

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.12.011

基于转动惯量算法的空间直线度 误差评定方法研究*

王 峰^{1,2}, 赵晓巍^{1,2}, 于大国^{1,2}

(1. 中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051; 2. 山西省深孔加工工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘要: 针对空间直线度误差评定的问题, 对空间直线度误差评定基线的选择、转动惯量、坐标转换与投影、最小覆盖圆等方面进行了研究。引入了空间直线度测量数据的数学模型、转动惯量计算、离散点坐标变换与投影、最小覆盖圆程序, 提出了一种基于转动惯量的算法, 以便于离散点投影到垂直于惯量主轴的平面上; 利用 MATLAB 软件对空间直线度误差进行了实例计算, 并将其结果与其他算法的计算结果进行了分析比较。研究表明: 该算法精度较高, 能够得出精确度较高的空间直线度误差, 可以实现高效的空间直线度误差评定, 适用于精度要求高的场合, 具有一定的工程实用价值。

关键词: 空间直线度; 转动惯量; 最小覆盖圆; 深孔检测

中图分类号: TH124; TH161.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2020)12-1466-07

Spatial straightness error assessment based on moment of inertia algorithm

WANG Feng^{1,2}, ZHAO Xiao-wei^{1,2}, YU Da-guo^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Deep Hole Processing Engineering Technology Research Center, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem of spatial straightness error assessment, experimental study on the selection of the baseline for the spatial straightness error assessment, moment of inertia, coordinate conversion, and projection, minimum coverage circle, etc. Introducing mathematical model of spatial straightness measurement data, the calculation of the moment of inertia, discrete point coordinate conversion, and projection, minimum coverage circle programming, an algorithm based on the moment of inertia was proposed, so that the discrete points were projected onto the projection plane perpendicular to the main axis of inertia and the spatial straightness error was calculated by MATLAB software, the calculated results were compared with those of the other algorithms. The results show that this algorithm has high precision, and can obtain spatial straightness error with high accuracy, and can realize efficient spatial straightness error assessment. It is suitable for high precision occasions, and has certain practical value of engineering.

Key words: spatial straightness; moment of inertia; minimal covering circle; deep hole detection

0 引 言

随着现代机械的发展, 机械零件的精密测量已经成为机械加工中极其重要的一部分。而其中空间直线度指标是判断深孔、轴类零件加工质量好坏的重要

因素。

为了让空间直线度误差的评定更为精确, 国家标准中介绍了几种直线度误差评定的算法, 主要有: 两端连线法、最小二乘法、以及最小包容区域法^[1]。

另外, 许多专家学者也提出了多种评定算法: 陈君

收稿日期: 2020-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875532); 山西省科技厅基金资助项目(201701D121081); 山西省回国留学人员科研资助项目(HGKY2019065)

作者简介: 王峰(1992-), 男, 山西阳泉人, 硕士, 主要从事深孔直线度检测方面的研究。E-mail: wangfeng7271@163.com

宝等人^[2]针对之前原始天牛须搜索算法精度较低的问题,建立了空间数学模型,采用变步长搜索算法求解目标函数,该方法编程求解方便,精度和收敛性较好;茅健等人^[3]提出了粒子群算法;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,运用实数值编码来对空间直线度模型进行求解,该算法收敛速度快,并且易于计算机编程实现,适用于大尺寸的被测物体;谢江平等^[5]提出了平面投影评定空间直线度误差,可以先求出点的最小二乘线,然后将测量点投影至最小二乘线的垂直面上,在垂直面上找出所有投影点的最小包容圆,这个最小包容圆的直径就是空间直线度误差,该方法操作简单、便于实现,适用于评定要求较高的场合。

现有空间直线度测量方法存在精度较低、迭代次数多、计算繁琐、收敛性差等问题,有时难以满足高精度要求的场合。

针对空间直线度评定的问题,笔者提出一种基于转动惯量算法的空间直线度误差评定方法。

1 转动惯量算法原理

1.1 转动惯量

转动惯量是对一个物体旋转运动惯性大小的度量。当同一质量的刚体围绕固定轴旋转时,惯性越大则刚体的截面积越大。当刚体在空间中绕惯性主轴旋转时,转动惯量是最小的。

因为转动惯量的值与物体的形状、质量分布和轴的位置有关,笔者将惯量主轴的计算引入到现有的空间直线度误差评定中,在此探讨借助转动惯量算法来提高零件空间直线度误差评定精度的方法。

