DOI:10.19652/j.cnki.femt.2305570

基于改进SSI法的加工机器人工作模态在线辨识*

郭 辉[1] 陈友兴[2] 韩 焱[2]
(1.山西晋中理工学院智能制造与车辆学院 晋中 030699;
2.中北大学信息与通信工程学院 太原 030051)

摘 要:为提高串联式机器人的加工能力,提出一种基于改进SSI法的加工机器人工作模态在线辨识方法,该方法首先在传统SSI法的基础上进行改进,利用NExT法、模态置信因子及模态保证准则3种手段来提高加工机器人工作模态参数辨识精度。其次,利用加工机器人铣削加工振动数据对其走刀路径上关键点位出的模态频率和阻尼比进行在线辨识。最终,通过机器人切削加工实验验证该方法,实验结果表明,相比于锤击实验结果,改进SSI法模态参数辨识误差在7%以内,且相比于传统SSI法,改进SSI法模态参数辨识精度更高。因此,若仅关心模态频率及阻尼比,该方法可实现加工机器人走刀过程中模态参数的在线辨识,可为后续机器人进行工艺规划和优化提供输入条件。

关键词:改进SSI法;加工机器人;工作模态在线辨识;模态频率;阻尼比
中图分类号:TP242.2 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:460.5030

On-line operation modal identification for machining robot based on optimized SSI method

Guo Hui[1] Chen Youxing[2] Han Yan[2]
(1. Shanxi Jinzhong Institute of Engineering, Intelligent Manufacturing and Vehicle College, Jinzhong 030699, China;
2. School of Information and Communications Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To improve the machining ability of serial robots, an optimized SSI method is proposed to realize online modal identification. The method employed NExT method, modal confidence factor and modal assurance criterion to improve the modal identification accuracy. Next, the machining vibration data at key points in the path of the machining robot are used to identify the mode frequency and damping ratio. Finally, the experimental results show that the optimized SSI method can restrict estimation accuracy in 7%, and the method of optimized SSI method is more accurate than the traditional SSI method. Therefore, if only the modal frequency and the damping ratio are concentrated, the method can realize the online recognition of modal parameters in the cutting path of the machining robot, which can provide the input parameters for the process planning and optimization.

Keywords: optimized SSI method; machining robot; operation mode online identification; modal frequency; damping ratio

0 引 言

串联式工业机器人因其柔性高、成本低等优点广泛应用于制造业中[1]。尤其是在国家各类重大项目的支持下,机器人化智能制造得到了长足的发展和进步[2]。其中,机器人加工技术为大尺寸结构件关键特征高效去材成型方法提供了新的思路。目前,机器人加工技术主要应用于制孔、抛磨及铣削加工3个方向[3]。其中,机器人末端定位误差的补偿及其铣削加工振动抑制是提高机器人加工能力的两项主要研究内容。而机器人本体固有特征(定位误差、末端执行器刚度、结构模态参数)的计算和辨识可为上述两项研究提供技术支持。其中,机器人结构模态参数直接影响其加工过程中的动态响应,也是其铣削颤振稳定性预测及控制的必要输入条件。因此本文以实现机器人结

收稿日期:2023-09-19
* **基金项目**:山西省自然科学基金(20210302124189)项目资助

构模态参数在线辨识为目标，研究实测振动数据驱动的机器人工作模态参数在线识别，以期为机器人铣削加工动力学建模和稳定性分析提供技术支撑。

常用的4类结构模态辨识方法有数学解析法、有限元法、实验模态分析法(experimental modal analysis，EMA)及工作模态分析法(operation modal analysis，OMA)。数学解析法[4]和有限元法[5]可用于辅助求解机器人的变形、刚度等静态特性，对于模态频率、阻尼比等动态特性来说，由于机器人整体结构较为复杂，因此不可避免的会造成模型简化及结果失真。EMA法[6]也即锤击实验，可根据结构输入与输出信号拟合频响函数，虽然模态辨识精度较高，但操作过程较为繁琐，特别是对于机器人走刀过程来说，由于其位姿不断变化，需针对每个特定的位姿状态进行EMA，进一步增加了模态辨识过程的复杂性。OMA法可仅根据振动数据获得结构模态参数，分析过程中无需对结构进行简化，也无需进行复杂的锤击实验。综合分析，OMA法更适用于机器人加工过程模态参数在线识别。

