

● 高等学校教材·工程应用型

电机与拖动

(配光盘)

杨天明 主编

内含电子教案、习题解答、实验、
试题库、试卷样本及参考答案



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

● 高等学校教材·工程类

电机与拖动

Dianji yu Tuodong

(配光盘)

杨天明 主编

内容提要

全书分主教材和光盘两部分,主教材内容为绪论、直流电机的基本原理、直流电机的运行原理、直流电动机的过渡过程、单相变压器、三相变压器及其他用途变压器、三相异步电动机的基本原理、三相异步电动机的运行原理、三相异步电动机的过渡过程、其他交流电机及电动机的选择、控制电机、附录;光盘内容为电子教案、习题解答、实验、试题库、试卷样本及参考答案。

本书可作为高等院校自动化和电气工程及其自动化等专业的教材,也可以作为成人高等教育和大专院校相关专业的教材,可根据教学要求选修部分内容,还可以供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动 / 杨天明主编. -- 北京:高等教育出版社, 2013.5
ISBN 978-7-04-037166-6

I. ①电… II. ①杨… 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(2013)第 068958 号

策划编辑 金春英 责任编辑 王勇莉 封面设计 于文燕 版式设计 王艳红
插图绘制 尹莉 责任校对 孟玲 责任印制 毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	国防工业出版社印刷厂	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm × 1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	21.5	版 次	2013 年 5 月第 1 版
字 数	520 千字	印 次	2013 年 5 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	39.60 元(含光盘)

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
物 料 号 37166-00

前 言

随着社会的发展,我国普通高等教育已由原来的精英教育转化为大众化教育。针对高等院校的学生就业以及社会要求,工程技术专业应突出专业特色,着重专业基础知识以及技术应用,以培养 21 世纪高级应用型技术人才。

《电机与拖动》一书是根据高等学校工程应用型教学需求而编写的。本书对一般理论进行了较为详尽的阐述,对不常用的知识进行了简化,注重实际中常用技术的分析与应用;突出了教学研究中的一些成果与特色,特别是一些内容的新提法;强化学生自动化专业的工程意识,培养学生掌握专业理论与解决实际问题的能力。本书具有以下特点:

1. 内容的完整性

全书分为主教材和光盘两部分。光盘内容包括习题解答、实验、试题库以及试卷样本及参考答案、PPT 教学课件。

2. 内容的针对性

本书根据学生思维以及学习方式,采用新的编写方式,主要为问题回答式,即因为、所以的逻辑推理方式。

3. 内容的新颖性

采用新的教学研究结果,如名词、概念、性能、特点清晰化(如磁场、电感、极距、电角度等),绕组排列技术的原则等。

4. 内容的实用性

本书附带配套光盘,实验部分方便学生实验中理论联系实践;习题解答部分方便学生自学;试题库以及试卷样本及参考答案部分不仅方便学生复习考试,而且方便教师、特别是年轻教师教学。

本书由杨天明任主编,魏增菊任副主编。张炜编写绪论及第 9 章;张焯编写第 1、4 章;李艳编写第 2、8 章;吴庆东编写第 5、10 章;孙志辉编写附录;余如军编写实验及试卷参考样本;魏增菊编写第 3、7 章及习题解答;杨天明编写第 9 章、试题库并且制作了多媒体课件。全书由沈阳工程学院衣丽葵主审。

由于编者水平所限,书中的缺点、错误以及疏漏等不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2012 年 12 月

