

电子
传感
器

电子传感器

李标荣 张绪礼 主编



862
51

国防工业出版社

版社

73.862
251

电子传感器

李标荣 张绪礼 主编

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

内 容 简 介

本书共分七章。其中包括力传感器, 温度传感器, 气体传感器, 湿度传感器, 光传感器, 磁传感器, 电压敏传感器。全书着重阐述电或非电物理量作用于传感器材料时的物理变化及其转变为电信号的过程, 并给出了各类电子传感器元件有关参数及型号。

本书适用于从事信息与控制技术、过程检测技术、智能机器人等广大科技人员及工程技术人员使用, 亦可作为工科电子类有关专业的教材或教学参考书。

1032/25

电 子 传 感 器

李标荣 张绪礼 主编

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092毫米 16开本 印张17¹/₂ 405千字

1993年1月第一版 1993年1月第一次印刷 印数: 60001—50000册

ISBN 7-118-00979-2 TP·123 定价15.00元

前 言

电子传感器是一门新兴学科，各类传感器之间，从性能要求上出发，有不少共同之处，但不论从传感器原理、材料性能、器件结构与信号处理等方面看，都有比较大的区别，各有其独特之处。因此本书所述不同传感器的各章之间，都具有其相对独立性，各具特色。

在各类传感器的编写工作中，力图讲清其工作原理，即在信息获取过程中，各种电的、非电的物理量、化学量或生物量，作用于传感材料时的物性变化过程，并通过对其物质的微观结构、显微结构的作用所引起的变化的分析，阐明其对宏观特性（主要是电特性）的影响机理。至于传感器的具体结构，基本工艺技术也给予适当注意。

本书由华中理工大学李标荣、张绪礼教授担任主编。绪论部分由李标荣编写；第一章由北京信息工程学院孙运懋编写；第二章由华中理工大学周东祥编写；第三章由成都电子科技大学王恩信编写；第四章由西安交通大学武明堂编写；第五章由上海交通大学胡齐风编写；第六章由天津大学王文生编写；第七章由华中理工大学许毓春编写。全书由李标荣、张绪礼、孙运懋统稿。

本书由成都电子科技大学恽正中教授主审，在组稿与编写过程中，得到机械电子工业部《电子材料与器件》编写组的大力支持与协助，编者在此表示感谢。

目 录

绪论	1
第一章 力传感器	4
§ 1-1 金属应变片	4
§ 1-2 压阻式压力传感器的基本原理	10
§ 1-3 压阻式压力传感器的结构设计	16
§ 1-4 硅压阻式压力传感器的制造	23
§ 1-5 硅压阻式传感器的测量与补偿线路	25
§ 1-6 压阻式压力传感器的结构、性能与应用	28
§ 1-7 其他几种压阻式力学量传感器	29
§ 1-8 压电式力传感器的基本原理	33
§ 1-9 压电式力传感器的压电材料	35
§ 1-10 力传感器压电元件的等效电路与测量线路	44
§ 1-11 几种压电式力学量传感器	49
第二章 温度传感器	60
§ 2-1 热电偶	61
§ 2-2 金属测温电阻器	65
§ 2-3 半导体热敏电阻温度传感器	66
§ 2-4 厚薄膜热敏电阻温度传感器	79
§ 2-5 半导体温度传感器	83
§ 2-6 晶体温度传感器	92
§ 2-7 NQR温度计	94
§ 2-8 非接触型温度(热)传感器	95
第三章 气体传感器	99
§ 3-1 概述	99
§ 3-2 接触燃烧式气体传感器	100
§ 3-3 半导体气体传感器的工作机理和特性参数	105
§ 3-4 SnO_2 气体敏感材料	109
§ 3-5 典型的 SnO_2 气敏元件	112
§ 3-6 氧化锌系和氧化铁系气敏元件	122
§ 3-7 氧气及其他气体传感器	130
§ 3-8 气体传感器的应用与发展	141
第四章 湿度传感器	146
§ 4-1 湿度的重要性	146
§ 4-2 湿度的表示方法及湿度发生装置	147
§ 4-3 湿度传感器的基本特性与参数	150
§ 4-4 电解质湿度传感器	155
§ 4-5 陶瓷湿度传感器	158

