



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制元件及线路

(第五版)

梅晓榕 柏桂珍 张卯瑞 编著



科学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制元件及线路

(第五版)

梅晓榕 柏桂珍 张卯瑞 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从原理、结构和特性等方面介绍自动控制系统常用的执行元件、传感元件和功率放大元件。包括直流电机、异步电动机、步进电动机、小功率同步电动机、无刷直流电动机与交流伺服电动机、直线电动机与超声波电动机、旋转变压器与感应同步器、测速发电机、编码器、阻容感传感器、热电式传感器、线性功率放大器、脉宽调制型(PWM)放大器和晶闸管变流器、液压元件、航天器中的姿态传感器、微传感器与微执行器。

本书既讲元件又讲线路,既讲原理又讲应用,既讲静特性又讲动特性,既注意科学性又避免深奥的数学推导。

本书可作为高等学校自动化、探测制导与控制、机械设计制造及其自动化、飞行器设计与工程、飞行器制造工程等专业的教材,也可供科研人员、工程技术人员和高级技工参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制元件及线路/梅晓榕,柏桂珍,张卯瑞编著. —5版. —北京:科学出版社,2013.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-03-038267-2

I. ①自… II. ①梅…②柏…③张… 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(2013)第 179711 号

责任编辑:余江 张丽花 / 责任校对:彭涛

责任印制:闫磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1993年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2007年4月第四版 印张:19 1/2

2013年8月第五版 字数:483 000

2013年8月第一次印刷

定价:42.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是高等院校“自动控制元件”课程的教材。全书分为电动机及其控制、测量元件、功率放大元件和其他元件共四篇，从原理、结构、特性和选择等方面讲述自动控制系统（特别是机械伺服系统）常用的电机、传感器、功率放大器和液压元件。内容包括直流电机、异步电动机、步进电动机、小功率同步电动机、无刷直流电动机与交流伺服电机、直线电机与超声波电动机、旋转变压器与感应同步器、测速发电机、编码器、阻容感传感器、热电式传感器、线性功率放大器、脉宽调制型（PWM）功率放大器和晶闸管变流器、液压元件、航天器中的姿态传感器、微传感器与微执行器。

本书在编写时充分注意和考虑到中国自动化学会等部门对“自动控制元件”课程的要求，参考了近几年新出版的相关教材，紧密结合近几年控制系统的科研和技术工作的实际及新的教学大纲。在内容上既包括元件又包括线路，既包括经典的控制电机又反映近几年发展和流行的元件与线路；既讲原理又讲应用，既讲静特性又讲动特性；既注意科学性、严密性，又避免深奥的数学论证；既强调物理概念，又提供实用的计算公式和电子线路。本书可作为高等学校自动化、机械工程及自动化、飞行器设计与工程等专业的教材，又可供科研人员、工程技术人员和高级技工参考。

本书第一版由梅晓榕、兰朴森、柏桂珍编著，姚纪文教授主审，1993年由哈尔滨工业大学出版社出版，一直被哈尔滨工业大学等多所高等学校采用，曾获黑龙江省优秀教材二等奖。第四版被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。第五版被列入哈尔滨工业大学“十二五”规划教材。第五版增加了一些习题，按现行的电气图形国标修改了有关的图形，对第5章和第6章做了较多的修改，对第15章和第17章做了重新编写和补充。其中第15章增加了晶闸管变流器一节，第17章增加了太阳敏感器等内容。

