

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312756

压阻式微差压传感器倾角误差分析与研究

张龙赐^{1,2} 金忠^{1,2} 曾庆平³

(1. 中国电子科技集团公司第四十八研究所 长沙 410111;
2. 高性能智能传感器及检测系统湖南省重点实验室 长沙 410111;
3. 薄膜传感技术湖南省国防重点实验室 长沙 410111)

摘要: 针对压阻式微差压传感器在不同姿态位置下倾角误差大的问题,设计了符合灵敏度要求的4种量程的微差压传感器,结果发现,单岛膜结构在硅岛边缘形成了应力集中,双岛膜结构在两岛之间中心位置形成了应力集中,均有助于提高灵敏度。通过单隔离膜片微量充油封装设计减少对倾角误差的影响,结果表明,传感器零点输出与倾角角度近似线性关系。差压量程越小,倾角误差越大。其中,2 kPa时倾角误差不超过0.94%。本研究为微差压传感器设计及其倾角误差分析提供了依据。

关键词: 微差压;岛膜设计;仿真分析;倾角误差

中图分类号: TP212/V441 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30

Analysis and research on inclination error of piezoresistive micro differential pressure sensor

Zhang Longci^{1,2} Jin Zhong^{1,2} Zeng Qingping³

(1. The 48th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Changsha 410111, China;
2. The High Performance Intelligent Sensor and Testing System in the Key Laboratory of Hu'nan Province, Changsha 410111, China;
3. The Defense Key Laboratory for thin-Film Sensor Technology in Hunan Province, Changsha 410111, China)

Abstract: In order to solve the problem of large inclination error of Piezoresistive micro differential pressure sensor at different attitude positions, this paper designs four range micro differential pressure sensors that meet the sensitivity requirements. The results show that the single island membrane structure forms a stress concentration at the edge of the silicon island, and the double island membrane structure forms a stress concentration at the center between the two islands, both cases help to improve sensitivity. The influence on inclination error is reduced through single isolation diaphragm and micro oil filled package design. The results show that the zero point output of sensor is approximately linearly related to the inclination angle, and the smaller the differential pressure range is, the greater the inclination error is, and the inclination error at 2 kPa shall not exceed 0.94%. This study provides a basis for the design of micro differential pressure sensor and the analysis of its inclination error.

Keywords: micro differential pressure; island membrane design; simulation analysis; inclination error

0 引言

压阻式压力传感器具有体积小、结构简单、动态响应好、灵敏度高等优点,可直接用于拉压力、压差测量,也可以间接测量液位、速度、真空度、流量等其他物理量,因此被广泛应用于各种场合^[1-2]。

飞行设备中,压阻式微差压传感器常用于管路流量、内外压差、飞行速度、姿态控制等参数测量,其测试精度直接关系到飞行品质的优劣和飞行安全^[3]。飞行过程中,微差

压传感器测量姿态发生变化,研究其在不同姿态下的倾角误差,对提供准确、实时、可靠的参数测量具有重要意义。

文献[4]设计了一种十字梁-四槽膜结构的微压力传感器,提高了灵敏度并减小了非线性度误差。文献[5]报道了一种梁-膜结构的压阻式微压传感器,并设计了一种折弯形的压敏电阻以提高其灵敏度和减小非线性度误差。文献[6]报道了一种包含5个硅岛的弹性元件的高灵敏度压阻式微压传感器,对其结构尺寸进行了优化。文献[7]报道了一种通过图形化减薄膜结构的微压传感器,与传统方

收稿日期:2023-02-07

形硅膜结构、穿孔结构相比,其输出电压显著提高。国内外关于压阻式微压传感器的研究以设计新型弹性元件产生应力集中提高灵敏度为主。

封装形式上,工业上常用 TO(晶体管外形)封装和隔离膜片充油封装两种,前者倾角误差较小,受环境因素影响较大,使用受到限制。后者利用了硅油的不可压缩性能与膜片良好的线性位移特性,将外界压力传递给压敏芯片^[8],解决了环境适应性问题,由于充油量较多,飞行过程的姿态变化引入了倾角误差,极大影响飞行设备测试性能。

