

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905415

# 基于 SVR-GA 算法的广义加工空间机床切削 稳定性预测与优化研究\*

邓聪颖<sup>1,3</sup>, 冯义<sup>1</sup>, 魏博<sup>1</sup>, 苗建国<sup>2</sup>, 杨凯<sup>1</sup>

(1. 重庆邮电大学先进制造工程学院 重庆 400065; 2. 四川大学空天科学与工程学院  
成都 610065; 3. 重庆大学机械工程学院 重庆 400030)

**摘要:**针对机床零件加工位置和进给方向不确定造成刀尖频响函数变化,导致切削稳定性叶瓣图与无颤振工艺参数预测具有不确定性问题,提出一种耦合支持向量回归机(SVR)与遗传算法(GA)的切削稳定性预测与优化方法。该方法采用锤击法模态实验和空间坐标变换,获取样本空间不同加工位置与进给方向的刀尖频响函数;进而结合传统切削稳定性预测方法构建以各向运动部件位移、进给角度、主轴转速、切削宽度、每齿进给量为输入的极限切削深度 SVR 预测模型;采用该 SVR 模型作为切削稳定性约束建立材料去除率优化模型,通过遗传算法求解各运动轴位移、进给角度与切削参数的最优配置。以某型加工中心展开实例研究,实验结果表明获取的优化配置能实现稳定切削,验证了该方法的有效性。

**关键词:**加工位置;进给方向;切削稳定性;支持向量回归机;遗传算法

中图分类号: TH113.1 TG506.5 TP391 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.3520

## Research on the prediction and optimization of machine tool cutting stability in generalized manufacturing space based on support vector regression machine and genetic algorithm

Deng Congying<sup>1,3</sup>, Feng Yi<sup>1</sup>, Wei Bo<sup>1</sup>, Miao Jianguo<sup>2</sup>, Yang Kai<sup>1</sup>

(1. School of Advanced Manufacturing Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing  
400065, China; 2. School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
3. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the uncertainty of part processing position and feed direction of machine tool causes the change of the tool tip frequency response function (FRF), which leads to the uncertainty of cutting stability lobe diagram and chatter-free processing parameter prediction, a cutting stability prediction and optimization method is proposed combining the support vector regression (SVR) machine and genetic algorithm (GA). This method adopts the hammer impact modal test and spatial coordinate transformation to obtain the tool tip FRFs of different machining positions and feed directions in sample space; then combining the traditional cutting stability prediction method, a SVR prediction model of the limiting cutting depth is established, which takes the displacements of machine tool moving parts, the feed angle, spindle rotation speed, cutting width and the feed rate per tooth as the inputs; the SVR model is taken as the cutting stability constraint to establish the optimization model for the material removal rate (MRR); with the genetic algorithm (GA), the optimal configuration of the displacements of the moving axes, feed angle and cutting parameters is solved. A case study was performed on a certain machining center, and the experiment result shows that the obtained optimal configuration can achieve stable cutting, which verifies the effectiveness and feasibility of the proposed method.

**Keywords:** machining position; feed direction; cutting stability; support vector regression machine (SVR); genetic algorithm (GA)

收稿日期: 2019-07-24 Received Date: 2019-07-24

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51705058)、中国博士后科学基金(2018M633314)、重庆市基础科学与前沿技术项目(cstc2017jcyjAX0005)、重庆市博士后科研项目(XmT2018040)资助

## 0 引言

铣削加工过程中,刀具与工件之间出现的强烈自激振动,是恶化零件加工表面质量、限制机床加工效率、降低机床与刀具使用寿命的主要因素<sup>[1-2]</sup>。因此,认知颤振机理、抑制颤振失稳一直是数控机床切削动力学的重点研究内容。

采用稳定域叶瓣图获取合理的切削参数组合,是实现无颤振切削的主要技术手段。长期以来,切削稳定域图的绘制大都局限于机床某一固定工位的动力学特性。然而实际加工过程中,机床整机质量矩阵、阻尼矩阵以及刚度矩阵随加工工位的变化而变化,使得机床动力学特性及其关联的切削稳定性预测具有不确定性<sup>[3-4]</sup>。针对上述问题,刘海涛等<sup>[3]</sup>提出广义加工空间概念,研究机床模态信息和刚度场信息随加工位置的变化,通过获取刀具最优姿态使加工过程尽量处于最优刚度空间。杨毅青等<sup>[5]</sup>基于切削实验研究机床沿不同进给方向以及主轴 $z$ 方向位置处于最低、中间、最高时的稳定域图,验证沿不同进给方向的切削稳定性存在差别。Law等<sup>[6]</sup>基于子结构综合法计算主轴箱位于立柱低、中、高位置的刀尖频响函数,对比分析3个位置对应进给方向的最小极限切削深度值。Tunc等<sup>[7]</sup>将机床工作空间划分为多个离散位置,结合切削稳定性叶瓣图获取不同加工位置的最优进给方向。上述切削稳定性研究仍然仅针对机床少数加工位置与进给方向展开,未进一步探讨任一加工姿态与切削参数的关联关系,无法完全描述切削稳定性在机床工作空间的动态演化。黄华等<sup>[8]</sup>与Zhang等<sup>[9]</sup>以机床运动部件的不同位置组合为对象,仅建立了最小极限切削深度的响应面模型,研究其在加工空间的分布规律。

切削参数的选择直接影响零件加工质量和加工效率,因此在满足零件加工质量前提下提高生产率,是切削加工行业不断研究的问题。目前,切削参数寻优多围绕稳定切削状态下的材料去除率(material removal rate, MRR)展开。胡瑞飞等<sup>[10]</sup>以材料去除率和刀具寿命构建优化目标函数,采用遗传算法(genetic algorithm, GA)求解切削参数最优解。李尧等<sup>[11]</sup>以切削过程利润和碳排放量为目标建立优化模型,通过自适应粒子群算法获取全局最优解。刘琼等<sup>[12]</sup>以制造过程最小碳排放量和完工时间为优化目标,采用改进的多目标万有引力搜索算法获取最优 Pareto 解集。然而在现有优化模型中,其稳定性约束仍采用传统的颤振稳定域解析表达,尚未考虑加工位置、进给方向的影响,限制了切削参数优选范围。

