

电涡流传感器测量精度的新型误差分析方法

姚焕新¹ 苗恩铭² 牛鹏程²

1. 宁波工程学院, 宁波, 315211 2. 合肥工业大学, 合肥, 230009

摘要:针对电涡流传感器标定常用的随机误差分析法会扩大测量误差的估计范围,限制其工程应用的问题,提出了新型误差分析方法,对多批次测量数据进行误差上下限分析,同时建立了测量批次数的判断准则,这样可以更为精确地获得电涡流传感器的测量精度,并且具有较好的工程运用价值。

关键词:电涡流传感器;误差分析;精度理论;数据处理

中图分类号:TH7

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.22.022

A New Error Analysis Method for Eddy Current Sensor Measurement Accuracy

Yao Huanxin¹ Miao Enming² Niu Pengcheng²

1. Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang, 315211

2. Hefei University of Technology, Hefei, 230009

Abstract: Because the random error analysis method for eddy current sensor calibration can expand the range of measurement error estimation and limit its engineering applications, a new error analysis method was used herein to analyze upper and lower limits of multiple batches measurement data. At the same time, a criterion for the measurement times was caught up. This method can obtain the measurement accuracy more precise, and has good engineering application values.

Key words: eddy current sensor; error analysis; precision theory; data processing

0 引言

电涡流传感器具有精度高、能进行非接触测量等特点,因而被广泛应用于生产线上的高速运动状态的轴向、径向等动态位移测量^[1]。国内外众多科研人员在提升电涡流传感器测量精度方面进行了大量的研究工作^[2-6]。电涡流传感器精度分析常采用随机误差分析法,即在一定测试条件下,以测量精度高一个数量级的位移传感器为参照,用电涡流传感器进行多批次测量,然后对测量值进行线性拟合建立数学模型并给予精度评估,以确定所测数据最大概率发生的区域范围及变化规律^[7]。商用传感器为便于应用,常采用一次线性拟合,并计算标准差,以此获得其测量精度。就电涡流传感器而言,其主要误差有温度变化引起的误差和由于特定被测材料而引起的迟滞误差^[5-6]。此外,由于测量条件的不完善和对误差源认识的不全面,电涡流传感器的测量值客观存在

一些未被我们完全认知或掌握的系统误差。这就造成各批次测量数据误差分布区域存在明显差异,出现单批次数据误差范围较小,而不同批次数据误差分布偏离中心较大的现象。目前对于实验的测量次数没有特别的规定,常因人而异。若增加测量次数,精度可以提高但同时也增加了工作量;而如果测量次数偏少,则所建数学模型精度不高,丧失实用性。

本文选用商用电涡流传感器进行误差标定,采用新型误差分析方法对测量数据进行误差分析,以确定实验测量次数,并根据多批次数据特点进行误差区域划分。

1 误差标定实验

本文选用的电涡流传感器量程范围为0.80~2.80mm(本实验选择线性度较好的测量区域范围为1.7~1.85mm),标准灵敏度为2V/mm,分辨率为1 μ m,电压为24V。使用的标定测量仪器是亚微米电感传感器 TESA ERONIC TT 80,分辨率为0.01 μ m,测量精度为0.1 μ m,选用型号为USB5935的数据采集卡,采样频率500kHz。选

收稿日期:2011-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175142);国家科技重大专项(2009ZX04014-023-02);浙江省自然科学基金资助项目(Y1110407)

[13] Fong Z K, Huang F C, Fang H S. Evaluating the Inter Lobe Clearance of Twin - screw Compressor by the Iso - clearance Contour Diagram (ICCD) [J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36(6): 725-742.

[14] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

(编辑 陈 勇)

作者简介:何雪明,男,1966年生。江南大学机械工程学院副教授、博士。主要研究方向为自由曲线及曲面 CAD/CAE/CAM 和逆向工程。戴进,男,1989年生。江南大学机械工程学院硕士研究生。刘洪国,男,1988年生。江南大学机械工程学院硕士研究生。

用 45 钢作为测量对象,两种仪器同步进行测量,获得电感传感器位移值与电涡流传感器的电压变化量。电涡流传感器的输出量是电压,灵敏度为 2V/mm。实验装置如图 1 所示。

