



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

电机与控制

(第2版)

邸敏艳 主编

容文杰 姚勇 副主编

<http://www.phei.com.cn>

电子电器

应用与维修专业



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

本书配有电子教学参考资料包

中等职业教育国家规划教材（电子电器应用与维修专业）

电机与控制（第2版）

邱敏艳 主编

容文杰 姚 勇 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是中等职业教育国家规划教材(修订版),共分3篇。第1篇着重介绍电动机基本原理,包括变压器、直流电机(包括单相串激电动机)、交流异步电动机(包括三相异步电动机、单相异步电动机)的基本工作原理,并介绍了步进电动机、微型同步电动机、无刷直流电动机等几种控制电机的典型结构和工作原理。第2篇重点介绍电动机的应用及其控制,包括洗衣机电动机的结构和典型控制方法;电风扇电动机的结构和典型控制方法;电冰箱、空调器电动机的结构和典型控制方法以及汽车启动机和发电机的原理及其控制,并介绍了一些其他家用电器电动机的原理和控制方法,如音响设备、厨房设备、电动工具、美容保健设备、办公自动化设备等。第3篇为检修和实验篇,检修部分主要包括直流电动机常见故障及检修,单相串激电动机常见故障及检修,单相异步电动机常见故障、检修方法及检验内容,三相异步电动机的故障及检修。实验部分包括单相异步电动机启动实验,直流电动机认识实验,双桶洗衣机典型控制实验,台扇典型控制实验,空调器典型控制实验,汽车蓄电池电压、启动机电流测量。

本书可作为中等职业学校电子电器应用与维修专业、日用电器专业的教材,也可供其他工科专业教学和社会培训选用。尤其对电气技术专业参加对口招生考试的同学可选用本教材进行考前准备。

为方便教师教学,本书还配有电子教学参考资料包,内容包括电子教案、教学指南及习题答案,详见前言。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电机与控制 / 邸敏艳主编. —2版. —北京:电子工业出版社, 2005.9

中等职业教育国家规划教材·电子电器应用与维修专业

ISBN 7-121-00795-9

I. 电… II. 邸… III. 电机—控制—专业学校—教材 IV. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 025668 号

责任编辑:徐晓光 特约编辑:何虹

印刷:北京季峰印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经销:各地新华书店

开本:787×1 092 1/16 印张:11.5 字数:294.4 千字

印次:2005 年 9 月第 1 次印刷

印数:6 000 册 定价:14.80 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

中等职业学校教材工作领导小组

- 组 长：**陈贤忠 安徽省教育厅厅长
- 副组长：**李雅玲 信息产业部人事司技术干部处处长
尚志平 山东省教学研究室副主任
睦 平 江苏省教育厅职社处副处长
苏渭昌 教育部职业技术教育中心研究所主任
王传臣 电子工业出版社副社长
- 组 员：**（排名不分先后）
- 唐国庆 湖南省教科院
张志强 黑龙江省教育厅职成教处
李 刚 天津市教委职成教处
王润拽 内蒙古自治区教育厅职成教处
常晓宝 山西省教育厅职成教处
刘 晶 河北省教育厅职成教处
王学进 河南省职业技术教育教学研究室
刘宏恩 陕西省教育厅职成教处
吴 蕊 四川省教育厅职成教处
左其琨 安徽省教育厅职成教处
陈观诚 福建省职业技术教育中心
邓 弘 江西省教育厅职成教处
姜昭慧 湖北省职业技术教育研究中心
李栋学 广西自治区教育厅职成教处
杜德昌 山东省教学研究室职教室
谢宝善 辽宁省基础教育教研培训中心职教部
安尼瓦尔·吾斯曼 新疆自治区教育厅职成教处
- 秘 书 长：**李 影 电子工业出版社
- 副秘书长：**蔡 葵 电子工业出版社

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成[2001]1 号）的精神，教育部组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁发的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写的，并且经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均进行了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并且在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司
2001 年 10 月



