

自 动 控 制 元 件

叶瑰昀 主编



A1014783

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

自动控制元件/叶瑰昀主编. —哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2002
ISBN 7-81073-342-7

I. 自... II. 叶... III. 自动控制系统-控制元件
-高等学校-教材 IV. TP214

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 057619 号

内 容 简 介

本书详尽地介绍了自动控制系统中常用的以电磁理论为基础的控制元件。重点讨论了它们的静态特性和动态特性,并对每种元件的选择和使用方法做了详细的介绍。

根据现代自动化技术的发展状况及要求,在本书中增加了控制系统中常用传感器的内容。同时对近年来出现的一些高效实用的新型控制元件做了详细的介绍。

本书可作为自动化、测控技术与仪器、探测制导与控制等专业的教材,也可从事自动控制专业的工程技术人员提供必要的参考。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001
新华书店经销
地矿部黑龙江测绘印制中心印刷厂印刷

*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 17.75 字数 450 千字
2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷
印数:1~3 000 册
定价:22.00 元

前 言

本教材是根据 1999 年修订的自动化专业《自动控制元件》课程的教学大纲编写的(已列入哈尔滨工程大学“十五”规划出版教材),主要是供自动化、测控技术与仪器、探测制导与控制等专业的师生作为教材之用,也可从事自动控制专业的工程技术人员提供参考。

本教材详细分析了各种自动控制系统中常用的以电磁理论为基础的元件(如直流伺服电动机、直流测速发电机、步进电动机、旋转变压器、自整角机、交流伺服电动机)的基本结构组成、工作原理、静态特性和动态特性,以及选择和使用方法。并且在此基础上,根据现代自动化技术的发展状况,增加了自动控制系统中常用的传感器一章,同时用相当大的篇幅介绍了一些常用的新型控制元件。从而加大了教材的信息量,使教材具有内容新、知识面宽等特点。

由于本教材主要用于教学之中,因而在每一章中均配有适当的习题和思考题,力求使读者通过解这些习题加深对教材中基本概念和原理的理解和掌握。

本教材由哈尔滨工程大学自动化学院叶瑰昀副教授主编,书中绪论、第一、二章由田凯编写;第三、六章由池海红编写;第七章由马忠丽编写;第四、五、八章由叶瑰昀编写。

哈尔滨工程大学的彭侠夫教授详细审阅了本书全部底稿,并提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

在编写过程中,得到哈尔滨工程大学李文秀教授、王科俊教授以及教研室各位同事的大力支持和帮助,在此致以诚挚的谢意。

本教材的编写过程中,参阅了大量相关中外文献,并引用了许多参考文献中的有关内容,对此编者表示了感谢。

限于作者的知识水平以及编写经验不足,书中难免还存在一些缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

2002 年 6 月

目 录

绪 论	1
§ 0-1 控制元件在自动控制系统中的作用	1
§ 0-2 本书主要内容	4
§ 0-3 预备知识	4
第一章 直流伺服电动机	12
§ 1-1 直流电机基本原理	13
§ 1-2 直流伺服电动机的静态特性	25
§ 1-3 直流伺服电动机的动态特性	32
§ 1-4 直流伺服电动机的选择	38
§ 1-5 直流力矩电动机	42
习题	50
第二章 直流测速发电机	51
§ 2-1 直流测速发电机的输出特性	52
§ 2-2 输出特性的误差分析	54
§ 2-3 直流测速发电机在控制系统中的应用	58
§ 2-4 直流测速发电机的选择	60
习题	62
第三章 步进电动机	63
§ 3-1 反应式步进电动机的工作原理	65
§ 3-2 步进电动机的静态特性	69
§ 3-3 步进电动机的动态特性	75
§ 3-4 步进电动机的驱动电路	86
§ 3-5 步进电动机的选择	90
习题	92
第四章 旋转变压器	93
§ 4-1 变压器工作原理	93
§ 4-2 旋转变压器结构和分类	100
§ 4-3 正余弦旋转变压器	101
§ 4-4 线性旋转变压器	108
§ 4-5 旋转变压器的应用	109
§ 4-6 旋转变压器的选用	112
§ 4-7 多极旋转变压器及其在随动系统中的应用	114
习题	118
第五章 自整角机	120
§ 5-1 力矩式自整角机	121

§ 5-2 力矩式自整角机的故障分析·····	129
§ 5-3 控制式自整角机·····	137
§ 5-4 自整角机的选择·····	143
习题·····	147
第六章 交流伺服电动机·····	149
§ 6-1 交流伺服电动机的工作原理·····	149
§ 6-2 两相绕组的圆形旋转磁场·····	152
§ 6-3 圆形旋转磁场作用下的电动机特性·····	157
§ 6-4 椭圆旋转磁场及其分析方法·····	168
§ 6-5 交流伺服电动机的控制方法及静态特性·····	176
§ 6-6 交流伺服电动机的动态特性·····	186
§ 6-7 交流伺服电动机的选择·····	187
习题·····	193
第七章 传感器·····	195
§ 7-1 霍尔传感器·····	195
§ 7-2 温度传感器·····	199
§ 7-3 压力传感器·····	209
§ 7-4 流量计·····	213
§ 7-5 湿敏传感器·····	218
§ 7-6 加速度计·····	221
§ 7-7 陀螺仪·····	223
习题·····	228
第八章 新型控制元件·····	230
§ 8-1 低惯量直流伺服电动机·····	230
§ 8-2 无刷直流电动机·····	232
§ 8-3 光电脉冲测速机·····	246
§ 8-4 位置测量元件与其轴角编码器·····	251
§ 8-5 新型传感器·····	264
习题·····	277
参考文献·····	278

