

自动控制元件及线路

梅晓榕 兰朴森 柏桂珍 编著

哈尔滨工业大学出版社

自动控制元件及线路

梅晓榕 兰朴森 柏桂珍 编著

哈尔滨工业大学出版社

(黑)新登字第4号

内 容 简 介

本书从原理、结构、特性和选择四个方面介绍自动控制系统常用的电机、传感器和功率放大线路。内容包括直流电动机、异步电动机、步进电动机及其控制,小功率同步电动机,永磁式直流无刷电机与交流伺服电动机,旋转变压器,位移轴角编码装置,测速发电机,阻容感传感器,热电式传感器,线性功率放大器,脉宽调制型放大器和晶闸管变流器。

本书特点是既讲元件又讲线路,既讲原理又讲应用,既讲静特性又讲动特性,既注意科学性,又注意避免深奥的数学论证。

本书是高等学校自动控制、自动化、机电一体化、导航、空间技术等专业的教材,也可供广大科研工作者、工程技术人员和高级技术工人参考和使用。

自动控制元件及线路

梅晓榕 兰朴森 柏桂珍 编著

*

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

黑龙江省肇东印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 27 字数 620 千字

1993年10月第1版 1994年9月第2次印刷

印数 2001—7000

ISBN 7-5603-0531-8/TP·40 定价 18.00 元

前 言

本书是在哈尔滨工业大学自动控制专业近十年来所用教材和讲义的基础上重新编写而成,全书分为执行元件、测量元件和功率放大元件三篇,从原理、结构、特性和选择四个方面介绍自动控制系统(特别是机械伺服系统)常用的电机、传感器和功率放大线路,内容包括直流电动机及其控制,异步电动机及其控制,小功率同步电动机,步进电动机及其控制,永磁式无刷直流电动机与永磁交流伺服电动机,自整角机、旋转变压器与感应同步器,位移轴角编码装置,测速发电机,阻容感传感器,热电式传感器,线性功率放大器,脉宽调制型放大器和晶闸管变流器。

本书是从控制系统的设计者、制造者和使用者的角度出发编写的,并认为读者已经掌握了电路、传递函数和电子技术的基本知识。在内容和叙述上,既包括元件又包括线路,既包括传统型控制电机,又反映了新近发展起来的元件和线路;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,又注意避免深奥的数学论证;既注意物理概念,又提供实用的计算公式和电子线路。为了方便读者,在绪论中概述了电磁学的基本概念和定律。编写中参考了近年来出版的有关教材和国内外新资料,有些内容取自近年的科研成果。在名词术语和图形符号上注意贯彻新的国家技术标准。本书为自动控制、自动化、机电一体化、导航、空间科学与技术等专业的大学本科生的教材,也可供有关专业的科研工作者和工程技术人员参考和使用。

本书由哈尔滨工业大学自动控制理论及应用教研室梅晓榕副教授、兰朴森高级工程师和柏桂珍高级工程师编著,梅晓榕任主编。其中第四章和第六章的6.5节由兰朴森编写,第十章和第十五章由柏桂珍编写,其余部分由梅晓榕编写。图稿由柏桂珍绘制。全书由姚纪文教授主审。

本书在编写和出版过程中,得到了庄显义教授、冯汝鹏教授、傅佩琛教授、裴润教授、鄢景华副教授和张浩然讲师的支持和帮助,对此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中不妥和错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。

作 者

1993年1月

绪 论

0.1 控制元件的作用和分类

控制自然界一直是人类的共同理想。人们的这种美好理想和要求不断改善生产条件、提高生活水平的愿望,促进着科学技术和历史不断地向前发展。在长于进取和高度发达的20世纪,控制工程师们已把人类的许多希望和梦想变成了现实。毫无疑问,自动控制已经是现代工程中非常重要的技术和专业。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宇宙飞船的姿态控制,从电动假肢的控制到机器人手脚的控制,自动控制技术的应用无所不在,由人间飞向天空,又从宇宙返回大地。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和电子线路组成的,这本书主要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所示遥控导弹发射架自动定位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,控制信号是电压信号,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。反馈信号和控制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,控制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

