

降低多传感器交叉敏感的法方程组方法

李世维^{1,2}, 刘君华¹, 王群书²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西北核技术研究所, 710024, 西安)

摘要: 针对用线性回归分析法降低多传感器交叉敏感中存在的问题,利用最小二乘法 and 矩阵计算理论,提出用法方程组的方法求解多传感器逆模型的拟合曲面方程的系数. 该方法的优点是简单、快捷,且易于编程实现多元高次拟合曲面方程的系数. 实验结果表明,用法方程组的方法也可以明显地改善多传感器的交叉敏感问题. 融合后压力传感器的温度灵敏度系数 α_s 降低近两个数量级,电流影响系数 α_I 降低一个数量级以上,而零位温度系数 α_0 也下降了 1/3,且拟合曲面方程次数越高,改善的效果越好.

关键词: 交叉敏感; 线性回归; 法方程组; 最小二乘法

中图分类号: TP212.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)06-0057-05

Method of Normal Equations for Reducing Cross-Sensitivity of Multi-Sensors

LI Shiwei^{1,2}, LIU Junhua¹, WANG Qunshu²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: For the problem in reducing cross-sensitivity of multi-sensors by linear regression, a method of normal equations based on the theory of least squares and matrix computations is proposed to solve the coefficient of fitting curved surface equation in the inverse model of multi-sensors, which is simple in programming to evaluate the coefficient of multivariable and higher order equation. The experiment shows that it can obviously reduce the multi-sensor cross-sensitivity, and improve nearly two orders of magnitude for the temperature coefficient of pressure sensor sensitivity, more than one order of magnitude or the electricity coefficient of sensor sensitivity, and three times for the temperature coefficient of zero position, especially for higher orders of fitting curves surface equations; algorithm.

Keywords: cross-sensitivity; linear regression; normal equations; least squares algorithm

传感器的交叉敏感表现在其输出值不只决定于一个主参量,当传感器的其他参量发生变化时,其输出值也要发生变化^[1]. 几乎所有的传感器都存在交叉敏感,其中比较典型的有压阻式压力传感器^[1-2]、光纤光栅传感器^[3-5]以及气体传感器^[6-8]等. 存在交叉敏感的传感器性能不稳定且测量精度低. 为了提高传感器的测量精度,人们提出很多降低传感器交叉敏感的方法,一方面分析造成传感器交叉敏感的

机理,从传感器的硬件结构进行改进和补偿^[2-4],另一方面采用软件的方法进行修正. 采用软件的方法能使传感器的精度更高且成本较低,主要包括回归分析^[2]、神经网络技术^[6-7]与支持向量机^[8]等. 在众多软件方法中,多元线性回归分析法是最基本、直观且实用的方法之一^[1]. 现有的线性回归分析法(曲线拟合)可以解决 2 个传感器的温度交叉敏感问题^[2],当传感器的数目 $n > 2$,且影响传感器输出的各输入

参量之间不能进行降维处理时,或用于拟合曲面方程的次数 $P > 2$ 时,采用该方法虽然在理论上可以实现^[1],但是在实际的使用过程中,计算过程十分繁琐,也很容易出错。

本文根据最小二乘法 and 矩阵计算理论^[9],提出用法方程组的方法求解线性回归分析法中的多元($n > 2$)高次拟合曲面方程的系数,来降低多传感器的交叉敏感。其优点是简便、快捷,且易于编程求解多元高次拟合曲面方程的系数,也是基于最小二乘法的最优解。

1 基本思想

1.1 问题描述

已知压阻式压力传感器输出电压是 U_P ,并且存在对温度 T 与工作电流 I 的交叉灵敏度。若按传统方法只对压力传感器进行一维标定实验,并由获得的输入(压力 P)与输出(电压 U_P)特性曲线来求取被测压力值会有较大误差,因为被测量压力 P 不是输出值 U_P 的一元函数。若工作电流的采样电压 U_I 和温度传感器输出电压 U_T 分别代表工作的电流信息 I 和温度信息 T ,则压力参量 P 用 U_P 及 U_I 、 U_T 的三元函数表示才更完备^[1],即 $P = f(U_P, U_I, U_T)$ 。由三维坐标($U_{P_i}, U_{I_i}, U_{T_i}$)决定的 P_i 在一超平面上,可利用三元曲面拟合方程进行描述

$$P = \alpha_0 + \alpha_1 U_P + \alpha_2 U_I + \alpha_3 U_T + \alpha_4 U_P^2 + \alpha_5 U_I^2 + \alpha_6 U_T^2 + \alpha_7 U_P U_I + \alpha_8 U_P U_T + \alpha_9 U_I U_T + \varepsilon_P \quad (1)$$

