

高等学校教材

计算机控制原理

戴冠中 编著

西北工业大学出版社

高等学校教材

计算机控制原理

(1988年修订本)

戴冠中 编著

戴冠中 蔡小斌 朱志祥 修订

西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了分析和设计具有数字计算机的自动控制系统(简称计算机控制系统)的基本理论。包括经典控制理论的Z变换分析设计法,以及现代控制理论的状态变量分析设计法;大部分篇幅阐述了计算机控制理论,但也从整个计算机控制系统的全局出发,介绍了实时控制计算机硬、软件的特殊性。全书共七章:①引论;②模拟式控制系统的分析基础;③数字信号;④计算机控制系统的Z变换分析法;⑤计算机控制系统的Z变换设计法;⑥计算机控制系统的状态变量分析设计法;⑦实时计算机控制系统。

本书是根据航空工业部1985年修订的《计算机控制原理》教学大纲修订的。原书由国防工业出版社出版,修订本改由西北工业大学出版社出版。本书可作为计算机应用与信息工程专业专业的教材,也可供与计算机控制技术有关的工程技术人员、大专院校其它专业的师生参考。

高等学校教材

计 算 机 控 制 原 理

(修订本)

戴 冠 中 编 著

戴冠中 蔡小斌 朱志祥 修订

责任编辑 王夏林

西北工业大学出版社出版

(西安市友谊西路127号)

陕西省新华书店发行

航空工业部〇一二基地印刷厂印装

开本787×1092毫米 1/16 印张15.75 382千字

1980年4月国防工业出版社第1版 1988年4月第2版第1次印刷

印数1—9000册

ISBN 7-5612-0052-8/TP·14(课) 定价:2.62元

前 言

《计算机控制原理》的第一版于1980年由国防工业出版社出版。它被西北工业大学计算机科学与工程系的“计算机应用”、“信息系统工程”等专业选为教材，已进行了七届的教学。一些兄弟院校的有关专业也选择本书作为教材或主要参考书，进行了几届的教学。

本书的修订本是根据多届教学实践中发现的问题和近年来计算机控制的理论与实践的发展、根据航空工业部1985年修订的《计算机控制原理》教学大纲，进行修订的。现作为通用教材继续出版。

由于第一版的篇幅已超过了作为60~80学时的教材篇幅，故在修订本中力求阐述更加简明扼要，删去了一些可省略的解释和图表；考虑到有些内容在先修课程中已讲过，这次修订中也予以删除；至于有些内容在现在看来已经过时，在修订中当然也删除了。另一方面，近年来计算机控制理论与应用的发展非常迅速，很多新的分析与设计计算机控制系统的方法理应补充增加，但限于本课程的教学时数有限，修订中仅仅增加了两种新的计算机控制系统的设计方法：一是近年来在控制工程中行之有效的自校正控制器的设计方法；二是在未来很有发展前途的专家智能控制器的设计问题。这两种方法已在本单位的“光纤拉丝过程微机自适应控制系统”的科研项目中得到了成功的应用。此外，修订本中还给出了书中大部分习题的参考答案，供读者参考。

本书由西北工业大学戴冠中、蔡小斌、朱志祥修订。

南京航空学院宋振璞同志参加了修订的大纲的讨论，在此深表谢意。

修订本中，如有不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

1987年7月

目 录

前言

第一章 引论..... (1)

1.1 自动控制系统的构成原理..... (1)

1.2 计算机控制系统..... (4)

思考题..... (7)

第二章 模拟式控制系统的分析基础..... (9)

2.1 系统的数学模型..... (9)

2.2 传递函数..... (22)

2.3 频率特性函数..... (33)

2.4 方块图与信号流图..... (40)

2.5 稳定性分析..... (47)

2.6 稳态误差..... (53)

2.7 动态品质的估算..... (57)

2.8 提高控制系统性能的基本方法..... (60)

习题..... (67)

第三章 数字信号..... (73)

3.1 数字信号的断续性..... (73)

3.2 采样过程..... (74)

3.3 整量过程..... (78)

3.4 信号保持..... (83)

习题..... (85)

第四章 计算机控制系统的Z变换分析法..... (87)

4.1 Z变换..... (88)

4.2 脉冲传递函数与方块图..... (100)

4.3 稳定性分析..... (107)

4.4 稳态误差与瞬态响应..... (112)

4.5 推广Z变换..... (116)

习题..... (123)

第五章 计算机控制系统的Z变换设计法..... (125)

5.1 模拟式调节器的数字化..... (125)

5.2 快速有波纹计算机控制系统的设计..... (131)

5.3 快速无波纹计算机控制系统的设计..... (141)

5.4 具有旁路数字控制器的系统的设计	(145)
5.5 具有干扰作用的系统的设计	(150)
5.6 控制公式的程序设计法	(155)
习题	(158)
第六章 计算机控制系统的状态变量分析设计法	(160)
6.1 动态系统的状态变量描述法	(160)
6.2 状态方程之解	(164)
6.3 具有输出反馈的快速最佳计算机控制系统的设计	(177)
6.4 具有状态反馈的快速最佳计算机控制系统的设计	(189)
6.5 具有二次型性能指标函数的最佳计算机控制系统的设计	(199)
6.6 自校正控制器的设计	(210)
习题	(218)
第七章 实时计算机控制系统	(221)
7.1 实时控制计算机	(221)
7.2 计算机控制系统设计中的一些问题	(224)
7.3 微机实时控制系统设计举例	(228)
习题参考答案	(235)
参考文献	(246)

