

传感器 与医学工程

CHUANGANQI YU YIXUE GONGCHENG

郑羽 陈瑞娟 田磊 著



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

传感器与医学工程

郑羽 陈瑞娟 田磊 著

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

传感器与医学工程 / 郑羽, 陈瑞娟, 田磊著. — 天津 : 天津大学出版社, 2019. 7
ISBN 978-7-5618-6445-6

I. ①传… II. ①郑…②陈…③田… III. ①生物传感器—研究②生物医学工程—研究 IV. ①TP212.3
②R318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 141252 号

出版发行 天津大学出版社
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647
网 址 publish. tju. edu. cn
印 刷 北京虎彩文化传播有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 13. 25
字 数 331 千
版 次 2019 年 7 月第 1 版
印 次 2019 年 7 月第 1 次
定 价 40. 00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请与我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

全方位、全周期保障人民对健康的需求是十九大以来党和国家对新时代卫生和健康发展的要求。未来的生命科学将伴随医学与工程技术的结合(即医工结合)而不断进步。工程技术的改进和医学检测仪器设备的更新换代,将不断促进医学乃至生命科学的发展。因此,通过医工结合,研发具有中国自主知识产权的高性能医疗器械重点产品,势必成为《中国制造2025》的迫切任务。纵观我国医疗器械领域的发展,与世界先进国家相比,仍存在非常大的差距。根据目前和未来的社会发展与市场需求,努力加强我国生物医学工程专业的人才培养,是提高我国医疗器械研发水平的基础和保障。传感器作为获取医疗信息的第一个环节,延伸了医生的感觉器官,可帮助医生进行客观、正确的定量分析。同时,传感器的灵敏度和可靠性决定了医学测量系统的精度和有效性,因此传感器在各类医学仪器的研制、开发及使用中都占据重要的地位。

“传感器与医学工程”在生物医学工程专业的课程体系中起着承上启下的作用,该课程的学习能够有效加深学生在医学工程设计中对传感器这一关键环节的理解。本书以传感器为核心,介绍传感技术在医学工程中的具体应用,结合目前最常用的医学仪器与检测技术,重点介绍主要采用的传感器类型,讲解该类传感器的工作原理,让学生掌握不同的医学仪器设计中传感器的使用和设计方法,而且更直观地了解传感器在生物医学工程中的具体应用。本书适合生物医学工程专业本科生和研究生教学使用。

全书共分为6章,第1章介绍了传感器的基本知识,讲解了医学传感器的发展现状、用途、特点、分类,给出了典型传感器的静态和动态特性,并介绍了传感技术的发展趋势;第2章介绍了传感器在生物电信号检测上的应用;第3章介绍了传感器在人体生理信号检测上的应用;第4章介绍了传感器在电疗与电磁刺激仪器上的应用;第5章介绍了传感器在医学成像中的应用;第6章介绍了传感器在检验分析仪器上的应用。同时,每章都结合传感器的基本原理讲解了其在医学工程中的具体应用,通过传感器应用与原理的有机结合来提高本科生和研究生的设计、实践和动手能力,也为课程效果评价提供了一种新的方法。本书阐述的部分内容是比较新颖的,可以开拓学生的视野,增强学生从事生物医学传感器研究与应用工作的兴趣。

天津工业大学生物医学工程系教师郑羽负责本书前言及第2、4、6章的编

写,陈瑞娟负责第1、5章的编写,田磊负责第3章的编写,王琦参与了第5章的编写,王慧泉、韦然、赵喆提供了大量的教案素材,研究生东磊、冯彦博、程建豪、田春晓、张康辉和宋文嘉参与了本书的图形编辑和文字校对工作,在此一并表示由衷的谢意。

以这样的思路和结构编写的传感器在医学工程中的应用的教材并不多,我们希望这样的尝试有助于读者更容易、更全面地学习和掌握传感器的原理及其在医学工程中的具体应用。目前,传感技术和医学仪器发展迅猛,生物医学工程专业涉及生物、医学和工程领域的各个方面,学科知识面广,由于作者写作时间紧,再加上知识和经验所限,难免有考虑不足或疏忽之处,敬请读者批评指正。作者 E-mail:zhengyu@tjpu.edu.cn。

