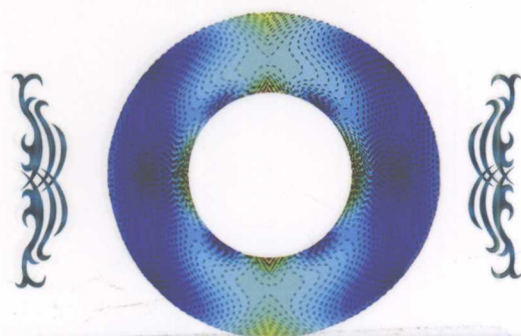


传感器非线性信号的 智能处理与融合

孙以材 刘新福 孟庆浩 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

传感器非线性信号的智能处理与融合

孙以材 刘新福 孟庆浩 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2010

内 容 简 介

本书介绍了压力传感器、圆环力敏传感器、氧传感器、有机蒸气传感器及其输出的非线性信号。因传感器是将输入的非电量转化为电学量的元件,要求将测得的电学量反演输出并显示为非电量,以达到测量的最终目的,这就要依靠经典算法以外的各种先进的算法,例如规范化多项式拟合法、输入-输出的归一算法、模拟退火算法、遗传算法、蚁群算法、量子粒子群算法、神经网络算法、模糊算法才能完成反演转换。本书重点就是结合实际应用介绍这些算法,书中有的算法是本书作者独创的。此外本书还介绍了不同非线性信号的自然和强制融合过程,从而可实现传感器的补偿,以提高其测量精度。

本书适合于信息、半导体、微电子、物理电子、电机、自动化等专业本科生、研究生及高校教师阅读参考,也可供从事传感器应用及计量、人脸图像识别、机器人、电网调度、半导体材料等方面的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器非线性信号的智能处理与融合/孙以材等著.

—北京:冶金工业出版社,2010.5

ISBN 978-7-5024-5188-2

I. ①传… II. ①孙… III. ①传感器—信息处理

IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 044574 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 贾 玲 王 楠 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5188-2

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010 年 5 月第 1 版,2010 年 5 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;9 印张;240 千字;275 页

29.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

传感器是将非电量转化成电学量的元件或器件。通过实验或理论,可由输入的非电量得到电学量输出,这是正演。同时,由输入得到输出时,还受环境因素(如环境温度,气敏元件的加热温度,水汽等其他气体)的干扰。人们需要把测得的电学信号,反推出非电量信号,达到使传感器起作用的最终目的,这是反演。正演是由原因得到结果,而反演则是由结果去寻找其产生的原因,而且要拨开各种干扰因素,因此,反演问题比较困难。这就要依靠各种先进算法,这也是研究和使用时必须解决的非线性信号的补偿、智能处理与融合问题。本书针对经典和近代各种非线性信号(函数)拟合算法展开讨论,重点放在我们所提出的创新拟合算法及在传感器中的应用。又由于传感器输出的非线性信号与传感器的制作密不可分,因此也对传感器制作稍作介绍,以使读者了解产生这种非线性信号的条件,但是本书不涉及单片机及其应用。我们在以下方面做出了创新:

(1) 在国际上首次发现“压阻式压力传感器的电桥存在零点电漂移现象”,对此现象给予了定义并进行了理论分析,确定了该特性指标检定方法。我们还发现即使是利用“自平衡电桥激励”也存在零点电漂移现象,这就涉及传感器标准的制定。

(2) 在国际上首次指出压力传感器的电桥的零点温漂不仅仅与国外科学家所指出的“与电阻条的温度非线性有关”,我们提出还与电阻条反向漏电有关。前者的零点温漂与温度的关系曲线仅仅呈抛物线形,后者的零点温漂与温度的关系则有更多曲线形状。

