



硅的电阻率温度系数~电阻率关系 SI 几种拟合方法的比较

摘要：本文以硅单晶的电阻率温度系数~电阻率非线性曲线为应用对象，用直线最小二乘法、牛顿插值法、规范化多项式、MATLAB 3次、4次及5次曲线分别进行拟合近似逼近，并得到各自的多项式，用到表和图线以作对比。结论是牛顿插值法、规范化多项式法、MATLAB 5次曲线最为逼近。

关键词：电阻率温度系数；最小二乘法；牛顿插值法；规范化多项式法；MATLAB 法

中图分类号：O241 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2006)03-0012-006

孙以材 宫云梅 王静 程东升 张效玮

一、引言

非线性函数的近似拟合在工程技术及科学计算中有着广泛的用途。曲线拟合的目的是寻找一条光滑曲线，即建立代数多项式关系，使它在某种准则下拟合效果最佳。依据原始非线性函数的分布性质，一类为确切分布的拟合，这时非线性函数在 $(x_i, y_i) i=1, 2, \dots, i \dots$ 点已有确切值。另一类为模糊分布的拟合，这时非线性函数只在两 endpoint $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 及斜率有确切值，而介于 x_1 和 x_2 之间即 $x \in (x_1, x_2)$ 点上的分布 y 值不确切。确切分布的拟合方法有最小二乘法^[1, 14]、牛顿插值法^[2]、规范化多项式拟合法^[3 4 9]、MATLAB 法^[5 6 7]等。模糊分布拟合法^[15]有三控制要素多项式拟合法和四控制要素多项式拟合法。本文主要讨论确切分布的拟合方法，并根据几种拟合方法对硅的电阻率的温度系数~电阻率曲线的拟合效果，得出较佳拟合法，这可应用于分析研究压力传感器信号^[8]。

二、几种拟合方法的基本原理

1、直线最小二乘法

如果实际校准曲线有 N 个测试点，对应的输入输出数据分别为电阻率 T_i ，电阻率的温度系数 $U_i (i=1, 2, \dots, N)$ 。设最小二乘拟合直线为： $U = a + kT$ (1)

其中，第 i 个测试点与所拟合直线的垂直偏差为： $\delta_i = U_i - (a + kT_i)$ (2)

根据最小二乘方原理，使 $\sum_i \delta_i^2$ 最小。可得 k, a 值如下：

$$k = \frac{N \sum T_i U_i - \sum T_i \sum U_i}{N \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2} \quad (3)$$

$$a = \frac{\sum T_i^2 \sum U_i - \sum T_i \sum T_i U_i}{N \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2} \quad (4)$$

根据校准曲线上 N 个测量值，将式 (3) 和式 (4) 编制计算程序，很快可得最小二乘法拟合直线的截距 a 和斜率 k 。

然后再由式(2)求出各残差 δ_i , 其中绝对值最大者即为最小二乘非线性误差。

2、牛顿插值法

插值计算方法的基本思想是：构造某个简单函数用以逼近原函数，通过计算逼近的关系式从而得到研究对象的近似值。逼近函数的类型有多种选法，但其基本是代数多项式，建立代数多项式也有多种方法。其中牛顿插值的方法具有递推性，其组成很有规律，方便于实际计算，并能应用较少的已知数据达到应有的精度。

差商是构造牛顿插值的基础。设已知函数 $y=f(x)$ 在区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上的平均变化率 $[f(x_{i+1})-f(x_i)]/(x_{i+1}-x_i)$ 称为函数 $f(x)$ 关于点 x_i, x_{i+1} 的一阶差商，并记为 $f[x_i, x_{i+1}]$ 。相仿地，一阶差商的平均变化率称为函数 $f(x)$ 的二阶差商，并记为 $f[x_i, x_{i+1}, x_{i+2}]$ 。依次类推，这就是说，高阶差商是由比它低一阶的两个差商组合而成。补充定义一个节点时的函数值 $f(x_0), f(x_1), \dots$ 为零阶差商。

x_k	0 阶	1 阶	2 阶	3 阶
x_0	$f(x_0)$			
x_1	$f(x_1)$	$f[x_0, x_1]$		
x_2	$f(x_2)$	$f[x_1, x_2]$	$f[x_0, x_1, x_2]$	
x_3	$f(x_3)$	$f[x_2, x_3]$	$f[x_1, x_2, x_3]$	$f[x_0, x_1, x_2, x_3]$
...

