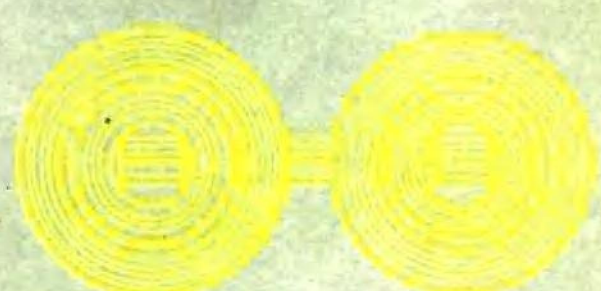


电机学

饶立昌 秦建球 等编

中南工业大学出版社



电 机 学

饶立昌 秦建球 等著

责任编辑: 雷丽云

插图编辑: 刘楷英

*

中南工业大学出版社出版发行
湖南省地质测绘印刷厂印装
湖南省新华书店经销

*

开本: 787×1092/32 印张: 15.5 字数: 380千字

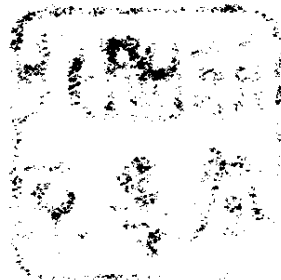
1989年11月第1版 1989年11月第1次印刷

印数: 0001—2000

*

ISBN 7-81020-256-1/TM-002

定价: 2.55元



前 言

本书是根据冶金工业部高等院校工业电气化及自动化专业《电机学》教学大纲编写的。在编写过程中，为使本课程的内容更好地满足该专业的教学需要，参考了全国自动化专业委员会所制订的专业教学计划。

《电机学》主要内容包括：直流电机，变压器，交流电机、交流异步电动机、交流同步电机和控制电机。编者根据本专业的性质和多年教学经验，从讲深、讲透，突出重点的要求出发，阐述了各种电机的基本结构，工作原理，内部电磁过程和能量转换关系及运行特性。

本书可作为高等院校工业电气自动化专业，自动化仪表等专业的教材，亦可作为职工大学，电视大学和从事自动控制的工程技术人员参考书。

本书由中南工业大学自动控制工程系饶立昌教授主编，绪论，第三、四章由秦建球编写，第一章黄芝华编写，第二章由郑晓明编写，第五章由戴授援编写，第六章由黄运生编写。在编写过程中得到杨欣荣副教授和教研室其他同志的大力支持和帮助。在此表示衷心地感谢。

由于编者水平有限，成书时间仓促，书中不妥和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1989年元月6日

绪 论

一、电机在国民经济中的作用

电机是进行机电能量转换的机器。发电机将机械能转变为电能；电动机将电能转变为机械能来拖动生产机械；变压器将某种电压的电能转变为另一种电压的电能以利于电能的传输与分配。由于电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制都比较方便，效率高，而且经济、安全可靠。因此，电能是国民经济中使用最广的主要能源。

在电力工业中，电机是发电厂和变电所的主要设备。在水电站，利用水轮机拖动水轮发电机将水流的动力转变为电能。在火力发电厂，用汽轮机拖动汽轮发电机将燃料燃烧的能量转变为电能。在核电站，发电机将原子核裂变的能量转变为电能。为了经济地传输和分配电能，利用变压器将电压升高后再把电能送到用电地区，然后又经变压器将电压降低供用户使用。

