文章编号: 1008-1542(2006)02-0150-05

最小区域法评定圆度误差的计算机实现方法

郝宏伟[1], 刘顺芳[2], 范淑果[3]

(1. 河北工业职业技术学院机电系, 河北石家庄 050019; 2. 河北科技大学机械电子工程学院, 河北石家庄 050054; 3. 河北师范大学职业技术学院, 河北石家庄 050031)

摘 要: 针对在用计算机实现圆度测量的过程中, 首先要解决的就是评定方法的算法, 介绍了按最小区域法评定圆度误差的一种快速、简便、易于微机实现的数据处理方法, 并给出了用 C语言实现其算法后的结果。

关键词: 最小区域; 圆度误差; 评定方法; 数据处理

中图分类号: TG801 文献标识码: A

Method for evaluation of errors of minimal territory roundness on computer

HAO Hong-wei[1], LIU Shun-fang[2], FAN Shu-guo[3]

(1. Department of Machinery and Electronics, Hebei Institute of Vocation and Technology, Shijiazhuang Hebei 050019, China; 2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050054, China; 3. Vocation and Technology Institute, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei 050031, China)

Abstract: In order to use computer in the roundness measuring, the algorithm of verifying method must be written. In this paper, the data processing method for evaluating the circularity error with minimal territory roundness is introduced. The method is quick and convenient to realize on computers and the algorithm is realized with C language.

Key words: minimal territory roundness; circularity error; verifying method; data processing

一个回转体零件, 其横截面轮廓是否为一正圆, 需要与一理想圆进行比较才能得出结论。圆度误差的评定过程就是将被测横截面的实际轮廓与理想圆比较的过程。最小条件法是圆度误差评定中寻找理想圆的基本原则, 目前经常采用的方法有最小二乘圆法、最小外接圆法、最大内切圆法和最小区域圆法[1]。最小二乘圆法具有统计意义, 虽不能消除最大误差带来的影响, 但在实际测量点有限的情况下仍不失为一种安全性较好的方法, 最小外接圆法和最大内切圆法能最逼近地描述配合件中的定位性质, 因而具有明显的实用价值, 最小区域圆法是一种新的优良评定方法, 它不仅可以获得最小的误差评定结果, 而且对零件的性质有稳定的约束 (通过包边界), 因而是现代测量技术致力研究的评定方法。

在传统圆度测量仪中, 实现最小区域圆评定的方法是测量仪通过传感器描绘出被测工件的轮廓误差曲线, 然后测量人员用同心圆模板试凑包容轮廓误差曲线, 达到符合最小区域圆条件为止。该判别方法简单直观, 易于理解, 但是, 因为没给出代数判别方法, 故无法实现计算机仲裁。因此, 这就需要研究圆度误差评定方法的代数判别方法, 设计出圆度误差评定软件, 以便于在三坐标测量机上测量和评定圆度误差[2]。

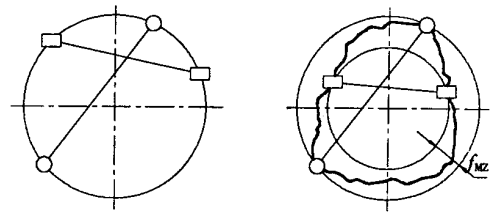
收稿日期: 2005-06-27; 修回日期: 2005-11-01; 责任编辑: 冯 民
基金项目: 河北省教育厅自然科学基金资助项目 (2003110)
作者简介: 郝宏伟 (1962-), 男, 河北藁城人, 高级工程师, 主要从事机械设计、制造方面的教学与研究。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　最小包容区域法 (最小条件)判别准则

用最小区域法评定圆度误差值是指以形成被测实际圆最小区域的 2个同心圆的半径差 f_{MZ}作为圆度误差[3]。若 $f_{MZ} \leqslant t$ 则被测圆合格。

如图 1所示, 由 2个同心圆包容实际被测轮廓时, 该轮廓上至少有 4个点内外相间地与 2个圆周接触, 则这 2个同心圆之间的区域就是最小包容区域 (简称最小区域)。这样 2个同心圆叫做最小区域圆, 它们的半径差 f_{MZ}, 即为符合定义的圆度误差值。最小区域根据被测要素与包容区域的接触状态来判断。



○—与外圆接触的圆; □—与内圆接触的圆

图 1　交叉准则

Fig 1　Intersection rule

2　求解符合最小区域圆度误差的思想

求解最小区域圆时, 为了比较迅速地找到满足最小条件的圆心位置, 首先以由公式直接计算出来的最小二乘圆圆心为 2个同心包容圆的初始圆心, 然后不断移动圆心, 寻找最小区域的圆心。

