

高等学校教材

电机学

武汉水利电力学院 陈道舜 主编

水利电力出版社



PDG

高等学校教材

电机学

武汉水利电力学院 陈道舜 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 22.25印张 498千字

1987年11月第一版 1987年11月北京第一次印刷

印数00001—10090册

ISBN7-120-00055-1/TV·42

15143·6490 定价 3.70 元

新华书店

PDG

内 容 提 要

本书为高等学校水电站动力装置工程专业与机电排灌工程专业的通用教材，也可供水利水电工程技术人员参考。

全书分五篇共二十二章。第一篇论述变压器的类型、构造、原理、性能和工况等；第二篇论述交流电机绕组、电势和磁势等；第三篇论述异步电动机的类型、构造、原理、性能和工况等；第四篇论述同步电机的构造、原理、性能和工况、发热和冷却以及同步电机励磁等；第五篇论述直流电机的类型、构造、原理和性能等。

前 言

本书是根据1982年10月在西安召开的水电站动力装置工程专业教材会议制定的电机学教学大纲与1983年4月在武汉召开的水利水电专业电类教材会议审议的水电站动力装置工程专业、机电排灌工程专业教学大纲编写的。

本书由武汉水利电力学院陈道舜副教授主编，华北水利水电学院周念祖同志、河海大学熊寿昌同志与陕西机械学院雷践仁同志参加编写，由陕西机械学院侯恩奎副教授主审。

周念祖同志编写第一至五章；熊寿昌同志编写第十四、十五、十六、十八与十九章；雷践仁同志编写第六、十七、二十一与二十二章；陈道舜同志编写概论、第八至十三章、第二十章与附录一、二。此外，陈道舜同志与雷践仁同志合编了第七章。

本书在编写过程中，承湖北工学院周克定教授提出宝贵意见，华中工学院陶醒世教授对本书进行了润色，武汉水利电力学院陈运校同志也参加了润色工作，在此表示感谢。

本书承沈阳变压器研究所、哈尔滨电机厂、东方电机厂与上海电机厂提供有关资料，在此致以谢意。

由于经验不足，本书可能有不少缺点，欢迎读者批评指正。

主要符号表

α	直流电枢绕组并联支路对数; 交流绕组每相并联支路数	I_0	激磁电流、空载电流
B_δ	气隙磁密	I_q	同步电机电枢电流的交轴分量(交轴电流)
B_r	电枢反应磁场磁密	I_{st}	起动电流
B_{ad}	直轴电枢反应磁场磁密	I_μ	磁化电流
B_{aq}	交轴电枢反应磁场磁密	k_M	过载能力
B_{f1}	励磁磁场的基波磁密	k	变比
C	常数; 电容	k_a	自耦变压器变比; 隐极同步电机电枢磁势的折算系数
C_e	电势常数	k_μ	饱和系数
C_M	转矩常数	k_d, k_q	直轴、交轴电枢磁密分布曲线的波形系数
E_a	直流电机感应电势; 交流电机电枢反电势	k_{ad}, k_{aq}	直轴、交轴电枢磁势的折算系数
E_0	空载电势	k_{q1}	电势或磁势基波的绕组分布系数
E_m	电势最大值	k_{y1}	电势或磁势基波的绕组节距系数
E_1, E_2	原、副边主电势	k_{w1}	电势或磁势基波的绕组系数
E_{10}, E_{20}	原、副边漏电势	k_c	短路比
E_{ad}	直轴电枢反应电势	M	转矩; 互感; 电磁转矩
E_{aq}	交轴电枢反应电势	M_N	额定转矩
e_L	自感电势	M_{em}	电磁转矩
e_M	互感电势	M_1	原动机转矩; 输入转矩
F_a	电枢磁势(基波幅值)	M_2	负载转矩; 输出转矩
F_{ad}	直轴电枢磁势(基波幅值)	M_0	空载制动转矩
F_{aq}	交轴电枢磁势(基波幅值)	m	相数
F_{f1}	励磁磁势(基波幅值)	n_N	额定转速
F_δ	气隙磁势(基波幅值)	n_1	同步转速; 定子基波旋转磁场转速
F_1, F_2	原、副边磁势(基波幅值)	P_{mec}	机械功率
F_0	励磁磁势, 空载磁势	P_1	输入功率
f_N	额定频率	P_2	输出功率
f_1	异步电机定子频率	P_0	空载功率(空载损耗用 p_0)
f_2	异步电机转子频率	p	损耗; 极对数
I_f	励磁电流	p_{cu}	铜耗(电阻损耗)
I_a	电枢电流	p_{Fe}	铁耗
I_d	同步电机电枢电流的直轴分量(直轴电流)	p_{mec}	机械损耗
I_N	额定电流	p_{ad}	附加损耗
I_k	短路电流	q	每极每相槽数
I_L	负载电流	R_{st}	起动电阻

