

Analyzing Electric Nonlinearity for Sensitivity in Pressure Sensors

SONG Qing-lin¹, SUN Yi-cai², DUO Xu-liang

- (1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. Hebei University of Technology, Tianjin, 300130, China;
3. Tianjin Research and Design Institute of Chemical Industry, Tianjin 300130, China)

Abstract: That the pressure signal is not linear with input voltage for pressure sensors found in experiments. The phenomenon is called electric nonlinearity for sensitivity. The nonlinear resistors, forming the bridge in pressure sensor, are influenced by temperature, input voltage and pressure together. And a multi-dimension model for nonlinear resistors is put forward. According to the model, the reasons for electric nonlinearity for sensitivity are analyzed. This paper points out that the equivalent functions of nonlinear resistors in the circuit can be simulated by a voltage-controlled source and its expansion function, showing the behavior of electric nonlinearity for sensitivity.

Key words: pressure sensor; electric drift of the offset; electric nonlinearity for sensitivity

EEACC: 7320; 7210

压力传感器灵敏度电压非线性分析

宋青林¹, 孙以材², 多旭亮³

- (1. 中国科学院电子学研究所, 传感技术国家重点实验室, 北京 100080;
2. 河北工业大学, 天津 300130;
3. 天津化工研究设计院, 天津 300133)

摘要: 实验发现压阻型压力传感器的压力输出信号与外加电压并不是线性关系, 存在着灵敏度电压非线性。本文指出组成压阻型压力传感器电桥的电阻受温度、输入电压、压力的共同影响, 在此基础上提出非线性扩散电阻的多维模型。依据此理论模型, 对灵敏度电压非线性现象的成因进行了理论分析, 并利用其中受电压控制的电压源及其扩展功能来模拟非线性扩散电阻在电路的等价作用, 进而显示出压力传感器灵敏度电压非线性的成因。

关键词: 压力传感器; 零点电漂移; 灵敏度电压非线性

中图分类号: TN389 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9490(2004)01-0031-04

图 1 为压力传感器的力敏电桥, 继发现压阻型压力传感器有零点电漂移^[1]后, 研究中又发现灵敏度电压非线性现象。电桥压力信号输出 U_{sig} 和电桥电压 V 并不是线性关系, 即 $\frac{\partial U_{sig}}{\partial V} \neq \text{恒量}$, 这里把这种现象叫做灵敏度电压非线性。经研究发现, 这种

非线性现象源于电桥扩散电阻的电压非线性, 此非线性产生的原因^[1]有以下三点: ① 扩散电阻器依靠 p-n 结与衬底隔离形成, p-n 结的空间电荷区宽度与电压有关, 导致电阻器的有效导电深度也与桥电压有关。50℃ 以下温度, p-n 结漏电流增长不很高时, 这是非线性产生的主要原因; ② p-n 结反向漏

收稿日期: 2003-09-12

基金项目: 国家“973”项目(G1999033102); 国家自然科学基金资助项目(69672015)。

作者简介: 宋青林(1975-), 男, 博士生, 研究方向为微传感技术及微光机电系统, qlsong719@yahoo.com.cn;

孙以材(1939-), 男, 教授, 博士生导师, 从事传感器技术、传感器敏感器件与半导体测试技术, pgfhe@163.com.

