

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.09.018

圆柱体全局尺寸评定结果的可视化研究^{*}

赵新宇¹, 赵则祥^{2*}, 刘如意², 窦武阳²

(1. 中原工学院 计算机学院, 河南 郑州 451191; 2. 中原工学院 机电学院, 河南 郑州 451191)

摘要:针对圆柱体全局尺寸评定结果的可视化问题,对圆柱体提取轮廓的局部放大、全局尺寸圆柱面的直径及其轴线参数的确定以及全局尺寸圆柱面的显示等方面进行了研究。基于局部放大后圆柱体的圆周轮廓,建立了全局尺寸圆柱面直径及轴线参数的评定模型;依据全局尺寸圆柱面的直径及其轴线参数,建立了全局尺寸圆柱面轮廓坐标的计算模型,提出了圆柱体全局尺寸评定结果的可视化方法;利用所建立的模型,编制了圆柱体全局尺寸评定结果的可视化程序,对一孔的最小二乘尺寸、最小外接尺寸、最大内切尺寸和最大最小尺寸进行了评定及其结果的可视化。研究表明:所建立的模型正确,提出的可视化方法和编制的程序实用可靠,也可应用于圆柱度误差评定结果的可视化。

关键词:圆柱体;全局尺寸;评定结果;可视化

中图分类号:TH115;

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)09-1094-05

Study on visualization of evaluation results of cylinder's global sizes

ZHAO Xin-yu¹, ZHAO Ze-xiang², LIU Ru-yi², DOU Wu-yang²

(1. School of Computer Science, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: Aiming at the visualization of the evaluation results of cylinder's global sizes, some issues on the local magnification of the extracted profiles of cylinder, the determination of diameters of cylindrical surfaces of global sizes and their axes parameters, the displays of cylindrical surfaces of global sizes and etc. were studied. Based on the cylindrical roundness profiles with local magnification, the evaluation models of diameters and axis parameters of global sizes' cylindrical surfaces were built, and the visualization methods of evaluation results of the cylindrical global sizes were proposed. The calculation model of profiles' coordinates of global sizes' cylindrical surfaces was established on the basis of their diameters and axis parameters. The visualization program of evaluation results was developed by using the above models, and the least-squares size, minimum circumscribed size, maximum inscribed size and minimax size of one hole were evaluated and their evaluation results were visualized. The results show that the models built in this research are correct and the proposed visualization methods and the developed program are practical and reliable, which can be also used for the evaluation visualization of cylindricity errors.

Key words: cylinder; global sizes; evaluation result; visualization

0 引 言

对于高精度的圆柱孔和轴,其不仅有较高的尺寸精度要求,而且有较高的几何精度要求,分别根据 GB/

T 1800^[1]和 GB/T 1182^[2]等国家标准标注和控制,但相配合的孔、轴的可装配性和配合性能是由实际尺寸和形状误差综合作用的结果。

ISO/TC 213 在 ISO 14405.1^[3]中,将实际尺寸与

收稿日期:2019-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51975598,51475485)

作者简介:赵新宇(1986-),男,河南郑州人,助理工程师,主要从事计算机应用技术和精密测量方面的研究。E-mail:xinyuzhao@zut.edu.cn

通信联系人:赵则祥,男,教授,硕士生导师。E-mail:zexiang_zhao@zut.edu.cn

形状误差综合作用的结果用全局尺寸表征,全局尺寸包括最小二乘尺寸、最小外接尺寸、最大内切尺寸和最大最小尺寸。Ze-xiang ZHAO 等^[4-5]对圆柱体全局尺寸的测量以及偏心、倾斜对圆柱体全局尺寸评定结果的影响问题进行了研究。圆柱体全局尺寸中的最小外接尺寸、最大内切尺寸和最大最小尺寸的评定,其实质是一个‘minimax’问题,分别与圆柱度误差评定中的最小外接法、最大内切法和最小区域法对应。

许多学者对圆柱度误差评定中优化算法进行了研究。YANG Y 等^[6]提出了一种改进的协调搜索算法;ZHENG P 等^[7]采用运动学几何优化算法,实现了圆柱度误差的最小区域法评定;宗涛等^[8]提出了双圆心拟合与网格逼近的优化算法;史栩屹等^[9]将二次插值鲸鱼优化算法应用于圆柱度误差的评定;赵艺兵等^[10]采用拟粒子群进化算法对坐标测量机提取的圆柱体轮廓进行了圆柱度误差的评定。

