



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家级精品资源共享课

E

电机学

ELECTRIC MACHINERY 第3版

© 林明耀 徐德淦 付兴贺 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育

规划教材

国家级精品教材

电 机 学

第 3 版

林明耀 徐德淦 付兴贺 编著
王宏华 主审



机械工业出版社

本书是面向电气工程及其自动化专业的一本技术基础课教材，不同于面向专业某个方向的基础课教材。

本书共分总论、动力电机和微特电机三篇共十三章。其特点是突出每种电机的五个基本点（基本功能和用途、基本作用原理、基本结构、基本分析方法、基本特性）；强干削枝，力求内容少而精；例题、习题和思考题占本书篇幅约20%，并配有电子课件，附有部分习题参考答案，便于自学和引发学习兴趣。内容安排灵活，讲授时可根据具体情况进行次序调整和内容增减。

本书可作为高校电气工程及其自动化专业以及其他强弱电结合的本科专业和大专的教材，亦可供有关技术人员及电类专业硕士生作为参考用书。

欢迎选用本书作为教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册后下载本书电子课件。

图书在版编目（CIP）数据

电机学/林明耀，徐德淦，付兴贺编著. —3版. —北京：机械工业出版社，2016.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 国家级精品资源共享课
ISBN 978-7-111-55135-5

I. ①电… II. ①林… ②徐… ③付… III. ①电机学—高等学校—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆CIP数据核字（2016）第246418号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：贡克勤 责任编辑：贡克勤 刘丽敏

责任校对：樊钟英 封面设计：张 静

责任印制：李 洋

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2017年1月第3版第1次印刷

184mm×260mm·20.5印张·493千字

标准书号：ISBN 978-7-111-55135-5

定价：45.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

第3版前言

本书是在2009年出版的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《电机学》(第2版)基础上编写的。本书出版以来,深受广大师生好评。

电机学科是历史悠久、理论相对较为成熟的学科,20世纪80年代前“电机学”一直是电类专业的一门主课,并往往分成若干门课程进行教学,学时数达三四百之多。随着科技发展,一方面,电机理论日臻完善,同时由于新兴学科丛生,以及电机的部分功能被电子技术所替代,导致电机学在电气工程专业内被日益削弱,以至于有些学校电专业将电机与其他课程合并,甚至干脆将电机学取消。国外有些高校的电气工程系甚至已没有电机学科组。

科技发展的另一方面,随着现代化的进程,电机的应用却越来越广泛,电机的应用达到了无所不在的程度。而今,电气工程技术人员不懂、不会使用电机是不可思议的,必将寸步难行。为解决上述矛盾,我们以电气工程专业教学改革指导思想——加强基础、淡化专业、着重培养学生的自学能力,来改革电机学科的教学,使电机学作为电气工程及其自动化专业的一门重要技术基础课,而不同于面向专业的某个方向的专业基础课。

本书着重介绍电机的基本原理和分析方法,具体是抓住每种电机的五个基本点:基本功能和用途、基本作用原理、基本结构、基本分析方法和基本特性。

本书删减各种电机工程应用的分析研究。工程应用问题量大面广,并与相关的其他学科密切相关,放在电机课内学习收效甚微,且有无的放矢之嫌。当学生工作中遇到电机工程应用问题时,可以凭借学到的基本知识,通过自学去解决。

全书分为三篇13章。微特电机独立成篇。微特电机的原理虽然同动力电机,但对它们的要求和分析的着眼点不同,通过该篇的学习,可巩固和拓宽电机理论。

全书例题、习题和思考题共占总篇幅的20%左右,并配有电子课件,附有部分习题参考答案。

我们在选择例题、习题和思考题时,考虑了启发学生学习兴趣、补充知识、提高自学能力、拓宽视野等因素,其难易程度亦有较大差异。应用本书时,带“*”内容任课教师可依据专业要求、学时数多少、学生具体情况等酌情筛选。

本书此次修订是根据各兄弟院校在应用本书的实践中提出的意见和建议而进行的。修订的原则是保持本书的原有特色,总体结构基本不变,重点在吸收新技术和新成果,充实和改进某些内容。在第三篇微特电机中,增加了“永磁无刷直流电动机”和“风力发电机”两章。

此次修订由林明耀、徐德淦、付兴贺主持。具体是:第一篇由徐德淦执笔,第二篇、第三篇第十章、第十一章由林明耀执笔,第三篇其余由付兴贺执笔,全书由林明耀统稿。在本书编写过程中,东南大学电机及其控制学科的研究生李晖和黄仁志帮助整理了部分习题答案,在此表示衷心感谢。