1.2 基本原理

笔者通过直线度检测仪得到沿空间直线轴均匀分布的测量点数据,在坐标系 $O(xyz)$ 中,把 N 个离散点看作是 N 个质点,并将 N 个质点用轻杆连接近似为一个“刚体”,通过求解该“刚体”的转动惯量得到惯量主轴;以该“刚体”的惯量主轴线建立直角坐标系 $O(x'y'z')$,选择与被测零件轴线相近的惯量主轴线 x' 轴线作为一个投影方向,可以将所有的离散点投影至坐标系 $O(x'y'z')$ 中的 $y'z'$ 平面内;将空间直线度评定问题转化为 $O(x'y'z')$ 中的 $y'z'$ 平面内点集的最小覆盖圆问题,然后利用平面内点集的最小圆覆盖法求解包容点集的最小圆直径,最后包容点集的最小圆直径即为被测量零件的空间直线误差。

基本原理图如图 1 所示。

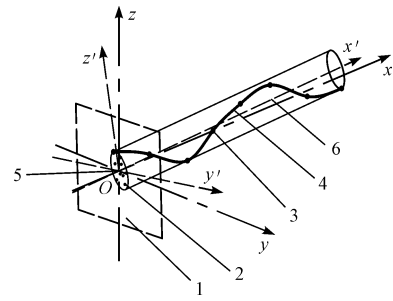


图 1 直线误差基本原理图

1 - 投影面 $y'z'$ 平面;2 - 投影面内离散点的投影点;3 - 测量所得离散点;4 - 测量所得实际轴线;5 - O 点;6 - O 点系惯量主轴

其算法流程图如图 2 所示。



图 2 算法流程图

1.3 刚体惯量主轴求解

笔者先假设有质量相同的 P_1, P_2, P_3 3 个质点组成一个不变的质点系, O 为这个质点系的原点, 3 个质点的位置分别是 $(a', a', 0), (0, a', a'), (a', 0, -a')$, 用轻杆连接, 来求惯量矩阵、主惯量和惯量主轴^[6]。

刚体对 O 点的惯量元素可以表示为:

$$\begin{cases} J_{xx} = \sum_{i=1}^n m_i (y_i^2 + z_i^2) = 4ma'^2 \\ J_{yy} = \sum_{i=1}^n m_i (x_i^2 + z_i^2) = 4ma'^2 \\ J_{zz} = \sum_{i=1}^n m_i (x_i^2 + y_i^2) = 4ma'^2 \\ J_{xy} = J_{yx} = \sum_{i=1}^n m_i x_i y_i = ma'^2 \\ J_{xz} = J_{zx} = \sum_{i=1}^n m_i x_i z_i = ma'^2 \\ J_{yz} = J_{zy} = \sum_{i=1}^n m_i y_i z_i = ma'^2 \end{cases} \quad (1)$$

则刚体对 O 点的惯量矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4ma'^2 & -ma'^2 & ma'^2 \\ -ma'^2 & 4ma'^2 & -ma'^2 \\ ma'^2 & -ma'^2 & 4ma'^2 \end{bmatrix} = ma'^2 \begin{bmatrix} 4 & -1 & 1 \\ -1 & 4 & -1 \\ 1 & -1 & 4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{vmatrix} 4ma'^2 - l & -ma'^2 & ma'^2 \\ -ma'^2 & 4ma'^2 - l & -ma'^2 \\ ma'^2 & -ma'^2 & 4ma'^2 - l \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

通过以上算式可以解得: $\lambda_1 = 3ma'^2, \lambda_2 = 6ma'^2, \lambda_3 = 3ma'^2$, 这样即得到了刚体 O 点的主惯量。

将 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别代入下面的齐次方程可得:

$$\begin{cases} 4 - \lambda x - y + z = 0 \\ -x + 4 - \lambda y - z = 0 \\ x - y + 4 - \lambda z = 0 \end{cases} \quad (4)$$

