绪　论

0.1　电机和电力拖动技术的发展及在国民经济中的作用

电能是能量的一种形式。与其他形式的能量相比，它具有明显的优越性，适用于大量生产、集中管理、远距离传输和自动控制。电机就是一种将电能与机械能相互转换的电磁机械装置。因此，电机一般有两种应用形式。第一种是把机械能转换为电能，称之为发电机，它通过原动机先把各类一次能源蕴藏的能量转换为机械能，然后再把机械能转换为电能，最后经输电、配电网络送往城市各工矿企业、家庭等各种用电场合。第二种是把电能转换为机械能，称之为电动机，它用来驱动各种用途的生产机械和其他装置，以满足不同的要求。电动机根据应用场合的要求和电源的不同，可分为直流电动机、交流感应电动机（也称交流异步电动机）和交流同步电动机。另外，运用电磁感应原理工作的变压器和控制电机也属于电机的类别。变压器是将一种交流电压、电流转换成同频率的另一种交流电压、电流的静止电器。控制电机的主要职能是在电气机械系统中进行调节、放大和控制。

电机是随着生产力的发展而发展的，反过来，电机的发展又促进了社会生产力的不断提高。从19世纪末起，电动机就逐渐代替蒸汽机作为拖动生产机械的原动机。近一个世纪来，电机的基本结构似乎并没有大的变化，但是电机的类型却有了很大发展，在运行性能、经济指标等方面也都有了很大的改进和提高，而且随着自动控制系统和计算装置的发展，在一般旋转电机的理论基础上又发展出许多种高可靠性、高精度、快速响应的控制电机，成为电机学科的一个独立分支。

我国的电机制造工业自新中国成立以来发展很快。建国以前，国内的电机制造厂主要做些装配和修理工作，生产的电机容量小，如发电机的单机容量不超过200kW，电动机不超过230kW，变压器不超过2 000kVA。建国以后我国的电机制造工业从仿制进入到自行实验研究和自行设计阶段，50多年来我们已经建立了自己的电机工业体系，有了统一的国家标准和统一的产品系列。我国生产的各种类型的电机不仅能满足国民经济各部门的需要，而且有的产品已经达到世界先进水平。

电动机拖动生产机械的运转称为电力拖动（或称为电气传动）。电力拖动系统一般由控制设备、电动机、传动机构、生产机械和电源五部分组成，它们之间的关系如图0－1所示。

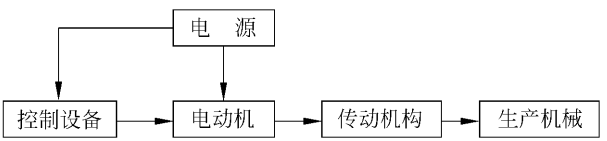

图0－1　电力拖动系统的组成

在国民经济各部门中，广泛地使用着各种各样的生产机械，而这些生产机械都需要有原动机拖动才能正常工作。目前拖动生产机械的原动机一般采用电动机。这是由于电

动机效率高,运转经济,而且电动机的种类和形式很多,可以充分满足各种不同类型的生产机械要求;同时电动机易于操作和控制,可以实现遥控和自动控制。

关于应用各种电动机拖动各种生产机械的电力拖动技术,其发展也是有个过程的。最初电动机拖动生产机械是通过天轴实现的,就是用一台电动机通过天轴及机械传动系统拖动一组生产机械,称为成组拖动。它的能量损耗大,生产效率低,劳动条件差,而且容易出事故。一旦电动机发生故障,则成组的生产机械将停车,甚至整个车间的生产可能停顿。这种陈旧、落后的拖动技术现在已经淘汰了。

从 20 世纪 20 年代起,开始采用由一台电动机拖动一台生产机械的系统,称为单电动机拖动系统。与成组拖动相比,它省去了大量的中间传动机构,使机械结构大大简化,提高了传动效率,增强了灵活性。由于电机与生产机械在结构上配合密切,因而可以更好地满足生产机械的要求。

