

滚珠丝杠进给系统动态特性集中质量建模与仿真*

罗 亮¹ 张为民^{1,2} 周敏剑² Jürgen Fleischer^{3,4}

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学中德学院, 上海 201804;
3. 同济大学中德先进制造技术中心, 上海 201804; 4. 卡尔斯鲁厄理工大学生产技术研究所, 卡尔斯鲁厄 76131, 德国)

摘要: 为了研究高速滚珠丝杠进给系统的动态特性, 提出一种改进的集中质量建模方法, 该方法考虑了滚珠丝杠进给系统基座的质量、柔性及进给系统部件间反向间隙对系统动态特性的影响, 并完善了滚珠丝杠进给系统集中质量模型等效参数的计算方法。以 MAG 某加工中心 X 轴滚珠丝杠进给系统为实验对象, 对该集中质量模型建模方法进行实验验证, 仿真结果与实测结果具有相同数量的特征频率, 且特征频率的误差在 5% 以内。滚珠丝杠进给系统的仿真分析表明, 螺母位置改变引起的进给系统固有频率变化将影响伺服系统的稳定性, 滚珠丝杠进给系统中的反向间隙会激励部件产生高频振动, 给进给系统带来不利影响。

关键词: 滚珠丝杠 进给系统 动态特性 反向间隙 集中质量

中图分类号: TH113.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0370-08

Dynamic Characteristics Modeling and Simulation of Ball Screw Feed Drive System Based on Lumped Mass Model

Luo Liang¹ Zhang Weimin^{1,2} Zhou Minjian² Jürgen Fleischer^{3,4}

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China
2. Sino-German College for Postgraduate Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China
3. Advanced Manufacturing Technology Center, Tongji University, Shanghai 201804, China
4. Wbk Institute of Production Science, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe 76131, Germany)

Abstract: High speeds and acceleration create high reactive forces between the moving mass and the stationary bodies of the ball screw feed drive system and excite the structure which causes undesired vibrations. Therefore, it is necessary to have an accurate dynamic model of the feed drive system for machine design and controller tuning. An optimized dynamic modelling and simulation method of a ball screw feed drive was presented based on the lumped mass model. The mass and the rigidity of the ball screw feed drive basis were considered in this new model and the calculation method of the equivalent parameters was optimized. Simulative and experimental examinations were conducted based on an X-axial ball screw feed drive system on a MAG machining center and the presented method was proved to be accurate because of the same eigenfrequency number and the limited error (less than 5%) between the simulated and measured eigenfrequencies of the ball screw feed drive system. Based on this model the vibration characteristic of a ball screw feed drive system was studied. The simulation results showed that the natural frequency change caused by the nut position change affected the stability of the servo system, and the backlash of feed drive system encouraged the components to produce high-frequency vibration and made the servo system unstable.

Key words: Ball screw Feed drive system Dynamic characteristics Backlash Lumped mass

收稿日期: 2015-03-12 修回日期: 2015-06-01
* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAF01B02)和同济大学中德学院 MAG 制造技术基金资助项目
作者简介: 罗亮, 博士生, 主要从事数控机床进给系统动态特性优化研究, E-mail: luoliang0909@126.com
通讯作者: 张为民, 教授, 博士生导师, 主要从事先进制造装备及技术、绿色制造研究, E-mail: iamt@tongji.edu.cn

引言

现代加工制造业要求进给系统具有更高的速度与定位精度,以使数控机床具有更高性能。进给系统传动部件具有一定的质量与柔性,在高速、高加速度进给过程中,由于外部激励或者由于进给系统的自激振荡致使传动部件产生强烈振动,不但严重影响了机床的定位精度和表面加工质量,同时也大幅降低了机床的使用寿命,甚至对机床造成严重的损坏^[1-5]。因此,研究进给系统的动态响应特性,对提高机床加工质量及效率具有十分重要的意义。

由于滚珠丝杠进给系统的高效率、高传动精度、在切削过程中对负载变化的低敏感度以及高寿命等特性,使滚珠丝杠成为数控机床进给系统的主要传动方式。传统的滚珠丝杠进给系统的建模方法是将所有传动部件的惯量等效到电动机轴端,建立进给系统的刚体模型,然而刚体模型无法反映进给系统的振动特性。考虑滚珠丝杠进给系统部件柔性的建模方法,目前主要有 3 种:①有限元法。建立进给系统的连续变形模型,通过模态分析法分析系统的频率响应特性^[6-11]。②集中质量法。将进给系统简化为离散物理模型,通过建立数学模型来分析系统的频率响应特性^[12-14]。③混合模型法。将滚珠丝杠进给系统中丝杠的有限元模型与其他部件的集中质量模型进行混合建模,分析计算系统的频率响应特性^[15-17]。

有限元法与混合法较集中质量法能够更全面地反映滚珠丝杠进给系统的高阶自然模态,但其计算过程较复杂。集中质量法是通过合理降低系统自由度数量从而简化计算过程。由于进给系统的低阶自然模态是影响进给系统动态特性的主要因素^[1],合理简化能够准确保留系统的低阶自然模态特性,获得准确的进给系统仿真结果,同时达到简化计算的目的。文献[12-14]通过集中质量法建立了滚珠丝杠进给系统的动态特性模型,并对滚珠丝杠进给系统进行了定性分析,然而其计算结果存在一定的误差,同时文献中没有建立有效的动态特性仿真方法。本文对滚珠丝杠进给系统集中质量建模方法进行改进,并在此基础上建立滚珠丝杠进给系统的动力学仿真模型,通过该方法分析研究滚珠丝杠进给系统的振动特性。

