

高等学校教学用书

电机拖动基础

冶金工业出版社

高等学校教学用书

电机拖动基础

武汉钢铁学院 宋银宾 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 $30\frac{1}{4}$ 字数 724 千字

1984年 6 月第一版 1984年 6 月第一次印刷

印数00,001~10,000册

统一书号: 15062·4118 定价3.10元

前 言

本书是根据冶金工业部高等院校《电机学》及《电力拖动基础》教学大纲编写的。在编写过程中，编者力图使电机及电力拖动基础两门课程的内容有机地结合起来，形成适应专业特点的课程体系，使之更好地满足工业电气自动化专业的教学需要。

《电机拖动基础》的主要内容包括：直流电机、电机拖动系统的运动方程、直流电机拖动系统的静态特性和动态特性、变压器、交流电机基础、异步电机拖动系统的静态特性、同步电动机以及电动机的容量选择。编者根据本专业的性质和多年的教学经验，从讲深、讲透、讲精的要求出发，介绍了电机的基本结构、工作原理、内部电磁物理过程和能量关系，深入地论述了电机拖动系统的基本理论和特性。全书着重基本原理和物理概念的阐述。书中习题附有答案。

本书可作为高等院校工业电气自动化专业的教材，亦可供职工大学、电视大学和从事电气传动、自动控制的工程技术人员参考。

本书由武汉钢铁学院宋银宾主编，第十一章由李忠高同志编写。在编写过程中，教研室的其他同志给予了极大支持与帮助。

东北工学院刘宗富、任兴权同志对本书进行了认真细致的审阅，并提出了许多宝贵的修改意见，在此表示深切的感谢。

在编写过程中，编者参阅了清华大学、华中工学院、哈尔滨工业大学、东北工学院等兄弟院校的自编教材和教学资料，在参考文献中没有一一列入，在此谨表谢意。

由于编者水平所限，时间仓促，书中不妥和错误之处在所难免，敬希读者批评指正。

编 者

1983年5月

目 录

前言

绪论	1
第一节 电机拖动技术在工业自动化中的作用	1
第二节 本课程的性质和任务	2
第三节 电机理论所遵循的基本电磁规律	2
第四节 电机中铁磁材料的特性	5
第五节 本课程的主要内容和特点	7

第一篇 直流电机拖动基础

第一章 直流电机	9
第一节 直流电机的工作原理和基本结构	9
第二节 直流电机的电枢绕组和感应电势	18
第三节 直流电机的电枢反应和换向	29
第四节 直流发电机和直流电动机的运行特性	38
第五节 小结	53
思考题与习题	54
第二章 电机拖动系统的运动方程式	58
第一节 单轴电机拖动系统的运动方程式	58
第二节 多轴电机拖动系统的运动方程式	60
第三节 典型的负载转矩特性	65
第四节 传动机构的损耗和效率	67
第五节 小结	68
思考题与习题	69
第三章 直流电机拖动系统的静态特性	71
第一节 直流他励电动机的机械特性	71
第二节 直流他励电动机的起动特性	81
第三节 直流他励电动机制动运转状态的特性	87
第四节 直流电机拖动的速度调节及其特性	100
第五节 直流串励电动机的机械特性	112
第六节 直流复励电动机的机械特性	119
第七节 小结	120
思考题与习题	121
第四章 直流电机拖动系统的动态特性	125
第一节 概述	125
第二节 直流他励电动机起动时的动态特性	126
第三节 直流他励电动机制动过程的动态特性	140
第四节 直流他励电动机励磁回路的动态过程	148

第五节 加快直流他励电动机机械过渡过程的方法	152
第六节 直流他励电机拖动系统, 在考虑电枢电感时的动态过程	156
第七节 小结	163
思考题与习题	163

第二篇 变 压 器

第五章 变压器的基本工作原理	169
第一节 概述	169
第二节 变压器的空载运行	174
第三节 变压器的负载运行	181
第四节 变压器参数的试验测定	189
第五节 变压器的运行特性	192
第六节 三相变压器	197
第七节 变压器的暂态过程	203
第八节 小结	209
思考题与习题	210
第六章 特殊用途的变压器	215
第一节 自耦变压器	215
第二节 仪用互感器	217
第三节 电焊变压器	218
第四节 整流变压器	219
第五节 脉冲变压器	229
第六节 直流电流互感器	233
思考题与习题	242

第三篇 交流电机拖动基础

第七章 交流电机的基础知识	243
第一节 交流电机的基本工作原理	243
第二节 交流电机的定子绕组	247
第三节 交流电机定子绕组建立的磁势	255
第四节 三相定子绕组建立的磁场	271
第五节 交流电机定子绕组的感应电势	272
第六节 小结	277
思考题与习题	278
第八章 异步电动机	281
第一节 异步电动机的基本结构、额定值和主要系列	281
第二节 异步电动机运行时的电磁关系	285
第三节 异步电动机运行时的基本关系式、等效电路和相量图	292
第四节 异步电动机的功率和转矩	299
第五节 异步电动机的工作特性	303
第六节 异步电动机的参数测定	304
第七节 单相异步电动机	308

