



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information •
Science and Technology

电机与拖动 学习指导及习题解答

刘 玫 孙雨萍 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

电机与拖动学习指导及习题解答

刘 玫 孙雨萍 编 著



机械工业出版社

本书是《电机与拖动》的配套学习指导书。全书共 8 章, 包括: 电机理论中常用的基本知识和基本定律、直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、三相同步电机及控制电机。书中重点总结了教材中各章节的知识要点、重点与难点, 并对全书的思考题与练习题进行了详细的解答。

本书是一本综合性强、概念清楚、深入浅出、解题思路明了、便于自学的简明教学指导书, 可作为自动化、电气工程及自动化和机电一体化等相关专业的本科教学指导教程, 也可通过适当的取舍满足不同层次的教学要求。同时, 本书对于长期从事运动控制领域、电气工程等领域的工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动学习指导及习题解答/刘玫, 孙雨萍编著. —北京: 机械工业出版社, 2014. 4

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

ISBN 978-7-111-46609-3

I. ①电… II. ①刘…②孙… III. ①电机 - 高等学校 - 教学参考资料
②电力传动 - 高等学校 - 教学参考资料 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 091700 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: 时 静 责任编辑: 时 静

版式设计: 赵颖喆 责任校对: 闫玥红

责任印制: 乔 宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·7.25 印张·170 千字

0 001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-46609-3

定价: 19.80 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

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新的科研领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲老师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业材料。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

本书是刘玫、孙雨萍编著的《电机与拖动》（机械工业出版社，2009 年出版）的配套教学用书。本着提高读者的自学能力、分析问题解决问题的能力为目的，作者结合多年来在“电机学”及“电力拖动”教学实践中所积累的教学研究成果及经验，力图做到教材内容由浅入深、通俗易懂、重点突出、解题思路明了及综合性强。

本书共 8 章，每一章都包括了“知识要点”“重点与难点”“思考题解答”及“练习题解答”环节。在第 3 章及第 6 章还添加了“一般计算方法的介绍”。“知识要点”主要总结了《电机与拖动》主教材中的知识要点，帮助读者复习并掌握各章节的知识结构、点出了重要概念，对各个知识点进行了理顺，为后面的解题先奠定一个基础。“重点与难点”主要针对本门课程难度较大的问题，指出了各章节的重点与难点，帮助读者明确问题，抓住要解决问题的重点。对难点引起重视，各个击破。“思考题解答”及“练习题解答”中则给出了主教材中全部思考题及练习题的详细解答，帮助读者提高自学能力。为了题目的内容更合理全面，个别题稍作了调整。“一般计算方法的介绍”中，作者在总结了大量的练习题的基础上，归纳了几种常见的问题类型，针对每一种问题类型提出了解决方法。帮助读者用一般的计算方法解决各类常见问题。明确了解题思路，找出了解题规律，降低了解题难度。

