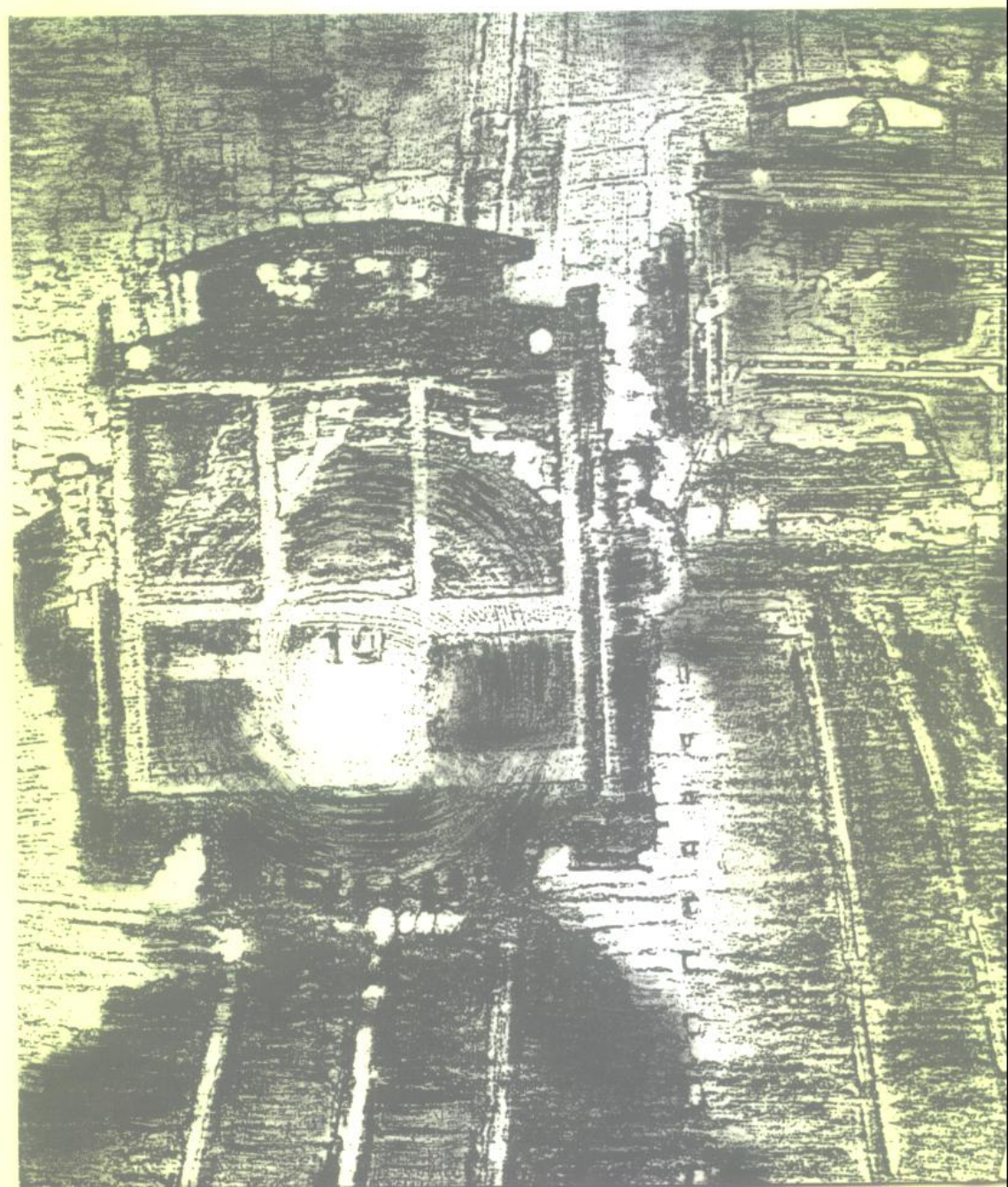


电机与拖动基础

任礼维 林瑞光 编著



浙江大学出版社

T11/21
R63

464885

电机与拖动基础

任礼维 林瑞光 编著



3



00464885

浙江大学出版社

2015/6

电机与拖动基础

任礼维 林瑞光 编著

责任编辑 杜希武

* * *

浙江大学出版社出版

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

杭州富阳何云印刷有限公司印刷

浙江省新华书店经销

* * *

787mm×1092mm 16 开 22.75 印张 582 千字

1994 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月第 6 次印刷

印数: 31001—35000

ISBN 7-308-01282-4/TM·017 定价: 23.00 元

前 言

《电机与拖动基础》是原《电机学》、《电力拖动基础》和《微特电机》等课程的有机结合。主要论述各类电机的基本原理和特性,以及利用电动机作为原动机来拖动生产机械按照人们所规定的规律进行运动的基本理论。是工业电气自动化专业、应用电子技术专业、机电一体化专业以及电气技术专业等工自类专业所必须掌握的一门技术基础课,对其专业培养及后续课程的教学有非常密切的关系。

编者根据工自类专业的性质,教学改革的要求以及多年来从事《电机学》《电机拖动》等课程的教学经验,力图使电机、电力拖动基础及控制电机等课程的内容有机地结合起来,突出重点,深入浅出地阐明各类电机的基本原理和特性以及电机拖动系统的基本理论,以形成适应专业特点的课程体系。

