



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电机与拖动基础

许建国 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

要

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电机与拖动基础

许建国 主编

姚裕安 副主编

邵可然 杨刚 许雪清 参编

高等教育出版社

内容提要

本书主要包含电机和电力拖动两部分内容。

在电机部分中,重点讲述了直流电机、变压器、交流异步电动机和同步电动机的基本结构、工作原理及运行特性;在介绍特种电机时重点讲述了直线电动机和磁悬浮装置的工作原理及应用。

在电力拖动部分中,讲述了直流电动机、交流电动机电力拖动系统的拖动原理、调速方法、控制规律,之后紧接着讲述了磁(悬)浮列车的牵引原理、导向原理及调速方法。最后还简要介绍了电力拖动系统中电动机的选择。

本书是高等学校电气及电子信息类专业的规划教材,既可以作为电气信息类和电子信息类本科教材,亦可供有关师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础/许建国主编. —北京:高等教育出版社,2004.8

ISBN 7-04-014562-6

I. 电... II. 许... III. ①电机-高等学校-教材
②电力传动-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 066932 号

策划编辑 李 慧 责任编辑 许海平 封面设计 李卫青
责任绘图 朱 静 版式设计 胡志萍 责任校对 王 雨
责任印制 孔 源

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 25.25
字 数 470 000

版 次 2004 年 8 月第 1 版
印 次 2004 年 8 月第 1 次印刷
定 价 31.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)64014089 64054601 64054588

总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展的需要，满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求，探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系，全国高等学校教学研究中心（以下简称“教研中心”）在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上，组织全国100余所培养应用型人才为主的高等院校，进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索，在高等院校应用型人才培养的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果，并在高等教育出版社的支持和配合下，推出了一批适应应用型人才培养需要的立体化教材，冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月，教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项，为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台，整体设计立项研究计划，明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式，分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现，组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组（亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组）。会后，教研中心组织了首批课题立项申报，有63所高校申报了近450项课题。2003年1月，在黑龙江工程学院进行了项目评审，经过课题领导小组严格的把关，确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月，各子课题相继召开了工作会议，交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题，确定了项目分工，并全面开始研究工作。计划先集中力量，用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是，“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才培养探索与实践成果基础上，紧密结合经济全球化时代高校应用型人才培养工作的实际需要，努力实践，大胆创新，采取边研究、边探索、边实践的方式，推进高校应用型人才培养工作，突出重点目标，并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础，作为体现教学内容

和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才培养体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。目前,教材建设工作存在的问题不容忽视,适用于应用型人才培养的优秀教材还较少,大部分国家级教材对一般院校,尤其是新办本科院校来说,起点较高、难度较大、内容较多,难以适应一般院校的教学需要。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才培养的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施,具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

前 言

迈入 21 世纪,我国高等教育事业进入了蓬勃发展的新时期。高等教育事业的发展推动了教学改革,开创了教材建设的新局面。本教材就是在这种新形势下为适应高等教育事业的发展,为电气及电子信息类专业而编写的规划教材。

本教材是编者在总结多年教学工作的基础上,结合当前有关科技研究成果而编写的,具有如下特点:

1. 传统技术与高新技术相结合

伴随着工业化的进程,电动机及电力拖动技术不断地发展,逐步形成了电力拖动领域中的传统技术,如电动机的起动、制动和调速等;但是随着电力电子技术的发展,电动机及电力拖动技术又不断地在技术上取得重大突破,形成了一系列高新技术,例如近年来随着我国铁路电气化改造速度的加快,随着铁路列车不断的提速,随着磁(悬)浮列车的运行,电动机及电力拖动技术取得了令人瞩目的成就。所以本教材在讲述传统的拖动技术后,紧接着在第八章中讲述磁(悬)浮列车的拖动技术,以反映最新的科研成果。

2. 讲述基础理论与分析应用实例相结合

电动机及电力拖动技术涉及电学、磁学、力学、机械学等多种学科,基础理论丰富,需要重点讲述;但是学习理论的目的归根结底在于应用,所以在教材中增加了应用实例的分析,如磁悬浮装置、熔融玻璃液搅拌器等。