§ 4-6	半导体结型及MOS型湿度传感器	170
§ 4-7	高分子湿度传感器	173
§ 4-8	湿度传感器的选择与应用	177
第五章	光传感器	182
§ 5-1	引言	182
§ 5-2	外光电效应器件	186
§ 5-3	内光电效应器件	193
§ 5-4	热敏效应光电器件	200
§ 5-5	光纤传感器	201
§ 5-6	电荷耦合器件[CCD]列阵探测器	209
§ 5-7	光传感器的应用	210
第六章	磁传感器	212
§ 6-1	霍尔器件与霍尔集成电路	212
§ 6-2	半导体磁阻器件	221
§ 6-3	结型磁敏器件	233
§ 6-4	强磁性金属磁敏器件	238
第七章	电压敏传感器	244
§ 7-1	电压敏感元件的基本特性	244
§ 7-2	电压敏感元件的电参数	248
§ 7-3	电压敏感元件的种类	251
§ 7-4	压敏元件的应用	261
参考文献		273

绪 论

由于大规模集成电路等电子技术及信息处理功能的飞速发展,以微型计算机为中心的微电子学也以其磅礴之势不断向人类社会各个领域扩散、渗透。极大程度地改变着人们的科技、生产方式和生活、社会结构。

尤其是微型计算机的出现,科技界、产业界、防务与民用领域中,各种各样的电子设备都广泛地用它作“电脑”,用以运算、处理、裁决不同类型的问题。使其有关设备日渐实现自动化、系统化和智能化。

与此同时,要求能够迅速、准确、灵敏地将有关信息获取并传输到电子设备或系统的器件——电子传感器,便显得特别重要并得到了很大发展。

如果把电子计算机比作人的“大脑”,那么电子传感器则酷似人的“五官”(视觉、嗅觉、味觉、听觉和触觉),不过对传感器的要求要比人的五官高得多,它还要对人体无法或难于感知的量测量出来,如紫外光、红外光、电磁场、无味无嗅之气体及特高温、特高压、剧毒品、各种微弱信号等,并能放大、处理、传输、存储、显示或作必要的控制输出。而作为感知元件的所谓“探头(probe)”,通常称之为“敏感元件”和英语中 sensor 相当,而具有上述功能的器件系统(其中也包含感知元件),则应该和英语中 transducer 相似。国内外(主要是中国和日本)有些学者也有时将这两个概念混用,值得我们注意。

在目前状态下,与快速发展的电子计算机技术相比,传感器技术的发展显得落后了,不论在性能上,品种上或规格、数量上,均远不能满足要求,大有“大脑发达,五官迟钝”之势。急起直追,在所必行。近年来,由于功能陶瓷、高分子薄膜等敏感材料的开发,半导体及细微加工技术的发展,新型传感器相继涌现,传感器理论及应用系统也有了较大的发展。故传感技术与信息处理技术之差距,已有日渐缩小之趋势。

早期出现的传感器,多是利用构件的移动、伸缩等几何尺寸与位置的变化来测量物理量,再转变成电磁量。如利用毛发、肠衣的伸缩来感知湿度的变化,再进一步用以移动衔铁来改变电感,从而获得电磁信号;金属膜伸缩来感知温度的变化并转变为电阻变化等。这类传感器常称之为结构型传感器。结构型传感器虽属早期开发的产品,但近年来由于新材料、新原理、新工艺的相继应用,在精确度、可靠性、稳定性、灵敏度等方面也有了很大的提高。所以,目前结构型传感器在工业自动化、过程检测与其它等方面仍占有相当大的比重。

随着半导体陶瓷及有机高分子功能材料的不断开发,使传感器技术别开生面,这些功能材料,在一定场合下可以直接感知某些待测的非电或电物理量、化学量或生物量,并将之转变为电信号。这些待测对象的被感知,并不是通过结构的改变来实现的,而只是敏感材料的某种物性的改变,故常称之为物性型传感器。尽管物性型传感器材料发展较晚,但它具有结构简单,体积小,重量轻,反应灵敏,易于集成化、微型化等一系列优点,故引起传感技术界与科技界的高度重视。虽然目前还不够完善,存在不少问题有

待解决,但确有很大的发展势头,方兴未艾,前途不可限量。本书所述电子传感器,是指通过电子学的原理及方法来获取、转换、传输及处理被感知量的传感器,故将兼述结构型与物性型两种传感器,不过更多的注意力将集中在物性型传感器上,着重点在于敏感元件方面。

电子传感器作为一种独立器件,当它和微电子技术与微处理技术结合后,出现了新的突破。现阶段正朝着集成化、智能化的方向快速发展。如果把传感元件与信号处理的电路集成到一块芯片之上,就成了信息型传感器;如果能把微处理器也集成到同一芯片上,就成了智能型传感器。这不仅给敏感材料与敏感机理提出了高的要求,同时也对半导体工艺与大规模集成技术提出了更高的要求。

传感器技术是一门学科交叉型和知识密集型的应用技术。它要求既要探索 and 了解传感技术,又要研究和制作敏感材料;既要熟悉待测对象各种变化习性,又要将所获取信号放大、传输、储存、反馈、处理、显示等。