本书由河海大学王宏华教授主审。本书在编写过程中,主审、兄弟院校任课教师,东南大学电机及控制系的同行等提出了许多宝贵和中肯的修改意见,在此谨致以衷心的感谢。

第2版前言

本书自2004年出版以来,深受广大师生好评,本书2008年被评选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

“电机学”是一门历史悠久、理论相对较为成熟的学科,20世纪80年代前它一直是强电类专业的一门主课,并往往分成若干门课程进行教学,学时数达三四百之多。随着科技发展,一方面电机理论研究日臻完善,同时由于新兴学科丛生,以及电机的部分功能被电子技术所替代,导致电机学在电气工程专业内被日益削弱,以至于有些院校电专业将电机与其他课程合并,甚至将电机课干脆取消。国外有些高校的电气工程系甚至已没有电机学科组(类似我们的教研室)。

科技发展的另一方面,随着现代化的进程,电机的应用却越来越广泛,已达到无所不在的程度。而今,电气工程技术人员不懂、不会使用电机是不可思议的,必将寸步难行。为解决上述矛盾,我们以电气工程专业教学改革指导思想——加强基础、淡化专业、着重培养学生的自学能力,来改革电机学科的教学,把电机学作为电气工程及其自动化专业的一门技术基础课,而不同于面向专业的某个方向的专业基础课。

本书着重介绍电机的基本原理和分析方法,具体是抓住每种电机的5个基本:基本功能和用途、基本作用原理、基本结构、基本分析方法和基本特性。

本书删减各种电机工程应用的分析研究。工程应用问题量大面广,并与相关的其他学科密切相关,放在电机课内学习很难收效,且有无的放矢之嫌。当学生工作中遇到电机工程应用问题时,可以凭借学到的基本知识,通过自学去解决问题。

上述观点,编者曾撰文发表于2002年的电气工程高等教育国际研讨会,受到有关同志的重视和关注,并在机械工业出版社高等教育分社的鼓励和支持下,按上述观点编写了本书。

全书共分三篇11章。微特电机独立成篇。控制电机的原理虽然同动力电机,但对它们的要求和分析的着眼点不同,通过该篇的学习可起到对电机理论的巩固和拓宽作用。

全书例题、习题和思考题共占总篇幅的20%左右,并配有课件光盘。

我们在选择思考题、习题和例题时,考虑了启发学生学习兴趣、补充知识、提高自学能力、拓宽视野等因素。其难易程度亦有较大差异。应用本书时,任课教师可依据专业要求、学时数多少、学生具体情况等酌情筛选。

本书此次修订是根据各兄弟院校在应用本书的实践中提出的意见和建议而进行的。修订的原则是保持本书的原有特色,总体结构基本不变。重点在充实和改进某些内容,并进一步提高课件的质量,以更好地与书相配合,更有利于“教”与“学”。

此次修订由徐德淦、李祖明、林明耀、黄允凯主持。具体是:第一篇由徐德淦执笔,第二篇由李祖明执笔,第三篇除第十章由林明耀撰写外,其余由黄允凯执笔,全书由徐德淦统稿。课件光盘由黄允凯制作。在本书编写过程中,东南大学电机与控制学科的研究生张磊、顾娟、周谷庆、王燕萍、师敬涛、季振亚和王彬彬等录入了书稿的部分章节,在此表示衷心



的感谢。

本书由湖北工业大学周克定、廖家平两位教授主审。主审、兄弟院校任课教师以及南京航空航天大学刘迪吉教授、西华大学何建平教授、江苏科技大学刘维亭教授、南京工业大学王德明教授和张九根教授、南京师范大学王恩荣教授、扬州大学莫岳平教授、上海电器科学研究所季杏法教授、东南大学胡敏强教授和程明教授都对本书提出了许多宝贵的意见和建议，在此对他们表示衷心的感谢。

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

编 者

主要符号表

角标的含义:

- “'” 归算值; 瞬态值
- “” 超瞬态值
- “*” 标么值

下标的含义:

- a 电枢值
- ad 附加
- av 平均值
- c 临界值; 控制
- e 有效; 电动势
- em 电磁
- f 励磁
- i 电流
- k 短路
- m 励磁
- N 额定
- 0 空载
- R 转子; 接收机
- S 定子; 绕组元件总数
- s 同步
- T 变压器
- ν 谐波次数
- δ 气隙
- σ 漏磁