本书由山东大学的刘玫、孙雨萍编写。刘玫教授撰写了第 1、2、3、6、7 章。孙雨萍教授撰写了第 4、5、8 章。

由于作者水平所限，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第1章 电机理论中常用的基本知识和

基本定律..... 1

1.1 知识要点 1

1.1.1 磁场的基本知识..... 1

1.1.2 安培环路定律 1

1.1.3 磁路的欧姆定律..... 1

1.1.4 电磁感应定律 1

1.1.5 电磁力定律 2

1.1.6 电路定律 2

1.1.7 常用的铁磁材料及其特性..... 2

1.2 重点与难点 3

1.3 思考题解答 3

1.4 练习题解答 5

第2章 直流电机 10

2.1 知识要点 10

2.1.1 直流电机的工作原理 10

2.1.2 直流电机的结构、额定值及主要 系列 10

2.1.3 直流电机的电枢绕组 10

2.1.4 直流电机的磁场 11

2.1.5 直流电机的电枢感应电动势和电磁 转矩 11

2.1.6 直流电动机的运行原理 11

2.1.7 直流发电机的运行原理 12

2.1.8 直流电机的换向 12

2.2 重点与难点 12

2.3 思考题解答 13

2.4 练习题解答 16

第3章 直流电动机的电力拖动 22

3.1 知识要点 22

3.1.1 电力拖动系统的动力学基础 22

3.1.2 各类生产机械的负载转矩特性 22

3.1.3 电力拖动系统稳定运行的条件 22

3.1.4 直流电力拖动系统的动态分析 22

3.1.5 他励直流电动机的起动 22

3.1.6 他励直流电动机的调速 23

3.1.7 他励直流电动机的制动 24

3.2 重点与难点 24

3.3 一般计算方法（直流电动机调速及制动 时其电阻和转速的计算方法） 25

3.4 思考题解答 27

3.5 练习题解答 32

第4章 变压器 42

4.1 知识要点 42

4.1.1 变压器的工作原理和结构 42

4.1.2 变压器的空载运行 42

4.1.3 变压器的负载运行 42

4.1.4 变压器的参数测定 44

4.1.5 标么值 44

4.1.6 变压器的运行性能和特性 44

4.1.7 三相变压器 45

4.1.8 变压器的并联运行 45

4.1.9 其他用途的变压器 45

4.2 重点与难点 46

4.3 思考题解答 46

4.4 练习题解答 48

第5章 异步电动机 55

5.1 知识要点 55

5.1.1 三相异步电动机的结构及额定值 ... 55

5.1.2 异步电动机的定子绕组 55

5.1.3 三相异步电动机的定子磁动势 与磁场	55	7.1 知识要点	87
5.1.4 三相异步电动机定子绕组的感应 电动势	56	7.1.1 三相同步电机的结构、工作原理及 额定数据	87
5.1.5 三相异步电动机的工作原理及运行 状态	56	7.1.2 三相同步电动机的电枢反应	87
5.1.6 三相异步电动机的电磁关系	57	7.1.3 三相同步电动机的电动势平衡方程 式、等效电路与相量图	88
5.1.7 三相异步电动机的基本方程式、等效 电路和相量图	57	7.1.4 三相同步发电机的电动势平衡方程 式、等效电路与相量图	88
5.1.8 三相异步电动机的功率与转矩	58	7.1.5 三相同步电动机的矩角特性	88
5.1.9 三相异步电动机的工作特性	59	7.1.6 三相同步电动机的功率因数调节与 V 形曲线	89
5.1.10 单相异步电动机	59	7.1.7 三相同步电动机的起动	89
5.2 重点与难点	59	7.2 重点与难点	89
5.3 思考题解答	59	7.3 思考题解答	89
5.4 练习题解答	62	7.4 练习题解答	92
第 6 章 三相异步电动机的电力拖动	67	第 8 章 控制电机	101
6.1 知识要点	67	8.1 知识要点	101
6.1.1 三相异步电动机的机械特性	67	8.1.1 伺服电动机	101
6.1.2 三相异步电动机的起动	67	8.1.2 测速发电机	101
6.1.3 三相异步电动机的调速	68	8.1.3 无刷直流电动机	101
6.1.4 三相异步电动机的制动状态	69	8.1.4 步进电动机	101
6.2 重点与难点	70	8.1.5 自整角机	102
6.3 一般计算方法（绕线转子电动机进行调速 和制动时其电阻和转速的计算方法）	70	8.1.6 旋转变压器	102
6.4 思考题解答	73	8.1.7 直线电动机	102
6.5 练习题解答	77	8.2 重点与难点	102
第 7 章 三相同步电机	87	8.3 思考题与练习题解答	102
		参考文献	109

第 1 章 电机理论中常用的基本知识和基本定律

1.1 知识要点

电机是一种进行机电能量转换的机电装置,发电机将机械能转换为电能,电动机将电能转换为机械能,变压器则是将一种电压的电能转换成另一种电压的电能。其工作原理及内部电磁关系和运行原理都要用到有关电和磁的基本知识和基本电磁定律。

1.1.1 磁场的基本知识

磁场的基本物理量是磁感应强度 B 、磁通 Φ 和磁场强度 H 。 B 是一个矢量,磁场中任一点的磁感应强度 B 的方向是通过该点磁感应线的切线方向,磁感应强度 B 的大小为通过该点与 B 垂直的单位面积上的磁感应线的数目。磁通 Φ 为穿过某一截面积 S 的磁感应强度 B 的通量,其表达式为 $\Phi = \int_s B ds$ 。 H 是表征磁场性质的另一个基本物理量,它也是一个矢量,其方向与 B 相同,其大小为磁通 Φ 除以导磁介质的磁导率 μ ,即 $H = \frac{\Phi}{\mu}$ 。

1.1.2 安培环路定律

安培环路定律指的是:在磁场中,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,其数学表达式为 $\oint_l H dl = \sum I$ 。

安培环路定律还可以表示为 $\sum H_k l_k = \sum I = IN (k=1, 2, 3 \dots)$
上式表明,沿着磁场中任一闭合磁路,其总的磁动势等于总磁压降。

1.1.3 磁路的欧姆定律

磁路的欧姆定律反映了磁通、磁动势及磁阻的关系,它的一般式为

$$\Phi = \frac{F}{R_{m1} + R_{m2} + \dots + R_{mi} + \dots + R_{mk}} = \frac{F}{\sum R_{mi}}, \text{ 它表明无分支磁路中的磁通 } \Phi \text{ 与磁}$$

动势 F 成正比,与磁路中的总磁阻 $\sum R_{mi}$ 成反比。这与闭合电路中电流与电动势成正比,与电路的总电阻成反比类似。

1.1.4 电磁感应定律

设一线圈位于磁场中,当该线圈中的磁通发生变化时,线圈中将有感应电动势产生。感应电势的大小与线圈的匝数 N 和线圈所交链的磁通对时间的变化率成正比,其实际方向由楞次定律确定。当按惯例规定电动势的正方向与产生它的磁通的正方向之间符合右手螺旋关

系时，感应电势的公式为 $e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt}$ 。在电机和变压器中产生感应电动势的情况主要有运动电动势和变压器电动势。

1.1.5 电磁力定律

载流导体处在磁场中会受到电磁力的作用，这个电磁力也叫做安培力。当磁力线和导体的方向互相垂直时，载流导体所受电磁力的公式为 $f = BIl$ ，电磁力的方向由左手定则判定。