因此， n 次牛顿插值多项式 $N_n(x)$ 可记为：

$$N_n(x) = f[x_0] + \Delta f[x_0, x_1](x-x_0) + \Delta^2 f[x_0, x_1, x_2](x-x_0)(x-x_1) + \dots + \Delta^n f[x_0, x_1, \dots, x_n](x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{n-1})$$

3、规范化多项式法

有一非线性信号 $y=f(x)$ 可以用一个多项式来表示：

$$y = y_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \dots + a_nx^n + \dots \quad (5)$$

通常取到 $n=4$ 或 5 便可以近似表达非剧变的非多极值的单值关系。当 $n=4$ 时，即有：

$$y - y_0 = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \varepsilon \quad (6)$$

式中， ε 为小量

如何得到多项式各个系数成为解决问题的关键。对于式(6)来说，一般需要有 4 次测量值 $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4$ ，即曲线上的四个点（如图 1 所示）方可得到 a_1, a_2, a_3, a_4 。对非线性信号式（6），当 x 取 x_1, x_2, x_3, x_4 时，便相应有：

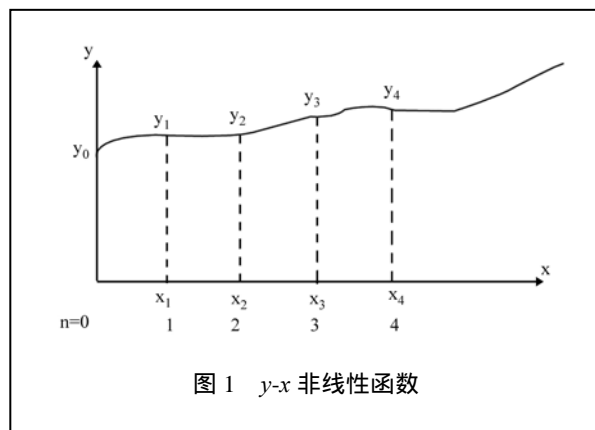


图 1 $y=f(x)$ 非线性函数

$$\begin{bmatrix} y_1 - y_0 \\ y_2 - y_0 \\ y_3 - y_0 \\ y_4 - y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \\ \Delta y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_1^2 & x_1^3 & x_1^4 \\ x_2 & x_2^2 & x_2^3 & x_2^4 \\ x_3 & x_3^2 & x_3^3 & x_3^4 \\ x_4 & x_4^2 & x_4^3 & x_4^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

求解上述代数方程可得到 a_1, a_2, a_3, a_4 ：

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_1^2 & x_1^3 & x_1^4 \\ x_2 & x_2^2 & x_2^3 & x_2^4 \\ x_3 & x_3^2 & x_3^3 & x_3^4 \\ x_4 & x_4^2 & x_4^3 & x_4^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \\ \Delta y_4 \end{bmatrix} = (x_{ij}^j)^{-1} \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \\ \Delta y_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

这里张量 x_{ij}^j 的右上角标代表方阶，第二个右下标则是列指标， x_1, x_2, x_3, x_4 取决于所测物理量的大小，与具体问题有关。因此求解 $(x_{ij}^j)^{-1}$ 便不能用一种标准化的方法。现在提出一种规范的方法，也就是说，不管什么问题， (x_{ij}^j) 与 $(x_{ij}^j)^{-1}$ 都可以转化为一种规范化的同构矩阵及相应的逆矩阵。这为非线性的问题采用多项式拟合提供了极大的方便。

令 $X_n = nX_1 \quad n$ 为整数 (9)

即有等分点 $x_2=2x_1, x_3=3x_1, x_4=4x_1, \dots$ 因此， x_1 被称为横坐标的缩尺。例如取 $n=4$ ，则有 $x_1=x_{max}/4$ 。于是有 (x_{ij}^j) 及 $(x_{ij}^j)^{-1}$ 规范化同构矩阵 (n_{ij}^j) 及 $(n_{ij}^j)^{-1}$ ，即：

$$(n_{ij}^j) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2^2 & 2^3 & 2^4 \\ 3 & 3^2 & 3^3 & 3^4 \\ 4 & 4^2 & 4^3 & 4^4 \end{bmatrix}; (n_{ij}^j)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2^2 & 2^3 & 2^4 \\ 3 & 3^2 & 3^3 & 3^4 \\ 4 & 4^2 & 4^3 & 4^4 \end{bmatrix}^{-1} \quad (10)$$

