

100
示范


国家示范性高职院校建设项目成果

高等职业教育教学改革系列规划教材·机电类

电机拖动与控制

王晓敏 主编
熊利军 梁嵩 副主编

 行动导向

 工学结合

 学生主体

 过程考核

随书有配套的教学资源，获取多媒体电子课件可登录

www.hxedu.com.cn 免费下载



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

高等职业教育教学改革系列规划教材

电机拖动与控制

王晓敏 主 编

熊利军 梁 嵩 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书为适应高职高专机电类专业教学改革实际需要而编写,教材中共包含电机原理和电力拖动两部分,主要内容有直流电机、变压器、交流电机、微特电机的基本结构及理论,电动机的电力拖动、电动机的变频控制、常用低压电器及基本控制电路、电动机的运行维修。全书共分8章,为了适应工学结合、项目驱动的教学改革原则,各章均有电机拖动与控制的实验实训项目。每章前后均附有学习目标、学习要求提示及小结习题。

本书深度适宜,实用性强,层次分明,条理清晰,结构合理,重点突出,概念阐述清楚、准确,内容深入浅出,通俗易懂。可作为高等职业学院、高等专科学校、成人高校及民办高校机电一体化、应用电子技术、自动控制、仪器仪表测量、计算机应用、机械制造、数控加工和模具技术等专业的教学用书,也可作为相关专业的培训教材或相关工程技术人员的技术参考及学习用书。

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

电机拖动与控制/王晓敏主编. —北京:电子工业出版社,2012.1

高等职业教育教学改革系列规划教材

ISBN 978-7-121-15048-7

I. ①电… II. ①王… III. ①电机—电力传动—高等职业教育—教材②电机—控制系统—高等职业教育—教材 IV. ①TM30

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第231750号

责任编辑:郭乃明

特约编辑:孙志明

印 刷:

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

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

开 本:787×1092 1/16 印张:18 字数:461千字

印 次:2012年1月第1次印刷

印 数:3000册 定价:29.80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,联系及邮购电话:(010)88254888。

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

服务热线:(010)88258888。

前 言

我国的高等职业教育目前进入了新的发展时期,各高职高专院校将培养适应生产、管理、服务第一线需要的应用型高级技术人员作为办学的根本目标,因此,编写适用于职业教育特点,突出科学性、实用性、综合性的高职教材已成为一项极具重要意义的工作。

科学技术发展到现在,随着现代化的进程,电机的应用越来越广泛,掌握电机技术已是电气工程技术人员一项必不可少的本领。根据 21 世纪高职院校人才培养方案及课程教学的要求,结合现代电机及拖动控制技术发展的最新趋势,作者总结多年的教学和科研经验,从实用角度出发,编写了这本独具特色的教材。本书力求内容新颖,叙述简练,灵活应用。全书参考学时 84 学时,调整部分章节内容也可适用于 42~64 学时。具体安排可参考下表:

章节	课 程 内 容	学 时 数		
		合计	讲授	实训
绪论	电机及电力拖动的作用	4	4	—
第 1 章	直流电机	10	6	4
第 2 章	变压器	10	6	4
第 3 章	异步电机	10	6	4
第 4 章	微特电机	10	6	4
第 5 章	异步电动机电力拖动	10	6	4
第 6 章	电动机的变频控制	10	6	4
第 7 章	电力拖动控制系统	10	6	4
第 8 章	电动机的运行维修	10	6	4
总 计		84	52	32

本书在编写过程中,力求做到以培养能力为主线。在保证基本概念、基本原理和基本分析方法的基础上,力求避免烦琐的数学推导。在教材的编排方面,力求遵循以下原则。

1. 注重教材内容的实用性。本书内容的编排是根据机电设备应用的需要和发展现状而确定的,适应培养企业实用性人才的需要。本书从实用性出发,确定了以了解实际电机与拖动控制为目的,尽量保证电机与拖动控制技术的内容精炼、易懂,为读者学好本课程奠定了基础。

2. 注重教材内容的理论联系实际。本书突出了应用基础理论解决实际问题的训练,通过对典型设备故障的诊断和维修实例进行分析,使课程学习与生产实际有机地结合起来。如本书的机电设备系统维修内容,不仅体现了机电系统故障诊断与维修的特点和机电结合的故障诊断与维修技术的综合性和先进性,而且还详细介绍了故障分析和排除的方法,对设备维修人员有较大的参考价值。

