

CHUANGANQI YUANLI YU JIANCE JISHU

传感器

原理与检测技术

永 远 著



科学出版社

传感器原理与检测技术

永 远 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

传感器原理与检测技术是测量技术与工程、生物电子工程、传感器设计和其他相近专业的专业基础课,是一门知识面较宽、综合性较强的基础课。本书立足于传感技术及微机电一体化系统的教学与研究,贯彻“理论、技术、应用、产品”主线,系统地阐述了涉及的基础理论,延伸至有应用前景的新技术,并列举了工程实践与日常生活领域已产业化的商品作为典型范例。

本书可作为在职教师以及专业技术人员从事材料学、力学、电学、磁学等相关技术的基础理论和应用技术的教材及参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理与检测技术 / 永远著. —北京: 科学出版社, 2013.8
ISBN 978-7-03-036944-4

I. 传… II. ①永… III. ①传感器-高等学校-教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 042328 号

责任编辑: 杨 岭 于 楠 / 封面设计: 墨创文化

责任校对: 贺江艳 / 责任印制: 邱志强

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>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

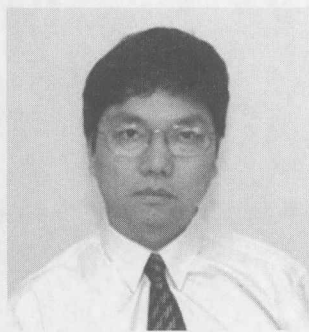
2013年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013年8月第一次印刷 印张: 33 1/2

字数: 770千字

定价: 96.00元

作者简介



永远, 中国海洋大学海洋化学系理学学士, 澳大利亚墨尔本皇家理工大学应用化学专业应用科学硕士, 澳大利亚悉尼大学化学系理学博士。

1997年受聘为澳大利亚联邦科技与工业研究院食品科技研究所研究员, 从事高分子材料研究。1999年2月作为客员研究员, 在日本通产省工业技术院生命工业技术研究所, 从事酵母生物化学机理研究。2000年4月在美国特拉华(Delaware)大学化学工程系, 从事大豆蛋白物理化学机理研究。2001年1月, 成为新西兰皇家研究院工业研究所终身研究员, 在国际上率先进行了分子键裂扫描理论与应用的研究, 首先研制成功了以生物亲和力为基础的分析测试仪。在国际上第一次同时检测到由分子键裂引起的共振频率变化和电噪声信号, 发展出了具有高度特异性识别特征的痕量免疫分析测试先进技术。在生物分子间相互作用研究、生物分子的检测和灾害性生物物质的实时、在线、痕量分析等方面具有重大意义。此项成果的转化应用和技术开发将孕育出新型医疗诊断产业, 促进生物医学等学科及相关产业的发展。

从化学到材料科学, 从蛋白质形成机理到微生物学, 再到生物传感器, 经历了跨学科的知识积累。

2008年7月与西南交通大学签约为期5年的合同, 建立多学科交叉的(生物)传感及微机电系统团队和组建相应研究实验室, 将国外20余年的多学科交叉研究积累, 以及在新西兰皇家研究院工业研究所发展出的独特的、国际领先的生物传感及医疗诊断研究方法和前沿的研究思路引入西南交通大学。

主要研究方向包括:

- (1) 压电式-分子键裂传感器。
- (2) 基于分子键断裂原理的生物传感器模拟。
- (3) 分子键裂传感器信号检测系统设计。
- (4) 基于库尔特原理进行细胞计数和种类区分的研究。
- (5) 介电泳力场下的微/纳米颗粒特性。
- (6) 基于表面等离子体共振原理分析生物分子间的作用。
- (7) 基于分子模板的纳米结构自主装。
- (8) 高速铁路轮轨动态接触状态实时监测系统。
- (9) 智能传感网示范工程及其运用。