根据响应信号形式不同，OMA法可分为时域、频域和时频域法3类[7]。其中，时域法因其无需对采集的数据进行时频转换而具有较高的模态参数识别精度。而最常用的时域OMA法为随机子空间法(stochastic subspace identification，SSI)[8-9]。基于该方法，张永祥等[10]综合利用SSI法及谱聚类法辨识平板结构的模态参数。付志超等[11]基于SSI法对机翼结构模态参数进行了辨识。黄焱等[12]利用结构实际空间信息与算法的相关性对Hankel矩阵进行重构，从而显著提高了结构模态识别的精度和效率。殷红等[13]将变分模态分解法融入SSI法提高模态参数的辨识精度。王燕等[14]证明了Toeplitz矩阵条件数越小，SSI方法的模态参数辨识结果越精确，由此给出了Toeplitz矩阵行数的选择方法，张小宁等[15]提出一种模态参数自动辨识方法，该方法利用模态置信因子及模态保证准则从多阶模态中挑选出结构真实模态参数。文鹏等[16]利用奇异熵增量的导数确定SSI法的阶数。陈永高等[17]基于奇异值跳跃法确定结构的模态阶次。以上方法均在实验中进行了验证，但实验对象大都集中在楼宇、船舶等大型结构中，而在加工机器人走刀过程关键点位模态参数识别中的应用还鲜有报道。为解决该问题，本文提出用于加工机器人走刀过程中工作模态频率和阻尼比在线识别的改进SSI法。该方法首先利用自然激励技术(natural excitation technology，NExT)对振动数据进行预处理，进而通过模态置信因子及模态保证准则剔除虚假模态，确定加工机器人最终模态参数。该方法仅通过对机器人铣削加工振动数据进行分析和处理，即可实现走刀过程中末端工作模态参数的准确辨识，为后续工艺规划及优化提供输入条件。

1 机器人工作模态参数在线辨识原理

加工机器人模态参数在线识别系统如图1所示。由加工机器人、控制系统、振动测量系统等组成。加工机器人根据运动控制指令进行走刀切削，可以看出在走刀过程中，机器人位姿不断改变，导致其模态参数也随之不断变化，进而导致走刀过程加工稳定性不断变化。因此，有必要对其走刀过程中各关键点位处的模态参数进行精确辨识。

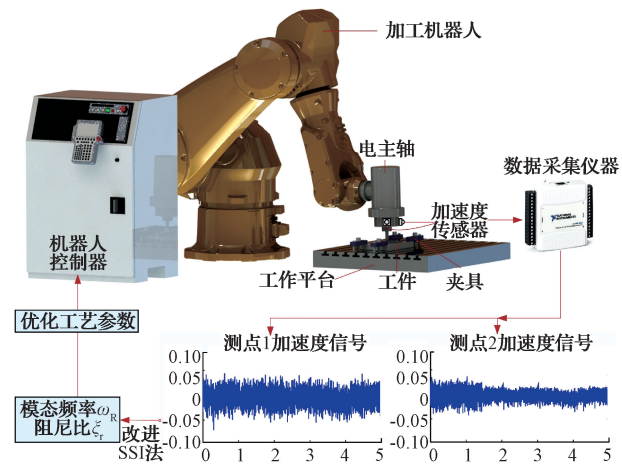


图1 加工机器人模态参数在线辨识系统及流程

振动测量系统由振动传感器(加速度计)和数据采集系统组成，完成加工振动信号获取；控制系统根据模态参数确定工艺参数并驱动刀具运动，从而实现稳态加工。在该过程中，模态参数辨识是最为关键的步骤，因此，本文主要聚焦于加工机器人走刀过程模态参数精确辨识。

在传统SSI法的基础上，考虑Toeplitz矩阵条件数，模态置信因子及模态保证准则，对机器人末端模态参数进行精确辨识。首先根据走刀过程中的关键点位对加工振动数据进行分段，然后，基于各数据段利用模态置信因子和模态保证准则辨识对应关键点位的模态参数。上述过程主要分为5个步骤。

1) 振动数据分段

选择走刀过程中的关键点位，本文按照均布分布的原则将单次走刀过程分为n个切削段，每个切削段对应1个关键点位，如图2所示。在获取单次走刀过程中的振动数据后，将振动数据拆分为n个数据段，每个数据段与切削段一一对应，且每个关键点位处的模态参数可通过各数据段辨识得到。

2)基于NExT法的数据预处理

在完成数据段划分后，利用NExT法对振动数据进行预处理。该方法的原理为通过对两个测点处的振动数据进行互相关计算，从原始强迫振动数据中提取自由振动响应数据，从而滤除一部分噪声，提高模态辨识精度。该方法表达为：

