

控制学科继续教育自学丛书

传感技术

蒋大明 编著

中国铁道出版社

控制学科继续教育自学丛书

传 感 技 术

蒋大明 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1998年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书从传感器基本原理出发,介绍了温度、压力、转速、超声波传感器和接近开关,就各种类型传感器的应用和后续电路作了较为深入的探讨。本书分为三部分:前面介绍了各种类型传感器的基本原理、具体应用场合和应注意的问题;中间部分介绍了放大、滤波、变换等后续电路和经常遇到的如抗干扰等问题的处理方法;本书的最后部分讲述了传感器与计算机的接口和具体应用实例。

本书适合于在职职工、技术干部作为继续教育之用,同时也适合于工院校学生和工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)

传感技术/蒋大明编著. —北京:中国铁道出版社,1998.8

(控制学科继续教育自学丛书)

ISBN 7-113-03037-8

I. 传… II. 蒋… III. 传感器-基本知识 IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第16513号

控制学科继续教育自学丛书

书 名:传感技术

著作责任者:蒋大明 编著

出版·发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

策划编辑:刘 波

责任编辑:刘 波

封面设计:陈东山

印 刷:北京彩桥印刷厂

开 本:850×1168 1/32 印张:5.625 字数:146千

版 本:1998年11月第1版 1998年11月第1次印刷

印 数:1—2000册

书 号:ISBN7-113-03037-8/TP·313

定 价:12.80元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

随着社会的进步和科学的发展,一场新的技术革命已经开始,计算机(特别是微型计算机)在这场革命中发挥着核心的作用。在日常生活、工农业生产、科学研究、国防等各个领域,我们常会遇到各种物理量、化学量和生物量。这些参量大致可分为电量和非电量两大类。对于计算机来讲,测量电量已不成问题,然而对于非电量而言,存在一个转换的问题。非电量的涉及面很广,如机械量(压力、加速度、尺寸、物体表面的粗糙度等),热工量(温度、湿度、流量、速度、物位),化学量(成分、酸碱度、反应速度),生物量等,如何将非电量转换适合为计算机等仪器测量的电量,则是本书所讨论的问题。

完成上述转换所需的设备就是传感器。检测中信息采集的主要手段是传感器,信息处理则依赖于计算机,两者是缺一不可。目前由于计算机技术发展迅猛,以致出现了信息处理技术发达,而信息采集技术落后的局面。这已严重影响到科学技术的进步和发展。因此,加强对传感器技术的进一步的研究、开发、应用已成为当务之急。

本书从传感器的基本原理出发,主要就传感器的应用及后续电路进行了较为深入的探讨。其中第一至第五章主要介绍各种传感器的基本工作原理,具体应用场合及应用中所应注意的问题。第六章介绍了传感器的各种后续电路,并就放大、滤波、变换、抗干扰等实际中常遇到的问题进行了详细的讨论。第七章研究了传感器与计算机的接口及一些具体应用实例。

书中尽量避免繁复的数学推导,力求言简意明,适合于大专院校工科各专业用于教学,也可为工程技术人员提供參考。

1997年1月作者于北方交通大学

目 录

第一章 传感器概述	1
第一节 什么是传感器.....	1
第二节 传感器的重要性.....	3
第三节 传感器的发展.....	5
第二章 温度传感器	8
第一节 热电偶.....	8
第二节 热电阻传感器	17
第三节 集成电路温度传感器	21
第四节 红外温度传感器	29
第三章 压力传感器	33
第一节 电容式压力传感器	33
第二节 压电陶瓷压力传感器	35
第三节 压阻式压力传感器	39
第四节 集成化压力传感器	40
第五节 压力传感器的应用	42
第四章 转速传感器	47
第一节 霍尔转速传感器	47
第二节 光电转速传感器	52
第三节 旋转编码器	60

