



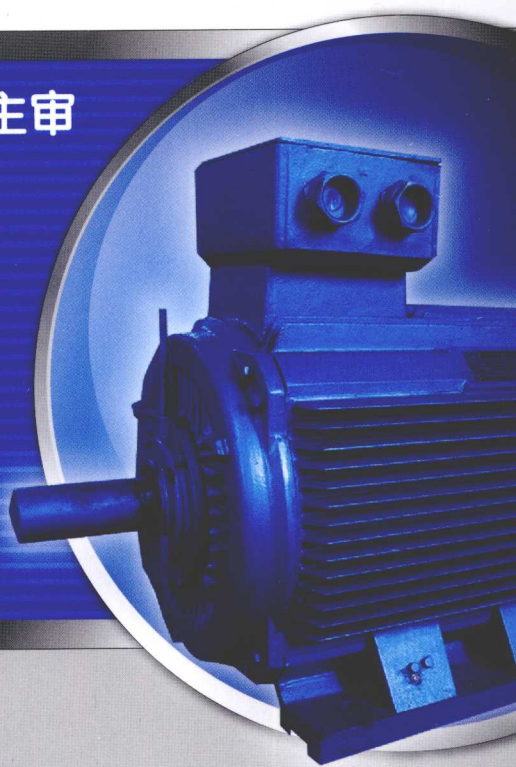
高职高专“十一五”规划教材

电机与电气控制 案例教程



DIANJI YU DIANQI
KONGZHI ANLI JIAOCHENG

何永艳 王锁庭 主编 周政新 主审



化学工业出版社

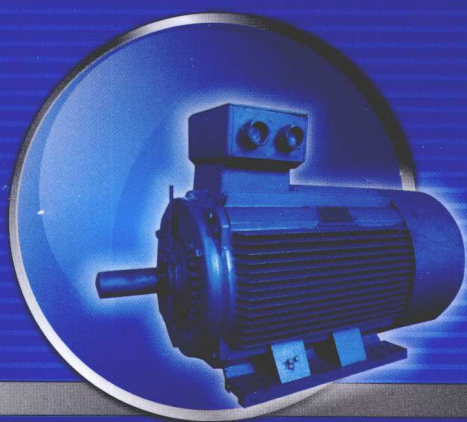


高职高专“十一五”规划教材

电机与电气控制 案例教程

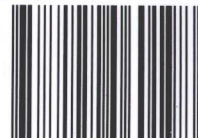


DIANJI YU DIANQI
KONGZHI ANLI JIAOCHENG



化学工业出版社 教学资源网
www.cipedu.com.cn
专业教学服务支持平台

ISBN 978-7-122-06019-8



9 787122 060198 >

定价：25.00元

高职高专“十一五”规划教材

电机与电气控制案例教程

何永艳 王锁庭 主编
周政新 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书内容包括：变压器；三相交流电动机与拖动控制；直流电动机与拖动控制；控制电机及其他电动机；典型生产设备的电气控制电路及常见故障分析等。其中以三相交流电动机与拖动控制为重点，以电气控制基本环节为主线，每个案例都是一个单独的个体，将内容分为电力拖动技术、常用工厂电气设备的电气控制技术、相对应的电机以及电气控制系统等几个内容，各部分内容均从应用角度进行阐述，注重理论联系实际，通过典型应用实例进行电路原理分析，强化对学生职业技能的培养与训练，以期培养学生分析、解决生产实际问题的能力和构建简单的电气控制系统的能力。既融会贯通，又单独成体。

本教材可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院的相关专业的教学用书，并可作为相关社会从业人员的业务参考书及培训用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与电气控制案例教程/何永艳，王锁庭主编. —北京：化学工业出版社，2009.8
高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-06019-8

I. 电… II. ①何…②王… III. ①电机学-高等学校：技术学院-教材②电气控制-高等学校：技术学院-教材
IV. TM3 TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 105229 号

责任编辑：廉 静
责任校对：吴 静

装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 装：北京市彩桥印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 14¼ 字数 366 千字 2009 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

我国的高等职业教育的根本任务是培养适合我国现代化建设和经济发展的高等技术应用型人才,所以,高等职业教育在对工业电气化技术、工业企业电气化、工业电气自动化、工业仪表自动化、生产过程自动化、应用电子技术、机电一体化等高等技术应用型相关专业人才的培养过程中,应使学生掌握电机与电气控制技术的基本知识和基本技能,为在今后的生产实践中灵活地应用电机与电气控制解决实际问题打下良好的理论和实践基础,《电机与电气控制技术案例教程》就成为教学中的必修课之一。本教材可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院的相关专业的教学用书,并可作为相关社会从业人员的业务参考书及培训用书。

本书内容包括:变压器;三相交流电动机与拖动控制;直流电动机与拖动控制;控制电机与特种电机;典型生产设备的电气控制电路及常见故障分析等。其中以三相交流电动机与拖动控制为重点,以电气控制基本环节为主线,每个案例都是一个单独的个体,将内容分为电力拖动技术、常用工厂电气设备的电气控制技术、相对应的电机以及电气控制系统等几个内容,各部分内容均从应用角度进行阐述,注重理论联系实际,通过典型应用实例进行电路原理分析,强化对学生职业技能的培养与训练,以期培养学生分析、解决生产实际问题的能力和构建简单的电气控制系统的能力。既融会贯通,又单独成体。