第八节 小结	315
思考题与习题	316
第九章 异步电机拖动系统的静态特性	319
第一节 异步电动机的机械特性	319
第二节 异步电动机的人工机械特性	326
第三节 异步电动机的起动	328
第四节 异步电动机的制动运行状态	354
第五节 小结	366
思考题与习题	367
第十章 异步电机拖动系统的速度调节	369
第一节 概述	369
第二节 绕线式异步电动机转子串电阻调速	370
第三节 改变异步电动机定子电压调速	372
第四节 异步电动机的变极调速	378
第五节 异步电动机的电磁转差离合器调速	383
第六节 异步电动机的变频调速	388
第七节 异步电动机的串级调速	392
第八节 异步电动机的双电机拖动	398
第九节 异步电动机的协调旋转(电轴系统)	399
第十节 小结	407
思考题与习题	408
第十一章 同步电动机	409
第一节 概述	409
第二节 同步电动机的电枢反应	411
第三节 同步电动机的电压平衡方程式和相量图	415
第四节 同步电动机有功功率的调节和功角及矩角特性	418
第五节 同步电动机的励磁调节和V形曲线	424
第六节 同步电动机的起动	428
第七节 小结	433
思考题与习题	434

第四篇 电动机容量的选择

第十二章 电动机容量的计算和选择	437
第一节 概述	437
第二节 电动机的发热与冷却规律	439
第三节 长期恒定负载运行时电动机容量的计算	443
第四节 长期变动负载运行时电动机容量的计算	445
第五节 短时负载下电动机容量的计算	451
第六节 重复短时工作制电动机容量的计算	453
第七节 鼠笼式电动机每小时允许接电次数的计算	455
第八节 电动机容量选择的工程方法	456
第九节 电动机额定转速的选择及最佳传速比的概念	458

第十节 电动机容量选择的计算举例	461
第十一节 小结	464
思考题与习题	464
附录 可控硅整流供电对直流电动机的影响	466
参考文献	475

绪 论

第一节 电机拖动技术在工业自动化中的作用

众所周知，工业企业中的各种生产机械，在完成生产过程时，都需要消耗一定形式的能量，诸如机械能、热能、化学能等等。但就大多数生产机械而言，需要的是机械能。因此，当前普遍采用各种类型的电动机来拖动生产机械，通过电动机将电能转换为生产机械所需要的机械能，从而满足生产工艺过程的要求。这种以电动机为动力拖动生产机械的拖动方式叫做“电机拖动”，或称为电力拖动。

电机拖动的根本任务，在于通过电机将电能转换成生产机械所需要的机械能，使电能成为工业企业中的主要能源。这主要是由于电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制都比较方便经济。它适宜于大量生产、集中管理、远距离传输和实现自动控制。因此，电机拖动已成为现代工业企业中广泛采用的拖动方式。它具有许多其它拖动方式无法比拟的优点，主要有：

(1) 电机拖动比其它形式的拖动（蒸汽、水力等）效率高，而且电动机与被拖动的生产机械联接简便；

(2) 电动机的种类和型号多，具有各种各样的运行特性，可以满足不同类型生产机械的要求；

(3) 电机拖动具有良好的调速性能，其起动、制动、反向和调速等控制简便，快速性好，易于实现完善的保护；

(4) 电机拖动装置参数的检测，信号的变换与传送都比较方便，易于组成完善的反馈控制系统，易于实现最优控制；

(5) 可以实行远距离测量和控制，便于集中管理，便于实现局部生产自动化乃至整个生产过程自动化。

因此，电机拖动，特别是自动化的电机拖动，成了现代工业生产电气化与自动化的基础与核心。随着自动控制理论不断发展，半导体器件的采用，以及数控技术和电子计算机技术的发展与采用，电机拖动装置的静态和动态特性品质大大地提高了，它能更好地满足生产工艺过程的要求。采用电机拖动对提高劳动生产率和产品质量，提高生产机械运转时的准确性、可靠性和快速性，改善工人的劳动条件，节省人力，都具有十分重大的意义。

电机拖动装置（或系统）一般是由电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源等基本环节所组成，如图 0-1 所示。其中电动机是一个机电能量转换元件，它把从电源输入的电能转换为生产机械所需