前 言

传感器原理与检测技术是测量技术与工程、生物电子工程、传感器设计和其他相近专业的专业基础课程，是一门知识面较宽的综合性和技术基础课。全书覆盖了与传感技术有关的基础理论：电学、磁学、微电子学、力学、光学、声学、化学、生物学、仿生学，同时延伸至精密机械、测量技术、半导体技术、计算机技术、信息处理技术，以及系统科学、人工智能、自动化技术等众多学科相互交叉的综合性和高新技术密集型前沿技术。

本专著立足于传感技术及机电一体化系统的教学、研究和产业化，贯彻“理论、技术、应用、产品”主线，系统地阐述了传感检测技术涉及的基础理论，延伸至有应用前景的新技术，列举了工程实践与日常生活领域，尤其是生物医学工程领域已产业化的商品作为典型范例。各高校可根据各自专业的特色与特点，将本书作为基础课、专业必修课或选修课的教材。并且，本书可作为在职教师的教材教辅，也可作为从事相关专业的工程技术人员提供相关基础理论及应用技术参考。

本专著分为三个部分 11 章。第一部分主要包括第 1~4 章，是传感技术、测量技术与工程的基础部分。第 5~9 章可以归纳为第二部分，主要介绍功能传感器，分别有所对应：①物理量，如力学量传感器、声波传感器、温度传感器等；②化学变化的特性和过程中所对应物质的量——化学传感器；③生物反应和相互作用而导致所测物理量的变化——生物传感器。第三部分包括第 10 和 11 章，是基于本书第一和第二部分，在此基础上利用多传感器集成，提出具有发展前途的智能传感器系统和仿生传感系统。

第 1 章从电磁传感器的核心理论——麦克斯韦方程开始，对电磁感应、霍尔、磁阻和微波效应等，以及其相应传感器进行系统论述，这是由于电、磁原理已普遍渗透于传感器。第 2 章在介绍常用微电子材料的物理性质的基础上，引出 PN 结、二极管、三极管、金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）等电子器件，随后介绍了微传感器的微加工技术。在前两章的基础上，第 3 章对以光电器件为转换元件的传感器进行展开，基于光电效应的光电器件是光电式传感器的核心。为纪念 2009 年诺贝尔物理学奖的华裔科学家高锟——光纤之父，特将应用广泛的光纤传感器列入第 4 章。光纤传感器以其高灵敏度、抗电磁干扰、耐腐蚀、可绕曲、体积小、结构简单，以及与光纤传输线路相容等独特优点，受到学术界和工业界的广泛重视。

第 5 章阐述了基于压力电阻效应或压电效应等物理效应，将机械力和加速度等物理量转换成电信号的元件——力敏传感器，用于测量力、加速度、位移、速度、扭矩和质量等物理量。第 6 章主要介绍声波传感器的原理、常用材料及典型的声波传感器；这些器件中典型的代表是声表面波（SAW）器件，在射频和中频波段中还可用作带通滤波

器。第7章将本书第一部分讨论的物理传感器用于测量温度，逐一介绍电阻式、半导体PN结及其集成温度传感器、热电偶温度传感器及热辐射温度传感器。第8、9章是基于前面7章的基本原理和检测技术，与化学和生物学分别交叉融合，在各自的学科领域生出新型的传感器原理与检测技术，并扩展出新应用方法和相应商业化产品。第8章着重阐述与化学传感器有关的相应化学基础知识，然后结合具体应用实例，讨论相应化学传感器。第9章生物传感器利用前几章所述的电磁学、微电子学、光学、声学、热学、化学等原理，将生物分子与分析物相互作用产生的信号转换为电信号。由生物敏感元件与适当的换能器组成，具有特异性识别生物分子的功能，并能检测生物分子与分析物之间的相互作用。

通过对四大经典传感器（力学量、光学、声学、温度传感器）基本理论及其典型应用的探讨，随着应用领域的不断扩展，单个传感器已经不能再满足复杂且多变的应用需求。因此，第10章提出了智能传感系统的新概念——传感器的智能化和多传感器的融合；各类传感器检测的数据，先进行存储、处理，然后用标准串并接口总线方式实现远距离、高精度的传输。最后以一个典型的智能传感系统，即智能汽车为例，介绍智能传感系统的应用。第11章仿生传感系统以仿生学为理论基础，模仿人或动植物的结构功能等，利用多种传感器融合构造成可达到一定类似功能或智能的器械或设备。为科研工作者开启了新的研究思路与研究领域的大门，也为人类的未来生活创造了无限可能。