编 者

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 医学传感器概述	(1)
1.1.1 医学传感器的发展现状	(1)
1.1.2 医学传感器的用途	(4)
1.1.3 医学传感器的特点	(4)
1.1.4 医学传感器的分类	(4)
1.2 传感器的基本特性	(6)
1.2.1 传感器的静态特性	(6)
1.2.2 传感器的动态特性	(9)
1.2.3 传感器的标定	(12)
1.3 传感技术的发展趋势	(14)
1.3.1 传感器的改进途径	(14)
1.3.2 传感器技术的创新	(15)
思考题	(17)
第2章 传感器在生物电信号检测上的应用	(18)
2.1 生物电基础	(18)
2.1.1 细胞生物电基础	(18)
2.1.2 微电极传感器	(22)
2.1.3 玻璃微电极在细胞生物电测量上的应用	(23)
2.2 人体生物电	(28)
2.2.1 人体生物电的分类和特点	(28)
2.2.2 人体常见的生物医用电极	(29)
2.3 心电信号的测量	(32)
2.3.1 心电信号的产生	(32)
2.3.2 心电信号的波形特点	(33)
2.3.3 心电信号的导联系统	(35)
2.3.4 生物电极在心电信号测量上的应用	(38)
2.4 肌电信号的测量	(42)
2.4.1 肌电信号的波形特点	(42)
2.4.2 肌电信号测量中的生物电极	(42)
2.4.3 生物电极在肌电信号检测上的应用	(43)
2.5 脑电信号的测量	(45)

2.5.1 脑电信号的产生	(45)
2.5.2 脑电信号的导联系统	(45)
2.5.3 脑电信号测量的传感器	(47)
2.5.4 生物电极在脑电信号检测上的应用	(48)
思考题	(49)
第3章 传感器在人体生理信号检测上的应用	(50)
3.1 血压的测量	(50)
3.1.1 血压测量的生理基础	(50)
3.1.2 血压检测中的检测参数	(51)
3.1.3 传感器在血压测量上的应用原理	(52)
3.1.4 传感器在血压测量上的具体应用	(62)
3.2 血氧饱和度的测量	(65)
3.2.1 血氧饱和度测量的生理基础	(65)
3.2.2 血氧饱和度检测中的检测参数	(66)
3.2.3 血氧饱和度的测量原理	(66)
3.2.4 光电式传感器	(67)
3.2.5 光电式传感器在血氧饱和度检测上的应用	(72)
3.3 呼吸的测量	(74)
3.3.1 呼吸测量的生理基础	(74)
3.3.2 呼吸的检测参数	(74)
3.3.3 呼吸的检测方法	(75)
3.3.4 呼吸测量的传感器	(76)
3.3.5 传感器在呼吸检测上的应用	(77)
3.4 体温的测量	(79)
3.4.1 体温测量的传感器	(79)
3.4.2 传感器在体温测量上的应用	(86)
3.4.3 红外传感器在体温测量上的应用	(87)
3.4.4 光纤温度传感器在体温测量上的应用	(88)
思考题	(90)
第4章 传感器在电疗与电磁刺激仪器上的应用	(91)
4.1 经颅直流电刺激(tDCS)的工作原理	(91)
4.1.1 tDCS 简介	(91)
4.1.2 tDCS 的发展	(91)
4.1.3 tDCS 的工作原理	(92)
4.1.4 经颅直流电定向刺激	(93)
4.1.5 经颅直流电刺激装置的系统结构	(94)
4.1.6 tDCS 传感器	(94)

