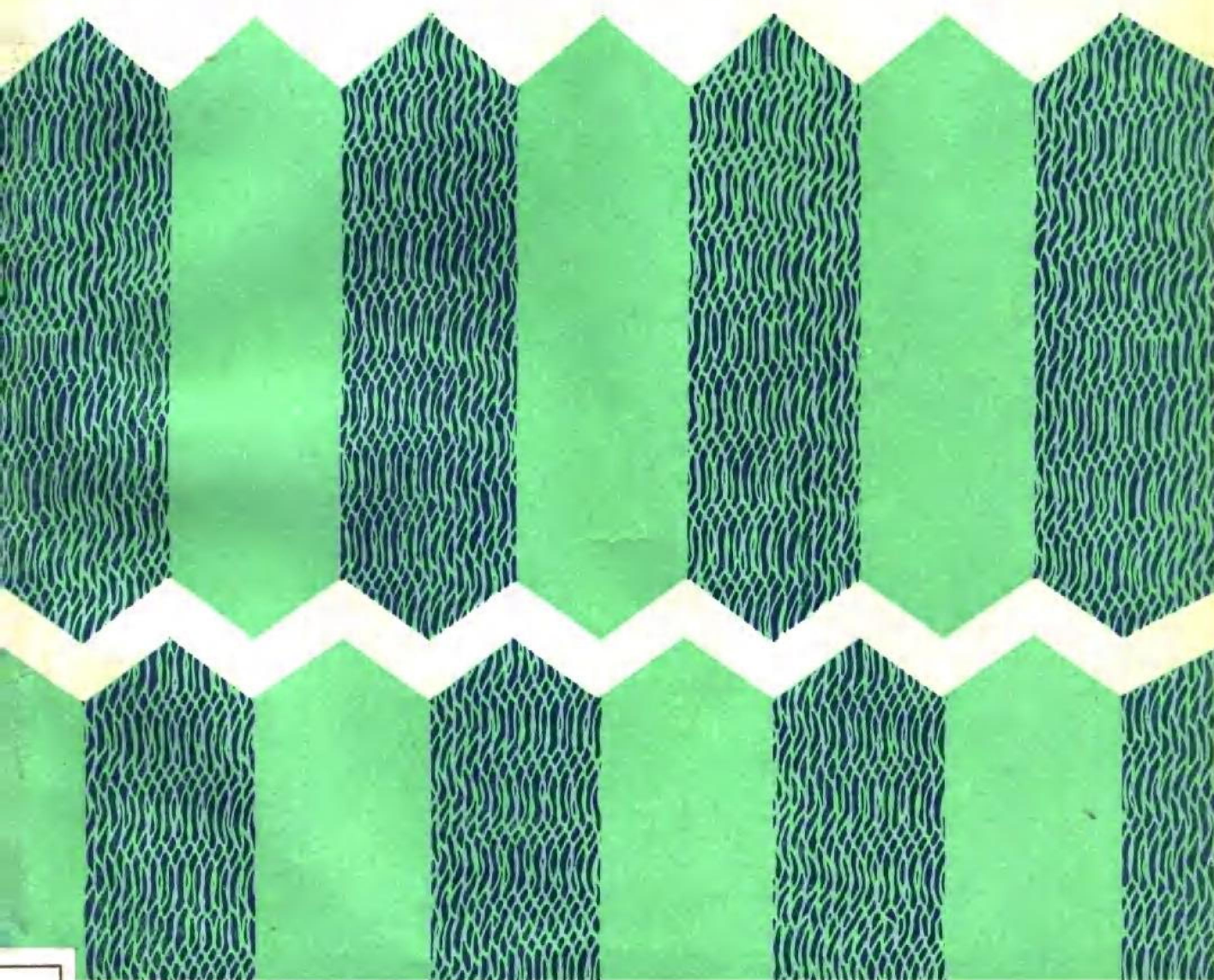


电机学

上册

艾维超 主编



机械工业出版社

本书共分两册。上册三篇分别是电机的基本理论和工程问题、磁路计算和变压器、交流绕组和异步电机；下册三篇分别是同步电机、直流电机、特种电机。本书对电机的讲述体系与其它书有所不同，其内容丰富、讲述细致。每章后附有大量习题，便于读者自学。

本书可作为高等院校电机专业的教材，也可供有关工程技术人员自学参考用。

电 机 学

(上 册)

艾维超 主编

*

责任编辑：陈建行

封面设计：方 芬

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 25³/₄ ·字数 596 千字

1988年4月北京第一版·1988年4月北京第一次印刷

印数 00,001—4,600 ·定价：6.20元

*

ISBN 7-111-00449-9/TM·74

前 言

在新的技术革命的推动下, 生产和社会活动中的自动化程度日益提高。由于今后对能源的需求更为急切, 作为能量转换重要工具的电机将承担更复杂而繁重的任务。对电机的要求不断提高, 不仅要求容量大, 品种翻新, 而且要求能在各种条件下工作, 控制方便, 效率高, 高度可靠。在这新形势下, 电机学这门重要的技术基础课有必要不断予以改进和充实。