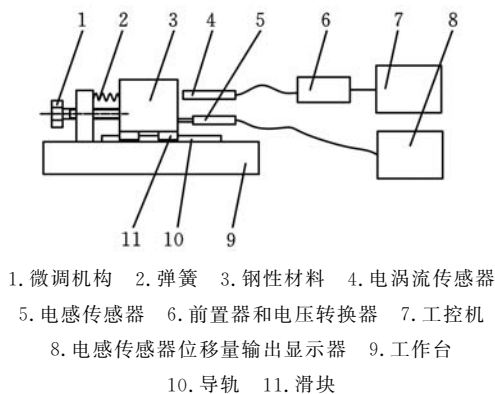


图 1 电涡流传感器精度标定实验装置

2 数据分析处理

2.1 常用误差分析法与新型误差分析法简介

常用误差分析方法是将单次或多次测量数据统一采用多元线性回归等数学运算建立模型,并计算其标准差 δ ,按照 $\pm 3\delta$ 划分误差范围,其中测量数据的批次受主观因素影响严重,具有随机性。

新型误差分析方法采用顺序批次测量,并进行误差分析;再根据各批次误差范围重新划分误差分布区域,同时判断数据测量批次次数,以获得最佳测量批次次数与最佳工程实用误差区域。

2.2 采用新型误差分析法确定误差区间

2.2.1 第一批测量数据误差处理

对任一自变量 x_i 对应的因变量 y_i 值测量 5 次,取其平均值 \bar{y}_i 作为因变量 y 值。以此获得 k 个自变量数组 $X = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k]$ 及因变量数组 $Y = [\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_i, \dots, \bar{y}_k]$ 。本实验每隔 25 μm 测一次涡流传感器输出电压值,故理论位移数组为 $[1700, 1725, \dots, 1850]$ 。第一批实际测量数据如表 1 所示。

表 1 第一批测量数据

| $X(\mu\text{m})$ | 1700 | 1725 | ... | 1825 | 1850 |
|------------------|--------|--------|-----|--------|--------|
| $Y(\text{mV})$ | 2952.8 | 3001.5 | ... | 3190.1 | 3233.0 |

对上述数据进行线性拟合,得

$$y_1 = 1.878x - 239.26 \quad (1)$$

样本标准差表达式为

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2} \quad (2)$$

式中, \hat{y}_i 为根据拟合直线计算的 y_i 期望值。

由式(2)得第一批测量数据的标准差 δ_1 为 1.5534 mV。根据精度理论,测量数据分散在

$\pm 3\delta_1$ 范围内,即 $\pm 4.6602 \text{ mV}$ 范围内。以此形成第一批测量数据误差区域的上下限,如图 2 所示。上限交于点 $A_{11}(1700, 2958.0)$ 和 $B_{11}(1850, 3239.7)$, 下限交于点 $A_{12}(1700, 2948.7)$ 和 $B_{12}(1850, 3230.4)$ 。分别连接各点就形成第一批测量数据误差区域上下限。

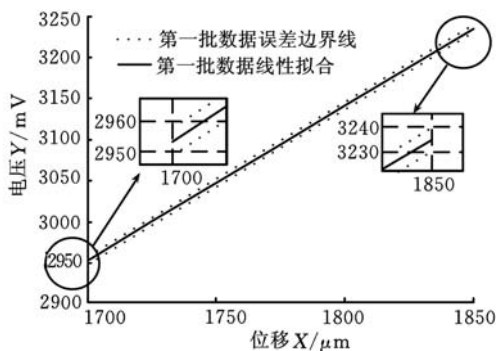


图 2 第一批测量数据误差区域分布图

2.2.2 第二批测量数据误差处理

按上述步骤,测得第二批数据,如表 2 所示。

表 2 第二批测量数据

| $X(\mu\text{m})$ | 1700 | 1725 | ... | 1825 | 1850 |
|------------------|--------|--------|-----|--------|--------|
| $Y(\text{mV})$ | 2947.4 | 3004.3 | ... | 3217.0 | 3268.0 |

对第二批数据进行线性拟合,得

$$y_2 = 2.1271x - 666.64 \quad (3)$$

检验所测第二批数据的误差分布范围是否在图 1 所示装置的上下限范围内。若在,则进行第三批数据测量;否则,按照所测第二批数据绘制出拟合直线 2,并进行误差分析,绘制其误差分布区域上下限,然后综合图 1 所示装置的上下限进行新误差区域划分,具体方法如下。