新型传感器的研制过程,往往是某种新原理、新效应的发现或新材料的应用,对该材料的组成、结构和性能之间的关系进行系统规律的研究过程。然后配以合适的加工工艺,将其制造成结构合理的传感元件,进而装配成能起到检测信号的传感器。通常将上述过程称之为传感器的“硬件”技术。对于传感器的实际应用来说,还有传感器的标定技术,即通过实验的方法以确定传感器的各种特性指标;抗干扰技术,即提高传感器的信噪比,以减少测量误差等;接口技术,即是与微型计算机组成的传感系统。后三者又被称为传感器的“软件”技术。理想的传感器硬件技术与软件技术相配合,可将从待测对象中获取信号的丰富信息,作出合理的信息处理和区别,从而扩大其功能,提高其灵敏度、准确度和识别能力。智能传感器,往往也就是智能机器人的一个重要组成部分,正引起人们的极大关注和着力研究开发。本书限于专业性质和有限篇幅,主要只涉及传感器的硬件部分,且更多地是对传感原理与敏感元件的描述。

为了使传感器便于研究开发、设计生产和推广应用,人们曾试图从不同的角度对传感器进行分类归纳,下面列举数例。

一、按传感器的机理及转换形式分类有结构型、物性型、数字(频率)型、量子型、信息型和智能型。

二、按敏感材料分类有半导体型(主要是元素硅或Ⅲ-V族、Ⅱ-VI族化合物)、功能陶瓷型(主要是电子型半导体瓷、压电瓷、快离子导体瓷)、功能高聚物型(主要是各种高分子有机半导体、压电体)等。

三、按测量对象参数分类有光传感器、湿度传感器、气体传感器、温度传感器、磁传感器、压力(压强)传感器、振动传感器、超声波传感器等。

四、按应用领域分类有机器人传感器、汽车传感器、医用(生物)传感器、环保传感器、各种过程检测传感器等。

一般地说,前两种分类方法便于传感器的研究制造;后两种分类方法有利于选择应用,不过任何一种分类方法都不是绝对的,都不同程度地带有局限性、主观性或随意性。本书结合专业特点,为方便选择、应用起见,基本上按第三种方法进行分类,主要讲述力传感器、温度传感器、气体传感器、湿度传感器、光传感器、磁传感器和电压敏感传感器等七大类。本来后者在国外传感器书刊中均不列入,即电压敏感元件只作为一种

非线性电阻或变阻器 (varistor), 而不把它当作敏感元件 (sensor) 或传感器 (transducer) 来看待, 但是国内多年来一直把压敏电阻列为敏感元件, 考虑到这种情况, 本书也把该部分列为一章。

在具体叙述过程中, 本书将力图讲清传感器的工作原理与基本特性, 说明各种材料的宏观特性与微观结构的关系; 工艺因素对材料结构及传感器电气性能的影响; 对各类传感器的结构与制造技术, 也给予适当的注意。本书内容涉及面广, 各章均有一定的独立性, 可以适应不同专业的广大读者的需求。

第一章 力 传 感 器

力学量传感器主要是用于测量力、加速度、扭矩、压力、流量等物理量。这些物理量的测量都与机械应力有关，所以把这类传感器称为力学量传感器。力学量传感器的种类繁多，应用较为普遍的有：电阻式、电容式、变磁阻式、振弦式、压阻式、压电式、光纤式等。不同类型的力学量传感器所涉及的原理、材料、特性及工艺也各不相同，本章不可能一一阐述。这里只准备对金属应变片、压阻式力学量传感器、压电式力学量传感器中应用较广、较为典型的一些类型进行讨论。

§ 1-1 金属应变片

金属应变片又称金属电阻应变片，它是一种能将机械构件上应变的变化转换为电阻变化的传感元件。金属应变片与相应的测量电路组成的测力、测压、称重、测位移、加速度、扭矩、温度等测量系统，目前已成为冶金、机器制造、电力、交通、石化、外贸、生物医学及国防等部门进行自动称量、过程检测、机械设备的实验应力分析，以及实现生产自动化不可缺少的手段之一。目前它仍是国内外应用数量最多的一种传感元件。

§ 1-1-1 金属应变片的基本原理

早在 1856 年人们就发现了金属导体的电阻随着它所受的机械变形（伸长或缩短）的大小而发生变化的现象，称为金属的电阻应变效应。金属导体的电阻之所以随其形变而改变，是由于导体在承受机械变形过程中，材料的电阻率及它的几何尺寸（长度和截面积）都在发生变化引起的，其间的定量关系如下：