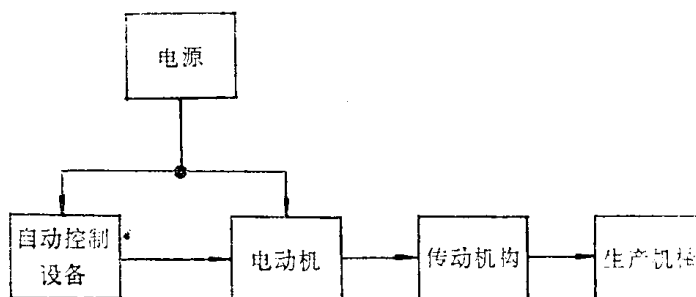


图 0-1 电机拖动系统的结构图

要的机械能，或者将生产机械的机械能（大都由动能或位能转换而来）转换成电能回馈至电网。传动机构则是用以传递动力，实现速度和运动方式的变换。

第二节 本课程的性质和任务

“电机拖动基础”是工业电气自动化专业的技术基础课之一。它主要研究电机拖动系统的基本理论问题，并初步联系生产实际，从生产机械工作的要求出发，分析研究交、直流电动机的基本结构、工作原理、基本电磁关系和运行特性。特别是深入、系统地讨论电机拖动装置的静态和动态特性，为掌握本专业和学习后续课程打下必要的理论基础。它既具有很强的基础性，但又结合基本理论的阐述，适当地介绍一些在生产实践中分析和处理问题的工程观点和工程方法。因此，它在整个专业学习中占有重要的地位。它所研究的电机拖动装置的基本理论，在一定程度上体现了本专业的性质和基本任务。后续的“自动控制系统”等专业课程，都是在它的基础上的深化与扩展。不了解和掌握“电机拖动基础”的基本内容，后续课程的学习将陷入极大的盲目性，或无的放矢。在自动化电机拖动系统中，可控硅等新型半导体器件的采用，数控和电子计算机等新技术在电气传动领域的应用，都是立足于改善和提高电机拖动系统的静态和动态品质，使生产机械和生产工艺过程处于最优状态。由此可见，“电机拖动基础”的基本理论，是从事工业电气自动化专业的学生必须学习和掌握的基本内容。

在电机拖动系统中，电动机只是其中的组成元件之一。因此在本门课程讲授电机时，是从应用的角度出发，把电机作为一个机电能量转换元件进行研究的。这和从设计、制造的要求对电机的分析，无论在内容和重点上都有所不同。我们既把电机作为一个元件，但又不能把它看成一个普通的电器元件。因为电机是各种电机拖动装置中的核心部件，通过它来实现能量的转换，分配和控制。通过它来保证生产机械的运动形式和运行状态，从而满足生产工艺过程的要求。所以在本门课程中，坚持从使用电机的观点出发，介绍电机的基本工作原理、基本结构、内部电磁物理过程和能量关系，重点在于分析电机运行的基本原理和特性。至于有关电机的设计计算，材质的选用，制造工艺等方面的问题，则不属本课程讨论的内容。由此可见，“电机拖动基础”并不是“电机学”和“电力拖动基础”两门课程的简单合并。

第三节 电机理论所遵循的基本电磁规律

自然界中存在着许许多多的客观规律，人们通过观察、分析和综合，不仅要达到认识这些客观规律的目的，更重要的是要利用这些客观规律为人类服务。可以说，科学技术中的各种定律（如牛顿定律等）是描述客观规律的工具。在电机理论中常用的基本电磁定律就是描述客观电磁规律的。或者说，人们就是利用客观的电磁规律从而设计制造出电机来为生产服务的。

上面曾经指出，电机是一种机电能量转换机械。发电机将机械能转换成电能，电动机将电能转换成机械能，变压器则是将一种电压的电能转换成另一种电压的电能。但无论是发电机还是电动机或变压器，其工作原理都是建立在电磁感应定律、全电流定律、电路定律和电磁力定律等基础之上的。为了掌握电机的运行原理和特性，复习一下这些基本电磁定律还是很有必要的。下面简要地介绍上述定律的内容。

一、全电流定律

设空间有 N 根载流导体，环绕载流导体任取一磁通的闭合回路，见图0-2。令 H 表示沿着该回路上各点切线方向的磁场强度，则全电流定律的积分形式可表示为：

$$\oint_l H dl = NI \quad (0-1)$$

式中 N —— 磁通回路包围的导体总数；

I —— 每一根导体中的电流；

NI —— 该回路所包围的总电流量(代数和)，也就是作用在该磁路上的总磁动势，简称为磁势。

式 (0-1) 表明，在环绕载流导体的任一磁通闭合回路中，磁场强度 H 沿着该回路的线积分，等于该闭合回路所包围电流的代数和，故称为全电流定律。其中电流的正负号这样来确定，凡导体电流的方向与积分路径的方向符合右手螺旋关系，则电流为正，反之为负。

