



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
全国高等院校规划教材

供生物医学工程、影像学等相关专业使用

# 医用传感器

第3版

主编 陈安宇



科学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
全国高等院校规划教材

供生物医学工程、影像学等相关专业使用

# 医用传感器

第3版

主 编 陈安宇

副 主 编 邢克礼 史学涛

编 著 者 (按姓氏笔画排序)

史学涛 (第四军医大学)

邢克礼 (天津医科大学)

刘 艳 (新乡医学院)

刘加峰 (首都医科大学)

李义兵 (湖北科技学院)

李振新 (新乡医学院)

张 旭 (首都医科大学)

陈安宇 (首都医科大学)

杨慧云 (天津医科大学)

周晋阳 (长治医学院)

夏军营 (第四军医大学)

徐新宇 (天津医科大学)

薛志孝 (天津医科大学)

校 对 薄雪峰 (首都医科大学)

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书全面介绍了医学领域中应用的传感器,系统地讲述了每类传感器的基本工作原理、品种和用途。本书具有如下特点:①突出医用传感器的特殊性,注重与医学临床实际相结合,对每类传感器都列举了一些生动、形象的医用实例;②注重培养读者解决实际问题的能力,针对被测对象,不仅介绍使用什么传感器,还包括与传感器匹配的转换器及其相关电路,使读者对传感器的工作过程有全面的了解和认识,增长对传感器的正确选择能力和对非电量测量的设计能力,学以致用;③本书每章都附有习题,书后附全部习题的参考答案,方便读者练习和自学。本书共分十二章,包括:绪论、传感器的基本特性、电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、热电式传感器、光学传感器、电化学传感器、生物医用电极、生物传感器。

本书可作为生物医学工程相关专业本科生的专业基础课教材,也可作为相关专业研究生、大专生选修课教材和专业工作者的自学读物。

### 图书在版编目(CIP)数据

医用传感器 / 陈安宇主编. —3 版. —北京: 科学出版社, 2016.5  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材·全国高等院校规划教材  
ISBN 978-7-03-047121-5

I. ①医… II. ①陈… III. ①医疗器械-传感器-高等学校-教材  
IV. ①TP212.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 012175 号

责任编辑: 朱 华 赵炜炜 / 责任校对: 赵桂芬  
责任印制: 赵 博 / 封面设计: 陈 敬

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

1997 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 5 月第 三 版 印张: 26

2016 年 5 月第 一 次印刷 字数: 618 000

定价: 65.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



## 第3版前言

国家制定的《医药工业“十二五”发展规划》中关于“先进医疗器械产品和技术发展重点”的文件中指出：重点发展“用于血细胞、生化、免疫、基因、蛋白质、药敏等分析的自动化临床检测系统及配套试剂”，重点开发“微系统和医用传感器”。传感器技术与通信技术、计算机技术构成信息产业的三大支柱，传感器作为信息采集系统的前端单元，其重要性已变得越来越明显。21世纪被普遍认为是生命科学高速发展的世纪，医学是生命科学的前沿，在医学研究和临床诊疗过程中需要获取大量的生物信息。医用传感器是获取生物信息的窗口，由此可以预见，医用传感器技术必将成为对21世纪产生巨大影响的技术。

从20世纪70年代末期，全国很多高等院校先后建立了生物医学工程专业，医用传感器是该专业的专业基础课程。1997年，当时已建立生物医学工程专业的七所医学高等院校共同编写了《医用传感器》教材，由科学出版社出版。2008年，由六所医学高等院校共同编写的《医用传感器》（第2版）问世，并入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。教材出版后被多所高等院校采用，先后十八次印刷，总印数已超过三万五千册。

由于医用传感器技术发展很快，很多知识需要补充和更新，于是由编写第2版的六所医学高等院校共同编写了《医用传感器》（第3版），并在每章增加了习题和参考答案。这部教材的编写单位都是正在开设医用传感器课程的高等院校，主编和副主编都参加过第2版教材的编写，编者都是多年从事医用传感器课程教学的资深教师。

编写的具体分工是：第一章由陈安宇编写，第二章由张旭编写，第三章由李振新编写，第四章由周晋阳编写，第五章由刘加峰编写，第六章由薛志孝、邢克礼编写，第七章由夏军营编写，第八章由史学涛编写，第九章由李义兵编写，第十章由徐新宇、邢克礼编写，第十一章由刘艳编写，第十二章由杨慧云、邢克礼编写。

