



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材



传感器原理及检测技术

Sensors Principle and Detection Technology

主编 梁福平
主审 孔力



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

传感器原理及检测技术

Sensors Principle and Detection Technology

主 编	梁福平	
副主编	苑惠娟	蔡利民
	李恒灿	李志华
参 编	刘波峰	毛献辉
	牛春晖	莫文琴
主 审	孔 力	



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书系统地介绍了传感器检测技术概论,包括传感器的基本概念、基本特性、技术性能指标及改善性能途径、传感器的标定和选用方法及传感器的发展和选用原则,并对各类传感器(如电阻式、电感式、电容式、压电式、磁电式、热电式、光电式、数字式和光纤传感器等)的工作原理、组成结构、特性及其在日常生活和生产过程中的典型应用作了较系统的阐述,并对其他现代新型传感器作了简要介绍。同时,介绍了常用的传感器信号调理电路和传感器检测系统。每章后面附有一定数量的思考题与习题,书末附有部分题目的参考答案。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、机电一体化、电子信息工程、检测技术、自动化和仪器仪表、机械设计制造及其自动化、电气工程及其自动化、通信工程、光信息科学与技术、电子信息科学与技术等专业的教材,建议课时为48~64学时;也可作为其他相近专业高年级本科生和硕士研究生的学习参考书,同时可供与上述领域相关专业的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及检测技术/梁福平 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2010.9
ISBN 978-7-5609-6357-0

I. 传… II. 梁… III. ①传感器-理论 ②传感器-检测 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 127800 号

传感器原理及检测技术

梁福平 主编

责任编辑:刘 飞

封面设计:范翠璇

责任校对:张 琳

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉首壹印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:18.25

字 数:479 千字

版 次:2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:32.50 元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

“传感器原理及检测技术”是现代测控技术
与仪器、自动化、信息工程和机电仪一
体化不可或缺的重要环节，是近代物理
与高科技集成的结合，不仅用于民用工
业，而对宇航、军工、国防工业尤为重要。

沈烈初

二〇〇九年十一月



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

编委会

主任：

钟毓宁

（湖北工业大学副校长，教育部高等学校仪器科学与技术专业教学指导委员会委员）

副主任：

孔力

（华中科技大学教授，教育部高等学校仪器科学与技术专业教学指导委员会委员）

许贤泽

（武汉大学教授，教育部高等学校仪器科学与技术专业教学指导委员会委员）

委员：（以姓氏笔画为序）

王连弟（华中科技大学出版社）

王先培（武汉大学）

史红梅（北京交通大学）

李威宣（武汉理工大学）

杨帆（武汉工程大学）

张思祥（河北工业大学）

何涛（湖北工业大学）

周荣政（江汉大学）

胡春海（燕山大学）

郭天太（中国计量学院）

康宜华（华中科技大学）

梁福平（北京信息科技大学）

董浩斌（中国地质大学）

曾以成（湘潭大学）

秘书：

刘锦 万亚军



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

总 序

测控技术与仪器专业是在合并原来的11个仪器仪表类专业的基础上新设立的专业，目前设有该专业的高校已经超过250所，是当前发展较快的本科专业之一。经过两届全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会的努力，形成了《测控技术与仪器专业本科教学规范》（以下简称《专业规范》）。《专业规范》颁布后，各高校开始构建面向21世纪的测控技术与仪器本科专业的课程体系，并进行教学改革，以更好地满足科学技术和国民经济发展的需要。

华中科技大学出版社邀请多位全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会委员和具有丰富教学经验的专家编写了这套“普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材”，这对于满足各高校测控专业建设需要，加强高校测控专业的建设，进一步落实《专业规范》精神，具有积极的作用。

这套教材基本涵盖了测控技术与仪器专业的专业基础课程和部分专业课程，编写定位清晰，内容适应了加强工程教学的趋势，注重了教材的实用性和创新性教育的推进。这套教材的出版，是测控专业教学领域“百花齐放、百家争鸣”的一个体现，它为测控专业教学选用教材又提供了一个选择。

