

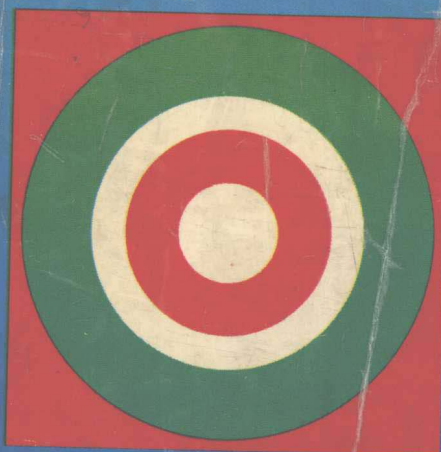


高等学校规划教材
工科电子类

传感器原理与应用

黄贤武 郑筱霞

CHUANGANQIYUANLI



YUYINGYONG

电子科技大学出版社

传感器原理与应用

,黄贤武 郑筱霞

电子科技大学出版社

1995

传感器原理与应用

黄贤武 郑筱霞

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号)邮编 610054

电子科技大学出版社印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16, 1印张 17.5 字数 426 千字
版次 1995年6月第一版 印次 1995年6月第一次印刷
印数 1—5000 册

ISBN 7-81043-113-7/TN·13

定价: 10.20 元

内 容 简 介

本书主要介绍各类传感器的工作机理、基本结构、相应的测量电路和大量的应用实例。全书共分十三章,第一章简介传感器的基本概念;第二至第四章简明介绍传统的电阻、电容和电感型传感器;第五章至第七章介绍压敏、热敏和光电效应类传感器;第八章至第十章介绍气敏、湿敏和辐射技术及其传感器;第十一章阐述了几种常用数字式传感器;第十二章介绍各类新型传感器(光纤、激光、仿生、超导、生物分子及智能等传感器)的特点、原理、应用、发展技术途径和前景。

该书内容广泛,结构紧凑,在编写中突出传感器的原理和实用。本书可作为应用电子技术、电子自动控制、仪器仪表、机电一体化等专业教学用书,也可作为有关工程技术人员的技术参考书。

江西南大

全书

人

工

出版说明

根据国务院关于高等学校

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“八五”期间以提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据形势的发展和教学改革的需要,制定了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,做出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部电子类专业教材办公室

查资料:光电传感器

前 言

传感器技术(非电量测量技术)是现代科学技术中的一个重要领域。它是信息科学阵地上的“前沿哨所”,即信息捕捉的必要手段。在当今信息时代中,随着自动测控系统的发展,对传感器技术的依赖程度愈来愈大,传感器技术掌握着系统的命脉并非言过其实,传感器技术的发展推动了科学技术的巨大进步。没有传感器也就没有现代化的自动测量和控制系统;没有传感器将没有现代科学技术的迅速发展。作者在多年的非电量测量教学和科研的基础上,根据电子工业教材办公室“八五”高校教材规划,“应用电子技术专业”教材编委会规定的教材编写要求,博采国内外传感器技术之精华,编写了《传感器原理与应用》一书。

本书既是传感技术的教学、科研成果的结晶,又是当今传感器品种繁多、传感技术发展日新月异、以及所涉及学科越来越广泛的特殊时代的产物。本书简洁明了地介绍传统传感器的机理、结构、测量电路和应用方法,基本上反应了当代新型传感器迅速发展的内容。本书在编写过程中重点放在原理阐述和实际应用的介绍上,保证必要的简明的数学推导,详细地给出物理概念,结合较多的应用实例,最大限度地培养、锻炼读者的实践能力,引导读者在阅读本书后,能举一反三,触类旁通。本书侧重介绍常用传感器;近代新型传感技术以及今后传感技术发展方向和前景;使读者建立完整的传感技术的整体概念,培养读者组建非电测量和控制系统的实际能力。

