

微型五坐标测量机激光测头安装误差的标定

费致根^{1,2}, 郭俊杰¹, 马小军³, 高党忠³

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 郑州轻工业学院机电学院, 450002, 郑州;
3. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 621900, 四川绵阳)

摘要: 针对非接触式五坐标测量机激光测头安装位置误差较大且不易调整的缺点, 建立了该五坐标测量机激光测头安装误差的数学模型. 选取激光测头的不同姿态, 通过测量实物基准的空间位置, 给出了误差模型待标定参数的无约束最优化目标函数的外点法惩罚函数. 通过计算个体之间的欧氏距离, 剔除掉那些相似的个体, 从而有效地避免了遗传算法易早熟的问题, 完成了对误差模型的求解. 实验结果表明, 所建立的激光测头安装误差模型不仅适用于扫描测头, 而且对触发测头也同样适用, 可把该机的空间测量精度从 $(11.82 + L/1\ 000)\ \mu\text{m}$ 提高到 $(1.96 + L/1\ 000)\ \mu\text{m}$.

关键词: 五坐标测量机; 激光测头标定; 误差模型; 改进遗传算法

中图分类号: TH72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0064-05

Installation Error Calibration of Laser Probe for Miniature Five-Coordinate Measuring Machine

FEI Zhigen^{1,2} GUO Junjie¹ MA Xiaojun³ GAO Dangzhong³

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Mechanical & Electrical Engineering Department, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 45002, China;
3. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: According to the practical measuring requirement, a non-contact five-coordinate measuring machine is exploited and developed. Considering that the installation error of laser probe is large and difficult to be adjusted, the installation error model of this machine is established. The unconstrained optimization objective function of error model is derived by measuring the spatial location of physical standard under several specific postures of laser probe. An improved genetic algorithm is introduced to solve the unknown optimal parameters. The calculation for Euclidean distance is used to evaluate the similarity between each individual. Those individuals between which similarity is greater than a given threshold will be eliminated from the population, to avoid the occurrence of prematurity for genetic algorithm. The experiments illustrate that the established error model is applicable for the scanning probe, as well as the touch-trigger probe, and the spatial measuring precision of this machine is enhanced from $11.82 + L/1\ 000\ \mu\text{m}$ to $1.96 + L/1\ 000\ \mu\text{m}$.

Keywords: five-coordinate measuring machine; laser probe calibration ; error model; improved genetic algorithm

近几十年, 坐标测量机取得了快速的发展. 目前, 坐标测量机已广泛应用于机械加工、汽车工业、

电子行业、航空工业以及国防工业等各个行业. 传统的接触式坐标测量机由于受自身限制, 无法满足那

些质软、易变形工件的测量要求,因此目前坐标测量机正朝着智能化、非接触式、非正交化、高精度的方向发展^[1].

当通用的一维激光测头用于坐标测量机时,通常采用专用夹具定位,但很难精确地安装、调整测头位置.文献[2]提出了一种利用位置敏感探测器(PSD)的方法来调整激光测头的光轴位置,通过标定激光光斑位置与 PSD 输出电压的关系,反复调整夹具上的调整螺钉来实现测头安装位置的调整,但该方法存在着调整精度不高、且无法精确分离出测头的安装偏心量与倾斜量等问题.文献[3]提出了一种安装在 PH10 回转体上的一维激光测头的安装误差数学模型,但获得该模型求解精度的条件则需要保证 PH10 回转体的回转精度.

求解激光测头安装误差模型中的未知参数,可以转化为求解含有多个未知参量的非线性最优化问题.遗传算法模仿生物界的进化机制以及适者生存的原则,能够在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识,通过对搜索空间中的个体解进行选择、交叉、变异操作,自适应地控制搜索过程以得到全局的最优解.该算法与其他优化算法相比,具有自身独特的优越性,是目前处理优化问题的一种有效方法^[4-6].针对该算法易出现早熟现象的不足,本文给出了一种改进的遗传算法,引入个体之间欧氏距离的计算,在每一代的群体中以适应度最高的个体为模板,剔除与其欧氏距离小于给定阈值的个体,从而保证了群体的多样性,有效地避免了早熟现象的出现.