编者在20年从事（生物）传感器教学及科研的基础上，根据“卓越工程师”教学内容和课程体系改革的需要，紧密结合微机电一体化系统的特点，将传感器原理和电子测量原理相结合，编写该书为生物医学工程专业学生在后续生物医学电子学等专业课程的学习打下坚实的基础。本书在编写过程中，得到了西南交通大学（生物）传感及微机电一体化系统研究团队常向荣和邓维礼老师的大力支持，对教材内容提出了可行的建议；同时，团队研究生们（李继、韩奎、陈巧莹、李强、魏登勇、陈世旺、王欣、宁文双、宿惠妮、吴俊霖、肖南、贾仁杰、刘宇捷和叶海燕）在搜集素材和编写编辑过程中付出了辛勤的劳动，尤其是他们分工协作、追求完美的工作态度和令人感动。在此表示衷心感谢！

由于时间仓促，教材中难免有不成熟或错误的地方，希望得到读者的反馈信息和批评指正。

永远

2013年1月悉尼

目 录

前言	1
第 1 章 电磁原理及其传感器	1
1.1 麦克斯韦方程	1
1.1.1 高斯定律	2
1.1.2 磁通连续性原理	2
1.1.3 电磁感应定律	3
1.1.4 全电流定律	4
1.2 电磁感应效应	5
1.2.1 自感效应	5
1.2.2 互感效应	10
1.2.3 电涡流效应	14
1.2.4 电磁感应式传感器	18
1.3 霍尔效应	26
1.3.1 基本工作原理	26
1.3.2 霍尔元件	27
1.3.3 霍尔传感器	28
1.4 磁阻效应	33
1.4.1 基本工作原理	34
1.4.2 磁阻元件	34
1.4.3 磁阻元件应用	36
1.5 微波效应	38
1.5.1 微波原理	38
1.5.2 微波传感器	40
1.6 质子旋进式及超导式磁敏传感器	47
1.6.1 质子旋进式磁敏传感器	47
1.6.2 超导磁敏传感器的原理、结构及应用	52
参考文献	57
第 2 章 微电子与传感器	59
2.1 微电子常用材料	59
2.1.1 原子结构	59
2.1.2 晶体	62

2.1.3 材料	66
2.2 二极管	66
2.2.1 PN结	67
2.2.2 二极管的V-I特性	71
2.2.3 磁敏二极管	72
2.3 双极结型三极管	75
2.3.1 双极结型三极管	75
2.3.4 磁敏三极管	79
2.4 金属-氧化物-半导体场效应晶体管	82
2.5 微加工技术	84
2.5.1 体微加工技术	84
2.5.2 表面微加工	103
2.5.3 N型增强型金属氧化物半导体场效应晶体管的制作	105
参考文献	109
第3章 光学传感器	110
3.1 概述	110
3.2 光源	110
3.2.1 半导体发光二极管光源	112
3.2.2 半导体激光光源	113
3.3 光电效应	114
3.3.1 内光电效应	115
3.3.2 外光电效应	120
3.4 光敏电阻	121
3.4.1 光敏电阻的基本原理与结构	121
3.4.2 光敏电阻的基本特性	122
3.4.3 光敏电阻的应用实例	127
3.5 光生伏特器件	129
3.5.1 硅光敏二极管	129
3.5.2 其他类型的光生伏特器件	132
3.6 光电发射器件	139
3.6.1 光电发射阴极	139
3.6.2 真空光电管与光电倍增管的工作原理	141
3.6.3 光电倍增管的供电电路	144
3.6.4 光电倍增管的应用	145
参考文献	149
第4章 光纤传感器与图像传感器	150
4.1 光纤传感器	150
4.1.1 光纤的基本原理	150

