

Mechano—Electric System

熊世和 编

机电系统 计算机控制技术

Computer
Control Technology

电子科技大学
出版社

机电系统计算机控制技术

熊世和 编

电子科技大学出版社

• 1993 •

[川]新登字 016 号

机电系统计算机控制技术

熊世和 编

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号)邮编 610054

电子科技大学出版社照排中心照排

成都市双流新桥印刷厂胶印

四川省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 15.375 字数 373 千字

版次 1993年9月第一版 印次 1993年9月第一次印刷

印数 1-3000册

中国标准书号 ISBN 7-81016-763-4/TP·64

定价:8.20元

31924904

内 容 简 介

JSS00/11

本书系统地介绍了机电系统计算机控制的基本原理、设计方法及其应用技术。全书共九章,内容包括:机电系统计算机控制的基本原理及其组成;机电系统动力学方程;机电系统计算机控制主要环节的原理及选择原则;机电系统计算机控制分析和设计所涉及的基本数学工具;机电系统计算机控制三种基本的设计方法,模拟化设计方法,离散化设计方法及状态空间设计方法;机电系统计算机控制工程实现应考虑的主要问题及工程应用实例。

本书可作为非自动控制专业的教材或教学参考书,各章内容基本独立,可根据讲课对象适当选择,并适合广大从事机械电子工程方面的技术人员自学和参考。

前 言

近几年来由于计算机的发展与普及异常迅速,出现了所谓“机电一体化”这一术语。它是将机械工程与电子工程这两个领域的技术有机地结合起来,促进了产品的更新换代,提高了生产产品装备的自动化水平,其发展前景是广阔的,其经济效益和社会效益是显著的。在发展过程中,机电系统计算机控制得到了极为广泛的应用。为了适应这一科学技术的发展,对于从事机械工程的学者和科技人员来说,要用系统工程的观点来合理地解决机械工程设计中的若干问题,就有必要了解这个系统,为此,编者根据教学和科研工作的实践体会,编写了这本书。本书的主要特点是:着重介绍机电系统计算机控制的基本原理及基本设计方法,重点放在实际工程应用。使读者明确机械部分在控制系统中的作用,以及为了满足系统要求的性能指标,对于机械和控制应综合考虑的问题。并为进一步提高系统性能指标指明了方向,因而重点突出,反映了当前计算机控制发展的新水平。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点乃至错误,敬请读者批评指正。

在此,对于在编写本书的过程中参考过的图书及文献的著者以及给予各种教益的专家、学者,深表谢意。

编 者

1993年4月26日

目 录

第一章 基本知识

1.1 机电系统计算机控制技术的含义	1
1.2 计算机分层控制系统结构	3
1.3 计算控制系统的设计特点	5
1.4 本课程讲述的内容	6
小结	7
练习题	7

第二章 机电系统的动态模型

2.1 机电系统原理简化图	9
2.2 机电系统动力学方程	12
2.3 状态变量法描述机电系统	24
2.4 机电系统未建动力学模型	26
小结	29
练习题	29

第三章 数字信号

3.1 采样理论	31
3.2 连续时间信号的离散时间处理	36
小结	41
练习题	41

第四章 Z 变换及 S 域到 Z 域之间的转换

4.1 Z 变换定义	43
4.2 $[Z]$ 平面	44
4.3 Z 变换的收敛域	45
4.4 由 $F(S)$ 求 $F(Z)$ 的方法	46
4.5 Z 反变换	47
4.6 Z 变换的性质和定理	51
4.7 连续时间和离散时间系统之间的变换	54
4.8 连续状态方程转换为离散状态方程	58
4.9 Z 传递函数	61
小结	65
练习题	65

第五章 模拟化的设计方法

5.1	控制器的离散等效法	66
5.2	大林数字控制器	73
5.3	W 变换设计法	75
5.4	Z 域的根轨迹法	77
5.5	采样周期的选择	84
	小结	85
	练习题	85
第六章 离散化的设计方法		
6.1	控制系统的主要性能指标	87
6.2	解析设计法	92
6.3	时间最优控制系统设计	98
6.4	具有扰动作用的系统设计	111
6.5	串级控制系统的设计	116
6.6	采样频率的选择	117
	小结	119
	练习题	119
第七章 离散状态空间设计法		
7.1	离散系统的可控性和可观测性	120
7.2	状态空间模型的极点配置设计法	123
7.3	最优控制	149
	小结	160
	练习题	160
第八章 自适性及非线性数字控制		
8.1	最小二乘估计辨识系统模型	163
8.2	自适性控制	170
8.3	非线性数字控制系统	172
	小结	182
	练习题	182
第九章 计算机控制系统的工程实现		
9.1	计算机控制系统实现中的工程实际问题	183
9.2	机械手机电一体化设计	198
9.3	机械手的一个终端执行器的微机控制	212
9.4	示教再现式机械手臂的计算机控制	218
9.5	计算机分层控制系统	224
	小结	232
参考文献		239

