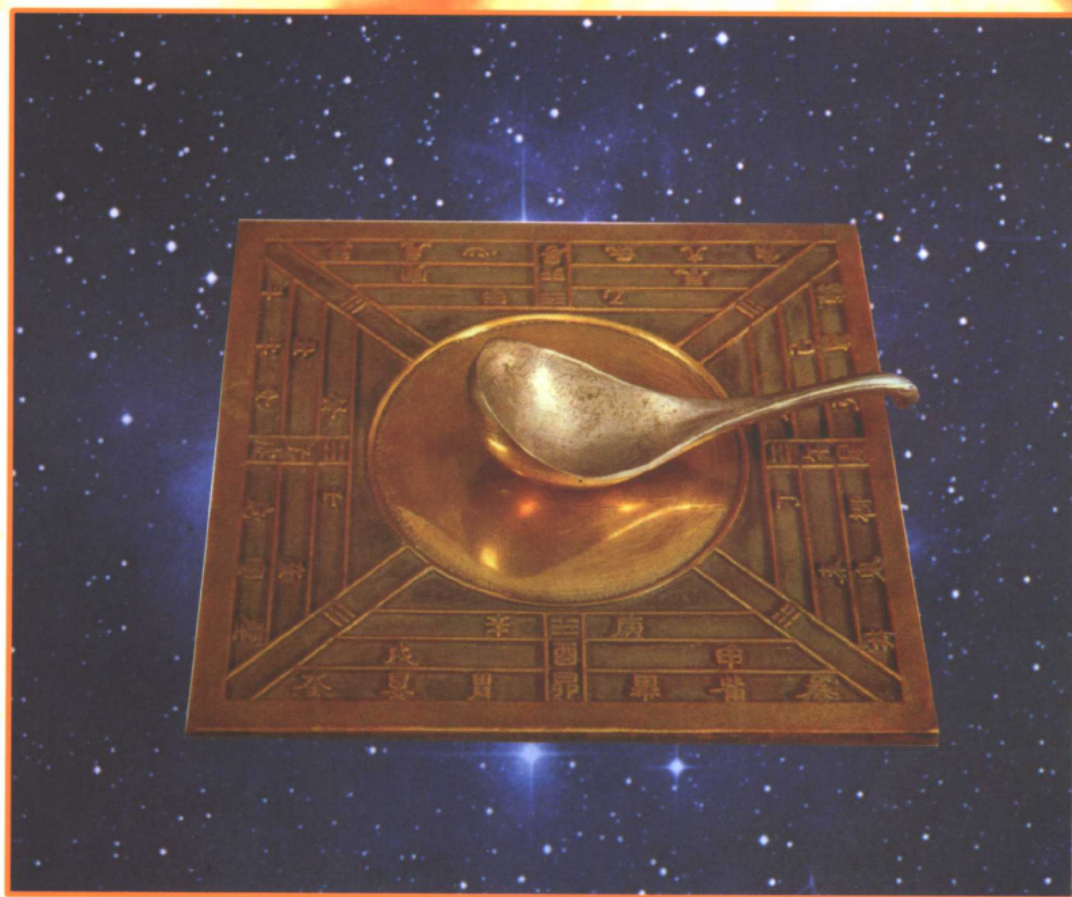


程景全 著

高新技术中的 磁学和磁应用



中国科学技术出版社



ISBN 7-5046-4274-6



9 787504 642745 >

ISBN 7-5046-4274-6

O-105 定价:78.00 元

高新技术中的磁学和磁应用

程景全 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF MAGNETISM

Jingquan Cheng

China Science & Technology Press

• Beijing •

图书在版编目(CIP)数据

高新技术中的磁学和磁应用 / 程景全著. —北京: 中国科学技术出版社, 2006.3
ISBN 7-5046-4274-6

I. 高... II. 程... III. 磁学 IV. 0441.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 003716 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志, 未贴防伪标志的为盗版图书。

责任编辑: 赵 晖

责任印制: 安利平

封面设计: 付小鹏

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 010-62103210 传真: 010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 14.625 字数: 348 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷

定价: 78.00 元

前 言

磁学又称为铁磁学，是一门非常古老的学科，几千年以前指南针的发现是磁学应用的第一个最重要的成果。但是在这以后磁学的发展十分缓慢，它在物理学中的地位远远低于电学、光学和力学等分支学科，仅仅成为电磁场理论中的一个部分。它的应用也仅仅局限于一些作为动力方面的电磁机械等少数几个领域。不过经过近一百年，特别是经过近几十年的发展和完善，磁学理论已经发展得十分成熟。应该说现代磁学是近代物理学中和电学、光学、力学等分支学科并列的一个重要学科。特别重要的是其发展和近代高科技的发展是直接联系在一起的。目前磁学的应用范围已经十分广泛，磁学的专著也正在不断地出现。但是在磁学界，仍然没有一本全面介绍磁学理论、磁学材料、磁学效应和磁学的应用的专门书籍。本书的目的就是向读者全面介绍现代磁学的相关理论，它的重要应用和新发展，本书力图将磁学领域中的最主要的最新的科技成果汇集在一起，使读者直接进入磁学发展的前沿领域。

磁学理论包括经典的磁学理论和现代磁学理论，本书全面地介绍了在经典理论和现代理论中磁矩、磁感应强度、磁场强度和磁化强度的概念。并且介绍了相应的矢量场的基本概念，还介绍了磁路分析的方法。磁学的发展和磁性材料的发展紧密联系在一起，在磁材料的部分，本书全面地介绍了各种材料的磁特性，特别是新近发展的各种亚磁性材料和它们在高频区的特点。在这一部分，还简单地介绍了超导体材料的特性。对磁性薄膜，磁性液体和磁阻材料也进行深入的介绍。磁学效应是磁学应用的基础，本书试图介绍现存的丰富多彩的磁学效应和它们的理论基础。这些效应包括磁电、磁应变、磁光、磁阻、超导、核磁共振、磁致冷、磁光谱等等效应。

本书的重点是磁学在各个高新技术领域的应用。磁传感器是磁应用的一个最重要的方面。磁传感器也是现代传感器中的一个非常重要的分支。它的应用是很多高新技术产品不断进步和发展的基础，以磁理论为基础的微弱磁场探测仪、金属和矿物探测仪、位移和其他精密传感器对航空、航天、天文、地质探矿、无损探伤、医学科学和军事科学所产生的作用是很多其他传感器所不能比拟的。在传统的测量领域，磁传感器可以识别非常小的位移的变化，它的应用使得测量技术特别是非接触测量技术有了根本性的变革。磁强计是很多医学和地质成像仪器的基础，它的应用涉及了多种学科的多个领域。本书全面介绍了各种磁传感器的原理和它们的设计方法。磁记录的发展是和计算机的发展紧密联系在一起，磁记录对计算机科学的发展起着无可估计的作用，本书专门列出一章详细地介绍了各种信息记录以及信息读取的方法和它们的发展趋势，并且全面介绍了各种最新发展的不同的磁记录载体的区别和它们的发展前景。磁悬浮是磁学在工业领域的一个重要应用，本书不仅介绍了磁悬浮的相关理论，而且还介绍了磁学在传统的工业领域的应用，这些应用包括磁分离、磁吸附、磁轴承、磁联轴节、变压器和各种不同的电机、发电机和测速机的原理和设计。磁变性材料和与之相关的电变性材料又称为新的智能材料，它的应用前景十分广阔，本书对磁变性材料的应用也进行了介绍。作者还对空间飞行器的等离子磁场的太阳风推进技术进行了介绍，对磁感应加热装置，对汽车的磁导引自动驾驶也进行了介绍。本书还对加速器中的磁场也进行了介绍。核磁共振成像仪是磁学理论以及相关的高技术和数理方法在医学领域的一个非常重要的应用，它在探矿及无损材料分析上也有很重要的价值。本书专门列出一章来介绍这一高新技术