医用传感器涉及数学、物理、化学、计算机、生物学和医学等多方面的知识，由于编者水平有限，难免存在不足，诚恳希望读者给予批评指正。

编者  
2015年12月

# 第1版前言

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做深入细致的介绍。

为了培养从事生物医学工程的高级技术人才,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的作用,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

1997年5月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....                | 1  |
| 第一节 传感器的作用 .....            | 1  |
| 第二节 医用传感器的定义、构成、用途及分类 ..... | 2  |
| 第三节 医用传感器应具有的性能和特殊要求 .....  | 4  |
| 第四节 医用传感器的发展 .....          | 5  |
| 本章习题 .....                  | 8  |
| 参考文献 .....                  | 8  |
| 第二章 传感器的基本特性 .....          | 9  |
| 第一节 传感器的静态特性 .....          | 9  |
| 第二节 传感器的动态特性 .....          | 13 |
| 第三节 传感器动态特性分析 .....         | 20 |
| 第四节 传感器的误差 .....            | 24 |
| 本章习题 .....                  | 26 |
| 参考文献 .....                  | 26 |
| 第三章 应变式电阻传感器 .....          | 27 |
| 第一节 金属电阻应变式传感器 .....        | 27 |
| 第二节 半导体固态压阻式传感器 .....       | 36 |
| 第三节 电阻式传感器的测量及接口电路 .....    | 39 |
| 第四节 应变式电阻传感器的医学应用 .....     | 54 |
| 本章习题 .....                  | 59 |
| 参考文献 .....                  | 60 |
| 第四章 电容式传感器 .....            | 61 |
| 第一节 基本工作原理、结构及特点 .....      | 61 |
| 第二节 电容式传感器的测量电路 .....       | 67 |
| 第三节 电容式传感器的误差分析 .....       | 77 |
| 第四节 电容式传感器的医学应用 .....       | 81 |
| 本章习题 .....                  | 86 |
| 参考文献 .....                  | 87 |
| 第五章 电感式传感器 .....            | 88 |
| 第一节 自感式传感器 .....            | 88 |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 第二节 互感式传感器 .....          | 93         |
| 第三节 电涡流式变换原理 .....        | 96         |
| 第四节 测量电路 .....            | 97         |
| 第五节 电感式传感器的应用 .....       | 99         |
| 本章习题 .....                | 101        |
| 参考文献 .....                | 102        |
| <b>第六章 压电式传感器</b> .....   | <b>103</b> |
| 第一节 压电效应 .....            | 103        |
| 第二节 压电材料及主要性能参数 .....     | 107        |
| 第三节 压电传感器的等效电路和测量电路 ..... | 110        |
| 第四节 压电传感器的应用 .....        | 114        |
| 本章习题 .....                | 120        |
| 参考文献 .....                | 120        |
| <b>第七章 磁传感器</b> .....     | <b>121</b> |
| 第一节 磁电式传感器 .....          | 121        |
| 第二节 电磁流量计 .....           | 126        |
| 第三节 霍尔传感器 .....           | 129        |
| 第四节 其他类型的磁传感器 .....       | 136        |
| 第五节 磁传感器的生物医学应用 .....     | 149        |
| 本章习题 .....                | 152        |
| 参考文献 .....                | 152        |
| <b>第八章 热电式传感器</b> .....   | <b>154</b> |
| 第一节 热敏电阻式传感器 .....        | 154        |
| 第二节 热电偶式传感器 .....         | 160        |
| 第三节 晶体管与集成温度传感器 .....     | 167        |
| 第四节 非接触式温度传感器 .....       | 173        |
| 第五节 其他类型的温度传感器 .....      | 179        |
| 第六节 热电式传感器的医学应用 .....     | 181        |
| 本章习题 .....                | 185        |
| 参考文献 .....                | 186        |
| <b>第九章 光学传感器</b> .....    | <b>187</b> |
| 第一节 光电传感器 .....           | 187        |
| 第二节 光电耦合器件 .....          | 207        |
| 第三节 红外传感器 .....           | 211        |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 第四节 光纤传感器 .....           | 216        |
| 第五节 CCD 器件及其应用 .....      | 221        |
| 本章习题 .....                | 228        |
| 参考文献 .....                | 228        |
| <b>第十章 化学传感器</b> .....    | <b>230</b> |
| 第一节 电化学测量基础 .....         | 230        |
| 第二节 离子传感器 .....           | 236        |
| 第三节 气体传感器 .....           | 252        |
| 第四节 光纤化学传感器 .....         | 266        |
| 第五节 压电化学传感器 .....         | 270        |
| 本章习题 .....                | 272        |
| 参考文献 .....                | 272        |
| <b>第十一章 生物医用电极</b> .....  | <b>274</b> |
| 第一节 电极的基本概念 .....         | 274        |
| 第二节 电极的极化 .....           | 275        |
| 第三节 极化电极与非极化电极 .....      | 278        |
| 第四节 电极的阻抗特性 .....         | 281        |
| 第五节 检测电极和刺激电极 .....       | 287        |
| 第六节 微电极 .....             | 296        |
| 本章习题 .....                | 300        |
| 参考文献 .....                | 301        |
| <b>第十二章 生物传感器</b> .....   | <b>302</b> |
| 第一节 概述 .....              | 302        |
| 第二节 生物敏感膜和敏感元件的制备技术 ..... | 309        |
| 第三节 酶生物传感器 .....          | 316        |
| 第四节 微生物和组织及细胞器传感器 .....   | 330        |
| 第五节 免疫传感器 .....           | 341        |
| 第六节 基因传感器 .....           | 354        |
| 第七节 新型的生物传感器 .....        | 361        |
| 本章习题 .....                | 370        |
| 参考文献 .....                | 370        |
| <b>习题参考答案</b> .....       | <b>371</b> |