R_a	电枢回路总电阻		转子漏阻抗 (复数)
R_f	励磁回路总电阻	Z_L	负载阻抗
R_L	负载电阻	Z_s	短路阻抗
r_a	电枢绕组内电阻	z	复数阻抗的模 (绝对值)
r_f	励磁绕组内电阻	α	系数; 角度
r_k	短路电阻	β	系数; 角度
S_N	额定视在功率 (额定容量)	γ	电导率; 短距角
s	转差率	δ	气隙长度
s_m	发生最大电磁转矩时的转差率	η_N	额定效率
s_N	额定转差率	η_{max}	最大效率
T	时间常数; 周期	θ	温度; 功率角
U_N	额定电压	μ	磁导率
U_ϕ, U_l	分别为相电压、线电压	Φ	磁通; 每极磁通; 变压器的主磁通
u	电压瞬时值; 虚槽数	Φ_m	主磁通最大值
u_k	阻抗电压 (短路电压)	Φ_o	漏磁通
w_1, w_2	变压器原、副绕组匝数	ϕ_{1o}, ϕ_{2o}	原、副绕组漏磁通的瞬时值
x_+, x_-, x_0	正序、负序、零序电抗	ϕ	相位角 (功率因数角)
x_{1o}, x_{2o} (或 x_1, x_2)	原、副绕组漏电抗	ψ	相位角 (内功率因数角); 磁链
x_k	短路电抗	Ω	机械角速度
y	节距; 合成节距	Ω_1	同步角速度
Z_1, Z_2	原、副绕组漏阻抗或异步电机定子、	ω	角频率

目 录

前言

主要符号表

概论	1
第一节 电机的作用	1
第二节 电机的理论基础	1
第三节 电机的主要类型	6
第四节 电机学的任务与学习方法	7
习题	7

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的基本工作原理、类别和结构	9
第一节 变压器的基本工作原理	9
第二节 变压器的用途和分类	9
第三节 变压器的结构与额定值	12
小结	17
习题	17
第二章 变压器的基本原理	18
第一节 概述	18
第二节 变压器的空载运行	18
第三节 变压器的负载运行	24
第四节 变压器参数的测定	30
第五节 标么值	36
第六节 电压变化率及电压调节	39
第七节 变压器的损耗和效率	42
小结	45
习题	46
第三章 三相变压器	47
第一节 概述	47
第二节 三相变压器的磁路系统	48
第三节 三相变压器的电路系统——绕组的连接法和连接组	50
第四节 三相变压器绕组的连接法和磁路系统对空载电势波形的影响	55
第五节 变压器的并联运行	57
第六节 变压器的V/V连接组	64
小结	65
习题	65

第四章 变压器的瞬变过程	67
第一节 概述	67
第二节 变压器的空载合闸	67
第三节 变压器的副边突然短路	70
第四节 变压器的过电压及其防护	73
小结	74
习题	75
第五章 特殊变压器	75
第一节 概述	75
第二节 三绕组变压器	75
第三节 自耦变压器	83
第四节 仪用互感器	88
小结	89
习题	89

第二篇 交流电机的绕组、电势和磁势

第六章 交流电机的绕组和电势	91
第一节 概述	91
第二节 槽电势星形图	93
第三节 三相绕组	94
第四节 在正弦分布磁场下的绕组电势	98
第五节 在非正弦分布磁场下绕组的谐波电势	102
第六节 电势中谐波的削弱方法	103
第七节 分数槽绕组	106
小结	109
习题	110
第七章 交流电机绕组的磁势	111
第一节 概述	111
第二节 单相绕组的脉振磁势	111
第三节 三相绕组合成磁势的基波	117
第四节 三相绕组合成磁势的高次谐波	121
小结	123
习题	123

第三篇 异步电机

第八章 异步电机的结构与运行状态	124
第一节 概述	124
第二节 异步电动机的基本工作原理	124
第三节 异步电机的三种运行状态	126
第四节 异步电机的主要结构部件	127

