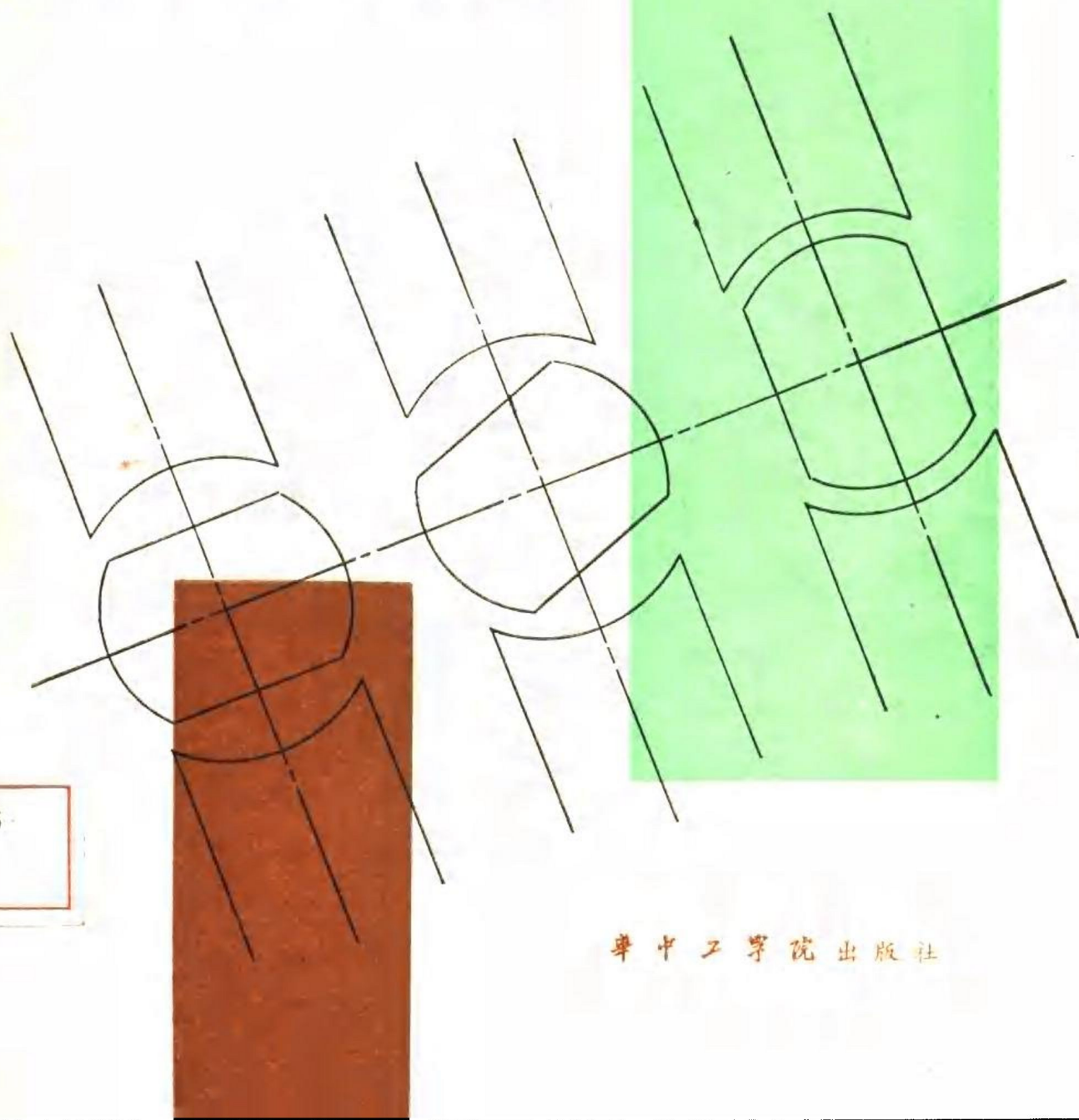


# 控制电机 及其应用

李忠高 编著 陶醒世 梁润生 审校



183

华中工学院出版社

S7  
TM383  
5  
3

# 控制电机及其应用

李忠高 编著 陶醒世 梁润生 审校

CA04/82

华中工学院出版社

**B** 207774

## 内 容 提 要

本书从各类控制电机的结构入手，着重讨论一般原理，并选择了典型的应用实例进行分析，使读者能在较短的时间内，系统地掌握控制电机的原理，并进而在实际中应用。

本书概念清晰、重点突出、层次清楚，可作为工科院校、职工大学、电视大学、函授大学工业自动化专业的教材，也可供工程技术人员参考。

### 控制电机及其应用

李忠高 编著

陶醒世 梁润生 审校

责任编辑 知平

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所发行

华中工学院出版社沔阳印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：10.5 字数：250,000

1986年8月第1版 1986年8月第1次印刷

印数：1—5,000

统一书号：15255—079 定价：1.80元



# 目 录

前言 .....	( 1 )
概论 .....	( 2 )
0-1 控制电机的基本用途 .....	( 2 )
0-2 控制电机的分类 .....	( 2 )
0-3 对控制电机的基本要求 .....	( 3 )
0-3-1 可靠性 .....	( 3 )
0-3-2 精度高 .....	( 4 )
0-3-3 快速响应 .....	( 4 )
0-4 控制电机的发展概况 .....	( 4 )
<b>第一章 直流伺服电动机</b> .....	
1-1 概述 .....	( 5 )
1-2 结构特点和工作原理 .....	( 5 )
1-2-1 传统型直流伺服电动机 .....	( 5 )
1-2-2 低惯量型直流伺服电动机 .....	( 6 )
1-3 运行特性 .....	( 6 )
1-3-1 静态特性和静态参数 .....	( 6 )
1-3-2 动态特性和动态参数 .....	( 8 )
1-4 无刷直流伺服电动机 .....	( 11 )
1-4-1 基本结构和工作原理 .....	( 11 )
1-4-2 运行特性 .....	( 15 )
1-5 其它型式直流伺服电动机 .....	( 16 )
1-5-1 光电式位置传感器无刷直流伺服电动机 .....	( 16 )
1-5-2 霍尔无刷直流伺服电动机 .....	( 17 )
1-5-3 直流力矩电动机 .....	( 18 )
1-5-4 永磁直流直线电动机 .....	( 19 )
1-6 直流伺服电动机的应用 .....	( 20 )
1-6-1 在位置控制系统中的应用 .....	( 20 )
1-6-2 在速度控制系统中的应用 .....	( 21 )
1-6-3 在混合控制系统中的应用 .....	( 21 )
1-6-4 在张力控制系统中的应用 .....	( 22 )
1-6-5 在自动检测装置中的应用 .....	( 23 )
1-6-6 在温度控制系统中的应用 .....	( 23 )
1-7 产品的选择和使用 .....	( 24 )
1-7-1 产品的选择 .....	( 24 )
1-7-2 产品的使用 .....	( 25 )
<b>思考题</b> .....	<b>( 26 )</b>

