

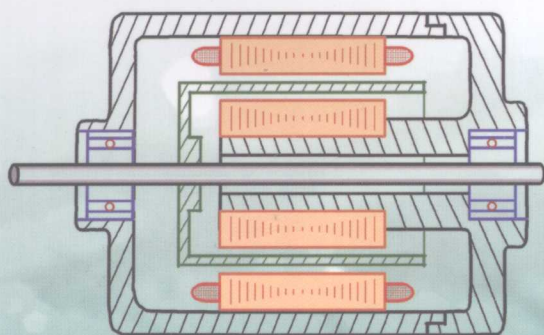


DIANQI
XINXILEI

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

电机与拖动MATLAB 仿真与学习指导

■ 刘凤春 孙建忠 牟宪民 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

MCS-51 单片机原理及应用 (免费电子课件)

电机原理及拖动 第2版

电机与拖动 (单独出版电子课件)

电机与拖动 MATLAB 仿真与学习指导

电力工程基础 (免费电子课件)

过程控制系统与仪表 (免费电子课件)

现代运动控制系统工程 (单独出版电子课件)

计算机控制系统 (免费电子课件)

计算机控制系统 (免费电子课件)

电磁兼容基础与应用 (英文版) (免费电子课件)

电器设备状态检测

微机原理与接口技术 (免费电子课件)

微机原理及接口技术 (免费电子课件)

机械工程学 第4版 (免费电子课件)

电力拖动运动控制系统 (免费电子课件)

人工智能及其应用 (免费电子课件)

电机学学习指导

智能控制理论及应用 (免费电子课件)

电力系统微机继电保护 (免费电子课件)

电器与可编程控制器应用技术 第3版 (免费电子课件)

贾好来

彭鸿才

孙建忠 刘凤春

刘凤春 孙建忠 牟宪民

孙丽华

王再英 刘淮霞 陈毅静

曾毅

张德江

李华 范多旺

赵阳

荣命哲

吉海彦

王惠中 王强 李策

丁树模

丁学文

孔月萍 周继 于军琪

赵莉华 曾成碧 张代润

韩力群

于群 曹娜

邓则名 程良伦 谢光汉

编辑热线: (010)88379727

地址: 北京市百万庄大街22号 邮政编码: 100037
联系电话: (010)88379694 网址: <http://www.cmpedu.com> (机工教材网)
(010)88379621 E-mail: cmp@cmpedu.com
购书热线: (010)88379639 网址: <http://www.cmpbook.com> (机工门户网)
(010)88379641 E-mail: cmp@cmpbook.com
(010)88379643

● ISBN 978-7-111-25052-4

● 策划: 刘丽敏 / 封面设计: 张静

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-111-25052-4



9 787111 250524 >

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

电机与拖动

MATLAB 仿真与学习指导

刘凤春 孙建忠 牟宪民 编著
陈希有 主审



机械工业出版社

本书是与孙建忠、刘凤春主编的《电机与拖动》相配套的教学辅助教材，是一本将电机与拖动理论和 MATLAB 仿真技术有机结合的新颖教材。

本书分上、下两篇。上篇为电机与拖动学习指导，共 11 章，与主教材《电机与拖动》的章节一一对应。每一章节由教学基本要求、学习指导、典型题分析以及思考题与习题解答部分组成。下篇为电机与拖动 MATLAB 仿真，共 5 章。包括 MATLAB 概要、变压器的 MATLAB 仿真、直流电动机的 MATLAB 仿真、异步电动机的 MATLAB 仿真、同步电机的 MATLAB 仿真和附录。通过大量的仿真实例，引导读者快速掌握 MATLAB 仿真工具的使用方法。附录为读者提供了使用 MATLAB/Simuink 仿真时的快速参考。

本书既可作为高等学校电机与拖动课程的教学参考书，也可作为电机电气仿真教学、课程设计的参考书，亦可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动 MATLAB 仿真与学习指导/刘凤春等编. —北京: 机械工业出版社, 2008.9

