



**GH**

高等学校  
工科电子类  
规划教材

沈裕康 严武昇 杨庚辰

# 电机与电器

北京理工大学出版社

# 电机与电器

沈裕康 严武昇 杨庚辰

北京理工大学出版社

# (京) 新登字 149 号

## 内 容 简 介

本教材着重介绍机电控制中常用的各种交直流电机和电器。内容有：直流发电机、直流电动机、直流伺服电动机、直流测速发电机、变压器、单相异步电动机、三相异步电动机、二相交流伺服电动机、交流测速发电机、自整角机、旋转变压器、感应同步器、直线电动机、步进电动机、角位移编码器和各类控制用低压电器。

本书从各类电机、电器的基本电磁关系出发，阐明其物理概念、深入浅出地分析其工作原理和特性，对各种电机、电器的使用 and 选择作了较为详细的说明，反映了当前国内外控制电机、电器的发展情况。

本书除作为电子机械类各专业的本科生教材外，还可作工程技术人员的参考资料。

## 电机与电器

尤裕康 严武昇 杨庚辰

\*

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

\*

850×1168 毫米 32 开本 12.5 印张 322 千字

1994 年 4 月第一版 1994 年 4 月第一次印刷

ISBN 7-81013-116-8/TB·7

印数：1—5500 册 定价：9.35 元

# 前 言

本教材系按中国电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由电子机械教材编审委员会无线电设备结构设计编审小组征稿并推荐出版。责任编辑为李秉永。

本教材由西安电子科技大学沈裕康担任主编,桂林电子工业学院秦清俊担任主审。

本教材参考学时数为 60 学时。内容包括直流发电机、直流电动机、直流测速发电机、直流伺服电动机、变压器、单相异步电动机、三相异步电动机、交流伺服电动机、交流测速发电机、自整角机、旋转变压器、感应同步器、直线电动机、步进电动机、位移编码器和各类控制用的低压电器。每章附有一定数量的习题。并收集了一些我国生产的电机和电器的型号和技术性能指标,以供选用时参考。本教材从各类电机、电器的基本电磁关系出发,阐明其物理概念,深入浅出地分析其工作原理及特性。对各类电机、电器的选择和使用作了较详细的说明。力求反映当前国内外控制电机和电器的发展情况,内容较为新颖,涉及的范围较广。

本教材可作为高等院校电子机械类专业的教科书,也可作为有关专业的教学参考书,并可供有关工程技术人员自学和参考。

本教材由沈裕康编写了第二章、第八章并统编全稿;严武昇编写了绪论、第一章、第五章、第六章和第七章;杨庚辰编写了第三章和第四章。浙江大学孙云鹏同志审阅了全稿,并提出了许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

绪 论 .....	( 1 )
第一节 电机、电器在国民经济中的作用 .....	( 1 )
第二节 电机、电器的种类和特点 .....	( 3 )
第三节 电机中常用的材料和基本电磁定律 .....	( 4 )
习题 .....	( 16 )
<b>第一章 直流电机</b> .....	( 18 )
第一节 直流电机的基础原理 .....	( 18 )
第二节 直流发电机 .....	( 36 )
第三节 直流电动机 .....	( 54 )
第四节 直流伺服电动机 .....	( 78 )
第五节 直流电动机的发展动向 .....	( 90 )
习题 .....	( 97 )
<b>第二章 变压器</b> .....	( 100 )
第一节 概述 .....	( 100 )
第二节 变压器的空载运行 .....	( 102 )
第三节 变压器的负载运行 .....	( 108 )
第四节 变压器参数的测定 .....	( 114 )
第五节 变压器的运行特性 .....	( 116 )
习题 .....	( 121 )
<b>第三章 交流电机</b> .....	( 124 )
第一节 概述 .....	( 124 )
第二节 异步电动机 .....	( 125 )
第三节 交流伺服电动机 .....	( 151 )
第四节 交流异步测速发电机 .....	( 174 )
第五节 直线电动机 .....	( 183 )
习题 .....	( 190 )