本教材由许建国教授任主编,姚裕安副教授任副主编。绪论、第二章、第四章、第五章和第八章由许建国教授编写,第一章和第六章由邵可然教授编写,第三章和第七章由姚裕安副教授编写,第九章由杨刚副教授和吴雨川副教授编写。全书由许建国教授统稿和定稿。许鼎衡在网上查询及下载资料与收集资料方面做了大量工作,许雪清在资料整理及计算机处理等方面做了大量的工作。

由于编者学识有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2004 年 2 月

目 录

绪论	1
0.1 电机与电力拖动在国民经济中的重要作用	1
0.2 常用的基本定律与定则	2
第一章 直流电机	9
1.1 直流电机的工作原理	9
1.2 直流电机的结构和额定值	11
1.3 直流电机的电枢绕组	16
1.4 直流电机的磁场	23
1.5 直流电机的感应电动势和电磁转矩	29
1.6 直流电动机	31
1.7 他励直流电动机的机械特性	36
1.8 直流发电机	40
1.9 直流电机的换向	47
思考题与习题	54
第二章 变压器	57
2.1 变压器的工作原理	58
2.2 变压器的结构和铭牌数据	59
2.3 变压器的空载运行	63
2.4 变压器的负载运行	71
2.5 用试验方法测定变压器的参数	82
2.6 变压器的运行特性	87
2.7 三相变压器	92
2.8 三相变压器的并联运行	100
2.9 特种变压器	105
思考题与习题	112
第三章 交流异步电动机	116
3.1 三相异步电动机的工作原理与结构	116
3.2 三相异步电动机的定子绕组	123
3.3 三相异步电动机定子绕组的感应电动势	128
3.4 三相异步电动机的定子磁动势	139

3.5	三相异步电动机的等值电路和相量图	149
3.6	三相异步电动机的功率和转矩	160
3.7	三相异步电动机的工作特性和参数测定	164
3.8	三相异步电动机的机械特性	168
3.9	单相异步电动机	177
	思考题与习题	182
第四章	同步电动机	186
4.1	同步电动机的结构及工作原理	186
4.2	同步电动机的电磁关系	188
4.3	同步电动机的功率关系、功角特性与矩角特性	193
4.4	同步电动机功率因数的调节和V形曲线	199
	思考题与习题	202
第五章	特种电机	204
5.1	伺服电机	205
5.2	测速发电机	212
5.3	自整角机	217
5.4	旋转变压器	224
5.5	步进电机	229
5.6	直线电动机与磁(悬)浮装置	234
	思考题与习题	244
第六章	直流电动机的电力拖动	246
6.1	电力拖动系统的运动方程式	246
6.2	工作机构转矩、力、飞轮矩和质量的折算	247
6.3	生产机械的负载转矩特性	253
6.4	电力拖动系统静态稳定运行的条件	258
6.5	他励直流电动机的起动	264
6.6	他励直流电动机的制动	270
6.7	他励直流电动机的调速	284
6.8	串励直流电动机的电力拖动	294
	思考题与习题	298
第七章	三相异步电动机的电力拖动	304
7.1	三相异步电动机的起动	304
7.2	三相异步电动机的调速	320
7.3	三相异步电动机的制动	343
	思考题与习题	352

第八章 同步电动机和直线电动机及磁浮列车的电力拖动	356
8.1 同步电动机的起动	356
8.2 同步电动机的变频调速	358
8.3 直线电动机及磁浮列车的电力拖动	361
思考题与习题	368
第九章 电力拖动系统中电动机的选择	370
9.1 电动机发热与冷却规律	370
9.2 电动机工作方式分类	373
9.3 电动机的一般选择	375
9.4 电动机额定功率的选择	377
思考题与习题	390
参考文献	392

