



上海出版资金项目
Shanghai Publishing Funds



创新应用型数字交互规划教材
机械工程

MECHANICAL AND ELECTRICAL
TRANSMISSION CONTROL

机电传动与控制

吴清 夏春明 编著
颜建军 李锦


上海科学技术出版社

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位



上海出版资金项目
Shanghai Publishing Funds



创新应用型数字交互规划教材
机械工程

机电传动与控制

吴清 夏春明
颜建军 李锦




上海科学技术出版社

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

内 容 提 要

本书根据机械类专业机电传动与控制课程教学大纲编写。全书共分10章,内容包括绪论、机电传动与控制的基础知识、直流电机、交流电动机、继电器-接触器控制系统、电动机的选择、可编程控制器、变频器、人机界面及组态软件和控制电机等。全书力求机电结合,涵盖了机械专业中所有强电的部分,保证了知识体系的完整性,内容由浅入深,便于自学。同时,本书依托增强现实(AR)技术,将视频等数字资源与纸质教材交互,为读者和用户带来更丰富有效的阅读体验。在出版社网站(www.sstp.cn)“课件/配套资源”栏目有免费电子教学资源,供读者和用户参考。

本书可作为高等院校机械工程类专业本科生学习的教材,也可供从事机电一体化技术工作的相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电传动与控制 / 吴清等编著. —上海:上海科学技术出版社,2018.9

创新应用型数字交互规划教材. 机械工程

ISBN 978-7-5478-4049-8

I. ①机… II. ①吴… III. ①电力传动控制设备—高等学校—教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 134198 号

机电传动与控制

吴 清 夏春明 颜建军 李 锦 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码200235 www.sstp.cn)

常熟市兴达印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 13.5

字数: 340千字

2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-4049-8/TH·76

定价: 49.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

编审委员会

主 任 李郝林 陈关龙

副主任 钱 炜

委 员 (以姓氏笔画为序)

王小静 李峥嵘 张慧敏 陈 浩

陈军华 徐 洋 惠 虎

顾 问 曹自强

编写委员会

(以姓氏笔画为序)

丁晓红 马淑梅 王岩松 朱文峰

任 彬 李 晏 李郝林 李蓓智

吴 清 张东民 张而耕 孟 焯

荆学东 黄迪山

支持单位

(按首字拼音排序)

德玛吉森精机公司

东华大学

ETA(Engineering Technology Associates, Inc.)中国分公司

华东理工大学

库卡机器人(上海)有限公司

雷尼绍(上海)贸易有限公司

青岛海尔模具有限公司

瑞士奇石乐(中国)有限公司

上海大学

上海电气集团上海锅炉厂有限公司

上海电气集团上海机床厂有限公司

上海高罗输送装备有限公司技术中心

上海工程技术大学

上海理工大学

上海麦迅惯性航仪技术有限公司

上海麦迅机床工具技术有限公司

上海师范大学

上海应用技术大学

上海紫江集团

上汽大众汽车有限公司

同济大学

西门子工业软件(上海)研发中心

浙江大学

中国航天科技集团公司上海航天设备制造总厂

丛书序

在“中国制造 2025”国家战略指引下,在“深化教育领域综合改革,加快现代职业教育体系建设,深化产教融合、校企合作,培养高素质劳动者和技能型人才”的形势下,我国高教人才培养领域也正在经历又一重大改革,制造强国建设对工程科技人才培养提出了新的要求,需要更多的高素质应用型人才,同时随着人才培养与互联网技术的深度融合,尽早推出适合创新应用型人才培养模式的出版项目势在必行。

教科书是人才培养过程中受教育者获得系统知识、进行学习的主要材料和载体,教材在提高人才培养质量中起着基础性作用。目前市场上专业知识领域的教材建设,普遍存在建设主体是高校,而缺乏企业参与编写的问题,致使专业教学教材内容陈旧,无法反映行业技术的新发展。本套教材的出版是深化教学改革,践行产教融合、校企合作的一次尝试,尤其是吸收了较多长期活跃在教学和企业技术一线的专业技术人员参与教材编写,有助于改善在传统机械工程向智能制造转变的过程中,“机械工程”这一专业传统教科书中内容陈旧、无法适应技术和行业发展需要的问题。

