

基于 Matlab 的时栅位移传感器的误差曲线分析与拟合研究^{*}

陈自然 彭东林 王先全 董 淳

重庆工学院

摘 要:提出了一种基于 Matlab 傅立叶算法的传感器误差修正和补偿方法,将其应用于时栅位移传感器研究,借助于 Matlab 强大的计算功能实现时栅位移传感器测量的误差曲线分析和拟合算法,用低精度的机械加工实现高精度的传感器制造。

关键词: Matlab, 谐波, 时栅位移传感器, 误差曲线, FFT

Error Curve Fitting of Time Grating Displacement Sensor Based on Matlab

Chen Ziran Peng Donglin Wang Xianquan *et al*

Abstract: A method based on Matlab FFT is presented for error correction and compensation of sensors. The measuring error curve analysis and its fitting algorithm of time grating displacement sensor can be got with the great command calculation of Matlab, which carry out to achieve high precision with low precision machined components measurement. As a result the precision of the sensor is promoted greatly.

Keywords: Matlab, harmonic wave, time grating displacement sensor, error curve, FFT

1 引言

基于时空坐标转换理论^[1]而研制的时栅位移传感器实现了以时间测量空间,但由于温度漂移、电子元器件不稳定性、机械加工精度不高等各种不确定因素影响了时栅精度的进一步提高。虽然目前已有运用 Labview 最小二乘法^[2]来修正和提高时栅的精度,但 labview 存在设计复杂,运算时间长等弊端。对此本文提出了一种新的误差曲线修正和补偿方法。选用的多对极电机,对多个采样脉冲信号进行多分频后合成一个采样脉冲,其整数倍的谐波分量误差是不可避免的,对这些误差就只能采取误差修正的方法予以解决。运用傅立叶级数对原测试曲线反复修正,就可以逐次将传感器误差减小来达到期望的精度。本文研究的内容就是针对运用 Matlab 对时栅位移传感器进行误差修正和补偿的研究而展开的。

2 误差曲线拟合分析和修正法

按照傅氏级数思想,一条误差曲线总可以展开成为 $1, 2, 3, \dots, N$ (N 趋于无穷大) 次误差,于是本修正法的修正过程如下:

- (1) 实测采样,依次读时栅和光栅的数,其差值就是该点采集得到的误差值,所形成的曲线就是误差曲线;
- (2) 根据采样值构成的误差曲线,由 Matlab 软件运用傅立叶算法拟合出一条误差曲线方程;
- (3) 用误差曲线减拟合曲线,对误差曲线进行修正;
- (4) 对相减后残存的误差曲线进行再拟合,即重复第(3)步工作;
- (5) 再进行第(4)步,即再进行修正;重复上述(3)、(4)步工作,直到误差曲线小于设计值。

3 误差曲线拟合的 Matlab 实现

试验中往往只能测得一些分散的数据点,为了从这些分散的数据点中找到其内在的规律性,就需

*国家自然科学基金资助项目(项目编号:50575235)
收稿日期:2008年5月

- 3 Ganesha Udupa, B K A Ngoi. Form error characterization by an optical profiler. *Advanced Manufacturing Technology*. 2001, 17: 114 ~ 124
- 4 吴剑锋,王 文,陈子辰. 激光三角法测量误差分析与精度提高研究. *机电工程*, 2003, 20(5): 89 ~ 91
- 5 Horikawa, N Maruyama and M Shimada. A low cost, high accuracy roundness measuring system. *Precision Engineering*. 2001:

200 ~ 205

- 6 曹麟祥,王丙甲. 圆度检测技术. 北京:国防工业出版社, 1998
- 第一作者:张玉梅,吉林大学机械科学与工程学院, 130025 长春市
- First Author: Zhang Yumei, College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

要利用这些分散的数据点来生成一个新的函数逼近这些已知点。Matlab 语言具有强大的计算功能和绘图功能,从而使得曲线拟合并绘制出拟合曲线图显得格外方便,也很容易找到分散数据的内在规律性。

根据圆封闭原理,时栅传感器由于采用多对极结构可以有效消除大部分误差。采用 n 对极的时栅传感器可以消除圆周上除 $in (i = 1, 2, 3, \dots)$ 次以外的各项周期性误差。即对于 n 对极的时栅传感器,其示值误差函数可以表示为

$$\begin{aligned}
 &= f(\theta) \\
 &= A_n \sin(n\theta - \phi_n) + A_{2n} \sin(2n\theta - \phi_{2n}) + \\
 &\quad L + A_{in} \sin(in\theta - \phi_{in}) \\
 &= \sum_{i=0}^m A_{in} \sin(in\theta + \phi_{in}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中 n ——时栅对极数

in ——误差展开为傅立叶级数的次数

整周误差由式(1)的误差可以转换为在测量范围内对应的 1, 2, 3, 4, …… 次谐波误差,则方程(1)可改写为

$$\begin{aligned}
 &1 = f(\theta) \\
 &= A_1 \sin(\theta - \phi_1) + A_2 \sin(2\theta - \phi_2) + \\
 &\quad L + A_i \sin(i\theta - \phi_i) \\
 &= \sum_{i=0}^m A_i \sin(i\theta + \phi_i) \quad (2)
 \end{aligned}$$

