

国家“十五”重点图书
微米纳米科学与技术丛书

微 传 感 器

——原理、技术及应用

章吉良 周 勇 戴旭涵等 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了各类机械微传感器,热微传感器,磁微传感器,辐射和光微传感器,声微传感器,化学和生物微传感器,集成、智能和灵巧传感器,微传感器阵列和微传感器网络的工作原理、制备技术和应用,重点介绍了各类传感器的最新发展动态,特别是传感器的小型化、集成化、阵列化、多功能化、智能化、系统化和网络化的情况。本书可作为研究生教材,也可供从事传感器工作的教学、科研和工程技术人员参考。

信息技术(IT)是建立在信息获取、信息传输、信息处理三大基础之上的技术,与之相对应的就是传感技术、通信技术和计算机技术,它们分别构成了信息技术系统的感官、神经和大脑,其中首当其冲的当推传感技术。传感技术的水平直接影响检测控制系统和信息系统的技术水平,起到促进传统产业和行业的技术跳跃式进步的作用,同时也起到拓展和涉足新的非传统领域应用的作用。目前传感器已广泛应用于航空航天、军事工程、工业自动化、汽车工业、机器人技术、海洋探测、环境监测、安全保障、医疗诊断等众多领域,已经渗透到人类生活的各个方面。可以说:“征服了传感器,就几乎等于征服了科学技术。”

世界上发达国家对开发传感器技术极其重视,美国国家长期安全和经济繁荣至关重要的22项技术中有6项与传感器信息处理技术直接相关,有关保持美国武器系统质量优势至关重要的关键技术中就有8项为无源传感器。美国空军2000年举出15项有助于提高21世纪空军能力的关键技术,传感器技术名列第二。日本把传感器技术与计算机、通信、激光半导体、超导并列为6大核心技术,日本科学技术厅制定的20世纪90年代重点科研项目的70个重点课题中有18项与传感器技术密切相关。德国视军用传感器为优先发展技术,英、法等国对传感器的开发投资逐年升级,前苏联军事航天计划中的第五条列有传感器技术。

世界传感器市场正以持续稳定的增长之势向前发展。1998年世界非军用传感器市场总额为325亿美元,包括293亿元成品传感器、17亿元半成品传感器、6亿元传感器模块、9亿元传感器系统。而传感器系统包括船用雷达传感器和飞行器用的激光陀螺导航传感器,如IRS系统,即集成化参数系统。2003年传感器的世界市场总额已达422亿美元。据预测,2008年将达506亿美元。1998至2003年的年平均增长率为5.3%,未来5年(2003年至2008年)的年平均增长率将降至3.7%。传感器厂商和投资专家认为以上的增长率估计是非常保守的,如考虑到传感器价格降低和难以预知的新兴应用领域的崛起等因素,2003至2008年的实际增长率有可能达到4.5%~5.0%。

近年来,国内的传感器研究开发虽然有了较快的进展,但与发达国家相比仍存在较大差距。特别是随着微光机电技术和微米纳米技术的迅猛发展,国际上微传感器的研发异常迅速,而国内仍较落后。在1998年世界传感器市场总额325亿美元中,美国、德国和其他欧美国家占68.8%,日本占19.4%,而包括中国在内的亚太地区国家仅占8.8%,不及日本的一半。预计在2008年的506亿美元总额中,考虑到亚太地区在今后10年处于经济上的恢复期,各类产品的市场需求都将明显增长,亚太地区传感器市场可能增长10%,但包括中国在内的亚太国家也仅占世界传感器市场总额的9.8%。

国内已出版的有关传统传感器技术方面书籍的内容已显落后,而系统介绍最

新微传感器方面的参考书还不多,希望通过本书介绍传感器技术的最新成果,为促进我国的传感器事业发展尽一份绵薄之力。

自上世纪 80 年代,我们就开始从事磁微传感器方面的研究开发工作,以后又拓展了光微传感器、机械微传感器等微传感器的研究开发工作。在本书中我们结合自己的科研工作,并查阅大量文献,尽可能详细地介绍各类机械微传感器、热微传感器、磁微传感器、辐射和光微传感器、声微传感器、化学和生物微传感器、集成、智能和灵巧传感器、微传感器阵列和微传感器网络的工作原理、制备技术和应用,重点介绍各类传感器的最新发展动态,特别是传感器的小型化、集成化、阵列化、多功能化、智能化、系统化和网络化方面的情况。本书可作为研究生教材,也可供从事传感器工作的教学、科研和工程技术人员参考。

