

文章编号: 2095-4980(2020)04-0729-05

基于改进粒子群算法的平面度测量误差

王海彦

(驻马店职业技术学院 机电工程系, 河南 驻马店 463000)

摘要: 为了准确评定平面度测量误差, 采用改进粒子群算法。建立平面度误差评定的数学模型; 对基本粒子群算法改进, 包括基于双 sigmoid 型乘积隶属函数的惯性权重控制过程、基于 Triangle 函数的自适应调节粒子位置过程、适应度函数选择方法; 给出了算法终止条件以及算法流程。实验仿真显示改进粒子群算法收敛较快, 与其他算法相比平面度误差结果比较小, 30 次实验平均值为 9.496 μm ; 标准差为 0.048 2 μm , 相比其他算法较小, 有效提高平面度测量精确度。

关键词: 惯性权重; 平面度; 误差; 位置

中图分类号: TN06; TH16; TH701 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2019358

Flatness measurement error based on improved particle swarm optimization

WANG Haiyan

(Department of Technical and Electrical Engineering, Zhumadian Vocational and Technical College, Zhumadian Henan 463000, China)

Abstract: Improved particle swarm algorithm is adopted in order to evaluate the flatness measurement error accurately. Firstly, mathematical model of flatness error evaluation is established. Secondly, particle swarm algorithm is improved, which is included inertia weight control based on membership function of double sigmoid type, Triangle function adjustment process, and selecting fitness function. Finally, the algorithm termination condition and flow are given. Experimental simulation results show that the convergence of improved particle swarm optimization algorithm is fast, the flatness error is 9.496 μm at an average of 30 experiments, which is smaller than that of other optimization; the standard deviation of the experiment is 0.048 2 μm , which is smaller than that of other algorithms as well, so that the evaluation precision is improved effectively.

Keywords: inertia weight; flatness; error; location

平面度是自动加工零件尺寸的主要几何要素之一, 在许多场合决定了仪器和机器精确度、性能、质量^[1-2]。平面度误差测量方法主要有: 平板检测法需要桥板和电子水平仪结合使用^[3], 数字式电子水平仪在各截面测量方向的不一致导致测量结果误差较大, 测量误差与水平面偏离角度相关, 效率低而且比较费时; 基于最小二乘拟合和三点法的平面度误差评定^[4], 属于近似方法, 评定结果得到的误差值往往大于规定的公差值, 不符合最小条件判定原则, 还要进一步用最小区域法判断是否合格; 水平仪法操作过程中需要不断移动仪器位置^[5], 后期需要数据处理分析; 自准直仪法由于操作过程中受环境因素影响^[6], 精确度无法提高; 凸包法理论明确, 易于编程实现^[7], 但是最小包容区域的确定非常困难, 当所计算的数据点的最小条件符合交叉准则或直线准则时, 所得到的结果就会偏离实际值, 存在一定的误差。计算几何法运用计算几何中的有关理论方法评定平面度误差, 保留有效测量点^[8], 但是多余的测量点一般不好剔除, 导致测量误差较大。智能算法如遗传算法、粒子群算法、人工神经网络算法等^[9-10], 遗传算法在进行平面度误差评定优化计算时, 容易受个体数据的影响, 局部搜索性能较差, 可能会出现早熟情况, 当种群数目庞大时, 计算所需要的迭代次数较多, 函数收敛速度并不理想; 粒子群算法在运算后期易于陷入局部寻优解, 无法获得全局最优解; 人工神经网络算法需要大量的测量数据作为支撑, 而且算法比较复杂, 运行时间太长, 导致其在应用中受到一些限制, 很难被操作人员掌握和实现在线测量。

收稿日期: 2019-09-21; 修回日期: 2019-10-19

作者简介: 王海彦(1982-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为控制理论与控制工程。email:2048353384@qq.com

本文采用改进粒子群算法,主要通过双 sigmoid 型乘积隶属函数对惯性权重控制、Triangle 函数对粒子位置自适应调节,适应度函数选择中引入非零因子,结合获取的测量点数据,进行平面度误差计算和仿真,改进粒子群算法的平面度误差结果比较小,有效提高平面度误差的评定精确度。

