

文章编号 1004-924X(2017)03-0706-06

浮点数编码改进遗传算法在平面度误差评定中的研究

杨 健*, 赵宏宇

(成都理工大学 核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:随着智能制造系统的迅猛发展,应用元启发模式计算方法快速、准确地求解平面度误差值凸显出重大现实意义。为进一步提高平面度误差计算精度,研究了一种基于浮点数编码的改进遗传算法,在原有遗传算法的交叉变异基础上,引入模拟退火思想,建立最小包容区域法的数学模型,通过计算机仿真获得了最佳适应度收敛曲线和平均适应度收敛曲线,优化结果表明相比传统遗传算法,平面度误差计算精度提高了 33.67%。本算法采用浮点数编码、三段式交叉、转轮式选择和最优保存策略,借助模拟退火算法的局部搜索优势,提升了算法的整体性能,且更便于计算机编程,可进一步推广应用到智能测量仪器的其他高精度形位尺寸计算问题领域。

关键词:遗传算法;退火算法;最小包容区域;平面度误差评定

中图分类号: 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172503.0706

The research of floating-point coding improved genetic algorithm in flatness error evaluation

YANG Jian*, ZHAO Hong-yu

(College of Nuclear Technology and Automation Engineering,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

* Corresponding author, E-mail: yangjian@cduet.edu.cn

Abstract: With rapid development of intelligent manufacturing system, using Meta heuristic method to quickly and accurately calculate the flatness error is of great practical significance. To further improve the accuracy of flatness error calculation, an improved genetic algorithm based on floating-point coding was studied. In this method, the simulated annealing idea was introduced and a mathematic model for minimum zone method was established based on crossover and variation of the original genetic algorithm; and then the optimal fitness convergence curve and average fitness convergence curve were obtained through computer simulation. The optimization results show that compared with traditional genetic algorithm, the accuracy of flatness error calculation is improved by 33.67%. The algorithm adopts floating-point coding, three section cross, turning wheel selection and optimal preservation strategy; and its overall performance can be improved by local search advantage of the simulated annealing algorithm. Being more convenient for computer programming, the algorithm can be further applied to other high-accuracy position and dimension calculations of intelligent measuring instruments.

Key words: genetic algorithm; annealing algorithm; minimum zone; flatness error evaluation

收稿日期:2016-09-20;修订日期:2016-10-27.

基金项目:机器人,国家高技术 863-809 专题专家组;成都理工大学机械工程创新团队(No. 10912-JXTD201501)

1 引言

平面是构成机械零件的重要组成元素,平面的平整程度对于机械零件的可靠性、稳定性和寿命等都起着至关重要的作用。平面度客观的反映了实际平面相对理想平面的偏差值,随着智能制造系统的迅猛发展,应用元启发模式计算方法快速、准确地求解平面度值具有重大意义。

目前应用于平面度误差评定的智能算法有:美国辛辛那提大学 Sharma 研究的二进制遗传评定法^[1];台湾 Tseng 的实数编码遗传评定法^[2];国内华侨大学崔长彩研究的粒子群平面度误差评定法^[3];河南科技大学雷贤卿教授研究的几何搜索逼近评定法^[4];重庆大学罗钧等人研究的改进蜂群算法在平面度误差评定中的应用^[5]等。遗传算法具有强大的全局搜索能力^[6],且便于二次编程开发^[7],能够较为准确的解决平面度误差评定中最小包容区域法的优化计算问题,对比传统的最小二乘法、对角线平面法、三远点平面法具有满足平面度误差定义、精度高、方法流程简单易于编程等优点。但传统的遗传算法^[8]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,陷入局部最优解,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。针对以上问题,本文提出了一种基于浮点数编码的改进遗传退火算法,应用最小包容区域法平面度误差评定模型,结合获取的测量点数据,进行平面度误差计算和仿真。

2 最小包容区域法的平面度误差评定模型

根据国家标准 GBT11337-2004,最小包容区域法求解平面度误差,即在实际被测平面上下两侧,通过一定的方法确定两个平行的平面(Σ_1 , Σ_2),将所有被测点包容在内且满足两个平面之间的距离 φ 最小,该距离 φ 即为所求的平面度误差值,如图 1 所示。