绪 论



0.1 电机与电力拖动在国民经济中的重要作用

在国民经济和人们的日常生活中，电能是最重要的能源之一。与其他能源相比，电能除了具有转换经济、传输和分配容易、使用和控制方便等优点外，尤为可贵之处是使用电能不会产生有毒有害的物质，不会污染环境。在人们环保意识愈来愈强烈的今天，作为一种干净清洁的能源，电能可在工农业生产、交通运输等各行各业和人们生活中得到越来越广泛的应用就不足为奇了。

自然界中不存在可以直接使用的电能，电能通常是由其他形式的能量转换而来的。发电机就是将另一种形式的能量转换为电能的装置。水力发电厂是利用水流的动能推动水轮机带动发电机旋转而发电；火力发电厂是利用在锅炉中燃烧煤或天然气产生的高压蒸汽推动汽轮机带动发电机发电；核电站类似于火力发电厂，只不过热能是由核裂变而产生；至于一些城市用焚烧垃圾发电，既获得了电能，又消除了垃圾，变废为宝，更是一举两得。

发电厂发出的电能通过电力网可以实现远距离传输，为了减少传输损耗，常用变压器将发电机发出的电压升高，实现高压传输。由于能高压远距离输电，我国的一些火力发电厂就建在煤矿附近，俗称“坑口电站”，就地将煤燃烧产生的热能转换为电能输往大城市；也正是采用了高压远距离输电技术，我国西部水力发电厂发出的电能才能传输到东南沿海一带，形成“西电东送”的格局。电能被输送到用电地区，要经过变压器降压，才能供用户使用。通过电力网和变压器的升压及降压作用，能够很方便地实现电能的传输和分配，可以看出变压器是在国民经济中起着重要作用的变电设备。

用户用电就是将电能转换为其他形式的能量。用户用电的一个重要方面就是利用电动机将电能转换为机械能，拖动生产机械工作。

用电动机拖动生产机械工作称为电力拖动，也称电气传动。由电动机和生产机械组成的系统称为电力拖动系统，其组成原理示意图如图 0.1 所示。电力拖动系统一般由电动机、生产机械、传动机构、控制装置和电源等五部分组成。电动机的作用是将电能转换为机械能，为生产机械提供动力，是生产机械的原动机。生产机械是直接进行工作的装置，在电动机的带动下完成生产任务。传动机构的作用是在电动机和生产机械之间实现功率传递及速度与运动方

式的配合。控制装置的作用是根据生产工艺要求控制电动机的运行，从而控制生产机械的运行。电源是向电动机和控制装置提供电能的设备。

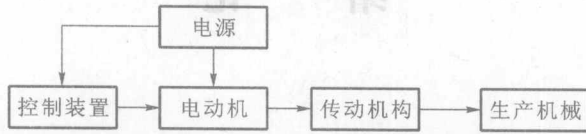


图 0.1 电力拖动系统示意图

电力拖动系统传动效率高、运行经济、操作简便、能实现自动控制和远距离控制，因而得到了越来越广泛的应用，特别是在现代工业企业中，几乎所有的生产机械都是由电动机来拖动的，例如各种机床、各种生产线、风机、水泵，等等。可以毫不夸张地说，没有电动机、没有电力拖动技术，就没有现代工业。这样，电动机和电力拖动技术在国民经济中的重要作用就不言而喻了。

0.2 常用的基本定律与定则

发电机、电动机、变压器等电磁设备，尽管它们的功能及结构有所不同，但是它们都是以磁场为媒介进行能量转换的设备，因而其工作原理都是建立在电磁感应定律、电磁力定律、全电流定律等基本电磁定律之上的。综述这些常用的定律和定则对本课程的学习是有帮助的。