21 世纪是知识经济的世纪，是人才辈出的世纪，是继续教育发展的世纪。随着科学技术的不断进步，对人才层次的要求提出了更高的标准，职业教育面临着新的发展机遇和更为严峻的挑战。教育部启动了“面向 21 世纪职业教育课程改革和教材建设规划”，并明确指出：树立以全面质量为基础、以能力为本位的指导思想，开发和编写体现新知识、新技术、新工艺和新方法的具有职业教育特色的教材。为此，我们本着以培养新世纪社会需要的、高素质的劳动者和中初级专门人才为出发点，力求编写出具有适应技术应用型人才培养要求的职业教育特色，具有思想性、科学性、先进性、实用性、规范性的优秀教材。

本课程是中等职业学校电子电器应用与维修专业日用电器专门化方面的一门专业主干课程。它的任务是使学生具备高素质劳动者和中初级专门人才所必需的电动机及其控制技术的基本技能，为学生学习专业知识和职业技能，提高全面素质，增强适应职业的能力和继续学习的能力打下基础。

近些年来，对《电机与控制》这门课程，全国各行业中的各种中等职业学校大多以自定教学大纲为基础，自编教材或讲义，进行教学活动。然而，随着社会、经济、技术、生产的发展，随着新的教育体制、人才结构、市场经济的形成，随着现代职业教育思想理念的建立与现代教育技术、方法的应用，教育部确定了提高教育质量、培养社会需要的高素质的劳动者和中初级专门人才的目标。这样，规范中等职业学校各专业教材的任务迫在眉睫，新编《电机与控制》教材势在必行。

过去的教材存在着讲授知识多，培养能力少；理论篇幅多，训练篇幅少；公式推导多，实际应用少；老内容多，新内容少；文字叙述多，图表说明少等问题。另外还存在着生产技术飞速发展与教材相对滞后的矛盾。因此随着社会、经济、技术、生产的发展；新的教育体制、人材结构市场机制的形成；现代教育技术方法的应用，原有的教材已不适应现实需求。只有以新的观念，勇于探索、不断创新，编写出高质量的实用教材，以适应现代职业教育的培养目标。

为了编好这本《电机与控制》教材，使学生具备高素质劳动者和中初级专门人才所必须的电动机及其控制方面的基本技能，为学生学习专业知识和职业技能打下基础，并注意渗透思想教育，逐步培养学生的辩证思想，加强学生的职业道德观念，我们在编写教材时遵循以下几点思路。

1. 指导思想

教材要具有适应 21 世纪人才要求的时代特征，具有适应社会主义建设需要、培养应用型人才的职教特色，强调以“能力为本位”的编写指导思想，体现“宽、浅、新、活、能”的

中职教育特色；能够反映现代教育观念，在教材体系上有所创新，教材内容上有所更新，教学方法和手段上有所革新。

2. 目标

新编教材根据中等职业教育的培养目标，使学生通过本教材的学习，掌握高素质的劳动者和专门人才必须具备的专业知识和基本技能，增强适应职业变化和解决实际问题的能力，使学生的素质得到全面提高。据此本教材着力于改革传统的教材模式，突出应用性和实践性；充分反映新知识、新技术。具体表现在，将讲授知识与培养能力相结合；重实训，少讲空洞的理论、抽象的公式推导，多讲一些生动的实际应用例子，将生产、科技最前沿的成果以统计数据或图表的形式介绍给学生。

3. 特色

(1) 教材的整体框架，以有利于学生专业能力的培养为出发点，强调理论与实践并重的原则。具体做法：教材既包括理论教学部分，又有实验部分，实验约占整门课程的五分之一。再加上专设的实习教学课，使学生的动手实践时间大大增加，为其能力的培养奠定基础。

