

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.019

# ABS 齿圈检测仪误差校正方法的研究

郭 鹤 石佩斐

(郑州科技学院 郑州 450064)

**摘要:**为了提高 ABS 齿圈检测仪测量质量,根据 ABS 齿圈检测仪测量原理、结构特点及测量过程中产生误差的原因,综合分析了影响 ABS 齿圈检测仪测量精度的本质因素,针对产生误差的关键问题,开发了一种以空间三维直角坐标系仿射变换原理及最小二乘法曲线拟合原理为核心的实时误差校正方法,该方法可在不降低测量速度的前提下,进行自适应实时误差校正,提高测量精度。同时,根据误差校正原理建立了数学模型,并通过 MATLAB 7.10 仿真验证了其准确性及可行性。经计算,误差校正后的 ABS 齿圈检测仪测量重复性和不确定度指标符合预期要求。事实证明该方法能够用于 ABS 齿圈检测仪系统中,具有很高的实用价值。

**关键词:** 线激光器;误差校正;高速;自适应

**中图分类号:** TH701;TN247      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.4030

## Research on error correction method of ABS gear detector

Guo He Shi Peifei

(Zhengzhou College of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

**Abstract:** In order to improve the measurement quality of ABS gear detector, according to the measuring principle, the structure feature and the reason of error produced during measuring, the basic factor influencing the measurement accuracy is analyzed in this paper. And an error correction method based on the principle of least square curve fitting and affine transformation of space rectangular coordinate is developed to solve the key problem of error production, which could improve measuring accuracy without affecting measuring speed. At the same time a mathematical model is built according to the measuring principle. The result of simulation by MATLAB7.10 proves that the error correction method is correct and feasible. The calculation proves that the measurement repeatability and uncertainty of ABS gear detector after error correcting is acceptable. It proves that the error correction method can be used into the ABS gear detecting system, and has high practical value.

**Keywords:** line lasers; error correction; high speed; self-adaptive

## 1 引言

随着科技的发展,人们对汽车安全有着更高的要求,ABS 系统已成为现代汽车系统中必不可少的部分。而作为 ABS 系统中关键部件之一的 ABS 齿圈,其精度直接影响着 ABS 系统的性能,因此,如何提高 ABS 齿圈加工及检测精度,已成为汽车工业领域的重要问题<sup>[1-3]</sup>。目前,国内外对于 ABS 齿圈检测系统的开发十分稀缺,大多运

用传统人工方法检测,因此,研制高精度、高效率的 ABS 齿圈检测系统具有十分重要的意义。

长春理工大学以激光检测技术为基础研发了一种 ABS 齿圈检测仪,实现了齿圈相关位置公差的自动化检测,但在检测过程中,检测精度会受到检测仪装配精度及测量齿圈安装精度的影响而降低。而目前在国内外,并没有提出一种适用于此检测仪的误差校正方法,因此本文针对设计的 ABS 齿圈检测仪,开发了一种自适应误差校正方法,该方法可在不降低测量速度的前提下,根据不

同误差参数,进行实时误差补偿,有效提高 ABS 齿圈检测仪测量精度,具有很高的实用价值。

### 2 ABS 齿圈检测仪测量原理

设计的 ABS 齿圈检测仪用于测量 ABS 齿圈整个齿顶平面相对于基面的平行度参数。检测仪采用线激光位移传感器采集坐标数据,与点激光不同,线激光位移传感器能够一次性测量一条直线上的坐标数据,从而提高了测量速度。

系统测量原理如图 1 所示。为了减小振动误差,测量仪采用激光器固定,齿圈旋转的方式进行测量,凸轮转动将推动夹紧杆从内而外夹紧齿圈,从而使旋转主轴与齿圈之间的相对运动消失,当电机带动旋转主轴旋转时,齿圈将随之进行匀速转动<sup>[4,5]</sup>,从而使线激光器均匀测量整个齿圈齿顶平面数据。

