

传感器 及其应用实例

何希才 薛永毅 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TP212
74

传感器及其应用实例

何希才 薛永毅 编著



机械工业出版社

本书主要介绍常用传感器应用技术及其实用电路的设计,内容包括温度传感器、光电传感器、磁敏传感器、压力传感器、湿度传感器、气敏传感器、超声波传感器、红外传感器等的原理、特性参数及选用原则,并提供较多的应用电路实例。这些电路设计新颖、结构合理、性能优良、实用性强。

本书主要供给传感器应用开发人员、电路设计工程师使用,也可作为大专院校电气与电子类专业学生教材以及教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器及其应用实例/何希才,薛永毅编著. —北京:机械工业出版社, 2004.1

ISBN 7-111-13321-8

I. 传… II. ①何…②薛… III. ①传感器-基本知识②传感器-电路设计 IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第099891号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:张沪光 版式设计:冉晓华 责任校对:陈延翔

封面设计:陈沛 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年1月第1版第1次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·13.5印张·329千字

0 001—4 000册

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

当前,计算机应用技术、通信技术和传感技术可以说是电子信息技术的三大主要组成部分。其中,计算机和通信技术发展相当迅速,而传感技术发展有些滞后,因此,我国和世界各国都视传感技术为现代电子信息技术的关键技术之一。对计算机和通信技术运用自如的工程技术人员已非常多,但精通并能灵活运用传感技术的工作者却很少,这是因为传感技术需要使用模拟技术,而模拟技术有很多问题都须亟待解决,这就需要进行进一步学习传感技术。另外,传感器应用又极其广泛,从家用电器到工业设备到处都要用到传感器,现在计算机为信息转换与处理提供了十分完善的手段,但若没有各种精确可靠的传感器去检测原始数据并提供真实的信息,那么,计算机也无法发挥其应有的作用。据此,编者参考有关最新资料 and 教学实践编写了这本书。本书的特点是从实践和应用角度出发,理论为实践服务,实用性较强,主要介绍常用传感器的外特性及选用原则,并提供较多的传感器基本应用电路及接口电路。读者可从本书中直接选用适用的传感器应用电路,还可对本书提供的电路稍加修改应用到自己设计的系统中,这样可以节省设计者的大量时间,而使设计系统的性能达到最佳。

另外,传感器的主要特性参数可直接在网上下载,其网址如下:

温度传感器的有关网址: www.analog.com; www.dallas.com; www.maxim-ic.com; www.national.com; www.dewer.com。

湿度传感器的有关网址: www.epluse.at。

压力传感器的有关网址: www.datainstruments.com。

光电传感器的有关网址: www.ovt.com; www.omron.com.cn; www.honeywell.com; www.mew.cojple-acg/。

气敏传感器的有关网址: www.cprgas.com。

超声波传感器的有关网址: www.dewer.com。

霍尔传感器的有关网址: www.honeywell.com/sensing/。

全书包括绪论和九章内容。绪论,主要介绍传感器的定义、类型及发展趋势。第1章温度传感器,主要介绍温度传感器的类型,热电阻、热敏电阻、热电偶及集成温度传感器的特性及其应用实例。第2章光电传感器,主要介绍光敏二极管、光敏晶体管、光敏电阻、光电位置检测器(PSD)、太阳电池及色敏传感器的特性及应用实例。第3章磁敏传感器,主要介绍霍尔元件、磁阻元件等磁敏传感器的特性及应用实例。第4章湿度传感器,主要介绍湿度传感器的工作原理、应用技术及应用实例。第5章气敏传感器,主要介绍气敏传感器的类型与特征、原理及应用实例。第6章超声波传感器,主要介绍超声波传感器的原理与特性、检测方式、系统构成及应用实例。第7章红外传感器,主要介绍红外传感器的原理、基本应用电路及热释电传感器的应用实例。第8章压力传感器,主要介绍压力传感器类型与原理、基本电路及应用实例。第9章传感器应用技术,主要介绍传感器的供电电源、放大电路、滤

波器电路、接口电路、同步整流、线性化及系统设计等技术。

在本书编写过程中，参考了瞿贵荣、许云、徐向峰、王静瑞、李春玲、郝鸿安、陈有卿、戴维德、周海、申新、杨邦朝等作者的资料，在此向他们表示感谢。由于编者水平有限，书中会有不妥之处，请读者批评指正。