主要符号

- A 面积; A 相
- a 绕组并联支路对数; 复数算子
- B B 相; 磁通密度
- b 宽度; 磁通密度瞬时值
- C C 相; 绕组每槽并列圈边数
- C_T 转矩常数
- D 直轴; 直径; 差动式
- E 电动势, 对交流表示有效值
- E_q q 个线圈合成电动势
- E_Q 虚拟电动势
- e 电动势瞬时值
- F 磁动势; 励磁绕组

- F_{q1} q 个线圈的基波合成磁动势
- f 频率
- H 磁场强度
- I 电流; 对交流表示有效值
- I_μ 励磁电流中的无功分量
- i 电流瞬时值
- J 转动惯量
- K_m 过载能力
- N 绕组总匝数; 每相绕组串联匝数
- N_c 每元件匝数; 每圈边导体数
- n 转速
- P 功率
- P_{mech} 机械功率
- p 极对数; 损耗功率
- P_{Cu} 铜耗
- P_{Fe} 铁耗
- P_{mech} 机械损耗
- Q 槽数; 交轴
- Q_c 虚槽数
- q 每极每相槽数
- r 交流电阻
- R 直流电阻
- S 视在功率; 容量; 绕组元件数
- s 转差率
- T 转矩; 时间常数
- T_c 换向周期
- t 时间, 时间常数
- T_{a3} 三相突然短路非周期分量电流衰减时间常数
- T''_{d3} 超瞬变电流分量衰减时间常数
- T'_{d3} 瞬变电流分量衰减时间常数
- T_{d0} 定子开路时励磁绕组电流自由分量衰减时间常数
- U 电压, 对交流为有效值
- u 电压瞬时值
- Δu 电压变化率



$2\Delta U$	电刷接触电压降
W	功; 能; 绕组
W_m	磁场储能
x	电抗
Y	导纳
y	绕组合成节距
Z	阻抗, $Z=r+jx$; 电枢总导体数
α	角度; 槽与槽间的夹角
β	夹角; 绕组短距角
δ	气隙; 功率角
η	效率

θ	位置角; 失调角
Λ	磁导
μ	磁导率
τ	极距; 时间常数
Φ	磁通量
Φ_m	主磁通; 每极磁通量
φ	功率因数角
Ψ	磁链
ψ	内功率因数角
Ω	机械角速度; 磁阻
ω	角频率; 电气角速度