168	4.1.2	光纤传感器的组成与分类	156
168	4.1.3	光纤传感器实例	161
168	4.2	CCD 的基本原理	166
173	4.2.1	电荷存储	166
173	4.2.2	电荷耦合	167
173	4.2.3	CCD 电极结构	168
173	4.2.4	电荷注入与电荷检测	173
173	4.2.5	光电信号的二值化处理	176
183	4.2.6	CCD 特性参数	179
183	4.3	CCD 图像传感器	181
183	4.3.1	微光图像传感器	181
183	4.3.2	红外 CCD 图像传感器	185
183	4.4	CMOS 光电图像传感器	187
183		参考文献	193
183	第 5 章	力学量传感器	195
183	5.1	概述	195
183	5.1.1	力学量的分类	195
183	5.1.2	力敏元件的分类	195
183	5.1.3	力敏元件的原理	197
183	5.2	几何量传感器	200
183	5.2.1	线位移、变形及位置传感器	201
183	5.2.2	角度及角位移传感器	210
183	5.3	运动学量的传感器	215
183	5.3.1	速度、角速度传感器	215
183	5.3.2	振动传感器	223
183	5.4	力学量传感器	231
183	5.4.1	力传感器	231
183	5.4.2	扭矩传感器	239
183		参考文献	241
183	第 6 章	声波传感器	243
183	6.1	原理	243
183	6.1.1	压电效应	243
183	6.1.2	波的类型及基本特性	246
183	6.1.3	超声波	251
183	6.1.4	波速测量中的影响因素	252
183	6.2	用于声波传感器的材料	253
183	6.2.1	压电体材料	253
183	6.2.2	压电薄膜材料	256

6.3	声波传感器的类型	261
6.3.1	体声波传感器	261
6.3.2	声表面波传感器	264
6.4	实用的声波传感器	270
6.4.1	超声波传感器	270
6.4.2	加速度声波传感器	275
6.4.3	温度声波传感器	277
6.4.4	声表面波压力传感器	279
	参考文献	281
第7章	温度传感器	283
7.1	电阻式温度传感器	283
7.1.1	电阻与温度的关系	283
7.1.2	金属热电阻传感器	284
7.1.3	半导体热敏电阻传感器	288
7.2	半导体PN结型温度传感器	294
7.2.1	温敏二极管及其应用	294
7.2.2	温敏三极管及其应用	297
7.2.3	集成温度传感器	300
7.3	热电偶	304
7.3.1	热电偶测温原理	304
7.3.2	热电偶的误差及补偿措施	307
7.3.3	常用热电偶结构及特性	310
7.3.4	热电偶测温线路	312
7.4	热辐射温度传感器	313
7.4.1	辐射测温的物理原理	313
7.4.2	辐射测温方法	315
7.5	其他温度传感器	318
7.5.1	磁式温度传感器	318
7.5.2	电容式温度传感器	320
	参考文献	322
第8章	化学传感器	326
8.1	电化学基础	326
8.1.1	化学反应速度和化学平衡	326
8.1.2	电极电位及能斯特方程	331
8.1.3	电极电位和电动势的相关测量	336
8.1.4	电化学传感器的电极	339
8.2	电极的化学修饰	353
8.2.1	吸附型电极修饰	354

8.2.2	共价键型电极修饰	355
8.2.3	聚合物型电极修饰	357
8.3	电位化学传感器	358
8.3.1	离子选择电极电位的相关参数测量	359
8.3.2	离子选择电极的应用	361
8.3.3	离子选择电极的相关产品	362
8.4	电流型化学传感器	366
8.4.1	电流型传感器基本原理	366
8.4.2	电流型传感器的应用	369
8.4.3	电流型传感器相关产品	369
8.5	电导型化学传感器	371
8.5.1	液体电导型传感器基本原理	371
8.5.2	半导体气敏传感器基本原理	374
8.5.3	电导型传感器的应用	378
8.5.4	电导型传感器相关产品	379
8.6	微全分析系统展望	382
8.6.1	微全分析系统的分类	382
8.6.2	微流控芯片	383
8.6.3	微全分析系统的发展趋势与展望	384
	参考文献	385
第9章	生物传感器	387
9.1	生物传感器的发展	387
9.2	生物传感器的基本结构	388
9.2.1	生物敏感元件	388
9.2.2	换能器	397
9.2.3	信号处理系统	397
9.3	生物传感器的分类与原理	397
9.3.1	电化学生物传感器	398
9.3.2	热效应生物传感器	406
9.3.3	光学生物传感器	410
9.3.4	压电晶体生物传感器	420
9.3.5	场效应晶体管生物传感器	425
9.4	生物传感器最新进展	430
9.4.1	光学生物传感器	430
9.4.2	阵列生物传感器	436
9.4.3	流式细胞术	437
9.4.4	键裂式生物传感器	439
	参考文献	442

