

# 某型飞机驾驶杆线性位移差分变压器 传感器信号调理校正

杜天军, 黄世超, 刘书国, 毛文杰

(中国人民解放军 95430 部队, 成都 610081)

**摘要:** 飞机驾驶杆 LVDT (线性位移差分变压器) 传感器信号测试校正正在航空测控研究领域具有十分重要的意义, 提出了一种针对某型飞机驾驶杆 LVDT 传感器信号精确调理校正方法; 介绍了飞机驾驶杆 LVDT 传感器原理, 分析了 AD598 LVDT 调理芯片的使用局限, 利用最小二乘法设计了精确调理校正方法; 基于 VC++2010 开发环境, 利用高精度的模拟校正源产生模拟激励校正信号, 设计了驾驶杆 LVDT 多通道软件自校正方法, 它可以有效提高解调电路的线性度和对称性, 克服了 AD598 常规调理电路的使用局限, 从而实现驾驶杆 LVDT 信号精确检测; 理论分析与数值试验验证了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:** 驾驶杆; LVDT 信号; 最小二乘法; 线性度

## LVDT Sensor Signal Conditioning and Calibration Method for a Certain Type Airplane Control Stick

Du Tianjun, Huang Shichao, Liu Shuguo, Mao Wenjie

(Army 95430 of PLA, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** This paper proposed a LVDT (Linear Variable Differential Transformer) signal conditioning and calibration method for a certain type fighter airplane control stick. Aimed at the airplane control stick LVDT signals, a conditioning and calibration method based on least squares method was founded via introducing the principles of LVDT sensor, and via analyzing the principles and limitation of AD598; a software self-calibration method which calibrate the multichannel LVDT signals was designed based on VC++ 2010, linearity and symmetry of signal conditioning circuit was improved effectively, and then detection precision of system was improved too. Theoretical analysis and experiment results show that the proposed method is effective for stick LVDT signal conditioning and calibration.

**Keywords:** airplane control stick; LVDT signal; least squares method; linearity

### 0 引言

飞机驾驶杆是飞机上用来传递操纵指令和各种传感器电信号, 驱动飞机舵面运动的多个装置总和, 用于飞机飞行姿态的控制<sup>[1-4]</sup>, 它的工作性能是否良好正常, 直接影响着飞机性能的正常发挥和飞行安全。某型飞机作为我国目前的主要机种, 其驾驶杆配置的是带有四余度的电传操纵系统。该型飞机驾驶杆中, 在俯仰 (也称纵向)、滚转 (也称横向)、偏航 3 个方向共配置有 12 个线性位移 LVDT (线性位移差分变压器, Linear Variable Differential Transformer) 传感器<sup>[1]</sup>, 主要用于感受和测量飞机在 3 个方向的杆位移和电气性能参数大小。LVDT 是一种机械-电子传感器, 其输入是磁芯的机械移动, 输出是与磁芯位置成正比的交流电压信号, 利用驾驶杆 LVDT 传感器输出的信号去控制舵机, 使飞机的舵面产生所需要的偏转角, 从而达到操纵飞机的目的。因此, 驾驶杆 LVDT 传感器是飞机操纵和飞行控制系统前端重要的信息源, 必须定期进行性能检测, 确保飞行安全。

在实际工程运用中, 通常采用 AD 公司生产的集成 LVDT 信号处理芯片 AD598 或 AD698 进行 LVDT 信号解调处理<sup>[5-9]</sup>。AD598/AD698 自身集成了内部振荡器、电压基准, 仅需少量几个外围无源元件就能完成对 LVDT 传感器的激励和信号解调处理, 并直接输出与位移成正比的直流电压, 芯片集成度

高, 电路设计极为方便。但是在其使用过程中, 由于零位偏移补偿电路的影响、滤波放大电路的影响、或者由于温度、湿度、噪声、电磁干扰等原因的影响, 会影响解调电路的线性度和对称性, 仅仅靠对 AD598 外围无源器件进行调整修正不能有效改善线性度和对称性, 进而影响 LVDT 信号的检测精度。