第五章 其它传感器	66
第一节 接近开关	66
第二节 超声波传感器	73
第三节 倾斜传感器	83
第六章 传感器信号处理电路	89
第一节 传感器信号处理电路概述	89
第二节 信号放大电路	93
第三节 信号变换电路	106
第四节 滤波电路	125
第五节 传感器电路的噪声与抑制	130
第七章 传感器信号的计算机处理	142
第一节 信号的非线性处理	142
第二节 数字滤波器	147
第三节 信号的温度补偿	150
第四节 生产过程中的微机与传感器	154
第五节 传感器在铁路中的应用	166

第一章 传感器概述

第一节 什么是传感器

一、传感器的定义

传感器的研究始于本世纪 30 年代,随着社会的进步,特别是微电子技术的发展,传感器技术的发展日新月异。它以材料的物理化学效应为基础,由物理、化学、材料科学、器件物理、工艺学、电子工程等多种学科交织发展而成,是研究电量与非电量信息间转换的一门跨学科的边缘技术科学。

所谓的传感器(Sensor)来自“感觉”一词。视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉,称做人的“五感”。人用眼睛可以看到物体的形状、大小、颜色;耳朵可以听到声音的强弱和高低;鼻子可以闻到各种气味;舌头可以尝到酸甜苦辣;皮肤可以感觉到物体的软硬和冷热。外界的各种刺激信号通过人的“五感”,被变为相应的信号传输给大脑,经过大脑的分析、判断,发出指令,使有关器官产生相应的行动。这就是人的信息处理过程,如图 1-1 所示。

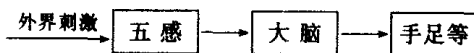


图 1-1 人的信息处理过程

传感器的作用与人的感觉器官类似。它可将各种被测量(包括物理、化学、生物等非电量)转化为可测量的电信号,传送给微型计算机等进行分析计算等数据处理,最后由执行装置执行相应的动作。这就是由传感器、计算机、执行装置组成的系统的信息处理过程,如图 1-2 所示。



图 1-2 系统的信息处理过程

比较图 1—1 和图 1—2 可以发现,传感器如同人的五感,微型计算机类似人的大脑,执行机构则像是人的手脚。

传感器的定义是:凡接受外界刺激并产生可用电信号的器件均可称为传感器。一般说来,传感器首先是一个测量装置,即是以测量为目的的。发电机为人类提供电能时不是传感器,但为了测定调速系统的转速时,它就是传感器了。其次传感器必须能在规定条件下感受外界信息,外界信息一般是指非电量,它不仅限于物理量而且包含化学量和生物的感觉信息。最后传感器能将感受到的外界信息转换成与之有确定关系的电信息。

二、传感器的分类

传感器可从不同的方面进行分类。

按能量变换的功能可分为两大类:物理传感器(包括温度传感器、压力传感器、光电传感器、磁传感器、霍尔传感器、压电传感器、光纤传感器、流量传感器、超声波传感器、激光传感器、红外传感器等)和化学传感器(包括气体传感器、湿度传感器、离子传感器等)。

按工作原理可分为物性型传感器和结构型传感器。物性型传感器是利用一些材料的物理特性的变化来反映外界的刺激。物性传感器又称为固体传感器。它具有体积小、反应速度快、寿命长等优点,目前利用半导体大规模集成电路技术,将敏感器件与外围电路集成在一起,构成所谓集成传感器,具有很大的发展前途。结构型传感器是利用弹性管、双金属片、电感、电容等结构元件进行测量。

按对信号的检测转换过程可分为直接转换型传感器和间接转换型传感器。例如光敏三极管、热敏电阻等直接把光和热的变化转换成电信号输出,属于直接转换型传感器。间接转换型传感器是先将外界刺激转换为别的现象,然后再转换成电信号,如应变式压力传感器等。

第二节 传感器的重要性

从生产技术的角度看,人类社会已经或正在经历着手工化→机械化→自动化→信息化→……的发展历程。在这发展历程中的每一个历史时代,都有其代表性的生产方式作为标志,如图 1-3 所示。