即： $(n_{ij}^j) (n_{ij}^j)^{-1} = I$ 。

这样与式（6）相对应有规范化多项式为：

$$y - y_0 = an + bn^2 + cn^3 + dn^4 \quad (11)$$

由逆矩阵的求法可以得到：

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2^2 & 2^3 & 2^4 \\ 3 & 3^2 & 3^3 & 3^4 \\ 4 & 4^2 & 4^3 & 4^4 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 4.0000 & -3.0000 & 1.3333 & -0.2500 \\ -4.3333 & 4.7500 & -2.3333 & 0.4583 \\ 1.5000 & -2.0000 & 1.1667 & -0.2500 \\ -0.1667 & 0.2500 & -0.1667 & 0.0417 \end{bmatrix} = (t_{ij}) \quad (12)$$

可以得到下式：

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = (n_{ij})^{-1} \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \\ \Delta y_4 \end{bmatrix} = (t_{ij}) \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \\ \Delta y_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 4.0000\Delta y_1 - 3.0000\Delta y_2 + 1.3333\Delta y_3 - 0.2500\Delta y_4 \\ -4.3333\Delta y_1 + 4.7500\Delta y_2 - 2.3333\Delta y_3 + 0.4583\Delta y_4 \\ 1.5000\Delta y_1 - 2.0000\Delta y_2 + 1.1667\Delta y_3 - 0.2500\Delta y_4 \\ -0.1667\Delta y_1 + 0.2500\Delta y_2 - 0.1667\Delta y_3 + 0.0417\Delta y_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中 a, b, c, d 就是 $y - y_0 = an + bn^2 + cn^3 + dn^4$ 规范化多项式的各系数。将式 (5) 表示为：

$$y = y_0 + a_1x_1 \frac{x}{x_1} + a_2x_1^2 \frac{x^2}{x_1^2} + a_3x_1^3 \frac{x^3}{x_1^3} + a_4x_1^4 \frac{x^4}{x_1^4} \quad (14)$$

$$= y_0 + a_1x_1n + a_2x_1^2n^2 + a_3x_1^3n^3 + a_4x_1^4n^4$$

其中 $n = \frac{x}{x_1}$, 比较式 (11) 和 (14) 可以得到：

$$a_1 = \frac{a}{x_1}, \quad a_2 = \frac{b}{x_1^2}, \quad a_3 = \frac{c}{x_1^3}, \quad a_4 = \frac{d}{x_1^4}$$

由式 (6), 即 $y = y_0 + (a_i)^T(x_i)$, 其中 $(abcd)^T$ 就是式(13), 可见这是一种标准算法, 与 x 物理量无关, 与物理量有关的仅仅是其缩尺 x_1 。

4、MATLAB 法

利用多项式或其它已知函数, 对所测得或采集到的离散数据点进行逼近, 如果要用人工计算, 则计算量非常之大, 而且比较繁琐, 若利用 Matlab 软件, 则只需要几个语句就可完成。Matlab 软件进行拟合的主要原理也是应用最小二乘法, 不过它可以方便的进行高次拟合, 不限于直线拟合。同时利用 Matlab 强大的绘图功能, 还可以将拟合而成的曲线绘制成图, 使之一目了然。在 Matlab 中, 用函数 Polyfit 可以对一组数据进行定阶数的多项式拟合。如: 测得一组数据

$$X = [0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1]$$

$$Y = [-0.447, 1.978, 3.28, 6.16, 7.08, 7.34, 7.66, 9.56, 9.48, 9.30, 11.2]$$

试用最小二乘法对这一组数据 X 和 Y 进行二次多项式拟合。这时只要用命令 $n=2; p=polyfit(x, y, n)$ 即可得到 $p = -9.8108, 20.1293, -0.0317$ 。

这表明二次多项式为 $y = -9.8108x^2 + 20.1293x - 0.0317$ 这样拟合出来的多项式能保证在所输入的数据 X 所能达到的区间上及其附近, 最大限度地逼近原函数。