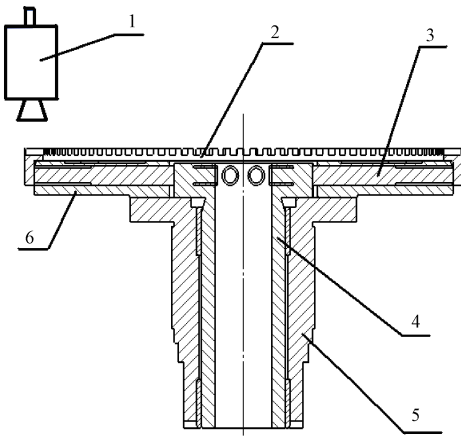


图 1 测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of measurement principle

测量过程中,由于齿圈的齿顶平面并不是连续的,当激光器完成一个齿顶平面上若干条直线的数据采集后,将会继续采集与齿顶相邻的齿根平面数据,此时检测系统将不再储存齿根数据,而转去处理刚采集的单个齿顶平面的数据,将采集的直线参数整合成该齿顶平面的面参数。当装夹机构旋转 360°后,线激光器再次采集齿根平面数据时,系统软件将对所有齿顶平面参数进行处理,从而计算出该 ABS 齿圈整个齿顶平面的面参数并通过上位机显示出来,上位操作界面如图 2 所示。

测量系统硬件大致分为 4 个部分:上位机、激光传感器控制器、伺服电机驱动器及装夹装置<sup>[3]</sup>。检测系统结构如图 3 所示。



图 2 上位机操作界面

Fig. 2 Operation interface of PC

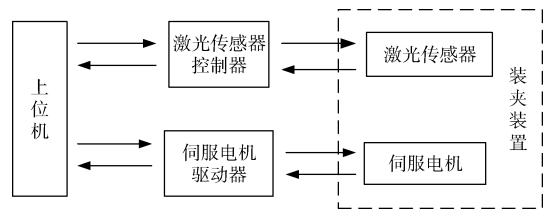


图 3 检测系统结构

Fig. 3 Structure of measuring system

### 3 误差分析

根据检测原理,建立测量坐标系。坐标系原点位于激光器线激光束所在等腰梯形面中心线上,距离激光发射点 30 mm,坐标系 Z 轴即为等腰梯形中线所在直线,方向向上指向线激光器,Y 轴在梯形面内与 Z 轴垂直,方向指向齿圈轴线,最后根据右手定理即可得出 X 轴方向,测量坐标系如图 4 所示。

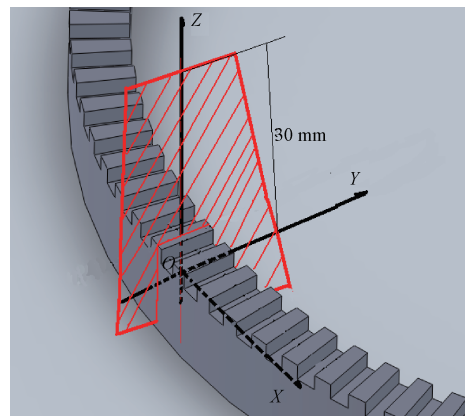


图 4 测量坐标系

Fig. 4 Measuring coordinate system

ABS 齿圈检测系统测量原理的设计,是以测量坐标系中  $Z$  轴与被测齿圈中轴线平行为基础的,即只有当  $XOY$  平面与基面平行这个假设成立的情况下,ABS 齿圈检测仪才能进行准确测量。但实际测量过程往往受到装置加工精度、被测齿圈安装精度的影响,测量中装夹装置主轴旋转时,轴承内外圈之间产生的微小晃动也会影响测量精度,从本质上说,在测量过程中,这些因素会导致测量坐标系  $XOY$  平面与测量基面之间产生一个不规则变化的夹角,从而使测量过程产生误差。

为了在不降低检测速度的前提下进行自适应误差补偿,提高精度,本文研发了一种误差校正算法,从而实现了检测仪的实时误差校正。

### 4 误差校正数学模型

假设在测量中的某一瞬间,测量坐标系  $XOY$  平面与 ABS 齿圈齿顶平面平行度基准面  $AOB$  之间的夹角为  $\alpha$ , 而此角即为影响 ABS 齿圈检测仪精度的原因所在,因此对设计的 ABS 齿圈检测仪误差校正的目标就是将  $\alpha$  角减小或消除,从而将线激光位移传感器测得的相对于  $XOY$  面的参数变换为相对于  $AOB$  平面的参数,本文采用坐标仿射变换的方法将测量坐标系绕  $XOY$  与  $AOB$  两平面交线  $L$  旋转  $\alpha$  角,从而完成误差校正。