第五节 异步电动机的额定值	130
第六节 国产异步电机简介	131
小结	132
习题	133
第九章 异步电动机的运行原理	133
第一节 概述	133
第二节 转子静止时的异步电机	133
第三节 转子旋转时的异步电机	139
小结	148
习题	148
第十章 异步电动机的电磁转矩	149
第一节 概述	149
第二节 异步电动机中的能量转换关系、功率和转矩平衡方程式	149
第三节 电磁转矩与磁通和转子电流的关系	152
第四节 电磁转矩与转差率, 最大转矩与起动转矩	154
第五节 $M=f(s)$ 曲线上的稳定运行区域	158
第六节 转矩的实用计算公式	159
小结	160
习题	161
第十一章 异步电动机的工作特性	162
第一节 概述	162
第二节 异步电动机的工作特性	162
第三节 用直接负载法求取工作特性	163
第四节 异步电机参数的测定与工作特性的求取	165
小结	168
习题	168
第十二章 三相异步电动机的起动和调速	168
第一节 概述	168
第二节 异步电动机的起动性能	168
第三节 异步电动机的起动方法	169
第四节 异步电动机的调速	176
小结	179
习题	180
第十三章 三相异步电动机在不对称电压下运行以及其它异步电机	180
第一节 概述	180
第二节 对称分量法	181
第三节 在不对称电压下运行的三相异步电动机与椭圆形旋转磁势	183
第四节 单相异步电动机	184
第五节 感应调压器与移相器	188
第六节 自整角机	189

第七节 交流伺服电动机	191
小结	192
习题	193

第四篇 同步电机

第十四章 同步电机基本工作原理与结构	194
第一节 同步电机的基本工作原理	194
第二节 同步电机的结构	195
第三节 同步电机的额定值	209
第四节 国产同步电机简介	209
小结	210
习题	210
第十五章 同步发电机的对称运行	211
第一节 概述	211
第二节 同步发电机的空载运行	211
第三节 对称负载时的电枢反应	215
第四节 电枢反应电抗和同步电抗	219
第五节 同步发电机的电势方程式和相量图	224
第六节 同步发电机的短路特性、零功率因数特性、电机参数及短路比的确定	229
第七节 同步发电机的外特性和调节特性	236
小结	239
习题	240
第十六章 同步发电机与大电网并联运行	241
第一节 概述	241
第二节 投入并联运行的条件和方法	241
第三节 同步发电机的功角特性	246
第四节 并网运行时同步发电机有功功率的调节	251
第五节 并网运行时同步发电机无功功率的调节	255
第六节 容量相近的两台同步发电机并联运行	257
小结	258
习题	258
第十七章 同步电动机和同步调相机	259
第一节 概述	259
第二节 同步电动机	259
第三节 同步电动机的基本方程式、相量图和功角特性	260
第四节 无功功率的调节	264
第五节 同步电动机的起动	265
第六节 同步电动机的工作特性	271
第七节 同步调相机	272
小结	273

习题	274
第十八章 同步发电机的不对称运行	274
第一节 概述	274
第二节 不对称运行的概念	275
第三节 不对称稳定运行时的各相序电抗	275
第四节 单相及两相稳定短路	279
第五节 不对称运行对电机的影响	283
小结	283
习题	284
第十九章 同步电机的突然短路	284
第一节 概述	284
第二节 分析同步电机过渡过程的简化方法	285
第三节 对称突然短路的物理过程	286
第四节 瞬变电抗和超瞬变电抗的基本概念及其测定方法	291
第五节 突然短路电流表达式及衰减时间常数	295
第六节 突然短路与同步电机及电力系统的关系	299
小结	300
习题	301
第二十章 同步电机的损耗和效率、发热和冷却及励磁方式	301
第一节 同步发电机的损耗和效率	301
第二节 同步发电机的发热和冷却	303
第三节 同步电机的励磁方式	305
小结	307
习题	307

第五篇 直流电机

第二十一章 直流发电机	308
第一节 直流电机的构造和基本工作原理	308
第二节 直流电机的电枢绕组、感应电势和电磁转矩	312
第三节 电枢反应	317
第四节 直流电机的电势、功率和转矩平衡方程式	319
第五节 并励发电机和复励发电机	320
第六节 直流电机的换向	324
第七节 直流测速发电机	326
小结	327
习题	328
第二十二章 直流电动机	328
第一节 直流电动机的电势、功率和转矩平衡方程式	328
第二节 直流电动机的机械特性	330
第三节 直流电动机的起动与调速	332

第四节 直流伺服电动机	335
小结	336
习题	336
附录一 电机中常用绝缘材料的耐热等级	337
附录二 习题中计算题的答案	338
主要参考书目	342