1 平面度测量误差数学模型

设 (x_i, y_i, z_i) 是被测平面上 n 个点的坐标值^[11-12], 参考平面方程为:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

式中: A, B, C 为 3 个待估计的参数, D 为常数。

被测点 (x_i, y_i, z_i) 到参考平面的距离之差 d :

$$d = \frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2)$$

则最小包容条件下的平面度误差值为:

$$F_{\text{error}} = \min[\max(d) - \min(d)] \quad (3)$$

这样转化为对参数 A, B, C 值求解的问题。

2 改进粒子群算法

2.1 改进策略

2.1.1 基于双 sigmoid 型乘积隶属函数的惯性权重控制过程

惯性权重控制过程通过双 sigmoid 型乘积隶属度函数 μ 实现:

$$\begin{cases} w' = \mu w \\ \mu(t, a_1, c_1, a_2, c_2) = \frac{1}{1 + e^{-a_1(t-c_1)}} - \frac{1}{1 + e^{-a_2(t-c_2)}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: w 为惯性权重; t 为迭代次数; a_1, c_1, a_2, c_2 为参数值。本文设置 $t_1=80, t_2=200$ 。通过 μ 对 w 控制, μ 随迭代次数 t 的变化过程如图 1 所示。从图 1 可以看出, 在开始时刻, μ 随着迭代次数 t 增加, 搜索空间在增大, 主要进行全局搜索, 以便尽快获得全局最优解, 这样加快了收敛速度; 当到一定代数之后, 保持一定的恒定值, 利于稳定性搜索, 以免数据坍塌出现; 然后逐步减小, 缩小搜索空间, 有利于局部搜索和得到更为精确的最优解, μ 起到平衡全局搜索和局部搜索的作用。

2.1.2 基于 Triangle 函数的自适应调节粒子位置过程

在对位置进行更新过程中, 初始阶段要求粒子位置改变较大; 运行后期或者大于某个次数阈值时, 要求粒子位置改变较小, 自适应调节通过 Triangle 函数实现:

$$\begin{cases} x_{i,j}^{t+1} = kx_{i,j}^t + (1-k)v_{i,j}^{t+1} \\ k = \max\left(\min\left(\frac{t-a}{b-a}, \frac{c-t}{c-b}\right), 0\right) \\ v_{i,j}^{t+1} = \mu v_{i,j}^t + r_1 \alpha [p_{i,j} - x_{i,j}^t] + r_2 \beta [p_{i,j} - x_{i,j}^t] \end{cases} \quad (5)$$

式中: k 为 Triangle 函数; a, b, c 为参数, 本文设置为 3, 6, 8; r_1, r_2 为常数; $v_{i,j}^t$ 是第 i 个粒子在 j 维空间第 t 次迭代时的速度; $x_{i,j}^t$ 是 $v_{i,j}^t$ 对应的空间位置; $p_{i,h}$ 为全局最优值; $p_{i,h}$ 为个体最优值; α, β 为 $[0,1]$ 之间相互独立的随机函数; μ 对粒子速度起到加速的作用, 从而对粒子的位置进行调节。 k 随迭代次数 t 变化过程如图 2 所示。

从图 2 可以看出, k 在初始阶段线性上升, 满足粒子位置在寻优前期进行大范围搜索的要求, 可提高搜索的全局性能; 随后逐渐线性下降, 进行小范围搜索, 提高搜索的局部性能。

