

DOI: 10.7652/xjtuxb201401015

考虑模态特性的高速机床进给系统刚度匹配研究

刘海涛, 王磊, 赵万华

(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: 为了得到进给系统的最优动态特性,建立了进给系统的动力学模型。采用有限元法对高速机床进给系统的部件与结合面进行刚度设计,通过分析进给系统的振动形式,找出了在各种因素下系统模态参数的变化规律,以工作台的结构设计为例,进行了合理的刚度匹配。进给系统在低频段沿进给方向振动,最显著的影响因素是工作台的质量、丝杠-螺母副接触刚度、轴承副接触刚度和丝杠自身的拉压刚度,当系统沿垂直于工作台的方向振动时,受导轨-滑块结合面刚度的影响较大。在不同导轨、滑块跨距组合参数下,对系统模态的特性变化规律进行了分析,当滑块跨距为 400 mm、导轨跨距为 300 mm 时,系统模态为最优分布。研究表明,该刚度匹配设计方法可使工作台的质量减小 10%,进给系统的 1 阶固有频率提高 9%,从而验证了该方法的准确性。

关键词: 高速机床;模态特性;进给系统;匹配设计

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)01-0090-06

Stiffness Matching Design for Feed System of High-Speed Machine Tool Considering Modal Characteristics

LIU Haitao, WANG Lei, ZHAO Wanhua

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

Abstract: To obtain the optimum dynamic characteristics of feed system, a dynamic model of the system is set up with finite element method to carry out the matching design of components and joint interfaces for high-speed machine tool. Analyzing the vibrating mode of the feed system, the changing rule of system mode parameters due to various factors is revealed. The optimization of the inner table structure is taken as an example to illustrate the matching design. When the system vibrates in feeding direction, the important affecting factors are table mass, screw-nut joint stiffness, bearing stiffness and screw stiffness itself, but when the system vibrates in direction normal to the table, the guideway joint interface stiffness dominates. Investigating the changing modes in different corporations of guideway spans and slides, the optimum result is found: the slide span of 400 mm and guideway span of 300 mm. The table mass can be reduced by 10% and the first-order frequency of the system increased by 9%.

Keywords: high-speed machine tool; modal characteristics; feed system; matching design

由于机床进给系统的动态特性对于机床的加工精度有很大影响^[1-3],因此为了避免共振、颤振等不良现象的发生,提高机床的加工精度,在机床的设计阶段必须对高速机床进给系统的动态特性进行主动

设计。

Liang 等分析了结合部预载对整机尤其是进给系统动态刚度的影响^[4]。Jui 等研究了考虑线性导轨预载的立式机床的稳定性问题^[5]。Ching 等研究了导轨预载对立式立柱-主轴箱系统动态性能的作用^[6]。Feng 等建立了滚珠丝杠副结合部预紧力可调整的进给系统动态模型,并对螺母的振动进行了谱分析^[7]。

若要实现真正的基于动态性能的主动设计,就必须弄清各种因素对进给系统动态特性的影响,如模态、振型等影响因素,以及各种影响因素之间复杂的耦合、制约关系,并在设计阶段进行合理的结构设计和刚度分配,以达到各种因素相匹配的目的。目前,以动态参数为目标,针对进给系统设计方面的研究还比较少,本文以典型的工作台进给系统为例,建立了考虑丝杠螺母结合面、导轨结合面和轴承结合面的进给系统动力学模型,研究了各种因素变化下系统模态参数的变化规律,找出了不同动态范围的敏感因素。通过综合各因素对机床模态特性的影响规律,并以工作台的结构设计为例,进行了合理的刚度匹配。

