

学校编码: 10384
学号: 19920111152793

分类号__密级__
UDC__

廈門大學

碩 士 学 位 论 文

**MEMS 压阻式压力传感器的
DSP 数字补偿技术应用研究**

**The research of DSP digital compensation technology
application for MEMS piezoresistive pressure sensor**

许辉铭

指导教师姓名: 伞海生教授

专 业 名 称: 机械工 程

论文提交日期: 2014 年 5 月

论文答辩时间: 2014 年 5 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____

2014 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

传感器技术是当今世界令人瞩目且发展迅猛的高新技术之一,也是当代科学技术发展的一个重要标志。无论是在工业生产领域,还是在日常的生活当中,每一项技术都离不开传感器。

设计和制造一个高精度、高稳定性的压力传感器,主要在两方面进行考虑,一是原理和结构的设计,涉及弹性体材料、应变合金材料的选取,应变结构的设计,镀膜、光刻、热处理等工艺的研究。另一方面是传感器探头的信号调理,主要是对传感器探头的输出信号进行放大、有效信号转换,并对零点、线性、温漂等误差进行补偿,进一步提高产品性能。特别在环境温度变化较大的场合,带来的测量误差较大,一般需要进行综合技术补偿。

如今经过 MEMS(微机电系统)制作的压力传感器的灵敏度、线性度有了很大的提高,但由于 IC 制造工艺和器件的温度特性等因素,压力传感器中的零点误差、灵敏度误差和温度漂移的缺点仍无法根本克服,这就要借助后续信号处理(补偿)技术。

本文在传感器信号调试处理的理论基础上,设计了一套实验室用的对压阻式压力传感器进行校准及 DSP(数字信号处理)增益补偿的系统。该系统的 DSP 增益补偿部分主要利用了 MLX90308 芯片对传感器的输出信号进行零点漂移、灵敏度及温度的补偿,并应用了 LabVIEW 软件对 NI6211 数据采集的卡所采集的传感器经校准后的信号进行数据演示与处理。

关键字: 增益补偿; 系统; 压力传感器

Abstract

Sensor technology is one of the impressive and rapidly developing new technology in the world, is an important symbol of development of contemporary science and technology. Both in the field of industrial production, and in daily life, every technology are inseparable from the sensor.

To design and manufacture a highly precise and stable pressure sensor, we should mainly consider in two aspects: On the one hand is the principle and structure design, involving the selection of the elastomer material and strain alloy materials, the design of the strain structure, and the process research of deposition, photolithography, and heat treatment. On the other hand is the signal disposal of the sensor probe, mainly to amplify the output signal of the sensor probe, converse the effective signal, and compensate the zero point offset, linearity, and temperature drift, and improving the performance of products. Especially, when the environmental temperature dramatically change, the measurement error is greater, so you usually need to use comprehensive compensation technology.

Nowadays, the pressure sensor, making by MEMS technology, has a big enhancement in sensitivity, linearity. But due to factors such as IC manufacturing process and temperature characteristic of the device, the shortcomings of the pressure sensor, such as zero point offset, sensitivity error and temperature drift still exist. So it needs subsequent signal processing technology (compensation).

In the paper, according to the theory of the signal detection and processing, we designed a system which is used for calibrating and DSP compensating the piezoresistive pressure sensor in the laboratory. The part of DSP compensation mainly used the MLX90308 chips to realize the compensation of zero point offset and sensitivity and temperature drift, and it also utilized the LabVIEW software to present and process the output signal after compensation collected by NI6211 DAQ.

