

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007206

基于改进遗传算法的机床主轴径向 回转误差分离技术研究*

杨赫然^{1,2}, 赵桐^{1,2}, 孙兴伟^{1,2}, 董祉序^{1,2}, 刘鹏君³

(1 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870; 2. 辽宁省复杂曲面数控制造技术重点实验室 沈阳 110870;
3. 长庆石油勘探局有限公司机械制造总厂 西安 710201)

摘要:以提高精密机床主轴回转误差的测量精度为研究目标,基于四点法矩阵算法,采用多圈重合式方法对主轴回转误差测量中的传感器输出数据进行处理。为提高传统遗传算法的收敛速度,降低优化结果对初始值的依赖性,对交叉和变异概率因子列式进行更新,并使用改进遗传算法对传感器安装角度和输出权重系数进行优化。使用改进遗传算法,收敛速率较传统遗传算法提高50%左右。利用多功能斜轨数控车床进行主轴径向回转误差测量及分离实验,分离后的标准芯棒形状误差值与标定值相比,误差在5%以内,且误差重复性低于5%。结果表明分离的结果精度较高,从而验证提出的算法的正确性和可行性。

关键词: 径向回转误差; 矩阵算法; 改进遗传算法; 误差分离

中图分类号: TH161+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Research on radial rotation error separation technology of machine tool spindle based on the improved genetic algorithm

Yang Heran^{1,2}, Zhao Tong^{1,2}, Sun Xingwei^{1,2}, Dong Zhixu^{1,2}, Liu Pengjun³

(1. College of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2. Key Laboratory of Numerical Control Manufacturing Technology for Complex Surfaces of Liaoning Province, Shenyang 110870, China; 3. Machinery Factory of Changqing Petroleum Exploration Bureau Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

Abstract: To improve the measurement accuracy of the spindle rotation error of precision machine tools, the multi-turn coincidence method is used to process the sensor data in the spindle rotation error measurement, which is based on the four-point matrix algorithm. The convergence speed of the traditional genetic algorithm is improved and the dependence of the optimization results on the initial value is reduced. The crossover and mutation probability factor formulas are updated, and the improved genetic algorithm is used to optimize the sensor installation angle and output weight coefficients. By using the improved genetic algorithm, the convergence rate is about 50% higher than the value of the traditional genetic algorithm. The spindle radial rotation error measurement and separation experiment are implemented by a multifunctional inclined rail CNC lathe. Compared with the calibration value, the deviation of the standard mandrel shape after separation is within 5%, and the error repeatability is less than 5%. Results show that the accuracy of the separation results is high. Thus, the correctness and feasibility of the proposed algorithm are verified.

Keywords: radial rotation error; matrix algorithm; improved genetic algorithm; error separation

收稿日期: 2020-12-07 Received Date: 2020-12-07

* 基金项目: 国家自然科学基金(52005347)、辽宁省自然科学基金计划指导计划(2019-ZD-0206)、辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC1905003)、中央引导地方科技发展专项资金(2020JH6/10500048)、辽宁省博士启动项目(2019BS181)资助

0 引言

装备制造是我国工业的支柱产业,为实现“中国制造2025”的计划基础。衡量制造业水平的重要指标之一是数控制造技术及装备的先进程度,且发展数控制造技术及装备的主要方式为提升加工精度。作为承担主运动的主轴,其运动精度对整机加工精度起到决定性作用。由于加工工艺系统中存在多种影响因素,主轴运动误差的在线测量比离线测量更为复杂,而误差分离技术的出现则为误差的在线测量提供了可能。很多学者针对主轴运动的回转误差测量及分离技术进行了研究。

1966年日本学者青木保雄等^[1]提出了三点法圆度误差分离技术,1976年英国学者Whitehouse^[2]总结并从理论上证明了误差分离技术的实用性。多年来误差分离技术得到了快速的发展和广泛的应用。国内外研究人员提出并研究了多种误差分离方法,主要针对回转体工件的圆度误差和主轴回转误差等进行误差分离技术研究。

目前对于分离回转误差和圆度误差的研究方法主要分为多步法以及由多步法演化出来的两步法、反向法等^[3],以及三点法和由其演化而来的两点法、四点法等^[4]。多步法操作简单,但存在谐波抑制的局限性,因此不适用于在线检测^[5];三点法适用于在线检测,但存在零点和谐波抑制的问题^[6]。根据已有研究,多点法中传感器数目多于3个时就可以有效避免谐波抑制和零点的问题,而多于4个时虽然精度更高,但相应的传感器安装、测量和数据处理难度也大大提高,效率明显降低,因此四点法是目前科学且效率较高的圆度误差和回转误差的分离方法^[7]。

上述方法在求解误差分离方程时都需要进行复杂的傅里叶变换,为了简化求解过程,雷贤卿等^[8]提出一种基于三点法圆度误差分离技术的矩阵算法,该算法可以在分离出圆度误差的同时分离出主轴纯回转误差和被测工件截面的最小二乘圆心的初始坐标,得到了较好的效果,有效地避免了传统傅里叶变换复杂的计算过程,也使编程过程更为简便。此外,影响误差分离精度的因素也有很多,浙江工业大学的任宁等^[9]对传感器安装角度进行求解优化得到了各谐波级次下的最佳安装角度,将实验数据与角度未经优化的实验数据进行对比,发现经过角度优化后的实验数据更为精确。通过研究前人的论文,发现虽然对多点法误差分离技术的研究已经很深入,但是对于误差分离精度影响较大的传感器安装角度和输出权值系数仍有深入研究的必要。

本文将矩阵算法应用到四点法,采用一种多圈重合式测量的方法,对传统遗传算法的交叉和变异概率因子

列式进行改进,分析影响回转误差测量精度的因素,使用改进遗传算法对测头安装角度和测头输出权值系数进行优化,并用实验验证本文提出方法的有效性及准确性,为主轴回转误差的分离提供新的思路。