1 进给系统动力学建模

1.1 进给系统等效动力学模型

如图 1 所示的工作台系统,忽略进给工作台内部的筋板结构,将其简化为相同外形尺寸的实心结构,采用实体单元进行等效,同时定义等效弹性模量 E 和等效密度 ρ 。如图 2 所示,采用 Timoshenko 梁单元定义丝杠、线性弹簧阻尼单元以建立各结合面的等效模型。每个导轨-滑块结合面由 1 组 y 、 z 方向的弹簧来等效,用于约束工作台 y 、 z 方向的自由度。由 4 个滑块组合在一起约束工作台绕 x 、 y 、 z 方向旋转的自由度,采用 1 组弹簧阻尼单元等效丝杠-螺母结合面,约束工作台 x 方向的自由度。采用 1 组三向弹簧来模拟轴承对丝杠的支撑,由 1 组 x 方向的扭转弹簧阻尼单元来模拟电机的伺服刚度,并约束丝杠扭转的自由度。

1.2 导轨-滑块结合面刚度

图 3 为导轨滑块副滚珠的受力状态,根据赫兹接触理论^[8],法向变形为

$$\delta_n = K_n Q_n^{2/3} \quad (1)$$

式中: K_n 为赫兹接触系数; Q_n 为法向载荷。对式(1)求导得到单一导轨滑块副法向的接触刚度为

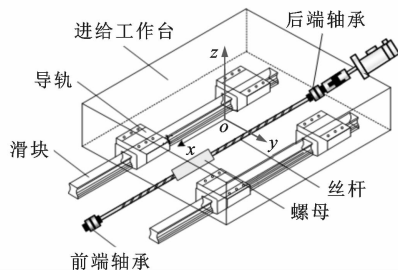
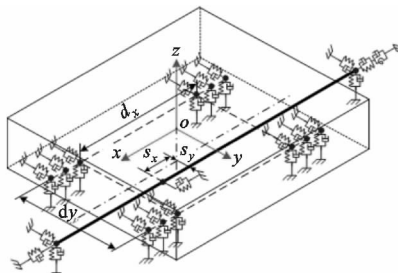
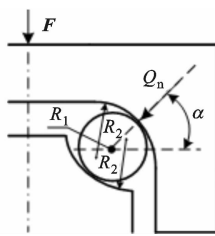


图 1 典型的工作台进给系统示意图



d_x : 滑块跨距; d_y : 导轨跨距; S_x : 螺母副距工作台轴线距离; S_y : 丝杠距工作台轴线距离

图 2 进给系统的等效动力学模型



F : 外载荷; R_1 : 滚珠体半径; R_2 : 轨道的半径;
 Q_n : 法向外载荷; α : 接触角

图 3 导轨-滑块副单一滚珠受力图

$$k_n = \frac{dF}{d\delta_n} = \frac{3}{2} K_n^{-1} \left(\frac{F}{\sin\alpha} + Q_p \right)^{1/3} \sin^2\alpha \quad (2)$$

式中: Q_p 为预加载荷。

同理,单一导轨滑块副切向接触刚度

$$k_\tau = \frac{dF}{d\delta_\tau} = \frac{3}{2} K_n^{-1} \left(\frac{F}{\sin\alpha} + Q_p \right)^{1/3} \sin\alpha \cos\alpha \quad (3)$$

式中: δ_τ 为切向变形量。采用式(2)、式(3)同样可以计算轴承副结合面的法向和切向接触刚度^[9]。

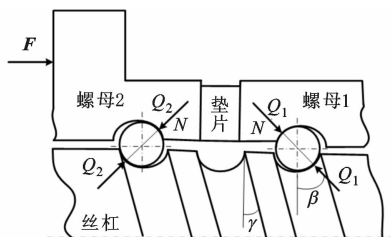
1.3 丝杠-螺母副结合面刚度

图 4 为采用双螺母预紧的丝杠-螺母副受力示意图。若已知预紧力和外加负载,则式(1)同样适用于丝杠-螺母副接触刚度的计算。当有轴向外载荷作用时,作用在丝杠上的总轴向力为

$$F_a = Z_{ef} (Q_1 + Q_2) \quad (4)$$

式中: Z_{ef} 为有效工作的滚珠数目; Q_1 、 Q_2 分别为 2 个

螺母与滚珠的接触力。



N : 正向压力; β : 接触角; γ : 丝杠螺旋角

图4 丝杠-螺母副受力状态示意图

由外部轴向力引起的轴向位移为^[10-11]