## 第二章 交流伺服电动机

2-1 概述 .....	(28)
2-2 结构特点和工作原理 .....	(28)
2-2-1 结构特点 .....	(28)
2-2-2 工作原理 .....	(29)
2-3 控制方法 .....	(30)
2-3-1 幅值控制 .....	(31)
2-3-2 相位控制 .....	(31)
2-3-3 幅值相位控制 .....	(32)
2-4 运行特性和性能指标 .....	(33)
2-4-1 静态特性和静态参数 .....	(33)
2-4-2 动态特性和动态参数 .....	(38)
2-4-3 性能指标 .....	(40)
2-5 交流伺服电动机的应用 .....	(40)
2-5-1 用于位置控制系统 .....	(41)
2-5-2 用于检测装置 .....	(41)
2-5-3 用于计算装置 .....	(42)
2-5-4 用于增量运动的控制系统 .....	(43)
2-6 产品的选择和使用 .....	(43)
2-6-1 电流种类的选择 .....	(43)
2-6-2 结构型式的选择 .....	(44)
2-6-3 使用中的问题 .....	(44)
思考题 .....	(47)

## 第三章 小功率同步电动机

3-1 概述 .....	(48)
3-2 永磁式同步电动机 .....	(48)
3-2-1 结构特点 .....	(48)
3-2-2 工作原理 .....	(49)
3-2-3 矩角特性 .....	(49)
3-2-4 起动方法 .....	(50)
3-3 磁阻式同步电动机 .....	(50)
3-3-1 结构特点 .....	(50)
3-3-2 工作原理 .....	(51)
3-3-3 矩角特性 .....	(52)
3-3-4 起动方法 .....	(52)
3-4 磁滞式同步电动机 .....	(53)
3-4-1 结构特点 .....	(53)
3-4-2 工作原理 .....	(53)
3-4-3 运行特性 .....	(54)
3-4-4 起动问题 .....	(55)
3-5 连续运转低速同步电动机 .....	(55)
3-5-1 磁阻式电磁减速同步电动机 .....	(56)

3-5-2 永磁式电磁减速同步电动机	( 57 )
3-6 小功率同步电动机的应用	( 58 )
3-7 产品的选择和使用	( 59 )
3-7-1 产品的选择	( 59 )
3-7-2 使用中的问题	( 59 )
思考题	( 61 )

#### 第四章 步进电动机

4-1 概述	( 62 )
4-2 结构特点和工作原理	( 62 )
4-2-1 永磁式步进电动机	( 62 )
4-2-2 磁阻式步进电动机	( 63 )
4-2-3 永磁感应子式步进电动机	( 66 )
4-2-4 直线和平面步进电动机	( 68 )
4-3 运行特性和性能指标	( 69 )
4-3-1 静态特性	( 70 )
4-3-2 动态特性	( 71 )
4-3-3 性能指标	( 75 )
4-4 驱动电源	( 76 )
4-4-1 环形脉冲分配器	( 76 )
4-4-2 功率放大电路	( 77 )
4-5 步进电动机的应用	( 78 )
4-5-1 用于电子计算机的外部设备	( 78 )
4-5-2 用于数字程序控制系统	( 79 )
4-5-3 用于点位控制的闭环控制系统	( 79 )
4-6 产品的选择和使用	( 80 )
4-6-1 产品的选择	( 80 )
4-6-2 使用注意事项	( 81 )
思考题	( 81 )