1 滚珠丝杠进给系统集中质量模型建模

典型的滚珠丝杠进给系统由伺服电动机、联轴器、丝杠螺母、工作台及基座组成(图 1)。丝杠通过角接触轴承支撑在基座上,以支撑丝杠及提供轴向

推进力,基座通过某种方式固定在床身或地面上。将丝杠每转一圈使螺母产生的轴向位移定义为丝杠螺母的传动比 i ,即

$$i = \frac{h}{2\pi} \quad (1)$$

式中 h ——丝杠导程

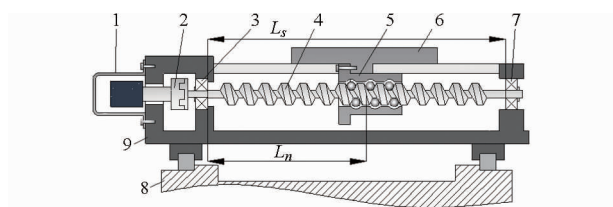


图 1 滚珠丝杠进给系统传动结构示意图

Fig. 1 Schematic configuration of ball screw feed drive system

1. 伺服电动机 2. 联轴器 3. 固定端轴承 4. 丝杠 5. 螺母
6. 工作台 7. 支撑端轴承 8. 床身 9. 基座

对于集中质量模型,合理的集中质量及其自由度的设置,能够反映连续系统的固有频率与振型的基本特征^[18],本文主要对数控机床进给系统动态特性的特征频率进行分析,因此忽略进给系统内部各组件之间的阻尼。

在对滚珠丝杠进给系统建模中一般将基座视为刚体,只考虑丝杠的柔性变形、丝杠螺母的接触变形以及丝杠的轴向窜动。然而在实际工况下基座质量与柔性会对滚珠丝杠进给系统的动态特性产生影响。因此,本文将滚珠丝杠进给系统简化为如图 2 所示的具有 5 个集中质量的离散模型。

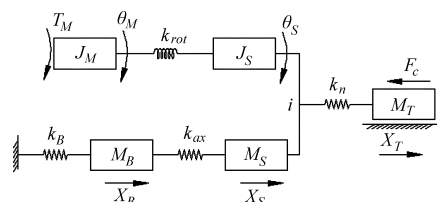


图 2 滚珠丝杠进给系统集中质量模型

Fig. 2 Lumped mass model of ball screw feed drive system

模型中惯性部件的参数为:伺服电动机转动惯量 J_M 、丝杠等效转动惯量 J_S 、基座质量 M_B 、丝杠等效质量 M_N 和工作台质量 M_T 。

集中质量间各等效弹簧刚度参数为:等效扭转刚度 k_{rot} 、等效轴向刚度 k_{ax} 、丝杠螺母接触刚度 k_n 、基座轴向刚度 k_b 。

集中质量的自由度参数为:伺服电动机转角 θ_M 、丝杠在工作台位置的转角 θ_S 、基座轴向位移 X_B 、丝杠在螺母位置的轴向位移 X_N 、工作台位移 X_T 。因此各等效弹簧的变形量为:等效扭转弹簧的变形量为 $\theta_M - \theta_S$ 、等效轴向弹簧的变形量为 $X_N - X_B$ 、基座轴向弹簧的变形量为 X_B 、丝杠螺母的接触变形量为 $X_T - X_N - i\theta_S$ 。

根据拉格朗日能量法建立该系统的动力学方程,系统动能 T 为

$$T = \frac{1}{2}J_M\dot{\theta}_M^2 + \frac{1}{2}J_S\dot{\theta}_S^2 + \frac{1}{2}M_B\dot{X}_B^2 + \frac{1}{2}M_S\dot{X}_S^2 + \frac{1}{2}M_T\dot{X}_T^2$$

(2)

系统势能 U 为

$$U = \frac{1}{2}k_{rot}(\theta_M - \theta_S)^2 + \frac{1}{2}k_B X_B^2 + \frac{1}{2}k_{ax}(X_S - X_B)^2 + \frac{1}{2}k_n(X_T - X_S - i\theta_S)^2$$

(3)

根据模型中集中质量的自由度参数,取系统的广义坐标矩阵 $\mathbf{q}$ 为

$$\mathbf{q} = [\theta_M \quad \theta_S \quad X_B \quad X_S \quad X_T]^T$$

系统的输入为伺服电动机的扭矩 T_M 与工作台的切削力 F_c ,取系统的广义力矩阵 $\mathbf{Q}$ 为

$$\mathbf{Q} = [T_M \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -F_c]^T$$

取 $L = T - U$,可以得到系统关于广义坐标 $\mathbf{q}$ 与广义力 $\mathbf{Q}$ 的拉格朗日函数

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Q}$$

(4)

经过计算整理,可以获得系统动力学模型的矩阵形式为

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{k}\mathbf{q} = \mathbf{Q}$$

(5)

