

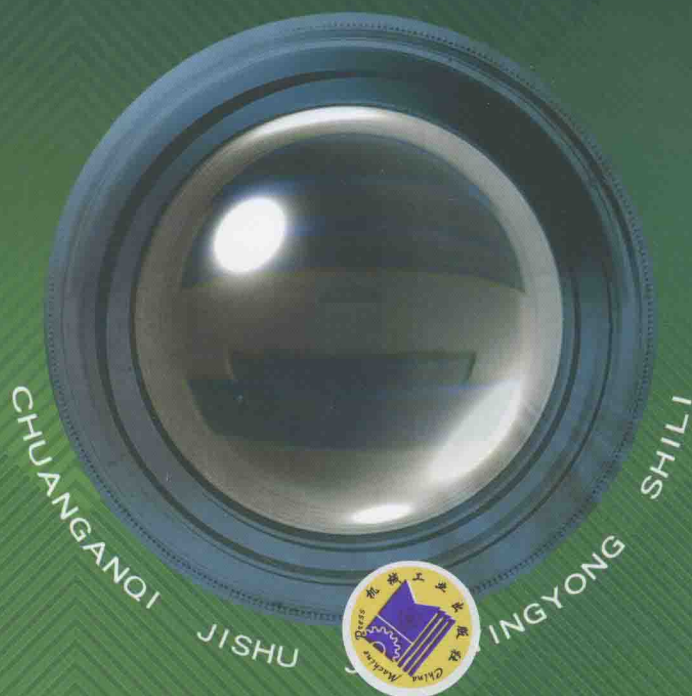
传感器技术

及其应用实例



王卫兵 张宏 郭文兰 编著

第2版



传感器技术及其应用实例

第 2 版

王卫兵 张宏 郭文兰 编著



机械工业出版社

本书详细介绍了常见传感器的工作原理和基本特性,并针对每一类传感器给出了具体的应用实例。同时介绍了传感器应用中经常遇到的信号处理、线性化、与微处理器的连接以及抗干扰等实用技术,对新兴的传感器网络的系统构成、工作原理及应用实例也进行了详细介绍。全书内容共12章,其中第1~9章主要以测量对象种类为主线,依次全面系统地介绍了温度、湿度、红外、超声波、气敏、磁敏、光电、压电及压力等各类传感器的原理、结构、性能指标及其应用电路的设计;第10章介绍了传感器应用技术;第11章介绍了传感器网络的系统构成和工作原理,并给出了详细的应用实例;第12章结合通用传感器开发实验平台的实际案例,详细介绍了平台的设计、开发过程,进一步强化了实用的技术细节,增强了本书的实用性。

本书可供从事与传感器技术相关的研究开发、生产与应用的工程技术人员阅读,还可作为仪器仪表、工业自动化、自动控制、计算机及电子信息等专业的大学本专科学学生和研究生的教材参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器技术及其应用实例/王卫兵,张宏,郭文兰编著.—2版.—北京:机械工业出版社,2015.10

ISBN 978-7-111-51826-6

I. ①传… II. ①王… ②张… ③郭… III. ①传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第245214号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张沪光 责任编辑:张沪光 责任校对:刘志文

封面设计:陈沛 责任印制:乔宇

北京富生印刷厂印刷

2016年1月第2版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·434千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-51826-6

定价:49.90元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

随着电子技术特别是计算机技术的发展,当今的社会已处于信息化社会的兴盛时期。作为信息化社会的每一个成员,人们时刻都在进行着信息的产生、采集、传输及处理的活动中,作为获取信息的手段——传感器技术得到了长足的进步,其应用领域越来越广泛,对其要求越来越高,需求越来越迫切。传感器技术已成为衡量一个国家科学技术发展水平的重要标志之一。因此,了解并掌握各类传感器的基本结构、工作原理及特性是非常重要的。

一方面,由于传感器能将各种物理量、化学量和生物量等信号转变为电信号,人们可以利用计算机实现自动测量、信息处理和自动控制;另一方面,实用中的传感器都不同程度地存在温漂和非线性等影响因素。因此,不仅必须掌握各类传感器的结构、原理及其性能指标,还必须懂得传感器经过适当的接口电路调整才能满足信号的处理、显示和控制的要求。只有通过对传感器的原理和传感器应用实例的分析了解,才能将传感器和信息通信与信息处理结合起来,适应传感器的生产、研制、开发和应用。由于传感器的被测信号来自于各个应用领域,每个领域都为了改革生产力、提高工效和时效,因此各自都在开发研制适合应用的传感器,于是种类繁多的新型传感器及传感器系统不断涌现。

为了满足当前传感器技术学习和应用的需求,我们本着新颖、实用、广泛和典型的原则编写了本书。书中系统地将传感器的基础知识与其应用有机结合,在详细讲述应用面较宽的传感器原理(如温度传感器、湿度传感器、红外传感器、超声波传感器、气敏传感器、磁敏传感器、光电传感器、压电传感器以及电阻应变传感器等)及其实际应用电路的基础上,对每一类传感器都给出了详细的应用实例,还针对每一种类型介绍了一些新型传感器以开阔视野、扩大知识面。此外本书还针对传感器应用中的一些共性问题,如传感器的供电,信号滤波、放大,线性化矫正,传感器与微处理器的连接、传感器网络以及传感器系统抗干扰技术等做了详细和全面的介绍。

全书内容共12章,其中第1~9章主要以测量对象种类为主线,依次全面系统地论述了温度、湿度、红外、超声波、气敏、磁敏、光电、压电及压力等各类传感器的原理、结构、性能指标及其应用电路的设计;第10章介绍了传感器的应用技术,包括传感器的供电电源、放大电路、滤波器电路、同步整流、线性化、抗干扰技术以及传感器与微处理器的结合等;第11章详细介绍了无线传感器网络,内容包括无线传感器网络介绍、基本技术原理、无线传感器网络开发环境及传感器网络应用实例;第12章结合通用传感器开发实验平台的实际案例,详细介绍了平台的设计、开发过程,进一步强化了实用的技术细节,增强了本书的实用性。