式中: $\alpha_0 \sim \alpha_9$ 为常系数; ε_P 高阶无穷小。

如果式(1)中各常系数已知,那么用于检测压力 P 和输出电压 U_P 的三元输入-输出特性就确定了。将采集到的三传感器的输出值 U_P 、 U_T 和 U_I 代入式(1),就可以计算得到传感器的被测参量 P ,因此式(1)就是用于降低多传感器交叉敏感的更完备的模型。

1.2 三元回归方程待定常系数的确定

为确定式(1)所表征的三元回归曲面拟合方程中的常系数,首先要进行三维标定实验获得数据,根据最小二乘法原理,求得的系数满足均方误差最小条件。当三元拟合曲面方程的最高次数为 2 时,则待求常系数的个数为 10 个($\alpha_0 \sim \alpha_9$);当若拟合曲面方程的最高次数为 3 时,则待求常系数的个数应为 20 个($\alpha_0 \sim \alpha_{19}$)。下面以 $\alpha_0 \sim \alpha_9$ 为例说明求取步骤。

将标定实验得到的 $s = m \times n \times l$ (m 为压力标定点的个数, n 为温度标定点的个数, l 为电流标定点的个数)组数据($U_{P_i}, U_{I_i}, U_{T_i}$), $i = 1, 2, \dots, s$ 全部

代入式(1),可以得到 $s = m \times n \times l$ 组方程,包含 t 个未知数、 s 个方程的方程组

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \alpha_0 + \alpha_1 U_{P_1} + \alpha_2 U_{I_1} + \dots + \alpha_9 U_{I_1} U_{T_1} \\ P_2 &= \alpha_0 + \alpha_1 U_{P_2} + \alpha_2 U_{I_2} + \dots + \alpha_9 U_{I_2} U_{T_2} \\ &\vdots \\ P_s &= \alpha_0 + \alpha_1 U_{P_s} + \dots + \alpha_9 U_{I_s} U_{T_s} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

若式(2)中方程的个数 s 大于未知量的个数 t (即 $s > t$)时,被称为超定方程组。将式(2)改写为矩阵形式为

$$P = H \times \alpha \quad (3)$$

式中:压力矩阵 P 为由标定压力值构成的 $s \times 1$ 列矩阵 $[P_1 \ P_2 \ \dots \ P_s]^T$, s 为标定数据的总数; H 为 $s \times t$ 维系数矩阵, t 为待定常系数的个数; α 为 $t \times 1$ 待求常系数矩阵, $\alpha = [\alpha_0 \ \alpha_1 \ \dots \ \alpha_t]^T$ 。

对于矩阵 H ,若采用三元二次拟合方程(以后称为 10 参数的模型),即 $t = 10$,则系数矩阵

$$H_{10} = [1 \ U_P \ U_I \ U_T \ U_P^2 \ U_I^2 \ U_T^2 \ U_P U_I \ U_P U_T \ U_I U_T \ U_P U_I U_T] \quad (4)$$

若三元三次曲面拟合方程(以后称为 20 参数的模型),即 $t = 20$,则系数矩阵为

$$H_{20} = [1 \ U_P \ U_I \ U_T \ U_P^2 \ U_I^2 \ U_T^2 \ U_P U_I \ U_P U_T \ U_I U_T \ U_P^3 \ U_I^3 \ U_T^3 \dots U_P^2 U_I \ U_P^2 U_T \ U_P U_I^2 \ U_P U_T^2 \ U_P U_I U_T \ U_I^2 U_T \ U_I U_T^2] \quad (5)$$

式(4)、式(5)中的 $U_P = [U_{P_1} \ U_{P_2} \ \dots \ U_{P_s}]^T$, $U_I = [U_{I_1} \ U_{I_2} \ \dots \ U_{I_s}]^T$ 和 $U_T = [U_{T_1} \ U_{T_2} \ \dots \ U_{T_s}]^T$ 。

根据矩阵计算理论,一般情况下超定方程组无解(此时为矛盾方程组),这时需要寻找方程组的一个“最近似”的最优解。记 $r = P - H\alpha$,称使 $\|r\|_2$ 最小的解 α^* 为方程组 $H\alpha = P$ 的最小二乘解。

