

文章编号:1009-3087(2013)04-0090-07

基于模态柔度的机床结合部动态刚度正交优化方法

孙明楠,殷国富*,胡 腾

(四川大学 制造科学与工程学院,四川 成都 610065)

摘 要:针对合理分配机床结合部动态刚度的需要,提出一种基于模态柔度理论的机床结合部动态刚度优化方法。该方法通过计算机床各阶模态柔度比判定对机床动态特性影响显著的薄弱模态,建立以几个薄弱模态的最小模态柔度为目标函数的多目标优化模型。为提高优化计算效率,引入了灰色系统理论中的灰关联分析法与正交试验设计。以1台精密卧式加工中心为例,将该方法应用于立柱-主轴系统分布的直线导轨、滚珠丝杠和螺栓结合部动态刚度的优化设计,识别出X向直线导轨结合部动态刚度对机床动态特性影响最为显著,并确定了1组结合部动态刚度的最优解。数值仿真和试验结果验证了该方法的有效性与工程实用性。

关键词:模态柔度;结合部;动态刚度;正交试验;灰关联分析;多目标优化

中图分类号:TH113;TG502

文献标志码:A

Orthogonal Optimization Method of Dynamic Stiffness of Machine Tool Joints Based on Modal Flexibility

SUN Ming-nan, YIN Guo-fu*, HU Teng

(School of Manufacturing Sci. and Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: To satisfy the requirements of distributing the dynamic stiffness of machine tool joints, an optimization design method for dynamic stiffness of machine tool joints based on the theory of modal flexibility was proposed. Weak modes that had significant effects on dynamic characteristics of the machine tool were judged according to modal flexibility coefficients of those modes. The multi-objective optimization mathematical model was established, with the minimum modal flexibility of the weak modes being the objective functions. To increase the efficiency of optimum calculations, the orthogonal experiment design and the grey relational analysis (GRA) method were introduced. Taking a precision horizontal machining center as example, the method was applied to the dynamic stiffness optimization design of the linear guide, ball screw, and bolt joints of the column-spindle system. The linear guide joint in the X-axial direction was identified that it has the most significant influence on dynamic characteristics of the machine tool. The best solution of dynamic stiffness of joints was obtained. The effectiveness and engineering practicability of the proposed method were verified by the results of numerical simulation and experiments.

Key words: modal flexibility; joints; dynamic stiffness; orthogonal experiment; grey relational analysis; multi-objective optimization

数控机床由于可以有效地提高机械零件的加工质量和加工效率,在现代航空航天、船舶、汽车等行业中起着重要作用。机床振动不仅影响机床的动态精度和工件的加工质量,而且会导致加工效率的降低并加速刀具的磨损^[1]。机床动态特性与各零部件间的结合部有密切关系,由结合部产生的柔度严重影响机床的动态特性,并且机床在受到动态载荷

时,大部分的能量被结合部消耗^[2]。因此,针对结合部动态特性的研究对机床动力学分析与优化有着重要意义。当前,机床结合部的研究主要集中在结合部参数辨识、动力学建模^[3-5]和面向机床动态特性的影响分析^[6-8]这两个方面。

然而,目前针对机床结合部的优化研究尚未丰富。作者在典型结合部动态刚度辨识、机床动力学有限元建模与实验验证的基础上,从基于模态柔度的机床动力学优化设计理论出发,通过计算模态柔度比判定对机床动态特性影响较大的薄弱模态,建立以几阶薄弱模态最小模态柔度为目标的优化设计模型,结合正交试验设计方法与灰关联分析法对结合部动态刚度进行优化设计。以1台精密卧式加工

收稿日期:2012-11-30

基金项目:科技部科技重大专项课题资助项目(2012ZX04011-031)

作者简介:孙明楠(1988—),男,博士。研究方向:机械振动、机床动力学与结构优化。E-mail: nannan516@163.com

* 通信联系人

中心的立柱-主轴系统为例,具体阐述了基于模态柔度的结合部动态刚度正交优化方法。

1 模态柔度理论

应用振动特性的模态表达式,假设机床结构的阻尼为比例阻尼,那么激振点 e 与相应点 c 之间的频响函数可以表示为:

$$\left(\frac{\mathbf{X}_c}{\mathbf{F}_e}\right) = \sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{nr}}\right)^2 + i2\xi_r\left(\frac{\omega}{\omega_{nr}}\right)\right]} (\mathbf{f}_{ce})_r \quad (1)$$

$$(\mathbf{f}_{ce})_r = \mathbf{A}_c^{(r)} \mathbf{A}_e^{(r)} / \mathbf{K}_r \quad (2)$$

