

压阻式压力传感器温度补偿技术的研究及应用

张艳华 陈玉玲 赵爽 窦海峰

(北京强度环境研究所 北京 100076)

摘要: 压阻式压力传感器易受温度影响产生零点漂移和灵敏度漂移,为了降低环境温度对传感器输出的影响,首先分析了传感器产生温度漂移误差的原因,针对传感器存在的温度漂移误差和输出信号的非线性介绍了一种硬件温度补偿方法和基于 MAX1452 的软件温度补偿方法,着重阐述了 MAX1452 的补偿原理以及对传感器的补偿过程。最后通过温度试验和温度循环试验比较分析了以上两种温度补偿方法,试验结果表明软件补偿方法具有更加优良的补偿效果,在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的精度小于 0.5% 。

关键词: 压阻式压力传感器;温度漂移误差;温度补偿;温度试验

中图分类号: TP212.11;TN705 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 53510

Research on method of temperature compensation for piezoresistive pressure sensor

Zhang Yanhua Chen Yuling Zhao Shuang Dou Haifeng

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Piezoresistive pressure sensor is easily affected by temperature to make zero drift and sensitivity drift. To reduce the influence coming from temperature, the reasons of the temperature drift error was analyzed at first. Then a hardware temperature compensation method and a software temperature compensation method based on MAX1452 were introduced for the temperature errors and the no-liner of the sensor. The principles of the temperature compensation based on MAX1452 and executive processes were emphatically described. Finally, these two temperature compensation methods were compared and analyzed through temperature test and temperature cycling test, the results show that the software temperature compensation method was a more excellent method, the measurement accuracy in the range of $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ is smaller than 0.5% .

Keywords: piezoresistive pressure sensor; temperature drift error; temperature compensation; temperature test

1 引言

基于 MEMS 技术制作的压阻式压力传感器具有灵敏度高、可靠性好、响应速度快、低功耗、易于微型化和集成化等很多优点,在航空、航天、船舶、生物医学工程、石油化工等领域应用广泛^[1-2]。由于半导体材料的压阻系数具有较大的温度系数,所以压阻传感器的输出易受温度影响^[3],在实际工程应用中为使传感器的技术指标及性能不受温度变化影响而采取的一系列技术措施称为温度补偿技术^[4]。对传感器进行温度补偿,降低传感器温度误差并对信号进行非线性修正是传感器设计领域一项重要的工作^[5-8]。

传感器的温度误差主要为包括零点温度漂移和灵敏度温度漂移,目前常见的温度补偿方法主要分为硬件补偿方

法和软件补偿方法,相比较而言,硬件补偿方法存在精度较低,通用性差、调试困难等缺点,不利于批量化应用,而基于数字信号处理技术的软件补偿方法则能够完美克服以上缺点,成为了当前传感器温度补偿技术的研究热点^[9]。

2 传感器的温度误差

2.1 零点温度漂移

由于温度变化导致传感器零点发生偏离,叫零点温度漂移。

压阻式压力传感器工作原理如图 1 所示,传感器采用恒流源 IC 供电, R_1 、 R_3 为正应力电阻, R_2 、 R_4 为负应力电阻,当有外界压力作用在感压膜片上时,膜片上的惠斯通电桥相应发生形变,导致 R_1 、 R_3 的阻值增加, R_2 、 R_4 的阻值减小。

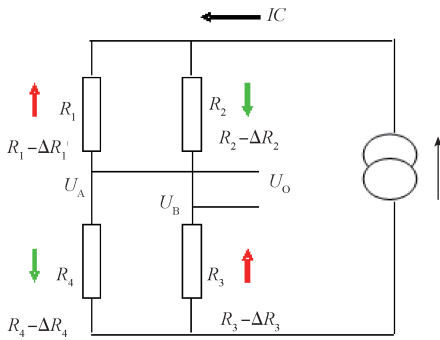


图1 惠斯通电桥的工作原理

当没有对感压膜片施加外界压力时,传感器输出为零点 U_o :

$$U_o = \frac{(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} I_c \quad (1)$$