第一章 引 论

所谓控制，从广义上讲，是指向被控制的对象施加作用，使它按照某种要求的规律运行。在自动控制技术发展之前，人们采用的是手动控制；在自动控制技术发展的初期，人们采用具有模拟式调节器的模拟式控制系统；当今，人们已广泛采用具有数字计算机的计算机控制系统。

本章通过对自动控制技术发展历史的回顾，介绍自动控制系统的一般构成原理和计算机控制系统的特殊问题。

1.1 自动控制系统的构成原理

本节首先研究手动控制过程的规律性，然后据此规律性构成自动控制系统。

手动控制 在手动控制过程中，人们通过目测观测被控制对象的输出，并根据观测结果，手动调整输入。下面是两个例子。

飞行员要使飞机大体上在某一高度上飞行，但是飞行中存在着许多使飞机偏离预定高度的干扰因素，例如气流的作用、发动机推力的不均匀等等。飞行员不断观察仪表板上的高度表。当指示的高度低于预定高度时，就需拉起驾驶杆，使飞机爬高；反之，当指示的高度超过预定高度时，则需压下驾驶杆，使飞机下降。这个控制过程可以用图 1-1 形象地表示，图中箭头的方向表示信息传递的方向。这里飞机是被控制对象，飞行高度是被控制参数，各种干扰因素使被控制参数偏离预定的值。高度表是测量装置，它测量被控制参数。飞行员判断预定高度与测量高度之间的误差，并根据误差的性质操纵驾驶杆。驾驶杆则是执行装置，它执行飞行员的命令，并通过高度机构，改变飞机的高度。象图 1-1 这种表示控制过程各部分的功能和信息传递关系的图，称为方块图。方块图使控制过程一目了然。

图 1-2 则是航空发动机高空模拟实验舱的方块图。高空舱大体上模拟了高空的物理环境，以试验航空发动机在高空状态下的性能。图中，测量仪表不断测量出舱内的温度、压力等设备参数。当这些参数偏离预定值时，由操纵员通过调节器进行调节，使这些参数达到预

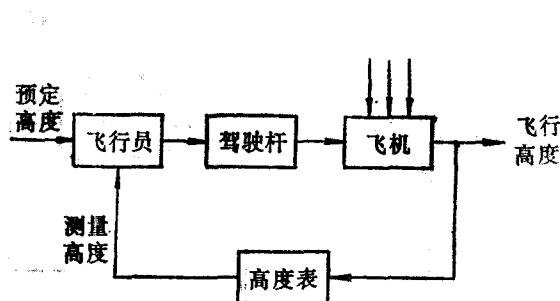


图 1-1 操纵飞机的控制过程

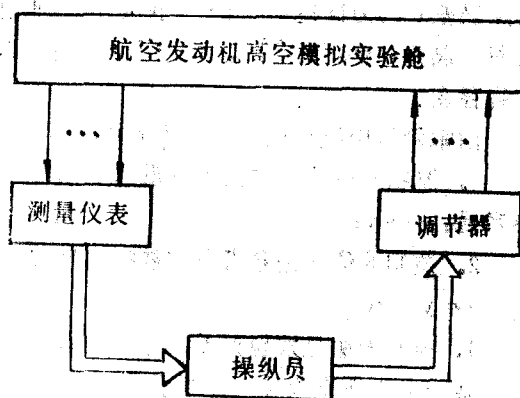


图 1-2 高空舱设备参数的控制过程

定的要求。这个控制过程中，高空舱是被控制对象，温度、压力等设备参数则是被控制参数。

通过上述两例，可以概括手动控制的本质如下：

1. 控制过程包括两个部分：被控制对象和控制部分。
2. 被控制对象（如飞机或高空舱等）的状况可以用一个或多个物理量来说明（如高度或温度、压力等），这些物理量称为被控制量，通常用字母 x 来表示。控制的简单目的就是使被控制量 x 达到预定的量 y ，称 y 为参考量。
3. 控制部分有三个基本要素：测量装置、操纵者、执行装置。测量装置对被控制对象的状况进行量测；操纵者根据所测得的结果和预定的控制要求，进行判断、分析；执行装置则把操纵者的控制命令作用到被控制对象上。
4. 被控制对象与测量装置、操纵者、执行装置所组成的控制部分之间，形成一个闭合的控制回路。闭合回路是建立控制过程的一个特征。

闭环负反馈 手动控制过程，需要操纵者在闭合回路内进行一定的分析、判断。这样，手动控制的主要缺点是：要人参与，控制过程未实现自动化。因而，在控制性能要求很高、控制过程非常迅速、控制系统十分复杂的情况下，人就难以胜任分析、判断的工作，更何况在有些控制过程中，是不允许人直接处于闭合回路内的，否则会危及人的生命。因此，我们就必须创造出自动控制系统。只要我们找到了手动控制过程的规律性，我们就能够用自动装置代替操纵者，把人从闭合回路中解放出来。

什么是控制过程的规律性呢？回到操纵飞机的例子。如果预定的飞行高度为 y ，测量的飞行高度为 x ，飞行员就能判断出误差 $e = y - x$ 。他就应该根据误差 e 来操纵驾驶杆。当 $e > 0$ ，应拉起驾驶杆，增大 x ； $e < 0$ ，则压下驾驶杆，减小 x 。 $|e|$ 越大，驾驶杆应改变得越大。因此，误差 e 就是飞行员进行控制的最基本、最重要的信息，而控制的目的是为了减小误差 e ，使之趋于零。概言之“发现误差，减小误差”，这就是控制的方法。