第 10 章 智能传感系统	445
10.1 智能传感系统概述	445
10.2 智能控制	446
10.3 智能传感器	449
10.3.1 概述	449
10.3.2 智能传感器设计与实现途径	451
10.4 多传感器信息融合技术	457
10.4.1 概述	457
10.4.2 多传感器信息融合的分类和结构	459
10.4.3 多传感器信息融合的一般方法	461
10.5 智能传感系统的发展方向	467
10.5.1 虚拟化	467
10.5.2 网络化	467
10.5.3 信息融合	469
10.6 智能传感系统——智能汽车	471
10.6.1 简介	471
10.6.2 智能汽车技术分析及系统结构	472
10.6.3 智能汽车发展方向	486
参考文献	488
第 11 章 仿生传感系统	489
11.1 机器人时代	489
11.1.1 机械部分	490
11.1.2 传感部分	494
11.1.3 控制部分	497
11.1.4 我们身边的机器人	497
11.2 大自然的馈赠	503
11.2.1 仿生医疗	503
11.2.2 仿生材料	506
11.2.3 仿生化学	509
11.2.4 仿生建筑	512
11.3 未来传感世界	513
11.3.1 微型化	513
11.3.2 智能化	516
11.3.3 仿生功能拓展方向	516
参考文献	521

第 1 章 电磁原理及其传感器

电磁原理已普遍渗透于传感器。本章首先综合讲述了电磁传感器的核心理论——麦克斯韦方程；然后，对电磁感应、霍尔、磁阻和微波效应等及其相应传感器进行系统论述；最后，介绍了质子旋进式及超导式两种磁敏传感器的原理及其应用。

1.1 麦克斯韦方程

由电磁理论可知静止的电荷产生静电场，恒定电流产生恒定磁场；同时，依据电磁感应现象，时变磁场产生时变电场。时变电场与磁场能够相互转化，两者不可分割，构成统一的时变电磁场。

静态场中的高斯定律及磁通连续性原理也适用于时变电磁场。英国物理学家麦克斯韦根据电磁感应定律和全电流定律，归纳并推导出 4 个描述时变电磁场的方程。为完整描述时变电磁场的特性，本节将系统阐述和说明电荷及电流关系的电荷守恒方程以及场量与介质特性关系的方程，即本构方程(表 1-1)。

表 1-1 麦克斯韦方程组及本构方程

名称	麦克斯韦方程		本构方程
	积分形式	微分形式	
全电流定律	$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \cdot d\mathbf{S}$	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	
电磁感应定律	$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$	$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\nabla \cdot \mathbf{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}$
磁通连续性原理	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}'$
高斯定律	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	

麦克斯韦方程组第一方程为全电流定律，第二方程为电磁感应定律，第三方程为磁通连续性原理，第四方程为高斯定律。电场线与磁场线相互铰链，自行闭合，时变电场的方向与时变磁场的方向处处相互垂直。

在本构方程中，第一方程为电荷守恒定律的微分形式，第二、三、四方程分别说明的是介质的极化性能、磁化性能及导电性能， ϵ 为介质的介电常数， μ 为磁导率， σ 为电

导率。

为了对麦克斯韦方程有更深一步的认识,下面对高斯公式、磁通连续性原理、电磁感应定律及全电流定律依次进行介绍。

1.1.1 高斯定律

电场对位于某点单位正电荷的作用力称为该点的电场强度,以 \mathbf{E} 表示,单位为 V/m 。

电场强度通过任一曲面的通量称为电通量,以 ψ 表示, $\psi = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$ 。