3. 注重教材内容的先进性。本书编入了电机与拖动控制技术领域中的一些新理论、新技术和新工艺,为在生产中应用这些先进技术提供了参考。

4. 注重教材内容的可用性,本书力求通俗易懂,详略得当,力图培养学生对电机与拖动控制技术能用、会用、会修的实际动手能力。

本书由王晓敏任主编,熊利军、梁嵩任副主编,第 1 章由武汉铁路职业技术学院熊利军老

师编写，第2章由三峡电力职业学院何朝阳老师编写，第3章由武汉工业职业技术学院梁嵩老师编写，第4章由三峡电力职业学院陈经文老师编写，第5章由三峡电力职业学院李斌贵老师编写，第6章由三峡电力职业学院万江丽老师编写，绪论和第7、8章由三峡电力职业学院王晓敏老师编写，全书由王晓敏老师统稿。

在本书编写过程中，得到许多同志的支持和帮助；编写中还参考了相关作者的关于电机、电器、拖动控制等文献材料，在此一并表示诚挚的谢意。

由于作者的水平有限，时间仓促，书中错误、不妥及疏漏之处在所难免，恳切希望专家学者和读者不吝指教为盼。

编者

2011年4月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

绪论	1
0.1 电机及电力拖动的作用	1
0.1.1 电机的主要用途及分类	1
0.1.2 电力拖动的作用及组成	1
0.2 电机的基本电磁定律	2
0.2.1 电路定律	3
0.2.2 磁路定律	3
0.2.3 电磁感应定律	4
0.2.4 电磁力定律	5
0.2.5 能量转换规律	5
0.3 电机铁磁材料的特性	6
0.3.1 磁导率及磁场强度	6
0.3.2 磁化曲线	6
0.3.3 磁滞回线	7
0.3.4 磁滞损耗与涡流损耗	8
0.4 本课程的任务和特点	8
第 1 章 直流电机	10
1.1 直流电机结构及工作原理	11
1.1.1 直流发电机的工作原理	11
1.1.2 直流电动机的工作原理	12
1.1.3 直流电机的基本结构	13
1.2 直流电机的铭牌和绕组	15
1.2.1 型号	15
1.2.2 额定值	16
1.2.3 直流电机的电枢绕组	17
1.2.4 单叠绕组	18
1.2.5 单波绕组	20
1.2.6 各种绕组的应用范围	22
1.3 直流电机的基本特性	22
1.3.1 直流电机的磁场和电枢反应	22
1.3.2 直流电机的电枢电动势和电磁转矩	25
1.3.3 直流电机的换向	27
1.3.4 直流发电机的基本特性	29
1.3.5 直流电动机的基本特性	32
1.4 直流电动机的电力拖动	34

1.4.1	生产机械的负载特性	34
1.4.2	直流电动机的工作特性	36
1.4.3	直流电动机的启动	40
1.4.4	直流电动机的制动	42
1.4.5	直流电动机的调速	43
1.5	直流电动机的故障分析及维护	44
1.5.1	直流电动机运行时的换向故障	45
1.5.2	直流电动机运行时的性能异常及维护	47
1.6	直流电动机的拖动实验	48
1.6.1	直流电动机的启动和调速	48
1.6.2	直流电动机的反转与制动	51
	本章小结	52
	思考与练习	54
第 2 章	变压器	56
2.1	变压器结构及工作原理	56
2.1.1	变压器的基本工作原理	56
2.1.2	变压器的分类	57
2.1.3	变压器的结构	58
2.1.4	变压器的额定值	62
2.2	单相变压器	63
2.2.1	变压器的空载运行	63
2.2.2	变压器的负载运行	64
2.2.3	变压器参数的测定	67
2.3	三相变压器	68
2.3.1	三相变压器的磁路系统	68
2.3.2	三相变压器绕组的连接	70
2.4	特殊变压器	72
2.4.1	自耦变压器	72
2.4.2	互感器	73
2.5	变压器的维护及故障分析	74
2.5.1	变压器的维护	75
2.5.2	变压器常见故障分析	75
2.6	变压器的测试与实验	78
2.6.1	实验说明	79
2.6.2	实验目的	79
2.6.3	实验内容及说明	79
2.6.4	实验线路及操作步骤	80
2.6.5	实验报告要求	81
2.6.6	实验注意事项	82