本文首先介绍驾驶杆 LVDT 传感器原理, 分析 AD598 LVDT 调理芯片的原理和使用局限, 然后利用最小二乘法设计精确调理校正方法, 基于 VC++2010 开发环境, 利用高精度的模拟校正源产生模拟激励校正信号, 设计了驾驶杆 LVDT 多通道软件自校正的方法, 可以有效提高解调电路的线性度和对称性, 从而克服 AD598 常规调理电路的使用局限, 实现驾驶杆 LVDT 信号精确调理检测, 极大提高测试精度。

### 1 驾驶杆 LVDT 传感器及调理电路

#### 1.1 驾驶杆 LVDT 传感器

LVDT 是一种机械-电子传感器<sup>[5-9]</sup>, 由一个初级线圈和二个次级线圈组成, 初级线圈由外部参考正弦波信号源激励, 二个次级线圈反向串联。活动磁芯的移动可改变初次级线圈之间的耦合磁通, 从而产生二个幅值不同的交流电压信号。串联次级线圈的输出电压随着磁芯移离中心位置而升高, 通过测量输出电压的电压可以判断磁芯移动的方向和大小。LVDT 主要用于对线位移/角位移进行测量, 具有精度高、线性度高、重复性好等特点, 在航空科技中, 广泛应用于对驾驶杆位置、驾驶杆角度、油门杆位置、喷口位置等线/角位移进行精确测量控制。

该型飞机驾驶杆中, 在俯仰、滚转、偏航 3 个方向配置有 12 个线位移 LVDT 传感器, 主要用于感受和测量飞机在 3 个

收稿日期: 2016-09-27; 修回日期: 2016-11-02。

作者简介: 杜天军 (1974-), 男, 四川阆中人, 博士, 高级工程师, 主要从事自动测试系统和机载设备故障诊断方向的研究。

方向的杆位移大小。LVDT 传感器具有输出稳定, 抗干扰性强的特点, 驾驶杆电传操纵装置中的大部分传感器均采用 LVDT 差分放大传感器形式, LVDT 为线位移传感器, RVDT 为角位移传感器, 其原理大致一致, 如图 1 所示。

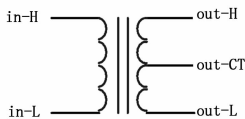


图 1 LVDT 差分放大传感器原理示意图

左侧为初级绕组, 即输入端; 右侧为次级绕组, 即输出端, 中间为磁芯。H-CT 部分绕行方向与输入侧相同, L-CT 部分绕行方向与输入侧相反, 当初级绕组和次级绕组之间没有相对位移时,  $U(out)_{H\_CT}$  与  $U(out)_{L\_CT}$  电压值相同, 故总输出  $U(out)_{H\_CT} - U(out)_{L\_CT}$  为零, 当初级绕组和次级绕组之间有相对位移时,  $U(out)_{H\_CT}$  与  $U(out)_{L\_CT}$  即不为零,  $U(out)_{H\_CT} - U(out)_{L\_CT}$  的大小即反映出位移的大小。

在图 1 中, 右侧输出为  $0 \sim 10$  V 的交流信号, 以  $out\_H$  和  $out\_L$  端的电压分析为例,  $UH-L$  的电压输出为  $-10$  V  $\sim$   $10$  V (负值表示  $U_{out\_H} < U_{out\_L}$ )。驾驶杆定期性能检测的主要工作就是: 将图 1 右侧交流输出信号解调成直流信号, 并进行采集分析, 从而判定 LVDT 传感器性能好坏, 进而判断驾驶杆电传系统性能。

