

电机与电磁器件

刘向群 编

北京航空航天大学出版社

电机与电磁器件

刘向群 编

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书主要内容是阐述自动控制系统中常用的各类电机和电磁器件的工作原理、特性、结构和应用等,其中包括直流电磁铁、直流继电器、直流伺服电动机、直流测速发电机、变压器、旋转变压器、自整角机、电磁传感器、磁放大器、三相异步电动机、交流伺服电动机、交流测速发电机、同步电动机等。

本书可作为工科自动控制专业和有关专业的教材或教学参考书,并可供有关工程技术人员自学和参考。

电机与电磁器件

DIANJI YU DIANCHI QIJIAN

刘向群 编

责任编辑 马晓虹

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

北京农业工程大学印刷厂印装

850×1168 1/32 84张, 9.75 字数, 260千字
1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷 印数, 4500册
ISBN 7-81012-116-2/TM·001 定价, 2.25元

前 言

本书是在总结多年教学经验的基础上编写的。在编写体系上，从电磁基本理论出发，将种类繁多的各类电机和电磁器件有机地结合在一起，使其成为一个完整的体系。

本书重点介绍了自动控制系统中各种典型电机和电磁器件的工作原理和特性，其中包括直流电磁铁、直流继电器、各类电机（特别是各种控制电机）、电磁传感器、磁放大器等。同时对它们的结构、材料、应用等也作了介绍。

在叙述方式上力求深入浅出、突出物理概念。

本书内容按60学时编写。

全书由朱耀忠同志主审。在编写过程中，得到王世序等同志的热情帮助，提出了许多宝贵的修改意见，谨此致谢。

由于水平有限，书中有不适当和错误之处欢迎大家批评指正。

编 者

一九八八年十一月

目 录

绪 论

§ 0-1 电机与电磁器件的定义和分类·····	1
§ 0-2 电机与电磁器件在国民经济中的作用·····	2
§ 0-3 课程特点·····	4

第一章 直流磁路

§ 1-1 电磁元件的磁系统·····	6
§ 1-2 磁路基本定律·····	7
§ 1-3 简单磁路的计算·····	12
§ 1-4 永久磁铁磁路简介·····	24
小结·····	31
习题及思考题·····	31

第二章 直流电磁铁

§ 2-1 电磁铁磁系统种类·····	34
§ 2-2 电磁铁的静吸力特性·····	37
§ 2-3 电磁继电器和接触器·····	45
§ 2-4 极化继电器·····	50
§ 2-5 交流电磁铁的吸力·····	56
小结·····	58
习题及思考题·····	59

第三章 直流电机的一般问题

§ 3-1 直流电机的基本原理及结构	60
§ 3-2 直流电机的电枢绕组	67
§ 3-3 直流电机的磁场	72
§ 3-4 直流电机的电枢电势	77
§ 3-5 直流电机的电磁转矩	79
§ 3-6 直流电机的基本关系	80
§ 3-7 直流电机的火花现象	87
小结	88
习题及思考题	88

第四章 直流发电机

§ 4-1 交轴磁场电机扩大机	91
§ 4-2 直流测速发电机	98
小结	103
习题及思考题	104

第五章 直流电动机

§ 5-1 直流伺服电动机	105
§ 5-2 直流驱动电动机	117
§ 5-3 直流力矩电动机	121
小结	123
习题及思考题	124

第六章 变压器

§ 6-1 概述	126
§ 6-2 单相变压器的空载运行	129

§ 6-3 单相变压器的负载运行	139
§ 6-4 负载时的相量图和等值电路	142
§ 6-5 变压器实验	149
§ 6-6 变压器的额定数据和特性	151
§ 6-7 几种特殊变压器	153
小结	156
习题及思考题	157

第七章 旋转变压器

§ 7-1 概述	160
§ 7-2 正余弦旋转变压器	161
§ 7-3 线性旋转变压器	168
小结	170
思考题	170

第八章 自整角机

§ 8-1 概述	172
§ 8-2 力矩式自整角机系统工作原理	177
§ 8-3 控制式自整角机系统工作原理	181
§ 8-4 多极自整角机和多极旋转变压器	184
小结	186
思考题	186

第九章 电磁传感器

§ 9-1 电感传感器	188
§ 9-2 差动变压器	190
§ 9-3 微动同步器	196
小结	206

思考题	206
-----------	-----

第十章 磁放大器

§ 10-1 简单磁放大器的基本工作原理	207
§ 10-2 单拍磁放大器	212
§ 10-3 双拍磁放大器	215
小结	217
思考题	217

第十一章 异步电动机

§ 11-1 概述	219
§ 11-2 三相异步电动机工作原理	220
§ 11-3 交流绕组、电势和磁势	226
§ 11-4 三相异步电动机的运行分析	234
§ 11-5 异步电动机的功率和转矩	238
§ 11-6 单相异步电动机	247
小结	252
习题及思考题	254

