

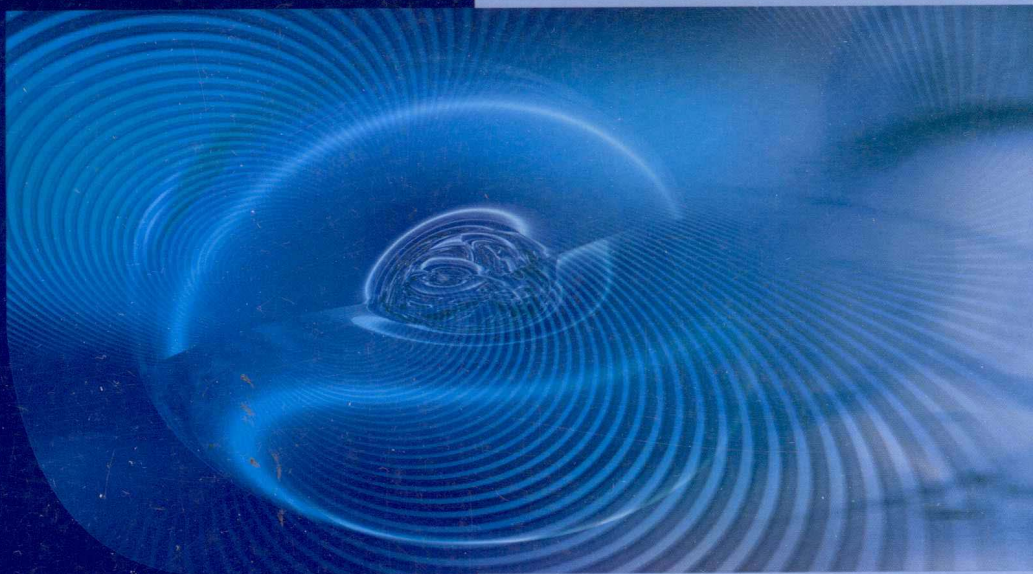


普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

电机与拖动基础及 MATLAB 仿真

◎ 陈亚爱 周京华 编著

DIANJI YU TUODONG JICHU JI
MATLAB FANGZHEN



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

电机与拖动基础及 MATLAB 仿真

陈亚爱 周京华 编著
李正熙 主审



机械工业出版社

前 言

“电机与拖动基础”是电类、自动化类专业的重要专业基础课之一，一般各高校自动化类专业培养计划中均将该课程列为必修课，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。本课程的教学目的是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。

一方面，在各高校教学改革普遍压缩学时、加大课堂教学信息量、提高教学质量的形势下，要求教师在教学过程中不仅要对课程内容进行重新整合，还应在教学手段或方法上下工夫，将先进的多媒体技术应用于教学中，提高教学质量。另一方面，电机运行时电、磁、力、热等物理定律同时起作用，互相制约，同时又由于电力拖动系统中的动力用电机包括变压器、交流异步电动机、同步电动机、直流电动机等，种类繁多，各具特性，学生学习时有一定的难度，该课程历来是学生们公认难学的几门课之一。而 MATLAB 仿真工具自问世以来，凭借其强大的数值计算能力，迅速成为各个学科和工程技术领域主要的计算机仿真平台，它能有效应用于电机与拖动系统等工程技术问题的仿真，并已成为当今工科院校本科毕业生必须掌握的仿真工具。合理使用计算机仿真工具解决电机与拖动系统中的复杂问题，能大大简化学习过程中的数学推导和演算，集中精力于基本概念和分析问题的方法，将有效缓解学生对电机学课程学习的畏难情绪，激发学生们的学习热情和兴趣。为了提高教学质量，顺应教学改革，提高学生的学习兴趣，将计算机技术和软件技术应用于这一经典的传统课程中，有其重要的现实意义。

本书不仅结合电气、自动化专业的特点，以电力拖动系统中应用最广泛的电机和电力拖动为重点，从使用的角度介绍交、直流电机、变压器、控制电机等设备的基本工作原理、基本结构、主要工作特性以及电力拖动系统的运行特性等，同时结合 MATLAB 仿真技术在电力拖动系统应用的特点，将 MATLAB 软件对磁路计算的仿真，对变压器特性、异步电动机和同步电动机及直流电动机进行特性仿真等内容编入各相关章节中，为该课程的学习提供新思路和新方法，同时适量增加电机与电力拖动领域的最新技术成果内容，以适应“十二五”时期电气、自动化专业的教学要求。书中打“*”部分可根据实际情况选学。

