下输出进行连续小波变换(CWT)得到的,其数据形式为 10×10 维向量,为了便于分类器计算,对 10×10 维的数据按照时域信息和频域信息交叉出现的形式进行重新组合,新的数据形式为 1×100 维向量;NOFRF 频谱样本是对每种状态下每一阶 NOFRF 频谱随机采集 25 个点(共振频点附近),4 阶 NOFRF 频谱共同构成一个 1×100 维向量。3 组实验各重复 200 次,每种状态分别得到 200×100 维数据集。

故障诊断采用核主元分析+支持向量机(KPCA+SVM)方法,即首先利用 KPCA 方法对 3 种不同的高维数据集进行压缩和降维,然后将低维数据送入 SVM 进行分类和识别。其中,KPCA 采用高斯径向核函数,SVM 分类器训练集和测试集分别取 80%和 20%的原数据集。采用 3 种故障特征进行诊断的结果如图 8。

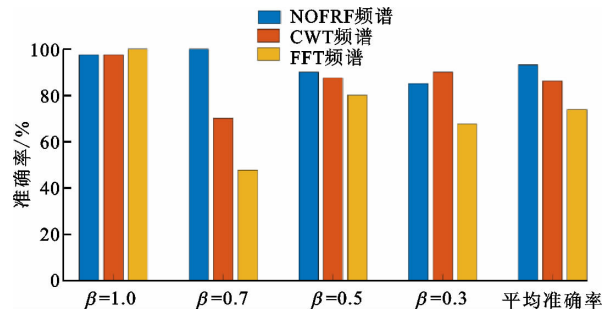


图 8 采用不同故障特征进行诊断的准确率
Fig. 8 Diagnosis accuracy of the methods using different fault features

从图 8 可以看出,采用 NOFRF 频谱作为故障特征进行诊断的准确率为 93.13%,与传统故障特征表征方法相比,分别高出 CWT 频域谱和 FFT 频域谱 6.88%和 19.38%。产生这样结果的原因在于:①NOFRF 频谱从系统整体角度考虑,在 4 个维

度上折射状态信息,而其他两种故障特征表征方法仅考虑系统输出信号,频谱中包含的大部分信息可能是局部的;②与 CWT 时频谱和 FFT 频域谱相比,NOFRF 频谱充分考虑了系统的非线性特性,这种非线性信息对状态变化比较敏感,使得不同状态下的频谱差异很大,更有利于分类器做出精准识别。

为了进一步说明问题,对 3 种不同故障信息经过 KPCA 处理之后的前 2 个主元在低维空间进行可视化,结果如图 9~11 所示。可以看出,不同状态 NOFRF 频谱的主成分特征区分度很明显,它们之间几乎没有交叉和重叠区域;CWT 频谱和 FFT 频谱的主成分特征虽然也具有一定的区分度,但是部分状态之间存在相互交叉和重叠现象(FFT 频谱主

成分重叠区域明显多于 CWT 频谱),不利于分类器准快速诊断和精确识别。由此,NOFRF 频谱作为重载机器人关节疲劳故障特征的有效性再次得到了验证。

4 结 论

本文考虑柔性关节对重载机器人的影响,在刚柔耦合的重载机器人数学模型基础上获取系统的多个单自由度振动模型,采用 NOFRF 理论建立系统关节的非线性频谱模型,分析关节发生疲劳故障时 NOFRF 频谱中 2 倍频、3 倍频和 4 倍频等超谐波成分和亚共振现象,解释了机器人系统因关节疲劳发生抖动的机理,研究了不同疲劳程度下 NOFRF 频谱变化规律。通过频谱分析和故障诊断对比实验,得到以下结论。

(1)用 NOFRF 频谱表征系统故障信息,能够很好地解释重载机器人因关节疲劳产生抖动症状的机理,为系统设计、优化和诊断提供理论基础。

(2)与传统故障特征提取方法相比,NOFRF 频谱对故障信息捕捉能力强、包含故障信息丰富、故障特征区分度明显,明显提高了故障诊断准确率。

后续研究将在故障机理分析基础上,结合当前热门的人工智能网络对 NOFRF 频谱关键特征信息进行深层次挖掘,从而进一步实现重载工业机器人故障精准、快速诊断。

参考文献:

[1] 魏雅君,邱国梁,丁广和,等. 一种重载码垛机器人结构优化设计方法 [J]. 工程设计学报, 2020, 27(3): 332-339.
WEI Yajun, QIU Guoliang, DING Guanghe, et al. A structural optimization design method for heavy-duty palletizing robot [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27(3): 332-339.
[2] 王田苗,陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1-13.
WANG Tianmiao, TAO Yong. Research status and industrialization development strategy of Chinese industrial robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1-13.
[3] FAN Shuai, FAN Shouwen, LAN Weibin, et al. A new approach to enhance the stiffness of heavy-load parallel robots by means of the component selection [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101834.
[4] YANG Kun, YANG Wenyu, CHENG Guangdong, et

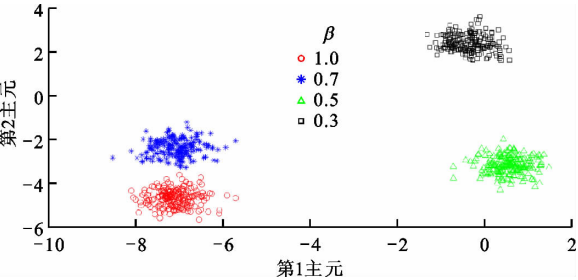


图 9 NOFRF 频谱在低维空间数据的可视化
Fig. 9 The visualization of NOFRF spectrum in low dimension space

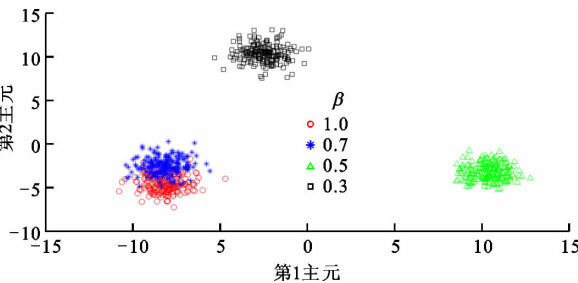


图 10 CWT 频谱在低维空间数据的可视化
Fig. 10 The visualization of CWT spectrum in low dimension space

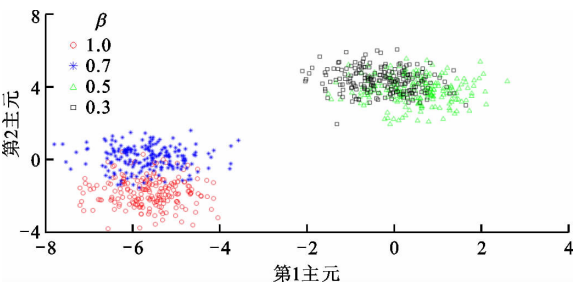


图 11 FFT 频谱在低维空间数据的可视化
Fig. 11 The visualization of FFT spectrum in low dimension space