把离散空间序列 $x(n)$ 经过离散傅立叶变换(DIFT)即得到

$$x(n) = x(e^{j\omega n}) \quad (3)$$

而

$$X(e^{j\omega}) = X_R(e^{j\omega}) + jX_I(e^{j\omega}) \quad (4)$$

由式(4)即可求得式(2)中各谐波幅值 $A(i)$ 和相位 $\phi(i)$

$$\begin{aligned}
 A(i) &= \sqrt{X_R^2(e^{j\omega}) + X_I^2(e^{j\omega})} \\
 \phi(i) &= \arctan \frac{X_I(e^{j\omega})}{X_R(e^{j\omega})} \quad (5)
 \end{aligned}$$

在过去采用 Labview 最小二乘法实现误差曲线拟合(见文献[2]),设计时结构复杂,需要有前面板和流程图两部分构成,内嵌多重循环语句。由于 Labview 的运行机制是多线程并行的,直接运用布尔控件控制,运行中每次循环都要对所有布尔控件判断之后才能确定程序的分支流程,所需时间较长,运行速度慢。并且在编程时 Labview 无法拟合多重谐波,只能拟合特定的几次谐波,因而容易造成在拟合谐波时造成频率泄露的问题,致使在拟合效果方面存在一定的缺陷。针对以上弊端,采用具有高质量、强大计算功能的 Matlab 并根据式(2)来实现误差曲

线拟合。程序方框图见图 1。

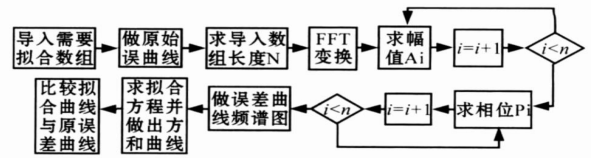


图 1 Matlab 程序方框图

在此用 37 对极示例对拟合程序的运用做些说明,在编写程序前,先把实测一组时栅和光栅采样点作差运算,其差值就是该点采集得到的误差值记做 a_1, a_2, \dots, a_{74} ;然后把此系列采样点整合为数组 Z_1 导入到程序中,运用 $N = \text{length}(Z_1)$ 命令求出数组长度 N ;再运用 Matlab 中的画图函数 plot 作出数据点及完成将离散点转换成连续曲线的功能(见图 3 中的原始曲线);然后再运用命令 $Z_2 = \text{fft}(Z_1, N)$ 进行傅立叶变换,把时域中的数据变换到复频域,通过式(4)进一步求出各谐波幅值 $A(i)$ 和相位 $\phi(i)$;把所求得的幅值 $A(i)$ 和相位 $\phi(i)$ 带入式(2)即得所求的离散点拟合图。最后用 Matlab 画图命令将离散拟合点用光滑曲线表示出来,对此可以得出圆周任何一点的拟合误差曲线图。在此范例中可准确拟合到 37 次高次谐波,能尽可能准确达到补偿目的,这些优点是先前 Labview 无法比拟的。

考虑到实际调试中的经验,实际测试中的条件限制,原始数据量有限等弊端,为保证测试精度,可以用插值法增加数据,以使插值后的拟合曲线更接近实际状态。插值的方法可采用拉格朗日插值、牛顿插值、样条插值等,通常是采用具有一定精度而运算量相对较小的分段二次插值,即分段抛物线插值。用这种方法得到的数据更精确,拟合后的误差曲线更平滑,更能反映试验的真实性。

4 高精度时栅传感器试验

图 2 为 37 对极时栅位移传感器及试验装置,上层为时栅,底层为光栅;回转工作台中心留有用于安装定位的莫氏锥孔,通过配合的莫氏锥轴将转台与底层的基准光栅同轴安装。将时栅转子的引出轴与莫氏锥轴同轴固定,将时栅的定子通过加长拨杆拨靠在固定杆上,保证在转子转动过程中定子不发生转动。这样,转动回转工作台则基准光栅和时栅在莫氏锥轴带动下同时进行同轴转动,并且转过的角位移一致。逐点采样,全周共采 74 点。每次采样依次读时栅和光栅的值,其差值即该点误差。图 3

