



普通高等教育“十二五”规划教材

电机学

◎ 主编 陈亚爱 周京华

DIANJIXUE



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

013043388

TM3
108

普通高等教育“十二五”规划教材

电 机 学

主编 陈亚爱 周京华
参编 梅 杨 温春雪
主审 李正熙



机械工业出版社



北航

C1650811

TM 3

108

883330310

本书在系统论述了传统电机方面的基本理论基础上, 新增了新能源发电机的内容, 主要内容包括变压器、交流电机、直流电机、风力发电机等的基本结构、工作原理、不同运行状态下的电磁物理过程和能量关系以及运行特性等基础知识。本书内容丰富、新颖, 每章均有教学基本要求、重点、典型例题, 章后附有思考题与习题。作为一本工程技术人员的参考书, 本书在附录中给出了部分变压器以及交、直流电动机等主要技术数据, 供读者选择电机时参考。

本书既可作为高等院校能源工程及其自动化、电气工程及其自动化、自动化、机械电子、机械制造及其自动化等相关专业的本科生、专科生以及成人高校学生的教材, 也可作学时较少的“电机学”课程的教材, 书中注有“*”的内容, 可根据各校的教学要求及学时数多少进行取舍, 同时本书也可供相关专业的研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学/陈亚爱, 周京华主编. —北京: 机械工业出版社, 2013.6

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-42180-1

I. ①电… II. ①陈…②周… 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 (2013) 第 075744 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: 于苏华 责任编辑: 于苏华 王寅生

版式设计: 霍永明 责任校对: 樊钟英

封面设计: 张 静 责任印制: 张 楠

唐山丰电印务有限公司印刷

2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14.75 印张 · 365 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-42180-1

定价: 29.80 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

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

“电机学”是电气工程、自动化类专业的重要专业基础课之一，该课程在整个专业培养计划的课程体系中起承上启下的作用。课程的教学目的是通过本课程学习，使学生掌握常用的交、直流电机及变压器的基本结构、工作原理、运行性能等知识，为后续专业基础课和专业课的学习准备必要的基础知识，提高学生分析、解决实际问题的能力，也为从事自动化工程技术工作和科学研究奠定初步基础。

近年来，为保障能源安全和保护环境，各国都在大力发展新能源和可再生能源。随着风力发电技术日趋成熟，世界上很多国家都在大规模发展风电，并将风电作为满足今后一、二十年新增电力需求的重点，增长速度大大高于传统电源。我国也不例外，风力发电已成为重要的新能源发电方式，正在有序地推进西北等风能资源丰富地区的风电建设，稳步发展海上风电，提高电力系统消纳风电能力。据 2011 年统计，我国风电并网装机容量 4784 万 kW，居世界第一。到 2015 年，中国风电装机容量将突破 1 亿 kW，其中海上风电装机容量将达 500 万 kW。在风力发电系统中风力发电机是其关键设备，其控制技术是保证风电健康发展的重要技术内容。因此，各种风力发电机组的结构、工作原理及相关控制技术是能源工程及其自动化等相关电类专业学生应当具备的基本知识。

本书在介绍传统电机的基础上，新增了新能源发电机的内容，如风力发电机结构、工作原理、各种风力发电机组成的风电系统等，为能源工程及自动化专业的后续专业课打下基础。

本书不仅结合能源工程及其自动化、电气工程及其自动化、自动化等专业特点，以电力拖动系统中应用最广泛的电机为重点，为更好地适应新能源发电的趋势，增加了新能源电机——风力发电机的内容，从使用的角度介绍交、直流电机、变压器、风力发电机等设备的基本工作原理、基本结构、主要工作特性等，同时适量增加电机领域的新技术成果内容，以适应“十二五”时期能源工程、电气工程、自动化等专业教学要求。

本书第 1、2、3 章以及附录由陈亚爱教授编写，第 4 章由梅杨副教授编写，第 5 章由周京华副教授编写，第 6 章由温春雪博士编写，绪论由陈亚爱教授与温春雪博士共同编写，全书的插图由陈亚爱教授、丁宝利副研究员等绘制完成，李正熙教授主审了该教材。

在本书构思过程中，得到北方工业大学机电工程学院的大力支持和帮助；本书的编写及出版受到 2012 年北京市电气工程优秀教学团队、2009 年北京市科技新星计划、2012 年北京市优秀人才培养计划以及北方工业大学北京市变频技术研究中心的资助，在此表示衷心的感谢。

