

机 电 控 制

骆涵秀 李世伦 朱捷 陈大军 编著

浙江大学出版社

机 电 控 制

骆涵秀 李世伦 编著
朱 捷 陈大军

浙江大学出版社

(浙)新登字 10 号

内 容 简 介

本书对机电控制所涉及的各种控制形式和控制元件作了比较详细的叙述,包括控制电机、电液伺服阀、电液比例阀、数字阀、电液阀控制的组件、电一气控制阀、控制放大器等。此外对计算机控制用的硬、软件及控制系统的静态设计和系统辨识也作了简要的介绍。

本书着重介绍机电控制中各种元件的结构原理、性能特点及工程应用。从应用的角度对各种控制元件进行了系统的论述。可作为机械电子工程、流体传动及控制、机电一体化及有关机械、电子、自动化等专业的工程技术人员、大专院校师生参考用书。

机 电 控 制

骆涵秀 李世伦 编著
朱捷 陈大军
责任编辑:李海燕

浙江大学出版社出版
浙江大学出版社电脑排版中心排版
杭州富阳何云印刷厂印刷
浙江省新华书店发行

* * *

787×1092 16开 20.25印张 518千字

1994年6月第1版 1994年6月第1次印刷

印数: 0001—2000

ISBN 7-308-01473-8/TP·102 定价:9.60元

前 言

由于近代科学技术的飞速发展,机械装备已与电子技术、计算机、控制工程等技术日益紧密结合而成为机电一体化的设备(国外称之为 Mechatronics)。这种设备还具有自动控制的功能。为了培养机械和电子技术兼备的人才,满足机械系拓宽专业范围而设立的机械电子工程专业的需要,特编写此书,作为该专业本科生的一门必修专业课程的教材。

本专业的前修课程是控制理论、电子技术、流体力学和液压传动等。由于教学计划中另安排有检测元件课程,因此本书中对此不再进行叙述。由于篇幅所限,系统的动态设计叙述得较为简略,所举实例较少,只是作为动态设计的入门介绍。详细的控制方法在控制理论中有所阐述,只需实际应用而已。由于电液控制系统中有某些不确定性,理论计算与实际系统往往有所出入,在对控制系统进行各种控制策略控制时又必须对该系统的数学模型有较准确的了解,因此增加了系统辨识这一节,而计算机控制的有关课程,因各校安排不同,若学时不足,此节和第六章计算机控制可省略。

本书由浙江大学机械系骆涵秀主编。第一、二、三、七章由骆涵秀编写;第四章由陈大军编写;第五章由李世伦编写;第六章由朱捷编写,全书由骆涵秀统稿。

由于本书编写较仓促,编者水平和条件有限,书中难免有疏误和缺点,恳切希望读者批评指正。

编 者

1993年6月

目 录

第一章 绪论

第一节 机电控制的组成和分类	1
一、机电控制装备的组成	1
二、机电控制的分类	1
第二节 机电控制的种类及其系统	3
一、控制电机	3
二、电液(或气动)控制机构	5
第三节 各种控制机构的适用范围	5

第二章 控制电机

第一节 直流伺服电动机	7
一、工作原理	8
二、结构与分类	8
三、控制方式	12
四、静态工作特性	12
五、动态特性	14
六、直流电动机的功率损耗	17
七、其他型式直流伺服电动机	18
八、直流伺服电动机的应用和选择	23
第二节 电—机械转换器(直流直线电动机)	30
一、动圈式电—机械转换器	30
二、动铁式电—机械转换器	34
第三节 交流伺服电动机	47
一、结构特点	47
二、工作原理	50
三、主要工作特性	55
四、交、直流伺服电动机的性能比较	58
五、交流伺服电动机的应用	59
第四节 同步电动机	60
一、永磁式同步电动机	61
二、反应式同步电动机	63
三、磁滞式同步电动机	65
第五节 步进电动机	70
一、反应式步进电动机	70

二、永磁式步进电动机	74
三、混合式步进电动机	76
四、直线和平面步进电动机	78
五、步进电动机主要性能指标和技术数据	80
六、产品的选择	81
第三章 电液控制机构	
第一节 概述	83
一、电液控制系统的组成	83
二、电液控制系统的分类	84
三、电液控制系统的发展和选择	86
第二节 液压控制阀	87
一、液压控制阀的结构及分类	87
二、滑阀静态特性的分析	89
三、喷嘴挡板阀的特性	97
第三节 液压动力元件	101
一、四通阀控制双出杆液压缸	103
二、四通阀控制液压马达	109
三、三通阀控制单出杆液压缸	110
四、四通阀控制单出杆液压缸	112
第四节 电液伺服阀	112
一、结构及工作原理	113
二、性能特性	120
三、选择和使用	125
第五节 电液比例阀	127
一、比例方向阀	127
二、比例压力阀	130
三、比例流量阀	134
四、电液比例阀的性能	134
第六节 数字阀及其控制元件	137
一、数字阀控制系统的工作原理和组成	137
二、数字阀结构原理	139
三、数字阀的性能指标	145
第七节 阀控缸(或马达)组件	148
一、数控步进液压缸(或马达)	148
二、伺服液压缸(或马达)	152
三、比例泵、伺服泵及数控泵	156
第四章 气动控制	
第一节 概述	161
一、气动控制的发展及其优缺点	161
二、气动控制系统的组成和分类	162

