

厚膜陶瓷电容式压力传感器 设计与制备

注：安徽省科技攻关项目资助（批准号：040120503）

摘要： 结合厚膜技术、陶瓷技术研制了双电容结构的压力传感器，详细阐述了厚膜陶瓷电容式压力传感器的结构设计、工作原理、制备方法、测试结果。试验结果表明：研制的传感器工作稳定，测量精确，非线性误差低于 1.0%，迟滞误差小于 0.5%，测试电容和参考电容温度系数几乎一致。

关键词： 厚膜；电容式；压力传感器

中图分类号：TP212.12 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2006)12-0012-0004

► 李鹏 李民强

一、前言

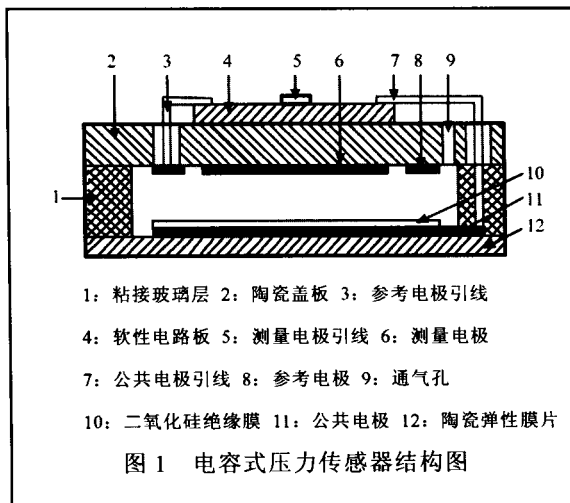
现代工业中压力传感器有着极其广泛的用途，例如测量压力，液位，物质成分比等，具有广大的市场前景。厚膜陶瓷电容式压力传感器是利用电容变间隙原理，采用厚膜传感技术和厚膜混合集成技术相结合，运用零力学滞后的陶瓷技术研制而成的非充液空气介质的传感器，同以往的压力传感器相比，具有较好的稳定性和重复性、精度高、温度漂移小、抗干扰能力强、结构简单、电容温度系数小、抗过载、耐腐蚀、蠕变和迟滞小、适用范围广等优点，成为具有良好应用前途的感压元件。

厚膜陶瓷电容式压力传感器作为感压元件是获取工业现场信号的重要装置，为后端信号处理电路提供了检测数据，是决定智能压力变送器性能的关键部件，影响着变送器的响应速度和稳定性等。本文讲述了厚膜陶瓷电容式压力传感器的双电容结构及其内部工作原理，对结构模型进行了推导计算，得到了参考电容和测量电容随压力变化的理论公式，给出了在实际生产中的厚膜工艺，最后分析产品（直径为 28mm 和 40mm 的感压元件）的测试结果，并给出总结。

二、结构原理与推导计算

1、结构与工作原理

电容式压力传感器是使用变隙式工作原理制成的感压元件，其结构如图 1 所示。盖板 and 膜片均为陶瓷制品（其主要化学成分为 Al_2O_3 ），通过厚膜丝网印刷工艺将钯银电极浆料（Pd-Ag 电极）印制在盖板和膜片上；利用环形低温玻璃将陶瓷盖板和弹性膜片电极粘接成一体，经烘干和高温烧结便形成了



一个非充液空气介质的电容器，其电容量由电容面积和两极间的间隙决定。电极初始间隙由烧结的玻璃体控制，当感压元件的弹性膜片受到外加压力时，弹性膜片产生形变，使两电极间隙减小，引起感压元件电容量的变化，电容的变化量与压力大小成比例。

由于陶瓷膜片边缘固定在陶瓷基座上，周边支撑，受力时中间形变大，边缘形变小，电容量输出具有非线性且其灵敏度较低。为减少温度影响和边缘效应，设计时在陶瓷膜片上设置一圆形的单电极作为公共电极，陶瓷盖板上设置双电极并使两电极面积相等，构成同轴环状的双电容感压元件结构。中心为测量电容 C_p ，边缘环形为参考电容 C_r ， C_r 的外侧是固支边。所研制的厚膜版图，设测量电极半径 R_1 ，参考电极内半径 R_2 ，参考电极外半径 R_3 ，则应满足 $R_3^2 - R_2^2 = R_1^2$ ，即测量电极与参考电极面积相等，也使测试电容和参考电容的初始容值相等，同时 R_2 比 R_1 大 0.5cm 以上，以减小测量电容和参考电容之间的干扰。双电容结构大大减小了传感器系统的非线性误差，同时在环境温度变化时，由于两电容感受同一温度的变化，温度对它们所产生的温度效应是一致的，差分输出时消去了温度影响，这就减小了因温度引起的测量误差，起到了温度自补偿作用。