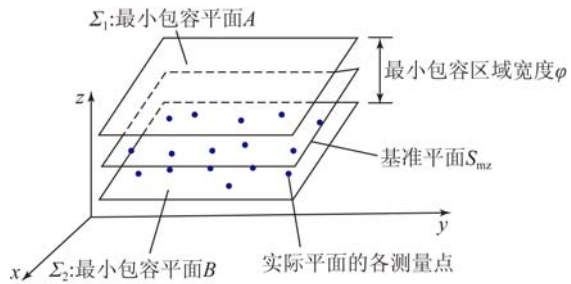


图 1 平面度最小包容区域
Fig. 1 Minimum zone of flatness

上下两个包容平面必须与实际被测平面有 3 个或以上点接触且满足:

(1)三角形准则:3 个高点点 1 个低点点(或相反),其中低点点(高点点)在另外一个平面上的投影落在 3 个高点点(低点点)所构成的三角形内部或一条边线上,如图 2 所示。

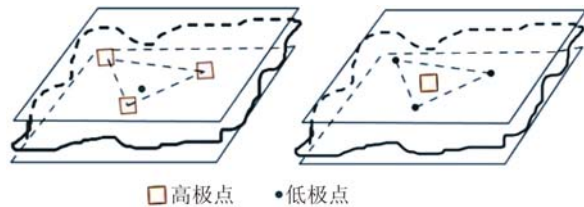


图 2 三角形准则
Fig. 2 Triangular criteria

(2)交叉准则:2 个高点点的连线与 2 个低点点的连线互相交叉,如图 3 所示。

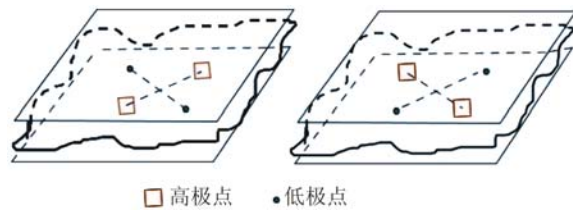


图 3 交叉准则
Fig. 3 Cross criteria

(2)直线准则:2 个高点点和 1 个低点点排列成直线(或相反),如图 4 所示。

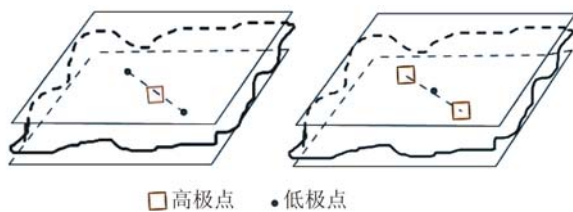


图 4 直线准则
Fig. 4 Linear criteria

通过三坐标测量机测量实际平面的各点为 $X_i(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 假设最小包容区域法确定的基准平面方程 S_{mz} 为 $z=qx+py+c$, 各个待测点到基准平面 S_{mz} 的垂直距离 D_i :

$$D_i = \frac{z_i - qx_i - py_i - c}{\sqrt{1+q^2+p^2}} (i=1, 2, \dots, n). \quad (1)$$

根据最小包容区域法原则, 实际平面的平面度误差值为两最小包容平面之间的距离值 φ , 即:

$$\varphi = \max(D_i) - \min(D_i) (i=1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得:

$$\varphi = \frac{\max(z_i - qx_i - py_i) - \min(z_j - qx_j - py_j)}{\sqrt{1+q^2+p^2}} (i, j=1, 2, \dots, n; i \neq j). \quad (3)$$

如图 1 所示的方式建立三坐标, 由于被测平面测量精度较高, 实际被测平面接近理想基准平面, 所以 $q, p \ll 1$, 故:

$$\varphi = \max(z_i - qx_i - py_i) - \min(z_j - qx_j - py_j) (i, j=1, 2, \dots, n; i \neq j). \quad (4)$$

通过一定的优化算法不断调整 q, p 值, 使得 $\varphi(q, p)$ 取得最小值:

$$\varphi(q, p)_{\min} = \min(\max(z_i - qx_i - py_i) - \min(z_j - qx_j - py_j)) (i, j=1, 2, \dots, n; i \neq j). \quad (5)$$

随着计算精度的提高 $\varphi(q, p)_{\min}$ 无限接近实际平面的平面度误差值, 这样平面度误差检测计算就转化为了只针对 q, p 值有关的离散型优化问题。

3 改进遗传算法

3.1 传统遗传算法

传统遗传算法在进行平面度优化计算的主要步骤为:

(1) 编码: 遗传算法计算的不是待测数据本身, 而是其对应的编码, 计算之前需要将实际数据预处理成为待计算编码, 目前应用较多的有一般二进制编码和实数编码;

(2) 种群初始化: 生成基因编码的定义区间, 从该区间内随机产生父代基因, 种群 POP 的规模越大算法搜索的全局性越好, 但对应的计算复杂度也越高;