本书绪论、第1、2、3、4、5、7章由陈亚爱编写，第6章由周京华编写，全书由李正熙教授主审。

在本书构思过程中，得到了北方工业大学机电工程学院、机械工业出版社的大力支持和帮助；在成书过程中，北方工业大学研究生薛颖、罗琼、金雍奥等同志付出了辛勤的劳动；本书的编写及出版受到了2009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（2009B01）、北京市属市管高等学校人才强教计划（PHR201008188）的资助，在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，参考了大量文献资料，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原谅并不吝指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
0.1 电机的分类和应用	1
0.2 我国电机工业概况	1
0.3 本教材内容、课程性质、教学任务及学习方法	2
0.4 电机中的铁磁材料及其特性	3
0.5 常用的基本电磁定律	5
0.6 磁路计算仿真	6
本章小结	14
思考题与习题	14

第1章 变压器

1.1 概述	16
1.1.1 变压器的用途与分类	16
1.1.2 变压器的基本工作原理	16
1.1.3 变压器的主要结构	17
1.1.4 变压器的铭牌数据和主要系列	18
1.2 单相变压器的空载运行	19
1.2.1 变压器空载运行时的磁场	19
1.2.2 变压器各电磁量正方向	19
1.2.3 空载运行时电压、电动势与主磁通的关系	20
1.2.4 变压器的励磁电流	21
1.2.5 变压器空载运行时的相量图与等效电路	22
1.3 单相变压器的负载运行	23
1.3.1 负载运行时的磁动势平衡方程	23
1.3.2 负载运行时的基本方程	24
1.3.3 变压器的参数折算	24
1.3.4 折算后变压器的基本方程	25
1.3.5 等效电路	26
1.3.6 相量图和功率关系	27
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	30

1.6 变压器的运行特性	31
1.6.1 电压变化率和外特性	31
1.6.2 变压器效率和效率特性	32
1.7 三相变压器	33
1.7.1 三相变压器的磁路系统	33
1.7.2 三相变压器的绕组联结组标号	33
1.7.3 试验确定绕组的极性和三相变压器的联结组标号*	36
1.8 其他用途的变压器*	38
1.8.1 自耦变压器	38
1.8.2 互感器	39
1.9 变压器并联运行*	40
1.9.1 电压比不等时的变压器并联运行	41
1.9.2 联结组标号不同时的变压器并联运行	41
1.9.3 短路阻抗标么值不等时的并联运行	41
1.10 实例(应用)	42
1.11 变压器仿真	51
1.11.1 变压器励磁电流仿真	51
1.11.2 变压器运行状态仿真	57
1.11.3 变压器暂态过程仿真	59
1.11.4 变压器二次侧突然短路仿真	59
1.11.5 变压器联结组标号仿真	60
本章小结	63
思考题与习题	64

第2章 三相交流电动机

2.1 交流电动机的基本工作原理和定子结构	66
2.1.1 三相同步电动机的基本工作原理	66
2.1.2 三相异步电动机的基本工作原理	67
2.1.3 交流电动机定子结构	67
2.2 旋转磁动势	68

