

文章编号 1004-924X(2014)12-3360-08

## 圆度仪的调平和圆柱度误差评定

宋 康<sup>1\*</sup>, 廖俊必<sup>1</sup>, 林长青<sup>2</sup>, 曹学东<sup>2</sup>

(1. 四川大学 制造学院 测控系, 四川 成都 610065; 2. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要:**从圆柱度误差的测量要求和圆柱度误差评定搜索算法两个方面研究了提高测量精度的方法。为了减小圆柱度误差测量中的工件倾斜误差,设计并分析了两点垂直布局的调平方法;根据工件轴线的方向余弦,计算得到了两点调整的高度值,克服了手动调整存在的问题,实现了工件快速精确调平并提高了工件圆柱度的测量精度。由于圆柱度误差评定是对满足最小条件的圆柱轴线的搜索,文中针对 Nelder-Mead 单纯形法的收敛精度依赖于初始解和收敛速度较慢,提出了拟牛顿法和 Nelder-Mead 单纯形法相结合的联合算法来实现全局最优解的快速准确搜索。对经典测试函数的 Matlab 仿真及实际测量数据的应用表明,该联合算法能有效地提高收敛速度和收敛精度,其收敛速度提高了 50%,收敛精度提高了 1 倍,从而提高了工件圆柱度误差的测量精度。

**关键词:**圆度仪;调平;圆柱度误差;拟牛顿法;Nelder-Mead 单纯形法;收敛;测量精度

**中图分类号:**TG834 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142212.3360

## Leveling and cylindricity error assessment for roundness measuring instrument

SONG Kang<sup>1\*</sup>, LIAO Jun-bi<sup>1</sup>, LIN Chang-qing<sup>2</sup>, CAO Xue-dong<sup>2</sup>

(1. *Department of Measurement & Control, School of Manufacturing  
Science & Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;*

2. *Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: songkang@scu.edu.cn*

**Abstract:** How to improve the measuring accuracy of a roundness measuring instrument was researched in consideration of the cylindricity error requirement and cylindricity error assessment searching algorithm. To reduce inclination error of a workpiece in measuring cylindricity error, a leveling method using a dual-point vertical layout was proposed and analyzed. According to the direction cosine of the axis of workpiece, the amount of leveling was defined and calculated to overcome the problem brought by manual adjustment technology and the accurate leveling and high precise measurement were completed. As the assessment of cylindricity error is to search for a cylinder axis that satisfies the minimum condition and the Nelder-Mead simplex method has lower convergence precision and convergence rate because it depends on initial solution, so that a combined algorithm with quasi-Newton method and simplex algorithm was proposed to achieve the fast and accurate search for global optimums. The Matlab simulation and

收稿日期:2014-01-23;修订日期:2014-03-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61271329);四川省科技厅科技支撑计划资助项目(No. 2012GZ0094);中科院成都光电所合作项目(No. 11H1797)

experimental testing on classical functions indicate that the combined algorithm improves the convergence rate and convergence precision effectively and the convergence rate has been increased over 50% and convergence precision increases over once as compared with that of Nelder-Mead simplex method, which ensures and improves the measuring precision of workpieces.

**Key words:** roundness measuring instrument; leveling; cylindricity error; quasi-Newton method; Nelder-Mead simplex method; convergence; measurement precision

## 1 引 言

在机械工业生产中,很多加工零件属于回转体零件,即具有圆形工作面,因此需对圆柱度误差进行准确评定。在国家标准中,圆柱度误差的评价方法有圆柱度的最小二乘评定方法、基于“凸理论”<sup>[1]</sup>的最小区域圆柱度、最大内接圆柱度及最小外接圆柱度。这 4 种评定方法的计算模型都建立在小误差和小偏差的基础上,小误差是指安装调试时工件的轴线要和工作台的轴线尽量重合,两者的误差必须达到小误差范围;小偏差指的是工件的形状误差要小。

使用圆度仪测量工件的圆度误差时,必须将偏心 and 倾斜误差从测量数据中分离出去,才能得到工件自身的圆度轮廓信息。偏心量过大会使测量模型非线性化<sup>[2]</sup>,并会导致对工件表面采样间隔的不均匀化<sup>[3]</sup>;倾斜则会使实际测量截面是工件圆柱轮廓的斜截面,从而影响圆柱轮廓的测量精度<sup>[4-5]</sup>。因此使用圆度仪对回转类零件进行测量之前需要对工件进行精确地调心调平,使工件轴线和回转轴线尽可能重合,以减小由于工件轴心与主轴回转中心不同心造成的工件圆度畸变误差<sup>[6]</sup>。

