

高等学校教学用书

# 过程机械量仪表

冶金工业出版社

高等学校教学用书

**过程机械量仪表**

东北工学院 张宏勋 主编

\*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张 12 3/4 字数 300 千字

1985年6月第一版 1985年6月第一次印刷

印数00,001~5,300册

统一书号: 15062·4276 定价2.45元

## 前 言

本书是根据1982年冶金高等院校教材编写规划编写的。《过程机械量仪表》是工业自动化仪表专业的一门专业课教材，它和《热工测量仪表》、《过程分析仪器》两本教材一起为该专业提供关于自动检测方面的全面而系统的专业知识。

全书共分八章，除第一章绪论外分两大部分，第二至第四章为第一部分，研究与力学量有关的仪表，即重量、轧制力、张力、速度等自动检测仪表；第五至第八章为第二部分，研究与位移量及尺寸量有关的仪表，即位移、厚度、宽度、直径、长度等自动检测仪表。

本书除着重对各种仪表的检测器或检测系统的结构及检测原理进行分析外，并适当地联系一些实际的仪表。过程机械量仪表的电气线路一般较复杂，特别是一些较新的仪表几乎都带有微处理机，由于讲课学时和篇幅的限制，在本书中一般只给出电气线路的原理方框图。

讲授本书需50学时左右。通过本书的学习虽然不能完全了解各种过程机械量仪表，但是学生毕业后参考仪表制造厂提供的仪表使用说明书会很快独立掌握仪表的正确使用与维修。培养学生设计与研制某些专用的过程机械量仪表，也是学习本课程的任务之一。

本书第一与第六章由张宏勋编写，第五、第七与第八章由于大安编写，第二、第三与第四章由张粉玉编写。由于编者水平有限，书中难免有错误，欢迎批评指正。

在本书编写过程中有关的一些高等院校、研究单位及工厂的同志提供了许多宝贵资料，谨在此表示感谢。

编 者

1984年4月

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第一章 绪论 .....               | 1   |
| 第一节 过程机械量仪表的概念 .....       | 1   |
| 第二节 过程机械量仪表的发展及应用 .....    | 1   |
| 第三节 过程机械量仪表的组成 .....       | 2   |
| 第四节 过程机械量仪表的主要技术性能指标 ..... | 3   |
| 第二章 自动称重仪表 .....           | 6   |
| 第一节 概述 .....               | 6   |
| 第二节 应变片 .....              | 6   |
| 第三节 应变片的测量电路 .....         | 16  |
| 第四节 应变式荷重传感器 .....         | 24  |
| 第五节 电子秤 .....              | 34  |
| 第三章 轧制力、张力测量仪表 .....       | 46  |
| 第一节 磁弹性效应 .....            | 46  |
| 第二节 压磁式测力传感器 .....         | 49  |
| 第三节 轧制力测量仪表 .....          | 56  |
| 第四节 张力测量仪表 .....           | 59  |
| 第四章 速度测量仪表 .....           | 62  |
| 第一节 离心式转速表 .....           | 62  |
| 第二节 发电机式转速表 .....          | 63  |
| 第三节 磁性转速表 .....            | 66  |
| 第四节 数字式转速测量仪表 .....        | 67  |
| 第五节 转速的相关测量法 .....         | 72  |
| 第六节 线速度的相关测量法 .....        | 74  |
| 第七节 激光测速法 .....            | 76  |
| 第五章 位移测量仪表 .....           | 82  |
| 第一节 概述 .....               | 82  |
| 第二节 感应同步器 .....            | 82  |
| 第三节 计量光栅 .....             | 89  |
| 第四节 磁栅传感器 .....            | 101 |
| 第五节 编码器式传感器 .....          | 107 |
| 第六章 测厚仪表 .....             | 111 |
| 第一节 射线测厚原理 .....           | 111 |
| 第二节 X射线测厚系统 .....          | 118 |
| 第三节 核辐射线测厚系统 .....         | 124 |
| 第四节 微波测厚系统 .....           | 128 |
| 第五节 激光测厚原理 .....           | 139 |
| 第七章 宽度和直径测量仪表 .....        | 144 |
| 第一节 光电宽度计概述 .....          | 144 |

|     |                      |     |
|-----|----------------------|-----|
| 第二节 | 单扫描器旋转狭缝宽度计 .....    | 145 |
| 第三节 | 双扫描器旋转狭缝宽度计 .....    | 149 |
| 第四节 | 旋转镜鼓式宽度计 .....       | 152 |
| 第五节 | 双扫描器旋转镜鼓宽度计 .....    | 157 |
| 第六节 | 激光测径仪 .....          | 161 |
| 第七节 | 直径和宽度测量的其它方法简介 ..... | 173 |
| 第八章 | 长度等大尺寸的测量 .....      | 178 |
| 第一节 | 接触式测长原理 .....        | 178 |
| 第二节 | 红热钢坯测长 .....         | 179 |
| 第三节 | 重轨测长仪 .....          | 186 |
| 第四节 | 钢丝绳测长仪 .....         | 190 |
| 第五节 | 微波在大尺寸测量上的应用简介 ..... | 193 |
| 第六节 | 炮孔深度的声回波测量法 .....    | 195 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 过程机械量仪表的概念

在工业生产流程中应用的自动检测仪表一般分为三大类，即热工测量仪表、过程分析仪器和过程机械量仪表。过程机械量仪表是在工业生产流程中对机械量进行自动检测的仪器仪表，主要用途是自动提供工业生产流程中各种机械量的信息，供给操作人员对生产过程进行监视，或输入给自动控制系统对生产过程进行自动调节，以保证生产高效地进行。