将 $\lambda_1 = 3, \lambda_2 = 3, \lambda_3 = 6$ 代入式(4), 可以得到下式:

$$\begin{cases} x_1 = -1 \\ y_1 = 1 \\ z_1 = 2 \end{cases} \begin{cases} x_2 = -1 \\ y_2 = -1 \\ z_2 = 0 \end{cases} \begin{cases} x_3 = 1 \\ y_3 = -1 \\ z_3 = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式(5) 单位化后为:

$$q_1 = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}, q_2 = -\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} \sqrt{3} \\ 3 \\ 0 \end{bmatrix}, q_3 = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6) 经过转化可得到 3 个惯量主轴的单位矢为:

$$\hat{i}' = \frac{-\hat{i} + \hat{j} + 2\hat{k}}{\sqrt{6}}, \hat{j}' = \frac{-\hat{i} - \hat{j}}{\sqrt{2}}, \hat{k}' = \frac{\hat{i} - \hat{j} + \hat{k}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

将这 3 个单位化后的单位特征向量组成矩阵可得:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} -1 & -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 2 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: Q — 将体系的原坐标轴转化为新坐标轴(即惯量主轴)的正交矩阵。

将 J 对角化可得:

$$J' = Q^T J Q \quad (9)$$

$$J' = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{1}{\sqrt{6}} ma'^2 \begin{bmatrix} -1 & 1 & 2 \\ -\frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 4 & -1 & 1 \\ -1 & 4 & -1 \\ 1 & -1 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 2 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} =$$

$$ma'^2 \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \end{bmatrix} \quad (10)$$

因此, 在以惯量主轴为坐标轴的新坐标系 $O(x'y'z')$ 中, 所有的惯量积都为零, 只有主惯量不为零, 即惯量矩阵对角化, 对角线上的元素便是体系对 O 的主惯量。

2 离散点坐标变换与投影

先将离散点的坐标转换至 $O(x'y'z')$ 内, 再将其中一个惯量主轴线 x' 轴方向的坐标降为 0, 即可得到离散点在投影面 $y'z'$ 平面的二维坐标 $(y'z')$, $O(xyz)$ 坐标的坐标向量为 i, j, k , $O(x'y'z')$ 坐标的坐标向量为 i', j', k' . 可将 $O(x'y'z')$ 坐标看作是由 $O(xyz)$ 坐标绕原点旋转而来^[7]。

坐标转换需要用到坐标向量间的夹角, 新旧坐标系坐标向量间的夹角如表 1 所示。

表 1 新旧坐标系坐标向量间的夹角

坐标向量	x 轴	y 轴	z 轴
x' 轴 / i'	α_1	β_1	γ_1
y' 轴 / j'	α_2	β_2	γ_2
z' 轴 / k'	α_3	β_3	γ_3

i', j', k' — 单位向量

由表 1 中新旧坐标系坐标向量间的夹角可知, 单位向量的坐标即为其 3 个方向的余弦值, 即:

$$\begin{cases} i' = i \cos \alpha_1 + j \cos \beta_1 + k \cos \gamma_1 \\ j' = i \cos \alpha_2 + j \cos \beta_2 + k \cos \gamma_2 \\ k' = i \cos \alpha_3 + j \cos \beta_3 + k \cos \gamma_3 \end{cases} \quad (11)$$

进一步可以推出:

$$\begin{cases} i' = (\cos\alpha_1, \cos\beta_1, \cos\gamma_1) \\ j' = (\cos\alpha_2, \cos\beta_2, \cos\gamma_2) \\ k' = (\cos\alpha_3, \cos\beta_3, \cos\gamma_3) \end{cases} \quad (12)$$