1988 年,日本 Hatsuzawa 等设计了一套自动调心系统,该系统可将工件的偏心量自动调整至 10 μm 以内<sup>[7]</sup>,Tsukada 等研制出了具有自动调心调倾功能的圆柱轮廓测量仪,其偏心量可以自动调整至 1 μm 以内,倾斜量可以自动调整至 8" 以内<sup>[8]</sup>。英国的泰勒霍普森公司研制了三点头调心调倾工作台<sup>[9]</sup>,这种工作台台面由 A、B 和 P 点 3 个支点构成的等边三角形来支撑。由于结构的原因,三点支撑式的工作台偏心调整和倾斜调整之间存在很大耦合,因此需要设计相应的解耦算法<sup>[10]</sup>。国内对自动调心调倾工作台的研究较少,艾竹君等研制了具备自动调心功能的小型便

携式圆度仪<sup>[11]</sup>;北京机电研究院研制了配有自动调心调倾工作台圆柱度测量仪<sup>[12]</sup>;丁晓晖等研制了四自由度自动调心调倾工作台<sup>[13]</sup>。

目前,国内圆柱度测量仪的调整工作台在调整精度和自动化程度上和国外还有较大的差距,还需要深入开展调平的理论研究<sup>[14-18]</sup>。本文针对减小圆柱度误差测量中的工件倾斜误差,设计并分析了两点垂直布局的调平方法,克服了手动调整所带来的耗时,精度低等问题,实现了工件快速精确调平,并提高了工件的测量精度。针对 Nelder-Mead(N-M)单纯形法搜索满足最小条件的圆柱轴线的过程中,收敛精度依赖于初始解和收敛速度较慢的问题,提出了拟牛顿法和 N-M 单纯形法相结合的联合算法,从而实现了全局最优解的快速准确搜索。

## 2 工件的调心和调平

根据国内外学者的研究可以知道,圆度仪的检测精度除了与其机械结构的加工装配精度、传感器分辨率和运动控制系统的定位精度相关外,还与被测工件的调整精度有关。当将被测工件安置在工件台上之后,其几何轴线和工件台的回转轴线不重合,而且存在夹角,即被测工件的安置总是既存在偏心又存在倾斜的。因此,为了提高圆度仪的检测精度,必须对工件进行精确的调心和调平,在此之前,应该首先确定工件的偏心量和倾角。

### 2.1 偏心量的确定

建立如图 1 所示的直角坐标系 X-Y-Z,其中 Z 轴为工作台回转轴,X-Y 平面为转台表面。定义被测工件轴是一条不同高度横截面中心之间的直线。设  $(a_i, b_i)$  是横截面  $Z=c_i (i=1, 2)$  的中心,且  $R_j (j=1, 2, \dots, N)$  是测量数据,则有公式(1):

$$\begin{cases} a_i = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N R_j \cos(2\pi j/N) \\ b_i = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N R_j \sin(2\pi j/N) \end{cases} \quad (1)$$

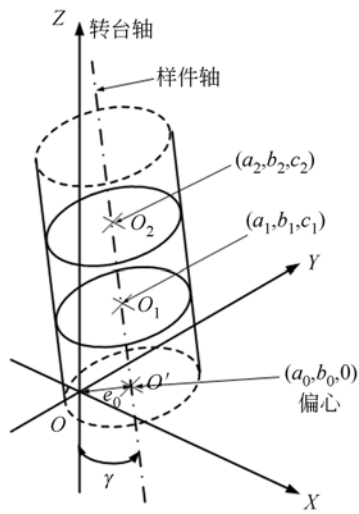


图 1 圆度仪转台直角坐标系 X-Y-Z

Fig. 1 Cartesian coordinates X-Y-Z of turntable for roundness measuring instrument

