

高等学校轻工专业试用教材

设备与过程的计算机控制

徐元昌 编

轻工业出版社

7P39
29
高等学校轻工专业试用教材

设备与过程的计算机控制

徐元昌 编



轻工业出版社

内 容 简 介

数字计算机在最近20多年的迅速发展,特别是半导体电路的高度集成化,运行速度和工
作可靠性的提高,使得计算机参与控制不仅成为现实,而且日益广泛。本书涉及一种离散信
息的处理,用有限差分方程的后移算法,进行计算机控制和综合。

本书可作为机械工程类专业、化工工程及其他有关专业的大学教材。也可供有关教师和
科技人员参考。

JS464/11

高等学校轻工专业试用教材 设备与过程的计算机控制

徐元昌 编

轻工业出版社出版
(北京广安门南滨河路25号)
轻工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

787×1092毫米¹/₁₆印张, 0.25字数, 237千字
1989年4月 第一版第一次印刷
印数: 1—1000 定价: 2.50元
ISBN 7-5019-0578-8/TP·010

前 言

现代科学的发展使计算机进入了各个领域。工厂、办公室、家庭，计算机正在广泛应用，生产、交通、通讯，甚至娱乐都离不开它们。

数字计算机在最近20多年的迅速发展，特别是半导体电路的高度集成化，运行速度和工作可靠性的提高，使得计算机参与控制不仅已成为现实，而且日益广泛。

为了能自动地控制一个生产过程或设备，显然要有一个计算机控制系统可以对一个给定的输入值和实际的输出值进行比较，然后进行校正。反馈控制系统的分析是从连续模拟控制概念开始的，很多从事设计的技术人员对连续系统较为熟悉。有了微分方程和复变函数理论，包括拉普拉斯变换的数学基础，设计者对连续线性系统就可列出系统模型方程式，从而进行操作、分析、设计和综合。

50年代出现离散系统理论后， Z 变换和相应的一些概念如理想采样等相继进入使用。结果设计者既要掌握连续系统控制理论又要掌握数字控制理论，才能设计一个离散控制系统。对于大多数希望用计算机进行反馈控制的设计者说来，要达到上述要求是有困难的，幸好有别的办法可以实现我们的目的。本书涉及一种离散信息的处理，利用差分方程，序列的一种时域法。它提供一个有效的工具来实现计算机控制。基本工具是有限差分方程的后移算子（ B 算子）法。借助于后移算子的使用，可以进行计算机控制和综合。

本书由西北轻工业学院徐元昌编写，袁印玖为本书作了插图等工作。全书由华中理工大学杨叔子教授主审。

目 录

第一章 概述	1
§ 1-1 计算机控制的发展	1
§ 1-2 计算机控制	3
第二章 计算机控制的数学模型	6
§ 2-1 过程	6
§ 2-2 计算机控制算法	10
§ 2-3 传递函数及方块图	13
§ 2-4 稳定性分析	17
第三章 系统响应	20
§ 3-1 系统输入	20
§ 3-2 系统响应	22
§ 3-3 控制器增益对系统响应的影响	26
第四章 控制器设计	29
§ 4-1 闭环响应的控制算法	29
§ 4-2 前馈控制	33
§ 4-3 串接控制	34
§ 4-4 对相交系统的非相交控制器	35
第五章 过程建模	38
§ 5-1 物理建模	38
§ 5-2 阶跃响应建模	41
§ 5-3 随机建模	45
第六章 控制计算机	53
§ 6-1 控制计算机特性	53
§ 6-2 计算机运算	61
§ 6-3 指令和数据	69
§ 6-4 输入/输出指令.....	72
§ 6-5 程序数据传送	72
第七章 计算机接口	74
§ 7-1 输入/输出.....	74
§ 7-2 逻辑电平输入/输出.....	82
§ 7-3 数—模转换器和模—数转换器	84
§ 7-4 字母—数字输入/输出.....	92
§ 7-5 数字输入/输出.....	94
第八章 用于计算机控制的传感器	97

§ 8-1	位置传感器	97
§ 8-2	速度传感器	105
§ 8-3	压电式加速度计	108
§ 8-4	力传感器	108
§ 8-5	温度传感器	109
§ 8-6	应变仪	112
§ 8-7	影象传感器	113
第九章	可编程序控制器	116
§ 9-1	可编程序控制器的发展	116
§ 9-2	布尔代数	120
§ 9-3	布尔方程的数字解	124
§ 9-4	梯形图	127
§ 9-5	顺序逻辑设计	130
§ 9-6	编程、监视和诊断	140
第十章	计算机控制应用举例	143
§ 10-1	使用微处理机控制的气动包装机械	143
§ 10-2	微处理机在玻璃窑生产上的应用	144
附录	解差分方程	149
习题		154
参考文献		158

第一章 概 述

数字计算机在最近20多年的迅速发展,特别是半导体电路的高度集成化,其运行速度和工作可靠性的提高,使得计算机参与控制不仅已成为现实,而且日益广泛。

§ 1-1 计算机控制的发展

迅速发展的电子和计算机技术加速了工业自动化的趋势。本世纪初期,工业生产依靠机械机构和液动气动元件进行控制,如一条汽车外壳加工生产线用天轴可同时进行550种以上的不同加工。随着电子测量、控制和操作技术的发展和改进,50年代工业自动化达到了一个新的水平。大多数的电子装置在那个时候是模拟装置,其功能是使电信号输入和输出与所要求的物理量成比例。50年代中期出现了数控N/C机床,是工业自动化的重大进展,它不仅使机器操作用预编程代替人工操作,而且当需要改变操作时,可以迅速重新编程。

