

压阻式差压传感器的迟滞非线性建模与补偿

蒋红娜 白 雪 朱 丽

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘 要: 压力是关系飞行试验的飞行品质与安全的重要测试参数,差压传感器由于自身特性和系统误差等原因,在测试校准过程中引入的迟滞非线性对传感器的精度有很大的影响。根据飞行试验中使用的压差传感器的原理,对其迟滞非线性进行了分析。根据传感器校准过程表现出的迟滞特性,构造迟滞逆算子,建立 T-S 迟滞逆模型,并对传感器联校数据进行补偿。实验仿真结果表明,该迟滞逆模型具有良好的逼近能力,在一定程度上补偿了传感器的迟滞误差,对提高压差传感器的测试精度具有重要意义。

关键词: 迟滞补偿;压差传感器;非线性

中图分类号: TN721.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30

Construction and compensation of hysteresis nonlinearity for piezoresistive differential sensor

Jiang Hongna Bai Xue Zhu Li

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In flight test, pressure is an important test parameter which concerns the flight quality and safety. Due to the characteristics and system errors of the differential pressure sensor, the hysteresis nonlinearity introduced in the process of testing calibration has a great influence on the precision of the sensor. The principle and hysteresis nonlinearity of differential pressure sensor used in flight test was introduced. According to the hysteretic characteristic performed in the process of sensor calibration. The hysteretic inverse operator and T-S hysteretic inverse model was constructed, meanwhile the co-calibrated data of the sensor was compensated. It was suggested that the inverse hysteretic model had favorable approximation ability to compensate the hysteresis error of sensor on the simulation result and has great significance to improve the test precision of the differential pressure sensor.

Keywords: Hysteresis compensation; differential pressure sensor; nonlinearity

1 引 言

在飞行试验中,差压传感器作为测试飞机大气数据以及飞行状态的重要工具。它的测试精度关系着飞行品质的优劣和飞行安全。分析机载压差传感器的测试精度,对提供准确、实时、可靠的压力参数测量具有非常重要的意义。基于弹性敏感元件在被测压力的作用下产生应力特性实现测量的硅压阻式差压传感器在飞行试验中得到了广泛的应用^[1]。在飞行试验机载测试校准工作中,发现硅压阻式差压传感器表现出了明显的迟滞非线性。迟滞性误差作为影响传感器测试精度的重要参数之一,将其建模并加以改善对提高压力测试精度具有重要的意义。

2 扩散硅压阻式传感器原理

压阻效应是固体受到外力后电阻随之改变的性质,压阻传感器便是基于该效应,在半导体材料的基片上采用集成电路工艺制成扩散电阻,从而进行压力测量的一类传感器^[2]。外部压力作用下,半导体材料的压阻效应可描述为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_a \sigma_a + \pi_n \sigma_n \quad (1)$$

式中: ΔR 为电阻的变化量, σ_a 和 σ_n 分别是以电阻条长度方向为参考方向的纵向应力和横向应力。 π_n 和 π_a 分别为纵向压阻系数和横向压阻系数。对于周边固支的厚度为 H , 工作半径为 R 的圆平膜片,在其上表面的半径 r 处,径向应力 σ_r 、切向应力 σ_θ 与所承受的压力 P 之间的关系为 (μ 为平

膜的泊松比):

$$\sigma_r = \frac{3p}{8H^2} [(1+\mu)R^2 - (3+\mu)r^2] \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{3p}{8H^2} [(1+\mu)R^2 - (1+3\mu)r^2] \quad (3)$$

在压阻式传感器的圆平硅膜片上,4个初始电阻值均为 R 的扩散电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 连接成惠斯通电桥如图1所示。

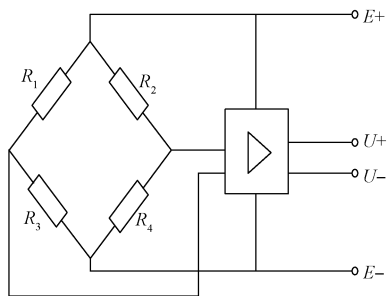


图1 传感器的测试电路

E 为激励桥压, U 为输出电压, ΔU 为扩散电阻的变化量,压力引起的电压变化量 ΔU 为:

$$\Delta U = KE \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (4)$$

3 传感器的迟滞性分析

迟滞非线性^[3]是传感器在全量程范围内正反行程输入-输出曲线不一致的程度。它反映了传感器不可避免的某些缺陷,如间隙、元件腐、材料的内摩擦以及积塞灰尘等。压差传感器分别有高低压两个测量端口,由于其制作工艺的复杂性,相比普通的传感器表现出了更加明显的迟滞非线性如图2所示。

