



普通高等教育“十三五”规划教材
“十三五”江苏省高等学校重点教材

Sensor and Automatic
Detecting Technology

传感器与 自动检测技术

◎ 张青春 纪剑祥 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十三五”规划教材

“十三五”江苏省高等学校重点教材 (编号: 2017-2-023)

传感器与自动检测技术

张青春 纪剑祥 主编



机械工业出版社

本书针对应用型本科教育和新工科的特点,以信息的传感、转换、处理为核心,按检测技术基础(第1~2章)、传感器原理及应用(第3~8章)、自动检测系统(第9~11章)三大模块组织内容。检测技术基础模块介绍了传感器与检测技术基础、测量误差与数据处理。传感器原理及应用模块以被测量为主线,分别介绍温度、力学量、声波、磁敏、光电式、气敏与湿敏等各类传感器的原理、结构、性能及其应用电路,并针对不同类型的传感器给出多个应用实例。自动检测系统模块包含虚拟仪器、无线传感器网络与物联网和自动检测系统共三章内容,第9章介绍虚拟仪器的概念、开发环境和数据采集;第10章介绍无线传感器网络与物联网的概念、技术架构、无线通信及其应用;第11章介绍自动检测系统的组成、设计方法和设计案例。

本书编写体系有一定的创新,内容组织合理,内容安排符合学习规律,注重工程实践训练和创新能力的培养。本书可作为普通高校应用型本科中的测控技术与仪器、自动化类、电子信息类、电气类、物联网等专业的教材,也可供相关专业技术人员参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作为教材的教师登录 www.cmpedu.com 注册下载,或发邮件至 [jinacmp@vip.163.com](mailto:jnacmp@vip.163.com) 索取。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与自动检测技术/张青春,纪剑祥主编. —北京:机械工业出版社,2018.5

“十三五”江苏省高等学校重点教材 普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-59353-9

I. ①传… II. ①张… ②纪… III. ①传感器-高等学校-教材②自动检测-高等学校-教材 IV. ①TP212②TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第044311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:吉玲 责任编辑:吉玲 张丽萍 刘丽敏

责任校对:刘岚 封面设计:张静

责任印制:李昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.75印张·378千字

标准书号:ISBN 978-7-111-59353-9

定价:38.00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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

本书是“十三五”江苏省高等学校重点教材，教材内容体系是编写团队教改研究和精品课程建设的成果。

传感器是实现物理环境或人类社会信息获取的基本工具，是检测系统的首要环节，是信息技术和物联网的源头，是智能检测技术与应用的基础，在国民经济中具有“倍增器”作用。工信部、科技部、财政部、国家标准化委员会于2013年3月联合印发《加快推进传感器及智能化仪器仪表产业发展行动计划》，实施期为2013~2025年。“中国制造2025”中明确把研制智能传感器、高端仪表标准作为研究的重点项目。

教材在保证课程的基本理论、基本方法和基本技能训练等传统内容的基础上，在内容阐述上赋予新技术、新方法和新应用，注重最新科研成果在课程中的渗透，结合专业和学科特点，突出应用性，具有一定学术价值。本书的主要特色与创新体现在如下几个方面：

(1) 精选教学内容，融入新技术。内容的选取根据我国当前工业生产及科研应用的实际，以信息的传感、转换、处理为核心，从基本概念入手，分别介绍温度、力学量、声波、磁敏、光电式、气敏和湿敏等各类传感器的原理、结构、性能及其应用电路。既介绍传统的传感器，也介绍新型传感器、集成传感器，还介绍了虚拟仪器、无线传感网与物联网等新技术。

(2) 以掌握概念、强化应用为重点，实现理论知识和实际应用的有机统一。第3~8章介绍了传感器原理及应用，各章均安排了典型应用部分，针对不同类型的传感器给出应用实例；第9~11章介绍了自动检测系统，给出了编写团队近年来在自动检测技术、虚拟仪器和物联网方面的多个研究成果案例，供读者在进行相关自动检测系统设计时参考。

(3) 采用模块化结构，思路清晰，易于理解。本书共分为三大模块。第1~2章为检测技术基础模块，介绍传感器与检测技术基础、误差理论和数据处理；第3~8章为传感器技术模块，介绍各类传感器的原理及应用；第9~11章为自动检测技术模块，介绍虚拟仪器、无线传感器网络与物联网、自动检测系统。本书编写体系有一定的创新，内容组织合理，符合学习规律，有利于教学。本书重点突出，难点得到分解，便于初学者理解和掌握，较好地处理了内容多、学时少的矛盾。

(4) 传感器部分采用按被测量分章，实用性强。区别于传统教材按工作原理分章的方法，本书采用按被测量（输入量）分章，进行传感器原理及应用技术的讲解，有利于学生及使用者对传感器进行比较、选型，突出了教材的实用性，构建了全新的课程教材体系。

