

# 基于灵敏度筛选的机床多固定结合面等效刚度虚拟识别方法

林盛腾

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2026年5月11日; 录用日期: 2026年6月4日; 发布日期: 2026年6月10日

## 摘要

针对缺少实验条件时机床多固定结合面刚度难以辨识的问题, 本文以由床身、立柱、主轴箱、主轴、刀具、鞍部和工作台组成的七部件机床为研究对象, 提出一种基于灵敏度筛选的等效刚度虚拟识别的方法。本文沿主传力路径选取床身-立柱、立柱-主轴箱、床身-鞍部和鞍部-工作台四个关键固定结合面。其中, 高保真基准模型采用4点分布式三向弹簧来表征界面特性, 低维识别模型采用集中等效三向平移刚度参数来进行描述。本文结合模态频率和刀尖-工作台相对位移响应对参数进行修正。结果表明, 识别后的模型在低阶模态频率和主要共振响应方面与基准模型更加接近。由此可以看出, 该方法能够较好表征关键结合面对整机动力学特性的主导作用。

## 关键词

机床动力学, 固定结合面, 等效刚度识别, 模态分析, 频率响应函数

## A Virtual Identification Method for the Equivalent Stiffness of Multiple Fixed Connection Surfaces of Machine Tools Based on Sensitivity Screening

Shengteng Lin

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 11, 2026; accepted: June 4, 2026; published: June 10, 2026

## Abstract

This paper addresses the problem of identifying the stiffness of multiple fixed joints in a machine tool when experimental conditions are limited. The study considers a seven-component machine tool made up of the bed, column, headstock, spindle, cutting tool, saddle, and worktable, and it presents a virtual identification method for equivalent joint stiffness based on sensitivity screening. Along the main load-transfer path, four key fixed interfaces are selected: the bed-column joint, the column-headstock joint, the bed-saddle joint, and the saddle-worktable joint. In the high-fidelity reference model, each interface is described by a four-point distributed spring system with stiffness in three directions. In the reduced-order identification model, each key interface is represented by lumped equivalent translational stiffness parameters in three orthogonal directions. The parameter updating process uses both modal frequencies and the relative displacement response between the tool tip and the worktable. The results show that, after identification, the reduced-order model agrees more closely with the reference model in low-order natural frequencies and major resonant responses. This result indicates that the proposed method can capture, in a clear and effective way, the dominant influence of key fixed joints on the overall dynamic behavior of the machine tool.

## Keywords

Machine Tool Dynamics, Fixed Joints, Equivalent Stiffness Identification, Modal Analysis, Frequency Response Function

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

机床是典型的多部件装配体，床身、立柱、主轴箱、鞍部和工作台之间并不是理想的连续连接，而是通过多个机械结合面共同传递载荷和振动。因此，结合面的动力学特性会直接影响整机的模态分布、共振区间及刀尖响应[1]。如果在建模时把界面处理得过于理想，即使几何参数和材料参数设置合理，有限元的结果也可能和真实动态行为存在明显偏差。

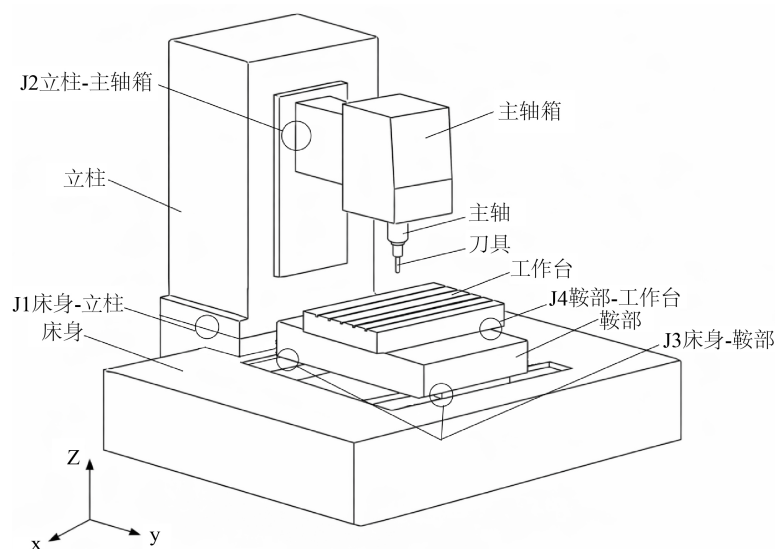
围绕固定结合面的建模问题，现有研究大体可以分为两类。一类方法把界面等效为集中弹簧-阻尼单元，这类方法形式简洁，也比较容易实现，但它往往难以充分反映界面的耦合作用和分布特征[2]。另一类方法则引入虚拟材料层、分形接触理论或分布式接触参数，这样做可以提高模型的物理真实性，但同时也会带来参数数量增多、辨识难度上升等问题[3]。从这个角度看，建模精度和参数可识别性之间始终存在一个比较突出的矛盾。

