

基于回归分析的绝对式光栅尺精度提高方法

乔 栋^{1,2} 续志军¹ 吴宏圣¹ 曾琪峰¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 提出一种使用回归分析提高绝对式光栅尺测量精度的方法. 分析了影响绝对式光栅尺测量精度的因素以及提高其测量精度的方法;对 JC09 型绝对式光栅尺的测量值和真值进行回归分析,得到回归方程;对回归方程进行了显著性分析,并提出了修正方程;通过实验验证了该方法能够有效提高绝对式光栅尺的测量精度. 实验结果表明:在绝对式光栅尺 800 mm 测量长度内,测量精度由 0~18.25 μm 提高到-4.21~5.72 μm . 另外,该方法具有成本低、计算量少以及易于实现的优点.

关键词 测量;回归分析;绝对式光栅尺;精度;误差补偿

中图分类号 TH711 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2015)01-0021-03

Method of improving the accuracy of absolute linear encoder using regression analysis

Qiao Dong^{1,2} Xu Zhijun¹ Wu Hongsheng¹ Zeng Qifeng¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A method of regression analysis for improving the accuracy of absolute linear encoder was presented. Firstly, the factors affecting the accuracy of the absolute linear encoder and the methods of improving the accuracy were introduced. Secondly, the regression equation for the JC09 absolute linear encoder was obtained by a linear regression between the measured value and the true value of the linear encoder. The significance level of the regression equation was analyzed, and the equation for the data correction of actual measurement was then acquired. Finally, the effectiveness of the proposed method to improve the accuracy of the linear encoder was verified by experiment, and the results show that the accuracy is improved from 0~18.25 μm to -4.21~5.72 μm in a measurement length of 800 mm. This method is effective and easy to be realized in industrial production, and with low cost.

Key words measurement; regression analysis; absolute linear encoder; accuracy; error compensation

绝对式光栅尺作为线位移传感器,广泛应用于机床加工行业中,其测量精度直接影响机床的加工精度.影响绝对式光栅尺精度的主要因素有标尺光栅精度、莫尔条纹质量、电子学细分精度以及安装精度等.标尺光栅精度决定了绝对式光栅尺在全长范围内的测量精度,其在 1 m 长范围内带来的误差可以达到 10 μm 量级;莫尔条纹质量决定了绝对式光栅尺在等周期范围内(通常是 20

μm)的细分精度,其带来的误差一般在 μm 量级以下,而且具有一定周期性;电子学细分精度取决于电子元器件的选取以及软件细分算法.由于高精度模拟/数字转换器件以及高性能数字信号处理器的快速发展,电子学细分带来的误差通常可以忽略;因此,提高绝对式光栅尺测量精度主要从三方面入手,即提高标尺光栅制造精度、提高莫尔条纹信号质量和对测量误差进行修正.标尺光栅

收稿日期 2013-12-17.

作者简介 乔 栋(1985-),男,博士研究生, E-mail: qiaodonglwz@163.com.

基金项目 国家科技重大专项资助项目(2013ZX04007-021).

精度主要依赖于刻划、复制以及其制造过程中的环境控制. 在提高莫尔条纹信号质量方面, 有相差补偿法^[1]、叠加法^[2]、神经网络自适应滤波算法^[3]、有限长冲激响应(FIR)数字滤波法^[4]、指示光栅移相法^[5]、傅里叶变换时移特性细分法^[6]、凸起光栅标记法^[7]、光栅栅距动态测量法^[8]、小波处理法^[9]等. 以上各种方法, 都只能提高光栅尺周期栅线内的细分精度, 而对光栅尺全长范围内的测量精度改善有限. 在对光栅尺误差进行修正方面, 有零位消除法^[10], 但该方法适用于有多个零位的光栅尺.

针对标尺光栅制造误差给绝对式光栅尺带来的测量误差, 本研究提出使用回归分析的方法对绝对式光栅尺测量值进行误差修正, 提高全长范围内的测量精度. 该方法具有成本低、计算量少以及易于实现的优点.

