

# 基于多元回归算法的激光位移传感器 非线性误差建模和补偿

刘辉<sup>1</sup>,冯海盈<sup>2</sup>,孙钦密<sup>2</sup>,徐元博<sup>1</sup>,李龙<sup>1</sup>,张立银<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安邮电大学自动化学院;<sup>2</sup>河南省计量科学研究院力学计量研究院

**摘要:** 本文针对三角测量法激光位移传感器的非线性误差产生原理进行了分析,并提出了误差建模算法。通过建模可实现误差的实时估计,并代入传感器测量值中对误差进行补偿,从而达到提升传感器测量精度的目的。提出了对应的误差测量方法,并对误差进行了实验测量和建模,对模型补偿效果进行了验证,结果表明,通过补偿能够大幅提升传感器的检测精度。

**关键词:** 激光位移传感器;非线性误差;建模;误差补偿

中图分类号: TG806;TH744.5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2021.02.021

## Modeling and Compensation of Nonlinear Error of Laser Displacement Sensor Based on Multiple Regression Algorithm

Liu Hui, Feng Haiying, Sun Qinmi, Xu Yuanbo, Li Long, Zhang Liyin

**Abstract:** Aimed at the nonlinear error of the triangulation laser displacement sensor, the principle of error generation is analyzed, and a targeted error modeling algorithm is proposed. Through modeling, the error can be estimated in real time, and the measurement value of the sensor can be added to compensate the error, so as to achieve the purpose of improving the measurement accuracy of the sensor. Finally, a corresponding error measurement method is proposed, the experimental measurement and modeling of the error is conducted, and the model compensation effect is verified. The verification result shows that the detection accuracy of the sensor can be greatly improved through compensation.

**Keywords:** laser displacement sensor; nonlinear error; modeling; error compensation

### 1 引言

激光位移传感器具有量程大、精度高、抗干扰性强等优势。根据测量原理不同,通常激光传感器可分为三角测量法和激光回波式<sup>[1,2]</sup>。其中,三角测量法具有更高的测量精度,非常适合于各种工业现场大范围、高精度位移测量的需求。

由于三角测量法激光位移传感器测量原理的限制,非线性误差成为影响激光位移传感器精度的主要因素<sup>[3]</sup>。如基恩士 IL-600 型激光位移传感器,

其重复定位精度仅 50 $\mu\text{m}$ ,但非线性误差高达 1~2mm。考虑到激光位移传感器的非线性误差具有明显的系统误差特征,可采用补偿的方式对非线性误差进行修正。具体方法:将被测物安装在标准位移台上,利用激光位移传感器对被测物进行测量,在被测物运动至不同的已知标准位移位置时,读取激光位移传感器的输出并计算非线性误差,进而通过测量数据建立非线性误差和传感器输出之间的数学模型,根据模型计算出传感器不同输出时的非线性误差,并对输出误差进行补偿。

非线性误差补偿的核心在于准确的非线性误差模型,激光位移传感器的非线性误差需要通过校准

收稿日期: 2020 年 8 月

法解决的工作,可以作为任意截面形状的柱面螺旋槽铣削加工方法。在四轴铣削加工方式下,NX CAM 编程是加工的核心,其中切削区域的选取、驱动面的规划和投影矢量设置是关键。

### 参考文献

[1]何延辉,邢乾坤,陈俊辉,等.基于 NX CAM 的复杂零件四轴数控粗加工方法研究[J].煤矿机械,2018,39(10):

98-100.

[2]邹小堤,胡纯.五轴联动车铣复合制造工艺技术应用[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2014,36(4):487-490.

[3]王卫兵.UG NX 数控编程实用教程[M].北京:清华大学出版社,2004.

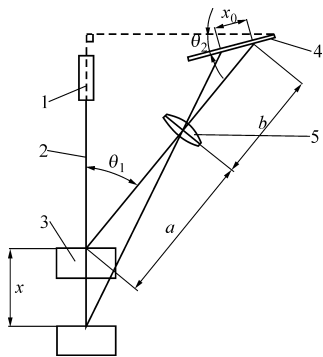
第一作者:王子汉,山西航天清华装备有限责任公司,046012 山西省长治市

的方式进行建模,而校准的实质也是对非线性误差测量数据的统计分析。因此,选择合适的建模算法非常重要。多元回归是常用的建模算法<sup>[4]</sup>,此算法通常被用于建立输入和输出之间的线性相关模型,但通过在模型中引入高次项,也可以实现非线性相关模型的建立。因此,本文选用多元回归结合引入高次项的方式对非线性误差进行建模。