因此,本文考虑机床零件加工位置、进给方向不确定的影响,通过构建以机床各向运动部件位移、进给角度、主轴转速、切削宽度、每齿进给量为输入,极限切削深度

为输出的支持向量回归机(support vector regression, SVR machine)预测模型,研究切削稳定性在机床工作空间的演化规律;将该 SVR 预测模型作为切削稳定性约束,建立以材料去除率为目标的优化模型,并应用遗传算法进行寻优计算,获取机床姿态与切削参数的优化配置,通过实例分析对其有效性进行验证。

## 1 切削颤振稳定性理论分析

Altintas等<sup>[13]</sup>提出的铣削加工二自由度振动系统如图1所示。

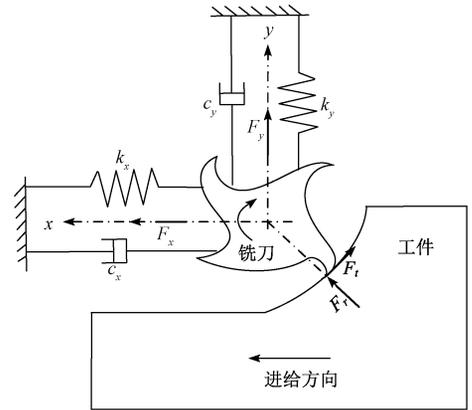


图1 铣削加工二自由度振动系统

Fig.1 2DOF vibration system of milling machining

其中机床 $x, y$ 坐标系下的极限切削深度为:

$$a_{plim} = -\frac{2\pi\Lambda_R}{N_t K_t} \left[ 1 + \left( \frac{\Lambda_I}{\Lambda_R} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: $\Lambda_R, \Lambda_I$ 分别表示系统特征值的实部与虚部,其计算公式为:

$$\Lambda = (\Lambda_R + \Lambda_I i) = -\frac{1}{2a_0} (a_1 \pm \sqrt{a_1^2 + 4a_0}) \quad (2)$$

$$a_0 = G_{xx}(i\omega_c) G_{yy}(i\omega_c) (a_{xx} a_{yy} - a_{xy} a_{yx})$$

$$a_1 = a_{xx} G_{xx}(i\omega_c) + a_{yy} G_{yy}(i\omega_c)$$

式中: $G_{xx}(i\omega_c)$ 和 $G_{yy}(i\omega_c)$ 分别表示刀具-工件系统 $x, y$ 方向的直接频响函数,当工件系统的刚性较大时,可用刀尖点频响函数矩阵表达; $a_{xx}, a_{yy}, a_{xy}, a_{yx}$ 表示平均方向性系数。

实际切削过程中,刀具加工路径往往与机床坐标系方向不一致,如图2所示。因此,需将机床坐标系 $x, y$ 方向( $X_{MT}(x) O Y_{MT}(y)$ )的频响函数矩阵转换为机床进给方向( $X_{feed}(u) O Y_{feed}(v)$ )的频响函数矩阵<sup>[6]</sup>:

$$[G_w(i\omega_c)] = [R]^{-1} [G_y(i\omega_c)] [R] \quad (3)$$

式中: $G_y(i\omega_c)$ 表示机床坐标系 $x, y$ 方向的频响函数矩阵, $G_w(i\omega_c)$ 表示机床进给方向的频响函数矩阵。图2

中  $\theta$  为机床坐标系与机床进给方向坐标系的旋转角度,空间坐标变换矩阵  $R$  可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

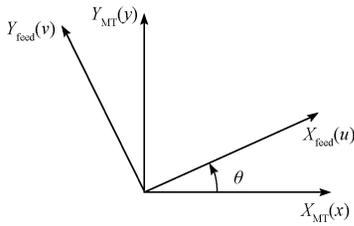


图 2 机床坐标系和机床进给方向坐标系

Fig.2 The machine tool coordinate system and machine tool feed direction coordinate system

将  $G_w(i\omega_c)$  代入式(1)、(2)即可获取机床进给方向的极限切削深度。

$$a_{plim_{feed}} = -\frac{2\pi A_{R_{feed}}}{N_t K_t} \left[ 1 + \left( \frac{A_{I_{feed}}}{A_{R_{feed}}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

根据式(5)进一步得到机床进给方向的切削颤振频率  $\omega_c$  及对应的主轴转速  $n$ 。

$$\begin{cases} \omega_c T = \pi - 2 \tan^{-1}(A_{I_{feed}}/A_{R_{feed}}) \\ n = \frac{60\omega_c}{N_t [(2k + 1)\pi - 2 \tan^{-1}(A_{I_{feed}}/A_{R_{feed}})]} \end{cases} \quad (6)$$

采用式(1)~(6)绘制图3所示的描述极限切削深度与主轴转速关联关系的稳定性叶瓣图。图3中,实线与虚线对应的进给角度分别为  $\theta=225^\circ$  与  $\theta=0^\circ$ ,叶瓣曲线以上为切削颤振区,以下为稳定切削区。分析图3可知:  
1)  $2\,000\text{ r/min} \leq n < 11\,400\text{ r/min}$  时,进给角度  $\theta=225^\circ$  对应的极限切削深度值大于  $\theta=0^\circ$  对应的极限切削深度值;  
2)  $11\,400\text{ r/min} \leq n \leq 15\,000\text{ r/min}$  时,进给角度  $\theta=225^\circ$  对应的极限切削深度值小于  $\theta=0^\circ$  对应的极限切削深度值。因此,进给角度的变化将改变叶瓣图稳定区域,影响无颤振切削参数组合的选择。

