

智能感知、无线 传感器及测量

Intelligent Sensing, Instrumentation
and Measurements



[新西兰] 苏巴斯·钱德拉·穆克帕德亚 (Subhas Chandra Mukhopadhyay) 著

梁伟 / 译

无线传感器网络的搭建

基于Xbee

通过X-CTU配置

即插即用自组网

三个实例

生理参数监测系统

情绪识别的智能感知系统

智能电力监测系统



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





智能感知、无线传感器及测量

[新西兰] 苏巴斯·钱德拉·穆克帕德亚 (Subhas Chandra Mukhopadhyay) 著

梁 伟 译



机械工业出版社

本书从传感器基础知识出发,对传感器连接到处理器的信号以及会出现的问题做了阐述,接着介绍了无线传感器网络(WSN)的基础知识,除了说明组建WSN的重要性及各个部分实现的功能外,还重点介绍了WSN的电源基础知识及各种供电技术,然后介绍了基于Zigbee的系统设计,对传感器数据接收和分析软件的设计进行了详细说明,最后列举了3个应用项目,读者会从中学习到一些项目的具体实现技巧。

本书适合从事传感器,无线传感器网络的专业技术人员和爱好者阅读,也适合大中专院校物联网、智能仪器仪表专业作为专业课教材。

Transation from the English language edition: "Intelligent Sensing, Instrumentation and Measurements" by Subhas Chandra Mukhopadhyay. Copyright©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013. Springer is part of Springer Science+Business Media.All Rights Reserved.

本书中文简体字版本由Springer授权机械工业出版社独家出版,版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2016-0488号。

图书在版编目(CIP)数据

智能感知、无线传感器及测量/(新西兰)苏巴斯·钱德拉·穆克帕德亚著;梁伟译.—北京:机械工业出版社,2016.7

(创客+)

书名原文: Intelligent Sensing, Instrumentation and Measurements

ISBN 978-7-111-53997-1

I. ①智… II. ①苏… ②梁… III. ①无线电通信-传感器
IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第128110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:罗莉 责任编辑:赵玲丽

责任校对:王欣 封面设计:鞠杨

责任印制:李洋

北京汇林印务有限公司印刷

2016年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm·9.75印张·197千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-53997-1

定价:59.00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

网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

2013年译者在新西兰梅西大学访学时，原作者 Subhas 教授刚刚完成本书的撰写工作，当时国内有关无线传感器网络方面的专著还比较缺乏，因此译者见到此书后，便与 Subhas 商议可否将此书翻译成中文在中国出版，并荣幸地得到 Subhas 的同意。可惜译者回国后因诸多繁忙事务使翻译工作一再拖延。这期间，Subhas 曾来我国东南大学给仪器仪表专业研究生讲课，并以本书内容作为教材。当时 Subhas 和译者两次见面，多次问及译作出版之事，使译者深感愧疚。现在终于翻译完成，很是欣慰。

本书以 Digi 公司的 XBee 模块为例，通过 X - CTU 软件进行配置，即插即用自组网，方便使用。XBee 模块在国外应用非常广泛，认可度很高。本书除了详述了建立无线传感器网络，以及数据接收和分析软件的设计。还着重介绍了三个项目：生理参数监测系统、情绪识别的智能感知系统和智能电力监控系统。

如果本书能够对我国物联网技术的发展起到某些推动作用，译者将深感荣幸。另外，对于本书翻译中的不确切之处，敬请读者不吝赐教与斧正。

本书翻译过程中，得到常熟理工学院计算机科学与工程学院师生的大力帮助，在此深表感谢！

值此《智能感知、无线传感器及测量》中译本出版之际，对关心、帮助过本书翻译和译稿整理工作的所有人士表示衷心的感谢！

梁 伟
常熟理工学院计算机科学与工程学院
2016年3月

原书前言

近来无线传感器和传感器网络发展迅速，广泛应用于环境监测、制造业现场监测和控制、智能交通、建筑健康监测以及健康护理等领域。随着电子、嵌入式单片机、智能无线传感器、网络以及通信技术的迅速发展，无线传感器节点才有实现低成本和低功耗的可能。虽然相关领域已经有不少出版物，但是本书从基本知识开始，帮助读者认识无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）。