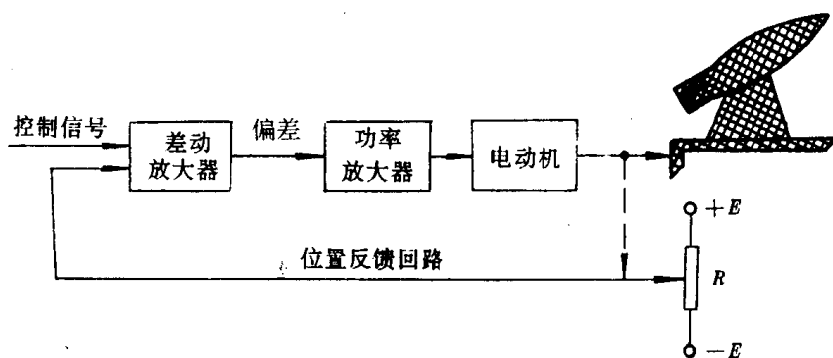


图 0-1 导弹发射架自动定位系统

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,转动方向是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,电机应停止转动并使发射架保持在期望位置。当控制信号改变时,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。为了提高系统的跟踪性能,实际系统中还要加入串联校正装置和并联(反馈)校正装置。

控制系统中的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,它的职能是驱动控制对象,直接完成控制任务。
2. 测量元件,它的职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(例如电压)。测量元件一般又称为传感器。
3. 放大元件,它的职能是将微弱信号放大,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大的功率,可以直接驱动执行元件。
4. 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它性能指标,控制系统的设计者往往还要在系统中另外增加一些元件,这些元件就称为校正元件。校正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,执行元件是直流电动机,测量元件是精密电位器,前置放大元件是差动放大器,功率放大元件是直流功率放大器,校正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的职能方框图。

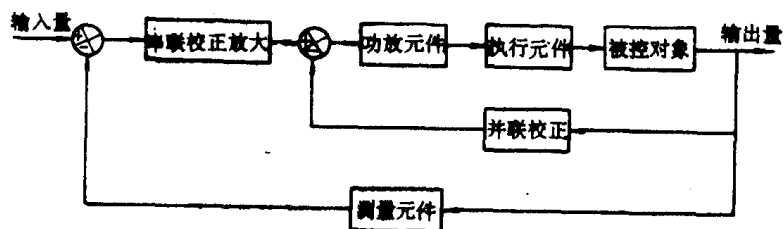


图 0-2 典型控制系统职能方框图

0.2 本书的主要内容

本书主要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,既可作测量元件,也可作反馈校正元件。大部分串联校正装置及一些反馈校正装置是由电子线路组成,或是由计算机实现,这些内容在电子技术、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。

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,在普通旋转电机

的基础上产生和发展了一大类被称为控制电机的装置,它们在控制系统中作执行元件和测量元件。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。作测量元件的控制电机包括自整角机,旋转变压器,感应同步器,交流和直流测速发电机等。控制电机是最重要的一大类自控元件,也是本书介绍的主要内容。

本书介绍的测量元件除了控制电机以外,还包括位移和轴角编码装置,阻容感传感器,热电式传感器。

本书介绍的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,晶闸管可控整流电路与变流器。

控制元件及线路这门课程的特点是:涉及的知识面广,实用性强。本书将从结构、原理、特性和选择这四个方面介绍常用的自控元件和线路。希望同学们通过本门课程的学习,对所介绍的元件和线路,能够做到,了解结构,熟悉原理,掌握特性,正确选用。

0.3 电磁学的基本概念与定律

控制电机是我们这本书的主要内容,而各类电机的工作原理都是以电磁学基本定律为出发点,复习并掌握以下的一些电磁学的基本概念和定律对于我们学习控制电机类元件是非常有用的。

本书所给出的各公式,除特殊说明者外各物理量的单位都属于国际单位制。

1. 磁场

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。表征磁场的物理量是磁感应强度(或称磁通密度、磁感应向量,简称磁密),一般记为 B 。它是一个矢量,在真空中它符合迭加原理。磁感应强度与电流的关系满足毕奥—萨伐尔—拉普拉斯定律。该定律说,电流元 Idl 在 P 点产生的磁感应强度 dB 的大小为