4.1.7 经颅直流电刺激的临床应用	(96)
4.2 经颅磁刺激(TMS)的工作原理	(97)
4.2.1 TMS 简介与发展历程	(97)
4.2.2 TMS 的治疗原理	(99)
4.2.3 TMS 的装置	(100)
4.2.4 经颅磁刺激的应用	(107)
4.3 植入式电疗仪器的测量原理	(108)
4.3.1 心脏起搏器	(108)
4.3.2 脑深部刺激器(DBS)	(116)
4.3.3 神经肌肉电刺激(NMES)	(119)
思考题	(122)
第5章 传感器在医学成像中的应用	(123)
5.1 电阻抗成像(EIT)	(123)
5.1.1 电阻抗成像的基本原理	(123)
5.1.2 传感器在电阻抗成像中的应用	(124)
5.1.3 电阻抗成像在肺呼吸过程成像中的应用	(133)
5.2 磁探测电阻抗成像(MDEIT)	(134)
5.2.1 磁探测电阻抗成像的基本原理	(134)
5.2.2 传感器在磁探测电阻抗成像中的应用	(136)
5.2.3 磁探测电阻抗成像的测量系统	(142)
5.3 X线成像	(148)
5.3.1 X线的基本性质及作用	(148)
5.3.2 X线成像的物理原理	(149)
5.3.3 X线机成像系统	(151)
5.3.4 传感器在X线机成像中的应用	(153)
5.4 X-CT 成像	(153)
5.4.1 X-CT 成像装置	(154)
5.4.2 X-CT 的成像过程	(155)
5.4.3 X-CT 的图像重建方法	(155)
5.4.4 CCD 图像传感器在X-CT中的应用	(157)
5.5 磁共振成像	(159)
5.5.1 磁共振成像的物理原理	(160)
5.5.2 磁共振成像的硬件系统	(163)
5.5.3 质子旋进式磁敏传感器在磁共振成像中的应用	(164)
5.6 超声成像	(167)
5.6.1 超声波的物理基础	(168)
5.6.2 传感器在超声成像中的应用	(170)

5.6.3 超声波的成像原理	(171)
思考题	(173)
第6章 传感器在检验分析仪器上的应用	(174)
6.1 血液细胞分析仪的测量原理	(174)
6.1.1 血液细胞分析仪的发展历史	(175)
6.1.2 血细胞计数原理	(175)
6.1.3 传感器在血细胞分析仪上的应用	(180)
6.1.4 光电倍增管在血细胞分析仪上的应用	(180)
6.2 流式细胞仪的测量原理	(180)
6.2.1 流式细胞仪的发展历史	(181)
6.2.2 流式细胞仪的测量原理	(181)
6.2.3 光电传感器在流式细胞仪上的应用	(182)
6.3 尿液分析仪的测量原理	(183)
6.3.1 干式尿液分析仪的发展历史	(183)
6.3.2 干式尿液分析仪的测试原理	(184)
6.3.3 光电传感器在尿液分析仪上的应用	(185)
6.4 电泳分析仪的测量原理	(186)
6.4.1 电解质溶液的基本性质	(186)
6.4.2 电泳分析仪的测量原理	(187)
6.5 微生物检测仪的测量原理	(188)
6.5.1 血培养仪的测量原理	(188)
6.5.2 生物传感器	(189)
6.5.3 微生物传感器在微生物分析仪上的应用	(191)
6.6 免疫分析仪的测量原理	(192)
6.6.1 化学发光免疫法的测量原理	(192)
6.6.2 免疫传感器在化学发光免疫分析仪上的应用	(194)
6.7 分子诊断仪的测量原理	(196)
6.7.1 基因扩增仪的测量原理	(196)
6.7.2 温度传感器在基因扩增仪上的应用	(197)
6.7.3 DNA 测序仪的测量原理	(198)
6.7.4 DNA 传感器	(199)
思考题	(200)
参考文献	(201)

第 1 章 绪论

传感技术作为信息的源头技术是现代信息技术的三大支柱之一,与物理学、测量学、电子学、光学、机械学、材料学、计算机科学等多门学科密切相关。生物医学传感器担负着从原始的生物体(特别是人体)获取信息这一重要任务,是构成复杂的测量系统以及医疗仪器、装置的核心。传感器与医学工程是一门对高新技术极度敏感,由多种技术相互渗透、相互结合而形成的新技术密集型工程技术学科,为现代生命科学技术发展提供了技术基础。

掌握生物医学传感器的原理、结构和应用的一般规律,了解现代传感器与医学工程的发展动态与趋势,掌握典型传感技术,能通过检索、阅读相关资料轻松地使用新型传感器,构建生物医学传感测量系统,是不断研发医用传感器产品的前提条件,也是现代医学工程发展的有力保障。