目前,基于倾角误差的压阻式微压传感器弹性元件及封装设计研究较少,实际应用中也很难通过倾角补偿来消除影响。本文以微差压传感器为研究对象,采用数值模拟方法分析了 4 种不同量程下压敏芯片的参数设计,通过单端隔离微充油封装设计,分析了不同量程下倾角误差的影响。

1 工作原理

传感器由敏感芯体和电子电路组成。最终将压力的差值转化为线性比例电信号输出,如图 1 所示。

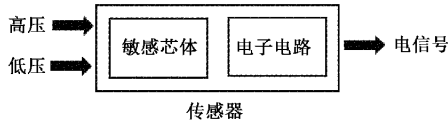


图 1 传感器功能框图

敏感芯体由压敏芯片经充油隔离封装组成。压敏芯片采用压阻敏感元件工作原理,如图 2 所示。压力差作用到膜片结构上,膜片受到压应力,使制作在膜片上的半导体电阻的电阻率与几何形状发生变化,再通过惠斯通电桥检测桥臂电阻变化引起的电势差信号^[9]。电子电路为敏感芯体电桥提供精密电压基准,并对敏感芯体输出进行补偿,再经标准化处理输出电信号。

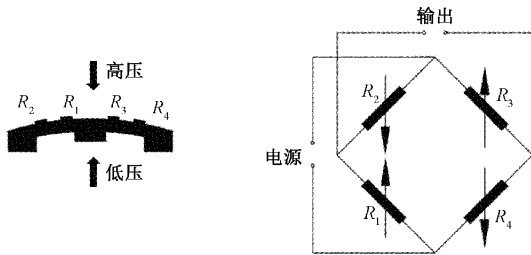


图 2 压敏芯片工作原理

固体材料受到外力作用时,其电阻的相对变化如下:

$$dR/R = d\rho/\rho + dL/L - dA/A \quad (1)$$

式中: $d\rho/\rho$ 是由压阻效应引起的固体电阻率变化, dL/L 、 dA/A 是由应变效应引起的电阻变化。在半导体材料中,压阻效应起主要作用^[10]。则半导体材料在受到外力作用时,其电阻的相对变化为:

$$dR/R = (\pi E + 1 + 2\mu)\epsilon = K\epsilon \quad (2)$$

π 为压阻系数矩阵, E 为材料的弹性模量, μ 为材料的泊松比, ϵ 为应变, K 是应变 ϵ 引起电阻变化的灵敏度系数。

2 参数设计

硅压阻压敏芯片主要有平膜结构、单岛膜结构、双岛膜结构、梁岛膜结构 4 种。在薄膜厚度尺寸及薄膜所受压力相等的情况下,岛膜结构最大应力大于平膜结构,梁岛膜结构最大应力大于岛膜结构,梁岛膜结构可以获得最佳的灵敏度^[11-13],其加工工艺最复杂。实际应用中常需根据量程等技术指标选择合适的结构类型。不同结构性能比较如表 1 所示。

表 1 不同膜片结构性能比较

结构形式	灵敏度	线性度	适用量程
平膜结构	低	低	中高量程
单岛膜结构	一般	较高	10~100 kPa
双岛膜结构	较高	高	1~10 kPa
梁岛膜结构	高	高	1 kPa 以下

综合考虑,压敏芯片的线性、灵敏度要求以及加工工艺成本,设计 15 kPa 和 30 kPa 量程的压敏芯片为单岛膜结构,2 kPa 和 7 kPa 量程的压敏芯片为双岛膜结构。

为了使传感器有线性输出,非线性应设计小于 0.2%。膜片的变形应满足小变形理论,且变形量小于膜片的厚度 20%。这时膜片仅有弯曲没有拉伸,膜片中心最大扰度:

$$\omega_{max} = 0.015 18 p a^4 (1 - \nu^2) / E_R h^3 \leq 0.2 h \quad (3)$$

式中: ω_{max} 为膜片中心最大扰度, p 为满量程压力, a 为膜片边长。由上式可得:

$$h \geq \sqrt[4]{0.07 p / E_R a} \quad (4)$$

利用抗过载能力,保证良好的线性,可得:

$$h \geq 2.38 a \sqrt{p / \sigma_m} \quad (5)$$

其中, σ_m 为硅片的破坏应力,取值为 4.5×10^8 Pa,硅材料的杨氏模量 E_R 为 190 GPa,泊松比 μ 为 0.278。

为了提高岛膜结构的灵敏度,将压敏芯片尺寸设计为 4 mm×4 mm 的方形芯片,厚度为 0.4 mm,湿法腐蚀时,由于 111 晶面腐蚀速率最慢,100 晶面腐蚀速率最快,为了保证两面之间的夹角,取膜片长度为 2.5 mm×2.5 mm,此时可设计各量程下的膜片厚度如表 2。