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

ISBN 978-7-111-25052-4

I. 电… II. 刘… III. ①电机—计算机辅助计算—软件包, MATLAB—高等学校—教学参考资料②电力传动—计算机辅助计算—软件包, MATLAB—高等学校—教学参考资料 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 135202 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 刘丽敏 责任校对: 李秋荣

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宁

北京机工印刷厂印刷 (北京樱花印刷厂装订)

2008 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·16 印张·392 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-25052-4

定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

前言

本书是与孙建忠、刘凤春主编的《电机与拖动》(机械工业出版社出版)配套的辅助教材。编写目的是为学生自学提供帮助、为教师教学提供参考。同时引导读者将先进的计算机仿真工具应用于“电机与拖动”这门传统课程。

本书分上、下两篇。上篇为电机与拖动学习指导,共11章,与主教材《电机与拖动》的章节一一对应。每一章由“教学基本要求”、“学习指导”、“典型题分析”以及“思考题与习题解答”几部分组成(第6章和第11章没有“典型题分析”)。在“教学基本要求”中,按照“了解”、“理解”和“掌握”3个层次,详细说明了每一章中对各个知识点应该掌握的程度;在“学习指导”中,简要地总结了每一章的基本知识,帮助读者理解关键概念并理顺各个知识点之间的联系;在“典型题分析”中,详细分析计算了一些具有综合性的问题,用于引导读者掌握“电机与拖动”课程中常见问题的分析与计算;在“思考题与习题解答”中,给出了主教材中全部思考题与习题的详细解答,以利于读者深刻理解课程的基本概念,同时也是课堂讨论的好素材。

下篇为电机与拖动 MATLAB 仿真,共5章。包括 MATLAB 概要、变压器的 MATLAB 仿真、直流电动机的 MATLAB 仿真、异步电动机的 MATLAB 仿真、同步电机的 MATLAB 仿真和附录。附录给出了 Simulink 基本库模块和电力系统模块库(SimPowerSystems)中的常用模块,为读者提供了使用 MATLAB/Simuink 仿真时的快速参考。

自 MATLAB 仿真工具问世以来,凭借其强大的数值计算能力、出色的数据图形可视化技术以及日益丰富的 Simulink 动态仿真模型库,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。特别是在 Simulink 环境下使用的电力系统模块库(SimPowerSystems),它可用于电路、电力电子系统、电机与拖动系统以及电力传输系统等工程技术问题的仿真。MATLAB 已成为当今工科院校大学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。这将有效缓解学生对学习该课程的畏难情绪,激发其学习热情和兴趣,也为对电机实现进一步的控制奠定基础。因此,在电机与拖动课程中介绍并使用 MATLAB 这一仿真工具是十分必要的。

本书 MATLAB 仿真部分基于 MATLAB 7.1 平台编写。通过大量仿真实例,引导读者在巩固已有的电机与拖动基本知识的同时,快速掌握 MATLAB 仿真工具的使用方法。教师适当利用本书所提供的例题和练习题,可以在不增加学时的情况下,使学生初步掌握 MATLAB 的使用方法,为后续专业课程学习以及将来从事科技工作奠定基础。

本书由大连理工大学刘凤春、孙建忠和牟宪民编写。其中,第2、3、5、6、10、11章由刘凤春编写;第1、4、7~9章由孙建忠编写;第12~16章以及附录由牟宪民编写。全书由刘凤春统稿。

本书承蒙大连理工大学陈希有教授主审并提出许多宝贵的意见,谨此致以衷心的感谢。在本书的编写过程中,参考了国内外有关的著作,在此对这些著作的作者表示诚挚的谢意。

关于本书的编写,我们在主观上倾注了极大的精力,力求谨慎从事,但限于学识与经验,疏漏之处,仍恐难免,恳请广大同行和读者不吝赐教。意见和要求请发送至: lfc5e001@dlut.edu.cn。

