

# 油气田监测高性能微传感器及数字化系统

赵玉龙<sup>1,2</sup>, 牛喆<sup>1,2</sup>, 周冠武<sup>1,2</sup>, 赵立波<sup>1,2</sup>, 蒋庄德<sup>1,2</sup>

(1.西安交通大学机械工程学院,西安 710049; 2.西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安 710049)

**[摘要]** 针对油气田特殊环境要求,介绍了一种高温高压传感器芯片的设计及加工制造方法,并研发了相关的高性能数字变送系统。所设计的高温高压传感器芯片解决了传统压阻式传感器在高温高压环境下的热稳定性问题,通过数字补偿技术进一步提升了其系统的线性度与精度,并针对油气田监测环境扩展了其相关外围设备。同时,为了适应油气田管监测理要求,设计了相关无线传感网络,以确保其工业生产的高效运行和有效控制。通过具体实验测试数据,验证了该油气田监测高性能微传感器及数字化系统的高精度及高可靠性,该系统的精度达到0.2% FS及以上,达到世界先进水平,对国内的石化工业发展有着非常重要的意义。

**[关键词]** 高温高压传感器芯片;高性能数字变送系统;数字补偿技术;无线传感网络;高精度

**[中图分类号]** TP212;TP217 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)01-0099-07

## 1 前言

随着石化工业的不断发展,传感器在高温高压环境下应用的要求也在不断增加,为适应不同的高温高压环境,其种类需求也在不断增大。目前,我国高性能传感器主要依赖进口,严重制约了许多领域的发展。石油行业对传感器需求巨大,数字化油气田是国内石化工业的重要发展目标,传感器是整个系统的基础。研究低成本、高稳定性油井监测微传感器及系统是油气田数字化系统高效平稳运行的需要,同时可带动行业技术水平的提升,意义重大<sup>[1]</sup>。为了适应油气田管理要求,确保其生产的高效运行和有效控制,克服传统现场控制系统存在布线困难、移动不便、数据处理能力差、实时性差和远程控制难度大等缺点,设计了一套油气井生产监测系统,以实现实时现场控制和远程控制。

## 2 油气田监测高温高压压力传感器研究

### 2.1 高温高压传感器芯片设计原理

压阻式压力传感器是一种基于压阻效应原理,将物理信号转化成可测得的电信号的传感方式。

压阻效应是指材料受到应力作用时,其电阻或电阻率发生明显变化的现象。压阻效应是在1856年由英国物理学家Thomson首先发现的,并在1923年由Bridgemen通过实验进行了验证。在高温高压传感器芯片的设计中,主要利用了单晶硅的压阻效应<sup>[2,3]</sup>。

硅的压阻效应是在1954年由Smith发现的<sup>[4]</sup>。当外界力作用于硅晶体时,晶体的晶格产生变形,使载流子从一个能谷向另一个能谷散射,引起载流子的迁移率发生变化,扰动了载流子纵向和横向的平均量,从而使硅的电阻率产生变化,这种物理效应称为硅压阻效应<sup>[5,6]</sup>。半导体硅、锗材料中的压阻效应比金属材料中的压阻效应要大得多。在半导体材料中,当应力作用在半导体晶体上时,电阻的变化主要由电阻率的变化引起。在正交坐标系中,当坐标轴与晶轴一致时,电阻的相对变化 $\Delta R/R$ 与应力之间的关系满足

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (1)$$

式(1)中, $\sigma_l$ 和 $\sigma_t$ 为沿电阻纵向与横向的应力; $\pi_l$ 和 $\pi_t$ 为沿纵向和横向压阻系数, $\pi_l$ 表示应力作用方

**[收稿日期]** 2012-10-10

**[基金项目]** 国家高技术研究发展计划“863”项目(2011AA040401)

**[作者简介]** 赵玉龙(1968—),男,山西运城市人,教授,博士生导师,长江学者特聘教授,主要从事MEMS技术、传感器技术及微纳制造等领域的基础理论和工程应用方面的研究工作;E-mail: zhaoyulong@mail.xjtu.edu.cn