1.2 信号调理电路

利用 AD598 为基础构建该型飞机驾驶杆 LVDT 信号调理电路。如图 2 所示, AD598 首先驱动 LVDT, 然后读出 LVDT 的输出电压并产生一个与磁芯位置成正比的直流电压信号。AD598 通过内部的低失真正弦振荡器产生一个固定频率、固定幅值的正弦波, 经放大后作为激励信号驱动 LVDT 的初级线圈, 再通过可移动的磁芯耦合到 LVDT 串联的两个次级线圈上, 产生两个同频率的正弦波 ( $V_A, V_B$ )。LVDT 的磁芯与其所感应的机械位移形成一定的硬连接关系, 当磁芯发生位移时, 两个次级线圈耦合到的正弦波的幅值发生变化, 且 ( $V_A - V_B$ ) 正比于磁芯位移即外部机械位移。AD598 通过同步测  $V_A$  与  $V_B$  的幅值之差, 在内部进行  $(V_A - V_B) / (V_A + V_B)$  的运算, 运算结果经滤波器滤波后, 通过运算放大, 输出一个与位移成正比的电压  $V_{out}$ 。

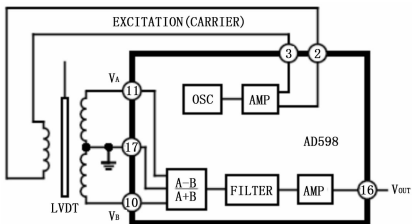


图 2 AD598 工作原理图

图 3 是 AD598 调理 LVDT 传感器的具体连接电路示意图。在具体使用过程中, 相关元器件的关键参数选择如下<sup>[6-7]</sup>:

(1) 选择激励信号频率来决定  $C1$

$$C1 = 35 \mu\text{F} \cdot \text{FHZ} / f_{\text{EXCITATION}} \quad (1)$$

(2) 根据外围电阻  $R1$  来确定调节激励信号的幅值。

AD598 可以产生频率从 20 Hz 到 20 kHz, 幅值为 2 V<sub>rms</sub> 到 24 V<sub>rms</sub> 的正弦波激励信号, 具体  $R1$  与  $V_{\text{EXC}}$  的对应关系在 AD598 器件手册中有一个曲线图表, 可以查找利用, 这里不再赘述。

本文采用的激励信号为 8 V<sub>rms</sub>/2 000 Hz 信号,  $R1 = 1.4$  k $\Omega$ 。

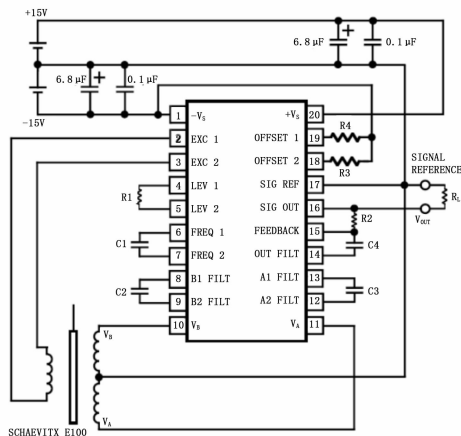


图 3 AD598 调理 LVDT 连接电路示意图

(3) 选择输出电压  $V_{out}$  来决定  $R_2$

$$R_2 = \frac{V_{out} \times (V_A + V_B)}{S \times V_{PRI} \times 500 \mu\text{A} \times d} \quad (2)$$

其中:  $S$  为灵敏度;  $d$  为满刻度磁芯位移, 单位为 inch;  $V_{PRI}$  为典型激励情况下的参考电压, 一般由器件制造商在器件手册中说明;  $V_A + V_B$  为典型激励情况下, 磁芯在中立位置  $V_A = V_B$  情况下的和值, 一般由器件制造商在器件手册中说明。例如, 针对 Schaevitz 公司 AD598 E100 芯片, 采用其常用的  $V_{out} = \pm 5$  V 输出范围, 则有:

$$R_2 = \frac{10 \text{ V} \times 2.7 \text{ V}}{2.4 \times 3 \text{ V}_{\text{rms}} \times 500 \mu\text{A} \times 0.2 \text{ inch}} = 37.6 \text{ k}\Omega \quad (3)$$