过程机械量仪表一般按被测量对象类别来分类较为方便。根据目前工业生产流程中需要自动检测的机械量的实际情况，可分为重量、力、速度、位移、厚度、宽度、直径、长度等类。称重仪表包括皮带电子秤、电子轨道衡、吊车秤、料斗秤等，它们应用在各个工业部门。测力仪表包括轧制力与张力检测仪表，它们主要应用在材料加工工业部门。测速仪表包括转速与线速度检测仪表，它们也应用在各个工业部门。位移、厚度、宽度、直径、长度等检测仪表主要应用在材料加工工业部门。

## 第二节 过程机械量仪表的发展及应用

过程机械量仪表是伴随生产过程自动化而发展起来的。过程机械量仪表在国际上大约从本世纪四十年代开始在工业生产流程上应用。在我国从五十年代末开始发展和应用过程机械量仪表，但较大量应用是从七十年代开始。目前我国已可制造各类过程机械量仪表，其中有些种类例如称重、测力、测速与测厚等仪表已可批量生产。

随着生产过程自动化程度的提高，过程机械量仪表的用量将会逐渐增加，有些生产过程离开过程机械量仪表就无法进行。图1-1为五机架冷连轧机主要过程机械量仪表配置图。为了控制各轧机轧辊的压下位移，配置了五台辊缝仪。为了进行厚度自动控制，配置了三台测厚仪。轧机的每个轧辊都由单独的电机拖动。为了控制速度和保持上下两轧辊同步工作，给

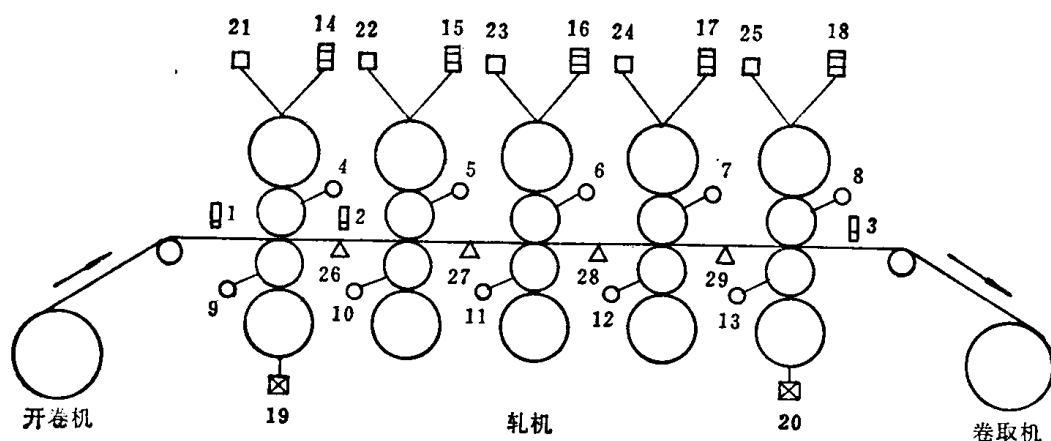


图 1-1 五机架冷连轧机主要过程机械量仪表配置图

1~3—测厚仪；4~13—测速仪；14~18—辊缝仪；19、20—轧制力测量仪；21~25—压力测量仪；26~29—张力量测量仪

每个轧辊配置一台测速仪，共十台。为了保持带钢张力恒定，在两机架间配置张力测量仪。在冷连轧机上，为了满足快速厚度自动控制的要求，一般都采用液压压下。为了测量各液压缸油压的压力，共配置了五台压力测量仪。另外，在第一和第五两机架上各配置了一台快速响应的轧制力测量仪。现代化的冷连轧机的轧制速度很高，末端机架常在30米/秒以上。象这样高速的轧机，只有配置各种检测仪表和采用计算机控制，才能保证生产正常进行。过程机械量仪表对这类生产过程是必不可少的。

### 第三节 过程机械量仪表的组成

图1-2为过程机械量仪表的组成方框图。它一般包括以下五个部分。

1. 被测机械量输入装置 它的任务是将被测的机械量输入给检测器或检测系统。一般它是一套机械装置，根据被测机械量不同，它的复杂程度不一。例如，带钢张力测量仪的输入装置由两个辊组成，如图1-3所示。带钢的张力通过测量辊转换为轴承的压力，然后输入给力传感器。光电式辊缝仪的输入装置是把线位移转换为角位移的传动轴。以上这几种仪表的输入装置都比较简单。但皮带电子秤的输入装置就比较复杂，它需要一套框架结构，而电子轨道衡的输入装置就更复杂些。

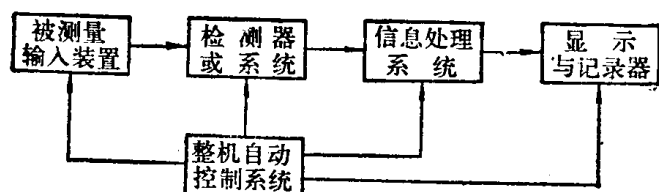


图 1-2 过程机械量仪表的组成方框图

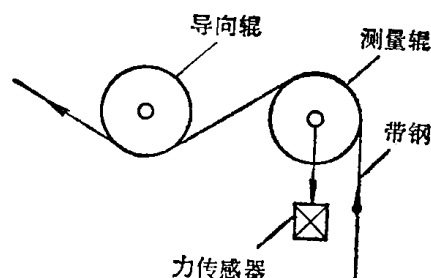


图 1-3 带钢张力测量仪的输入装置示意图

被测机械量输入装置设计的好坏直接影响仪表的测量精度。例如，皮带电子秤的框架结构如果设计不合理，则仪表就不能稳定运行。有些皮带电子秤不好用，它的框架结构设计得不合理往往是重要原因之一。