据此方法，最简单的自动驾驶仪只需构成误差信号 e ，就能代替人的作用，如图 1-3。图中，高度计是测量装置，它测量出飞机的实际飞行高度 x 。由于干扰的作用，飞机的实际飞行高度 x 往往偏离预定的飞行高度 y 。比较装置代替了操纵者，它检测出误差 $e = y - x$ ，然后通过作为执行装置的高度机构，操纵飞机往消除误差 e 的方向运动。由于干扰是不断地作用着，误差 e 就不断产生，所以上述控制过程始终存在。

由本例可以概括出控制过程的规律性：

1. 控制的目的是使被控制量达到预定的参考量： $x \rightarrow y$ ；
2. 控制的信息是参考量与被控制量的误差： $e = y - x$ ；
3. 控制方法是发现误差、减小误差。

基于上述规律构成的控制系统，由于被控制量是控制系统的输出，而它变化着的值又反

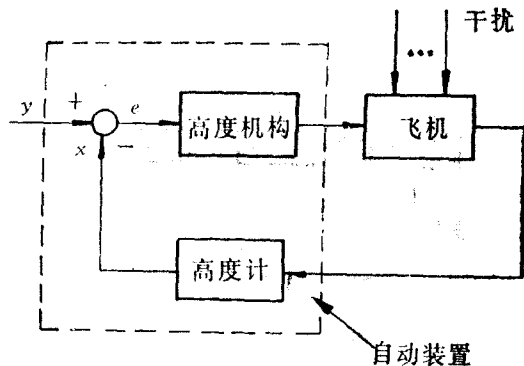


图 1-3 高度自动控制系统示意图

馈到控制系统的输入端，与作为输入量的参考量相减，所以这种控制系统称为闭环负反馈控制。

在这种控制系统中，不论造成误差的干扰因素有多少、误差是由系统内部元件参数变化还是外部因素的变化引起的、有没有规律性，该控制系统总是趋向于减小误差而工作。因此闭环负反馈控制具有很大的优越性。

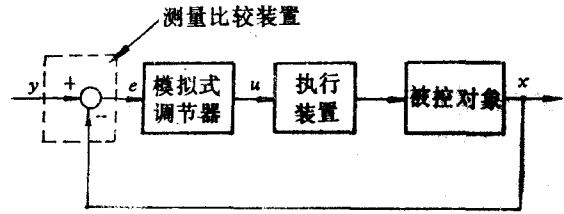


图 1-4 模拟式控制系统的基本方块图

模拟式控制系统 一般的模拟式自动控制系统，就是根据闭环负反馈原理构成的。如图 1-4 所示，测量比较装置将被控制量 x 与参考输入量 y 相比较，以构成误差信号 $e = y - x$ 。模拟式调节器对误差信号进行加工，生成控制信号 u ，再经执行装置作用到被控制对象上，使系统减小误差，直到被控制量 x 达到参考量 y 。这里，模拟式调节器是为了提高控制系统的性能而设置的；我们以后将会知道，直接用误差信号 e 去驱动执行装置，往往不能得到满意的控制性能。

在本世纪 40~50 年代及 60 年代的初期，出现了大量的模拟式控制系统。下面我们举一个实例。

图 1-5 是航空炮塔控制系统的一个通道的示意图。控制系统的任务是使机关炮轴的方向跟踪瞄准具轴的方向。这里武器轴的方向是系统的被控制量或输出量，而瞄准具轴的方向则是系统的参考量或输入量。图中，一对电位计 R_1 与 R_2 用以测量武器轴与瞄准具轴之间的误差角。当武器轴偏离瞄准具轴时，由电位计 R_1 取得的电压值就不等于由电位计 R_2 取得的电压值，这个误差信号经差动放大器与功率放大器以及校正电路的变换，然后驱动伺服电动机转动，并通过减速器，改变武器轴的位置，以减小误差角，直到武器轴方向与瞄准具轴方向一致为止。因此，当射手操纵瞄准具对准敌机时，控制系统自动地使机关炮轴的方向指向目标。在本系统中，模拟式调节器就是简单的 RC 校正电路。