取工件上任意两个不同横截面的中心,坐标分别为  $(a_1, b_1, c_1)$ ,  $(a_2, b_2, c_2)$ , 则工件轴和 X-Y 平面的交点  $(a_0, b_0)$  坐标可由公式(2)给出:

$$\begin{cases} a_0 = a_1 - (a_2 - a_1) c_1 / (c_2 - c_1) \\ b_0 = b_1 - (b_2 - b_1) c_1 / (c_2 - c_1) \end{cases} \quad (2)$$

工件轴的偏心量  $e_0$  和对 Z 轴的倾角  $\gamma$  如公式(3)所示:

$$\begin{cases} e_0 = (a_0^2 + b_0^2)^{1/2} \\ \cos \gamma = (c_2 - c_1) / L \\ L = \{(a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2 + (c_2 - c_1)^2\}^{1/2} \end{cases} \quad (3)$$

由上式可得到工件的偏心量  $e_0$  和坐标  $(a_0, b_0)$  后,即可通过计算机对工件进行自动调心。

### 2.2 工件轴线倾角的确定

这里对工件的调平进行详细分析和推导。

如果分别用  $l, m$  和  $n$  表示工件轴对 X-Y-Z 坐标轴的方向余弦,则:

$$\begin{cases} l = (a_2 - a_1) / L \\ m = (b_2 - b_1) / L \\ n = \cos \gamma = (1 - l^2 - m^2)^{1/2} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $L = \sqrt{(a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2 + (c_2 - c_1)^2}$ 。

在圆度仪转台面(X-Y)上取 3 点 A、B 和 C 点,其中 C 点固定不动,C 点处于  $\angle AOB$  的角平分线的延长线上;A、B 两点可以调节,与蜗轮和蜗杆机构相连,A 点位于转台面坐标系的 X 轴正方向上,B 点位于转台面坐标系的 Y 轴负方向

上,C 点位于坐标平面第二象限的角平分线上,因此  $\angle COB = \angle COA = 135^\circ$ 。A、B 和 C 三点的坐标分别为  $(x_1, y_1, z_1)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)$  和  $(x_3, y_3, z_3)$ , 如图 2 所示。

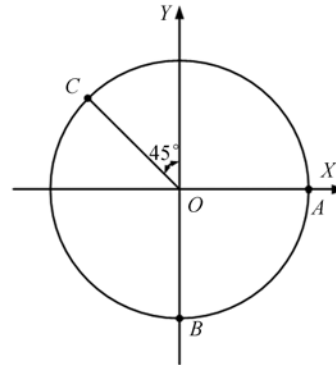


图 2 圆度仪转台面坐标系 X-Y

Fig. 2 Cartesian coordinates X-Y of turntable surface of roundness measuring instrument

设 A、B、C 三点确定的平面,即转台面的法向量的方向余弦为  $(l_0, m_0, n_0)$ ,可由公式(5)得到:

$$\begin{cases} l_0 = a / (a^2 + b^2 + c^2)^{1/2} \\ m_0 = b / (a^2 + b^2 + c^2)^{1/2} \\ n_0 = c / (a^2 + b^2 + c^2)^{1/2} \end{cases} \quad (5)$$

这里  $(a, b, c)$  为 A、B 和 C 三点确定平面及转台面的法向量的坐标,由 A、B 和 C 三点可以确定 3 个向量 AB、BC 和 CA,平面的法向量垂直于平面内任何一条直线,即法向量与上述 3 个向量均垂直,它们的数量积为零,于是,法向量的坐标可以用三点坐标来表示,如公式(6)所示:

$$\begin{cases} a = (y_1 - y_2)(z_2 - z_3) - (z_1 - z_2)(y_2 - y_3) \\ b = (z_1 - z_2)(x_2 - x_3) - (x_1 - x_2)(z_2 - z_3) \\ c = (x_1 - x_2)(y_2 - y_3) - (y_1 - y_2)(x_2 - x_3) \end{cases} \quad (6)$$

A、B 和 C 三点的坐标值可由公式(7)确定:

$$\begin{cases} y_1 = 0, x_2 = 0, z_3 = 0 \\ A(x_1, 0, z_1) \\ B(0, -x_1, z_2) \\ C\left[-\frac{\sqrt{2}}{2}x_1, \frac{\sqrt{2}}{2}x_1, 0\right] \end{cases} \quad (7)$$