向与通过压阻元件的电流方向一致,  $\pi_i$  表示应力作用方向与通过压阻元件的电流方向垂直。

利用上述的硅压阻效应,采用半导体工艺技术经过掺杂(扩散或离子注入),沿单晶硅片上的特定晶向,制成敏感电阻,构成惠斯通电桥,利用硅材料的弹性力学特性,就制成了一个力敏与电信号转换检测于一体的掺杂硅传感器。

薄膜变形理论是分析压阻式压力传感器的理论基础,根据传感器的性能要求,压力传感器结构尺寸设计必须满足线性度要求及抗过载能力要求的原则。引起传感器输出非线性的主要原因是晶体中应力较大时压阻效应的线性关系受到破坏及应变膜形变较大时应力与压力线性关系受到破坏。为了使传感器具有良好的线性度,膜厚  $h$  的设计必须满足中心最大挠度要小于膜厚,一般规定中心挠度要小于膜厚的 1/5。同时,压力传感器的抗过载能力就是传感器在承受 150 MPa 的载荷时能够保持高的灵敏度及稳定的工作性能<sup>[7]</sup>。

在四边固支方形膜条件下:

方形膜的最大应力发生在各边中心

$$\sigma_{\max} = -\frac{0.308pa^2}{h^2} \quad (2)$$

最大挠度发生在平板中心

$$w_{\max} = -\frac{0.0138pa^4}{Eh^3} \quad (3)$$

通过有限元分析对传感器芯片在受力状态下的表面应力进行分析<sup>[8]</sup>,精确计算出压敏电阻的分布位置,并设计传感器尺寸结构<sup>[9-11]</sup>。设定硅传感器的弹性模量。图 1 为传感器硅基底的应力分布,图 2 为方膜高温高压传感器。

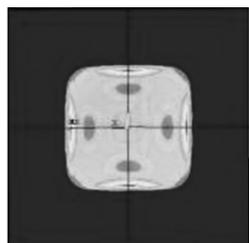


图 1 传感器硅基底的应力分布

Fig.1 Stress distribution on the sensor silicon-substrate

## 2.2 高温高压传感器芯片加工工艺

油气井压力监测环境的高温高压特点对压力传感器提出了较高的热稳定性要求<sup>[12]</sup>。在使用温度大于 120 °C 时,因 PN 结产生漏电流而使传感器

的性能恶化甚至失效,因而,传统扩散硅压力传感器难以解决油气井高温环境下的压力测量难题。针对油气井压力监测环境的高温高压要求,在传感器的加工工艺中采用了硅隔离(SOI)芯片制造技术<sup>[4,13,14]</sup>。

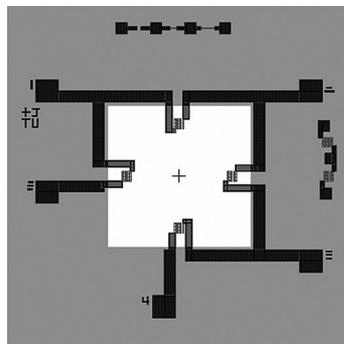


图 2 方膜高温高压传感器

Fig.2 The square diaphragm high-temperature and high-pressure sensor

通过静电键合封装技术将 SOI 硅微固态压阻芯片与 PYREX7740 玻璃片在真空环境下封装结合为一体作为全硅结构的压力传感器的弹性敏感单元<sup>[15,16]</sup>,解决高温环境下测量大量程压力的难题。同时,采用高温充硅油技术,用波纹片和高温硅油将被测量介质隔离开来,因此该类传感器具有动态特性好、耐高温( $\geq 200$  °C)、精度高、量程大(60~150 MPa)及微型化等特点,并且具有工作安全可靠、适应性强的特点。高量程高温压力传感器的全硅结构电路转换元件采用微机电系统(MEMS)技术和 SOI 技术中的注氧隔离(SIMOX)技术制作的浮雕式硅微固态压阻芯片<sup>[17,18]</sup>,由 SIMOX 技术制作的  $\text{SiO}_2$  层将芯片内的测量电路层与硅基底隔离开来,实现了在大于 200 °C 的应用环境下稳定测量技术。另外,高量程高温压力传感器的弹性元件及敏感元件采用全硅结构正方形平膜结构,通过对正方形硅膜结构参数(厚度和边长)设计,可设计出芯片尺寸结构  $\leq 3$  mm、量程为 60~150 MPa 的高量程压力传感器。由于半导体硅良好的机械特性,同时作为传感器转换电路的压阻惠斯通测量电桥集成制造在全硅结构正方形平膜结构上,这样传感器的弹性和敏感元件与转化电路之间集成为一体,大大降低了传感器在测量过程中的迟滞、重复性误差,从而提高传感器的测量精度。芯片的测量精度达到 0.2 % FS 及以上。具体高温高压传感器芯片的加工工艺流程如图 3 所示。

