

文章编号 1004-924X(2017)09-2300-09

未知相对位置条件下回转体厚度的双激光检测

李加福, 唐文彦, 张晓琳, 王 军*

(哈尔滨工业大学 电气及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了实现对大型空心回转体厚度的测量, 提出了一种基于双激光位移传感器的非接触扫描检测方法。在回转体与双激光位移传感器相对位置未知的条件下, 分析了由回转体安装偏心以及传感器光轴与原点不共线时所引入的测量误差, 建立了双传感器信号与被测位置厚度之间的数学模型。并借助于相关理论相位差算法、牛顿迭代法以及循环平移方法, 将实际厚度值从传感器信号中提取出来。对回转体厚度检测算法的仿真实验表明, 当检测信号中干扰分量的幅值不大于 0.3 mm 时, 算法检测厚度的相对误差总体保持在 0.5% 以内, 并将此作为调整旋转台转速的依据。分析实验测量数据发现, 两路信号的最大相对平移量为 4; 通过对数据进行偏心补偿以及平移, 本厚度检测算法的测量重复性误差并不大于 0.05 mm, 可以实现在随机位置状态下对回转体厚度的高精度检测。

关键词: 非接触测量; 激光技术; 厚度检测; 回转体; 相对位置

中图分类号: TH741; TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2300

Thickness measurement of rotary parts with double laser under unknown relative position condition

LI Jia-fu, TANG Wen-yan, ZHANG Xiao-lin, WANG Jun*

(School of Electrical Engineering and Automation,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: wang_jun@hit.edu.cn

Abstract: In order to measure the thickness of large-sized hollow rotating parts, a non-contact measuring method based on double laser displacement sensors was proposed. With unknown relative position between rotating parts and the double laser displacement sensor, the measuring errors induced by the installed eccentricity of rotating pieces as well as the non-collinear relationship between dual-sensor optic axis and the origin were analyzed. Meanwhile, mathematical model between dual-sensor signals and the thickness of the measured surface position was deduced. Thereby, the actual thickness value can be extracted from the sensor signals with the aids of the phase difference measurement based on correlation theory, Newton iterative method and the circulation translation method. Through the simulating experiment for the thickness detection algorithm of the rotary body, it is indicated that the relative detection error remains within 0.5% when the amplitude of the interference component in the detected signal is no greater than 0.3mm, which can be used as a reference for rotating speed adjustment of the turntable. The analysis on the experimental

收稿日期: 2017-01-04; 修订日期: 2017-02-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61501132); 上海航天科技创新基金资助项目 (No. SAST2015029)

measurement data shows that the maximum relative translation of two detection signals is 4; with eccentricity compensation and cycle-spinning of the data, the measurement repeatability error of the thickness detection algorithm is less than 0.05 mm, which meets the detection precision requirement large-sized hollow rotating parts in any position.

Key words: non-contact measurement; laser technique; thickness measurement; revolving body; relative position

1 引言

航空航天产品中包含有大量空心回转类壳段部件,其厚度的加工精度对产品的整体质量以及有效载荷有着至关重要的影响。现有的厚度检测方法主要基于法向矢量算法或者三角函数算法,借助于测量工装或者坐标点拟合的方式获取被测表面法线方向的厚度值,使用的设备有U型卡尺、三坐标测量机或者超声波测厚仪^[1-2]。前两种设备采用逐点测量方式,检验人员劳动强度较大,测量结果的一致性较差。而使用超声波测厚仪时,需要针对不同材料制作标准试块,且材料内部缺陷对测量效果影响较大。

随着激光测量技术的逐渐成熟,激光三角法成为检测厚度的一种有效手段^[3-4]。天津大学提出了一种基于垂直入射差分激光三角海面溢油油膜厚度的检测方法,其测量范围为0.1~10 mm,测量的相对误差小于1%^[5]。齐齐哈尔大学将线阵CCD双激光传感器用于测量冷轧钢板的厚度,其测量误差为 $\pm 10 \mu\text{m}$ ^[6]。常州工程学院利用多分辨率小波对激光测量锂电池厚度信号进行滤波处理,动态扫描精度可以达到 $3 \mu\text{m}$ ^[7-8]。因此,现有的激光测厚技术可以满足壳段厚度的测量精度要求。

