

国家级特色专业教材系列

传感技术与 中学物理探究实验

肖 利 刘茂军 隋瑛锐 费金有 编 著



科学出版社

国家级特色专业教材系列

传感技术与中学物理探究实验

肖 利 刘茂军 隋瑛锐 费金有 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以美国 PASCO 公司提供的“科学工作室”实验系统为平台,以中学物理新课程内容与理念为基础,将传感器与中学物理实验进行有效整合,设计了关于力、热、电、光、原子物理等上百个物理探究实验。实验采用先进的传感技术采集各种物理量的数据,将各种外界信号转换成电脑可以识别的电信号,通过数据转换接口在电脑软件中显示即时的实验数据。PASCO 数据采集系统(包括采集器、传感器、软件等)令实验操作简单方便,信息获取准确,实验过程清晰直观,数据的采集和分析精准,是开展中学物理实验设计与实验探究的理想平台。

本书分两部分,第一部分主要介绍各种 PASCO 传感器的特点和工作原理;第二部分精选了初中和高中部分物理实验内容,让学生运用传感器开展实验设计与探究,学生可以通过查阅和搜集资料自行推证有关理论、设计实验方案、选择实验器材,独立地进行操作和测量,并完成实验数据分析、处理,以得出探究结论。本书对有效提高学生的实验设计与研究能力,促进学生创造性思维能力的发展具有不可估量的作用。

本书可作为高等师范院校物理教育专业本科生和研究生的教材,也可作为中学物理教师培训教材以及中学生课外活动的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

传感技术与中学物理探究实验/肖利等编著. —北京:科学出版社, 2016.11

国家级特色专业教材系列

ISBN 978-7-03-050185-1

I. ①传… II. ①肖… III. ①传感器—应用—中学物理课—实验—教学研究 IV. ①G633.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 240877 号

责任编辑:昌盛 王刚 / 责任校对:张凤琴

责任印制:张伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 11 月第一次印刷 印张:16

字数:330 000

定价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

社会科技的发展推动了传感器技术的广泛应用，同时也使得国内外物理教育领域开始重视传感器在物理实验（教学）中的应用，其目的在于培养学生的科技意识、创新能力和科学素养。在中学物理实验教学中引入传感器技术，不仅使应用某些传统物理实验器材无法完成的实验成为可能，还能促使学生了解先进的科学技术，感悟科学的魅力，获得科学的学习方法，形成正确的思维方式，极大地提高了中学物理实验教学绩效。在物理新课程改革中把传感器与中学物理实验的结合作为重要内容和课程理念体现在新课程标准中，将传感器传感技术、信息技术、计算机技术融入中学物理实验和中学物理教学中已经成为引领物理教育发展的新趋势。

让学生较独立地进行科学探究，培养学生的自主探究、自主学习、自己解决问题的能力是中学物理课程基本理念之一。将传感器技术应用于物理实验探究教学中是贯彻这一理念的最有效的手段和途径。因此，我们组织编写了《传感技术与中学物理探究实验》，旨在提高物理师范生、研究生和在职教师运用传感技术设计探究实验的能力和组织探究实验教学的水平，为更有效地指导中学生“经历科学探究过程，认识科学探究的意义，尝试应用科学探究的方法研究物理问题，验证物理规律”打下良好基础。

我们主要采用了美国 PASCO 公司生产提供的“科学工作室”（science workshop），该仪器种类齐全，涵盖关于力、热、波、电、磁、光、原子物理等上百个物理实验；采用先进的传感技术采集各种物理量的数据，传感器的数量超过 50 种；利用先进的数据采集技术，令物理实验更准确、更有效率；而且实验操作简单，设计新颖，既可做定量探究实验，也可做定性探究演示实验。

“科学工作室”主要由三部分组成：计算机接口，它将来自传感器的数据信号输入计算机，采样速率最高为每秒 25 万次；传感器，利用先进的传感技术，可适时采集物理实验中各种变化物理量的数据；软件（即 DataStudio），用来分析和处理数据。