本书力求体现以下特色。

- ① 集理论、实训、技能训练与应用能力培养为一体,体系新颖。
- ② 保证基础,加强应用,突出能力,突出实际、实用、实践的原则,贯彻重概念、重结论的指导思想,注重内容的典型性、针对性,加强理论联系实际。
- ③ 在教材内容的编排上,先从典型的案例出发,引出教学内容;在讲述教学内容时,先介绍控制电路的实现形式,再展开介绍和分析相关的知识点;强调实际技能的训练和培养,增设了问题探讨部分,便于教学和学生讨论。
- ④ 讲述深入浅出,将知识点与能力点紧密结合,注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力。

本教材按80~120课时编写,有条件的学校可另安排两周的课程技能训练,各学校根据不同的教学课时可以选择重点的章节进行讲解。

本书由何永艳、王锁庭担任主编并统稿。参加编写的有:何永艳(绪论及第2章)、张晓莉(第4章)、许素玲(第1、3章)、王锁庭(第5章)。周政新教授在百忙中仔细、认真地审阅了全书,提出了许多宝贵意见。在此一并真诚致谢。

限于编者的学术水平和实践经验,书中的疏漏及不足之处,恳切希望有关专家和广大读者批评指正。

编 者
2009年4月

目 录

绪论	1
0.1 电机的广泛应用	1
0.2 电机及其分类	1
0.3 电气控制技术	2
0.4 电机的基本作用原理	3
0.4.1 磁与电磁的基本关系	3
0.4.2 电磁感应	6
0.5 常用电工指示仪表	7
0.6 常用电工工具	9
0.7 常用电线电缆	12
0.8 电气安全技术知识	12
第1章 变压器	16
1.1 案例1：成品变压器需要做的参数测定试验	16
1.1.1 【知识进阶1】变压器的基本结构与功能	16
1.1.2 【知识进阶2】变压器的基本工作原理	20
1.1.3 【知识进阶3】变压器的铭牌数据	22
1.1.4 【知识进阶4】单相变压器的运行原理	23
1.1.5 【知识进阶5】变压器的运行特性	28
1.1.6 【知识进阶6】变压器的试验	30
【问题探讨】	31
1.2 案例2：变压器同名端的识别	32
1.2.1 【知识进阶1】单相变压器绕组同名端的识别	32
1.2.2 【知识进阶2】三相变压器绕组同名端的识别	33
【问题探讨】	35
1.3 案例3：专门供测量用的变压器	35
1.3.1 【知识进阶1】电压互感器	36
1.3.2 【知识进阶2】电流互感器	36
【问题探讨】	37
1.4 其他用途的变压器	37
1.4.1 【知识进阶1】自耦变压器	37
1.4.2 【知识进阶2】电焊变压器	39
【问题探讨】	40
小结	40
第2章 三相交流异步电动机与拖动控制	41
2.1 案例1：三相交流笼式异步电动机的点动控制	41
2.1.1 【解决方案】控制电路的实现	41
2.1.2 【知识进阶1】三相交流异步电动机的结构与基本原理	42
2.1.3 【知识进阶2】电气控制系统图	50
2.1.4 【知识进阶3】涉及的低压电器	54
2.1.5 【知识进阶4】电路故障诊断与维修	65
2.1.6 【知识进阶5】电机故障判断及维修	67

【问题探讨】	68
2.2 案例 2: 三相笼式异步电动机的单向直接启动控制	68
2.2.1 【解决方案】控制电路的实现	68
2.2.2 【知识进阶 1】三相笼式异步电动机的拖动方式 (直接启动)	69
2.2.3 【知识进阶 2】涉及的低压电器	71
2.2.4 【知识进阶 3】电路故障诊断与维修	74
2.2.5 【知识进阶 4】保护环节	74
2.2.6 【应用拓展】常用的点动与连续控制电路	75
【问题探讨】	75
2.3 案例 3: 两地对同一台电动机的启停控制	76
2.3.1 【解决方案】控制电路的实现	76
2.3.2 【知识进阶】电路故障诊断与维修	76
【问题探讨】	77
2.4 案例 4: 多台电动机顺序控制	77
2.4.1 【解决方案】控制电路的实现	77
2.4.2 【知识进阶】电路故障诊断与维修	78
2.4.3 【应用拓展】主电路实现的顺序控制电路	79
【问题探讨】	79
2.5 案例 5: 三相笼型异步电动机的可逆直接启动控制	79
2.5.1 【解决方案】控制电路的实现	79
2.5.2 【知识进阶】电路故障诊断与维修	80
2.5.3 【应用拓展】双重互锁的可逆直接启动控制电路	81
【问题探讨】	81
2.6 案例 6: 电动机行程控制电路	81
2.6.1 【解决方案】控制电路的实现	82
2.6.2 【知识进阶 1】涉及的低压电器	82
2.6.3 【知识进阶 2】电路故障诊断与维修	84
2.6.4 【应用拓展】自动往返控制电路	84
【问题探讨】	85
2.7 案例 7: 间歇运行控制	85
2.7.1 【解决方案】控制电路的实现	85
2.7.2 【知识进阶 1】涉及的低压电器	85
2.7.3 【知识进阶 2】电路故障诊断与维修	89
【问题探讨】	89
2.8 案例 8: 三相笼式异步电动机的降压启动控制	89
2.8.1 【解决方案】星-三角降压启动控制电路的实现	89
2.8.2 【知识进阶 1】三相笼型异步电动机的拖动方式 (降压启动)	90
2.8.3 【知识进阶 2】涉及的低压电器	91
2.8.4 【知识进阶 3】电路故障诊断与维修	92
2.8.5 【应用拓展】三相笼型异步电动机其他的降压启动控制电路	92
【问题探讨】	95
2.9 案例 9: 三相绕线式异步电动机的启动控制	95
2.9.1 【解决方案】控制电路的实现	96
2.9.2 【知识进阶 1】三相绕线式异步电动机的结构和工作原理	97
2.9.3 【知识进阶 2】涉及的低压电器	97
2.9.4 【知识进阶 3】三相绕线型异步电动机的拖动方式	99