术成果的理论基础和它的具体设计方法。磁性材料的微波吸收涂层又称为隐形涂层，它是现代隐形飞机的技术关键。它的奥秘在于现代磁性材料对微波辐射的吸收。新型的超导体光子接收器有比 CCD 成像装置还要好的特点，它的开发可能会带来接收器的又一次革命。同时磁性材料在射电电波的接收器和混频器中的作用也是十分重要的。本书对磁性材料对超导集成电路的影响也进行相关的介绍。

和铁磁学紧密相关的学科是铁电学(ferroelectricity)。铁电学理论也是现代高新技术中十分重要的学科，它包含了应用极其广泛的铁电效应、压电效应、热电效应、双折射效应、液晶效应。它在传感器、红外成像、高能量充电电池、液晶显示、信息储存等方面都有着十分重要的应用。本书的续集将是《高新技术中的铁电学和应用》。这两本书将是高新技术发展方面的重要专著。作者以此作为对现代化进程的重要贡献。

在本书的写作过程中获得了一些专家和同仁们的帮助，他们有翟超、张培强、郭红峰、杨德华等等。无锡杰西医药科学技术公司为本书的出版作出了重要贡献,特此致谢。

作者 2006 年 3 月于美国

内 容 提 要

在以现代通信技术和数字技术为代表的高新技术的发展的过程中,铁磁学作为现代物理学中的一个新的独立学科发挥了至关重要的作用。它的发展直接和计算机的发展、通信技术的发展、遥控和自动识别技术的发展,核磁共振成像、现代地质探矿、超导技术、微波接收技术和传感器技术的发展直接联系在一起。它在信息学、医学、地质学、天文学、仪器科学、空间科学和军事科学等很多学科中都占据着十分重要的地位。在所有这些新技术发展的同时,磁学作为一个新的学科自身也得到了极大的丰富和巨大的发展。但是遗憾的是这么一个十分重要的学科至今并没有正式地、大量地进入理工医科大学的教学计划之中,磁学理论长期封闭在固体物理、分子物理的象牙塔之中。有关磁学理论和应用的系统的教材和资料也十分缺乏。正是由于这个原因,作者大量参考各种相关的磁学理论及其应用的专著和资料,编写了这本十分重要的关于磁学原理和应用的原著。这本著作是这一领域独有的专著。它将向读者全面地介绍最新的磁学理论、计算方法、磁材料的特性、磁学效应、磁传感器的设计、磁信息的存储和读取,核磁共振成像、磁悬浮、电机、变压器和其他磁机电产品、等离子磁场、磁变性液体、磁接收器、磁性隐形涂层以及磁学在集成电路上的应用等等。这是在国内第一本如此全面、深刻地介绍与磁学相关的最新技术的专著。

这本书是作者对新技术发展的主要贡献,也是作者几十年工作和研究的成果。它将是无数技术专利和发明创造的来源。本书讨论的范围从速度、位移测量到数字集成电路;从电机、测速机到微波隐形材料;从变压器、电磁灶到磁记录;从磁分选、磁悬浮到自动驾驶;从潜水艇的探测到宇宙航行的太阳风推进;从核磁共振到脑磁探测仪,从微波接收到加速器中的磁场。其内容广泛,可以让你一步进入磁学研究的前沿领域。

和铁磁学紧密相关的学科是铁电学(ferroelectricity)。铁电学理论也是现代高新技术中十分重要的学科,它包含了应用极其广泛的铁电效应、压电效应、热电效应、双折射效应、液晶效应。它在传感器、红外成像、高能量充电电池、液晶显示、信息储存等方面都有着十分重要的应用。本书的续集将是《高新技术中的铁电学和应用》。

目 录

前言

第一章 磁场理论

1.1 经典磁场理论	(1)
1.1.1 磁荷和磁矩	(1)
1.1.2 磁感应、磁场强度和磁化强度	(2)
1.1.3 磁化强度和外部磁场强度	(4)
1.2 现代磁场理论	(5)
1.2.1 磁场和电场	(5)
1.2.2 矢量场理论简介	(6)
1.2.3 磁场的特点	(8)
1.2.4 磁感应的矢量势	(9)
1.3 永磁体的磁场	(11)
1.4 近似的磁路分析	(12)