全书共十三章,第一章概述有关传感器的基本概念。第二章至第四章简述了传统的电阻、电容、电感类的传感器技术。第五章至第七章介绍压敏、热电、光电效应的敏感原理及其传感器的结构、应用等。第八章至第十章介绍气敏、湿敏、磁敏和辐射技术及传感器。第十一章介绍数字传感器。第十二章,介绍各类新型传感器(光纤、激光、仿生、起导、生物及智能等传感器)的特点、原理、应用、发展的技术途径和前景。第十三章简单介绍使用传感器的几个技术问题。各章均附有适量的习题和思考题,以此巩固所学内容。本书第一章、第六章至十三章由黄贤武编写,第二章至第五章由郑筱霞编写,全书由黄贤武负责统稿。并由东南大学杨吉祥教授主审。

本书可作为应用电子技术、电子工程、仪器仪表、自动检测、自动测控、机电一体化等专业的教学用书和有关工程技术人员的参考资料。

本书在编写过程中,始终受到工科类“应用电子技术教材编委会”的直接指导;同时,还得到上海大学胡平洋老师、苏州大学工学院何启才老师以及东南大学黄正瑾老师的鼓励和帮助;同时,本书也得到电子科技大学出版社有关同志的全力支持,在此一并致谢。

由于传感器是多学科知识的综合,所涉及内容多、面广,加之编者水平和经验的限制,错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1994年5月于苏州大学工学院

目 录

第一章 传感器的基本概念	1
第一节 传感器的定义与组成	1
第二节 传感器的分类	2
一、按输入物理量分类	2
二、按工作原理分类	3
三、按能量的关系分类	3
四、按输出信号的性质分类	3
第三节 传感器的数学模型概述	3
一、静态模型	4
二、动态模型	4
第四节 传感器的基本特性	5
一、静态特性	6
二、动态特性	8
习题与思考题	12
第二章 电阻式传感器	13
第一节 线绕电位器式传感器	13
一、线绕电位器结构和工作原理	13
二、线绕电位器式传感器的阶梯特性、误差和分辨率	14
三、非线性线绕电位器结构	15
第二节 非线绕式电位器	16
一、膜式电位器	16
二、导电塑料电位器	16
三、光电电位器	17
第三节 应变式电阻传感器	17
一、应变效应	17
二、电阻应变片的结构和工作原理	17
三、电阻应变片的种类	19
四、电阻应变片的测量电路	20
第四节 电阻式传感器应用举例	26
一、电阻应变仪	26
二、电位器式压力传感器	27
三、电阻应变片在轧制力检测中的应用	27
四、应变传感器在衡器中的应用	29
习题与思考题	32

直流电桥(平衡条件,电压灵敏度),非线性误差及其补偿

交流电桥

第三章 电容式传感器	33
第一节 电容式传感器的工作原理和结构	33
一、基本工作原理	33
二、变极距型电容式传感器	34
三、变极板面积型电容式传感器	35
四、变介质型电容式传感器	36
五、电容式位移传感器的结构形式	36
六、电容式传感器的输出特性	36
第二节 电容式传感器的等效电路	38
第三节 电容式传感器的测量电路	39
一、调频电路	39
二、谐振电路	40
三、运算放大器式电路	41
四、二极管双 T 型交流电桥	42
五、脉冲宽度调制电路	42
六、电桥电路	44
第四节 电容式传感器应用举例	45
一、电容测厚传感器在板材轧制装置中的应用	45
二、电容式液位计	46
三、电容式压力传感器	48
习题与思考题	48
第四章 电感式传感器	50
第一节 变磁阻式传感器	50
一、结构和工作原理	50
二、等效电路	51
三、变气隙式电感传感器输出特性	52
四、差动自感传感器	52
第二节 互感式传感器	55
一、结构与工作原理	55
二、等效电路	56
三、测量电路	57
第三节 电涡流式传感器	60
一、基本原理	60
二、等效电路	61
三、测量电路	62
第四节 电感式传感器应用举例	63
一、差动式电感测厚仪	63
二、涡流式传感器应用举例	64
习题与思考题	66