上述圆柱度误差评定所用的优化算法均可用于圆柱体全局尺寸的评定。为了使评定结果更加直观,需要对评定结果可视化。

本文以局部放大的圆柱体圆周轮廓为基础,研究圆柱体全局尺寸评定结果的可视化。

1 圆柱体圆周轮廓的可视化

已知圆柱体圆周轮廓上所有采样点到工作台回转轴线的径向距离,可求得上述距离值的均值,即:

$$R = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \quad (1)$$

式中: ρ_{ij} —第*i*圆周轮廓上第*j*采样点到工作台回转轴线的径向距离;*m*—圆周轮廓数;*n*—每个圆周轮廓上的采样点数。

为使圆周轮廓的可视化,笔者对圆周轮廓进行局部放大,局部放大后第*i*圆周轮廓第*j*采样点到工作台回转轴线(*z*轴)的径向距离可表示为:

$$\rho_{Aij} = R + (\rho_{ij} - R) \times A \quad (2)$$

式中:*A*—局部放大倍数。*A*值过大,显示的圆周轮廓变形;*A*值过小,起不到轮廓局部放大的作用,*A*值的选择,满足圆周轮廓适宜放大即可。当*A*为1时,局部放大后圆周轮廓的 ρ_{Aij} 就是实际圆周轮廓的 ρ_{ij} 。

圆柱体局部放大后的圆周轮廓在 $o_A x_A y_A z$ 坐标系中的示意图如图1所示。

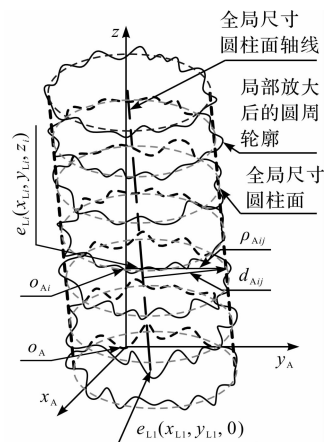


图1 局部放大后的圆周轮廓在 $o_A x_A y_A z$

坐标系中的示意图

d_{Aij} —局部放大后的第*i*圆周轮廓第*j*采样点到全局尺寸圆柱面轴线的垂直距离,全局尺寸圆柱面可以是最小二乘圆柱面、最小外接圆柱面、最大内切圆柱面、最大最小圆柱面等4种全局尺寸圆柱面之一; $e_{Li}(x_{Li}, y_{Li}, z_i)$ —全局尺寸圆柱面的轴线与局部放大后的第*i*圆周轮廓所在平面的交点; $e_{Li}(x_{Li}, y_{Li}, 0)$ —全局尺寸圆柱面的轴线在 $x_A o_A y_A$ 平面上的坐标; o_{Ai} —工作台回转轴线与局部放大后的第*i*圆周轮廓所在平面的交点

局部放大后的第*i*圆周轮廓示意图如图2所示。

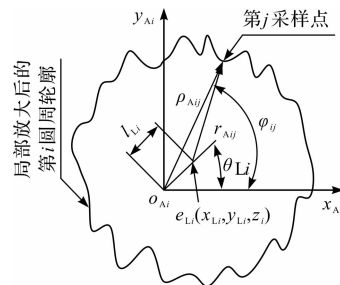


图2 局部放大后的第*i*圆周轮廓示意图

l_{Li} — e_{Li} 与 o_{Ai} 之间的距离; θ_{Li} — $o_{Ai} e_{Li}$ 与 x_{Ai} 轴之间的夹角; r_{Aij} —局部放大后的第*i*圆周轮廓第*j*采样点到 e_{Li} 的距离; φ_{ij} —局部放大后的第*i*圆周轮廓第*j*采样点与 x_{Ai} 间的夹角

l_{Li} 和 θ_{Li} 由下式确定:

$$\begin{cases} l_{Li} = \sqrt{x_{Li}^2 + y_{Li}^2} \\ \theta_{Li} = \tan^{-1} \frac{y_{Li}}{x_{Li}} \end{cases} \quad (3)$$