$$\delta = \frac{2K_n}{\sin\beta\cos\gamma}(Q_1^{2/3} - Q_2^{2/3}) \quad (5)$$

结合式(4)、式(5),由刚度表达式

$$k_s = \frac{dF}{d\delta} \quad (6)$$

即可求解滚珠丝杠-螺母副的轴向接触刚度。

2 仿真分析

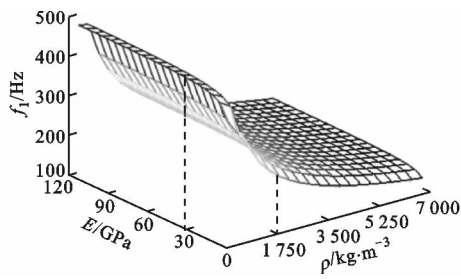
2.1 工作台力学属性对模态特性的影响

由图5a可以看出,进给系统的第1阶固有频率 $f_i(i=1,2,3,4)$ 对工作台结构等效弹性模量的变化不敏感,在 $E=30$ GPa左右达到饱和,而对工作台结构等效密度的变化极为敏感。该阶振型为工作台沿 x 方向窜动,决定该阶振型频率大小的是工作台的质量以及丝杠-螺母副接触刚度、轴承副接触刚度以及丝杠自身拉压刚度,对反映工作台自身刚性的等效弹性模量并不敏感。

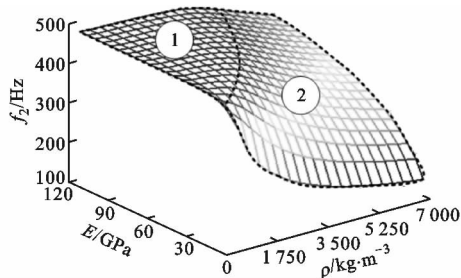
图5b可以按系统振型的变化分成2个区域。第1个区域的振型为丝杠自身的弯曲,同时带动工作台沿 z 方向作微幅振动。在该区域内,工作台自身刚度远大于丝杠的刚性,由于二者在该方向的刚度是串联作用,系统的动态特性取决于刚度小的因素,因此系统的固有频率对工作台的自身力学属性不敏感。第2个区域的振型为丝杠、工作台的弯曲,此时系统的固有频率对工作台的自身力学属性很敏感。同理,对比图5c和图5d中系统第3、4阶固有频率的变化规律和对应的振型,可以找出工作台自身力学属性对于系统固有频率的影响规律。

2.2 丝杠-螺母副接触刚度对模态特性的影响

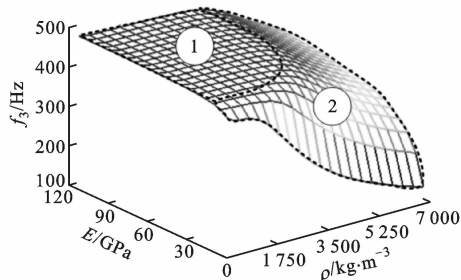
由2.1节的分析可知,丝杠-螺母副接触刚度和丝杠自身拉压刚度对于进给系统沿 x 方向振动的模态影响较大,而丝杠自身的拉压刚度又取决于丝杠的公称直径。图6为当丝杠公称直径和丝杠-螺



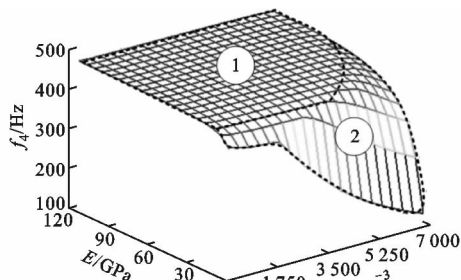
(a) 第1阶固有频率



(b) 第2阶固有频率



(c) 第3阶固有频率



(d) 第4阶固有频率

图5 运动工作台对系统前4阶固有频率的影响

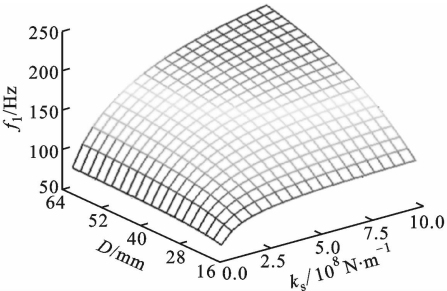
母副轴向接触刚度发生变化时,系统前4阶固有频率的变化。由图6a可以看出,丝杠公称直径 D 对于系统沿 x 方向的振动影响很大,丝杠沿轴向的拉压刚度可表示为