本书的第 1 章绪论、第 6 章声波微传感器、第 8 章集成、智能和灵巧传感器以及第 9 章微传感器阵列和微传感器网络由章吉良编写;第 2 章机械微传感器由王莉编写;第 3 章热微传感器由李以贵编写;第 4 章磁微传感器由周勇编写;第 5 章辐射和光微传感器由戴旭涵编写;第 7 章化学和生物微传感器由陈迪编写。

由于传感器技术的发展日新月异,而编写的时间仓促,编者的水平又有限,书中的不妥之处在所难免,恳望读者鉴谅和指教。

编 者

2005 年 12 月于上海交通大学
微纳科学技术研究院

目 录

第 1 章	绪 论	1
1.1	传感器的分类	3
1.2	传感器的理想特性和实际限制	5
1.3	传感器的信号获取及接口	12
1.3.1	电阻、电容及电感的测量	13
1.3.2	接口电路	19
1.3.3	频率转换	21
1.3.4	数字传输	22
第 2 章	机械微传感器	27
2.1	机械微传感器的测试参量	27
2.2	硅微结构的机械性能	27
2.3	位移微传感器	30
2.3.1	基本概念	30
2.3.2	电容和电感式位移微传感器	30
2.3.3	光学位移微传感器	30
2.3.4	超声波位移微传感器	31
2.3.5	热电及其他位移微传感器	32
2.3.6	小结	32
2.4	速度和流速微传感器	32
2.4.1	基本概念	32
2.4.2	热式流速微传感器	33

2.4.3	电容式流量微传感器	36
2.4.4	共振微桥式流量微传感器	36
2.5	加速度微传感器	37
2.5.1	基本概念	37
2.5.2	压阻式微加速度计	40
2.5.3	电容和力平衡式微加速度计	41
2.5.4	性能比较	42
2.6	力、压强和应变微传感器	43
2.6.1	基本概念	43
2.6.2	力微传感器	44
2.6.3	应力敏感的电子器件	45
2.6.4	压强微传感器	46
2.6.5	应变微传感器	47
2.7	质量微传感器	49
2.7.1	基本概念	49
2.7.2	压电式质量微传感器	49
2.7.3	表面声波谐振微传感器	50
2.8	其他机械参数的测试	51
2.8.1	粗糙度与形状	51
2.8.2	粘度与密度	52
2.8.3	声与超声微传感器	53

第3章 热微传感器 56

3.1	引言	56
3.2	基本概念及定义	57
3.2.1	基本术语	57
3.2.2	热交换的形式	59
3.3	非接触温度测量	61
3.4	热机械传感器	62
3.5	热敏电阻	65
3.5.1	热阻效应	65
3.5.2	金属热敏电阻	66

3.5.3	半导体热敏电阻	68
3.6	热二极管	72
3.6.1	基本原理	72
3.6.2	集成的热二极管	75
3.7	热晶体管	76
3.7.1	基本原理	76
3.7.2	集成的热晶体管	76
3.8	热电偶	77
3.9	其他电测量的热微传感器	82
3.9.1	热开关	82
3.9.2	微热量计	82
3.10	其他非电测量的热微传感器	83
3.10.1	温度计	83
3.10.2	温度指示器和光纤传感器	83
3.10.3	表面声波温度微传感器	84
3.11	性能比较和商品器件	86
3.11.1	常用热微传感器的性能比较	86
3.11.2	热微传感器商品	87

第4章 磁微传感器 89

4.1	霍尔效应器件	90
4.1.1	霍尔效应和霍尔器件的工作原理	90
4.1.2	霍尔传感器的设计及霍尔材料	94
4.1.3	MOS霍尔片	96
4.1.4	集成霍尔器件	97
4.2	半导体磁阻效应及其器件	99
4.3	磁敏二极管和磁敏三极管	101
4.3.1	磁敏二极管	101
4.3.2	磁敏三极管	103
4.4	磁通门微磁强计	106
4.5	隧道效应磁强计	112
4.6	超导量子干涉磁强计	114