为适应技术发展的需要, 电机学教材应在以下方面予以改进: ①近年来科学技术的新成就已深刻影响着电机的生产和使用, 电机学中除必要的经典理论外, 对新技术必须有所适应。例如电子技术已广泛应用于各行各业, 在电机的控制方面效果特别显著, 现正在发展将电子控制与电机合成一体的新型电机。因此必须重视电子技术与电机的结合。又如随着生产自动化程度的提高, 已不能满足于对电机的静态研究, 必须增加有关动态问题的分析。②电机新品种和新的工作方式越来越多, 但电机学教材的内容不允许无限扩大。因此必须着重研究各类电机的共性问题, 深入了解电机中能量传递和转换的规律以及它在各种电机中的不同反映, 以求掌握电机中最本质的原理。此外应重视分析问题的方法, 以使读者有办法解决所遇到的各种实际问题。③为了贯彻科学技术为经济建设服务的方针, 在重视系统理论的同时, 在教材中要加强生产观点和经济观点, 使读者习惯于使科学技术与生产、理论与实践更密切地结合, 为学好后续专业课作好准备。④大学教材要不断改进, 以适应学时要减少, 质量要提高, 并注意培养学生的自学能力等各项要求。因此教材必须充分考虑适合学生自学的需要, 应力求把问题提得明确, 引导思考方法, 提示解决问题的途径, 使学生自学后能独立解决问题。

本书系由上海工业大学艾维超主编, 邹景祥和边文纲参加编写, 经胡之光及电机教研室各同志提出建议, 并经三届学生试用后重新修改而成。

本书在编写中曾蒙福州大学卓忠疆教授等同志提出不少宝贵意见, 并得到上海电机厂、上海变压器厂、上海南洋电机厂、革新电机厂、人民电机厂、跃进电机厂的大力支持, 谨此致谢。

编 者

主要符号

A	电负荷, 面积	Q_i	虚槽数
a	绕组支路数(交流), 绕组支路对数(直流)	q	每板每相槽数
B	磁通密度(磁感应强度)	R	半径
b	宽度, 电纳	R_M	磁阻
C	电容	r	电阻, 转数
c	比热	S	视在功率, 容量, 电枢绕组线圈数
D	直径	s	转差
E	电动势有效值, 电场强度	SCR	晶闸管
e	电动势瞬时值	scr	短路比
F	磁势, 力	T	周期, 时间常数, 转矩, 力矩
f	频率, 磁势瞬时值	T_M	电磁转矩
G	重量	t	时间, 温度, 齿距, 匝数
g	电导	U	电压有效值
H	磁场强度	ΔU	电压变化率
I	电流有效值	U_M	磁压
i	电流瞬时值	U_m	励磁阻抗压降
J	转动惯量	u	电压瞬时值, 每槽每层线圈边数
j	电流密度	V	体积
K	换向片数	v	速度
K_{fe}	铁心压装系数	W	能量
K_M	过载能力	w	绕组匝数, 能量密度
K_u	磁路饱和系数	x	电抗
k	变比, 折算系数	x_s	同步电抗
k_d	绕组分布系数	x_p	漏梯电抗
k_p	绕组短距系数	Y	复导纳
k_{dp}	绕组系数	y	线圈节距, 复导纳模
k_{sk}	斜槽系数	Z	复阻抗
L	电感	Z_m	励磁阻抗
l	长度	z	阻抗模, 每槽导线数
M	互感	α	槽距角
m	相数, 质量, 电枢绕组重数	β	角度, 角加速度, 负载系数
N	导体数	γ	角度, 电导率
n	转速, 导线数	δ	气隙长度
P	有功功率, 损耗	ε	介电常数
P_M	电磁功率	η	效率
p	瞬时功率, 极对数	θ	空间电角度, 功率角, 温度
Q	无功功率, 槽数	$\Delta\theta$	温升

Λ	磁导	τ	极距
λ	磁导系数	Φ	磁通
μ_0	真空磁导率	ϕ	磁通瞬时值
μ	磁导率, 转子谐波次数	φ	相位角, 功率因数角
ν	定子谐波次数	Ψ	磁链
ξ	考虑磁路饱和时磁化电流幅值与有效值转换的修正系数	ψ	磁链瞬时值, 电动势与电流夹角
ρ	电阻率	Ω	机械角速度
σ	漏磁系数	ω	角频率