其中

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} J_M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_T \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_{rot} & -k_{rot} & 0 & 0 & 0 \\ -k_{rot} & k_{rot} - i^2 k_n & 0 & -ik_n & ik_n \\ 0 & 0 & -k_{ax} - k_B & k_{ax} & 0 \\ 0 & -ik_n & -k_{ax} & k_{ax} - k_n & k_n \\ 0 & ik_n & 0 & k_n & -k_n \end{bmatrix}$$

为了能够在仿真模型中集成反向间隙、库伦摩擦等非线性因素,本文没有采用由状态空间模型转换为传递函数的仿真模型建模方法。将式(4)所示的滚珠丝杠进给系统动力学模型分解为扭转振动子系统、丝杠轴向振动子系统和工作台振动子系统3部分,建立了滚珠丝杠进给系统的 Simulink 仿真模型。仿真模型的输入为电动机扭矩 T_M 与工作台的切削力 F_c ,输出为 X 工作台的加速度 a_T 与位移 X_T 。滚珠丝杠进给系统仿真模型如图3所示。

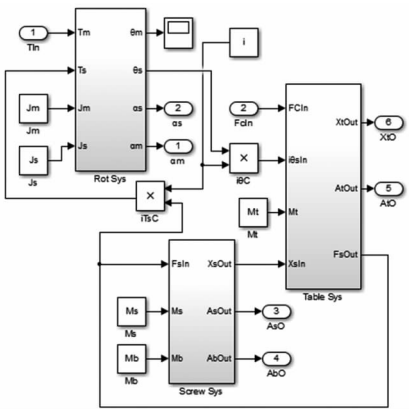


图3 滚珠丝杠进给系统仿真模型
Fig.3 Simulation model of ball screw feed drive system

2 集中质量模型等效参数计算

准确的滚珠丝杠进给系统动力学仿真结果需要合理的等效参数计算方法^[18]。等效参数的计算必须结合滚珠丝杠进给系统离散模型的特征,分析进给系统的动力学特性,来选取合适的等效参数计算方法。

丝杠的等效转动惯量 J_s 由丝杠的转动惯量 J_{sc} 、联轴器转动惯量 J_c 与工作台质量 M_T 折算到丝杠上的转动惯量组成,即

$$J_s = J_{sc} + J_c + M_T i^2$$

(6)

$$J_{sc} = \frac{\rho \pi}{32} d_s^4 l_s$$

(7)

式中 ρ ——丝杠材料密度
 d_s ——丝杠直径 l_s ——丝杠长度

丝杠的等效质量 M_s 由丝杠质量 M_{sc} 、伺服电动机转子质量 M_m 与联轴器质量 M_c 构成,即

$$M_s = M_{sc} + M_m + M_c$$

(8)

$$M_{sc} = \frac{\rho \pi}{4} d_s^2 l_s$$

(9)

滚珠丝杠进给系统的轴向刚度与丝杠的安装方式有关,在此以多数机床采用的丝杠固定-支撑方式为例进行说明(图4)。丝杠轴伺服电动机侧采用固定支撑方式以提供丝杠轴向支撑,末端采用自由支撑方式。

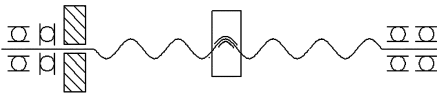


图4 丝杠固定-支撑安装方式示意图
Fig.4 Fixed-free schematic of shaft mounting configuration

因此,滚珠丝杠进给系统的轴向刚度 k_{ax} 由丝杠轴承刚度 k_b 与丝杠轴轴向刚度 $k_{s_{ax}}$ 组成,即

$$\frac{1}{k_{ax}} = \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_{s_{ax}}}$$

(10)

根据工作台位置丝杠的轴向刚度 $k_{s_{ax}}$ 为

$$k_{s_{ax}} = \frac{EA}{l_n} = \frac{\pi d_s^2 E}{4l_n} \tag{11}$$

式中 E ——材料弹性模量 A ——丝杠截面积
 l_n ——工作台位置的丝杠长度

滚珠丝杠进给系统的扭转刚度 k_{rot} 由丝杠的扭转刚度 $k_{s_{rot}}$ 与联轴器扭转刚度 k_c 组成,即

$$\frac{1}{k_{rot}} = \frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_{s_{rot}}} \tag{12}$$

根据工作台位置,丝杠的扭转刚度 $k_{s_{rot}}$ 为

$$k_{s_{rot}} = \frac{T}{\Delta\theta} = \frac{GI_p}{l_n} = \frac{G\pi d_s^4}{32l_n} \tag{13}$$

式中 G ——材料剪切模量
 I_p ——丝杠截面极惯性矩
丝杠螺母的接触刚度 k_n 为

$$k_n = 0.8K \left(\frac{F_a}{0.1C_a} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{14}$$

式中 K ——螺母刚度参考值
 F_a ——螺母轴向载荷
 C_a ——基本动额定载荷

3 集中质量模型实验对比

以 MAG 某加工中心 X 轴滚珠丝杠进给系统为研究对象(图 5), X 工作台通过导轨及滚珠丝杠安装在 Y 工作台上, Y 工作台通过导轨及滚珠丝杠安装在床身上,其部件参数如表 1 所示。建立该滚珠丝杠进给系统的集中质量仿真模型并进行频率响应特性分析;通过实验对该进给系统的动态响应特性进行测试,分析比较仿真结果与实验结果,对集中质量仿真模型进行实验验证。