第一章 基本知识

1.1 机电系统计算机控制技术的含义

1. 机电系统的含义

一般来说机电系统的动力部分是电气的,经过电气系统与工艺过程相联系的是机械设备。机械与电气动力相结合的系统是机电系统,机电系统是控制系统的基本环节。现代控制系统常常是机电的,是运动控制技术的最基本的环节。其他的工艺系统都难免不同机电系统发生联系,比如化工生产过程控制中的蒸馏过程,本身不是机电系统,而保证这个过程正常运行的却是机电系统。又因为力学系统中的位置、速度、转角;电力系统的电流、电压、电感和电容;化学热力学系统中的克分子数、温度、压力、流量等,这些系统的数学模型是相似的。所以机电系统的分析是具有一般性和代表性的。

2. 机电系统计算机控制技术的含义

电子数字计算机和微电子学的迅速发展,数字计算机不仅可以作为复杂控制系统中的一个组成部分,而且可以用于单个控制回路的调节器中,代替常规的模拟控制器,它不局限于少数的有限的几种功能。现代工业生产的主要经济指标是产量高,速度快,质量好,消耗少,产品易于更新换代。因而要求从事生产的设备向“智能”和“柔性”方向发展。所谓“智能”和“柔性”就是不改变系统的硬件,能根据客观的情况做多种事情。用户对产品的要求是性能好,可靠性高,功能强,价格便宜,易于维护和修理等,这正是计算机的特长。数字计算机模拟人的“大脑”,是机电产品和生产装备的重要组成部分。因而机电系统计算机控制技术的含义是机械、执行器、信息处理、接口等部分在数字计算机的支持下,以系统的观点进行有效的组合形成的新型系统,以满足性能指标的要求,是产品或生产设备的核心。

对于有计算机参加控制的系统称为计算机控制系统,有时也称为数字控制系统,这是计算机在控制系统中的在线应用。在讲述计算机控制系统时以机电系统为实际内容,满足机械电子工程专业和机电一体化技术的需要。所以我们称为机电系统计算机控制技术。

计算机还可以帮助工程设计人员对控制系统进行分析、设计、仿真及建模等工作,这方面的内容称为计算机辅助设计或控制系统 CAD,这是计算机控制系统方面的离线应用。

3. 计算机控制系统的基本理论

控制系统按所包含的信号形式可以划分为以下 4 种典型结构框图:

- (1)连续控制系统,如图 1.1 所示,系统中各处均为连续信号。
- (2)离散控制系统,如图 1.2 所示,系统中各处均为离散信号。
- (3)采样控制系统,如图 1.3 所示,其中有连续信号也有离散信号。