编者 2003 年 8 月

目 录

前言	
绪论	1
第1章 温度传感器	5
1.1 温度传感器的类型	5
1.2 热电阻	6
1.3 热敏电阻	10
1.4 热电偶	15
1.5 集成温度传感器	27
1.6 其他类型温度传感器	41
第2章 光电传感器	52
2.1 概述	52
2.2 光敏二极管	53
2.3 光敏晶体管	56
2.4 光敏电阻	68
2.5 光电位置检测传感器 (PSD)	76
2.6 太阳电池	82
2.7 色敏传感器	88
第3章 磁敏传感器	90
3.1 概述	90
3.2 霍尔传感器	90
3.3 磁阻元件	97
3.4 其他磁敏传感器	99
3.5 磁敏传感器的应用实例	104
第4章 湿度传感器	111
4.1 概述	111
4.2 湿度传感器的工作原理	113
4.3 湿度传感器的应用技术	115
4.4 湿度传感器的应用实例	117
第5章 气敏传感器	126
5.1 气敏传感器的类型与特征	126
5.2 气敏传感器的原理	128
5.3 气敏传感器的应用技术	129
5.4 气敏传感器的应用实例	132
第6章 超声波传感器	138
6.1 超声波传感器的原理与特性	138
6.2 超声波传感器的检测方式	141
6.3 超声波传感器系统的构成	143
6.4 超声波传感器的应用实例	145
第7章 红外传感器	153
7.1 红外传感器的原理	153
7.2 红外传感器的基本电路	159
7.3 热释电传感器的应用实例	164
第8章 压力传感器	170
8.1 压力传感器的类型与原理	170
8.2 压力传感器的基本电路	171
8.3 压力传感器的应用实例	176
第9章 传感器的应用技术	183
9.1 传感器的供电电源	183
9.2 传感器的放大电路	186
9.3 滤波器电路	189
9.4 接口电路	193
9.5 同步整流	197
9.6 线性化	198
9.7 系统设计	206
参考文献	208

结 论

传感器技术是现代信息技术的主要内容之一。信息技术包括计算机技术、通信技术和传感器技术，计算机相当于人的大脑，通信相当于人的神经，而传感器就相当于人的感官。传感器是将能够感受到的及规定的被测量按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成，其中敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量（输入量）的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件感受的或响应的被测量转换成适于传输和（或）测量的电信号的部分。

传感器与人的感官一一对应，相当人眼（视觉）的光传感器，如光敏元件、电荷耦合器件（CCD）、图像传感器和光敏二极管等；相当于人耳（听觉）的音响传感器，如传声器、压电元件等；相当于人皮肤（触觉）的振动传感器、温度传感器和压力传感器，其中振动传感器有应变片、半导体压力传感器等，温度传感器有热敏电阻、铂电阻、热电偶和热释电传感器等，压力传感器有膜片、力敏聚合物等；相当于人舌头（味觉）的味觉传感器，如铂、氧化物、离子传感器等；相当于人鼻子（嗅觉）的嗅觉传感器，如生物化学元件等。此外，还有检测位移量的差动变压器、检测转速的编码器、磁性传感器等。

传感器的作用包括以下几方面：

1. 信息的收集

科学研究中的计量测试、产品制造与销售中所需的计量等都要由测量而获得准确的定量数据。对某种特定要求，需检测目标物的存在状态，把某状态信息转换为数据。

对系统或装置的运行状态进行监测，也由传感器来实现，发现异常情况时，发出告警信号并启动保护电路工作。这样可以对系统或装置进行正常运行与安全管理。判断产品是否合格，或人体各部位的异常诊断等都需由传感器的测量来完成。

2. 信息数据的交换

把以文字、符号、代码、图形等多种形式记录在纸或胶片上的信号数据转换成计算机、传真机等易处理的信号数据，或者读出记录在各种媒介体上的信息并进行转换。例如，磁盘与光盘的信息读出磁头就是一种传感器。

3. 控制信息的采集

检测控制系统处于某种状态的信息，并由此控制系统的状态，或者跟踪系统变化的目标值。

传感器种类繁多，有不同的分类方式，下面介绍一些基本类型：

1. 按传感器构成分类

可分为基本型传感器、组合型传感器和应用型传感器。

基本型传感器是一种最基本的单个变换装置。组合型传感器是由不同单个变换装置组合而构成的传感器。而应用型传感器是基本型传感器或组合型传感器与其他机构组合而构成的传感器。

2. 按传感器机理分类

可分为结构型传感器、物性型传感器、混合型传感器以及生物型传感器。

结构型传感器是基于某种结构的变换装置的一种传感器。例如,电容压力传感器就属于这种传感器,当外加压力改变时,电容极板发生位移,电容量发生变化,如果谐振装置中采用这种电容,其谐振频率就随电容量发生变化,检测谐振频率的变化就能测量压力的大小。

物性型传感器是一种利用物质所具有的物理或化学特性来构成的,它对应力、温度、电场、磁场等有一定依赖关系,并能进行变换。这种传感器一般没有可动结构部分,易小型化,构成一种所谓固态传感器。

混合型传感器是结构型与物性型传感器组合而成的一种传感器。

生物型传感器是利用微生物或生物组织中生命体的活动现象作为变换结构的一种传感器。这可为生物、医学范围内提供一种有用的传感器。

3. 按作用形式分类

可分为主动型和被动型传感器。

主动型传感器有作用型和反作用型,此种传感器对被测对象能提供一定探测信号,能检测探测信号在被测对象中所产生的变化,或者由探测信号在被测对象中产生某种效应而形成信号。检测探测信号变化方式的称为作用型,检测产生响应而形成信号方式的称为反作用型。雷达与无线电频率范围探测器是作用型实例,而光声效应分析装置与激光分析器是反作用型实例。