表 1 硅的电阻率温度系数 ~ 电阻率关系各种方法的拟合函数

电阻率 ρ	$10^{-3.8}$	$10^{-3.3}$	$10^{-2.8}$	$10^{-2.3}$	$10^{-1.8}$	$10^{-1.3}$	$10^{-0.8}$	$10^{-0.3}$	$10^{0.2}$	$10^{0.7}$	$10^{1.2}$
$x = \lg \rho + 3$	-0.8	-0.3	0.2	0.7	1.2	1.7	2.2	2.7	3.2	3.7	4.2
ASTM 原始值 y	0.2	0.2	0.18	0.08	-0.03	0.3	0.55	0.68	0.75	0.8	0.81
规范化拟合 (分为两段拟合)	$y = 0.0667 \times x_1^5 - 0.2467 \times x_1^4 + 0.2433 \times x_1^3 - 0.0983 \times x_1^2 + 0.0150 \times x_1 + 0.2$ 其中: $X_1 = X + 0.8 \quad X \in [-0.8, 1.7]$ $y = -0.0107 \times x_3^5 + 0.0400 \times x_3^4 + 0.0267 \times x_3^3 - 0.3300 \times x_3^2 + 0.6540 \times x_3 + 0.3$ 其中: $X_3 = X - 1.7 \quad X \in [1.7, 4.2]$										
最小二乘法	$y = 0.1625 \times x_1 + 0.1346$										
牛顿插值	$y = -0.007x^{10} + 0.1235x^9 - 0.8847x^8 + 3.2442x^7 - 6.1278x^6$ $+ 4.4466x^5 + 2.5184x^4 - 5.0504x^3 + 1.1779x^2 + 0.4298x + 0.0822$										
MATLAB 二次曲线	$y = 0.0372x^2 + 0.0361x + 0.1491$										
MATLAB 三曲线	$y = -0.0307x^3 + 0.1938x^2 - 0.0935x + 0.0677$										
MATLAB 四次曲线	$y = -0.0112x^4 + 0.0454x^3 + 0.0697x^2 - 0.1114x + 0.1260$										
MATLAB 五次曲线	$y = 0.0122x^5 - 0.1149x^4 + 0.3015x^3 - 0.0371x^2 - 0.2940x + 0.1801$										
MATLAB 五次曲线 (分段拟合)	$y = 0.0867x^5 - 0.1363x^3 - 0.1068x^2 - 0.0416x + 0.1937 \quad X \in [-0.8, 1.7]$ $y = 0.0160x^5 - 0.2627x^4 + 1.7104x^3 - 5.5961x^2 + 9.4338x - 6.0014$ $X \in [1.7, 4.2]$										

三、对硅的电阻率温度系数 ~ 电阻率关系曲线拟合结果的比较

1、表 1 为硅的电阻率温度系数 ~ 电阻率关系各种方法的拟合函数

2、对应表 1 中硅的见图 3—图 10 电阻率温度系数 ~ 电阻率关系各种方法的拟合函数的曲线

图中的曲线坐标是以 $x \sim y$ 的对应关系, $x \sim \rho$ 的关系 (表 1 中的关系 $x = \lg \rho + 3$), 则相应的坐标可以转换成 $\rho \sim y$ 的关系。

四、结果与讨论

本文简单介绍了几种曲线拟合的方法，并以硅的电阻率温度系数~电阻率为研究对象，列出了结果与图形。可以看出拟合效果除了与拟和方法本身有关以外，还与曲线的拟合点的选取好坏有密切关系。当曲线不光滑并有尖点时，($C_T \sim \rho$ 曲线上有尖点，位于 $10^{-2} \sim 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间)，如果尖点不被选为拟合点，则效果不理想，会使拟合曲线的极小点 ($10^{-3} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间)。实际位置是，两者不重合。图 8 和图 10 分别示出 MATLAB 5 次曲线分段拟合法和规范化 5 次分段拟合的效果。两者都与图 1 十分接近，且极点都在 $10^{-2} \sim 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。从结果我们可以得出如下结论：

(1) 最小二乘法曲线拟合一般以实验数据与拟合值之差的平方和最小为理想结果。它反映了实验点的变化趋势，并不要求曲线通过全部的实验点。曲线拟合的最小二乘法可以用来解决测得的实验数据以寻求较简单函数逼近的问题。它在数据处理和误差分析中应用非常广泛，可提高数据处理的效率和精确度，已成为这类数据处理的重要的比较可靠的技术手段。最小二乘法对多组测量结果的处理较为准确，在物理实验及其他领域的线性测量中得到较为广泛的应用。此方法对于直线形式的数据拟合的最好，对于单调的曲线进行拟合也能得到较好的效果，对于单峰值数据进行拟合也基本上能够得到令人满意的结果，但对于多峰数据（如正弦函数有多个周期的情况），应用最小二乘法就无法对其进行一次性的拟合。最小二乘法可使误差较大的测量点对拟合曲线的精度影响较小，而且实现简单，易于编程。