2.2.1 单相脉振磁动势	68	3.2 三相异步电动机的电力拖动	115
2.2.2 三相绕组的合成旋转磁动势	71	3.2.1 异步电动机的机械特性	115
2.2.3 两相绕组产生的旋转磁动势	71	3.2.2 异步电动机的人为机械特性	118
2.3 交流绕组的感应电动势	73	3.2.3 三相异步电动机的起动	120
2.3.1 整距线圈感应电动势	73	3.2.4 三相异步电动机的制动	130
2.3.2 整距分布线圈感应电动势	75	3.2.5 三相异步电动机的调速	134
2.3.3 短距线圈感应电动势	76	3.2.6 现代交流调速系统的组成	141
2.3.4 一相绕组感应电动势	77	3.2.7 三相异步电动机的各种运行 状态	142
2.3.5 绕组的谐波感应电动势	77	3.3 三相同步电动机的电力拖动	142
2.4 三相异步电动机	78	3.3.1 同步电动机的起动	142
2.4.1 基本结构和铭牌数据	78	3.3.2 同步电动机的调速	143
2.4.2 三相异步电动机空载运行	81	3.4 三相交流电动机的动态数学模型 简介	144
2.4.3 三相异步电动机负载运行	83	3.4.1 坐标变换	144
2.4.4 三相异步电动机的电压方程和 等效电路	89	3.4.2 三相异步电动机的动态数学 模型	147
2.4.5 三相异步电动机的功率和转矩 方程	91	3.5 实例(应用)	149
2.4.6 笼型转子的极数和相数	92	3.6 三相交流电动机电力拖动的仿真	151
2.4.7 异步电动机的工作特性及参数 测定	94	3.6.1 三相异步电动机机械特性的 仿真	151
2.5 三相同步电动机	96	3.6.2 三相异步电动机起动仿真	155
2.5.1 同步电动机的基本结构和铭牌 数据	97	3.6.3 三相异步电动机制动仿真	160
2.5.2 同步电动机的基本方程和 相量图	97	3.6.4 三相异步电动机正反转仿真	162
2.5.3 同步电动机的功率和转矩方程	100	3.6.5 三相异步电动机调速仿真	163
2.5.4 同步电动机的功角特性和矩角 特性	101	3.6.6 三相同步电动机的仿真	167
2.5.5 同步电动机的励磁调节和 V 形 曲线	103	本章小结	170
2.6 实例(应用)	104	思考题与习题	171
2.7 三相交流电动机的仿真	106	第4章 直流电机	173
2.7.1 三相同步电动机的功角特性 仿真	106	4.1 直流电机工作原理	173
2.7.2 三相同步电动机的矩角特性 仿真	107	4.1.1 直流电机的基本工作原理及 主要结构	173
本章小结	109	4.1.2 电枢绕组和直流电机模型	176
思考题与习题	109	4.1.3 直流电机的铭牌数据和主要 系列	177
第3章 三相交流电动机的电力拖动	111	4.2 直流电机的磁场	179
3.1 电力拖动系统基础	111	4.2.1 直流电机的励磁方式	179
3.1.1 运动方程式	111	4.2.2 直流电机的空载磁场	179
3.1.2 生产机械的负载转矩特性	112	4.2.3 直流电机负载时的磁场	180
3.1.3 电力拖动系统稳定运行的条件	113	4.2.4 直流电机的电枢反应	182
		4.2.5 直流电机的感应电动势和电磁 转矩	182
		4.3 直流电机的基本方程	184