(5) 以学生为本，建立立体化的教材体系。本书适用于“自动检测技术”“传感器技术”“传感器原理及应用”等课程的理论教学。本书编写组已制作完成本课程的PPT、课后

习题参考答案和精品课程网络课堂，为学生的学习提供形式多样的立体化教材体系，尽量使学生的学习不受时间和空间的约束，培养学生的自学能力以及分析问题和解决问题的能力。

本书可作普通高校应用型本科中的测控技术与仪器、自动化类、电子信息类、电气类、物联网等专业的教材，也可供相关专业技术人员参考。

本书由张青春、纪剑祥主编，李洪海、李华、白秋产、段卫平、付丽辉参与了本书的部分章节编写和校对工作。江苏苏仪集团陈云副总经理、南京聚擎测控技术有限公司朱云云工程师、武汉创维特科技有限公司丁林副总经理分别对第3~4章、第9章、第10章提出了建议和意见，本书参考文献中所列出的各位作者以及众多未能一一列出的作者为编著者提供了宝贵而丰富的参考资料，在此表示诚挚的谢意。同时，对机械工业出版社的大力支持和帮助表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，恳请各位专家和读者不吝赐教，以利于不断完善。

编者邮箱：1524668968@qq.com。

编 者

目 录

前言	
第 1 章 传感器与检测技术基础	1
1.1 检测技术概论	1
1.1.1 检测技术	1
1.1.2 传感器与检测技术的作用与地位	1
1.2 传感器的定义及其分类	2
1.2.1 传感器的定义与组成	2
1.2.2 传感器的分类	2
1.3 传感器的基本特性	3
1.3.1 传感器的静态特性	3
1.3.2 传感器的动态特性	6
1.4 传感器技术的发展	9
思考题与习题	10
第 2 章 测量误差与数据处理	11
2.1 测量误差的基本概念	11
2.1.1 量值	11
2.1.2 误差的表达方法	11
2.2 误差的分类及其来源	13
2.2.1 系统误差	13
2.2.2 随机误差	13
2.2.3 粗大误差	13
2.3 测量误差的处理	14
2.3.1 随机误差的处理	14
2.3.2 系统误差的处理	16
2.3.3 粗大误差的处理	17
思考题与习题	18
第 3 章 温度传感器	19
3.1 热电偶	19
3.1.1 热电偶传感器测温原理	19
3.1.2 热电偶的基本定律	22
3.1.3 热电偶的结构与种类	23
3.1.4 热电偶的冷端温度补偿	25
3.1.5 热电偶的实用测温电路	26
3.2 热电阻	27
3.2.1 铂热电阻	27
3.2.2 铜热电阻	28
3.2.3 热电阻的测量电路	28
3.3 热敏电阻	29
3.3.1 热敏电阻的结构与特点	29
3.3.2 热敏电阻的类型及其温度特性	30
3.4 辐射式温度传感器	30
3.4.1 辐射测温的物理基础	30
3.4.2 辐射式测温方法	31
3.5 集成温度传感器	32
3.5.1 集成温度传感器的工作原理及分类	32
3.5.2 电压型集成温度传感器 μ PC616A/C	32
3.5.3 电流型集成温度传感器 AD590	33
3.5.4 数字型温度传感器 DS18B20	34
3.6 温度传感器的应用	34
3.6.1 NTC 热敏电阻温度控制	34
3.6.2 PTC 热敏电阻自动延时电路	34
3.6.3 管道流量测量	35
3.6.4 集成温度传感器温差测量	35
思考题与习题	35
第 4 章 力学量传感器	37
4.1 应变式压力传感器	37
4.1.1 电阻应变效应	37
4.1.2 电阻应变片的种类和结构	38
4.1.3 电阻应变式传感器的测量电路	39
4.1.4 电阻应变片温度误差及其补偿	42
4.2 压电式传感器	44
4.2.1 压电效应	44
4.2.2 压电材料	46