目 录

绪论	1	1.4 直流电机的磁场、电动势及转矩	26
0.1 电机的概念	1	1.4.1 直流电机的磁场	26
0.1.1 电能的应用	1	1.4.2 电枢绕组的感应电动势	30
0.1.2 电机的概念	1	1.4.3 电枢绕组的电磁转矩	31
0.1.3 电机的分类	1	1.5 直流电机的换向	33
0.2 电机及电力拖动的发展概况	1	1.5.1 换向的过程	33
0.2.1 电机的发展概况	2	1.5.2 影响换向的因素	34
0.2.2 电力拖动的发展概况	3	1.5.3 改善换向的方法	35
0.3 本课程的性质、任务、内容、要求与特点	4	本章小结	37
0.3.1 本课程的性质	4	思考题与习题	38
0.3.2 本课程的任务	4	第2章 直流电机的运行原理	39
0.3.3 本课程的内容	4	2.1 电力拖动系统的基本概念	39
0.3.4 本课程的要求	4	2.1.1 电力拖动系统的运动方程式	39
0.3.5 本课程的特点	4	2.1.2 生产机械的负载转矩特性	40
0.4 本书常用的一些电磁理论基础知识	5	2.2 直流电动机的基本平衡方程式	42
0.4.1 磁场的概念	5	2.2.1 电压平衡方程式	42
0.4.2 电磁场的基本定律	8	2.2.2 功率平衡方程式	43
第1章 直流电机的基本原理	12	2.2.3 转矩平衡方程式	45
1.1 直流电机的工作原理	12	2.3 直流电动机的工作特性	45
1.1.1 直流电动机的工作原理	13	2.3.1 转速特性	45
1.1.2 直流发电机的工作原理	13	2.3.2 转矩特性	46
1.1.3 直流电机的可逆原理	14	2.3.3 效率特性	46
1.2 直流电机的结构和额定值	14	2.4 直流电动机的机械特性	47
1.2.1 直流电机的结构	14	2.4.1 机械特性方程式	47
1.2.2 直流电机的额定值	18	2.4.2 固有机械特性	47
1.2.3 直流电机的励磁方式	18	2.4.3 人为机械特性	48
1.3 直流电机的电枢绕组	19	2.4.4 机械特性的计算与绘制	50
1.3.1 电枢绕组元件与节距	19	2.4.5 电力拖动系统稳定运行的条件	51
1.3.2 单叠绕组	22	2.5 串励直流电动机	52
1.3.3 单波绕组	24	2.5.1 串励直流电动机的接线与	

特点	52	配合	81
2.5.2 串励直流电动机的工作特性	53	3.4 他励直流电动机的制动	83
2.5.3 串励直流电动机的机械特性	54	3.4.1 制动的分类	83
2.6 直流发电机	55	3.4.2 能耗制动	84
2.6.1 他励直流发电机	55	3.4.3 反接制动	86
2.6.2 他励直流发电机的特性	55	3.4.4 回馈制动	89
2.6.3 并励直流发电机	57	本章小结	91
2.6.4 并励直流发电机的负载运行	59	思考题与习题	92
2.7 电机放大机	60	第4章 单相变压器	94
2.7.1 电机放大机的工作原理	60	4.1 变压器的结构与原理	94
2.7.2 电机放大机的结构	60	4.1.1 变压器的应用及分类	94
2.7.3 电机放大机的特性	62	4.1.2 单相变压器的工作原理	95
本章小结	63	4.1.3 变压器的结构	96
思考题与习题	63	4.1.4 变压器的型号和额定值(铭牌数据)	97
第3章 直流电动机的过渡过程	65	4.2 单相变压器的空载运行	98
3.1 电力拖动系统的过渡过程	65	4.2.1 空载运行时的物理状况	98
3.1.1 电力拖动系统动态分析的假设条件	65	4.2.2 空载运行等效电路	101
3.1.2 电力拖动系统转速的动态方程	66	4.3 单相变压器的负载运行	102
3.1.3 电力拖动系统转矩的动态方程	67	4.3.1 磁动势平衡方程式	102
3.1.4 过渡过程时间的计算	67	4.3.2 电压平衡方程式	103
3.2 直流电动机的起动	67	4.3.3 等效电路的分析	104
3.2.1 直流电动机起动的基本要求	67	4.3.4 单相变压器的相量图	106
3.2.2 电枢回路串电阻起动	69	4.4 变压器的运行特性	106
3.2.3 降低电枢电压的降压起动	72	4.4.1 变压器的外特性	107
3.2.4 直流电动机起动的过渡过程	73	4.4.2 效率特性	108
3.3 直流电动机的调速	75	4.5 标么值	109
3.3.1 调速的概念	75	4.5.1 标么值的定义	109
3.3.2 调速指标	76	4.5.2 标么值的应用特点	109
3.3.3 他励直流电动机的调速方法及其调速性能	78	4.6 变压器的参数测定	110
3.3.4 调速方式与负载类型的		4.6.1 空载试验	110
		4.6.2 短路试验	111
		本章小结	112
		思考题与习题	112
		第5章 三相变压器及其他用途变压器	114
		5.1 三相变压器的联结组	114
		5.1.1 三相变压器的电路系统——	

