



普通高等教育“十三五”规划教材

# 传感器原理 与检测技术

主编 © 何兆湘 黄兆祥 王楠



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>



普通高等教育“十三五”规划教材

# 传感器原理 与检测技术



主 编 何兆湘 黄兆祥 王 楠  
副主编 冷 芳 李雁星 郭 彬 黄梅志  
余承意 朱逢园 张玉伽



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书的主要内容分为三大部分:传感器的组成与工作原理;光电探测系统的组成与工作原理;传感器与光电探测系统中信号处理电路的低噪声电子设计原理和抗干扰技术。本书共分18章,第1章概要介绍了在检测领域中常用的传感器和光电探测系统这两类重要的检测装置,并对二者作了比较。接着,运用“信号与系统”的基本原理,对二者的静态特性、动态特性、频域特性、稳定特性和不失真特性进行了介绍和讨论。其余各章对上述三大部分内容进行了详细的分析和讨论。本书配有较多的例题和设计实例,便于读者自学。本书可供电类各专业学生作教材使用,也可供相关专业研究生阅读以及硬件系统设计工程师参考。

为了方便教学,本书还配有电子课件等教学资源包,任课教师和学生可以登录“我们爱读书”网([www.ibook4us.com](http://www.ibook4us.com))注册并浏览,任课教师还可以发邮件至 [hustpeiit@163.com](mailto:hustpeiit@163.com) 索取。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器原理与检测技术/何兆湘,黄兆祥,王楠主编. —武汉:华中科技大学出版社,2019.9  
普通高等教育“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-5680-3802-7

I. ①传… II. ①何… ②黄… ③王… III. ①传感器-高等学校-教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 198385 号

### 传感器原理与检测技术

Chuanganganqi Yuanli yu Jiance Jishu



何兆湘 黄兆祥 王楠 主编

策划编辑:康序

责任编辑:康序

责任监印:朱玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话:(027)81321913

邮编:430223

录排:武汉正风天下文化发展有限责任公司

印刷:武汉华工鑫宏印务有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:19

字数:486千字

版次:2019年9月第1版第1次印刷

定价:48.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前言

## PREFACE

人类在探索自然奥秘的过程中,从来没有停止过前进的步伐。随着科学技术的发展,人类研究自然奥秘的仪器和方法愈来愈先进。“传感器原理与检测技术”这门课程就是讲述如何利用各种类型的传感器,获取所需信号并进行适当的处理,从而获得有价值的信息并对生产过程进行必要的控制,以及由此而涉及的若干专门的技术和相关的基础理论。

近年来,光信息科学技术的迅速发展,对传感器技术起到了积极的推动作用,因此大多数讲述传感器的教材,都增加了一些光电探测器的内容,本书也不例外。只是本书还适当增加了学习光电探测器所必须掌握的微弱信号处理的相关内容。因此,本书所适用的专业也更宽广一些。

在传感器中,连接在敏感元件和转换元件后面的是信号调理与转换电路;在光电探测系统中,连接在光电探测器后面的是光电信号处理电路。实际上,无论是信号调理与转换电路,还是光电信号处理电路,都是电子线路。二者虽有各自的特性,但都具有电子线路的共性。并且,在传感器中转换元件的输出信号,与在光电探测系统中光电探测器的输出信号,都是很微弱的信号。传感器中转换元件输出的信号可达微安、微伏数量级,而光电探测器输出的信号则更微弱,达到纳安、纳伏数量级。严格来说,对于传感器中的信号调理与转换电路,以及光电探测系统中的光电信号处理电路,其设计均应遵循低噪声电子设计和抗干扰的原则。因此,本书适当地增加了这部分内容的讲解。

本书的另一个特点是,在讨论传感器和光电探测系统的一般特性时,用“信号与系统”课程所讲授的基本原理来进行分析,有的则直接引用“信号与系统”课程中所得到的结论,因此,这就要求采用本书的专业,最好开设了“信号与系统”课程。

为了适应应用型人才的培养,编写适合于应用型人才阅读、自学的教材,本书还有一个特点是,适当增加了实用产品的设计实例,以帮助读者进一步提高系统设计能力。为了提高学生的系统设计和调试能力,建议使用本书的院校,理论学时可安排为32~48学时,很多内容可由学生自学后写读书报告,而增加8~16学时的实训课或课程设计。

本书是根据各位主编长期从事科研、教学积累的丰富经验和查阅大量著作

文献并指导副主编,共同编写而成。个人的学识和水平毕竟都是有限的,书中如有错误和不妥之处,敬请读者不吝指出,各位编者在此表示衷心的感谢。

本书共分 18 章,下面分别进行简要介绍。

**第 1 章 概述。**本章介绍了在检测技术中常用的传感器和光电探测系统这两类重要的检测装置,并对二者进行了比较。接着,运用“信号与系统”课程的基础知识,结合传感器和光电探测系统的具体情况,对其静态特性、动态特性、频域特性、稳定特性和不失真特性进行了介绍和讨论。

**第 2 章 金属丝应变片传感器。**本章在介绍了金属丝的应变效应之后,主要讲解了金属丝应变片传感器的结构、主要特性和参数、测量与转换电路、温度误差及其补偿以及金属丝应变片传感器的应用。在本章中以例题的形式详细讲解了关于金属材料的泊松比  $\mu$  的理论推导过程。

**第 3 章 半导体压阻式传感器。**本章在介绍了半导体压阻式传感器的结构框图之后,详细地讲解了半导体应变片的工作原理、结构和特性,接着给出了半导体应变片的测量与转换电路,最后列举了半导体压阻式传感器的特点和应用。

**第 4 章 气敏传感器与湿敏传感器。**本章分别介绍了电阻型半导体气敏传感器、湿敏传感器的工作原理和它们的典型应用实例。首先,画出了电阻型半导体气敏传感器的结构框图,介绍了电阻型半导体气敏元件三种类型的基本结构、电阻型半导体气敏元件的两种加热方式、电阻型半导体气敏元件的七种主要特性参数,列举了气敏传感器的三种应用实例;然后,画出了湿敏传感器的结构框图,介绍了有关湿度及其度量的基本概念、湿敏元件的分类和常用的四种湿敏元件、湿度传感器的九种主要特性参数、湿度传感器对测量电路的要求,以及三种湿敏传感器的测量与转换电路。