1 非接触式五坐标测量机简介

根据实际工程的测量需要,研发了一台非接触式五坐标测量机,结构如图 1 所示.图中 X 、 Y 、 Z 轴的行程为 $200\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 60\text{ mm}$, A 轴行程为 $\pm 105^\circ$, B 轴行程为 $\pm 90^\circ$.系统主体采用基座、立柱、悬臂梁结构,激光测头位于横梁末端,可沿立柱导轨做 Z 方向的上下运动,同时可以绕 A 、 B 轴做旋转运动,工件位于工作台上,可沿 X 、 Y 方向导轨在水平方向运动.各轴均采用带有细分功能的步进电机驱动,控制系统采用分布式的闭环控制模式,基座、立柱均采用性能稳定的大理石材料.

2 激光测头安装误差建模

激光测头在其轴线方向具有很高的灵敏度和测量精度,配合 A 轴 $\pm 105^\circ$ 、 B 轴 $\pm 90^\circ$ 的测量行程,可

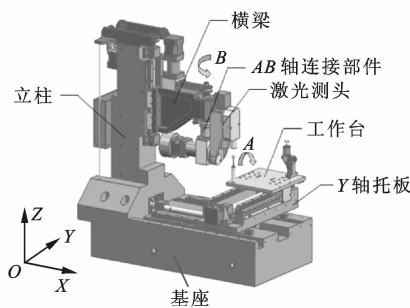


图1 五坐标测量机整体结构

以实现从空间不同方向对工件实施测量,因此极大地增加了探测的柔性.该五坐标测量机的设计测量零位要求激光测头的光轴与 Z 轴平行,激光测头通过专用夹具实现装夹、定位.由于安装、装配误差的存在,很难保证激光测头光轴与 Z 轴的平行,从而将会产生较大的测量误差.因此,本文建立了一个误差模型来标定激光测头安装的实际空间位置,通过求解该误差模型参数,实现了该五坐标测量机真正意义上的高精度测量.

为了建立激光测头安装的误差模型,首先需要建立 4 个坐标系,如图 2 所示.

(1)测量机基准坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$.坐标原点及坐标测量机的原点在测量过程中不随各轴的运动而发生改变,坐标轴方向与坐标测量机的 Z 、 Y 、 Z 方向保持一致,且符合右手定则.

(2)测量机移动坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$.坐标原点 O_1 为 B 轴与 A 轴中心线所在水平面的交点,且不随各个轴的运动而发生改变,坐标轴 X_1 、 Y_1 、 Z_1 的方向与坐标测量机的 X 、 Y 、 Z 轴保持一致.

(3)基于回转轴 B 轴的坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$.坐标原点 O_2 位于 O_1 ,坐标轴 Z_2 的方向与坐标测量机的 Z 轴方向一致,坐标轴 X_2 的方向始终平行于 A 轴电机的中心线,且在 B 轴旋转的过程中, X_2 的正向始终与坐标测量机 X 轴正向保持小于等于 90° 的夹角.坐标轴 Y_2 的方向由右手定则给出.

(4)基于回转轴 A 轴的坐标系 $O_3X_3Y_3Z_3$.坐标轴 Z_3 的方向为测量机的 Z 轴绕 A 轴旋转一定角度后的方向,坐标轴 X_3 的方向同 X_2 ,坐标原点 O_3 为坐标轴 X_3 与 Z_3 的交点,坐标轴 Y_3 的方向由右手定则给出.

通过分析 4 个坐标系之间的关系可知,测量机移动坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 与基准坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 之间仅存在一种平移关系,平移矩阵为

$$T_{10} = Q_{10} \quad Q_{10} = [x_{10} \quad y_{10} \quad z_{10}]^T \quad (1)$$

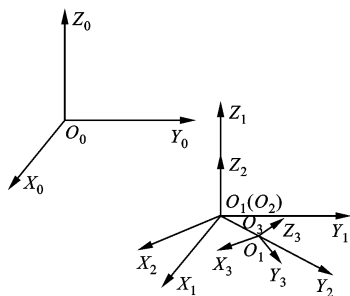


图2 误差模型各坐标系位置的关系

式中: $\mathbf{Q}_{10}$ 为坐标测量机 X 、 Y 、 Z 轴光栅尺的示值. 坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 与 $O_1X_1Y_1Z_1$ 之间只是一种绕 Z 轴的旋转关系, 旋转矩阵为

$$\mathbf{T}_{21} = \mathbf{R}_{21} \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_{21} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_B + \Delta\theta_B) & -\sin(\theta_B + \Delta\theta_B) & 0 \\ \sin(\theta_B + \Delta\theta_B) & \cos(\theta_B + \Delta\theta_B) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: θ_B 为 B 轴相对于安装测量零位转过的角度; $\Delta\theta_B$ 为 A 轴电机中心线偏离设计测量零位的角度, 是一个很小的定值.

