

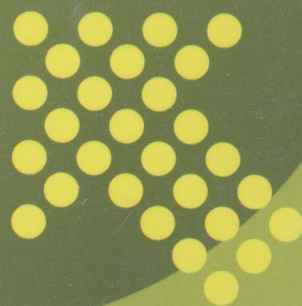
21世纪高等学校规划教材



DIAN JI XUE

电机学

张俊芳 顾春雷 康明才 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

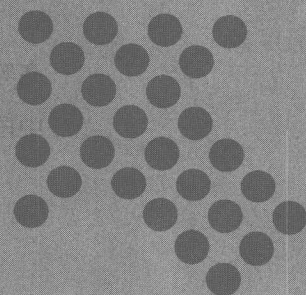
21世纪高等学校规划教材



DIAN JI XUE

电机学

张俊芳 顾春雷 康明才 编
孙宪君 王战铎 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分 21 章, 主要阐述直流电机、变压器、异步电机和同步电机四种典型电机的基本结构、工作原理、运行特性和分析方法, 并对异步电机的其它运行方式与其它交流电动机做了一般分析和说明。每章后都附有本章小结、思考题和习题, 以便学生学习。本书的特点是深入浅出、重点突出, 详略得当, 内容精练。

本书可作为普通高等院校电气信息类专业的教学用书, 也可作为有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/张俊芳, 顾春雷, 康明才编. —北京: 中国电力出版社, 2010. 1

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5123-0118-4

I. ①电… II. ①张…②顾…③康… 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 (2010) 第 025843 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22 印张 531 千字

定价 35.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书以科学发展观为指导,充分结合我国国民经济发展的实际,突出强化基础知识、拓宽专业口径,注重学生能力培养和综合素质的提高。编者结合自己多年的教学经验,吸收科技发展成果,参考大量优秀教材,深入浅出、循序渐进地阐述了电机的基本结构、工作原理、运行性能和分析方法。

电机学是电气类专业的一门重要学科基础课。它对学生此前学过的大学物理、电路等课程的相关知识和概念是一个必要的重复、巩固和提高,同时又担负着为后续课程打基础的重要任务。在目前大众化教育背景下,要求课程总学时有所削减,但必须掌握的知识点不能减少,对课程所包含的大量物理概念和复杂的电磁关系的掌握不能削弱。因此在这种状况下,编写出一套好的电机学教材是十分重要的。这就要求教材必须突出重点,主次分明、详略得当。

电机学以直流电机、变压器、异步电机和同步电机这四类电机为主体,重点讲授它们的结构、工作原理、运行特性和分析方法。本书按照直流电机、变压器、交流电机的共同理论、异步电机和同步电机进行叙述。直流电机内容相对比较简单,放在前面学习学生容易接受。把变压器放在交流电机的前面学习,一方面是因为先修课程电路中介绍了变压器的有关概念和原理,学习起来比较容易;另一方面,变压器的电势、磁势平衡关系、等效电路和分析方法与异步电机相类似,有助于异步电机的学习。在异步电机和同步电机学习之前,先将它们的共同理论,包括交流绕组、绕组电动势和磁动势进行了集中讲述。最后进行异步电机和同步电机的学习。这样由简到繁、逐层深入、环环相扣,有助于学生理解和掌握课程内容。另外,由于直流电机和变压器这两部分内容相对比较独立,放在前面也能适合某些高校设置电机学(上)、(下)课程的需要。电机学(上)2学分(折合32学时)完成直流电机和变压器内容的学习,电机学(下)3学分(折合48学时)完成交流电机共同理论、异步电机和同步电机的学习。

本书可作为普通高等学校电气工程学科相关专业电机课程的教材或参考书。通过本书学习,可以使學生掌握四种典型电机的基本结构、工作原理、特性和应用以及分析方法,同时提高了电机实验操作技能,正确合理使用和选择电机,为以后的工作和学习奠定基础。