每次移心都需要确定移心方向和移心步长 。移心方向要以满足使 2个同心包容圆的半径差 Δ减小的充要条件为基础, 保证原有的接触点仍在新的内接圆上, 还要针对具体接触情况, 选择半径差减小速度最快的方向。通过不断移动圆心 O, 使 2个同心包容圆的半径差 Δ不断减小, 直至找到与实际轮廓曲线有 4个内外相间的交错接触点为止 (即达到 2个同心包容圆的半径差 Δ最小为止)。

3　按最小区域判别准则求圆度误差值的过程和步骤

以下叙述中用 A, B, C 表示内接触点, E, F, G 表示外接触点, I 表示新的接触点, J 表示直线与直线的交点, $\boldsymbol{n}$ 为圆心移动方向。当 2个同心圆的中心 O 沿 $\boldsymbol{n}$ 移动时, 出现新的外接触点和新的内接触点所需的移心步长分别为 e_L 和 e_S, 出现新的接触点所需的移心步长为 e。

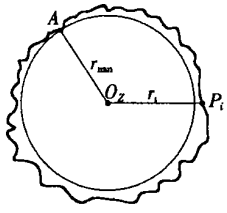


图 2　A 点的确定

Fig. 2　Determination of the point A

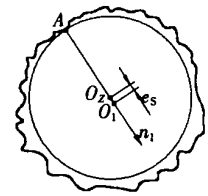


图 3　$\boldsymbol{n}_1$ 方向的确定

Fig. 3　Determination of the direction $\boldsymbol{n}_1$

1)找出最内接触点 A　以最小二乘圆的圆心 O_Z 为初始圆心, 并计算最小二乘圆的圆心 O_Z (x_Z, y_Z)和实际轮廓上各测点 $P_i(x_i, y_i)$对 O_Z 的半径 r_i, 找出最内接触点 A, 见图 2。

2)找出新接触点 B　沿背离 A 点的方向, 即取 $\boldsymbol{n}_1 = \overrightarrow{AO_Z}$ 的方向移动圆心, 确定移心步长 e_S, 新圆心为 $O_1(m, n)$, 并计算实际轮廓上各测点到 O_1 的半径值 r_i, 见图 3。找出最小半径点作为第 2内接触点 B, 取最大半径点作为第 1外点 E。此时为“1+ 2” $(E/A, B)$型接触形式, 见图 4。

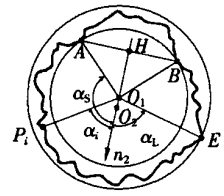


图 4　“1+ 2”型寻找新接触点时 $\boldsymbol{n}_2$ 的确定

Fig 4　Determineation of“$\boldsymbol{n}_2$” as finding a new point contact in the“1+ 2” model

3)“1+ 2”$(E/A, B)$型接触形式 (见图 4)　沿 AB 直线的垂直平分线 (即与 A, B 2点保持等距)且靠近外点 E 的方向 (即取 $\boldsymbol{n}_2 = O_1O_2$ 方向), 并以 e 为移心步长, 从 $O_1(m, n)$到 $O_2(p, q)$移动圆心, 计算各测点到 O_2 的半径 r_i, 得到新的接触点 I。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4) 判断新接触点 I 的属性 ①如果 $e_S < e_L$, 则 $e = e_S$, I 为内接触点, 将 I 定义为 C 点, 此时已有 1个外点 E 和 3个内点 A, B, C, 属"1+3"型接触形式 ($E/A, B, C$), 见图 5, 转步骤 5)。②如果 $e_S > e_L$, 则 $e = e_L$, I 为外接触点, 将 I 定义为 F 点, 此时已有 2个外点 E, F 和 2个内点 A, B, 属"2+2"型接触形式 ($E, F/A, B$), 见图 6, 转步骤 6)。

5) "1+3"型接触形式 ($E/A, B, C$) (见图 5) 以新接触点 I 和距离外接触点 E 较近的另一个内接触点的连线的垂直平分线为圆心的移动线, 且靠近外接触点 E 一方为移心方向, 步长为 e。

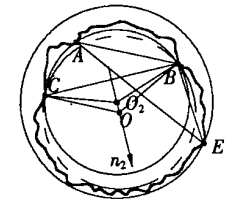


图 5 "1+3"型舍去距离外接触点远的点

Fig 5 Getting rid of the point which is distant from the circumscribed point in the "1+3" model

若 $|BE| < |AE|$, 则舍去 A 点, 保留 B 点, 将 C 点定义为 A 点, 即 $A = C$, 属"1+2"型接触形式 ($E/A, B$), 转步骤 3)。