2.9.5 【知识进阶4】电路故障诊断与维修	100
2.9.6 【应用拓展】三相绕线式异步电动机其他启动控制电路	101
【问题探讨】	102
2.10 案例10：三相异步电动机的制动控制	102
2.10.1 【解决方案】控制电路的实现	102
2.10.2 【知识进阶1】涉及的低压电器	102
2.10.3 【知识进阶2】三相异步电动机的拖动方式（制动）	104
2.10.4 【知识进阶3】电路故障诊断与维修	106
2.10.5 【应用拓展】三相异步电动机其他的制动控制电路	106
【问题探讨】	109
2.11 案例11：三相异步电动机的调速控制	110
2.11.1 【解决方案】控制电路的实现	110
2.11.2 【知识进阶1】双速异步电动机的工作原理	110
2.11.3 【知识进阶2】三相异步电动机的拖动方式（调速）	110
2.11.4 【知识进阶3】电路故障诊断与维修	113
【问题探讨】	113
小结	113
第3章 直流电动机与拖动控制	116
3.1 案例1：直流电动机启动控制	116
3.1.1 【解决方案】控制电路的实现	116
3.1.2 【知识进阶1】直流电机的结构与基本原理	117
3.1.3 【知识进阶2】涉及的低压电器	124
3.1.4 【知识进阶3】直流电动机的拖动方式（启动）	125
3.1.5 【知识进阶4】电路故障诊断与维修	126
3.1.6 【应用拓展】其他几种启动控制电路	127
【问题探讨】	128
3.2 案例2：直流电动机单向运转能耗制动控制	129
3.2.1 【解决方案】控制电路的实现	129
3.2.2 【知识进阶1】直流电动机的拖动方式（制动）	130
3.2.3 【知识进阶2】电路故障诊断与维修	133
3.2.4 【应用拓展】直流电动机可逆运转反接制动控制	134
【问题探讨】	135
3.3 案例3：直流电动机调速控制	135
3.3.1 【解决方案】控制电路的实现	135
3.3.2 【知识进阶1】直流电动机的拖动方式（调速）	136
3.3.3 【知识进阶2】电路故障诊断与维修	138
【问题探讨】	138
小结	139
第4章 控制电机及其他电动机	140
4.1 单相异步电动机	141
4.1.1 【案例说明】电风扇的调速电路	141
4.1.2 【知识进阶1】单相异步电动机的结构	141
4.1.3 【知识进阶2】单相异步电动机工作原理	141
4.1.4 【知识进阶3】单相异步电动机的启动方法	142
4.1.5 【技能拓展】电冰箱中的单相异步电动机	144
【问题探讨】	145

