



普通高等教育“十二五”规划教材

电机与控制

(第3版)

FUNDAMENTALS OF ELECTRIC MACHINES AND CONTROL SYSTEMS (3RD EDITION)

主编◎王 勇



普通高等教育“十二五”规划教材

电机与控制

(第3版)

FUNDAMENTALS OF ELECTRIC MACHINES AND CONTROL SYSTEMS (3RD EDITION)

主 编◎王 勇
副主编◎温照方

中文样本图书

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与控制 / 王勇主编. —3 版. —北京: 北京理工大学出版社, 2016.6
ISBN 978-7-5682-2446-8

I. ①电… II. ①王… III. ①电机-控制系统-高等学校-教材 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 132926 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 15

字 数 / 349 千字

版 次 / 2016 年 6 月第 3 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 38.00 元

责任编辑 / 钟 博

文案编辑 / 钟 博

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

《电机与控制》(第2版)于2010年5月出版,迄今已6年。从教材的使用情况来看,我们认为它重视实用性和工程性,适应了当时教学改革的需要。

近年来,随着高等教育的迅猛发展、科学技术的日新月异、教育国际化进程的加速、工程教育认证的全面开展,我们认为有必要对教材进行修订。本版仍遵循前两版的体系、结构。在第2版的基础上,我们对全书内容进行了如下增补:

(1)改写了第1章“磁路”,在磁路计算中,明确提出了均匀磁路模型及其计算方法,从能量转换的观念处理磁体结构中电磁力的计算问题,并以例题的形式分析了典型电磁铁中磁力的计算问题。

(2)增加了第3章“电机概述与直流电机”,从“机-磁-电”能量转换的角度,考察了电机的一般特性。为机械、机电非电类专业的后续课程考虑,增加了直流电机内容,并重点介绍了并励直流电机。

(3)在第4章“交流异步电动机”中,对三相交流异步电动机的等效电路进行了改写,使其物理意义明确,具有实践指导意义。

(4)对第6章和第7章,重新绘制了几乎全部图例,并增加了部分例题和系统设计实例。

(5)在前7章,增加了部分习题,以利于学生掌握其内容、理论。

(6)在每个章节前,增加了该章需掌握的内容,以利于读者学习参考。

本书的编写,反映了北京理工大学近年来“电工和电子技术”课程全体任课教师面向世界一流,面向国际化,培养具有创新能力、开拓进取的一流人才而所进行的教学改革成果。

参加修订的老师有:王勇(编写了第1章、第3章、第4章、第6章、第7章、第8章、第9章)、温照方(编写了第2章、第5章)。全书由王勇统稿并担任主编,温照方担任副主编。

本书在编写过程中,得到了刘蕴陶教授、李燕民副教授、邵志峰副教授,以

及高玄怡、叶勤、马玲、金兆健、孙林等老师的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。特别感谢李燕民教授,她从写作伊始便对编者不吝鼓励和帮助,书稿完成后,又细心审阅修改,为本书增色不少。由于编者水平和能力有限,加之编写时间仓促,书中难免有疏漏和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2016年5月

前言(第2版)

《电机与控制》(第1版)于2004年1月出版,迄今已经使用了6年。从使用教材的教学实践效果来看,本书在取材内容和组织上适应了工科大学的教学需要。

为了适应控制技术的迅速发展和大学工科类教学改革的深入,本教材进行了重新修订。在原教材的基础上,编者对书中内容进行了整合、补充和精炼。本书在内容编排上更清晰易读,并更重视实用性和工程性,在各章增加了相应的例题和应用实例,特别是在第7章增加了容易理解和掌握的小系统,并对第8章的软件进行了更新。

参加修订的教师有:温照方(编写了第1章、第2章、第3章、第4章),王勇(编写了第5章、第6章、第7章、第8章),本书由温照方担任主编,由王勇担任副主编,温照方对全书进行了统稿。

本书在编写过程中,得到了刘蕴陶教授及李燕民、吴仲、叶勤、李宇峰、郇志峰、姜明、许建华、高玄怡等老师的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。由于水平和能力有限,加之编写时间仓促,书中难免有疏漏和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2010年3月

前言 (第1版)

本书是按照教育部(前国家教育委员会)1995年颁发的高等工业学校“电工技术(电工学Ⅰ)”和“电子技术(电工学Ⅱ)”两门课程的教学基本要求,根据多年的教学实践经验编写的。

