

# 基于改进粒子群算法的圆柱度误差评定\*

喻晓<sup>1</sup>, 彭建喜<sup>1</sup>, 刘建萍<sup>2</sup>

(1. 佛山职业技术学院 电子信息系, 广东 佛山 528137;

2. 佛山职业技术学院 机电工程系, 广东 佛山 528137)

**摘要:** 根据新一代 GPS 标准, 建立了符合最小区域条件的圆柱度评定的数学模型。提出了一种带交叉算子的改进粒子群优化算法, 并以此对圆柱度测量数据进行最小区域评定, 给出了该算法的实现方法。经实例验证, 该方法可以在新一代 GPS 标准下更快速、准确地评价圆柱度误差。

**关键词:** 新一代 GPS; 圆柱度; 评定; 粒子群优化算法; 交叉算子

中图分类号: TH124

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)15-0074-04

## Cylindricity error evaluation based on improved particle swarm optimization

Yu Xiao<sup>1</sup>, Peng Jianxi<sup>1</sup>, Liu Jianping<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Foshan Polytechnic, Foshan 528137, China;

2. Department of Mechanical Electronic, Foshan Polytechnic, Foshan 528137, China)

**Abstract:** Based on the new generation of GPS, a mathematical model for cylindricity measurement of minimum zone condition is given. According to the characteristics of cylindricity error evaluation, an improved particle swarm optimization (PSO) with hybrid gene is proposed to evaluate the mathematical model by measured data. Finally the result of example verifying shows that the feasibility and availability of the method.

**Key words:** the new generation of GPS; cylindricity; evaluation; particle swarm optimization(PSO); hybrid genes

随着现代精密和超精密加工技术以及纳米技术的迅速发展与应用, 对机械产品制造精度的要求不断提高。传统的以几何学为基础的第一代产品几何技术规范由于在误差评定模型、数据采集方法等方面存在经验性、随意性等缺点, 已经不能完全适应现代制造业对误差评定既准且快的要求<sup>[1]</sup>。近年来, 随着以计量学为基础的新一代产品几何技术规范 GPS (Geometrical Product Specification and Verification) 系列标准的出现, 对形状误差的规范评定提出了新的要求。

在形状误差的几种要素中, 圆柱度误差作为衡量轴类零件形状误差的主要指标, 其精度的高低对产品的质量及其使用寿命有着至关重要的影响, 能否实现圆柱度误差快速、准确的评定具有重要的实际意义。因此, 本文以圆柱度精度检测为例, 依据新一代 GPS 形状误差规范认证标准, 提出一种带交叉算子的改进粒子群优化算法

应用于圆柱度测量数据的最小区域评定。该算法借鉴了遗传算法中的选择交叉操作, 通过交叉增加粒子多样性, 充分利用群体粒子的优良特性, 跳出局部最优的同时也加快了收敛速度。

### 1 基于新一代 GPS 标准体系的圆柱度误差评定的数学模型

在新一代 GPS 标准体系中, 操作是为了规范几何产品的误差评定而提出的概念, 是获得几何要素的特征值及特征的几何变动范围(极限值)的基本数学工具。操作分为要素操作和评估操作。其中, 要素操作中的拟合操作定义了基于计量数学的各种拟合目标函数, 且用  $L_p$  范数定义了最小二乘、最小区域、单边切比雪夫目标函数的统一数学模型<sup>[1]</sup>。 $L_p$  范数的定义为:

$$L_p\text{-norm} = \left[ \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n |r_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \right]_{n \rightarrow \infty} \quad (1)$$

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50865003)

# 技术与方法

## Technique and Method

式中,  $i$  为非理想要素(即实际被测几何要素)上特定点的序号;  $p$  为函数的级数;  $n$  为所采用的非理想要素点的个数;  $r_i$  为对应于从非理想要素到所拟合的理想要素距离的余量。

最小区域法目标函数的定义是使余量绝对值中的最大值为最小, 令式(1)中的  $p = \infty$ , 即:

$$\min(L_{\infty}\text{-norm}) = \min\left\{\left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n |r_i|^p\right)^{\frac{1}{p}}\right]\right\}_{n \rightarrow \infty, p \rightarrow \infty} \quad (2)$$

在圆柱度拟合操作中, 由于圆柱度误差是单一实际圆柱所允许的变动全量。因此, 按最小区域法评定的平面度误差的关键是寻求某一圆柱面, 计算被测轮廓上各测量点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 到此圆柱面轴线的距离, 令各距离中的最大最小值之差为最小, 则此距离差即为圆柱度误差值, 如图 1 所示。