4.3.1 电压方程	184	5.6.3 直流电动机制动仿真	228
4.3.2 转矩方程	185	5.6.4 直流电动机调速仿真	229
4.3.3 电磁功率和功率平衡方程	185	5.6.5 直流调速系统仿真*	231
4.4 直流发电机的运行特性与试验测试	187	本章小结	237
4.4.1 他励直流发电机空载特性	188	思考题与习题	237
4.4.2 他励直流发电机外特性	188	第6章 驱动和控制微电机	239
4.4.3 并励直流发电机	188	6.1 概述	239
4.5 直流电动机的工作特性与试验测试	190	6.2 单相异步电动机	240
4.5.1 他励(并励)直流电动机的工作特性	190	6.2.1 单相异步电动机的基本工作原理	240
4.5.2 串励直流电动机的工作特性	192	6.2.2 单相异步电动机的起动	241
4.6 直流电机的换向*	192	6.3 测速发电机	243
4.6.1 换向的物理过程	193	6.3.1 直流测速发电机	243
4.6.2 换向元件的感应电动势	193	6.3.2 交流测速发电机	244
4.6.3 改善换向的方法	194	6.4 伺服电动机	246
4.7 实例(应用)	194	6.4.1 直流伺服电动机	246
4.8 直流电机性能的仿真	196	6.4.2 交流伺服电动机	247
4.8.1 直流发电机运行特性仿真	196	6.5 步进电动机	249
4.8.2 直流电动机运行特性仿真	201	6.5.1 步进电动机结构与基本工作原理	249
本章小结	203	6.5.2 步进电动机的运行特性	251
思考题与习题	204	6.5.3 步进电动机的驱动电路*	252
第5章 直流电动机的电力拖动	206	6.6 其他驱动和控制微电机	253
5.1 他励直流电动机的机械特性	206	6.6.1 自整角机	253
5.1.1 机械特性表达式	206	6.6.2 开关磁阻电动机	254
5.1.2 固有机械特性和人为机械特性	206	6.6.3 旋转变压器	256
5.2 他励直流电动机的起动	208	6.6.4 无刷直流电动机	257
5.2.1 系统对起动的要求	208	6.6.5 直线电动机	257
5.2.2 起动方法	208	6.6.6 新原理微电机*	259
5.3 他励直流电动机的电动与制动	210	本章小结	259
5.3.1 他励直流电动机的电动运行	210	思考题与习题	261
5.3.2 他励直流电动机的制动运行	211	第7章 电动机容量的选择	262
5.3.3 他励直流电动机的各种运行状态	215	7.1 电动机选择的主要内容	262
5.4 他励直流电动机的调速基础	216	7.2 电动机的发热、冷却与工作制	263
5.4.1 调速的性能指标	216	7.2.1 电动机的发热与冷却	263
5.4.2 他励直流电动机的调速方法	217	7.2.2 电动机的工作制	263
5.4.3 调速方法与负载性质的匹配问题	218	7.3 电动机容量的选择	264
5.5 实例(应用)	219	7.3.1 连续工作制电动机容量的选择	264
5.6 直流电动机拖动的仿真	223	7.3.2 短时工作制电动机容量的选择	269
5.6.1 他励直流电动机的机械特性仿真	223	7.3.3 周期断续工作制电动机容量的选择	270
5.6.2 直流电动机起动仿真	225	7.4 实例(应用)	271
		本章小结	272

思考题与习题	273	附录 F 部分 Y3 系列三相异步电动机的	
附录	274	技术数据	284
附录 A 部分变压器磁心型号	274	附录 G 部分 Z4 系列直流电动机的技术	
附录 B 交流绕组连接规律举例	275	数据	285
附录 C 交流绕组的分布系数和短距		附录 H 小功率异步电动机的技术数据	287
系数	277	附录 I 部分 S9 系列配电变压器的主要	
附录 D 直流电机的电枢绕组	278	技术数据	288
附录 E 他励直流电动机过渡过程	280	参考文献	289

绪 论

0.1 电机的分类和应用

1. 分类

电机是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，按不同的功能可分成动力设备用和控制元件用两大类，其中动力设备用又分旋转电机和变压器两类，如图 0-1 所示。

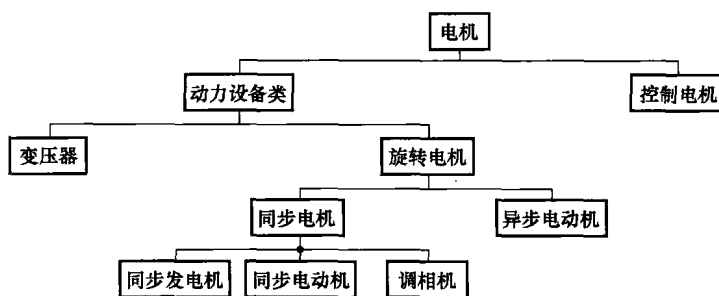


图 0-1 电机分类示意图

2. 应用

作为动力设备的旋转电机其主要任务是能量转换，主要解决如何提高能量转换的效率这一问题；控制电机的主要任务是完成控制信号的传递和转换，主要解决如何提高可靠性和精度等问题，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自动控制系统中。

电能具有易于转换、传输、分配和控制的特点，因此已成为现代能源的主要形式，支撑着产业与生活。因此，与电能密切相关的电机广泛应用于社会生产各个部门和社会生活各个方面。电机和电力拖动在国民经济中有着广泛的应用，起着重要的作用。

电能生产——由同步发电机生产；

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电压降为所需低电压，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 我国电机工业概况^[1]