“电工和电子技术”课程是面向高等工科学校非电类专业本科生开设的技术基础课。几年来,我们对“电工和电子技术”课程的内容、体系及方法进行了改革和实践,并取得了一定的成效。在多年的教学实践、教学改革和探索的基础上,我们编写了这本《电机与控制》教材,并与《电路和电子技术》教材一起使用,作为“电工和电子技术”课程的配套教材。

“电工和电子技术”课程的总体框架是:电路基础-元件-线路-系统。本书在实现以上教学思想方面作了一些尝试,其特点是:

(1)打破了原“电工电子技术”课程中电路、电子、电机与控制相对独立的格局,加强了电路、电子、电机与控制的内在联系,并突出了系统性。改变了通常将“电工和电子技术”课程分为“电工技术”和“电子技术”两大部分的做法,将电路基础部分、电子技术的内容提前,将电机和控制内容安排在最后,从而增加了系统知识。

(2)“电工和电子技术”课程的新体系体现了一定的基础性,使学生通过本课程的学习,能够具有较为宽厚的基础理论知识,具有可持续发展和创新能力。为此,书中强调了课程内容的基础性和实用性,加强了对微电机的介绍,如引入直线电动机等内容。

(3)“电工和电子技术”课程的新体系体现了一定的先进性。为此,书中以西门子S7-200机型为主,介绍了可编程序控制器的基本工作原理、基本指令和应用,适当给出一些应用实例,以培养学生对新技术的浓厚兴趣,引导学生积极主动地学习。

(4)新体系的课程内容注重培养学生分析问题和解决问题的能力、综合运用所学知识的能力以及工程实践能力。本书第7章“电工与电子系统”举出一些较为综合的系统实例,引入了PLC与变频器组成的控制系统,温度测量控制系统等,帮助学生了解电工技术和电子技术在工程实际中的应用。第8章“Protel99SE原理图设计与仿真”介绍了工程设计软件,使非电类学生具有一定的电子线路的设计能力。

(5) 本书在选材和文字叙述上力求符合学生的认知规律,由浅入深,由简单到复杂,由基础知识到应用举例。本书配有丰富的例题和习题,并在书后给出了部分习题的参考答案。

本书编写的分工如下:温照方,第1章、第2章、第3章(3.5.2节除外)、第4章、第5章、第6章;王勇,第7章的7.1节、7.2节、7.5节,第8章;李宇峰,第3章的3.5.2节,第7章的7.3节、7.4节。全书由温照方统稿。

北京理工大学刘蕴陶教授对本书进行了认真的、逐字逐句的审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议。此外,北京理工大学信息学院电工教研室的各位老师在本书的编写过程中也给予了很大的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于我们的水平和能力有限,加之编写时间较为仓促,书中难免存在一些疏漏和错误之处,恳请读者批评指正,以便今后加以改进。

编 者

2004年1月于北京

目 录

CONTENTS

第 1 章 磁路	001
1.1 电和磁	001
1.1.1 磁场和法拉第定律	001
1.1.2 自感和互感	004
1.2 安培定律	005
1.3 磁路和磁路欧姆定律	008
1.3.1 磁路和磁路的欧姆定律介绍	008
1.3.2 磁路的计算	010
1.3.3 交流磁路和直流磁路的特点	015
1.3.4 交流磁路中的电磁关系	016
1.4 磁性材料和 $B-H$ 特性曲线	017
1.4.1 高导磁性	018
1.4.2 磁饱和性	019
1.4.3 磁滞性与涡流	019
1.5 机电能量转换	020
1.5.1 磁结构中的力	021
1.5.2 直流电磁铁和交流电磁铁	025
习题	027
第 2 章 变压器	029
2.1 变压器的结构和工作原理	029
2.1.1 单相变压器的基本结构	029
2.1.2 变压器的工作原理	030
2.2 变压器的额定值	036
2.3 绕组的同名端及绕组的串联和并联	040
2.3.1 同名端的判别方法	040
2.3.2 绕组的串联与并联	041
2.4 三相变压器	041
2.5 自耦变压器与电流互感器	043
2.5.1 自耦变压器	043