目前,国内外主要致力于研究平板厚度的激光测量机理,而关于回转体类厚度检测的基础理论研究则相对较少。理论上,只有在两个传感器光轴与回转体圆点共线的条件下,测量出的结果才符合厚度定义。然而,由于回转体装卡偏心的存在,旋转台带动回转体转动时,回转体圆点与传感器光轴之间的位置会发生周期性的改变,使得测量结果大于实际厚度值。为了保证采用双激光位移传感器测量回转类厚度的精度,需要手动调整回转体和传感器的位置,并且被测产品以及传感器的安装精度需要达到亚微米级别才能满足测量精度的要求。由于被测产品的半径一般都不低于800 mm,纯手动调整不仅费时费力,而且具有随机性,无法满足批

量检测壳段产品的要求。另一方面,激光位移传感器也被用于回转体的定位。天津大学提出了一种非接触式回转逼近孔心定位的方法。该方法利用机床主轴带动传感器进行回转、平移,可以快速定位与机床相关联的圆心的相对坐标,其定心精度可以达到 $3 \mu\text{m}$ ^[9]。厦门大学提出了一种单激光传感器的砂轮偏心的高精度检测方法,能够快速还原砂轮的偏心距以及偏心方向,但是测量过程中需要保证传感器轴线与原点重合^[10]。

本文结合现有的回转体偏心测量算法,提出了一种基于双激光传感器的大型回转体连续非接触厚度检测方法。与现有方法相比,该方法测量时不需要提前确定传感器与被测产品之间的相对位置关系,能够实现回转体厚度的在位修正。

2 回转体厚度双激光检测原理

2.1 厚度检测原理

本文借助现有机床设计了一种回转体厚度测量系统,不仅节省空间、节约成本,还可以实现在位测量,其结构如图1所示。该系统主要包括2套激光位移传感器、U型扫描夹具、机床以及旋转台等。

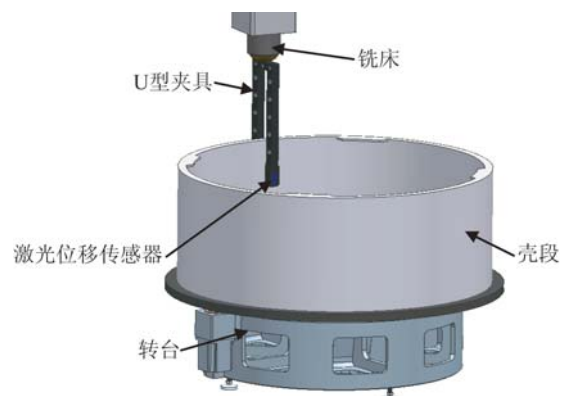


图1 回转体厚度测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of revolving body thickness measurement system

U 型夹具内固定有两个同轴反向的激光传感器,将夹具安装在机床的主轴上,代替机床铣刀,通过机床在 Z 轴方向的运动以及转台的旋转,能够连续测量回转体某一截面上的点到传感器出射点的距离。令两激光传感器所得到的信号为 S_1 与 S_2 ,激光传感器间距为固定值 $A_1 B_1$,则回转体厚度为:

$$d = A_1 B_1 - (S_1 + S_2). \quad (1)$$

2.2 误差分析

回转体厚度的测量精度主要受双传感器光轴同轴度、光轴与回转体之间的夹角以及回转体安装偏心以及噪声干扰等因素的影响。通过分析发现,在双传感器光轴夹角不大于 0.25° 、距离不大于 0.1 mm 的情况下,由光轴同轴度引起的测量误差不大于 $2 \mu\text{m}$,即在后续的理论分析中可以假定光轴共线。其中,光轴共线的调节及校准主要采用 CCD 光学成像系统以及多组标准量块,详细方法参考文献[11],这里不再赘述。而作为高阶分量的外界干扰,主要利用滤波的方法尽量从原始信号中分离。