式中: $(\mathbf{f}_{ce})_r$ 定义为第 r 阶模态的模态柔度; $\mathbf{A}_c^{(r)}$ 、 $\mathbf{A}_e^{(r)}$ 分别为机床以第 r 阶模态振动时 c 、 e 两点某方向上的相对振幅; $\mathbf{f}_r$ 为机床结构的第 r 阶模态的模态刚度。由系统动态特性的模态表达式可知, $\mathbf{K}_r$ 可以按照式(3)计算:

$$\mathbf{K}_r = (\mathbf{A}^{(r)})^T \mathbf{k} \mathbf{A}^{(r)} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{k}$ 为系统刚度矩阵, $\mathbf{A}^{(r)}$ 为系统的第 r 阶模态振型。

当激振频率 ω 趋近于 0 时,代入式(1)中得:

$$\left(\frac{\mathbf{X}_c}{\mathbf{F}_e}\right)_{\omega \rightarrow 0} = (\mathbf{f}_{ce})_s = \sum_{r=1}^{\infty} (\mathbf{f}_{ce})_r \quad (4)$$

以及

$$\frac{\sum_{r=1}^{\infty} (\mathbf{f}_{ce})_r}{(\mathbf{f}_{ce})_s} = \frac{(\mathbf{f}_{ce})_1}{(\mathbf{f}_{ce})_s} + \frac{(\mathbf{f}_{ce})_2}{(\mathbf{f}_{ce})_s} + \cdots = 1.0 \quad (5)$$

由式(4)、(5)得出模态柔度的 2 个重要性质:第一,当激振频率 ω 趋近于零时,机床动柔度的值等于静柔度值。第二,所有模态的模态柔度之和等于静柔度;而第 r 阶模态柔度与静柔度之比 $(\mathbf{f}_{ce})_r / (\mathbf{f}_{ce})_s$ 表示该阶模态柔度对总柔度的影响程度。通过计算各阶模态柔度与静柔度的比值 $(\mathbf{f}_{ce})_r / (\mathbf{f}_{ce})_s$,就可以衡量机床结构质量、刚度的分布偏离最优设计的程度。

当机床在其第 r 阶固有频率 ω_{nr} 附近振动时,在各阶模态耦合不紧密的情况下,动柔度 $(\mathbf{X}_c / \mathbf{F}_e)$ 主要由该阶模态决定,其余模态的影响可以忽略。因此,式(1)可以近似写为:

$$\left(\frac{\mathbf{X}_c}{\mathbf{F}_e}\right)_{\omega \approx \omega_{nr}} = \left(\frac{\mathbf{X}_c}{\mathbf{F}_e}\right)_r \approx \frac{(\mathbf{f}_{ce})_r}{2\xi_r} \sin \varphi_r \quad (6)$$

式中, φ_r 为在第 r 阶模态 X_c 滞后于 F_e 的相位角。由式(6)可以看出,减小第 r 阶模态柔度 $(\mathbf{f}_{ce})_r$,可以减小该阶模态下的动柔度 $(\mathbf{X}_c / \mathbf{F}_e)$,从而提高机床的抗振能力。

廖伯瑜^[9]等的研究指出往往存在 $(\mathbf{f}_{ce})_r / (\mathbf{f}_{ce})_s$ 比值较大的几个模态决定了结构的动态性能,是机床的薄弱模态。因此实际上只需要从少数几个薄弱模态入手,优化机床结构以减小其模态柔度即可。

式(2)、(3)中, $\mathbf{A}_c^{(r)}$ 、 $\mathbf{A}_e^{(r)}$ 由系统的第 r 阶模态振型 $\mathbf{A}^{(r)}$ 确定,是系统在无阻尼条件下计算得出的; $\mathbf{K}_r$ 则由 $\mathbf{A}^{(r)}$ 和系统刚度矩阵 $\mathbf{k}$ 确定。所以模态柔度是一个与阻尼无关的参数。在复杂的机床结构分布的结合部接触阻尼参数准确数值计算尚未完备阶段,可以首先开展针对机床结合部动态刚度的优化设计工作。作者针对提高机床动态性能的需要,以机床薄弱模态的模态柔度为直接优化目标,展开结合部动态刚度的优化研究。