# 第一章 绪 论



## 第一节 传感器的作用

随着现代医学和相关科学技术的发展，尤其是电子技术、计算机技术、信息技术的飞速发展，许多先进的高科技仪器、设备应用于医学领域，在诊断、治疗、监护及康复各个阶段中发挥着重要的作用。如果把计算机看成是识别和处理信息的“大脑”，把通信系统看成传递信息的“神经系统”，传感器就是信息系统的“感觉器官”。

每一种生物都需要与周围环境交换信息，因此所有生物都有感知周围环境和自身状态的器官或组织，如人类的眼、耳、鼻、舌、皮肤等，能够获取视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉等信息。传感器与这些感官相似，是感知、获取信息的窗口。

医用传感器（medical sensors）作为拾取生命体征信息的“感觉器官”，延伸、扩展了医生的感知范围，并把定性的感知提高为定量的检测，是医用仪器、设备的关键器件。常用的生物信号检测类仪器结构框图如图 1-1 所示。

传感器将微弱的生物信号转化成微弱的电信号，再经过放大后进行 A/D 转换，将模拟信号转换成数字信号输入计算机。在计算机中可以进行分析、计算以及各种处理，然后输出到显示器、打印机等输出设备。目前，除了传感器之外，其他组成

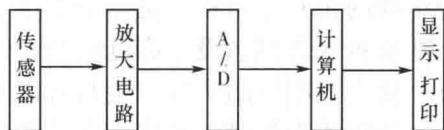


图 1-1 生物信号检测类仪器结构框图

部分都已具备相对比较成熟、完善的技术，已经达到集成化、规范化、系统化的程度，能够较为理想地实现所担负的功能。因此在整体结构中，传感器的性能至关重要，起着关键性的作用，原因如下：①生物信号很多是非电量信号，如：体温、血压等，必须经过传感器感知并转化成电信号才容易进行后续处理；②生物电信号十分微弱，其电压幅度多数是微伏级，最大也只有毫伏级；③生物信号信噪比很低，微弱的有用信号往往淹没在强大的干扰和噪声之中；④生物信号多数变化频率都很低，容易受到 50 Hz 电源和其他生理活动的干扰；⑤无创伤的检测患者才能乐于接受，临床应用才能方便易行。如果传感器的灵敏度不够，就检测不出微弱的生物信号；如果传感器的抗干扰能力不强，信噪比很低，仅仅依靠放大电路的模拟滤波和计算机的数字滤波也很难达到检测的要求；如果传感器只能在有创伤的条件下应用，其应用范围将受到很大的局限。所以，传感器决定着检测的可能性和检测仪器的精确性、可靠性及其应用范围。在其他医疗设备中，传感器也同样起着关键性的作用。例如，现代假肢是一种精密的受控装置，当用一只假手拿起一个纸杯，施力过大会把纸杯捏扁，施力过轻又可能拿不住，并且力的大小还要随着纸杯中水的多少进行调节才能满足日常生活的要求。这些精密的控制是根据手指上微型传感器的信号实现的。