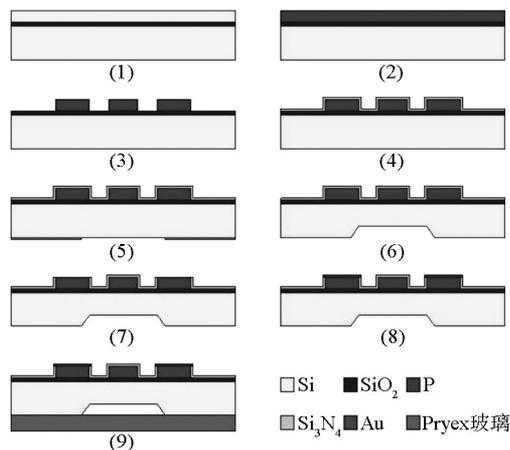


图3 高温高压传感器芯片加工工艺流程

Fig.3 Fabrication process of the high-temperature and high-pressure sensor chip

### 2.3 油气田高温高压压力传感器封装技术研究

可靠的键合引线技术研究和隔离封装技术研究是解决油气田应用传感器高温环境下稳定性和耐腐蚀性的关键技术问题。

油气田压力传感器引线键合与传统的集成半导体芯片(IC)引线键合工艺不同的是:MEMS 高温压力传感器的封装在第一焊点(球焊)完成后不进行第二焊点(楔焊)的连接,或者只进行第二焊点的连接而不需要第一焊点,并且第一焊点所在的腔体深度较大,不易形成线弧,因此使用传统的引线键合设备不能完成MEMS 高温压力传感器的封装,须研究具有深腔焊功能的引线键合设备并能单独完成第一焊点或第二焊点的焊接,即在第一焊点完成后自动剪断金线或直接进行第二焊点的焊接。总体技术路线:工艺分析—总体结构—模块设计—系统集成—实验应用。

建立和研究油气田微传感器专用键合工艺原则。研究和设置焊球的初始直径一般为金丝直径的2~3倍,还要保证最终成球尺寸是金丝线直径的2.5~5倍,且不能超过焊盘尺寸的3/4。线弧长度不应超过金丝直径的100倍,而且不允许有垂直方向的下垂或水平方向的摇摆,以保证引线键合的质量和um提高传感器应用的可靠性。

研究传感器芯片封装结构,以提高油气田传感器在油气田应用的耐腐蚀性和稳定性,提高压力传感器的长期稳定性和工程化应用水平,在进行压力敏感元件的封装时,宜采用充硅油结构和技术,避免被测介质与敏感元件的直接接触,提高传感器稳定性的同时提升其适应能力。由此,可以从结构上提高压力传感器的测量精度、可靠性和温度稳定

性。涉及基于SOI技术的高温环境下高量程、高精度的压力传感器,解决了高温条件和高压场合下的压力测量难题,由于采用了充高温硅油技术,使得测量SOI硅压力敏感元件与被测量介质隔离开来,因而提高了传感器的适应能力。充硅油压力传感器的结构见图4。图5为键合与高温充硅油封装实物图。