在机械、冶金、石油、煤碳和化学工业中，大量地使用各种电动机拖动生产机械。例如，用电动机拖动各种机床，轧钢机、起重机、通风机、压气机和水泵等生产机械。

在交通运输业中，用牵引电机拖动电车、电气机车等交通工具。

在农业上，使用电机进行电力排灌、碾米、榨油等。此外，在国防、文教、卫生和日常生活中电机也获得了广泛地应用。

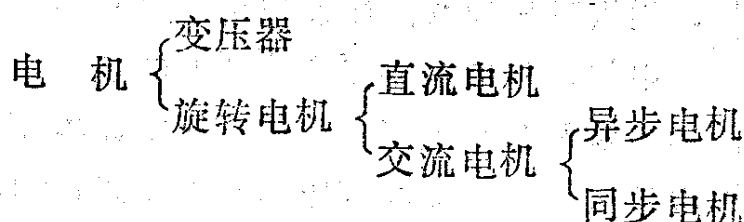
随着四个现代化的发展，工业生产自动化程度的不断提高，电机的应用将愈来愈广。

二、电机的分类

电机的类型很多，分类的方法也各异。如按电流的形态可分为直流电机与交流电机，按相数可分为三相电机和单相电机等。而按其功能可分为：

1. 发电机 把机械能转变为电能；
2. 电动机 把电能转变为机械能；
3. 变压器、变频器、变流机、移相器 分别用于改变电能的电压、频率、电流和相位。
4. 控制电机 作为控制系统中的检测元件和执行元件等。

按其结构特点可分为：



三、电机的基本电磁规律

电机的工作原理是建立在电磁感应定律、电磁力作用定律和三相旋转磁场理论的基础之上。不论何种电机，它们在进行能量转换时一定要遵循磁路和电路的规律。因此，电磁感应定律、全电流定律、电路定律和电磁力定律是电机的基本电磁规律。熟练地掌握这些基本电磁定律是深入研究电机基本理论的

基础。下面简要地介绍这些定律。

1. 全电流定律

设空间有 N 根载流导体，各导体中的电流分别为 $I_1, I_2, \dots$ ，则沿任何闭合回路 l ，磁场强度 H 的线积分 $\oint_l H \cdot dl$ 等于该闭合回路所包围的导体电流的代数和，即

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I \quad (0-1)$$

这就是全电流定律。 $\sum I$ 是回路所包围的全电流。在(0-1)式中，若导体中电流的方向与积分路径的方向符合右手螺旋定则，该电流取正号，反之取负号。

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。把全电流定律应用到电机和变压器中的多段磁路时，可写成：

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum I = IW \quad (0-2)$$

式中： H_k ——第 K 段磁路处的磁场强度（安匝/米）

l_k ——第 K 段磁路的平均长度（米）

IW ——磁势（安匝）

上式中每一段的 Hl 值，称为该段磁路上的磁压降，而 WI 是作用在整个磁路上的磁势，在电机中就是激磁绕组产生的安匝数。(0-2)式表明，作用在磁路上的总磁势等于各段磁路上的磁压降之和。

2. 磁路欧姆定律

由于 $B = \mu H$ ，而磁感应强度 B 又等于磁通量 ϕ 除以磁路的截面积 A ，即 $B = \phi / A$ ，所以(0-2)式可改写为

$$F = WI = \sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^n \frac{B_k}{\mu_k} l_k = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\mu_k} \cdot \frac{\phi_k l_k}{A_k}$$

$$= \phi \sum_1^n \frac{1}{\mu_k} \frac{l_k}{A_k} = \phi \sum_1^n R_k \quad (0-3)$$

式中：\$F\$——磁路的磁势

\$R_k\$——第\$K\$段磁路的磁阻

$$R_k = \frac{1}{\mu_k} \cdot \frac{l_k}{A_k} \quad (0-4)$$

磁路的磁阻主要取决于磁路的几何尺寸和所使用材料的导磁系数\$\mu\$。\$\mu_k\$为第\$K\$段磁路的导磁系数。第\$(0-3)\$式可改写成

$$\phi = \frac{F}{\sum_1^n R_k} \quad (0-5)$$

从\$(0-5)\$式可知，磁路的磁通等于作用在磁路上的总磁势除以磁路的总磁阻，这就是磁路的欧姆定律。

3. 电磁感应定律

设有一只匝数为\$W\$的线圈放在磁场中，当与线圈交链的磁通\$\phi\$随时间变化时，线圈内将感应出电势。这种现象称为电磁感应。如果规定感应电势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋定则，则感应电势可用下式表示：

