

物理学与高新技术

主 编 史通源 李树河

参编者 徐福亮 朱 霞 蒲志文

何玉龙 姚晓玲 翟绍成

范森春 邓明琳

重庆大学出版社

内 容 提 要

本教材以大学物理学为基础,阐述了高新技术的基本理论及其在军事高科技等方面的应用。全书共8章,包括传感技术、激光技术、红外成像技术、电子对抗技术、核技术、空间技术、超导体、超声及次声技术八个内容。本书理论与应用紧密结合,深入浅出,内容新颖,信息量大,能扩展读者知识面。体现了物理教学改革思想。

适于工科院校各专业本科学生教学使用,也可供科技人员及青少年阅读。

物理学与高新技术

史通源 李树河 主编

责任编辑: 李树河

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆后勤工程学院印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/32 印张:9 字数:202 千

1994年12月第1版 1995年11月第2次印刷

印数:3001—6000

ISBN 7-5624-1013-5/O·116 定价:8.00元

(川)新登字 020 号

前 言

作为一所工程技术院校,我们认为基础物理学与高新技术的衔接问题是一个有待解决的紧迫问题。现代高新技术的发展以雄厚的自然科学理论的研究为基础,不断日新月异。它们不是单一的技术,而是一个新兴的技术群。高新技术总是走在科技进步的最前沿,当前一系列的高新技术在各个方面的应用特别是在军事上的应用进入了新阶段,如高性能的传感技术、自动控制和遥感技术、激光技术、红外成像技术、电子对抗技术、空间技术、核技术、超导电应用技术、声学技术等,并已形成了可靠的系统。

与大学物理学教学配套,应该本着加强基础,提高起点的原则,不断进行教学内容的更新,并且把传授知识,传授科学方法和强化育人三者有机地结合起来。我们认为第一步是增加当代高新技术方面的内容,经过适当的选择、提炼和加工,把它们转化成具有基础物理学风格和水平易于被学生接受的东西;同时要大胆引进前沿科学的新思想、新观点、新方法、努力反映新技术的研究成果。因此大学物理的教学内容及教材建设也应随着科技、经济和军事的发展予以调整和充实。应该看到,现在的做法尚不是长远之计,从根本上讲,还是应努力去触动传统教材的框架,根据现代科技的发展,重新设计,重新编排内容,建立一个新的工科物理教学体系。因此,我们编写了这本补充教材。

本书共8章,在阐述物理原理的同时,着重介绍了高新技

术,特别是军事高科技方面的应用。这仅仅是一个起步,但只要沿着这个方向努力,一定会培养出更多能更好地适应科技迅速发展、并把物理学知识和科学方法运用到有关科技领域的国防科技人才。

本教材由史通源、李树河主持编写和统稿。由国家教委高等学校工科物理课程教学指导委员会前委员何世湘教授审稿。参加本教材编写的有徐福亮、朱霞(第一章)、蒲志文、何玉龙(第二章)、姚晓玲(第三章)、史通源(第四章)、翟绍成(第五章)、李树河(第六章)、范森春(第七章)、邓明晰(第八章)。由于编者水平有限,不足之处在所难免,敬请指正。

编者 1994年9月

目 录

第一章 传感器技术	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 电阻式传感器	5
§ 1-3 电容式、电感式、压电式传感器	20
§ 1-4 光纤传感器	36
§ 1-5 频率式传感器	43
§ 1-6 光电传感器	47
习 题	52
第二章 激光技术	51
§ 2-1 原子的激发与辐射 激光原理	54
§ 2-2 激光的产生	62
§ 2-3 激光器对频率的选择	73
§ 2-4 激光的特性	77
§ 2-5 激光在军事上的应用	79
习 题	96
第三章 红外成像技术	98
§ 3-1 红外辐射	98
§ 3-2 红外探测器.....	103
§ 3-3 红外成像.....	107
§ 3-4 红外成像技术在军事上的应用.....	114