坐标系 $O_3X_3Y_3Z_3$ 与 $O_2X_2Y_2Z_2$ 之间存在着平移、旋转关系, 由于装配误差, O_3 与 O_2 之间在 Y_2 方向存在一个平移量, 这 2 个坐标系之间的关系矩阵为

$$\mathbf{T}_{32} = \mathbf{R}_{32} + \mathbf{Q}_{32} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_A & -\sin\theta_A \\ 0 & \sin\theta_A & \cos\theta_A \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q}_{32} = [0 \quad \Delta y_{32} \quad 0]^T$$

激光测头在完成一次装夹后, 它与夹具的相对位置保持不变, 在坐标系 $O_3X_3Y_3Z_3$ 中, 测头光轴的直线方程是确定的. 设被测点 q 的坐标为 (x, y, z) , 测头零位坐标为 (x_{43}, y_{43}, z_{43}) , 测头光轴方向矢量为 (l, m, n) , 若测头示值为 t , 则测头光轴直线方程为

$$\frac{x - x_{43}}{l} = \frac{y - y_{43}}{m} = \frac{z - z_{43}}{n} = t \quad (4)$$

被测点 q 在坐标系 $O_3X_3Y_3Z_3$ 的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t l + x_{43} \\ t m + y_{43} \\ t n + z_{43} \end{bmatrix} = t \mathbf{R}_{43} + \mathbf{Q}_{43} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_{43} = [l \ m \ n]^T, \mathbf{Q}_{43} = [x_{43} \ y_{43} \ z_{43}]^T$$

因此, 通过各个坐标系之间的变换关系, 就可以将激光测头的示值转换到基准坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$

中. 设当测头示值为 t 时, 在基准坐标系中的坐标为 $(x_{q0}, y_{q0}, z_{q0})^T$, 将式(1)~(5)代入下式

$$\begin{bmatrix} x_{q0} \\ y_{q0} \\ z_{q0} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{10} \mathbf{T}_{21} \mathbf{T}_{32} \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

整理后得

$$\begin{bmatrix} x_{q0} \\ y_{q0} \\ z_{q0} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{21} (\mathbf{R}_{32} + \mathbf{Q}_{32}) (t \mathbf{R}_{43} + \mathbf{Q}_{43}) + \mathbf{Q}_{10} \quad (7)$$

式(7)即为激光测头安装误差的数学模型.

3 误差模型的标定

在式(7)中, 对于 $\mathbf{Q}_{32}$ 、 $\mathbf{R}_{43}$ 、 $\mathbf{Q}_{43}$ 的求解, 通常采用测量空间某一定点的方法, 实际上是通过测量标准球的球心来完成未知参数的求解.

标定时, 当测头调整到某个姿态位置后, θ_A 与 θ_B 都为定值, 如果保持测头示值不变, 式(7)中的值即为定值, 可记作 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$, 则

$$\begin{bmatrix} x_{q0} \\ y_{q0} \\ z_{q0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{10} \\ y_{10} \\ z_{10} \end{bmatrix} \quad (8)$$

此时, 对于任一被测点, 光栅尺的读数与该点变换后在基准坐标系中的坐标只是一种平移关系, 平移量为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$. 因此, 在标准球表面均匀地取 N 个点 ($N \geq 4$), 采用最小二乘法拟合光栅读数得到球心坐标 $\mathbf{S}_1$, 则标准球心坐标

$$\mathbf{S}_0 = \mathbf{S}_1 + (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T \quad (9)$$

这样, 测头在一个姿态下测量一次标准球心即可建立 3 个方程, 包括 $\mathbf{S}_0$ 的 3 个球心坐标和 8 个待标定参数, 共有 11 个未知量, 因为 $\mathbf{R}_{43}$ 是单位矢量, 所以增加了一个约束方程. 因此, 只需要在 4 个不同的姿态下测量标准球, 即可建立一个含有 12 个非线性方程的冗余方程组, 从而可完成 11 个未知参数的求解. 构造目标函数

$$F(X) = \sum_{i=1}^k \|\mathbf{S}_0^{(i)} - \mathbf{S}_0\|^2 = \min$$

$$h = l^2 + m^2 + n^2 - 1 = 0 \quad (10)$$

利用外点法惩罚函数, 将约束最优化目标函数转化为无约束最优化目标函数

$$G(X) = \sum_{i=1}^k \|\mathbf{S}_0^{(i)} - \mathbf{S}_0\|^2 + M h^2 \quad (11)$$

式中: k 为对标准球的标定次数; M 为惩罚因子.