全书由王卫兵、张宏、郭文兰编著。本书的第1~4、9、10章由王卫兵编写;第6~8章由郭文兰编写;第5、11、12章由张宏编写;全书由孙宏高级工程师主审。徐松源教授和高峻山教授参与和组织了本书的编写工作,并提出了许多指导意见,在此表示

感谢。

本书内容丰富、实用性强，在注重理论性和系统性的同时，又突出了解决实际问题的实用性，适合作为电子信息、物理、仪器仪表、工业自动化、自动控制及机电类专业的大学本科高年级学生和研究生的教材，也可供从事传感器技术的研究与开发、生产与应用的科技工作者和工程技术人员参考。

由于本书内容涉及物理学、化学、生物学和电子学等多学科的知识，加之编著者水平有限，难免有不妥和错误之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2015 年 7 月

目 录

前言

第1章 温度传感器	1
1.1 温度传感器的类型	1
1.2 电阻式温度传感器	2
1.2.1 金属测温电阻器	2
1.2.2 半导体热敏电阻	5
1.3 热电偶	8
1.3.1 热电偶的工作原理	8
1.3.2 热电偶的应用技术	10
1.3.3 热电偶应用实例	14
1.4 集成温度传感器	17
1.4.1 AD590 及其应用	17
1.4.2 LM35 及其应用	20
1.4.3 LM335/LM336 及其应用	23
1.4.4 其他集成温度传感器及其应用	25
1.5 其他类型温度传感器	29
1.5.1 晶体振荡温度传感器	29
1.5.2 弹性表面波温度传感器	30
1.5.3 光纤温度传感器	33
第2章 湿度传感器	37
2.1 概述	37
2.1.1 湿度及其表示	37
2.1.2 湿度传感器的类型	37
2.2 湿度传感器的工作原理	38
2.2.1 湿敏电阻传感器	38
2.2.2 湿敏电容传感器	39
2.2.3 电解质式湿度传感器	39
2.3 湿度传感器的应用技术	40
2.3.1 湿度传感器应用电路设计要点	40
2.3.2 湿度传感器应用电路框图	41
2.4 湿度传感器的应用实例	42
第3章 红外传感器	46
3.1 红外传感器的原理	46
3.1.1 红外发光二极管(LED)和PIN 光敏二极管	46
3.1.2 热电堆	47
3.1.3 热释电传感器	51
3.2 红外传感器的基本电路	53

3.3 热释电传感器的应用实例	57
第4章 超声波传感器	61
4.1 超声波传感器的原理与特性	61
4.1.1 超声波传感器的原理	61
4.1.2 超声波传感器的特性	63
4.2 超声波传感器的检测方式	64
4.3 常用超声波传感器	66
4.3.1 超声波流量传感器	66
4.3.2 超声位移传感器	66
4.3.3 超声温度传感器	67
4.4 超声波传感器的应用实例	69
第5章 气敏传感器	76
5.1 气敏传感器的类型及必备条件	76
5.1.1 气敏传感器的类型	76
5.1.2 气敏传感器的必备条件	77
5.2 气敏传感器的原理	77
5.2.1 半导体气敏传感器	77
5.2.2 固体电解质气敏传感器	79
5.2.3 红外线吸收式气敏传感器	79
5.3 气敏传感器的应用实例	81
第6章 磁敏传感器	84
6.1 霍尔传感器	84
6.1.1 霍尔元件的原理及特性	84
6.1.2 霍尔元件的基本电路	85
6.1.3 霍尔集成元件	87
6.2 磁阻元件	89
6.2.1 磁阻元件的结构与特性	89
6.2.2 磁阻元件的基本电路	90
6.3 磁敏二极管和磁敏晶体管	91
6.3.1 磁敏二极管的原理与特性	91
6.3.2 磁敏晶体管的原理与特性	93
6.4 其他磁敏传感器	95
6.4.1 舌簧触点元件	95
6.4.2 差动变压器	96
6.4.3 涡流式传感器	97
6.5 磁敏传感器的应用实例	98
6.5.1 霍尔元件的应用	98
6.5.2 磁阻元件的应用	102