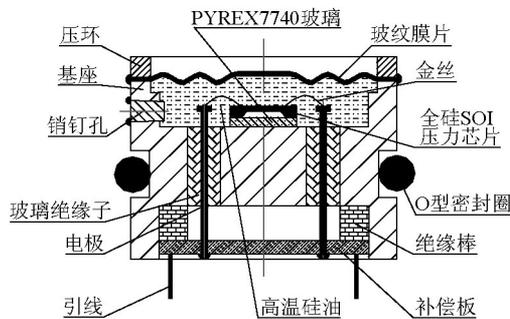


图4 充硅油压力传感器结构

Fig.4 Structure of the pressure sensor filled with silicone oil

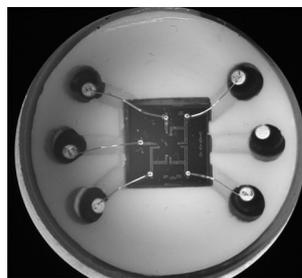


图5 键合与高温充硅油封装实物图

Fig.5 The practical packaging of bonding and silicone oil filling

## 3 高性能压力传感器测试与补偿技术研究

### 3.1 传感器温度补偿原理

由于压阻式压力传感器受温度影响较大,基线温度漂移和线型温度漂移都可达到0.02% FS/°C。假设外界温度的范围是-40~60°C,温差为100°C,那么基线温度漂移和线型温度漂移都将达到2% FS。因此变送器工作温度变化范围越大,如果不做校准其精度将比较差。

本文采用多温度点、多压力点标定,再在相邻两个温度点之间进行拟合,从而使得变送器在全温度范围达到最高精度。该标定系统利用最小二乘法求出校准数据的理论直线。假设该直线方程为

$$y = P_1 x + P_2 \quad (4)$$

式(4)中, $y$ 为传感器的理论输出; $x$ 为传感器的实际输入; $P_1$ 为直线方程的斜率,表示所给定的传感器的灵敏度; $P_2$ 为直线方程的截距,表示所给定的传感器

的初始偏差(零位)。

假设有  $m$  个校准测试点,传感器实际输出为  $y$ , 则第  $i$  个校准数据与理论值线上相应值之间的最小偏差为

$$\Delta_i = y_i - (P_1 x_i + P_2) \quad (5)$$

利用最小二乘法理论直线的拟合原则,使得  $\sum_{i=1}^m \Delta_i^2$  为最小值,即使  $\sum_{i=1}^m \Delta_i^2$  对  $P_1$  和  $P_2$  的一阶偏导数为零,从而求得  $P_1$  和  $P_2$  的表达式

$$P_1 = \frac{m \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (6)$$

$$P_2 = \frac{m \sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (7)$$

式(6)、式(7)中,

$$\sum x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_m; \quad \sum y_i = y_1 + y_2 + \dots + y_m;$$

$$\sum x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_m y_m;$$

$$\sum x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_m^2;$$

$m$  为校准点数。

通过最小二乘法将同一温度时刻的传感器输出进行了线性补偿之后,将相邻两个温度点之间的传感器输出再次进行拟合,可获得高线性度、高精度的全温度范围输出结果。

### 3.2 油气田压力传感器智能数字变送系统硬件电路的设计与实现

一般工业现场环境对压力传感器监测系统的要求较高,如荒漠、雨林、山区等,其高温、高湿、长距离无人值守等因素为工业检测提出了较强的针对性要求。

油气田监测高性能微传感器的性能应满足油气田监测系统通讯协议和高精度的目标要求。针对油气田压力传感器智能数字变送器及标定系统整体技术要求,重点研究电源和信号全隔离技术、4~20 mA 监测信号和液晶显示及 RS-485 总线同步工作技术、小信号无失真高精度的放大电路及低滤波技术、动态实现传感器的温度漂移、基线漂移、线性漂移的抑制技术以及在恶劣环境下实现防雷击、浪涌抑制等电路保护技术等,以提高传感器在油气田应用的可靠性。同时研究油气田压力传感器智能数字变送器标定测试系统以提高其测量精度。标定系统可以方便地标定压力传感器智能数字变送器,并通过温度和线性化的数字补偿技术有效地提升压力传感器的系统精度,使得油气田高性

