



高等学校电子信息类规划教材



(第三版)

控制电机

● 陈隆昌 阎治安 刘新正 编著



西安电子科技大学出版社

[http:// www.xduph. com](http://www.xduph.com)

高等学校
电子信息类 规划教材

控制电机

(第三版)

陈隆昌 阎治安 刘新正 编著

西安电子科技大学出版社

2000

内 容 简 介

本书是新修订的第三版。此书主要阐述自动控制系统中常用的各种控制电机的工作原理、工作特性和使用方法,其中包括交、直流伺服电动机,交、直流测速发电机,自整角机,旋转变压器,无刷直流电动机,步进电动机,小功率同步电动机等,并对直流力矩电动机,低惯量直流电动机,感应同步器,多极旋转变压器,低速同步电动机和直线电机等新型电机作了介绍。

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,也可供从事自动控制方面工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制电机/陈隆昌等编著 - 3.版

—西安:西安电子科技大学出版社,2000.5

高等工科电子信息类规划教材

ISBN 7-5606-0332-7

I. 控… II. 陈… III. 自动控制-电机-高等学校-教材 IV. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 71375 号

责任编辑 夏大平 钟宏萍

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安电子科技大学印刷厂

版 次 1984年6月第1版 1994年6月第2版

2000年5月第3版 2000年5月第10次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18

字 数 423千字

印 数 50 001~54 000册

定 价 16.00元

ISBN 7-5606-0332-7/TP·0120

*** 如有印装问题可调换 ***

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作，根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》，我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社，各专业教学指导委员会，在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上，根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求，编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报，经各学校、出版社推荐，由各专业教学指导委员会评选，并由我们与各专指委、出版社协商后审核确定的。本轮规划教材的编制，注意了将教学改革力度较大、有创新精神、有特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列于规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时，选择了一批对学科发展具有重要意义，反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划，以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足，希望使用教材的学校、教师、学生和其他广大读者积极提出批评和建议，以不断提高教材的编写、出版质量，共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

前 言

《控制电机》一书作为自动控制专业教材于1984年6月出版以来,深受广大读者好评,前后共印刷9次,并于1996年获原电子工业部优秀教材一等奖。国内很多设有自动控制专业的院校都选用了本教材。为适应教材建设的需要,及时地对教材内容进行修改和充实,编者在原《控制电机》教材内容的基础上,根据各兄弟院校多年来在教学实践中反映的意见和建议,对《控制电机》一书再次作了重新修订。

与原教材相比,各章内容都有较大程度的修改和调整,删去了原第三章“交轴磁场电机放大机”及附录,增加了一章“无刷直流电动机”。其次,原教材中一些不符合法定计量单位和国家标准规定的有关量、单位和符号,都按要求作了修改。此外,为了精简篇幅,对一些在手册上能方便查取的产品型号和技术数据,都从各章中删除。修订后,教材质量有明显提高,其内容更加充实,富有先进性;论述和分析更为正确;条理更为清楚,便于教学。

本书第2、3章由刘新正修编,第4至第6章由阎治安修编,第1章及第7章至第12章由陈隆昌修编。全书由陈隆昌统稿,西北工业大学李钟明担任主审。修订过程中,兄弟院校的“控制电机”课程任课教师对本书提出了许多宝贵意见和建议,谨在此致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

1999年6月

第二版前言

《控制电机》一书作为自动控制专业教材于1984年6月出版以来,深受广大读者好评,前后共印刷6次,国内很多设有自动控制专业的院校都选用了该教材。根据教材建设的需要,应及时对教材内容进行修改和充实。本教材就是在原《控制电机》教材内容的基础上,根据各兄弟院校多年来在教学实践中反映的意见和建议重新修订的。

与原教材相比,各章内容都作了较大程度的修改和调整,删去了原第三章“交轴磁场电机放大机”,增加了一章“无刷直流电动机”。原教材中一些不符合法定计量单位和国家标准规定的有关量、单位和符号,按要求都作了修改。修订后教材质量有明显提高,其内容更加充实,富有先进性;论述和分析更为正确;条理更为清楚,便于教学。

本书第一章至第五章及附录部分由陈筱艳修编,第六章至第十一章及绪论部分由陈隆昌修编。全书由陈隆昌全面审校和统改。修订过程中,兄弟院校的“控制电机”课程任课教师对本书提出了许多宝贵的意见和建议,谨在此致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