一种新的传感器可以引领一类医用仪器设备的发展和普及，带来根本性的习俗变革。20 世纪末，由于精密光电传感器技术的发展，使原来必须到医院检测的血糖可以自己在家

里完成,从而导致袖珍型快速血糖仪在糖尿病患者家庭的普及和在医院的广泛应用。过去早期妊娠检测试验必须去医院才能进行,受试者的尿样要注入青蛙体内(所以又称青蛙试验),至少半天后才能得到结果,费时费力,操作繁琐。由于生物化学传感器技术的发展,青蛙试验已经被早期妊娠试纸所取代,只要把受试者的尿样点到试纸上,一分钟内就显示出结果,可以十分方便地自行测试完成。微型温度传感器导致了电子体温计的研发,与传统的水银体温计相比,测量体温所需的时间大大缩短。压电传感器的发展引领了超声诊断技术,从而诞生了各种超声诊断仪器,在临床得到了普遍应用。

目前,无创测量血压有多种方法,但测量比较准确、能够在临床应用的方法中都离不开袖带,致使血压不能无间断地连续测量,测量时操作也不够简便。如果发明一种能够直接在体表准确感受血压的传感器,将会带来血压计的根本变革。迄今为止,对于每搏心输出量的体外测量还不够准确;对于疼痛这种常见的症状根本无法进行客观的、定量的检测,只能根据患者的表情和自述判断;这些问题都有待于传感器的发展才能得到解决。

传感器不仅在医学领域中发挥着重要的作用,在其他领域和日常生活中也是不可或缺的重要部件。例如:普通汽车上大约装有十几个传感器,高级豪华车更是多达几十个,构成了安全气囊、防滑、灯光等控制系统以及刹车防抱死装置和电子变速系统等。传感器在汽车中充当着感官和触角,对车辆行驶速度、加速度、发动机转速、进气量、水温、燃料剩余量等工作状态信息进行实时检测,由车内微型计算机根据自身状态和各种外界环境实施自动控制和调节,使汽车随时随地都能处于最佳工作状态,为车辆的正常运行和人员安全提供了保障。在日常生活中,传感器也随处可见。全自动洗衣机水位到达设定高度时会自动关闭进水阀门,这一控制需要水位传感器才能完成。楼道照明灯的声控开关具有以下功能:白天光线明亮时保持关断状态,照明灯关闭;当夜晚来临时,发出声音就能够开启照明灯。由此可见,照明灯声控开关电路中具有光敏传感器和声音传感器。电热水壶加热至水沸腾后会自动关断电源,一定装有温度传感器。从上述实例中可以看出,传感器的应用是十分广泛的,可谓无处不在,必不可少。传感器的作用就是将非电量(如:速度、位移、光、声音、温度等)转换成电量(如:电压、电流、电阻等)输出。所以,传感器是感知信息的关键器件,是进行信号检测的前提,是实现自动控制的基础。

## 第二节 医用传感器的定义、构成、用途及分类

### 一、医用传感器的定义和构成

根据国家标准 GB/T 7665-2005《传感器通用术语》,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和装置。

传感器通常由敏感元件和转换元件两部分组成。敏感元件是指传感器中能直接感受和响应被测量的部分;转换元件则进一步将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输和处理的电信号。例如,压力变化能够改变石英晶振的振荡频率,石英晶体与振荡电路可以组成压力传感器,石英晶体是敏感元件,振荡电路则属于转换元件。

医用传感器是应用于医学领域的传感器,其敏感元件除具有一般传感器的共性外,为适应医学检测的需求,又具有其特点。一般传感器的敏感元件大多是没有生物活性的,例如,温度传感器的热敏电阻,压力传感器的金属应变片等。医用传感器同样可以采用这些敏感元件,在检测大分子有机物质时,还经常采用具有生物活性的物质作为敏感元件,例如:酶传感器。酶是由具有生物活性的蛋白质组成的,酶传感器一般是将某种酶膜固定在电极上,利用酶的专一、高效催化作用检测某种有机物质的存在,以电极电位或电流的变化作为输出电信号。在这里,酶是敏感元件,电极是转换元件。另外,不是所有的传感器都能够清晰的分成敏感元件和转换元件两个部分,例如,光敏电阻,热电偶传感器等,可以认为两部分的功能是合二为一的。