1.1.6 电路定律

(1) 基尔霍夫第一定律——电流定律

对于电路中任一节点，所有流入节点和流出节点电流的代数和等于零。其表达式为 $\sum i = 0$ ，式中，若设流进节点的电流为正时，则流出节点的电流为负。

(2) 基尔霍夫第二定律——电压定律

对于电路中任一闭和回路，所有电压降的代数和等于所有电动势的代数和，其表达式为 $\sum u = \sum e$ ，式中，闭合回路中各电压降 u 和电动势 e 的正方向与所选取的回路绕行方向（任选）相同时为正，相反时则为负。

1.1.7 常用的铁磁材料及其特性

1. 铁磁材料的磁化特性

电机和变压器的铁心都是使用铁磁材料制造而成，铁磁材料的性能的优劣将直接影响电机的运行性能。铁磁材料的磁化曲线为磁场强度与磁通密度的关系，即 $B-H$ 特性，磁化曲线描述了铁磁材料的磁化过程，此特性为非线性带饱和的曲线，如图 1-1 所示。

2. 铁磁材料的损耗

铁磁材料的损耗称为铁耗，是磁滞损耗和涡流损耗之和。

(1) 磁滞损耗

铁磁材料在交变磁场的反复磁化过程中，磁畴会不停的转动，互相之间产生摩擦，因而要有一定的功率损耗，这种损耗叫磁滞损耗 p_h 。磁滞损耗的表达式为 $p_h = fV \oint H dB$ 。不同的材料磁滞回线的面积不同，相同材料磁滞回线的面积取决于最大磁通密度 B_m ，经实验确定，磁滞损耗的表达式为 $p_h = k_h f B_m^\alpha V$ 。

(2) 涡流损耗

当通过导电的铁磁材料中的磁通发生交变时，根据电磁感应定律，在铁心中将产生围绕着磁通呈螺旋状的感应电动势和感应电流，简称涡流。涡流在其流电路径上的等效电阻中要产生损耗，简称涡流损耗。其表达式为 $p_e = k_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V$ 。

(3) 铁心损耗

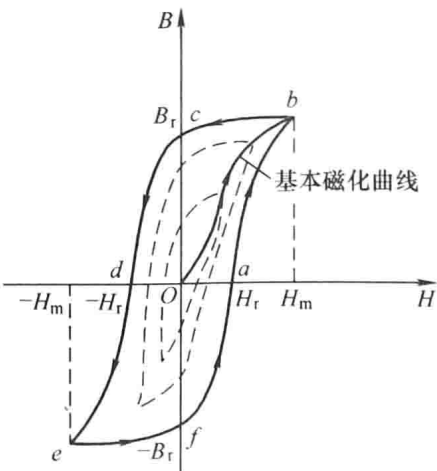


图 1-1 铁磁材料的磁化曲线

铁心损耗为磁滞损耗和涡流损耗之和，简称铁耗 p_{Fe} 。其表达式为

$$p_{Fe} = p_h + p_e = (k_h f B_m^\alpha + k_e \Delta^2 f^2 B_m^2) V$$

一般的电工钢其正常工作点的磁通密度 $1\text{T} \leq B_m \leq 1.8\text{T}$ ，上式可近似为 $p_{Fe} \approx k_{Fe} f^{1.3} B_m^2 G$ 。铁耗将造成有功功率损失并导致铁心发热。

1.2 重点与难点

重点：安培环路定律、磁路的欧姆定律、电磁感应定律、电磁力定律及电路定律的正确使用。铁磁材料的磁化曲线的特点。铁磁材料的损耗包括磁滞损耗和涡流损耗。

难点：电磁感应定律、电磁力定律及磁路的欧姆定律的正确应用。铁磁材料的损耗产生的原因及使用时的注意事项。

1.3 思考题解答

1-1 变压器绕组电动势和电机绕组中的运动电动势产生的原因有什么不同？其大小与哪些因素有关？

答：在变压器中，磁通本身是由交流电流产生的，也就是说磁通本身是随时间变化的，这时变压器绕组中产生的感应电势称为变压器电动势，如图 1-2 所示的正方向，其感应电势的公式为 $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 。其大小与线圈的匝数及磁通的变化率有关。当电感 L 为常数

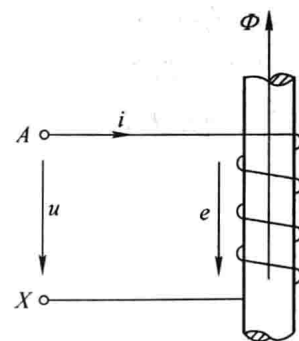


图 1-2 思考题 1-1 附图

时，感应电动势的公式可写为 $e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$ 。

在电机中，绕组和磁场之间有相对运动，导体切割磁力线而在其中产生感应电动势，称为运动电动势。若磁力线、导体与运动方向三者互相垂直，感应电动势的表达式为 $e = Blv$ 。其大小与磁通密度 B 、导体的有效长度 l 及运动速度 v 成正比。