对于整机多结合面系统，这一问题会更明显。若将全部界面参数同时纳入识别过程，模型往往会呈现维数过高、参数相关性过强以及结果不唯一等情况[4][5]。已有研究表明，床身-立柱类界面通常属于高敏感界面，其法向刚度对低阶模态和整体响应影响尤为显著[3][6]。这也说明，并不是所有结合面对整机动力的贡献都处于同一水平，优先识别关键界面更符合工程实际。

基于上述认识，本文以七部件机床为对象，选取四个关键固定结合面，建立参数化有限元模型，并提出“灵敏度筛选-最小二乘更新”的虚拟识别流程。本文采用“高保真基准模型生成虚拟试验数据-低维识别模型反演参数”的双模型策略，用来验证在缺乏实验条件时，多固定结合面等效刚度识别的可

行性。

为了更清楚地说明研究对象和关键界面的位置，图 1 给出了七部件机床及四个关键固定结合面的结构示意图。



**Figure 1.** Schematic diagram of the seven-component machine tool and the four key fixed connection surfaces

**图 1.** 七部件机床与四个关键固定结合面示意图

## 2. 七部件机床及关键结合面参数化模型

### 2.1. 关键结合面选取

本文研究对象由床身、立柱、主轴箱、主轴、刀具、鞍部和工作台七个部件组成。若从动力传递角度看，整机可分为刀尖侧和工作台侧两条主要支路。基于这一点，本文选取以下四个固定结合面作为识别对象：

- J1: 床身 - 立柱结合面；
- J2: 立柱 - 主轴箱结合面；
- J3: 床身 - 鞍部结合面；
- J4: 鞍部 - 工作台结合面。

这样的取舍有意避开了主轴 - 刀具、主轴箱 - 主轴支承等接口，因为这些位置更接近夹持界面或支承系统问题，如果和固定结合面同时处理，会弱化本文主题，也会明显增加参数数量。相比之下，J1~J4 四个界面都位于整机主刚度链路上，并与刀尖 - 工作台相对动态误差直接相关，更适合作为本文研究核心。

### 2.2. 动力学方程

在小振动线性假设下，机床系统动力学方程可表示为：

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K(\theta)x = F(t)$$

其中， $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵， $x$  为位移向量， $F(t)$  为外激励， $\theta$  为待识别参

数向量。

系统总刚度矩阵可写为：

$$K(\theta) = K_0 + \sum_{i=1}^4 T_i^T K_{J_i}(\theta_i) T_i$$

式中， $K(\theta)$ 为七部件刚性装配时的基体刚度矩阵  $K_{J_i}$  为第  $i$  个结合面的局部刚度矩阵， $T_i$  为装配变换矩阵。本文关注的重点并不是材料本体参数，而是各关键界面等效刚度对整机刚度矩阵的修正作用。