由于时间所限，这套教材可能存在这样那样的问题。随着这套教材投入教学使用和通过教学实践的检验，它将不断得到改进、完善和提高，为测控专业人才的培养做出积极的贡献。

谨为之序。

全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会主任委员

胡 唐

2009年7月



序

在现代科学技术的推动下,仪器科学与技术学科,也紧跟国际发展的步伐,在实现微型化、数字化、智能化、集成化和网络化等方面取得了显著的进展。测控技术与仪器专业属于仪器科学与技术学科领域,它研究信息的获取和预处理,同时对相关要素进行控制,是将电子、光学、精密机械、计算机技术和信息技术等多学科互相渗透融合而形成的一门高新技术密集型综合学科。目前设有该专业的高校已经超过250所,是当前发展较快的本科专业之一。在全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会的指导下,华中科技大学出版社组织具有丰富教学经验的专家编写了这套“普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材”,这对促进我国仪器科学与技术的人才培养是一件大好事。《传感器原理及检测技术》就是这套规划教材中的一本。

传感技术完成对信息的获取、传输和处理,是现代信息技术和物联网技术的源头,在信息技术中起着相当重要的作用。因此,“传感器原理及检测技术”是本科教学中的主干专业课,目前几乎所有有工科研究背景的院校都开设了相关的课程。本教材由多所院校多位教师编写,他们既有在工厂和研究所工作的实际经验,又有在高校教学的丰富经验。在编写过程中,能遵循简明、系统、实用、新颖的原则,力求理论联系实际,使教材具有一定的实用和参考价值。我相信,本教材的出版发行,一定会使更多的同学热爱传感器技术,学好传感器技术,应用好检测技术,一定会对仪器科学与技术学科人才的培养起到积极的推进作用。

中国工程院院士



2010年5月

前 言

我国“两弹一星”的元勋、“航天之父”、著名科学家钱学森明确指出：“发展高新技术，信息技术是关键；信息技术包括测量技术、计算机技术和通信技术；测量技术是关键和基础。”作为测量和测试技术集中体现的仪器科学与技术学科，在当今我国国民经济和科学技术发展中的作用日益明显。正如著名科学家、资深两院院士王大珩指出的，“仪器仪表是工业生产的‘倍增器’，科学研究的‘先行官’，军事上的‘战斗力’，国民活动中的‘物化法官’，应用无所不在”。这已广为人们所理解。

仪器是对物质世界的信息进行测量与控制的基础手段和设备，是我们认识世界的工具。而传感器技术则是我们认识世界的“先行官”，它和通信技术及计算机技术一起，完成对信息的获取、传输和处理，形成了信息技术系统的“感官”、“神经”和“大脑”三大组成部分，构成了 Collection、Communication and Computer，即 3C 技术。其中“感官”是信息的“先行官”，因此传感器是信息获取系统的首要部件，是现代信息技术和物联网技术的源头。

传感器技术涉及传感器的机理研究与分析、设计与研制、材料与工艺、性能评估与应用等综合性技术，是一门以传感器为核心，与测量学、物理学、微电子学、光学与光电子学、机械学、材料学、计算机科学等多门学科和多种技术相互交叉、互相渗透与结合的现代科学技术。

检测技术是多门学科和多种技术的综合应用技术，它涉及信息论、数理统计、电子学、光学、精密机械，以及传感技术、计量测试技术、自动化技术、微电子技术和计算机应用技术等学科知识和近代技术。

随着现代测量技术、控制技术、自动化技术和物联网技术的发展，传感器技术越来越受到人们的重视，传感器检测技术在国民经济各领域和宇航、军工等国防建设中的应用也越来越广泛。因此，全国相关的理工科院校几乎都开设了传感器检测技术或传感技术的课程。由此可见，本课程在信息技术中的重要地位。

本书遵循简明、实用、新颖的编写原则，力求理论联系实际，简要论述了传感器的基本概论，根据我国最新发布的《传感器通用术语》国家标准(GB/T 7665—2005)介绍传感器的定义、命名方法及代码和常用图形符号；对各种经典传感器和新型传感器的工作原理、结构、特性作了系统而简明的阐述，同时对各种传感器的应用等方面作了较详细的介绍；对传感器检测系统也作了概要介绍；最后，介绍了传感器的标定与选用。为方便读者巩固所学知识，章末附有思考题与习题，书后附有部分题目的参考答案供读者参考。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、机电一体化、电子信息工程、检测技术、自动化和仪器仪表、机械设计制造及其自动化、电气工程及其自动化、通信工程、光信息科学与技术、电子信息科学与技术等专业的教材，建议课时为 48~64 学时；也可作为其他相近专业高年级本科生和硕士研究生的学习参考书，同时可供与上述领域相关专业的科研人员和工程技术人员参考。