PASCO 传感器具有操作简单、数据准确、品种齐全的特点。学生运用传感器进行探究实验，可以不从实验器材上考虑实验的可行性与可操作性，以集中精力思考探究的思路、方法与策略，不仅为实验探究设计方案、采集数据、分析数据，而且为探究提供更多的思维空间。传感器技术不仅弥补了传统物理实验教学工具的缺陷，而且革新了物理实验仪器与方法，拓展了物理实验的内容，符合了实验探究的真正目的，可以更加有效地培养学生的创新思维能力。

本书由吉林师范大学国家级物理实验教学示范中心的肖利、刘茂军、隋瑛锐、费

金有老师编著，参加本书编写工作的还有刘惠莲、于万秋、张勇等老师，同时在本书的出版过程中得到了科学出版社的大力支持与帮助，在此一并致谢！

由于作者水平有限，加之时间仓促，不足之处在所难免，望广大读者批评指正。

编 者

2016 年 4 月

目 录

前言

第 1 章	传感器简介	1
1.1	传感器定义	1
1.2	传感器技术在中学物理实验中的作用	1
1.3	传感器的构成	3
1.4	传感器的分类	4
1.5	几种常见传感器的工作原理	4
第 2 章	美国 PASCO 公司的数据采集器系统简介	21
2.1	数据采集器系统特点	21
2.2	采集器	21
2.3	传感器	22
2.4	软件	25
第 3 章	力学探究实验	27
3.1	测单摆周期	27
3.2	测量物体的相对速度	29
3.3	位置-时间图像描绘	32
3.4	速度-时间图像描绘	33
3.5	测即时速度和平均速度	35
3.6	测电动车的速度	37
3.7	匀速运动和匀加速运动研究	39
3.8	匀加速直线运动研究	41
3.9	研究位移、速度和加速度在直线运动中的关系	43
3.10	测量小车沿斜面下滑的加速度	45
3.11	测自由落体加速度	48
3.12	用光电门测自由下落物体的加速度	50
3.13	改变初速度的抛体运动研究	52
3.14	改变发射角的抛体运动研究	55
3.15	牛顿第一定律验证	58

3.16	牛顿第二定律(质量恒定)验证	61
3.17	牛顿第二定律(力恒定)验证	63
3.18	用牛顿第二定律测物体的质量	65
3.19	牛顿第三定律验证	67
3.20	用亚特伍德机研究物体加速度与所受力的关系	68
3.21	应用阿基米德定律测液体密度	72
3.22	测定静摩擦和滑动摩擦系数	74
3.23	研究影响滑动摩擦力的因素	78
3.24	研究形状对物体临界速度的影响	81
3.25	研究物体的质量对临界速度的影响	82
3.26	研究非弹性碰撞中的动量守恒	84
3.27	研究弹性碰撞中的动量守恒	86
3.28	碰撞中冲量和动量关系研究	88
3.29	自由落体的能量守恒研究	90
3.30	研究重力势能与高度的关系	92
3.31	测量弹簧的劲度系数	93
3.32	测量弹簧的弹性势能	95
3.33	重力势能与动能转变关系研究	98
3.34	重力势能与电能转换研究	101
3.35	单摆能量守恒研究	103
3.36	验证功能原理	106
3.37	测量弹性和非弹性碰撞中的动量和动能	108
3.38	测量弹簧上的物体作简谐运动的周期	114
3.39	受迫振动研究	117
3.40	简谐振动的研究	119
3.41	测量复摆的周期	122
3.42	测定复摆的向心力	124
3.43	测量转动圆盘的角位移和角速度	127
3.44	测量物体的转动惯量	129
第4章	热学探究实验	133
4.1	研究热与温度的关系	133
4.2	研究辐射能量转换	135
4.3	测定金属比热	137
4.4	测热功当量值	140
4.5	验证玻意耳定律	143