$$k = EA/l \quad (7)$$

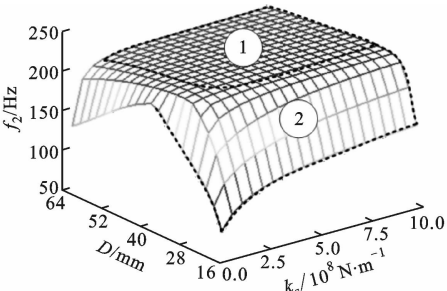
$$A = \pi/4 D^2 \quad (8)$$

式中: l 为丝杠的长度; A 为丝杠的截面积。

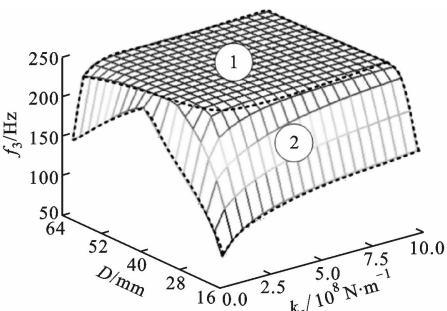
因此,增大丝杠公称直径可以有效地提高丝杠自身的拉压刚度,从而提高进给系统沿 x 方向的固有频率。同理,增大丝杠-螺母副轴向接触刚度也可提高进给系统的 1 阶固有频率。由图 6b 可以看出,



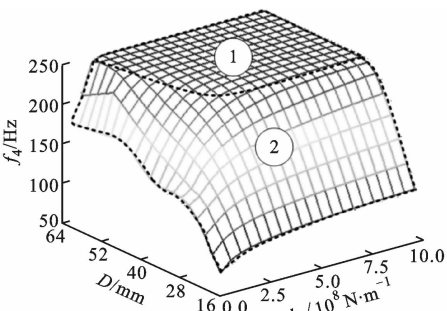
(a) 第 1 阶固有频率



(b) 第 2 阶固有频率



(c) 第 3 阶固有频率



(d) 第 4 阶固有频率

图 6 丝杠公称直径和丝杠-螺母副轴向接触刚度对固有频率的影响

在第 1 个区域内,由于丝杠直径较大,丝杠自身弯曲刚度较工作台的弯曲刚度和导轨-滑块 z 方向的刚度大,因此该阶振型主要由工作台的力学属性和导轨-滑块 z 方向的刚度决定,而对丝杠的直径和丝杠-螺母副接触刚度不敏感。在第 2 个区域内,由于丝杠直径变小,丝杠的弯曲刚度降低,因此该阶模态对丝杠直径的变化很敏感。同理,由图 6c 和图 6d 可得丝杠的直径和丝杠-螺母副接触刚度对第 3、4 阶模态的影响规律。

2.3 导轨-滑块结合面刚度对模态特性的影响

由图 1 可知,导轨-滑块结合面约束了进给系统 y 方向和 z 方向的自由度,因此导轨-滑块结合面接触刚度的变化将影响进给系统沿 y 、 z 方向的振动模态。

由图 7a 可以看出,当导轨-滑块结合面接触刚度 k_g 不是很小时(大于 130 MN/m),系统沿 x 方向的振动模态对导轨-滑块结合面刚度不敏感,而系统的第 2 阶模态为工作台沿 z 方向振动,导轨-滑块结合面刚度对其影响很大。同理,可以对比振动模态对系统第 3、4 阶模态的影响,如图 7c 和图 7d 所示。