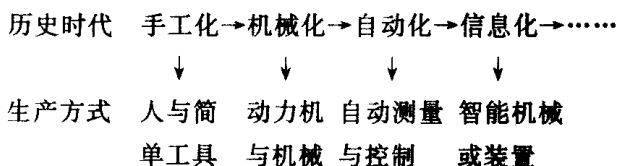


图 1-3 人类社会发展的生产方式

而每一种生产方式,又要以相应的科学技术水平作支柱。200 多年前,以蒸气机广泛使用为标志的第一次产业革命结束了人们笨重的体力劳动。到 19 世纪中叶,随着电气技术的发展和电动机的广泛使用,使社会生产进入了电气化时代。20 世纪初,随着科学技术的发展和控制理论的创立,尤其是电子技术的广泛应用,以信息检测和系统控制为基础的生产方式将人类社会推进到自动化时期。本世纪 50 年代,电子计算机已开始崭露头角,进入生产和管理领域;60 年代初微电子技术的兴起,为人类社会过渡到信息化社会奠定了坚实的基础。第四次产业革命最主要的特征之一是“智能机器”进入生产领域。这场席卷全球的技术大革命是以计算机,特别是微型机和微电子技术广泛应用为主要标志的。随着技术革命的蓬勃展开,人类社会将由工业社会过渡到高度发展的信息社会。而能感知各种信息,并能使感知信息以电信号进行传输的传感器,必将在这场人类社会的伟大转折中起到重大的促进作用。

随着信息革命的不断深入,传感器的使用数量越来越大,应用领域越来越广,一切现代化的仪器设备几乎都离不开传感器。从广义上讲,传感器是系统之间实现信息交流的“接口”,它为系统提供着赖以进行处理和决策所必须的信息,它是高度自动化系统乃至现代尖端技术必不可少的关键组成部分。

仪器仪表是科学研究和工业技术的“耳目”。在基础科学和尖端技术的研究中,大到上千光年的茫茫宇宙,小到 10^{-13}cm 的粒子世界;长到数十亿年的天体演化,短到 10^{-24}s 的瞬间反应;高到 $5\times 10^4\sim 10^8\text{℃}$ 的超高温,或 $3\times 10^8\text{Pa}$ 的超高压,低到 0.01K 的超低温,或 10^{-13}Pa 的超真空;强到 25T 以上的超强磁场,弱到 10^{-11}T 的超弱磁场……,要测量如此极端巨微的信息,单靠人的感官或一般电子设备远已无能为力,必须借助于配备有相应传感器的高精度测试仪器或大型测试系统才能奏效。因此,某些传感器的发展,是一些边缘科学研究和高、新技术开发的先驱。

在工业与国防领域,传感器更有它的用武之地。高度自动化的工厂、设备、装置或系统,可以说是传感器的大集合地。例如:各种自动化生产线、计算机集成制造系统、几十万千瓦的大型发电机组、无人驾驶的自动化汽车、多功能武器攻击指挥系统、导弹、卫星等等,均需要配置数以千计的传感器,用以检测各种各样的工况参数,以达到运行监控的目的。

在铁路运输领域,传感器同样起着不可替代的作用。在通信信号、机车车辆、铁路建筑、运输管理、旅客服务等部门,都有各种各样的传感器在为铁路运输的安全、高效贡献着自己的力量。例如,在由我国自行研制的架桥机计算机监控系统中,用压力、风速、平衡、光电开关、接近开关、旋转编码器等传感器来监测系统工作所需要的各种变量,最终完成保障施工安全,提高施工效率的目的。

当传感器技术在工业自动化、交通运输、军事国防、宇宙开发等工程与尖端科学领域广泛应用的同时,它正以自己的巨大潜力,向着与人们生活密切相关的方面渗透,生物工程、医疗卫生、环境保护、安全防范、家用电器等方面的传感器已层出不穷,并在日新月异地发展。

可见,从茫茫太空,到浩瀚海洋;从各种复杂的工程系统,到日常生活的衣食住行,几乎每一个现代化项目,都离不开各种各样的传感器。可以毫不夸张地说,未来的社会,将是充满传感器的世界!