(2) 扩大教材适应性。目前专业越来越多，学制也参差不齐，故在教材编写过程中，编者利用模块式管理的方法，注意各模块的相对独立性。

(3) 在教材内容上突出实用性、创新性并留有发展的余地，在语言文字表达上力求精练，通俗易懂。

本次修订根据使用本教材第1版的同行及该学科专家们提出的宝贵意见，结合目前我国飞速发展的科学技术在实际中的大量应用，我们对原教材内容进行了必要的修改和补充。

本教材第1~5章由邱敏艳、吕锋编写与修订，第7、8章由容文杰编写与修订，第6、10章由于红编写与修订，第9章由姚勇编写，第11、12章由何明中、姚勇、邱敏艳编写与修订。全书由邱敏艳统稿。

由于编者能力有限，本书有些内容难免不够妥善，甚至会有错误之处。希望读者，特别是使用本教材的教师和同学积极提出批评和改进意见。

为了方便教师教学，本书还配有教学指南、电子教案和习题答案（电子版），请有此需要的教师登录华信教育资源网（<http://www.hxedu.com.cn>）下载或与电子工业出版社联系，我们将免费提供。E-mail:ve@phei.com.cn

邱敏艳

2005年1月



目 录



第 1 篇 电机篇	(1)
第 1 章 绪言	(3)
1.1 工农业及家用电器中常用电机的主要类型	(3)
1.2 铁磁材料的基本特性	(3)
1.2.1 铁磁材料的导磁性	(3)
1.2.2 磁滞现象和磁滞损耗	(4)
1.2.3 涡流损耗	(4)
1.3 电机学中常用的基本电磁定律	(5)
1.3.1 法拉第电磁感应定律	(5)
1.3.2 电磁力定律	(6)
1.3.3 全电流定律	(6)
1.3.4 磁路欧姆定律	(7)
1.4 交流铁心线圈电路	(7)
1.4.1 电磁关系	(8)
1.4.2 电压电流关系	(8)
第 2 章 变压器	(10)
2.1 变压器的分类	(10)
2.2 变压器的基本结构	(10)
2.3 变压器的额定值和型号	(13)
2.3.1 变压器的额定值	(13)
2.3.2 变压器的型号	(13)
2.4 变压器的基本工作原理	(13)
2.4.1 电压变换	(14)
2.4.2 电流变换	(15)
2.4.3 阻抗变换	(15)
2.5 变压器的运行特性	(16)
2.5.1 外特性和电压变化率	(16)
2.5.2 损耗与效率特性	(16)
2.6 其他用途变压器	(17)
2.6.1 自耦变压器	(17)
2.6.2 电流互感器与电压互感器	(17)

习题 2	(19)
第 3 章 直流电机	(20)
3.1 直流电机的基本结构和分类	(20)
3.1.1 直流电机的基本结构	(20)
3.1.2 直流电机的分类	(22)
3.2 直流电机的额定值和主要系列	(22)
3.2.1 直流电机的额定值	(22)
3.2.2 直流电机的系列与型号	(23)
3.3 直流电机的基本工作原理	(23)
3.3.1 直流电动机的基本工作原理	(23)
3.3.2 直流发电机的基本工作原理	(24)
3.3.3 可逆原理阐述	(25)
3.4 直流电动机的运行特性	(25)
3.4.1 并励直流电动机基本方程式	(25)
3.4.2 并励直流电动机的工作特性	(27)
3.5 直流电动机的启动、反转和调速	(28)
3.5.1 直流电动机的启动	(28)
3.5.2 直流电动机的反转	(28)
3.5.3 直流电动机的调速	(29)
3.6 单相串激电动机	(31)
3.6.1 单相串激电动机的结构	(31)
3.6.2 单相串激电动机的工作原理	(33)
习题 3	(35)
第 4 章 交流异步电动机	(36)
4.1 异步电动机的基本结构	(36)
4.1.1 异步电动机的定子	(37)
4.1.2 异步电动机的转子	(38)
4.2 异步电动机的额定值和主要系列	(38)
4.2.1 异步电动机的额定值	(38)
4.2.2 异步电动机的类型和系列	(40)
4.3 交流异步电动机的基本工作原理	(41)
4.3.1 概述	(41)
4.3.2 三相绕组旋转磁场的产生	(42)
4.3.3 异步电动机的基本工作原理	(43)
4.3.4 异步电动机的转差率	(44)
4.4 三相异步电动机的电路分析	(44)
4.4.1 定子电路	(45)
4.4.2 转子电路	(45)
4.5 三相异步电动机的功率、转矩和机械特性	(47)