2 机床结合部动态刚度优化设计模型及其计算方法

2.1 基于正交试验与灰关联的优化设计模型

基于模态柔度理论,面向机床动态特性,以机床薄弱模态的最小模态柔度为目标,建立针对结合部动态刚度的优化设计模型:

$$\text{Minimize } (\mathbf{f}_{ce})_r = \frac{\mathbf{A}_c^{(r)} \mathbf{A}_e^{(r)}}{\mathbf{K}_r}, r = 1, 2, \cdots, n;$$

$$\text{Subject to } k_{\min} \leq k_i \leq k_{\max} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{f}_r (r = 1, 2, \cdots, n)$ 为各阶薄弱模态的模态柔度, k_i 为机床结合部动态刚度。

由于机床结构分布的结合部众多,如直线导轨、滚珠丝杠、螺栓等结合部,不同边界条件下的结合部动态刚度不同,研究每一个动态刚度水平值下结合部对机床动态特性的影响是很难实现的。正交试验设计通过正交表规划试验,可大幅度地减少试验数量而不影响试验质量^[11],适合用于机床多结合部动态刚度的优化设计。

正交试验设计另外一个明显优势在于对试验结果的处理方面:通过对试验结果的极差分析与方差分析,可以确定一组最优方案以及对试验指标影响较大的显著影响因素。

可以看出,采用正交试验设计对结合部动态刚度进行优化有 2 个特点:

一个是试验设计所构造的样本空间具有小样本、贫信息的特点。

二是属于多目标优化问题,需要单目标有效解中提取多目标的最有效解。

灰色理论中的灰关联分析法可以有效地解决这一类问题^[12-13]。

令矩阵 F 为多目标优化模型的结果集,

$$F = \begin{bmatrix} f_1^{(1)} & f_1^{(2)} & \cdots & f_1^{(l)} \\ f_2^{(1)} & f_2^{(2)} & \cdots & f_2^{(l)} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ f_n^{(1)} & \cdots & \cdots & f_n^{(l)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $f_q^{(p)}$ ($p = 1, 2, \cdots, l; q = 1, 2, \cdots, n$) 为第 q 组试验设计中第 p 个试验指标的计算结果。将试验设计中各目标函数的最好计算结果组成理想方案, 作为参考序列 $F_0 = [f_0^1 \ f_0^2 \ \cdots \ f_0^l]$; 将试验设计中的所有结果 F 作为比较序列, 即矩阵 F 。那么, 两者之间存在灰关联系数 $\gamma(f_0^p, f_q^p)$,

$$\gamma(f_0^p, f_q^p) = \frac{f(\min) + \alpha f(\max)}{\Delta f_{0,q}^p + \alpha f(\max)} \quad (9)$$

式中, $f(\min) = \min_p \min_q \Delta f_{0,q}^p$, 为参考序列与比较序列构成的差异信息空间中的下环境参数; $f(\max) = \max_p \max_q \Delta f_{0,q}^p$, 为上环境参数; $\Delta f_{0,q}^p = |f_q^p - f_0^p|$, 为 f_0^p, f_q^p 两点间的绝对差值。

聚集灰关联系数 $\gamma(f_0^p, f_q^p)$ 在 n 组试验设计结果集中的值, 得出灰关联度计算公式:

$$\gamma(f_0, f^p) = \sum_{p=1}^l \beta_p \gamma(f_0^p, f_q^p) \quad (10)$$

式中, β_p ($p = 1, 2, \cdots, l$) 为第 p 个目标函数在多目标优化模型中的权重。

2.2 集成软件环境下优化模型的构建与计算

基于正交试验方法的结合部动态刚度优化设计模型需要在试验设计指定的样本空间中建立多个机床动力学有限元模型。由于动力学参数的不同, 重复建立相应的有限元模型、以及在有限元软件中进行模态计算和数据提取的工作费时费力。因此, 作者提出在数学计算软件 MATLAB 和有限元软件 Ansys 的集成环境下进行有限元模型构建、仿真计算和数据提取、处理。

其技术路线是: 在 MATLAB 中生成主控程序, 将机床有限元模型信息写入 Ansys 中, 并调用 Ansys 进行模态计算; 通过 Ansys 参数化语言 APDL 读取模态计算结果写入 MATLAB 的实验结果分析程序中, 得出试验设计优化方案, 从而实现优化过程中的有限元模型构建、有限元计算与结果分析 3 方面任务的集成化。具体流程由图 1 给出。