**第 5 章 电容式传感器及其应用。**本章首先介绍了电容式传感器的工作原理与分类,然后详细讲解了变极距型、变面积型、变介质型三种不同类型的电容式传感器的工作原理,讨论了电容式传感器的等效电路与测量电路,分析了电容式传感器的误差成因,最后列举了三类电容式传感器的应用。

**第 6 章 电感式传感器及其应用。**本章首先画出了电感式传感器的结构框图,然后详细讲解了自感式、差动变压器式、电涡流式三种不同类型的电感式传感器的工作原理,着重讨论了电感线圈的等效电路与测量电路,最后介绍了各类电感式传感器的应用。

**第 7 章 压电式传感器及其应用。**本章首先介绍了电介质及其电偶极矩等有关的基础知识,然后讨论了石英晶体的结构特点及其压电效应、压电材料的结构及其压电效应,接着分析了压电式传感器的等效电路与测量电路、压电式传感器的工作原理,最后,介绍了压电式传感器的应用。

**第 8 章 热电式温度传感器及其应用。**本章介绍了几种热电式温度传感器,包括热电偶、热电阻、热敏电阻和 PN 结集成温度传感器。本章首先详细讨论了热电偶的工作原理、热电效应、热电偶的四大基本定律、常用热电偶的材料和种类及结构、与热电偶配套的仪表及温度信号变送器,进而讨论了在应用热电偶测温时热电偶的冷端温度可能给测量带来的误差及其补偿问题。接着介绍了热电阻的测温原理、目前用于测温的金属热电阻的种类和结构、热电阻的分度表、热电阻的温度检测系统。然后,介绍了 PN 结集成温度传感器的工作原理和两款常用的 PN 结集成温度传感器。在本章的最后,介绍了热敏电阻的制作材料、结构、外形、种类和各种应用。

**第 9 章 光纤传感器及其应用。**本章介绍了光纤的结构与种类、光纤的传光原理、光纤

传感器的结构与分类、光纤传感器的主要元器件及选择方法和光纤传感器的应用。

第10章 光电探测器及其应用。本章首先复习了光的基本性质及其度量,在介绍了各类光电探测器工作原理的基础上,讨论了常见的几种光电探测器(包括光子探测器、光电导探测器、光伏探测器)及其应用。对于光子探测器,着重介绍了光电倍增管的结构、工作原理、相关的电子线路及其在光子计数测量中的应用。对于光电导探测器则是以光敏电阻为例,介绍了其结构、工作原理和特性,并对三个应用实例进行了详细分析。对于光伏探测器,分别介绍了光电二极管、光电三极管、光电池的结构、工作原理和特性,同样对三个应用实例进行了详细分析。本章最后对光电耦合器,包括普通光电耦合器和线性光电耦合器进行了简明扼要的介绍,使读者在应用时注意二者的区别。

第11章 红外传感器及其应用。本章首先介绍了红外辐射的基本知识,包括红外辐射在电磁波谱中的位置、红外辐射的特性和关于红外辐射的三大定律。接着介绍了红外探测系统的一般组成框图,然后详细地讲解了红外探测器的分类和几个主要特性参数。在本章最后详细分析和介绍了两种红外探测器以及由它们构成的红外探测系统,包括红外焊缝检测仪和热释电红外探测系统。

第12章 磁敏传感器及其应用。本章从洛伦兹力、霍尔效应等基本概念着手,介绍了霍尔元件的结构、主要特性参数、电路符号和命名方法、常用的激励电源和对后置放大器的要求。接着介绍了两类常用的霍尔集成电路即霍尔线性型集成电路和霍尔开关型集成电路,分析了它们的内部结构框图。最后,介绍了霍尔元件在大电流测量、磁性材料特性研究、转速测量、无触点键盘等多方面的应用。本章同样对磁敏电阻、磁敏二极管、磁敏三极管的工作原理、结构、主要特性参数和应用都进行了较为详细的介绍和分析。

第13章 智能传感器。本章在介绍了智能传感器的发展史之后,给出了智能传感器的定义,详细地分析了智能传感器的结构和其所具有的优点,指出了智能传感器今后的发展方向,最后介绍了几个典型的集成化智能传感器实例。

第14章 传感器网络简介。本章论述了智能传感器实现网络化后所增加的新功能,进而介绍了传感器网络的结构及传感器网络信息交换体系。重点介绍了OSI开放系统互连参考模型及OSI参考模型对应的各层规范的功能。还介绍了传感器网络常用的通信协议,包括汽车协议、工业网络协议、办公室与楼宇自动化网络协议及家庭自动化网络协议等。

第15章 无线传感器网络。本章介绍了无线传感器网络的发展历史、研究现状以及它与物联网的关系,进而讨论了无线传感器网络的结构及其各组成部分,包括传感器节点、汇聚节点、监控管理中心和终端用户,较详细地介绍了无线传感器网络的网络协议和操作系统。还总结了无线传感器网络的特征以及它与现有无线网络的区别、与现场总线的区别、与传感器网络的区别。最后,举例介绍了无线传感器网络的应用。

第16章 噪声与干扰的基本知识。本章在介绍了噪声与干扰的基本定义之后,对噪声进行了全面的分析和描述,包括光电探测系统、传感仪表中电子线路常见的基本噪声、噪声的关联与相加、含多个噪声源的电路及其计算法则、等效噪声带宽、噪声的基本属性以及噪声对数字系统的影响等。

第17章 低噪声前置放大器。本章首先全面地论述了放大器的噪声分析方法,涉及放大器的噪声电压-噪声电流( $E_n-I_n$ )模型、等效输入噪声及简化计算法则、噪声系数、最佳源电阻 $R_{opt}$ 与最小噪声系数 $NF_{min}$ 、噪声温度、多级放大器的噪声系数 $NF_{1,2,\dots,n}$ 等基本知识。接着介绍了耦合网络的低噪声设计原则、低噪声前置放大器的选用方法、噪声参数的测量、低噪声前置放大器对电源的要求等技术问题。最后,介绍了低噪声集成运算放大器的选用