- al. A new methodology for joint stiffness identification of heavy duty industrial robots with the counterbalancing system [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 53: 58-71.
- [5] VIHONEN J, MATTILA J, VISA A. Joint-space kinematic model for gravity-referenced joint angle estimation of heavy-duty manipulators [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(12): 3280-3288.
- [6] MA Nan, DONG Xin, AXINTE D. Modeling and experimental validation of a compliant underactuated parallel kinematic manipulator [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(3): 1409-1421.
- [7] 李连鹏, 解仑, 刘振宗, 等. 基于人机交互的重载机械臂控制方法 [J]. *机器人*, 2018, 40(4): 525-533.
- LI Lianpeng, XIE Lun, LIU Zhenzong, et al. A control method for heavy load manipulator based on man-machine interaction [J]. *Robot*, 2018, 40(4): 525-533.
- [8] ZHA Fusheng, CHEN Chen, GUO Wei, et al. A free gait controller designed for a heavy load hexapod robot [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(3): 168781401983836.
- [9] SABRY A H, NORDIN F H, SABRY A H, et al. Fault detection and diagnosis of industrial robot based on power consumption modeling [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(9): 7929-7940.
- [10] INCE T, KIRANYAZ S, EREN L, et al. Real-time motor fault detection by 1-D convolutional neural networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(11): 7067-7075.
- [11] PAN M C, VAN BRUSSEL H, SAS P. Intelligent joint fault diagnosis of industrial robots [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1998, 12(4): 571-588.
- [12] LIU Xiaoqin, WU Xing, LIU Chang, et al. Research on condition monitoring of speed reducer of industrial robot with acoustic emission [J]. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2016, 40(5): 1041-1049.
- [13] 陈乐瑞, 曹建福, 王晓琪. 结合非线性频谱和核主元分析的机器人用 RV 减速器故障诊断 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(1): 32-41.
- CHEN Lerui, CAO Jianfu, WANG Xiaoqi. Fault diagnosis for robot RV reducer using nonlinear frequency spectrum and kernel principal component analysis [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(1): 32-41.
- [14] ZHU Y P, LANG Z Q. The effects of linear and non-linear characteristic parameters on the output frequency responses of nonlinear systems: the associated output frequency response function [J]. *Automatica*, 2018, 93: 422-427.
- [15] LIU Yang, ZHAO Yulai, LI Jintao, et al. Feature extraction method based on NOFRFs and its application in faulty rotor system with slight misalignment [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 99(2): 1763-1777.
- [16] MAO Hanling, TANG Weili, HUANG Yang, et al. The construction and comparison of damage detection index based on the nonlinear output frequency response function and experimental analysis [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 427: 82-94.
- [17] CHEN Lerui, ZHANG Zerui, CAO Jianfu. A novel method of combining generalized frequency response function and convolutional neural network for complex system fault diagnosis [J]. *PLoS One*, 2020, 15(2): e0228324.
- [18] 陈乐瑞, 曹建福, 王晓琪. 工业机器人驱动系统非线性频谱故障诊断方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(4): 93-99.
- CHEN Lerui, CAO Jianfu, WANG Xiaoqi. Nonlinear spectrum based fault diagnosis method for industrial robot drive systems [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(4): 93-99.
- [19] 张家良, 曹建福, 高峰, 等. 基于非线性频谱数据驱动的动态系统故障诊断方法 [J]. *控制与决策*, 2014, 29(1): 168-171.
- ZHANG Jialiang, CAO Jianfu, GAO Feng, et al. Fault diagnosis approach of dynamic system based on data driven of nonlinear spectrum [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(1): 168-171.
- [20] 姚祥. 重载机器人刚柔耦合动力学建模与补偿控制方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018: 3-5.
- [21] 张世杰, 梁乐, 马清伍, 等. 高速重载码垛机器人刚柔耦合模型建立及动态特性分析方法 [J]. *机械与电子*, 2016, 34(1): 67-71.
- ZHANG Shijie, LIANG Le, MA Qingwu, et al. A method for rigid-flexible coupling modeling and dynamic characteristic analysis of high-speed and heavy-load palletizing robots [J]. *Machinery & Electronics*, 2016, 34(1): 67-71.
- [22] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1987, 109(4): 310-318.
- [23] 郑修麟, 王泓, 鄢君辉. 材料疲劳理论与工程应用

- [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 278-281.
- [24] NIE Songliang, LI Yuwen, SHUAI Guo, et al. Modeling and simulation for fatigue life analysis of robots with flexible joints under percussive impact forces [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, 37: 292-301.
- [25] WEI Xiaopeng, LIU Dajun, ZHAO Lasheng, et al. Time-varying stiffness analysis on rotating shaft with elliptical-front crack [J]. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2014, 17(3): 302.
- [26] JING Xingjian, LANG Ziqiang, BILLINGS S A. Parametric characteristic analysis for generalized frequency response functions of nonlinear systems [J]. *Circuits, Systems & Signal Processing*, 2009, 28(5): 699-733.
- [27] BAYMA R S, ZHU Yunpeng, LANG Ziqiang. The analysis of nonlinear systems in the frequency domain using nonlinear output frequency response functions [J]. *Automatica*, 2018, 94: 452-457.
- [28] BILLINGS S A, PEYTON JONES J C. Mapping nonlinear integro-differential equations into the frequency domain [J]. *International Journal of Control*, 1990, 52(4): 863-879.
- [29] JONES J C P, BILLINGS S A. Recursive algorithm for computing the frequency response of a class of nonlinear difference equation models [J]. *International Journal of Control*, 1989, 50(5): 1925-1940.
- [30] WANG Peng, ANANYA, YAN Ruqiang, et al. Virtualization and deep recognition for system fault classification [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, 44: 310-316.