6.5.3 磁敏二极管和磁敏晶体管的 应用	103	8.4.5 压电传感器的应用实例	146
第7章 光电传感器	105	第9章 电阻应变式传感器	149
7.1 概述	105	9.1 应变片的结构与类型	149
7.2 光敏二极管	106	9.2 电阻应变式传感器的原理	151
7.2.1 光敏二极管的原理与类型	106	9.3 应变式传感器的测量电路	153
7.2.2 光敏二极管的特征及参数	107	9.3.1 电桥电路	153
7.2.3 光敏二极管的基本应用电路	107	9.3.2 电桥的线路补偿	156
7.3 光敏晶体管	108	9.3.3 应变式传感器性能分析	157
7.3.1 光敏晶体管的结构和原理	108	9.4 应变式传感器的应用设计实例	160
7.3.2 光敏晶体管的特性	109	9.4.1 各种弹性元件的特性分析	160
7.3.3 光敏晶体管的应用	111	9.4.2 应变式传感器的设计	163
7.4 光敏电阻	113	9.4.3 应变式传感器的标定	164
7.4.1 光敏电阻的结构和原理	113	9.4.4 供桥电压的选择	165
7.4.2 光敏电阻的特性和参数	113	9.4.5 应变式传感器的电路补偿	165
7.4.3 光敏电阻的应用	115	9.4.6 称重电子秤设计实例	167
7.5 光电位置检测传感器 (PSD)	117	第10章 传感器的应用技术	179
7.5.1 PSD的结构和原理	117	10.1 传感器的供电电源	179
7.5.2 PSD的特性	119	10.1.1 电池	179
7.5.3 PSD的应用	119	10.1.2 直流稳压电源	179
7.6 太阳电池	123	10.1.3 直流电压变换器	180
7.6.1 太阳电池的原理与特征	123	10.1.4 偏置电路	180
7.6.2 太阳电池的特性	123	10.2 传感器的放大电路	181
7.6.3 太阳电池应用实例	127	10.2.1 电流放大电路	181
7.7 色敏传感器	128	10.2.2 电流-电压变换电路	182
7.7.1 色敏传感器的原理	128	10.2.3 反相放大电路	182
7.7.2 色敏传感器的应用	129	10.2.4 同相放大电路	182
第8章 压电传感器	130	10.2.5 差动放大电路	182
8.1 压电效应	130	10.2.6 低漂移放大电路	183
8.1.1 石英晶体压电特性	130	10.3 滤波器电路	184
8.1.2 压电常数	132	10.3.1 滤波器的种类	184
8.1.3 石英晶片的应变形式	134	10.3.2 1次和2次滤波器	184
8.2 压电材料	135	10.4 同步整流	187
8.2.1 压电晶体	135	10.4.1 同步整流的主要用途	187
8.2.2 压电陶瓷	136	10.4.2 同步整流的方法	187
8.2.3 新型压电材料	137	10.5 线性化	188
8.3 等效电路与测量电路	138	10.5.1 电阻补偿法	188
8.3.1 等效电路	138	10.5.2 折线近似法	189
8.3.2 测量电路	139	10.5.3 幂级数近似法	189
8.4 压电传感器的应用	141	10.5.4 对数变换方式	191
8.4.1 压电传感器中压电片的连接	142	10.5.5 正反馈法	192
8.4.2 压电式力传感器	142	10.5.6 查表法	193
8.4.3 压电式压力传感器	143	10.5.7 软件和硬件结合的方法	193
8.4.4 压电式加速度传感器	144	10.6 传感器与微处理器的结合	194
		10.6.1 传感器输出信号的类型	194

10.6.2 传感器输出的模拟信号的处理	194	实例	239
10.6.3 传感器与计算机的接口	199	12.1 通用传感器实验平台概述	239
10.6.4 传感器中的数据处理	201	12.2 STC12C5A60S2 单片机简介	239
10.7 抗干扰技术	204	12.2.1 STC12 单片机 I/O 口结构	240
第 11 章 无线传感器网络	209	12.2.2 STC12C5A60S2 系列单片机的 A-D 转换器	241
11.1 无线传感器网络概况	209	12.2.3 STC12C5A60S2 串口通信	243
11.1.1 无线传感器网络的发展历程	209	12.3 通用传感器实验平台硬件电路	243
11.1.2 无线传感器网络特点	209	12.3.1 STC 单片机开发板	244
11.1.3 无线传感器网络体系结构	210	12.3.2 LED 数码管显示、键盘电路、LCD 显示模块	247
11.1.4 无线传感器网络的应用	211	12.3.3 DS18B20 温度传感器	250
11.2 ZigBee 无线传感器网络	211	12.3.4 GaAs 光强监测传感器模块	253
11.2.1 ZigBee 网络拓扑结构	211	12.3.5 MQ-5 烟雾传感器模块	254
11.2.2 ZigBee 网络构建原理	212	12.3.6 RFID 模块、时钟模块 DS1302	256
11.2.3 ZigBee 基本技术原理	215	12.3.7 U 盘、SD/TF 卡接口	259
11.2.4 ZigBee 协议栈 Z-Stack	217	12.3.8 VS1003 音频解码模块、音频信号采样	260
11.3 ZigBee 无线传感器网络开发环境	221	12.4 软件开发	262
11.3.1 ZigBee 协议栈 Z-Stack 开发环境配置	221	12.4.1 Keil 开发环境	262
11.3.2 建立 ZigBee 新工程	222	12.4.2 LED 数码管显示	266
11.3.3 建立和添加 ZigBee 应用程序	224	12.4.3 A-D 采样程序、键盘程序	267
11.3.4 工程配置	227	12.4.4 STC 单片机程序下载 ISP	268
11.3.5 程序的编译和下载	228	参考文献	273
11.4 ZigBee 无线传感器网络的应用实例	228		
第 12 章 通用传感器实验平台开发			

第 1 章 温度传感器

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。

1.1 温度传感器的类型

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，测温敏感元件不与被测介质接触，通过辐射和对流实现热交换，达到测量的目的。各种温度检测方法各有自己的特点和各自的测温范围，常用测温方法、类型及特点见表 1-1。

表 1-1 常用测温方法、类型及特点

测温方式	温度计或传感器类型		测量范围/℃	误差(%)	特 点
接 触 式	热膨胀式	汞(水银)	-50~650	0.1~1	简单方便,易损坏(汞污染)
		双金属	0~300	0.1~1	结构紧凑、牢固可靠
		压力	液体	1	耐振、坚固、价格低廉
			气体		
	热电偶	铂铑-铂	0~1600	0.2~0.5	种类多、适应性强、结构简单、经济方便、应用广泛。需注意寄生热电动势及动圈式仪表电阻对测量结果的影响
		其他	-200~1100	0.4~1.0	
	热电阻	铂	-260~600	0.1~0.3	准确度及灵敏度均较好,需注意环境温度的影响
		镍	-500~300	0.2~0.5	
非 接 触 式	辐射温度计	铜	0~180	0.1~0.3	体积小、响应快、灵敏度高、线性差,需注意环境温度影响
		热敏电阻	-50~350	0.3~0.5	
	光学高温计	热探测器	200~2000	1	非接触测温,不干扰被测温度场,响应快,测温范围大,适于测温度分布,易受外界干扰,标定困难
		热敏电阻探测器	-50~3200	1	
其 他	示温涂料	光子探测器	0~3500	1	测温范围大,经济方便,特别适于大面积连续运转零件上的测温,准确度低、人为误差大
		碘化银、二碘化汞、氯化铁、液晶等	-35~2000	<1	