2.5.2 电流互感器	044
习题	045
第3章 电机概述与直流电机	048
3.1 电机概述	048
3.1.1 电机的基本分类	048
3.1.2 电机的性能特点	050
3.1.3 旋转电机的基本原理	052
3.1.4 电机中的磁极	052
3.2 直流电机	054
3.2.1 直流电机的物理结构	054
3.2.2 直流电机的分类——按励磁方式	055
3.2.3 直流电机的模型	056
3.3 直流发电机	058
3.4 直流电动机	059
3.4.1 并励式直流电动机的转速——转矩特性和动态特性	060
习题	061
第4章 交流异步电动机	062
4.1 三相异步电动机的结构	062
4.2 三相异步电动机的型号与主要技术数据	064
4.3 三相异步电动机的工作原理	065
4.3.1 异步电动机的转动原理	065
4.3.2 三相绕组产生的旋转磁场	066
4.3.3 三相异步电动机的等效电路	070
4.4 三相异步电动机的功率与转矩	072
4.4.1 三相异步电动机的功率和转矩介绍	072
4.4.2 电磁转矩 T	074
4.4.3 机械特性	076
4.5 三相异步电动机的使用	079
4.5.1 三相异步电动机的起动	079
4.5.2 三相异步电动机的调速	082
4.5.3 三相异步电动机的制动	086
4.6 三相异步电动机的选择	087
习题	089
第5章 其他类型电动机	091
5.1 单相异步电动机	091
5.1.1 单相异步电动机的结构和特点	091

5.1.2 分相式单相异步电动机	093
5.1.3 罩极式异步电动机	094
5.1.4 单相异步电动机的应用	095
5.2 直线异步电动机	096
5.2.1 直线电动机概述	096
5.2.2 直线异步电动机的基本结构	097
5.2.3 直线异步电动机的工作原理	098
5.2.4 直线电动机的型号及主要参数	099
5.2.5 直线异步电动机推力的基本特性	100
5.2.6 直线电动机的应用	100
5.3 永磁直流电动机	101
5.3.1 永磁直流电动机的结构	101
5.3.2 永磁直流电动机的工作原理	101
5.4 控制电机	102
5.4.1 伺服电动机	102
5.4.2 步进电动机	105
5.4.3 测速发电机	109
习题	111
第 6 章 电动机的电器控制	112
6.1 常用低压电器	112
6.1.1 手动电器	112
6.1.2 自动电器	114
6.1.3 电气控制线路图的图形、文字符号及绘制原则	119
6.2 控制线路的基本环节和典型控制线路	123
6.2.1 电动机的点动和长动控制	123
6.2.2 正、反转控制线路	125
6.2.3 行程控制	127
6.2.4 顺序控制	127
6.2.5 时间控制	128
6.3 实际机床控制线路举例	130
6.4 继电器控制线路的一般设计原则	132
6.5 常用电器元件的选择	134
6.5.1 交流接触器的选择	134
6.5.2 继电器的选择	134
6.5.3 熔断器的选择	135
习题	135

第7章 可编程序控制器原理及应用	139
7.1 概述	139
7.2 可编程序控制器的基本结构和工作原理	141
7.2.1 可编程序控制器的基本结构	141
7.2.2 可编程序控制器的工作原理	142
7.3 S7-200 CPU 存储器的数据类型及寻址方式	144
7.3.1 CPU 存储器的有效范围	144
7.3.2 SIMATIC S7-200 CPU 存储器的寻址方式	145
7.4 可编程序控制器的基本指令和编程方法	148
7.4.1 位逻辑指令	149
7.4.2 置位和复位指令	151
7.4.3 定时器及计数器指令	152
7.4.4 传送指令	156
7.4.5 比较指令	158
7.4.6 逻辑操作指令	158
7.4.7 移位和循环移位指令	159
7.4.8 整数数学运算指令	160
7.5 编程实例	163
习题	170
第8章 电工与电子系统	172
8.1 电工与电子系统概论	172
8.1.1 电工与电子系统的基本概念	172
8.1.2 电工电子系统的分类	172
8.2 温度测量控制系统	173
8.2.1 简介	173
8.2.2 温度的检测	173
8.2.3 信号的放大	174
8.2.4 温度控制	175
8.2.5 功率驱动和加热	175
8.2.6 系统电路简介	176
8.3 由 PLC 控制的双坐标运动系统	177
8.3.1 双坐标运动系统的构成	177
8.3.2 驱动部分	177
8.3.3 用 PLC 实现对双坐标运动系统的控制	178
8.4 由 PLC 和变频器组成的电动机闭环控制系统	180
8.4.1 系统概述	180
8.4.2 系统硬件设计	181
8.4.3 系统软件设计	182