第五版由梅晓榕、柏桂珍、张卯瑞编著，梅晓榕教授任主编。参加编写工作的还有马广程、何朕、王述一等。

编写中参考了很多优秀的教材与著作。在此向参考文献中的各位作者表示真诚的谢意。书中不当之处敬请读者批评指正。

作 者

2013年5月于哈尔滨工业大学

目 录

前言

绪论	1
0.1 控制元件的作用和分类	1
0.2 本书的主要内容	2
0.3 电磁学的基本概念与定律	2
0.4 运动控制系统的执行元件	7
习题	8

第一篇 电动机及其控制

第1章 直流电动机及其控制	9
1.1 直流电机及其基本结构	9
1.2 电机中的磁性材料	12
1.3 直流电机工作原理	17
1.4 电机磁场、电枢反应与换向	21
1.5 直流电动机的特性与控制方法	23
1.6 直流伺服电动机	40
1.7 直流力矩电动机	43
1.8 有限转角直流力矩电动机	46
1.9 直流电动机的选择	47
1.10 例题	50
习题	53
第2章 变压器	55
2.1 变压器的用途和结构	55
2.2 变压器的理论基础	56
2.3 等值电路和副边的折算值	61
习题	63
第3章 异步电动机及其控制	64
3.1 异步电动机的结构特点和工作原理	64
3.2 交流绕组磁场的分析	69
3.3 异步电动机的主要特性	75
3.4 三相异步电动机	79
3.5 两相电动机	91
3.6 单相异步电动机	99
3.7 单相串励电动机	101

3.8 电动机应用实例·····	103
习题·····	104
第4章 小功率同步电动机 ·····	106
4.1 同步电动机的构造和分类·····	106
4.2 永磁式同步电动机·····	106
4.3 磁阻同步电动机·····	109
4.4 磁滞同步电动机·····	111
4.5 电磁减速式同步电动机·····	114
习题·····	115
第5章 步进电动机及其控制 ·····	116
5.1 概述·····	116
5.2 磁阻式步进电动机的工作原理·····	117
5.3 磁阻式步进电动机的静态特性·····	122
5.4 磁阻式步进电动机的运行特性·····	127
5.5 永磁式和混合式步进电动机·····	136
5.6 步进电动机的驱动器·····	139
5.7 步进电动机的选择·····	145
习题·····	146
第6章 无刷直流电动机与交流伺服电动机 ·····	147
6.1 无刷直流电动机的结构·····	147
6.2 位置传感器·····	148
6.3 无刷直流电动机的工作原理·····	149
6.4 交流伺服电动机·····	152
6.5 无位置传感器的无刷直流电动机·····	156
6.6 无刷直流电动机的应用·····	156
6.7 开关磁阻电动机·····	157
习题·····	157
第7章 直线电动机与超声波电动机 ·····	158
7.1 直线直流电动机·····	158
7.2 直线感应电动机·····	160
7.3 直线步进电动机·····	162
7.4 超声波电动机·····	164
习题·····	164

第二篇 测量元件

第8章 测量元件概述 ·····	165
8.1 测量元件的组成、作用和分类·····	165

8.2 测量元件的特性	166
习题	169
第9章 旋转变压器与感应同步器	170
9.1 旋转变压器	170
9.2 多极旋转变压器	177
9.3 感应同步器	179
习题	192
第10章 测速元件及测速方法	193
10.1 直流测速发电机	193
10.2 异步测速发电机	198
10.3 由位移传感器的脉冲信号求转速	200
习题	201
第11章 编码器与光栅	202
11.1 编码器	202
11.2 光栅	207
习题	209
第12章 阻容感传感器	210
12.1 电阻式传感器	210
12.2 电感式传感器	213
12.3 电容式传感器	217
习题	223
第13章 热电式传感器	224
13.1 热电偶	224
13.2 热电阻	228
13.3 热敏电阻	229
13.4 晶体管、集成电路型温度传感器	231
习题	231

第三篇 功率放大元件

第14章 功率放大器概述	232
14.1 电力电子器件简述	232
14.2 功率放大器的类型和要求	233
14.3 线性功率放大器	234
习题	241
第15章 脉宽调制型(PWM)放大器和晶闸管变流器	242
15.1 概述	242
15.2 电力电子器件的特性	242

15.3	电阻和电感负载电路的开关过程	250
15.4	PWM 放大器输出级的工作原理	252
15.5	PWM 放大器的特性	259
15.6	PWM 放大器的几个问题	262
15.7	脉宽调制器的典型电路	266
15.8	PWM 电路的电源及泵升电压	269
15.9	正弦波脉宽调制 (SPWM) 电路原理	270
15.10	晶闸管变流器	272
	习题	280