设 $P = R_1 R_3 - R_2 R_4$, $Q = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$, 则:

$$U_o = \frac{P}{Q} I_c \quad (2)$$

若用 R_i ($i=1, 2, 3, 4$)表示桥臂电阻阻值, R_{oi} 表示 0°C 桥臂电阻阻值, α_i ($i=1, 2, 3, 4$)代表桥臂电阻的温度系数, 则:

$$R_i = R_{oi}(1 + \alpha_i T) \quad (3)$$

由于电流源 I_c 恒定, 则:

$$\frac{\partial U_o}{\partial T} = I_c \left(\frac{\partial P}{\partial T} - \frac{P \partial Q}{Q^2 \partial T} \right) = \frac{U_o}{P} \frac{\partial P}{\partial T} - \frac{I_c P}{Q^2} \frac{\partial Q}{\partial T} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知:

$$\frac{\partial P}{\partial T} = R_{o1} R_{o3} (\alpha_1 + \alpha_3) - R_{o2} R_{o4} (\alpha_2 + \alpha_4) + 2(R_{o1} R_{o3} \alpha_1 \alpha_3 -$$

$$R_{o2} R_{o4} \alpha_2 \alpha_4) T \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial T} = \left(\sum R_{oi} + \sum \alpha_i \right) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

当 R_1, R_2, R_3, R_4 相近时, 相比于 $\frac{\partial P}{\partial T}$, $\frac{I_c P}{Q^2} \frac{\partial Q}{\partial T}$ 可忽略不计, 则:

$$\frac{\partial U_o}{\partial T} = \frac{I_c}{Q} [R_{o1} R_{o3} (\alpha_1 + \alpha_3) - R_{o2} R_{o4} (\alpha_2 + \alpha_4) + 2(R_{o1} R_{o3} \alpha_1 \alpha_3 - R_{o2} R_{o4} \alpha_2 \alpha_4) T] \quad (7)$$

由式(7)可知, 零点温度漂移的根本原因在于四个桥臂电阻的阻值和温度系数不能完全匹配。由于桥臂电阻位置的离散特性, 利用扩散工艺进行的电阻浓度掺杂很难完全一致, 因此桥臂电阻的阻值和温度系数很难精确相等。此外由于电阻工作时的发热会引起温度分布的不均匀, 即便组成电桥的桥臂电阻参数完全匹配, 传感器也可能存在零点漂移^[10]。

2.2 灵敏度温度漂移

当环境温度发生变化时, 传感器的灵敏度也会随之变化, 这种现象就是灵敏度温度漂移。如图1所示, 当传感器感受压力时感压膜片发生形变, 传感器输出为:

$$U_o =$$

$$\frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 - \Delta R_2)(R_4 - \Delta R_4)}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_2 - \Delta R_4)} I_c \quad (8)$$

假设 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, 且 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R$, 则:

$$U_o = \Delta R I_c$$

由式(9)可知, 灵敏度温度漂移也与桥臂电阻的阻值有关, 同样受温度系数影响。

3 传感器温度补偿方法

在工程应用中, 传感器的温度补偿通常都是依靠外电路进行, 电路温度补偿方法包括硬件补偿和软件补偿两种。

3.1 硬件补偿方法

硬件补偿方法多数通过在桥臂上串并连电阻网络^[11]或者桥外串并联热敏电阻元件实现补偿。一种常见硬件补偿方法如图2所示, 在运算放大器输入端加入热敏电阻 R_T , 根据电路参数和 R_T 阻值计算调整补偿电阻 R_3 和调零电阻(R_3, R_4)的阻值实现传感器的零点温度补偿; 根据温度对传感器满度输出的影响调整运算放大电路的放大倍数实现灵敏度补偿。