本教材内容包括绪论、直流电机、直流电机电力拖动、变压器、三相感应电动机、三相感应电动机电力拖动、三相同步电机、驱动和控制微电机、电动机的容量选择等8章。每章都辅以若干典型例子以助加深理解。并且附有相当数量的习题与思考题供读者课后练习。其中绪论、第一、二、四、五、八章由林瑞光副教授编写,第三、六、七章由任礼维副教授编写。

本教材可以作为高等院校工自类本科各专业以及工人业余大学、职工大学、夜大、函授等成人高校工自类各专业“电机与拖动”课程的教学用书。如删去注有*的内容,也可作为少学时“电机学”课程的教材。

本教材虽然经过本科、夜大、函授工自类各专业的多届使用并修改,但是难免仍有不妥甚至错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

1994年5月

目 录

绪论	1
§ 0-1 本课程的专业地位和特点	1
§ 0-2 电机的主要类型	1
§ 0-3 电机理论中常用的基本电磁定律	2
§ 0-4 电机中铁磁材料的特性	5
习题与思考题	8
第一章 直流电机	9
§ 1-1 直流电机的基本工作原理和结构	9
§ 1-2 直流电机的电枢绕组	14
§ 1-3 直流电机的磁场	20
§ 1-4 直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率	26
§ 1-5 直流电动机的运行原理	27
§ 1-6 直流发电机的运行原理	33
§ 1-7 直流电机的换向	37
习题与思考题	41
第二章 直流电机的电力拖动	44
§ 2-1 电力拖动系统的运动方程式	44
§ 2-2 生产机械的负载转矩特性	49
§ 2-3 他励直流电动机的机械特性	51
§ 2-4 他励直流电动机的起动	57
§ 2-5 他励直流电动机的制动	60
§ 2-6 他励直流电动机的调速	67
§ 2-7 他励直流电动机的过渡过程(*)	76
§ 2-8 串励和复励电动机的电力拖动(*)	85
习题与思考题	88
第三章 变压器	94
§ 3-1 变压器的基本工作原理和结构	94
§ 3-2 单相变压器的空载运行	99
§ 3-3 单相变压器的负载运行	106
§ 3-4 变压器参数的试验测定	114
§ 3-5 标么值	116

§ 3-6 变压器的工作特性	118
§ 3-7 三相变压器	121
§ 3-8 变压器的并联运行	127
§ 3-9 其它用途的变压器	130
3-4 习题与思考题	135
第四章 三相感应电动机	139
§ 4-1 三相感应电动机的基本工作原理与结构	139
§ 4-2 交流电机的电枢绕组	144
§ 4-3 交流绕组的感应电动势	151
§ 4-4 交流绕组建立的磁动势	157
§ 4-5 三相感应电动机转子静止时的运行分析	171
§ 4-6 三相感应电动机转子转动时的运行分析	177
§ 4-7 三相感应电动机的功率和转矩	185
§ 4-8 三相感应电动机的工作特性	187
§ 4-9 三相感应电动机的参数测定	188
习题与思考题	190
第五章 三相感应电动机的电力拖动	195
§ 5-1 三相感应电动机的机械特性	195
§ 5-2 三相感应电动机的起动	201
§ 5-3 三相感应电动机的制动	216
§ 5-4 三相感应电动机的调速	228
习题与思考题	244
第六章 三相同步电机	249
§ 6-1 同步电机的基本工作原理与结构	249
§ 6-2 同步电机的电枢反应	252
§ 6-3 同步电动机的电动势方程、同步电抗和矢量图	256
§ 6-4 同步电动机的功角特性、矩角特性和有功功率的调节	260
§ 6-5 同步电动机的工作特性、无功功率的调节和 V 形曲线	265
§ 6-6 同步电动机的起动	272
§ 6-7 同步发电机的电动势方程、相量图、功角特性和工作特性(*)	277
§ 6-8 同步发电机的并联运行(*)	283
§ 习题与思考题	288
第七章 驱动和控制微电机	293
§ 7-1 单相感应电动机	293
§ 7-2 伺服电动机	299
§ 7-3 测速发电机	306
§ 7-4 自整角电机	310
§ 7-5 旋转变压器	317

§ 7-6 步进电动机	320
习题与思考题	328
第八章 电机容量的选择(*)	330
§ 8-1 概述	330
§ 8-2 电机的发热与冷却	331
§ 8-3 连续工作制电动机容量的选择	334
§ 8-4 短时工作制电动机容量的选择	342
§ 8-5 周期性断续工作制电动机容量的选择	345
习题与思考题	349

绪 论

§ 0-1 本课程的专业地位和特点

由于电能的生产、变换、传送、分配、使用和控制都比较方便经济,因此电能是现代最主要的能源。在现代工业企业中,利用电动机把电能转换成机械能,去拖动各种类型的生产机械按人们所给定的规律运动(即电力拖动),比其它拖动方式有无可比拟的优点。