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

式中 r 是电流元 Idl 所在点到 P 点的距离, α 为 Idl 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。

磁场中各点的磁感应强度可以用磁感应线(磁力线)的疏密来表示。磁感应线总是闭合的,且围绕着产生它的电流,其方向与电流方向之间满足右手螺旋关系。

穿过某一截面 S 的磁感应线的总数称为磁通,记为 ϕ ,有

$$\phi = \oint_S B dS = \oint_S B \cdot \cos \theta dS \quad (0-2)$$

式中 θ 为 dS 的法线方向与该点处的磁通密度向量之间的夹角。

由于磁感应线是闭合的,所以通过任一闭合面的磁通一定等于零,这个结论被称为磁通连续性原理,用公式表示为

$$\phi = \oint_S B dS = 0 \quad (0-3)$$

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。在工程上,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)是电机学中经常用到的一个定律,其内容是:在磁场中,沿任一闭合路径磁场强度向量 H 的线积分,等于该闭合回路所包围的各电流的代数和,即

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

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,电流前面取正号,反之取负号。

我们一般把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,而每一段磁路的磁场强度 H 是常数,于是式0-5变成

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

或

$$\sum_i H_i l_i = NI \quad (0-7)$$

式中 H_i —— 第 i 段磁路的磁场强度;

L_i —— 第 i 段磁路的平均长度;

$H_i l_i$ —— 第 i 段磁路的磁压降;

N —— 磁通回路所包围的导体总数,即线圈的匝数;

I —— 每一导体中的电流。

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周围的空气和其它物质的磁导率大得多,所以在相同磁场强度 H 时铁磁物质内的磁通密度 B 要比其它物质内的磁通密度大得多,因此在有铁心的磁场中,磁通量几乎全部被限制在铁心范围内通过,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磁路系统,图中虚线为磁路。其中图 a 、 c 所示的磁路可看成是铁心和空气的串联组合,图 b 和 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整体称为磁路。

虽然利用铁磁物质可以把磁通尽量地约束在磁路中,但与电路相比,漏磁现象远比漏电现象严重。全部在磁路中闭合的磁通称为主磁通;部分经过磁路,部分经过磁路周围的物质而闭合的磁通以及全部不在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。

设无分支磁路由某种铁磁物质构成,其横截面处处均为 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)上的磁通密度。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

$$\oint_L H dl = Hl = WI \quad (0-9)$$

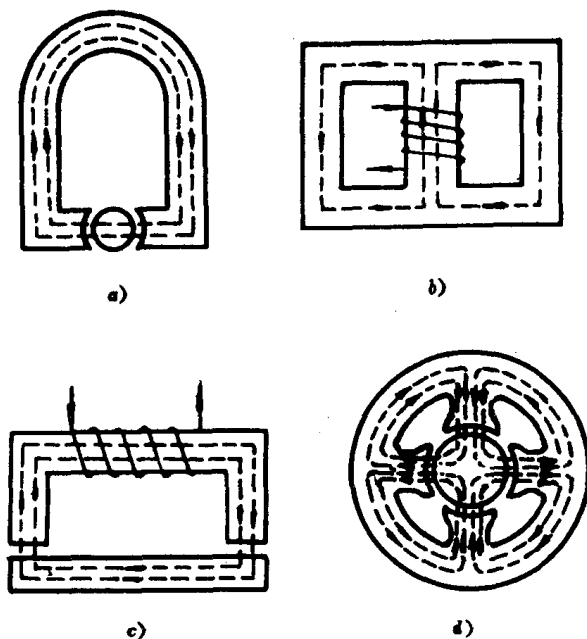


图0-3 常用电工设备中的磁路图

因为 $B = \mu H$, 故由式(0-8)、(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 为 $G_m = 1/R_m$, 则式(0-11)变为