本书分为7章。

第1章讲述传感器的基本知识。对常用的几种用于无线传感器网络 and 智能传感器网络的传感器作了简要的介绍。本章的基础知识对于实现一个智能传感器非常重要。

第2章对传感器连接到处理器的信号条件以及会出现的问题作了阐述。这是由于要构建智能传感器或者无线传感器网络，传感器就要与处理器相连，当传感器连接到处理器接口上时常常会出现一些问题。

第3章介绍了无线传感器网络组成的一些基础知识，说明了组建 WSN 的重要性以及各个组成部分实现的功能。

第4章说明了 WSN 节点的电源供电基本知识和各种电源供电技术。

第5章叙述了实现一个 WSN 的基本知识，重点说明了基于 ZigBee 的系统设计，由此读者对于如何实现配置传感器节点和协调器会有一个整体的概念。接着，本章对编程序和数据接收以及储存的 GUI 程序编制进行了说明。

在第6章对传感器数据进行分析的几种技术进行了说明。

第7章阐述了有关无线传感器和传感器网络的3个应用项目，读者会学习到一些项目的具体实现技巧。

我的很多学生（毕业了的和没有毕业的）对本书的编写做了不少工作，在此我不得不提一下他们的名字（名字不分先后）：Nagender Kumar Suryadevara, Quan Vu, Sean Kelly, Gerard Mendez, Mathias Haefke, Chinthaka Gooneratne, Michael Sutherland, Anuroop Gaddam, Mohd Syaifudin Abdul Rahman, Vishnu Kasturi, Karan Singh Malhi, Matias Haefke, Julia Schnepfer, Satinder Singh Gill, Mohd. Amri Yunus, Chagitha Ranhotigamage, Hatim Al Abri。尤其要指出的是 Nagender Kumar Suryadevara 在编写第5章和第6章时做了大量工作。也感谢诸多科技论文的作者，他们的名字在本书中没有提到。也诚挚地感谢我的夫人 Krishanthi 以及孩子 Sakura 和 Hiroshi 对我一贯的支持和帮助！

作者：Subhas Chandra Mukhopadhyay

新西兰梅西大学（Palmerston North, Manawatu 校区）工程与先进技术学院

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 传感器基础	1
1.0 引言	2
1.1 传感器的分类	2
1.2 热传感器	3
1.2.1 热敏电阻	3
1.2.2 热电偶	4
1.2.3 电阻式温度检测器	6
1.3 湿度传感器	7
1.3.1 电阻式湿度传感器	7
1.3.2 电容式湿度传感器	8
1.3.3 热导式湿度传感器	8
1.4 电容式传感器	9
1.5 平面叉指式传感器	10
1.6 平面电磁传感器	11
1.7 光敏技术	13
1.7.1 光照度传感器	13
1.7.2 光敏电阻	14
1.7.3 日照强度仪	14
1.8 湿度传感技术	15
1.8.1 频域反射土壤湿度传感器	15
1.8.2 时域反射土壤湿度传感器	16
1.8.3 石膏块电阻土壤湿度传感器	16
1.8.4 中子探测土壤湿度传感器	16
1.9 二氧化碳检测技术	17
1.9.1 固态电化学型二氧化碳传感器	17

1.9.2 非色散红外二氧化碳气体传感器	18
1.10 传感器的参数	18
1.10.1 测量范围	19
1.10.2 灵敏度	19
1.10.3 精确度	19
1.10.4 稳定性	19
1.10.5 重复性	19
1.10.6 静态和动态特性	19
1.10.7 能量收集	20
1.10.8 温度变化以及其他环境参数变化的补偿	20
1.11 传感器的选择	20
1.12 进一步阅读建议	20

第 2 章 传感器接口技术和信号调整	23
2.0 引言	24
2.1 信号的偏差转换与电压转换	24
2.2 传感器输出的负载效应	24
2.3 分压电路	25
2.4 低通 RC 滤波器	27
2.5 高通 RC 滤波器	29
2.6 设计无源滤波器需要考虑的实际问题	30
2.7 基于仪器应用的运算放大器电路	31
2.7.1 差分放大器	31
2.7.2 共模抑制	33