第二章 磁性材料 (15)

2.1 材料的磁特性	(15)
2.2 弱磁性材料和超导体	(16)
2.3 亚磁性和强磁性材料	(18)
2.4 永磁体	(20)
2.5 低频区域的软磁性材料	(22)
2.6 高频区域的软磁性材料	(23)
2.7 磁性薄膜和磁性针的磁化特点	(27)
2.8 磁性液体和磁变性材料	(30)
2.9 磁阻材料和元件	(32)

第三章 磁学效应 (34)

3.1 电磁场感应	(34)
3.2 电磁效应	(36)
3.2.1 霍尔效应	(36)
3.2.2 磁阻效应	(38)
3.3 磁致弹性效应	(41)
3.4 磁光效应	(41)
3.5 超导效应	(43)
3.6 核磁共振效应	(44)
3.7 绝热去磁致冷效应和热开关	(45)
3.8 磁光谱塞曼效应	(48)

第四章 磁传感器 I (50)

4.1 霍尔传感器	(50)
4.1.1 霍尔传感器的基本结构	(50)
4.1.2 霍尔传感器的灵敏度和偏置电压	(51)
4.1.3 薄膜式霍尔传感器	(53)
4.1.4 分子束外延法薄膜霍尔传感器	(54)
4.1.5 其他形式的霍尔传感器	(55)
4.1.6 霍尔传感器的主要应用	(59)
4.2 磁阻传感器	(66)
4.2.1 磁阻传感器的设计	(67)
4.2.2 金属涡流探测装置	(70)
4.3 磁变形传感器	(70)
4.3.1 力矩传感器	(72)
4.3.2 力和位移传感器	(75)
4.4 磁门磁强传感器	(78)
4.4.1 双频磁门磁强计	(79)
4.4.2 圆环形的磁门磁强计和正交磁门磁强计	(81)
4.4.3 微型磁强计和多轴磁强计的设计	(84)
4.5 感应线圈磁场传感器	(85)
4.5.1 空气芯感应线圈磁场传感器	(85)
4.5.2 磁芯感应线圈磁场传感器	(88)
4.5.3 射频识别装置中的感应线圈	(89)
4.6 感应传感器	(91)
4.6.1 永磁体类位移感应传感器	(91)
4.6.2 感应测速发电机	(92)
4.6.3 LVDT 位移传感器(线性变量差分变压器)	(93)
4.6.4 变电感传感器	(96)
4.6.5 同步传感器和感应同步器	(98)
4.7 涡流传感器	(100)
4.7.1 涡流传感器的原理	(100)
4.7.2 涡流速度表	(101)
4.7.3 涡流式的邻近仪	(102)
4.8 磁开关	(103)
第五章 磁传感器 II	(107)
5.1 超导量子干涉装置	(107)
5.1.1 直流超导量子干涉装置	(109)
5.1.2 交流超导量子干涉装置	(112)
5.2 谐振式磁强仪	(115)