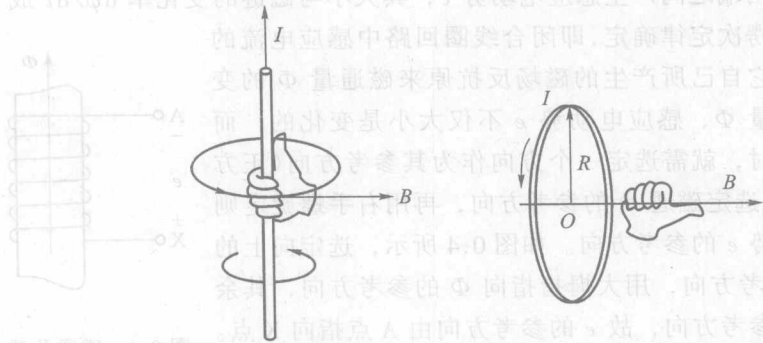
0.2.1 电机磁场的描述

电机和变压器的绕组流过电流时会在周围空间产生磁场。为了表述磁场特性，常用磁感应强度 B 来表示磁场的强弱。为了形象地描绘磁场的空间分布情况，通常使用磁感应线（磁力线）。磁感应线是无头无尾的闭合曲线，曲线上任一点的切线方向表示了该点磁感应强度 B 的方向，通过该点垂直于 B 的单位面积的磁感应线数目等于该点 B 的大小。电流与所产生的磁场方向用右手螺旋定则确定，如图 0.2 所示。对直导线，用右手握住载流导线，大拇指伸直代表电流方向，弯曲的四指指向磁感应线的回绕方向，如图 0.2 (a) 所示；对于线圈，弯曲的四指表示线圈中电流方向，伸直的大拇指表示了磁感应线的方向，如图 0.2 (b) 所示。

在均匀的磁场中，如果截面 S 与 B 垂直，如图 0.3 所示，则通过该截面的磁感应通量 Φ 可表示为

$$\Phi = BS \text{ 或 } B = \Phi/S \quad (0.1)$$

Φ 亦称为磁通量，简称为磁通。由上式可知，磁感应强度 B 表示了单位



(a) 载流直导线磁场的方向 (b) 线圈中的电流与磁场方向

图 0.2 电流与产生的磁场方向

面积上的磁通，故而又被称为磁通密度。在国际单位制中，磁通 Φ 的单位为韦 [伯] (Wb)；磁通密度 B 的单位为特 [斯拉] (T)， $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb}/\text{m}^2$ ； S 的单位为平方米 (m^2)。

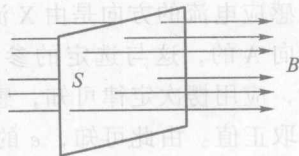


图 0.3 均匀磁场中的磁通

在电机和变压器的磁路计算中，为了计算上的方便，还经常使用磁场强度 H 这一辅助物理量，它也是一个矢量。 H 与 B 的关系是

$$B = \mu H \quad (0.2)$$

式中的 μ 是磁介质的磁导率，单位为亨/米 (H/m)，不同的物质具有不同的磁导率。真空的磁导率为 $\mu_0 = 1.25 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ ，是常数。铁磁材料的磁导率 μ 远远大于 μ_0 ， μ 约为 μ_0 的数百倍到数千倍，如硅钢片的 μ 为 μ_0 的 6 000 ~ 7 000 倍，但不是一个常数。在同样大小的电流下，铁心线圈的磁通比空心线圈的磁通大得多，这就是电机和变压器通常都用铁磁材料来制造的原因。 H 的单位是安/米 (A/m)。

0.2.2 电磁感应定律

电磁感应定律是电机和变压器的理论基础。电机和变压器的绕组 (或线圈) 能够产生感应电动势只有两种情况：一是如变压器，绕组和磁场相对静止不动，与绕组相交链的磁链发生变化而在绕组中产生感应电动势，称为变压器电动势；二是如电机，绕组和磁场之间有相对运动，绕组中的导线切割磁场而产生的感应电动势，称为切割电动势 (或称旋转电动势)。

1. 变压器电动势

若线圈 (或绕组) 的匝数为 N ，当与线圈相交链的磁链 $\psi = N\Phi$ 发生变化

时,会在线圈两端之间产生感应电动势 e ,其大小与磁链的变化率 $d\psi/dt$ 成正比;其方向由楞次定律确定,即闭合线圈回路中感应电流的方向总是使得它自己所产生的磁场反抗原来磁通量 Φ 的变化。如果磁通量 Φ 、感应电动势 e 不仅大小是变化的,而且方向也变化时,就需选定一个方向作为其参考方向(正方向),一般是先选定磁通 Φ 的参考方向,再用右手螺旋定则确定感应电动势 e 的参考方向。如图 0.4 所示,选定向上的方向为 Φ 的参考方向,用大拇指指向 Φ 的参考方向,其余四指指向 e 的参考方向,故 e 的参考方向由 A 点指向 X 点。