定理 1 α^* 是方程组 $H\alpha = P$ 的最小二乘解的充分必要条件为 α^* 是 $H^T H\alpha = H^T P$ 的解。

证明 充分性。若存在 t 维向量 α^* ,使得 $H^T H\alpha = H^T P$ 。任取一 t 维向量 $\bar{\alpha} \neq \alpha^*$,令 $y = \bar{\alpha} - \alpha^*$,则 $y \neq 0$,且

$$\begin{aligned} \|P - H\bar{\alpha}\|_2^2 &= \|P - H\alpha^* - Hy\|_2^2 = \\ &= (P - H\alpha^* - Hy, P - H\alpha^* - Hy) = \\ &= (P - H\alpha^*, P - H\alpha^*) - 2(P - H\alpha^*, Hy) + \\ &+ (Hy, Hy) = \|P - H\alpha^*\|_2^2 - 2y^T H^T (P - H\alpha^*) + \\ &+ \|Hy\|_2^2 = \|P - H\alpha^*\|_2^2 + \\ &+ \|Hy\|_2^2 \geq \|P - H\alpha^*\|_2^2 \end{aligned}$$

所以 α^* 是 $H\alpha = P$ 的最小二乘解。

必要性. $\boldsymbol{r}$ 的第 i 个分量为 $r_i = p_i - \sum_{k=1}^t h_{ik} \alpha_k$, $i = 1, 2, \dots, s$, 记

$$\|\boldsymbol{r}\|_2^2 = I(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_t) \Rightarrow$$

$$\|\boldsymbol{r}\|_2^2 = \sum_{i=1}^s (p_i - \sum_{k=1}^t h_{ik} \alpha_k)^2$$

由多元函数求极值的必要条件, 可得

$$\frac{\partial I}{\partial \alpha_j} = -2 \sum_{i=1}^s (p_i - \sum_{k=1}^t h_{ik} \alpha_k) h_{ij} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, t$$

$$\sum_{k=1}^t \left[\left(\sum_{i=1}^s h_{ij} h_{ik} \right) \right] \alpha_k = \sum_{i=1}^s h_{ij} p_i \quad j = 1, 2, \dots, t$$

(6)

根据线性代数知识, 式(6)写成矩阵形式为

$$\boldsymbol{H}^T \boldsymbol{H} \boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{H}^T \boldsymbol{P} \quad (7)$$

它是关于 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_t$ 的线性方程组, 称为正规方程组或法方程组.

下面, 讨论式(7)解存在的惟一性. 由于 $\boldsymbol{H}^T \boldsymbol{H}$ 是 t 阶方阵, 且是对称阵. 当 $\boldsymbol{H}$ 的列向量线性无关时, 秩 $R(\boldsymbol{H}) = t$, 对 $\forall \boldsymbol{y} \neq 0$, $\exists H\boldsymbol{y} \neq 0$. 所以, $\boldsymbol{y}^T (\boldsymbol{H}^T \boldsymbol{H}) \boldsymbol{y} = \boldsymbol{H} \boldsymbol{y}, \boldsymbol{H} \boldsymbol{y}) = \|\boldsymbol{H} \boldsymbol{y}\|_2^2 > 0$, 可见 $\boldsymbol{H}^T \boldsymbol{H}$ 是正定矩阵, 必有 $\det(\boldsymbol{H}) > 0$, 故式(7)的解存在且惟一

$$\boldsymbol{\alpha} = (\boldsymbol{H}^T \boldsymbol{H})^{-1} \boldsymbol{H}^T \boldsymbol{P} \quad (8)$$

对于本文讨论的问题, 因为压力传感器输出、电流传感器输出电压和温度传感器输出电压之间是线性无关的, 因此对于 10 参数模型的系数矩阵 $\boldsymbol{H}_{10}$, 其秩为 $R(\boldsymbol{H}_{10}) = 10$, 同理 20 参数模型的系数矩阵的秩为 $R(\boldsymbol{H}_{20}) = 20$.

2 实验标定与结果

2.1 实验标定

在不同的工作温度 T 、不同工作电流 I 的条件下, 对 JCY-201 型压阻式压力传感器的静态输入特性进行标定, 共获得 $s = m \times n \times l = 216$ 组标定数据, 各标定点的数量应能满足最小二乘法的样本数量要求. 训练样本标定点的详细情况如表 1 所示. 由于标定样本的数据量太大, 为了简化, 表 2 只列出部分标定值(未写序号的数据略去).

