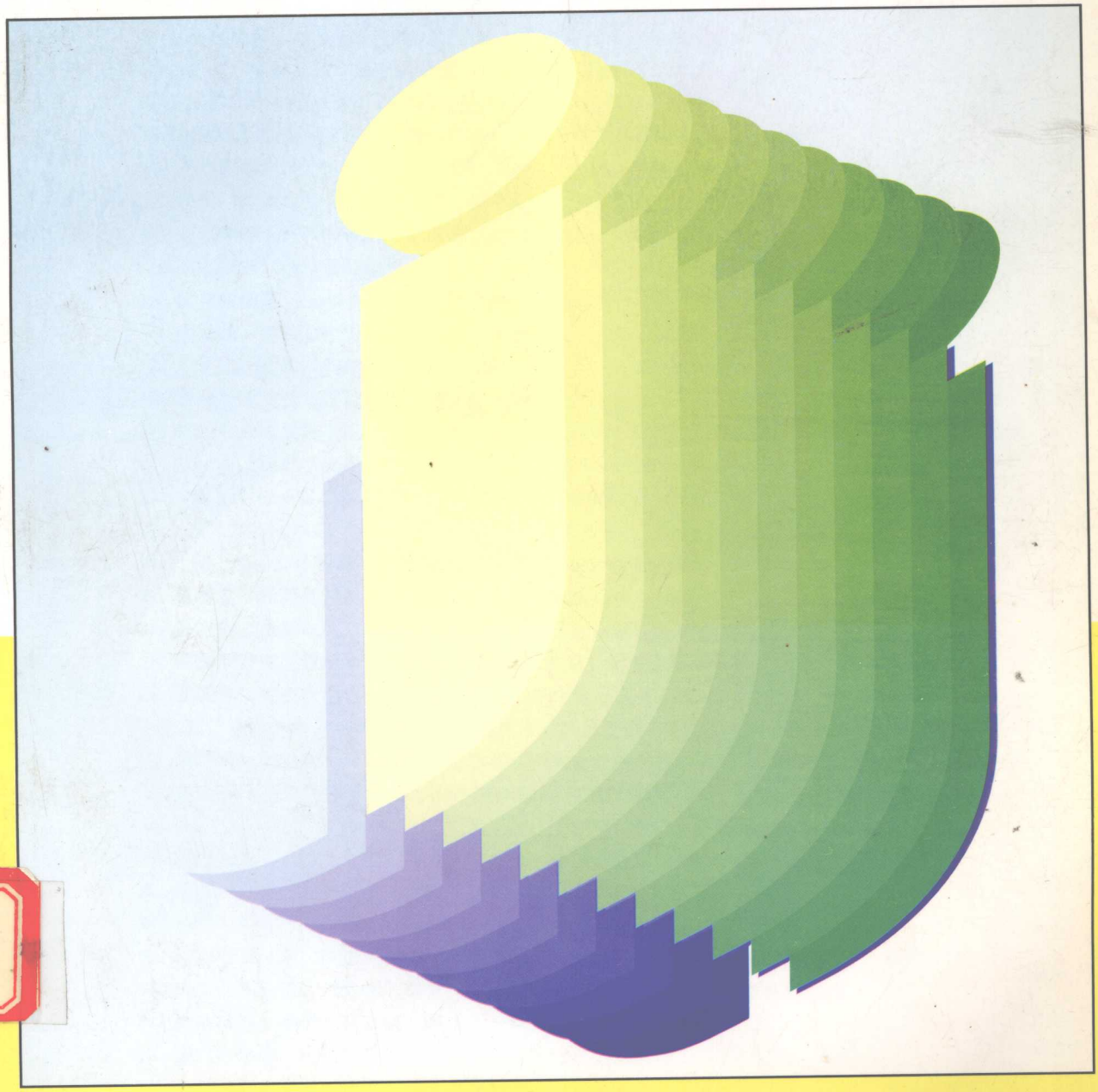
机电一体化系列教材

# 电磁元件及其控制

葛伟亮 编



机械工业出版社

机电一体化系列教材

# 电磁元件及其控制

机械工业出版社

本书主要介绍机电一体化装置中常用的各类电磁元件的基本结构、工作原理、特性及其控制。其中包括电磁铁、继电器、变压器、直流电机、感应电机、自整角机、旋转变压器和步进电机。内容上从电磁基本原理出发，并以此为主线，又以各个元件的特殊性为依据，逐个讨论各类电磁元件的特性和控制方法，以应用实例介绍具体控制线路。书中对当前该领域中的最新成果也作了适当介绍。

本书主要供高等学校机电一体化专业作为教材，也可供自动控制、工业自动化专业和其他相关专业作为教学参考书。并可供从事上述专业的工程技术人员参考。

**图书在版编目（CIP）数据**

电磁元件及其控制/葛伟亮编．-北京：机械工业出版社，1997．4
ISBN 7-111-05382-6

Ⅰ．电…　Ⅱ．葛…　Ⅲ．导磁部件（电机）-控制　Ⅳ．TM30　3.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（96）第 18627 号

出版人：马九荣（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
责任编辑：孙本绪　版式设计：王　颖　责任校对：李秋荣
封面设计：姚　毅　责任印制：路　琳
机械工业出版社印刷厂印刷・新华书店北京发行所发行
1998 年 4 月第 1 版第 1 次印刷
787mm×1092mm 1/16　13.5 印张・326 千字
0 001—2000 册
定价：22.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

# 前　言

本书是为机电一体化专业本科生学习“电磁元件及其控制”课程而编写的。内容主要包括电磁基本知识，常见的各类电磁电器、电机及其控制。

机电一体化装置种类繁多，尽管机床是其中重要的一个方面，但仅局限于此，显然是不够的。编者在总结国内、外各种机电一体化装置的基础上，结合我国的实际情况，以各类电磁元件为核心并介绍其原理和控制线路，在应用实例中，又结合具体对象，将各单元控制线路组合起来，以达到既提供给学生一个个可拼搭的板块，又掌握拼搭的方法之目的。在内容上摒弃一些简单而又陈旧的部分，补充当今本学科中的一些新成果，增加信息量，并尽可能与目前国外技术发展水平接轨。

本书着重电磁基本知识的完整阐述，并引导学生用电磁基本理论分析各类电磁元件的工作原理、特性和应用。在内容安排上遵循从普遍到特殊，从一般电磁元件的共性到电磁控制元件的特性的原则。全书力求叙述清楚、简明扼要、条理分明、循序渐进。各章均有例题、习题和思考题及应用实例，还附有常用磁性材料和各类元件型号表等，以供备查。