在本书编写过程中，参考的大量文献资料已在书后的参考文献中列出，在此谨对所有参考文献的作者致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中一定有不少疏漏和不妥之处，敬请前辈、同仁们以及广大读者见谅并不吝指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
0.1 电机的分类和应用	1
0.1.1 分类	1
0.1.2 应用	1
0.2 我国电机工业简介	2
0.3 我国风电概况	2
0.4 电机中的铁磁材料及其特性	3
0.4.1 磁化曲线	4
0.4.2 磁滞回线	4
0.4.3 交流磁路中的铁心损耗	4
0.5 常用基本电磁定律	5
0.5.1 电路定律	5
0.5.2 电磁感应定律	6
0.5.3 全电流定律(安培环路定律)	6
0.5.4 电磁力定律	6
0.5.5 磁路定律	6
0.5.6 电路与磁路的比较	7
0.6 电机的发热与温升	7
0.6.1 电机的发热与冷却	7
0.6.2 电动机的工作制	8
0.7 教材内容、课程性质、教学任务及学习方法建议	9
0.7.1 教材内容	9
0.7.2 课程性质	9
0.7.3 教学任务	9
0.7.4 学习方法建议	9
本章小结	10
思考题与习题	10
第1章 变压器	11
本章教学基本要求	11
本章重点	11
1.1 概述	11
1.1.1 变压器的基本工作原理	11
1.1.2 变压器的用途与分类	12
1.1.3 变压器的主要结构	13
1.1.4 变压器的铭牌数据和主要系列	13
1.2 单相变压器的空载运行	15

1.2.1	变压器空载运行时的磁场	15
1.2.2	变压器各电磁量的正方向	15
1.2.3	空载运行时电压、电动势与主磁通的关系	15
1.2.4	变压器的励磁电流	17
1.2.5	变压器空载运行时的相量图与等效电路	18
1.3	单相变压器的负载运行	19
1.3.1	负载运行时的磁动势平衡方程	20
1.3.2	负载运行时的基本方程	20
1.3.3	变压器的参数折算	21
1.3.4	折算后变压器的基本方程	22
1.3.5	等效电路	22
1.3.6	变压器相量图和功率关系	23
1.4	变压器参数的试验测定	28
1.4.1	变压器空载试验	28
1.4.2	变压器短路试验	29
1.5	标么值	32
1.6	变压器的运行特性	33
1.6.1	电压变化率和外特性	33
1.6.2	变压器效率和效率特性	34
1.7	三相变压器	35
1.7.1	三相变压器的磁路系统	35
1.7.2	三相变压器的绕组联结组标号	36
*1.7.3	试验确定绕组的极性和三相变压器的联结组标号	39
*1.7.4	三相变压器空载运行时的电动势波形	41
*1.8	其他用途的变压器	44
1.8.1	自耦变压器	44
1.8.2	互感器	46
*1.9	变压器的并联运行	47
1.9.1	电压比不等时的变压器并联运行	48
1.9.2	联结组标号不同时的变压器并联运行	48
1.9.3	短路阻抗标么值不等时的变压器并联运行	49
	本章小结	49
	思考题与习题	50
	第2章 交流电机基础	52
	本章教学基本要求	52
	本章重点	52
2.1	交流电机的基本工作原理和定子结构	52
2.1.1	三相同步电机的基本工作原理	52
2.1.2	三相异步电机的基本工作原理	53
2.1.3	交流电机的定子结构	53
2.2	旋转磁动势	54
2.2.1	单相脉振磁动势	54
2.2.2	三相绕组的合成旋转磁动势	57

2.2.3 两相绕组产生的旋转磁动势	57
2.3 交流绕组的感应电动势	59
2.3.1 一根导体的感应电动势	60
2.3.2 整距线匝的感应电动势	61
2.3.3 整距线圈的感应电动势	62
2.3.4 整距分布线圈的感应电动势	62
2.3.5 短距线圈的感应电动势	63
2.3.6 一相交流绕组的感应电动势	63
2.3.7 交流绕组的谐波感应电动势	63
本章小结	66
思考题与习题	66
第3章 异步电动机	68
本章教学基本要求	68
本章重点	68
3.1 三相异步电动机	68
3.1.1 基本结构和铭牌数据	68
3.1.2 三相异步电动机空载运行	71
3.1.3 三相异步电动机负载运行	75
3.1.4 三相异步电动机的电压方程和等效电路	81
3.1.5 三相异步电动机的功率和转矩方程	85
3.1.6 笼型转子的极数和相数	87
3.1.7 三相异步电动机的机械特性	88
3.1.8 三相异步电动机的工作特性及参数测定	93
3.2 其他常用异步电动机	96
3.2.1 单相异步电动机	96
3.2.2 直线电动机	100
本章小结	101
思考题与习题	102
第4章 同步电机	104
本章教学基本要求	104
本章重点	104
4.1 同步电机的分类、结构、励磁和铭牌数据	104
4.1.1 同步电机的基本结构和铭牌数据	104
4.1.2 同步电机的励磁方式	106
4.2 同步发电机	108
4.2.1 同步发电机的基本工作原理	109
4.2.2 同步发电机的空载运行	110
4.2.3 同步发电机的负载运行和电枢反应	111
4.2.4 同步发电机的基本方程和相量图	113
4.2.5 同步发电机的运行特性和电抗测试	116
4.2.6 同步发电机的功率与转矩	119
4.2.7 同步发电机的并联运行	121
4.3 同步电动机	126