第四篇 其他元件

第 16 章	液压元件	281
16.1	概述	281
16.2	叶片式液压马达	283
16.3	轴向柱塞式液压马达	284
16.4	径向柱塞式液压马达	284
16.5	电液伺服阀	285
16.6	阀控液压马达的特性与传递函数	287
	习题	289
第 17 章	航天器中的姿态传感器	290
17.1	陀螺传感器	290
17.2	太阳敏感器	291
17.3	地球敏感器	293
17.4	星敏感器	295
	习题	295
第 18 章	微传感器与微执行器	296
18.1	微机电元件的应用	296
18.2	微机电器件的加工技术与工艺	296
18.3	微传感器	297
18.4	微执行器	300
	习题	301
	参考文献	302

绪 论

0.1 控制元件的作用和分类

自动控制是现代工程中非常重要的技术。从机械位移、转速的控制到工业过程中温度、压力、流量、物位的控制，从现代飞机的航向控制到太空飞船和卫星的姿态控制，从电动假肢的控制到机器人的控制，自动控制技术的应用无处不在。而所有这些形形色色的控制系统，又都是由一些具有典型功能的元件和电子线路组成的，本书将介绍自动控制系统中这些常用的元件及线路。

我们以图 0-1 所示导弹发射架控制系统示意方框图为例，说明控制系统的组成。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，又称为反馈信号。反馈信号和参考输入信号一起加到放大器的输入端。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。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。功放输出的电压加到直流电动机的电枢绕组上，使电机转动，带动导弹发射架转动，转动方向要使偏差电压减小到零。当导弹发射架转动到期望位置时，偏差信号为零，电机电枢绕组两端电压也变为零，电机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。整个系统是角位移跟踪系统，又称为伺服系统。为了提高系统的跟踪性能，实际系统中还要加入串联补偿装置和反馈补偿装置。

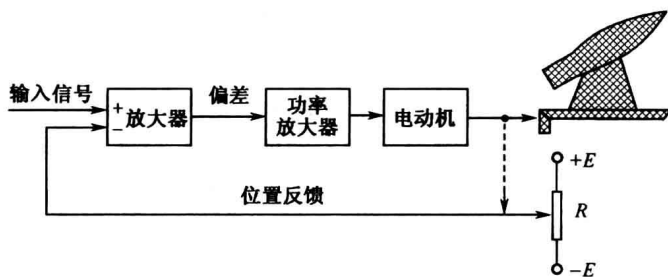


图 0-1 导弹发射架控制系统

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。其功能是驱动控制对象，控制或改变被控量(输出量)。
- 2) 测量元件。其功能是将被测量检测出来并转换成另一种容易处理和使用的量(如电压)。测量元件一般称为传感器，在过程控制中又称为变送器。

3)放大元件。其功能是将微弱信号放大。放大元件又可分为前置放大元件和功率放大元件。功率放大元件的输出信号具有较大的功率,可以直接驱动执行元件。

4)补偿元件(校正元件)。为了确保系统稳定并使系统达到规定的精度等性能指标,控制系统的设计者往往还要在系统中增加一些元件,这些元件称为补偿元件。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的系统中,执行元件是直流电动机,测量元件是精密电位器,前置放大元件是放大器,功率放大元件是直流功率放大器,补偿元件在图中没有画出。

如果用方框表示系统中各元件的功能,用框图外边的箭头代表元件的输入和输出信号,可以得到如图0-2所示的典型控制系统的功能框图。

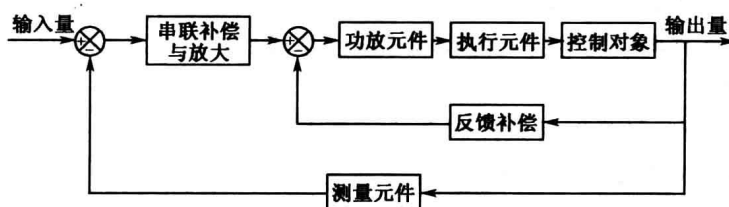


图0-2 典型控制系统的功能框图

0.2 本书的主要内容

本书介绍控制系统中常见的执行元件、测量元件、功率放大元件及有关线路。有的元件,如测速发电机,既可用作测量元件,也可用作反馈补偿元件。大部分串联补偿装置及一些反馈补偿装置是由电子线路组成,或是由计算机实现的,本书不做介绍。

