



中等职业学校教学用书(电子技术专业)

电动机的结构与维修 (第2版)

◎ 杜德昌 主 编

本书配有电子教

84



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

中等职业学校教学用书（电子技术专业）

电动机的结构与维修

（第 2 版）

杜德昌 主编

王 猛 主审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书贯彻以学生为主体,以就业为导向,以培养学生技能为目标的职业教育理念,参照项目教学的模式,采用任务驱动方式,依据电工《职业技能鉴定规范(考核大纲)》和《工人技术等级标准》组织编写。主要内容包括:电动机基础知识、三相异步电动机及其控制、三相异步电动机的绕组、三相异步电动机的维修、单相异步电动机、直流电动机、特种电动机等七部分。

本书内容深入浅出、简明扼要、通俗易懂、图文并茂,是各类中等职业学校必不可少的专业教材。

为了方便教师教学,本书配有电子教学参考资料包(包括教学指南、电子教案、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

电动机的结构与维修 / 杜德昌主编. —2版. —北京: 电子工业出版社, 2007.1

中等职业学校教学用书. 电子技术专业

ISBN 7-121-03048-9

I. 电… II. 杜… III. ①电动机—结构—专业学校—教材 ②电动机—维修—专业学校—教材 IV. TM32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 093421 号

责任编辑: 蔡 葵

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

装 订: 北京牛山世兴印刷厂

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

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13.5 字数: 345.6 千字

印 次: 2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 5000 册 定价: 18.50 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 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; 邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

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
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

前 言

本书是根据《电动机的结构与维修》重新进行修订编写的。本书贯彻以学生为主体,以就业为导向,以培养学生技能为目的的职业教育理念,参照项目教学的模式,采用任务驱动方式重新组织编写内容。

修订后的教材内容主要包括:电动机基础知识、三相异步电动机及其控制、三相异步电动机的绕组、三相异步电动机的维修、单相异步电动机、直流电动机、特种电动机等七部分。主要介绍了电动机所涉及的基础知识;维修电工基本操作、维修电工工具的使用方法;交、直流电动机绕组的概念和排列方式,绕组的重绕以及改绕的简单计算;电动机结构的原理和主要部件的维修技术,电动机常见故障及其处理方法;修复后的电动机整体检查和绝缘耐压、空载运行、温升超速试验等。在每一章的后面附有本章小结和复习思考题,对于技能性较强的操作部分,均安排了技能训练的课题,便于学生加深对理论知识的理解,培养学生的实际动手能力。

本书以理论知识的讲授为主线,着重于电动机维修技能的培养,力求紧密结合教学和生产的实际。在文字的表述上力求深入浅出、简明扼要、通俗易懂,并尽可能多地采用插图,以求直观形象。

本教材的总教学课时定为 72 学时,其中,理论教学 50 学时、技能训练 22 学时,各部分内容的课时分配建议如下:

序 号	教 学 内 容	理论教学	技能训练	备 注
一	电动机基础知识	6	2	
二	三相异步电动机及其控制	8	2	
三	三相异步电动机的绕组	6	4	
四	三相异步电动机的维修	10	8	
五	单相异步电动机	8	4	
六	直流电动机	6	2	
七	特种电动机	6		
合计		50	22	

本次修改由山东省教学研究室杜德昌担任主编,参加编写的有济南信息工程学校吴炳东(绪论、第七章)、济南第九职业中专鹿学俊(第 1 章)、章丘第一职业中专王英群(第 2 章)、淄博工业学校苏云国(第 3、4 章)、邹平职业中专李执明(第 5 章)、山东民族职业中专冀协义(第 6 章),最后由杜德昌、吴炳东统稿。

全书承蒙常州刘国钧高等职业技术学院王猛审阅,在此谨表示诚挚的感谢。

由于编写经验不足,加之时间仓促,教材中定有许多不足之处,诚望广大读者提出宝贵意见,以便进一步修改完善。

为了方便教学,本书配有电子教学参考资料包,包括电子教案、教学指南及习题答案,请有此需要的教师登录华信教育资源网(www.huaxin.edu.cn 或 www.hxedu.com.cn)免费注册后进行下载,如果有问题请在网站留言或与电子工业出版社联系(E-mail:hxedu@phei.com.cn)。