2.7.3 单电阻控制测量放大		4.6 振动能量收集	69
电路	33	4.7 热能能量收集	69
2.8 电流—电压转换器	34	4.8 电能管理技术	70
2.9 比较器	34	4.8.1 路由协议	70
2.10 信号调整电路设计的几个		4.8.2 睡眠模式简介	70
原则	36	4.8.3 MAC 协议	70
2.11 传感器性能的影响因素 ..	37	4.9 选择电池要慎重	70
2.11.1 传感器补充说明	37	4.10 进一步阅读建议	71
2.12 温度的影响	41		
2.13 传感器老化	42	第 5 章 数据接收和分析软件的设计	74
2.14 进一步阅读建议	42	5.0 简介	75
第 3 章 无线传感器和传感器		5.1 无线传感器网络的建立 ..	76
网络	44	5.2 配置 ZigBee 无线模块的	
3.0 简介	45	步骤	77
3.1 无线通信的频率	46	5.2.1 ZigBee Explorer USB	77
3.2 基于项目的无线传感器网络		5.2.2 (无线基站) 协调器的	
开发	47	配置	78
3.2.1 基于微控制器和通信设备		5.2.3 远程 ZigBee 节点的配置	
的无线传感器	47	(传感设备 # 1 无线模块) ..	79
3.2.2 基于微控制器和 ZigBee 通信		5.3 API 模式数据传输简述	80
设备的无线传感器网络 ..	51	5.4 测试协调器和远程 XBee 节点	
3.3 纯 ZigBee 构建的无线传感		之间的通信	83
器网络	55	5.4.1 例 1	83
3.4 进一步阅读建议	55	5.4.2 例 2	84
第 4 章 传感器电源	57	5.5 用 C # 设计和开发图形用户	
4.0 简介	58	界面接收传感器数据	84
4.1 电源	58	5.5.1 创建一个新的 Visual Studio	
4.1.1 市电电源供电	59	C # 程序	84
4.1.2 电池	59	5.6 更改组件名称	90
4.2 能量收集	61	5.7 在 Visual Studio C # 应用	
4.2.1 太阳能	62	程序中添加程序语句	91
4.3 太阳能和铅酸电池的进一步		5.7.1 通过串口接收传感器数据	
探讨	65	的编码步骤	92
4.4 风力发电	67	5.8 完整的程序 (Form1.cs) 和	
4.5 射频能量收集	68	注释	93
		5.9 参考文献	99

第 6 章 传感器的信号处理技术	100	6.3 参考文献	117
6.0 引言	101	第 7 章 几个项目简介	119
6.1 建筑结构健康监测信号处理技术的简介	101	7.0 概要	120
6.1.1 正常状态	102	7.1 基于无线传感器网络生理参数监测系统	120
6.1.2 特征提取	104	7.1.1 测量人体温度	122
6.1.3 降维	106	7.2 情绪识别的智能感知系统	132
6.1.4 协同损伤事件检测方法	107	7.2.1 情绪识别系统的目标	132
6.2 传感器数据提取信息之后的信号处理技术	108	7.2.2 情绪识别智能感知系统的发展	133
6.2.1 从传感器数据获取信息：日常活动识别模型	108	7.2.3 实验结果及分析	136
6.2.2 从传感器数据中求出行为模式	114	7.2.4 总结与讨论	141
6.2.3 传感器数据分类	115	7.3 基于无线传感器网络的智能电力监控系统	141
6.2.4 检测趋势	115	7.3.1 系统概况	141
6.2.5 传感器数据特征表示	116	7.4 进一步阅读建议	147
6.2.6 注释方法	116		

第1章

传感器基础

1.0 引言

在日常生活中，对于不同的应用，我们会使用不同的传感器。传感器就是用来测量物理、化学、生物或者其他参数的元器件，或者是测量系统中的一部分。通常传感器能够提供一个等价的电压或者电流形式的信号，这个信号可以用以检测、处理、存储和转发。例如，一个电阻测温器（Resistance Temperature Detector, RTD）的电阻会随温度的变化而变化，通过测量电阻的变化来测量温度。把电阻测温器连接到适当电路，我们就可以取得一个与温度函数一致的电压信号。