(3) 适应度计算: 在求解全局最大值的优化问题当中, 适应度函数 $FitFun(x)$ 通常选择目标函数 $F(x)$ 本身, 将各编码值带入计算适应度值。平面度误差这类最小值求解问题通常采用的适应度函数为:

$$FitFun(x) = -F(x), \quad (6)$$

$$FitFun(x) = \frac{1}{\varepsilon + F(x)} (\varepsilon \neq 0), \quad (7)$$

式中插入一个非零的 ε 用来保证分母不为零。

(4) 选择: 一般采用转轮式选择法, 按照式(5)计算所得适应度高低确定所占转轮比例, 按照比例随机进行个体基因编码的选择和淘汰, 被选中的基因进行下一代计算, 淘汰的基因则从待解集中删除;

(5) 交叉和变异: 以一定概率(交叉概率)挑选一对基因从指定的编码位置断开分别交换另一半编码链组成新的基因。以一固定的概率(变异概率)在新的基因链中选取某一个编码进行变异, 实数编码变异范围为 $0 \sim 9$, 二进制变异则 $0, 1$ 相互转换, 进而生成新一代的基因编码;

(6) 重复以上步骤(3)~(6), 直到目标收敛获得最优解或达到其他停机条件。

3.2 浮点数编码的遗传-退火计算

遗传算法在求解平面度误差问题时, 由于待处理数据为实数, 传统的采用实数进行编码的方法减少了实数到二进制转化的映射误差, 数据理解更加方便, 但是并不利于计算机编程设计, 无法给实际应用和后续研究提供便利条件; 二进制编码方式一定程度上解决了这个问题, 但是由于字长限制和映射误差的存在, 其精度又无法进一步提升。另外, 遗传算法在计算的初期收敛速度非常快, 进入中期开始明显下降, 后期收敛速度极其缓慢, 基因选择时传统使用的转轮法和定概率变异法在前期有一定几率会淘汰全局最优解, 在后期容易陷入局部最优解, 无法得到理想的计算结果。本文研究一种基于浮点数编码机制, 结合模拟退火计算局部搜索优势的遗传-退火算法, 改善了原有算法局部搜索性能差的缺陷, 同时有效的控制了算法的遗传代数, 所得结果更加接近真实值。

3.2.1 模拟退火计算

高温物体的自然冷却过程,在冷却初期温度下降速度极快,其温度下降速度以一定的衰变系数减小直至常温。退火计算即模拟这一过程,在优化计算初期中,以较高的概率(初始温度 T_0)接受差解,其接受概率随着计算的进行逐步降低(衰减系数 k),最后达到停机条件(最终温度 T_n),得到最优解:

$$T_i = kT_{i-1} (i=1,2,\dots,n). \quad (8)$$

3.2.2 遗传-退火算法求平面度误差

在平面度误差检测问题当中,在传统的遗传算法基础上主要步骤:

(1)基因编码:采用浮点数编码,设置一个行向量用以保存各测量点数据,利用 double 型函数将各个被测点的数据转换成双精度型浮点数,以提高计算精度;

(2)初始化种群:初始种群规模 POP-SIZE,在定义域内随机产生父个体 $M(i)(i=1,2,\dots,POP-S)$;

(3)适应度函数计算: $FitFun(i) = \frac{1}{\epsilon + F(i)}$ ($i=1,2,\dots,n$),令 $\epsilon=0.001$;

$$P_i = \begin{cases} 1, & FitFun(i) > FitFun(i-1) \\ \exp\left[-\frac{FitFun(i-1) - FitFun(i)}{T_i}\right], & FitFun(i) \leq FitFun(i-1) \end{cases}, \quad (9)$$

其中:退火温度 T_i 、遗传进行的代数 i 和初始退火温度 T_0 的函数关系满足:

$$T_i = \frac{T_0}{\lg(1+i)}. \quad (10)$$

随着计算的进行, i 值变大,退火温度 T_i 降低,差解接受概率 P_i 降低,保证了最优解不被淘汰,算法流程如图 5 所示。

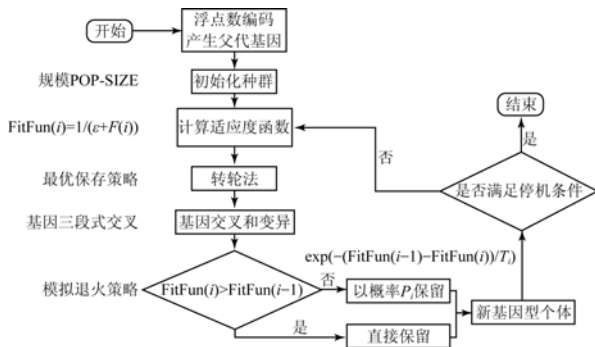


图 5 遗传-退火算法流程

Fig. 5 Flow diagram of genetic annealing algorithm

(4)选择方式:转轮法按照适应度高低比例淘汰基因。在此基础上,采用最优保存策略,以行向量保存每代适应度值较高的个体,使其直接进入下一代的计算,保存优良性状;