4.2.3 测量电路	47	6.2.1 电涡流传感器的工作原理	89
4.3 电容式传感器	51	6.2.2 电涡流传感器的测量电路	91
4.3.1 电容式传感器的工作原理	51	6.3 霍尔式传感器	92
4.3.2 电容式传感器的测量电路	55	6.3.1 霍尔效应	92
4.3.3 电容式压力传感器	57	6.3.2 霍尔元件	93
4.4 电感式压力传感器	57	6.3.3 霍尔元件的误差及其补偿	94
4.4.1 自感式压力传感器	58	6.3.4 霍尔式传感器的基本测量电路	96
4.4.2 互感式压力传感器	62	6.4 半导体磁阻传感器	96
4.5 力学量传感器的应用	64	6.4.1 磁阻效应	96
4.5.1 电阻式传感器测量力、重量和 加速度	64	6.4.2 磁敏电阻元件	97
4.5.2 压电式传感器测量力和加速度	68	6.4.3 磁敏电阻的温度补偿	97
4.5.3 电容式传感器测量位移、加速度、 厚度和液位	68	6.5 结型磁敏器件	98
4.5.4 电感式传感器测量压力和加 速度	70	6.5.1 磁敏二极管	98
思考题与习题	72	6.5.2 磁敏晶体管	99
第5章 声波传感器	74	6.6 磁敏传感器的应用	101
5.1 声波概述	74	6.6.1 磁电感应式振动速度传感器和 电磁流量计	101
5.1.1 声波	74	6.6.2 电涡流传感器振幅、转速测量和 无损探伤	101
5.1.2 声波的物理特性	74	6.6.3 霍尔式传感器位移、转速和功率 测量	102
5.2 微波传感器	76	6.6.4 交流电流监视器	104
5.2.1 微波传感器的工作原理	77	6.6.5 磁电式无触点开关	104
5.2.2 微波传感器的组成	77	思考题与习题	105
5.2.3 微波传感器的特点	78	第7章 光电式传感器	106
5.3 超声波传感器	78	7.1 光电式传感器的类型和基本形式	106
5.3.1 超声波及其特性	78	7.1.1 光电式传感器的类型	106
5.3.2 超声波传感器的分类	78	7.1.2 光电式传感器的基本形式	107
5.4 次声波传感器	80	7.2 光电效应与光电器件	107
5.4.1 次声波及其特性	80	7.2.1 外光电效应及其典型器件	108
5.4.2 次声波传感器的分类	80	7.2.2 内光电效应及其典型器件	111
5.5 声波传感器的应用	81	7.2.3 光生伏特效应及其典型器件	114
5.5.1 微波液位和湿度检测	81	7.3 光纤传感器	120
5.5.2 超声波物位、流量测量和无损 探伤	82	7.3.1 光纤的传光原理及主要特性	121
5.5.3 次声波管道泄漏定位和灾害 预测	85	7.3.2 光纤传感器的组成和分类	122
思考题与习题	86	7.4 计量光栅传感器	123
第6章 磁敏传感器	87	7.4.1 光栅的结构和分类	123
6.1 磁电感应式传感器	87	7.4.2 光栅传感器的工作原理	124
6.1.1 磁电感应式传感器的工作原理	87	7.4.3 辨向与细分技术	127
6.1.2 磁电感应式传感器的测量电路	89	7.5 光电编码器	128
6.2 电涡流传感器	89	7.5.1 工作原理	128
		7.5.2 光电码盘	129
		7.6 红外传感器	131

7.6.1 红外辐射基本性质	131	第9章 虚拟仪器	171
7.6.2 热探测器	132	9.1 虚拟仪器概述	171
7.6.3 光子探测器	133	9.1.1 虚拟仪器的组成	171
7.7 CCD 图像传感器	133	9.1.2 虚拟仪器与传统仪器的比较	171
7.7.1 CCD 的基本结构和工作原理	134	9.1.3 虚拟仪器的优点	173
7.7.2 CCD 的特性参数	136	9.2 LabVIEW 虚拟仪器开发环境	173
7.7.3 CCD 图像传感器的分类	137	9.2.1 LabVIEW 程序的基本构成	173
7.8 光电式传感器的应用	139	9.2.2 LabVIEW 程序的特点	174
7.8.1 精密核辐射探测器	139	9.3 虚拟仪器在工程中的应用	176
7.8.2 光电式火灾探测报警器	140	9.4 虚拟仪器数据采集	177
7.8.3 路灯自动控制器和楼道双光控延时开关	141	9.4.1 数据采集 (DAQ) 系统组成	177
7.8.4 光电式数字转速计	141	9.4.2 数据采集 (DAQ) 设备	177
7.8.5 光纤温度、图像和流量传感器	142	9.4.3 DAQ 系统中的计算机	178
思考题与习题	144	9.4.4 DAQ 系统中的软件组件	178
第8章 气敏与湿敏传感器	146	9.4.5 使用 LabVIEW 连接测量硬件	178
8.1 气敏传感器	146	9.5 超越 PC 的虚拟仪器系统	183
8.1.1 气敏传感器概述	146	思考题与习题	183
8.1.2 半导体电阻式气敏传感器	147	第10章 无线传感器网络与物联网	185
8.1.3 接触燃烧式气敏传感器	149	10.1 无线传感器网络	185
8.1.4 红外吸收式气敏传感器	151	10.1.1 无线传感器网络概念	185
8.1.5 热导式气敏传感器	153	10.1.2 无线传感器网络工作原理	185
8.1.6 热磁式气体分析传感器	154	10.1.3 无线传感器节点构成	186
8.2 湿敏传感器	155	10.2 物联网	187
8.2.1 湿敏传感器概述	155	10.2.1 物联网的定义	187
8.2.2 电阻式湿敏传感器	156	10.2.2 物联网的技术架构	187
8.2.3 电容式湿敏传感器	160	10.2.3 物联网的特点	188
8.2.4 集成电容式湿敏传感器 IH3605	161	10.3 物联网的无线通信技术	189
8.3 气敏与湿敏传感器的应用	163	10.3.1 近距离无线通信	189
8.3.1 简易家用气体报警电路	163	10.3.2 远距离移动无线通信	190
8.3.2 便携式矿井瓦斯超限报警器	163	10.4 物联网的应用	191
8.3.3 有害气体鉴别、报警与控制电路	163	10.4.1 智能交通物联网	191
8.3.4 酒精检测报警器	164	10.4.2 智能家居物联网	193
8.3.5 汽车后车窗玻璃自动去湿装置	165	10.4.3 智能农业物联网	195
8.3.6 房间湿度控制器	165	10.4.4 智能医疗物联网	195
8.3.7 镜面水汽清除器	166	思考题与习题	197
8.3.8 土壤缺水告知器	166	第11章 自动检测系统	198
8.3.9 电容式谷物水分测量仪	167	11.1 自动检测系统的结构组成	198
8.3.10 重油含水量测量	168	11.1.1 自动检测系统的基本结构	198
思考题与习题	170	11.1.2 自动检测系统的组成	199
		11.1.3 自动检测系统的软件	202
		11.2 自动检测系统的基本设计方法	204
		11.2.1 系统需求分析	204