本书共分4篇21章,其中绪论、第1篇直流电机、第4篇同步电机由南京理工大学张俊芳副教授编写,第3篇交流电机共同理论和异步电机由盐城工学院顾春雷副教授编写,第2篇变压器由南京理工大学康明才副教授编写。全书由南京理工大学张俊芳副教授负责统

稿。本书在编写过程中得到了南京理工大学动力工程学院的大力支持。

南京理工大学电机学课程先后被评为校级一类优秀课程和江苏省二类优秀课程，其课程网站地址为 <http://jpkc.njust.edu.cn/dj>。

本书承南京理工大学孙宪君教授和陕西理工学院王战铎教授主审，参加本书审稿的还有清华大学董新洲教授，他们提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。此外，本书在编写过程中，还参考了国内许多优秀教材，并得到了专家们热情帮助，在此亦深表谢意。

由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编者通信地址：南京理工大学动力学院；邮编：210094；电子邮箱：zif807@163.com。

编者

2009年8月

目 录

前言

绪论	1
本章小结	10
思考题	11
习题	11

第一篇 直 流 电 机

第一章 直流电机的工作原理与基本结构	12
第一节 直流电机的工作原理	12
第二节 直流电机的基本结构	13
第三节 直流电机的励磁方式	16
第四节 额定值	17
本章小结	17
思考题	18
习题	18
第二章 直流电机的电枢绕组和电枢反应	19
第一节 直流电枢绕组的基本特点	19
第二节 单叠和复叠绕组	21
第三节 单波和复波绕组	25
第四节 直流电机的磁场和磁路	28
第五节 电枢绕组的感应电动势	33
第六节 直流电机的电磁转矩	35
本章小结	36
思考题	37
习题	38
第三章 直流发电机	40
第一节 直流发电机的基本方程式	40
第二节 他励发电机的特性	42
第三节 并励发电机的自励条件和特性	44
第四节 复励发电机的特性	47
本章小结	47
思考题	48

习题	48
第四章 直流电动机	49
第一节 直流电动机的可逆原理	49
第二节 直流电动机的基本方程式	50
第三节 直流电动机的工作特性和机械特性	51
第四节 直流电动机的起动	57
第五节 直流电动机的调速	60
第六节 直流电动机的制动	61
第七节 直流电动机的换向	65
本章小结	68
思考题	69
习题	70

第二篇 变 压 器

第五章 变压器的用途、分类与结构	72
第一节 变压器的用途和分类	72
第二节 电力变压器的基本结构	73
第三节 变压器发热、升温与冷却	77
第四节 变压器的额定值	78
本章小结	78
思考题	79
习题	79
第六章 变压器的运行原理和特性	80
第一节 变压器的空载运行	80
第二节 变压器的负载运行	85
第三节 标么值	89
第四节 参数测定方法	90
第五节 变压器的运行特性	96
本章小结	99
思考题	100
习题	101
第七章 三相变压器	103
第一节 三相变压器的磁路系统	103
第二节 三相变压器绕组的连接法与连接组	104
第三节 三相变压器空载电动势波形	107
第四节 三相变压器的不对称运行	109
本章小结	115

思考题	116
习题	116
第八章 变压器的并联运行	118
第一节 变压器的理想并联运行条件	118
第二节 变压器并联运行时的负载分配	119
本章小结	121
思考题	121
习题	121
第九章 变压器的过渡过程	123
第一节 变压器空载合闸时的过渡过程	123
第二节 变压器二次侧突然短路时的瞬变过程	125
第三节 过电压现象	127
本章小结	127
思考题	128
习题	128
第十章 三绕组变压器及其他变压器	129
第一节 三绕组变压器	129
第二节 自耦变压器	133
第三节 电压互感器和电流互感器	135
本章小结	136
思考题	137
习题	137