电流;③表面漏电导。对于灵敏度电压非线性,到目前为止国内外还没有相关文章报导。

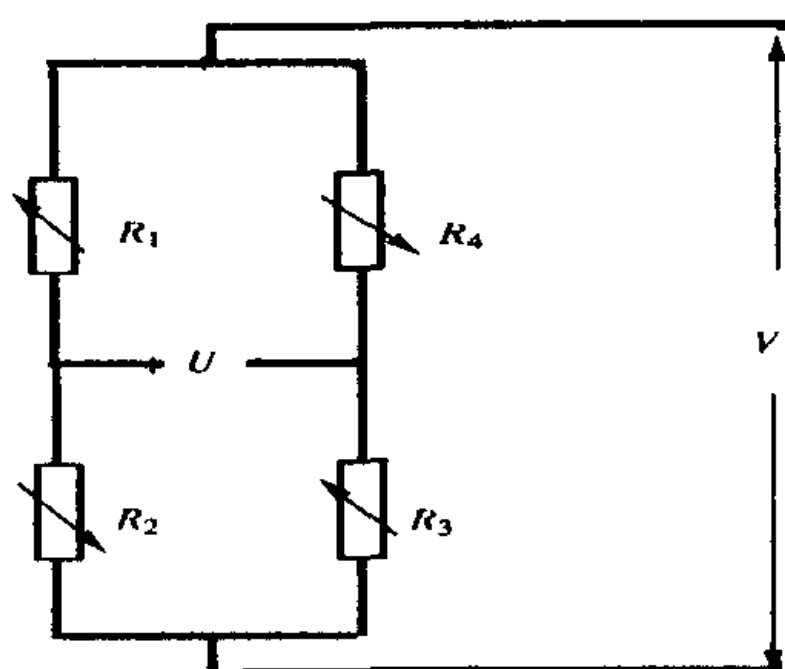


图1 压力传感器的力敏电桥

在测量过程中,如果外加电压有变化,压力传感器的灵敏度就不稳定,必然会给测量带来很大误差。因此研究灵敏度与外加电压的关系以及探讨灵敏度电压非线性的成因对传感器提高测量精度来说具有十分重要的意义。

研究发现^[1,3]半导体扩散电阻的阻值不仅与温度、压力有关,而且还具有明显的电压非线性特性,本文提出了扩散电阻与温度、压力、外加电压多维关系的模型。在扩散电阻多维模型的基础上对灵敏度电压非线性进行了理论分析和 PSPICE 模拟,并结合实验进行了比较验证。

1 扩散电阻的理论模型

压力传感器的扩散电阻 R_i 与外加电压 V 有关^[1], R_i 可以表示为 V 的函数,用泰勒公式展开:

$$R_i(V) = R_i^0 [1 + b_{i1}(V - V_0) + b_{i2}(V - V_0)^2 + \dots + b_{in}(V - V_0)^n \dots] \quad (1)$$

其中, R_i^0 为桥电压为 V_0 时扩散电阻条的阻值, b_{i1} b_{i2} \dots 为扩散电阻的电压系数。

经研究^[4]发现(1)式可以取一阶近似:

$$R_i(V) = R_i^0 [1 + b_i(V - V_0)] \quad (2)$$

$b_i = \frac{\partial R_i}{\partial V} \Big|_{V=V_0}$ 可由实验确定,文献^[1]已报导对电桥四条电阻分别有 $b_1, b_4 < 0, b_2, b_3 > 0$,一般在 10^{-2} 数量级。

同时考虑输入电压和温度对压力传感器影响,组成电桥非线性扩散电阻在温度 $T = T_0$ 、某桥压 $V = V_0$ 附近可用泰勒公式展开并取一级近似^[5],则电阻可表示为:

$$R_i(T, V) = R_i^0 [1 + \alpha_i(T - T_0) + b_i(V - V_0)] \quad (3)$$

其中, α_i 为温度系数, R_i^0 为温度为 T_0 、输入电压为 V_0 时扩散电阻的阻值。

利用压阻效应原理制成的压力传感器,其半导体电阻随压力的变化率为:

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_i \sigma \quad (4)$$

其中, π_i ($i = 1, 4$) 分别为四个力敏电阻条的压阻系数, σ 为应力。仅在压力的作用下,压敏电阻的变化规律可表示为:

$$R_i(P) = R_i^0 (1 \pm k_i P) \quad (5)$$

R_i^0 为无压力时扩散电阻的阻值;压力系数 k_i 为一正常数(一般在 10^{-3} 数量级),它的大小与电阻条的压阻系数 π 成正比。为了使力敏电桥有较大的信号输出,在压力传感器芯片设计和制作过程中,使其中两电阻条的阻值随压力增大而增大,而另两条相反。

同时考虑有压力 P 、温度 T 和外加电压 V 对扩散电阻阻值影响时,用多元泰勒公式将扩散电阻表达式展开并取一阶近似:

$$R_i(T, V, P) = R_i^0 [1 + \alpha_i(T - T_0) + b_i(V - V_0) \pm k_i P] \quad (6)$$