另外,传统教科书形式单一,一般形式为纸媒或者是纸媒配光盘的形式。互联网技术的发展,为教材的数字化资源建设提供了新手段。本丛书利用增强现实(AR)技术,将诸如智能制造虚拟场景、实验实训操作视频、机械工程材料性能及智能机器人技术演示动画、国内外名企案例展示等在传统媒体形态中无法或很少涉及的数字资源,与纸质产品交互,为读者带来更丰富有效的体验,不失为一种增强教学效果、提高人才培养的有效途径。

本套教材是在上海市机械专业教学指导委员会和上海市机械工程学会先进制造技术专业委员会的牵头、指导下,立足国内相关领域产学研发展的整体情况,来自上海交通大学、上海理工大学、同济大学、上海大学、上海应用技术大学、上海工程技术大学等近 10 所院校制造业学科的专家学者,以及来自江浙沪制造业名企及部分国际制造业名企的专家和工程师等一并参与的内容创作。本套创新教材的推出,是智能制造专业人才培养的融合出版创新探索,一方面体现和保持了人才培养的创新性,促使受教育者学会思考、与社会融为一体;另一方面也凸显了新闻出版、文化发展对于人才培养的价值和必要性。

中国工程院院士

丛书前言

进入 21 世纪以来,在全球新一轮科技革命和产业变革中,世界各国纷纷将发展制造业作为抢占未来竞争制高点的重要战略,把人才作为实施制造业发展战略的重要支撑,改革创新教育与培训体系。我国深入实施人才强国战略,并加快从教育大国向教育强国、从人力资源大国向人力资源强国迈进。

《中国制造 2025》是国务院于 2015 年部署的全面推进实施制造强国战略文件,实现“中国制造 2025”的宏伟目标是一个复杂的系统工程,但是最重要的是创新型人才培养。当前随着先进制造业的迅猛发展,迫切需要一大批具有坚实基础理论和专业技能的制造业高素质人才,这些都对现代工程教育提出了新的要求。经济发展方式转变、产业结构转型升级急需应用技术类创新型、复合型人才。借鉴国外尤其是德国等制造业发达国家人才培养模式,校企合作人才培养成为学校培养高素质高技能人才的一种有效途径,同时借助于互联网技术,尽早推出适合创新应用型人才培养模式的出版项目势在必行。

为此,在充分调研的基础上,根据机械工程的专业和行业特点,在上海市机械专业教学指导委员会和上海市机械工程学会先进制造技术专业委员会的牵头、指导下,上海科学技术出版社组织成立教材编审委员会和编写委员会,联络国内本科院校及一些国内外大型名企等支持单位,搭建校企交流平台,启动了“创新应用型数字交互规划教材 | 机械工程”的组织编写工作。本套教材编写特色如下:

1. 创新模式、多维教学。教材依托增强现实(AR)技术,尽可能多地融入数字资源内容(如动画、视频、模型等),突破传统教材模式,创新内容和形式,帮助学生提高学习兴趣,突出教学交互效果,促进学习方式的变革,进行智能制造领域的融合出版创新探索。

2. 行业融合、校企合作。与传统教材主要由任课教师编写不同,本套教材突破性地引入企业参与编写,校企联合,突出应用实践特色,旨在推进高校与行业企业联合培养人才模式改革,创新教学模式,以期达到与应用型人才培养目标的高度契合。

3. 教师、专家共同参与。主要参与创作人员是活跃在教学和企业技术一线的人员,并充分吸取专家意见,突出专业特色和应用特色。在内容编写上实行主编负责下的民主集中制,按照应用型人才培养的具体要求确定教材内容和形式,促进教材与人才培养目标和质量的接轨。

4. 优化实践环节。本套教材以上海地区院校为主,并立足江浙沪地区产业发展的整体情况。参与企业整体发展情况在全国行业中处于技术水平比较领先的位置。增加、植入这些企业中当下的生产工艺、操作流程、技术方案等,可以确保教材在内容上具有技术先进、工艺领

