

高等学校试用教材

# 电 工 学

下 册

(电机与自动控制)

大连工学院电工学教研室编

人民教育出版社

TMI  
49  
345

高等学校试用教材

# 电 工 学

下 册  
(电机与自动控制)

大连工学院电工学教研室编

B770/63



人民教育出版社

A752752

本书系根据一九七七年十二月高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议所通过的编写大纲编写的,经电工学教材审稿会议审查通过,可作为高等工科院校机械、动力类专业电工学课程的试用教材。

全书分上、中、下三册出版。下册为电机与自动控制,包括磁路和变压器、直流电机、异步电动机、同步发电机、控制电机、自动控制的基本原理、闭环控制系统的分析等内容。

本书也可供有关科技人员参考。

本书责任编辑是刘秉仁。

高等学校试用教材

电 工 学

下 册

(电机与自动控制)

大连工学院电工学教研室编

\*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 8.25 字数 190,000

1980年4月第1版 1980年9月第1次印刷

印数 00,001—15,000

书号 15012·0249 定价 0.83元

# 目 录

## 第 三 篇

### 电 机

引言	1
<b>第十一章 磁路和变压器</b>	<b>3</b>
11-1 磁路	3
11-2 直流电磁铁	11
11-3 交流电磁铁	15
11-4 变压器	20
(一) 用途和构造	20
(二) 空载运行	22
(三) 任载运行	24
(四) 损耗和效率	28
(五) 三相电压的变换	29
练习题	31
<b>第十二章 直流电机</b>	<b>37</b>
12-1 直流电机的作用原理	37
12-2 直流电机的构造	41
(一) 定子	41
(二) 转子	42
12-3 直流电机的电磁转矩和电动势	44
(一) 电磁转矩	44
(二) 电动势	45
12-4 直流电动机运行情况的分析	46
(一) 他励电动机	46

(二) 并励电动机	50
(三) 串励电动机	51
(四) 复励电动机	52
12-5 直流电动机的使用	53
(一) 起动	53
(二) 调速	55
(三) 反转	62
(四) 制动	62
12-6 直流发电机	63
(一) 他励发电机	64
(二) 并励发电机	65
(三) 复励发电机	69
练习题	70
<b>第十三章 异步电动机</b>	<b>73</b>
13-1 三相异步电动机的作用原理	73
(一) 旋转磁场	73
(二) 作用原理	76
13-2 三相异步电动机的构造	78
(一) 定子	78
(二) 转子	79
13-3 三相异步电动机运行情况的分析	80
(一) 电磁转矩	80
(二) 机械特性	86
(三) 运行特性	87
13-4 三相异步电动机的使用	90
(一) 起动	90
(二) 调速	94
(三) 反转	96
(四) 制动	96
13-5 单相异步电动机	98
练习题	101

<b>第十四章 同步发电机</b> .....	104
14-1 同步发电机的构造.....	104
14-2 三相同步发电机运行情况的分析.....	106
(一) 三相电动势的产生.....	106
(二) 空载特性.....	107
(三) 电枢反应.....	109
(四) 外特性.....	111
(五) 调节特性.....	112
14-3 同步发电机的相量图.....	113
14-4 同步发电机有功功率的调整.....	115
(一) 发电机的任载.....	116
(二) 功角特性.....	118
14-5 同步发电机无功功率的调整.....	120
(一) 调相运行.....	120
(二) V形曲线.....	121
练习题.....	123
<b>第十五章 控制电机</b> .....	126
15-1 执行电动机.....	126
15-2 步进电动机.....	130
15-3 测速发电机.....	134
(一) 直流测速发电机.....	135
(二) 交流测速发电机.....	135
15-4 旋转变压器.....	138
(一) 正弦-余弦旋转变压器.....	139
(二) 线性旋转变压器.....	142
15-5 自整角机.....	144
练习题.....	148