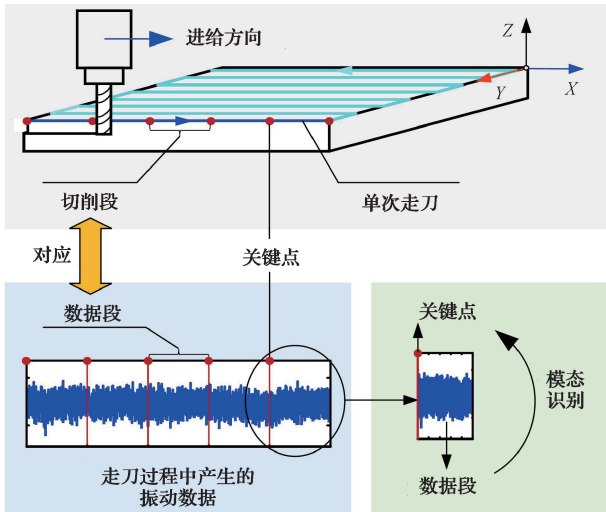


图 2　走刀过程分解

$$y_{ij}(\tau)=E[x_i(t+\tau)\cdot x_j(t)] \tag{1}$$

式中：$y_{ij}(\tau)$为互相关后的结果数据；$x_i(t)$为第 i 个测点对应的振动数据；$x_j(t)$为第 j 个测点对应的振动数据；$E[\cdot]$为互相关计算函数。

3)构建 Teoplitz 矩阵

利用 NExT 法输出的自由振动数据构建 Toeplitz 矩阵。首先由 NExT 法输出构成 Hankel 矩阵为：

$$\boldsymbol{Y}_{0|3M-2}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{Y}_p\\ \boldsymbol{Y}_f\end{pmatrix}=\frac{1}{\sqrt{M}}\begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{M-1}\\ y_1 & y_2 & \cdots & y_M\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ y_{M-1} & y_M & \cdots & y_{2M-2}\\ y_M & y_{M+1} & \cdots & y_{2M-1}\\ y_{M+1} & y_{M+2} & \cdots & y_{2M}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ y_{2M-1} & y_{2M} & \cdots & y_{3M-2}\end{bmatrix}_{2M\times M} \tag{2}$$

式中：$y_i(i=0,1,2,\cdots)$为 NExT 法输出结果；$\boldsymbol{Y}_p$ 为 $y_0\sim y_{2M-2}$ 构成 $M\times M$ 的上 Hankel 矩阵；$\boldsymbol{Y}_f$ 为 $y_M\sim y_{3M-2}$ 构成 $M\times M$ 的下 Hankel 矩阵。

将上、下 Hankel 矩阵中所有实测振动位移响应值进行协方差计算，所得序列构成 Toeplitz 矩阵 $\boldsymbol{T}$ 为：

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{Y}_f\cdot(\boldsymbol{Y}_p^{\mathrm{T}})=\begin{bmatrix} R_i & R_{i-1} & \cdots & R_1\\ R_{i+1} & R_i & \cdots & R_2\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ R_{2i-1} & R_{2i-2} & \cdots & R_i\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$\widetilde{R}_i$ $(i=0,1,2,\cdots)$为实测振动数据的协方差。

4)模态参数预辨识

求矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的单边最小二乘解，得到矩阵 $\boldsymbol{A}$。$\boldsymbol{A}$ 的特征值分解包含特征值对角矩阵 $\boldsymbol{\Lambda}=\mathrm{diag}(\lambda_i)$ 和特征向量 $\boldsymbol{\Phi}$ 矩阵为：

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

其中，特征值为 $\lambda_i=a_i\pm jb_i$，据此可得机器人末端模态参数 f_i 和 ε_i 为：

$$f_i=\sqrt{a_i^2+b_i^2}/2\pi \tag{5}$$

$$\varepsilon_i=\frac{-a_i}{\sqrt{a_i^2+b_i^2}} \tag{6}$$

式中：f_i、ε_i 分别为 i 阶模态频率和阻尼比。

5)最终模态参数精确辨识

利用模态置信因子(modal confidence factor，MAF)及模态保证准则(modal assurance criterion，MAC)从式(5)和(6)确定的结果中选择准确的模态参数。

首先假设加工机器人末端的模态阶次分别为 1，2，3，…，n，针对各阶次，循环执行式(5)和(6)计算机器人对应的模态参数 f_i、ε_i，并构造模态参数下三角矩阵 $\boldsymbol{F}_{n\max}$：

$$\boldsymbol{F}_{n\max}=\begin{bmatrix} f_{1,1} & 0 & 0 & \cdots & 0\\ f_{2,1} & f_{2,2} & 0 & \cdots & 0\\ f_{3,1} & f_{3,2} & f_{3,3} & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ f_{n\max,1} & f_{n\max,2} & f_{n\max,3} & \cdots & f_{n\max,n\max}\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：$f_{a,b}$ 为机器人末端模态阶次为 a 时的第 b 阶模态频率。阻尼比类似。