将 A、B、C 的坐标代入其确定平面法向量的坐标,得到公式(8):

$$\begin{cases} a = \frac{\sqrt{2}}{2} x_1 (\sqrt{2} z_1 + z_1 - z_2) \\ b = \frac{\sqrt{2}}{2} x_1 (z_1 - z_2 - \sqrt{2} z_2) \\ c = -x_1^2 (1 + \sqrt{2}) \end{cases} \quad (8)$$

然后,通过蜗轮蜗杆系统修正倾斜误差,以满足公式(9)保证调平,

$$\begin{cases} l + l_0 = 0 \\ m + m_0 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

因为  $l^2 + m^2 + n^2 = l_0^2 + m_0^2 + n_0^2 = 1$ , 根据公式(9)有,  $n_0^2 = n^2 \Rightarrow n_0 = \pm n$ , 取  $n_0 = -n$ , 即  $n_0 + n = 0$ 。于是,可以求出  $z_1, z_2$ , 最后得到公式(10):

$$\begin{cases} z_1 = \frac{x_1}{2} \left[ \frac{l}{n} (\sqrt{2} + 1) - \frac{m}{n} \right] \\ z_2 = \frac{x_1}{2} \left[ \frac{l}{n} - \frac{m}{n} (\sqrt{2} + 1) \right] \end{cases} \quad (10)$$

$z_1$  和  $z_2$  即是转台 A 和 B 两点要调整的高度值,通过计算机控制蜗轮蜗杆传动机构,即可实现工件的自动调平。

### 3 拟牛顿和单纯形联合算法

圆度和圆柱度误差评定实际上是搜索满足最小条件的圆心和圆柱轴线,是一个非线性无约束的求最小值的优化问题。无约束优化问题的求解方法有很多种,每一种方法都有各自的特点和适用范围。

内尔德-米德单纯形法 (Nelder-Mead modified simplex algorithm) 具有简单实用的优点,大量的计算结果表明它是一种十分可靠的方法,特别需要指出的是其能处理函数值变化剧烈的问题<sup>[19]</sup>。单纯形法不需要目标函数一阶或二阶可导,具有较好的局部搜索能力,但是它对初始解具有较强的依赖性<sup>[20]</sup>,即初值不同会导致最后的搜索结果差别较大,不能保证精度,甚至会出现错误结果,即它是一种局部最优化算法。因此,利用单纯形算法的一个根本前提是要有一个初始的基可行解,对于一些简单问题,通过观察或其它手段,这一点容易满足,但对于较复杂的问题,利用这种方法几乎是不可能的。考虑到拟牛顿算法对一致凸函数具有全局收敛性<sup>[19,21]</sup>,本文基于上述两种算法的特点,采取如下的搜索策略实现全局快速收敛,并保证收敛精度。首先采用拟牛顿法得到

初始基可行解,以实现了解空间的全局搜索和收敛,从而避免搜索陷入局部最优,即初始基可行解位于全局最优点附近的某个邻域;再利用单纯形法进行局部寻优,从而快速、准确地搜索到解空间的全局最优解。拟牛顿和单纯形联合算法流程如图 3 所示。

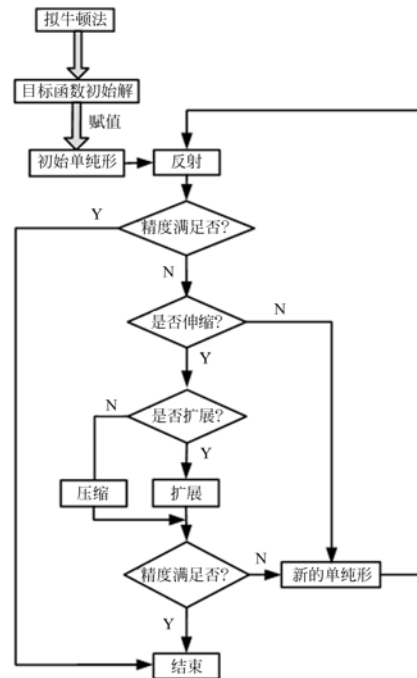


图 3 拟牛顿和单纯形联合算法流程图

Fig. 3 Flowchart of combined method with simplex algorithm and quasi-Newton method

