

圆柱度仪单截面自动对中调节方法的研究

张 瑞 卢好蕊 张林娜 郑 鹏

郑州大学, 郑州, 450046

摘要:依据倾斜圆柱横截面为椭圆,在分析圆柱度仪工作台偏心和倾角调整原理的基础上,提出了一种新的单截面椭圆测量自动对中控制算法;根据调整运动的不同,提出了两种对中调节方法;结合谱分析技术实现了椭圆特征参数的便捷提取;采用 LabView 编制了相应的算法软件。仿真结果表明,单截面自动对中调节方法耗时短、精度高,显著提高了圆柱度仪对中的效率。

关键词:自动对中;Labview;圆柱度仪;频谱分析

中图分类号:TH

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.003

Research on Self-centering Control Method of Cylindricity Measuring Instrument

Zhang Rui Lu Haorui Zhang Linna Zheng Peng

Zhengzhou University, Zhengzhou, 450046

Abstract: This paper put forwards a new self-centering control algorithm by analyzing the principles of worktable adjustment based on that the section of angled cylinder is ellipse and put forwards two centering adjustment methods based on the differences of adjusting movements. Then the characteristic parameters of the elliptic by analyzing the spectrum were extracted. The algorithm software was finished by Labview. The simulation results show that the algorithm has features as short time, high precision and more efficiency.

Key words: self-centering control; Labview; cylindricity measuring instrument; spectrum analysis

0 引言

使用转台式圆柱度仪测量工件时,若被测工件的几何主轴与圆柱度仪回转工作台的回转主轴既不重合又存在夹角,则被测工件的安放既偏心又倾斜,其偏心量和倾斜量的大小直接影响到测量精度^[1-2]。传统的圆柱度测量仪只配备手动调整工作台,调节时间和精度因操作人员的技能而异,极大地影响了圆柱度仪的测量效率以及测量精度的可靠性^[3-4]。近年来,随着自动化技术的迅猛发展,已开始出现自动对中工作台,具有代表性的是泰勒公司的 Talyrond tr131 系列圆度仪,它采用的对中调节算法是双截面法,测量过程为循环迭代^[1]。本文依据四自由度自动对中工作台,

提出了一种新的单截面测量法。该方法调节过程更为便捷,效率也更高,对保证圆柱度仪快速高精度的检测具有重要意义。

1 圆柱度仪对中调节原理

为了实现圆柱度仪的高精度测量,圆柱度仪对中需进行两方面的调节:①使工件中心与回转中心重合的调心调节;②使工件轴线垂直于水平面的调倾调节^[5]。这就要求圆柱度仪的调节工作台既能实现水平面内的二维移动,又能实现空间的转动。四自由度工作台是一种可行的实现方法。图 1 为四自由度圆柱度仪的结构及坐标和调节示意图。

工作台的回转主轴位置是固定的,回转主轴轴线为坐标系 Z 轴,回转主轴轴线与工作台上表面的交点为坐标原点 O。测量传感器的测头中心

收稿日期:2011-11-03

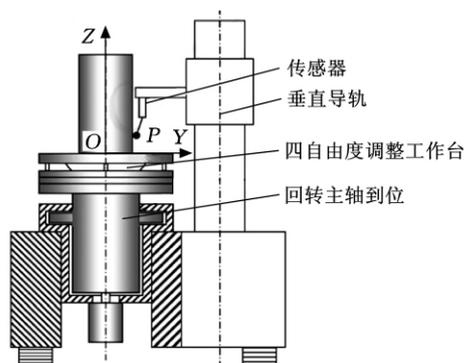
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975262)

[14] 赵燕江,张永德,邵俊鹏. 柔性针的运动学建模及实验研究[J]. 机器人,2010,32(5):666-673.

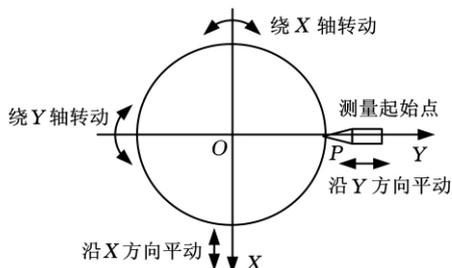
Zhao Yanjiang, Zhang Yongde, Shao Junpeng. Kinematic Modeling and Experimental Study of Flexible Needle[J]. Robot,2010,32(5):666-673.