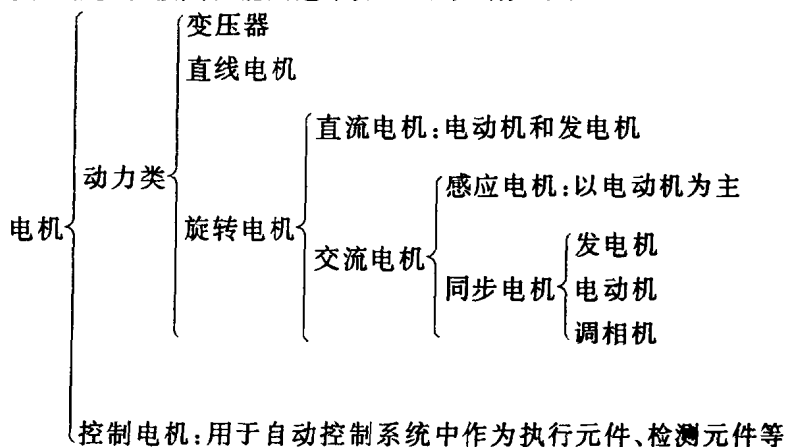
电力拖动具有良好的调速性能,起动、制动、反转和调速的控制简单方便、快速性好且效率高。电动机的类型很多,具有各种不同的运行特性,可以满足各种类型生产机械的要求。电力拖动系统各参数的检测、信号的变换与传送方便,易于实现自动控制。

因此,电力拖动成为现代工业电气自动化的基础。《电机与拖动基础》课程内容,是工业电气自动化等专业学生必须学习和掌握的基本理论。学习各类电机的基本结构、工作原理和运行特性,掌握电力拖动系统的静态和动态特性,将为本专业的培养及后续课程的学习打下必要的理论基础。为此,“电机与拖动基础”课程的学习,在整个专业学习中占有相当重要的地位。

本课程是一门技术基础课,既有基础性又有专业性。它是运用“电路原理”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。但它与“电路原理”等基础课的性质不同。在“电机与拖动基础”课程中,不仅有理论的分析推导,而且还要用基本理论分析研究比较复杂的而且往往带有综合性的工程实际问题。这是学习本课程的特点,也是难点。

§ 0-2 电机的主要类型

电机的类型很多。按其功能用途来分,可以归纳如下:



本课程的内容,就是学习以上各种电机的基本结构、工作原理和特性,以及在电力拖动系统中的应用。

§ 0-3 电机理论中常用的基本电磁定律

电机是进行能量转换的一种机械。发电机将机械能转换成电能,电动机将电能转换成机械能,变压器则是把一种形式的电能转换成另一种形式的电能。虽然其功能及结构各异,但其工作原理都是建立在全电流定律、电磁感应定律和电磁力定律等基本的电磁定律基础上的。

一、全电流定律

凡导体中有电流流过时,就会产生与该载流导体相交链的磁通。全电流定律就是揭露电产生磁的本质,阐明电流与其磁场的大小及方向的关系。

设空间有 n 根载流导体,其电流分别为 $I_1, I_2, \dots$, 则沿任闭合路径 l , 磁场强度 H 的线积分 $\oint_l H \cdot dl$ 等于该回路所包围的导体电流的代数和。即:

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I$$

式中 $\sum I$ 是回路所包围的全电流。若导体电流的方向和积分路径的方向符合右手螺旋关系,该电流取正号,反之取负号。对图 0-1 所示方向, $\sum I = I_1 + I_2 - I_3$

在图 0-1 中又任取另一积分路径 l' , 据全电流定律应有:

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I = \oint_{l'} H \cdot dl'$$

电流的正方向与由它所生的磁场正方向必符合右手螺旋关系,如图 0-2 所示。

在电机和变压器中,常把整个磁路分成若干段,每一段磁路内的磁场强度 H 、导磁材料及导磁面积 S 相同,如图 0-3 所示。则全电流定律简化为:

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 \cdot l_3 + H_4 \delta + H_4 l_4 + H_5 l_5 = NI$$

$$\text{即 } \sum H_k l_k = NI \quad (0-1)$$

式中 H_k 为第 k 段磁路的磁场强度(A/m)

l_k 为第 k 段磁路的平均长度[m]

NI 为作用在整个磁路上的磁动势[A]

$H_k \cdot l_k$ 为第 k 段磁路上的磁压降。

式(0-1)表明,作用在整个磁路上的总磁动势等于各段磁路的磁压降之和。

第 k 段磁路的磁压降可以写成:

$$\begin{aligned} H_k \cdot l_k &= \frac{B_k}{\mu_k} \cdot l_k = \frac{1}{\mu_k} \cdot \frac{\phi}{S_k} l_k \\ &= \phi \cdot \frac{l_k}{\mu_k \cdot S_k} = \phi \cdot R_{mk} \end{aligned} \quad (0-2)$$

式中 $R_{mk} = \frac{l_k}{\mu_k S_k}$ 称为第 k 段磁路的磁阻。式(0-2)表

明,第 k 段磁路的磁通乘上该段磁路的磁阻即为该段磁路的磁压降。这与电路的欧姆定律 $U = IR$ 相似,称为磁路的欧姆定律。则对于图 0-3 所示的无分支磁回路可以写出:

$$\begin{aligned} F = NI &= \sum H_k \cdot l_k = \sum \phi \cdot R_{mk} = \phi \cdot \sum R_{mk} \\ \text{或 } \phi &= F / \sum R_{mk} \end{aligned} \quad (0-3)$$