第二节 气体流动的基本方程	163
一、可压缩气体绝热流动柏努里方程	163
二、有机械功的压缩性气体能量方程	163
第三节 气动控制阀的压力流量特性	163
一、气体通过单节流孔的压力流量特性	164
二、两个可变节流孔串联的稳定流动	168
三、三通阀的压力流量特性	168
四、四通阀的压力流量特性	169
第四节 气压伺服阀	174
一、气压伺服阀的结构原理	174
二、喷嘴挡板阀的静特性分析	174
三、喷嘴挡板阀的动特性	178
第五节 气动伺服机构	179
一、阀控气缸的分析	179
二、气动伺服机构举例	181
第五章 控制放大器	
第一节 运算放大器及其主要作用	185
一、运算放大器	185
二、信号的放大和处理	187
第二节 控制信号电路	193
一、利用手调电位器给定控制电压信号	194
二、非周期性函数发生器	194
三、周期函数发生器	195
第三节 功率放大器	198
一、电压反馈型功率放大器	198
二、电流反馈型功率放大器	198
三、开关式功率放大器	200
第四节 控制电机驱动线路	204
一、直流伺服电机驱动线路	204
二、步进电机的驱动电源	207
三、调制与解调	209
第五节 晶闸管及其基本电路	210
一、晶闸管(SCR)	212
二、单相可控整流电路	216
三、三相可控整流电路	222
四、晶闸管供电对电动机的影响	227
第六节 典型控制放大器介绍	228
一、伺服控制器	229
二、比例控制器	233
三、闭环控制时采用的放大器	238

第六章 计算机控制技术概述

第一节 计算机控制系统概论	239
一、计算机控制系统的组成及其特点	239
二、计算机控制系统的分类	239
三、计算机控制技术的发展方向	241
第二节 计算机控制系统的接口技术	242
一、计算机接口技术概述	242
二、模拟量接口	242
三、开关量接口	256
第三节 计算机控制算法	261
一、计算机控制算法设计概述	261
二、PID 控制算法	261
三、模拟量校正装置的离散化方法	265
四、具有最快响应的无波纹系统	272
第四节 计算机控制实例	274
一、计算机位置控制系统	274
二、硬件电路	274
三、控制软件	275
第七章 机电控制装备的设计和应用	
第一节 初步设计	277
一、电液控制系统的初步设计	277
二、电动机控制系统的初步设计	282
第二节 控制系统的动态设计	284
一、电液控制系统	284
二、伺服电动机控制系统	300
第三节 系统的辨识	304
一、辨识前的预备知识	304
二、输入测试信号的选择	306
三、数字滤波	309
四、采样周期和试验数据长度的选择	310
五、系统辨识误差	311
六、模型的检验	312
参考文献	314

第一章 绪 论

随着工业水平的不断发展,机械装备已逐步地由手工操作改为自动控制,装备本身也发展成机电一体化的综合体。这种自动控制的机电装备能提高产品的质量,降低生产成本,提高劳动生产率,它使人们从繁重的体力劳动和重复的手工操作中解放出来,因此机电控制的装备已成为现代工业、现代科学技术和军事工程等不可缺少的部分。它的应用范围从计算机存储器、打印机的控制到绘图仪、记录仪,从大型科学实验设备到轻工、冶金、土建、机械、船舶、武器控制、航空航天技术、海洋技术等诸方面,非常广泛。

机电控制就是介绍自动控制的机电装备,它的各种执行元件、控制元件等及其所组成的系统,并简要叙述了计算机控制的概况。本课程不涉及整个生产线及工厂的控制。

第一节 机电控制的组成及分类

一、机电控制装备的组成

机电控制装备最基本的方框图如图 1-1 所示。

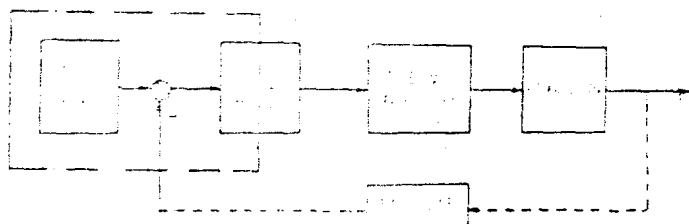


图 1-1 机电控制装备方框图

由指令机构发出指令,通过控制放大器放大该信号,使执行元件按指令的要求运动,而执行元件往往和机械装备相连接,使机械装备的被控量如位移、速度、力等等按要求的规律运动。如图 1-1 中实线所示。