式 (0-1) 还表明，磁场强度沿闭合回路的线积分，其结果与积分路径无关，即：

$$\oint_l H dl = \oint_{l'} H dl = NI \quad (0-2)$$

全电流定律在电机中应用很广，它是电机和变压器磁路计算的基础。

必须指出，磁路中的磁通，等于作用在磁路上的总磁动势除以磁路的总磁阻，这就是磁路的欧姆定律。由于磁阻 $R_\mu = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{A}$ ，所以磁路的磁阻取决于磁路的几何尺寸和所用材料的导磁系数 μ 。磁路的平均长度 l 越长，截面积 A 越小，磁阻就越大。材料的导磁系数越大，磁阻越小。所以电机的磁路大都采用铁磁材料。由于空气的导磁率 μ_0 远远小于铁磁材料的导磁率 μ_{Fe} ，即 $\mu_0 \ll \mu_{Fe}$ 。所以电机的气隙虽然很小，但其磁阻很大，是整个磁路总磁阻的主要部分。

二、电磁感应定律（法拉第定律）

假设有一线圈位于磁场中，则将有磁力线穿过该线圈而和它键链。如果各个部分磁通量各自键链该线圈的匝数不同，则该线圈的总磁链数为：

$$\Psi = \sum W_x \Phi_x \quad (0-3)$$

式中 Φ_x —— 某一部分的磁通量；

W_x —— Φ_x 所键链的匝数。

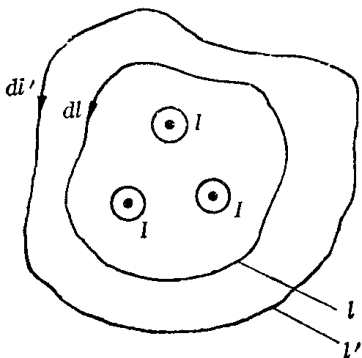


图 0-2 全电流定律的应用

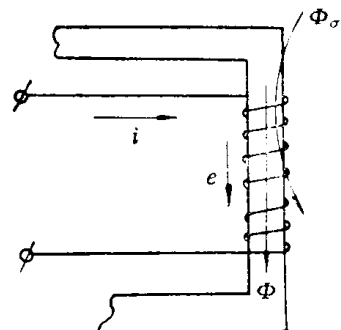


图 0-3 电磁感应定律的应用

如果该线圈中的磁链 Ψ 发生变化,则在该线圈中将有一感应电势产生。这一感应电势的数值,和线圈所链的磁链的变化率成正比。感应电势的方向这样来确定:由该电势产生的电流,力图阻止线圈中磁链的变化。如果电势、电流和磁通的正方向按图0-3所示来选取,即正电势产生正电流,而正电流产生正磁通,而且电流的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋定则,这样,电磁感应定律可表示为:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (0-4)$$

如果所有的磁通都链着匝数为 N 的整个线圈,则上式可写为:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt} \quad (0-5)$$

式中 Φ 的单位是韦伯,感应电势 e 的单位为伏特。

上面指出的是,线圈中的磁链发生变化,就会在线圈中产生感应电势。读者必然会问,线圈中的磁链为什么会发生变化呢?这可能是由两个方面的原因所引起:(1)磁通本身就是由交流电流所产生,即磁通本身随时间在变化;(2)磁通虽然不变,由于线圈与磁场间有相对运动,使得线圈中的磁链发生变化。普遍地说,任何磁链的总增量 $d\Psi$ 必为:

$$d\Psi = \frac{\partial\Psi}{\partial t}dt + \frac{\partial\Psi}{\partial x}dx \quad (0-6)$$

因此感应电势为:

$$\begin{aligned} e &= -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\partial\Psi}{\partial t} - \frac{\partial\Psi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \\ &= -\frac{\partial\Psi}{\partial t} - v \frac{\partial\Psi}{\partial x} = e_b + e_s \end{aligned} \quad (0-7)$$

式中 $v = \frac{dx}{dt}$ 为导体与磁场间的相对速度。由此可见,任何一个处于磁场中的线圈,其感应电势可分为两部分: $e_b = -\frac{\partial\Psi}{\partial t}$,称为变压器电势; $e_s = -v \frac{\partial\Psi}{\partial x}$,称为旋转电势或速率电势。

三、回路定律

在任何一个电路的回路中,若沿某一方向环绕回路一周,则该回路内所有电势的代数和等于所有电压降的代数和,即:

$$\sum e = \sum u \quad (0-8)$$

回路中各个电量的正负号这样来确定:首先规定电流、电势和电压降的正方向,然后任意选定环绕回路一周的正方向。凡是正方向与环绕方向一致的电势和电压降取正号,反之取负号。在图0-4中,沿 $abcd a$ 环绕一周,可得:

$$e_L = iR - u$$

$$\text{或} \quad u = iR - e_L = iR + L \frac{di}{dt} \quad (0-9)$$

式中 $e_L = -L \frac{di}{dt}$ 为电感线圈中的自感电势。如果外加电压 u 按正弦规律变化,则可得回

路定律的复数方程为:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{I} R + j\omega L \dot{I} \\ &= \dot{I} (R + jX_L) = \dot{I} Z\end{aligned}\quad (0-10)$$