原则和方法并给出了设计实例。

第 18 章 屏蔽接地技术。本章全面分析了抗干扰的三要素、干扰源的种类及频谱、干扰对电路的作用形态,介绍了在干扰传播途径中抑制干扰的各种措施以及如何正确选用电源及采用电源滤波器。

本课程的授课学时可安排在 32~48 学时,也可根据专业情况和需要有选择性地讲解某些章节,一部分章节也可安排学生自学后写出读书报告。应该根据教材内容和实际情况安排 8~16 学时的课程设计或实训。对于传感器技术、检测技术和光电探测技术一类硬件性质课程,学十遍不如做一遍。因此,对于本课程应当充分重视课程设计和实训教学。

本书由华中科技大学何兆湘、文华学院黄兆祥、沈阳科技学院王楠任主编,由大连海洋大学应用技术学院冷芳、广西外国语学院李雁星、北京交通大学海滨学院郭彬、武汉华夏理工学院黄梅志、汉口学院余承意和朱逢园、哈尔滨远东理工学院张玉伽任副主编。全书由何兆湘组织、定稿。

为了方便教学,本书还配有电子课件等教学资源包,任课教师和学生可以登录“我们爱读书”网([www.ibook4us.com](http://www.ibook4us.com))注册并浏览,任课教师还可以发邮件至 [hustpeiit@163.com](mailto:hustpeiit@163.com) 索取。

本书在编写过程中,得到了华中科技大学光学与电子信息学院领导的大力支持和鼓励,在此表示衷心的感谢。还要感谢华中科技大学出版社的相关编辑,没有他们的努力和帮助,本书也不可能及时且顺利地出版。

编者

2019 年 4 月

目  
录

## CONTENTS

第 1 章 概述 .....	(1)	5.2 电容式传感器的工作原理与分类 .....	(62)
1.1 传感元件与传感器 .....	(1)	5.3 变极距型电容式传感器 .....	(63)
1.2 光电探测器与光电探测系统 .....	(2)	5.4 变面积型电容式传感器 .....	(65)
1.3 传感器与光电探测系统的比较 .....	(3)	5.5 变介质型电容式传感器 .....	(67)
1.4 传感器的一般特性 .....	(3)	5.6 电容式传感器的等效电路与测量电路 .....	(69)
习题 1 .....	(11)	5.7 电容式传感器的误差成因分析 .....	(74)
第 2 章 金属丝应变片传感器 .....	(12)	5.8 电容式传感器的应用 .....	(75)
2.1 金属丝应变片传感器的结构框图 .....	(12)	习题 5 .....	(80)
2.2 金属丝的应变效应 .....	(12)	第 6 章 电感式传感器及其应用 .....	(82)
2.3 金属丝应变片的结构 .....	(14)	6.1 自感式传感器 .....	(82)
2.4 金属丝应变片的主要特性和参数 .....	(16)	6.2 差动变压器式传感器 .....	(87)
2.5 金属丝应变片的测量与转换电路 .....	(19)	6.3 电涡流式传感器 .....	(90)
2.6 金属丝应变片的温度误差及其补偿 .....	(28)	6.4 电感式传感器的应用 .....	(93)
2.7 金属丝应变片传感器的应用 .....	(30)	习题 6 .....	(96)
习题 2 .....	(33)	第 7 章 压电式传感器及其应用 .....	(97)
第 3 章 半导体压阻式传感器 .....	(35)	7.1 电介质及其电偶极矩 .....	(97)
3.1 概述 .....	(35)	7.2 石英晶体及其压电效应 .....	(98)
3.2 半导体应变片的工作原理、结构与特性 .....	(35)	7.3 压电材料及其压电效应 .....	(99)
3.3 测量与转换电路 .....	(39)	7.4 压电式传感器的等效电路与测量电路 .....	(100)
3.4 半导体压阻式传感器的应用 .....	(41)	7.5 压电式传感器的应用 .....	(105)
习题 3 .....	(44)	习题 7 .....	(107)
第 4 章 气敏传感器与湿敏传感器 .....	(45)	第 8 章 热电式温度传感器及其应用 .....	(108)
4.1 气敏传感器 .....	(45)	8.1 热电偶 .....	(108)
4.2 湿敏传感器 .....	(50)	8.2 热电阻 .....	(118)
习题 4 .....	(61)	8.3 PN 结集成温度传感器 .....	(122)
第 5 章 电容式传感器及其应用 .....	(62)	8.4 热敏电阻 .....	(129)
5.1 概述 .....	(62)	习题 8 .....	(131)