#### 第五章 交磁电机放大机

5-1 概述	( 83 )
5-2 结构特点和工作原理	( 83 )
5-2-1 结构特点	( 83 )
5-2-2 工作原理	( 84 )
5-3 运行特性	( 86 )
5-3-1 静态特性	( 86 )
5-3-2 动态特性	( 87 )
5-4 交磁电机放大机的应用	( 88 )
5-4-1 用于自动调压系统	( 89 )
5-4-2 用于自动调速系统	( 89 )
5-4-3 用于随动系统	( 90 )
5-5 产品的选择和使用	( 91 )
5-5-1 产品的选择	( 91 )

5-5-2 调整和使用	( 91 )
思考题	( 92 )
<b>第六章 测速发电机</b>	
6-1 概述	( 94 )
6-2 直流测速发电机	( 94 )
6-2-1 结构特点和工作原理	( 94 )
6-2-2 运行特性和性能指标	( 94 )
6-3 异步测速发电机	( 98 )
6-3-1 结构特点和工作原理	( 98 )
6-3-2 运行特性和主要性能指标	( 99 )
6-4 其它型式的测速发电机	( 101 )
6-4-1 永磁式直流低速测速发电机	( 101 )
6-4-2 永磁式直流直线测速发电机	( 102 )
6-4-3 永磁脉冲测速发电机	( 103 )
6-4-4 伺服电动机-测速发电机组	( 103 )
6-5 测速发电机的应用	( 104 )
6-5-1 用作测速元件	( 104 )
6-5-2 用作校正元件	( 104 )
6-5-3 用作解算元件	( 105 )
6-6 产品的选择和使用	( 107 )
6-6-1 产品的选择	( 107 )
6-6-2 调整和使用	( 108 )
思考题	( 110 )
<b>第七章 自整角机</b>	
7-1 概述	( 113 )
7-2 结构特点	( 113 )
7-3 力矩式自整角机系统	( 114 )
7-3-1 工作原理	( 114 )
7-3-2 运行特性和性能指标	( 117 )
7-4 控制式自整角机	( 118 )
7-4-1 工作原理	( 119 )
7-4-2 运行特性和性能指标	( 119 )
7-5 差动自整角机	( 121 )
7-5-1 概述	( 121 )
7-5-2 力矩式差动自整角接收机	( 121 )
7-5-3 力矩式差动自整角发送机	( 123 )
7-5-4 控制式差动自整角发送机	( 123 )
7-6 双通道自整角机系统	( 124 )
7-6-1 力矩式自整角双通道指示系统	( 124 )
7-6-2 控制式自整角双通道伺服系统	( 125 )
7-7 自整角机的应用	( 127 )
7-7-1 在角度指示系统中的应用	( 127 )

7-7-2	在程序控制中的应用	(128)
7-7-3	双通道自整角机系统的应用	(130)
7-7-4	在位置伺服系统中的应用	(131)
7-8	产品的选择和使用	(133)
7-8-1	自整角机的选择	(133)
7-8-2	产品的使用	(133)
	思考题	(135)
<b>第八章 旋转变压器</b>		
8-1	概述	(137)
8-2	正弦-余弦旋转变压器	(137)
8-2-1	结构特点	(137)
8-2-2	工作原理	(137)
8-2-3	输出特性和性能指标	(140)
8-3	其它型式旋转变压器	(141)
8-3-1	线性旋转变压器	(141)
8-3-2	比例式旋转变压器	(143)
8-4	旋转变压器的应用	(143)
8-4-1	用于远距离高精度的角度传输系统	(143)
8-4-2	用作解算元件	(145)
8-5	电感移相器及其应用	(146)
8-5-1	基本工作原理	(146)
8-5-2	应用举例	(147)
8-6	感应同步器及其应用	(148)
8-6-1	结构特点	(148)
8-6-2	工作原理	(149)
8-6-3	应用举例	(151)
	思考题	(152)
附录一	本书涉及的量及其单位	(155)
附录二	角标符号	(155)
附录三	主要符号	(156)
附录四	控制电机型号命名方法	(158)
	主要参考书目	(160)



# 前 言

目前,控制用微型电机在国内外得到了广泛的应用,它是自动控制系统、计算机系统、遥控遥测装置的主要组成部件。随着四化建设的发展,各部门生产过程机械化、电气化和自动化的不断深入,人们对了解和学习控制电机知识的要求越来越迫切。为了适应新形势的需要,高等工科院校工业自动化专业的教学大纲,已将控制电机从电机学中独立出来作为高年级开设的选修课,全国高教自学考试指导委员会制订的“电气工程专业(本科)考试计划”,也有《控制电机及其线路》课程。

本书是根据冶金部、机械工业部所属院校的工业自动化专业教学大纲,并参阅全国高等教育自学考试电气工程专业考试计划而编写的。初稿(即《控制电机原理及应用》讲义)已使用多遍,效果很好。这次出版的《控制电机及其应用》是在原讲义的基础上修改加工而成的。本书立足于用,因此,取材力求精练,深度适中,在写法上也尽量做到主次分明,层次清楚,概念突出。

在编写本书的时候,编者假定读者已经掌握电机学的一般基础知识。因此,在具体分析控制电机原理和特性时,尽量以电机学的理论为依据。

全书共分八章,依次阐述直流伺服电动机、交流伺服电动机、小功率同步电动机、步进电动机、交磁电机放大机、测速发电机、自整角机、旋转变压器等控制电机的结构特点、工作原理、运行特性、工程应用,产品选择和使用。