全书共分八章，前两章为电磁基础知识和电磁电器，后六章为各类电机及其控制。包括变压器、直流电机、感应电机、自整角机、旋转变压器和步进电动机。还对一些新型电机及其控制线路也作了简要介绍。

本书是在总结多年教学实践经验和科研成果的基础上编写而成的。全书由葛伟亮主编，林梦泉参与了第三章、第五章的部分编写工作。全书承蒙北京理工大学胡祐德教授在百忙之中认真审阅，并提出宝贵的意见和建议，在此表示深切的谢意。由于编者水平有限，难免有错误和不妥之处，诚恳地欢迎读者批评指正。

编者　1996. 2. 26

# 目　录


前　言

绪　论 …… 1

**第一章　磁路及其计算** …… 5

1.1　磁路的基本物理量和基本定律 …… 5

1.1.1　磁路的基本物理量 …… 5

1.1.2　磁路的基本定律 …… 7

1.2　铁磁材料的特性 …… 12

1.2.1　铁磁材料的导磁性能 …… 12

1.2.2　磁滞现象和磁滞损耗 …… 12

1.2.3　涡流损耗 …… 14

1.2.4　温度特性 …… 15

1.3　磁路计算 …… 15

1.3.1　直流磁路的计算 …… 16

1.3.2　交流磁路的计算 …… 18

思考题及习题 …… 21

**第二章　电磁铁和电磁继电器** …… 23

2.1　电磁铁的吸力和吸力特性 …… 23

2.1.1　电磁铁中的能量转换和电磁力 …… 23

2.1.2　交流电磁铁 …… 25

2.1.3　静吸力特性 …… 27

2.2　电磁铁的特性参数与应用 …… 29

2.2.1　电磁铁的特性参数 …… 29

2.2.2　电磁铁的应用举例 …… 30

2.3　电磁继电器 …… 31

2.3.1　结构和工作原理 …… 31

2.3.2　静吸力特性和反力特性配合 …… 32

2.3.3　继电器的主要技术指标 …… 32

2.4　常用的电磁继电器 …… 33

2.4.1　中间继电器 …… 33

2.4.2　时间继电器 …… 33

2.4.3　磁保持继电器 …… 34

2.4.4　速度继电器 …… 34

2.4.5　舌簧继电器 …… 34

2.4.6　霍尔效应继电器 …… 35

2.5　电磁接触器 …… 36

思考题及习题 …… 37

**第三章　变压器** …… 38

3.0　概述 …… 38

3.1　单相变压器的空载运行 …… 38

3.1.1　空载运行的电压平衡方程式 …… 39

3.1.2　感应电动势和空载电流 …… 39

3.1.3　变压器空载时的等效电路和相量图 …… 41

3.2　变压器的负载运行 …… 42

3.2.1　负载时变压器的磁势平衡 …… 42

3.2.2　负载时的电压平衡方程式 …… 43

3.2.3　变压器负载运行时的等效电路和相量图 …… 43

3.3　变压器的额定值和性能指标 …… 44

3.3.1　变压器的额定值 …… 44

3.3.2　变压器的特性 …… 45

3.4　特殊变压器 …… 47

3.4.1　自耦变压器 …… 47

3.4.2　电压互感器 …… 48

3.4.3　电流互感器 …… 48

思考题及习题 …… 49

**第四章　直流电机** …… 50

4.0　概述 …… 50

4.1　直流电机的基本原理和结构 …… 50

4.1.1　基本原理 …… 50

4.1.2　基本结构 …… 51

4.2　直流电机的电枢绕组和磁场 …… 53

4.2.1　直流电机的电枢绕组 …… 53

4.2.2　直流电机的磁场 …… 55

4.3　直流电机的电枢电动势、电磁转矩 …… 56

4.3.1　直流电机的电枢电动势 …… 56

4.3.2　直流电机的电磁转矩 …… 56

4.4　直流发电机 …… 57

4.4.1　直流发电机的型式 …… 57

4.4.2　直流发电机的基本电磁关系 …… 58

4.4.3　直流发电机的外特性 …… 59

4.4.4　直流测速发电机 …… 60

4.5　直流电动机 …… 62

4.5.1　直流电动机的基本方程和

功率平衡方程式 …… 63
4.5.2 直流电动机的运行特性 …… 64
4.5.3 直流电动机的使用 …… 65
4.5.4 直流电动机的调速控制系统 …… 69
4.6 直流伺服电动机 …… 81
4.6.1 直流伺服电动机的传递函数和动态特性 …… 81
4.6.2 直流伺服电动机的控制 …… 83
4.6.3 直流伺服电动机的额定值 …… 87
4.7 特殊直流电动机 …… 88
4.7.1 直流力矩电动机 …… 88
4.7.2 无刷直流电动机 …… 89
4.7.3 直流直线伺服电动机 …… 91
思考题及习题 …… 94
**第五章 交流异步电动机** …… 96
5.0 概述 …… 96
5.1 交流异步电动机的结构和磁场 …… 96
5.1.1 交流异步电动机的结构 …… 96
5.1.2 交流异步电动机的磁场 …… 98
5.2 异步电动机工作原理 …… 102
5.2.1 异步电动机的工作原理、电动势和功率平衡方程式 …… 102
5.2.2 异步电动机的机械特性 …… 106
5.3 异步电动机的使用 …… 108
5.3.1 异步电动机的额定值 …… 108
5.3.2 异步电动机的起动 …… 108
5.3.3 异步电动机的反转 …… 110
5.3.4 异步电动机的制动 …… 110
5.3.5 异步电动机的调速 …… 111
5.4 交流伺服电动机 …… 112
5.4.1 交流伺服电动机的结构和工作原理 …… 113
5.4.2 交流伺服电动机的运行分析 …… 114
5.4.3 交流伺服电动机的移相方法 …… 118
5.4.4 应用举例 …… 120
5.4.5 单相异步电动机 …… 121
5.4.6 直线异步电动机 …… 122
5.5 交流异步测速发电机 …… 124
5.5.1 基本结构 …… 124
5.5.2 工作原理 …… 125
5.5.3 主要技术指标 …… 125
5.6 异步电动机的控制 …… 126
5.6.1 异步电动机的继电器—接触器控制 …… 126
5.6.2 异步电动机的无触点控制 …… 132
5.6.3 异步电动机的可编程控制 …… 136
5.6.4 异步电动机的速度控制 …… 144
思考题及习题 …… 152
**第六章 自整角机** …… 154
6.0 概述 …… 154
6.0.1 自整角机的分类 …… 154
6.0.2 自整角机的基本结构 …… 156
6.1 控制式自整角机 …… 157
6.1.1 控制式自整角机的工作原理 …… 157
6.1.2 控制式自整角机的主要技术指标 …… 162
6.2 力矩式自整角机 …… 163
6.2.1 力矩式自整角机的工作原理 …… 164
6.2.2 力矩式自整角机的主要技术指标 …… 165
思考题及习题 …… 166
**第七章 旋转变压器** …… 167
7.0 概述 …… 167
7.1 正、余弦旋转变压器 …… 168
7.1.1 空载时的工作原理 …… 168
7.1.2 负载时的工作分析 …… 168
7.1.3 正、余弦旋转变压器的补偿 …… 169
7.2 线性旋转变压器 …… 171
7.3 旋转变压器的应用 …… 171
7.3.1 远距离同步角度传递 …… 171
7.3.2 矢量与三角运算 …… 173
7.4 感应同步器 …… 175
7.4.1 直线式感应同步器 …… 175
7.4.2 圆盘式感应同步器 …… 177
7.4.3 感应同步器的工作状态与应用 … 178
思考题及习题 …… 180
**第八章 步进电动机** …… 181
8.0 概述 …… 181
8.1 反应式步进电动机的工作原理 …… 182
8.1.1 单三相通电方式 …… 182
8.1.2 三相六拍通电方式 …… 183
8.1.3 三相双三拍制通电方式 …… 184
8.2 反应式步进电动机的基本特性 …… 184
8.2.1 静态运行特性 …… 184
8.2.2 单步运行状态 …… 187