目 录

第3版前言 第2版前言 主要符号表

第一篇 总论 1

第一节 电机的基本功能与分类 1

第二节 电机的基本作用原理 2

一、磁场、磁感应强度、磁通 2

二、磁场强度、磁导率 4

三、安培环路定律(全电流定律) 4

四、磁路、磁路参数 5

五、磁性材料的 $B-H$ 曲线 6

六、铁心损耗 7

七、磁场储能 8

八、电感 9

九、电磁感应定律 10

十、电磁力、电磁转矩 12

十一、能量守恒原理 12

十二、电机的可逆性原理 13

第三节 电机的基本结构 13

一、定子 13

二、转子 14

三、主要材料 14

第四节 电机的基本分析方法 15

一、电路方程式 15

二、等效电路 16

三、相量图 16

四、旋转磁场 16

五、功率平衡 16

六、对称分量法 17

七、傅里叶级数 17

第五节 电机的基本特性 17

一、外特性 17

二、效率特性 17

三、电机的起动特性 17

四、电机的调节特性 17

思考题 18

习 题 18

第二篇 动力电机 22

第一章 直流电机 22

第一节 直流电机的基本功能与用途 22

第二节 直流电机的基本作用原理 23

第三节 直流电机的基本结构 25

一、主磁极与励磁线圈 25

二、电枢铁心 26

三、电枢绕组及绕组术语 26

四、直流电机电枢绕组的特点 27

五、单叠绕组 28

六、单波绕组 29

七、换向器和电刷装置 30

八、换向极 31

九、气隙 31

十、机座和端盖 31

第四节 直流电机的基本分析方法 31

一、气隙磁场 32

二、电刷间的感应电动势 E_a 34

三、直流电机的电磁转矩 T_{em} 35

四、电磁功率 P_{em} 35

五、电压方程式 36

六、功率平衡方程式 37

第五节 直流电机的基本特性 37

一、直流发电机的基本特性 37

二、直流电动机的基本特性 42

三、电动机稳定运行的条件 44

四、直流电动机的起动 45

五、直流电动机的调速 46

六、直流电动机制动的概念 47

七、火花、换向 48



八、铭牌数据	49	二、定子绕组	99
思考题	50	三、转子铁心	102
习 题	51	四、绕线转子绕组	102
第二章 变压器	58	五、笼型绕组	103
第一节 变压器的基本功能与用 途	58	六、气隙	103
第二节 变压器的基本作用原理	58	七、铭牌数据和额定值	103
第三节 变压器的基本结构	61	第四节 基本分析方法	104
第四节 变压器的基本分析方法	62	一、旋转磁场	104
一、变压器的基本方程式	63	二、感应电动机与变压器的比较	114
二、归算	64	三、转子卡住不动时的绕线转子感应 电动机	115
三、变压器的等效电路	65	四、转子转动后的绕线转子感应电动 机	117
四、关于三相变压器	66	五、感应电动机的基本方程式和等效 电路	119
五、变压器的相量图	67	六、笼型感应电动机	120
六、标么制	67	七、感应电动机等效电路参数的 测定	121
七、变压器参数的测定	68	第五节 基本特性	122
第五节 变压器的基本特性	70	一、功率关系	122
一、电压	71	二、转矩公式	123
二、波形与频率	71	三、感应电动机的工作特性	126
三、相位角	72	四、感应电动机的起动	127
四、变压器的工作特性	74	五、感应电动机的调速	130
第六节 变压器的几种运行方式	75	第六节 单相感应电动机	134
一、并联运行	75	思考题	138
二、三相变压器的不对称运行	76	习 题	142
三、变压器的瞬态过程	79	第四章 同步电机	155
第七节 几种特殊结构的变压器	81	第一节 同步电机的基本功能及 用途	155
一、自耦变压器	81	第二节 同步电机的基本作用原 理	155
二、三绕组变压器	82	第三节 同步电机的基本构造	157
三、互感器	84	一、转子	157
四、整流装置中的变压器	85	二、定子	159
思考题	86	三、机座	160
习 题	87	四、气隙	160
第三章 感应电机	98	五、冷却系统	161
第一节 感应电机的基本功能与用 途	98	六、励磁系统	163
第二节 感应电机的基本作用 原理	98	七、铭牌数据	164
第三节 感应电机的基本结构	99	第四节 同步电机的基本分析方 法	164
一、定子铁心	99		



一、两种旋转磁场	164	思考题	229
二、电枢反应	165	习 题	229
三、隐极同步发电机的分析方法	168	第六章 步进电动机	231
四、凸极同步发电机的分析方法	170	第一节 概述	231
五、铁心饱和的影响	173	第二节 基本工作原理	231
六、同步电机稳态参数的测定	175	第三节 基本构造	232
第五节 同步电机的基本特性	179	第四节 基本特性	236
一、同步发电机正常运行时的特性	179	第五节 开关磁阻调速电动机	239
二、同步发电机与电网并联运行	181	思考题	240
三、同步电动机	187	习 题	242
四、同步补偿机	191	第七章 测速发电机	243
第六节 同步电机几种不正常运行	191	第一节 概述	243
一、同步发电机的不对称运行	191	第二节 直流测速发电机	243
二、各序阻抗及对应的等效电路	191	第三节 同步测速发电机和脉冲测速发电机	245
三、不对称短路(稳态)举例	194	第四节 交流异步测速发电机	245
四、同步电机的突然短路	197	思考题	247
思考题	203	习 题	247
习 题	204	第八章 旋转变压器	248
第三篇 微特电机	215	第一节 概述	248
第五章 伺服电动机	218	第二节 正弦和余弦旋转变压器	248
第一节 直流伺服电动机	218	第三节 旋转变压器的补偿问题	250
一、概述	218	第四节 线性旋转变压器	250
二、电枢控制的工作原理	218	第五节 应用举例	251
三、电枢控制直流伺服电动机的静态特性	219	思考题	252
四、动态特性简介	219	习 题	253
五、几种低惯量直流伺服电动机	221	第九章 自整角机	254
六、无刷直流电动机	222	第一节 概述	254
第二节 交流伺服电动机	222	第二节 基本结构	255
一、概述	222	第三节 自整角机的指示式运行	255
二、交流伺服电动机的对称分量分析	224	第四节 差动式自整角机	257
三、各序的等效电路	224	第五节 自整角机的变压器式运行	258
四、伺服电动机的电压方程和电磁功率	225	思考题	259
五、伺服电动机获得圆形旋转磁场的条件	226	习 题	260
六、交流伺服电动机的特性	227	第十章 永磁无刷直流电动机	261
第三节 力矩电动机	228		