下标符号表

Al	铝	min	最小的
a	电枢, 有功的	N	额定, 基值
add	附加的	p	每一磁极的
av	平均值	q	横轴
b	导条, 电刷	R	合成的
c	导体, 线圈, 铁心柱	Re	调节的
cr	临界的	r	冲击的, 端环的, 无功的
Cu	铜	s	同步的, 串励, 槽的
D	阻尼	s_c	短路
d	纵轴	st	起动
e	电的, 涡流的, 端部的	t	齿
Fe	铁	w	绕组的
f	励磁(绕组回路)的	y	轭
h	磁滞	z	阻抗的
i	电流	δ	气隙
K	换向器的, 换向的	ϕ	相的
l	线值, 负载	1	输入, 定子, 原边, 正序
m	磁的, 幅值, 相互的	2	输出, 转子, 副边, 负序
max	最大的	0	零序, 空载
$mech$	机械的		

目 录

绪 论

- 0.1 电机学的目的与任务 1
- 0.2 电机的分类 1

- 0.3 电机的工作情况和额定值、系列化与标准化 2
- 0.4 我国电机工业的发展概况 5

第 1 篇 电机的基本理论和工程问题

第 1 章 电磁相互作用的基本规律 8

- 1.1 磁场的产生、磁路定律 8
- 1.2 感应电动势——电磁感应定律 10
- 1.3 电感 13
- 1.4 电磁力 14

- 3.1 波形问题——谐波分析 34
- 3.2 电路中的电动势平衡规律 35
- 3.3 主磁通和漏磁通、磁势平衡规律 35
- 3.4 矢量图——时间矢量和空间矢量 39
- 3.5 等值电路 40
- 3.6 对称分量法 43

第 2 章 能量传递和机电能量转换 17

- 2.1 单个线圈的能量关系 17
- 2.2 两个线圈间的能量传递 20
- 2.3 电能和机械能的转换、电磁力和力矩的产生 22
- 2.4 电机中的功率转换 31

第 4 章 其它工程和经济问题 46

- 4.1 电机的绝缘 46
- 4.2 损耗及效率 50
- 4.3 发热和冷却 55
- 4.4 机械结构 62
- 4.5 经济技术问题 66

第 3 章 电机的分析方法 34

第 2 篇 磁路计算和变压器

第 5 章 磁路计算 69

- 5.1 铁磁物质 69
- 5.2 直流磁路计算 74
- 5.3 交流磁路的特点和计算 78

第 7 章 变压器的运行原理 105

- 7.1 变压器的空载运行 105
- 7.2 变压器的负载运行 109

第 6 章 变压器的基本原理、用途、分类和结构 91

- 6.1 变压器的基本原理 91
- 6.2 变压器的基本用途 92
- 6.3 变压器的分类与结构 93

第 8 章 变压器的参数和运行性能 124

- 8.1 变压器的参数计算和测定 124
- 8.2 变压器的运行特性 134
- 8.3 变压器并联运行时的负载分配 138
- 8.4 变压器的过载能力 142

第9章 变压器运行中的瞬**变情况147**

- 9.1 空载合闸的瞬变过程147
- 9.2 故障短路瞬变过程149
- 9.3 故障短路电流的影响151
- 9.4 变压器的过电压现象153

第10章 自耦变压器和三绕组变**压器163**

- 10.1 自耦变压器163
- 10.2 三绕组变压器171

第11章 三相变压器182**11.1 三相变压器的磁路系统182****11.2 绕组的极性、连接法及连接
组别184****11.3 绕组连接方法和磁路系统对空
载电流、电动势波形的影响189****11.4 变换相数的连接法193****11.5 三相变压器不对称运行195****第12章 其它类型变压器203****12.1 调压变压器208****12.2 互感器210****12.3 整流变压器212****第3篇 交流绕组和异步电机****第13章 交流电机的绕组、感应电动****势和磁势223**

- 13.1 绕组的作用和对绕组的要求223
- 13.2 交流绕组的结构及其分类223
- 13.3 交流绕组的感应电动势236
- 13.4 分数槽绕组247
- 13.5 交流绕组的磁势252
- 13.6 其它各种绕组272

第14章 异步电机的基本工作原理、**用途、分类和结构281**

- 14.1 异步电机的基本工作原理及
用途281
- 14.2 异步电机的分类和基本结构283

第15章 异步电机的运行原理288

- 15.1 异步电机的磁通和电抗288
- 15.2 电动势平衡规律和磁势平衡
规律294
- 15.3 折算法及基本方程式298
- 15.4 异步电机的等值电路和矢量图301
- 15.5 笼式转子的分析方法305