一个理想的传感器应该只受它所测量参数的影响而变化，不会受到环境中其他参数的影响，并且被测参数也不能对传感器的正常工作产生干扰。

传感器的输出随被测参数的变化而变化，它的输出和被测参数之间的关系被定义为传感器灵敏度。例如一个转速检测传感器的输出是以伏特（V）为单位的电压输出，它是转速（Revolutions per Minute, RPM，即转/分钟）的函数，因此转速传感器的灵敏度表示为 V/RPM 。在理想状况下，传感器的输出和所测参数之间的关系应为线性比例关系。然而，通常这种理想状态并不可能实现，所以输出常表示成所测参数的数学函数。

传感技术对现代产业产生了巨大的影响，在市场上有很多的传感器，而且也有很多研究人员正在研发更加智能、高效和高性能的传感器。下面这节我们将介绍一下传感器的分类。

1.1 传感器的分类

图 1.1 给出了几种新西兰梅西大学正在开发的新型传感器，图 1.2 给出了市场上常见的几种传感器，其中有些图片是从网络上下载的。市面上有很多传感器，可以用于系统感知测量。在本节，我们会特别说明几种在市面上销售的传感器，用它们来构建感知系统，阐述它们的工作原理以及利弊。

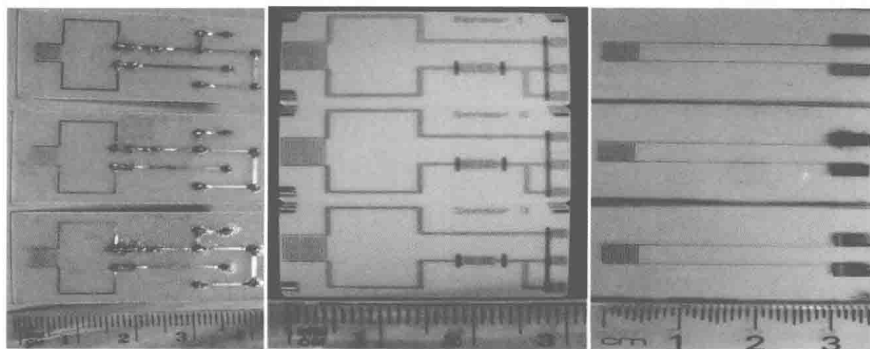


图 1.1 新西兰梅西大学正在开发的新型传感器

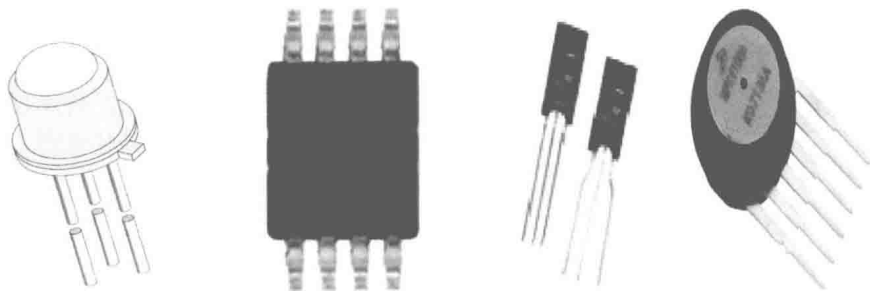


图1.2 市面上销售的几种传感器

表 1.1 说明了几种传感器的测量对象（物理量、物理特性或物理条件）和物理转换原理。测量不同的对象时，我们采用不同的测量方法，它们各有各的用途。

表 1.1 几种传感器的测量对象和物理转换原理

测量对象	物理转换原理
温度	热敏电阻、热电偶、热机械
湿度	电阻、电容
压力	压力电阻
流量	压力变化、热敏电阻
力	压电效应、压力电阻
扭矩	压力电阻、光电效应
拉力	压力电阻
振动	压力电阻、压电效应、光纤、声波、超声波
地理位置	电磁转换、GPS、接触传感器
速度	多普勒效应、霍尔效应、光电效应
角速度	光学编码器
加速度	压力电阻、压电效应、光纤
距离接近	霍尔效应、电容、磁场变换、地震式、声响、射频
触觉 / 接触	接触开关、电容

1.2 热传感器

热传感器（Thermal sensors）主要用于温度的测量。热传感器是现代社会中应用最普遍的传感器之一，热传感器分为 5 类，它们各有利弊，本节对热传感器做一个概括说明。