由图2可知:局部放大后的第*i*圆周轮廓第*j*采样点的 ρ_{Aij} 可表示为:

$$\rho_{Aij} = l_{Li} \cos(\varphi_{ij} - \theta_{Li}) + \sqrt{r_{Aij}^2 - [l_{Li} \sin(\varphi_{ij} - \theta_{Li})]^2} \quad (4)$$

2 局部放大后的全局尺寸的确定

依据图1所示的圆周轮廓采用圆柱度误差评定方法(最小二乘法、最小外接法、最大内切法和最小区域

法), 可得到相应全局尺寸圆柱面, 全局尺寸圆柱面的直径即为圆柱体局部放大后的全局尺寸。圆柱体全局尺寸的最小二乘尺寸、最小外接尺寸、最大内切尺寸和最大最小尺寸分别对应于最小二乘圆柱面、最小外接圆柱面、最大内切圆柱面和最大最小圆柱面。

根据图 1, 笔者建立最小二乘圆柱面的方程:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (d_{Aij} - R_{AL})^2 = \min \quad (5)$$

式中: R_{AL} —最小二乘圆柱面的半径。

式(5)中的全局尺寸圆柱面为最小二乘圆柱面。

式(5)是一个非线性最小二乘方程。由于圆周轮廓提取前已进行了调心调平处理, l_{Li} 较小, 式(5)中的 d_{Aij} 可由图(2)中的 r_{Aij} 代替, 并假设式(4)中的 $[l_{Li} \sin(\varphi_{ij} - \theta_{Li})]^2 \approx 0$, 式(3)可近似表示为:

$$\begin{aligned} \rho_{Aij} &\approx l_{Li} (\cos\varphi_{ij} \cos\theta_{Li} + \sin\varphi_{ij} \sin\theta_{Li}) + r_{Aij} = \\ &l_{Li} \cos\theta_{Li} \cos\varphi_{ij} + y_{Li} \sin\varphi_{ij} + r_{Aij} = \\ &x_{Li} \cos\varphi_{ij} + y_{Li} \sin\varphi_{ij} + r_{Aij} \end{aligned}$$

则有:

$$r_{Aij} = \rho_{Aij} - x_{Li} \cos\varphi_{ij} - y_{Li} \sin\varphi_{ij} \quad (6)$$

式中: x_{Li}, y_{Li} —最小二乘圆柱面轴线在第 i 圆周轮廓平面内的 x_{Ai} 和 y_{Ai} 坐标值。

x_{Li} 和 y_{Li} 可由下式确定:

$$\begin{cases} x_{Li} = x_{Li} + p_L z_i \\ y_{Li} = y_{Li} + q_L z_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_{Li} —最小二乘圆柱面轴线在 $x_A o_A y_A$ 平面上的 x_A 的坐标值; y_{Li} —最小二乘圆柱面轴线在 $x_A o_A y_A$ 平面上的 y_A 的坐标值; p_L —最小二乘圆柱面轴线参数 $\cos\alpha_L/\cos\gamma_L$, α_L, γ_L —最小二乘圆柱面轴线与 x_A 和 z 轴之间的夹角; q_L —最小二乘圆柱面轴线参数 $\cos\beta_L/\cos\gamma_L$, β_L —最小二乘圆柱面轴线与 y_A 轴之间的夹角; z_i —局部放大后的第 i 圆周轮廓与 $x_A o_A y_A$ 平面之间的距离。

将式(5)的非线性最小二乘问题转化为线性最小二乘问题, 即:

$$\begin{aligned} F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\rho_{Aij} - x_{Li} \cos\varphi_{ij} - y_{Li} \sin\varphi_{ij} - \\ p_L z_i \cos\varphi_{ij} - q_L z_i \sin\varphi_{ij} - R_{AL})^2 = \min \end{aligned} \quad (8)$$

将式(8)分别对 x_{Li}, y_{Li}, p_L, q_L 和 R_{AL} 求偏导, 并令其为 0, 可得到五元一次方程组。解该方程组, 即可得到最小二乘圆柱面轴线参数 x_{Li}, y_{Li}, p_L, q_L 和圆柱体轮廓局部放大后的最小二乘圆柱面直径, 即:

$$D_{AL} = \frac{2}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \rho_{Aij} \quad (9)$$