(4)数字控制系统,如图 1.4 所示,其中有连续信号也有离散数字信号。

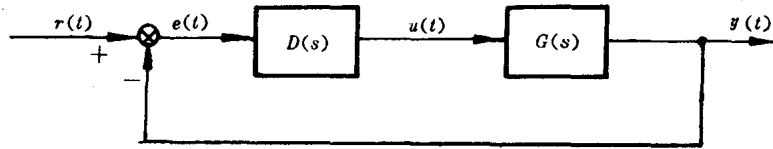


图 1.1 连续控制系统

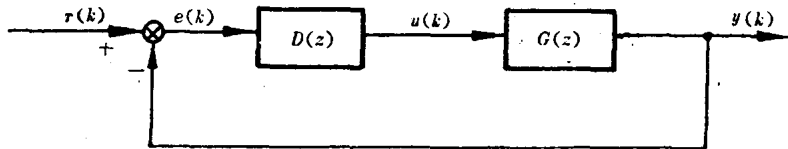


图 1.2 离散控制系统

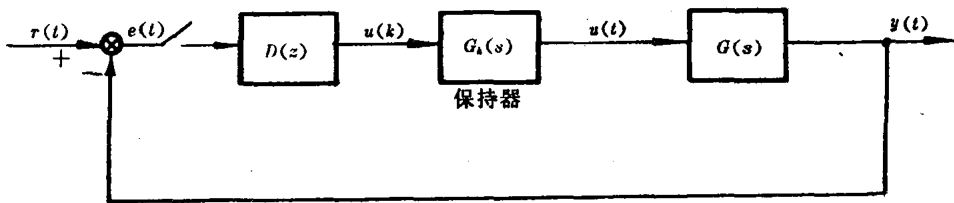


图 1.3 采样控制系统

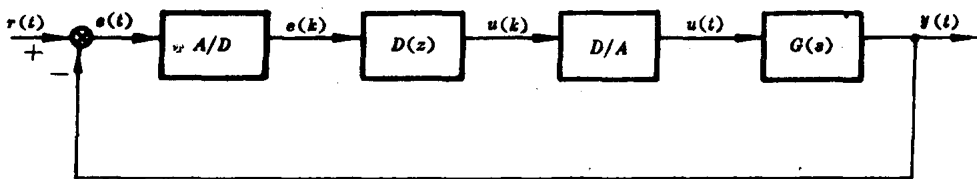


图 1.4 数字控制系统

在数字控制系统中如果忽略幅值上的量化效应,即为采样控制系统。如果将连续的控制对象同保持器一起进行离散化,采样控制系统就简化为离散控制系统,所以离散控制系统理论是计算机控制系统的基本理论。

离散系统理论主要是对离散系统进行分析和各种方法的研究,它是以差分方程、 Z 变换及 Z 传递函数为基本数学工具。采样控制系统理论除了包括离散系统理论外还包括采样定理等。数字控制系统除包括离散系统和采样系统理论以外还包括数字整量化效应等。

1.2 计算机分层控制系统结构

1. 工业过程的全局控制可以描述如图 1.5 所示的递阶控制形式

第一级用前馈或反馈的方法,控制可测量的 y 。参考值 r 既可是常数也可由上级计算机提供。如果要控制的变量有多个,则称为多变量控制系统。

第二级是过程监督,检查过程的各种功能,例如测试指定的参数是否超过某一限值。监督可以仅限于当前的变量参数也可以包括预估将来的变量值。这一级可以报警,并可实现保安控制。

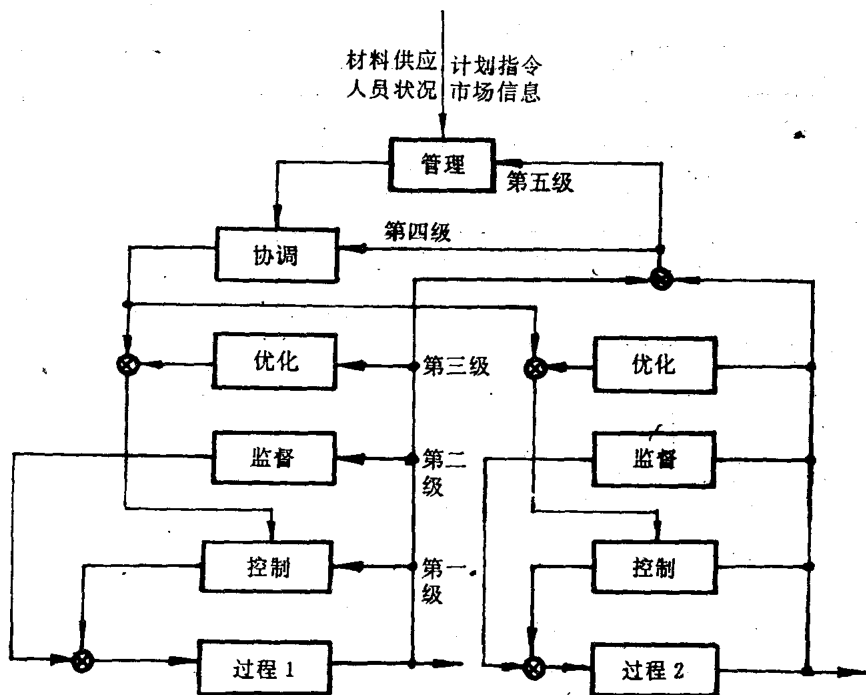


图 1.5 分层控制系统

第三级是组织过程最优化,如使产量和效率达到最高或者使消耗及成本降至最小。它可分为稳态性能最优化和在线最优化。

第四级是协调级,它可以协调几个过程的工作。

第五级是管理级,整个工艺系统按照计划、市场、原材料供应和工作人员状况来组织。

在上述各级中都可用前馈和反馈控制原理,形成数据处理系统、操作指导控制系统、监督控制系统和直接数字控制系统等。

2. 适应性机器人的分层控制结构

机器人是生产过程自动化的重要组成部分。适应性机器人的控制是使得机器人在不定

的环境中完成机动的任务。图 1-6 是适应性机器人的分层控制结构框图。战术级的任务是运动规划,适应性的控制机械手的运动。战略级的任务是根据获得的客观知识建立模型、决策、行为规划。这两级也可各自再分为两级,形成四级控制系统。此外还有协调和示教再现两个部分。