第五章 压电式传感器	67
第一节 压电效应和压电材料	67
一、压电效应	67
二、压电材料简介	67
三、石英晶体的压电特性	68
四、压电陶瓷的压电现象	70
第二节 压电传感器等效电路和测量电路	71
一、压电晶片的连接方式	71
二、压电传感器的等效电路	72
三、压电传感器的测量电路	73
第三节 压电传感器应用举例	76
一、压电式测力传感器	76
二、压电式压力传感器	78
三、压电式加速度传感器	79
习题与思考题	79
第六章 热电式传感器	81
第一节 热电偶	81
一、热电效应	81
二、热电偶基本定律	83
三、热电偶结构和种类	85
四、热电偶实用测量电路	88
五、热电偶冷端补偿方式	90
第二节 热电阻	91
一、常用的几种热电阻	92
二、热电阻的测量电路与应用举例	96
第三节 热敏电阻	98
一、热敏电阻的结构形式	98
二、热敏电阻的温度特性	98
三、热敏电阻输出特性的线性化处理	99
第四节 PN 结型温度传感器	102
一、温敏二极管	102
二、温敏三极管	103
三、集成温度传感器	104
四、应用举例	106
习题与思考题	111
第七章 光电式传感器	112
第一节 光电效应	112
一、外光电效应	112
二、内光电效应	112

第二节 外光电效应的光电器件	113
一、光电管及其基本特性	113
二、光电倍增管及其基本特性	115
第三节 内光电效应器件	117
一、光敏电阻	117
二、光电池	119
三、光敏二极管和光敏三极管	121
第四节 新型光电传感器	124
一、高速光电二极管	124
二、色敏光电传感器	125
三、光位置传感器	125
四、光固态图像传感器	126
第五节 光电传感器应用举例	129
一、烟尘浊度监测仪	129
二、光电转速传感器	129
三、光电池应用	130
习题与思考题	135
附录 7-1 光电管参数	136
附录 7-2 光电倍增管参数	136
附录 7-3 光敏电阻参数	137
附录 7-4 2CR 型硅光电池参数	138
附录 7-5 2CU 型硅光敏二极管参数	138
附录 7-6 3DU 型硅光敏三极管参数	139
第八章 气、湿敏传感器	140
第一节 半导体气敏传感器	140
一、半导体气敏材料的导电机理	140
二、电阻型半导体气敏传感器的结构	141
三、气敏器件的基本特性	143
四、非电阻型气敏器件	145
第二节 湿敏传感器	146
一、水分子亲和力型湿敏元件	147
二、非水分子亲和力型湿敏传感器	151
第三节 气、湿敏传感器应用举例	152
一、 SnO_2 气敏传感器的自动吸排油烟机	152
二、便携式缺氧监视器	152
三、SMC-2 型湿度传感器	154
四、自动去湿器	155
习题与思考题	156
第九章 磁敏式传感器	157

第一节	霍尔传感器	157
一、	霍尔效应和工作原理	157
二、	霍尔元件的主要技术参数	159
三、	霍尔元件连接方式和输出电路	160
四、	霍尔元件的测量误差和补偿方法	162
第二节	磁敏电阻器	165
一、	磁阻效应	165
二、	磁敏电阻的结构	165
第三节	磁敏二极管和磁敏三极管	167
一、	磁敏二极管的结构和工作原理	167
二、	磁敏三极管的结构和工作原理	170
第四节	磁敏式传感器应用举例	173
一、	霍尔位移传感器	174
二、	汽车霍尔点火器	174
三、	磁敏二极管漏磁探伤仪	176
四、	磁敏三极管电位器	176
	习题与思考题	176
第十章	辐射式传感器	177
第一节	红外辐射传感器	177
一、	红外辐射的基本特点	177
二、	红外辐射的基本定律	178
三、	红外探测器(传感器)	178
第二节	超声波传感器	182
一、	超声波的传播特性	182
二、	超声波传感器	184
第三节	核辐射传感器	185
一、	核辐射源——放射性同位素	185
二、	核辐射的物理特性	185
三、	核辐射传感器	187
第四节	辐射式传感器应用举例	188
一、	红外气体分析仪	189
二、	红外无损探伤仪	189
三、	超声波测量厚度	190
四、	超声波诊断仪	191
五、	核辐射流量计	193
六、	核辐射测厚仪	193
	习题与思考题	194
第十一章	数字式传感器	195
第一节	栅式数字传感器	195

