

# 基于最小二乘法的霍尔电流传感器静态校准

叶晓雯\*, 唐武忠, 杜玲玲

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

**摘要:**以霍尔电流传感器静态特性校准为目标, 提出基于最小二乘法回归数学模型方法来处理采用循环校准方法获得的数据, 推导了适合于霍尔电流传感器校准的具体计算过程, 得到霍尔电流传感器的静态特性。通过比较标准不确定度分量, 获得测试端的最佳配置。

**关键词:**霍尔电流传感器; 静态校准; 最小二乘法; 不确定度

中图分类号: TM93 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 09-0052-04

飞机变频供电系统试验中, 为验证飞机交流供电系统的质量, 常以负载转换法为手段来测量供电系统的电压瞬变性质, 并配以霍尔电流传感器监测电流大小。电流的准确测量直接影响试验结果的符合性, 因此, 需要对霍尔传感器进行检定/校准, 确保其量值的准确可靠。

目前, 工业部门制定了《SJ20790-2000 电流电压传感器总规范》, 规定了该类传感器的通用要求和试验方法, 但计量行政部门尚未发布针对电流传感器的检定规程或校准规范, 使得该类传感器的校准缺乏依据。因此, 有必要探索该类传感器的校准设备、校准方法及数据处理方法。

国外常采用跨导放大器并通过绕匝线圈的方式进行校准, 现有最新 FLUKE 公司的 52120 型跨导放大器, 配合附件安匝线圈使用, 电流可直接扩展至 6000A。但由于安匝线圈的结构特性, 无法校准闭环结构的霍尔电流传感器<sup>[1]</sup>。国内有大电流使用需求的冶金、电力等行业所使用的校准设备, 由于技术指标不一致, 不适用于飞机变频供电系统试验中使用的霍尔电流传感器的校准<sup>[2]</sup>。

霍尔电流传感器的静态特性是衡量其质量优劣的重要指标。静态特性主要包括灵敏度、线性度、回程误差和重复性等。为了得到灵敏度, 需要明确传感器输入、输出值的函数关系, 最小二乘法通过测量得到一组离散数据序列,

$(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, m$ , 在建立逼近函数时, 按误差最小原则, 逼近函数最优地逼近采样点, 即在测量数据无偏、正态、独立的情况下, 逼近函数最可信赖值的结果应在测量参与误差的平方和为最小的条件下求得<sup>[3]</sup>。回程误差可通过测量相同输入下不同的行程方向的输出值获得。另外, 该传感器电流值较大, 由负载产生的热效应尤为明显, 有必要对测试端的连接方式加以研究。

本文以霍尔电流传感器静态特性校准为目标, 通过搭建校准系统, 采用循环测量的方式获得校准数据, 利用最小二乘法建立传感器的输入、输出数学模型, 进一步通过不确定度分析, 比较系统不同的测试端配置, 为霍尔电流传感器的校准提供指导。

## 1 最小二乘法建立数学模型

当测量值  $x_i$  与  $y_i$  之间存在着线性关系时, 可采用线性回归拟合直线。若  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  相应的测量值为  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ , 假设其线性方程为:

$$\hat{y} = kx + b \quad (1)$$

式 (1) 的系数  $k$  和  $b$  可由最小二乘法求得, 即为该线性方程的斜率和截距。

最小二乘法要求各  $y_i$  值与式 (1) 之间的差  $v_i$  的平方和

收稿日期: 2016-05-20; 退修日期: 2016-07-26; 录用日期: 2016-07-28

\* 通讯作者. Tel.: 18049511073 E-mail: xiaowen-ye@hotmail.com

引用格式: YE Xiaowen, TANG Wuzhong, DU Lingling. Static calibration of Hall Current Sensor by using least-square theory [J].

Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (09): 52-55. 叶晓雯, 唐武忠, 杜玲玲. 基于最小二乘法的霍尔电流传感器静态校准 [J].

航空科学技术, 2016, 27 (09): 52-55.