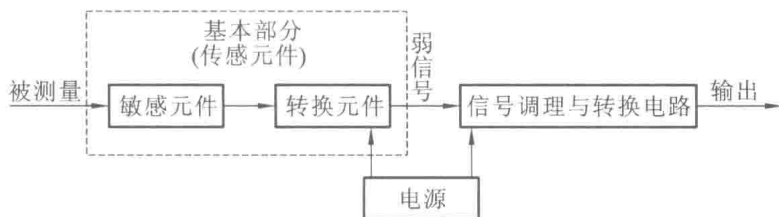
<b>第9章 光纤传感器及其应用</b> .....	(133)	<b>第15章 无线传感器网络</b> .....	(239)
9.1 概述 .....	(133)	15.1 概述 .....	(239)
9.2 光纤的结构与种类 .....	(133)	15.2 无线传感器网络的结构 .....	(240)
9.3 光纤的传光原理 .....	(135)	15.3 无线传感器网络的操作系统 .....	(241)
9.4 光纤传感器的结构原理及分类 .....	(137)	15.4 无线传感器网络的特征 .....	(242)
9.5 光纤传感器的主要元器件及选择 .....	(140)	15.5 无线传感器网络的应用 .....	(244)
9.6 光纤传感器的应用 .....	(142)	习题 15 .....	(245)
习题 9 .....	(145)	<b>第16章 噪声与干扰的基本知识</b> .....	(246)
<b>第10章 光电探测器及其应用</b> .....	(146)	16.1 引言 .....	(246)
10.1 光的基本性质与度量 .....	(146)	16.2 噪声与干扰的基本知识 .....	(247)
10.2 光子探测器及其应用 .....	(151)	16.3 噪声的关联与相加 .....	(250)
10.3 光电导探测器及其应用 .....	(163)	16.4 含多个噪声源的电路及其计算法则 .....	(251)
10.4 光伏探测器及其应用 .....	(169)	16.5 等效噪声带宽 .....	(252)
10.5 光电耦合器件 .....	(182)	16.6 噪声的基本属性 .....	(255)
习题 10 .....	(184)	16.7 噪声对数字系统的影响 .....	(258)
<b>第11章 红外传感器及其应用</b> .....	(185)	习题 16 .....	(261)
11.1 红外辐射的基本知识 .....	(185)	<b>第17章 低噪声前置放大器</b> .....	(262)
11.2 红外探测系统的组成 .....	(187)	17.1 放大器的噪声电压-噪声电流( $E_n$ - $I_n$ )模型 .....	(262)
11.3 红外探测器 .....	(188)	17.2 等效输入噪声及简化计算法则 .....	(262)
11.4 典型的红外探测器及其构成的红外探测系统 .....	(191)	17.3 噪声系数 .....	(263)
习题 11 .....	(196)	17.4 最佳源电阻 $R_{opt}$ 与最小噪声系数 $NF_{min}$ .....	(265)
<b>第12章 磁敏传感器及其应用</b> .....	(198)	17.5 噪声温度 .....	(266)
12.1 霍尔效应与霍尔元件 .....	(198)	17.6 多级放大器的噪声系数 $NF_{1,2,\dots,n}$ .....	(267)
12.2 霍尔元件的激励电源与后置电压放大器 .....	(204)	17.7 耦合网络的低噪声设计原则 .....	(268)
12.3 霍尔集成电路 .....	(205)	17.8 低噪声前置放大器的选用 .....	(270)
12.4 霍尔传感器的应用 .....	(208)	17.9 噪声参数的测量 .....	(272)
12.5 磁敏电阻及其应用 .....	(211)	17.10 低噪声前置放大器对电源的要求 .....	(276)
12.6 磁敏二极管及其应用 .....	(216)	17.11 低噪声集成运算放大器的选用 .....	(276)
12.7 磁敏三极管及其应用 .....	(221)	习题 17 .....	(280)
习题 12 .....	(225)	<b>第18章 屏蔽接地技术</b> .....	(282)
<b>第13章 智能传感器</b> .....	(227)	18.1 抗干扰方法 .....	(282)
13.1 智能传感器的发展史 .....	(227)	18.2 干扰源的种类及频谱分析 .....	(282)
13.2 智能传感器的定义、结构、优点与发展方向 .....	(227)	18.3 干扰对电路的作用形态 .....	(283)
13.3 智能传感器实例 .....	(230)	18.4 在干扰传播途径中抑制干扰的措施 .....	(285)
习题 13 .....	(232)	18.5 正确选用电源及采用电源滤波器 .....	(294)
<b>第14章 传感器网络简介</b> .....	(233)	习题 18 .....	(295)
14.1 概述 .....	(233)	<b>参考文献</b> .....	(296)
14.2 传感器网络的结构 .....	(233)		
14.3 传感器网络信息交换体系 .....	(234)		
14.4 传感器网络的通信协议 .....	(236)		
习题 14 .....	(238)		

现代社会已经全面进入信息化时代,传感器与检测技术已经深入我们生活的方方面面。传感器与检测系统是从自然和生产领域获取信息的重要设备和工具。它们有许多相同之处,也有一些不同之处,本章首先介绍二者的基本结构,然后将二者进行对比,讨论它们的异同点,以便在实际工作中更好地选用它们。

## 1.1 传感元件与传感器

中华人民共和国国家标准《传感器通用术语》(GB/T 7665—2005)3.1节对传感器(transducer/sensor)的定义为:“能感受被测量并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。”其又进一步解释:“敏感元件(sensing element),指传感器中能直接感受或响应被测量的部分。转换元件(transducing element),指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。”还指出:“当输出为规定的标准信号时,则称为变送器(transmitter)。”

按照国家标准的定义,传感器仅由敏感元件和转换元件组成,这里的传感器,实际上是一个元器件,可理解为狭义的传感器。在实际工作中,仅含有敏感元件和转换元件,多数情况下不可能按一定的规律转换成可用输出信号,在转换元件后面一般都连接有信号调理与转换电路,并且还须配以适当的电源。电源不仅供信号调理与转换电路使用,有时还得供转换元件使用。这样一来,通常所说的传感器,其组成框图如图1.1.1所示。



由图1.1.1可以看出,传感器实际上应由四部分组成,分别是敏感元件、转换元件、信号调理与转换电路和电源等。当输出为规定的标准信号时,则称为变送器。由此可见,传感器或变送器都是一种前端检测设备,要得到一个完整的检测仪表或控制系统,在信号调理与转换电路后面还要增加相应的功能模块,如显示模块或功率驱动模块,以便实现信息的显示和设备的自动控制。

传感器的工作过程具体如下。

(1) 当敏感元件感受到被测量时,将其传送给转换元件。

(2) 转换元件在电源的帮助下(有的传感元件不需要)将敏感元件感受到的被测量的信息转换成电信号输出。

(3) 信号调理与转换电路将转换元件送来的微弱电信号进行初步的放大和处理。

实际上,在图1.1.1中,有时敏感元件和转换元件是合在一起无法区分的,因此可以把敏感元件和转换元件组成的传感器基本部分称为传感元件(或狭义传感器)。传感元件输出

的信号十分微弱,往往只有  $\mu\text{A}$ 、 $\mu\text{V}$  数量级,有的甚至只有  $\text{nA}$ 、 $\text{nV}$  数量级。因此,后面的信号调理与转换电路中的前置放大器必须采用低噪声前置放大器和抗干扰技术。