4.6 验证盖·吕萨克定律	145
第 5 章 声学探究实验	149
5.1 声波的特性和行为研究	149
5.2 横波与纵波的演示	152
5.3 波的一般特征研究	153
5.4 研究弦上驻波	155
5.5 研究管中声音共鸣模式	159
5.6 测定空气中的声速	163
5.7 声波的叠加研究	165
5.8 研究声波的干涉——拍	167
第 6 章 光学探究实验	171
6.1 薄透镜的物距和像距关系研究	171
6.2 研究光的反射与折射	174
6.3 测量凹面镜的焦距	177
6.4 制作望远镜和显微镜	179
6.5 研究光强度的变化	184
6.6 探究距离对光强的影响	187
6.7 验证(马吕斯)定律	189
6.8 光的衍射研究	192
第 7 章 电学探究实验	197
7.1 静电感应研究	197
7.2 研究静电分布	199
7.3 静电场描绘	201
7.4 验证欧姆定律	204
7.5 探究简单电路的电压和电流	207
7.6 探究串、并联电路电阻	212
7.7 验证基尔霍夫定律	218
7.8 充放电状态下的 RC 回路研究	220
7.9 研究 LRC 振荡电路	222
7.10 二极管一般特性研究	225
7.11 建立整流器	228
7.12 研究 NPN 晶体管数字开关	230
7.13 测定晶体管电流增益	232

第 8 章 磁学探究实验	236
8.1 测量地球磁场	236
8.2 研究永磁体的磁场	239
8.3 电磁感应研究	241
8.4 测通电线圈中的磁场	243
参考文献	247

第 1 章 传感器简介

1.1 传感器定义

传感器亦被称为换能器、变换器、变送器或探测器，主要特征是能感知和检测某一形态的信息（电量或非电量），并将其转换成另一形态的信息。因此，传感器是指那些对被测对象的某一确定的信息具有感受（或响应）与检出功能，并使其按照一定规律转换成与之对应的有用输出信号的元器件或装置。

（1）从传感器的输入端来看，一个指定的传感器只能感受规定的被测量，即传感器对规定的物理量具有最大的灵敏度和最好的选择性。例如，温度传感器只能用于测温，而不能同时受其他物理量的影响。

（2）从传感器的输出端来看，传感器的输出信号为“可用信号”。这里所谓的“可用信号”是指便于处理、传输的信号，最常见的是电信号、光信号等。可以预料，未来的“可用信号”或许是更先进、更实用的其他信号形式。

（3）从输入与输出的关系来看，输入与输出之间的关系应具有“一定规律”，即传感器的输入与输出不仅是相关的，而且可以用确定的数学模型来描述，也就是具有确定规律的静态特性和动态特性。

由传感器的定义可知，其基本功能是检测信号和进行信号转换。因此，传感器总是处于测试系统的最前端，用来获取检测信息，其性能将直接影响整个测试系统，对测量精确度起着决定性作用。

传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。如果没有传感器对原始参数进行精确可靠的测量，那么，无论是信号转换、信息处理，或者数据的显示与控制，都将成为一句空话。可以说，没有精确可靠的传感器，就没有自动检测和控制系統。近代电子技术和电子计算机为信息的转换与处理提供了极其完善的手段，近代检测与控制系统正经历着重大的变革，需要各种传感器去检测大量原始数据并提供信息，可见传感器有着巨大的应用价值。

1.2 传感器技术在中学物理实验中的作用

人类的发展和进步是建立在工具和手段的进步之上的。时代在变化，科学在进步，应用于教学领域的技术手段也在不断更新，人们不断地运用各种工具和仪器延伸着自

己器官的感知范围和准确度，传感器就是其中的一种。科技的发展推动了传感器技术的广泛应用，我国在物理新课程改革的过程中也非常重视传感技术、信息技术、计算机技术等物理实验中的应用，在物理课程标准中使用了诸如“了解”“知道”“列举”“分析”“调查”“制作”等词汇来描述对传感器及其教学的要求。例如，在选修 1-1 的“电磁技术与社会发展”部分中明确提出“了解常见传感器及其应用，体会传感器的应用给人们带来的方便，知道温度传感器具有将温度信号转变为电信号的作用”。在选修 3-2 中专门列出了关于传感器的内容标准，提到“知道非电学量转换成电学量的技术意义；通过实验，知道常见传感器的工作原理，通过实验认识温度传感器将温度信号转变为电信号的作用；列举传感器在生活和生产中的应用，了解光敏传感器及其在日常生活中的应用”。由此可见，将传感器融入中学物理课程以及实验教学的做法已经成为一种共识，成为新课程改革的重要内容，也是我国物理教育研究领域的新趋势。