迄今为止，测量温度通常都是采用间接测量的方法。即利用一些材料或元件的性能随温度而变化的特性，通过测量该性能参数，而得到被测温度的大小。用来测量温度特性的材料性能有热膨胀、电阻、热电动势、半导体 PN 结特性、磁导率、介电系数、光学特性、弹性等，其中前四种尤为成熟，应用广泛。因而，温度传感器发展很快，种类也很多。

1.2 电阻式温度传感器

热电阻式温度传感器是利用基本材料（金属或非金属）的电阻随温度变化而变化的特性，来实现温度测量的。按其材料的性质来分，可分为金属测温电阻器和半导体热敏电阻器。

1.2.1 金属测温电阻器

1. 金属热电阻类型

金属热电阻主要有铂电阻、铜电阻和镍电阻等，其中铂电阻和铜电阻最为常见。

1) 铂电阻：铂易于提纯、复制性好，在氧化性介质中，甚至高温下，其物理性质化学性质稳定，但在还原性介质中，特别是在高温下很容易被从氧化物中还原出来的蒸气弄脏，以致铂丝变脆，并改变了它的电阻与温度的关系。此外，铂是一种贵金属，价格较贵，尽管如此，从对热电阻的要求来衡量，铂在极大的程度上能满足上述要求，所以仍然是制造基准热电阻、标准热电阻和工业用热电阻的最好材料。至于它在还原性介质中不稳定的特点可用保护套管设法避免或减轻，铂热电阻温度计的使用范围是 $-200 \sim 850^{\circ}\text{C}$ ，铂热电阻和温度的关系如下：

在 $-200 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 的范围内

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100^{\circ}\text{C})t^3] \quad (1-1)$$

在 $0 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 的范围内

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (1-2)$$

式中， R_t 为温度为 t 时的阻值； R_0 为温度为 0°C 时的阻值； A 、 B 、 C 为常数， $A = 3.90802 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ， $B = -5.802 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$ ， $C = -4.27350 \times 10^{-12}/^{\circ}\text{C}^4$ 。

2) 铜电阻：由于铂是贵金属，一般在测量准确度要求不太高、测量范围不大的情况下，可以采用铜电阻来代替铂电阻，这样可以在满足准确度要求的条件下，降低成本。

在 $-50 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 范围内，铜电阻与温度的关系为

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad (1-3)$$

式中， R_t 和 R_0 分别为 t 和 0°C 时的电阻值； t 为任意温度； A 、 B 、 C 为常数， $A = 4.28899 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ， $B = -2.133 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$ ， $C = 1.233 \times 10^{-9}/^{\circ}\text{C}^3$ 。

铜容易提纯，在 $-50 \sim +150^{\circ}\text{C}$ 范围内，其物理、化学性能稳定，输出-输入特性接近线性，且价格低廉。铜电阻的缺点是电阻率较低，仅为铂电阻的 $1/6$ 左右；电阻的体积较大，热惯性也较大，当温度高于 100°C 时易氧化。因此，铜电阻只适于在温度较低和没有侵蚀性的介质中工作。

2. 热电阻的结构

热电阻主要由电阻体、绝缘套管和接线盒等组成，其结构如图 1-1a 所示。电阻体主要由电阻丝、引出线、骨架等部分组成。端面热电阻实物图如图 1-1b 所示。

1) 电阻丝：由于铂的电阻率较大，而且相对机械强度较大，通常铂丝的直径在 $(0.03 \sim 0.07 \text{ mm}) \pm 0.005 \text{ mm}$ 之间。可单层绕制，若铂丝太细，电阻体可做得小，但强度低；若铂丝粗，虽强度大，但电阻体大了，热惰性也大，成本高。由于铜的机械强度较低，电阻丝的直径需较大。一般为 $0.1 \text{ mm} \pm 0.005 \text{ mm}$ 的漆包铜线或丝包线分层绕在骨架上，并涂上绝缘漆而成。由于铜电阻的温度低，故可以重叠多层绕制，一般多用双绕法，即两根丝

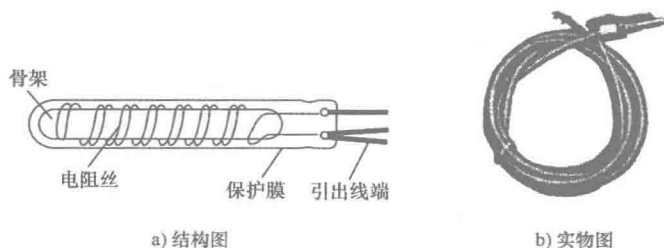


图 1-1 热电阻

平行绕制，在末端把两个头焊接起来，这样工作电流从一根热电阻丝进入，从另一根丝反向出来，形成两个电流方向相反的线圈，其磁场方向相反，产生的电感就互相抵消，故又称无感绕法。这种双绕法也有利于引线的引出。

2) 骨架：热电阻线是绕制在骨架上的，骨架是用来支持和固定电阻丝的。骨架应使用电绝缘性能好、高温下机械强度高、体膨胀系数小、物理化学性能稳定、对热电阻丝无污染的材料制造，常用的是云母、石英、陶瓷、玻璃及塑料等。

3) 引线：引线的直径应当比热电阻丝大几倍，尽量减小引线的电阻，增加引线的机械强度和连接的可靠性，对于工业用的铂热电阻，一般采用 1 mm 的银丝作为引线。对于标准的铂热电阻则可采用 0.3 mm 的铜丝作为引线。对于铜热电阻则常用 0.5 mm 的铜线。