被动型传感器只是接收被测对象本身产生的信号。例如,红外辐射温度计、红外摄像装置等。

4. 按变换工作能量供给形式分类

可分为能量变换型与能量控制型传感器。

能量变换型传感器在进行信号转换时不需要另外提供能量,把输入信号能量变换为与其不同的另一种形式能量而输出。例如,太阳电池和压电加速度传感器属于这类传感器。能量控制型传感器在进行信号转换时,需要先供给能量,由输入信号控制供给的能量,并检测能量的变化作为输出信号。电阻应变传感器与光敏晶体管等是其实例。

5. 按输出信号形式分类

可分为模拟信号与数字信号传感器。

输出为模拟信号的传感器,其输出一般为连续的模拟信号。而输出周期性信号的传感器实质上也是模拟信号传感器。但周期信号容易变为脉冲信号,可作为准数字信号使用。因此,可以称为准数字信号传感器。例如,利用振动的传感器就是这种类型。

输出为数字信号的传感器是输出 1 与 0 两种信号的传感器,应用极广。两种信号可由电路的通断、信号的有无、绝对值的大小、极性的正负等来实现。实例有双金属温度开关等。

数字信号传感器是一种获得代码信号输出的传感器,敏感元件本身为数字量的极少,一般与编码器组合而成。如旋转编码器能检测旋转角,线性编码器能检测位置、距离等。一般要经模/数转换器转换为数字信号。

6. 按传感器的特殊性分类

上面介绍的五种分类是传感器的基本类型。按特殊性分有下列类型。

按检测功能可分为检测温度、压力、湿度、流量、流速、加速度、磁场、光通量等,其中最常用的是温度传感器,其次是压力、流量传感器。

按转换现象的范围可分为电化学传感器、电磁传感器、力学传感器、光应用传感器。

按材料分有陶瓷传感器、有机高分子材料传感器、半导体传感器、气敏传感器等。

按用途分有工业用、民用、科研用、医疗用、农用、军用等传感器,还有汽车、宇宙飞船、防灾等用的传感器。

按功能用途分有计测用、监视用、检查用、诊断用、控制用、分析用等传感器。

传感器特性包括静态特性和动态特性,其中静态特性有灵敏度与 S/N (信/噪比)、线性、时滞、环境特性、稳定性和精度等。

传感器选用要考虑以下几个方面:

1. 测量条件

如果误选传感器,就会降低系统的可靠性。为此,要从系统总体考虑,明确使用的目的以及采用传感器的必要性,绝对不要采用不适宜的传感器与不必要的传感器。测量条件列举如下:测量目的、测量量的选定、测量的范围、输入信号的带宽、要求的精度、测量所需要的时间、过输入发生的频繁程度等。

2. 传感器的性能

选用传感器时,要考虑传感器的下述性能:精度、稳定性、响应速度、模拟信号或者数字信号、输出量及其电平、被测对象特性的影响、校准周期、过输入保护等。

3. 传感器的使用条件

传感器的使用条件有设置的场所、环境(湿度、温度、振动等)、测量时间、与显示器之间的信号传输距离、与外设的连接方式以及供电电源容量等。

传感器的种类繁多,应用的场合也各式各样,用户在使用传感器之前应特别注意详细阅读说明书。现把传感器一些常见的使用方法总结如下:精度较高的传感器都需要定期校准,一般来说,需 3~6 个月校准一次;传感器通过插头与供电电源和二次仪表连接时,应注意引线号不能接错;各种传感器都有一定的过载能力,但使用时尽量不要超过量程。在搬运和使用中,不应碰坏传感器的探头处;传感器不使用时,应存放在温度为 $10\sim 35^{\circ}\text{C}$,相对湿度不大于 85%,无酸、

无碱和无腐蚀性气体的室内。

传感器技术是 21 世纪人们在高新技术发展方面争夺的一个制高点,各发达国家都将传感器技术视为新技术发展的关键,从 20 世纪 80 年代起,日本就将传感器技术列为优先发展的高新技术之首,美国等西方国家也将此项技术列为国家科技和国防技术发展的重点内容。我国在 20 世纪 80 年代以来也已将传感器技术列为国家高新技术发展的重点。21 世纪是人类全面进入信息电子化时代,作为现代信息技术三大支柱之一的传感器技术必将有较大的发展,概括起来有以下几个方面:

1. 高精度化

随着自动化生产程度的不断提高,对传感器的要求也在不断提高,必须研制出具有灵敏度高、精确度高、响应速度快、互换性好的新型传感器,以确保生产自动化的可靠性。目前能生产精度在万分之一以上的传感器的厂家为数很少,其产量也远远不能满足要求。

