doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.054

## 基于混沌相空间重构的数控机床运动精度预测

杜柳青<sup>1,2</sup> 殷国富<sup>1</sup> 余永维<sup>2</sup>

(1.四川大学制造科学与工程学院,成都 610065; 2.重庆理工大学机械工程学院,重庆 400054)

摘要:针对难以通过数学建模方法分析数控机床运动精度演化规律的问题,提出了基于混沌相空间重构理论的数 控机床运动精度非线性演化预测方法。采用平均互信息法计算延迟时间,以虚假最近邻点法计算最小嵌入维数, 对数控机床运动精度的一维时间序列进行相空间重构,获得与原系统拓扑同构的状态空间。基于混沌系统内在的 规律性和有序性,用相点轨迹描述运动精度在相空间中的演化规律,以相点的多维分量构成输入向量,以运动精度 预测值为输出向量,构造了基于 RBF 神经网络的非线性预测模型。引入了量子粒子群方法对预测模型参数进行优 化,得到 RBF 预测网络的中心点、宽度及连接权值的全局最优值,采用优化后的模型对数控机床运动精度演化趋势 进行了预测。实验结果表明,基于混沌相空间重构的预测模型,可以很好地追踪数控机床运动精度的演变趋势和 规律,有较高的预测精度。

关键词:数控机床 运动精度 相空间重构 预测 量子粒子群方法 中图分类号:TH115 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2015)10-0397-06

### Prediction of Numerical Control Machine's Motion Precision Based on Chaotic Phase Space Reconstruction

Du Liuqing<sup>1,2</sup> Yin Guofu<sup>1</sup> Yu Yongwei<sup>2</sup>

College of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China
 College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Aiming at the difficulty to analysis the regularity of CNC machine tools' motion precision through mathematical model, the nonlinear prediction method based on chaotic phase space reconstruction theory was proposed. The optimum delay time was evaluated by the average mutual information method and the minimum embedding dimension calculated by false nearest neighbor method. The phase space reconstruction for one-dimensional time series of the motion accuracy was implemented. The topology isomorphic state space of the original system was obtained. According to the chaotic system's inner orderliness and regularity, the phase points' trajectory was employed to describe motion precision's evolution regularity in phase space. The input vector was constituted by phase points' multi-dimensional component, and the predictive value of the motion accuracy was used as output vector. The nonlinear prediction model of CNC machine tools' motion precision was constructed based on RBF. In order to improve the prediction accuracy and generalization ability, the algorithm of quantum-behaved particle swarm optimization was proposed to select the parameters of RBF. Global optimum value of RBF network's center, width and connection weights were obtained. Through the prediction model, the evolution trend of CNC machine tools' motion precision was predicted. The experiments verified that the prediction model based on chaotic phase space reconstruction can trace the evolutionary trends and regularity of the precision properly. The maximum relative error of the precision was less than 6.67%. Key words: CNC machine tools Motion precision Phase space reconstruction Prediction Quantum-

behaved particle swarm method

作者简介: 杜柳青,博士生,重庆理工大学教授,主要从事数控机床精度设计研究, E-mail: lqdu1@126. com

收稿日期:2014-11-11 修回日期:2014-12-31

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51305476)和"十二五"国家科技重大专项资助项目(2013ZX04005-012)

通讯作者: 殷国富,教授,博士生导师,主要从事数控机床精度设计和机器视觉研究, E-mail: gfyin@ scu. edu. cn

#### 引言

国内外学者在数控机床精度领域的研究主要集 中于误差建模<sup>[1-2]</sup>、精度检测<sup>[3]</sup>、误差辨识<sup>[4-5]</sup>及误 差补偿方法<sup>[6]</sup>方面,并取得了较多成果,而对精度 演变预测的研究极少。文献[7-9]均基于多体运 动学理论来建立误差模型,通过误差检测、辨识来进 行机床精度现有状态的评估,对于机床精度状态评 估研究具有指导意义,但是没有对精度演化规律进 行研究,其所进行的预测不是实际意义上的预测,即 没有对精度随时间发展变化规律的预测。