2. 检测器或检测系统 它的任务是将机械量信息自动转换成电信息。机械量信息是指重量、力、速度、位移、厚度、宽度、直径、长度等信息；电信息是指电压、电流、电阻、电感、电容、频率等电的信息。检测器或检测系统是过程机械量仪表的核心部分，它们所依据的原理十分广泛，涉及物理学的各个领域。以测厚仪为例，它有电感式、涡流式和电容式，它们的原理涉及电磁学。测厚仪还有X射线式、核辐射线式、微波式、激光式和超声式等，因此它们又分别涉及射线技术、核辐射技术、微波技术、激光技术和超声技术等。较简单的过程机械量仪表检测器本身就是一个传感器，例如轧制力测量仪的检测器就是一个压磁式力传感器。但较复杂的过程机械量仪表仅用一个传感器往往不能实现信息转换功能，还需与一些其他器件配合共同组成一个检测系统才能实现。例如，X射线测厚仪需要由X射线发生器和X射线探测器(电离室或闪烁计数器)组成检测系统。再例如，旋

转狭缝式光电测宽仪，是由靠电机拖动的旋转狭缝、光电倍增管以及以透镜和狭缝为主体的光学系统、精密丝杠及其拖动电机等组成检测系统。这里采用的光电倍增管是一个光电传感器，它只能实现光到电的信息转换，而不能直接实现宽度到电的信息转换。为了实现宽度到电信息的转换，先需经过检测系统的其他部件将宽度信息转换成光信息，然后再由光电倍增管将光信息转换成电信息。由此可见，传感器是组成仪表检测器或检测系统的主要部件，但又不是唯一的部件。因此，在研制过程机械量仪表时必须研制或选择性能良好的传感器，但同时又不能忽视其他部件。

3. 信息处理系统 它的任务是对检测器或检测系统输出的微弱电信息进行放大、补偿（线性、温度、材质等）、数学运算（四则、对数函数、三角函数等）、模数转换等信息处理工作。1975年微处理器问世以前，上述信息处理工作靠采用各种模拟电路来实现。对较简单的信息处理任务，采用模拟电路处理是比较方便的。但对较复杂的信息处理任务采用模拟电路处理，常常需要用大量的电子器件组成庞杂的电路，很不方便。有些复杂的信息处理任务采用模拟电路几乎无法实现。微处理器问世以后给过程机械量仪表的信息处理提供了先进的技术。从国际上看，目前仪器仪表已普遍采用微处理器。没有微处理器的仪器仪表已逐渐在市场上丧失竞争能力。过程机械量仪表当然更不例外。近年来我国也在过程机械量仪表里开始应用微处理器。

4. 显示与记录器 它的任务是用模拟量显示仪表与记录仪、各种数字显示器或屏幕显示器，显示出经过信息处理系统处理后的被测机械量的数值，并同时用曲线记录或用数字打印。此数值有的用被测机械量的绝对值表示，也有的用被测机械量与给定值的差值即偏差表示。

早期的过程机械量仪表都是采用模拟量表头显示，用自动电子电位差计描绘曲线作记录。近期的过程机械量仪表都兼有模拟量和数字量两种显示，并用数字打字机打印作记录。

过程机械量仪表的显示常常在两处进行，一处在现场，另一处在仪表控制室。

5. 整机自动控制系统 它的任务是自动控制整机各部分协调工作。较简单的过程机械量仪表可能没有这部分，也可能仅是个简单的控制电路。较复杂的过程机械量仪表，可采用顺序控制电路实现整机的控制功能。采用微处理器进行数据处理的过程机械量仪表，它的整机控制功能也是利用微处理器实现的。

采用微处理器的过程机械量仪表不仅具有高性能的数据处理功能，而且具有较完备的整机控制功能。例如，除了控制整机协调工作外，还可以定时自动调零、自动校准，有故障时显示报警和按一定程序自动处理故障，等等。总之，微处理器的出现，为开发种类更多、性能更好的过程机械量仪表提供了有利条件。

#### 第四节 过程机械量仪表的主要技术性能指标

过程机械量仪表是用来自动检测生产工艺流程中经常变化的各种机械量的仪器仪表。使用它们的目的是为了监视和控制生产过程，使生产稳定和高效率地进行。因此，过程机械量仪表的技术性能指标，应当根据生产需要来制定。从这点出发，过程机械量仪表的主要技术性能指标应有以下四方面。

1. 量程 量程是表示仪表的测量范围的指标，是指仪表能检测的上下限范围，例如

100~1250吨（指轧制力）或0.1~8mm（指厚度）。

2. 精确度 精确度又称精度，它是表示仪表测量误差大小的性能指标。过程机械量仪表的精度表示方法不统一，目前我国实际采用的有以下三种表示方法。

（1）相对额定误差。它的表示式为

$$\text{相对额定误差} = \frac{\text{绝对误差的最大值}}{\text{仪表量程范围}} \times 100\% \quad (1-1)$$