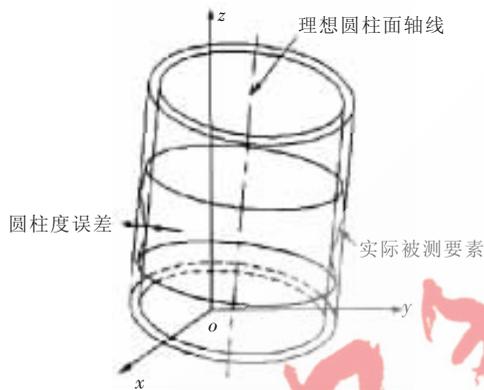


图 1 圆柱度误差示意图

设理想圆柱面的轴线方程为:

$$\frac{x-a}{l} = \frac{y-b}{m} = \frac{z-c}{n} \quad (3)$$

其中,  $l, m, n$  为理想圆柱面轴线  $L$  的方向向量。则第  $i$  个点  $(x_i, y_i, z_i)$  到此轴线的距离  $d_i$  为:

$$d_i = \sqrt{(x_i-a)^2 + (y_i-b)^2 + (z_i-c)^2 - \frac{[l(x_i-a) + m(y_i-b) + n(z_i-c)]^2}{l^2 + m^2 + n^2}} \quad (4)$$

圆柱面度误差的最小区域目标函数即为:

$$f(a, b, c) = \min[\max(d_i) - \min(d_i)] \quad (5)$$

在以往的圆柱度评定过程中, 一般令  $c=0, n=1$ , 从而将式(5)中的六个变量简化为四个变量, 以减小计算难度及复杂度。但这种做法的前提是假设轴为垂直放置, 轴线平行于  $Z$  轴, 且轴线起点的  $Z$  坐标位置为零。而在实际情况中, 被测圆柱面往往会因加工或定位误差导致轴线偏差, 此时使用简化后的公式是无法得到精确的评定结果的。因此, 本文针对六个变量的复杂目标函数, 提出基于遗传交叉算子的改进粒子群算法进行圆柱度误差评定, 以获得准确及高精度的评定结果。

## 2 基于遗传交叉算子的改进粒子群算法

### 2.1 基本粒子群算法

粒子群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种基于群体智

能理论的全局优化方法, 通过群体中粒子间的合作与竞争产生的群体智能指导优化搜索<sup>[2]</sup>。研究实践表明, PSO 在多维空间函数寻优、动态目标寻优等方面有着收敛速度快、非劣解质量高、鲁棒性好等优点, 特别适合于工程应用。但同时 PSO 也存在早熟收敛、搜索精度不高、后期迭代效率不高<sup>[3]</sup>的缺点。

在基本粒子群算法中, 每个优化问题被看作是搜索空间中的一个没有体积没有质量的飞行粒子, 粒子在每一次迭代中通过跟踪两个“极值”来更新自己: 一个是粒子自身目前找到的最优解, 即个体极值  $pbest$ ; 另一个是全局极值  $gbest$ , 即整个种群目前找到的最优解<sup>[4]</sup>。找到这两个最优解后, 粒子根据如下的公式来更新自己的速度和新的位置:

$$v_{ij}^{k+1} = \omega * v_{ij}^k + c_1 * r_1 * (pbest_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 * r_2 * (gbest_j^k - x_{ij}^k) \quad (6)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (7)$$

### 2.2 引入收敛因子模型的 PSO 算法

为有效地控制粒子的飞行速度, 使算法达到全局探测与局部开采两者间的有效平衡, Clerc M 在基本 PSO 的基础上, 构造了引入收敛因子模型的 PSO 算法<sup>[4]</sup>, 其位置更新方程同式(7), 速度更新方程如式(8)所示:

$$v_{ij}^{k+1} = K * [v_{ij}^k + c_1 * r_1 * (pbest_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 * r_2 * (gbest_j^k - x_{ij}^k)] \quad (8)$$

式中,  $K$  为收敛因子,  $K = \frac{2}{|2 - C - \sqrt{C^2 - 4C}|}$ ,  $C = c_1 + c_2$  且  $C > 4$ 。

实验结果表明<sup>[5]</sup>, 收敛因子  $K$  比惯性权重系数  $\omega$ , 更能有效地控制与约束粒子的飞行速度, 增强算法的局部搜索能力。因此, 本文在引入收敛因子模型的 PSO 算法基础上, 借鉴了遗传算法中的选择交叉操作, 提出了基于遗传交叉算子的改进粒子群算法。

