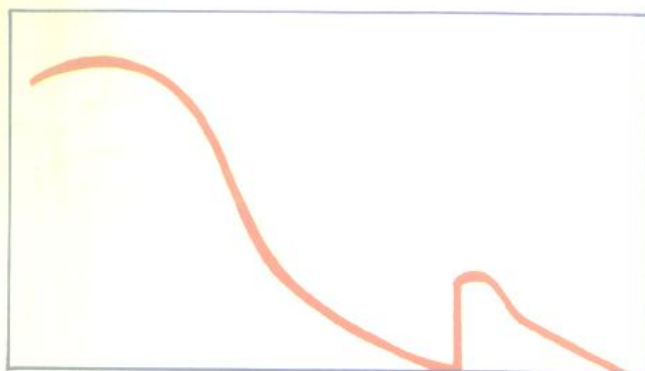


全国医学院校生物医学工程专业协编教材

医用传感器

● 主 编 姜远海
 霍纪文
 尹立志



科学出版社

73.862
377

医 用 传 感 器

姜远海 霍纪文 尹立志 主 编

科 学 出 版 社

1 9 9 7

2025/12
内 容 简 介

本书是我国从事医用传感器教学和研究工作多年、具有丰富实践经验的专家联合编写的。书中较全面地介绍了各类生物医学测量常用的物理、化学和生物传感器的构成原理、性能特点和在医学上应用方法。在尽量保持传感器系统性的基础上,主要突出医用特点,注重现代半导体、固体传感器件和化学、生物传感器的介绍,体现近代传感器技术的新进展和先进性。

本书从选择和正确使用传感器的角度出发,适当控制内容的深度,各章均附有联系医学应用实例和思考题。

本书为全国医学院校生物医学工程专业学生的适用教材,也可供理工学院生物医学工程专业学生选用。可供具有大专以上文化程度的生物医学工程技术人员和医生阅读,也可供相关专业大学及专科学校的师生教学和自学选用。

医用传感器

姜远海 霍纪文 尹立志 主编

责任编辑 曾桂芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100017

北京双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1997年6月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1997年6月第一次印刷 印张: 20 1/4

印数: 1—3 000 字数: 464 000

ISBN 7-03-005798-8/R·285

定价: 29.00 元

主 编 姜远海 霍纪文 尹立志

编著者 尹立志 包家立 孙卫新 孙冬梅

邢克礼 严华春 杨 昭 姜远海

贾娟兰 薛 原 霍纪文

前 言

医用传感器是检测人体各种信息的重要工具,是各种医学检测仪器输入端的敏感元件。它对医学基础研究、临床定量研究和医学仪器开发起着重要作用。根据对人体各种测量的要求,医用传感器中除传统的以测量物理量为基础的物理传感器外,还发展出以非生物物质作为分子识别系统测量化学量的化学传感器,和以生物物质作为分子识别系统测量化学量的生物传感器。本书本着为学生提供选择、分析和使用各种传感器所需的必要知识,着重介绍它们的结构原理、性能特点和医学应用,特别对新兴起的半导体、固体敏感元件和生物传感器作深入细致的介绍。

为了培养从事生物医学工程的高级技术人材,许多高等医学院校建立了生物医学工程专业,并把医用传感器作为必修课,迄今已有 10 年左右的教学经验。为取众家之长,促进互相学习,由首都医科大学、天津医科大学、中国医科大学、第四军医大学、浙江医科大学、西安医科大学和第一军医大学共同编写了《医用传感器》这本教材。该教材适于医学院校生物医学工程专业本科生 70~90 学时的教学使用,也可供国内有关专业的本科生、研究生、从事生物医学工程研究和医疗仪器开发的工程技术人员和医务工作者参考。

如果本书对培养实用型医学工程人才起到提高水平和促进发展作用,那将是我们编者的目的。

本书共 12 章,第一、二章由霍纪文编写,第三、五章由孙冬梅和姜远海编写,第四章由贾娟兰编写,第六章由包家立编写,第七、八章由严华春和薛原编写,第九章由杨昭和孙卫新编写,第十、十一和十二章由尹立志编写,其中邢克礼参加编写了第十章后半部分内容。