绝对误差在仪表量程范围内各点不同，因此，取仪表量程范围内绝对误差的最大值来定义相对额定误差。仪表量程范围指仪表测量范围上下限之差。例如，量程为100~1250吨，则仪表量程范围为1150吨。如果其绝对误差的最大值为11.50吨，则测量精度为1%。

自动检测仪表中热工测量仪表和过程分析仪器都采用上述相对额定误差表示仪表的精度。但过程机械量仪表只有一部分采用相对额定误差表示仪表的精度，例如测力仪表和称重仪表。为了统一精度表示方法，应用在工业生产流程上的全部自动检测仪表最好都采用相对额定误差。

（2）绝对误差。这种表示法是指在仪表的量程范围内各点测量时误差都不超过某一个值。例如，测径仪的误差小于±0.1毫米，测长仪的误差小于0.01米，都是指绝对误差。显然，这种表示法很易换算成相对额定误差。

（3）相对误差。相对误差是指某点的绝对误差和该点的真实值之比，它的表示式为

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真实值}} \times 100\% \approx \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量值}} \times 100\% \quad (1-2)$$

由于测量值与真实值相差不多，因此计算相对误差时可采用测量值。用相对误差表示的仪表精度，是指在全部量程范围内（或在某挡量程范围内）各点相对误差都不超过某个值。例如，测厚仪的误差小于测量值的±1%。

在此应当指出，仪表的相对误差和相对额定误差数值相同的两台仪表，它们的精度相差很多，前者要比后者高很多。例如，对相对额定误差为1%的仪表，被测值为满量程时相对误差为1%，而被测值为满量程的20%时相对误差将明显上升，最大可达5%。

仪表的精度主要决定于仪表的检测原理与结构（包括光、机、电等仪表的全部结构）。另外，仪表周围环境的变化也会影响仪表的精度。仪表精度是表示仪表测量准确性的主要性能指标。为了进一步表示仪表测量的准确性，还规定有灵敏度、噪音、重复性、稳定性等性能指标。

灵敏度：是指仪表的输出量与输入量之比。输入量是机械量，而输出量一般指显示器的指示值，也有时指检测器的输出量。灵敏度的定义为

$$s = \frac{dy}{dx} \quad (1-3)$$

式中  $s$  ——灵敏度；

$y$  ——输出量；

$x$  ——输入量。

如果输出量与输入量之间是线性关系，则灵敏度为常量；如果是非线性关系，则为变量。

噪音：是指仪表的输入量为零时，仪表的显示器指示值围绕零点抖动的宽度。一般噪

音用显示器的输入量表示，例如多少毫伏。仪表的噪音由实验求出。

**重复性：**是指仪表的输入量不变，在短时间内仪表多次重复测量，各次测量值之间的误差。

**稳定性：**对过程机械量仪表主要指长时间稳定性，比如24小时或48小时的稳定性。稳定性可定义为，仪表的输入量为零时，在某段时间内，仪表的指示值偏离零点的误差。稳定性有时也称漂移。

从上述灵敏度、噪音、重复性、稳定性等指标的定义可看出，它们都直接影响仪表的精度。特别是后三个指标更是精度指标在特定条件下的具体化，因此精度指标应当将它们都包括在内。

**3. 响应时间** 响应时间是动态性能指标，而以前讨论的性能指标都是静态指标。响应时间是表示仪器测量速度快慢的。这项性能指标对过程机械量仪表十分重要，特别是作为自动控制生产过程的过程机械量仪表，一般都要求测量速度快。响应时间的定义不统一，从原则上讲应定义为，从测量开始到仪表显示器显示出被测量值为止的一般时间。过程机械仪表一般可看成一个惯性环节，理论上讲显示器显示出被测机械量值需无限大时间。但一般认为，显示值达到与最终值相差为仪表误差时就认为达到了最终值。这样，响应时间可定义为，从测量开始到显示值与最终值相差为仪表误差时的一段时间。例如，相对误差为 $\pm 5\%$ ，则响应时间就是达到最终值的95%时所经历的时间。也有时把响应时间定义为达到最终值90%时所经历的时间。为了明确起见，表示响应时间时应注明距最终值的差，例如7秒（ $\pm 10\%$ ）、10秒（ $\pm 5\%$ ）等。也有时不用响应时间，而用时间常数表示测量速度的快慢。时间常数是表示显示值达到最终值的63.2%时所经历的时间。

**4. 平均故障间隔时间** 为了表征仪表的全面质量，应当规定平均故障间隔时间。它可定义为，在一段时间（例如一年或几年）内发生故障停机的次数去除那一段时间。对过程机械量仪表，它也应该是一个很重要的指标，但目前还没有被人们重视。

最后应当指出，目前关于过程机械量仪表的各项技术性能指标各个制造厂家还没完全统一，有关书籍中关于各项指标的定义也略有差别。

## 第二章 自动称重仪表

### 第一节 概 述

重量是重力的表现,因此,称重仪表是一种测力仪表。凡用于对生产过程中物料重量进行自动称量、配料和控制的测力仪表,均称为自动称重仪表。它有机械杠杆式、机电结合式、电子式等多种。所谓电子式,是指直接将重量信号转换成电信号的自动称重仪表,通常称为“电子秤”。本章所研究的自动称重仪表就是指这一种。