混沌是确定的非线性动力系统中出现的貌似无 规则、类似随机实则有序的现象。混沌理论是非线 性科学最重要的成就之一,其揭示了隐藏在无序和 复杂表象背后的有序和规律<sup>[10-11]</sup>。数控机床在使 用过程中不断地受到各种作用力的影响,系统内部 各要素之间及与外部系统的相互作用具有明显的非 线性特征。例如,零部件受力时应力、应变全过程的 高度非线性和不可逆性;影响精度变化的各因素之 间的非线性耦合;系统内部及其与外部系统的非线 性相互作用等<sup>[12-13]</sup>。在上述各种非线性因素的共 同作用下,数控机床运动精度演化过程可视为一种 具有混沌特征的复杂非线性过程。本文利用混沌系 统内在的有序性和规律性,依据数控机床运动精度 的历史数据时间序列,提出利用相空间重构方法,将 隐含在部分变量时间序列中的原系统信息提取出 来,重构一个与原系统拓扑同构的状态空间,实现时 间与空间的转换;进一步提出用相点轨迹描述机床 运动精度在相空间中的演化规律,并构造一个非线 性预测模型,用相点的多维分量构成输入向量;引入 QPSO 方法对预测模型参数进行优化,以提高其预 测精度和泛化能力,采用优化后的预测模型对数控 机床运动精度演化趋势进行预测。

#### 机床运动精度混沌相空间重构方法 1

混沌动力学研究表明,对于决定系统长期演化 的任一变量的时间序列,均包含了系统所有变量长 期演化的信息。Takens 等证明,可用任一确定系统 长期演化的一维时间序列响应来重构与原动力系统 拓扑同构的相空间,从而描述系统的本质特征和内 在规律<sup>[14]</sup>。

对于数控机床,其单变量运动精度监测时间序 列为  $e(t_1), e(t_2), \dots, e(t_n), e(t_i) \in \mathbf{R}$ ,其中  $t_i = t_0 +$  $i\Delta t_{\odot}$ 

根据 Packard 等在微分拓扑和动力学系统理论 基础上提出的时间延迟嵌入理论,重构运动精度的 相空间为

一延迟时间,是运动精度相空间重构的关 键参数

采用平均互信息法计算延迟时间 $\tau$ ,即 1

$$(\tau) =$$

$$\sum_{i} p(e(i), e(i+\tau)) \operatorname{lb} \frac{p(e(i), e(i+\tau))}{p(e(i))p(e(i+\tau))}$$
(2)

式中 
$$p(e(i)), p(e(i+\tau)) \longrightarrow e(i), e(i+\tau)$$
的概  
率密度估计

$$p(e(i), e(i+\tau)) \longrightarrow e(i)$$
和  $e(i+\tau)$ 的联合  
概率密度估计

将 $I(\tau)$ 的第1个极小值所对应的延迟时间作 为最优延迟时间。

采用虚假最近邻点法计算最小嵌入维数 m,其 基本思想是:当维数从 m 增加到 m +1,如没有虚假 的邻点,则认为几何结构被完全打开。

 $\mathcal{O}_{X_m} \in X_i$ 的最近邻点,两点之间的距离为

$$\| E_m - E_i \|^{(m)} = \sqrt{\sum_{k=0}^{m-1} \left[ e(m+k\tau) - e(i+k\tau) \right]^2}$$
(3)

当维数增加到 m + 1 时,距离为 ||  $E_m$  - $E_{i} \parallel (m+1)_{o}$ 

 $10 \leq R_r \leq 50$ ,则  $E_m \neq E_i$ 的虚假最近邻点。

对于运动精度实测时间序列,令试算的 m 从 2 开始,取 $R_r$  = 30,计算虚假最近邻点的比例。逐步 增加m,当虚假最近邻点不再随着m的增加而减少 时,可以认为完全打开,此时 m 即为最小嵌入维数。