1-2 简要说明磁路的饱和现象？随着磁路的饱和，磁导率是如何变化的？

答：由图 1-3 中磁化曲线（特性曲线 1）可见，开始磁化时，由于外磁场较弱，所以 B 值增加较慢，对应 Oa 段。随着外磁场的增强，铁磁材料中大量磁畴转向和外磁场一致的方向， B 值增加很快，见图中 ab 段。再增加外磁场，可转向的磁畴越来越少， B 值增加的越来越慢，见图中 bc 段，这时铁磁材料逐渐饱和。至 c 点后，所有磁畴都转向和外磁场一致的方向，再增加 H ， B 值基本不增加，出现了深度饱和现象，这就是饱和现象。

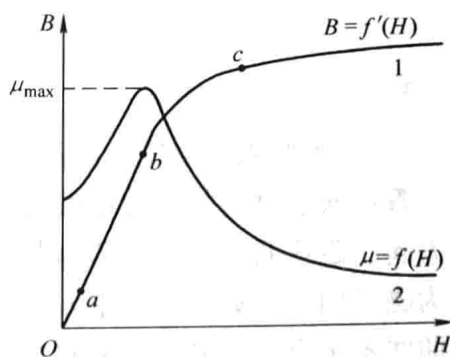


图 1-3 思考题 1-2 附图

由式 $\mu = B/H$ 可知，磁导率 $\mu = f(H)$ 的特性也是非线性的，如图 1-3 中特性曲线 2 所示。

1-3 铁心中的磁滞损耗与涡流损耗是如何产生的？如何能够减小铁心中的铁耗？

答：铁磁材料在交变磁场的反复磁化过程中，磁畴会不停的转动，互相之间产生摩擦，因而要有一定的功率损耗，这种损耗叫磁滞损耗 p_h 。磁滞损耗的表达式为 $p_h = \oint H dB$ 。经实验确定，磁滞损耗的表达式也可表示为 $p_h = k_h f B_m^\alpha V$ 。

当通过导电的铁磁材料中的磁通发生交变时，根据电磁感应定律，在铁心中将产生围绕着磁通呈螺旋状的感应电动势和感应电流，简称涡流。涡流在其流通过径上的等效电阻中要产生损耗，简称涡流损耗。其表达式为 $p_e = k_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V$ 。

铁耗为磁滞损耗和涡流损耗之和，其表达式为

$$p_{Fe} = p_h + p_e = (k_h f B_m^\alpha + k_e \Delta^2 f^2 B_m^2) V。$$

可见减小磁场交变的频率 f 、铁心中磁通密度 B_m 、铁心体积 V 、铁心厚度 Δ 及增加磁阻都可使得铁耗减小。为了减少涡流损耗，通常变压器和电机中使用厚度较小的硅钢片叠压而成，而不是采用整体的硅钢实现，硅钢片的厚度一般为 $0.3 \sim 0.5\text{mm}$ 。另外，为了减小涡流损耗，可设法提高铁磁材料的电阻率，硅钢片和硅钢片之间以及整个铁心都要经过绝缘处理。

1-4 实际的电机和变压器的铁心一般采用硅钢片叠压而成，而不是采用整块铸钢或硅钢组成，为什么？

答：由于硅钢片的磁滞回线面积很小，而且导磁性能很好，故磁滞损耗小，因此电机和变压器的铁心常常用硅钢片制成。

1-5 如图 1-4 所示，匝数为 N 的线圈与时变的磁通 Φ 交链，如果感应电动势的正方向与磁通的正方向分别如图 1-4a、b 所示，试分别写出 e 与 Φ 之间的关系式。

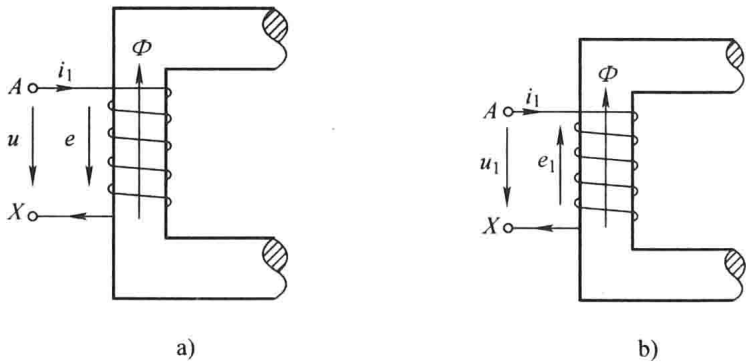


图 1-4 思考题 1-5 附图

答：a) $e_1 = -N \frac{d\Phi}{dt}$

b) $e_2 = N \frac{d\Phi}{dt}$

1-6 起始磁化曲线、磁滞回线和基本磁化曲线是如何形成的？它们有哪些区别？

答：铁磁材料的磁化曲线是非线性的，未磁化过的铁磁材料进行磁化后的 $B-H$ 特性，称为起始磁化曲线。若铁磁材料进行正负反复磁化， B 和 H 的关系变成闭合曲线，此曲线称之为磁滞回线，如图 1-5 中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 曲线。磁滞回线表明，上升磁化曲线和下降磁化曲线不重合，不同的铁磁材料有不同的磁滞回线。将各条磁滞回线在第一象限的顶点连接起来，所得到的曲线叫做基本磁化曲线或平均磁化曲线，如图 1-5 所示，此曲线与起始磁化曲线的差别很小，在工程上广泛使用。