第16章 异步电动机的参数和运行**性能310**

- 16.1 异步电动机参数测定310

16.2 异步电动机的能量传递312**16.3 异步电动机的转矩及稳定运行
条件314****16.4 异步电动机的运行特性324****第17章 三相异步电动机的起动和****调速328****17.1 起动过程的分析328****17.2 笼式电动机的起动330****17.3 绕线式异步电动机的起动334****17.4 改善笼式电动机起动性能的
方法336****17.5 三相异步电动机调速342****17.6 改变极数调速343****17.7 改变转子串联电阻调速350****17.8 改变定子外加电压调速351****17.9 改变电源频率调速352****17.10 转子电路内串联入电子线路
调速356****第18章 谐波磁场对异步电动机****的影响358****18.1 谐波磁场的产生358****18.2 谐波磁场对电机的影响358****18.3 克服谐波磁场影响的方法362****第19章 三相异步电机的其它运****行方式365**

19.1 异步发电机	365	21.1 实心转子异步电动机的结构 特点	390
19.2 异步电机的制动运行状态	369	21.2 实心转子异步电动机的基本 工作原理	390
19.3 感应调压器	372		
第20章 单相异步电动机	374	第22章 异步电机的圆图	396
20.1 单相异步电动机的工作原理	374	22.1 圆图的基本理论	396
20.2 单相异步电动机的起动方法	380	22.2 用实验方法决定圆图及由圆图 确定最大转矩	400
20.3 电容电动机	382		
第21章 实心转子异步电动机	390		

绪 论

0.1 电机学的目的与任务

电力装备在能量的转换、传输和应用方面都具有无可比拟的优越性,在工农业生产、交通运输业,以及人民生活方面都是不可缺少的。

随着生产和科技的发展,对电机也不断提出新的要求。例如现在需要每分钟几十万转的超高速电机和几分钟一转的超低速电机;能在大范围内均匀调速的电机;能在高温、超低温,或有放射性物质的环境下工作的电机。由于自动化技术的不断发展,电机成为一个复杂的大系统中的一个元件,它必须能精确地加以控制,而且必须有非常高的可靠性。

新技术的发展也影响着电机工业本身,不断对它提出新的任务。新材料的发现,新工艺的采用,使电机的结构不断改变。例如超导技术的发展对未来大电机的结构将带来革命性的改变。应用了电子计算机后,设计工作也有重大变化,用计算机可以进行以往用手工无法进行的计算,得出更合理的最佳方案。

现有电机也要不断改进。例如要用电子线路组成的可控电源来驱动电机;要减小电机噪声;要提高电机效率等。这些要改进的要求,无疑会给电机的理论、结构和工艺等方面带来许多值得深入研究的问题。

电机的品种非常多。不论从容量大小或工作情况来看都是千变万化的。电机学不可能逐个讨论它们。但作为动力机械的各类电机,它们终究是一种通过电磁作用进行能量转换或传递的机件。它们本身有着共同的必须遵守的电、磁和力等方面的内在规律。这些规律在传统电机中是适用的,在发展的新式电机也是必须遵循的。要改进电机的结构,增大容量或改善工作性能都必须依据这些基本规律。我们应该掌握这些规律,并学会用这些规律去解决各种问题。本书将先介绍这些规律,其中主要是能量转换规律,然后通过对几种主要电机类型的详细分析去掌握如何运用这些规律。学习以后,就能够为改进常规的电机和设计特殊的电机打好基础,同时也能够合理地选择和使用电机。这就是电机学这门课程的任务和目的。

0.2 电机的分类

电机是一种利用电磁作用进行能量转换或传递的机件。它可进行机械能和电能的相互转换或者不同形式的电能相互转换,根据转换的不同电机可以分为以下几类:

发电机(generator)——将机械能转换成电能;

电动机(motor)——将电能转换成机械能;

变压器(transformer)——将某一形式电能转换成另一形式电能,所改变的主要是交流电的电压,在特殊情况下也可以改变相数或频率。

本书所讨论的电机主要就是这几类电机。有些电机虽然也应用同样原理,也进行能量

转换,但它们的目的是主要不是为了传递能量而是为了执行某种控制任务,对它们的性能另外有不同的要求。这种电机统称为控制电机,有专门的课程和书籍讨论,不属本书的范围。

从电源的性质来看,电机可以分成交流机(alternating current machine)和直流机(direct current machine)两类。在交流电机中又可分成同步(synchronous)和异步(asynchronous)两类,它们主要的差别在于运行速度与电网的频率有不同的关系,同时它们也有较明显的不同运行性能。为了学习上的方便,本书主要就变压器、异步机、同步机、和直流机这四个基本类型分别进行讨论,除此之外,还有许多特殊的类型,它们在结构上或运行方式上有所不同,但基本原理是一致的,本书将介绍几种主要类型的特特点。本书在最后对各类电机予以综合讨论,以指出它们的共性。

