doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.050

## 基于 Kriging 元模型的机床进给驱动系统动态特性优化\*

杨勇1张为民1,2杨涛1

(1. 同济大学机械工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学中德学院, 上海 200092)

摘要:提出一种基于改进 Kriging 元模型的机床进给系统动态特性优化方法。在推导滚珠丝杠副动力学模型,建立 准确进给驱动多柔体模型的基础上,在实际装配边界条件下,以立柱为设计对象,以刀具位置中心点的振动加速度 最大偏离比为动态特性直观评价指标,采用可信参数更新元模型对进给系统的动态特性进行优化,在不增加质量 的前提下,刀具位置中心点的进给向振动加速度最大偏离比降低了 8.7%,从而最终实现立柱结构改进、伺服电动 机至刀具端的进给系统的动态特性改善。

关键词:机床 进给系统 动态特性优化 元模型 中图分类号:TH113.1 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2013)05-0288-06

## Dynamic Characteristic Optimization of Feed System Based on Kriging Metamodel

Yang Yong<sup>1</sup> Zhang Weimin<sup>1,2</sup> Yang Tao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China
2. Chinese – German School for Postgraduate Studies, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract**: A dynamic characteristic optimization method of feed system based on improved Kriging metamodel was proposed. On the foundation of dynamic model derivation of screw-nut assembly and accurate multi-flexible body dynamic model of feed drive system, the dynamic characteristic of feed system was optimized by taking the Kriging metamodel based on the trust parameters update with the assessment of tool motion (maximum ratio of vibration acceleration), which adopted the column as the design object under the condition of assembly. The optimization result showed that both the structure of column and dynamic performance of feed system from motor to tool were improved.

Key words: Machine tool Feed system Dynamic characteristic optimization Metamodel

### 引言

机床进给驱动系统中的机械传递环节对整体进 给系统动态特性有着非常重要的影响<sup>[1-7]</sup>,从不同 角度改善其动态性能一直受到国内外学者的关注。 以往研究中多借助大型商用数值仿真与优化软件, 通过反复调用仿真程序、计算、迭代、改进,最终实现 机械传动部件及机械传递环节动态特性改善<sup>[8-12]</sup>。 但由于大多数优化通过模态分析法在非实际装配条 件下进行,边界条件设置不够准确,优化评价指标选 择多受限于软件本身,且随着产品复杂性、非线性以 及内部耦合性程度不断增加,使得整个系统的优化 过程十分耗时甚至无法实现,且其结果准确性、适用 性与可靠性均受到一定制约<sup>[13~14]</sup>。

机床滚珠丝杠进给系统中,由伺服电动机产生的旋转运动通过滚珠丝杠转换成为立柱的平移运动,并通过立柱的连接最终转换为刀具运动,立柱作为机械传递环节中的一个重要的结构大件,同时受到进给驱动力和切削阻力的作用,其动力学性能直接影响到伺服电动机至刀具端的进给系统的动态特性及机床的加工精度。

针对上述问题,本文提出一种基于 Kriging 元模

\*国家科技重大专项资助项目(2011ZX04016-021)

收稿日期: 2012-05-28 修回日期: 2012-06-13

作者简介:杨勇,博士生,主要从事机床动态特性研究,E-mail: yangyong5114360@163.com

型的过程优化方法,并对该 Kriging 元模型进行改进,以进给系统准确的多柔体动力学模型为基础,以 立柱为设计对象,在实际装配边界条件下,以刀具位置中心运动为动态特性直观评价指标,在降低优化 过程计算成本,保证优化结果可靠性的同时,最终实现立柱结构改进、伺服电动机至刀具端的进给系统动态特性改善及机床加工精度的提高。

### 1 进给系统多柔体动力学建模

为保证优化结果的可靠性,需要建立准确的进 给系统多柔体动力学模型,以确保优化边界条件及 评价指标的准确性。

首先建立滚珠丝杠副动力学模型,对于滚珠丝 杠接触副而言,其质量可以忽略<sup>[15]</sup>,在建立滚珠丝 杠副动力学模型时,可只考虑结合部的刚度和阻尼 特性,因此,滚珠丝杠副的动力学模型可以简化为

$$\mathbf{C} \, \mathbf{x}(t) + \mathbf{K} \mathbf{x}(t) = \mathbf{Q}(t) \tag{1}$$