编 者

2006 年 4 月



• V •

目 录



绪 论	(1)
第 1 章 电动机基础知识	(3)
1.1 电磁基础知识	(3)
1.1.1 电路	(3)
1.1.2 磁路	(4)
1.1.3 电与磁	(5)
1.1.4 单相正弦交流电	(9)
1.1.5 三相交流电	(12)
1.2 常用维修工具与仪表	(14)
1.2.1 通用电工工具	(15)
1.2.2 专用电工工具	(18)
1.2.3 电动机维修常用的仪表	(20)
1.3 常用维修材料	(24)
1.3.1 电磁线和引接线	(24)
1.3.2 绝缘材料	(27)
1.3.3 轴承	(29)
1.3.4 电刷	(30)
第 2 章 三相异步电动机及其控制	(34)
2.1 三相异步电动机的结构	(34)
2.1.1 定子	(35)
2.1.2 转子	(36)
2.1.3 气隙	(38)
2.2 三相异步电动机的拆装	(38)
2.2.1 三相异步电动机的拆卸	(38)
2.2.2 三相异步电动机的装配	(40)
2.3 三相异步电动机的工作原理	(42)
2.3.1 旋转磁场	(42)
2.3.2 三相异步电动机的转动原理	(44)
2.3.3 转差率 s	(44)
2.3.4 三相异步电动机的运行特性	(45)
2.4 三相异步电动机的控制	(47)
2.4.1 三相异步电动机的起动	(47)
2.4.2 三相异步电动机的调速	(49)
2.4.3 三相异步电动机的反转与制动	(51)
2.5 三相异步电动机的选择与安装	(53)

2.5.1	三相异步电动机的铭牌	(53)
2.5.2	三相异步电动机的选择	(54)
2.5.3	电动机的安装	(57)
第3章	三相异步电动机的绕组	(61)
3.1	绕组基本概念	(61)
3.1.1	绕组、绕组展开图及三相绕组构成原则	(61)
3.1.2	槽数和磁极数	(62)
3.1.3	极距和节距	(63)
3.1.4	电角度	(63)
3.1.5	每极每相槽数	(63)
3.1.6	相带	(64)
3.2	三相异步电动机绕组的排列	(64)
3.2.1	单层绕组	(64)
3.2.2	双层绕组	(69)
3.2.3	分数槽绕组	(73)
第4章	三相异步电动机的维修	(77)
4.1	定子的维修	(77)
4.1.1	电动机定子铁心的修理	(77)
4.1.2	定子绕组故障的检修	(78)
4.1.3	定子机壳的维护	(83)
4.1.4	机座、端盖裂缝的维修	(83)
4.2	转子的维修	(83)
4.2.1	转子断条的维修	(84)
4.2.2	转轴的维修	(86)
4.2.3	轴承的故障与维护	(87)
4.2.4	集电装置的故障与维修	(90)
4.3	三相异步电动机绕组的重绕	(94)
4.3.1	记录原始数据	(94)
4.3.2	拆除旧绕组	(95)
4.3.3	制作绕线模	(96)
4.3.4	线圈的绕制	(99)
4.3.5	嵌线操作	(100)
4.3.6	接线与焊接	(102)
4.3.7	绕组检查与试验	(103)
4.3.8	绕组的浸漆与烘干	(103)
*4.4	三相异步电动机绕组改绕	(105)
4.4.1	绕组数据的确定	(105)
4.4.2	改变导线规格的计算	(107)
4.4.3	改极计算	(108)
4.4.4	改压计算	(110)

4.4.5	单速电动机改为多速电动机的计算	(112)
4.5	三相异步电动机的常见故障	(113)
4.5.1	故障分析	(114)
4.5.2	三相异步电动机的常见故障及其处理方法	(115)
4.6	电动机修理后的检查与试运转	(116)
4.6.1	电动机的整体检查	(116)
4.6.2	绝缘耐压试验	(118)
4.6.3	空载运转试验	(120)
4.6.4	温升超速试验	(121)
第 5 章	单相异步电动机	(133)
5.1	单相异步电动机的结构与原理	(134)
5.1.1	单相异步电动机的结构	(134)
5.1.2	单相异步电动机的启动工作原理	(136)
5.2	单相异步电动机的起动方式	(137)
5.2.1	分相式电动机	(137)
5.2.2	单相罩极式异步电动机	(139)
5.3	单相异步电动机的反转与调速	(140)
5.3.1	单相异步电动机的反转	(140)
5.3.2	单相异步电动机的调速	(140)
5.4	单相异步电动机的定子绕组	(142)
5.4.1	单层绕组	(142)
5.4.2	双层绕组	(147)
5.4.3	正弦绕组	(148)
5.5	单相交流异步电动机常见故障的检修	(150)
5.5.1	单相交流异步电动机的常见故障及排除方法	(150)
5.5.2	单相交流异步电动机的局部修理及检验	(152)
5.5.3	维修实例	(153)
第 6 章	直流电动机	(158)
6.1	直流电动机的结构与工作原理	(158)
6.1.1	直流电动机铭牌	(158)
6.1.2	直流电动机结构	(159)
6.1.3	直流电动机工作原理	(161)
6.2	直流电动机的分类及特性	(164)
6.2.1	并励直流电动机	(164)
6.2.2	永磁直流电动机	(165)
6.2.3	串励直流电动机	(165)
6.2.4	复励直流电动机	(166)
6.2.5	直流电动机的应用实例	(167)
6.3	直流电动机的常见故障及处理	(168)