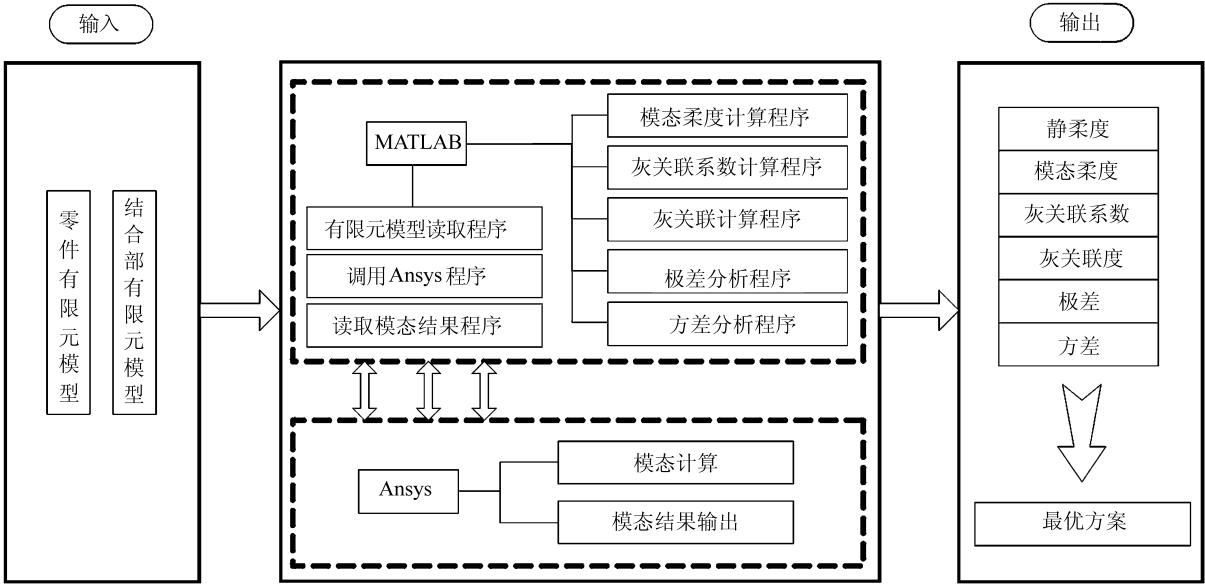


图 1 集成软件环境下的优化流程示意图

Fig. 1 Chart of optimization flow in multi-software environment

在输入部分, 构建机床结构动力学有限元模型时, 采取分别构建结合部动力学模型与机床零件动力学模型的方法, 这是为了可以将结合部动力学模型从整体动力学模型中分离出作为试验设计因素, 方便在 MATLAB-Ansys 集成环境中对其进行调整。

MATLAB-Ansys 集成环境中, MATLAB 通过“有限元模型读取程序”、“调用 Ansys 程序”、“读取模

态结果程序”分别将读取的零件有限元模型、结合部有限元模型信息读入 Ansys 软件, 调用 Ansys 进行模态计算, 然后读入 Ansys 输出的模态结果, 将其写入“模态柔度”、“灰关联系数”、“灰关联度”、“极差”、“方差”计算程序中, 得出输出部分的参数值, 从而获取最优方案。

3 卧式加工中心立柱-主轴系统多结合部动态刚度正交优化实例

将基于模态柔度的机床结合部动态刚度正交优化方法应用在1台精密卧式加工中心的立柱-主轴系统中,以直线导轨、滚珠丝杠、螺栓结合部为例,阐述该优化方法的应用。

3.1 立柱-主轴系统动力学建模、实验验证与模态柔度计算

1)结合部参数辨识

直线导轨结合部动态刚度辨识采用将模态实验数据与有限元分析模型相集成的优化识别方法。由式(11)定义目标函数,以结合部动刚度为设计变量对目标函数寻优。

$$\min f(k) = \beta^2 \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\omega_i^e(k) - \omega_i^e}{\omega_i^e} \right)^2 \right] \quad (11)$$

式中, ω_i^e 和 $\omega_i^e(k)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为固有频率的实验值和预测值; $\omega_i^e(k)$ 为设计变量 k 的函数, k 为结合部接触刚度, β^2 为目标函数的放大因子。