4.7 磁阻和巨磁电阻材料及其器件	118
4.7.1 磁阻效应器件	118
4.7.2 巨磁电阻传感器	123

光微传感器

第5章 与辐射微传感器	134
-------------------	-----

5.1 概述	134
5.1.1 核辐射与电磁辐射	134
5.1.2 辐射的度量	137
5.1.3 辐射传感器的分类	138
5.2 核辐射微传感器	138
5.2.1 基于电离的探测器	138
5.2.2 闪烁探测器	139
5.2.3 直接固态辐射探测器	139
5.2.4 其他的探测器类型	142
5.3 光学微传感器	142
5.3.1 概述	142
5.3.2 直接光学微传感器	144
5.3.3 间接光学微传感器	159
5.3.4 生物光学微传感器	167

第6章 声波微传感器	174
------------------	-----

6.1 引言	174
6.1.1 声波技术和压电效应	174
6.1.2 声波的传播	174
6.2 用于声波传感器的压电材料	178
6.2.1 压电体材料	178
6.2.2 压电薄膜材料	182
6.3 声波的探测	185
6.4 声波微传感器的类型	187

6.4.1	体声波微传感器	187
6.4.2	表面声波微传感器	189
6.5	实用的声波微传感器	196
6.5.1	加速度微传感器	196
6.5.2	温度微传感器	198
6.5.3	压力微传感器	198
6.5.4	扭矩微传感器	199
6.5.5	质量(重量)微传感器	200
6.5.6	露点(湿度)微传感器	201
6.5.7	化学蒸气微传感器	201
6.5.8	生物微传感器	211

第7章 化学生物微传感器 217

7.1	化学生物微传感器的一些基本概念	217
7.1.1	化学生物微传感器的定义	217
7.1.2	生物化学传感器的分类	217
7.2	电阻式化学微传感器	220
7.2.1	引言	220
7.2.2	金属氧化物气体传感器	220
7.2.3	有机材料气体微传感器	223
7.3	化学电容器	224
7.4	化学二极管	225
7.4.1	无机肖特基器件	225
7.4.2	有机肖特基器件	226
7.5	化学三极管	227
7.5.1	金属氧化物场效应晶体管(MOSFET) 气体传感器	227
7.5.2	离子选择场效应晶体管(ISFETs)	228
7.6	热化学微传感器	229
7.6.1	电热调节器	229
7.6.2	Pellistor 气体传感器	231
7.6.3	热电偶气体传感器	233

7.7	质量敏感型化学微传感器	233
7.7.1	压电型器件	233
7.7.2	表面声波(SAW)生化微传感器	234
7.8	化学微传感器的应用	235
7.9	化学微传感器最新进展	236

集成传感器、智能传感器

第8章 及灵巧传感器 241

8.1	集成传感器、智能传感器及灵巧 传感器的一般定义	241
8.2	测量控制系统的组成和功能	243
8.2.1	总线结构传感系统	243
8.2.2	传感节点结构及界面标准	247
8.2.3	传感器的补偿	252
8.3	接口电路	253
8.3.1	基本模块	253
8.3.2	电阻式传感器的接口电路	256
8.3.3	电容式传感器的接口电路	258
8.4	集成传感器的制备技术	259
8.4.1	集成电路制备技术的回顾	260
8.4.2	常规技术和要求	261
8.5	灵巧传感器的设计	264
8.5.1	电路的功能	264
8.5.2	集成度	267
8.5.3	信号处理的集成	267
8.5.4	自校准微传感器	268
8.5.5	自测试微传感器	269
8.5.6	多功能微传感器	269
8.6	灵巧传感器的应用实例	270
8.6.1	多元件灵巧气体分析仪	270
8.6.2	监测水质的灵巧传感系统	275
8.6.3	温控表面声波灵巧气体传感器	279

微传感器阵列及 微传感器网络

第9章

293

9.1 微传感器阵列器件的定义和基本设想	293
9.1.1 微传感器阵列器件的定义	293
9.1.2 阵列传感器的功能	294
9.2 辐射阵列传感器	298
9.2.1 热阵列传感器	298
9.2.2 光阵列传感器	299
9.3 机械阵列传感器	304
9.4 磁阵列传感器	306
9.5 化学阵列传感器	307
9.5.1 基本原理	307
9.5.2 气体传感器阵列	308
9.5.3 气味传感器阵列	309
9.6 微传感器网络	311

第 1 章

绪 论

信息技术(IT)是建立在信息获取、信息传输、信息处理三大基础之上的技术,与之相对应的就是传感技术、通信技术和计算机技术,它们分别构成了信息技术系统的感官、神经和大脑,其中首当其冲的当推传感技术。难怪有人说:“征服了传感器,就几乎等于征服了科学技术^[1]。”