先、案例新颖的特色,将在同类教材中起到一定的引领作用。

5. 与国际工程教育认证接轨。增设与国际工程教育认证接轨的“学习成果达成要求”,即本套教材在每章开始,明确说明本章教学内容对学生应达成的能力要求。

本套教材“创新、数字交互、应用、规划”的特色,对避免培养目标脱离实际的现象将起到较好作用。

丛书编委会先后于上海交通大学、上海理工大学召开 5 次研讨会,分别开展了选题论证、选题启动、大纲审定、统稿定稿、出版统筹等工作。目前确定先行出版 10 种专业基础课程教材,具体包括《机械工程测试技术基础》《机械装备结构设计》《机械制造技术基础》《互换性与技术测量》《机械 CAD/CAM》《工业机器人技术》《机械工程材料》《机械动力学》《液压与气动技术》《机电传动与控制》。教材编审委员会主要由参加编写的高校教学负责人、教学指导委员会专家和行业学会专家组成,亦吸收了多家国际名企如瑞士奇石乐(中国)有限公司和江浙沪地区大型企业的参与。

本丛书项目拟于 2017 年 12 月底前完成全部纸质教材与数字交互的融合出版。该套教材在内容和形式上进行了创新性的尝试,希望高校师生和广大读者不吝指正。

上海市机械专业教学指导委员会

前 言

机电传动与控制课程是机械类专业的一门必修专业基础课,是机械类人才学习电气知识的主要课程。本课程以电动机、控制元件及控制系统为主线,将机电传动的基础知识、电动机特性、常规控制元件、典型控制线路及现代机械设备中所需要的先进控制技术,如可编程控制器、变频器和组态软件技术有机衔接起来,构成一个完整的体系。

本书根据学科发展及其内在规律,把机械类专业所需的强电控制知识都集中在一起,避免了不必要的重复,节省了学时,加强了系统性,注重理论联系实际。全书共分 10 章。第 1 章为绪论。第 2 章为基本知识,已经具备相关知识的可以跳过这一章节。第 3、第 4 章分别介绍了直流电动机和交流电动机的工作原理及其特性。由于继电器-接触器控制系统还广泛应用于生产实际中,第 5 章介绍了继电器-接触器控制系统中用到的常用电器和基本控制线路等。第 6 章介绍了电动机选择。随着微型计算机的出现和迅速发展,可编程控制器在机电传动中广泛使用。第 7 章介绍了可编程控制器的原理和使用。同时变频器的使用越来越普遍,第 8 章介绍了变频器的原理和使用。第 9 章介绍了人机界面及组态软件,适应目前触摸屏和组态软件的普及应用。随着机电传动控制系统的发展,控制电机作为一种重要的检测、控制元件,用得愈来愈多,故第 10 章介绍了目前典型的控制电机的结构特点、工作原理、性能和应用。

相比其他同类教材,本书创新融入了数字交互资源,通过手机等移动端扫描教材中相应位置,可以观看视频,了解实物的实际工作过程和软件具体操作过程,使学生对相关内容的学习更加直观和产生兴趣。本书从第 2 章起各章后附有思考与练习,并在出版社网站(www.sstp.cn)“课件/配套资源”栏目给出部分练习题的答案和提示,以便读者自学。

本书由华东理工大学机械教学团队编写。具体编写分工如下:吴清编写第 1、7、10 章,夏春明编写第 5、8、9 章,颜建军编写第 2、4 章,李锦编写第 3、6 章;全书由吴清统稿。在本书的资料收集和整理过程中,张诗雨、余静、余夏辉、曹炜、曹默、罗巍巍、马畅、沈天柱、尚文、张滨、朱佳华、盛然给予了很大的帮助,在此表示感谢。


由于编者水平所限,书中可能存在错误或不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者

本书配套数字交互资源使用说明

针对本书配套数字资源的使用方式和资源分布,特做如下说明:

1. 用户(或读者)可持安卓移动设备(系统要求安卓 4.0 及以上),打开移动端扫码软件(不包括微信),扫描教材封底二维码,下载安装本书配套 APP,即可阅读识别、交互使用。

2. 插图图题等后有加“”标识的,提供视频等数字资源,进行识别、交互。具体扫描对象位置和数字资源对应关系参见下表。

扫描对象位置	数字资源类型	数字资源名称
图 7-24	视频	S7-200 操作演示
图 7-31	视频	三菱 Q 系列 PLC 的实物调试操作
图 8-16	视频	三菱 FR-A800 系列变频器操作使用
图 9-5	视频	Easy Builder500 操作演示
图 9-9	视频	GT Designer3 操作演示
图 9-10	视频	WinCC 操作演示
图 9-11	视频	组态王操作演示
图 10-6	视频	MR-J4 伺服系统操作演示
图 10-21	视频	无刷直流电机的操作演示
图 10-23	视频	舵机的操作演示
图 10-47	视频	步进电动机驱动器及三菱定位模块控制步进电动机

绪 论

◎ 学习成果达成要求

绪论是本课程的入门引导,是对学生学习目的、学习任务、学习内容的总引导。

学生应达成的能力要求包括:

1. 掌握机电传动与控制的目的和任务。
2. 了解机电传动与控制的发展。

《《《

本章作为本课程的入门引导,介绍机电传动与控制的目的和任务、机电传动与控制系统的
发展概况、有关概念和课程的性质与特点。

1.1 机电传动与控制的目的和任务

机电传动(又称电力传动或电力拖动)是以电动机为原动机驱动生产机械的系统之总称,它的目的是将电能转变为机械能,实现生产机械的启动、停止以及速度调节,完成各种生产工艺过程要求,保证生产过程的正常进行。

机电传动不仅包括拖动生产机械的电动机,而且包含控制电动机的一整套控制系统。所以,现代机电传动是和由各种控制元件组成的自动控制系统紧密联系在一起,这也是本书取名为《机电传动与控制》的原因。

按照现代化生产的要求,机电传动控制系统所要完成的任务,从广义上讲,就是要使生产机械设备、生产线、车间甚至整个工厂都实现自动化。从狭义上讲,则专指控制电动机驱动生产机械,实现生产产品数量的增加、质量的提高、生产成本的降低、工人劳动条件的改善以及能量的合理利用。

1.2 机电传动与控制的发展概况

机电传动与控制是随着社会生产的发展而发展的。单就机电传动而言,其发展大体上经历了成组拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。所谓成组拖动,是指一台电动机拖动一根天轴,然后再由天轴通过皮带轮和皮带分别拖动各生产机械,这种拖动方式生产效率低,劳动条件差,一旦电动机发生故障,将造成成组的生产机械停车;所谓单电动机拖动,是指用一台电动机拖动一台生产机械,它虽较成组拖动前进了一步,但当一台生产机械的运动部件较多

时,机械传动机构仍十分复杂;所谓多电动机拖动,是指一台生产机械的每一个运动部件分别由一台专门的电动机拖动,这种拖动方式不仅大大简化了生产机械的传动机构,而且控制灵活,为生产机械的自动化提供了有利的条件,所以,现代化的机电传动基本上均采用这种拖动形式。

原始的机械设备由工作机构、传动机构和原动机组成,控制方式由工作机构和传动机构的机械配合实现。随着以电气元件为主的自动控制系统的出现,设备的性能不断提高,使工作机构、传动机构的结构大为简化。主要由继电器、接触器、按钮、开关等元件组成的电气控制系统称作继电器-接触器控制系统。这种继电器-接触器控制属于断续控制或开关控制,其结构简单、易操作、价格低、易维修,但也存在功耗大、体积大、控制方式完全固定和不灵活的缺点。