习 题.....	128
第四章 电子对抗技术.....	129
§ 4-1 电磁振荡的产生与传输	129
§ 4-2 天线	133
§ 4-3 电子侦察和反电子侦察	142
§ 4-4 电子干扰和反电子干扰	156
§ 4-5 摧毁与反摧毁	163
习 题.....	165
第五章 空间技术.....	166
§ 5-1 空间飞行器中的物理学	166
§ 5-2 卫星	171
§ 5-3 载人飞船	192
习 题.....	200
第六章 核技术.....	201
§ 6-1 原子核的结构及核力	201
§ 6-2 原子核的放射性衰变	205
§ 6-3 原子核的结合能与相对论质能关系式	207
§ 6-4 重核的裂变与原子弹	211
§ 6-5 轻核的聚变与氢弹和中子弹	219
§ 6-6 核武器及其发展趋势	225
§ 6-7 原子反应堆与核技术的和平应用	229
习 题.....	233

第七章 超导电技术	235
§ 7-1 超导电性与迈斯纳效应	236
§ 7-2 BCS 理论	238
§ 7-3 约瑟夫森效应	240
§ 7-4 超导量子干涉器(SQUID)	244
§ 7-5 超导计算机	246
§ 7-6 超导体在军事和技术工程中的应用	248
习 题.....	252
第八章 声学技术	253
§ 8-1 声学概述	255
§ 8-2 次声波及其应用	261
§ 8-3 超声波及其应用	264
§ 8-4 声纳技术	273
习 题.....	279

第一章 传感器技术

§ 1-1 概 述

一、非电量电测技术的地位

随着科学技术的发展,科学实验和生产实践对测量手段的要求越来越高,与此相关的仪器仪表的更新日新月异。可以说,测量仪器仪表水平的高低,是科学技术现代化程度的重要标志。

测量仪表是从机械式仪表的出现为开端,以后发展到光学的、电学的、等等。近 30 年来,电子技术的新成果,使电学量的测量技术得到很大发展,具有了准确度高、灵敏度高、能进行连续测量、便于自动记录等优点。由于科学技术和工程上所要测量的参数大都是非电量,如机械量(尺寸、位移、力、振动等)、热工量(温度、压力、流量、物位等)和化学量,等等,往往难以直接测量,从而促使人们研究用电测的方法来测量非电量,逐渐形成一门新的技术学科——非电量电测技术。现今的非电量电测技术具有测量精度高,反应速度快,能够自动、连续地进行测量,可实现遥测和自动记录与自动控制,可与电子计算机联结进行数据处理,可采用微处理器构成智能仪表等优点,所以很快地在各个科学技术部门得到广泛的应用。

国防工业是非电量电测技术应用很广的部门,很多新型的非电量电测仪器都是为适应国防工业的需要而发展起来的。在飞机、导弹和卫星的设计、试验中,严格的测试是极为重要的。例如,对飞行器的构件进行强度和动力特性的研究设计时,要测量有关点的应力、应变、温度、振动状态,发动机参数(转速、转矩、推力……),燃烧室和管道内的压力、温度、流量,并进行记录和分析;在常规武器的研制中,要通过实弹射击测试弹丸的出口速度、腔压,枪体和炮体有关点的振动加速度、位移等。这些测试都要用非电量电测技术来实现。

目前,国内、外都已经把非电量电测技术向日常生活领域扩散,如小汽车的速度自动控制及自动驾驶、电灶温度的控制、家用电器的自动控制等。

二、非电量电测系统的重要部分——传感器

现代自动测量系统中,各个组成部分常常以信息流的过程来划分,一般可分为:

信息的获得——传感器(变送器,换能器);

信息的转换——放大器,变换器;

信息的显示——指示仪,记录仪,报警器;

信息的处理——调节器,数据分析仪,电子计算机。

它们之间的关系可用图 1-1 的框图来表示

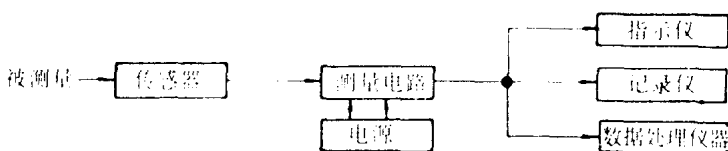


图 1-1 非电量电测系统的组成

传感器(Transducer)是一个把被测的非电量转换成电量的装置,因此是一种获得信息的手段,在非电量电测系统中占有重要的位置。传感器获得信息的正确与否,关系到整个测量系统的精度。以前,传感器也称为变送器、发送器或换能器,现在,在过程检测仪表装置中把它们统称为传感器,而把输出为标准信号的传感器称为变送器(Transmitter),在生物医学仪器、超声检测仪器中习惯上还称为换能器。