### 2.3. 结合面等效参数化

为兼顾界面分布特性与参数可识别性，本文对高保真基准模型与低维识别模型采用不同的界面表达方式。

在低维识别模型中，每个关键结合面采用集中等效三向平移刚度参数表示，即

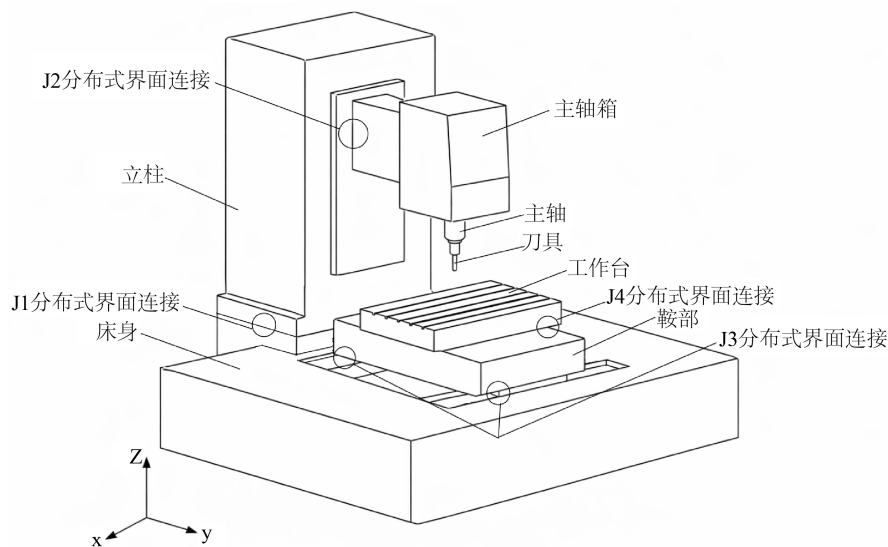
$$K_{J_i} = \text{diag}(k_{x_i}, k_{y_i}, k_{z_i}), \quad i = 1, 2, 3, 4$$

其中， $k_{x_i}$ ， $k_{y_i}$ ， $k_{z_i}$  分别表示第  $i$  个关键结合面在三个正交方向上的等效平移刚度。由此，待识别参数向量可写为：

$$\theta = [k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}, k_{x2}, k_{y2}, k_{z2}, k_{x3}, k_{y3}, k_{z3}, k_{x4}, k_{y4}, k_{z4}]^T$$

高保真基准模型中，J1~J4 关键结合面均采用 4 点分布式三向弹簧模型。本文在结合面两侧设置 4 对对应分布点，并在各对应点之间沿三个正交方向布置弹簧，用来表征界面的分布式刚度特性。该模型虽然不单独设置转动刚度，但可以通过多点空间分布反映界面对局部转动和耦合变形的约束。基于此，本文建立了“高保真分布式弹簧界面模型 - 低维集中等效刚度模型”的双层参数化框架。前者用于生成虚拟参考模态与频响数据，后者用于参数识别与模型更新。

表 1 中  $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  为界面总等效刚度初值；在高保真模型中，单个分布点对应方向的弹簧刚度取总刚度的 1/4，而在低维模型中则直接作为集中参数使用。



(a) 高保真基准模型示意图

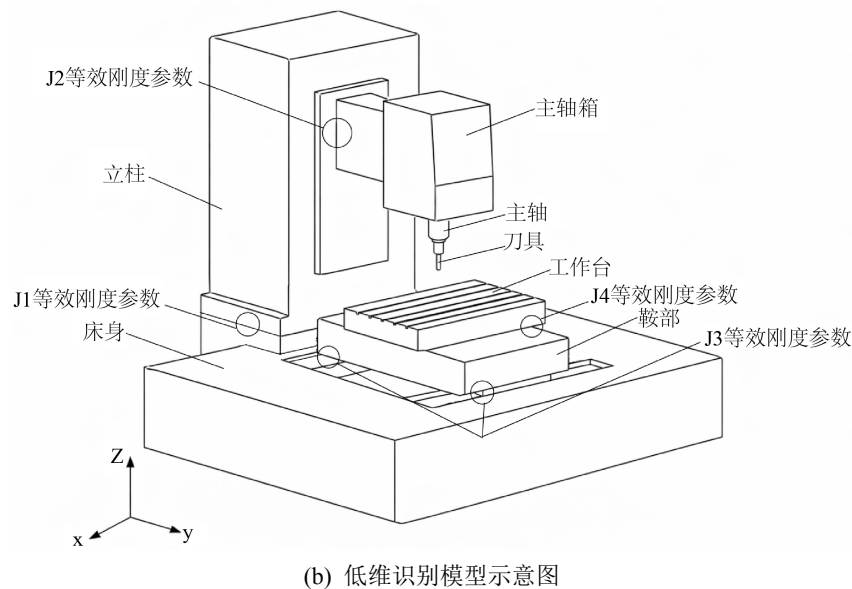


Figure 2. Schematic diagram of high-fidelity benchmark model and low-dimensional identification model

图 2. 高保真基准模型与低维识别模型示意图

4 点分布式弹簧的布置遵循“覆盖结合面主要受力区域并兼顾计算简化”的原则。具体而言，4 个分布点沿结合面几何范围近似均匀布置，并尽量靠近界面四个象限区域，以保证界面法向与切向刚度的空间分布能够得到基本表征。与单点集中连接相比，4 点布置能够更有效反映界面对局部转动和耦合变形的约束作用，同时避免分布点过多导致参数规模和计算成本显著增加。