在要求控制精度较高的场合,往往采用闭环控制,需要用检测元件对被控量进行检测,将该量值转换成电量后反馈到输入端与指令信号相比较,再将差值进行控制,如图中虚线所示。

在计算机日益普及的情况下,自动控制往往采用计算机进行控制和数据处理。如图 1-1 中点划线所示,它可以取代指令机构及控制放大器的部分功能,并使控制更灵活和自动化。

本课程叙述控制系统中的控制执行元件、控制放大器和计算机控制,尤其对控制执行元件予以详细的介绍。检测元件和机械装备各不相同,另有课程专门叙述,这里只在介绍整个系统时略加叙述。

二、机电控制的分类

机电控制主要以系统的执行元件进行分类。

执行元件可分为机械式、电气式和流体式(包括液压和气动)三大类别。

三种执行元件可根据它的构造从能量变换元件和变换功率的控制器进行对比,如表 1-1 所示。

表 1-1 各种执行元件和结构因素的比较

工作能量	功率源	能量变换元件	功率变换控制器	
			阀式控制	功率源控制
机械式(动力)	原动机、飞轮	无	离合器、飞轮	无
流体式(压力)	液压(气)泵、蓄能器	液压(气动)马达或缸	伺服阀、比例阀等	变量泵
电气式(电力)	商用电源(发电机)、蓄电池	电动机、动铁或动圈式元件	开关、晶体管可控硅等	可变电电压发电机

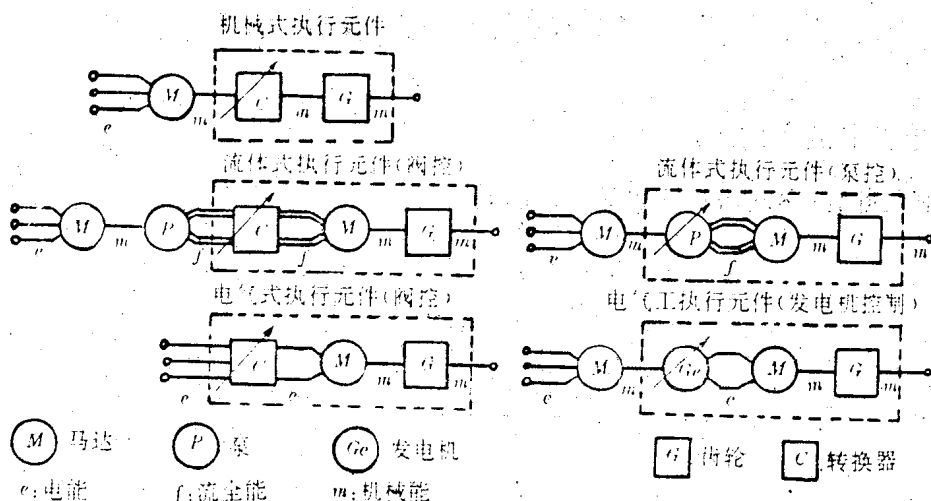


图 1-2 执行元件的结构图

它们的结构情况如图 1-2 所示。表及图表明了各种执行元件能量的转换和功率的控制情况。由图可见,机械式的没有能量转换元件,控制元件只能用离合器、飞轮等很难进行控制的器件,因此,目前已被淘汰。在机电控制中使用的主要是流体式和电气式,本课程也只叙述这二种类型的控制。

图 1-2 的左半部分是阀式控制的结构,用阀的形式来控制进入执行元件的功率,如用伺服阀或比例阀控制液压马达(或缸)的流量,用晶体管(三极管或二极管等)来控制电动机的转速或力矩等等。这种结构,操纵的功率小,响应快,但系统的效率低,能耗大。右半部分是改变功率源的输出以达到控制的目的,如用变量泵改变输入液压马达中的流量以改变转速,用可变电电压的发电机改变电压以达到使用电动机变速的目的等等。这种结构控制的功率大,响应慢,但能达到节能的效果,一般只在动态要求不高时采用。实际上使用时还需有另一套控制系统来控制泵的流量和发电机电压的变化。

由图 1-2 左半部分可见,阀控流体式执行元件中能量之间的变换比电气的多,这必然带来功率损失,使控制系统效率低。但这种结构可用于高速、大功率的场合。电气式的执行元件虽然

能量转换较少,但功率也小,虽然目前控制电机也在不断发展,在快速性和功率容量上都有所提高,但总的容量及响应性能还是不能代替液压式的。

第二节 机电控制的种类及其系统

机电控制装备,一般可采用控制电机、电液控制机构及电—气动机构三种控制及执行元件所组成,分述如下:

一、控制电机

控制电机有直流伺服电动机、交流伺服电动机及步进电动机等,都有着广泛的应用,分别介绍如下:

(一) 直流伺服电动机

直流伺服电动机近来不断在结构上进行改进,使性能得到提高。控制用的直流伺服电动机的特征是惯性小、起动转矩大、起动时能迅速达到要求的速度,能承受频繁的加、减速,设计得当的话不存在散热、退磁等问题。在机械手、数控机床等方面都得到了应用。

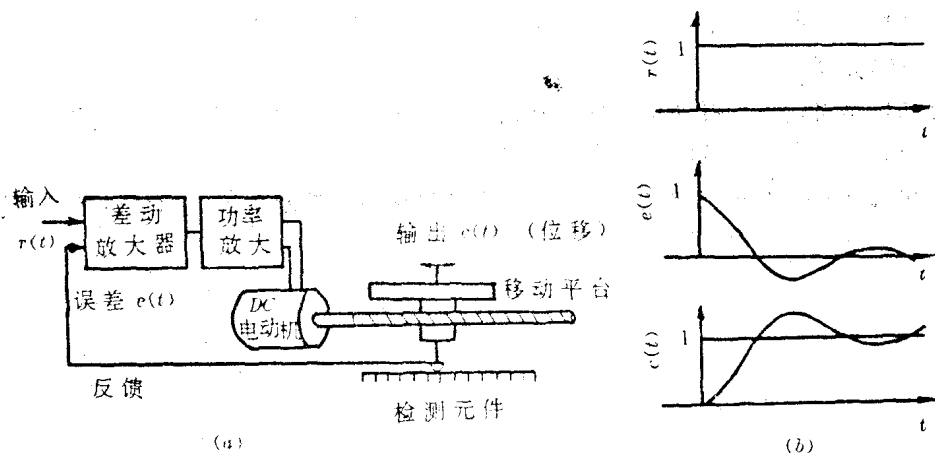


图 1-3 直流伺服电动机反馈控制系统及其响应曲线

直流伺服电动机的控制系统如图 1-3(a) 所示,它的输出量是位移、速度等。用检测元件进行检测并反馈,由于采用反馈控制,给系统带来了稳定性问题,但动态性能和控制精度都得到了提高,设计得当的话,可获得高性能的控制。

(二) 交流伺服电动机

交流伺服电动机也称二相伺服电动机。它的优点是可靠性高,耐久性强。

交流伺服电动机所组成的系统原理图如图 1-4(a) 所示。系统信号包括检测元件全部由交流信号传送,采用了可靠性、精度和耐久性都高的同步装置检测角度,并使用了交流测速发电机。缺点是要用 400~1500Hz 的激磁交流电源,为此需要特殊的发电机,一般工业中不必采用这种形式。

由图 1-4(a) 可见交流伺服电动机根据放大器来的信号转动,经齿轮减速后使控制变压器达到一定的位置 θ_c ,若该位置与控制发生器发出的信号 θ_c 不符,则产生误差电压 e_e ,与测速发电机的电压 e_s 叠加后输入到交流伺服电动机的放大器中,从而使电动机根据要求转动。图 1-4(b) 是该系统的信号及响应曲线。