自动称重仪表主要由荷重传感器、机械测量机构(如秤架)、信号处理系统和显示仪表构成。荷重传感器是整个仪表的核心。荷重传感器从工作原理来分,主要有电阻应变式、压磁式、振弦式、电感式、电容式、压电式等。但是,目前在自动称重系统中以电阻应变式荷重传感器应用最为广泛。国内研制生产的电阻应变式荷重传感器,量程一般为1公斤~100吨,测量精确度为 $\pm 0.05 \sim 0.1\%$ 。

自动称重仪表——电子秤,是工业生产过程或运输作业过程自动化必不可少的重要技术工具。因而,在现代工业、农业、商业贸易、交通运输、港口计量和科学研究等部门得到了广泛的应用。电子秤的应用不仅可提高生产过程自动化,减轻劳动强度,而且对提高设备能力,节约能源,加强企业管理,提高经济效益都有着重要的意义。

随着高精度荷重传感器的发展,尤其是随着抗侧向力强,偏荷影响小的剪切式传感器(包括“S”型,精确度一般为 $0.05 \sim 0.03\%$ )研制成功并投入批量生产,电子秤的精度大为提高,电子秤的品种也越来越多。凡是工业生产上需要的称重设备,都可以做成专用的电子秤,小到几克,大到几百吨。微处理机在电子秤中的应用发展很快,很多制造厂和研究单位都在进行这项工作。微处理机应用于各种电子秤的控制、数据处理及管理,有广阔的前景。

本章将重点研究电阻应变式自动称重仪表。

### 第二节 应 变 片

应变片,是利用金属丝的电阻应变效应或半导体的压阻效应制成的一种传感元件。应

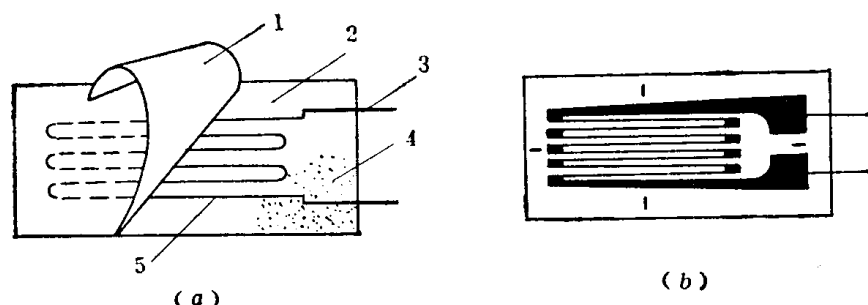


图 2-1 应变片的构造

(a) 丝式应变片; (b) 箔式应变片

1—覆盖层; 2—基底; 3—引线; 4—粘结剂; 5—敏感栅

变片的用途不同，其构造不完全相同，但一般的应变片都具有敏感栅、基底、覆盖层和引线等部分。金属应变片的基本结构如图 2-1 所示。测量时将应变片用粘结剂贴在试件或受力作用的弹性元件上，测出其电阻变化，即可求出其应变或受力的大小。

电阻应变效应的发现，迄今已有一百多年的历史。1856年汤姆逊（W. Thomson）首先发现金属丝在机械应变作用下发生电阻变化的现象，1938年西蒙斯（E. Simmons）与鲁奇（A. Ruge）创制出纸基丝绕应变片后，电阻应变片开始用于应变测量。以后陆续出现了箔式应变片，半导体应变片等。现在已有用于不同环境和条件的各种类型的电阻应变片，并大量用于制造测量各种参数的传感器。

按照敏感栅所用材料不同，应变片可分为金属应变片和半导体应变片两大类。在金属应变片中又分为金属丝式应变片、金属箔式应变片和金属薄膜应变片；在半导体应变片中则分为体型、扩散型和薄膜型。下面分别加以介绍。

### 一、金属丝的电阻应变效应

实验证明，绝大部分金属丝沿其轴线方向受到拉伸（或压缩）时，电阻值会增大（或缩小）。这种电阻值随变形发生变化的现象，叫做电阻应变效应。图2-2是几种金属丝材的电阻应变效应曲线。从图中看出，有些金属丝在一定变形范围内，其电阻变化率与应变成正比关系，可用下式表示

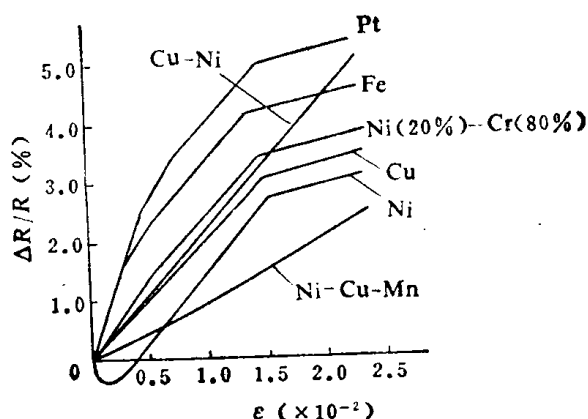


图 2-2 几种金属丝的电阻应变效应

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0 \varepsilon \quad (2-1)$$

式中  $R$ ——长度为  $l$  的丝材的初始电阻值；

$\Delta R$ ——丝材伸长  $\Delta l$  后电阻值的变化；

$\varepsilon$ ——金属丝轴线方向产生的应变，等于  $\Delta l/l$ ，为无量纲的值；因为此值通常很小，故常用  $10^{-6}$  表示，称为微应变 ( $\mu\varepsilon$ )；