4.5.1	三相异步电动机的功率和转矩平衡	(47)
4.5.2	三相异步电动机的电磁转矩	(48)
4.5.3	三相异步电动机的工作特性	(50)
4.6	三相异步电动机的启动、反转、调速和制动	(51)
4.6.1	三相异步电动机的启动	(51)
4.6.2	三相异步电动机的反转	(52)
4.6.3	三相异步电动机的调速	(53)
4.6.4	异步电动机的制动	(55)
4.7	单相异步电动机	(55)
4.7.1	单相异步电动机的分类及其结构	(55)
4.7.2	单相异步电动机转动原理	(57)
4.7.3	单相异步电动机的启动、反转和调速	(59)
习题 4		(62)
第 5 章	其他类型电动机	(63)
5.1	步进电动机	(63)
5.1.1	步进电动机的工作原理	(63)
5.1.2	步进电动机的典型结构	(65)
5.2	微型同步电动机	(67)
5.2.1	永磁式微型同步电动机	(67)
5.2.2	反应式微型同步电动机	(70)
5.3	无刷直流电动机	(72)
5.3.1	无刷直流电动机基本结构和类型	(72)
5.3.2	无刷直流电动机的基本工作原理	(74)
5.4	伺服电动机	(76)
5.4.1	交流伺服电动机	(76)
5.4.2	直流伺服电动机	(77)
5.5	测速发电机	(77)
习题 5		(78)
第 2 篇	电动机的应用及其控制	(79)
第 6 章	洗衣机电动机及其控制	(81)
6.1	洗衣机电动机的结构与特点	(81)
6.1.1	波轮式洗衣机电动机的结构和特点	(81)
6.1.2	滚筒式全自动洗衣机电动机的结构和特点	(82)
6.1.3	搅拌式洗衣机电动机的结构和特点	(82)
6.2	洗衣机电动机的控制线路	(83)
6.2.1	洗衣机常用电控器件	(83)
6.2.2	洗衣机电动机的基本控制方式	(89)
6.2.3	典型的洗衣机电控线路	(90)
6.3	新型洗衣机电控线路简介	(92)

6.3.1	模糊控制洗衣机	(92)
6.3.2	变频洗衣机	(93)
6.3.3	超声波洗衣机和离子洗衣机	(94)
习题 6		(94)
第 7 章	电风扇电动机及其控制	(95)
7.1	电风扇用电动机的结构与特点	(95)
7.1.1	台扇电动机的结构与特点	(95)
7.1.2	吊扇电动机的结构与特点	(95)
7.1.3	转页扇电动机的结构与特点	(96)
7.2	电风扇电动机的控制线路	(96)
7.2.1	电风扇常用电控器件的结构、原理和使用	(96)
7.2.2	电风扇用电动机的基本调速方法	(98)
7.2.3	典型电风扇电控线路	(101)
习题 7		(102)
第 8 章	电冰箱和空调器电动机及其控制	(104)
8.1	电冰箱、空调器压缩机用电动机的结构及其工作原理	(104)
8.1.1	电冰箱、空调器压缩机用电动机的结构	(104)
8.1.2	电冰箱、空调器压缩机用电动机的工作原理	(105)
8.2	电冰箱、空调器的控制线路	(106)
8.2.1	常用电控器件的结构、原理和特点	(106)
8.2.2	电冰箱、空调器的典型电控线路	(111)
习题 8		(114)
第 9 章	汽车启动机、发电机及其控制	(115)
9.1	汽车直流启动机	(115)
9.1.1	汽车直流串激式电动机的结构及参数	(115)
9.1.2	汽车启动机的参数选择	(117)
9.1.3	电磁啮合式启动机	(118)
9.1.4	其他形式的启动机	(119)
9.2	汽车交流发电机	(120)
9.2.1	交流发电机的工作原理	(120)
9.2.2	交流发电机的构造	(123)
习题 9		(125)
第 10 章	其他家用电器电动机的原理及控制	(126)
10.1	音响设备电动机的原理及控制	(126)
10.1.1	盒式录音机	(126)
10.1.2	唱机	(128)
10.2	美容保健电动器具电动机及控制	(128)
10.2.1	电吹风中的电动机及控制	(128)
10.2.2	电动剃须刀中的电动机及控制	(129)