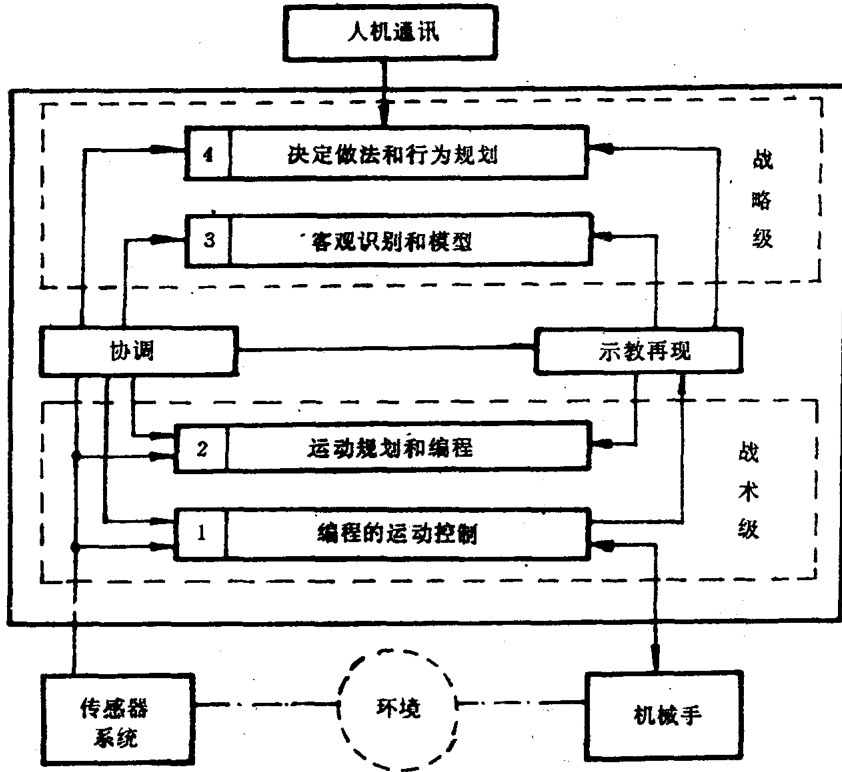


图 1.6 适应性机器人分层控制结构

无论是工业过程还是机器人控制的分层结构控制系统,由于各级中的控制手段是广义的前馈和和反馈控制,所以必须设计、选择、整定多级控制算法并与过程相匹配。本书的重点是以战术级和第一级的控制为重点。对于第一级数字控制系统的基本组成如图 1.7 所示。控制系统的核心是计算机,通过数字模拟转换器(D/A)、模拟数字转换器(A/D)或者输入、输出端口经过需要的环节同机械相连,这样数字控制系统就成为一般的反馈控制系统。反馈回路是借助计算机程序的信息环组成。

传感器是作来检测同机械状态有关的量,它的输出最终必须转换为电信号。机械的状态量,有机械各部分的位置、速度、加速度、力、力矩等各种各样的物理量。

执行机构是对机械起作用的工作部分,主要产生力学运动,由此改变机械状态。执行机构按动力源可分为电气式、液压式、气动式以及其他方式。电气执行机构中有伺服电机、步进电机、电磁线圈等。