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d\phi}{dt} \quad (0-6)$$

式中：\$\psi = W\phi\$ 为线圈所交链的磁链。上式表明，由电磁感应产生的电势与线圈的匝数和磁通的变化率成正比。式中的负号表示：如果在感应电势的作用下在线圈内产生电流，则该电流所产生的磁通起着反对原有磁通变化的作用。例如，当磁通增加时（此时\$d\phi/dt\$为正值，则\$e\$为负值），它企图减小磁

通。若磁通减小时（此时 $d\phi/dt$ 为负值，则 e 为正值），则企图增加磁通。这个规律，常称为楞次定律。它是变压器工作原理的理论基础。因此，由上述电磁感应产生的电势，在电机学中常称为变压器电势。

电磁感应定律的另一种表达形式如下：当导体在恒定磁场中运动而切割磁力线时，导体内将感应出电势。若磁力线、导体和运动方向三者互相垂直，则导体的感应电势为：

$$e = Blv \quad (0-7)$$

式中： B ——磁感应强度（韦/米²）

l ——导体切割磁力线的有效长度（米）

v ——导体相对磁场运动的线速度（米/秒）

e ——感应电势（伏）

导体内的电势方向由右手定则确定。导体相对于磁场运动切割磁力线而感应的电势，在电机学中常称为旋转电势（或称为速率电势）。

4. 回路定律

在任何闭合电路中，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之和。即

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

回路中各电量正负号的规定如下：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。凡是正方向与环绕回路方向一致的电势和电压降取正号，反之取负号。

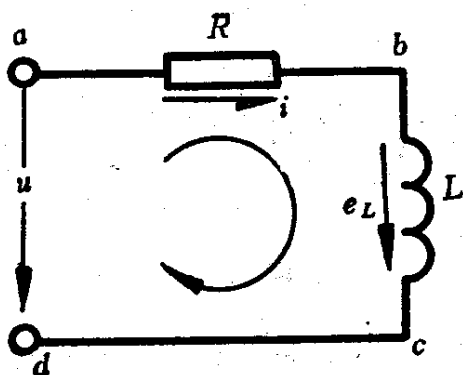


图0-1 电路中各电量的正方向

在图0-1中，沿 $abcd a$ 环绕

一周,可得

$$e_L = iR - u$$

或

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

式中: $e_L = -L \frac{di}{dt}$ 为电感线圈中的自感电势。如果外加电压按正弦规律变化时,则可得回路定律的相量方程式为:

$$\dot{U} = \dot{I}R + j\omega L \dot{I} = \dot{I}R + j\dot{I}X_L \quad (0-10)$$

式中: X_L ——电抗线圈 L 的电抗

$\omega = 2\pi f$ ——电流变化的角频率

5. 电磁力定律

载流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产生的,故称为电磁力。若磁场的磁力线与载流导体相互垂直,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)

电磁力的方向由左手定则确定。

四、本课程的主要内容和特点

电机学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电机的基本理论及其在生产实践中的

应用问题。电机学研究的中心问题是能量的转换。其主要研究内容包括：各种电机的基本结构、工作原理、内部电磁过程和能量关系，运行特性及其各种电机的应用等问题。因此，在学习本课程时，既要抓住基本理论和基本概念，又要学会运用基本理论去分析和解决实际问题。

电机是一种电磁机构，因此，它在运行时要遵循磁路规律和电路规律，上述规律常用磁势平衡与电势平衡方程式表之。电机又是一种电力机械装置，因此，它在运行时要遵循动力学规律（即机械规律），电机的动力学规律用转矩平衡方程式表之。电机又是一种能量转换的机器，因此，它在运行时要遵循能量守恒的规律，此规律用功率平衡方程式表之。上述三个平衡方程式反映了电机运行时要遵循的客观规律。所以，称为电机的基本方程式。