由式(2)得: $\delta_2 = 1.9615 \text{ mV}$, 所得的第二批测量数据分散在 $\pm 3\delta_2$ 范围内,即 $\pm 5.8845 \text{ mV}$ 范围内。拟合直线 2 的误差上下限分别与 $x = 1700$ 和 $x = 1850$ 两线相交于点 $A_{21}(1700, 2955.4)$ 、 $A_{22}(1700, 2943.6)$ 、 $B_{21}(1850, 3274.5)$ 、 $B_{22}(1850, 3262.7)$ 。分别比较点 A 和 B 的因变量 y_i 的大小,选出其中的最大值点和最小值点。经比较后,选出 $x = 1700$ 线上点 $A_{11}(1700, 2958.0)$ 为最大值点, $A_{22}(1700, 2943.6)$ 为最小值点;同理获得 $x = 1850$ 线上最大值点 $B_{21}(1850, 3274.5)$ 和最小值点 $B_{12}(1850, 3230.4)$, 如图 3 所示。连接两线上最大值点,即线 $A_{11}B_{21}$, 作为前两批次数据的误差范围上限;连接两线上最小值点,即线 $A_{22}B_{12}$, 作为前两批次数据的误差范围下限,如图 4 所示。

2.2.3 第三批测量数据误差处理

按上述步骤,测得第三批数据,如表 3 所示。

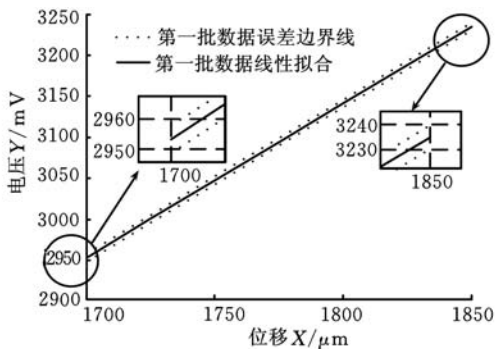


图3 第一、二批测量数据误差区域分布图

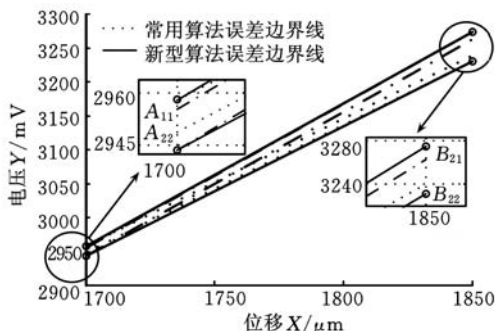


图4 二批测量数据误差区域新型分布图

表3 第三批测量数据

| | | | | | |
|-------|--------|--------|-----|--------|--------|
| X(μm) | 1700 | 1725 | ... | 1825 | 1850 |
| Y(mV) | 2943.4 | 2992.1 | ... | 3207.2 | 3258.0 |

按上述方法检验第三批数据的误差分布范围是否在图4中的上下限误差范围内。如果在,则进行第四批数据测量;否则,将第三批测量数据进行误差分析,按上述分析方法进行误差范围上下限分析。

对第三批数据进行线性拟合,得

$$y_2 = 2.1136x - 651.35 \quad (4)$$

由式(2)得: $\delta_3 = 1.8945\text{mV}, \pm 3\delta_3$ 误差范围上下限分别与 $x = 1700$ 和 $x = 1850$ 两线交于点 $A_{31}(1700, 2947.4)$ 、 $A_{32}(1700, 2936.0)$ 、 $B_{31}(1850, 3264.4)$ 、 $B_{32}(1850, 3253.1)$ 。与2.2.2节中所得的上下限误差范围 $A_{11}B_{21}$ 和 $A_{22}B_{12}$ 比较得: 上限