式中 *x*——系统速度向量

- **x**——系统位移向量
- C——系统阻尼矩阵
- K——系统刚度矩阵
- Q----系统载荷向量

假设滚珠丝杠副的接触为点接触,分别用 S 和 N 来定义滚珠丝杆与螺母的接触点。在接触副刚度 特性中,相比于丝杠和螺母,滚珠变形处于主导位 置<sup>[4]</sup>,因此,滚珠丝杠结合副单元示意图可用图1 表 示,在实际的动力学模型建立过程中,将滚珠丝杠接 触副连接简化为丝杆接触点 S 和螺母接触点 N 的 关系问题。



### 图 1 滚珠丝杠结合副示意图与简化模型 Fig. 1 Sketch map and simplification model of ball screw assembly

假设 S 节点与 N 节点在各自由度上的相对位 移为 $(x_{is} - x_{in})(i = 1, 2, \dots, 6)$ ,其中 $x_{is}, x_{in}$ 分别为 S 点和 N 点在各自由度上的位移 $(i = 1, 2, \dots, 6)$ ,分 析可得滚珠丝杠结合副势能  $U_{sN}$ 由两部分组成,即

$$U_{SN} = U_{SN1} + U_{SN2}$$
 (2)  
 $U_{SN1}$ 是与各自由度上的相对位移有关的势能

$$U_{SN1} = \sum_{i=1}^{6} \int_{0}^{x_{is} - x_{in}} k_{i} x dx$$
(3)

式中k<sub>i</sub>为结合副各自由度上的刚度影响系数,其物

理意义可理解为仅在S节点与N节点的i自由度方向上产生单位相对位移所需要施加的力。

 $U_{SN2}$ 是与滚珠丝杠副牵连运动有关的势能。假 设各自由度上的相对位移均按照同一比例系数 m从零增加至终值,且在某一中间值时自由度 1 和自 由度 4 上的位移分别为  $m(x_{1s} - x_{1n}), m(x_{4s} - x_{4n}),$ 设位移有一微小增量  $\Delta m$ ,则自由度 4 上的位移引 起的自由度 1 上的位移增量为  $r\Delta m(x_{4s} - x_{4n}),$ 其中 r为旋转运动到直线运动的转换常数,此时自由度 1 上的力在该位移上的做功为

$$\Delta W = -k_1 m (x_{1s} - x_{1n}) r \Delta m (x_{4s} - x_{4n})$$
(4)

位移从零到终值(m从0到1)的过程中,牵连运动势能可通过对式(4)的积分得到

$$U_{SN2} = \sum -k_1 m(x_{1s} - x_{1n}) r \Delta m(x_{4s} - x_{4n}) = \int_0^1 -k_1 m(x_{1s} - x_{1n}) r(x_{4s} - x_{4n}) dm$$
(5)

因为滚珠丝杠副的接触刚度可近似认为是常数,即*k<sub>i</sub>*大小与*x*无关,因此将式(3)~(5)代入式(2)整理后可得

$$U_{SN} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{6} k_i (x_{is} - x_{in})^2 - \frac{1}{2} k_1 (x_{1s} - x_{1n}) r(x_{4s} - x_{4n})$$
(6)

依据动力学基本原理,将式(6)代人拉格朗日 动力学方程进行求解,可得其刚度矩阵 K 为

		K =	k* -k*	- k	$\begin{bmatrix} \mathbf{k}^* \\ \mathbf{k}^* \end{bmatrix}$		(′	7)
其中		$k_1$	0	0	$-rk_{1}/2$	0	0 ]	
		0	$k_2$	0	0	0	0	
	7 *	0	0	$k_3$	0	0	0	
	<i>K</i> =	$-rk_{1}/2$	0	0	$k_4$	0	0	
		0	0	0	0	$k_5$	0	
		0	0	0	0	0	$k_6$	