其中 R_i^0 为温度为 T_0 、输入电压为 V_0 、无压力时扩散电阻的阻值。

式(6)中由压力引起的电阻的变化量的大小为 $\Delta R_i = R_i^0 k_i P$,则由压力引起的电阻的变化率为:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R_i}{R_i} &= \left| \frac{R(T, V, P) - R(T, V, 0)}{R(T, V, 0)} \right| \\ &= \frac{k_i P}{1 + \alpha_i(T - T_0) + b_i(V - V_0)} = \pi_i |\sigma| \quad (7) \end{aligned}$$

由上式可得压阻系数和压力系数的关系为:

$$\pi_i = \frac{k_i P / |\sigma|}{1 + \alpha_i(T - T_0) + b_i(V - V_0)} \quad (8)$$

在输入电压稳定为 V_0 时,由式(8)可以得到:

$$\pi_i = \frac{k_i P / |\sigma|}{1 + \alpha_i(T - T_0)} \quad (9)$$

显然,此时

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial T} = - \frac{\alpha_i k_i P / |\sigma|}{[1 + \alpha_i(T - T_0)]^2} < 0 \quad (10)$$

所以, π_i 具有负温度特性。

在温度稳定为 T_0 时,由式(8)可以得到:

$$\pi_i = \frac{k_i P / |\sigma|}{1 + b_i(V - V_0)} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial V} = - \frac{b_i k_i P / |\sigma|}{[1 + b_i(V - V_0)]^2} \quad (12)$$

因此, π_i 也具有电压特性, 其符号和电压系数的符号相反。

2 灵敏度电压非线性理论分析

当图 1 所示的力敏电桥用电压 V 激励时, 电桥输出 U 为:

$$U = V \frac{S}{K} \quad (13)$$

其中,

$$S = (R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 - \Delta R_2)(R_4 - \Delta R_4) \\ = S_0 + \Delta S \quad (14)$$

$\Delta R_i (i=1, 4)$ 是由压力引起的电阻的变化量; $R_i (i=1, 4)$ 为未加压时扩散电阻的阻值; $K = (R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 - \Delta R_4) \approx \text{const}$; $S_0 = R_1 R_3 - R_2 R_4$ 为电桥的不平衡量;

$\Delta S \approx R_1 R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) + R_2 R_4 \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$ 为压力引起的电桥不平衡量。

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = \pi_i |\sigma|$$

$$\Delta S = R_1 R_3 (\pi_1 + \pi_3) |\sigma| + R_2 R_4 (\pi_2 + \pi_4) |\sigma| \quad (15)$$

把(14)式代入(13)式中得到:

$$U = V \left(\frac{S_0}{K} + \frac{\Delta S}{K} \right) = U_0 + U_{sig} \quad (16)$$

$$U_0 = V \frac{S_0}{K} \quad (17)$$

称为零点输出;

$$U_{sig} = V \frac{\Delta S}{K} \quad (18)$$

称为压力信号输出。

当压力 P 存在并且外加电压 V 变化时, 式(18)两边对外加电压求一阶导数得到:

$$\frac{\partial U_{sig}}{\partial V} = \frac{\Delta S}{K} + \frac{V}{K} \frac{\partial \Delta S}{\partial V} - \frac{V \Delta S}{K^2} \frac{\partial K}{\partial V} \quad (19)$$

为灵敏度电压变化率

$$\frac{\partial \Delta S}{\partial V} = \frac{\partial [R_1 R_3 (\pi_1 + \pi_3) |\sigma| + R_2 R_4 (\pi_2 + \pi_4) |\sigma|]}{\partial V} \\ \approx R_1 R_3 |\sigma| \frac{\partial (\pi_1 + \pi_3)}{\partial V} + R_2 R_4 |\sigma| \frac{\partial (\pi_2 + \pi_4)}{\partial V} \\ + 2\pi |\sigma| \frac{\partial (R_1 R_3 + R_2 R_4)}{\partial V} \quad (20)$$

由(12)式得:

$$R_1 R_3 |\sigma| \frac{\partial (\pi_1 + \pi_3)}{\partial V} + R_2 R_4 |\sigma| \frac{\partial (\pi_2 + \pi_4)}{\partial V} \\ \approx - [R_1 R_3 (b_1 + b_3) + R_2 R_4 (b_2 + b_4)] k_i P \\ = \Gamma \quad (21)$$