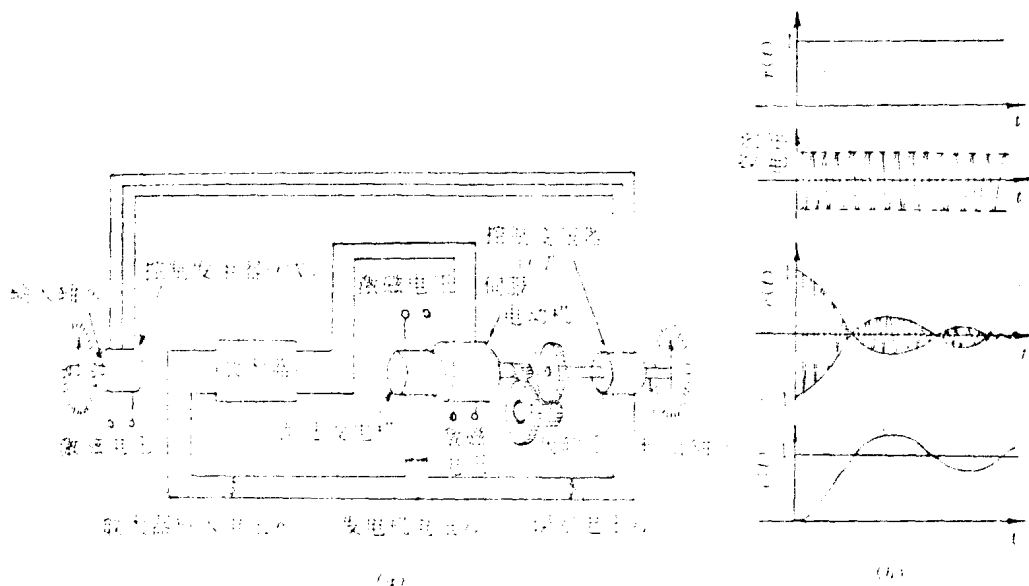


图 1-4 二相伺服电动机控制的交流伺服系统原理图

这种电动机在一般的产业中都有所应用。

(三) 步进电动机

步进电动机是将输入的脉冲信号转变成阶跃性的角位移或直线位移的电动机，即给一个脉冲信号，电动机移动一步，所以叫步进电动机。

步进电动机具有精度高、惯性小的优点，特别适合于数字控制系统。它有三种结构型式：永磁(PM)式、反应(VR)式和混合(HB)式。

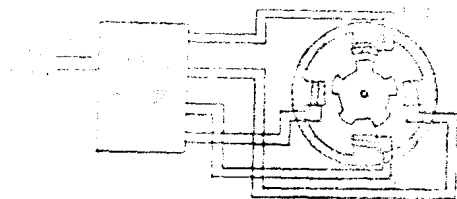


图 1-5 反应式步进电动机及其驱动回路

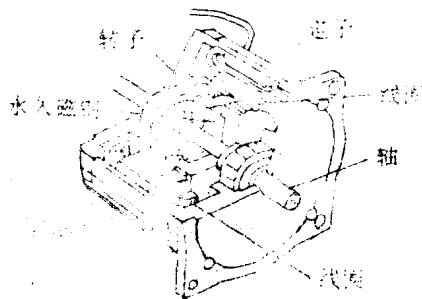


图 1-6 混合式步进电动机

图 1-5 所示是反应(VR)式步进电动机及其驱动回路图，它的转子和定子是由硅钢片及其它软磁材料制成凸极结构，定子磁极上绕有线圈，转子的齿依次被电磁铁吸引而实现回转控制。永磁(PM)式的结构和它相似，只是转子上装的是永磁材料。混合(HB)式的又称为永磁感应子式步进电动机，它的结构兼有反应式和永磁式的某些特点，结构图如图 1-6 所示，在转子的内部装有永久磁钢，而齿槽部分仍由软磁材料组成。

步进电动机可以开环使用也可闭环使用，在要求不高的场合可用开环进行控制，但在负载过大或速度过高时可能产生失步现象从而使系统存在误差，采用闭环控制可弥补此缺点，但将使系统复杂。

步进电动机还可以和液压结合,复合成集电气、液压于一体的电液步进液压缸(或马达)等。

二、电液(或气动)控制机构

当负载惯性大、所需功率较大时,一般采用流体式控制,这样的功率放大型式是很有利的。

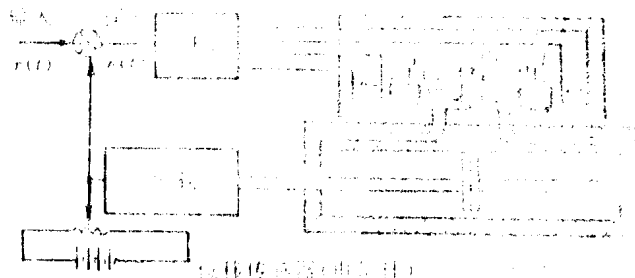


图 1-7 电液伺服机构示意图

图 1-7 所示为电液伺服机构,这是用电液伺服阀控制的电液伺服位置控制系统示意图。输入信号经控制放大器放大后送到伺服阀线圈,当线圈通电流后,根据电流的方向和大小使阀芯作相应的移动,从而使节流口打开,图中所示为阀芯向左移动,则压力油由压力腔 P ,经滑阀流到液压缸右侧,而左侧的液压油经滑阀流到回油腔 T ,由于液流的作用使活塞向左移动,并带动负载和反馈电位计一起运动,电位计输出的信号反馈到输入端,与输入信号相比较,若有误差则活塞继续运动,直到活塞的位置和要求相符。

电液控制机构使控制系统能进行高速、大功率的控制,被广泛应用于冶金、塑料机械、大型飞机和船舶等的操纵机构及大功率科学实验装备和军工部门等。电液控制机构与电气的比较,缺点是需要液压源,价格比较高,液压油的管理和使用也比较麻烦。

电—气动机构的结构原理图和图 1-7 相似,所不同的仅是以空气代替液压油作为介质,这种控制系统维护管理比较容易,但由于空气的可压缩性而使动特性恶化,此外运动副还需要加以润滑,它在机器人、机械手、机床的程序控制等容易维护的控制机构中得到广泛应用。

第三节 各种控制机构的适用范围

选择控制机构的型式时,着眼点是它的输出功率和响应速度,使控制功率和驱动机器的输出特性和负载相适应。

图 1-8 是目前市场上通常使用的各种控制机构的功率—响应速度范围图。在设计、选择控制机构的机种时,必须注意传递机构和负载的动特性。在高速控制情况下,执行元件的频带有时可能比传递机构的频带狭。

在控制微小运动时,必须特别注意它的频带范围。在输入较大信号时,必须考虑放大器和伺服阀的饱和情况、电动机的最大电流、控制机构的力和速度的使用范围等,这些称为静态特性或操作性能以和控制性能相区别。控制性能应注意它的响应能力,一般称为动态性能。