4.2 三相同步电动机	145
4.2.1 【案例说明】电梯驱动	145
4.2.2 【知识进阶1】同步电动机的结构	145
4.2.3 【知识进阶2】三相同步电动机的工作原理	146
4.2.4 【知识进阶3】三相同步电动机的启动	146
4.2.5 【知识进阶4】三相永磁同步电动机	147
4.2.6 【技能拓展】信息技术中的永磁同步电动机	148
【问题探讨】	148
4.3 直线电动机	148
4.3.1 【案例说明】电动大门	149
4.3.2 【知识进阶1】直线电动机的工作原理	149
4.3.3 【知识进阶2】直线电动机的种类及结构	149
4.3.4 【技能拓展】直线电机驱动的电梯	152
【问题探讨】	152
4.4 伺服电动机	152
4.4.1 【案例说明】数控机床伺服系统	153
4.4.2 【知识进阶1】直流伺服电动机	153
4.4.3 【知识进阶2】交流伺服电动机	154
4.4.4 【技能拓展】电子电位差计	157
【问题探讨】	157
4.5 步进电动机	157
4.5.1 【案例说明】开环数控机床伺服系统	158
4.5.2 【知识进阶1】步进电动机的结构	158
4.5.3 【知识进阶2】步进电动机的工作原理	158
4.5.4 【知识进阶3】步进电动机的驱动电源	160
4.5.5 【技能拓展】	160
【问题探讨】	160
4.6 测速发电机	161
4.6.1 【案例说明】数控伺服系统中的速度校正元件	161
4.6.2 【知识进阶1】直流测速发电机	161
4.6.3 【知识进阶2】交流测速发电机	162
4.6.4 【技能拓展】测速发电机用于恒速控制系统	163
4.7 自整角机和旋转变压器	164
4.7.1 【案例说明】液面位置指示器	164
4.7.2 【知识进阶1】自整角机	164
4.7.3 【知识进阶2】旋转变压器	166
4.7.4 【技能拓展】数控机床伺服系统中的角度检测元件	167
【问题探讨】	167
第5章 典型生产设备的电气控制电路及常见故障分析	168
5.1 案例1:卧式车床的电气控制	168
5.1.1 【知识进阶1】卧式车床的运动形式与控制要求	168
5.1.2 【知识进阶2】卧式车床的电气控制原理	169
5.1.3 【知识进阶3】卧式车床的电气故障诊断与维修	171
5.1.4 【技能训练】技能操作训练	171
【问题探讨】	172
5.2 案例2:平面磨床的电气控制	173

5.2.1 【知识进阶 1】平面磨床的运动形式与控制要求	173
5.2.2 【知识进阶 2】平面磨床的电气控制原理	174
5.2.3 【知识进阶 3】平面磨床的电气故障诊断与维修	175
5.2.4 【技能训练】技能操作训练	176
【问题探讨】	176
5.3 案例 3: 摇臂钻床的电气控制	177
5.3.1 【知识进阶 1】摇臂钻床的运动形式与控制要求	177
5.3.2 【知识进阶 2】摇臂钻床的电气控制原理	178
5.3.3 【知识进阶 3】摇臂钻床的电气故障诊断与维修	179
5.3.4 【技能训练】技能操作训练	180
【问题探讨】	181
5.4 案例 4: 万能铣床的电气控制	181
5.4.1 【知识进阶 1】万能铣床的运动形式与控制要求	181
5.4.2 【知识进阶 2】万能铣床的电气控制原理	182
5.4.3 【知识进阶 3】万能铣床的电气故障诊断与维修	185
5.4.4 【技能训练】技能操作训练	186
【问题探讨】	187
5.5 案例 5: 卧式镗床的电气控制	187
5.5.1 【知识进阶 1】卧式镗床的运动形式与控制要求	188
5.5.2 【知识进阶 2】卧式镗床的电气控制原理	189
5.5.3 【知识进阶 3】卧式镗床的电气故障诊断与维修	191
5.5.4 【技能训练】技能操作训练	192
【问题探讨】	193
* 5.6 案例 6: 龙门刨床的电气控制	193
5.6.1 【知识进阶 1】龙门刨床的运动形式与控制要求	193
5.6.2 【知识进阶 2】龙门刨床的电气控制原理	194
5.6.3 【知识进阶 3】龙门刨床的电气故障诊断与维修	201
5.6.4 【技能训练】技能操作训练	204
【问题探讨】	204
5.7 案例 7: 桥式起重机的电气控制	205
5.7.1 【知识进阶 1】桥式起重机的运动形式与控制要求	206
5.7.2 【知识进阶 2】凸轮控制器及其控制电路的电气控制原理	207
5.7.3 【知识进阶 3】主令控制器控制电路的电气控制原理	210
5.7.4 【知识进阶 4】起重机电气保护设备的电气保护原理	212
5.7.5 【知识进阶 5】交流桥式起重机控制电路的电气控制原理	214
5.7.6 【知识进阶 6】桥式起重机的电气故障诊断与维修	215
5.7.7 【技能训练】技能操作训练	216
【问题探讨】	216
附表 常用低压电器的分类和用途	217
参考文献	218

绪 论

0.1 电机的广泛应用

电能是现代社会中最常用且极为普遍的一种二次能源，它的生产、变换、传送、分配、使用和控制都比较方便，且效率较高，因而广泛应用于工农业生产、交通运输、科技研发、信息传输及日常生活中，极大地推动了科学技术的进步和生产力的发展。而要实现电能的生产、变换和使用等都离不开电机。

电机是与电能的生产、传输和使用有着密切关系的电磁机构。将自然界的一次能源如水能、热能、风能和原子能等转换为电能需要发电机，它是电厂的主要电气设备。为了经济的使用和分配电能，需要变压器，它是电站和变电所的主要电气设备之一。在机械、冶金、纺织、石油、煤炭、化工及其他工业企业中，人们利用电动机把电能转换成机械能，去拖动机床、起重机、轧钢机、电铲、搅拌机等各种生产机械，从而满足生产工艺过程的要求。在交通运输业中，需要大量的牵引电动机和船用、航空电机。随着农业机械化的发展，电力排灌、播种、收割等农用机械中，都需要规格不同的电动机。在航天、航空和国防科学等领域的自动控制技术中，各种各样的控制电机作为检测、随动、执行和计算等元件。在品种繁多的家用电器中，也离不开功能各异的小功率电动机。在医疗、文教和日常生活中，电机的应用也是十分广泛。