(5)基因交叉方式:由于本方法采用字长较长的浮点数对数据进行编码,为进一步提高函数的全局搜索性能,在原有的基因交叉断点 P_1 以外新增一个断点 P_2 ,将基因 $M(i)$ 分为三段 $M(u, v, w)$ (u, v, w 分别是原基因链在 P_1, P_2 两点处断开的三段基因编码),以 3 个基因 $M(i), M(i+1), M(i+2)$ 为一组分别交叉 u, v, w 编码段形成新的基因 $M'(i), M'(i+1), M'(i+1)$,以提高良好基因的产生几率;

(6)退火策略:在原有的交叉-变异基础之上,引入模拟退火思想,不直接淘汰适应度较低的基因,而是与上一代基因进行比较,并以一定概率接受进入下一代运算,在算法运行初期为了防止最优解的遗漏其接受概率较大,运行后期为了防止函数收敛于局部最优解,差解接受概率依然存在,只是较小,接受概率受退火温度影响,其具体关系为:

4 仿真与试验

为使算法与其他算法具有可比性,在此同样对文献[9]中的测量数据(表 1)进行计算处理。

种群规模 POP-SIZE 取 50,交叉概率取 0.80,变异概率取 0.05,最优保存个体比例取 0.2,退火初始温度 T_0 取 500,图 6 所示为最佳适应度收敛曲线,上面是平均适应度函数收敛情况,下面是最佳适应度函数的收敛情况,在 50 代左右取得最优解,优化结果 $q = -0.4443, p = -0.4960$,最后结果 $\varphi = 6.711 \mu\text{m}$,相比传统遗传算法 $8.97 \mu\text{m}$,精度提高 33.67%,效果明显。为方便比较,表 2 列出了各种常见算法的平面度误差计算优化结果。

表 1 平面度误差测量数据

Tab. 1 Measurement data of flatness error

(μm)

y 轴方向/cm	x 轴方向/cm									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	10.71	4.30	-2.69	-8.67	-13.63	-18.26	-22.04	-25.43	-28.58	-31.71
10	8.81	1.90	-5.00	-11.01	-16.19	-20.70	-24.50	-28.11	-30.99	-33.68
20	6.31	-0.82	-7.77	-14.03	-19.10	-23.86	-27.90	-31.66	-34.67	-37.13
30	4.01	-3.17	-10.22	-16.65	-21.86	-26.55	-30.64	-34.52	-37.59	-39.62
40	1.91	-5.24	-12.29	-18.53	-24.09	-28.91	-33.22	-37.05	-39.99	-41.96
50	0.80	-6.65	-13.93	-20.56	-26.03	-31.11	-35.52	-39.16	-41.96	-43.41
60	0.00	-7.38	-14.66	-21.10	-26.53	-31.42	-35.87	-39.24	-42.08	-43.93

表 2 常见方法平面度误差最优解对比

Tab. 2 Comparison of common method of flatness error of the optimal solution

算法	系数 q	系数 p	平面度 误差/ μm
	/ $(\mu\text{m} \cdot \text{cm}^{-1})/(\mu\text{m} \cdot \text{cm}^{-1})$		
最小二乘法	-0.483 2	-0.222 7	9.21
标准遗传算法	-0.482 0	-0.196 0	8.97
文献[10]	-0.487 7	-0.212 6	7.81
文献[11]	-0.488 1	-0.204 9	8.756
文献[12]	-0.488 11	-0.205 01	8.75
本文方法	-0.444 3	-0.395 68	6.711