8.2.3 步进电动机的连续运行 …… 189
8.3 直线步进电动机 …… 190
8.4 步进电动机的驱动电源及控制线路 …… 191
8.4.1 驱动电源与控制 …… 191
8.4.2 加减速控制 …… 197
8.4.3 计算机控制 …… 198
8.5 步进电动机主要性能指标及技术数据 …… 202
8.5.1 主要性能指标 …… 202
8.5.2 主要技术指标 …… 203
思考题及习题 …… 203
附录A 控制电机产品名称代号 …… 205
附录B 控制电机机座号 …… 206
附录C 控制电机使用环境条件 …… 206
附录D 控制电机电源频率和电压等级 …… 207
附录E 各种控制电机传递函数表 …… 207
附录F 部分电工器件名称和代号 …… 208
参考文献 …… 209

# 绪　论

1. 自动控制元件在机电一体化装置中的地位

自人类发明和使用电开始，机械和电就结成了密不可分的一体。随着科学技术的飞速发展，机电一体化技术诞生是各种技术互相渗透、结合的必然结果。机电一体化并不是简单的机电的组合，而是由信息处理、检测和控制系统等有机地结合。机电一体化产品种类繁多，从初级的电子钟表、电子快门、汽车电子装置、数控机床等到高级的工业机器人、大型飞机、导弹、人造卫星等。尽管机电一体化产品的大小不一，功能各异，结构有别，但其基本组成均包括机械本体、检测系统、信息处理环节、执行机构和接口 5 个部分，如图 0-1 所示。

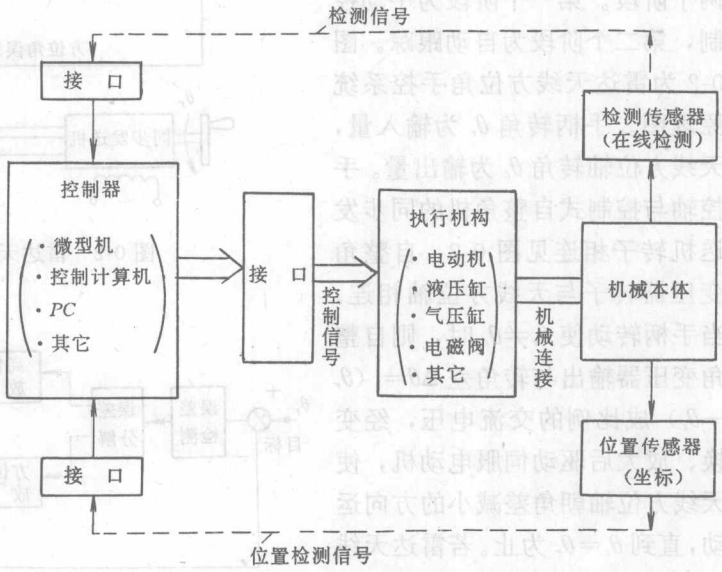



图 0-1　机电一体化装置的基本组成

(1) 机械本体　它是机电一体化产品功能的集中体现。

(2) 检测系统　各种传感器是检测部分的核心，它相当于人的感觉器官，完成各种信息的搜集、整理，送给信息处理环节去加工、处理。

(3) 信息处理环节　它相当于人的头脑，它由一般的电子装置、可编程控制器、单片机、微型计算机等来承担。传感器检测的各种信息送到这里进行存贮、运算、交换等加工后经接口电路向执行机构发出命令，完成必要的动作。

(4) 执行机构　这部分相当于人的手足，它根据信息处理环节发出的命令，完成所规定的动作。它包括各种电磁电器、各种电机、电磁阀、气（液）压缸等。

(5) 接口　它相当于联络员，将其它 4 部分有机地连接成一个整体，主要起信息交换和电平转换的作用。

由此可知，任何一个机电一体化产品都离不开大量的检测、放大、执行元件，这些元件统称为自动控制元件。

自动控制元件种类繁多，它们的工作原理可以是基于物质的各种物理、化学性能，如光特性、电特性、磁特性、机械特性、化学特性等，而其中根据电磁原理而工作的自动控制元件称为电磁控制元件。它包括：电磁电器，如电磁铁、继电器、接触器等；电磁传感器，如电感式传感器、旋转变压器、自整角机、交直流测速发电机、电磁流量计等；各种电磁执行元件，如各种交直流电动机、步进电动机、电磁阀等。

电磁元件开发的历史悠久，人们对它的研究比较成熟，又因它是直接利用电能来进行工作的，与采用其它能源的元件相比，在信号的采集，转换、传递、控制与处理方面具有一系列的优点，因此，目前其品种最多，产量最高，性能可靠、稳定，应用最广泛。随着新材料、新工艺、新技术的出现及控制系统的发展，它也得到了越来越迅速的发展。

