

经典教材辅导用书



# 电机学实例解析

龚世纓 熊永前 编



华中科技大学出版社

经典教材辅导用书

# 电机学实例解析

龚世纓 熊永前 编

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机学实例解析/龚世纓 熊永前 编  
武汉:华中科技大学出版社,2001年4月  
ISBN 7-5609-2018-7

- I. 电…
- II. ①龚… ②熊…
- III. 电机学-题解
- IV. TM3

电机学实例解析

龚世纓 熊永前 编

责任编辑:胡章成  
责任校对:陈元玉

封面设计:潘 群  
责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

经 销:新华书店湖北发行所

录 排:华中科技大学出版社照排室  
印 刷:武汉市新华印刷有限责任公司

开本:850×1168 1/32

印张:17.25

字数:417 000

版次:2001年4月第1版

印次:2001年4月第1次印刷

印数:1—4 000

ISBN 7-5609-2018-7/TM·79

定价:20.80元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了电机学习题的解题方法,选题包含了学生必须掌握的电机学全部内容。本书的目的是为了帮助学生深入理解电机学基本理论,巩固所学知识,开拓思路,提高解题能力和应试水平。全书精选了近 500 道习题,其中包括概念题和计算题,全部给出解答。

本书内容丰富,可供高等院校电工、电力类学生在复习和考研时使用,也可供教学人员和自学者参考。

# 前 言

---

电机学是电工、电力类专业的公共技术基础课。该课程既有系统的理论性,又有紧密联系实际工程实用性的表现,表现出鲜明的学科特色。

为了帮助读者熟练掌握电机学的基本原理,深入理解基本概念,改进学习这门课程的思维方法,提高解题能力和应试水平,编者根据多年教学实践的积累,从教学习题、研究生入学试题以及国内外相关教材中,精选了近 500 道习题,其中包括概念题和计算题,全部给出解答,供读者在自学、复习和考研时参考。

本书系统地介绍了电机学习题的解题方法,选题包含了学生必须掌握的电机学全部内容。题型具有典型性,部分题目有一定的广度和深度。有的题目反映了电机领域的新技术和新成果。本书的名词术语采用国家标准,物理量单位采用法定计量单位。

在内容的安排上,每章的开头写有提要,指明该章的重点,对主要内容进行归纳和总结,再按概念题和计算题的顺序列出题目和解答。考虑到读者的广泛性,对少数难度较大的题目给出了较深入分析,有的给出了不同解法。

本书由熊永前副教授编写直流电机、变压器和交流电机理论的共同问题部分;由龚世纓教授编写基本电磁定律、感应电机和同步电机部分,并负责主编工作。

书中的错误和不妥之处,殷切希望读者指正。

编 者

2000 年 8 月于武昌喻家山

# 目 录

---

<b>第一章 基本电磁定律和磁路</b> .....	(1)
<b>第二章 直流电机</b> .....	(27)
一、直流电机的磁路、电枢绕组和电枢反应 .....	(27)
二、直流电机的基本方程式和运行特性 .....	(46)
三、直流电机的换向 .....	(95)
<b>第三章 变压器</b> .....	(107)
一、变压器的运行原理 .....	(107)
二、三相变压器 .....	(158)
三、三相变压器的不对称运行 .....	(184)
四、变压器的瞬变过程 .....	(207)
五、三绕组变压器及其它用途变压器 .....	(211)
<b>第四章 交流电机理论的共同问题</b> .....	(236)
一、交流绕组及其电动势 .....	(236)
二、交流绕组的磁动势 .....	(260)
<b>第五章 感应电机</b> .....	(294)
一、感应电机的运行原理、功率和转矩 .....	(294)
二、感应电动机的机械特性、起动和调速 .....	(329)
三、三相感应电动机在不对称电压下运行及特种感应电动机 .....	(382)
<b>第六章 同步电机</b> .....	(417)
一、同步电机的运行原理和运行特性 .....	(417)
二、同步发电机的并联运行及同步电动机 .....	(456)
三、同步发电机不对称运行和突然短路 .....	(511)
<b>参考文献</b> .....	(542)