可以看出该刚度矩阵具有以下性质<sup>[16-17]</sup>:可分 块性;沿主对角线的对称性,该性质可通过功的互等 定理证明。参照动力学模型坐标系(图1所示),分 析可知: $k_1$ 表示滚珠丝杆副的轴向刚度; $k_2 = k_3$ 表示 滚珠丝杠副的径向刚度; $k_4$ 表示滚珠丝杠副的扭转 刚度; $k_5 = k_6$ 表示滚珠丝杠副的弯曲刚度; $k_c = -rk_1/2$ 表示滚珠丝杠副旋转与平移运动的耦合刚 度, $k_1 \sim k_6$ 可参照文献[4]及赫兹弹性接触理 论<sup>[18-19]</sup>进行计算。滚珠丝杠接触副的基本参数为: 丝杆的公称直径 60 mm,滚珠直径 9 mm,接触压力 角 45°,滚珠工作圈数 8,丝杠有效长度 105 mm。滚 珠丝杠接触副的接触刚度为: $k_1 = 1.65 \times 10^9$  N/m,  $\begin{aligned} k_2 &= k_3 = 8.35 \times 10^8 \text{ N/m}, k_4 = 9.4 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m/rad}, \\ k_5 &= k_6 = 1.73 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m/rad}, k_c = 3.94 \times 10^6 \text{ N/rad}_{\circ} \end{aligned}$ 

同理得支撑轴承轴向刚度为 2.13 × 10<sup>9</sup> N/m, 导轨滑块的竖直刚度和切向刚度为 1.88 × 10<sup>9</sup> N/m、 1.25 × 10<sup>9</sup> N/m,实际动力学建模过程中,采用弹簧 单元对轴承及直线导轨进行模拟建模。

立柱的结构示意图及有限元模型见图 2,滚珠 丝杠进给系统整体模型如图 3 所示,为保证优化结 果的准确性,床身、立柱、滑枕等部件采用三维实体 单元进行建模,近似认为滚珠丝杠轴及电动机轴为 两端弹性支承且均匀材料、等圆截面的铁木辛柯梁, 采用考虑剪切变形的梁单元建模,电动机轴及滚珠 丝杠轴通过弹簧单元与床身连接以模拟轴承的支撑 作用,立柱与床身之间采用切向弹簧和垂向弹簧模 拟导轨滑块系统(保留立柱沿导轨的相对滑动自由 度),模拟实际边界条件约束床身支座的全部自由 度。



图 2 立柱结构示意图及有限元模型 Fig. 2 Structure and FEM model of column 1. 纵肋板 2. 横肋板 3. 内侧肋板 4. 顶肋板 5. 外侧肋板



图 3 进给系统多柔体模型 Fig. 3 Multi flexible body model of feed system

### 2 基于可信参数更新的 Kriging 元模型

设 x 为待估计点,  $x_1$ , ...,  $x_i$ , ...,  $x_N$  为待估计点 周围的试验样本点,  $\exists x_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, x_i^{(3)}, ..., x_i^{(i)},$ ...,  $x_i^{(n)}$ ), N 为试验样本点数, n 为设计变量数,则试 验样本点处的观测值为  $y(x_i)$ , 根据 Kriging 元模型 的基本原理,则待估计点处的预测值可以由待估计 点周围试验样本点的已知观测值加权求和得到,其 加权系数可根据无偏估计和方差最小来确定, 其基 本形式为<sup>[20-21]</sup>

$$\mathbf{y}(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}} \mathbf{Y}(\mathbf{x}) + \mathbf{Z}(\mathbf{x})$$
(8)

其中  $\lambda$  表示待定回归系数向量,可写为: $\lambda$  = ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ )<sup>T</sup>;Y(x) 表示回归模型向量,可表示 为 $Y(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x))^T, p$  为回归模 型向量中的基本回归模型个数; $\lambda^T Y(x)$  为全局近似 函数,Z(x) 为服从正态分布的局部偏差函数,且其 具有如下性质<sup>[20-21]</sup>

$$\begin{cases} E(\mathbf{Z}(\mathbf{x})) = 0\\ D(\mathbf{Z}(\mathbf{x})) = \sigma^{2}\\ Cov(\mathbf{Z}(\mathbf{x}), \mathbf{Z}^{j}(\mathbf{x})) = \sigma^{2} \mathbf{R}(\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{x} | \mathbf{x}^{j})) \end{cases}$$
(9)