**注意:**在有些情况下,传感器在测温现场,而信号调理和转换电路在距离较远的中控室,传感元件输出的微弱信号要通过较长的导线才能传输到信号调理和转换电路,若不采取一定的抗干扰措施,是无法获得真实有用的信号的。

本书中后面用到“传感器”这个词时,既是指传感元件(或狭义传感器),还是指图 1.1.1 所示的传感器,读者可根据上下文来理解,有时也会在文中相应的位置注明。

传感器种类繁多,常用的有如下几大类:电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、热电式传感器、磁电式传感器、光电式传感器、超声波式传感器、光纤传感器等。

## 1.2 光电探测器与光电探测系统

归纳有关文献对光电探测器的论述,可得出光电探测器的定义如下:光电探测器是一类能接收调制光或非调制光,在辅助电源的帮助下(有些不需要),将其转换成电信号输出的器件。常用的这类器件有光电子发射探测器、光电导探测器、光伏探测器、热电探测器、热释电探测器、光电二极管、光电三极管、PIN 光电二极管、光电成像器件等。

在光电探测器的输出端接上低噪声前置放大器及相应的信号处理电路,就构成了光电探测系统。光电探测系统的组成框图如图 1.2.1 所示。

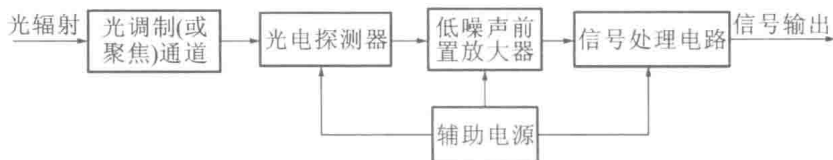


图 1.2.1 光电探测系统的组成框图

由图 1.2.1 可以看出,光电探测系统由五部分组成,分别是光调制(或聚焦)通道、光电探测器、低噪声前置放大器、信号处理电路和辅助电源等。

光调制通道由电机和调制盘组成,其作用是:当光通过调制通道时,被调制盘斩波,由连续光变成非连续光,即光由直流信号变为交流信号。聚焦通道则由一个或一组透镜组成,其作用是:当光通过聚焦通道后,可增强照射在光电探测器上光的强度,从而使光电探测器的输出信号增大。

光电探测系统的工作过程具体如下。

(1) 可见光或其他非可见光的电磁辐射经过调制通道的传输和调制后(有些系统是非调制通道,有些系统则是聚焦通道)到达光电探测器,在辅助电源的帮助下(有些不需要)产生微弱的电信号输出。

(2) 光电探测器输出的电信号十分微弱,往往只有  $\mu\text{A}$ 、 $\mu\text{V}$  数量级,有的甚至只有  $\text{nA}$ 、 $\text{nV}$  数量级。经过低噪声前置放大器放大后再送到信号处理电路进一步处理。

光电探测器输入的是光信号,输出的是电信号,光电探测器因此而得名。

根据光电探测系统所要完成功能的不同,信号处理电路会有很大的差异,但不管实现何

种功能,低噪声前置放大器都是必不可少的。只有把光电探测器输出的微弱电信号放大到足够大,才能进行下一步的处理。有些情况下,仅用一级低噪声前置放大器是不够的,必须采用多级低噪声前置放大器的级联。在进行信号放大的同时,还必须采取防止内部串扰和外部干扰的相关措施。

## 1.3 传感器与光电探测系统的比较

比较图 1.1.1 所示的传感器的组成框图和图 1.2.1 所示的光电探测系统的组成结构框图,可以发现传感器与光电探测系统的异同之处。

二者的相同之处如下。

(1) 传感器中由敏感元件感受被测物理量并由转换元件将其转换为微弱的电信号输出,同样,光电探测系统中由光电探测器接收光辐射的照射并将其转换为微弱的电信号输出。

(2) 传感器中连接在转换元件后面的是电子线路,同样,光电探测系统中连接在光电探测器后面的也是电子线路。

(3) 传感器中必须配备直流稳压电源,同样,光电探测系统中也必须配备直流稳压电源。

二者的不相同之处如下。

(1) 传感器中由敏感元件直接感受被测物理量,而光电探测系统中由光电探测器接收来自调制通道或聚焦通道的光辐射照射。

(2) 传感器中由转换元件输出的微弱信号一般直接送到信号调理与转换电路进行处理;而光电探测系统中由光电探测器输出的微弱信号一般必须先经过一级或多级低噪声前置放大器放大后,才能进一步处理。

如果在图 1.2.1 所示的光电探测系统的组成结构框图中,把低噪声前置放大器归于信号处理电路,把经过光调制或聚焦通道的输出作为光源,那么光电探测系统的组成就与传感器的组成没有区别,这时,光电探测器相当于传感器中的传感元件,它感受光的照射并把这种照射转换为微弱的电信号输出。鉴于此,国家标准《传感器通用术语》(GB/T 7665—2005)中列入了三种常见的光电探测器,分别为 3.1.27 节的光导式传感器,3.1.28 节的光伏式传感器和 3.1.29 节的热电式传感器。

对于使用传感元件或光电探测器来设计相关设备、产品的人员来说,重要的是掌握传感元件或光电探测器的外特性,以及在何种外部条件下才能获得最佳性能。在设计前一定要对它们的外特性进行单独、反复的测试,并找到获得最佳性能的外部条件,以便在设计中尽量满足此条件,达到获得最佳性能的目的。

## 1.4 传感器的一般特性

### 1.4.1 静态特性

图 1.1.1 所示的传感器和图 1.2.1 所示的光电探测系统,都有各自的特性。但是,由“信号与系统”课程的知识可知,它们都符合“系统”的定义,即它们都是由若干相互联系、相互依赖的部件(或单元、元素)按一定规则组合而成,并能实现一定功能的整体。因此,二者也有一些共性。若只考虑输入量和输出量之间的关系,而不计其内部的具体结构,二者都可以用图 1.4.1 所示的方框来表示,即它们都遵循“信号与系统”课程中所述“系统”所应遵循

