

980167
高等|学|校|教|学|用|书

过程机械量仪表

(第 2 版)

GAODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

过程机械量仪表

(第二版)

东北大学 张宏勋 主编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

图书在版编目 (CIP) 数据

过程机械量仪表/张宏勋编. -2版. -北京: 冶金工业出版社, 1995.5

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-1595-5

I. 过… II. 张… III. 过程-机械仪表-力学测试仪器-高等学校-教材 IV. TH82

中国版本图书馆CIP数据核字 (94) 第10566号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷39号 邮编100009)

中国有色曙光印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版; 各地新华书店发行

1985年6月第1版, 1995年5月第2版, 1995年5月第4次印刷

787mm×1092mm 1/16; 11.5印张; 271千字; 176页; 7200-8800册

7.00元

再 版 前 言

本书是根据“八五”期间冶金高等院校教材编写计划修订的。“过程机械量仪表”是过程检测仪表课程的三个分支之一。它和另两个分支“热工测量仪表”及“过程分析仪器”构成了研究检测工业生产过程各种参量的全面而系统的知识。它们是检测技术及仪器仪表专业的专业课教材。

本书仍保持八章篇幅，但内容比第一版有较大改变。第二、第三和第四三章完全重新编写，各章的篇幅都比原来减少。第二章章名将原来的“自动称重仪表”改为“质量测量仪表”，第三章章名将原来的“轧制力、张力测量仪表”改为“力、扭矩测量仪表”。第七章去掉了原旋转镜鼓式宽度计、双扫描器旋转镜鼓宽度计和直径和宽度测量的其它方法简介等三节，增加了“固态图象传感器”一节。第八章的节数和内容都做了较大的精简。

本书第一、第二与第六章由张宏勋编写，第五、第七与第八章由于大安编写，第三章由杨为民编写，第四章由裴珍编写。由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，欢迎批评指正。

在修订过程中，兄弟学校的同事提出了不少宝贵意见，谨此表示感谢。

编 者

1994年4月

EAC90/14/10

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 质量测量仪表	6
第一节 概述.....	6
第二节 电阻应变片.....	6
第三节 电阻应变式称重传感器.....	11
第四节 电子皮带秤的检测系统.....	24
第五节 电子皮带秤对电气线路的要求.....	36
第六节 其他电子秤的检测系统.....	42
第三章 力、扭矩测量仪表	52
第一节 压磁式测力传感器.....	52
第二节 压磁式轧制力测量仪表.....	58
第三节 张力测量仪表.....	59
第四节 扭矩测量仪表.....	60
第四章 速度测量仪表	66
第一节 概述.....	66
第二节 测速发电机.....	66
第三节 磁感应式转速表.....	69
第四节 频闪式转速表.....	70
第五节 电子计数式转速表.....	72
第六节 激光测速法.....	75
第七节 光纤测速仪.....	80
第五章 位移测量仪表	83
第一节 概述.....	83
第二节 感应同步器.....	84
第三节 计量光栅.....	90
第四节 磁栅传感器.....	103
第五节 编码器式传感器.....	107
第六章 测厚仪表	112
第一节 射线测厚原理.....	112
第二节 X射线测厚系统.....	118
第三节 核辐射射线测厚系统.....	124

第四节	微波测厚系统.....	128
第五节	激光测厚原理.....	138
第七章	宽度、直径测量仪表.....	142
第一节	光电宽度计概述.....	142
第二节	单扫描器旋转狭缝宽度计.....	143
第三节	双扫描器旋转狭缝宽度计.....	146
第四节	激光测径仪.....	150
第五节	固态图象传感器.....	161
第八章	长度等大尺寸的测量.....	166
第一节	接触式测长原理.....	166
第二节	光电式测长仪.....	167
第三节	磁标记式测长仪.....	171
第四节	多普勒式测长仪.....	174
主要参考文献		176

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过程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，可分为质量、力、速度、位移、厚度、宽度、直径、长度等类。测质仪表包括电子皮带秤、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40年代开始在工业生产流程上应用。我国从50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70年代开始。目前我国可制造各类过程机械量仪表，其中有些种类例如测质、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