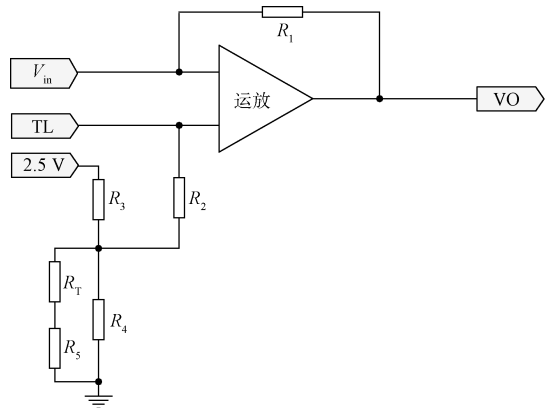


图2 热敏电阻温度补偿电路原理

硬件温度补偿方法往往具有绝佳的动态响应特性, 但由于传感器零点和灵敏度温度漂移差异性较大, 所以调试过程较复杂, 对操作人员的经验要求较高, 不利于实现批量化工程应用。

3.2 软件温度补偿

软件补偿是基于数字信号处理技术的补偿方法。目前,

软件温度补偿方法则主要为3种: 1) 将传感器输出采集至上位机然后运用数据处理模型对测量数据进行温度补偿^[12], 该方法具有较高的补偿精度, 但补偿过程需要上位机支持, 体积较大不方便携带; 2) 单片机和温度传感器同时使用实现传感器温度补偿, 该方法使用灵活, 但是补偿过程需要使用温度传感器, 外围电路较复杂, 不易实现小型化^[13]; 3) 专用信号调理芯片实现传感器温度补偿, 该方法

具有集成度高、体积小、成本低、精度高、使用简单、便于批量化生产等优点,是一种先进的温度补偿技术。

MAX1452 是美国 MAXim 公司推出一款高度集成的专用信号调理芯片,内部集成温度传感器,具有放大、校准和温度补偿功能,其综合工作特性逼近传感器所固有的可重复能力,可同时实现零点和灵敏度的补偿。该芯片还可用于加速度传感器、湿度传感器的温度补偿及校准。补偿

电路主要由稳压源、信号调理芯片 MAX1452 和惠斯通电桥组成,如图 3 所示。稳压源给电路提供 +5 V 稳定电压,信号调理芯片通过 BDR 管脚给电桥供电,电桥输出信号通过 INM 和 INP 管脚反馈到芯片,MAX1452 对反馈的检测信号进行温度补偿和放大,将最终补偿后的电压值通过 OUT 管脚输出。MAX1452 为 SSOP-16 封装,功耗仅为 2 mA,适于应用于便携式产品。

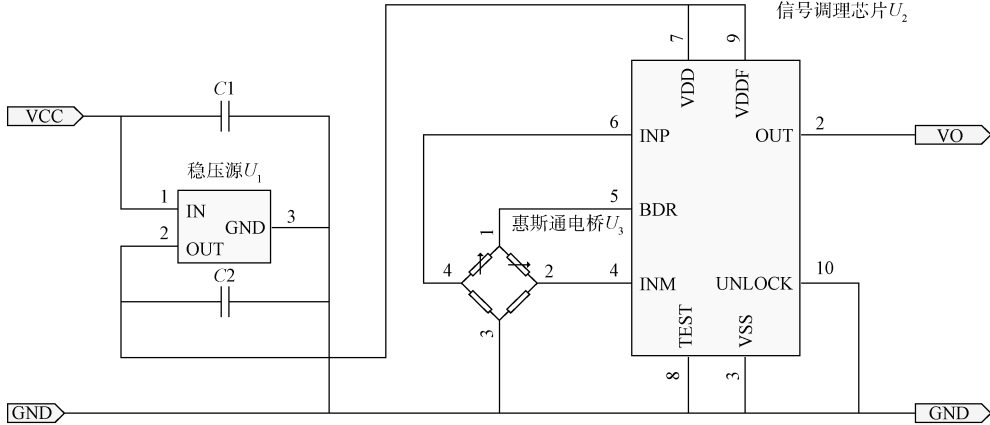


图 3 MAX1452 温度补偿电路原理

3.3 软件温度补偿工作原理

MAX1452 能提供 $-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的温漂补偿,在这个温度区间内每隔 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对应一个补偿点,每个补偿点在芯片内部都对应了一个零点补偿值和满度补偿值。全部补偿值通过最小二乘法生成温度补偿曲线,补偿曲线对传感器的零点漂移曲线进行温度补偿和非线性调整,零点温度补偿过程如图 4 所示。