## 二、医用传感器的用途

医学领域有很多反映生命体征的信息量,常见的各种信息量如表 1-1 所示。

表1-1 医学领域常见的各种信息量

|         |                                                                             |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 位移      | 血管直径、心室容积变化,肌肉收缩变化,胸廓变化,胃收缩,肠蠕动等                                            |
| 速度      | 动脉、静脉血液流速,呼吸气体流速,排尿、流泪速度等                                                   |
| 振动(加速度) | 心音,呼吸音,血管音,脉搏,心尖搏动,心瓣膜震动,手颤,颈动脉搏动,语音等                                       |
| 压力      | 血压,眼压,心内压,颅内压,膀胱压,子宫内压等                                                     |
| 力       | 心肌力,肌肉力,咬合力,骨骼负载力,血液黏滞力等                                                    |
| 流量      | 血流量,呼吸流量,尿流量,心输出量等                                                          |
| 温度      | 口腔温,直肠温,皮肤温,脏器温,肿物温,中耳膜内温等                                                  |
| 生物电     | 心电,脑电,肌电,眼电,胃电,神经电,皮肤电等                                                     |
| 化学成分    | K, Na, Cl, Ca, O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , H, Li 等 |
| 生物物质    | 乳酸,血糖,蛋白质,尿素氮,胆固醇,抗原,抗体,激素等                                                 |

反映生命的信息多数属于非电量,对于非电量的放大和处理是很困难的。医用传感器的任务是检测到生命信息,并把非电量转换成电量。对于本身就是电量的生命信息,如:心电,脑电,肌电等,一般采用医用电极将生物体内的离子导电方式转换成导联线中的电子导电方式,进而进行后续处理,可以认为医用电极是一种具有特定功能的医用传感器。

医用传感器的主要用途:

**1. 提供信息** 如心音、血压、脉搏、体温、血流等,作为重要的生理参数供临床诊断和基础研究。

**2. 监护** 长时间连续检测某些生理参数,监视其是否超出正常范围,以便随时掌握患者的状况,出现异常及时报警。

**3. 生化检验** 利用医用传感器的分子识别能力,检测各种体液、溶液中的成分及含量。

**4. 自动控制** 根据医用传感器提供的生理信息,调节执行机构做出反应,实现自动控制。例如:注射泵根据流量传感器的信息调节推进量,实现单位时间注射量的自动控制。

**5. 参与治疗** 医用电极经常既用于检测信号,又用于实施治疗。例如:按需型体内起搏器的电极既作为自主心电的检测电极,又作为无自主心电时起搏器发放脉冲的刺激电极,此时所起的就是治疗作用。

### 三、医用传感器的分类

医用传感器的种类很多,分类方法也有多种,可以根据传感器的工作原理、被测量的种类以及与人体的感官相对应的功能进行分类。

#### (一) 按工作原理分类

**1. 物理传感器** 利用物理性质和物理效应制成的传感器。属于这种类型的传感器最多,例如:位移传感器、压力传感器、流量传感器、温度传感器等。

**2. 化学传感器** 利用化学性质和化学效应制成的传感器。这种传感器一般是通过离子选择性敏感膜将某些化学成分、含量、浓度等非电量转换成与之有对应关系的电学量。例如:不同种类的离子敏感电极、离子敏场效应管、气体传感器等。

**3. 生物传感器** 采用具有生物活性物质作为敏感元件的传感器。这种传感器一般是利用酶催化某种生化反应或者通过某种特异性的结合,检测大分子有机物质的种类及含量,是近半个世纪发展起来的新型传感器。例如:酶传感器、微生物传感器、免疫传感器、组织传感器、DNA 传感器等。

#### (二) 按被测量的种类分类

这是根据被测量的种类对传感器进行分类的方法。例如:压力传感器,包括金属应变片压力传感器、半导体压力传感器、电容压力传感器等所有能够检测压力的传感器。温度传感器,包括热敏电阻、热电偶、PN 结温度传感器等所有能够检测温度的传感器。

#### (三) 按与人体感官相对应的功能分类

这是根据传感器所能替代的人体感官对传感器进行分类的方法。例如:视觉传感器,包括各种光学传感器以及其他能够替代视觉功能的传感器。听觉传感器,包括各种拾音器、压电传感器、电容传感器以及其他能够替代听觉功能的传感器。嗅觉传感器,包括各种气体敏感传感器以及其他能够替代嗅觉功能的传感器。这种分类方法有利于仿生传感器的开发及其仿生学的研究。

除了上述列举的常见传感器分类方法外,还有根据传感器材料、传感器结构、能量转换方式等多种分类方法,都具有各自的长处和局限性。

### 第三节 医用传感器应具有的性能和特殊要求

医用传感器主要是用来检测人体生物信号的,针对人体生物信号特点应具备特殊的性能,以满足医用的要求。生物体是一个有机的整体,各个系统和器官都有各自的功能和特点,但又彼此依赖,相互制约。从体外或体内检测到的信号,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。医用传感器要从这些综合信息中提取特定的待测信息,并把这种信息转换成电学量。例如:将心音传感器放在胸壁检测心音,胸壁上除了来自体内的心音外,还有呼吸时胸廓的运动、躯体活动产生的振动和外界的噪声干扰,这就对心音传感器提出了很高的要求。因此,医