8.4.4 监控系统设计	183
8.5 基于工业控制计算机的剑杆织机控制系统	184
8.5.1 剑杆织机的原理和系统组成	184
8.5.2 工业控制计算机简介	185
8.5.3 系统硬件设计	186
8.6 与电话机并行使用的多功能电路	187
8.7 浴室灯的自动控制电路	188
第9章 EDA 软件 Altium Designer 简介	191
9.1 Altium Designer Summer09 简介	191
9.1.1 EDA 技术	191
9.1.2 Altium Designer (Protel) 的发展历史	191
9.1.3 Altium Designer Summer09 的设计体系的结构	193
9.2 Altium Designer Summer09 操作环境介绍	195
9.2.1 进入 Altium Designer Summer09	195
9.2.2 Altium Designer Summer09 的文件系统	196
9.2.3 Altium Designer Summer09 的常用键盘操作键	196
9.3 电路原理图设计	197
9.3.1 概述	197
9.3.2 原理图的组成	197
9.3.3 Altium Designer Summer09 电路原理图元件的属性	198
9.3.4 Altium Designer Summer09 的原理图设计工具	198
9.3.5 在平面上放置元件	200
9.3.6 绘制电路原理图	201
9.4 混合信号电路仿真	203
9.4.1 概述	203
9.4.2 仿真分析的操作步骤	203
9.4.3 电路仿真常用电源/激励源简介	205
9.4.4 常用仿真方式和应用	207
9.4.5 仿真实例	210
9.5 PCB 设计简介	214
9.5.1 PCB 和元器件封装简介	214
9.5.2 Altium Designer Summer09 PCB 设计基础	216
9.5.3 PCB 的布局设计	220
9.5.4 电路板相关报表的输出	223
参考文献	224

第1章

磁 路

机电能量转换在电气工程和其他领域之间建立起重要的桥梁,成为非电类工程师必须重点关注的领域之一。机电转换器广泛用于工业、航空和生物医学等领域。

学习本章后,应能:

- 分析简单磁路,计算机电能量转换的性能和能量;
- 描述机电系统中的能量转换过程;
- 对机电转换器进行简单线性分析。

1.1 电和磁

19世纪早期,丹麦物理学家奥斯特(H.C. Oersted)率先提出电和磁是相互联系的概念,并验证了电流能产生磁场。很快,法国科学家安培(André Marie Ampère)建立了安培定律,精确表示了二者之间的相互关系。随后,英国科学家法拉第验证了安培定律的逆问题也成立,即变化的磁场也能产生电场(法拉第定律)。

在随后的章节中,读者将看到磁场构成了电能与机械能之间必不可少的联系。安培定律和法拉第定律描述了电场和磁场之间的关系。事实上,人们常说的机电转换器,更准确地说,应该叫电-磁-机能量转换器,因为它们绝大多数都是通过电能-磁能-机械能来完成能量转换的。

1.1.1 磁场和法拉第定律

用来定量描述磁场强度的量有磁通 Φ (单位为韦伯, Wb)、磁通密度或磁感应强度 B (单位为韦伯/米², Wb/m²或特斯拉, T)。磁感应强度 B 与磁场强度 H (单位为安培/米, A/m)紧密相连,均是矢量。因此,磁感应强度和磁场强度通常用矢量形式来描述。但在后续讨论中,我们总假定场是标量场,即磁场方向处于单一的空间方向,以简化分析和计算。

习惯上,用磁感(应)线来表示磁场。通过观察磁感线在空间中的分布密度,就可直观地确定磁场强度。磁场之间的相对强弱可通过磁感线的分布密度来确定,如图1.1.1所示。

运动的电荷产生磁场,这种效应可通过磁场作用于运动电荷的力来进行测量。在磁感应强度 B 中以速度 v 运动的电荷 q 所受到的力 f 由下式确定:

$$f = qv \times B \quad (1.1.1)$$

式中,“ $\times$ ”表示叉乘。若电荷运动速度与磁感应强度之间有角度 θ ,则力的大小为

$$f = qvB \sin \theta \quad (1.1.2)$$

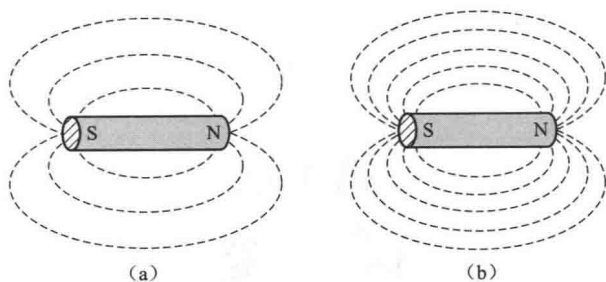


图 1.1.1 磁感线

(a) 磁场弱; (b) 磁场强

式中, v 、 B 分别为其矢量的大小, 力的方向垂直于矢量 B 和 v 所组成的平面, 可用右手定则确定, 其关系如图 1.1.2 所示。

磁通 Φ 则定义为磁感应强度在一定面积内的积分。为了分析简单, 常常考虑磁力线垂直于某一截面积 S 的情况, 此时磁通

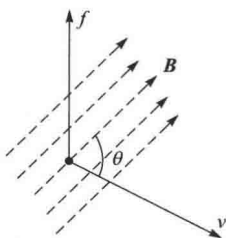


图 1.1.2 运动电荷在恒定磁场中所受的力

$$\Phi = \int_S B dS \quad (1.1.3)$$

式 (1.1.3) 中, 积分下限 S 表示积分是在整个表面积 S 上进行。如果通过表面积 S 的磁通是不变的恒定磁通, 那么积分运算就可简化如下:

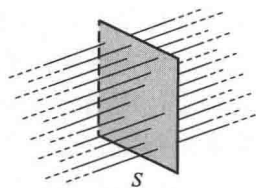
$$\Phi = B \cdot S \quad (1.1.4)$$

图 1.1.3 中, 假定磁力线穿过表面积 S , 磁场为均匀磁场, 则可利用式 (1.1.4) 计算穿过表面积 S 的磁通 Φ 。

法拉第定律说明, 如果由导体限定了表面积 S , 则变化的磁场将感应电压, 进而有电流流过该导体。更精确地说, 法拉第定律描述了随时间变化的磁通所引起的感应电动势, 其关系如下:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1.5)$$

考虑只有一匝的线圈组成的圆形截面积, 如图 1.1.4 (a) 所示, 磁通 B 垂直向上穿过该线圈构成的平面。如果穿过线圈的磁场 (或者说磁通) 是恒定不变的, 则在端子 a 和 b 之间没有感应电动势产生。若磁通增加, 在端子 a 和 b 之间连接电阻 R , 则线圈中有电流 i 流过。电流 i 产生的磁场将阻碍原磁通增加的磁场, 如图 1.1.4 (b) 所示。式 (1.1.5) 中的负号说明感应电流产生的磁感应强度方向与原磁感应强度 B 的方向相反, 这就是楞次定律。在图 1.1.4 (a) 中, 感应磁通的方向垂直向下, 在图 1.1.4 (b) 中为进入纸面。通过右手定则, 图 1.1.4 (b) 中的感应磁通将感应出顺时针方向的电流, 即电流从 b 点流出, 然后通过电阻 R 流入 a 点。这就导致电阻 R 两端的电压是负的。如果原磁通是减小的, 线圈中的感应电流将重建原磁通 (即阻碍原磁通的减小), 这意味着

图 1.1.3 穿过表面积 S 的磁感线

感应电流产生的磁通方向必须向上 [图 1.1.4 (a)], 流出纸面 [图 1.1.4 (b)], 相应的, 电压也必须改变方向。

感应电动势的方向常常能通过物理方法获得。因此, 式 (1.1.5) 中的负号可省略。

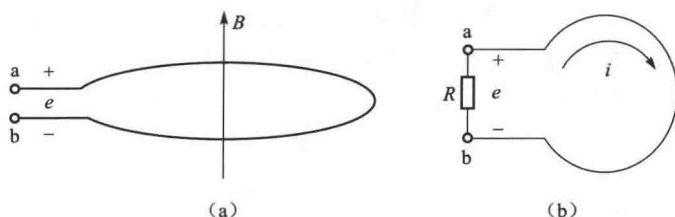


图 1.1.4 磁场中的感应电动势

(a) 磁通恒定; (b) 变化磁场产生感应电动势

在实际应用中, 常常通过增加线圈的匝数来获得更高的感应电压, 而不是改变磁通的变化率。对穿过截面积 S 的 N 匝线圈, 其感应电动势的大小为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1.6)$$

图 1.1.5 中, N 匝线圈与一定量的磁通交链。如果 N 很大且线圈缠绕紧密, 仍不能认为通过每匝线圈的磁通是一样的。实际中, 为了方便, 定义磁链 λ (单位为 Wb 或 Vs) 为

$$\lambda = N\Phi \quad (1.1.7)$$

因此

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} \quad (1.1.8)$$

式 (1.1.8) 描述了磁链与感应电动势之间的关系, 该式类似于电荷与电流的关系:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1.9)$$