1 基于四点法矩阵算法的多圈重合式测量方法

1.1 数学模型建立

四点法圆度误差分离原理如图1所示。

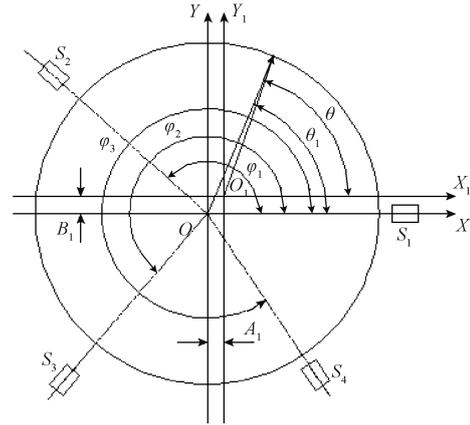


图1 四点法圆度误差分离原理

Fig. 1 Four point roundness error separation principle

图1中 XOY 是以4个传感器轴线交点为圆心建立的测量坐标系, $X_1O_1Y_1$ 是以被测工件圆轮廓最小二乘中心的坐标为圆心建立的理论坐标系。在工件圆周平面内分布4个位移传感器 S_n ($n=1,2,3,4$),各传感器与 X 轴的夹角为 φ_i ($i=0,1,2,3$) (1号传感器与 X 轴重合,所以 $\varphi_0=0^\circ$),用 $r(\theta)$ 表示被测圆轮廓傅里叶级数中除一阶分量之外的其余各项和,用 $r_1(\theta_1)$ 表示被测圆轮廓的圆度误差。设轮廓上测量点到测量坐标系的表达式为 $y(\theta)$ 。 (A_1, B_1) 是理论坐标系原点 O_1 的坐标点。

设定主轴采样点数为 N , S_1 传感器单圈采样点数为 T ,采样圈数为 t ,则1s内传感器每圈采样数据点数可由式(1)获得。

$$X_t = V_{(t-1)+N/T(k-1)} [(2\pi + 2\pi/N)(t-1)] \quad (1)$$

其中 $2\pi/N$ 是被测工件每相邻两个采样点之间相位差, $t=1,2,\dots,N/T,k=1,2,\dots,T$ 。

经过 t 圈重合测量,得到被测工件采样点数据如式(2)所示。

$$\begin{cases} X_1 = S_0, S_{0+N/T}, S_{0+2N/T}, \dots, S_{0+N/T(t-1)} \\ \vdots \\ X_t = S_{t-1} [(2\pi + 2\pi/N)(t-1)], \\ S_{t-1+N/T} [(2\pi + 2\pi/N)(t-1)], \dots, \\ S_{t-1+N/T(t-1)} [(2\pi + 2\pi/N)(t-1)] \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可见,第1圈采集的数据与第2圈采集的数据相差一个 $2\pi + 2\pi/N$ 的相位角,依次递推到 i 圈,直至每个传感器都采集到 N 个数据点。由于径向回转误差具有周期性,所以可以根据各个数据采集点的初始位置进行重新排列,即可得到第一个传感器的采集数据结果 y_0 。其余3个传感器的数据采集过程同理,分别记为 y_1, y_2, y_3 。取初始安装角为 $\varphi_0 = 0^\circ$, 根据参考文献[6]中关于三点法矩阵算法的原理将本文的多圈重合式四点法公式转换为矩阵形式,如式(3)所示。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{E}\mathbf{R} + \mathbf{A}\boldsymbol{\delta}(\theta) \quad (3)$$

式中: \mathbf{Y} 为各传感器输出信号矩阵; \mathbf{E} 为单位矩阵; \mathbf{R} 为各传感器测得的圆度误差信号和回转误差信号的离散化矩阵; \mathbf{A} 为各安装角的离散化矩阵; $\boldsymbol{\delta}(\theta)$ 代表被测工件在 X, Y 方向的回转误差。为了分离回转误差,式(3)两边左乘传感器输出权重系数矩阵 \mathbf{A}^* , 可得式(4)。

$$\mathbf{A}^* \mathbf{Y} = \mathbf{A}^* \mathbf{E}\mathbf{R} + \mathbf{A}^* \mathbf{A}\boldsymbol{\delta}(\theta) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A}^* = [\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3]$ 。

由式(4)可知,若想要分离出圆度误差,需使 $\mathbf{A}^* \mathbf{A} = 0$, 取 $a_0 = 1$, 代入式(4)后化简可得式(5)。

$$\begin{cases} a_1 = \frac{a_3 \sin[2\pi(p_3 - p_2)/N] - \sin(2\pi p_2/N)}{\sin[2\pi(p_2 - p_1)/N]} \\ a_2 = -\frac{a_3 \sin[2\pi(p_3 - p_1)/N] - \sin(2\pi p_1/N)}{\sin[2\pi(p_2 - p_1)/N]} \end{cases} \quad (5)$$

其中, p 为传感器角位置编号, $p_i = N \times \varphi_i / 2\pi$ 。设 $a_3 = k$, $\mathbf{Y}_n(i)$ 为4个传感器输出信号的加权组合, $\mathbf{r}(i)$ 为具有周期性的离散序列。则 $\mathbf{r}(i)$ 时延后代入 $\mathbf{Y}_n(i)$ 中可得式(6)。

$$\mathbf{Y}_n(i)_{N \times 1} = \mathbf{A}_{N \times N} \mathbf{r}(i)_{N \times 1} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{A}_{N \times N} = \left[\sum_{l=0}^3 (\mathbf{a}_l \boldsymbol{\varepsilon}_{p, q+p_l}) \right]_{N \times N}$; $p, q = 0, 1, 2, \dots, N$; $l = 0, 1, 2, 3$; $p = q$ 时 $\boldsymbol{\varepsilon}_{p, q+p_l} = 1$, $p \neq q$ 时 $\boldsymbol{\varepsilon}_{p, q+p_l} = 0$; $p_0 = 0$ 。由于 $\text{rank}([\mathbf{A}, \mathbf{Y}_n(n)]) = \text{rank}(\mathbf{A}) = N$, 所以有唯一解 $\mathbf{r}(i)_{N \times 1} = \mathbf{A}_{N \times N}^{-1} \mathbf{Y}_n(i)_{N \times 1}$ 。

式(6)中未含一阶谐波分量,若以此来计算圆度误差则会导致失真。因此为获得被测工件准确的圆度误差,需要得到一阶谐波分量,然后将之与 $\mathbf{r}(i)$ 组合重构圆轮廓。

1.2 圆轮廓重构

将式(3)离散化,可得到 $y(\theta) = C\cos(\theta) + D\sin(\theta)$ 和 $\delta(\theta)$, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} y_0(i) = r(i + p_0) + \delta_x(i) \\ y_1(i) = r(i + p_1) + \delta_x(i) \cos(2\pi p_1/N) + \\ \delta_y(i) \sin(2\pi p_1/N) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\delta_x(i)$ 和 $\delta_y(i)$ 是 $\delta(\theta)$ 在 X, Y 轴的分量。