2. 高可靠性和宽温度范围

传感器的可靠性直接影响到电子设备的抗干扰等性能,研制高可靠性、宽温度范围的传感器将是永久性的方向。提高温度范围历来是个大课题,大部分传感器的工作温度范围都在 $-20 \sim +70^{\circ}\text{C}$,在军用系统中要求工作温度范围在 $-40 \sim +85^{\circ}\text{C}$,而汽车、锅炉等场合要求传感器工作在 $-20 \sim +120^{\circ}\text{C}$,在冶炼、焦化等方面对传感器的温度要求更高,因此发展新兴材料(如陶瓷)的传感器将很有前途。

3. 微型化

各种控制仪器设备的功能越来越强,要求各个部件体积越小越好,因而传感器本身体积也是越小越好,这就要求发展新的材料及加工技术,目前利用硅材料制作的传感器体积已经很小。如传统的加速度传感器是由重力块和弹簧等制成的,因而体积较大、稳定性差、寿命也短,而利用激光等各种微细加工技术制成的硅加速度传感器的体积非常小,互换性与可靠性都较好。

4. 低功耗及无源化

传感器一般都是非电量向电量的转化,工作时离不开电源,在野外现场或远离市电的地方,往往是用电池供电或用太阳电池等供电,开发低功耗的传感器及无源传感器是必然的发展方向,这样既可以节省能源又可以提高系统寿命。目前,低功耗的芯片发展很快,如 TL2702 运算放大器,静态电流只有 $1.5\mu\text{A}$,而工作电压只需 $2 \sim 5\text{V}$ 。

5. 智能化与数字化

随着现代电子技术的发展,传感器的功能已突破传统的功能,其输出不再是一个单一的模拟信号(如 $0 \sim 10\text{mV}$),而是经过微处理器处理好的数字信号,有的甚至带有控制功能,这就是所说的数字信号传感器。

第 1 章 温度传感器

1.1 温度传感器的类型

温度是与人类的生活、工作关系最密切的物理量，也是各门学科与工程研究设计中经常遇到和必须精确测量的物理量。从工业炉温、环境气温到人体温度；从空间、海洋到家用电器，各个技术领域都离不开测温 and 控温。因此，测温、控温技术是发展最快、范围最广的技术之一。

温度传感器有各种类型，根据使用方法不同，基本上分为接触式和非接触式两大类，见表 1-1。接触式是传感器与物体直接接触，从而测量物体的温度，这种方式构造简单，现在应用最广；非接触式是测量物体相应温度辐射的红外线，从而测量物体的温度，这种方式测量物体的相对温度较方便，但测量物体绝对温度时需要进行补偿，传感器构成复杂。

表 1-1 传感器的类型

传感器的方式	传感器机理	传感器的实例
接触式	热膨胀	气体压力（气体温度计、蒸汽压温度计）、液体体积（水银温度计）、固体形变（双金属片）
	电阻	金属（铂电阻温度传感器）、半导体（热敏电阻、二极管）
	热电动式	热电偶
	磁性	温敏铁氧体开关
	介质特性	电容传感器
	集成传感器	—
	光纤传感器	—
	其他传感器	颜色（液晶、彩色温度标示漆）
非接触式	辉度检测方式	光高温计、双色高温计、自动辉度调节温度计
	辐射能量检测方式	热型（辐射热测量计、热电堆、热电型等）、量子型（光电导、光生伏特等）

表 1-2 示出各种温度传感器大致的测温范围。在使用温度传感器时，应根据以下要求选择最适宜的传感器，这些要求包括被测量对象的温度范围；传感器的灵敏度、精度和噪声、响应速度等；实装电路；特性的离散性及蠕变；机械强

度、耐热性；生产性及价格等。

表 1-2 温度传感器的测温范围

温度传感器的类型	测温范围/℃	温度传感器的类型	测温范围/℃
石英晶体温度计	-100~220	双金属片式温度计	0~300
热敏电阻	-200~800	水银温度计	-30~350
集成温度传感器	-55~150	酒精温度计	-60~100
铂热电阻	-180~600 ($\alpha = +0.003916/^\circ\text{C}$)	热电偶	R: 200~1400 K: 0~100 E: 200~700 J: 0~600
铜热电阻	0~200 (使用较少)		
镍铬热电阻	-20~300 (使用较少)	光高温计	800~2000
		辐射温度计	0~2000

1.2 热电阻

金属电阻一般为正温度系数，这时，电阻随温度变化可用式 (1-1) 表示，即

$$R_T = R_0(1 + aT + bT^2 + \dots) \quad (1-1)$$

式中， R_T 为 $T^\circ\text{C}$ 时金属电阻； R_0 为 0°C 时金属电阻； T 为测量温度； a 和 b 为由金属决定的常数。

热电阻传感器是检测金属电阻随温度变化而测量温度的传感器，若金属的纯度恒定，则电阻随温度变化的重现性好。目前使用的热电阻材料有铂 (Pt)、铜 (Cu)、镍 (Ni) 和钨 (W) 等，将这些金属丝绕在电绝缘的耐热玻璃上而构成线绕型温度传感器，图 1-1 为这类金属电阻随温度变化的曲线。