随着生产技术的发展和生产规模的扩大,制造出了各种大型的复杂机械设备,在一台生产机械上就具有多个工作机构,同时运动的形式也相应增多,这时如果仍由一台电动机拖动,则生产机械内部的传动机构就会变得异常复杂。因此,从 30 年代起,开始发展采用多电动机拖动系统,即一台生产机械中的每一个工作结构分别由一台电动机拖动,这样不仅大大简化了生产机械的机械结构,而且可以使每一工作结构各自采用最合理的运动速度,进一步提高生产效率。目前较大型的生产机械如龙门刨床、摇臂钻、铣床等,都是采用多电动机拖动系统。

生产的发展,对拖动系统又提出更高的要求,如要求提高加工的精度和工作的速度,要求快速启动、制动和逆转,实现很宽范围内的调速及整个生产过程的自动化等,这就需要有一整套自动控制设备组成自动化的电力拖动系统。而这些高要求的拖动系统随着自动控制理论的不断发展,半导体器件和电力电子技术的采用,以及数控技术和计算机技术的发展与采用,正在不断地完善和提高。

综上所述,电力拖动技术发展至今,它具有许多其他拖动方式无法比拟的优点。它启动、制动、反转和调速的控制简单、方便、快速且效率高;电动机的类型多,且具有各种不同的运行特性来满足各种类型生产机械的要求;整个系统各参数的检测和信号的变换与传送方便,易于实现最优控制。因此,电力拖动已成为国民经济电气自动化的基础。

0.2 本课程的性质、内容及任务

“电机与电力拖动”是将电机学和电力拖动基础有机结合起来的一门课程。它是工业电气自动化、电气技术、供用电技术和机电一体化等电类专业的一门主要技术基础课。其内容主要包括直流电机及其电力拖动、变压器、三相感应电动机及其电力拖动、单相感应电动机和三相同步电动机、控制电机和电力拖动系统电动机的选择。

本课程的任务主要是使学生掌握电机的基本知识、基本理论、基本计算方法和一般的应用问题,从而为后续专业课的学习打好基础,并为学生在未来的技术工作中能分析和解决在电机方面所遇到的问题打好初步基础。

本课程的基本要求是:了解电机的基本结构,掌握电机的工作原理和分析电机拖动

系统的基本理论，掌握电机正常运行时的稳态性能，熟悉电机参数、电动势平衡方程式、磁动势平衡方程式、相量图和等效电路等分析方法。

本课程既具有基础性，又具有专业性。它运用物理、电工基础等基础课的基本理论来分析研究各类电机内部的电磁物理过程，从而得出各类电机的一般规律及其各异的特性。然而，它又与物理、电工基础等基础课的性质不同。

首先，它所研究的对象是实物，是一个电的、磁的、机械的综合体。因此要求学生(1) 要清楚机械实物的具体结构；(2) 要弄清电机内主要电磁物理量的特性及相互关系，并能用方程式、相量图和等效电路这三种主要方式表示它；(3) 要能运用这些特性和关系结合具体条件对电机的稳态运行进行初步的分析。这也是本课程的主要任务或总体要求。

其次，本课程前后的连贯性强。各种电机都存在共性，例如，各种电机的工作原理都是以电磁感应定律和载流导体在磁场中受力作为基础的，这就决定了在讲后面的内容时，要用到前面所学的知识。这就要求学生不但要掌握前面所学的基本理论，而且在学后续内容时要善于比较找出不同电机的共同处和不同点，以便更好地掌握各类电机的特点。

最后，本课程以定性分析为主。这就要求学生改变以往以套公式算题就算完成学习任务的学习方法，而把学习重点放在课后及时复习、钻研教材；在掌握电机中主要物理量的特性及相互关系上，结合具体的条件，对电机的运行进行分析，即认真思考章节后的习题和思考题，培养分析问题和解决问题的能力，并且勤于总结。

0.3　电机理论分析的部分基础知识

电机是通过电磁感应原理来实现能量转换的机械装置，因此，电和磁是构成电机的两大要素，缺一不可。电在电机中主要以路的形式出现，即由电机内的线圈、绕组构成电机的电路；对于电路的理论，一般都较熟悉，在这里就不再介绍了。磁在电机中是以场的形式存在的，但在工程分析计算时，为了方便起见，常把磁场的问题简化为磁路的问题来处理。与电路相比，一般对磁路较生疏，因此，有必要在此作简要回顾并给以适当延伸。