设有一根长为 l 、截面积为 S 、电阻率为 ρ 的金属丝（图1-1），其起始电阻为 R ，于是有：

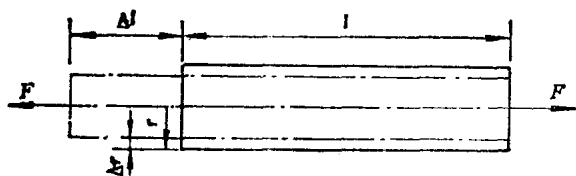


图1-1 金属的电阻应变效应

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-1)$$

设导线在力 F 作用下，其长度 l 变化 dl ，截面 S 变化 dS ，电阻率 ρ 变化 $d\rho$ ，因而将引起 R 变化 dR 。由式（1-1）微分可得

$$dR = \frac{\rho}{S} dl - \frac{\rho l}{S^2} dS + \frac{l}{S} d\rho = R \left(\frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho} \right)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-2)$$

由于

$$S = \pi r^2 \quad dS = 2\pi r dr$$

所以式 (1-2) 可写为

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-3)$$

式中 dR/R ——金属丝电阻的相对变化 (即电阻变化率);

$d\rho/\rho$ ——电阻率的相对变化;

dl/l ——电阻丝轴向长度的相对变化 (即轴向应变);

dr/r ——电阻丝半径的相对变化 (即径向应变)。

令 dr/r 与 dl/l 的比为泊松系数 μ , $dl/l = \varepsilon$, 则有

$$\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dl}{l} = -\mu \varepsilon \quad (1-4)$$

式 (1-4) 中的负号表示径向应变与轴向应变相反。将式 (1-4) 代入式 (1-3), 整理后可得

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-5)$$

或写为

$$\frac{dR}{R} = [(1 + 2\mu) + (d\rho/\rho)/\varepsilon] \varepsilon \quad (1-6)$$

$$k_0 = (dR/R)/\varepsilon = (1 + 2\mu) + (d\rho/\rho)/\varepsilon \quad (1-7)$$

k_0 称为金属材料的灵敏系数, 即单位应变所引起的电阻变化率。由式 (1-6) 可知, 金属材料的灵敏系数 k_0 的大小是由两个因素引起的。一个是由金属丝几何尺寸的变化引起的, 即 $(1 + 2\mu)$ 项; 另一个是受力后材料的电阻率发生变化引起的, 即 $(d\rho/\rho)/\varepsilon$ 项。这是由于材料发生变形时, 晶格畸变, 能带结构发生改变引起电阻率的变化。目前该项尚不能用解析式给予表达, 所以 k_0 只能由实验测得。对金属材料而言, 前项 $(1 + 2\mu)$ 是主要的, 而对半导体材料, 后项 $[(d\rho/\rho)/\varepsilon]$ 则是主要的。大量实验证明, 金属材料在一定应变范围内, k_0 为一常数。因此, 式 (1-5) 以增量表示可写为

$$\frac{\Delta R}{R} = k_0 \varepsilon \quad (1-8)$$

上式说明, 金属材料在一定应变范围内的电阻变化率与应变成正比。

康铜是用得最广泛的应变片材料, 它的 k_0 在 2 左右。它有很多优点, k_0 值对应变的恒定性非常好, 不但在弹性变形范围内 k_0 保持常量, 而且在进入塑性变形范围内, 也基本上保持常量, 所以康铜丝应变片的测量范围大。康铜的 ρ 值也足够大, 且温度系数小而稳定, 它的加工性也好, 易于焊接。

镍铬合金与康铜相比, 其电阻系数 ρ 较高, 且抗氧化能力强, 因此较康铜的使用温度高。但其最大缺点是电阻温度系数大, 因此主要用于动态测量中。在镍铬合金基础上添加铝等金属而形成的镍铬铝合金, 可保持镍铬合金的高电阻率和抗氧化性, 而其电阻温度系数可与康铜差不多, 因此, 是一种优良的应变丝材料。

铁铬铝也是一种性能良好的应变丝材料, k_0 为 2.8 左右, 静态测量使用温度可达 600°C。贵金属及其合金宜作高温应变片, 但我国资源少, 应研制其他合金替代。

9310160

§ 1-1-2 金属应变片的结构和类型

金属应变片的典型结构主要由四个部分组成,如图 1-2 所示。一是金属电阻丝(敏感栅),它是应变片的转换元件;二是基底和面胶(或覆盖层),基底是将传感器(或试件)弹性表面的应变传递到敏感栅上的中间介质,并起到电阻丝与弹性体之间的绝缘作用。面胶起着保护敏感栅的作用;三是粘结剂,它将电阻丝与基底粘贴在一起;四是引出线,作为连接测量导线用。