(3) 在国际上首次提出了一种“非线性信号(函数)规范化拟合法”。该方法简单,分段时数值连续,部分重叠时,导数也连续。能拟合有起伏像正弦波那样的曲线,已推广到范德堡函数的拟合。以上研究成果分别获得了2004年和2009年河北省自然科学奖。之后又首次提出了一种“非线性信号(函数)反演‘归十’拟合算法”。该算法在压力、流量传感器中和气体传感器中均得到应用。首次提出了一种“无学习率的权值微小调整,误差迭代减小的神经网络”算法。虽有神经网络结构,但权值调整时不需要反复选择学习率,而用一个统一的公式进行权值微小的调整即可使计算流程收敛。这使计算机编程大为简化。这种方法特别适用于曲线的多项式拟合的应用。

圆环力敏传感器的制作涉及其中应力计算,近百年来有十多位科学家致力于该研究,其可称得上力学中的哥德巴赫猜想,在本书中我们提出了一个相对更为简单、物理含义明确的应力计算公式,还为我们发明的“四探针微区电阻测试技术”测定硅片上千点的薄层电阻,引入了模糊数学概念,选定了合适的隶属度函数,依据它们的隶属度而确定其所属模糊集,同一模糊集则可绘出一条等电阻率线。这种从高到低的电阻率条纹绘制被称为硅片的 Mapping 技术,可应用于指导晶体生长。提出的三控制要素模糊拟合不仅能模拟直线、波形曲线、三角函数,还能模拟波的衰减与激励增强以及模拟电力系统负荷的剧烈变化过程和人脸的识别。我们提出的二极管与可变电阻并联可使网络热敏结点脱敏,在传感器中已取得良好效果。此外,我们还将蚁群觅食最短路径仿生算法应用于多机器人气味源定位,也已取得良好效果。最后用镜像源理论补偿修正推导出改进的 Rymazewski 方形四探针薄层电阻测量公式,希望今后能得到推广应用。

以上研究成果均可在本书及其中文、外文参考文献中找

到。上述研究的学术思想虽然是由本书第一作者提出，但都是在他所指导的博士、硕士的努力工作下完成的。此外，刘翠响（撰写 3.13 节）、潘国锋、何平、高振斌等副教授在研究中做出了创造性贡献，在此一并表示感谢。

本书编写过程中我们参考了相关课题研究中许多专家的论文及著作，在参考文献中已基本列出。对某些先进算法，我们未曾使用过，为全面起见，本书只以少量文字作了介绍。限于作者水平有限，书中不妥之处，望读者予以指正。

作 者
2009 年 12 月

目 录

1 传感器中的非线性信号及其反演	1
1.1 传感器中的非线性信号	1
1.1.1 压力传感器的零点电漂移特性指标	1
1.1.2 压力传感器的零点电漂移特性的理论分析	3
1.1.3 零点电漂移的利用和抑制	10
1.1.4 小结	13
1.2 反向漏电对热零点漂移的影响	13
1.2.1 国外科学家提出的热零点漂移模型	13
1.2.2 反向漏电流对热零点漂移影响模型	15
1.3 压力传感器灵敏度电压非线性分析	18
1.3.1 扩散电阻的理论模型	19
1.3.2 灵敏度电压非线性理论分析	21
1.3.3 对灵敏度电压非线性特性的模拟及实验	23
1.3.4 小结	25
1.4 压力传感器零点电漂移与热漂移特性的模拟	26
1.4.1 概述	26
1.4.2 利用 PSPICE 处理非线性电阻的方法	27
1.4.3 模拟结果	29
1.4.4 实验结果	32
1.4.5 小结	33
1.5 气敏传感器的灵敏度非线性信号	35
1.5.1 以 TiO_2 膜为基的 NO_2 气敏传感器中的 灵敏度非线性	35
1.5.2 新型智能 TiO_2 基的氧敏传感器中的 灵敏度非线性	39

