

医学影像专业特色系列教材

医用传感器

主 编 朱险峰



科学出版社

医学影像专业特色系列教材

医用传感器

主 编 朱险峰

副主编 张彦超

编 者 (按姓氏笔画排序)

于广浩(牡丹江医学院)

朱险峰(牡丹江医学院)

朱海夫(牡丹江医学院)

刘 丹(桦林佳通轮胎有限公司)

刘佳佳(牡丹江红旗医院)

苏 奎(牡丹江医学院)

李永生(牡丹江医学院)

李明珠(牡丹江医学院)

李莲娣(牡丹江医学院第二附属医院)

宋华林(牡丹江医学院)

张彦超(牡丹江医学院)

赵祥坤(牡丹江医学院)

侯智博(牡丹江医学院)

徐建忠(牡丹江医学院)

董祥梅(牡丹江医学院红旗医院)

科 学 出 版 社

· 版权所有 侵权必究 ·

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303 (打假办)

内 容 简 介

本书全面介绍了生物医学领域中常用的传感器,系统阐述了各类常见医用传感器的基本工作原理及相关医学应用。本书具有如下特点:①注重传感器技术与医学临床实际应用的有机结合,对每类传感器都列举了一些医用实例,帮助读者生动、形象地理解相关的理论知识。②注重培养读者解决实际问题的能力,针对被测对象,不仅说明使用的传感器,还包括与传感器匹配的转换器及其相关电路,使读者可以全面了解和认识医用传感器的工作过程,增长对医用传感器的正确选择能力和对非电量测量任务的设计能力。

本书共分十三章,包括医用传感器总论、传感器基本特性、压电式传感器、电容式传感器、电感式传感器、电阻式传感器、磁电式传感器、热电式传感器、光学传感器、化学传感器、生物传感器、生物医用电极及实验。此外,各章都附有思考题。

本书适用于生物医学工程、医学影像技术和医学检验专业人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

医用传感器 / 朱险峰主编. —北京: 科学出版社, 2014.6
医学影像专业特色系列教材

ISBN 978-7-03-041290-4

I. ①医… II. ①朱… III. ①医疗器械-传感器-医学院校-教材 IV. ①P212.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 131741 号

责任编辑: 周万灏 王 颖 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 范璧合

版权所有, 违者必究。未经本社许可, 数字图书馆不得使用

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张: 16 7/8

字数: 388 000

定价: 65.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

医学影像专业特色系列教材

编委会

主 任 关利新

副主任 王 莞 卜晓波

委 员 (按姓氏笔画排序)

王汝良 仇 惠 邢 健 朱险峰 李方娟 李芳巍

李彩娟 周志尊 周英君 赵德信 徐春环

秘 书 富 丹 李明珠

前 言

传感器技术在医学领域应用日益广泛，国内许多医学院校均开设了相应课程。有关传感器方面教材也陆续问世。这些著作在原理与实用、传统与新型以及广度与深度上各有所侧重。随着高新技术发展，专业面拓宽以及社会需求不断扩大，更希望有两者兼顾的教材。为配合我校特色应用型大学建设的需要，作者撰写了本书。

针对近年传感器新技术飞速发展现状以及教学思想发展，本书通过精选内容，归类编排的方法增强了传感器教学的系统性，这就有利于读者对传感器的现状和发展形成一个系统化概念。本书在编写中力求突出共性基础；对各类传感器则注重机理分析与应用阐述。

本书编排采用按原理分类方法。把近代发展的传感技术分散到几个分类中，并把几个共性技术安排在概论后，分散到几个分类中详细讲解。这样编排的目的是为了增强学生发散思维的能力。在原理分类讲述后又安排了交叉内容的应用章节，以求提高学生的实际应用能力。

本书适用于生物医学工程、医学影像技术和医学检验技术专业。通过本教材的学习，为今后学习和掌握医用常规检验仪器、临床医学设备学、医学影像设备学打下良好基础；从而针对校内实践基地、医学检验仪器、医学临床设备、医学影像设备所使用的传感器进行重点阐述，便于学生更好理解传感器原理与应用。

本教材使用了许多文献与教材资料，在此向相关作者一并致谢。

传感器技术涉及的学科众多，而作者学识有限，书中错误与缺点在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者
2014年3月

序

医学影像专业特色系列教材以《中国医学教育改革和发展纲要》为指导思想,强调三基、五性,紧扣医学影像学专业培养目标,紧密联系专业发展特点和改革的要求,由10多所医学院校医学影像专业的教学专家与青年教学翘楚共同参与编写。

本系列教材是在教育部建设特色应用型大学和培养实用型人才背景下编写的,突出了实用性的原则,注重基层医疗单位影像方面的基本知识和基本技能的训练。本系列教材可供医学影像学、医学影像技术、生物医学工程及放射医学等专业的学生使用。

本系列教材第一批由人民卫生出版社出版,包括《医学影像设备学实验》、《影像电工学实验》、《医学图像处理实验》、《医学影像诊断学实验指导》、《医学超声影像学实验与学习指导》、《医学影像检查技术实验指导》、《影像核医学实验与学习指导》七部教材。此次由科学出版社出版,包括《影像电子工艺学及实训教程》、《信号与系统实验》、《大学物理实验》、《临床医学设备学》、《医用常规检验仪器》、《医用传感器》、《AutoCAD 中文版基础教程》、《介入放射学实验指导》八部教材。