表 1 实验用物理量标定点的数值及数量

序号	1	2	3	4	5	6
P/MPa	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$T/^{\circ}\text{C}$	25	35	39	49	55	64
I/mA	6	7	8	9	10	11

表 2 JCY-201 型压力传感器三维标定实验数据

序号	P/MPa	I/mA	$T/^{\circ}\text{C}$	U_I/V	U_T/V	U_P/V
1	0.0	6.0	25.0	0.6	5.62	0.325
2	0.1	6.0	25.0	0.6	5.62	0.834
3	0.2	6.0	25.0	0.6	5.62	1.329
4	0.3	6.0	25.0	0.6	5.62	1.825
5	0.4	6.0	25.0	0.6	5.62	2.232
6	0.5	6.0	25.0	0.6	5.62	2.819
7	0.0	7.0	25.0	0.7	6.56	0.321
8	0.1	7.0	25.0	0.7	6.56	0.925
9	0.2	7.0	25.0	0.7	6.56	1.503
10	0.3	7.0	25.0	0.7	6.56	2.08
105	0.2	11.0	39.0	1.1	10.54	2.163
106	0.3	11.0	39.0	1.1	10.54	3.073
107	0.4	11.0	39.0	1.1	10.54	3.985
108	0.5	11.0	39.0	1.1	10.54	4.898
109	0.0	6.0	49.0	0.6	5.82	0.154
110	0.1	6.0	49.0	0.6	5.82	0.747
111	0.2	6.0	49.0	0.6	5.82	1.243
112	0.3	6.0	49.0	0.6	5.82	1.739
113	0.4	6.0	49.0	0.6	5.82	2.237
114	0.5	6.0	49.0	0.6	5.82	2.736
115	0.0	7.0	49.0	0.7	6.8	0.13
116	0.1	7.0	49.0	0.7	6.8	0.825
117	0.2	7.0	49.0	0.7	6.8	1.403
118	0.3	7.0	49.0	0.7	6.8	1.983
213	0.2	11.0	64.0	1.1	10.92	1.978
214	0.3	11.0	64.0	1.1	10.92	2.889
215	0.4	11.0	64.0	1.1	10.92	3.802
216	0.5	11.0	64.0	1.1	10.92	4.718

2.2 实验结果

待定常系数矩阵 $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_0 \ \alpha_1 \ \dots \ \alpha_t]^T$ 是通过在 Matlab 环境下编程计算求得的. 首先将三维标定实验得到的数据 p_i 和 $(U_{P_i}, U_{I_i}, U_{T_i})$, $i = 1, 2, \dots, s$ 输入到程序中, 然后根据式(4)、式(5)分别计算 10 参数模型的系数矩阵 $\boldsymbol{H}_{10}$ 和 20 参数模型的系数矩阵 $\boldsymbol{H}_{20}$, 将 $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{H}_{10}$ 、 $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{H}_{20}$ 分别代入式(8)就可以解得所求系数, 具体数值见表 3 和表 4. 将求得的常系数代入式(5)中, 就可以求得相应的各个标定点的数
据融合的计算值 $\hat{p}$, 如表 5、表 6 所示.

表 3 拟合超曲面三元二次方程的常系数 $\alpha_0 \sim \alpha_9$ 的计算值

待定系数	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9
具体数值	0.168	0.287	-1.748	0.125	0.002	1.609	0.007	-0.142	-0.003	-0.200

表 4 拟合超曲面三元三次方程的常系数 $\alpha_0 \sim \alpha_{19}$ 的计算值

待定系数	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9
具体数值	0.138	0.435	-2.473	0.175	0.005	1.989	-0.006	-0.419	-0.012	-0.038
待定系数	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}	α_{15}	α_{16}	α_{17}	α_{18}	α_{19}
具体数值	-0.001	614.092	-0.679	-0.003	0.001	-0.509	-0.007	0.141	19.712	-190.669