$K_0$ ——常数，其物理意义是每单位应变所造成的相对电阻变化，称为金属丝电阻变化率对应变的灵敏系数，简称灵敏系数。

公式 (2-1) 从理论上可作如下解释。已知金属丝材的电阻值与尺寸及组成材料的关系为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2-2)$$

式中  $l$  —— 金属丝的长度;  
 $S$  —— 金属丝的截面积;  
 $\rho$  —— 金属丝材料的电阻率。

为求得电阻的变化 (假定这变化很小), 对公式 (2-1) 全微分并用相对变化量表示

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (2-3)$$

式中,  $dS$  表示金属丝长度变化时由于泊松效应造成的金属丝截面积的变化。如果金属材料在某一个方向受力产生应变, 则在另一个方向上虽然没有应力也产生应变, 这种现象称之为泊松效应。如果金属丝沿轴向伸长 (或缩短) 时, 与轴向垂直的横向尺寸反而缩短 (或伸长), 其横向应变与轴向应变之比的绝对值称为泊松比, 用  $\mu$  表示为

$$\mu = \left| \frac{\Delta r/r}{\Delta l/l} \right|$$

式中  $\Delta l/l$  —— 轴向应变 (或纵向应变), 用  $\varepsilon$  表示;  
 $\Delta r/r$  —— 横向应变, 用  $\varepsilon_t$  表示,  $\varepsilon_t = -\mu\varepsilon$ ;  
 $r$  —— 与轴向垂直的横向尺寸。

设金属丝的截面为圆形, 直径为  $D$ , 则  $S = \frac{\pi}{4}D^2$ , 取微分后得

$$\frac{dS}{S} = 2 \frac{dD}{D}$$

将  $\mu$  代入上式, 得

$$\frac{dS}{S} = -2\mu \frac{dl}{l} \quad (2-4)$$

将公式 (2-4) 代入公式 (2-3), 得

$$\frac{dR}{R} = (1+2\mu) \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} = (1+2\mu)\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\text{或} \quad \frac{dR}{R} = \left[ (1+2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \right] \varepsilon \quad (2-5)$$

将公式 (2-5) 与公式 (2-1) 相比较, 可得

$$K_0 = 1 + 2\mu + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \quad (2-6)$$

此式表明, 金属丝的电阻应变效应由两方面原因造成: 一是由  $(1+2\mu)$  表达的几何尺寸的改变, 一是电阻率也随应变发生变化。电阻率  $\rho$  依什么规律随应变变化, 至今尚无圆满的解释。

早在1917年, Бриджмен 在研究高液压对金属丝作用时曾给出一个电阻率与金属丝体积变化率之间的线性关系

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V}$$

式中,  $C$  为取决于金属材料的常数。而体积  $V = Sl$ , 取其全微分, 得

$$\frac{dV}{V} = \frac{dS}{S} + \frac{dl}{l}$$

将公式 (2-4) 代入上式, 可得

$$\frac{dV}{V} = (1 - 2\mu)\varepsilon$$

因而有

$$\frac{d\rho}{\rho} = C(1 - 2\mu)\varepsilon \quad (2-7)$$

将公式 (2-7) 代入公式 (2-6), 得

$$K_0 = (1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu) \quad (2-8)$$

当材料确定时, 灵敏系数  $K_0$  只是  $\mu$  的函数。一般金属在弹性范围内,  $\mu$  为确定的常数。可见,  $K_0$  为一常数。根据公式 (2-1) 知道,  $K_0$  越大, 在同一应变条件下其电阻值的变化也越大。实践证明,  $K_0$  值与合金的成分、杂质含量、加工工艺以及热处理过程有关。各种材料的灵敏系数  $K_0$  均由实验测定。

## 二、半导体的压阻效应

一块半导体沿某一轴向受到应力作用而产生应变时, 它的电阻率会发生变化, 这种现象称为半导体的压阻效应。半导体的压阻效应由下式表示

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_e \sigma = \pi_e E \varepsilon \quad (2-9)$$

式中  $\pi_e$  —— 半导体材料的压阻系数;

$\sigma$  —— 半导体受到的轴向应力;

$\varepsilon$  —— 半导体轴向应变;

$E$  —— 半导体材料轴向弹性模量。

将公式 (2-9) 代入公式 (2-6), 得

$$K_0 = (1 + 2\mu) + \pi_e E \quad (2-10)$$

实验证明, 半导体材料的压阻效应很大, 可使  $\pi_e E \gg (1 + 2\mu)$ , 故后者可忽略不计, 因此半导体应变片的灵敏系数可表示为

$$K = \frac{dR/R}{\varepsilon} \approx \pi_e E \quad (2-11)$$

实验又证明, 半导体应变片的灵敏系数  $K$  取决于半导体材料、导电类型、晶轴方向、杂质浓度和温度等。杂质的影响见图 2-3 所示。由图可见, 杂质含量越高, 灵敏系数越低。另外, 实验也指出, 应变方向不同时, 灵敏系数也不同; 且拉应变时  $\Delta R/R$  与  $\varepsilon$  的线性优于压应变。

温度对灵敏系数的影响如图 2-4 所示。由图可见, 温度越高, 灵敏系数越低, 但杂质含量越高的受温度影响越小。

晶轴方向与灵敏系数的关系见表 2-1。当用锗材料时, 采用  $N[111]$ 、 $P[111]$  晶轴; 用硅材料时, 采用  $N[100]$  或  $[110]$ 、 $P[110]$  或  $[111]$  晶轴。此时  $K$  值均大于 100, 比金属应变片大 50 倍以上。