依据最小外接尺寸、最大内切尺寸和最大最小尺寸的定义, 最小外接尺寸 D_{AC} 、最大内切尺寸 D_{AI} 可用优化函数表示:

$$\begin{cases} D_{AC} = 2 \min_{X_{AC}} \max_{\substack{1 \leq j \leq n \\ 1 \leq i \leq m}} d_{Aij} \\ D_{AI} = -2 \min_{X_{AI}} \max_{\substack{1 \leq j \leq n \\ 1 \leq i \leq m}} (-d_{Aij}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: X_{AC} —最小外接圆柱面的轴线参数, $X_{AC} = [x_{C1}, y_{C1}, p_C, q_C]^T$; X_{AI} —最大内切圆柱面的轴线参数, $X_{AI} = [x_{I1}, y_{I1}, p_I, q_I]^T$ 。

最大最小尺寸 D_{AZ} 可由下式确定:

$$D_{AZ} = \max_{\substack{1 \leq j \leq n \\ 1 \leq i \leq m}} d_{Aij} + \min_{\substack{1 \leq j \leq n \\ 1 \leq i \leq m}} d_{Aij} \quad (11)$$

$$s. t. f = \min_{X_{AZ}} (\max_{\substack{1 \leq j \leq n \\ 1 \leq i \leq m}} d_{Aij} - \min_{\substack{1 \leq j \leq n \\ 1 \leq i \leq m}} d_{Aij})$$

式中: X_{AZ} —最大最小圆柱面的轴线参数, $X_{AZ} = [x_{Z1}, y_{Z1}, p_Z, q_Z]^T$ 。

式(10)和式(11)中的 d_{Aij} 可由下式得到:

$$\begin{aligned} d_{Aij} = \left\{ (\rho_{Aij} \cos\varphi_{ij} - x_{Ti})^2 + (\rho_{Aij} \sin\varphi_{ij} - y_{Ti})^2 + z_i^2 - \right. \\ \left. \frac{[p_T(\rho_{Aij} \cos\varphi_{ij} - x_{Ti}) + q_T(\rho_{Aij} \sin\varphi_{ij} - y_{Ti}) + z_i]^2}{1 + p_T^2 + q_T^2} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: T —全局尺寸圆柱面的类型, T 可为 L, C, I, Z 之一, 分别代表最小二乘圆柱面、最小外接圆柱面、最大内切圆柱面和最大最小圆柱面的轴线参数。

3 全局尺寸圆柱面的可视化

3.1 全局尺寸圆柱面轮廓坐标的确定

全局尺寸评定结果的可视化实质上是全局尺寸相对应的圆柱面的可视化。全局尺寸圆柱面的可视化首先要确定全局尺寸圆柱面轮廓的坐标值。

由于全局尺寸圆柱面的轴线与 z 轴间不平行, 全局尺寸圆柱面在平行于 $x_A o_A y_A$ 平面的截面上的轮廓为一椭圆, 如图 3 所示。

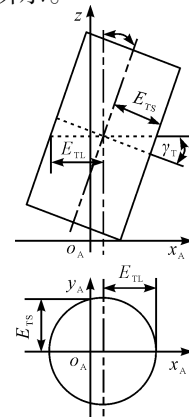


图 3 全局尺寸圆柱面轴线倾斜时的椭圆轮廓示意图

E_{TL} —椭圆轮廓的长半轴长; E_{TS} —椭圆轮廓的短半轴长; γ_T —全局尺寸圆柱面的轴线与 z 轴间的夹角

E_{TL} 和 E_{TS} 可由下式确定:

$$\begin{cases} E_{TL} = \frac{D_{AT}}{2\cos\gamma_T} \\ E_{TS} = \frac{D_{AT}}{2} \end{cases} \quad (13)$$

当全局尺寸圆柱面的轴线与 z 轴不重合时,全局尺寸圆柱面椭圆轮廓在 $x_A o_A y_A$ 平面上的投影如图4所示。

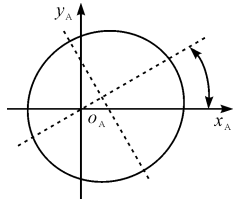


图4 椭圆轮廓在 $x_A o_A y_A$ 平面上的投影示意图

λ_T —椭圆轮廓长轴在 $x_A o_A y_A$ 平面上与 x_A 轴间的夹角

λ_T 可由下式确定:

$$\lambda_T = \tan^{-1} \frac{q_T}{p_T} - 0.5\pi \quad (14)$$

全局尺寸圆柱面第 i 轮廓第 j 采样点到 z 轴的径向距离为:

$$\rho_{TEij} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, i = 1 \sim m, j = 1 \sim n \quad (15)$$