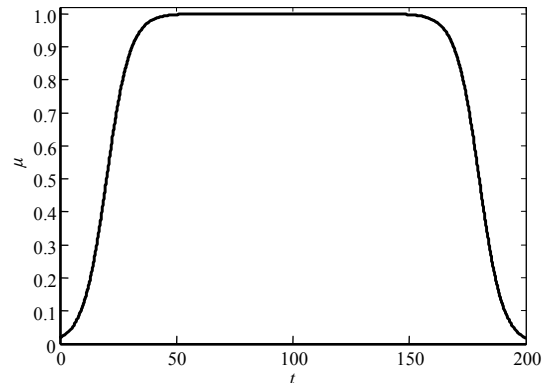


Fig.1 μ changing with iteration number t

图 1 μ 随迭代次数 t 变化情况

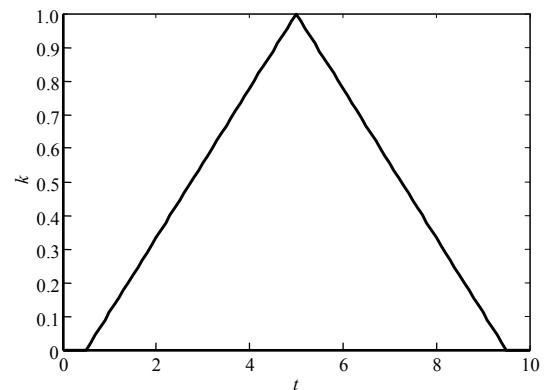


Fig.2 k changing with iteration number t

图 2 k 随迭代次数 t 变化过程

2.2 适应度函数选择

在求解粒子群算法全局最大值的优化问题当中^[13]，适应度函数 $fitfun(x)$ 通常选择目标函数 $f(A,B,C)_{\min}$ 本身，按各进化值计算适应度值，本文针对平面度误差最小值求解问题选择的适应度函数为：

$$fitfun(x) = \frac{1}{\varepsilon + f(A,B,C)_{\min}} \tag{6}$$

式中引入非零因子 ε ，本文为 0.001 5，避免分母为零。

2.3 算法终止条件

智能算法优化搜索到最优值附近时^[14-15]，根据微小误差准则：在工程计算中，随机效应引起误差小于总误差 1/3 时，该误差可忽略。改进粒子群算法对评定平面逼近极小值时， A, B, C 对误差判定的贡献值为 $(x-x_0)u_A, (y-y_0)u_B, (z-z_0)u_C$ 。当 A, B, C 对误差判定的贡献值为微小值时，根据误差微小值准则，此时 A, B, C 的忽略条件为：

$$(x-x_0)u_A = (y-y_0)u_B = (z-z_0)u_C = \frac{\sqrt{2}u_f}{3} \tag{7}$$

式中： u_A, u_B, u_C 为测量误差； u_f 为理论误差。得出：

$$u_A = u_B = u_C = \frac{\sqrt{2}u_f}{3L} = 0.467 \frac{u_f}{L} \tag{8}$$

式中 L 为测量步长，本文选取 0.2 mm。

即搜索 A, B, C 的值时， A, B, C 的变化范围在理想值 $\pm 0.467u_f/L$ 范围内时，由 A, B, C 引起的误差可以忽略，因此可将 $\pm 0.467u_f/L$ 作为寻优最小搜索范围；当搜索 A, B, C 范围小于这个最小范围时，算法结束，此时逼近最优值距离小于该值，根据误差微小值准则存在，继续逼近最优值失去意义。算法流程如下：

- 步骤 1) 初始化粒子的速度和位置，设置好进化代数最大为 200 次；
- 步骤 2) 根据粒子的适应度值，获得初始解；
- 步骤 3) 进行粒子惯性权重及位置更新，采用式(5)、式(6)；
- 步骤 4) 判断全局最优值是否满足寻优最小搜索范围要求，或算法迭代已达到设置的进化代数，若满足，则迭代结束，并输出最终的全局最优值作为问题的解；否则继续迭代，重复步骤 3)~4)。

3 实验验证

采用英国 LKG90 三坐标测量机作为检测设备，该设备测量长度示值精确度 $2.5 \mu\text{m} + L/300$ ， L 为测量步长，重复测量精确度是 $1.8 \mu\text{m}$ ，被测平板大小为 $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ，放置于三坐标测量机的测量平台上，并使被测工件的长边平行于 X 轴，在 X 轴方向按均匀间隔 1 mm 取 20 个点，采用自动扫描功能进行提取，获得实验数据为三维坐标点形式，如图 3(a)所示；同样使被测工件的短边平行于 X 轴，在 X 轴方向按均匀间隔 0.5 mm 取 20 个点，采用自动扫描功能进行提取，获得实验数据为三维坐标点形式，如图 3(b)所示。