<b>第四章 自整角机</b> .....	(200)
第一节 概述 .....	(200)
第二节 自整角机的结构 .....	(202)
第三节 控制式自整角机的工作原理 .....	(203)
第四节 力矩式自整角机的工作原理 .....	(210)
第五节 差动自整角机 .....	(215)
第六节 自整角机的发展动向 .....	(218)
习题 .....	(220)
<b>第五章 旋转变压器</b> .....	(228)
第一节 旋转变压器的结构和基本工作原理 .....	(228)
第二节 旋转变压器的应用 .....	(235)
第三节 旋转变压器的技术性能指标 .....	(238)
第四节 感应移相器 .....	(240)
第五节 多极旋转变压器 .....	(243)
第六节 感应同步器 .....	(248)
习题 .....	(253)
<b>第六章 步进电动机</b> .....	(255)
第一节 反应式步进电动机的结构和基本原理 .....	(255)
第二节 反应式步进电动机的特性 .....	(262)
第三节 步进电动机的驱动电源 .....	(272)
第四节 步进电动机的使用 .....	(277)
习题 .....	(281)
<b>第七章 位移编码装置</b> .....	(283)
第一节 直接编码装置 .....	(283)
第二节 光栅位移传感器 .....	(291)
<b>第八章 低压电器</b> .....	(296)
第一节 概述 .....	(296)
第二节 刀开关和转换开关 .....	(299)
第三节 熔断器 .....	(304)
第四节 自动开关 .....	(309)
第五节 主令电器 .....	(320)
第六节 控制器 .....	(326)

第七节	接触器	.....	(328)
第八节	继电器	.....	(350)
<b>主要参考书</b>		.....	(390)

# 绪 论

## 第一节 电机、电器在国民经济中的作用

电机、电器是机械工业的一部分，它对国民经济和建设起着重要的作用，其发展同国民经济和科学技术的发展有着密切的联系。

由于电能的生产 and 变换比较经济，传输和分配比较容易，使用和控制比较方便，因而电能已成为现代最主要的能源。电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制都离不开电机、电器。在电力工业中，发电机和变压器是电站和变电所的主要设备。在工厂里，大量应用各种电动机拖动各种生产机械，一个现代化的工厂需要各种系列许多台电机。在交通运输业中，随着城市交通和电气铁路的发展，也需要大量牵引电机。在自动控制系统中则大量应用各种各样的小巧灵敏的控制电机作为检测、放大、变换、校正、执行和解算元件。在各种电器设备中，大量应用如接触器、继电器、熔断器、行程开关等控制电器组成各种电器控制系统。随着国民经济的发展，农业、国防、航空、船舶、文教、卫生及人们的日常生活中，电机、电器的应用也愈来愈广泛。

下面以雷达天线控制系统为例，说明控制电机在自动控制系统中的作用。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，达到跟踪空中目标（飞机或导弹）的目的。为了便于叙述，先讲手控系统，然后分析自动跟踪系统。

图 0-1 为雷达天线方位角手控系统原理图。手柄转角  $\theta_1$  为输入量，天线方位轴转角  $\theta_2$  为输出量，手柄轴与控制式自整角发



送机转子相连，自整角变压器转子与天线方位轴相连。手柄转动时，若  $\theta_r \neq \theta_c$ ，则自整角变压器输出与角差 ( $\Delta\theta = \theta_r - \theta_c$ ) 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，直至  $\theta_c = \theta_r$  为止。若手柄连续转动，则天线方位轴按照  $\theta_r$  的规律跟随转动，从而使天线方位轴复现了手柄的转动（输入指令）。

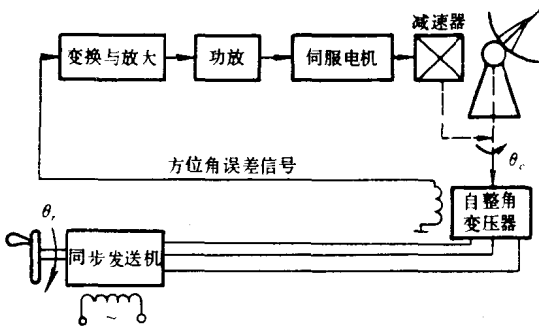


图 0-1

由于雷达天线在空中的指向由方位角和高低角两个参数所确定，所以天线控制系统还有一路与上述手控系统类似的高低角手控系统。为了使控制系统有良好的性能，常用测速发电机将伺服电动机的速度变换成相应的电压，构成速度负反馈。系统中的伺服电动机是执行马达，可以选用直流伺服电动机、交流伺服电动机、力矩电机或步进电机等。自整角机是角位置误差检测元件，也可以选用旋转变压器、感应同步器，光栅等更高精度的元件。测速发电机是速度检测（校正）元件，可选用直流或交流测速发电机。通常将上述各种伺服电动机、测速发电机和自整角机等统称为控制电机。