第三节 传感器的发展

传感器的发展应包括社会对传感器需求的新动向和传感器新技术的发展趋势两方面。

一、社会对传感器需求的新动向

社会需求是传感器技术发展的强大动力。随着现代化科学技术,特别是大规模集成电路技术的飞速发展和电脑的普及,传感器在新技术革命中的地位和作用将更为突出,一般竞相开发和应用传感器的热潮已在世界范围内兴起。这主要基于如下原因:

1. “电五感”的发展赶不上“电脑”的发展,这已成为微型计算机进一步开发和应用的一大障碍。

2. 许多有竞争力的新产品开发和卓有成效的技术改造,都离不开新型传感器的开发和应用。

3. 传感器的应用直接带来了明显的经济效益和社会效益。

4. 传感器普及于社会各个领域,将造成良好的销售前景。

1990 年全世界传感器市场总销售额约为 60 亿美元,且以 7% 的年增长率稳定增长。市场结构以投资类产品为主,约占整个传感器市场的 85%,家用电器等消费类产品占 13%~15%。投资类产品中机器制造业和仪器仪表的比重较大,分别为 18% 和 12%,作为例子,表 1-1 给出了日本传感器市场的结构。

表 1-1 传感器市场结构

应用领域	信息处理与通信	科学仪器仪表	电力与能源	机械制造设备	家用电器	汽车	运输	空间开发	环保气象安全	资源与海洋开发	医疗卫生	农林渔业	土木建筑与工程	商业金融	其它
百分比	8	11.7	5.3	18.1	13.9	7.3	1.6	2.7	10	1.4	11	0.7	0.7	0.3	7.3

二、传感器新技术的发展趋势

目前的传感器,无论在数量上、质量上和功能上,都还远远不能适应社会多方面发展的需要。因而,人们在充分利用先进的电子技术条件,研究和采用合适的外部电路以及最大限度地提高现有传感器的性能价格比的同时,正在寻求传感器技术发展的新途径。

1. 开发新型传感器

利用物理现象、化学反应和生物效应设计制作各种用途的传感器,这是传感器技术的重要基础工作。因此,发现和应用新的现象、反应和效应,其意义极为深远。例如,日本夏普公司利用超导技术研制成功高温超导磁传感器。该传感器是在稳定的氧化钇上制作 $5\mu\text{m}$ 厚的 YBCO 薄膜,面积 $(5 \times 20)\text{mm}^2$,四个接点采用钛金属。这种超导材料在 80K 时呈全超导状态。超导磁传感器的出现是传感器技术的重大突破,其灵敏度比霍尔器件高,仅低于超导量子干涉器件,而其制造工艺比超导量子干涉器件的简单,可用于磁成像技术。

传感器材料是传感器技术的重要基础。随着物理学和材料科学的进步,人们已有可能自由地控制能制造出来的材料成分,从而设计制造出用于各种传感器的材料。当今,以硅材料为主的半导体传感器材料已成熟,人们设计制造的陶瓷传感器材料可用于高温,从而弥补了半导体传感器材料上限工作温度低的缺点。目前,陶瓷和有机传感器材料的研究受到国内外学者的高度重视。

2. 传感器的集成化和多功能化

以前的传感器大多数都是分立型的,即敏感元件与放大电路(或测量电路)分开。随着半导体技术的发展,现在已经把敏感元件与信号处理以及电源部分制作在同一基片上,从而使检测及信号处理一体化。这类传感器便于成批生产,尺寸可以做得很小。它是利用某些固体材料的物理性变化(如机械特性、电特性、磁特性、光特性、化学特性等)来实现信息直接变换。与一般传感器相比,它具有结构简单、重量轻、体积小、响应速度快、稳定性好等特点。例如

霍尔元件连同放大、激励输出电路做在一个硅片上,用以制做无接触键。这就是传感器的集成化。

为了使传感器进一步简化,现在已经出现了多功能传感器,使一种传感器可以测量多种参数或具有多种功能。

3. 传感器技术向智能化进军

“电五感”与“电脑”的结合,就是传感器的智能化。智能化传感器不仅具有信号检测、功能转换,同时还具有记忆、存储、解析、统计处理及自诊断、自校准、自适应等功能。如进一步将传感器与微型计算机的这些功能集成于同一芯片上,就成为智能传感器。