1994年3月

第一版前言

本教材系由计算机与自动控制专业教材编审委员会自动控制专业教材编审小组评选审定，并推荐出版。

该教材由西安交通大学陈隆昌、陈筱艳编著，上海交通大学林润汤副教授担任主审。编审者均依据自动控制专业教材编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

“控制电机”课程的课内参考学时数为 60 学时，为了使各校有选择的余地，本教材按 70 学时编写。全书共分 11 章，前三章是分析比较易懂的直流电机，包括直流测速发电机、直流伺服电动机、交磁放大机；四至六章是分析具有脉振磁场的小型变压器、自整角机、旋转变压器；七到九章是分析具有旋转磁场的交流伺服电动机、交流异步测速发电机和小功率同步电动机；最后两章是分析比较特殊的步进电动机和直线电机。在使用本教材时应注意以下几个方面：

1. 由于从事自动控制方面的科技人员主要是合理地选择和正确使用各种控制电机，因此本教材着重阐明各种常用的控制电机的工作原理、内部电磁关系、工作特性和使用方法。对于工作原理和电磁关系力求通俗易懂，讲清物理本质，不作深入、全面、严格的分析。

2. “控制电机”是“电工基础”的后继课程，学生尚未学过电机学。为了加强针对性，本教材对一般电机不单独列章，而把一般交、直流电机的工作原理、电磁关系与有关的控制电机结合起来。

3. 为了便于掌握各种控制电机的共性和个性，本教材不按控制电机的功能进行分类，而是把工作原理、电磁关系比较接近的几种电机放在一起，由浅入深，由易到难地来安排章次。

4. 为了使学生了解目前新型控制电机的情况，本教材对一些定型的而且用途日趋广泛的新型控制电机，例如多极旋变、感应同步器、电感移相器、直流力矩电机、低速同步电动机和直线电机等作了一些介绍，并略述了各种控制电机的发展方向。

本教材第一章至第六章及附录部分由陈筱艳编写，第七章至第十一章及绪论部分由陈隆昌编写。参加审阅工作的还有上海交通大学陈育才、王庆文和西安微电机研究所的部分同志，他们为本书提出了许多宝贵意见，这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者

1983 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 控制电机在自动控制系统中的作用	1
1.2 控制电机的种类和特点	4
1.3 如何学习“控制电机”这门课程	6
第 2 章 直流测速发电机	7
2.1 直流发电机工作原理和结构	7
2.2 直流电势的关系式	12
2.3 直流测速发电机及其输出特性	14
2.4 直流测速发电机误差及其减小的方法	16
2.5 直流测速发电机的应用	21
2.6 直流测速发电机的性能指标	22
2.7 直流测速发电机的发展趋势	24
小结	25
思考题与习题	26
第 3 章 直流伺服电动机	27
3.1 直流电动机的工作原理	27
3.2 电磁转矩和转矩平衡方程式	28
3.3 直流电动机的反电势和电压平衡方程式	30
3.4 直流电动机的使用	31
小结	38
3.5 直流伺服电动机及其控制方法	39
3.6 直流伺服电动机的稳态特性	41
3.7 直流伺服电动机在过渡过程中的工作状态	46
3.8 直流伺服电动机的过渡过程	48
3.9 直流力矩电动机	53
3.10 低惯量直流伺服电动机	56
思考题与习题	58
第 4 章 变压器	60
4.1 变压器的应用、结构和原理	60
4.2 变压器的额定值	62
4.3 变压器空载运行分析	63
4.4 变压器负载时的情况	66

4.5 变压器的等值电路及相量图	67
4.6 脉冲变压器	71
4.7 单相自耦调压变压器	74
小结	75
思考题与习题	75
第5章 自整角机	77
5.1 自整角机的类型和用途	77
5.2 自整角机的基本结构	79
5.3 控制式自整角机的工作原理	81
5.4 带有“ZKC”的控制式自整角机	90
5.5 力矩式自整角机的运行	92
5.6 自整角机的选用和技术数据	96
小结	98
思考题与习题	99
第6章 旋转变压器	101
6.1 旋转变压器的类型和用途	101
6.2 旋转变压器的结构特点	101
6.3 正余弦旋转变压器的工作原理	103
6.4 线性旋转变压器	107
6.5 旋转变压器的典型应用	108
6.6 多极和双通道旋转变压器	110
6.7 感应移相器	114
6.8 感应同步器	117
小结	122
思考题与习题	123
第7章 交流伺服电动机	124
7.1 概述	124
7.2 交流伺服电动机结构特点和工作原理	125
7.3 两相绕组的圆形旋转磁场	128
7.4 圆形旋转磁场作用下的运行分析	135
7.5 三相异步电动机磁场及转矩	147
7.6 椭圆形旋转磁场及其分析方法	148
7.7 幅值控制时的特性	153
7.8 移相方法和控制方式	161
7.9 电容伺服电动机的特性	167
7.10 交流伺服电动机的使用	170
7.11 主要性能指标和技术数据	175
小结	178
思考题与习题	180