整理各式令:

$$\begin{cases} h_1(i) = y_0(i) - r(i) \\ h_2(i) = \left\{ [y_1(i) - r(i + p_1)] - [y_0(i) - r(i)] \cos\left(\frac{2\pi p_1}{N}\right) \right\} / \sin\left(\frac{2\pi p_1}{N}\right) \end{cases} \quad (8)$$

代入式(7)整理后可得纯回转轴的回转运动误差,如式(9)所示。

$$\delta(i) = h_1(i) \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right) + h_2(i) \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right) - C \cos\left(\frac{4\pi i}{N}\right) - D \sin\left(\frac{4\pi i}{N}\right) \quad (9)$$

式中: C, D 为一阶谐波分量。

由此可分离出一阶谐波分量和主轴的回转误差。因为 $r(i)$ 是去除了一阶谐波分量之后的圆度误差,不能直观地反映被测工件的截面轮廓,所以可以在半径上添加工件的基准半径,让图像更加直观,不影响误差的评定。被测截面的圆轮廓的点在测量坐标系内的坐标表示为:

$$\begin{cases} x(i) = C + [R_1 + r(i)] \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \\ y(i) = D + [R_1 + r(i)] \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \end{cases} \quad (10)$$

式中: R_1 为被测工件的基准半径。接下来通过仿真验证该算法的可行性。

1.3 仿真验证

为了验证该算法的可行性,需要先设定一圆轮廓和回转误差的函数,再代入各个参数进行仿真。本文后续实验所用主轴芯棒半径为 20 mm, 根据圆轮廓的傅里叶变换形式设定圆轮廓函数为:

$$r(\theta) = 20 + 1.2\cos\theta - 0.8\sin\theta + 0.2\sin 2\theta + 0.5\cos 6\theta - 0.8\cos 8\theta + 0.3\sin 13\theta + 0.4\cos 20\theta$$

设定回转误差函数为:

$$\delta(\theta) = 1.3 + 0.1\cos(\theta + \pi/4) + 0.6\sin(2\theta + \pi/12) + 0.2\cos(7\theta) - 0.4\cos(12\theta + \pi/10)$$

参数设置如下:测量点数 $N = 128$; 默认第1个传感器的安装角度为 0° , 另外3个传感器与 X 轴的正半轴夹角设为: $\varphi_1 = 14 \times 2\pi/N$, $\varphi_2 = 65 \times 2\pi/N$, $\varphi_3 = 116 \times 2\pi/N$ 。谐波级次 $k = 20$, 谐波级次是指对周期性非正弦交流量进行傅里叶级数分解,其中的谐波频率与基波频率之比。由式(5)可得权值系数为: $a_0 = 1$, $a_1 = 1.7487$, $a_2 = 2.8273$, $a_3 = 1.953$ 仿真流程如图2所示。

根据设定的圆轮廓函数和回转误差函数得到的图像如图3和4所示。4个传感器输出信号图像如图5所示。分离、设定及重构圆轮廓信号图像如图6所示。分离及设定回转误差图像如图7所示。由图4可以看出设定的回转误差是由圆心向周围发散的形式,参考的是主轴在旋转过程中的径向偏移误差和角度摆动误差。