2.6.7 思考	82
本章小结	82
思考与练习	83
第3章 异步电机	85
3.1 三相交流绕组	85
3.1.1 三相交流绕组的基本知识	85
3.1.2 三相交流绕组的平面展开图	87
3.1.3 交流绕组的电动势	91
3.1.4 三相交流绕组的旋转磁场	92
3.2 三相异步电动机	94
3.2.1 三相异步电动机的工作原理	94
3.2.2 三相异步电动机的基本结构	95
3.2.3 三相异步电动机的铭牌数据	97
3.2.4 三相异步电动机的主要系列简介	99
3.3 三相异步电动机的运行	100
3.3.1 三相异步电动机的空载运行	100
3.3.2 三相异步电动机的负载运行	100
3.3.3 三相异步电动机的功率和转矩	102
3.4 三相异步电动机的工作特性	104
3.4.1 三相异步电动机的机械特性	104
3.4.2 三相异步电动机工作特性和参数	108
3.5 单相异步电动机	112
3.5.1 单相异步电动机的结构	112
3.5.2 单相异步电动机的转矩特性及工作原理	113
3.5.3 单相异步电动机的启动方法	115
3.5.4 单相异步电动机反转控制方法	117
3.5.5 单相异步电动机的调速	117
3.6 三相异步电动机的安装与运行	118
3.6.1 三相异步电动机的安装	118
3.6.2 三相异步电动机的运行	124
本章小结	126
思考与练习	128
第4章 微特电机	130
4.1 伺服电动机	131
4.1.1 直流伺服电动机	131
4.1.2 交流伺服电动机	135
4.2 测速发电机	138
4.2.1 直流测速发电机	138
4.2.2 交流异步测速发电机	139

4.3	步进电动机	141
4.3.1	反应式步进电动机的工作原理	141
4.3.2	步进电动机的三种工作方式	142
4.3.3	步距角及转子齿数	144
4.3.4	步进电动机应用举例	145
4.4	自整角机	145
4.4.1	控制式自整角机	145
4.4.2	力矩式自整角机	148
4.5	小功率同步电动机	150
4.5.1	概述	150
4.5.2	永磁式同步电动机	150
4.5.3	反应式同步电动机	151
4.5.4	磁滞式同步电动机	152
4.6	微特电动机应用实例	153
	本章小结	155
	思考与练习	156
第5章	异步电动机电力拖动	158
5.1	三相笼形异步电动机的启动	158
5.1.1	直接启动	159
5.1.2	笼形异步电动机的降压启动	160
5.2	三相绕线式异步电动机的启动	164
5.2.1	转子串接电阻器启动	164
5.2.2	转子串频敏变阻器启动	165
5.3	三相异步电动机的调速	165
5.3.1	变极调速	166
5.3.2	变频调速	167
5.3.3	改变定子电压调速	167
5.3.4	转子串电阻调速	168
5.3.5	串级调速	169
5.4	三相异步电动机的反转与制动	170
5.4.1	三相异步电动机的反转	170
5.4.2	三相异步电动机的制动	170
5.5	三相异步电动机的拖动实训	174
5.5.1	电动机 Y- Δ 启动控制线路	174
5.5.2	三相异步电动机 Y- Δ 启动控制电路图	175
5.5.3	安装与接线	176
5.5.4	检测与调试	177
5.5.5	完成课题报告	178
	本章小结	178
	思考与练习	178

第 6 章 电动机的变频控制	180
6.1 变频器概述.....	180
6.1.1 变频器应用范围.....	180
6.1.2 变频器的分类.....	181
6.1.3 变频器基本工作原理.....	182
6.2 变频器的组成与控制.....	184
6.2.1 变频器的组成.....	184
6.2.2 变频器的技术指标.....	188
6.3 变频器的使用.....	189
6.3.1 通用变频器的基本参数.....	189
6.3.2 通用变频器的选择.....	193
6.3.3 变频器的故障显示功能.....	196
6.3.4 变频器的矢量控制.....	197
6.3.5 三菱 FR-E500 系列变频器的使用.....	199
6.4 变频器控制电动机的基本环节.....	204
6.4.1 电动机的启动/停止控制.....	204
6.4.2 电动机的正反转控制.....	205
6.4.3 电动机的制动控制.....	208
6.5 变频器在生产中的应用.....	209
6.5.1 变频调速电梯控制概述.....	209
6.5.2 控制柜的主要控制功能.....	209
6.5.3 电梯控制调速功能.....	211
6.5.4 电梯运行动作顺序.....	211
6.5.5 安装调试.....	212
6.5.6 电梯常见故障及处理.....	214
6.6 变频器的实训操作.....	215
6.6.1 三菱 FR-E500 型变频器的实操练习.....	215
6.6.2 组合运行操作.....	216
6.6.3 多段速度运行操作.....	217
6.6.4 频率跳变的设置.....	218
本章小结.....	219
思考与练习.....	219
第 7 章 电力拖动控制系统	220
7.1 常用低压电器.....	220
7.1.1 低压电器的基本知识.....	221
7.1.2 开关电器.....	223
7.1.3 熔断器.....	225
7.1.4 主令电器.....	226
7.1.5 接触器.....	229

