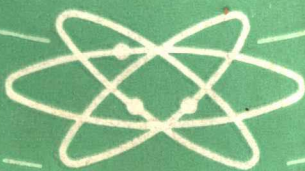


高等学校教材

控制电机

陈隆昌 陈筱艳 编著



西北电讯工程学院出版社

258

高等学校教材

控 制 电 机

陈隆昌 陈筱艳 编著

西北电讯工程学院出版社

1984

内 容 简 介

本书主要内容是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,步进电动机,交磁放大机,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《控制电机》课程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之用。

高等学校教材

控制电机

陈隆昌 陈筱艳 编著

西北电讯工程学院出版社出版

西北电讯工程学院印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 $787 \times 1092 - \frac{1}{16}$ 印张19 印刷字数457,000

1984年6月新一版 1984年6月第一次印刷 印数15,000

书号: 15322·1 定价: 2.06元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是通过教学实践，从师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

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付教授担任主审。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。全书共分十一章,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;七至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,由易到难的来安排章次。

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

绪论

一 控制电机在自动控制系统中的作用	1
二 控制电机的种类和特点	4
三 如何学习控制电机这门课程	6

第一章 直流测速发电机

1-1 直流发电机的工作原理和结构	7
1-2 直流电势的大小	11
1-3 直流测速发电机及其输出特性	13
1-4 直流测速发电机的误差及其减小的方法	15
1-5 直流测速发电机的应用	21
1-6 直流测速发电机的性能指标和使用	23
1-7 直流测速发电机的发展动向	26
小 结	28
复习思考题	29

第二章 直流伺服电动机

2-1 直流电动机的工作原理	30
2-2 直流电动机的转矩和转矩平衡方程式	31
2-3 直流电动机的反电势和电压平衡方程式	33
2-4 直流电机两种运行状态的比较	34
2-5 直流电动机的使用	36
2-6 直流电动机的型号和额定值	41
小 结	46
思考题和习题	46
2-7 直流伺服电动机的控制方法	47
2-8 直流伺服电动机的特性	48
思考题和习题	54
2-9 直流伺服电动机在过渡过程中的工作状态	54
2-10 直流伺服电动机的过渡过程	56
2-11 直流力矩电动机	61
2-12 低惯量直流伺服电动机和无刷直流电动机	64

第三章 交轴磁场电机放大机

3-1 直流发电机可看作功率放大器	69
-------------------	----

3-2 交磁放大机的工作原理	70
3-3 交磁放大机的空载特性和外特性	71
3-4 交磁放大机的技术数据和使用	73
小 结	75

第四章 变压器

4-1 概述	76
4-2 变压器空载时的情况	77
4-3 变压器有载时的情况	79
4-4 变压器的等值电路	80
4-5 变压器的相量图	85
4-6 变压器的额定值及其使用	87
小 结	88
复习思考题	89

第五章 自整角机

5-1 自整角机在转角随动系统中的功用	91
5-2 自整角机的结构和控制式自整角机的工作原理	92
5-3 控制式自整角机的质量指标	106
5-4 力矩式自整角机	109
5-5 自整角机技术数据和使用	111
5-6 国内外自整角机发展动向	116
小 结	118
思考题和习题	119

第六章 旋转变压器

6-1 概述	121
6-2 正余弦旋转变压器的结构特点	121
6-3 正余弦旋转变压器的工作原理	122
6-4 线性旋转变压器	125
6-5 旋转变压器的应用	126
6-6 旋转变压器的特性指标和技术数据	127
小 结	131
复习思考题	131
6-7 多极旋转变压器及其在双通道同步随动系统中的应用	132
6-8 感应同步器	137
6-9 感应移相器	142

第七章 交流伺服电动机

7-1 概述	146
--------------	-----

7-2	交流伺服电动机结构特点和工作原理	146
7-3	两相绕组的圆形旋转磁场	150
7-4	圆形旋转磁场作用下的运行分析	157
7-5	移相方法和控制方式	171
7-6	椭圆形磁场及其分析方法	177
7-7	幅值控制时的特性	186
7-8	电容伺服电动机的特性	190
7-9	交流伺服电动机主要性能指标	193
7-10	交流伺服电动机的使用	195
7-11	交流伺服电动机的主要技术数据	202
	小 结	205
	复习思考题和习题	206