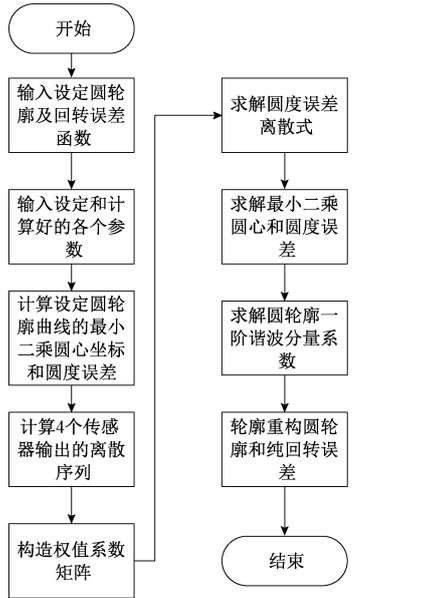


图 2 仿真验证流程

Fig. 2 Flow of simulation verification

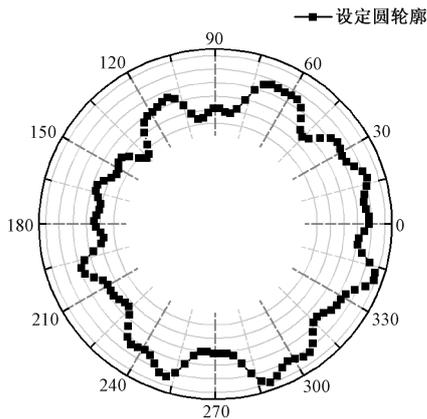


图 3 设定圆轮廓图像

Fig. 3 Image of the set circle profile

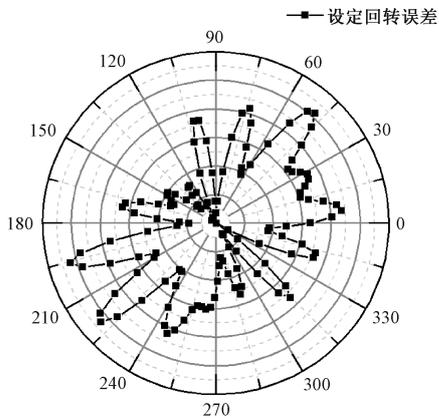


图 4 设定回转误差

Fig. 4 Rotation error set

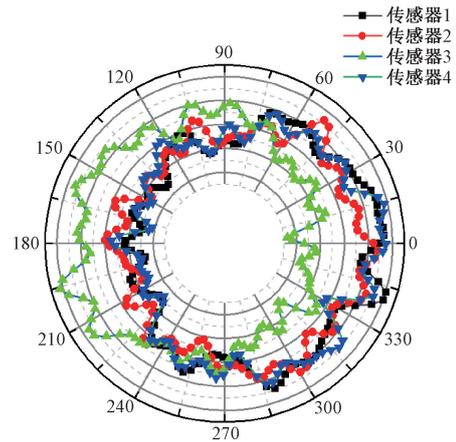


图 5 传感器输出信号

Fig. 5 Sensor signal

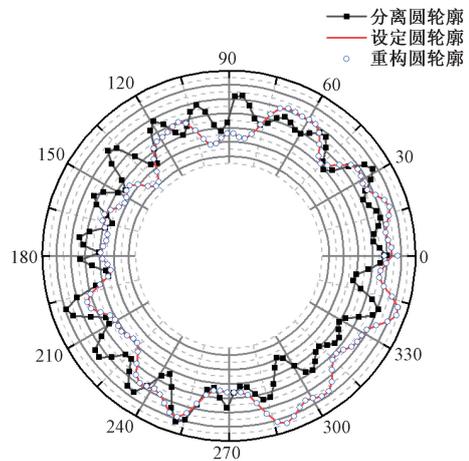


图 6 分离、设定及重构圆轮廓对比

Fig. 6 Comparison of separating, setting and reconstructing circle contour

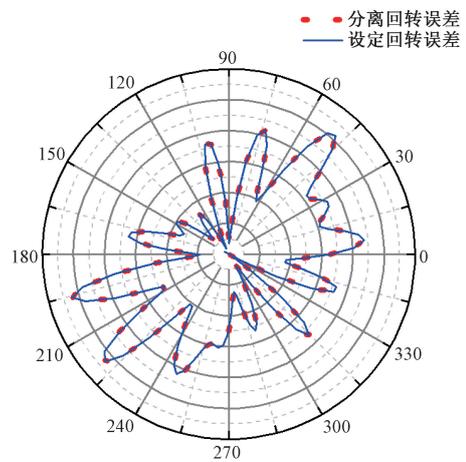


图 7 分离、设定回转误差对比

Fig. 7 Comparison of rotation error between separation and setting

由图5可以看出4个位移传感器的输出差异较大,主要是因为4个位移传感器的安装角度不同,而且每个传感器的输出特性曲线也不同;图6中,设定的圆轮廓平均值为 $20.0\ \mu\text{m}$,分离出的圆轮廓平均值为 $18.5\ \mu\text{m}$,重构后的圆轮廓平均值为 $19.8\ \mu\text{m}$,可以得知经过重构后的圆轮廓曲线和设定圆轮廓曲线基本一致,而与分离出来没有经过算法重构的圆轮廓曲线则相差很大,存在差值的原因是分离出的圆轮廓误差含有一阶谐波分量;这说明了该算法可以将圆轮廓的圆度误差从混合信号误差中分离出来,但依然不能直接反映圆度,需要经过重构圆轮廓才能更好地进行分析。图7中设定的回转误差平均值为 $1.29\ \mu\text{m}$,而分离出的回转误差平均值为 $1.28\ \mu\text{m}$,可以看出经过该算法计算分离出的回转误差和最初设定的回转误差图像曲线几乎吻合,通过上述分析可知本文所使用的多圈重合式四点法矩阵算法是可行的。

2 实验各参数的改进遗传算法优化

实验时混合误差信号通常表示为各传感器输出的加权和,所以权值系数的选取对分离结果有很大的影响;与常规的多步法两点法等不同,使用多点法测量主轴回转误差或工件的圆度误差时,传感器在工件周围的角度分布不同,得到的测量结果差异性较大,从而影响误差的分离和测量精度,因此对传感器安装角度的研究是很有必要的。

2.1 建立目标优化函数

使用四点法测量主轴或工件的误差时,需要沿圆周平面一定位置分布4个传感器,各传感器与 X 轴正半轴的夹角为 φ_i ($\varphi_0 = 0^\circ$),工件的圆度 $r(\theta_n)$,径向回转误差 $\delta(\theta)$,各个传感器输出信号为:

$$y_i(\theta) = r(\theta + \varphi_i) + \delta_x(\theta) \cos\varphi_i + \delta_y(\theta) \sin\varphi_i \quad (11)$$

对 $r(\theta_n)$ 进行傅里叶级数展开得到:

$$r(\theta_n) = A_0 + \sum_{k=1}^{k_m} (A_k \cos k\theta_n + B_k \sin k\theta_n) \quad (12)$$

式中: k 为谐波级次; A_k, B_k 为各次谐波的余弦值和正弦值。

将 $y_i(\theta)$ 和权值系数矩阵 $[a_0, a_1, a_2, a_3]$ 相乘后代回式(11)后得到式(13)。

$$y_0(\theta_n) = A_0(1 + a_1 + a_2 + a_3) + \lambda_1 \delta_x(\theta_n) + \mu_1 \delta_y(\theta_n) + \sum_{k=2}^{\infty} [(A_k \lambda_k - B_k \mu_k) \cos k\theta_n + (B_k \lambda_k + A_k \mu_k) \sin k\theta_n] \quad (13)$$

令:

$$\begin{cases} \lambda_k = 1 + a_1 \cos k\varphi_1 + a_2 \cos k\varphi_2 + a_3 \cos k\varphi_3 \\ \mu_k = a_1 \sin k\varphi_1 + a_2 \sin k\varphi_2 + a_3 \sin k\varphi_3 \end{cases} \quad (14)$$

为了分离出 $\delta_x(\theta), \delta_y(\theta)$ 应使 $\lambda_1, \mu_1 = 0$,得到:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{a_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2) - \sin\varphi_2}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \\ a_2 = -\frac{a_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_1) - \sin\varphi_1}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \end{cases} \quad (15)$$

将 $y_0(\theta_n)$ 进行傅里叶级数展开得到:

$$y_0(\theta_n) = y_{n0} + \sum_{k=1}^{\infty} (F_k \cos k\theta_n + G_k \sin k\theta_n) \quad (16)$$

式中: F_k, G_k 为测头读数误差影响函数;可得各个阶次谐波的余弦和正弦分别为:

$$\begin{cases} A_k = -\frac{\lambda_k F_k + \mu_k G_k}{\lambda_k^2 + \mu_k^2} \\ B_k = \frac{\mu_k F_k - \lambda_k G_k}{\lambda_k^2 + \mu_k^2} \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{其中} \begin{cases} F_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_0(\theta_n) \cos k\theta_n \\ G_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_0(\theta_n) \sin k\theta_n \end{cases}, \text{将 } A_k, B_k \text{ 代入 } r(\theta_n)$$