式中: a, b, c —一元二次方程中的3个参数。

a, b, c 可分别由以下各式确定:

$$a = E_{TS}^2 \cos^2(\varphi_{ij} - \lambda_T) + E_{TL}^2 \sin^2(\varphi_{ij} - \lambda_T) \quad (16)$$

$$b = -2E_{TS}^2(x_{Ti}\cos\lambda_T + y_{Ti}\sin\lambda_T)\cos(\varphi_{ij} - \lambda_T) + 2E_{TL}^2(x_{Ti}\sin\lambda_T - y_{Ti}\cos\lambda_T)\sin(\varphi_{ij} - \lambda_T) \quad (17)$$

$$c = E_{TS}^2(x_{Ti}\cos\lambda_T + y_{Ti}\sin\lambda_T)^2 + E_{TL}^2(x_{Ti}\sin\lambda_T - y_{Ti}\cos\lambda_T)^2 - E_{TS}^2 + E_{TL}^2 \quad (18)$$

当 ρ_{TEij} 确定后,全局尺寸圆柱面上轮廓的三维坐标可由下式确定:

$$\begin{cases} x_{TEij} = \rho_{TEij}\cos\varphi_{ij} \\ y_{TEij} = \rho_{TEij}\sin\varphi_{ij}, i = 1 \sim m, j = 1 \sim n \\ z_{TEij} = z_i \end{cases} \quad (19)$$

确定轴线在 $x_A o_A y_A$ 平面和第 m 圆周轮廓平面上的坐标,即可实现圆柱面轴线的可视化,其坐标可由下式确定:

$$\begin{cases} x_{Tk} = x_{Tl} + p_T z_k \\ y_{Tk} = x_{Tl} + p_T z_k, k = 1, m \\ z_{Tk} = z_k \end{cases} \quad (20)$$

式中: $k = 1, z_1 = 0, k = m, z_m = L; L$ —轴向测量长度。

3.2 程序编制

最小外接圆柱面、最大内切圆柱面和最大最小圆

柱面的直径通过对式(10)和式(11)优化问题采用 Matlab 中的‘fminimax’函数获得,最小外接圆柱面、最大内切圆柱面和最大最小圆柱面的轴线的优化初始值均是小二乘圆柱面的轴线参数值。

圆柱体局部放大后的轮廓坐标、全局尺寸圆柱面的轮廓坐标和全局尺寸圆柱面轴线两端点的坐标确定后,可将 Matlab 中的 plot3 三维绘图函数与 hold on 语句组合使用,把 m 个局部放大圆周轮廓、全局尺寸圆柱面的 m 个椭圆轮廓、全局尺寸圆柱面的轴线呈现在一张图上。

对于圆柱体全局尺寸圆柱面的显示,可将 m 个椭圆轮廓的坐标利用 Matlab 中的 surf 或 mesh 函数显示。

4 实验及结果分析

在 Talyround 585LT 圆柱度仪上,笔者对一孔进行了圆周轮廓提取,并将圆周轮廓数据以‘.CVS’格式导出。孔的公称尺寸 D 为 51.5 mm,测量长度 L 为 100 mm,圆周轮廓数 m 为 21,每个圆周轮廓的采样点数 n 为 2 000。

笔者用所建立的模型编制的程序,对被测孔的轮廓进行了全局尺寸的评定。该孔的最小二乘尺寸、最小外接尺寸、最大内切尺寸和最大最小尺寸分别为 50.994 8 mm, 51.016 mm, 50.976 8 mm 和 50.996 7 mm。