联结组	114	6.4.3 一相绕组的基波感应电动势	164
5.1.2 三相变压器的磁路系统	118	6.4.4 定子绕组的谐波电动势	165
5.1.3 三相变压器磁路系统对电动势 波形的影响	119	本章小结	165
5.2 三相变压器的并联运行	120	思考题与习题	166
5.2.1 变压器并联运行的意义	120	第7章 三相异步电动机的运行	
5.2.2 变压器并联运行的条件	120	原理	167
5.3 其他用途的变压器	122	7.1 三相异步电动机运行时的电磁	
5.3.1 自耦变压器	122	关系	167
5.3.2 仪用互感器	124	7.1.1 三相异步电动机空载运行时的 物理情况	167
5.3.3 电焊机变压器	125	7.1.2 三相异步电动机负载运行时的 物理情况	168
本章小结	127	7.2 三相异步电动机的等效电路及	
思考题与习题	128	相量图	174
第6章 三相异步电动机的基本		7.2.1 三相异步电动机定、转子电路及 电压平衡方程	174
原理	129	7.2.2 等效电路的等效分析	175
6.1 三相异步电动机的工作原理与		7.2.3 异步电动机的相量图	180
结构	129	7.3 三相异步电动机的功率、转矩平衡	
6.1.1 三相异步电动机的工作 原理	129	方程	181
6.1.2 交流电动机中旋转速度的 问题	132	7.3.1 功率平衡方程	181
6.1.3 三相异步电动机的基本 原理	134	7.3.2 转矩平衡方程	183
6.1.4 三相异步电动机的结构	137	7.4 三相异步电动机的机械特性	183
6.1.5 三相异步电动机的铭牌 数据	140	7.4.1 电磁转矩公式	183
6.2 三相异步电动机的绕组	141	7.4.2 三相异步电动机的机械 特性	187
6.2.1 三相异步电动机绕组的一些基本 知识和基本量	141	7.4.3 三相异步电动机的固有机 械特性	188
6.2.2 三相异步电动机绕组排列的 基本原则	143	7.4.4 三相异步电动机的人为机 械特性	189
6.3 三相异步电动机的定子磁动势	146	7.5 三相异步电动机的工作特性和参数	
6.3.1 单相绕组的磁动势——脉振 磁动势	147	测定	191
6.3.2 三相绕组基波合成磁动势—— 旋转磁动势	157	7.5.1 三相异步电动机的工作 特性	191
6.4 交流电动机电枢绕组的感应电动势 ..	161	7.5.2 三相异步电动机的参数 测定	192
6.4.1 线圈组的感应电动势	161	本章小结	194
6.4.2 线圈组的基波感应电动势	163	思考题与习题	195
		第8章 三相异步电动机的过渡	

过程	196	9.3.4 同步电机的励磁方式	238
8.1 三相异步电动机的起动	196	9.3.5 同步电机的运行分析	240
8.1.1 三相异步电动机起动性能的 要求	196	9.3.6 同步电动机的功角特性和 矩角特性	241
8.1.2 异步电动机起动电流与起动 转矩的关系	196	9.3.7 同步电动机的功率因数调节	243
8.2 三相笼型异步电动机的起动	197	9.3.8 同步电动机的起动	245
8.2.1 直接起动	197	9.3.9 同步调相机	247
8.2.2 定子绕组降压起动	197	9.4 无换向器电动机——自控式同步 电动机	248
8.2.3 转子深槽型和双笼型异步 电动机	201	9.4.1 无换向器电动机的分类	248
8.3 三相绕线型异步电动机的起动	202	9.4.2 无换向器电动机的工作 原理	249
8.3.1 转子回路串接电阻器起动	203	9.4.3 无换向器电动机的调速原理	249
8.3.2 转子串接频敏变阻器起动	204	9.4.4 无换向器电动机的特点	251
8.4 三相异步电动机的调速	205	9.5 开关磁阻电动机	252
8.4.1 变极调速	205	9.6 电动机的选择	253
8.4.2 变频调速	208	9.6.1 电动机的种类、形式、额定电压与 额定转速的选择	253
8.4.3 改变转差率调速	210	9.6.2 电动机的发热与冷却	254
8.5 三相异步电动机的制动	216	9.6.3 电动机的工作方式	255
8.5.1 三相异步电动机的能耗制动	216	9.6.4 额定功率的选择	256
8.5.2 三相异步电动机的反接制动	220	9.7 电动机的维护及故障	259
本章小结	225	9.7.1 起动前的准备	259
思考题与习题	225	9.7.2 起动时的注意事项	260
第9章 其他交流电机及电动机的 选择	227	9.7.3 运行中的监视	260
9.1 单相异步电动机	227	9.7.4 电动机的定期维修	260
9.1.1 单相单绕组异步电动机的基本 工作原理	227	9.7.5 常见故障及扫除方法	261
9.1.2 单相异步电动机的基本工作 原理	228	本章小结	262
9.1.3 单相异步电动机的绕组	232	思考题与习题	263
9.2 移相器与感应调压器	233	第10章 控制电机	264
9.2.1 移相器	233	10.1 伺服电动机	264
9.2.2 感应调压器	235	10.1.1 直流伺服电动机	264
9.3 同步电机	236	10.1.2 交流伺服电动机	266
9.3.1 同步电机的结构	236	10.2 步进电动机	270
9.3.2 同步电机的分类	237	10.2.1 步进电动机的分类	270
9.3.3 同步电机的基本工作原理	238	10.2.2 反应式步进电动机的结构和 工作原理	271
		10.2.3 反应式步进电动机的特性	274