换句话说, 磁链可看作电路分析中的电荷。需要注意的是之前假设均匀磁场穿过紧密缠绕的线圈, 而电路分析中的电感线圈往往满足不了这个假设条件。

什么样的物理结构能引起磁通变化, 进而产生感应电动势呢? 有两种结构能满足这样的功能。第一种由在线圈附近运动的永磁体, 产生时变的磁通; 第二种先由电流产生磁场, 然后改变电流, 则磁通随之变化。在多数情况下, 不采用永磁体, 而采用改变励磁电流来改变磁场强度。但是第一种方法在概念上更简单、直观。由运动磁场产生的感应电动势叫作动生电压, 而由时变磁场产生的感应电动势叫作感生电压 (transformer voltage)。

在电路分析中, 假设磁链和电流的关系是线性的:

$$\lambda = Li \quad (1.1.10)$$

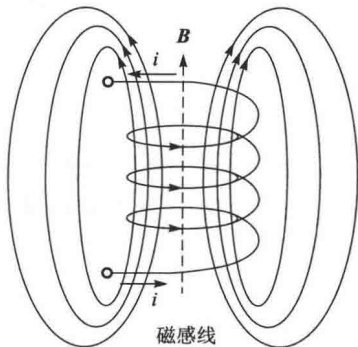


图 1.1.5 磁链的概念

其结果是时变电流将在感应线圈中感应出感生电压

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1.1.11)$$

事实上, 式 (1.1.11) 定义了理想自感 L 。除了自感外, 在相邻电路间可能产生的磁耦合也很重要。在电路中, 电流流过, 产生磁场, 该磁场在同一电路中感应出的电压由自感来度量。一个电路中的磁场变化可能在附近的另一个电路中产生感应电压, 这就是互感和变压器的原理。

1.1.2 自感和互感

图 1.1.6 中各有一对线圈, 其中 L_1 由电流 i_1 激励, 因此建立磁场并产生感应电压 u_1 ; 而另一线圈 L_2 没有电流激励, 但与电流 i_1 在线圈 L_1 中产生的磁场部分交链。这两个线圈之间建立的磁耦合用互感 M 来定量描述, 并由下式定义:

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt} \quad (1.1.12)$$

图 1.1.6 中的小黑点 “•” 表示两个线圈耦合的极性。如果点 “•” 在线圈的同一端, 则线圈 1 中的电流 i_1 在线圈 2 中的感应电压的方向与该电流在线圈 1 中感应电压的方向相同。反之, 电压方向相反。在两个线圈中表示磁耦合和感应电压方向的小黑点 “•” 叫作同名端。显然, 若线圈 2 中有电流流过, 则也会在线圈 1 中产生互感电压。通常, 线圈的感应电压为自感电压和互感电压之和。

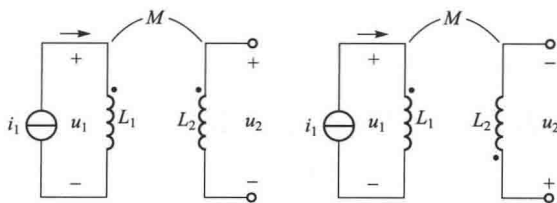


图 1.1.6 互感

在实际的电磁电路中, 电路的自感 L 通常不是常数, 而取决于磁场强度的大小, 因此不太可能采用简单的公式 $u = L di/dt$ 。考虑式 (1.1.6), 在电感线圈中, 电感量由下式给定:

$$L = \frac{N\Phi}{i} = \frac{\lambda}{i} \quad (1.1.13)$$

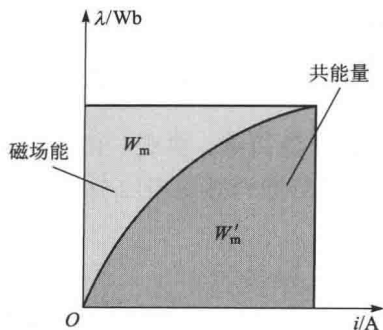


图 1.1.7 磁链、电流、能量和共能量的关系

当磁路是线性时, 式 (1.1.13) 描述了电流和磁通之间的关系。而实际上, 磁性材料的磁通和电流的关系曲线是非线性的, 因此电路分析中所用的简单线性的电感参数并不能描述本章磁路中的行为特点。在任何实际应用中, 磁链 λ 和电流的关系都是非线性的, 如图 1.1.7 所示。由于其电路形式为非线性的, 因此, 用能量计算方式来分析磁路更为方便。

在磁路中, 储存在磁场中的能量等于瞬时功率

的积分, 而瞬时功率等于电压和电流的乘积: