

21 世纪工程技术新型教程系列

传感工程

〔日〕井口征士 编

本系列为日本名牌大学面向 21 世纪教育改革成果

科学出版社

OHM社

薄

最薄的大
学专业系列
教材。易于讲授

精

内容充实精
要，结构紧凑。易于学习

新

反映理论与实用技术的
最新发展。易于成才



传感工程

〔日〕井口征士 编
蔡 萍 译
刘志刚
沈生培 校

科学出版社 OHM 社
2001

JS504/23

图字:01-2000-1520 号

Original Japanese edition

Shinsedai Kougaku Shirizu; Senshingu Kougaku

Edited by Seiji Inokuchi

Written by Kimisuke Shirae, Toshirou Ono, Takahiko Inari, Youichi Tamura, Masaharu Hashimoto and Youji Marutani

Copyright © 1999 by Seiji Inokuchi

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

**新世代工学シリーズ
センシング工学**

井口征士 オーム社 1999 第1版 第1刷

图书在版编目(CIP)数据

传感工程/[日]井口征士编;蔡萍,刘志刚译. -北京:科学出版社,2001.1

(21世纪工程技术新型教程系列)

ISBN 7-03-008862-X

I. 传… II. ①井…②蔡…③刘… III. 传感器-基本知识-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 70660 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2001 年 1 月第一次印刷 印张: 8 1/2

印数: 1—5 000 字数: 132 000

定 价: 17.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

丛 书 序

主编 樱井良文

现在,很多大学正在进行学部、学科的重组,以研究生培养为重点,引入学期制,采用新的课程体系和不断深入的教育计划改革,特别是由于学期制教育的引入,使得原来以分册编写的教材在一个学期的教学中很难消化。因此,各学校对“易教”、“易学”的教材需求越来越迫切。

《21世纪工程技术新型教程系列》是面向通信、信息,电子、材料,电力、能源,以及系统、控制等多学科领域的新型教程系列。这些教程均由活跃在各学科领域第一线的教授任主编,由年轻有为的学者执笔,内容丰富,有利于对学科基础的理解。版面设计时为学生留出了写笔记的空间,是一种可以兼作笔记,风格别致的教科书。

希望肩负新世纪工程技术领域发展重任的青年读者们,通过本教程系列的学习,建立扎实的学科基础,在实践中充分发挥自己的应用能力。

21世纪工程技术新型教程系列编辑委员会

主 编

樱井良文 大阪工业大学校长
大阪大学名誉教授

副主编

西川 伟一 大阪工业大学信息科学部学部长
京都大学名誉教授

编委(按姓氏笔画顺序)

广濑全孝	广 岛 大 学 教 授	井口征士	大 阪 大 学 教 授
木村磐根	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	仁田旦三	东 京 大 学 教 授
白井良明	大 阪 大 学 教 授	西原 浩	大 阪 大 学 教 授
池田克夫	京 都 大 学 教 授	滨川圭弘	立命馆大学副校长 大阪大学名誉教授

前言

在我们日常生活中,使用着各种各样的传感器,如电冰箱和电饭煲中的温度传感器、空调中的温度和湿度传感器、煤气灶中的煤气泄漏传感器、水表、电表,还有电视机和放像机遥控器中的红外传感器、照相机中的光传感器、汽车中的燃料计和速度表等,不胜枚举。我常留心周围的事物,一直在考虑是哪些传感器给我们的生活带来了便利和帮助。在工厂的生产车间,工程施工的现场,以及环境与公害的判定和医疗诊断等场合,传感器对观测和自动化技术所起的作用比在家庭生活中所起的作用要大得多。这几乎已成为无处不在的事实。

要实现某种目的,“首先了解对象”是必要的,而要了解对象最基本的就是进行测量。可以毫不夸张地说,测量技术像物理和数学一样是所有科学技术的基础。曾经有关于检测到燃料泄漏便马上中止航天飞机发射的报道,无论是喷气式飞机的高度计和速度计,还是原子能发电站的放射线敏感器,各种传感器的使用使我们的生命远离危险,实现具有尽可能高的可靠性的传感器是我们坚持不懈的追求。一些以前无法得到的重要信息,现在通过传感器和信息解读技术正使问题一步一步得到解决,例如,最近经常看到关于DNA破译和发现基本粒子中微粒子的报道。

以广阔技术领域为基础所形成的传感技术,实际上由传感器元件及其应用技术构成。传感器元件以前也称为“信号转换器”或“换能器”,它是一种把外界的温度、压力、流量等信号转换为电信号的功能器件。它所利用的是在物理学上称为“效应”的各种物理现象。但是由传感器得到的信号大部分不能直接利用,这就需要用到本书将要介绍的以计算机为基础的信号处理技术,即将得到的信号根据使用要求进行加工。雷达技术、CT技术就是这方面成功应用的范例,为此与计算机的接口技术也成为传感工程中重要的关键技术。

本书内容力求通俗易懂,全书分为以下六章:

第1章:传感器概论(白口公辅)

第2章:力的测量(小野敏朗)

第3章:测量形状、位置与颜色的传感器(稻荷隆彦)

第4章:测量温度和气体成分的传感器(田村洋一)

第5章:测量流量、流速的传感器(桥本正治)

第6章:传感器与计算机(丸谷洋二)

在学习有关传感器的基础知识之后,再学习力、光、温度、流量等传感器的原理和性质,最后了解计算机与传感器的连接。本书旨在介绍传感器的基础知识和传感器的应用这一完整体系,不要求涉及太多的先进测量技术,而是着眼于理解最基本的测量技术,相信一定会使大家对最近测量技术的迅猛发展产生浓厚的兴趣。

为加深理解本书内容,各章中还准备了练习题和练习题简答。对于重要的术语附有注释进行专门的阐述。为了使表述清晰和正确,给出了必要的公式,并附有许多插图,这样能使读者更好地理解各种现象的物理意义。

最后对在本书编写过程中给予支持的丛书编委们表示谢意,同时也对为本书的出版给予多方支持的欧姆社有关人士表示谢意。

井口征士

目 录

第 1 章 传感器概论	1
1.1 什么是传感器	1
1.2 传感器传感什么	2
1.3 信号处理	3
1.3.1 差动法	3
1.3.2 零位法	5
1.3.3 信号放大	6
1.3.4 变交流信号为直流信号	8
1.3.5 数字式输出	10
1.4 消除测量中的误差和噪声	12
1.4.1 测量仪器的误差	12
1.4.2 电磁干扰	13
1.4.3 传感器的接地	15
1.5 测量的历史和测量单位	16
1.5.1 测量的历史和测量单位的概貌	16
1.5.2 国际单位体系	17
练习题	17
第 2 章 力的测量	21
2.1 力转换成位移,然后转换为电信号	21
2.1.1 力的测量原理——转换为其它物理量后的测量	21
2.1.2 差动变压器原理——位移通过互感的变化取得	22
2.1.3 电容式传感器原理——位移通过电容量的变化取得	23
2.1.4 应变计工作原理——位移通过电阻的变化取得	24
2.1.5 应变计的结构	25
2.1.6 采用应变计的荷重传感器	26

2.1.7 利用弹性振动子的测力传感技术——通过 频率变化进行测量	27
2.2 电信号的获取方法	28
2.2.1 电桥法	28
2.2.2 共振法	28
2.3 压力、加速度、力矩等的传感技术	29
2.3.1 压力传感技术	29
2.3.2 加速度传感技术	30
2.3.3 扭矩的传感技术	31
2.4 力传感器应用举例	32
2.4.1 称重方面的应用	32
2.4.2 机器人方面的应用	33
练习题	36
第3章 测量形状、位置与颜色的传感器	37
3.1 代替人眼睛的传感器——光传感器	37
3.1.1 视觉与光传感器	37
3.1.2 半导体光传感器	37
3.1.3 光电二极管	38
3.1.4 几种不同的光电二极管	40
3.1.5 光电二极管的信号放大	41
3.2 二维视觉传感器——面型传感器	43
3.2.1 二维的概念	43
3.2.2 摄像机的构造及面型传感器	44
3.2.3 与图像处理技术的结合	46
3.3 光和声音的利用	46
3.3.1 光和声都是一种波	47
3.3.2 基本应用	47
3.3.3 能量反射、能量发生的检测	47
3.3.4 利用几何光学原理进行测量	48
3.3.5 光作为电磁波的应用	49
3.4 关于颜色	51
3.4.1 光的波长与颜色的关系	51
3.4.2 分光测量	53
3.4.3 颜色的测量	54
练习题	55