所示原始曲线为实测一组误差曲线,综合误差约为 ± 200 。

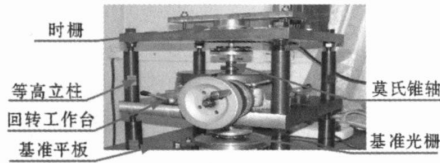


图2 实验装置

傅氏变换是将时域信号变换为频域信号的一种方法。离散傅里叶变换用于采样数据的变换,变换的结果是信号的功率谱密度,或是与频率相对的能量分布,如在谱窗口的每一频率的功率大小,在时栅误差修正试验中表现为各次谐波成分在误差中的比重,由此可以得出拟合的各次谐波在误差中的分量。由于傅立叶变换的对称性,74点只能拟合到37次谐波,把图3的原始曲线做傅立叶变换,分析频谱发现37次谐波足够拟合误差曲线,变换后频谱见图3中原始曲线频谱图。根据式(5)编写图1Matlab程序,所求得幅值 $A(i)$ 和相位 $\phi(i)$ 的结果见表1。

表1 拟合误差曲线幅值相位表

A1 = 42.4333	A2 = 85.8936	A3 = 62.7266	A4 = 9.3187	A5 = 34.7027
Q1 = 4.7124	Q2 = 1.6866	Q3 = 1.9452	Q4 = 1.9197	Q5 = 4.1898
A6 = 6.0176	A7 = 84.8998	A8 = 3.8075	A9 = 5.0883	A10 = 0.6325
Q6 = 2.9644	Q7 = -1.4195	Q8 = 3.214	Q9 = 2.7074	Q10 = 2.5672
.....	A36 = 0.1729	A37 = 0.0416	
.....	Q36 = 1.9739	Q37 = -0.2093	

把表1中的幅值 $A(i)$ 和相位 $\phi(i)$ 带回方程2即可得到拟合后曲线见图3。

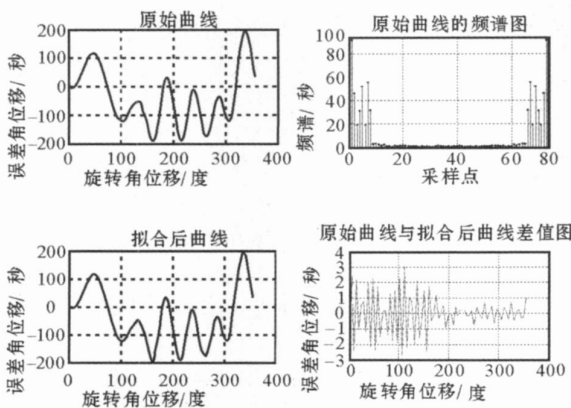


图3 Matlab拟合效果图

由图3中原始曲线与拟合后曲线差值图可知拟

合后的误差能控制在 $3 \sim -2.5$ 范围内,拟合效果相当好。

再用拟合误差后曲线来修正试验误差,重新测试整周误差曲线,如图4所示。

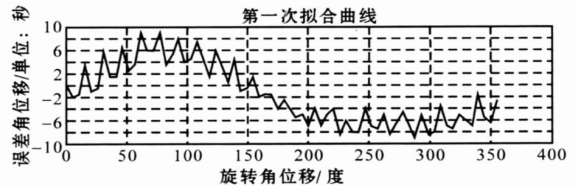


图4 第一次拟合后误差曲线

误差曲线范围由原来的峰—峰值约 ± 200 急速缩减到约 ± 10 ,再在第一次拟合的基础上,按照上面的步骤重新再次拟合,误差曲线如图5所示。

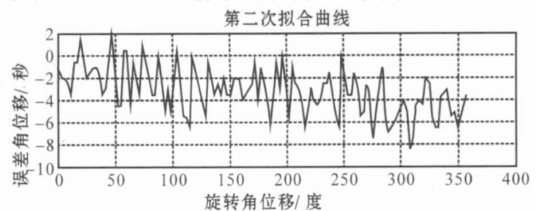


图5 第二次拟合后误差曲线

第二次拟合后误差曲线范围由原来的峰—峰值约 ± 10 下降到约 $+2 \sim -8$,试验结果再次证明试验方法的可行性。

5 试验总结

(1) 相比最小二乘法,傅立叶算法计算量小,计算速度快;能轻松分解出误差信号的高次谐波成分,从而进行有效补偿;有效防止在谐波补偿过程中的频率泄露问题,克服人工处理数据过程中随意性的影响,减少了误差,能得到较为准确的数值解。所以具有一定的实用价值。