Keyword: gain and offset; system; pressure sensor

目 录	
第一章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.1.1 传感器技术简介	1
1.1.2 压力传感器校准与补偿简介	1
1.2 压阻式压力传感器补偿技术的发展	2
1.2.1 桥内补偿技术	2
1.2.2 桥外热敏器件补偿技术	7
1.2.3 双敏感器件（双桥）补偿技术	11
1.2.4 DSP 数字补偿技术	15
1.3 研究意义及论文主要内容	19
第二章 静态测量系统的原理	20
2.1 一般的测量系统	20
2.1.1 测试系统的作用	20
2.1.2 测试系统的构成	20
2.2 测量系统元件的静特征	21
2.2.1 系统特性	21
2.2.2 系统元件的一般形式	25
2.2.3 单元件的统计特性	26
2.3 元件静特性的鉴定	27
2.3.1 标准	27
2.3.2 试验测量和估计结果	27
2.4 本章小结	30
第三章 测试系统的介绍	31
3.1 系统硬件	31
3.1.1 敏感元件	31
3.1.2 信号调试元件	32
3.1.3 信号处理元件	33
3.1.4 其它系统硬件	34
3.2 系统软件	35
3.2.1 调整增益补偿软件	35
3.2.2 数据显示软件	35
3.2.3 数据处理软件	37
3.3 系统硬件的连线	38

3.3.1 DK90308 Evaluation Kit 的连线.....	39
3.3.2 数据采集卡 Ni6211 的连线.....	40
3.3.3 温控设备的连线.....	43
3.4 本章小结	44
第四章 压阻式压力传感器的校准与 DSP 补偿.....	45
4.1 惠斯通电桥式压阻压力传感器	45
4.1.1 工作原理.....	45
4.1.2 压力传感器的重要参数.....	47
4.2 传感器的校准	48
4.2.1 输出特性曲线.....	49
4.2.2 不同温度下的输出特性.....	52
4.2.2 重复性实验.....	54
4.3 增益补偿	55
4.3.1 增益补偿的目的及原理.....	55
4.3.2 补偿增益实验.....	55
4.3.3 实验结果.....	58
4.4 改变输出特性曲线的线性度	60
4.4.1 传统的线性校正.....	60
4.4.2 实验原理.....	61
4.4.3 曲线化实验.....	63
4.4.4 实验结果.....	68
4.5 温度的增益与补偿	69
4.5.1 温度补偿的原理.....	69
4.5.2 温度补偿实验.....	71
4.5.3 实验结果.....	73
4.6 本章小结	74
第五章 总结及展望	75
5.1 总结	75
5.2 展望	75
参考文献	77
攻读硕士学位期间取得的成果	81
致 谢.....	82

Table of Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background of project	1
1.1.1 Overview of the sensor technology	1
1.1.2 Introduction of calibration and compenstion to the presssure sensor.....	1
1.2 Development of compensation technology to the piezoresistive sensor	2
1.2.1 Compenstion technology in the bridge.....	2
1.2.2 Thermal compensation device technology out of the bridge.....	7
1.2.3 Double sensitive devices (double bridges) compensation technology	11
1.2.4 Digital signal process compensation technology	15
1.3 Motivation and contents of the thesis.....	19
Chapter 2 Principle of static measurement system	20
2.1 General measurement system	20
2.1.1 Purpose of measurement systems.....	20
2.1.2 Structure of measurement systems.....	20
2.2 Static characteristics of measurement system elements	21
2.2.1 Systematic characteristics	21
2.2.2 Generalised model of a system element.....	25
2.2.3 Statistical characteristics of a single element.....	26
2.3 Identification of static characteristics	27
2.3.1 Standards.....	27
2.3.2 Experimental measurement and evaluation of results	27
2.4 Summary.....	30
Chapter 3 Introduction of the measurement system	31
3.1 Hardware of the system.....	31
3.1.1 Sensing element	31
3.1.2 Signal conditioning element.....	32
3.1.3 Signal processing element.....	33
3.1.4 Data presentation element	34
3.2 Software of the system	35
3.2.1 The compensation software.....	35
3.2.2 The data presentation software.....	35
3.2.3 The data processing software	37
3.3 Connection of the hardware.....	38