四个关键结合面的参数定义、等效尺寸及初始刚度范围见表 1。

Table 1. Definition and initial range of key joint surface parameters

表 1. 关键结合面参数定义与初始范围表

界面编号	界面名称	等效长度 $l_i/\text{mm}$	等效宽度 $b_i/\text{mm}$	$k_x$ 初值 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	$k_y$ 初值 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	$k_z$ 初值 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
J1	床身 - 立柱	420	180	$3.0\times 10^8$	$3.2\times 10^8$	$6.5\times 10^8$
J2	立柱 - 主轴箱	260	140	$2.4\times 10^8$	$2.6\times 10^8$	$5.2\times 10^8$
J3	床身 - 鞍部	300	160	$2.2\times 10^8$	$2.0\times 10^8$	$4.2\times 10^8$
J4	鞍部 - 工作台	280	150	$1.8\times 10^8$	$1.7\times 10^8$	$3.6\times 10^8$

### 3. 基于虚拟试验的等效刚度识别方法

#### 3.1. 双模型虚拟识别框架

在无实体实验条件下，本文采用双模型策略开展虚拟识别。高保真基准模型在 J1~J4 四个关键固定结合面上布置 4 点分布式三向弹簧，用来表征界面的分布式刚度特性；低维识别模型则将各关键结合面压缩为集中等效三向平移刚度参数，用于参数更新。随后，由高保真基准模型生成虚拟模态与频响数据，再由低维识别模型进行参数反演。该策略的核心在于：在保留界面分布特征的基础上，通过参数压缩提高识别可行性，并验证低维模型对整机动力学主导特征的保持能力。

### 3.2. 灵敏度分析

直接对 12 个参数全部联合优化虽然可以实现, 但会增加求解不稳定性。因此, 本文先对候选参数进行灵敏度排序。对第  $r$  阶模态频率  $f_r$  与参数  $\theta_j$ , 定义归一化灵敏度为:

$$S_{rj} = \left| \frac{\theta_j}{f_r} \cdot \frac{\partial f_r}{\partial \theta_j} \right|$$

采用有限差分近似可得:

$$\frac{\partial f_r}{\partial \theta_j} \approx \frac{f_r(\theta_j + \Delta\theta_j) - f_r(\theta_j - \Delta\theta_j)}{2\Delta\theta_j}$$

为了兼顾整体模态和局部响应, 本文进一步将关键测点频响峰值纳入评价, 构造综合灵敏度指标:

$$\bar{S}_j = \sum_{r=1}^m \omega_r S_{rj}^{(f)} + \sum_{q=1}^n \nu_q S_{qj}^{(H)}$$

其中,  $\omega_r$  和  $\nu_q$  为权重。按  $\bar{S}_j$  大小排序后, 仅保留前若干个高敏感参数参与识别, 其余参数固定为初值。

本文对模态频率指标和关键响应峰值指标采用等权处理, 即各阶模态频率权重  $\omega_r$  取相同值, 各响应峰值权重  $\nu_q$  也取相同值。基于综合灵敏度指标  $\bar{S}_j$  的排序结果, 保留前 6 个高敏感参数进入后续识别, 其余参数固定为初始值。该处理方式在控制参数维数的同时, 能够突出对低阶模态和关键响应影响较大的界面参数。

### 3.3. 目标函数与参数更新

本文采用加权最小二乘方法进行参数更新, 目标函数为:

$$J(\theta) = \sum_{r=1}^m \omega_r \left( \frac{f_r^{cal}(\theta) - f_r^{ref}}{f_r^{ref}} \right)^2 + \sum_{q=1}^n \nu_q \left( \frac{H_q^{cal}(\theta) - H_q^{ref}}{H_q^{ref}} \right)^2$$

为保证物理合理性, 给定参数边界约束:

$$\theta_j^L \leq \theta_j \leq \theta_j^U$$

在 MATLAB 中调用 lsqnonlin 即可完成求解。本文没有将 Bayesian 反演作为主体方法, 原因并不在于其不重要, 而是当前研究更强调流程闭合与快速实现, 过强的概率建模会使文章主线分散。基于 ANSYS 与 MATLAB 的联合计算流程如图 3 所示。