表 5 10 参数模型的计算结果

$T/^\circ\text{C}$	P/MPa	$I=6\text{ mA}$		$I=7\text{ mA}$		$I=8\text{ mA}$		$I=10\text{ mA}$		$I=11\text{ mA}$	
		$\hat{P}/\text{MPa}$	$\Delta P/\text{MPa}$	$\hat{P}/\text{MPa}$	$\Delta P/\text{MPa}$	$\hat{P}/\text{MPa}$	$\Delta P/\text{MPa}$	$\hat{P}/\text{MPa}$	$\Delta P/\text{MPa}$	$\hat{P}/\text{MPa}$	$\Delta P/\text{MPa}$
39	0	0.0232	0.023	0.009	0.009	0.001	0.001	0.006	0.006	0.020	0.020
	0.500	0.490	-0.010	0.506	0.006	0.514	0.014	0.499	-0.001	0.497	-0.003
49	0	-0.001	-0.001	-0.016	-0.016	-0.024	<u>-0.024</u>	-0.016	-0.016	-0.002	-0.002
	0.500	0.483	<u>-0.017</u>	0.499	-0.001	0.506	0.006	0.502	0.002	0.488	-0.012
55	0	0.016	0.016	0.001	0.001	-0.006	-0.006	-0.002	-0.002	0.012	0.012
	0.500	0.484	-0.016	0.498	-0.002	0.508	0.008	0.503	0.003	0.490	-0.010

注:下划线的数字分别为压力传感器零点和满量程的压力融合计算值与标定值之间的最大偏差(表 6 同)。

表 6 20 参数模型的计算结果

$T/^\circ\text{C}$	P/MPa	$I=6\text{ mA}$		$I=7\text{ mA}$		$I=8\text{ mA}$		$I=10\text{ mA}$		$I=11\text{ mA}$	
		$\hat{P}/\text{MPa}$	$\Delta P/\text{MPa}$	$\hat{P}/\text{MPa}$	$\Delta P/\text{MPa}$	$\hat{P}/\text{MPa}$	$\Delta P/\text{MPa}$	$\hat{P}/\text{MPa}$	$\Delta P/\text{MPa}$	$\hat{P}/\text{MPa}$	$\Delta P/\text{MPa}$
39	0	0.011	0.011	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	0.006	0.006
	0.500	0.503	0.003	0.506	0.006	0.504	0.004	0.490	<u>-0.010</u>	0.500	0.000 4
49	0	-0.012	-0.012	-0.014	<u>-0.014</u>	-0.0124	-0.014	-0.006	-0.006	-0.009	-0.009
	0.500	0.496	-0.004	0.501	0.001	0.499	-0.001	0.499	-0.002	0.500	-0.001
55	0	0.005	0.005	0.002	0.002	0.004	0.004	0.008	0.008	0.007	0.007
	0.500	0.497	-0.003	0.511	-0.000 4	0.502	0.002	0.501	0.001	0.504	0.004

3 融合处理效果评价

3.1 融合前各系数的计算值

由表 2 标定实验数据可得:满量程输出值 $U_{\text{F.S}}=4.928\text{ V}$,当温度的变化范围 $\Delta T=39\text{ }^\circ\text{C}$ (由 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 至 $64\text{ }^\circ\text{C}$),电流由 6 mA 至 11 mA ,变动 $\Delta I=5\text{ mA}$ 时,零点值的最大变化范围 $\Delta U_{\text{om}}=0.356\text{ V}$ (由 0.328 V 至 -0.028 V),满量程输出值由 4.928 V 下降到 2.710 V ,输出变化范围 $\Delta U_{\text{m}}=-2.218\text{ V}$,

故有

$$\alpha_0 = \frac{|\Delta U_{\text{om}}|}{U_{\text{F.S}} \times \Delta T} = 1.852 \times 10^{-3} (^\circ\text{C}^{-1})$$

$$\alpha_s = \frac{|\Delta U_{\text{m}}|}{U_{\text{F.S}} \times \Delta T} = 1.154 \times 10^{-2} (^\circ\text{C}^{-1})$$

条件(ΔU_{m} 、 $U_{\text{F.S}}$)同前,电流变动 $\Delta I=5\text{ mA}$,则有电流影响分数

$$\alpha_I = \frac{|\Delta U_{\text{m}}|}{U_{\text{F.S}} \times \Delta I} = 9.002 \times 10^{-2} (\text{mA}^{-1})$$

3.2 融合后各系数的计算值

在 $\Delta T=39\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta I=5\text{ mA}$ 的变化范围内,10 参数零点融合计算值的最大偏差 $|\Delta P'_{\text{om}}|=0.024\text{ }3\text{ MPa}$;满量程压力 $P_{\text{F.S}}=0.5\text{ MPa}$,其融合计算值的最大偏差量 $|\Delta P'_{\text{m}}|=0.016\text{ }9\text{ MPa}$,则有

$$\alpha_0 = \frac{|\Delta P'_{\text{om}}|}{P_{\text{F.S}} \times \Delta T} = 1.246 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

$$\alpha_s = \frac{|\Delta P'_{\text{m}}|}{P_{\text{F.S}} \times \Delta T} = 8.667 \times 10^{-4} (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

$$\alpha_1 = \frac{|\Delta P'_{\text{m}}|}{P_{\text{F.S}} \times \Delta I} = 6.760 \times 10^{-3} (\text{mA}^{-1})$$

