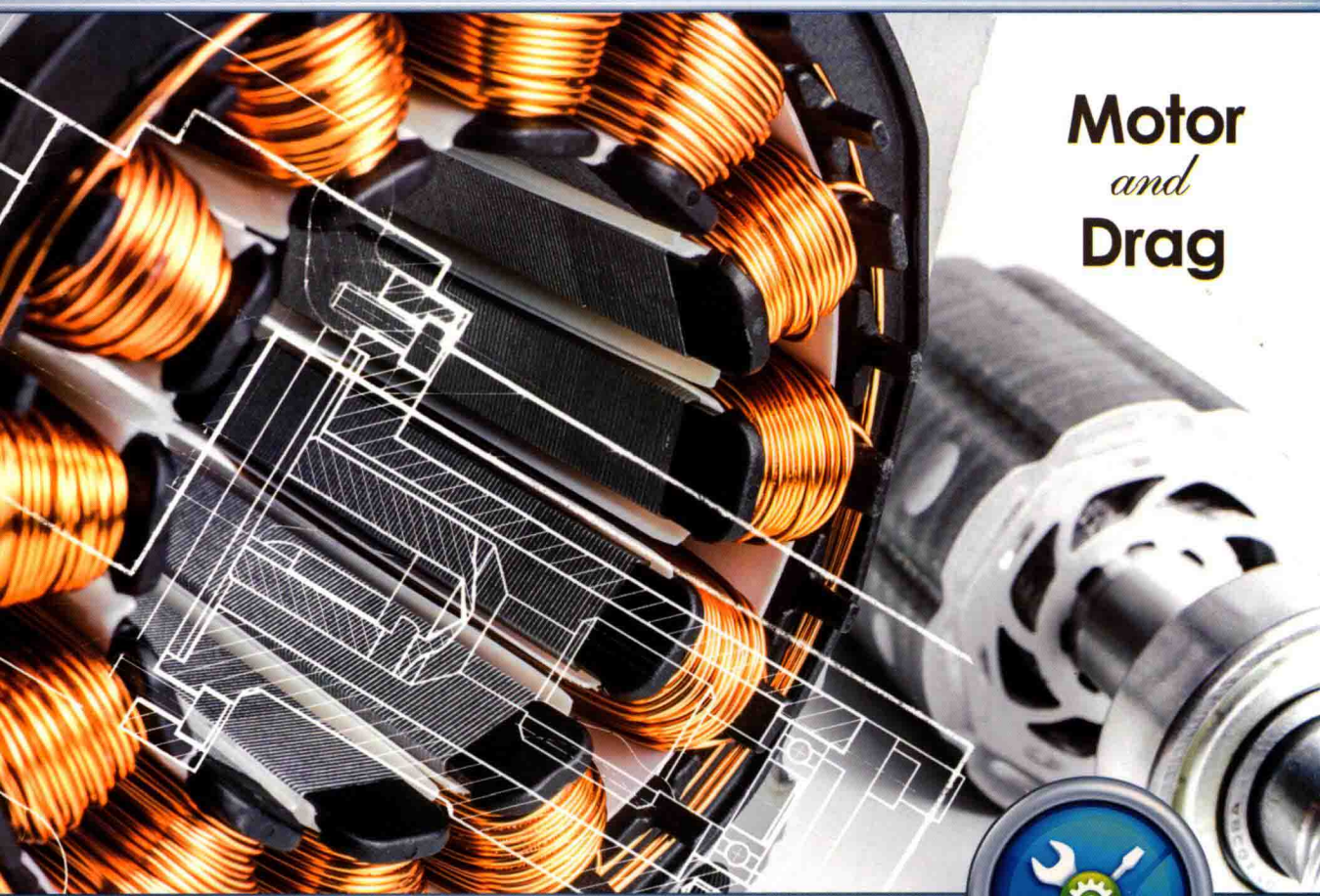


创新型人才培养“十三五”规划教材

电机与拖动

赵连友 王德军 编著



内容简介

创新型人才培养“十三五”规划教材

电机与拖动

赵连友 王德军 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

全书共分为 7 章和绪论及附录。讲述一般直流电机、变压器、三相异步电动机的基本理论、基本结构、工作原理、内部电磁关系和能量转换关系,以及电力拖动系统运行的基本理论和实践知识。为了满足专业和工程实践的需要,也讲述了单相异步电动机、同步电动机、无换向器电动机(即直流无刷电动机)和控制电机等常用电机的基本原理和工作特性。为了更好地服务于科研和生产发展,编写了附录 A~M,包括并励直流发电机的自励过程与条件,串励与复励直流电动机的机械特性,多轴系统的转矩与飞轮矩、力与质量的折算,晶闸管变流供电对直流电动机的影响,变压器等值电路中的参数测定,交流电机的分布与短距绕组系数,三相异步电动机的参数测定与工程计算,特殊笼形转子异步电动机,电动机容量的选择,逆变器供电异步电动机的选配,异步电动机的矢量变换控制理论,直接转矩控制基本理论等内容,以引申、扩充正文和引入新技术,也为工程及实验提供必要的理论和计算知识,非常便于工程中参考查阅。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化及相关电类学科的本科、高职高专、成人教育学生的教学用书,也可以作为相关工程技术人员的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动 / 赵连友, 王德军编著. —北京: 电子工业出版社, 2017.4
创新型人才培养“十三五”规划教材

ISBN 978-7-121-31061-4

I. ①电… II. ①赵… ②王… III. ①电机—高等学校—教材②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 046617 号

策划编辑: 宋 梅

责任编辑: 张 京

印 刷: 北京京科印刷有限公司

装 订: 北京京科印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 28.5 字数: 730 千字