第一节 概述	261	习 题	288
第二节 基本结构和工作原理	261	第十二章 直线电动机简介	289
一、基本结构	261	一、直线感应电动机	289
二、工作原理	264	二、直线步进电动机	291
第三节 基本特性	267	三、微动直线电动机	292
一、基本方程	267	四、超声波电动机	293
二、运行特性	269	思考题	293
第四节 基本控制方法	269	习 题	295
一、有位置传感器控制	270	第十三章 风力发电机	297
二、无位置传感器控制	272	第一节 概述	297
小结	277	第二节 直驱式永磁风力发电机	298
思考题	278	一、简介	298
习题	278	二、直驱式永磁风力发电机的基本结构和 工作原理	298
第十一章 单相交流串励电动机	279	三、直驱式永磁风力发电机的结构 类型	299
第一节 概述	279	四、直驱式永磁风力发电机的运行 特性	301
第二节 基本结构和工作原理	279	第三节 双馈式异步风力发电机	304
一、基本结构	279	一、简介	304
二、工作原理	280	二、双馈式异步风力发电机的基本结构和 工作原理	304
第三节 单相串励电动机的工作 特性	281	三、双馈式异步风力发电机的基本方程、 等效电路、相量图	305
一、磁通	282	四、双馈式异步风力发电机的运行 控制	308
二、感应电动势	282	思考题	308
三、电压平衡方程及相量图	283	习题	308
四、电磁转矩	284	部分习题参考答案	309
五、工作特性	284	参考文献	314
第四节 单相串励电动机的调速	286		
一、改变电源电压调速	286		
二、改变励磁磁通调速	287		
三、串电阻调速	287		
第五节 单相串励电动机产生的干扰 及其抑制措施	287		
一、噪声及其抑制措施	287		
二、无线电干扰的抑制	288		
思考题	288		



第一篇

总 论

第一节 电机的基本功能与分类

任何机器都是能量转换装置，电机是以磁场为媒介进行机械能和电能相互转换的电磁装置。其中除变压器外，均为机、电能量的转换，涉及的机械能主要是旋转机械功率。把机械能转换为电能的称发电机，其逆运行为电动机。变压器的功能是将某个电压的交流电能转换成同频率但不同电压的交流电能，它是静止不动的，故应称为器，不称机。只因为它的工作原理和分析方法与旋转电机密切关联，故无例外地将它列入电机范畴。

电机分类方法众多，常用的方法是：按电能的性质分为直流、交流电机；按同步转速 $n_s = 60f/p$ （单位为 r/min ）分类，它是取决于电频率 f （单位为 Hz ）和电机磁极对数 p 的一个常数。凡是电机转速等于 n_s 的称同步电机，不等于 n_s 的称异步电机或感应电机，没有固定 n_s 的为直流电机。

同步发电机是当前人类获取电能最重要的装置，无论火电厂、核电厂、水电站，它们只是获得初始能量的方法不同，由热能、核能、水的势能转换为机械能，最后都是通过同步发电机将机械能转换为电能。电动机是当今获取机械能最方便、灵活、可靠的装置，尤以异步电机最为常见。无论工业、商业、交通运输、办公民用，处处可见各种各样、大小不一、功能不同的电动机。电能传输宜用高电压（220 ~ 500kV，甚至更高），用电端电压较低（380V，220V）。为此，电力系统中必须把交流电压进行升降变换，绝大部分由变压器来完成。

从电机的容量、体积来看，其间差异极为悬殊。交流同步发电机的容量最大可达上千 MW（1000MW 的汽轮发电机，其转子直径达 1.25m，轴长近 10m）。容量为 700MW 的长江三峡电站水轮发电机，转子直径近 20m 之巨，相应的配套变压器的容量为 360MV · A、840MV · A，



它们的重量竟达数千吨。反之,有些控制用微电机,外径不到 10mm,转子轴直径不到 1mm,其重量以克来计算,最小的微型电动机转子直径仅为 $100\mu\text{m}$,可以在人体的血管中移动工作。不同电机的转速亦有极大差异,从一分钟数转到一分钟几十万转。