开关控制不能满足对调速性能要求较高的生产机械,因此出现了直流发电机-电动机调速系统,属于连续控制。直流电动机具有启动转矩大、容易进行无级调速的特点。但它需要直流电源,直流电源是由一台交流电动机拖动一台直流发电机提供的。这种方式存在所用电机数量多、占地面积大、噪声大和效率低等缺点。20世纪60年代出现了晶闸管电动机自动调速系统,这种系统中的直流电源由晶闸管组成的可控整流电路提供,具有体积小、重量轻、效率高和控制灵敏度高优点,得到了普遍应用。

20世纪80年代以后,由于半导体技术的应用与发展,使得交流电动机调速系统有了突破性进展。交流调速有许多优点,单机容量和转速可大大高于直流电动机,交流电动机无电刷与换向器,易于维护,可靠性高,能用于带有腐蚀性、易爆性、含尘气体等特殊环境中。与直流电动机相比,交流电动机还具有体积小、重量轻、制造简单、坚固耐用等优点。交流变频调速器、矢量控制伺服单元及交流伺服电动机已日益广泛地应用于工业中。

目前为了适应工业自动化和生产过程变动节奏加快的要求,可编程控制器(programmable logic controller, PLC)在工业过程自动化系统中的应用日益广泛。PLC从其问世就是以最基层、第一线的工业自动化环境及任务为前提的。PLC可用梯形图编程,具有硬件结构简单、安装维修方便、抗强电磁干扰、工作可靠等优点,工程技术人员能很快地熟悉和使用它。PLC及其有关外部设备,都按易于工业控制系统连成一整体,又易于扩充功能的原则设计。

在软件方面,目前许多工业部门都采用了组态软件,组态软件是数据采集监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)的软件平台工具,是工业应用软件的一个组成部分。通过组态软件由上位机程序监控 PLC,然后由 PLC 控制现场的变频器和电动机或直接用组态软件控制现场的变频器和电动机系统。

1.3 机电传动与控制课程的性质与特点

机械产品质量和技术水平的高低,已成为当今世界衡量一个国家实力和国际地位的重要标志。实现产品的高质量和技术的高水平,与机电传动和控制息息相关。本课程把驱动电机、控制电机、继电器-接触器控制、可编程控制器、变频器、组态软件等相关内容,根据学科的发展与其内在规律,有机地结合起来,把机械专业所需的强电控制知识都集中在这一门课程中,理论联系实际,学以致用。

1.4 本教材的内容安排

本教材是为最大化地保证整个体系的完整性而编写的,部分内容可能以前课程已经涉及,是否还需要再讲,教师可在教学中灵活掌握,因此教学内容弹性很大,可以适用于学时数 24~64 的教学。其中第 2 章基础知识在学生以前的物理等教学中已有涉及,可以根据学生掌握程度让其课后自学;第 5 章有些内容在电工学中也有涉及,部分内容可以安排学生自学;第 7 章介绍了可编程控制器,虽然所有可编程控制器基本原理一样,但各个厂家的产品的使用还是差别很大,本书介绍了西门子的 S7-200 系列和三菱 Q 系列,在具体教学中可以根据已有的实验条件或教学计划选择其中的一种,突出原理的教学,淡化具体的型号;第 10 章介绍了目前典型的控制电机,根据学时可以选择其中几种来教学或在教师启发下让学生自学。本书各章后面附有思考与练习,并附有部分相关答案或提示,适于自学。

机电传动与控制的基础知识

◎ 学习成果达成要求

学生应达成的能力要求包括：

1. 了解电磁感应定律、电磁力定律、安培环路定律和电路定律等基本定律。
2. 掌握机电传动系统的运动方程式及其相关计算和多轴拖动系统中转矩折算的基本原则与方法。
3. 了解几种典型生产机械的负载特性。
4. 掌握机电传动系统稳定运行的条件并学会用它来分析系统的稳定平衡点。

« « «

电机的工作原理都是建立在电磁感应定律、电磁力定律、安培环路定律和电路定律等基本定律之上。电机又往往是用来驱动负载的,控制系统、机电传动系统的运动方程式及其相关计算和多轴拖动系统中转矩折算的基本原则与方法、典型生产机械的负载特性、机电传动系统稳定运行的条件,是学习后续章节前先要掌握的基本知识。如果已经有了相关知识,可以跳过本章节或安排自学。