## 2 三角测量法激光位移传感器非线性误差分析

在进行位移测量时,三角测量法激光位移传感器会发出激光照射在被测物表面上,进而反射光线经过透镜聚焦后打在感光片上形成光斑;当被测物发生位移后,感光片通过感应光斑的位移计算出被测物的位移。基于此原理,对激光位移传感器的非线性误差和热误差的成因进行了定性分析。

图1为三角测量法激光位移传感器的测量原理图。理想情况下,激光器发出的光线会垂直照射在被测物表面,经过被测物表面漫反射,一部分光线经过透镜的聚焦汇聚在感光片上,感光片一般为线性CCD或CMOS阵列,能够感知光斑的位移,进而计算出被测物的位移量。为了保证最佳的聚焦效果,通常需要将感光片旋转一定的角度<sup>[1]</sup>。



1. 激光器 2. 光路 3. 被测物 4. 感光片 5. 透镜

图1 三角测量法激光位移传感器原理

通过图1可推导出物体位移和感光片上光斑位移之间的对应关系为

$$x = \frac{x_0 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin\theta_1} \times \frac{a}{b} \quad (1)$$

式中, $x_0$ 为光斑在感光片上的位移; $x$ 为被测物在激光器出射光方向上的位移; $a$ 为透镜中心点和透镜光轴与激光器出射光交点之间的距离; $b$ 为透镜中心点和透镜光轴与感光器交点之间的距离; $\theta_1$ 为激光器出射光和反射光之间的夹角; $\theta_2$ 为感光片和激光器出射光垂直方向之间的夹角。

根据式(1)可以看出, $\theta_1$ 会随着被测物的位移

发生变化,从而导致 $x'$ 和 $x$ 之间不满足严格的线性关系,产生非线性误差,有

$$\Delta E_{nl} = \frac{x_0 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\sin\theta_1} \times \frac{a}{b} - (kx_0 + b) \quad (2)$$

式中, $k$ 和 $b$ 为传感器的线性输出模型,通常会采用校准的方式计算得出<sup>[5]</sup>。

对于传感器的使用者来说,光斑在感光片上的位移量无法读取,只能根据计算光斑位移后得到被测物位移测量值,因此,非线性误差对于使用者来说为关于位移测量值的函数,有

$$\Delta E_{nl} = f(x') \quad (3)$$

## 3 三角测量法激光位移传感器非线性误差的建模

采用校准的方式实现激光唯一传感器非线性误差的建模。这种方法的特点为忽略系统内部的复杂性,采用实验手段直接测量系统的输入和输出,进而基于统计理论根据测量数据完成建模。考虑到模型中的高阶非线性成分,选择利用多元回归结合引入高次项的方式对非线性误差进行建模。

为了便于理解,对多元回归算法和高次项的引入方法进行简述,进而结合算法原理,对整个建模的方法进行说明。

多元回归算法的本质为构建一种多项式模型结构,根据输入输出变量的直接测量数据,对模型参数进行调整,使模型对于测量数据的残差平方和达到足够小的程度<sup>[6]</sup>。

模型参数为多项式的系数,参数求解的方法为通过最小二乘算法一步完成参数的求解。通常,多元回归被应用于线性相关数据的建模,即模型形成常为线性多项式,但是通过在多项式中引入输入变量的高阶项,也可以通过多元回归完成有限阶数的非线性建模。

假设目前有1个输入变量和1个输出变量,分别记为 $x_1$ 和 $y_1$ ,则模型采用的多项式形式为

$$y_1 = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2 + a_3 x_1^3 + \dots \quad (4)$$

式中, $a_0, a_1, \dots$ 为模型的参数。

同样,假设对 $x_1$ 和 $y_1$ 进行测量得到了 $Q$ 组测量值,分别记为

$$\mathbf{X}_1 = [x_{1,1}, x_{1,1}, \dots, x_{1,Q}]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}_1 = [y_{1,1}, y_{1,1}, \dots, y_{1,Q}]^T$$

式中, $[\dots]^T$ 表示转置。

通过最小二乘算法可直接求出模型参数,令

$$\mathbf{A} = [\mathbf{X}_1 \mathbf{0} + \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_1^2, \dots]^T \quad (6)$$