可以求解出圆度误差,设每个传感器的方差为 σ^2 ,则可以得到:

$$\sigma^2(A_k) = 2 \frac{1 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}{\lambda_k^2 + \mu_k^2} \sigma^2 \quad (18)$$

同理 $\sigma^2(B_k) = \sigma^2(A_k) = 2q_k^2 \sigma^2$,其中,

$$q_k^2 = \frac{1 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}{\lambda_k^2 + \mu_k^2} \quad (19)$$

式中: q_k^2 为误差传递函数,由式(19)可知 q_k^2 与 λ_k^2, μ_k^2 有关,而 λ_k, μ_k 是关于安装角度和权值系数的函数且与 A_k, B_k 有关,因此多点法位移传感器的安装角度对 A_k, B_k 有影响,所以目标优化函数定为:

$$H = q_k^2 = \frac{1 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}{\lambda_k^2 + \mu_k^2} \quad (20)$$

2.2 基于改进遗传算法的传感器安装角度及输出权值系数优化

遗传算法(genetic algorithm)基于进化论原理,在多目标参数优化领域应用广泛,具有良好的全局搜索性^[10-11];但传统的遗传算法仍存在收敛速度慢,优化结果过于依赖初始值等局限性^[12-13];针对这一问题,本文对传统遗传算法的采样策略进行优化,提高优化效率的同时让优化结果更接近最优值。由2.1节的分析可以得出目标优化函数 $H = q_k^2$ 是关于权值系数 a_i ,谐波级次 k 和传感器间夹角 φ_i 的函数(其中第1个传感器的安装角度默认为 0°),而权值系数可以以 a_3 表示,因此将四点法误差分离各关键参数的优化问题归于多目标函数优化问题。使用遗传算法能够有效避免在搜索时陷入局部最优,可以得到最佳的优化结果^[14]。因此本文决定使用改进遗传算法对四点法传感器的安装角度和各测头输出的权值系

数进行仿真优化。

在传统遗传算法中的优化多目标参数过程阶段,种群多样性主要依赖于交叉概率,而能否避开局部最优值主要依赖于变异概率^[15],因此本文拟对传统遗传算法的交叉和变异概率进行改进。通过误差函数的倒数来定义个体适应度 F ,第 i 个个体的适应度表示为:

$$F(i) = \frac{1}{H(i)} \quad (21)$$

在传统的遗传算法中,交叉概率和变异概率为常数,但实际上在遗传算法的进化过程中,进化前期和后期所需要的交叉和变异程度是不同的。在遗传算法的前期,因为个体的适应度较差,需要较大的交叉概率值才能扩大算法的全局搜索范围,同时以较小的变异概率来保存个体优良基因;而在后期,个体的适应度高于平均的适应度值,就需要较小的交叉概率来降低全局搜索能力,较大的变异概率来增强局部搜索能力。因此改进后的交叉和变异概率分别为:

$$P_j = \begin{cases} P_{jmax}, & F < F_{mean} \\ P_{jmax} - \frac{P_{jmax} - P_{jmin}}{\alpha_{max}} \times \alpha, & F \geq F_{mean} \end{cases} \quad (22)$$

$$P_b = \begin{cases} P_{bmin}, & F < F_{mean} \\ P_{bmin} - \frac{P_{bmax} - P_{bmin}}{\alpha_{max}} \times \alpha, & F \geq F_{mean} \end{cases} \quad (23)$$

式中: F 表示种群中父代染色体的适应度值; F_{mean} 表示种群个体的平均适应度值; α 表示遗传算法当前的迭代次数; α_{max} 表示最大迭代次数,根据交叉概率和变异概率的默认取值范围^[16]。将初始值的交叉概率 P_{jmax} 设定为 0.99, P_{jmin} 设定为 0.4, 初始值的变异概率 P_{bmax} 设定为 0.09, P_{bmin} 设定为 0.005。

首先将需要优化的各个变量进行种群初始化并设置好各个变量的范围,根据目标函数计算适应度值后进行基因选择,通过设定好的自适应交叉和变异后创建新种群,对新种群中的全局最优个体进行适应度评价,若符合要求则结束,不符合要求则重新进行上述步骤,最终得到优化结果。优化后可得到权值系数 a_i , 谐波级次 k 和传感器间夹角 φ_i 。

将改进遗传算法的收敛曲线和传统遗传算法的收敛曲线进行对比,可得到图 8 和 9 所示的结果。由图 8 和 9 可以看出经过改进的遗传算法收敛于 55 次左右,而传统遗传算法在 118 次左右收敛,改进遗传算法的收敛速度明显高于传统遗传算法,说明本文所使用的改进遗传算法相比于传统遗传算法具有优越性,但随着研究深入,仍然有可能对算法中的选择因子进行进一步优化,从而进一步加快收敛速度。

仿真运行得到部分谐波级次下的结果如表 1 所示,

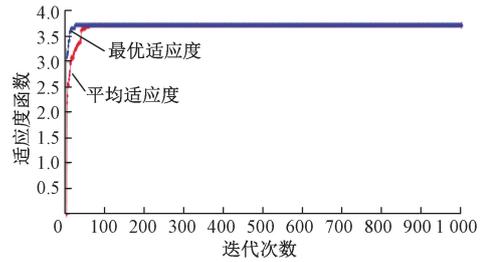


图 8 改进遗传算法优化收敛曲线

Fig. 8 Optimization of convergence curve by the improved genetic algorithm

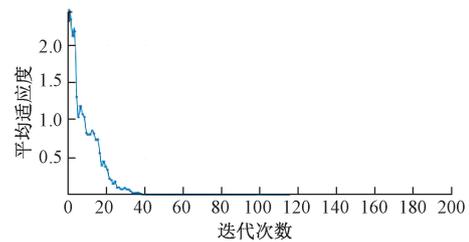


图 9 传统遗传算法优化收敛曲线

Fig. 9 Optimization of convergence curve by the traditional genetic algorithm

目标函数值随谐波级次的变化规律如图 10 所示。由图 10 可以看出随着谐波级次的增加,目标函数的函数值在 0.250~0.273 之间波动,说明谐波级次对于目标函数的优化结果影响较小。图 11 所示为不同谐波级次下得到的传感器优化安装角度。由图 11 可以看出随着谐波级次的增加,传感器的安装角度在不断发生变化,但仅在小范围内波动,各个谐波级次下的 3 个安装角度相差较大, φ_1 和 φ_3 变化相对平稳, φ_2 的变化波动较大。不同谐波级次下的权值系数值如图 12 所示。由图 12 可以看出随着谐波级次的变化,权系数的值在一定范围内波动,且每个谐波级次的最优权值系数值是不同的。

表 1 部分谐波级次下的仿真结果

Table 1 Simulation results of parameters at different harmonic levels

k	H	φ_1	φ_2	φ_3	a_1	a_2	a_3	k
10	0.256	0.307	1.89	5.04	0.956	1.30	1.00	240
20	0.257	0.522	3.45	5.47	2.430	3.82	1.39	280
40	0.273	0.222	1.70	4.94	1.110	1.28	1.06	320
80	0.252	0.271	2.14	4.74	0.162	1.74	1.44	360
...