第 8 章 交流异步测速发电机	182
8.1 概述	182
8.2 交流异步测速发电机结构和工作原理	183
8.3 异步测速发电机的特性和主要技术指标	185
8.4 异步测速发电机的使用	193
8.5 交流伺服测速机组	198
小结	199
思考题与习题	199
第 9 章 小功率同步电动机	200
9.1 概述	200
9.2 永磁式同步电动机	202
9.3 反应式同步电动机	204
9.4 磁滞式同步电动机	207
9.5 电磁减速式同步电动机	210
小结	214
思考题与习题	214
第 10 章 无刷直流电动机	216
10.1 概述	216
10.2 无刷直流电动机的基本结构	217
10.3 无刷直流电动机工作原理	219
10.4 无刷直流电动机的运行特性	224
10.5 无刷直流电动机的电枢反应	228
10.6 改变无刷直流电动机转向的方法	229
小结	231
思考题与习题	231
第 11 章 步进电动机	232
11.1 概述	232
11.2 反应式步进电动机的工作原理和基本特点	234
11.3 步进电动机的矩角特性和静态转矩	240
11.4 步进电动机的单步运行状态	245
11.5 步进电动机的连续脉冲运行和动特性	250
11.6 电源及分配方式对电机性能的影响	256
11.7 步进电动机主要性能指标	261
11.8 其它类型的步进电动机	263
小结	265
思考题与习题	265
第 12 章 直线电机	267
12.1 概述	267

12.2 直线感应电动机	268
12.3 直线直流电动机	271
12.4 直线自整角机	273
12.5 直线和平面步进电动机	274
主要参考书	278

第 1 章 绪 论

1.1 控制电机在自动控制系统中的作用

在各类自动控制系统、遥控和解算装置中，需要用到大量的各种各样的元件。控制电机就是其中的重要元件之一。它属于机电元件，在系统中具有执行、检测和解算的功能。虽然从基本原理来说，控制电机与普通旋转电机没有本质上的差别，但后者着重于对电机的力能指标方面的要求，而前者则着重于对特性、高精度和快速响应方面的要求，满足系统对它提出的要求。

控制电机已经成为现代工业自动化系统、现代科学技术和现代军事装备中不可缺少的重要元件。它的应用范围非常广泛，例如，火炮和雷达的自动定位，舰船方向舵的自动操纵，飞机的自动驾驶，遥远目标位置的显示，机床加工过程的自动控制和自动显示，阀门的遥控，以及机器人、电子计算机、自动记录仪表、医疗设备、录音录像设备等中的自动控制系统。下面以雷达扫描及自动跟踪飞机的过程为例，具体说明控制电机在自动控制系统中所起的作用和所处的地位。

雷达天线控制系统的原理线路如图 1-1 所示。这个系统有两种工作状态。一种是当雷达还没有捕捉到飞机时，要由雷达操纵手操作，使天线旋转去搜索飞机，这就是雷达的搜索过程。这时图 1-1 上的闸刀 S 合在位置 I。第二种状态是当天线捕捉到目标时，把闸刀立即合向位置 II。这时雷达天线作自动跟踪飞机的运动，系统处于自动跟踪状态。下面分别讨论系统的这两种状态。

1.1.1 雷达天线控制系统的搜索状态

在搜索飞机时，我们希望雷达天线按照要求在空间不断旋转，使雷达发射机发出的强大的电磁波束跟着天线的转动在空中进行扫描。由于雷达天线又大又重，人是摇不动的，这时雷达操纵手只需要摇动手把 7，使自整角发送机 1 的转子旋转，通过自动控制系统的作用，就可使雷达天线 3 跟着自整角发送机的转角 α 自动地旋转。发送机转几度，天线也转几度；发送机正转，天线也正转；发送机反转，天线也反转。

自整角接收机 2 的转轴是和天线的转轴联结在一起的。自整角发送机和自整角接收机一般不单独使用而是成对地使用。当发送机的转角 α 和接收机的转角 β 相等，也就是转角差 $\gamma = \alpha - \beta$ 等于零时，接收机的输出电压 U_1 也等于零。当转角 α 和 β 不等时，接收机就有

1—自整角发送机；2—自整角接收机；3—雷达天线；4—变速箱；5—直流伺服电动机；6—测速发电机；7—手轮

图 1-1-1 雷达天线控制系统原理线路

和转角差 γ 成正比的交流电压 U_1 输出。这样，自整角接收机就好像自动控制系统的眼睛一样，可以很灵敏地感觉出天线的转角是否跟上自整角发送机的转角。当跟上时，转角 α 等于转角 β ，没有电压输出；当没有跟上，即转角 α 和转角 β 不等时，通过自整角接收机输出电压 U_1 ，就可把转角差 γ 测量出来，因此自动控制系统中的自整角机被称为敏感元件。

假如雷达手向某一方向摇动手轮 7，产生一个转角差 γ ，这时自整角接收机就有交流电压 U_1 输出；这个电压经过交流放大器放大后，由环形解调器转换成直流电压 U_2 ，并送入直流放大器放大，放大后的直流电压 U_3 被输入到可控硅控制线路的差动放大器，去控制可控硅的导通和截止。当可控硅 V_{D1} 和 V_{D4} 导通时，就有一定极性的信号电压通入直流伺服电动机 5，直流伺服电动机就立即向一个方向旋转。当手轮 7 向另一方向转动，电压 U_1 的相位就相反了，因而使电压 U_2 、 U_3 的极性相反，这时可控硅 V_{D2} 和 V_{D3} 导通，通入直流伺服电动机的信号电压极性也随之相反，直流伺服电动机就立即向另一方向旋转。这里直流伺服电动机将电信号变为转轴转动，执行了电信号所给予的控制任务，所以常称为执行元件。直流伺服电动机转动以后，经过变速箱 4 带动天线 3 旋转，同时也带动自整角接收机。直流伺服电动机应该是朝着天线和发送机之间的转角差 γ 减小的方向旋转，直到转角 β 和转角 α 相等。这时 U_1 、 U_2 、 U_3 都等于零，伺服电动机才停止转动。这样，雷达天线的转角就能自动地跟随手轮而转动，以达到手控天线的目的。

为了改善自动控制系统的品质，在系统中还采用了校正元件——直流测速发电机。测速发电机的输出电压 U_4 与它的转速 n 成正比，并把它反馈到直流放大器中。

整个控制系统的工作原理可以用图 1-2 这样的方框图来表示。图上各个元件和实际线路对应如下：

敏感元件——自整角发送机和接收机。

转换元件——放大器和解调器。

放大元件——直流放大器和可控硅控制线路。

执行元件——直流伺服电动机。

校正元件——直流测速发电机。

控制对象——雷达天线。

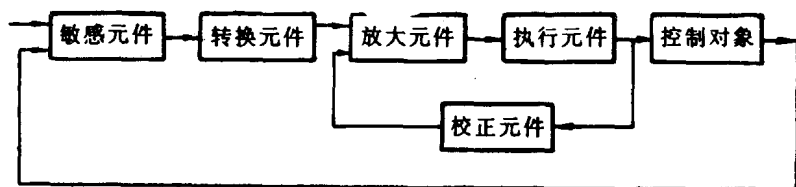


图 1-2 雷达天线控制系统方框图

1.1.2 雷达天线控制系统的自动跟踪状态

当雷达手从显示器的荧光屏上看到雷达已经捕捉到飞机以后，立即把闸刀 S 合向位置 II，系统就工作在跟踪状态。这时，雷达接收机收到从飞机反射回来的回波，并把它转换成电信号直接输入到放大器去控制天线的旋转，此时天线不需要手控而自动作跟踪飞机的运动。