获得重构运动精度相空间的嵌入维数 m 和延 迟时间 $\tau$ 后,则运动精度相空间的轨迹矩阵为

$$E = \begin{bmatrix} E_{1} \\ E_{2} \\ \vdots \\ E_{N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1+\tau} & e_{1+2\tau} & \cdots & e_{1+(m-1)\tau} \\ e_{2} & e_{2+\tau} & e_{2+2\tau} & \cdots & e_{2+(m-1)\tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{N} & e_{N+\tau} & e_{N+2\tau} & \cdots & e_{N+(m-1)\tau} \end{bmatrix}$$
(4)

#### 2 基于重构相空间的 RBF 网络预测模型

重构的运动精度嵌入相空间和原系统的相空间 微分同胚,即拓扑等价,有相同的几何性质和物理性 质。运动精度嵌入相空间中, $E_i$ 为相点,m维序列  $\{E_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 构成一个相型,表示数控机床系 统在某一瞬间的运动精度状态。按时间增长的顺序 将其相连,即可描述系统在m维相空间中的演化轨 迹。此时状态空间 $E_i \longrightarrow E_{i+1}$ 的演化反映了系统 的演化,因此可由历史数据进行预测。

在 t 时刻对运动精度的一步预测模型可表示为  $e(t+1) = f\{e(t), e(t-\tau), \dots, e(t-(m-1)\tau)\}$ (5)

第 k 步的预测模型可表示为  
$$e(t+k) =$$
  
 $f \{ e(t+k-1), \dots, e(t+k-1-(m-1)\tau) \}$  (6)

式(5)和式(6)中 f为非线性预测映射,即  $f: \{e(t), e(t-\tau), \dots, e(t-(m-1)\tau)\} \longrightarrow e(t+1)$ 。

鉴于 RBF 神经网络具有最佳的逼近任意非线 性映射的特性,用 RBF 网络来逼近该非线性映射 f。 因此,基于重构相空间的机床运动精度预测模型如 图 1 所示。



Fig. 1 Machine tool's motion precision prediction model based on reconstructed phase space

预测模型中 RBF 网络为 3 层,其中隐含层和输 出层神经元的传递函数分别取高斯函数和线性函 数。具有最小嵌入维数的重构相空间完全保留了数 控机床系统状态空间的拓扑结构,因此,将运动精度 重构相空间的最小嵌入维数 m 作为 RBF 网络输入 层的神经元个数。 $e \in \{e(t), e(t - \tau), \dots, e(t - (m - 1)\tau)\}$ 为运动精度重构相空间的相点,其在多 维相空间的 m 个分量,作为 RBF 网络的输入向量。 运动精度预测模型的预测输出为

$$f(e) = \lambda_0 + \sum_{j=1}^h \lambda_j \Phi(\|e - c_j\|)$$

$$(7)$$

其中 
$$\Phi( \| e - c_j \|) = \exp \frac{-\| e - c_j \|}{2\sigma^2}$$

式中  $\Phi(\cdot)$  —— 径向基函数  $c_{i}$  —— RBF 网络的隐含层中心点  $\sigma$  —— 常数,是高斯函数的宽度参数  $\lambda_{j}$  —— RBF 网络隐含层到输出层的连接权值  $\lambda_{0}$  —— 网络偏置 隐含层的神经元个数采用减聚类方法来确定。

# 3 基于量子粒子群算法的 RBF 预测模型优化

#### 3.1 量子粒子群优化方法

采用 k 均值聚类、最小二乘法等直接方法确定 RBF 网络中心点、宽度及连接权值等参数,因初始 参数的随机性问题,较难获得参数最优解,从而影响 预测精度;粒子群(Particle swarm optimizer,PSO)方 法是基于群体智能的新优化算法,因没有个体杂交、 变异等操作,比遗传算法收敛更快,但仍然存在搜索 空间有限,可能陷入局部最优的缺点。量子粒子群 算法(Quantum-behaved particle swarm optimization, QPSO)基于 PSO 方法,从量子力学的角度,以 DELTA 势阱为基础,在整个可行解空间中进行搜 索,全局搜索性能远优于 PSO 算法,且有参数个数 少,易控制等优点<sup>[15]</sup>。本文引入 QPSO 方法对 RBF 预测模型进行优化,提高推广能力,使泛化误差最 小。