5.2.1 质子进动磁强仪·····	(115)
5.2.2 奥豪申效应质子磁强仪·····	(118)
5.2.3 光激发磁强仪·····	(119)
5.3 磁光传感器·····	(122)
5.3.1 偏振式的磁光传感器·····	(122)
5.3.2 抗磁材料的磁光电流变压器·····	(123)
5.3.3 透明铁磁材料的磁光电流变压器和无损探伤·····	(124)
5.4 利用电磁力实现零点补偿的传感器·····	(125)
5.4.1 传感器的零点补偿和闭环控制·····	(125)
5.4.2 倾斜仪和压力计中的零点力补偿·····	(133)
5.5 其他磁传感器·····	(134)
5.5.1 磁流量计·····	(134)
5.5.2 磁流体角速度仪·····	(134)
5.5.3 磁性液体的加速度仪和倾斜仪·····	(135)
5.5.4 磁氧气探测器·····	(135)
5.5.5 磁力显微镜·····	(136)
第六章 磁信息的记录和提取 ·····	(138)
6.1 纵向磁记录装置·····	(138)
6.2 不同磁头的磁场分布·····	(141)
6.3 磁信息的读取·····	(143)
6.4 垂直磁记录装置·····	(146)
6.5 磁阻材料所制成的磁头·····	(147)
6.5.1 磁阻式的读取磁头·····	(147)
6.5.2 磁性薄膜的喷镀·····	(149)
6.6 磁光记录方法·····	(150)
6.6.1 光盘信息的记录和读取·····	(150)
6.6.2 磁光盘的热磁信息记录·····	(153)
6.6.3 高密度的磁光盘的发展·····	(155)
6.7 现代磁记录载体·····	(157)
第七章 磁动力和磁悬浮装置 ·····	(160)
7.1 磁工业装置·····	(160)
7.1.1 磁分离、磁吸附、磁轴承、磁齿轮和磁联轴节·····	(160)
7.1.2 磁线圈、变压器、电机和发电机·····	(162)
7.1.3 磁感应加热和磁导向装置·····	(169)
7.1.4 磁性液体的工业应用·····	(171)
7.1.5 磁变性材料的工业应用·····	(172)
7.2 磁悬浮理论·····	(173)

7.2.1 超导体的特点和它在磁悬浮中的作用·····	(173)
7.2.2 磁应力和磁强度的概念·····	(175)
7.2.3 电磁悬浮和电动悬浮·····	(178)
7.2.4 魏氏磁阵列悬浮·····	(179)
7.3 现代加速器中的磁场·····	(180)
7.3.1 两磁极磁场和磁硬度·····	(180)
7.3.2 聚焦四磁极磁场·····	(182)
7.4 等离子磁场和飞行器的太阳风推进·····	(184)
7.5 磁屏蔽·····	(185)
第八章 断层显像和核磁共振 ·····	(187)
8.1 计算机断层显像·····	(187)
8.2 雷登变换理论·····	(189)
8.3 核磁共振扫描仪·····	(191)
8.4 核磁共振的原理·····	(192)
8.4.1 磁旋系数和喇吗频率·····	(192)
8.4.2 核子的磁化和激发·····	(193)
8.4.3 梯度磁场和激发磁场的分量·····	(195)
8.4.4 回声测量和重新定相位·····	(196)
8.5 核磁共振信号的频率和相位编码·····	(198)
8.5.1 频率编码的方法·····	(198)
8.5.2 相位编码的方法·····	(199)
8.5.3 三维人体成像·····	(200)
8.6 核磁共振中的雷登变换·····	(201)
第九章 集成电路和电磁波领域的磁学应用 ·····	(203)
9.1 超导跃迁点测辐射热计·····	(203)
9.2 超导隧道集光子接收器·····	(207)
9.3 SIS 集混频器·····	(208)
9.3.1 非线性函数的变频原理·····	(208)
9.3.2 射电接收器中的本振和混频·····	(210)
9.4 微波吸收涂层·····	(211)
9.5 超导集成电路的发展·····	(212)
索引·····	(215)