上述控制系统中所用的自整角发送机、自整角接收机、直流伺服电动机、直流测速发

电机都属于电机类型，统称为控制电机。可以看出，这些电机在自动控制系统中起到了很重要的作用，是必不可少的元件。

自动控制系统和它所用到的控制电机的关系是整体和局部的关系，是一对矛盾的两个对立面。一方面控制电机的性能和作用要服从于整个系统对它的要求，控制电机性能好坏要看它能不能满足系统的要求；另一方面控制电机的性能又直接影响整个控制系统的性能，控制电机的性能不好或者使用不恰当，整个控制系统的性能就无法提高；控制电机的革新又可以带来整个系统的革新。

既然自动控制系统和控制电机是整体和局部的关系，因此，从事自动控制系统工作的技术人员，不但要了解控制系统的整体以及系统中各个元件的相互关系，而且对系统中的各个元件和控制电机也要熟悉，只有这样，才能恰当地选择和使用各种元件，并有可能了解整个自动控制系统。

1.2 控制电机的种类和特点

1.2.1 控制电机的种类

控制电机的种类很多，除了自整角机、直流伺服电动机和测速发电机外，还有交流伺服电动机、交流测速发电机、旋转变压器、无刷直流电动机、步进电动机等。根据它们在自动控制系统中的作用，可以作如下的分类。

1. 执行元件(功率元件)

主要包括直流伺服电动机、交流伺服电动机、步进电动机和无刷直流电动机等。这些电动机的任务是将电信号转换成轴上的角位移或角速度以及直线位移和线速度，并带动控制对象运动。

理想的直流伺服电动机和交流伺服电动机的转速与控制信号的关系如图 1-3 所示，转速和控制电压的关系成正比关系，而转速的方向由控制电压的极性来决定。步进电动机的转速与脉冲电压的频率成正比，如图 1-4 所示。

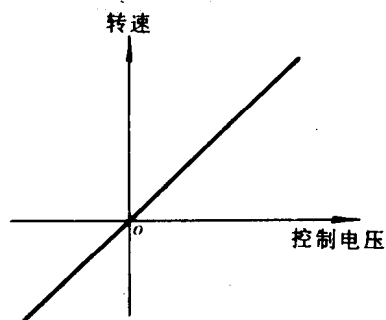


图 1-3 伺服电动机的控制特性

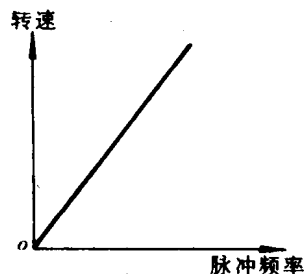


图 1-4 步进电动机的控制特性

2. 测量元件(信号元件)