本书是电机与拖动立体化教材建设内容之一,配套的《电机与拖动多媒体教学光盘》(978-7-89482-790-6)已出版发行。

编 者

2008年4月于大连

目 录

前言

上篇 电机与拖动学习指导

第1章 电机学基础知识	2	6.2 学习指导	91
1.1 基本要求	2	6.3 思考题与习题解答	93
1.2 学习指导	2	第7章 电力拖动基础	97
1.3 典型题分析	4	7.1 基本要求	97
1.4 思考题与习题解答	5	7.2 学习指导	97
第2章 直流电机	10	7.3 典型题分析	98
2.1 基本要求	10	7.4 思考题与习题解答	99
2.2 学习指导	10	第8章 直流电动机的电力拖动	105
2.3 典型题分析	12	8.1 基本要求	105
2.4 思考题与习题解答	14	8.2 学习指导	105
第3章 变压器	27	8.3 典型题分析	106
3.1 基本要求	27	8.4 思考题与习题解答	108
3.2 学习指导	27	第9章 异步电动机的电力拖动	118
3.3 典型题分析	31	9.1 基本要求	118
3.4 思考题与习题解答	36	9.2 学习指导	118
第4章 异步电机	55	9.3 典型题分析	120
4.1 基本要求	55	9.4 思考题与习题解答	122
4.2 学习指导	55	第10章 同步电动机的电力拖动	134
4.3 典型题分析	57	10.1 基本要求	134
4.4 思考题与习题解答	60	10.2 学习指导	134
第5章 同步电机	70	10.3 思考题与习题解答	136
5.1 基本要求	70	第11章 电力拖动系统中电动机的	
5.2 学习指导	70	选择	139
5.3 典型题分析	73	11.1 基本要求	139
5.4 思考题与习题解答	75	11.2 学习指导	139
第6章 控制电机	91	11.3 思考题与习题解答	140
6.1 基本要求	91		

下篇 电机与拖动 MATLAB 仿真

第12章 MATLAB 概要	146	12.2.1 MATLAB 主窗口	146
12.1 MATLAB 简介	146	12.2.2 图形显示窗口	147
12.2 MATLAB 工作环境	146	12.2.3 M 文件编辑器	148

12.2.4 联机帮助	149	仿真	198
12.3 MATLAB 语言要点	150	14.3.2 直流电动机改变励磁电流调速 仿真	199
12.3.1 变量	150	小结	201
12.3.2 运算符	151	练习题	202
12.3.3 流程控制	151	第 15 章 异步电动机的 MATLAB	
12.3.4 基本数学函数	151	仿真	203
12.4 命令文件 (M 函数和 M 文件)		15.1 异步电动机人为机械特性仿真	203
简介	152	15.2 三相异步电动机启动和制动的仿 真	205
12.4.1 M 文件	152	15.2.1 异步电动机直接启动仿真	205
12.4.2 M 函数	152	15.2.2 异步电动机定子串电阻启动仿 真	210
12.5 Simulink 动态系统仿真工具	153	15.2.3 异步电动机能耗制动仿真	211
12.5.1 Simulink 交互式仿真集成环境 ..	154	15.3 异步电动机正反转和调速仿真	213
12.5.2 Simulink 仿真模型的建立	154	15.3.1 异步电动机正反转控制仿真	213
练习题	158	15.3.2 异步电动机调压调速仿真	213
第 13 章 变压器的 MATLAB 仿真	159	小结	215
13.1 磁路基础计算	159	练习题	215
13.1.1 磁路计算仿真	159	第 16 章 同步电机的 MATLAB 仿	
13.1.2 磁饱和引起的磁化电流畸变	160	真	216
13.1.3 磁滞引起的磁化电流畸变	162	16.1 同步发电机的功角特性仿真	216
13.2 变压器仿真	165	16.2 同步发电机突然短路仿真	218
13.2.1 变压器负载运行状态仿真	165	16.3 同步电动机启动和制动仿真	225
13.2.2 变压器暂态过程仿真	170	16.3.1 同步电动机直接启动和能耗制动 仿真	225
13.2.3 变压器联结组别仿真	174	16.3.2 同步电动机减压限流启动仿 真	229
小结	178	16.4 同步电动机调速仿真	233
练习题	179	小结	236
第 14 章 直流电动机的 MATLAB		练习题	236
仿真	180	附录	237
14.1 直流电动机的机械特性仿真	180	附录 A Simulink 基本库模块	237
14.2 直流电动机的启动和制动仿真	185	附录 B 电力系统模块库常用模块	240
14.2.1 直流电动机直接启动仿真	185	参考文献	247
14.2.2 直流电动机电枢串联电阻起 动仿真	190		
14.2.3 直流电动机能耗制动仿真	191		
14.2.4 直流电动机反接制动仿真	196		
14.3 直流电动机调速仿真	198		
14.3.1 直流电动机改变电枢电压调速			