版 次: 2017 年 4 月第 1 版

印 次: 2017 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 2 000 册 定价: 79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: mariams@phei.com.cn。

前 言

“电机与拖动”课程是自动化、电气工程及其自动化等相关电类专业的专业基础必修课程,电机及拖动技术在相应的工程技术领域也有着广泛应用。一本质量尚佳的教材对电机及拖动技术的学习和应用起着良好的推动作用。

本书作为基础教材面向自动化、电气工程及其自动化本科生,成教学生;考虑工程实践性面向工程一线的工作人员;挖掘可读性面向有志于此的自学人士。在教材编写过程中,博采众长,始终以培养读者分析问题和解决问题的能力为指导思想,强调说理性,力图将理论与实践、普及与提高、讲授与自学的内容有机结合起来,精选内容,突出重点,做到通俗易懂、由浅入深,并融入当前新技术、新方法,在维持相对完整、系统的基础上,教学内容可精简,并进行重新组合(书中标注“*”的部分适宜作为参考内容或自学)。注意与前继及后续相关课程的衔接处理,为其他课程的学习做良好的铺垫,也适应各层次教学、自学和参考的需要。

本书已有几十年的使用、修正、更新历史。前期版本曾于1993年经原吉林工业大学专家组评议后,获得了当时学校教材建设基金的资助,作为校内教材发行使用。多年来,在本科、专科及各种成人教育教学中进行了广泛的使用。并根据教学反馈和相关知识的更新情况一直处于动态的修改当中。在多年的教学实践基础上,为了拓宽专业知识面,与目前世界电机新技术应用的现状接轨,适应当前学分制,便于自学和工程性应用等,在内容编排、阐述、取舍和更新等方面做了修改和补充。为了适应新的教学形式需要,添加了电子课件部分。随着科学技术的进一步发展,电机的应用领域较以往拓宽了很多,特别体现在高铁、电动车等被控对象的应用方面,也对电机应用提出了新要求,需要更新对电机的认知。推陈出新也是电机及其拖动技术发展的需要,电机的矢量控制技术是当前乃至今后相当长一段时期内行业关注和应用的焦点。编者承担过工信部关于交流电机矢量控制相关的课题,相关基础较为扎实。本书在追踪前沿技术方面有所考虑。例如,本书将电机模型的矢量分解和交流电机的直接转矩控制基本理论纳入进来,以接轨于前沿技术。