可见,电机的种类繁多,性能各异。本书只择其基本型、常见型、有代表性的电机分述于后。

第二节 电机的基本作用原理

电机是通过电磁感应原理来实现能量转换的,因此,电和磁是构成电机的两大要素。

电在电机中主要是以路的形式出现,即由导体、线圈、绕组构成电机的电路。可以是直流电路,也可以是单相、两相或对称三相交流电路。这些电路的理论和分析方法未超出先修课“电路”的内容,这里就不再重复了。但有一点值得一提的是,电机是旋转机械,必然有固定不动的部分(称它为**定子**)、能旋转的转动部分(称为**转子**),二者之间必须有**空气隙**才能正常工作。因此,定子上的电路属于普通的静止电路,转子上的电路是和转子一起旋转的旋转电路。外界的静止电路如何与转子电路连通,是电机电路的一个特殊问题,它可通过**滑动接触**来解决。滑动接触示意图如图 0-1 所示。其中图 0-1a 称为**集电环与电刷结构**,由石墨-碳导电材料制成的固定电刷与静止的外电路相连接,转子上的导体与由导电材料制成的环状集电环随转轴旋转,受有适当压力的电刷 b_1 始终通过滑动接触与集电环 r_1 (导体 1) 联通。同理, b_2 与 r_2 (导体 2) 联通。此种结构只解决旋转电路(导体)与静止电路(电刷)的电气连接问题。图 0-1b 为**换向片与电刷结构**,由图可见,导电材料制成的瓦状换向片与导体随转轴一起旋转,固定的电刷 b_1 在半周中与换向片 A (导体 1) 联通,在另外半周内改为与换向片 B (导体 2) 联通。此类结构除了解决旋转和静止电路的联通外,还起着改换连接关系的作用,称为**换向**。上述结构中,前者常见于交流电机,后者主要用在直流电机中。

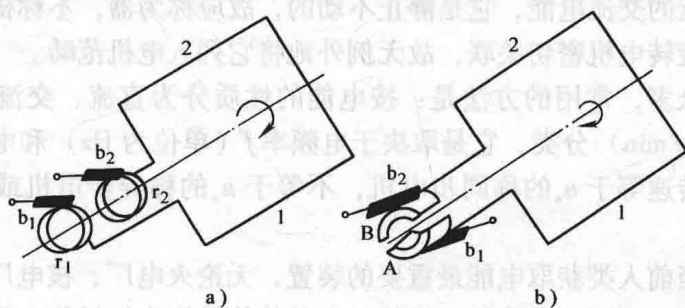


图 0-1 滑动接触示意图

a) 集电环与电刷结构 b) 换向片与电刷结构

磁在电机中是以场的形式存在的,一般工程分析计算时,为了方便,常将磁场简化为磁路来处理。与电路相比,无论是磁路还是磁场,同学们相对接触较少,比较生疏。因此,有必要在先修课的基础上,对它们作一简要回顾并给予适当的延伸。

一、磁场、磁感应强度、磁通

运动电荷(电流)的周围空间存在着一种特殊形态的物质,人们称之为**磁场**。磁场可由位于该空间的载流导体所受到的一种力——洛伦兹力来确定它的存在及了解它的性质。具



体说来, 上述洛伦兹力 dF 可表示为

$$dF = IdlB \quad (0-1)$$

式中, I 为载流导体中的电流 (A); dl 为导体微小单元长度 (m); dF 为该微小导体单元上受到的洛伦兹力 (N), 亦称为电磁力; B 为导体单元 dl 所在空间的磁场性质的一个基本物理量, 称为磁感应强度, 它是一个矢量, 单位为 T (特斯拉)。式 (0-1) 的约束条件是 F 、 I 、 B 三者互相垂直, 并且 F 有确定的方向。

在给定的磁场中, 某一点的磁感应强度 B 的大小和方向都是确定的。若设想用假想的曲线来表示磁场的分布, 则应规定曲线上的每一点的切线方向就是该点磁感应强度 B 的方向。这样的曲线叫做磁感应线或磁力线。要注意, 磁力线是人为地设想出来用以描述磁场的, 并非磁场中真的有这种线存在。

图 0-2 中示出了长导线、环形导线和螺线管载流时的磁感应线的图形, 可见磁感应线具有以下特性:

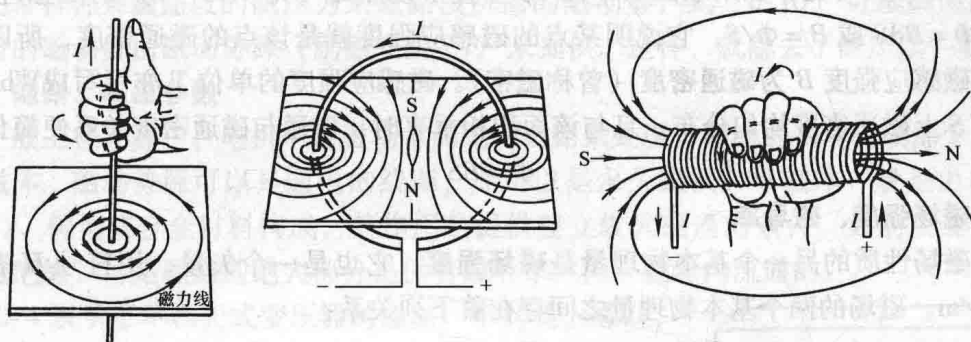


图 0-2 载流长导线、环形导线和螺线管载流时的磁感应线

- 1) 磁感应线的回转方向和导体中电流的方向之间的关系遵守右手螺旋法则。
- 2) 磁感应线不会相交, 因为磁场中每点的磁感应强度的方向是唯一的。
- 3) 磁感应线都是围绕电流的闭合曲线, 没有起点, 也没有终点。