1.2.1 热敏电阻

热敏电阻（Thermistors）广泛用于温度测量，使用起来简单方便。热敏电阻是由半导体材料烧结而成的温度感知元件，当温度发生微小变化时，其电阻值会成比例地

发生很大的变化。热敏电阻的温度系数通常为负,也就是说温度上升时热敏电阻的阻值减小。热敏电阻并不是非常的精确和稳定,但是却很容易接入电路,费用低廉,又由于可以直接使用,所以在自动控制电路上应用普遍。图 1.3 给出了几种市面上常见的热敏电阻。图 1.4 给出了热敏电阻电阻值随温度变化的一种典型特性曲线。热敏电阻的优点在于:(i) 灵敏度高而且稳定;(ii) 价格低廉;(iii) 在某个小的温度变化范围内具有相当的准确度。但是热敏电阻也有一些缺点:(i) 电阻值随温度变化不是线性比例关系;(ii) 只能在有限的温度变化范围内工作;(iii) 自身会发热。

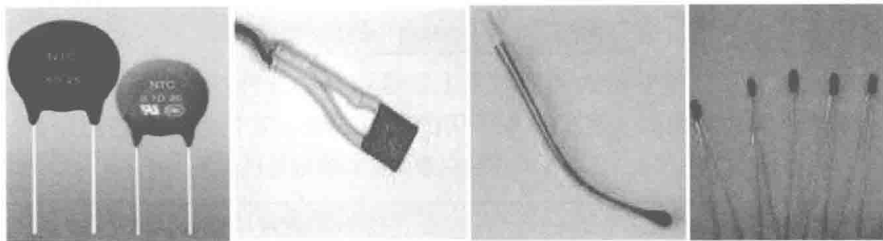


图1.3 几种常见的热敏电阻

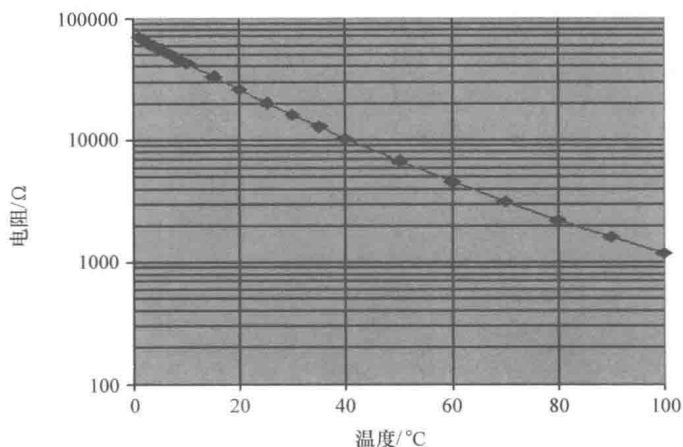


图1.4 热敏电阻电阻值随温度变化的典型特性曲线

1.2.2 热电偶

热电偶 (Thermocouple) 由两种不同的金属构成, 其中一端结合在了一起。当两种金属接合的地方受热或受冷时就会产生电压, 而电压的变化又与温度相关。热电偶的工作原理如图 1.5 所示, 热电偶适合测量的温度变化范围比较大, 然而热电偶并不适合温度变化小且测量精度要求高的应用场合, 这种情况更适合使用热敏电阻和电阻温度检测器。热电偶常常用于炉窑、燃气涡轮排气口、柴油发动机以及其他工业应用的温度测量。图 1.6 给出了几种市场上销售的热电偶传感器, 表 1.2 列出了常见热电偶传感器的测温范围和灵敏度, 图 1.7 给出了几种热电偶传感器的特性曲线。

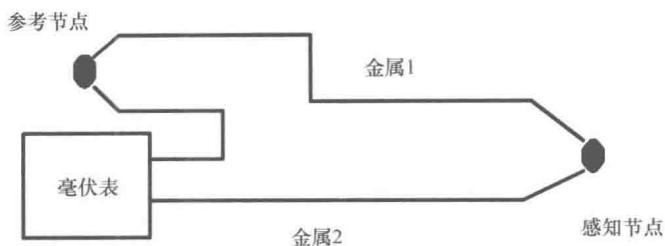


图1.5 热电偶传感器的工作原理



图1.6 几种市场上销售的热电偶传感器

表 1.2 热电偶传感器的测温范围和灵敏度

编号	材料	测温范围/℃	灵敏度/($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
E	铬镍合金/铜镍合金	-200~1000	63
J	铁/铜镍合金	-200~900	53
T	铜/铜镍合金	-200~400	43
K	铜镍合金/镍铝合金	-200~1300	41
R	铂/铂铑合金	0~1400	6