本系列教材吸收了各参编院校在医学影像专业教学改革方面的经验,使其更具有广泛性。本系列教材各自成册,又互成系统,希望能满足培养医学影像专业高级实用型人才的要求。

医学影像专业特色系列教材编委会
2014年4月

目 录

序

前言

第一章 医用传感器总论	1
第一节 传感器的界定和组成	1
第二节 医用传感器的主要用途及分类	2
第三节 医用传感器的特性和要求	4
第四节 医用传感器的发展	4
第二章 传感器基本特性	7
第一节 传感器的静态特性	7
第二节 传感器的动态特性	10
第三节 传感器时域、频域分析	16
第四节 传感器测量数据处理中的几个小问题	18
第三章 压电式传感器	26
第一节 压电效应及材料	26
第二节 压电传感器等效电路和测量电路	32
第三节 压电式传感器及其应用	38
第四节 声波传感技术	44
第四章 电容式传感器	58
第一节 基本工作原理、结构及特点	58
第二节 电容传感器的测量电路	64
第三节 电容式传感器误差分析	70
第四节 电容式传感器的医学应用	72
第五章 电感式传感器	80
第一节 自感式传感器	80
第二节 医用差动式电感传感器	83
第三节 电涡流式传感器	85
第四节 测量电路	86
第五节 电感式传感器的医学应用	88
第六章 电阻式传感器	90
第一节 金属应变片式传感器	90
第二节 半导体固态压阻式传感器	96
第三节 电阻传感器测量电路	100
第四节 电阻式传感器的医学应用	109
第七章 磁电式传感器	113
第一节 磁电感应式传感器	113
第二节 霍尔式传感器	117
第八章 热电式传感器	127
第一节 热敏电阻式传感器	127
第二节 热电偶式传感器	133
第三节 晶体管与集成温度传感器	139
第四节 其他类型的温度传感器	147

第九章 光学传感器	154
第一节 光电传感器的基本原理	154
第二节 光电器件的基本特性	155
第三节 光电管、光电倍增管、光电编码器及其应用	157
第四节 光电池及其应用	161
第五节 光敏二极管及其应用	164
第六节 光敏三极管及其应用	169
第七节 光敏场效应管及其应用	172
第八节 光电耦合器件	174
第九节 光纤传感器及其医学应用	177
第十节 CCD 组件工作原理及其医学应用	180
第十章 化学传感器	184
第一节 电化学测量基本基础	184
第二节 离子选择电极	190
第三节 气敏电极	198
第四节 离子敏场效应管	202
第五节 半导体陶瓷气敏传感器	204
第六节 半导体陶瓷湿度传感器	206
第十一章 生物传感器	209
第一节 生物传感器工作原理和分类	209
第二节 酶传感器	211
第三节 微生物传感器	219
第四节 电化学免疫传感器	225
第十二章 生物医用电极	233
第一节 检测电极和刺激电极	233
第二节 极化现象及其对生物电检测和电刺激的影响	234
第三节 极化电极和不极化电极	236
第四节 电极的阻抗特性	238
第五节 检测电极和电刺激电极	242
第六节 微电极	249
第十三章 实验	253
实验一 金属箔式应变片单臂电桥性能实验	253
实验二 直流激励下霍尔传感器位移特性实验	254
实验三 电容式传感器位移特性实验	255
实验四 集成温度传感器特性实验	257
实验五 热敏电阻特性实验	258
实验六 光敏电阻特性实验	259
参考文献	261

第一章 医用传感器总论

第一节 传感器的界定和组成

传感器技术是人类科学发展的结晶,社会的进步要求传感器技术不断推陈出新。在医学应用领域,发展生物科学、开展医学研究和进行病症诊断都要求获取人体各方面的生理信息。针对冠心病的诊断,它就要求来自从系统到器官、组织细胞等层次的生理信息,即心血管系统心音血压信息、心脏心电图信息、血流灌注的心肌组织信息,以及心肌酶谱相关信息。实现捕获有关生物信息的手段是依靠不同的医用传感器组件(medical sensor components)来完成。医用传感器组件就是指感知生物体内的各种生理、生化以及病理信息,并把它们转换为相关电信号的部件。由于人们关注传感器把非电量转换为相应的电压或者电流等电学量,因此传感器组件有时又称为换能器(transducer)。

中国物联网校企联盟认为,传感器的存在和发展,让物体有了触觉、味觉和嗅觉等感官,让物体慢慢变得活了起来。在新韦式大词典中“传感器”被定义为:“从一个系统接受功率,通常以另一种形式将功率送到第二个系统中的器件。”国家标准 GB7665-87 对传感器下的定义是:“能感受规定的被测量件并按照一定的规律(数学函数法则)转换成可用信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。”根据这个定义,传感器的组成部分如图 1-1 所示。其中,感应元件为传感器中可以直接感受或响应被测量的单元;转换元件是指传感器中能将感应元件感受或相应的被测量信号转换为适应传输或者测量的电信号单元;信号调理与转换元件包括放大、运算调制等单元;辅助电源为传感器组件的供电单元。伴随半导体与集成技术的进一步发展,信号调理与转换电路,和感应元件一起被集成在同一芯片中,安装在传感器的壳体内。