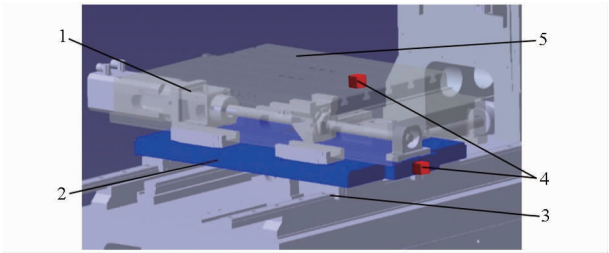


图 5 MAG 加工中心 X 轴进给系统结构
Fig.5 X -axis feed drive system structure of
MAG machining center

1. X 轴进给系统 2. Y 工作台 3. Y 轴导轨滑块 4. 加速度传感器 5. X 工作台

根据滚珠丝杠进给系统参数计算得出集中质量模型各参数,并建立系统动力学仿真模型,仿真模型所用参数如表 2 所示。在此基座的轴向刚度 k_B 由 X 工作台导轨刚度 k_g 与 Y 工作台滚珠丝杠径向刚度 k_{sy} 并联组成,即

$$k_B = 2k_g + k_{sy} \tag{15}$$

表 1 进给系统部件参数

Tab.1 Parameters of feed drive system components	
参数	数值
X 工作台质量 M_x /kg	399
Y 工作台质量 M_y /kg	365.5
联轴器质量 M_c /kg	0.3
联轴器转动惯量 J_c /($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	1.6×10^{-4}
伺服电动机转动惯量 J_m /($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	2.3×10^{-3}
伺服电动机转子质量 M_m /kg	6.38
联轴器扭转刚度 k_c /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	1.4×10^3
丝杠轴承轴向刚度 k_b /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	1.6×10^3
X 工作台导轨刚度 k_g /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	3.5×10^8
Y 工作台丝杠径向刚度 k_{sy} /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	3.38×10^6
丝杠导程 h /m	1.2×10^{-2}
丝杠直径 d_s /m	3.2×10^{-2}
丝杠长度 l_s /m	0.7
工作台位置丝杠长度 l_n /m	0.35
螺母刚度参考值 K /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	6.12×10^8
基本动额定载荷 C_a /kN	37.4

表 2 仿真模型参数

Tab.2 Parameters of simulation model	
参数	数值
伺服电动机转动惯量 J_M /($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	2.3×10^{-3}
丝杠侧的转动惯量 J_S /($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	2.09×10^{-3}
基座质量 M_B /kg	374
丝杠等效质量 M_S /kg	11.1
工作台质量 M_T /kg	365
扭转刚度 k_{rot} /($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$)	1.322×10^3
轴向刚度 k_{ax} /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	1.196×10^8
丝杠螺母接触刚度 k_n /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	6.79×10^7
基座轴向刚度 k_B /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	7.03×10^8

以电动机扭矩 T_M 为输入, X 工作台加速度 $\ddot{X}_T$ 以及 Y 工作台加速度 $\ddot{X}_B$ 为输出,进行频率响应特性分析,其结果如图 6 所示。

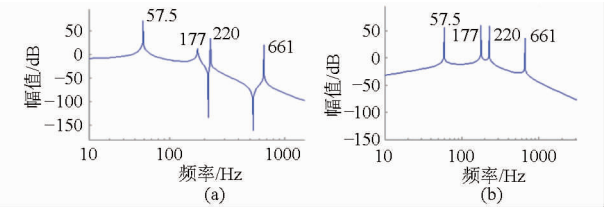


图 6 频率响应特性仿真结果
Fig.6 Simulated result of frequency response
(a) X 工作台 (b) Y 工作台

采用 AVANT-7008 型数据采集与分析仪和 Dytran 压电加速度计在该加工中心上构建了动态响应特性测试实验平台(图 7)。分别在 X 工作台与 Y 工作台上布置加速度传感器(图 5)。在 X 轴进给过程中对 X 工作台与 Y 工作台的轴向加速度信号进行采集并进行频谱分析,其结果如图 8 所示。

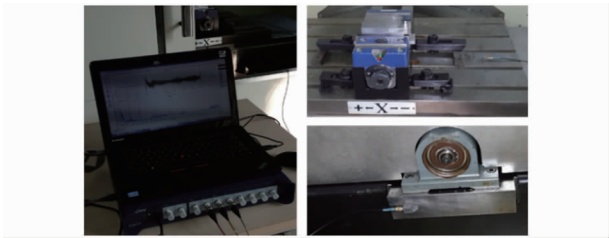


图 7 动态响应特性测试实验平台

Fig. 7 Test platform of dynamic response characteristics

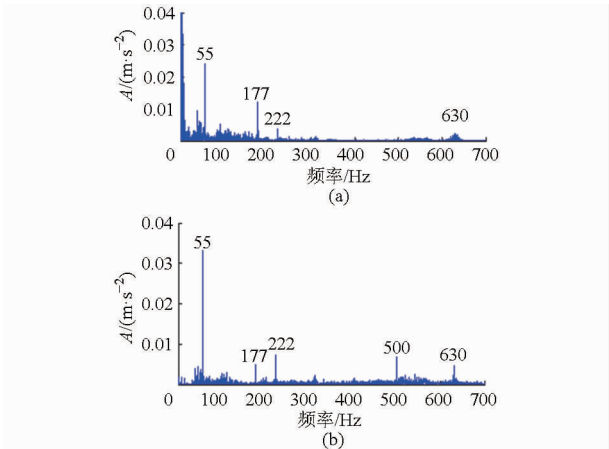


图 8 动态响应特性测试频谱分析结果

Fig. 8 Spectrum analysis result of dynamic response characteristics test
(a) X 工作台 (b) Y 工作台