第 4 章 测量温度和气体成分的传感器	57
4.1 使用广泛的温度传感器	57
4.1.1 温度传感器的种类	57
4.1.2 接触式温度测量	59
4.1.3 非接触式温度测量	59
4.2 家用电器及汽车用温度传感器	60
4.2.1 热电偶测量温度	60
4.2.2 由金属电阻的变化测量温度	65
4.2.3 利用半导体的电阻变化测量温度	67
4.3 远距离测量温度	68
4.3.1 热辐射	68
4.3.2 用辐射温度计测量温度	70
4.3.3 温度分布的测量	72
4.4 测量微量气体成分	73
4.4.1 通过气体吸附程度测量成分浓度	73
4.4.2 通过热传导测量气体的浓度	74
4.4.3 根据红外线吸收程度测量气体浓度	75
4.4.4 利用成分移动速度的差别测量气体浓度	75
练习题	76
第 5 章 测量流量、流速的传感器	79
5.1 连续流量的测量	79
5.2 根据流体的变化测量流量	81
5.2.1 因节流而使压力变化的测量流量的方法 ——压差式流量计	81
5.2.2 用节流孔面积测量流量的方法 ——面积式流量计	82
5.2.3 根据涡漩产生的频率测量流量的方法 ——涡流流量计	83
5.2.4 利用流体振动的现象测量流量的方法 ——射流流量计	85
5.3 测量流速	86
5.3.1 非接触测量——电磁流速计	86
5.3.2 用光、声测量流速——超声波流速计、激光 流速计	86
5.3.3 测温度求流速法——热线流速计	88
5.3.4 通过测量压力求流速——皮托管	90
练习题	91

第 6 章 传感器与计算机	93
6.1 计算机对传感器的信号采集	93
6.1.1 传感器与计算机的接口	93
6.1.2 数字式数据的表示	94
6.1.3 A/D 转换	95
6.1.4 A/D 转换板	97
6.2 利用电子电路除去传感器信号中的噪声	99
6.2.1 信号的频率成分	99
6.3 基于计算机的传感器信号处理	102
6.3.1 移动平均	102
6.3.2 数字微分	103
6.3.3 数字积分	103
6.3.4 同步积分	104
6.3.5 对数变换	104
6.3.6 互相关函数	104
6.3.7 自相关函数	105
6.3.8 人体断面图	105
6.3.9 传感器融合	106
6.4 人体的测量	107
6.4.1 传感器的种类	107
6.4.2 红外线传感器与人	107
6.4.3 磁传感器与人	108
6.4.4 通过传感器,人与计算机的交流将更加自然	108
练习题	108
附 录 国际单位制(SI)	111
1. SI 基本单位和 SI 辅助单位	111
2. 具有专用名称的 SI 导出单位	111
3. 没有专用名称的 SI 导出单位	112
4. 用以构成十进倍数和分数单位的词头	113
练习题简答	115
参考文献	121

第 1 章

传感器概论

传感器种类繁多,本章就传感器的共性问题进行阐述,包括传感器的定义,传感器的使用方法,传感器信号的处理,传感器的误差和噪声等;最后介绍国际计量单位。为使读者加深对重要概念的理解,还编制了一些习题,请读者自行解答。

1.1 什么是传感器

测量仪器一般如图 1.1 所示。由信号检出器件和信号处理两部分组成。信号检出器件的任务是检测出测量环境下的被测信号。例如在测量面包烤箱(测量环境)的温度(被测信号)时,将热敏电阻(信号检出器件)插入烤箱中,热敏电阻的阻值便随着温度的变化而变化。这种能感应被测量的变化并将其转换为其它物理量变化的器件,是狭义的传感器(sensor)。也就是说信号检出器件就是传感器。

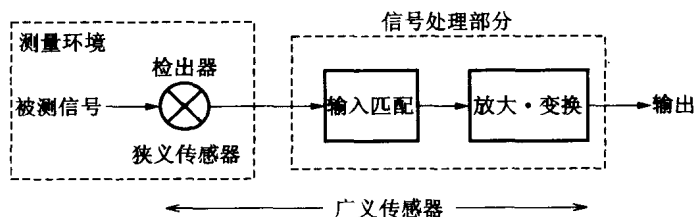


图 1.1 测量仪器的构成

对于各种各样的被测量,有各种各样的传感器与之相对应,其输出信号的形式因传感器而异。但检测仪器所输出的信号形式一般为直流电流、直流电压和数字信号等标准形式,信号处理部分的作用就是将各种传感器的不同输出信号形式转换成所希望的信号形式。检测仪器的输出或送至控制器用以调节控制,或送至计算机作进一步的信息处理。所以从广义的角度来说,信号检出器件和信号处理部分总称为传感器。