2.4 导轨-滑块跨距对系统模态特性的影响

在导轨-滑块结合面接触刚度不变的条件下,改变导轨、滑块跨距同样可以对系统的模态特性产生影响。从图 8a 中的 1 阶振型可以看出,该阶振型由丝杠-螺母副接触刚度和丝杠自身刚度主导,改变导轨-滑块跨距对该阶模态几乎没有影响,而图 8b、图 8c 和图 8d 中的振型都包含工作台沿 z 方向和 y 方向的振动,而不同导轨-滑块的跨距将改变工作台的约束条件,从而对其模态频率产生影响。由第 2、3、4 阶固有频率的变化规律可知,导轨-滑块的最优分布为: $d_x=400\text{ mm}$, $d_y=300\text{ mm}$ 。

3 基于模态特性的匹配设计实例

通过分析各种因素对系统模态特性的影响规律,得到了各种因素间的耦合制约关系,根据这些制约关系对刚度进行了匹配设计。以工作台结构设计为例,当外界激振频率不超过 150 Hz、系统振动的模态为工作台沿 x 方向振动时,该阶模态对工作台自身刚性的等效弹性模量不敏感,因此在保证静态刚度的条件下,应尽可能地减小工作台的质量。本文在保证外形尺寸相同的条件下,设计了 2 种结构的工作台,并进行了对比。第 1 种结构工作台的底面壁厚为 42 mm,筋壁厚为 20 mm,总质量为 171 kg (见图 9a);第 2 种结构工作台的底面壁厚为