10.2.3	按摩器中的电动机及控制	(130)
10.3	办公自动化设备电动机的原理及控制	(130)
10.4	厨房器具电动机的原理及控制	(132)
10.5	电动工具电动机的原理及控制	(133)
习题 10		(134)
第 3 篇	电机故障检修与实验	(135)
第 11 章	电机常见故障及检修方法	(137)
11.1	直流电动机常见故障及检修	(137)
11.1.1	直流电动机常见故障及原因	(137)
11.1.2	直流电动机绕组故障的检验及修理	(138)
11.1.3	直流电动机换向器部位故障的检验及修理	(141)
11.2	单相串激电动机常见故障及检修	(143)
11.2.1	定子绕组故障的检查与修理	(143)
11.2.2	电枢绕组故障的检查与修理	(144)
11.2.3	换向器部位故障的检查与修理	(144)
11.2.4	噪声过高的原因及降低噪声的方法	(146)
11.3	单相异步电动机常见故障、检修方法及检验内容	(147)
11.3.1	单相异步电动机常见故障	(147)
11.3.2	单相异步电动机检修方法	(148)
11.3.3	单相异步电动机的验收方法	(151)
11.4	三相异步电动机的故障及检修	(152)
11.4.1	三相异步电动机运行前后的检查	(152)
11.4.2	电动机启动时的故障分析及检修	(153)
11.4.3	电动机运行时的故障分析及检修	(153)
第 12 章	电机与控制实验	(155)
12.1	电机与控制实验的基本要求	(155)
12.2	直流电机认识实验	(156)
12.3	单相异步电动机实验	(158)
12.3.1	单相电阻启动异步电动机实验	(158)
12.3.2	单相电容启动异步电动机实验	(160)
12.3.3	单相电容运转异步电动机实验	(161)
12.4	双桶洗衣机控制线路实验	(162)
12.5	台扇实验	(164)
12.6	电冰箱电气控制系统的观测实验	(164)
12.7	窗式空调器控制电路的实验	(166)
12.8	汽车蓄电池电压、启动机电流测量	(167)

第 1 篇 电 机 篇

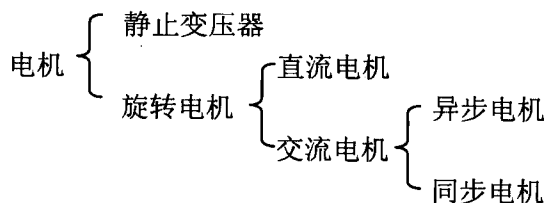
电机的作用是将电能转换为机械能。现代各种生产机械都广泛使用电机来驱动。由此可见，电机在国民经济中起着极其重要的作用。

第1章 绪 言

1.1 工农业及家用电器中常用电机的主要类型

在国民经济及家用电器中所应用的电机是多种多样的，但其基本工作原理都是基于法拉第电磁感应定律和安培力定律。因此，其构成的一般原理为：采用相应的导磁和导电材料构成能相互进行电磁感应的磁路和电路，以产生感应电势和电磁转矩，从而达到转换能量形态的目的。