若 $|AE| < |BE|$, 则舍去 B 点, 保留 A 点, 将 C 点定义为 B 点, 即 $B = C$, 属"1+2"型接触形式 ($E/A, B$), 转步骤 3)。

如图 5所示, 假设 $|BE| < |AE|$, 即 B 点比 A 点离 E 点近, 则沿 BC 直线的垂直平分线为圆心移动线, 且靠近外点 E 方向, 步长为 e, 圆心由 O_2 移到 O 时, 外包容圆的半径变小, 内包容圆的半径增大, 圆弧 AC 曲率变小, 因此, A 点不再是移心后新的内包容圆上的点 (双点画线圆), 即 A 点在新的内包容圆的圆周外面, 亦即 A 点为虚接触点, 所以要舍去 A 点, 保留 B 点。反之, 如果 $|AE| < |BE|$, 即 A 点比 B 点距离外接触点 E 距离近, 则 B 点为虚接触点, 应该舍去 B 点, 保留 A 点。

6) "2+2"型接触形式 (见图 6) A, B, E, F 4点坐标均为已知, 设 k_1, k_2 分别为直线 AB, EF 的斜率。

当 $k_1 = k_2$, 即 $AB \parallel EF$ 时, 2对接触点相邻但互不交错, 应舍去 B 点 (或 A 点), 属"2+1" ($E, F/A$) 接触形式, 见图 6(a)所示, 转步骤 7)。

当 $k_1 \neq k_2$, 即 AB 与 EF 相交时, 2直线交点为 $J(a, b)$, 若 $|O_2J| < |O_2A|$, 则交点 J 在 AB 之间 (即交点 J 在内包容圆圆周内), A, B, E, F 4点内外交错, 见图 6(b), 则接触形式符合最小区域判别准则的接触形式, 此时 2个同心圆间的区域已为最小区域, 转步骤 10)。否则, 2对内、外接触点相邻但互不交错, 见图 6(c)、图 6(d), 转步骤 8)。

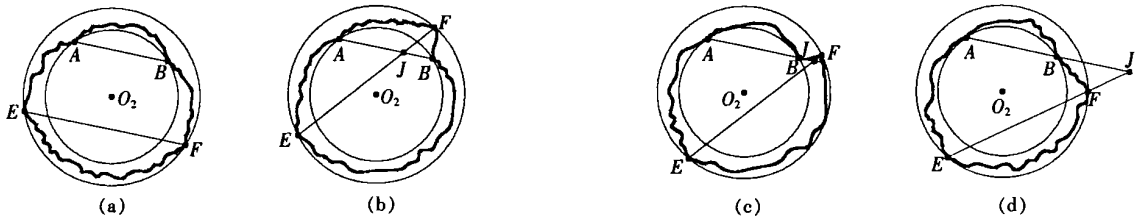


图 6 "2+2"型接触形式

Fig 6 Contact fomal of "2+2" model

7) "2+1"型接触形式 (见图 7) 此形式实际上仍为"2+2"型接触形式, 因为 B 点仍在移心后的新内接圆上, 但是, 为了数学模型简单, 故记为"2+1", 并将被舍去的点记为 (B)。

沿 EF 垂直平分线 (即保持与 E, F 2点等距) 且远离内接触点 A 方向 $\boldsymbol{n}_3$, 从 O_2 到 O_3 移动圆心, 计算移心步长 e、新圆心 $O_3(K, L)$、各测点 P_i 到 O_3 的半径 r_i。

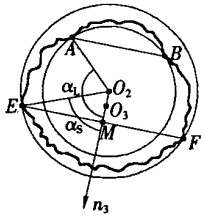


图 7 "2+1"型移心方向的确定

Fig 7 Determination of the moving center's direction in the "2+1" model

若 $e_S < e_L$, 则 $e = e_S$, 得到的新接触点 I 为内接触点, 将 I 点定义为 B 点, 即 $B = I$, 属"2+2"型接触形式 ($E, F/A, B$, 实为"2+3"型), 转步骤 6)。

若 $e_S > e_L$, 则 $e = e_L$, 得到的新接触点 I 为外接触点, 且 I 点必将落在 A 点一侧的弧 EF 之间 (因外接触圆的半径变小), 将 I 点定义为 G 点, 即 $G = I$, 属"3+1"型接触形式 ($E, F, G/A$, 实为"3+2"型), 见图 8, 转步骤 9)。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