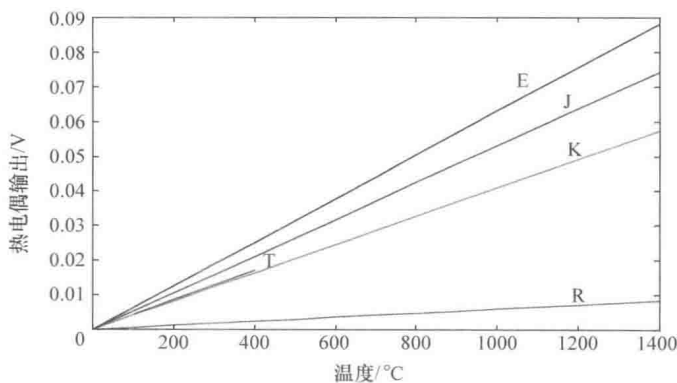


图1.7 几种热电偶传感器的特性曲线

热电偶传感器有以下优点：(i) 温度测量范围广， $230\sim 2300^{\circ}\text{C}$ ；(ii) 价格相对低廉；(iii) 精度高；(iv) 时间漂移小；(v) 响应时间快。但是也有几个缺点：(i) 温度与热电偶信号之间不是线性比例关系；(ii) 输出信号 (μV) 比较小；(iii) 易锈蚀；(iv) 热电偶传感器调校起来比较困难。

1.2.3 电阻式温度检测器

电阻式温度检测器，简称 RTD (Resistance Temperature Detector)，它的工作原理是电阻会随温度的变化而变化，因而可以通过电阻值的变化来测量温度。RTD 广泛应用于很多工业领域，例如：空调、食品加工、纺织生产、塑料制品加工、微电子学和排气口的温度测量等。大多数 RTD 元件由一根细卷线环绕着陶瓷芯或者玻璃芯而构成，这种元件通常非常脆弱，因此往往要放置在一个有护套的探头中以加强保护。图 1.8 给出了几个市面上销售的 RTD。RTD 的优点有：(i) 在较大的工作温度范围内与温度变化呈线性比例关系；(ii) 相对来说测量比较精确；(iii) 在高温 ($65\sim 700^{\circ}\text{C}$) 时重复性好，稳定性不错。缺点有：(i) 灵敏度低；(ii) 比热电偶成本高，抗冲击抗振动能力较弱。



图1.8 市面上销售的RTD

图 1.9 给出了几种 RTD 测量温度的电路图，图中单臂电桥 (Wheatstone bridge) 的输出接至处理器的接口以计算温度值。其他温度传感器也可以采用此电路图连接方式。