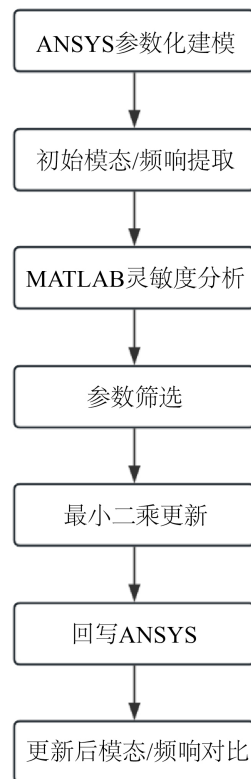
## 4. 有限元模型与计算工况

本文在 ANSYS Workbench 中建立七部件机床装配模型。低维识别模型中, J1~J4 四个关键结合面采用集中等效三向平移刚度连接; 高保真基准模型中, 则采用 4 点分布式三向弹簧, 用来表征界面的分布式刚度特性。本文在床身底面施加固定约束, 并将刀尖点 P1 和工作台中心点 P2 设为响应测点。

谐响应分析时, 本文在刀尖附近施加 Z 向单位简谐力, 频率范围为 0~500 Hz, 再根据两测点的复数响应差计算刀尖 - 工作台相对位移幅频曲线。本文设置初始模型、高保真基准模型和识别后模型三类工况。

刀尖 - 工作台相对位移定义为:

$$\Delta X(\omega) = X_{tool}(\omega) - X_{table}(\omega)$$



**Figure 3.** Joint ANSYS-MATLAB Identification Flowchart

**图 3.** ANSYS-MATLAB 联合识别流程图

其幅值为:

$$|\Delta X(\omega)| = |X_{tool}(\omega) - X_{table}(\omega)|$$

这一指标被用作最终工程评价量，因为相较于单独的刀尖位移或工作台位移，它更接近加工误差形成机制。

七部件材料参数信息列于表 2。

**Table 2.** Material properties of the seven components

**表 2.** 七部件材料参数表

部件名称	材料	弹性模量 $E$ GPa	泊松比 $\nu$	密度 $\rho$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
床身	HT300 灰铸铁	130	0.27	7300
立柱	HT300 灰铸铁	130	0.27	7300
主轴箱	HT300 灰铸铁	130	0.27	7300
主轴	40Cr 钢	210	0.3	7850
刀具	高速钢	210	0.3	7800
鞍部	HT300 灰铸铁	130	0.27	7300
工作台	HT300 灰铸铁	130	0.27	7300

## 5. 结果与讨论

### 5.1. 灵敏度排序结果

灵敏度分析表明，不同界面和不同方向刚度对模态与频响的影响存在明显差异。总体来看，J1(床身-立柱)和J2(立柱-主轴箱)表现出更高的综合灵敏度，而J3和J4对工作台支路相关响应更敏感。其中，J1的法向刚度通常对低阶模态影响最显著，这与已有文献结论基本一致[7]。这一结果说明，沿刀尖支路的关键界面更值得优先识别。

### 5.2. 模态对比结果

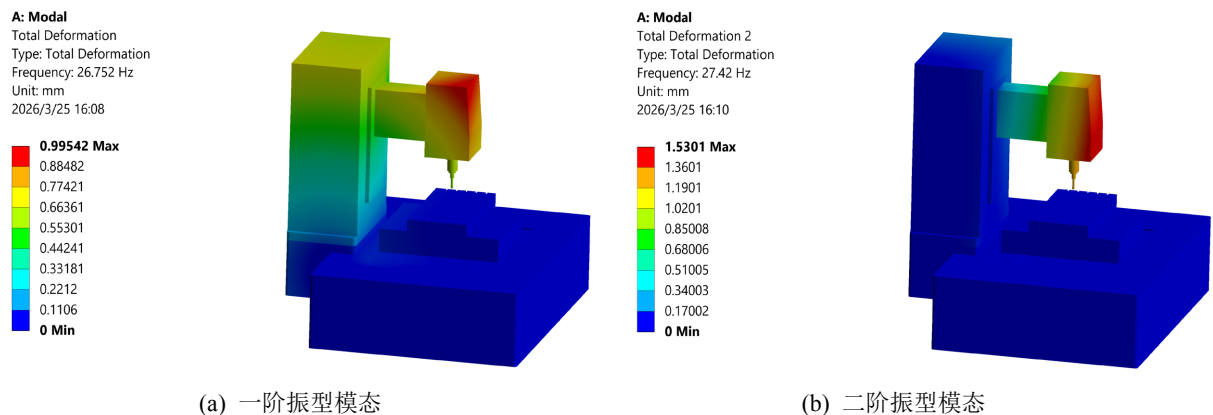
对初始低维模型和高保真基准模型进行模态分析后可以看出，初始模型虽然能够反映主要振型特征，但前几阶频率仍有较明显偏差。这说明仅靠经验刚度值，还不能准确描述多固定结合面对整机动态特性的综合影响。识别完成后，更新模型在前6阶模态频率上的误差明显减小，这说明参数修正是有效的，不过该方法对较高阶局部模态的修正作用仍然有限。