MAF 表征模态频率稳定性为：

$$MAF_{a,b}=[(x_{a,1}-x_{b,1})^2+\cdots+(x_{a,n}-x_{b,n})^2]^{-1/2} \tag{8}$$

式中：$MAF_{a,b}$ 为机器人末端模态阶次为 a 时的第 b 阶模态频率或阻尼比。由式(8)可得，$MAF_{a,b}$ 越大(欧氏距离越小)模态参数的稳定性越高。

其中 n 的取值为假设的加工机器人末端最高模态阶次，因此，可获得 $n_{\max-1}$ 个阶次对应的 MAF 为 $MAF_{2,1}$，$MAF_{3,2}$，…，$MAF_{n\max,n\max-1}$，将上述 MAF 降序排列，并选则 m 个最大的 MAF，$MAF_{i,i-1}$，$MAF_{j,j-1}$，$MAF_{k,k-1}$，…，这些阶次即可假设为加工机器人末端的模态阶次。

在 m 个模态频率稳定阶次的基础上，利用 MAC 对振型稳定性判定，MAC 定义为：

$$MAC_{a,b}=\frac{|\varphi_{a,j}^{\mathrm{T}}\varphi_{b,j}^{\mathrm{T}}|^2}{(\varphi_{a,j}^{\mathrm{T}}\varphi_{a,j})(\varphi_{b,j}^{\mathrm{T}}\varphi_{b,j})} \tag{9}$$

式中：$MAC_{a,b}$ 表征机器人末端相邻振型的相关性；$\varphi_{a,j}$ 为 a 阶机器人末端系统中的第 j 阶模态振型，$\varphi_{b,j}$ 同理。$MAC=1$ 表示两阶振型完全相关，且 $\sum MAC$ 表示前 n 阶模态振型的 MAC 之和。

通过模 MAF 及 MAC 即可确定加工机器人末端模态频率及振型最稳定的阶次，该阶次对应的模态参数即是其最终确定的结果。利用 NExT 法，模态置信因子及模态保证准则 3 种方案来减小噪声干扰，剔除虚假模态，提高加工机器人末端的模态参数识别精度。

基于上述思路，首先将机器人第 1 次走刀设置为侦测

工步，然后采集侦测工步执行过程中的振动数据并分解为若干数据段，对走刀过程中各段数据进行分析，从而辨识得到刀具轨迹上各关键点位处的模态参数，实现加工机器人末端模态参数在线辨识。

2 实验验证

为验证上述方法的实际应用效果，本文采用一台串联式加工机器人进行实验验证，如图 2 所示。实验系统包括一台加工机器人及一套振动数据采集分析系统。机器人采用史陶比尔 TX200 系列机器人，包含机器人本体结构、末端电主轴、圆柱螺旋立铣刀（直径为 8 mm，刀齿数为 3）及其控制系统，数据采集分析系统包括振动加速度传感器、数据采集设备以及振动数据分析处理软件系统。加速度传感器分别放置于加工机器人主轴 X 及 Y 方向上，采样频率设置为 10 kHz。

为准确获得加工机器人末端的模态参数，首先进行工艺规划，将第 1 次走刀设备为侦测工步，并将该工步拆分为 5 个切削段，每个切削段对应一个关键点位，如图 3 所示。采集侦测工步执行过程中的加工振动数据，并将其分解为 5 个数据段，每个关键点位处的模态参数基于一个对应数据段利用改进 SSI 法辨识得到。在完成模态参数计算后，将改进 SSI 法模态参数辨识结果与传统锤击实验结果进行对比，验证其模态辨识结果的准确性。

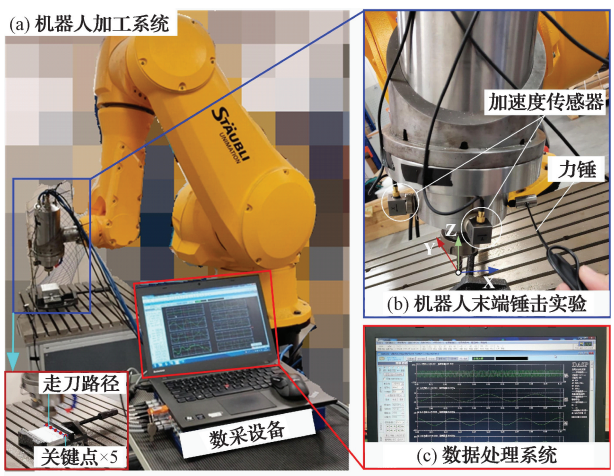


图 3 机器人铣削加工系统

2.1 改进 SSI 法模态参数辨识

侦测工步执行过程中工艺参数设置为主轴转速为 4 800 r/min，轴向、径向切深分别为 0.1 和 4 mm，进给率为 300 mm/min。在其走刀过程中，采集电主轴上的 X、Y 两个方向的铣削加工振动加速度数据。以 5 s 的采样时间为例，机器人铣削加工过程的振动加速度数据以及数据分段图如图 4 所示。从图 4 可以看出，机器人 X 方向的振动加速度信号最大振幅约为 Y 向的 5 倍，因此，可以看出，机器人 X 向的结构刚度更低，该方向上更容易产生加工失稳现象。利用 X 向和 Y 向振动数据对机器人末端进行模态参数辨识。