第三篇 异步电机

第十一章 交流电机的共同问题	139
第一节 交流绕组的基本概念	139
第二节 三相交流绕组	142
第三节 正弦磁场下绕组的感应电动势	146
* 第四节 高次谐波电动势及其削弱方法	149
第五节 单相绕组的磁动势——脉振磁动势	152
第六节 脉振磁动势的分解	156
第七节 三相绕组的磁动势——旋转磁动势	157
本章小结	161
思考题	162
习题	162
第十二章 异步电机基本理论	164
第一节 三相异步电动机的工作原理和运行状态	164

第二节 三相异步电动机的结构和额定值	166
第三节 转子静止时的异步电机	170
第四节 转子旋转时的异步电机	179
第五节 三相异步电机的等效电路和相量图	181
本章小结	185
思考题	185
习题	186
第十三章 三相异步电动机的功率、转矩和运行性能	187
第一节 三相异步电动机的功率和转矩	187
第二节 三相异步电动机的机械特性	189
第三节 三相异步电动机的工作特性及参数测定	197
本章小结	200
思考题	201
习题	201
第十四章 三相异步电动机的起动、调速与制动	202
第一节 异步电动机的起动性能要求	202
第二节 笼型转子异步电动机的起动	203
第三节 绕线转子异步电动机的起动	207
第四节 深槽和双笼型三相异步电动机	211
第五节 三相异步电动机的调速	212
第六节 三相异步电动机的制动	225
本章小结	231
思考题	232
习题	233
第十五章 异步电机的其他运行方式与其他交流电动机	234
第一节 异步发电机	234
第二节 单相异步电动机	235
第三节 伺服电动机	240
第四节 测速发电机	245
第五节 旋转变压器	248
第六节 步进电动机	252
本章小结	257
思考题与习题	258

第四篇 同 步 电 机

第十六章 同步电机的原理和结构	259
第一节 同步电机原理简述	259

第二节 汽轮发电机的基本结构	261
第三节 水轮发电机的基本结构	264
第四节 同步发电机励磁方式	265
第五节 同步电机的铭牌参数	266
本章小结	266
思考题	267
习题	267
第十七章 同步电机的基本电磁关系	268
第一节 同步电机的基本原理	268
第二节 同步电机的空载运行	269
第三节 对称三相负载时的电枢反应	271
第四节 电枢反应磁动势的折算	276
第五节 隐极同步发电机的负载运行	279
第六节 凸极同步发电机的负载运行	282
本章小结	286
思考题	286
习题	287
第十八章 同步发电机的运行特性	289
第一节 同步发电机的空载特性	289
第二节 同步发电机的短路特性与短路比	291
第三节 零功率因数负载特性曲线	292
第四节 同步电抗的实验测定	293
第五节 漏抗的测定和保梯电抗	295
第六节 同步发电机的外特性和调节特性	296
本章小结	297
思考题	298
习题	298
第十九章 同步发电机的并联运行	300
第一节 并联运行的条件和方法	300
第二节 同步电机的功率方程和转矩方程	302
第三节 同步发电机的稳态功角特性	303
第四节 有功功率调节和静态稳定、动态稳定的概念	305
第五节 无功功率的调节和 V 形曲线	310
本章小结	314
思考题	314
习题	315

第二十章 同步电动机和同步调相机	317
第一节 同步电动机的基本方程式、相量图和功角特性	317
第二节 无功功率的调节	319
第三节 同步电动机的起动方法	320
第四节 同步调相机	320
第五节 同步电机的几种运行情况	322
本章小结	322
思考题	323
习题	323
第二十一章 同步发电机的不对称运行和暂态过程	325
第一节 同步发电机不对称运行时的参数和等效电路	325
第二节 稳态不对称短路分析	328
第三节 同步发电机的突然短路分析	330
第四节 同步电机的振荡	336
第五节 不对称运行和突然短路的影响	337
本章小结	337
思考题	338
习题	338
参考文献	339