4.3.1 同步电动机的基本工作原理	126
4.3.2 同步电动机的基本方程和相量图	126
4.3.3 同步电动机的功率和转矩方程	129
4.3.4 同步电动机的功角特性和矩角特性	130
4.3.5 同步电动机的励磁调节和 V 形曲线	132
4.3.6 同步电动机的起动	134
4.4 其他同步电机	135
4.4.1 永磁同步电机	135
4.4.2 同步补偿机	138
本章小结	139
思考题与习题	140
第5章 直流电机	141
本章教学基本要求	141
本章重点	141
5.1 直流电机的工作原理	141
5.1.1 直流电机的基本工作原理及主要结构	141
5.1.2 电枢绕组和直流电机模型	145
5.1.3 直流电机的铭牌数据和主要系列	146
5.2 直流电机的磁场	147
5.2.1 直流电机的励磁方式	147
5.2.2 直流电机的空载磁场	148
5.2.3 直流电机负载时的磁场	149
5.2.4 直流电机的电枢反应	151
5.2.5 直流电机的感应电动势和电磁转矩	152
5.3 直流电机的基本方程	153
5.3.1 电压方程	153
5.3.2 转矩方程	154
5.3.3 电磁功率和功率平衡方程	155
5.4 直流发电机的运行特性与试验测试	159
5.4.1 他励直流发电机的空载特性	159
5.4.2 他励直流发电机的外特性	159
5.4.3 并励直流发电机	160
5.5 直流电动机的工作特性与试验测试	161
5.5.1 他励(并励)直流电动机的工作特性	162
5.5.2 串励直流电动机的工作特性	163
5.6 直流电动机的机械特性	164
5.6.1 他励直流电动机的机械特性表达式	164
5.6.2 他励直流电动机的固有机机械特性	165
5.6.3 他励直流电动机的人为机械特性	166
*5.7 直流电机的换向	168
5.7.1 换向的物理过程	168
5.7.2 换向元件的感应电动势	169
5.7.3 改善换向的方法	169

本章小结	170
思考题与习题	171
第 6 章 风力发电机	173
本章教学基本要求	173
本章重点	173
6.1 风力发电基本理论	173
6.1.1 风能的计算	173
6.1.2 风机的功率	175
6.1.3 独立运行风力发电系统	177
6.1.4 并网运行风力发电系统	178
6.1.5 大型风力发电机的主流机型	181
6.1.6 小型风力发电机的主流机型	182
6.2 定速感应发电机	183
6.2.1 定速感应发电机的结构和工作原理	183
6.2.2 定速感应发电机的稳态特性	184
6.2.3 用于风力发电的定速感应发电机	186
6.2.4 定速感应发电机的建模	188
6.3 直驱式永磁同步发电机	192
6.3.1 永磁同步发电机的结构和工作原理	193
6.3.2 永磁同步发电机的气隙磁场和等效绕组	195
6.3.3 永磁同步发电机的基本方程和相量图	196
6.3.4 永磁同步发电机的工作特性和控制	198
6.4 双馈式交流励磁感应发电机	201
6.4.1 双馈式交流励磁感应发电机的结构和工作原理	201
6.4.2 双馈式交流励磁感应发电机的稳态特性	202
6.4.3 双馈式异步发电机的控制与特性	205
6.4.4 无刷双馈发电机	212
本章小结	213
思考题与习题	213
附录	215
附录 A 部分 S9 系列配电变压器的主要技术数据	215
附录 B 交流绕组连接规律举例	216
附录 C 交流绕组的分布系数和短距系数	218
附录 D 部分 Y3 系列三相异步电动机的技术数据	220
附录 E 生产机械的负载转矩特性	222
附录 F 小功率异步电动机的技术数据	223
附录 G 直流电机的电枢绕组	224
附录 H 部分 Z4 系列直流电动机的技术数据	226
参考文献	228