2.2.1 光轴径向夹角误差

当两个激光传感器轴线与回转体圆心不共线时,测量原理如图 2 所示。转台旋转角度为 θ_i 时,实际的厚度值 $A_2 A_3(\theta_i)$ 小于利用式(1)获取的回转体厚度值 $A_2 B_2(\theta_i)$,即:

$$A_2 A_3(\theta_i) < A_2 B_2(\theta_i). \quad (2)$$

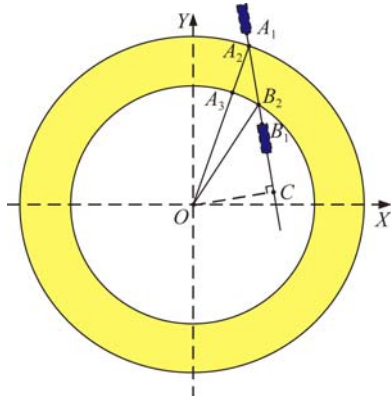


图 2 传感器光轴与原点不共线时的厚度测量模型

Fig. 2 Thickness measurement model when optical axis of sensor and origin are not collinear

$$OB_2(\theta_i) = e \cos(\theta_i - \varphi) + O_0 B_2(\theta_i) \sqrt{1 - \frac{e^2 \sin^2(\theta_i - \varphi)}{O_0 B_2(\theta_i)}} = e \cos(\theta_i - \varphi) + O_0 B_2(\theta_i) \left[1 - \frac{e^2 \sin^2(\theta_i - \varphi)}{2O_0 B_2^2(\theta_i)} + o(\sin^2 \theta_i) \right], \quad (8)$$

式中偏心量 $e = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ 。

由于偏心量远小于半径 $O_0 B_2$,并且泰勒级数

通过分析可知,传感器示数 $A_1 A_2(\theta_i)$ 、 $B_1 B_2(\theta_i)$ 与回转体半径 $OA_2(\theta_i)$ 、 $OB_2(\theta_i)$ 之间的关系为:

$$\begin{cases} A_1 A_2(\theta_i) = A_1 B_1 - (OA_2(\theta_i) \times \cos \angle OA_2 C - B_1 C) \\ B_2 B_1(\theta_i) = OB_2(\theta_i) \times \cos \angle OB_2 C - B_1 C \end{cases}, \quad (3)$$

其中 $\angle OA_2 C$ 与 $\angle OB_2 C$ 都为定值,并且:

$$\angle OB_2 C = \angle OA_2 C + \angle A_2 OB_2. \quad (4)$$

因此,壳段的实际厚度也可以表示为:

$$d(\theta_i) = OA_2(\theta_i - \angle A_2 OB_2) - OB_2(\theta_i). \quad (5)$$

2.2.2 偏心误差

当回转体存在安装偏心,转台旋转角度为 θ_i 时,壳段的实际厚度应为:

$$d(\theta_i) = O_0 A_2(\theta_i - \angle A_2 O_0 B_2) - O_0 B_2(\theta_i). \quad (6)$$

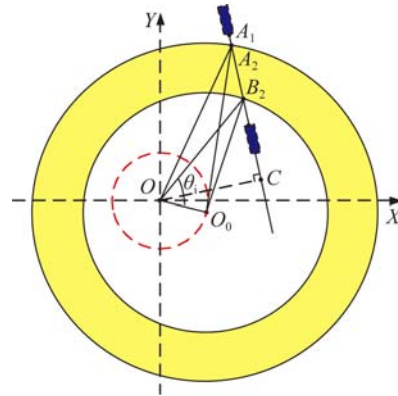


图 3 回转体安装偏心时厚度测量模型

Fig. 3 Thickness measurement model with installed eccentricity of rotating pieces

而从图 3 中可以发现,激光传感器测量点 B_2 到原点 O 的距离 OB_2 与其对应的半径 $O_0 B_2$ 之间的关系可以表示为^[12]:

$$OB_2(\theta_i) = x_0 \cos \theta_i + y_0 \sin \theta_i + \sqrt{O_0 B_2^2(\theta_i) - (x_0^2 + y_0^2) \sin^2(\theta_i - \varphi)}, \quad (7)$$

其中: $\theta_i = \angle B_2 O X$, $\varphi = \arctan \left[\frac{y_0}{x_0} \right]$ 。

对式(7)进行泰勒级数展开,得到:

$$OB_2(\theta_i) \approx e \cos(\theta_i - \varphi) + O_0 B_2(\theta_i). \quad (9)$$

的高阶项为无穷小,因此,式(8)可以化简为:

①无偏心

根据式(3)对传感器示数进行积分,可得:

$$\begin{cases} \int_0^T S_{l_1} d\theta = 2\pi(r_1 \cos \angle OA_2 C - B_1 C) \\ \int_0^T S_{l_2} d\theta = 2\pi(r_2 \cos \angle OB_2 C - B_1 C) \end{cases} \quad (18)$$

结合式(4),在回转体半径的理论值已知的前提下,通过牛顿迭代法可以获取参数 $\cos \angle OA_2 C$ 、 $\cos \angle OB_2 C$ 和 $B_1 C$ 的值。

因此,在无偏心条件下,回转体半径的实测值为:

$$\frac{r_{l_1}^2(\theta_1) + (S_{l_1}(\theta_1) - S_{l_1}(\theta_m))^2 - \left[\frac{S_{l_1}(\theta_m) + B_1 C}{\cos \alpha} \right]^2}{2r_{l_1}(\theta_1)(S_{l_1}(\theta_1) - S_{l_1}(\theta_m))} = b_1 + \alpha, \quad (21)$$

式中: $r_{l_1}(\theta_1) = \frac{S_{l_1} + B_1 C}{\cos \alpha + b_1 \cos(\theta_1 - \varphi)}$, $\theta_1 + \delta_1 = 0$, $\theta_m + \delta_1 = \pi$ 。为了加快计算速度,引入参数 h_1 :

$$h_1 = \frac{S_{l_1} + B_1 C}{r_1} - \cos \alpha = (\cos \alpha + b_1 \cos(\theta_1 - \varphi)) \left[1 + \frac{e \cos(\theta_1 - \varphi)}{r_1} \right] - \cos \alpha = b_1 \cos(\theta_1 - \varphi) \left[1 + \frac{e \cos(\theta_1 - \varphi)}{r_1} \right] + \frac{e \cos \alpha \cos(\theta_1 - \varphi)}{r_1} = b_1 \cos(\theta_1 - \varphi) \left[1 + k_1 + \frac{e \cos(\theta_1 - \varphi)}{r_1} \right], \quad (22)$$

其中 $k_1 = \frac{e \cos \alpha}{b_1 r_1}$ 。

h_1 与 b_1 的关系可以表示为:

$$b_1 = k(\max(h_1) - \min(h_1))/2. \quad (23)$$

$$\begin{cases} OB_2(\theta_1) = \frac{S_1 + B_1 C}{\cos \alpha + b_1 \cos(\theta_1 - \varphi)} \\ OA_2(\theta_1 + \angle A_2 OB_2) = \frac{S_2 + B_1 C}{\cos \beta + b_2 \cos(\theta_1 - \varphi + \angle A_2 OB_2)} \end{cases} \quad (24)$$

(5)厚度计算及滤波处理

对数据进行循环平移,平移量为:

$$n \approx \text{round} \left[\frac{\angle A_2 OB_2}{2\pi f_s / T} \right], \quad (25)$$

其中: f_s 为采样频率, T 为旋转台转动周期。

最后,求取壳段的实际厚度信号,并利用经验模态滤波算法进行降噪处理。

4 仿真分析

仿真实验参数设置如下:回转体内外半径分别为 1 000, 990 mm, 偏心初始坐标 $O_0(4, 3)$, 传感器坐标为(950, 40)、(1 015, -20), 转台角速度为 0.04π rad/s, 采样频率为 40 Hz, 采样点数为 2 000。在此条件下,传感器测量获得数据的参数

$$\begin{cases} OA_2(\theta_1 + \angle A_2 OB_2) = \frac{S_1 + B_1 C}{\cos \angle OA_2 C} \\ OB_2(\theta_1) = \frac{S_2 + B_1 C}{\cos \angle OB_2 C} \end{cases} \quad (19)$$

②有偏心

根据式(14)、式(15)对信号进行积分,得:

$$\begin{cases} \int_0^T S_{l_1} d\theta = 2\pi(r_1 \cos \alpha - B_1 C) \\ \int_0^T S_{l_2} d\theta = 2\pi(r_2 \cos \beta - B_1 C) \end{cases} \quad (20)$$