表5 按传统误差分析法对第一至第六批测量数据精度分析

| | $\delta_i(\mu\text{m})$ | A_{i1} | A_{i2} | B_{i1} | B_{i2} |
|----------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 第一批数据 | 1.5534 | (1700, 2958.0) | (1700, 2948.7) | (1850, 3239.7) | (1850, 3230.4) |
| 第一至第二批数据 | 10.2020 | (1700, 2968.7) | (1700, 2934.2) | (1850, 3269.0) | (1850, 3234.6) |
| 第一至第三批数据 | 8.7383 | (1700, 2966.5) | (1700, 2929.9) | (1850, 3272.4) | (1850, 3235.8) |
| 第一至第四批数据 | 7.9662 | (1700, 2966.6) | (1700, 2927.8) | (1850, 3276.2) | (1850, 3237.4) |
| 第一至第五批数据 | 7.4198 | (1700, 2969.5) | (1700, 2925.0) | (1850, 3280.7) | (1850, 3236.2) |
| 第一至第六批数据 | 6.8095 | (1700, 2967.3) | (1700, 2926.4) | (1850, 3279.3) | (1850, 3238.5) |

$A_{31}B_{31}$ 包含在 $A_{11}B_{21}$ 内,所以上限还是 $A_{11}B_{21}$ 不变;而下限中点 $A_{32}(1700, 2936.0)$ 比点 $A_{22}(1700, 2943.6)$ 的 y 值更小,故应用点 A_{32} 替代 A_{22} ,从而获得新的误差下限 $A_{32}B_{12}$ 。

2.2.4 后续测量数据处理

依此类推,若连续测量3~5次的数据都在已建立的误差上下限范围内,即无需进行上下限替代,则停止测量。此时所建立的误差上下限即为多批次测量数据的最终误差范围,否则仍按上述步骤持续进行测量。

本实验中第四至第六批测量数据精度分析结果如表4所示。经分析,各批次数据的上下限均在线 $A_{11}B_{21}$ 和线 $A_{32}B_{12}$ 范围内,故停止数据采样。

表4 第四至第六批测量数据精度分析

| | 第四批数据 | 第五批数据 | 第六批数据 |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|
| $\delta_i(\mu\text{m})$ | 0.7940 | 1.7728 | 1.2481 |
| A_{i1} | (1700, 2946.7) | (1700, 2952.9) | (1700, 2948.4) |
| A_{i2} | (1700, 2941.9) | (1700, 2942.2) | (1700, 2940.9) |
| B_{i1} | (1850, 3267.1) | (1850, 3270.3) | (1850, 3265.1) |
| B_{i2} | (1850, 3262.4) | (1850, 3259.6) | (1850, 3257.6) |

2.3 采用新型误差分析法确定测量批次

根据测量批次对电涡流传感器精度误差按常用的误差分析方法进行分析可获得不同的误差精度区间。如仅测量一批次数据进行处理,数据标准差为 1.5534mV ,所获误差区间为 $A_{11}(1700, 2958.0)$ 、 $A_{12}(1700, 2948.7)$ 、 $B_{11}(1850, 3239.7)$ 、 $B_{12}(1850, 3230.4)$,如图2所示。

若以测量第一、第二批次数据统一进行误差分析,则标准差为 10.2020mV ,所获误差区间为 $A_{11}(1700, 2968.7)$ 、 $A_{12}(1700, 2934.2)$ 、 $B_{11}(1850, 3269.0)$ 、 $B_{12}(1850, 3234.6)$ 。

同理可以测量第一至第三、第一至第四直至第一至第六批次数据统一进行误差分析的拟合函数与标准差值,并获得误差区间范围,如表5所示。

由表 5 分析, 单取第一批数据进行的误差区间范围确定, 标准差很小, 显然精度过高, 不适用于其他批次的误差预测; 取第一、第二批数据分析的误差区间范围快速增大, 处于不稳定状态; 进行三批次直至六批次数据分析可以看出标准差趋向于某一稳定值, 如图 5 所示。