全书共分 13 章，由 6 所院校 9 位老师参加本书的编写，由梁福平教授任主编。第 1、2、13 章由北京信息科技大学梁福平教授编写；第 3、6 章由哈尔滨理工大学苑惠娟教授编写；第 4、

11 章由华北水利水电学院李恒灿编写;第 5 章和第 12 章第 6 节由中国地质大学(武汉)李志华副教授和莫文琴博士共同编写;第 7 章由湖南大学刘波峰副教授编写;第 8 章由北京信息科技大学牛春晖博士编写;第 9 章由江汉大学蔡利民编写;第 10 章和第 12 章第 1~5 节由北京信息科技大学毛献辉博士编写。全书由梁福平教授负责统稿,并由华中科技大学孔力教授主审。

在本书的编写过程中,各位作者结合教学与科研实践的经验,同时查阅和参考了大量文献。特别荣幸的是本书得到了原信息产业部吴基传部长和原机械工业部副部长沈烈初教授的大力支持和有益的教诲,沈部长仔细审查了编写提纲,并提出了一些有益的建议,还特地为本书题词。中国工程院叶声华院士特地应邀为本书精心作序。此外,还得到了中国仪器仪表行业协会传感器分会副理事长王文襄教授、沈阳仪表科学研究所、浙江高联科技发展有限公司、现代测控技术教育部重点实验室,以及参编的各个单位的领导、兄弟院校许多老师的大力支持,同时受到华中科技大学出版社万亚军等编辑的热情帮助,在此一并表示诚挚的谢意!

由于编者水平所限,书中可能会有疏漏、欠妥和错误之处,恭请读者不吝赐教。

编 者

2010 年 5 月

目 录

第 1 章 传感器检测技术概论	(1)
1.1 传感器的基本概论	(2)
1.2 传感器的基本特性.....	(13)
1.3 传感器的技术性能指标及改善性能的途径.....	(23)
1.4 传感器技术的现状与发展.....	(27)
思考题与习题	(31)
第 2 章 电阻式传感器	(32)
2.1 应变式电阻传感器.....	(32)
2.2 压阻式传感器.....	(50)
2.3 电位器式传感器.....	(58)
思考题与习题	(61)
第 3 章 电感式传感器	(63)
3.1 自感式传感器.....	(63)
3.2 差动变压器.....	(66)
3.3 零点残余电压.....	(69)
3.4 电涡流式传感器.....	(71)
3.5 压磁式传感器.....	(74)
思考题与习题	(77)
第 4 章 电容式传感器	(79)
4.1 电容式传感器的工作原理和特性.....	(79)
4.2 电容式传感器的测量转换电路.....	(83)
4.3 电容式传感器的应用.....	(89)
4.4 硅电容式集成传感器.....	(91)
思考题与习题	(94)
第 5 章 压电式传感器	(96)
5.1 压电式传感器的工作原理.....	(96)
5.2 压电式传感器的测量电路	(100)
5.3 压电式传感器的应用	(103)
5.4 超声波传感器	(108)
思考题与习题.....	(111)
第 6 章 磁电式传感器	(112)
6.1 磁电感应式传感器	(112)
6.2 霍尔式传感器	(115)
6.3 磁栅式传感器	(119)
思考题与习题.....	(121)