为了使磁感应线不但能表示磁场的方向, 而且能描述磁场各点的强弱, 人们以磁感应线的疏密程度来表示该点处的磁感应强度 B 的大小。对磁感应线的多少规定如下: 通过磁场中某点处垂直于 B 矢量的单位面积上的磁感应线的多少定义为该点 B 的数值, 故亦称它为磁感应线密度。因此, 磁场强的地方, B 大, 磁感应线密; 磁场弱的地方, B 小, 磁感应线稀。

对均匀磁场来说, 磁场中的磁感应线相互平行, 各点的 B 相等; 对非均匀磁场来说, 各条磁感应线相互不平行, 各处的 B 大小不相等。

工程上常把通过磁场中某一面积的磁感线数称为通过该面积的磁通量, 简称磁通, 用符号 Φ 表示, 单位为 Wb (韦伯)。

根据上述磁感应强度和磁通的定义, 由图 0-3 可见, 在均匀磁场中, 穿过面积 S 的磁通为

$$\Phi = BS \cos \theta \quad (0-2)$$

式中, θ 为面积 S (m^2) 的法线 n 与磁感应强度 B 之间的夹角。

由式 (0-2) 可见, 当磁感应线与 S 平面正交时 ($\theta = 0^\circ$), 通过平面 S 的磁通量为最大; 当两者平行时 ($\theta = 90^\circ$), 通过平面 S 的磁通量为零。



通过任意曲面的磁通量为

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S B \cos\theta dS \quad (0-3)$$

式中, dS 为表面上的单元面积, 其面积分即为通过该曲面的磁通量。

由于磁感应线是闭合的, 无始端也无终端, 因此, 对任意封闭曲面来说, 进入该封闭曲面的假设为正的磁感应线, 它一定等于假设为负的穿出该封闭曲面的磁感应线, 即通过任意封闭曲面的磁通量总和必等于零, 用公式表示为

$$\oint_S B \cos\theta dS = 0 \quad (0-4)$$

这个结论叫做磁场的高斯定理, 也称为磁通连续性定理。

由式 (0-3) 可见, 如果取面积单元 dS 垂直于该点处 (即 $\cos\theta = 1$) 的磁感应强度 B , 于是有 $d\Phi = BdS$ 或 $B = \Phi/S$, 它说明某点的磁感应强度就是该点的磁通密度, 所以在工程中常常称磁感应强度 B 为磁通密度 (曾称磁密)。磁感应强度的单位 T 亦可写成 Wb/m^2 。若某一面积 S 上磁通密度均匀分布, 且与该面积相垂直时, 磁通与磁通密度关系便简化为

$$\Phi = BS \quad (0-5)$$

二、磁场强度、磁导率

表征磁场性质的另一个基本物理量是磁场强度, 它也是一个矢量, 用符号 H 表示, 其单位为 A/m 。磁场的两个基本物理量之间存在着下列关系:

$$B = \mu H \quad (0-6)$$

式中, μ 称为磁导率, 由磁场该点处的介质性质所决定, 其单位是 H/m (亨/米)。

磁导率的数值随介质的性质而异, 变化范围很大。我们熟知的真空磁导率 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7} \text{H}/\text{m}$ 。在电机中应用的介质, 一般按其导磁性能分为铁磁物质和非铁磁物质。后者如空气、铜、铝和各种绝缘材料等, 它们的磁导率可认为等于真空磁导率; 前者如铁、镍及其合金, 其磁导率大于真空磁导率达数千甚至上万倍。通常以 μ_r 表示某物质的磁导率 μ 与真空磁导率 μ_0 的比值 (倍数), 称为相对磁导率, 即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (0-7)$$

众所周知, 导体与非导体的电导率之比, 其数量级可达 10^{16} 之巨。所以一般电流是沿着导体流通, 电流主要以由导体构成的电路的形式出现。导磁体与非导磁体亦即铁磁物质与非铁磁物质的磁导率之比, 其数量级仅为 $10^3 \sim 10^5$ 。所以磁感应线 (磁通) 不只顺着导磁体, 且同时向周围的非导磁体散播流通。因此, 除超导体外, 不存在磁绝缘的概念, 亦不存在磁绝缘体物质。实际上, 磁是以场的形态存在的。