1. 运用传感器技术可使抽象的物理过程和概念具体化

美国 PASCO 公司生产的 PASCO 传感器系统和上海朗威 DISLab 传感器系统提供的先进技术手段突破了传统实验手段的限制，大幅度改进原来做不出、做不好的实验。传感器系统的基本结构为“传感器+数据采集器+计算机”，以一系列传感器替代了传统的测量仪器，能够完成力、热、声、光、电、位移、磁感强度、辐射等多种物理量数据的采集。传感器数据通过四通道数据采集器处理后上传到计算机，由教学软件进行实时的处理与分析。利用传感器技术可将抽象的物理过程和概念具体化变成学生“看到现象”，帮助他们总结出物理规律，以唤起学生对物理学的兴趣。

2. 运用传感器技术可使微观现象直观化

在中学物理实验中有许多物理过程是一种微观变化的过程，肉眼无法观察到，如音叉振动形成的“拍”现象；两个滑块发生碰撞前后速度变化过程等，利用声传感器和速度传感器，可直接在计算机上清晰地看到这一过程，栩栩如生，一目了然。传感器技术发挥了其独特的作用，极大地扩展了实验的可视性和重复性，信息技术给物理量的测量带来了革命性的变化，不但简单方便，而且调动了学生的科学探究的主动性。

3. 运用传感器技术可使暂态现象凝固化

在物理实验教学中，像自感现象、电磁振荡、阻尼振动等许多暂态过程由于比较抽象，用传统的实验手段和方法难以观察，物理现象不能够清晰地展现在学生面前，以造成学生对物理规律认识上的难点。如果将传感器引入暂态现象实验中，将物理过程的瞬间变化凝固下来，让学生仔细观察和分析。通过“看到”物理现象，正确理解和认识物理规律。

4. 运用传感器技术可使定性实验定量化

利用传感器测量的各种物理量都要经过采集器进行处理后才能变为计算机能够

储存和处理的数据，从数据的测量到采集再到处理，都是在系统内部完成的，避免了传统实验仪器由于估读时人为引进的各种测量误差，使实验结果更精确、可靠。在传统物理实验操作过程中，虽然能观察到实验过程出现的现象，但很难进行量化处理。使用数字化传感技术，可以采集到实验整个过程的完整数据，通过数据的分析可以感受实验全程的变化，从而可以得到更加精确、科学的结论。将计算机与手持技术仪器联用时，传感器可以精确地测量与传递实验中所测定的各种实验参数，所得实验数据将通过数据采集器转到计算机中，计算机经由配套软件将数据以表格和图像的形式呈现，并进行分析处理。

5. 运用传感器技术可使学生有效开展探究实验

实验探究教学是指在教师引导下，学生运用已有的物理知识和技能，通过自己设计实验方案、进行实验操作、处理和分析数据、解决物理问题和探索结论的一种教学模式，让学生体验到“提出问题—实验设计—实验探究—获得结论”等环节的科学探究过程，初步掌握科学研究的方法。传统条件下，相当一部分探究过程中学生探究需求受到限制，可进行科学探究实验的内容相对较少，而且定性、模糊的研究较多。科学探究实验与传感器技术有较大的关联度，将数字传感器技术引入科学探究实验，不仅是让学生亲历探究活动更有保证，而且可以拓展研究内容，更好地满足学生的创新欲望；降低实验难度，提高实验效率，让学生有更多的时间和精力反思、交流自己和同伴的探究过程，整理、分析实验现象和数据，完成对新知的自主建构；创新实验方法，拥有更多定量实验的机会，让学生探究活动更接近科学本质。