10.2.4 步进电动机的特点及应用	276	10.6 旋转变压器	289
10.3 测速发电机	277	10.6.1 旋转变压器的分类及结构	289
10.3.1 直流测速发电机	277	10.6.2 正、余弦旋转变压器的工作 原理	289
10.3.2 交流测速发电机	278	10.6.3 正、余弦旋转变压器的 应用	293
10.4 直线电动机	281	10.7 感应同步器	293
10.4.1 直线异步电动机的结构 形式	281	10.7.1 圆盘式感应同步器	294
10.4.2 直线异步电动机的工作 原理	283	10.7.2 直线式感应同步器	295
10.4.3 直线异步电动机的应用	284	10.7.3 感应同步器的应用	295
10.5 自整角机	284	本章小结	295
10.5.1 力矩式自整角机	284	思考题与习题	296
10.5.2 控制式自整角机	287	附录	298
10.5.3 自整角机的应用	288	参考文献	330

绪 论

0.1 电机的概念

0.1.1 电能的应用

电能是一种应用最为广泛的能源。电能与其他能源相比,具有突出的优点。首先,电能的生产与转换比较经济。目前,我国的公共电网主要是由众多的火力发电厂与水力发电站并网运行组成的。其次,电能的传输与分配比较容易,它可以远距离输送,可把某地生产的电能输送到几千千米之外的地区去。最后,电能的使用与控制也比较方便,易于实现自动化。因此,在现代社会中,电能的应用已遍及各行各业中。

0.1.2 电机的概念

所谓电机,是指那些利用电磁感应原理实现机械能与电能(或信号)的传递与变换的电磁机械装置。这主要是在电能的生产、转换、传输、分配、使用与控制等方面,都必须通过能够进行能量(或信号)传递与变换的电磁机械装置,这些电磁机械装置被广义地称为电机。

0.1.3 电机的分类

电机的分类方法很多,这里仅从功能、电流类型及原理方面分类。

1. 按电机的功能分

(1) 发电机——把机械能转变成电能;

(2) 电动机——把电能转变成机械能;

(3) 变压器、变频器、变流机、移相器——分别用于改变电压、频率、电流及相位,即把一种类型的电能转变成另一种类型的电能;

(4) 控制电机——应用于各类自动控制系统中的控制元件。

以上各种电机中,有些是静止的,如变压器;有些是旋转的,如发电机与电动机。发电机与电动机只是电机的两种不同的运行方式,从能量转换的观点来看,二者是可逆的。

2. 按电流的类型及工作原理的某些差异分

直流电机、变压器、交流异步电机、交流同步电机及各种具有专门用途的控制电机等。

0.2 电机及电力拖动的发展概况

19世纪60~70年代的第二次工业技术革命,是以电力的广泛应用为显著特点的。从此,人

类社会由蒸汽机时代步入了电气化时代。

0.2.1 电机的发展概况

1. 电机的产生

1831年,法拉第发现的电磁感应现象为研制各种电机奠定了重要的理论基础。1833年,楞次建立了楞次定律。其后他致力于电机理论的研究并阐明了电机的可逆性原理。1834年,雅可比制造出世界上第一台直流电动机,从而证明了实际应用电能的可能性。1838年,用直流电动机拖动电动轮船试验成功。1871年,凡·麦尔准发明了交流发电机。1882年法国学者德普勒发明了远距离送电的方法。同年,美国著名发明家爱迪生创建了美国第一个火力发电站,把输电线结成网络,从此电能作为一种新能源而广泛应用。1885年,费那里斯发现了两相电流能产生旋转磁场。1886年,研制成功了两相感应电动机模型。

19世纪末,发明了三相感应电动机、三相同步发电机、三相变压器以及三相输电方式。各种电机初步定型,电机设计理论和电机设计计算初步建立,电机在工业上得到了初步应用。

2. 电机的发展

随着科技的进步和经济发展的需要,对电机也提出了更高的要求,如性能良好、运行可靠、单位容量的质量轻、体积小等。另外,随着自动控制系统的发展要求,在旋转电机的理论上,派生出多种精度高、响应快的控制电机,已成为电机学科的一个独立分支。