我国电机工业体系是从新中国成立后建立的。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实验基地，

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 本教材内容、课程性质、教学任务及学习方法

1. 教材内容

《电机与拖动基础及 MATLAB 仿真》教材，把“电机学”和“电力拖动基础”两门课程内容整合为一，同时结合仿真技术，加入了 MATLAB 仿真技术在电机与电力拖动系统应用的实例。本教材以电力拖动系统中应用最广泛的电机和电力拖动为重点，从使用的角度介绍交、直流电机、变压器、控制电机的基本结构、工作原理、主要工作特性、电力拖动系统的运行特性以及 MATLAB 仿真软件在电机与拖动系统中的应用技术等。

2. 课程性质

“电机与拖动基础”课程属电气工程及其自动化或电类专业的专业技术基础课，学习过程中需用到“高等数学”、“大学物理”、“电路”、“模拟电子技术”等课程的知识。本课程虽是基础课，但又具有专业课程性质，讲授的内容是电机方面非常具体、实际的问题。因此，该课程具有内容涉及面广、理论性强、实践性强及综合性强等特点。

3. 教学任务

通过课程的学习，掌握常用交、直流电机及变压器的基本结构、工作原理、运行性能仿真和实验方法；了解交、直流电力拖动的基础知识，掌握异步电动机的特性分析、起制动方法和交流电机基本的调速方法；掌握他励直流电动机起制动及调速等各种运行状态的静动态特性和参数计算；熟悉常用控制电机的原理和特性，学会电动机容量的选择方法，熟悉 MATLAB 仿真软件在电机与拖动系统中的应用技术。为后续专业基础课和专业课的学习准备必要的基础知识，提高分析问题、解决问题的能力，也为从事自动化及电气工程技术工作和科学研究奠定初步基础。

4. 学习方法建议

本课程既涉及理论基础知识，又涉及工程技术问题，研究的对象——电机种类繁多，内容涉及面广，综合性强。因此，建议学习时注意以下三点：

1) 在实际运行着的电机中，电、磁、力、热等物理定律同时起作用，互相制约，分析解决这种复杂问题时，往往需忽略一些次要矛盾，抓住主要矛盾加以解决，只要所得结果正确，引起的误差在允许的范围内，在工程上就是允许的，这与以前所学课程中解决问题理想化、单一化有很大区别，学习时需有足够的认识。

2) 本课程的动力设备用电机包括变压器、交流异步电动机、同步电动机、直流电机等，种类繁多，各具特性，但就其内部电磁关系耦合过程和机电能量转换关系来说，仍有其内在联系。基本工作原理都是建立在电磁感应定律和电磁力定律基础上的；能量转换都是以

磁场为媒介，其电磁关系可抽象为电路参数，得出基本方程式和等效电路，这是共性方面。在学习中应将变压器、交流电机、直流电机的相似性有机地统一起来，注意课程内容的内在联系，形成学习本课程鲜明的主线，只要学好了变压器，对交流电机和直流电机的内容就比较容易掌握了。

3) 理论联系实际，注重做好本课程要求的仿真和开设的相关实验，立足于学会使用各类电机。利用 MATLAB 仿真工具帮助理解课程所涉及的知识 and 电机的运行特性，在实验中学习解决实际问题的方法，注意培养解决工程实际问题的能力。

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。铁磁材料是组成磁路的主要部分。

所谓铁磁材料是指导磁性能好的材料，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 $\mu_{Fe} = (2000 \sim 8000)\mu_0^{[1]}$ 。铁磁材料能在外磁场中呈现很强的磁性，该现象称磁化，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，每个磁畴可看做一微型磁铁，其示意图如图 0-2 所示，磁化前，磁畴随机排列，铁磁材料对外不呈磁性，如图 0-2a 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 0-2b 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由磁导率较高的铁磁材料制成，以获得在一定的励磁磁动势下产生较强的磁场。

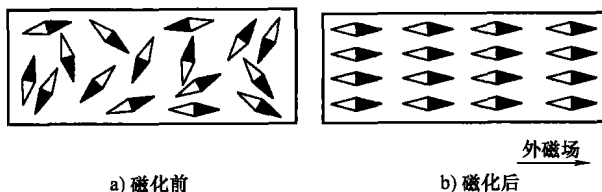


图 0-2 磁畴示意图

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} 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，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 0-3 所示。