为了满足自动控制系统(主要是机械伺服系统)对控制元件的要求,在普通电机的基础上产生和发展了被称为控制电机的装置,它们在控制系统中用作执行元件和测量元件。用作执行元件的控制电机包括各种直流伺服电动机、交流伺服电动机、步进电动机、力矩电动机和小功率同步电动机等。用作测量元件的控制电机包括旋转变压器、感应同步器、交流和直流测速发电机等。控制电机是主要的控制元件,也是本书的主要内容。

对于执行元件将详细讨论各种电动机和液压元件。测量元件除了控制电机以外,还包括编码器、阻容感传感器、热电式传感器。功率放大元件包括线性功率放大器、脉冲宽度调制型放大器和晶闸管变流器。最后介绍航天器中的姿态传感器、微传感器与微执行器等特种元件和新型元件。

0.3 电磁学的基本概念与定律

控制电机是本书的主要内容,而各类电机的工作原理都是以电磁学基本定律为基础。这里介绍电磁学的基本概念和定律。书中所给出的各公式除特殊说明外,各物理量的单位均为国际单位制。

0.3.1 磁场

表示磁场强弱的物理量是磁通密度(简称磁密,或称磁感应强度),一般记为 B 。它是一个矢量,在真空中符合叠加原理。电流元 $I dl$ 在 P 点产生的磁密 dB 的大小为

$$dB = \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I dl \sin \alpha}{r^2} \quad (0-1)$$

式中, r 是电流元 $I dl$ 所在点到 P 点的距离, α 为 $I dl$ 与 r 之间小于 180° 的夹角, μ_0 是真空磁导率, μ_r 是相对磁导率。

磁场中各点的磁密可以用磁力线的疏密来表示。磁力线是闭合的,围绕着产生它的电流,方向与电流方向之间满足右手螺旋关系。

穿过某一截面 S 的磁通 Φ 为

$$\Phi = \int_S B \cos \theta dS \quad (0-2)$$

式中, θ 为 dS 的法线方向与该点处的磁密向量之间的夹角。

对于磁场中面积为定值的任一平面,有

$$\Phi = \Phi_m \cos \theta \quad (0-3)$$

由于磁力线是闭合的,所以通过任一闭合面的磁通一定等于零,称为磁通连续性原理。

磁场强度向量 H 与 B 的关系是

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad (0-4)$$

式中, $\mu = \mu_r \mu_0$ 称为磁场中物质的磁导率。在工程中,除了铁磁物质外,其余物质的磁导率均认为等于真空中的磁导率 μ_0 。铁磁物质的磁导率 μ 不仅比 μ_0 大得多,而且与磁场强度和磁状态的历史有关,它不是一个常数。

安培环路定律(全电流定律)的内容是:在磁场中,沿任一闭合路径 l 磁场强度向量 H 的线积分,等于该闭合回路所包围的各电流的代数和,即

$$\int_l H dl = \sum I \quad (0-5)$$

当电流的参考方向与闭合回路的方向符合右手螺旋关系时,电流为正,反之为负。

磁通所通过的区域称为磁路。在实际的电机磁路中,常将磁路分成若干段,每一段磁路的磁场强度 H 是常数,于是式(0-5)变成

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \cdots + H_n l_n = NI \quad (0-6)$$

$$\sum_{i=1}^n H_i l_i = NI \quad (0-7)$$

式中, H_i 为第 i 段磁路的磁场强度; l_i 为第 i 段磁路的平均长度; $H_i l_i$ 为第 i 段磁路的磁压降或磁势; N 为磁通回路所包围的导体总数,即线圈的匝数; I 为每一导体中的电流。

0.3.2 磁路定律

在电工技术中,为了获得强磁场,常常用铁磁材料做成各种形状的铁心。由于铁磁物质的磁导率比其他物质的磁导率大得多,所以在相同磁场强度 H 时铁磁物质组成的磁路内的磁密 B 要比其他磁路的磁密大得多,因此在有铁心的磁场中,大部分磁通在铁心内通过,形成明显的闭合磁回路。图 0-3 表示几种典型的电工设备中的铁心磁路系统,图中虚线为磁

路。其中图 0-3(a)、(c)所示的磁路可看成是铁心和空气的串联组合,图(b)和图(d)中的磁路是并联组合。工程上把这种主要由铁磁物质所组成的、能使磁通集中通过的指定磁路称为主磁路,常简称为磁路。