0.3.1　磁场的概念

描述磁场的主要物理量有磁感应强度(或磁通密度)B、磁通 Φ 和磁场强度 H。

1. 磁感应强度(或磁通密度)B

带电的导体周围存在着磁场，描述磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度 B，因此 B 是矢量。为了形象地描绘磁场，磁力线常被采用。磁力线是闭合的曲线。它在磁场外部由 N 极指向 S 极；而在磁场内部，又由 S 极指向 N 极。图 0-2 画出了用磁力线表示的载流长导线、线圈和螺线管周围的磁场。

磁力线的方向与产生它的电流的方向遵守右手螺旋定则，并且规定磁力线上的每一点的切线方向就是该点的磁感应强度 B 的方向。同时磁力线的疏密程度常被用来表示磁

感应强度 B 的大小，且规定，通过磁场中某点处垂直于 B 的单位面积上的磁力线数等于该点 B 的数值。

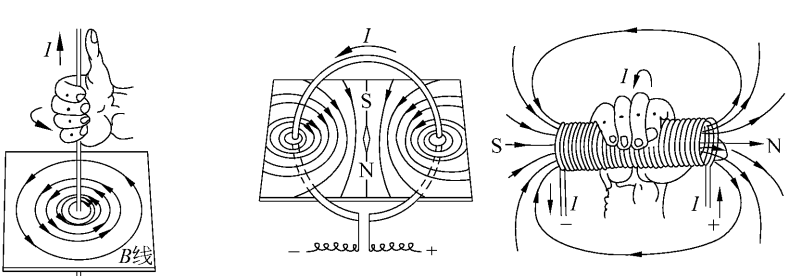

图 0－2　用磁力线表示的载流长导线、线圈和螺线管周围的磁场

(a) 载流长导线；(b) 线圈；(c) 螺线管

2. 磁通 Φ

穿过某一截面 A 的磁感应强度 B 的通量，即穿过截面 A 的磁力线数称为磁感应通量，简称磁通，用 Φ 表示。在均匀磁场中，如果截面 A 与 B 垂直，则磁通 Φ 和磁感应强度 B 的数值关系为

$$\Phi = BA \tag{0-1}$$

或

$$B = \frac{\Phi}{A} \tag{0-2}$$

因此，B 又为单位面积上的磁通，称为磁通密度，简称磁密。在国际单位制中，截面 A 的单位为平方米，用符号 m^2 表示；磁通 Φ 的单位为韦[韦伯]，用符号 Wb 表示；B 的单位为特[特斯拉]，用符号 T 表示，并且 $1\mathrm{T} = 1\mathrm{Wb/m}^2$。

3. 磁场强度 H

表征磁场性质的另一个基本物理量是磁场强度 H，H 也是矢量，其单位为安 / 米，用符号 A/m 表示。它与磁感应强度 B 的数值关系为

$$H = \frac{B}{\mu} \tag{0-3}$$

式中，μ 为导磁介质的磁导率。在电机中应用的介质，一般按其磁性能分为铁磁材料和非铁磁材料。如空气、铜、铝和绝缘材料等，为非铁磁材料，它们的磁导率可认为等于真空的磁导率 μ_0，真空的磁导率 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{H/m}$。铁磁材料的磁导率远大于真空的磁导率，如铸钢的磁导率 μ 约为 μ_0 的 1 000 倍，各种硅钢片的磁导率 μ 约为 μ_0 的 6 000 ～ 7 000 倍。

导电体和非导电体的电导率之比的数量级可达 10^{16} 之大，所以电流沿导电体流通，则称非导电体为绝缘体。与导电材料不同，铁磁材料与非铁磁材料的磁导率之比的数量级仅为 $10^3 \sim 10^5$，所以磁力线不仅流经铁磁材料，而且有一小部分流经非铁磁材料。因