设空间内一点在 $O(xyz)$ 坐标系中的坐标为 (x, y, z) , 在 $O(x'y'z')$ 坐标系中坐标为 (x', y', z') , 则有:

$$\vec{OP} = xi + yj + zk \quad (13)$$

$$\vec{OP'} = x'i' + y'j' + z'k' \quad (14)$$

由于原点并未改变, 此处 $O = O'$, 继而由式 (13), 14) 可得:

$$xi + yj + zk = x'i' + y'j' + z'k' \quad (15)$$

将式 (12) 中的 i', j', k' 代入式 (15) 可得:

$$\begin{aligned} xi + yj + zk &= i(x'\cos\alpha_1 + y'\cos\alpha_2 + z'\cos\alpha_3) + \\ &(x'\cos\beta_1 + y'\cos\beta_2 + z'\cos\beta_3)j + \\ &(x'\cos\gamma_1 + y'\cos\gamma_2 + z'\cos\gamma_3)k \end{aligned} \quad (16)$$

由式 (16) 可以得到:

$$\begin{cases} x = x'\cos\alpha_1 + y'\cos\alpha_2 + z'\cos\alpha_3 \\ y = x'\cos\beta_1 + y'\cos\beta_2 + z'\cos\beta_3 \\ z = x'\cos\gamma_1 + y'\cos\gamma_2 + z'\cos\gamma_3 \end{cases} \quad (17)$$

将式 (17) 进行逆变换, 最终可以得到变换后的坐标值 (x', y', z') 。

由式 (12) 可知:

$$\begin{cases} x' = x\cos\alpha_1 + y\cos\beta_1 + z\cos\gamma_1 \\ y' = x\cos\alpha_2 + y\cos\beta_2 + z\cos\gamma_2 \\ z' = x\cos\alpha_3 + y\cos\beta_3 + z\cos\gamma_3 \end{cases} \quad (18)$$

变换后的坐标值仍为空间坐标, 此处将 x' 坐标去掉, 沿 x' 轴将离散点投影至 $y'z'$ 平面, 可得到投影后的离散点坐标 (y', z') 为:

$$\begin{cases} i' = \left(-\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{2}{\sqrt{6}}\right) = (\cos\alpha_1, \cos\beta_1, \cos\gamma_1) \\ j' = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0\right) = (\cos\alpha_2, \cos\beta_2, \cos\gamma_2) \\ k' = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}, -\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}\right) = (\cos\alpha_3, \cos\beta_3, \cos\gamma_3) \end{cases} \quad (19)$$

由此可得到新旧坐标系坐标向量间的夹角余弦值, 如表 2 所示。

表 2 新旧坐标系坐标向量间的夹角余弦值

坐标向量	x 轴	y 轴	z 轴
x' 轴 / i'	$\cos\alpha_1 = -\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\cos\beta_1 = \frac{1}{\sqrt{6}}$	$\cos\gamma_1 = \frac{2}{\sqrt{6}}$
y' 轴 / j'	$\cos\alpha_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\cos\beta_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\cos\gamma_2 = 0$
z' 轴 / k'	$\cos\alpha_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}$	$\cos\beta_3 = -\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\cos\gamma_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}$

将 P_1, P_2, P_3 的坐标 $(a, a, 0), (0, a, a), (a, 0, -a)$ 与表 2 中的数据一起代入式 (18) 中, 可以得到:

$$\begin{cases} P'_1 = (0, -\sqrt{2}a, 0) \\ P'_2 = \left(\frac{3a}{\sqrt{6}}, -\frac{a}{\sqrt{2}}, 0\right) \\ P'_3 = \left(-\frac{3a}{\sqrt{6}}, -\frac{a}{\sqrt{2}}, 0\right) \end{cases} \quad (20)$$

将 P'_1, P'_2, P'_3 的 x' 坐标去掉, 沿 x' 轴将离散点投影至 $y'z'$ 平面, 可得到平面坐标 P'' 为:

$$\begin{cases} P''_1 = (-\sqrt{2}a, 0) \\ P''_2 = \left(-\frac{a}{\sqrt{2}}, 0\right) \\ P''_3 = \left(-\frac{a}{\sqrt{2}}, 0\right) \end{cases} \quad (21)$$