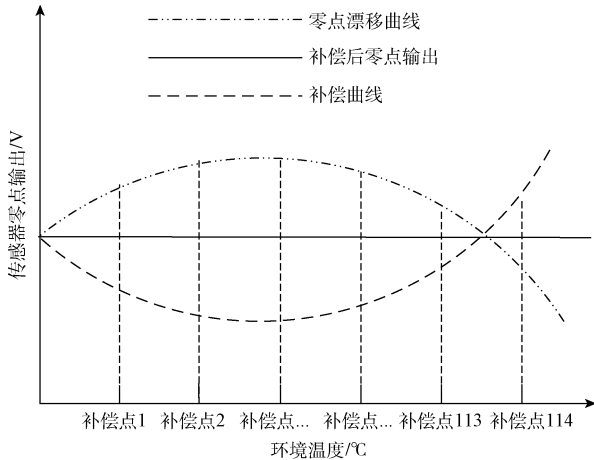


图 4 零点温度补偿

MAX1452 温度补偿原理如图 5 所示,芯片内部集成了一片温度传感器,每 1 ms 给出一个当前温度检测信号并通过一个 8 位 ADC 转换为查询片内寄存器的指针 Uindex1 和 Uindex2;指针 Uindex1 和 Uindex2 分别在满

度补偿表 FSO TABLE 和零点补偿表 OFFSET TABLE 中查询出当前温度对应的补偿点的补偿数据,该补偿数据通过对应的 16 位 (DAC) 转换为满量程补偿值 U_{iso} 、 U_{isotc} ,零点补偿值 U_{offset} 、 $U_{offsetc}$; U_{iso} 和 U_{isotc} 通过加法器 adder1 共同作用于电流源来改变电桥的激励电压 U_b 大小,实现调节满程输出电压,从而对传感器的灵敏度进行温度补偿。相比于硬件补偿,软件补偿方法可充分发挥计算机的运算,判断和记忆的功能,还可以充分利用误差补偿理论的最新研究成果。

4 测试与试验

为了验证补偿效果,决定采用两种补偿方法对同一个传感器进行温度补偿,传感器选用 MEAS 公司的 IC86 压力传感器,补偿完成后进行温度实验和温度循环试验。该传感器的理论工作直线如图 6 所示,输出为 $0.2\sim 4.8\text{ V}$ 的电压信号, P_{max} 为传感器满度压力值。

在标准活塞式压力计上分别对硬件补偿和软件补偿后的传感器进行校准,常温性能指标如表 1 所示,比对两种方法测试数据可知常温下软件温度补偿方法具有更加优良的补偿精度和线性度。

4.1 温度试验

温度试验原理如图 7 所示,将传感器装到加压工装上,工装和传感器放入温度试验箱中,工装通过油管与箱外活塞式压力计连接,传感器通过测试电缆与箱外电源和数字表连接。温度试验条件如表 2 所示。