此，除超导体外不存在磁绝缘的概念。实际上，磁是以场的形态存在的。

0.3.2　磁路的基本定律

在磁路的分析和计算时，常用到安培环路定律、磁路欧姆定律、磁路的基尔霍夫第一定律和第二定律。

1. 安培环路定律

在磁场中，磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 沿任意闭合磁回路 L 的线积分值 $\oint_L \boldsymbol{H}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 等于该闭合磁回路所包围的总电流 $\sum i$（代数和），这就是安培环路定律，也称全电流定律，用公式表示为

$$\oint_L \boldsymbol{H}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \sum i \tag{0-4}$$

式中，若电流的正方向与闭合回路 L 的环行方向符合右手螺旋定则时，则 i 取正号，否则取负号。例如在图 0-3 中，i_2 取正号，i_1 和 i_3 取负号，故有 $\oint_L \boldsymbol{H}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = -i_1 + i_2 - i_3$。

若磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 沿着回路 L 的方向总在切线方向且各点的大小相等，同时闭合回路所包围的总电流是由通入电流 i 的 N 匝线圈所提供，此时式(0-4)可简写为

$$HL = Ni \tag{0-5}$$

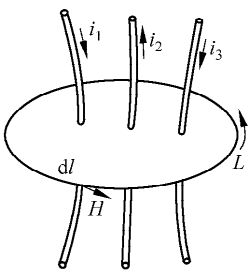

图 0-3　安培环路定律

2. 磁路欧姆定律

假定有一个无分支铁心磁路，如图 0-4(a) 所示，铁心上绕有通入电流 i 的 N 匝线圈，铁心截面积为 A，磁路的平均长度为 l，材料的磁导率为 μ。若忽略漏磁通，并认为各截面上的磁通密度均匀且垂直于各截面，然后，将式(0-3)和式(0-2)代入式(0-5)可得

$$Ni = \frac{B}{\mu}l = \Phi\frac{l}{\mu A} \tag{0-6}$$

或

$$F = \Phi R_{\mathrm{m}} = \frac{\Phi}{\Lambda} \tag{0-7}$$

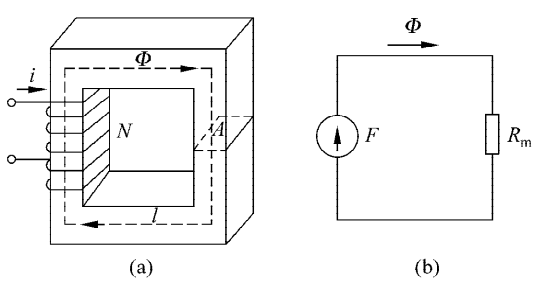

图 0-4　无分支铁心磁路

(a) 无分支铁心磁路；(b) 模拟电路图

式中，$F = Ni$ 为作用在铁心磁路上的安匝数，称为磁路的磁动势，单位为安匝或安，用符号 A 表示；$R_{\mathrm{m}} = l/\mu A$ 为磁路的磁阻，单位为 A/Wb；$\Lambda = 1/R_{\mathrm{m}}$ 为磁路的磁导，单位为 Wb/A。

式(0-7)表明，作用在磁路上的磁动势 F 等于磁路内的磁通 Φ 乘以磁阻 R_{m}，此关系与电路中的欧姆定律在形式上十分相似，因此，式(0-7)称为磁路的欧姆定

律。这里，磁路的磁动势 F 被比拟为电路的电动势 E，磁通 Φ 被比拟为电流 I，磁阻 R_m 和磁导 Λ 分别被比拟于电阻 R 和电导 G。图 0－4(b) 表示相应的模拟电路图。

磁阻 R_m 与磁路的平均长度 l 成正比，与磁路的截面积 A 及磁路材料的磁导率 μ 成反比。需要注意的是，铁磁材料的磁导率 μ 不是一个常数，所以由铁磁材料构成的磁路，其磁阻也不是常数，而是随着磁路中磁通密度 $\dot{B}$ 的大小而变化，这种情况被称为非线性。

3. 磁路的基尔霍夫第一定律

如果铁心不是一个简单回路，而是带有并联分支的分支磁路，如图 0－5 所示，则当中间铁心柱上加有磁动势 F 时，磁通的路径将如图中虚线所示。若令进入闭合面 A 的磁通为负的，从闭合面 A 穿出的磁通为正的，则有