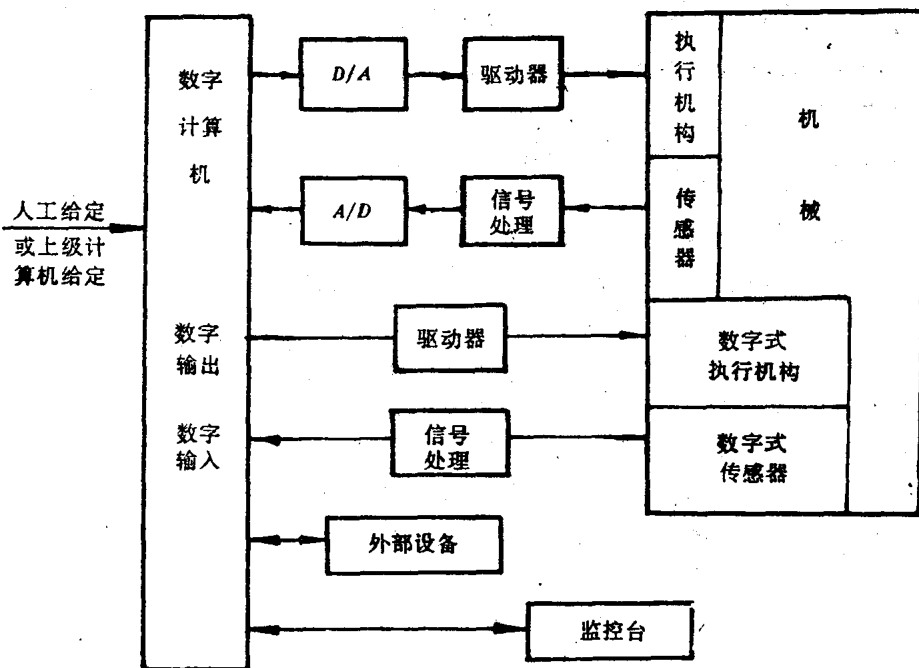


图 1.7 数字控制系统的基本结构

1.3 计算机控制系统的设计特点

1. 对控制计算机的要求

作为计算机控制系统的控制过程,可归结为实时数据采集、实时决策和实时控制。也就是说收集被控对象和外界有关信息,进行处理,将处理结果控制被控对象以达到所要求的或最佳的性能。因而对控制计算机的要求是:

(1)实时性。计算机运算和操作速度必须与被控制对象的实际运行相适应,对被控对象在控制过程运行中的微小变动要及时作出响应,这就要求及时计算和及时控制,一般由软件和硬件两个方面来保证。

(2)综合控制能力。它应有较强的计算、信息处理和控制在能力,有灵活的输入和输出设备,有较完备的中断系统,以便实现各种需要的请求。

(3)高可靠性和可维护性。由于计算机是实时控制,因而是长期使用,因此在选型和设计中必须考虑软件和硬件的可靠性和易维护性。

(4)环境适应性。由于控制计算机往往要放置在控制现场,即在比较恶劣的环境下工作,因此要考虑抗干扰的问题。

2. 计算机控制系统设计的一般步骤

计算机控制系统的设计,主要是根据系统任务的要求,订出满足要求的技术指标。要注

意技术指标的先进性和可实现性,要注意性能价格比。其设计步骤大致分为以下几步:

(1)分析被控对象,明确控制任务。被控对象是控制系统中的根本环节,因此必须对被控对象的物理过程作深入调查、分析和研究,掌握其静态和动态性能,通过有效的方法建立其必要的数学模型。

(2)提出系统的设计准则。设计准则是设计中所依据的规则,以保证系统达到总的目标及技术指标的要求。在制定设计准则时一般要围绕系统的工艺要求、控制任务、环境要求、投资和可实现性、先进性和继承性等综合全面的考虑。

(3)确定计算机控制系统方案。主要解决计算机的选型、硬件配置。软件与硬件、硬件与软件之间的接口等问题。也就是说要确定出计算机控制系统的各个环节。

(4)确定系统的工程结构。它主要包括控制现场各种装置的安装、走线和控制台的结构等。在设计中要注意抗干扰、造型和使用维护方便等。

(5)确定控制算法、编程与计算机系统的调试。

(6)进行数字仿真或混合实时仿真,验证控制系统的合理及有效性。

(7)现场调试,现场调试主要是联调,以解决整个系统在运行中存在的实际工程问题。

1.4 本课程讲述的内容

学习本书的目的是为了使电子机械工程类、机电一体化和非自动控制类专业的学员对机电系统计算机控制的设计打下良好的基础,以便以系统的观点解决机电工程的实际问题,提高设计水平,从而提高机电产品和生产设备的性能。讲述的内容如图 1.8 所示的典型的计算机控制系统。首先讲述各环节的基本原理、性能指标和选择原则,其次是讲述各环节之间的联系及处理方法,最后是讲述计算机控制的各种设计方法。这些内容涉及到计算机控制系统的基本理论和基本数学工具。因此学习本课程的起点是具有模拟电路、数字电路、微机原理、高等数学、自动控制原理、电机电器和机械等课程的基本知识。