## 4 经典测试函数 Matlab 仿真

### 4.1 Rosenbrock's parabolic valley 函数

Rosenbrock 函数形式为

$$f_1(x) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2.$$

Rosenbrock 函数在  $x^* = [1, 1]^T$  处存在最小值零。该函数是一个单峰值函数,形状像香蕉,俗称香蕉函数,常被广泛应用于测试全局优化算法的搜索能力以及求解多维优化问题的能力,被公认为是可以有效评价算法性能的公式<sup>[22]</sup>。

(1)当搜索初值为  $[-10, 10]^T$  时,单独使用单纯形法的计算结果如下:精度达到  $1.63 \times 10^{-6}$  时,迭代次数为 124 次,最优点搜索结果为  $x^* = [1.000 0, 0.999 9]^T$ ;联合使用拟牛顿法和单纯形法后,精度达到  $7.01 \times 10^{-7}$  时,迭代次数为 85 次,

最优点搜索结果为  $\mathbf{x}^* = [1.000\ 0, 1.000\ 0]^T$ 。迭代次数减少了 39 次,而收敛精度却提高了 2 倍,用 Matlab 进行编程仿真,Rosenbrock 目标函数的寻优过程如图 4 所示。

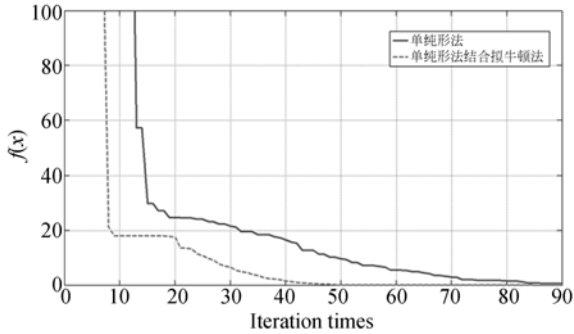


图 4 Rosenbrock's parabolic valley 函数的寻优过程 (初值为  $[-10, 10]^T$ )

Fig. 4 Optimization of Rosenbrock's parabolic valley function (with initial values of  $[-10, 10]^T$ )

(2) 当迭代初值为  $[0, 1]^T$  时,单独使用单纯形法的计算结果为:精度达到  $1.58 \times 10^{-9}$  时,迭代次数为 101 次,最优点搜索结果为  $\mathbf{x}^* = [1.000\ 0, 1.000\ 0]^T$ ;联合使用拟牛顿法和单纯形法后,精度达到  $2.49 \times 10^{-10}$  时,迭代次数为 22 次,最优点搜索结果为  $\mathbf{x}^* = [1.000\ 0, 1.000\ 0]^T$ 。迭代次数减少了 89 次,而收敛精度却提高了 1 个数量级,Rosenbrock 目标函数的寻优过程如图 5 所示。

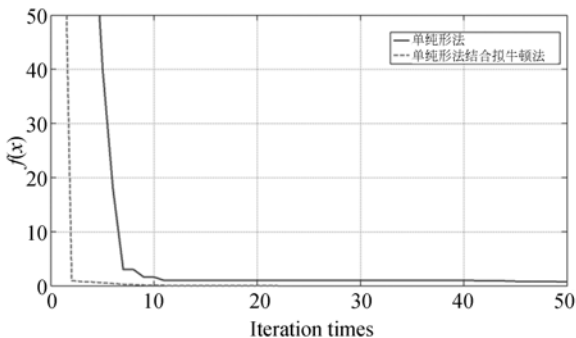


图 5 Rosenbrock's parabolic valley 函数的寻优过程 (初值为  $[0, 1]^T$ )

Fig. 5 Optimization of Rosenbrock's parabolic valley function (with initial values of  $[0, 1]^T$ )

## 4.2 Powell's quartic 函数

Powell's quartic 函数形式如下:

$$f_2(x) = (x_1 + 10x_2)^2 + 5(x_3 + x_4)^2 + (x_2 - 2x_3)^4 + 10(x_1 - x_4)^4,$$

该函数在  $\mathbf{x}^* = [0, 0, 0, 0]^T$  处,存在最小值零。若迭代初值为  $[-10, -10, -10, -10]^T$ ,单独使用单纯形法的计算结果如下:精度达到  $1.05 \times 10^{-4}$  时,迭代次数为 196 次,最优点搜索结果为  $\mathbf{x}^* = [-0.027\ 3, 0.052\ 3, 0.026\ 7, -0.026\ 7]^T$ ;联合使用拟牛顿法和单纯形法后,精度达到  $6.48 \times 10^{-5}$  时,迭代次数为 64 次,最优点搜索结果为  $\mathbf{x}^* = [-0.027\ 5, 0.052\ 4, 0.026\ 8, -0.026\ 8]^T$ ,迭代次数减少了 132 次,收敛精度提高了一倍,Powell 目标函数的寻优过程如图 6 所示。