图 0-2 为雷达天线自动控制系统原理框图。目标的方向 ( $\theta_r$ ) 与雷达天线轴线的指向 ( $\theta_c$ ) 在天线头部用等信号或相位原理进行比较，雷达接收机将比较所得的误差信号分解成方位角和高低角误差信号，并各自通过相应的支路去控制天线的方位角和高

低角，使天线朝误差角减少的方向运动，直至对准目标为止。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。

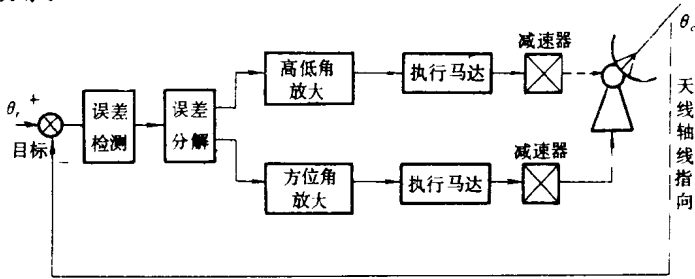


图 0-2

由此可见，控制电机在自动控制系统中起着十分重要的作用，是必不可少的元件。控制电机性能的好坏将直接影响控制系统的性能。因此，工程技术人员必须熟悉控制电机的原理、性能和正确使用方法。只有这样，才能正确选用和使用各种元件。

## 第二节 电机、电器的种类和特点

电机的型式很多，按功能可分类如下：

- (1) 发电机：生产电能的装置，将机械能转换成电能。
- (2) 电动机：即各种执行马达，将电能转换成机械能以驱动负载。
- (3) 控制电机：在控制系统中作为执行元件、检测元件、校正元件使用，如交、直流伺服电动机、测速发电机、自整角机、旋转变压器等。
- (4) 变压器、变频器、变流器和移相等：用来改变电压、频率、电流和相位等参量的装置。

当电机作为动力源使用时，主要任务是转换能量，它的突出

问题是如何提高能量转换的效率，这对普通发电机和电动机是十分重要的。控制电机在自动控制系统中主要是完成控制信号的传递和变换，而能量转换是次要的。因此，对控制电机的要求是运行可靠、动作迅速、精度高和对环境的适应能力强等。在某些场合（如航空电机和卫星上的电机）则要求体积小、重量轻、耗电少，因而各种微特电机得到迅速发展。

电器的种类也很多，通常按其工作电压以交流 1000V、直流 1200V 为界，划分为高压电器和低压电器。低压电器按其控制对象又可分为电器控制系统用的和电力系统用的电器。

根据电子机械类专业的需要，本课程着重讲述各种控制电机和常用的低压控制电器。为了扩大学生的知识面，对普通电机在讲清基本工作原理的基础上，对使用中的一些主要问题也作了简要介绍。

尽管电机、电器的种类很多，但其工作原理均奠基于一一些基本电磁定律，因而它们之间有许多共同之处。当然它们也各有自己的特点。因此，在学习时要注意运用辩证的观点，着重分析和掌握一些共同的规律，从而将各种电机、电器有机地联系起来。这样，也就能区分它们各自所具有的特殊性质。

另外，对非电机、电器专业的学生来说，学习本课程的目的不在于设计电机、电器，而是为了正确使用它们。因此，学习时应着重掌握其特性和正确使用方法。不同的电机、电器具有各自特性的根本原因在于自身的内部矛盾和规律，使用条件只是外因。所以，只有掌握了基本原理，了解了它们的内部矛盾，才能确切地掌握其特性和正确的使用方法。

### 第三节 电机中常用的材料和基本电磁定律

电机是以磁场为媒介，利用电磁感应作用实现能量转换的。所以其组成部分有引导磁通的磁路和引导电流的电路；在带电导体

之间及带电导体与铁心之间还有绝缘物质，用以把带电部分分隔开来以构成电路；此外还有既不属于磁路也不属于电路，而是构成电机整体所需要的结构部分。

为了减小电阻损耗 ( $i^2r$ )，电路必须采用导电性能良好的材料，电机绕组常用紫铜线和铝线制成。为了增大磁路的导磁系数，使在一定激磁电流下产生较强的气隙磁场，所以电机和变压器铁心采用高导磁的硅钢片制成；而磁路的其他部分常采用导磁性能较高的钢板或铸钢制成。对绝缘材料则要求介电强度高，耐热性能好。常用的绝缘材料有 A、B、E、F 和 H 等几种等级。以上各种绝缘材料的耐热能力不同，E 级材料在温度达 120℃ 时能长期使用，温度大于 120℃ 时则老化很快；H 级材料在 180℃ 以下也能长期使用，耐热性能良好。对结构部分的材料，则要求是机械强度高。常用的结构材料有铸钢、钢板，在小型电机中也有用铝合金的。