绝大多数传感器都是依据各种物理原理或物理效应设计制成的。

一般地说,传感器由两个环节组成:(1)敏感元件。许多非电量不能直接转换为电量,敏感元件的作用是对它们进行预变换,把被测非电量变换为易于转换成电学量的一种非电量;(2)转换元件,又称变换器。它的作用是将非电量转(变)换为电学量。有些传感器不需要敏感元件进行预变换,所以往往笼统地称传感器为转换元件或变换器。

三、传感器的转换函数或灵敏度函数

设传感器输出的电学量为 y , 输入的非电量为 x 。 y 与 x 的关系可用一个函数 $y=f(x)$ 表示, 称 $y=f(x)$ 为传感器的转换函数或灵敏度函数。

实际上,除了待测输入量 x 之外,测量对象和测量环境的其它干扰因素也可能影响输出量 y 。例如,测量应力 x 时,气压 p 、温度 T 、振动 θ 以及湿度、声强、辐射和电磁感应等都

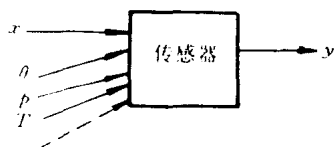


图 1-2 传感器的输入与输出

可能使输出的电学量发生变化(如图 1-2 所示),也就是说,转

换函数实际是一个多元函数

$$y = f(x, p, T, \theta \dots) \quad (1-1a)$$

应用多元函数微分,得

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial p} dp + \frac{\partial f}{\partial T} dT + \frac{\partial f}{\partial \theta} d\theta + \dots \quad (1-1b)$$

式(1-1b)的意义是:输出量 y 的变化值 dy 与各输入量的变化值 $dx, dp, dT, d\theta, \dots$ 有关。这些输入量对输出量影响的大小,取决于该式中各项的系数 $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial p}, \frac{\partial f}{\partial T}, \frac{\partial f}{\partial \theta} \dots$ 。显然,设计和制造传感器时,应该使与干扰因素对应的系数尽可能地小,以至在测量时可以忽略它们的影响。如果设法使(1-1b)中的 $\frac{\partial f}{\partial p} = \frac{\partial f}{\partial T} = \dots = 0$, 于是,该式变成

$$dy = \frac{df}{dx} dx \quad (1-2)$$

式中 $\frac{df}{dx}$ 是输出量对输入量的变化率。显然,这个值越大,传感器越灵敏,所以称 $\frac{df}{dx}$ 为待测输入量 x 的灵敏度,用 S_x 表示

$$S_x = \frac{df}{dx} \quad (1-3)$$

设计和制造传感器,还要求输入量 x 的灵敏度 $S_x = \frac{df}{dx}$ 是个常量。也就是说,输出量 y 和输入量 x 的转换函数是线性函数。这不仅对测量设备进行刻度定标大为方便,还可以提高测量的准确度。

物理学为研制和开发各种传感器提供了理论基础,寻找转换函数必须从物理学的基本原理入手。新的物理理论和物理效应则是设计新型传感器的依据。

传感器可按被测量分类,如力敏传感器、加速度传感器、

温度传感器等;也可按输出量的转换原理分类,如电阻式传感器、电容式传感器、光电传感器等。

在现代高科技战争中,各种传感器使用很多。例如,在飞行器、导弹、舰船以及陆地车辆上,在各种惯性导航,制导及控制(瞄准)系统中都要使用陀螺传感器,加速度传感器等。目前的惯性测量技术中采用了激光陀螺和光纤陀螺。应用近代电子科学技术能开发更高度,更有组织和更精密的战场监视系统。它可以探测到在地面上活动的各种物体,并加以综合分析后采用攻击手段。战场监视系统的组成中就有多种传感器,如对潜艇作战中,使用声纳浮标的水中音波探测器。如果在声波探测器上再装上传声器,就构成了音响传感器,这种传感器能收集各种声音。另外还有探测振动的振动传感器。本章中所阐述的各种传感器在军事高科技中都有广泛应用。