1.3 传感器的构成

传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用输出的转换元件以及相应的基本转换电路所组成，如图 1-3-1 所示。

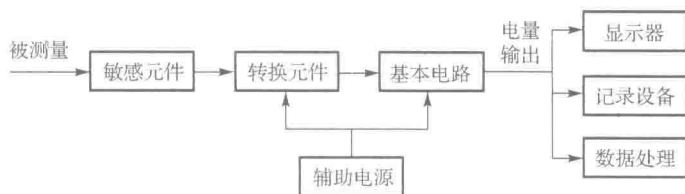


图 1-3-1 传感器组成

(1) 敏感元件：直接感受被测量，并以确定关系输出某一物理量。如弹性敏感元件将力转换为位移或应变输出。

(2) 转换元件：将敏感元件输出的非电物理量（如位移、应变、光强等）转换成电路参数（如电阻、电感等）或电量。

(3) 基本转换电路：将电路参数转换成便于测量的电量，如电压、电流、频率等。

通常，传感器输出信号一般都很微弱，需要有信号调节与转换电路将其放大或变换为容易传输、处理、记录和显示的形式。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调节与转换可以安装在传感器的壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上。因此，信号调节与转换电路以及所需电源都应作为传感器的组成部分。

1.4 传感器的分类

传感器种类繁多，按照不同的划分标准，具有不同的分类方式。目前采用较多的传感器分类方法主要有四种。

1. 按能量供给形式分类

按能量供给形式分为：无源传感器和有源传感器。无源传感器只是被动地接收来自被测物体的信息；有源传感器则可以有意地向被测物体施加某种能量，并将来自被测物体的信息变换为便于检测的能量后再进行检测。

2. 按功能角度分类

可将传感器分为：电传感器、磁传感器、位移传感器、压力传感器、振动传感器、声传感器、速度传感器、加速度传感器、流量传感器、流速传感器、真空度传感器、温度传感器、湿度传感器、光传感器、射线传感器、分析传感器、仿生传感器、气体传感器和离子传感器等。

3. 按使用材料分类

可将传感器分为：陶瓷传感器、半导体传感器、复合材料传感器、金属材料传感器、高分子材料传感器。

4. 按技术特点分类

可将传感器分为：电传送、气传送或光传送、位式作用或连续作用、有触点或无触点、模拟式或数字式、常规式或灵巧式、接触式或非接触式、普通型、隔爆型或本安型（本质安全型）等传感器。

1.5 几种常见传感器的工作原理

1. 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器是应用最广泛的传感器之一，利用电阻式传感器可以测量形变、压力、力、力矩、位移、加速度、质量和温度等非电量参数。这类传感器的种类

很多,大致可分为电阻应变式、压阻式和热电阻式传感器。电阻应变式传感器的原理是基于电阻应变效应,即导体在受到外界拉力或压力的作用时会产生机械变形,同时机械变形会引起导体阻值的变化,这种导体材料因变形而使其电阻值发生变化的现象称为电阻应变效应。

已知导体材料的电阻可表示为

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

当外力作用时,导体的电阻率 ρ 、长度 l 、截面积 S 都会发生变化,从而引起电阻值 R 的变化,通过测量电阻值的变化可以检测出外界作用力的大小。电阻丝受轴向力作用时形变情况如图1-5-1所示,若轴向拉长 Δl ,径向缩短 Δr ,电阻率增加 $\Delta\rho$,电阻值的变化为 ΔR ,将引起电阻的相对变化为

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

轴向应变为

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

截面积相对变化量为

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta r}{r}$$

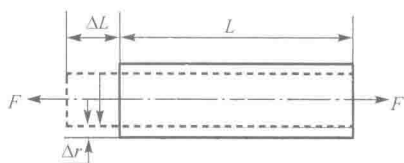


图 1-5-1 电阻丝受轴向力作用时形变情况

由材料力学相关知识可知,在弹性范围内金属的泊松系数可表示为金属受力时的轴向应变和径向应变关系,即

$$\mu = -\frac{\Delta r / r}{\Delta l / l}$$

横向变形系数为

$$\frac{\Delta r}{r} = -\mu \frac{\Delta l}{l}$$

将泊松系数和横向变形系数代入式(1-1)中得

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} = (1 + 2\mu)\varepsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1-2)$$