其中 $\sigma^2$ 为方差,  $R(R(\theta, x, x'))$ 为相关函数矩阵, 其

矩阵元素 R(θ,x,x<sup>i</sup>)为以相关系数待估参数向量 θ 为参数的相关函数。工程应用中常用的相关函数包 括指数函数、样条曲线函数、高斯函数等,本文采用 高斯函数为其核函数,其基本形式为

$$\begin{cases} R(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}^{j}) = \prod_{k=1}^{n} R_{k}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}^{j}) = \\ \prod_{k=1}^{n} \exp(-\theta_{k} (x_{k} - x_{k}^{j})^{2}) \\ \boldsymbol{\theta} = (\theta_{1}, \theta_{2}, \cdots, \theta_{k}) \end{cases}$$
(10)

其中 x<sup>i</sup><sub>k</sub> 为第 k 个设计变量的第 j 组样本值。其中 θ 可通过最大似然函数的参数估计求得, 当相关函数 为高斯函数时, 该过程可以表示为

$$\boldsymbol{\theta} = \min(|\boldsymbol{R}|\sigma^{2n}) \tag{11}$$

其中|R|为相关函数矩阵的行列式。实际应用 过程中回归模型常作常数项处理,即令 $f_i(x) = 1$ ,因 此Y(x) = I,令 $Y_R$ 为设计样本的响应向量, $Y_R =$ ( $y(x_1), y(x_2), \dots, y(x_n)$ ),通过最大似然函数参数 估计可以得到  $\lambda$  和  $\sigma^2$ 的预测值为<sup>[20~23]</sup>

$$\hat{\boldsymbol{\lambda}} = (\boldsymbol{I}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{R}^{-1} \boldsymbol{I}) \boldsymbol{I}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{R}^{-1} \boldsymbol{I} \qquad (12)$$

$$\hat{\sigma}^{2} = [(\boldsymbol{Y}_{R} - \boldsymbol{I}\hat{\boldsymbol{\lambda}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{R}^{-1} (\boldsymbol{Y}_{R} - \boldsymbol{I}\hat{\boldsymbol{\lambda}})] / N \qquad (13)$$

$$\Rightarrow \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}} = (R(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}^{1}), R(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}^{2}), \cdots, R(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}^{N})), \text{for } \boldsymbol{\beta}$$

291

终可以得到待估点 x 处的预测值为

 $\hat{y}(x) = \hat{\lambda}^{T} Y(x) + r^{T} R^{-1}(Y_{R} - I\hat{\lambda})$  (14) 从式(8)~(14)可以看出,在试验样本点确定 的情况下,只要确定最大似然函数的参数估计 $\theta$ ,便 可以最终得到待估点x的预估值 $\hat{y}(x)$ ,而在求解最 优向量 $\theta$ 的实际过程中,常需要对 $\theta$ 进行预估计,而 不同的参数预估尤其在样本点不足、样本区间有所 偏差的情况下,势必造成结果的局部最优性与 式(14)Kriging元模型的求解误差差异较大。为了 减少Kriging元模型对待估点的预测误差,本文提出 可信参数更新的Kriging元模型,实现不同的初始可 信参数选择,适当抑制因样本不足、样本设计缺陷、 局部寻优性等带来的不良影响,从而提高Kriging 元 模型拟合精度,改善最终优化结果的不确定性,其具 体的求解过程见图4。

从图 4 可以看出优化过程开始前需要定义优化 求解问题以及确定模型误差评价标准、实验设计方 法。工程实际应用中,常用的元模型误差评价方法 包括 update 最大绝对误差法、均方误差法(RMSE)、 复相关系数法、显著性检验等方法<sup>[23~24]</sup>;试验设计 方法包括全因子方法、超拉丁方方法、正交数组法、 中心复合法等<sup>[23~24]</sup>。此外,可以看出如果可信参数 更新的 Kriging 元模型在抑制样本不足、局部寻优性 等不良影响因素的基础上,近似误差仍然较大,则需 要适当增加样本采集点,重新建立其元模型,该方法 一定程度实现了以最少样本点采集来建立最小误差 元模型的目的,这对于样本点观测值求解成本较大 的情况是非常有利的。