由图 0-3 可见，曲线分四段， Oa 段： H 增大使得 B 增大，但 B 增大速度较慢； ab 段： B 随 H 迅速增大（呈直线段）； bc 段： B 随 H 增大的速度又较慢； cd 段：磁饱和区（又呈直线段）。其中， a 点称为跗点；拐弯点 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于 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。

2. 磁滞回线

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 0-4 所示, 同一个 H 值下, 有两个 B 值与之对应。当 $H=0$ 时, $B \neq 0$, $B = B_r$, B_r 称为剩磁; 当 $B=0$ 时, $H \neq 0$, $H = H_c$, H_c 称为矫顽力。

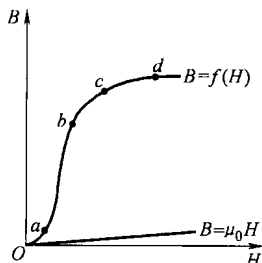


图 0-3 起始磁化曲线

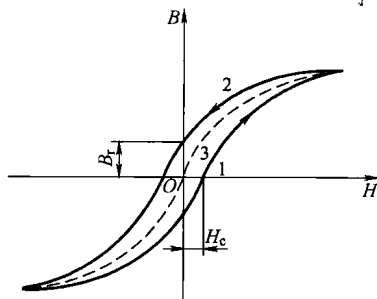


图 0-4 磁滞回线

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。剩磁广泛用在扬声器和永磁电机等装置中。

不同的铁磁物质其磁滞回线宽窄是不同的, 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 0-4 曲线 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, 剩磁、矫顽力大, 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, 剩磁、矫顽力小, 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。

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

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

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^n 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

铁心是导电的、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

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

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合称为铁心损耗, 即有

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

0.5 常用的基本电磁定律

在学习电机与拖动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等, 为便于读者使用, 现简述于下。

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

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

(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

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

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

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

3. 全电流定律

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

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

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, 作用在载流导体上的电磁力为

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

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)。

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	
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 磁路计算仿真

MATLAB 仿真软件凭借其强大的数值计算能力、优越的数据图形可视化技术和不断丰富的 Simulink 动态仿真模型库，已成为一个高效数值计算和可视化软件的代表，被广泛应用

于工程领域，在高校和科研院所也已成为教学、学术活动、技术研发和工程设计的重要仿真软件。本书在介绍电机与拖动基本理论和知识的过程中，将加入 MATLAB 仿真技术在电机、电力拖动领域应用的实例，便于读者更好地理解和掌握电机的相关知识。

1. 磁路计算仿真

磁路计算是电机、变压器分析和设计中的基本计算内容，使用 MATLAB 软件编制 M 文件的方法可以进行磁路分析。

【仿真实例 0-1】 图 0-5 所示为电工钢片叠压而成的磁路，叠片净长与包含绝缘的总长之比即铁心的叠压系数 $k_{Fe} = 0.94$ ，各段铁心的截面积相同，均为 $A = 0.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ，各段铁心的平均长度分别为 $l_1 = 0.08 \text{ m}$ ， $l_2 = 0.1 \text{ m}$ ， $l_3 = 0.034 \text{ m}$ ， $l_4 = 0.04 \text{ m}$ ， $l_5 = 0.1 \text{ m}$ ，气隙长度 $\delta = 0.006 \text{ m}$ 。已知铁心的相对磁导率为 1900，励磁绕组匝数 $N = 2000$ ，若要在铁心中产生 $1 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 的磁通，问需要多大的励磁电流？试用 M 语言编写计算程序。

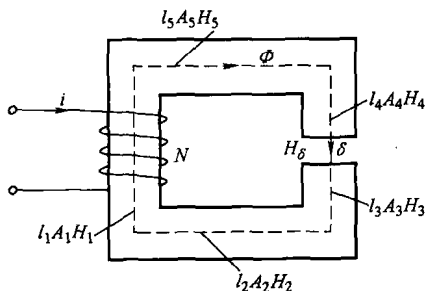


图 0-5 【仿真实例 0-1】的磁路结构

解：用 M 语言编写计算励磁电流的程序如下：

% 磁路计算求解励磁电流问题

clc

clear

A = 0.8 * 1e - 3;

kFe = 0.94;