或用单位应变引起的相对电阻变化表示为

$$\frac{\Delta R / R}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon} \quad (1-3)$$

令金属电阻丝应变片的灵敏系数为

$$k_0 = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon} \quad (1-4)$$

由式(1-4)可见,金属丝灵敏系数 k_0 主要由材料的几何尺寸决定。受力后材料的几何尺寸变化为 $1+2\mu$,电阻率的变化为 $(\Delta\rho/\rho)/\varepsilon$ 。对于金属电阻丝,泊松系数范围在 $\mu=0.25\sim 0.5$ (钢的泊松系数 $\mu=0.285$),由于有 $(1+2\mu)\gg(\Delta\rho/\rho)/\varepsilon$,因此,金属电阻丝的灵敏系数可近似写为 $k_0=1+2\mu(k_0=1.5\sim 2)$ 。

由于应力正比于应变,应变又与电阻变化率成正比,即应力正比于电阻的变化。通过弹性元件可将位移、压力、振动等物理量转换为应力、应变进行测量,这是应变式传感器测量应变的基本原理。

2. 电容式传感器

电容式传感器是以不同类型的电容器作为传感元件,并通过电容传感元件把被测物理量的变化转换成电容量的变化,然后再经转换电路转换成电压、电流或频率等信号输出的测量装置。随着电子技术的迅速发展,特别是集成电路的出现,电容式传感器所具有的优点将得到进一步体现,而它存在的分布电容、非线性等缺点又将不断得到克服,因此电容式传感器在非电测量和自动检测中得到了广泛的应用。它不仅广泛应用于位移、振动、角度、加速度等机械量的精密测量,而且还逐步扩大应用于压力、差压、液面、料面、成分含量等方面的测量。

平板式电容器是由两个金属极板、中间混夹一层电介质构成的,如图1-5-2所示。若在两极板间加上电压,电极上就储存有电荷,所以电容器实际上是一种储存电场能的元件。平板式电容器在忽略其边缘效应时的电容量可用下式表示:

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d} \quad (1-5)$$

式中, S 为电容器两极板的遮盖面积(m^2); ε_r 为介质的相对介电常量; ε_0 为真空的介电常量($8.85\times 10^{-12}\text{F/m}$); d 为极板间距离(m)。

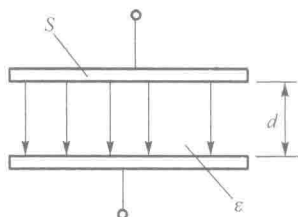


图 1-5-2 平板式电容器

由式(1-5)可知,若三个变量中任意两个为常数而改变另外一个,则电容量发生变化,根据这个原理电容传感器有:

(1) 变极距型电容式传感器。极板面积和介电常量为常数,而平板电容器的极板间距为变量的传感器称为变极距型电容式传感器。这种传感器可以用来测量微小位移的范围为 $0.01 \sim 0.1 \text{ mm}$ 。

(2) 变面积型电容传感器。极板间距和介电常量为常数,而平板电容器的面积为变量的传感器称为变面积型电容传感器。这种传感器可以用来测量角位移(1分到几十秒)和厘米数量级的位移。

(3) 变介质型电容传感器。极板面积和极板间距是常数,而平板电容器的介电常量为变量的传感器称为变介质型电容传感器。这种传感器可以用来测量湿度、物位、密度等。

3. 电感式传感器

电感式传感器是利用线圈自感和互感的变化以实现非电量电测的一种装置,传感器利用电磁感应定律将被测非电量转换为电感或互感的变化。它可以用来测量位移、振动、压力、应变、流量等参数。