比较分析仿真结果与实验结果,图 6 所示频率响应特性仿真曲线中,X 工作台与 Y 工作台具有 4 个特征频率 $f_1 \sim f_4$,图 8 所示 X 工作台与 Y 工作台振动信号频谱中也存在 4 个特征频率 $f'_1 \sim f'_4$ 。其特征频率基本吻合,误差 σ 在 5% 以内(表 3)。实验结果说明该滚珠丝杠进给系统集中质量建模方法能够准确反映滚珠丝杠进给系统的特征频率。

表 3 仿真结果与实验结果对比
Tab.3 Comparison of simulated and measured eigenfrequencies

i	特征频率仿真	特征频率实验	误差
	结果 f_i/Hz	实测结果 f'_i/Hz	
1	57.5	55	4.5
2	177	177	0
3	220	222	2.3
4	661	630	4.9

4 滚珠丝杠进给系统振动特性分析

4.1 集中质量振动频谱分析

基于滚珠丝杠进给系统集中质量模型,以常用的梯形加速度运动指令相对应的伺服电动机扭矩 T_M 为输入,记录各集中质量的加速度输出并进行频谱分析,其结果如图 9 所示。仿真结果表明,第 1 阶

固有频率存在于各个集中质量的振动中,X 工作台的振动以第 1 阶固有频率的频率成分为主。

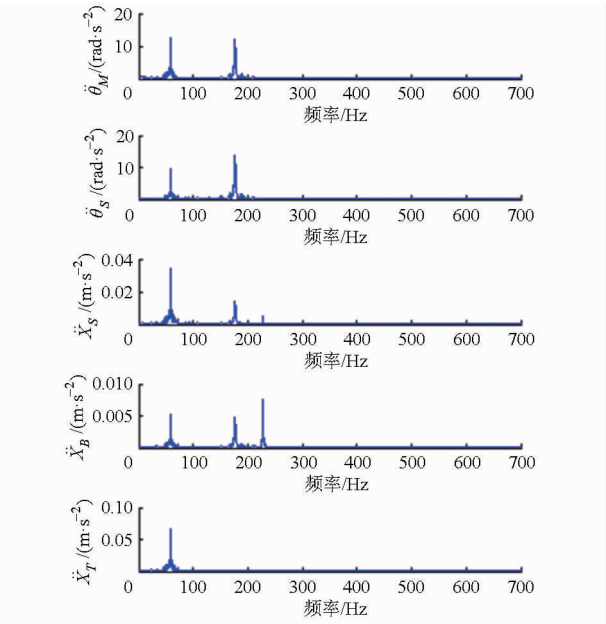


图 9 各集中质量振动频谱分析结果

Fig.9 Frequency spectrum analysis results of each lumped mass vibration

分别以伺服电动机扭矩 T_M 以及切削力 F_c 为输入,以 X 工作台和 Y 工作台为输出对该集中质量仿真模型进行阶跃响应测试,并进行频谱分析,其结果如图 10 所示。

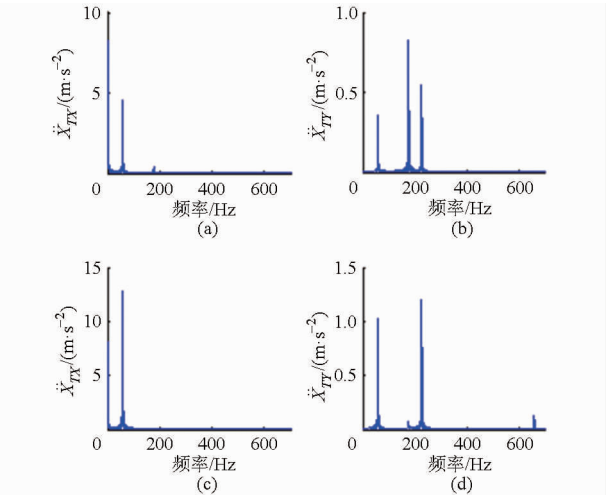


图 10 滚珠丝杠进给系统模型阶跃响应频谱分析结果

Fig. 10 Spectrum analysis results of step response test for ball screw feed drive system

(a) T_M 输入下 X 工作台 (b) T_M 输入下 Y 工作台
(c) F_c 输入下 X 工作台 (d) F_c 输入下 Y 工作台

分析阶跃响应仿真结果,第 1 阶固有频率是影响进给系统动态特性的主要因素。因此,提高第 1 阶固有频率对改善滚珠丝杠进给系统动态特性具有十分重要的意义。通过仿真发现,工作台质量 M_T 与丝杠螺母的接触刚度 k_n 对第 1 阶固有频率的影