在 QPSO 算法中,每一个粒子均收敛于各自的随机点 P,即

$$P = rP_{ibest} + (1 - r)P_{gbest} \quad (r \in (0, 1))$$
(8)  
中 r—— 陌机数

式中 r——随机数

P<sub>ibest</sub>——粒子的个体历史最优位置

P<sub>gbest</sub>——全局最优位置

量子粒子群最优位置的平均值

$$P_{mbest} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{m} p_i = \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} p_{i1}, \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} p_{i2}, \cdots, \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} p_{im}\right) \quad (9)$$

式中 M——种群规模

p<sub>i</sub>——第 i 个粒子的最优位置

粒子的状态只用位置向量来描述,则粒子的位 置方程为

$$x(t+1) = P \pm \beta | P_{mbest} - x(t) | \ln(1/u) (u \in (0,1))$$
(10)

max

其中 
$$\beta = 0.5 + 0.5(w_{max} - w)/w$$

式中 u——随机数 w——迭代次数

β——收缩因子,用以调整算法的收敛速度,
 是 QPSO 算法中唯一控制参数
 w<sub>max</sub>——最大迭代次数

#### 3.2 QPSO-RBF网络预测模型参数优化

QPSO 方法优化 RBF 网络预测模型的基本思想 是:结合 QPSO 算法的全局搜索能力和 RBF 神经网 络局部优化能力,通过先 QPSO 全局搜索,然后 RBF 局部优化,再 QPSO 全局搜索,如此循环,直至在 QPSO 算法中和 RBF 局部优化中,同时得到 RBF 网 络中心点、宽度及连接权值等参数的全局最优值。 从而避免该 RBF 网络预测的不确定性,提高运动精 度预测的准确性。

QPSO 方法对 RBF 网络预测模型进行优化步骤 如下:

(1)减聚类算法确定基函数中心个数,也即确 定 RBF 预测网络隐层节点数量。

(2)将 RBF 预测网络的高斯基函数中心点、宽 度及隐层与输出层的连接权值,以实数编码串的形 式表示为 QPSO 的粒子个体,即建立了 QPSO 的粒 子与 RBF 网络参数之间的映射关系。根据粒子群 规模 *M*,随机产生 *M* 个粒子个体组成种群,每个个 体代表 RBF 预测网络的一组参数;同时,初始化最 优位置 *P*<sub>ibest</sub>和 *P*<sub>gbest</sub>。

(3)解码粒子个体串,得到含对应参数的 *M* 个 RBF 预测模型。用给定的 *n* 个学习样本分别进行 局部优化训练,并计算其相应的适应度 *f*,即

 $f = 100 \sum_{k=1}^{n} |y(k) - \hat{y}(k)|$ 式中  $y(k), \hat{y}(k)$  — 预测网络的实际输出与期望 输出

f作为目标函数,评价粒子群中的所有个体,用 来判断是否需要更新粒子的最优位置 P<sub>ibest</sub>和 P<sub>sbest</sub>。

(4)按照 QPSO 粒子的位置方程式(10)更新每 一个体的位置向量,得到新的粒子群状态。将新的 粒子群继续映射为 RBF 预测网络的参数,重复步 骤(3)~(4)的过程,直到满足算法终止条件,获得 最优的 RBF 预测模型。

#### 4 实验及结果分析

两轴插补的圆运动精度不仅包含与数控装备的 几何精度、位置误差、定位精度等有关信息,而且还 包含与进给速度和伺服控制系统有关的动态误差分 量信息,如爬行、反向间隙、丝杆螺距误差、伺服增益 不匹配和伺服响应滞后等,因此圆运动信息能够较 全面地反映出数控机床的运动精度性能变化情况。 采用描述数控机床圆运动精度的圆度误差来验证与 优化基于混沌相空间重构的数控机床运动精度演化 与预测方法,具有全面代表性。