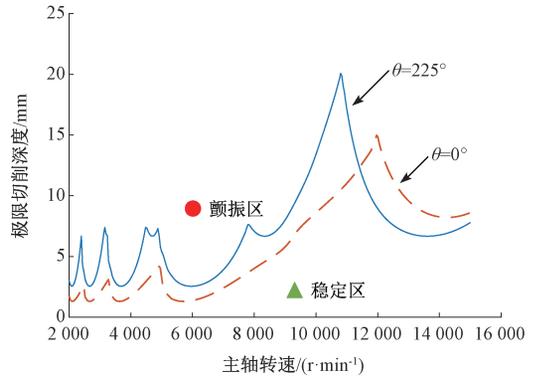


图 3 不同进给方向的切削稳定性叶瓣图

Fig.3 The cutting stability lobe diagrams for different feed directions

## 2 基于机床工作空间的切削稳定性分析

分析式(1)~(6)可知,求解极限切削深度及对应的主轴转速需要提前获取工件-刀具接触区域的频响函数矩阵。由于刀尖点频响函数矩阵受到机床加工位置和进给方向的影响,本文以一台立式加工中心为研究对象,首先采用正交试验设计离散机床工作空间,然后结合锤击法模态实验和空间坐标变换理论,获取工件-刀具系统在各加工位置不同进给方向的频响函数矩阵  $G_w(i\omega_c)$ ,展开切削稳定性预测研究。

### 2.1 基于正交试验设计的刀尖频响函数实验

根据正交试验设计在机床工作空间内选取均匀分布的实验点进行锤击法模态实验,以在满足实验要求下减少实验次数<sup>[14]</sup>。实验因素为各向运动部件位移与进给角度( $x, y, z, \theta$ ),每个因素对应8个水平,如表1前4行所示。选择  $L_{64}(8^4)$  正交表规划表2所示的64组正交试验方案,用于离散化机床工作空间。

表 1 正交试验因素和水平

Table 1 The factors and levels of the orthogonal experiment

因素	区间范围	水平							
		1	2	3	4	5	6	7	8
x 向位置 $x/\text{mm}$	0~550	70	140	210	280	350	420	490	550
y 向位置 $y/\text{mm}$	0~400	50	100	150	200	250	300	350	400
z 向位置 $z/\text{mm}$	0~400	50	100	150	200	250	300	350	400
进给角度 $\theta/(\circ)$	0~360	45	90	135	180	225	270	315	360
主轴转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	0~15 000	2 000	4 000	6 000	8 000	10 000	12 000	14 000	15 000
切削宽度 $a_c/\text{mm}$	2~25	3	6	9	12	15	18	21	24
每齿进给量 $f_z/(\text{mm}\cdot\text{z}^{-1})$	0.02~0.2	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2

表2 正交实验方案  
Table 2 The orthogonal experiment scheme

序号	$x$	$y$	$z$	$\theta$	$n$	$a_e$	$f_z$	$a_{plim_{feed}}$	序号	$x$	$y$	$z$	$\theta$	$n$	$a_e$	$f_z$	$a_{plim_{feed}}$	序号	$x$	$y$	$z$	$\theta$	$n$	$a_e$	$f_z$	$a_{plim_{feed}}$
1	7	4	6	3	8	5	1	4.02	23	5	4	8	7	1	3	2	1.29	45	3	6	8	2	3	4	5	4.90
2	3	8	6	4	1	2	7	10.57	24	8	6	3	7	5	2	1	8.53	46	1	4	4	4	4	4	4	4.51
3	7	1	7	2	5	8	4	16.82	25	5	2	6	5	3	1	4	3.24	47	7	6	4	5	2	3	7	2.67
4	6	5	2	4	3	7	1	0.24	26	7	7	1	8	3	2	6	10.44	48	8	4	5	1	3	8	7	1.38
5	3	3	1	7	6	5	4	10.42	27	4	5	8	3	7	2	4	9.75	49	5	1	5	6	4	2	3	2.23
6	4	4	1	6	2	7	5	1.23	28	2	6	5	8	1	7	4	0.36	50	4	7	6	1	5	4	2	8.13
7	5	7	3	4	6	8	5	7.20	29	8	8	1	5	7	4	3	3.89	51	2	5	6	7	2	8	3	0.78
8	5	3	7	8	2	4	1	0.50	30	6	2	5	7	8	4	6	2.89	52	7	3	5	4	7	6	2	3.78
9	4	3	2	5	1	8	6	2.87	31	5	6	2	1	7	5	8	1.52	53	3	2	4	6	7	8	1	1.75
10	2	7	8	5	4	6	1	2.39	32	1	1	1	1	1	1	1	1.54	54	6	3	8	6	5	1	7	15.85
11	4	6	7	4	8	1	3	10.63	33	1	2	2	2	2	2	2	1.57	55	6	7	4	2	1	5	3	1.59
12	2	2	1	4	5	3	8	6.30	34	5	5	1	2	8	6	7	1.18	56	7	2	8	1	6	7	3	2.40
13	4	1	4	7	3	6	8	1.07	35	3	4	2	8	5	6	3	7.68	57	1	5	5	5	5	5	5	10.93
14	6	6	1	3	4	8	2	2.21	36	8	2	7	3	1	6	5	0.91	58	5	8	4	3	5	7	6	12.52
15	8	7	2	6	8	3	4	7.39	37	6	1	6	8	7	3	5	8.51	59	1	8	8	8	8	8	8	0.99
16	3	1	3	5	8	7	2	4.45	38	2	8	7	6	3	5	2	1.33	60	2	1	2	3	6	4	7	5.13
17	8	5	4	8	6	1	2	7.56	39	4	8	5	2	6	3	1	1.30	61	6	8	3	1	2	6	4	1.38
18	4	2	3	8	4	5	7	3.92	40	1	3	3	3	3	3	3	1.65	62	3	7	5	3	2	1	8	6.25
19	7	5	3	6	1	4	8	2.85	41	1	6	6	6	6	6	6	1.72	63	1	7	7	7	7	7	7	1.19
20	3	5	7	1	4	3	6	7.03	42	2	3	4	1	8	2	5	9.26	64	7	8	2	7	4	1	5	12.96
21	6	4	7	5	6	2	8	5.83	43	8	3	6	2	4	7	8	1.05									
22	2	4	3	2	7	1	6	7.38	44	8	1	8	4	2	5	6	4.91									