下面以三个实例，来进一步说明电磁元件在机电一体化装置中的地位和作用。

雷达天线控制系统　雷达天线控制系统的作用是使雷达天线的指向自动复现输入指令，以达到跟踪空中目标的目的。由于雷达天线在空中的指向由方位角和高低角二个参数所确定，所以控制系统分为二个通道，即高低角控制通道和方位角控制通道，两个通道工作原理和控制过程是相同的，所以下面仅介绍方位角控制通道。

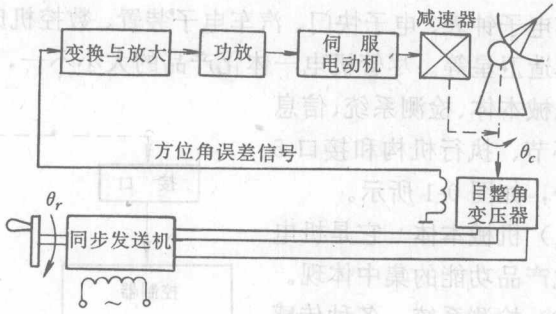



图 0-2　雷达天线方位角手控原理图

方位角控制通道控制过程分两个阶段。第一个阶段为手动控制，第二个阶段为自动跟踪。图 0-2 为雷达天线方位角手控系统原理图。手柄转角 $\theta_r$ 为输入量，天线方位轴转角 $\theta_c$ 为输出量。手控轴与控制式自整角机的同步发送机转子相连见图 0-2，自整角变压器转子与天线方位轴相连。当手柄转动使 $\theta_r \neq \theta_c$ 时，则自整角变压器输出与转角差 $\Delta\theta = (\theta_r - \theta_c)$ 成比例的交流电压，经变换、放大后驱动伺服电动机，使天线方位轴朝角差减小的方向运动，直到 $\theta_c = \theta_r$ 为止。若雷达天线操作员根据目标位置连续摇动转柄，则天线方位轴按照 $\theta_r$ 的规律跟随转动，直到跟上目标，图 0-3 为雷达天线自动控制系统原理框图，当雷达盯上目标后，雷达发射的电磁波经目标反射回来，雷达接收反射回来的电磁波信号后，经过相应的处理，分解为方位角和高低角信号，并通过相应的控制通道去控制雷达天线的方位角和高低角，使天线朝误差角减少的方向运动，直到完全对准目标。若目标连续飞行，则雷达天线跟随目标连续运动，实现对目标的自动跟踪。

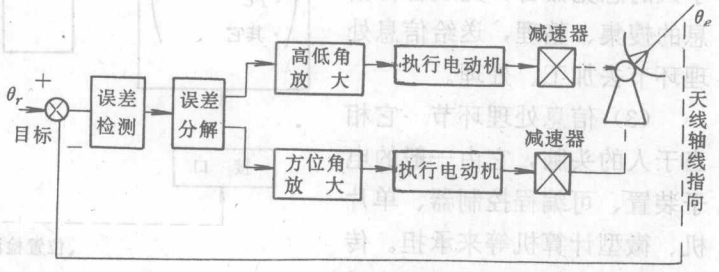



图 0-3　雷达天线自动控制系统原理框图

图 0-4 为机床的数字控制系统，在该系统中机床工作台的运动可以由纸带上的二进制信息来

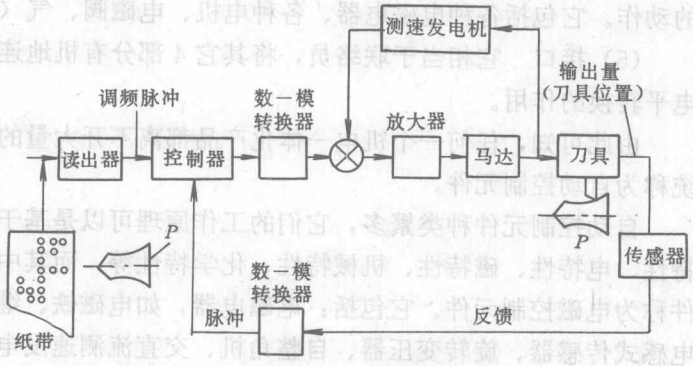



图 0-4　机床的数控系统原理图

控制。根据对工件 $p$ 的加工要求，在纸带上进行二进制编码。工作时，首先起动系统，于是纸带上的信息通过读出器送进系统，输入的调频脉冲信号与反馈脉冲信号进行比较，控制器根据脉冲信号的差值进行数学运算。如果在两个脉冲信号之间存在某一差值，此差值由数-模转换器变为模似信号，即一定数值的电压，经放大器放大后去驱动伺服电动机。刀架的位置由伺服电动机的输入信号控制，与刀具连结在一起的传感器，将刀具的运动变为电脉冲信号。只要在两个脉冲信号之间存在某一差值，便有电压输送到伺服电动机，以驱动刀具的运动，减小这一差值直到为零为止。

图 0-5 是典型的数字计算机控制系统方框图。该系统是由一组模拟传感器、一组模/数转换器、数字计算机、一组数/模转换器、一组模拟控制器和执行元件所组成。




图 0-5　典型的数字计算机控制系统原理框图

由此可见，自动控制元件与控制系统的关系是局部与整体的关系。一方面控制元件的性能和作用要服从于整个系统对它的要求，控制元件的性能好坏要看它能否满足系统的要求；另一方面控制元件的性能又直接制约了整个系统的性能。控制元件性能不佳或使用不当，整个系统的性能就无法提高，控制元件的发展又可以推动控制系统的发展。因此，对从事机电一体化技术的工程技术人员，不但要了解系统的整体，系统中各个元件的相互关系，而且对系统中的各个元件也必须熟悉，只有这样，才有可能在设计机电一体化装置时正确地选择，并合理地使用各种元件，使所设计的装置性能价格比高，运行稳定而可靠。

2. 电磁控制元件的分类

自动控制系统中最广泛应用的电磁元件是根据电磁原理工作的。从能量转换角度来看，它们是电能和机械能之间互相转换的器件。一般来说，机械能和电能之间不能直接相互转换，而是要通过中间媒介磁场才能实现，其工作过程可用图 0-6 来表示。因此，电磁元件就是指在磁场参与下进行能量和机电信息的传递或转换的自动控制元件。