### 2.3 基于遗传交叉算子的改进粒子群算法

基于遗传交叉算子的改进粒子群算法 (GHP SO) 借鉴了遗传算法中的组合交叉和变异思想, 通过采用交叉算子产生出代表新的解集的种群。其交叉方法如下: 每一次迭代中, 取排序后适应度好的前一半粒子直接进入下一代, 后一半粒子放入粒子选择池中两两配对, 产生一个随机交叉位置进行遗传选择和交叉操作, 生成和父代同样数目的子代后再和父代做比较, 选择适应度好的一半进入下一代, 以保持种群的粒子数目不变。这样通过交叉既可以增加粒子多样性, 跳出局部最优, 还可以加快收敛速度<sup>[3]</sup>。

设  $a, b$  分别表示被选择进行遗传选择和交叉操作的两个父代个体的指针, 则该操作的具体计算公式如下:

$$x_a^{k+1} = r_i x_a^k + (1.0 - r_i) x_b^k \quad (9)$$

$$x_b^{k+1} = r_i x_b^k + (1.0 - r_i) x_a^k \quad (10)$$

$$v_a^{t+1} = \frac{v_a^t + v_b^t}{\|v_a^t + v_b^t\|} \|v_a^t\| \quad (11)$$

## 技术与方法 Technique and Method

$$v_b^{t+1} = \frac{v_a^t + v_b^t}{\|v_a^t + v_b^t\|} \|v_b^t\| \quad (12)$$

经过上述计算,在由父代粒子形成的超立方体中随机产生了两个新的位置,其中在速率的交叉处将两个父代个体的速率之和的长度进行了规格化。因此,只有粒子的方向受到影响,数量却不会改变。该算法流程图如图2所示。

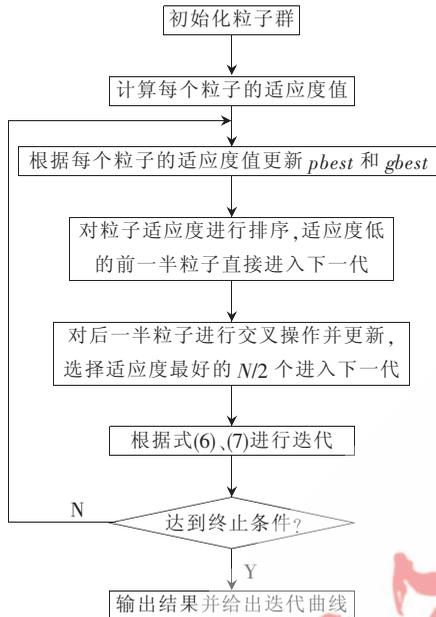


图2 算法流程图

## 3 实例验证与结果讨论

本文使用参考文献[6]给出的两组圆柱度误差的测量数据按照之前提出的数学模型和优化算法进行计算分析。根据圆柱度误差的特性并参考经典 PSO 参数集[7],本文设置算法的基本参数如下:

- (1) 粒子规模数  $n$ : 一般取 20~40, 本文取  $n=40$ ;
- (2) 粒子维数  $D$ : 由目标优化函数的自变量个数决定, 本文取  $D=6$ ;
- (3) 粒子范围: 根据测点的分布范围确定;
- (4) 最大速度  $v_{\max}$ : 由于圆柱度的误差较小, 设  $v_{\max} = 0.02$ ;
- (5) 最大迭代次数: 设为 500 次;
- (6) 终止条件: 循环达到终止迭代次数或最优适应度值连续迭代 50 次, 计算结果差值小于 0.000 000 1。

参考文献[6]分别应用最小区域法(MZM)和最小二乘法(LSM)对这两组数据进行了计算;参考文献[8]和参考文献[9]则分别应用了遗传算法(GAM)和基本粒子群算法(PSO)对这些数据进行计算分析。表1和表2为以上几种算法和本文使用 GHPSO 算法得到的结果。图3和图4分别为 GHPSO 算法计算这两组数据时的粒子适应度收敛曲线。由这些表和图中可以看出,本文针对同一组数据计算得出的结果明显优于遗传算法和基本粒子群算法,收敛过程迅速、稳定。

《微型机与应用》2011年第30卷第15期

表1 第一组数据计算结果比较

	圆柱度误差/mm	圆柱半径/mm
MZM <sup>[6]</sup>	0.183 96	59.989 505
LSM <sup>[6]</sup>	0.211 97	60.001 193 0
GAM <sup>[8]</sup>	0.183 957 4	59.989 505 5
PSO <sup>[9]</sup>	0.183 958 9	59.989 505 7
GHPSO	0.168 635 9	59.991 420 9