能传感器精度提高到 0.1 % FS 及以上,远高于目标任务的 0.2 % FS 的技术指标。

油气田压力传感器智能数字变送系统机构框图见图 6。压力传感器智能数字变送器内部采用一套数据采集电路、一套数据存储电路、一套数据传输电路、一套电源管理电路、一套两线制 4~20 mA 回路信号电路和一套防雷击电路保护及信号全隔离电路,安装在专用的金属结构内。图 7 为智能数字变送系统实物图。

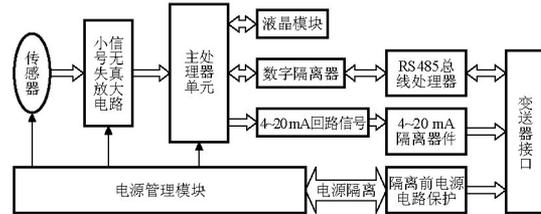


图 6 压力传感器智能数字变送器系统框图

Fig.6 The system schematic of the pressure sensor intelligent digital transmitter

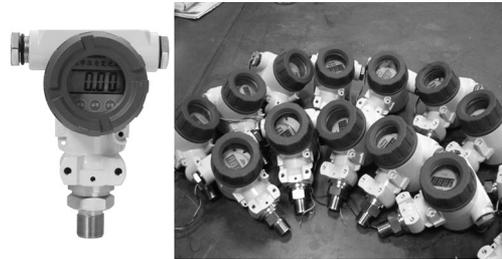


图 7 智能数字变送系统实物图

Fig.7 The practical pressure sensor intelligent digital transmitter system

## 4 无线传感网络研究

### 4.1 无线网络方案

目前使用较广泛的短距无线通信技术是蓝牙 (Bluetooth) 无线局域网 802.11 (Wi-Fi) 和红外数据传输 (IrDA) 3 种,同时还有一些具有发展潜力的近距离无线技术标准。它们分别是 ZigBee、超宽频 (Ultra WideBand) 等<sup>[19]</sup>。对于油气井生产监测,选择 ZigBee 技术出于如下考虑<sup>[20]</sup>。

成本: ZigBee 芯片 1 美元左右。Wi-Fi 和蓝牙芯是 3 美元左右,使用 Zigbee 整个系统的费用将大幅降低。传输速率: ZigBee 传输速度是 250 kbps, Wi-Fi 和蓝牙分别是 54 Mbps 和 1~2 Mbps。在监测系统中,主要发送传感器数据与控制信号,低速率已满足需求。网络容量: ZigBee 网络中心可运行 65 000 个节点, Wi-Fi 和蓝牙分别是 32 个和 7 个节点。ZigBee 满足工业生产规模的不断扩大。能量

消耗: Zigbee 的电流是 3 mA, 而 Wi-Fi 和蓝牙分别是 350 mA 和 65~170 mA。

ZigBee 是一个由可多达 65 000 个无线数传模块组成的网络平台, 十分类似现有移动通信的码分多址(CDMA)网或全球移动通讯系统(GSM)网。其中每一个 ZigBee 网络数传模块类似移动网络的一个基站, 在整个网络范围内, 它们之间可以进行相互通信; 每个网络节点间的距离可以从标准的 75 m, 到扩展后的几百米, 甚至几千米(可以通过 CC2591 射频前端芯片以扩展传输距离)。另外, 整个 ZigBee 网络还可以与现有的其他各种网络链接。每个 ZigBee 网络节点可支持多达 31 个的传感器和受控设备, 并且每一个传感器和受控设备还可以有 8 种不同的接口方式。另外, ZigBee 可以采集和传输数字量和模拟量<sup>[21]</sup>。

#### 4.2 系统设计

由于油气田生产井比较分散且只需要实现采集点与总控制端的通信即可, 即一般采集点之间不需要通信所以选择簇树状或网状网拓扑结构比较合适, 既能有效地增大网络的覆盖范围又能节省网络维护的费用。本系统根据 ZigBee PRO 的网状网络拓扑结构特性进行设计, 因为其具有自动建立和维护网络的功能, 无需人工干预。这样油气井所采集到的数据就可以从终端设备经过路由器而转发到主站上, 或者从终端设备直接发至主站上, 从而实现对油气井生产的远程监护。系统架构如图 8 所示, 系统数据传输示意图如图 9 所示。

