

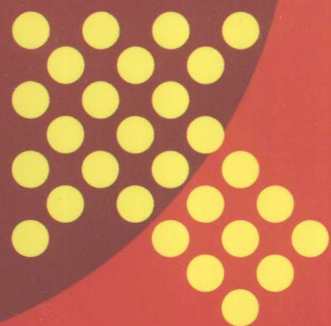
21世纪高等学校规划教材



ZIDONG KONGZHI YUANJIAN

自动控制元件

冯 越 姜艳姝 孙真和 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



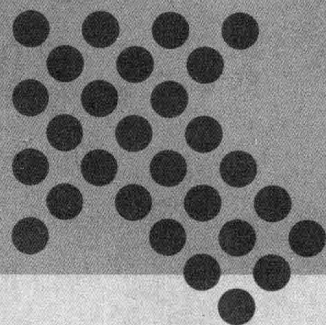
21世纪高等学校规划教材



ZIDONG KONGZHI YUANJIAN

自动控制元件

编著 冯 越 姜艳姝 孙真和
主审 万 磊 高俊山



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书详细介绍了自动控制系统中各种典型的电磁类控制元件的基本结构、工作原理、特性及应用实例。全书共分 11 章, 主要内容包括作为执行元件使用的拖动电机中的直流电动机、交流电动机和同步电动机, 作为执行元件使用的控制电机中的直/交流伺服电动机、步进电动机、无刷直流电动机、直线电动机以及作为测量元件使用的控制电机中的测速发电机、旋转变压器、自整角机和感应同步器等。本书的编写力求体系完整, 注意各种电机的联系与对比, 既突出了理论性也增强了实用性。

本书可作为普通高等院校各类自动化专业、电气类专业以及机电一体化专业等的教材, 也可作为工程技术人员学习电机知识的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制元件/冯越, 姜艳姝, 孙真和编著. —北京: 中国电力出版社, 2010. 1

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9816 - 7

I. ①自… II. ①冯… ②姜… ③孙… III. ①自动控制—控制元件—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 219889 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http: //jc. cepp. com. cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 447 千字

定价 29.60 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书是作者根据自动化专业的性质、教学改革的要求,并结合多年的教学经验编著而成。

本书主要内容包括执行元件和测量元件两大部分,涵盖了应用最广泛的拖动电机,如直流电动机、交流电动机和同步电动机三大电机,控制用电机如伺服电动机、步进电动机、无刷直流电动机、直线电动机,以及测量用电机,如测速发电机、旋转变压器、自整角机和感应同步器等。

本书的特点如下。

(1) 内容典型,体系完整。本书介绍了自动控制系统中各种典型的电磁类控制元件,从常用的交、直流电机入手,扩充到各种控制电机,使各类电磁元件(各种电机)有机地结合起来,形成一个完整的体系。

(2) 注重基础,结合应用。本书重点介绍了自动控制元件的基本结构、工作原理以及特性,在此基础上,各章给出了各种控制元件的应用实例,使读者在学习本教材之后可以对控制元件及其相关知识有比较全面和系统的了解和掌握。

(3) 知识更新,适合于作教材。本书既包括执行元件也包括测量元件,尤其对具有新结构和新原理的电磁元件,如无刷直流电动机、直线电动机等也作了一定的介绍,使内容更加充实。作为教材,本书的编写注重层次分明,语言简练,各章节风格统一。为了便于读者对本书教学内容的理解和巩固,各章均配有适当的习题和思考题。课堂讲授与实验总学时数约 70 学时左右。

本书可作为普通高等院校各类自动化专业、电气类专业以及机电一体化专业等的教材,也可以作为工程技术人员学习电动机知识的参考书。

本书由冯越、姜艳姝、孙真和编著。冯越编写了第 1、4、5、6、7 章和附录,姜艳姝编写了第 2、8、9、10、11 章,孙真和编写了绪论和第 3 章。全书由冯越统稿。

本书由高俊山教授主审,对全书提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示诚挚的感谢。在编写过程中作者参考了书末所列的文献资料,在此谨向其作者表示感谢。

由于作者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2010 年 2 月

目 录

前言

绪论	1
0.1 控制元件的作用与分类	1
0.2 本书的主要内容	3
0.3 预备知识	3
思考题与习题	8

第一篇 执行元件——拖动电机

第1章 直流电机	9
1.1 直流电机的结构	9
1.2 直流电机的基本工作原理	13
1.3 串励直流电动机	27
1.4 他励直流电动机的外部特性	29
1.5 直流电动机应用举例	46
思考题与习题	47
第2章 三相异步电动机	50
2.1 三相异步电动机的结构及基本工作原理	50
2.2 三相异步电动机的数学描述	59
2.3 三相异步电动机的外部特性	69
2.4 三相异步电动机的使用	75
2.5 单相异步电动机	87
思考题与习题	94
第3章 三相同步电动机	96
3.1 概述	96
3.2 同步电动机的结构及特点	97
3.3 同步电机的基本原理	98
3.4 同步电动机的特性	99
3.5 同步电动机的起动	100
思考题与习题	101

第二篇 执行元件——控制电机

第4章 直流伺服电动机	104
4.1 直流伺服电动机	104

4.2 直流力矩电动机	111
4.3 无刷直流电动机	116
思考题与习题	123
第5章 交流伺服电动机	125
5.1 交流异步伺服电动机	125
5.2 小功率同步电动机	132
5.3 永磁式同步电动机	133
5.4 磁阻式同步电动机	135
5.5 磁滞式同步电动机	137
5.6 电磁式减速同步电动机	139
5.7 应用举例	141
思考题与习题	142
第6章 步进电动机	144
6.1 概述	144
6.2 磁阻式步进电动机的工作原理	145
6.3 磁阻式步进电动机的运行特性	149
6.4 其他型式的步进电动机	156
6.5 步进电动机的驱动电源	158
6.6 步进电动机主要性能指标及选择	166
6.7 步进电动机的应用举例	169
思考题与习题	171
第7章 直线电动机	173
7.1 概述	173
7.2 直线感应电动机	173
7.3 直线直流电动机	177
7.4 直线自整角机	180
7.5 直线和平面步进电动机	181
7.6 直线电动机的应用举例	184
思考题与习题	185

第三篇 测量元件——控制电机

第8章 测速发电机	187
8.1 直流测速发电机	187
8.2 交流测速发电机	192
8.3 测速发电机的应用举例	201
思考题与习题	205
第9章 变压器基础	206
9.1 变压器的基本结构	207

9.2	变压器的工作原理	211
9.3	变压器的作用	212
9.4	仪用互感器	214
第 10 章	旋转变压器	224
10.1	旋转变压器的结构	224
10.2	正、余弦旋转变压器	225
10.3	线性旋转变压器	230
10.4	旋转变压器的技术指标	232
10.5	旋转变压器的应用	234
10.6	感应同步器	240
10.7	感应移相器	245
	思考题与习题	248
第 11 章	自整角机	249
11.1	力矩式自整角机	250
11.2	控制式自整角机	258
11.3	自整角机的应用举例	264
	思考题与习题	266
附录 A	电磁式直流电动机主要技术数据	268
附录 B	Y2 系列三相异步电动机主要技术数据	271
附录 C	SZ 系列电磁式直流伺服电动机主要技术数据	274
附录 D	LYX 系列稀土永磁直流力矩电动机主要技术数据	275
附录 E	SL 系列两相交流伺服电动机主要技术数据	276
附录 F	TZ 系列磁滞式同步电动机主要技术数据	277
附录 G	BH 系列永磁感应子式步进电动机主要技术数据	278
附录 H	空心杯转子异步测速发电机主要技术数据	279
附录 I	旋转变压器主要技术数据	280
附录 J	自整角机主要技术数据	284
	参考文献	286

绪 论

0.1 控制元件的作用与分类

自 20 世纪 40 年代以来,随着科学技术和生产的迅速发展,自动化技术也随之得到非常广泛地应用,并已渗透到社会生产和人类社会中的许多领域。在宇宙开发利用方面,如卫星发射、轨道变更、飞船发射、姿势控制、飞船回收及其他操作;在航空方面,如机场控制、导航;在国防军事方面,如导弹制导、自动火炮;在交通运输方面,如磁悬浮列车和全天候客机的自动运行;在工业生产方面,如温度、压力、流量、物位及成分等参数的控制,机床、各类大型机械、轧钢机、冶金工程、化工工程、生物与制药工程生产调度;在日常生活方面,如空调器、电梯、自动售货机等,都离不开自动化技术。毫无疑问,自动控制已经是现代工程中非常重要的技术。而所有这些形形色色的控制系统,又都是由一些具有几种典型功能的元器件及其电子线路组成,本书主要介绍自动控制系统中这些常用的元器件。

图 0-1 所示为遥控导弹发射架自动定位系统示意框图。该系统的控制对象是导弹发射架,被控制的量是导弹发射架的转角位置,参考输入信号是电压信号,它代表导弹发射架应当转动的角位移,即期望位置。精密电位器的转轴和发射架的轴相连接,它的输出电压代表发射架的实际位置,这个电压反馈到输入端,又被称为反馈信号。反馈信号和参考输入信号一起加到差动放大器的输入端。如果发射架的实际位置和期望位置不一致,参考输入信号和反馈信号之间就有一个差值,这个差值反映了实际位置偏离期望位置的程度,称为偏差信号。差动放大器将偏差信号放大,放大后的信号仍不足以拖动电动机转动,所以又经过功率放大器放大。功率放大器输出的电压加到直流电动机的电枢绕组上,使电动机转动,带动导弹发射架转动,转动方向是使偏差电压减小到 0。当导弹发射架转动到期望位置时,偏差信号为 0,电动机电枢绕组两端电压也变为 0,电动机应停止转动并使发射架保持在期望位置。当参考输入信号改变时,发射架将随着信号转动。整个系统属于角位移跟踪系统,又称为随动系统或伺服系统。

为了提高系统的跟随性能,实际系统中还要加入串联补偿装置和并联(反馈)补偿装置。

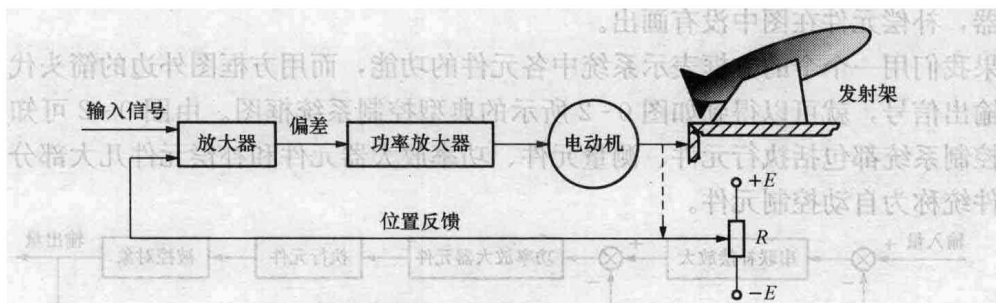


图 0-1 导弹发射架自动定位系统

控制系统中的控制元件虽然是各种各样的,但根据它们在控制系统中的功能和作用可以分为以下四大类。

(1) 执行元件。驱动控制对象，控制或改变被控量（输出量），直接完成控制任务。

应用最广泛的执行元件是电动机，包括直流电动机、异步电动机、步进电动机、小功率同步电动机等。从原理上来说，所有电机都有可逆性，一台电机可以作为电动机用，也可以作发电机用，所以发电机和电动机往往统称为电机。电机按电源性质可分为直流电机、交流电机、脉冲电机等。电机按功率可分为大型、中小型和微型。微电机一般指折算至 1000r/min 时连续额定功率为 750W 及以下，或机壳外径不大于 160mm，或轴中心高不大于 90mm 的电机。微电机按其用途可分为三大类：电源微电机（包括各类发电机），驱动微电机和控制微电机。控制微电机指的是在自动控制系统中，用于检测、放大、执行、解算等用途的微电机。

执行元件是控制系统最基本的组成部分。从广义上说，执行元件受放大后的信号驱动，直接带动控制对象完成控制任务。执行元件的作用是将电信号转换成机械位移（线位移或角位移）或速度。系统对执行元件的基本要求是：具有良好的静特性（调节特性和机械特性）和快速响应的动态特性。本书将对执行元件做重点介绍。

(2) 测量元件。将被测量检测出来并转换成另一种容易处理和使用的量。所谓容易处理的量，主要指的是电信号，因为只有电信号容易进行放大、加减、积分、微分、滤波、存储和传送。因此测量元件又可狭义地理解为：将外界输入的信号变换为电信号的一类元件。测量元件一般称为传感器。过程控制中又称为变送器。

(3) 放大元件。将微弱信号放大，以便最后驱动执行元件。放大元件又可分为前置放大元件和功率放大元件两种。功率放大元件的输出信号具有较高的功率，可以直接驱动执行元件。

在控制系统中，控制信号不能直接驱动执行元件——电动机，因为它不能提供电动机运行所需要的足够大的功率。控制信号必须通过功率放大元件才能使电动机按着期望的方向和速度运行。可以说，功率放大元件把具有固定电压的电源变成了由信号控制的能源，电压或电流随控制信号而变化的电源。

(4) 补偿元件（旧称校正元件）。为了确保系统稳定并使系统达到规定的精度指标和其他性能指标，控制系统的设计者往往还要在系统中另外增加一些元件，这些元件就被称为补偿元件。补偿元件的作用是改善系统的性能，使系统能正常、可靠地工作并达到规定的性能指标。

在图 0-1 的自动定位系统中，执行元件是电动机，测量元件是精密电位器，放大元件是放大器，补偿元件在图中没有画出。

如果我们用一个个的方框表示系统中各元件的功能，而用方框图外边的箭头代表元件的输入和输出信号，就可以得到如图 0-2 所示的典型控制系统框图。由图 0-2 可知，任何一个自动控制系统都包括执行元件、测量元件、功率放大器元件和补偿元件几大部分，我们将这些元件统称为自动控制元件。

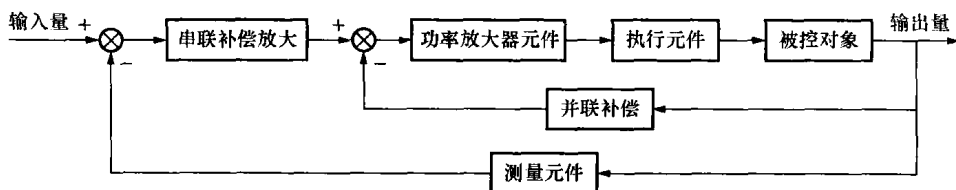


图 0-2 典型控制系统框图

图 0-3 所示为某工件加热用电炉炉温自动控制系统示意图。由给定环节给出的电压 u_r 代表所要求保持的炉温，它与表示实际炉温的测温热电耦的电压 u_f 相比较，形成误差电压 $\Delta u = u_r - u_f$ 。 Δu 经过放大器放大后带动电动机 M 向一定方向转动，并使调压器提高或降低加热电压，以使 u_f 达到 u_r 并使 $\Delta u = 0$ 。这时，电动机不再转动，自动调节系统达到新的平衡点。这里，电动机有一个正确的旋转方向问题，当 $u_r > u_f$ ，即 $\Delta u > 0$ ，此时表示炉温低于所要求保持的恒值，电动机的旋转方向应该使调压器的滑动触点向上，以增加加热电压。反之， $\Delta u < 0$ ，则滑动触点应向下移动以减少加热电压。这里，执行元件是电动机，测量元件是热电耦，放大元件是放大器，补偿元件在图中没有画出。

由于自动控制元件是构成自动控制系统的基础，无疑其性能将在很大程度上决定着整个系统的工作。所以现代控制系统对元件提出了高可靠性、高精度、快速性的要求。

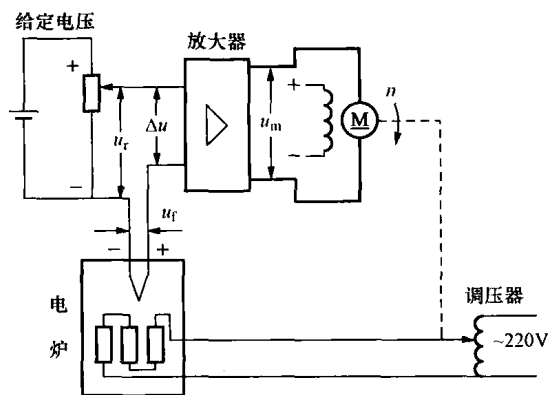


图 0-3 自动控温系统示意图

0.2 本书的主要内容

本书主要介绍自动控制系统中常见的电磁类执行元件和测量元件。这些元件是在磁场参与下进行机械能与电能或电能与电能之间的转换，它们是利用电和磁的原理进行工作的元件，我们把这类元件统称为电磁元件。常见的电磁类执行元件包括拖动电动机中的直流电动机、交流电动机和同步电动机三大电动机以及控制微电动机（也称控制电动机）中的伺服电动机、步进电动机、无刷直流电动机、直线电动机等，常见的电磁类测量元件包括控制电机中的测速发电机、旋转变压器、自整角机和感应同步器等。有的元件，如测速发电机，既可做测量元件，也可做反馈补偿元件。而放大元件（装置）和大部分补偿元件（装置）均由电子线路组成，或是由计算机实现，这些内容在电子技术、电力电子技术、自动控制原理及计算机控制等课程中有详细介绍，本书不再赘述。

必须说明的是：为了适应教学改革，编著本书旨在将电机与拖动、自动控制元件两门课程融会贯通，合二为一，故本书对电机与拖动内容要有所侧重。实际上，拖动电机、控制电机就是执行元件。

自动控制元件这门课程涉及的知识面广，实用性强。本书将从结构、原理、特性和应用实例四个方面介绍常用的控制元件。希望同学们通过本门课程的学习，对所介绍的控制元件能够做到了解结构，熟悉原理，掌握特性，正确使用。

0.3 预 备 知 识

1. 感应强度（或磁通密度） B

磁场是由电流产生的。描述磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度 B 。为了形象地描绘

磁场, 采用磁感应线或称磁力线, 磁力线是无头无尾的闭合曲线。图 0-4 中画出了直线电流, 圆电流及螺线管电流产生的磁力线, 分别如图 (a)、(b)、(c) 所示。

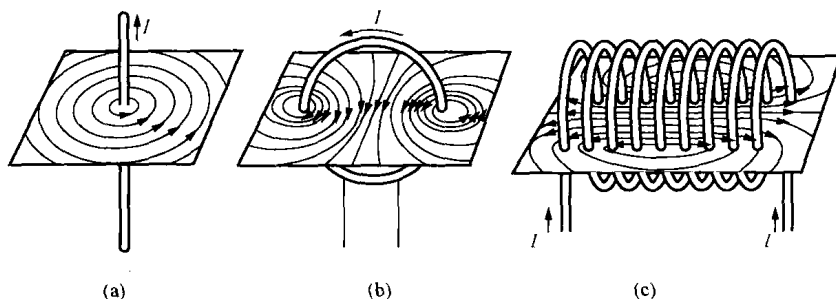
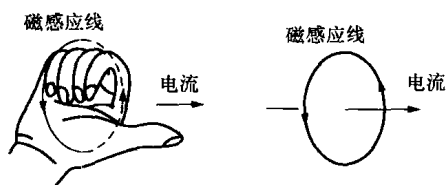


图 0-4 电流磁场中的磁力线

磁感应强度 B 与产生它的电流之间的关系用毕奥—萨伐尔定律描述, 磁力线的方向与电流的方向满足右手螺旋关系, 如图 0-5 所示。



2. 磁场强度 H

计算导磁物质中的磁场时, 引入辅助物理量磁场强度 H , 它与磁密 B 的关系为

$$B = \mu H \quad (0-1)$$

图 0-5 磁力线与电流的右手螺旋关系 式中 μ ——导磁物质的磁导率。

真空的磁导率为 μ_0 。铁磁材料的 $\mu \gg \mu_0$, 例如铸钢的 μ 约为 μ_0 的 1000 倍, 各种硅钢片的 μ 约为 μ_0 的 6000~7000 倍。国际单位制中磁场强度 H 的单位名称为安 [培]/米, 单位符号 A/m。

3. 安培环路定律 I

在磁场中, 沿任意一个闭合磁回路的磁场强度线积分等于该回路所环链的所有电流的代数和, 即

$$\oint_l H dl = \sum I \quad (0-2)$$

式中 $\sum I$ ——该磁路所包围的全电流。

因此, 这个定律也叫全电流定律。工程应用中遇到的磁路, 其几何形状是比较复杂的, 直接利用安培环路定律的积分形式进行计算有一定的难度。为此, 在计算磁路时, 要进行简化。简化的办法是把磁路分成几段, 几何形状规则的为一段, 找出它的平均磁场强度, 再乘上这段磁路的平均长度, 得磁位降 (也可理解为一段磁路所消耗的磁通势)。最后把各段磁路的磁位降加起来, 就等于总磁通势, 即

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum I = IW \quad (0-3)$$

式中 H_k ——磁路里第 k 段磁路的磁场强度, A/m;

l_k ——第 k 段磁路的平均长度, m;

IW ——作用在整个磁路上的磁通势, 即全电流数, 安匝;

W ——励磁线圈的匝数。

式 (0-3) 也可以理解为, 消耗在任一闭合磁回路上的磁通势, 等于该磁路所链着的全

部电流。

4. 铁磁材料的磁化特性

铁磁材料（如铁、镍、钴等）的磁导率 μ 比空气的磁导率 μ_0 大几千到几万倍。对于铁磁材料，磁导率 μ 除了比 μ_0 大得多外，还与磁场强度以及物质磁状态的历史有关，所以铁磁材料的 μ 不是一个常数。在工程计算时，不按 $H=B/\mu$ 进行计算，而是事先把各种铁磁材料用试验的方法，测出它们在不同磁场强度 H 下对应的磁密 B ，并画成 $B-H$ 曲线，称为磁化曲线，如图0-6所示。从图0-6(a)曲线1、曲线3看出，铁磁材料的 $B-H$ 曲线不是单值的，而是具有磁滞回线的特点，即在同一个大小的磁场强度 H 下，对应着两个磁密 B 值，这就是说，究竟是对应着哪一个磁密 B 值，还要看铁磁材料工作状态的历史情况。当铁磁材料的磁滞回线较窄时，可以用它的平均磁化曲线，即基本磁化曲线[见图0-6(a)中曲线2]进行计算。这样 B 与 H 之间便呈现了单值关系。顺便还要指出，磁化特性的另一个特点是具有饱和性。图0-6(b)是铁磁材料的原始磁化特性，它与平均磁化特性相差甚小。当磁场强度从0增大时，磁密 B 随磁场强度量增加较慢（图中0a段），之后，磁密 B 随 H 的增加而迅速增大（ab段），过了 b 点， B 的增加减慢了（bc段），最后为 cd 段，又呈直线。其中 a 称为跖点， b 点为膝点， c 点为饱和点。过了饱和点 c ，铁磁材料的磁导率趋近于 μ_0 。

磁滞回线较窄的铁磁材料属于软磁材料，如硅钢片、铁镍合金、铁淦氧、铸钢等。这些材料磁导率较高，回线包围面积小，磁滞损耗小，多用于作电机、变压器的铁心。硬磁材料，如钨钢、钴钢等，其磁滞回线较宽，主要用作永久磁铁。

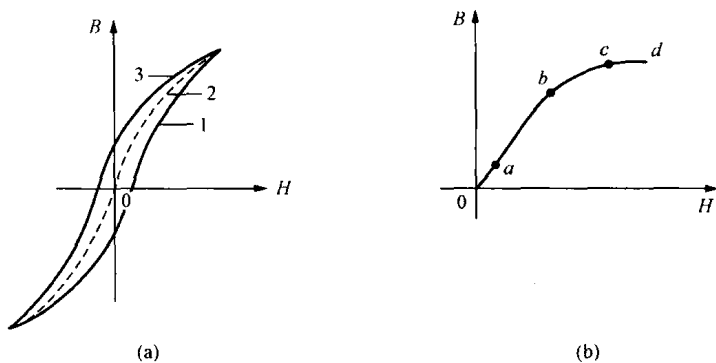


图0-6 铁磁材料的磁化特性

1—磁滞回线上升分支；2—平均磁化特性；3—磁滞回线下降分支

5. 磁感应通量（或磁通） Φ

穿过某一截面积 S 的磁感应强度 B 的通量，即穿过截面积 S 的磁力线根数称为磁感应通量，简称磁通，用 Φ 表示，即

$$\Phi = \int_S B dS \quad (0-4)$$

在均匀磁场中，如果截面积 S 与 B 垂直，如图0-7所示，则式(0-4)变为

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (0-5)$$

式中 B ——单位截面积上的磁通，称为磁通密度，简称磁密，在电机和变压器中常采用磁密。在国际单位制中， Φ 的单位名称为韦[伯]，单位符号Wb； B 的单位名称为[特斯拉]，单位符号T， $1T=1Wb/m^2$ 。

6. 简单磁路的计算方法

图0-8是一个最简单的磁路，它是由铁磁材料和空气两部分串联而成。铁心上绕了匝

数为 W 的线圈称为励磁线圈，线圈电流为 I 。进行磁路计算时，把这个磁路按材料及形状分成两段，一段截面积为 S 的铁心，长度为 l ，磁场强度为 H ；另一段是空气，长度为 δ ，磁场强度为 H_δ 。根据安培环路定律，则

$$Hl + H_\delta \delta = IW \quad (0-6)$$

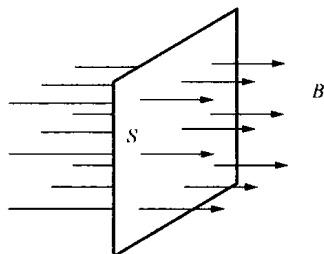


图 0-7 均匀磁场中的磁通

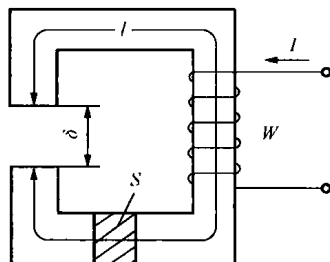


图 0-8 简单磁路

在电机或变压器里，磁路计算时，已知的是磁路里各段的磁通 Φ 以及各段磁路的几何尺寸（即磁路长度与横截面），求出所需的总磁通势 IW 。从式 (0-6) 看出，磁路长度 l 、 δ 以及匝数 W 是已知的，要求出电流 I ，必须先找出各段磁路的 H 和 H_δ 。具体计算时，根据给定各段磁路里的磁通 Φ ，先算出各段磁路中对应的磁通密度 B ($B = \Phi/S$, S 是截面积)，然后根据算出的磁通密度 B ，求磁场强度 H ($H = B/\mu$)。对于铁磁材料，可以根据其磁化特性查出磁场强度 H 。

7. 载流导体在磁场中的电磁力定律

磁场对场中载流导体施加的力称为电磁力，流过电流 i 的导体上取一小段为电流元，电流元所受电磁力的大小及方向由电磁力定律来描述，即

$$df = i dl \times B \quad (0-7)$$

式中 dl ——线元；

idl ——电流元，方向同电流 i 的方向；

B ——电流元所在处的磁感应强度；

df ——磁场对电流元的作用力。

在均匀磁场中，若载流直导体与 B 方向垂直、长度为 l ，流过的电流为 i ，载流导体所受的力为 f ，则

$$f = Bli \quad (0-8)$$

在电机学中用左手定则确定 f 的方向。即伸开左手，大拇指与其他四指成 90° ，如图 0-9 所示，如果磁力线穿过手心，其他四指指向导线中电流的方向，则拇指指向就是导体受力的方向。

8. 电磁感应定律

变化的磁场会产生电场，使导体中产生感应电动势，这就是电磁感应现象。在电机中电磁感应现象主要表现在两个方面：①导体与磁场有相对运动，导体切割磁力线时，导体内产生感应电动势，称为切割电动势；②线圈中的磁通变化时。线圈内产生感应电动势。下面介绍这两种情况下产生的感应电动势的定性与定量的描述。

(1) 切割电动势。长度为 l 的直导体在磁场中与磁场相对运动，导体切割磁力线速度为 v ，导体处的磁感应强度为 B 时，若磁场均匀、直导线 l ，磁感应强度 B ，导体相对运动方

向 v 三者互相垂直，则导体中感应电动势为

$$e = Blv \quad (0-9)$$

在电机学中用右手定则确定电动势 e 的方向。即把右手手掌伸开，大拇指与其他四指成 90° 角，如图 0-10 所示，如果让磁力线穿过手心，拇指指向导体运动方向，则其他四指的指向就是导体中感应电动势的方向。

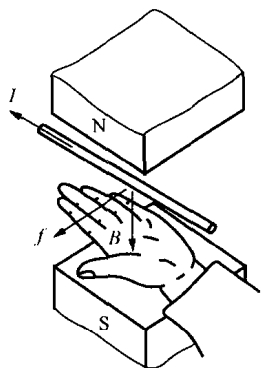


图 0-9 左手定则确定感应电动势

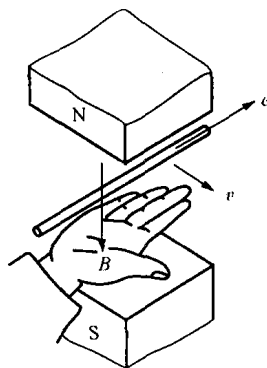


图 0-10 右手定则确定电磁力

(2) 变压器电动势。图 0-11 所示，匝数为 W 的线圈环链着磁通 Φ ，当 Φ 变化时，线圈 AX 两端感匝电动势 e ，其大小与线圈匝数及磁通变化率成正比。方向由楞次定律决定。当 Φ 增加时，即 $d\Phi/dt > 0$ ， A 点为高电位， X 点为低电位；当 Φ 减小时，即 $d\Phi/dt < 0$ ，根据楞次定律， X 点为高电位， A 点为低电位。为了写成数学表达式，首先规定电动势 e 的正方向。有以下两种方法。

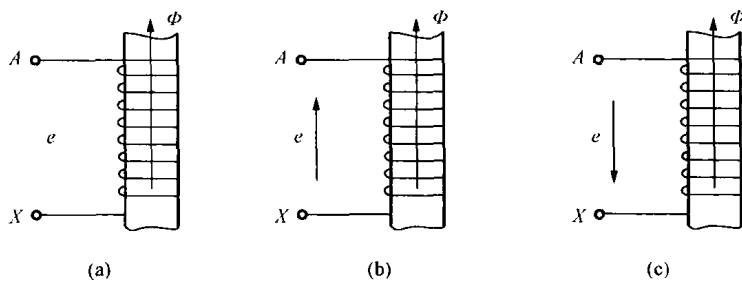


图 0-11 磁通及其感应电动势

1) 按左手螺旋关系规定 e 与 Φ 的正方向。如图 0-11 (b) 所示， e 的正方向从 X 指向 A 。与实际情况相比，当 $d\Phi/dt > 0$ 时，实际上是 A 点高电位， X 点低电位，而规定的 e 的正方向与之相同，这样 $e > 0$ ；当 $d\Phi/dt < 0$ 时，实际上是 A 点低电位， X 点高电位，而规定的 e 的方向正好与之相反，因此 $e < 0$ 。这样， $d\Phi/dt$ 与 e 的符号是一致的，同时为正或同时为负， e 和 Φ 之间的关系应为

$$e = W \frac{d\Phi}{dt}$$

2) 按右手螺旋关系规定 e 与 Φ 的正方向。如图 0-11 (c) 所示，此时 e 的正方向从 A 指向 X 。与实际情况相比，当 $d\Phi/dt > 0$ 时，实际上 A 点为高电位， X 点为低电位，而规定的 e 的正方向与实际方向相反，此时 $e < 0$ ；显然，当 $d\Phi/dt < 0$ 时， $e > 0$ ，这就是 $d\Phi/dt$ 与 e

总是不同符号， e 与 Φ 的关系式应为

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt}$$

以上两种不同正方向的规定下，数学式的符号不同。

思考题与习题

- 0 - 1 自动控制系统有哪几个基本元件？
- 0 - 2 自动控制系统对自动控制元件有何要求？
- 0 - 3 试对图 0 - 3 所示的炉温自动控制系统作出含有基本环节的功能框图。

第一篇 执行元件——拖动电机

电机是自动控制系统中一种最重要和最基本的元件，它包括发电机和电动机两大类。作为动力元件，发电机是电能的主要能源，它将机械能转换为电能；作为用电元件，电动机是主要的设备，它将电能转换为机械能来拖动生产机械。

第1章 直流电机

1.1 直流电机的结构

直流电机分为直流电动机和直流发电机两大类。从直流电机的主要结构来看，发电机和电动机没有太大差别，主要是由定子（静止的）部分、转子（旋转的）部分和气隙组成。对电机来说，固定不动的部分称为定子；旋转的部分称为转子，定子与转子间的空隙称为气隙。结构图和基本组成如图 1-1 和图 1-2 所示。

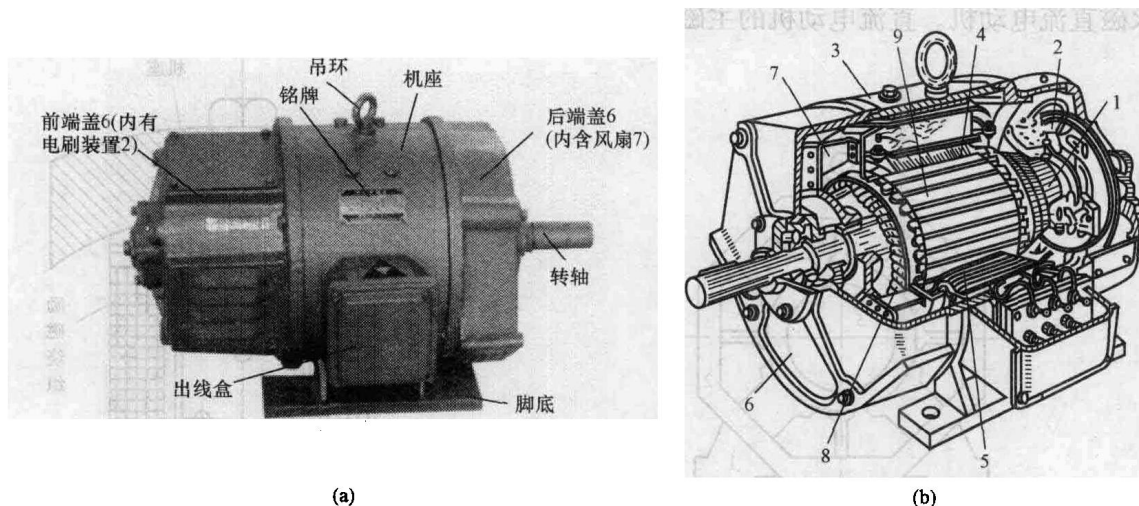


图 1-1 直流电机结构图

(a) 实物图；(b) 装配图

1—换向器；2—电刷装置；3—机座；4—主磁极；5—换向极；6—端盖；7—风扇；8—电枢绕组；9—电枢铁心

1.1.1 定子部分

1. 机座

机座用来固定主磁极和换向极，并借助它与底座相连以固定电动机。机座由铸钢或钢板制成，它是磁路的一部分，故称之为定子磁轭。机座两端装有端盖以保护绕组，中小型电动机端盖中装有轴承以支撑电枢。多边形机座示意图如图 1-3 所示。

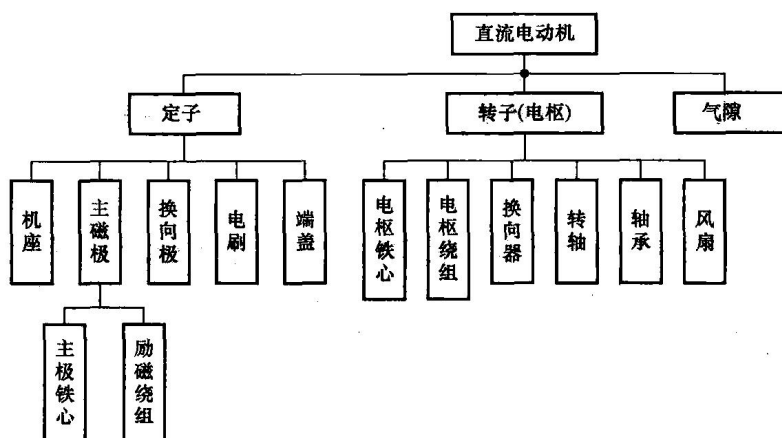


图 1-2 直流电动机的基本组成

2. 主磁极

固定在电动机外壳内部的磁极，由主磁极铁心和励磁绕组两部分组成，其作用是产生磁场。主磁极总是成对出现，用 p 代表磁极对数，如四极电动机 $p=2$ ，直流电动机可以做成多对磁极。转子转动时，因齿与槽相对于主磁极铁心在不断地变动，即磁路的磁阻在不断变化，从而在主磁极铁心中将引起涡流损耗。为了减小涡流损耗，主磁极铁心常用 1.5mm 厚的低碳薄钢板叠压而成。主磁极上有励磁绕组，多数直流电动机都是由励磁绕组通以直流电流来建立主磁场，只有小功率直流电动机的主磁极会用永久磁铁，由永久磁铁做成的电动机叫永磁直流电动机。直流电动机的主磁极如图 1-4 所示。

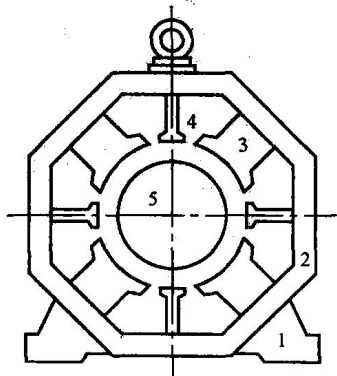


图 1-3 多边形机座示意图

1—机座；2—磁轭；3—主极；4—换向极；5—电枢

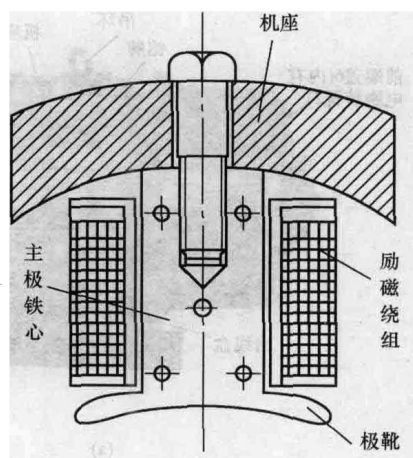


图 1-4 直流电动机的主磁极

3. 换向极

换向极又称附加极，用以产生换向磁场，改善电动机的换向，减小换向火花。换向极放置在主磁极间，铁心大多用整块钢加工而成，大型直流电动机也采用硅钢片叠压而成。换向绕组与电枢绕组串联，电流较大，一般用铜线或扁铜线绕制而成。

4. 电刷

电刷有两个作用：其一是把转动的电枢与静止的外电路相连接，使电流经电刷流入电枢或从电枢流出；其二是它与换向器配合而获得直流电压。电刷常用具有光滑接触特性的石