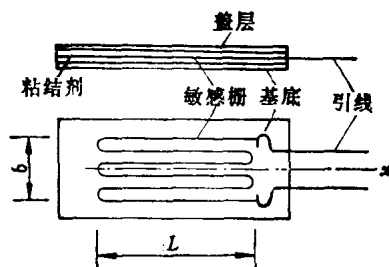


图1-2 电阻应变片的典型结构

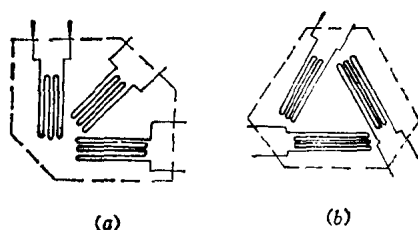


图1-3 应变花

敏感栅一般用直径在 $0.015\sim 0.05\text{mm}$ 之间、电阻值为 60Ω 、 120Ω 、 200Ω 等多种规格的金属丝绕制而成。敏感栅的纵向轴线(图中 x 轴)称为应变片的轴线。敏感栅在纵轴方向的长称为栅长。对圆弧敏感栅应变片,栅长是指两端圆弧内侧之间的最大距离,以 L 表示。在与应变片轴线相垂直的方向上,敏感栅外侧之间的距离称为栅宽,以 b 表示。栅长可在 $0.2\sim 200\text{mm}$ 之间根据需要选取。

应变片的分类方法很多,常用的方法可按其使用的材料、工作温度,以及用途的不同进行分类。

按应变片敏感栅所用的材料,可分为金属电阻应变片和半导体压阻应变片两种。

按应变片的基底材料,可分为纸基应变片、胶基应变片、浸胶基应变片、金属基应变片。按应变片安装方法,可分为粘贴式与非粘贴式(又称张丝式)应变片,绝大部分应变片是粘贴式。

按应变片敏感栅的结构形状,可分为单轴应变片和应变花。应变花是由两个或两个以上轴线相交一定角度的单轴敏感栅组成的应变片(亦称多轴应变片),用于测量平面应变,如图 1-3 所示。敏感栅不仅可用金属丝绕成,亦可用金属箔片通过光刻、腐蚀等工艺制成箔片式应变片。

按应变片工作的温区之不同,又可分为常温、中温、高温及低温应变片。

§ 1-1-3 金属应变片的主要特性

一、应变片的灵敏系数

当我们将金属线材作成金属应变片时,电阻-应变特性与金属单丝时不同,此时金属应变片的灵敏系数与金属线材的灵敏系数不同,因此必须重新用实验测定它。这种实验必须按规定的统一标准进行,测定时,规定将应变片贴在一维应力作用下的试件上,

例如受轴向拉压的直杆、纯弯梁等，试件材料规定为泊松系数 $\mu = 0.285$ 的钢。用一定加载方式使直杆或梁发生变形，再用其他测应变的仪器测定试件的应变，同时测出应变片电阻的变化，即可测得金属应变片的电阻-应变特性。实验证明，金属应变片的 $\Delta R/R$ 与 ε 的关系在很大范围内仍有很好的线性关系，即

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (1-9)$$

上式中 k 称为金属应变片的灵敏系数，也就是产品上注明的灵敏系数，常称“标称灵敏系数”。

二、横向效应与横向灵敏度

1. 横向效应

在一般情况下，被测试件表面上的应变，即使试件上只承受单向的拉伸作用，其表面变形也仍是处于平面应变状态中，既有轴向伸长也有横向缩短。测量时，被测试件的轴向应变 ε_x 和横向应变 $\varepsilon_y = -\mu\varepsilon_x$ (μ 为试件材料的泊松系数)，均会被应变片的敏感栅所感受，U形应变片（图 1-4）的半圆弧对 ε_y 感受更灵敏一些。电阻应变片由于横向缩短作用 (ε_y) 引起电阻值减小，轴向伸长作用 (ε_x) 引起电阻值增加，其综合结果将使总的电阻增量 ΔR 减小，故电阻变化率 $\Delta R/R$ 减小，从而降低了应变片的灵敏系数。应变片由于受横向应变而使电阻变化率减小并降低灵敏系数的现象，称为应变片的横向效应。

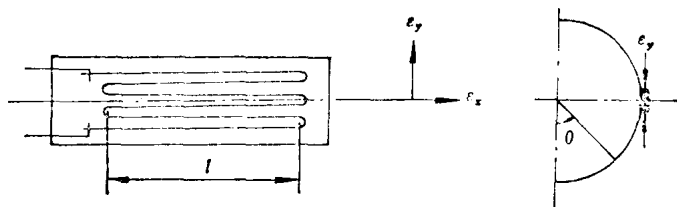


图1-4 横向效应

2. 横向灵敏度

由上述讨论已知，敏感栅感受应变时，其电阻相对变化，一部分与纵向应变有关，另一部分与横向应变有关。对于图 1-4 所示 U 型应变片，理论推导与实验证明其电阻相对变化计算式可表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = \left[\frac{2nl + (n-1)\pi r}{2L} k_0 \right] \varepsilon_x + \left[\frac{(n-1)\pi r}{2L} k_0 \right] \varepsilon_y \quad (1-10)$$

式中 l ——应变片直线段长度，

L ——电阻总长度，

r ——圆弧部分半径，

k_0 ——线材灵敏系数，

n ——电阻丝直线段数，

ε_x ——轴向应变，

ε_y ——横向应变。

$$\text{设} \quad k_x = \frac{2nl + (n-1)\pi r}{2L} k_0 \quad k_y = \frac{(n-1)\pi r}{2L} k_0$$

$$C = \frac{k_y}{k_x} \quad (1-11)$$

式 (1-11) 可写为对其他型式应变片也适用的一般形式, 即

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x \varepsilon_x + k_y \varepsilon_y \quad (1-12)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x (\varepsilon_x + C \varepsilon_y) \quad (1-13)$$

$$k_x = \left(\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon_x} \right)_{\varepsilon_y=0} \quad k_y = \left(\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon_y} \right)_{\varepsilon_x=0} \quad (1-14)$$

式中 k_x ——电阻丝片对轴向应变的灵敏系数,

k_y ——电阻丝片对横向应变的灵敏系数,

C ——应变片的横向灵敏度。

由于横向效应的存在, 电阻应变片如果用来测量 μ 不为 -0.285 的试件, 或者不是单向拉压, 而是在任意两向受力的情况下, 当其垂直方向应变不符合泊松比关系时, 如果仍按标称灵敏系数计算应变, 则必将造成测量误差, 其误差可用式 (1-12) 计算。

标定时, 在单向应力状态下, 标定梁材料的泊松比为 μ_0 , 因此 $\varepsilon_y = -\mu_0 \varepsilon_x$, 由式 (1-10) 可得

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x (1 - C\mu_0) \varepsilon_x = k \varepsilon_x$$

$$k = k_x (1 - C\mu_0) \quad (1-15)$$

上式说明应变片标定的灵敏系数 k 与 k_x 及 C 的关系。现假定实测时应变场是任意的 ε_x 和 ε_y , 材料的泊松比为 μ , 此时其电阻相对变化应按式 (1-12) 计算, 而灵敏系数却按标称灵敏系数 k 计算, 显然计算所得应变值与真实应变值不符, 而带来一定的误差。设计算所得的应变为 ε'_x , 则

$$\varepsilon'_x = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{k} = \frac{k_x (\varepsilon_x + C \varepsilon_y)}{k_x (1 - C\mu_0)} = \frac{\varepsilon_x + C \varepsilon_y}{1 - C\mu_0}$$

应变的相对误差 e 为

$$e = \frac{\varepsilon'_x - \varepsilon_x}{\varepsilon_x} = \frac{C}{1 - C\mu_0} \left(\mu_0 + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right) \quad (1-16)$$

上式说明, 相对误差与应变片横向灵敏度及应变场有关, 只有当 $\varepsilon_y/\varepsilon_x = -\mu_0$ 时, 此项误差 e 才为零。若取锻铁泊松比为 0.28、混凝土为 0.17、橡胶为 0.47, 在单向应力状态下测纵向应变, 按式 (1-16) 计得的误差在 $\pm 1\%$ 之内, 一般工程上可忽略。但由于应变状态不同引起的误差, 却是值得注意的。譬如设 $\varepsilon_x = \varepsilon_y$ 时, 误差可达 6%, 这就不能忽视了。

三、动态响应特性

在测量变化频率较高的动态应变时, 应考虑应变片的频率响应问题。根据分析, 敏

感栅对试件应变的响应时间约为 2×10^{-7} s。这一过程, 是以应变波的形式, 由试件材料表面, 经粘合层和基片传播到敏感栅的, 由于粘合层和基片的总厚度约为 0.05mm, 所需时间极其短暂, 故可认为敏感栅对应变的响应是即时的。但当应变波为敏感栅感受而在线栅长度方向传播时, 由于只有在应变波通过敏感栅全部长度后, 应变片所反映的测量过程经过一定时间的延迟, 才能达到最大值, 此时敏感栅的长度将引起频率响应误差。