最小。

$$v_i = y_i - \hat{y} \tag{2}$$

根据多元函数求极小值的方法,令:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\sum v_i^2)}{\partial b} = 0 \\ \frac{\partial(\sum v_i^2)}{\partial k} = 0 \end{cases} \tag{3}$$

$$\text{又 } v_i = y_i - \hat{y} = y_i - b - kx_i$$

得正规方程组:

$$\begin{cases} nb + k\sum x_i = \sum y_i \\ b\sum x_i + k\sum x_i^2 = \sum x_i y_i \end{cases} \tag{4}$$

由于  $x_i$  完全不相同,式 (4) 可写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \end{bmatrix} \tag{5}$$

式 (5) 的解为:

$$\begin{cases} k = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i / n}{\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n} \\ b = \frac{\sum y_i}{n} - k \frac{\sum x_i}{n} \end{cases} \tag{6}$$

## 2 校准系统搭建

校准系统由直流源、电流比例标准、Fluke 742A 标准电阻 (2 个)、8508A 高精度数字多用表 (2 个)、Agilent E3645A 可编程直流电源组成,各仪器技术指标见表 1,其连接方式如图 1 所示。

表 1 校准系统各仪器技术指标  
Table 1 List of instrument specification

设备	测量范围	准确度等级 / 最大允许误差
直流电源	0 ~ 2000A	稳定性 $2 \times 10^{-5}/\text{min}$
直流电流比例标准	0 ~ 2000A	0.002%
Agilent E3645A 可编程直流电源	0 ~ 35V	$<0.01\% \pm 3\text{mV}$
Fluke 742A 标准电阻	1Ω	4ppm/y
8508A 高精度数字多用表	0 ~ 1V 档	$\pm 3.0\text{ppm}$

校准系统搭建方法如下:

(1) 将直流源输出的大电流通过一根粗铜导线穿过电流比例标准以及被校霍尔电流传感器的中心位置,再回到直流源构成回路。

(2) 电流比例标准的输出端子与输入端子之间串联第一个标准电阻,用第一个 8508A 高精度数字多用表测量第一个标准电阻 Fluke 742A 两端的电压,换算出通过第一个

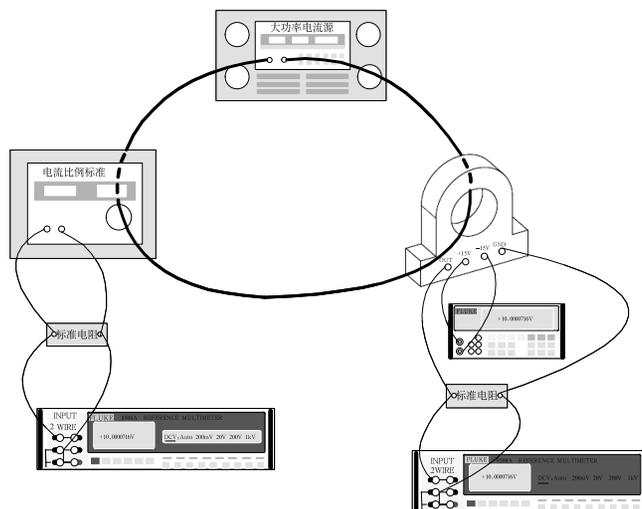


图 1 校准系统连接示意图

Fig.1 Diagram of the calibration system connection

标准电阻的电流值,该电流值即为电流比例标准感应电流的大小。

(3) 电流比例标准在小回路中的输出电流与直流源输出的电流具有比例关系,且比例关系恒定,比如,如果电流比例标准的变比关系为 2000:1,则直流源输出的电流为 2000A 时,电流比例标准输出为 1A。

(4) Agilent E3645A 直流电源给被校霍尔电流传感器提供 ±12V 的工作电压,被校霍尔电流传感器的 OUT、GND 端与第二个标准电阻的两端连接,用第二个 8508A 高精度数字多用表测量第二个标准电阻 Fluke 742A 两端电压,换算出通过第二个标准电阻 Fluke 742A 的电流值,该电流值即为被校霍尔电流传感器的副边电流大小。

整个校准电路中,利用 2 台 8508A 八位半数字多用表实现同步测量与控制,进一步提高了校准系统的精度。

## 3 校准方法

对变频供电系统试验中使用的 LEM 公司 LT2005-S 型电流传感器进行校准,该电流传感器的电气参数为:原边额定电流有效值 2000A,原边电流测量范围 0 ~ ±3000A;副边输入的工作电压 ±(15 ~ 24) V,允许偏差 ±5%;副边测量电阻  $R_1$  在 70℃, ±15V, ±2000A 情况下的范围为 0 ~ 7.5Ω;副边额定电流有效值 400mA;70℃ 时副边线圈电阻为 25Ω。