式中 X_L ——电抗线圈 L 的感抗;

$\omega = 2\pi f$ ——电流的角频率;

$Z = R + jX_L$ ——回路的阻抗。

四、电磁力定律

电磁力定律的内容是, 载流的导体在磁场中将受到力的作用。由于这种力是磁场和电流相互作用而产生的, 故称为电磁力。若磁场与导体相互垂直, 则作用在导体上的电磁力为:

$$f = Bli \quad (0-11)$$

式中 B ——磁场的磁感应强度 (韦/米²);

i ——导体中的电流强度 (安);

l ——导体的有效长度 (米);

f ——作用在导体上的电磁力 (牛)。

电磁力的方向可由左手定则确定。或者是根据右手螺旋法则画出电流 i 产生的磁力线, 把这种磁力线与导体所在处的外磁场磁力线迭加, 这样将使导体一边的磁力线增加, 另一边减少, 电磁力的方向是从磁力线密的一边指向磁力线疏的一边, 如图0-5所示。

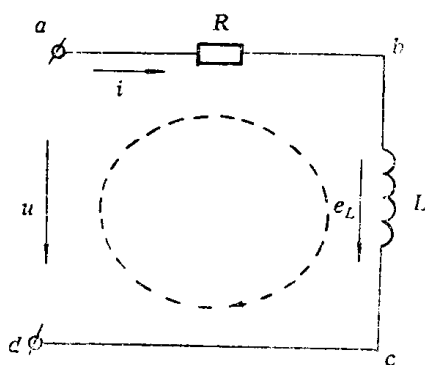


图 0-4 电路中各物理量的正方向

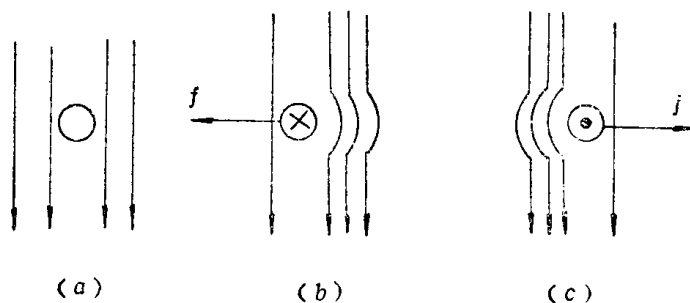


图 0-5 电磁力方向的确定方法
(a) $i = 0$; (b) i 流入纸面; (c) i 流出纸面

第四节 电机中铁磁材料的特性

各种电机都是通过电磁感应作用而实现能量转换的, 磁场是它的媒介。因此, 电机中必须具有引导磁通的磁路。为了在一定的励磁电流下产生较强的磁场, 电机和变压器的磁路都采用导磁性能良好的铁磁材料制成。实验表明, 所有非铁磁材料的导磁系数都接近于真空的导磁系数 μ_0 , 而铁磁材料的导磁系数 μ_F 远远大于真空的导磁系数。因此, 在同样的电流下, 铁心线圈的磁通比空心线圈的磁通大得多。

铁磁材料之所以具有高导磁性能, 在于其内部存在着强烈磁化了的自发磁化单元, 称为磁畴。在正常情况下, 磁畴是杂乱无章的排列着, 因而对外不显示磁性。但在外磁场的作用下, 磁畴沿着外磁场的方向作出有规则的排列, 从而形成了一个附加磁场迭加在外磁场上。由于铁磁材料的每个磁畴原来都是强烈磁化了的, 具有较强的磁场。因此, 它们所

产生的附加磁场的强度，要比非铁磁物质在同一外磁场下所产生的磁场强得多。所以铁磁物质的导磁系数 μ_{Fe} 比非铁磁物质的大得多。

在非铁磁材料中，磁感应强度（即磁通密度） B 与磁场强度 H 成正比，即 $B = \mu_0 H$ ，它们之间呈线性关系。铁磁材料的 B 与 H 之间是一种非线性关系，即 $B = f(H)$ 是一条曲线，称为磁化曲线，如图0-6所示。在磁化的开始阶段（0a段），由于外磁场较弱，随着 H 的增加， B 的增加缓慢， $\mu_{Fe} = \frac{B}{H}$ 随 H 的变化而变化。在 ab 段，外磁场较强，因而随着 H 的增加， B 迅速增加。在 bc 段，外磁场进一步加强时，磁畴大都已转到与外磁场一致的方向，这时它们所产生的附加磁场已接近最大值，即使 H 再增大， B 的增加也很有限。这种现象称为磁饱和现象，也叫做磁饱和。