绪 论

电能是现代社会使用最为广泛的一种能源。在电能的生产、传输和使用过程中都离不开电机。电机是利用电磁原理进行能量转换或信号传递的重要电气设备,是实现电能的生产、变换、传输、分配、使用 and 控制的电磁机械装置。电机广泛应用于工业、农业、交通运输、日常生活、文教、医疗以及国防和人造卫星等领域。

电机学是讲述电机的基本结构、基本原理及运行特性的一门学科。电机学课程与其他后续专业课程联系密切。学好该课程可为后续其他课程的学习和将来从事电气工作奠定基础。

一、电机在国民经济中的作用

电能与其他形式的能量相比,具有明显的优越性:适宜大量生产、集中管理、远距离传输、灵活分配、自动控制和易于转换,而且清洁环保。电机是能量转换或信号传递的核心电气设备之一。电机主要包括发电机、变压器和电动机等类型。不同类型的电机虽然性能不相同,但它们都是一种能量转换装置。长期以来,电机在国民经济建设中发挥着重要的作用,广泛应用于各行各业及人们日常生活中。

1. 电机在电力系统中的作用

电力系统包括发电、变电、输配电、用电等环节。在生产电能的发电厂,依靠发电机把机械能转换为电能;在火电厂,通过汽轮机带动发电机,把燃料燃烧所产生的能量转变为电能;在水电厂,通过水轮机带动发电机,把水流的能量转变为电能;在核电厂,把原子核裂变产生的能量通过发电机转变为电能。

变压器是变电和输配电环节的关键设备。在电力系统中依靠电力变压器来改变电压、传输电能。一般发电机出口电压比较低,为了提高输电的容量及经济性,需要采用高压输电。只有通过变压器才能把电力系统中的低电压升高到需要的电压等级。另外,由于各种用电设备如电动机、电炉、电灯等需要在不同的低电压下工作,因此也要应用变压器把电压降低到各用电设备所需的电压。

电动机是电力系统的主要用电设备,它把电能转换成机械能。

2. 电动机驱动各种生产机械和装备

在工农业、交通运输、国防等部门和生活设施中,广泛应用各种电动机来驱动生产机械、设备和器具。例如,机床驱动、电力排灌、农副产品加工、矿石采掘和输送、电车和电力机车的牵引、抽水、鼓风、起吊、轧钢、造纸、医疗设备及家用电器的运行等一般都采用电动机来拖动。

3. 控制电机是各种自动控制系统和自动化、智能化装备的重要元件

随着工农业和国防设施自动化水平的日益提高,出现了各种各样的控制电机,它们在控制系统、自动化和智能化装置(例如电子计算机和机器人)中分别作为执行、检测、放大和解算元件。这类电机一般功率较小,但品种繁多、用途各异,例如,电梯的自动选层与显示、阀门遥控、火炮和雷达的自动定位、飞行器的发射与姿态的控制、机床加工的自动控制和显示以及计算机外围设备、各种自动记录仪表、音像录放设备、医疗器械和现代家用电器

设备等的运行控制、检测或者记录显示。

随着现代社会的发展,电机工业在国民经济中将发挥更重要的作用。

二、电机工业发展概况

电机的发展可以分为两个时期。第一个时期是从发现电磁感应现象开始,直到 19 世纪末和 20 世纪初,当各种电机和变压器的基本型式已具备时为止,称为电机发展初期。这一时期可分为四个阶段:①电磁感应定律的发现。1831 年法拉第提出了电磁感应定律,随即出现了各种各样原始型式的发电机。②直流电机的发展。由于电能工业上最早的应用是照明和电化学工业,所以,最初发展的是直流发电机。③单相交流电的出现。在 19 世纪 70 年代人们尝试应用交流电传输电能;1876 年,交流电已被应用于照明装置。相继出现原始型式的同步发电机及变压器。④三相交流电的应用。由于单相交流电动机无法自行起动,1885 年制成了两相交流异步电机的模型。直到 1889~1897 年间,才制成了三相电动机和三相变压器,建成了第一个三相交流输电系统。从此,交流三相制发电厂迅速发展,高速运转的汽轮发电机代替了以蒸汽机为原动机的发电机。