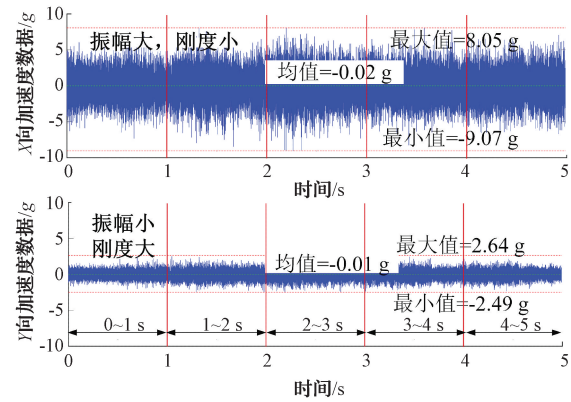


图 4 机器人末端 X 及 Y 向加工振动数据

首先，将 X、Y 向振动数据分别分为 5 个数据段，每个数据段对应 1 个关键点位（图 2）。然后，基于 X、Y 向各段数据，利用 NExT 法对其进行互相关计算实现数据预处理，结果如图 5 所示。可以看出，利用 NExT 法可从机器人铣削加工振动数据中提取到其自由振动数据，为后续模态辨识提供基础数据。

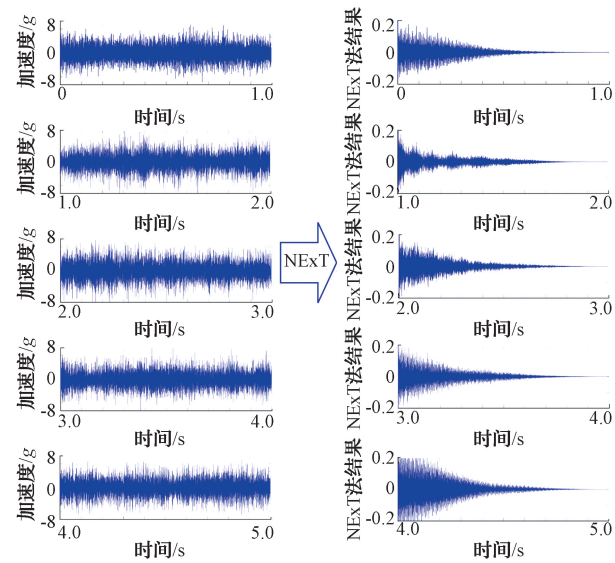


图 5 NExT 法数据预处理

然后，利用 NExT 法计算结果构造 Toeplitz 矩阵。在 Toeplitz 矩阵构建过程中，假设机器人末端模态阶次分别为 1，2，3，i，…，n，针对阶次 i，分别对 Toeplitz 进行奇异值分解求取其矩阵特征值（式（4）），进而利用式（5）和（6）计算阶次 i 对应的模态参数。根据上述步骤，计算模态频率下三角矩阵。进而利用模态频率置信因子及模态保证准确定机器人末端最终模态阶次及模态参数。

基于模态参数下三角矩阵，利用各段振动数据进行模态参数辨识得到的功率谱及稳定图如图 6 所示，可以看

出，利用本文提出的改进 SSI 法可有效提出虚假模态（主要为切削激励频率引起的模态），实现加工机器人末端模态参数的在线精确辨识。本文选择前 3 阶模态参数作为加工机器人最终的模态参数辨识结果。表 1 为通过改进 SSI 法辨识得到的加工机器人各数据段（切削段）对应的前 3 阶模态频率和阻尼比。各关键点位处的模态参数共同构成了机器人切削走刀过程的模态信息。

2.2 机器人模态参数辨识精度分析

为验证上述结果的准确性，将 EMA 法（锤击实验）模态辨识结果作为真值，并将改进 SSI 法辨识结果与 EMA 法及传统 SSI 法辨识结果进行对比，从而验证改进 SSI 法的模态辨识精度。

