



普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材

# 电机与拖动 实验及学习指导

DIANJI YU TUODONG SHIYAN JI XUEXI ZHIDAO

刘凤春 孙建忠 牟宪民 编著

第2版



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材

# 电机与拖动实验及学习指导

第2版

刘凤春 孙建忠 牟宪民 编 著  
陈希有 主 审



机械工业出版社

本教材是与孙建忠、刘凤春主编的《电机与拖动》第3版( ISBN 978-7-111-53886-8, 机械工业出版社出版)相配套的辅助教材,分为上、下两篇。上篇为电机与拖动学习指导,共11章,这是与主教材《电机与拖动》第3版的章节一一对应的。每一章由“基本要求”“学习指导”“典型题分析”“思考题与习题解答”等几部分组成。下篇为电机与拖动实验,共4章。从第12章到第15章依次为实验预备知识、基础性实验、设计性实验和电机仿真实验。其中,在实验预备知识章节中,介绍了电机与拖动实验的一般要求、教学实验平台所包含的基本设备以及安全用电常识。在基础性实验和设计性实验章节中,按照直流电机、变压器、异步电机、同步电机和控制电机的电机类别给出了丰富的实验项目。在仿真实验章节,首先介绍了MATLAB 仿真软件的基本使用方法,然后给出了各类电机的MATLAB 仿真实验范例以及仿真实验项目和要求。通过大量仿真范例,方便学生快速掌握MATLAB 仿真工具的使用方法。

本教材既是高等学校电机与拖动实验课程的教材,又是电机与拖动理论课程重要的教学参考书,还可以作为学习电机仿真的入门教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动实验及学习指导/刘凤春,孙建忠,牟宪民编著. —2版.  
—北京:机械工业出版社,2017.8  
普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-111-57488-0

I. ①电… II. ①刘… ②孙… ③牟… III. ①电机—实验—高等学校—  
教学参考资料②电力传动—实验—高等学校—教学参考资料 IV. ①TM3-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第175070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:王康 责任编辑:王康 刘丽敏  
责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明  
责任印制:李昂  
三河市宏达印刷有限公司印刷  
2017年9月第2版第1次印刷  
184mm×260mm·14印张·344千字  
标准书号:ISBN 978-7-111-57488-0  
定价:35.00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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

# 前 言

本教材是与孙建忠、刘凤春主编的《电机与拖动》第3版（ISBN 978-7-111-53886-8，机械工业出版社出版）配套的辅助教材，分为上、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》第3版的章节一一对应。每一章由“基本要求”“学习指导”“典型题分析”“思考题与习题解答”等几部分组成（第6章、第10章和第11章没有典型题分析）。在“基本要求”中，按照“了解”“理解”“掌握”三个层次，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的详细解答，以利于读者深刻理解课程的基本概念；对于计算类的习题，每一章给出了绝大部分习题的详细计算过程，并留有几道省略计算过程只给出答案的习题，目的是为学习者留出一定独立思考的空间，这些题亦可作为教师课堂讨论的素材。

下篇为电机与拖动实验，共4章。从第12章到第15章依次为实验预备知识、基础性实验、设计性实验和电机仿真实验。其中，在实验预备知识章节中，介绍了电机与拖动实验的一般要求、教学实验平台所包含的基本设备以及安全用电常识。在基础性实验和设计性实验章节中，按照直流电机、变压器、异步电机、同步电机和控制电机的电机类别给出了丰富的实验项目，指导教师可以根据实验学时和学生的实验水平，设定必做实验项目和选做实验项目。在电机仿真实验章节，首先介绍了MATLAB仿真软件的基本使用方法，然后给出了各类电机的MATLAB仿真实验范例以及仿真实验项目和要求。通过大量仿真范例，方便学生快速掌握MATLAB仿真工具的使用方法。

本教材所提供的MATLAB仿真程序是基于MATLAB 2016平台编写的。MATLAB是一款可用于电路、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。自MATLAB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。因此，利用MATLAB仿真软件可以方便地构成电机学的仿真实验平台。在这样的仿真实验平台上，学生设计的任意实验方案均可以实施，不仅很好地弥补了实验室硬件条件的不足，也为实验前的预习工作创造了优越的条件。仿真实验环境可以为学生实际动手连接电路和测试电路提供很好的“练习场所”，为学生进入实验室实施真实实验奠定良好的基础。而且，交互式的仿真方法与分析功能为学生深入理解理论或查找方法错误提供了极大的帮助，也使学生得到最新科学研究方法的培养和训练。