以二维直角坐标系仿射变换原理为基础<sup>[4]</sup>,进行一系列推导及拓展,得到了三维直角坐标系绕空间任一通过原点的直线旋转任意角的变换矩阵,设其为矩阵  $T$ ,则:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon & \sin\varepsilon\cos\alpha & \sin\varepsilon\sin\alpha & 0 \\ -\sin\varepsilon & \cos\varepsilon\cos\alpha & \cos\varepsilon\sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为任意旋转角,  $\varepsilon$  为  $X$  轴与通过原点的任意直线之间的夹角。

在误差校正数学模型中,  $\alpha$  即为基准面  $AOB$  与测量坐标系  $XOY$  平面之间的夹角,  $\varepsilon$  为  $X$  轴与两面交线之间的夹角,如图 5 所示。

设主激光器测得的 ABS 齿圈齿顶某条直线上的坐标点为  $P$ , 则其与误差校正后实际坐标点  $P'$  之间的关系为:

$$P' = T \cdot P \quad (2)$$

将坐标点变换之后,通过分析校正后坐标点,即可计算出平行度的准确值。

在测量过程中,基准面  $AOB$  与  $XOY$  平面之间的夹角  $\alpha$  角是不断变化的,为实时计算出  $\alpha$  角的大小,可采用双激光器结构,如图 6 所示。两激光器均为相同型号的线激光位移传感器,分别在齿圈相距  $1/4$  圆

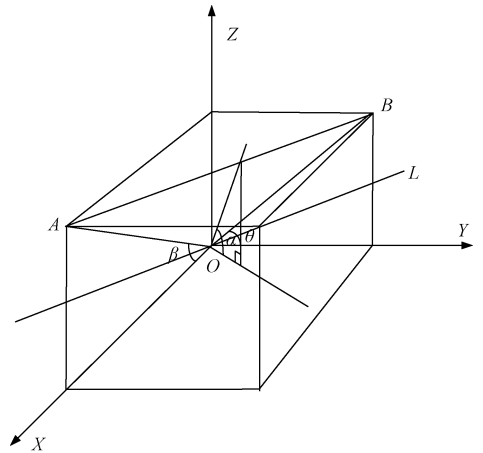


图 5 测量坐标系中误差校正模型

Fig. 5 Error correction model in measuring coordinate system

处设置,其中,激光器  $A$  为主激光器,  $B$  为辅激光器,测量过程中的测量坐标系是根据建立原则在主激光器(即  $A$ )处建立的。通过实时分析两激光器测得度数据,即可得出变换矩阵中的  $\alpha$  角及  $\varepsilon$  角相关三角函数的实时数值。

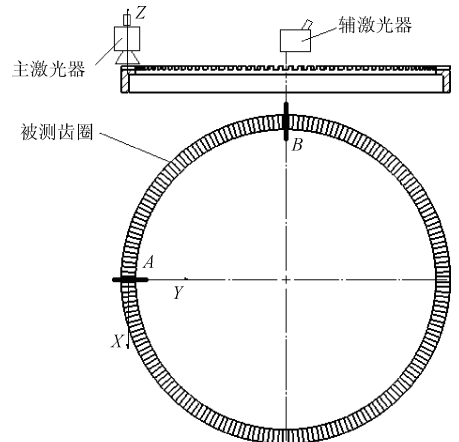


图 6 误差校正原理

Fig. 6 Schematic diagram of error correction principle

根据最小二乘法曲线拟合原理,可将主激光器  $A$  测得的点拟合成直线,该直线即为图 5 中的直线  $OB$ ,辅助激光器  $B$  所测得的点所拟合出的直线即为图 5 中的直线  $OA$ 。

设主激光器测得直线上的各个点坐标数据为  $(y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, n$ ;