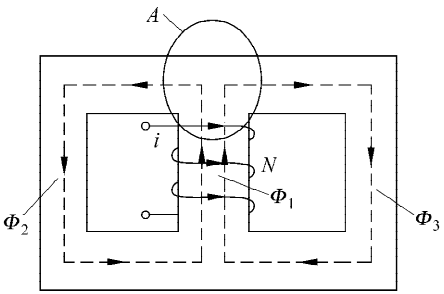

图 0－5　磁路的基尔霍夫第一定律

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

或

$$\sum\Phi=0 \qquad (0-8)$$

式(0－8) 表明，穿出(或进入) 任一闭合面的总磁通恒等于零(或者说，进入任一闭合面的磁通恒等于穿出闭合面的磁通)，这就是磁通连续性定律。它可比拟于电路中的基尔霍夫第一定律 $\sum i=0$，因此该定律称为磁路的基尔霍夫第一定律。

4. 磁路的基尔霍夫第二定律

电机和变压器的磁路总是由数段不同截面、不同铁磁材料的铁心组成，而且还含有气隙。磁路计算时，总是把整个磁路分成若干段，每段为同一材料、相同截面，且磁通密度相等，则磁场强度也相等。如图 0－6 所示，磁路由三段组成，其中两段为截面积不同的铁磁材料，第三段为气隙。若铁心上的励磁磁动势为 $F(F=Ni)$，则根据安培环路定律和磁路欧姆定律有

$$Ni=\sum_{k=1}^{3}H_kl_k=H_1l_1+H_2l_2+H_\delta\delta=\Phi_1R_{m1}+\Phi_2R_{m2}+\Phi_\delta R_{m\delta} \qquad (0-9)$$

式中，l_1 和 l_2 分别为第一和第二段铁心的长度，其截面积分别为 A_1 和 A_2；δ 为气隙长度；H_1 和 H_2 分别为第一和第二段磁路内的磁场强度；H_δ 为气隙内的磁场强度；Φ_1 和 Φ_2 分别为第一和第二段铁心内的磁通；Φ_δ 为气隙内的磁通；R_{m1} 和 R_{m2} 分别为第一和第二段铁心磁路的磁阻；$R_{m\delta}$ 为气隙的磁阻。

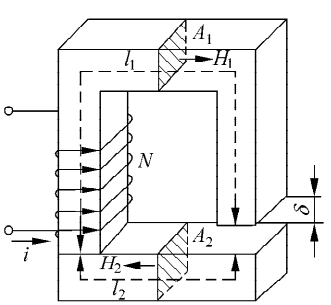

图 0－6　磁路的基尔霍夫第二定律

由于磁场强度也定义为单位长度上的磁位降，则 H_kl_k 也是一段磁路上的磁位降，又 Ni 是作用在磁路上的总磁动势，因此式(0－9) 表明，沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁路磁位降的代数和。它可比拟于电路中的基尔霍夫

第二定律，因此该定律称为磁路的基尔霍夫第二定律。可以看出，此定律实际上是安培环路定律的另一种表达形式。

需要注意，磁路与电路的比拟仅是一种数学上的类似，而不是物理本质上的相似。

0.3.3　铁磁材料的磁化特性

为了在一定的励磁磁动势作用下能激励较强的磁场，电机和变压器的铁心常采用磁导率较高的铁磁材料制成。下面介绍铁磁材料的磁化特性。

1. 铁磁材料的磁化

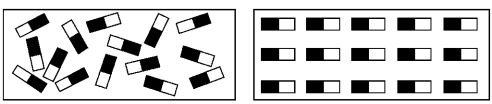

图 0－7　磁畴

(a) 未磁化；(b) 磁化后

铁磁材料包括铁、镍、钴等以及它们的合金。铁磁材料在外磁场中呈现很强的磁性，此现象就称为铁磁材料的磁化现象。铁磁材料能被磁化，是因为在它内部存在着许多很小的被称为磁畴的天然磁化区，如图 0－7 所示（图中磁畴用一些小磁铁来形象表示）。在铁磁材料未放入磁场之前，这些磁畴杂乱无章地排列着，其磁效应相互抵消，对外部不呈磁性，如图 0－7(a) 所示；当铁磁材料放入磁场后，在外磁场的作用下，磁畴的轴线将趋于一致（如图 0－7(b) 所示），由此形成一个附加磁场，叠加在外磁场上，使合成磁场大大增强。由于磁畴所产生的附加磁场将比非铁磁材料在同一磁场强度下所激励的磁场强得多，所以铁磁材料的磁导率要比非铁磁材料的大得多。