在 MATLAB 中采用基于 Armijo 搜索准则的拟牛顿 BFGS 算法对目标函数寻优,直线导轨结合部接触刚度寻优结果为 $3.18 \times 10^9 \text{ N/m}$ 。图2中 $\text{fun}(k_1)$ 、 $\text{fun}(k_2)$ 代表接触刚度赋予不同初值下的识别过程,2种情况收敛结果一致。

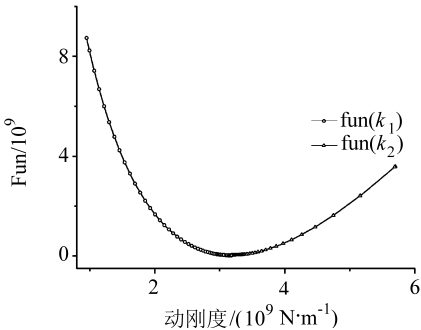


图2 导轨结合部动刚度识别过程

Fig.2 Process of identifying stiffness of guideway joint

滚珠丝杠、螺栓结合部动力学有限元模型基于本课题组^[14]辨识的结合部动态参数构建,其动态参数由表1给出。

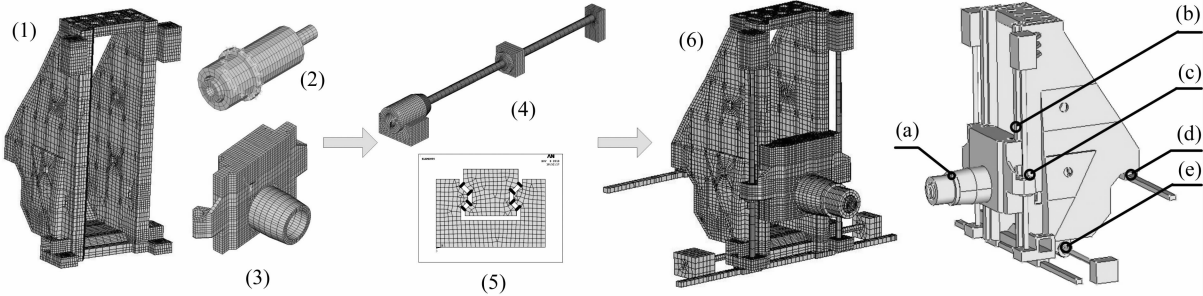
表1 滚珠丝杠、螺栓结合部动态刚度

Tab.1 Dynamical stiffness of screws and bolts

结合部	动刚度($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
X向滚珠丝杠	1.17×10^{-9}
Y向滚珠丝杠	1.056×10^{-9}
螺栓	1.18×10^{-11} $3.92 \times 10^{-10} *$

注: * 前值为法向刚度,后值为切向刚度。

建立各零部件有限元模型并进行装配,在结合部生成弹簧阻尼单元,图3给出了立柱-主轴系统的有限元模型与结合部分布示意。



(1)立柱有限元模型;(2)主轴系统有限元模型;(3)主轴箱有限元模型;(4)滚珠丝杠结合部有限元模型;
(5)直线导轨结合部有限元模型;(6)立柱-主轴系统有限元模型;(a)螺栓结合部;(b)Y向导轨结合部;
(c)Y向滚珠丝杠结合部;(d)X向直线导轨结合部;(e)X向滚珠丝杠结合部。

图3 立柱-主轴系统有限元模型与结合部分布示意

Fig.3 FEM of the column-spindle system and distribution of joints

2)实验验证

采用锤击法对主轴前端进行激振,由加速度传感器获取激励点的加速度信号,使用 INV3020C 采集数据,在 DASP-V10 软件中提取传递函数、模态参数。图4为激振实验现场。立柱-主轴系统动力学模型的固有频率预测值与实验值由表2给出,两者的误差值验证了立柱-主轴系统动力学模型的有效性和可行性。

3)立柱-主轴系统模态柔度计算

由2.1节提出的结合部动态刚度优化设计模型看出,需要首先、确定立柱-主轴系统的薄弱模态。因此,对立柱-主轴系统进行有限元计算,得出系统各阶模态柔度(f_{ce})_r、静柔度(f_{ce})_s及模态柔度比(f_{ce})_r/ (f_{ce}) _s,由表3给出。得到,立柱-主轴系统的薄弱模态有5阶,分别为第2、3、4、7、8阶模态。