电机运行时，内部的电磁过程非常复杂，而且磁路的工程计算又很困难，因此，在工程上为了使问题简化和便于计算，常常将电磁问题转化为一个纯电路问题，即用一个等值电路来代替实际电机的电磁关系。此外，在研究交流电机和变压器时，认为各物理量均按正弦规律变化，因此，可以将各物理量用相量表示，相量图可以明确地表示各物理量之间的相互关系。因此，基本方程式、等值电路与相量图是研究电机的三种工具，利用它可分析各种电机运行的客观规律及其物理本质。上述三种工具虽不相同，各有其用处，但三者之间是有联系的，也是统一的。有关它们之间的关系将在后续章节详细分析。

目 录

绪 论	(I)
第一章 直流电机	(1)
第一节 直流电机的工作原理和结构	(2)
第二节 直流电机的空载磁场	(20)
第三节 直流电机的电枢绕组和电枢电势	(25)
第四节 直流电机的电枢反应和电磁转矩	(40)
第五节 直流发电机	(50)
第六节 直流电动机	(68)
第七节 直流电机的换向	(89)
习 题	(103)
第二章 变压器	(108)
第一节 变压器的工作原理和结构	(108)
第二节 变压器的空载运行	(118)
第三节 变压器的负载运行	(129)
第四节 变压器的参数测定	(145)
第五节 变压器的运行特性	(150)
第六节 三相变压器	(158)
第七节 变压器的并联运行	(176)
第八节 电流互感器及电压互感器	(184)
第九节 自耦变压器	(189)
第十节 电焊变压器	(193)
总 结	(196)
习 题	(199)

第三章 交流电机的共同问题	(210)
第一节 交流电机的绕组	(210)
第二节 交流绕组的磁势	(223)
第三节 交流绕组的感应电势	(247)
小 结	(256)
习 题	(257)
第四章 交流异步电机	(260)
第一节 三相异步电机的作用原理和结构	(260)
第二节 三相异步电动机的运行分析	(270)
第三节 异步电动机的参数测定	(294)
第四节 异步电动机的运行特性	(298)
第五节 异步电动机的起动	(308)
第六节 深槽式及双鼠笼式电动机	(321)
第七节 三相异步电动机的调速与制动	(325)
第八节 异步发电机	(326)
第九节 单相异步电动机	(330)
小 结	(339)
思考题与习题	(345)
第五章 同步电机	(349)
第一节 同步电机的运行原理和结构	(349)
第二节 同步发电机	(356)
第三节 同步电动机	(368)
第四节 同步补偿机	(392)
第五节 反应式同步电动机	(394)
小 结	(396)
思考题	(397)

第六章 控制电机	(399)
第一节 伺服电动机	(400)
第二节 测速发电机	(418)
第三节 自整角机	(430)
第四节 步进电动机	(447)
第五节 旋转变压器	(455)
第六节 电机扩大机	(465)
习 题	(478)

第一章 直流电机

直流电机是将直流电能和机械能相互转换的旋转电机。它可用作电动机或发电机，还可作其他特殊用途。

直流电动机具有优良的调速性能，不但调速平滑、方便，而且范围宽广；它的过载能力大，能承受负载的频繁冲击与变动；能实现频繁的无级快速起动，制动和反转；能满足生产过程自动化系统各种不同的特殊运行要求等特点。虽然它的制造成本和维护工作量比交流电动机大，尽管可控硅器件出现为交流电动机调速开辟了可行的广阔的前程，直流电动机在今后不短的时期内仍将在电力拖动系统中担负着主要的角色。在需要宽广调速的场合和要求特殊运行性能的自动控制系统中，一直占有突出的地位，被广泛应用于冶金矿山，交通运输，纺织印染，造纸印刷、以及化工和机床等工业。