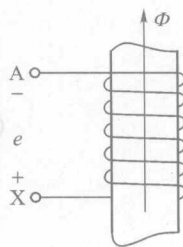


图 0.4 磁通及感应电动势方向

当磁通增大时,即 $d\Phi/dt > 0$,根据楞次定律可知,感应电流所产生的磁通方向应该是向下的,才能反抗磁通的增大,又依照线圈电流与磁场方向之间的右手螺旋定则关系[如图 0.2(b)],可以确定感应电流的方向是由 X 流向 A 的,感应电动势与感应电流同方向,亦是由 X 指向 A 的,这与选定的参考方向是相反的,这时 e 应取负值;当 $d\Phi/dt < 0$ 时,应用楞次定律可知,感应电动势方向与选定的参考方向是相同的,这时 e 应取正值。由此可知, e 的正负与 $d\Phi/dt$ 的正负是相反的, $d\Phi/dt$ 为正,则 e 为负, $d\Phi/dt$ 为负,则 e 为正。这样,应用楞次定律, e 与 Φ 之间的关系为

$$e = -d\psi/dt = -Nd\Phi/dt \quad (0.3)$$

当然也可用左手螺旋定则确定 e 的参考方向,这与右手螺旋定则确定的参考方向相反,这时 e 与 Φ 的关系为

$$e = d\psi/dt = Nd\Phi/dt \quad (0.4)$$

同一物理量,在不同的参考方向规定下,表达该物理量的数学表达式符号不同,但本质相同,两个表达式都说明 e 的大小与 N 和 $d\Phi/dt$ 成正比,而且感应电动势阻碍磁通的变化。

2. 切割电动势

若长度为 l 的直导线与磁场有相对运动,其切割磁感应线速度为 v ,导线所在处的磁感应强度为 B ,且直导线 l 、磁感应强度 B 和相对切割速度 v 三者之间互相垂直,则导线中感应电动势 e 的大小为

$$e = Blv \quad (0.5)$$

e 的方向用右手定则确定,即把右手伸开,大拇指与其他四指垂直成 90° ,如图 0.5 所示,让磁感应线指向手心,大拇指指向导线运动方向,其他四指的指向就是导线中感应电动势即切割电动势 e 的方向。

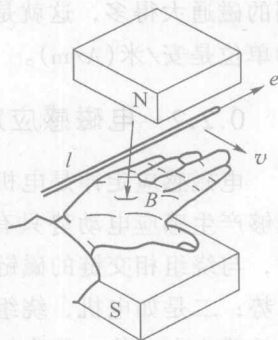


图 0.5 确定感应电动势方向的右手定则

0.2.3 电磁力定律

通电导体在磁场中受到的磁场对它的作用力称为电磁力，也称安培力。一根长度为 l 的直导线中流过的电流为 i ，其所在的磁场为均匀磁场，磁感应强度为 B ，且直导线 l 与磁感应强度 B 的方向垂直，则导线上所受到的电磁力 f 大小为

$$f = Bli \quad (0.6)$$

用左手定则确定 f 的方向，即把左手伸开，大拇指与其他四指垂直成 90° ，如图 0.6 所示，让磁感应线指向手心，四指指向电流 i 的方向，则大拇指的指向就是导线所受到的电磁力 f 的方向。

综上所述，在确定电流 i 、磁通 Φ 、感应电动势 e 及电磁力 f 相互之间关系时，要用到右手定则、左手定则及右手螺旋定则，需要区别开来。右手定则用来确定在磁场中运动的导体产生切割电动势的方向，如图 0.5 所示。左手定则用来确定载流导体在磁场中受到的电磁力的方向，如图 0.6 所示。右手螺旋定则既可以用来确定导线中的电流所产生的磁场方向，如图 0.2 所示；也可以用来确定线圈中的磁通与感应电动势参考方向之间的关系，如图 0.4 所示。应注意在不同情况下使用不同的定则，以免混淆。