表 2 膜片厚度参数设计

量程/kPa	30	15	7	2
膜厚/ μ m	49	35	24	14

对于 30 kPa、15 kPa 量程的压敏芯片,根据最佳岛膜尺寸比例,设计单岛边长为 1 087 μ m,对于 2 kPa、7 kPa 量

程的压敏芯片,设计岛与边框距离为 $250\ \mu\text{m}$,两岛距离为 $500\ \mu\text{m}$ 。

压敏芯片受到压力作用时,硅膜片产生弹性形变,硅膜片最大应力区域在形变之下产生应力,应力使硅膜上压敏电阻条的电阻率发生变化。压敏电阻在(100)晶面上平行或垂直于[011]晶向时获得最大的压阻系数^[14]。连接惠斯通电桥的两臂电阻发生变化时,其变化率的正负变化由应力差的正负变化来实现。惠斯通电桥输出灵敏度为:

$$\Delta R/R = \pi_{11}(\sigma_x - \sigma_y)/2 \quad (6)$$

其中, σ_x 、 σ_y 分别为弹性元件测量点处横向和纵向的应力, π_{11} 为 P-Si 的压阻系数。

3 仿真分析

在有限元软件中对硅杯结构进行分析,采用四面体网格划分,对薄膜片及硅岛进行细化,如图3所示,以 $30\ \text{kPa}$

量程的压敏芯片为例,形成网格单元数为 $304\ 048$ 个,节点为 $440\ 232$ 个。

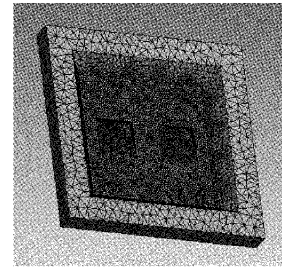


图3 敏感芯片网格划分图

对芯片进行仿真分析,对硅杯底面与玻璃键合处进行固定,分别在芯片表面施加满量程载荷,其综合应力图如图4所示,由图4可知,硅杯在方形膜固定边缘及硅岛边缘都出现了应力集中,对提高灵敏度有很大改善。