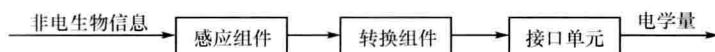


图 1-1 医用传感器的组成

医学传感器由于它所拾取的信息是人体的生理信息,而它的输出常以电信号来表现,因此,医用传感器可以定义为:把人体的生理信息转换成为与之有确定函数关系的电信息的变换装置。其中确定函数关系由感应元件的特性来决定。

用于非电量感知的传感器有些是把待测量直接转换成相应的电压与电流,其感应元件和转换元件集成在一起,但也有些需要另加传递与处理等间接转换。压电材料与热电阻是直接把压力与内能转换成相应的电压或者电流,而某些位移传感器或加速度传感器,其感应元件与转换元件互相分离。根据传感器的定义,人们从感应元件组成材料、转换机制、输出信号选择原理和智能化发展四个方面进行研究、分析与设计新型传感器组件。各种微型智能化固态传感器就是基于这种理念研发出来的,它完成了三位一体化设计,即把感应元件、转换元件与处理元件集成在一块芯片上。

智能化传感器(smart sensors)的发展得力于两方面技术的飞速发展,其一是计算机人工智能技术的迅猛发展,它带来的微处理器(micro computer unit, MCU)技术的快速更新换代;其二是材料物理学的高速进步,这带来了感应元件性能与品质的极大改善。于是微处理器与传感器技术有机结合,产生了功能强大的智能化传感器。所谓智能化传感器,就是嵌入微处理器,兼有

信息检测、信号处理、记忆与逻辑思维与判断能力的传感器复合组件。

智能传感器已广泛应用于航天、航空、国防、科技和工农业生产等各个领域中。例如,它在机器人领域中有广阔应用前景,智能传感器使机器人具有类人的五官和大脑功能,可感知各种现象,完成各种动作。在工业生产中,利用传统的传感器无法对某些产品质量指标(例如,黏度、硬度、表面光洁度、成分、颜色及味道等)进行快速直接测量并在线控制。而利用智能传感器可直接测量与产品质量指标有函数关系的生产过程中的某些量(如温度、压力、流量等),利用神经网络或专家系统技术建立的数学模型进行计算,可推断出产品的质量。在医学领域中,糖尿病患者需要随时掌握血糖水平,以便调整饮食和注射胰岛素,防止其他并发症。通常测血糖时必须刺破手指采血,再将血样放到葡萄糖试纸上,最后把试纸放到电子血糖计上进行测量,这是一种既麻烦又痛苦的方法。美国 Cygnus 公司生产了一种“葡萄糖手表”,其外观像普通手表一样,戴上它就能实现无痛、无血、连续的血糖测试。“葡萄糖手表”上有一块涂着试剂的垫子,当垫子与皮肤接触时,葡萄糖分子就被吸附到垫子上,并与试剂发生电化学反应,进而产生电流。传感器测量该电流,经处理器计算出与该电流对应的血糖浓度,并以数字量显示。

第二节 医用传感器的主要用途及分类

21 世纪是现代信息技术大融和的时代,信息处理技术包括信息采集、信息传输和信息处理。而信息采集则需要通过相应的传感组件来实现。传感组件作为测控系统中对象信息的入口、检测技术的核心部件,在现代化的自动检测、自动控制和遥控系统中是必不可少的部分。

传感器技术(传感组件技术)日益被广泛应用于航天航空、军事、工业、农业、医学、环境保护、机器人、汽车、舰船、灾害预测预防、家电、公共安全以及日常生活等各个领域,可以说是无所不在。有人说:征服了传感器,几乎就征服了现代科学技术。话虽夸张,却说明了传感器技术在现代科学技术中的重要地位。如美国 22 项国家长期安全和经济繁荣的关键技术中有 6 项与传感器技术直接相关;保持武器系统质量优势的关键技术中有 8 项为传感器技术;美国空军举出的 15 项有助于提高 21 世纪空军能力的关键技术中,传感器技术名列第二,每年仅在生物传感器技术及产品开发研究方面投资额度约为 13 亿美元。早在 20 世纪 80 年代,日本就把传感器技术列为优先发展的十大技术之首。目前,我国也把传感器技术列为重点发展的技术之一。

随着科学技术的发展,医学科学已进入一个崭新阶段,从定性医学走向定量医学已经迈进了坚实的一步。医用传感器的发展延伸了医生的感觉器官,把定性感觉拓展为定量的测量。例如,用压电传感器测量手腕的微振动、心室内壁压力、心内瓣膜振动;用固态压阻传感器测量指尖、桡骨和手腕等位置的脉压;用电阻应变片测量呼吸气流、脉象和肌肉收缩力等。