11.2.2	系统总体设计	204			
11.2.3	采样频率的确定	205			
11.2.4	标度变换	205			
11.2.5	硬件设计	206			
11.2.6	软件设计	208			
11.2.7	系统集成与维护	209			
11.3	自动检测系统的设计案例	209			
11.3.1	智能人体电子秤	209			
11.3.2	基于虚拟仪器直流电动机性能的				
				综合测试系统	211
			11.3.3	基于 ZigBee 建筑塔吊安全监测	
				预警系统	216
			11.3.4	基于 WSN 和 COMWAY 协议温室	
				大棚参数远程监控系统	221
			11.3.5	基于 GPRS 和 OneNet 水质远程	
				监测预警系统	227
				思考题与习题	241
				参考文献	242

传感器与检测技术基础

1.1 检测技术概论

1.1.1 检测技术

检测技术是以研究自动检测系统中的信息提取、信息转换、信息处理以及信息传输的理论和技術为主要内容的一门应用技术学科；具有参数测量功能、参数监测控制功能和测量数据分析判断功能。

广义地讲，检测技术是信息技术的四大支柱之一。信息技术包括检测技术、计算机技术、自动控制技术和通信技术。

信息提取是指从自然界诸多被测量（物理量、化学量、生物量、机械量、热工量等）中提取有用的信息，实现非电量与电量或电参数的转换。物理及化学量主要有浓度、湿度、密度、比重、成分、pH 值、PM2.5、VOC 等；生物量主要有血压、体温、心率、酶、微生物、细胞、DNA 等；机械量主要有位移、尺寸、振动、加速度等；热工量主要有温度、压力、流量、流速等。

信息转换是将提取的信息进行电量形式、幅值、功率的转换。如将 R 、 C 、 L 等电参数转换为电压信号，将电压进行放大，将电压信号转换为电流、频率等。信息转换一般通过硬件实现。

信息处理是根据输出环节的需要，将变换后的电信号进行数值运算、A-D 变换等处理。如加、减、乘、除、二次方、开方等数学运算，滤波、整形、相关运算、小波分析等信号处理。信息处理可以通过硬件或软件实现。

信息传输是指在排除干扰的情况下，经济地、准确无误地把信息进行远、近距离的传递，包括有线传输和无线传输。

传感器位于研究对象与测控系统之间的接口位置，是感知、获取与检测信息的窗口。一切科学实验和生产实践，特别是自动控制系统中要获取的信息，都要首先通过传感器获取并转换为容易传输和处理的电信号。传感器是实现对物理环境或人类社会信息获取的基本工具，是检测系统的首要环节，是信息技术的源头。

1.1.2 传感器与检测技术的作用与地位

传感器与检测技术在信息技术领域具有十分重要的基础性地位，推动了现代科学技术的

进步，在国民经济中具有“倍增器”作用。

1) 与人们日常生活密切相关。如家用电器温度设定、控制、显示；家居防火、防盗、防煤气泄漏；智能家居的灯光控制；居家老人的健康监护等。

2) 推进信息化与工业化的深度融合。工业生产中，借助检测技术，提高自动化程度，提高产品质量，提高经济效益；对工艺参数、成分进行检测与控制；对工业设备运行状态进行监测；对产品质量进行自动测试；对产品数量进行自动计数等。

3) 助推智能农业快速发展。气象预报，温室大棚的温湿度、光照、CO₂、pH 值、风力的测量与控制，水土成分的测量与分析；工厂化水产和牲畜养殖环境参数的测量与控制等。

4) 是国防现代化的技术保障。雷达导航，卫星定位系统，航母战斗群及潜艇水下声纳系统测物、测距、测向，现代化战争中目标精确定位、精准打击等。

5) 在智能交通中有广泛的应用。公路交通违章监控、测速、超载称重，轨道交通（高铁、动车、地铁、轻轨、云轨）运营设备在线监测，水运航向、水位、风力、荷载测量，机场危险品检查等。

1.2 传感器的定义及其分类

1.2.1 传感器的定义与组成

根据我国国家标准（GB/T 7665—2005），传感器（Transducer/Sensor）定义为：能够感受规定的被测量并按照一定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的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件的感受或响应的被测量转换成适于传输和处理的电信号部分。

传感器的共性就是利用物理定律或物质的物理、化学或生物特性，将非电量（如位移、速度、加速度、力等）输入转换成电量（电压、电流、电荷）或电参数（电阻、电容、电感、频率等）输出。