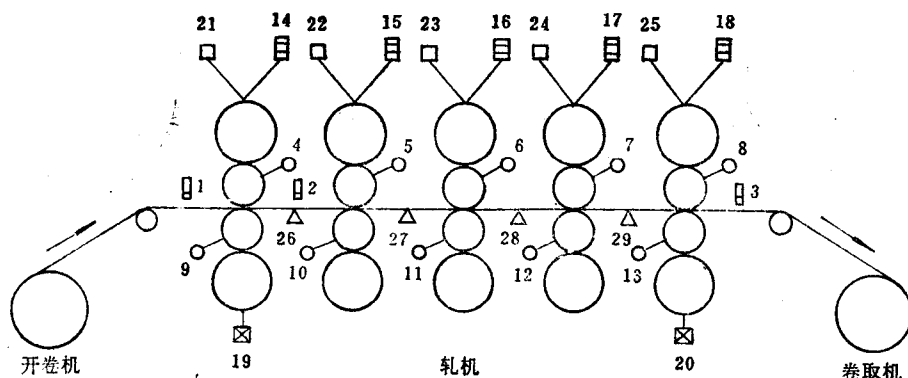


图 1-1 五机架冷连轧机主要过程机械量仪表配置图

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—张力测量仪

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30m/s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。但电子皮带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。

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

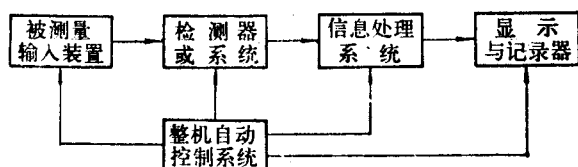


图 1-2 过程机械量仪表的组成方框图

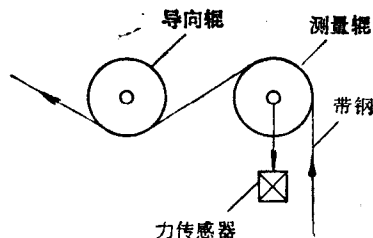


图 1-3 带钢张力测量仪的输入装置示意图

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。机械量信息是指质量、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。在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。我国也在过程机械量仪表里应用了微处理器。

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

100~1250t (指轧制力) 或0.1~8mm (指厚度)。

2. 准确度 准确度又称精度, 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100~1250t, 则仪表量程范围为1150t。如果其绝对误差的最大值为11.50t, 则测量精度为1%。

过程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, 例如测力仪表和测质仪表。为了统一精度表示方法, 应用在工业生产流程上的全部过程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 $\pm 0.1\text{mm}$, 测长仪的误差小于 0.01mm , 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 $\pm 1\%$ 。

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段时间。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7s($\pm 10\%$)、10s($\pm 5\%$)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. 平均无故障间隔时间 为了表征仪表的全面质量,应当规定平均无故障间隔时间。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。

思 考 题

1. 过程机械量仪表的“过程”二字含义是什么?
2. 机械量包括哪些量?
3. 检测器或检测系统与传感器是否有区别?
4. 相对误差与相对额定误差的区别。如果两种误差都是1%,那么哪种误差要求严?
5. 平均无故障间隔时间指标的实际意义。

第二章 质量测量仪表

第一节 概述

过程质量测量仪表是在工业生产流程中用于对质量进行自动检测的仪表。人们在日常生活和经济活动中,常常习惯地将质量称为重量。因此,习惯地将质量测量仪表称为重量测量仪表。

质量表示物质所含的物质的多少,是标量。任何物体都受地球的吸引力,称这种力为重力。重力是矢量。它们之间的关系为

$$W=mg \quad (2-1)$$

式中 W ——重力,单位为牛顿(N);

m ——质量(习惯称为重量),单位为千克(kg);

g ——重力加速度,量纲为米/秒²(m/s²)。

由于地球各处重力加速度 g 不同,因此同样质量的物体在地球各处所受的重力不同。但由于地球各处重力加速度 g 的差别极小,因此可将 g 看成常量,一般取 $g=9.8066\text{m/s}^2$ 。这样,根据上式由重力求得的质量误差也很小,可以忽略不计。

目前,在工业生产流程中应用最多的质量测量仪表是各种电子秤。电子秤从20世纪50年代开始应用,目前已广泛应用于各个工业部门,并且技术上也比较成熟。本章仅研究各种电子秤。