电机是转换能量形态的一种装置。发电机把机械能转换成电能，电动机把电能转换成机械能，变压器则把一种电压的电能转变成另一种电压的电能。但是，它们的工作原理都是建立在电磁感应定律、全电流定律、电路定律、电磁力定律的基础之上的。所以，掌握这些基本定律是深入研究电机基本理论的基础。

本节着重介绍铁磁性材料的特性和常用的基本电磁定律。

## 一、铁磁性材料的特性

### 1. 铁磁性材料的导磁性能

铁磁性材料包括铁、镍、钴以及它们的合金。实验表明，所有非铁磁性材料的导磁系数都接近于真空中的导磁系数  $\mu_0$ ，而铁磁性材料的导磁系数  $\mu_F$  比  $\mu_0$  大几百到几千倍。电机中所用的铁磁材料的  $\mu_F = (2000 \sim 6000) \mu_0$ 。因此，在同样大小的电流下，铁心线圈的磁通比空心线圈的磁通大得多。 $\mu_0 = 1.25 \times 10^{-6} (\text{H}/\text{m})$ 。

铁磁性材料导磁系数高的原因在于其内部存在很多极小的强

烈磁化了的自发磁化区域，它相当于一块块小磁铁，称为磁畴。磁化前这些磁畴杂乱地排列着，磁场相互抵消，对外界不显示磁性。但在外界磁场的作用下，磁畴沿着外界磁场的方向有规则地排列，顺着外磁场方向的磁畴扩大，逆着外磁场的磁畴缩小，形成一个附加磁场迭加在外磁场上。所以，在同一外磁场下，铁磁材料所产生的附加磁场比非铁磁材料大得多，因而其  $\mu_F$  比非铁磁物质大得多。

非铁磁材料中的磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$  成正比 ( $B = \mu_0 H$ )，呈线性关系。铁磁性材料则不然， $B = f(H)$  如图 0-3 所示，称为磁化曲线。磁化曲线大致可分为三段：在磁化开始时随着  $H$  的增加  $B$  缓慢地增加，如  $oa$  段；之后，随着  $H$  增加  $B$  迅速增加，如  $ab$  段；再以后，随着  $H$  增加  $B$  的增加又缓慢下来，

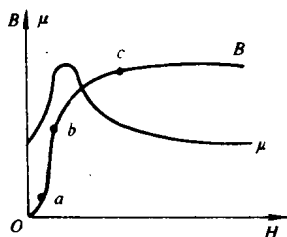


图 0-3

如  $bc$  段。与此对应的  $\mu_F = \frac{B}{H}$  也随  $H$  的变化而变化，如图 0-3 所示。可见磁化过程中， $\mu_F$  开始较小，随着  $H$  的增加  $\mu_F$  迅速增大，随后  $\mu_F$  又减小下来。 $\mu_F$  变小的现象称为磁饱和。

磁饱和现象原因是：在  $oa$  段，外磁场较弱，顺着外磁场方向的磁畴在扩大，逆着外磁场方向的磁畴在缩小， $B$  增加缓慢。在  $ab$  段，外磁场较强，虽然磁畴的扩大与缩小的过程仍在继续进行，但逆着外磁场方向的磁畴已开始倒转到与外磁场一致的方向，故  $B$  迅速增强。在  $bc$  段，几乎所有磁畴都已转到与外磁场一致的方向了，产生的附加磁场已达最大值，即使  $H$  再增大， $B$  的增加已很有限，出现饱和。

## 2. 磁滞现象和磁滞损耗

如图 0-4 所示，当测取磁化曲线时， $H$  由零上升到某最大值  $H_m$  时， $B$  沿曲线  $oa$  变化。但  $H$  由  $H_m$  降到零时， $B$  并不沿  $ao$  下