电感式传感器种类很多,根据原理可分为自感式(变磁阻式)、互感式(差动变压器式)和电涡流式三大类,前两类属接触型传感器,而电涡流式属于非接触型传感器,但它局限于被测物体为导体。

电感式传感器与其他传感器相比具有以下特点:结构简单可靠、分辨力高,能测量 $0.1 \mu\text{m}$ 甚至更小的机械位移,能感受 $0.1''$ 的微小角位移,零点漂移少、线性度好、输出功率大,即使不用放大器,一般也有 $0.1 \sim 0.5 \text{ V/mm}$ 的输出。缺点是响应时间较长,不宜进行频率较高的动态测量。

本节只介绍自感式传感器,它是由线圈 L 、铁心 A 、衔铁 B 三部分组成的,如图 1-5-3 所示。

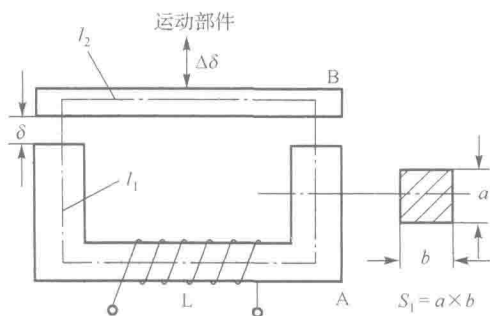


图 1-5-3 自感式传感器

根据电工磁路知识,磁路总磁阻为铁心、衔铁和间隙磁阻之和,故有

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_0} \quad (1-6)$$

式中, δ 为间隙厚度; μ_1 、 μ_2 和 μ_0 分别为铁心、衔铁和空气的磁导率; l_1 和 l_2 分别为磁通经过铁心和衔铁的长度; S_1 、 S_2 和 S_0 分别为铁心、衔铁和空气的截面积。

因为导磁材料的磁导率远大于空气间隙的磁导率, μ_1 、 μ_2 比 μ_0 高上千倍, 故式 (1-6) 忽略前两项, 磁路磁阻可近似表示为

$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}$$

若传感器线圈匝数为 N , 流入线圈的电流为 I , 由磁路欧姆定律可得出磁路的磁通为

$$\Phi = IN / R_m$$

根据自感的定义式 $L = N\Phi / I$, 线圈自感系数 L 可按式计算:

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{2\delta} \quad (1-7)$$

由式 (1-7) 可以看出, 当线圈匝数一定时, 电感量与空气隙厚度成反比, 与空气隙相对截面积成正比。若 S 不变, δ 变化, 则 L 为 δ 的单值函数, 可构成变气隙式传感器; 若 δ 不变, S 变化, 则可构成变截面积式传感器; 若线圈中放入圆柱形衔铁, 则是一个可变自感; 当衔铁上、下移动时, 自感量将相应发生变化, 这就构成了螺线管式自感传感器。

4. 压电式传感器

当沿着一定方向对某些电介质 (晶体) 施加力时, 内部会产生极化现象, 同时在这它的两个表面会产生符号相反的电荷, 当外力去掉后, 又重新恢复为不带电的状态, 这种现象称压电效应。当作用力方向改变后, 电荷的极性也随之改变。压电效应是可逆的, 当在介质极化的方向施加电场时, 电介质会产生形变, 这种现象称“逆压电效应”, 这里是将其电能转化成机械能。

自然界中许多晶体具有压电效应, 但都十分微弱, 研究发现石英晶体、钛酸钡、锆钛酸铅是优等压电材料, 压电材料又可以分为多种类型: 压电晶体、压电陶瓷、高分子乙烯、半导体等。

压电传感器是以某些电介质的压电效应为基础, 可测量力、压力、加速度、位移等多种物理量, 相应地有压电式加速度传感器、压电式压力传感器和压电式超声波传感器等, 这里主要介绍压电式加速度传感器和压电式超声波传感器的工作原理。

1) 压电式加速度传感器

压电式加速度传感器又称压电加速度计或压电加速度表, 是目前使用较广泛的测量加速度的传感器。其结构一般有纵向效应型、横向效应型和剪切效应型三种。纵向