绪 论

§ 0 - 1 控制元件在自动控制系统中的作用

一、自动控制元件的定义和分类

随着科学技术的迅猛发展,自动控制系统在工业、农业、交通、航海、航空、航天及国防等各种领域中的应用日趋广泛。尽管它们的功能和结构不同,但基本组成均包括指令机构、控制器、放大器、执行机构、检测装置和被控对象等部分(图 0 - 1)。

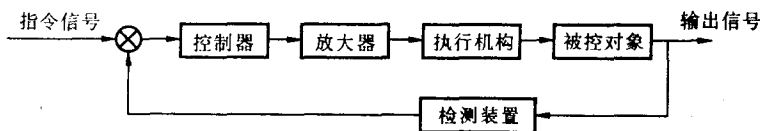


图 0 - 1 典型控制系统基本组成方框图

自动控制系统各部分功能是:指令机构发出的指令信号与检测装置检测的被控量(输出信号)之差,经过控制器的处理(校正)以满足一定的控制品质,由放大器将该信号放大后驱动执行机构,使被控对象的被控量跟随指令信号变化。

从以上各部分在系统中的功能和作用可知,任何一个自动控制系统都包括大量的检测、放大、执行和校正几个部分,实现这些部分功能的元件统称为自动控制元件。与上述功能相对应的元件称为测量元件、放大元件、执行元件和校正元件。

自动控制元件有很多类型,通常它们可以从能量转换的形式进行分类。自然界有多种形式的能量(如机械能、电能、磁能、化学能、核能等),其中一部分元件是在磁场参与下进行机械能与电能之间或电能与电能之间转换。它们是利用电和磁的原理进行工作的元件,这类元件统称为电磁元件。电磁元件在自动控制系统中应用最多,是自动控制元件中最重要的部分。本书将对典型的电磁元件进行介绍。

为了学习方便,可以按各种分类原则对电磁元件进行分类。

1. 按作用分类

- (1) 功率元件:进行电 - 机能量转换的元件,如力矩电机、三相异步电动机等。
- (2) 信号元件:进行机 - 电能量转换的元件。如测速发电机、自整角机、旋转变压器等。

2. 按电流分类

- (1) 直流元件:如直流电动机、直流无刷电机等。
- (2) 交流元件:如自整角机、两相伺服电动机等。
- (3) 脉冲元件:如步进电机等。

二、控制元件在自动控制系统中的作用

自动控制系统特别是计算机自动控制系统已成为现代科学技术、军事工程和现代工业等领域不可缺少的部分。因而自动控制元件在大型飞机、船舶、导弹、人造卫星、汽车、机床、机器人、家用电器等各种控制系统中得到广泛的应用。下面结合具体实例说明控制元件在自动控制

系统中的重要作用。

1. 防空天线 - 火炮控制(指挥) 系统

现代武器正朝着威力大、速度快、准确度高方向发展,只靠人的脑力和体力是不行的,必须借助于自动控制技术来实现。防空天线 - 火炮控制系统就是由雷达、指挥仪和火炮随动系统组成的现代武器系统,它可以有效地击中目标。该系统包括:

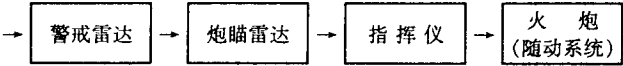


图 0-2 防空天线 - 火炮控制系统方框图

警戒雷达 — 远距离发现目标,将其粗略的方位、高度、距离等参数发送给炮瞄雷达;

炮瞄雷达 — 近距离精确地测得目标位置的雷达,它能发现并测得目标的方位角、高度角和斜距离,并将这些参数发送给指挥仪;