3.3.1 The connection of DK90308 Evaluation Kit.....	39
3.3.2 The connection of DAQ NI6211	40
3.3.3 The connection of temperature control devices.....	43
3.4 Summary.....	44
Chaper 4 Calibration and DSP compenstion	45
4.1 The piezoresistive pressure sensor.....	45
4.1.1 Operating principle.....	45
4.1.2 The important parameters.....	47
4.2 Calibration.....	48
4.2.1 The output characteristic curve	49
4.2.2 The output characteristics under different temperature.....	52
4.2.2 Repeatability experiment	54
4.3 Gain and offset	55
4.3.1 The purpose and princple of gain and offset	55
4.3.2 Experiment	55
4.3.3 Result	58
4.4 Change the linearity of the output characteristic curve.....	60
4.4.1 The genneral linearity correction	60
4.4.2 The experimental principle.....	61
4.4.3 Experiment	63
4.4.4 Result	68
4.5 Gain and offset of temperature.....	69
4.5.1 The principle of temperature compensation.....	69
4.5.2 Experiment	71
4.5.3 Result	73
4.6 Summary.....	74
Chaper 5 Conclusion and prospect.....	75
5.1 Conclusion	75
5.2 Prospect.....	75
Reference	77
Publications	81
Acknowledgements	82

第一章 绪论

1.1 课题背景

1.1.1 传感器技术简介

传感器技术是现今世界令人关注且发展迅速的高新技术之一，也是现代科学技术发展的一个主要标志。不论是在工业生产领域，或是在日常生活中，很多技术都离不开传感器。早在 80 年代，美国就宣称世界已进入传感器的时代，日本则将传感器技术列为六大核心技术（通信、计算机、半导体、超导、激光和传感器）之一。早在 20 世纪 60 年代，我国就开始涉足传感器制造行业，并取得了较大的成绩。在各类传感器中，压力传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、稳定可靠、成本低、便于集成化的优点，可广泛用于压力、高度、加速度、液体的流量、流速、液位、压强的测量与控制。压力传感器已成为各类传感器技术最成熟、性能比最高的一类传感器^[1]。

1.1.2 压力传感器校准与补偿简介

设计和制造一个高精度、高稳定性的压力传感器，主要在两方面进行考虑，一是原理和结构的设计，涉及弹性体材料、应变合金材料的选取，应变结构的设计，镀膜、光刻、热处理等工艺的研究^[2]。另一方面是传感器探头的信号调理，主要是对传感器探头的输出信号进行放大、有效信号转换，并对零点、线性、温漂等误差进行补偿，进一步提高产品性能。特别在环境温度变化较大的场合，带来的测量误差较大，一般需要进行综合技术补偿^[3]。

如今经过 MEMS（微机电系统）制作的压力传感器的灵敏度、线性度有了很大的提高，但由于 IC 制造工艺和器件的温度特性等因素，压力传感器中的零点误差、灵敏度误差和温度漂移的缺点仍无法根本克服，这就要借助后续信号处理（补偿）技术。该技术主要包括对每个压力传感器的误差进行校正，对温度漂移进行补偿。

对压力传感器信号补偿校正这一领域里，国外一直都走在前列，取得了很大的进步，并已应用于相关的生产实践中。虽然信号调理模块能够用运算放大器和

分立电路元件构成,但是集成信号调理芯片具有成本低、体积小和设计时间短的优点。传统的压力传感器通常都采用手动补偿的方法以消除它们的失调和量程误差。这通常是通过在传感器的桥臂上串联或并联一个特定的电阻网络来实现的。这种方法存在着效率低,工作量大,精度低,灵活性差等特点。随着电子技术的发展,将微处理器、微控制器引入到传感器领域,便出现了“智能传感器”的概念。

利用集信号处理、温度补偿于一体的压力传感器专用信号调理芯片(SCC)进行压力传感器信号调理的方法受到了国内外的广泛使用。这种方法以其高集成、多功能的优点极大的提高了压力传感器的性价比。这类芯片的温度补偿方法与利用 DPS 和 MCU 的软件补偿类似,即先通过温度传感器检测环境温度,然后从预先设置好参数的存储器中取出对应该温度的零点和灵敏度温度修正系数,经 D/A 转换成模拟量,修正传感器输出信号中零点温度漂移和灵敏度温度漂移。