一、医用传感器的主要用途

(1) 提供诊断用信息:如心音、血压、脉搏、血流、呼吸、体温和脑电等生理信息,供临床诊断和医学研究用。

(2) 监护:长时间连续测定某些参量,监视这些参量是否处于规定的范围内,以便了解患者的恢复过程,出现异常时及时报警,比如对重症监护(ICU)的实时监控。

(3) 疾病治疗和控制:利用检测到的生理参数控制人体的生理过程。例如,自动呼吸器就是用传感器检测患者的呼吸信号来控制呼吸器的动作,使之与人体呼吸同步。电子假肢就是用测得的肌电信号控制人工肢体的运动。体外循环中的血流、血压控制等。

(4) 临床检验: 除直接从人体收集信息外, 临床上常从各种体液(血、尿、唾液等)样品获得诊断信息, 即生化检验信息。它是利用化学传感器和生物传感器来获取, 是诊断各种疾病必不可少的依据。

传感器种类繁多, 功能各异。由于同一被测量可用不同转换原理实现探测, 利用同一种物理法则、化学反应或生物效应可设计制作出检测不同被测量的传感器, 而功能大同小异的同一类传感器可用于不同的技术领域, 故传感器有不同的分类法。

二、传感器的分类

医学传感器一般根据两个标准进行分类。第一按照生理参数分类, 检测电学量参数, 包括机体的各种生物电(心电、脑电、肌电、神经元放电等)的传感部件称为生物电极; 检测非电学量参数的传感器又按照不同的机理分成物理传感器、化学传感器和生物传感器三大类。

1. 物理传感器 利用传感材料的物理特性制成的传感器叫物理传感器。按目前国内对传感器符号的标记方法, 在这里介绍两种分类方法。一种是按工作机理分类, 另一种是按被检测量分类。从工作机理上分, 有应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、热电传感器、光电传感器、压阻传感器和霍尔传感器。从被检测量来分, 有位移传感器、压力传感器、振动传感器、流量传感器和温度传感器。由于一种被检测量往往可以用数种工作原理不同的传感器来检测, 所以物理传感器的名称常常是在被测量前边加上不同工作原理的定语, 如应变片压力传感器、压阻压力传感器和压电压力传感器。目前国内标记传感器采用大写汉语拼音字母和阿拉伯数字作标记代号。传感器标记由下列四部分构成: 主称、被测量、原理、序号。例如, CWY-WL-10 是序号为 10 的电涡流位移传感器; CY-YZ-2A 是序号为 2A 的压阻压力传感器等。

2. 化学传感器 化学传感器利用人体内化学反应原理把化学成分、溶液浓度等转换成与之有确切关系的电学量的组件。通常指基于化学原理的、以化学物质成分为检测对象的一类传感器。该类传感器主要是利用敏感材料与被测物质中的离子、分子或生物物质相互接触而产生的电极电位变化、表面化学反应或引起的材料表面电势变化, 并将这些反应或变化直接或间接地转换为电信号。它多是利用某些功能性膜对特定成分的选择作用把被测成分筛选出来, 进而用电化学变换单元把它变为电学量。

一般多是依膜电极的响应机理、膜的组成和膜的结构进行分类, 分为离子选择性电极、气敏电极、湿敏电极、涂丝电极、聚合物基质电极、离子敏感场效应管、离子选择性微电极和离子选择性电极薄片等。目前利用各种化学传感器已成功的测量了人体中的某些化学成分, 如用离子选择性电极测量钾、钠、氯、钙等离子; 利用气敏电极测定氧分压和二氧化碳分压等。以半导体陶瓷为材料的气敏、湿敏传感器也得到广泛应用。

化学传感器在医学中的应用和技术改进使医学生化检验更加快速、准确、方便, 它的发展趋势向实时、经济、无创、自动化和微型化发展。化学传感器有可逆和不可逆之分, 前者的试剂相不因与待测物反应而被消耗, 后者相反。因而可逆型化学传感器更被重视。

3. 生物传感器 它利用某些生物活性物质所具有的选择识别待测生物化学物质的能力制成的传感器组件, 是一种以固定化的生物体成分(酶、抗原、抗体、激素)或生物体本身(组织、细胞、细胞器)作为敏感元件的感应器件。结构如图 1-2 所示, 包括感应元件(生物选择性膜)以及换能器件(通过化学方法、光方法、声方法、电学方法将检测到的信号转换成可以测量的量或者相应电学量)。



图 1-2 生物传感器的结构示意图

根据所用的敏感物质分为生物酶传感器、免疫生物传感器、微生物传感器、组织生物传感器和细胞生物传感器等。根据所用的信号转换器又可将生物传感器分为电化学生物传感器、半导体生物传感器、测热型生物传感器、测光型生物传感器和测声型生物传感器。