为简化起见,笔者仅给出了局部放大后的圆周轮廓、最小外接尺寸圆柱面及其轴线 2 种可视化方法的显示,如图5所示。

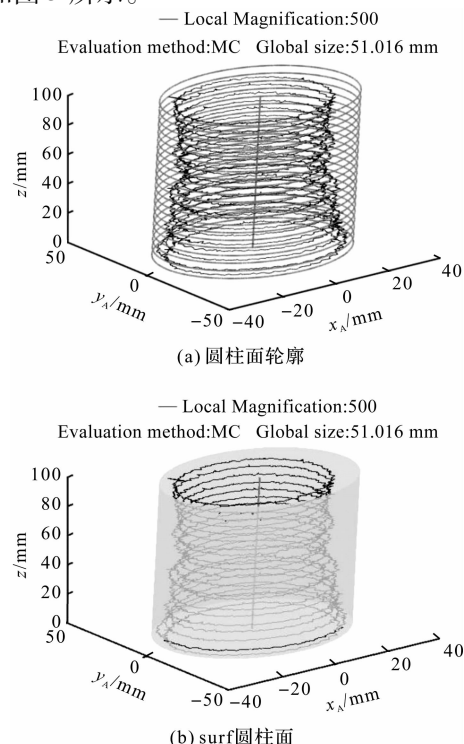


图5 最小外接圆柱面与最小外接尺寸

由图 5 可知: x_A 和 y_A 的坐标并不是真实的坐标,而是局部放大后轮廓的坐标,轮廓局部放大倍数为 500;2 种可视化方法均能较清晰地显示被测孔的圆周轮廓、全局尺寸圆柱面及其轴线,图中的 MC 表示最小外接评定方法。

5 结束语

以局部放大的圆柱体圆周轮廓为基础,笔者建立了确定圆柱体最小二乘圆柱面、最小外接圆柱面、最大内切圆柱面和最大最小圆柱面的尺寸和轴线参数的模型;由全局尺寸圆柱面的尺寸和轴线参数,建立了全局尺寸圆柱面轮廓坐标的生成模型,并提出了全局尺寸圆柱面及其轴线的 2 种可视化方法;基于所建立的模型,笔者编写了圆柱体全局尺寸的评定及其可视化程序,并对一个孔的全局尺寸进行了评定及其结果显示,给出了基于圆柱面轮廓法和 surf 圆柱面法的最小外接尺寸评定的可视化结果。

可视化结果表明:笔者所建模型正确,圆周轮廓、全局尺寸圆柱面及其轴线的 2 种可视化方法的结果直观清晰;2 种可视化方法也可用于圆柱度误差评定中的图形显示。

参考文献(References):

- [1] GB/T 1800.1—2009. 产品几何技术规范(GPS) 极限与配合 第 1 部分:公差、偏差和配合的基础[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [2] GB/T 1182—2018. 产品几何技术规范(GPS) 几何公差

形状、方向、位置和跳动公差标注[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

- [3] ISO 14405—1: 2016. Geometrical product specifications (GPS) — Dimensional tolerancing — Part 1: Linear sizes [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2016.
- [4] ZHAO Z X, LI B, ZHANG G, et al. Study on the evaluation of cylinder's global sizes [J]. **Precision Engineering**, 2017, 49(2): 189-199.
- [5] ZHAO Z X, LI B, ZHANG G Q, et al. Influence of eccentricity and tilt of cylindrical part's axis on the measurement results of its diameters [J]. **Measurement**, 2019, 138(5): 232-239.
- [6] YANG Y, LI M, WANG C, et al. Cylindricity error evaluation based on an improved harmony search algorithm [J]. **Scientific Programming**, 2018(2): 1-13.
- [7] ZHENG P, LIU D L, ZHAO F X, et al. An efficient method for minimum zone cylindricity error evaluation using kinematic geometry optimization algorithm [J]. **Measurement**, 2019, 135(3): 886-895.
- [8] 宗 涛, 袁佳健. 双圆心拟合与网格逼近的圆柱度误差评定算法[J]. 机械设计与制造, 2018(10): 32-35, 39.
- [9] 史栩屹, 李 明, 韦庆钥. 二次插值鲸鱼优化算法在圆柱度误差评定中的应用 [J]. 计量与测试技术, 2019, 46(2): 58-60.
- [10] 赵艺兵, 温秀兰, 许有熊. 基于坐标测量机和拟粒子群进化算法的圆柱度误差检测与评定 [J]. 中国机械工程, 2015, 26(18): 2432-2436.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

赵新宇, 赵则祥, 刘如意, 等. 圆柱体全局尺寸评定结果的可视化研究[J]. 机电工程, 2020, 37(9): 1094-1098.

ZHAO Xin-yu, ZHAO Ze-xiang, LIU Ru-yi, et al. Study on visualization of evaluation results of cylinder's global sizes [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(9): 1094-1098.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>