磁化是铁磁材料的一种特性。

2. 磁化曲线和磁滞回线

铁磁材料的磁化特性可由磁化曲线和磁滞回线来表示。

(1) 起始磁化曲线

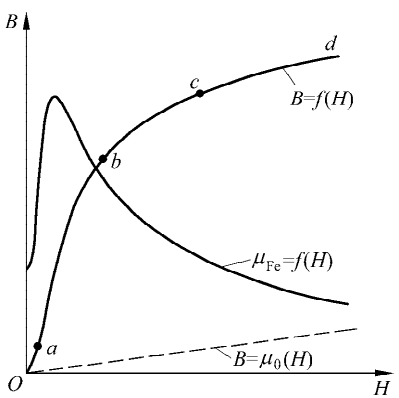

图 0－8　铁磁材料的起始磁化曲线

在非铁磁材料中，磁通密度 B 和磁场强度 H 之间呈线性关系，如图 0－8 中虚线所示，其斜率就是 μ_0。铁磁材料的 B 和 H 之间呈非线性关系，曲线 $B=f(H)$ 就称为起始磁化曲线，如图 0－8 所示。

起始磁化曲线基本上可以分为四段：开始磁化时，外磁场 H 较弱，磁通密度 B 增加得不快，如图 0－8 中 oa 段所示；随着外磁场 H 的增强，材料内部大量磁畴开始转向，趋向于外磁场方向，此时磁通密度 B 值增加得很快，如图中 ab 段所示；若继续增大外磁场 H，由于大部分磁畴已趋向外磁场方向，可转向的磁畴越来越少，所以磁通密度 B 值增加得越来越慢，如图中 bc 段所示，这种现象称为饱和；达到饱和后，磁化曲线基本上成为与非铁磁材料的 $B=\mu_0 H$ 特性相平行的直线，如图中 cd 段所示。磁化曲线开始拐弯的点（图 0－8 中 b

点）称为膝点。

由于铁磁材料的磁化曲线不是一条直线，所以 $\mu_{Fe}=B/H$ 也随 H 值的变化而变化，如图 0－8 中所示的曲线 $\mu_{Fe}=f(H)$。

设计变压器和电机时，为使主磁路内得到较大的磁通而又不过分增大励磁磁动势，通常把铁心内的工作磁通密度选择在膝点附近。

（2）磁滞回线

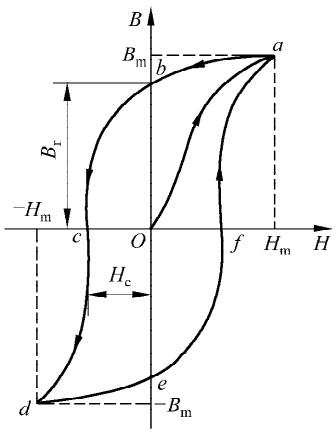

图 0－9　铁磁材料的磁滞回线

将铁磁材料进行周期性磁化，磁通密度 B 和磁场强度 H 之间的变化关系就会变成如图 0－9 所示的曲线 $Oabcdefa$。由图可见，当磁场强度 H 开始从零增加到 H_m 时，B 也相应地从零增加到 B_m。若此时逐渐减少磁场强度 H，则磁通密度 B 值将沿曲线 ab 下降。当 $H=0$ 时，B 值并不等于零，而等于 B_r。这种去掉外磁场之后，铁磁材料内仍有保留的磁通密度 B_r 称为剩余磁通密度，简称剩磁。要使 B 值从 B_r 减少到零，必须加上相应的反向磁场，此反向磁场强度称为矫顽力，用 H_c 表示。B_r 和 H_c 是铁磁材料的两个重要参数。铁磁材料所具有的这种磁通密度 B 的变化滞后于磁场强度 H 变化的现象叫做磁滞。呈现磁滞现象的 B-H 闭合回线称为磁滞回线，如图 0－9 中所示的曲线 $abcdefa$。