指挥仪 — 现代的指挥仪是一台计算机系统。它接收炮瞄雷达传来的信号,迅速而准确地计算出目标的未来点位置(方位角、高低角和斜距离),并把参数发送给火炮随动系统。

火炮随动系统 — 根据指挥仪传输来的目标位置信号,火炮随动系统将炮身转向目标的未来点方向,发射炮弹,击毁目标。

上述四部分组成的防空指挥系统的每一部分都是一个精密的控制系统,本书仅将火炮方位随动系统略述如下(图 0-3)。

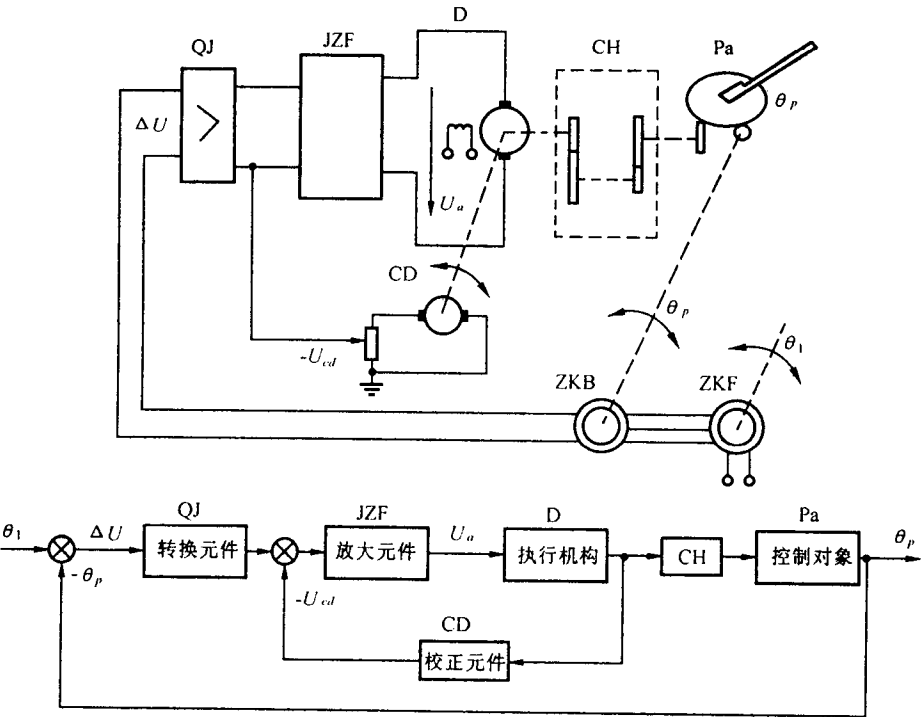


图 0-3 火炮随动系统(方位角) 原理及其方块图

QJ—前放和解调;JZF—晶闸管功放;D—伺服电动机;CH—减速机械;Pa—火炮;
ZKF—自整角发送机;ZKB—自整角变压器;CD—测速发电机

若系统各元件处于相对稳定的初始状态,即“火炮炮身”方位为 $\theta_p = 0^\circ$,“自整角机对”也处于协调位置, $\theta_i = 0^\circ$ 。显然“误差电压”也为零。若此刻目标在方位 $\theta'_i = 15^\circ$ 处出现,自整角机发送机接到由指挥仪发出的控制信号,使其位置处于 $\theta'_i = 15^\circ$ 。于是“自整角机对”将产生相应的“偏差电压”(ΔU),经过解调和功率放大,作为控制电压将 U_c 加到直流电动机电枢绕组两端,电动机将向消除误差电压的方向旋转,经过减速装置拖动炮身,使 $\theta'_p = \theta'_i = 15^\circ$,从而使偏差电压为零,系统进入新的稳定状态。这时,炮身的方位已对准目标。如果结构类似的高低角随动系统也将炮身高低角置于适应位置,火炮便可以进入射击状态。

在系统中,还有一台直流测速发电机与直流伺服电动机同轴连接,它将把电动机的速度信号变换成电压信号,再负反馈到相应放大器的输入端。这个负反馈的作用将使控制系统的品质得到改善。

2. 导弹制导系统

导弹的制导系统是以导弹为控制对象的闭环系统,它主要由导引系统、控制系统和弹体组成(图 0-4)。

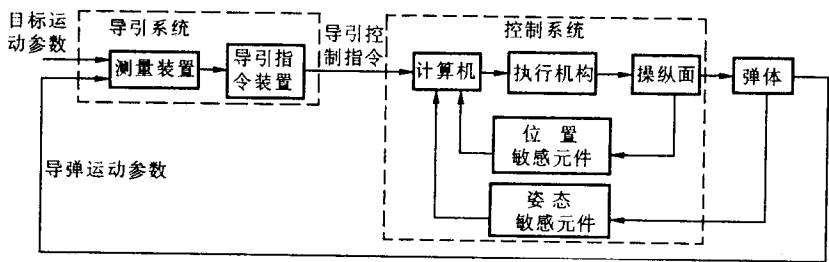


图 0-4 导弹制导系统基本组成方框图

导引系统一般由测量装置、导引指令装置组成,其功能是测量导弹相对理想弹道或目标的运动偏差,以形成预定的导引控制指令。

导弹控制系统一般由敏感元件(测量元件)、计算机和执行机构等组成。其主要功能是保证导弹在导引控制指令作用下沿着要求的弹道飞行,保证导弹的姿态稳定及不受各种干扰的影响。

3. 数控机床

数控机床一般由数控系统、包含伺服电动机和检测反馈装置的伺服系统,机床本体(包括主传动系统、强电控制柜)和各类辅助装置组成。(图 0-5)。

数控系统是机床实现自动加工的核心。主要有操作系统、主控制系统、可编程控制器、各类输入输出接口等组成。其控制方式又可分为数据运算处理控制和时序逻辑控制两大类,其中主控制器内的插补运算模块就是根据所读入的零件程序,通过译码、编译等信息处理后,进

行相应的刀具轨迹插补运算,并通过与各坐标伺服系统的位置、速度反馈信号比较,从而控制机床各个坐标轴的位移。而时序逻辑控制通常由可编程控制器(PLC)来完成,它根据机床加工过程中的各个动作要求进行协调,按各检测信号进行逻辑判别,从而控制机床各个部件有条不紊

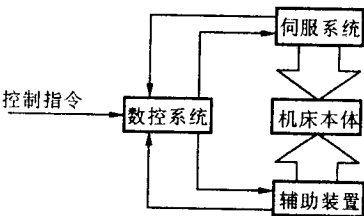


图 0-5 数控机床的组成示意图

紊地按序工作。

伺服系统是数控系统与机床本体之间的电传动联系环节。它主要由伺服电动机、驱动控制系统及位置检测反馈装置组成。伺服电动机是系统的执行元件,驱动控制系统则是伺服电动机的动力源。数控系统发出的指令信号与位置检测反馈信号比较后作位移指令,再经驱动控制系统功率放大后,驱动电动机运转,从而通过机械传动装置拖动工作台或刀架运动。

辅助装置主要由各类电气控制的刀具自动交换机、回转工作台、液压控制系统等组成,以完成不同的加工工艺。

从以上实例不难看出,无论哪种自动控制系统,控制元件均是系统重要的组成部分,它们在系统中起到了不可缺少的重要作用。随着科学技术的飞速发展,它们在各种自动控制系统中的作用会越来越重要。

§0-2 本书主要内容

本书作为自动化专业、检测技术专业本科生使用的技术基础课的教材,主要对各类典型控制元件(直流伺服电动机、直流测速发电机、步进电机、旋转变压器、自整角机、交流伺服电动机)的基本原理、简单结构、工作特性以及典型应用等予以介绍,并对传感器和新型控制元件(低惯量直流伺服电动机、无刷直流电动机等)作了简单介绍,使学生尽量接触更多的控制元件,增加科技新水平的信息量。