对测量数据处理过程中，参数设置：粒子群数量为 150 个，最大迭代次数为 200，学习因子均为 1.458 9， $w=0.972 6$ ，理论误差设为 $7 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ，测量步长 L 取 0.2 mm。把图 3 中的三维数据代入到粒子群中，仿真通过 Matlab 实现，与基本粒子群算法的目标函数值迭代对比曲线如图 4 所示。

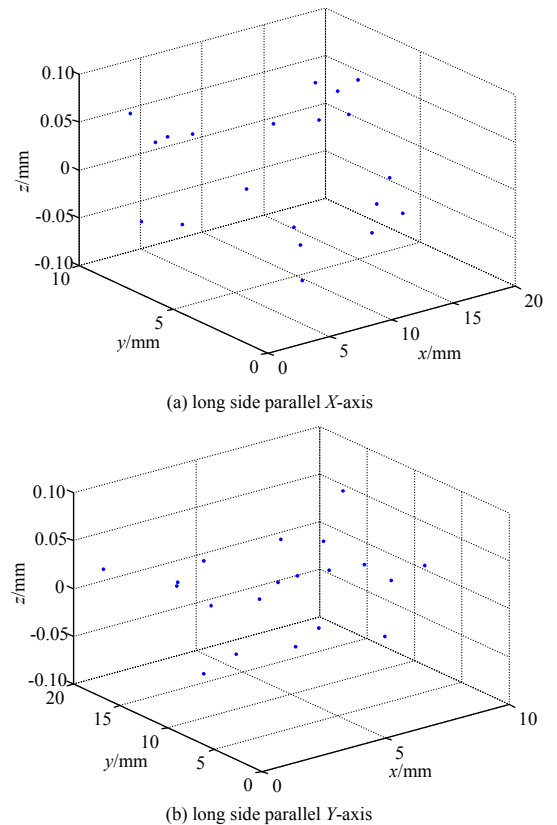


Fig.3 Measurement data
图 3 测量数据

从图 4 中可以看出,基本粒子群算法对目标函数值求解的最优值需要经历 140 次左右迭代才能够趋于稳定,改进粒子群算法优化程度进一步得到提高,只需要大约经过 100 次左右迭代,其目标函数值的最优解可趋于稳定,相比基本粒子群算法需要迭代次数减少较多。

在稳定收敛条件下, Matlab 进行 30 次蒙特卡罗方法处理,获得 A, B, C 三个参数值以及常数 D 值如图 5 所示。通过计算获得图 5 的平均值为 $A=0.0047, B=0.0018, C=0.0072, D=1.0612$, 最后计算工件的平面度误差为 $9.426 \mu\text{m}$, 依次与其他方法比较,涉及到的算法有最小二乘法、凸包法、计算几何法、遗传算法、基本粒子群算法,对图 2 的数据进行 30 次蒙特卡罗方法处理,每次不同算法的平面度误差比较结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,本文算法与其他算法相比平面度误差结果比较小,30 次实验平均值为 $9.496 \mu\text{m}$; 本文算法的数据标准差为 $0.0482 \mu\text{m}$, 比其他算法较小,有效提高平面度误差的评定精确度。最小二乘法中存在最小值和极值的误解,极值不一定是最小值,误把极小值作为最小值;凸包法需要设置限制条件,否则存在没有唯一解;计算几何法过多地依赖于坐标参数的选取,缺乏几何不变性;遗传算法收敛时存在收敛于局部最优,难于达到全局最优;基本粒子群算法收敛时不能以概率 1 收敛于全局最优点,原因是种群多样性随迭代次数增加而快速下降,粒子多样性差,会使算法不能跳出局部极值点而过早收敛,从而影响全局搜索能力。

