



电工学教学小丛书

控制电机

唐 介 编

高等教育出版社

33

电工学教学小丛书

控制 微 电 机

唐 介 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本787×1092 1/32 印张7.25 字数157 000

1987年7月第1版 1987年7月第1次印刷

印数 00 001—5,150

书号 15010·0722 定价 1.35 元

前 言

控制微电机是自动控制系统中应用广泛的自动控制元件。由于现有电工学教材中这部分内容所占篇幅不多,为了适应高等学校工科各非电专业的不同需要,尤其是为了满足希望对这部分内容有较多了解的学生的自学要求,故编写本书作为电工学课程的教学参考书。

鉴于以上目的,本书在论述过程中尽量不采用电专业教材中分析电机时常用的等效电路和相量图等方法,以便学生在学完电工学或电工技术基础课程之后即可自学本书而不必另外增加补充知识。

控制微电机就其基本的电磁原理来说,与普通的动力用电机虽无实质的区别,但因用途不同,对它们的基本要求以及它们的运行特性则相差甚大。不注意这一点,常会在学习过程中带有一定的盲目性,增加学习的困难。为此,本书在论述各种控制微电机时,一般先从讨论其用途和基本要求开始,最后通过应用举例再加深对它们的了解。

本书初稿由清华大学蔡耀陆同志审阅,提出了很多宝贵的意见;在编写过程中,还得到了大连工学院蒋德川教授、周武禄和马鋈副教授的很多帮助和支持,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,经验不足,错误和不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1985年8月8日

• 1 •

目 录

绪论	1
第一章 执行电动机	6
1-1 执行电动机的用途和基本要求	6
1-2 直流执行电动机的基本结构和作用原理	8
1-3 直流执行电动机的运行特性	11
(一)电枢控制时的特性	11
(二)磁极控制时的特性	14
(三)两种控制方式的比较	16
1-4 直流执行电动机的选用	17
(一)主要特点	17
(二)主要技术数据	18
(三)使用注意事项	22
(四)应用举例	23
1-5 直流力矩电动机	25
(一)基本结构	25
(二)主要特点	26
(三)主要技术数据	27
(四)使用注意事项	28
(五)应用举例	28
1-6 交流执行电动机的基本结构和作用原理	30
(一)基本结构	30
(二)作用原理	32
1-7 交流执行电动机的运行特性	38
(一)双相控制时的特性	38
(二)幅值控制时的特性	40

(三) 相位控制时的特性	43
(四) 三种控制方式的比较	46
1-8 交流执行电动机的选用	48
(一) 主要特点	48
(二) 移相方式	48
(三) 主要技术数据	53
(四) 使用注意事项	55
(五) 应用举例	55
复习题	57
第二章 微型同步电动机	59
2-1 微型同步电动机的用途和种类	59
2-2 永磁式同步电动机	61
2-3 反应式同步电动机	64
2-4 磁滞式同步电动机	67
2-5 交流力矩电动机	71
2-6 微型同步电动机的选用	74
(一) 主要特点	74
(二) 主要技术数据	75
(三) 使用注意事项	75
(四) 应用举例	76
复习题	77
第三章 步进电动机	79
3-1 步进电动机的用途和基本要求	79
3-2 步进电动机的作用原理和基本结构	81
3-3 步进电动机的运行特性	87
(一) 静态运行特性	87
(二) 步进运行特性	90
(三) 连续运行特性	91
3-4 步进电动机的驱动电源	95

3-5 步进电动机的选用	99
(一)主要特点	99
(二)主要技术数据	102
(三)使用注意事项	103
(四)应用举例	104
复习题	105
第四章 测速发电机	107
4-1 测速发电机的用途和基本要求	107
4-2 直流测速发电机的基本结构和作用原理	109
4-3 直流测速发电机的运行特性	110
4-4 交流测速发电机的基本结构和作用原理	115
4-5 交流测速发电机的运行特性	119
4-6 测速发电机的选用	121
(一)主要特点	121
(二)主要技术数据	122
(三)使用注意事项	123
(四)应用举例	125
复习题	128
第五章 自整角机	130
5-1 自整角机的用途和基本要求	130
5-2 自整角机的基本结构和种类	132
5-3 力矩式自整角机的作用原理	135
5-4 力矩式自整角机的运行特性	140
5-5 控制式自整角机的作用原理	143
5-6 控制式自整角机的运行特性	146
5-7 自整角机的并联运行	147
5-8 自整角机的选用	150
(一)主要特点	150
(二)主要技术数据	151

(三)使用注意事项	153
(四)应用举例	154
复习题.....	156
第六章 旋转变压器	158
6-1 旋转变压器的基本结构和种类	158
6-2 正、余弦旋转变压器	159
(一)空载运行	159
(二)负载运行	161
(三)应用举例	165
6-3 线性旋转变压器	167
(一)工作原理	167
(二)应用举例	168
6-4 比例式旋转变压器	170
6-5 数据传输用旋转变压器	172
6-6 旋转变压器的运行特性	174
6-7 多级自整角机和多级旋转变压器	177
6-8 旋转变压器的选用	180
(一)主要特点	180
(二)主要技术数据	181
(三)使用注意事项	181
复习题.....	182
第七章 感应同步器	183
7-1 感应同步器的特点	183
7-2 圆盘式感应同步器	184
7-3 直线式感应同步器	187
7-4 感应同步器的工作方式	189
(一)鉴幅型工作方式	189
(二)鉴相型工作方式	190
7-5 感应同步器的运行性能	192

7-6 感应同步器的应用举例	193
(一)在机械加工中的应用	193
(二)在数控机床中的应用	195
(三)在同步联结系统中的应用	198
复习题.....	198
附录 1 电磁式直流执行电动机主要技术数据表	200
附录 2 永磁式直流力矩电动机主要技术数据表	203
附录 3 鼠笼转子交流执行电动机主要技术数据表	211
附录 4 磁滞式同步电动机主要技术数据表	216
附录 5 空心杯转子异步测速发电机主要技术数据表.....	217
附录 6 自整角机主要技术数据表	218
附录 7 旋转变压器主要技术数据表	220
附录 8 反应式步进电动机主要技术数据表	

绪 论

微电机,顾名思义,就是指容量和尺寸都比较微小的电机。按用途的不同,可分为驱动用微电机、电源用微电机和控制用微电机三大类。

驱动微电机是驱动机械用的普通微型电机,如微型异步电动机,微型同步电动机等等。它们的结构和工作性能与普通中、小型电动机相同,仅容量和尺寸更小而已。

电源微电机是在自动装置中作小容量特殊电源用的微电机,如变流机、变频器等等。

本书所要介绍的控制微电机则是在自动控制系统和计算装置中作检测、放大、执行和校正等元件使用的微电机。它是在普通电机理论的基础上发展起来的特殊用途的电机。功率一般从数毫瓦到数百瓦,重量从数十克到数千克,机壳外径大多数在 12.5~130 mm 之间。当然,在大功率自动控制系统中的控制电机则可远远超过上述数值。

在科学技术高度发展的今天,控制微电机已是构成开环控制、闭环控制、同步联结和机电模拟解算装置等系统的基础元件,广泛地应用于各个部门:在民用设备中,如化工、炼油、钢铁、造船、原子能反应堆、数控机床、自动化仪表和仪器、电影、电视以及电子计算机的外部设备等;在军事装备中,如雷达天线的自动定位、飞机的自动驾驶仪、导航仪、激光和红外线技术、导弹和火箭的制导、自动火炮的射击控制、舰艇的驾驶盘和方向盘的控制等等。这些系统所能处理的物理量包括

直线位移、角位移、速度、加速度、温度、湿度、流量、压力、液面高低、比重、浓度、硬度等等。

现以自动控制系统的一个重要分支——按预定要求控制物体位置的伺服系统为例来说明一下控制微电机的种类和用途。图 1 是这种伺服系统的示意方框图，各部分的职能和常用的微电机如下：

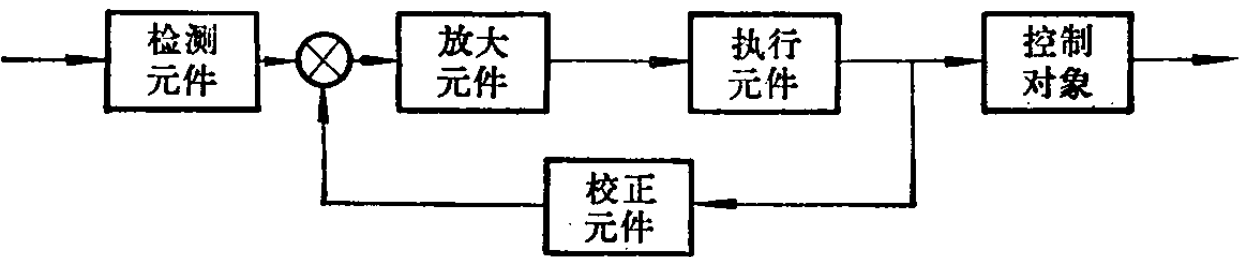


图 1 伺服系统的示意方框图

检测元件的作用是把被测量(例如位移、转角等)转换成易于传输、显示或记录的电信号。常用的控制微电机有自整角机、旋转变压器和感应同步器。

放大元件的作用是把转换而来的电信号进行电压放大和功率放大，以达到能驱动执行元件的程度。常用的控制微电机有电机放大机。不过,由于半导体器件的飞速发展,电机放大机已逐渐被各种半导体器件组成的放大器所取代。

执行元件的作用是把已放大的电信号转换为机械位移以带动控制对象。常用的控制微电机有执行电动机、力矩电动机、磁滞电动机和步进电动机。

校正元件的作用是通过反馈以改进系统的品质，保证系统工作的稳定性。常用的控制微电机有测速发电机。

上述这些控制微电机尽管职能不同，但基本上又可分为功率元件和信号元件两大类。

功率元件主要是把电信号转换成输出的电功率或机械功率的元件。例如电机放大机、执行电动机和力矩电动机等。

信号元件主要是用于把某一种信号转换成另一种信号的元件。例如,把角位移转换成电信号的旋转变压器,把转速转换成电压的测速发电机等。

各种常用的控制微电机的类别和用途如表 1 所示。

控制微电机是在普通旋转电机的基础上发展起来的,从基本原理来说与普通旋转电机并无本质区别。不过,普通电机的主要任务是完成能量的转换,对它们的要求主要是着重于提高效率等经济指标以及起动和调速等性能。而控制微电机的主要任务是完成控制信号的传递和转换。因此,现代控制系统对它的基本要求是高精确度、高灵敏度和高可靠性。

高精确度是指控制微电机的实际特性与理想特性的差异应越小越好。对功率元件来说,主要指特性的线性度和不灵敏区;对信号元件来说,主要指静态误差、动态误差以及环境温度、电源频率和电源电压的变化所引起的漂移。这些都直接影响整个系统的精确度。

高灵敏度是指控制微电机的输出量应能迅速跟上输入信号的变化,即对输入信号能作出快速响应。目前,自动控制系统中的控制指令是经常变化的,有时甚至是变化极为迅速的,因而控制微电机,特别是功率元件能否对输入信号作出快速响应,会严重影响整个系统的工作。表征快速响应的主要指标有灵敏度和机电时间常数等。

高可靠性是指控制微电机对不同的使用环境应有广泛的适应性,都能非常可靠的工作。

为了适应自动控制技术的发展,目前,新品种、新系列、高

表 1 常用控制微电机的类别和用途

类别	名 称	用 途
功 率 元 件	执行电动机	转速与转向取决于控制电压的大小和极性(或相位),而且转速随转矩的增加而下降。在系统中通过齿轮等减速机构带动负载作执行元件。
	力矩电动机	是一种能长期处于起动状态下工作的低转速、大转矩的执行元件。可不经减速机构而直接带动负载。
	磁滞电动机	具有恒速特性,亦可在异步状态下运行,主要用于驱动功率较小的要求转速平稳和起动频繁的同步驱动装置中。
	低速电动机	不需要齿轮减速即可得到低转速。长期堵转不会烧坏,转动惯量小,起动快、通以交流可作低速运转,加上脉冲电压可作步进运转。可作直接驱动负载的执行元件。
	步进电动机	由专门的电源供给脉冲信号电压。角位移与输入脉冲数成正比,转速与输入脉冲频率成正比,多用在开环控制系统中作执行元件。
信 号 元 件	测速发电机	输出电压精确地与转速成正比,主要用作转速检测,速度反馈以及进行微分和积分计算的元件。
	自整角机	基本用途是角位移传输、变换和接收,一般由两个以上元件对接使用。输出电压信号的属于信号元件,输出功率的属于功率元件。
	旋转变压器	输出电压是转子转角的正弦、余弦或其它函数关系。主要用作坐标变换,三角解算,也可以用作角度数据传输和移相元件。
	感应同步器	用作直线或角位移的检测。

性能的控制微电机仍在不断地出现。发展的动向主要是提高精确度、灵敏度和可靠性,尺寸小型化,适应数字控制的要求以及满足特殊性能或特殊用途的要求等等。

控制微电机品种繁多,不胜枚举,不可能一一加以讨论。

本书只是在学完电工学或电工技术基础课程的基础上，对常用的控制微电机的基本工作原理、主要运行性能和使用方法作些简要的介绍，供希望增加这方面知识 的同学及有关科技人员参考。

第一章 执行电动机

1-1 执行电动机的用途和基本要求

执行电动机(或称伺服电动机)是自动控制系统和计算装置中广泛应用的一种执行元件,其功能是把所接受的电信号转换为电动机转轴的角位移或角速度的变化。执行电动机的转速通常要比控制对象(电动机的负载)的运动速度高得多,一般都是通过减速机构(如齿轮)将两者联接起来的。执行电动机的应用实例如图 1-1 所示,它是温度测量和控制系统中经常应用的自动电子电位差计的基本电路。热电偶将被测温度变换成与之成正比的热电动势 E_t , 直流电源 E_r 经可调电阻 R 提供一个给定电压 U_r , 两者相比较后所得到的差值 ΔU 称为偏差信号,经放大器放大后作为执行电动机的控制信号(控制电压)。执行电动机的转轴则带动可调电阻的滑动触点以及指示记录机构(指针和记录笔)。若 E_t 与 U_r 相等,执行电动机的控制电压等于零,电动机不会旋转,指针所指示的刻度就是此时的准确温度。当被测温度升高或降低时, E_t 大于或小于 U_r , 电动机顺时针或反时针方向旋转,带动可调电阻的滑动触点向上或向下移动,直到两者重新相等为止。上述电路稍加改变还可以用来对温度进行自动调节。

由此可见,控制系统对执行电动机的基本要求是:

(1) 良好的可控性 即指执行电动机在控制电压等于零

时不应旋转；控制电压不等于零时，其转速与转向应完全取决

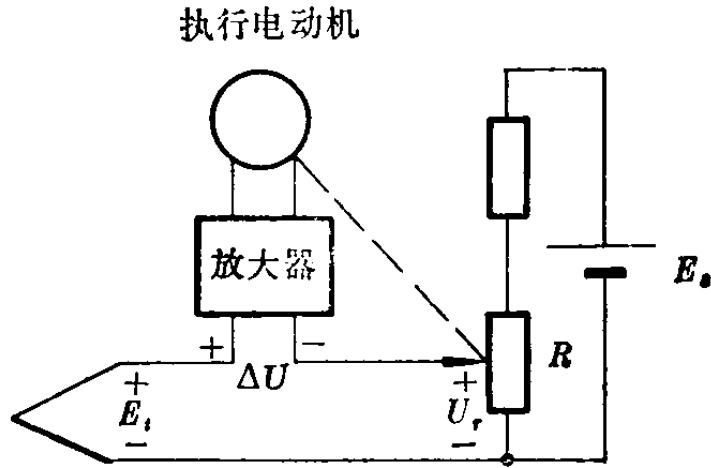


图 1-1 电子电位差计的基本电路

于控制电压的大小与极性(或相位)。而且最好转速能正比于控制电压的大小，即最好具有线性的调节特性。

(2) 运行稳定 即为了能在较宽的速度范围内稳定运行，执行电动机应具有下垂的机械特性；而且最好转速能随转矩的增加而均匀下降，即最好具有线性的机械特性。执行电动机特性的非线性将会给系统的设计带来一定的困难。

(3) 快速响应 即要求执行电动机在接到控制信号时能快速起动；失去控制信号时能迅速停止；在控制信号的大小变化时能迅速跟上信号的变化。这就希望电动机能有较大的起动转矩和较小的转动惯量，而且在控制信号消失和减小的瞬间能自行制动，迅速减速。

除以上基本要求外，不同的控制系统还会对执行电动机提出其它一些要求。例如，当控制系统中放大器的输出功率有一定限制时，要求执行电动机的控制功率尽可能小等。

按电流种类的不同，执行电动机可分为直流执行电动机和交流执行电动机两大类。还有一种力矩电动机也可以看成

是一种特殊类型的执行电动机，也放在本章中一起讨论。

1-2 直流执行电动机的基本结构和作用原理

一般的直流执行电动机的基本结构与普通直流电动机并无本质的区别。也是由装有磁极的定子、可以转动的电枢和换向器等组成。按励磁方式之不同可分为电磁式和永磁式两种。电磁式直流执行电动机的磁场由励磁绕组产生，按励磁绕组和电枢绕组联接方式的不同，又分他励式、并励式和串励式三种，一般多用他励式。永磁式直流执行电动机的磁场由永久磁铁产生，无需励磁绕组和励磁电源。为了适应各种不同系统的需要，近年来从结构上作了许多改进，又发展了无槽电枢、空心杯形电枢、印刷绕组电枢和无刷直流执行电动机等品种。它们的特点及应用范围见表 1-1。

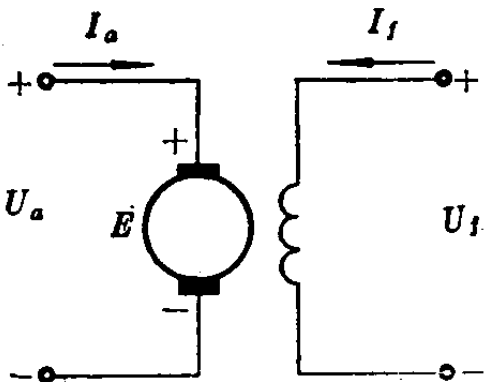


图 1-2 直流执行电动机的原理图

式三种，一般多用他励式。永磁式直流执行电动机的磁场由永久磁铁产生，无需励磁绕组和励磁电源。为了适应各种不同系统的需要，近年来从结构上作了许多改进，又发展了无槽电枢、空心杯形电枢、印刷绕组电枢和无刷直流执行电动机等品种。它们的特点及应用范围见表 1-1。

直流执行电动机的作用原理与普通直流电动机相同。现以他励式直流执行电动机为例，电路如图 1-2 所示。当电枢绕组和励磁绕组分别加上电压 U_a 和 U_f 后，电枢电流 I_a 与励磁电流 I_f 产生的磁场相互作用，从而产生了使电枢旋转的电磁转矩：

$$T = C_T \Phi I_a \tag{1-1}$$

电枢旋转时，电枢绕组又会切割磁极的磁力线而产生反电动势：

$$E = C_E \Phi n \tag{1-2}$$

表 1-1 直流执行电动机的特点和应用范围

名称	励磁方式	产品型号	结 构 特 点	性 能 特 点	适用范围
一般直 流执行 电动机	电 磁 或 永 磁	SZ 或 SY	与普通直流电机 相同，但电枢铁心 长度与直径之比大 一些，气隙较小。	具有下垂的机械 特性和线性的调节 特性，对控制信号 响应快速。	一般直 流伺服 系统。
无槽电 枢直流 执行电 动机	电 磁 或 永 磁	SWC	电枢铁心为光滑 圆柱体，电枢绕组 用环氧树脂粘在电 枢铁心表面，气隙 较大。	具有一般直流执 行电动机的特点， 而且转动惯量和机 电时间常数小，换 向良好。	需要快速 动作、功 率较大的 直流伺服 系统。
空心杯 形电枢 直流执 行电动 机	永 磁	SYK	电枢绕组用环氧 树脂浇注成杯形， 置于内、外定子之 间，内、外定子分别 用软磁材料和永磁 材料做成。	具有一般直流执 行电 动 机 的 特 点 外，转动惯量和机 电时间常数小，低 速运转平滑，换向 好。	需要快速 动作的直 流伺服系 统。
印刷绕 组直流 执行电 动机	永 磁	SN	在圆盘形绝缘薄 板上印制裸露的绕 组构成电枢，磁极 轴向安装。	转动惯量小，机 电时间常数小，低 速运行性能好。	低速和起 动、反转 频繁的控制 系统。
无刷直 流执行 电动机	永 磁	SW	由晶体管开关电 路和位置传感器代 替电刷和换向器， 转子用永久磁铁做 成，电枢绕组在定 子上且做成多相式。	既保持了一般直 流执行电动机的优 点，又克服了换向 器和电刷带来的缺 点。寿命长，噪音 低。	要求噪音 低、对无 线电不产 生干扰的 控 制 系 统。

式中 C_T 和 C_E 是由电机结构所决定的常数。由电工学*可知，它们之间有如下关系：

* 见大连工学院电工学教研室编的《电工学》下册（第一版）例题 12-1 和例题12-2。