2.1 电磁知识

电机是一种基于电磁感应原理和电磁力定律而实现机电能量转换的机械装置,发电机将机械能转换成电能,电动机将电能转换成机械能。

2.1.1 常用物理量

描述磁场的物理量主要有磁感应强度(或磁通密度) B 、磁场强度 H 、磁通 Φ 、磁动势 F 、磁阻 R_m 、磁导 Δ_m 、磁链 ψ 等。

1) 磁感应强度(或磁通密度) B

载导体周围存在着磁场,描述磁场强弱和方向的物理量是磁感应强度 B , B 是矢量。磁感应强度也称作磁通密度,单位为 T(特)。为了形象地描绘磁场,常采用磁力线。磁力线是闭合的曲线,在磁铁外部由 N 极指向 S 极;在磁铁内部,由 S 极指向 N 极。图 2-1 画出了用磁力线表示的载流长导线、线圈和螺线管周围的磁场分布情况。

磁力线的方向与产生它的电流方向符合右手螺旋定则,如图 2-2 所示。

2) 磁场强度 H

表征磁场性质的另一个基本物理量是磁场强度 H , H 是矢量,其单位为 A/m。它与磁感应强度 B 的关系为

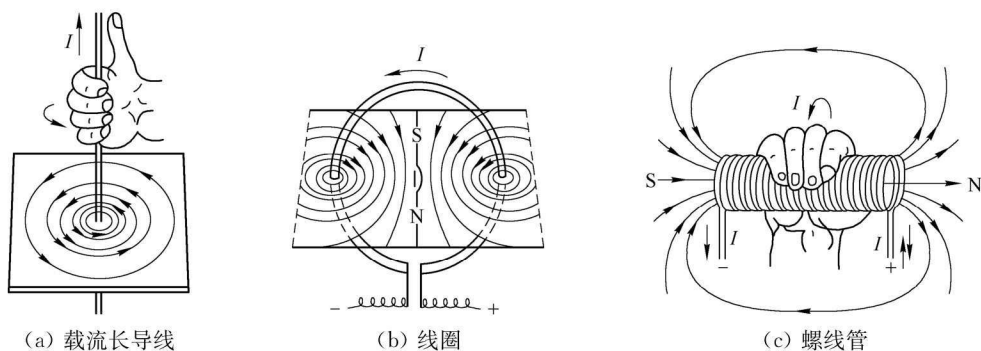


图 2-1 用磁力线表示的载流体周围的磁场分布

$$H = B/\mu \quad (2-1)$$

式中, μ 为介质的磁导率。电机中所用的介质, 主要是铁磁材料和非导磁材料。空气、铜、铝和绝缘材料等为非导磁材料, 它们的磁导率可认为等于真空的磁导率 μ_0 , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。铁磁材料的磁导率远大于真空的磁导率, 如铸钢的磁导率 μ 约为 μ_0 的 1000 倍, 各种硅钢片的磁导率 μ 为 μ_0 的 6000 ~ 7000 倍。

3) 磁通 Φ

穿过某一截面 A 的磁感应强度 B 的总量称作磁通, 用符号 Φ 表示, 即

$$\Phi = \int_A B dA \quad (2-2)$$

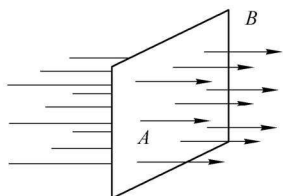


图 2-3 均匀磁场中的磁通

在均匀磁场中, 如果截面 A 与 B 垂直, 如图 2-3 所示, 则磁通 Φ 和磁感应强度 B 之间的数值关系为

$$\Phi = BA \quad \text{或} \quad B = \Phi/A \quad (2-3)$$

因此, B 又是单位面积上的磁通, 称作磁通密度, 简称为磁密。在国际单位制中, 磁通 Φ 的单位为 Wb (韦伯), 磁通密度的单位为 T , $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$ 。