应该指出,以上的分类方法只是为了分析方便,并不说明各类电机有本质上的差异。各种电机都有内在的共性,这就是电磁相互作用的规律,只是在不同客观条件下反映的形式有所不同而已。实际上,在一定的客观条件下,各种类型可以互相转换。例如同一台电机,如果有机械功率输入时,它能够发出电功率而变为发电机;但若有电功率输入时,它也能输出机械功率,这时就成为电动机。又如变压器是静止的,但旋转电机也有变压器的作用,有可能作为变压器用。直流机也可以说是频率等于零的交流机。又如同步机和异步机在一般情况下它们的结构不同,使用场合不同,但在一定条件下它们也能相互作为另一种电机运行。总之,在学电机学时,虽然按各种电机类型来讨论,但必须注意它们的共性和特殊性,即电磁作用在各种电机中是怎样反映的。这样才能抓住它们的本质,掌握电机的基本规律。

0.3 电机的工作情况和额定值、系列化与标准化

0.3.1 电机的工作情况和额定值

所有电机总是在一定的情况下工作。例如一台由原动机拖动的交流发电机的工作情况包括:转速是多少;所发出的电压有多大;电压频率是多少;相数是多少;发出的电流是多大,功率是多大等。如果是一台变压器,它输入和输出的电压各是多少。对于电动机也有相似的工作情况。不同的工作情况对电机的要求不同,例如在同样转速下,一台功率大的电机,总比功率小的电机需要大一些的体积。所以各个电机都有它相应的工作情况。

对每一台电机都必须规定出它应有的主要的工作情况。这些规定出的数值称为电机的额定值(rating)电机在这些规定值下工作时,就说它处在额定运行状态,或额定工作状态。例如一台直流发电机至少有下列一些额定值:

额定电压	U_N	V
额定电流	I_N	A
额定功率	P_N	kW
额定转速	n_N	r/min
对交流发电机则有:		
额定电压	U_N	V

额定电流	I_N	A
额定功率	P_N	kW
额定功率因数	$\cos\varphi_N$	
额定相数	m	
额定频率	f	Hz
额定转速	n_N	r/min
对变压器则有:		
额定原边电压	U_{1N}	V
额定副边电压	U_{2N}	V
额定电流	I_{1N}/I_{2N}	A
额定容量	S_N	kV·A
额定相数	m	

电动机也有大致相似的额定值。上面所称的额定功率一般都指电机的输出功率。除这些数值外,有时还规定了电机其它的运行条件:例如规定电机安装地点的周围环境温度;规定电机是否可以长期运行或每次连续运行多长时间等。

在每一台电机的外壳上都钉有“名牌”,标明该电机的名称、型号、制造厂和电机的额定值。小电机的名牌较简单,有时只标明使用电压和电流。大电机的名牌较详细,除全部额定值以外还有接线图、电机的出厂号和出厂年月等。

电机应该在它的额定情况下运行。但要注意这些额定值对电机只是有约束性,而不是绝对不可逾越的。例如一台发电机的额定容量规定了这台发电机的最合理负载,它能够在这个负载下在应有的使用寿命期内始终安全而经济地运行。如果实际负载小于额定值,电机就不能充分发挥其潜力;如果实际负载大于额定值,只要不超过太多或超载时间太长,也是可以运行的,只是效率可能降低些,对使用寿命不至于有明显影响。对于额定电压和额定电流也有相同的情况。额定值是规定电机运行情况的数值,制造厂根据这些数值来设计电机,用户也根据它们来选择适合需要的电机。

额定值只是对电机的几个主要运行情况作了规定。在实际生产电机时,只要求这些数据是不充分的。工厂在生产一种电机之前应对电机必须满足的全部要求编制出详细的说明。其说明文件称为**技术条件**。它的内容除了额定值以外,还列出了对电机的其它技术方面的要求:例如电机的结构形式是立式还是卧式;封闭的型式如何;绝缘等级是什么;用什么冷却方式;使用地点的条件如何(如海拔高度,有否腐蚀性气体等);有什么附加设备;电机运行性能应满足什么要求;以及用什么试验方法来测试等。对大批生产的电机由工厂订出技术条件,供用户参考。由用户定制的特殊规格的电机,则由工厂根据用户的要求订出技术条件。对大型电机还必须列出运输安装时的特殊要求等。这种技术条件经双方协商同意后,就成为工厂生产时的根据和在交货时用户据以验收的文件。

0.3.2 系列化与标准化

电机的输出功率应该满足负载的要求。不同的负载有不同大小的功率要求,因此电机也应该有不同大小的额定功率输出。但实际生产的电机不可能有太多的不同规格以全部满足负载的不同需要。对某一种类型的电机(即属于同一型号的电机),一般在一定范