(1) 大容量

电机制造向着大型、巨型发展,如三峡发电机组等。

(2) 普通容量的中小型电机

向多用途、多品种方向发展,向高效节能方向发展。各种响应快速、起停快速的特种电机,在各种复杂的计算机控制系统和无人工厂中应用十分广泛,实现了比人的手脚更复杂而精巧的运动。电气化、信息化的要求使得交流变频调速系统及变频电机、大功率无刷直流电机、永磁同步无刷电机等得到了很大发展。稀土永磁电机和无轴承电机也是电机技术发展的新动向。

(3) 微电机

随着新兴行业的发展,微电机也成为了电机行业发展的亮点,特别是在机器人、医疗器械、仿生、自动化领域里得到了快速发展。

由于交流电动机较之直流电动机具有结构简单、价格便宜、维护方便、惯性小等一系列优点,而且单机容量可以做得很大,电压等级可以做得很高,可以实现高速拖动等,所以,人们一直在致力研究性能更高的交流调速系统。

3. 我国的电机发展

我国的电机生产始于1917年。目前已形成了比较完整的产业体系,品种、规格、性能、产量都能满足国民经济发展的需要,一些产品已经达到世界先进水平。

特别是近年来我国在发电、电力机车、电动汽车、电动自行车及生产自动化等方面的产业调整,大型直流电动机、异步电动机、同步电动机、控制电机以及新系列电机方面有了长足的发展。

0.2.2 电力拖动的发展概况

1. 电力拖动及其组成

(1) 电力拖动(或称为电气传动)

由电动机拖动生产机械的运转的拖动。

(2) 电力拖动系统

一般由控制设备、电动机、传动机构、生产机械和电源五部分组成。它们之间的关系如图 0.1 所示。

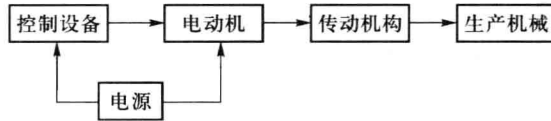


图 0.1 电力拖动系统的组成

2. 电力拖动的发展

(1) 成组拖动

电力拖动代替蒸气或水力拖动之初,电力拖动的方式是成组拖动,就是由一台电动机拖动一组生产机械,从电动机到各个生产机械的能量传递以及各个生产机械之间的能量分配完全用机械的方法,靠“天轴”以及机械传动系统来实现,车间里有大量的“天轴”、长皮带和皮带轮等。这种传动方式生产率低下,灰尘大,劳动条件和卫生条件差,且容易出事故。另外,电动机发生故障,则成组拖动的所有生产机械都将停车,生产将可能停滞。显然,这是一种落后的电力拖动方式。

(2) 单电机拖动系统

20 世纪 20 年代以来,生产机械上广泛采用一种“单电机拖动系统”,即一台生产机械用一台单独的电动机拖动,简化了机械结构,且易于实现生产机械运转的全部自动化。但是,由于是一台电动机拖动具有多个工作机构的生产机械,因此需要负责能量传递的机械传动机构。

(3) 多电动机拖动系统

20 世纪 30 年代起,广泛采用了“多电动机拖动系统”,即每个工作机构由单独的电动机拖动,因而生产机械的机械结构可以大大简化,提高了机械机构的可靠性。

3. 电力拖动系统发展的趋势——自动化

随着生产的发展和科技水平的提高,对电力拖动提出了更高的要求,如要求提高加工精度与工作速度,要求快速启动、制动及反转,实现在大范围内调速以及整个生产过程自动化等。这些都必须要自动控制系统,以组成自动化的电力拖动系统。

(1) 有触点控制系统

最早的电力拖动控制系统是继电器-接触器自动控制系统,属于有触点控制系统。

(2) 无触点控制系统

电力电子技术、微型计算机以及检测与传感技术的发展,使得无触点控制系统得到了广泛应用。自动化成套标准控制单元,控制装置集成化、小型化、微型化,使得设备的可靠性进一步提高,维护更加简便,许多设备可做到自动运行,不需要监视和维护。

综上所述,电力拖动技术发展至今,具有许多其他拖动方式无法比拟的优点。特别是它启动、制动、反转和调速的控制简单、方便、快速且效率高;电机的类型多,且具有各种不同的运行特性来满足各种类型生产机械的要求;整个系统各参数的检测和信号的变换与传送方便,易于实现最优控制。因此,电力拖动已成为国民经济电气自动化的基础。