第二个时期是从 20 世纪初直到现在,称为近代发展时期。20 世纪的特点是由电气化时代进入原子能、计算机及自动化时代,这对电机的运行性能、单位容量的质量、体积等方面提出了更多的要求,而且随着自动控制系统和计算装置的发展,电机的发展又进入了新的阶段,出现了多种高精度、快响应的控制电机。

在 20 世纪 70 年代以后,有了电力电子变流装置,逐步解决了调速装置需要减少设备、缩小体积、降低成本、提高效率、消除噪声等问题,使交流调速获得了飞跃发展。出现矢量控制算法之后,又提高了交流调速系统的静、动态性能。但是要实现矢量控制规律,需要复杂的电子电路。采用微机控制以后,用软件实现矢量控制算法,使硬件电路规范化,从而降低了成本,提高了可靠性,而且还有可能进一步实现更加复杂的控制技术。由此可见,电力电子和微机控制技术的迅速进步是推动交流调速系统不断更新的动力。

另外,高性能永磁材料和超导材料的发展,也给电机的发展注入了新的活力。

永磁电机由于具有结构简单、可靠性好、效率高、节省能量的特点,从成本、性能、投资、维修和可靠性等几方面综合考虑,都优于普通电机。但过去永磁材料的磁能体积小,一直没有得到广泛应用。近几年,随着稀土永磁材料的高速发展和电力电子技术的发展,永磁电机的发展有了长足进步。采用钕铁硼永磁材料的电动机、发电机已得到广泛应用,大至舰船推进,小到人工心脏血泵等。

超导电机已经用于发电和高速磁悬浮列车与船舶的推进等。

随着科学技术的进步、原材料性能的提高和制造工艺的改进,电机的品种规格、大小悬殊的功率等级(从百万分之几瓦到 1000MW 以上)、极为宽广的转速范围(从数天一转到每分钟几十万转)、非常灵活的环境适应性(如平地、高原、空中、水下、油中,寒带、温带、湿热带、干热带,室内、室外,船上等),满足着国民经济各部门和人类生活的需要。

我国的电机工业在新中国成立前非常落后,全国只有少数几家规模小、设备差、生产能力低的电机制造厂。新中国成立以来,我国的电机制造业发生了巨大的变化。经过 60 多年的努力,不仅建成了独立自主和完整的体系,而且有一些产品已经达到或接近世界先进水平。近年来已生产了大型水轮发电机(如三峡水电站的 70 万 kW 水轮发电机)、大型汽轮发电机、大型的直流电动机、异步电动机和同步电动机;在中小型电机和控制电机方面,自行

设计和生产了新系列电机；在电动机调速系统方面，随着大功率电力电子元件及微电子器件的出现和变频技术的发展，交流异步机的调速在平滑度、范围和效率方面都得到了很大的改进。近几年来，对电机的新原理、新结构、新工艺、新材料、新的运行方式和调试方法，进行了许多探索、研究和试验工作，取得了一定的成就。

三、电机分类

电机的种类繁多，结构和性能各异。使用场合不同，原理和运行情况也不尽相同，从不同角度可以将电机划分为不同类型。

(1) 从能量转换或功率传递以及用途不同可将电机分为：发电机（机械能→电能）；电动机（电能→机械能）；变压器（一种形式的电能→另一种形式的电能）；控制电机（信号传递和转换）。