实验以 V51030ABM 型加工中心为对象作运动 精度实验,通过 NC 编程使工作台在 *XOY* 平面内以 半径为 50 mm 和进给速度为 2 000 mm/min 作顺时 针/逆时针圆运动,使用 Renishaw QC20 球杆仪在机 测量机床的圆运动轨迹。每次实验使数控机床处于 运行状态中,每间隔大约 T = 20 h 采样 1 次,得到 200 组以上圆形轨迹,分别提取各组数据的圆度误 差。取  $\Delta t = T$ ,将各时间点的圆度误差前后相减,得 到  $\Delta t$  时间内的圆度误差演化量时间序列 { $x(t_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 270$ },如图 2 所示。其中,前 200 个数据 用于训练预测模型,后 70 个数据用于进行预测验 证。



采用小数据量的 Lyapunav 指数计算方法对圆度误差演化量时间序列进行混沌特性判定,得到最大 Lyapunav 指数 *LE* = 0.056。所得到的 Lyapunav 指数是正数,表明系统具有混沌特性。

对圆度误差演化量时间序列 { $e(t_i), i = 1, 2, \cdots$ , 200},利用互信息最小法计算出最佳延迟时间  $\tau = 2,$ 如图 3 所示;利用虚假最近邻点法得到最小嵌入 维数(取 m = 5),如图 4 所示。



重构圆度误差演化量时间序列的嵌入相空间 E

为



图 4 虚 限 取 近 中 点 伝 永 地 奴 Fig. 4 Obtaining dimension through false

nearest adjacent points

$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_{192} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 & e_3 & e_5 & e_7 & e_9 \\ e_2 & e_4 & e_6 & e_8 & e_{10} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{192} & e_{194} & e_{196} & e_{198} & e_{200} \end{bmatrix}$$
(11)

用减聚类方法确定 RBF 预测网络的隐层节点 数为8,则 RBF 预测模型结构即输入、隐层、输出层 节点数分别为5-6-1。因此,预测网络中需要优 化的参数为高斯基函数的6个中心与6个基宽,以 及6个隐层与输出层的连接权值和1个输出偏移, 共19个网络参数。RBF 预测网络梯度下降学习算 法的训练精度设为0.001,学习速率0.05,动量因 子0.15。QPSO 算法中的粒子将在19 维空间中寻 优,收缩因子β范围设为[0.85,0.3],线性减小;粒 子群规模 *M* 为 50。

将训练优化后的预测模型作为预测器,对 200 点以后的精度数据进行预测,对 210 点~270 点运 动精度的单步预测结果如图 5 所示,预测值与实际 值变化趋势准确一致,预测精度较高。





采用多步预测方法,当预测步长小于 16 时,能 较准确地预测精度演化趋势,步长为 8~15 时,预测 效果如表 1 所示;步长为 8 时,最大绝对误差为 0.12 μm,最大相对误差为 3.22%,实验数据表明预 测结果能够较好地反映精度演化量变化的趋势和规 律,预测精度也较高。

用传统 RBF 方法、PSO - RBF 方法对以上 270 组样本数据进行对比实验,预测步长为 8 时,预测误

差对比结果如表 2 所示,数据表明采用本文方法对 RBF 精度预测网络结构进行优化后,收敛速度、推 广能力及预测准确度等方面都有显著提高,优于 RBF 方法和 PSO - RBF 方法。

表1 多步预测精度

Tab. 1 Multi-step prediction precision

步长	最大绝对	平均绝对	最大相对	平均相对
	误差/μm	误差/μm	误差/%	误差/%
8	0.12	0.07	3.22	2.98
9	0.26	0.09	3.51	3.06
10	0.36	0.12	3.87	3.17
11	0.43	0.16	4.26	3.88
12	0.50	0.20	4.82	4.02
13	0.55	0. 29	4.96	4.65
14	0.61	0.32	5.13	4.96
15	0.76	0.38	5.56	5.01