1.2 压阻式压力传感器补偿技术的发展

纵观压阻式压力传感器补偿技术的发展,主要经历了桥内补偿技术、桥外热敏器件补偿技术、双敏感器件(双桥)补偿技术、DSP(数字信号处理)数字补偿技术——四个阶段。

1.2.1 桥内补偿技术

桥内补偿技术是最早在惠斯通电桥采用的补偿技术,该类补偿方法的技术特点是所有补偿手段均是在电桥上完成的,因此这类方法称之为“桥内补偿技术”。在压阻式压力传感器问题上,使用该技术主要可用于补偿压力传感器的零点误差和零点温度漂移误差。

① 零点误差的补偿

利用扩散硅形成的压阻式压力传感器中四个力敏电阻往往会构成图 1.1 所示的惠斯通电桥,利用电桥实现微小电阻变化的测量。

当实际采用惠斯通全桥应变测量电路时,因工艺过程中系统误差和偶然误差的影响,即使在相同的工艺下,同一芯片的四个薄膜电阻的阻值和温度系数都不可能绝对一致,所以桥路有一定的初始零点误差。当传感器空载(无压力)、标准温度时,其输出仍不为零。补偿方法就是在组成惠斯通电桥的四个电阻中,在

相应的桥臂上串、并联上一定阻值大小的电阻，平衡因四个扩散电阻初始阻值不匹配造成的零点误差。

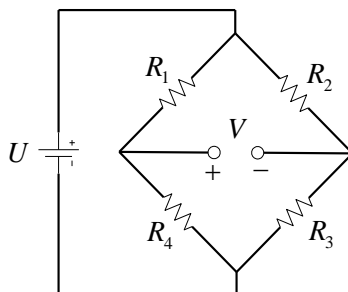


图 1.1 压阻式传感器惠斯通电桥输出

参照惠斯通电桥应变电路图 1.1 可知，桥路的输出零点为：

$$V = \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} U \quad (1.1)$$

电桥的平衡条件为 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。假设电桥不平衡，四个薄膜电阻阻值分别为：

$R_1 = R_2 = R_3 = R$ ，而 $R_4 = R - \Delta R$ ，则桥路的零点输出为：

$$V \approx \frac{-\Delta R}{4R} U \quad (1.2)$$

按常规测试环境设计，如果选择 9V 的恒压源为供桥电压，当 ΔR 的大小超过桥臂电阻的 0.1% 时，将引起桥路超过 225uV 的零点输出，这就需要进行零点补偿。

根据生产统计，薄膜电阻阻值的误差 $\frac{\Delta R}{\bar{R}}$ （ \bar{R} 是指同一芯片上的四个薄膜

电阻的平均值， ΔR 是每个电阻相对平均值的偏差）的分布比例见图 1.2。

从图中可见，生产的薄膜电阻误差在 0.1% 的很少，86% 的薄膜电阻的误差在 5% 以内。现有工艺中很难保证薄膜电阻阻值的均匀性达到 0.1%，所以利用桥路实际压阻变化测量，均有进行零点补偿的需要。

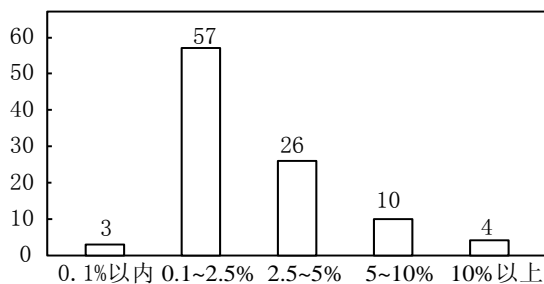


图 1.2 扩散硅电阻阻值的误差 $\frac{\Delta R}{R}$ 分布

桥内补偿技术中,对惠斯通电桥进行零点补偿最有效的方法是在桥路中串联一个由精密电阻材料制作的丝绕电阻,使电桥达到平衡。零点补偿电阻 R_0 的大小即为 ΔR ,可由下式求得:

$$R_0 \approx \frac{4RV}{U} \quad (1.3)$$

如图 1.3 所示。零点补偿电阻 R_0 串接在 R_4 桥臂上。补偿电阻的材料可选用锰铜丝或康铜丝,将电阻丝绕制在一个绝缘的骨架上,而后接入需要补偿的桥臂。这种串接的补偿方法能将桥路的零点输出精确控制在 $\pm 100\mu V$ 以内。