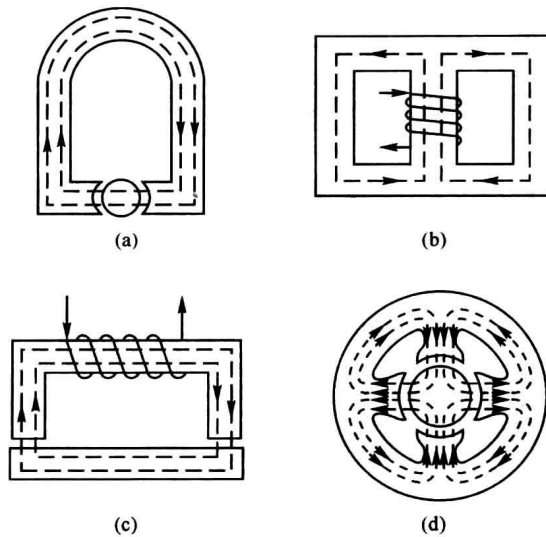


图 0-3 常用电工设备中的铁心磁路图

与电路相比,漏磁现象远比漏电现象严重。全部在主磁路中闭合的磁通称为主磁通;部分经过主磁路、部分经过主磁路周围的物质而闭合的磁通以及全部不在主磁路中闭合的磁通都称为漏磁通。

磁路定律是由磁通连续性原理和安培环路定律推导出来的。

设无分支串联磁路由某种铁磁物质构成,其横截面积处处均为 S , 平均长度为 l , 磁导率为 μ 。若平均长度远比横截面的线性尺寸大得多,则可近似地认为磁通在横截面上分布是均匀的,于是有磁通 Φ 为

$$\Phi = BS \quad (0-8)$$

式中, B 是中心线(即平均长度线)上的磁密。在中心线上各处横截面积相等,所以 B 相等, H 也相同。设 W 为绕组的匝数,由安培环路定律知

$$\int \mathbf{H} d\mathbf{l} = Hl = WI \quad (0-9)$$

因为 $B = \mu H$, 由式(0-8)、式(0-9)得

$$\Phi = \frac{WI}{\frac{l}{\mu S}} \quad (0-10)$$

上式与简单回路的欧姆定律 $I = E/R = E/(l/(\gamma S))$ 相似。定义磁势 F_m 为 $F_m = WI$, 磁阻 R_m 为 $R_m = l/(\mu S)$, 则式(0-10)变为

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} \quad (0-11)$$

若令磁导 $G_m = 1/R_m$, 则式(0-11)变为

$$\Phi = G_m F_m \quad (0-12)$$

式(0-11)、式(0-12)有时称为磁路的欧姆定律。

定义磁压 U_m 为

$$U_m = \int \mathbf{H} d\mathbf{l} \quad (0-13)$$

则有

$$U_m = WI = F_m = R_m \Phi \quad (0-14)$$

应当指出的是,在铁磁物质中 μ 不是常数,它随 H 的大小而变化,所以磁阻是非线性的,因此以上的公式只适用于对磁路作定性分析。

在磁路计算中,往往根据磁路中的材料和截面积把磁路分成若干段,每一段的 H 相同,这时可按式(0-6)进行计算。每段磁路的磁阻 R_{mi} 为

$$R_{mi} = \frac{l_i}{\mu_i S_i}$$

整个磁路总磁阻 R_m 为

$$R_m = \sum_{i=1}^n R_{mi} \quad (0-15)$$

即串联磁路的磁阻等于各部分磁阻之和。

对于图 0-3(b)所示的并联磁路,总磁阻的倒数等于各分支磁路磁阻倒数之和。

当闭合磁路由铁心和空气隙串联组成时,一般情况下气隙磁阻远远大于其他部分的磁阻,整个磁路磁阻主要由空气隙决定。

在工程上,对于铁磁材料,由 B 求 H 或由 H 求 B ,一般不用公式 $B = \mu H$ 计算,而是从材料的磁化曲线(即 $B-H$ 曲线)求出所需要的量。