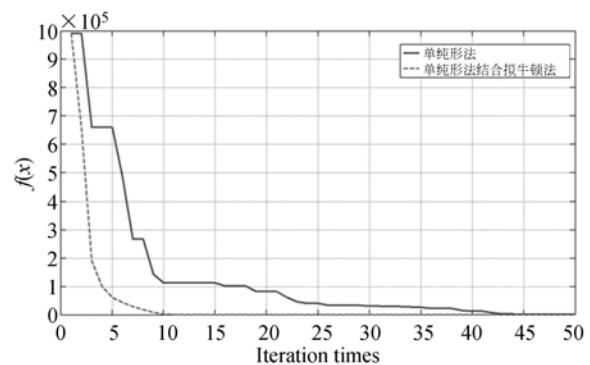


图 6 Powell's quartic 函数的寻优过程 (初值为  $[-10, -10, -10, -10]^T$ )

Fig. 6 Optimization of Powell's quartic function (with initial values of  $[-10, -10, -10, -10]^T$ )

从上面的测试函数可以看出,联合算法的收敛性能高于单纯形法,收敛速度提高了 50% 以上,并且收敛精度提高了一倍以上。

## 5 实际测量数据评定

根据文献[23]给出的数据,评定工件的圆柱度误差,其优化参数为  $[u, v, j, k, R]^T$  (满足最小条件的理想圆柱轴线的位置由  $u$  和  $v$  确定,方向由  $j$  和  $k$  确定, $R$  为理想圆柱半径)。如果单独使用单纯形法,最后的寻优结果如下:迭代初值分别为  $[0, 0, 0, 0, 0]^T$ 、 $[1, 0, 0, 0, 0]^T$  和  $[10, 0, 0, 0, 0]^T$ ,最小区域法的圆柱度误差分别为 0.026 3、0.051 4 和 0.038 6 mm。如果联合使用拟牛顿法和单纯形法,则最后的寻优结果分别为 0.021 4、0.021 7 和 0.021 9 mm,而文献[16]给出的圆柱度

误差值为 0.021 037 mm。从上面的数据处理结果来看,对于不同的迭代初值,联合算法的收敛稳定性和精度均有大幅提高,收敛精度提高了 5 倍以上。

根据文献[24]给出的数据,如果单独使用单纯形法评定工件的圆柱度误差,最后的寻优结果如下:若迭代初值为 $[1,0,0,0,0]^T$ 和 $[5,0,0,0,0]^T$ 时,最小区域法的圆柱度误差分别为 0.314 5 mm 和 0.390 58 mm;而联合使用拟牛顿法和单纯形法的寻优结果分别为 0.002 789 mm 和 0.002 8 mm,文献[17]给出的圆柱度误差值为 0.002 788 mm。从上面的数据处理结果来看,对于不同的迭代初值,联合算法的收敛稳定性和精度均有大幅提高,收敛精度提高 10 倍以上。

从以上对文献数据的处理结果可以看出,利用单纯形法计算圆柱度误差时,依赖于迭代初值,并且其迭代收敛性相对较慢;而采用拟牛顿法和单纯形联合算法时,收敛精度提高了 5 倍以上,并且最终结果同文献的评定结果吻合,且与迭代初值无关。

## 参考文献:

- [1] 熊有伦. 线性极差极小化问题及其应用[J]. 华中工学院学报,1985,13(5):117-142.  
XIONG Y L. On minimization of linear extremum difference and its application [J]. *Journal of Huazhong College of Technology*, 1985, 13(5):117-124. (in Chinese)
- [2] CHETWYND D G. Roundness measurement using limacons [J]. *Precision Engineering*, 1979, 1(3):137-141.
- [3] 赵前程. 轮廓形状特征的建模与参数辨识及其应用[D]. 合肥:合肥工业大学博士学位论文,2004:41.  
ZHAO Q CH. *Modeling and identification of contour features and its application* [D]. Dissertation for Doctor degree of HeFei University of Technology, 2004: 41. (in Chinese)
- [4] 李勇建,魏贵玲,邓劲松,等. 自动调平技术研究[J]. 压电与声光,2010,32(6):949-952.  
LI Y J, WEI G L, DENG J S, *et al.*. Study on automatic leveling technology[J]. *Piezoelectrics &*