电机与拖动实验是电机与拖动课程的实践性教学环节。其基本任务不仅要帮助学生理论联系实际，巩固和加深对所学理论知识的理解，更重要的是让学生得到实践技能的基本训练，提高学生分析问题和解决问题的能力，树立工程实际观念，培养严谨而科学的工作作风。因此，通过实验课程，学生的实践能力和学科综合素质将得到大幅提高。

实验课程与理论课程的重要差别在于，学生是实验课堂的主体，教师仅起辅助作用。在实验课

程实施之前, 学生必须认真阅读本教材的第 12 章, 明确电机与拖动实验的一般要求, 了解教学实验台(设备)的组成和基本使用方法, 学习安全用电常识, 并熟记安全操作规程。学生在每次实验之前, 必须在课前通读教材的相关章节, 明确实验目的(任务), 充分理解实验项目的具体内容, 弄清实验原理、实验线路和实验步骤, 了解本次实验所需要的实验设备、仪器和仪表以及它们的使用方法、使用注意事项, 撰写预习报告。

提交正确的预习报告是能进入实验室、实施实验的必要条件。预习报告的主要内容包括解答基本理论问题以及与实验设备、操作方法相关的问题。对于设计性实验, 还需要学生根据实验目的和要求, 自主拟定实验线路、实验步骤、实验数据表格, 确定所需的实验设备。在实验过程中, 必须严格遵守实验室的各项规章制度和安全操作规程, 严格遵守“先接线后通电, 先断电后拆线”的操作程序。完成接线、检查无误后, 必须经指导教师的同意, 方可通电实验。出现故障时, 应立刻断电, 并配合指导教师查找原因、排除故障。实验数据测试完毕, 应呈交指导教师检查, 经指导教师签字认可后, 方可拆线。

本教材由大连理工大学刘凤春、孙建忠和牟宪民编著。其中, 第 2、3、5、6、10~13 章由刘凤春编写; 第 1、4、7、8、9、14 章由孙建忠编写; 第 15 章由牟宪民编写。全书由刘凤春统稿。

本教材承蒙大连理工大学陈希有教授主审并提出许多宝贵的修改意见, 谨此致以衷心的感谢。在本教材的编写过程中, 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。本教材的编写还得到了大连理工大学教务处的大力支持。

关于本教材的编著, 我们在主观上倾注了极大精力, 力求精益求精, 但限于学识与经验, 疏漏之处, 仍恐难免, 殷切希望使用本教材的师生给予批评指正。作者也可以为使用本教材的教师提供原始 MATLAB 仿真程序, 以及部分只有答案的练习题的全解, 联系方式: [lfc5e001@dlut.edu.cn](mailto:lfc5e001@dlut.edu.cn)。

编著者

# 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	3
1.1 基本要求	3
1.2 学习指导	3
1.3 典型题分析	5
1.4 思考题与习题解答	6
第2章 直流电机	9
2.1 基本要求	9
2.2 学习指导	9
2.3 典型题分析	11
2.4 思考题与习题解答	12
第3章 变压器	21
3.1 基本要求	21
3.2 学习指导	21
3.3 典型题分析	25
3.4 思考题与习题解答	29
第4章 异步电机	41
4.1 基本要求	41
4.2 学习指导	41
4.3 典型题分析	43
4.4 思考题与习题解答	45
第5章 同步电机	53
5.1 基本要求	53
5.2 学习指导	53
5.3 典型题分析	57
5.4 思考题与习题解答	58

<b>第6章 控制电机</b> .....	69
6.1 基本要求.....	69
6.2 学习指导.....	69
6.3 思考题与习题解答.....	72
<b>第7章 电力拖动基础</b> .....	74
7.1 基本要求.....	74
7.2 学习指导.....	74
7.3 典型题分析.....	75
7.4 思考题与习题解答.....	76
<b>第8章 直流电动机的电力拖动</b> .....	81
8.1 基本要求.....	81
8.2 学习指导.....	81
8.3 典型题分析.....	82
8.4 思考题与习题解答.....	84
<b>第9章 异步电动机的电力拖动</b> .....	91
9.1 基本要求.....	91
9.2 学习指导.....	91
9.3 典型题分析.....	93
9.4 思考题与习题解答.....	95
<b>第10章 同步电动机的电力拖动</b> .....	103
10.1 基本要求.....	103
10.2 学习指导.....	103
10.3 思考题与习题解答.....	105
<b>第11章 电力拖动系统中电动机的选择</b> .....	108
11.1 基本要求.....	108
11.2 学习指导.....	108
11.3 思考题与习题解答.....	110