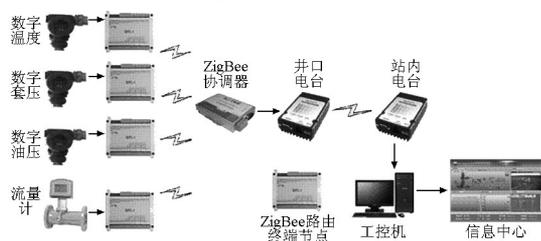


图8 Zigbee系统总体架构

Fig.8 The architecture of the Zigbee system

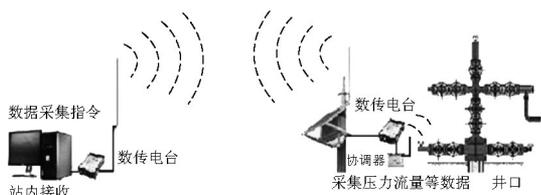


图9 系统数据传输示意图

Fig.9 The schematic diagram of the system data transmission

油气井监测系统采用分散数据采集, 集中处理结构, 由多个数据采集点和数据处理点组成。安装应用网络化系统, 建立服务器和安装客户端应用程序。

## 5 实验及分析

### 5.1 高温高压传感器芯片测试实验

本实验通过精度为 0.02 % 的活塞式压力计, 在室温为 25 °C 的条件下, 对高温高压传感器芯片进行压力测试实验。为测定该芯片的耐高压性能, 测试压力范围为 0~150 MPa。实验施加电源为 5 V 的直流稳压源。实验测试结果如图 10 所示。

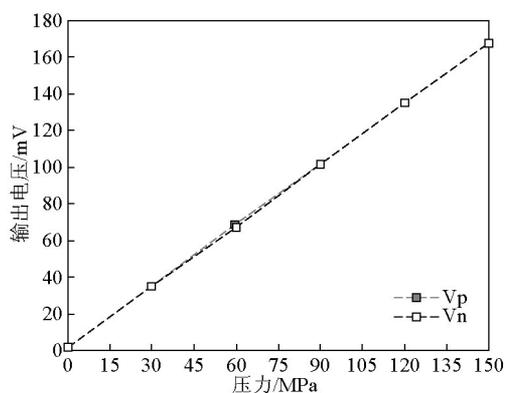


图10 传感器芯片输出测试结果

Fig.10 Output of the sensor chip

### 5.2 油气田压力传感器智能数字变送系统温度补偿与标定实验

为了保证该智能变送系统的可靠性与精度, 通过实际实验来测试当前系统的各项输出并计算其性能指标。实验通过利用活塞式压力计(精度为 0.02 %, 量程为 1~100 MPa)向压力式传感器输入压力, 压力范围为 0~32 MPa。将高性能数字压力变送器放置在恒温箱内进行温度标定, 设置温度点为 -25 °C、-10 °C、20 °C、45 °C。通过长时间恒温测量后, 将所采集到的数据通过上位机标定系统进行处理, 再发送至高性能数字压力变送器进行标定。图 11 和图 12 是所采集到的标定后的高性能数字压力变送器的实际输出结果, 其中, 图 11 为二维数据对比图, 图 12 为三维数据平面分析图。