第7章 热电式传感器	(123)
7.1 热电阻温度传感器	(123)
7.2 热电偶	(129)
7.3 半导体温度传感器	(139)
7.4 温度传感器与仪表的选用	(144)
思考题与习题.....	(146)
第8章 光电式传感器	(148)
8.1 光电式传感器的组成及工作原理	(148)
8.2 光电式传感器及其应用	(161)
思考题与习题.....	(165)
第9章 数字式传感器	(166)
9.1 光栅传感器	(166)
9.2 感应同步器	(173)
9.3 编码器	(179)
思考题与习题.....	(185)
第10章 光纤传感器	(186)
10.1 光纤传感器的技术基础.....	(186)
10.2 光纤传感器的结构原理与分类.....	(190)
10.3 光纤传感器的应用.....	(200)
思考题与习题.....	(207)
第11章 其他传感器简介	(208)
11.1 气敏传感器.....	(208)
11.2 湿敏传感器.....	(213)
11.3 微波传感器.....	(217)
11.4 固态图像传感器.....	(218)
11.5 智能传感器.....	(222)
思考题与习题.....	(225)
第12章 传感器检测系统	(226)
12.1 传感器检测系统概述.....	(226)
12.2 常用的信号调理电路.....	(228)
12.3 传感器中的接口技术.....	(243)
12.4 传感器检测系统的设计.....	(249)
12.5 抗干扰问题.....	(253)
12.6 虚拟仪器.....	(257)
思考题与习题.....	(264)
第13章 传感器的标定与选用	(265)
13.1 传感器的标定与校准.....	(265)
13.2 传感器的选用.....	(275)
思考题与习题.....	(276)
习题参考答案	(277)
参考文献	(280)

第1章 传感器检测技术概论

著名俄罗斯化学家德·伊·门捷列夫说过,科学是从测量开始的。仪器是对物质世界的信息进行测量与控制的基础手段和设备,是我们认识世界的工具。而传感器技术又是我们认识世界的“先行官”,它和通信技术及计算机技术一起,完成对信息的获取、传输和处理,形成了信息技术系统的“感官”、“神经”和“大脑”三大组成部分,构成了 Collection、Communication and Computer,即 3C 技术。其中“感官”是信息的“先行官”,因此传感器是信息获取系统的首要部件,是现代信息技术的源头。传感器技术已不再被视为制造产业的一个附属技术,它是现代信息技术和物联网技术的关键和基础。

在现代科学技术和生产力的推动下,测量控制与仪器仪表已成为完整的仪器科学与技术学科,它作为一个工程性学科,承担着各类仪器研究、开发、制造和应用的任务,包括有关新仪器的设计、制造,各类仪器运行、应用的基础理论研究,新技术、新器件、新材料、新工艺的开发研究及相关的传感器、元器件和材料等领域的研究工作。

由中国科学技术协会主编、中国仪器仪表学会编写的《2006—2007 仪器科学与技术学科发展报告》中指出,“传感技术不仅是检测的基础,它也是控制的基础。这不仅是因为控制必须以检测输入的信息为基础,而且是由于控制达到的精度和状态必需被感知所决定的,否则,不明确控制效果的控制仍然是盲目的。信息获取、传感器技术是仪器科学与技术学科的基础技术;新型传感器是发展高水平测量控制仪器仪表的基础。传感器技术已成为制约测量控制仪器仪表发展的瓶颈。

新型传感器及信息获取、传感器技术主要是对客观世界有用信息的检测,它包括有用被测量敏感技术,涉及各学科工作原理、遥感遥测、新材料等技术、信息融合技术、传感器制造技术等。信息融合技术涉及传感器分布、微弱信号提取(增强)、传感信息融合、成像等技术;传感器制造技术涉及微加工、生物芯片、新工艺等技术。”

传感器制造技术是涉及传感器的机理研究与分析、设计与研制、材料与工艺、性能评估与应用等的综合性技术,是一门以传感器为核心逐渐外延,与测量学、物理学、微电子学、光学与光电子学、机械学、材料学、计算机科学等多门学科和多种技术相互交叉、互相渗透和结合的现代科学技术。

随着现代测量技术、控制技术、自动化技术和物联网技术的发展,传感器技术越来越受到人们的重视,传感器检测技术在国民经济各领域和宇航、军工等国防建设中的应用也越来越广泛。

检测技术是多门学科和多种技术的综合应用技术,它涉及信息论、数理统计、电子学、光学、精密机械,以及传感技术、计量测试技术、自动化技术、微电子技术和计算机应用技术等学科知识和近代技术。

检测技术,有时也称为测试技术,它包含测量和检测(试验)两部分。测量,就是把被测对象中的某种信息测出来,并加以度量;检测是指利用各种物理效应及化学效应,将生产、科研及日常生活诸方面的检测系统中所存在的某种信息,通过某种合适的方法与装置,人为地把它激发出来,并加以检查与测量,给出定性或定量的结果。

总之,“传感器原理及检测技术”是一门涉及传感器技术、电工电子技术、光电检测技术、控制技术、计算机技术、数据处理技术、精密机械设计技术等众多基础理论和技术的综合性技术。现代检测系统通常是集光、机、电、计算机于一体,软硬件相结合。