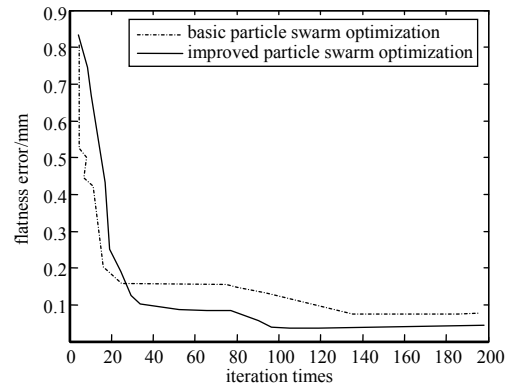


Fig.4 Iterative comparison of objective function value
图 4 目标函数值迭代对比

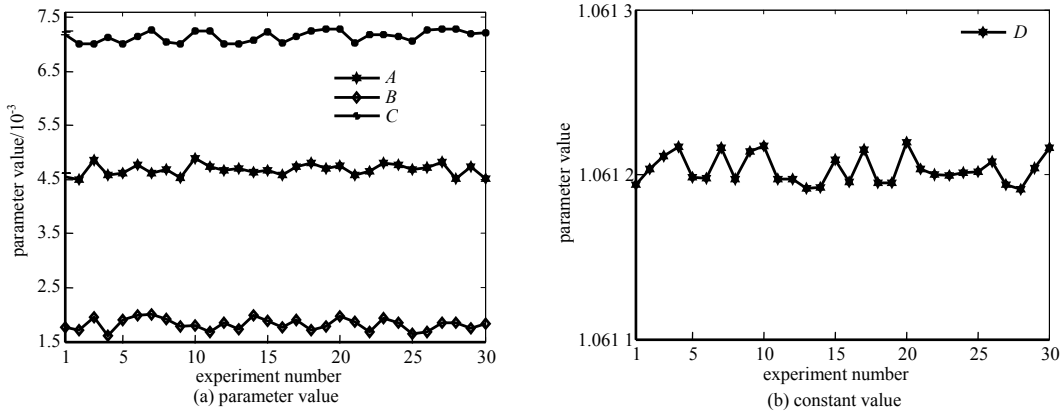


Fig.5 Parameter value and constant value of flatness measurement estimation

图 5 平面度测量估计的参数值以及常数值

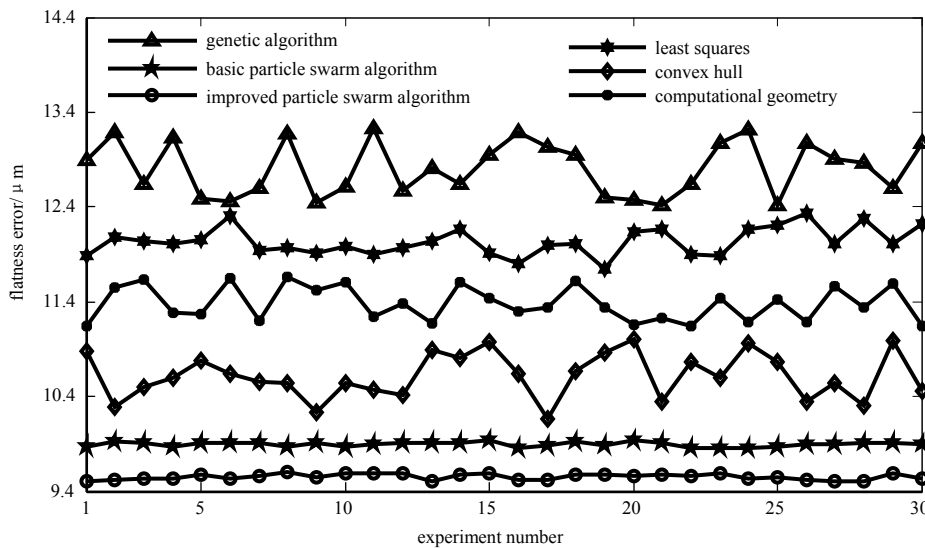


Fig.6 Comparison results of flatness errors of different algorithms

图 6 不同算法的平面度误差比较结果

4 结论

本文通过双 sigmoid 型乘积隶属函数对惯性权重控制, 在开始时刻搜索空间逐渐变大, 后期搜索空间变小; Triangle 函数对粒子位置自适应调节, 初始阶段改变较大, 后期改变较小; 算法终止条件结合了微小误差准则。改进粒子群算法的平面度误差结果比较小, 30 次实验平均值为 9.496 μm , 本文算法的数据标准差为 0.048 2 μm , 有效提高平面度误差的评定精确度, 为平面度测量误差提供一种新的方法。