本书对各类控制元件的论述有很强的工程实践性,因此在学习中不但要较好地掌握其基本原理,而且对其结构、应用等方面也要给予充分的重视,并要掌握实验环节,加强动手能力。

§0-3 预备知识

电磁控制元件尽管种类繁多,但是它们在运行原理上,可以说是达到了惊人的统一。几乎所有的电磁控制元件在结构上都由两大部分构成:静止部分(定子)和运动部分(转子)。正如爱因斯坦所说:“一个理论体系的一切概念和一切关系,都归为尽可能小的逻辑上独立的基本概念和公理”,只要读者纯熟电路和电磁基本定理,并对电机运行原理基本掌握,学习本门课程将是不难的。为了承上启下,达到温故而知新的目的,本节将对铁磁物质的基本特性、磁路的基本物理量和基本定律进行简单介绍。

一、基本物理量

1. 磁感应强度 B

磁场是由电流或永磁体产生的。就其本质来说,一切磁现象都来源于电荷的运动。磁感应强度 B 是表征磁场强度强弱及方向的一个物理量,或称磁通密度(磁密),其国际单位是 T。

磁场中,不同地点的磁感应强度是不同的,为了形象地描绘出磁场中各处磁感应强度及方向的分布情况,可用该处磁力线的多少来表示。

图 0-6 为几种形状不同的导体,通入电流后产生磁力线的情况。

磁力线的方向与电流方向满足右手螺旋定则。磁力线上任意点的切线方向就是该点磁感应强度 B 的方向。

2. 磁通量 Φ

通过某一截面 S 的磁力线的总数称为磁通量 Φ ,简称磁通。其定义为

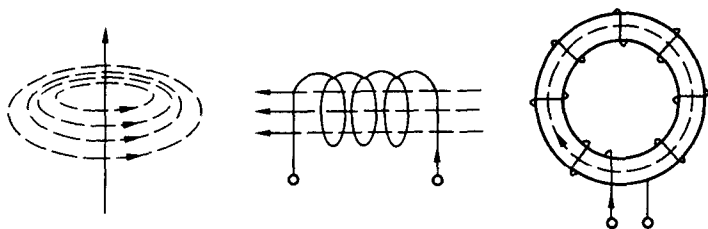


图 0-6 磁力线图
(a) 直导线; (b) 螺线管; (c) 环形线圈

$$\Phi = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (0-1)$$

磁通的单位为 Wb。

3. 磁场强度 H

磁场强度是用来表示磁场中各点磁力大小和方向的一个物理量,与磁感应强度不同,它的大小与磁场中磁介质的性质无关,仅与产生磁场的电流大小和载流导体的形状有关。

磁场强度与磁感应强度之间关系为

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu} \quad (0-2)$$

磁场强度 H 的单位是 A/m, μ 为磁导率。

4. 磁导率 μ

磁导率 μ 是用于衡量物质导磁能力的物理量。物质按导磁性能的不同分为铁磁物质(铁、钴、镍及其合金)和非铁磁物质(铁磁物质以外的其它物质,如铜、铝、橡胶等各种绝缘材料及空气等)两类。非铁磁物质的磁导率 μ 与真空的磁导率 μ_0 相差很小,工程上通常认为二者相同。

铁磁物质的磁导率 μ 要比真空的 μ_0 大很多倍(几百 ~ 几万倍不等),因此工程上用铁磁物质做成各种形状的磁路,以便使磁通能集中在选定的空间,以增强磁场。

磁导率的单位是 H/m。

真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$

二、磁性材料的主要特性

1. 高导磁性

磁性材料(铁、钴、镍及其合金)的磁导率 μ 是非磁性材料磁导率($\approx \mu_0$)的几百 ~ 几万倍,这就使它们具有被强烈磁化(呈现磁性)的特性。

下面用磁分子学说解释磁性物质为什么具有被磁化的特性。大家知道在物质的分子中由于电子环绕原子核运动和本身自转运动而形成分子电流,分子电流也要产生磁场,每个分子相当于一个基本小磁铁。同时,在物质内部还分成许多小区域,这些小区域称为磁畴。由于磁性物质不同于其他物质,其分子间有一种特殊的作用力。在没有励磁电流(或外磁场)作用时,各个磁畴排列混乱,磁场互相抵消,对外就显示不出磁性来。当有励磁电流(或外磁场)的作用时,磁性物质每个磁畴内的分子磁铁都会顺外磁场方向转向,显示一定的磁性。

随着励磁电流的增大(或外磁场的增强),磁畴就逐渐转到与外磁场相同的方向上并整齐

地排列起来。这样,便产生了一个很强的与外磁场同方向的磁化磁场,而使磁性物质内的磁感应强度大大增加,这就是说磁性物质被强烈地磁化了。

2. 磁饱和性

铁磁材料的另一个磁特性可由磁化曲线或 $B-H$ 曲线来表示。例如,若一个没有磁化的铁磁物质制成的闭合环状铁心,将线圈均匀地缠绕在这一铁心上(图 0-7(a)),那么当改变通入绕圈内的电流 I 时,可以得到一条磁化曲线(图 0-7(b))。

