

基于变步长天牛须搜索算法的空间直线度误差评定

陈君宝¹, 王宸^{1,2}, 王生怀¹

¹湖北汽车工业学院; ²上海大学上海市智能制造与机器人重点实验室

摘要: 为提高空间直线度评定精度,建立了空间直线度数学模型。采用变步长天牛须搜索算法对目标函数进行求解,主要包括天牛须搜索及变步长等步骤。针对原始天牛须搜索算法求解精度不高,易陷入局部最优等问题,设计变步长方法,增强算法多样性,从而充分提高计算精度。对其进行求解,并根据终止准则得到计算结果,将该寻优结果与其他方法的评定结果相比较,验证了该算法的可行性及优越性。

关键词: 空间直线度;天牛须搜索算法;变步长

中图分类号: TG702;TB91

文献标志码: A

Research on Evaluation Method of Spatial Straightness for Variable Step Beetle Antennae Search Algorithm

Chen Junbao, Wang Chen, Wang Shenghuai

Abstract: In order to improve the accuracy of spatial straightness assessment, a mathematical model of spatial straightness is established. The objective function is solved by using a variable step length beetle search algorithm. It mainly includes the steps of the search and step length of the beetle. The precision of the original search algorithm is not high, and it is easy to fall into the local optimal problem. The variable step length method is designed to enhance the diversity of the algorithm and improve the calculation precision. The solution is solved and the calculation results are obtained according to the termination criterion. Compared with the results of other methods, this optimization result verifies the feasibility and superiority of this algorithm.

Keywords: spatial straightness; beetle antennae search algorithm; variable step

1 引言

随着精密制造技术的不断发展,零件的数字化测量已成为产品全生命周期中的关键步骤。在零件的评定要素中,空间直线度作为管类、轴类零件等误差评定的一项关键形位要素,其评定结果的准确性会在很大程度上影响到零件整体的评定结果。在相关的国际标准和国家标准中,直线度误差评定的主要算法为最小区域法、最小二乘法及智能优化算法等。智能优化算法如遗传算法和粒子群算法等被应用到空间直线度误差评定问题中已较为广泛,但这些算法求解效果与算法参数的选择关系较大,且计算速度慢,精度不够高,算法鲁棒性需要进一步加强。

黄富贵等^[1]在三坐标测量机上对八种不同的被测直线提取了采样点坐标数据,给出了两种算法模型,分别用最小二乘法和最小包容区域法进行评

定。研究表明,这两种算法评定结果符合最小条件;张新宝等^[2]针对空间直线度误差评定中误差过大或采用进化算法耗时太长等问题,提出了一种定向包容圆柱轴线的方法,该算法搜索方法明确,无反迭代,鲁棒性好;吴呼玲^[3]提出了基于蒙特卡罗与GUM法的混合计算方法求解直线度误差评定问题,通过实际数据验证了方法的可行性。随着群体智能优化算法的发展,各种新型算法不断涌现,改变了以往算法复杂度较高且计算耗时等问题;廖平等^[4]提出了基于遗传算法的空间直线度误差求解算法,采用实数编码对空间直线度模型进行求解。该算法通过仿真计算和实际数据验证,表明该算法具有实现全局最优,收敛速度较快,且在计算机上容易实现等特点;茅健等^[5]提出了一种满足最小区域法的空间直线度误差评价方法,建立空间直线度模型并采用粒子群算法求解,通过三坐标测量机等测量系统测量的实际数据进行验证,取得较优效果;叶明等^[6]采用最小二乘法和人工鱼群算法进行混合求解空间直线度误差评定问题,计算结果与遗传算法和粒子群算法相比具有更高的正确度。当前,采用新型智能优化算法对空间直线度误差问题进行评定具有运

基金项目: 国家自然科学基金(51475150);汽车动力传动与电子控制湖北省重点实验室开放基金(ZDK1201703);湖北省教育厅青年基金(Q20181801)