§ 1-2 电阻式传感器

电阻式传感器的类型很多,在非电量电测技术中应用十分广泛。它们的基本原理是将被测的非电量转换成电阻值。然后通过电阻值的测量来达到测量非电量的目的。

由于构成电阻的材料种类很多,有导体、半导体、绝缘体和电解质溶液等。而引起导体、半导体电阻变化的物理原因很多。例如,导体或半导体的长度变化,导体或半导体的内应力变化、温度变化等。根据这些不同的物理原理,就产生了各种各样的电阻式传感元件以及由这些元件构成的电阻式传感器。利用电阻式传感器可测量力、位移、形变、加速度和温度等非电量参数。

一、应变式力敏传感器

(一)应变式力敏传感器工作原理

力是工程技术中最常见的物理量,许多方面都要测量力的大小。测量力的传感器称为力敏传感器。商店中广为使用的电子称的力与电转换器件就是力敏传感器。

应变式力敏传感器的转换元件是电阻应变片。将金属丝、金属箔或半导体薄片粘贴在支承片(一般为绝缘纸或胶膜)上,再焊接两根引出线,就成了电阻应变片,如图 1-3 所示。

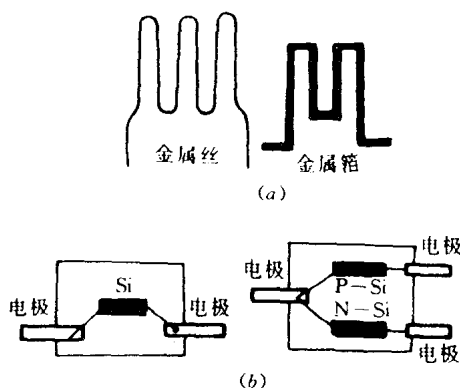


图 1-3 电阻应变片

下面讨论物体(包括导体和半导体)的受力与电阻变化之间的关系。

以最简单的形变——拉伸或压缩为例,如图 1-4 所示。设想物体上有一段与轴平行的直线 $\overline{AB}$, 长度为 l , 在一对与轴平行、

方向相反的拉力或压力下变为 $l' = \overline{A'B'}$, 长度变化量 $\Delta l = l' - l$ 称为线形变, 比值 $\frac{\Delta l}{l}$ 称为线应变或应变, 以符号 ϵ 表示

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

由虎克定律知,在弹性限度内,物体产生的应力 f 和应

变 ϵ 成正比,即

$$f = Y\epsilon \quad (1-4)$$

式中比例系数 Y 称为杨氏模量。对于一定的材料, Y 为常量。同样,若以 Δb 表示与轴线垂直的方向上的线形变,它与 Δl 形变符号相反,则比值 $\frac{\Delta b}{b}$ 称为横向应变,以符号 ϵ' 表示

$$\epsilon' = \frac{\Delta b}{b}$$

电阻定律指出,粗细均匀的物体,其电阻 R 与其长度 l 、截面积 S 、电阻率 ρ 的关系为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-5)$$

由上式可见,如果物体发生形变,则电阻将发生相应的变化,由式(1-5)可得此变化为

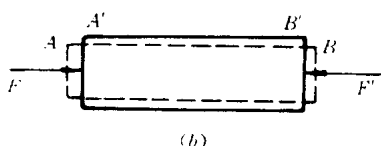
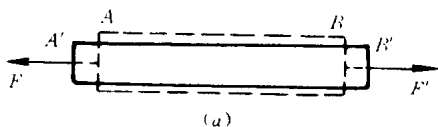


图 1-4 拉伸和压缩变形示意图

$$\Delta R = \frac{l}{S} \Delta \rho + \frac{\rho}{S} \Delta l - \rho \frac{l}{S^2} \Delta S$$

即

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \quad (1-6)$$

假如物体是直径为 D 的圆柱体,则 $S = \frac{\pi D^2}{4}$,所以

$$\Delta S = \frac{\pi}{4} \cdot 2D \cdot \Delta D = 2S \frac{\Delta D}{D}$$

将上式代入(1-6)式得

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta D}{D}$$

将线应变 $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ 和横向应变 $E' = \frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta D}{D}$ 代入上式得

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \epsilon - 2\epsilon' \quad (1-7)$$

令 $\mu = -\frac{\epsilon'}{\epsilon}$, 代入式(1-7)得

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \epsilon(1 + 2\mu) \quad (1-8)$$

对于给定的一种材料, 在一定的形变范围内, μ 为常数, 式(1-8)对于金属导体和半导体均适用。而对于金属导体, $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ 很小, 可以忽略, 于是式(1-8)变为