1.5.3	ZnO 薄膜的丙酮气敏特性	41
1.6	轿车门二限位器疲劳试验平台与拉力传感器的 非线性信号	42
1.6.1	概述	42
1.6.2	疲劳实验平台机械结构	44
1.6.3	力传感器的制作	46
1.7	非线性信号的反演	50
1.7.1	反演问题的困难	50
1.7.2	电阻率测量中的反演问题	51
2	经典非线性信号 (函数) 拟合法	57
2.1	最小二乘法	57
2.1.1	直线最小二乘法	57
2.1.2	曲线最小二乘法	58
2.2	牛顿插值法	63
2.2.1	牛顿插值法基本原理	63
2.2.2	用牛顿插值法对传感器输出的非线性信号 进行反演	65
2.2.3	小结	69
3	近代非线性信号 (函数) 拟合法	71
3.1	MATLAB 算法	71
3.1.1	曲线拟合	71
3.1.2	坐标点不在一条曲线上的拟合	74
3.2	模拟退火算法	76
3.2.1	模拟退火算法的模型	77
3.2.2	模拟退火算法的参数控制问题	78
3.2.3	模拟退火算法的应用	79
3.3	遗传算法	80
3.3.1	遗传算法定义	80

3.3.2	遗传算法的特点	80
3.3.3	遗传算法的一般过程	81
3.3.4	遗传算法的运算过程	83
3.3.5	遗传算法的应用	83
3.4	非线性函数规范化多项式拟合法	84
3.4.1	原理	84
3.4.2	拟合精度的影响因素	87
3.4.3	规范化矩阵的各阶同构逆矩阵	87
3.5	输出信号基于规范化多项式拟合的智能压力传感器	89
3.5.1	概述	89
3.5.2	融入环境温度信息的压力解析表达式	90
3.5.3	小结	95
3.6	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	96
3.6.1	概述	96
3.6.2	范德堡函数的局域反演和全局反演	97
3.6.3	范德堡函数非线性多项式在硅单晶圆片 测试中的应用	101
3.6.4	范德堡函数非线性拟合多项式的误差分析	102
3.6.5	小结	103
3.7	对硅的电阻率温度系数与电阻率的关系曲线的 各种拟合方法结果的比较	104
3.7.1	各种拟合方法结果	104
3.7.2	小结	107
3.8	非线性函数反演“归十”拟合法	108
3.8.1	算法的基本原理	109
3.8.2	实验数据拟合成规范化多项式时各阶变量 系数间的关系	111
3.8.3	归十化多项式中 $ w_i/w_{i-1} $ 的关系	114
3.8.4	包括 $ w_i/w_{i-1} > 1$ 的全部情况的 β 、 γ 、 δ 的	

取值范围	115
3.8.5 归十的反演拟合多项式去“归十”化	115
3.8.6 算法的应用	117
3.8.7 小结	119
3.9 神经网络拟合法	120
3.9.1 人工神经网络模型	121
3.9.2 人工神经网络的分类	122
3.9.3 有学习率神经网络拟合法	124
3.10 无学习率权值调整神经计算法拟合范德堡 函数多项式	134
3.10.1 样本数与权值数相等的神经网络拟合算法 拟合范德堡函数	134
3.10.2 样本数大于权值数时误差迭代下降的 神经网络拟合算法	143
3.10.3 两种神经算法的比较	154
3.11 量子粒子群优化算法及仿真分析	154
3.11.1 QPSO 算法	154
3.11.2 QDPSO 算法	158
3.11.3 典例仿真与对比分析	159
3.12 模糊拟合算法	162
3.12.1 模糊数学的名词	162
3.12.2 四控制要素模糊算法	165
3.12.3 三控制要素模糊算法	166
3.13 基于三控制要素的多项式模糊拟合在人脸图像 识别中的应用	174
3.13.1 人脸识别问题	174
3.13.2 人脸图像数据的非线性降维	175
3.13.3 实验结果	183
3.14 利用模糊数学分类和绘制硅片上电阻率等值线	187
3.14.1 概述	187