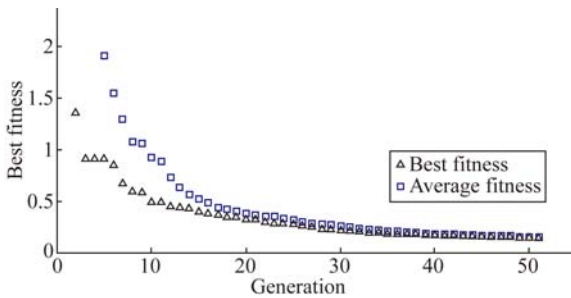


图 6 适应度收敛曲线

Fig. 6 Fitness convergence curves

5 结 论

本文针对最小包容区域法求解平面度误差,提出一种基于浮点数改进遗传-退火算法,实例仿真研究表明,该方法相比传统遗传算法在精度上提高

了 33.67%。利用退火算法的局部搜索性能、三段式基因交叉、最优保存策略改进遗传算法,不仅在合理的遗传代数内能有效地提高平面度误差的计算精度,而且更便于计算机编程。这种算法同时可推广应用于其他高精度形位公差测量中,对各种智能测量仪器的研发及创新设计提供了参考。

参考文献:

- [1] SHARMA R, RAJAGOPAL K, ANAND S. A genetic algorithm based approach for robust evaluation of form tolerances [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2000, 19(1): 46-56.
- [2] TSENG H Y. A genetic algorithm for assessing flatness in automated manufacturing systems [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2006, 17(3): 301-306.
- [3] 崔长彩, 张耕培, 傅师伟, 等. 利用粒子群优化算法的平面度误差评定[J]. 华侨大学学报(自然科学

版), 2008, 29(4): 507-509.

CUI C C, ZHANG G P, FU SH W, *et al.*. Particle swarm optimization-based flatness evaluation [J]. *Journal of Huaqiao University: Natural Science*, 2008, 29(4): 507-509. (in Chinese)

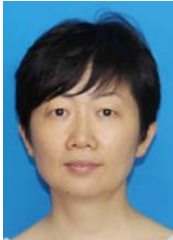
- [4] 雷贤卿, 李飞, 涂鲜萍, 等. [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1312-1317.

LEI Q X, LI F, TU X P, *et al.*. Geometry searching approximation algorithm for flatness error evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1312-1317. (in Chinese)

- [5] 罗钧, 王强, 付丽. 改进蜂群算法在平面度误差评定

- 中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 422-430.
- LUO J, WANG Q, FU L. Application of modified artificial bee colony algorithm to flatness error evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 422-430. (in Chinese)
- [6] 邓博予, 赵尚弘, 侯睿, 等. 基于遗传蚁群融合算法的混合链路中继卫星资源调度研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2211-2217.
- DENG B Y, ZHAO S H, HOU R, *et al.*. Research for resource scheduling of relay satellite system with hybrid links based on fusion algorithm of genetic and ant colony[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2211-2217. (in Chinese)
- [7] 劳大宝, 周维虎. 基于遗传算法的柱面光栅测角技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2182-2188.
- LAO D B, WEI W H. Cylindrical grating angle measurement technology based on genetic algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2182-2188. (in Chinese)
- [8] 王小平, 曹立明, 等. 遗传算法与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- WANG X P, CAO L M, *et al.*. *Genetic algorithm and software implementation* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. (in Chinese)
- [9] HUANG S T, FAN K C, WU J H. A new minimum zone method for evaluating flatness errors [J]. *Prec. Eng.*, 1993, 15(1): 25-32.
- [10] 崔长彩, 车仁生, 罗小川, 等. 基于实数编码遗传算法的平面度评定[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(1): 36-40.
- CUI CH C, CHE R SH, LUO X CH, *et al.*. Flatness evaluation based on real coded genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(1): 36-40. (in Chinese)
- [11] 温秀兰, 宋爱国. 基于实数编码的改进遗传算法及在平面度误差评定中的应用[J]. *计量学报*, 2003, 24(2): 88-91.
- WEN X L, SONG A G. Improved genetic algorithm based on real coding and its application in flatness error evaluation [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2003, 24(2): 88-91. (in Chinese)
- [12] 田社评, 韦红雨, 王志武. 用遗传算法准确评定平面度误差评价[J]. *计量技术*, 2007(1): 66-69.
- TIAN SH P, WEI H Y, WANG ZH W. Using genetic algorithm to accurately assess flatness error evaluation [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007(1): 66-69. (in Chinese)

作者简介:



杨 健(1972—), 女, 重庆人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 成都理工大学核技术与自动化工程学院机电工程系主任, 主要从事先进制造技术领域的研究。
E-mail: yangjian@cdut.edu.cn



赵宏宇(1990—), 男, 吉林辽源人, 硕士研究生, 主要从事先进制造技术领域的研究。
E-mail: 471359350@qq.com