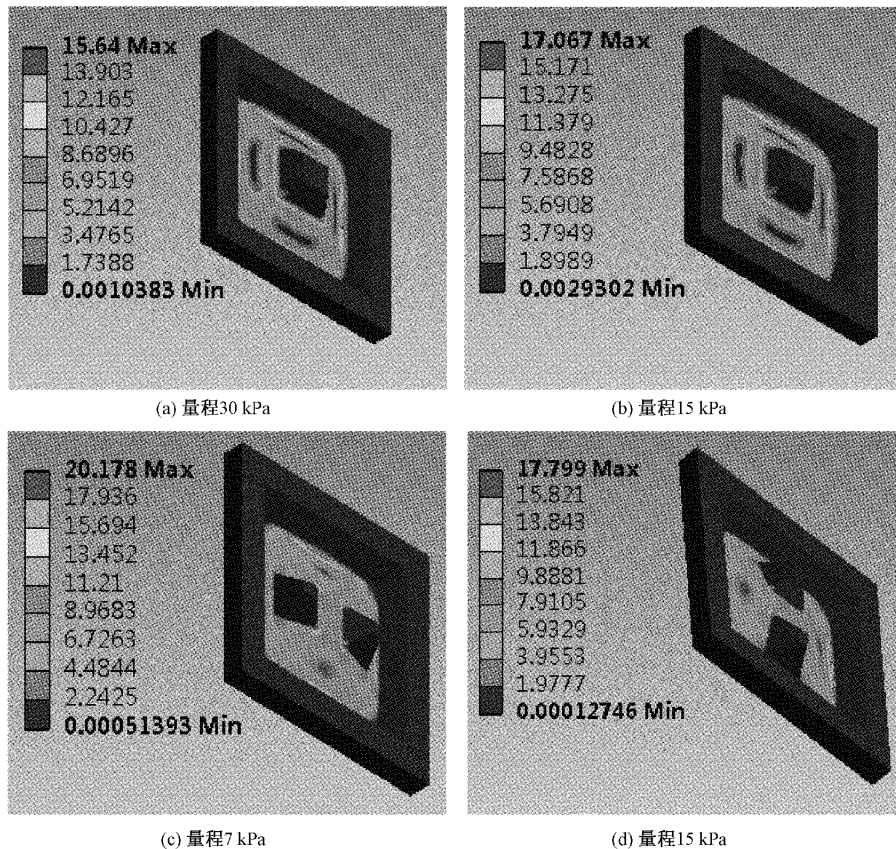


图4 芯片满量程时应力云图

纵横应力如图5所示,图中X向表示横向应力,Y向表示纵向应力。由图5可知, $30\ \text{kPa}$ 、 $15\ \text{kPa}$ 量程的压敏芯片的横向应力在硅岛边缘出现峰值, $7\ \text{kPa}$ 、 $2\ \text{kPa}$ 量程的压敏芯片的横向应力在硅岛边缘与双硅岛之间出现峰值,4种量程压敏芯片的纵向应力变化很小,在横向应力峰值处布置压敏电阻可获得高灵敏度,由式(6)可求得4种量程下的灵敏度如表3所示。

4 封装设计

为防止流体介质直接接触敏感芯片对其产生腐蚀、阻塞、沉积、碰撞等不良影响和破坏,常将敏感芯片封装在一个密封容器中,介质压力通过波纹膜片传递给硅油,在传递给压敏芯片,使被测介质与压敏芯片完全隔离,起到保护作用^[15-17]。

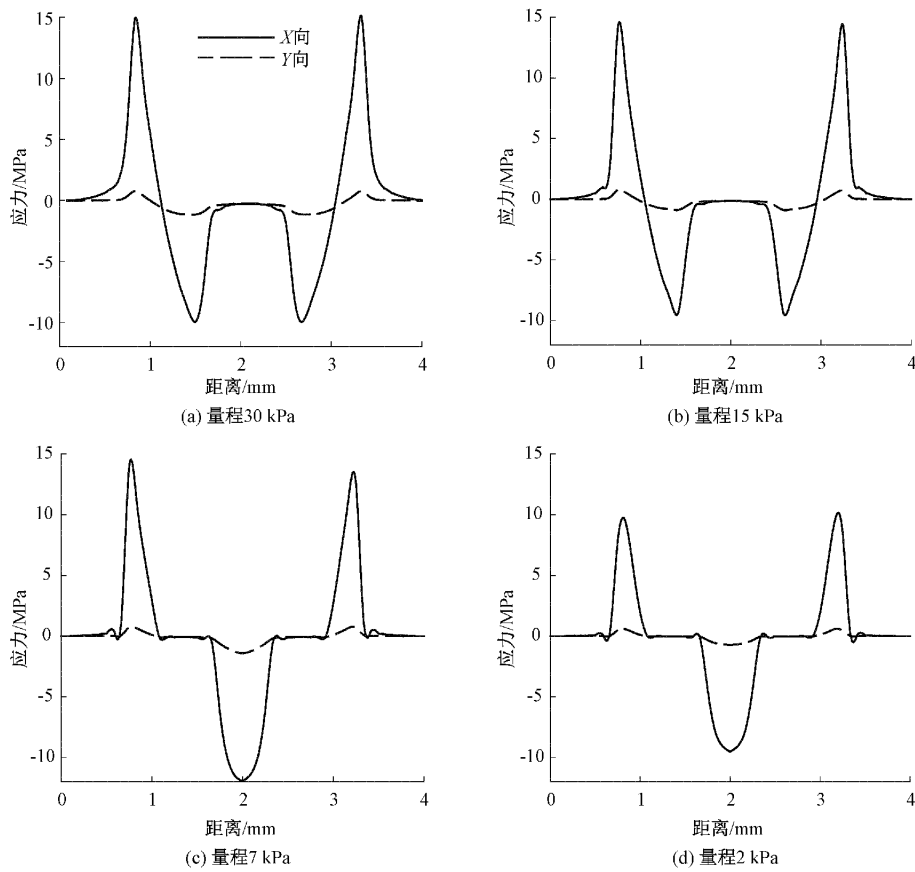
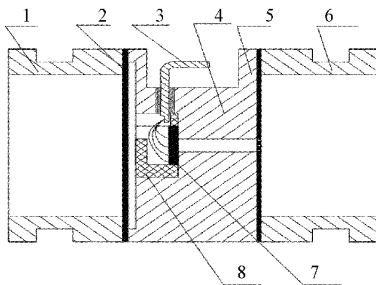