1）锤击实验模态辨识结果

由于锤击实验一般具有较高的模态辨识精度，因此将锤击实验辨识结果作为加工机器人末端模态参数参考值，将改进 SSI 法得到的辨识结果与其进行对比，计算辨识误差，从而验证辨识精度。

（1）同 2.1 节中机器人走刀过程中各切削段对应的关键点位置，将加工机器人分别移动到各关键点位，并逐点进行锤击实验，从而辨识得到关键点位处的模态参数。

（2）在各关键点位处，利用力锤作为激振设备，在锤击的同时采集的力锤的激励数据及加速度传感器的响应数据。

（3）根据激励与响应数据，利用特征系统实现算法拟合机器人末端频响函数，进而计算各关键点处对应的模态参数。表 2 为锤击实验法得到的各阶模态参数。

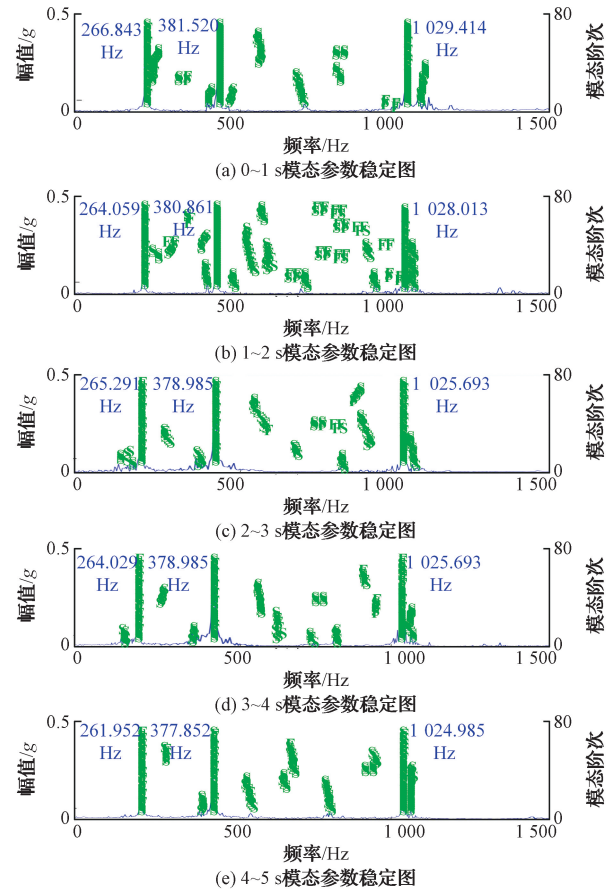


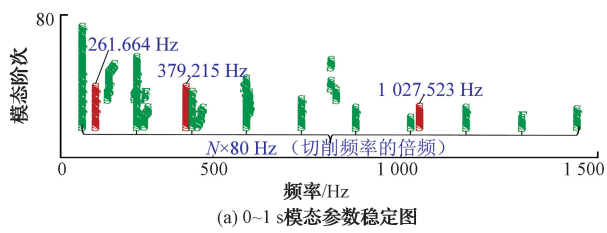
图 6 基于改进 SSI 法的模态结果稳定图

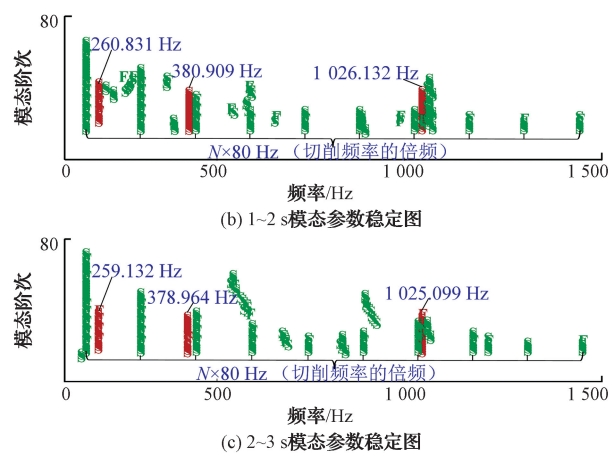
表 1 改进 SSI 法的模态参数辨识结果

阶次	0～1 s		1～2 s		2～3 s		3～4 s		4～5 s	
	ω	ξ	ω	ξ	ω	ξ	ω	ξ	ω	ξ
1	266.84	2.249	264.05	2.240	265.29	2.235	264.02	2.233	261.95	2.230
2	381.52	1.971	380.86	1.968	380.00	1.962	378.98	1.959	377.85	1.945
3	1 029.41	1.506	1 028.01	1.512	1 027.25	1.502	1 025.69	1.489	1 024.98	1.482