至此, 空间直线度误差分析问题便已转换为了平面内点集的最小圆覆盖问题。

3 最小覆盖圆求解

由式 (21) 可知: P''_2, P''_3 在平面内重合, 笔者利用 CAD 软件建立模型, 如图 3 所示。

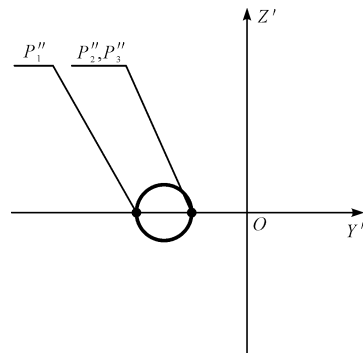


图 3 平面模型

由图 3 可以直观地看出: 该组原始数 (P_1, P_2, P_3) 的空间直线度误差即为 P''_1 与 P''_2 之间的距离; 原始数据 (P_1, P_2, P_3) 的直线度误差为 $\frac{a}{\sqrt{2}}$ 。

笔者通过对数据 (P_1, P_2, P_3) 进行分析, 论证了利用基于转动惯量算法的空间直线度误差分析算法, 来评定空间直线度的方法是可行的。

4 实验及结果分析

根据上述原理, 为了便于与其他方法进行对比, 笔者采用甘永立、陈君宝等人文献中的测量数据, 来

进行基于转动惯量法的空间直线度误差分析算法评定。

其中,测点数据 1 如表 3 所示。

表 3 测点数据 1

测点	X/mm	Y/ μm	Z/ μm
1	0	0	0
2	100	1	1
3	200	2	4
4	300	0	0
5	400	3	4
6	500	-0.2	-0.5
7	600	-1.5	-1
8	700	3	-1

测点数据 2 如表 4 所示。

表 4 测点数据 2

测点	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	6.60	15.58	65.46
2	6.49	15.59	53.40
3	6.95	15.55	101.46
4	6.16	15.56	65.43
5	6.33	15.53	30.46
6	6.72	15.57	83.46
7	6.83	15.46	89.46
8	6.72	15.49	71.16
9	6.39	15.52	42.46
10	6.13	15.51	42.46
11	6.47	15.53	53.46
12	6.95	15.54	87.56

求解惯量主轴需要进行建立惯量矩阵、求解主惯量等复杂计算,计算量庞大,在此笔者利用 CATIA 的惯量测量模块,对质点系进行惯量求解。

求解得到新坐标系后,将离散点的坐标转换至 $O(x'y'z')$ 内,再将其中一个惯量主轴 x' 轴方向的坐标降为 0,得到离散点在投影面 $y'z'$ 平面的二维坐标值 (y',z') 。

在 CATIA 工程图模块中,将空间的离散点沿着 x' 轴方向进行投影,直接得到离散点在投影面 $y'z'$ 平面的模型;在 AUTO-CAD 中,以 $y'z'$ 的 O 点为原点, y' 轴

线为横坐标轴, z' 轴线为纵坐标轴,对平面内的离散点进行坐标输出;最后对平面离散点坐标进行最小圆覆盖求解,即可得到直线度误差。

对表 3 的数据进行求解,即可得到测点数据平面投影 1,如图 4 所示。

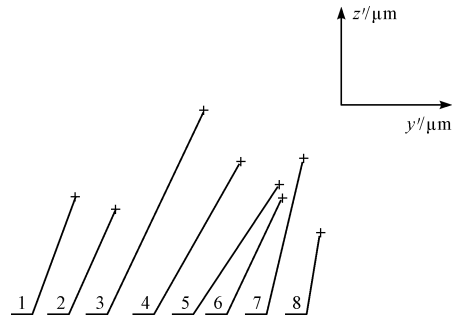


图 4 测点数据平面投影 1

同时可得到投影面离散点坐标如表 5 所示。

表 5 投影面离散点坐标

序号	y' 坐标	z' 坐标
1	-5.851 562 5	-1.049 743 652
2	-4.811 035 156	-1.359 069 824
3	-2.545 776 367	1.302 520 752
4	-1.616 455 078	-0.065 185 547
5	-0.639 282 227	-0.719 543 457
6	-0.548 095 703	-1.049 865 723
7	0	0
8	0.431 945 801	-2.008 239 476