同理,20 参数的零点融合计算值的最大偏差 $|\Delta P'_{\text{om}}|=0.014\text{ }4\text{ MPa}$,满量程压力融合计算值的最大偏差量 $|\Delta P'_{\text{m}}|=0.009\text{ }9\text{ MPa}$,则有

$$\alpha_0 = \frac{|\Delta P'_{\text{om}}|}{P_{\text{F.S}} \times \Delta T} = 7.385 \times 10^{-4} (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

$$\alpha_s = \frac{|\Delta P'_{\text{m}}|}{P_{\text{F.S}} \times \Delta T} = 5.077 \times 10^{-4} (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

$$\alpha_1 = \frac{|\Delta P'_{\text{m}}|}{P_{\text{F.S}} \times \Delta I} = 3.960 \times 10^{-3} (\text{mA}^{-1})$$

3.3 结果比较

比较融合前后的各系数值可以看出,融合后压力传感器的温度灵敏度系数 α_s 降低了近两个数量级,电流影响系数 α_1 降低了一个数量级以上,而零位温度系数 α_0 也下降了 1/3. 比较采用两种参数模型融合的结果,可以明显看出 20 参数模型的结果要明显优于 10 参数模型的融合结果,这也与所预期的相吻合.

4 结 论

- (1)法方程组法可以用于降低多传感器交叉敏感的影响,并明显地改善传感器的性能.
- (2)拟合方程中的常系数越多,即拟合曲面的次数较高,传感器性能改善的效果越好.
- (3)法方程组法简便、快捷、易于编程实现,尤其对多传感器($n>2$)数据融合,当拟合曲面的次数越高时,简便、快捷的优势越凸显.

参考文献:

[1] 刘君华. 智能传感器系统[M]. 陕西:西安电子科技大学出版社,1999.

[2] 李强,梁莉,刘桢,等. 具有温度补偿功能的智能压力传感器系统[J]. 仪器仪表学报,2008,29(9):1934-1937.

LI Qiang, LIANG Li, LIU Zhen, et al. Intelligent pressure sensor system with temperature compensation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29 (9):1934-1937.

[3] 董玉明,张旭苹,路元刚,等. 布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题[J]. 光学学报,2007,27(2):197-201. DONG Yuming, ZHANG Xuping, LU Yuangang, et al. Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 197 -201.

[4] 张祝林,杨振坤,伍辉华,等. 双光纤布拉格光栅温度和应变传感研究[J]. 西安交通大学学报,2004,38 (6):607-610. ZHANG Zhulin, YANG Zhenkun, WU Huihua, et al. Temperature and strain-sensed researches of double fiber Bragg gratings[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(6): 607-610.

[5] 李国利,李志全. 光纤光栅应变传感测量中的温度补偿问题[J]. 激光与光电子学进展,2005,42(4):25-28. LI Guoli, LI Zhiquan. Research of the temperature compensation for strain sensing measurement of fiber Bragg grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(4): 25-28.

[6] 高峰,董海鹰,胡彦奎,等. 基于 BP 神经网络的传感器交叉敏感性抑制[J]. 传感器技术,2005,24(2):22-26. GAO Feng, DONG Haiying, HU Yankui, et al. Sensor cross-sensitivity restraining based on BP neural network[J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24 (2): 22-26.

[7] 毕海军,傅圣雪,冯遵成,等. Labview 设计中压力传感器的 RBF 神经网络温度补偿[J]. 中国海洋大学学报,2004,34(6):1041-1044. BI Haijun, FU Shengxue, FENG Zhuncheng, et al. RBF neural network temperature compensation for a pressure transducer based on Labview[J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(6): 1041-1044.

[8] 林继鹏,刘君华. 基于小波的支持向量机算法研究[J]. 西安交通大学学报,2005,39(8):816-819. LIN Jipeng, LIU Junhua. Algorithm research on wavelet support vector machine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(8): 816-819.

[9] GOLUB G H, VAN LOAN C F. 矩阵计算[M]. 袁亚湘,译. 北京:科学出版社,2001.

(编辑 杜秀杰)