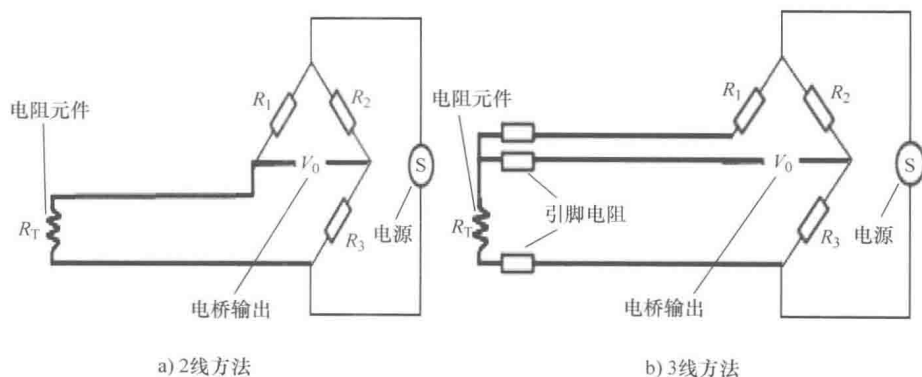


图1.9 几种不同的RTD连接方式

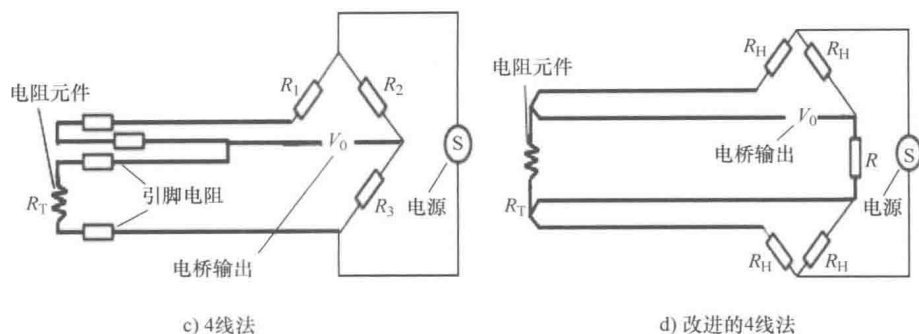


图1.9 几种不同的RTD连接方式(续)

1.3 湿度传感器

湿度传感器 (Humidity Sensors) 测量空气的湿度, 湿度是一个需要频繁测量的重要天气参数。因为湿度影响供暖、通风和空调系统, 所以有时也需要测量室内的湿度。湿度传感器可以用于车辆、办公室、工业领域, 还可以用于气象台的天气预报。湿度传感器有 3 类: 电阻、电容和热导式湿度传感器, 下一节讨论它们的工作原理并说明它们的优缺点。

1.3.1 电阻式湿度传感器

电阻式湿度传感器 (Resistive Humidity Sensors, RHS) 是利用吸湿性媒介的阻抗会随湿度变化而变化的原理进行湿度测量的传感器, 可以作为吸湿媒介的有导电聚合物、盐或者经过加工处理过的基底。这类传感器适合用于工业、商业和居民应用的控制产品和显示产品。RHS 由贵金属电极通过光刻技术在基底上沉淀而成, 或者在塑料上也可以是在玻璃柱上线绕电极而成。图 1.10 给出了几种典型的电阻式湿度传感器。

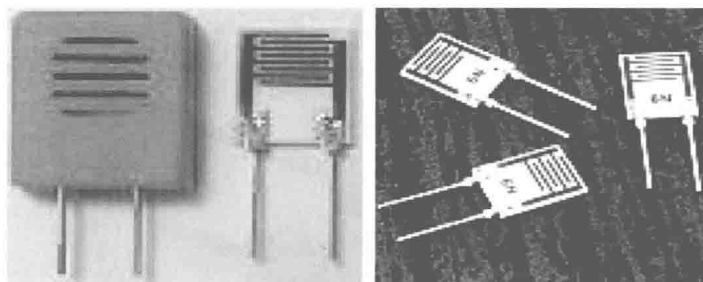


图1.10 电阻式湿度传感器

电阻式湿度传感器的优点在于: (i) 响应迅速; (ii) 近似线性电压输出; (iii) 精确度高; (iv) 尺寸小; (v) 适用的湿度范围广。同时也有几个缺点: (i) 工作温度较低; (ii) 容易受到化学蒸汽影响; (iii) 抗污染物能力低; (iv) 易受凝结液滴的

影响。

1.3.2 电容式湿度传感器

电容式湿度传感器 (Capacitive Humidity Sensors, CHS) 广泛应用于工业、商业和天气自动测量。电容式湿度传感器由薄薄一层金属氧化物或聚合物沉积在两个导电电极之间的基底上而成。感应层上覆盖有多孔的金属电极保护膜, 使其免受污染或暴露在凝结液滴中。典型的基底是玻璃、陶瓷或硅。电容式湿度传感器的介电常数的变化几乎是直接与周围环境的相对湿度成正比。图 1.11 显示了几个典型的电容式湿度传感器。

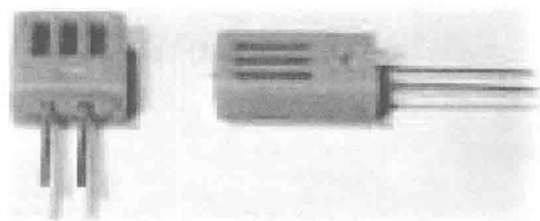


图1.11 电容式湿度传感器

电容式湿度传感器有以下优点: (i) 能在高温环境下工作 (最高可达 200°C), (ii) 近乎于线性电压输出, (iii) 相对湿度范围广, (iv) 凝聚相容性较高, (v) 抗化学气体和污染物较好, (vi) 长期漂移很小, (vii) 精度高, (viii) 体积小且成本低。