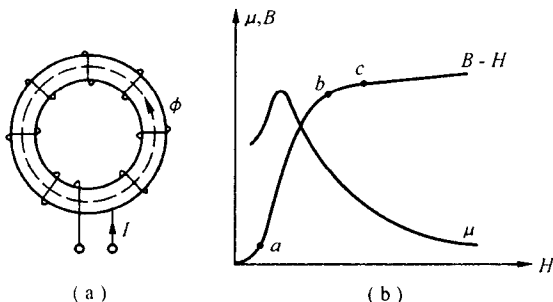


图 0-7 磁化曲线

(a) 闭合环状铁心及线圈;(b) 铁心的磁化曲线

随着通入线圈内电流 I 的增加,磁路内磁通增大,磁感应强度就增加。在开始阶段, B 随 H 的增加较慢,超过 a 点后再增大线圈电流则 B 迅速增长,超过 b 点之后增长减慢,并逐渐趋于饱和。 $B-H$ 曲线上的 b 点称为膝点, c 点称为饱和点。当磁路内的磁感应强度 B 的数值超过 c 点所对应的数值后,励磁电流 $I(H)$ 继续增大, B 值增加不多,这种情况称铁磁物质达到饱和。这是因为磁性物质由于磁化所产生的磁化磁场不会随着外磁场的增强而无限地增强。当外磁场(或励磁电流)增大到一定值时,全部磁畴的磁场方向与外磁场的方向一致。这时磁化磁场的磁感应强度即达到饱和值。在实际应用中,我们应当避免磁路内的 B 值在饱和点以上,同时也应当注意磁路内的 B 值不应过低。通常将磁路内的磁密选择在 $B-H$ 曲线膝部或稍高一些。

$B-H$ 曲线不是直线,即 B 和 H 的比值 μ (磁导率)不是常数, μ 随 H 改变的情况如图 0-7(b) 所示。在磁化的起始阶段 μ 数值较小,随着 H 的增加, μ 值迅速增加达到最大值, H 再继续增加后, B 值接近饱和,而 μ 值反而下降,所以铁磁物质的 μ 值不是常数,其值的大小与磁场强度及铁磁物质的磁状态的情况有关。

铁磁材料的 $B-H$ 曲线不是直线,即 B 和 H 的比值 μ (磁导率)不是常数, μ 随 H 改变的情况如图 0-7(b) 所示。在磁化的起始阶段 μ 数值较小,随着 H 的增加, μ 值迅速增加达到最大值, H 再继续增加后, B 值接近饱和,而 μ 值反而下降,所以铁磁物质的 μ 值不是常数,其值的大小与磁场强度及铁磁物质的磁状态的情况有关。

3. 磁滞性

当图 0-7(a) 所示铁心线圈内的电流大小及方向改变时,磁场强度将循环地在 $+H_m$ 和 $-H_m$ 之间变化,这时就得到一个对称原点的闭合磁化曲线(图 0-8),该曲线称为铁磁物质的磁滞回线。

铁磁物质反复磁化时,磁化过程的上升段 $a \rightarrow b$ 或 $(d \rightarrow e)$ 与下降段 $b \rightarrow c$ 或 $(e \rightarrow f)$ 不重合,即 H 减为零时, B 减小到 B_r 。 B_r 称剩磁,只有反向去磁的磁场强度达到 $-H_c$ 时剩磁才会消失。在反复的磁化过程中, B 的变化落后于 H ,这种现象称为磁滞现象,由此测试出的闭合磁化曲线称为磁滞曲线。

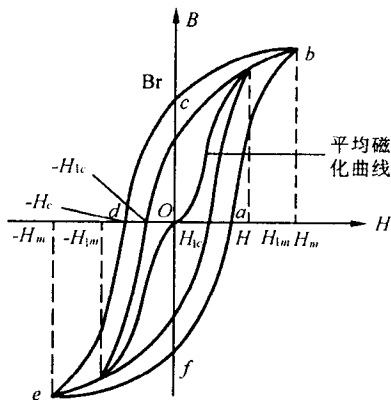


图 0-8 磁滞回线

若增大 H_m 或减小 H_m 可以得到不同的磁滞回线。

为了便于磁路计算,实际工程中应用“平均磁化曲线”进行磁路计算。平均磁化曲线是由不同 H_m 值的磁滞回线顶点相连的一条曲线。每种磁性材料的平均磁化曲线是确定的。

三、磁路及其基本定律

在电工技术中,利用磁性物质的高导磁性,制成一定形状的导磁的路径,可以认为磁通将主要集中在该路径内闭合,这个路径是磁通的主要路径。而周围空间磁通很少,它们在铁心外通过空气隙闭合,这是磁通的次要路径。这两种路径即凡是磁通经过的路径统称为磁路。通过主要路径的磁通称为主磁通,用 Φ_0 或 Φ 表示。通过次要路径的磁通称为漏磁通,用 Φ_σ 表示。图 0-9 给出了三种典型电磁元件的磁系统。图(a) 为拍合式电磁铁,图(b) 为直流电机,图(c) 为变压器。它们的磁路一般都包括一定形状的铁磁材料和气隙两部分。我们把这种主要由铁磁材料和线圈以及气隙等组成的整体称为磁系统。

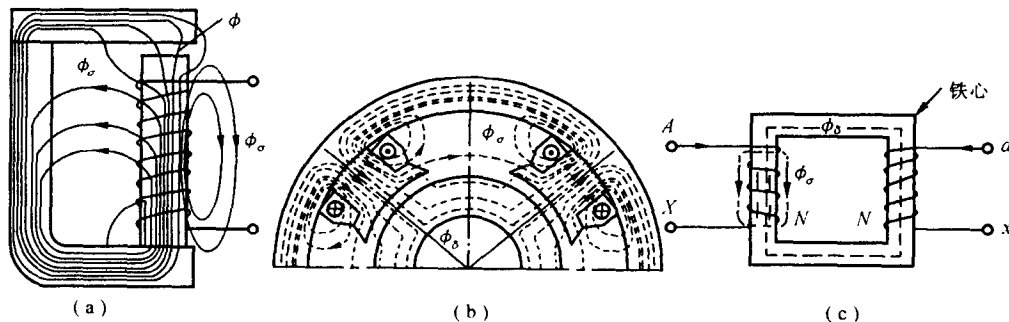


图 0-9 典型电磁元件的磁系统
(a) 拍合式电磁铁; (b) 直流电机; (c) 变压器

磁路的基本定律与磁场的基本定律相对应,磁路的基本定律都可直接从磁场的基本定律转化而得到。

1. 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律与磁场的磁通连续定律(高斯定律) 相对应。

磁通连续定律是磁场的一个基本性质,即在磁场中任何闭合面上的磁通代数和恒等于零,或者说进入闭合面的磁通等于离开闭合面的磁通,其表达式为

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad \text{或} \quad \sum \Phi = 0$$