## 下篇 电机与拖动实验

<b>第12章 实验预备知识</b> .....	115
12.1 实验的目的、意义及一般要求.....	115
12.2 实验设备.....	118
12.3 安全用电常识.....	123
<b>第13章 基础性实验</b> .....	125
13.1 直流发电机实验.....	125

---

13.2	单相变压器实验 .....	129
13.3	三相笼型异步电动机实验 .....	134
13.4	三相同步发电机并联运行实验 .....	140
13.5	三相同步电动机实验 .....	147
13.6	步进电动机实验 .....	151
<b>第 14 章</b>	<b>设计性实验</b> .....	<b>160</b>
14.1	三相变压器实验 .....	160
14.2	变压器的并联运行实验 .....	162
14.3	并励与串励直流电动机实验 .....	164
14.4	三相绕线转子异步电动机实验 .....	166
14.5	伺服电动机实验 .....	170
14.6	永磁同步电动机实验 .....	174
<b>第 15 章</b>	<b>电机仿真实验</b> .....	<b>179</b>
15.1	MATLAB 概要 .....	179
15.2	变压器的 MATLAB 仿真 .....	186
15.3	直流电动机的 MATLAB 仿真 .....	193
15.4	异步电动机的 MATLAB 仿真 .....	203
15.5	同步电机的 MATLAB 仿真 .....	209
<b>参考文献</b>	.....	<b>215</b>





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) 理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及永磁材料的特性。

## 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。

### 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。在工程分析计算中，常将磁场简化为磁路来处理。电路和磁路的类比见表 1-1。

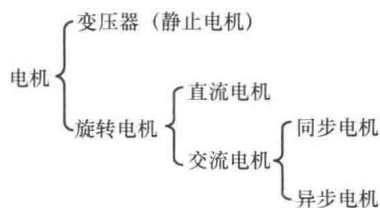


图 1-1 电机的分类

表 1-1 电路和磁路的类比

电 路	磁 路
电流 $I$ (A)	磁通 $\Phi$ (Wb)
电流密度 $J$ (A/m <sup>2</sup> )	磁通密度 $B$ (1T = 1Wb/m <sup>2</sup> )
电动势 $E$ (V)	磁动势 $F$ (A)
电阻 $R = \rho \frac{l}{A}$ ( $\Omega$ )	磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu A}$ (A/Wb 或 1/H)
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,二者在本质上是有所区别的,主要体现在以下两个方面:

1) 在电路中有真正的带电粒子作定向运动,而在磁路中却没有什么东西沿着闭合回路流动。

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磁的绝缘体。因此,磁路是磁场的近似和简化。

### 3. 电机学的基本定律及可逆性原理

全电流定律、电磁感应定律和电磁力定律是分析电机的基本定律,可逆性原理是电机运行的普遍规律,简要总结在表 1-2 中。

表 1-2 电机学的基本定律

基本定律及可逆性原理	内容	数学公式
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	$\int_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum i$ 式中,如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
电磁感应定律	设一 $N$ 匝线圈位于磁场中,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 $e$ 产生。 $e$ 的数值与线圈所交链的磁链的变化率成正比, $e$ 的方向倾向于阻止线圈内磁链的变化	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 $e = -\frac{d\psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt}$
电磁力定律	位于磁场中的载流导体所受到的磁场对它的作用力称之为电磁力;电磁力的大小与磁感应强度、导体中的电流以及导体的长度成正比,电磁力的方向由左手定则决定	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 $f = Bli$
电机的可逆性原理	任何电机既可以作为发电机运行,又可以作为电动机运行,这一性质称为电机的可逆性原理。实际上,某些电机常称为发电机(或电动机),只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(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装在一起。因此,电机的制造材料主要为导磁材料、导电材料、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。

导磁材料又称铁磁材料,它包括铁或铁与钴、镍、钨、铝等金属构成的合金。工程上用铁磁材料来构成电机和变压器的主磁路。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、不停摩擦会产生磁滞损耗;由于铁心既是导体又是电导体,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

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。旧标准将绝缘材料分为 Y、A、E、B、F、H、C 七个等级,2006 年制定的新国家标准,直接使用绝缘材料的容许工作温度代表其绝缘等级,参见表 1-3。表中,90℃(Y)级绝缘已基本淘汰。