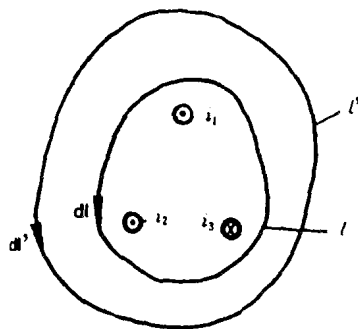


图 0-1 全电流定律

式中 $F=NI$ 为作用在整个磁路上的总磁动势

$\sum R_{mk}$ 为整个磁路的总磁阻。

例 0-1 对于图 0-3 所示的无分支磁路,为了产生给定的磁通 ϕ (Wb),求所需的励磁磁动势 $F=NI$ (若线圈匝数 N 已知,则由 F 可得所需的励磁电流 I)。

对于气隙部分, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] 是一常数。则气隙 δ 上的磁压降 $H_\delta \cdot \delta = \frac{\phi}{\mu_0 \cdot S_\delta} \cdot \delta$, 将 μ_0 及气隙尺寸 (截面积 S_δ 及长度 δ) 和给定的 ϕ 值代入即得气隙磁压降 $H_\delta \cdot \delta$ 。

对于铁芯部份,由于铁的导磁系数 μ_{Fe} 不是常数,所以先据给定的 ϕ 值和各段磁路截面积 S_k 求出该段的磁通密度 $B_k = \frac{\phi}{S_k}$, 再在该段磁路材料的磁化曲线 $B=f(H)$ 查出与 B_k 相对应的 H_k 值,然而算出该段磁路的磁压降 $H_k \cdot l_k$ 。

最后,据式 (0-1) 将各段磁路的磁压降相加,即得和给定磁通 ϕ 相对应的磁动势 $F=NI$ 。

由于 $\mu_0 \ll \mu_{Fe}$ (下述),所以计算表明:即使气隙 δ 很小,气隙磁阻仍很大,气隙磁压降仍比其它各段铁磁路的磁压降之和还要大得多,即励磁磁动势的绝大部份都消耗在气隙上。换言之,由于图 0-3 的磁回路中含有气隙,将使励磁磁动势大为增加。

二、电磁感应定律

设有一匝数为 N 的线圈处在磁场中,它所

交链的磁链为 $\Psi = N \cdot \phi$, 则不论由于什么原因,当该线圈所交链的磁链发生变化时,在线圈内就有一感应电动势产生。这种现象称为电磁感应。这一感应电动势的大小,和该线圈所链的磁链变化率成正比;感应电动势的方向,是该电动势企图在线圈内产生电流 (即感应电流),该感应电流所建立的磁通用来阻止线圈中磁通的变化。如果感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋关系,如图 0-4 所示。则电磁感应定律可用下式表示:

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

式中负号即代表楞次定律。

上面所讲的线圈中磁链的变化、可能由两个原因所引起:

1. 线圈与磁场相对静止,但是穿过线圈的磁通本身 (大小或方向) 发生变化。这种情况如同变压器一样,所以这种感应电动势称为变压器电动势。

以图 0-4 为例,设线圈 N_1 通入随时间而变的电流 i_1 而线圈 N_2 开路。这时由 i_1 所建立的磁通也随时间而变,使与线圈 N_1 和 N_2 所交链的磁链 $\Psi = N_1 \phi$ 和 $\Psi_2 = N_2 \phi$ 也随时间而变化,从而

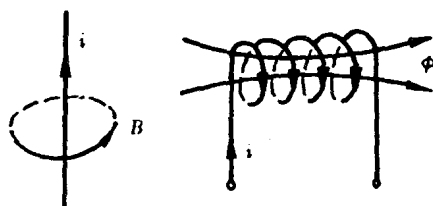


图 0-2 电流与磁场的正方向

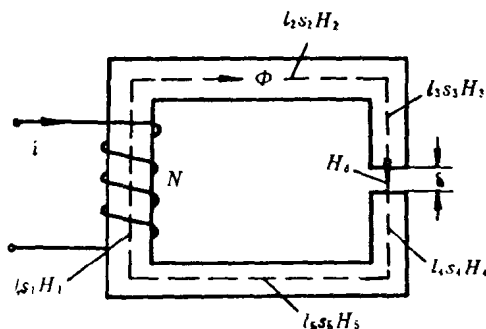


图 0-3 无分支磁路

在线圈 N_1 和 N_2 中都会感应电动势 e_1 和 e_2 。感应电动势的正方向如图 0-4 所示,其表达式如下

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

在此例中,由线圈 N_1 中电流 i_1 的变化而在自身线圈 N_1 内感应的电动势 e_1 称为自感电动势,而由线圈 N_1 中电流 i_1 的变化在另一线圈 N_2 内感应的电动势 e_2 称为互感电动势。

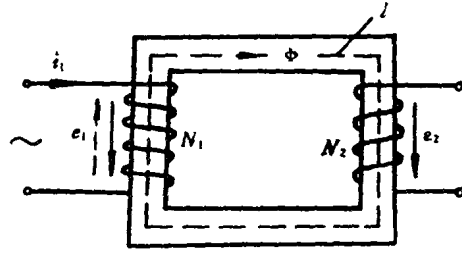


图 0-4 感应电动势的正方向

2. 磁场的大小及方向不变,而线圈与磁场之间有相对运动,使得线圈中的磁链发生变化。这种情况一般发生在旋转电机中,电机旋转时导体“切割”磁力线而产生电动势,所以称之为旋转电动势或速率电动势。