1.1 医学传感器概述

传感器(sensor)是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并能将感受到的信息按一定规律转换成电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。

生物医学传感器(biomedical sensor)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,还要满足生物医学信号检测的需求。因此,生物医学传感器的定义是将生物体各种不同的生命信息转换为与之有确定函数关系的电信号的变换装置。由于生物医学传感器是用于生物体的,因此除了一般测量对传感器的要求外,还必须考虑到生物体的解剖结构和生理功能,安全性和可靠性问题更应特别重视。如:传感器必须与生物体内的化学成分相容,传感器和生物体要有足够的电绝缘,传感器不应干扰生物体正常的生理功能等。

1.1.1 医学传感器的发展现状

随着信息时代的到来,传感器技术成为信息社会的重要技术基础,传感器技术水平的高低在很大程度上决定了一个国家仪器设备水平的高低。各个国家都投巨资致力于发展尖端传感器技术,使得传感器技术近年来获得了突飞猛进的发展。早在 20 世纪 80 年代,美国就认为世界已进入传感器时代,日本将传感器技术列为十大技术之首,我国也将传感器技术列为我国的重点科技攻关项目。今天的传感器,正在从传统的结构设计和生产转向以微机械加工技术为基础、仿真程序为工具的微结构设计,并优先选用硅材料,研制各种敏感机理的集成化、陈列化、智能化硅微传感器。医用传感器作为临床医学诊断的“电五官”,在临床医学中的诊断、治疗、监护和康复保健等各个阶段都必不可少且意义重大,成为制约高

水平先进医疗设备发展的关键技术,也是每个国家都优先发展的先锋技术。可以说,医用传感器技术的每一次进步都会带来临床医学的突破性进展。近年来,针对临床医学的特点和临床应用的需要,医用传感器技术发生了根本性的变革,已经彻底克服了传统医用传感器体积大、性能差的缺点,形成了全新的、现代的新型医用传感器技术,并向着崭新的方向快速发展。现代传感器技术的发展方向概括起来主要有智能化、微型化、多参数、可遥控和无创检测等五个方面。

生物医学传感器在医疗保健系统中发挥着重要的作用,生物医学传感器是高质量、低成本的医疗保健系统发展的主要驱动力。下面以生物医学智能服装、无损检测传感器、吞服式智能药丸、植入式传感器、无线传感器等为例介绍生物医学传感器的发展趋势,并对未来医疗保健系统的发展进行展望。

1. 传感器健康监护在智能服装中的应用

在不影响人体正常活动的前提下,对身体进行连续监测的一种设计方案是可穿戴式生物医学传感器,其方法是将带有集成传感器的检测处理电路集成到具有特定功能的衣服中,这种衣服称为生物医学智能服装,用于健康监护。生物医学智能服装的功能包括检测生理参数、做出诊断、监测疾病的发展趋势和做出相应的处理,通过反馈设备的配合,可以与使用者互动,就如得到医疗专家的服务一样。生物医学智能服装可具有监测心血管状态的功能,其设计涉及血压检测以及血管与无线传感检测的适应性、心电图的无线读数等问题。其可用于葡萄糖传感检测,为糖尿病患者服务;也可用于呼吸系统传感检测,包括功能性呼吸系统的检测和呼出气体成分的检测等。传感器也可集成到包扎伤口的绷带上,用于对伤者进行连续的生理信号监测。另外,高级穿戴式生物医学传感器与远程医疗相结合,可以大大提高医疗监护系统的效率,扩展其功能和作用,自动诊断和自动给药治疗功能可以保证人体的健康,提高生活质量。图 1.1 所示是用于呼吸功能监测和心电监测的智能服装。