第十二章 两相电机

§ 12-1 两相伺服电动机	256
§ 12-2 异步测速发电机	269
小结	274
习题及思考题	274

第十三章 同步电动机

§ 13-1 永磁式同步电动机	276
§ 13-2 磁滞电动机	278

§ 13-3 磁阻式同步电动机	285
§ 13-4 步进电机	288
小结	296
习题及思考题	297

主要参考书

绪 论

§ 0-1 电机与电磁器件的定义和分类

电机与电磁器件均属于电磁元件，电磁元件是利用电磁感应原理工作的自动化元件。自然界有多种形式的能量，如机械能、电能、磁能、化学能、原子能等。根据能量守恒定律，这些能量既不能创生，也不能消灭，只能从一种形式转变成另一种形式。电机与电磁器件是使机械能与电能相互转换的元件。但是一般地说，机械能与电能之间不能直接相互转换，而是要通过一个媒介——磁场才能实现。因此，电机与电磁器件即是指在磁场参与下进行机电能量转换或电能之间转换的自动化元件。

电磁元件包括为数众多的元件，为了学习方便，可以按各种标准对它进行分类。

一、按作用分

1. 功率元件——进行机电能量转换的元件。
2. 信号元件——进行机电信号转换的元件（如将角位移转换成电信号，将转速转换成电压信号）；严格地说，信号也是一种能量，只不过是一种极微弱的能量。

二、按电流分

1. 直流元件；
2. 交流元件；
3. 脉冲元件。

三、按功用分

1. 电机；
2. 电器；

3. 电磁传感器。

本书是按先直流后交流的顺序编写的。

§ 0-2 电机与电磁器件在国民经济中的作用

电机与电磁器件广泛用于工农业生产、交通运输、国防、宇航以及家用电器等各个领域。随着生产和科学技术的发展、自动化和电气化水平的提高，它们在国民经济各个领域的应用越来越广泛，所起的作用也越来越重要。

据统计，例如每新增加1 000万千瓦的发电能力，不计各种大小发电机、电动机，只是高压断路器就需10万台之多，而其它高压电器如隔离开关、熔断器、避雷器、互感器等数量将为断路器的几倍。至于低压电器和自动化元件的数量则更为巨大。又如年产30万吨合成氨的工厂使用低压电器元件312种，4 220件。在现代大型飞机上装有400多种不同型号的电机和电器，例如作为动力装置的各种电动机、发电机均应用在电源、发动机和武器等系统中；作为信号变换的各种控制电机应用在各种自动控制系统中。它们在自动控制系统中起着检测、放大、控制、保护、执行和调节等功能。

下面结合函数记录仪和自动驾驶仪系统来说明电机与电磁器件在系统中的重要作用。

函数记录仪一般采用负反馈原理，其结构通常由衰减器、测量电路、放大装置、伺服电动机-测速机组、齿轮系及绳轮等组成，其原理示意图见图0-1。系统的输入信号是待记录的电压，被控对象为记录笔，其位移即为被控制量。函数记录仪控制系统的任务是控制记录笔位移，使其在记录纸上描绘出待记录的电压曲线。