第八章 交流异步测速发电机

8-1	概述	208
8-2	交流异步测速发电机结构和工作原理	209
8-3	异步测速发电机的特性和主要技术指标	211
8-4	异步测速发电机的使用	219
8-5	交流异步测速发电机产品型号和主要技术数据	224
8-6	交流伺服测速机组	225
	小 结	226
	复习思考题	226

第九章 小功率同步电动机

9-1	概述	227
9-2	永磁式同步电动机	229
9-3	反应式同步电动机	231
9-4	磁滞同步电动机	234
9-5	电磁减速式同步电动机	236
9-6	部分产品的主要技术数据	240
	小 结	241
	复习思考题	242

第十章 步进电动机

10-1	概述	243
10-2	反应式步进电动机工作原理和基本特点	245
10-3	反应式步进电动机的特性	250
10-4	电源及分配方式对电机性能的影响	267
10-5	步进电动机主要性能指标和技术数据	271

10-6 其它类型的步进电动机·····	273
小 结 ·····	275
复习思考题和习题 ·····	276

第十一章 直线电机

11-1 概述·····	277
11-2 直线感应电动机·····	277
11-3 直线直流电机·····	280
11-4 直线自整角机·····	282
11-5 直线和平面步进电动机·····	283

附 录

附录一 各种控制电机的传递函数 ·····	287
附录二 时间常数的测试方法 ·····	288
附录三 控制电机产品名称代号 ·····	290
附录四 控制电机机座号 ·····	292
附录五 控制电机使用环境条件 ·····	292
附录六 控制电机电源频率和电压等级 ·····	292

绪 论

一、控制电机在自动控制系统中的作用

党的十二大向我们指出了祖国壮丽、灿烂的美好前景，鼓舞着全国人民为实现我国的工业、农业、科学技术和国防的现代化而努力奋斗。在实现这个伟大而艰巨的任务中，各个部门需要尽可能地采用各种先进技术，其中包括各种类型的自动控制系统、遥控和解算装置。例如在生产过程自动化中，在现代国防所应用的武器中就需要有很多这样的自动控制系统和装置。目前，这些系统和装置大部分是机械和电气相结合的，需要用到大量的各种各样的元件，而控制电机就是其中的重要元件之一。例如在一枚较复杂的导弹或一架飞机中就要用到成百台，在一台用来指挥大炮射击的机电式指挥仪中要用几十台，就连一个在飞机的仪表盘上给驾驶员指示飞机航向的指示器中，也要用到三台不同类型的控制电机。如果没有这些控制电机，导弹就无法发射，飞机就无法起飞，因此，控制电机在自动控制系统中是不可缺少的。

各种控制电机从它们的外表看差不多都是一个圆柱体，中间有一根转动轴，体积一般都比较小，目前控制电机系列产品中最小的机座外径只有10毫米左右，和小姆指差不多粗，因此控制电机是一种微电机。从它们完成的任务来看，各种控制电机又各不相同，有的用来带动自动控制系统中的机构运动，有的用来量测机械转角或转速，有的可以进行三角函数运算，有的可以进行积分或微分运算等。可以说，电机虽小，用处不少。下面以雷达扫描及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地位。

雷达天线控制系统的原理线路如图 0-1 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 0-1 上的闸刀 K 合在位置 1。第二种状态是当天线捕捉到目标时，把闸刀立即合向位置 2，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。

（一）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无线电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。

因为自整角接收机 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，接收机就有和转角差 γ 成正比的交流电压 U_1 输出。这样，自整角机就好象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 ，

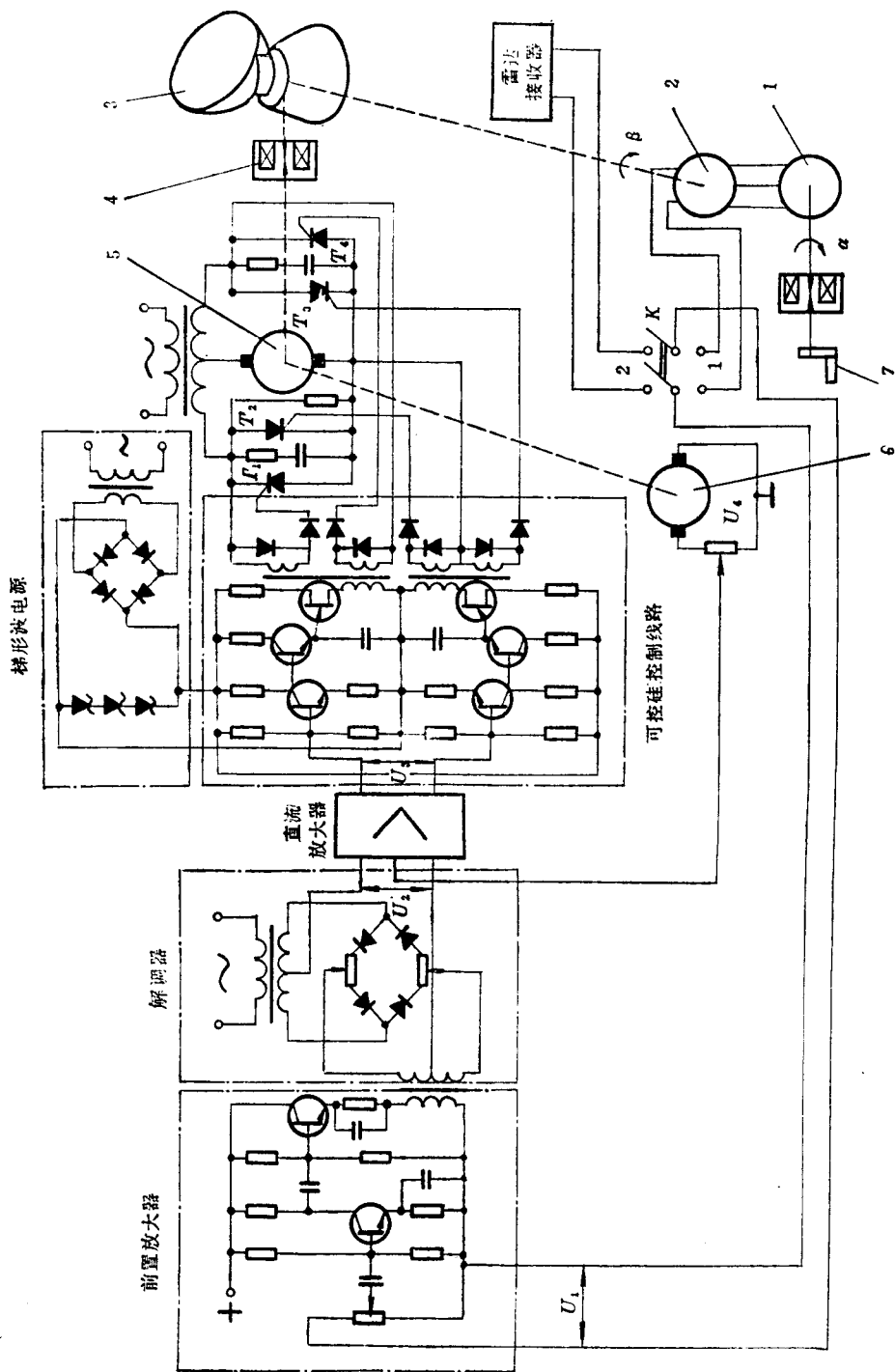


图 0-1 天线控制系统原理图

- 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

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 T_1 和 T_4 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 T_2 和 T_3 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使天线和发送机之间的转角差 γ 减少的方向旋转,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 和它的转速 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0-2这样的方框图来表示。图上各个元件和实际线路对应如下:

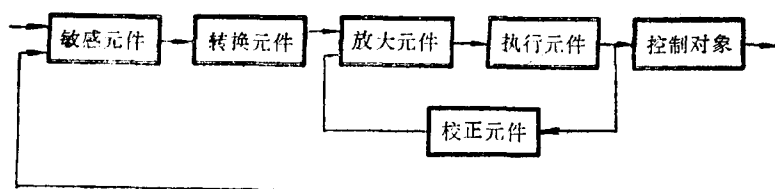


图0-2 天线控制系统方框图

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。

(二) 天线控制系统的自动跟踪状态

当雷达手从显示器的萤光屏上看到雷达已经捕捉到飞机以后,立即把闸刀 K 合向位置2,系统就工作在跟踪状态。这时,雷达接收机收到雷达波从飞机反射回来的回波,并把它转换成电信号直接输入放大器去控制天线的旋转,此时天线不需要手控而自动地作跟踪飞机的运动。

上述控制系统中所用的自整角发送机、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，因此对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如控制电机也要熟悉，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。

二、控制电机的种类和特点

（一）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、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

主要包括直流伺服电动机、交流伺服电动机、步进电动机和直线电动机等。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电信号的关系如图 0-3 所示。转速和控制电压的关系是正比关系，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 0-4 所示。

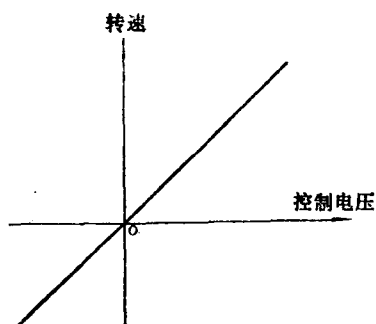


图 0-3 伺服电动机的控制特性

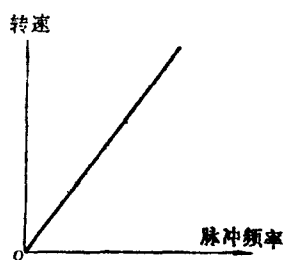


图 0-4 步进电动机的控制特性

2. 测量元件

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0-5所示。

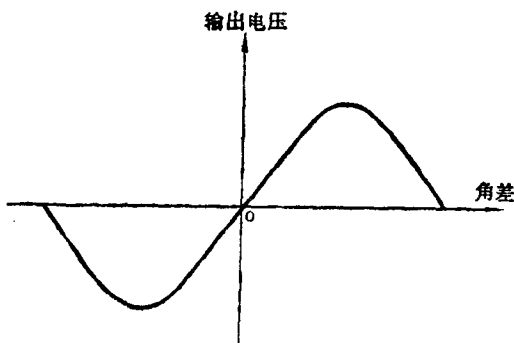


图 0-5 自整角机的控制特性

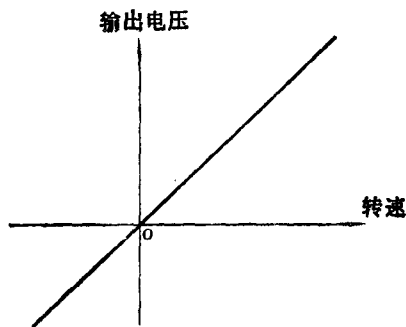


图 0-6 测速发电机的控制特性

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0-6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0-7所示。

上面所列举的是几种主要的控制电机，除此之外，还有许多特殊用途的控制电机。如在一些控制系统中还经常用到电机放大机，它和电子放大器一样可以作信号的功率放大，因此可作为放大元件。由于电机放大机体积大，有噪声，维护不便，近来已逐步被可控硅放大器所代替。

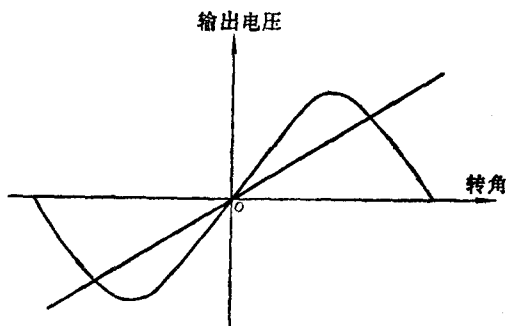


图 0-7 旋转变压器的控制特性

(二) 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，自动控制系统是由成百个、成千个各种各样元件所组成，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、太空以致原子能反应堆等地方都在使用，而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(尤其是高空中使用)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。象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,耗电不到 $1\mu\text{W}$,重量只有十几克。

三、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。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是很多、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,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,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,这样才能正确地主动地掌握控制电机的使用方法。

最后还应指出,小功率同步电动机是一般用途电动机,变压器也不属于控制电机范围,但由于它们在控制系统中得到广泛的应用,在实际的工作中又经常会遇到,故也列为本教材的内容。

第一章 直流测速发电机

在绪论中提到的天线位置控制系统中,已经遇到作为自动控制系统校正元件的直流测速发电机。就物理本质来说,此种电机是一种测量转速的小型直流发电机。从能量转换的角度来看,它把机械能转换成电能,输出直流电;从信号转换的角度来看,它把转速信号转换成电压信号,其值和转速成正比,即

$$U = K n$$

式中 U 为测速发电机的输出电压;

n 为测速发电机的转速;

K 为比例系数。

也就是说,测速发电机的输出电压能表征转速。因而可以用来测速,故得名测速发电机。

由于直流测速发电机本身是一种小型直流发电机,故首先介绍直流发电机的工作原理和结构,推导其输出电势公式,然后叙述直流测速发电机的特性及应用。

1-1 直流发电机的工作原理和结构

(一) 直流电势是怎样产生的

为了简明易懂,用一个比较简单的环形绕组两极电机的模型来说明。图 1-1 是该模型的示意图。

图中磁极 N、S 和电刷 A、B 在空间固定不动。安放线圈的环形铁心、换向器都装在轴上,并由原动机带着旋转。磁极的中心线称为磁极轴线, N、S 极之间的中心线称为几何中心线。环形铁心上的一匝线圈称为一个元件。元件 1、2、3……均匀地绕在环形铁心上,并自成闭合回路。换向器有许多导电的换向片 1、2、3……,其片数等于元件数,元件 1、2、3……的头尾分别接到相邻的换向片上,换向片之间则相互绝缘。电刷 A、B 位于几何中心线并压在换向器上,当电机旋转时,电刷和换向器作滑动接触。

磁通由 N 极通过环形铁心进入 S 极。当电机旋转时,处于环形铁心外表面的导体将切割磁通产生感应电势。内腔里的导体不切割磁通不感应电势,只起连接作用。如果电机向某一方向旋转,则所有元件就顺次不断地从一种极性越过几何中心线进入相对的异性极性下。也就是说,它一会儿切割 N 极磁通,一会儿切割 S 极磁通,因此所有元件的电势都是交变电势。那末电刷两端的电压为什么又是方向不变的直流电势呢?

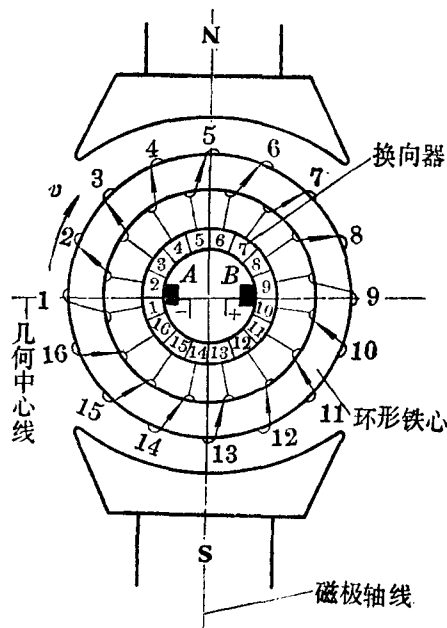


图 1-1 环形绕组原理图

首先根据右手定则，确定电机旋转时元件的电势方向。从图 1-1 可知，当电机按顺时针方向旋转时，不管哪一瞬间，不管转动部分转到哪个位置，N 极下的导体（指元件在铁心外表面的有效边），其电势方向都是离开读者指向纸面，而 S 极下导体的电势都是离开纸面指向读者，这样元件中的电势便如图 1-1 中箭头所示。

再看电机旋转时，电刷通过换向片轮流和元件 1、2、3……连接。尽管两电刷间所连接的元件每瞬间都不一样，但两个电刷所连接的元件总是位于一定的磁极之下。当电刷位于几何中心线时，A、B 电刷便连接了 N 极下所有的元件，构成一条支路，并连接了 S 极下所有的元件构成另一条并联支路，其等效电路图如图 1-2 所示。由于 N、S 极下元件电势的方向

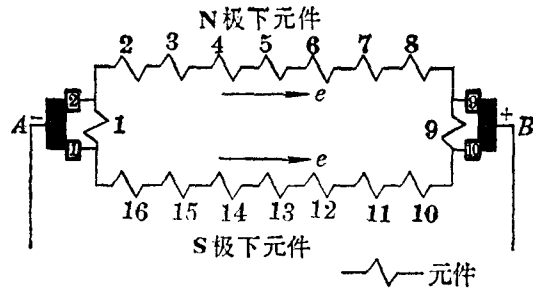


图 1-2 等效电路

都是不变的，所以电刷的极性也就不变。即 A 电刷是负刷，B 电刷是正刷。如果电机反向旋转，则电刷极性和上述相反。即 A、B 电刷之间只产生直流电势。

由图 1-1 还可以看出，为使电刷间获得的电势最大，电刷必须通过换向片与位于几何中心线上的导体相连接；或者说被电刷短路的元件应处于感应电势为零的位置。这是一般直流电机安放电刷的原则，应特别注意。

由于环形铁心内腔的导体不切割磁通，不产生电势，它们是无效的，这对用铜很不经济。因此通过生产实践，环形绕组被淘汰了，取代它的是鼓形绕组。但环形绕组和鼓形绕组在作用原理上没有区别，而环形绕组结构简单，易为初学者所接受，故我们分析工作原理时往往仍采用环形绕

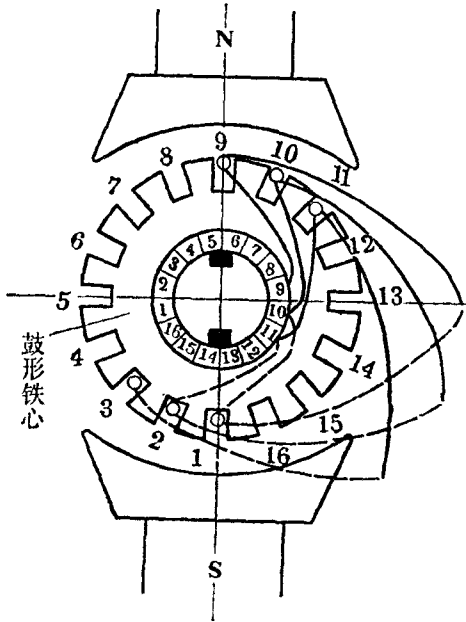


图 1-3 鼓形绕组简图

组。如果把环形绕组铁心内腔的导体移到鼓形铁心的外圆上，使之成为有效边，则环形绕组便过渡到鼓形绕组。

图 1-3 为鼓形绕组简图。铁心呈鼓形（实为圆柱形），表面上有齿有槽，槽中安放元件。为简明起见，图中只画了部分元件，元件形状如图 1-4 所示。匝数等于 1 的元件称为单匝元件，

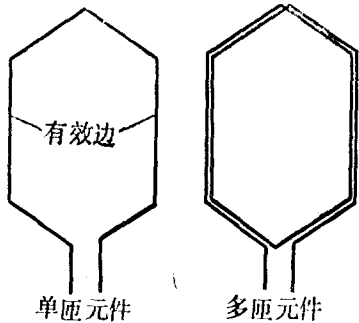


图 1-4 鼓形绕组元件