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon(1 + 2\mu) \quad (1-9)$$

式中, $(1 + 2\mu)$ 为常量。上式指出, 在一定的形变范围内, 一段金属导体因形变引起的电阻变化 ΔR 与该金属导体的应变 ϵ 成正比。而式(1-4)又指出, 与外力成正比的物体的应力 f 正比于应变 ϵ , 所以, 作用于该段金属导体的外力与其电阻的增量成正比。

把金属导体做成如图 1-3 所示的应变片, 并将它贴在被测物体上。当外力作用于被测物体时, 物体发生形变, 应变片也随着发生应变, 因而应变片的电阻值发生变化。利用测量电阻的电路或设备测出电阻的变化值, 即可确定物体的受作用力的大小。

(二) 应变式传感器的特点

应变片是非电量电测技术中非常重要的传感元件, 被广泛地应用于科学技术、工程测量和科学实验中。它具有如下一些优点:

(1)测量应变的灵敏度和精度高。能测 $1\sim 2\mu\text{m}$ 应变,误差小于 1%;

(2)应变片的尺寸小,重量轻,对试件的工作状态和应力分布基本上没有影响。不但可以用于静态测量,还可以用于动态测量;

(3)测量范围大,既可以测量弹性形变,也可以测量塑性形变。变形范围从 $1\sim 20\%$;

(4)能适应各种环境。可以在高温、超低温、高压、水下、强磁场以及核辐射等恶劣环境下使用;

(5)便于多点测量,便于记录和处理测量数据及远距离传送。

(三)应变片的温度补偿

环境温度的变化会引起应变片电阻的变化,从而引入测量误差,为此,必须进行温度补偿。应变片的温度补偿方法通常有三种,补偿片法、应变片自补偿法和热敏电阻补偿法。

1. 补偿片法

这种方法是利用应变片测量电路的特点来进行温度补偿。应变片常用的测量电路是电桥,如图 1-5 所示。在图 1-5 中 R_1 为工作应变片, R_2 为补偿应变片, R_3 、 R_4 为固定电阻。 R_1 粘贴在试件上, R_2 粘贴在材料、温度与试件完全相同的补偿块上。补偿片 R_2 与工作片 R_1 是完全相同的,因此当温度变化时两个应变片

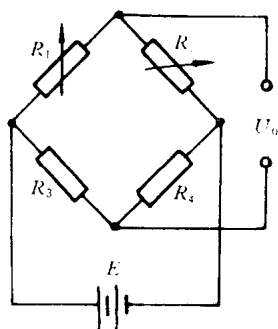


图 1-5 补偿片法

的电阻变化 ΔR_1 和 ΔR_2 的符号相同,而且数量也相等,桥路仍然满足平衡条件, $R_1 R_4 = R_2 R_3$, 电桥没有输出。工作时,只有工作片感受应变,补偿片不感受应变,因此电桥输出就只与被测试件的应变有关,而与环境温度无关。

有时,在结构允许情况下,不用另设补偿块,而将补偿片直接贴在被测试件上,见图 1-6。当图中弹簧片 3(悬臂梁测试件)受到力 F 作用后,上下两个应变片 1、2 分别得到相反符号的应变。把这两个应变片接到图 1-5 所示的桥路相邻两臂,构成差动电路。一方面实现了温度补偿,同时也提高了灵敏度。

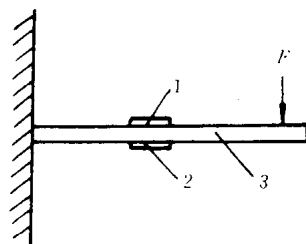


图 1-6 差动电桥补偿法

1—工作应变片 2—补偿应变片

3—弹簧片

2. 应变片自补偿法

这种温度补偿法是利用自身具有温度补偿作用的特殊应变片。这种应变片称为温度自补偿应变片。

由于温度变化而引起的应变片的电阻值变化为

$$\frac{\Delta R_t}{R} = [K(\alpha_t - \alpha_c) + \alpha] \Delta t$$

式中 α_t ——试件的线膨胀系数;

α_c ——电阻丝材料的线膨胀系数;

α ——电阻温度系数;

K ——应变片灵敏度。

要实现温度自补偿的条件是

$$\alpha + K(\alpha_t - \alpha_c) = 0$$