则

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \end{pmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Y}_1 \quad (7)$$

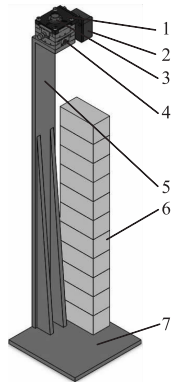
基于上述误差分析可知,激光位移传感器的非线性误差和被测物的位移测量值相关,因此,可通过实验得到被测物在不同位置处的非线性误差变化数据。以被测物的位移作为输入变量,以非线性误差作为输出变量,利用多元回归算法进行建模。模型多项式的阶数不宜选择过高,因为过高的阶数会引发龙格现象<sup>[7]</sup>,使模型对输入变量的误差敏感,反而不利于模型在应用时的精度稳定性,因此选择 2 阶作为模型的最高阶数。为了便于描述,将建立的简称非线性误差-位移模型。

#### 4 三角测量法激光位移传感器非线性误差测量

根据上述分析,激光位移传感器非线性误差的建模需要被测物位移和非线性误差之间的同步测量数据,基于非线性误差的特性,针对性地提出了具体的测量方法。

(1)三角测量法激光位移传感器非线性误差测量原理

根据激光位移传感器角度非线性误差的特性,非线性误差和被测物的位移相关。基于此,具体的测量方法如图 2 所示。



1. 夹具 2. 传感器测头 3. 全向水平仪 4. XY 双向倾斜调整平台  
5. 支架 6. 标准块 7. 工作台

图 2 激光位移传感器误差测量原理

由图可知,将激光位移传感器通过夹具安置在工作台上,借助水平仪,通过 XY 二维角度微动台,调整激光出射方向垂直于工作台表面。工作台上放置利用因瓦合金(4j36)材料制成的标准块,每块厚度为 50mm,误差为  $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 。通过标准块的堆叠,为激光位移传感器提供分辨率为 50mm 的标准位

移。比如要实现位移增加 100mm,只需要增加两个标准块即可。

(2)三角测量法激光位移传感器非线性误差测量流程

基于上述原理,具体的测量步骤如下:

①将激光位移传感器连同夹具工作台进行安装,调整标准块,使其读数处于量程最小端(0 点);

②调整标准块数量,以提供不同的标准位移量,进而分别记录激光传感器的输出和标准位移量,计算出当前非线性误差数据。

(3)三角测量法激光位移传感器非线性误差测量结果

选择某品牌 600mm 量程的激光位移传感器,对传感器的非线性误差进行测量。测量原始数据如图 3 所示。

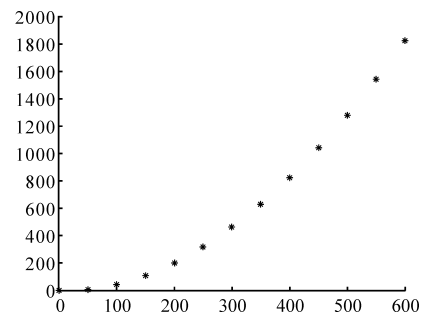


图 3 非线性误差原始测量数据

#### 5 三角测量法激光位移传感器非线性误差的建模及补偿

根据原始测量数据对非线性误差进行建模,根据模型对误差进行补偿,并对补偿效果进行比对验证。根据非线性误差测量数据,采用非线性多元回归算法,建立被测物位移和非线性误差之间的非线性误差-位移模型。为了防止求解时出现奇异矩阵,将位移的单位转换为 cm,误差的单位为  $\mu\text{m}$ 。建模结果如表 1 所示,模型对非线性误差的估计结果如图 4 所示。

表 1 非线性误差-位移模型建模结果

一次项系数	二次项系数	模型
0.2747	0.5052	$Err = 0.2747x + 0.5052x^2$

利用非线性误差-位移模型对非线性误差进行估计,得到误差值后,在测量值中减去误差可得到补偿后的测量值,最终补偿后的残余误差结果见图 5。

比对图 3 和图 5 可知:补偿前,激光位移传感器的误差高达  $1800 \mu\text{m}$ ;补偿后,误差在  $-20 \sim 15 \mu\text{m}$  之间波动,幅值为  $35 \mu\text{m}$ ,可见补偿后误差大幅减小。