为了加深读者对传感器这一术语的理解,下面给出几个传感器的应用实例。热敏电阻作为温度传感器将温度的变化转换成电阻的变化;光电二极管作为光电传感器将光通量的变化转换成电流的变化;SQUID (superconducting quantum interference device,超导量子干涉器件)是超高灵敏度的磁场传感器,以上三种是狭义传感器的例子。如果热敏电阻用来进行温度测量,同时输出 4 ~ 20mA 的电流,SQUID 用来进行生物体磁场的测量则是广义传感器的应用实例。

传感器这一术语可在各种不同的场合下应用,其内涵还是以不多加限制为好。

实际上,被测对象涉及各个领域。最初的测量对象是长度、体积、质量和时间。18 世纪以来科学技术取得飞速发展,被测对象范围迅速扩大,力学领域有速度、加速度、力、功和能量等,电磁学领域中有电流、电压、电阻、电容、磁场等,化学领域中有浓度、成分、pH 值等,工业领域中除上所述之外,还有流量、压力、温度、黏度等被测量。

现在被测对象更为广泛,不仅有人体心电、脑波等体表电位的测量,甚至生物体的断面测量都已司空见惯。在工业领域还有光泽、触觉等品质测量。无论是搭载在卫星上的监视地球的红外线传感器、机器人视觉传感器还是触觉传感器等,对从传感器来的信息进行处理是非常重要的。现在还没有味觉、嗅觉、疼觉的测量手段,将来若能够开发出能客观地测量疼痛度的传感器该有多好呀!

1.2 传感器传感什么

作为检出器的传感器,是决定测量仪器整体性能的重要部分,现在就使用传感器或开发新的传感器时应留意的一些基本点作一介绍。

首先考察传感器的输入与输出关系,设测量信号为 x ,传感器输出为 y ,比例系数为 k ,则有

$$y = kx \quad (1.1)$$

这是理想的线性关系,但实际上这样的关系式难以成立,因为有避免不了的非线性(限于微分符号一定的单调的递增或递减函数)和零位输出(off set)。考虑这些因素后有

$$y = kf(x) \quad (1.2)$$

$f(\cdot)$ 为单调非线性函数, $f(0)$ 是被测信号为 0 时的输出,也就是零位输出(练习题 1)。

但是具有这样输入输出关系的传感器还是不存在,因为传感器是处于一定测定环境中的,在响应被测信号的同时,还受到各环境因素的影响。设各环境因素以综合变量 N 表示,则传感器的输出改写为

$$y = f(x, N) \quad (1.3)$$

由于环境是变动的,因此这种变化将影响传感器的输出。式(1.3)以某种基准状态 x_0, N_0 展开,得到

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial N} \Delta N \quad (1.4)$$

式(1.4)中右边第一项为传感器本身的输出,第二项为环境变化时的输出,后者引起零点输出的变化,称为漂移(drift)。由于漂移与传感器本身的输出无法区分,因此应尽量抑制。

$\partial f / \partial x$ 是传感器的灵敏度,它是 x_0 和 N_0 的函数,与 x_0 是非线性关系。 $\partial f / \partial x$ 与 N_0 的关系使得传感器的灵敏度随环境而发生变化。现实中无论什么传感器其特性或多或少都含有这种变化因素。

环境变量有温度、湿度、振动、加速度、空气、大气情况等等。时间也是重要参数,有的传感器在几小时内保持稳定,传感器输出随时间的变化可用小时稳定性或年度稳定性来表示。

评估传感器特性的指标除上述的线性度、稳定性(灵敏度的变化或漂移)外,还有响应速度、重复、滞后、动态范围和准确度等。

以上的讨论在传感器使用上很重要,开发新传感器时要尽量减小环境变量的影响。

1.3 信号处理

传感器的输出有各种形式,如热电偶、pH 电极等输出为直流电压,光电二极管输出为直流电流,差动变压器或电磁流量计输出为交流电压,热敏电阻或应变计、半导体气体传感器输出为电阻值,电感式位移传感器输出为电感,水晶厚度传感器则为振动频率的变化。