参考文献:

- [1] WINER L K, WEN Xiulan, WANG Fenglin. Flat epithelial atypia and the risk of sampling error: determining the value of excision after image-guided core-needle biopsy[J]. *The American Journal of Surgery*, 2019, 218(4): 730–736.
- [2] WANG C H, SUN X K, ZHANG J Z. Uncertainty analysis of trench film cooling on flat plate[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156(25): 562–575.
- [3] ZHAN D D, CHEN S Y, PENG X Q, et al. Absolute flat test using rotated and multi-shifted maps with relative tilt measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 114(3): 121–128.
- [4] AMIT R, SENGUPTA A S. Least square ellipsoid fitting using iterative orthogonal transformations[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2017, 314(1): 349–359.
- [5] NGO L C, CHOI H G, MUHAMMAD S F. Treatments of the singularity in the level set method for unstructured meshes[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2019, 162(15): 34–50.
- [6] 吴呼玲. 基于蒙特卡罗法的平面度测量不确定度评定[J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25(5): 262–265. (WU Huling. Uncertainty evaluation of flatness measurement based on Monte Carlo method[J]. *Computer Measurement & Control*, 2017, 25(5): 262–265.)
- [7] 柴光耀, 孙长敬, 单越康. 基于新型凸包法的平面度误差评定[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2016(4): 97–100. (CHAI Guangyao, SUN Changjing, SHAN Yuekang. The evaluation of flatness error based on a new convex hull method[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2016(4): 97–100.)
- [8] 雷贤卿, 李飞, 涂鲜萍, 等. 评定平面度误差的几何搜索逼近算法[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1312–1317. (LEI Xianqing, LI Fei, TU Xianping, et al. Geometry searching approximation algorithm for flatness error evaluation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1312–1317.)
- [9] LI P, DING X M, TAN J B, et al. A hybrid method based on reduced constraint region and convex-hull edge for flatness error evaluation[J]. *Precision Engineering*, 2016, 6(45): 168–175.
- [10] WEN X L, HUANG J C, SHENG D H, et al. Conicity and cylindricity error evaluation using particle swarm optimization[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(2): 338–344.
- [11] 王灿, 许本胜, 黄美发. 正交试验下平面度误差区域搜索评定[J]. *制造业自动化*, 2015, 37(8): 102–103. (WANG Can, XU Bensheng, HUANG Meifa. The evaluation of flatness based on orthogonal test[J]. *Manufacturing Automation*, 2015, 37(8): 102–103.)
- [12] 单忠德, 张飞, 聂军刚, 等. 非接触式缸盖平面度误差检测方法 with 测量系统研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(20): 1–7. (SHAN Zhongde, ZHANG Fei, NIE Jungang, et al. Study on the detection method and measurement system of head flatness error on non-contact detection[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(20): 1–7.)
- [13] 杨健, 赵宏宇. 浮点数编码改进遗传算法在平面度误差评定中的研究[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3): 706–711. (YANG Jian, ZHAO Hongyu. The research of floating-point coding improved genetic algorithm in flatness error evaluation[J]. *Editorial Office of Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(3): 706–711.)
- [14] 王傲胜. 基于测量不确定度的平面度误差搜索范围研究[J]. *计量学报*, 2017, 38(2): 168–170. (WANG Aosheng. Research on search area for flatness error based on the measurement uncertainty[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017, 38(2): 168–170.)
- [15] 杜清福. 合作式粒子群优化算法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2016, 14(2): 276–281. (DU Qingfu. Cooperative particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2016, 14(2): 276–281.)