国内选定几个功率等级进行生产。这样同一类型电机的不同大小的功率等级称为一个**系列** (series)。一个系列中分几个等级，每级的功率差别多大是一个重要的问题。如果级数太少，每级的功率差别太大，对用户选用就不方便。如果级数很多，对用户是方便了，但在生产上是不经济的。因为生产一种规格的电机，必须为它进行设计计算，准备一套图纸，还要有一套冲模、绕线模等工艺装备。品种规格太多将使生产成本太高。所以决定一个系列中的等级，必须经过调查研究，全面考虑应用和生产方面的要求，制订出最合理的方案。系列确定后，工厂可以从全系列的要求进行最合理的设计；同时由于生产的品种少，每种产量大，可以采用较先进的工艺过程和工艺装备；这样就有利于提高产品质量，降低成本。所以一般通用电机都是成系列生产的。各类电机的系列举例如下。

变压器：

SJL系列，这是中小型三相油浸自冷式变压器的系列。其中S——三相；J——油浸自冷式；L——铝导线绕组。

异步电机：

Y系列，是新采用的效率较高的笼型电动机。

JO系列，是被替代的小型三相笼型电动机系列。其中J——异步；O——封闭式。

YR系列，是中小型绕线式三相异步电动机。R——绕线式转子。

同步电机：

T2系列，是小型同步发电机系列。其中T——同步，2——第二次统一设计。

QFS系列，是大型双水内冷汽轮发电机系列。

TS系列，是立式中、大型水轮发电机系列。

直流电机：

Z3系列，是一般用途的小型直流电机系列。其中Z——直流。

ZJF、ZJD系列，是大型直流发电机和电动机系列。

ZQ系列，是直流牵引电机系列。

除了系列化以外还有一个**标准化**问题。如果各工厂各自生产的电机规格不统一，外型尺寸和安装尺寸都不同，电机的性能也各有差异，这对用户使用时将很不方便。所以，应该把各厂生产的同一类型电机的规格统一起来，使它们有同样的输出功率等级，有同样的安装尺寸（包括轴中心高度、底脚螺孔的尺寸和位置、外形尺寸以及性能指标等），成为一个标准系列。这样既便于用户使用，也有利于生产。标准化是近代工业生产的一个重要特征。制订这种统一的标准是在有关的主管部门领导下进行的。

电机的标准化不仅限于容量等级和安装尺寸等，也深入到了电机的内部结构，即尽量采用标准的结构部件。不仅螺钉等紧固件采用标准尺寸，其它主要部件的尺寸也统一起来，这样使同一规格电机的部件可以互相调换。这种**互换性或通用性**对电机的维护修理是很有必要的。

除了对需要量大的通用电机有标准系列外，对有特殊要求需用量较大的电机也另有专用系列。例如矿井中的电机使用条件最苛刻，结构要加强，还要求有隔爆性，以确保矿井的安全。这种电机称为**隔爆型电机**，它自成系列，如YB系列。专用系列种类很多，它们各有不同的结构和性能。

为实现系列化、标准化和通用化,国务院和机械工业部已经颁布了许多工业标准。由国务院颁布的标准称为国家标准,简称“国标”,以GB标志。例如GB1094--71,是1971年颁布的关于电力变压器的标准。由机械工业部颁布的标准简称“部标”,以JB标志。例如JB223--77,是1977年颁布的关于大型异步电动机的标准。

0.4 我国电机工业的发展概况

建国以前,我国电机工业的基础十分薄弱,仅能生产小电机,例如发电机只能做到200kW,变压器只有2000kV·A。主要材料如硅钢片、各种绝缘材料和轴承等都要依靠进口。建国以后,电机制造业有了较大发展,1956年生产出6000千瓦的汽轮发电机,在1958年制造成功当时在国际上首创的12000kW双水内冷汽轮发电机。以后电机容量逐步增大,品种不断增多。我国目前已能生产300MW的汽轮发电机组和水轮发电机组,以及与它们配套的360MV·A变压器。这些电站设备都能成套供应汽轮机、锅炉、水轮机、全套附属设备和各种仪表及自动控制设备。在用电设备方面已能生产现代化钢厂或矿山的成套电气设备。例如本溪钢厂的1.7m热连轧机系统共有大型直流电机27台,总容量约100MW,最大容量为5000kW;大型交流电机10台,总容量约80MW,最大容量为10000kW;另有较小交、直流电机155台,总容量约58MW。这些设备全部由国内制造。关于中小型电机和变压器已有许多经过多次改进的标准系列,可以适应各方面的需要。电工所需要的材料基本上国内都能自给。我国实行经济开放政策以来,原来一向需要进口的电机现在已经开始出口。例如我国的小水轮发电机和小型异步电动机现在已远销美国和西德等工业先进国家。