上式规定,进入闭合面的磁通取负号,离开闭合面的磁通取正号,如图 0-10(a) 所示。

将这个原理应用到图 0-10(b) 中的封闭曲面 A 处,则有

$$-\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

而这里的封闭曲面 A 就是一段有分支磁路,如果把分支处看成磁路的一个节点,则汇聚在该节点上磁通的代数和必恒等于零。推广一般,即磁场的磁通连续定律可相应为磁路基尔霍夫第一定律,则汇聚在任一节点上磁通的代数和恒等于零,即

$$\sum \Phi_i = 0$$

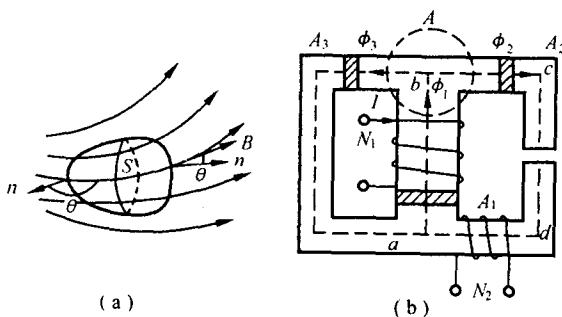


图 0-10 磁通连续定律应用举例

式中 i 为支路数

2. 欧姆定律和基尔霍夫第二定律

欧姆定律和基尔霍夫第二定律是与磁场的安培环路定理相对应。安培环路定理表明磁场强度 H 与励磁电流 I 之间的关系,其表示式为

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (0-3)$$

当线圈有 N 匝时,则式(0-3)变为

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum IN \quad (0-4)$$

就是说磁场强度 H 沿某一闭合路径 l 的线积分,等于路径 l 所包围的电流 I 的代数和。当电流的参考方向与闭合路径规定的方向符合右手螺旋定则时,电流 I 取正号,反之取负号。

当磁路各点的磁场度 H 方向与路径 l 的方向一致时,则磁场强度 H 沿指定路径 l_{ab} 的线积分,即由 a 至 b 线积分定义为磁场中 a 与 b 间的磁压降 U_{ab} 为

$$U_{ab} = \int_a^b \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$$

在均匀磁场中,则有

$$U_{ab} = Hl_{ab}$$

如果磁路是由不同截面的几段组成,则上式可写成磁路的形式。

$$\sum_{i=1}^n H_i l_i = \sum_{i=1}^n \Phi_i R_i = \sum_{i=1}^n \Phi_i / \Lambda_i = \sum_{i=1}^n U_i = \sum IN$$

式中 $R_i = l_i / \mu_i S_i$ —— 第 i 段磁路的磁阻(1/H);

$\Lambda_i = 1/R_i$ —— 第 i 段磁路的磁导(H) 或(Wb/A);

U_i —— 第 i 段磁路的磁压降(V);

$\sum IN$ —— 磁路的磁动势(安匝)。

而表达式

$$\Phi_i R_i = \Phi_i / \Lambda_i = U_i \quad (0-5)$$

是安培环路定律在无分支磁路中以 Φ , U 等表示的形式,也称为磁路的欧姆定律。而表达式

$$\sum U_i = \sum IN \quad (0-6)$$

即为磁路基尔霍夫第二定律。它表示在闭合磁路中,沿某一环线方向磁压降的代数和等于磁动势的代数和。

必须指出,每段磁路磁压降 U_i 有 Hl 或 $\Phi R = \Phi / \Lambda$ 两种表达形式。在磁路计算中,对于导磁体的磁压降均采用 Hl 的形式,即要利用铁磁材料的磁化曲线由 B 值查到对应的 H 值,再乘以导磁体中的磁路长度 l ,这是非线性的计算方法。对于气隙的磁压降则采用 ΦR 的形式,因为气隙的磁导率 μ_0 是常数,故当气隙长度不变时,其磁阻值是不变的,具有线性性质。

因此,对于有气隙的磁路,式(0-6)可以表示为

$$\sum IN = \sum_{i=1}^n H_{mi} l_{mi} + \sum_{i=1}^m \Phi_{\delta i} / \Lambda_{\delta i} = U_m + U_{\delta} \quad (0-7)$$

式中 H_{mi} —— 第 i 段导磁体中的磁场强度(A/m);

l_{mi} —— 第 i 段导磁体的长度(m);

Φ_j ——第 j 段气隙中的磁通(Wb);
 $\Lambda_j = 1/R_j$ ——第 j 段气隙的磁导(Wb/A);
 U_m ——导磁体的总磁压降(V);
 U_δ ——气隙的总磁压降(V)。

式中各项正负号规定如下:先规定各回路环线的方向,如果回路中各段磁通 Φ (或 H) 的正方向与规定环线方向一致,则该段的磁压降为正;当线圈磁动势的正方向与环线方向一致时,则该线圈的磁动势为正,而磁动势正方向和线圈电流正方向应符合右手螺旋关系。

