

某型歼击机驾驶杆力和位移测试校准系统

杜天军 黄世超 刘书国 官 利

(中国人民解放军 95430 部队 成都 610081)

摘 要:飞机驾驶杆的杆力和杆位移测试校准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歼击机驾驶杆力和位移测量的原位检测校准方法。基于 VC++2010 开发环境和工具,利用虚拟仪器技术,将驾驶杆的力和位移传感器信号,通过硬件系统进行信号调理,利用 PCI 数据采集卡进行数据采集;系统软件将采集到的各信号数据进行分析,最后以实时图形显示出杆力和杆位移的动态数据范围;通过最小二乘法曲线拟合来进一步提高解调电路的线性度,进而提高系统的检测精度。理论分析与数值试验验证了方法的有效性。

关键词:驾驶杆;杆力和位移检测;虚拟仪器;线性度

中图分类号: V241.06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.5010

Force and shift-length detection system for a certain type fighter airplane control stick

Du Tianjun Huang Shichao Liu Shuguo Guan Li

(Army 95430 of PLA, Chengdu 610081, China)

Abstract: This paper proposed a force and shift-length detection method for a certain type fighter airplane control stick. Aimed at the airplane control stick force and shift-length LVDT signals, a hardware who capture these signals was founded via signal conditioning circuit and PCI data collecting card based on virtual instrument technology; a software who analyze the collected signal data was founded based on VC++2010, it can display the dynamic data range of stick force and stick shift-length via real-time curves; linearity of signal conditioning circuit was improved via Least Square Curve Fitting, and then detection precision of system was improved too. Theoretical analysis and experiment results show that the proposed method is effective for stick force and shift-length detection.

Keywords: airplane control stick; stick force and shift-length detection; virtual instrument; linearity

1 引 言

飞机驾驶杆是飞机上用来传递操纵指令,驱动舵面运动的多个装置总和,用于飞机飞行姿态的控制^[1-2]。驾驶员通过操纵飞机的驾驶杆来发送操纵指令,传感器将指令以各种电信号的形式传递给执行机构以实现飞行状态控制,因此驾驶杆是飞机的飞行控制系统的重要组成部分之一,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,并关系到飞机的飞行安全。而对于飞行控制系统的一个重要部分驾驶杆的操作,杆力和杆位移大小在其中扮演着关键作用^[1-4]。飞行员拉杆过大或过猛都有可能

了非常重要的作用。

随着航空科技的发展,目前很多飞机驾驶杆都采用电传系统,已经无法拆卸到实验室进行杆力值和杆位移值校准^[5-6];即使驾驶杆不采用电传系统,可以拆卸回到实验室进行校正,但反复拆卸会损坏传感器,造成巨大经济损失,因此必须寻找一种可以原位进行驾驶杆力和位移参数测试校准的方法。某型歼击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,不能拆回实验室进行校正,必须定期在原位进行驾驶杆力和位移的测试校正。

本文基于 VC++2010 开发环境和工具,利用虚拟仪器技术,构建出友好直观的检测界面,将驾驶杆的力和位移传感器的传感器信号,通过硬件系统进行信号调理和数据采集,将数据引入到系统软件进行数据分析,最后以实

时图形显示出杆力和杆位移的动态数据范围,从而可以调整校正杆力和杆位移的误差,达到精确校正,使得驾驶杆更为精确地完成飞行控制。

2 硬件系统描述

检测系统硬件设计以研华的高性能工控机 IPC610H 为处理平台,集成高精度 PCI 数据采集卡 PCI-1602 和开关量采集卡 PISO-P16R16U,力传感器、位移传感器、信号调理电路及测试电缆附件等组成。力传感器选用型号为 HONEWELL 公司的 3397-100lbs,量程为 $\pm 50 \text{ kg} \cdot \text{N}$ (拉为+,压为-),精度为 0.25% F. S.。位移传感器采用 BY135HT,量程为 0~600 mm,精度为 0.25% F. S.。