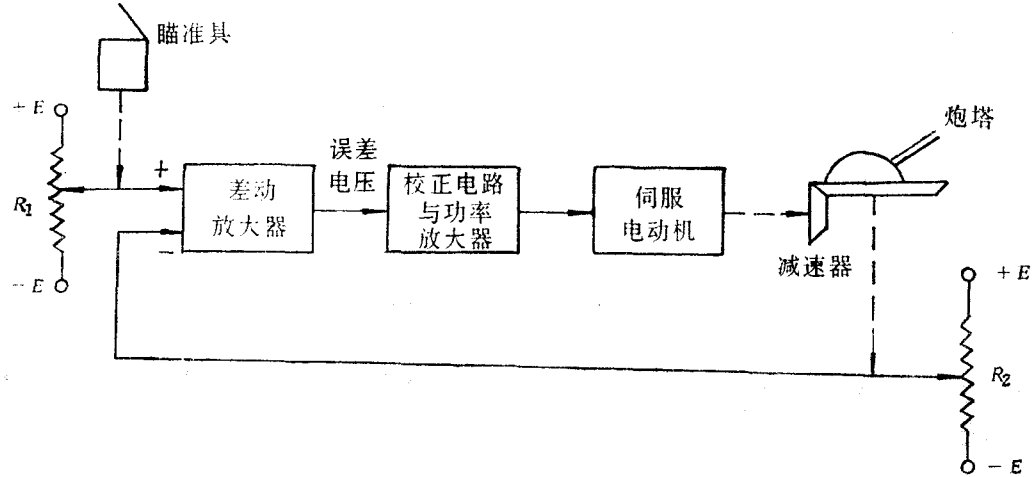


图 1-5 航空炮塔控制系统示意图

1.2 计算机控制系统

随着计算机的迅速发展，它在实时控制领域中的应用也不断扩大。具有计算机的自动控制系统，称为计算机控制系统。60年代中期已开始出现这种控制系统。今天，具有微处理器或微计算机的计算机控制系统已大量涌现。

本节首先讨论计算机控制系统的组成，然后研究计算机控制系统的特点，最后介绍计算机控制系统的发展过程。

计算机控制系统的组成 上一节已指出，自动控制系统的三个基本要素是：测量装置、代替操纵者的控制器、执行装置。三者的关系好比是人的眼睛、脑、手。显然，其中最重要的部分是控制系统的“大脑”——控制器，它从质和量上决定了控制系统的性能。由于计算机具有很强的计算、逻辑判断和记忆等信息加工能力，因此，在信息变换的自动控制系统中，以计算机为控制部件，并充分发挥其潜力，就能大幅度提高系统的控制质量。

顾名思义，计算机控制系统是计算机与自动控制相结合的产物。图 1-6 示出了计算机控制系统的组成。图中，系统首先检测表示被控制对象状态的各种物理量（如电压、电流等电量，或温度、压力、流量、位置、转速等非电量）。对于非电量要用传感器转换成电量，或用转换器直接转换为数字信号。这些检测出的信号通过电缆线或光导纤维的传输，再经过由模拟量变换为数字量的转换（A/D 转换），输入到计算机中。计算机根据输入的数据，执行规定的控制算法，计算出控制信号，再通过将数字量变换为模拟量的转换（D/A 转换），把控制信号传输给驱动器或执行装置，以对被控制对象进行控制。通常控制信号需经功率放大后，再传送给驱动器或执行装置。我们可看到这是一个闭环的信息流程：对被控制对象的

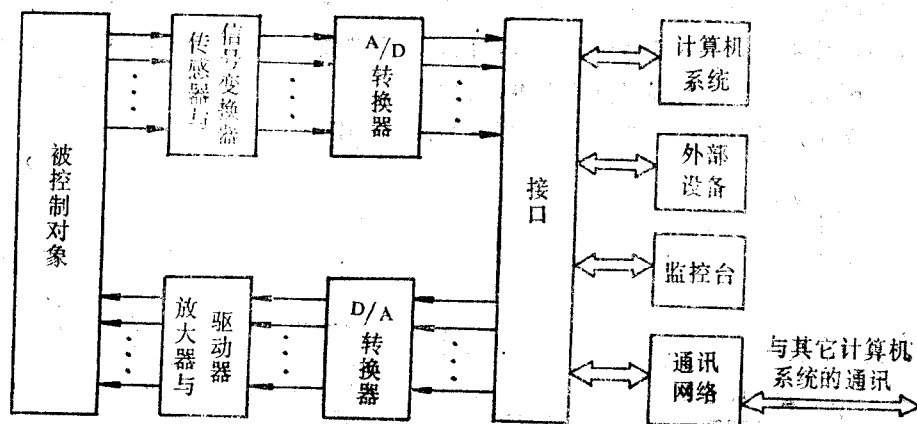


图 1-6 计算机控制系统的组成

状态变量进行检测、转换、传输和 A/D 变换，再由计算机进行信息处理，然后将处理所得的控制信号进行 D/A 变换和放大，经驱动器或执行装置去控制被控制对象。在计算机控制系统中，计算机除了执行上述的实时控制任务外，还可执行数据处理（如巡回检测、数据记录、性能计算、分析处理、选点显示、定时制表等等）和监控（如超限报警、事故预报与处理、设备的自动启停、系统的诊断、系统管理等等）等任务。这样的计算机控制系统往往用

于工业过程的控制任务之中，故常称为计算机过程控制系统。在航空工业的产品设计、试验、加工和测试中，广泛应用计算机过程控制系统。

计算机控制系统控制飞机和导弹，有效地提高了飞机和导弹的战术技术性能。图 1-7 为机载火力控制计算机系统的一个通道的简化方块图。图中，雷达、瞄准具等测量装置所给出的测量信号 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 由 A/D 转换，输入计算机中，经过解命中问题的瞄准计算程序，计算出武器应有的转角 y 。计算机控制系统另一个任务是将计算结果的二进制数码 y ，转换为武器实际的机械转角 x 。图 1-7 指出了，武器实际的机械转角 x 经反馈电位计，产生