# 3 基于可信参数更新元模型的进给系统动态特性优化

基于可信参数更新的 Kriging 元模型,综合考虑 进给系统内部的非线性及耦合因素,以进给系统准 确的多柔体动力学模型为基础,在实际装配条件下, 以立柱为设计对象,以刀具位置中心运动为动态特 性直观评价指标,实现立柱结构的改进、伺服电动机 至刀具端的进给系统的动态特性优化。模拟加工时 的边界条件,在电动机轴端施加扭矩载荷(电动机 额定载荷 74 N·m),在刀具位置中心点施加三向切 削力载荷(300 N),立柱的设计变量见表1。不同于 以往优化过程设计响应选择受限于大型商用软件, 基于可信参数更新元模型的评价指标选择的直观性 与多样性大大增加,本文定义上述边界条件下刀具 中心点的运动加速度最大偏离比及立柱质量为设计 响应作为优化评价指标,从而建立伺服电动机至刀 具端的进给系统动态特性优化的元模型。



图 4 可信参数更新的 Kriging 元模型

Fig. 4 Kriging metamodel based on trust parameters update

## 表1 立柱设计变量

设计变量	初始值/mm	上限/mm	下限/mm
外侧肋板厚度 $x_1$	30	60	15
内侧肋板厚度 x2	30	60	15
横肋板厚度 x3	20	60	10
纵肋板厚度 $x_4$	20	60	10
顶肋板厚度 x5	20	60	10

采用优化拉丁方方法(Optimal Latin hypercube) 进行试验设计,使试验设计矩阵中的各个样本点的 因子水平分布尽可能均匀。根据试验方案设计,进 行样本点观测值求解,提取前述定义的设计响应值, 最终形成动态特性评价指标样本。其试验设计及响 应观测值见表 2,其中 M 为立柱质量, $\delta_x$ 、 $\delta_y$ 、 $\delta_z$  分别 为刀具中心点在 X、Y、Z 方向的振动加速度最大偏 离比。将评价指标按照质量递增进行排序,如图 5 所示,可以看出,随着 M 增加  $\delta_y$ 、 $\delta_z$  呈递减趋势,并 且在相同质量时  $\delta_y$ 、 $\delta_z$  的幅值变化范围较小, m  $\delta_x$ 