## 第 四 篇

### 自 动 控 制

引言.....	150
---------	-----

<b>第十六章 自动控制的基本原理</b> .....	152
16-1 开环和闭环控制系统 .....	152
16-2 低压开关和熔断器 .....	155
(一) 刀开关 .....	155
(二) 熔断器 .....	156
(三) 空气开关 .....	158
16-3 有触点的继电-接触器自动控制 .....	159
(一) 交流接触器和按钮 .....	160
(二) 热继电器 .....	161
(三) 控制电路的图形符号和文字符号 .....	162
(四) 鼠笼式电动机的起-停和正反转控制 .....	165
(五) 行程开关和行程控制 .....	167
(六) 时间继电器和时限控制 .....	169
16-4 无触点电器的继电控制 .....	171
(一) 无触点控制电器 .....	171
(二) 有触点控制变换成无触点控制举例 .....	175
(三) 无触点控制与有触点控制的比较 .....	178
(四) 开环控制系统的特点 .....	179
*16-5 顺序控制器 .....	180
16-6 变换器 .....	186
(一) 有源变换器 .....	187
(二) 无源变换器 .....	189
16-7 闭环控制系统 .....	192
(一) 直流他励电动机的闭环调速系统 .....	192
(二) 位置随动系统 .....	197
(三) 闭环控制系统的特点 .....	200
练习题 .....	202
<b>*第十七章 闭环控制系统的分析</b> .....	207
17-1 器件的传递函数 .....	207
17-2 方框图 .....	212
(一) 系统方框图的绘制 .....	212

(二) 闭环系统的方框图·····	213
(三) 方框图的简化·····	215
17-3 直流电动机调速和位置随动系统的方框图 和传递函数·····	217
17-4 动态响应分析·····	221
(一) 一阶系统·····	222
(二) 二阶系统·····	223
(三) 动态响应指标·····	226
(四) 二阶系统斜坡响应的稳态偏差·····	227
17-5 系统稳定性·····	230
(一) 线性系统稳定的条件·····	230
(二) 系统稳定性的判别·····	231
(三) 稳定裕量·····	238
练习题·····	241
<b>练习题选答</b> ·····	<b>245</b>
<b>索引(中英名词对照)</b> ·····	<b>249</b>



## 第三篇 电 机

### 引 言

电机是现代工农业生产中不可缺少的能量变换装置,电能的产生、输送、分配和使用几乎都离不开它。可以说,电机的发明和应用开创了世界电气化的新时期。

自从 1821 年法拉第发现了利用电磁力将电能转换成机械能的可能性(电动机的工作原理),1831 年又发现了将机械能转换成电能的电磁感应定律(发电机的工作原理)以后,各种电机相继问世。其中,发明最早的是直流电机,当时已应用于照明、化学工业和城市交通运输等方面。随着用电区域和输电距离的扩大,又发明了变压器和同步电机。特别是在十九世纪末期,三相同步发电机、三相变压器和三相异步电动机的出现,使得电机工业得到了更为迅速的发展。

进入二十世纪以后,由于人们对电机理论研究的日益深入,许多新的导磁材料和绝缘材料的采用,冷却方法的改善,电机的单机容量在不断增大,而同容量电机的外型尺寸和重量却逐渐减小,电机的性能更加提高,许多适用于各种行业 and 不同环境的电机新品种陆续制成。随着生产过程自动化和遥测遥控技术的发展,各种微型控制电机纷纷出现,并得到了迅速广泛的发展和应用。

电机的种类很多,它们的理论分析也日益深入和完善。在本书中,我们既不可能对每种电机都一一加以讨论,也不可能在理论上对所讨论的电机作深入细致的分析。在科学技术飞跃发展的今天,我们把电机作为一种电磁元件来看待,这也是我们不用更多的

篇幅去探讨它们的原因之一。因此,本篇只是介绍机械、动力类各专业常用的一些电机的一般工作原理和它们的主要工作特性, 期为今后在实际工作中掌握和运用这些电机打下必要的基础。

# 第十一章 磁路和变压器

电机，包括变压器和旋转电机都是利用磁场来实现能量变换的装置。除某些容量很小的微型电机的磁场是用永久磁铁产生的以外，在大多数情况下，磁场都是用电流来产生的，而且把磁场集中在一定的范围之内，形成磁路。因此，本章将首先讨论在电机中的磁路问题。