(2) 并非拟合次数越高偏差越小;试验采用傅立叶算法来修正误差,取74个采样点,拟合到37次谐波;用这样方法拟合的结果不可避免的把试验当中的一些随机误差当作系统误差来修正,在消除谐波误差的同时又带入新的误差源;因而如何正确选择修正的谐波次数是提高试验精度的一个重要环节。

(3) 由于温度漂移、电子元器件不稳定性、机械加工精度不高和各种不确定因素影响试验精度的提高,因而如何进一步补偿这些因素带来的误差需要做更深入的研究。

投影仪内参数的标定新方法*

许桢英 肖 凯 王 匀 李伯全

江苏大学

摘 要:基于编码结构光的自标定三维重构技术中需将投影仪视为一个逆向的摄像机,而且需要标定其在针孔模型下的内参数矩阵。本文提出的投影仪内参数新标定方法,不需要精密移动的机械装置或精密标定模块就可以实现投影仪内参数的标定。该方法首先提取图像中的特征点坐标,依据伪随机编码原理求出特征点在投影平面上的坐标,利用几何原理求得特征点在靶标平面上的二维坐标,再通过张氏标定法完成对投影仪的内参数标定。实验表明该方法可操作性好,结果准确可靠。

关键词:自标定, 彩色编码, 伪随机阵列, 张氏标定法, 投影系统

A New Method For Calibration of Intrinsic Parameters of Projector

Xu Zhenying Xiao Kai Wang Yun *et al*

Abstract: The projector is taken as an inversed camera in the self-calibration of the 3-D reconstruction system using coded structured light and the intrinsic parameters of the projector should be calibrated. In this article, a new method is proposed which can achieve the calculation of the parameters without precise moving mechanical device or precise calibrating module. Firstly, the minutiae are extracted. Then, their coordinates on the project plane are calculated based on the pseudo-random theorem. And then, their 2-D coordinates on the target plane are obtained according to the geometric relationship. At last, the intrinsic parameters of the projector are calibrated using Zhang's calibration method. The results of the experiment prove that this method is easy to operate and the calibrated result is accurate and reliable.

Keywords: self-calibration, color codes, pseudo-random array, Zhang's calibration, projector

1 引言

在基于机器视觉的三维场景的欧氏重构方法中,如用单幅图像重构三维场景^[1,2],尤其是构造动态的三维场景,最有效的方法是采用编码图案结构光照明主动视觉技术。由于在重构过程中,投影仪

被看成是一个逆向的摄像机^[3],因此与摄像机一样,投影仪的投影模型也可视为针孔模型。完成重构的过程中需要预标定投影仪的内参数,比较常用的是由D. Q. HUYNH^[4]等人提出的点对点的标定方法。由于该方法需要两个标定平面,平面之间的角度已知且固定,因此,不太方便实验操作。张勇斌^[5]等人在此基础上提出了通过一维导轨的平移实现投影仪内参数标定的方法,但该方法的实现需要使用精密导轨,因而只局限于实验室内采用,难以进行现场操

江苏省高校自然科学基金资助项目(项目编号:NO. 05 KJD460046)
江苏省自然科学基金资助项目(项目编号:B K2006551)
江苏大学高级人才基金资助项目(项目编号:NO. 04 KJD005)
收稿日期:2008年7月

6 结语

基于 Matlab 传感器误差曲线拟合实现了时栅位移传感器测量误差分析的计算机化,不但克服了手工绘制工作量大的缺点,而且程序简单,执行速度快,大大减少了进行误差分析所花费的时间,提高了效率。试验结果证明了文中提出的误差修正方法的正确性。

参考文献

- 1 彭东林,刘成康,谭为民. 时空坐标转换理论与时栅位移传感器研究. 仪器仪表学报, 2002, 21 (4): 338 ~ 342
- 2 徐建国,彭东林,朱 革等,基于 LabVIEW 的场式直线时

- 栅位移传感器误差曲线拟合. 工具技术, 2006, 40(1)
- 3 彭东林,张兴红,刘小康等. 场式时栅位移传感器研究. 仪器仪表学报, 2003(3)
- 4 王 宏. MATLAB 6.5 及其在信号处理中的应用. 北京:清华大学出版社, 2004
- 5 姚天任. 数字信号处理. 武汉:华中科技大学, 2002
- 6 和子康. 机床传动精度测量与提高. 北京:计量出版社, 1985

第一作者:陈自然,硕士,重庆工学院电子信息与自动化学院, 400050 重庆市

First Author: Chen Ziran, Master, School of Electronic Information and Automation, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China