铁磁材料的磁化曲线可通过实验测绘，在测试时， H 由零上升到某个最大值 H_m 时， B 值是沿磁化曲线0a上升（见图0-7）。当 H 由 H_m 下降到零时， B 不是沿a0下降，而是沿着另一条ab线变化。当 H 由零变化到 $-H_m$ ，即进行反向磁化时， B 沿着曲线bcd变化。当 H 由 $-H_m$ 回升到 H_m 时， B 沿着曲线defa变化。这样将铁磁材料磁化一个循环时，得到一个闭合回线abcdefa，称为铁磁材料的磁滞回线。不同的铁磁材料有不同的磁滞回线。

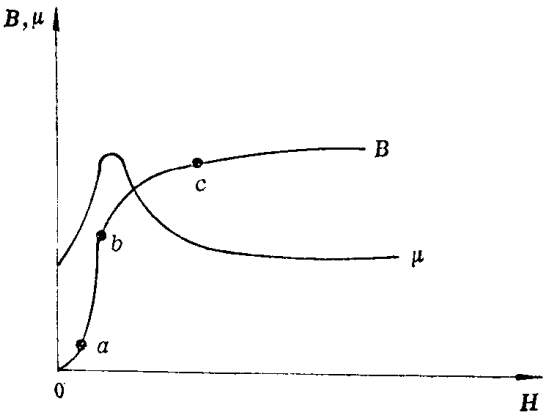


图 0-6 铁磁材料的磁化曲线

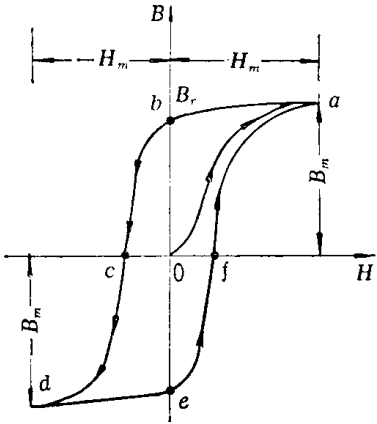


图 0-7 铁磁材料的磁滞回线

从图 0-7 可以看出，磁化曲线的上升段与下降段不重合。下降时， B 的变化滞后于 H 的变化，当 H 下降为零时， B 不为零，而是下降到某一个数值 B_r ，这种现象称为磁滞， B_r 称为剩余磁感应强度。由于存在磁滞现象，所以铁磁材料的磁化过程是不可逆的。在某一 H 下的 B 值，取决于该 H 值之前的磁化状态。磁滞现象的产生，是由于铁磁材料中的磁畴，在外磁场作用下进行排列时，彼此之间产生“摩擦”。由于这种“摩擦”的存在，当外磁场停止作用后，磁畴与外磁场方向一致的排列，被部分的保留下来，从而形成了磁滞现象和剩磁。

同一铁磁材料在不同的 H_m 值下，有不同的磁滞回线。所以用不同的 H_m 值可测绘出许多不同的磁滞回线。把这些磁滞回线的顶点连接起来而得到的磁化曲线，称为铁磁材料的基本磁化曲线，也称为平均磁化曲线。工程上所谓的磁化曲线就是指平均磁化曲线。

铁磁材料在交变磁场的作用下而反复磁化时，磁畴之间不断地发生摩擦，必然消耗一定的能量，产生损耗。这种损耗称为磁滞损耗。试验表明，在交变磁化时，铁磁材料的磁

滞损耗 p_{ch} 与磁通的交变频率 f 成正比, 与磁通密度的幅值 B_m 的 α 次方成正比, 即:

$$p_{ch} \propto f B_m^\alpha \quad (0-12)$$

对于常用的硅钢片, 当 $B_m = 1.0 \sim 1.6$ 韦/米²时, $\alpha \approx 2$ 。由于硅钢片的磁滞回线的面积比较小, 所以电机和变压器的铁心都采用硅钢片。

第五节 本课程的主要内容和特点

本课程是工业电气自动化专业的一门重要技术基础课。它主要研究工业企业中常用的电机拖动系统的基本理论及其在生产实践中的应用问题。主要内容有: 直流电机、变压器、交流电机的基本结构、工作原理、内部电磁物理过程和能量关系。并在此基础上讲授直流电机拖动系统的静态特性和动态特性, 交流电机拖动系统的静态特性。这些内容都是以电动机为核心, 从电动机的各种运行状态出发, 分析研究各种电机拖动系统的运行特性、能量关系和工程应用等方面的问题。因此, 在学习本门课程时, 既要抓住基本理论和基本概念, 又要初步学会运用理论去分析和解决实际问题。