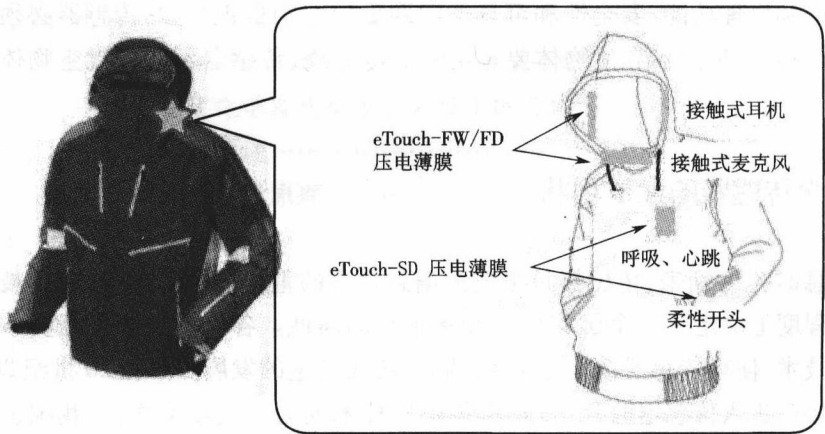


图 1.1 智能服装

2. 传感器在高血压测量监护中的应用

血压测量常分为有创和无创两大类。有创血压测量在临床上主要采用导管术的方法, 此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

即先通过穿刺将导管置于被测部位的血管内,血管内的压力通过导管内的液体传递到外部的压力传感器上,传感器的一端接检测仪,另一端连接自动冲洗装置,通过特定的计算方法将动脉的压力值显示在检测仪上。无创血压测量的方法有很多,最主要的一种方法是通过外部加压阻断动脉,再对脉搏的变化或血流的变化进行分析处理获得血压值,该方法又可分为柯氏音法、超声法、测振法等,具体测量方法详见第3章。

3. 传感器在心脏疾病监测中的应用

对心电信号进行检测已成为长时间家庭监护中应对老龄化社会转变医疗方式的重要方法。心脏的生理功能与心电图之间存在着密切关系,心电图的波形可以将丰富的心脏及神经系统活动信息表示出来,在心脏疾病的治疗、诊断和预防等方面有广泛的应用。心电图诊断方法是心血管疾病诊断中一种十分重要的方法,对辅助诊断有很高的应用价值。利用心电电极对人体的心电信号进行采集的过程详见第2章。

4. 传感器在糖尿病治疗中的应用

目前较广泛使用的植入血糖检测仪都属于微创,即将细针状传感器探头直接刺入皮下,基座和数据部分固定在皮肤上。经过数十年的研究,其在血糖仪的探索方面取得了一定的成果,如通过无创伤或极微小的创伤直接检测体液中的微量葡萄糖,采用光谱法对血糖进行测量分析,采用能量代谢守恒法测量血压,这些测量方法都应用了传感器。

目前,将植入式传感器、控制电路、微处理器做成一粒电子药丸植入体内,成为集信号检测、处理与控制于一体的闭环控制装置。用于治疗糖尿病的药疗系统如图1.2所示。另外,还有植入式心脏起搏器及除颤器等。

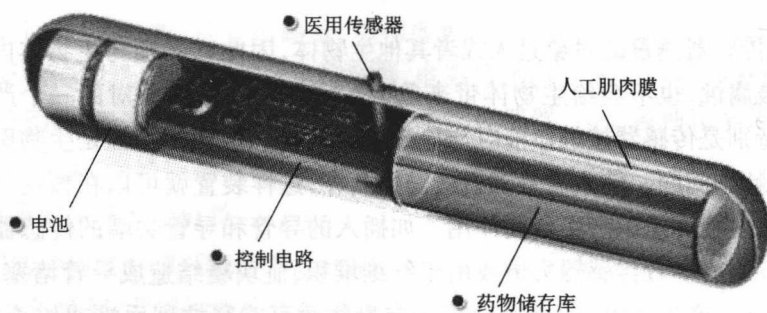


图 1.2 检测、处理与控制三位一体的植入式糖尿病治疗电子药丸

5. 传感器在癌症研究中的应用

肿瘤标志物一般由胚胎组织正常产生,或者由肿瘤组织直接产生。由于肿瘤标志物与癌症之间的特异性很差,因此单一肿瘤标志物免疫传感器通常诊断价值受到限制,开发多肿瘤标志物免疫传感器(多靶标免疫传感器)非常必要。Wilson 等首次开发了一种能通过电化学酶联竞争免疫分析来实现同时检测的阵列免疫传感器。新型电流型多靶标免疫传感器的常用模式是“三明治夹心”型,需要同时获得两种或两种以上可显著区分的电流信号,将不同的电话性物质标记于不同的抗体上,再通过免疫反应得到相应的检测信号。一