在骨架上烧制好热电阻丝，并焊好引线之后，在其外面加上云母片进行保护，再装入外保护套管，并和接线盒或外部导线相连接，即得到热电阻传感器。

3. 热电阻主要参数

1) 热电阻分度表与分度号：在工业上，将热电阻的 R_t 值与温度 t 的对应关系列成的表格称为热电阻分度表。制成电阻的金属材料加上标称电阻值即为其分度号。例如 Cu50、Pt100 等。

2) 允许偏差：允许偏差即热电阻实际的电阻值与温度关系偏离分度表的允许范围。

3) 热响应时间：当温度发生阶跃变化时，热电阻的电阻值变化至相当于该阶跃变化的某个规定百分比所需要的时间，称为热响应时间，通常以 τ 表示。一般记录变化 50% 或 90% 的响应时间分别为 $\tau_{0.5}$ 与 $\tau_{0.9}$ 。热电阻的响应时间不仅与结构、尺寸、材质有关，还与被测介质的散热系数、比热容等因素有关。

4) 额定电流：额定电流是指在测量电阻值时，允许在元件中连续通过的最大电流，一般为 2 ~ 5 mA。限制额定电流是为了减少热电阻自热效应引起的误差，对热电阻元件都规定了额定电流。

表 1-2 和表 1-3 分别给出铂电阻和铜电阻的部分技术参数。

表 1-2 铂电阻的部分技术参数

名称	等级	分度号	测温范围/℃	允许偏差/℃
铂热电阻	A	Pt10	-200 ~ 850	$\pm (0.15 + 0.002 T)$
		Pt100		
	B	Pt10		$\pm (0.30 + 0.005 T)$
		Pt100		

表 1-3 铜电阻的部分技术参数

名称	分度号	测温范围/℃	允许偏差/℃	0℃时电阻值/Ω
铜热电阻	Cu50	-50 ~ 150	$\pm (0.30 + 0.006 T)$	50.000 ± 0.050
	Cu100			100.00 ± 0.10

注：|T| 为温度的绝对值（℃）。

4. 使用时的注意事项

工业上广泛应用金属感温电阻器作为 $-200 \sim +600^{\circ}\text{C}$ 范围的温度测量。它的特点是准确度高，适于测低温。但使用中需要注意以下两点：

1) 自热误差：在用感温电阻器测量时，电阻总要消耗一定的电功率，它同样会造成电阻值的变化，但这种变化是不希望的。使用中应尽量减少由于电阻器通电产生的自热而引起的误差。一般是限制电流，规定其值应不超过 6mA 。

2) 引线电阻的影响：用于测量的感温电阻器，总得有连接导线，但由于金属电阻器本身的电阻值很小，所以引线的电阻值及其变化就不能忽略。比如对于 50Ω 的测温电阻， 1Ω 的导线电阻将产生约 5°C 的误差，这是不能允许的。为此，测量电阻的引线通常采用三线式或二线式接法。

图 1-2 中， R_t 为热电阻， r_1 、 r_2 、 r_3 为引线电阻。在三线式连接法中，一根引线接到电源对角线上，另两根分别接到电桥相邻的两个臂。这样，引线电阻值及其变化对仪表读数的影响可以互相抵消一部分。而图 1-3 所示的二线式接法中，两根引线完全加到一个桥臂上，引线电阻值及其变化将引起电桥输出变化，造成测温误差。

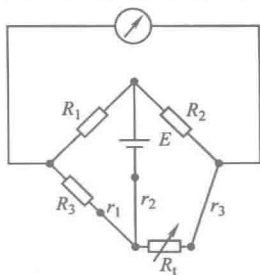


图 1-2 三线式接法

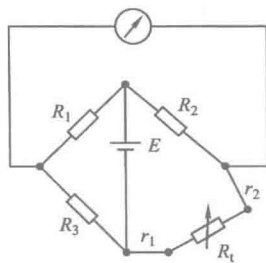


图 1-3 二线式接法

5. 热电阻应用电路

1) 三线桥式测温电路：三线桥式测温电路如图 1-4 所示。该电路测温元件选择金属热电阻，测量电路采用不平衡电桥和仪表放大器。不平衡电桥由高精度电阻 $R_1 \sim R_3$ 与铂热电阻 R_t 组成。热电阻采用三线方式连接， R_{w1} 、 R_{w2} 、 R_{w3} 是连接导线等效电阻。电源 V_c 为测量桥路提供工作电流。从图中可见，由于 R_{w1} 、 R_{w2} 的存在使得电桥桥臂发生了变化， R_{w1} 和 R_t 组成一个桥臂， R_{w2} 和 R_3 组成另一个桥臂。因为电缆线的型号和长度相同， R_{w1} 和 R_{w3} 相等，可以得到这个新桥路的输出电压表达式为

$$V_o \approx \frac{R_1 R_3 - R_2 R_t}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_t)} V_c \quad (1-4)$$

式中，已经没有引线电阻 R_{w1} 和 R_{w2} 了，可见测温电桥中铂电阻采用三线方式可以消除引线电阻的影响。电桥后的放大电路采用常用的仪表用放大器，其特点是输入阻抗高、共模抑制比高。运算放大器 A_1 和 A_2 构成差分放大， A_3 将双端输入转换成单端输出。

2) 铂电阻恒流源测温电路：图 1-5 所示为铂电阻恒流源测温电路。图中 A_1 、 V_r 、 R_t 、

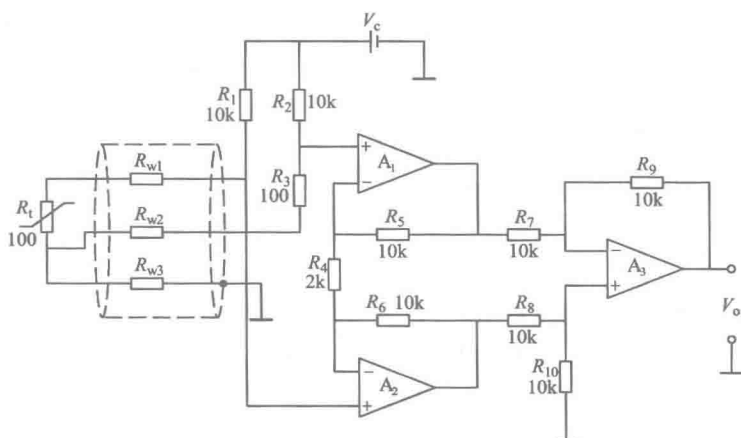


图 1-4 三线桥式测温电路

RP_1 等组成了恒流源电路, V_r 为热电阻 R_t 提供工作电流。 V_r 为 2V 的基准电压, 作为恒流源的基准。 R_t 采用标称值为 1k Ω 的铂热电阻。