结合式(4)、式(17),并利用回转体半径的理论值,可以计算出参数 $\cos \alpha$ 、 $\cos \beta$ 、 $B_1 C$ 。

求解以下方程,获取估计参数 b_1 :

通过求取参数 k 来间接获取 b_1 。同理求取参数 b_2 。

因此,在无偏心的条件下,回转体与机床原点间的实测值为:

理论值如表 1 所示。

表 1 模型参数理论值

Tab. 1 Theoretical values of model parameters

$\cos(\alpha)$	$\cos(\beta)$	$\angle A_2 OB_2 / \text{rad}$
0.732 670	0.7389 34	9.249 86e-3
$B_1 C / \text{mm}$	b_1	b_2
6.709 3e2	3.196 9e-3	3.075 6e-3

为了验证本文所提算法处理传感器测量信号的有效性,分别对理想信号加入不同幅值的噪声信号,其幅值为 0.1~0.9 mm。图 6 为加噪后的信号,图 7 为预处理阶段降噪得到的信号。

表 2 无偏心时的参数估计结果

Tab. 2 Parametric estimation results without eccentricity

信噪幅值/mm	计算值					相对误差/%				
	$\cos(\alpha)$	$\cos(\beta)$	$\angle A_2OB_2/\text{rad}$	B_1C/mm	$\max(\vartheta)/\min(\vartheta)$	$\cos(\alpha)/10^{-3}$	$\cos(\beta)/10^{-3}$	$\angle A_2OB_2$	$B_1C/10^{-3}$	$\max(\vartheta)/\min(\vartheta)$
0.1	0.732 699	0.738 962	9.248 7e-3	6.709 4e+2	0.013/-0.017	1.53	1.48	-0.012 5	1.71	0.126/-0.171
0.3	0.732 719	0.738 982	9.248 1e-3	6.709 6e+2	0.029/-0.041	4.26	4.11	-0.019 0	4.76	0.29/-0.41
0.5	0.732 739	0.739 001	9.247 6e-3	6.709 8e+2	0.052/-0.065	6.99	6.74	-0.024 4	7.82	0.52/-0.65
0.7	0.732 759	0.739 021	9.247 1e-3	6.710 0e+2	0.076/-0.089	9.72	9.36	-0.029 8	9.36	0.76/-0.89
0.9	0.732 779	0.739 040	9.246 5e-3	6.710 2e+2	0.098/-0.112	1.24	1.19	-0.036 3	13.9	0.98/-1.12

表 3 有偏心时的参数估计结果

Tab. 3 Parametric estimation results with eccentricity

信噪幅值/mm	计算值							相对误差/%						
	$\cos(\alpha)$	$\cos(\beta)$	$\angle A_2OB_2/\text{rad}$	B_1C/mm	$b_1/10^{-3}$	$b_2/10^{-3}$	$\max(\vartheta)/\min(\vartheta)$	$\cos(\alpha)/10^{-2}$	$\cos(\beta)/10^{-2}$	$\angle A_2OB_2$	$B_1C/10^{-2}$	b_1	b_2	$\max(\vartheta)/\min(\vartheta)$
0.1	0.732 609	0.738 875	9.25 12e-3	6.708 6e+2	3.201 0	3.077 3	0.008/-0.016	-0.824	-0.799	0.014 5	-0.934	0.12	0.05	0.08/-0.16
0.3	0.732 469	0.738 739	9.254 7e-3	6.707 2e+2	3.199 8	3.061 9	0.041/-0.033	-2.73	-2.64	0.052 3	-3.02	0.09	-0.45	0.41/-0.33
0.5	0.732 339	0.738 612	9.258 3e-3	6.705 9e+2	3.198 7	3.060 1	0.049/-0.070	-4.50	-4.35	0.091 2	-4.96	0.06	-0.51	0.49/-0.70
0.7	0.732 209	0.738 486	9.261 8e-3	6.704 6e+2	3.197 5	3.058 2	0.067/-0.100	-6.28	-6.06	0.129 1	-6.89	0.02	-0.56	0.67/-1.00
0.9	0.732 079	0.738 360	9.265 3e-3	6.703 3e+2	3.196 3	3.056 4	0.0852/-0.131	-8.05	-7.77	0.166 9	-8.83	-0.01	-0.62	0.852/-1.31