电机的分类方法很多。对于常用电机，如按其结构形式及其产生感应电势和电磁转矩的电磁感应方式来看，可进行如下形式的分类：



对于上述各类电机，如果按其功能来分类，可分为：

1. 发电机——用于把机械能转换成电能；
2. 电动机——用于把电能转换成机械能；
3. 变压器、变频器、移相器——分别用于改变电源电压、频率和相位；
4. 控制电机——作为控制系统中的控制元件或执行元件。

1.2 铁磁材料的基本特性

电机是以磁场为媒介，利用电磁感应作用实现能量转换的。因此，作为构成电机磁路的铁磁材料，其性能的优劣对电机性能的好坏起着关键作用。下面来介绍铁磁材料的基本特性，为今后研究电机的磁路和运行特性打下基础。

1.2.1 铁磁材料的导磁性

在电机中，常用的铁磁材料有铁、钴、镍及它们的合金；常见的非铁磁材料有空气和变压器（电容器）油。我们用 μ_{Fe} 来表示铁磁材料的导磁系数；用 μ_0 表示非铁磁材料的导磁系数， μ_0 可视为常量。通常 μ_{Fe} 为 μ_0 的两千至六千倍。因此，在同样大小的电流下，铁心线圈的磁通比空心线圈的磁通大得多。在非铁磁材料中，由于导磁系数 μ_0 为一常量，所

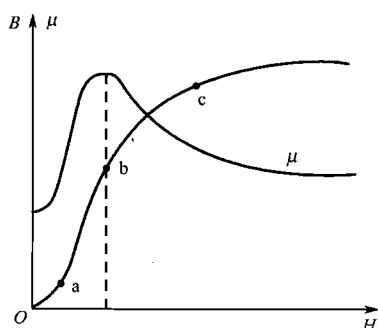


图 1.1 铁磁材料的磁化曲线

通常,把过b点之后,这种H增加时,B的增加变缓直至基本不变的现象称为磁饱和。

1.2.2 磁滞现象和磁滞损耗

如图 1.2 所示,在测取铁磁物质的磁化曲线时,当H由零上升到某个最大值 H_m 时,B 是沿着磁化曲线 O1 上升的;当H由 H_m 下降到零时,B 不是沿着 1O 下降,而是沿着另一条曲线 12 变化。当H由零变到 $-H_m$,即进行反向磁化时,B 沿着曲线 234 变化。当H由 $-H_m$ 上升到零时,B 沿着曲线 45 变化。当H再由零上升到 H_m 时,B 沿着 561 上升,又几乎回到了 1 点。这样反复磁化一个循环时,就得到一个闭合回线 123456,该回线称为铁磁材料的磁滞回线。不同的铁磁材料有不同的磁滞回线。同一铁磁材料, H_m 越大,则磁滞回线的面积越大。

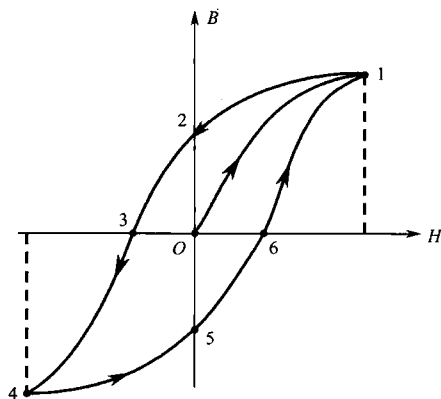


图 1.2 磁滞回线

从磁滞回线可以看出,上升磁化曲线与下降曲线并不重合,下降时,B 的变化总是滞后于H 的变化,当H 下降到零时,B 不是下降到零,而是下降到某一个数值 B_r ,这种现象称为磁滞, B_r 称为剩余磁感应强度。