在直流电动机和电液控制机构使用范围相重合时,二者比较,直流电动机的传递函数近似于一阶滞后环节,分析较简单,而电液控制机构中,电液伺服(或比例)阀的传递函数要复杂得

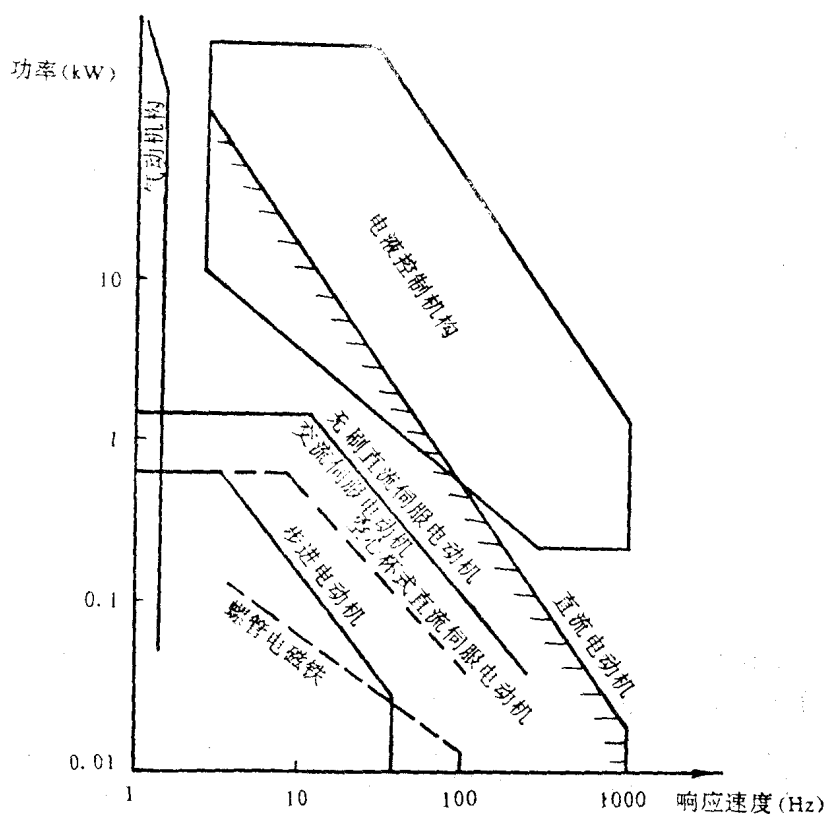


图 1-8 各种控制机构的适用范围

多,与液压缸一起考虑至少为三阶,而且内部情况很难了解。因此二种控制机构各有利弊,选择条件和设计准则很难一概而论,需根据具体情况作出决定。

本书将详细介绍电液控制机构。直流电动机本身属于一般传动用的电动机,不属本书介绍的范畴,但当交、直流电动机与晶闸管调速系统相结合,可组成控制系统,也属机电控制范畴,有关晶闸管调速系统将在控制放大器这一章中予以介绍。

第二章 控制电机

机电控制中最先得到应用的是控制电机,随着装置控制的功率愈来愈大,动态响应要求愈来愈高,电液控制才得到发展,此后电—气动控制也有了应用。但控制电机也在不断发展中,它的可控功率也在逐步增加,动态性能也在改善。在某些领域中正和电液控制机构争夺市场。由于控制电机减少了能量转换过程,减少了成本和消耗,因此在中、小功率情况时一般都优先使用控制电机。它的种类繁多,可供选择的余地较大。

控制电机是机电控制中的执行元件。作为执行元件的控制电机主要有直流和交流伺服电机、直流力矩电机、直流无刷电机、直流直线电机、步进电机等。作为检测元件或信号元件的控制电机不属本章讨论范围。

第一节 直流伺服电动机

伺服电动机又称为执行电动机。在自动控制系统中作为执行元件,把输入的电压信号变换成转轴的角位移或角速度输出。输入的电压信号又称为控制信号或控制电压,改变控制电压可以变更伺服电动机的转速及转向。

伺服电动机按其使用的电源性质不同,可分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类。直流伺服电动机通常用在功率稍大的系统中,其输出功率约为 $1 \sim 600\text{W}$,但也有的可达数千瓦,交流伺服电动机输出功率约为 $0.1 \sim 100\text{W}$,其中最常用的在 30W 以下。

近年来,由于应用范围日益扩展,要求不断提高,促使伺服电动机有了很大发展,出现了许多新型结构。又因系统对电机快速响应的要求越来越高,使各种低惯量的伺服电动机相继出现,如盘形电枢直流电动机、空心杯电枢直流电动机和电枢绕组直接绕在铁芯上的无槽电枢直流电动机等。