3. 14. 2	模糊数学在硅片上电阻率等值线连接中的 应用	190
3. 14. 3	编程及利用现有的软件画出等值线	198
3. 14. 4	如何利用 MATLAB 软件将现有的 10 个模糊 集绘制成等值线	200
3. 14. 5	等值线的连接质量评价	203
3. 15	蚁群优化算法	204
3. 15. 1	算法基本原理	204
3. 15. 2	改进蚁群优化算法及其在多机器人气味源 定位中的应用	205
4	传感器非线性信号的补偿与融合	211
4. 1	非线性信号补偿	211
4. 1. 1	图形补偿	211
4. 1. 2	函数补偿	215
4. 2	非线性信号信息融合	215
4. 2. 1	概述	215
4. 2. 2	自然融合法	216
4. 2. 3	强制融合法	219
4. 2. 4	小结	222
4. 3	网络热敏结点的可变电阻、二极管并联 脱敏法脱敏应用	223
4. 3. 1	概述	223
4. 3. 2	理论分析	225
4. 3. 3	实验结果与理论分析的比较	230
4. 3. 4	热敏基元在压力传感器中的应用	233
4. 3. 5	小结	234
4. 4	压力传感器灵敏度温漂补偿技术	234
4. 4. 1	压阻型压力传感器灵敏度温漂	234
4. 4. 2	灵敏度温漂产生的原因	236

4.4.3	灵敏度温漂补偿方法及技术	236
4.5	压力传感器的热零点漂移现象各种补偿方法的比较	244
4.5.1	概述	244
4.5.2	压力传感器的热零点漂移现象	245
4.5.3	最佳拟合直线的补偿原理	248
4.5.4	非线性反函数补偿方法	249
4.5.5	非线性函数多项式规范化拟合原理	250
4.5.6	基于神经网络的非线性补偿	252
4.5.7	各种补偿方法拟合结果的比较	253
4.6	自平衡电桥激励的压力传感器零点输出信号的电漂移特性及热漂移消除	255
4.6.1	概述	255
4.6.2	理论分析	256
4.6.3	小结	264
4.7	电阻率测量中的有限厚度样品电场分布的畸变修正补偿问题	264
4.7.1	方形探针测试法的厚度修正	264
4.7.2	非线性厚度修正系数的规范化多项式拟合	268
4.7.3	试验验证	269
4.7.4	小结	270
参考文献		271

1 传感器中的非线性信号及其反演

1.1 传感器中的非线性信号

1.1.1 压力传感器的零点电漂移特性指标

用半导体硅集成电路工艺制备压力传感器已有 30 多年历史了，随着市场需求其每年以 20% 的速度增长，竞争十分剧烈，但仍存在以下问题迫切需要解决，并应引起注意：

(1) 电阻非线性问题突出。力敏电阻依靠 p-n 结与衬底隔离，在 p 区侧的耗尽层宽度与外加电压有关，故电阻条的有效导电厚度随外加电压而变化，表现为非线性，并直接导致零点的电漂移。

(2) 零点电漂移。压力传感器的特性指标除众所周知的几个之外，我们在上百次对国内外不同品种的压力传感器进行测定时，均发现了零点电漂移现象，在国际上我们是领先观察到并给予定义的。零点电漂移影响压力传感器的测量精度，使灵敏度大大降低。

(3) 热零点漂移与漏电问题。热零点漂移是影响压力传感器性能的重要指标，受到广泛重视。国际上认为热零点漂移仅取决于力敏电阻的不等性及其温度非线性，但我们认为热零点漂移还与力敏电阻的反向漏电有关，对该理论作出了重要补充，还指出多晶硅可以吸除衬底中的重金属杂质，从而减小力敏电阻的反向漏电、改善热零点漂移，提高传感器的性能。