此外，根据传感器是模拟人体视、听、触、嗅、味五种感觉器官的器件，也有学者按照感官功能把传感器分为视觉传感器、听觉传感器、触觉传感器、嗅觉传感器和味觉传感器。

第三节 医用传感器的特性和要求

医学传感器用来检测人体相关的生理特征信息，而且要满足特定要求。生物体是一个有机整体，各个系统和器官都有着各自的功能和特点，但又彼此依赖，互相制约。从体外或器官内所量测的信息，既传达了被测系统和器官的特征，又蕴含其他系统和器官的影响，经常是多种物理参数、化学参数和生物参数的综合映射。医学传感器的任务是从这种信息复杂关系中提取出有价值的信息，并把它变换为电信号。然而此时传感器将遇到种种制约和困难，例如把心音传感器放在胸壁上测量心音时，情况就会变得很复杂。胸壁上除有心音外还有呼吸产生的振动，躯体各部分活动产生振动以及体外传来的振动波引起的噪声，这些噪声会在很大程度上干扰正常心音信号的正常俘获。因此医用传感器应具有以下特性：

- (1) 高灵敏度与信噪比，以确保能检测出微小的有用信息，同时具有很强的鲁棒性。
- (2) 良好线性和快速响应，保证信号变换后不失真并能使输出信号及时跟随输入信号线性变化。
- (3) 良好稳定性和互换性，以保证输出信号受环境影响小而保持稳定。更换传感器时要尽量选择特性基本一致的同类型传感器，以免影响测量数据。

此外，还必须考虑到生物体的解剖结构和生理功能，尤其是安全性和可靠性更应特别重视。具体要求包括：

- (1) 传感器必须与生物体内的化学组成互相兼容，同时要求它既不被腐蚀也不给生物体带来毒性。
- (2) 传感器形状、尺寸和结构应必须与被检测部位相适应，使用时不应损伤组织，不给受体生理活动带来明显影响，也不应干扰其正常生理功能。
- (3) 传感器要与人体要有足够电绝缘，要求即使传感器损坏情况下，人体受到的电压必须低于安全值。
- (4) 植入生物体内长期使用的传感器，不应对生物体内有不良的刺激。
- (5) 结构上必须便于消毒。
- (6) 对于生物体必须安全可靠。

第四节 医用传感器的发展

传感器技术朝着两个方向发展，一个是传感器器件材料与结构本身的研究与开发，另一个是基于计算机技术的智能化控制体系研发。其中传感器本身的研究开发拥有两个分支，一是传

感器基础研究,即研究传感器发展所需要新理论与新技术,另一是新型传感器产品的开发,即面向市场研究并生产社会迫切需要的产品。基础研究的重心多集中在新材料和超微细加工技术开发。新产品研发的重点在于解决光电技术的应用、微电子封装技术和一次性芯片等关键技术问题。下面以新材料技术和新加工技术为重点阐述近期发展动向。

1. 智能化精密陶瓷传感器 伴随物理学和材料学对各种材料的物理性能的深入解析,人们已经有可能自由地控制材料的组成成分,并根据不同用途设计出不同的材料,其中最成熟的材料就是硅半导体材料。它的出现改善了各种物理传感器的面貌,如基于半导体材料的力敏传感器,扩散电阻型传感元件以及基于PN结的温度传感器。

近期又出现许多精密陶瓷材料,它们使用精选原料,在预先周密制定的化学组成方案基础上经过高精度成型烧结后成型。这些陶瓷材料一方面充分发挥了陶瓷材料固有的耐热性、耐磨性、耐腐蚀性、硬度特性和电特性,另一方面弥补了硅或锗半导体温度上限较低的缺点,因此进一步扩展了传感器的应用范围。新制成的多种陶瓷气敏传感器和湿敏传感器,如二氧化钛传感器,与传统二氧化钛传感器相比具有型小价廉和工作范围广等优点。此外又成功研究开发了利用 SnO_2 薄膜和 V_2O_5 薄膜的传感器, Fe_3O_4 正特性湿敏传感器和 $\text{Si-Na}_2\text{O-V}_2\text{O}_5$ 负特性湿敏传感器,其具有测量准确度高、工作重复性好、使用寿命长和结构牢固等优点,可以用作湿控单元感湿组件,在汽车自动去湿及土壤湿度检测等应用领域应用广泛。再如新型热敏电阻钛酸钡材料,在某温度以下时其阻值低是负温度系数,但是达到某温度(称为相位转移温度)后,其阻值急剧增加并为正温度系数,其电阻系数与相位转移温度大小决定于材料的组成成分与制作工艺。例如,使用锶(Sr)或铅(Pb)对钛酸钡进行置换反应时,其相位转移温度可发生变化。当用电流对这种新型热敏电阻加热时,在相位转移温度附近由于电流急剧减少,故可能自动保持在这个相位转移温度附近,于是传感组件和加热组件就成为一体,起到感温和控温两种作用。它在保温电饭锅、衣物干燥器和烫发吹风干燥器等家用电器中已被运用。

2. 分子识别材料物质与传感器 在新材料研究中分子识别材料(也称生物功能性物质)的研究在发展智能生物医学传感器中引人注目。目前已有的传感器还不能说部分代替了生物体的感觉功能,它只是利用相关材料的物理或化学特征的一种信号映射单元。生物体中的物质膜能对外来刺激做出反应,可以用作感应部件,这种生物膜厚6~10pm,内部含有许多受容细胞(受体),它是一种磷脂质双层膜,蛋白质镶嵌在相应的生物膜上。当外来刺激加在生物膜时,对应膜电位发生变化,同时,与受容细胞相连的神经发出脉冲传递到神经中枢;当外来刺激是光时,由于光敏蛋白的作用,使膜电位发生变化;当外来刺激是化学物质时,由于膜附着有化学物质而引起膜电位变化。目前已研制出利用抗原抗体结合使膜电位变化的人工功能性膜(免疫膜)和利用固定于膜上的生物受容物质的选择性吸收被测物质后而形成复合体性质的膜(酶膜)。人们正是利用这种生物功能性膜研制开发出各种新型生物传感器,这为仿生物传感器的发展奠定了基础。在医学中已经用这种传感器测血糖、乳酸以及免疫球蛋白(IgG)和甲胎蛋白(AFP),也有用来测脱氧核糖核酸(DNA)、核糖核酸(RNA)和神经递质等。有学者提出了使用阵列电极或复合酶电极同时识别多种化学物质,从而实现制造出更加人性化的生物传感器。

3. 微细加工技术与微型传感器 微型传感器可以不受空间大小制约而安放在狭小位置上,并且拥有对被测对象的状态干扰小、时间响应快和成本低等优点。过去手工制作传感器受到机械能力与加工精度的双重限制,因此传感器测量精度比较低。以集成技术为基础的微细加工技术能把电路加工到光波数量级,而且可批量生产,从而把传感器技术推到了更高的发展层面上。

集成电路加工技术由三大基本技术组成:①平面电子工艺技术;②选择性化学腐蚀技术;

③机械切割技术。这三项技术都能进行三维加工。平面电子工艺技术是把在硅表面生成的氧化膜作为一种掩膜,在具有掩膜的硅单晶上进行具有空间选择的扩散和腐蚀加工。所以平面电子工艺技术包括照相制版技术、杂质扩散技术、离子注入技术和化学气相沉积(CVD)技术等。利用选择性化学腐蚀技术能对由平面电子工艺技术制作而成的氧化物掩膜和已扩散了杂质的半导体物体空间进行有选择的化学腐蚀加工,从而可以在特定方向上把硅体腐蚀掉,进而可以进行三维加工。这种微加工技术可以把物体加工成极微细的可动部件,如应力杆状物、开关甚至马达等,比如美国斯坦福大学已把过去相当大的难以搬运的气相色谱仪集成在直径5cm的硅片上,制成超小型气相色谱仪。现代传感器的理念已跳出原来含义的束缚,而是以微型、集成化和智能化为特征微控系统。该微系统除具有自测试、自校准和数字补偿的微处理器之外,还具有微型执行组件(包含开关、马达、泵体以及各种电磁阀)。现代微细加工技术已经达到可以把微型传感器、微处理器和微执行器集成在一块硅片上构成微系统的作业水平。国内外有许多研究机构正在从事这种微控检测系统的研发研制工作。

医用传感器实用化研究目前在下列几个方面已取得了明显突破:

- (1) 体液成分的实时监控,比如血液中各种离子、气体等生理指标的在体实时测量技术。
- (2) 多信息融合微型生物传感器阵列的应用,例如使用导管探针从心脏内部同时俘获有关心脏功能的多种生理信息融合测量技术。
- (3) 利用光导纤维和半导体微光器件研究开发更加先进的人体测量技术。
- (4) 研究开发利用生化反应的新型医学传感器用于分子水平测量。

图 1-3 给出了医用传感技术发展的趋势与基本脉络,医用传感器技术的研发包括传感器专项开发、传感器与计算机结合嵌入式系统的开发两大块。其中传感器专项开发又包括传感器基础研究和传感器新产品研发两块。

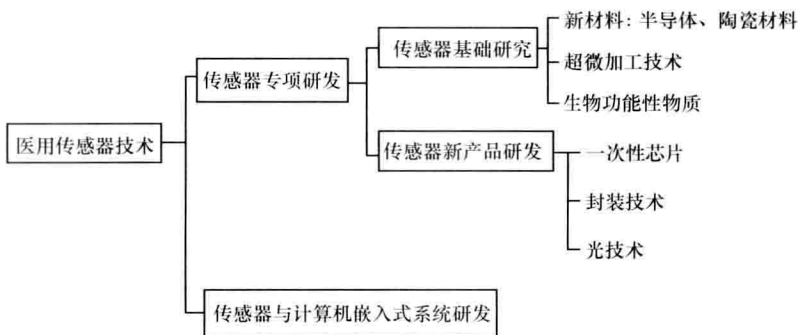


图 1-3 医用传感器技术研发发展趋势

思考题

1. 简述医用传感器的定义和组成。
2. 医用传感器主要用途有哪些?
3. 对医用传感器有什么特殊要求?
4. 利用表格整理医用传感器的分类。
5. 搜集各方面资料,总结医用传感器的发展趋势。

第二章 传感器基本特性

为了更好地掌握与运用传感器，必须事先充分了解相关传感器的特征属性。所谓传感器特性是指它转换信息的能力和性质。这种能力和性质通常使用传感器输入和输出的映射关系来描述。根据传感器的输入量分为静态和动态两大类，传感器的特性也通常从静态特性和动态特性两方面来讨论。