当测量按正弦规律变化的应变波时, 由于应变片反映出来的应变波形, 是应变片线栅长度内所感受应变量的平均值, 因此应变片反应的波幅将低于真实应变波, 从而带来一定的误差, 显然这误差将随应变片栅长的增加而增大。图 1-5 表示应变片正处于应变波达到最大幅值时的瞬时情况, 应变波的波长为 λ , 应变片的栅长为

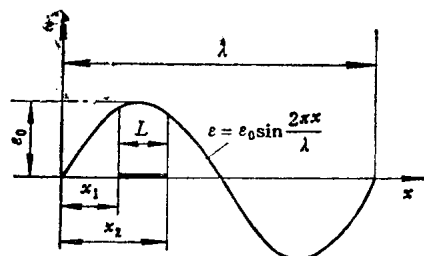


图1-5 应变片对正弦应变波的响应特性

L , 其两端点的坐标为 x_1 和 x_2 , 而 $x_1 = \frac{\lambda}{4} - \frac{L}{2}$, $x_2 = \frac{\lambda}{4} + \frac{L}{2}$, 此时应变片在栅长 L 内测得的平均应变 $\bar{\varepsilon}$ 达到最大值, 其值为

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon} &= \frac{\int_{x_1}^{x_2} \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x dx}{x_2 - x_1} = -\frac{\lambda \varepsilon_0}{2\pi L} \left(\cos \frac{2\pi}{\lambda} x_2 - \cos \frac{2\pi}{\lambda} x_1 \right) \\ &= \frac{\lambda \varepsilon_0}{\pi L} \sin \frac{\pi L}{\lambda}\end{aligned}\quad (1-17)$$

因而应变波幅测量的相对误差 l 为

$$l = \frac{\bar{\varepsilon} - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = \frac{\lambda}{\pi L} \sin \frac{\pi L}{\lambda} - 1 \quad (1-18)$$

由上式可知, 测量误差 l 与应变波长对栅长的相对比值 $n = \lambda / L$ 有关, λ / L 愈大, 误差愈小。一般可取 λ / L 为 10~20, 其误差 l 小于 1.6~0.4%。

因为 $\lambda = \frac{v}{f}$ $\lambda = nL$

所以 $f = \frac{v}{nL}$ (1-19)

式中 f ——应变片的可测频率;

v ——应变波在试件中的传播速度;

n ——应变波波长与栅长之比。

由式 (1-19) 可知, 当 v 、 n 、 L 给出时, 即可求得所用应变片的最高工作频率 f 。若应变波为阶跃波, 此时应变片的最高工作频率可近似为

$$f = 0.4 \frac{v}{L} \quad (1-20)$$

四、应变片的应变极限

应变片的应变极限, 是指在一定温度下 (室温或极限使用温度), 在应变片的指示应

变值对试件的真实应变的相对误差不超过规定范围时（一般为1%）的真实应变值。一般情况下，影响应变极限大小的主要是粘合剂和基底材料的性能。

将应变片粘合在试件或传感器的弹性元件上，然后构成半桥或全桥电路。当弹性元件（或试件）受力后，产生应变，敏感栅的电阻发生变化，产生正比于力（或应变）的电压信号，测定电压就可确定力（或应变）的大小，其测量电路可见§1-5节。由上可知，应变片不仅可对试件进行测量，而且与不同弹性元件结合可制成力、压力、称重、扭矩、加速度等多种力学量传感器（见§1-7节）。

§1-2 压阻式压力传感器的基本原理

§1-2-1 概述

随着固体物理学的发展，固体的各种效应逐渐被人们所发现。固体受到力的作用后，电阻率将发生显著的变化，这种效应称为压阻效应。压阻式传感器就是利用这种效应制成的。压阻式传感器主要用于测量力、压力、加速度、载荷和扭矩等参量。