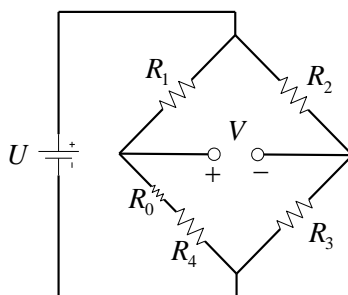


图 1.3 电桥零点误差补偿输出

② 零点热漂移误差的补偿

从理论上说,当环境温度改变 ΔT 时,惠斯通电桥路的输出具有温度自补偿性,即电阻桥的输出不受温度的影响。但因工艺中存在误差,电阻桥路的四个桥臂电阻的温度系数有细微差别,这使得桥路有一定的零点温漂,而且这个零点温漂是

随机的，不可控的。

中南大学何迎辉对电阻桥臂进行了统计^[4]（其结果如图 1.4 所示），零点温漂在 $\pm 0.005\%/^{\circ}\text{C}$ 以内的占 57%，在 $\pm 0.005\%/^{\circ}\text{C}$ 与 $\pm 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ 之间的占 38%，超过 $\pm 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ 的仅占 5%。这说明，单纯的薄电阻桥的温度性能较好，基本能满足 0.2 级的精度要求。

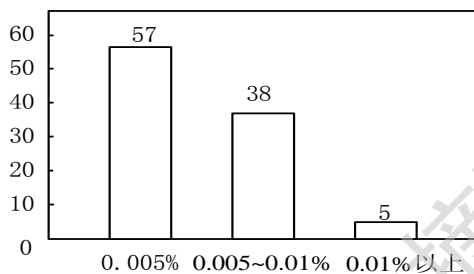


图 1.4 膜电阻桥路的零点温漂比例

假设桥臂薄膜电阻的温度系数均为 a ，当环境温度改变 ΔT 时，桥臂电阻的阻值变为， $R'_1 = R'_2 = R'_3 = (1 + a\Delta T)R$ ， $R'_4 = (1 + a\Delta T)(R - \Delta R)$ ，此时桥路的输出为：

$$V_T = \frac{-\Delta R}{4R} U_0 \quad (1.4)$$

这个值与初始零点值是相同的，这说明理想电阻桥的输出不随温度的改变而改变。如果在桥路中串接了一个大小为 ΔR 的零点补偿电阻 R_0 ，则桥路的初始零点输出 $V_0 = 0$ 。假设零补电阻的温度系数为 a_1 ，则当温度改变 ΔT 时，零补电阻的大小为：

$$R'_0 = (1 + a_1\Delta T) R_0 \quad (1.5)$$

桥路的输出为：

$$V_T = \frac{(a_1 - a)\Delta T \Delta R}{4R} U \quad (1.6)$$

从上式可以看出，补偿电阻材料与薄膜电阻材料的温度系数不同， $a_1 \neq a$ ，则桥路的输出 $V_T = 0$ ，有一个零点温漂，而且这个零点温漂值与二种材料的温度

系数差，与零点补偿电阻的阻值基本成正比。

在 $-60^{\circ}\text{C}\sim+140^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内，薄膜电阻的阻值基本呈线性增加，温度系数约为 $82\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ ；而作为零点补偿材料的康铜丝的阻值变化相对较小，温度系数在 $20\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ 以内。取二者的温度系数差值为 $100\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ ，传感器的灵敏度为 1.5mV ，当零点温漂为 $0.02\%\text{FS}/^{\circ}\text{C}$ 时， $\Delta R/R=0.012$ ，这说明，只要零补电阻大于桥臂膜电阻的百分之一，由温度系数不匹配而引起的温度误差就可能超过 0.2 级精度标准要求，从而需要进行零点温漂补偿。