降,而是沿  $ab$  变化。当  $H$  由零变为  $-H_m$ (反向磁化)时,  $B$  沿  $bcd$  变化。而  $H$  由  $-H_m$  回升到零时,  $B$  却沿  $de$  变化。 $H$  由零再次增加到  $H_m$  时,  $B$  沿  $efa$  变化。这样反复磁化一个循环时,得到如图 0-4 所示的闭合曲线  $abcdefa$ ,称为铁磁材料的磁滞回线。不同材料有不同的磁滞回线。同一材料  $H_m$  愈大,回线包围的面积也愈大。

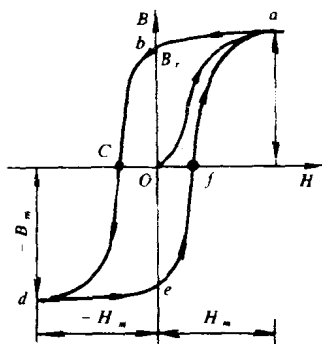


图 0-4

由图可见,磁化曲线是不可逆的,下降时  $B$  的变化总是滞后于  $H$  的变化, $H$  降为零时  $B$  不为零而是下降到某一数值  $B_r$ ,这种现象称为剩磁,  $B_r$  称为剩余磁感应强度。产生磁滞现象的原因是由于铁磁材料中的磁畴在外磁场作用下发生扩大和倒转时,彼此之间产生“摩擦”的结果。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部分便被保留下来,形成了磁滞现象和剩磁。

同一铁磁材料在不同  $H_m$  值下有不同的磁滞回线,然后把不同磁滞回线的顶点连接起来,所得到的曲线即铁磁材料的基本磁化曲线。工程上所用的磁化曲线就是这种基本磁化曲线。

铁磁材料在交变外磁作用下反复磁化的过程中,磁畴之间不停地相互“摩擦”而消耗能量,从而引起损耗,称之为磁滞损耗。磁滞回线面积大则损耗大。试验表明,交变磁化时磁滞损耗  $p_h$  与磁通的交变频率  $f$  成正比,与磁通密度的幅值  $B_m$  的  $\alpha$  次方成正比。即

$$p_h = KfB_m^\alpha \quad (0-1)$$

常用的硅钢片,当  $B_m = 1 \sim 1.6 \text{ Wb/m}^2$  时,  $\alpha \approx 2$ 。由于硅钢片的磁滞回线面积小,所以电机和变压器铁心都采用硅钢片制成。

### 3. 涡流损耗

当铁心的磁通交变时，根据电磁感应定律，铁心内将感应出电势并产生电流，电流在铁心内部围绕着磁通呈漩涡状态，称为涡流，如图 0-5 所示。设  $E_w$  和  $I_w$  分别为涡流电势和电流， $r_w$  为涡流回路的等效电阻，则涡流损耗  $p_w$  为

$$p_w = I_w^2 r_w = \frac{E_w^2}{r_w} \quad (0-2)$$

由于  $E_w$  正比于磁通的交变频率  $f$ ，磁通幅值又正比于  $B_m$ ，试验又证明电工钢片的涡流损耗与钢片的厚度  $d$  的平方成正比，所以

$$p_w \propto f^2 B_m^2 d^2 / r_w \quad (0-3)$$

因此，减小  $P_w$  的途径首先是减小  $d$ ，所以电机中的电工钢片多制成厚度为 0.35~0.5mm 的薄片；其次是增大  $r_w$ ，即在电工钢片中常加入 4% 左右的硅，以提高电阻系数。

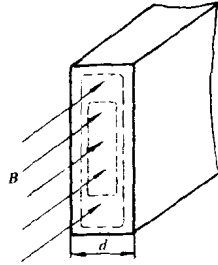


图 0-5

磁滞损耗和涡流损耗的两者之和称为铁耗，以  $p_\mu$  表示。单位重量铁心的  $p_\mu$  可用如下经验公式计算

$$p_\mu = p_{1/50} \left(\frac{f}{50}\right)^\beta B_m^2 \quad (\text{W/kg}) \quad (0-4)$$

式中  $p_{1/50}$  为铁耗系数，表示  $B_m = 1 \text{wb/m}^2$ ， $f = 50 \text{Hz}$  时，每千克硅钢片的损耗； $\beta = 1.2 \sim 1.6$ 。