收稿日期: 2017年12月

算精度高,速度快等特点。因此采用设计或改进新型智能优化算法求解空间直线度数学模型是较优的解决途径。

2 问题建模

首先确定被测零件,通过三坐标测量机获取零件的空间直线测量数据;空间直线度实际上是直线相对于理想直线的偏差量,即包容所有测点的最小圆柱(见图1)。

空间直线的点向式参数方程为

$$\frac{x-x_1}{a} = \frac{y-y_1}{b} = \frac{z-z_1}{c} \quad (1)$$

建立空间直线度的误差评定数学模型,其中 (x_1, y_1, z_1) 为包容所有测点的理想包容圆柱轴线 L 上的定点, (a, b, c) 为 L 在 x, y, z 方向上的向量参数, f 为所求空间直线度,点到空间直线的距离求解方法为

$$f = 2 \times \sqrt{\frac{\begin{vmatrix} x-x_1 & y-y_1 \\ a & b \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} x-x_1 & z-z_1 \\ a & c \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} y-y_1 & z-z_1 \\ b & c \end{vmatrix}^2}{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (2)$$

目标函数为

$$F = \min[\max f(x_1, y_1, z_1, a, b, c)] \quad (3)$$

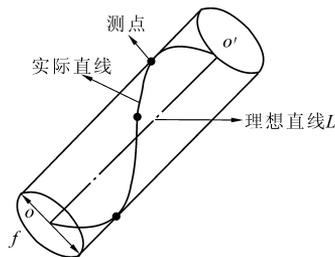


图1 空间直线度示意图

3 求解算法

3.1 天牛须算法

天牛须算法(Beetle Antennae Search, BAS)是Jiang X.等^[7]在2017年提出的一种新型智能优化算法,具有求解速度快、精度高等特点。BAS也叫甲壳虫算法,它是受到天牛觅食原理的启发而开发出的算法。天牛觅食时根据食物气味强弱来觅食,天牛具有两只长触角,如果左边触角收到的气味强度高于右边,则往左搜索食物,反之亦然。天牛的目的是找到全局气味值最大的点,Li S.等^[7]仿照天牛行为设计了智能优化算法进行高效的函数寻优。BAS类似于粒子群、遗传算法等智能优化算法。BAS搜索算法不需要梯度信息和函数的具体形式,可以实现

高效寻优与求解。相比于粒子群算法,BAS算法搜索只需要一个个体,即一只天牛,使得算法运算量大为降低。然而原始BAS算法步长为固定值,使得在全局搜索和局部搜索过程中搜索效率和精度较为一般。针对上述问题,本文设计变步长天牛须搜索算法(variable step beetle antennae search algorithm, VS-BAS),使得算法开始步长大,后来小。开始先粗略搜索确定大致范围,然后精细化搜索,两者结合保证了算法在精度和全局收敛速度之间的平衡。

3.2 算法流程

读取测点数据,代入目标函数(3),对天牛须搜索算法进行初始化。主要包括:变步长参数Eta,天牛两须间距离 d_0 ,天牛步长step,迭代次数 n ,问题维度 D ,随机初始解 $x = \text{rands}(D, 1)$ 。 x 为 $D-1$ 内的随机初始值。

计算天牛左须坐标为

$$XL = x + d_0 \text{dir}/2 \quad (4)$$

计算天牛右须坐标为

$$XR = x - d_0 \text{dir}/2 \quad (5)$$

式中, $\text{dir} = \text{rands}(D, 1)$, dir 为 $D-1$ 内的随机值。

计算须的气味强度(即函数适应度值),有

$$F_{\text{left}} = f(XL) \quad (6)$$

$$F_{\text{right}} = f(XR) \quad (7)$$

采用变步长法计算天牛下一步要走的位置为

$$x = \begin{cases} x + \text{Eta} \times \text{step} \times \text{dir} \times (XL - XR), & F_{\text{left}} < F_{\text{right}} \\ x - \text{Eta} \times \text{step} \times \text{dir} \times (XL - XR), & F_{\text{left}} > F_{\text{right}} \end{cases} \quad (8)$$

判断迭代次数是否满足最大迭代次数,如果满足,则计算终止;如果没有满足,则继续循环。迭代终止后的适应度函数值为测点的空间直线度误差,位置坐标为满足目标函数(3)的解,即空间直线的方程参数。迭代曲线如图2所示。

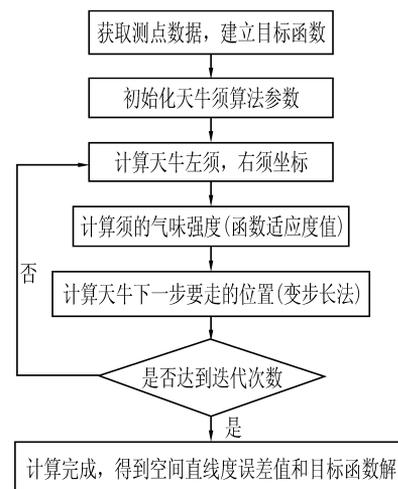


图2 算法流程图

4 实验验证

为了进一步验证本文提出的模型和算法,通过三坐标机对部分空间直线度测量的实际数据进行计算验证,测量结果见表1。VSBAS 算法部分参数设置为:种群大小 NP = 50, 变步长参数 $\text{Eta} = 0.95$ 。算法使用 MATLAB 2016a 编程实现^[8], 运行于内存为 8G, CPU 为 3.20GHz 双核, 操作系统为 Windows10 专业版的高性能计算机。