1 测量值和真值之间回归分析

回归分析是处理变量之间相关关系的一种数理统计方法, 其应用数学方法对大量的观测数据进行处理, 从而得到比较符合事物内部规律的数学表达式^[11]. 在理想情况下, 绝对式光栅尺测量结果和位置真值相符, 但是由于在实际生产过程中的一些随机因素, 会导致绝对式光栅尺的测量结果和位置真值有一定的偏差; 因此, 可以通过一组绝对式光栅尺测量值和位置真值的数据, 确定两者之间的数学关系, 即回归方程, 从而找到修正绝对式光栅尺测量结果的方法, 提升其测量精度.

采用长春光机所生产的 JC09 型绝对式光栅尺为实验对象, 以雷尼绍 XL80 激光干涉仪为测量基准. XL80 激光干涉仪测量精度为 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$, 即 $\pm 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$, 分辨率为 1 nm; JC09 测量精度为 $\pm 10 \mu\text{m}/\text{m}$, 分辨率为 10 nm. 由于激光干涉仪的测量精度远高于光栅尺测量精度, 因此可以将激光干涉仪的测量结果作为位置真值, 对 JC09 进行精度检测. 在 JC09 的 800 mm 测量范围内, 每 10 mm 取一个检测点, 共取 80 个点, 检测数据如图 1 所示, x 为位置真值, y 为绝对式光栅尺测量值. 精度曲线如图 2 所示, δ 为误差量.

该光栅尺的测量精度为 $0 \sim 18.25 \mu\text{m}$, 其最大误差在 700 mm 处. 根据图 1 可以看出位置真值与绝对式光栅尺测量值之间大致呈线性关系, 因此可以假设位置真值与绝对式光栅尺测量值的内在关系是一条直线, 而测试结果中的点与该直线的偏离是由于误差引起的, 即

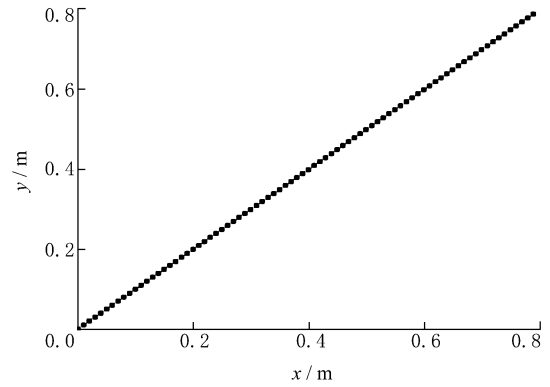


图 1 JC09 检测数据

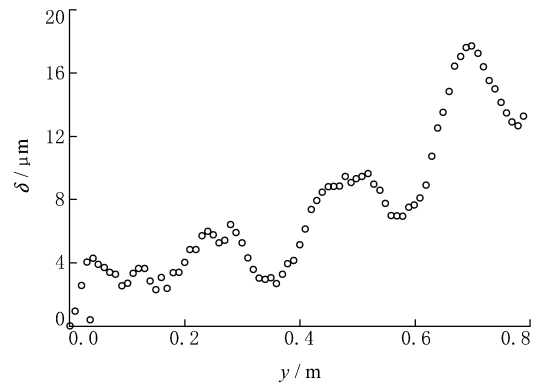


图 2 JC09 精度曲线

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \delta_i, \quad (1)$$

式中: β_0 和 β_1 为固定系数; i 为第 i 次测量. 设 b_0 和 b_1 为式(1)中参数 β_0 和 β_1 的最小二乘法估计, 于是得到绝对式光栅尺测量值一元线性回归方程

$$y^* = b_0 + b_1 x, \quad (2)$$

式中 y^* 为绝对式光栅尺测量值的估计量. 由于测试过程是等精度测量, 因此根据最小二乘原理, 回归系数 b_0 和 b_1 的解为:

$$b_1 = \frac{[n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)]}{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2]}$$

$$b_0 = \frac{[(\sum_{i=1}^n x_i^2)(\sum_{i=1}^n y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i) \cdot (\sum_{i=1}^n x_i y_i)]}{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2]}$$

式中 n 为等精度测量次数.