根据传感器的定义，传感器的基本组成为敏感元件和转换元件两部分，分别完成检测和转换两个基本功能。传感器的典型组成如图 1.1 所示。

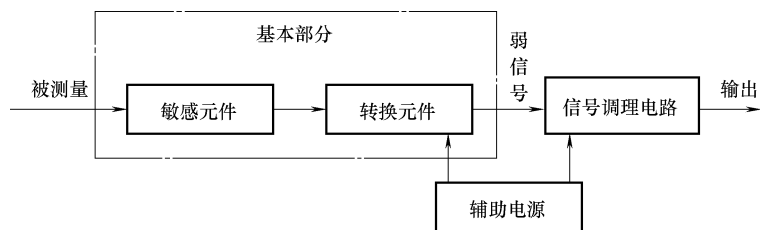


图 1.1 传感器的典型组成

1.2.2 传感器的分类

传感器可按输入量、输出量、工作原理、基本效应、能量变换关系以及所蕴含的技术特征等进行分类，见表 1.1。其中按输入量和工作原理的分类方法应用较为普遍。

表 1.1 传感器的分类表

传感器分类方法	传感器名称
输入量(被测参数)	位移传感器、速度传感器、加速度传感器、温度传感器、湿度传感器、流量传感器、压力传感器等
输出量(输出信号)	模拟式传感器、数字式传感器
工作原理	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、光电式传感器等
基本效应	物理传感器:力学量、光学量、温度、物位、流量、尺寸等传感器 化学传感器:成分、湿度、酸碱度、反应速度等传感器 生物传感器:酶、生物组织、微生物、免疫、细胞、DNA 等传感器
能量变换关系	能量变换型(发电型、有源型)传感器、能量控制型(参量型、无源型)传感器
技术特征	普通传感器、集成传感器、智能传感器、无线传感器

1.3 传感器的基本特性

传感器的基本特性包括静态特性和动态特性。

1.3.1 传感器的静态特性

1. 精确度

传感器的精确度简称精度，与精密度和准确度有关。

(1) 精密度 说明传感器输出值的分散性，是随机误差大小的标志。精密度高，意味着随机误差小，但不一定准确度高。

(2) 准确度 说明传感器输出值与真值的偏离程度，是系统误差大小的标志。准确度高意味着系统误差小；准确度高不一定精密度高。

(3) 精确度(精度) 它是精密度和准确度两者的总和，精确度高表示精密度、准确度都比较高。可用公式表示为

$$A = \frac{\Delta A}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.1)$$

式中 ΔA 为测量范围内允许的最大误差； y_{FS} 为传感器满量程输出。

以射击为例，加深对三个概念的理解。图 1.2a 准确度高，精密度低；图 1.2b 准确度高，精密度高；图 1.2c 准确度、精密度都高，精确度高。

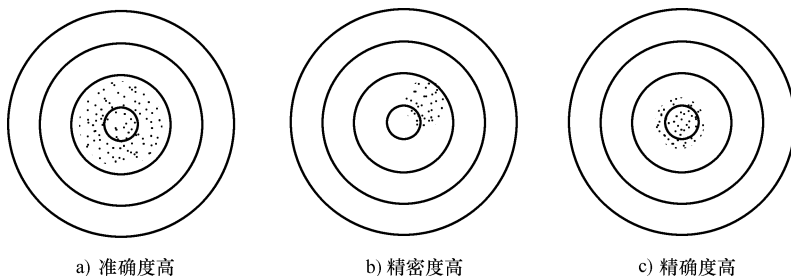


图 1.2 精度的划分及其意义

2. 稳定性

传感器的稳定性可用稳定度和影响量两个指标来表示。

(1) 稳定度 在测量条件不变时,在规定时间内,传感器中随机变动、周期性变动和漂移等引起传感器输出的变化量,称为稳定度,一般可用精密度和观测时间来表示。例如,传感器输出电压值每小时变化 1.2mV,则其稳定度可表示为 1.2mV/h。

(2) 影响量 外界环境条件变化引起传感器输出的变化量,称为影响量,环境条件主要指温度、湿度、电源电压、频率、振动等。例如,某传感器由于工作电源电压变化 10%而引起其输出值变化 0.01mA,则其影响量可表示为 $0.01\text{mA}/(U \pm 10\%U)$ 。

3. 传感器的静态输入-输出特性

静态特性是指输入的被测参数不随时间而变化或随时间变化很缓慢时,传感器的输出量与输入量的关系。

(1) 线性度 线性度是指传感器输出与输入之间实际曲线偏离其拟合直线的程度。设传感器实际输入-输出关系曲线用下列多项式代数方程表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1.2)$$

式中 y 为输出量; x 为输入量; a_0 为零点输出; a_1 为理论灵敏度; a_2 、 a_3 、 \dots 、 a_n 为非线性系数。通常用相对误差 δ_L 来表示为