4 改进的遗传算法

遗传算法在求解多元多极值点目标函数时, 一

个突出的问题就是易早熟,即容易收敛到局部最优解而非全局最优解. 避免早熟的关键问题是需要使群体呈多样化发展,为此,本文提出了一种改进的遗传算法,引入了个体之间欧氏距离的计算.

(1)编码. 实数编码具有表达直观、精度高、搜索范围大等优点,而且还可以消除采用二进制编码存在的“海明悬崖”现象^[7-8]. 设定求解精度为 10^{-6} ,对于误差模型中的 11 个未知参数,只需用 11 个精度高于 10^{-6} 的实数组成个体串即可得到

$$X=(\Delta\theta_B,\Delta y_{32},l,m,n,x_{43},y_{43},z_{43},x_0,y_0,z_0)$$

(2)生成初始群体. 随机生成含有 N 个个体的初始群体.

(3)设计适应度评价函数是求解目标函数最小化的问题. 对于个体,其目标函数值越小,表示其适应度就越高. 因此,设计如下适应度函数

$$B(X)=\frac{1}{1+G(X)}\tag{12}$$

由目标函数的定义可知 $B(X)\geq 0$,它保证了适应度函数的非负性. 利用该适应度函数计算每个个体的适应度,为了避免算法出现早熟现象,对传统的遗传算法做了如下改进:①对每个个体按照适应度值大小排序;②计算平均适应度值,选择那些适应度值大于平均适应度值的个体;③计算个体之间的欧氏距离. 设群体中任意 2 个个体串为 $X_i=(x_{1i},x_{2i},\cdots,x_{11i})$ 与 $X_j=(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{11j})$,计算其欧氏距离

$$d_{ij}=(x_{1i}-x_{1j})^2+(\Delta x_{2i}-\Delta x_{2j})^2+\cdots+(x_{11i}-x_{11j})^2)^{1/2}$$

以最高适应度的个体为模板,剔除与其欧氏距离小于给定阈值 ϵ 的个体;④重复③,逐次以适应度高的个体为模板,去除相似个体;⑤如果达到了群体的规模要求,则进行遗传算法下一步的操作,否则重复④;⑥对采用上述方法产生的群体进行选择、交叉、变异操作,选择算子采用最优保存策略,交叉算子采用两点交叉法,变异算子采用高斯变异算子;⑦对于本算法,设定进化终止条件为目标函数 $(G(X)<10^{-6})$,若不满足该条件,设定最大进化代数为 1 000,超过该值则退出.

5 实 验

误差模型标定时,实物基准选用雷尼绍 $\Phi 12$ mm 的标准钢球,其球度误差小于 $0.1\ \mu\text{m}$,激光测头为以色列的 CONO 测头,配以 HD25 的透镜,其工作参数详见表 1.

表 1 激光测头的工作参数

分辨率 / μm	重复精 度/ μm	量程 / mm	角度 / $(^\circ)$	工作距 离/ mm
0.1	0.2	0.62	0~170	14

设遗传算法的种群大小为 200,交叉概率为 0.5,变异概率为 0.05, M 为 10^4 . 坐标测量机在 4 个姿态下对标准球进行测量,拟合得到的球心坐标见表 2.

表 2 测头在不同姿态下光栅坐标拟合球心的结果

t/mm	$\theta_A,\theta_B/(^\circ)$	S_1/mm		
		x_{10}	y_{10}	z_{10}
0.0	(0, 0)	0.001 743	0.002 189	-4.725 415
0.2	(90, 0)	0.088 509	-30.046 754	4.432 010
0.4	(-90, 0)	-0.012 881	9.609 871	25.132 104
0.6	(90, 90)	-139.878 714	-130.717 940	4.430 974