# 第一章 基本电磁定律和磁路

---

## 内 容 提 要

电机的基本工作原理是建立在电磁感应定律、全电流定律、电路定律、磁路定律和电磁力定律等定律基础上的,掌握这些基本定律,是研究电机基本理论的基础。

### ▲ 全电流定律

全电流定律

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I$$

式中,当电流方向与积分路径方向符合右手螺旋关系时,电流取正号。

在电机和变压器的磁路计算中,上式可简化为

$$\sum Hl = \sum Ni$$

### ▲ 电磁感应定律

#### ① 电磁感应定律

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - N \frac{d\Phi}{dt}$$

式中,感应电动势方向与磁通方向应符合右手螺旋关系。

#### ② 变压器电动势

磁场与导体间无相对运动,由于磁通的变化而感应的电势称为变压器电动势。电机中的磁通 $\Phi$ 通常是随时间按正弦规律变化的,线圈中感应电动势的有效值为

$$E = 4.44fN\Phi_m$$

③ 运动电动势

$$e = Blv$$

④ 自感电动势

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

⑤ 互感电动势

$$e_{M1} = -M \frac{di_2}{dt}$$

$$e_{M2} = -M \frac{di_1}{dt}$$

▲ 电磁力定律

$$f = Bli$$

▲ 磁路基本定律

① 磁路欧姆定律

$$\Phi = \frac{Ni}{l/\mu A} = \frac{F}{R_m} = \Lambda_m F$$

式中,  $F = Ni$ ——磁动势, 单位为 A;

$R_m = \frac{l}{\mu A}$ ——磁阻, 单位为  $H^{-1}$ ;

$\Lambda_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu A}{l}$ ——磁导, 单位为 H。

② 磁路的基尔霍夫第一定律

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

上式表明, 穿入(或穿出)任一封闭面的磁通等于零。

③ 磁路的基尔霍夫第二定律

$$\sum F = \sum HI = \sum \Phi R_m$$

上式表明, 在磁路中, 沿任何闭合磁路, 磁动势的代数和等于磁压降的代数和。



## 实例解析

1-1 在电机制造中,通常使用哪些材料?

答 为了减小电阻损耗,电机绕组通常用紫铜线或铝线制成。为了增加磁路的磁导率、降低铁耗,电机的铁心采用导磁性能高的硅钢片制成,磁路的其他部分常采用导磁性能较高的钢板和铸铁制成。常用的绝缘材料有云母、石棉、玻璃丝、聚酯薄膜、磁漆、棉纱等。它们的性能不同,耐热能力也不同。常用的结构材料有铸铁、铸钢和钢板,有的小型电机采用铝合金。

1-2 磁滞损耗和涡流损耗是什么原因产生的?铁耗与哪些因素有关?

答 铁磁材料在交变磁场的作用下,磁畴之间相互摩擦产生的能量损耗称为磁滞损耗。当交变磁通穿过铁磁材料时,将在其中感应电动势和产生涡流,涡流引起的损耗称为涡流损耗。磁滞损耗和涡流损耗合在一起称为铁耗,单位重量的铁耗由下式计算

$$P_{Fe} = P_{1/50} \left( \frac{f}{50} \right)^{\beta} B_m^2$$

式中, $\beta$ ——频率指数,其值在 1.2~1.6 范围内。

上式表明,铁耗与磁感应强度的平方及磁通交变频率  $f$  的 1.2~1.6 次方成正比。

1-3 试比较磁路和电路的相似点和不同点。

答 表 1-1 说明了磁路和电路的相似性。

磁路与电路相似之处只是形式上的,与电路比较,磁路有以下特点:

(1) 电流表示带电质点运动,它通过电阻时的功率损耗为  $I^2R$ 。磁通不代表质点运动, $\Phi^2R_m$  也不代表功率损耗。

(2) 自然界存在着良好的对电流绝缘的材料,但尚未发现对

表 1-1 磁路参数和电路参数比较

电 路			磁 路		
基本物理量 或基本定律	符号或定义	单 位	基本物理量 或基本定律	符号或定义	单 位
电 流	$I$	A	磁 通	$\Phi$	Wb
电 压	$U=EI$	V	磁动势	$F=HI$	A
电源电压	$U$	V	磁动势	$F$	A
电 阻	$R=\frac{l}{\gamma A}$	$\Omega$	磁 阻	$R_m=\frac{l}{\mu A}$	1/H
电 导	$G=\frac{1}{R}$	S	磁 导	$\Lambda=\frac{1}{R_m}$	H
电流密度	$J=\frac{I}{A}$	A/m <sup>2</sup>	磁通密度	$B=\frac{\Phi}{A}$	$\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}=1\text{T}$
电导率	$\gamma$	S/m	磁导率	$\mu$	H/m
电流定律	$\Sigma I=0$		磁通连续性 原理	$\Sigma \Phi=0$	
电压定律	$\Sigma U=0$		安培环路 定律	$\Sigma HI=\Sigma NI$	
欧姆定律	$U=RI$		磁路欧姆 定律	$F=R_m\Phi$	

磁通绝缘的材料。磁路中没有断路情况，即不存在有磁动势无磁通的现象。

(3) 空气也是导磁的，磁路中存在着漏磁现象。

(4) 含有铁磁材料的磁路几乎都是非线性的。一般地讲，磁路问题是非线性的问题，磁阻的概念和磁路欧姆定律只有在磁路中各段的材料都是线性的或可以作为线性处理的情况下才能适用。在精确的磁路计算中不用磁阻概念和磁路欧姆定律，而是直接用全电流定律和各段材料的  $B-H$  曲线。

1-4 什么是软磁材料？什么是硬磁材料？

答 铁磁材料按其磁滞回线的宽窄可分为两大类,即软磁材料和硬磁材料。磁滞回线较宽,即矫顽力大、剩磁也大的铁磁材料称为硬磁材料,也称永磁材料。这类铁磁材料一经磁化就很难退磁,能长期保持磁性。常用的硬磁材料有铁氧体、铝镍钴、钕铁硼等,这些材料可以用来制造永磁电机。磁滞回线较窄,即磁导率大、矫顽力小的铁磁材料称为软磁材料。电机铁心常用的硅钢片、铸钢、铸铁等都是软磁材料。

1-5 电磁感应定律有时写成  $e = -\frac{d\Psi}{dt}$ , 有时写成  $e = -N\frac{d\Phi}{dt}$ , 有时又写成  $e = -L\frac{di}{dt}$ , 这三种写法之间有什么差别? 在什么情况下写成  $e = +\frac{d\Psi}{dt}$ ?

答  $e = -\frac{d\Psi}{dt}$  是电磁感应定律的普遍表达式; 当所有磁通与线圈全部匝数交链时, 则可写成  $e = -N\frac{d\Phi}{dt}$ ; 当磁路是线性的, 且磁场是由电流产生时, 有  $\Psi = Li$ ,  $L$  为常数, 则可写成  $e = -L\frac{di}{dt}$ ; 当  $e$  的假定正向与  $\Phi$  的正向符合左手螺旋关系时, 电磁感应定律写成  $e = +\frac{d\Psi}{dt}$ 。

1-6 有一单匝矩形线圈与一无限长导体在同一平面内, 见图 1-1。试分别求出在下列条件下线圈内的感应电动势:

- (1) 导体中通以直流电流  $I$ , 线圈以线速度  $v$  从左向右移动;
- (2) 电流  $i = I_m \sin \omega t$ , 线圈不动;
- (3) 电流  $i = I_m \sin \omega t$ , 线圈以线速度  $v$  从左向右移动。

解 无限长导体在图中  $x$  处产生的磁通密度为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$$