第一节 传感器的静态特性

一、静态特性

当人体各项待测生物指标信息处于稳定状态时，对应传感器的输入量会在在较长时间维持不变或发生极其缓慢地变化，则此时传感器的输出量与输入量间的映射就是传感器的静态特性。这种关系一般是由传感器物理、化学或生物的特征而决定。在这里，不具体讨论传感器的物理、化学或生物的特征，只从其输出和输入间的关系来讨论其相关特征。通常都希望传感器的输出和输入具有一一映射关系，这样的传感器才能如实反映待测的生物信息。

假设输出量为 y ，输入量为 x 时，则

$$y = a_1 x \quad (2-1)$$

a_1 为对应的传感器特征变换参数。或者输入分别为 x 和 $x + \Delta x$ ，则对应于两者的输出为：

$$\Delta y = a_1 \Delta x \quad (2-2)$$

满足公式(2-1)和公式(2-2)的传感器数学模型是一个二元一次方程，这种传感器叫线性传感器。如图 2-1 所示。这时的 a_1 叫做传感器的灵敏度(sensitivity)。如果 a_1 为常数，则 $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ 为定值。对线性传感器来说，从 Δy 求 Δx 时没必要知道 x 的值，这往往很易于实现。基于公式(2-1)或公式(2-2)的线性传感器是理想传感器模型，而实际的传感器由于原理上及制作工艺上的双重限制，此时其静态特性表达式常在线性项上加上 x 的非线性项。例如，电容式位移传感器，电容量 $c = \varepsilon s d_0^{-1}$ 的电容器极板在工作点 d_0 附近产生位移 Δd 时，电容量的变化量 Δc 为：

$$\Delta c = \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i (\varepsilon s) (\Delta d)^i (d_0)^{-(i+1)} \quad (2-3)$$

式中第一项表示电容式位移传感器的输出量 Δc 和位移 Δd 成正比，这是传感器的线性项，常数项 $(\varepsilon s)(d_0)^{-2}$ 是其灵敏度。第二项以下是一些非线性项。所以，传感器静态特性的一般表达式可写为：

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x^i \quad (2-4)$$

a_0 代表传感器的零偏值，即表示传感器组件输入为零时对应的输出； a_1 表示线性项常数，表示传感器的灵敏度；其余各项 x 的系数表示特性非线性项常数。式(2-4)可以充分表达传感器的静态特性，所以称为传感器静态特性的数学模型。例如，除了 a_1 和 a_0 以外，其他各项系数均

为零, 则模型就变为 $y = a_0 + a_1x$, 它表示一个有零点漂移的线性传感器模型; 如果非线性项只有 x 的奇次项, 输出-输入关系曲线如图 2-1(b)所示, 在原点附近有 $y(-x) + y(x) = 0$ 的对称关系, 且有足够长的线性段; 如只有偶次项, 所得曲线不对称, 如图 2-1(a)所示。

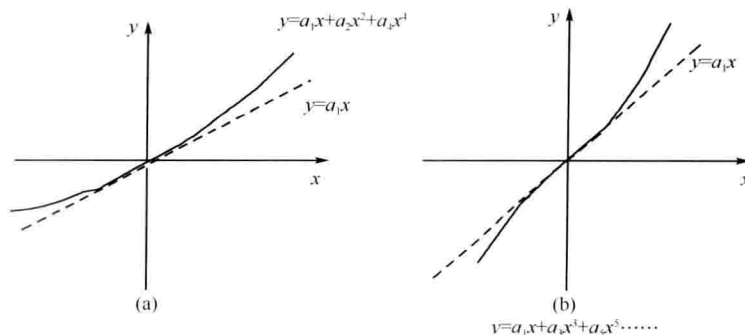


图 2-1 传感器静态特性曲线

此外, 用该数学模型还可以讨论差动测量的优越性。众所周知, 使用差动式测量系统有时会大大减少测量系统的非线性。如果用另一相同的传感器经相应拓扑结构使之产生反向位移, 于是两路输出信号做差, 这样不但可以消除偶次项进而改善传感器的特性, 而且也可以消除零偏, 同时传感器灵敏度成为变为单端接法的两倍。实际应用中, 如果非线性项的幂次不高, 则在输入量变化不大的范围内可以用以直代曲的方式代替实际静态特性的某一段, 使得传感器的静态特性近似于线性, 称为传感器静态特性线性化技术。只要非线性程度较小, 测量范围不大就可以做这样近似处理。

二、静态特性指标

1. 测量范围和灵敏度 对于传感器来说, 理想情况下测量范围不管输入值为多大, 式(2-2)恒成立。然而实际上如果让公式(2-2)成立, 输入量的取值范围是受限的。首先从能量角度上讲, 传感器的功率不可能无穷大, 因此输入与输出不可能达到无穷大。其次传感元件的测量范围有一定的限度; 再次变换电路的工作范围也是有限制的。例如弹性体传感元件, 如果加在弹性体上的应力越大就越容易产生塑性变形, 如果超出弹性极限范围, 则会致使传感器原来的特性不能再恢复。因此必须限定弹性体的形变量, 于是限制了它的工作范围。在使用电桥变换组件时, 若组成电桥的元件阻抗变化量过大, 则电桥的输出电压与变化量就不再保持正比例关系, 这同样也限制了它的工作范围。传感器的灵敏度是指传感器达到稳定后输出量变化 Δy 对输入量变化 Δx 的比值, 即公式(2-2)中的 a_1 , 通常用 k 表示, 即