辅激光器测得直线上的点坐标为  $(x_i, z_i), i = 1, 2, \dots, n$ ;

直线  $OB$  为  $z = a_0 + a_1y$ ;

直线  $OA$  为  $z = b_0 + b_1x$ ;

根据最小二乘法原理,对式(3)求偏导得:

$$M = \sum_{i=1}^n [z_i - (a_0 + a_1 y_i)]^2 \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{(\sum y_i^2)(\sum z_i) - (\sum y_i)(\sum y_i z_i)}{n(\sum y_i^2 \delta) - (\sum y_i)^2} \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{n(\sum y_i z_i) - (\sum y_i)(\sum z_i)}{n(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2} \quad (5)$$

将式(3)中的  $\alpha$  用  $b$  替换,同理可计算得:

$$b_0 = \frac{(\sum x_i^2)(\sum z_i) - (\sum x_i)(\sum x_i z_i)}{n(\sum x_i^2 \delta) - (\sum x_i)^2} \quad (6)$$

$$b_1 = \frac{n(\sum x_i z_i) - (\sum x_i)(\sum z_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (7)$$

由此可计算出图5中直线  $OB$  与测量坐标系  $Y$  轴之间的夹角  $\theta$ , 直线  $OA$  与测量坐标系  $X$  轴之间的夹角  $\beta$ 。

$$T = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} & -\frac{2b_1}{\sqrt{(a_1^2 + b_1^2)(b_1^2 + a_1^2 + 4)}} & -\frac{b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + 4}} & 0 \\ \frac{b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} & \frac{2a_1}{\sqrt{(a_1^2 + b_1^2)(b_1^2 + a_1^2 + 4)}} & \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + 4}} & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{b_1^2 + a_1^2}}{\sqrt{b_1^2 + a_1^2 + 4}} & \frac{2}{\sqrt{b_1^2 + a_1^2 + 4}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

再代入式(2),经整理,得出误差校正后坐标点  $P'(x', y', z')$  坐标值为:

$$\begin{cases} x' = \frac{a_1 x}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} - \frac{2b_1 y}{\sqrt{(a_1^2 + b_1^2)(b_1^2 + a_1^2 + 4)}} - \frac{b_1 z}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + 4}} \\ y' = \frac{b_1 x}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} + \frac{2a_1 y}{\sqrt{(a_1^2 + b_1^2)(b_1^2 + a_1^2 + 4)}} + \frac{a_1 z}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + 4}} \\ z' = -\sqrt{\frac{b_1^2 + a_1^2}{b_1^2 + a_1^2 + 4}} y + \frac{2z}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + 4}} \end{cases}$$

在实际测量中,线激光器  $B$  测得的坐标数据拟合出的直线以及测量坐标系  $XOY$  面与实际基准面  $AOB$  交线,均为不经过测量坐标系原点的空间直线,若按实际情况计算非常不便,经分析,本检测系统计算所需的关键数据均只与坐标点  $z$  坐标有关,在不改变  $z$  坐标的前提下,将测得的坐标点在  $XOY$  面内平移后,计算得出的最终数据与平移前的数据相同,因此为方便计算,提高系统检测速度,计算时将辅助激光器  $B$  测得的坐标在测量坐标系  $XOY$  面内平移至合适位置,使基准面  $AOB$  与  $XOY$  面的交线通过原点,从而使上述模型成立<sup>[5-8]</sup>。

## 5 仿真实验

### 5.1 仿真

根据上述误差校正原理,运用 MATLAB 7.10 对主激

$$\theta = \arctan a_1 \quad (8)$$

$$\beta = \arctan b_1 \quad (9)$$

再根据立体几何相关原理,经过一系列数学计算,得出变换矩阵中  $\alpha$  角及  $\varepsilon$  角相关三角函数的值,分别为:

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{b_1^2 + a_1^2}{b_1^2 + a_1^2 + 4}} \quad (10)$$

$$\cos \alpha = \frac{2}{\sqrt{b_1^2 + a_1^2 + 4}} \quad (11)$$

$$\sin \varepsilon = -\frac{b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \quad (12)$$

$$\cos \varepsilon = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \quad (13)$$