磁滞现象是铁磁材料的另一种特性。

（3）基本磁化曲线

对同一铁磁材料，选择不同的磁场强度 H_m 进行反复磁化，可得到一系列大小不同的磁滞回线，如图 0－10 所示。再将各磁滞回线的顶点连接起来，所得到的曲线称为基本磁化曲线或平均磁化曲线。基本磁化曲线不是起始磁化曲线，但差别不大。直流磁路计算时所用的磁化曲线就是基本磁化曲线。

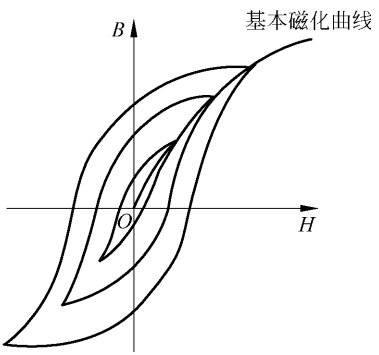

图 0－10　基本磁化曲线

3. 铁心损耗

铁心损耗是指磁滞损耗和涡流损耗。

（1）磁滞损耗 p_h

当铁磁材料置于交变磁场中时，材料将被反复交变磁化，与此同时，磁畴间相互不停地摩擦并消耗能量，从而造成损耗，这种损耗被称为磁滞损耗。

分析表明，磁滞损耗 p_h 与磁场的交变频率 f、铁心的体积 V 和磁滞回线所包围的面积成正比。实验证明，磁滞回线所包围的面积与最大磁通密度 B_m 的 n 次方成正比，故磁滞损耗可写成

$$p_h=C_h f B_m^n V \qquad (0-10)$$

式中，C_h 为磁滞损耗系数，其大小取决于材料的性质；对一般的硅钢片，$n=1.6\sim2.3$。由

于硅钢片磁滞回线的面积小，故电机和变压器的铁心常用硅钢片叠成。

(2) 涡流损耗

由于铁心是导电的，故根据电磁感应定律，当通过铁心的磁通随时间变化时，铁心中将产生感应电动势，并引起环流。这些环流在铁心内部围绕磁通做旋涡状流动，故称为涡流，如图 0－11 所示。涡流在铁心中引起的损耗被称为涡流损耗。

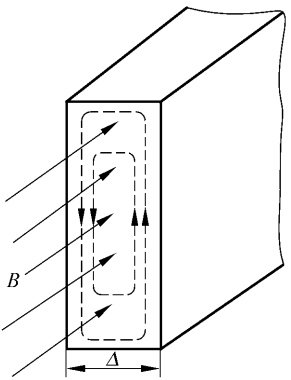

图 0－11　硅钢片中的涡流

分析表明，频率越高，磁通密度越大，感应电动势就越大，涡流损耗也就越大；而铁心的电阻越大，涡流所流过的路径越长，涡流损耗就越小。对于由硅钢片叠成的铁心，经推导可知，涡流损耗 p_e 为

$$p_e = C_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V \qquad (0-11)$$

式中，C_e 为涡流损耗系数，其大小取决于材料的电阻率；Δ 为硅钢片的厚度。因此为减少涡流损耗，电机和变压器的铁心都用含硅量较高的薄硅钢片(0.35 ～ 0.5mm) 叠成。

(3) 铁心损耗

铁心中的磁滞损耗和涡流损耗之和称为铁心损耗，用 p_{Fe} 表示。当通过铁心的磁通随时间变化时，有

$$p_{Fe} = p_h + p_e = (C_h f B_m^n + C_e \Delta^2 f^2 B_m^2) V \qquad (0-12)$$

对于一般的电工钢片，在正常的工作磁通密度范围内($1T < B_m < 1.8T$)，式(0－12) 可近似写成

$$p_{Fe} \approx C_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G \qquad (0-13)$$