电子秤的名称最初是为了区别于机械秤而得名,它是带有电子装置的秤。电子秤虽然可用来测量各种物料的质量,但多数场合是用来测量粉粒物料和固体的质量。电子秤的种类很多,有电子皮带秤、螺旋电子秤、转子电子秤、电子料斗秤、电子吊秤、电子轨道衡等。电子秤的电子装置的核心是称重传感器。称重传感器是将质量信号(或重力信号)转换为电信号的器件。目前在电子秤中大量应用的称重传感器是电阻应变式传感器。

第二节 电阻应变片

电阻应变片是电阻应变式称重传感器的核心部件。本节将讨论它的原理、结构和工作特性。

一、电阻应变效应

由电学可知,一段截面均匀的金属导线的电阻可由下式计算,

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

式中 R ——导线的电阻,单位为欧(Ω);

l ——导线的长度,单位为米(m);

A ——导线的截面积,单位为米²(m²);

ρ ——制造导线的金属材料的电阻率,单位为欧·米($\Omega\cdot\text{m}$)。

这个公式的意义是导线的电阻与导线的长度成正比,与导线的截面积成反比。而制造

导线的金属材料成分一定时,电阻率为一常量。如对金属导线施加机械力,例如沿轴向拉伸,这时导线的尺寸将沿轴向增大,而沿横向缩小,即 l 增大,而 A 缩小。由公式(2-2)可见,这时电阻 R 将增大。如导线受力产生塑性变形,长度 l 增大,截面积 A 缩小,并且不能恢复,这时电阻 R 可由公式(2-2)计算, ρ 仍保持为常量。如导线受力产生弹性应变,实验指出,这时不能用公式(2-2)计算,即 ρ 不为常量。为了计算导线电阻 R 的变化量,对公式(2-2)进行微分,并等式两边各除以 R ,可得

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

将上式表为增量形式,即

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2-4)$$

公式(2-4)的意义是,当金属导线受力产生弹性应变时,导线电阻将发生变化,导线电阻的相对变化量不仅与几何尺寸的相对变化量有关,也与电阻率的相对变化量有关。这种现象称为电阻应变效应。

由虎克定律知,在弹性范围内,横截面均匀的杆件受到轴向力,杆件长度改变量与轴向力成正比,与杆件长度成正比,与杆件横截面成反比,即

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA} \quad (2-5)$$

式中 Δl ——杆件长度的改变量,单位为米(m);

F ——施加给杆件的轴向力,单位为牛顿(N);

l ——杆件的长度,单位为米(m);

A ——杆件的横截面,单位为米²(m²);

E ——杆件材料的拉伸(或压缩)弹性模量,量纲为牛顿/米²(N/m²)。

上式还可表为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

或

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-6)$$

式中 ε ——等于 $\Delta l/l$,称为轴向应变或线应变,简称应变,无量纲;

σ ——等于 F/A ,为正应力,单位牛顿/米²(N/m²)。

设前边讨论的金属导线为圆形截面,直径用 D 表示,则

$$dA = d\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) = \frac{\pi}{2} D dD$$

表为增量形式

$$\Delta A = \frac{\pi}{2} D \Delta D$$

而

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\pi}{2} D \Delta D / \frac{\pi D^2}{4} = 2 \frac{\Delta D}{D} \quad (2-7)$$

由实验知,杆件受轴向力,杆件横截面尺寸的相对改变量与杆件长度的相对改变量存在以

下关系

$$\frac{\Delta D}{D} = -\mu \frac{\Delta l}{l} \quad (2-8)$$

上式也可表为

$$\varepsilon_r = -\mu \varepsilon \quad (2-9)$$

式中 $\varepsilon_r = \Delta D/D$ 称为横向应变； μ 称为金属材料的横向变形系数或泊松比，它表示横向应变与轴向应变之比。由于轴向增大（或减小），横向将减小（或增大），因此公式中取一负号。

金属材料成分确定，泊松比 μ 也确定，为一常量。在弹性变形范围内，金属材料的泊松比一般在0.3左右；在塑性范围内，一般在0.5左右。由此可见，对一段确定的金属导线，在弹性范围内和在塑性范围内产生应变时两者体积不同。体积不同，相应的电阻率也不同。实验证实了这一点，并且有人假定电阻率的变化与体积的变化成比例，即