绪 论

0.1 电机的分类和应用

0.1.1 分类

电机是一种以电磁感应为基础的机电能量转换或信号转换的机械装置。电机的种类繁多,就能量转换而言,电机可分为电动机和发电机,电动机是将电能转换为机械能的装置,发电机则是将机械能转换为电能的装置。电机若按不同的功能又可分为动力设备类与控制电机两大类,其中动力设备类又分为旋转电机和变压器两类,图 0-1 所示为电机按功能分类示意图。

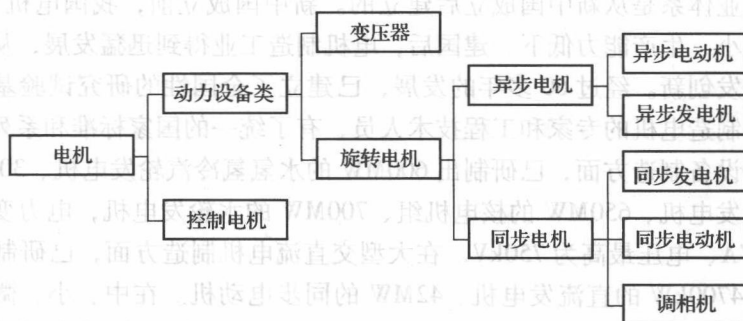


图 0-1 电机按功能分类示意图

近年来,可再生能源已成为实现能源多样化、社会可持续发展及应对气候变化的重要替代能源。同时,随着能源供需矛盾的日益突出,基于风能、太阳能等可再生能源的发电系统成为相关领域的研究热点。对新能源电机,即风力发电机的控制研究也逐步成为电类专业学生要了解的专业知识。为适应社会科技的发展,本教材将介绍风力发电机的相关知识,就新能源电机而言,典型的风力发电机主要分为定速感应发电机、直驱式永磁同步发电机、双馈式交流励磁感应发电机、无刷双馈式发电机、永磁直流发电机等,其分类示意如图 0-2 所示。

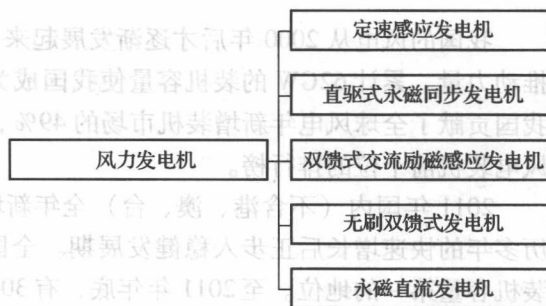


图 0-2 风力发电机分类示意图

0.1.2 应用

作为动力设备类电机其主要任务是能量转换,主要问题是解决如何提高能量转换的效率;控制电机其主要任务是完成控制信号的传递和转换,主要问题是解决如何提高可靠性和

精度等,而能量转换是次要的。因此,控制电机应具有高可靠性、高精度和快速响应等性能,并被广泛应用于各种现代化的自动控制系统中。

电能因其具有易于转换、传输、分配和控制等特点,已成为现代能源的主要形式,支撑着产业与生活。由电动机作为原动机拖动生产机械运转的拖动方式称为电力拖动或电气传动,在现代化生产中绝大多数生产机械都采用电力拖动。因此,与电能密切相关的电机被广泛应用于社会生产各领域和大众生活各方面。电机和电力拖动在国民经济中广泛的应用,起着重要作用。例如:常规电能由同步发电机生产;风电由风力发电机生产;高压输电由升压变压器将发电机发出的电压升高到输电电压再输送;降压用电由降压变压器将输来的高压电降为所需低电压,供给用电设备;生产机械的拖动由各种电动机或电力拖动系统实现;控制系统中的信号转换由各种控制电机完成。

0.2 我国电机工业简介

我国电机工业体系是从新中国成立后建立的。新中国成立前,我国电机工业极其落后,电机制造厂规模小、生产能力低下。建国后,电机制造工业得到迅猛发展,从初期的仿制到自行设计再到研发创新。经过 60 多年的发展,已建立了全国性的研究试验基地,培养了一大批从事研究、制造电机的专家和工程技术人员,有了统一的国家标准和系列产品。

在大型发电设备制造方面,已研制出 600MW 的水氢氢冷汽轮发电机、300MW 的双水内冷和全氢冷汽轮发电机、650MW 的核电机组、700MW 的水轮发电机,电力变压器的最大容量已达到 840MVA、电压最高为 750kV。在大型交直流电机制造方面,已研制出 $2 \times 5000\text{kW}$ 的直流电动机、4700kW 的直流发电机、42MW 的同步电动机。在中、小、微型电机制造方面,已独立自主开发研制成 100 多个系列,上千个品种。各种类型的电机基本上满足了生产和生活的需要。

