DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.043

基于网格搜索算法的圆锥度误差计算*

雷贤卿[1] 韦芳霞[1] 薛玉君[1] 李济顺[2] 段明德[1]

(1.河南科技大学机电工程学院,洛阳 471003;2.河南省机械设计及传动系统重点实验室,洛阳 471003)

【摘要】 针对圆锥度误差评定中寻找理想圆锥轴线问题,提出了网格搜索算法,并建立了圆锥度误差数学模型。该算法是在圆锥初始、终止截面的最小二乘圆心周围,布置一定边长的正方形并以此划分网格点,将两截面的网格点两两连线作为理论圆锥轴线,计算最小区域圆锥度误差。论述了采用网格搜索算法求解圆锥度误差的原理和步骤。实例表明,网格搜索算法可以有效、正确地评定圆锥度误差。

关键词:圆锥度 网格搜索算法 最小区域 误差评定

中图分类号:TH161^{+}.12 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-1298(2010)11-0219-04

Mesh Searching Algorithm for Calculating Conicity Error

Lei Xianqing[1] Wei Fangxia[1] Xue Yujun[1] Li Jishun[2] Duan Mingde[1]

(1. *School of Mechatronics Engineering*, *Henan University of Science & Technology*, *Luoyang* 471003, *China*

2. *Henan Key Laboratory of Modern Mechanical Design and Transmission System*, *Luoyang* 471003, *China*)

Abstract

In view of searching the ideal cone axis for error evaluation of the conicity, a new kind of algorithm of evaluating conicity error, named as mesh searching algorithm, and the mathematical model of conicity error were presented. The algorithm has three steps. Firstly, a certain length square was collocated around the centre of least square circle on the initial section and terminal section. Secondly, a series of mesh points on the initial section and terminal section could be obtained by dividing the certain length square. And a series of lines could be obtained by connecting each mesh point on the initial section to the each mesh point on terminal section. Thirdly, a series of lines were regarded as theoretical cone axis, then the minimum zone conicity error could be calculated according to the definition of conicity error. The principle of the method and the steps of using the mesh searching algorithm to solve the conicity error were described in detail. Results of the calculation example revealed that the conicity error could be evaluated effectively and accurately by using the mesh searching algorithm.

Key words Conicity, Mesh searching algorithm, Minimum zone, Error evaluation

引言

圆锥度是构成圆锥面各要素形状误差的总体表现,圆锥度误差值是用包容被测轮廓的两同轴圆锥面间的距离来确定的。结合其他形状误差的评定方法,圆锥度误差的评定有最小二乘法及最小区域法,最小二乘法评定简单但不太精确,最小区域法是符合定义的圆锥度误差评定方法。

圆锥度误差评定的两个关键问题是:①采用何种参数方程描述圆锥面以利于数据测量和处理。②采用何种优化搜索方法进行方程求解[1~3]。文献[4]提出了一种基于归一化实数编码遗传算法的圆锥度误差评定算法,此算法在处理复杂的非线性优化问题上具有独到之处;文献[5]基于序列二次规

收稿日期:2009-11-09 修回日期:2010-01-25

* 国家自然科学基金资助项目(50875076)和河南科技大学科研创新能力培育基金资助项目(2010CZ0002)

作者简介:雷贤卿,教授,博士,主要从事精密测试技术研究,E-mail:ly-lxq@163.com

划法提出了一种圆锥度误差的自适应算法;文献[6]以被测圆锥与实际圆锥表面相接触且空间余隙的积分和为最小目标函数,提出了最佳内接、最佳外接圆锥度误差评定法。这些算法一定程度上可以较好地解决圆锥零件形状误差的评定问题。但这些评定算法需要优化的目标函数参数比较多,算法复杂且不易编程实现。

本文根据圆锥度误差定义,提出一种基于网格搜索的圆锥度误差评定算法,该算法可实现圆锥形零件形状误差的评定,可得到最小区域圆锥度误差。

1 网格搜索算法评定原理

圆锥度误差评定方法(最小区域法)的核心就是根据被测圆锥面上的点解算出包容实际轮廓的理想圆锥面的轴线方程。文献[7]中的结果可知最小二乘法圆锥度误差比最小区域圆锥度误差大10% ~ 15%,所以圆锥面理想轴线一定在最小二乘轴线的周围。设测量圆锥时的起始、终止测量截面分别为 $z=0$ 和 $z=H$(z 为测量截面的轴向坐标),在两测量截面的最小二乘圆心周围特定区域内布置一系列的点,以其中一截面上的点遍历另一截面上的点构造直线群,此直线群中必有某条直线与包容被测点的构成最小区域的两同心圆锥的理想轴线最接近或者重合。由于最小二乘圆心周围的网格点是按一定规则人为设定的,故直线群中的每一条直线的参数都可计算。通过寻找所有测量点至每一条直线所构造的圆锥面之间的关系,根据最小区域评定圆锥度误差的定义,可求出最小区域圆锥度误差。