由上可知,磁路计算中所用到的概念和定律在形式上与电路非常相似,表 0-1 列出电路与磁路的对应关系。

表 0-1 电路与磁路对应表

电 路	磁 路
电动势 $E(V)$	磁动势 $F(F = IN)(A)$
电流 $I(A)$	磁通 $\Phi(Wb)$
电阻 $R(R = \rho l/S)(\Omega)$	磁阻 $R_i(R_i = \frac{l_i}{\mu_i S_i})(1/H)$
电导 $G(G = 1/R)(1/\Omega)$	磁导 $\Lambda_i(\Lambda_i = 1/R_i)(H)$
欧姆定律 $U = IR$	磁路欧姆定律 $U_i = \Phi_i R_i$
基尔霍夫第一定律 $\sum I = 0$	磁路基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi = 0$
基尔霍夫第二定律 $\sum E = \sum U$	磁路基尔霍夫第二定律 $\sum IN = \sum U$

考虑到目前电磁学中还有电磁单位制的使用,表 0-2 列出国际单位制与电磁单位制的换算关系,以便考查,本书一律采用国际单位制。

表 0-2 磁量的基本单位及换算关系

名 称	国际单位制	电磁单位制	换算关系
磁通 Φ	$Wb = V \cdot S$	Ma	$1Wb/m^2 = 10^8 Ma$
磁感强度 B	$T = Wb/m^2$	$Gs = Ma/cm^2$	$1Wb/m^2 = 10^4 Gs$
磁场强度 H	A/m	$1.25Oe = A/cm$	$1A/m = 10^{-2} A/cm = 1.25 \times 10^{-3} Oe$
磁导率 μ	$Wb/A \cdot m = H/m$	$Ma/A \cdot cm$	$1Wb/A \cdot m = 10^6 Ma/A \cdot cm$
空气磁导率 μ_0	$1.25 \times 10^{-6} H/m$	$1.25 Ma/A \cdot cm$	—
磁压降 U	A	A	—
磁导 Λ	$H = Wb/A$	Ma/A	$1Wb/A = 10^8 Ma/A$

3. 电磁感应定律

通过一个线圈的磁通量 Φ 与线圈匝数 W 的乘积一般称为磁链,记为 ψ ,即 $\psi = W\Phi$ 。若磁

通(或磁链)通过了线圈所包围的面,就说磁通(或磁链)和线圈交链(或称匝链、相链、环链)。

如果一个线圈位于磁场中,就会有許多磁力线穿过该线圈而与它交链。如果有許多部分磁通各自交链该线圈的不同匝数,则该线圈的总磁链数为

$$\psi = \sum W_i \Phi_i \quad (0-8)$$

式中 Φ_i —— 某一部分磁通;

W_i —— Φ_i 所交链的匝数。

如果电势、电流取相同的正方向,并且它们与磁通的正方向之间符合右手螺旋定则,则电磁感应定律可写成

$$e = - \frac{d\psi}{dt} \quad (0-9)$$

若所有磁通 Φ 都交链线圈的全部匝数 W , 式(0-9) 便成为

$$e = - W \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-10)$$

线圈中的磁通变化可能有两种不同的方式:(1) 磁通本身就是由交流电流产生的,也就是说空间中任一点的磁通本身随时间变化;(2) 空间中各点的磁通本身虽不变化,但线圈处于不同位置时,通过它的磁通可能不同,由于线圈和磁场间有相对运动,线圈中的磁通在变化。一般说来,磁链可以看成是时间和位移的函数,即 $\psi = \psi(t, x)$, 所以有

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial t} dt + \frac{\partial \psi}{\partial x} dx \quad (0-11)$$

$$\text{故有} \quad e = - \frac{d\psi}{dt} = - \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} = - \frac{\partial \psi}{\partial t} - v \frac{\partial \psi}{\partial x} = e_T + e_R \quad (0-12)$$

式中 $v = dx/dt$ 为导体(线圈)与磁场间的相对速度。由此可见感应电势 e 可分为两部分, e_T

$= - \frac{\partial \psi}{\partial t}$ 称为变压器电势; $e_R = - v \frac{\partial \psi}{\partial x}$ 称为旋转电势或速度电势。

变压器为一特殊例子,它的线圈静止不动,速度电势为零,线圈中的感应电势仅有变压器电势 e_T 。直流电机为另一特例,在直流电机中间任一点的磁通对时间为恒定不变,变压器电势为零,线圈中的电势仅有速度电势。

一根长为 l 的导线在磁场中以速度 v 切割磁力线,当 B 、 L 、 v 互相垂直时有感应电势

$$e = Blv \quad (0-13)$$

若一个线圈本身的电流 i 所产生的磁链为 ψ , 则定义该线圈由磁链 ψ 所引起的电感 L 为

$$L = \frac{\psi}{i} \quad (0-14)$$

若线圈是空心线圈,周围没有铁磁材料,则 L 是常数,与电流无关,这时称这个线圈的电感是线性电感。这时感应电势为

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - L \frac{di}{dt} \quad (0-15)$$

若线圈周围有铁磁材料,则 L 就不是常数,它的大小随电流而变化,称为非线性电感。但是,若磁通的回路上有空气隙,空气隙的磁阻(或磁压 Hl) 远大于其他磁路段的磁阻(或磁压),这时由磁链 ψ 所引起的电感仍可看成是线性电感,式(0-15) 仍然适用。