0.3.3 电磁感应定律

通过一个线圈的磁通 Φ 与线圈匝数 W 的乘积称为磁链,记为 Ψ ,即 $\Psi = W\Phi$ 。如果磁通各自通过线圈的不同匝数,则该线圈的总磁链数为

$$\Psi = \sum W_i \Phi_i \quad (0-16)$$

式中, Φ_i 为某一部分磁通; W_i 为 Φ_i 所通过的匝数。

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

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (0-17)$$

若所有磁通 Φ 都通过线圈的全部匝数 W ,式(0-17)便成为

$$e = - W \frac{d\Phi}{dt} \quad (0-18)$$

线圈中的磁链变化有两种原因: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,即由于线圈和磁场间有相对运动,线圈中的磁链在变化。因此磁链可以看成是时间和位移的函数,即 $\Psi = \Psi(t, x)$, 所以有

$$d\Psi = \frac{\partial\Psi}{\partial t}dt + \frac{\partial\Psi}{\partial x}dx \quad (0-19)$$

故有

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\partial\Psi}{\partial t} - \frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{dx}{dt} = -\frac{\partial\Psi}{\partial t} - V\frac{\partial\Psi}{\partial x} = e_T + e_R \quad (0-20)$$

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。

变压器的线圈静止不动, 线圈中的感应电势仅有变压器电势 e_T 。直流电机空间任一点的磁通对时间为恒定不变, 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

$$e = Blv \quad (0-21)$$

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

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (0-22)$$

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

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -L\frac{dI}{dt} \quad (0-23)$$

若线圈周围有铁磁材料, 则 L 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 引起的电感仍可看成是线性电感, 式(0-23)仍然适用。

0.3.4 电磁力与电磁转矩

磁极之间存在作用力, 方向是异性相吸, 同性相斥, 大小与距离平方成反比。

磁场中的载导体所受的电磁力 F_e 为

$$F_e = BlI \quad (0-24)$$

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_e 为

$$T_e = BlIr \quad (0-25)$$

转矩也可由功率关系算得

$$T_e = \frac{P}{\omega} \quad (0-26)$$

式中, P 为电机转轴上的机械功率; ω 为转轴的角速度。

当磁路由铁磁材料和空气隙组成时, 如图 0-3(c), 在铁磁材料与空气接触的表面要受到电磁力的作用。电磁力的大小与气隙磁通的平方成正比, 电磁力的方向是使磁阻或气隙减小的方向, 即由铁磁材料表面向外, 指向气隙。

磁场产生的磁力线就像被伸长的橡皮筋或弹簧, 具有收缩力, 力图使异性磁极靠近, 或使磁阻减小, 或使空气隙减小。

电磁力 F_{em} 可用下式表示：

$$F_{em} = \frac{1}{2} \Phi_{\delta}^2 \frac{dR_{\delta}}{d\delta} \quad (0-27)$$

式中, Φ_{δ} 为气隙磁通; δ 为沿磁力线方向的气隙长度; R_{δ} 为气隙磁阻; F_{em} 的方向为沿磁力线并使气隙减小的方向。

0.3.5 圆柱面磁场间的力矩

图 0-4 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、异性相吸的原理可以看出, 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

$$T_1 = K \sin \theta \quad (0-28)$$

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(0-28)。

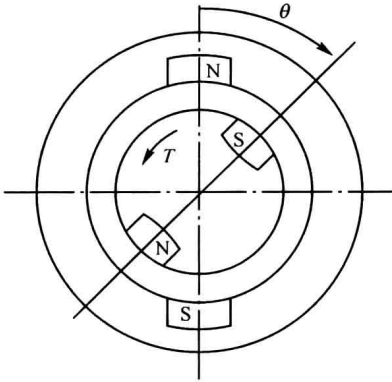


图 0-4 两极磁场

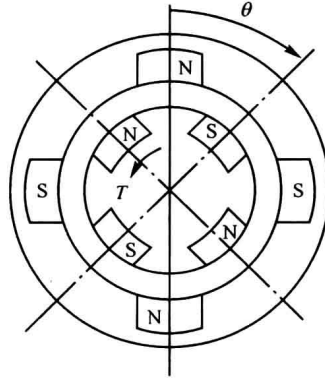


图 0-5 四极磁场

图 0-5 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 $360^\circ/2$, 其傅里叶级数中的基波表达式为

$$T_2 = K \sin 2\theta \quad (0-29)$$

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

$$T_p = K \sin(p\theta) \quad (0-30)$$

绝大部分电机中力矩的产生都可以用上述圆柱面磁场来解释, 电机中的力矩 T 与磁场间的夹角 θ 的关系近似符合式(0-30)。

0.4 运动控制系统的执行元件

系统对执行元件的基本要求是: 有足够大的功率及力或力矩, 有准确的静特性和快速响应的动特性。运动控制系统常用的执行元件是电动机、液压元件和气动元件。其中使用最方便、应用最广泛的是电动机, 而力或力矩最大的是液压元件。