表 2、表 3 分别为有无偏心时该算法对受干扰原始信号的参数估算结果。仿真结果表明,有无偏心条件下算法的计算偏差基本一致;随着干扰信号幅值的增大,算法的偏差也随之变大,各个估计参数的最大相对误差为 1.39%。为了保证厚度测量结果的偏差不大于 0.045 mm,外界干扰信号的幅值不能大于 0.3 mm。从实测信号中分离出关于参数 $\cos\angle OA_2C$ 、 $\cos\angle OB_2C$ 、 B_1C 的直流分量是准确估计参数的关键,式(18)和式(20)利用了积分的性质,但是其抗噪声干扰的能力较差。因此,下一步的研究重点是提高算法的滤波能力或者借助于希伯特变换来获取相应的直流分量。

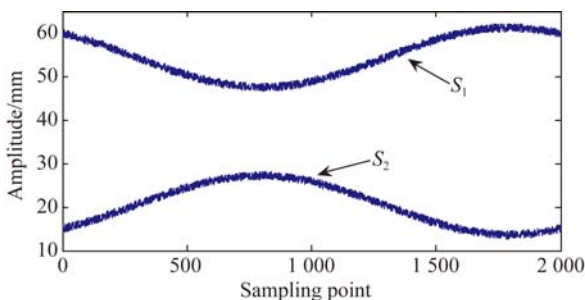


图 6 模拟激光传感器测量信号

Fig. 6 Analogue measuring signals of laser sensor

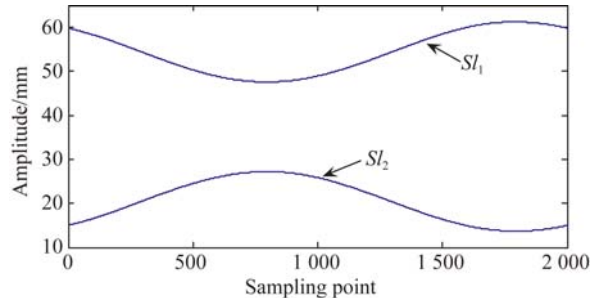


图 7 降噪后的激光传感器测量信号

Fig. 7 Measuring signals of laser sensor after de-noising

5 实验测试

利用本文的测量方法对某型号的壳段产品厚度进行了测量,壳段厚度的设计理论值为 10 mm。实验中旋转台的转速为 0.02π rad/s,采样频率为 40 Hz,采样点数为 4 000。经过标定,两个传感器之间的距离为 69.909 mm。原始信号以及处理结果如图 8 所示,可以发现,该方法能成功地将厚度值从原始信号中提取出来。

为了验证本方法的稳定性,在相同位置进行了多次重复测量。对每一组实验数据再采用本文算法重构壳段厚度的实际值,并且计算出其他数

据相对于第一次测量结果的厚度值误差,如图 9 所示。从图 9 可以发现,6 次测量结果的最大绝对偏差量不大于 0.05 mm。

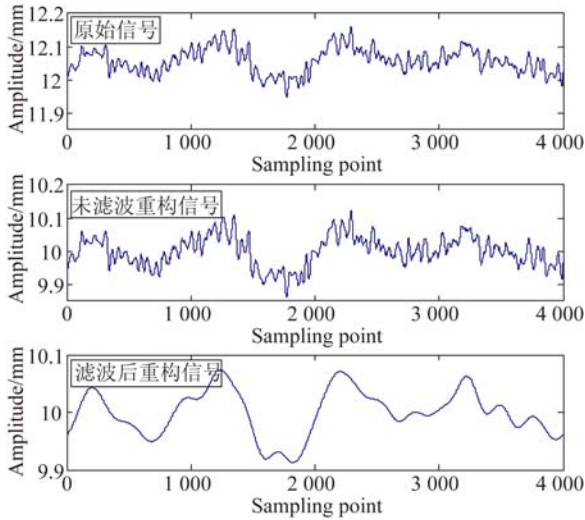


图 8 原始信号、未滤波与滤波后的重构信号比较

Fig. 8 Comparison between original signal and filtered and un-filtered reconstructed signals