因此,要学好“传感器原理及检测技术”,必须要有良好的高等数学、大学物理、模拟电子技术、数字电子技术、电路分析基础、测控电路、信号与系统、概率论与数理统计等先修课程的基础。本课程要求学生掌握传感器的基本概念、基本特性、基本测量电路及其应用,了解改善性能途径、传感器的标定和校准方法,同时了解其他现代新型传感器和传感器技术的发展,并着重培养学生熟练掌握各类传感器(包括电阻式、电感式、电容式、压电式、磁电式、热电式、光电式、数字式和光纤传感器等)的工作原理、组成结构、主要特性及其在生产过程和日常生活中的典型应用和选用原则,了解并掌握传感器检测系统。

本课程是一门实践性很强的课程,在理论学习的同时,要求学生通过一系列实验和实践来熟练掌握各类典型传感器的基本原理及其应用,达到理论与实践高度统一,突出能力的培养。

本章将简要阐述传感器的基本概论、传感器的基本特性、传感器的技术性能指标及改善性能的途径,以及传感器技术的现状与发展。

1.1 传感器的基本概论

1.1.1 传感器的定义与组成

1. 传感器的定义

在国外,如美国,transducer 和 sensor 是通用的,均称为传感器;英国则称 sensor 为传感器、敏感元件,而将 transducer 称为变换器、换能器。通常将传感器(sensor)定义为接收信号或激励并以电信号进行响应的装置,而变换器(transducer)则是把一种能量转换成另一种能量的转换器。不过,实际上这两个术语常常交替使用。国际电工委员会(IEC, International Electrotechnical Committee)将传感器定义为“传感器是测量系统中的一种首要部件(primary element),它将输入变量转换成可供测量的信号”。

根据我国 2005 年 7 月 29 日发布的《传感器通用术语》国家标准(GB/T 7665—2005),传感器(transducer/sensor)的定义为:能感受被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。

在该标准中,同时附有三条注释。

注(1):敏感元件(sensing element)是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分。

注(2):转换元件(transducing element)是指传感器中能将敏感元件的感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。

注(3):当输出为规定的标准信号时,则称为变送器(transmitter)。

根据这一定义,可获得关于传感器的以下几方面的信息:

- ① 传感器是一种测量“器件或装置”,能完成检测任务;
- ② 它的输入量是某一“被测量”,它可能是物理量,也可能是化学量、生物量等;
- ③ 它的输出量是“可用”的信号,便于传输、转换、处理和显示等,这种信号可以是气、光、电等物理量,但主要是易于处理的电物理量,如电压、电流、频率等;
- ④ 输出输入之间的对应关系应具有“一定的规律”,且应有一定的精确程度,可以用确定

的数学模型来描述；

⑤ 将传感器和变送器的概念明确区分开来,当传感器(transducer/sensor)的输出为“规定的标准信号”时,则称之为变送器(transmitter)。所谓的“规定的标准信号”,即是指新的国家标准规定的若以电流形式输出,标准信号应为 $4\sim 20\text{ mA}$;若以电压形式输出,标准信号应为 $1\sim 5\text{ V}$ (旧国家标准规定电流输出为 $0\sim 10\text{ mA}$,电压输出为 $0\sim 2\text{ V}$)。

由传感器的定义可知,传感器的基本功能是检测被测量信号和信号的转换。因此,传感器总是处于检测系统的源头,是获取信息的先行官,因此传感器对整个检测系统至关重要。

对现有的以及正在发展中的检测系统来说,如果说电子计算机相当于人的大脑(即电脑),而相应于人的感官部分接受外界信息的装置就是传感器。传感器是人类感官的扩展和延伸,传感器的功能可与人类五大感觉器官相比拟:光敏传感器——视觉;声敏传感器——听觉;气敏传感器——嗅觉;化学传感器、微生物传感器——味觉;力敏、温敏、流体传感器——触觉。因此,传感器又可称为“电五官”。

2. 传感器的组成

根据传感器的定义还可知,传感器的基本组成为敏感元件和转换元件两部分,它们分别完成检测和转换两个基本功能。例如,应变式测力传感器,其测量框图如图 1-1 所示,其基本组成部分即为弹性元件(力敏元件)和应变片(转换元件)两部分,弹性元件对所测的力“敏感”并将力变成弹性元件的变形,而应变片则将该变形“转换”成电阻的变化。