Table of Contents

1. Theory of magnetism

1.1 Classical theory of magnetism

1.1.1 Magnetic charge and magnetic moment

1.1.2 Magnetic induction, field intensity and magnetization

1.1.3 Spontaneous magnetization and external magnetic field

1.2 Modern theory of magnetism

1.2.1 Magnetic induction and electric field

1.2.2 Vector field theory

1.2.3 Characteristics of magnetic field

1.2.4 Vector potential of magnetic induction

1.3 Fields for a permanent magnet

1.4 Analysis of magnetic circuit

2. Magnetic materials

2.1 Magnetic states of matter

2.2 Weakly magnetic materials and superconductors

2.3 Ferromagnetic and ferromagnetic materials

2.4 Permanent magnets

2.5 Soft materials for low frequency applications

2.6 Soft materials for high frequency applications

2.7 Magnetic films and line magnetic materials

2.8 Ferrofluid and magneto-rheological materials

2.9 Magnetoresistance and giant magnetoresistance

3. Magnetic effects

3.1 Faraday law

3.2 Galvanomagnetic effects

3.2.1 Hall effect

3.2.2 Magnetoresistive effect

3.3 Magnetostriction and magnetoelastic effects

3.4 Magneto-optics effect

3.5 Meissner effect

3.6 Magnetic resonance

3.7 Adiabatic demagnetization cooling and heat switch

3.8 Zeeman spectrum splitting

4. Magnetic sensors I

4.1 Hall sensors

- 4.1.1 Structure of Hall sensor
- 4.1.2 Sensitivity and bias voltage of Hall sensors
- 4.1.3 Thin film Hall sensors
- 4.1.4 Molecular beam epitaxy thin film sensors
- 4.1.5 Other types of Hall sensors
- 4.1.6 Applications of Hall sensors
- 4.2 Magnetoresistive sensors
 - 4.2.1 Design of magnetoresistive sensors
 - 4.2.2 Eddy current metal detectors
- 4.3 Magnetostriction sensors
 - 4.3.1 Torque sensors
 - 4.3.2 Force and displacement sensors
- 4.4 Fluxgate magnetometers
 - 4.4.1 Second harmonic fluxgate magnetometers
 - 4.4.2 Ring core and orthogonal fluxgate sensors
 - 4.4.3 Film magnetometers and magnetic compass
- 4.5 Induction coil magnetometers
 - 4.5.1 Air core magnetometers
 - 4.5.2 High permeability core magnetometers
 - 4.5.3 Induction cores in radio frequency identification devices
- 4.6 Induction sensors
 - 4.6.1 Sensors excited by permanent magnets
 - 4.6.2 Tachometers
 - 4.6.3 LVDT sensors
 - 4.6.4 Variable inductance sensors
 - 4.6.5 Synchros and inductosyns
- 4.7 Eddy current sensors
 - 4.7.1 Principle of eddy current sensors.
 - 4.7.2 Eddy current speedometers
 - 4.7.3 Proximity sensors
- 4.8 Magnetic switches
- 5 Magnetic sensors II**
 - 5.1 SQUID devices
 - 5.1.1 DC SQUID devices
 - 5.1.2 RF SQUID devices
 - 5.2 Resonance magnetometers
 - 5.2.1 Proton precession magnetometers