4) 磁动势 F

线圈中通以电流就会产生磁场, 若线圈的匝数为 N , 电流为 I , 则线圈所产生的磁动势 F 为

$$F = NI \quad (2-4)$$

磁动势是产生磁通的“动力”, 单位为 A (安)。

5) 磁链 ψ

线圈的匝数 N 与通过线圈的磁通 Φ 的乘积称作磁链, 用 ψ 表示, 即

$$\psi = N\Phi \quad (2-5)$$

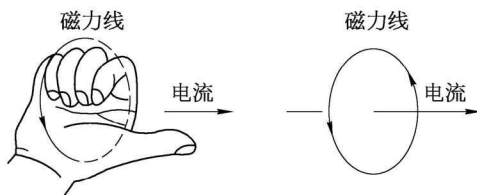


图 2-2 磁力线与电流的右手螺旋关系

2.1.2 磁路

磁通所通过的路径称作磁路,图 2-4 表示了几种常见的磁路。

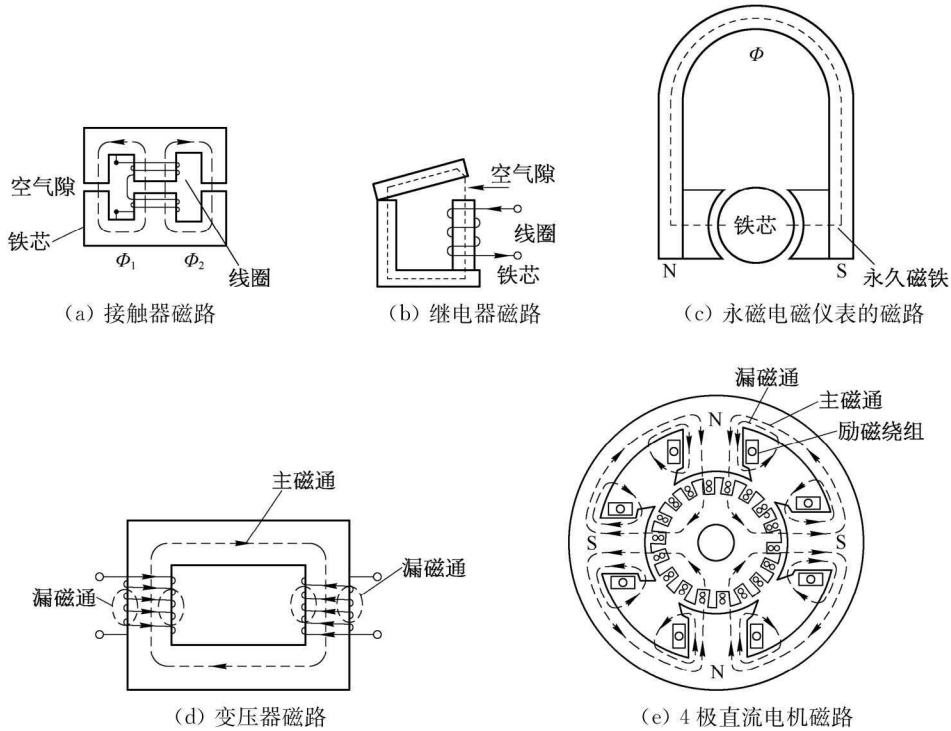


图 2-4 几种常见的磁路

2.1.3 基本定律

1) 安培环路定律

安培环路定律也称作全电流定律。设空间有 N 根载流导体,环绕载流导体任取一磁通的闭合回路,如图 2-5 所示。令 H 表示沿着回路上各点切线方向的磁场强度,则全电流定律的积分形式可表示为