识别前后模型与高保真基准模型前6阶模态频率对比结果见表3。

**Table 3.** Comparison table of the first 6 modal frequencies  
**表 3.** 前 6 阶模态频率对比表

阶次	高保真模型 频率/HZ	低维模型 频率/HZ	初始误差/%	识别后模型 频率/HZ	识别后误差 /%	主要振型特征
1	26.752	21.739	18.739	25.777	3.645	一阶整体摆振模态
2	27.42	24.679	9.996	27.471	0.186	二阶主轴箱局部摆振模态
3	48.466	42.611	12.081	48.464	0.004	三阶工作台-鞍部局部振动模态
4	53.552	43.658	18.476	53.452	0.187	四阶刀尖支路-工作台支路耦合模态
5	54.867	52.614	4.106	54.24	1.143	五阶整机局部复合振动模态
6	59.237	58.985	0.425	54.551	7.911	六阶主轴箱前端局部振动模态

为进一步说明识别模型与基准模型在振型层面对应关系，给出了基准模型前6阶典型振型，如图4所示。



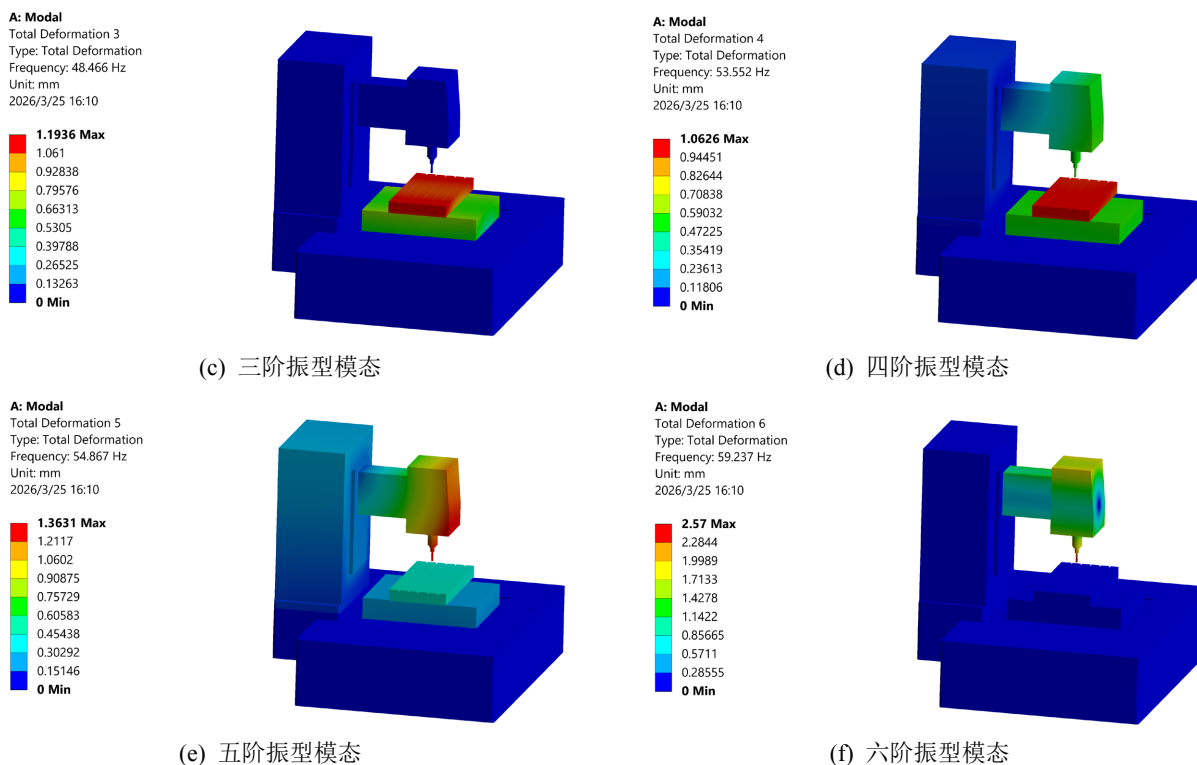


Figure 4. Typical vibration patterns of the first 6 orders of the benchmark model