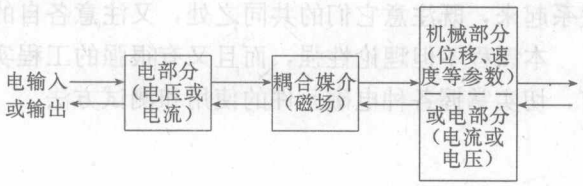



图0- 6　电磁元件工作过程图

在机电一体化装置中使用的电磁元件包括两大类，一类是常规的电磁元件，另一类是控制系统中使用的电磁元件。从基本结构和原理上来说，它们之间没有本质区别，但使用中两者的主要要求却不同，前者着重于效率等能量转换指标，而后者则要求高精度、高灵敏度和高可靠性。

对为数众多的电磁元件，可以按多种方式对它进行分类：

按它在机电一体化装置中的作用可分为：

① 功率元件　进行机电能量转换的电磁元件，如电磁阀，电磁铁，各类电机。

② 信号元件　进行机电信号转换的电磁元件，如各种电磁传感器，交、直流测速发电

机等。

按它们的功用可分为：

① 电磁器件。

② 电磁传感器。

③ 电机。

按产生磁场的电流可分为：

① 直流电磁元件。

② 交流电磁元件。

3. 本教材特点和如何学习本课程

本书作为非电类机电一体化专业本科生的必修技术基础课的教材，主要介绍各类电磁元件的基本构造、工作原理、特性及基本控制线路。机电一体化产品种类繁多，尽管机床是其中重要的一个方面，但仅局限于机床及其电气控制，将不符合深化教学改革提出的“拓宽专业，加强基础”的要求。因此本教材在总结各种机电一体化产品中电磁元件及其控制线路的基础上，模糊具体对象，而以各类电磁元件为核心，提供给读者的是一个个可拼接的板块。结合具体对象的应用实例介绍，提供给读者一个理论与实践相结合的蓝本，为进一步学习、分析和设计机电一体化产品打个基础。本教材通过摒弃一些陈旧的内容如熔断器、闸刀、按钮等，增加目前国内、外一些先进产品和技术，使教材内容尽可能与当今技术发展水平相接轨。

在内容安排上既考虑它是先修课（物理学、电路理论、电子学等）的延伸，适当地增加了交、直流磁路及其计算的内容。又要为后续课打好基础，因此给出了传递函数，开、闭环控制，数字控制，计算机在控制中的作用等一些基本概念。在交、直电机的章节中，本着从一般到特殊，从共性到个性的思维规律，先介绍电机的共同问题，再讨论控制电机的特殊问题。在控制线路部分遵循其发展规律，由简到繁，由浅入深。各类电磁元件的控制线路也有其共性及特性，为避免内容上的重复，教材中突出了其个性，这点请读者注意在学习中能举一反三，触类旁通。

电磁元件种类繁多，不可能也没有必要一一列举。本课程只是对部分典型的电磁元件进行比较深入的分析和研究，因此，从整个课程内容的系统性来讲，不像基础课那样各章节之间有严密的数理逻辑联系。但是各种电磁元件都是建立在基本的电磁规律的基础上的，它们的控制线路也有共同之处，在学习本课程时，应抓住此特点，将各种电磁元件及其控制线路联系起来，既注意它们的共同之处，又注意各自的特殊性。

本课程不但理论性强，而且又有很强的工程实践性。因此，在学习中一定要重视实践环节，切实掌握各种电磁元件的使用和测试方法。

# 第一章　磁路及其计算

电磁元件都是利用磁场作媒介来实现能量（或信息）传递（或转换）的装置。除某些容量很小的电磁元件的磁场是由永久磁铁产生的以外，在大多数情况下，磁场都是由电产生的。任何运动电荷周围空间除了存在电场以外，还存在磁场，磁场是物质的一种形态。根据产生磁场的电的性质不同，磁场可分为稳定磁场和交变磁场。对磁场完整的描述应是麦克斯威方程组，再加上充满磁场的不同介质材料的性能参数及几何形状。这是一个根据边界条件求解三维空间矢量微分方程的复杂问题。在工程上，如在各种电磁元件中，为了能用较小的电流产生较强的磁场，得到较大的磁通常把产生磁场的线圈绕在由铁磁物质制成的，具有一定形状的铁心上，由于铁磁材料导磁性能远比空气要好，使磁通主要集中在铁磁物质内，形成一条闭合的通路，而铁磁物质周围空间磁通极少。磁通的这种特殊的闭合路径称为磁路。通过这主要路径的磁通称为主磁通，用 $\Phi_o$ 表示。另外还有少量的磁通不在此路径通过称为漏磁通，用 $\phi_S$ 表示。图 1-1 为典型的电磁元件的磁路，它一般包括铁心和工作气隙两部分。在磁路几何尺寸不大，铁磁材料质地均匀情况下，可近似认为铁心各横截面上各点磁场强度相等，且与横截面垂直。根据磁场连续性原理，对这样的磁路，可以近似地用它们的几何中心线作为它的平均路径来进行描述和计算，如图中虚线所示。这样，在实际工程中的磁场问题就被简化为磁路问题。因此磁路计算是磁场计算的一种特殊情况，它是满足工程要求的近似的计算方法。

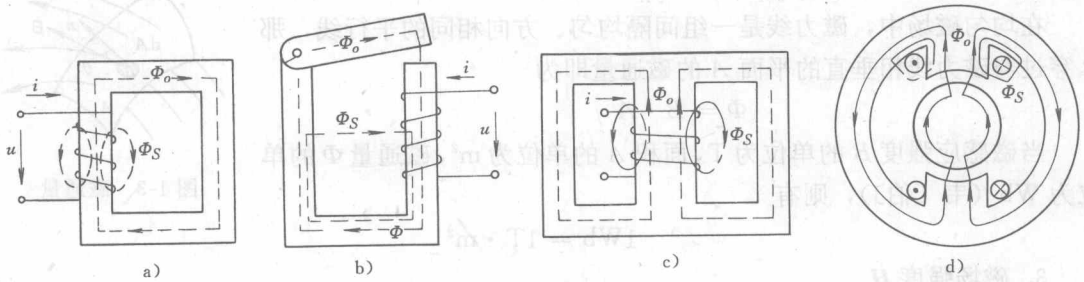



图 1-1　电磁元件的磁路

a）无气隙简单磁路　b）变气隙简单磁路　c）无气隙分支磁路　d）有气隙分支磁路

## 1.1　磁路的基本物理量和基本定律

磁路作为磁场的一种特殊情况，因此，磁路的基本物理量和基本定律都可直接从磁场的基本物理量和基本定律引伸而得到。

### 1.1.1　磁路的基本物理量

1. 磁感应强度 $\boldsymbol{B}$

磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 是表示空间某点磁场强弱和方向的物理量，它是一个矢量。磁场中某点的磁感应强度的大小规定为：当电荷在该点的运动方向与磁场方向垂直时，等于它所受的最大