表2 第二组数据计算结果比较

	圆柱度误差/mm	圆柱半径/mm
MZM <sup>[6]</sup>	0.009 41	49.999 532 8
LSM <sup>[6]</sup>	0.010 37	49.999 911 0
GAM <sup>[8]</sup>	0.009 410 5	49.999 533 4
PSO <sup>[9]</sup>	0.009 412 2	49.999 534 2
GHPSO	0.009 410 1	49.999 561 9

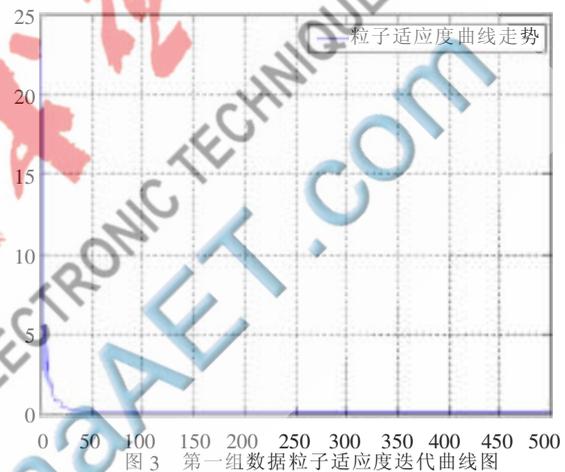


图3 第一组数据粒子适应度迭代曲线图

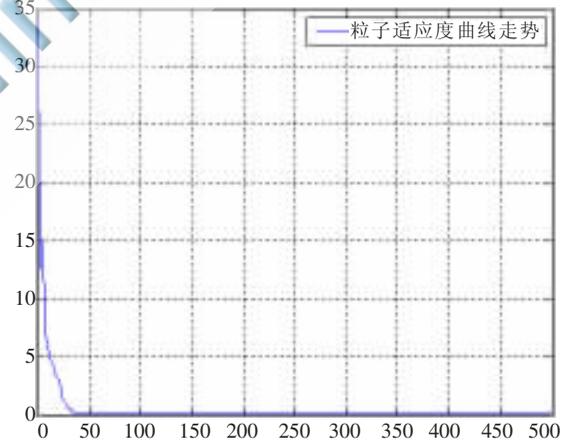


图4 第二组数据粒子适应度迭代曲线图

本文根据新一代 GPS 标准体系给出了圆柱度误差的定义及误差评定的数学模型,并将一种带交叉算子的改进粒子群优化算法应用于圆柱度误差评定,得到了较好的效果。该改进粒子群算法原理较简单,且计算效率高,相比其他几种算法可以更有效、准确地评定圆柱度误差。同时,将圆柱度误差的目标函数稍加改变,即可方便地应用于其他形位误差的评定。因此,该方法作为一种误差评定方法,对于规范形状误差的评定过程具有一

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 85

定的现实意义与参考价值。

#### 参考文献

- [1] 蒋向前. 新一代 GPS 标准理论与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [2] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory [C]. Proc. of the 6th Int'l Symp. on Micro Machine and Human Science. Nagoya, Japan:[s. n.], 1995.
- [3] ANGELINE P J. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization; Philosophy and performance differences[C]. Proc. of the 7th Annual Conf. on Evolutionary Programming. Germany: [s. n.], 1998.
- [4] CLERC M. The swarm and the queen: Towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization [C]. Proc. 1999 Congress on Evolutionary Computation. Washington, DC: [S], 1999.
- [5] EBERHART R C, HU X. Human tremor analysis using particle swarm optimization [C]. Proc. 1999 Congress on Evolutionary Computation. Washington, DC: [S], 1999.
- [6] FERREIRA C K. Verification of form tolerances, Part II: Cylindricity and straightness of a median line [J]. Precision Engineering, 1995, 17(2): 144-156.
- [7] CARLISLE A, DOZIER G. An off-the-shelf PSO [J]. Purdue School of Engineering and Technology, 2001(10): 20-21.
- [8] CHANGCAI C, RENSHENG C, DONG Y, et al. Research on the minimum zone cylindricity evaluation based on genetic algorithms [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(2): 167-170.
- [9] 崔长彩, 黄富贵, 张认成, 等. 粒子群优化算法及其在圆柱度误差评定中的应用[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 256-260.

(收稿日期: 2011-04-01)

#### 作者简介:

喻晓, 1981年生, 硕士, 助教, 主要研究方向: 新一代GPS 关键技术研究。