对于不同的研究内容、研究范围和研究时间,换能器(Transducer)、传感器(Sensor)和执行器(Actuator)可以有不同的定义。例如按照中华人民共和国国家标准(GB 7665—87),传感器(Transducer/Sensor)的定义为:传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(Sensing Element)和转换元件(Transduction Element)组成,前者指传感器中能直接感受到或响应被测量的部分,后者指传感器中能将前者感受或响应的被测量转换成适合于传输或测量的电信号部分。由于迄今为止能适合传输或测量的信号仍然主要是电信号,因此目前对传感器、执行器和换能器的一般定义为:传感器(Sensor)是一种对某一特定被测量提供相应的有用的电输出信号的器件;执行器(Actuator)的作用与传感器相反,是一种将电信号转换成动作的器件;换能器(Transducer)可以认为是一种将某一形式的信号或能量转换成另一形式的信号或能量的器件,因此换能器一词可用作传感器也可用作执行器。

人自出生到幼儿,直至成年,可以说对于信息的需求一直是无止境的。但是为了使用这些信息,人们首先需要对大量的信息进行处理,然后才能更有效地收集。人是通过感官来感知周围的信息的(例如光、声音、触摸、气味等物理量和化学量),然后由大脑进行处理,最后才能形成决定(例如是不是要吃这种食物)。在日常生活中,人的测量系统可以完成大量的简单的或复杂的任务,人具有自适应的能力来极迅速地处理大量数据。但是人直接得到的信息往往是主观的和定性的,因此人们早就开始利用仪器和工具来得到定量的信息,并利用测量系统来获得定量的数据,然后利用各种方法进行数据处理。

图 1-1 表示测量系统或信息处理系统的基本功能。系统的输入信号常称为被测量,它们通常是一些需要测量的物理或化学量(例如位移、压力、气体成分等)。

这些被测量被所谓的传感器或输入换能器检测或传感,变成电信号再经过调制后,才能显示、记录或传输而变成输出信号。由于来自传感元件的信号通常是模拟信号,因此需经过处理。处理器可定义为在不改变信号原来能量形式的情况下调制电信号的各种器件。有时还可将处理器分为主处理单元(如 Intel 486 微处理器)和信号预置单元(如放大器、滤波器或模拟-数字转换器),后者又往往称为预处理器或转换器。

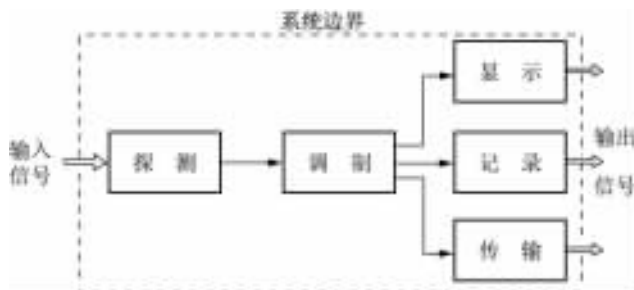


图 1-1 测量系统的功能方块图^[2]

与其他固态传感器不同,微传感器(Microsensor)的尺寸更小,而且绝大部分微传感器是利用在集成电路制备中已开发成熟的工艺加上其他特殊工艺制造的,这种特殊工艺的一个典型实例是牺牲层工艺。有些微传感器是将集成电路和传感元件一起组合在同一芯片上,虽然这种做法可能增加了工艺的复杂性并且限制了传感器工作温度范围,但这种集成微传感器可以提供比传感器本身更为线性的输出,从而可得到更佳的性能而又不致使成本增加太多。由于一次可以同时生产成