下面利用图 0-5 来推导旋转电动势的计算公式。图中导体 ab 经金属架及灯泡构成一个回路,导体 ab 可以沿金属架移动并且处于磁通密度 B 为恒值的磁场中。设导体 ab 与金属架构成的平面与磁力线垂直,磁力线的方向是进入纸面的,用 $\otimes$ 表示。当导体 ab 在外力作用下,在 dt 时间内从左向右移动很小距离 dx 时,在 dx 范围内可视为磁密 B 是均匀的。则在 dt 时间内,由导体 ab 与金属架所构成的回路内的磁通变化为:

$$d\phi = -B \cdot ds = -B \cdot l \cdot dx$$

式中负号表示磁通减少。则感应电动势为:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{(B \cdot l \cdot dx)}{dt}$$

$$= B \cdot l \cdot \frac{dx}{dt} = B \cdot l \cdot v.$$

式中 $v = \frac{dx}{dt}$ 为导体运动的线速度。电动势的正方向符合右手螺旋关系,如图 0-4 所示。

结论:

(1) 当导体在恒定磁场中运动时,若导体、磁力线和运动方向三者互相垂直,则导体内的感应电动势为

$$e = B \cdot l \cdot v$$

式中 B 为导体所处的磁通密度,单位为 T;

l 为切割磁力线的导体有效长度,单位为 m;

v 为导体相对于磁场的运动线速度,单位为 m/s;

e 为导体中感应电动势,单位为 V。

(2) 旋转电动势的方向可以由图 0-6 所示的右手定则确定:伸开右手,使大姆指与其余四指互相垂直,让磁力线穿过手心,大姆指指向导体相对于磁场的运动方向,则四指所指的方向即为旋转电动势的方向。

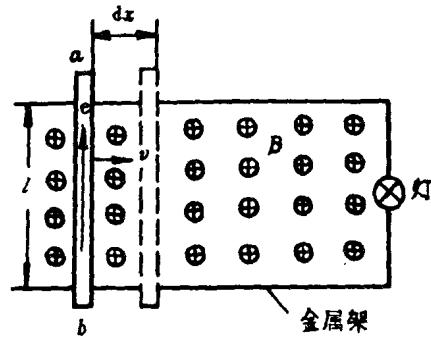


图 0-5 旋转电动势的产生

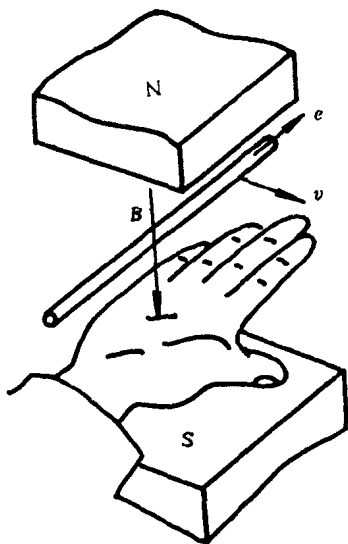


图 0-6 右手定则

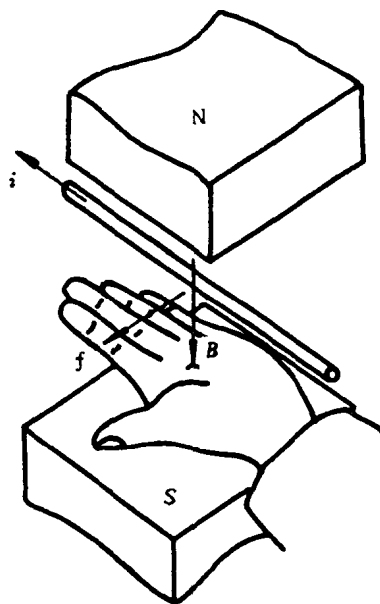


图 0-7 左手定则

三、电磁力定律

载流导体在磁场中将受到力的作用,这种力是磁场与电流相互作用所生的,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:

$$f=B \cdot l \cdot i$$

式中 B 为导体所处的磁通密度,单位为 T;

i 为导体中的电流,单位为 A;

l 为导体在磁场中的有效长度,单位为 m;

f 为作用在导体上的电磁力,单位为 N。

电磁力的方向可用图 0-7 所示的左手定则确定:伸开左手,使大拇指与其余四指互相垂直,让磁力线穿过手心,四指指向电流的方向,则大拇指所指的方向即为电磁力的方向。

§ 0-4 电机中铁磁材料的特性

电机中所用的材料有很多种,有组成电路的导电材料,组成磁路的导磁材料、用以把带电部份分隔开来的绝缘材料以及为了构成电机整体所必需的结构材料等。为了研究电机的原理及特性,必须对这些材料尤为导磁材料的特性有所了解。

各类电机都是以磁场作为媒介,通过电磁感应作用来实现能量转换的,所以在电机里必须有引导磁能的磁路。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是用导磁性能良好的铁磁材料组成。

铁磁材料包括铁、钴、镍及其合金(如电机和变压器中常用的硅钢片)。其电磁方面的特性简述如下:

一、良好的导电性

铁磁材料与电机中常用的导电材料(铜或铝)相比较,虽然其电阻率较大,但是它仍然是一种有较好导电性能的导电材料。

二、高的导磁性能与磁化曲线的非线性

实验表明,所有非铁磁材料(如铜、铝、绝缘材料和木材等)的导磁系数都接近于空气的导磁系数 μ_0 ,而铁磁材料的导磁系数 μ_{Fe} 比 μ_0 大几百到几千倍。对于电机中常用的铁磁材料,其 μ_{Fe} 约为 μ_0 的 2000~6000 倍。所以在同样大小的电流下,带铁芯线圈的磁通比空芯线圈的磁通大得多。

铁磁材料之所以有高导磁性能,是因为铁磁材料内部存在着很多很小的强烈磁化了的自发磁化单元,称为磁畴。在平常,这些磁畴是杂乱无章地排列着,磁场互相抵消,所以对外不显示磁性。但在外界磁场的作用下,磁畴沿外磁场的方向作较有规则的排列,形成了一个附加磁场叠加在外磁场上。

将铁磁材料在外界磁场作用下(外施励磁磁动势)做磁化试验:改变励磁磁动势大小,测出磁通密度 B 与磁场强度 H ,得到 B 与 H 的关系曲线 $B=f(H)$,称之为铁磁材料的磁化曲线。如图 0-8 所示。由图可知,铁磁材料的磁化曲线不是一条直线。在 oa 段, B 的增加缓慢;在 ab 段, B 几乎随 H 正比地增加而且增长迅速;在 bc 段, B 的增加又缓慢下来;在 C 点以后,当 H 再继续增加时, B 几乎不再增加了。对于铁磁材料,当 H 较大时 B 之增加变缓甚至几乎不增加的现象,称为磁饱和现象。据 $\mu_{Fe} = \frac{B}{H}$ 可得 $\mu_{Fe} = f(H)$ 曲线也如图 0-8 所示,由图可知,当铁磁材料饱和时,其导磁系数 μ_{Fe} 变小,即其导磁性能变差。

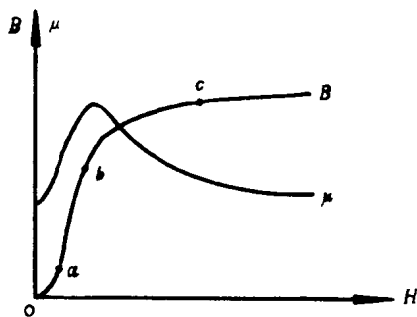


图 0-8 铁磁材料的磁化曲线

对于非铁磁材料,其 $B = \mu_0 \cdot H \propto H$, 即 $B = f(H)$ 是一条直线。

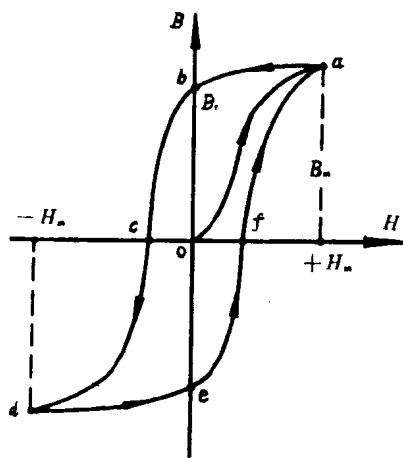


图 0-9 铁磁材料的磁滞回线

三、磁滞现象和磁滞损耗

在测取铁磁材料的磁化曲线时,改变外施励磁磁动势的大小及方向,使磁场强度在 $-H_m \sim +H_m$ 之间反复磁化,所得的 $B \sim H$ 关系曲线是图 0-9 所示的闭合曲线 $abcdefa$,称为铁磁材料的磁滞回线。同一铁磁材料在不同的 H_m 值下有不同的磁滞回线。把不同 H_m 值的各磁滞回线的顶点(如图 0-9 中的 a 点)连接起来所得的曲线,称为基本磁化曲线(如图 0-9 中的 oa)。

由图 0-9 可知,上升磁化曲线与下降磁化曲线不重合。下降时, B 的变化总是滞后于 H 的变化,当 H 下降到零时, B 未下降到零而是仅下降至某一数值 B_r ,这种现象称为磁滞现象, B_r 称为剩余磁感应强度。

铁磁材料在交变磁场的作用下反复磁化时,内部的磁畴不停地往返倒转,磁畴之间不停地互相磨擦而消耗能量,引起损耗。这种损耗称为磁滞损耗 P_h 。它与磁通的交变频率 f 及磁通密度的幅值 B_m 的关系为:

$$p_h \propto f \cdot B_m^\alpha$$

对于常用的硅钢片,当 $B_m = 1.0 \sim 1.6 [T]$ 时, $\alpha \approx 2$ 。硅钢片的磁滞回线较窄,磁滞损耗较小,所以电机和变压器的铁芯都用硅钢片。

四、涡流损耗

当铁芯中的磁通发生交变时,据电磁感应定律,在铁芯内也会感应电动势并产生感应电流。此感应电动势及电流的正方向与通过铁芯的交变磁通 B 的正方向之间的关系符合右手螺旋关系,如图 0-10 所示,由于此电流在铁芯内的流动状况呈旋涡状,故称之为涡流。此涡流在铁芯电阻上的损耗称为涡流损耗 P_w 。