第 7 章 特种电动机	(172)
7.1 电磁调速异步电动机	(172)
7.1.1 电磁调速电动机的结构	(172)
7.1.2 电磁调速电动机的工作原理	(173)
7.1.3 电磁调速电动机的特点	(173)
7.1.4 电磁调速电动机的应用	(173)
7.2 步进电动机	(174)
7.2.1 步进电动机的结构	(174)
7.2.2 步进电动机的工作原理	(174)
7.2.3 步进电动机的应用	(175)
7.3 永磁电动机	(176)
7.3.1 永磁直流电动机	(176)
7.3.2 永磁无刷直流电动机	(177)
7.3.3 永磁交流同步电动机	(177)
7.4 伺服电动机	(178)
7.4.1 交流伺服电动机	(178)
7.4.2 直流伺服电动机	(179)
7.5 直线电动机	(181)
7.5.1 直线异步电动机的结构	(181)
7.5.2 直线异步电动机的工作原理	(182)
附录 A Y 系列 (IP44) 小型三相鼠笼式异步电动机主要技术数据	(186)
附录 B 中华人民共和国工人技术等级标准	(191)
附录 C 中华人民共和国职业技能鉴定规范	(196)

绪 论



1. 电动机在生产生活中的作用

自然界中存在着电能、热能、光能、核能、化学能、机械能等，而且这些能量形式是能够互相转换的。由于电能的生产、变换、传输、分配、控制等都比较方便，因此电能是目前使用最广泛的一种能量，已成为国民经济各部门中的主要能源。

电动机是将电能转换成机械能来拖动生产设备进行运转的最直接、最有效的设备。工厂中的各种风机、水泵、机床、吊车等；生活中的电冰箱、空调、洗衣机、吸尘器、风扇、随身听、影碟机等；在高科技领域更是离不开各种各样的电动机，例如计算机的软盘驱动器、硬盘驱动器和自动化生产线上的机械手——在某些特种电动机的作用下完成比人的手脚更复杂、更精巧的快速响应，快速启停，模仿性运动等动作。

2. 电动机的发展

电动机是随着生产的发展而产生和发展的，其发展过程可以粗略地划分为两个时期。

准备阶段：从 1821 年法拉第发现电流在磁场中受到安培力的作用，出现了电动机的原始模型，直到 19 世纪末期电动机较为完善的理论和设计计算及定型才算真正建立起来。

成熟阶段：进入 20 世纪后，随着交流三相电的投入使用，古典控制理论及近代控制理论的建立和以 1958 年美国通用电气公司研制成功第一个工业用的普通晶闸管为标志的传统电力电子技术的到来，各种通用型电动机迅速产生，其中典型代表就是目前仍然大量使用的三相鼠笼式异步电动机。

3. 电动机的分类

只要能够把电能转换成机械能的设备，都可以称之为电动机。因此，电动机有很多种类，将电动机的分类如图 0-1 所示。

4. 本课程的任务与要求

本课程是中等职业学校的维修电工类专业的主干专业课之一。本课程主要介绍三相异步电动机，单相异步电动机，直流电动机的结构、工作原理、常见故障的检修以及修理后的检查与试运转，同时对某些特种电动机的结构、工作原理以及应用也给予了适当介绍。通过实验、实习等实践环节，培养具有对常见电动机的安装、调试和维修的初步能力。学完本课程应达到下列要求：

- (1) 理解电路、磁路、电磁定律、单相交流电和三相交流电等理论基础知识。
- (2) 掌握电动机的常用维修工具与仪表的使用方法及运用技巧。
- (3) 学会根据实际情况合理选择维修材料。