表 2-1 半导体应变材料K值表

| 晶轴方向  | 材 料  |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|
|       | Ge   |      | Si   |      |
|       | 类 型  |      | 型 值  |      |
|       | N    | P    | N    | P    |
|       | K    |      |      |      |
| [100] | -2   | -5   | -132 | +10  |
| [110] | -97  | +67  | -104 | +123 |
| [111] | -147 | +103 | -13  | +177 |

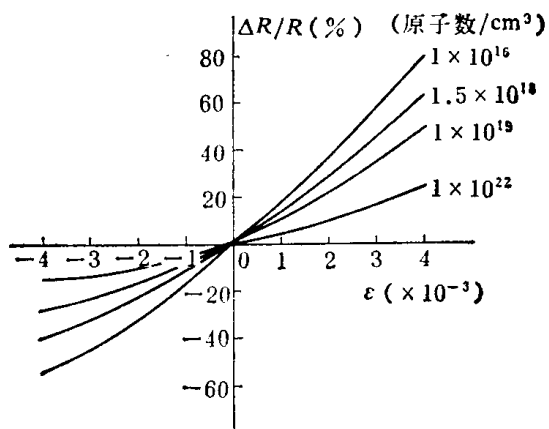


图 2-3 P型硅杂质浓度引起灵敏系数的变化

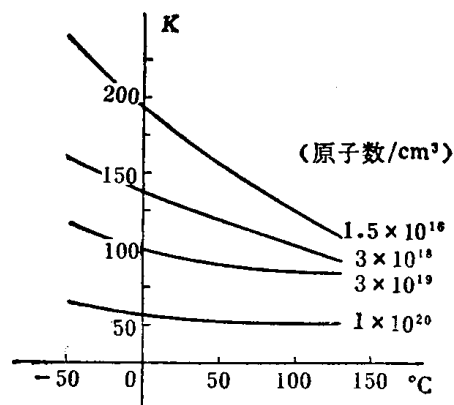


图 2-4 P型硅的灵敏系数与温度的关系

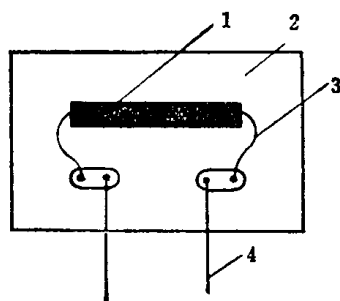


图 2-5 半导体应变片的结构  
1—硅条；2—基底；3—内引线；4—外引线

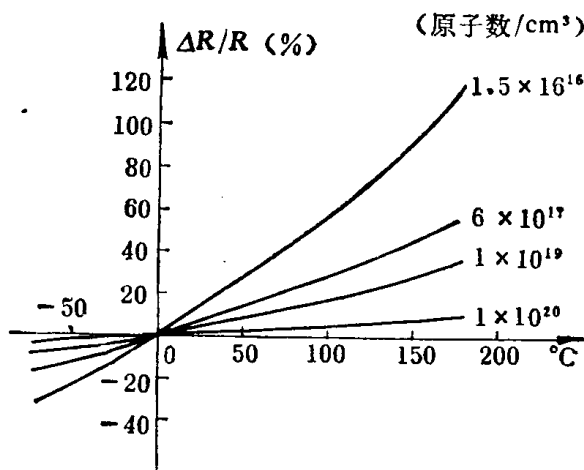


图 2-6 P型硅电阻的变化与温度的关系

半导体应变片的结构如图2-5所示。

半导体应变片的优点是灵敏系数高，且有正有负，可以制成高输出的传感器或用于低

应变测量；横向效应小；机械滞后小；体积小；便于制成高阻值的应变片等。其缺点是电阻温度系数大，且杂质浓度越低，电阻的变化受温度影响越大，如图 2-6 所示。还有，半导体应变片的灵敏系数的温度系数大（图 2-4）；测量较大应变时非线性严重；灵敏系数的离散性大，且受拉受压时不同等。

采用杂质浓度高的半导体应变片，可使其线性度得到改善，电阻温度系数大为减小，灵敏系数的温度系数也变小，其性能与金属应变片相似。但这种应变片的比电阻下降（图 2-7），灵敏系数  $K$  也下降（至 60~70 左右）。为了增加阻值，必须增加栅长，故特制成“U”字型，如图 2-8 所示。