[15] Zhang Yongde, Zhao Yanjiang. Kinematic Modeling of Bevel Tip Flexible Needle[C]//ICIRA 2010. Shanghai, China,2010:405-416. (编辑 郭伟)

作者简介:赵燕江,男,1979年生。哈尔滨理工大学智能机械研究所博士研究生、讲师。主要研究领域为多指灵巧手、医疗机器人。张艳华,女,1962年生。哈尔滨医科大学附属肿瘤医院主任医师。陈浩,男,1982年生。哈尔滨理工大学智能机械研究所硕士研究生。张永德,男,1965年生。哈尔滨理工大学智能机械研究所教授、博士研究生导师。Yan Yu,男,1961年生。美国托马斯·杰斐逊大学杰斐逊医学院教授、博士研究生导师。



(a) 四自由度圆柱度仪的结构简图



(b) 工作台坐标和调节示意图

图 1 四自由度圆柱度仪的结构及工作台坐标和调节示意图

在工作台上表面的投影为 P , OP 连线方向为坐标系 Y 轴,如图 1a 所示。坐标系 OXY 为系统的固定坐标系,对中调节开始,通过光电传感器和相应的程序进行坐标系校准操作,保证调心调平旋钮和坐标系 OXY 的位置关系如图 1b 所示。圆度仪在对中过程中可以使用的工作台运动有:工作台绕 Z 轴的旋转;工作台沿 X 轴或 Y 轴方向的平移;工作台绕 X 轴或 Y 轴方向的转动。

在进行圆度测量时,被测圆柱形工件放置在工作台上,圆柱工件的轴线 $O'A$ 与 XOY 平面的交点为 $O'(e_x, e_y)$,线段 OO' 的长度定义为工件的偏心量 e ; $O'A$ 在 XOY 平面的投影 $O'A'$ 与 X 轴正向夹角为 θ , $O'A$ 在 YOZ 平面的投影与 Z 轴正向夹角为 β , $O'A$ 与 X 轴正方向的夹角为 α , $O'A'$ 与 $O'A$ 的夹角为 γ ,如图 2 所示。

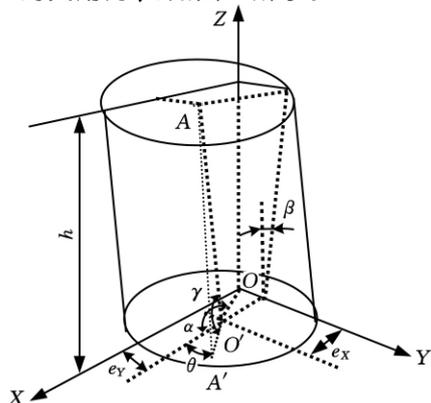


图 2 工件任意放置空间位置示意图

对过程中可采用两种方法实现工件的调心与调倾。第一种方法是将工作台沿 X 轴负向平移 e_x ,沿 Y 轴负向平移 e_y ,实现调心;将工作台绕 X 轴逆时针旋转 β 角度,使 $O'A$ 处于 XOZ 平面内,然后绕 Y 轴逆时针转动 $90^\circ - \alpha$ 角度,实现工件的调倾。第二种方法的调心过程与第一种完全一样,只不过在调倾时,工作台绕 Z 轴逆时针旋转 $90^\circ - \theta$ 角度,使 $O'A'$ 与 Y 轴平行,然后绕 X 轴逆时针转动 $90^\circ - \gamma$ 角度,即可实现工件的调倾。