## 6 结 论

本文从圆柱度误差的测量要求和圆柱度误差评定搜索算法两个方面提出了拟牛顿法和单纯形联合算法及其改进措施,以提高圆度仪的测量精度。为减小圆柱度误差测量中的工件倾斜误差,设计并详细分析了基于两点垂直布局的调平方法,计算得到了两点调平量同工件倾斜轴方向余弦的数值关系,即得到了调整量,避免了手动调平技术,实现了工件精确、快速调平,并提高了工件的测量精度。圆柱度误差评定是搜索满足最小条件的理想圆柱轴线,针对 N-M 单纯形法的收敛依赖于初始解和收敛速度相对较慢的问题,提出了拟牛顿法和 N-M 单纯形法相结合的方法,首先由拟牛顿法搜索得到初始基可行解,然后由单纯形法搜索最优解,最终实现了全局最优解的快速准确搜索。对经典测试函数的 Matlab 仿真及实际测量数据的验证表明,采用拟牛顿法和 N-M 单纯形法相结合,能有效提高收敛速度和收敛精度,对不同的测试函数和实际测量数据,其收敛速度能提高 2 倍以上,收敛精度能提高 1 倍以上。

- Acoustooptics*, 2010, 32(6):949-952. (in Chinese)
- [5] 姜伟伟,高云国,冯栋彦,等. 大型光电设备基准平面自动调平系统[J]. 光学精密工程,2009,17(5):1039-1045.  
JIANG W W, GAO Y G, FENG D Y, *et al.*. Automatic-leveling system for base-plane of large-size photoelectric equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1039-1045. (in Chinese)
- [6] 袁成杰. 圆度仪智能化研究[D]. 成都:四川大学工程硕士学位论文,2004:4.  
YUAN CH J. *Research on intelligent roundness tester* [D]. Dissertation for Master Degree of Engineering of Sichuan University, 2004: 4. (in Chinese)
- [7] HATSUZAWA T. Automatic centering system for a roundness tester using force feedback techniques [J]. *Precision Engineering*, 1988, 10(1):19-23.
- [8] TSUKADA T, KANADA T, LIU S. The development of a computer sided centering and leveling system for cylindrical form measurement [J]. *Precision Engineering*, 1988,10(1):13-18.