根据表2中实验方案调整加工位置,展开锤击法模态测试,获取各方案对应加工位置机床坐标系 $x$ 、 $y$ 方向的频响函数矩阵。实验现场如图4(a)所示,实验中采用PCB冲击力锤对刀尖点激振,通过粘贴于刀尖点的ICP型加速度传感器拾取响应信号,基于模态分析软件处理采集的激振力信号与加速度信号,得到以图4(b)为例的测试点 $x$ 、 $y$ 方向的频响函数。

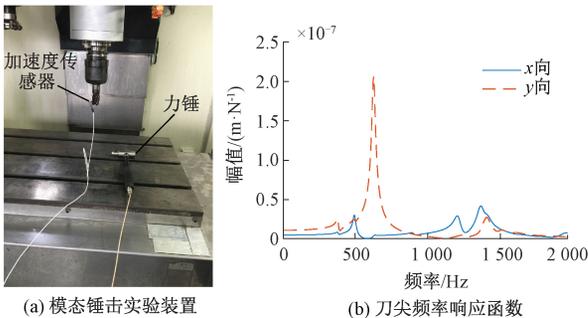


图4 模态锤击实验装置和刀尖频率响应函数

Fig.4 The modal hammer impact test device and the tool tip FRFs

## 2.2 正交试验结果与分析

由前述切削稳定性分析基本理论可知,主轴转速 $n$ 、切削宽度 $a_e$ 、每齿进给量 $f_z$ 等切削用量也会影响极限切削深度的选择。因此,同时以各切削用量为实验因素,每个因素对应8个水平,如表1后3行所示。在此基础上,结合各运动部件位移( $x$ 、 $y$ 、 $z$ )、进给角度 $\theta$ ,形成表2所示的64组切削稳定性正交试验方案。表2中,各组实验方案下的极限切削深度值 $a_{plim_{cut}}$ 由2.1节的实验数据与式(1)~(6)获取。

为进一步了解各因素对极限切削深度 $a_{plim_{cut}}$ 的影响趋势与显著性程度,采用Minitab软件对实验数据进行极差分析与方差分析:

1) 极差分析,采用式(7)计算表2中各因素的极差值 $R_j$ ,以各极差值判断因素主次影响顺序并确定优组合。

$$R_j = \max(K_{ji}) - \min(K_{ji}) \quad (7)$$

式中: $K_{ji}$ 为表2中第 $j$ 个因素第 $i$ 水平对应的极限切削深度值之和。

2) 方差分析,基于 $F$ 检验确定各试验因素对试验指标的影响程度。

$$\left\{ \begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^{n_1} x_{ji}, CT = T^2/n_1, Q_T = x_{ji}^2, r = n_1/m \\ SS_j &= \frac{1}{r} \sum_{i=1}^m K_{ji}^2 - CT, SS_T = Q_T - CT, SS_e = SS_T - SS_j \\ df_T &= n_1 - 1, df_j = m - 1, df_e = df_T - df_j \\ S_j &= SS_j/df_j, S_e = SS_e/df_e, F_j = S_j/S_e \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中:  $x_{ji}$  为表 2 中第  $j$  个因素第  $i$  水平对应的极限切削深度值;  $n_1$  为试验总次数;  $m$  为因素水平个数;  $SS_j$  为第  $j$  个因素的偏差平方和;  $SS_T$  为总偏差平方和;  $SS_e$  为误差平方和;  $df_T$  为总自由度;  $df_j$  为第  $j$  个因素的自由度;  $df_e$  为误差自由度;  $S_j$  为第  $j$  个因素的方差;  $S_e$  为误差方差;  $F_j$  为第  $j$  个因素的  $F$  值。

表 3 正交实验极差分析和方差分析结果

Table 3 The range analysis and variance analysis results of the orthogonal experiment

来源	极差分析			方差分析				
	极差 $R$	主次顺序	优水平	自由度	偏差平方和	方差	$F$ 值	$P$ 值
$x$ 向位置 $x/\text{mm}$	31.82	4	$x_7$	7	104.997	15.000	3.70	0.018
$y$ 向位置 $y/\text{mm}$	22.38	5	$y_3$	7	58.761	8.394	2.07	0.117
$z$ 向位置 $z/\text{mm}$	15.14	7	$z_7$	7	18.356	2.622	0.65	0.711
进给角度 $\theta/(\circ)$	15.49	6	$\theta_4$	7	21.858	3.123	0.77	0.621
主轴转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	67.47	1	$n_5$	7	399.395	57.056	14.08	0.000
切削宽度 $a_e/\text{mm}$	45.32	2	$a_{e1}$	7	216.841	30.977	7.65	0.001
每齿进给量 $f_z/(\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	35.64	3	$f_{z5}$	7	161.865	23.124	5.71	0.003
误差				14	56.720	4.051		
总计				63	1 038.790			

### 3 基于支持向量机的切削稳定性预测

#### 3.1 切削稳定性支持向量机预测模型

支持向量机 (support vector machine, SVM) 是解决小样本、高维数、非线性、局部极小点等非参数回归建模问题的有效方法<sup>[15]</sup>。与 BP 神经网络模型、响应面模型等常用方法相比,支持向量机具有更好的回归性能与泛化能力<sup>[16]</sup>。

支持向量机回归算法的基本原理是给定样本集  $D = \{(\mathbf{x}_i, y_i), i = 1, 2, \dots, l\}$ , 其中  $\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^n$  和  $y_i \in \mathbf{R}$  分别表示  $n$  维输入变量与输出变量; 通过非线性映射将输入变量映射到高维特征空间, 并在特征空间用回归函数  $f(x) = \omega\Phi(x) + b$  拟合输入变量与输出变量之间的关系, 其求解过程可依据式(9) ~ (12)归纳为以下 4 步<sup>[17-18]</sup>:

(1) 引入两个非负松弛变量  $\zeta_i$  和  $\zeta_i^*$ , 将函数的回归拟合问题转化为优化问题。

正交实验极差分析和方差分析结果如表 3 所示, 结合该表中各因素极差值  $R$  与  $F$  值的大小可知, 各因素对切削稳定性影响程度从大到小为:  $n > a_e > f_z > x > y > \theta > z$ ; 同时, 由表 3 极差分析结果中各因素主次顺序及其对应优水平可知, 具有最大  $a_{\text{plim}_{\text{min}}}$  值的最优组合为  $n_5 a_{e1} f_{z5} x_7 y_3 \theta_4 z_7$ , 下标数字对应表 1 中各因素的水平值。由于该最优组合仅基于离散的试验数据分析获取, 其对应的  $a_{\text{plim}_{\text{min}}}$  值不能完全表征各因素在定义域内不同组合下预测的  $a_{\text{plim}_{\text{min}}}$  最优值。因此, 本文基于上述分析中获取的各因素与极限切削深度样本信息, 引入支持向量回归机建立以各因素为输入、极限切削深度为输出的切削稳定性预测模型, 进而建立切削稳定性优化模型并采用遗传算法求解, 获取机床工作空间内加工位置、进给方向、切削参数的最优组合。

$$\left\{ \begin{aligned} \min & \frac{1}{2} \|\omega\| + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{s.t.} & y_i - \omega\Phi(\mathbf{x}_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i, \\ & -y_i + \omega\Phi(\mathbf{x}_i) + b \leq \varepsilon + \xi_i^*, \\ & \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

式中:  $C$  表示惩罚因子;  $\varepsilon$  表示不敏感损失函数系数。

(2) 引入拉格朗日乘子  $\alpha_i$  和  $\alpha_i^*$ , 将式(9)的优化问题转化为对偶问题。

$$\left\{ \begin{aligned} \max_{\alpha, \alpha^*} & \left[ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i - \sum_{i=1}^l (\alpha_i + \alpha_i^*) \varepsilon \right] \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ & 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C \end{aligned} \right. \quad (10)$$

(3) 获取支持向量权重  $\omega$  和偏差  $b$  的表达式:

$$\begin{cases} \omega^* = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \Phi(x_i) \\ b = \frac{1}{N_{nsr}} \left\{ \sum_{0 < \alpha_i < C} [y_i - \sum_{x_j \in sv} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x_j) - \varepsilon] + \sum_{0 < \alpha_j < C} [y_j - \sum_{x_i \in sv} (\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_i, x_j) + \varepsilon] \right\} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $N_{nsr}$  表示支持向量个数。

(4) 获取非线性拟合函数表达式。

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad (12)$$

式中:  $K(x_i, x_j) = \Phi(x_i) \Phi(x_j)$  表示核函数, 且  $\alpha_i - \alpha_i^* \neq 0$  时对应的样本  $x_i$  为支持向量。

### 3.2 基于 SVR 的切削稳定性预测与实验验证

根据图 5 所示 SVR 基本结构, 以机床加工位姿 ( $x, y, z, \theta$ ) 与切削参数 ( $n, a_e, f_z$ ) 为输入, 极限切削深度  $a_{p, \lim_{min}}$  为输出构建切削稳定性 SVR 预测模型。为进一步完善输入与输出样本信息, 本文以 300 rpm 为间隔将主轴转速区间 [2 000, 15 000] rpm 离散化, 并结合 2.2 节表 2 中其余变量的不同取值, 共形成 2732 组方案。采用切削稳定性理论分析方法计算每组方案对应的极限切削深度, 共构造 2 732 组输入与输出样本信息, 其中 2 682 组为训练样本, 50 组为测试样本。

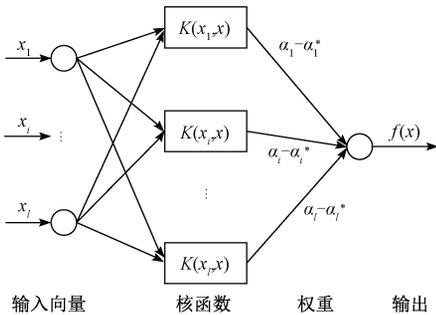


图 5 支持向量回归机结构

Fig.5 The structure of the support vector regression machine

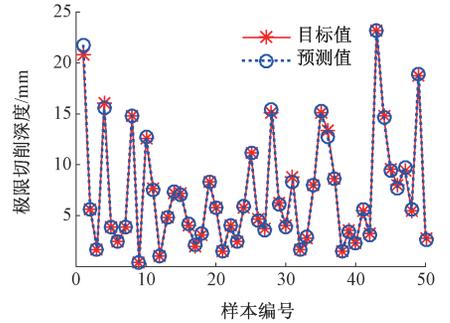
本文采用网格参数寻优方法对 SVR 模型参数进行优化选取, 该方法实质是以式 (13) 所示的径向基 (radial basis function, RBF) 核函数为基础, 利用  $k$  折交叉验证的方式获取最优惩罚因子  $C$  和核函数方差  $g$ 。SVR 预测模型的优劣性通过测试集中的极限切削深度预测值与目标值之间的平均平方误差  $MSE$ 、平方相关系数  $R^2$  判定;  $MSE$  越趋近于 0、 $R^2$  越趋近于 1, 模型的拟合精度越高。

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\delta^2}\right) \quad (13)$$

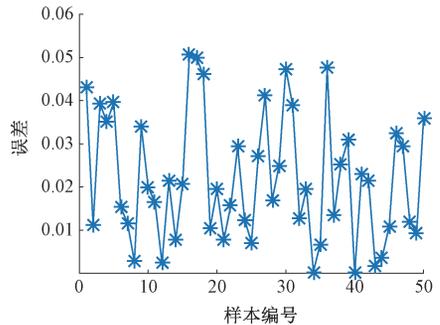
式中:  $\delta > 0$  为高斯核的带宽。

基于样本数据和 MATLAB 软件环境, 本文采用 3 折

交叉验证的方式获取的惩罚因子  $C = 2$ 、核函数方差  $g = 6.05$ 。在此基础上建立极限切削深度 SVR 预测模型, 计算测试集输入样本对应的极限切削深度值, 其与实际值之间的  $MSE = 3.737 \times 10^{-5}$ 、 $R^2 = 0.998$ , 说明拟合的 SVR 模型满足检验要求。极限切削深度预测值和实验值的对比结果如图 6 所示, 其相对误差绝对值的最大值为 5.09%。为进一步验证 SVR 模型的准确性, 选择非样本空间内的 6 组方案进行切削实验, 实验采用刀具直径为 20 mm、螺旋角为  $45^\circ$  的 4 齿硬质合金立铣刀对 45 号钢工件进行切削加工。每组实验过程中, 切削深度由小逐渐递增, 通过 Kistler 测力仪记录的切削力信号的频谱分析判断每次切削是否发生颤振, 并将颤振发生时对应的切削深度值记为极限切削深度。表 4 所示为 6 组实验方案  $a_{p, \lim_{min}}$  实验值与 SVR 模型预测值的对比结果, 其相对误差绝对值在可接受范围内, 满足工程应用需求, 表明构建的 SVR 预测模型的有效性。