电容式湿度传感器的缺点: (i) 感知距离有限, (ii) 传感器集成器件不易调校。

1.3.3 热导式湿度传感器

热导式湿度传感器 (Thermal Conductivity Humidity Sensors, TCHS) 是通过衡量干燥空气的导热系数与含有水蒸气的空气导热系数之间的差异来测量绝对湿度。这些传感器有很多的应用, 例如: 造纸、烹饪、化工固体、木材干燥窑、织物烘干设备、药品生产和脱水食品。热导式湿度传感器由在同一桥电路中的两个匹配的负温度系数 (NTC) 的热敏电阻元件组成: 一个是密封封装在干燥的氮气之中, 另一个是暴露于环境之中。一些典型的热导式湿度传感器如图 1.12 所示。

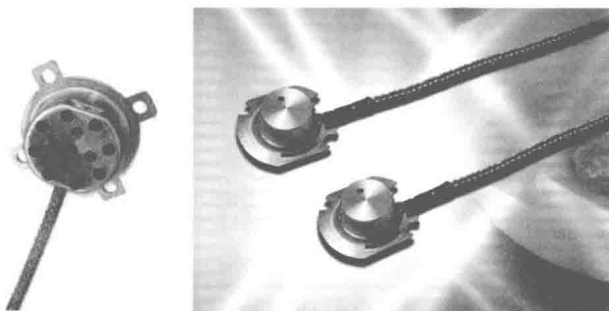


图1.12 热导式湿度传感器

热导式湿度传感器的优点在于: 耐用, 具有高温 (温度高达 600°C) 操作的能力,

对化学和物理的污染物免疫力极强，精确度高，凝聚性高。

热导式湿度传感器的缺点在于：费用昂贵，而且对于任何导热特性不同于干燥氮气的气体，它都会做出反应。

1.4 电容式传感器

电容式传感器 (CaPacitive Sensors) 在许多领域很受欢迎，主要用于测量介电特性。平行板电容器的两个电极如图 1.13a 所示，且电极连接到一个电压源。测量电容的必要的电气连接如图 1.13b 所示，在正负电极之间形成电容。平行板之间的电容可由式 (1.1) 给出：

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (1.1)$$

式中 C ——电容 (F)；

ϵ_0 ——自由空间的绝对介电常数， $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ；

ϵ_r ——材料的相对介电常数；

A ——有效面积；

d ——正极和负极之间的有效间距。

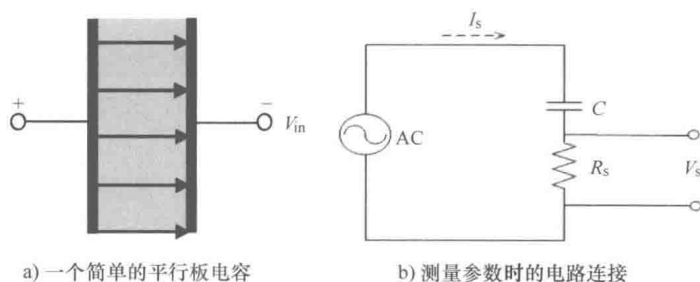


图1.13 一个简单的平行板电容器和测量参数时的电路连接

针对图 1.13b，电容传感器的阻抗可以由式 (1.2) 计算得到。

$$Z = \frac{V_{in}}{I_s} = \frac{V_{in}}{V_s/R_s} \quad \text{或} \quad Z = \frac{V_{in}}{V_s} R_s \quad (1.2)$$

其中， V_{in} 是涉及电容传感器和一个串联电阻的系统的输入电压或励磁电压。串联电阻 R_s 应合理选择，以便于它不影响测量。 I_s 是电源电流。 V_s 是通过串联电阻的电压。

传感器的大小和相位都要测量。实部 (R) 和虚部 (容抗, X_c) 的传感器是通过式 (1.3) 得到的。

$$R = Z \cos \theta - R_s \quad (1.3)$$

$$X_c = Z \sin \theta \quad (1.4)$$