矩形线圈所交链的磁通为

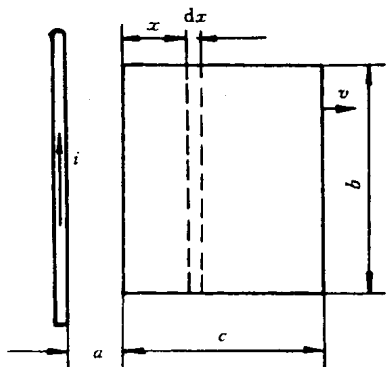


图 1-1

$$\Phi = \int_{a+vt}^{a+c+vt} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} b dx = \frac{\mu_0 b I}{2\pi} \ln \frac{a+c+vt}{a+vt}$$

(1) 线圈以线速度  $v$  从左向右移动, 线圈内的感应电动势为

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 b I}{2\pi} \frac{vc}{(a+c+vt)(a+vt)}$$

(2) 当  $i = I_m \sin \omega t$ 、线圈不动时

$$\Phi = \frac{\mu_0 b}{2\pi} I_m \sin \omega t \ln \frac{a+c}{a}$$

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \left( \frac{\mu_0 b \omega I_m}{2\pi} \ln \frac{a+c}{a} \right) \cos \omega t$$

(3) 当  $i = I_m \sin \omega t$ 、线圈移动速度为  $v$  时

$$\Phi = \frac{\mu_0 b}{2\pi} I_m \sin \omega t \ln \frac{a+c+vt}{a+vt}$$

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 b I_m}{2\pi} \frac{vc}{(a+c+vt)(a+vt)} \sin \omega t$$

$$- \left( \frac{\mu_0 b I_m \omega}{2\pi} \ln \frac{a+c+vt}{a+vt} \right) \cos \omega t$$

1-7 设有一矩形线圈, 结构尺寸如图 1-2 所示。线圈共有 200

匝，环绕图中所示中心轴线以 3000r/min 的转速匀速旋转，线圈所处空间为  $B=1.4\text{T}$  的均匀磁场，试求：

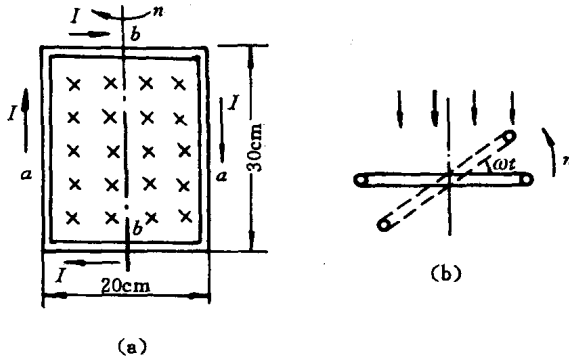


图 1-2

- (1) 线圈中感应电动势的时间表达式；
- (2) 当线圈中通入  $I=20\text{A}$  的电流时，线圈上产生的电磁力和电磁转矩，写出电磁转矩与线圈位置关系的表达式。

解 (1) 线圈平面与磁通  $\Phi$  垂直时，线圈交链的磁链最大，为

$$\Psi_m = N\Phi_m = 200 \times 1.4 \times 0.2 \times 0.3\text{Wb} = 16.8\text{Wb}$$

线圈旋转的角速度为

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \times 3000}{60}\text{rad/s} = 314\text{rad/s}$$

设线圈平面与磁通  $\Phi$  垂直时， $t=0$ ，即  $t=0$  时  $\Psi = \Psi_m$ ， $\Psi$  随时间变化的表达式为

$$\Psi = \Psi_m \cos \omega t$$

感应电动势的时间表达式为

$$\begin{aligned} e &= -\frac{d\Psi}{dt} = \Psi_m \omega \sin \omega t \\ &= 16.8 \times 314 \sin 314t \text{ V} = 5275 \sin 314t \text{ V} \end{aligned}$$

- (2) 当线圈平面与磁通  $\Phi$  垂直时，线圈各边所受到的电磁力

为

$$a \text{ 边 } F_{ea} = NBl_a I = 200 \times 1.4 \times 0.3 \times 20 \text{ N} = 1680 \text{ N}$$