(2) 牛顿插值的方法具有递推性，其组成很有规律，便于实际计算，取值不一定必须是等分点，并能应用较少的已知数据达到应有的精度。用牛顿插值方法处理测量数值，具有使插值多项式通过选定测量值的特点，所以在数据处理中有其一定的应用场合。当测量值较多、较密时，为了减轻计算工作量及提高准确性，应选取合适的测量值作为差商计算的依据求得牛顿插值多项式。它的系数恰好是各阶差商，式中各项很

有规律性，当增加一个新的插值点时，只需再增加一项，原来算出的各项仍然有效，并且与它的排列次序无关。由于有递推这一优点，牛顿插值公式在用计算机求解时非常方便。

(3) 基于 MATLAB 的数据拟合方法可以更快速的从采样数据逼近待测函数或曲线。它可以使用者从繁琐、无谓的底层编程中解放出来，把宝贵的时间更多的花在解

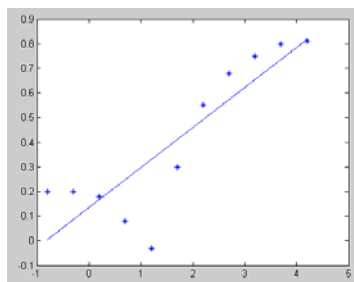


图 3 最小二乘拟合硅的电阻率温度系数~电阻率曲线

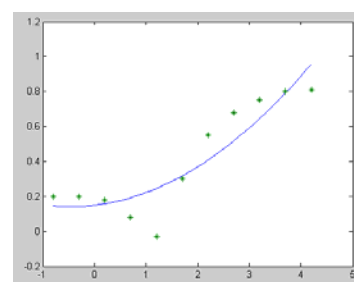


图 4 MATLAB 二次拟合硅的电阻率温度系数~电阻率曲线

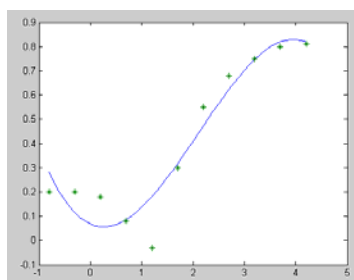


图 5 MATLAB 三次拟合硅的电阻率温度系数~电阻率曲线

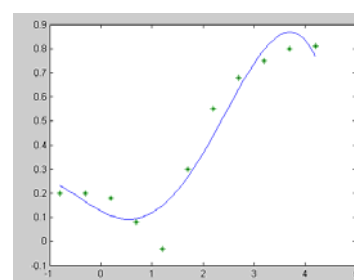


图 6 MATLAB 四次拟合硅的电阻率温度系数~电阻率曲线

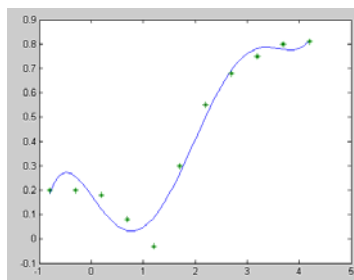


图 7 MATLAB 五次拟合硅电阻率的温度系数~电阻率曲线

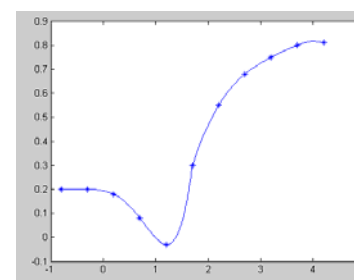


图 8 MATLAB 五次(分段)拟合硅电阻率的温度系数~电阻率曲线

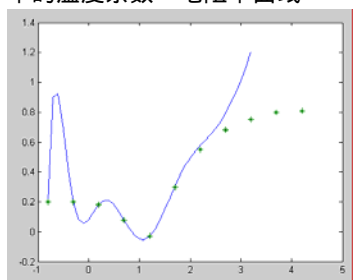


图 9 牛顿插值硅的电阻率温度系数~电阻率曲线

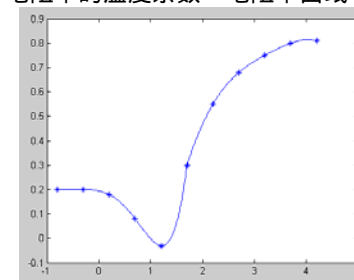


图 10 规范化多项式拟合硅电阻率的温度系数~电阻率曲线

决问题中,这样无疑会提高工作效率。但是由上文也可以看出,基于 MATLAB 的拟合法,有时低次拟合效果不是很好。

(4) 规范化多项式拟合法利用规范化多项式处理非线性问题,与具体问题无关,处理起来简单。这种方法多项式拟合的精度与逆矩阵元系数的小数位数的选取和多项式阶数的选取有关。应选取适当的小数位数和矩阵元阶数。利用规范化多项式进行处理,选用 3、4 阶,等分点太少,精度不高。选用 6、7 阶,一个是因为等分点为无穷小数,另外是因为 6 阶以上时,逆矩阵的最后一行及最后一列系数太小,容易造成误差。所以我们可以选用 5 阶的多项式,并且实践也证明,选用 5 阶可以达到很好的精度。如果有时对精度要求比较高,我们可以先取曲线的中点,然后再分别把这两部分再 4 或 5 等分,进行计算,得出多项式。由于规范化多项式精度较高。所以,拟合曲线在两部分的交接处是连续的,这样整个曲线将连续。

(5) 通过对各种方法的分析和对拟合结果的比较,我们看出规范化多项式拟合法和 MATLAB 的数据拟合方法的效果是非常好的。特别是规范化多项式拟合法,只要它的小数位数和阶数选择适当,就可以达到很好的拟合效果和很高的拟合精度。

参考文献:

- [1] 王新和,程世洲,曲线拟合的最小二乘法[J],新疆职业大学学报,2004, V12(12): 84-86
- [2] 李庆扬,数值分析[M],武汉:华中理工大学出版社,2003
- [3] 孙以材等,传感器与固体电子学中非线性信号的多项式拟合规范化[J],电子器件,2004, V27(1), 1-4;
- [4] 李国玉,孙以材,潘国峰,戴振清,非线性函数规范化多项式拟合精度分析[J],传感器世界,2004, 10(3), 30-34
- [5] 楼顺天,陈生潭,雷虎民, MATLAB 语言 5.X 程序设计语言[M],西安:西安电子科技大学出版社,2000.1