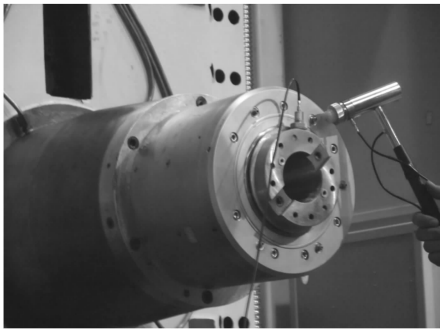


图 4 立柱-主轴系统模态实验现场

Fig.4 Modal experiment of the column-spindle system

表 2 立柱-主轴系统固有频率仿真值与实验值对比
Tab.2 Comparison of predicted and experimental frequencies

阶次	仿真值/Hz	实验值/Hz	误差/%
1	48.63	49.84	2.43
2	66.55	—	—
3	77.59	75.90	2.23
4	108.21	—	—
5	131.30	132.60	0.98
6	164.53	166.40	1.12
7	198.52	188.10	5.54
8	215.63	202.00	6.75
9	234.82	232.50	1.00
10	236.66	238.50	0.77
11	267.12	264.80	0.88

表 3 立柱-主轴系统静柔度与模态柔度
Tab.3 Static flexibility and modal flexibility of the column-spindle system

阶次	模态柔度/($10^{-9} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1}$)	模态柔度比/%
1	0.60	2.11
2	4.45	15.74
3	3.24	11.46
4	5.16	18.27
5	0.42	1.48
6	2.56	9.06
7	3.75	13.29
8	3.74	13.25
9	0.41	1.46
10	0.26	0.93
11	0.66	2.33

注:静柔度为 $2.85 \times 10^{-8} \text{ m/N}$ 。

3.2 结合部动态刚度正交优化

根据 2.2 节提出的优化设计模型,将第 2、3、4、7、8 阶薄弱模态的最小模态柔度作为优化目标,记立柱

- 主轴系统分布的 X 向直线导轨结合部、Y 向直线导轨结合部、X 向滚珠丝杠结合部、Y 向滚珠丝杠结合部、螺栓结合部的动态刚度分别为 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 , 作为设计变量。基于本课题组^[13]对精密卧式加工中心 THM63100 分布的直线导轨、滚珠丝杠结合部在不同预载力下、螺栓结合部在不同材料、加工手段等条件下动态特性的研究成果,并考虑了机床制造方的设计经验与对外购部件(直线导轨、滚珠丝杠)的选择要求,结合正交试验表确定了各结合部动态刚度的 3 个水平值,如表 4 所示。表中,将螺栓结合部的法向和切向刚度作为一个试验因素嵌入。

表 4 正交试验因素水平表

Tab.4 Influencing factors and their levels of the orthogonal experiment

因素	刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)		
	1	2	3
k_1	2.68×10^{-9}	3.18×10^{-9}	3.68×10^{-9}
k_2	2.68×10^{-9}	3.18×10^{-9}	3.68×10^{-9}
k_3	0.67×10^{-9}	1.17×10^{-9}	1.67×10^{-9}
k_4	0.556×10^{-9}	1.056×10^{-9}	1.556×10^{-9}
k_5	0.68×10^{-11}	1.18×10^{-11}	1.68×10^{-11}
	3.42×10^{-10}	3.92×10^{-10}	4.42×10^{-10}

该正交试验为 5 因子 3 水平,应用正交试验表 $L_{18}(3^5)$ 规划试验方案,共计 18 次试验设计,如表 5 所示。

根据 2.2 节 MATLAB-Ansys 集成环境下的优化方案,可以计算得出立柱-主轴系统第 2、3、4、7、8 阶薄弱模态的模态柔度;结合 2.1 节对目标函数的灰关联分析,得出各阶薄弱模态柔度的灰关联系数 γ_2 、 γ_3 、 γ_4 、 γ_7 、 γ_8 和多目标函数的灰关联度 γ ,由表 5 给出。应用式(9)定义的灰关联度计算公式时,式中的权重 $\beta_i = 0.2 (i = 2, 3, 4, 7, 8)$ 。

对灰关联度 γ 作极差分析与方差分析,由表 6 和 7 分别给出分析结果。

由极差分析和方差分析结果可知,正交试验最优参数组合 $(k_1)_3(k_2)_3(k_3)_2(k_4)_3(k_5)_3$;X 向直线导轨结合部动态刚度对机床动态特性影响最为显著。将最优参数组合中各结合部的动态刚度写入立柱-主轴系统有限元模型中,按照图 1 所示流程重新计算,得到正交优化设计前后各目标函数的对比值,由表 8 给出。经结合部动态刚度正交优化设计后,薄弱模态第 2、4、7、8 阶模态柔度分别下降了 14.77%、10.72%、3.27%、8.44%;仅有第 3 阶增大了 3.72%。这说明有效地降低了对立柱-主轴系

