

球度误差的网格搜索算法*

雷贤卿¹ 宋红卫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. 河南科技大学机械设计及传动系统重点实验室, 洛阳 471003)

【摘要】 结合几何形状误差的定义及球度误差的几何特征,提出了一种球度误差评定的几何算法——网格搜索算法。以最小二乘球心为初始参考点,按一定的规则布置一系列的网格点,依次以各网格点为假定理想球心计算所有测量点的半径值,通过比较、判断获得相应评定方法(最小外接球法、最大内接球法和最小区域球法)的球度误差值。阐述了球度误差网格搜索算法原理和实现过程。实例结果表明,该算法可以有效、正确地评定球度误差。

关键词: 误差评定 球度误差 网格搜索算法

中图分类号: TH161 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)05-0222-04

Sphericity Error Based on Mesh Search Algorithm

Lei Xianqing¹ Song Hongwei¹ Xue Yujun¹ Li Jishun² Duan Mingde¹

(1. School of Machatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

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

Abstract

With the definition of the geometry error and the geometric characteristics of sphericity error, a sphericity error evaluation method with the name of mesh search algorithm was presented. The principle of the algorithm was that with the least-square as the initial reference point, and a series of mesh points were collocated around the periphery of the least-square mad self-alignment according to the certain rules, the radius values of all the measured points were calculated by using each mesh point as the ideal center. By comparison and judgment to obtain corresponding evaluation methods (minimum circumscribed sphere (MCS), maximum inscribed sphere (MIS), minimum zone sphere (MZS)). The principle and the realization process of the mesh search algorithm were described in detail. The examples results show that the sphericity error can be evaluated effectively and exactly by using this algorithm.

Key words Error evaluation, Sphericity error, Mesh search algorithm

引言

随着精密制造技术的发展,高精密球面或球体零件的应用日趋广泛。球面零件的形状误差对机械产品的精度有着重要的影响。因此,研究球面零件形状误差的高精度评定算法,在理论及实践上都具有重要的意义。

国际标准 ISO1101 中规定了直线度、平面度、圆度、圆柱度等形状误差的评定,但对球度误差评定并

未做出明确规定,通过借鉴圆度、圆柱度误差的评定,定义最小区域球法、最小外接球法、最大内接球法和最小二乘法 4 种球度误差,分别对应不同的理想球心。球度误差定义为实际被测球相对于其理想球的变动量,且理想球的位置应符合最小条件;球度误差的评定即可以采用最小二乘法、最小区域法、最小外接球法和最大内接球法这 4 种评定方法。

球度误差的测量与评定是当前几何量测量领域的一个研究热点,在评定理论及算法上已取得了许

收稿日期: 2011-04-14 修回日期: 2011-06-06

* 国家自然科学基金资助项目(50875076)

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

多研究成果^[1-11]。这些研究成果对球度误差的评定理论和方法都有着重要的促进作用。

本文结合几何形状误差的定义及球度误差的几何特征,提出一种球度误差评定的几何算法——网格搜索算法,以实现球度误差的精确评定。

1 网格搜索算法的原理

首先以一定方法(如最小二乘法)确定一个参考点(如最小二乘球心),以参考点为基准构造一定边长(如最小二乘球度误差或估计的球度误差)的立方体;其次将立方体的各个边 n 等分得到 $(n+1)$ 个等分点,将同坐标平面内的等分点两两连线构造出 $(n+1)^3$ 个网格点。然后依次以各网格点为假定理想球心,计算所有测量点的半径值;对于任一假定理想球心,都可以得到一个最大半径、一个最小半径和一个半径极差值;有 $(n+1)^3$ 个网格点(假定理想球心),就可以得到 $(n+1)^3$ 个最大半径、 $(n+1)^3$ 个最小半径和 $(n+1)^3$ 个半径的极差值;依据球度误差的定义及评定方法可知, $(n+1)^3$ 个最大半径中的最小者即为最小外接球半径, $(n+1)^3$ 个最小半径中的最大者即为最大内接球半径, $(n+1)^3$ 个半径的极差值中的最小值即为最小区域球度误差,以此实现球度误差的精确评定。