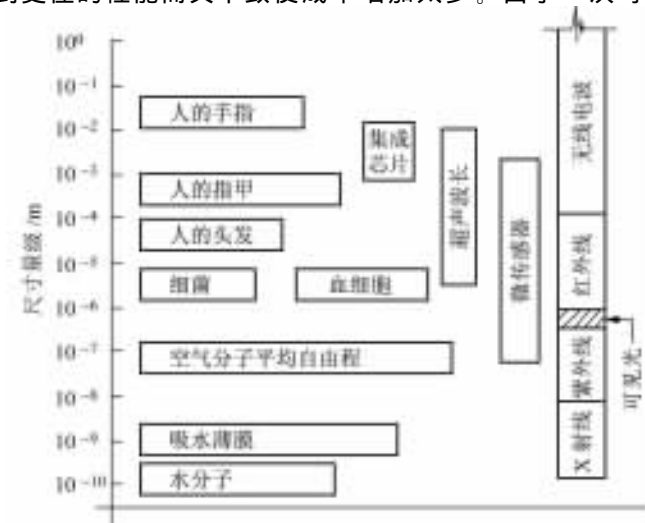


图 1-2 微传感器的尺寸

千上万的微传感器,因此使微传感器的性价比大大提高,从而更具有市场竞争力。

图 1-2 是微传感器与其他量的尺寸比较^[3],其纵坐标是 m。由图可见微传感器的尺寸主要在微米量级。在微传感器中一般的沉积薄膜的厚度在十分之一微米量级,而其大小则从几个微米到几个毫米,在微传感器中各部分的间距往往为 $1\mu\text{m}$ 或更小一些。

1.1 传感器的分类

传感器的分类方法有许多种,主要有:

- (1) 按传感器工作所依据的转换原理可分为:物理、化学、生物传感器等。
- (2) 按传感器测量的量的性质可分为:压力、加速度、气体浓度、离子浓度等。
- (3) 按传感器的制备技术和材料可分为:薄膜、半导体、陶瓷等。
- (4) 按传感器的应用可分为:汽车、医学、航天等。

现在最常用的方法是按被测量的性质对传感器进行分类,表 1-1 将被测量按其英文单词首写字母的次序进行排列。

表 1-1 被测量的性质

声学	波幅、相位、偏振、声谱等
生物学	酶、荷尔蒙、抗原、生物量(识别、密度、状态)等
化学	成分(识别、浓度、状态)湿度、pH 值等
电学	电荷、电流、电位、电位差、电场(大小、相位、极性等)、电导率、介电常数、电阻、电感、电容、频率等
磁学	磁场(大小、相位、极性等)、磁通、磁导率等
机械	力、应力、压力、形变、质量、密度、力矩、转矩、流速、质量传输率、形状、粗糙度、排向、刚度、柔顺度、粘滞度、结晶度、结构完整性、位移、速度、加速度等
光学	波幅、相位、偏振、光谱、波速等
辐射	类型(γ 射线、X射线、红外线、紫外线、可见光、微波、无线电波等)、能量、强度等
热学	温度、通量、比热容、热导率、熵、热容量、热流等

表 1-2 列出了传感器所用测量方法、转换原理及技术性能,表 1-3 列出了传感器材料及应用范围。表 1-1、表 1-2、表 1-3 都为多种分类方法提供了参考^[4]。

表 1-2 传感器所用的测量方法、转换原理及技术性能

测量方法	转换原理	技术性能
生物	生物：	灵敏度
化学	生物转换	测量范围
电、磁或电磁波	物理转换	稳定性(短期、长期)
热、温度	测试组织的效率	分辨率
机械位移或波	分光镜	选择性
辐射性、辐射率	其他	响应速度
其他	化学：	环境条件
	化学转换	过载特性
	物理转换	工作寿命
	电化学测量	输出类型
	分光镜	成本、大小、形态
	其他	其他
	物理：	
	热电	
	光电	
	光磁	
	磁电	
	热光	
	磁致伸缩	
	热致伸缩	
	光致伸缩	
	电致伸缩	

表 1-3 传感器材料及应用范围

传感器材料	应用范围
无机	农业
有机	汽车
导体	土木工程、土木建筑
绝缘体	配给系统、贸易、会计
半导体	家用设备
液体、气体或等离子体	能量、能源
生物材料	健康、医药
其他	健康、医药
	信息、无线通信
	生产
	矿产
	军事
	科学测量
	空间科学
	运输(包括汽车)
	其他

本书按常用的分类方法及被测量性质,将微传感器分为:机械微传感器、热微传感器、磁微传感器、光和辐射微传感器、声微传感器、生物和化学微传感器,前 5 类传感器均属物理传感器。

1.2 传感器的理想特性和实际限制

简单地说,传感器就是一个具有输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 的系统。图 1-3(a) 表示自激发式传感器系统,而图 1-3(b) 则表示调制式传感器系统。自激发式传感器系统的输出能量完全是由输入信号提供的,其最好的实例是热偶和压电晶体。在热偶的情况下,输入信号是结点的温差 $\Delta T(x)$ 而输出是电动势 $E(t)$ (单位用 V 表示)。