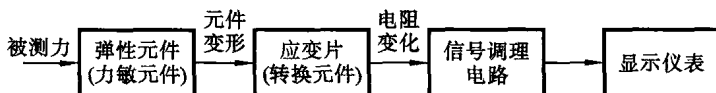


图 1-1 应变式测力传感器的测量框图

值得指出的是,一方面,并不是所有传感器都能明显地区分敏感元件和转换元件这两个部分,如半导体气敏或湿度传感器、热电偶、压电晶体、光电器件等,它们一般能将感受到的被测量直接转换为电信号输出,即将敏感元件和转换元件两者的功能合二为一了;另一方面,仅由敏感元件和转换元件组成的传感器通常输出信号较弱,还需要信号调理电路将输出信号进行放大并转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。信号调理电路的作用是:把来自传感器的信号进行转移和放大,使其更适合于作进一步处理和传输,多数情况下是将各种电信号转换为电压、电流、频率等少数几种便于测量的电信号;进行信号处理,即对经过调理的信号,进行滤波、调制和解调、衰减、运算、数字化处理等。

常见的信号调理与转换电路有放大器、电桥、振荡器、电荷放大器、滤波器等。另外,传感器的基本部分和信号调理电路,还需要辅助电源提供工作能量。

因此,传感器的组成部分可由图 1-2 所示。

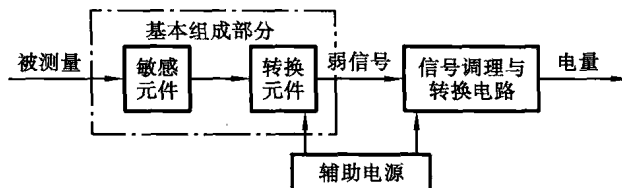


图 1-2 传感器的组成部分

1.1.2 传感器的基础定律

传感器的共性就是利用物理定律或物质的物理、化学、生物特性,将非电量(如位移、速度、加速度、力等)的信号输入转换成电量(如电压、电流、电容、电阻等)信号输出。

传感器之所以能正确地传递信息和信息转换,成为现代信息技术的源头,是因为它遵循并利用了自然规律中的各种定律、法则和效应。

1. 守恒定律

守恒定律是自然科学中最重要也是最基本的定律,它是自然界普遍遵守的定律之一,即某一种物理量,它既不会自行产生,也不会自行消失,其总量守恒不变。它包括:能量守恒定律、质量守恒定律、动量守恒定律、角动量守恒定律、电荷守恒定律及信息守恒定律等。

下面对能量守恒定律、动量守恒定律、电荷守恒定律分别进行说明。

1) 能量守恒定律

能量守恒定律可表述为:在自然界里任何与周围隔绝的物质系统(孤立系统)中,不论发生什么变化或过程,能量的形态虽然可以发生转换,但能量的总和恒保持不变。非孤立系统由于与外界可以通过做功或传递热量等方式发生能量交换,它的能量会有改变,但它增加(或减少)的能量值一定等于外界减少(或增加)的能量值。所以从整体看来,能量之和仍然是不变的。这个规律称为“能量守恒和转化定律”。它是自然科学中关于物质运动的最重要的普遍定律之一。能量守恒定律反映了:相应于物质运动的不能创生或消灭,作为物质运动一般量度的能量也是不能创生或消灭的;能量只能在各部分物质之间进行传递,或者从一种形态转换为另一种形态(在发生能量传递的同时,按照质能关系式,也相应地存在着质量的传递)。这一定律由法国哲学家笛卡儿、德国化学家迈尔和物理学家赫尔姆霍茨、英国物理学家焦耳及格罗沃(William Robert Grove, 1811—1896)等加以论证和发展,得到了恩格斯很高的评价,同细胞学说和进化论一起被称为 19 世纪自然科学的三大发现。能量守恒和转换定律的发现,直接证明了物质运动的永恒性,为马克思主义哲学提供了重要的自然科学依据。

这一定律包括定性和定量两个方面,在性质上它确定了能量形式的可变性,在数值上肯定了自然界能量总和的守恒性。一种能量的减少,总是伴随某种能量的增加,一减一增,其数值相等。由于各种不同形式的运动(如机械运动、热运动、电磁运动等)都具有相应的能量,因而这一定律是人类对自然现象长期观察和研究的经验总结。