将三角函数值代入变换矩阵,得:

光器在 10 条直线上测量数据进行误差校正仿真。仿真数据如表 1 所示。

表 1 误差校正仿真结果

Table 1 Simulation results of error correction

$\theta/$ (°)	$\beta/$ (°)	实际 参数值	校正前 参数值	校正前 误差	校正后 误差值	校正后 误差
-1.145	-0.993	0.040 9	0.040 0	0.000 9	0.041 2	0.000 3
-0.764	-0.688	0.040 2	0.039 9	0.000 3	0.040 3	0.000 1
-0.611	-0.535	0.040 1	0.096	0.000 7	0.040 2	0.000 1
-0.458	0.381	0.040 2	0.040 0	0.000 2	0.040 2	0.000 0
0.535	0.382	0.040 1	0.039 8	0.000 3	0.040 2	0.000 1
0.611	0.688	0.040 5	0.039 9	0.000 6	0.040 4	0.000 1
0.764	0.840	0.041 0	0.040 0	0.001 0	0.040 9	0.000 1
0.993	0.764	0.041 0	0.039 8	0.001 2	0.041 4	0.000 4
1.069	0.917	0.040 8	0.039 9	0.000 9	0.040 9	0.000 1
1.146	1.298	0.042 4	0.040 0	0.002 4	0.042 1	0.000 3

在测量过程中,直线  $OA$  与  $X$  轴夹角  $\beta$  及直线  $OB$  与  $Y$  轴夹角  $\theta$  在不断变化,因此,这两个参数计算出的基准面  $AOB$  与  $XOY$  面夹角  $\alpha$  也在不断变化。

由仿真数据可看出,  $\alpha$  角显著影响测量误差,  $\alpha$  角越大,测量误差就越大,且由图 7 可看出,校正前测量仪测量的 ABS 齿圈参数值较实际值偏小,且误差大小无固定规律,而经过校正后,测量仪测量同一齿圈所得的参数值明显更贴近实际值,且测量误差基本在一定范围内,因此经仿真可证明,研发的误差校正方法能够根据不同的  $\alpha$  角进行自适应误差校正从而使测量误差保持在  $1 \mu\text{m}$  的范围内,相较于校正前,显著提高了 ABS 齿圈检测仪的测量精度。

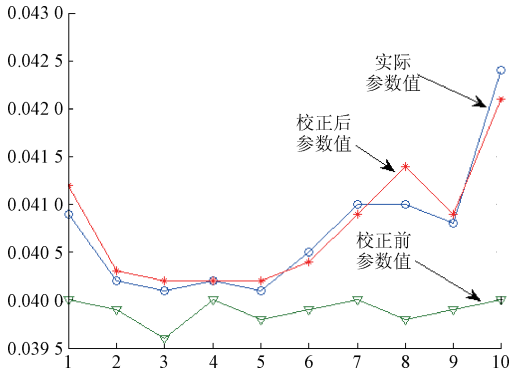


图 7 仿真参数对比曲线

Fig. 7 Curve of simulation parameters comparison

### 5.2 重复性测试

在此基础上,通过实际测量实验,又对用该方法校正过误差的 ABS 齿圈测量仪进行了重复性测试,重复测量平行度参数为  $0.015\ 12$  的 ABS 齿圈,测量 10 次,每次取 4 次度数的均值,实验数据如表 2 所示。

表 2 重复测试数据

Table 2 Repeated test data

标准值/ mm	校正前/ mm	误差/ $\mu\text{m}$	校正后/ mm	误差/ $\mu\text{m}$
0.015 12	0.015 08	0.04	0.015 12	0.00
	0.015 08	0.04	0.015 12	0.00
	0.015 15	0.03	0.015 13	0.01
	0.015 15	0.03	0.015 12	0.00
	0.015 08	0.04	0.015 11	0.01
	0.015 08	0.04	0.015 12	0.00
	0.015 15	0.03	0.015 12	0.00
	0.015 15	0.03	0.015 13	0.01
	0.015 08	0.04	0.015 12	0.00
	0.015 15	0.03	0.015 13	0.01