0.3 本课程的性质、任务、内容、要求与特点

0.3.1 本课程的性质

《电机拖动》是电气工程及其自动化专业、自动化专业的一门专业基础课,也可以作为其他专业的专业课程。

0.3.2 本课程的任务

了解常用交流电机、直流电机、变压器和控制电机的基本结构与工作原理。掌握电机稳态运行时的分析方法和运行性能。理解电机能量转换关系以及稳态运行时各种参数的物理意义,并能熟练应用等效电路和相量图。通过实验,掌握电机的基本实验方法和电机使用的基本技能。为学习《工厂电气控制设备》、《信号与系统》、《电力电子技术》等课程打下坚实的基础。

0.3.3 本课程的内容

《电机与拖动》是分析和解决电机与电力拖动系统的基本问题,主要包括直流电机及其拖动、变压器、异步电机及其拖动、同步电动机、控制电机和电动机容量的选择等内容。

0.3.4 本课程的要求

1. 了解磁场的基本理论知识。
2. 掌握常用的交、直流电机及变压器的基本原理(电磁关系、能量关系)。
3. 掌握电动机的机械特性以及各种运行状态的基本原理。
4. 掌握电力拖动系统中电动机的调速方法、调速原理和技术经济指标。
5. 掌握电机与电力拖动系统的基本实验方法与技能,并具有熟练的运算能力。
6. 掌握电力拖动系统中电动机容量的选择。
7. 掌握控制电机的工作原理、特性及用途。

0.3.5 本课程的特点

《电机拖动》是理论性强、实践性也强的一门课程。分析电机与电力拖动的工作原理要用到电学、磁学和动力学的基础理论,既要有时间概念,又要有空间概念,所以理论性较强;而用理论分析各种电机和电力拖动的实际问题时,必须结合电机的具体结构、采用工程观点和理论联系实际的工程分析方法,除要掌握基本理论以外,还应注意培养实验操作技能和计算能力,所以实践性也较强。因此,学习本门课程应该特别注意理论联系实际。

0.4 本书常用的一些电磁理论基础知识

0.4.1 磁场的概念

1. 磁场

所谓磁场,实质上就是电流周围的效应场。由于电子环绕原子核运动,实际上就是电流,也可以称之为原子内部的电流或原子流,在其周围存在着一种效应,另外分子本身自转运动而形成分子电流,其周围也存在着一种相同的效应,称为分子磁铁,这种物理现象其实就是磁场。每个分子相当于一个基本的小磁铁,称之为分子流。在物质的内部还分成许多小区域,由于分子间有一种特殊的作用力而使每一区域内的分子磁铁都排列整齐,显示磁性。这些小区域称为磁畴。

在没有外磁场的作用时,各个磁畴排列混乱,磁场相互抵消,对外就显示不出磁性,如图 0.2(a)所示。在外界磁场作用下(例如给绕在铁心柱上的线圈通入电流,产生磁场的作用下),其中的磁畴就顺外磁场方向转向,显示出磁性;这一过程称为磁化。磁化过程其实就是电能转化为磁能的一个过程,即磁化线圈内的电能通过磁化导磁材料,转化为导磁材料内部的磁能,而使导磁材料显示出磁性形成磁铁,如图 0.2(b)所示。总的来说,磁场是由导体中的电流(移动的电荷)在其周围产生的,实质上就是磁畴有规则地排列所产生的一些现象。

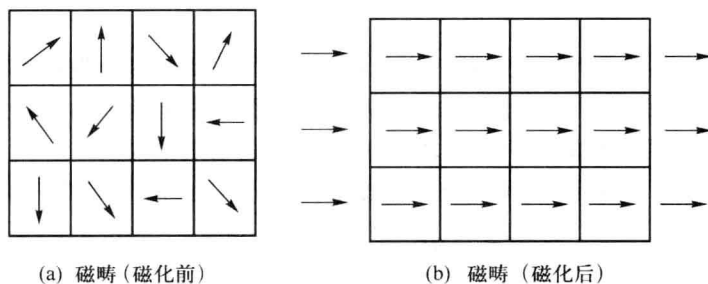


图 0.2 磁性物质的磁化

无论是直流电动机,还是交流电动机,都是在磁场和电流的共同作用下工作的,二者缺一不可。在直流电动机中,磁场是恒定不变的;在交流电动机中,磁场是交变的、不固定的,即是旋转的。磁场的形成有两种基本形式,其一是电磁场,由通电的线圈在其周围产生;其二是永久磁铁形成的磁场,实际上就是电流周围的效应在磁铁中滞留的时间较长,所以说永久磁铁的磁场不“永久”。