涡流损耗与磁通的交变频率 f 、铁芯中磁通密度幅值 B_m 、钢片的电阻 r_w 及钢片厚度 d 有关,为下式所示:

$$p_w \propto f^2 \cdot B_m^2 \cdot d^2 / r_w$$

由此式可知,为了减少涡流损耗,必须减少钢片的厚度,所以电工钢片的厚度一般为 0.35 和 0.5mm。同时必须增加钢片的电阻率,所以电工钢片中常加入 4%左右的硅,变成硅钢片。

所以,当铁芯中的磁通交变时,有磁滞损耗和涡流损耗两种损耗,合称为铁芯损耗,简称为铁耗 p_{Fe} 。当硅钢片厚度及材料一定时,铁耗与磁通的交变频率及磁密幅值的关系如下:

$$p_{Fe} \propto f^\beta \cdot B_m^2$$

式中, $\beta = 1.2 \sim 1.6$

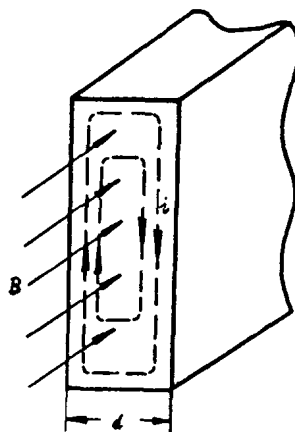


图 0-10 一片硅钢片中的涡流

习题与思考题

0-1 在求取感应电动势时, 式 $e_L = -L \cdot \frac{di}{dt}$ 、式 $e = -\frac{d\psi}{dt}$ 、式 $e = -N \frac{d\phi}{dt}$ 以及式 $e = Blv$ 等式中, 哪一个式子具有普遍的形式? 另外诸式必须在各自的什么条件下才能适用?

0-2 有两个线圈匝数相同, 一个绕在闭合铁芯上, 另一个绕在木材上, 两个线圈通入相同频率的交变电流。如果它们的自感电动势相等, 试问哪个线圈的电流大? 为什么?

0-3 如果感应电动势正方向与磁通的正方向之间不符合右手螺旋关系, 则电磁感应定律应写成 $e = +\frac{d\psi}{dt} = +N \frac{d\phi}{dt}$, 试说明其原因。

0-4 在图 0-11 中, 当线圈 N_1 外施正弦电压 U_1 时, 为什么在线圈 N_1 及 N_2 中都会感应出电动势? 当电流 i_1 增加时, 标出这时 N_1 及 N_2 中感应电动势的实际方向。

0-5 在图 0-12 中, 电流 i_1 在铁芯中建立的磁通为 $\phi = \phi_m \cdot \sin \omega t$, 各物理量的正方向如图所示。试求匝数为 N_2 的线圈中感应电动势的表达式。

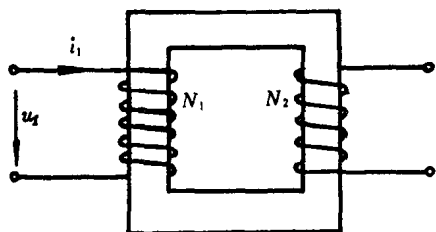


图 0-11 习题 0-4 附图

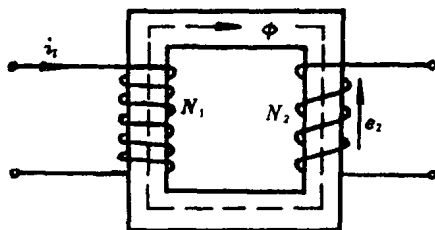


图 0-12 习题 0-5 附图

0-6 试用磁畴的观点, 解释铁磁材料磁化曲线的饱和现象、磁滞现象及剩磁。

0-7 为什么电机和变压器的磁路都采用很薄的而且含有硅的钢片迭片而成。

第一章 直流电机

直流电机可作电动机用,也可作发电机用。直流电动机是将直流电能转换成机械能而带动生产机械运转。由于直流电动机具有优良的起动性能和调速性能,所以在电气传动系统中,尤其是对起动及调速性能要求较高的生产机械,一般都用直流电动机进行拖动。

直流发电机是将机械能转换成直流电能而对电解、电镀及直流电动机等负载供电。随着电子技术的发展,直流发电机有逐步被可控整流电源所取代的趋势。但从电源质量和可靠性等方面考虑,在一些重要的直流拖动系统中仍然采用直流发电机作为直流电源,单独对直流电动机供电,组成直流发电机—电动机组。

本章分析直流电机(主要是直流电动机)的工作原理及特性,为直流电机拖动系统的研究提供基础知识。

§ 1-1 直流电机的基本工作原理与结构

一、直流电机的基本工作原理

1. 直流发电机的基本工作原理

图 1-1 是一个直流发电机的工作模型。图中 N、S 是两个在空间固定不动的磁极(它可以是永久磁铁,也可以是在铁芯上绕上励磁线圈并通入直流电流来建立磁场的电磁铁); $abcd$ 是一个装在可以转动的铁磁圆柱体上的线圈(合称为电枢);线圈的首、末端分别连接到与电枢同轴旋转的两个圆弧形铜片(称为换向片)上,换向片之间及换向片与转轴之间是互相绝缘的; A 和 B 是两个与换向片相接触,但在空间上静止不动的铜片(称为电刷),从电刷 A 、 B 引出即可对负载(图中用灯泡表示)供电。