用传感器应具有以下性能:

- (1) 足够高的灵敏度, 能够检测出微弱的生物信号。
- (2) 尽可能高的信噪比, 以便在干扰和噪声背景中提取有用的信息。
- (3) 良好的精确性, 以保证检测出的信息准确、可靠。
- (4) 足够快的响应速度, 能够跟随生物体信息量的变化。
- (5) 良好的稳定性, 长时间检测漂移很小, 保持输出稳定。
- (6) 较好的互换性, 调试、维修方便。

另外, 医用传感器主要是用于人体的, 与一般传感器相比, 还必须提出以下特殊要求:

(1) 与人体接触、特别是植入体内的传感器材料必须是无毒的, 并且与生物体组织具有良好的相容性, 长期接触不会引起排异、炎症等不良反应。

(2) 传感器在进行检测时, 不能影响或者尽可能少影响正常的生理活动, 否则检测的信息将是不准确的。

(3) 传感器应具有良好的电气安全性, 特别是与体内接触的传感器应按照防止微电击的电气安全标准具有良好的绝缘性能。微电击是指电流不经体表直接进入体内引起的电击, 由于体内电阻小, 对接触体内传感器的绝缘性能要求很高。

(4) 传感器在结构上和性能上要便于清洁和消毒, 防止有害物质存留引起交叉感染。

综上所述, 由于生物信号幅值低, 信噪比低, 容易受到各种干扰, 医用传感器往往直接接触人体, 所以医用传感器需要具备优越的性能并且满足特殊的要求。

## 第四节 医用传感器的发展

人类社会已进入信息化社会, 传感器是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。传感器技术已成为信息化社会的重要技术基础, 被普遍认为是对 21 世纪产生巨大影响的技术之一。现代计算机技术和通信技术不仅对传感器的精度、可靠性、响应速度、获取的信息量要求越来越高, 而且希望体积小、重量轻、成本低、使用方便。很多国家投入巨资进行传感器尖端技术的研究, 有力地推动了传感器的发展。近年来, 针对临床医学的特点和临床应用的需求, 医用传感器技术也发生了根本性的变革, 形成了全新的现代医用传感器技术, 并向着崭新的方向快速发展。

### 一、智能化传感器

智能传感器 (smart sensor, intelligent sensor) 最早出现在 20 世纪 80 年代, 是计算机技术、微电子技术与传感器技术的结合。智能化传感器一般具有以下功能:

- (1) 能够根据检测到的信号进行判断和决策。
- (2) 可以根据软件控制执行相应的操作。
- (3) 具有输入、输出接口, 能够与外部进行信息交流。
- (4) 具有自我检测、自我校正和自我保护功能。

智能化传感器的结构框图如图 1-2 所示。

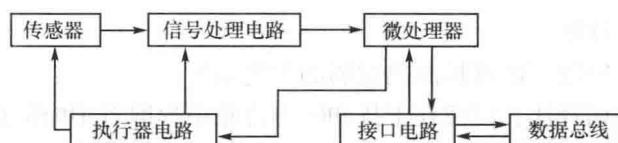


图 1-2 智能化传感器结构框图

智能化传感器技术的应用提高了医学仪器设备的性能，主要体现在：

**1. 自动数据处理** 智能化传感器改变了传统的对参数的被动测量，成为主动测量。一方面可以根据已测得的参数求得未知参数，另一方面还可以根据计算进行判断，主动选择待测参数，并能实现自动调零、自动平衡、自动补偿、自动量程选择等功能。

**2. 自我检测、诊断和报警功能** 智能化传感器能够根据预先设定的算法对设备的工作状态是否正常进行检测，能够诊断故障原因并以故障代码的形式显示出来。目前大部分的现代医学仪器设备如 CT 机、血液透析机、超声仪、自动生化仪都具有自诊断功能，都是以智能化传感器技术作为基础。智能化传感器与显示器结合可选择显示或定时循环显示各个测量参数，通过与给定值的比较，实现上、下限的报警功能。

**3. 接口功能** 智能化传感器技术采用标准数字化输出，能够通过接口技术实现传感器与系统之间、传感器与网络之间的数据交换和共享，构成一个网络化的智能传感器系统。例如：通过智能传感器测定某糖尿病患者食物的成分，经网络传输到医院的信息中心，根据患者的具体情况进行分析，计算出该患者需要注射胰岛素的准确剂量，再通过网络控制该患者的胰岛素注射泵，完成自动按需给药。