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

式(0-11)、(0-12)有时称为磁路的欧姆定律。

定义磁压 U_m 为

$$U_m = \int_l H \cdot dl \quad (0-13)$$

则有

$$U_m = R_m \phi \quad (0-14)$$

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。

对于一个闭合磁路来说,凡是截面积和材料相同的部分,由于各处 ϕ 相同,所以 B 相同, H 也相同。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。磁路分段以后,每段磁路的磁阻 R_{mi} 为

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

由 $\phi = B_i S_i = \mu_i H_i S_i$ 可得

$$H_i l_i = R_{mi} \phi \quad (0-15)$$

由 $R_m \phi = F_m = \sum H_i l_i = \sum R_{mi} \phi$ 可知整个磁路总磁阻 R_m 为

$$R_m = \sum_{i=1}^n R_{mi} \quad (0-16)$$

即串联磁路的磁阻等于各部分磁阻之和。

对于图0-3b)所示的并联磁路,同样可以证明,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,即使空气隙比较小,空气隙的磁阻也仍然远远大于其它部分的磁阻,这时整个磁路的磁阻主要由空气隙决定。

如果磁路由不同材料或不同长度和截面的数段组成,则磁路的欧姆定律可写成

$$\phi = \frac{WI}{R_m} = \frac{WI}{\sum R_{mi}}$$

根据上面的电磁学方面的概念和定律,特别是安培环路定律,我们就可以求解磁路问题。常见的磁路问题是,已知磁路的尺寸和磁导率,由给定的 ϕ (或 B) 求磁势 F_m (或电流 I),或反过来由已给的磁势 F_m (或 I) 求磁通 ϕ (或磁密 B)。

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,而是从所用材料的磁化曲线(即 $B-H$ 曲线)求出所需要的量。

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

$$\psi = \sum W_x \phi_x \quad (0-17)$$

式中 ϕ_x —— 某一部分磁通;

W_x —— ϕ_x 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

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

若所有磁通 ϕ 都交链线圈的全部匝数 W , 式(0-18)便成为

$$e = -W \frac{d\phi}{dt} \quad (0-19)$$

线圈中的磁链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,也就是说磁通本身在变化;(2)磁通本身虽不变化,但由于线圈和磁场间有相对运动,线圈中的磁链在变化。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

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial t} dt + \frac{\partial \psi}{\partial x} dx \quad (0-20)$$

故有

$$\begin{aligned} e &= -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} \\ &= -\frac{\partial \psi}{\partial t} - V \frac{\partial \psi}{\partial x} = e_T + e_R \end{aligned} \quad (0-21)$$

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, $e_T = -\partial\psi/\partial t$ 称为变压器电势; $e_R = -V\partial\psi/\partial x$ 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

$$e = Blv \quad (0-22)$$

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

$$L = \frac{\psi}{I} \quad (0-23)$$

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

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (0-24)$$

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 HI)远大于其它磁路段的磁阻(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(0-24)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

$$F_e = BIl \quad (0-25)$$

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

$$T_e = BIlr \quad (0-26)$$

转矩也可由功率关系算得

$$T_e = \frac{P}{\omega} \quad (0-27)$$

式中 P —— 输出功率;
 ω —— 转轴的角速度。

5. 磁场的能量

磁场的能量密度 w_m 为

$$w_m = \frac{1}{2}BH \quad (0-28)$$

体积为 dv 的磁场能量 dW_m 为

$$dW_m = \frac{1}{2}BHdv \quad (0-29)$$

磁场的总能量 W_m

$$W_m = \frac{1}{2} \int_v BHdv \quad (0-30)$$

自感为 L 的线圈, 当它的电流达到稳态值 I 时, 它的磁场能量 W_m 又可写为

$$W_m = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2} \int_v BHdv \quad (0-31)$$

对于电机, 气隙中的磁场能量 W_m 与电磁转矩 T_e 之间有下列关系

$$T_e = \left. \frac{\partial W_m}{\partial \theta} \right|_{I=\text{常数}} = - \left. \frac{\partial W_m}{\partial \theta} \right|_{\phi=\text{常数}} \quad (0-32)$$

式中 θ —— 电机转角。

目 录

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	(3)