同样地,对表 4 数据进行上述求解,可得到测点数据平面投影 2 如图 5 所示。

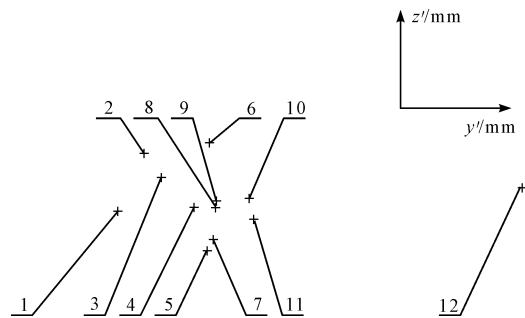


图 5 测点数据平面投影 2

得到投影面离散点坐标如表 6 所示。

对最小圆覆盖问题进行求解,鉴于其计算量庞大,此处笔者借助 MATLAB 软件进行数学求解,使用 MATLAB 软件进行编程计算。

表 6 投影面离散点坐标

序号	y'坐标	z'坐标
1	-4.215 454 1	-16.095 703 13
2	-4.178 527 83	-16.012 237 55
3	-4.155 456 54	-16.047 363 28
4	-4.108 703 61	-16.087 98 218
5	-4.091 369 63	-16.150 360 11
6	-4.086 853 03	-15.998 931 88
7	-4.082 275 39	-16.132 507 32
8	-4.077 941 89	-16.088 317 87
9	-4.076 538 09	-16.081 695 56
10	-4.031 005 86	-16.078 796 39
11	-4.024 169 92	-16.105 621 34
12	-3.647 949 22	-16.061 218 26

将表 3 中的数据代入该程序如下:

```
function [x,r,exit] = myga() p =
[-5.851 562 5 -1.049 743 652
-4.811 035 156 -1.359 069 824
-2.545 776 367 -1.302 520 752
-1.616 455 078 -0.065 185 547
-0.639 282 227 -0.719 543 457
-0.548 095 703 -1.049 865 723
00
0.431 945 801 -2.008 239 476];
p = p';
lb = min(p);
ub = max(p);
options = gaoptimset('TimeLimit',300);
[x,r,exit] = ga(@ (x) rmax(p,x),2,[],[],[],
[],lb,ub,[],options);
theta = 0:2 * pi/100:2 * pi;
plot(p(1,:),p(2,:),k*');
hold on
rx = x(1) + r * cos(theta);
ry = x(2) + r * sin(theta);
plot(rx,ry)
axisequal
function r = rmax(p,x)
a = x(1);b = x(2);
r = max(((p(1,:) - a).^2 + (p(2,:) - b).^2).^0.5);
得到的圆心位置为(-2.723 738 827 072 369,
-1.620 297 486 747 916)。
```