表 2 预测方法对比

#### Tab. 2 Comparison of prediction methods

ZZ 35d → 54	最大绝对	最大相对	训练预测
顶侧力法	误差/µm	误差/%	时间/s
RBF	1.05	7.56	1.566
PSO - RBF	0.26	4.13	0.782
本文	0.12	3.22	0.658

为进一步验证本文方法的有效性,对 22 台数控 机床作同样的分析实验,提取运动精度周期检测数 据,也得到了比较准确的结果,步长为 8 时,预测最 大相对误差小于 6.67%,各机床预测最大误差的数 据(部分)如表 3 所示。

表3 各机床预测最大误差

Tab. 3 Maximum prediction error of each machine

机床编号	最大相对误差/%	机床编号	最大相对误差/%
机床1	4.70	机床 7	3.28
机床2	5.22	机床 8	4.68
机床3	6.20	机床9	6.22
机床4	4.90	机床 10	6.31
机床 5	4.05	机床11	5.12
机床6	6.67	机床 12	3.98

#### 5 结束语

基于混沌相空间重构理论,采用了非线性预测方法来重构数控机床精度的内在动力学模型, 并引入 QPSO 方法对预测模型参数进行优化,采用 优化后的预测模型对数控机床运动精度演化趋势 进行预测,显著提高了预测模型的预测精度和泛 化能。实验结果表明,用本文方法对数控机床运 动精度的时间序列进行相空间重构,能够得到与 原系统拓扑同构的高维相空间;本文所提基于重 构相空间的非线性预测方法、模型结构及 QPSO 优 化策略,步长为 8 时,仍可以很好地追踪数控机床