一、栅式数字传感器的分类	195
二、栅式传感器的结构和工作原理	195
三、栅式传感器的测量电路	198
第二节 编码器	202
一、接触式编码器	202
二、光电式编码器	204
三、电磁式编码器	206
四、脉冲盘式数字传感器	207
第三节 频率式数字传感器	207
一、RC 振荡器式频率传感器	208
二、弹性体频率式传感器	209
三、频率式传感器的基本测量电路	211
第四节 感应同步器	212
一、感应同步器的类型	212
二、感应同步器的结构	212
三、感应同步器的工作原理	214
第五节 数字式传感器应用举例	215
一、光电增量编码器在电脑绣花机中的应用	215
二、转速测量	216
三、压控振荡式频率传感器在测温上的应用	216
习题与思考题	217
第十二章 新型传感器	219
第一节 光纤传感器	219
一、光(导)纤(维)的结构和传光原理	219
二、光纤传感器基本原理及类型	222
三、光纤传感器的调制器原理	225
四、光纤传感器应用举例	229
第二节 激光探测器(传感器)	232
一、激光产生的机理	232
二、激光的特性	233
三、激光器及其特性	233
四、激光探测器的应用	234
第三节 仿生传感器	235
一、仿生传感器的主要类型及其作用	236
二、视觉传感器	236
三、听觉传感器	239
四、接触觉传感器	239
五、压觉传感器	241
六、接近觉传感器	243

七、力觉传感器.....	244
八、滑觉传感器.....	245
第四节 智能传感器.....	245
一、智能传感器定义及其功能.....	245
二、传感器智能化的技术途径.....	246
三、智能传感器举例.....	247
四、智能传感器的发展前景.....	249
五、其它新型传感器.....	250
习题与思考题.....	251
第十三章 正确使用传感器的一些技术问题.....	252
第一节 传感器非线性处理方法.....	252
一、硬件线性化处理方法.....	252
二、软件线性化方法.....	254
第二节 传感器的正确选用.....	264
一、与测量条件有关的因素.....	264
二、与传感器有关的技术指标.....	265
三、与使用环境条件有关的因素.....	265
四、与购买和维修有关的因素.....	265
习题与思考题.....	265
参考文献.....	266

W

第一章 传感器的基本概念

在现代科学技术发展过程中,非电量(例如压力、力矩、应变、位移、速度、加速度、温度、流量、液位、浓度、重量等)测量技术(传感器技术)已经成为各个应用领域,特别是自动检测、自动控制系统中必不可少的部份,获取这些参数的传感器无疑掌握着这些系统的命脉。

例如,在化工产品自动生产过程中,首先,进料时要自动对原料称重,分析原料成份或浓度,使它们按比例混合;混合后,在反应容器中自动反应,又必须测定容器中的压力或体积;如果是液体,还需要自动控制容器液位高度;然后,半成品在生产线(管道)中传输,需要自动控制传输速度或流量,这里必须使用液动或气动设备产生推动力,因而要检测压力或压强等……;最后成品自动分装还要称重等等。所有这些环节均需要使用各种传感器对相应的非电量进行检测和控制,使设备或系统自动、正常地运行在最佳状态,保证生产的高效率和高质量。

又如,在各种航天器上,都利用多种传感器测定和控制航天器的飞行参数、姿态和发动机工作状态,将传感器获取的种种信号再输送到各种测量仪表和自动控制系统,进行自动调节,使航天器按人们预先设计的轨道正常运行。

传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节;如果没有传感器对原始信息进行精确可靠的捕获和转换,那么一切测量和控制都是不可能实现的。传感器好比是人的五官和四肢,直接感观外部世界的一切信息;这些通过神经系统传递给大脑进行加工处理,控制器好比是大脑。显然,没有传感器也就没有现代化的自动测量和控制系统;没有传感器将没有现代科学技术的迅速发展。

第一节 传感器的定义与组成

传感器是将被测非电量信号转换为与之有确定对应关系电量输出的器件或装置。传感器有时也叫做变换器、换能器或探测器。

传感器一般是利用物理、化学和生物等学科的某些效应或原理按照一定的制造工艺研制出来的。因此,传感器的组成将随不同情况而有较大差异。但是,总的来说,传感器应由敏感元件、传感元件和其它辅助部件组成,如图 1-1 所示。