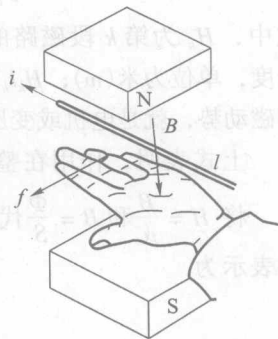


图 0.6 确定载流导体受力方向的左手定则

0.2.4 全电流定律

全电流定律亦称安培环路定律，是表示电流与所产生的磁场之间关系的定律。设空间有多根载流导体，流过的电流分为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 \dots 、 I_n ，则沿任何闭合路径 l 对磁场强度 H 的线积分，等于该闭合回路所包围的电流的代数和，即全电流 $\sum I$ ，于是就有

$$\oint_l H dl = \sum I \quad (0.7)$$

上式就是全电流定律的表达式， $\sum I$ 为电流的代数和，其正负由右手螺旋定则确定，当导体中电流方向与积分路径方向符合右手螺旋定则时，该电流取正号，否则取负号。如在图 0.7 中，积分路径方向为逆时针方向，所以 I_1 、 I_2 、 I_3 为正， I_4 为负，故 $\sum I = I_1 + I_2 + I_3 - I_4$ 。

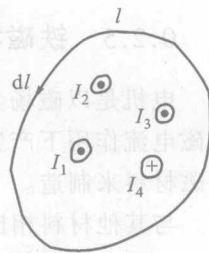


图 0.7 全电流定律

全电流定律常用于电机和变压器的磁路计算，

这时根据磁路在几何形状上的特点，把整个磁路分成若干段，几何形状相同的为一段，这样磁场强度 H 沿整个磁路的线积分就等于每段磁路磁场强度与磁路长度乘积之和，即

$$\oint_l H dl = \sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum I = NI = F \quad (0.8)$$

式中， H_k 为第 k 段磁路的磁场强度，单位为安/米(A/m)； l_k 为第 k 段磁路的长度，单位为米(m)； $H_k l_k$ 称为第 k 段磁路的磁压降； $F = NI$ 为作用在整个磁路上的磁动势，就是电机或变压器励磁绕组的安匝数； N 为励磁绕组串联的匝数。

上式表明，作用在整个磁路上的磁动势等于各段磁路磁压降之和。

将 $H = \frac{B}{\mu}$ 和 $B = \frac{\Phi}{S}$ 代入磁路的磁压降的表达式中，则第 k 段磁路的磁压降可表示为

$$H_k l_k = \frac{B_k}{\mu_k} l_k = \frac{\Phi_k}{\mu_k S_k} l_k = \Phi_k R_{mk} \quad (0.9)$$

式中， $R_{mk} = l_k / \mu_k S_k$ 为第 k 段磁路的磁阻。式(0.9)表示，一段磁路的磁通乘以该段磁路的磁阻等于该段磁路的磁压降，这与电路的欧姆定律 $U = RI$ 相似。

对于无分支磁路，由于各段磁路的磁通是相等的，式(0.8)所表示的全电流定律可以写成为

$$F = NI = \sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^n \Phi_k R_{mk} = \Phi \sum_{k=1}^n R_{mk} = \Phi R_m$$

也可写成

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (0.10)$$

上式表明，磁路的磁通 Φ 等于作用在磁路上的总磁动势 F 除以磁路的总磁阻 R_m ，称为磁路的欧姆定律。式中 $R_m = \sum_{k=1}^n R_{mk}$ 为各段磁路磁阻之和，即磁路的总磁阻。需要说明的是，在铁磁材料构成的磁路中，由于磁路有饱和现象， R_m 不为恒值，因此式(0.10)一般只用于定性分析，不用于定量计算。