0.2 电机及其分类

始于 19 世纪 60~70 年代的第二次工业技术革命，是以电力的广泛应用为显著特点的。从此人类社会由蒸汽机时代步入了电气化时代。在法拉第电磁感应定律基础上，一系列电气发明相继出现。1866 年，德国工程师西门子制成发电机；1870 年比利时人格拉姆发明了电动机，电力开始成为取代蒸汽来拖动机器的新能源。随后，各种用电设备相继出现。1882 年法国学者德普勒发明了远距离送电的方法。同年，美国著名发明家爱迪生创建了美国第一个火力发电站，把输电线结成网络。从此电力作为一种新能源而广泛应用。那时，电机刚刚在工业上初步应用，各种电机初步定型，电机设计理论和电机设计计算初步建立。

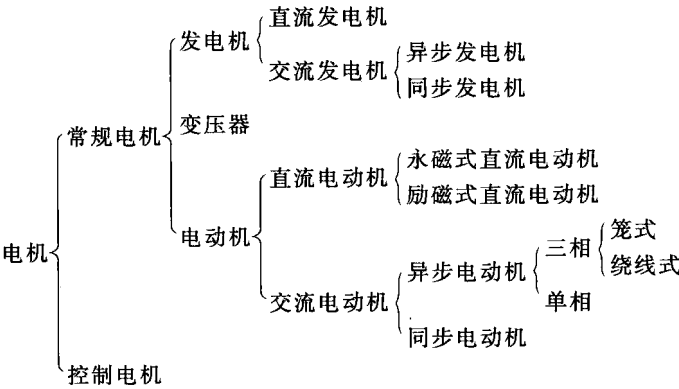
随着社会生产的发展和科技的进步，对电机也提出了更高的要求，如：性能良好、运行可靠、单位容量的重量轻、体积小等，而且随着自动控制系统的发展要求，在旋转电机的理论基础上，又派生出多种精度高、响应快的控制电机，成为电机学科的一个独立分支。电机制造也向着大型、巨型发展。中小型电机正向多用途、多品种方向发展，向高效节能方向发展。各种响应快速、启停快速的特种电机在各种复杂的计算机控制系统和无人工厂中实现了比人的手脚更复杂而精巧的运动。古老的电机学已经和电力电子学、计算机、控制论结合起来，发展成了一门新的学科。

在我国，电机制造业也发生了巨大的变化。我国的电机生产从 1917 年至今已有 90 多年的历史，经过改革开放 30 年的发展，特别是近 10 年的发展，有了长足的进步，令世人瞩目。目前已经形成比较完整的产业体系，电机产品的品种、规格、性能和产量满足了我国国

民经济发展的需要。而且一些产品已经达到或接近世界先进水平。近来世界上电机行业专家纷纷预测，中国将会成为世界电动机的生产制造基地。近年来我国已生产了不少大型直流电动机、异步电动机和同步电动机；在中小型电机和控制电机方面，也自行设计和生产了不少新系列电机；对电机的新理论、新结构、新工艺、新材料、新运行方式和调试方法，进行了许多研究和试验工作，取得不少成果。

总之，电机是一种利用电磁感应定律和电磁力定律，将能量或信号进行转换或变换的电磁机械装置。电机的品种繁多，按其功能用途来分，可以分为常规电机和控制电机两大类。按电能的转化形式不同，电机可分为以下几种：

- ① 发电机 将机械能转化为电能或少量的热能；
- ② 电动机 将电能转化为机械能；
- ③ 变压器 对电能进行变换；
- ④ 控制电机 是一种特殊的电机，作为自动系统中的元件，完成信息的某种处理。



0.3 电气控制技术

各种行业都大量使用各种电动机作为原动力，用以拖动各种机械设备，称为电力拖动（或称为电气传动）。它具有许多其他拖动（如蒸汽机、内燃机、水轮机等）无法比拟的优点。

与电机发展过程一样，电力拖动技术也有个不断发展的过程。电力拖动系统一般由控制设备、电动机、传动机构、生产机械和电源五部分组成。它们之间的关系如图 0-1 所示。

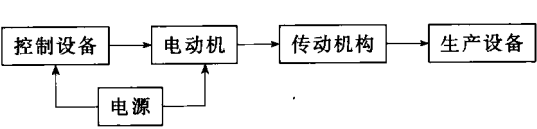


图 0-1 电力拖动系统组成部分

电力拖动代替蒸汽或水力拖动之初，电力拖动的方式是成组拖动，就是由一台电动机拖动一组生产机械，从电动机到各个生产机械的能量传递以及各个生产机械之间的能量分配完全用机械的方法，靠“天轴”以及机械传动系