随着电子技术的发展,又出现了采用电子器件换向的新型直流伺服电动机,它取消了传统直流电机上的电刷和换向器,故称为无刷直流伺服电动机。

此外,为了适应高精度低速伺服系统的需要,还研制出直流力矩电动机,取消了减速机构而直接驱动负载。在某些控制系统中,作为输出或中间环节,要求电动机在有限的角度范围内围绕轴心作往复摆动,因而又产生了有限转角力矩电动机。

伺服电动机的种类虽多,用途也很广泛,但自动控制系统对它们的基本要求可归结为如下几点:

1. 宽广的调速范围:即要求伺服电动机的转速随着控制电压的改变能在宽广的范围内连续调节。
2. 机械特性和调节特性均为线性:伺服电动机的机械特性是指控制电压一定时,转速随转矩的变化关系,调节特性是指电机转矩一定时,转速随控制电压的变化关系。线性的机械特性和调节特性有利于提高自动控制系统的动态精度。
3. 无“自转”现象:即要求伺服电动机在控制电压降为零时能立即自行停转。
4. 快速响应:即电机的机电时间常数要小。相应地伺服电动机要有较大的堵转矩和较小的转动惯量。这样,电机的转速才能随着控制电压的改变而迅速变化。

此外,还有一些其它的要求。如希望伺服电动机的控制功率要小,这样可使放大器的尺寸相应减少;在航空上使用的伺服电动机还要求其重量轻、体积小等等。

一、工作原理

直流伺服电动机的工作原理、基本结构及内部的电磁关系和一般作动力用的直流电动机相同。其工作原理图如图 2-1,在 A、B 两电刷间加直流电压时,电流便从 B 刷流入,由 A 刷流出。由于两电刷分别把 N 极和 S 极下的元件联接成两条并联支路,所以 N 极和 S 极下导体的电流方向是不变的。由图可见,N 极下有效导体中的电流由纸面指向读者,用 $\odot$ 表示;S 极下有效导体中的电流由读者指向纸面,用 $\otimes$ 表示。

载流导体在磁场中受到电磁力。若导体在磁场中的长度为 l ,其中流过的电流为 i ,导体所在处的磁密为 B ,则导体所受到的电磁力为

$$f = Bli$$

式中所用的单位: $f - \text{N}$; $B - \text{Wb/m}^2$; $l - \text{m}$, $i - \text{A}$ 。电磁力的方向由左手定则确定。

由此,得出图 2-1 中 N 极、S 极下一根导体所受的电磁力的方向,如图 2-1 中箭头所示。由此可见,图中所有载流导体均受到顺时针方向的转矩,从而使电动机旋转。由于定磁极下元件的电流方向是不变的,所以转矩是方向恒定的转矩,称为直流电动机的电磁转矩。若电机轴上带有负载,它便输出机械功。

直流电机是可逆的,它根据不同的外界条件而处于不同的运行状态。当迫使它旋转,输入机械能时,它便输出电能,处于发电机状态,此时称为发电机;当在电刷两端施加电压输入电能时,它便旋转起来输出机械能,处于电动机状态。

二、结构和分类

直流伺服电动机有传统式结构和低惯量型两大类。

(一) 传统式直流伺服电动机

传统式直流伺服电动机的结构型式是由定子、转子两大部分所组成。它又可再分为永磁式和电磁式两种。永磁式直流伺服电动机是在定子上装置由永久磁钢做成的磁极,目前我国生产的 SY 系列直流伺服电动机就属于这种结构。电磁式直流伺服电动机的定子通常由硅钢片冲制叠压而成,磁极和磁轭整体相连如图 2-2 所示。在磁极铁芯上套有激磁绕组。目前我国生产的 SZ 系列直流伺服电动机就属这种结构。