- [9] BAMABY A B, MILLS M W, LANE H R. Metrological apparatus work-piece position controller-automatically centers and levels by computer using surface sensed data from transducer with transverse compensation after tilting, UK:EP240150-A2[P]. 1987; 2-8.
- [10] 李东升, 王伟杰, 谭久彬. 回转体类零件四自由度姿态解耦问题的研究[J]. 宇航计测技术, 1999, 19(3):35-38.  
LI D SH, WANG W J, TAN J B. Study of decoupling problem of four freedom attitude adjustment for gyro-rotor specimen [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 1999, 19(3): 35-38. (in Chinese)
- [11] 艾竹君, 刘巧云, 王宏涛, 等. 便携式自动调心圆度仪控制系统设计[J]. 低温与超导, 2008, 36(2): 63-64.  
AI ZH J, LIU Q Y, WANG H T, *et al.*. Portable self-aligning small scaled roundness instrument control system design [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2008, 36(2):63-64. (in Chinese)
- [12] 缪铁夷, 肖亦华. YZY-1 型圆柱度测量仪[J]. 机床, 1984, 12;31-33.  
MIU T Y, XIAO Y H. Type YZY-1 of roundness measurement instrument [J]. *Machine Tools*, 1984, 12;31-33. (in Chinese)
- [13] 丁晓晖. 圆柱轮廓精密测量中的滤波与调心调倾技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2010:22-31.  
DING X H. *Research on filtering and adjustment of centering and tilting technologies in precision measurement of cylindrical profile* [D]. Harbin: Dissertation for the Master Degree in Engineering of Harbin Institute of Technology, 2010; 22-31. (in Chinese)
- [14] 张玉梅, 左春桢, 刘岩, 等. 圆度误差检测方法现状与展望[J]. 工具技术, 2008, 40(11):8-11.  
ZHANG Y M, ZUO CH CH, LIU Y, *et al.*. Present state and expectation of roundness measurement method [J]. *Tool Engineering*, 2008, 40(11):8-11. (in Chinese)
- [15] 薛玉君, 畅为航, 雷贤卿, 等. 圆度误差评定的研究与展望[J]. 机床与液压, 2008, 36(12): 183-185, 137.  
XUE Y J, CHANG W H, LEI X Q, *et al.*. Research and advances about evaluation of roundness error [J]. *Machine tool & Hydraulics*, 2008, 36(12):183-185, 137. (in Chinese)
- [16] 冯欢欢, 吴旭光, 肖鼎新, 等. 高精密切圆度仪的研究与设计[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(3): 725-727.  
FENG H H, WU X G, XIAO D X, *et al.*. Design and application of high precision roundness tester [J]. *Computer Measurement & Control*, 2011, 19(3):725-727. (in Chinese)
- [17] 张楚鹏, 赵则祥, 赵惠英, 等. 大口径高精度四维调整工作台设计[J]. 制造技术与机床, 2013, 6:89-94.  
ZHANG CH P, ZHAO Z X, ZHAO H Y, *et al.*. Design of a large aperture high-precision four-dimensional adjustment table [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2013, 6:89-94. (in Chinese)
- [18] 王新宽, 黄文, 吉方, 等. 精密调平工装结构设计及优化[J]. 制造技术与机床, 2013, 4:39-42.  
WANG X K, HUANG W, JI F, *et al.*. Structure design and optimization of levelling-tooling with high precision [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2013, 4:39-42. (in Chinese)
- [19] 袁亚湘. 非线性优化计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008:124.  
YUAN Y X. *Computational Methods for Nonlinear Optimization* [M]. Beijing: Science Press, 2008: 124. (in Chinese)
- [20] 向丽, 顾培亮. 一种快速收敛的混合遗传算法[J]. 控制与决策, 2002, 17(1):19-23.  
XIANG L, GU P L. Hybrid genetic algorithm with quick convergence [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(1):19-23. (in Chinese)
- [21] 邓乃扬, 薛毅, 张海斌. 基于新拟牛顿方程的拟牛顿法的全局收敛性分析[J]. 北京工业大学学报, 1999, 25(4):6-12.  
DENG N Y, XUE Y, ZHANG H B. Global convergence of the Quasi-Newton method based on the new Quasi-Newton equation [J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 1999, 25(4):6-12. (in Chinese)
- [22] 叶峰, 邵之江, 梁昔明, 等. 四种无约束优化算法的比较研究[J]. 数学的实践与认识, 2004, 34(5): 108-112.  
YE F, SHAO ZH J, LIANG X M, *et al.*. A comparative study on four unconstrained optimization algorithms [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2004, 34(5):108-112. (in Chinese)

- [23] 张娇娜,郭伟伟,曹衍龙,等. 圆柱度误差评价方法研究[J]. 机床与液压,2008,36(2):106-109.  
ZHANG J N, GUO W W, CAO Y L, *et al.*. Research on cylindricity error evaluation methods [J]. *Machine Tools & Hydraulics*, 2008, 36(2): 106-109. (in Chinese)
- [24] 温秀兰,宋爱国. 基于改进遗传算法评定圆柱度误差[J]. 计量学报,2004,25(2):115-118.  
WEN X L, SONG A G. Cylindricity error evaluation based on an improved genetic algorithm [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(2):115-118. (in Chinese)

## 作者简介:



宋 康 (1973—),男,四川成都人,博士,讲师,2005年于西安交通大学获得机械工程博士学位,研究方向为测试计量技术及仪器,及精密测量方面的研究。E-mail: songkang@scu.edu.cn



廖俊必 (1953—),男,四川成都人,博士,教授,博士生导师,1986年于成都科技大学获得硕士学位,1998年于英国 DERBY 大学获得博士学位,主要从事传感器及智能化系统方面的研究。E-mail: liaojunbi@scu.edu.cn

(本栏目编辑:马 健)

(版权所有 未经许可 不得转载)