0.3 我国风电概况

我国的风电从 2000 年后才逐渐发展起来,然而在此期间我国已经成为全球风电的主要推动力量。累计 62GW 的装机容量使我国成为全球风电累计装机容量最大的国家,2010 年我国贡献了全球风电年新增装机市场的 49%,2011 年是 43%。四家中国风电企业跻身全球风电装机前十位的排行榜。

2011 年国内(不含港、澳、台)全年新增风电装机容量 17.63GW,我国风电市场在经历多年的快速增长后正步入稳健发展期。全国累计装机容量 62.36GW,继续保持全球风电装机容量第一的地位。至 2011 年年底,有 30 个省、市、自治区(不含港、澳、台)有了自己的风电场,风电累计装机容量超过 1GW 的省份有 10 多个,其中超过 2GW 的省份 9 个。领跑我国风电发展的地区仍然是内蒙古自治区,其累计装机容量 17.59GW,紧随其后的是河北、甘肃和辽宁,累计装机容量都超过 5GW。

我国海上风电建设有序推进,上海、江苏、山东、河北、浙江、广东海上风电规划已经完成;辽宁大连、福建、广西、海南等省市的海上风电规划正在完善和制定。到 2011 年底,全国海上风电共完成吊装容量 242.5MW。

2011 年风电新增并网接近 17GW，基本上与全年吊装容量相当，并网难的问题得到了初步缓解。全国风电并网容量累计达到了 47.84GW。同时，“弃风”^①成为风电发展的新难题，2011 年风电“弃风”超过 100 亿 kW·h。

2011 年国内新安装的风力发电机组中，平均功率为 1.545MW，与 2010 年相比继续保持增长，制造业面向海上风电积极研制多兆瓦级风电机组。目前，世界上单机容量最大的陆上风电机组达到 5MW，海上单机容量最大的风电机组达到 6MW，更大容量的如 7MW、10MW 等机组也正在研究试制阶段。目前，我国制造商已可以批量生产 5MW 容量的风力发电机组。

2012 年国内风电市场发展依然延续 2011 年的发展趋势，新增装机容量将维持在 15 ~ 18GW。到 2015 年，风电装机将达到 100GW。分布式风电的比重会进一步提高，但仍然以规模化开发和陆上风电开发为主，分布式的比例最高可达到 30%。

根据国家能源局《可再生能源发展“十二五”规划》，预计到 2015 年，我国将建成海上风电 5GW，形成海上风电产业链。2015 年后，海上风电将进入规模化发展阶段，达到国际先进技术水平。2020 年，我国海上风电容量将达到 30GW。

0.4 电机中的铁磁材料及其特性

电机是以电磁感应为基础、以磁场作为耦合媒介实现机电能量转换的装置，主要由两大系统组成：电路系统和磁路系统。电机和变压器通常采用铁磁材料来加强磁场，因此，铁磁材料是组成磁路的主要部分。

所谓铁磁材料是指磁性能好的材料，包括铁、镍、钴等以及它们的合金。铁磁材料的磁导率 μ_{Fe} 要比非铁磁材料磁导率 μ 大得多 ($\mu_{Fe} \gg \mu$)，非铁磁材料磁导率接近真空磁导率 μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$)，电机中常用铁磁材料的磁导率 $\mu_{Fe} = (2000 \sim 8000)\mu_0$ 。铁磁材料能在外磁场中呈现很强的磁性，该现象称为磁化，这是因为铁磁材料内部存在许多很小的被称为磁畴的天然磁化区（也有资料将这些天然磁化区称为“磁分子”），每个磁畴可看做一微型磁铁，其示意图如图 0-3 所示，未磁化前，磁畴随机排列，铁磁材料对外不呈磁性，如图 0-3a 所示；磁化后，在外磁场的作用下，磁畴沿磁场方向排列整齐，铁磁材料呈现较强的磁性，如图 0-3b 所示，形成了一个附加磁场叠加在外磁场上，使合成磁场显著增强。利用这种特性，电机和变压器的铁心是用磁导率较高的铁磁材料制成的，以获得在一定的励磁磁势下产生较强的磁场，即可实现用较小电流产生较大磁场的目的。