上 篇

电机与拖动学习指导

第 1 章 电机学基础知识

1.1 基本要求

1. 了解电机的基本分类。
2. 了解磁场的基本物理量。
3. 掌握磁路的分析方法。
4. 掌握电机学的基本定律：全电流定律、电磁感应定律和电磁力定律。
5. 理解电机的可逆性原理。
6. 了解电机的主要制造材料，掌握铁磁材料的重要特性。

1.2 学习指导

1. 电机的分类

电机是实现能量转换和信号转换的电磁装置，在现代社会中起着重要的作用。按照电机的结构特点及电源性质不同，电机分类如图 1-1 所示。

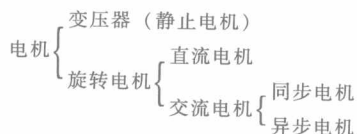


图 1-1 电机的分类

2. 电机中的电与磁

电机是通过电磁感应原理来实现能量变换的，电和磁是构成电机的两大要素，二者缺一不可。电在电机中主要是以路的形式出现，即由电机内的绕组构成电机的电路。磁在电机中是以场的形式存在的。

表征磁场强弱的物理量是磁感应强度 B ，磁场中各点的磁感应强度可以用磁感线的疏密程度来表示，应注意磁感线是人为地设想出来、画出来的，并非磁场中真的有这种线存在。

穿过某一截面 A 的磁感应强度 B 的通量称为磁通量，简称磁通，用 Φ 表示，定义为

$$\Phi = \int_A B dA$$

磁场强度 H 是进行磁场计算时引进的一个辅助物理量，在各向同性介质中，它与磁感应强度 B 之间有如下关系：

$$B = \mu H$$

在工程分析计算中，常将磁场简化为磁路来简化电机的分析与设计。电路和磁路的类比见表 1-1。

表 1-1 电路和磁路的类比

电 路	磁 路
电流 I	磁通 Φ
电流密度 J	磁通密度 B
电动势 E	磁动势 F
电阻 $R = \rho \frac{l}{A}$	磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu A}$
电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R}$	磁路欧姆定律 $\Phi = \frac{F}{R_m}$

但是, 必须指出, 电路和磁路只是形式上相似, 二者在本质上是区别的, 主要体现在以下方面:

1) 在电路中有真正的带电粒子作定向运动, 而在磁路中却没有任何粒子沿着闭合回路流动。

2) 对电来讲, 存在电的导体和绝缘体, 电流集中在导体中通过, 但是并不存在磁的导体和绝缘体。因此, 磁路概念并不像电路概念那样简明。

3. 电机学的基本定律

安培环路定律、电磁感应定律和电磁力定律是分析电机的基本定律, 可逆性原理是电机中的普遍规律, 简要回顾如下:

(1) 安培环路定律 (全电流定律)

在磁场中, 磁场强度矢量沿任一闭合路径的线积分, 等于该闭合路径所包围的电流的代数和, 即

$$\int_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum i$$

式中, $\sum i$ 为全电流 (传导电流和位移电流) 的代数和。

当电流的方向与闭合线上磁场强度的方向满足右手螺旋规律时, 电流取正值, 否则取负值。

(2) 电磁感应定律

设有一匝数为 N 的线圈位于磁场中, 当与线圈交链的磁链 $\psi = N\Phi$ 发生变化时, 线圈中将有感应电动势产生。感应电动势的数值与线圈所匝链的磁链的变化率成正比。如果感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋关系, 则感应电动势为