由于书中涉及工程、物理、数学、化学和医学等多方面的知识,编者水平有限,在书中必然会有缺点和错误,诚恳希望读者批评和指正。

编 者

一九九七年五月

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
第一节 传感器的定义和组成.....	(1)
第二节 传感器的作用和分类.....	(2)
第三节 医用传感器的特点和要求.....	(4)
第四节 医用传感器的发展.....	(4)
第二章 传感器的基本特性	(8)
第一节 传感器的静态特性.....	(8)
第二节 传感器的动态特性	(12)
第三节 传感器动态特性例举	(19)
第四节 传感器的误差	(22)
第三章 电阻式传感器	(25)
第一节 电阻传感器测量电路——直流电桥	(25)
第二节 电阻应变片式传感器	(35)
第三节 固态压阻式传感器	(46)
第四章 电容式传感器	(53)
第一节 基本工作原理、结构及特点.....	(53)
第二节 电容传感器的测量电路	(58)
第三节 等效电路及分布电容的消除方法	(65)
第四节 电容式压力传感器及血压测量	(68)
第五节 直流极化型电容传感器及呼吸测量	(71)
第六节 电容位置传感器及心电图测量	(73)
第五章 电感式传感器	(77)
第一节 自感式传感器	(77)
第二节 差动式电感传感器	(81)
第三节 电涡流式传感器	(83)
第四节 测量电路	(85)
第五节 电感式传感器的应用	(87)
第六章 压电式传感器	(89)
第一节 压电效应	(89)
第二节 压电方程与压电常数	(92)
第三节 压电材料特性	(96)
第四节 压电振子.....	(104)

第五节	压电传感器·····	(108)
第七章	磁电式传感器·····	(118)
第一节	磁电式传感器的工作原理与结构·····	(118)
第二节	电磁血流量计·····	(122)
第三节	霍尔式传感器·····	(127)
第四节	磁敏二极管和三极管·····	(137)
第八章	热电式传感器·····	(145)
第一节	热敏电阻式传感器·····	(145)
第二节	金属热电偶传感器·····	(152)
第三节	PN 结型温度传感器 ·····	(157)
第四节	石英晶体测温传感器·····	(164)
第五节	热释电传感器·····	(165)
第九章	光学传感器·····	(170)
第一节	光电传感器的基本理论·····	(170)
第二节	光电器件的基本特性·····	(172)
第三节	光电管、光电倍增管及其应用 ·····	(174)
第四节	光电池及其应用·····	(179)
第五节	光敏二极管及其应用·····	(182)
第六节	光敏三极管及其应用·····	(188)
第七节	光敏场效应管·····	(192)
第八节	光电耦合器件·····	(194)
第九节	光纤传感器及其医学应用·····	(198)
第十节	CCD 器件工作原理及应用 ·····	(202)
第十章	化学传感器·····	(207)
第一节	电化学测量基础·····	(207)
第二节	离子选择电极·····	(216)
第三节	气敏电极·····	(227)
第四节	离子敏场效应管·····	(231)
第五节	半导体陶瓷气敏传感器·····	(234)
第六节	半导体陶瓷湿度传感器·····	(239)
第十一章	生物传感器·····	(244)
第一节	生物传感器工作原理和分类·····	(244)
第二节	酶传感器·····	(249)
第三节	微生物传感器·····	(261)
第四节	电化学免疫传感器·····	(270)
第十二章	生物医用电极·····	(280)
第一节	检测电极和刺激电极·····	(280)
第二节	极化现象及其对生物电检测和电刺激的影响·····	(281)
第三节	极化电极和不极化电极·····	(285)

第四节 电极的阻抗特性.....	(287)
第五节 检测电极和电刺激电极.....	(296)
第六节 微电极.....	(306)
参考文献.....	(313)