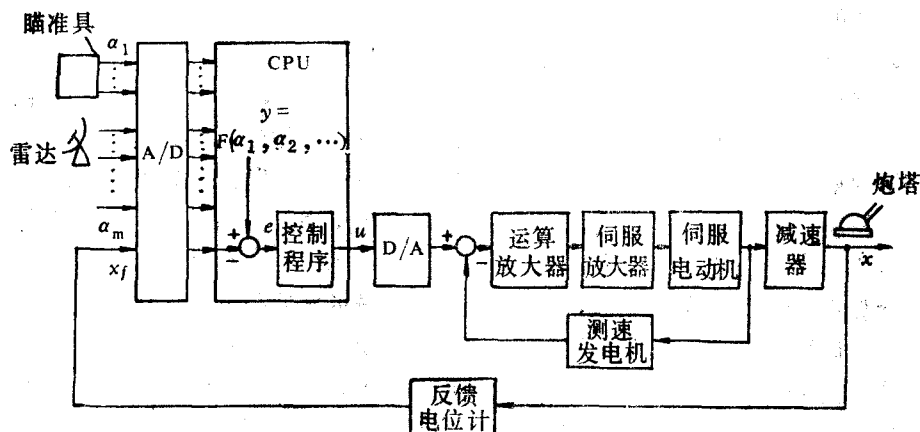


图 1-7 机载火力控制计算机系统的简化方块图

相应的电压信号 x_f ，再经 A/D 转换器将 x_f 转换成数字信号，反馈到计算机中，在计算机中由程序实现相减： $e = y - x_f$ 。计算机的控制程序对误差 e 进行加工： $u = f(e)$ ，输出控制信号 u 。D/A 转换器将数字控制信号 u 转换成模拟控制信号，再经运算和伺服放大器放大，驱动伺服电机，经减速器而改变武器转角 x ，从而也改变电位计的反馈电压信号 x_f 。控制系统力图使误差 $e \rightarrow 0$ ，即 $x_f \rightarrow y$ 。这就使武器实际的机械转角 x 趋于计算所得的武器应有的转角（二进制数码） y 。图中，测速发电机的作用是改善控制系统的性能。这个系统将计算机包围在闭合回路内。形成误差 e 的相减是由计算机的程序实现。这里，计算所得的武器应有转角 y 就是控制系统的参考量或输入量，武器实际转角 x 则是控制系统的被控制量或输出量。

计算机控制系统的特点 通过以上两例可知，同不包含数字计算机的模拟式控制系统相比，计算机控制系统有两个主要特点：

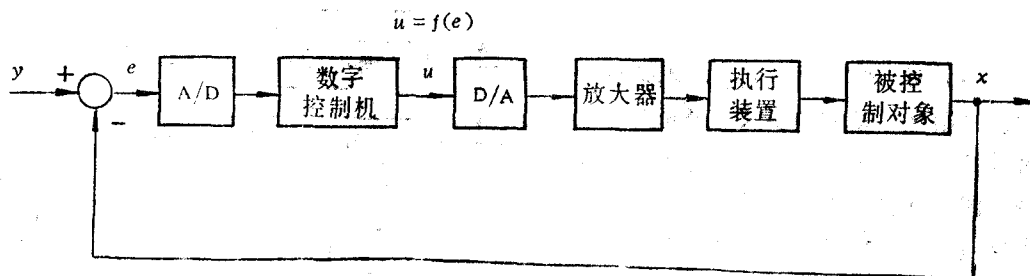


图 1-8 计算机控制系统的基本方块图

1. 出入数字机的信号都是断续的数字信号。因此计算机控制系统中需有将连续测量信号转换为数字测量信号的 A/D 转换器, 将数字控制信号转换为连续控制信号的 D/A 转换器。

2. 可以充分利用计算机硬件, 特别是软件的巨大潜力, 建立高质量的控制系统。例如图 1-8 计算机控制系统的基本方块图中, 计算机对误差信号进行加工处理, 即对误差 e 进行一定的数学或逻辑运算: $u = f(e)$, 用经过加工后的控制信号 u 去控制被控制对象, 以提高系统的控制质量。

计算机控制系统中, 构成控制信号 u 的第一手材料仍是误差 e 。这同模拟式控制系统一样, 遵循闭环负反馈的控制原则, 这也是两者的共性。

本书第二章首先回顾模拟式控制系统的基本分析方法, 因为这是研究计算机控制系统的基础。第三章研究计算机控制系统的特点之一——信号的数字化对控制系统性能的影响。第四至第六章则研究计算机控制系统的最本质特点——充分发挥计算机的潜力, 设计高质量的计算机控制系统的基本分析、综合方法。最后第七章中, 介绍了设计计算机控制系统的一些具体问题。

计算机控制系统的发展过程 计算机控制系统的发展与数字计算机本身的高速发展密切相关。在计算机控制系统的早期阶段, 由于数字机在硬件上不具备中断功能, 软件上没有操作系统的支持, 计算机就只能进行数据处理和对被控制对象的运行状况进行监控, 而控制系统的控制器是由模拟式调节器来担任。在 60 年代中期, 以集成电路为主要元件的小型数字计算机的出现, 计算机硬件功能日趋完善, 特别在软件上配备了实时操作系统, 计算机就能有效地完成不同的任务 (包括对外部设备进行管理)。一般来说, 计算机除了完成数据处理和监控任务外, 还在闭合回路中作为控制器, 直接控制被控制对象。在此发展阶段, 由于计算机价格还较昂贵, 一般是使用一台控制计算机, 分时控制几十个甚至几百个控制回路, 这是一种集中式的控制方式。此阶段所采用的控制算法也往往是模拟式调节器中常用的比例加积分加微分的所谓 PID 控制规律。这种计算机控制系统也称为直接数字控制 (DDC)。