7.1.6	继电器	230
7.2	电气控制系统图	234
7.2.1	电气控制系统图中的图形符号和文字符号	234
7.2.2	电气控制系统图分类	234
7.2.3	电气原理图的阅读分析方法	235
7.3	三相异步电动机启动控制电路	236
7.3.1	笼形异步电动机全压启动控制电路	236
7.3.2	三相笼形异步电动机减压启动控制电路	241
7.3.3	三相绕线式异步电动机启动控制电路	246
7.4	三相异步电动机电气制动控制电路	249
7.4.1	反接制动控制电路	249
7.4.2	能耗制动控制电路	252
7.5	三相异步电动机的调速控制电路	253
7.5.1	改变磁极对数调速控制电路	253
7.5.2	转子电路串电阻调速	255
7.6	电力拖动控制系统实训	255
7.6.1	双重联锁的三相异步电动机正反转控制	255
7.6.2	双重联锁的三相异步电动机正反转控制电路图	255
7.6.3	安装与接线	256
7.6.4	检测与调试	256
7.6.5	完成课题报告	256
	本章小结	258
	思考与练习	258
第 8 章	电动机的运行维修	260
8.1	异步电动机的运行管理	261
8.1.1	启动前的准备	261
8.1.2	启动时的注意事项	261
8.1.3	运行中的监视	261
8.2	异步电动机维修及故障排除	262
8.2.1	电动机的定期维修	262
8.2.2	常见故障及排除方法	263
8.3	异步电动机启动和制动控制实训	264
8.3.1	实训目的	264
8.3.2	实训设备和器材	264
8.3.3	实训电路	265
8.3.4	实训内容和步骤	265
8.3.5	实训说明	267
8.3.6	实训报告	267
8.4	异步电动机的正反转控制实训	267

8.4.1	实训目的	267
8.4.2	实训设备和器材	268
8.4.3	实训电路	268
8.4.4	实训内容和步骤	269
8.4.5	实训说明	269
8.4.6	实训报告	270
8.5	生产机械的限位控制实训	270
8.5.1	实训目的	270
8.5.2	实训设备和器材	270
8.5.3	实训电路	271
8.5.4	实训步骤	271
8.5.5	实训说明	272
8.5.6	实训报告	272
	本章小结	272
	思考与练习	273
	参考文献	274

绪 论

0.1 电机及电力拖动的作用

任何机械都是能量转换装置，电机是根据电磁感应原理实现机电能量转换的电力机械设备。

工业中的各种生产机械，在完成生产的过程中，普遍采用各种类型的电动机来拖动生产机械。这种以电动机为动力拖动生产机械的拖动方式称为电力拖动，或电机拖动、电气传动等。

0.1.1 电机的主要用途及分类

电机的用途极为广泛。在发电厂，由原动机带动发电机旋转，发电机可以输出交流电功率；在输配电系统中，为了节省材料并减少输电线路损耗，必须采用升压变压器，使交流发电机出口端的电压等级升高，将电能进行远距离传输后，再采用降压变压器降低电压等级，供用户使用；在用户端，电动机将电能转换成机械能，为生产机械提供动力。在电气传动控制系统中，广泛采用各种控制电机实现指示、随动、反馈等控制。

根据电机的用途及结构特点，电机可分成以下几种类型。

- (1) 变压器（静止的电机）。
- (2) 交流电机。包括同步电机、异步电机。
- (3) 直流电机。包括直流发电机、直流电动机。
- (4) 控制电机。包括测速发电机、伺服电机、自整角机、步进电机等。