(4) 掌握三相异步电动机，单相异步电动机，直流电动机的结构、工作原理。

(5) 掌握三相异步电动机，单相异步电动机，直流电动机的安装、调试以及拆卸、组装、维护、检修等。

本课程内容具有科学性、针对性、实用性，因此，学习本课程要重视实验、实习，重点培养看懂基本电路图、分析问题和实际动手能力。

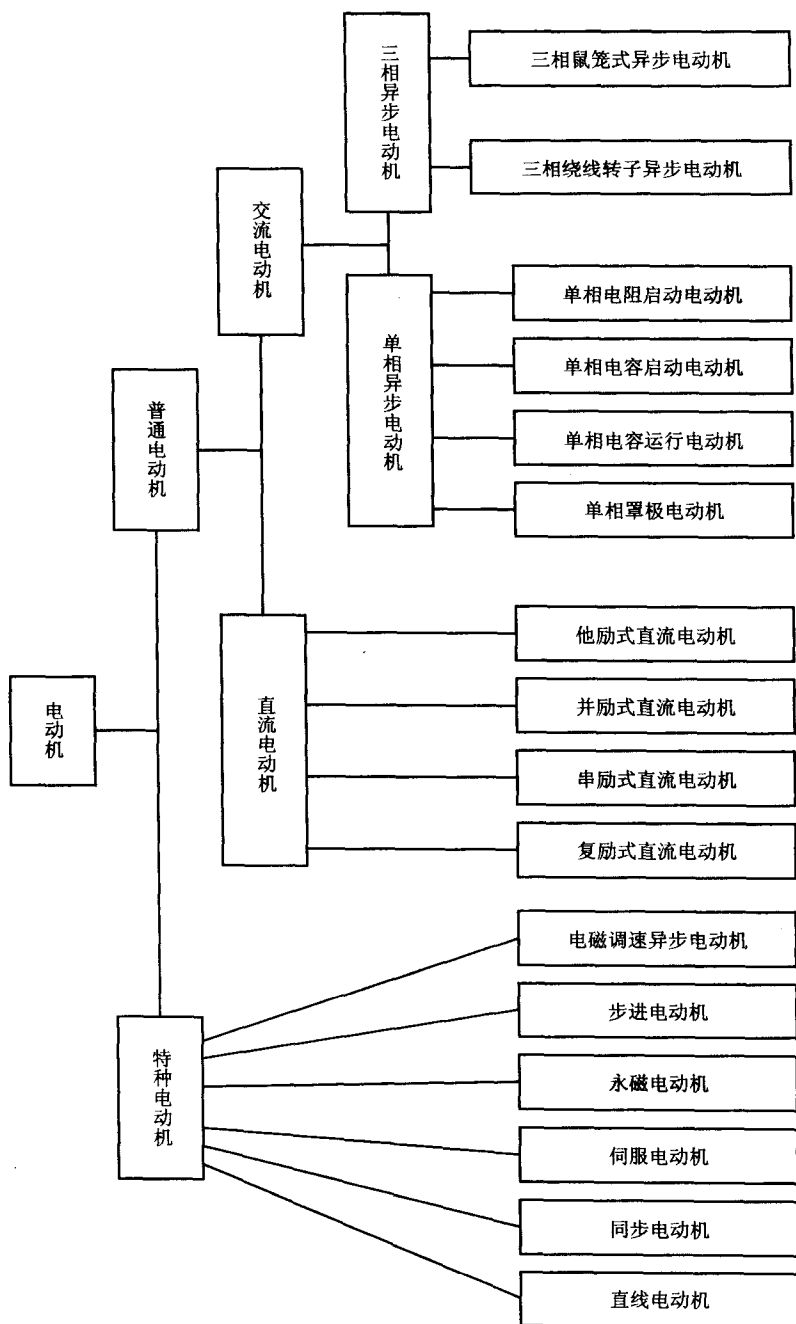


图 0-1 电动机的分类

第1章 电动机基础知识

学习完本章之后，你将能够：

- ❖ 了解电动机维修常用工具和仪表的组成、结构；
- ❖ 认识电动机维修时常用的维修材料，学会其选用；
- ❖ 掌握与电动机原理相关的电磁基础知识；
- ❖ 知道电动机维修常用工具和仪表的使用。