2.1 信号调理电路

信号调理电路将各类传感器回传的信号进行预处理,包括开关量信号的规约、直流模拟量的规约、以及 RVDT 传感器和 LVDT 传感器差分信号的解调等,处理后的信号直接交由工控机进行采集^[7-8]。开关量规约主要是将不宜开关量采集板卡直接读取的开关量信号转换为可直接读取的高低电平;直流模拟量规约是将超出采集卡采集范围的直流模拟量按一定比例规约至采集卡的采集范围之内;RVDT 传感器和 LVDT 传感器输出信号的解调是将传感器输出的表征角度或位移的差分信号进行有效值转换,转换后的信号为 $\pm 10 \text{ V}$ 范围内的直流电压信号,可供采集卡直接采集。

该型歼击机驾驶杆中的杆力传感器和杆位移传感器都是 LVDT 传感器,主要用于感受和测量飞机驾驶操纵力和杆位移,也可用于其他有关驾驶、操纵作用力和位移的检测^[1]。在飞机电传操纵中,利用杆力传感器和杆位移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,杆力传感器和杆位移传感器是飞机操纵和飞行控制系统前端重要的信息源。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。

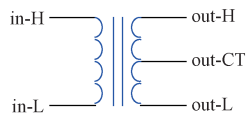


图 1 LVDT 差分放大传感器原理示意

左侧为初级绕组,即输入端;右侧为次级绕组,即输出端。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, $U(\text{out})_{\text{H_CT}}$ 与 $U(\text{out})_{\text{L_CT}}$ 电压值相同,故总输出 $U(\text{out})_{\text{H_CT}} - U(\text{out})_{\text{L_CT}}$ 为零,当初级绕组和次级绕组之间有相对位移时, $U(\text{out})_{\text{H_CT}}$ 与 $U(\text{out})_{\text{L_CT}}$ 即不为零, $U(\text{out})_{\text{H_CT}} - U(\text{out})_{\text{L_CT}}$ 的大小即反映出位移的大小。

LVDT 差分放大传感器输出信号为交流模拟信号,系统的采集资源不能直接进行采集,需要将其解调为直流模拟量。当根据 LVDT 原理, $U(\text{out})_{\text{H_CT}} - U(\text{out})_{\text{L_CT}}$ 与 $U(\text{in})_{\text{H-L}}$ 同向时,表示为传感器有正位移,反之为负位移。解调模块的功能即将该交流模拟信号换算成其有效值对应的直流模拟量。采用 AD630 锁相调理模块和 LM148 放大器对 LVDT 差分放大传感器输出信号进行解调、放大后变换成直流信号送采集卡采集。如图 2 所示, LVDT 差分信号经过 AD630 初步锁相放大调理后,其输出依次接入一个由 LM148 构建的积分放大电路和一个滤波电路,则将交流信号换算成其有效值对应的直流模拟量,可以直接供采集卡直接采集。

2.2 驾驶杆力和位移的测试校准方法

1)将硬件系统中的力传感器和位移传感器用专用夹具固定在飞机驾驶杆的特定位置,将其传感器信号引入系统信号调理电路,经过调理电路处理放大后供采集卡直接采集;2)同时将驾驶杆电传操纵系统中的杆力 LVDT 传感器和杆位移 LVDT 传感器信号引入系统信号调理电路,经过调理电路处理,从而将 LVDT 交流信号换算成其有效值对应的直流模拟量,供采集卡直接采集;3)系统软件将采集到的各信号数据进行分析,最后以实时图形显示出杆力和杆位移的动态数据范围。在飞机座舱里将飞机