研制了膜片直径为 $\phi 28\text{mm}$ 和 $\phi 40\text{mm}$ 两种感压元件，图2为 $\phi 40\text{mm}$ 双电容感压元件的电极网版设计图。电极板粘接时C对C' 作为公共电极引出端，A对A' 作为测量电容引出端，B对B' 作为参考电容引出端，通过粘接密封网版将上下电极边缘印刷玻璃粘接。

2、推导计算

由物理学可知，电容器的电容量是构成电容器的两个极板形状、大小、相互位置及电介质介电常数的函数。以最简单的平板单电容器为例，当不考虑边缘电场影响，在零压时其初始电容量为：

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r R^2}{d_0} \quad (1)$$

其中， ϵ_0 —真空介电常数， $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/cm}$ ；
 ϵ_r —极板间介质的相对介电常数，介质腔为空气， $\epsilon_r \approx 1$ ；

d_0 —电容极板间的初始间隙，单位 m；

R —电极半径，单位 m。

对弹性膜片施加压力 P 时，则距膜片中心为 r 处受压其极距间隙变化量(挠度)为：

$$W_r = \frac{3P(1-\mu^2)}{16Et^3} (a^2 - r^2)^2 \quad (2)$$

其中， W_r —挠度，单位：m；

μ —泊松比， $\mu \approx 0.3$ ；

E —扬氏弹性模量，单位：N/m²；

P —压力，单位：N；

t —弹性膜片厚度，单位：m；

a —弹性膜片半径，单位：m。

可见受载后弹性膜片发生挠曲，由于电容量的可加性，若电极半径为 R ，则总电容量为各挠曲微元电容的积分：

$$C = \int_0^R \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{d_0 - W_r} \cdot r \cdot dr = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{d_0} \int_0^R \frac{1}{1 - \frac{W_r}{d_0}} dr^2 \quad (3)$$

挠度 W_r 不会超过电容初始间隙 d_0 ，当 $W_r \ll d_0$ 时，上式被积函数经级数展开则有：

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{d_0} \int_0^R \left(1 + \frac{W_r}{d_0} + \left(\frac{W_r}{d_0}\right)^2 + \left(\frac{W_r}{d_0}\right)^3 + \dots + \left(\frac{W_r}{d_0}\right)^n + \dots \right) dr^2 \quad (n \rightarrow \infty) \quad (5)$$

由(2)式知，挠度 W_r 与压力 P 成线性关系，但经(4)式积分后电容 C 不再与压力 P 有线性关系。当 $n > 1$ 时出现压力 P 的非线性项。只有当挠度 $W_r \ll d_0$ 时，即 $W_r/d_0 \ll 1$ 时，电容量 C 才随作用压力 P 变化呈线性变化关系。此时：

$$C \cong \frac{\pi \eta_0 \epsilon_r}{d_0} \int_0^R \left(1 + \frac{W_r}{d_0} \right) dr^2 \quad (6)$$

将(2)式代入(6)，则：

$$C \cong \frac{\pi \eta_0 \epsilon_r}{d_0} \left(r^2 + \frac{KP}{d_0} \left(a^4 r^2 - a^2 r^4 + \frac{r^6}{3} \right) \right) \Bigg|_0^R \quad (7)$$

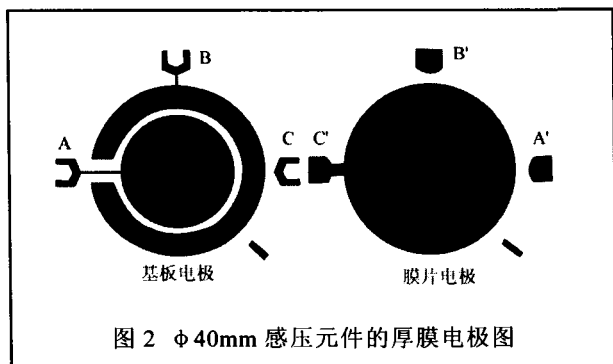


图2 $\phi 40\text{mm}$ 感压元件的厚膜电极图

其中, $K = \frac{3\pi\epsilon_0\epsilon_r(1-\mu^2)}{16E\delta_0^2l^3}$.

所以在弹性膜片上, 测试电容 C_p 和参考电容 C_r 分别为:

$$C_p \approx \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r R_1^2}{\delta_0} + KP \left[a^6 - (a^2 - R_1^2)^3 \right] \quad (8)$$

$$C_r \approx \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r (R_3^2 - R_2^2)}{\delta_0} + KP \left[(a^2 - R_2^2)^3 - (a^2 - R_3^2)^3 \right] \quad (9)$$

式中, a —弹性膜片半径; m;

R_1 —测试电容 C_p 的电极半径, m;

R_2 —参考电容 C_r 的环行电极内半径, m;

R_3 —参考电容 C_r 的环行电极外半径; m.