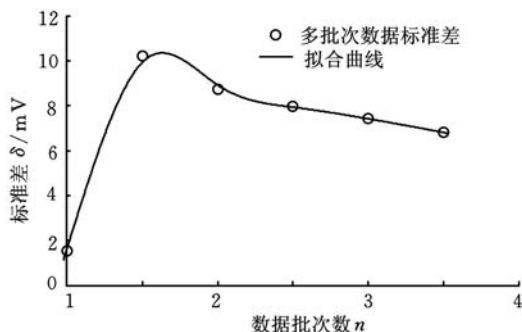


图 5 多批次数据标准差

考虑到采用常用的误差分析法时, 数据越多越具有代表性, 本文以六批次数据作为研究对象, 计算其标准差为 $\delta = 6.8095 \text{ mV}$, $\pm 3\delta_3$ 范围上下限与 $x = 1700$ 和 $x = 1850$ 两线交点为 $A_1(1700, 2967.3)$ 、 $A_2(1700, 2926.4)$ 、 $B_1(1850, 3279.3)$ 、 $B_2(1850, 3238.5)$ 。即得到其传统误差范围在线 A_1B_1 与线 A_2B_2 区间内, 如图 6 所示。

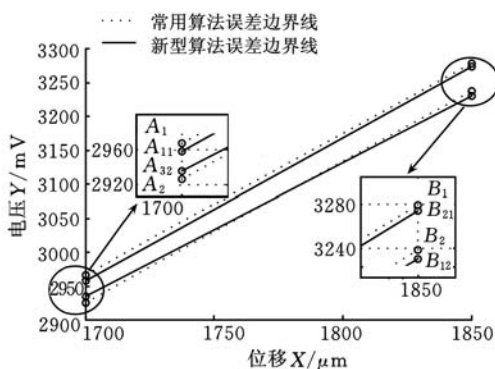


图 6 两种误差分析方法精度比较

2.4 两种误差分析方法精度和效率的比较

将六批次数据按照常用误差分析方法和本文新型误差分析方法计算的误差区域放在一起进行比较, 如图 6 所示。分析比较结果可知, 新型误差分析法对于多批次测量数据误差区间在同概率条件下范围更窄, 最大误差范围为 $3274.5 - 3230.4 = 44.1 \text{ (mV)}$, 最小误差范围为 $2958.0 - 2936.0 = 22.0 \text{ (mV)}$, 并且误差上下限不平行。而且实验测量次数可以根据测量数据实际情况确定, 易于判断。而常用随机误差分析法所得测量数据上下限平行, 误差范围都为 $2967.3 - 2926.4 =$

$3279.3 - 3238.5 = 40.8 \text{ (mV)}$, 这样就扩大了测量数据的实际误差, 降低了研究对象的精度, 且对误差分布没有考虑到不同量程范围的影响。

此外, 对于常用的误差分析方法, 其实验测量次数不能明确, 数据太少则精度不够, 太多又耗费大量时间。而利用本文介绍的新型误差分析方法不仅可以确定更为准确的误差区间, 还可以确定实验测量的批次数。

3 结语

新型误差分析法相对于一般误差分析方法, 实现了误差范围最小化。同时考虑到传感器精度随量程变化产生的误差分布不均的特征, 也具有较好的误差预测性, 从而可以提高实际研究对象的测量精度。该方法提供了实验测量批次数的判别准则, 使所测次数更加科学, 避免了测量次数过多导致工作量过大、过少导致误差过大, 而失去对误差预测的功效。

新型误差分析法使用简便、稳定性高、可靠性强, 可通过软件编程实现在线误差范围分析, 具有良好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 单成祥, 牛彦文, 张春. 传感器原理与运用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 谭进, 戴连平. 电涡流传感器在使用中应注意的问题[J]. 化工进展, 2003, 22(8): 902-903.
- [3] 郑贺予, 刘海波, 陈传钊, 等. 电涡流传感器的频率补偿式测量方法的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2007(8): 76-77.
- [4] 何文辉, 颜国正, 郭旭东. 一种新型电涡流传感器的理论分析[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(3): 495-498.
- [5] 冯荣耀. 具有温漂补偿功能的电涡流传感器 Z/V 变换器[J]. 仪表技术与传感器, 2008(7): 86-87.
- [6] 樊树江, 吴峻, 杨光, 等. 电涡流传感器温度漂移分析及补偿实现[J]. 传感技术学报, 2004(3): 427-430.
- [7] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2004.

(编辑 陈勇)

作者简介: 姚焕新, 男, 1966 年生。宁波工程学院机械工程学院副教授。主要研究方向为精密机械误差理论与应用技术、测量与控制技术。发表论文 10 余篇。苗恩铭, 男, 1971 年生。合肥工业大学仪器科学与光电工程学院教授、博士。牛鹏程, 男, 1989 年生。合肥工业大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生。