统动态特性有显著影响的薄弱模态的轴端动柔度，从而使其动态特性得到改善。

表 5 正交实验方案和实验结果

Tab.5 Scheme and results of the orthogonal experiment

序号	实验因素					模态柔度/(10 ⁻⁹ m·N ⁻¹)					灰关联系数					灰关 联度 γ
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	$(f_{ce})_2$	$(f_{ce})_3$	$(f_{ce})_4$	$(f_{ce})_7$	$(f_{ce})_8$	γ_2	γ_3	γ_4	γ_7	γ_8	
1	1	1	1	1	1	5.32	3.38	5.13	3.74	4.39	0.33	0.46	0.44	0.34	0.36	0.39
2	1	2	2	2	2	5.01	2.41	5.06	3.70	3.95	0.37	0.71	0.47	0.34	0.49	0.48
3	1	3	3	3	3	4.88	1.96	4.88	3.65	3.79	0.39	0.95	0.58	0.35	0.56	0.57
4	2	1	1	2	2	4.58	3.22	5.44	3.78	3.58	0.44	0.49	0.34	0.34	0.70	0.46
5	2	2	2	3	3	4.49	2.72	5.25	3.76	3.50	0.46	0.61	0.39	0.34	0.78	0.51
6	2	3	3	1	1	4.29	4.01	4.65	3.54	4.39	0.51	0.38	0.83	0.36	0.36	0.49
7	3	1	2	1	3	3.54	4.46	4.96	1.63	3.68	0.81	0.33	0.53	1.00	0.63	0.66
8	3	2	3	2	1	3.72	3.79	5.18	3.41	3.55	0.71	0.40	0.42	0.38	0.73	0.53
9	3	3	1	3	2	3.79	3.36	5.11	3.64	3.44	0.67	0.47	0.45	0.35	0.84	0.56
10	1	1	3	3	2	5.09	1.88	5.40	3.70	3.54	0.36	1.00	0.35	0.34	0.73	0.56
11	1	2	1	1	3	5.19	3.38	4.88	3.66	4.50	0.35	0.46	0.58	0.35	0.33	0.41
12	1	3	2	2	1	4.93	2.44	4.86	3.70	4.10	0.38	0.70	0.60	0.34	0.43	0.49
13	2	1	2	3	1	4.58	3.23	5.45	3.81	3.62	0.44	0.49	0.34	0.33	0.67	0.46
14	2	2	3	1	2	4.39	4.05	4.83	3.57	4.22	0.48	0.37	0.62	0.36	0.40	0.45
15	2	3	1	2	3	4.35	3.24	4.95	3.70	3.85	0.49	0.49	0.53	0.34	0.53	0.48
16	3	1	3	2	3	3.86	3.82	5.46	3.12	3.33	0.65	0.40	0.33	0.42	1.00	0.56
17	3	2	1	3	1	3.89	3.36	5.33	3.64	3.36	0.63	0.47	0.37	0.35	0.95	0.55
18	3	3	2	1	2	3.30	4.31	4.56	2.67	4.03	1.00	0.35	1.00	0.51	0.46	0.66

表 6 极差分析结果

Tab.6 Results of range analysis

因素	均值			极差 R 值	最优水平
	水平 1	水平 2	水平 3		
k_1	0.482	0.474	0.587	0.113	3
k_2	0.513	0.489	0.543	0.051	3
k_3	0.475	0.543	0.524	0.068	2
k_4	0.509	0.499	0.534	0.035	3
k_5	0.483	0.525	0.528	0.049	3

表 7 方差分析结果

Tab.7 Results of variance analysis

因素	偏差平方和	自由度	F 比(显著性)
k_1	0.048	2	9.600
k_2	0.008	2	1.600
k_3	0.015	2	3.000
k_4	0.004	2	0.800
k_5	0.009	2	1.800

表 8 正交优化设计结果

Tab.8 Results of orthogonal optimization design

阶次	模态柔度/(10 ⁻⁹ m·N ⁻¹)		变化率/%
	优化前	优化后	
2 阶	4.45	3.79	-14.78
3 阶	3.24	3.35	+3.72
4 阶	5.16	4.61	-10.72
7 阶	3.75	3.63	-3.27
8 阶	3.74	3.43	-8.44