物理实验表明,真空中静电场的电场强度 \mathbf{E} 满足下列积分方程:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1-1)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (1-2)$$

式(1-1)为高斯定律, ϵ_0 为真空介电常数, F/m ($\epsilon_0 = 8.854\ 187\ 817 \dots \times 10^{-12} \text{F/m}$); q 为闭合面 S 包围的总电荷量。

体积 V 中的电荷 q 等于电荷体密度 ρ 对体积 V 的积分,即 $q = \oint_V \rho \cdot dV$, 所以式(1-1)、式(1-2)相应的微分形式分别为

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1-3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (1-4)$$

电磁学中定义电极化强度 \mathbf{P} , 实验结果表明其正比于介质中的电场强度 \mathbf{E} 。在介质中穿过闭合面 S 的电极化强度的通量与闭合面内束缚电荷 q' 的关系为

$$q' = - \oint_S \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S} \quad (1-5)$$

介质中的静电场可以归结为自由电荷与束缚电荷在真空中共同产生的静电场。所以,在介质内部,穿过任一闭合面 S 的电通为

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} (q + q') \quad (1-6)$$

令 $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$, 定义的矢量 \mathbf{D} 为电通密度, 又称电位移。根据式(1-5)和式(1-6)则可得介质中的静电场方程, 即高斯公式:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q \quad (1-7)$$

高斯方程表明介质中穿过任一闭合面的电通密度的通量等于该闭合面包围的自由电荷, 而与束缚电荷无关。其相应的微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1-8)$$

1.1.2 磁通连续性原理

磁场中, 定义矢量 \mathbf{B} 为磁通密度, 又称为磁感应强度, 其单位为 T , 其与电荷 q 、

运动速度 \mathbf{v} 及作用力 \mathbf{F} 的关系为 $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 。磁通密度 \mathbf{B} 通过某一表面 S 的磁通称为磁通, 其单位为 Wb, 以 Φ 表示, 即 $\Phi = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$, 式中 S 为闭合线圈界定的面积。

物理实验表明, 真空中恒定磁场的磁通密度 \mathbf{B} 满足下列积分方程:

$$\oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (1-9)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1-10)$$

式(1-9)称为安培环路定律。式中, μ_0 为真空磁导率; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ (亨/米); I 为闭合曲线包围的电流。式(1-10)表明, 真空中恒定磁场通过任一闭合面的磁通为零。由此可见, 磁通线是处处闭合的, 没有始点与终点, 这种特性称为磁通连续性原理。

由于穿过截面 S 的电流 I 为穿过该截面的电流密度的通量, 即

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$$

所以, 上述公式相应的微分形式为

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (1-11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-12)$$

1.1.3 电磁感应定律

由物理学知, 穿过闭合线圈的磁通 Φ 发生变化时, 线圈中产生感应电动势 e , 且感应电动势正比于磁通量对时间变化率的负值, 即 $e = -\frac{d\Phi}{dt}$, 式中电动势 e 的正方向规定为与磁通方向构成右旋关系, 如图 1-1 所示。

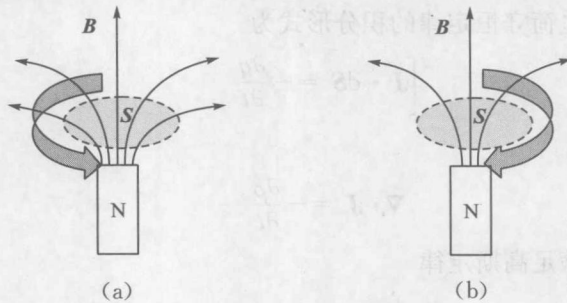


图 1-1 电磁感应定律示意图

在图 1-1(a)中, \mathbf{B} 与 S 同向, $\Phi > 0$, $d\Phi < 0$, $e > 0$; 图 1-1(b)中 \mathbf{B} 与 S 异向, $\Phi < 0$, $d\Phi > 0$, $e < 0$;