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (2-5)$$

线性传感器的特性曲线的斜率就是对于对应传感器的静态灵敏度(static sensitivity)。在整个测量范围内它是一个常数。实际传感器灵敏度当 x 值比较小时, k 是定值, 当 x 值比较大时灵敏度 k 就随着 x 变化, 通常是变小(图 2-2), 即输出 y 对输入 x 的导数值逐步变小。即使是利用同一原理的传感器, 如果改变传感器的工作点, 那么其灵敏度也会随之改变。仍以前述的电容式位移传感器为例, 因其灵敏度 $(\epsilon s)(d_0)^{-2}$, 改变工作点就是改变 d_0 大小, d_0 越小其灵敏度就越大。

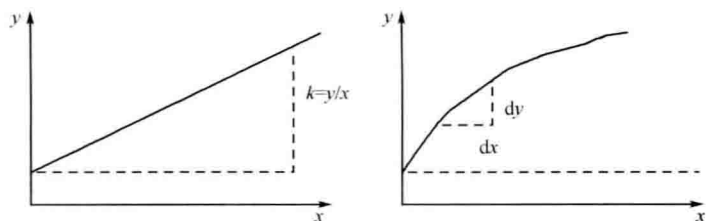


图 2-2 传感器灵敏度

此外，传感器灵敏度还和测量范围有关，多数传感器的灵敏度越高，测量范围越窄。这可从公式(2-3)来理解解析，式中第二项以下各项是非线性项，它们的大小反映着偏离线性的程度。对同样大小 Δd 、 d_0 越小，非线性项就越大。如果控制偏离线性的量为常数，则可允许的 Δd 值就变小，即测量范围变窄。这种现象是电容式传感器和很多其他传感器共同存在的问题。

灵敏度的另一个不可忽视的指标是灵敏度界限。从灵敏度定义看，输入变化 Δx 时，输出变化 Δy 也变小。但是一般来说 Δx 小到某种程度时，输出 Δy 就不再变化了，这时的 Δx 称为灵敏度界限。存在灵敏度界限的原因大致有两个，一个是 Δx 通过传感器内部时被吸收了，因而反映不到输出端上去。第二个原因是传感器输出中存在噪声，如传感器输出值比噪声电平低，此时就得不到有用的输出。假如某光纤式导管末端血压传感器上加小于 66.661Pa(0.5mmHg)的压力时，如果没有输出，则其灵敏度界限为 66.661Pa(0.5mmHg)。

2. 线性度(linearity) 大多数传感器是按照输入与输出间有一定比例关系设计的，但严格来说这种比例关系即使在测量范围内也是很难成立的。有些传感器应用有比例关系的传感机理，但实际上物理无法实现；有些传感器所应用的传感机理理论上也只是近似的比例关系；更有些传感器的传感机理具有二阶非线性特性。为了反映传感器偏离线性的程度，需要引入线性度概念，线性度也叫非线性误差，是指在规定条件下传感器特性曲线与拟合直线间最大偏差 $\Delta DL_{\max}$ 与传感器满量程(FS)输出值 Y_{FS} 的百分比，如图 2-3 所示，用 δ_L 代表线性度，则有

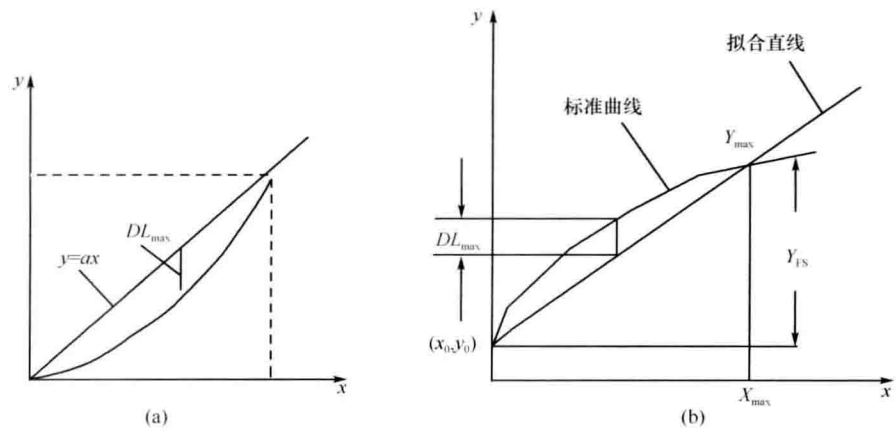


图 2-3 传感器线性度

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta DL_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \tag{2-6}$$

$$Y_{FS} = Y_{\max} - Y_0 \tag{2-7}$$

拟合直线的方法很多，较为简单的方法是以理论直线作为拟合直线，即静态特性的理想情