正如前面所指出的, “电机拖动基础”是一门既有基础性又有专业性的课程, 因而与“电路原理”等基础课程的性质很不相同。在“电路原理”课程中所要解决的问题, 大都是理想化了的, 因而比较单纯, 系统性比较强, 能用较严密的数学模型予以描述和分析, 从而抓住问题的物理本质, 得出一般性的结论。

在“电机拖动基础”课程中, 不仅有理论性的推导与分析, 还需要运用基本理论分析和研究某些实际问题, 而实际问题的客观情况往往是比较复杂的, 带综合性的。因此在分析时, 有必要运用工程观点和工程方法将问题简化, 找出主要矛盾, 然后运用理论加以解决。这样所得的结果, 已经足够正确地反映客观实际。在工程实践上, 这不仅是必要的, 而且也是可行的。

在“电机拖动基础”课程的学习中, 既要介绍直流电机、交流电机和变压器, 还要介绍有关电机容量选择等方面的内容。每一种电机又必须从结构、工作原理、电磁物理过程、一直讲到运行特性和能量关系, 从电机拖动系统的静态特性讲到动态特性。这就是说, 由于电机的种类和电机拖动系统的类型繁多, 各有各的个性和特点, 都是必须掌握的。但更需注意到, 各种电机及其拖动系统也有共性。这就要求在掌握个性的基础上, 掌握其共性, 从而找出规律性的东西, 使我们的认识深化一步。例如从了解交、直流电机和变压器工作原理的基础上, 可以看出, 各种电机和变压器的工作, 都是建立在电磁感应定律和电磁力定律所反映的客观物理规律基础上的。它们都是以磁场作为媒介来实现机电能量转换的, 各种电机的定、转子磁势都是相对静止的等等, 这些就是它们所具有的共性。

在“电机拖动基础”课程的学习中, 还必须注意掌握分析问题的方法。例如就各种电机的结构、工作原理等等来讲, 还是比较复杂的。但就其电磁物理本质而言, 总可以用基本方程式、等效电路和相量图(对交流电机)等予以描述。也就是说, 可以用上述三种工具来描述其物理本质, 以便在不同的场合使用不同的工具进行分析和研究。上述三种工具虽不相同, 各有各的用处, 但三者是有联系的, 也是统一的。

“电机拖动基础”课程在整个专业的学习中, 具有承上启下的性质。它是在“电路原理”等基础课的基础上开出的, 运用在“电路原理”等课程中的基本理论来进行研究和分

析，又为学习“自动控制”等等后续课程准备必要的基础知识。这对读者是必须引起足够重视的问题，以便较好地掌握本课程的基本内容，达到教学大纲所规定的要求。

第一篇 直流电机拖动基础

第一章 直流电机

第一节 直流电机的工作原理和基本结构

一、概述

在现代工业企业中，有许多生产机械的工作相当繁重，其负载变化范围也比较大，需要频繁地起动和制动，需要频繁地或周期性地改变旋转方向，要求在宽广的范围内平滑地调节速度等等。由于直流电机具有良好的起动、制动和调速性能，因此，一般对于要求较高的生产机械大都采用直流电动机，组成直流电机拖动系统，它能较好地满足生产工艺的要求。

直流电机可作为电动机用，也可作为发电机用。

直流发电机是将机械能转换为直流电能，供给负载。常作为电解、电镀、电焊以及各种自动化系统的独立电源。应该指出，随着电子技术的发展，由可控硅整流元件组成的直流电源，正逐步取代直流发电机。但从电源质量和可靠性来看，可控硅整流电源还不能完全令人满意。因此直流发电机在某些场合仍有一定的应用价值。

直流电动机是将直流电能转换为机械能、驱动生产机械按工艺要求运行，它广泛地用于对起动性能和调速性能要求较高的生产机械上。例如轧钢机、轧钢主要辅助设备、高炉卷扬设备、电力机车以及某些起重设备上均采用直流电动机组成的电机拖动系统。

本篇介绍直流电机的工作原理、基本结构和运行时的基本电磁物理过程。着重分析直流电动机的各种运行状态，并对直流电机拖动的动态过程进行必要的分析和讨论。

由于本门课程主要讨论用电动机作为主要元件构成的电机拖动装置的基本理论，所以有关电机的设计和制造工艺等方面的问题，将不予分析和介绍。

二、直流电机的工作原理

1. 直流发电机的工作原理 图 1-1 所示是一个简单的直流发电机模型。它的两个磁极（ N 极和 S 极）在空间固定不动。两磁极之间有一铁质的圆柱体（称为电枢铁芯）。电枢铁芯与磁极之间的间隙称为气隙。两根导体 ab 和 cd 连成一个线圈，并嵌置在电枢铁芯表面上，通常称为电枢绕组。线圈的首、末端分别连接到两个圆弧形的铜片（称为换向片）上。换向片固定在转轴上，换向片之间以及换向片与转轴之间都是互相绝缘的。电机的转动部分称为电枢。为了把电枢绕组和外电路接通，装置了两个在空间固定不动的电刷 A 和 B 。当电枢转动时，电刷 A 只能与转到上面的一片换向片接触，而电刷 B 只能与转到下面的一片换向片接触。

假设电机的电枢由一原动机拖动，以恒定转速逆时针方向旋转。根据法拉第电磁感应定律可知，每一根导体中将感生电势，其方向可用右手定则确定。在图1-1所示位置时， ab 导体处于 N 极下，电势方向由 b 到 a ，而 cd 导体处于 S 极下，电势方向由 d 到 c 。从整个

线圈来看，导体 ab 与 cd 的电势方向恰好是相加的，并经由电刷 A 和 B 输出给负载。很明显，电刷 A 具有正极性；电刷 B 具有负极性。

当电枢以恒定转速旋转时，导体 ab （或 cd ）将轮流在 N 极下及 S 极下切割磁力线，所以导体 ab 及 cd 中感应电势是交变电势。但由于电刷 A 只与处于 N 极下的导体相接触，当 ab 导体处在 N 极下时，电势方向由 b 到 a ，引到电刷 A 上时，电刷 A 的极性为“+”。当 cd 导体转到 N 极下时，电刷 A 则与 cd 导体相接触，电势方向由 c 到 d ，引到电刷 A 上时，其极性仍为“+”。由此可见，电刷 A 的极性永远为“+”，电刷 B 的极性永远为“-”，故 A 、 B 电刷间的电势为直流电势。

由此可见，当电枢在原动机的驱动下以恒定速度运转时，线圈中感应的交变电势，通过换向片和电刷的整流作用变成直流电势。因此供给外电路的电流是方向不变的直流。所以说直流电机实质上是一台装有机电整流器的交流电机。为了突出换向器在直流电机中将交流整成直流的作用，人们又把这种电机称为换向器式直流电机。

现在进一步分析线圈中感应电势的波形。对每根导体而言，其感应电势的瞬时值为：

$$e = B_x l v \tag{1-1}$$

式中 B_x ——导体所处位置的磁通密度（简称为磁密）；

l ——导体的有效长度，即导体切割磁力线部分的长度；

v ——导体相对于磁场运动的线速度；

在已制成的电机中，导体的有效长度 l 为定值。如电机以恒定速度旋转，则 v 为常数。由式（1-1）可知，电势 e 与磁密 B_x 成正比。也就是说，当电枢恒速旋转时，导体内感应电势随时间变化的规律与磁密沿气隙的分布规律相同。在实际电机中，气隙磁密沿空间分布的规律如图1-2所示，因此导体内感应电势的波形亦如图1-2所示，而电刷 A 、 B 之间输出电势的波形则如图1-3所示。

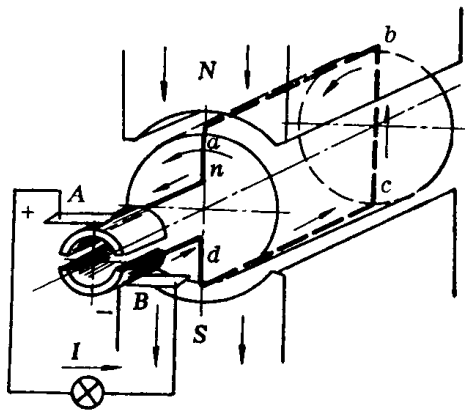


图 1-1 直流发电机的工作原理图

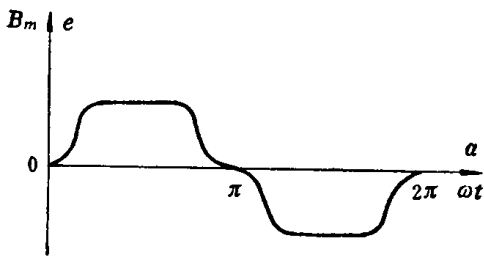


图 1-2 气隙磁密分布曲线或线圈的电势波形

从图1-3可以看出，电刷 A 、 B 间的输出电势是脉动的直流电势，而且电压的数值不高。为了消除电压的脉动并提高其幅值，在实际电机中，电枢绕组不是由一个线圈而是由若干个分布在电枢表面的线圈按一定规律联接而成。这一问题将在第二节中详细介绍。

2. 直流电动机的工作原理 现仍以直流机的简单模型（图1-4所示）来说明直流电动机的工作原理。直流电动机不是由原动机驱动，而是在电刷 A 、 B 两端接上直流电源