2）传统 SSI 法模态辨识结果

基于 2.1 节得到的振动数据，利用传统 SSI 法对各段数据进行模态辨识。利用传统 SSI 法与改进 SSI 法进行模态辨识得到的稳定图如图 7 所示。其中红色标记代表传统 SSI 法模态真实值，而绿色标记代表切削基频率、倍频及噪声的模态。





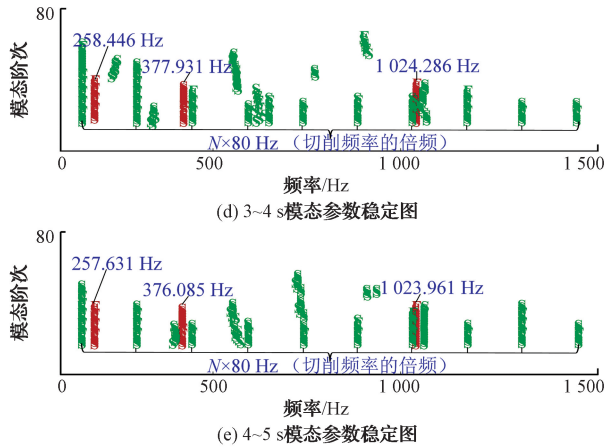


图 7　传统 SSI 法模态分析稳定图

可以看出传统 SSI 法得到的能量谱中切削激励频率能量分为占主要成分，且其几乎淹没了机器人末端真实模态参数。相比之下，本文提出的改进 SSI 法可实现加工机器人末端模态参数的精确辨识。在此基础上，表 3 为传统 SSI 法得到的机器人各阶模态参数。

3）改进、传统 SSI 法模态辨识误差分析

将锤击实验结果（表 2）作为加工机器人模态参数参考值，将改进 SSI 法辨识结果（表 1）及传统 SSI 法（表 3）辨识结果分别与之对比验证其辨识精度。表 4～8 分别为改进 SSI 法与传统 SSI 法的模态辨识精度。

从表 4～8 可以看出，改进 SSI 法相比于传统 SSI 法模态参数辨识误差更小，精度更高。其中，基于 SSI 法的模态频率辨识结果误差均在 7%以内。可以看出，若只关心模态频率及阻尼比，改进 SSI 法可代替锤击实验法作为加工机器人模态参数辨识的一种新方法。

值得指出的是，利用改进 SSI 法对加工机器人进行模态参数辨识无需进行复杂的锤击实验，且不影响加工机器人正常加工过程。同时，基于该方法也可实现加工机器人末端模态参数在线识别。除此之外，该方法实验成本较低，对于加工机器人动力学特性的分析和工艺参数优化也

表 2　锤击实验模态参数辨识结果

阶次	关键点 1		关键点 2		关键点 3		关键点 4		关键点 5	
	ω	ξ	ω	ξ	ω	ξ	ω	ξ	ω	ξ
1	278.235	2.200	277.136	2.159	275.856	2.153	275.011	2.109	274.371	2.100
2	397.680	1.987	396.752	1.972	395.723	1.937	394.285	1.902	393.971	1.987
3	1 056.444	1.613	1 055.019	1.601	1 054.251	1.602	1 053.852	1.588	1 052.397	1.572

表 3　传统 SSI 法模态参数辨识结果

阶次	0～1 s		1～2 s		2～3 s		3～4 s		4～5 s	
	ω	ξ	ω	ξ	ω	ξ	ω	ξ	ω	ξ
1	261.664	2.236	260.831	2.229	259.132	2.212	258.446	2.208	257.631	2.207
2	379.215	1.962	380.909	1.959	378.964	1.951	377.931	1.943	376.085	1.941
3	1 027.523	1.500	1 026.132	1.503	1 025.099	1.492	1 024.286	1.488	1 023.961	1.480

表 4　改进、传统 SSI 法计算误差（关键点 1）

阶次	改进 SSI 法		传统 SSI 法	
	ω/%	ξ/%	ω/%	ξ/%
1	4.094	2.245	5.956	1.636
2	4.064	0.800	4.643	1.258
3	2.559	6.615	2.738	7.006

表 5　改进、传统 SSI 法计算误差（关键点 2）

阶次	改进 SSI 法		传统 SSI 法	
	ω/%	ξ/%	ω/%	ξ/%
1	4.719	3.756	5.883	3.242
2	4.005	0.193	3.993	0.659
3	2.560	5.540	2.738	6.121

表 6　改进、传统 SSI 法计算误差（关键点 3）

阶次	改进 SSI 法		传统 SSI 法	
	ω/%	ξ/%	ω/%	ξ/%
1	3.830	3.818	6.063	2.740
2	3.972	1.316	4.235	0.722
3	2.561	6.236	2.765	6.866