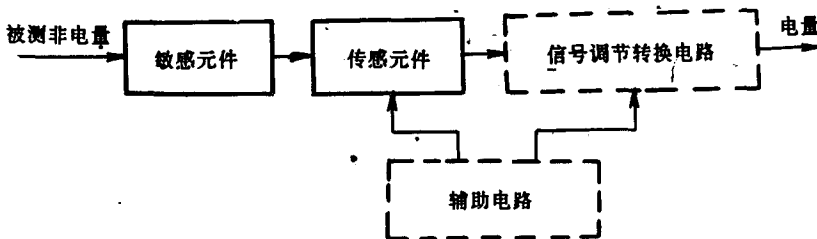


图 1-1 传感器组成框图

敏感元件是直接感受被测非电量,并按一定规律转换成与被测量有确定关系的其它量(一般仍为非电量)的元件。

传感元件又称变换器。能将敏感元件感受到的非电量直接转换成电量的器件称为传感元件。例如应变式压力传感器由弹性膜片和电阻应变片组成。应变式压力传感器的弹性膜片就是敏感元件,它能够将压力转换成弹性膜片的应变(形变);弹性膜片的应变施加在应变片上,它能够将应变转换成电阻的变化,电阻应变片就是传感元件。

应该指出的是,并不是所有的传感器必需包括敏感元件和传感元件。如果敏感元件直接输出的是电量,它就同时兼为传感元件;如果传感元件能直接感受被测非电量而输出与之成确定关系的电量,此时传感器就无敏感元件。例如压电晶体、热电偶、热敏电阻、光电器件等。因此,敏感元件和传感元件两者合二为一的传感器是很多的。

信号调节与转换电路是能把传感元件输出的电信号转换为便于显示、记录、处理和控制的有用电信号的电路。这些电路视传感器的类型而定。常用的电路有电桥、放大器、变阻器、振荡器等等。

辅助电路通常包括电源,有些传感器系统常采用电池供电。

仅就目前而言,传感器技术应涉及传感器原理、传感器器件设计、传感器开发和应用等项综合技术。

第二节 传感器的分类

传感器一般都是根据物理学、化学学、生物学等的特性、规律和效应设计而成的。由某一原理设计的传感器可以同时测量多种非电参数,而有时一种非电量又可用几种不同传感器测量。因此传感器的分类方法很多,一般可按如下几种方法分类。

① 按输入物理量分类

这种方法是根据输入量的性质进行分类,如速度传感器、温度传感器和位移传感器等。

表 1-1 基本物理量和派生物理量

基本物理量		派生物理量
✓ 位 移	线位移	长度、厚度、应变、振动、磨损、不平度
	角位移	旋转角、偏转角、角振动等
✓ 速 度	线速度	速度、振动、流量、动量等
	角速度	转速、角振动
✓ 加 速 度	线加速度	振动、冲击、质量等
	角加速度	角振动、扭矩、转动惯量等
✓ 力	压 力	G (重量) 应力、力矩等
✓ 时 间	频 率	周期、计数、统计分布等
✓ 温 度		热容量、气体速度、涡流等
✓ 光		光通量与密度、光谱分布等

这种分类方法把种类繁多的物理量分为基本量和派生量两大类。例如力可视为基本物理量,从力可派生出压力、重量、应力、力矩等派生物理量。当我们需要测量上述物理量时,只要采用力的传感器就可以了。所以了解基本物理量和派生物理量的关系,对于系统使用何种传感器是很有帮助的。

现将常见的基本非电量和派生量列于表 1-1

这种分类方法是按输入物理量命名的。其优点是较明确地表达了传感器的用途,便于使用者根据其用途选用。但是这种分类方法是将原理互不相同的传感器归为一类,很难找出每种传感器在转换机理上有什么共性和差异,因此,掌握传感器的一些基本原理及分析方法是不利的。