作为热电阻材料的金属要求电阻值稳定、电阻值随温度变化的线性度好，最常用的是铂金属材料。热电阻的标称电阻值有温度为 0°C 时 50Ω 和 100Ω 两种，但 50Ω 热电阻用得较少，将被淘汰掉，主要使用 100Ω 热电阻。

热电阻的使用温度范围：低温为 $-200 \sim +100^\circ\text{C}$ ，中温为 $0 \sim 350^\circ\text{C}$ ，高温为 $0 \sim 500^\circ\text{C}$ 。用热电阻测量温度时，要外部施加电源，使流经热电阻的电流为规定值，测量该电流在热电阻两端产生的电压降，从而达到测量温度的目的。因此，温度的测量精度高，尤其是测量常温下的温度比热电偶温度计更适宜。

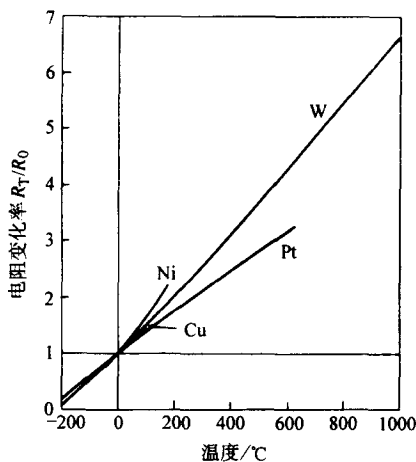


图 1-1 电阻变化率与温度之间关系曲线

为了对热电阻施加机械与化学性保护，使用时常将热电阻放在保护管内，尤其是在工业生产的使用场合，对热电阻施加抵抗各种气体侵蚀的保护，需要注意保护管种类的选择。保护管选用时要满足以下条件：保护管要有足够的耐热性和耐压力性，抗被测物体的腐蚀性强，并不与被测物体起化学反应，密封时对急剧的温度变化也不会损坏，耐振动和冲击性强，外部温度能迅速传递到热电阻体等。

采用热电阻构成的测温仪器有电桥、直流电位差计、电子式自动平衡计量仪器、动圈比率式计量仪器、动圈式计量仪器、数字温度计等。在这些仪器的测量电路中，为保证不同的测量精度，热电阻的导线连接方式有4线式、3线式和2线式。

为了消除热电阻测量电路中电阻体内导线以及连线引起的误差，在图1-2所示的电桥及直流电位差计或数字电压表中，热电阻体采用4线连接方式，这样，可用于对标准电阻温度计进行校正，并能对温度进行高精度的测量。图1-2中， R_x 为热电阻体构成的电阻元件， L_1 和 L_2 为热电阻体内导线， G 为检流计或微电流检测器， R_S 为标准电阻， R 为固定电阻， $R_1 \sim R_4$ 为平衡调节电阻， R_h 为电流调节电阻， S 为切换开关。