通过上述分析可知,各个谐波级次下的最佳权值系数和传感器安装角度是不同的,每个谐波级次下均

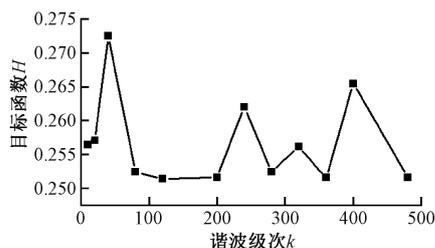


图 10 不同谐波级次下的目标函数值

Fig. 10 Objective function values under different harmonic levels

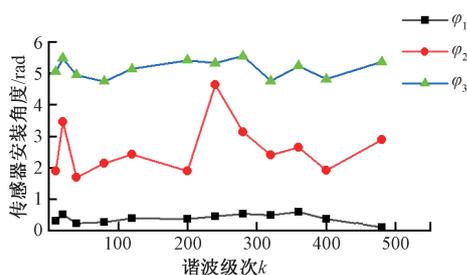


图 11 不同谐波级次下的安装角度值

Fig. 11 Installation angle under different harmonic levels

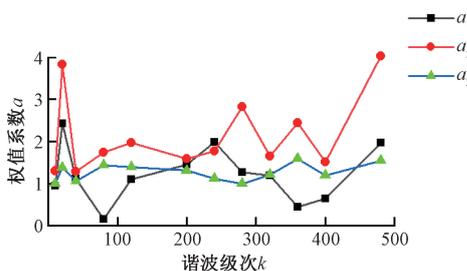


图 12 不同谐波级次下的权值系数值

Fig. 12 Value of weight coefficient under different harmonic levels

有相应的最佳权值系数取值和最佳安装角度值,因此
在实际测量过程中,只需在固定的谐波级次下进行实
验即可。

3 误差分离实验

首先进行实验台的搭建,本实验装置主要包括
CWY-DO-502 非接触式电涡流位移传感器、E100H45-
1024BZ-24FG2 中空轴脉冲编码器、NI-USB 数据采集卡、
BT40 主轴芯棒、电源及上位机。

根据 2.2 节优化得到的参数,选用 HXC32D 斜轨数
控车床进行误差分离实验。实验中,考虑到安装角度分
布的均匀性,故选择 $k=20$ 。根据优化角度设计传感器夹
持和编码器夹持工装,机床及实验台搭建如图 13~15 所

示。图 14 中 1 为车床刀架,2 为数据采集卡,3 为计算
机。图 15 中 1 为脉冲编码器,2 为夹具,3 为固定板,4 为
位移传感器,5 为主轴芯棒。



图 13 HXC32D 斜轨数控车床

Fig. 13 HXC32D inclined rail CNC lathe



图 14 实验台搭建

Fig. 14 Construction drawing of experimental platform

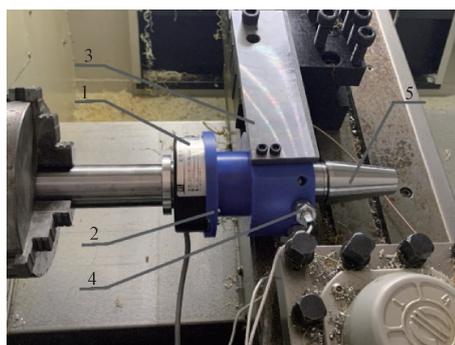


图 15 实验台内部结构

Fig. 15 Internal structure of the experimental platform

全部连接固定完成后,主轴正转,系统预热 15 min
后,开始测量。根据分离算法编写程序,得到混合误差信
号如图 16 所示。由混合误差信号分离出来的形状误差
信号和回转误差信号如图 17 和 18 所示。

由图 17 和 18 可看出分离出的回转误差信号由圆心
发散呈放射状,而形状误差信号轮廓与工件圆轮廓相似;