电磁铁，严格地说，并不属于电机的范畴。考虑到它也是一种常用的借助于磁场来实现能量变换的装置，从电路和磁路的角度来看都与变压器有共同之处，而且通过对它的分析有助于加深对磁路的理解，因此也在本章一并讨论。

本章最后着重阐述变压器的工作原理和特性，旋转电机则留待以后各章中讨论。

## 11-1 磁 路

在利用磁场来实现能量变换的装置中，为了产生强的磁场，常常把线圈绕在铁心上。例如在图 11-1 中，当通过线圈的电流一定时，它所产生的磁场中的任一点的磁场强度  $H$  就是一定的。磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$  之间有如下的关系：

$$B = \mu H \quad (11-1)$$

式中， $\mu$  为物质的磁导率。我们知道，非铁磁物质的磁导率近似地等于真空的磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  亨/米，而铁磁物质的磁导率则远大于非铁磁物质的磁导率，两者之比一般约为  $10^3 \sim 10^4$ 。因此，当线圈绕在铁心上时，铁心中的  $B$  将大大增加，而且比铁心外

的  $B$  大得多。这样，一方面可以利用较小的电流来产生较强的磁场；另一方面可以使绝大部分磁通集中在由铁磁物质所限定的空间之内。这部分磁通（图 11-1 中的  $\Phi$ ）称为主磁通。此外，还有很少一部分磁通通过铁磁部分以外的空间而闭合。这部分磁通（图 11-1 中的  $\Phi_l$ ）称为漏磁通。为简便起见，我们有时将它忽略不计。磁通通过的路径，即主磁通通过的路径称为磁路。铁磁物质的形状往往就决定了磁路的形状。在这种情况下，研究电流与它所产生的磁场的问题便简化成为磁路的分析和计算问题。

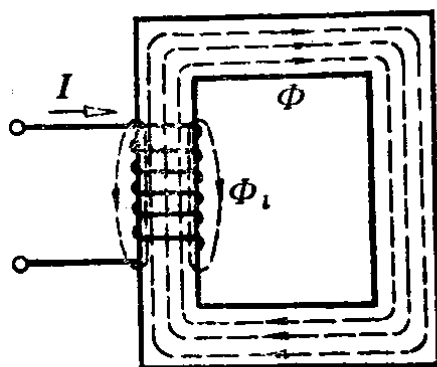


图 11-1 磁路

磁路的分析和计算如同电路的分析和计算一样，可以通过一些基本定律来进行。磁路的基本定律是由物理学中已学过的磁通的连续性原理和全电流定律导出的。

以图 11-1 所示的无分支磁路为例，设磁路是由同一种铁磁物质构成，其截面积为  $S$ ，平均长度为  $l$ 。由于磁通的连续性，通过铁心各处的磁通  $\Phi$  相同，磁力线如图中虚线所示。如果磁路的平均长度远大于横截面的线性尺寸，则可认为磁通在横截面内是均匀分布的，因而磁路中的磁通密度，也就是磁感应强度

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (11-2)$$

在国际单位制中，磁通  $\Phi$  的单位用韦伯 (Wb)，磁感应强度  $B$  的单位用特斯拉 (T)，即韦伯/米<sup>2</sup> (Wb/m<sup>2</sup>)，磁场强度  $H$  的单位用安/米 (A/m)。在工程中，有时由于韦伯等单位太大，也有仍采用电磁单位制的，或者两种单位制混用的。在电磁单位制中，磁通  $\Phi$  的单位是麦克斯韦，简称麦 (Mx)；磁感应强度  $B$  的单位是高斯，简称高 (Gs)；磁场强度  $H$  的单位是奥斯特，简称奥 (Oe)。以上两