(4) 选择  $R_3, R_4$  来调整偏置电压  $V_{os}$ 。

$$V_{os} = 1.2 \text{ V} \times R_2 \times \left( \frac{1}{R_3 + 5 \text{ k}\Omega} - \frac{1}{R_4 + 5 \text{ k}\Omega} \right) \quad (4)$$

2 调理电路局限及精确调理实现

2.1 调理电路局限

虽然 AD598/AD698 LVDT 处理芯片使用简单、芯片集成度高、电路设计方便, 但存在以下使用局限:

1) 总误差 (包括温度、湿度、噪声、增益、增益漂移及输入失调电压漂移): 满度 0.6%; 增益误差: 满度 0.4%; 漂移误差: 满度 0.3% (以上参数详见 AD598 器件使用手册)。如果按照输出电压  $V_{out} = \pm 10$  V 计算, 则对应的总误差、增益误差、漂移误差分别达到 60 mV、40 mV、30 mV, 而该型飞机驾驶杆 LVDT 的性能检测要求精度达到  $\pm 15$  mV, 因此必须对 AD598 调理电路进一步高精度调理校正, 否则难以满足精度要求。

2) 由公式 (4) 可以看出, 偏置电压  $V_{os}$  与  $R_2, R_3, R_4$  相关,  $R_2$  与输出电压  $V_{out}$  相关,  $V_{out}$  大则  $R_2$  大, 进而  $V_{os}$  变大。理想的信号调理电路, 如果没有特殊要求, 尽量要求  $V_{os}$  趋近于 0 值, 以使得调理电路具有良好的线性度和对称性。因此, 一般选择  $V_{out} = \pm 5$  V 输出范围, 减小  $R_2$  对  $V_{os}$  影响; 选择  $R_3$  趋近于  $R_4$ , 减小  $R_3, R_4$  对  $V_{os}$  影响。然而, 在实际使用过程中, 由于环境、温度、湿度、噪声、电磁干扰等因素的影响,  $R_3$  不可能完全等同于  $R_4$ , 偏置电压  $V_{os}$  始终会存在, 因此必须对 AD598 调理电路进一步高精度调理修正, 否则难以满足精度要求。

3) 综合以上分析, 以及由于传感器本身特性和调理电路

的本身特性并不是完全遵从 0 起点的线性关系,造成调理电路在实际使用过程中线性度和对称性差,必须修正参数以提高解调电路的线性度和对称性,否则会产生极大的系统误差。如图 4 所示,理想的调理电路输入输出线性度曲线如虚线所示,但实际应用中可能会由于温度、湿度、噪声、电磁干扰等原因出现如图所示的真实线性度曲线,必须对其进行输入输出曲线校正,以使得其接近理想线性度曲线,提高测试精度。

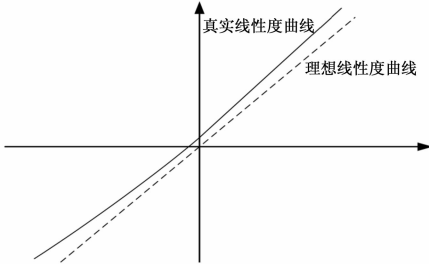


图 4 调理电路线性度误差示意图

线性度和对称性是信号调理电路和 LVDT 差分传感器放大电路的重要指标。如果调理电路和放大电路的线性化程度差,则其传递的数据变化差异很大,即没用的信号,对后续信号处理无任何意义。因此,线性度是解调电路线性特性的最客观重要标准,直接影响线性回归方程的求解和最终测量精度。

### 2.2 利用最小二乘法实现单个 LVDT 调理通道高精度校正

采用了最小二乘法曲线拟合来修正单个通道调理系统误差<sup>[10-11]</sup>。假设调理电路的输入输出满足以下多项式:

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k \quad (5)$$

其误差为:

$$Q = \sum_{i=1}^m \omega_i (f(x_i) - P_n(x_i))^2 = \sum_{i=1}^m \omega_i (f(x_i) - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k)^2 = \sum_{i=1}^m \omega_i (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k)^2 \quad (6)$$