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - N \frac{d\Phi}{dt}$$

式中, 负号含义是线圈中的感应电动势倾向于阻止线圈内磁链的变化。

(3) 电磁力定律

位于磁场中的载流导体受到磁场力的作用, 该力称为电磁力。如果磁场与载流导体相互垂直, 则作用在导体上的电磁力为

$$f = Bli$$

(4) 电机的可逆性原理

电机可逆性原理说明,发电机和电动机只是一种电机的两种不同运行方式而已。实际上,某些电机常称为发电机(或电动机),这说明该类电机作为发电机(或电动机)运行时性能较好,而不是说只能用作发电机(或电动机)。

4. 电机的制造材料

各种电机虽然结构不同,但都是由导电回路(包括定子回路和转子回路)和导磁回路组成的,电磁系统用绝缘材料分隔开,并利用各种结构零件组合在一起。因此,电机的制造材料主要为导电材料、导磁材料、绝缘材料以及结构材料四大类。此外还有散热、冷却、润滑等材料。

铁磁材料(铁族元素及其合金)是良好的导磁材料,工程上用铁磁材料来构成电机和变压器的磁路。铁磁材料具有高导磁性、磁饱和特性和磁滞特性。

铁磁材料在交变磁场作用下反复磁化时,内部磁畴不停翻转和摩擦会产生磁滞损耗;由于铁心既是导磁体又是导体,交变磁场在铁心中感应的电动势将在铁心中引起涡流,从而在铁心中产生涡流损耗。磁滞损耗和涡流损耗统称为铁耗。电机和变压器采用各种电工钢片(俗称硅钢片)叠成铁心,就是为了减小铁耗。

绝缘材料在电机中的作用是把导电部分(如铜线)与不导电部分(如铁心)隔开,或把不同电位的导体隔开(如相间绝缘、匝间绝缘)。在热的作用下,绝缘材料会逐渐老化,即逐渐丧失其机械强度和绝缘性能。为了保证电机能在一定的年限内可靠运行,对绝缘材料都规定了容许工作温度。绝缘材料可分为 Y、A、E、B、F、H、C 七级,其中 Y 级绝缘已基本淘汰,各级绝缘的允许工作温度和主要材料见表 1-2。

表 1-2 绝缘材料的等级

绝缘等级	Y	A	E	B	F	H	C
允许工作温度/℃	90	105	120	130	155	180	> 180

1.3 典型题分析

【例 1-1】 图 1-2 是变压器的原理图,图中还标出了变压器一次、二次绕组的电压、电流和磁通的正方向,试用电磁理论分析理想变压器的条件。

解 根据电磁感应定律,主磁通 Φ 分别在一次绕组和二次绕组中感应出电动势 e_1 和 e_2 , 其大小为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 和 $\Phi_{2\sigma}$ 在一次绕组和二次绕组中产生感应电动势 $e_{1\sigma}$ 和 $e_{2\sigma}$, 其大小为

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt}, \quad e_{2\sigma} = -N_2 \frac{d\Phi_{2\sigma}}{dt}$$

根据基尔霍夫定律可列出一、二次绕组的电压方程为

$$u_1 = R_1 i_1 + e_1 + e_{1\sigma}, \quad u_2 = -R_2 i_2 + e_2 + e_{2\sigma}$$

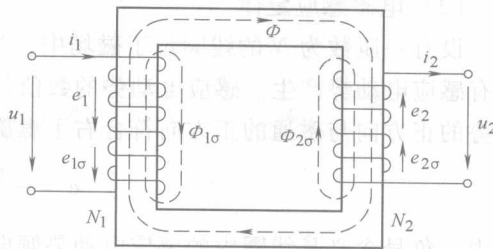


图 1-2 变压器原理图

故一、二次绕组的电压比为

$$\frac{u_1}{u_2} = -\frac{R_1 i_1 + e_1 + e_{1\sigma}}{R_2 i_2 + e_2 + e_{2\sigma}}$$