概 论

第一节 电机的作用

电能在生产、传输、分配、使用等方面都比较方便。所以在现代工农业生产、交通运输、国防工程以及日常生活中，电能的使用均占有十分重要的地位。

电机的作用主要表现在下述三个方面：

(1) 发电机和变压器 发电机一般由汽轮机、水轮机带动。汽轮机、水轮机分别把热能、水能转化为机械能，再通过发电机转化为电能。变压器可以将发电机的电压升高，通过输电线把电能送到用电中心。然后再用变压器将电压降低供用户使用。

(2) 电动机 工农业、交通运输业、国防等各部门中生产机械和装备的运转，绝大多数是由电动机驱动的。例如在农业中的电力排灌，脱粒以及农副产品加工等；采矿工业中的碎料、送料、送风、给水等；机械工业中各种机床的驱动；交通运输用电气机车牵引等，都要采用各种型式的电动机。

(3) 控制电机 随着经济建设的发展，工业生产自动化程度不断提高，需要采用各式各样的控制电机。

在解放前，我国电机工业主要是搞些修理与装配，根本谈不上什么电机制造业。解放后，在党的英明领导下，通过自力更生、艰苦奋斗，我国已建立起完整的电机制造业体系，有了统一的国家标准。目前，我国已能制造330kV、36万kVA电力变压器，已能制造双水内冷、30万kW的大型水轮发电机、60万kW大型汽轮发电机。各种电机都有了系列产品。同时，我国的电机制造业还大量采用新材料、新工艺、新技术，不断生产出适应国民经济发展的新产品。

第二节 电机的理论基础

电机的原理基本上建立在下列几个定律与概念的基础上：1) 全电流定律与磁路欧姆定律；2) 电磁感应定律；3) 电磁力定律；4) 自感与互感概念；5) 基尔霍夫定律；6) 能量守恒定律。

以下重点复习全电流定律和自感与互感的概念。

一、全电流定律

如图(0-1)所示。设空间有 n 根(设为3根)载流导体，导体的电流分别 i_1 、 i_2 、 i_3 ，这些载流导体为任何闭合路径 l 所包围着。通过试验，发现磁场与建立它的电流之间存在着下述关系：磁场强度矢量 H 沿空间任意闭合回路的线积分等于该回路所包围的导体电流的代数和。这就是全电流定律，其数学表达式为

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad (0-1)$$

其中电流的方向是这样选定的，把回路的线积分方向比作右手螺旋的旋转方向，则电流方向与螺旋前进的方向一致的为正电流，相反的为负电流。在图 0-1 中， i_2 、 i_3 为正， i_1 为负。

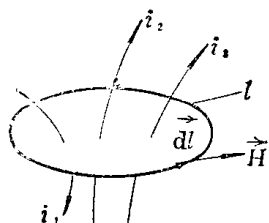


图 0-1 全电流定律

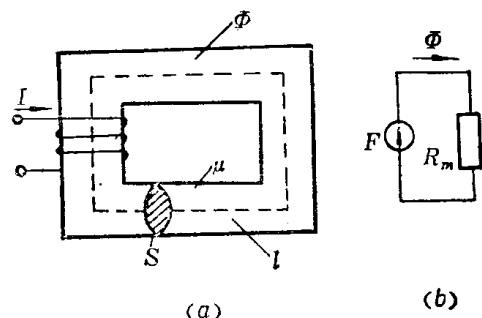


图 0-2 无分支磁路
(a) 实际磁路图；(b) 等效磁路图

在磁路的分析计算中，常用到磁路欧姆定律，它可以从全电流定律推导出来。

设有图 0-2 (a) 所示的无分支磁路，它由铁磁物质（铁磁物质系指铁、钴、镍及其合金，例如硅钢片）所叠成，其横截面为 S ，磁路平均长度为 l 。如果磁路的平均长度比其横截面的线性尺寸大得多，则可近似认为磁通在横截面上的分布是均匀的，即有

$$\Phi = BS$$

式中， B 是其中心线上的磁感应强度，也称磁通密度，简称磁密。

根据全电流定律，可得

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = Hl = wI$$

式中 w 为励磁绕组匝数。

考虑到 $B = \mu H$ ，由以上各式可以导出磁通为

$$\Phi = (\mu H)S = \left(\frac{\mu w I}{l} \right) S = \frac{wI}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{F}{R_m} \quad (0-2)$$