在内容编排方面,除章后有小结、思考题及习题外,章前有导引,指出重点内容和学习方法。书中以电机应用为主线设立章节,重点内容后都有示例,便于

消理解，并使之与工程或实验结合起来。此外，本书章节、内容具有较强的伸缩性和适应性，考虑了在各层次教学中根据需要可以增减的部分，以便于重组教学内容，尽量避免影响重组后内容的完整性、连续性和系统性。为因材施教，本书写入了典型电机或新型电机，并在书后编写了附录 A~M，以引申、扩充正文和引入新技术，也为工程及实验提供必要的理论和计算知识。

在内容阐述方面，以电机拖动为主导统编全书，将电机与拖动内容有机结合起来，精简那些重复或只与设计制造有关的内容。注意采用先提出问题、后由浅入深地解决问题的方式，启发读者思考。并充分利用举例和图表说明问题，突出实用性和形象化。

本书配备相应的多媒体课件，采用必要的动画形式，以增加趣味性和可读性，如有需要，请登录电子工业出版社华信教育资源网（www.hxedu.com.cn），注册后免费下载。

多年来，本书作为校内教材使用多版，虽有良好的使用基础，但由于种种原因，从未正式出版发行。偶有读者出于本书基础性、系统性、可读性和工程性的考虑索要高质量版本，未给出相应满意回应，实为编者心中憾事。希望借此时机正式公开出版，发挥本书应有的作用。

全书由赵连友和王德军编著。刘振泽、郭洪艳、刘奇芳参加了部分章节的编写和整理工作；葛平鑫、鲍亚新、张贤达、高昂、樊志梹、曲卓、魏薇郦、吕志超、梁晓娜和丁健楠等研究生为本书的绘图、录入、整理及校对工作付出了辛苦劳动，做出了贡献，在此一并感谢。此外，还要感谢在背后默默付出、提供强大支持和动力的家人。

编著者

目 录

绪论	1
0.1 电机拖动在自动化中的作用	1
0.2 本课程的性质、内容和特点	2
0.3 电机原理所遵循的基本电磁规律	2
0.3.1 电机工作原理中的基本知识	2
0.3.2 磁路中的基本定律	5
0.4 电机中铁磁材料的特性	6
第 1 章 直流电机	10
1.1 直流电机的基本工作原理与结构	10
1.1.1 直流电机的基本工作原理	10
1.1.2 直流电机的主要结构部件	13
1.1.3 直流电机的主要额定值及系列	15
1.2 电枢绕组	16
1.2.1 电枢绕组构成的原则	17
1.2.2 单叠绕组与单波绕组的特点	19
1.3 直流电机的磁场	23
1.3.1 直流电机的励磁方式	23
1.3.2 直流电机空载时磁场	24
1.3.3 直流电机负载时气隙磁场	25
*1.4 直流电机的换向	29
1.4.1 换向中的电磁现象	30
1.4.2 改善换向的方法	34
1.4.3 环火与直流电机的过载能力	35
1.5 直流电机运行时的基本关系式	36
1.5.1 电枢电势及电磁转矩	36
1.5.2 电势平衡方程式	39
1.5.3 功率平衡方程式	41
1.5.4 转矩平衡方程式	44
*1.6 直流电机的可逆原理	46
1.6.1 直流发电机转变成电动机的过程	46
1.6.2 直流电动机转变成发电机的过程	47

小结	48
思考题	49
习题	50
第 2 章 直流电动机拖动基础	53
2.1 他励直流电动机的机械特性	53
2.1.1 他励直流电动机的机械特性方程式	53
2.1.2 他励直流电动机的自然机械特性	55
2.1.3 他励直流电动机的人工机械特性	55
2.1.4 机械特性曲线的绘制	58
2.2 典型的负载转矩特性	62
2.2.1 恒转矩负载特性	62
2.2.2 恒功率负载特性	63
2.2.3 通风机型负载特性	64
2.3 电力拖动系统的运行分析	64
2.3.1 拖动系统的基本运动方程式	65
2.3.2 拖动系统运动过程的分析	67
2.3.3 拖动系统稳定运行条件	70
2.4 他励直流电动机的起动	72
2.4.1 起动方法	72
*2.4.2 起动过渡过程	74
2.4.3 电机常数 T_M 的含义	81
*2.4.4 缩短电力拖动系统过渡过程时间的途径	82
2.5 他励直流电动机的制动运行状态	83
2.5.1 回馈制动	84
2.5.2 能耗制动	88
2.5.3 电压反接制动	94
2.5.4 倒拖制动	103
2.6 他励直流电动机的转速调节	111
2.6.1 电枢串电阻调速	113
2.6.2 降低电源电压调速	113
2.6.3 弱磁调速	117
2.6.4 评价调速性能的主要指标	121
小结	130
思考题	133
习题	136