$x(t)$  → [系统] →  $y(t)$  的一般规律。

图 1.4.1 用方框表示传感器或光电探测系统

图 1.4.1 中  $x(t)$  是传感器或光电探测系统的输入量,  $y(t)$  是输出量。这里的  $y(t)$  可以是系统的输出, 也可以是传感元件或光电探测器的输出, 因为可以把传感元件看成传感器的子系统, 而将光电探测器看成是光电探测系统的子系统。

当输入量  $x(t)$  是常量  $x$  时, 输出量  $y(t)$  也是对应的常量  $y$ 。对于每一个常量  $x$  的输入, 系统的输出都有一个常量  $y$  与之对应。若已知系统结构和元件参数, 则可列出描述系统工作特性的数学方程, 解这个方程即可求得输出和输入之间对应的函数关系如下。

$$y = f(x) \quad (1.4.1)$$

式(1.4.1)所表示的系统的特性, 称之为静态特性。一般情况下式(1.4.1)是一条曲线, 称为系统的静态特性曲线, 它是在静态标准条件下测定的。利用一定精度等级的测量设备, 对系统进行往复循环测试, 即可得到输入-输出数据。将这些数据取平均值后, 即可绘制出系统的静态特性曲线。

根据函数的幂级数展开式, 将式(1.4.1)展开为麦克劳林级数, 得到:

$$y = f(0) + f'(0)x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!}x^n + \dots \quad (1.4.2)$$

在上式中, 分别令  $a_0 = f(0), a_1 = f'(0), a_2 = \frac{f''(0)}{2!}, \dots, a_n = \frac{f^{(n)}(0)}{n!}, \dots$  得到:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n + \dots \quad (1.4.3)$$

由式(1.4.3)可知, 一般情况下, 系统的静态特性曲线不是直线, 而是曲线。系统的静态特性包括线性性质、灵敏度、分辨力、重复性、迟滞性、温漂、可靠性等, 下面分别介绍。

### 1. 线性性质

在式(1.4.3)中, 若  $a_2$  及其以后的系数  $a_n$  都为零, 则系统的输入-输出关系是线性关系, 即:

$$y = a_0 + a_1x \quad (1.4.4)$$

满足式(1.4.4)的系统, 称为线性系统, 线性系统有许多优良的性质, 这在“信号与系统”课程中已进行过充分的讨论。在式(1.4.4)中, 若  $a_0$  也等于零, 则是理想的线性关系, 输入-输出的关系是过原点的一条直线, 即:

$$y = a_1x \quad (1.4.5)$$

为了描述非线性关系时系统的线性性质, 即系统的静态特性曲线偏离直线的程度, 引入非线性误差的概念, 其定义如下。

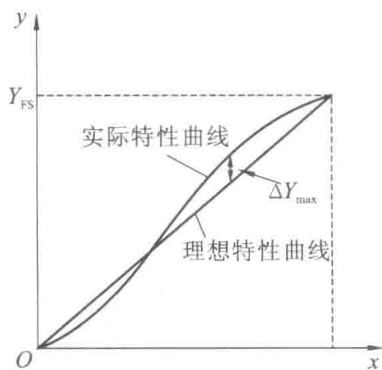


图 1.4.2 系统的非线性误差

### 非线性误差

在测量范围内, 系统的静态特性曲线与理想直线间最大偏差  $\Delta Y_{\max}$  对系统满量程输出  $Y_{FS}$  的百分比称为非线性误差, 用  $\delta_L$  表示, 如图 1.4.2 所示。即:

$$\delta_L = \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.4.6)$$

由图 1.4.2 可以看出, 非线性误差的大小与理想直线的选取有关。以不同的直线作为比较标准, 得到的非线性误差是不同的。非线性误差越小, 线性度就越好, 系统静态特性曲线就越接近直线。选取标准直线的方法有

多种,比较简单而实用的方法是观察法。观察法是在系统静态特性曲线的坐标图上,选择一条在各处都最贴近曲线的直线位置,将其画出来。图 1.4.2 中的标准直线就是用观察法获得的。

## 2. 灵敏度 $K$

系统的灵敏度  $K$  是指到达稳定工作状态时,输出变化量  $\Delta y$  与引起此变化的输入变化量  $\Delta x$  之比。即:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.4.7)$$

线性系统的灵敏度  $K$  就是其静态特性曲线——直线的斜率,如图 1.4.3 所示。非线性系统的灵敏度  $K$  就是其静态特性曲线上各点的斜率,在不同的点,斜率不同,如图 1.4.4 所示。在非线性系统的情况下,灵敏度  $K$  为一变量,且有:

$$K = \frac{dy}{dx} = y'_x = f'(x) \quad (1.4.8)$$

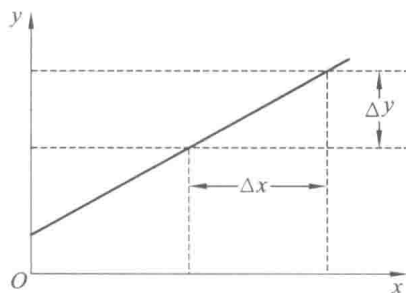


图 1.4.3 线性系统的灵敏度  $K$

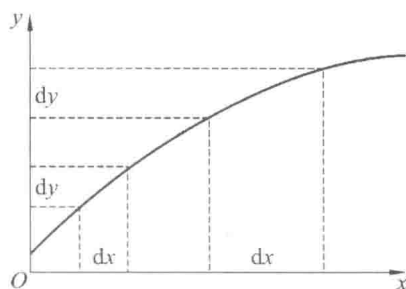


图 1.4.4 非线性系统的灵敏度  $K$

由式(1.4.8)可知,非线性系统的灵敏度  $K$  就是其静态特性曲线的一阶导数。

为了获得传感器或光电探测系统的灵敏度  $K$ ,在其输出端要有显示单元。对于灵敏度  $K$ ,下面举例进行说明。

### 例 1.4.1

一个 3 位半的数字万用表,其直流电压 200 mV 挡的灵敏度  $K$  是多少?