三、感压元件的制备

研制出的 $\phi 28\text{mm}$ 和 $\phi 40\text{mm}$ 两组感压元件中电极板为 96% Al_2O_3 陶瓷盖板和陶瓷弹性膜片, 通过厚膜丝网印刷工艺将钯银电极浆料 (Pd-Ag 电极) 印制在盖板和膜片上形成固定电极和可动电极, 利用环形低温玻璃将陶瓷盖板和弹性膜片电极粘接成一体, 经烘干和高温烧结便形成了一个非充液空气介质的双电容感压元件。其主要工艺如下:

(1) 绘制平面化设计版图后照相制板, 并经感光胶曝光显影, 将原图转印于丝网上构成掩模网板;

(2) 选择陶瓷基板, 使用 96% Al_2O_3 陶瓷膜片, 并在净化间进行超声波清洗;

(3) 丝网印刷: 将 Pd/Ag 电极浆料充分搅拌, 取适量浆料于网板上, 用刮板匀浆并通过网孔把浆料均匀地沉积在陶瓷基片, 其图案由丝网下面的掩膜图形决定;

(4) 电极印刷后, 水平放置流平 10min 至网纹消失, 然后在 125°C 下烘干;

(5) 电极烧结: 在隧道烧结炉 850°C 下烧结, 烧结带速: 0.83m/min;

(6) 印刷玻璃: 在有电极的弹性膜片及盖板上印刷玻璃层;

(7) 上下电极粘结: 据图 2 将弹性膜片和盖板粘结, 干燥箱烘干冷却;

(8) 烧结粘结玻璃, 烧结温度为 520°C, 至此感压元件制成。

四、性能测试实验与数据分析

性能测试实验包括压力测试实验, 温度测试实验。

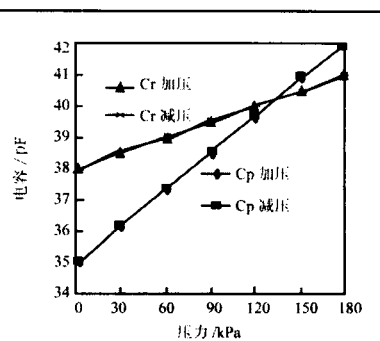


图 3 $\phi 28\text{mm}$ 产品压力—电容曲线图

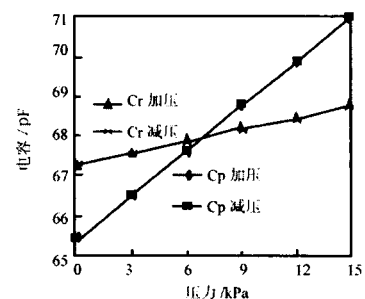


图 4 $\phi 40\text{mm}$ 产品压力—电容曲线图

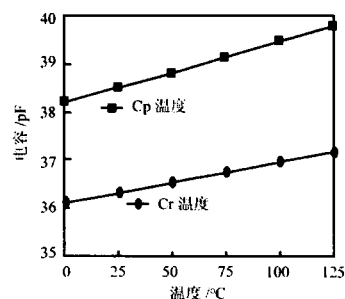


图 5 $\phi 28\text{mm}$ 产品温度—电容曲线图

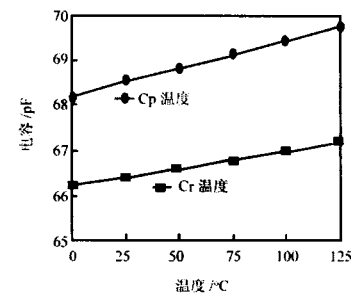


图 6 $\phi 40\text{mm}$ 产品温度—电容曲线图

在压力测试实验中, 采用浮球式压力计作为施压和测压设备, 采用电容测试仪作为电容测量装置, 得到 $\phi 28\text{mm}$ 和 $\phi 40\text{mm}$ 两组感压元件的压力—电容 C_p , C_r 关系曲线如图 3、图 4 所示。

压力测试实验表明: 两组样品的测试电容 C_p 和参考电容 C_r 与外加压力都有很好的线性关系, 非线性误差小, 最大不超过 1%, 曲线较为平滑, 并且加压、减压的压力正反行程曲线重合得很好, 迟滞误差很小, 都在 0.5% 以内, 这为感压元件后续的信号处理电路提供了很宽的性能提高空间。