个由马萨诸塞大学阿默斯特分校的化学家领导的研究小组开发出了一种快速、灵敏的探测方法,能从微观水平识别出活组织内各种细胞的类型,几分钟就能区分出癌转移组织和正常组织。此外,石墨烯复合物用于肿瘤标志物多靶标电化学免疫检测也表现出良好的稳定性和灵敏度。

1.1.2 医学传感器的用途

医学传感器在临床上的用途主要有以下四种。

(1)检测:检测正常或异常生理参数,如血压、血氧、心电、肌电、脑电、体温、血流、CT 或 MRI 图像等,这些参数都可以作为重要的生理参数供临床诊断和基础研究用。

(2)监护:连续测定某些生理参数是否处于正常范围,以随时掌握患者的状况,出现异常及时报警。在 ICU 病房,配有对危重病人的体温、脉搏、血压、呼吸、心电等进行连续监护的监护仪。

(3)控制:利用检测到的生理参数控制人体的生理过程,如用同步呼吸器抢救病人时,要检测病人的呼吸信号,以控制呼吸器的动作与人体呼吸同步。

(4)治疗:一些医用电极经常既用于检测信号,又用于实施治疗,例如脑深部刺激器(Deep Brain Stimulator, DBS)的电极可以通过控制器发送脉冲信号刺激对应的靶点组织或细胞,对一些神经退行性疾病起到治疗作用。

1.1.3 医学传感器的特点

生物医学传感器测量的对象是人或者其他生物体,因此它必须与生物体内的化学成分相容,既不会被腐蚀,也不会给生物体带来危害。使用传感器所面对的一个严重问题就是生物相容性,特别是传感器接触血液时与血液的相容性。生物相容性是生物医学传感器需要考虑的一个特殊问题。植入装置和血液需要共存,这样装置就可以在预定目的下发挥功能,而又不会对血液和组织产生负面作用。如插入的导管和导管尖端的传感器可能引发许多反应,这些反应会导致传感器失灵或由于纤维堆积、血块凝结造成导管堵塞。此外,装置的存在可能使病人产生危险,这种危险源于有毒物质可能释放到血液或体液中,传感器产生的电荷或电流外部泄漏而导致血栓症严重。血液凝结时间是接触到血液的材料的生物相容性最明显的指示,被广泛应用在生物医学传感器技术中。其中,聚四氟乙烯被认为是最具惰性、最相容的生物医学聚合材料,它的血液凝结时间是 11 ~ 13 min,被认为 100% 相容。而一般的无机硅和玻璃的血液凝结时间非常短,都短于 10 min。因此,传感器和导管设计的表面材料构成和表面修饰已经成为植入式传感器研究和发展的关键问题。

1.1.4 医学传感器的分类

医学传感器是知识和技术密集的产品,一种被测量可以用不同的传感器来测量,同一

原理的传感器通常可测量多种被测量,因此分类方法多种多样,目前尚没有统一的分类方法,主要的分类方法有以下几种。

1. 按被测量分类

按被测量可将生物医学传感器分为以下三类。

(1) 物理量传感器:用于测量和监护生物体的血压、呼吸、脉搏、体温、心音、呼吸频率和血液黏度、流速、流量等物理量。

(2) 化学量传感器:用于测量人体中气味分子、氧和二氧化碳的含量,体液(血液、汗液、尿液等)的 pH 值以及金属离子的浓度等。

(3) 生物量传感器:用于检测生物体中的组织、细胞、酶、抗原、抗体、受体、激素、DNA、RNA 以及蛋白质等生物量。

2. 按工作原理分类

按工作原理可将生物医学传感器分为电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、热电式传感器和光电式传感器等。根据具体测量的对象,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。一种传感器可以根据多种工作方式制成,因此往往可以用不同工作原理的定语来描述传感器,如应变片式压力传感器、压阻式传感器和压电式传感器等。目前,国内标准传感器采用大写汉语拼音字母和阿拉伯数字做标志代号。传感器标志由下列四部分构成:主称、被测量、原理、序号。例如 CWY-WL-10 表示序号为 10 的电涡流位移传感器;CY-YZ-2A 表示序号为 2A 的压阻式压力传感器等。