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (1.3)$$

式中, ΔL_{\max} 为最大非线性误差; Y_{FS} 为满量程输出。

图 1.3 为传感器输入-输出特性线性化图。实际拟合直线的方法有理论拟合、端点拟合、过零旋转拟合、端点平移拟合、最小二乘拟合等。其中拟合精度最高的是最小二乘拟合,拟合精度最低的是理论拟合。

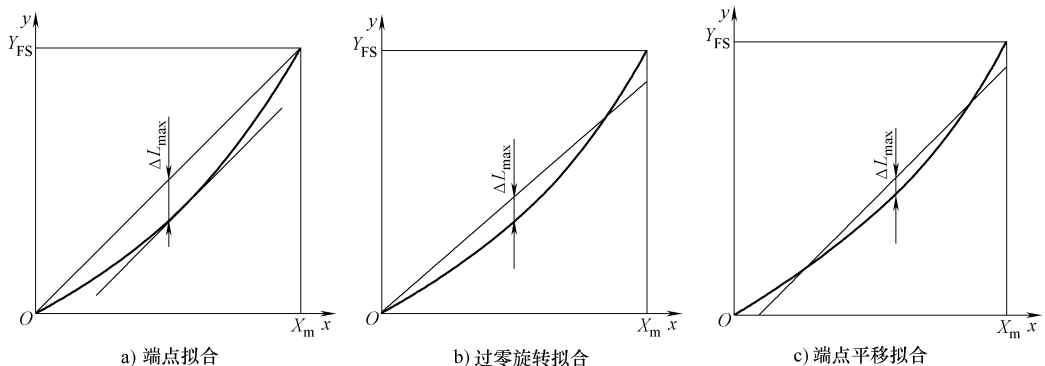


图 1.3 输入-输出特性线性化图

(2) 灵敏度 灵敏度表示传感器的输入增量 Δx 与由它引起的输出增量 Δy 之间的函数关系。即灵敏度 S 等于传感器输出增量与被测增量之比,它是传感器在稳态输入-输出特性曲线上各点的斜率,用公式可表示为

$$S = \frac{dy}{dx} = \frac{df(x)}{dx} = f'(x) \quad (1.4)$$

灵敏度表示单位被测量的变化所引起传感器输出值的变化量。 S 值越高表示传感器越

灵敏。

(3) 灵敏度阈与分辨力 灵敏度阈是指传感器最小所能够区别的读数变化量，是零点附近的分辨力。分辨力是指数字式仪表指示数字值的最后一位数字所代表的值，当被测量的变化量小于分辨力时，仪表的最后一位数不变，仍指示原值。灵敏度阈或分辨力都是有单位的量，它的单位与被测量的单位相同。

对于一般传感器的要求是，灵敏度应该大，而灵敏度阈应该小。但也不是灵敏度阈越小越好，因为灵敏度阈越小，干扰的影响越显著，会给测量的平衡过程造成困难，而且不经济。

因此，选择的灵敏度阈只要小于允许测量绝对误差的三分之一即可。灵敏度是广义的增益，而灵敏度阈则是死区或不灵敏区。

(4) 迟滞 迟滞，也叫回程误差，是指在相同测量条件下，对应于同一大小的输入信号，传感器正（输入量由小增大）、反（输入量由大减小）行程输出信号大小不相等的现象。

产生迟滞的原因：传感器机械部分存在不可避免的摩擦、间隙、松动、积尘等，引起能量吸收和消耗。

迟滞特性表明传感器正、反行程期间输入-输出特性曲线不重合的程度，如图 1.4 所示。迟滞的大小一般由实验方法来确定。用正反行程间的最大输出差值 ΔH_{\max} 对满量程输出 Y_{FS} 的百分比来表示，即

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.5)$$

(5) 重复性 重复性表示传感器在输入量按同一方向做全程多次测试时所得输入-输出特性曲线一致的程度。实际特性曲线不重复的原因与迟滞的产生原因相同。重复特性曲线如图 1.5 所示。

重复性指标一般采用输出最大不重复误差 ΔR_{\max} 与满量程输出 Y_{FS} 的百分比表示，即

$$\delta_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.6)$$

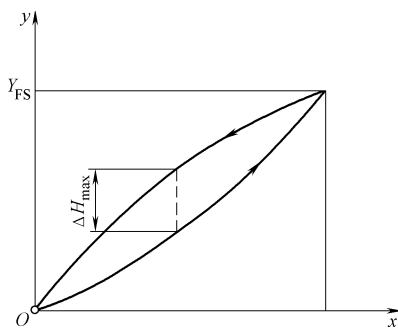


图 1.4 迟滞特性

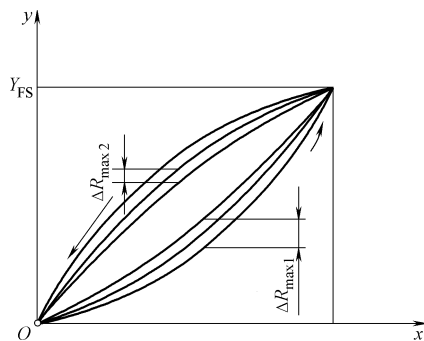


图 1.5 重复特性

(6) 漂移 漂移是指传感器在输入量不变的情况下，输出量随时间变化的现象；漂移将影响传感器的稳定性或可靠性（Stability or Reliability）。产生漂移的原因主要有两个：一是传感器自身结构参数发生老化，如零点漂移（简称零漂）；二是在测试过程中周围环境（如温度、湿度、压力等）发生变化，这种情况最常见的是温度漂移（简称温漂）。