另一方面,测量仪器的输出信号须转化成上述电压、电流或数字量中的一种。信号处理(signal conditioning)就是通过进行信号的转换、放大、解调、A/D 转换得到所希望的输出信号的处理过程。这是在测量中使用的共同技术。

1.3.1 差动法

这是在输入端对信号进行处理的方法。现以电阻式传感器为例来说明差动法的原理。传感器的输出假设为下列线性关系

$$R_x = kx + R_0 \quad (1.5)$$

式中, x 为输入信号, k 为比例系数, R_x 为输出电阻。 R_0 是当 x 为 0 时的输出电阻(这样设定不影响以下讨论的本质)。

由电阻转换为电压最简单的电路如图 1.2(a) 所示。输出电压由下式表示:

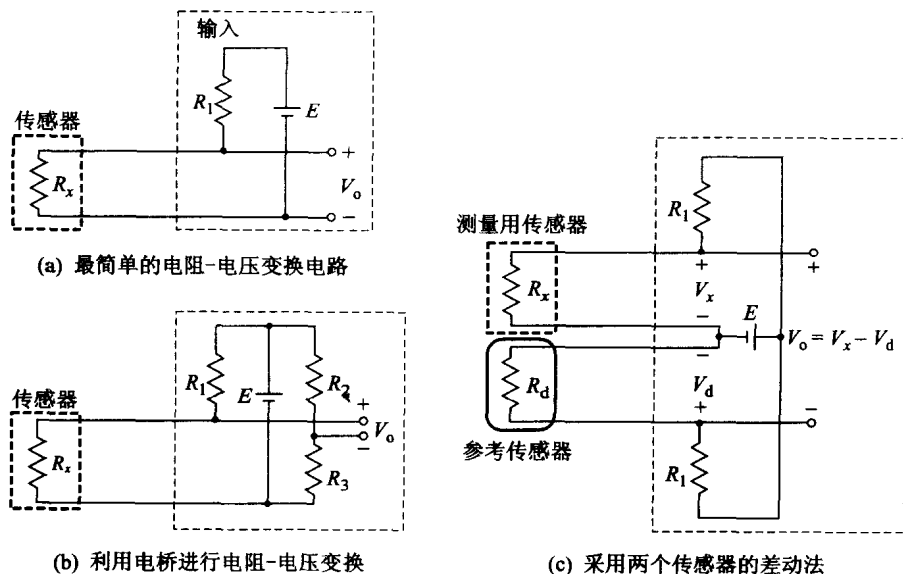


图 1.2 电阻式传感器的输出电阻转换为电压的方法

$$V_o = \frac{R_x}{R_x + R_1} E \quad (1.6)$$

但在 $x=0$ 时, 存在零位电压: $R_0/(R_0 + R_1)E$ 。

若增加抵消零位电压的电路, 如图 1.2(b) 所示, 则输出电压为

$$V_o = \left(\frac{R_x}{R_x + R_1} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) E \quad (1.7)$$

并且, R_2 和 R_3 的选择应满足下式

$$\frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{R_0}{R_0 + R_1} \quad (1.8)$$

这样, $R_x = R_0$ 时输出电阻为 0, 零位电压被抵消, 这就是大家所熟知的电桥电路。

但若 R_0 随环境而变化, 则式 (1.8) 无法满足, 输出电压出现漂移。

最后要讨论的是如图 1.2(c) 所示的采用差动法 (differential method) 的电路。采用差动法时, 使用两个同样的传感器, 一个作为测量传感器, 另一个作为参考传感器 (dummy)。两者放在同一环境中, 并且参考传感器不受所测信号的影响。因此参考传感器电阻 R_d 与所测信号变动无关, 一直保持为 R_0 。以测量传感器电压 V_x 和参考传感器电压 V_d 的差作为输出电压 V_o , 因为 $R_d = R_0$, V_o 由下式表示

$$V_o = V_x - V_d = \frac{R_x}{R_x + R_1} E - \frac{R_0}{R_0 + R_1} E \quad (1.9)$$

可见输出电压不产生漂移(见练习题2)。

差动法的原理虽简单,但却是一种基本而重要的测量方法。由差动法而测量成功的例子不胜枚举。

差动法也适用于电感式或电容式传感器。另外像由差动电容或差动变压器之类的传感器自身构成的差动型式的传感器也很多。只是这种场合所输出的电压为交流电压,需再进行解调转换为直流电压。