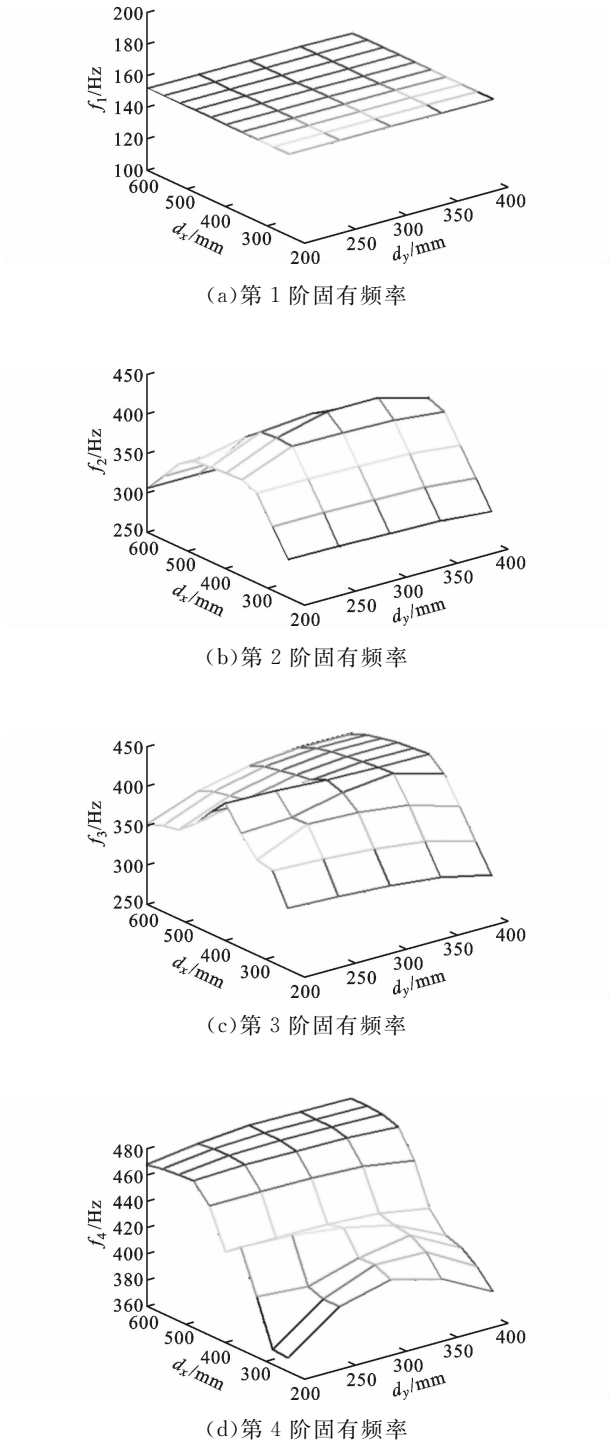
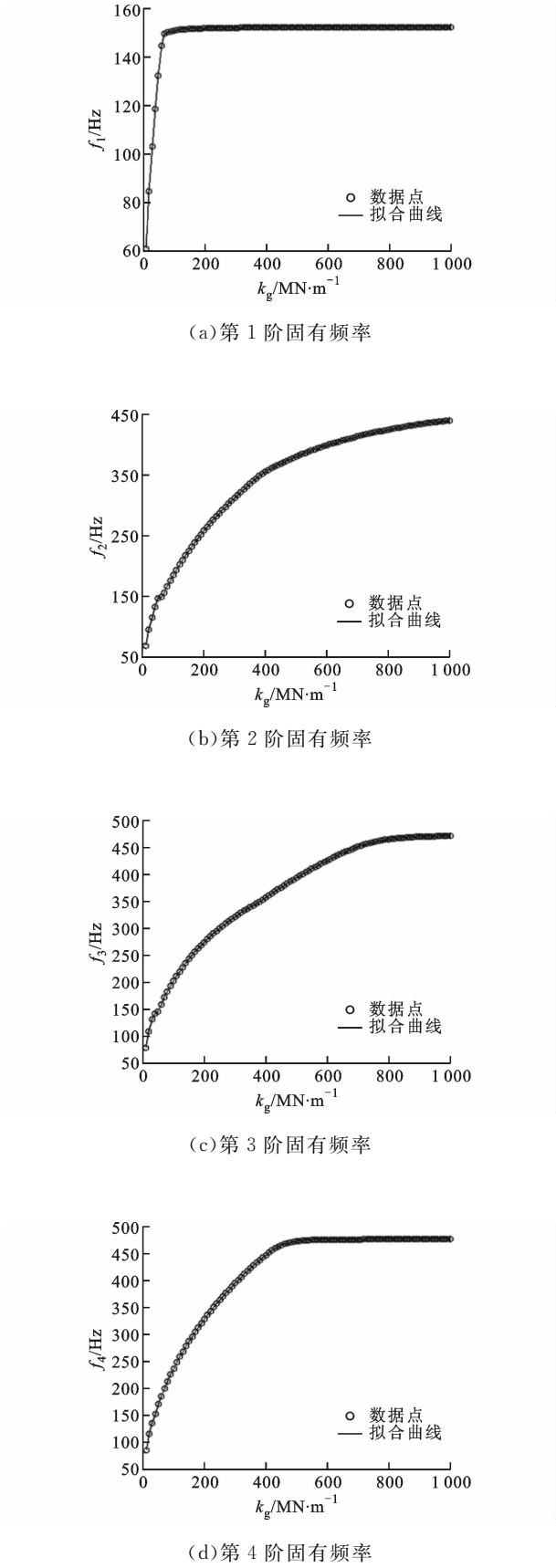


图 8 导轨-滑块跨距对前 4 阶固有频率的影响

30 mm,筋壁厚为 15 mm,总质量为 154 kg(见图 9b)。

采用前 3 阶自由模态等价的方法,计算得到了 2 种工作台的等效密度、等效弹性模量,以及进给工作台系统的 1 阶模态。由表 1 可以看出,2 种结构工作台的等效弹性模量相差很小,但结构 1 工作台的等效密度较大,使得工作台的质量较大,由于进给