Ph = 1 * 1e - 3;

u0 = 4 * pi * 1e - 7;

l1 = 0.08; l2 = 0.1; l3 = 0.034; l4 = 0.04; l5 = 0.1; % 已知各段磁路长度 m

N = 2000;

d = 0.006;

Ak = kFe * A;

B = Ph / Ak;

uFe = 1900 * u0;

Hc = B / uFe;

Fc = Hc * (l1 + l2 + l3 + l4 + l5);

Ha = Ph / u0 / A;

Fa = Ha * d;

F = Fc + Fa;

i = F / N;

s = num2str(i);

s1 = '励磁电流为:';

s = strcat(s1, s, 'A');

disp(s);

% 清除主程序窗口

% 清除变量空间的变量

% 已知铁心截面积 m^2 , 1e - 3 表示 10^{-3}

% 已知铁心叠片系数

% 需产生的磁通量 Wb

% 已知空气磁导率 H/m, 1e - 7 表示 10^{-7}

% 已知各段磁路长度 m

% 已知励磁绕组匝数

% 已知气隙长度 m

% 计算净截面积 m^2

% 计算铁心磁通密度

% 计算铁心磁导率

% 计算铁心磁场强度

% 计算铁心的磁压降

% 计算气隙磁场强度

% 计算气隙的磁压降

% 计算总磁压降

% 计算励磁电流

% 将数字转换成字符串

% 定义字符串

% 合并字符串

% 显示计算结果

【仿真实例 0-2】 已知某电感线圈匝数 $N=400$ ，铁心长度 $l=0.3\text{m}$ ，截面积 $A=8 \times 10^{-4}\text{m}^2$ ，真空磁导率 $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ ，气隙长度 $\delta=0.005\text{m}$ ，气隙截面积 $A_0=8 \times 10^{-4}\text{m}^2$ ，相对磁导率 $\mu_r=100 \sim 8000$ ，试计算电感系数 L 和绘制电感系数与相对磁导率之间的关系曲线 $L=f(\mu_r)$ 。

解：计算电感系数的公式为 $L=\mu_0\mu_rAN^2/l$ ，用 M 语言编写计算电感系数和绘制电感系数与相对磁导率之间关系曲线的程序如下：

```
% 求解电感系数和绘制  $L=f(\mu_r)$  曲线问题
clc                                     % 清除主程序窗口
clear                                  % 清除变量空间的变量
u0 = pi*4e-7;                          % 已知空气磁导率 H/m, 1e-7
                                       % 表示  $10^{-7}$ 
N = 400; l = 0.3; d = 0.005; A = 8e-4; A0 = 8e-4; % 已知匝数、铁心长度、气隙、截面积
R0 = d/(u0*A0);                       % 求气隙磁阻
for n = 1:80;                          % for 循环语句
    ur(n) = 100 + (10000 - 100)*(n-1)/100; % 求相对磁导率
    Rm(n) = l/(ur(n)*u0*A);             % 求铁心磁阻
    R = R0 + Rm(n);                    % 求计算总磁阻
    L(n) = N^2/R;                      % 求电感系数
end                                     % for 循环语句的结束
plot(ur, L)                            % 绘制  $L=f(\mu_r)$  曲线
title('L=f(\mu_r) 关系曲线')          % 标题'L=f(\mu_r) 关系曲线'
xlabel('铁心相对磁导率 \mu_r')        % 设置 x 坐标标签“铁心相对磁
                                       % 导率 \mu_r”
ylabel('电感系数 L/H')                % 设置 y 坐标标签“电感系数 L/H”
```