第 3 章 变压器	141
3.1 变压器的基本工作原理与结构	141
3.1.1 变压器的基本工作原理	141
3.1.2 变压器的额定值	143
3.1.3 变压器的主要结构部件	144
3.2 变压器空载运行	146
3.2.1 变压器空载时的物理情况	146
3.2.2 变压器中各电磁量正方向的规定	147
3.2.3 主磁通 Φ 与 e_1 、 e_2 、 u_1 之间的大小与相位关系	148
3.2.4 变压器的空载电流	150
3.2.5 变压器空载时的电势方程、等值电路与相量图	152
3.3 变压器负载运行	155
3.3.1 变压器负载运行的物理情况	156
3.3.2 变压器负载时的基本方程式	157
3.3.3 绕组的折算与等值电路	158
3.3.4 变压器负载运行时的相量图	164
3.4 变压器的运行特性	166
3.4.1 变压器的外特性	166
3.4.2 变压器的效率特性	168
3.5 三相变压器	171
3.5.1 三相变压器的磁路系统	171
3.5.2 三相变压器绕组的连接形式	172
3.5.3 三相变压器的联接组	173
3.5.4 三相绕组的连接形式和磁路系统对电势波形的影响	180
3.6 特殊用途的变压器	182
3.6.1 自耦变压器	182
3.6.2 交流互感器	185
小结	188
思考题	190
习题	192
第 4 章 三相异步电动机	196
4.1 三相异步电动机的工作原理与结构	196
4.1.1 三相异步电动机的基本工作原理	196
4.1.2 旋转磁场的建立	197
4.1.3 三相异步电动机转子的转向与转速	201
4.1.4 三相异步电动机的主要结构部件	201

4.1.5	三相异步电动机的铭牌数据	204
*4.2	三相异步电动机的磁势与绕组	205
4.2.1	单相定子绕组的磁势	206
4.2.2	三相定子绕组的磁势	211
4.2.3	几种常用的单层分布绕组	214
4.2.4	转子绕组与磁势	217
4.3	三相异步电动机运行时的电磁关系	219
4.3.1	转子不转时的电磁关系	219
4.3.2	转子旋转时的电磁关系	222
4.3.3	异步电动机运行时的基本方程式	224
4.4	三相异步电动机的等值电路与相量图	225
4.4.1	等值电路	225
4.4.2	相量图	228
4.5	三相异步电动机的功率与转矩	229
4.5.1	异步电动机的功率平衡关系	229
4.5.2	异步电动机的转矩平衡关系	231
*4.6	三相异步电动机的工作特性	233
4.6.1	转速特性 $n = f(P_2)$	233
4.6.2	定子电流特性 $I_1 = f(P_2)$	233
4.6.3	电磁转矩特性 $T_e = f(P_2)$	234
4.6.4	功率因数特性 $\cos\varphi_1 = f(P_2)$	234
4.6.5	效率特性 $\eta = f(P_2)$	234
	小结	235
	思考题	236
	习题	237
第5章	三相异步电动机拖动基础	240
5.1	三相异步电动机的电磁转矩表达式与机械特性	240
5.1.1	电磁转矩的三种表达式及其描述的机械特性	240
5.1.2	异步电动机的自然机械特性	248
5.1.3	异步电动机的人工机械特性	249
5.2	三相异步电动机的起动	251
5.2.1	异步电动机的固有起动性能	252
5.2.2	直接起动	254
5.2.3	降压起动	254
5.2.4	绕线转子异步电动机转子串变阻器起动	264
*5.2.5	异步电动机起动时间的计算	269