图 7 导轨-滑块结合面接触刚度对固有频率的影响

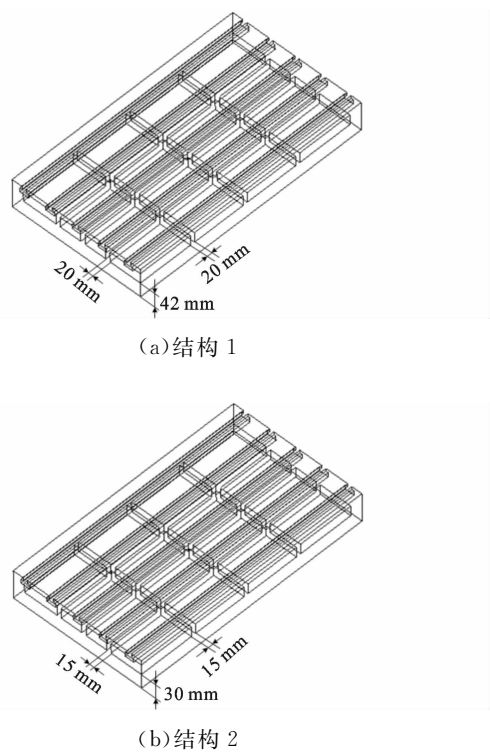


图 9 2 种不同内部筋板结构的工作台示意图

系统的 1 阶模态对工作台的质量很敏感,因此结构 1 比结构 2 工作台构成的系统固有频率 f 低 9%。

表 1 2 种结构工作台的等效密度和等效弹性模量

结构	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	E/GPa	f/Hz
1	726	737	1 503	4 750	105	155
2	745	757	1 522	4 333	101	173

4 结 论

本文采用有限元方法对影响进给系统模态特性的各种因素进行了分析,得到的主要结论如下。

(1)当系统沿 x 方向振动时,对模态影响最大的因素是工作台的质量、丝杠-螺母副接触刚度、轴承副接触刚度以及丝杠自身的拉压刚度。

(2)当导轨-滑块结合面刚度相对较大时,系统沿 x 方向的振动模态对导轨-滑块结合面刚度的变化不敏感,但系统沿 z 方向振动时受导轨-滑块结合面刚度的影响较大。

(3)改变导轨-滑块跨距可以改变工作台沿 z 方向和 y 方向振动的模态频率,并存在导轨-滑块跨距最优的分布。

(4)在进行刚度匹配设计时,当确定了系统的工作频率范围,以及对系统动态特性影响最显著的因

素、影响规律时,应优先提高显著因素。

参考文献:

[1] VERL S. Correlation between feed velocity and preloading in ball screw drives [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 429-432.

[2] NEUGEBAUER R, DENKENA B, WEGENER K. Mechatronic systems for machine tools [J]. Annals of the CIRP, 2007, 56(2): 657-686.

[3] 卢秉恒, 赵万华, 张俊. 高速高加速度下的进给系统机电耦合 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 2-10.

LU Bingheng, ZHAO Wanhua, ZHANG Jun. Electromechanical coupling in the feed system with high speed and high acceleration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 2-10.

[4] LIANG Mi, 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.

[5] HUNG Juipin, LAI Yuanlung, LIN Chingyuan, et al. Modeling the machining stability of a vertical milling machine under the influence of the preloaded linear guide [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(9): 731-739.

[6] LIN Chingyuan, HUNG Juipin. Effect of preload of linear guides on dynamic characteristics of a vertical column-spindle system [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(1): 741-746.

[7] FENG Guohua, PAN Yilu. Investigation of ball screw preload variation based on dynamic modeling of a preload adjustable feed-drive system and spectrum analysis of ball-nuts sensed vibration signals [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 52(1): 85-96.

[8] GREENWOOD J A. Analysis of elliptical Hertzian contacts [J]. Tribology International, 1997, 30(3): 235-237.

[9] 冈本纯三. 球轴承的设计计算 [M]. 黄志强, 译. 北京: 机械工业出版社, 2003: 1-14.

[10] BREWE D E, HAMROCK B J. Simplified solution for elliptical-contact deformation between two elastic solids [J]. Journal of Lubrication Technology, 1977, 99(4): 485-487.

[11] RIVIN E I. Stiffness and damping in mechanical design [M]. New York, USA: Marcel Dekker Inc, 1999: 266-271.

(编辑 管咏梅)