第一章 绪 论

第一节 传感器的定义和组成

发展人体科学、开展医学研究和进行疾病诊断都要求获得人体各方面的信息。仅以心脏疾病诊断为例,它要求来自从系统到器官、组织、细胞、分子等各层次的信息,即心血管系统的心音血压信息、心脏器官的心电信息、血流灌注的心肌组织信息以及心肌细胞的心肌酶谱[乳酸脱氢酶(LDH)和肌酸激酶(CK)]信息等。实现这些生物信息的检测手段就是依靠各种各样的医用传感器(medical sensors)。医用传感器就是感知生物体内各种生理的、生化的和病理的信息,把它们传递出来并转换为易处理的电信号装置。由于日常生活中所遇到的信息绝大部分是非电量的,人们着眼于传感器把非电量变换为电学量这一特点,所以又把它叫做换能器(transducer)。

传感器的定义,按我国制定的国家标准“传感器通用术语”中对传感器的定义是“能感受(或响应)规定的被测量并按照一定规律转换成可用信号输出的器件或装置”,并定义了其组成,“传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件以及相应的电子线路所组成”。这使人们对传感器有了更明确的概念。根据这个定义,传感器包括如图 1-1 所示的 3 个组成部分。

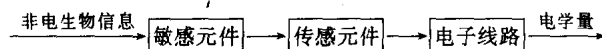


图 1-1 传感器的组成

用于非电物理量测量的传感器有的可以把待测量直接转换成电学量,其敏感元件和传递元件集于一体,但也有的需要另加传递和处理的间接转换。压电晶片和热电偶等直接把压力或热转换为电学量,而某些位移传感器或加速度传感器,其敏感元件和转换元件相互分离。明确了传感器的定义和组成对研究和发展传感器是很重要的,人们可以从敏感材料、传感机制和输出信号的选择三个方面进行研究、分析和设计新型传感器。各种微系统化智能化固态传感器就是在这种认识基础上研究出来的。它是把敏感器件、执行机械器件和处理电路集成在一起制成的。又如在尿素生物传感器的设计中,从敏感材料看可用尿素酶,也可用谷氨酸脱氢酶,还可以用谷氨酸氧化酶制成性能各异的尿素传感器;从传感机制看可用反应生成物 NH_3 ,也可用反应时 NADH (还原型磷酸吡啶核苷酸)的减少,还可以用 H_2O_2 的生成等作为信号的转换来设计尿素传感器;从输出信号的检测方式可以设计成热测量式、光测量式和半导体式等。这样,拓宽了设计、研究和分析传感器的思路。

第二节 传感器的作用和分类

一、传感器的作用

医用传感器是一种用来感知生物的各种信息并转换成容易处理的电信号器件,在医学仪器的研制和医学实验中占有重要地位。从图 1-2 所示的医学测量系统框图可以看出,它是医学测量仪器的第一个环节,是医学仪器与人直接耦合的环节,也是一个关键环节。如果没有医用传感器对原始参量进行精确可靠的测量,那么后续各环节再先进也得不到正确结果。另外,医用传感器为医学诊断仪器提供的是特定信息,它往往决定着医学仪器的测量原理和结构设计。



图 1-2 医学测量系统

随着科学技术的发展,医学科学已进入了崭新的阶段,从定性医学走向定量医学。在此发展过程中医用传感器起了重要作用,它延伸了医生的感觉器官,把定性感觉扩展为定量的测量,如用压电传感器测手的微振动,测心室内部压力,测心内瓣膜振动等;用固态压阻传感器测指尖、桡骨和手腕等部的脉压;用电阻应变片测呼吸气流、脉象和肌肉力等等。

医用传感器的主要用途有:

(1) 提供诊断用信息:如心音、血压、脉搏、血流、呼吸、体温等信息、供临床诊断和医学研究用。

表 1-1 医学上的各种量

位 移	血管内、外径,主动脉、腔静脉尺寸,左心室尺寸,肢体容积变化,胸廓变化,心脏收缩变化,骨骼肌收缩变化,胃收缩,肠蠕动
速 度	血流速度,排尿速度,分泌速度,发汗速度,流泪速度,呼吸气流速
振动(加速度)	心音,呼吸音,血管音,脉搏,心尖搏动,心瓣膜振动,手颤,颈动脉搏动,脉象,语音
压 力	血压,眼压,心内压,颅内压,胃内压,食道压,膀胱压,子宫内压
力	心肌力,肌肉力,咬合力,骨骼负载力,血液粘滞力,手握力
流 量	血流量,呼吸流量,尿流量,心输出量
温 度	口腔温,直肠温,皮肤温,体核温,心内温,肿物温,中耳膜内温,脏器温,血液温
生物电	心电,脑电,肌电,眼电,胃电,神经电,脑干电,皮肤电
化学成分	K, Na, Cl, Ca, O ₂ , CO ₂ , NH ₃ , H, Li
生物物质	乳酸,血糖,蛋白质,尿素氮,胆固醇,酶、抗原,抗体,受体,激素,神经递质,DNA, RNA

(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,以便了解病人的恢复过程,出现异常时及时报警。一心脏手术后的病人需监视其体温、脉搏、动脉压、静脉压、呼吸和心电等一系列参数的变化情况。

(3) 人体控制: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

传感器检测病人的呼吸信号来控制呼吸器的动作,使之与人体呼吸同步;又如电子假肢就是用测得的肌电信号控制人工肢体的运动;再如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。这类信息叫做生化检验信息。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。

医学上需要测量的各种量如表 1-1 所示。

二、传感器的分类

医用传感器的种类很多,其分类方法也较多,国内外尚没有统一的方法。总的来说,医用传感器可分为物理传感器、化学传感器和生物传感器三大类。

1. 物理传感器

利用物理性质和物理效应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。一是按工作原理分类,另一是按被测量分类。从工作原理上分有: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、热电传感器和光电传感器等。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、温度传感器等。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,如应变片式压力传感器、压阻式压力传感器和压电式压力传感器等。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

化学传感器是把人体内某些化学成分、浓度等转换成与之有确切关系的电学量的器件,近年来得到很大发展。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,进而用电化学装置把它变为电学量。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,分有离子选择性电极、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。

3. 生物传感器

它是近些年出现的新型传感器。它是利用某些生物活性物质所具有的选择识别生物化学物质的能力制成的传感器,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)作为敏感元件的传感器。根据所用的敏感物质分为酶传感器、免疫传感器、微生物传感器、组织传感器和细胞传感器等。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等。为了更明确的反映传感器的敏感特性和转换结构,实用中常综合使用上述两种分类法,如酶传感器中又分为酶电极、酶热敏电阻、酶 FET、酶光极等。

上述的物理、化学、生物等传感器除按物性的分类外,从传感器的效用来看,它是代替人体的视、听、触、嗅、味 5 种感觉器官的器件,所以也有按人的感觉功能分类,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。这种分类方法有利于仿生学的发展,对推动新型传感器的开发也是有利的。

第三节 医用传感器的特点和要求

医用传感器是用来检测人体信息的,针对生物体信息特点它应具备特殊的性质和满足特殊的要求。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。从体外或器官内所观察到的信息,既表现了被测系统和器官的特征,又含有其他系统和器官的影响,往往是多种物理量、化学量和生物量的综合。医学传感器的任务是从这种综合信息中提取出欲测的量,并把它变换为电信号,这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心音的情况就很复杂。胸臂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音等。因此医用传感器应具有以下特性:

(1) 较高的灵敏度和信噪比,以保证能检测出微小的有用信息。

(2) 良好的线性和快速响应,以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的变化。

(3) 良好的稳定性和互换性,以保证输出信号受环境影响小而保持稳定。同类型传感器的性能要基本相同,在互相调换时不影响测量数据。

除具有上述特性外,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。即:

(1) 传感器必须与生物体内的化学成分相容。要求它既不被腐蚀也不给生物体带来毒性。

(2) 传感器的形状、尺寸和结构应和被检测部位的结构相适应,使用时不应损伤组织,不给生理活动带来负担,也不应干扰正常生理功能。

(3) 传感器和人体要有足够的电绝缘,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) 对植入体内长期使用的传感器,不应给体内有不良的刺激。