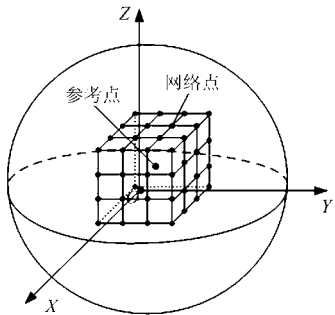


图 1 球度误差网格搜索算法原理图

Fig. 1 Principle of the mesh search arithmetic for ball degrees error evaluation

2 球度误差网格搜索算法步骤

(1) 求最小二乘球心及最小二乘球度误差

设测量点坐标为 $P_k(x_k, y_k, z_k)$ ($k = 1, 2, \dots, N$), 用最小二乘法计算出球的最小二乘球心坐标 $B(x_0, y_0, z_0)$ 及最小二乘球度误差 f 。球度误差的最小二乘评定算法在很多文献中都有详细的描述, 本文不再重复。

(2) 构造网格点

以最小二乘球心坐标 $B(x_0, y_0, z_0)$ 为参考点, 以最小二乘球度误差(或估计的球度误差 f) 为边长构造立方体, 将立方体的各个边 n 等分并将同坐标平

面内的 $(n+1)$ 个等分点两两连线得到 $(n+1)^3$ 个网格点(交叉点)(图 2)。依据几何关系, 计算出各网格点 $A(k_1, k_2, k_3)$ 的坐标

$$\begin{cases} x_w = x_0 - \frac{f}{2} + \frac{f}{n}(k_1 - 1) & (k_1 = 1, 2, \dots, n+1) \\ y_w = y_0 - \frac{f}{2} + \frac{f}{n}(k_2 - 1) & (k_2 = 1, 2, \dots, n+1) \\ z_w = z_0 - \frac{f}{2} + \frac{f}{n}(k_3 - 1) & (k_3 = 1, 2, \dots, n+1) \end{cases} \quad (1)$$

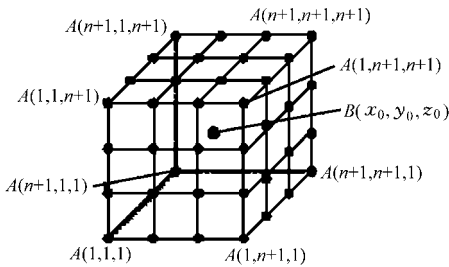


图 2 球度网格点坐标示意图

Fig. 2 Coordinate schematic of ball degrees grid points

(3) 测量点半径

依次以每一个网格点为假定理想球心, 调用点与点之间的距离公式

$$R(k_1, k_2, k_3) = \sqrt{(x_k - x_w)^2 + (y_k - y_w)^2 + (z_k - z_w)^2}$$
 计算所有测点的半径值, 并找出每一个网格点为假定理想球心时的最大半径 $R_{\max}(k_1, k_2, k_3)$ 、最小半径 $R_{\min}(k_1, k_2, k_3)$ 及半径极差 $R_{\text{cha}}(k_1, k_2, k_3)$ 。有 $(n+1)^3$ 个网格点就可以得到 $(n+1)^3$ 个最大半径 $R_{\max}(k_1, k_2, k_3)$ 、 $(n+1)^3$ 个最小半径 $R_{\min}(k_1, k_2, k_3)$ 和 $(n+1)^3$ 个半径的极差值 $R_{\text{cha}}(k_1, k_2, k_3)$ 。

(4) 最小外接球球度误差

在 $(n+1)^3$ 个最大半径 $R_{\max}(k_1, k_2, k_3)$ 中, 最小者 $\min\{R_{\max}(k_1, k_2, k_3)\}$ 即为被测球的最小外接球半径, 用符号 R_{out} 表示, 所对应的网格点即为最小外接球球心, 用 $O_{\text{out}}(x_{\text{out}}, y_{\text{out}}, z_{\text{out}})$ 表示。与此球心相对应的所有测点最小半径用 r_{out} 表示, 则依据最小外接球法概念可知, 最小外接球法球度误差为

$$F_{\text{out}} = R_{\text{out}} - r_{\text{out}} \quad (2)$$

(5) 最大内接球球度误差

在 $(n+1)^3$ 个最小半径 $R_{\min}(k_1, k_2, k_3)$ 中, 最大者 $\max\{R_{\min}(k_1, k_2, k_3)\}$ 即为被测球的最大内接半径, 用符号 r_{in} 表示, 所对应的网格点即为最大内接球球心, 用 $O_{\text{in}}(x_{\text{in}}, y_{\text{in}}, z_{\text{in}})$ 表示。与此球心相对应的所有测点的最大半径用 R_{in} 表示, 则依据最大内接球法概念可知, 最大内接球法球度误差为