表 1-3 绝缘材料的等级

绝缘等级(旧标准)	Y	A	E	B	F	H	C		
耐热等级/(℃)(新标准)	90	105	120	130	155	180	200	220	250

永磁材料用于产生电机的磁场,描述永磁材料特性的参数主要有退磁曲线、回复线、内禀退磁曲线和稳定性等。

永磁材料的磁滞回线在第二象限的部分称为退磁曲线,它是永磁材料的基本特性曲线。退磁曲线上磁场强度  $H$  为零时相应的磁感应强度值称为剩余磁感应强度,又称剩余磁通密度,退磁曲线上磁感应强度  $B$  为零时相应的磁场强度值称为磁感应强度矫顽力,简称矫顽力。

永磁体的工作点落在其回复线上,大部分稀土永磁材料的退磁曲线为直线,回复线与退磁曲线相重合,可以使电机的磁性能在运行过程中保持稳定,这是在电机中使用最理想的退磁曲线。

永磁材料的内在磁性能需要用内禀退磁曲线来表征。内禀退磁曲线上内禀磁感应强度  $B_i$  为零时相应的磁场强度值称为内禀矫顽力,反映永磁材料抗去磁能力的大小。

### 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  $\Phi$  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

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

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

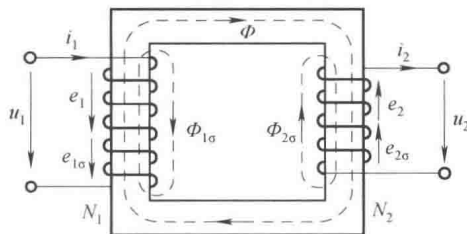


图 1-2 变压器原理图

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  $A$ ，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，只有变压器铁心的磁导率  $\mu = \infty$ ，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，理想变压器电流关系成立的条件是一、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  $\mu$  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，磁路的磁阻取决于磁路的饱和程度，磁路的饱和程度越高，磁阻越大。

1-2 说明由直流电流励磁的直流磁路和由交流电流励磁的交流磁路的不同点。

答：直流磁路和交流磁路的不同点主要体现在：

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 比较磁路与电路的不同点。

答：磁路与电路的不同点主要有：

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) 自然界中不存在对磁绝缘的材料，甚至连空气和真空也都是导磁的，因此磁路中存在漏磁现象；而电路则不然。

3) 含有铁磁材料的磁路几乎都是非线性的，而电路则大多是线性的。

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  $\Phi$  发生变化时，在铁心中产生感应电动势，这个感应电动势在铁心中引起电流（涡流）从而产生电损耗。涡流损耗  $P_e = C_e A^2 f^2 B_m^2 V$ ，它与交变频率  $f$  的二次方、 $B_m$  的二次方以及铁心厚度的二次方成正比。

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。

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 1-4，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 1-4 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。

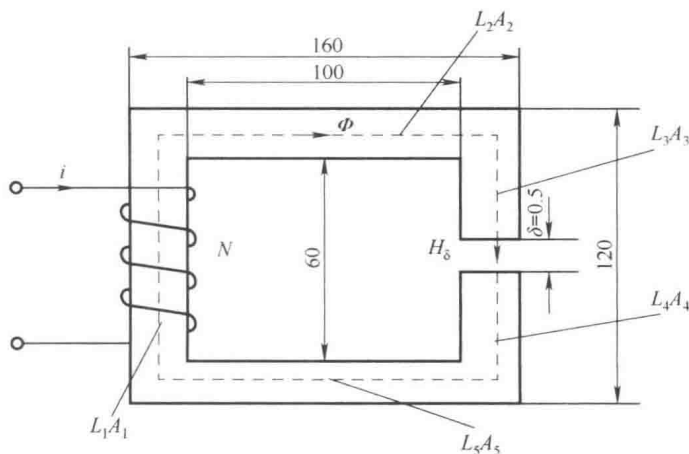


图 1-3 题 1-8、题 1-9 图

解答过程略。解答提示：注意铁心面积=叠压系数×铁心截面积。

答案：励磁电流为  $i=0.461\text{A}$ ，励磁线圈的电感为  $L=2.603\text{H}$ 。

1-9 磁路尺寸同题 1-8，试求当励磁电流为  $0.6\text{A}$  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 80%，则气隙磁压降为

$$H_{\delta}\delta = 0.8 \times 1000 \times 0.6\text{A} = 480\text{A}$$

气隙磁场强度与磁通密度分别为

$$H_{\delta} = \frac{480}{0.0005}\text{A/m} = 9.6 \times 10^5\text{A/m}$$

$$B_{\delta} = \mu_0 H_{\delta} = 4\pi \times 10^{-7} \times 9.6 \times 10^5\text{T} = 1.206\text{T}$$