Tab. 2	Experimental	design	and	evaluation	index	samples

试验设计方案及评价指标样本

恚り

$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$\delta_Z$
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	08 67
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	76 32
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	57 00
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	90 59
6       30.75       26.25       45       57.5       17.5       1.839       1.119 63       1.108 69       1.038         7       60       39.75       37.5       55       35       2.061       1.065 16       1.052 55       0.990         8       46.5       21.75       60       42.5       40       1.905       1.124 60       1.086 45       1.025         9       33       19.5       10       35       30       1.668       1.213 35       1.149 13       1.085         10       44.25       15       40       17.5       22.5       1.711       1.215 51       1.142 59       1.081         11       39.75       35.25       15       60       45       1.911       1.085 09       1.080 42       1.022         12       21.75       17.25       32.5       47.5       55       1.723       1.176 16       1.121 66       1.076         13       57.75       24       25       25       50       1.865       1.156 15       1.094 77       1.044         14       15       28.5       52.5       27.5       32.5       1.721       1.113 08       1.120 19       1.085	97 37
7       60       39.75       37.5       55       35       2.061       1.06516       1.05255       0.990         8       46.5       21.75       60       42.5       40       1.905       1.124 60       1.086 45       1.029         9       33       19.5       10       35       30       1.668       1.213 35       1.149 13       1.089         10       44.25       15       40       17.5       22.5       1.711       1.215 51       1.142 59       1.081         11       39.75       35.25       15       60       45       1.911       1.085 09       1.080 42       1.022         12       21.75       17.25       32.5       47.5       55       1.723       1.176 16       1.121 66       1.076         13       57.75       24       25       25       50       1.865       1.156 15       1.094 77       1.044         14       15       28.5       52.5       27.5       32.5       1.721       1.113 08       1.109 19       1.087	38 39
8       46. 5       21. 75       60       42. 5       40       1. 905       1. 124 60       1. 086 45       1. 029         9       33       19. 5       10       35       30       1. 668       1. 213 35       1. 149 13       1. 089         10       44. 25       15       40       17. 5       22. 5       1. 711       1. 215 51       1. 142 59       1. 081         11       39. 75       35. 25       15       60       45       1. 911       1. 085 09       1. 080 42       1. 022         12       21. 75       17. 25       32. 5       47. 5       55       1. 723       1. 176 16       1. 121 66       1. 076         13       57. 75       24       25       25       50       1. 865       1. 156 15       1. 094 77       1. 044         14       15       28. 5       52. 5       27. 5       32. 5       1. 721       1. 113 08       1. 120 19       1. 087	90 10
9       33       19.5       10       35       30       1.668       1.213 35       1.149 13       1.089         10       44.25       15       40       17.5       22.5       1.711       1.215 51       1.142 59       1.081         11       39.75       35.25       15       60       45       1.911       1.085 09       1.080 42       1.022         12       21.75       17.25       32.5       47.5       55       1.723       1.176 16       1.121 66       1.076         13       57.75       24       25       25       50       1.865       1.156 15       1.094 77       1.044         14       15       28.5       52.5       27.5       32.5       1.721       1.113 08       1.120 19       1.087	29 48
10       44. 25       15       40       17. 5       22. 5       1. 711       1. 215 51       1. 142 59       1. 081         11       39. 75       35. 25       15       60       45       1. 911       1. 085 09       1. 080 42       1. 022         12       21. 75       17. 25       32. 5       47. 5       55       1. 723       1. 176 16       1. 121 66       1. 076         13       57. 75       24       25       25       50       1. 865       1. 156 15       1. 094 77       1. 044         14       15       28. 5       52. 5       27. 5       32. 5       1. 721       1. 113 08       1. 120 19       1. 087	89 45
11       39.75       35.25       15       60       45       1.911       1.085 09       1.080 42       1.022         12       21.75       17.25       32.5       47.5       55       1.723       1.176 16       1.121 66       1.076         13       57.75       24       25       25       50       1.865       1.156 15       1.094 77       1.044         14       15       28.5       52.5       27.5       32.5       1.721       1.113 08       1.120 19       1.057	81 88
12         21.75         17.25         32.5         47.5         55         1.723         1.176.16         1.121.66         1.076           13         57.75         24         25         25         50         1.865         1.156.15         1.094.77         1.044           14         15         28.5         52.5         27.5         32.5         1.721         1.113.08         1.120.19         1.057	22 62
13         57.75         24         25         25         50         1.865         1.156         15         1.094         77         1.044           14         15         28.5         52.5         27.5         32.5         1.721         1.113.08         1.120.19         1.057	76 58
14 15 28 5 52 5 27 5 32 5 1 721 1 113 08 1 120 10 1 057	44 21
14 15 26.5 52.5 27.5 52.5 1.721 1.11506 1.12517 1.057	57 20
15         51         55.5         42.5         37.5         57.5         2.103         1.029 05         1.032 58         0.972	72 87
16         55.5         44.25         57.5         22.5         25         2.013         1.062 70         1.064 27         0.991	91 98
17         37.5         33         47.5         10         52.5         1.826         1.104 43         1.097 09         1.037	37 53
18         35. 25         53. 25         50         32. 5         10         1. 961         1. 046 57         1. 075 76         0. 993	93 14
19         17. 25         46. 5         17. 5         45         20         1. 796         1. 049 51         1. 108 87         1. 031	31 29
20 53. 25 30. 75 22. 5 40 12. 5 1. 879 1. 127 77 1. 103 23 1. 031	31 21
21         28.5         42         20         30         60         1.826         1.06540         1.09389         1.031	31 94