响最大。可以通过合理降低工作台质量或者采用更高接触刚度的丝杠螺母来优化滚珠丝杠进给系统动态特性。

4.2 螺母位置对系统振动特性的影响分析

螺母位置对滚珠丝杠进给系统动态特性的具有一定的影响^[14,19]。由于无法构建准确的仿真模型及实验检测设备的限制,目前基本只能进行定性分析。根据本文提出的集中质量建模方法,比较具体地分析了螺母位置对滚珠丝杠进给系统动态特性的影响。参考 X 轴的工作行程,计算螺母处在不同位置时丝杠的等效扭转刚度 k_{rot} 以及等效轴向刚度 k_{ax} 如表 4 所示。

表 4 不同螺母位置等效扭转刚度与等效轴向刚度
Tab.4 Equivalent rotational rigidity and axial rigidity of ball screw feed drive model at different table positions

l_n /m	等效扭转刚度 $/(N \cdot m \cdot rad^{-1})$	等效轴向刚度 $/(N \cdot m^{-1})$
0.10	1.377×10^3	1.459×10^8
0.15	1.366×10^3	1.398×10^8
0.20	1.355×10^3	1.341×10^8
0.25	1.344×10^3	1.289×10^8
0.30	1.332×10^3	1.241×10^8
0.35	1.322×10^3	1.196×10^8
0.40	1.312×10^3	1.154×10^8
0.45	1.302×10^3	1.115×10^8
0.50	1.292×10^3	1.079×10^8
0.55	1.282×10^3	1.045×10^8
0.60	1.272×10^3	1.013×10^8
0.65	1.262×10^3	9.830×10^7

仿真分析集中质量模型在各等效刚度参数下的频率响应特性,并记录系统的固有频率值。以螺母处于中间位置时系统各固有频率数值为参考,分别计算集中质量模型的固有频率的变化率,最终获得系统固有频率随螺母位置变化的趋势如图 11 所示。

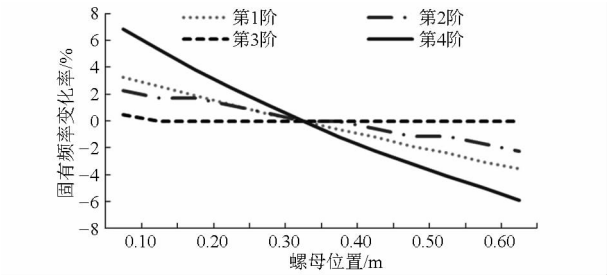


图 11 不同螺母位置的滚珠丝杠进给系统固有频率
Fig.11 Natural frequencies of ball screw feed drive system at different machine table positions

分析表明,螺母位置对滚珠丝杠进给系统第 4 阶固有频率影响最大,达到 6.8%。螺母位置对系统第 1 阶、第 2 阶固有频率产生一定的影响,考虑到伺服电动机扭转振动的频率为第 1 阶与第 2 阶固有频率,其振动信号会通过伺服电动机速度反馈引入

控制回路。因此,螺母位置引起的固有频率变化将导致进给系统的不稳定。

4.3 反向间隙对动态特性的影响分析

传动链中存在间隙会导致进给系统在反向运动时使工作台的位移相对于伺服电动机的转角产生一定的滞后,同时反向间隙的作用又会导致滚珠丝杠进给系统部件之间产生冲击而激励部件产生振动。滚珠丝杠进给系统反向间隙主要包括丝杠-螺母间隙和轴承轴向间隙等。为研究丝杠螺母反向间隙对系统振动特性的影响,采用死区模型建立如图 12 所示的反向间隙模型。

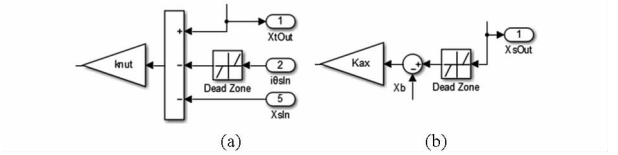


图 12 反向间隙仿真模型
Fig.12 Simulation model with backlash
(a) 丝杠螺母反向间隙 (b) 轴承反向间隙

梯形加速度运动指令突出的柔性控制能力而被广泛使用在高端数控系统中^[20],本文以梯形加速度运动指令相对应的伺服电动机扭矩 T_M 为输入,以丝杠-螺母副的反向间隙 0.005 mm 为例进行仿真分析。图 13 对比分析了无反向间隙与有反向间隙各集中质量的振动加速度曲线。图 14 和图 9 分别为有反向间隙情况下各集中质量振动频谱和无反向间隙的各集中质量振动频谱。

仿真结果表明反向间隙对滚珠丝杠进给系统存在较大的影响。反向间隙产生的激励致使各集中质量的振动振幅增大,同时增加了振动的频率成分。

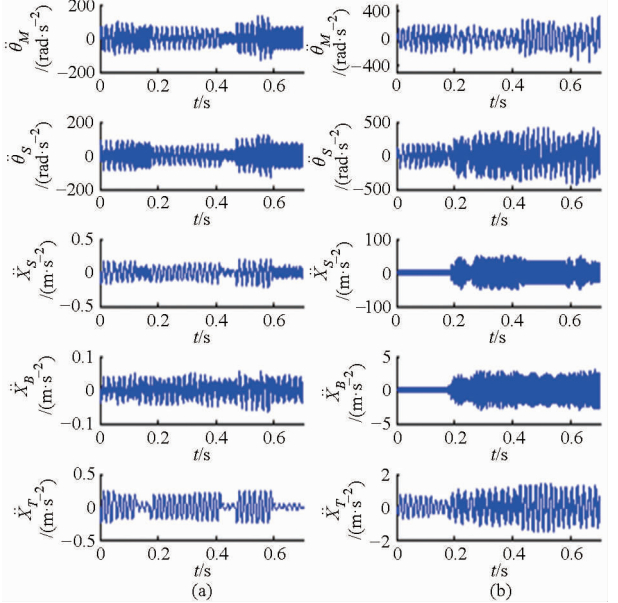


图 13 反向间隙对系统振动的影响
Fig.13 Influence of backlash on system vibration
(a) 无反向间隙 (b) 有反向间隙