图 5 芯片满量程时纵横应力

表 3 不同量程下的灵敏度

量程/kPa	30	15	7	2
应力差/MPa	14.4	13.8	16.5	9.8
灵敏度/(mV/V)	10.0	9.6	11.5	6.8

为了满足一定环境适应性,在压敏芯片的引线端采用隔离膜片充油封装,芯片背面不充油,直接接触被测介质低压端。背面通过基座和压环安装过滤网,较少固体颗粒污染物的影响。为了减少倾角误差,需在充油端缩短隔离膜片与芯片表面的距离以及减少内部充油量。设计敏感芯体封装形式如图 6 所示。



1,6-压环,2-波纹膜片,3-引针,4-基座,5-过滤网,7-芯片,8-陶瓷环

图 6 单隔离膜片充油封装结构

由图 6 可知,在出线方式上,采取与敏感芯体轴线垂直的引针出线,减少轴向长度,充分利用径向空间尺寸,缩短正压端隔离膜片与压敏芯片表面的距离,减少芯片正面充油高度。

在充油端,隔离膜片与芯片表面距离不超过 2 mm,引针与芯片周围布置陶瓷环,保护芯片表面电路并减少充油量。充油端腔体可充油体积为 88 mm³,硅油密度为 0.99 g/cm³,总充油重量为 87 mg。在芯片版图设计上,将焊盘设计在靠近引针的一端,引针焊接端成平面状,方便金丝引线。没有引线的芯片上表面可通过陶瓷环进行保护。

5 测试结果与分析

按图 7 所示示意图进行检测,给传感器施加 1.5 mA 激励信号,设传感器轴线水平时倾角为 0°,正压端朝上的竖直位置为 90°,正压端朝下的倒立位置为 -90°。测量传感器 0°时的满量程输出 V 。满量程输出为满度输出与零点输出的差值。

测量传感器在 90°、-90°下的零点输出分别为 V_{01} 、 V_{02} , δ_1 为 90°时的倾角误差, δ_2 为 -90°时的倾角误差。传感器倾角误差 δ 为两者中的最大值。其中:

$$\delta_1 = V_{01}/V \times 100\% \quad (7)$$

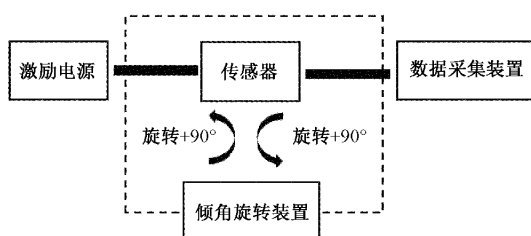


图 7 倾角测试示意图

$$\delta_2 = V_{02}/V \times 100\% \quad (8)$$

表 4 为 4 种量程传感器的满量程输出及 2 种位置下 (90° 、 -90°) 下的零点输出以及倾角误差。图 8 为 4 种量程零点输出随倾角变化。由表 4 和图 8 可知,以水平位置为参考,随着正压端逐渐朝上,零点输出逐渐增加,随着正压端逐渐朝下,零点输出逐渐减少。零点输出与角度近似线性关系。倾角误差最大值出现在正压端竖直向上时。在 4 种量程中,量程越大,倾角误差越小。30 kPa 量程的传感器具有最小倾角误差 0.44%。量程越小,倾角误差越大。2 kPa 量程的传感器具有最大倾角误差 0.94%。

表 4 不同倾角下零点输出及误差

量程/kPa	V/mV	V_{01} /mV	V_{02} /mV	δ_1	δ_2
30	52.29	2.65	2.22	0.44%	0.35%
15	46.19	-0.46	-0.82	0.51%	0.29%
7	59.68	2.04	1.11	0.87%	0.65%
2	41.60	2.61	1.88	0.94%	0.73%