8)“2+ 2”型接触形式　“2+ 2”型接触形式中, 交点 J 和 A 或 B 点重合以及在 A, B 2点之外的情况, 即 J 点在内包容圆圆周及圆周之外。

见图 9, 设 M 为 EF 直线的中点, 应舍去离 M 点远的原有内接触点。

若 $|BM| < |AM|$, 则舍去 A 点, 保留 B 点, 并将 B 点定义为 A 点, 即 $A = B$, 属“2+ 1”型 (E, F /A), 转步骤 7)。

若 $|AM| < |BM|$, 则舍去 B 点, 保留 A 点, 属“2+ 1”型接触形式, 转步骤 7)。

图 9中, 假设 $|BM| < |AM|$, 沿 EF 垂直平分线且远离内点方向 $\boldsymbol{n}_4$ 移动圆心, 新圆心为 O, OA 与 $\boldsymbol{n}_4$ 夹角比 OB与 $\boldsymbol{n}_4$ 夹角大, 即 $|AM|$ 大于 $|BM|$。此时, $OA > OB$, 移心后内包容圆的半径应为 OB, 所以, 移心后 A 点不可能在新的内包容圆上 (双点画线圆), 而是在新的内包容圆圆周之外, 即 A 点是虚接触点, 故应舍去 A 点, 保留 B 点。反之, 如果 $|AM| < |BM|$, 则 B 点是虚接触点, 应舍去 B 点, 保留 A 点。

总之, 可利用比较 $|AM|$ 与 $|BM|$ 的大小来确定 A, B 2点的舍取。

9)“3+ 1”型接触形式 (E, F, G /A, 实为“3+ 2”型) (见图 8)　舍去离 A 点远的外接触点, 并沿离 A 点近的外接触点和 G 点连线的垂直平分线方向 ($\boldsymbol{n}_5$) 移动圆心。

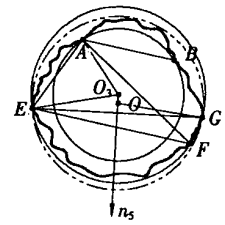


图 8　“3+ 1”型舍去离 A 点远的原外接触点

Fig 8　Getting rid of the original circumscribed point which is distant from the “A” point in the “3+ 1” madel

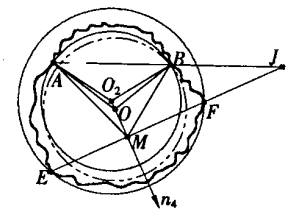


图 9　舍去离 M 点远的原内接触点

Fig 9　Getting rid of the originnal and internal contactpoint which is distant from the “M” point

若 $|AE| < |AF|$, 舍去 F 点, 并将 G 点定义为 F 点, 即 $F = G$, 属“2+ 1”型接触形式 (E, F /A, 实为“2+ 2”型), 转步骤 7)。

若 $|AF| < |AE|$, 舍去 E 点, 并将 G 点定义为 E 点, 即 $E = G$, 属“2+ 1”型接触形式 (E, F /A, 实为“2+ 2”型), 转步骤 7)。

见图 8, 假设 $|AE| < |AF|$, 则沿 EG 直线的垂直平分线且远离内点 A 的方向由 O_2 移心到 O, 此时, 外接圆的半径变小为 OG, 点 F 将落在新的外包容圆的里面 (双点画线圆), 不再是外包容圆上的点, 故 F 点为虚接触点, 应舍去。反之, 若 $|AF| < |AE|$, 则 E 点为虚接触点, 应舍去。

10) 求圆度误差值 f_{MZ} (A, B, E, F 为 4个内外交错点)　在找到 4个内外交错点后, 将直接采用最初实测的坐标值来确定符合最小条件的同心包容圆。因为这样可以消除计算过程中的全部累积误差。所以只要不求错 4个交错点的位置, 计算过程中的全部累积误差就对最终的计算结果毫无影响。设由 A, B, E, F 确定同心圆的圆心 $O(U, V)$, 见图 6(b), 所以圆度误差为

$$f_{MZ} = R_E - R_A。$$

根据上述求解过程, 并采用一定的程序设计技术, 可以设计出按最小区域法评定圆度误差值的计算软件。图 10给出了该计算软件的程序流程框图。

4　数据处理实例分析

根据图 10所示的程序框图用 C语言编制圆度误差评定软件, 并对石家庄金刚集团生产的康明斯牌系列发动机上的 6BT活塞销在三坐标测量机上进行了测量 (该活塞销的技术参数如下: 直径为 (40 ±0. 003 2) mm, 圆度公差 f = 0. 0025mm, 圆度公差等级为 5级, 表面粗糙度 R_a 为 0. 8), 对标号为 1#, 2#, 3#的试件