1-7 如图 1-6 所示变压器磁路中，当在一次侧线圈中施加正弦电压 u_1 时，一次侧和二

次侧线圈中是否都有感应电动势？为什么？两个感应电动势与匝数之间有什么关系？当流过一次侧线圈中的电流 i_1 减小时，试标出 N_1 、 N_2 两个线圈中感应电动势的实际方向与输出电压的方向，并计算两个线圈感应电动势之间的关系。

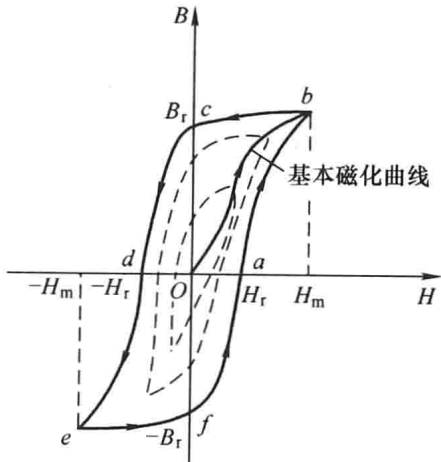


图 1-5 思考题 1-6 附图

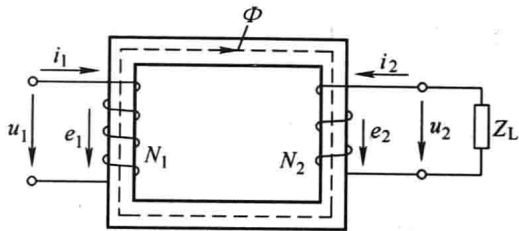


图 1-6 思考题 1-7 附图

答：当一次侧接到正弦电压 u_1 时，一次侧绕组中有交流电流 i_1 流过，并在铁心中产生交变磁通 Φ ，且这一磁通同时交链一次侧、二次侧绕组，根据电磁感应定律，一次侧、二次侧绕组分别感应电动势 e_1 及 e_2 ，其表达式分别为 $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ ， $e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$ 。一次侧、二次侧感应电动势与匝数的关系式为 $\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$ 。当流过一次侧线圈中的电流 i_1 减小时， e_1 、 e_2 的实际方向都为上正下负， u_2 为上正下负。

1.4 练习题解答

1-1 某铸钢材料的圆环如图 1-7 所示，其磁化曲线数据见表 1-1。环的平均半径 $r = 100\text{mm}$ ，截面积 $s = 200\text{mm}^2$ ，绕在环上的线圈匝数 $N = 350$ 。不计漏磁通。试求：

1) 当圆环内磁路的磁通 Φ 分别为 $0.16 \times 10^{-3}\text{Wb}$ 和 $0.32 \times 10^{-3}\text{Wb}$ 时，磁通密度 B 、磁路的磁导率 μ 分别为多少？所需的励磁电流 I 分别为多少？

2) 若要求磁通为 $0.2 \times 10^{-3}\text{Wb}$ ，励磁电流 I 不大于 1.5A ，则线圈匝数 N 至少应是多少？

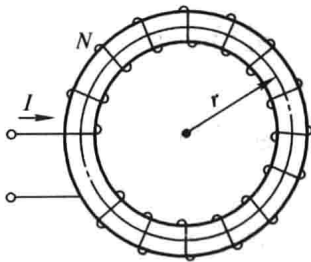


图 1-7 练习题 1-1 附图

表 1-1 铸钢的磁化曲线数据

$H/\text{A} \cdot \text{cm}^{-1}$	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100
B/T	0.65	1.06	1.27	1.37	1.48	1.55	1.60	1.64	1.72	1.78

解：1) 因为磁通密度与磁通的关系式为 $B = \frac{\Phi}{A}$ ，所以有

当 $\Phi_1 = 0.16 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 时, $B_1 = \frac{\Phi_1}{s} = \frac{0.16 \times 10^{-3}}{200 \times 10^{-6}} \text{ T} = 0.8 \text{ T}$

查表 1-1 (利用线性法插值) 得,

磁场强度 $H_1 = 5 + \frac{10-5}{1.06-0.65} \times (0.8-0.65) \text{ A/cm} = 6.83 \text{ A/cm}$

磁导率为 $\mu_1 = \frac{B_1}{H_1} = \frac{0.8}{6.83 \times 10^2} \text{ H/m} = 0.117 \times 10^{-2} \text{ H/m}$

磁导为 $\Lambda_1 = \mu_1 \frac{s}{l} = 0.117 \times 10^{-2} \frac{200 \times 10^{-6}}{2\pi \times 100 \times 10^{-3}} \text{ H} = 0.373 \times 10^{-6} \text{ H}$

所需要的电流为 $I_1 = \frac{\Phi_1}{N\Lambda_1} = \frac{0.16 \times 10^{-3}}{350 \times 0.373 \times 10^{-6}} \text{ A} = 1.226 \text{ A}$

当 $\Phi_2 = 0.32 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 时, $B_2 = \frac{\Phi_2}{s} = \frac{0.32 \times 10^{-3}}{200 \times 10^{-6}} \text{ T} = 1.6 \text{ T}$

查表 1-1 得, $H_2 = 50 \text{ A/cm}$, 磁导率为 $\mu_2 = \frac{B_2}{H_2} = \frac{1.6}{50 \times 10^2} \text{ H/m} = 0.32 \times 10^{-3} \text{ H/m}$