2. 磁动势(磁通势) F

类似电路中电动势是产生电流的源泉,磁动势是产生磁场的源泉。与电动势为相量不同的是,磁动势是一个矢量。

凡是电流均会在其周围产生磁场,这就是电流的磁效应,即所谓“电生磁”,也就是说,电流是产生磁场的源泉。例如,电流通过一根直的导体,在导体周围产生的磁场用磁力线描述时,磁力线是以导体为轴线的同心圆,磁力线的方向可根据电流的方向由右手螺旋定则确定,如图

0.3(a)所示,则磁动势 $F = I$,单位为安培(A),这在实际分析讨论问题中很容易与电流搞混,不利于磁动势的问题分析。

实际中假设有 N 根导体,且其电流均为 I ,则磁动势可表示为

$$F = \sum I = IN \quad (0.1)$$

单位为安培·匝数。

如果电流通过的是绕成线圈的导体,则产生的磁场的磁力线方向仍可用右手螺旋定则确定,这时,使弯曲的四指方向与电流方向一致,则大拇指的方向即为线圈内磁力线的方向,如图0.3(b)所示。

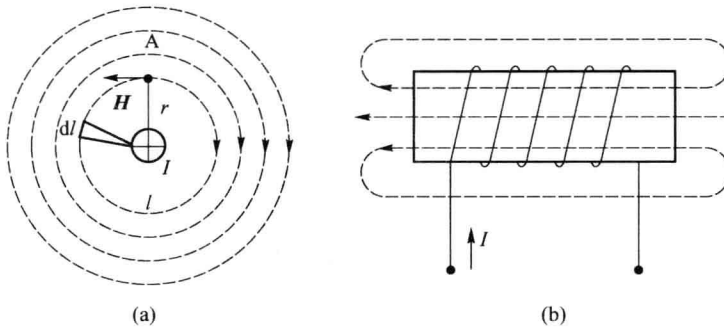


图 0.3 电流方向与磁力线方向的关系

3. 磁场强度 H

磁场强度是表征距离磁源即磁动势一定位置的地方,磁动势影响强度的一个物理量。如图0.3(a)中的A点,磁场强度是一个矢量,在以磁源为圆心、距离为 r 的各点组成的闭合磁力线路径 l 上,各点磁场强度的数值是相等的,但方向为各点的切线方向。

类似电路中的基尔霍夫定律,闭合的磁力线路径上所消耗的磁压降等于其磁动势,则

$$F = IN = \oint_l H dl = 2\pi r H \quad (0.2)$$

$$H = \frac{F}{2\pi r} = \frac{IN}{2\pi r} \quad (0.3)$$

式(0.3)说明磁场强度与磁动势成正比,与磁源距离 r 成反比。

4. 磁导率 μ

由于物质自身性质的不同,物质内部磁畴的密度大小也不同,所以,就此区分出铁磁性材料和非铁磁性材料。物质内部磁畴密度大的称为铁磁性材料,其磁导率大;磁畴密度小的称为非铁磁性材料,其磁导率小。铁磁性材料主要是指铁、镍、钴及其合金,铁磁性材料易被磁化,形成磁铁,如收音机内小喇叭上的磁铁。

铁磁性材料又可分为硬磁材料和软磁材料;硬磁材料用于永久磁铁,软磁材料广泛用于电机铁心和各种电磁铁。

磁导率 μ 是反映导磁介质导磁性能的物理量,磁导率 μ 越大的介质,其导磁性能越好。磁导率的单位是 H/m 。真空中的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$,其他导磁介质的磁导率 μ 通常用 μ_0 的倍数来表示,即

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (0.4)$$

式中, $\mu_r = \mu/\mu_0$ 为导磁介质的相对磁导率。

铁磁性材料的相对磁导率 $\mu_r = 2\,000 \sim 6\,000$, 但不是常数, 非铁磁性材料的相对磁导率 $\mu_r \approx 1$, 且为常数。磁场强度的单位为 A/m, 工程上常沿用 A/cm 为单位。