$$F_{\text{in}} = R_{\text{in}} - r_{\text{in}} \quad (3)$$

(6)最小区域球度误差

在 $(n+1)^3$ 个半径的极差值 $R_{cha}(k_1,k_2,k_3)$ 中,最小者 $\min\{R_{cha}(k_1,k_2,k_3)\}$ 即为包容被测球轮廓的最小区域。与此相对应的网格点即为最小区域球球心,用 $O_{area}(x_{area},y_{area},z_{area})$ 表示,则最小区域法球度误差为

$$F_{area} = \min\{R_{cha}(k_1,k_2,k_3)\} \tag{4}$$

为提高被测球的形状误差评定精度,可在步骤(2)中改变等分点的个数或者以半径差最小的网格点坐标为新的参考点布置更细密的网格,重复步骤(3)~(6)。

当所求出的半径极差的最小值 $R_{cha,min}$ 与半径极差的次最小值 $R_{ccha,min}$ 十分接近(其差值小于0.000 1 mm)时,可以认为此时的最小区域球度误差已经十分接近符合最小条件球度误差的真值,此时的最小极差值就是最小区域法球度误差。

球度误差网格搜索算法流程如图3。

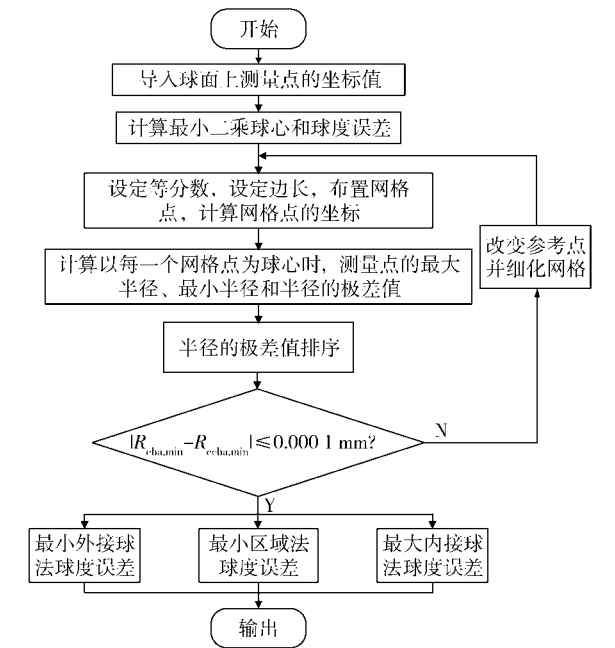


图3 球度误差网格搜索算法流程图

Fig.3 Flowchart of the mesh search arithmetic for ball degrees error evaluation

3 实例验证

为了验证球度误差网格搜索算法的正确性,利用球度误差网格搜索算法对表1中的测量数据^[11]进行球度误差评定。

用所提算法处理表1的测量数据时,初始条件如下:初始参考点:最小二乘球心,球心坐标为(-0.004 730 4,-0.001 702 7,0.001 816 7);立方体边长:0.021 mm(文献[11]球度误差的2倍);立方体边长等分数:40等分。

表1 测量点坐标

Tab.1 Coordinate values of measurement points mm

序号	X	Y	Z
1	12.752 9	2.248 7	48.328 6
2	10.607 3	7.427 3	48.326 7
3	6.475 1	11.215 2	48.330 6
4	-4.429 1	12.168 9	48.329 6
5	-9.156 4	9.156 4	48.326 7
6	-12.167 4	4.428 6	48.323 8
7	-12.900 6	-1.128 7	48.329 6
8	-11.215 6	-6.475 3	48.332 5
9	-7.428 5	-10.609 0	48.334 4
10	-2.248 9	-12.753 9	48.332 5
11	3.351 7	-12.508 6	48.329 6
12	8.324 2	-9.920 4	48.330 6
13	42.672 0	24.636 7	8.688 2
14	28.260 9	40.360 8	8.687 9
15	-12.753 4	47.596 3	8.688 6
16	-31.673 0	37.746 4	8.688 4
17	-44.655 1	20.823 0	8.687 9
18	-49.268 5	0.000 0	8.687 4
19	-44.657 7	-20.824 2	8.688 4
20	-31.674 8	-37.748 6	8.688 9
21	-12.754 4	-47.600 1	8.689 3
22	8.559 9	-48.528 7	8.688 9
23	28.262 6	-40.363 2	8.688 4
24	42.673 7	-24.637 7	8.688 6
25	19.869 9	7.232 0	-45.345 8
26	14.952 1	14.951 2	-45.343 9
27	7.232 3	19.870 7	-45.347 6
28	1.843 0	21.065 4	-45.347 6
29	-10.572 7	18.312 5	-45.346 7
30	-17.320 3	12.127 8	-45.343 9
31	-20.821 7	3.671 4	-45.341 2
32	-20.425 0	-5.472 9	-45.346 7
33	-16.199 4	-13.592 9	-45.349 4
34	-8.937 4	-19.166 2	-45.351 2
35	8.936 5	-19.164 3	-45.346 7
36	16.198 7	-13.592 3	-45.347 6