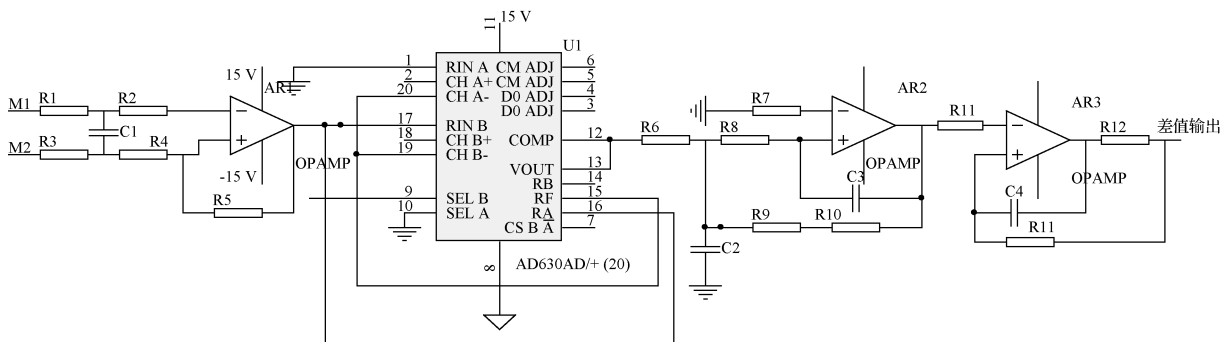


图 2 LVDT 差分放大传感器解调电路

驾驶杆按照“中立位置→后拉极限位置→中立位置→前压极限位置→中立位置”的路线推压一个周期行程,则检测界面显示的杆力-电压曲线或杆力-位移曲线必将是一个闭合曲线,如果此闭合曲线在理论的安全闭合曲线之内,说明此飞机的驾驶杆力和位移值在安全的飞行包络曲线范围内,否则必须进行校正调整,直到杆力曲线在理论的安全闭合曲线之内。

3 系统软件设计

3.1 软件结构

测试系统软件使用 VC++2010 编写,利用 VC++2010 开发环境和工具,基于虚拟仪器开发技术,可以方便地设计出驾驶杆杆力和杆位移测试校准系统软件,构建出友好直观的检测界面。系统软件的开发步骤如下:1)制定

程序的基本框架。根据驾驶杆杆力和杆位移信号参数测量任务,确定程序的基本框架、仪器面板界面、程序中需要的控制函数、软硬件的通信方式和协议;2)创建用户图形界面;3)程序源代码的编制。根据计算机自动生成程序代码及主体函数基本框架,利用 VC++2010 编译环境和 C++编程语言,完成程序的编制;4)调试运行工程文件,将用户界面文件、源代码文件添加到工程文件中,完成程序的编制,进而编译调试程序。系统软件的流程结构如图 3 所示,整个系统以软件主界面为中心,完成了驾驶杆杆力、杆位移检测相关的软件版本识别、系统自检、数据通信、数据采集、数据记录、数据监控以及驾驶杆手柄上的各控制开关的开关量实时检测等功能。设计的软件操作主界面如图 4 所示,限于保密要求,将部分涉密的敏感关键词进行了屏蔽处理。