由左手定则, 两条  $a$  边的受力方向为向外。

$$b \text{ 边 } F_{eb} = NBl_b I = 200 \times 1.4 \times 0.2 \times 20 \text{ N} = 1120 \text{ N}$$

由左手定则, 两条  $b$  边的受力方向亦向外。

由于两条  $a$  边上的电磁力大小相等方向相反, 两条  $b$  边上的电磁力也是大小相等方向相反, 均互相抵消, 故这时作用在线圈上的电磁转矩  $T_{em} = 0$ 。

当线圈平面与磁通平行时, 见图 1-3, 这时各边所受电磁力为

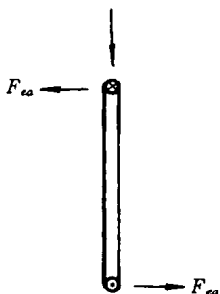


图 1-3

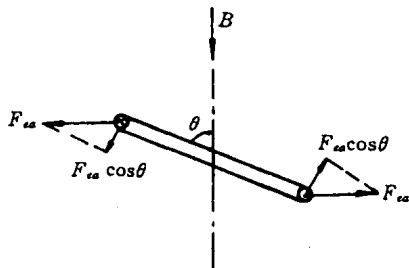


图 1-4

$$a \text{ 边 } F_{ea} = NBl_a I = 1680 \text{ N}$$

电磁力方向如图 1-3 所示, 这时设上导体电流为流进纸面, 下导体电流为流出。

$$b \text{ 边 } F_{eb} = 0$$

线圈所受电磁转矩为

$$T_{em} = F_{ea} b = 1680 \times 0.2 \text{ N} \cdot \text{m} = 336 \text{ N} \cdot \text{m}$$

设线圈平面与磁通  $\Phi$  间的夹角为  $\theta$  (见图 1-4), 电磁转矩

$$T_{em} = F_{ea} b \cos \theta = 1680 \times 0.2 \cos \theta \text{ N} \cdot \text{m} = 336 \cos \theta \text{ N} \cdot \text{m}$$

1-8 设题 1-7 中的磁场为一交变磁场, 交变频率为 50 Hz, 磁场的最大磁通密度  $B_m = 1.4 \text{ T}$ 。

(1) 设线圈不动,线圈平面与磁力线垂直时,求线圈中感应电动势的表达式;

(2) 设线圈不动,线圈平面与磁力线间有  $45^\circ$  的夹角时,求线圈感应电动势的表达式;

(3) 设线圈以  $n=3000\text{r/min}$  的速度旋转,且当线圈平面垂直于磁力线时,磁通达最大值,求线圈中感应电动势的表达式。

解 (1) 线圈中的最大磁链为

$$\Psi_m = N\Phi_m = 200 \times 1.4 \times 0.2 \times 0.3\text{Wb} = 16.8\text{Wb}$$

磁通交变的角频率为

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50\text{rad/s} = 314\text{rad/s}$$

设  $\Phi = \Phi_m$  时,  $t=0$ , 则

$$\Psi = \Psi_m \cos \omega t = 16.8 \cos 314t$$

感应电动势为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = 16.8 \times 314 \sin 314t \text{V} = 5275 \sin 314t \text{V}$$

(2) 当线圈平面与磁力线间有  $45^\circ$  夹角时

$$\Psi_m = N\Phi_m \sin 45^\circ = 16.8 \times \sin 45^\circ \text{Wb} = 11.88\text{Wb}$$

设  $\Phi = \Phi_m$  时,  $t=0$ , 感应电动势为

$$\begin{aligned} e &= -\frac{d\Psi}{dt} = \Psi'_m \sin 314t = 11.88 \times 314 \sin 314t \text{V} \\ &= 3730 \sin 314t \text{V} \end{aligned}$$

(3) 线圈的机械旋转角速度为

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \times 3000}{60} \text{rad/s} = 314\text{rad/s}$$