1.1 电磁基础知识

【任务】了解与电动机有关的电路、磁路、单相交流电、三相交流电理论知识。

1.1.1 电路

1. 电路的基本概念

电路是把各种电气设备和元器件按一定的连接方式构成的电流通路，以实现电器设备的预定功能。通常由电源、负载装置、导线和控制元器件构成。最基本的电路如图 1-1 所示。

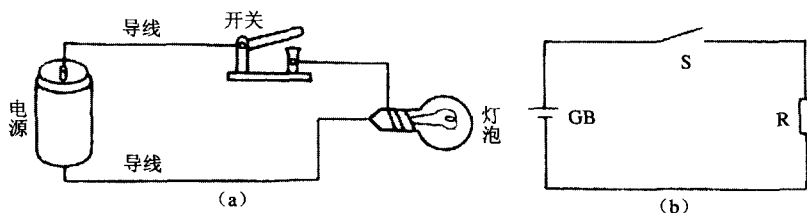


图 1-1 电路和电路图

(1) 电源

把其他形式的能转为电能的装置叫电源，它是电路中的能源。常见的电源有干电池、蓄电池和交、直流发电机等。

(2) 负载

通过做功把电能转变成其他形式的能的装置叫负载装置，也叫用电器。例如：电灯、电铃、电炉、电扇、电动机等。

(3) 导线

连接电源与负载装置的金属线叫导线。常用铜或铝材料制成，它是电能的传输通道。

(4) 控制元件

控制电路接通和断开的装置称为控制元件，又叫开关。常用开关有拉线开关、闸刀开关、



按钮开关等。

某些电路中根据需要还装配有其他辅助设备，例如测量仪表用来测量电路中的电量，熔丝用来执行保护任务。

2. 电路图

图 1-1 (a) 所示是用电气设备的实物图形表示的实际电路。它的优点是直观，但画起来很复杂，不便于分析和研究。因此，在分析和研究电路时，总是把这些实际设备抽象成一些理想化的模型，用规定的图形符号表示，画出其电路模型图，如图 1-1 (b) 所示。这种用统一规定的图形符号画出的电路模型称为电路图。

3. 电路的状态

电路的状态通常有三种，即通路、断路和短路。

通路也叫闭路，在这种状态下，控制元件将电路接通，电路中有电流通过，负载正常工作，是电路正常、安全运行状态。必须注意：处于通路状态的各种电气设备的电压、电流、功率等数值不能超过其额定值。

断路也叫开路，是指电路断开，没有电流通过。分为两种情况：一是将电路的控制元件人为分断，这种是正常断路；二是在电路上不应分断部位断开，使电路不通，这属于故障状态。在实际电路中，电气设备与电气设备之间、电气设备与导线之间连接时接触不良往往会造成断路故障。

短路也叫捷路，可分为两种情况：一是电源的两极被一导线连接而直接形成回路；二是电路中某一部分负载两端被导线连接而使该部分短路。无论哪种短路，都会导致电路中电流比正常时大得多，可能烧坏电源和其他设备，甚至会造成火灾。因此，在电路中必须装有熔丝等保护设施，防止短路事故，确保用电安全。

1.1.2 磁路

1. 磁路的概念

磁通经过的闭合路径称为磁路。由于磁场的磁感线是闭合曲线，所以，磁路可由不同介质或真空构成。如图 1-2 所示为变压器中的硅钢铁心，当线圈中通以电流时，主磁通通过铁心、衔铁和工作气隙构成回路；而漏磁通可通过空气自成回路。

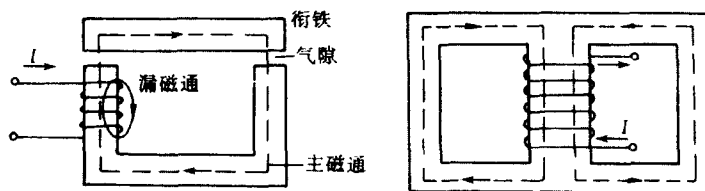


图 1-2 硅钢铁心磁路

2. 磁路的欧姆定律

通过磁路的磁通与激发磁通的磁动势成正比，与磁阻成反比，这一规律称为磁路的欧姆定律。用公式表示为：

$$\Phi = E_m / R_m$$

式中 E_m ——激发磁通的磁动势,其大小等于线圈的匝数与线圈中的电流的乘积,单位是安(A);
 R_m ——磁阻,其大小与磁路的尺寸及铁磁性物质的磁导率有关,单位是每亨 ($1/H$);
 Φ ——磁通,单位是韦伯 (Wb)。