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

式中 V ——导线的体积，

C ——常数。

而 $V=lA$ ，则

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{d(lA)}{lA} = C \left(\frac{dl}{l} + \frac{dA}{A} \right) \quad (2-10)$$

将上式表为增量形式为

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = C \left(\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta A}{A} \right) \quad (2-11)$$

将公式（2-6）至（2-11）表示的一些关系代入公式（2-4）得

$$\frac{\Delta R}{R} = \left[1 + 2\mu + C(1 - 2\mu) \right] \varepsilon \quad (2-12)$$

令

$$1 + 2\mu + C(1 - 2\mu) = K_s \quad (2-13)$$

则

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \varepsilon \quad (2-14)$$

K_s 称为金属导线电阻应变效应的灵敏系数，它表示产生单位应变时导线电阻的相对变化量。灵敏系数 K_s 由实验确定。一般金属导线在弹性范围内，当应变 ε 不大时 K_s 为常量，其中康铜的线性范围最宽。康铜的灵敏系数 K_s 在2左右。

二、电阻应变片

电阻应变片是利用电阻应变效应制成的敏感元件。将它粘贴在试件表面，可将该表面的应变值转换成电阻值的改变量。它是制造称重传感器的核心部件。图2-1为电阻应变片的结构示意图。电阻应变片由敏感栅、引线、基底、盖层和粘结剂构成。

1. 敏感栅 敏感栅是电阻应变片的核心部件，常见的有两种结构，图2-2为丝式应变片的敏感栅示意图，图2-3为箔式应变片的敏感栅示意图。两种敏感栅都由金属合金材料制成，最常见的材料是康铜，它是铜和镍的合金。丝式敏感栅是由金属丝绕成的，而箔式

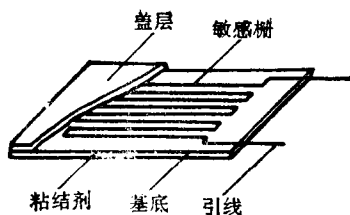


图 2-1 电阻应变片的结构示意图

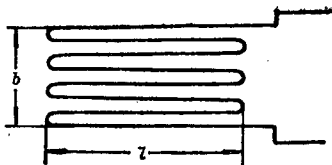


图 2-2 丝式应变片的敏感栅示意图

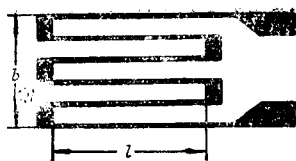


图 2-3 箔式应变片的敏感栅示意图

敏感栅是采用化学腐蚀方法制成的。敏感栅的纵向中心线称为敏感栅的轴线。金属丝或箔条沿纵向两端内侧的长度 l 称为敏感栅的栅长。金属丝或箔条沿横向两边外侧的宽度 b 称为敏感栅的栅宽。敏感栅的栅长由于用途不同，长的可达一、二百毫米，短的可到十分之几毫米。

2. 基底 基底是一种专用薄膜，上边粘贴敏感栅。常用的有纸膜和胶膜两种。早期用纸膜，现在广泛采用胶膜。胶膜一般采用有机树脂和粘结剂制成。

3. 粘结剂 粘结剂被用来将敏感栅粘贴在基底上，用以保持敏感栅形状。粘结剂分有机粘结剂和无机粘结剂两种。

4. 引线 引线是连接敏感栅的金属丝。金属丝的材料常用紫铜。

5. 盖层 盖层被用粘结剂粘在敏感栅上边，用来保护敏感栅。常用与基底相同的材料制成。

三、电阻应变片的工作特性

用数据或曲线表达的应变片的性能称为工作特性。应变片的主要工作特性如下：

1. 应变片电阻 应变片在没有安装，不受外力和室温条件下，测定的电阻值称为应变片电阻，用 R 表示。应变片的电阻值多选用 120Ω 。这是因为测量应变片的电桥电路的桥臂电阻多选用 120Ω 。除此而外，常用的应变片电阻值为 60 、 200 、 350 、 500 、 1000Ω 等。将应变片粘贴在试件上以后，即使试件不受外力和仍在室温条件下，它的电阻值也可能有微小改变，称这时的电阻值为安装后的电阻值，用 R_m 表示。