(2) 从电流种类不同可将其分为：直流电机；交流电机。交流电机又分为变压器、异步电机、同步电机。

(3) 从运行方式不同可将其分为：旋转电机（直流电机、异步电机、同步电机）；直线电机（直流电机、异步电机、同步电机）；静止电机（变压器）。

此外，还有其他分类方法，每一种分类都不是绝对的，这里不再介绍。本书基本上是按照直流电机、变压器、异步电机（感应电机）和同步电机的顺序来介绍的。

四、电机学课程的特点及学习方法

（一）课程特点及要求

电机学课程是一门既带基础课程又带专业课程性质的专业基础课，是从基础课程到专业课程过渡的桥梁。课程对四种典型电机（变压器、直流电机、异步电机、同步电机）进行理论分析。课程的重点是讲述电机的基本原理、基本结构、运行特性和应用。

通过对本课程的学习，可获得电机的基本理论和基本性能，为学习后续专业课程做好准备，为今后从事相关工作打下基础。

通过学习本课程，应达到下列基本要求：

(1) 了解电机中的磁路、磁场铁心及线圈等的基本性能和计算方法，理解电机中气隙磁场的性质和时间空间关系。

(2) 认识并理解变压器和三种主要电机（直流电机、异步电机和同步电机）的基本结构。

(3) 掌握电机正常稳态运行时的分析方法和运行性能。能正确地建立电压方程和转矩方程，弄清电机中的能量转换关系；对稳态运行时电机的参数要有清晰的物理概念，能熟练地运用等效电路和复数来计算交流电机的性能。

(4) 掌握电机中的感应电动势、电磁功率、电磁转矩和机电能量转换过程。

（二）课程的学习方法建议

电机理论是人们从长期的电机工程实践中总结提炼出来的，理论联系实际是电机最为突出的特点之一。电机学课程理论的学习只有和实际电机结合起来，才能深入理解电机的工作原理、电磁关系和运行特性。在课程的学习过程中，要不断总结电机的共性，同时要注意各种电机的差异，再结合实验和一定数量习题的练习，这样，学起来就会转难为易，兴趣也会越来越浓。

其中共性包括以下几个方面：

- (1) 电机结构：定子、转子；磁路、电路。
- (2) 电机原理：电和磁是构成电机的两大要素，缺一不可。电机通过电磁感应实现能量转换。
- (3) 分析方法：先找平衡方程，再画出等效电路和相量图；先分析工作原理，再分析运行特性。

五、电机学中常用的电工知识

电机是通过电磁感应来实现能量转换的，离不开电和磁这两大要素。各种电机的运行原理都是以基本电磁定律和能量守恒定律为基础。

(一) 电路定律

1. 基尔霍夫电流定律

在电路任意一个节点处，所有支路的电流代数和恒等于零，即 $\sum i = 0$ 。对于正弦交流稳态电路，其相量形式为 $\sum \dot{I} = 0$ ，其中，支路电流的参考方向流入为正、流出为负；或者规定流出为正、流入为负。

2. 基尔霍夫电压定律

在电路中任一回路内各段电压的代数和恒等于零，即 $\sum u = 0$ 。对于正弦交流稳态电路，其相量形式为 $\sum \dot{U} = 0$ ，其中，当电压的参考方向与回路的绕行方向一致（相反）时为正（负）。也可表达为任一电路电压降的代数和等于电动势的代数和，即 $\sum u = \sum e$ 。对于正弦交流稳态电路，其相量形式为 $\sum \dot{U} = \sum \dot{E}$ 。

(二) 磁场的基本物理量

磁感应强度是表征磁场特性的一个基本物理量，用 $\mathbf{B}$ 表示，单位是 T ($1\text{T} = 1\text{Wb}/\text{m}^2$)。磁感应强度是一个矢量，表示空间任何一点磁场的强弱（量值）和方向。磁感应强度矢量的通量称为磁通量，用 Φ 表示，单位是 Wb。磁场中经过一个曲面 S 的磁通为 $\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$ 。磁感应强度量值相等、方向相同的磁场称为均匀磁场。在磁感应强度为 $\mathbf{B}$ 的均匀磁场中，通过垂直于磁场、面积为 A 的磁通为 $\Phi = BA$ ，即 $B = \Phi/A$ ，因此，磁感应强度又称磁通密度。