### 解答

由 3 位半数字万用表中直流电压 200 mV 挡的结构和工作原理可知,系统的输入量  $x$  为电压,输出量  $y$  为数码  $N$ ,且  $N$  的显示范围限定在  $0 \sim 1999$ 。实测表明,当输入量  $x$  由 5 mV 变化到 10 mV 时,输出量  $y$  的数码  $N$  由 50 变化到 100(注意:此时应不考虑显示出的小数点),因此得到:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{100 - 50}{(10 - 5)} \text{ mV}^{-1} = 10 \text{ mV}^{-1}$$

计算结果表明,此挡的灵敏度  $K$  为  $(10/\text{mV})$ ,其含义是输入量每变化 1 mV,输出数码就变化 10。故设计此挡时,要将数码  $N$  的个位左边的小数点同时点亮。这样,当输入量为 1 mV 时,显示器将显示 1.0,表示输入量为 1.0 mV,显示正确。

## 3. 最小可检测量 $x_{\min}$

系统的最小可检测量  $x_{\min}$  是使系统能产生输出的最小的输入量。为了获得系统的最小可检测量  $x_{\min}$ ,在其输出端要有显示单元。对于最小可检测量  $x_{\min}$ ,举例说明如下。

### 例 1.4.2

一个 3 位半的数字万用表,其直流电流 200 mA 挡的最小可检测量  $x_{\min}$  是多少?

**解答**

由 3 位半数字万用表中直流电流 200 mA 挡的结构和工作原理可知,系统的输入量  $x$  为电流,输出量  $y$  为数码  $N$ ,且  $N$  的显示范围限定在  $0\sim 1999$ 。当输出量  $y$  的数码  $N=001$  时,对应的输入量  $x$  即为系统的最小可检测量  $x_{\min}$ 。对于 200 mA 挡来说,设计此挡时,要将数码  $N$  的个位左边的小数点同时点亮。这样一来,直流电流 200 mA 挡的最小可检测量  $x_{\min}$  则为 0.1 mA,而最大量程为 199.9 mA。

在没有干扰和噪声的理想情况下,线性系统的最小可检测量  $x_{\min}$  就是系统的分辨率。

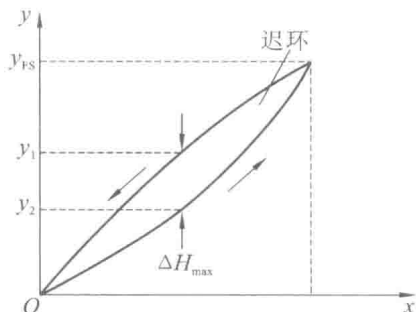


图 1.4.5 系统的迟滞特性

**4. 迟滞**

系统在输入量由小到大(正行程)及由大到小(反行程)的变化期间所测得的输入-输出特性曲线不重合的现象称迟滞,如图 1.4.5 所示。系统出现迟滞的原因,是系统中含有不合格的传感元件或探测器。必须设法消除迟滞现象,否则系统就没有实用价值。

**5. 温度漂移**

温度漂移简称温漂,表示在输入不变的情况下,系统输出值随着温度的变化而变化的特性。

温漂  $W_p$  是以温度变化  $1\text{ }^\circ\text{C}$  所引起的输出变化量的最大值  $\Delta y_{\max}$  与满量程输出  $y_{FS}$  的百分比来表示的。即:

$$W_p = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{FS} \Delta T} \quad (1.4.9)$$

式中,  $\Delta T$  为温度变化值。

温漂的成因是由组成系统的元器件的温度特性所决定的,而元件的温度特性又取决于制造元件所使用的材料。而在众多的基础材料中,用得最多的是半导体,而半导体的温度特性又比较差,半导体的导电性能会随着温度的变化而产生较大的变化。如果系统的温漂过大,则无使用价值。要减小或克服系统的温漂,从理论上分析,一般有如下三种方法。

(1) 采用温度特性优良的材料制造元器件,这种材料的导电性能不随温度的变化而变化,但是能取代半导体的这种优良材料还没有研制出来。

(2) 在系统设计中采取措施,如放大器的设计中采用稳定工作点的偏置电路、负反馈以及热敏电阻等。

(3) 使系统工作在温度相对恒定的环境中,如在计算机的机箱内安装风扇,在 CPU 的背部安装风扇等和其他稳定环境温度的措施。

**6. 重复性**

在相同的工作条件下,系统的输入量由小到大(正行程)及由大到小(反行程)进行变化,在满量程范围内进行多次测量时,所测得的输入-输出特性曲线保持不变,即称此系统具有重复性。不具有重复性的系统,没有实用价值。例如,一个电子秤,对于同一个物品的称量,必须在满量程范围内进行多次测量时具有相同的测量值,否则就没有实用价值。系统不具有重复性的原因,一般是因为系统中的某些元器件性能不稳定造成的,必须设法找出来并进行更换。

**7. 可靠性**

系统的可靠性是指系统在规定时间内和规定条件下,完成规定功能的能力。规定时间包括储存时间和使用时间;规定条件包括环境条件、使用条件、维修条件等;规定功能是指给

系统设计的各类技术指标。系统的可靠性一般用概率来衡量,系统的可靠性只有达到100%,这个系统才具有实用价值。假设每个元器件的可靠性是99.999%,系统由10个元器件组成,则系统的可靠性只有 $(99.999\%)^{10}=99.990\%$ ;若系统由100个元器件组成,则系统的可靠性降为 $(99.999\%)^{100}=99.900\%$ 。可见组成系统的元器件越多,对每个元器件的可靠性要求越高。

### 8. 测量仪表的精度等级

传感器和光电探测系统最终都会构成一个工程上能实用的测量仪表或生产控制装置。对于测量仪表的精度等级,国家标准《工业过程测量和控制用检测仪表和显示仪表精确度等级》(GB/T 13283—2008)作了规定,简要介绍如下。

(1) 定义仪表的测量误差为仪表的测量读数与被测量的真值之差。

(2) 定义仪表的基本误差(又称相对误差)为:

$$A = \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \times 100\% \quad (1.4.10)$$