3. 按人类的感覺分类

由于传感器是模拟人体的视、听、嗅、味、触五种感觉器官的器件,也有研究者按照感觉功能把传感器分为以下五类: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;味觉传感器,包括各种化学传感器;触觉传感器,包括压敏、温敏、流体传感器等。

4. 按传感器的构成原理分类

根据传感器的构成原理可将传感器分成结构型传感器和物性型传感器两类。

(1) 结构型传感器:利用物理学中场的定律构成的传感器。定律包括动力场的运动定律、电磁场的电磁定律等,一般是以方程式给出的。这种传感器的工作原理是以传感器中元件相对位置的变化引起场的变化为基础,而不是以材料特性的变化为基础,如应变电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、磁电式传感器。

(2) 物性型传感器:定律、法则大多数是以物质本身的常数形式给出的,利用物质定律构成的传感器,这些定律如胡克定律、欧姆定律等。这些常数的大小决定了传感器的主要性能,如热电式传感器、光电式传感器、压电式传感器、压阻式传感器、霍尔传感器、光纤传感器。

5. 按传感器的能量转换情况分类

根据传感器的能量转换情况可将传感器分成能量控制型传感器和能量转换型传感器。

(1) 能量控制型传感器: 变换的能量是由外部电源供给的, 而外界的变化 (即传感器输入量的变化) 只起到控制的作用, 如电阻、电感、电容等电路参量传感器都属于这类传感器, 基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应等的传感器也属于这类传感器。

(2) 能量转换型传感器: 传感器输入量的变化直接引起能量的变化, 主要由能量变化元件构成, 不需要外接电源, 如基于压电效应、热电效应、光电动势效应的传感器等。

1.2 传感器的基本特性

1.2.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性指对静态的输入信号, 传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。因为这时输入量和输出量都和时间无关, 所以它们之间的关系, 即传感器的静态特性可用一个不含时间变量的代数方程, 或以输入量为横坐标, 与其对应的输出量为纵坐标画出的特性曲线来描述。表征传感器静态特性的主要参数有线性度、灵敏度、迟滞、重复性、漂移等。

1. 线性度

线性度是传感器的输出与输入呈线性关系的程度。传感器的理想输入 - 输出特性曲线应该是线性的, 但是传感器的实际输入 - 输出特性曲线大都具有一定程度的非线性, 在输入量变化范围不大的条件下, 可以用切线或割线拟合、过零旋转拟合、断点平移拟合等近似地代表实际曲线的一段, 这就是传感器非线性特性的线性化。

传感器的线性度一般用非线性误差表示, 即实际的工作特性曲线与理想的线性特性曲线的偏离程度, 通常以最大偏移量 $\Delta_{\max}$ 与额定输出值 Y_{FS} 的百分比表示, 如式 (1-1) 所示, 曲线如图 1.3 所示。