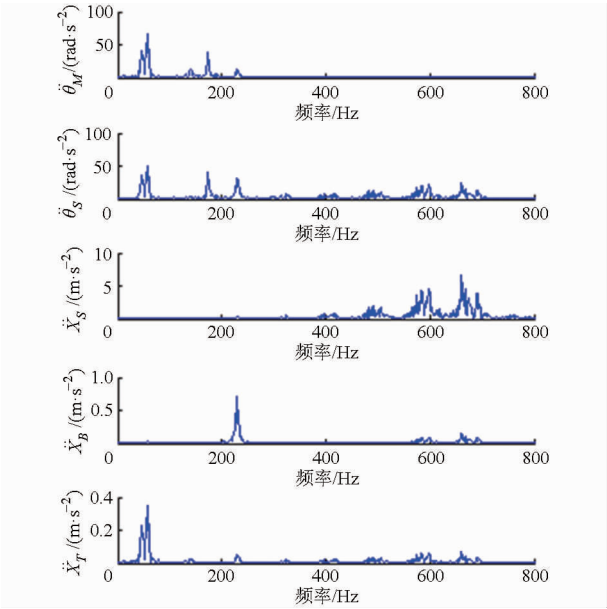


图 14 反向间隙作用下各集中质量振动频谱分析结果

Fig. 14 Frequency spectrum analysis results of each lumped mass vibration with backlash

其中对丝杠轴向及扭转振动的影响最大。由于工作台具有较大的质量,高频振动成分得到了抑制。

图 15 所示工作台加速度曲线仿真结果说明了反向间隙对滚珠丝杠进给系统的激励作用。工作台反向加速前振动以低频振动为主,加速度曲线较光滑;反向加速后因反向间隙产生的激励致使工作台的高频振动明显加强。这些振动给进给系统的伺服控制带来不利影响,同时丝杠轴向高频振动会降低丝杠支撑轴承以及丝杠-螺母副的寿命。因此,在机床控制参数匹配以及日常维护过程中,应该重视滚珠丝杠进给系统中的反向间隙对进给系统动态特性的影响,同时对反向间隙产生的冲击激励进行有效的控制。

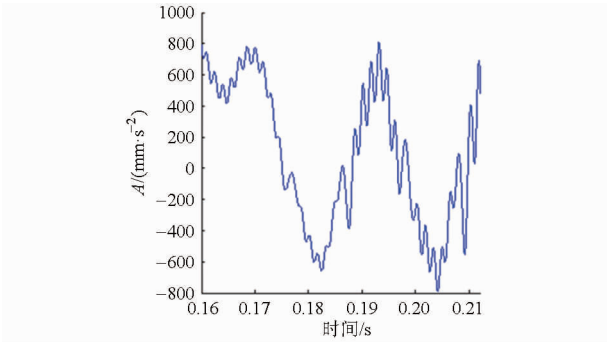


图 15 工作台加速度曲线仿真结果

Fig. 15 Simulated acceleration curve of machine table

5 结论

(1) 提出了一种考虑滚珠丝杠进给系统基座柔性的集中质量建模方法,并提出了动态特性仿真方法,实现了对各集中质量动力学特性的仿真。

(2) 以 MAG 某加工中心 X 轴滚珠丝杠进给系统为研究对象,验证了该集中质量建模方法与仿真方法的正确性。仿真结果与实验结果的特征频率误差在 5% 以内。基于该集中质量动力学仿真模型,对滚珠丝杠进给系统的振动特性、螺母位置对滚珠丝杠进给系统动态特性的影响以及反向间隙对滚珠丝杠进给系统动态特性的影响进行了分析。

(3) 第 1 阶固有频率是影响进给系统动态特性的主要因素,合理降低工作台质量或者采用更高接触刚度的丝杠-螺母副可提高系统的第 1 阶固有频率。螺母位置对系统第 1 阶、第 2 阶固有频率产生一定的影响,螺母位置引起的固有频率变化会通过速度反馈回路影响伺服控制系统,使进给系统不稳定。滚珠丝杠进给系统中的反向间隙会激励电动机等部件产生高频振动,给进给系统带来不利影响。

参 考 文 献

1 Altintas Y, Verl A, Brecher C, et al. Machine tool feed drives[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(2):779 - 796.

2 张曙. 机床产品创新与设计[M]. 南京:东南大学出版社, 2014.

3 杨明,胡浩,徐殿国. 永磁交流伺服系统机械谐振成因及其抑制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(1):79 - 84.
Yang Ming, Hu Hao, Xu Dianguo. Cause and suppression of mechanical resonance in PMSM servo system[J]. Electric Machines and Control, 2012,16(1):79 - 84. (in Chinese)

4 Dietmair A, Verl A. Drive based vibration reduction for production machines [J]. Modern Machinery Science Journal, 2009(10): 130 - 134.