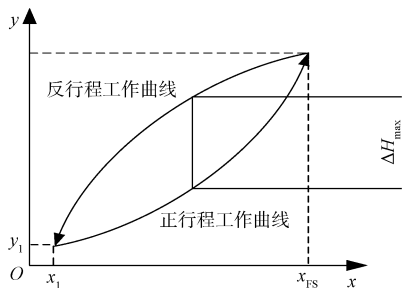


图2 传感器迟滞特性示意图

迟滞非线性的大小一般由实验确定。在压差传感器的校准实验中,同一校准点正行程输出的算术平均值与反行程输出的算术平均值之差:

$$\Delta y_{Hi} = \overline{y_{正i}} - \overline{y_{反i}} (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

传感器迟滞按下式计算:

$$\xi_H = \frac{|\Delta y_H|_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (6)$$

4 压差传感器的迟滞非线性建模

4.1 迟滞非线性建模方法

压差传感器的迟滞曲线具有多值对应的非常规非线性特性,为了提高飞行试验机载测压的精度,对压差传感器的迟滞非线性进行有效控制,必须对其迟滞性建模并加以补偿。

T-S模糊模型^[4]是一种对复杂非线性系统进行建模的有效方法,它的本质是将输入的非线性系统模糊分区,分别对各子空间建立线性模型,通过隶属度函数将各子线性系统连接起来,形成整个系统的全局模糊线性模型。T-S模糊建模方法在复杂非线性系统的建模中具有非常大的优越性。本文主要研究基于T-S模型的迟滞非线性建模,并通过构造迟滞逆算子与非线性系统串联实现对传感器的输出的补偿,使得补偿后的传感器输入输出具有良好的迟滞非线性,提高整个系统的测试精度如图3所示。

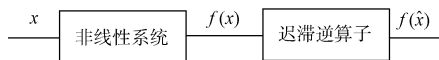


图3 传感器迟滞非线性补偿框图

4.2 迟滞算子的构造

通过引入迟滞算子,模糊的勾画出压差传感器迟滞环的轮廓。迟滞算子能够粗略的表达出随着传感器输入量的变化,迟滞曲线的上升、下降、转折以及次环的形成等信息。由于硅压阻式压差传感器的迟滞具有一定的记忆性,本文通过构造反正切函数作为压差传感器T-S建模的迟滞算子:

$$f(x) = \arctan(x - x_v) + f(x_v) \quad (7)$$

式中: x 和 $f(x)$ 分别表示当前时刻迟滞算子的输入和输出, x_v 和 $f(x_v)$ 分别表示距离当前时刻最近的输入极值以及输入为极值时的输出极值。该算子当前的输出值与距离时刻最近的输入输出极值相关,迟滞算子随着传感器输入压差值的变化不断变换极值点的值,体现出了迟滞的上升、下降以及转折,从而画出了传感器迟滞曲线的轮廓。

4.3 迟滞逆算子的构造

迟滞逆算子^[5]的构造思想与迟滞算子相同,为了尽可能的表达出硅压阻式压差传感器的迟滞逆特性,本文选择幂函数作为该非线性系统的迟滞逆算子:

$$f(x) = (x - x_v)^{1/3} + f(x_v) \quad (8)$$

式中: x 和 $f(x)$ 分别表示当前时刻迟滞逆算子的输入和输出, x_v 和 $f(x_v)$ 分别表示迟滞逆算子距离当前时刻最近的输入极值以及输入为极值时的输出极值。

5 飞行试验压差校准数据迟滞分析及补偿

在机上压力测试系统中,采用KAM500采集器的KAM/ADC/012板卡进行压力传感器的数据采集记录^[6]。该板卡具有24路模拟电压采集通道,每个通道具有14位

的 A/D 转换模块以及可编程的增益、偏置、滤波功能。压差传感器的实验室校准采用传感器与采集器联校的方式模拟机上压力测试状态^[7]。得到终端输出为二进制码值。以目前飞行试验中最常用的压差传感器为 P1662 型扩散硅压阻传感器为例,分析机上压差传感器的迟滞非线性精度传感器校准数据如表 1 所示。