1.3.2 零位法

这里考虑电压式传感器输出电压 V_s 的情况。

首先试着用动圈式电压表来测量。如图 1.3(a) 所示,在传感器输出端 A, B 处连接电压表,这样,就可以从电压表上的刻度读取 A, B 两点间的电压值 V_{AB} 。 V_{AB} 由下式表示

$$V_{AB} = \frac{R_v}{R_v + R_s} \cdot V_s \quad (1.10)$$

其中, R_v 是电压表的内阻。

传感器内电阻 R_s 已知时可从 V_{AB} 反算出 V_s 。 R_s 未知时则不能算出 V_s , 仅当 $R_v \gg R_s$ 时,可用 V_{AB} 代替 V_s 。

测量信号直接由测量仪的指针偏转角度进行测量的方法为偏转法(deflection method)。

解决电压测量与传感器内阻有关的问题的方法是零位法。原理如图 1.3(b) 所示,细线围着的部分是电位差计(potentiometer),用来产生正确的基准电压 V_r 。移动滑线电阻器的滑块产生恒定电流,电压的大小可以从装在滑线电阻器上的刻度读取。

传感器的输出 V_s 与参考电压 V_r 按互相抵消的原则连接,从传感器流向电位差计的电流 I 由电位差计观察,边测量边移动滑块直到 I 为零

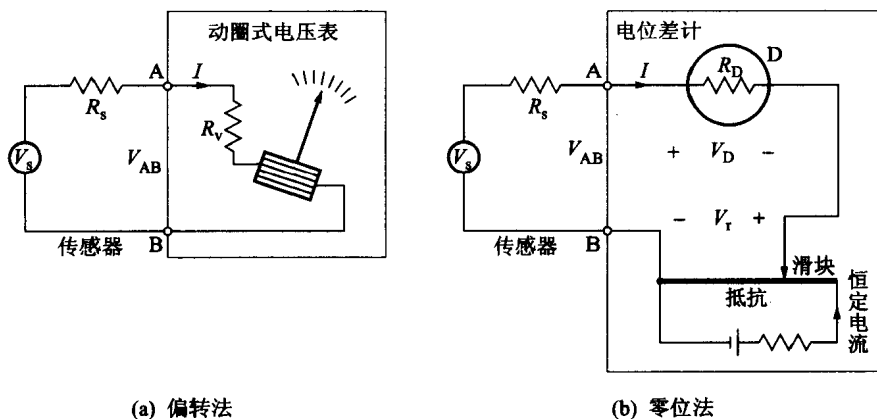


图 1.3 测量电压的零位法和偏转法

的位置。因为 I 与 $V_s - V_r$ 成正比,而此时

$$V_s = V_r \quad (1.11)$$

V_s 与 V_r 平衡,因此从滑块的位置可以读出 V_s 的大小。传感器的内部电阻不影响测量结果。

这种使被测信号与用于平衡的参考信号相平衡的测量方法称为零位法(zero method; null method)。

电位差计是电压表的一种,下面试着求出这个电压表内阻 R_p 。内阻是端电压 V_{AB} 和流入电流 I 的比值

$$R_p = V_{AB}/I = (V_s - R_s I)/I \quad (1.12)$$

R_p 随电流 I 而变化,平衡状态时 I 为 0,这个电压表的内部电阻为无限大。

一般而言,用零位法测量的一个重要性质是不从信号源获取能量,换句话说,零位法测量不会给信号源带来干扰,从而可实现高精度的测量。

另一方面,偏转法测量时从信号源攫取能量: $V_s^2/(R_s + R_v)$,故给测量带来误差。

人类从远古时代就开始使用天平,通过使砝码与物质的质量相平衡,由砝码的质量求得物体的质量这一过程就是一种零位测量法。弹簧秤则是偏转法测量,由作用在物质上的重力改变弹簧的位置,然后读出刻度。因为重力随所处位置不同而改变,即使是同一物质,弹簧秤放在不同地方测量得出的值也会不一样,而天平不受重力的影响。

零位法不仅仅用于电压或质量的测量。在测量中,如果能找到和被测量具有相同调节性的基准量均可使用零位法。例如,在力的测量中就使用力输出电机(force motor)来产生基准力,下面将要讲述的放大器和 A/D 转换器均使用了零位法原理。