磁导为 $\Lambda_2 = \mu_2 \frac{s}{l} = 0.32 \times 10^{-3} \frac{200 \times 10^{-6}}{2\pi \times 100 \times 10^{-3}} \text{ H} = 0.102 \times 10^{-6} \text{ H}$

所需要的电流为 $I_2 = \frac{\Phi_2}{N\Lambda_2} = \frac{0.32 \times 10^{-3}}{350 \times 0.102 \times 10^{-6}} \text{ A} = 8.96 \text{ A}$

2) 若求磁通为 $\Phi_3 = 0.2 \times 10^{-3} \text{ Wb}$, 则 $B_3 = \frac{\Phi_3}{s} = \frac{0.2 \times 10^{-3}}{200 \times 10^{-6}} \text{ T} = 1 \text{ T}$

查表 1-1 (利用线性插值) 得, 磁场强度 $H_3 = 5 + \frac{10-5}{1.06-0.65} \times (1-0.65) \text{ A/cm} =$

9.268 A/cm

磁导率为 $\mu_3 = \frac{B_3}{H_3} = \frac{1}{9.268 \times 10^2} \text{ H/m} = 0.108 \times 10^{-2} \text{ H/m}$

磁导为 $\Lambda_3 = \mu_3 \frac{s}{l} = 0.108 \times 10^{-2} \frac{200 \times 10^{-6}}{2\pi \times 100 \times 10^{-3}} \text{ H} = 0.3435 \times 10^{-6} \text{ H}$

磁动势为 $F_3 = \frac{\Phi_3}{\Lambda_3} = \frac{0.2 \times 10^{-3}}{0.3435 \times 10^{-6}} \text{ A} = 582.2 \text{ A}$

线圈的匝数为 $N = \frac{F_3}{I} = \frac{582.2}{1.5} = 388$

可见, 当要求电流 $I \leq 1.5 \text{ A}$ 时, 线圈的匝数 $N \geq 388$ 匝。

1-2 某硅钢片叠成的磁路如图 1-8 所示, 图中尺寸的单位为 mm, 线圈的匝数为 $N = 800$, 其磁化曲线数据见表 1-2。忽略铁心的叠片系数, 试求:

1) 若要求铁心中磁通为 $0.8 \times 10^{-3} \text{ Wb}$, 励磁电流 I_f 应为多少?

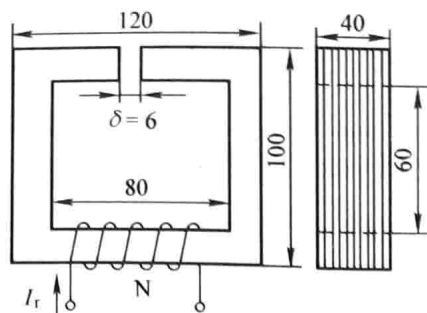


图 1-8 练习题 1-2 附图

2) 若铁心用同尺寸的铸钢材料构成, 其磁化曲线数据见表 1-1, 要求铁心中磁通仍为 $0.8 \times 10^{-3} \text{Wb}$, 励磁电流 I_f 应为多少? 比较两种材料下励磁电流有何不同?

表 1-2 硅钢片的磁化曲线数据

$H/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	100	200	300	400	500	600	700	800	1000
B/T	0.6	0.8	1.1	1.25	1.38	1.48	1.52	1.6	1.64

解: 1) 由于 $I_f = \frac{F_f}{N}$, 故应先求出铁心中磁通为 $0.8 \times 10^{-3} \text{Wb}$ 所需总的磁势 F_f , 从而求出励磁电流 I_f 。

铁心磁路的中心长度为

$$l = [(100 - 40) + (80 + 40)] \times 2 - 6 \text{mm} = 2 \times (100 + 80) - 6 = 354 \text{mm} = 0.354 \text{m}$$

铁心的截面积为

$$s = \frac{100 - 60}{2} \times 10^{-3} \times 40 \times 10^{-3} \text{m}^2 = 0.8 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

铁心中的磁通密度为

$$B = \frac{\Phi}{s} = \frac{0.8 \times 10^{-3}}{0.8 \times 10^{-3}} \text{T} = 1 \text{T}$$

查表 1-2 (利用线性插值) 得, 铁心磁场强度为

$$H = 200 + \frac{300 - 200}{1.1 - 0.8} \times (1 - 0.8) \text{A/m} = 266.67 \text{A/m}$$

忽略气隙处的边缘效应, 气隙内的磁通密度与铁心相同, 那么气隙中的磁场强度为

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} \text{A/m} = 7.96 \times 10^5 \text{A/m}$$

根据安培环路定律, 线圈的电流产生的磁势与各个磁路中的磁压降的关系式为

$$\begin{aligned} F_f &= F + F_{\delta} = Hl + H_{\delta}\delta = 266.67 \times 0.354 + 7.96 \times 10^5 \times 6 \times 10^{-3} \text{A} \\ &= 94.4 + 4775 \text{A} = 4869.4 \text{A} \end{aligned}$$