2 网格搜索算法步骤

设圆锥面上各测量点的坐标 $A_{ij}(x_{ij},y_{ij},z_j)$($j$ 表示测量截面,$j=1,2,\cdots,M$;i 表示截面上的测量点,$i=1,2,\cdots,N$);被测圆锥面采用最小二乘评定算法[3]得到的最小二乘轴线作为本文圆锥度误差的初始轴线,并计算出最小二乘圆锥度误差。

2.1 计算初始轴线与测量起始、终止截面交点坐标

设测量截面按等间隔测量时,被测圆锥面初始轴线(最小二乘轴线)与起始测量时的截面($z=0$ 截面)的交点坐标为 $A_0(x_0,y_0,z_0)$,与终止测量时的截面($z=H$ 截面)的交点坐标为 $A_M(x_M,y_M,z_M)$,A_0 与 A_M 的连线就是初始轴线。

$$\begin{cases} x_0 = \dfrac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_{i0} \\ y_0 = \dfrac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_{i0} \\ z_0 = 0 \end{cases} \qquad \begin{cases} x_M = \dfrac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_{iM} \\ y_M = \dfrac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_{iM} \\ z_M = H \end{cases}$$

2.2 构造网格点

如图1所示分别以端点 $A_0(x_0,y_0,z_0)$、$A_M(x_M,y_M,z_M)$ 为基准点,在 $z=0$、$z=H$ 平面内设置一边长为最小二乘圆锥度误差 f 倍数(f 也可以是估计值)的小正方形,将该正方形的边长上布置 n 个等分点($n-1$ 等分)并对边等分点两两连线共形成 n^2 个交点,初始截面网格点用 $d_{uv}(x_u,y_v,z_0)$($u=1,2,\cdots,n$;$v=1,2,\cdots,n$)表示,终止截面网格点用 $e_{st}(x_s,y_t,z_M)$($s=1,2,\cdots,n$;$t=1,2,\cdots,n$)表示,则

$$\begin{cases} x_u = x_0 - \dfrac{f}{2} + \dfrac{f}{n-1}(u-1) \\ y_v = y_0 - \dfrac{f}{2} + \dfrac{f}{n-1}(v-1) \\ z_0 = 0 \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} x_s = x_M - \dfrac{1}{2}f + \dfrac{1}{n-1}f(s-1) \\ y_t = y_M - \dfrac{1}{2}f + \dfrac{1}{n-1}f(t-1) \\ z_M = z_{iM} \end{cases} \tag{2}$$

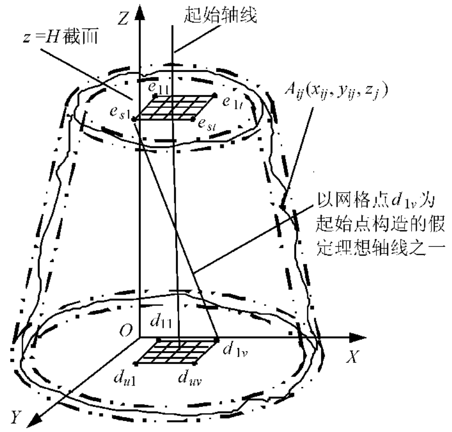

图1 圆锥度误差网格搜索评定原理

Fig. 1 Evaluating principle of conicity error based on mesh searching algorithm

2.3 构造直线群

依次用初始截面上的网格点遍历终止截面上的网格点,可形成 n^4 条直线,依据几何原理可以得到此直线群的方向数。

$$\begin{cases} P_{us} = \dfrac{x_u - x_s}{z_M - z_0} = \dfrac{x_u - x_s}{z_M} \\ Q_{vt} = \dfrac{y_v - y_t}{z_M - z_0} = \dfrac{y_v - y_t}{z_M} \end{cases} \tag{3}$$

2.4 理论圆锥面锥角和顶点坐标

用直线群其中之一作为理论圆锥轴线构造圆锥面,它与初始和终止两截面的平均半径可构成简化的圆锥模型,如图2中,起始、终止两截面上网格点对应的平均半径为 R_{uv}、R_{st},由三角形理论可以求出构造圆锥的锥角和顶点坐标。

初始截面测量点到 d_{uv} 的平均半径为

$$R_{uv}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sqrt{(x_{i1}-x_u)^2+(y_{i1}-y_v)^2}\qquad(4)$$

同理，终止截面上以网格点为圆心的平均半径为

$$R_{st}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sqrt{(x_{iM}-x_s)^2+(y_{iM}-y_t)^2}\qquad(5)$$