上式与电路的欧姆定律相似,磁通对应于电流,磁动势对应于电动势,磁阻对应于电阻。

1.1.3 电与磁

1. 电流的磁场

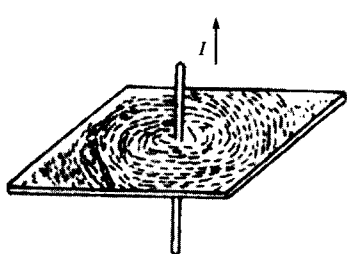
1820年丹麦物理学家奥斯特从实验中发现,放在导线旁边的磁针,当导线通入电流时,磁针会受到力的作用而偏转。这表明通电导线的周围存在着磁场,电与磁有密切联系。

(1) 通电直导线周围的磁场

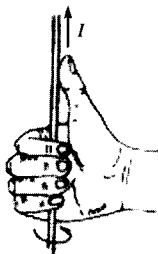
通电直导线周围磁场的磁感线是一些以导线上各点为圆心的同心圆,这些同心圆都在与导线垂直的平面上,如图 1-3 (a) 所示。

实验表明,改变电流的方向,各点磁场方向都随之改变。

磁力线的方向与电流方向之间的关系可用安培定则(又称右手螺旋法则)来判断,如图 1-3 (b) 所示,用右手握住通电直导线,让拇指指向电流方向,则四指环绕的方向就是磁感线的方向。



(a) 通电直导线



(b) 安培定则

图 1-3 通电直导线磁场

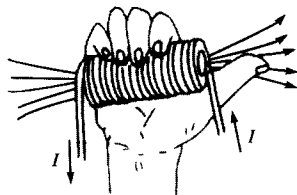


图 1-4 通电线圈磁场

(2) 通电线圈的磁场

通电线圈表现出来的磁性类似条形磁铁,一端相当于 N 极,另一端相当于 S 极,如果改变电流的方向,它的 N 极、S 极随之改变。通电线圈的磁感线是一些穿过线圈横截面的闭合曲线,在线圈外部从 N 极指向 S 极,在线圈内部从 S 极指向 N 极。其磁感线方向与电流方向之间的关系仍可以用安培定则来判定,如图 1-4 所示。用右手握住线圈,弯曲四指指向线圈电流环绕方向,则拇指方向就是线圈内部磁感线的方向。

2. 磁场对载流导体的作用

(1) 磁场对载流直导体的作用

将一长度为 L 的导线垂直放入一匀强磁场中,当导线中通以电流 I 时,该导线将受到磁场对它的作用力,称为安培力。安培力的大小可通过安培定律来描述:载流导线在磁场中所受到的安培力与磁场的磁感应强度 B 、导线的有效长度 L 和导线内部的电流强度 I 这三者的乘积成正比,这一结论称为安培定律,用公式表示为:

$$F=BIL$$



式中 B ——磁感应强度,也叫磁通密度,单位是特斯拉 (T);

I ——电流强度,单位是安培 (A);

L ——导线的有效长度,单位是米 (m);

F ——导线所受的安培力,单位是牛顿 (N)。

安培力的方向可用左手定则来判断:伸开左手,拇指与其他四指垂直,并与手掌在同一平面内,手心对准 N 极,让磁感线垂直穿过手心,四指指向电流方向,大拇指所指的方向就是安培力的方向。

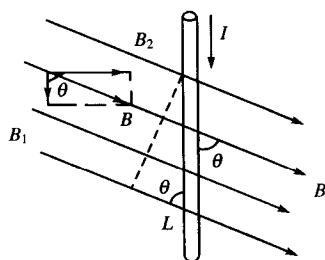


图 1-5 载流导体在磁场中受力

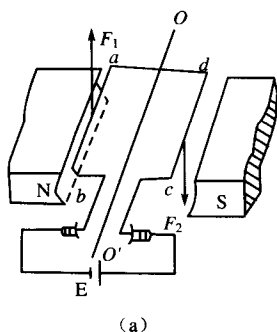
必须指出:式中 L 为导线的有效长度,其有效二字的含义有两点:一是导线必须完全处在磁场中;二是导线必须与磁场方向垂直,若二者不垂直,而呈角度 θ ,如图 1-5 所示,则有效长度为导线 L 在垂直于磁场方向上投影的长度 $L \sin \theta$,所以,安培定律的一般形式为