5.3 三相异步电动机制动运行状态	272
5.3.1 回馈制动	272
5.3.2 能耗制动	275
5.3.3 倒拖控制	280
5.3.4 定子两相反接制动	281
5.3.5 异步电动机负载运行实例及起、制动与调速电阻的计算	283
5.4 三相异步电动机的转速调节	291
5.4.1 改变极对数调速	291
5.4.2 改变电源频率调速	296
5.4.3 绕线转子串电阻调速	298
5.4.4 串级调速	300
5.4.5 降定子电压调速	307
5.4.6 电磁转差离合器调速	312
小结	317
思考题	319
习题	321
第6章 几种其他典型电机	324
6.1 单相异步电动机	324
6.1.1 单相绕组电机的工作特点	324
6.1.2 两相绕组电机的磁势	326
6.1.3 单相异步电动机的起动方法	328
6.2 同步电动机	331
6.2.1 同步电动机的基本结构及工作原理	331
6.2.2 同步电动机的电势方程及相量图	332
6.2.3 同步电动机运行特性	334
6.2.4 同步电动机的起动	340
*6.3 无换向器电动机	344
6.3.1 基本结构与工作原理	344
6.3.2 无换向器电动机的调速性能	346
小结	349
思考题	350
第7章 控制电机	352
7.1 伺服电动机	352
7.1.1 直流伺服电动机	352
7.1.2 交流伺服电动机	354
7.2 测速发电机	359

7.2.1 直流测速发电机	359
7.2.2 交流测速发电机	360
7.2.3 感应子测速发电机	363
7.3 自整角机	364
7.3.1 自整角机的基本结构	365
7.3.2 力矩式自整角机的工作原理	365
7.3.3 控制式自整角机的工作原理	368
7.4 步进电动机	369
7.4.1 基本结构与工作原理	370
7.4.2 通电方式与转速	370
7.4.3 步进电动机的运行性能	373
小结	376
思考题	377
附录	379
附录 A 并励直流发电机的自励过程与条件	379
附录 B 串励与复励直流电动机的机械特性	382
附录 C 多轴系统的转矩与飞轮矩、力与质量的折算	384
附录 D 晶闸管变流供电对直流电动机的影响	388
附录 E 变压器等值电路中的参数测定	391
附录 F 交流电机的分布与短距绕组系数	393
附录 G 三相异步电动机的参数测定与工程计算	397
附录 H 改善起动性能的特殊笼形转子异步电动机	404
附录 I 电动机容量的选择	407
附录 J 逆变器供电异步电动机的选配	417
附录 K 异步电动机的矢量变换控制理论	421
附录 L 直接转矩控制基本理论	434
附录 M 部分习题答案	439
参考文献	443

绪 论

0.1 电机拖动在自动化中的作用

当前在工农业生产中，乃至家用电器中，用电动机拖动工作机构，以完成生产工艺要求的拖动方式，已是举目可见。这种以电动机为原动机的拖动方式称为“电机拖动”或“电力拖动”。

电力拖动一般都由电动机、传动机构、控制设备及电源和生产机械五个基本环节构成系统，它们之间的关系如图 0-1 所示。



0-1 电力拖动系统基本环节间的关系

显然，在电力拖动系统中，电动机是将电能转换成机械能的原动机。当前可用作原动机的还有蒸汽机、水轮机、内燃机等，但它们远没有电动机应用广泛，首要原因在于，电能是电动机的直接能源。电能在生产、变换、传输、分配、使用和控制等方面既方便又经济。再加上电机本身结构紧凑，种类、型号繁多，且有多种运行性能。故由电动机通过传动机构与生产机械构成的拖动系统，与由其他原动机构成的拖动系统相比具有如下优点：

- (1) 电动机与被拖动的生产机械的连接简便，且效率高；
- (2) 电动机的种类和型号多，已成系列，可以满足各种生产机械的需求；
- (3) 电机拖动具有良好的调速、起动、制动性能，控制简便，且易于实现最优控制和完善保护；
- (4) 电机拖动可以实行远距离控制和测量，便于集中管理，便于实现生产过程自动化。

综上所述，电机拖动，特别是自动控制的电机拖动，在实现工农业生产过程电气化与自动化中已是不可缺少的重要组成部分。随着自动控制理论不断发展，半导体器件的采用，特别是微电子技术和计算机技术的发展与应用，电机拖动系统的静态和动态品质都被大大提高了。因此，电机拖动自动控制，对提高生产机

械运转时的准确性、可靠性和快速响应性,进而提高生产效率和产品质量,改善劳动条件,节省人力、物力,都具有十分重大的意义。

0.2 本课程的性质、内容和特点

“电机与拖动”的内容既有基础理论,又有理论的应用,故是一般电类专业的一门技术基础课。主要阐述通用的直流电动机、变压器、异步电动机,以及使用上述电动机的拖动基础。另外,也讲述了同步电动机和控制电机等其他电机。

本课程在讲述电机、变压器的基本结构、工作原理、电磁关系和运行特性时,除满足生产实际需要的基本知识外,主要服从拖动系统的需要。电机拖动基础是重点内容。因为,当我们给一个生产机械配置动力时,一般都先依据生产机械的特性和要求,如负载的转矩特性、机械惯性的尺寸、起动的频繁程度、在运行中有无调速和制动的要求等,然后选择技术性能好、经济效益高、运行可靠、维护方便的电动机及拖动方式。这就要求工程技术人员掌握电动机的静态和动态特性,起动、制动及调速的性能与方法,且应有较全面、深入的了解。同时,本课程也为学习后续课程——电力电子变流技术、控制理论、电力拖动自动控制系统、工厂电气控制设备等,打下必要的理论与实践基础。

本课程的特点:既是电磁学与机械力学的结合,又是理论与实践的结合。鉴于电、磁、力三者内在联系的复杂性,在应用理论分析实际问题时,常常先作出若干假定或忽略次要因素,以使问题简化。只要近似程度在工程允许的误差范围之内,就可以认为它已足够准确地反映了客观规律。同时,也应用了问题的主要因素与次要因素在不同条件下可以相互转化的哲理。抓住主要因素就使问题清晰明了。另外,书中还多处应用了折算与等效概念。它是通过物理效应,在一定条件下,将不同的物理量化为等价,进行变换,以利于解决复杂的理论与实际问题。

在学习本课程时,须牢记和运用上述方法。同时,要善于比较、总结,找出规律,以便掌握。

0.3 电机原理所遵循的基本电磁规律

0.3.1 电机工作原理中的基本知识

由物理学已知,导体做切割磁场的运动时,在导体中将产生感应电势。若磁场的磁感应强度、导体与导体运动的方向相互垂直,如图 0-2 所示,则感应电势的

大小为:

$$e = Blv \quad (\text{V})$$

式中, B 为磁感应强度 (T); l 为导体切割磁场的有效长度 (m); v 为导体相对磁场的运动速度 (m/s)。这是法拉第定律的一个应用。

感应电势的方向由右手定则确定, 如图 0-3 所示。

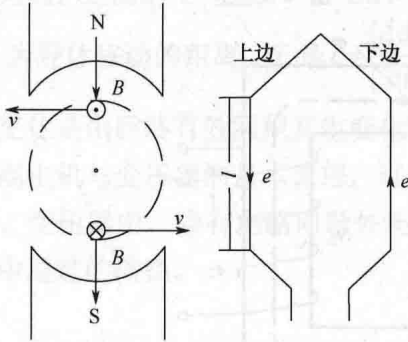


图 0-2 发电原理

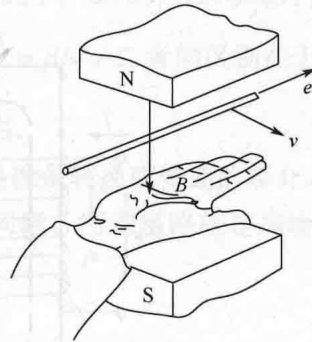


图 0-3 确定感应电势的右手定则

由上述可知, 产生感应电势需具备的条件是: 磁场和使导体产生运动的外力, 这可以形象地表示为“力”+“磁”→“电”。显然, 这是将机械能转换为电能的过程, 是发电机原理。

当处于磁场中的导体通过电流时, 磁场与电流相互作用将产生电磁力。若磁感应强度与导体相互垂直, 如图 0-4 所示, 则电磁力的大小为:

$$f = Bli \quad (\text{N})$$

式中, B 与 l 同前所述; i 为通过导体的电流 (A)。

电磁力的方向由左手定则确定, 如图 0-5 所示。

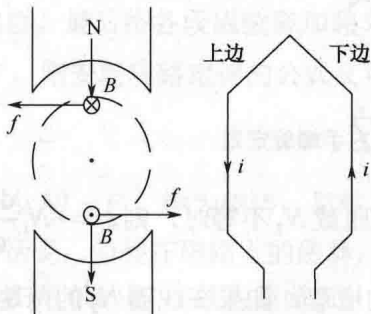


图 0-4 电动原理

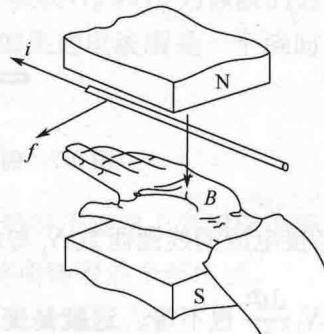


图 0-5 确定导体受力的左手定则

由上述可知, 产生电磁力需具备的条件是: 磁场和导体通有电流。这又可形象地表示为“电”+“磁”→“力”。显然, 这是将电能转换为机械能的过程, 是电动机原理。

又知位于磁场中的线圈将有磁通与其交链。如果被交链的匝数为 N 匝，则交链的总磁通为 $N\Phi = \Psi$ ，称 Ψ 为磁链。根据法拉第电磁感应定律，当交链的磁通或者说磁链发生变化时，则在线圈中将产生电势，如图 0-6 所示。根据法拉第定律，其大小为：

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} (\text{V})$$

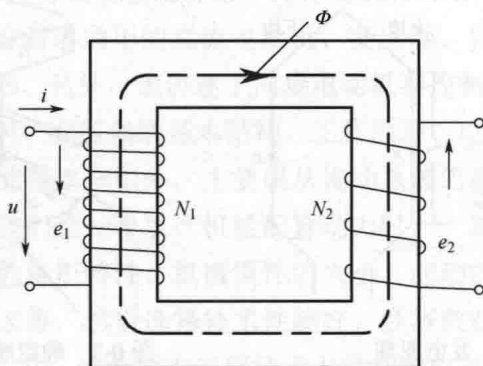


图 0-6 变压原理

其方向由右手螺旋定则确定，如图 0-7 所示。式中负号是楞次定律的数学表示法，由确定电势正方向而得，详见 3.2 节。

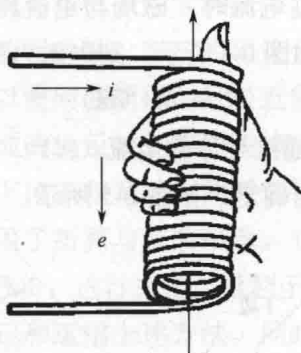


图 0-7 确定线圈感应电势的右手螺旋定则

当接电源的线圈匝数 N_1 与承接负载的线圈匝数 N_2 不等时，则 $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ 与 $e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$ 也不等，这就是变压器变换电压的道理。如果在线圈 N_2 的两端接通负载，则在 e_2 的作用下将有电流流过负载。显然，上述过程可以归结为，将一种电压的电，通过磁场的耦合作用，转换成电压为另一数量级的电的过程，即可形象地表示为“电”→“磁”→“电”，这是变压器的工作原理。

由上述可知： $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 为线圈中的磁场发生了变化产生的电势，故称感应电势，在电机学中又称变压器电势； $e = Blv$ ，为导体与磁场之间有相对运动产生的电势，故称切割电势，在电机学中又称旋转电势。这两种电势的产生，论其实质，都可以看作是在由导体构成的回路中磁通量发生了变化引起的。以一根导体和一匝线圈为例，则磁通变化量 $d\Phi = BdA = Bldx$ ，式中， dA 为回路构成的有效面积；变量 dx 为导体移动的距离。于是 $e = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \frac{Bldx}{dt} = Blv$ 。二者的区别在于，后者磁通量的变化是由回路有效面积发生变化而引起的。