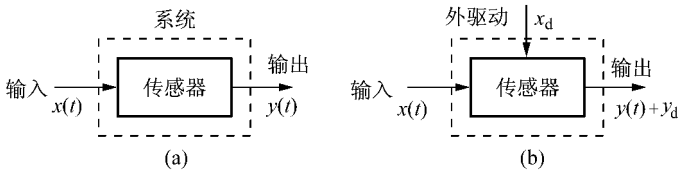


图 1-3 自激发式和调制式传感器系统的基本表达

(a) 自激发式; (b) 调制式

描述自激发式传感器的一般方程可写作

$$y(t) = F(x(t)) \quad (1-1)$$

对于热偶则可写为

$$\phi(t) = F(\Delta T(t)) \quad (1-2)$$

其中 $F(x(t))$ 是描述自激发式传感器的特征关系。对于调制式传感器,其系统方程可写为

$$y(t) = F[x(t) + x_d(t)] \quad (1-3)$$

其中外来信号 $x_d(t)$ 应该是理想的瞬间函数且无噪声的,例如 $x_d(t)$, 可以是驱动电流或外加参考电压常数。

图 1-4 表示输入信号与输出信号成正比的理想传感器输入输出特性,该理想传感器不仅具有线性输出信号 $y(t)$, 而且它是随输入信号 $x(t)$ 即时(瞬间)变化的,因此

$$y(t) = Sx(t) \quad (1-4)$$

其中输入输出曲线的斜率 S 对线性传感器是常数,它通常可称为灵敏度。实际上,方程(1-4)在使用时必须十分小心,因为没有一个传感器能对输入信号的变化作出即时(瞬间)反应,而总是需要一定的时间才能达到稳定值,例如系统要达到热的、电的或化学的平衡总是需要一定的时间。假如传感器是一个与时间有关的线

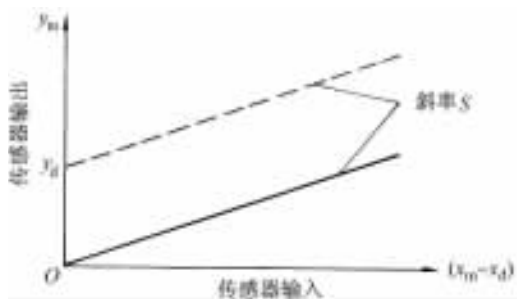


图 1-4 自激发式(实线 $y_d=0$)和调制式(虚线 $y_d \neq 0$)的理想输入输出关系

性传感器,那么式(1-1)可改写为

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t) \quad (1-5)$$

其中 a_i 是有一定物理涵义的线性系数。我们知道,对自激发式传感器而言,当输入 $x(t)$ 为零时,输出 $y(t)$ 也为零;而对调制式传感器而言,当输入 $x(t)$ 为零时,输出 $y(t)$ 并不为零。以热敏电阻这种简单的传感器为例,我们可以认为 $a_i (i=2, 3, \dots, n)$ 都要比 a_1 和 a_0 小,从而可忽略为零。而将它模拟为一级近似的线性传感器,其物理意义在于,由于热系统只有一个能量存储单元即热容量,而且假设与温度无关,因此热系统几乎只能是一级近似的线性传感器。另外我们已经假设热损耗是线性的(尽管并不严格正确)。因此,这类传感器的理想特性还可进一步写为

$$a_0 y + a_1 \frac{dy}{dt} = x(t) \quad (1-6)$$

其中 a_0 对应于系统的增益,而 a_1 对应于系统的时间响应特性。对于任何输入 $x(t)$,式(1-6)可以用拉普拉斯变换法解得。在被测量从零到 x_m 瞬间变化的情况下,也就是说,当输入信号有一个阶梯变化时,有

$$x(t) = x_m \mu(t) \quad (1-7)$$

当 $t=0$, x_m 是台阶高度时,式中的 $\mu(t)$ 就是单位阶跃函数。

对一级近似线性系统,可用式(1-6)来描述,对方程的左右两边进行拉普拉斯变换,我们可以解得线性系统的响应为

$$a_0 Y(s) + a_1 [sY(s) - y(+0)] = X(s) \quad (1-8)$$

对自激发式传感器,输出的初始值 $y(+0)$ 取作零,而对调制式传感器则可重新写为 y_d 。

一般来说,自激发(或其他)系统的转换函数 $H(s)$ 可以写成

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1-9)$$

因此对一级近似线性传感器系统,其转换函数可写成