虽然,本书涉及的机种多达40~50种,但每章只重点介绍一、二种有代表性的常用机种,对其它机种,力求举一反三,触类旁通。各章内容既有内在联系,又相对独立,应用实例都选自冶金、机械、电子、军工、电力、采矿、纺织和轻工等不同行业的生产实践。每章末还附有一定数量的思考题,这些思考题富有启发性,对读者掌握本章基本内容很有帮助。思考题可供课堂讨论,也可作开卷考查或自学考试试题。

本书可作为大专院校、职工大学、电视大学、函授大学工业自动化专业的教材和电气工程专业(本科)自学考试的自学课本,也可供厂矿、企业、科研单位、部队的技术人员和电机制造专业的师生参考。

本书教学时数可在20~50学时内灵活选定。

全书由华中工学院电力系陶醒世教授主审,武汉钢铁学院自动化系梁润生副教授参加了审阅。

在编写过程中,编者得到武汉钢铁学院各级领导,特别是自动化系和教材科同志的热情鼓励和大力支持。武汉钢铁学院的黄声华、邵平凡两位同志为本书校阅了全部初稿,宋银宾副教授、李广德工程师以及中国自动化学会理事、河南省自动化学会副理事长胡东荣副教授,合肥工业大学李忠杰同志对本书初稿都提过许多宝贵意见。在此,编者向他们表示真诚的谢意。

毋庸讳言,编者的理论水平和实际知识都还不够,书中不妥和错误之处,欢迎广大读者批评指正。

编者 1985年9月

# 概 论

## 0-1 控制电机的基本用途

控制电机一般指用于自动控制、自动调节、远距离测量、随动系统以及计算装置中的微特电机。其机壳外径在12.5毫米至130毫米之间，输出功率从数百毫瓦到数百瓦，但在大功率自动控制系统中，控制电机的体积和输出功率远比这些数字大。

控制电机在国民经济各个领域中的应用是非常广泛的。

国防现代化方面用于：火炮自动瞄准，飞机和军舰自动导航，导弹遥测遥控，雷达装置自动扫描。据有关资料统计，一艘潜艇仅导航仪表配套设备就用90多台控制电机，一个自动火炮系统要用60多台，一枚导弹要用60多台。

工业现代化方面用于：机床仿形加工，程序控制，轧钢机自动控制，纺织、印染、造纸机匀速控制，布设海底电缆，各种自动记录仪表，电子计算机系统。据统计，年产120万吨的煤矿要用控制电机100多台；一座1513立方米的高炉要用40多台，某轧钢厂仅控制电机备品就多达2000余台，一台电模拟计算机要用30多台。

农业现代化方面：水坝闸门自动开启、水位自动指示、鱼群探测等也少不了控制电机。

随着人们物质生活和文化生活水平的提高，控制电机的应用范围日益扩大。例如，高层楼房电梯的自动选层，电脑控制音响设备，高级摄影录像设备，机器人等，也都具有由控制电机和其它控制元件、器械等器件组成的自动控制和检测的设备。

## 0-2 控制电机的分类

根据控制电机在自动控制系统中的职能可以把它分成四类：

(1) 测量元件 把被测量（例如转角或转角差）转换为另一种易于显示、传输或记录的物理量（例如电量）。

(2) 放大元件 将输入的信号（例如电压）进行放大，以得到足够大的功率去驱动电动机。

(3) 执行元件 把经放大元件放大后的电信号转换为机械位移，以带动控制对象。

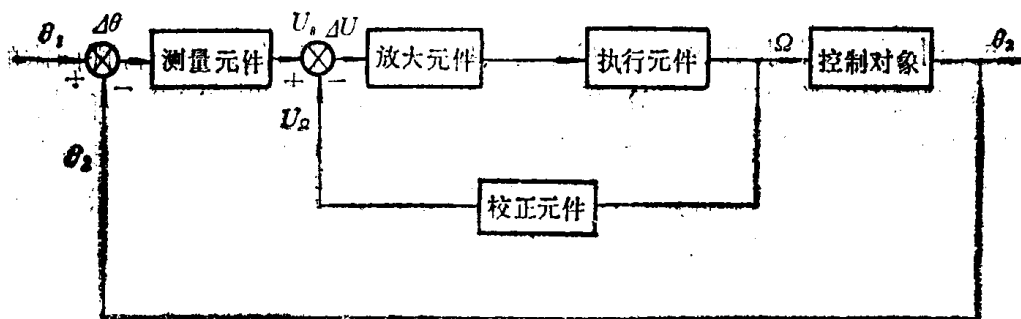


图0-1 自动控制系统

(4)校正元件 为了改善系统的品质,通常在系统中附加一些元件,以保证系统工作稳定。

图0-1为上述元件组成的自动控制系统方框图。系统的工作原理将结合具体应用实例予以介绍。其中各类元件行使的职能尽管不同,但一般可分为信号元件和功率元件两大类。信号元件主要用来转换信号,功率元件主要用来将微弱信号转换为具有所需功率的输出信号。控制电机较详细的分类方法如图0-2所示。