而理想变压器的电压比为

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{e_1}{e_2}$$

可见, 只有忽略绕组的电阻损耗, 即 $R_1 = R_2 = 0$; 且变压器没有漏磁 ($\Phi_{1\sigma} = \Phi_{2\sigma} = 0$), 即一、二次绕组全耦合时, 理想变压器的电压关系才成立。

设变压器磁路的平均磁场强度为 H , 磁路平均长度为 l , 磁路的平均截面积为 A , 如忽略变压器中的涡流, 根据全电流定律得

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = Hl = \frac{\Phi}{\mu A}$$

而理想变压器的电流比为

$$\frac{i_1}{i_2} = -\frac{N_2}{N_1}$$

可见, 只有忽略变压器的铁损耗, 且铁心的磁导率 $\mu = \infty$, 即磁路的磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu A} = 0$, 亦即变压器不需要励磁电流时, 理想变压器的电流关系才成立。由于绕组的电感 $L = \frac{N^2}{R_m}$, 所以, 从电路的角度看, 不需要励磁电流也就是一、二次绕组的电感为无穷大。

总之, 理想变压器电压、电流关系成立的条件是忽略变压器的电阻损耗和铁心损耗, 且一、二次绕组的电感为无穷大。

1.4 思考题与习题解答

1-1 磁路的结构和尺寸一定, 磁路的磁阻是否一定?

答: 磁路的磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu A}$, 它除了与磁路的长度 l 和面积 A 有关外, 还与磁路的磁导率 μ 成反比。而铁磁材料的磁导率随磁路的饱和程度增加而减小。因此, 在磁路的结构尺寸一定时, 磁路的饱和程度越高, 则磁阻越大。

1-2 说明直流磁路和交流磁路的主要不同点。

答:

1) 直流磁路中磁通恒定, 励磁绕组中无感应电动势; 而交流磁路中磁通随时间交变, 因而会在励磁绕组中产生感应电动势。

2) 直流磁路中无铁心损耗, 而交流磁路中有铁心损耗。

3) 交流磁路中磁饱和现象会导致电流、磁通和电动势波形畸变; 而直流磁路中不会。

1-3 比较磁路与电路的主要不同点。

答:

1) 电流通过电阻时有功率损耗, 而磁通通过磁阻时无功率损耗。

2) 自然界中不存在绝对的磁绝缘材料, 甚至连空气也是导磁的, 因此磁路中存在漏磁现象; 而电路则不然。

3) 磁路的磁阻随通过的磁通变化而变化, 而电路的电阻不随流过的电流变化而变化 (不考虑电流引起的温度变化)。

1-4 磁滞损耗和涡流损耗是什么原因引起的, 其大小与哪些因素有关?

答: 磁滞损耗是由于磁场交变时铁磁物质内磁畴之间反复摩擦, 消耗能量而产生的。磁滞损耗 $p_h = C_h f B_m^n V$, 它与磁场的交变频率 f 成正比, 与磁密幅值 B_m 的 n ($n = 1.6 \sim 2.3$) 次方成正比。

涡流损耗是由于通过铁心的磁通 Φ 发生变化时, 在铁心中产生感应电动势并引起电流 (涡流), 从而产生电损耗。涡流损耗 $P_e = C_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V$, 它与频率 f 的平方、 B_m 的平方以及铁心厚度的平方成正比。

1-5 公式 $e = L \frac{di}{dt}$ 、 $e = -\frac{d\Psi}{dt}$ 、 $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 及 $e = Blv$ 都是电磁感应定律的不同写法, 哪一个具有普遍意义?

答: 公式 $e = -\frac{d\Psi}{dt}$ 是电磁感应定律的基本公式, 具有普遍意义。而 $e = L \frac{di}{dt}$ 适用于计算线性线圈的自感电动势; $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 适用于计算多匝线圈通过同一主磁通时绕组的感应电动势; $e = Blv$ 适用于求运动导体切割磁感线时产生的电动势, 且需 B 、 l 、 v 三者互相垂直。

1-6 既然电机都是可逆的, 为什么工程实际中还会有发电机和电动机之分?