因为 $R_i = R_i^0 [1 + b_i (V - V_0)]$,

所以:

$$2\pi |\sigma| \frac{\partial (R_1 R_3 + R_2 R_4)}{\partial V} \\ \approx 2\pi |\sigma| [(b_1 + b_3) R_1^0 R_3^0 + (b_2 + b_4) R_2^0 R_4^0] \quad (22)$$

而

$$\frac{\Delta S}{K} \frac{\partial K}{\partial V} = \frac{R_1 R_3 (\pi_1 + \pi_3) |\sigma| + R_2 R_4 (\pi_2 + \pi_4) |\sigma|}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \times \\ \frac{\partial [(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)]}{\partial V} \\ \approx \pi |\sigma| (b_1 + b_2 + b_3 + b_4) (R_1 R_3 + R_2 R_4) \\ \approx 2\pi |\sigma| \frac{\partial (R_1 R_3 + R_2 R_4)}{\partial V} \quad (23)$$

所以,

$$\frac{\partial U_{sig}}{\partial V} = \frac{\Delta S}{K} + \frac{\Gamma}{K} V \quad (24)$$

Γ 符号及数值是灵敏度电压非线性的决定因素。灵敏度随输入电压成近似一次函数规律变化, 这里把截距 $\frac{\Delta S}{K}$ 称作线性灵敏度, 斜率 $\frac{\Gamma}{K}$ 称作非线性灵敏度系数。非线性灵敏度系数的存在是产生灵敏度电压非线性的原因, 而力敏电阻的阻值不同以及其电压系数的一致则是产生该系数的根源。

3 对灵敏度电压非线性特性的模拟及实验

为了验证以上提出的非线性扩散电阻多维模型以及研究灵敏度非线性的规律, 利用电压控制的电压源及其扩展功能模型^[4,5]对压力传感器的电桥进行 PSPICE 模拟。选取温度为 25℃, 选定压力 P 的值不同(0 和 4MPa)时, 得到无压力和压力为 4MPa 的电桥输出曲线, 如

图 2 所示。图中曲线 1 为无压力时, 电桥输出 U_1 与输入电压关系曲线; 图中曲线 2 为压力为 4MPa 时, 电桥输出 U_2 与输入电压关系曲线; 曲线 2 和曲线 1 之间的距离就是电桥输出的压力信号电压 U_{sig} 的大小。利用模拟得到的数据, 制作出为 U_{sig}/V 与输入电压 V 的关系曲线, 如图 3 所示。图中得到的

线性灵敏度 $\frac{\Delta S}{K}$ 为 4.27×10^{-3} , 非线性系数 $\frac{\Gamma}{K}$ 为 2.53×10^{-5} 。 U_{sig}/V 的值随电压的增大而变大, 出现了灵敏度电压非线性现象。从模拟的结果可知, 产生灵敏度电压非线性原因主要是力敏电阻电压系数的不一致。