国外近十多年来,在技术上的发展是非常快的。以电机的最大容量来说,目前国外大型汽轮发电机中,容量为600和800MW是一般的,最大单机容量已做到1300MW。水轮发电机最大的为820MW,还在研制1000MW和更大的电机。输电电压750kV已用得不少,在法国已有一条1200kV的试验线路,并正在研究以1500~1600kV作为输电电压。变压器的容量已做出1000MV·A三相变压器组。直流输电近年来也发展较快,直流输电容量在1980年已有12000MW,现正在研究直流电压为 ± 600 kV, ± 750 kV,输电距离为2400km的线路。在电机的性能方面,在节约能源的要求下,电机的效率近年来提高很多,电机的可靠性也有很大提高。

我国目前在和国外的技术上的差距还是很大的。我们必须作很大努力方能在各方面提高我国电机工业的技术水平。首先要加强理论工作,对有关的电磁、机械、损耗、发热、振动噪声等问题进行大量的研究,以最新的技术来改进我们的设计方法。其次要采用新材料新工艺,新结构,充实完善各种测试技术,制造出容量更大的,电压更高的,性能更好的,高度可靠的和符合经济要求的各种电机。同时,我们要发挥我国的资源优势,以适应我国的特殊需要。我国有丰富的核能、煤、水力资源和广阔的草原、漫长的海岸,我们除了发展核能、火力和大型水电站外,也可以大力发展水力、风力、太阳能、潮汐等发电技术,使广大山区、草原和沿海地区能就近获得电能。我们还要推广采用国际标准,提高电机的性能,使我国的电机符合国际市场的要求。

第 1 篇 电机的基本理论和工程问题

电机是一种通过电磁相互作用进行能量转换和传递的设备，电机学主要分析电机中电和磁的现象以及它们的相互作用。除了电磁问题以外，实际电机中还有机械、绝缘和发热、冷却等其它重要问题。但本书将不对它们作深入的探讨，只就几个共同的工程问题作扼要的介绍，说明它们的重要性。以求全面了解电机的制造要求及运行性能。

各种类型的电机由于不同的结构和运行条件而表现出不同的工作情况和性能。但它们都是电和磁相互作用的结果，在理论上有着密切的内在联系。第 1 章先复习基本电磁理论。第 2 章重点讨论电机中能量转换的问题，为以后几篇讨论具体电机时奠定基础。

在学习电机理论时，要学会分析各种问题的方法，要注意问题的实质是什么，有什么具体条件，然后考虑用什么方法去处理它，以得到较正确的结果。在第 3 章中，将列出电机理论中用到的重要的分析方法，并且说明如何运用在物理课和电工理论中学过的基本规律来解决电机中的具体问题。

本书基本采用国际单位制，即SI制 (International System of units)。主要物理量的单位如下：

长度	m (有时用cm)
质量	kg
力	N
时间	s
电动势 E	V
电流 I	A
功	J
磁通 Φ	Wb
磁通密度 B	T
磁场强度 H	A/m
磁势 F	A (At)
电感 L	H
磁导	H
温度	°C

第1章 电磁相互作用的基本规律

1.1 磁场的产生、磁路定律

电机中有磁场。在某些小型电机中,磁场由永久磁体产生。绝大多数电机的磁场都是由线圈中通入电流而产生。其线圈可以是单个线圈、一组线圈或多组线圈。以一定规律联接起来的一组线圈称为绕组(winding)。这里先讨论产生磁场的基本规律。

毕奥-萨伐尔定律是关于载流导线的周围有磁场存在的基本定律。它指出,由一载有电流*i*的线段单元*dl*在真空中离该线段*r*远的*P*点上产生的磁感应强度即磁通密度(flux density)为

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i}{r^2} d\vec{l} \times \vec{r}_0 \quad (1-1)$$

其量值

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{idl}{r^2} \sin \theta$$

式中 $\vec{r}_0$ ——由线段指向*P*点的单位矢量;

μ_0 ——真空中的磁导率;

θ ——线段*dl*中*i*的方向与 $\vec{r}_0$ 之间的夹角。

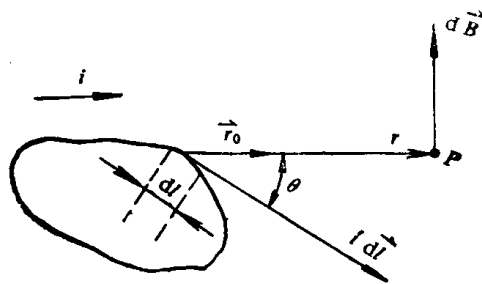


图1-1 毕奥-萨伐尔定律

矢量*dB*的方向垂直于包含*dl*及*r*两线段的平面,正方向由右手螺旋定则决定(见图1-1)。一个具体线圈的电流在*P*点所产生的总的磁感应强度*B*可沿线圈积分求得,积分时要考虑各不同的*dl*线段在*P*点所产生的*dB*有不同的大小和方向。如果线圈周围不是真空而是充满着均匀而各向同性的导磁介质,那末各点的磁感应强度也可以用同样公式计算,只是公式中 μ_0 须改用介质的磁导率 μ 。