根据该霍尔传感器的输出范围,取均匀分布的 10 个校准点,将电流比例标准感应得到的电流值按比例换算得到直流源输出的电流值,调节直流源电流输出,使输出电流依

次为 200A, 400A, 600A, 800A, 1000A, 1200A, 1400A, 1600A, 1800A, 2000A, 在每个电流校准点上保持 15s 后读取霍尔电流传感器两端的电压输出, 即可得到其副边电流值。完成一个正行程的校准后, 再进行反行程校准, 一个正反行程为一个校准循环, 共进行 3 次校准循环。校准数据如表 2 所示。

表 2 霍尔电流传感器校准数据  
Table 2 Calibration data of Hall Current Sensor

校准点	输入电流 /A	第一循环电压 /mV		第二循环电压 /mV		第三循环电压 /mV	
		正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
1	200	39.911	39.896	39.908	39.861	39.898	39.821
2	400	79.925	79.947	79.913	79.901	79.904	79.886
3	600	119.890	119.830	119.886	119.884	119.862	119.827
4	800	159.902	159.954	159.943	159.927	159.916	159.902
5	1000	199.883	199.872	199.860	199.896	199.875	199.883
6	1200	239.876	239.911	239.904	239.884	239.880	239.853
7	1400	279.933	279.923	279.912	279.941	279.915	279.906
8	1600	319.878	319.886	319.863	319.860	319.871	319.858
9	1800	359.886	359.834	359.868	359.870	359.858	359.855
10	2000	399.875	399.863	399.854	399.847	399.841	399.833

#### 4 静态特性

将三次循环的测量结果带入式 (6), 可得霍尔电流传感器线性方程的斜率  $k$  及截距  $b$ :

$$k=0.20$$

$$b=-0.06$$

该传感器工作特性方程为:

$$y=0.2x-0.06$$

##### (1) 灵敏度

工作特性直线的斜率  $k$  即为灵敏度的测量结果:

$$k=0.20$$

##### (2) 线性度

$$\varepsilon_L = \frac{|\bar{y}_i - y_i|_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{|\bar{y}_i - y_i|_{\max}}{Y_M - Y_N} \times 100\% = 0.16\%$$

式中:  $\bar{y}_i$  为校准点输出值的算术平均值;  $Y_M$  表示霍尔电流传感器为上限时 3 组正、反行程所测得的实际输出值的平均值;  $Y_N$  表示霍尔电流传感器为上限时 3 组正、反行程所测得的实际输出值的平均值;  $Y_{FS}$  为霍尔电流传感器输出信号的量程。

##### (3) 回程误差

计算同一校准点中正行程输出值的算术平均值与反行

程输出值的算术平均值之差, 传感器的回程误差为:

$$\xi_H = \frac{|\Delta y_{Hi}|_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{|\bar{y}_{i+} - \bar{y}_{i-}|_{\max}}{Y_{FS}} = -0.0067\%$$

##### (4) 重复性

经查表, 极差系数  $C=3.08$ , 计算同一校准点中正行程或反行程输出值中最大值与最小值之差, 传感器的重复性为:

$$\xi_S = \frac{|\Delta y_{Si}|_{\max}}{CY_{FS}} \times 100\% = \frac{|y_{\max} - y_{\min}|_{\max}}{CY_{FS}} = -0.1147\%$$