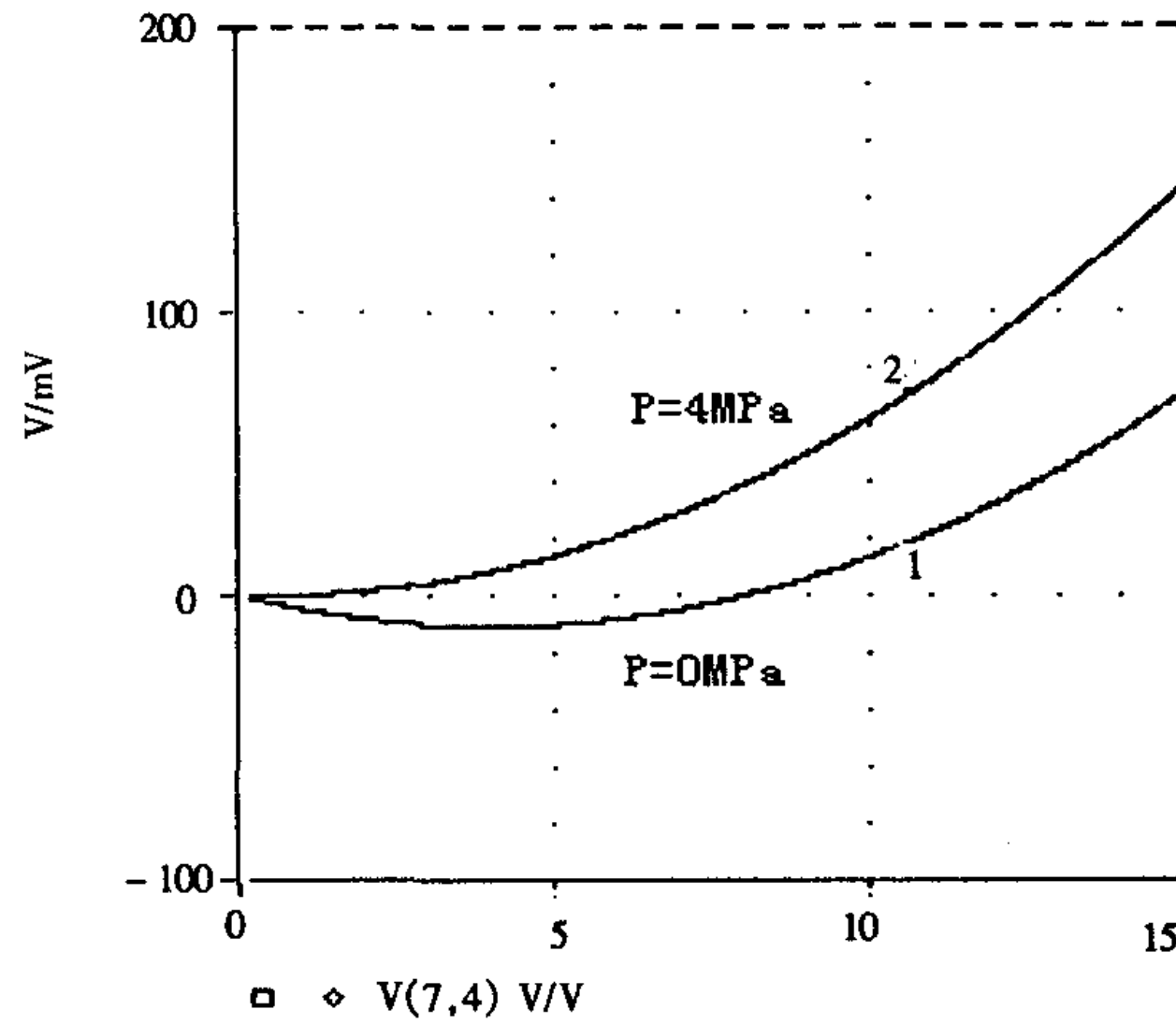


图 2 压力传感器电桥输出 U 与输入电压 V 之间关系的模拟曲线

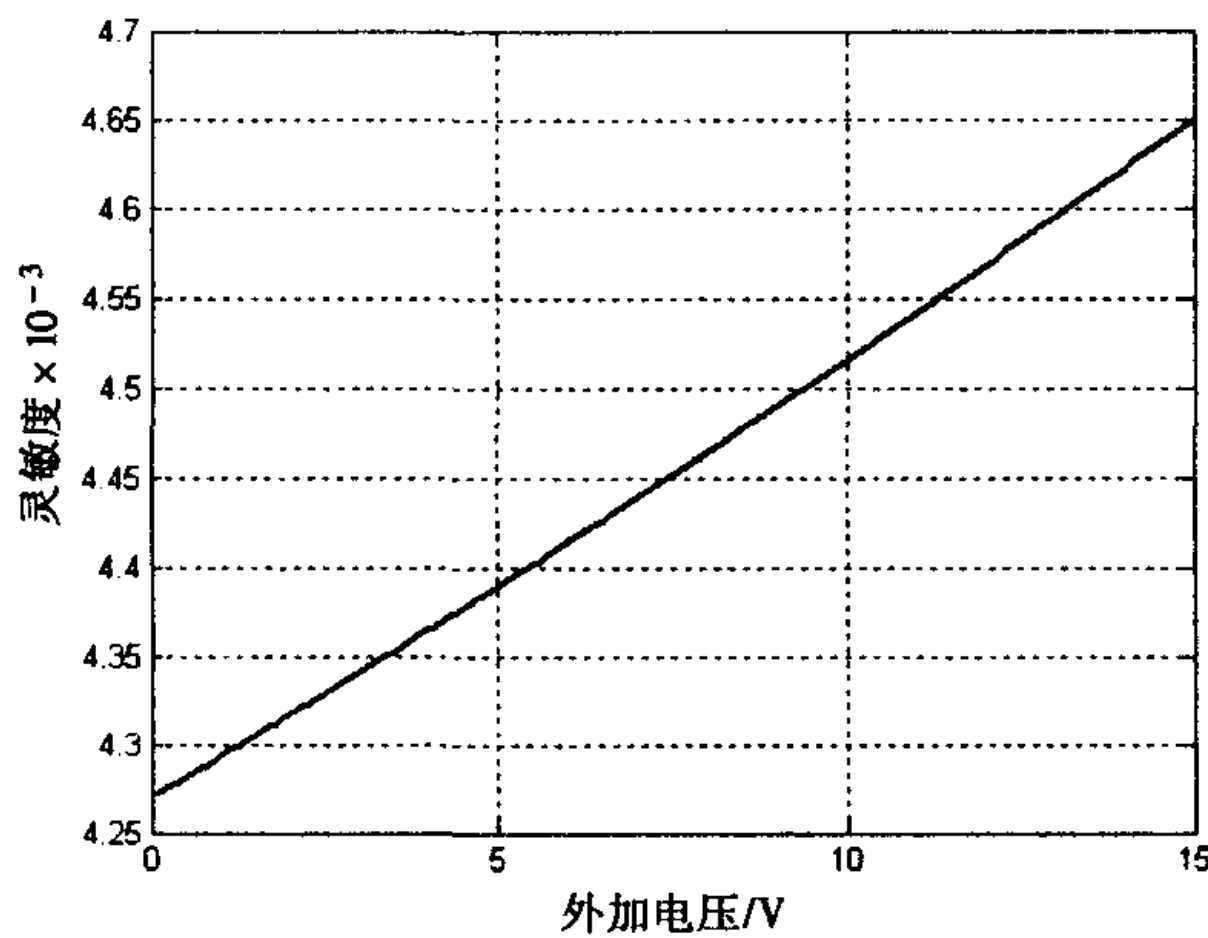


图 3 压力传感器灵敏度与输出电压 V 之间关系的模拟曲线

实验中, 将一个压力传感器在温度为 25°C 时、外加电压为 9.40 V 时调节电桥输出为零(力敏电桥为图 1), 然后加 4 MPa 的压力, 测得不同输入电压 V 时压力信号电压 U_{sig} , 绘制出 U_{sig}/V — V 关系曲线, 如图 4 所示。图中得到的线性灵敏度 $\frac{\Delta S}{K}$ 为 4.05×10^{-3} , 非线性系数 $\frac{\Gamma}{K}$ 为 4.74×10^{-5} 。