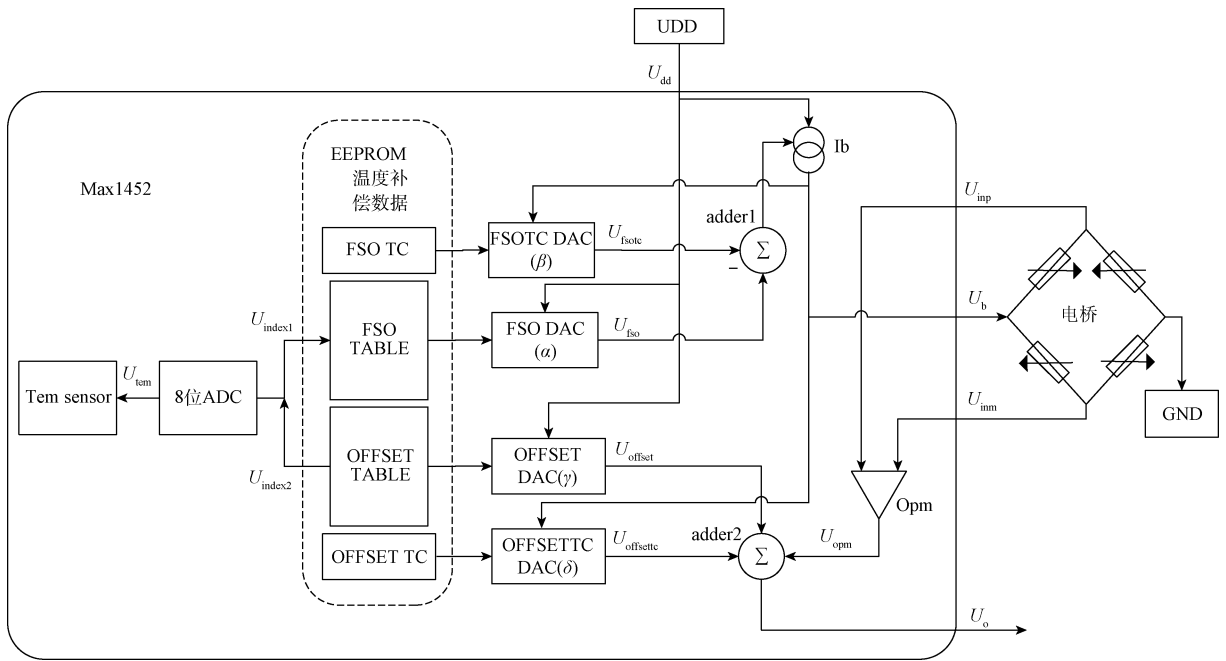


图5 MAX1452 温度补偿原理

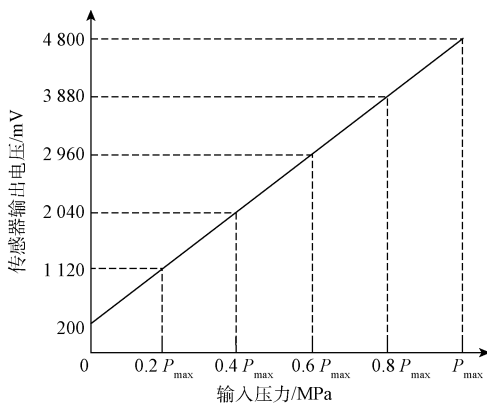


图6 传感器理论工作直线

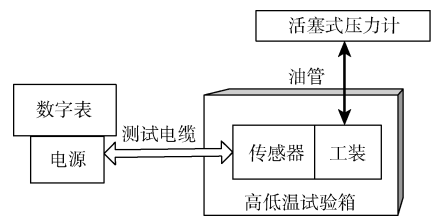


图7 温度试验原理

表2 温度试验参数

温度试验参数	下限温度: -40 °C, 上限温度: 60 °C
	温度步长: 20 °C, 每个温度点停留时间: t=1.5 h
	满度压力: 1 Ma

表1 压力传感器室温性能测试

测量参数	计量单位	设计值	测试值	
			软件补偿	硬件补偿
量程	MPa	/	0~1	0~1
零点输出电压	V	0.2±0.02	0.202	0.200
满度输出电压	V	4.8±0.2	4.806	4.819
精度	%FS	≤0.3	0.189	0.286
线性度	%FS	≤0.3	0.046	0.084
迟滞	%FS	≤0.3	0.007	0.051
重复性	%FS	≤0.3	0.143	0.269
灵敏度	mv/MPa	/	383.625	384.560

温度试验测试数据如表3所示。

表3 温度试验测试数据

补偿方法	压力/MPa	输出电压/V					
		-40 °C	-20 °C	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C
软件补偿	0	0.199	0.199	0.200	0.201	0.201	0.201
补偿	1	4.807	4.805	4.804	4.803	4.804	4.805
硬件补偿	0	0.195	0.196	0.198	0.200	0.210	0.215
补偿	1	4.844	4.836	4.826	4.819	4.817	4.816