硅晶体有良好的弹性变形性能和显著的压阻效应，利用硅的压阻效应和集成电路技术制成的传感器，具有灵敏度高、动态响应快、测量精度高、稳定性好、工作温度范围宽、易于小型化和批量生产及使用方便等特点。因而是一种应用日益广泛、发展非常迅速的传感器。早期的硅压力传感器，称为体型压力传感器（又称半导体应变片式压力传感器）。它的应变片是采用单晶硅在生产过程中掺入杂质硼，形成具有一定电阻率的晶体，然后将单晶硅切割加工成薄片矩形条，粘贴在金属或其它材料制成的弹性元件上，构成半桥或全桥电路。当弹性体承受压力后，产生应力，使硅片受到压缩或拉伸，硅的电阻率发生变化，产生正比于力的电压信号输出，测定电压大小就可确定力的大小。这种半导体应变片式力传感器，后来发展成在N型硅单晶片上选择适当位置，通过扩散制成厚度极薄的P型硅应变电阻条。P型硅应变电阻条与N型硅单晶基片（膜片）之间构成PN结，反向偏置后，可使P型硅应变电阻条与N型硅基片形成绝缘。把制成的P型硅应变电阻条连接成惠斯顿电桥，这就是压阻式传感器的芯片。把芯片粘贴在弹性元件上，当压力作用于弹性元件时，芯片上的电桥在压力作用下出现不平衡，输出一正比于压力变化的电压信号。这种压阻式传感器，由于采用了粘片结构，所以存在着较大的滞后和蠕变现象，并具有固有频率较低、精度不够高、小型化集成化有困难等问题，因此影响了它的使用和发展。

70年代，采用集成电路技术制造压阻式传感器获得了极大的发展。制成了周边固支的电阻与硅膜片一体化的硅杯式扩散型压阻式传感器。它克服了上述压阻式传感器的问题，其性能优良，易于小型化和批量生产，而且能把应变电阻条、补偿线路、信号调整，甚至能将计算处理电路集成在一块硅片上，制成“智能传感器”，这使压阻式传感器获得了更广泛的应用，成为人们更为重视的一种新型传感器。

由于体型半导体应变片和扩散型力敏元件在原理、设计方法、应用电路是相通的，主要是结构上的区别，因此，扩散型力敏传感器是本章讨论的重点。

§ 1-2-2 基本原理

压阻式传感器的基本原理可以从材料电阻的变化率看出。在 § 1-1 节中我们已知, 任何材料电阻的变化率都可由下式决定:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho}$$

对半导体而言, 上式中 dl/l 与 dr/r 两项很小, 即几何尺寸的变化率很小, 相对讲就显得不重要了, 而电阻率的变化率 $d\rho/\rho$ 较大, 故半导体电阻的变化率主要是由 $d\rho/\rho$ 项引起的。由 § 1-1 节可知, 上式又可改写为式 (1-5) 的形式, 即

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon + 2\mu\varepsilon \quad (1-21)$$

如果引用

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi T \quad T = E\varepsilon$$

式中, π 为压阻系数 (m^2N^{-1}); T 为应力 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$); E 为弹性模量 ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$); ε 为轴向应变 (图 1-1), 则式 (1-21) 可写为

$$\frac{dR}{R} = \pi T + \varepsilon + 2\mu\varepsilon = (\pi E + 1 + 2\mu) \varepsilon = k_s \varepsilon \quad (1-22)$$

式 (1-22) 中, k_s 为半导体材料的灵敏系数。对于半导体材料, πE 比 $(1 + 2\mu)$ 大得多, 故 $(1 + 2\mu)$ 可略去不计, 压阻系数 $\pi = (40 \sim 80) \times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$, 弹性模量 $E = 1.67 \times 10^{11} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。因之半导体灵敏系数 k_s 可近似写为 $k_s = \pi E \approx 50 \sim 100$ 。于是有:

$$k_s \approx (50 \sim 100) k_0$$

上式表明, 半导体压阻转换元件的灵敏系数比金属应变片的灵敏系数大 50~100 倍。由于半导体材料的 πT 比 $(1 + 2\mu) \varepsilon$ 大得多, 因而电阻相对变化可写为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} = \pi T \quad (1-23)$$

式 (1-23) 说明, 半导体材料受力形变后电阻的变化率 $\frac{dR}{R}$ 主要是由 $\frac{d\rho}{\rho}$ 引起的, 这就是压阻式传感器元件所依据的原理。

半导体压阻式传感器的灵敏系数很大, 有时输出无需放大, 可直接用于测量, 所以它的灵敏度高。它的另一优点是分辨率也很高。压阻式传感器的灵敏系数之所以很高, 这是因为当力作用于硅单晶使晶格产生形变时, 能带的结构也将发生变化, 从而影响载流子在能谷中的迁移, 造成硅电阻率的变化。这个变化随取向而异, 所以硅的压阻效应与晶向有关。

§ 1-2-3 压阻系数

上节我们仅在半导体受有拉伸应力作用下, 给出了压阻系数这一物理量。实际情况并非如此简单。作为各向异性的晶体, 它的压阻系数具有复杂的形式, 现讨论如下:

一、应力张量

弹性体内某一点的应力, 要用九个应力分量组成的应力张量来描述。假想在弹性体中取一正平行六面微分体, 整个弹性体可以看成是无数小微分体组成。若正平行六面微