图0-1中，测量电路是由电位器 R_0 和 R_M 组成的桥式线路，

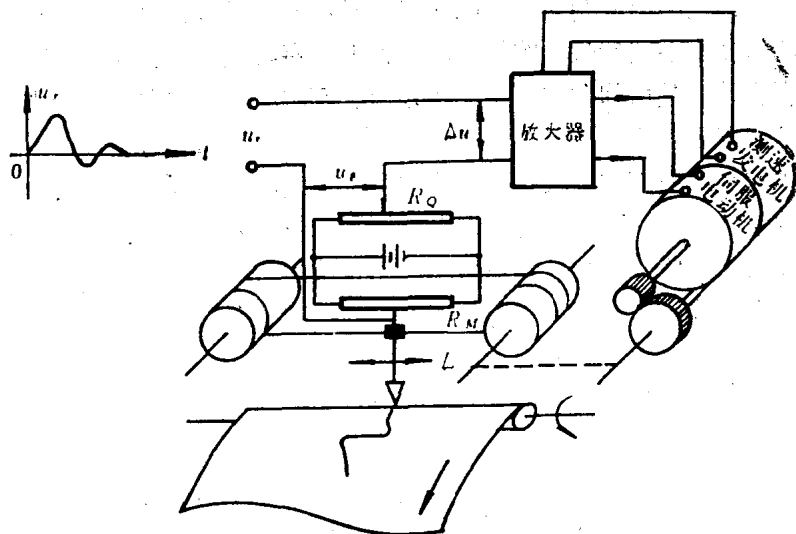


图0-1 函数记录仪原理示意图

记录笔就固定在电位器 R_M 的电刷上，因此测量电路的输出电压 u_p 与记录笔位移成正比。当存在输入信号 u_r 时，在放大装置输入口得到偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p$ ，经放大后驱动伺服电动机，并通过齿轮系及绳轮而带动记录笔移动，使偏差电压减小。当偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p = 0$ 时，电动机停止转动，记录笔也静止不动。此时 $u_p = u_r$ ，即记录笔位移与输入信号相对应。如果输入信号随时间连续变化，记录笔便描绘出随时间连续变化的相应曲线。

飞机自动驾驶仪是一种能保持或改变飞机飞行状态的自动装置。它可以稳定飞行姿态、高度和航迹；可以操纵飞机爬高、下滑和转弯。

自动驾驶仪控制飞机是通过控制飞机的三个操纵面（升降舵、方向舵、副翼）的偏转来改变舵面的空气动力特性，以形成围绕飞机重心的旋转力矩，从而改变飞机姿态和轨迹。现以电动式自动驾驶仪稳定飞机俯仰角为例，说明其工作原理。

飞机的俯仰角用垂直陀螺仪测量，见图 0-2。当飞机按给定俯仰角水平飞行时，陀螺仪电位器 1 没有电压输出。如果飞机受到扰动，使俯仰角向下偏离给定值，则陀螺仪电位器输出与俯仰角偏差成正比的信号，经放大器放大后驱动舵机，一方面推动升降舵 2 的舵面向上偏转，产生使飞机抬头的力矩 M ，减小俯仰角偏差；与此同时，带动反馈电位器 3 的电刷，产生与舵面偏转角成正比的信号并反馈到输入端。随着俯仰角偏差的减小，陀螺仪电位器输出信号越来越小，舵面的偏转角也随之逐渐减小，直到俯仰角恢复到给定值为止，这时舵面也回到原来状态。

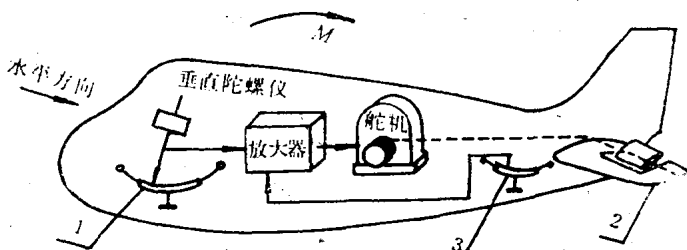


图 0-2 飞机自动驾驶仪原理图

1—陀螺仪电位器；2—升降舵；3—反馈电位器

舵机是直接带动舵面工作的机构，主要由电动机、离合器和传动齿轮构成。早期的放大器是由电子管、磁放大器等组成，现在已采用晶体管了。而电动陀螺大量采用三相异步电动机或三相磁滞电动机。

上述两个系统所提到的测速发电机、伺服电动机、磁放大器、舵机电动机、离合器、三相异步电动机和磁滞电动机均属电磁元件。由此可见离开了电磁元件，上述两个系统就无法工作，也更谈不上系统能准确而可靠地工作了。

§ 0-3 课程特点

本课程的特点是对部分典型电机和电磁器件内部电磁关系、

基本原理和特性进行了比较深入的分析和研究，因此与基础课相比其系统性就有显著的特点，它不象一条线式地有严密的数理逻辑，而是根据典型元件的机理和性能对其电磁现象和机械现象进行综合研究。在学习上要搞清它们的电磁关系，掌握基本规律和主要理论，特别要掌握分析问题和解决问题的方法。