70 年代以来, 由于微型计算机的迅猛发展, 使计算机控制发展到了一个新的阶段。由于微处理器具有价格便宜、功能较全、可靠性好的优点, 这使过去的集中控制方式往往改成分散控制方式。在这种分散控制系统中, 地理上分散的被控制对象少则几个, 多则十几个。我们可以使用多个微处理器进行分散控制, 必要时还可以用数据通讯线把这些微处理器连接在一起, 实现信息传递。

另一方面, 随着被控系统越来越大、复杂化以及控制要求越来越高, 从系统结构上说, 出现了分层的计算机控制系统。图 1-9 表示了一种四层的系统, 这四个层是: 直接控制层、最优化控制层、自适应控制层和自组织层。这里, 直接控制层使系统的被控制量达到参考量 (或称

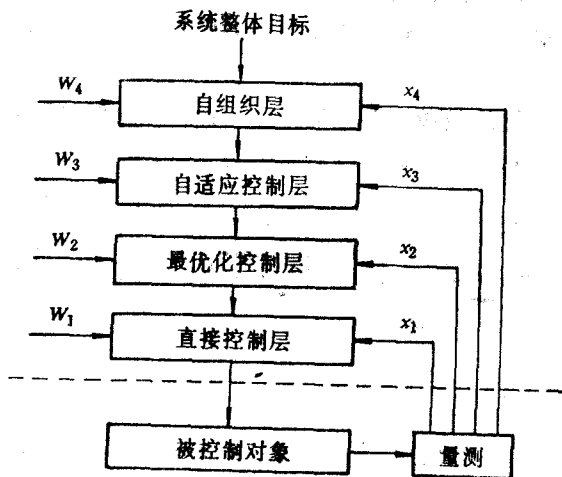


图 1-9 分层计算机控制系统

设定值)；最优化控制层给出使某个性能函数为最优的直接控制层的最优设定值；自适应控制层根据所获得的有关被控制对象内部和外部的信息，确定最优化控制层的性能函数和参数；自组织层则根据系统整体目标来确定系统的结构。图中， x_1, x_2, x_3 和 x_4 表示反馈到各控制层计算机的有关被控制对象的状态信息； w_1, w_2, w_3 和 w_4 则分别表示系统状态变量的扰动、运行方面的扰动、参数扰动和结构方面的扰动。分层计算机控制系统中，越是上面的控制层，所需处理的内容越复杂，控制的执行周期就越大；反之，越是下面的控制层，虽然处理的内容越简单，但扰动的变化越快，故对实时处理的要求也越高。

限于篇幅，本书主要讲述直接控制层计算机的各种控制方法，因为这是计算机控制理论中最基础的内容，系统地掌握了这些知识后，就为研读计算机控制理论的有关专著打下较扎实的理论基础。

思 考 题

- 1-1 试举日常生活中所遇到的手动控制过程的若干个实例，并绘出方块图。
- 1-2 用负反馈概念解释高精度跟随器、运算放大器、稳压电源的工作原理。
- 1-3 x - y 记录仪的简化方块图如图 1-10，试分析其工作原理。