0.1.2 电力拖动的作用及组成

电力拖动的根本任务，在于通过电机将电能转换成生产机械所需的机械能，以求满足工业企业完成加工工艺和生产过程的要求。这主要是由于电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制都比较方便、经济。因此，电力拖动已成为现代工业企业中广泛采用的拖动方式，它具有许多其他拖动方式无法比拟的优点，例如：

1. 电力拖动比其他形式的拖动（蒸汽、水力等）效率高，而且电动机与被拖动的生产机械连接简便，由电动机拖动的生产机械可以采用集中传动、单独传动、多电动机传动等方式；
2. 异步电动机结构简单，规格齐全，价格低，效率高，便于维护；
3. 电动机的种类和型号多，不同类型的电动机具有不同的运行特性，可以满足不同类型生产机械的要求；

4. 电力拖动具有良好的调速性能，其启动、制动、反向和调速等控制简便，快速性好，易于实现完善的保护；

5. 电力拖动装置参数的检测、信号的变换与传送都比较方便，易于组成完善的反馈控制系统，易于实现最优控制；

6. 可以实行远距离测量和控制，便于集中管理，便于实现局部生产自动化乃至整个生产过程自动化。

随着自动控制理论的不断进步和半导体器件的大量采用，以及数控技术和电子计算机技术的发展，电力拖动装置的运行特性及品质大大提高了，它能更好地满足生产工艺过程的要求。采用电力拖动对提高劳动生产率和产品质量，提高生产机械运转时的准确性、可靠性和快速性，改善工人的劳动条件，节省人力，都具有十分重大的意义。因此，电力拖动，特别是自动化的电力拖动，成了现代工业生产电气化与自动化的基础与核心。

电力拖动装置一般由电动机、传动机构、生产机械、控制设备和电源等基本环节组成，如图 0-1 所示。其中，

- (1) 电动机。包括异步电动机、直流电动机、同步电动机等。
- (2) 传动机构。包括齿轮传动、皮带传动、联轴器传动、卷筒—钢绳传动等。
- (3) 生产机械。包括泵与风机的叶轮、机床主轴、轧钢机轧辊、卷扬机、电力机车等。
- (4) 控制设备。包括电气控制设备、控制电机等。

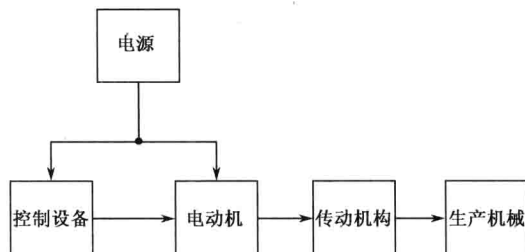


图 0-1 电力拖动装置方框图

电动机是一个机电能量转换元件，它将从电源输入的电能转换为生产机械所需要的机械能。

传动机构则是用以传递动力，实现速度和运动方式的变换。不同的传动方式，其使用场合不同，传动效率不同，工作原理不同。

电力拖动装置中的生产机械作为电动机的负载，靠传动机构将电动机轴上输出的机械功率传递给工作机构，它是实现电力拖动能量传递的主体对象。

控制设备的主要作用是，应用电力电子技术和计算机控制技术，从对电动机的控制入手，实现对生产机械运行特性的控制。控制系统的设计直接关系到电力拖动装置运行的可靠性和生产过程的自动化水平。

0.2 电机的基本电磁定律

自然界中存在着许许多多的客观规律，在电机理论中常用的基本电磁定律就是描述客观电磁规律的。

电机是通过电磁感应实现能量转换的机械设备。发电机将机械能转换成电能，电动机将电能转换成为机械能，变压器则是将一种电压的电能转换成另一种电压的电能。但无论是发电机还是电动机或变压器，其工作原理都是建立在电磁感应定律、电路磁路定律和电磁力定律等基础之上的。为了掌握电机的运行原理和特性，复习一下这些基本电磁定律是很有必要的。下面简要地介绍这些定律的内容。