曲线则相反,如点 1 和点 2,其质量几乎相同,但其 偏离比则相差 10%,因此,可认为质量相同条件下,  $\delta_x$ 的优化空间更大。最终优化问题定义为

$$\begin{cases} \min \delta_{X}(\boldsymbol{x}) \\ \text{s. t.} \quad M(\boldsymbol{x}) \leq M_{0} \\ \boldsymbol{x} = (x_{1}, x_{2}, x_{3}, x_{4}, x_{5}) \\ x_{1d} \leq x_{1} \leq x_{1u} \\ \vdots \\ x_{5d} \leq x_{5} \leq x_{5u} \end{cases}$$
(15)

其中 $M_0$ 为立柱的初始质量(1.69 t), $x_{1d}$ ,…, $x_{5d}$ 为设计变量的下限值, $x_{1u}$ ,…, $x_{5u}$ 为设计变量的上限值。



由于优化部件的总质量为设计变量的线性函数,故采用一阶线性多项式建立部件质量与设计变量之间的关系,并用最小二乘法求解得到其最终关系式

 $M(\mathbf{x}) = (5.23674x_1 + 6.34924x_2 + 2.17409x_3 +$ 

2. 721 25 $x_4$  + 1. 126 74 $x_5$ ) × 10<sup>-3</sup> + 1. 229 96

(16)

用样本对此线性模型进行复相关系数求解,可 以得到其复相关系数  $R^2 = 0.997$ ,说明该线性模型 是有意义的。由于  $\delta_x$  与设计变量之间的关系较复 杂,采用可信参数更新的 Kriging 元模型构建其关系 式,基于图 4 所示求解过程,按照式(16)的优化问 题定义,根据检验样本采用均方误差法对所建模型 进行 评价,最终得到  $\theta^* = (0.060 3, 0.031 0,$ 0.024 3,0.029 5,0.004 3),其检验样本均方误差为 0.005 482 6,说明所建立的元模型足够精确。优化 前后设计变量及动态特性评价指标见表 3,可以看 出:优化后,设计变量  $x_2$  较初始值增加较多, $x_1$ 、 $x_3$ 、  $x_4$  较初始值减少, $x_5$  几乎没变,在保证质量不增加 的前提下, $\delta_x$ 、 $\delta_z$  几乎没有变化, $\delta_x$  降低了 8.7%,即 电动机端至刀具端的进给系统的动态特性得到优 化。

#### 表 3 优化前后设计变量及评价指标 Tab. 3 Comparison of design variables and evaluation index

	$x_1$ /mm	$x_2$ /mm	<i>x</i> <sub>3</sub> /mm	<i>x</i> <sub>4</sub> /mm	x₅ ∕mm	M ∕t	$\delta_{\chi}$	$\delta_Y$	$\delta_Z$
优化前	30	30	20	20	20	1.689	1.149	1.145	1.071
优化后	15	48. 79	14.54	10	20. 29	1.690	1.049	1.132	1.048

### 4 结论

(1) 推导了滚珠丝杠副动力学模型,在综合考

虑系统柔性及内部耦合性影响因素的基础上,建立 了准确的进给系统多柔体模型,确保优化边界条件 及评价指标的准确性。

(2)提出一种基于 Kriging 元模型的过程优化 方法,并对该元模型进行改进,得到可信参数更新的 Kriging 元模型。

(3) 以进给系统准确的多柔体动力学模型为基

础,在实际装配边界条件下,以立柱为设计对象,以 刀具中心点在 X、Y、Z 坐标方向的振动加速度最大 偏离比为动态特性直观评价指标,采用可信参数更 新元模型对进给系统的动态特性进行优化,获得了 较好的优化结果,最终实现了立柱结构改进、伺服电 动机至刀具端的进给系统动态特性改善及机床加工 精度的提高。