1.3.3 信号放大

传感器的输出电压一般来说都很小(毫伏级),通常需要放大到伏级。传感器的输出电压在未达到测量仪器的输出水平时皆需进行信号放大。

首先看看放大信号的性质。图 1.4(a)为信号源电压与内阻相串联的情况,同图 1.3 一样。热电偶的等效电路即属于此种类型。图 1.4(b)是电流源的等效电路,电流源 I_s 和内部电阻 R_s 并联,如不短路输出端子就不能正确测出 I_s 。光电二极管就是典型的例子。

在电压信号的情况下,往往使用如图 1.4(c)所示的等效电路。这种等效电路有两个电压源,电压信号 V_s 对地有一电位 V_c 。因为 V_c 同时加在两个输出端故称为共模(common mode)电压;对应地, V_s 称为差模或常模(normal mode)电压。在心电或脑电波的测量中,电极间的电压或磁流量计的信号就是这种情况。高温电炉使用的热电偶由于存在来自电源的漏电,因此也用图 1.4(c)表示其等效电路。 L, C, R 式的传感器,采用差动方式得

到输出电压,它们的等效电路亦如图 1.4(c)所示(见练习题 4)。

测量用放大器的放大倍数要求能在数年内维持恒定,频率特性要求从直流至某截止频率的范围内保持平坦,姑且不论半导体放大器的频率特性,放大倍数要长期保持恒定还有很大难度。高质量的放大器可通过对高增益半导体放大器加深度负反馈来完成。集成化的运算放大器(operation amplifier)就具有高增益的特点,可用来构成负反馈放大器。电压水平极低时,可采用斩波型的运算放大器。

代表性的放大器如图 1.5 所示,三角形符号表示高增益运算放大器,具有“+”,“-”两个输入端。输入端之间电压为 e ,放大后的输出电压为 V_o , V_o 以地线为参考点测量。输入端电压相对地面浮置,参考点为“-”端。在图 1.5(a)所示的电压放大器中,输入电压 V_s 加在“+”端,将 V_s 用电阻 R_1 和 R_2 分压后的电压 V_f 加在“-”端,成为负反馈。由于运算

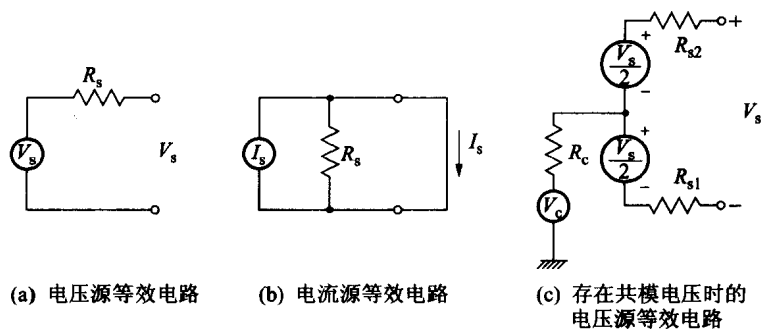


图 1.4 放大器输入信号的等效电路

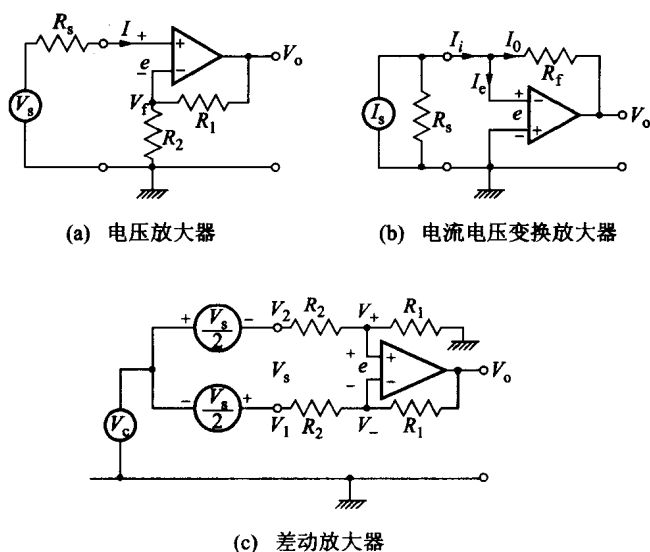


图 1.5 测量用负反馈放大器