测量元件包括自整角机, 交、直流测速发电机和旋转变压器等。它们能够用来测量机械转角、转角差和转速, 一般在自动控制系统中作为敏感元件和校正元件。

自整角机可以把发送机和接收机之间的转角差转换成与角差成正弦关系的电信号, 如图 1-5 所示。

测速发电机可以把转速转换成电信号, 它的输出电压与转速成正比, 如图 1-6 所示。

旋转变压器的输出电压与转子相对于定子的转角成正、余弦或线性关系, 如图 1-7 所示。

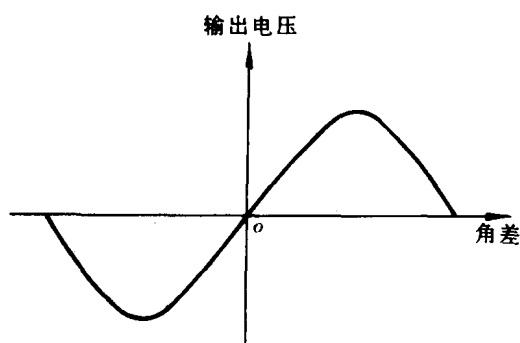


图 1-5 自整角机的控制特性

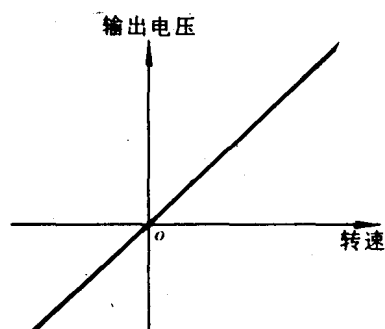


图 1-6 测速发电机的控制特性

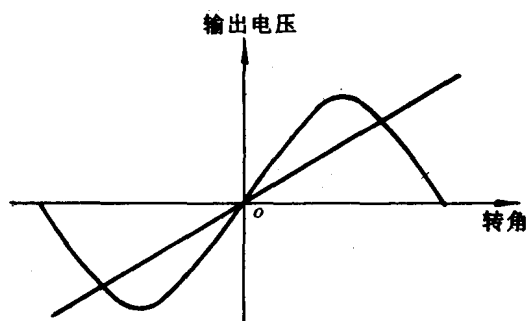


图 1-7 旋转变压器的控制特性

1.2.2 控制电机的特点

人们在日常的工作和生活中也经常要用到电机, 例如电灯所用的电是由发电机发出的, 抽水机要用电动机来带动, 工厂里车床要用电动机才能旋转, 手电钻里装的也是电机。这些电机与上面研究的控制电机有些什么不同呢?

从所举的例子中可以看出, 日常生活和工作中遇到的电机一般是作为动力来使用的, 它们的主要任务是能量转换, 发电机是把机械能转换成电能, 电动机是把电能转换成机械能, 它们的主要问题是提高能量转换的效率。控制电机在自动控制系统中, 只起一个元件的作用, 其主要任务是完成控制信号的传递和转换, 而能量转换是次要的。根据它们使用

的场合及所完成任务的特点,决定了对它们的主要要求是运行可靠、动作迅速和准确度高。众所周知,自动控制系统由成百个、成千个各种各样的元件所组成,每个元件都按照系统对它的特定要求而工作。因此,每个元件工作的好坏,直接影响到整个系统的工作。为了使整个自动控制系统能够敏捷地、准确地按照人们的要求而动作,这就要求组成系统的每一个元件都要动作迅速、准确和可靠。

同时,控制电机的使用范围很广,从地下、水面、海洋到高空、太空以至原子能反应堆等地方都在使用,而且工作环境条件常常十分复杂,如高温、低温、盐雾、潮湿、冲击、振动、辐射等,这就要求电机在各种恶劣的环境条件下仍能准确、可靠地工作。

另外,很多使用场合(尤其在航空航天技术中使用)还要求控制电机体积小、重量轻、耗电少,所以我们常见到的控制电机很多都是体积很小的微电机。像电子手表中用的步进电动机,直径只有 6 mm,长度为 4 mm 左右,耗电仅几微瓦,重量只有十几克。

1.3 如何学习“控制电机”这门课程

控制电机的种类虽然很多,可以列举出数十种来,但是这些电机的基本原理都是建立在以下两个基本规律的基础上的:一是电磁转化规律,就是在一定条件下电和磁可以相互转化;二是电流在磁场中要受到力的作用。因此在“控制电机”这门课程中,我们选择了直流伺服电动机、变压器和交流伺服电动机这三种最基本的电机作为典型,比较深入地研究和分析其中的电磁关系和它们的基本原理及特性。通过这三种电机的解剖和分析,使大家对控制电机中普遍存在的电磁规律及其分析方法有所了解。读者在学习时要抓主要矛盾,以这三种电机作为重点进行学习。首先应将这三种电机中的一些电磁关系搞清楚,并掌握分析问题和解决问题的方法,这样学习其它几种电机就不困难了。即使在学习每一种电机时,也要掌握重点。每一种电机牵涉的问题也很多、很广,要集中精力掌握一些基本规律和一些主要的理论,对一些枝节问题可不必过于深究。

由于各种控制电机的原理都是建立在基本的电磁规律基础上的,因而它们之间不是孤立的,它们既有共性,也有个性。在以后学习中就会发现,一种电机与另一种电机之间在电磁关系上、在基本特性上有很多相同之处,但它们各自又具有与众不同的特点。因此,在学习时也要用辩证法的观点来学,将各种控制电机联系起来,着重分析和掌握一些共同规律,同时也要研究每个电机所具有的特殊性质。

为了便于理解,本教材不是按控制电机的性质进行分类的,而是把电磁关系比较接近的放在一起,按照由浅入深、循序渐进的原则安排章、节次序。

对自动控制系统专业的学生来说,今后的工作中主要是使用控制电机,所以通过本门课程主要是学习控制电机的特性和使用方法。但同时我们还需要学习电机的基本原理,因为对电机来说,其使用时的条件只是外因,电机之所以有各种特性的根本原因是在于电机本身的内部矛盾。我们要通过学习电机的基本原理,了解电机内部的基本矛盾,这样才能正确而主动地掌握控制电机的使用方法。