二、按工作原理分类

这种分类方法是以工作原理划分,将物理和化学等学科的原理、规律和效应作为分类的依据,如压电式、热电式、热阻式等。这种分类法的优点是对于传感器的工作原理比较清楚,类别少,有利于传感器专业工作者对传感器的深入研究分析。本书的传感器就是按工作原理分类进行编写的。

三、按能量的关系分类

根据能量观点分类,可将传感器分为有源传感器和无源传感器两大类。前者将非电能量转换为电能量,称之为能量转换型传感器,也称为换能器(只转换能量本身并不转换能量信号的装置),通常配合有电压测量电路和放大器,如压电式、热电式、电磁式等。无源传感器又称为能量控制型传感器。它本身不是一个换能器,被测非电量仅对传感器中的能量起控制或调节作用。所以,它们必须具有辅助能源(电能),这类传感器有电阻式、电容式和电感式等。无源传感器常用电桥和谐振电路等电路测量。

四、按输出信号的性质分类

这种分类方法可分为模拟式和数字式传感器,即传感器输出量分别为模拟量或数字量。当然输出的模拟量或数字量都与被测非电量成一定关系。数字传感器便于与计算机联用,且抗干扰性较强,例如盘式角度数字传感器,光栅传感器等。

第三节 传感器的数学模型概述

从系统角度来看,一种传感器就是一种系统。根据系统工程学理论,一个系统总可以用一个数学方程式或函数来描述。即用某种方程式或函数表征传感器的输出和输入间的关系和特性,从而,用这种关系指导对传感器的设计、制造、校正和使用。通常从传感器的静态输入-输出关系和动态输入-输出关系两方面建立数学模型,但是准确地建立一个系统的数学模型是困难的。在工程上,总是采用一些近似方法建立起系统的初步模型,然后,经过反复模拟试验确立系统的最终数学模型,这种方法同样适用传感器数学模型的建立。下面介绍传感器静态和动态数学模型的一般描述方法。

一、静态模型

静态模型是指在静态信号(输入信号不随时间变化)情况下,描述传感器输出与输入量间的一种函数关系。如果不考虑蠕动效应和迟滞特性,传感器的静态模型一般可用多项式来表示

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中 x —— 输入量;

y —— 输出量;

a_0 —— 零位输出;

a_1 —— 传感器线性灵敏度,常用 K 或 S 表示;

$a_2 \cdots a_n$ —— 非线性项的待定系数。

传感器的静态模型有三种有用的特殊形式

$$1. y = a_1x \quad (1-2)$$

$$2. y = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots \quad (1-3)$$

$$3. y = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \cdots \quad (1-4)$$

式(1-2)表示传感器的输出和输入量呈严格的线性关系;式(1-3)和(1-4)均为非线性关系。

二、动态模型

动态模型是指传感器在准动态信号或动态信号(输入信号随时间而变化的量)作用下,描述其输出和输入信号的一种数学关系。动态模型通常采用微分方程和传递函数描述。

(一)微分方程

绝大多数传感器都属模拟(连续变化)系统之列。描述模拟系统的一般方法是采用微分方程。在实际的模型建立过程中,一般采用线性时不变系统理论描述传感器的动态特性,即用线性常系数微分方程表示传感器输出量 y 和输入量 x 的关系。其通式如下

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中: $a_n, a_{n-1} \cdots a_0$ 和 $b_m, b_{m-1} \cdots b_0$ 为传感器的结构参数(是常量)。对于传感器,除 $b_0 \neq 0$ 外,一般取 $b_1, b_2 \cdots b_m$ 为零。

对于复杂的系统,其微分方程的建立求解都是很困难的。但是一旦求解出微分方程的解就能分清其暂态响应和稳定响应。为了求解的方便,常采用拉普拉斯变换将式(1-5)变为算子 S 的代数式或采用下面将要介绍的传递函数研究传感器动态特性。

(二)传递函数

如果 $y(t)$ 在 $t \leq 0$ 时, $y(t) = 0$, 则 $y(t)$ 的拉氏变换可定义为

$$Y(S) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt \quad (1-6)$$

$$\begin{aligned} y(0) &= 0 \\ y'(0) &= 0 \end{aligned}$$