$$F = BIL \sin \theta$$

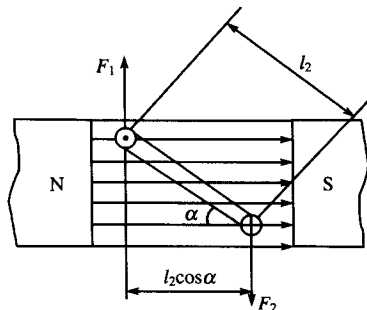
(2) 磁场对通电矩形线圈的作用

研究磁场对通电矩形线圈的作用具有重要的实际意义,因为常用的直流电压表、直流电流表、万用表等磁电式仪表以及直流电动机都是应用这一原理制成的。

如图 1-6 (a) 所示,在均匀磁场中放置一通电矩形线圈 $abcd$,当线圈平面与磁感线平行时,由于 ad 边和 bc 边与磁感线平行而不受磁场的作用力,但 ab 边和 cd 边因与磁感线垂直将受到磁场的作用力 F_1 和 F_2 ,而且 $F_1 = F_2$,受到作用力的两个边叫有效边。



(a)



(b)

图 1-6 磁场对通电线圈的作用

两有效边所受到的作用力不仅大小相等而且根据左手定则可知,受力方向正好相反,形成力偶矩将使线圈绕轴线做顺时针方向转动,电动机就是根据这一原理旋转起来的。

在图 1-6 (a) 中,设: $ab = cd = l_1$ $ad = cb = l_2$,则此时的转矩为:

$$M = F_1 l_2 = BIl_1 l_2 = BIS$$

式中 B ——均匀磁场的磁感应强度,单位是特斯拉 (T);

I ——线圈中的电流,单位是安培 (A);

S ——线圈的面积 ($S = l_1 l_2$),单位是米² (m²)。

如图 1-6 (b) 所示,若线圈在转矩 M 的作用下顺时针旋转,当线圈平面与磁感线的夹角为 α 时,线圈的转矩为:



$$M = BIS \cos \alpha$$

由上式可知：当线圈平面与磁感线平行时， $\cos \alpha = 1$ ，这时转矩达到最大值， $M = BIS$ 。当线圈平面与磁感线垂直时， $\cos \alpha = 0$ ，这时的转矩最小为零。

若矩形线圈由 N 匝绕制，则转矩为：

$$M = NBIS \cos \alpha$$

3. 电磁感应

由于磁通变化而在导体或线圈中产生感应电动势的现象称为电磁感应，也称“动磁生电”。由电磁感应产生的电动势称为感应电动势，由感应电动势产生的电流叫感应电流。产生电磁感应的条件是通过线圈回路的磁通发生变化。

(1) 法拉第电磁感应定律

在图 1-7 所示的实验中，当条形磁铁插入或拔出线圈的速度越快时，检流计指针偏转角度越大，说明线圈中产生的感应电动势就越大；当插入或拔出线圈的速度越慢时，检流计指针偏转角度愈小，说明线圈中产生的感应电动势就愈小。

上述实验现象可总结为：线圈中感应电动势的大小与穿过线圈的磁通量的变化率（即变化快慢）成正比，这一规律就叫做法拉第电磁感应定律。

设 Δt 时间内通过线圈的磁通量为 $\Delta \Phi$ ，则单匝线圈中产生的感应电动势的平均值为：

$$|e| = |\Delta \Phi / \Delta t|$$

对于 N 匝线圈，其感应电动势为：

$$|e| = |N \Delta \Phi / \Delta t|$$

式中 e ——在 Δt 时间内产生的感应电动势，单位是伏（V）；

N ——线圈的匝数；

$\Delta \Phi$ ——线圈中磁通的变化量，单位是韦伯（Wb）；

Δt ——磁通变化 $\Delta \Phi$ 所需要的时间，单位是秒（s）。

上述表明：线圈中感生电动势的大小，取决于线圈中磁通量的变化速度，而与线圈中磁通本身的大小无关。若 $\Delta \Phi / \Delta t = 0$ ， $e = 0$ ，即使线圈中磁通再大，也不会产生感生电动势。

(2) 楞次定律

楞次定律可以判定线圈中感应电动势或感应电流的方向。其内容是：在电磁感应中，感应电流产生的磁通总是阻碍原磁通（即产生感应电流的磁通）的变化，即当原磁通增加时，感应电流产生的磁通与原磁通方向相反，阻碍原磁通的增加；当原磁通减少时，感应电流产生的磁通与原磁通方向相同，阻碍原磁通的减少。