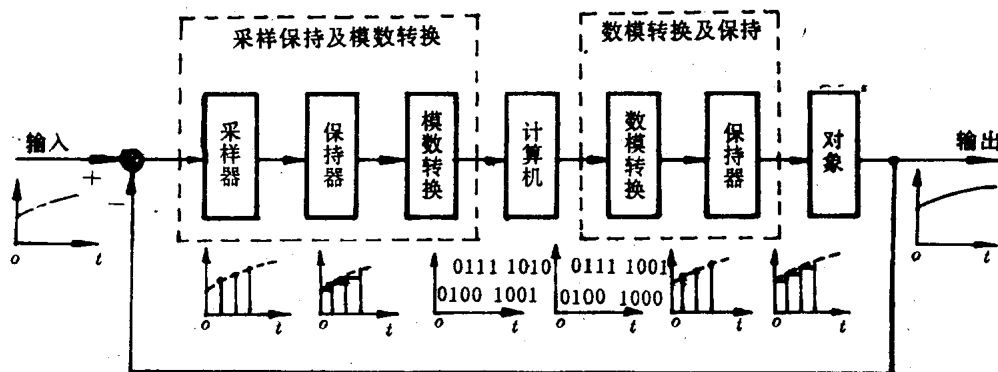


图 1.8 典型计算机控制系统(信号属于开环情况)

小结

本章主要介绍计算机控制系统的特点,由于数字计算机是直接作为控制系统中的一个主要环节,它的输入、输出都是数字信号,对于机电系统,就常常要求将连续的测量信号转换为数字信号(即 A/D 转换器)送入计算机。将计算机输出的数字信号转换为连续信号(即 D/A 转换器)去控制被控对象,这里计算机不仅代替了连续控制系统的比较环节、控制器或调节器,而且具有多种信号运算处理功能,使控制系统的控制性能指标更好地满足被控对象的要求。

练习题

1-1 如图 1.9、1.10 和 1.11 所示的控制系统,试说明其工作原理,各具有什么特点。

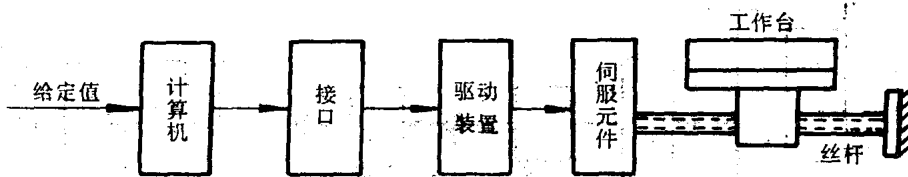


图 1.9 开环计算机控制

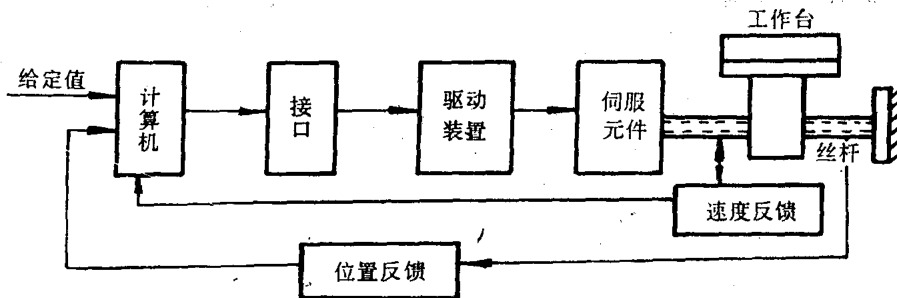


图 1.10 闭环计算机控制

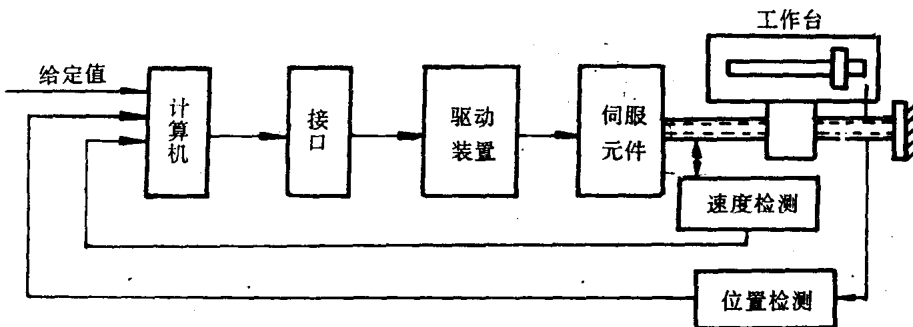


图 1.11 闭环计算机控制

1-2 由图 1.12 和图 1.13 所示的控制系统,试说明其工作原理,各有什么特点:

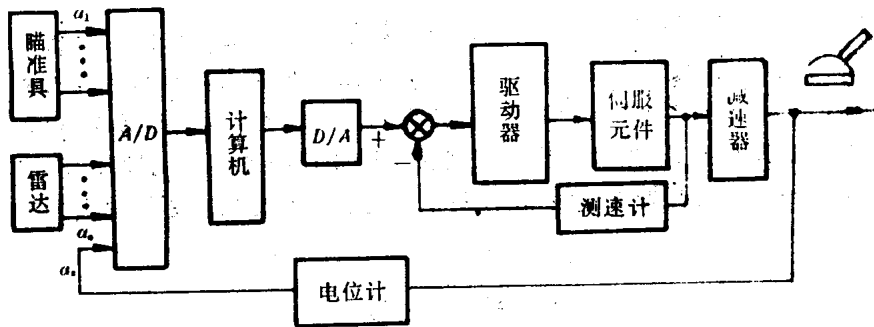


图 1.12 闭环计算机控制

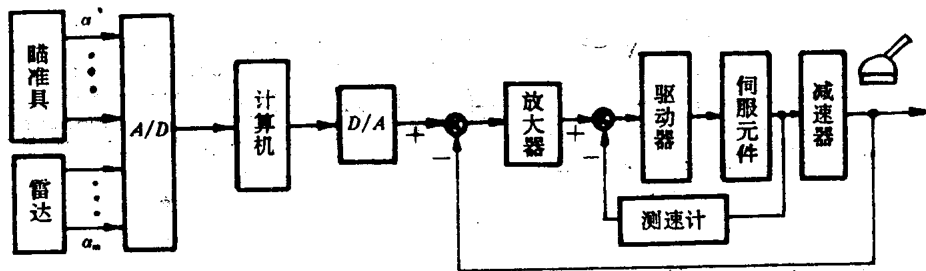


图 1.13 开环计算机控制

第二章 机电系统的动态模型

一谈到机电系统自然联想到它的运动,而运动又必须涉及到状态位置和状态位移这两个概念。位置与位移是刻画运动的不可分割的两个要素,而速度则只是位移的派生物,加速度是速度的速度。人为的控制系统就是不能让系统“听其自然”地发展,而是要它按照我们既定的目标运动,这个既定的目标是由被控对象所确定的。因此我们的任务是要根据被控对象寻找达到既定目标的控制规律。一般说来是要达到稳、准和快的要求,例如火车准点到达,这就不仅要控制速度,而且要控制起动和停止时间,即是说对于位置控制不仅要调整速度,还要调整加速度,这就必须配备一套合理的动态模型。为此我们必须建立系统的动态模型,实现动态控制,达到我们既定的目标。本章是讲述机电系统的动态模型。

2.1 机电系统原理简化图

机电系统的动力学方程,必须包含以下三个方面的内容:

- (1)系统的物理描述;
- (2)系统运动微分方程的推导;
- (3)符合所关心的运动条件的方程解。

系统的能量对动态特性起着主导作用,如果能够用数学方式描述一个系统的能量作用和能量关系,则就描述了该系统的动态特性。对于一个系统它是由各元件所组成,从能量的观点出发,其系统的元件可被分为能源、能量储存元件、能量消耗元件、能量变换元件、能量传输和能量调节等。对于机电系统,能量的来源即能源,全部来自于电源,而无一来自于机械源。如果将系统中的元件正确连接,则就能够确定系统的动力学方程。

1. 元件方程

对于机械系统能源是力。对于电气系统能源是电压或电流。对于理想机械的质量、惯量和理想电气系统的电容,它们分别通过速度和电压存储能量。弹簧及电感是通过力和电流来储能,阻尼和电阻是消耗能量。对于机电系统其元件方程如表 2.1 所示。