精度的演变规律,有较高的预测精度,说明本文方 法的有效性和适用性。

#### 参考文献

- 吴军.基于性能参数的数控装备服役可靠性评估方法与应用[D].武汉:华中科技大学,2008:12-22.
   Wu Jun. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008:12-22. (in Chinese)
- 2 韩飞飞,赵继,张雷,等. 数控机床几何精度综合解析与试验研究[J]. 机械工程学报,2012,48(21):141-148.
- Han Feifei, Zhao Ji, Zhang Lei, et al. Synthetical analysis and experimental study of the geometric accuracy of CNC machine tools [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(21):141 148. (in Chinese)
- 3 Ibaraki S, Oyama C, Otsubo H. Construction of an error map of rotary axes on a 5-axis machining center by static R-test [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3):190-200.
- 4 Mann S, Bedi S, Israeli G, et al. Machine models and tool motions for simulating five-axis machining [J]. Computer-Aided Design, 2010,42(3):231-237.
- 5 萨日娜,张树有,刘晓健. 面向零件切削性评价的数控机床精度特性重要度耦合识别技术[J]. 机械工程学报,2013,49(9): 113-120.
  - Sa Rina, Zhang Shuyou, Liu Xiaojian. Identification of accuracy characteristics importance of machine tool for parts machinability evaluation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(9):113 120. (in Chinese)
- 6 Fujimori T, Taniguchi K, Ellis C, et al. A study on error compensation on high precision machine tool system using a 2D laser holographic scale system[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2012, 6(6):999 - 1114.
- 7 粟时平,李圣怡.多体系统理论在数控加工精度软件预测中的应用[J].组合机床与自动化加工技术,2004(4):26-30. Su Shiping, Li Shengyi. Study about the application of multi-body system theory in machining precision of CNC machine tools[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique,2004(4):26-30. (in Chinese)
- 8 王民,胡建忠,咎涛,等.基于斜置锥台的五轴数控机床加工精度预测技术[J].高技术通讯,2011,21(12):1299-1304. Wang Min, Hu Jianzhong, Zan Tao, et al. Prediction of the machining precision of five-axis NC machine tools based on cone frustum[J]. High Technology Letters, 2011,21(12):1299-1304. (in Chinese)
- 9 胡占齐,刘金超,解亚非,等.基于多体运动学的超重型数控机床维护周期预测[J].燕山大学学报,2012,36(3):201-214. Hu Zhanqi, Liu Jinchao, Xie Yafei, et al. Prediction of super-heavy CNC machine maintenance cycle based on multibody kinematics[J]. Journal of Yanshan University,2012,36(3):201-214. (in Chinese)
- 10 张春涛,马千里,彭宏.基于信息熵优化相空间重构参数的混沌时间序列预测[J].物理学报,2010,59(11):7623-7629. Zhang Chuntao, Ma Qianli, Peng Hong. Chaotic time series prediction based on information entropy optimized parameters of reconstruction[J]. Acta Physica Sinica,2010,59(11):7623-7629. (in Chinese)
- 11 杜柳青,佘骋南,佘永维.一种基于混沌特性的磁瓦表面缺陷视觉提取方法[J].仪器仪表学报,2013,34(11):2620-2625. Du Liuqing, She Chengnan, Yu Yongwei. Visual extraction method of arc magnet surface defects based on chaotic characteristic [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2013,34(11):2620-2625. (in Chinese)
- 12 Takens F. Detecting strange attractor in turbulence [C]. Lecture Notes in Mathematics, 1981, 898:366-381.
- 13 姚焕新,牛鹏程,龚亚运,等.数控机床热误差补偿中分布滞后模型的建立[J].农业机械学报,2013,44(3):246-250. Yao Huanxin, Niu Pengcheng, Gong Yayun, et al. Establishment of autoregressive distributed lag model in thermal error compensation of CNC machine tools[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(3):246-250. (in Chinese)
- 14 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)
- 15 Sun Jun, Feng Bin, Xu Wenbo. Particle swarm optimization with particles having quantum behavior [C] // Proceedings of 2004 Congress on Evolutionary Computation, 2004: 325 - 331.
- 16 邢元,张连洪,何柏岩,等. 基于多体理论的数控机床精度逆设计方法[J].农业机械学报,2014,45(3):282-287. Xing Yuan,Zhang Lianhong, He Baiyan, et al. Precision reverse design of numerical controlled (NC) machine on the basis of multibody theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(3):282-287. (in Chinese)
- 17 谭雁清,张连洪,王凯峰,等. 基于表面磨损的机床导轨副精度保持性模型[J]. 农业机械学报,2015,46(2):351-356.
   Tan Yanqing,Zhang Lianhong,Wang Kaifeng, et al. Modeling of precision retaining ability for slide guide of machine tool based on wear analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(2):351-356. (in Chinese)
- 18 赵三琴,刘德营,丁为民,等.边界点数量对傅里叶描述子识别精度的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(9):305-310. Zhao Sanqin,Liu Deying,Ding Weimin, et al. Influence of outline points on the recognition accuracy of Fourier descriptors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9):305-310. (in Chinese)
- 曹鋆汇,付文智,李明哲,等.聚碳酸酯板材多点热成形数值模拟与成形精度分析[J]. 农业机械学报,2014,45(1):335-340.
   Cao Junhui, Fu Wenzhi, Li Mingzhe, et al. Numerical simulation and accuracy analysis of multi-point thermoforming of polycarbonate sheet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):335-340. (in Chinese)
   沈学会,张建华,邢栋梁,等.超声振动辅助微细铣削加工尺寸精度实验[J]. 农业机械学报,2014,45(3):229-233.
- 20 化子云, 床建中, 肺尿末, 导, 超产派动轴动版轴龙的加工尺, 导轴及头盔[J]. 太空花城子城, 2017, 45(3):229 233. Shen Xuehui, Zhang Jianhua, Xing Dongliang, et al. Effects of the ultrasonic vibration on dimensional accuracy in micro milling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3):229 - 233. (in Chinese)