除动态响应特性、噪声等指标外，在国际上我们首先发现并

提出零点电漂移也应作为一个特性指标。

衡量压力传感器性能大致有下列七个指标：线性度、灵敏度、重复性、迟滞、分辨率、漂移、稳定性。漂移可分为温漂、时漂、力学蠕变漂移以及电源的不稳定性。温漂又分为热零点和热灵敏度漂移。虽然人们曾提到过电源不稳定性造成的漂移，但没有明确提出过零点电漂移这个概念，也不把它当作一个可测定的技术指标。我们上百次测定不同品种的压力传感器的零点输出 $U_0(p=0)$ 与外加电压 V 的关系时，均发现存在零点电漂移现象，即在外加电压 $V=V_0$ 时，可调整桥臂电阻使压力 $p=0$ 时的输出 $U_0|_{V=V_0}=0$ ，但 $\left. \frac{\partial U_0}{\partial V} \right|_{V_0} \neq 0$ ，我们把这种现象称作零点电漂移。在国际上我们首先发现并提出零点电漂移也应作为一个特性指标。零点电漂移会影响压力传感器的测量精度。对此我们在下面作详细分析。

力敏电桥的输出 U 与压力 p 及外加电压 V 之间在三维空间的典型曲线如图 1-1 所示。当 $V=V_0$ 时， $U_0=0$ ，当 $V<V_0$ 时， $U_0<0$ ；当 $V>V_0$ 时， $U_0>0$ 。这就是零点电漂移现象。当 $V \equiv \frac{V_0}{2}$

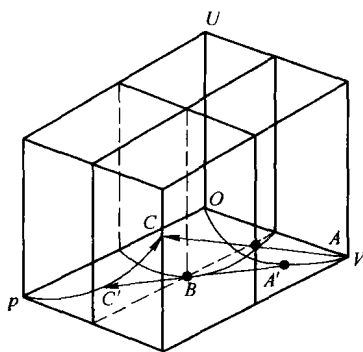


图 1-1 $U \sim p, V$ 三维空间中典型曲线及传感器的零点电漂移特性

时, 由于 $U_0 \ll 0$, $p = p_{\max}$ 时的满量程输出 $U\left(\frac{V_0}{2}\right)$ (即 C' 点) 远小于 $U(V_0)$ (即 C 点)。也就是 $V \cong \frac{V_0}{2}$ 时, 灵敏度大降, 从而影响测量精度。

零点电漂移有害, 但也可化为利。下文对零点电漂移的产生原因作理论分析, 并提出使零点电漂移抑制的方法, 以及如何利用零点电漂移来消除热零点漂移。

1.1.2 压力传感器的零点电漂移特性的理论分析

压阻型半导体压力传感器利用四个力敏电阻构成电桥。当电桥用 V 激励时, 电桥的输出为:

$$U = \frac{V}{k} (S_0 + \Delta S) = U_0 + U_{\text{sig}}$$

式中, $S_0 = R_1 R_3 - R_2 R_4$ 为电桥的不平衡量; $k = (R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 - \Delta R_4)$; ΔS 为压力引起的电桥不平衡量, $\Delta S = (2\Delta R_i / R_i)(R_1 R_3 + R_2 R_4)$; $\Delta R_i / R_i = kp$ 。

当 $p = 0$ 时, $\Delta R_i = 0$, $\Delta S = 0$, 此时:

$$U = U_0 = \frac{V}{k} S_0 \quad k \approx \text{const}$$

考虑温度一定时桥激励电压的变化, 则有:

$$dU_0 = \left(\frac{\partial U_0}{\partial V} \right)_T dV = \left(\frac{S_0}{k} + \frac{1}{k} \frac{\partial S_0}{\partial V} \right) dV$$

因为力敏电阻用扩散法制备, 依靠 p-n 结与衬底隔离, 空间电荷区的宽度与外加电压有关, 因而力敏电阻条的有效导电宽度随外加电压以及沿电阻条长度而变化, 因而力敏电阻具有非线性。对某一外加电压 V_0 , 其阻值可用泰勒级数展开:

$$R_i = R_i^0 [1 + a_i (V - V_0)] + \dots$$

这里取一级项。

$$\begin{aligned}\left. \frac{\partial S_0}{\partial V} \right|_{V_0} &= \left. \frac{\partial (R_1 R_3 - R_2 R_4)}{\partial V} \right|_{V_0} \\ &= (a_1 + a_3) R_1^0 R_3^0 - (a_2 + a_4) R_2^0 R_4^0 = A\end{aligned}$$