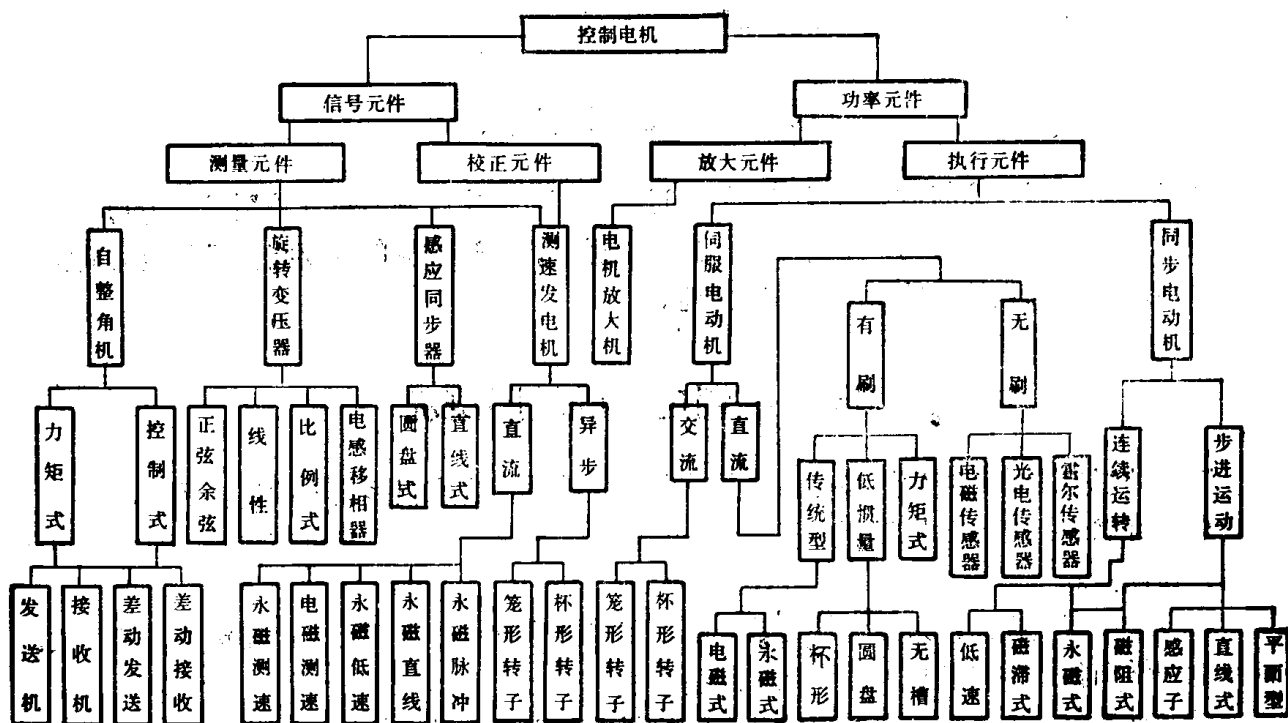


图0-2 控制电机的分类  
(图中列出的只是本书所涉及的控制电机)

### 0-3 对控制电机的基本要求

控制电机是在一般旋转电机的基础上发展起来的小功率电机。就电磁过程及所遵循的基本规律而言,它与一般旋转电机没有本质区别,只是作用不同,对它们的基本要求不一样而已。一般,驱动电机主要用来完成能量的变换,具有较高的力能指标(如效率和功率因数等);而控制电机主要用来完成控制信号的传递和变换,故要求它们技术性能可靠、稳定、灵敏、精度高、体积小、重量轻、耗电少。

#### 0-3-1 可靠性

自动控制系统是由控制电机等控制元件和其它一些器件构成的。整个系统工作是否正常,无疑取决于各元件是否可靠。在宇宙航行装置、军事装备和一些现代化的大型工业自动化系统中,所用控制电机的可靠性总是作为首要的要求。例如,采用自动化炼钢厂,一旦伺服系统中的控制电机发生故障,就会造成停产事故,甚至损坏炼钢设备;在核反应堆中使用

的执行元件，由于工作条件所限，维修不便，所以要求它们能长期可靠地工作。

### 0-3-2 精 度 高

在各种军事装备、无线电导航、自动记录、钢板轧制厚度的远程控制等自动控制系统中，对精度要求越来越高。

所谓精度，就是实际特性和理想特性之间的差异。差异越小，则元件的精度越高。元件的精度决定整个系统的精度。为了提高精度，可采用以下措施：更新结构和制造工艺，发展组合电机，研制新原理电机等。

### 0-3-3 快 速 响 应

由于自动控制系统的主令信号变化极为迅速，所以要求控制电机（特别是作为功率的控制电机，如伺服电动机）对信号能作出快速适应。快速响应的主要指标是机电时间常数和灵敏度。这些都直接影响系统的动态性能。

## 0-4 控制电机的发展概况

随着控制系统的不断发展和更新，其控制元件的性能也有很多新的改进。例如，

(1) 可靠性提高：采用无刷电机作为控制电机，可克服有刷电机可靠性差、有无线电干扰等致命缺点。

(2) 工作精度提高：采用多极旋转变压器和多极感应同步器可大大提高精度。近年来，借助电子学和物理学的新成就，研制了新型电机。

(3) 小型化、数字化：在航天设备上的控制电机应具有最小的体积和重量。为此，采用高导磁材料来发展组合电机，以进一步实现小型化。在自动控制系统中，已广泛采用数字机，其输出装置常常要求把数字信息转变为机械位移。步进电动机则较好地解决了这个问题。

(4) 控制元件与线路互相协调：伺服电动机性能是否能充分发挥，与放大器的设计关系非常密切；步进电动机工作与其驱动线路分不开；感应同步器也必须在配以适当的电子线路后，才能发挥其效能。在这方面还有许多工作要做。