一台电机可作电动机用，也可作发电机用，这个原理称为电机的可逆原理，它们往往也被统称为电机。电机按所用电源可分为直流电机、交流电机和脉冲电机。交流电机按磁场转速和电机转速的关系又分为异步电机和同步电机。电机按功率大小可分为大型、中小型和微型三类。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。微电机按用途可分为三类：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、执行等用途的微电机。

近年出现了应用电力电子器件和控制技术制成的机电一体化的电机装置，它们的特性比原电机固有特性有很大改进，以至于无法说清楚这样一台具体的电机装置应划为哪种类别，应该称为什么电机。

习 题

1. 按功能和作用分类，自动控制系统有哪四大类元件？
2. 写出圆柱面磁场间的力矩表达式。

第一篇 电动机及其控制

第1章 直流电动机及其控制

1.1 直流电机及其基本结构

直流电动机和直流发电机的基本结构是相同的，统称为直流电机。

直流电机的发明和应用比交流电机早，但交流电机的应用却后来居上。目前发电站的发电机全部是交流发电机；各行各业作为驱动的电机中，大部分也是交流电机。但是在机械装置的自动控制领域，特别是在高精度位置伺服系统中，直流电机占有重要地位。此外，在调速性能要求高或者需要大转矩（特别是大启动转矩）的场所，如轧钢机、龙门刨床、电车、电气铁道牵引、起重机械拖动等方面，直流电动机也有广泛应用。

直流电动机有以下优点：①转矩大；②调速范围宽；③易于控制且可靠性高；④调速时能量损耗较小。

直流电动机的主要缺点是有换向器。由于有换向器，使直流电机比交流电机费工费料，造价贵，运行时换向器需要经常维修，寿命也较短，而换向条件又使直流电机的容量受到限制。

直流电机按部件的运动状态可分为定子和转子两部分，按部件的作用可分为磁极、电枢绕组、换向器和电刷。为了实现电枢绕组电流换向，电枢绕组放在转子上，磁极位于定子上。定子和转子之间存在间隙（称为气隙），以便定、转子能够进行相对机械运动。小容量电机的气隙约为1~3mm。定子由定子铁心、激磁绕组或永磁体、机壳、端盖和电刷装置等组成。转子由电枢铁心、电枢绕组、换向器、轴、风扇等组成。风扇是用来冷却的。一般小型电机的轴是通过滚动轴承支承在两端的端盖上。直流电机的基本结构示意图如图1-1所示。

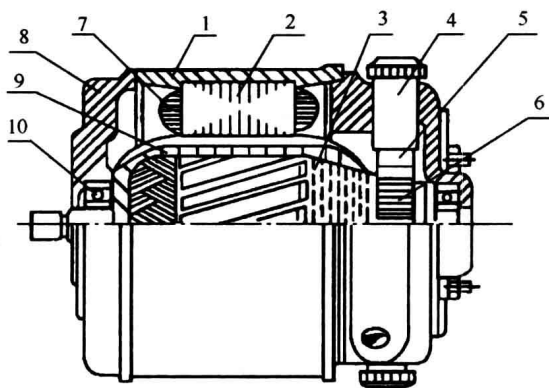


图 1-1 直流电机结构简图

1. 机壳 2. 定子铁心 3. 电枢 4. 电刷座 5. 电刷
6. 换向器 7. 激磁绕组 8. 端盖 9. 空气隙 10. 轴承

1.1.1 磁极和定子铁心

按激磁方式，直流电机可分为电磁式和永磁式两种。

电磁式直流电机应用于功率大的场合。它的磁场由激（励）磁绕组产生。绕组由铜线绕