## 二、全电流定律

### 1. 全电流定律

设空间有  $n$  根导体，其中电流分别为  $I_i$ ，则沿任何一路径  $l$  的

线积分  $\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l}$  等于该闭合路径所包围的导体中电流的代数和，即

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Sigma I_i \quad (0-5)$$

称为全电流定律。 $\Sigma I_i$  称为全电流。式 (0-5) 中，若导体中电流

方向与积分路径方向符合右手螺旋关系，则电流取正号，反之取负号。对图 0-6 所示电流方向， $I_1$  和  $I_2$  应取正号， $I_3$  取负号。

根据全电流定律，图 0-6 中无论取积分路径  $l$  或  $l'$ ，其积分结果都相等，因为所包围的全电流相等。

把全电流定律应用到电机和变压器中的多段磁路时，可改写成

$$\sum_1^n H_k \cdot l_k = WI \quad (0-6)$$

式中  $H_k$  为第  $k$  段磁路的磁场强度（安匝/米）； $l_k$  为第  $k$  段磁路的平均长度（米）； $WI$  为磁势（安匝）。每一段磁路上的  $HI$  值称为该段磁路的磁压降。 $WI$  是作用于整个磁路上的磁势。式（0-6）表明作用在磁路上的总磁势等于各段磁路的磁压降之和。

## 2. 磁路欧姆定律

根据  $B = \mu H$ ， $B = \phi/A$ ， $\phi$  为磁通量， $A$  为磁路截面积，则式（0-6）可写成

$$F = WI = \sum_1^n \frac{\phi}{\mu_k A_k} \cdot l_k = \phi \sum_1^n \frac{l_k}{\mu_k A_k} \quad (0-7)$$

式中  $F$  为磁路的磁势， $l_k/\mu_k A_k$  为第  $k$  段磁路的磁阻。

令  $R_k = l_k/\mu_k A_k$ ，则式（0-7）改写为

$$F = \phi \sum_1^n R_k$$

或

$$\phi = F / \sum_1^n R_k \quad (0-8)$$

这表明磁路的磁通等于作用于磁路上的总磁势除以磁路总磁阻，这就是磁路欧姆定律。磁阻主要取决于几何尺寸和材料的导磁系数。磁路愈长、截面积愈小，则磁阻愈大。材料的导磁系数愈大，则磁阻愈小，所以电机中要求采用铁磁性材料。由于  $\mu_0 \ll \mu_F$ ，即使空

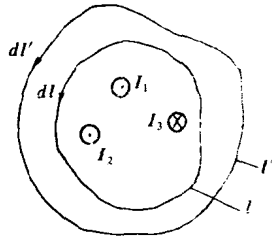


图 0-6



气隙很小时,气隙磁阻也很大,是整个磁路总磁阻的主要部分。

### 三、电磁感应定律

#### 1. 电磁感应定律

将一匝数为  $W$  的线圈放在磁场中,不论什么原因,如线圈本身移动或转动,或磁场强度本身发生变化等,只要造成和线圈交链的磁通  $\phi$  随时间发生变化时,线圈内都会感应出电势,这种现象称为电磁感应。感应电势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋关系时,感应电势为

$$e = -W \frac{d\phi}{dt} \quad (0-9)$$

其含意是:由电磁感应产生的电势与线圈匝数和磁通变化率成正比。式中的负号表明,在感应电势作用下线圈内有电流时,该电流产生的磁通起着反对磁通变化的作用。当  $d\phi/dt > 0$  时,  $e$  为负值,它企图减小磁通;当  $d\phi/dt < 0$  时,  $e$  为正值,它企图使磁通增大。

式(0-9)中当  $\phi$  的单位用(wb),  $t$  的单位用(s)时,  $e$  的单位为(V)。

设  $\phi$  随时间呈正弦变化,即

$$\phi = \phi_m \sin \omega t \quad (0-10)$$

则感应电势为

$$e = -W \frac{d\phi}{dt} = -W \omega \phi_m \cos \omega t = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (0-11)$$

式中  $E_m = W \phi_m \omega$  为感应电势的幅值。式(0-11)表明,当  $\phi$  呈正弦变化时,线圈的感应电势亦呈正弦变化,但在相位上滞后于磁通  $90^\circ$ ,如图0-7所示。感应电势的有效值为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f W \phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 W f \phi_m \quad (0-12)$$

式中的  $\phi_m$  为交变磁通的幅值(wb);  $f$  为交变频率(Hz);  $W$  为线