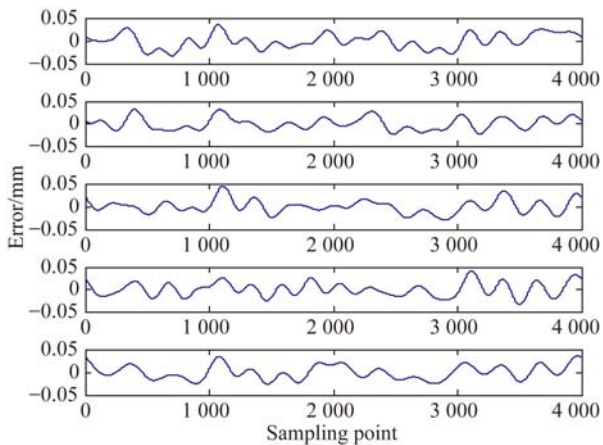


图 9 多次厚度测量数据间的绝对误差

Fig. 9 Absolute error between multiple thickness measured data

保持壳段以及传感器高度不变,通过机床主轴带动 U 型夹具旋转来改变传感器与壳段之间的夹角关系。机床主轴每次旋转 5° , 总共旋转 6 次。算法对数据进行处理时,循环位移数量分别为 4, 3, 2, 2, 1, 0。根据测量结果,不同旋转角度下测量数据相对于第一次测量结果的厚度值误差如图 10 所示。从图 10 可以发现,6 次测量结果的最大绝对偏差量不大于 0.04 mm。实验结果表明,本测量方法具有良好的检测重复性以及较高的稳定精度。

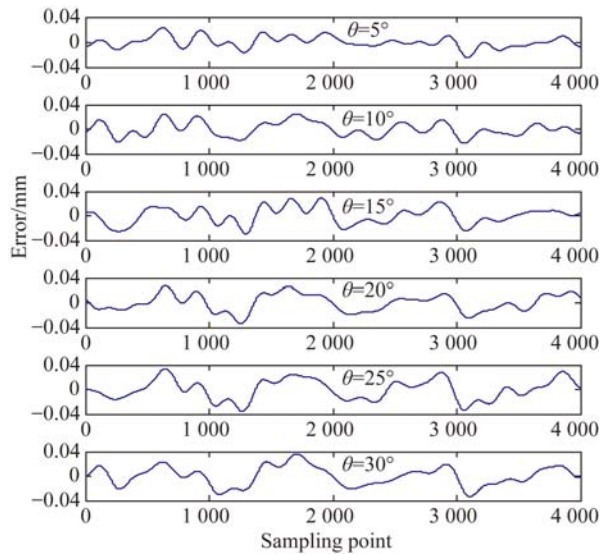


图 10 不同旋转角度下厚度测量数据间的绝对误差

Fig. 10 Absolute error between measured data at different rotation angles

6 结 论

为了实现大型薄壁回转类壳段厚度的测量,本文提出了一种机床与 U 型夹具联合的非接触测量方法,其核心是如何在回转体与传感器位置关系不确定的情况下,从两路激光传感器信号中提取出实际的厚度值。重点讨论了回转体安装偏心以及传感器光轴与原点不共线时,双传感器信号与被测产品内外半径之间的数学模型,并借助相关理论相位差算法、牛顿迭代法以及循环平移法,实现了模型参数的准确估计。通过仿真发现,在干扰信号的幅值不大于 0.3 mm 的情况下,参数估计的相对误差保持在 1.39% 以内,而计算出的厚度值的绝对误差不大于 0.045 mm,这为旋转台转速的调节提供了依据。通过对某型号的壳段产品进行实际测量发现,方法的测量重复性不大于 0.05 mm,与理论结果一致。同时,在利用机床主轴改变传感器与原点之间的相对夹角关系时,发现最大相对平移量为 4,便可以实现两路测量信号的对齐。在厚度测量过程中,本文提出的方法不受回转体在机床上的偏心安装误差的影响,也无需知道回转体与传感器光轴之间的角度关系。此外,对于其他类型的回转体厚度以及偏心信号的检测,该方法同样具有参考价值。

参考文献:

- [1] 毛雄忠,王庆霞,杨建国,等. 天线罩法向几何厚度测量方法研究与实现[J]. 机床与液压, 2013, 41(21):26-28, 43.
MAO X ZH, WANG Q X, YANG J G, *et al.*. Study and implementation of normal geometric thickness for radome [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2013, 41(21):26-28, 43. (in Chinese)
- [2] CONG S, GANG T. Ultrasonic thickness measurement for aluminum alloy irregular surface parts based on spectral analysis [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(S2):s323-s328.
- [3] 冯俊艳,冯其波,匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. 应用光学, 2004, 25(3):33-36.
FENG J Y, FENG Q B, KUANG C F. Present status of high precision laser displacement sensor based on triangulation [J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, 25(3):33-36. (in Chinese)
- [4] 陈骥,王鑫,曹久大,等. 高速 CCD 激光位移传感器[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4):611-616.
CHEN J, WANG X, CAO J D, *et al.*. Development of high-speed CCD laser displacement sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4):611-616. (in Chinese)
- [5] 吴顿,吕且妮,陈曦,等. 差分激光三角法油膜厚度测量传感器的测量范围与精度分析[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版, 2013, 46(11):998-1002.
WU D, LÜ Q N, CHEN X, *et al.*. Analysis on measurement range and precision of the oil Film thickness measurement sensor based on differential laser trigonometry [J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2013, 46(11):998-1002. (in Chinese)
- [6] 郭媛,王娜. 基于 CCD 的激光非接触式钢板测厚方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2014, (12):68-70.
GUO Y, WANG N. Study on laser non-contact thickness measurement method for cold-roll steel sheets based on linear CCD [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(12):68-70. (in Chinese)
- [7] 陈功,朱锡芳,许清泉,等. 多分辨率小波在非连续涂层测厚的应用[J]. 控制工程, 2013, 20(1):175-178.
CHEN G, ZHU X F, XU Q Q, *et al.*. Multi-resolution wavelet in discontinuous coating thickness measurement [J]. *Control Engineering of China*, 2013, 20(1):175-178. (in Chinese)
- [8] 陈功,朱锡芳,许清泉,等. 未知噪声频率环境下锂电池极片激光测厚研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9):1978-1986.
CHEN G, ZHU X F, XU Q Q, *et al.*. Research on electrode film thickness measurement of lithium battery with laser under unknown noise frequency environment [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(9):1978-1986. (in Chinese)
- [9] 王仲,苏野,刘新波,等. 回转激光位移传感器逼近式孔心定位方法[J]. 中国激光, 2012, 39(6):0608001.
WANG ZH, SU Y, LIU X B, *et al.*. An approximation hole center positioning method by rotating laser displacement Sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6):0608001. (in Chinese)
- [10] 王振忠,陈世平,王泉金,等. 砂轮偏心信号的高精度检测方法[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10):20-27.
WANG ZH ZH, CHEN SH P, WANG Q J, *et al.*. High accuracy detection algorithm for eccentric signal of grinding wheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10):20-27. (in Chinese)
- [11] 刘新波,付鲁华,王仲,等. 双激光位移传感器组合测头的光轴共线调校法[J]. 光电子·激光, 2013, 24(7):1363-1369.
LIU X B, FU L H, WANG ZH, *et al.*. Optic axis collinear adjustment method for the double laser displacement sensors combination probe [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(7):1363-1369. (in Chinese)
- [12] MARESCA P, GÓMEZ E, CAJA J, *et al.*. Use of coordinate measuring machines and digital optical machines for the geometric characterization of circumference arcs using the minimum zone method [J]. *Measurement*, 2010, 43(6):822-836.
- [13] 沈廷整,涂亚庆,李明,等. 基于相关原理的相位

差测量改进算法及应用[J]. 振动与冲击, 2014, 33(21):177-182.

SHEN T A, TU Y Q, LI M, *et al.*. An improved

method for phase difference measurement based on correlation theory [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(21):177-182. (in Chinese)

作者简介:



李加福(1988—),男,山东德州人,博士研究生,2011年于山东理工大学获得学士学位,2014年于中国计量大学获得硕士学位,主要从事信号处理和精密测量方面的研究。E-mail: li-jia-fu@163.com

导师简介:



唐文彦(1958—),男,黑龙江阿城人,教授,博士生导师,1982年、1984年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,1992年在德国获得博士学位,主要从事光电信息及光电检测技术方面的研究。E-mail: tangwy@hit.edu.cn