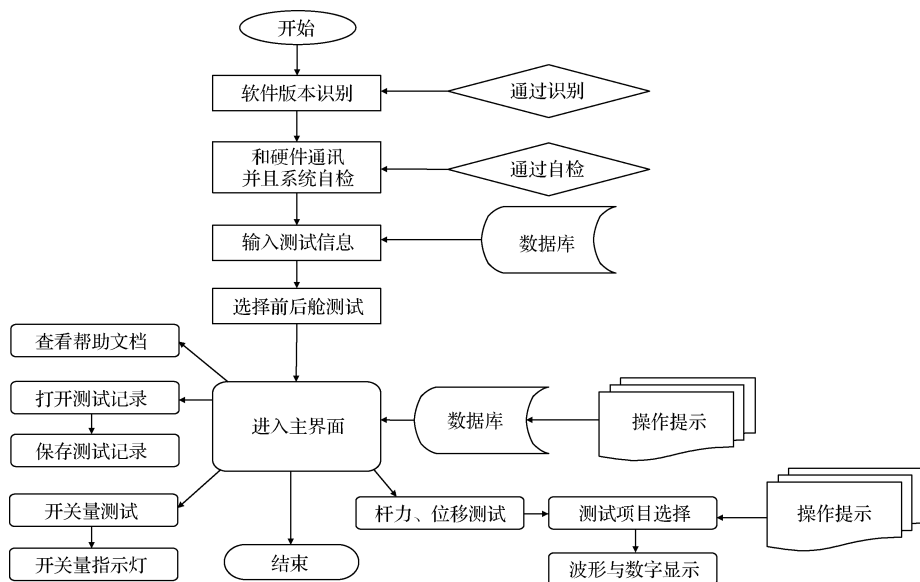


图3 系统程序的流程

3.2 利用最小二乘法曲线拟合来提高调线性度

系统中信号调理电路将各类传感器回传的信号进行预处理,处理后的信号可供采集卡 PCI-1602 直接采集。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,必须修正参数以提高解调电路的线性度,否则会产生极大的系统误差^[9-13]。线性度是信号调理电路和 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。如图 5 所示,理想的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 5 所示的真实线性度曲线,必须对其进行曲线拟合处理,以

使得其接近理想线性度曲线,提高测试精度。

采用了最小二乘法曲线拟合来修正调理系统误差^[14-15]。假设调理电路的输入输出满足以下多项式:

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k \quad (1)$$

其误差为:

$$\Delta E = \sum_{i=1}^m w_i (f(x_i) - P_n(x_i))^2 = \sum_{i=1}^m w_i (f(x_i) - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k)^2 = \sum_{i=1}^m w_i (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k)^2 \quad (2)$$

在此处要求解 a_0, a_1, \dots, a_n , 使得误差 ΔE 最小,则真实线性度曲线会无限接近理想线性度曲线。根据求极值的方法,在公式(2)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:

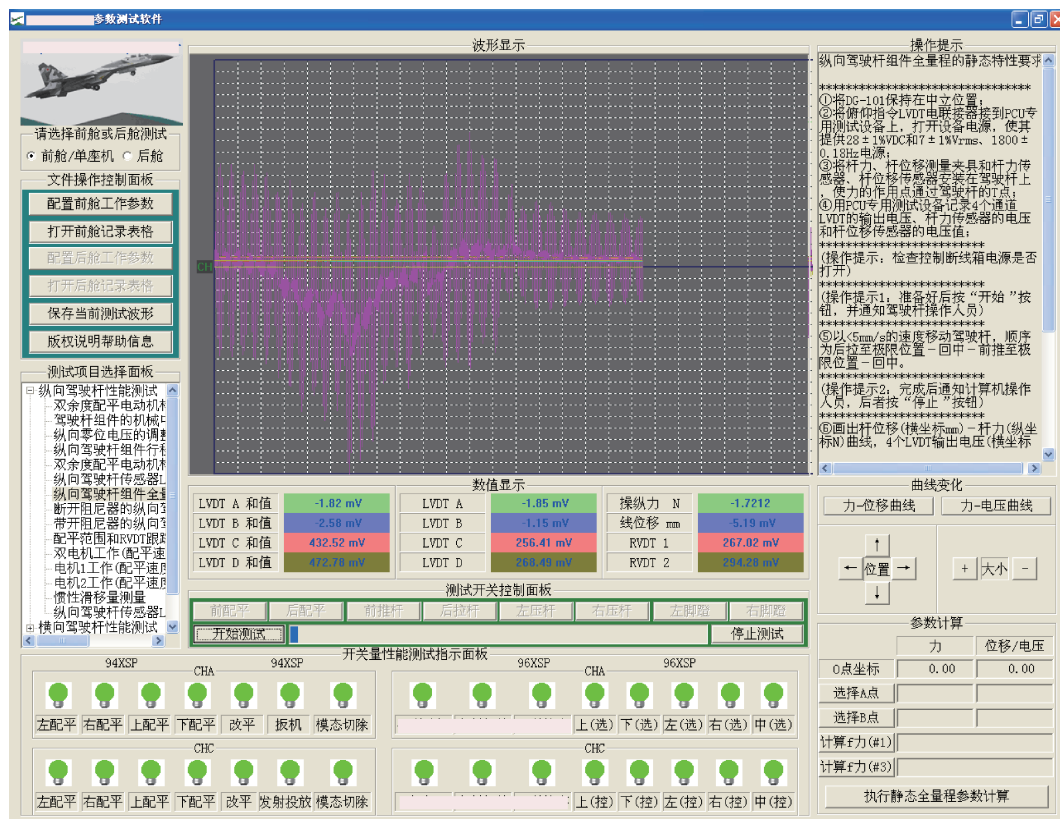


图4 软件操作主界面

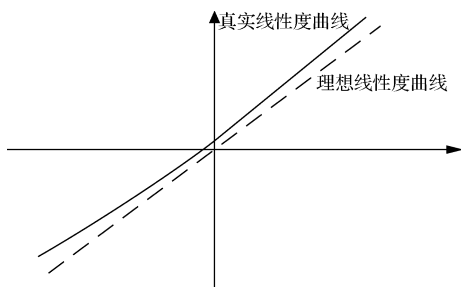


图5 调理电路线性度误差示意

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^m w_i a_0 + \sum_{i=1}^m x_i w_i a_1 + \cdots + \sum_{i=1}^m x_i^n w_i a_n &= \sum_{i=1}^m w_i y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i w_i a_0 + \sum_{i=1}^m x_i^2 w_i a_1 + \cdots + \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} w_i a_n &= \sum_{i=1}^m x_i w_i y_i \\ &\vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n w_i a_0 + \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} w_i a_1 + \cdots + \sum_{i=1}^m x_i^{2n+1} w_i a_n &= \sum_{i=1}^m x_i^n w_i y_i \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a_0} &= \sum_{i=1}^m (-2) w_i \cdot (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a_1} &= \sum_{i=1}^m (-2) x_i^1 w_i \cdot (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k) = 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial E}{\partial a_n} &= \sum_{i=1}^m (-2) x_i^n w_i \cdot (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k) = 0 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$\xrightarrow{\text{整理后}} \left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^m w_i \cdot (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k) &= 0 \\ \sum_{i=1}^m x_i^1 w_i \cdot (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k) &= 0 \\ &\vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n w_i \cdot (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k) &= 0 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$\xrightarrow{\text{用矩阵表示}} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m w_i & \sum_{i=1}^m x_i w_i & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^n w_i \\ \sum_{i=1}^m x_i w_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 w_i & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} w_i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n w_i & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} w_i & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^{2n+1} w_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m w_i y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i w_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n w_i y_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

求解公式(6)所示的方程组,可得到 a_0, a_1, \dots, a_n , 代入公式(1)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:

$$y = ax + b \quad (7)$$

则有:

$$\Delta E = \sum_{i=1}^m [y_i - (ax_i + b)]^2 \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial a} = \sum_{i=1}^m (-2)x_i(y_i - ax_i - b) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b} = \sum_{i=1}^m (-2)(y_i - ax_i - b) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} a = \frac{\sum_{i=1}^m y_i \sum_{i=1}^m x_i - m \sum_{i=1}^m x_i y_i}{(\sum_{i=1}^m y_i)^2 - m \sum_{i=1}^m x_i^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^m x_i y_i \sum_{i=1}^m x_i - \sum_{i=1}^m y_i \sum_{i=1}^m x_i^2}{(\sum_{i=1}^m x_i)^2 - m \sum_{i=1}^m x_i^2} \end{cases} \quad (10)$$