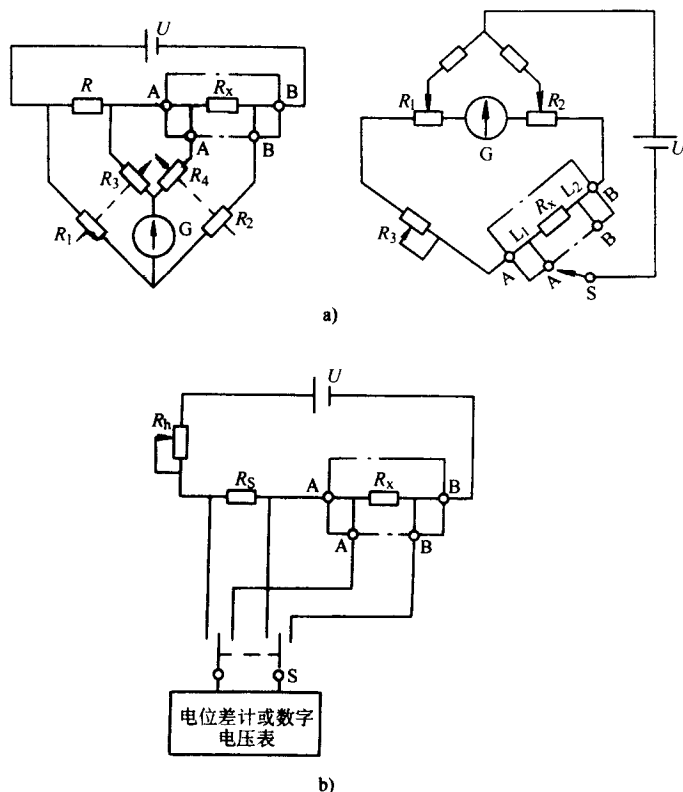


图1-2 4线式连接的测量电路

a) 电桥 b) 电位差计或数字电压表

图1-3所示电路为采用3线式连接方式，这时使用的导线必须是材质、线径、长度及电阻值相等，而且在全长导线内温度分布相同。这种方式可以消除热

电阻内导线及连线引起的大部分误差，一般的温度测量大都采用这种接线方式。

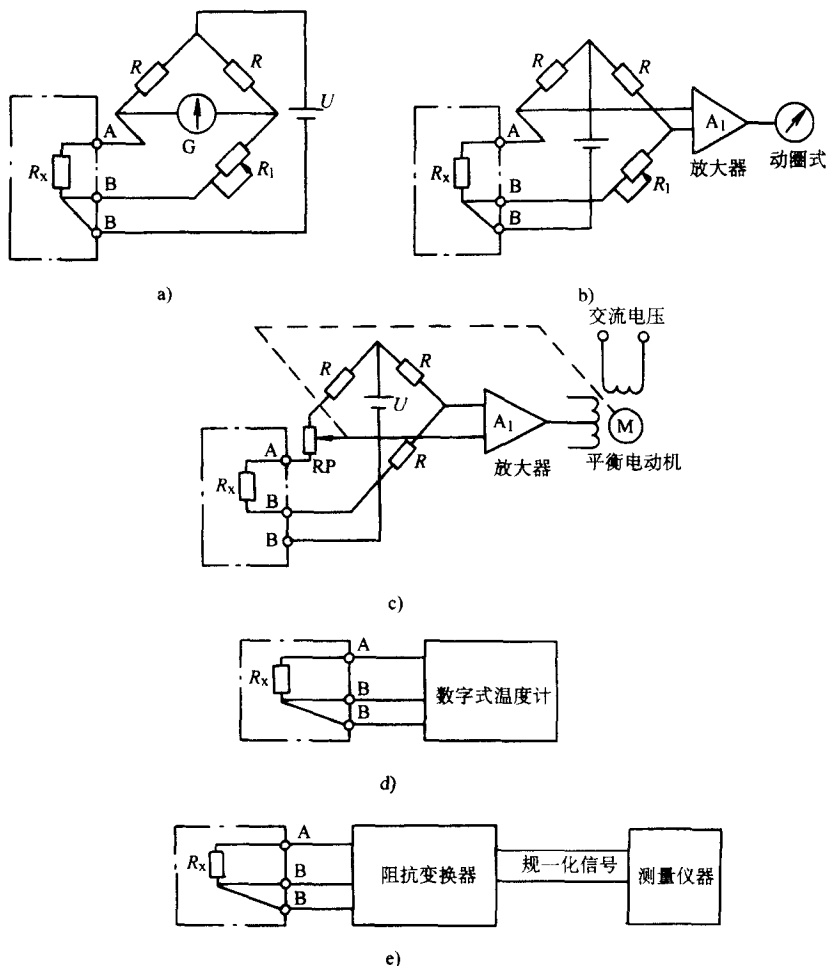


图 1-3 3 线式连接的测量电路

- a) 电桥或动圈式计量仪器 b) 带放大器的动圈式计量仪器
c) 电子自动平衡式计量仪器 d) 数字式温度计 e) 采用阻抗变换器的电路

图 1-4 所示电路为采用 2 线式连接方式，这种接线方式不能消除连线电阻随温度变化引起的误差，为此，应确保连线电阻值远低于测温的热电阻值。

一定要将外部的电阻值调整到计量仪器说明书中提供的标称值。外部电阻是指接在计量仪器的测量端子外侧的导线及测温热电阻体内导线所组成的电路的电阻，不包括由热电阻体构成的电阻元件的电阻。