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

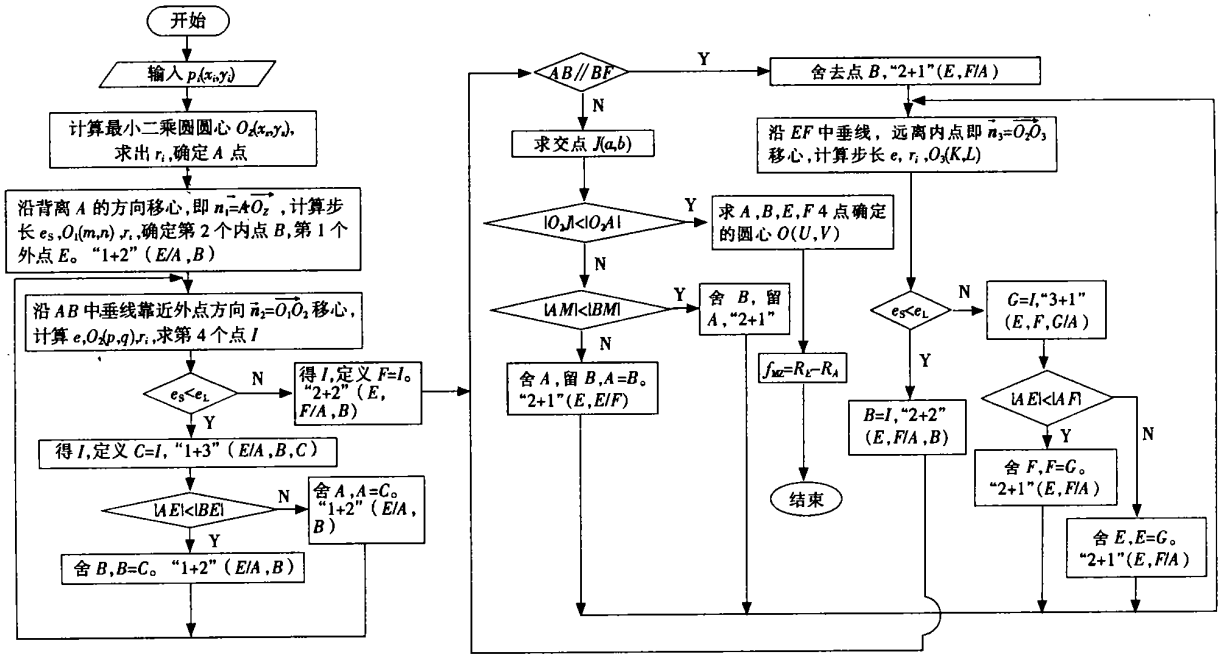


图 10 按最小区域法评定圆度误差的程序流程图

Fig. 10 Program diagram of roundness error judged by the minimum field

采用等角度采点(每间隔 10°采 1个测量点，共 36个测量点)，对测量数据进行处理，结果见表 1。

通过对实验过程和数据结果分析可知：根据最小区域判别准则，利用计算机快速精确算法评定圆度误差速度快、时间短、精度高。

表 1 某次实例测量数据的处理结果

Tab. 1 Processed result of one actual measuring data

试件	测点数 N	圆度误差值 f_{MZ} /mm
1#	36	0.002 6
2#	36	0.002 2
3#	36	0.002 4

参考文献：

[1] 闵 莉，吴玉厚，富大伟. 圆度误差的现状与展望[J]. 沈阳建筑工程学院学报，1999，15(3)：273-276.

[2] 侯伯杰. 一种快速、准确的圆度误差评定的计算机实现方法[J]. 计量技术，1994，(4)：7-9.

[3] 齐秀彪. 圆度误差数学模型的建立与仿真分析[J]. 本溪冶金高等专科学校学报，2001，3(2)：26-28.

(上接第 145页)

参考文献：

[1] 阮宇成. 茶叶中的硒及其与人体健康[J]. 中国茶叶，1987，(5)：10-11.

[2] 陈宗懋. 也谈茶硒素与人体健康[J]. 中国茶叶，1988，(4)：14-15.

[3] 方兴汉，吴 彩，沈星荣. 从我国茶叶含硒量状况谈我国高硒茶的开发应用[J]. 中国茶叶，1990，(6)：6-8.

[4] LAM S K. 9th seah cheng siang memorial lecture: Gastric cancer-where are we now? [J]. Ann Acad Med Singapore, 1999, 28(6): 881-883.

[5] 杜琪珍，沈星荣，方兴汉. 茶叶中的硒成分分析[J]. 茶叶科学，1991，11(2)：133-137.

传播科学技术，扩大对外交流。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net