统来实现，车间里有大量的“天轴”、长皮带和皮带轮等。这种传动方式效率低下、生产率低下、灰尘大、劳动条件和卫生条件差，且容易出事故。另外，电动机发生故障，则成组拖动的所有生产机械都将停车，生产将可能停滞。显然这是一种落后的电力拖动方式。

随着生产的发展，人们对不同产品的生产工艺和精度要求不同，常需要生产机械具有不同的速度，这就要求对拖动生产机械进行控制，控制的方法很多，有电气的控制、液压控制、气动控制、机械控制配合使用，但以电气控制技术尤为普遍。

随着科学技术的突飞猛进，对生产工艺的要求也越来越高，对电气控制技术提出了更高

的要求。控制方法从手动到自动控制，功能从简单到复杂，控制技术从单机到群控，操作由笨重到轻便，推动了生产技术的不断更新和高速发展。

随着自动控制理论不断发展，半导体器件的采用，以及数控技术和计算机及网络等技术的发展与采用，电力拖动正向着自动控制系统-无触点空系统、计算机控制系统迈进。电力拖动装置的特性品质大大提高，极大地提高了劳动生产率和产品质量，提高了生产机械运转的准确性、可靠性，提高了电力拖动系统的自动化控制，所以电力拖动成为现代工农业电气自动化的基础。目前仍在使用的控制设备有继电-接触器型有触头式控制系统、晶闸管控制系统、PLC 控制系统以及单片机控制系统等。本书主要介绍继电-接触器型有触头式控制系统。

电气控制技术的发展是伴随着社会生产规模的扩大、生产水平的提高而不断发展的，同时它反过来促进社会生产力的进一步提高，从而为电力达到最佳运行状态，实现最理想的控制提供了条件。

0.4 电机的基本作用原理

0.4.1 磁与电磁的基本关系

凡具有吸引铁、镍、钴等物质的性质称为磁性。具有磁性的物体叫磁体。磁体两端磁性最强的区域叫磁极。每个磁体都有两个磁极，即南极 (S)、北极 (N)。两个磁体之间具有同极性相排斥，异性相吸引的特性。磁极间的这种相互作用力也叫磁力。磁体周围存在的磁力作用的空间称为磁场。一般都用磁力线来直观、形象的表示磁场的强弱和磁力的方向。在磁体外部，磁力线由 N 极指向 S 极；在磁体内部，磁力线由 S 极指向 N 极。

(1) 电流的磁场

通电导体的周围有磁场存在。导体中通过电流时产生的磁场方向可用安培定则（又称右手螺旋定则）来判断。当通电导体为直导体时，用图 0-2(a) 所示方法进行；右手握直导体，拇指的方向为电流方向，弯曲四指的指向即为磁场方向。当通电导体为螺旋管（线圈）时，用图 0-2(b) 所示方法进行：右手握螺旋管，弯曲四指表示电流方向，拇指所指的方向即为磁场方向。

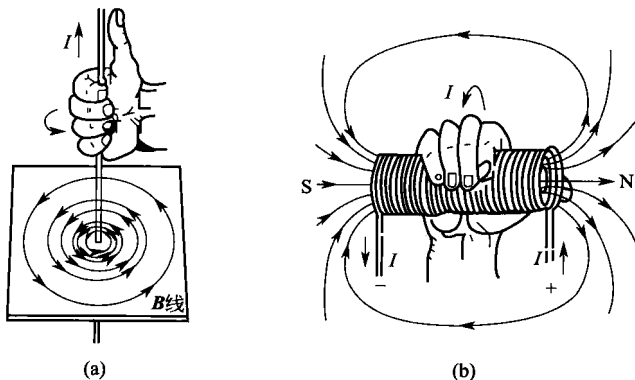


图 0-2 磁场方向判定

(2) 磁通与磁感应强度

① 磁通 通过与磁场方向垂直的某一面积上的磁力线数的总数称为通过该面积的磁通量（磁通），用字母 Φ 表示，单位 Wb（韦伯）。面积一定时，通过的磁通越多，磁场就

越强。

② 磁感应强度 垂直通过单位面积的磁力线的数目,叫该点的磁感应强度。用字母 B 表示,单位是 T (特),在均匀磁场中,磁感应强度 $B = \Phi/S$ 。

B 是矢量,既有大小,又有方向,用磁力线上每点的切线方向规定 B 的方向,用磁力线的疏密程度表示 B 的大小。

(3) 磁场对电流的作用

磁场是一种特殊形式的物质,磁场中能够储存能量,在磁场建立过程中,能量由外部能源转换而来。磁场能量主要存储在气隙中。

① 磁场对通电直导体的作用 处在磁场中的直导体流过电流时,导体会发生运动,表明通电导体受到一个电磁力的作用。这个电磁力 F 的大小与通过导体电流 I 的大小成正比,与导体在磁场总的有效长度 $L \sin \alpha$ 以及导体所处位置的磁感应强度 B 成正比。当导体垂直于感应强度的方向放置时,导体所受到的电磁力最大;与其平行放置时不受力。导体所受的电磁力为: $F = BIL \sin \alpha (N)$ 。