将误差值代入式(14),得  $s = 0.035\ 6 \mu\text{m}$ ,方差为  $1.18 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$ 。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \tag{14}$$

式中:  $x_i$  为校正后检测仪器度数,  $\bar{x}$  为标准值,  $n$  为测量次数。

由计算结果看出,用该方法进行误差校正后的测量仪测量重复性良好,结果稳定<sup>[9-12]</sup>。

### 5.3 不确定度评定

测量不确定度是指测量过程中,测量仪测量结果的可信赖程度。它是衡量测量仪测量质量的重要指标之一。

本文以英国 LK 公司 G90C8-7-6 型三坐标测量仪对同一 ABS 齿圈平行度参数的测量结果为标准,检定误差校正后的 ABS 齿圈测量仪的测量不确定度。评定过程如下。

首先,建立不确定度计算数学模型:

$$\Delta = t - t_s \tag{15}$$

式中:  $\Delta$  为检测仪示值误差,  $t$  为检测仪读数,  $t_s$  为标准值。

采用不确定度的 A 类评估方法,根据误差校正过的测量仪的重复性及式(16)计算出检测仪示值的不确定度分量  $u(t)$ 。

$$u(t) = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{16}$$

式中:  $s$  为测量仪重复性,值为  $0.035\ 6 \mu\text{m}$ ;  $n$  为重复性测试中每个测量结果重复读数次数,值为 4。代入计算得:

$$u(t) = \frac{0.035\ 6}{\sqrt{4}} = 0.017\ 8 \mu\text{m}$$

采用不确定度的 B 类评估方法,根据式(17),计算出三坐标测量仪的标准不确定度分量  $u(t_s)$ 。

$$u(t_s) = \frac{U}{k} \tag{17}$$

式中:  $U$  为三坐标测量仪的扩展不确定度,值为  $2.8 \mu\text{m}$ ;  $k$  为包含因子,值为 3。

计算得:

$$u(t_s) = \frac{2.8}{3} = 0.93 \mu\text{m}$$

再次,根据误差校正后测量仪示值不确定度分量,三坐标测量仪的标准不确定度分量,检测仪示值的不确定度分量,及式(18)~(20),计算出误差校正后的 ABS 齿圈测量仪合成不确定度  $u_c$ 。

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta)}{\partial t} = 1 \tag{18}$$

$$c_2 = \frac{\partial(\Delta)}{\partial t_s} = -1 \tag{19}$$

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u^2(t) + c_2^2 u^2(t_s)} \tag{20}$$

式中:  $c_1$  和  $c_2$  为灵敏系数,  $u(t)$  为误差校正后测量仪示值不确定度分量,  $u(t_s)$  为三坐标测量仪的标准不确定度分量。

计算得:

$$u_c = \sqrt{0.0178^2 + 0.93^2} \approx 0.93 \mu\text{m}$$

最后,根据合成不确定度及式(21),计算出误差校正后的扩展不确定度  $U$ 。

$$U = u_c \cdot k \quad (21)$$

式中:  $k$  为包含因子,取值2;  $u_c$  为误差校正后测量仪的合成不确定度。

计算得:

$$U = 2 \times 0.93 = 1.86 \mu\text{m}$$

综上,误差校正后的 ABS 齿圈检测仪的扩展不确定度为  $U = 1.86 \mu\text{m}$ , 包含因子为  $k=2$ 。

仿真与实验证明,使用该方法对 ABS 齿圈检测仪进行误差校正,能够使测量误差保持在  $1 \mu\text{m}$  的范围内,显著提高了检测仪的检测精度,同时,误差校正后的 ABS 齿圈检测仪重复性良好,测量结果稳定,不确定度符合要求,具有高速高精度的特点,能够应用于实际测量中<sup>[13-15]</sup>。

## 6 结 论

本文针对 ABS 齿圈检测仪测量精度需求,开发了一种基于最小二乘曲线拟合原理及坐标仿射变换原理的自适应误差校正算法,仿真与实验证明,该方法能够在不影响测量速度的情况下,实时自动调整补偿参数,进行误差校正,提高测量精度,同时,经计算,误差校正后的 ABS 齿圈检测仪测量重复性和不确定度指标符合预期要求。事实证明,该方法用于 ABS 齿圈检测系统中,能够达到预期效果,具有很高的实用价值。

## 参考文献

[1] 郭鹤. ABS 齿圈平行度及圆跳动检测技术研究[D]. 长春:长春理工大学, 2014:2-6.