同样可以选择在桥臂中串接电阻的方法来进行零点温漂补偿。具体操作方法是：在桥路的某一臂（与零补电阻同在内阻或同在外阻臂上）串入一个小电阻 R_t （温度系数为 a_t ），使 R_t 所产生的温度效应正好抵消零点温漂，即 $(a_1 - a)R_0 = (a - a_t)R_t$ 。制造 R_t 的材料应是具有高稳定性和高正温度系数的材料。这里选用铜丝作为补偿材料，铜的温度系数比薄膜的温度系数大了近 50 倍，而且非线性较好，用较小的温补电阻就可以补偿薄膜压力传感器的零点温漂，其电路如图 1.5 所示。

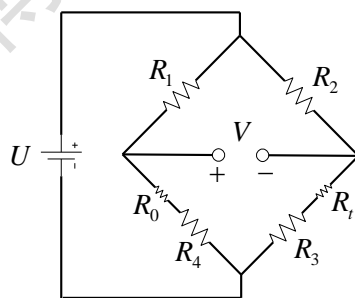


图 1.5 电桥零点热漂移误差补偿

如已知在温度范围 ΔT 内，要补偿的零点温漂值为 ΔV ，补偿丝的温度系数为 a_t ，零点温漂补偿电阻可用下式估算：

$$R_t = \frac{4R\Delta V}{(a_t - a)\Delta TU} \quad (1.7)$$

③ 技术实现

当然，在 MEMS 工艺技术中，实际接入丝绕电阻是不可能的，对此有具体方法可以解决。实际这个补偿电阻在技术上可采用如下方法：

第一类方法是在实际高精度生产过程中，采用先进的激光调阻技术对薄膜电阻栅条形状进行修整，从而改变电阻的阻值，使桥路平衡。瑞士 Intersema 公司目前精度最高 0.01% 的气压传感器 MS5534，其桥阻不平衡性就是采用激光调阻法（参见 Intersema 公司主页中“Passive and active laser trimming”环节）。

第二类方法可在镀膜、光刻的时候，就制作在同一芯片上的薄膜电阻作为补偿电阻。不过，同一芯片上平衡电桥所需的零补电阻值的具体大小是随机的，不能事前预算到的。所以，要设计用薄膜电阻来平衡电桥，只能在芯片上制作一系列的小电阻，通过最终的选用来进行补偿，该技术国内较普遍使用^[5]。

④ 技术结论

实际传感器测试结果表明，利用这种桥内补偿技术，在温度为 $-40^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ ，压力量程为 $0\sim 0.54\text{ MPa}$ 的条件下，通过补偿后，压力传感器组件在温度漂移、零点误差方面的性能都要较大的提高。压力传感器补偿前——传感器的零点误差为 3.98%、温漂为 0.151%（如果工作时，其温度变化达 50°C 的化，温度漂移可达 7.5% FSO）；而补偿校正后——传感器的零点误差为 1%，温漂为 0.0238%（温度变化达 50°C 时，其温度漂移可达 1.2%）。具体实验测试可参见卢亮军 2007 年华中科技大学硕士论文^[6]。

1.2.2 桥外热敏器件补偿技术

通过“桥内补偿技术”可以较方便实现零点误差和零点热偏移误差的校正，传感器精度一般可达到 2%FSO。但随着对压阻式传感器精度要求的提高及补偿技术的发展，仅从电桥内进行误差修正已不能达到技术要求，因此本领域又发展了桥外热敏器件补偿技术。当外界条件温度发生变化时，压力传感器的灵敏度会受到一定的影响。这是由于压阻式传感器是压阻系数亦随温度变化引起的。一般来说，当温度升高时传感器的灵敏度要降低，温度降低时要升高，也就是说一般压力传感器的灵敏度温度系数是负的。

① 桥外热敏器件补偿原理

在理想条件下，温度发生变化时，电桥四个应变电阻条的改变量相等，从而保证电桥在不受压力、不同温度时依然保持平衡，以达到消除温度对传感器输出

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库