不考虑边缘效应时，气隙面积等于铁心截面积；由于磁通的连续性，故气隙中的磁通及磁通密度分别与各段铁心中的磁通及磁通密度相等，即

$$B_i = \frac{\Phi_{\delta}}{k_{\text{Fe}} A_{\delta}} = \frac{B_{\delta}}{k_{\text{Fe}}} = 1.269\text{T}$$

查表 1-4 知磁通密度为  $1.25\text{T}$  和  $1.3\text{T}$  时，磁场强度分别为  $254.78\text{A/m}$  和  $314.49\text{A/m}$ ，通过插值计算，可得

$$H_i = \left[ 254.78 + \frac{314.49 - 254.78}{1.3 - 1.25} \times (1.269 - 1.25) \right] \text{A/m} = 277.5\text{A/m}$$

铁心磁压降为

$$\sum_{i=1}^5 H_i l_i = 277.5 \times (0.09 + 2 \times 0.13 + 0.0895)\text{A} = 121.96\text{A}$$

该磁路计算总磁动势为

$$F = \sum_{i=1}^5 H_i l_i + H_{\delta}\delta = (480 + 121.96)\text{A} = 601.96\text{A}$$

实际磁动势与计算磁动势的误差为

$$\frac{601.96 - 600}{600} \times 100\% = 0.327\% < 5\%$$

计算精度满足要求。如果计算误差  $> 5\%$ ，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。

铁心的磁通为

$$\Phi = B_i A_i = 1.269 \times 1.14 \times 10^{-3}\text{Wb} = 1.447 \times 10^{-3}\text{Wb}$$

励磁线圈的电感为

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{1000 \times 1.447 \times 10^{-3}}{0.6}\text{H} = 2.411\text{H}$$



## 第2章 直流电机

### 2.1 基本要求

(1) 了解直流电机的基本结构、电枢绕组的组成方式和励磁方式；掌握直流电机的工作原理和额定值。

(2) 理解直流电机的电枢反应；了解电枢反应对换向的影响和改善换向的措施。

(3) 理解直流电机的电动势和电磁转矩计算公式的物理意义。

(4) 掌握他励和并励直流电动机的基本方程式和工作特性；理解电动机的功率流程图；理解串励和复励直流电动机的工作特性。

(5) 掌握他励直流发电机的基本方程式和工作特性；理解发电机的功率流程图；理解并励直流发电机的自励过程与外特性。

### 2.2 学习指导

#### 1. 直流电机的工作原理、基本组成和额定值

直流电机按其能量转换方向的不同分为直流发电机和直流电动机，两者之间具有可逆性。

对于直流电动机，当给电枢绕组通入直流电流时，通过电刷和换向器转换为交变电流，使处于主极磁场中电枢绕组的线圈始终受到相同方向电磁转矩的作用，保证了电动机连续转动，从而实现电能到机械能的转换。对于直流发电机，当原动机拖动电枢转动时，电枢绕组的线圈切割主极磁场而产生交变感应电动势，再通过换向器和电刷转换为直流电动势，可从电刷输出直流电流，从而实现机械能到电能的转换。

直流电机主要由定子和转子两大部分组成。其基本组成如图 2-1 所示。

转子称为电枢，它是能量转换的枢纽。电枢绕组构成了直流电机的主要电路，它是由很多元件按一定规律连接起来的闭合绕组。按元件的连接方式和端接形状分类，电枢绕组主要有叠绕组和波绕组两大类。换向器是直流电机所特有的部件，与电刷配合，实现电枢绕组端部的直流电流与电枢绕组内部的交变电流之间的转换，在直流电动机中起“逆变器”的作用，在直流发电机中起“整流器”的作用。

直流电机的额定值主要有额定电压、额定电流、额定功率和额定转速等。值得注意的是，各种电机的额定功率均是指输出功率的额定值。对于电动机，额定功率是指轴上输出的额定机械功率；对于发电机，额定功率是指电枢绕组输出的额定电功率。

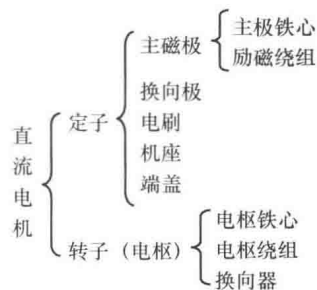


图 2-1 直流电机的基本组成