直流发电机能提供无脉动的电力，其输出电压便于精确地调节和控制。它的主要用途是作为某些重要的直流电动机的电源，使其获得较好的换向性能；它还能满足直流和同步电机励磁系统的不同要求；它在电化工业中作为电解，电镀的低压大电流的直流电源。随着可控硅整流电源的广泛应用和日趋完善，及其在技术上，经济上的显著优点使直流电动机应用范围进一步扩大，因而在许多领域取代了直流发电机。但直流发电机在某些领域中，如真空冶炼工业和无交流电网且又需直流电源的场合等，仍有它一定的重要性。

本章研究换向器式直流电机。首先介绍它的工作原理及基

本结构，并对其磁路系统和电路系统进行分析，然后论述直流电机作为电动机运行及作发电机运行的电磁过程及工作特性，最后简要介绍换向理论和改善换向的方法。

第一节 直流电机的工作原理和结构

一、直流电机的工作原理

直流电机在本质上是一台装有换向器的交流电机。依靠换向器的作用把交流变成直流。所以为了说明直流电机的工作原理，我们先了解一下最简单的交流发电机是怎样工作的。

1. 最简单的交流发电机的工作原理

图1-1为一台最简单的交流发电机工作原理图。它的最主要构

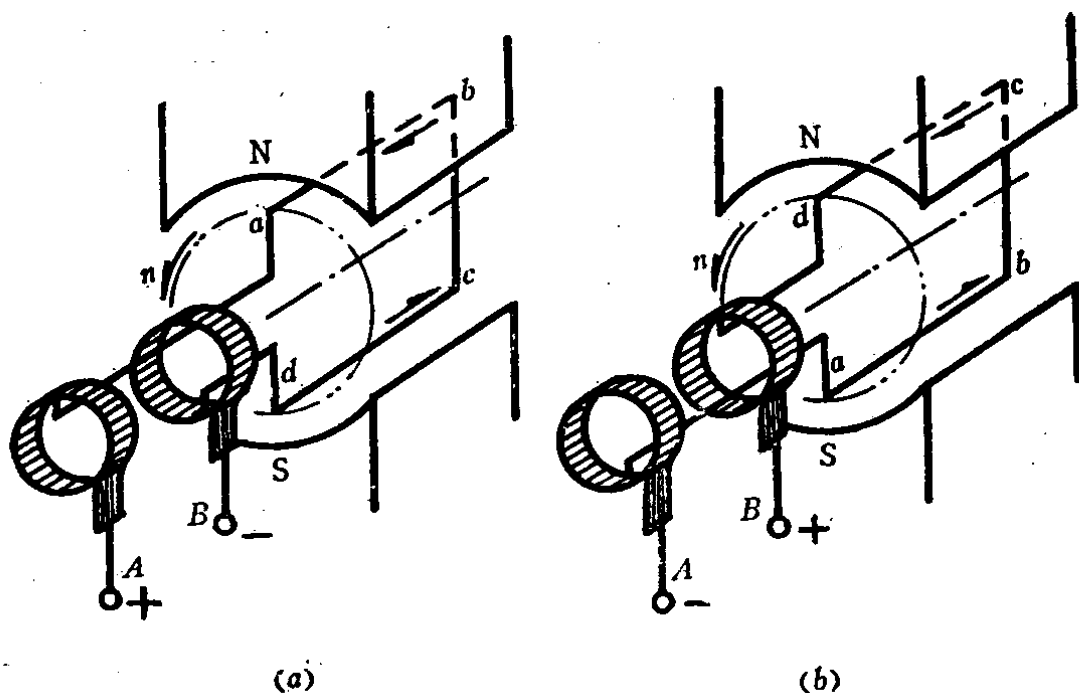


图 1-1 最简单的交流发电机

件是：一对永久磁铁构成的固定磁极，其磁力线方向从N极到S极；和一个在两磁极间沿固定轴旋转的线圈 $abcd$ 。线圈和安放线圈的导磁构件（图中略去）合称为电枢；为了把这个旋转线圈中感应电势引出来，再配上两个滑环，两个电刷。两个滑环分别与线圈的首末端连结，并与之一起运转，而电刷则是静止的，两个电刷分别与两个滑环永远保持电接触。