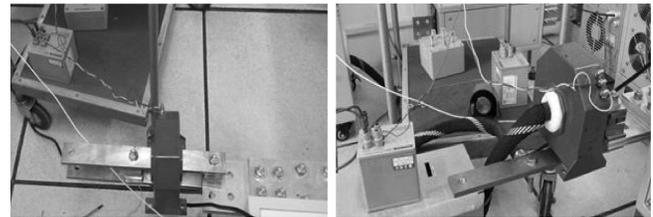
#### 5 系统测试端配置对不确定度的影响

为获得测试端的最佳配置, 对 4 组常用的连接方式引入的标准不确定度分量进行比较, 测试端连接方式如表 3 所示。

表 3 测试端连接方式  
Table 3 The connection way of test end

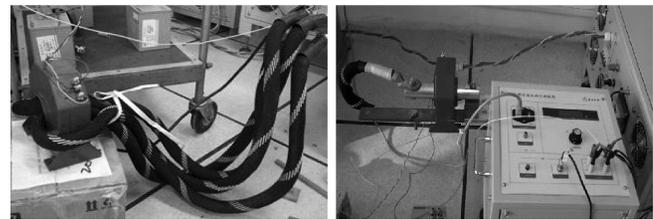
序号	测试端配置	传感器位置摆放方式
a	上、下铜排	铜排穿过传感器中心
b	大电流导线及铜排	大电流导线穿过传感器中心
c	均为大电流导线	两根大电流导线穿过传感器中心, 分居两侧
d	铜棒及铜排	铜棒穿过传感器中心

2000A 的直流电流穿心通过该霍尔电流传感器, 控制其他条件不变。测试端连接如图 2 所示。



(a) 上下铜排

(b) 上为大电流导线, 下为铜排



(c) 上下均为大电流导线

(d) 上为铜棒, 下为铜排

图 2 测试端连接图

Fig.2 Diagram of test end connection

使用拉依达法则剔除 4 组测试端配置的测量异常值, 计算其标准差, 进一步得到由测试端引入的标准不确定度分量大小, 如表 4 所示。结果表明, 采用上为铜棒、下为铜排, 铜棒穿过传感器中心的配置方式, 对测量不确定度影响最小, 该组合为最佳测试端配置。

表4 不同测试端引入的标准不确定度分量

Table 4 Standard uncertainty components of different test end

序号	测试端配置	标准不确定度分量
a	上、下铜排	$1.6 \times 10^{-4}$
b	大电流导线及铜排	$1.2 \times 10^{-4}$
c	均为大电流导线	$0.8 \times 10^{-4}$
d	铜棒及铜排	$0.6 \times 10^{-4}$

## 6 结束语

传感器的静态特性是评价传感器性能的常用指标,直接影响测试结果的准确程度。文中从校准设备、校准方法和数据处理方法等3方面探索了霍尔电流传感器静态特性的校准思路。分析了最小二乘法的原理,自主搭建了霍尔电流传感器的校准系统,利用最小二乘法对测量数据进行函数化,建立霍尔电流传感器的数学模型,并在此基础上研究了霍尔电流传感器的灵敏度、线性度、回程误差和重复性等静态特性。最后,通过试验比较了4种常用测试端配置的标准不确定度分量,明确了最佳测试端配置,提高了校准的准确度。



## 参考文献

- [1] REN Shiyan. A 100000-A high precision on-site measurement calibration device for heavy direct current [J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1990, 39 (1): 19-22.
- [2] 潘洋, 来磊, 石雷兵, 等. 钳形电流表校准不确定度的分析与评定 [J]. 电测与仪表, 2009, 46 (8): 76-80.  
PAN Yang, LAI Lei, SHI Leibing, et al. Analysis and evaluation of uncertainty of clamp ammeters calibration [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46 (8): 76-80. (in Chinese)
- [3] 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.  
FEI Yetai. Error theory and data processing [M]. Beijing: Machine Industry Press, 2013. (in Chinese)

## 作者简介

叶晓雯(1984—)女,博士,工程师。主要研究方向: 计量技术。

Tel: 18049511073

E-mail: xiaowen-ye@hotmail.com

唐武忠(1976—)男,硕士,高级工程师。主要研究方向: 型号计量保障和计量性设计。

# Static Calibration of Hall Current Sensor by Using Least-square Theory

YE Xiaowen\*, TANG Wuzhong, DU Lingling

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

**Abstract:** In order to calibrate static characteristics of Hall Current Sensor, least square method was applied to processing the data based on the cycle measurement. The mathematical derivation and some concrete results were also presented. Best test configuration was given by comparing the standard uncertainty of different test ends.

**Key Words:** Hall Current Sensor; static calibration; least-square; uncertainty

Received: 2016-05-20; Revised: 2016-07-26; Accepted: 2016-07-28

\*Corresponding author. Tel.: 18049511073 E-mail: xiaowen-ye@hotmail.com