改进的遗传算法与传统的遗传算法的性能对比如图 3 所示. 11 个未知参数的标定结果为

$$\Delta\theta_B=-0.722\ 465\ (^\circ),\ \Delta y_{32}=0.782\ 104\ \text{mm}$$

$$\begin{bmatrix}l\\m\\n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.109\ 543\\0.047\ 720\\0.976\ 634\end{bmatrix}$$

$$(x_{43},y_{43},z_{43})=$$

$$(119.982\ 704,9.864\ 540,20.204\ 917)\ \text{mm}$$

$$(x_0,y_0,z_0)=$$

$$(-119.961\ 064,-9.877\ 542,15.479\ 502)\ \text{mm}$$

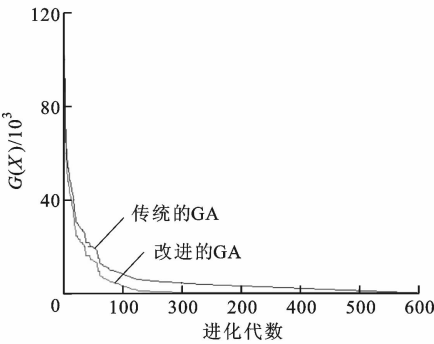


图 3 遗传算法改进前后的求解结果对比

多次运用改进的遗传算法进行求解,结果表明,其求解精度可以达到亚微米级,因此完全可以满足该坐标测量机标定精度的要求. 为验证该测量机在对激光测头安装位置误差标定前后的测量精度的变

化,分别在这 2 种情况下对 $\Phi 12\text{ mm}$ 标准钢球自动测量了 5 次.采用静态取点模式,测量路径采用如图 4 所示的“西瓜皮”式均布路径,每次测量的取点数为 64,个对标准球的测量结果如表 3 所示.

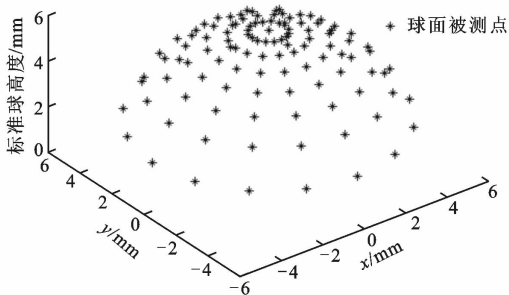


图 4 钢球的测量路径

表 3 标准钢球在标定前、后的测量结果

测量顺序	1	2	3	4	5
r_p/mm	6.012 8	6.012 2	6.011 9	6.011 4	6.012 2
r_l/mm	5.999 7	6.000 9	6.000 6	5.999 3	6.000 3

注: r_p 、 r_l 分别表示标准钢球在标定前、后的测量半径.

由表 3 可以看出,对激光测头安装位置误差标定后,标准球测量的绝对精度提高了约 $12\text{ }\mu\text{m}$.整机的空间测量精度由原来的 $11.82+L/1\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ 提高到了 $1.96+L/1\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$.

6 结 论

本文针对所研发的非接触式五坐标测量机的结构形式,建立了该测量机激光测头安装误差的数学模型.采用改进的遗传算法,通过设定合适的算法参数,完成了对误差模型的自动标定.实验结果证明了该误差模型的正确性以及所提出的改进遗传算法的可行性.本文建立的误差模型不仅适用于扫描测头,而且也同样适用于触发测头,因此具有很强的工程实用价值.

参考文献:

[1] 张国雄. 坐标测量技术发展方向[J]. 红外与激光工程, 2008,37(4): 2-5.
ZHANG Guoxiong. Development orientations of coordinate measuring techniques[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 2-5.

[2] 房佳威, 张国雄, 裘祖荣. 非接触激光测头测量轴线标定系统[J]. 电子测量技术, 2006, 29(3): 160-161.
FANG Jiawei, ZHANG Guoxiong, QIU Zurong. Calibration system for surveying axis of non-contact laser probe [J]. Electronic Measurement Technology, 2006, 29(3): 160-161.

[3] 宋开臣. 三坐标测量机激光扫描测量系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 1997.

[4] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998:1-5.

[5] WEN Xiulan, SONG Aiguo. An improved genetic algorithm for planar and spatial straightness error evaluation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003,43(11): 1157-1162.

[6] LAI H Y, JYWE W J, CHEN C K, et al. Precision modeling of form errors for cylindricity evaluation using genetic algorithm[J]. Precision Engineering, 2000,24(4): 310-319.

[7] 韩瑞峰, 张永奎. 一种改进的实数编码遗传算法 [J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(13): 78-80.
HAN Ruifeng, ZHANG Yongkui. An improved genetic algorithm coded with real number [J]. Computer Engineering and Application, 2002,38(13): 78-80.

[8] 王成栋, 张优云. 基于实数编码的自适应伪并行遗传算法 [J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(7): 707-710.
WANG Chengdong, ZHANG Youyun. Adaptive pseudo-parallel genetic algorithm based on real coding [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37 (7): 707-710.

(编辑 管咏梅)