通过 RP_1 将同相端电位调整为 1V, 此时流经 R_t (k Ω) 的电流是 1mA, 则 $e_1 = 1V - 1mA \times R_t$ (k Ω)。当温度在 0 $^{\circ}C$ 以上时, e_1 为负值。根据式 (1-2)

$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$, 其中 R_t 和 R_0 分别是 t 和 0 $^{\circ}C$ 时的电阻值, t 为任意温度; A 、 B 为常数, $A = 3.96847 \times 10^{-3}/^{\circ}C$, $B = -5.847 \times 10^{-7}/^{\circ}C^2$, 可知在 0 ~ 500 $^{\circ}C$ 温度变化范围内, e_1 有 3.618mV/ $^{\circ}C$ 的温度灵敏度, 它是热电偶的 50 倍以上。同时可知温度范围越大, 其温度灵敏度越低。

A_2 的作用是将 e_1 的值反相放大, 使其对应于温度 0 ~ 500 $^{\circ}C$ 范围变化, 输出电压为 0 ~ 5V, 即灵敏度为 10mV/ $^{\circ}C$ 。

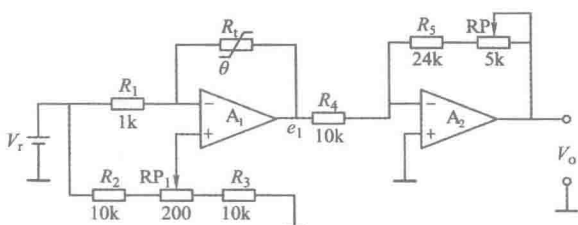


图 1-5 铂电阻恒流源测温电路

1.2.2 半导体热敏电阻

1. 热敏电阻的分类

热敏电阻是其电阻值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。常用热敏电阻的外形如图 1-6 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 1-6 常用热敏电阻的外形

1) 正温度系数 (PTC) 热敏电阻: 电阻值随温度升高而增大的热敏电阻称为正温度系数热敏电阻。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。

2) 负温度系数 (NTC) 热敏电阻: 电阻值随温度升高而下降的热敏电阻称为负温度系数热敏电阻。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。

3) 临界温度系数热敏电阻 (CTR): 该类电阻的电阻值在某特定温度范围内随温度升高而急剧降低 3~4 个数量级, 即具有很大的负温度系数。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。

2. 热敏电阻的特点

1) 灵敏度高, 热敏电阻温度系数的绝对值比金属热电阻大 10~100 倍。

2) 电阻值高, 它的标称电阻值有几欧到十几兆欧之间的不同规格。因此, 在使用热敏电阻时, 一般不必考虑引线电阻的影响。

3) 结构简单, 热敏电阻可根据使用要求加工成各种形状, 特别是能够做到小型化, 目前的珠状热敏电阻的直径仅为 0.2mm。

4) 体积小、热惯性小、响应时间短, 响应时间通常为 0.5~3s。

5) 化学稳定性好、力学性能好、价格低廉、使用寿命长。

6) 缺点是阻值与温度呈非线性关系, 且互换性差。

3. 热敏电阻的主要参数

1) 标称电阻值 R_{25} : 标称电阻值是环境温度为 25°C 时热敏电阻的阻值, 又称为冷电阻。

2) 电阻温度系数 α_t ($\%/^{\circ}\text{C}$): 电阻温度系数是指在某温度下, 热敏电阻的电阻值随温度的变化率与它的电阻值之比。 α_t 决定了热敏电阻在全部工作温度范围内的温度灵敏度。

3) 耗散常数 δ ($\text{mW}/^{\circ}\text{C}$): 耗散系数是热敏电阻器温度变化 1°C 所耗散的功率。在工作温度范围内, 当环境温度变化时, δ 值的大小与热敏电阻的结构、形状和所处介质的种类及状态有关。

4) 材料常数 B (K): 材料常数是表征负温度系数热敏电阻材料物理特性的常数。一般材料常数 B 越大, 则电阻值越大, 绝对灵敏度越高。在工作温度范围内, 材料常数的值并不是一个常数, 而是随温度的升高略有增加的。

5) 热容量 C : 热敏电阻的温度变化 1°C 时, 所需吸收或释放的能量 (单位为 $\text{J}/^{\circ}\text{C}$)。

6) 时间常数 τ : 是指温度为 T_0 的热敏电阻, 在忽略其通过电流所产生热量的作用下, 突然置于温度为 T 的介质中, 热敏电阻的温度增量达到 $\Delta T = 0.63 (T - T_0)$ 时所需的时间, 它与电容 C 和耗散系数 δ 之间的关系如下:

$$\tau = \frac{C}{\delta} \quad (1-5)$$

4. 热敏电阻的主要特性

1) 热敏电阻的电阻-温度特性: 热敏电阻的电阻-温度特性曲线如图 1-7 所示, 图中的曲线 1、2、3、4 分别为 NTC 热敏电阻、CTR、PTC 热敏电阻和铂的电阻温度特性曲线。由图可见, 热敏电阻的灵敏度优于铂电阻, 而线性度则远不如铂电阻。