最后应该说明，随着现代科学技术的发展，相继出现了一些新型元件。这些元件的出现打破了电机的传统概念，例如霍尔电机、静电电机、集成电路电机等已不再局限于一般的电机的原理和理论，而与其它学科紧密相关，本书就不专门介绍了。

# 第一章 直流伺服电动机

## 1-1 概 述

伺服电动机又叫执行电动机。它把输入的电压信号变换为轴上的角位移和角速度输出。

伺服电动机分直流和交流两大类。前者输出功率较大，后者输出功率较小。

直流伺服电动机又分传统型和低惯量型。

传统型直流伺服电动机的结构和普通直流电动机相同。其励磁方式有电磁式和永磁式两种。

低惯量型直流伺服电动机电枢分为杯形电枢、圆盘电枢、无槽电枢等种类。

自动控制系统对伺服电动机的基本要求是：调速范围广，机械特性和调节特性均为线性，无自转现象（控制电压降到零时，伺服电动机能停止转动），快速响应好（电机的转速随控制电压的改变而迅速变化）。此外，还要求伺服电动机的控制功率小、重量轻、体积小。

## 1-2 结构特点和工作原理

### 1-2-1 传统型直流伺服电动机

这种电动机的结构和普通直流电动机基本相同，由定子和转子两大部分组成的。其转子铁心由硅钢片冲制迭压而成，在转子冲片的外圆开有均匀分布的槽，槽内放置电枢绕组，绕组经换向器、电刷引出。电枢铁心长度与直径之比较普通直流电动机的大，且气隙较小。定子励磁方式有永磁式和电磁式两种。永磁式的定子上装有永久磁铁制成的磁极，电磁式的定子通常由硅钢片迭压而成，磁极和磁轭整体相连，如图 1-1 所示。在磁极上装有励磁绕组。

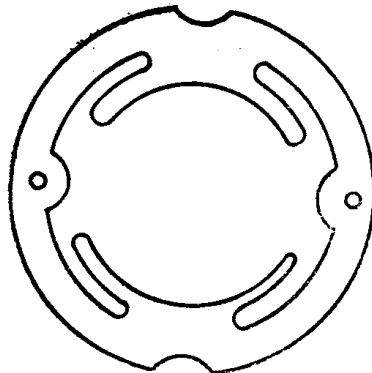


图1-1 电磁式直流伺服电动机定子冲片

传统型直流伺服电动机的工作原理和普通直流电动机相同，即由定子励磁磁通和由电刷、换向器引入的电枢电流相互作用产生电磁转矩并驱使电枢旋转。只要适当地控制电枢电流的大小和方向就能控制该电机的转速和转向。当电枢电流为零时，伺服电动机停止转动。

### 1-2-2 低惯量型直流伺服电动机

这类电动机的特点是转子轻，转动惯量小，快速响应好。图1-2所表示的杯形电枢直流伺服电动机只是其中的一种。它的定子分外定子和内定子。外定子采用软磁性材料做铁心，

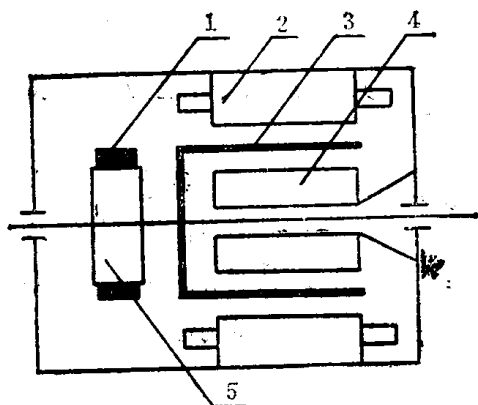


图1-2 杯形电枢、电磁式伺服电动机结构简图

- 1——电刷； 2——外定子； 3——杯形电枢；  
4——内定子； 5——换向器

装有集中励磁绕组（永磁式则用永久磁铁制成两个半圆形磁极）；内定子由圆柱形软磁性材料制成，仅作磁路的一部分，以减小磁阻。它的电枢是一个用非磁性材料（如塑料）制成的空心杯形圆筒，并直接装在电机轴上。在电枢表面，有印刷绕组，或沿圆周有轴向排成空心杯状并用环氧树脂固化成型的电枢绕组。空心电枢在外定子和内定子之间的间隙中转动。电压是通过电刷和换向器加到电枢上的。这种电枢的转动惯量比普通圆柱形电枢的转动惯量小得多。

杯形电枢直流伺服电动机的工作原理与传统型直流伺服电动机相同，也是由定子（外定

子）的励磁磁通和电枢电流相互作用产生电磁转矩的。

低惯量直流伺服电动机的电枢除了杯形电枢以外，还有圆盘电枢、无槽电枢等结构型式。

圆盘电枢：在圆形绝缘薄板上，印制裸露的绕组，通常将这种多层的电路叠粘在一起构成电枢，磁极轴向安装，具有扇形极靴。

无槽电枢：电枢铁心为光滑圆柱体，电枢绕组用耐热环氧树脂固定在圆柱形铁心表面上，定转子间气隙大。定子可采用永磁式电磁结构。这种电动机的转动惯量和电枢电感都比杯形或圆盘形电枢的大，因而动态性能较差。