测试结果也表明: C_r 随压力变化相对 C_p 小, 其灵敏度较低, 因为 C_r 电极在陶瓷盖板的外环, 相同的压力使 C_r 间隙变化相对 C_p 小, 所以 C_r 灵敏度较低, 随压力变化相对缓慢, 这就保证了后续信号处理电路处理电容差直时也有一定的灵敏度输出。

两组样品的测试电容和参考电容初始值大致相等, 但

也存在偏差,偏差的产生一方面是电极间隙控制存在误差,上下电极粘结时工艺因素也可能导致较大的偏差,比如:粘结时上下电极没完全对准或两侧用力不均,同时设计为使上下电极充分粘结密封,粘结玻璃层内半径比参考电极外半径小0.5mm左右,参考电极和粘结玻璃有面积重叠,这部分电容单元的介质是玻璃不再是空气,玻璃的介电常数比空气大,也可能使参考电容初始值比测量电容大;另外,电容测试过程中,电容引出线及仪器周边设备都可能产生电容分布干扰,存在少许寄生电容,在电容测试中,应将整个测试装置固定,并充分接地屏蔽,电容引出线尽可能短,且适当分开或垂直,并用单刀双掷开关一次性测试 C_p 和 C_r 值,保证杂散电容小而稳定。

在温度测试实验中,采用专用温度试验箱作为实验温度控制装置,得到 $\phi 28\text{mm}$ 和 $\phi 40\text{mm}$ 两组感压元件的温度-电容 C_p , C_r 关系曲线如图5,图6所示。

温度测试试验表明:两组感压元件的测试电容 C_p 、参考电容 C_r 的电容-温度曲线几乎平行,斜率很相近,且很平滑在后端电路处理时,取其差值信号作为输出,温度影响就可以相互抵消,具有较好的温度自补偿能力。温度主要影响感压元件的几何尺寸,温度变化使电容极板间的间隙或极板面积发生变化。由于两极板间的间隙非常小,只要很小的间隙变化就会引起很大的温度误差,由于 C_p 和 C_r 性质完全相同且置于同一温度场中,当测量环境温度变化时 C_p 和 C_r 产生相同的电容值变化,差值输出后起了一定的温度补偿作用。

五、结论

双电容厚膜陶瓷感压元件是一种干式空气介质的电容器,由于空气的介电常数随温度变化量极小,因而同以往的压力传感器相比其温度漂移小;再设计了双电容结构,同一温度对测试电容和参考电容所产生的温度效应是一致的,温度影响可以相互抵消,两电容差值输出时,大大减小了温度引起的测量误差,起到了温度自补偿作用。压力测试也表明:该感压元件具有较低的非线性误差和迟滞误差。感压元件电极间间隙通过丝网印刷的玻璃粘结层厚度来控制的,通过反复工艺实验可以有效地控制电极间隙,使得感压元件的初始电容量,电容变化量和非线性都能满足后续信号处理要求,为厚膜电容式压力传感器集成化奠定基础。

参考文献:

- [1] Chang Sung-pil, Mark G. Demonstration for integration capacitive pressure sensors with read-out circuitry on stainless steel substrate[J]. Sensors and Actuators A,2004,116: 198-204.
- [2] Rane S B, Khanna P K, Seth T. Firing and processing effects on microstructure of fritted silver thick film electrode materials for solar cells[J]. Materials Chemistry and Physics,2003,82:237-245.
- [3] Simon L, Dren S L, Gonnard P. PZT and PTscreen-printed thick films[J]. Journal of the European ceramic society,2001,(21):1441-1444.
- [4] Lee B Y, Chae I A, Kim J S. Low temperature firing of PZT thick films[J]. Materials letters, 2002, 56:518-521.

Design And Production Of Thick Film Ceramic Capacitive Pressure Sensor

Abstract: The pressure sensor with dual-capacity was designed by the thick film technology and the ceramic production technique. The structure design, basic working principle, fabrication technique and performance test of thick film ceramic capacitive pressure sensor were described in detail. Experimental results indicate that the sensor has many merits such as: the non-linearity error and hysteresis error are within 1.0% and 0.5% respectively. Both temperature coefficient and test capacity values are identical.

Keywords: thick film ; capacity; pressure sensor

作者简介:

李鹏,中国科学院合肥智能机械研究所、中国科学技术大学在读硕士研究生,传感技术国家重点实验室,研究方向为力敏传感器设计,智能仪表技术,嵌入式系统技术。

通讯方式:安徽省合肥市中国科学院合肥智能机械所

邮编:230031 E-mail: powell.lee@163.com

李民强,中国科学院合肥智能机械研究所副研究员,研究方向为压力传感器设计与制备,一维纳米传感器设计与研究等

本文编辑:陈明 读者服务卡编号002□