表1 直线度测量被测圆心拟合点坐标

	X	Y	Z		X	Y	Z
1	6.60	15.58	65.46	7	6.83	15.46	89.46
2	6.49	15.59	53.4	8	6.72	15.49	71.16
3	6.95	15.55	101.46	9	6.39	15.52	42.46
4	6.16	15.56	65.43	10	6.13	15.51	24.36
5	6.33	15.43	30.46	11	6.47	15.53	53.46
6	6.72	15.57	83.46	12	6.95	15.54	87.56

表2为采用遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)^[9]和VSBAS算法求得的最终结果。由表可知,VSBAS算法求得的数值结果最小,精度最高。VSBAS相比于其他算法的结果均有较大提升,显示出变步长天牛须搜索算法对于模型求解的效果更优。

表2 直线度误差计算结果

方法	迭代次数	直线度误差
GA	300	0.0753
PSO	300	0.0701
VSBAS	300	0.0632

图3为GA、PSO和VSBAS算法的迭代曲线。如图所示,GA收敛速度最慢,PSO收敛速度和精度要优于GA,VSBAS算法在精度和收敛度上都优于其他算法。

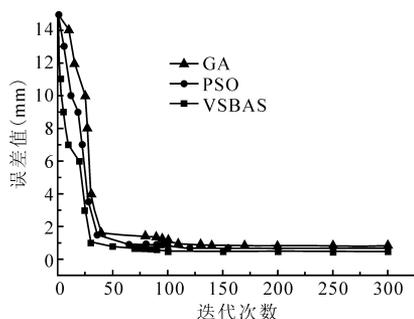


图3 算法的迭代曲线

5 结语

为提高空间直线度评定精度,建立了空间直线度数学模型.采用变尺度天牛须算法进行求解。通过实验验证和对比,变尺度天牛须算法在精度和收

敛度上均优于其他算法。智能优化算法在求解空间直线度误差问题上简单易懂,编程求解较为方便,结合测量数据应用到空间直线度误差评定领域取得较好的结果。

参考文献

- [1]黄富贵,崔长彩. 评定直线度误差的最小二乘法与最小包容区域法精度之比较[J]. 光学精密工程,2007,15(6):889-893.
- [2]张新宝,谢江平. 空间直线度误差评定的逼近最小包容圆柱法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2011,39(12):6-9.
- [3]吴呼玲. 基于蒙特卡罗法与GUM法的直线度测量不确定度评定[J]. 工具技术,2017,51(5):104-107.
- [4]廖平,喻寿益. 基于遗传算法的空间直线度误差的求解[J]. 中南大学学报(自然科学版),1998(6):586-588.
- [5]茅健,曹衍龙. 基于粒子群算法的空间直线度误差评定[J]. 工程设计学报,2006,13(5):291-294.
- [6]叶明,唐敦兵. 最小二乘与鱼群混合优化方法评定直线度误差的研究[J]. 机械科学与技术,2014,33(7):1013-1017.
- [7]Jiang X, Li S. BAS: beetle antennae search algorithm for optimization problems[J]. arXiv:1710.
- [8]林志熙,周景亮. 基于MATLAB的直线度误差数据处理的研究[J]. 工具技术,2008,42(3):84-87.
- [9]王宸,杨洋,袁海兵,等. 基于混合粒子群算法的数控切削参数多目标优化[J]. 现代制造工程,2017(3):77-82.

第一作者:陈君宝,研究生,副教授,高级工程师,湖北汽车工业学院机械工程学院,湖北省十堰市442002

First Author: Chen Junbao, Postgraduate, Associate Professor, Senior Engineer, Dept of Mechanical Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan, Hubei 442002, China

通信作者:王宸,讲师,湖北汽车工业学院机械工程学院,湖北省十堰市442002

Corresponding Author: Wang Chen, Lecturer, Dept of Mechanical Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan, Hubei 442002, China