## 1-3 运行特性

### 1-3-1 静态特性和静态参数

通常用电枢电压作为控制信号，实现对转速的控制，这种控制方法叫电枢控制。

电枢控制的原理图如图1-3(a)和(b)所示。

电枢控制的特点是励磁磁通 $\Phi_f$ 恒定不变，作为信号的控制电压 $U_c$ 则是变量。

若转矩不变、控制电压变化，或控制电压不变、转矩变化时，直流伺服电动机转子旋转角速度将如何变化，这就要进一步讨论反映这些物理量之间的函数关系及其特性曲线了。

## 一、静态特性——机械特性和调节特性

根据电机学中直流伺服电动机的一般理论，我们知道电枢电压平衡方程式：

$$E_a = U_a - I_a R_a, \quad (1-1)$$

电枢反电势

$$E_a = \frac{PN}{60a} \Phi_f n = \frac{PN}{2\pi a} \Phi_f \Omega, \quad (1-2)$$

电磁转矩

$$T = \frac{PN}{2\pi a} \Phi_f I_a, \quad (1-3)$$

式中， $U_a$ 、 $I_a$ 、 $R_a$  分别为电枢电压、电枢电流和电枢电阻； $P$  为磁极对数； $N$  为电枢绕组总导体数； $a$  为并联支路对数； $\Phi_f$  为励磁磁通； $n$  为转子旋转速度； $\Omega$  为转子旋转角速度； $T$  为电磁转矩。

以式(1-2)和式(1-3)代入式(1-1)，整理后得

$$\Omega = \frac{U_a}{K\Phi_f} - \frac{R_a}{(K\Phi_f)^2} T, \quad (1-4)$$

式中， $K = \frac{PN}{2\pi a}$  为电机转矩系数。

式(1-4)是直流伺服电动机运行特性的一般表达式。

对于电枢控制而言，

$$U_a = U_c, \quad \Phi_f = \Phi_r \quad (\text{因 } U_f = U_r),$$

所以

$$\Omega = \frac{U_c}{K\Phi_r} - \frac{R_a}{(K\Phi_r)^2} T = \Omega_0 - \frac{R_a}{(K\Phi_r)^2} T \quad (1-4')$$

在式(1-4')中，令  $T = 0$ ，求得理想空载角速度

$$\Omega_0 = \frac{U_c}{K\Phi_r}, \quad (1-5)$$

它与控制电压成正比。

令  $\Omega = 0$ ，求得起动转矩

$$T_{st} = \frac{K\Phi_r}{R_a} U_c, \quad (1-6)$$

它随控制电压的升高而增大。

式(1-4')就是在电枢控制时直流伺服电动机的静态特性方程式。

当  $U_c = \text{常数}$  时， $\Omega = f(T)$  为电动机的机械特性表达式；当  $T = \text{常数}$  时， $\Omega = f(U_c)$  为调节特性表达式。

如果不考虑电枢反应的影响，认为励磁磁通是常数，则由式(1-4')可知，机械特性和调节特性曲线都将是直线。分别用图1-4(a)和(b)表示。

## 二、静态参数

直流伺服电动机作为自动控制系统的一个元件，有时引用下列参数表示其静态性能：

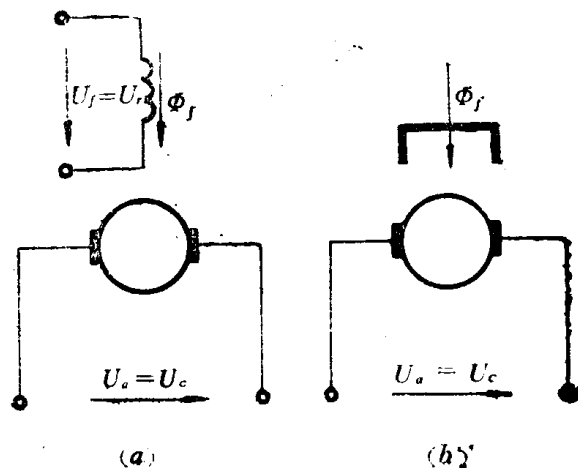


图1-3 电枢控制原理电路图  
(a)电磁式；(b)永磁式

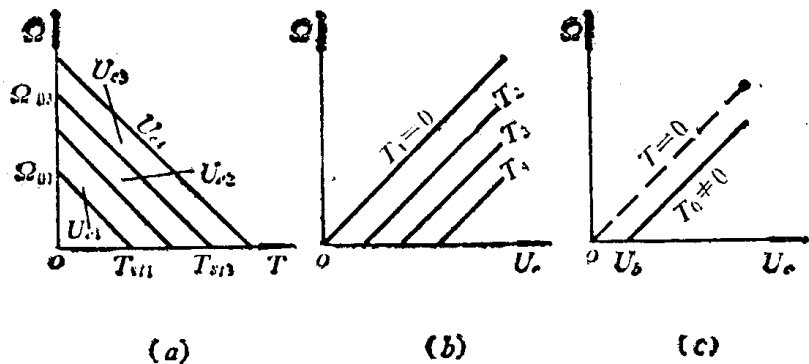


图1-4 电枢控制时直流伺服电动机静态特性  
(a)机械特性; (b)调节特性; (c)始动电压

内阻尼系数 $K_d$ : 它等于机械特性上已知点的转矩对转子角速度的导数, 即

$$K_d = \frac{dT}{d\Omega} \quad (1-7)$$

由式(1-4')可知:

$$K_d = -\frac{(K\Phi_r)^2}{R_a} \quad (1-7')$$

式(1-7')中, 负号表示转矩增加引起转子速度下降。由电机拖动理论知道, 这种下降的机械特性, 能保证伺服电动机在整个速度范围内都能稳定运行, 而且内阻尼系数的绝对值越大, 稳定的程度越高。内阻尼系数与控制电压的大小无关。不同控制电压下的机械特性曲线是一簇互相平行的直线。随着控制电压的降低, 机械特性平行地向低速度、小转矩的方向移动。此时,  $\Omega_0$  和  $T_{st}$  均随之减小, 而  $K_d$  不变。