种单位制的对应单位之间的换算关系是:

$$1 \text{ 韦伯} = 10^8 \text{ 麦克斯韦}$$

$$1 \text{ 特斯拉} = 10^4 \text{ 高斯}$$

$$1 \text{ 安/米} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ 奥斯特}$$

另外, 全电流定律又告诉我们: 在磁路中, 沿任一闭合路径, 磁场强度矢量的线积分, 等于与该闭合路径交链的电流的代数和。若用公式表示, 即

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \Sigma I \quad (11-3)$$

当电流的方向与闭合路径的积分方向符合右手螺旋定则时, 电流前取正号, 反之取负号。将此定律应用于图 11-1 所示的磁路, 取其中心线即平均长度的磁力线回路为积分回路, 由于中心线上各点的磁场强度矢量的大小相同, 其方向又与  $d\vec{l}$  的方向一致, 故

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H dl = H \oint dl = Hl$$

而电流的代数和  $\Sigma I$  则等于线圈的匝数  $N$  与电流  $I$  的乘积, 因此

$$Hl = NI \quad (11-4)$$

由于

$$Hl = \frac{B}{\mu} l = \frac{\Phi}{\mu S} l = \Phi \frac{l}{\mu S}$$

若令

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (11-5)$$

则

$$Hl = \Phi R_m \quad (11-6)$$

而且由式(11-4)和式(11-6)可得

$$\Phi = \frac{NI}{R_m} \quad (11-7)$$

上述三式分别与电路中的电阻公式

$$R = \frac{l}{\gamma S}$$

电阻上的电压降

$$U = RI$$

和欧姆定律

$$I = \frac{E}{R}$$

形式上完全相同。这说明磁路和电路之间具有对偶关系。磁路中的磁导率  $\mu$  与电路中的电导率  $\gamma$  (电阻率  $\rho$  的倒数) 互为对偶; 磁路中的  $R_m$  与电路中的电阻  $R$  互为对偶, 故将  $R_m$  称为磁路的磁阻, 单位是亨<sup>-1</sup>(H<sup>-1</sup>); 磁路中的磁通  $\Phi$  与电路中的电流  $I$  互为对偶; 磁路中的  $Hl$  与电路中的电阻电压降  $U$  互为对偶, 故将  $Hl$  称为磁路的磁压降, 磁路中的  $NI$  与电路中的电动势  $E$  互为对偶, 故将  $NI$  称为磁路的磁动势, 磁压降和磁动势的单位均为安(A); 式(11-7)则称为磁路欧姆定律。

磁阻  $R_m$  的倒数称为磁导, 用  $G_m$  表示, 即

$$G_m = \frac{1}{R_m} \quad (11-8)$$

单位是亨(H)。因此, 磁路欧姆定律又可以写成

$$\Phi = G_m NI \quad (11-9)$$

应该指出, 磁路虽然与电路具有对偶关系, 但绝不意味着两者的物理本质相同。例如电路如果开路, 虽有电动势也不会有电流, 而在磁路中, 即使存在着空气隙, 只要有磁动势则必然有磁通。在电路中, 直流电流通过电阻时要消耗能量, 而在磁路中, 恒定磁通通过磁阻时并不消耗能量。

工程上遇到的磁路并不都是用同一种铁磁物质构成的, 各处

的截面积也不全相同。例如图 11-2 所示的磁路, 由磁导率分别为  $\mu_1$  和  $\mu_2$  的两种不同的铁磁物质以及它们之间的一段不大的空气隙所组成。对于这种无分支磁路, 利用全电流定律和前述的分析步骤可以证明: 各段磁路的磁压降之和应等于磁路的磁动势, 即

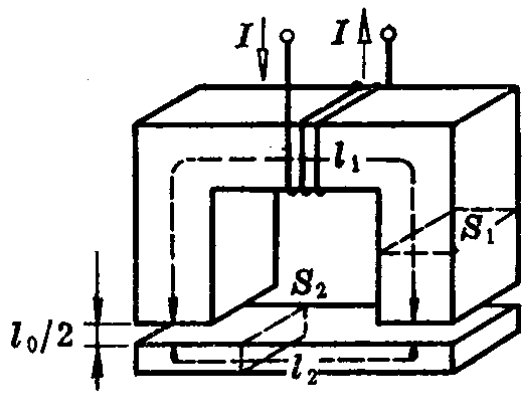


图 11-2 有空气隙的磁路

$$H_0 l_0 + H_1 l_1 + H_2 l_2 = NI \quad (11-10)$$

在这种情况下, 如果按磁导率和截面积之不同将磁路分成数段, 则磁路的总磁阻应等于各段磁路的磁阻之和, 即

$$R_m = R_{m0} + R_{m1} + R_{m2} = \frac{l_0}{\mu_0 S_0} + \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} \quad (11-11)$$