### 参考文献

- 1 Vicente D A, Hecker R L, Villegas F J, et al. Modeling and vibration mode analysis of a ball screw drive [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012,58(1~4): 257~265.
- 2 Dadalau A, Mottahedi M, Groh K, et al. Parametric modeling of ball screw spindles [J]. Production Engineering, 2010,4(6): 625~631.
- 3 Okwudire C E. Improved screw-nut interface model for high-performance ball screw drives [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2011,133(4): 041009 1 ~ 041009 10.
- 4 Zaeh M F, Oertli T. Finite element modelling of ball screw feed drive systems [J]. Annals of the CIRP, 2004,53(1): 289 ~ 293.
- 5 王林鸿. 数控工作台非线性动态特性的辨识研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2009.
- 6 Altintas Y, Verl A, Brecher C, et al. Machine tool feed drives [J]. CIRP Annals- Manufacturing Technology, 2011,60(2): 779 ~ 796.
- 7 AltintasY, Brecher C, Weck M, et al. Virtual machine tool [J]. Annals of CIRP, 2005,54(2):651~674.
- 8 巫修海,马云芳,张建润. 高速高精度卧式加工中心动态优化设计[J]. 振动与冲击, 2009(10): 74~77. Wu Xiuhai, Ma Yunfang, Zhang Jianrun. Dynamic optimization design of a high-speed and high-precision HMC [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009(10): 74~77. (in Chinese)
- 9 丛明,房波,周资亮. 车-车拉数控机床拖板有限元分析及优化设计[J]. 中国机械工程, 2008,19(2): 208~213. Cong Ming, Fang Bo, Zhou Ziliang. Finite element analysis and optimization design of the carriage of turn broach NC machine tool [J]. China Mechanical Engineering, 2008,19(2): 208~213. (in Chinese)
- 10 吴凤和,乔利军,杨育林,等. 超重型数控落地铣镗床立柱结构优化研究[J]. 中国机械工程, 2011,22(21): 2 546 ~ 2 603.

Wu Fenghe, Qiao Lijun, Yang Yulin, et al. Column structure optimization of super-heavy-duty CNC floor boring and milling machine [J]. China Mechanical Engineering, 2011,22(21): 2546~2603. (in Chinese)

- 11 Albers A, Ottnad J. Integrated structural and controller optimization in dynamic mechatronic systems [J]. Journal of Mechanical Design, 2010,132(4): 041008 - 1 ~ 041008 - 8.
- 12 李小彭,赵志杰,聂慧凡,等. 某型数控车床床身的模态分析与结构优化[J]. 东北大学学报:自然科学版,2011,32(7): 988~991.

Li Xiaopeng, Zhao Zhijie, Nie Huifan, et al. Modal analysis and optimization of the bed structure of a CNC machine tool [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2011,32(7): 988 ~991. (in Chinese)

- 13 Wang G G, Shan S. Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2007,129(2): 370 ~ 380.
- 14 黄章俊, 王成恩. 基于 Kriging 模型的涡轮盘优化设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(5): 905~911.
- 15 毛宽民,李斌,谢波,等. 滚动直线导轨副可动结合部动力学建模[J]. 华中科技大学:自然科学版, 2008, 36(8): 85~88.
   Mao Kuanmin, Li Bin, Xie Bo, et al. Dynamic modeling of the movable joint on rolling linear guide [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2008, 36(8): 85~88. (in Chinese)
- 16 王瑁成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
- 17 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- 18 Johnson K L. Contact mechanics [M]. New York: Cambridge University Press, 1985.
- 19 程光认. 滚珠螺旋传动设计基础[M]. 北京:中国机械出版社, 2011.
- 20 Simpson T W, Mauery T M, Korte J J, et al. Kriging models for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization [J]. AIAA Journal, 2001,39(12): 2 223 ~ 2 241.
- 21 Sacks J, Schiler S B, Welch W J. Design for computer experiment [J]. Technometrics, 1989,31(1): 1~47.
- 22 高云凯,孙芳,余海燕. 基于 Kriging 模型的车身耐撞性优化设计[J]. 汽车工程, 2010,32(1): 17~21. Gao Yunka, Sun Fang, Yu Haiyan. Crashworthiness optimization of car body based on Kriging surrogate model[J]. Automotive Engineering, 2010,32(1): 17~21. (in Chinese)
- 23 Sakata S I, Ashida F, Zako M. Approximate structural optimization using Kriging method and digital modeling technique considering noise in sampling data [J]. Computers and Structures, 2008,86(13~14): 1477~1485.
- 24 王振国,陈小前,罗文彩. 飞行器多学科设计优化理论与应用研究[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.