工作台绕 Z 轴的运动是圆柱度仪的测量主运动,因此第二种方法对工作台运动的利用度较高。同时,没有使用工作台绕 Y 轴的旋转运动,在机构实现上也比第一种方法简单。

通过以上分析可知,只要获取了 e_x 、 e_y 、 β 和 α 或 θ 和 γ 即可通过相应的运动实现工件的调心与调倾。

2 工件偏心和倾斜调节参数量的获取方法

2.1 双截面法

传统的自动对中控制算法为双截面法,如图 3 所示^[6]。

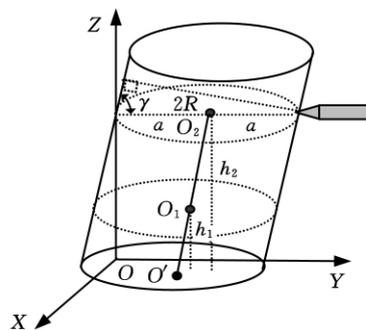


图 3 双截面法原理图

控制测头在 h_1 高度和 h_2 高度各进行一个圆度测量,通过最小二乘拟合的方法可得出中心 $O_1(X_1, Y_1, h_1)$ 和 $O_2(X_2, Y_2, h_2)$,进而得到 $O'(e_x, e_y, 0)$,根据图 2 所示的角度关系和图 3 可得到调节参数 e_x 、 e_y 、 β 和 α ,表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{e_x - X_1}{X_1 - X_2} &= \frac{e_y - Y_1}{Y_1 - Y_2} = \frac{0 - h_1}{h_1 - h_2} \\ \cos\theta &= \frac{X_2 - X_1}{Y_1 - Y_1} \\ \tan\gamma &= \frac{h_2 - h_1}{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}} \\ \cos\gamma\cos\theta &= \cos\alpha \\ \tan\beta &= \frac{Y_2 - Y_1}{h_2 - h_1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

通过一定的迭代次数,可实现自动对中调节。双截面法在需要高精度调节时,迭代次数较

多,调节时间久,效率很低。基于此,本文提出了一种新的单截面测量法。

2.2 单截面法

对于倾斜的圆柱,其测量截面在理论上是一个椭圆,且这个椭圆的大小与方向与其在圆柱轴线上的位置无关。将在高度为 h 处测头所测截面投影到 XOY 平面,投影中心为 $O'_h(e_{Xh}, e_{Yh})$,如图 4 所示。 P 为位移传感器侧头位置, M 为椭圆上的一个已测点,则有 O 点与 O'_h 点之间的距离 e_h 为截面偏心, a 为椭圆长半轴的长度, b 为椭圆短半轴的长度。根据倾斜圆柱的特性,圆柱轴线在 XOY 平面的投影与椭圆长轴重合,因此长轴与 X 轴的夹角为 θ 。工件沿顺时针转过 δ_i 角度时,测点 M 对 O 点的矢径为 $r(\delta_i)$,其中 $i=1,2,\dots,N$, N 为采样点数。根据测头测量一周的矢径 $r(\delta_i)$,可得到截面椭圆的特征参数。

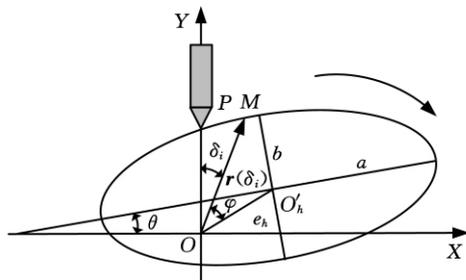


图 4 截面在 XOY 平面投影

一般来说,椭圆空间位置参数的求解可采用椭圆最小二乘拟合的方法^[7],为了简化计算过程,本文采用谱分析法。据文献[8-9],椭圆涡动轨迹可以看成是两同频余弦运动轨迹的合成。现假设工件的回转运动在 X 方向和 Y 方向的轨迹分别为

$$\begin{cases} X = X_0 + X_a \cos(\omega t + \varphi_x) \\ Y = Y_0 + Y_a \cos(\omega t + \varphi_y) \end{cases} \quad (2)$$

式中, X_a, Y_a 分别为 X 方向和 Y 方向的运动幅值; φ_x, φ_y 分别为 X 方向和 Y 方向的运动相位。

由文献[4],椭圆的各特征参量可由下式得出:

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X \\ Y_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} Y \\ a &= \left[\frac{1}{2} (X_a^2 + Y_a^2) + \sqrt{\frac{1}{4} (X_a^2 - Y_a^2)^2 + X_a^2 Y_a^2 \cos^2(\varphi_x - \varphi_y)} \right]^{\frac{1}{2}} \\ b &= \left[\frac{1}{2} (X_a^2 + Y_a^2) - \sqrt{\frac{1}{4} (X_a^2 - Y_a^2)^2 + X_a^2 Y_a^2 \cos^2(\varphi_x - \varphi_y)} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \tan 2\theta &= \frac{2X_a Y_a \cos(\varphi_x - \varphi_y)}{X_a^2 - Y_a^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, (X_0, Y_0) 为椭圆中心坐标,对应于 O'_h 点的坐标 (e_{Xh}, e_{Yh}) 。

相比于最小二乘法,谱分析法计算量小,受圆度误差影响小,对滤波要求低。同时, θ 值也能在式(3)中直接得出,又 $\sin \gamma = \frac{b}{a}$,因此本文直接使用第二种调节方法。

结合测头高度,第一种调节方法所用参数 e_x, e_y, α 和 β 也可由下式得出:

$$\left. \begin{aligned} e_x &= e_{Xh} - \frac{h}{\tan \gamma} \cos \theta \\ e_y &= e_{Yh} - \frac{h}{\tan \gamma} \sin \theta \\ \cos \alpha &= \cos \gamma \sin \theta \\ \tan \beta &= \frac{e_{Yh} - e_y}{h} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

从上述推导过程可以看出,单截面调节法可通过一次测量就得到所有对中所需的调节参数,并可直接使用第二种调节方法,在机构实现的简便性以及调节的效率方面都有很大的优势。

3 自动调心调平控制软件设计

本文采用 MATLAB 和 LabView 相结合的办法,实现了自动调心调平控制软件的设计,软件的设计流程如图 5 所示,软件的主界面如图 6 所示。图 6 中,左边是调节参数输入,包括调节精度、采样频率等,右边是每次调节后工件的空间位置参数,中间是工件三维实时显示图,可调节视角,能从各个方向观察工件主轴的空间状态。

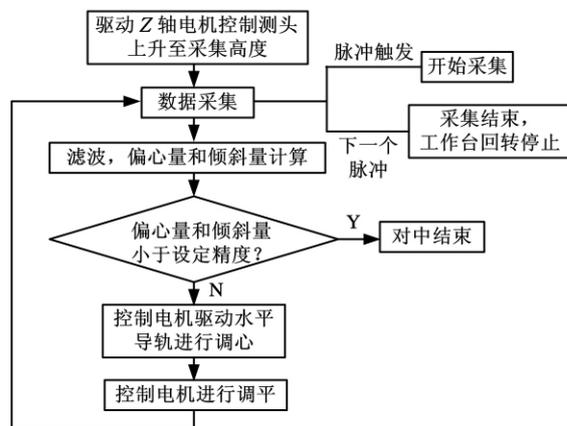


图 5 自动对中控制系统软件设计流程图

4 仿真结果对比分析

若要精确地评定出双截面法和单截面法的优劣,需要在同一驱动控制结构上对具有相同偏心量和倾斜量的工件进行自动对中调节,在实际操作中很难达到这种条件,故可以用测量数据采用软件仿真来评定。