纵观电机与变压器的基本原理，可见磁场是能量转换或传递的媒介，故需知，在电机、变压器中，除有电路问题外还有磁路问题，所谓磁路就是描绘磁场的磁力线集中通过的路径。

0.3.2 磁路中的基本定律

1. 安培环路定律

安培环路定律定义为：在磁路中，沿任一闭合路径对磁场强度向量的线积分，等于穿过该闭合路径所有导体中电流的代数和。即：

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I$$

由定义可知，只要所包围的电流之代数和不变，积分路径是可以任意选取的，即所谓积分值与路径无关。在工程实际中，一般来说磁路都比较复杂，分析计算时往往分成几段。将路径上各点磁场强度 H_k 相等，方向又都取向长度 l_k 方向的部分划为一段，并将 $H_k l_k$ 称为该段的磁位降。通常都取 H_k 和 l_k 为该段的 H 和 l 的平均值。最后将各段磁位降加起来就等于 $\sum I$ 。如果通电线圈是一个绕向，匝数为 N ，则安培环路定律的公式又可写为：

$$\sum_l H_k l_k = \sum I = NI$$

令 $NI = F$ ，称为磁势。显然，通电线圈的磁势等于磁路上各段磁位降的和。换句话说，消耗在磁路上的磁势，等于该闭合磁路所链着的全部电流。

在图 0-8 中， l 段为截面积 A 相同的铁芯，其磁场强度为 H ；另一段 l_g 为空气隙，其磁场强度为 H_g 。根据安培环路定律，则有：

$$Hl + H_g l_g = NI$$

该式便为安培环路定律的实用表达式，也是磁路中的基尔霍夫第二定律。

2. 磁路欧姆定律

在工程中，为加强磁场，常常将产生磁场的线圈即励磁线圈绕在导磁性能好的铁芯上，使磁力线尽量集中在铁芯里。因此，铁芯成为很多电器磁路的主要介质。

在多数情况下，电器铁芯中的磁场都可以近似看作均匀磁场，即在铁芯截面积 A 上各处磁感应强度 B 大小相等、方向相同，且垂直于平面 A ， $\Phi = BA$ ，其中 B 又称磁通密度，简称磁密（单位 $T = \text{Wb}/\text{m}^2$ ）。又知

$B = \mu H, H = \frac{NI}{l}$ ，分别代入 Φ 式后得：

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu A}} = \frac{NI}{R_m} \quad (\text{Wb})$$

这就是磁路的欧姆定律。可见，是在磁势的作用下，产生磁通建立了磁场。

式中， $R_m = \frac{l}{\mu A}$ 称为磁路的磁阻， l 为磁路长度， A 为磁路截面积， μ 为构成磁路介质的导磁系数（或叫磁导率）。该式与电路的电阻表达式相似，在工程中，鉴于磁场的复杂性，具体数值往往不好确定，磁阻公式多用来作物理解释，而不用作计算。

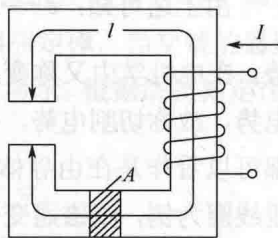


图 0-8 简单磁路

0.4 电机中铁磁材料的特性

一般电器的铁芯都用铁磁材料制成。铁磁材料主要是指铁、镍、钴及其合金，它们的磁性能主要由磁化曲线，即 $B \sim H$ 曲线或由其磁导率 μ 来表示，其特点如下。

1. 铁磁材料在外磁场作用下易被磁化

其原因在于铁磁材料内部存在着已强烈磁化了的自发磁化单元，即磁畴。原无规则排列的磁畴，一旦在外磁场的作用下，它们就会按照外磁场的方向作出有规则的排列，从而形成了非常强的与外磁场同方向的附加磁场。因此，在用铁磁材料作铁芯的线圈中，通入较小的电流（建立外磁场），就可在线圈获得较强的磁场，这就是铁磁材料在电器中的重要作用。

2. 铁磁材料具有高导磁性

介质的导磁性能好坏用磁导率 μ 的大小来表示。铁磁材料的磁导率 μ 远远大