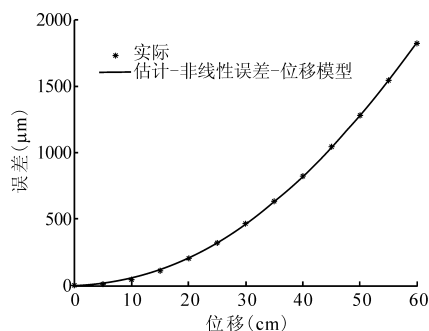


图4 非线性误差模型估计结果

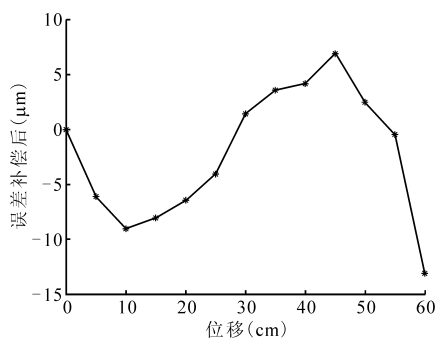


图5 非线性误差补偿后残余误差

## 6 结语

本文针对三角法激光位移传感器的测量精度展开研究。对三角法激光位移传感器存在的主要非线性误差进行了分析,并根据误差分析结果,有针对性地提出了对应的误差建模方法。采用多元回归算法结合引入高次项的方式,实现了非线性误差的建模,

简称非线性误差-位移模型。结合误差分析结果提出了对应的误差测量方案,对非线性误差进行测量,根据测量数据,利用所提出的建模算法建立非线性误差-位移模型。根据模型对误差进行估计和补偿,补偿后结果显示,误差明显下降。

## 参考文献

- [1]贾琦. 基于三角测量法的激光位移传感器的研究[D]. 长春:长春理工大学,2014.
- [2]李演楷. 激光位移传感器输出特性分析及应用[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [3]刘立波. 基于 DSP 的激光三角测距传感器研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.
- [4]H M Raymond. Classical and modern regression with applications (second edition) [M]. Beijing: Higher Education Press,2005.
- [5]JJF 1305-2011 线位移传感器校准规范[S].
- [6]Liu H, Miao E M, Wei X Y, et al. Robustness modeling method for thermal error of CNC machine tools based on ridge regression algorithm[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2017,113:35-48.
- [7]Boyd J P, Xu F. Divergence (runge phenomenon) for least-squares polynomial approximation on an equispaced grid and mock-chebyshev subset interpolation[J]. Applied Mathematics and Computation,2009,210(1):158-168.

第一作者:刘辉,讲师,西安邮电大学,710121 西安市

First Author: Liu Hui, Lecturer, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China

## 欢迎订阅 2021 年《工具技术》《工具展望》

《工具技术》杂志是成都工具研究所主办的切削与测量工程综合性技术刊物。主要报道机械加工中切削与测量技术的最新进展,金属切削理论研究,新型刀具研制及其应用,数控工具系统、新型刀具材料、涂层技术、刀具 CAD/CAM、刀具磨损和破损在线技术,新材料及难加工材料的切削与刀具技术,汽车、摩托车等行业专用刀具的开发;新的测量方法研究与新型量具量仪开发,精密测量技术与质量控制系统技术,加工过程中的自动测量与精度控制,加工误差补偿技术,传感与图象技术,智能测量系统,电子数显量具开发与应用,量具量仪调修与维护,工模夹具及五金工具产品与技术,工厂技术革新和实用技术,技术市场及技术讲座等。

《工具展望》是综合报道国内外工具工业生产技术发展动态的内部刊物,主要内容为国内外切削刀具、量具量仪的技术发展趋势,国内外工具市场预测及经济信息,国内及国际展览会工具展品综合评述,国外工具行业考察报告,国内汽车、摩托车等行业工具国产化调研报告,有关行业组织的工作活动情况等。

工具技术为月刊,每月 20 日出版,全国邮局均可订阅,邮发代号 62-32;工具展望为双月刊,逢双月出版,可在编辑部订阅。

2021 年《工具技术》定价:180 元/年,2021《工具展望》定价:60 元/年

欢迎机械加工工业各类人士踊跃投稿、订阅、刊登广告

工具技术杂志社:成都市府青路二段 24 号 电话:028-83242219 传真:028-83242240

E-mail: toolmagazine@163.com (广告) toolmagazine@chinatool.net(投稿)