磁场力和电荷量 $q$ 及其速度 $v$ 的乘积之比值。磁感应强度的方向就是该点的磁场方向，即放在该点处小磁针 $N$ 极所指的方向。在电磁元器件中，磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 与产生磁场的电流之间方向可用右手螺旋定则来确定。

磁感应强度的法定单位为 T（特〔斯拉〕），与非法定单位 G（高斯）的换算关系为：

$$1\mathrm{T} = 10^4\mathrm{G}$$

2. 磁力线、磁通量

可以在磁场中画出若干条曲线来描述磁场，这些曲线上的任一点的切线方向都和该点的磁场方向一致，这样的曲线称为磁力线或 $\boldsymbol{B}$ 线，如图 1-2 所示。磁力线有两个基本特征：第一，在任何磁场中每一条磁力线都是环绕电流的无头无尾的闭合线；第二，在任何磁场中，每一条闭合的磁力线的回转方向和所包围的电流方向符合右手螺旋法则。磁场中某点磁感应强度的大小等于垂直于磁感应强度矢量的单位面积内磁力线的条数，因此磁感应强度又称磁通密度，简称磁密。

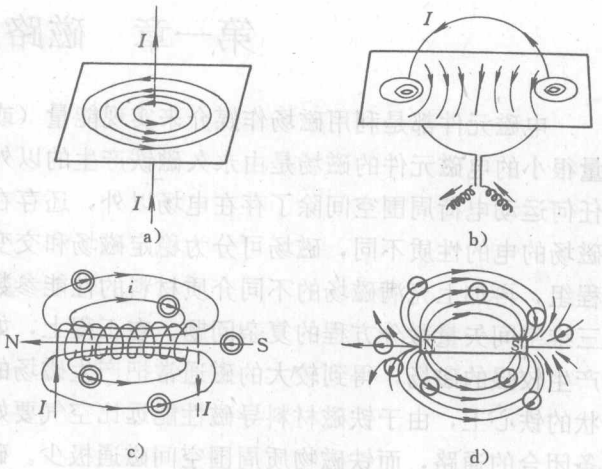



图 1-2　磁力线图

a）直电流的磁力线　b）圆电流的磁力线

c）螺管线圈的磁力线　d）永久磁铁的磁力线

通过磁场中一个给定面 $A$ 的磁力线条数称为通过这个面的磁通量，简称磁通，以 $\Phi$ 表示，如图 1-3 所示。这样 $\Phi = \int_A \boldsymbol{B}\mathrm{d}\boldsymbol{A} = \int_A B\cos\theta \mathrm{d}A$。

在均匀磁场中，磁力线是一组间隔均匀、方向相同的平行线，那么穿过与磁力线相垂直的平面 $A$ 的磁通量即为

$$\Phi = B \cdot A$$

当磁感应强度 $B$ 的单位为 T，面积 $A$ 的单位为 $\mathrm{m}^2$，磁通量 $\Phi$ 的单位为 Wb（韦〔伯〕），则有

$$1\mathrm{Wb} = 1\mathrm{T} \cdot \mathrm{m}^2$$

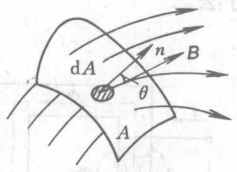



图 1-3　磁通量

3. 磁场强度 $\boldsymbol{H}$

磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 也是一个矢量。它定义为在有介质存在的情况下，磁场中某点的磁感应强度与该处介质磁导率 $\mu$ 的比值，即

$$\boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{B}}{\mu}$$

磁场强度也是用来表示磁场中各点磁力大小和方向的物理量，与磁感应强度不同的是它的大小与磁场中磁介质的性质无关，仅与产生磁场的电流大小和载流导体的形状有关。

磁场强度的单位为 A/m（安每米）或 A/cm。

4. 磁导率 $\mu$

用来表示物质导磁能力的物理量称为导磁系数或磁导率，记作 $\mu$。其单位为 H/m（亨每米）。

真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)。空气的磁导率 $\mu$ 近似等于 $\mu_0$。通常还采用某物质的

实际磁导率 $\mu$ 与真空磁导率的比值 $\mu_r=\mu/\mu_0$ 来表示该物质的导磁能力，称为相对磁导率，它是没有单位的。

### 1.1.2 磁路的基本定律

1. 磁通连续性定律

如图 1-4 所示，在磁场中有一个封闭曲面 $A$，那么通过该封闭曲面的总磁通量为零，其数学表达式为

$$\oint_A \boldsymbol{B}\mathrm{d}\boldsymbol{A} = \oint_A B\cos\theta \cdot \mathrm{d}A = 0 \tag{1-1}$$

如定义穿入该封闭曲面 $A$ 的磁通为负，穿出封闭曲面的磁通为正。那么由于每一条磁力线都是环绕电流的闭合曲线，因此有几条磁力线进入封闭曲面 $A$，必然也有同样数量的磁力线穿出封闭曲面，其总量也就为零。

如图 1-5 所示的由铁磁材料构成的分支磁路，由于磁场在各分支磁路内是均匀的，磁力线始终垂直于铁心各截面，所以

$$\Phi = \int_A \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{A} = B \cdot A$$

即

$$\Phi_1 = B_1 A_1,\ \Phi_2 = B_2 A_2,\ \Phi_3 = B_3 A_3$$

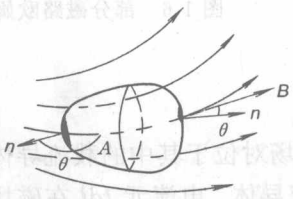



图 1-4　磁通连续性定律

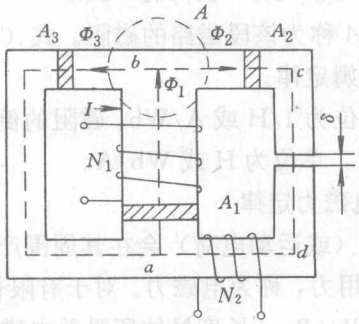



图 1-5　磁路的基尔霍夫第一定律

则对 $b$ 点而言，当忽略漏磁通时有

$$\Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_1 = 0$$

一般来说，汇集一处的各段磁路（分支磁路）中的磁通代数和等于零，即

$$\sum_i \Phi_i = 0 \tag{1-2}$$

上式称为磁路的基尔霍夫第一定律。

2. 安培环路定律

在介质磁导率为 $\mu$ 的磁场中，沿任意一条闭合路径 $l$，磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 的线积分等于这个闭合回路所包围的各个传导电流的代数和。当电流的方向与闭合路径积分方向符合右手螺旋关系时为正，否则为负。其表达式为