例如，原磁通方向如图 1-8 所示，当把磁铁插入线圈时，线圈中磁通的变化趋势是增加。根据楞次定律可知感应电流所产生的磁通与原磁通方向相反，其方向向上，如图 1-8（a）所示。再根据安培定则判断出感应电流方向即感应电动势的方向，在线圈中由上端指向下端。

当把磁铁拔出线圈时，线圈中磁通的变化趋势是减少的。根据楞次定律可知感应电流所产生的磁能与原磁通方向相同，其方向向下，如图 1-8（b）所示，再根据安培定则可知，此时感应电动势的方向在线圈中由下端指向上端。

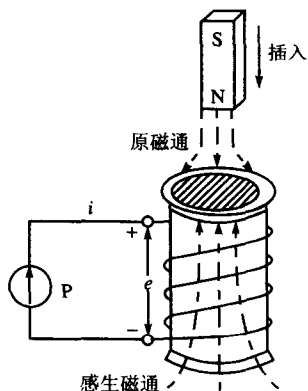


图 1-7 电磁感应现象

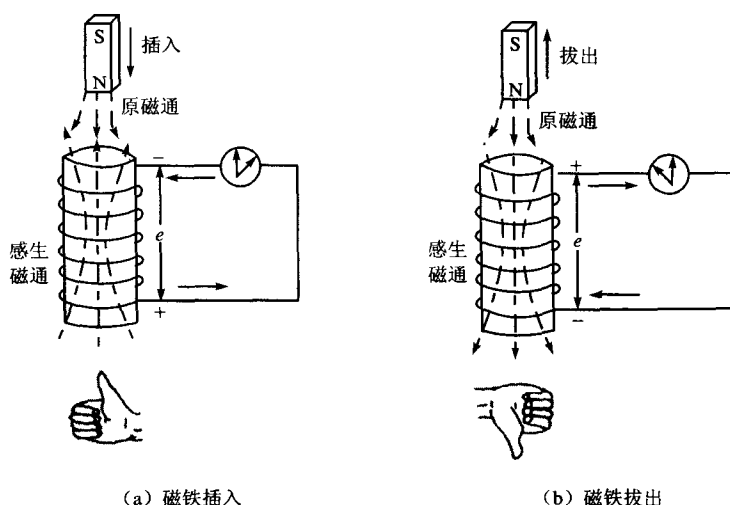


图 1-8 应用楞次定律判断感应电流方向

如图 1-9 所示,直导体切割磁力线运动造成穿过闭合电路的磁力线条数(磁通量 Φ)减少或增多,检流计指针均发生偏转,说明电路中产生感生电动势和感生电流。感应电动势的方向,可以用楞次定律来判定,但是用右手定则判定更为简便。方法如图 1-10 所示:伸出右手,拇指与四指垂直,让磁力线垂直穿过手心,拇指指向导体的运动方向,则四指的方向便是感应电动势或感应电流的方向。

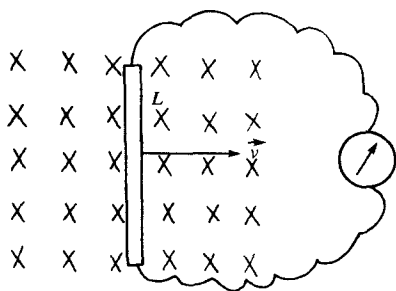


图 1-9 导体切割磁力线运动

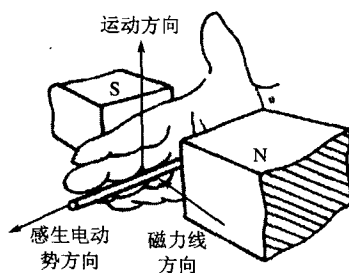


图 1-10 右手定则

通过分析可得:在导体切割磁感线这类电磁感应现象中,所产生的感应电动势为:

$$|e| = BLv \sin \alpha$$

式中, α 为速度方向与磁场方向之间的夹角,而 $v \sin \alpha$ 为导线切割磁感线的有效速度。

上述公式用文字叙述如下:闭合电路中的一段导体在磁场中切割磁力线时,导体内所产生的感应电动势与磁场的磁感应强度、导体的有效长度和导体切割磁力线的有效速度的乘积成正比。

在实际应用中,各量均采用国际单位: B ——特(T); L ——米(m); v ——米/秒(m/s)。

直导体是线圈相当于一匝的特殊情况;右手定则是楞次定律的特殊形式; $e = BLv \sin \alpha$ 是法拉第电磁感应定律的特殊形式。