- [6] 李俊林、田立强、赵彦晓、孙以材,基于 Matlab 软件实现传感器压力值解析算法[J],自动化仪表;2003, 24(8): 5-9
- [7] 张智星, MATLAB 程序设计与应用[M],北京:清华大学出版社,2002.4
- [8] 苏亚、孙以材、李国玉,压力传感器热零点漂移补偿各种计算方法的比较[J],传感器技术学报,2004, V17(3): 375-378
- [9] 王静,孙以材,利用多项式拟合规范化方法实现范德堡函数的高精度反演[J],半导体学报,2003, 24(8): 817-821
- [10] 孙以材等,电阻率自动测试四探针仪中电阻率温度系数的规范化多项式拟合的应用[J],电子学报 2005, 33(8): 108-111
- [11] 刘新福,孙以材,用改进的 Rymaszewski 公式及方形四探针法测定微区的方块电阻[J],物理学报 2004, 53(8) 2461-2466

[12] 李国玉,孙以材,基于 BP 网络的压力传感器信息融合[J],仪器仪表,2005, V26, 168-171

[13] 孙以材、刘玉岭、孟庆浩,压力传感器的设计制造与应用[M],北京:北京冶金工业出版社,2000

[14] A.Tarantola and B.Vallete, Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion[J], Rev.Geophys and space phys, 1982, 20(2): 219-232.

[15] T.A.Runkler, J.C.Bezdek, Function approximation with polynomial membership functions and alternating cluster estimation [J], Fuzzy Set and System 1999, V101 207-218

Comparison Among Several Methods Of Matching The Relation Curve Of Temperature Coefficient Of Resistivity ~ Resistivity For Silicon

Abstract: Matching the relation curve of temperature coefficient of resistivity ~ resistivity for silicon, as an objective example, were carried out respectively using the least square criterion, Newton's value-insert, normalized polynomial and MATLAB three, four, five order curves. Comparison among their results are presented with tables and figures. It is confirmed that Newton's value-insert, normalized polynomial and MATLAB five order curve are the best in approximation.

Keywords: the least square criterion; newton's value-insert; normalized polynomial MATLAB software

作者简介:

孙以材,河北工业大学学士教授、博导,从事半导体测量与传感器研究。

通讯地址:天津市红桥区河北工业大学东院北大楼三楼智能传感器实验室 邮编:300130 电话:022-60204422
宫云梅,河北工业大学硕士硕士生,从事传感器与无线数据传输研究。

宫云梅:河北工业大学硕士研究生,从事传感器信号无线数据传输。

王静,河北工业大学学士。

程东升,河北工业大学硕士,从事氧敏传感器的研究。

张效玮,河北工业大学硕士,从事压力传感器的研究。

本文编辑:霍莉 读者服务卡编号 003