$$\delta_1 = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-1)$$

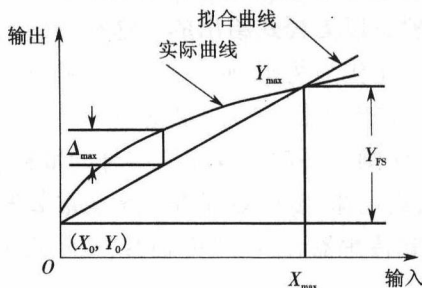


图 1.3 传感器的线性度

2. 灵敏度

灵敏度是表征传感器静态特性的一个重要指标。灵敏度是传感器在稳态下输出量变化与输入量变化的比值,如图 1.4 所示,用 K 来表示,即

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (1-2)$$

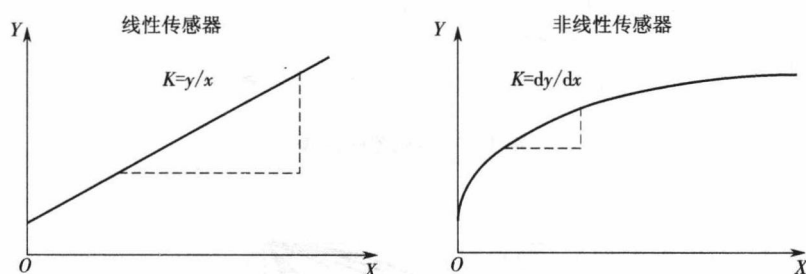


图 1.4 传感器的灵敏度

线性传感器的灵敏度就是它的静态特性曲线的斜率;非线性传感器的灵敏度为一个变量。传感器的静态特性曲线越陡峭,其灵敏度越大;越平坦,灵敏度越小。灵敏度实质上是一个放大倍数,它体现了传感器将被测量的微小变化放大为显著变化的输出信号的能力,即传感器对输入变量微小变化的敏感程度。通常用拟合直线的斜率表示系统的平均灵敏度。一般希望传感器灵敏度高,但是灵敏度越高越容易受到外界干扰的影响,系统稳定性就越差。

3. 迟滞

传感器在输入量由小到大(正行程)及由大到小(反行程)变化期间,输入输出特性曲线不重合的现象称为迟滞。对于同一大小的输入信号,传感器的正、反行程输出信号大小不相等,这个差值称为迟滞差值。

迟滞也叫回程误差,是在相同的测量条件下,对应于同一大小的输入信号,传感器正、反行程的输出信号大小不相等的现象,如图 1.5 所示。产生迟滞的原因有传感器机械部分存在不可避免的摩擦、间隙、松动、积尘等,从而引起能量的吸收和消耗。迟滞的大小一般用实验的方法来确定,用正、反行程的最大输出差值 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出 Y_{FS} 的百分比来表示:

$$\gamma_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-3)$$

4. 重复性

重复性是传感器在输入量沿同一方向全量程连续多次变化时,所得特性曲线不一致的程度,如图 1.6 所示。重复性指标一般采用输出最大不重复误差 $\Delta R_{\max}$ 与满量程输出 Y_{FS} 的百分比表示:

$$\gamma_K = \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

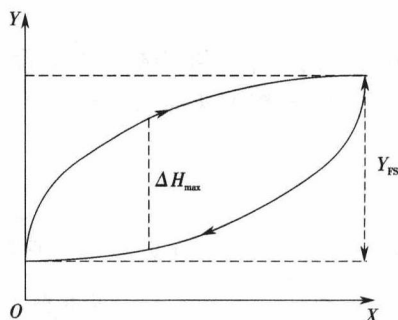


图 1.5 传感器的迟滞

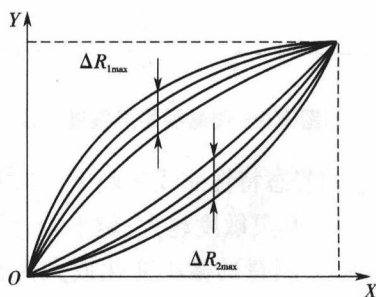


图 1.6 传感器的重复性

5. 漂移

漂移是传感器在输入量不变的情况下,输出量随时间变化的现象,漂移将影响传感器的稳定性。产生漂移的原因主要有两个:传感器自身的结构参数发生老化,如零点漂移是在规定条件下,一个恒定的输入在规定时间内输出在标称范围最低值处的变化;在测试过程中周围环境发生变化,如温度漂移是周围环境温度变化引起的输出变化。

零点漂移指传感器无输入(或输入值不变)时,每隔一定时间进行读数,读数偏离零值(或原指示值)的最大输出值,一般表示为

$$\text{零点漂移} = \frac{\Delta Y_0}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

其中, ΔY_0 为最大零点偏差; Y_{FS} 为满量程输出。

温度漂移又称为温度稳定性,是传感器在外界温度变化下输出量发生的变化,一般以温度变化 1°C 时输出最大偏差与满量程之比表示,又称为温度误差系数。

$$\text{温度漂移} = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS} \times \Delta T} \quad (1-6)$$

其中, $\Delta_{\max}$ 为温度变化 ΔT 时输出量的改变值; Y_{FS} 为满量程输出。

6. 分辨率

传感器的输入-输出关系在整个测量范围内不可能处处连续。输入量变化太小时,输出量不会发生变化;当输入量变化到一定程度时,输出量才发生变化。因此,从微观来看,