从图中可以看到, 使用 CTR 组成热控制开关是十分理想的。但在温度测量中, 则主要

采用 NTC 热敏电阻，其温度特性如下所示，即

$$R_t = R_0 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \tag{1-6}$$

式中， R_t 、 R_0 分别为 T K 和 T_0 K 时的热敏电阻值； B 为热敏电阻的材料常数，其值主要取决于热敏电阻的材料。一般情况下， $B = 2000 \sim 6000$ K，在高温下使用时， B 值将增大； T 为被测温度（K）。

若定义 $\frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dT}$ 为热敏电阻的温度系数 α ，即

$$\alpha = \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dT} = \frac{1}{R_t} R_0 \left\{ \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] B \left(-\frac{1}{T^2} \right) \right\} = -\frac{B}{T^2} \tag{1-7}$$

可见， α 随温度降低而迅速增大。如 B 值为 4000K，当 $T = 293.15$ K (20℃) 时，用式 (1-7) 可求得 $\alpha = 4.7\%/^{\circ}\text{C}$ ，约为铂电阻的 12 倍，因此这种测温电阻灵敏度高。 R_0 的常用范围是几百欧到 100kΩ，所以这种测温电阻的引线电阻影响小，可以忽略。体积小也是半导体热敏电阻的又一个特点。由于有这些特点，使它非常适合于测量微弱的温度变化、温差以及温度场的分布。

2) 热敏电阻的伏安特性：热敏电阻的伏安特性表示在热敏电阻和周围介质热平衡（即加在元件上的电功率和耗散功率相等）时，加在热敏电阻两端的电压和通过热敏电阻中电流之间的关系。

图 1-8 所示为 NTC 热敏电阻在不同温度下的伏安特性曲线。

热敏电阻的型号很多，表 1-4 列出几种常用型号，供读者参考。

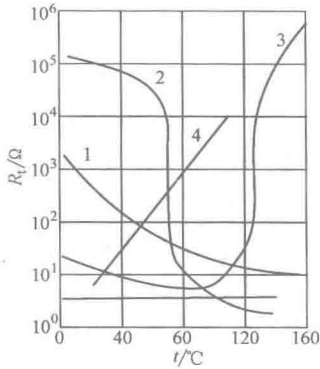


图 1-7 热敏电阻的电阻-温度特性曲线

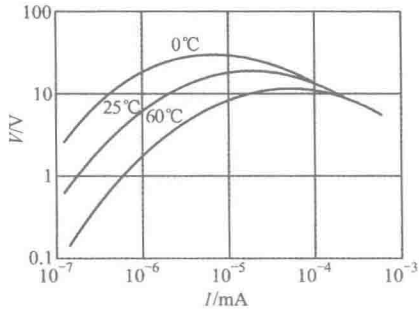


图 1-8 NTC 热敏电阻伏安特性曲线

表 1-4 常用热敏电阻型号

型号	主要用途	主要参数			外形、方式
		标称阻值/kΩ(25℃)	额定功率/W	时间常数/s	
MF-11	温度补偿	0.01 ~ 16	0.50	≤60	片状、直热
MF-13	测温、控温	0.82 ~ 300	0.25	≤85	杆状、直热
MF-16	温度补偿	10 ~ 1 000	0.50	≤115	杆状、直热
RRC2	测温、控温	6.8 ~ 1 000	0.40	≤20	杆状、直热
RRC7B	测温、控温	3 ~ 100	0.03	≤0.5	珠状、直热
RRW2	稳幅	6.8 ~ 500	0.03	≤0.5	珠状、直热

5. 热敏电阻的应用

由于热敏电阻具有许多优点，所以应用范围很广，可用于温度测量、温度控制、温度补偿、稳压稳幅、自动增益调整、气体和液体分析、火灾报警、过载保护等方面。下面介绍几种主要用法。

1) 温度测量：图 1-9 所示是热敏电阻测温原理图，测温范围为 $-50 \sim 300^{\circ}\text{C}$ ，误差小于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，图中， S_1 为工作选择开关，“0”、“1”、“2”分别为电压断开、校正、工作三个状态。工作前根据开关 S_2 选择量程，将开关 S_1 置于“1”处，调节电位计 R_p 使检流计 G

指示满刻度，然后将 S_1 置于“2”，热敏电阻被接入测量电桥进行测量。

2) 温度补偿：仪表中通常用的一些零件，多数是用金属丝制成的，例如线圈、线绕电阻等，金属一般具有正温度系数，采用负温度系数热敏电阻进行补偿，可以抵消由于温度变化所产生的误差。实际应用时，将负温度系数热敏电阻与锰铜丝电阻并联后再与被补偿元件串联，如图 1-10 所示。

3) 温度控制：用热敏电阻与一个电阻相串联，并加上恒定的电压，当周围介质温度升到某一数值时，电路中的电流可以由十分之几毫安突变为几十毫安。因此可以用继电器的绕组代替不随温度变化的电阻。当温度升高到一定值时，继电器动作，继电器的动作反映了温度的大小，所以热敏电阻可用作温度控制。

4) 过热保护：过热保护分为直接保护和间接保护。对小电流场合，可把热敏电阻直接串入负载中，防止过热损坏以保护器件。对大电流场合，可通过继电器、晶体管电路等保护。不论哪种情况，热敏电阻都与被保护器件紧密地结合在一起，充分热交换，一旦过热，就起保护作用。图 1-11 为几种过热保护实例。