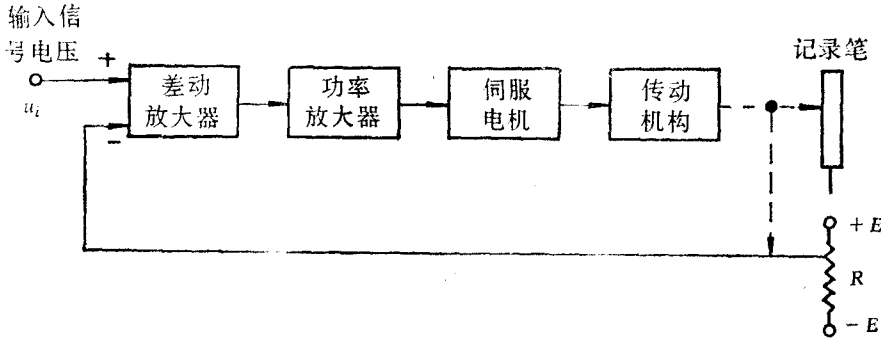


图 1-10 x - y 记录仪简化方块图

1-4 除了闭环控制系统以外，还有一种开环控制系统。图 1-11 所示的即是开环数控机床的简化方块图，试说明其工作原理，并比较开、闭环控制系统的优缺点。

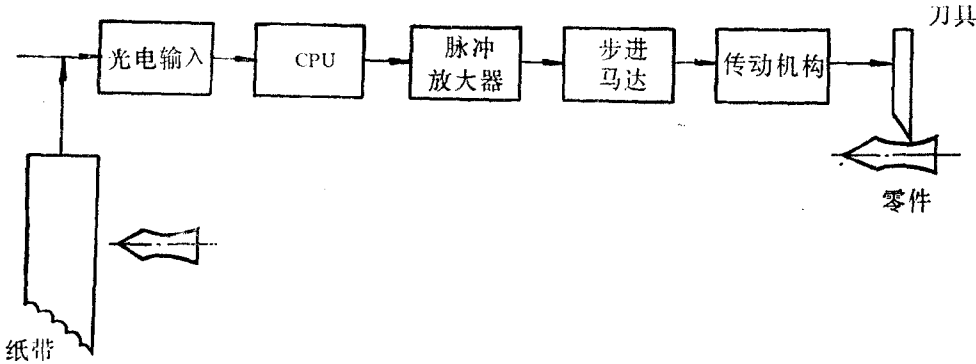


图 1-11 开环数控机床简化方块图

1-5 图 1-7 所举的是闭环的机载火力控制计算机系统，图 1-12 所示的是开环的机载火力控制计算机系统，试说明其工作原理。

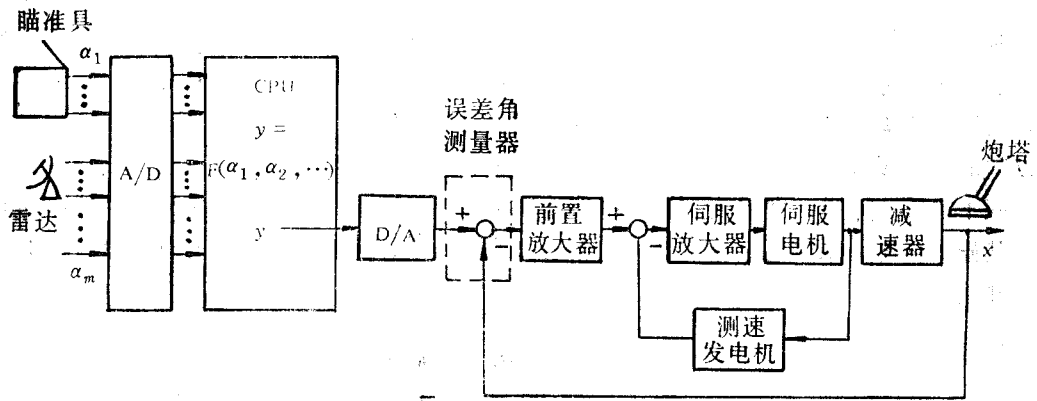


图 1-12 开环机载火力控制计算机系统

第二章 模拟式控制系统的分析基础

所谓分析,就是找出控制系统结构、参数与系统性能之间的内在联系。本章我们讨论模拟式控制系统的各种分析方法。

为了进行系统分析,首当其冲的是要研究描述系统输出与输入之间的关系的数学方程式,这即是系统的数学模型。第一节我们在时间域内研究控制系统的数学模型,第二、三节则在频率域内研究系统的数学模型。对于复杂系统输出与输入之间关系的求法,在第四节中介绍了方块图法和信号流图法。第五至第七节中我们研究了模拟式控制系统的基本分析方法,最后在第八节中则介绍了提高系统性能的一些校正方法。

2.1 系统的数学模型

建立系统的数学模型的方法通常有两种:即理论推导法和实验分析法。理论推导法是根据系统内部所遵循的已知的运动规律,直接推导出系统输出与输入的关系。当系统内部结构很复杂,人们对其运动规律的认识还不清楚时,一般只能用实验分析法来建立数学模型。

下面首先研究理论推导法。各种不同的自动控制系统,不论是机械的、电气的、电气——机械的、液压的、热力的、气动的等等,往往可以用微分方程来描述其输出与输入的关系。系统是由各元件按一定方式组成的,为了推导系统的数学模型,首先要推导各元件的数学模型。

元件的数学模型 任何元件,其外部特征是输出量与输入量之间的关系,这种关系可由方程来描述。在推导元件方程时,我们总是抓住元件中物理过程的主要矛盾,忽略一些次要因素(例如较小的非线性因素、不显著的元件参数变化因素、低频情况下的分布参数因素等等)。如果这些被忽略的因素对输出/输入关系的影响较小,那么,所推导的方程往往可以用线性常系数的微分方程或代数方程来描述。

控制系统元件按元件在系统中的功能进行分类,由第一章所举的系统中可知,有测量元件、放大元件、执行元件和校正元件等。

一般而言,误差测量元件检测参考输入量 y 与被控制输出量 x 之间的误差 e , 产生成正比的误差信号 u_e , 其方块图如图 2-1。描述输出与输入量之间的方程为

$$u_e = K_s e = K_s (y - x) \quad (2-1)$$

式中, K_s ——误差测量元件的传递系数。

对于电子放大元件,输出电压 u_a 与输入电压 u_i 之间的关系为

$$u_a = K_A u_i \quad (2-2)$$

式中, K_A ——放大元件的传递系数或增益。放大元件的方块图如图 2-2。

模拟式控制系统中常用两类校正元件:具有 R 、 L 、 C 的无源四端网络以及简单的有源元

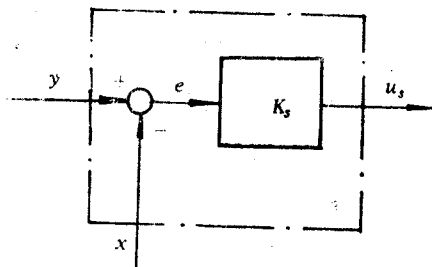


图 2-1 误差测量元件

件（如测速发电机、有源四端网络等），推导从略。

下面我们着重推导作为执行元件的电动机的微分方程，其目的是说明如何根据物理学的基本定律，把电动机内部的运动规律翻译成数学的语言——方程。

自动控制系统中，经常采用电动机作为执行元件，它也常和负载一起作为被控制对象。电机可分为交流和直流电机。直流他激电机具有效率高的优点，用于大功率控制系统中。

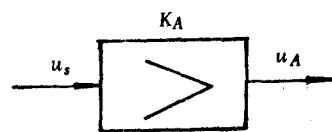


图 2-2 放大元件

图 2-3 是直流他激电动机的原理图。图中， u_B 为激磁线圈上的恒定的激磁电压， ϕ 是由 u_B 产生的恒定的激磁磁通， u_A 为加在电枢两端的输入控制电压， R_M 和 L_M 分别为电枢绕组的电阻和电感， i_M 和 e_M 分别为电枢绕组中的电流和反电势， Ω 和 ω 分别是电动机转速和负载转速（ i 为减速比）。下面根据电动机内部物理过程所遵循的物理定律，推导电动机输出转速 Ω 与输入电压 u_A 的数学关系式。