$$\int Hdl = NI = \sum I \quad (2-6)$$

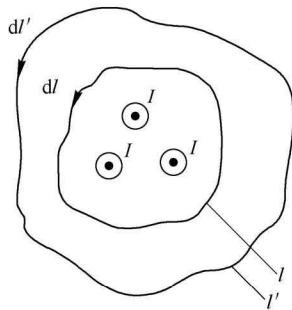


图 2-5 安培环路定律

式中, N 为磁通回路包围的导体总数; I 为每一根导体中的电流; NI 为该回路所包围的总电流量(代数),也就是作用在该磁路上的

的总磁动势,简称为磁势。

式(2-6)中电流的正负号这样来确定:凡导体电流的方向与积分路径的方向符合右手螺旋关系,则电流为正,反之为负。

同时还可以得到磁场强度沿闭合回路的积分,其结果与积分路径无关,即

$$\int Hdl = \int Hdl' = NI \quad (2-7)$$

全电流定律在电机中应用很广,它是电机磁路计算的基础。

2) 电磁感应定律(法拉第定律)

随时间变化的磁场会产生感应电动势,此现象称作电磁感应。如图 2-6 所示,若线圈的匝数为 N ,所通过的磁通为 Φ ,当磁通 Φ 随时间变化时,线圈内将产生感应电动势 e , e 的大小与 N 和磁通的变化率 $d\Phi/dt$ 成正比。 e 的实际方向由楞次定律判定如下:在图 2-6a 中,当 Φ 增加时,感应电动势的方向为阻止磁通变化的方向,于是 e 的实际方向由 X 指向 A;当 Φ 减小时, e 的实际方向由 A 指向 X。

感应电动势 e 的数学表达式与 e 的正方向的规定有关:

若规定 e 的正方向从 X 指向 A,如图 2-6b 所示,并认为 $e = Nd\Phi/dt$,则当 Φ 增加, $d\Phi/dt > 0$ 时, e 的实际方向与规定的正方向相同;当 Φ 减小, $d\Phi/dt < 0$ 时, e 的实际方向与规定的正方向相反。可见,两种情况下由 $d\Phi/dt$ 所确定的实际方向与由楞次定律确定的实际方向相一致,于是 e 的数学表达式可写成

$$e = Nd\Phi/dt \quad (2-8)$$

若规定 e 的正方向从 A 指向 X,如图 2-6c 所示,并认为 $e = Nd\Phi/dt$,则当 Φ 增加, $d\Phi/dt > 0$ 时,表示 e 的实际方向与规定的正方向相同,从 A 指向 X,这与由楞次定律所确定的实际方向不符;当 Φ 减小, $d\Phi/dt < 0$ 时, e 的实际方向与规定的正方向相反,由 X 指向 A,这亦与由楞次定律所确定的实际方向不符。于是 e 的数学表达式不能写成 $e = Nd\Phi/dt$,而应写成

$$e = -Nd\Phi/dt \quad (2-9)$$

同一物理现象,在不同的正方向规定下,数学表达式的符号不同,但本质相同。两种表达式都说明电动势 e 的大小与 $Nd\Phi/dt$ 成正比,电动势 e 的方向为阻碍磁通变化的方向。在电机和变压器的分析中,常采用上述第二种规定。

另外,长度为 L 的直导线在均匀磁场中运动时,若导线切割磁力线的速度为 v ,导线所在处的磁感应强度为 B ,当导线、磁感应强度 B 、导线的运动速度 v 三者互相垂直时,导线中感应电动势为

$$e = BLv \quad (2-10)$$

感应电动势 e 的方向用右手定则来确定,即把右手伸开,大拇指与其他四指成 90° ,如图 2-7 所示,让磁力线指向手心,大拇指指向导线运动方向,则四指所指方向就是导线中感应电动势 e 的方向。

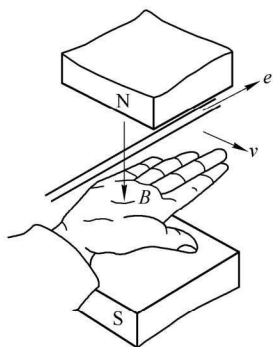


图 2-7 右手定则

3) 电路定律

(1) 欧姆定律。一段电路上的电压降 U 等于流过该电路的电流 I 与电路电阻 R 的乘积,即

$$U = RI \quad (2-11)$$

(2) 基尔霍夫第一定律(电流定律)。在电路中任一节点上,电流的代数和恒等于零,即