设线圈在外机械（原动机）的带动下沿着逆时针方向匀速旋转时，穿过线圈内的磁力线数目在不断地周期性变化，根据楞次定律线圈内必定感应出电势。再进一步分析可知，在旋转的线圈中只有 ab 和 cd 两段才切割磁力线，根据法拉第定律只有这两段才感应电势。在电机学中把这感应电势的线圈部分称为导体。这与物理学中导体的含义有区别。线圈中其它部分称为端接。 bc 段称为后端接， ad 段称为前端接（当线圈匝数大于1时）， a 和 d 点与滑环相连的部分叫线圈的首末端或引出线。

按法拉第电磁感应定律，导体中感应电势的方向依右手定则来判明。在图1—1a中，导体 ab 处于N磁极下，导体 cd 处于S磁极下，电势方向为 $b \rightarrow a$ ， $d \rightarrow c$ 。所以一个单匝线圈所感生电势的方向从 d 经 c 、 b 到 a ，从而在电刷A上得到正极性，电刷B上得到负极性。

当线圈转过了 180° ，如图1—1b所示。 ab 导体处于S极下， cd 导体处于N极下，此时它们感应电势方向分别为 $a \rightarrow b$ 、 $c \rightarrow d$ 。线圈电势的方向则自 a 经 b 、 c 至 d 。由于电刷A永远与 a 引线端所连的滑环接触，故它的极性变为负。同理，B电刷的极性则变为正。

每根导体感应电势的瞬时值 e 大小为：

$$e = B_x l v \quad (1-1)$$

式中： B_x ——导体所处位置的磁通密度（磁密）；

l ——导体的有效长度，即导体实际长度在与 v 和 B 同时相垂直的方向上的投影长；

v ——导体运动的线速度。

由于原动机恒速运转，故 v 为常数。 l 决定于电机的结构也是常数。从(1-1)式知， $e \propto B_x$ 。而导体在空间的位置随时间作周期性改变的，所以感生电势的波形决定于导体所经过空间的磁密分布情况。如图1-2所示，磁密在空间分布的波形若为平顶波。则感生电势随时间变化的波形也必定为平顶波。该图中将空间 360° 内磁密大小分两部分画在空间角横坐标的两侧。这是因为处N磁极下的导体所切割的磁力线是从磁极指向导体运行轨迹的内部，而处于S磁极下的导体所切割的磁力线的方向则是从它运行轨迹内部指向S极。

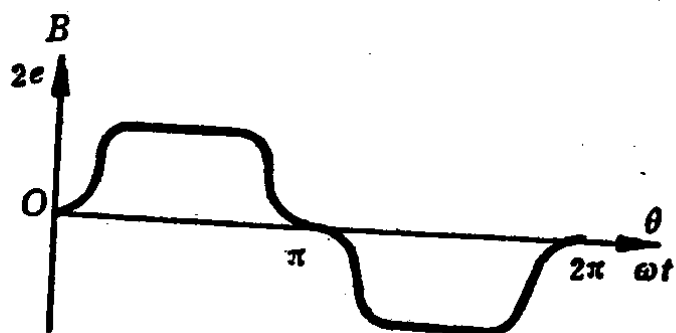


图 1-2 交流电机的气隙磁密分布和电势波形

感应电势的频率决定于原动机的转速 n (r/min)，图1-1所示的电机的极对数 p 为1，导体（或电枢）每转过一圈电势变化一个周期。故感应电势的频率 $f = n/60$ ，当电机的极对数为 p 时， $f = pn/60$ 。

由上分析可知最简单的交流发电机在原动机的带动下，它的导体感应电势、滑环间电势、电刷之间电势都是交变的。电势频率决定于原动机的转速。当原动机转速恒定的情况下，这个随时间改变的感应电势，显现出磁密在空间分布的情况。换言之，空间的磁密分布波形，通过磁场和导体相对运动转化成时间上以同一情况出现的电势波。时间量和空间量相互转化这