由表3可知,软件补偿方法在整个温度范围内测量误差散布更小,测量曲线更加平坦,传感器采用软件补偿法温度范围内精度为0.198%FS,而传感器采用硬件补偿方

法温度范围内精度为 1.437%FS,因此软件温度补偿方法在温度范围内具有更优秀的补偿精度。

4.2 温度循环试验

将传感器放入温度速变箱中,连接好检测仪器设备后按表 4 所示条件进行温度循环试验。

表 4 温度循环试验参数

温度循环试验参数	下限温度: -40 °C, 上限温度: 60 °C 变温率: 10 °C/min, 循环次数: 10 次, 高温/低温保持时间 $t=110$ min
----------	---

传感器温度循环试验条件剖面图如图 8 所示,试验图如图 9 所示。

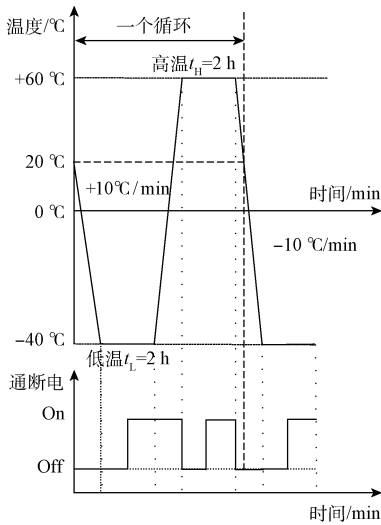


图 8 温度循环试验条件剖面图

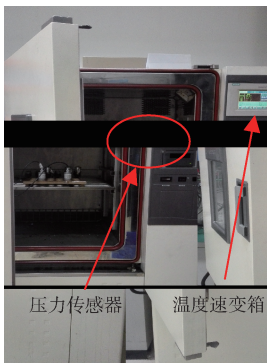


图 9 温度循环试验

传感器温度循环试验测试数据如表 5 所示。由表 5 可知,温度循环过程中传感器在高温和低温时的零点都较稳定,但是传感器采用软件补偿法在高温和低温时零点偏差更小,因此软件温度补偿方法具有更加优良的稳定性。

表 5 温度循环试验测试数据

测量参数	计量单位	设计值	试验过程中零点输出/V	
			软件补偿	硬件补偿
测量范围	MPa	/	1	1
低温零点输出	V	0.2±0.02	0.199~0.201	0.195~0.197
高温零点输出	V	0.2±0.02	0.201~0.202	0.214~0.216

5 结 论

压阻式压力传感器温度补偿技术在军事和民用领域都有十分重要的应用价值,目前,软件补偿已经成为了一种主流的温度补偿技术,本文介绍一种基于 MAX1452 的温度补偿方法,该方法通过设定数字量修正值的方法提高了传感器的补偿效率和精度,具有较高的性价比和优秀的补偿效果,适合批量化生产,对压力传感器更好的应用于测量领域有着重要的意义,对其他传感器的温度补偿也可以提供一种思路。

参 考 文 献

- [1] 李科杰. 新编传感器技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 486-488.
- [2] 李强, 梁莉, 刘楨, 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): 1934-1938.
- [3] 孙艳梅, 苗凤娟, 陶柏睿. 基于 PSO 的 BP 神经网络在压力传感器温度补偿技术中的应用[J]. 传感器技术学报, 2014, 27(3): 342-346.
- [4] 杜永苹, 何小映. 浅谈传感器的温度补偿技术[J]. 国外电子元件, 2009, 17(6): 63-64.
- [5] 党瑞荣, 张宏伟, 宋楠, 等. 高温高压井下压力传感器的补偿与校正[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 737-742.
- [6] 王锋, 刘美全, 范江玮. 霍尔传感器温度补偿方法研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 97-99.
- [7] 唐炜, 徐晓苏. 改进遗传神经网络在传感器温度补偿中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(1): 62-66.
- [8] 梁伟锋, 汪晓东, 梁萍儿. 基于最小二乘支持向量机的压力传感器稳定补偿[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(12): 2235-2238.
- [9] 刘永涛, 徐大诚, 郭述文. 一种硅压阻式压力传感器温度补偿算法及软件实现[J]. 现代电子技术, 2013(12): 18-20.

(下转第 153 页)