由于  $\mu_0 \ll \mu, \frac{1}{\mu_0} \gg \frac{1}{\mu}$ , 空气隙的长度尽管很小, 其磁阻  $R_{m0}$  却仍然

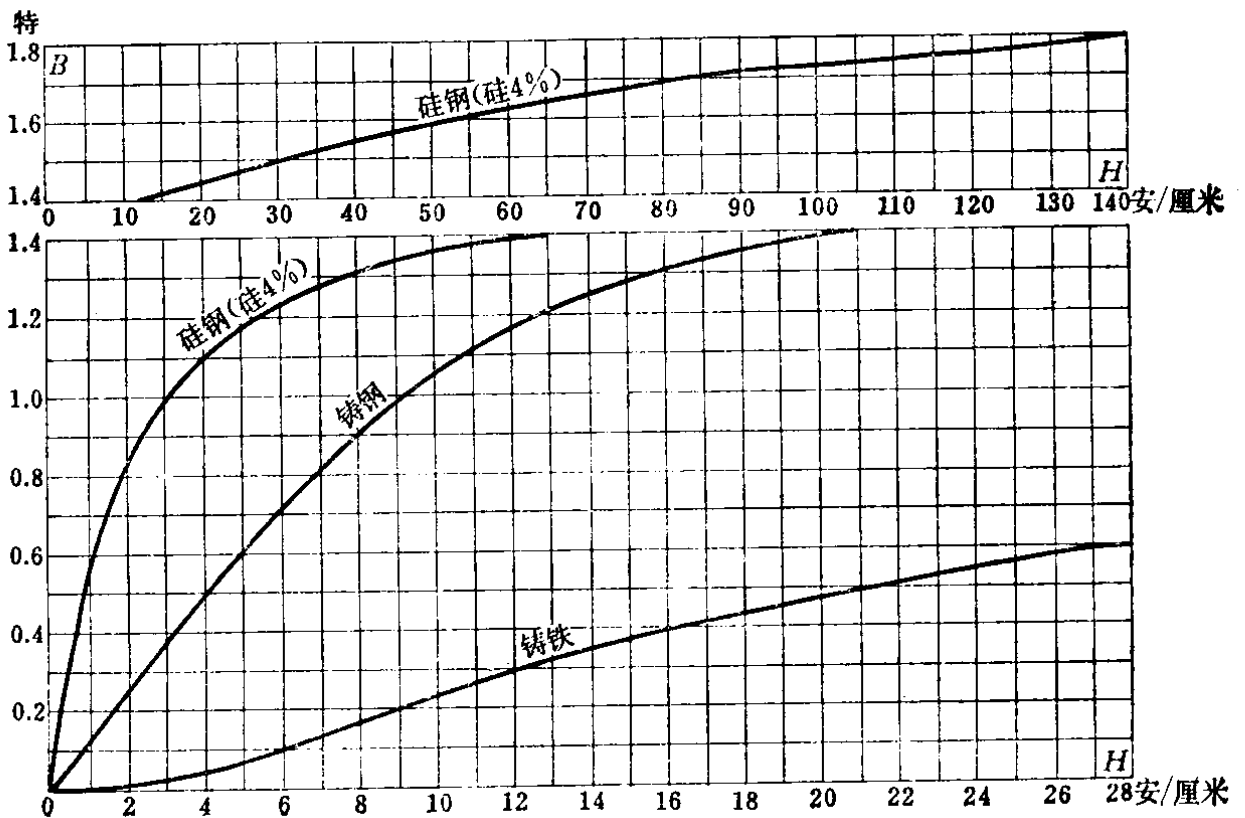


图 11-3 磁化曲线

可以比  $R_{m1}$  和  $R_{m2}$  大得多。因此,当磁路中有空气隙存在时,磁路的总磁阻将显著增加。若磁动势  $NI$  一定,则磁路中的磁通  $\Phi$  将减小;反之,若要保持磁路中的磁通一定,则磁动势就要增加。可见,磁路中应尽量减少非必要的空气隙。