0.2.1 电路定律

1. 基尔霍夫第一定律

在电路的节点上，电流瞬时值的代数和等于零，即

$$\sum i = 0 \quad (0-1)$$

列电流方程时，先确定电流的正方向，对于正弦交流电路，电流用复数 \dot{i} 表示。

2. 基尔霍夫第二定律

在闭合电路中，沿着回路的巡行方向，电压降的代数和等于电动势的代数和，即

$$\sum u = \sum e \quad (0-2)$$

如果将电压看成负的电动势，则回路中的电动势的总和等于零。列回路方程时，先规定电流、电压降、电动势的正方向，再选定回路的巡行方向。凡电动势和电压降与巡行方向一致时取正号；反之取负号。对于正弦交流电路，其电流、电压降、电动势分别用复数 \dot{i} 、 \dot{U} 、 \dot{E} 表示。

0.2.2 磁路定律

1. 磁路欧姆定律

磁路中的磁通 Φ 等于作用在磁路上的磁动势 F 与磁导 λ_m 的乘积，磁导 λ_m 与磁阻 R_m 互为倒数，所以，磁路中的磁通 Φ 等于作用在磁路上的磁动势 F 除以磁路的总磁阻 R_m ，这就是磁路的欧姆定律。即

$$\Phi = F \lambda_m = \frac{F}{R_m} \quad (0-3)$$

电机的主磁路为分段磁路，由于各部分的材料、磁路长度不同，因而磁导不同，用 λ_{mk} 表示第 k 段磁路的磁导，单位为 H，磁导与磁导率成正比，与磁路长度成反比，公式 (0-3) 还可以写成

$$\Phi = F \sum_1^n \lambda_{mk} \quad (0-4)$$

由于磁阻 $R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{L}{A}$ ，所以磁路的磁阻取决于磁路的几何尺寸和所用材料的磁导率 μ 。磁路的平均长度 L 越长，截面积 A 越小，磁阻就越大。材料的磁导率越大，磁阻就越小。所以电机的磁路大都采用铁磁材料。

2. 磁路基尔霍夫定律

在磁路节点上，磁通的代数和等于零，即

$$\sum \Phi = 0 \quad (0-5)$$

公式 (0-5) 表明，进入闭合面的磁通等于离开闭合面的磁通。如果磁通均按正弦规律变化，可用复数 $\dot{\Phi}$ 表示。

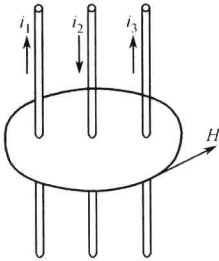


图 0-2 安培环路定律

3. 安培环路定律

闭合磁路中，磁场强度矢量的线积分等于该闭合回路所包围的各电流的代数和，即

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad (0-6)$$

公式 (0-6) 中，电流的方向与磁场强度的方向符合右手螺旋规律，如图 0-2 所示， i_1 、 i_3 取正值， i_2 取负值。安培环路定律表明，载导体周围必然存在着磁场。

0.2.3 电磁感应定律

假设有一线圈位于磁场中，则有磁力线穿过该线圈和它相链。当线圈的磁链发生变化时，会在线圈中感生电动势，单位为 V。线圈磁链的变化又分为两种情况。

① 线圈和磁场相对静止，而线圈中的磁通本身随时间交变，此时，在线圈中感生变压器电动势 e ， e 的大小正比于磁链的变化率，即

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - N \frac{d\phi}{dt} \quad (0-7)$$

式中， N 为线圈的匝数； ψ 为线圈的磁链， $\psi = N\phi$ ；负号表明感应电动势的方向总是企图产生一个阻止磁链变化的电流。当磁链增加时， $d\phi/dt > 0$ ， $e < 0$ ，与指定正方向相反，产生去磁电流；当磁链减少时， $d\phi/dt < 0$ ， $e > 0$ ，与指定正方向相同，产生助磁电流，如图 0-3 所示。

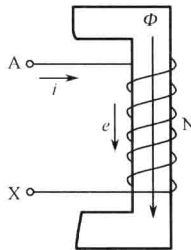


图 0-3 感应电动势的方向

② 恒定的磁场在空间按一定规律分布，导体以匀速运动切割磁力线时，在导体中感生速率电动势 e ， e 的大小正比于磁通密度和导体的切割速度，即

$$e = Blv \quad (0-8)$$

式中， B 为导体所在处的磁通密度； l 为导体的有效长度； v 为导体相对磁场运动的线速度。

速率电动势的方向符合右手发电机定则，如图 0-4 所示。伸开右手掌，拇指与其余四指相互垂直，掌心迎着磁力线，拇指为导体运动方向，四指所指的方向为速率电动势的方向。