图 0-3 磁畴示意图

① 弃风：由于电网接纳能力不足等原因导致的风机暂停的现象。

0.4.1 磁化曲线

在非铁磁材料中,磁通密度 B 和磁场强度 H 之间呈线性关系,即 $B = \mu_0 H$ 。对于铁磁材料,磁导率 μ_{Fe} 的值除了比 μ_0 大得多以外,还与磁场强度以及物质磁状态的历史有关,所以铁磁材料的磁导率 μ_{Fe} 不是常数。在工程计算时,通常事先将各种铁磁材料用试验的方法,测得它们在不同磁场强度 H 下对应的磁通密度 B ,绘制成 $B-H$ 曲线,该 $B-H$ 曲线称为磁化曲线。将未经磁化的铁磁材料进行磁化,磁场强度 H 由零增大时,磁通密度 B 随之增大,所得的 $B = f(H)$ 曲线称为起始磁化曲线,如图 0-4 所示。

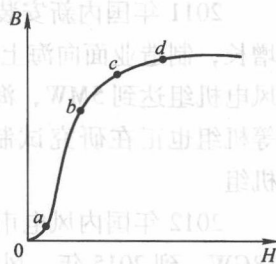


图 0-4 起始磁化曲线

由图 0-4 可见,曲线分四段,在 $0a$ 段:当 H 增大使得 B 增大,但 B 增大速度较慢;在 ab 段: B 随 H 迅速增大(呈直线段);在 bc 段: B 随 H 增大的速度又较慢;在 cd 段:磁饱和区(又呈直线段)。其中, a 点称为附点;拐点 b 称为膝点; c 点为饱和点。过了饱和点 c ,铁磁材料的磁导率趋近 μ_0 。

铁磁材料具有如下特点:其磁化曲线具有饱和性,磁导率 μ_{Fe} 不是常数,且随 H 的变化而变化。

0.4.2 磁滞回线

试验发现,铁磁材料被反复磁化时, $B-H$ 曲线不是单值,而是一条磁滞回线,如图 0-5 所示,同一个 H 值下,有两个 B 值与之对应(图中 H_1 对应了 B_1 和 B_2)。当 $H=0$ 时, $B \neq 0$,此时 $B = B_r$, B_r 称为剩磁;当 $B=0$ 时, $H \neq 0$,此时 $H = H_c$, H_c 称为矫顽力。

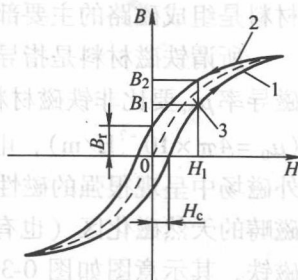


图 0-5 磁滞回线

剩磁的意义在于,当没有外部励磁时,也能在磁路中产生磁通。剩磁广泛用于扬声器和永磁电机等装置中。

不同的铁磁物质有不同宽窄的磁滞回线,当铁磁材料的磁滞回线较窄时,可用其平均磁化曲线,即基本磁化曲线进行计算,如图 0-5 虚线 3 所示。

根据磁滞回线形状的不同,铁磁材料可分为硬磁材料和软磁材料。

硬磁材料的磁滞回线胖宽,其剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 均大,如钨钢、钴钢、镍铝钴合金、钕铁硼等,一般用来制造永久磁铁。

软磁材料的磁滞回线瘦窄,其剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 均小,如硅钢片、铸钢等。

一般电机铁心采用软磁材料制成,其磁滞回线瘦窄,在进行磁路计算时,为了简化计算,不考虑磁滞现象,而用基本磁化曲线来表示 B 与 H 之间的关系,故通常所说的铁磁材料的磁化曲线是指基本磁化曲线。

0.4.3 交流磁路中的铁心损耗

交流磁路中存在着铁心损耗,铁心损耗又分为磁滞损耗和涡流损耗。

1. 磁滞损耗

铁磁材料在交变的磁场中反复磁化, 磁畴间相互摩擦, 产生损耗, 该损耗称为磁滞损耗。磁滞损耗与交变磁场的频率 f 、铁心的体积 V 、磁滞回线的面积成正比。磁滞损耗功率可用式 (0-1) 表示, 即有

$$p_h = k_h f B_m^n V \quad (0-1)$$

式中, k_h 为磁滞损耗系数, 其数值大小取决于材料性质; f 为磁通交变频率; B_m 为磁通密度的最大值; 对一般电工钢片, $n = 1.6 \sim 2.3$ 。