2) 动量守恒定律

动量守恒定律也是物理学中的重要定律之一。它可表述为:任何物质系统(包括质点)在不受外力作用或所受外力之和为零时,它的总动量保持不变。若所受外力之和不为零,但在某一方向上的分力之和为零时,则总动量在该方向的分量保持不变。

3) 电荷守恒定律

电荷守恒定律也是自然科学中的基本定律之一。在一个与外界不发生电荷交换的孤立系统中,所有正负电荷的代数和保持不变。例如,两个中性物体互相摩擦而一个物体带正电时,另一个物体必然带等量的负电。又如,一个电子与一个正电子在适当条件下相遇时,会发生湮灭而转化为两个光子,电子与正电子所带的电荷等量而异号,光子则不带电,所以在湮灭过程中,正负电荷的代数和依然不变。

它也可表述为:电荷既不能被创造,也不能被消灭,它们只能从一个物体转移到另一个物体,或者从物体的一部分转移到另一部分,也就是说,在任何物理过程中电荷的代数和是守恒的。

利用守恒定律可以构成传感器,例如利用差压原理进行流量测量的传感器,其基本测量原理就是以能量守恒定律、伯努利方程和流动连续性方程为基础的。

2. 场的定律——关于物质作用的定律

物理学上“场”的概念最早是由英国物理学家法拉第和麦克斯韦在电磁场理论的研究中确立的。法拉第首先提出了磁力线和电力线的概念,在电磁感应、电化学及静电感应的研究中进一步深化和发展了力线思想,并第一次提出“场”的思想,建立了电场、磁场的概念。后来,经麦克斯韦与赫兹进一步研究,经典电磁场论得到确立。在经典电磁学的建立与发展过程中,形成了电磁场的概念。

现在人们认识到电磁场是物质存在的一种特殊形式。电荷在其周围产生电场,这个电场又以力作用于其他电荷。磁体和电流在其周围产生磁场,而这个磁场又以力作用于其他磁体和内部有电流的物体。电磁场也具有能量和动量,是传递电磁力的媒介,它弥漫于整个空间。

随着科学技术的发展,场的概念已经远远超出了电磁学的范围。场成了非常基本、非常普遍的概念。在现代物理学中,所谓物理场,即相互作用场,是物质存在的两种基本形态之一,存在于整个空间,是指某一空间范围及其各种事物分布状况的总称。电场、磁场、引力场、光电磁场、声场、热场等都是物理场,而物理场是空间中存在的一种物理作用或效应,分布在引起它的场源体周围。实物之间的相互作用就是依靠有关的场来实现的,例如,在电磁场中,带电粒子受到电磁力的作用;在引力场中,两个物体之间受到万有引力的相互作用。

场本身有能量、动量和质量,而且在一定条件下可以和实物相互转化。根据量子场论的观点,场与基本粒子有不可分割的联系,即一切基本粒子都可以看做相应场的最小单位(量子),例如,光子是物质的基本粒子,光子联系于电磁场,电子联系于电子场等。这样,一切相互作用都可归结为有关场之间的相互作用。按照这种观点,场和实物并没有严格的区别。

场的定律,如电磁场感应定律、光电磁场干涉现象、动力场的运动定律等,都是关于物质作用的客观规律。这些规律所揭示的是物体在空间排列和分布状态与某一时刻的作用有关的客观规律,一般可用物理方程给出。这些方程就是某些传感器工作的数学模型,与这些定律有关的参数通常和具体物质的内部结构(如成分、材料等)无关,而与物质在空间的位置及分布状态和某时刻的作用有关。