式中: $\Delta Y_{\max}$ 为测量的最大绝对误差; $Y_{\max}$ 为最大测量读数; $Y_{\min}$ 为最小测量读数。

将基本误差去掉“%”号后,就是国家标准规定的测量仪表的精度等级。国家标准中有如下若干等级:0.01,0.02,0.03,0.05,0.1,0.2,0.25,0.3,0.4,0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,4.0,5.0。例如,某台测温仪的基本误差为0.1%,则其精度等级为0.1级。又如,某台测温仪的基本误差为1.3%,则其精度等级为1.5级(因为国标中没有1.3级,故只能往后定为1.5级,而不能往前定为1.0级)。

**例 1.4.3** 一台精度等级为0.01级,量程范围为1 500~2 000 °C的温度仪表,它测量时,允许的最大绝对误差是多少?检测某点的最大绝对误差为5 °C,此表是否合格?

**解**

由式1.4.10可知,允许的最大绝对误差为:

$$\Delta Y_{\max} = A(y_{\max} - y_{\min})$$

代入题设参数可得: $\Delta Y_{\max} = A(y_{\max} - y_{\min}) = 0.01 \times (2\,000 - 1\,500)^\circ\text{C} = 5^\circ\text{C}$ ,因检测某点的最大绝对误差为5 °C,没有超过允许的最大绝对误差,故此表合格。

**例 1.4.4** 一台量程范围为0~200 °C的温度仪表,检验测试结果其最大绝对误差 $\Delta Y_{\max} = 4^\circ\text{C}$ 试判断该温度仪表的精度等级。

**解**

由题意可知该温度仪表的相对误差为:

$$A = \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \times 100\% = \frac{4}{200} = 2.0\%$$

故该温度仪表为2.0级。

## 1.4.2 动态特性

图1.1.1所示的传感器和图1.2.1所示的光电探测系统都有各自的特性,但它们都符合“信号与系统”课程中关于“系统”的定义,即它们都是由若干相互联系、相互依赖的部件(或单元、元素)按一定规则组合而成,并能实现一定功能的整体。对于实际的物理系统,常讨论的重要性质有稳定性、时域特性和频域特性。动态特性是时域特性之一,讨论传感器和光电探测系统的动态特性,可以从一般系统的动态特性着手。

当系统的输入量是随时间变化而变化的时间变量 $x(t)$ 时,则系统的输出量也是随时间变化而变化的时间变量,记为 $y(t)$ ,如图1.4.6所示。 $y(t)$ 的特性就是系统的动态特性。只



图 1.4.6 输入、输出均为时间变量的系统

要求得  $y(t)$  的表达式或波形图,系统的动态特性就一目了然。

系统从大的方面来分类,可分为线性系统和非线性系统。

对于线性系统的性质,已有许多文献和教材进行了详细的论述。

对于非线性系统,还在不断的探索和研究之中。严格来说,大多数

系统都是非线性系统。为了研究非线性系统的性质和求解非线性系统,可采用近似的方法,即在小信号输入范围内,把非线性系统近似等效为线性系统。所以在讨论传感器和光电探测系统的动态特性时,也可采用这种方法。

对于线性系统,在已知输入  $x(t)$ 、系统结构及其元件参数的条件下,为了求得输出  $y(t)$ ,可列出描写系统工作特性的输入-输出微分方程:

$$\begin{aligned} \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1.4.11)$$

求解这个微分方程,即可求得系统的动态特性  $y(t)$ 。对于式(1.4.11)的各种求解方法,在“信号与系统”课程中有详尽的论述,这里不再赘述。对于实际的物理系统,在式(1.4.11)中,满足  $n \geq m$ 。当  $n=1$  时,该系统称为一阶系统;当  $n=2$  时,该系统称为二阶系统,依此类推。

系统的输入  $x(t)$  又称为激励,系统的动态特性  $y(t)$  又称为响应。响应有完全响应  $y(t)$ 、零输入响应  $y_{zi}(t)$ 、零状态响应  $y_{zs}(t)$  之分。并且完全响应等于零输入响应与零状态响应之和,即:

$$y(t) = y_{zi}(t) + y_{zs}(t) \quad (1.4.12)$$

在实际应用中,系统开始启动时,其起始状态一般为零。因此由起始状态产生的零输入响应为零,此时系统的动态特性(系统的完全响应),等于零状态响应,即:

$$y(t) = y_{zs}(t) \quad (1.4.13)$$

求得系统的动态特性后,便可根据其判断质量的好坏。例如,系统的动态特性  $y(t)$  能否真实地反映系统的输入  $x(t)$ ,是否存在失真、延时等。通过观察判断后,可对系统设计提出改进措施。改进系统特性的方法是,根据描写系统工作特性的输入-输出微分方程式(1.4.11),画出系统的直接模拟图,然后可选择用软件在计算机上实现,可以通过改变直接模拟图的有关参数来获得所需要的系统特性,最后,根据改进后的参数重新改造系统。

系统的时域特性除了动态特性(系统的完全响应)外,还包括系统的冲激响应和阶跃响应。在时域中观察和分析系统的性质,除了通过求系统的动态特性之外,还可以通过求系统的冲激响应和阶跃响应来进行。冲激响应  $h(t)$  是激励为单位冲激函数  $\delta(t)$  时系统的零状态响应;而阶跃响应  $y_e(t)$  是激励为单位阶跃函数  $\epsilon(t)$  时系统的零状态响应。

### 1.4.3 频域特性

传感器和光电探测系统在小信号输入的情况下,可作为线性系统来处理,1.4.2节简要地讨论了线性系统的时域特性,本节讨论线性系统的频域特性,频域特性又称为频响特性。所谓频响特性是指系统在输入量为正弦波时,输出量的变化情况,这包括幅度和相位两个方面的变化情况。在“信号与系统”课程中已经证明,当系统的输入量为正弦波时,其输出量的稳态部分也是同频率的正弦波,只是振幅已被系统的幅频特性所加权,相位是输入正弦波的相位与系统的相频特性相加。