2. 涡流损耗

铁心是导电和有阻值的, 当磁通交变时, 铁心中会感应交变电动势, 在导电的铁心中就会产生环流, 该电流在铁心构成的回路与磁通相环链, 故称涡流, 涡流产生的损耗称为涡流损耗。涡流损耗功率可用式 (0-2) 表示, 即有

$$p_w = k_w f^2 B_m^2 \quad (0-2)$$

式中, k_w 为与材料有关的比例系数。

3. 铁心损耗

铁心中的磁滞损耗和涡流损耗之和称为铁心损耗, 即有

$$P_{Fe} = p_h + p_w \quad (0-3)$$

0.5 常用基本电磁定律

在学习“电机学”课程过程中常要用到的基本电磁定律有全电流定律、磁路欧姆定律、电磁力定律、电磁感应定律、基尔霍夫电流定律和电压定律、电路欧姆定律等, 为便于读者使用, 现简述于下。

0.5.1 电路定律

1. 电路欧姆定律

流过电阻 R 的电流 I 的大小与电阻两端的电压 U 成正比, 与电阻 R 的大小成反比, 即有

$$\begin{cases} I = \frac{U}{R} & \text{直流电路} \\ i = \frac{\dot{U}}{Z} & \text{交流电路} \end{cases} \quad (0-4)$$

2. 基尔霍夫第一定律

电路中任意节点的电流的代数和等于零, 即有

$$\begin{cases} \sum I = 0 & \text{直流电路} \\ \sum i = 0 & \text{交流电路} \end{cases} \quad (0-5)$$

3. 基尔霍夫第二定律

对电路中任一回路, 电压降的代数和等于电动势的代数和, 即有

$$\begin{cases} \sum U = \sum E & \text{直流电路} \\ \sum \dot{U} = \sum \dot{E} & \text{交流电路} \end{cases} \quad (0-6)$$

0.5.2 电磁感应定律

一匝数为 N 的线圈，在变化的磁场中产生的感应电动势的大小与线圈匝数 N 和线圈所交链的磁通对时间的变化率 $d\phi/dt$ 成正比，当感应电动势正方向与产生它的磁通正方向符合右手螺旋定则时，则有

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (0-7)$$

0.5.3 全电流定律（安培环路定律）

磁场中沿任一闭合回路的磁场强度 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，即有

$$\oint H dl = \sum IN \quad (0-8)$$

0.5.4 电磁力定律

载流导体在磁场中受到力的作用，当磁场与导体相互垂直作用时，作用在载流导体的磁力为

$$F = BIl \quad (0-9)$$

0.5.5 磁路定律

1. 磁路基尔霍夫第一定律

在磁路中根据磁通的连续性可得：穿入任一闭合面的磁通必等于穿出该闭合面的磁通，即磁路中通过任何闭合面上的磁通的代数和等于零，则有

$$\sum \Phi = 0 \quad (0-10)$$

式 (0-10) 中一般将穿出闭合面的磁通取正号，穿入闭合面的磁通取负号。

2. 磁路基尔霍夫第二定律

根据麦克斯韦方程 (式 (0-8)) 可得：在闭合的磁路中，各段磁压降的代数和等于闭合磁路中磁动势的代数和，即有

$$\sum HL = \sum IN \quad (0-11)$$

式中， H 为磁场强度 (A/m)； L 为各段磁路的长度 (m)； N 为线积分线路所包围的导体数； I 为每根导体所流过的电流 (A)。

3. 磁路欧姆定律

在无分支的磁路中，磁通 Φ 与磁动势 F 大小成正比，与磁路中的总磁阻 R_m 的大小成反比，即有

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (0-12)$$

式中, R_m 为磁路的总磁阻 ($1/H$)。

结合安培环路定律, 则磁动势 $F = Ni$ 为作用在铁心磁路上的安匝数, 单位为 A。

0.5.6 电路与磁路的比较

磁路与电路有许多相似之处, 为便于读者查阅, 表 0-1 列出了电路和磁路常用的物理量和定律。

表 0-1 电路与磁路对比表

电 路		磁 路	
物理量或定律名称	符号或公式	物理量或定律名称	符号或公式
电导率	γ	磁导率	μ
电流	I	磁通	Φ
电动势	E	磁动势	F
电阻	R	磁阻	R_m
电压降	$U(IR)$	磁压降	$HL(\Phi R_m)$
电路欧姆定律	$I = \frac{U}{R}$	磁路欧姆定律	$\Phi = \frac{F}{R_m}$
电路基尔霍夫第一定律	$\sum I = 0$	磁路基尔霍夫第一定律	$\sum \Phi = 0$
电路基尔霍夫第二定律	$\sum IR = \sum E$	磁路基尔霍夫第二定律	$\sum HL = \sum IN$