(a) 极限切削深度 SVR 模型预测值与目标值  
(a) The prediction and target values of the limiting cutting depth SVR model



(b) 预测值与目标值相对误差绝对值  
(b) The absolute value of the relative error between the prediction and target values

图 6 切削稳定性目标值与 SVR 模型预测值对比结果和预测精度

Fig.6 The comparison results between the target and SVR model prediction values and the prediction accuracy of the cutting stability

采用该 SVR 预测模型可进一步研究极限切削深度  $a_{p, \lim_{feed}}$  在加工空间的演化规律, 如图 7(a) ~ (c) 所示依次描述了工作台处于  $x$  向、床鞍处于  $y$  向、主轴箱处于  $z$  向

表 4 非样本空间内的切削稳定性实验值与 SVR 模型预测值

Table 4 The tested and SVR model prediction values of the cutting stability in non-sample space

序号	$x/\text{mm}$	$y/\text{mm}$	$z/\text{mm}$	$\theta/(\text{°})$	$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$a_e/\text{mm}$	$f_z/(\text{mm}\cdot\text{z}^{-1})$	极限切削深度 $a_{p\text{lim,feed}}/\text{mm}$		
								实验值	预测值	误差/%
1	450	400	150	45	15 000	6	0.15	6.15	6.08	1.07
2	550	310	150	315	2 500	18	0.175	2.82	2.69	4.84
3	400	350	150	180	13 000	15	0.1	6.70	6.60	1.42
4	330	200	400	315	15 000	3	0.15	10.95	10.77	1.70
5	270	300	350	180	7 000	3	0.175	6.96	6.68	4.19
6	500	150	400	90	8 000	24	0.15	5.26	5.49	4.10

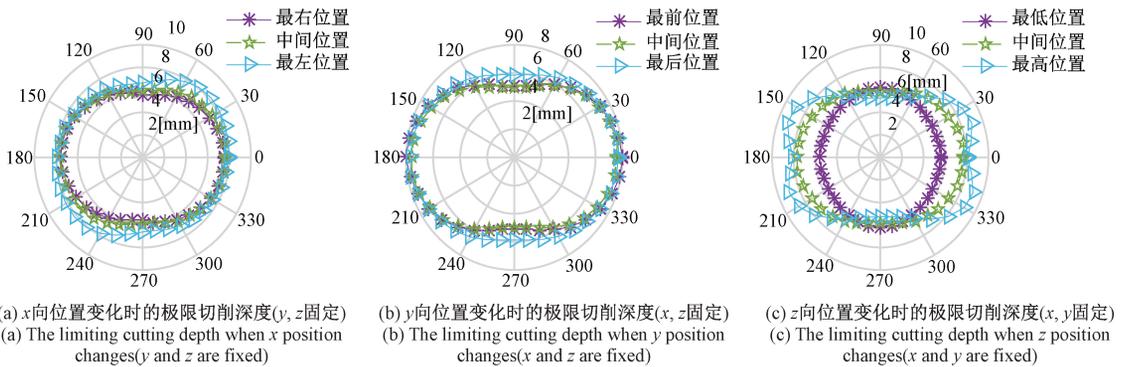


图 7 不同加工位置与进给方向的切削稳定性叶瓣图

Fig.7 The cutting stability lobe diagrams for different machining positions and feed directions

3 个典型位置不同进给方向的稳定域图。图 7(a) 中,  $\theta = 60^\circ$  时  $a_{p\text{lim,feed}}$  变化最大, 最低为 6.24 mm, 最高为 7.79 mm, 变化率为 24.84%; 图 7(b) 中,  $\theta = 90^\circ$  时  $a_{p\text{lim,feed}}$  变化最大, 最低为 4.94 mm, 最高为 5.86 mm, 变化率为 18.62%; 图 7(c) 中,  $\theta = 200^\circ$  时  $a_{p\text{lim,feed}}$  变化最大, 最低为 5.49 mm, 最高为 8.98 mm, 变化率为 63.57%。

## 4 基于材料去除率的切削稳定性优化

### 4.1 铣削参数优化模型

#### 1) 优化变量

由 2.2 节可知, 在铣削加工过程中影响切削稳定性的主要因素有: 加工位置、进给角度、切削参数。因此, 本文拟以运动部件各向位移( $x, y, z$ )、进给角度  $\theta$ 、主轴转速  $n$ 、切削宽度  $a_e$ 、每齿进给量  $f_z$ 、极限切削深度  $a_{p\text{lim,feed}}$  为优化变量, 记为  $V = (x, y, z, \theta, n, a_e, f_z, a_{p\text{lim,feed}})$ , 各变量在表 1 中列出的定义域内变化。

#### 2) 目标函数

本文以材料去除率  $MRR$  为优化的总体目标。对于铣削加工而言,  $MRR$  为轴向切深  $a_p$ 、径向切宽  $a_e$ 、主轴转

速  $n$ 、每齿进给量  $f_z$  及刀具齿数  $N_t$  的函数。

$$MRR = a_p \cdot a_e \cdot n \cdot f_z \cdot N_t \quad (14)$$

#### 3) 约束条件

由于受所选机床的加工稳定性、主轴转速、切削力、切削扭矩、切削功率、刀具寿命等限制, 铣削加工时应满足以下约束条件。

##### (1) 稳定域约束

以建立的极限切削深度 SVR 预测模型表征切削稳定性约束:

$$a_p \leq a_{p\text{lim,feed}}^{\text{SVR}} \quad (15)$$

##### (2) 主轴转速约束

刀具允许切削速度应满足:

$$\begin{cases} n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ \frac{\pi d n_{\min}}{1000} \leq v_c \leq \frac{\pi d n_{\max}}{1000} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $n_{\min}$ 、 $n_{\max}$  分别为主轴转速的最小值、最大值;  $d$  为刀具直径;  $v_c$  为切削速度。