5.2.2 Overhauser-effect proton magnetometers

5.2.3 Optically pumped magnetometers

5.3 Magneto-optical sensors

5.3.1 Polarimetric measurements

5.3.2 Magneto-optical current transformers based on diamagnets

5.3.3 MOCT based on transparent ferromagnets

5.4 Sensors using electromagnetic balance forces

5.4.1 Force balance principle and closed loop control

5.4.2 Force balance for tiltmeters and pressure meters

5.5 Other magnetic sensors

5.5.1 Flow meters

5.5.2 Magnetohydrodynamic angular rate sensor

5.5.3 Accelerometer and tiltmeters

5.5.4 Oxygen sensor

5.5.5 Magnetic force microscope

6 Magnetic recording and reading

6.1 Longitude magnetic recording

6.2 Magnetic fields of recording heads

6.3 Read process

6.4 Perpendicular magnetic recording

6.5 Magnetoresistive and giant magnetoresistive heads

6.5.1 Magnetoresistive reading head

6.5.2 Sputtering of magnetic film

6.6 Magneto-optical recording

6.6.1 Optical recording and reading

6.6.2 Thermal recording of magneto-optical disk

6.7 Modern magnetic recording devices

7 Magnetic industrial and levitation devices

7.1 Magnetic industrial devices

7.1.1 Magnetic separation, attraction, bearings, gears and couplings

7.1.2 Magnetic coils, transformers motors and generators

7.1.3 Magnetic heating and guiding

7.1.4 Industrial applications of ferromagnetic fluid

7.1.5 Industrial applications of magnetic-rheological materials

7.2 Theory of magnetic levitation

7.2.1 Superconductor and its application in magnetic levitation

7.2.2 Magnetic forces and magnetic stiffness

- 7.2.3 Electromagnetic and electrodynamic levitations
- 7.3 Magnet in modern accelerators
 - 7.3.1 Dipole magnet and magnetic rigidity
 - 7.3.2 Focusing quadrupole magnet
- 7.4 Plasma magnet and solar wind propulsion
- 7.5 Magnetic shielding
- 8 Tomograph and nuclear magnetic resonance imaging
 - 8.1 Computer-aided tomograph scanning
 - 8.2 Radon transformation
 - 8.3 Nuclear magnetic resonance imager
 - 8.4 Principles of nuclear magnetic resonance
 - 8.4.1 Gyromagnetic ratio and Larmor frequency
 - 8.4.2 Magnetization and excitation of nucleons
 - 8.4.3 Gradient and excitation fields
 - 8.4.4 Echo detection and post-excitation rephasing
 - 8.5 Frequency and phase coding
 - 8.5.1 Frequency coding method
 - 8.5.2 Phase coding method
 - 8.6 Three dimensional imaging
 - 8.7 Radon transformation in nuclear magnetic resonance
- 9 Magnetism in microwave and integrated circuit fields
 - 9.1 Transition-edge bolometer
 - 9.2 Photon detector with a superconducting tunnel junction
 - 9.3 SIS mixers
 - 9.3.1 Frequency multiplication using nonlinear components
 - 9.3.2 Local oscillator and mixer
 - 9.4 Microwave absorber
 - 9.5 Superconductor integrated circuit

Index

第一章 磁场理论

1.1 经典磁场理论

1.1.1 磁荷和磁矩

在磁场的经典理论中，一个最基本的公式就是一个单独的没有任何尺寸大小的磁极在磁场中所受到的作用力的公式。但是和电场理论中的电荷的概念不一样，电场中的独立的正负电荷可以单独存在，而单独的正负磁极实际上是不存在的，磁极从来都是成对出现的。正负磁极一般称为磁北极和磁南极。为了避免这种理论上的困难，经典磁场理论认为一个非常细长的磁铁中的一个磁极则可以被近似地看成是一个单独的磁极。根据这样一个假设，从而可以得出一个单独的磁极在磁场中所受到的力和磁极本身的强度成正比，和磁极所在地点的磁场强度(field intensity)成正比的关系式。用具体的公式表示为(Ripka,2000):

$$\mathbf{F} = Q_m \mathbf{H} \quad (1.1)$$

式中 Q_m 是一个理想化的磁极的强度， $\mathbf{H}$ 是磁极所在地的磁场强度。同样地根据这个大胆的假设，推导出了一个和万有引力定律非常相似的公式，即两个没有任何尺寸大小的磁极之间的作用力可以写成下面著名的库伦(Coulomb)公式的形式:

$$\mathbf{F} = \frac{Q_{m1} Q_{m2}}{4\pi\mu_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (1.2)$$

式中 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ 是真空的磁导系数(permeability of vacuum), 也称为磁场常数或者导磁系数, 它是人为引进的。它的引进是为了使公式 1.1 中不含有任何系数。磁场常数的大小和单位在不同的单位系统中是不相同的, 这里用的数值和单位是在米千克秒安培(mkgsA)系统中的磁场常数的值。在传统的厘米克秒制中, 这个磁场常数的值等于 1, 这时这个常数没有任何单位。式中 r 是两个磁极之间的距离, $\mathbf{e}_r$ 是沿着距离方向的单位矢量。这两个公式既是经典磁学理论的基础, 也为经典磁学理论带来了一些不可解决的困难。这是因为在实际的磁场中, 磁场的性质和电场以及引力场有着很大的区别, 所以在一些新的磁学理论的书籍中已经不再采用这样的研究方法, 而是引进电流元的概念。这样通过电流元来形成的磁场而开始磁学理论的研究。在实际的环境中, 磁和电流是直接联系在一起的, 环形电流会产生一对磁极, 称为磁偶极子或者磁矩。任何磁极总是成对出现, 互相依存的。这种成对出现的两个符号相反的磁极就叫作库伦磁矩(Coulomb magnetic moment):