在此处要求解  $a_0, a_1, \dots, a_n$ , 使得误差  $Q$  最小, 则公式 (6) 中  $P_n(x_i)$  代表的真实线性度曲线会无限接近公式 (6) 中  $f(x_i)$  代表的理想线性度曲线,  $\omega_i$  为权值。根据求极值的方法, 并参考文献 [10-11] 的思路, 在公式 (6) 中分别对  $a_0, a_1, \dots, a_n$  求偏导, 再使得偏导数为零, 则得到  $a_0, a_1, \dots, a_n$  应满足如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_0} = \sum_{i=1}^m (-2)\omega_i \cdot (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_1} = \sum_{i=1}^m (-2)x_i^1 \omega_i \cdot (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k) = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial Q}{\partial a_n} = \sum_{i=1}^m (-2)x_i^n \omega_i \cdot (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

整理方程组 (7) 并用矩阵表示可得到如下方程:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \omega_i & \sum_{i=1}^m x_i \omega_i & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^n \omega_i \\ \sum_{i=1}^m x_i \omega_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 \omega_i & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} \omega_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n \omega_i & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} \omega_i & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^{2n+1} \omega_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \omega_i y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i \omega_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n \omega_i y_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

求解公式 (8) 所示的方程组, 可得到  $a_0, a_1, \dots, a_n$ , 代入公式 (5) 即可得到最小二乘拟合多项式。针对 LVDT 传感器调理电路, 线性度的偏差主要由乘性噪声和加性噪声引起, 故本文设定电压输入输出函数为一次函数即可:

$$y = ax + b \quad (9)$$

则有:

$$Q = \sum_{i=1}^m [y_i - (ax_i + b)]^2 \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = \sum_{i=1}^m (-2)x_i (y_i - ax_i - b) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = \sum_{i=1}^m (-2)(y_i - ax_i - b) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} a = \frac{\sum_{i=1}^m y_i \sum_{i=1}^m x_i - m \sum_{i=1}^m x_i y_i}{(\sum_{i=1}^m y_i)^2 - m \sum_{i=1}^m x_i^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^m x_i y_i \sum_{i=1}^m x_i - \sum_{i=1}^m y_i \sum_{i=1}^m x_i^2}{(\sum_{i=1}^m x_i)^2 - m \sum_{i=1}^m x_i^2} \end{cases} \quad (12)$$

### 2.3 利用软件自校正来实现驾驶杆 LVDT 多通道调理高精度校正

在本文的调理电路和软件系统设计中, 基于最小二乘法原理, 利用软件自校正来实现驾驶杆 LVDT 多通道调理高精度校正。如图 5 所示, 利用一个高精度模拟 LVDT 来产生图 1 中的次级绕组输出电压, 利用测试校正线将输出电压信号引入对应的校正通道, AD598 处理芯片选择  $V_{out} = \pm 5 \text{ V}$  输出范围以尽量降低总误差和偏置电压的影响。利用高精度模拟 LVDT 产生输出电压  $V_{a-b} = V_a - V_b$  (差值电压) 和  $V_{a+b} = V_a + V_b$  (和值电压) (如图 5 所示), 以 0.1 V 为间隔, 在 (0 VAC, +9 VAC) 的范围内, 依次接入差值电压  $V_{a-b}$  交流信号, 记作公式 (12) 中的  $x_i$ , 利用数据采集卡测定图 5 调理电路板卡的输出端  $V_{out}$ , 记作公式 (12) 中的  $y_i$ , 由此得到 90 组数据, 可以重复进行多次测量以增加最小二乘拟合的精确性, 则利用公式 (12) 即可求出拟合公式 (9)。拟合公式求出后, 在实际测试中, 当系统对俯仰 LVDT A 进行测试时, AD 采集单元测得某一数值后, 即可利用拟合公式反向求出俯仰 LVDT A 的真实输出  $V_{a-b}$ , 对  $V_{a-b}$  进行数据分析, 即可判定该型飞机驾驶杆俯仰 LVDT A 的性能。本文基于 VC++2010 开发环境, 设计了软件自校正的方法, 利用高精度的模拟校正源产生模拟激励校正信号, 利用测试校正导线将信号引入对应的校正通道, 则软件自动基于最小二乘法原理对通道的工作参数进行校正。