由图 2 可知，顶点坐标为 $D(x_p,y_p,z_p)$，半锥角为 θ，通过几何关系由初始和终止两截面截面平均半径和截面网格点求得理论圆锥顶点坐标和半锥角为

$$\begin{cases}x_p=x_s-(x_u-x_s)\dfrac{R_{st}}{R_{uv}-R_{st}}\\ y_p=y_t-(y_v-y_t)\dfrac{R_{st}}{R_{uv}-R_{st}}\\ z_p=z_M-(z_0-z_M)\dfrac{R_{st}}{R_{uv}-R_{st}}\end{cases}\qquad(6)$$

$$\theta=\arctan(R_{st}/|Dd_{uv}|)\qquad(7)$$

其中

$$|Dd_{uv}|=\sqrt{(x_p-x_u)^2+(y_p-y_v)^2+(z_p-z_M)^2}$$

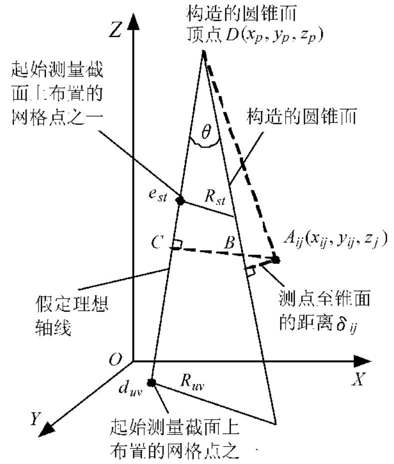

图 2　圆锥简化模型

Fig. 2　Simplified model of cone

2.5　计算圆锥度误差

根据理论圆锥轴线的方向数，每个理论轴线所构造的圆锥面对应的顶点坐标和锥角，计算圆锥度误差。由图 2 中的几何关系可知，$A_{ij}(x_{ij},y_{ij},z_j)$ 到理论轴线的距离为

$$\delta_{ij}=|A_{ij}B|\cos\theta=(|A_{ij}C|-|BC|)\cos\theta=$$
$$|A_{ij}C|\cos\theta-\sin\theta\sqrt{|A_{ij}D|^2-|A_{ij}C|^2}\qquad(8)$$

其中

$$|A_{ij}C|=\frac{|(x_{ij}-x_u,y_{ij}-y_v,z_j-z_0)\times(P_{us},Q_{vt},1)|}{\sqrt{p_{us}^2+Q_{vt}^2+1}}$$

$$|A_{ij}D|=\sqrt{(x_{ij}-x_p)^2+(y_{ij}-y_p)^2+(z_j-z_p)^2}$$

式中　$|A_{ij}C|$——测量点到假定理论轴线的距离

由于测量点至任一条轴线所构造圆锥面的距离中，都存在最大值、最小值和极差，则最小区域圆锥度误差值为

$$J_{area}=\min(\max\delta_{ij}-\min\delta_{ij})\qquad(9)$$

根据上述求解过程，圆锥度误差网格搜索算法的程序流程图如图 3 所示。

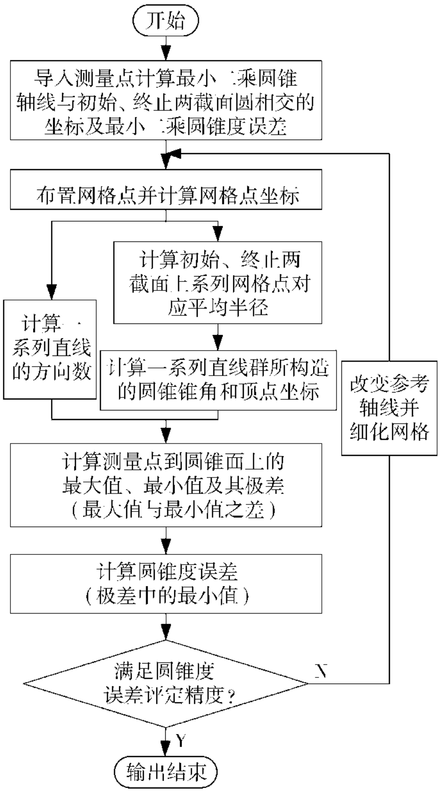

图 3　圆锥度误差网格搜索算法程序流程

Fig. 3　Flowchart of the mesh searching algorithm of the cone error

3　计算实例

将被测圆锥（轴承的圆锥滚子）大端置于三坐标测量机（Brown & Sharpe, Global Status574）的工作台上，测量时先在上端面及一轴截面上取点，确定测量坐标系，然后沿轴向非等间隔测量 4 个截面，每个截面非等间隔测量 8 个点。从其操作系统中导出的测量数据及测量结果如表 1、表 2 所示。