运行上述程序，得到图 0-6 所示的 $L=f(\mu_r)$ 仿真曲线。

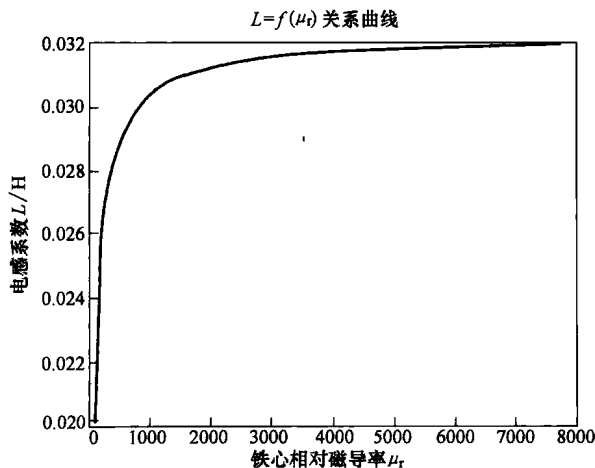


图 0-6 【仿真实例 0-2】的仿真结果

2. 磁化曲线仿真

磁化曲线是铁磁材料的重要特性之一，一般可根据试验数据通过曲线拟合取得，下面介绍用 MATLAB 软件拟合获得磁化曲线的方法。

【仿真实例 0-3】 已知某铁磁材料的磁化数据见表 0-2，试用 MATLAB 软件进行磁化曲线的拟合并绘制拟合的磁化曲线^[2]。

表 0-2 某铁磁材料的磁化数据 I

B/T	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	1.38	1.40	1.42	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56
0.5	1.58	1.60	1.62	1.64	1.66	1.69	1.71	1.74	1.76	1.78
0.6	1.81	1.84	1.86	1.89	1.91	1.94	1.97	2.00	2.03	2.06
0.7	2.10	2.13	2.16	2.20	2.24	2.28	2.32	2.36	2.40	2.45
0.8	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.76	2.81	2.87	2.93	2.99
0.9	3.06	3.13	3.19	3.26	3.33	3.41	3.49	3.57	3.65	3.74
1.0	3.83	3.92	4.01	4.11	4.22	4.33	4.44	4.56	4.67	4.80
1.1	4.93	5.07	5.21	5.36	5.52	5.68	5.84	6.00	6.16	6.33
1.2	6.52	6.72	6.94	7.16	7.38	7.62	7.86	8.10	8.36	8.62
1.3	8.90	9.20	9.50	9.80	10.1	10.5	10.9	11.3	11.7	12.1
1.4	12.6	13.1	13.6	14.2	14.8	15.5	16.3	17.1	18.1	19.1
1.5	20.1	21.2	22.4	23.7	25.0	26.7	28.5	30.4	32.6	35.1
1.6	37.8	40.7	43.7	46.8	50.0	53.4	56.8	60.4	64.0	67.8
1.7	72.0	76.4	80.8	85.4	90.2	95.0	100	105	110	116
1.8	122	128	134	140	146	152	158	165	172	180

解：用 M 语言编写拟合磁化曲线的 MATLAB 程序如下：

% 拟合与绘制磁化曲线问题

clc

clear

Hdata = [1.38,1.40,1.42,1.44,1.46,1.48,1.50,1.52,1.54,1.56,...

1.58,1.60,1.62,1.64,1.66,1.69,1.71,1.74,1.76,1.78,...

1.81,1.84,1.86,1.89,1.91,1.94,1.97,2.00,2.03,2.06,...

2.10,2.13,2.16,2.20,2.24,2.28,2.32,2.36,2.40,2.45,...

2.50,2.55,2.60,2.65,2.70,2.76,2.81,2.87,2.93,2.99,...

3.06,3.13,3.19,3.26,3.33,3.41,3.49,3.57,3.65,3.74,...

3.83,3.92,4.01,4.11,4.22,4.33,4.44,4.56,4.67,4.80,...

4.93,5.07,5.21,5.36,5.52,5.68,5.84,6.00,6.16,6.33,...

6.52,6.72,6.94,7.16,7.38,7.62,7.86,8.10,8.36,8.62,...

8.90,9.20,9.50,9.80,10.1,10.5,10.9,11.3,11.7,12.1,...

12.6,13.1,13.6,14.2,14.8,15.5,16.3,17.1,18.1,19.1,...

20.1,21.2,22.4,23.7,25.0,26.7,28.5,30.4,32.6,35.1,...

37.8,40.7,43.7,46.8,50.0,53.4,56.8,60.4,64.0,67.8]; % 磁场强度数据

Bdata = 0.40:0.01:1.69;

% 磁感应强度数据