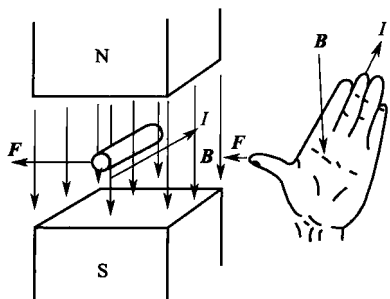


图 0-3 左手定则

通电导体在磁场中受到的电磁力的方向,可用左手定则来判定,如图 0-3 所示。伸开左手,让拇指与其余四指垂直并同在一个平面内,让磁力线穿过手心,四指指向电流方向,拇指所指的方向就是通电导体所受到的电磁力的方向。

② 磁场对通电线圈的作用 在均匀磁场中放置一个可以转动的通电矩形线圈 $abcd$,如图 0-4 所示,当线圈平面与磁力线平行时, ad 和 bc 边不受磁场的作用力,但 ab 和 cd 边会受到磁场力 (F_1 、 F_2) 的作用。令 $ab = cd = L_1$, $ad = bc = L_2$,则 $F_1 = F_2 = BIL_1$ 。用左手定则可判断出 F_1 与 F_2 方向相反。此时线圈受到的转动力矩为: $M = F_1 L_2 = BIL_1 L_2 = BIS$

式中 B ——均匀磁场的磁感应强度;

I ——线圈中的电流;

S ——线圈的有效面积。

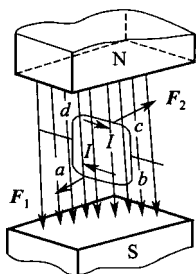
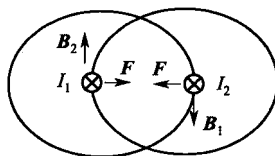
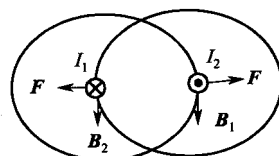


图 0-4 磁场对通电线圈的作用



(a) 电流方向相同



(b) 电流方向不相同

图 0-5 通电平行导线间的相互作用力

③ 通电平行导体之间的相互作用 两根平行且靠近的通电导体,相互之间都要受到对方电磁力的作用。电磁力的方向可用图 0-5 的方法来判定。先判定通电导线产生的磁场方向,再判定两根导体分别受到的电磁力方向。由图中可以看出;两根平行导体的电流方向相同时 [图 0-5(a)],相互吸引;电流方向相反时 [图 0-5(b)],相互排斥。

(4) 磁导率与磁场强度

① 磁导率 磁导率 μ 是衡量物质导磁能力大小的物理量。在国际单位制中, μ 的单位是亨/米 (H/m)。通电导体所建立的磁场强弱与其周围介质有关, 磁导率反映了不同介质的导磁性能, 真空的磁导率 μ_0 为一常数, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。任意一种物质的磁导率 μ 和真空的磁导率 μ_0 的比值, 称为该物质的相对磁导率 μ_r , 即 $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ 。

自然界所有物质按磁导率的大小, 或者说按磁化的特性大体上可分为磁性材料和非磁性材料两大类。对非磁性材料而言, $\mu \approx \mu_0$, $\mu_r \approx 1$, 基本上不具有磁化的特性, 而且每一种非磁性材料的磁导率都是常数。对于磁性材料, 其导磁性能很强, 即 $\mu \gg \mu_0$, $\mu_r \gg 1$, 非磁性物质如空气、铜、铝和绝缘材料等, 磁性物质如铁、钢、镍、钴及其合金以及铁氧等。

② 磁场强度 磁场强度 H 是进行磁场计算时所引入的一个物理量, 也是矢量。磁场中某点的磁感应强度 B 与该点介质磁导率 μ 的比值称为该点的磁场强度, 即 $H = \frac{B}{\mu}$ 。在国际单位制中, 磁场强度的单位是安/米 (A/m)。磁场强度只与产生磁场的电流以及这些电流的分布情况有关, 而与磁场介质无关。在均匀介质中与磁感应强度的方向一致。

(5) 铁磁材料的性质、分类及用途

① 性质 铁磁材料具有以下共同的性质: 能被磁体吸引; 磁化后有剩磁, 能形成磁体; 磁感应强度 B 有一个饱和值; 具有磁滞损耗; 磁导率比非铁磁物质大很多倍, 并且不是一个常数。

② 分类 根据用途不同, 铁磁材料可以分为三大类。

a. 软磁材料 其特点是磁导率高, 易磁化也易去磁, 剩磁和矫顽力都小, 磁滞损耗很小, 如硅钢片, 纯铁等。常用来制造电机、变压器等电器的铁芯。

b. 硬磁材料 其特点是不易磁化, 也不易去磁, 剩磁和矫顽力都很大, 如钨钢、钴钢、铁镍钴及其合金等, 今年稀土硬磁材料发展很快, 其矫顽力更大。常用于各类永久磁铁、扬声器磁钢的制造。

c. 矩磁材料 其特点是在很小的外磁作用下就能磁化, 并且达到饱和, 去掉外磁后, 磁性仍能保持在饱和值, 如镁锰铁氧体和某些铁镍合金等。在计算机和自动控制中广泛用作记忆元件、开关元件和逻辑元件。