答: 任何电机既可以作为发电机运行, 也可以作为电动机运行, 这是电机的可逆性原理。但是, 电机在正常情况下是用作发电机还是电动机, 其设计和制造都有不同的要求。因此, 同一台电机用作不同用途时其性能会有很大的差异。

1-7 将一个铁心线圈分别接到频率为 50Hz 和 60Hz 的交流电源上, 如果电源电压相等, 不考虑线圈的漏磁和电阻, 问哪种情况下铁心中的磁通大? 哪种情况下线圈的感应电动势大?

答: 在不考虑线圈的漏磁和电阻的条件下, 根据线圈的电压方程, 可知此时线圈的感应电动势等于电源电压, 因此两种情况下线圈的感应电动势相等。由 $E = 4.44fN\Phi_m$ 可知, 频率为 50Hz 时, 铁心中的磁通较大。

1-8 图 1-3 所示的磁路由 DW360-50 电工钢片叠成, 其磁化曲线见表 1-3, 图中尺寸单位为 mm, 电工钢片的叠厚为 40mm, 铁心的叠压系数为 $k_{Fe} = 0.95$, 励磁线圈匝数为 1000, 试求当铁心中磁通为 $1.2 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 时, 励磁电流为多少? 励磁线圈的电感为多少?

表 1-3 DW360-50 直流磁化曲线数据

B	0	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
H	0	44.59	48.57	54.94	58.92	63.49	66.48	69.27	71.66	74.04	78.03
B	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.0	1.05	1.10	1.15	1.20
H	82.01	85.99	95.54	103.50	111.46	119.43	127.39	143.31	159.25	191.08	218.95
B	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	
H	254.78	314.49	406.05	557.32	835.99	1353.50	2308.92	3642.42	5254.78	7165.61	

注: 表中 B 的单位为 T, 查得 H 的单位为 A/m。

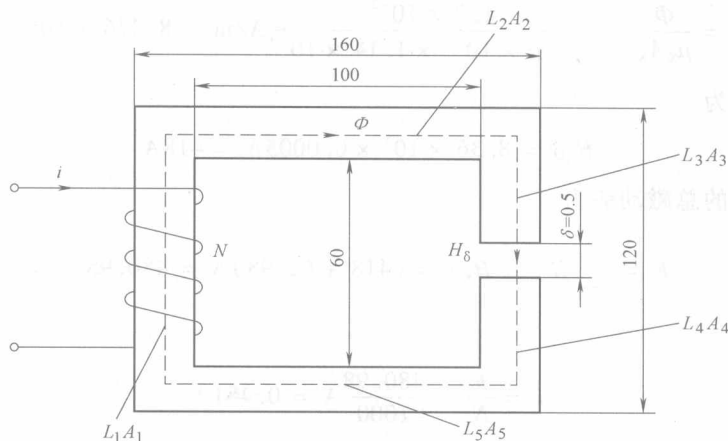


图 1-3 题 1-8、1-9 图

解 各段磁路铁心的净面积分别为

$$A_{i1} = k_{Fe} A_1 = 0.95 \times \frac{160 - 100}{2} \times 40 \text{ mm}^2 = 1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{i2} = k_{Fe} A_2 = 0.95 \times \frac{120 - 60}{2} \times 40 \text{ mm}^2 = 1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{i3} = A_{i4} = A_{i1} = 1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{i5} = A_{i2} = 1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

由于各段铁心的净面积相等，其平均磁通密度均为

$$B_1 = B_2 = B_3 = B_4 = B_5 = \frac{\Phi}{A_{i1}} = \frac{1.2 \times 10^{-3}}{1.14 \times 10^{-3}} \text{ T} = 1.05 \text{ T}$$