式中 F —— 磁势；

R_m —— 磁阻。

这就是磁路的欧姆定律，它与电路的欧姆定律形式上相似。磁阻 R_m 的倒数为磁导 λ_m ，

即 $\lambda_m = \frac{1}{R_m}$ 。

图 0-2 (b) 为仿照电路形式绘出的等效磁路图，电阻图形符号侧面加线条的表示非线性磁阻。铁心磁阻为非线性磁阻。

磁路与电路有许多相似之处，现将这二者的对比示于表 0-1 中。

如果无分支磁路由具有不同截面或不同材料的几段所组成，例如各段磁路的截面不同但材料相同或截面相同但材料不同，此时通过各截面的磁通应相等，均为 Φ ，可以得到下面较一般的表达式

$$\left. \begin{aligned} \Sigma F &= \Phi \Sigma R_m \\ \Sigma wI &= \Phi \Sigma R_m \end{aligned} \right\} \quad (0-3)$$

其中 ΣF (或 ΣwI)为总磁势 (当 I 的方向与 Φ 的方向符合右手螺旋关系时, wI 前取“+”号, 反之取“-”号), ΣR_m 为各段磁阻的总和。

必须指出, 磁路与电路虽有许多相似之处, 但却有一个本质的差别, 即磁通并不象电流那样代表某种质点的运动; 恒定磁通通过磁阻, 并不象恒定电流通过电阻时那样

具有能量形式的转换。并且, 由于铁磁物质的磁导率 μ 不是常数, 它随磁场强度 H 而变化, 故磁阻也不是常数, 使得我们不能直接利用磁路的欧姆定律, 而不得不利用下述方法进行计算。

无分支磁路的计算有两种, 一种是已知磁势和磁路的几何尺寸求磁通; 另一种是已知磁通和磁路的几何尺寸求磁势。由于磁路的非线性, 使得铁心磁阻不是常数, 故上述两种计算, 必须根据所用材料的磁化曲线, 才能进行。

无分支磁路计算的顺序是: 已知磁通 $\Phi \rightarrow$ 找出各段磁感应强度 $B_k = \frac{\Phi}{S_k} \rightarrow$ 由磁化曲线查出各段的 $H_k \rightarrow$ 由 $\Sigma H_k l_k = wI$ 找到磁势 $F = wI$ 。

对于空气隙, 由于磁导率 μ_0 为常数, 已知 B_a 可以用下面的公式求 H_a 。如果 B_a 的单位用T, H_a 的单位用A/m, 由于空气的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, 则

$$H_a = \frac{B_a}{\mu_0} = \frac{B_a}{4\pi \times 10^{-7}} = 0.8 B_a \times 10^6 \quad (0-4)$$

铁心的净截面积等于从视在截面积中扣除其中绝缘材料的截面积后剩余的面积, 一般用视在截面积乘填充系数来求。填充系数 $K = \frac{\text{净截面积}}{\text{视在截面积}}$, 一般 K 在0.91左右。

几种常用材料的磁化曲线, 如图0-3所示。

[例 0-1] 如图0-4(a)所示的磁路具有励磁线圈200匝, 磁路各部分尺寸均已在图中标出, 其单位为mm。磁路用0.5mm厚的D11硅钢片叠成, 其填充系数 $K = 0.91$, 忽略气隙的边缘效应 (在空气隙中, 磁通有向外扩张的效应, 使得气隙截面积大于邻近铁心的截面积, 如忽略此效应, 则气隙截面积等于所邻近铁心的截面积)。求在此磁路中建立 $\Phi = 3 \times 10^{-3} \text{Wb}$ 的磁通所需的励磁电流。图0-4(b)示出其等效磁路图, 其中, 电阻图形符号侧面未加线条的为线性磁阻, 空气隙的磁阻就是线性磁阻。

[解] 绘出磁路的中心线并把磁路划分为铁心长度 l_1 、 l_2 与气隙长度 l_a 三段, 如图0-4(a)所示, 各段长度为

$$l_1 = 240 - 40/2 - 40/2 - 5 = 195 \text{mm} = 0.195 \text{m}$$

$$\begin{aligned} l_2 &= (240 - 40/2 - 40/2) + 2(190 - 40/2 - 60/2) = 480 \text{mm} \\ &= 0.48 \text{m} \end{aligned}$$

表 0-1 磁路与电路的对比

电 路		磁 路	
电流	I	磁通	ϕ
电势	E	磁势	F
电压降	IR	磁压降	ϕR_m
电阻	$r = \frac{l}{\gamma S}$ (其中 γ 是电导率)	磁阻	$R_m = \frac{l}{\mu S}$ (其中 μ 是磁导率)
电导	$g = \frac{1}{r}$	磁导	$\lambda_m = \frac{1}{R_m}$