图 4. 基准模型前 6 阶典型振型图

从图 4 可以看出, 前 6 阶振型已经表现出较清晰的结构分布特征。第 1、2 阶模态主要受立柱 - 主轴箱支路控制, 表现为整机低阶整体摆振, 以及主轴箱悬伸部分局部摆振。第 3 阶模态中, 工作台 - 鞍部支路变形开始增强, 这说明工作台侧的局部柔性开始显现。第 4、5 阶模态表现为刀尖支路与工作台支路的耦合振动。第 6 阶模态则主要集中于主轴箱前端和刀尖附近的局部振动。总体来看, 低阶模态主要受立柱 - 主轴箱支路影响, 而随着阶次升高, 工作台 - 鞍部支路的参与程度逐步增强。

### 5.3. 频响与相对位移验证

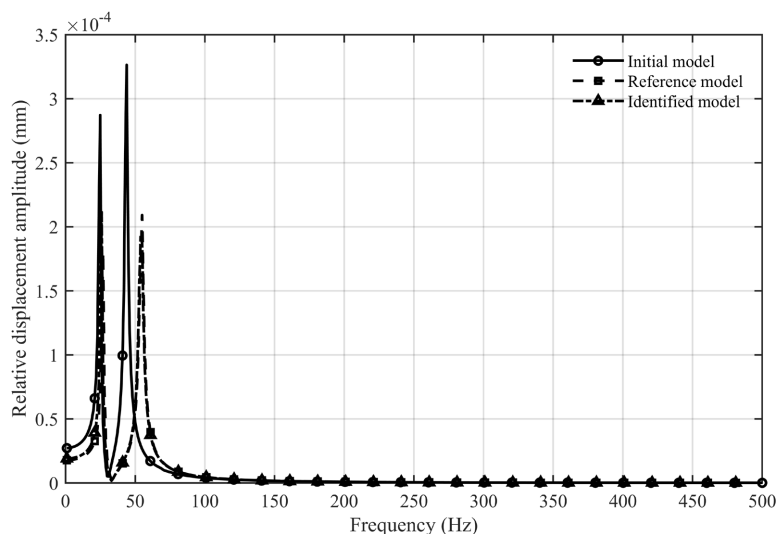
由于缺乏实体实验数据, 本文将高保真基准模型结果作为虚拟参考数据。该模型在 J1~J4 四个关键固定结合面上均采用 4 点分布式三向弹簧进行表征。针对初始低维模型, 本文选取 J1 和 J2 的等效刚度缩放系数作为待识别参数, 并结合模态频率与关键响应峰值构造最小二乘目标函数, 以此得到识别后模型。随后, 本文提取刀尖点与工作台点在 Z 方向上的位移频响, 再通过复数响应差计算刀尖 - 工作台相对位移幅频曲线, 结果如图 5 所示。

图 5 给出了不同模型下刀尖 - 工作台相对位移幅频曲线的对比结果。由图 5(a)可以看出, 各模型在全频段内的总体变化趋势基本一致, 差异主要集中在低频共振区间。图 5(b)进一步说明, 不同模型在主要共振峰的频率位置和峰值幅值上仍存在一定的差异。与初始低维模型相比, 识别后模型的曲线更接近高保真基准模型, 这说明参数修正后, 模型对关键动态响应的预测能力得到了提高。