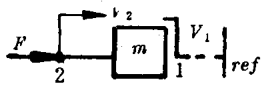
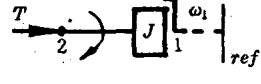
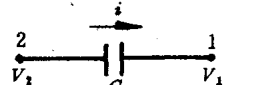
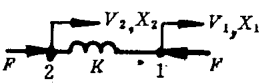
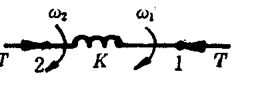
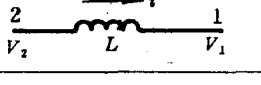
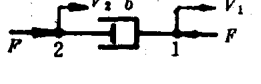
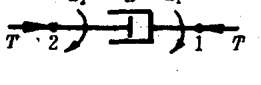
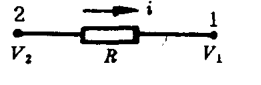
2. 机电系统元件连接原则

要建立系统的动力学方程,首先是要根据元件的物理特性建立元件方程,其次再建立这些方程之间的关系。这个关系对于电的系统来说就是基尔霍夫电压定律和电流定律,对于机械系统而言是达朗贝尔的静力平衡原理和空间连续律。

- (1)基尔霍夫电压定律是说绕某一回路(第 K 个回路)的全部电压降为零,即

$$\sum_{i=1}^s u_{ki} = 0 \quad (2-1)$$

表 2.1 机电系统理想元件方程

名称	符号	方程	能量或功率	广义方程
质量		$F = m \frac{dV_2}{dt}$ $V = \frac{1}{m} \int_0^t F dt + (V_{21})_0$	$\epsilon_K = \frac{1}{2} m V_2^2$	$f = C \frac{dV_{21}}{dt}$
惯量		$T = J \frac{d\omega_2}{dt}$ $\omega_{21} = \frac{1}{J} \int_0^t T dt + (\omega_{21})_0$	$\epsilon_K = \frac{1}{2} J \omega_2^2$	$V_{21} = \frac{1}{C} \int_0^t f dt + (V_{21})_0$
电容		$i = C \frac{dV_{21}}{dt}$ $V_{21} = \frac{1}{C} \int_0^t i dt + (V_{21})_0$	$\epsilon_e = \frac{1}{2} C V_{21}^2$	$\epsilon_e = \frac{1}{2} C V_{21}^2$
弹簧		$F = K \int_0^t V_{21} dt + F_0$ $V_{21} = \frac{1}{K} \frac{dF}{dt}$	$\epsilon_p = \frac{1}{2} \frac{F^2}{K}$	$V_{21} = L \frac{df}{dt}$
扭簧		$T = K \int_0^t \omega_{21} dt + T_0$ $\omega_{21} = \frac{1}{K} \frac{dT}{dt}$	$\epsilon_p = \frac{1}{2} \frac{T^2}{K}$	$f = \frac{1}{L} \int_0^t V_{21} dt + f_0$
电感		$i = \frac{1}{L} \int_0^t V_{21} dt + i_0$ $V_{21} = L \frac{di}{dt}$	$\epsilon_m = \frac{1}{2} L i^2$	$\epsilon_m = \frac{1}{2} L f^2$
阻尼		$F = b V_{21}$ $V_{21} = \frac{F}{b}$	$P = b V_{21}^2$	$V_{21} = R f$
旋转阻尼		$T = B \omega_{21}$ $\omega_{21} = \frac{1}{B} T$	$P = B \omega_{21}^2$	$f = \frac{1}{R} V_{21}$
电阻		$i = \frac{1}{R} V_{21}$ $V_{21} = R i$	$P = \frac{1}{R} V_{21}^2$	$P = \frac{(V_{21})^2}{R}$

式中 u_{ki} 是 K 个回路中的 i 个电压。举例如图 2.1 所示。它是电阻和电容的并联，表明两元件两端电压相等。进入的电流分成两个分支，即 i_c 和 i_R 。

(2) 基尔霍夫电流定律是说流经某一节点(第 K 个节点)的一切电流的总和等于零，即

$$\sum_{i=1}^n i_{ki} = 0 \quad (2-2)$$

式中 i_{ki} 是流入第 K 个节点的第 i 股电流。举例如图 2.2 所示。它是电阻和电容的串联，通过两元件的电流相等，即 $i = i_R = i_C$ ，电压 $V = V_{13} = V_{12} + V_{23}$ 分成两部分。

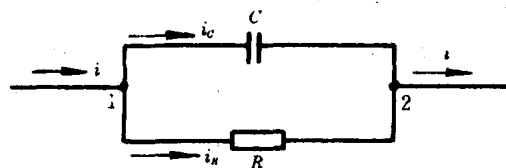


图 2.1 电阻和电容的并联

(3) 空间连续律是说绕任何一个