第一篇 执行元件

第一章 直流电动机及其控制	(1)
1.1 直流电机及其基本结构	(1)
1.2 电机中的磁性材料	(5)
1.2.1 铁磁物质	(5)
1.2.2 永磁材料的磁化特性	(6)
1.2.3 永磁材料的工作点	(8)
1.2.4 常用的永磁材料	(10)
1.2.5 永磁电机的磁路结构	(11)
1.3 直流电动机工作原理	(11)
1.3.1 电磁力定律和电磁感应定律	(11)
1.3.2 直流电动机的工作原理	(12)
1.4 电枢反应与换向	(14)
1.5 直流电动机的特性与控制方法	(16)
1.5.1 直流电动机的基本关系式	(16)
1.5.2 直流电动机的静态特性与控制方法	(20)
1.5.3 直流发电机	(27)
1.5.4 直流电动机的工作状态	(30)
1.5.5 直流电动机的动态特性	(33)
1.6 直流伺服电动机	(37)
1.6.1 低惯量型直流伺服电动机	(38)
1.6.2 宽调速直流伺服电动机	(39)
1.7 直流力矩电动机	(40)
1.8 有限转角直流力矩电动机	(45)

1.9 直流电动机的选择	(46)
1.10 例题	(51)
习题	(53)
第二章 变压器	(55)
2.1 概述	(55)
2.2 变压器的理论基础	(56)
2.2.1 变压器的工作原理简介	(56)
2.2.2 变压器的空载运行	(57)
2.2.3 变压器的负载运行	(59)
2.3 等值电路和副边的折算值	(62)
2.3.1 等值电路及其应用	(62)
2.3.2 副边折算值与变压器相量图	(65)
2.4 变压器的额定值及其使用	(66)
习题	(68)
第三章 异步电动机及其控制	(70)
3.1 异步电动机的结构特点和工作原理	(70)
3.1.1 概述	(70)
3.1.2 异步电动机的结构特点	(71)
3.1.3 异步电动机的工作原理	(73)
3.1.4 旋转磁场	(74)
3.2 两相伺服电动机	(77)
3.2.1 概述	(77)
3.2.2 单相交流绕组的脉振磁场	(78)
3.2.3 两相绕组的圆形旋转磁场	(82)
3.2.4 圆形旋转磁场作用下的异步电动机	(84)
3.2.5 椭圆形旋转磁场及其分析方法	(95)
3.2.6 两相伺服电动机的控制方法	(101)
3.2.7 幅值控制时的特性	(102)
3.2.8 幅相控制	(105)
3.2.9 两相伺服电动机的动态特性	(107)
3.2.10 使用中的几个问题	(110)
3.3 交流力矩电动机简介	(118)
3.4 三相异步电动机及其调速	(118)
3.4.1 三相异步电动机的基本知识	(118)
3.4.2 三相异步电动机的调速	(121)
3.5 单相异步电动机	(127)
习题	(130)

第四章 小功率同步电动机	(131)
4.1 同步电动机的构造和分类	(131)
4.2 永磁式同步电动机	(131)
4.3 磁阻同步电动机	(134)
4.4 磁滞同步电动机	(137)
4.5 电磁减速式同步电动机	(140)
习题	(142)
第五章 步进电动机及其控制	(143)
5.1 概述	(143)
5.2 磁阻式步进电动机的工作原理	(145)
5.3 磁阻式步进电动机的静态特性	(152)
5.4 磁阻式步进电动机的动态特性	(158)
5.5 永磁式和永磁感应子式步进电动机	(171)
5.6 步进电动机的驱动电路	(173)
5.6.1 引言	(173)
5.6.2 功率放大器	(174)
5.7 步进电动机的选择	(181)
习题	(183)
第六章 永磁式无刷直流电动机与永磁交流伺服电动机	(184)
6.1 无刷直流电动机的结构	(185)
6.2 位置传感器	(185)
6.3 无刷直流电动机的工作原理	(188)
6.4 无刷直流电动机的电枢反应	(194)
6.5 永磁交流伺服电动机	(195)
第七章 直线电动机	(199)
7.1 直线直流电动机	(199)
7.2 直线感应电动机	(202)
7.3 直线步进电动机	(204)