2. 绝缘电阻 已安装在试件上的应变片，敏感栅和引线与被测试件之间的电阻值，称为绝缘电阻，用 R_m 表示。

3. 灵敏系数 安装在被测试件上的应变片，在其轴向受到单向应力时引起的电阻相对变化量，与由此单向应力引起的试件表面轴向应变之比，称为灵敏系数，用式子表示为

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l} \quad (2-15)$$

式中 K ——应变片灵敏系数；

$\Delta R/R$ ——电阻相对变化量；

$\Delta l/l$ ——轴向应变 ϵ 。

公式(2-15)还可表为

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (2-16)$$

由公式(2-16)可见,应变片灵敏系数的意义是产生单位应变时应变片电阻的相对变化量。灵敏系数 K 不等于制造敏感栅那段金属丝或箔条伸展开后的电阻应变效应的灵敏系数 K_0 。金属丝被绕成敏感栅制成应变片后,应变片的灵敏系数 K 比直丝的灵敏系数 K_0 要下降。下降的原因,一方面是由于敏感栅两端有横栅,它们的变形不是沿丝或箔条的轴向进行的;另一方面,试样表面变形是通过基底和粘结剂传递给敏感栅,两端的变形将会比中部略小一些。由此可见, K 比 K_0 下降的数量与敏感栅的几何形状及尺寸有关,与粘结剂和基底的材料及厚度有关,也与应变片的制造工艺和粘贴方法有关。显然,应变片的灵敏系数 K 不能根据金属丝或箔条的灵敏系数 K_0 通过计算得到,而要由实验方法确定。

4. 机械滞后 对已安装在试件上的应变片,在温度恒定时,增大和减小机械应变过程中同一机械应变下应变片的应变显示值不同,其差值称为机械滞后,用 Z 表示。机械滞后主要是由于应变片去掉机械应变后仍存在有残余应变造成的。

5. 零点漂移 对已安装在试件上的应变片,在温度恒定和试件不受机械力的条件下,应变片的应变显示值随时间的变化,称为零点漂移,用 P 表示。产生零点漂移的因素较多,例如,通入工作电流后应变片的温度变化、应变片的内应力变化等。

6. 蠕变 对已安装在试件上的应变片,在温度恒定和试件承受某恒定的机械力的条件下,应变片的应变显示值随时间的变化,称为蠕变,用 θ 表示。试件产生机械应变后,以切应力的形式传递给应变片的胶层,不同的胶层之间将发生微小的位移。开始阶段位移较大,以后逐渐减小。这种位移是引起蠕变的主要因素。当然,形成零点漂移的因素也会引起蠕变。

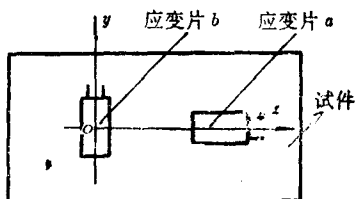


图 2-4 应变片横向效应示意图

7. 横向效应及横向效应系数 应变片被粘贴在试件上,如图2-4所示。试件沿图2-4中应变片a的轴向(ox)产生机械应变 ε_x 。这时试件还伴有横向(oy)应变 ε_y ,它们之间的关系为

$$\varepsilon_y = -\mu\varepsilon_x \quad (2-17)$$

式中 μ ——试件材料的泊松比。

显然,应变片a的敏感栅同时感受轴向应变 ε_x 和横向应变 ε_y 。轴向应变 ε_x 引起敏感栅沿栅长方向的纵向金属丝或箔条的电阻变化。为了测量轴向应变,这是需要的。但横向应变 ε_y 将引起敏感栅沿栅宽方向的横向金属丝或箔条的电阻变化,这是不需要的,但又无法避免。这种现象称为横向效应。为了衡量横向效应,将与应变片a同一批生产的应变片b沿横向 oy 粘贴。设在沿 ox 方向的单向应变作用下,应变片a的应变显示值为 ε_a ,应变片b的应变显示值为 ε_b ,定义 ε_b 与 ε_a 之比的百分数为横向效应系数,用 H 表示,即

$$H = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} \times 100\% \quad (2-18)$$

这里要注意 ε_a 与 ε_b 中既包含了敏感栅纵向金属丝或箔条的电阻变化也包含了横向金属丝或箔条的电阻变化。由上述分析可见,横向效应系数与敏感栅的几何形状及尺寸有关,同时也与敏感栅、基底及粘结剂的材料有关。