[本刊相关文献链接]

- 张西宁, 郭清林, 刘书语. 深度学习技术及其故障诊断应用分析与展望. 2020, 54(12): 1-13. [doi: 10. 7652/xjtuxb202012001]
- 赵小强, 梁浩鹏. 使用改进残差神经网络的滚动轴承变工况故障诊断方法. 2020, 54(9): 23-31. [doi: 10. 7652/xjtuxb202009002]
- 徐浩, 张刚, 张天骐. 采用形变周期势系统的轴承故障诊断方法. 2020, 54(8): 77-83. [doi: 10. 7652/xjtuxb202008010]
- 张弘斌, 袁奇, 赵柄锡, 等. 采用多通道样本和深度卷积神经网络的轴承故障诊断方法. 2020, 54(8): 58-66. [doi: 10. 7652/xjtuxb202008008]
- 王慧, 张刚, 张天骐. 改进型双稳随机共振系统及其在轴承故障诊断的应用. 2020, 54(4): 110-117. [doi: 10. 7652/xjtuxb202004014]

- 张赞, 林学森, 王琳, 等. 采用监督局部切空间排列算法的航空发动机磨损故障诊断. 2020, 54(4): 179-185. [doi: 10. 7652/xjtuxb202004022]
- 陈保家, 黄伟, 李立军, 等. 最大重叠离散小波包变换边际谱特征在齿轮故障诊断中的应用. 2020, 54(2): 35-42. [doi: 10. 7652/xjtuxb202002005]
- 吴静然, 丁思杰, 崔冉, 等. 采用多尺度注意力机制的旋转机械故障诊断方法. 2020, 54(2): 51-58. [doi: 10. 7652/xjtuxb202002007]
- 赵柄锡, 冀大伟, 袁奇, 等. 采用时域与时频域联合特征空间的转子系统碰磨故障诊断. 2020, 54(1): 75-84. [doi: 10. 7652/xjtuxb202001010]
- 陈乐瑞, 曹建福, 王晓琪. 结合非线性频谱和核主元分析的机器人用RV减速器故障诊断. 2020, 54(1): 32-41. [doi: 10. 7652/xjtuxb202001005]
- 刘泽潮, 张兵, 易彩, 等. 高阶频率加权能量算子在列车轴箱轴承故障诊断中的应用. 2019, 53(12): 46-56. [doi: 10. 7652/xjtuxb201912007]
- 樊红卫, 邵偲洁, 张旭辉, 等. 一种对称极坐标图像模糊C均值聚类的电主轴失衡故障诊断方法. 2019, 53(12): 57-62, 86. [doi: 10. 7652/xjtuxb201912008]
- 张西宁, 周融通, 郭清林, 等. 局部倒频谱编辑方法及其在齿轮箱微弱轴承故障特征提取中的应用. 2019, 53(12): 1-9. [doi: 10. 7652/xjtuxb201912001]
- 张西宁, 张雯雯, 周融通, 等. 基于多维缩放和随机森林的轴承故障诊断方法. 2019, 53(8): 1-7. [doi: 10. 7652/xjtuxb201908001]
- 张康, 陶建峰, 覃程锦, 等. 随机丢弃和批标准化的深度卷积神经网络柴油机失火故障诊断. 2019, 53(8): 159-166. [doi: 10. 7652/xjtuxb201908021]
- 胥永刚, 田伟康, 曹金鑫, 等. 精细谱负熵及其在滚动轴承故障诊断中的应用. 2019, 53(8): 31-39, 128. [doi: 10. 7652/xjtuxb201908005]
- 向宙, 张西宁, 张雯雯, 等. 区分自编码网络及其在滚动轴承故障特征提取中的应用. 2019, 53(8): 47-55, 140. [doi: 10. 7652/xjtuxb201908007]
- 刘锐, 邹俊荣, 任超, 等. 采用规范化局部保持投影的轴承故障诊断方法. 2019, 53(6): 54-61. [doi: 10. 7652/xjtuxb201906008]
- 张志强, 孙若斌, 徐冠基, 等. 采用非相关字典学习的滚动轴承故障诊断方法. 2019, 53(6): 29-34. [doi: 10. 7652/xjtuxb201906005]
- 陈乐瑞, 曹建福, 王晓琪. 工业机器人驱动系统非线性频谱故障诊断方法. 2019, 53(4): 93-99. [doi: 10. 7652/xjtuxb201904014]

(编辑 陶晴)