将图 1 中的数据代入式(2), 可得回归方程

$$y^* = 0.580\ 058\ 6 + 1.000\ 017\ 2x. \quad (3)$$

2 回归方程显著性分析及修正方程

2.1 δ_i 的分布形式分析

在线性回归理论中, 通常认为测试点与回归直线之间的偏离 δ (误差量) 是由随机因素造成

的,假设 δ 服从正态分布 $N(0, \sigma)$. 基于此对回归方程进行显著性检验,因此分析式(3)的显著性之前,必须检验 δ 是否服从正态分布.

通过式(1)和(3),可得到 δ_i 的表达式

$$\delta_i = y_i - (b_0 + b_1 x_i),$$

用 Jarque-Bera 方法

$$JB = n(J^2/6 + B^2/24) \sim \chi^2(2) \quad (4)$$

考核式(1)中的误差项 δ_i 是否符合正态分布,式中:

$$J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i - \bar{\delta}}{s} \right)^3; B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i - \bar{\delta}}{s} \right)^4 -$$

3,其中, $\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i, s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}$. 取

显著水平为 0.05,将 δ_i 代入式(4),可得

$$JB = 0.7242 < \chi_{0.05}^2(2) = 5.991. \quad (5)$$

由式(5)可知:对于显著水平为 0.05,JB 统计量小于 χ^2 分布的 0.05 分位数 $\chi_{0.05}^2(2)$,可以认为 δ_i 服从正态分布,且由于 $\bar{\delta} = 4.18 \times 10^{-11} \approx 0$,因此可认为 $\delta_i \sim N(0, \sigma^2)$. 图 3 描述了 δ 的分布函数. 可知 δ 近似服从正态分布.

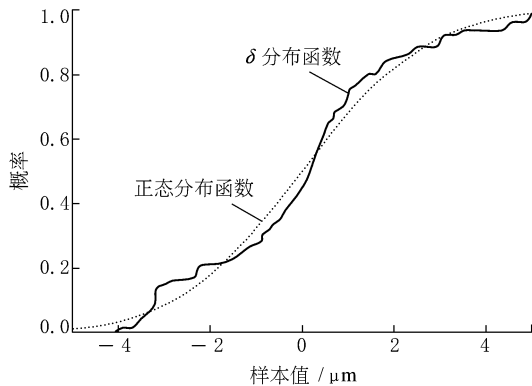


图 3 δ 的分布函数

2.2 回归方程的显著性检验

对于本实验, n 个观测值之间的差异可以用离差平方和 S 来表示,即

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = U + Q,$$

式中: $U = \sum_{i=1}^n (y_i^* - \bar{y})^2$ 为回归平方和, y_i^* 为第

i 次的回归分析值; $Q = \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2$ 为残余平

方和; $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$. 对于式(1),假设 y 与 x 之间不

存在线性关系,即 $b_1 = 0$,由于 $\delta_i \sim N(0, \sigma^2)$,定义 $A = U/[Q/(n-2)]$,因此有

$$A = U/[Q/(N-2)] \sim F(1, N-2). \quad (6)$$

对于给定的显著水平 $\alpha = 0.01$,原假设的拒绝域为 $A > F_{0.01}(1, 78)$,将数据代入到式(6),可得 $A = 8.78 \times 10^{11} > F_{0.01}(1, 78) = 6.325$,因此可

以认为式(3)的线性回归是高度显著的.

2.3 精度修正方程

基于以上分析,可以认为对绝对式光栅尺测量值和真值之间的线性关系的假设是合理的,对式(3)求逆,可得到绝对式光栅尺精度修正方程

$$x^* = -0.580\ 058\ 6 + 0.999\ 982\ 8y, \quad (7)$$

式中 x^* 为修正后结果.