4. 研究生物感官,开发仿生传感器

大自然是生物传感器的优秀设计师。它通过漫长的岁月,不仅造就了多种感官于一身的人类本身,而且还设计了许许多多功能奇特、性能高超的生物传感器。例如狗的嗅觉(灵敏阈为人的 10^6 倍);鸟的视觉(视力为人的 $8\sim 50$ 倍);蝙蝠、飞蛾、海豚的听觉(主动型生物雷达——超声波传感器);蛇的接近觉(分辨力达 0.001°C 的红外测温传感器)等等。这些动物的感官性能,是当今传感器技术所望尘莫及的。研究它们的机理,开发仿生传感器,也是引人注目的方向。

第二章 温度传感器

温度传感器是利用金属、半导体材料的热敏特性及 PN 结的正向压降随温度变化的缺陷而制成的。温度传感器在各种传感器中是应用最广泛的一种,而且随着应用范围的不断扩大,人们对温度传感器的要求日益增高。

温度传感器从使用上大致上可分为接触型和非接触型两类。前者是直接接触被测物体;后者是把传感器放在与被测物体有一定距离的地方,检测从被测物体放射出的红外线,从而达到测温的目的。

在接触型温度传感器中,比较常用的有热电偶、热电阻和集成温度传感器。非接触型温度传感器最常用的是红外温度传感器。

第一节 热 电 偶

热电偶被誉为温度测量的“常规武器”,常与显示或控制调节仪表配套,用以直接测量、控制和调节各种 $-271^{\circ}\text{C} \sim +2800^{\circ}\text{C}$ 温度范围的气体、液体、蒸汽等介质及固体表面的温度。

一、工作原理

两种不同材料的导体 A 与 B,按图 2-1 所示的组合在一起,如果两结点的温度不同,则在回路中就会有电势产生,其电势(电流)的大小与两导体的性质和结点的温度有关。这种现象称为热电势效应。

热电偶是根据热电势效应的原理制成的。用两根不同材料的金属导线一端焊接在一起,焊接端称为工作端或热端,未焊接端称为自由端或冷端,两根导线称为电极。使用时将工作端置于待测温

度场(或介质)中,自由端接入仪表以测其电势,并使其温度恒定(如置于冰水混合液体中保持 0°C)。热电偶产生的电势称为热电势。进一步的分析表明,热电势由两种导体的接触电势和单一导体的温差电势所组成。

1. 两种导体的接触电势

假设金属 A、B 的自由电子密度分别为 n_A 和 n_B , 且 $n_A > n_B$ 。当两种金属相接触时,将产生自由电子的扩散现象,如图 2-2 所示。

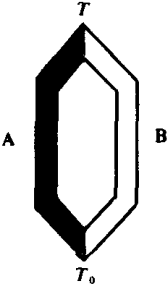


图 2-1 热电效应

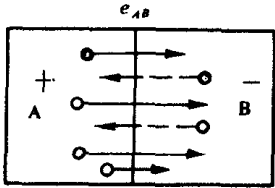


图 2-2 两种导体的接触电势

在同一瞬间,由 A 扩散到 B 中去的电子比由 B 扩散到 A 的多,从而使金属 A 失去电子带正电;金属 B 因得到电子带负电,在接触面形成电场。此电场阻止电子进一步扩散,达到动态平衡时,在 A、B 之间形成稳定的电位差,即接触电势。其大小由下式表示:

$$e_{AB}(T) = (KT/q) \ln(n_A/n_B) \quad (2-1)$$

式中 $e_{AB}(T)$ ——A、B 两金属在温度 T 时的接触电势;

k ——波尔兹曼常数;

q ——电子电荷。

由 A、B 两导体构成的闭合回路,一端温度为 T ,另一端温度为 T_0 。时,在 T_0 结点产生的接触电势同样可表示为

$$e_{AB}(T_0) = (KT_0/q) \ln(n_A/n_B) \quad (2-2)$$

因此,在闭合回路中,总的接触电势为

$$e_{AB}(T, T_o) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_o) \\ = (K(T - T_o)/q) \ln(n_A/n_B) \quad (2-3)$$