例如,由电磁感应定律:导体回路中感应电动势的大小与穿过回路的磁通量的变化率 $d\Phi/dt$ 成正比。感应电动势 E 为

$$E = -K \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

其中, K 为比例常数。当 $d\Phi$ 的单位为 Wb , t 的单位为 s 时, E 的单位为 V 时, $K=1$ 。

而当线圈在恒定磁场中以速度 v 作切割磁力线运动时,则在线圈中产生的感应电动势 E 与运动速度 v 成正比,那么,感应电动势 E 可表示为

$$E = -BlvN \sin\theta \quad (1-2)$$

式中: N 为线圈匝数; l 为每匝线圈平均长度; B 为磁感应强度; θ 为线圈运动方向与磁场方向的夹角。

利用电磁感应定律可以构成磁电感应式(或称电动式)传感器,如自感式传感器、互感式传感器、感应同步器和电涡流式传感器等,可用来测量位移、运动速度、振动等多种物理量。

又如,利用静电场的有关定律制成电容传感器。静电场中两平行电极板间的电容量 C 为

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{\delta} \quad (1-3)$$

式中: S 为极板相对覆盖面积; δ 为极板间距离; ϵ_r 为相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$; ϵ 为电容极板间介质的介电常数。

当被测量的变化使式中的 δ 、 S 和 ϵ_r 中的某一项或几项发生变化时, 电容量 C 就随之发生变化。 δ 和 S 的变化可以反映线位移或角位移的变化, 也可间接反映压力、加速度等的变化; ϵ_r 的变化则可反映液面的高度、材料厚度等的变化。这就可以制成测量各种物理量的电容式传感器。

波是场的一种运动形态, 光波是一种广泛存在的电磁波。利用光电磁场的基本定律, 如光的直线传播定律、光波之间的相互作用, 如干涉、衍射、偏振现象、光的多普勒效应等, 可以制成影像、干涉、衍射、偏振及光栅、光学码盘等各式各样的传感器和测量装置。

利用场的定律所构成的传感器, 其性能由定律决定, 而与所使用的材料无关, 例如差动变压器, 铁芯可以使用坡莫合金或铁氧体制成, 绕组可使用铜线或其他导线制成, 都是利用电磁感应定律作为差动变压器而工作。这类传感器的形状、尺寸等参数决定了传感器的量程、灵敏度等性能, 也即传感器的工作原理是以传感器中元件相对位置的变化而引起场的变化为基础, 而不是以材料特性变化为基础。因此, 这类传感器统称为结构型传感器。这类传感器具有设计的自由度较大、选择材料的限制较小等优点, 但一般体积较大, 并且不容易集成。

3. 物质定律

物质定律是表示各种物质本身内在性质的定律、法则、规律等。这些定律通常以物质所固有的物理常数加以描述, 并决定着传感器的主要性能, 即定律是定义各种物理常数的公式。一般来说公式是近似的, 超过某些范围就不成立。如胡克定律, 欧姆定律及各种效应等。

利用各种物质定律构成的传感器统称为物性型传感器。这些传感器的主要性能在很大程度上受相应的物理常数或化学、生物特性所决定, 也即物性型传感器的性能是随材料的不同而不同的。例如, 利用半导体物质具有的压阻、压电、热阻、光阻、湿阻和霍尔等效应, 可以分别制成力、压力、温度、光强、湿度和磁场等传感器; 利用压电材料所具有的压电效应可制成压电式、声表面波和超声波等传感器; 利用生物、化学敏感特性制成生物、化学传感器等。由于利用物质定律的物性型传感器具有构造简单、体积小、无可动部件及反应快、灵敏度高、稳定性好、易集成等特点, 因此是当代传感技术领域中具有广阔发展前景的传感器。

与物质所固有的物理常数有关的各种现象可分为三大类: 热平衡现象、传输现象和量子现象。关于这些现象, 可参考相关的参考书。

4. 统计定律

统计定律是对大量偶然事件整体起作用的定律, 它表现了这些事物整体的本质和必然的联系。

5. 传感器的基础效应

物性型传感器是利用某些物质(如半导体、陶瓷、压电晶体、强磁性体和超导体等)的物理性质随外界待测量的作用而发生变化的原理制成的。它利用了诸多的效应(包括物理效应、化学效应和生物效应)和物理现象, 如利用材料的压阻、压电、湿敏、热敏、光敏、磁敏、气敏等效应, 把应变、力、湿度、温度、位移、磁场、煤气浓度等被测量变换成电量。而新原理、新效应(如约瑟夫逊效应等)的发现和利用, 新型材料的开发和应用, 使传感器得到很大发展, 并逐步成为传感器发展的主流。因此, 了解传感器所基于的各种效应, 对传感器的深入理解、开发和使用是非常必要的。主要物性型传感器所基于的效应及所使用的材料如表 1-1 所示。