4. 电磁力与电磁转矩

磁场中的载流导体所受的电磁力 F_e 为

$$F_c = BIl \quad (0-16)$$

式中 l 为导线长度, I 为导线中的电流, B 、 l 、 I 三者互相垂直。若这导线在电机的转子上, 导体至旋转轴的距离为 r , 则电磁转矩 T_c 为

$$T_c = BIlr \quad (0-17)$$

转矩也可由功率关系算得

$$T_c = \frac{P}{\omega} \quad (0-18)$$

式中 P ——电机转轴上的机械功率;
 ω ——转轴的角速度。

5. 圆柱面磁场间的力矩

图 0-11 表示两个同心圆柱面, 圆柱孔的内表面和圆柱体的外表面都是两极磁场。取两个异性磁极正好对齐的位置为磁场夹角 θ 的零值, 内圆柱体所受力矩为 T 。根据磁极间同性相斥、异性相吸的现象可以看出, 只要两个表面的磁极不是正好对齐, 两表面间就存在相互作用力矩 T 。 T 是 θ 的周期函数, 周期是 360° 。根据傅里叶级数理论, 可将 T 写成 θ 的一系列正弦函数之和, 其中基波为

$$T_1 = K \sin \theta \quad (0-19)$$

谐波的振幅比基波振幅小。如果谐波可以忽略, 则 T 与 θ 的关系就是式(0-19)。

图 0-12 表示的圆柱面具有四极磁场, 同样可以看出, T 仍是 θ 的周期函数, 但周期是

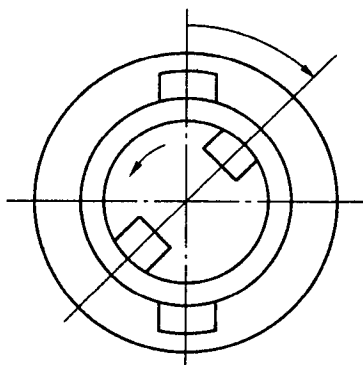


图 0-11 两极磁场

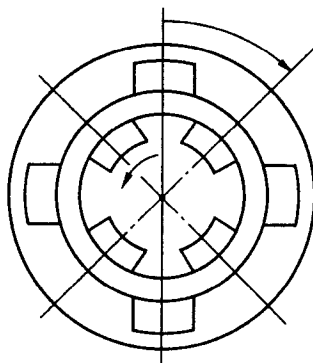


图 0-12 四极磁场

$\frac{360^\circ}{2}$, 其傅里叶级数中的基波表达式为

$$T_2 = K \sin 2\theta \quad (0-20)$$

同样, 若两圆柱表面的磁场是 p 对极, 其力矩的基波表达式为

$$T_p = K \sin p\theta \quad (0-21)$$

绝大部分电机中的力矩的产生都可以用上述圆柱面磁场来进行解释, 电机中的力矩 T 与磁场间的夹角 θ 的关系近似符合式(0-21)。

第一章 直流伺服电动机

电机是使机械能与电能相互转换的机械。从原理上讲,一台电机,不论是直流电机,还是交流电机,都可以在一种条件下作为发电机运行,把机械能转变为电能,而在另一种条件下作为电动机运行,把电能转变为机械能,这个原理叫做电机的可逆原理。

直流电动机把直流电能变为机械能,直流发电机把机械能变为直流电能。直流电动机和直流发电机在结构上没有差别。

历史上,最早的电源是电池,只能供应直流电能,所以直流电机的发展比交流电机早。后来交流电机发展比较快,这是因为交流电机与直流电机相比有很多优点,如易生产、成本低、能做到较大容量等。目前电站的发电机全部是交流发电机;用在各行各业的电机,大部分也都是交流电机。

由于直流电动机具有良好的调速特性、较大的起动转矩、相对功率大及快速响应等优点,尽管有结构复杂、成本较高的缺点,但是它在国民经济中仍占有重要地位,在自动控制系统中也获得了广泛的应用。特别是近年来,随着大功率晶闸管元件及其整流放大电路的成功运用,高性能磁性材料的不断问世,以及新型结构的设计,使得直流电动机控制性能更加改善。因此,在控制系统中的应用有了更新的发展。

直流电动机在自动控制系统中作为执行系统控制信号命令的元件,被称作执行元件(图 1-1)。又因为它执行命令的动作是使负载(或者说控制系统的“对象”)进入新的运行状态(随动系统)或保持原来的运行状态(恒值控制系统),因而,可以视其为控制对象“服务”的。这样,又把在控制系统中作为执行元件使用的直流电动机叫做直流伺服电动机。

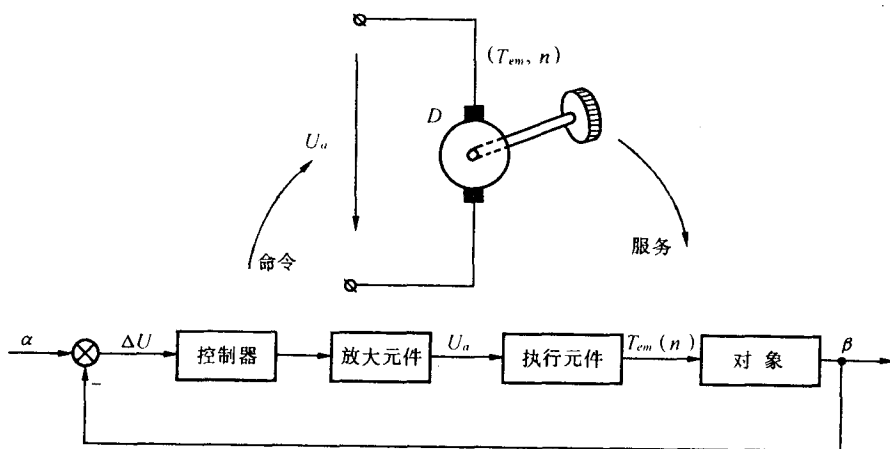


图 1-1 直流伺服电动机在控制系统中的位置

直流电动机有以下几方面的优点:1) 调速范围广,且易于平滑调节;2) 过载、起动、制动转矩大;3) 易于控制,控制装置的可靠性高;4) 调速时的能量损耗较小。