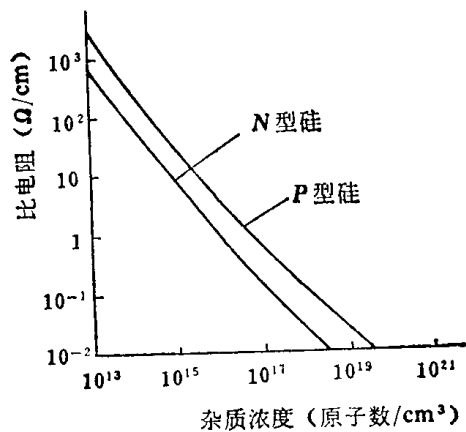


图 2-7 杂质浓度和电阻的关系

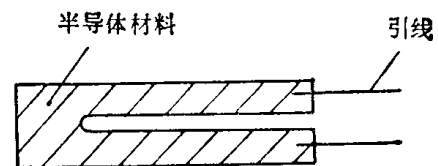


图 2-8 U型半导体应变片

在实际测量中，是否选用半导体应变片，要根据测量内容、精度要求、环境条件等因素，并结合半导体应变片的特点而定。

### 三、应变片的工作特性

用来表达应变片工作特性的数据和曲线，通称为应变片的工作特性。

1. 应变片的工作状态 当应变片粘贴在试件表面后，在工作时希望敏感栅的变形和试件的变形完全一样。这一点很难完全做到，但力求做得好些。设敏感栅  $S$  由单根直金属丝组成，基底  $T$  用粘结剂粘贴在试件  $A$  上（图 2-9）。试件和基底是面接触。当试件沿  $x$  方向均匀发生变形时，试件的应变是通过基底以剪力的形式传给金属丝使之沿纵轴方向受拉伸或压缩。应变片的敏感栅（即金属丝）轴向应变的变化规律如图 2-9 所示。由图可见，即使试件的应变是均匀分布的，金属丝各截面的应变却不是常数。图中用虚线绘出等效的应变分布情况。这时可等效地看作应变是均匀分布的，但参加应变的长度缩短了  $2a$ ，即有效长度为  $(l-2a)$ 。这样，电阻的变化  $\Delta R$  势必减小，应变片的灵敏系数随之降低。敏感栅为栅状的应变片情况也一样。金属丝的直径越小，基底越薄，粘合层越薄，粘合力越强时， $a$  值越小，应变片的灵敏系数可增大。

2. 应变片的灵敏系数 前面提到的  $K$  是指线材的应变灵敏系数。为了表示应变片的电阻变化与试件应变的关系，引入应变片的灵敏系数。其定义为：如果将应变片粘贴在处于单向应力状态下的试件上，且应变片的轴线方向与试件所受的主应力方向重合，这时，应变片的电阻变化率与试件主应力方向应变之比，称为应变片的灵敏系数，通常以  $K$  表示，即

$$K = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon_x} \quad (2-12)$$

式中,  $\varepsilon_x$  为处于单向应力状态下的试件沿主应力方向的应变。在标定灵敏系数  $K$  时, 规定标定梁材料的泊松比  $\mu_0 = 0.285$ 。

因为一般应变片不能重复使用, 应变片的灵敏系数只能抽样测定。由于应变片受横向应变的影响, 应变片的灵敏系数  $K$  恒小于线材的灵敏系数  $K_0$ , 并且应变片的  $K$  值随温度变化。但在一定温度范围内,  $K$  值可认为是不变的。图2-10给出几种不同应变片的灵敏系数随温度变化的曲线。

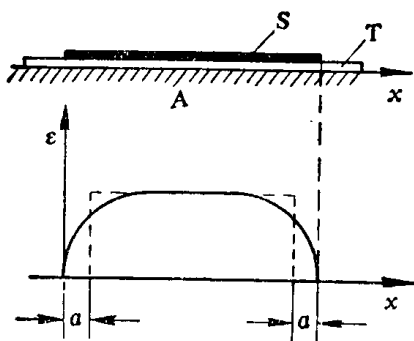


图 2-9 应变片轴向应变的变化规律

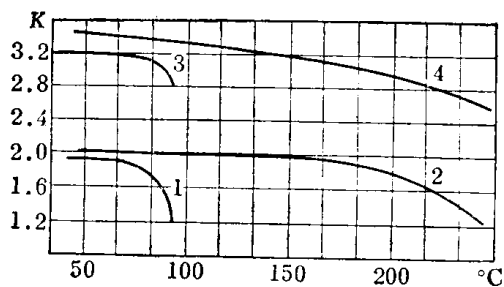


图 2-10 应变片  $K$  值随温度变化曲线

1—康铜线材, 纸基; 2—康铜线材, 浸酚醛胶纸基;  
3—铁镍铬合金, 纸基; 4—铁镍铬合金, 浸酚醛胶纸基

3. 应变片的横向效应 在一般情况下, 粘贴在试件表面上的应变片, 即使只承受单向应力作用, 其表面变形仍是处在平面状态中, 既有轴向应变, 也有横向应变。根据泊松效应, 应变片由横向应变所引起的电阻值的变化, 对由轴向应变引起的电阻值的变化起抵消作用, 使所测得的应变值偏小, 或者说使应变片的灵敏系数减小。这种现象称作横向效应。丝式应变片和箔式应变片都有大小不同的横向效应, 即敏感栅不仅反映轴向应变, 而且也反映横向应变。

应变片横向效应的大小, 用横向效应系数表征。其定义是: 一个单向应变, 分别沿栅宽和栅长方向作用于同一应变片 (实际上是取自同一批中的两片, 其中一片沿单向应变垂直方向粘贴, 另一片沿单向应变方向粘贴), 测得前者 (即前一应变片) 的电阻变化率与后者 (即后一应变片) 的电阻变化率之比, 作为这批应变片的横向效应系数, 用  $H$  表示, 即

$$H = \frac{\Delta R_y / R}{\Delta R_x / R} = \frac{K_y}{K_x} \quad (2-13)$$

式中  $\Delta R_x$ ——单向应变作用于应变片栅长方向时所引起的电阻变化;

$\Delta R_y$ ——单向应变作用于应变片栅宽方向时所引起的电阻变化;

$K_x$ ——应变片的轴向灵敏系数 (即应变片沿单向应变方向粘贴时测得的灵敏系数);

$K_y$ ——应变片的横向灵敏系数 (即应变片沿单向应变垂直方向粘贴时测得的灵敏系数)。