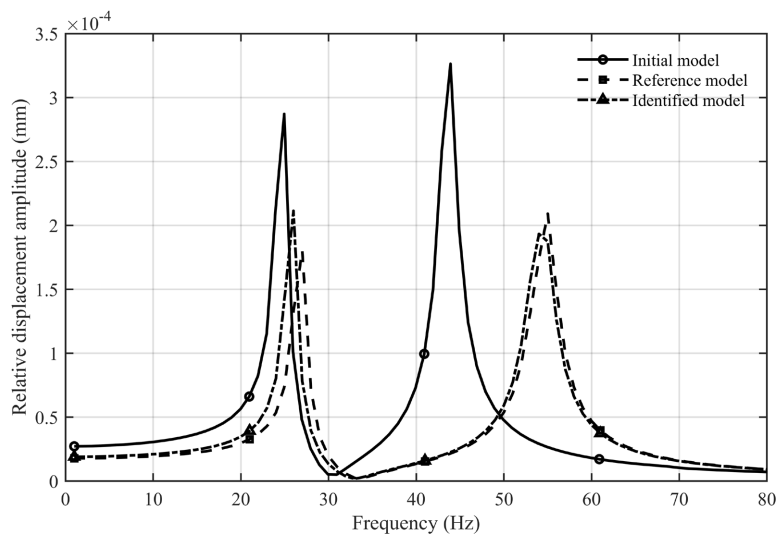
### 5.4. 局限性分析

本文方法不依赖实体实验, 参数数量可控, 而且结果具备一定的工程解释性, 但是仍存在局限。本文采用的是线性等效刚度模型, 没有考虑预紧力变化、表面粗糙度演化和界面非线性接触等因素, 也没

有纳入基础柔性、移动副和主轴夹持接口等影响。也就是说，本文更适合用于固定结合面优先识别的前期研究。



(a) 0~500 Hz 全频段对比



(b) 0~80 Hz 低频局部放大

**Figure 5.** Comparison chart of amplitude-frequency curve of relative displacement between tool tip and worktable

**图 5.** 刀尖 - 工作台相对位移幅频曲线对比图

## 6. 结论

本文以七部件机床为研究对象，围绕多固定结合面刚度识别问题，提出了一种基于灵敏度筛选的虚拟识别方法。结合本文的建模与分析结果，可以得到以下结论：

(1) 本文选取床身 - 立柱、立柱 - 主轴箱、床身 - 鞍部和鞍部 - 工作台四个关键固定结合面，能够较好地覆盖刀尖支路和工作台支路的主要刚度传递链路。

(2) 本文采用“4 点分布式三向弹簧高保真基准模型 - 低维集中参数模型”的双模型策略，可以在没

有实验条件的情况下,验证了多固定结合面等效刚度识别的可行性。

(3) 归一化模态与频响灵敏度分析可以有效筛选高敏感参数,这样不仅能降低识别维数,也能提高最小二乘更新过程的稳定性。

(4) 识别后模型在模态频率、频响函数以及刀尖-工作台相对位移响应方面,都更接近高保真基准模型,说明本文方法能够较好恢复多固定结合面对整机动力学的主导贡献。

(5) 刀尖支路上的结合面通常表现出更高的敏感性,其中床身-立柱和立柱-主轴箱界面的法向刚度对低阶模态及关键响应影响更为明显,这个结果可为机床结构优化和后续实验识别提供参考。

## 参考文献

- [1] Tian, H., Li, B., Liu, H., Mao, K., Peng, F. and Huang, X. (2011) A New Method of Virtual Material Hypothesis-Based Dynamic Modeling on Fixed Joint Interface in Machine Tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **51**, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.004>
- [2] Mao, K., Li, B., Wu, J. and Shao, X. (2010) Stiffness Influential Factors-Based Dynamic Modeling and Its Parameter Identification Method of Fixed Joints in Machine Tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **50**, 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.10.017>
- [3] Chang, Y., Ding, J., He, Z., Shehzad, A., Ding, Y., Lu, H., et al. (2020) Effect of Joint Interfacial Contact Stiffness on Structural Dynamics of Ultra-Precision Machine Tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **158**, Article ID: 103609. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103609>
- [4] Ugras, R.C. and Altintas, Y. (2024) Modeling and Identification of Clamping Contact Stiffness. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **52**, 264-276. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.06.005>
- [5] Ping, M., Zhang, W. and Tang, L. (2025) A Novel Bayesian Method for Simultaneous Identification of Structural Mass and Stiffness Parameters. *Probabilistic Engineering Mechanics*, **82**, Article ID: 103868. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2025.103868>
- [6] 申继承, 朱祥龙, 董志刚, 康仁科, 徐嘉慧. 磨床床身立柱固定结合面动态特性研究[J]. 制造技术与机床, 2023(7): 89-93.
- [7] 郭垒, 张辉, 叶佩青, 等. 基于灵敏度分析的机床轻量化设计[J]. 清华大学学报, 2011, 51(6): 846-850.