可见, 在气隙中降落的磁压降比铁心中大得多, 其损耗也大得多。

励磁线圈中所需的励磁电流为

$$I_f = \frac{F_f}{N} = \frac{4869.4}{800} \text{A} = 6.09 \text{A}$$

2) 若铁心用同尺寸的铸钢材料构成, 铁心长度和面积不变。铁心内的磁通密度仍为 1T 查表 1-1 (利用线性插值) 得, 磁场强度为

$$H' = 5 + \frac{10 - 5}{1.06 - 0.65} \times (1 - 0.65) \text{A/cm} = 9.268 \text{A/cm} = 926.8 \text{A/m}$$

忽略气隙处的边缘效应, 气隙内的磁通密度与铁心相同, 那么气隙中的磁场强度仍为

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} \text{A/m} = 7.96 \times 10^5 \text{A/m}$$

总的磁动势为

$$\begin{aligned} F'_f &= F' + F_{\delta} = H'l + H_{\delta}\delta = 926.8 \times 0.354 + 7.96 \times 10^5 \times 6 \times 10^{-3} \text{A} \\ &= 328.09 + 4775 \text{A} = 5104.09 \text{A} \end{aligned}$$

励磁线圈中所需的励磁电流为

$$I'_f = \frac{F_f}{N} = \frac{5104.09}{800} \text{A} = 6.38 \text{A}$$

可见，要产生同样的磁通，用硅钢片材料比铸铁所需的励磁电流要小。

1-3 如图 1-9 所示的磁路，由具有无穷大磁导率的磁性铁心上的绕组及两个长度分别为 δ_1 和 δ_2 ，面积分别为 S_1 和 S_2 的并联气隙组成，忽略气隙的边缘效应。试求：

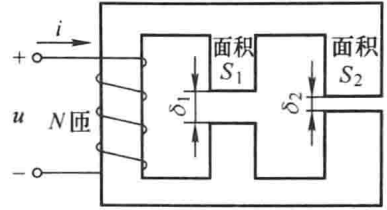


图 1-9 练习题 1-3 附图

1) 当绕组带有电流 i 时通过绕组铁心中的磁通 Φ 为多少？

2) 气隙 δ_1 及 δ_2 中的磁通密度 B_1 及 B_2 为多少？

3) 如果气隙长度 δ_1 增大到原来的 2 倍，磁通密度 B_1 将如何变化？

解：1) 气隙 δ_1 及 δ_2 所对应的磁阻分别为 $R_{\delta 1} = \frac{\delta_1}{\mu_0 s_1}$ 及 $R_{\delta 2} = \frac{\delta_2}{\mu_0 s_2}$ 。

假设铁心具有无穷大磁导率，则铁心磁阻为零，铁心磁路中只有两个气隙磁阻（并联）。根据磁路的欧姆定律，通过绕组铁心中的磁通为 $\Phi = \frac{Ni}{\frac{R_{\delta 1} \cdot R_{\delta 2}}{R_{\delta 1} + R_{\delta 2}}} = \frac{Ni(R_{\delta 1} + R_{\delta 2})}{R_{\delta 1} \cdot R_{\delta 2}}$ 。

2) 通过气隙 δ_1 的磁通为 $\Phi_1 = \frac{Ni}{R_{\delta 1}} = \frac{Ni\mu_0 s_1}{\delta_1}$ ，磁通密度为 $B_1 = \frac{\Phi_1}{s_1} = \frac{Ni\mu_0}{\delta_1}$ 。

通过气隙 δ_2 的磁通为 $\Phi_2 = \frac{Ni}{R_{\delta 2}} = \frac{Ni\mu_0 s_2}{\delta_2}$ ，磁通密度为 $B_2 = \frac{\Phi_2}{s_2} = \frac{Ni\mu_0}{\delta_2}$ 。

3) 如果气隙 $\delta'_1 = 2\delta_1$ ，由式 $B_1 = \frac{Ni\mu_0}{\delta_1}$ 可知， $B'_1 = \frac{1}{2}B_1$ 。可见气隙长度越大，其中的磁通密度越小。

1-4 某对称磁路的铁心尺寸如图 1-10 所示，铁心上有 3 个绕组，绕组 1 绕在铁心中柱的上方，绕组 2 和 3 绕在底部的两个铁心柱上，铁心的磁导率为 μ 。试求：

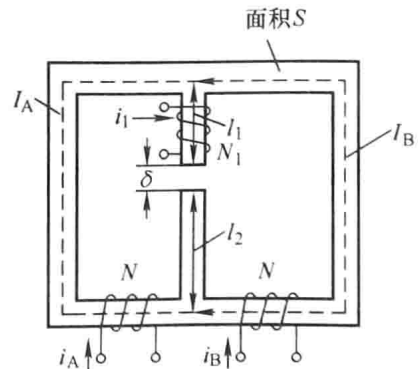


图 1-10 练习题 1-4 附图

1) 求每个绕组的自感，并说明当气隙长度 δ 增加时，线圈 1 中的自感将如何变化？

2) 求三对绕组间的互感，并说明当匝数 N 及 N_1 增加时，互感将如何变化？

3) 当绕组 A 和 B 中通以时变电流 $i_A(t)$ 和 $i_B(t)$ 时，求出绕组 1 中的感应电动势表达式。

应测量哪个参数可以判断两个同频率正弦交流电流 $i_A(t)$ 和 $i_B(t)$ 是否平衡？

解：1) 将如图 1-10 所示的对称磁路分为 5 段，它们的长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_A 、 l_B 、 δ ，其中 $l_A = l_B$ 。