依据表 1、表 2 的数据及参数，按照圆锥度误差的定义，利用空间几何知识计算出的被测圆锥面的圆锥度误差为 0.102 6 mm。

利用表 2 中轴线参数计算此轴线与测量起始、终止截面的交点坐标，并以交点坐标为参考点，分别在起始、终止截面内以边长为 0.3 mm 划分网格点，利用本文所提算法，对表 1 中数据进行处理，划分 10 等分，得圆锥度误差 0.096 1 mm；划分 20 等分得出的圆锥度误差是 0.089 3 mm；划分 25 等分得出的圆锥度误差是 0.088 3 mm。

可以看出，本文所提算法计算的结果优于三坐标测量机的处理结果；等分点数越多计算出来的圆

表1 测点坐标

Tab.1 Coordinates of measuring points mm

序号	x	y	z	序号	x	y	z
1	-12.853	-17.677	1.700	17	17.313	-13.460	21.302
2	-19.335	-10.051	1.700	18	7.560	-20.942	21.302
3	-20.678	5.980	1.700	19	-4.489	-22.028	21.302
4	-11.181	18.060	1.700	20	-15.831	-16.016	21.302
5	9.366	18.848	1.700	21	-20.179	8.785	21.302
6	19.432	8.328	1.700	22	-6.339	20.523	21.302
7	19.658	-8.502	1.700	23	9.909	18.803	21.302
8	13.860	-16.569	1.700	24	21.261	2.874	21.302
9	12.373	-18.041	9.289	25	21.551	1.170	31.598
10	-1.594	-22.069	9.289	26	18.872	-11.293	31.598
11	-19.193	-11.000	9.289	27	7.295	-21.271	31.598
12	-15.440	15.029	9.289	28	-8.670	-21.071	31.598
13	2.722	21.007	9.289	29	-21.334	-7.695	31.598
14	17.223	12.330	9.289	30	-20.569	8.445	31.598
15	20.230	-7.472	9.289	31	-11.593	18.436	31.598
16	16.175	-14.561	9.289	32	12.935	16.951	31.598

锥度误差值越小,当 $n \geqslant 20$ 时,所计算出的圆锥度误差值之间相差小于0.001 mm,所以在实际应用划分网格时 $n \leqslant 20$ 即可。

表2 三坐标测量机测量结果

Tab.2 Measurement results by CMM

轴线参数					
起始点坐标			方向数		
x	y	z	i	j	k
-0.187	-0.365	1.7	-0.007 533 5	-0.007 189 5	0.999 945 8

4 结论

(1)本文算法是形状误差评定的一种新思路,为实现寻找理论圆锥轴线方程提供了一个有效方法。

(2)网格搜索算法满足最小区域原则,是用纯几何关系寻找理想圆锥轴线方程,避免了确定优化步长、方向等问题。

(3)依据该算法求得的最小区域圆锥度误差值优于在三坐标测量机上测得的圆锥度误差值。

参考文献

1 候宇,袁志文. 任意方位圆锥度误差的测量和评定[J]. 现代计量测试,1996(4):16~19.
Hou Yu, Yuan Zhiwen. Measurement and evaluation of conicity tolerance in arbitrary position and orientation [J]. Modern Metrological Testing Technology, 1996(4):16~19. (in Chinese)

2 王宇华,范彦斌. 圆锥轮廓误差的最小区域评定方法[J]. 测试技术学报,2004,18(2):147~150.
Wang Yuhua, Fan Yanbin. The minimal area method for the error evaluating of cone-type profile[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2004,18(2): 147~150. (in Chinese)

3 田社平. 圆锥轮廓误差最小二乘评定方法[J]. 计量技术,2005(3):25~27.

4 廖平,喻寿益. 基于归一化实属编码遗传算法的圆锥度误差计算[J]. 仪器仪表学报,2004,25(3):395~398.
Liao Ping, Yu Shouyi. Calculating of cone error based on genetic algorithms with canonicity real number encoding[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2004,25(3):395~398. (in Chinese)

5 Liu Baoqing, Dong Huimin. A method for evaluation of coning error based on adaptive cone[J]. Intelligent Robotics and Applications, 2008,5315:640~649.

6 刘书桂,叶声华,塚田忠夫, 等. 用最佳内接或最佳外接圆锥评定锥形零件误差的方法[J]. 仪器仪表学报,1997,18(1):109~112.

7 王瑞康,张国雄. 三坐标测量机上实现圆锥度误差测量和评定[J]. 仪器仪表学报,1993,14(1):1~7.
Wang Ruikang, Zhang Guoxiong. The measurement and evaluation of conical deviation on the 3-D coordinate measuring machine[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,1993,14(1):1~7. (in Chinese)