1.3.2 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指传感器对动态激励（输入）的响应（输出）特性，即其输出对随时间变化的输入量的响应特性。

一个动态特性好的传感器，其输出随时间变化的规律（输出变化曲线），将能再现输入随时间变化的规律（输入变化曲线），即输出与输入具有相同的时间函数。但实际上由于制作传感器的敏感材料对不同的变化会表现出一定程度的惯性（如温度测量中的热惯性），因此输出信号与输入信号并不具有完全相同的时间函数，这种输入与输出间的差异称为动态误差，动态误差反映的是惯性延迟所引起的附加误差。

传感器的动态特性可以从时域和频域两个方面分别采用瞬态响应法和频率响应法来分析。在时域内研究传感器的响应特性时，一般采用阶跃函数；在频域内研究动态特性一般采用正弦函数。对应的传感器动态特性指标分为两类，即与阶跃响应有关的指标和与频率响应特性有关的指标。

1) 在采用阶跃输入研究传感器的时域动态特性时，常用延迟时间、上升时间、响应时间、超调量等来表征传感器的动态特性。

2) 在采用正弦输入信号研究传感器的频域动态特性时，常用幅频特性和相频特性来描述传感器的动态特性。

1. 传感器的数学模型

通常可以用线性时不变系统理论来描述传感器的动态特性。从数学上可以用常系数线性微分方程（线性定常系统）表示传感器输出量 $y(t)$ 与输入量 $x(t)$ 的关系为

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1.7)$$

式中， a_n, \dots, a_0 和 b_m, \dots, b_0 为与系统结构参数有关的常数。

线性时不变系统有两个重要的性质：叠加性和频率保持特性。

2. 传递函数

对式（1.7）做拉普拉斯变换，并认为输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 及它们的各阶时间导数的初始值（ $t=0$ 时）为 0，则得

$$H(s) = \frac{L[y(t)]}{L[x(t)]} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1.8)$$

式中， $s = \beta + j\omega$ 。

式（1.8）的右边是一个与输入 $x(t)$ 无关的表达式，它只与系统结构参数（ a, b ）有关，由此可见，传感器的输入-输出关系特性是传感器内部结构参数作用关系的外部特性表现。

3. 频率响应函数

对于稳定的常系数线性系统，可用傅里叶变换代替拉普拉斯变换，相应地有

$$H(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (1.9)$$

模（称为传感器的幅频特性）：

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{[H_R(\omega)]^2 + [H_I(\omega)]^2} \quad (1.10)$$

相角（称为传感器的相频特性）：

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)} \quad (1.11)$$

4. 传感器的动态特性分析

一般可以将大多数传感器简化为一阶或二阶系统。

(1) 一阶传感器的频率响应 一阶传感器的微分方程为

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1.12)$$

它可改写为

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = S_n x(t) \quad (1.13)$$

式中， τ 为传感器的时间常数（具有时间量纲）； S_n 为传感器的灵敏度。

这类传感器的幅频特性、相频特性分别为

$$\text{幅频特性} \quad A(\omega) = 1/\sqrt{1+(\omega\tau)^2} \quad (1.14)$$

$$\text{相频特性} \quad \varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (1.15)$$

图 1.6 为一阶传感器的频率响应特性曲线。从式 (1.14)、式 (1.15) 和图 1.6 看出，时间常数 τ 越小，此时 $A(\omega)$ 越接近于常数 1， $\varphi(\omega)$ 越接近于 0，因此，频率响应特性越好。当 $\omega\tau \ll 1$ 时， $A(\omega) \approx 1$ ，输出与输入的幅值几乎相等，它表明传感器输出与输入为线性关系。 $\varphi(\omega)$ 很小， $\tan(\varphi) \approx \varphi$ ， $\varphi(\omega) \approx -\omega\tau$ ，相位差与频率 ω 呈线性关系。

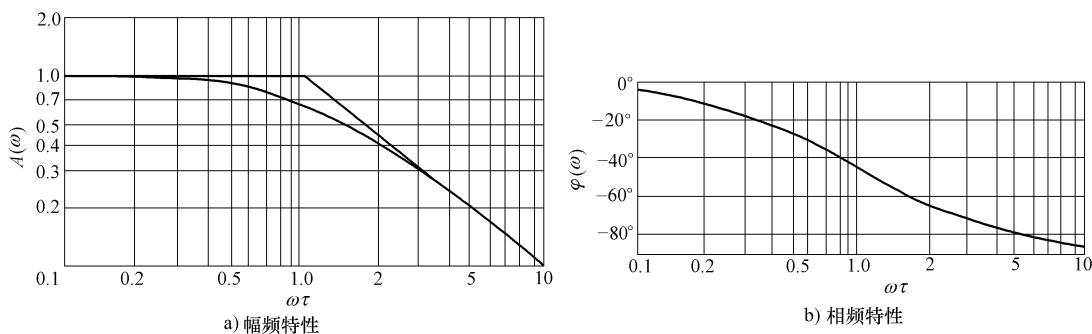


图 1.6 一阶传感器的频率响应特性曲线

(2) 二阶传感器的频率响应 典型的二阶传感器的微分方程为

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = a_0 x(t) \quad (1.16)$$

因此有

$$\text{幅频特性} \quad A(\omega) = \left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (1.17)$$

$$\text{相频特性} \quad \varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad (1.18)$$