毕奥-萨伐尔定律是计算形状比较规则的导线或线圈在空气中所产生的磁场的基本依据。电机中的线圈形状一般是不规则的,而且有铁磁材料,也有气隙,用这一定律来计算磁场是不现实的。只在个别情况下,例如在大容量电机及变压器中计算某局部的磁场时才应用它。

麦克斯韦的电磁场理论对电磁场问题做了完善的描述。根据这个理论,只要知道了电流分布情况和给定了边界条件,在一定范围内的磁场分布就完全可以确定。在几何形状比较规则的情况下,可以根据电磁场的基本方程组,用解析法进行计算。但电机的结构形状比较复杂,许多问题不能直接用解析法解决,而须根据电磁场理论用数值法进行计算,这时计算工作比较繁重,只有依靠计算机才能进行。

在实际工作中,大部分情况下可以用简化的方法来进行计算,就是把一个磁场的问题简化成一个磁路的问题来处理。磁场本来是在空间各点都有不同数值的一个场的问题。如果磁场中有铁磁材料,就可以把它简化成主要由铁磁材料组成的磁路,然后用路的规律来分析它。图1-2表示一个铁心和一个通有电流*I*的线圈。在线圈周围的空间,包括

铁心内和铁心外的空间，都有磁场。但是由于铁心的磁导率比空气的大得多，绝大部分磁通都集中在铁心中。为简化起见，可忽略铁心外的磁通，认为全部磁通 Φ 都在铁心内通过，形成一个磁路，如同电流在导线内通过时形成电路一样。其次，再简化磁场在铁心拐角处的复杂情况，认为沿磁路各点的截面都是相同的，等于铁心直线部分的截面积 A ，并以铁心的平均周长 l 作为磁路的有效长度。这样，可以求得铁心中的磁通密度（简称磁密）

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (1-2)$$

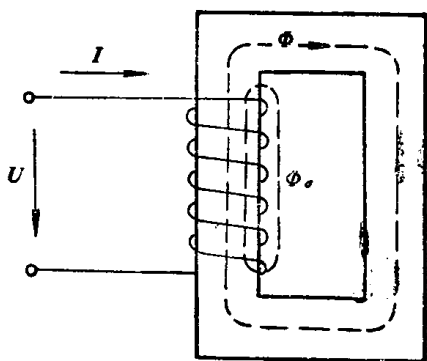


图1-2 铁心线圈的磁路

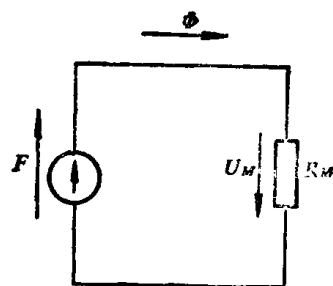


图1-3 铁心线圈等值电路

根据假定，当 Φ 不变时， B 在磁路中任意一点上都是常数。这相当于电路中的电流密度 $j = \frac{I}{A}$ 的情况一样。由磁通密度可以求出磁场强度（magnetic field intensity）

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{\Phi}{\mu A} \quad (1-3)$$

因为 B 是常数， H 在磁路各点也是常数。

然后，就可以应用全电流定律（安培环路定律）来求得电流与磁场之间的关系。全电流定律指出，在一磁场内，磁场强度 H 沿任一闭合回路的线积分等于这个回路所匝链的总电流，即

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I = wI \quad (1-4)$$

式中 w 是回路链着的线圈匝数， I 是线圈中的电流。在图1-2所示的系统中，铁心回路总链着线圈的全部匝数 w ，而且在 H 和 B 是常数的情况下，当沿铁心有效长度 l 作积分时，式（1-4）可写成

$$\oint H dl = Hl = wI = F \quad (1-5)$$

wI 或 F 称为线圈的磁势（magnetomotive force缩写mmf）。

$$Hl = \frac{l}{\mu A} \Phi = R_M \Phi = \frac{1}{\Lambda} \Phi = U_M \quad (1-6)$$

式中 $R_M = \frac{l}{\mu A}$ 称为磁路的磁阻（magnetic reluctance）； $\Lambda = \frac{1}{R_M} = \frac{\mu A}{l}$ 称为磁路的磁导（magnetic permeance）。在线性系统中， R_M 和 Λ 都是常数。 U_M 称为磁路的磁压降或磁压。公式 $U_M = R_M \Phi$ 称为磁路欧姆定律。