0.2.5 铁磁材料的特性

电机是以磁场为媒介，利用电磁感应作用实现能量转换的。为了在较小的励磁电流作用下产生较强的磁场，电机和变压器的磁路都是用导磁性能良好的铁磁材料来制造。

与其他材料相比，铁磁材料具有如下的独特性能。

1. 高导磁性能

实测表明，所有非铁磁材料(木材、铜、铝等)的磁导率都接近真空的磁导率

μ_0 ，而铁磁材料的磁导率 μ 比 μ_0 大数百倍到数千倍，如各种硅钢片的 μ 约为 μ_0 的 6 000 ~ 7 000 倍。这一宝贵的特性，使得在由铁磁材料构成的电机和变压器的磁路中，通入较小的励磁电流就能产生较强的磁场，提高了电机运行效率。铁磁材料之所以导磁性能优良，是因为其内部存在着许多被强烈磁化了的自发磁化单位，称为磁畴。平常，磁畴杂乱无章的排列着，磁场互相抵消，对外不显磁性。一旦有外磁场的作用，磁畴将沿外磁场的方向作有规则的排列，形成一个很强的附加磁场叠加在外磁场上，从而使铁磁材料具有高导磁性能。

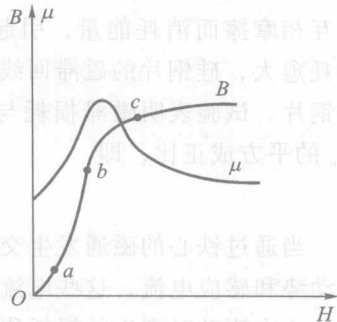


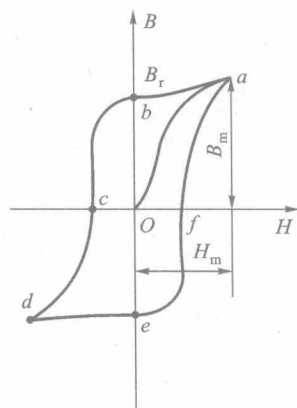
图 0.8 铁磁材料的磁化曲线

2. 饱和特性

在非铁磁材料中，磁感应强度 B 与磁场强度 H 成正比，即 $B = \mu_0 H$ ， B 与 H 成线性关系。在铁磁材料中， B 与 H 是非线性关系，即 $B = f(H)$ 是一条曲线，称为磁化曲线，如图 0.8 所示。由磁化曲线可见：在磁化开始时，随着 H 的增加 B 缓慢增加，如 Oa 段；之后，随着 H 的增加， B 迅速增加，如 ab 段；再以后，随着 H 的增加， B 的增加又缓慢下来，如 bc 段所示；过 c 点后，当 H 再继续增加时， B 增加很小，甚至几乎不增加。这种当 H 较大时，随着 H 的增加 B 的增加缓慢甚至几乎不增加的现象称为饱和现象。铁磁物质具有饱和现象的特性称为饱和特性。由 $\mu = B/H$ 可作出 $\mu = f(H)$ 曲线，示于图 0.8 中，由图可知，当铁磁材料饱和时，磁导率 μ 变小，导磁性能变差。

3. 磁滞特性

铁磁材料的磁化曲线可以用实验测绘。做实验时，改变励磁磁动势的大小和方向，使磁场强度 H 在 $0 \sim H_m \sim 0 \sim -H_m \sim 0 \sim H_m$ 之间反复变化，所得的 $B-H$ 关系曲线是图 0.9 所示的闭合曲线 $abcdefa$ ，称为铁磁材料的磁滞回线。由磁滞回线可以看到， B 的变化总是滞后于 H 的变化，当 H 下降为零时， B 不为零而是 B_r ，这种现象称为磁滞现象， B_r 称为剩余磁感应强度。铁磁材料具有磁滞现象的特性称为磁滞特性。



同一铁磁材料在不同的 H_m 下有不同的磁滞回线，把所有磁滞回线的顶点连接起来而得到的曲线称为铁磁材料的基本磁化曲线(或平均磁化曲线)，

图 0.9 铁磁材料的磁滞回线