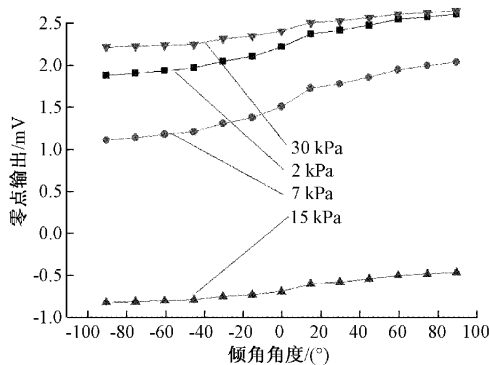


图 8 零点输出随倾角变化

6 结 论

基于数值仿真计算,本文研究了 4 种不同量程压敏芯片的参数设计。分析发现:单岛膜结构在硅岛边缘形成了应力集中,双岛膜结构在两岛之间中心位置形成了应力集中,均有助于提高灵敏度。

采用正压端单隔离膜片微量充油封装设计,以传感器轴线水平时为参考,随着正压端逐渐朝上,零点输出逐渐增大,正压端逐渐朝下,零点输出逐渐减少。零点输出与角度近似线性关系。

4 种不同量程的传感器中,倾角误差最大值均出现在正压端竖直向上时。30 kPa 量程的传感器具有最小的倾角误差,为 0.44%。2 kPa 量程的传感器具有最大倾角误差,为 0.94%。

参考文献

- [1] 许富景,马铁华,李新娥. 压力传感器加速度效应的系统辨识与建模研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6): 1236-1243.
- [2] 赵松玲,韩昕彤,桑艺珂. 基于扩散硅压阻压力传感器的压差测量[J]. 南方农机, 2020(2): 244-245.
- [3] 蒋红娜,白雪,朱丽. 压阻式差压传感器的迟滞非线性建模与补偿[J]. 电子测量技术, 2016, 39(6): 138-140.
- [4] LI C, ZHAO L, OCAA J, et al. Characterization and analysis of a novel structural SOI piezoresistive pressure sensor with high sensitivity and linearity[J]. Microsystem Technologies, 2020, 26(9): 2955-2960.
- [5] 吴佐飞,尹延昭,田雷. 一种压阻式微压传感器芯片设计与实现[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(6): 73-78.
- [6] BASOV M, PRIGODSKIY D. Investigation of high sensitivity piezoresistive pressure sensors at ultra-low differential pressures [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(14): 7646-7652.
- [7] KORDROSTAMI Z, HASSANLI K, AKBARIAN A. MEMS piezoresistive pressure sensor with patterned thinning of diaphragm [J]. Microelectronics International, 2020, 37(3): 147-153.
- [8] 王臻,李文璋,王彦奎,等. 无介质硅压阻式压力/压差传感器的研制[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(4): 27-33.
- [9] 胡浩,钟丽琼,周潜. 差压传感器技术的现状与发展[J]. 机床与液压, 2013, 41(11): 187-190.
- [10] 王臻,王伟,杨明等. 背压式硅压阻压差传感器的研制[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(1): 98-102.
- [11] 王峰,谭晓兰,张敏亮. 压阻式微压力传感器结构参数设计[J]. 自动化仪表, 2013, 34(3): 83-86.
- [12] 盛文军,陈丛,钱江蓉,等. 充油 MEMS 压力传感器研制[J]. 中国设备工程, 2018, 8(8): 137-138.
- [13] 郝建红,范宗皓,李艺. 一种改进型梁-岛-膜压力传感器的研究与设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019(4): 10-14.
- [14] 李村,杨鑫婉,赵玉龙,等. 适用于无引线封装的 SOI 压力敏感芯片总体结构[J]. 中国测试, 2020, 46(12): 54-59.
- [15] 郭源生. 基于 MMS 技术的介质隔离压力传感器工艺研究[J]. 仪表技术与传感器, 2018, 11(8): 18-20.
- [16] 金忠,何峰,刘又清,等. 基于 ASIC 的充油压力敏感芯体设计[J]. 物联网技术, 2020(6): 6-9.
- [17] 张艳华,陈玉玲,史岩峰,等. 高可靠性压力传感器的设计方法[J]. 传感器及非电量技术, 2018, 41(1): 109-113.

作者简介

张龙赐,高级工程师,主要研究方向为微机电系统设计、传感器设计及制造。

E-mail: zhanglc@cs48.com