(5) 在结构上便于消毒。

第四节 医用传感器的发展

近年来医用传感器得到迅速发展,其发展概况如图 1-3 所示。

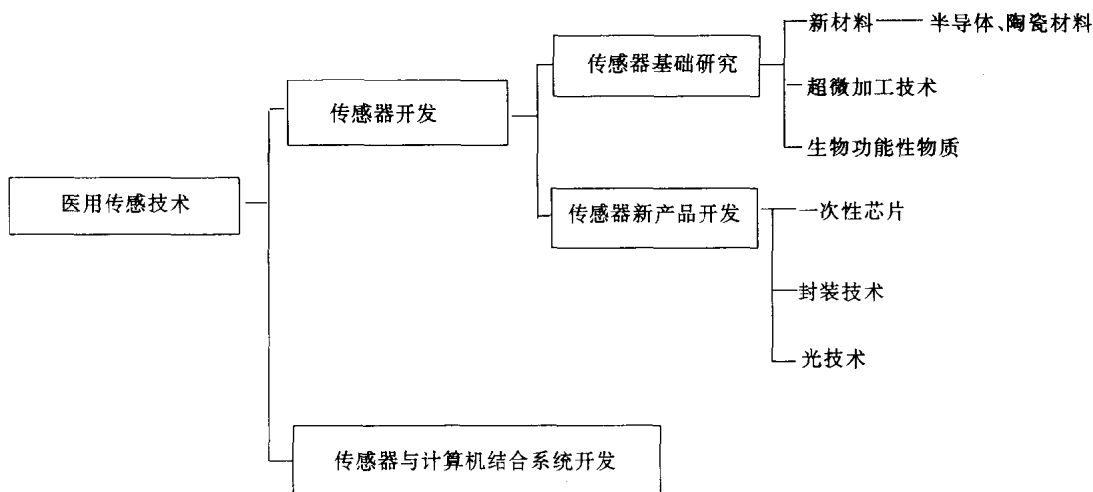


图 1-3 传感技术发展

从图可见,传感技术有两个发展方向,一个是传感器本身的开发研究,另一个是与计算机技术相结合的研究。其中传感器本身的开发研究有两个分支,一是有关传感器基础研究,即研究发展传感器所需要的新技术和新原理,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。基础研究中集中在新材料和超微细加工技术。新产品开发中重点解决光技术的应用、微电子封装技术和一次性芯片等。下面以新材料技术和新的加工技术为中心介绍最近的发展动向。

1. 多功能精密陶瓷与传感器

随着物理学和材料学对各种物理性能的进一步研究,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。它的出现改观了各种物理传感器的面貌,如利用半导体制成的力敏传感器,扩散电阻型传感元件以及利用 PN 结、二极管的温度传感器等。最近又出现许多精密陶瓷材料,它是使用精选的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制作出来的。它是一种多功能陶瓷,并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,弥补了硅或锗半导体温度上限较低的缺点,扩展了传感器的应用范围,新制成了多种陶瓷气敏传感器和湿敏传感器。如二氧化钛传感器,与以往的二氧化锆传感器相比具有型小价廉和工作范围广等优点。此外又成功的研究开发了利用 SnO_2 薄膜和 V_2O_5 薄膜的传感器,又如 Fe_3O_4 系湿敏传感器和 $\text{Si-Na}_2\text{O-V}_2\text{O}_5$ 湿敏传感器,其准确度高、重复性好、工作寿命长和结构牢固等,将得到广泛应用。再如新出现的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受材料的组成成分与制作方法所支配。例如钛酸钡中的钡用锶(Sr)或铅(Pb)进行置换时,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。这样一来,传感器和加热器就成为一体,起到感温