## 二、微型化传感器

随着微电子机械系统（micro electro-mechanical system, MEMS）技术的发展，现代传感器正在从传统的结构设计和生产工艺向微型化转变。微型化传感器（micro-sensor）是由微机械加工技术精密制作而成的，包括蚀刻、沉积、腐蚀等微细加工工艺，敏感元件的体积可以小到微米级。

微型化传感器可以进入常规传感器不能达到的部位，深入脏器、病灶的内部，获取常规传感器不能获取的信息。例如：新型体内心脏起搏器就带有血氧、运动等微型传感器，可以使患者心率随实际需要有所变化，如缺氧或运动时心率加快，睡眠时心率放慢，更符合正常生理规律，提高患者的生活质量。另外，由于微型化传感器的体积很小，极大地减小了对正常生理活动的妨碍和影响，使检测值更加真实、可靠。

## 三、多参数传感器

在临床医学领域，往往需要同时检测多种生理参数，需要同时使用多种传感器。多参数传感器（poly-parameter sensor）是一种体积小而多种功能兼备的探测系统，用单独一个传感器系统同时测量多种参数，实现多种传感器的功能。多参数传感器将若干种不同的敏感元件集成在一块芯片上，工作条件完全相同，易对系统误差进行补偿和校正，与采用多个传感器系统相比，检测精度高，稳定性好，体积小，重量轻，成本低。近年来研制的仿生传感器“电子鼻”是一种能够识别多种气体成分的多参数传感器，“电子舌”是一种能够识别多种味觉的多参数传感器，这些研究成果已经应用于各种类型的机器人中。

## 四、遥控传感器

在临床医学领域,很多情况下需要在患者体内植入或让患者吞服一些检测体内某些参数的传感器或定时释放药物的装置,对于这种传感器或装置需要在体外进行遥控。遥控传感器(remote-control sensor)就是将遥控技术与传感器技术相结合形成的一种新型传感器。例如:吞服“电子药丸”微型传感器到达胃内,遥控检测胃液的 pH、胃内压力、消化液成分等参数,并将检测结果通过微型无线发射装置传送到体外的接收器。

## 五、无创传感器

随着人类生活水平的提高,人们的健康意识也在不断增强,已经不仅仅满足于治疗疾病,对于预防疾病和摆脱亚健康状态提出了更多的要求。另外,随着社会的老龄化,社区医疗、自我保健将越来越重要。这些变化都要求能够经常地、方便地检测一些生理指标,并且检测操作简便,易于接受,在社区甚至在家里就可以完成。于是,无创检测就成为医用传感器研究的一个重要方向。无创检测就是在检测的全过程没有任何创伤或者几乎没有创伤。无创检测不仅减少了受试者的痛苦,使受试者能够乐于接受,而且对机体状态影响小,检测可靠,此外还具有操作简单、消毒容易、不易发生感染等优点。

无创检测传感器(noninvasive detecting sensor)在体表进行检测,需要具有更高的灵敏度和精确性,具有更高的抗干扰性能和信噪比。例如:采用指夹式光电容积血流脉搏波传感器固定在人体指尖进行检测,可以定量检测出人体每搏心输出量、血管弹性、血液黏度、外周阻力等血流参数,但精确度尚有待提高。

## 六、无线传感网络

无线传感网络(wireless sensor network, WSN)是利用无线电波作为信息传输介质,由无线传感器组群以及接收处理中心组成的互联通信网络。无线传感器主要由传感器、处理器和无线通信模块组成。无线传感网络具有简便、快速、实时、无创采集患者生理指标的功能,覆盖面广,通信迅速,在医学领域具有广阔的应用前景。例如:随着社会老龄化的进程,对于独居老人健康状况的监护是一项重要工作。在老人身上及居室内安装呼吸、体温、血压、身体移动等无线传感器,社区医生就可以远程了解老人的健康情况,在不影响其活动的情况下观测到老人的各项生理指标和各种预警信息。

医用传感器的发展已经改变了传统的模式,形成了智能化、微型化、多参数、可遥控、无创检测、无线传感网络等全新的发展方向,并取得了一系列的技术突破。目前,医用传感器还在快速发展,新型的敏感材料层出不穷,如:陶瓷材料、磁性材料、纳米材料等。加工工艺水平也在不断提高,如:电子束、分子束、等离子体蚀刻技术,各向异性腐蚀技术等。改善传感器性能的其他途径,如:差动技术、补偿与修正技术、稳定性处理等方法也在研究、实验之中。