已知回路中电动势的方向与电流方向相同, 因此, 线圈中感应电流产生的感应磁通方向总是阻碍原有磁通的变化。闭合线圈中产生感应电流意味着导线中存在电场推动电荷运动, 这种电场称为感应电场, 以 \mathbf{E} 表示。感应电场强度沿线圈回路的闭合线积分等于线圈中的感应电动势 e , 即

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1-13)$$

由 $\Phi = \oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$ ，便可得电磁感应定律：

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1-14)$$

它表明时变磁场可以产生时变电场，其微分形式为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-15)$$

1.1.4 全电流定律

首先，在外加磁场作用下，介质发生磁化，内部出现磁化电流 I' ，磁化介质内部的磁场相当于传导电流 I 及磁化电流 I' 在真空中产生的合成磁场。这样，磁化介质中磁通密度 \mathbf{B} 沿闭合曲线的环量为

$$\oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 (I + I') \quad (1-16)$$

电磁学中定义磁极化强度为 \mathbf{M} ，磁化电流公式为

$$I' = \oint_l \mathbf{M} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-17)$$

令 $\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} = \mathbf{H}$ ，定义的矢量 \mathbf{H} 为磁场强度，其单位是 A/m。根据式(1-16)和式(1-17)则得安培环路定律为

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (1-18)$$

其次，自由电子在导体和电解液中形成的传导电流及电荷在气体中形成的运流电流均满足电荷守恒定律。电荷守恒定律的积分形式为

$$\oint_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (1-19)$$

相应微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1-20)$$

同时，由时变电场满足高斯定律

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q \quad (1-21)$$

电磁场理论中，定义 \mathbf{J}_d 为位移电流密度。 $\mathbf{J}_d = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ ，即电通密度的变化率，是与电场的变化率有关的量。因此，由式(1-19)和式(1-21)得到时变电场的全电流连续性原理的积分形式为

$$\oint_s (\mathbf{J} + \mathbf{J}_d) \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1-22)$$

相应微分形式为

$$\nabla \cdot (\mathbf{J} + \mathbf{J}_d) = 0$$

在静电场中, 由于 $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0$, 自然不存在位移电流。而在时变电场中, 电场变化越快, 产生的位移电流密度也越大。在时变电场中存在位移电流, 麦克斯韦认为位移电流也可产生磁场, 因此在安培环路定律中增加一项位移电流, 即可得到全电流定律:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \quad (1-23)$$

相应微分形式为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

该定律表明, 时变磁场是由传导电流、运流电流及位移电流共同产生的。已知位移电流是由时变电场形成的, 由此可见, 时变电场可以产生时变磁场。

1.2 电磁感应效应

根据上述对麦克斯韦方程组中电磁关系的探讨, 按照转换方式的不同, 电磁感应可分为自感效应、互感效应和电涡流效应三种。以下将分别介绍这三种效应的工作原理和主要应用。

1.2.1 自感效应

1. 自感原理

当一个回路中通有电流 I 时, 电流所产生的磁感应通量必然通过回路本身(图 1-2)。线圈内实线为回路电流产生的磁通量方向, 虚线指示自感电动势的方向。当回路中的电流变化时, 通过回路的磁通量发生相应变化, 回路自身产生感应电动势。这种因回路中电流的变化而引起回路自身的电磁感应现象叫做自感效应, 所产生的电动势叫做自感电动势。

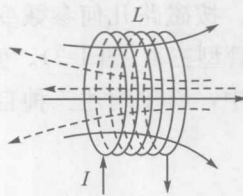


图 1-2 自感效应示意图

当线圈中不存在铁磁质时, 线圈中电流所激发的磁感强度与电流强度成正比。因此, 通过线圈本身的磁通链 ψ (即磁通量乘以线圈的匝数, 代表了单位导体截面通过磁通量的多少, 就是磁通的强度) 也正比于线圈中的电流强度 I :

$$\psi = LI \quad (1-24)$$

而对于 N 匝串联回路, 每匝中穿过的磁通分别为 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N$, 一般各匝线圈磁