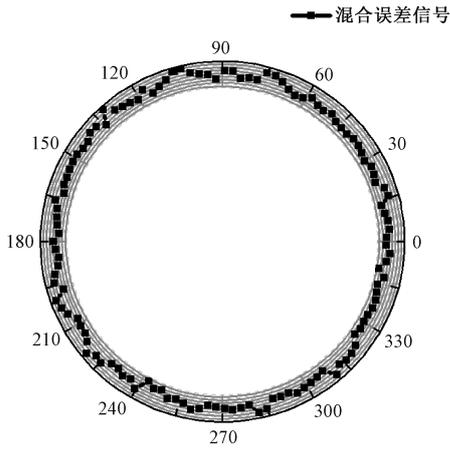


图 16 混合误差信号
Fig. 16 Mixed error signal

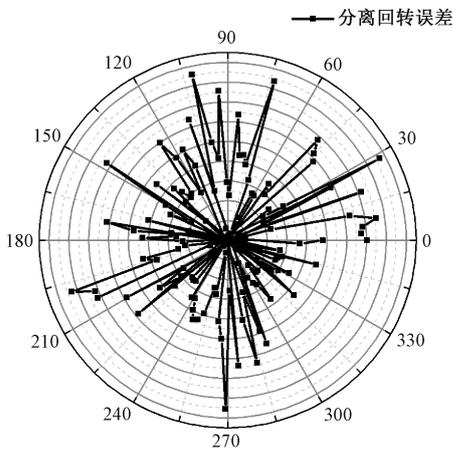


图 17 回转误差信号
Fig. 17 Rotary error signal

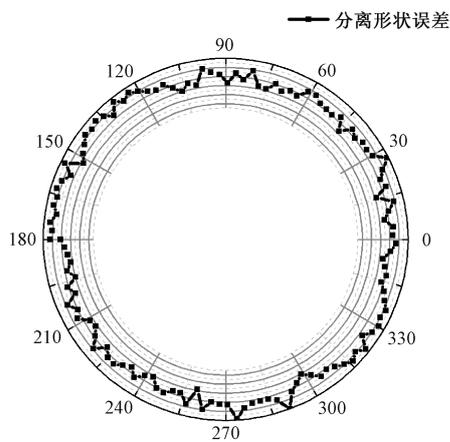


图 18 形状误差信号
Fig. 18 Shape error signal

仿真情况与实验结果具有相似性。由于实验受到环境因素影响,采集到的电信号可能存在跳跃失真的情况,影响对实验数据的分析,所以需要测得的信号进行滤波。本文选用的滤波方式为低通 FFT 滤波,实验过程中由于机床主轴转速较高,会产生振动及噪声信号,这些信号往往是高频的,采用低通滤波可以很有效地筛去实验过程中产生的噪声信号。

实验中所使用的各级转速条件下滤波后的误差信号图像如图 19 和 20 所示。通过图 19 可知,各转速下分离出的回转误差信号基本吻合;由图 20 可以看出,各个转速下所得到的形状误差圆轮廓基本重合,与仿真分析结果较吻合,说明本文中的方法可以有效的分离出形状误差和回转误差,将其用于四点法的径向回转误差分离是可行的。

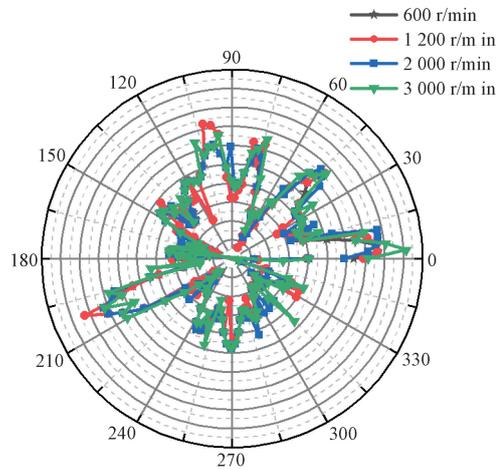


图 19 滤波后不同转速回转误差信号
Fig. 19 Rotation error signal at different rotation speed after filtering

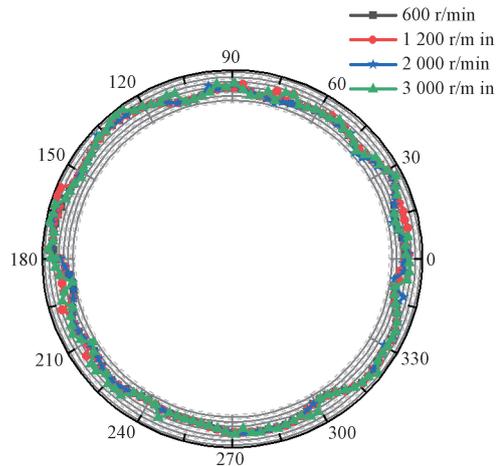


图 20 滤波后不同转速形状误差信号
Fig. 20 Shape error signal at different rotation speed after filtering

根据实验所测得的数据,可以得出各转速下分离出的形状误差平均值如表2所示。

表2 各转速下分离形状误差平均值
Table 2 Average values of separation shape error at each speed

转速/($r \cdot \min^{-1}$)	600	1 200	2 000	3 000
$\delta/\mu\text{m}$	2.87	2.90	2.92	2.95
标准偏差	0.154	0.105	0.085	0.049
重复性/%	4.67	3.62	2.91	1.66

实验所用BT40主轴测试芯棒的出厂标准圆度公差值为 $3\mu\text{m}$,通过表2可以看出本文中的方法可以有效的分离所选机床的主轴形状误差。

重复性指在相同的测量条件下对同一被测量进行连续多次测量时,所有测得值的分散程度。由表2可知本文中实验测得的径向回转误差重复性低于5%,证明分离结果的精度较高。随着机床转速的提高,测得的后转误差平均值有增大趋势,分析是由于转速提高,主轴转动过程中的振动振幅变大所导致。

为了证明本文采用的优化方法得到的安装角度优于其他安装方案,进行了随机安装角度仿真与优化安装角度所得的后转误差对比,如图21所示。转速设定为 600 r/min ,首先由图像可以看出当采用非优化角度进行数据处理时,得到的分离后转误差图像明显波动较大,通过仿真结果平均值也可以得到这个结论,选用优化角度时,后转误差平均值为 $2.866\mu\text{m}$,而仿真得到的后转误差平均值分别为 3.313 、 3.465 、 $3.364\mu\text{m}$,误差明显大于采用优化角度得到的结果,因此可以说明本文采用的优化方法是有效的。

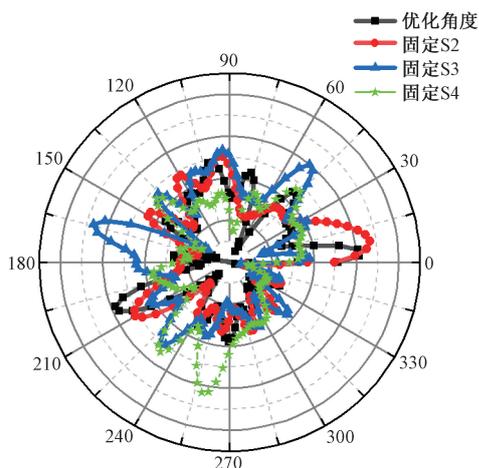


图21 随机安装角度与优化角度所得后转误差对比
Fig. 21 Comparison of rotation error between random installation angle and optimized angle

此外,谐波级次的选择对于后转误差的测量数据采集影响较小,仅对实验数据的处理产生影响。选用对应谐波级次下的最佳权值系数和安装角度进行数据处理,可以得到更为准确的测量结果,虽然每个谐波级次下的最佳安装角度不同,但每个传感器均有较适合的取值范围。以四点法为例,取第一个传感器的角度为 0 ,则其余3个传感器的推荐取值范围分别为 $[0, \pi/4]$ 、 $[\pi/4, 3\pi/2]$ 及 $[3\pi/2, 2\pi]$ 。