设线圈平面与磁力线垂直时,  $t=0$ , 这时  $\Psi = \Psi_m = 16.8\text{Wb}$ , 故

$$\begin{aligned} \Psi &= \Psi_m \cos \omega t \cos \Omega t = \Psi_m \cos 314t \cos 314t \\ &= \frac{1}{2} \Psi_m [\cos(2 \times 314t) + 1] \\ &= \frac{1}{2} \times 16.8 [\cos 628t + 1] \text{Wb} \end{aligned}$$

$$= 8.4[\cos 628t + 1]\text{Wb}$$

感应电动势为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = 5275\sin 628t \text{ V}$$

1-9 在图 1-5 所示的磁路中,线圈都接在直流电源上,已知  $I_1, I_2, N_1, N_2$ , 回答下列问题:

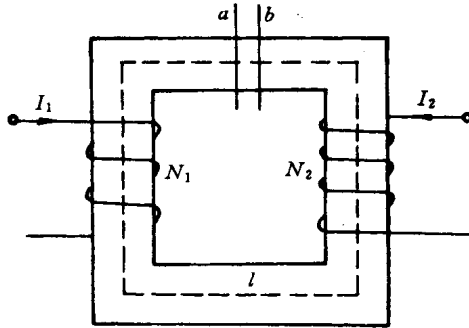


图 1-5

- (1) 总磁动势  $\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$  是多少?
- (2) 若  $I_2$  反向, 总磁动势  $\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$  是多少?
- (3) 若在  $a, b$  处切开, 形成一气隙  $\delta$ , 总磁动势  $\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$  是多少? 这时磁压降主要是在铁心中还是在气隙中?
- (4) 试比较(1)、(3)两种情况铁心中  $B, H$  的大小。
- (5) 比较(3)情况下铁心和气隙中  $B, H$  的大小。

解 (1) 总磁动势为  $F = I_1 N_1 - I_2 N_2$

(2)  $I_2$  反向, 总磁动势为  $F = I_1 N_1 + I_2 N_2$

(3) 若  $I_2$  不反向, 磁路在  $a, b$  处切开, 则总磁动势为

$$F = I_1 N_1 - I_2 N_2$$

由于气隙中的磁阻大, 磁压降主要在气隙中。



(4) 在第三种情况下,由于磁路中存在气隙,磁路的磁阻增大,在磁动势不变的情况下,磁通减少,铁心中的  $B$ 、 $H$  比第一种情况下的小。

(5) 根据磁通的连续性原理,当忽略气隙两边的边缘效应时,铁心和气隙中的  $B$  相等。由于气隙的磁导率  $\mu$  小,气隙中的  $H$  大。

1-10 用 D23 硅钢片做成的环形磁路如图 1-6 所示,其平均长度  $l=70\text{cm}$ ,截面积  $A=6\text{cm}^2$ ,回答下列问题:

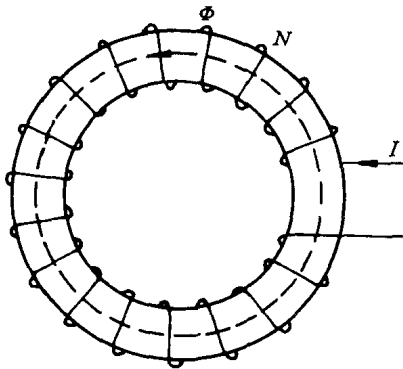


图 1-6

(1) 设环中磁通  $\Phi=5\times 10^{-4}\text{Wb}$ ,线圈匝数  $N=10000$  匝,问需通入多大的电流  $I$ ? 磁场强度  $H$  为多大?

(2) 当环中磁通  $\Phi_1=2\Phi$  时,  $I_1$ 、 $H_1$  各为多少?

(3) 若在圆环上开一缺口  $\delta=1\text{cm}$ ,  $\Phi=5\times 10^{-4}\text{Wb}$  时,  $I_2$  为多少?

解 (1) 
$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{5 \times 10^{-4}}{6 \times 10^{-4}} \text{T} = 0.83 \text{T}$$

查 D23 硅钢片  $B$ - $H$  曲线,得

$$H = 2.65 \text{A/cm}$$