由电磁感应定律，描述电能转变成机械能的方程为

$$M = C_M i_M \quad (2-3)$$

式中， M 为电动机所产生的机械转矩， $C_M = C_M' \phi$ 为电动机的力矩常数， C_M' 为取决于电机内部构造的比例系数。

描述机械能消耗电能的方程为

$$e_M = C_E \Omega \quad (2-4)$$

式中， $C_E = C_E' \phi$ 为电动机反电势常数， C_E' 为取决于电机内部构造的比例系数。由克希霍夫定律，电枢电路方程为

$$L_M \frac{di_M}{dt} + R_M i_M + e_M = u_A$$

电枢电路电感 L_M 通常较小，可以忽略，则电枢电路的方程简化为

$$R_M i_M + e_M = u_A \quad (2-5)$$

由牛顿定律，电动机轴上机械运动方程为

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = M$$

式中， J ——电动机和负载折合到电动机轴上的等效转动惯量， f ——电动机和负载折合到电动机轴上的等效粘性摩擦系数。一般 f 较小，可以忽略，则电动机轴上机械运动的方程简化为

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M \quad (2-6)$$

将 (2-3) 和 (2-5) 式代入 (2-6) 式，得

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_M i_M = \frac{C_M}{R_M} (u_A - e_M)$$

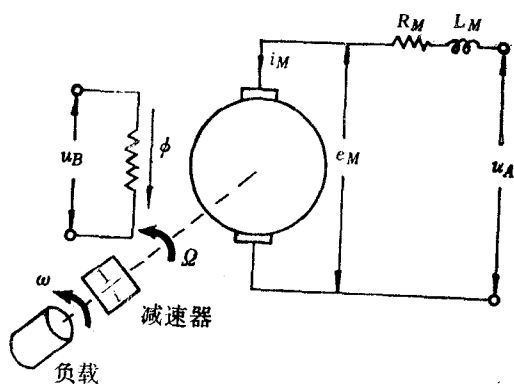


图 2-3 直流他激电动机

再将 (2-4) 式代入上式, 得

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \frac{C_M}{R_M} (u_A - C_E \Omega)$$

稍加整理, 可得

$$\frac{JR_M}{C_E C_M} \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = \frac{1}{C_E} u_A$$

或改写成标准形式:

$$T_M \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = K_M' u_A \quad (2-7)$$

式中, $T_M = JR_M / C_E C_M$, 称为电动机的时间常数, (一般, 电动机功率越大, T_M 也越大); $K_M' = 1 / C_E$ 称为电动机的传递系数。(2-7) 式即为描述电动机输出转速 Ω 与输入电压 u_A 之间关系的方程式。

电动机与负载之间通常有齿轮减速器。利用齿轮传动, 可实现减速, 增大转矩。设减速器的传动比为 i , 则负载转速 $\omega = \Omega / i$ 。于是 (2-7) 式可改写为

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_M u_A \quad (2-8)$$

式中, $K_M = K_M' / i$ 为包括了传动比后的电动机的传递系数。

我们也可以把负载的转角看作电动机的输出量。由于 $\omega = dx / dt$, 所以 (2-8) 式变为

$$T_M \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = K_M u_A \quad (2-9)$$

方程 (2-8) 和 (2-9) 是我们熟知的线性常系数微分方程式。

系统的数学模型 推导控制系统的方程式时, 先列出系统中各元件的方程式, 然后消除被控制输出量与参考输入量之外的所有中间变量, 最后得到被控制输出量与参考输入量之间的系统方程。下面以图 2-4 的炮塔控制系统为例, 说明系统方程的列写方法。我们从误差测量元件开始, 顺着回路的方向, 依次列出各元件的方程。

误差角 e 为 $e = y - x$ (2-10)

电位计输出的信号电压为

$$u_s = K_s e \quad (2-11)$$

式中, K_s ——传递系数, 量纲为 [伏/度]。

暂且忽略放大器中非电子放大级的惯性, 则放大器的输出电压 u_A 与输入电压 u_s 的关系为

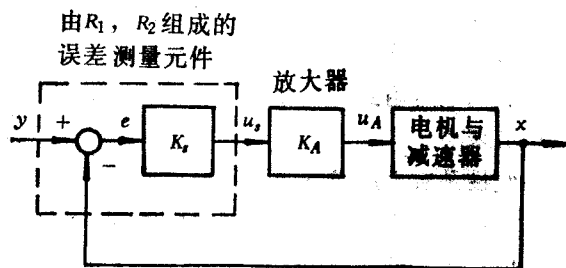


图 2-4 炮塔控制系统

$$u_A = K_A u_s \quad (2-12)$$