式中，C_{Fe} 为铁心的损耗系数；G 为铁心的重量。式(0－13) 表明，铁心的损耗与频率 f 的 1.3 次方、磁通密度的平方和铁心的重量成正比。

4. 磁场储能

磁场是一种特殊形式的物质，它能够储存能量，这种能量是在磁场建立过程中由外部能源的能量转换而来的。在电机中就是通过磁场储能实现机电能量的转换。

磁场中，单位体积的磁能密度 w_m 可写为

$$w_m = \int_0^{B_0} \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{B} \qquad (0-14)$$

对于 μ 为常值的磁性介质，式(0－14) 可写成

$$w_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2} BH \qquad (0-15)$$

上式表明，在一定的磁感应强度下，介质的磁导率越大，磁场的储能密度就越小。所以对于通常的机电装置，当磁通从零开始上升时，大部分磁场能量将储存在磁路的气隙中；当磁通减少时，大部分磁场能量将从气隙通过电路释放出来。铁心中的磁场储能很小，常可忽略不计。

第 1 章　直流电机

本章首先介绍直流电机的工作原理和基本结构，接着分析直流电机的电枢绕组和电枢反应，导出直流电机的电磁转矩和感应电动势公式，然后列出直流电机的基本方程式，并分别分析直流发电机和直流电动机的稳态运行性能，最后简要介绍换向问题。

在电力拖动系统中，将直流电能转换成机械能的旋转电机称为直流电动机，而直流发电机是将机械能转换为直流电能的旋转电机。

直流电动机具有很多优点：过载能力强，启动转矩大，制动转矩大；直流电动机调速性能比交流电动机的调速性能好，调速范围广，调速的平滑性好，调速方式易于控制，调速装置可靠性高，并且调速时损耗小，经济性好。所以，直流电动机被广泛地应用在电力机车、无轨电车、轧钢机、机床和各种起重设备中。直流发电机供电质量较好，常常作为中小型同步发电机的励磁电源和一些化学工业中的直流电源。但与交流电机相比，直流电机的结构复杂、成本较高、可靠性稍差，使它的应用受到限制。随着电力电子技术的发展，与电力电子装置结合而具有直流电机性能的电机不断涌现，使直流电机有被逐步取代的趋势。尽管如此，研究直流电机仍有一定的理论意义和实用价值。

1.1　直流电机的工作原理

直流电机是一种能实现机电能量转换的电磁装置，它能使绕组在气隙磁场中旋转感生出交流电动势，并依靠换向装置，将此交流电变为直流电。其产生交流电的物理根源在于，电机中存在磁场和与之有相对运动的电路，即气隙磁场和绕组。旋转绕组和静止气隙磁场相互作用的关系可通过电磁感应定律和电磁力定律来分析。

根据电磁感应定律，在恒定磁场中，当导体切割磁场磁力线时，导体中将感应电动势。如果磁力线、导体及其运动方向三者互相垂直，则导体中产生的感应电动势的大小为

$$e = Blv \tag{1-1}$$

式中，B 为磁感应强度，单位为 T；l 为导体切割磁力线的有效长度，单位为 m；v 为导体切割磁场的线速度，单位为 m/s；e 为导体感应电动势，单位为 V。

依据电磁力定律，当磁场与载流导体相互垂直时，如图 1-1(a) 所示，作用在载流导体上的电磁力为

$$f = Bil \tag{1-2}$$

式中，i 为载流导体中电流，单位为 A；f 为电磁力，单位为 N。电磁力的方向用左手定则确定，如图 1-1(b) 所示。

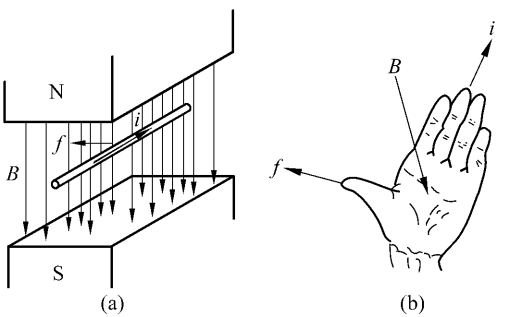

图 1-1　载流导体在磁场内受到的电磁力及左手定则