##### (3) 切削功率、切削扭矩约束

加工过程中, 切削力、铣削扭矩和铣削功率不能超过许用值, 即:

$$\begin{cases} F \leq F_{\max} \\ T_c \leq F \cdot \frac{d}{2 \times 1000} \leq T_e \\ P \leq F \cdot \frac{v_c}{60 \times 1000} \leq \eta P_e \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $T_e$  为机床主轴额定功率;  $\eta$  为机床效率;  $P_e$  为机床主轴额定功率。

#### (4) 刀具寿命约束

由式(18)可知, 切削速度、每齿进给量、轴向切深、切削宽度等切削用量增大时会降低刀具寿命, 因此还需考虑刀具寿命约束:

$$T_{\text{tool}} = \frac{K_T C_T}{v_c^m f_z^q a_p^s a_e^r} \geq T_{\text{tool}_{\min}} \quad (18)$$

式中:  $K_T$  为修正系数;  $C_T$  为耐用度系数;  $m, q, s, r$  分别为  $v_c, f_z, a_p, a_e$  对刀具寿命的影响程度系数。

## 4.2 基于 SVR-GA 算法的铣削参数优化与算例验证

### 1) 优化过程

遗传算法是模拟自然界遗传机制和生物进化论而形成的一种并行随机搜索最优化方法, 具有良好的全局搜索能力、鲁棒性、自适应能力等特点。该算法通过对优化变量进行基因编码操作形成初始种群, 计算种群中各个体的适应度, 采用选择、交叉、变异等操作对个体进行筛选, 保留适应度高的染色体并组成新的群体, 反复循环直至满足一定的条件。SVR-GA 算法在切削稳定性优化中的具体应用步骤如下:

(1) 设置种群规模为 100, 迭代次数为 200, 交叉概率与变异概率分别取值为 0.7、0.01。为了便于处理复杂的

变量约束条件, 采用浮点数编码的方式将变量编码成染色体, 随机产生一个  $100 \times 7$  的初始种群。

(2) 以式(14)所示的材料去除率为适应度函数, 计算初始种群中最大适应度值及其位置, 并记录每一次迭代中最大适应度与平均适应度。

(3) 采用比例选择算子选择新个体, 并随机选择个体进行交叉、变异操作产生新的染色体, 将优化后的染色体遗传到下一代, 生成新的种群。

(4) 重复步骤(2)与(3), 将最大适应度值作为最优解, 当最大适应度值收敛或循环次数达到迭代次数时算法终止, 输出最优解及其在所属种群中的位置。

### 2) 优化结果分析与实验验证

在各优化变量的可行域内, 采用遗传算法计算的各项运动部件位移、进给方向、切削参数的最优组合为:  $V = (416 \text{ mm}, 375 \text{ mm}, 341 \text{ mm}, 202^\circ, 6540 \text{ r/min}, 18 \text{ mm}, 0.025 \text{ mm/z}, 5.49 \text{ mm})$ , 由图 8(a) 可知最佳适应度值为:  $MRR = 65960 \text{ mm}^3/\text{min}$ , 对应的刀具寿命为:  $T_{\text{tool}} = 50 \text{ min}$ 。

根据最优结果展开切削实验验证研究, 首先按各轴位移的优化结果移动工作台、床鞍、主轴箱来调整机床加工位置, 然后采用优化后的切削参数组合对工件进行铣削加工。工件材料、刀具参数等工艺信息与 3.1 节实验一致, 切削加工过程如图 8(b) 所示。图 8(c) 为 Kistler 测力仪获取的切削力信号频谱图, 从图 8 中可看出, 切削系统振动的主导频率为 436 Hz 及其整数倍, 对应刀具的切削频率, 说明该组优化结果能够实现稳定切削加工。

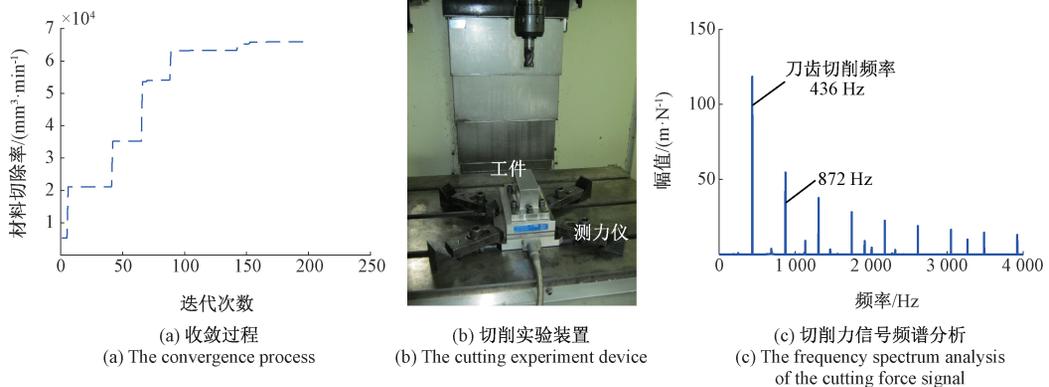


图 8 优化过程的适应度曲线和基于优化结果的切削实验分析

Fig.8 The fitness curve of the optimization process and the cutting experiment analysis based on the optimization results

## 5 结论

1) 采用支持向量回归机建立以各向运动部件位移、

进给角度、主轴转速、切削宽度、每齿进给量为输入的极限切削深度预测模型, 研究切削稳定性在加工空间的演化规律, 克服了传统的忽略机床加工位置与进给方向不确定对切削稳定性影响的不足。