(6) 磁路及其基本定律

① 磁路 电流产生磁场, 通有电流的线圈内部及周围有磁场存在, 为了使较小的励磁电流产生足够强的磁场, 通常把线圈绕在由磁性材料做成的铁芯上。由于铁芯的磁导率比周围空气或其他物质的磁导率高很多, 因此产生的磁通绝大部分将集中在铁芯中, 沿铁芯而闭和, 这部分磁通称为主磁通, 用字母 Φ 表示。只有很少一部分磁通沿铁芯以外的空间而闭和, 这称为漏磁通, 用 Φ_0 表示, Φ_0 很小, 工程上常忽略不计。

主磁通所通过的闭和路径称为磁路, 磁路中的磁通可以由励磁线圈中的电流产生, 也可以由永久磁铁产生。磁路中可以有空气气隙, 也可以没有空气气隙。磁路也分为直流磁路和交流磁路, 它们具有不同特点。

磁路按其结构不同, 又可分为无分支磁路和分支磁路。分支磁路又可分成对称分支磁路和不对称分支磁路。

② 磁路的欧姆定律 磁场中磁场强度与励磁电流的关系, 遵循安培环路定律, 又称全电流定律, 即: 在磁场中磁场强度 H 沿任何闭和曲线的线积分, 等于这闭和曲线所包围的电流的代数和, 其数学表达式为

$$\oint H dl = \sum_{k=1}^n I_k$$

其中, 电流的正负规定如下: 任意选定一个闭和曲线的围绕方向, 凡是电流方向与闭和曲线围绕方向之间符合右手螺旋定则的电流为正, 反之为负。

磁路欧姆定律可以表示为:
$$\Phi = \frac{NI}{R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + \dots + R_{mn}}$$

式中, N 为线圈匝数; I 为通过的电流; $R_m = \frac{L}{\mu S}$ 为磁路中的磁阻; L 为磁路平均长度; S 为铁芯截面积。

0.4.2 电磁感应

(1) 电磁感应现象

如图 0-6 所示, 均匀磁场中放置一根导体 AB , 两端连接一个检流计 PA , 当导体垂直于磁力线作切割运动时, 检流计的指针发生偏转, 说明此时回路中有电流存在; 当导体平行于磁力线方向运动时, 检流计指针不发生偏转, 此时回路中无电流存在。

如图 0-7 所示, 在线圈两端接上检流计 PA 构成回路, 当磁体插入线圈时, 检流计指针发生偏转; 磁铁在线圈中不动时, 检流计指针不偏转; 将磁体迅速由线圈中拔出时, 检流计指针又向另一个方向偏转。

上述现象说明: 当导体切割磁力线或线圈中磁通发生变化时, 在导体或线圈中都会产生感应电动势。其本质都是由于磁通发生变化而引起的。因此, 电磁感应的条件是穿越线圈回路中的磁通必须发生变化。

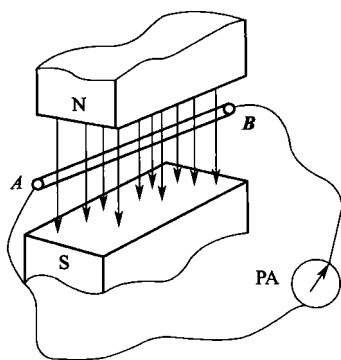


图 0-6 直导体的电磁感应现象

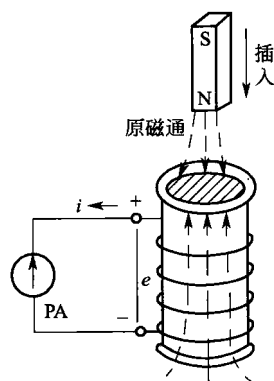


图 0-7 磁铁在线圈中运动

(2) 直导体中的电磁感应

由图 0-6 所示电路中可以看出, 导体与磁场相对运动而产生的感应电动势 e 的大小与导体切割磁力线时的速度 v 、导体有效长度 L 和导体所处的磁感应强度 B 有关, 即

$$e = Bvl$$

感应电动势的方向可用右手定则来判定: 伸开右手, 让拇指与其余四指垂直并同在一个平面内, 使磁力线穿过掌心, 拇指指向切割运动方向, 四指就指着感应电动势的方向。

(3) 线圈中的电磁感应

如图 0-7 所示, 当磁铁插入或拔出越快, 指针偏转越大。即回路中感应电动势的大小与穿过回路的磁通变化率成正比, 这就是法拉第电磁感应定律。

线圈中产生的感应电动势方向, 可用楞次定律进行判定。楞次定律的内容是: 感应电流的磁通总是反抗原有磁通的变化。应用其判断感应电动势方向的具体方法是:

① 首先确定原磁通的方向及其变化趋势;