当原动机拖动电枢以转速 n 恒速旋转时,导体 ab 和 cd 切割磁力线而感应电动势,其方向可用右手定则确定。在图 1-1 所示的时刻,整个线圈的电势方向是 e_{dcba} ,即从 d 到 a 。此时 a 端经换向片接触电刷 A , d 端经换向片与电刷 B 接触,所以电刷 A 为正极性而电刷 B 为负极性。如果在电刷 AB 之间接上负载,则就有电流 I 从电刷 A 经过外电路负载而流向电刷 B 。根据电流的连续性,此电流必经过换向片及线圈 $abcd$ 而构成回路,所以此时刻在电枢的线圈中,电流的方向也是 i_{dcba} ,亦从 d 到 a 。

当电枢转过 180° 时,线圈 $abcd$ 中感应电动势的方向为 e_{abcd} ,即从 a 到 d 。此时 d 端与电刷 A 相接触,而 a 端与 B 电刷接触。所以电刷 A 仍为正极性,电刷

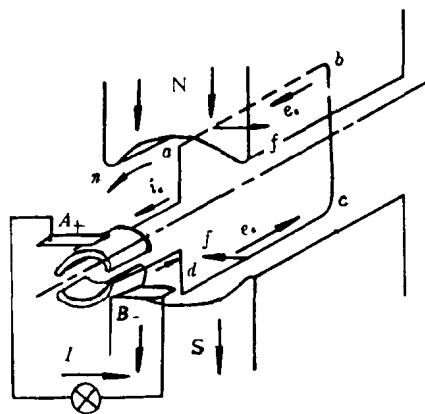


图 1-1 直流发电机的工作模型

B 仍为负极性。因而流过外部负载的电流方向不变。据电流连续性,此时在电枢线圈中的电流方向为 i_{abcd} ,即从 a 到 d 。

根据以上两个特定位置的分析,可以得出直流发电机以下几个结论:

(1)在电枢线圈内的感应电动势 e_a 及电流 i_a 都是交流电,通过换向片及电刷的整流作用才变成从外部看的两电刷间的直流电动势,使外部电路得到方向不变的直流电流;

(2)在发电机中,电枢线圈中的感应电动势 e_a (称为电枢电动势)与其电流 i_a (称为电枢电流)的方向始终一致;

(3)虽然电枢线圈是旋转的且电枢线圈中的电流是交变的,但从空间上看, N 极与 S 极下的电枢电流的方向不变,因此,由电枢电流所产生的磁场从空间上看也是一个恒定不变的磁场;

(4)当直流发电机接上负载时,电枢绕组中就有电流 i_a ,此电流与磁场相互作用产生电磁力 f 。据左手定则可以得出 f 的方向如图 1-1 所示。此电磁力 f 使转轴受到一个力矩 $T=f \cdot R$ (式中 R 为导体对转轴中心的半径),称之为电磁转矩,其方向是与转子转向相反的,是制动性质。为此原动机必须输入机械功率克服电磁转矩的制动作用才能使转子继续恒速旋转,才能继续不断地发出电能输给负载,这就是将机械能通过电磁感应作用变成了电能。

2. 直流电动机的工作原理

保持图 1-1 所示的直流发电机的工作模型的结构不变,仅将电刷出线端的灯泡改成外施直流电源 u ;而且将轴上的原动机卸掉,换成生产机械负载。这样就成了图 1-2 所示的直流电动机的工作模型。

对于图 1-2 所示时刻,在外施电压 u 的作用下,有电流 I 经过电刷 A 及与之相接触的换向片进入电枢绕组 $abcd$,成为电枢绕组中的电流 i_a ,其方向为 i_{abcd} 。然后经换向片及与之相接触的电刷 B 而返回电源负端。电枢电流 i_a 与磁场相作用,使电枢线圈受到电磁力 f ,其方向可由左手定则确定,如图 1-2 所示。在此电磁力所产生的电磁转矩 T 的驱动下,使转子沿 T 的方向旋转起来。

当电枢转过 180° 时,虽然外部直流电路的电流 I 方向不变,但从电刷进入电枢绕组内部的电流方向变为 i_{dcba} ,此时电磁力的方向不变,因而电磁转矩 T 的方向也不变。转子在方向恒定的转矩 T 的驱动,继续不停地旋转,从而带动轴上的机械负载转动。

由以上两个特定的位置分析,也可以得出以下结论:

(1)在直流电动机中,虽然外施电压 u 及电流 I 是直流,但在电枢绕组内部,电流 i_a 是交流。这是靠换向片及电刷的逆变作用,将外部直流变成内部的交流;

(2)仿上,虽然电枢线圈是旋转的且电流是交变的,但从空间上看,由电枢电流所生的磁场也是一个恒定磁场;

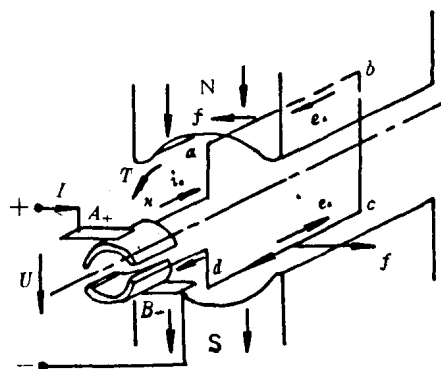


图 1-2 直流电动机的工作模型