和控温两种作用。它将开创更为广阔的应用前景,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应用。

2. 生物功能性物质与传感器

在新材料研究中生物功能性物质(也称分子识别物质)的研究在发展仿生传感器中引人注目。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,它只是利用物理或化学现象的信号变换器。真正代替生物体感觉功能的传感器很少。生物体中的物质膜能对外来刺激作出反应,这种生物膜厚约 $6\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,内含许多受容细胞(受体),它是一种磷脂质双层膜,蛋白质像瓷砖似的镶在上面。外来刺激加在生物膜时,膜电位发生变化,与受容细胞相连的神经发出脉冲传递到神经中枢,外来刺激是光时,由于光敏的蛋白质的作用,使膜电位发生变化;如果外来刺激是化学物质,由于膜附着有化学物质而引起膜电位变化。仿生物体中的物质膜现已研究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)和由于固定于膜上的生物受容物质的选择吸收被测物质后而形成复合体性质的膜(酶膜)。人们正利用这种生物功能性膜研究开发出各种新型传感器,即生物传感器,为仿生传感器的发展奠定了基础。在医学中已用这种传感器测血糖、乳酸、免疫球蛋白G(IgG)、甲胎蛋白(AFP)等,也有的用来测脱氧核糖核酸(DNA)、核糖核酸(RNA)和神经递质等。有人提出用阵列电极或复合酶电极同时识别多种化学物质以实现和人的五种感觉相媲美的生物传感器。

3. 微细加工技术与超小型传感器

小型传感器可以不受空间大小制约而安放在狭小位置上,并有对被测对象的状态干扰小、时间响应快和成本低等优点。过去制作传感器一边用眼看一边用手加工,就是机械加工也受到机械能力的限制。以集成技术为基础的微细加工技术则不然,能把电路加工到光波数量级,而且可批量生产,价格便宜。

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 有选择的化学腐蚀技术;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。利用有选择的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。利用这种技术可以在特定方向上把硅体腐蚀掉,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。美国斯坦福大学已把过去相当大的连搬运都困难的气相色谱仪集成在直径 5 cm 的硅片上,制成超小型气相色谱仪,现在的传感器概念已跳出原来含义的小圈子,而是以微型、集成化和智能化为特征的微系统。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,还具有微执行器(含开关、马达、泵、阀门等)。现代的微细加工技术已把微传感器、微处理器和微执行器集成在一块硅片上构成微系统。这种微系统的开发研制工作正在美国密执安大学、日本东京工学院和上海交通大学等单位进行着。

医用传感器的实用化研究在下列几个方面引人注目:

- (1) 体液成分的实时测量:如血液中各种离子、气体等的在体实时测量技术。
- (2) 多信息超小型传感器阵列的应用:如使用导管探针从心脏内部同时测量有关心功能的多种信息同时测量技术。
- (3) 利用光导纤维和半导体微光器件研究开发更先进的人体测量技术。
- (4) 研究开发利用生化反应的新型用于分子水平测量的技术。

思 考 题

- 1. 明确医用传感器的定义和组成对研究传感器有何意义?
- 2. 医用传感器主要用途有哪些? 举出各方面的 5 种实例?
- 3. 对医用传感器有些什么特殊要求? 实现它们需些什么措施?
- 4. 你对医用传感器的发展有些什么想法? 应优先发展什么?

第二章 传感器的基本特性

为了掌握和使用传感器,必须事先充分了解传感器的特性。传感器的特性是指它转换信息的能力和性质。这种能力和性质常用传感器的输入和输出的对应关系来描述。由于传感器的输入量可分为静态和动态两大类,所以传感器的特性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

人体的各被测信息处于稳定状态时,传感器的输入量在较长时间维持不变或发生极其缓慢的变化,则这时传感器的输出量与输入量间的关系就是传感器的静态特性。这种关系一般是由传感器的物理、化学或生物的特性来决定。在这里,不具体讨论传感器的物理、化学或生物的特性,只从其输出和输入间的关系来讨论其特性。

通常都希望传感器的输出和输入间具有一一对应的关系,这样的传感器才能如实反映待测的信息。

设输出量为 y , 输入量为 x 时,
则

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

或输入分别为 x , $x + \Delta x$, 则对应于两者的输出差 Δy 为:

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

具有这种特性的传感器的数学模型是一直线方程,这种传感器叫线性传感器。如图 2-1 所示。这时的 $a_1 = \frac{y}{x} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$, 叫做传感器的灵敏度(sensitivity)。如果 a_1 是定值,则 Δx 与 Δy 成正比。对线性传感器来说,从 Δy 求 Δx 时没必要知道 x 的值,这是很方便的。

直线方程(式 2-1 或式 2-2)代表的线性传感器是理想的情况。实际的传感器由于原理上的和制作工艺上的原因都有一定程度的非线性特性。这时的静态特性表达式常在线性项 $a_1 x$ 上迭加上非线性项(x 的高次项)。以电容式位移传感器为例,电容量 $c = \frac{\epsilon_s}{d_0}$ 的电容器的极板在工作点 d_0 附近产生位移 Δd 时,电容量的变化量 Δc 为:

$$\Delta c = -\frac{\epsilon_s}{d_0^2} \Delta d + \frac{\epsilon_s}{d_0^3} (\Delta d)^2 - \frac{\epsilon_s}{d_0^4} (\Delta d)^3 + \dots \quad (2-3)$$

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,是这种传感器的线性项,常数 ϵ_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:

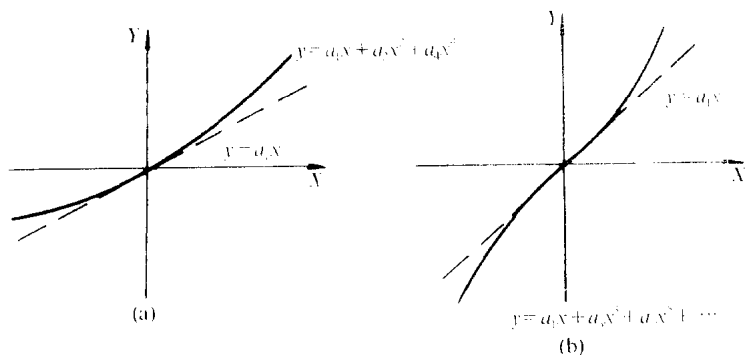


图 2-1 传感器静态特性

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (2-4)$$

式中 a_0 是零偏,表示没有输入时的输出; a_1 是线性项常数,表示传感器的灵敏度; $a_2, a_3, \dots$ 表示特性的非线性项的常数。此式可以充分表达传感器的静态特性,所以叫作传感器静态特性的数学模型。例如,当 $a_0 = a_2 = a_3 = \dots = 0$,该式就是前边的理想情况式(2-1);如 $a_0 \neq 0, a_1 \neq 0, a_2 = a_3 = a_4 = \dots = 0$,它仍表示线性,这时的直线不通过原点,有一零偏 a_0 ;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 origin 附近有 $y(x) = y(-x)$ 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,用该数学模型还可以讨论差动测量的优越性。众所周知,使用差动的测量系统有时会大大减少测量系统的非线性。设一传感器的输出为:

$$y_1 = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \dots$$

如果用另一相同的传感器经适当连接使之产生反向位移,则对相同的位移其输出为:

$$y_2 = a_0 - ax + a_2x^2 - a_3x^3 + a_4x^4 + \dots$$

而输出的差

$$\Delta y = y_1 - y_2 = 2(a_1x + a_3x^3 + \dots) \quad (2-5)$$

这样,差动型传感器的线性由于消去了偶次项而得到改善,零偏也消去了,灵敏度成为原来的两倍。

实际应用中,如果非线性项的方次不高,则在输入量变化不大的范围内可以用切线或割线代替实际静态特性的某一段,使得传感器的静态特性近于线性,这称为传感器静态特性线性化。只要非线性程度较小,测量范围不大就可以这样处理。

二、静态特性指标

1. 测量范围和灵敏度

最理想的测量范围是不管输入值是多大,式(2-2)总是成立。但实际上欲让这公式成立,输入量的范围是有限制的。首先传感元件的测量范围有一定的限度;其次变换电路的