GUO H. The research of the measuring system of ABS Gear parameters of parallelism and circular run-out[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014:2-6.

[2] 罗文发. ABS 齿圈和传感器的应用技术[J]. 汽车电器, 2008, 24(12):28-32.

LUO W F. Application technology for ABS gear ring and sensor[J]. Automotive Electrical Appliances, 2008, 24(12):28-32.

[3] 苏立波,李川. 拉普拉斯方程从直角坐标系到球面坐标系的变换[J]. 兴义民族师范学院学报, 2013, 13(6):106-110.

SU L B, LI CH. The Transformation of laplace equation from vertical coordinate to sphere coordinate[J]. Journal of Southwest Guizhou Teachers College for Nationalities. 2013, 13(6):106-110.

[4] 刘汝卫,张钢. 防抱死系统(ABS)发展现状与趋势[J]. 机械制造, 2009, 22(12):51-54.

LIU R W, ZHANG G. Development status and trend of anti-lock braking system (ABS) [J]. Machinery, 2009, 22(12):51-54.

[5] 黄江航. 浅谈汽车防抱死系统的组成及工作原理[J]. 机械工程与自动化, 2011, 13(12):189-190.

HUANG J H. Composition and working principle of automobile ABS [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2011, 13(12):189-190.

[6] YAN Y F, LI Y, BAI S P. Study on Photoelectric measuring systems for the swaying of rocket and artillery systems [J]. Acta Armamentarii. J. 2007, 7(1):782-784.

[7] 曹国华. 大型机组轴系激光对中精密检测技术研究[D]. 长春:长春理工大学, 2008.

CAO G H. The precise measuring technology of large-size generating shafting alignment based on laser technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008.

[8] BAI X, WANG Y. Research on measuring and modifying for mobile theodolite's sloshing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 11(2):161-165.

[9] 王飞. 基于 FPGA 的全数字化峰值时刻检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6):914-919.

WANG F. Full digital peak time discrimination technique based on FPGA[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6):914-919.

[10] LIU Z P, SHI L Y. Principle of least square algorithm and its achievement by MATLAB[J]. Development and Application, 2008, 17(5):33-34.

[11] 陆健. 最小二乘法及其应用[J]. 中国西部科, 2007, 12(2):19-21.

LU J. The least square method and its application[J]. Science and Technology of West China, 2007, 12(2):19-21.

[12] 郝绍杰,韩晓东. 矢量网络分析仪硬件性能对测量结果的分析[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(1):28-32.

HAO SH J, HAN X D. Analysis of vector network analyzer hardware performance influence measurement result[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(1):28-32.

[13] 陶洪峰,周超超,杨慧中. 三电平逆变器的决策树

- SVM故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2):238-244.
- TAO H F, ZHOU CH CH, YANG H ZH. Fault diagnosis of three-level inverter based on decision tree SVM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31 (2):238-244.
- [14] 彭太乐, 张文俊, 汪友宝, 等. 基于多特征的视频镜头检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 2013-2020.
- PENG T L, ZHANG W J, WANG Y B, et al. Video shot boundary detection algorithm based on multi-features[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 2013-2020.
- [15] 王文清, 沈海阔. 大尺寸部件测量信息高速并行处理系统设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(9): 108-113.

WANG W Q, SHEN H K. Design of high-speed parallel processing system for large-scale objects vision measurement information [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(9):108-113.

### 作者简介



郭鹤, 2011年于河南科技大学获得学士学位, 2014年于长春理工大学获得硕士学位, 现为郑州科技学院助教, 主要研究方向为机电系统控制与技术。

E-mail:441059684@qq.com

**Guo He** received B. Sc. from Henan University of Science and Technology in 2011 and M. Sc. from Changchun University of Science and Technology in 2014, respectively. Now she is assistant in Zhengzhou College of Science and Technology. Her main research interest includes electromechanical system control and technology.