5 吴子英,刘宏昭,王胜,等. 数控机床进给伺服系统研究进展[J]. 振动与冲击, 2014, 33(8):148 - 160.
Wu Ziyang, Liu Hongzhao, Wang Sheng, et al. Advances in research of feed-servo systems of CNC machine tools[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(8): 148 - 160. (in Chinese)

6 Zaeh M, Oerli T, Miberg J. Finite element modeling of ball screw feed drive system[J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2004, 53(1):289 - 292.

7 杨勇,张为民,杨涛. 基于 Kriging 元模型的机床进给驱动系统动态特性优化[J]. 农业机械学报, 2013,44(5):288 - 293.
Yang Yong, Zhang Weimin, Yang Tao. Dynamic characteristic optimization of feed system based on Kriging metamodel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013, 44(5):288 - 293. (in Chinese)

- 8 Dadalau A, Mottabedi M, Groh K, et al. Parametric modeling of ball screw spindles[J]. *Production Engineering*, 2010, 4(6):625–631.
- 9 Sekler P, Voss M, Verl A. Model-based calculation of the system behavior of machine structure on the control device for vibration avoidance[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 58(9–12):1087–1095.
- 10 Chinedum Okwudire. Finite element modeling of ball screw feed drive system for control purposes[D]. Vancouver, BC Canada: The University of British Columbia, 2005.
- 11 杨勇, 张为民, 陈希光. 数控机床导轨滑块结合部组建模与参数辨识方法研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(7):313–320. Yang Yong, Zhang Weimin, Chen Xiguang. Modeling and parameter identification of linear guideway in NC machine tool[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7):313–320. (in Chinese)
- 12 刘栋, 梅雪松, 冯斌, 等. 基于 Symlets 小波滤波的滚珠丝杠伺服传动系统频响特性辨识[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(13):153–159. Liu dong, Mei Xuesong, Feng Bin, et al. Frequency response identification for ballscrew servo driven system based on Symlets wavelet[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(13):153–159. (in Chinese)
- 13 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 and Manufacture*, 2012, 52(1):85–96.
- 14 Frey S, Dadalau A, Verl A. Expedient modeling of ball screw feed drives[J]. *Production Engineering*, 2012, 6(2):205–211.
- 15 Okwudire E C, Altintas Y. Hybrid modeling of ball screw drives with coupled axial, torsional and lateral dynamics[J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2009, 131(7):071002–1–071002–9.
- 16 Vicente Diego A, Hecker Rogelio L, Villegas Fernando J, et al. Modeling and vibration mode analysis of a ball screw drive[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 58(1–4):257–265.
- 17 董亮, 汤文成, 刘立. 考虑摩擦和间隙的柔性滚珠丝杠进给系统建模与分析[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11):300–307. Dong Liang, Tang Wencheng, Liu Li. Modeling and analysis of flexible ball screw driven servomechanisms with friction and backlash[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11):300–307. (in Chinese)
- 18 师汉民, 黄其柏. 机械振动系统·分析·建模·测试·对策·上册 [M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013.
- 19 卢秉恒, 赵万华, 张俊, 等. 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):2–11. Lu Bingheng, Zhao Wanhua, Zhang Jun, et al. Electromechanical coupling in the feed system with high speed and high acceleration[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6):2–11. (in Chinese)
- 20 谢东, 丁杰雄, 杜丽, 等. 高速加工运动性能预测方法研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(6):333–340. Xie Dong, Ding Jiexiong, Du Li, et al. Prediction of high-speed machining kinematic performance[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(6):333–340. (in Chinese)
-

(上接第 361 页)

- 12 杨新刚, 黄玉美, 杨文栋, 等. 基于可操作性的串联机器人相对传动比优化[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(8):209–213, 218. Yang Xin'gang, Huang Yumei, Yang Wendong, et al. Relative proportion of serial robot transmission ratios optimization based on manipulability[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(8):209–213, 218. (in Chinese)
- 13 李宪华, 郭永存, 张军, 等. 模块化六自由度机械臂逆运动学解算与验证[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(4):246–251. Li Xianhua, Guo Yongcun, Zhang Jun, et al. Inverse kinematics solution and verification of modular 6-DOF manipulator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4):246–251. (in Chinese)
- 14 张永贵, 高金刚, 刘文洲, 等. 切削加工机器人系统综合误差解耦补偿[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(12):326–331. Zhang Yonggui, Gao Jin'gang, Liu Wenzhou, et al. Robotic kinematics parameters error identification based on genetic algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(12):326–331. (in Chinese)
- 15 Chen I M, Yang Guilin. Automatic model generation for modular reconfigurable robot dynamics[J]. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1998, 120(3):346–352.
- 16 Meister E, Nosov E, Levi P. Automatic onboard and online modeling of modular and self-reconfigurable robots[C]//2013 6th IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 2013:91–96.
- 17 张为民, 李国伟, 陈灿. 基于雅可比旋量理论的公差优化分配[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(4):216–219, 228. Zhang Weimin, Li Guowei, Chen Can. Optimal allocation of tolerance based on Jacobian-torsor theory[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(4):216–219, 228. (in Chinese)
- 18 Gao Wenbin, Wang Hongguang, Jiang Yong, et al. Research on the calibration of modular reconfigurable robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(17):92–100.