3 实验结果

使用激光干涉仪对 JC09 绝对式光栅尺进行第二次精度检测,每 1 mm 取一个检测点,共取 800 个检测点,将检测到的 JC09 读数带入式(7),得到修正后的位置信息并保留到 10 nm. 修正前后的误差曲线如图 4 所示.

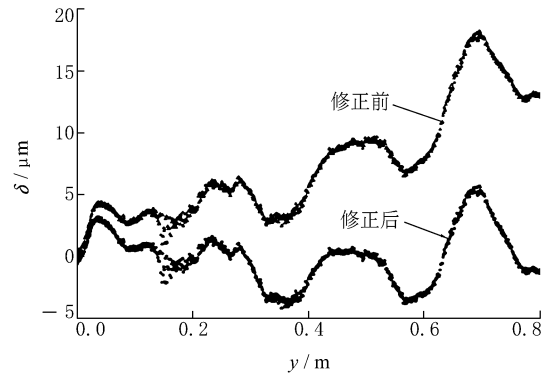


图 4 修正前后的误差曲线对比

经过修正,在 800 mm 的测量范围内,JC09 的测量误差从 0~18.25 μm 降低到 -4.21~5.72 μm ,光栅尺的精度得到大幅提高. 另外,该方法具有成本低、计算量少以及易于实现的优点.

参 考 文 献

- [1] 吴宏圣,曾琪峰,乔栋,等. 提高光栅莫尔条纹的滤波方法[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1944-1949.
- [2] 罗华,高山,李翔龙. 粗光栅信号全数字化处理法实现高倍数细分[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 283-288.
- [3] 吕孟军. 光栅莫尔条纹电子学细分技术研究[D]. 南京航空航天大学机电学院, 2008.
- [4] 喻洪麟,黄良明,王远干. 莫尔条纹信号的 DSP 滤波及细分技术研究[J]. 光电工程, 2004, 31(9): 61-65.
- [5] Song Juho, Kim Kyungchan, Kim Soohyun, et al. A new error compensation method in linear encoder using phase shifted grating[C]// Proc OSJ/SPIE Conference on Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology. [s. n.], 1999: 124-127.

(下转第 79 页)

- sis of an upflow sand filter: tracer experiments, mathematical model and CFD computation [J]. Chemical Engineering Science, 2013, 104: 460-472.
- [9] 陈彬,刘阁,张贤明. 真空压力对油水分离的影响研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(10): 1339-1344.
- [10] 陈凯,余钊圣,邵雪明. 多孔介质方腔自然对流的直接数值模拟[J]. 浙江大学学报, 2012, 46(3): 549-554.
- [11] 车得福,李会雄. 多相流及其应用[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2007: 378-407.
- [12] 杨建红. 一种新型管道过滤器的工作原理及应用[J]. 化工生产与技术, 2013, 21(3): 8-22.
- [13] 聂松林,石学园,李永平,等. 液压系统污染状态模拟与过滤器优化配置[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(1): 71-74.
- [14] 骆桂英,俞立凡. 燃气轮机进气过滤系统的运行[J]. 发电设备, 2008(5): 398-403.

(上接第 23 页)

- [6] 楚兴春,吕海宝,赵尚弘. 基于傅里叶变换的高精度条纹细分方法[J]. 光学学报, 2007, 27(12): 2179-2183.
- [7] 王莉,魏慧芬,王权岱,等. 利用优化材料的凸起光栅标记提高莫尔条纹图像的对比度[J]. 中国科学:技术科学, 2013, 43(2): 153-160.
- [8] 常丽,许会,修国一. 基于相关和最小二乘原理的光栅栅距动态测量[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1001-1007.
- [9] 陈兴林,刘杨,吕恒毅. 采用小波处理的空间光电编码器智能故障诊断[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2010, 38(4): 79-82.
- [10] 张勇,王选择,郭桂珍. 一种提高光栅尺测量精度的有效方法[J]. 湖北工学院学报, 2002, 17(4): 98-101.
- [11] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 合肥:合肥工业大学出版社, 2010.