随着医用传感器技术的发展,人类将得到更多的有关生命客观、准确的信息,远远超出人类自身的感知能力。在基础研究方面,将最终全部揭开生命的奥秘,找到“不治之症”的病因,攻克各种顽疾;在临床应用方面,将极大地推进计算机在医学领域的应用,实现计算机诊断甚至机器人手术,开创崭新的医疗模式。医用传感器将引领现代医学更快的发

展, 在生命科学的世纪发挥重大的作用。

## 本章习题

- 1.1 传感器的定义是什么?
- 1.2 为什么说在检测类仪器的整体结构中, 传感器起着关键性的作用。
- 1.3 生物电信号有哪些特点?
- 1.4 日常生活中应用到哪些传感器, 举出两三个实例。
- 1.5 医用传感器主要是用于人体的, 与一般传感器相比, 还必须满足哪些特殊要求。
- 1.6 医用传感器常用的分类方法有哪些?
- 1.7 传感器的基本构成通常分为几部分, 各自的功能是什么?
- 1.8 生物传感器经常采用什么材料作为敏感元件。
- 1.9 医用传感器主要应用于哪些方面?
- 1.10 智能传感器一般具有哪些功能?
- 1.11 为什么说智能传感器的接口具有重要作用。
- 1.12 医用传感器有哪些发展方向?
- 1.13 什么是微电击, 为什么对接触体内的传感器电气安全要求更高。
- 1.14 表 1-1 中所列的生物电, 本身就属于电量信号, 检测一般采用什么传感器。
- 1.15 医用传感器技术的发展与计算机诊断有何关系?

## 参考文献

- 陈安宇. 2008. 医用传感器. 第 2 版. 北京: 科学出版社.
- 胡向东. 2013. 传感与检测技术. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社.
- 李林功. 2015. 传感器技术及其应用. 北京: 科学出版社.
- 孟宪宇. 2012. 多感知系统与智能仿真. 北京: 国防工业出版社.
- 尼库、雷克列. 2015. 微纳机电生物传感器. 北京: 机械工业出版社.
- 沈燕卿. 2013. 传感器技术. 北京: 中国电力出版社.
- 杨博雄. 2015. 无线传感网络. 北京: 人民邮电出版社.

## 第二章 传感器的基本特性



传感器的特性主要是指其转换信息的能力和性质。这种能力和性质常用传感器输入和输出的对应关系来描述。传感器的输入量可分为静态量和动态量,静态量是指不随时间变化或变化甚为缓慢的量(如体温),动态量是指周期性信号、瞬态变化或随机变化的信号(如心电、血压等)。当输入量为静态量时,其输出输入关系称为静态特性,输入量为动态量时,则称为动态特性。所以医用传感器的特性可以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,如果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,则传感器的输出量与输入量间的关系即为静态特性。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,我们不具体讨论传感器的物理、化学或生物的特性,只从其输出和输入之间的关系来讨论其特性。

输出与输入的关系可分为线性特性和非线性特性。通常人们都希望传感器的输出和输入之间具有确定的对应关系,并且具有线性关系,即满足理想的输出输入关系,以便如实反映待测的信息。但实际遇到的传感器大多为非线性特性,在不考虑迟滞、蠕变和不稳定性等因素的情况下,其静态特性可用下列多项式代数方程表示:

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

式中  $y$  指输出信号;  $x$  指输入信号;  $a_0$  指无输入时的输出,零位输出;  $a_1$  指传感器的线性灵敏度  $a_2, a_3, \cdots, a_n$  指非线性项的待定常数;

此方程又称为传感器静态特性的数学模型。若  $a_0=0$ , 即不考虑零位输出,则静态特性过原点,此时静态特性由线性项和非线性项叠加而成。一般有以下几种典型情况:

**1. 理想线性特性** 当  $a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$  时,输入与输出之间具有理想的线性关系,特性曲线如图 2-1(a) 所示。此时传感器的静态特性为:

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

静态特性曲线为一条直线。具有这种特性的传感器称为线性传感器。

若  $a_0 \neq 0, a_1 \neq 0, a_2 = a_3 = a_4 = \cdots = 0$ , 仍表示线性,只是这时的直线不通过原点,有零偏  $a_0$ ;

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

$$\Delta y = a_1 \Delta x \quad (2-3)$$

这时的  $a_1 = \frac{y}{x} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ , 称为传感器的灵敏度(sensitivity)。如果  $a_1$  是定值,则  $\Delta x$  与  $\Delta y$  成正