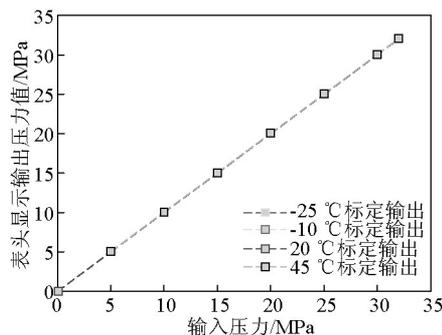


图11 二维数据对比图

Fig.11 The comparison of the two-dimensional data

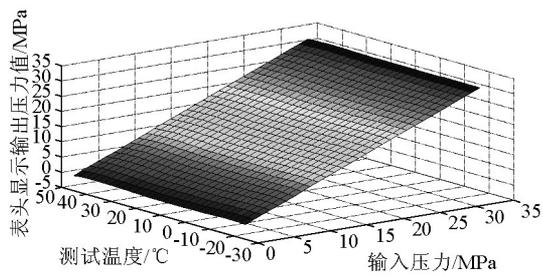


图 12 三维数据平面分析图

Fig.12 The analysis of the three-dimensional of plane data

通过计算可得出在全温度、全量程范围内该智能数字压力变送器的误差和线性度,结果如表 1 所示。

表 1 全温度范围测试技术指标

Table 1 The qualification of the full temperature range experiment

温度/°C	误差/%	线性度/%
-25	0.04	0.078
-10	0.20	0.072
20	0.08	0.034
45	-0.08	0.113

## 6 结语

本文设计了一种适用于油气田特殊环境的高温高压传感器芯片及其高性能数字智能变送系统。通过实验数据表明,本系统的测量精度达到设计要求的 0.2% FS 及以上,具有较高的可靠性和稳定性,对油气田生产安全起到重要的保障。油气田监测微传感器及系统研究是一项综合性的系统研发,涉及的创新点包括高温高压微传感器的设计制造、批量化生产的稳定性,油气井状态参数标准库的建立,压裂工艺目标参数的验证技术等内容。其创新点主要体现在:a. 高温、高压微传感器的设计技术;b. 高温、高压微传感器的制造工艺技术;c. 低功耗特性微传感器的设计技术;d. 基于微结构工艺相关特性参数提取的 MEMS 器件芯片设计技术;e. 监测系统抗干扰技术;f. 多联作压裂高温高压监测技术。实验表明,该系统达到国内外先进技术指标要求。该智能数字压力变送器的后续补充及功能扩展工作正在不断进行当中。

### 参考文献

[1] James W K Wong. City-gas development in China—An NG perspective [J]. Energy Policy, 2010, 38: 2107–2109.  
 [2] Tian B, Zhao Y L, Jiang Z D. Fabrication and structural design of micro pressure sensors for tire pressure measurement systems

(TPMS) [J]. Sensors, 2009(9):1382–1393.  
 [3] Timoshenko S, Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells [M]. New York: McGraw-Hill, 1959.  
 [4] Herrera G V, Bauer T, Blain M G, et al. SOI-Enabled MEMS processes lead to novel mechanical, optical, and atomic physics devices [C]// IEEE International SOI Conference Proceedings. New Paltz, NY, United states. 2008: 5–8.  
 [5] Xu J B, Zhao Y L, Jiang Z D. A monolithic silicon multi-sensor for measuring three-axis acceleration, pressure and temperature [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22: 731–739.  
 [6] Roark R J. Formulas for Stress and Strain [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1965:427–524.  
 [7] Pancewicz T, Jachowicz R, Gniazdowski Z, et al. Empirical verification of the FEM model of semiconductor pressure sensor [J]. Sens Actuat, 1999, 76:260–265.  
 [8] Azi A A, Majlis B Y. A simulation studies of piezoresistive sensing resistor in MEMS square diaphragm [C]// Second International Conference on Computer Engineering and Application. Indonesia. 2010:576–579.  
 [9] Narayanaswamy Joseph D, Sumangala Antony J. Computer aided modelling and diaphragm design approach for high sensitivity silicon-on-insulator pressure sensors [J]. Measurement, 2011, 44: 1924–1936.  
 [10] Reddy J N. Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells [M]. 2d ed. USA: CRC, 2007.  
 [11] Babuska I, Banerjee U, Osborn J E. Generalized finite element methods: Main ideas, results, and perspective [J]. International Journal of Computational Method, 2004(1): 67–103.  
 [12] Wang X Y, Zheng W P, Hu Y R. Experimental characterization for active flatness control of membrane structures [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. China: Changchun, 2009:2846–2851.  
 [13] Zhao L B, Zhao Y L, Jiang Z D. Design and fabrication of a high temperature pressure sensor [C]// Proceedings of MNC, Mrico Nano China07. China: Sanya, 2007:10–13.  
 [14] Zhao Y L, Zhao L B, Jiang Z D. A novel high temperature pressure sensor on the basis of SOI layers [J]. Sensors and Actuators A, 2003, 108:108–111.  
 [15] Tan C M, Gan Z H, Gao X F. Temperature and stress distribution in the SOI structure during fabrication [J]. IEEE Trasaction on Semiconductor Manufacturing, 2003, 16(2): 314–318.  
 [16] Liu J W, Shang J T, Huang Q A, et al. Micromachining of pyrex 7740 glass by silicon molding and vacuum anodic bonding [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20(4): 909–915.  
 [17] Yang C R, Chen P Y, Chiou Y Ch, et al. Effects of mechanical agitation and surfactant additive on silicon anisotropic etching in alkaline KOH solutio [J]. Sensors and Actuators A, 2005, 119: 263–270.  
 [18] An S, Lee S G, Kim H H, et al. The effect of the KOH and KOH/IPA etching on the surface roughness of the silicon mold to be used for polymer waveguide imprinting [J]. Proc of SPIE, 2008, 6897: 195–201.  
 [19] 张和平. 浅析短距离无线通信技术[J]. 信息时代, 2012(2): 53–54.  
 [20] 杨青青. 精密机械加工中的无线网络监控系统[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(18):4136–4137.  
 [21] 李文仲, 段朝玉. ZigBee2007/PRO 协议栈实验与实践[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009.