$$\oint_l \boldsymbol{H}\mathrm{d}\boldsymbol{l} = \sum_i I_i \tag{1-3}$$

在图 1-5 所示的 $abcda$ 闭合回路中，如取闭合路径方向与磁力线方向一致，由于各段磁路中磁场是均匀的，则 $\boldsymbol{H}_i\mathrm{d}\boldsymbol{l}_i = H_i\mathrm{d}l_i$，则安培环路定律此时可简化为

$$H_1l_{ab}+H_2l_{bc}+H_3l_{cd}+H_4l_{da}+H_\delta l_\delta=I_1N_1-I_2N_2$$

就一般情况而言，闭合回路中磁场强度与产生磁场的电流之间的关系可表达为

$$\sum_i H_il_i=\sum_K I_KN_K \tag{1-4}$$

式中 $H_il_i$ 称为磁场在该段磁路的磁压降（简称磁压）记作 $U_{m_i}$，磁压降的正方向与磁场方向相同。$I_KN_K$ 称为磁路的磁动势（简称磁势）用 $F_m$ 表示，它的正方向与电流一致，则式（1-4）可改写为

$$\sum_i U_{m_i}=\sum_K F_{m_K} \tag{1-5}$$

它称为磁路的基尔霍夫第二定律。

3. 部分磁路的欧姆定律

以一段磁路为例，设该段磁路是由磁导率为 $\mu$ 的均匀材料制成，其截面积为 $A$，长度为 $l$，磁路中的磁通为 $\Phi$，磁感应强度为 $B$，磁场强度为 $H$，如图 1-6 所示。各截面内磁感应强度大小相等，方向均垂直于截面，取路径方向与磁场强度方向一致，则有

$$H=\frac{B}{\mu},B=\frac{\Phi}{A}$$

所以

$$U_m=Hl=\Phi l/\mu A=\Phi R_m \tag{1-6}$$

式中 $R_m=l/\mu A$ 称为该段磁路的磁阻。式（1-6）称为该段磁路的欧姆定律。

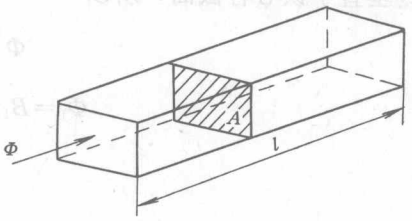



图 1-6　部分磁路欧姆定律

磁阻的单位为 1/H 或 A/Wb。磁阻的倒数称为磁导，用 $\Lambda$ 表示，单位为 H 或 Wb/A。

4. 安培电磁力定律

载流导体（或运动电荷）会在其周围产生磁场。磁场对位于其中的载流导体（或运动电荷）将产生作用力，称为电磁力。对于有限长度 $l$ 的载流导体。电流元 $I\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 在磁场中所受的电磁力为 $\mathrm{d}\boldsymbol{f}=I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{B}$，$l$ 长度导体所受总电磁力 $\boldsymbol{F}$ 为

$$\boldsymbol{F}=\int_l I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{B} \tag{1-7}$$

如图 1-7 所示的均匀磁场中，若载流导体为长 $l$ 的直导体，且与磁场相互垂直，则作用于导体上的电磁力为

$$F=BIl \tag{1-8}$$

电磁力的方向可由左手定则确定：伸开左手，使大姆指与其余四指垂直，掌心迎着磁力线，四指方向为电流方向，大姆指的指向为作用在导线上的电磁力的方向，图 1-7 中导线受力方向指向纸面，以⊕表示。

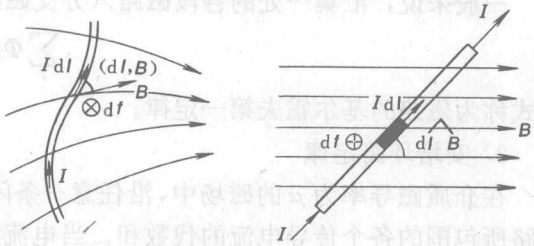



图 1-7　安培电磁力定律

式(1-8)中当磁感应强度 $B$ 的单位为 T，电流 $I$ 的单位为 A，导线长度 $l$ 单位为 m，则电磁力 $F$ 的单位为 N（牛〔顿〕）。

5. 电磁感应定律

（1）感应电流、电磁感应　在磁场中放入一个 $N$ 匝的闭合线圈，当该闭合线圈所包围面

积内的磁通量发生变化时，在这个闭合线圈内就会产生电流，这种电流称为感应电流。这种由于磁通量变化而在闭合导电回路内产生感应电动势和电流的现象称为电磁感应。

当感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋定则时，感应电动势 $e$ 的大小为

$$e = -N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \tag{1-9}$$

式中负号表示在感应电动势作用下线圈回路内有电流时，该电流产生的磁通起着阻止原来磁场变化的作用。当 $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t>0$ 时，$e$ 为负值，它企图减少磁通；当 $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t<0$ 时，$e$ 为正值，它企图使磁通增加。实际应用上式时，先在该闭合回路上任意假定一个电流的正方向，如图 1-8 中所示 $I$。然后规定如果回路所包围面积内的磁通和正向电流之间符合右手定则时为正，否则为负。如图中 $\Phi_0$ 为正。那么当穿过该面积 $A$ 的磁通量增加到 $\Phi_t$ 时$\left(\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}>0\right)$，则由式（1-9）可得出感应电流为负，即回路中感应电动势 $e_i$ 方向与假设的电流正方向相反。

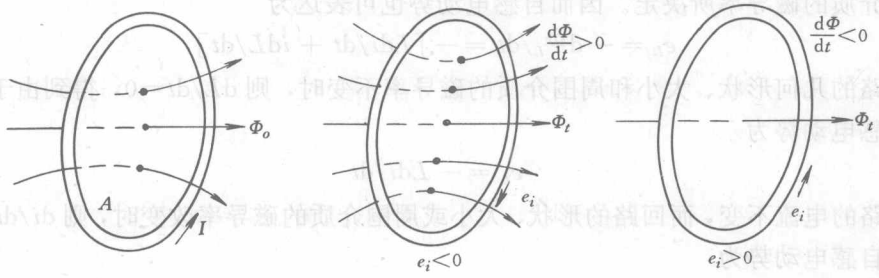



图 1-8　电磁感应定律的应用

当磁通 $\Phi$ 的单位为 Wb，时间 $t$ 的单位为 s 时，感应电动势 $e$ 的单位为 V。

根据磁通的定义 $\Phi=\int_A \boldsymbol{B}\mathrm{d}\boldsymbol{A}$ 可知，穿过闭合导电回路所包围面积内磁通量变化的原因存在两种情况