用本文网格搜索算法对测量数据进行计算所得的球度误差及相应球心坐标如表2。

运用球度误差网格搜索算法对表1的测量数据进行计算只需用时10 s,且不用分别构造数学模型去逐个计算不同方法的球度误差,能够很快地得到球度误差值。并且由表2可知:网格搜索算法得到

表 2 数据处理结果

Tab.2 Results of data processing mm

评定方法	球心坐标			球度 误差
	X	Y	Z	
最大内接球法	0.004 719	-0.002 122	-0.000 283	0.016 1
最小外接球法	-0.003 155	-0.003 172	0.000 241	0.015 9
最小区域法	0.003 669	-0.003 172	-0.000 283	0.009 6
最小区域法 ^[11]	0.003 509	-0.003 305	-0.000 292	0.009 7

的最小区域球度误差(0.009 6 mm)与文献[11]中求得
的球度误差(0.009 7 mm)基本相等,说明球度

误差网格搜索算法可以有效、准确地对球度误差进行
评定。

4 结束语

通过对球度误差网格搜索评定算法的实例分析,证明球度误差网格搜索评定算法能够有效地对球度误差进行精确评定,可以实现对球度误差(最大内接球、最小外接球和最小区域球)的统一评定。在此基础上设计出的球度误差评定软件也可以在三坐标测量机、球度测量仪等仪器上运用,能够满足测量需要。

参 考 文 献

1 刘飞,彭晓南. 最小外接球法球度误差评价与实现[J]. 机械工程学报, 2009,45(9):243~248.
Liu Fei, Peng Xiaonan. Evaluation of sphericity error by using minimum circumscribed sphere [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 243~248. (in Chinese)

2 谭静,任粉梅,温秀兰,等. 球度误差及其评定方法综述[J]. 计量与测试技术, 2004,31(1):10~11.
Tan Jing, Ren Fenmei, Wen Xiulan. Sphericity error and its evaluation methods review [J]. Metrology & Measurement Technique, 2004, 31(1): 10~11. (in Chinese)

3 Cui Changcai, Che Rensheng, Ye Dong, et al. Sphericity error evaluation using the genetic algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(4): 333~339.

4 Wen Xiulan, Song Aiguo. An immune evolutionary algorithm for sphericity error evaluation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(10): 1 077~1 084.

5 喻晓,黄美发,夏澎,等. 基于改进粒子群算法的球度误差评定[J]. 计算机系统应用, 2009(12):201~203.
Yu Xiao, Huang Meifa, Xia Peng, et al. Sphericity error evaluation based on an improved particle swarm optimization [J]. Computer Systems & Applications, 2009(12): 201~203. (in Chinese)

6 刘文文,邓善熙,聂恒敬,等. 球度误差包容评定的高精度实现方法[J]. 计量学报,2000,21(2):100~105.
Liu Wenwen, Deng Shanxi, Nie Hengjing, et al. High precision algorithm for evaluation of sphericity error [J]. Acta Metrologica Sinica, 2000, 21(2):100~105. (in Chinese)

7 徐烈,谭久彬,张杰,等. 经线法球度测量的评定方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(5):620~624.
Xu Lie, Tan Jiubin, Zhang Jie, et al. Evaluation of longitude sphericity error measurement [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33 (5): 620~624. (in Chinese)

8 郭旭蕊,金施群. 高精度球面轮廓的测量和评定方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007.
Guo Xurui, Jin Shiqun. The research on the high precision sphericity measurement and the evaluation of sphericity error [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. (in Chinese)

9 Fan Kuangchao, Lee Jichun. Analysis of minimum zone sphericity error using minimum potential energy theory [J]. Precision Engineering, 1999, 23(2): 65~72.

10 Samuel G L, Shunmugam M S. Evaluation of sphericity error from data using computational geometric techniques [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(3): 405~416.

11 Chen Chaokuang, Liu Chenhong. A study on analyzing the problem of the spherical form error [J]. Precision Engineering, 2000, 24(2): 119~126.