磁滞损耗:在铁磁材料处于交变磁场作用下反复磁化的过程中,磁畴之间不停地相互摩擦,从而产生能量消耗,这种能量消耗称为磁滞损耗。磁滞回线面积越大,损耗越大。实验表明,交变磁化时,磁滞损耗 p_h 与磁通的交变频率 f 成正比,与磁通密度的幅值 B_m 的 α 次方成正比,即

$$p_h \propto f B_m^\alpha \quad (1-1)$$

对常用的硅钢片,当 $B=(1.0\sim1.5)\text{T}$ 时, $\alpha \approx 2$ 。由于硅钢片的磁滞回线面积较小,所以电机的铁心大都采用硅钢片。

1.2.3 涡流损耗

如图 1.3 所示,依据电磁感应定律,当铁心内的磁通发生交变时,铁心内将产生感应电势和感应电流。这些电流将在铁心内部围绕磁通呈漩涡状流动,称为涡流。涡流在铁心中引

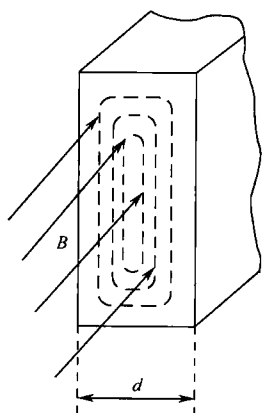


图 1.3 硅钢片中的涡流

起的损耗称为涡流损耗。设 I_w 和 E_w 分别为涡流和产生涡流的电势, r_w 为涡流回路的等效电阻, 则涡流损耗 P_w 可用下式表示

$$P_w = I_w^2 r_w = \left(\frac{E_w}{r_w} \right)^2 r_w = \frac{E_w^2}{r_w} \quad (1-2)$$

由于感应电势 E 与磁通交变频率 f 和磁通幅值成正比, 而后者又与磁通密度的幅值 B_m 成正比, 于是, 涡流损耗与 $f^2 B_m^2$ 成正比, 即 $P_w \propto \frac{f^2 B_m^2}{r_w}$ 。进一步分析表明,

对于电工钢片, 涡流损耗还与其厚度 d 的平方成正比, 故得

$$P_w \propto \frac{f^2 B_m^2 d^2}{r_w} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可见, 为了减小涡流损耗, 首先是减小钢片的厚度。所以, 电工钢片通常做成 0.5mm 和 0.35mm。对于中高频电路, 甚至做成 0.2mm 和 0.1mm。其次是增加涡流回路的电阻, 为此电工钢片中常加入 4% 左右的硅, 变成硅钢片, 用以提高电阻系数。

在研究电机和变压器时, 通常把磁滞损耗和涡流损耗合并在一起, 统称为铁心损耗, 简称铁损。单位质量的铁损通常用下式计算

$$P = P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta B_m^2 \text{ (W/kg)} \quad (1-4)$$

式中, $P_{1/50}$ 为铁损系数, 表示当 $B_m = 1\text{T}$, $f = 50\text{Hz}$ 时, 每千克硅钢片的损耗; $\beta = 1.2 \sim 1.6$ 。

1.3 电机学中常用的基本电磁定律

1.3.1 法拉第电磁感应定律

设有一个单匝线圈放置在磁场中, 不论什么原因 (如线圈本身的移动或转动、磁场强度自身发生变化等), 只要引起该线圈相交链的磁通 Φ 随时间发生变化, 则在该线圈中必然有感应电势 e 产生, 这种现象称为电磁感应。如果把感应电势的正方向与磁通的正方向规定得符合右手螺旋关系, 则感应电势可表示为

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 是法拉第电磁感应定律的数学描述。

如果上述线圈不是单匝的, 而是 N 匝, 那么, 磁通量发生变化时, 每匝中都将产生感应电势。由于匝与匝之间是相互串联的, 整个线圈的总电势就应等于各匝线圈所产生的电势之和。令 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_w$ 分别是通过各匝线圈的磁通量, 则

$$e = - \frac{d\Phi_1}{dt} - \frac{d\Phi_2}{dt} - \dots - \frac{d\Phi_w}{dt} = - \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w) = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (1-6)$$