所对应的磁阻分别为 $R_1 = \frac{l_1}{\mu s}$ ， $R_2 = \frac{l_2}{\mu s}$ ， $R_\delta = \frac{l_2}{\mu_0 s}$ ， $R_A = R_B = \frac{l_A}{\mu s}$ 。

由于各线圈的自感为 $L_i = \frac{N_i^2}{R}$ ，那么绕组 1 的自感为

$$L_{11} = \frac{N_1^2}{R_1 + R_2 + R_\delta + R_A/2} = \frac{N_1^2}{(l_1/\mu s) + (l_2/\mu s) + (\delta/\mu_0 s) + (l_A/2\mu s)}$$

$$= \frac{N_1^2 \mu s}{l_1 + l_2 + \delta \mu/\mu_0 + l_A/2}$$

由上式可知, 当气隙 δ 增大时, 绕组 1 的自感 L_{11} 减小。

绕组 A 和 B 的自感为

$$L_{AA} = L_{BB} = \frac{N^2 (R_1 + R_2 + R_\delta) (R_A/2)}{R_1 + R_2 + R_\delta + R_A/2} = \frac{N^2 [(l_1/\mu s) + (l_2/\mu s) + (\delta/\mu_0 s)] (l_A/2\mu s)}{(l_1/\mu s) + (l_2/\mu s) + (\delta/\mu_0 s) + (l_A/2\mu s)}$$

$$= \frac{N^2 \mu s (l_1 + l_2 + \delta \mu/\mu_0)}{l_A [l_A + 2(l_1 + l_2 + \delta \mu/\mu_0)]}$$

2) 各个绕组的互感分别为

$$L_{A1} = L_{A1} = -L_{B1} = -L_{1B} = \frac{-NN_1 (R_A/2)}{R_1 + R_2 + R_\delta + R_A/2}$$

$$= \frac{-NN_1 (l_A/2\mu s)}{(l_1/\mu s) + (l_2/\mu s) + (\delta/\mu_0 s) + (l_A/2\mu s)} = \frac{-NN_1 \mu s}{l_A + 2(l_1 + l_2 + \delta \mu/\mu_0)}$$

由上式可知, 当绕组匝数 N 及 N_1 增加时, 各个绕组的互感的值增加。

3) 当绕组 A 和 B 中通过时变电流 $i_A(t)$ 和 $i_B(t)$ 时, 根据电磁感应定律, 在绕组 1 中的

感应电动势为
$$e_1 = \frac{d}{dt} (L_{A1} i_A + L_{B1} i_B) = L_{A1} \frac{d}{dt} (i_A - i_B)$$

由上式可知, 只要 $i_A \neq i_B$, 绕组 1 中就有感应电动势 e_1 存在。可见通过测量 e_1 是否为零, 就可判定绕组 A 和 B 中的两个同频率正弦交流电流是否平衡。

第2章 直流电机

2.1 知识要点

2.1.1 直流电机的工作原理

直流电动机的工作原理是建立在电磁力定律的基础上的,当直流电动机通上励磁电流及电枢电流后,根据电磁力定律,电动机转动起来,靠换向器和电刷的作用将外部直流变成内部交流,从而得到方向固定的电磁转矩,使得电枢朝一个方向连续旋转。

直流发电机的工作原理是建立在电磁感应定律基础上的,当直流发电机通上励磁电流且原动机拖动电枢旋转时,根据电磁感应定律,发电机发出电来。靠换向器和电刷的作用将内部交流电动势变成外部电刷间的直流电动势,从而使外部电路得到直流电流。

2.1.2 直流电机的结构、额定值及主要系列

(1) 定子部分

定子部分由主磁极、换向级、机座和电刷装置等组成。

(2) 转子(电枢)部分

转子部分由电枢铁心、电枢绕组、换向器和转轴等组成。

(3) 直流电机的额定值

电机的额定值是使电机安全可靠地工作且具有优良的运行性能的保障。直流电机的额定值主要有以下几项:额定功率 P_N (kW)、额定电压 U_N (V)、额定电流 I_N (A)、额定转速 n_N (r/min) 等。

对于直流发电机有: $P_N = U_N I_N \times 10^{-3} \text{ kW}$

对于直流电动机有: $P_N = U_N I_N \eta_N \times 10^{-3} \text{ kW}$

2.1.3 直流电机的电枢绕组

(1) 单叠绕组

单叠绕组具有如下特点:

1) 对于单叠绕组,电刷总是把上层处于同一主磁极下的元件串联成一条支路,所以支路对数 a 等于极对数 P ,即 $a = P$ 。

2) 电刷杆数等于极数。

3) 电枢总电流 I_a 为支路电流的 i_a 的 $2a$ 倍,即 $I_a = 2ai_a$ 。

(2) 单波绕组

单波绕组具有如下特点:

1) 对于单波绕组,电刷总是把上层边处于同一极下的所有元件串联成一条支路,而电