表 7　改进、传统 SSI 法计算误差（关键点 4）

阶次	改进 SSI 法		传统 SSI 法	
	ω/%	ξ/%	ω/%	ξ/%
1	3.993	5.884	6.023	4.694
2	3.880	3.039	4.148	2.156
3	2.672	6.178	2.806	6.297

表 8　改进、传统 SSI 法计算误差（关键点 5）

阶次	改进 SSI 法		传统 SSI 法	
	ω/%	ξ/%	ω/%	ξ/%
1	4.526	6.190	6.101	5.095
2	4.091	2.104	4.540	2.315
3	2.604	5.706	2.702	5.852

具有一定的指导意义。

3 结 论

本文提出一种实测振动数据驱动的加工机器人工作模态参数在线辨识方法。该方法基于传统 SSI 法，利用 NExT 法，模态置信因子及模态保证准则 3 个步骤提高其工作模态参数辨识精度。实验结果表明，该方法可准确地获得机器人工作模态参数，相比于锤击实验法，模态参数辨识误差可控制在 7%以内(模态频率辨识误差在 5%以内，阻尼比辨识误差为 7%以内)。首次将工作模态参数辨识方法应用于加工机器人模态参数在线识别过程中，该方法基于加工振动数据对机器人走刀路径上关键点位处的模态参数进行在线识别，且识别结果可服务于加工机器人铣削加工动力学分析和后续走刀过程工艺参数优化。提出的基于改进 SSI 法的加工机器人工作模态参数辨识方法具备一定的适用性，可应用于多种类机器人工作模态参数辨识过程中，例如协作机器人，码垛机器人等。

参 考 文 献

[1] 焦传佳，江明. 基于 AprilTag 图像识别的移动机器人定位研究[J]. 电子测量与仪器学报，2021，35(1)：110-119.

[2] 李特，葛宇航，艾靖超，等. 锥形薄壁筒内轮式加工机器人自适应运动控制[J]. 仪器仪表学报，2023，44(5)：90-99.

[3] 朱大虎，徐小虎，蒋诚，等. 复杂叶片机器人磨抛加工工艺技术研究进展[J]. 航空学报，2021，42(10)：8-30.

[4] 陈仁良，李攀，吴伟，等. 直升机飞行动力学数学建模问题[J]. 航空学报，2017，38(7)：520915-520915.

[5] 方彦奎，李长玉. 某轿车排气系统模态分析与悬挂位置优化[J]. 电子测量与仪器学报，2020，34(2)：195-202.

[6] 朱梦，张方，秦远田，等. RV 减速器的模态仿真及实验[J]. 国外电子测量技术，2017，36(12)：5-9.

[7] 刘宇飞，辛克贵，樊健生，等. 环境激励下结构模态参数识别方法综述[J]. 工程力学，2014，31(4)：46-53.

[8] 李玉刚，叶庆卫，周宇，等. 基于模态参数提取的随机子空间辨识算法改进[J]. 中国机械工程，2017，28(1)：69-74.

[9] 屈文忠，蔡元奇，朱以文. 基于随机子空间方法的框架结构模态辨识实验[J]. 武汉大学学报(工学版)，2007，40(5)：82-85.

[10] 张永祥，刘心，褚志刚，等. 基于随机子空间法的模态参数自动提取[J]. 机械工程学报，2018，54(9)：187-194.

[11] 付志超，仲维国，陈志平，等. 大展弦比柔性机翼的结构动力学特性试验研究[J]. 航空学报，2013，34(9)：2177-2184.

[12] 黄焱，陈涛，朱本瑞. 基于随机子空间法的海洋平台模态特征实时提取方法研究[J]. 振动与冲击，2021，40(3)：147-155.

[13] 殷红，董康立，彭珍瑞. 基于 VMD-SSI 的结构模态参数识别[J]. 振动与冲击，2020，39(10)：81-91.

[14] 王燕，杭晓晨，姜东，等. 协方差驱动随机子空间的 Toeplitz 矩阵行数选择方法[J]. 振动与冲击，2015，34(7)：71-92.

[15] 张小宁，段忠东. 一种自动识别结构模态参数的随机子空间方法[J]. 振动工程学报，2017，30(4)：542-548.

[16] 文鹏，陈桥枫，杨风帆. 改进随机子空间算法在桥梁结构中的运用[J]. 振动、测试与诊断，2020，40(2)：301-315.

[17] 陈永高，钟振宇，何杰. 基于改进确定-随机子空间算法的桥梁结果模态参数识别[J]. 振动与冲击，2021，40(2)：220-227.

作 者 简 介

郭辉(通信作者)，硕士，高级工程师，主要研究方向为机器人加工技术、模态分析技术等。
E-mail：gh8029@163.com