如图 2-3 所示。

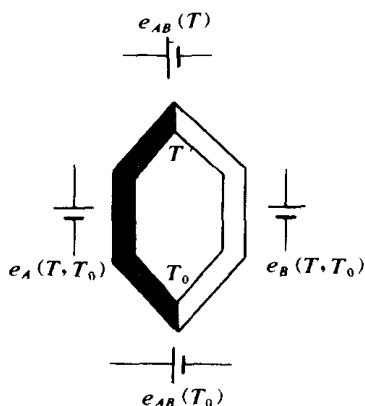


图 2-3 接触电势示意图

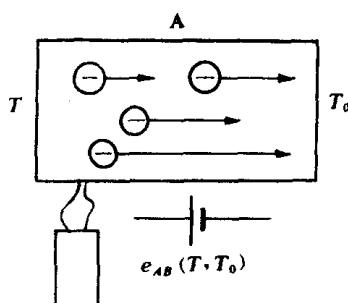


图 2-4 单一导体的温差电势

2. 单一导体的温差电势

对于单一导体,如果两端温度分别为 T 和 T_o ,且 $T > T_o$,如图 2-4 所示。导体中的自由电子,在高温端的具有较大的动能,因而向低温端扩散;高温端因失去了自由电子带正电,低温端获得了自由电子带负电,即在导体两端产生了电势,这个电势称为单一导体的温差电势。

设导体 A 达动态平衡时的温差电势为 $e_A(T, T_o)$,导体 B 的温差电势为 $e_B(T, T_o)$ 。由 A, B 两导体组成的闭合电路总温差电势为

$$e'_{AB}(T, T_o) = \int_{T_o}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \quad (2-4)$$

式中 σ_A, σ_B ——导体 A, B 的汤姆逊系数。

由式(2-3)和(2-4)可得热电偶总的热电势为

$$E_{AB}(T, T_o) = e_{AB}(T, T_o) - e'_{AB}(T, T_o) \\ = (K(T - T_o)/q) \ln(n_A/n_B) + \int_{T_o}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \quad (2-5)$$

综上所述,可得如下结论:

(1)同种导体构成的热电偶,即便 $T \neq T_0$, 闭合回路中也不会产生热电势。因此,作为热电偶,必须采用两种不同的导体做热电极。

(2)热电偶所产生的热电势大小,只决定于热电极材料的成分和两结点温度,与热电极的长度,直径和接触面的形状,大小无关。当 $T = T_0$ 时,热电势为零。

(3)热电偶两电极材料成分确定后,热电势大小只由两结点温度决定,与电极中间温度无关。若自由端温度 T_0 保持一定,由式(2-5)可知,热电偶的热电势仅是测量端温度 T 的单值函数。即

$$E_{AB}(T, T_0) = \varphi(T) \quad (2-6)$$

测出热电势大小,就间接知道了测量端温度。这就是热电偶为什么能用于测温的道理。

二、热电偶的种类和结构

热电偶的种类很多,按照构成热电偶的材料,有廉金属、贵金属、难熔金属和非金属四大类。

廉金属中有:铁—康铜、铜—康铜、镍铬—康铜、镍铬—镍硅(镍铝)等。

贵金属中有:铂铑₁₀—铂、铂铑₃₀—铂铑₆、以及铂铑系、铱铑系、铂铱系、铱铑系等。

难熔金属中有:钨钼系、钨铼系、铱钨系和铱钛系等。

非金属中有:石墨—碳化物、二碳化钨—二碳化钼等。

按照用途和结构分为普通工业用和专用两类。

普通工业用热电偶分为直形、角形、锥形(其中包括无固定装置、螺纹固定装置和法兰固定装置等品种)。

专用热电偶分为铠装热电偶(缆式热电偶),薄膜热电偶等。

1. 普通工业用热电偶

图 2-5 所示是直形无固定装置普通工业用热电偶结构示意图