MATLAB 计算结果 1 如图 6 所示。

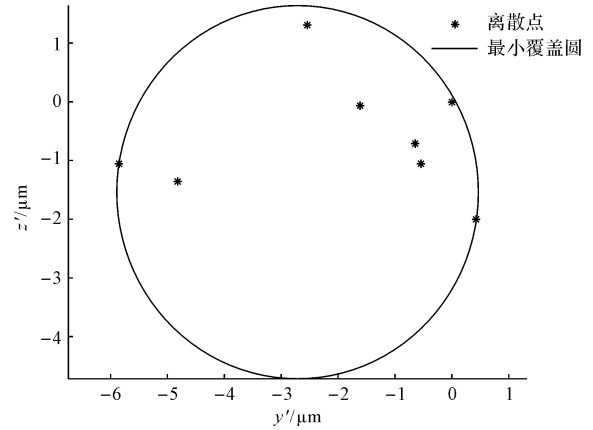


图 6 MATLAB 计算结果 1

同理,将表 4 中的数据代入以上程序。

得到的圆心位置为(-3.931 589 270 716 889, -16.080 312 874 278 057)。

MATLAB 计算结果 2 如图 7 所示。

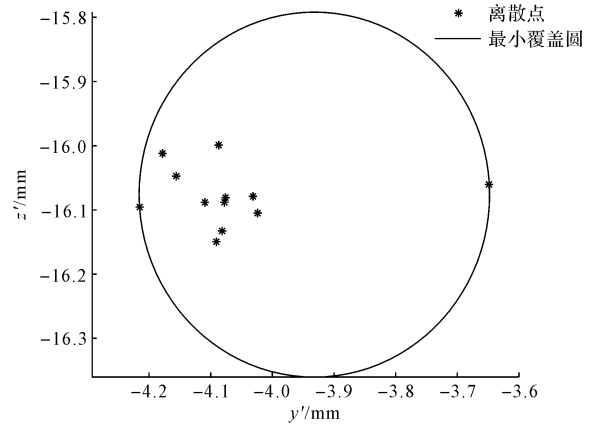


图 7 MATLAB 计算结果 2

(1)以表 3 中的数据作空间直线度误差评定,采用笔者所述的方法进行求解,可以得到直线度误差为 6.356 μm;(2)再以表 4 中的数据做空间直线度误差评定,采用笔者所述的方法进行求解,可以得到空间直线度的误差值为 0.056 9 mm。

将所得到的数据与对应的原始数据,采用不同算法求解的空间直线度误差进行对比,评定结果对比 1 如表 7 所示。

表 7 评定结果对比 1

评定方法	评定结果/μm
最小二乘法	8.25 ^[8]
LSABC 算法	7.855 5 ^[9]
3DLSA 算法	7.244 8 ^[10]
最小区域法	7.026 ^[11]
转动惯量法	6.356

评定结果对比 2 如表 8 所示。

表 8 评定结果对比 2

评定方法	评定结果/mm
遗传算法	0.075 3
粒子群算法	0.070 1
变步长天牛须法	0.063 210
转动惯量法	0.056 9

5 结束语

该算法将被测点集通过轻质杆连接近似成为刚体,利用转动惯量的计算,将被测点集投影至平面内,将空间直线度误差评定问题转换为平面内最小圆覆盖问题,简化了空间直线度求解模型;

笔者选用了两组数据,简述了转动惯量的计算过程,利用 CATIA 软件进行实例建模计算,将问题转换为最小圆覆盖问题,最终利用 MATLAB 软件编程计算得到了实例数据的直线度误差,验证了转动惯量算法的可行性;

笔者将该算法所得结果与其他方法计算结果进行了对比,结果表明,该算法对空间直线度的评定精度有显著提高,可适用于对精度要求较高的场合。

参考文献 (References) :

[1] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 11336 - 2004, 直线度误差检测[S]. 北京:中国标准出版社,2004.

[2] 陈君宝,王 宸,王生怀. 基于变步长天牛须搜索算法的空间直线度误差评定[J]. 工具技术,2018,52(8):136-138.

[3] 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.

[4] 廖 平,喻寿益. 基于遗传算法的空间直线度误差的求解[J]. 中南工业大学学报,1998(6):586-588.

[5] 谢江平,张新宝. 基于平面投影的空间直线度误差评定[J]. 计量技术,2011(6):3-5.

[6] 焦扬松. 有关惯量主轴的计算方法[J]. 贵州工程应用技术学院学报,2018,36(3):102-114.

[7] 王仲锋,杨凤宝. 空间直角坐标转换大地坐标的直接解法[J]. 测绘工程,2010,19(2):7-9,12.

[8] 甘永立. 形状和位置误差检测[M]. 北京:国防工业出版社,1995.

[9] 胡仲勋,杨旭静,王伏林. 空间直线度误差评定的 LSABC 算法研究[J]. 工程设计学报,2008(3):187-190,212.

[10] 胡仲勋,杨旭静,金湘中. 评定空间直线度误差的 3DLS 算法研究[J]. 中国机械工程,2010,21(3):325-329.

[11] 李淑娟,刘云霞. 基于坐标变换原理的最小区域法评定空间直线度误差[J]. 计测技术,2006,26(1):24-25.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

王 峰,赵晓巍,于大国. 基于转动惯量算法的空间直线度误差评定方法研究[J]. 机电工程,2020,37(12):1466 - 1472.

WANG Feng, ZHAO Xiao-wei, YU Da-guo. Spatial straightness error assessment based on moment of inertia algorithm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(12):1466 - 1472.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>