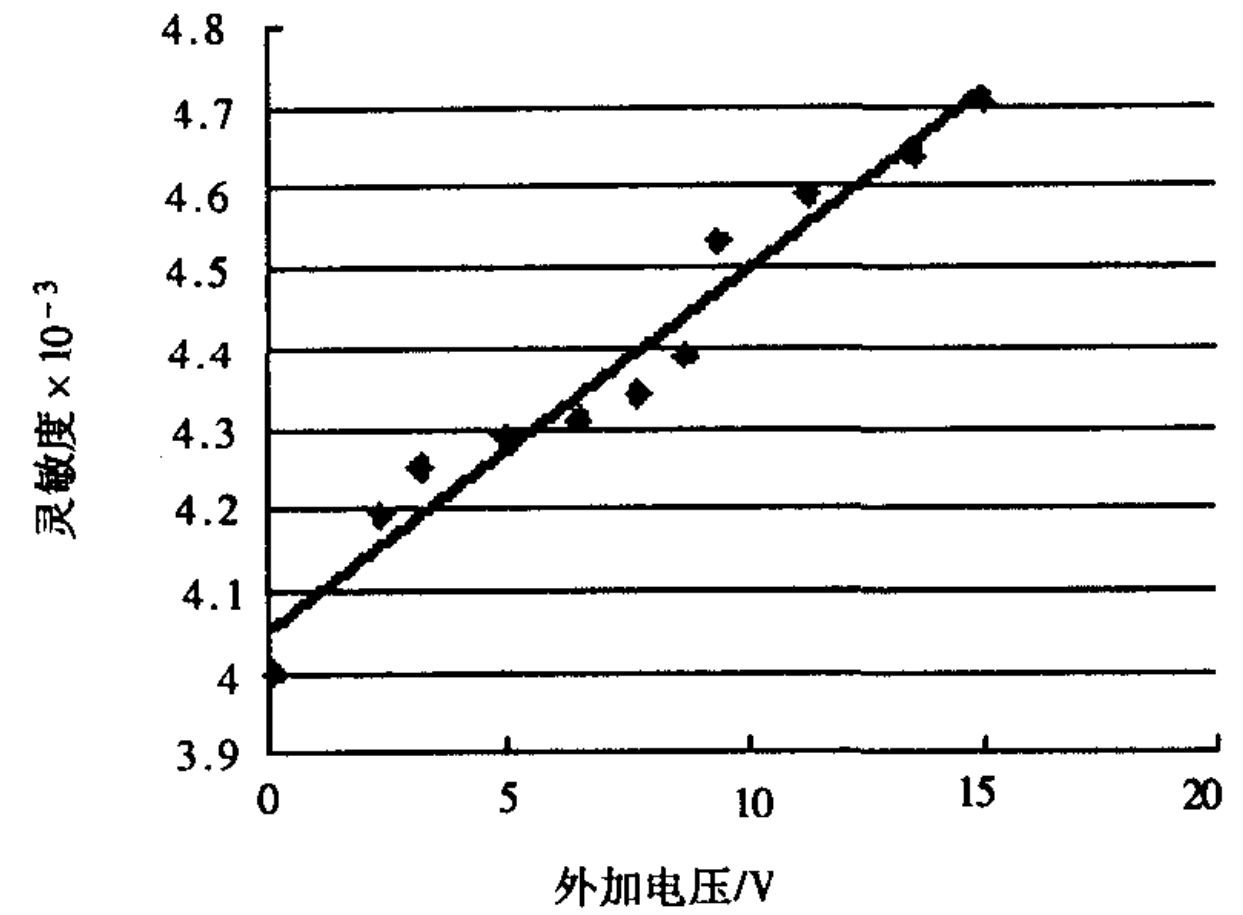


图 4 一压力传感器灵敏度与输入电压 V 之间关系的实验曲线

比较图 3 和图 4 发现两图虽然在数值上存在差别, 但两图中的形状很相似, 说明非线性模型有使用价值。只是在电阻初值, 温度、电压和压力系数的选取上模拟和实验有些差别。实验和模拟结果一样出现了灵敏度电压非线性现象。

4 结 论

研究发现压阻型压力传感器的灵敏度具有电压非线性, 并确定了起因于非线性扩散电阻的电压特性。通过模拟和实验比较, 验证了以上提出的用于描述扩散电阻的多维理论模型的可使用性以及灵敏度电压非线性理论分析的正确性。

参考文献:

- [1] Sun Yi cai, Electric Drift of the Bridge Offset for Pressure Sensors and Its Utilization [J]. Sensors and Actuators A, 1997, 582:49 - 256.
- [2] Tuftte O N and Steltzer E L. Piezoresistive Properties of Silicon Diffused Layers [J]. J. Appl. Phys. 1963, 34:313 - 318.
- [3] 宋青林, 孙以材, 压力传感器的激励电源电压值的选择 [J]. 传感器世界, 2000, 6(9):8 - 13.
- [4] 孙以材, 宋青林, 压力传感器零点电漂移和热零点漂移的模拟 [J]. 电子器件, 2000, 2:94 - 99.
- [5] 宋青林, 孙以材, 应用 PSPICE 软件分析压力传感器的非线性电阻电桥电路 [J]. 传感器世界, 2000, 6(4):16 - 20.