用磁感应线（又称磁力线）来表示磁场。磁感应线上任何一点的切线方向即是该点的磁场方向。磁感应线密集处的磁通密度值大，稀疏处的磁通密度值小。磁通可以看作磁场中通过某一面积的磁感应线的数量。

磁场强度是表征磁场特性的另一个基本物理量，用 $\mathbf{H}$ 表示，单位是 A/m，是矢量。磁介质的磁导率定义为磁介质中的某点的磁通密度与磁场强度量值之比，用 μ 表示，即 $\mu = B/H$ ，单位是 H/m，其值由磁场该点处的磁介质性质决定。通常由于矢量 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 方向相同，可写成矢量式 $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ 。

(三) 磁路基本定律

1. 主磁通和漏磁通

磁路是磁通所通过的路径。图 0-1 所示为两种常见的磁路。

在电机和变压器中，通常把线圈套装在铁心上，当线圈通有电流时，在线圈周围的空间（包括铁心内、外）就会形成磁场。由于铁心的导磁性能比空气要好得多，所以绝大部分磁通将在铁心内通过，并在能量传递或转换过程中起耦合场的作用，这部分磁通称为主磁通。

围绕载流线圈、部分铁心和铁心周围的空间,还存在少量分散的磁通,这部分磁通称为漏磁通。主磁通和漏磁通所通过的路径分别构成主磁路和漏磁路,如图 0-1 所示。

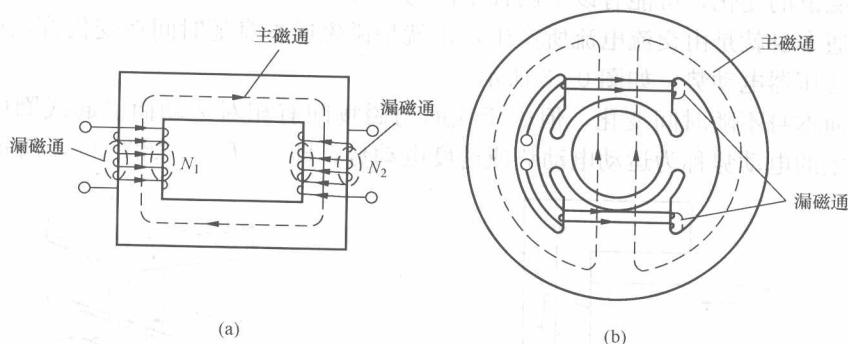


图 0-1 两种常见的磁路

(a) 变压器的磁路; (b) 两极直流电机的磁路

用以激励磁路中磁通的载流线圈称为励磁绕组,励磁绕组中的电流称为励磁电流。若励磁电流为直流,磁路中的磁通是恒定的,不随时间变化而变化,这种磁路称为直流磁路;直流电机的磁路就属于这一类。若励磁电流为交流,磁路中的磁通随时间交替变化,这种磁路称为交流磁路;交流电机和变压器的磁路都属于这一类。

2. 安培环路定律

如图 0-2 所示,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,即

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum_{k=1}^n I_k \quad (0-1)$$

式 (0-1) 中,电流方向与闭合回路的绕行方向符合右手螺旋定则者为正,反之为负。

由于磁场是由电流所激发,故式 (0-1) 中磁场中回路所匝链的电流称为磁动势,通常以 $\mathbf{F}$ 表示,其单位为 A (安)。

磁压降是磁路中两点间的磁位降,可表示为磁场强度沿一条路径的线积分,即为该路径上的磁压,以 U 表示,其单位为 A,和磁动势的单位一样。

在磁路路径上 1、2 间的磁位降表示式为

$$U_{m12} = \varphi_{m1} - \varphi_{m2} = \int_1^2 \mathbf{H} d\mathbf{l} \quad (0-2)$$