表 1 差压传感器的联校数据

码值 kP	正行 程 1	反行 程 1	正行 程 2	反行 程 2	正行 程 3	反行 程 3
	程 1	程 1	程 2	程 2	程 3	程 3
0	579	595	580	598	594	599
4	7 628	7 680	7 635	7 695	7 640	7 676
8	14 700	14 778	14 708	14 780	14 692	14 758
12	21 762	21 851	21 760	21 854	21 760	21 845
16	28 822	28 912	28 818	28 928	28 815	28 906
20	35 880	35 971	35 875	35 989	35 876	35 985
24	42 931	43 019	42 940	43 039	42 926	43 029
28	49 990	50 058	50 000	50 072	49 985	50 078
32	57 037	57 080	57 048	57 094	57 046	57 103
35	62 316	62 335	62 330	62 352	62 320	62 356

根据迟滞误差的计算公式求出该传感器在各校准点的迟滞性误差,得到传感器大致的迟滞曲线轮廓如图 4 所示。

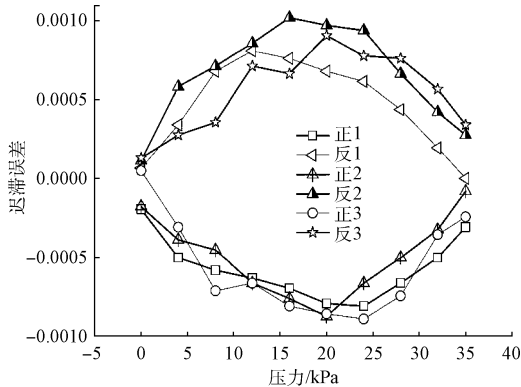


图 4 传感器各校准点的迟滞误差

为了试验 T-S 迟滞逆算子建模的有效性,选择该压差传感器联校数据的前两个循环来逼近文中所建立的迟滞逆模型,用传感器在 1~29 的奇数校验点的测试数据来验证该迟滞逆算子的逼近误差^[8]。在逆模型仿真建模的过程中,使用 MATLAB 模糊工具箱中的 anfis 函数进行模型训练。图 5 表示 T-S 迟滞逆算子模型仿真的结果与传感器实测数据的逼近程度,图 6 给出了该迟滞逆算子的逼近的绝对误差。从仿真结果可以看出,根据硅压阻式压差传感器表现出的多值对应的迟滞特性而构造的幂函数迟滞逆算子可以有效的逼近传感器的迟滞曲线,这就具备了用该方法进行迟滞建模补偿的关键条件。

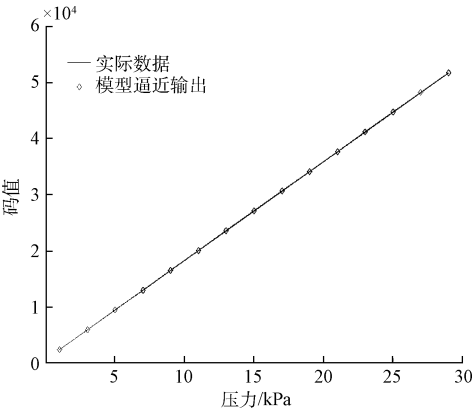


图 5 逆算子模型仿真输出与传感器实测数据的逼近程度

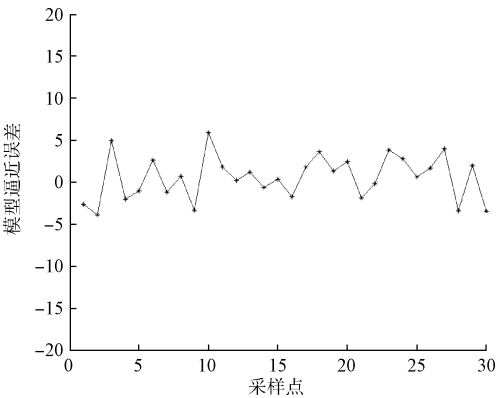


图 6 迟滞逆算子的逼近误差

为了消除硅压阻式压差传感器的迟滞非线性对飞行试验测试精度的影响,将迟滞逆算子置于压差传感器测试数据的后方,即将迟滞逆模型与非线性系统串联^[9]。补偿后的传感器输入输出的迟滞性误差得到了极大改善。利用建立好的迟滞逆模型对传感器联校数据的第三个循环进行补偿,其补偿结果如表 2 所示。

表 2 补偿前后的压差传感器输出数据值

码值 kP	补偿前		补偿后	
	正行程	反行程	正行程	反行程
0	594	599	596	597
4	7 640	7 676	7 648	7 660
8	14 692	14 758	14 712	14 740
12	21 760	21 845	21 784	21 823
16	28 815	28 906	28 835	28 886
20	35 876	35 985	35 896	35 942
24	42 926	43 029	42 946	43 002
28	49 985	50 078	50 023	50 058
32	57 046	57 103	57 068	57 089
35	62 320	62 356	62 330	62 356

(下转第 148 页)