三、安培环路定律 (全电流定律)

安培环流定律, 亦称为全电流定律反映了由电流激励磁场的关系, 式 (0-8) 即该关系的数学表达式

$$\oint_l H dl = \sum_{k=1}^n I_k \quad (0-8)$$

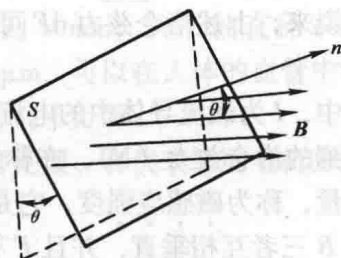


图 0-3 磁感应强度
n—平面 S 的法线



它说明在磁场中, 磁场强度矢量 $\mathbf{H}$ 沿任一闭合路径的线积分等于穿过该闭合路径的限定面积中流过电流的代数和。积分回路的绕行方向和产生该磁场的电流方向符合右手螺旋定则, 参看图 0-2。

人们定义磁场强度沿一条路径 l 的线积分为该路径上的磁压 (亦称为磁位差), 以符号 U_M 表示, 其单位为 A, 即有

$$U_M = \int_l H dl \quad (0-9)$$

由于磁场是由电流所激励, 故式 (0-8) 中回路所匝链的电流称为磁动势。通常以符号 F 表示, 显然其单位和磁压相同, 也为 A。这样, 说明电流和它所产生的磁场之间关系的安培环路定律, 就可以定义为: 沿着磁场中任一闭合回路, 其 i 段的总磁压等于总磁动势, 为

$$\sum U_{Mi} = \sum I_k \quad (0-10)$$

这与在闭合电路中, 总的电压降等于总的电动势相似。

我们常常称某磁路段的磁压为某磁路段所需的磁动势, 式 (0-10) 可理解为闭合磁路各段所需的磁动势由磁动势源 (励磁安匝 $\sum I$) 来提供。这样, 就隐去了磁压这一名称。

四、磁路、磁路参数

在一般工程计算中, 电机中的磁场常简化为磁路来处理。磁路的基本组成部分为磁动势源和导磁体。磁动势源可以是通电的线圈, 亦可以是永久磁铁。导磁体一般是由电工钢片 (硅钢片)、铸钢或合金材料构成, 其作用是提供建立较大磁通的条件。如前所述, 虽然没有什么磁绝缘, 可是磁通的绝大部分是循着磁导率大的导磁体内流通的。

图 0-4 表示了单相壳式变压器的磁路, 中间柱上通以电流的线圈为磁动势源, 为简单起见, 设变压器二次线圈开路, 所以图中未予画出。由电工钢片叠成的铁心为导磁体, 可以认为磁通完全在导磁体中通过。由式 (0-10) 可知, 对磁路中任何一段, 例如, 截面积为 S_{cl} , 长度为 l_{cl} 的中间心柱 AB, 可认为磁通在截面 S_{cl} 为均匀分布, 其磁通密度为 B_{cl} , 则该段磁路的磁通和所需的磁动势 (磁压) 为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{cl} &= B_{cl} S_{cl} \\ U_{cl} &= H_{cl} l_{cl} \end{aligned} \right\} \quad (0-11)$$

与电路中的电流和电压降的关系相似, 定义

$$\Omega_{cl} = \frac{U_{cl}}{\Phi_{cl}} \quad (0-12)$$

为该心柱段的磁阻, 单位为 A/Wb, 式 (0-12) 指出了在一个磁路段上磁通与磁压间的关系, 称为磁路的欧姆定律。

设 μ 为该段磁路导磁体的磁导率, 则根据式 (0-6)、式 (0-11)、式 (0-12), 写出磁阻的广义表示式为

$$\Omega = \frac{l}{\mu S} \quad (0-13)$$

可见磁阻的表示式与导体电阻表示式相似。同样, 称磁阻的倒数为磁导, 用符号 Λ 表示。

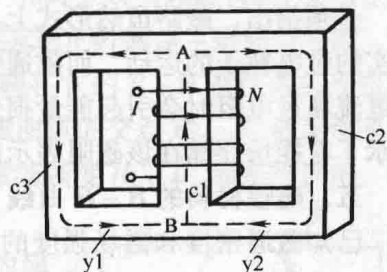


图 0-4 单相壳式变压器的磁路

AB 为中心柱 c1、c2、c3
为两侧心柱; y1、y2 为磁轭