3. 电磁感应定律

磁链:如图 0-2 所示,穿过线圈的磁通形成磁链。设线圈有 N 匝,流过电流后产生每匝链线圈的磁通为 Φ ,则磁链 Ψ 为

$$\Psi = N\Phi \quad (0-3)$$

当该线圈中的磁链 Ψ 发生变化时,线圈中将产生感应电动势

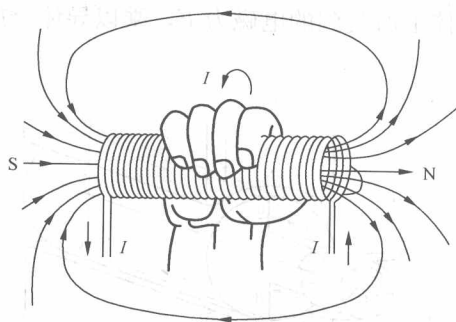


图 0-2 螺线管的磁感应线

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-4)$$

线圈中磁链的变化, 可能有以下两种不同的方式。

(1) 磁通本身就是由交流电流所产生, 也就是说磁通本身随时间在变化着, 这样产生的电动势称为变压器电动势, 如图 0-3 所示;

(2) 磁通本身不随时间变化, 但由于线圈与磁场间有相对运动而引起线圈中磁链的变化, 这样产生的电动势称为运动电动势或速度电动势, 即 $e = Blv$, 如图 0-4 所示。

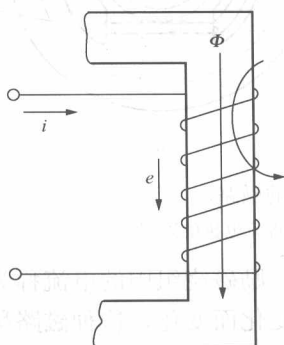


图 0-3 电流、电动势和磁通的正方向

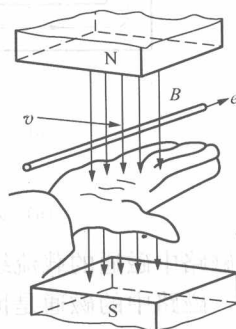


图 0-4 右手定则

4. 电磁力、电磁转矩

由于导体以恒速 v 运动, 那么在导体上除施加机械力 F 外, 必然有另一与之相平衡的力作用着, 这就是位于磁场中的载流导体所受到的电磁力 F_e , 表达式为

$$F_e = F = BLi \quad (0-5)$$

各种旋转电机都是旋转运动, 所研究的导体位于电机的转子上, 如图 0-5 所示, 如把导体上所受到的电磁力 F , 乘以导体至旋转轴之间的距离 R , 便得电磁转矩 T , 即

$$T = FR \quad (0-6)$$

5. 磁路欧姆定律

图 0-1 (a) 所示为一个无分支铁心磁路, 铁心上两绕组总匝数为 N 匝的线圈通有电流 i ; 铁心截面积为 A , 磁路的平均长度为 l , 材料的磁导率为 μ 。若不计漏磁通, 并认为各截面上的磁通密度为均匀, 并且垂直于各截面, 则磁通量 Φ 等于磁通密度乘以面积, 即

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = BA \quad (0-7)$$

考虑到磁场强度等于磁通密度除以磁导率, 即

$\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu$, 于是由安培环路定律得到的 $\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = Hl = \sum i = Ni$ 可改写成

$$Ni = \frac{B}{\mu} l = \Phi \frac{l}{\mu A} \quad (0-8)$$

或

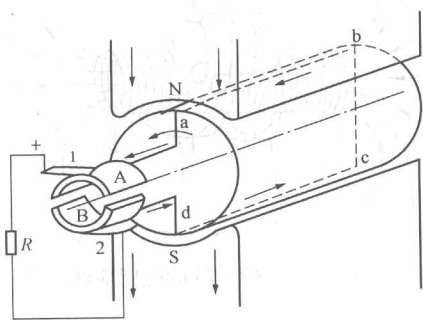


图 0-5 一线圈至换向器和电刷的示意图