1）回路的位置、形状和大小不变，而回路所在处的磁感应强度随时间在变化，因此磁通量也随时间在变化。由此而引起的感应电动势称为感生电动势，在电磁元件中又称为变压器感应电动势。

2）回路所在的空间内磁感应强度的分布不随时间变化，但回路的位置、形状或大小在改变，此种情况下回路内的感应电动势称为动生电动势或切割电动势。如图 1-9 所示，在均匀磁场中有一个闭合导电回路 $abcd$，回路平面与磁感应强度 $B$ 垂直，图中⊕表示磁力线方向为进入纸面。其中 $ab$ 长度为 $l$ 的一段直导线它沿 $x$ 方向以速度 $v$ 匀速运动。当导线 $ab$、速度 $v$ 和磁感应强度 $B$ 三者互相垂直条件下，回路 $abcd$ 所包围面积中的磁通 $\Phi=Blx$，当导线 $ab$ 以速度 $v$ 相对磁场作匀速运动时，穿过该导电回路面积内磁通量的变化率 $\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(Blx)=Blv$。因此，当导线、运动速度和磁感应强度三者之间互相垂直时，单根导体作匀速运动所感应的电动势为

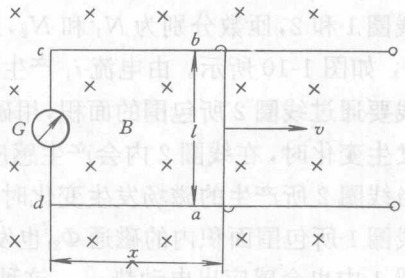



图 1-9　动生电动势

$$e_i = Blv \tag{1-10}$$

（2）自感电动势和自感　当电流流过一个闭合线圈回路时，该电流所产生的磁场必然链过这个线圈回路自身。当该回路的电流或者回路的形状、大小、周围介质发生变化时，都会引起穿过导电回路所包围面积内的磁通量的变化。由电磁感应定律知道：这种磁通量的变化同样会在闭合导电回路内感生电动势，这种现象称为导电回路的自感，所产生的电动势称为自感电动势。设导电回路有 $N$ 匝，则自感电动势 $e_L$ 为

$$e_L = -N\mathrm{d}\Phi_L/\mathrm{d}t = -\mathrm{d}\Psi_L/\mathrm{d}t \tag{1-11}$$

式中 $\Psi_L = N\Phi_L$ 称为线圈的自感磁链。

当通电线圈中的电流为 $i$，周围的磁介质为线性磁介质（即 $\mu$ 为常数），由毕奥-沙伐定律可知，该电流在空间任意一点所产生的磁场的大小和回路中的电流强度 $i$ 成正比。因此，磁通量 $\Phi$ 也和 $i$ 成正比，即 $\Psi_L = N\Phi = Li$。比例系数 $L$ 称为线圈的自感系数，简称自感。自感是线圈回路本身的一种属性，它与线圈所通的电流大小无关。它的大小仅由回路的几何形状、大小及周围介质的磁导率所决定。因而自感电动势也可表达为

$$e_L = -\mathrm{d}\Psi_L/\mathrm{d}t = -[L\mathrm{d}i/\mathrm{d}t + i\mathrm{d}L/\mathrm{d}t]$$

当回路的几何形状、大小和周围介质的磁导率不变时，则 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}t = 0$，得到由于电流变化引起的自感电动势为

$$e_L = -L\mathrm{d}i/\mathrm{d}t \tag{1-12}$$

当回路的电流不变，而回路的形状、大小或周围介质的磁导率改变时，则 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t = 0$，由此而引起的自感电动势为

$$e_L = -I\mathrm{d}L/\mathrm{d}t \tag{1-13}$$

上两式中负号同样表明自感电动势总是力图阻止磁通的变化。因此当电流与由它产生的磁通符合右手螺旋关系时，$e_L$ 和 $\Phi_L$ 也符合右手螺旋关系，$e_L$ 的正方向与式（1-9）的电动势正方向一致。

当磁介质为铁磁性材料时，由于铁磁材料的磁导率 $\mu_{Fe}$ 远大于空气磁导率，所以铁心线圈的自感比空心线圈大得多。又因铁磁材料的 $\mu_{Fe}$ 不是常数，所以随着铁心饱和程度增加，$\mu_{Fe}$ 减小，自感也将减小。

（3）互感现象和互感　设有两个邻近的载流闭合线圈 1 和 2，匝数分别为 $N_1$ 和 $N_2$，通入的电流为 $i_1$ 和 $i_2$，如图 1-10 所示。由电流 $i_1$ 产生的磁场一部分磁力线要通过线圈 2 所包围的面积，用磁通 $\Phi_{12}$ 表示。当 $\Phi_{12}$ 发生变化时，在线圈 2 内会产生感应电动势 $e_{12}$。同样，当线圈 2 所产生的磁场发生变化时，它所产生的通过线圈 1 所包围面积内的磁通 $\Phi_{21}$ 也发生变化，从而在线圈 1 中也会感应出电动势 $e_{21}$，这种现象称为互感现象，所感应的电动势称为互感电动势，它们分别为

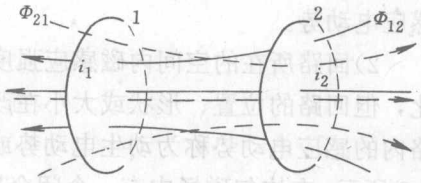



图 1-10　互感现象

$$\left.\begin{aligned} e_{12} &= -N_2\mathrm{d}\Phi_{12}/\mathrm{d}t = -\mathrm{d}\Psi_{12}/\mathrm{d}t \\ e_{21} &= -N_1\mathrm{d}\Phi_{21}/\mathrm{d}t = -\mathrm{d}\Psi_{21}/\mathrm{d}t \end{aligned}\right\} \tag{1-14}$$

式中 $\Psi_{12}$，$\Psi_{21}$ 称为互磁链。

当两个线圈是放在线性磁介质中时，则有