4 结 论

1) 基于模态柔度理论,直观阐述了薄弱模态对机床动态特性的影响机理,构建了以机床薄弱模态的最小模态柔度为目标函数的结合部动态刚度优化设计模型,避免了对所有模态讨论的盲目性。

2) 基于结合部动态参数辨识构建了精密卧式加工中心立柱-主轴系统有限元模型,以激振实验

验证了模型的有效性;在此基础上,将正交试验法与灰关联分析法相结合,实现了结合部动态刚度的多目标优化设计,确定了1组结合部动态刚度的最优组合,优化后2、4、7、8阶薄弱模态的模态柔度分别下降了14.77%、10.72%、3.27%、8.44%。

3) 实现了基于 Ansys 和 MATLAB 集成软件环境下优化模型的构建和计算,使得针对结合部动态刚度的优化设计计算效率与操作性都得到了改善。

4) 作者提出的基于模态柔度理论、结合正交试验与灰关联分析方法的多结合部动态刚度优化方法为机床设计制造过程中的直线导轨、滚珠丝杠以及螺栓选型环节提供了技术支持。

参考文献:

- [1] Gao Xiangsheng, Zhang Yidu, Zhang Hongwei, et al. Effects of machine tool configuration on its dynamics based on orthogonal experiment method[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(2): 285 – 291.
- [2] Ahmadian H, Jalali H. Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(2): 1041 – 1050.
- [3] Wang Mian, Wang Dong, Zheng Gangtie. Joint dynamic properties identification with partially measured frequency response function[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 27: 499 – 512.
- [4] Cai Ligang, Li Ling, Guo Tieneng, et al. Identifying mechanical joint dynamic parameters based on incomplete frequency response functions[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(4): 345 – 350. [蔡力钢, 李玲, 郭铁能, 等. 基于力状态映射法辨识非线性结合部动态参数[J]. 振动工程学报, 2011, 24(4): 345 – 350.]
- [5] Sun Wei, Wang Bo, Lu Ming, et al. Analytical modeling of linear rolling guide system based on lagrange equation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(4): 781 – 786. [孙伟, 汪博, 鲁明, 等. 基于拉格朗日方程的直线滚动导轨系统解析建模[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(4): 781 – 786.]
- [6] Hung J P. Load effect on the vibration characteristics of a stage with rolling guides[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(1): 89 – 99.
- [7] Wang Lihua, Luo Jianping, Liu Hongbin, et al. Research on dynamic characteristics of key mechine joint surfaces of the numerically controled milling machine[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 125 – 129. [王立华, 罗建平, 刘泓滨, 等. 铣床关键结合面动态特性研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 125 – 129.]
- [8] Ertürk A, Özgüven H N, Budak E. Effect analysis of bearing and interface dynamics on tool point FRF for chatter stability in machine tools by using a new analytical model for spindle-tool assemblies[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(1): 23 – 32.
- [9] 廖伯瑜, 周新民, 尹志宏. 现代机械动力学及其工程应用: 建模、分析、仿真、修改、控制、优化[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 538 – 540.
- [10] Yang Y, Muñoa J, Altintas Y. Optimization of multiple tuned mass dampers to suppress machine tool chatter[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(9): 834 – 842.
- [11] Xu Fang, Zhang Libin, Jiang Jiandong, et al. Optimization method of agricultural mechninery handle based on FEA and orthogonal experimental design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 245 – 249. [胥芳, 张立彬, 蒋建东, 等. 农机扶手有限元正交优化方法及应用[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 245 – 249.]
- [12] Yan Jiayu, Zhang Hongtao, Liu Guoliang, et al. Application of a new optimizing method for the measuring points of CNC machine thermal error based on grey synthetic degree of association[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(2): 160 – 164. [闫嘉钰, 张宏韬, 刘国良, 等. 基于灰色综合关联度的数控机床热误差测点优化新方法及应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(2): 160 – 164.]
- [13] Wei Fengtao, Song Li, Li Yan. Mechanical multi-objective optimal design methods based on grey and fuzzy theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(9): 1823 – 1827. [魏锋涛, 宋俐, 李言. 机械多目标灰色与模糊优化设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(9): 1823 – 1827.]
- [14] Mi Liang, Yin Guofu, Sun Mingnan, et al. Effects of preloads on joints on dynamic stiffness of a whole machine tool structure[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(2): 495 – 508.