采用热电阻进行高精度的温度测量时，不希望采用 2 线式连接方式，即使采用这种接线方式也要使用电阻补偿导线。图 1-5 是采用电阻补偿导线的 2 线式

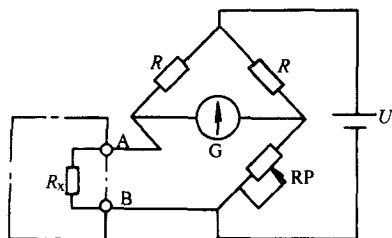


图 1-4 2 线式连接方式的测温电路

连接方式测量电路, 若对使用的导线要求与3线式一样, 也能得到与3线式同样的测量效果。

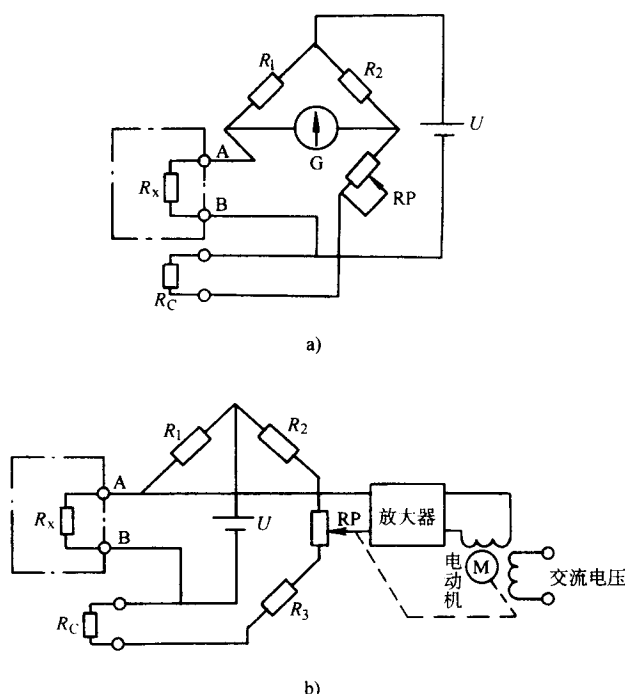


图 1-5 采用电阻补偿导线的 2 线式连接方式的测量电路

a) 电桥或动圈式计量仪器 b) 电子自动平衡式计量仪器

图 1-6 是 3 线式铂热电阻实用放大电路, 它是消除铂热电阻接线电阻的影响, 把铂热电阻 R_T 随温度变化的阻值 ΔR 变换为电压再进行放大的电路。若 R_T 的阻值为 100Ω , 输入端 A 作为基准, 则 B 点电压 U_B 为 $1\text{mA} \times (2r + 100\Omega)$, b 点的电压 U_b 为 $1\text{mA} \times (r + 100\Omega)$ 。从 B 点看, 增益为 $-(R_3/R_2)(1 + R_5/R_4) = -(1 + R_5/R_4)$, 从 b 点看, 增益为 $(1 + R_5/R_4)(1 + R_3/R_2) = 2(1 + R_5/R_4)$, 若加上 B、b 点电压, 则输出电压为 $U_O = -1\text{mA} \times (2r + 100\Omega)(1 + R_5/R_4) + 1\text{mA} \times (r + 100\Omega) \times 2(1 + R_5/R_4) = 1\text{mA} \times 100\Omega \times (1 + R_5/R_4)$ 。由此可见, 式中没有接线电阻 r 项, 这就消除接线电阻的影响。

R_0 的阻值与 R_T 相同, 也为 100Ω , 则 B' 点电压 $U_{B'}$ 为 $1\text{mA} \times (200\Omega + 2r)$, 输出电压 U_O 为 $U_O = -1\text{mA} \times (2r + 200\Omega)(1 + R_5/R_4) + 1\text{mA} \times (r + 100\Omega) \times 2(1 + R_5/R_4) = 0$, 即输出电压为 0V 。

R_T 的阻值是随温度变化的, 假设由 100Ω 变为 110Ω , 输出电压 U_O 为 $U_O = -1\text{mA} \times (2r + 110\Omega + 100\Omega)(1 + R_5/R_4) + 1\text{mA} \times (r + 110\Omega) \times 2(1 + R_5/R_4) = 1\text{mA} \times 10\Omega \times (1 + R_5/R_4)$, 由此可见, 放大的仅是 R_T 随温度变化的部分。例如, 采用铂热电阻 R_T 的标称电阻为 100Ω , 测量 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 的温度, R_0 为 R_T 的 0°C 时 100Ω , 输出为 $0 \sim 1.0\text{V}$ 。 100°C 时 R_T 为 138.5Ω , 就可求出 R_T 随温度变化的 $\Delta R = 38.5\Omega$, 用确定增益的电阻 R_4 与 R_5 , 使其输入电压为

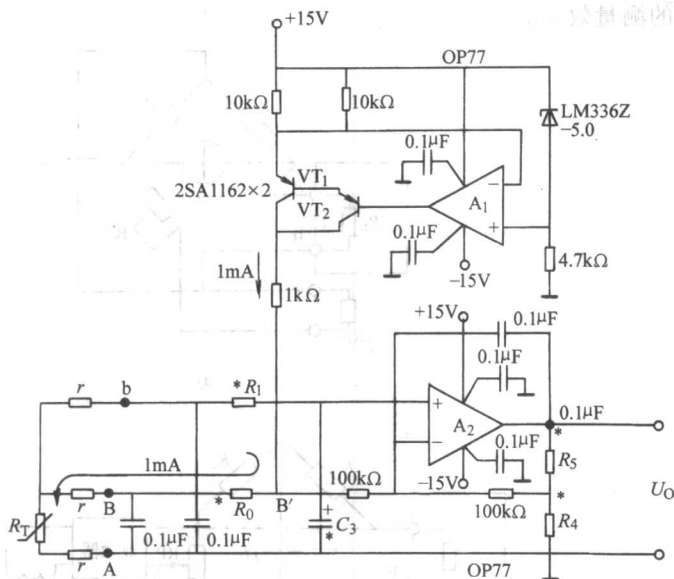


图 1-6 3 线式铂热电阻实用放大电路

1.3 热敏电阻

1.3.1 热敏电阻的特性

热敏电阻是其电阻体随温度变化而显著变化的半导体电阻，通常可分为正温度系数（Positive Temperature Coefficient - PTC）热敏电阻、负温度系数（Negative Temperature Coefficient - NTC）热敏电阻和临界温度系数（Critical Temperature Coefficient - CTC）热敏电阻三类。常用的热敏电阻的外形如图 1-7 所示，使用时不用放在保护管内，因此，测量温度时比热电阻更为简单方便。