式中, ω_n 为传感器的固有角频率, $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$; ζ 为传感器的阻尼系数, $\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0a_2}}$ 。

图 1.7 为二阶传感器的频率响应特性曲线。从式 (1.16)、式 (1.17) 和图 1.7 可见, 传感器的频率响应特性好坏主要取决于传感器的固有角频率 ω_n 和阻尼系数 ζ 。当 $0 < \zeta < 1$, $\omega_n \gg \omega$ 时, $A(\omega) \approx 1$ (常数), $\varphi(\omega)$ 很小, $\varphi(\omega) \approx -2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}$, 即相位差与频率 ω 呈线性关系, 此时, 系统的输出 $y(t)$ 真实准确地再现输入 $x(t)$ 的波形。

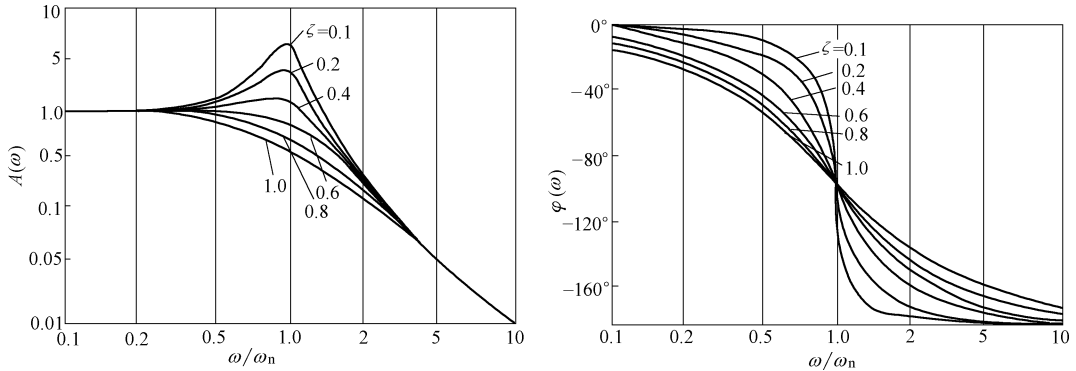


图 1.7 二阶传感器的频率响应特性曲线

在 $\omega = \omega_n$ 附近, 系统发生共振, 幅频特性受阻尼系数影响极大, 实际测量时应避免。

通过上面的分析, 可得出结论: 为了使测试结果能精确地再现被测信号的波形, 在传感器设计时, 必须使其阻尼系数 $\zeta < 1$, 固有角频率 ω_n 至少应大于被测信号频率 ω 的 (3~5) 倍, 即 $\omega_n \geq (3 \sim 5)\omega$ 。在实际测试中, 被测量为非周期信号时, 选用和设计传感器时, 保证传感器固有角频率 ω_n 不低于被测信号基频 ω 的 10 倍即可。

(3) 一阶或二阶传感器的动态特性参数 一阶或二阶传感器单位阶跃响应的时域动态特性分别如图 1.8、图 1.9 所示 ($S_n = 1, A_0 = 1$)。其时域动态特性参数描述如下。

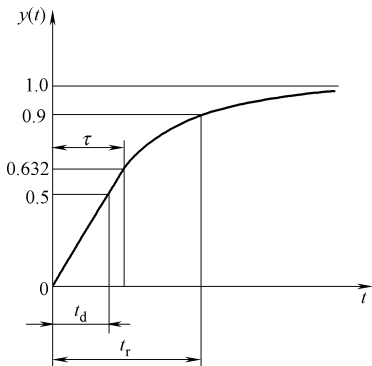


图 1.8 一阶传感器的时域动态特性

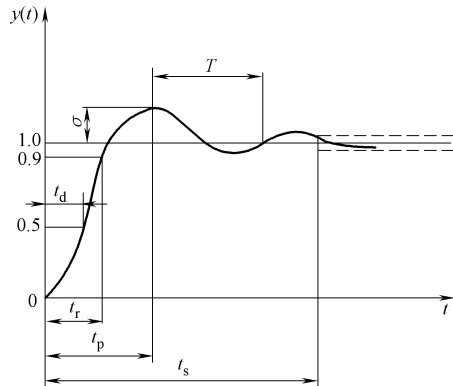


图 1.9 二阶传感器 ($\zeta < 1$) 的时域动态特性

时间常数 τ : 一阶传感器输出上升到稳态值的 63.2% 所需的时间。

延迟时间 t_d : 传感器输出达到稳态值的 50% 所需的时间。