# The high-performance micro sensor and digital system for monitoring of the oil and gas field

Zhao Yulong<sup>1,2</sup>, Niu Zhe<sup>1,2</sup>, Zhou Guanwu<sup>1,2</sup>,  
Zhao Libo<sup>1,2</sup>, Jiang Zhuangde<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**[Abstract]** In order to suit for the special requirements of the oil and gas fields, in this paper, the design and fabrication of a high-temperature and high-pressure sensor chip was described. And the related high-performance digital transmitter system was produced. The textual sensor chip was designed to accomplish the thermostability in the high temperature environment which the traditional sensor can't suit for. The linearity and accuracy of the system were promoted by the digital compensation technology. And the associated equipment were integrated into the system. Moreover, in order to meet the requirements of the oil and gas fields inspect managements, the wireless sensor network were designed, which can guarantee the high-efficiency operation and control of the industrial production. Through the experiments, the high-accuracy and reliable of the high-performance micro sensor and digital transmitter system were credible. The accuracy of it is above 0.2 % FS. The system has reached the world class and was especially significant for the domestic petrochemical industry.

**[Key words]** high-temperature and high-pressure sensor chip; high-performance digital transmitter system; digital compensation technology; wireless sensor network; high accuracy

---

(上接 56 页)

# Study on rapid 3D full-field deformation&strain measurement and inspection for mechanical engineering and material mechanical properties

Liang Jin, Guo Xiang, Hu Hao, Li Leigang,  
Tang Zhengzong, Shi Baoquan, Sun Tao

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**[Abstract]** Many large-scale (several meters to dozens of meters) or complex parts and new composite materials are used in atuo, aerospace, shipping, military industry and so on, the rapid and feasible 3D profile, deformation and strain measurement are in urgent need. In view of the need, a new approach based on close range photogrammetry and digital image correlation is proposed and implemented. In this method, multi-image in 2D sequence are taken by many kinds of industrial cameras, and the 3D coordinates, deformation and strain data of tested objects can be resolved quickly based on these images. Owing to this method, not only rapid measurement on large-scale or complex parts, small to medium parts, micro-nano scale and material property analysis can be realized, but also vabration and shock from low to high velocity and modal analysis can be satisfied. Application results in mechanical engineering, materails science, mechanics and many industries show that, the new method is versatile, rapid, feasible and flexible. Futhermore, remarkable economic and social benefits have been achieved.

**[Key words]** industrial close range photogrammetry; digital image correlation; deformation; strain