4 结 论

本文通过研究四点法误差分离的矩阵算法模型,使用遗传算法作为求解工具,并对传统遗传算法中的交叉概率因子和变异概率因子进行了改进,提高了优化求解时收敛速度,同时削弱了传统遗传算法对于初始值的依赖性。使用改进遗传算法对影响误差分离精度的权值系数和各传感器安装角度进行了优化,实验结果表明本文所用的方法可以有效的分离出主轴的形状误差和径向后转误差且具有较高精度。为后续的后转研究做好了铺垫,也为他人对机床主轴的测量精度研究提供了理论依据和参考。

参考文献

- [1] 青木保雄,大园成夫. 三点法真圆度的测定法展开[J]. 精密机械, 1966, 32(12):27-32.
AOKI Y, SHIGEO O. Research of three-point method roundness error measurement [J]. Precise Machinery 1966,32(12):27-32.
- [2] WHITEHOUSE D J. Some theoretical aspects of error separation techniques in surface metrology[J]. Journal of Physics E Scientific Instruments, 1976, 9(7):531-536.
- [3] 金岸,缪寅宵,刘冬冬,等. 主轴动态后转误差测量技术[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10):2228-2231.
JIN AN, MIAO Y X, LIU D D, et al. Measurement technology of spindle dynamic rotation error [J]. Optical Precision Engineering, 2020, 28(10):2228-2231.
- [4] 刘思遥,黄美发,张政泼. 基于多变量优化的机床主轴后转误差分离研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(7):85-87.
LIU S Y, HUANG M F, ZHANG ZH P. Research on spindle rotation error separation based on multivariable optimization [J]. Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology, 2020(7):85-87.
- [5] 乔凌霄,陈江宁,陈文会,等. 一种基于多步法的高精密主轴后转误差分离算法[J]. 计量学报, 2018, 39(1):6-9.
QIAO L X, CHEN J N, CHEN W H, et al. An algorithm of high precision spindle rotation error separation based on multi-step method [J]. Acta Metrologica Sinica,

- 2018,39(1):6-9.
- [6] 魏许杰,王红军,王泽. 基于新的时域三点法的机床主轴回转误差研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(11):84-91.
WEI X J, WANG H J, WANG Z. Research on spindle rotation error of machine tool based on new time domain three-point method [J]. Modular Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2019(11):84-91.
- [7] 郭学庆,杨赫然,孙兴伟. 一种主轴回转误差测量方法的研究[J]. 机床与液压, 2018,46(16):99-102.
GUO X Q, YANG H R, SUN X W. Research on a measurement method of spindle rotation error [J]. Machine Tools and Hydraulics, 2018,46(16):99-102.
- [8] 雷贤卿,李言,周彦伟,等. 3点法圆度误差分离技术的新算法[J]. 兵工学报, 2007,28(1):73-77.
LEI X Q, LI Y, ZHOU Y W, et al. A new algorithm for roundness error separation using 3-point method [J]. Acta Ordnance Engineering, 2007,28(1):73-77.
- [9] 任宁,宋德玉,陈岁繁. 四点法圆度检测中测头最佳角位置的研究[J]. 现代制造工程, 2016(1):118-123.
REN N, SONG D Y, CHEN S F. Research on the best angle position of probe in roundness detection by four point method [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(1):118-123.
- [10] YOU X X, HU F X, DONG SH CH, et al. Shape optimization approach for cambered otter board using neural network and multi-objective genetic algorithm[J]. Applied Ocean Research, 2020(7):1-3.
- [11] 刘辉,曾鹏飞,巫乔顺,等. 基于改进遗传算法的转炉炼钢过程数据特征选择[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12):187-189.
LIU H, ZENG P F, WU Q SH, et al. Feature selection of converter steelmaking process data based on improved genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12):187-189.
- [12] 郭世杰,武建新,乔冠,等. 数控机床几何误差正弦低次多项式参数化建模与应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(10):137-139.
GUO SH J, WU J X, QIAO G, et al. Parametric modeling and application of sinusoidal low order polynomial for geometric error of CNC machine tools [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(10):137-139.
- [13] 邓聪颖,冯义,魏博,等. 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[J]. 仪器仪表学报, 2019,40(10):227-236.
DENG C Y, FENG Y, WEI B, et al. Feature selection of converter steelmaking process based on the improved genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(10):227-236.
- [14] 罗志远,丰硕,刘小峰,等. 一种基于分步遗传算法的多无人清洁车区域覆盖路径规划方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(8):43-46.
LUO ZH Y, FENG SH, LIU X F, et al. An area coverage path planning method for multiple unmanned cleaning vehicles based on stepwise genetic algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2020, 34(8):43-46.
- [15] 汪杰军,刘江宽,黄喜军,等. 基于混合遗传蚁群算法的数字微流控芯片测试路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2017,31(8):1185-1189.
WANG J J, LIU J K, HUANG X J, et al. Test path planning for digital microfluidic chip based on hybrid genetic ant colony algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017,31(8):1185-1189.
- [16] 刘浩然,赵翠香,李轩,等. 一种基于改进遗传算法的神经网络优化算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7):1574-1577.
LIU H R, ZHAO C X, LI X, et al. A neural network optimization algorithm based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016,37(7):1574-1577.

作者简介



杨赫然, 分别于 2006 年、2008 年和 2012 年在吉林大学获得学士、硕士和博士学位, 现为沈阳工业大学机械工程学院讲师, 主要研究方向为复杂曲面数字化制造技术与装备。

E-mail: yangheran@sut.edu.cn

Yang Heran received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Jilin University in 2006, 2008 and 2012, respectively. He is currently a lecturer at Shenyang University of Technology. His main research interests include digital manufacturing technology and equipment of complex surface.



孙兴伟(通信作者), 分别于 1992 年和 1995 年在沈阳工业大学获得学士和硕士学位, 于 2006 年在天津大学获得工学博士学位。现为沈阳工业大学机械工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂曲面测量与数控加工轨迹优化、数控技术与专用集成数控系统、CAD/CAM/CAE 技术等。

E-mail: sunxingw@126.com

Sun Xingwei (Corresponding author) received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Shenyang University of Technology in 1992 and 1995, and received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2006. She is currently a professor and a doctoral supervisor in the School of Mechanical Engineering at Shenyang University of Technology. Her main research interests include complex surface measurement and NC machining trajectory optimization, CNC technology and dedicated integrated CNC system, and CAD/CAM/CAE technology.