查表 1-3，可得各段铁心的磁场强度为

$$H_1 = H_2 = H_3 = H_4 = H_5 = 143.31 \text{ A/m}$$

各段磁路铁心的平均长度为

$$l_1 = \frac{120 + 60}{2} \text{ mm} = 0.09 \text{ m}$$

$$l_2 = l_5 = \frac{160 + 100}{2} \text{ mm} = 0.13 \text{ m}$$

$$l_3 + l_4 = \frac{l_1}{2} - \delta = (0.09 - 0.0005) \text{ m} = 0.0895 \text{ m}$$

铁心部分的磁压降为

$$\sum_{i=1}^5 H_i l_i = 143.31 \times (0.09 + 2 \times 0.13 + 0.0895) \text{ A} = 62.98 \text{ A}$$

不考虑边缘效应，则气隙中磁通与铁心中相等，故气隙中磁场强度为

$$H_{\delta} = \frac{\Phi}{\mu_0 A_{\delta}} = \frac{1.2 \times 10^{-3}}{4 \times \pi \times 10^{-7} \times 1.14 \times 10^{-3}} \text{ A/m} = 8.376 \times 10^5 \text{ A/m}$$

气隙磁压降为

$$H_{\delta} \delta = 8.36 \times 10^5 \times 0.0005 \text{ A} = 418 \text{ A}$$

该磁路所需的总磁动势为

$$F = \sum_{i=1}^5 H_i l_i + H_{\delta} \delta = (418 + 62.98) \text{ A} = 480.98 \text{ A}$$

励磁电流为

$$i = \frac{F}{N} = \frac{480.98}{1000} \text{ A} = 0.481 \text{ A}$$

励磁线圈的电感为

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{1000 \times 1.2 \times 10^{-3}}{0.481} \text{ H} = 2.495 \text{ H}$$

1-9 磁路尺寸同题 1-8, 试求当励磁电流为 0.6A 时, 铁心中磁通为多少? 励磁线圈的电感为多少?

解 本题采用迭代法求解。

空气隙磁压降一般占磁路总磁压降的 80% 以上, 本题设空气隙磁压降占总磁压降的 82%, 则气隙磁压降为

$$H_{\delta} \delta = 0.82 \times 1000 \times 0.6 \text{ A} = 492 \text{ A}$$

气隙磁场强度为

$$H_{\delta} = \frac{492}{0.0005} \text{ A/m} = 9.84 \times 10^5 \text{ A/m}$$

气隙磁通密度为

$$B_{\delta} = \mu_0 H_{\delta} = 4\pi \times 10^{-7} \times 9.84 \times 10^5 \text{ T} = 1.237 \text{ T}$$

由于不考虑边缘效应, 气隙中磁通与铁心中相等, 且气隙面积等于铁心面积, 故各段铁心中磁通密度等于气隙磁通密度, 即

$$B_i = B_{\delta} = 1.237 \text{ T}$$

查表 1-3 知磁通密度为 1.2T 和 1.25T 时, 磁场强度分别为 218.95A/m 和 254.78A/m, 通过插值计算, 可得

$$H_i = \left[218.95 + \frac{254.78 - 218.95}{1.25 - 1.2} \times (1.237 - 1.20) \right] \text{ A/m} = 245.8 \text{ A/m}$$

铁心磁压降为

$$\sum_{i=1}^5 H_i l_i = 245.8 \times (0.09 + 2 \times 0.13 + 0.0895) \text{ A} = 108.02 \text{ A}$$

该磁路计算总磁动势为

$$F = \sum_{i=1}^5 H_i l_i + H_{\delta} \delta = (492 + 108.02) \text{ A} = 600.02 \text{ A}$$

实际磁动势与计算磁动势的误差为

$$\frac{600.02 - 600}{600} \times 100\% = 0.003\% < 5\%$$

计算精度满足要求。如果计算误差大于5%，则应对假设值进行修正，重复上述计算步骤，直到满足精度要求为止。

铁心的磁通密度为

$$\Phi = B_i A_i = 1.23 \times 1.14 \times 10^{-3} \text{ Wb} = 1.41 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

励磁线圈的电感为

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{1000 \times 1.41 \times 10^{-3}}{0.6} \text{ H} = 2.35 \text{ H}$$