2) 以各向运动部件位移、进给角度、轴向切深、径向切宽、每齿进给量为优化变量,将极限切削深度 SVR 预测模型表征切削稳定性约束,建立以最大材料切除率为目标的优化模型。

3) 采用遗传算法求解优化模型,获取加工位置、进给角度与切削参数的最优配置,通过实例表明最大材料切除率下的优化配置能实现稳定切削,验证了提出的广义空间切削稳定性预测与优化方法的有效性。

## 参考文献

- [ 1 ] LIU Y. Chatter reliability of turning processing system based on fourth moment method [ J ]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20): 193-200.
- [ 2 ] 吴石, 林连冬, 肖飞, 等. 基于多类超球支持向量机的铣削颤振预测方法 [ J ]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2414-2421.  
WU SH, LIN L D, XIAO F, et al. Milling chatter prediction method based on multiclass hypersphere support vector machine [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2414-2421.
- [ 3 ] 刘海涛, 赵万华. 基于广义加工空间概念的机床动态特性分析 [ J ]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 54-60.  
LIU H T, ZHAO W H. Dynamic characteristic analysis for machine tools based on concept of generalized manufacturing space [ J ]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 54-60.
- [ 4 ] GRAHAM E, MEHRPOUYA M, Park S S. Robust prediction of chatter stability in milling based on the analytical chatter stability [ J ]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(4): 508-517.
- [ 5 ] 杨毅青, 刘强. 数控机床切削稳定性分析及实验研究 [ J ]. 振动与冲击, 2014, 33(22): 101-105.  
YANG Y Q, LIU Q. Analysis and experimental investigation on the cutting process stability of machine tool [ J ]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(22): 101-105.
- [ 6 ] LAW M, ALTINTAS Y, PHANI A S. Rapid evaluation and optimization of machine tools with position-dependent stability [ J ]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 68(3): 81-90.
- [ 7 ] TUNC L T, STODDART D. Tool path pattern and feed direction selection in robotic milling for increased chatter-free material removal rate [ J ]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9-12): 2907-2918.
- [ 8 ] 黄华, 张树有, 刘晓健, 等. 基于响应面模型的广义空间切削稳定性研究 [ J ]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(7): 1215-1223.  
HUANG H, ZHANG SH Y, LIU X J, et al. Research on cutting stability of generalized manufacturing space based on response surface mode [ J ]. Journal of Zhejiang University ( Engineering Science ) 2015, 49 ( 7 ): 1215-1223.
- [ 9 ] ZHANG L, GAO W, ZHANG D, et al. Rapid evaluation of machine tools with position-dependent milling stability based on response surface model [ J ]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(3): 1-12.
- [ 10 ] 胡瑞飞, 殷鸣, 刘雁, 等. 切削稳定性约束下的铣削参数优化技术研究 [ J ]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 190-198.  
HU R F, YIN M, LIU Y, et al. Optimization of milling parameters under constrain of process stability [ J ]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 ( 5 ): 190-198.
- [ 11 ] 李尧, 刘强. 面向服务的绿色高效铣削优化方法研究 [ J ]. 机械工程学报, 2015, 51(11): 89-98.  
LI Y, LIU Q. Service-oriented research on multi-pass milling parameters optimization for green and high efficiency [ J ]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11): 89-98.
- [ 12 ] 刘琼, 周迎冬, 张漪. 面向低碳的切削参数与调度集成优化 [ J ]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 24-33.  
LIU Q, ZHOU Y D, ZHANG Y. Integrated optimization of cutting parameters and scheduling for reducing carbon emissions [ J ]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 24-33.
- [ 13 ] ALTINTAS Y, BUDAK E. Analytical prediction of stability lobes in milling [ J ]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1995, 44(1): 357-362.
- [ 14 ] 刘笃喜, 覃秋霞, 王新刚, 等. 基于正交实验的大气静压精密测量静压管设计 [ J ]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 360-367.  
LIU D X, QIN Q X, WANG X G, et al. Design of static pressure tube for precision air static pressure measurement based on orthogonal test design method [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2): 360-367.
- [ 15 ] BEN S S, BACHA K, CHAARI A. Support vector machine based decision for mechanical fault condition

monitoring in induction motor using an advanced Hilbert-Park trans-form [J]. *ISA Transactions*, 2012, 51(5): 566-572.

- [16] BASUDHAR A, MISSOUM S. Adaptive explicit decision functions for probabilistic design and optimization using support vector machines [J]. *Computers & Structures*, 2008, 86(19-20): 1904-1917.
- [17] 焦晓璇, 景博, 李娟, 等. 基于 ADEGWO-SVM 的机载燃油泵寿命预测研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(8): 43-52.

JIAO X X, JING B, LI J, et al. Research on remaining useful life prediction of fuel pump based on adaptive differential evaluation grey wolf optimizer-support vector machine [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(8): 43-52.

- [18] 姜力, 贺晓雷, 行鸿彦. 改进 GA-SVM 的湿度传感器温度补偿研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(9): 1420-1426.

JIANG L, HE X L, XING H Y. Research of temperature compensation for humidity sensor based on improved GA-SVM [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2017, 31(9): 1420-1426.

## 作者简介



邓聪颖, 分别在 2012 年和 2016 年于四川大学获得学士学位和博士学位, 现为重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为数控机床动力学、数字化设计与制造。

E-mail: dengey@cqupt.edu.cn

**Deng Congying** received her B. Sc. and Ph. D. degrees both from Sichuan University in 2012 and 2016, respectively. Now she is an associate professor in Chongqing University of Posts and Telecommunications. Her main research interest includes the CNC machine tool dynamics and digitized design and manufacturing.



苗建国(通信作者), 分别在 2014 年和 2017 年于四川大学获得学士学位和硕士学位, 现为四川大学博士研究生, 主要研究方向为超精密切削加工。

E-mail: jianguomiao1992@163.com

**Miao Jianguo** (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Sichuan University in 2014 and 2017, respectively. He is now a Ph. D. student in Sichuan University. His main research interests include ultra-precision cutting machining.