静态放大系数 $K_g$ : 它等于调节特性上已知点的转子角速度对控制电压的导数, 即

$$K_g = \frac{d\Omega}{dU_c} \quad (1-8)$$

它表明转子速度随控制电压变化的程度。

由式(1-4')可知:

$$K_g = \frac{1}{K\Phi_r} \quad (1-8')$$

式(1-8')说明在线性的调节特性上,  $K_g$  是一个常数, 与负载转矩无关。不同负载转矩时, 调节特性曲线是一簇互相平行的直线。

始动电压 $U_b$ : 当电动机理想空载, 即 $T = 0$ 时, 电动机的调节特性从零开始 [见图1-4(c)虚线], 表示只要有很小的控制电压, 电机就能旋转起来。但实际空载, 即 $T = T_c \neq 0$ 时 [见图1-4(c)实线], 电动机在某一控制电压下才开始转动。这个控制电压叫始动电压。它的大小决定于电动机的摩擦转矩。摩擦转矩大, 始动电压大。当电动机带有负载时, 始动电压还随负载转矩的增大而增大。一般把调节特性曲线上横坐标从零到始动电压的这一范围叫不灵敏区。在不灵敏区, 虽然电枢有外加电压, 但转子转不起来。

### 1-3-2 动态特性和动态参数

动态特性是指伺服电动机外施阶跃电压 ( $t = 0$  时,  $U_c = 0$ ;  $t > 0$  时,  $U_c = \text{常数}$ ) 时,



转子速度随时间的变化规律, 即  $\Omega = f(t)$ 。

为了研究直流伺服电动机的动态特性, 通常采用拉普拉斯变换。将输入的控制电压和输出的转子角速度的时间函数变换为相应的象函数, 从而求出反映输出和输入的传递函数, 再将传递函数进行反变换, 就可以得到转子角速度和控制电压之间随时间变化的函数关系。

### 一、传递函数和动态特性

下面通过研究电枢控制时直流伺服电动机的起动特性, 学会分析直流伺服电动机动态特性的一般方法。

在讨论电枢控制直流伺服电动机动态特性时, 由于电枢电路的电感很小, 所以, 当电枢外施阶跃电压时, 可认为电枢电流和电磁转矩瞬时上升到稳定值。

由电机拖动的一般理论, 可以写出伺服系统的运动方程式:

$$T - T_s = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (1-9)$$

式中,  $T_s$  为轴上静阻转矩;  $J$  为折算到电动机轴上的系统总转动惯量。

为简单起见, 假设  $T_s = 0$ , 于是, 式(1-9)可写成

$$T = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (1-9')$$

式中,  $T$  和  $\Omega$  是相互对应的, 如图1-5所示的机械特性上某点  $C$  的坐标。

由于三角形  $ABC$  和  $AB'C'$  相似, 所以,

$$\frac{T}{\Omega_0 - \Omega} = \frac{T_{st}}{\Omega_0}, \quad (1-10)$$

式中,  $\Omega_0$  和  $T_{st}$  分别代表控制电压为  $U_c$  时, 理想空载角速度和起动转矩。

由式(1-10)可知

$$T = \frac{T_{st}}{\Omega_0} (\Omega_0 - \Omega), \quad (1-11)$$

将式(1-11)代入式(1-9')后, 得:

$$J \frac{\Omega_0}{T_{st}} \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = \Omega_0 \quad (1-12)$$

令

$$\tau_m = J \frac{\Omega_0}{T_{st}} \quad (1-13)$$

为机电时间常数,

以式(1-13)和式(1-5)代入式(1-12), 则:

$$\tau_m \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = \frac{U_c}{K\Phi_r}. \quad (1-14)$$

电动机在外施控制电压之前为停转状态, 角速度的初始值  $\Omega = 0$ , 对方程式(1-14)两边取拉氏变换,  $\frac{d}{dt}$  用算符  $p$  代替, 原函数  $\Omega$  和  $U_c$  分别用象函数  $\Omega(p)$  和  $U_c(p)$  代替, 则式(1-14) 变成如下形式:

$$\tau_m p \Omega(p) + \Omega(p) = \frac{U_c(p)}{K\Phi_r} \quad (1-15)$$

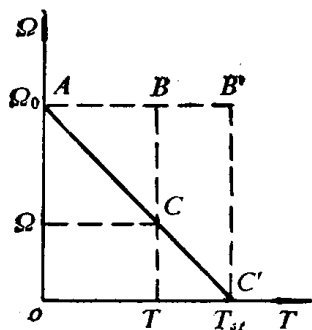


图1-5 控制电压为  $U_c$  时直流伺服电动机机械特性