式中, $a_1 \sim a_4$ 为在 V_0 时各电阻 R_i 的电压一次正比系数, 且 a_1 、 $a_4 < 0$, a_2 、 $a_3 > 0$ 。

调整桥臂电阻使:

$$S_0|_{V_0} = 0, U_0|_{V_0} = 0$$

但是:
$$\left. \frac{\partial U_0}{\partial V} \right|_{V_0} = \frac{1}{k} \left. \frac{\partial S_0}{\partial V} \right|_{V_0} = \frac{A}{k} \Big|_{V_0}$$

式中, $\left. \frac{\partial U_0}{\partial V} \right|_{V_0}$ 为零点电漂移项, 其大小与 A 成正比。

可以看出, 零点电漂移起因于力敏电阻的非线性。我们已测定了力敏电阻与外加电压的关系, R_1 和 R_4 随 V 增加而减小, R_2 和 R_3 则相反。我们对扩散电阻的非线性作了分析。将扩散力敏电阻用图 1-2a 所示模型表示。在 x 点的 p-n 结反向偏置电压为:

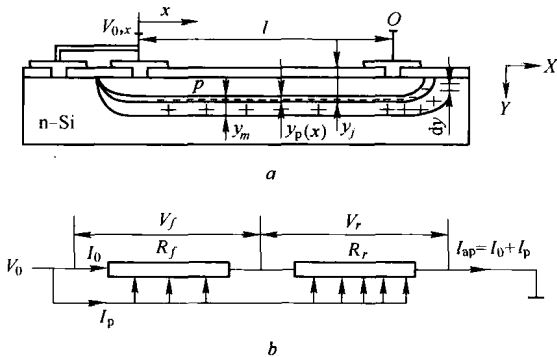


图 1-2 扩散电阻模型

a—空间电荷区及有效导电层宽度 $y_p(x)$;

b—反向漏电流 I_l 及 I_0 和表观电流 I_{ap}

$$V_x = V_0 \frac{x}{l}$$

在 x 点 p 型侧空间电荷区宽度 $y_p(x)$ 为:

$$y_p(x) = \left[\frac{2\varepsilon_1\varepsilon_2N_D(V - V_{bi})}{qN_A(\varepsilon_2N_D + \varepsilon_1N_A)} \right]^{\frac{1}{2}} \approx k_p \sqrt{V_0 \frac{x}{l}}$$

式中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ——介电常数;

N_A, N_D ——分别为受主浓度、施主浓度;

V_{bi} ——内建电势, $V_{bi} = 0.7V$;

q ——电子电荷量;

l ——电阻条长度。

电阻条的阻值可以表示为:

$$R(x) = \int_0^x \left[\mu q W \int_0^{y_j - y_p(x)} N(y) dy \right]^{-1} dx$$

式中, 当恒定表面浓度 N_s 扩散时:

$$N(y) = N_s \left\{ 1 - \operatorname{erfc} \left[\frac{y}{y_j} \operatorname{erfc}^{-1} \left(1 - \frac{N_D}{N_s} \right) \right] \right\}$$

当恒定表面源 Q 扩散时:

$$N(y) = N_s \left(\frac{N_D}{N_s} \right)^{(y/y_j)^2}$$

式中 μ ——载流子的迁移率;

W ——电阻条的横向宽度;

y_j ——p-n 结结深;

$N(y)$ —— y 方向杂质扩散浓度分布;

N_s ——表面的杂质浓度;

N_D ——衬底的杂质浓度。

因为电阻条 1、2 或 4、3 间是串联连接的, 可以看成是前后两半条串联构成整个电阻器。于是其电阻分别表示为:

$$R_f = \int_0^{\frac{l}{2}} \left[\mu q W \int_0^{y_j - y_p(x)} N(y) dy \right]^{-1} dx$$

$$R_r = \int_{\frac{l}{2}}^l \left[\mu q W \int_0^{y_j - y_p(x)} N(y) dy \right]^{-1} dx$$