### 3 试验与分析

利用本文构建的驾驶杆 LVDT 信号多通道调理参数校正

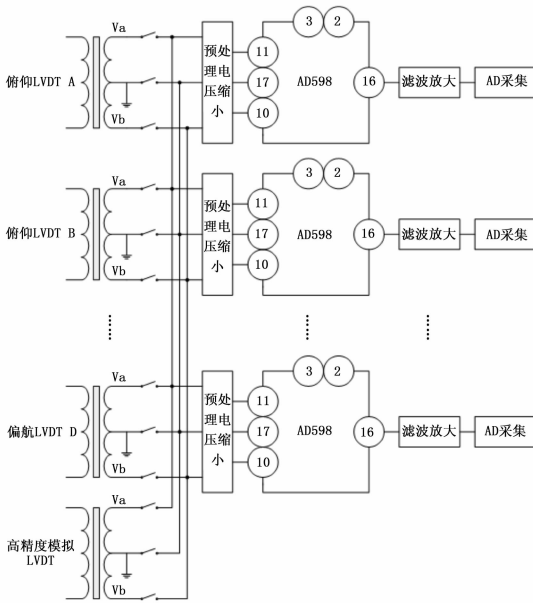


图 5 驾驶杆 LVDT 多通道调理高精度校正

方法对 LVDT 进行了测试校正试验, 测试结果如图 7 所示。在图 7 中, 当调理电路输入电压  $I$  分别为 6.99 V、4.995 V、3.129 V、0.949 V 时, 驾驶杆纵向 A/B/C/D 4 个 LVDT 信号通道的调理输出分别如图 6~7 所示, 其中垂直方向的 0.000 ~ 50.000 是为了便于观察分析的放大显示值, 不考虑也不影响线性度的计算。试验结果显示了经过多通道软件自校正后, 解调电路系统具有极好的线性度和对称性, 具体分析如下: 在图 6 中, 以 A 通道为例, 当输入  $I$  分别为 6.99 V、4.995 V、3.129 V、0.949 V 时, A 通道的解调输出分别为 9.217 V、6.589 V、4.128 V、1.251 V, 可以大致估算线性度如下:  $9.217/6.99 \approx 1.3186$ ;  $6.589/4.995 \approx 1.3191$ ;  $4.128/3.129 \approx 1.3192$ ;  $1.251/0.949 \approx 1.3183$ ; 可以得出以上线性度之间的最大误差为:  $1.3192 - 1.3183 = 0.0009$ ; 如果以输入 7.5 V 为例 (因为  $7.5 \text{ V} * 1.3192 \approx 9.89 \text{ V}$  接近采集卡最高采样电压值 10 V), 则有输出最大误差  $7.5 \text{ V} * 0.0009 = 6.75 \text{ mV}$ , 6.75 mV 远小于系统  $\pm 15 \text{ mV}$  的精度要求; 在图 6 中, B、C、D 通道也可以得出上述类似结果, 由此可以看出: 经过多通道软件自校正后, 解调电路系统线性度良好。在图 7 中, 显示的是解调电路系统良好的对称性, 如图所示, 输入某一电压后, 采集到 A、B、C、D 通道的正向输出电压分别为 9.217 V、9.216 V、9.210 V、9.219 V, 正向电压反映在图 3、图 5 中即  $V_a > V_b$ , 这时候利用导线将输入电压反向接入解调电路系统, 采集到 A、B、C、D 通道的反向输出电压分别为 9.213 V、9.215 V、9.207 V、9.220 V (注: 反向输出电压实际为负值, 此处为了直观反映对称性而取其绝对值进行分析), 对应的最大误差为  $9.217 \text{ V} - 9.213 \text{ V} = 4 \text{ mV}$ , 由此可见: 经过多通道软件自校正后, 解调电路系统对称性良好。