本课程不但理论性强，而且又有很显著的工程实践性，因此在学习中不但要掌握其基本理论和规律，还要对其结构、材料、工艺、测试等给予充分的重视。

第一章 直流磁路

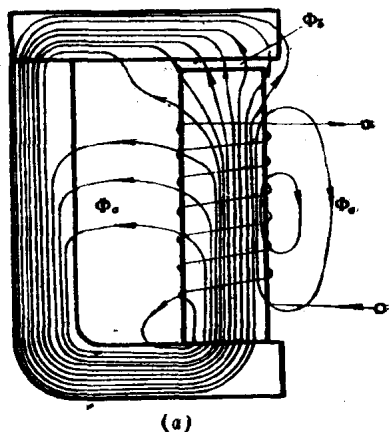
已经指出，电磁元件是利用电磁现象来工作的。因此，我们首先从概念上和数量上对电流的磁效应进行分析和计算。在工程计算中，可以将磁场简化为磁路，用类似电路的方法来进行磁路计算。

§ 1-1 电磁元件的磁系统

在电工技术中，为了加强磁场并使其绝大部分磁通在预定的路径中通过，就沿这个路径放置一定形状的铁磁材料，这个路径是磁通的主要路径。另外，还有少量的磁通不在此路径中通过，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_m 或 Φ 表示。通过次要路径的磁通称为漏磁通，用 Φ_l 表示。我们把这种主要由铁磁材料和线圈所组成的整体称为磁系统。

铁磁材料主要分为软磁材料和硬磁材料。

图1-1示出了两种典型电磁元件的磁系统。



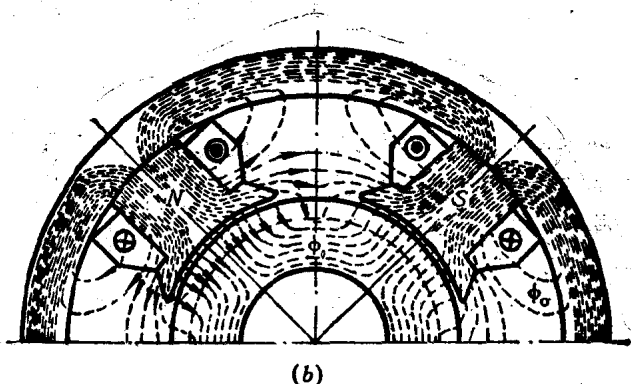


图1-1 典型电磁元件的磁系统
(a) 拍合式直流电磁铁；(b) 直流电机

§ 1-2 磁路基本定律

磁路中所用到的一些概念和定律，如磁势、磁通、磁阻、磁压降、磁路的欧姆定律和克希荷夫定律等都是直接从磁场的概念和定理转化来的。磁路计算的理论依据是磁通连续原理和安培环路定理。

表示某点磁场性质的基本物理量是磁感强度矢量 $\mathbf{B}$ ，而磁通则是磁感强度矢量的通量，即

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

如果磁场是均匀的，且 $\mathbf{B}$ 又垂直于面积 S ，则上式可写成

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \Phi / S$$

因此， $\mathbf{B}$ 又称为磁通密度，简称磁密。

磁通的连续性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：

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad \text{或} \quad \sum \Phi = 0 \quad (1-1)$$

式中规定，进入闭合面的磁通取负号，离开闭合面的磁通取正号。

上述磁通连续原理相应为磁路克希荷夫第一定律，即汇聚在任一节点上的磁通代数和恒等于零。这里所说的节点实际上并不真是一个点，而是包围磁路分叉处的一个封闭曲面，如图 1-2 所示。

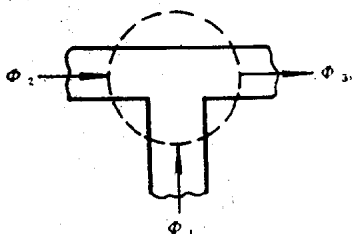


图1-2 磁路分叉处

在分析磁场和电流之间的依存关系中，引入磁场强度矢量 $\mathbf{H}$ 这一物理量，则

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

其中 μ 是一个衡量物质对磁场所呈现性质的系数，叫做磁导率。

磁场强度矢量和电流以安培环路定理相联系，其表达式为

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (1-2)$$

就是说，磁场强度矢量 $\mathbf{H}$ 沿某闭合回路的线积分等于穿过该闭合路径所环绕的各电流的代数和。当电流的参考方向与闭合路径的方向符合右螺旋关系时，电流取正号，反之取负号。

磁场强度矢量 $\mathbf{H}$ 沿指定路径由 a 至 b 的线积分定义为磁场中 a 与 b 间的磁压降（或磁位降） U_{ab} ，即

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

在均匀磁场中，则有

$$U_{ab} = H l_{ab}$$

由于磁路各点的磁场强度方向与路径方向一致，且线圈有 W 匝，则式 (1-2) 变为：

$$\oint_l H dl = \oint_l \frac{\Phi}{\mu S} dl = \sum IW$$