这两种电机的转子铁芯,均由硅钢片冲制叠压而成,在转子冲片的外圆周上开有均布的齿槽,如图 2-3 所示。在转子槽中放置电枢绕组,并经换向器、电刷引出。

(二) 低惯量型直流伺服电动机

1. 盘形电枢直流伺服电动机

图 2-4 为盘形电枢直流伺服电动机。它的定子是由永久磁钢和前后磁轭所组成,磁钢在圆

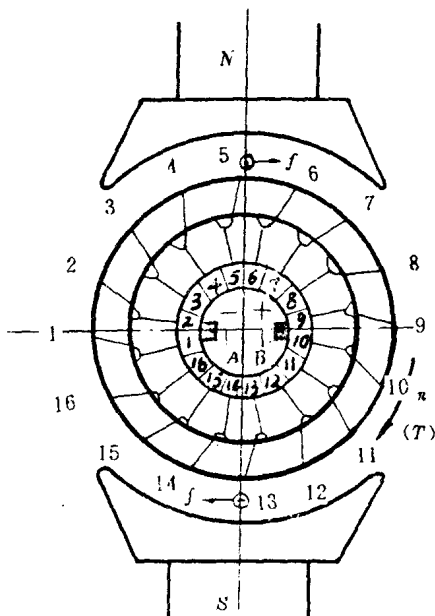


图 2-1 直流电动机工作原理图

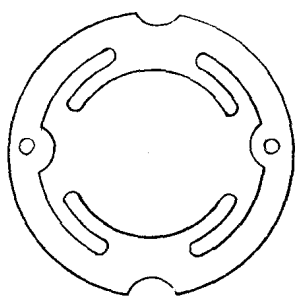


图 2-2 电磁式直流伺服电动机的定子冲片

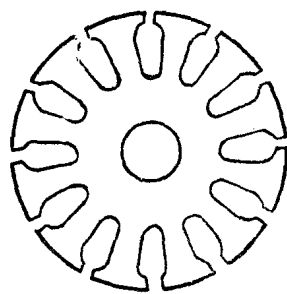


图 2-3 直流伺服电动机的转子冲片

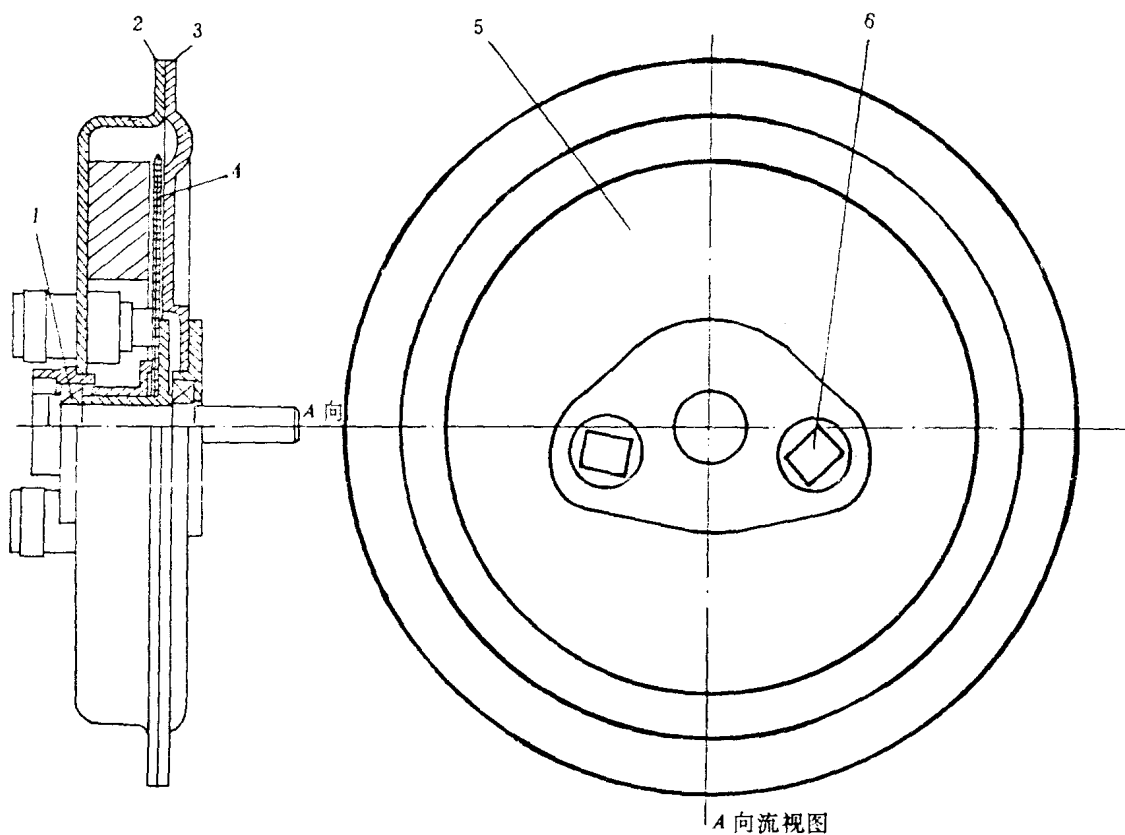


图 2-4 盘形印制绕组电枢直流电动机结构

1 — 轴承；2 — 导磁端盖；3 — 导磁外壳；4 — 印制绕组；5 — 多极磁钢；6 — 电刷

盘的一侧放置，也可以在两侧同时放置。电机的气隙就位于圆盘的两边，圆盘上有电枢绕组，可分为印制绕组和线绕式绕组两种形式。图 2-4 所示为印制绕组，图 2-5 是绕线盘形电动机的主要零部件结构图。印制绕组是采用制造印刷电路相类似的工艺制成的，它可以是单片双面的，也可以是多片重叠的。线绕式绕组则是先绕制成单个线圈，然后将绕好的全部线圈沿径向向圆周排列起来，再用环氧树脂浇注成圆盘形。盘形电枢上电枢绕组中的电流是沿径向流过圆盘表面，并与轴向磁通相互作用而产生转矩。因此，绕组的径向段为有效部分，弯曲段为端接部分。