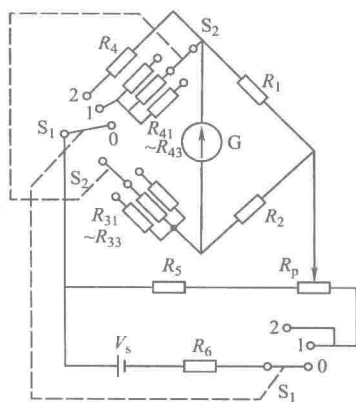


图 1-9 热敏电阻测温原理图

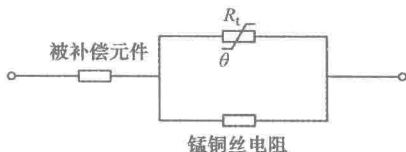


图 1-10 仪表中温度补偿

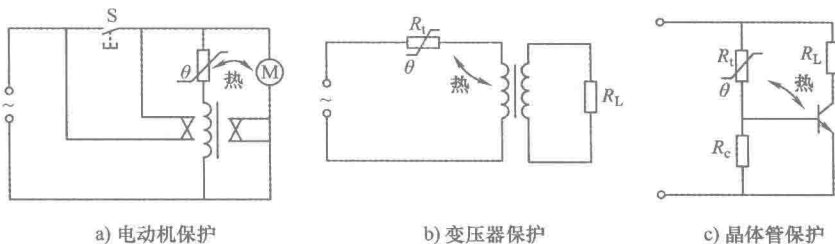


图 1-11 几种过热保护实例

1.3 热电偶

1.3.1 热电偶的工作原理

热电偶是目前应用广泛、简单的温度传感器，也是有源热电传感器的主要类型，它在很多方面具备了理想温度传感器的条件。

1. 热电偶的特点

- 1) 热电偶是将温度变换为电量进行检测，因此方便记录与控制。
- 2) 价廉而且容易买到，测量方法简便而且准确度高，测量时间也比较短。
- 3) 测量温度范围较宽，可以根据灵敏度与寿命选用热电偶的种类与线径。
- 4) 可以测量较小物体的温度以及狭窄场所处的温度。

5) 被测物体与计量仪器间的距离可较远，途中即使局部发生温度变化，对测量值几乎没有影响。

2. 热电偶的工作原理

热电偶是利用物理学中的塞贝克效应制成的温敏传感器。当两种不同的导体 A 和 B 组成闭合回路时,若两端结点温度不同(分别为 T_0 和 T),则回路中产生电流,相应的电动势称为热电动势,这种装置称为热电偶,如图 1-12 所示。热电动势是由接触电动势和温差电动势两部分组成,其大小和两端点的温差有关,还和材料性质有关。实验和理论都表明,在 A、B 间接入第三种材料 C,只要结点 2、3 温度相同,则和 2、3 直接连接时的热电动势一样。这一点很重要,它为热电偶测量时接测量引线带来方便。这种由两种不同导体组成的热电偶的热电动势一般情况和两端点温度 T 、 T_0 都有关。若使 T_0 为给定的恒定温度,如取为 0°C ,则热电动势仅为 T 一端(称为测量端)温度 T 的单值函数。

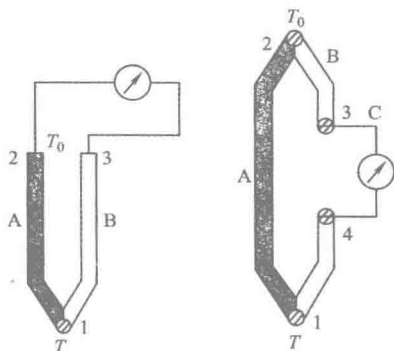


图 1-12 热电偶结构图

$$E_{AB} = (T, T_0) = e_{AB}(T) - f(T_0) = f(T) - 0 = \Phi(T) \quad (1-8)$$

显然,利用热电偶这一特性做成测温计可用于测温,但要求材料的热性能要稳定、电阻率小、电导率高、热电效应强、复制性好。

3. 常用热电偶

常用的热电偶有铂铑-铂热电偶、镍铬-镍铝(镍铬-镍硅)热电偶和铜-康铜热电偶。

铂铑-铂热电偶用于较高温度的测量,标定在 $630.74 \sim 1064.43^\circ\text{C}$ 范围内温标基准。其电动势与温度关系(定零端温度为 0)为

$$E(t_{63}) = a + bt_{63} + ct_{63}^2 \quad (1-9)$$

式中,下标 63 为 1963 年国际实用温标; a 、 b 、 c 为常数。

可选用三点标准温度标定,国际上选铟、银、金熔点;而我国选铜、铟、锌三个熔点来标定出 a 、 b 、 c 三个常数。在测量范围为 $0 \sim 1800^\circ\text{C}$ 时,误差为 $\pm 15\%$ 。

镍铬-镍铝(镍铬-镍硅)热电偶是贵重金属热电偶中最稳定的一种,用途很广,可在 $0 \sim 1000^\circ\text{C}$ (短时间可在 1300°C)下使用,误差大于 1% ,其线性度较好,热电动势在相同环境下比铂铑-铂还大 $4 \sim 5$ 倍,但这种热电偶不易做的均匀,误差比铂铑-铂大。

铜-康铜热电偶用于较低的温度($0 \sim 400^\circ\text{C}$)具有较好的稳定性,尤其是在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内,误差小于 0.1% ,其热电动势-温度关系为

$$E = at + bt^2 \quad (1-10)$$

式中, a 、 b 可用铂电阻温度比较,从而确定出 a 、 b 值。

目前,国际电工委员会(IEC)推荐了 8 种类型的热电偶作为标准化热电偶,即为 T 型、E 型、J 型、K 型、N 型、B 型、R 型和 S 型。其中 7 种规格的热电偶见表 1-5。

表 1-5 热电偶种类及特性参数

适用范围		测温范围/ $^\circ\text{C}$	热电动势/ mV	优点
低温	T	$-200 \sim +350$	$-5.603/-200^\circ\text{C}$ $+17.816/+350^\circ\text{C}$	最适用于 $-200 \sim +100^\circ\text{C}$ 适应弱氧化性环境
	E	$-200 \sim +800$	$-8.82/-200^\circ\text{C}$ $+61.02/800^\circ\text{C}$	热电动势大
中温	J	$-200 \sim +750$	$-7.89/-200^\circ\text{C}$ $+42.28/750^\circ\text{C}$	热电动势大 适应还原性环境