5. 磁感应强度(磁通密度) B

磁感应强度是表征距离磁源即磁动势一定位置的地方, 磁动势感应能力强弱的一个物理量。磁感应强度是一个矢量。

通过实验可知, 磁场中某点的感应强度不仅与其磁场强度成正比关系, 而且还与此点的介质(材料的导磁系数) μ 成正比关系, 即

$$B = \mu H \quad (0.5)$$

磁感应强度 B 的单位为特斯拉(T), 工程上常沿用高斯(Gs)为单位, 其换算关系为 $1\text{T} = 10^4 \text{Gs}$ 。

6. 磁通 Φ

(1) 磁通

垂直穿过某一截面(面积为 S)的磁力线的数目。如图 0.4 所示, 在量值上有如下式:

$$\Phi = \int_S B \cdot dS \quad (0.6)$$

设磁场均匀, 且磁场与截面垂直, 则上式可简化为

$$\Phi = BS \quad (0.7)$$

磁通的单位为韦伯(Wb)。

由式(0.7)可知, 磁场均匀, 且磁场与截面垂直时, 磁感应强度的大小可以用下式表示:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (0.8)$$

因此, 磁感应强度又称为磁通密度。

(2) 磁链

垂直穿过 N 匝线圈的磁力线称为磁链, 用 ψ 表示, 则

$$\psi = N\Phi \quad (0.9)$$

7. 磁阻 R_m

磁力线通过的路径称为磁路, 如图 0.5 所示。电路中有电阻阻碍电流, 磁路中也有磁阻阻碍磁力线。所谓的磁阻, 就是磁力线通过磁路时所遇到的阻碍。磁阻 R_m 与磁路的长度 l 成正比, 与磁路的磁导率 μ 成反比, 并与磁路的截面积 S 成反比, 即

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (0.10)$$

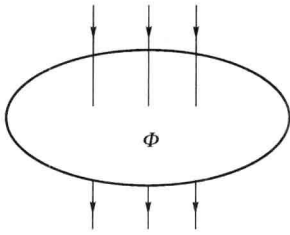


图 0.4 垂直穿过截面 S 上的磁力线

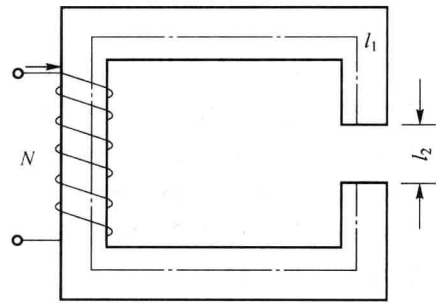


图 0.5 磁路示意图

0.4.2 电磁场的基本定律

1. 全电流定律

磁场中沿任一闭合回路 l 对磁场强度 H 的线积分等于该闭合回路所包围的所有导体电流的代数和。其数学表达式为

$$\oint_l H dl = \sum I_i \quad (0.11)$$

这就是全电流定律,当导体电流的方向与积分路径的方向符合右手螺旋定则时为正,如图 0.6 中的 I_1 和 I_3 ;反之为负,如图 0.6 中的 I_2 。

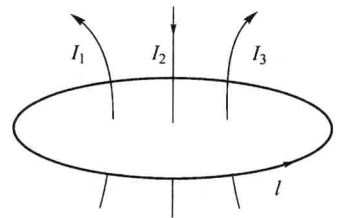


图 0.6 全电流定律

2. 磁路的欧姆定律

如图 0.5 所示,工程上将全电流定律用于磁路时,通常把磁力线分成若干段,使每一段的磁场强度 H 为常数,则线积分

$\oint_l H dl$ 可用式 $\sum H_k l_k$ 来代替,全电流定律可以表示为

$$\sum H_k l_k = \sum I_i \quad (0.12)$$

式中, H_k 为第 k 段的磁场强度; l_k 为第 k 段的磁路长度。

对图 0.5 所示的磁路, $\sum H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2$, $\sum I_i = IN$, N 为线圈匝数, I 为线圈中的电流,则有

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 = NI \quad (0.13)$$

将 $H = \frac{B}{\mu}$ 和 $B = \frac{\Phi}{S}$ 代入式(0.13), 即得

$$\frac{\Phi}{\mu_1 S_1} l_1 + \frac{\Phi}{\mu_2 S_2} l_2 = \Phi R_{m1} + \Phi R_{m2} = NI = F \quad (0.14)$$

式中, $R_{m1} = \frac{l_1}{\mu_1 S_1}$, $R_{m2} = \frac{l_2}{\mu_2 S_2}$ 分别为第 1 段、第 2 段磁路的磁阻; ΦR_{m1} 、 ΦR_{m2} 分别为第 1 段、第 2 段磁路的磁压降。

一般情况下,磁路分为 n 段时,则有

$$\Phi R_{m1} + \Phi R_{m2} + \dots + \Phi R_{mn} = F \quad (0.15)$$