第二篇 测量元件

第八章 测量元件概述	(207)
8.1 测量元件的组成和作用	(207)
8.2 测量元件的分类	(208)
8.3 测量元件的特性	(209)
第九章 自整角机与旋转变压器	(213)
9.1 自整角机	(213)
9.1.1 概述	(213)

9.1.2	自整角机的结构	(214)
9.1.3	控制式自整角机的工作原理	(215)
9.1.4	力矩式自整角机的工作原理	(217)
9.2	旋转变压器	(219)
9.2.1	概述	(219)
9.2.2	旋转变压器的结构	(219)
9.2.3	正余弦旋转变压器的工作原理	(220)
9.2.4	线性旋转变压器	(225)
9.2.5	旋转变压器的应用	(226)
9.3	多极旋转变压器及其在双通道随动系统中的应用	(228)
9.4	感应同步器	(232)
9.4.1	感应同步器的结构	(233)
9.4.2	感应同步器的工作原理	(235)
9.4.3	感应同步器的信号处理	(239)
	习题	(241)
第十章	测速发电机	(243)
10.1	直流测速发电机	(243)
10.1.1	直流测速发电机的结构	(243)
10.1.2	直流测速发电机的基本关系式与输出特性	(244)
10.1.3	直流测速发电机输出特性的误差分析	(246)
10.2	交流测速发电机	(250)
10.2.1	交流测速发电机的结构和分类	(250)
10.2.2	空心杯转子异步测速发电机的工作原理	(253)
10.2.3	输出特性	(253)
10.2.4	交流测速机的技术指标	(256)
第十一章	位移和轴角编码装置	(259)
11.1	感应同步器编码装置	(259)
11.1.1	鉴相型数字编码装置	(259)
11.1.2	相位伺服系统	(262)
11.1.3	鉴幅型编码装置	(263)
11.2	直接编码装置	(266)
11.2.1	增量码盘	(266)
11.2.2	绝对值码盘	(268)
11.3	光栅	(269)
11.3.1	概述	(269)
11.3.2	直线光栅的工作原理	(269)
11.3.3	位移——数字转换原理	(271)
11.4	磁栅式传感器	(273)

第十二章 阻容感传感器	(279)
12.1 电阻式传感器.....	(279)
12.1.1 电位器	(279)
12.1.2 应变式电阻传感器	(284)
12.2 电感式传感器.....	(287)
12.2.1 概述	(287)
12.2.2 变压器式传感器	(288)
12.3 电容式传感器.....	(296)
12.4 力平衡式加速度传感器.....	(304)
第十三章 热电式传感器	(308)
13.1 热电偶.....	(308)
13.2 热电阻.....	(313)
13.3 热敏电阻.....	(314)
13.4 晶体管、集成电路型温度传感器	(315)

第三篇 功率放大元件

第十四章 线性功率放大器	(317)
14.1 功率放大器概述.....	(317)
14.2 线性功率放大器.....	(318)
14.2.1 线性功率放大器的优缺点	(318)
14.2.2 分立元件的线性功率放大器的基本结构	(318)
14.2.3 分立元件的线性功率放大器典型线路	(319)
14.2.4 设计和功率放大器需要注意的几个问题	(320)
14.2.5 电流源型线性功率放大器	(325)
14.2.6 集成功率放大器	(326)
第十五章 脉宽调制型(PWM)功率放大器	(329)
15.1 概述.....	(329)
15.2 晶体管的四个运行区域.....	(329)
15.3 晶体管的开关过程.....	(331)
15.3.1 纯电阻负载	(332)
15.3.2 电阻—电感负载	(334)
15.3.3 有续流回路的电阻—电感负载	(335)
15.3.4 具有制动状态电路的开关过程	(337)
15.4 PWM功率放大器输出级的工作原理	(338)
15.5 PWM放大器的静态特性	(345)
15.6 PWM功率放大器设计、选择和使用中的几个问题	(348)
15.7 PWM功率放大器的典型电路	(352)