0.6 电机的发热与温升

0.6.1 电机的发热与冷却

电机在运行过程中会产生各种损耗, 这些损耗均会生成热能使电机温度高于工作环境温度。电机的发热是指从空载到负载或在运行中突加负载时, 损耗随负载增加而增加, 电机的温度也随之升高, 稳定后的温度比起始温度高, 该过程称为电机发热过程。通常, 将运行着的电机温度比环境温度高出部分的值称为温升, 记作 τ 。可证明电机的温升过程曲线是按指数规律上升, 如图 0-6 所示的曲线 1, 图中 T_0 为发热时间常数, 可理解为电机发出的热量全部用作提高电机的温度, 使电机温升从零上升到稳定温升所需要的时间。电机在运行中突增负载其温度也随之升高, 如图 0-6 所示的曲线 2, 如果电机是从冷却状态开始运行, 则起始温升 $\tau_0 = 0$ 。

电机的冷却是指负载减小或切断电源停止运行, 电机内部损耗减小或降为零, 导致电机温升降低的过程。同样可证明, 电机的冷却过程曲线是按指数规律下降的曲线, 如图 0-7 所示曲线 1, 图中 T'_0 为冷却时间常数。如果停电后, 电机产生的热量为零, 则冷却过程如图 0-7 曲线 2 所示。

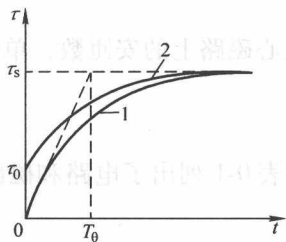


图 0-6 电机的温升曲线

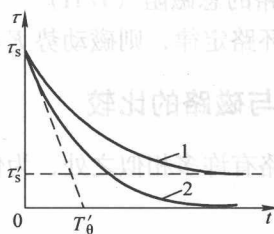


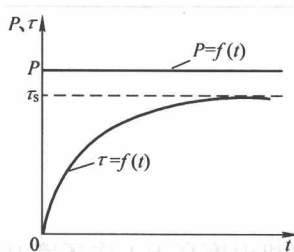
图 0-7 电机的冷却曲线

0.6.2 电动机的工作制

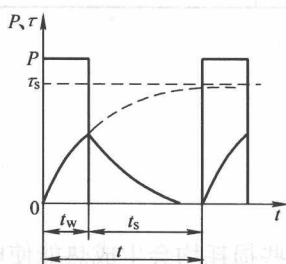
实际运行中的电动机所带负载多种多样,运行状态也不尽相同,而电动机的温升不仅取决于负载的大小,且与负载持续时间有关。所谓电动机的工作制即指电动机的工作方式,是对电动机运行情况的具体说明,根据不同的运行情况,国标 GB 755—2008《旋转电机 定额和性能》将电动机的工作制分为 S1~S10 共十类,下面介绍常用的 S1~S3 三种,即连续工作制 (S1)、短时工作制 (S2) 和周期断续工作制 (S3)。

1. 连续工作制

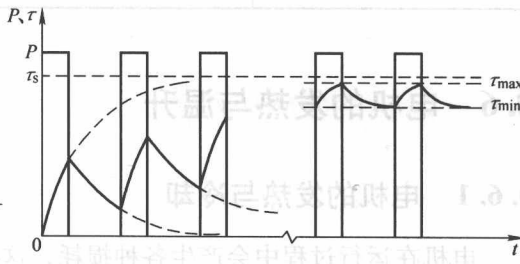
连续工作制是指电动机在恒定负载或周期性变化负载下连续运行,工作时间内使电动机的温升达到稳定温升。显然连续工作制的工作时间 $t_w > (3 \sim 4) T_0$, 其典型负载图和温升曲线如图 0-8a 所示,实际生产中的水泵、风机、轧钢机主传动拖动电动机等属于连续工作制电动机。适用于连续工作制的电动机有 Y2、Y3 系列三相笼型异步电动机。



a) 连续工作制



b) 短时工作制



c) 周期断续工作制

图 0-8 电动机的负载图和温升曲线

2. 短时工作制

短时工作制是指电动机工作时间短,在工作时间内,电动机的温升达不到稳定温升,而停歇时间长,一般停歇时间 $t_s > (3 \sim 4) T_0'$, 在此时间内,电动机的温度可以降至周围介质温度,其负载图和温升曲线如图 0-8b 所示。我国规定短时工作制的时间有 10min、30min、60min、90min 四种。实际生产中的车床夹紧装置、水闸的闸门电动机等属于短时工作制的电动机。

3. 周期断续工作制

周期断续工作制是指电动机的工作时间 t_w 和停歇时间 t_s 相互交替,在工作时间内电动机温升达不到稳定值,停歇时间内电动机温升也降不到零,其负载图和温升曲线如图 0-8c 所