由于铁磁物质的磁导率不是常数,磁路的磁阻也不是常数,  $B$  和  $H$  的关系一般很难用准确的数学式来表达,因此用实验方法得到的  $B-H$  曲线或称磁化曲线是进行磁路计算不可缺少的资料。图 11-3 是几种常用铁磁材料的磁化曲线。正是由于这一原因,磁路欧姆定律也只在磁路进行定性分析时比较有用,而对磁路进行定量分析时比较多的是利用式(11-10)。

**例 11-1** 图 11-2 所示的磁路,是由两块铸钢铁心及它们之间的一段空气隙构成的。各部分的尺寸是:  $l_0/2=0.5$  厘米,  $l_1=30$  厘米,  $l_2=12$  厘米,  $S_0=S_1=10$  厘米<sup>2</sup>,  $S_2=8$  厘米<sup>2</sup>。今要求在空气隙处的磁感应强度达到  $B_0=1$  特斯拉,问需要多大的磁动势?

**解:** (1) 磁路中的磁通

$$\Phi = BS = 1 \times 0.001 = 0.001 \text{ Wb}$$

(2) 各段磁路的磁感应强度

$$B_0 = 1 \text{ T}$$

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{0.001}{0.001} = 1 \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{0.001}{0.0008} = 1.25 \text{ T}$$

(3) 各段磁路的磁场强度

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} = 796000 \text{ A/m} = 7960 \text{ A/cm}$$

由图 11-3 中的磁化曲线查得

$$H_1 = 9.2 \text{ A/cm}$$

$$H_2 = 14 \text{ A/cm}$$

(4) 各段磁路的磁压降



$$H_0 l_0 = 7960 \times 1 = 7960 \text{ A}$$

$$H_1 l_1 = 9.2 \times 30 = 276 \text{ A}$$

$$H_2 l_2 = 14 \times 12 = 168 \text{ A}$$

### (5) 磁动势

$$NI = H_0 l_0 + H_1 l_1 + H_2 l_2 = 7960 + 276 + 168 = 8404 \text{ A}$$

值得注意的是,磁动势的单位虽然是“安”,但是它并非是线圈中的电流。线圈中的电流值应该等于磁动势除以线圈的匝数。

从以上计算结果可以看出,空气隙虽然只占磁路总平均长度的 $\frac{1}{43} = 2.33\%$ ,但是它的磁压降却占了磁动势的 $\frac{7960}{8404} = 94.7\%$ ,即磁动势主要用来克服空气隙的磁阻了。因此,当磁路中的空气隙较大时,可以根据空气隙的磁压降来估算磁路的磁动势。

在工程实际中,我们还经常会遇到各种有分支的磁路。根据磁通的连续性原理和全电流定律,或者利用磁路与电路的对偶关系,我们还可以得到磁路克希荷夫定律。

磁路克希荷夫第一定律指出:在磁路的任何一个闭合面上,磁通的代数和等于零。用公式表示,即

$$\sum \Phi = 0 \quad (11-12)$$

其中,如果穿出闭合面的磁通前面取正号,则进入闭合面的磁通前面取负号。例如对图 11-4 中虚线图示的闭合面来说:

$$\Phi_3 - \Phi_2 - \Phi_1 = 0$$

磁路克希荷夫第二定律指出:在磁路的任一闭合回路中,磁压降的代数和等于磁动势的代数和,即

$$\sum Hl = \sum NI \quad (11-13)$$

其中,磁场的方向与回路环行方向一致时, $Hl$  前面取正号,否则取负号;电流的方向与回路环行方向符合右手螺旋定则时, $NI$  的前面取正号,否则取负号。应用此定律进行磁路计算时,所选回路应按磁导率、截面积或通过的磁通之不同而分成若干段。因为这三