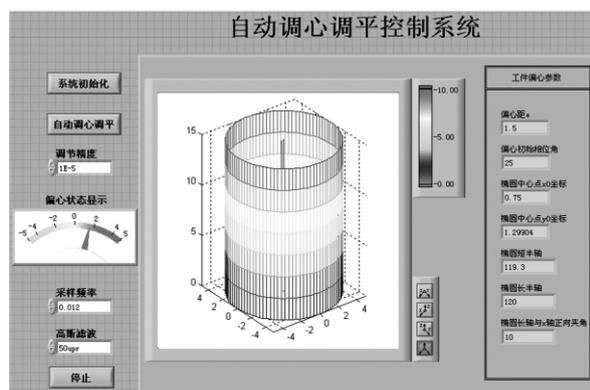


图 6 软件主界面图

取一偏斜工件,分别在高为 100mm、200mm 和 300mm 处采集圆周信号,再用双截面法对 100mm 和 300mm 两个截面处理调节,然后对 200mm 信号用单截面法处理调节。工件的偏斜信息为:偏心量为 1.5mm,偏心初始相位角为 30° ,工件主轴与其在 XOY 平面上投影夹角为 85.8° ,工件主轴在 XOY 平面上投影与 X 轴的夹角为 25° 。设采集一周信号所需时间为 T ,电机进行水平和倾斜调节耗时为 t ,比较两种算法的仿真结果,可得到表 1。

表 1 仿真结果对比表

调节参数	双截面法			单截面法		
	调节值	误差值	总调节 耗时	调节值	误差值	总调节 耗时
	第 1 次调节			第 1 次调节		
e_X (mm)	0.7497	0.0002	$6T+3t$ (迭代 3 次)	0.7501	0.0001	$2T+2t$ (迭代 2 次)
e_Y (mm)	12.9911	0.0008		12.9904	0.0002	
α ($^\circ$)	6.1904	0.0006		6.192	0.0001	
β ($^\circ$)	2.6245	0.0007		2.6254	0.0002	

从仿真结果可以看出:在 1 次调节的情况下,单截面法比双截面法的调节参数误差要小;双截面法在工件偏心较大的情况下,计算误差较大,要在多次迭代下才能得到较好的结果,而单截面法不受偏心量影响,分析结果稳定。工作台回转恒定匀速,双截面法一次测量需测 2 个圆度,而单截面法一次测量仅需测 1 个圆度,调节效率远远高于双截面法。此外,工件的圆度误差为高频信号,由于单截面法在计算工件偏心时采用的是频谱分析法,对中结果受圆度误差影响小,但对于双截面法则需要严格滤波后才能保证一定的计算精度。

5 结束语

通过对现有自动对中调节技术的研究,提出了两种圆度仪对中调节方法;根据倾斜圆柱的横截面为椭圆这一客观现象,提出了单截面自动对中思想,并推导了相应的控制算法;结合信号分析技术,根据椭圆 X 分量和 Y 分量的轨迹特性,以谱分析方法得出了椭圆的几何参量;将 LabView

和 MATLAB 结合,发挥各自的优势,实现了整个控制系统的软件编写。仿真结果表明,单截面自动对中控制算法调节耗时短、精度高,显著提高了圆柱度仪自动对中效率。同时,本文方法也便于与第二种调节方法相结合,在机构实现上也更加简便。

参考文献:

- [1] 丁晓辉. 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, 2010.
- [2] 李济顺, 雷贤卿, 薛玉君, 等. 基于坐标变换的圆柱度误差评定算法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(16): 1983-1987.
- [3] 董景新, 赵长德, 杨继范. 圆度仪被测工件的自动对中[J]. 宇航计测技术, 1994, 13(6): 20-24.
- [4] 刘飞. 圆柱度误差的测量与评价[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2008.
- [5] Muralikrishnan B, Raja J. Computational Surface and Roundness Metrology [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [6] Taylor H. Product [EB/OL]. [2011-11-03]. <http://wenku.baidu.com/view/4b57d7d950e2524de5187e49.html>.
- [7] 闫蓓, 王斌, 李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(3): 295-298.
- [8] 韩捷, 石来德. 全矢谱技术及工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] Hatsuzawa T. Automatic centering System for a Roundness Tester Using Force Feedback Techniques [J]. Precision Engineering, 1988, 10(1): 19-23.

(编辑 郭伟)

作者简介: 张瑞, 女, 1970 年生。郑州大学机械工程学院副教授。研究方向为 CAD/CAM/CAE 技术及应用、复杂型面设计与测量。卢好蕊, 女, 1987 年生。郑州大学机械工程学院硕士研究生。张林娜, 女, 1957 年生。郑州大学机械工程学院教授。郑鹏, 男, 1976 年生。郑州大学机械工程学院副教授。