在本文的调理电路和软件系统设计中,具体最小二乘拟合的方法如下:在图2中调理电路板卡的输入端(M1-M2),利用精密交流稳压电源,以0.1V为间隔,在(0VAC, +9VAC)的范围内,依次接入差值电压 V_{M1-M2} 交流信号,记作公式(10)中的 x_i ,利用数据采集卡PCI-1602测定图2调理电路板卡的输出端 V_{out} ,记作公式(10)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(10)即可求出拟合公式(7)。本文得到的杆力LVDT传感器和杆位移LVDT传感器信号解调电路最小二乘拟合公式分别如下:

$$\text{杆力: } V_F = 1.323 \bar{V}_{F_{in}} + 1.12 \quad (11)$$

$$\text{杆位移: } V_L = 1.356 \bar{V}_{L_{in}} + 0.89 \quad (12)$$

4 数值试验

利用本文构建的驾驶杆力和位移检测校准系统对某型歼击机的驾驶杆操纵装置进行了原位驾驶杆力和位移的测试校正试验,测试结果如图6所示。在图6中,显示了红蓝两种闭合曲线,曲线为该型歼击机驾驶杆俯仰方向的杆力-位移曲线,红色曲线代表理想的安全闭合曲线,蓝色曲线代表该架飞机的实际驾驶杆俯仰方向的杆力-位移曲线,如果此闭合曲线在红色的安全闭合曲线之内,说明该架飞机的驾驶杆力和位移值在安全的飞行包络曲线范围内,可以继续使用。如图6所示,蓝色曲线的极值部分在安全闭合曲线内(尾部的超出部分,是位移极限位置时仍在推压驾驶杆造成的正常现象),但中立位置部分有超出红色安全闭合曲线的现象,因此必须通过“中立位置调整顶杆”对驾驶杆操纵装置进行校正调整,“极限位置调整顶杆”可以不需调整,直到整体曲线在理论的安全闭合曲线之内。具体驾驶杆调整方法,这里不再赘述。

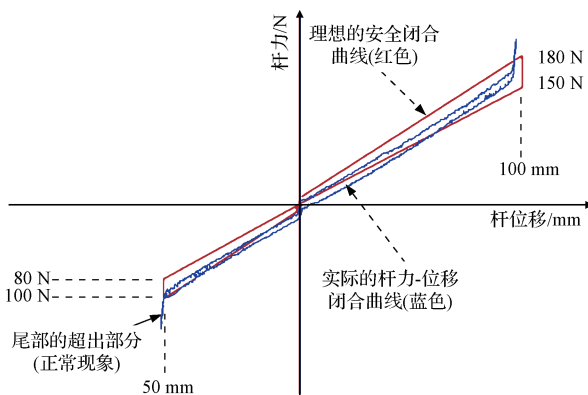


图6 某型歼击机俯仰方向杆力-杆位移测试曲线

5 结 论

飞机驾驶杆操纵装置的杆力和杆位移测试校准在航空测控研究领域具有十分重要的意义,本文基于VC++2010开发环境和工具,利用虚拟仪器技术,将驾驶杆的力和位移传感器的传感器信号,通过硬件系统进行信号调理和数据采集,构建了某型歼击机驾驶杆力和位移测试校准系统。构建的检测界面友好直观,通过最小二乘法曲线拟合来进一步提高解调电路的线性度,进而提高系统的测试精度。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[M]. 成都:中航工业成都飞机设计研究所,2006.
- [2] 李京生. 机载传感器发展与展望[J]. 航空精密制造技术,2006,42(3):1-4.
- [3] 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,2009,25(6):103-104.
- [4] 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.
- [5] 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,2016,35(5):88-90.
- [6] 过峰,俞建峰,陆振中,等. 力传感器关键性能参数自动标定系统[J]. 电子测量技术,2015,38(5):85-88.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 严中毅,李凯. 测量仪器与现代微电子、计算机和软件技术的融合[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(5):631-637.

(下转第82页)