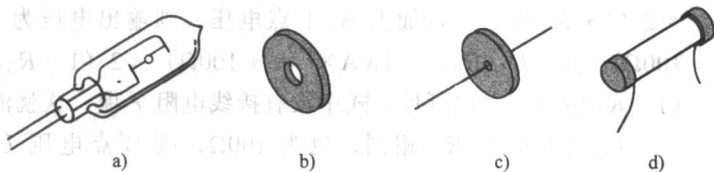


图 1-7 常用的热敏电阻的外形

a) 玻璃罩式 b) 垫圈式 c) 圆片式 d) 棒状

NTC 热敏电阻的测温范围：低温为 $-100\sim 0^{\circ}\text{C}$ ，中温为 $-50\sim +300^{\circ}\text{C}$ ，高温为 $+200\sim +800^{\circ}\text{C}$ ，主要材料有 Mn、Ni、Co、Fe、Cu、 Al_2O_3 等，用于温度测量、温度补偿和电流限制等；PTC 热敏电阻的测温范围为 $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，主要材料有 BaTiO_3 等，用于温度开关、恒温控制和防止冲击电流等；CTC 热敏电阻的测温范围为 $0\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，主要材料有氧化钒系列等，用于记忆、延迟和辐射热测量计等。

热敏电阻有如下优点：对于温度变化，其阻值变化较大，即输出灵敏度高；便于大批量生产，因而价格便宜；体积小而且坚固；由于灵敏度高，因此信号处理非常方便。缺点是非线性元件、测温范围窄、互换性差等。

热敏电阻的温度-电阻之间关系为

$$R_{RT} = R_0 \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (1-2)$$

式中， R_{RT} 为温度 T ($^{\circ}\text{C}$) 时的电阻值； R_0 为温度 T_0 ($^{\circ}\text{C}$) 时电阻值； B 为热敏电阻常数 ($^{\circ}\text{C}$)。

T_0 大都以 298.15K (25 $^{\circ}\text{C}$) 作为基准。电阻值与温度关系即 $\ln R_{RT}$ 与 $1/T$ 为线性关系，如图 1-8 所示，图中直线的斜率相当于热敏电阻的常数 B ， B 的值由下式给出：

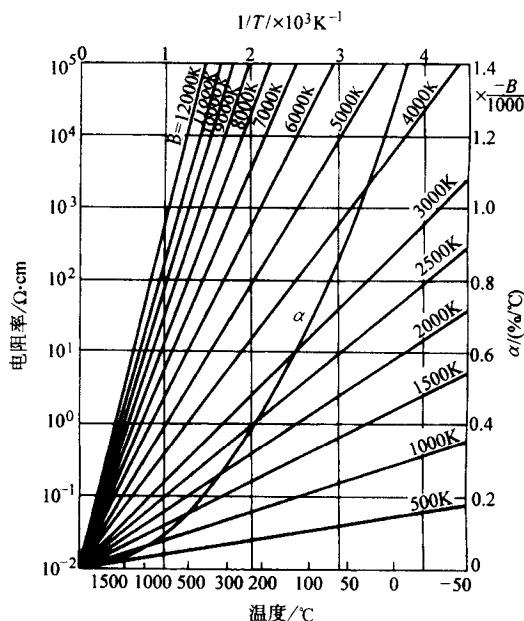


图 1-8 NTC 热敏电阻的温度特性

$$B = \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{(1/T_2) - (1/T_1)} \quad (1-3)$$

式中， R_1 为温度 T_1 ($^{\circ}\text{C}$) 时电阻值； R_2 为温度 T_2 ($^{\circ}\text{C}$) 时电阻值。

但实际上，电阻值与温度不是线性关系，因此，需要进行精密测温时，电阻值-温度关系可表示为

$$R = AT^{-C} \exp(D/T) \quad (1-4)$$

式中， A 、 C 与 D 为随材料不同的常数，其中， C 值可正可负。

热敏电阻的温度系数 α 定义为

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2} \quad (1-5)$$

若热敏电阻中流经电流，则焦耳热使温度升高，这时，热敏电阻发热温度 T ($^{\circ}\text{C}$) 与环境温度 T_0 ($^{\circ}\text{C}$) 以及消耗功率 P (W) 之间关系为