经过前述的 LVDT 多通道调理高精度校正方法之后, 可以利用校正后的 LVDT 调理电路构建该型飞机驾驶杆电气性能检测系统, 进行驾驶杆 LVDT 信号性能测试。具体驾驶杆 LVDT 性能测试软件使用方法, 这里不再赘述。

#### 4 结论

飞机驾驶杆操纵装置 LVDT 传感器信号测试校准在航空

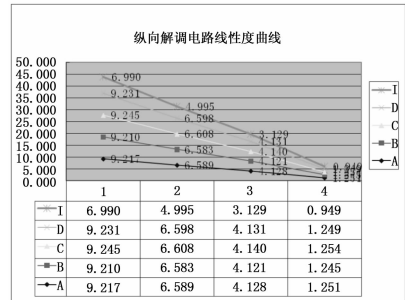


图 6 纵向解调电路线性度曲线测试结果

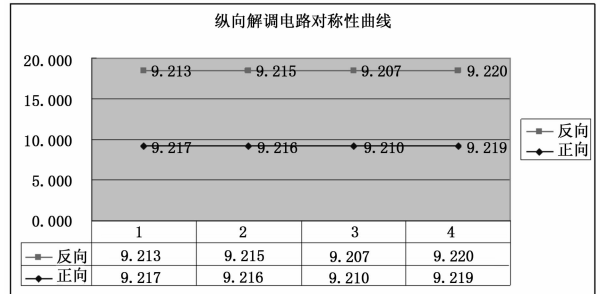


图 7 纵向解调电路对称性曲线测试结果

测控研究领域具有十分重要的意义, 本文介绍了驾驶杆 LVDT 传感器原理, 分析了 AD598 LVDT 调理芯片的原理和使用局限, 利用最小二乘法设计了精确调理校正方法, 基于 VC++ 2010 开发环境, 利用高精度的模拟校正源产生模拟激励校正信号, 设计了驾驶杆 LVDT 多通道软件自校正的方法, 可以有效提高解调电路的线性度和对称性, 从而实现驾驶杆 LVDT 信号精确调理检测。理论分析与数值试验验证了本文所提方法的正确性和有效性。

#### 参考文献:

- [1] 某型飞机技术手册 [Z]. 成都: 中航工业成都飞机设计研究所, 2006.
- [2] 贺松, 陆安江, 张正平. 基于 LabVIEW 的某型歼击机驾驶杆力标定系统设计 [J]. 微计算机信息, 2009, 25 (6): 103-104.
- [3] 彭嫚. 基于 LABVIEW 的教练机驾驶杆测量系统研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
- [4] 蒋红娜, 朱丽, 冯铭瑜. 飞机驾驶杆 (盘) 力系统现场测试校准技术研究 [J]. 国外电子测量技术, 2016, 5 (5): 88-90.
- [5] 王敬亭, 廖力清, 凌玉华. AD698 型 LVDT 信号调理电路的原理与应用 [J]. 国外电子元器件, 2005, 9: 63-64.
- [6] Analog Devices Inc. DataSheet, Universal LVDT Signal Conditioner AD698 [Z]. 2006.
- [7] Analog Devices Inc. DataSheet, Universal LVDT Signal Conditioner AD598 [Z]. 2002.
- [8] 江澄, 彭立志, 孙健国. 航空发动机数控系统中 LVDT 传感器信号处理及在线故障检测 [J]. 航空动力学报, 2007, 22 (8): 1397-1400.
- [9] 李勇, 张俊安. 一种 LVDT 信号调理电路的研究 [J]. 微电子学, 2007, 37 (3): 320-325.
- [10] 王伟斌, 邱长泉. 基于最小二乘曲线拟合的信号调理电路误差补偿方法 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (11): 2286-2288.
- [11] Timothy Sauer 著, 裴玉茹, 马康宇译. 数值分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.