60年代以来,电子技术应用得到飞速发展,电子传感器在包括冶金、塑料、化工、造纸和纺织在内的各工业领域中得到应用。电子计算机的出现提供了建立复杂的数据获取、监视、通讯和控制系统的可能。

服务业也开始实现自动化。银行首先进行了统计、簿记和数据输入的计算机自动化。计算机现在已进入世界范围内商用空中旅行数据库来帮助飞行管理。新的飞机有100台以上的联机计算机,可以自动起飞和着落。

在超级市场里,结帐柜台上的条形码阅读机可以迅速地鉴别商品。商品上印上了一系列不同宽度的线条,这些条形线条可以转化成一组数字码,用来区别不同的商品。当商品上的条形码通过一个“窗口”时,光传感器系统检测它们并将其转化为电信号。该信号被送到一个中央计算机。计算机里储存了所有商品的库存量,价格等信息。结果,商品的价格可以送回到柜台而商品的库存量则被修改,从而可以得知还有多少商品库存量以及是否需要再入库一批商品。管理人员便可以设法减少库存量,仅仅保留必要的库存,从而降低保管费用,减少商品的损耗。

工业自动化的发展需要高级的电子装置如故障传感器,操作参数传感器(扭矩,速度,流量等等)以及触觉和光敏传感器等。各种类型传感器供给信息流到计算机,以便监视和控制设备。近年来由于激光和微电子传感器的应用,使先前很难测量的一些物理量能够迅速测量。执行机构的技术也随着由高精度定位系统需要而产生的AC伺服驱动,力矩马达以及压电式机构的发展而改进。

一个实际的数字电子装置系统例子,可以帮助我们对设备和过程的计算机控制有一个初步的了解。图1-1为一个加工中心,该加工中心包括一台机床和一个用于装卸工件的机械手,每个装置及其作用如下:

机床

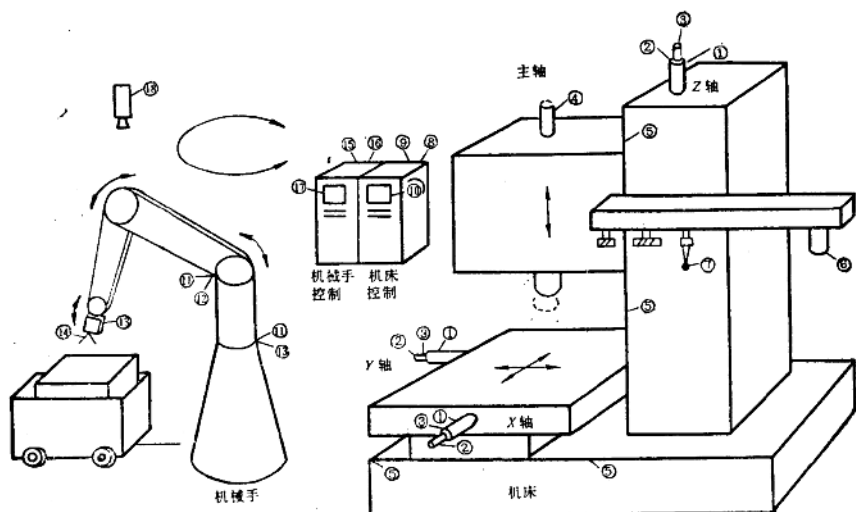


图1-1 带机械手的加工中心

- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1. DC(直流)轴向驱动马达——机床运转。 | 2. 转速计——驱动马达速度传感器。 |
| 3. 三相解算器——机床位置传感器。 | 4. AC(交流)主轴驱动马达——刀具旋转。 |
| 5. 限位开关——越位保护。 | 6. 步进马达——刀具位置变化装置。 |
| 7. 触觉探头——工件测量。 | 8. 伺服放大器——机床驱动。 |
| 9. 控制计算机——机床控制。 | 10. 显示——机床工作状态显示。 |
| 机械手 | 11. 伺服阀——液压臂操作。 |
| 12. 光敏编码器——液压臂位置传感器。 | 13. 控制阀——气动抓手。 |
| 14. 触觉传感器——抓手支持力检测。 | 15. 伺服放大器——机械手液压臂驱动。 |
| 16. 控制计算机——机械手控制。 | 17. 显示——机械手工作状态显示。 |
| 18. 电视摄像机——工件识别和机械手导向。 | |

上述各种装置包括计算机位置传感器, 速度传感器, 行程开关和一些执行机构如DC马达, 步进电机等, 此外还有观察系统如工件识别和机械手导向和触觉传感器, 用来检测工件尺寸和进行自动调整。

反馈控制系统的分析, 是从连续模拟控制概念研究开始的, 很多从事机械设计的技术人员对连续系统较为熟悉。有了微分方程和复变量理论, 包括拉普拉斯变换的数学基础, 设计者对连续线性控制系统就可列出系统模型方程式, 从而进行操作、分析、设计和综合。

从50年代末出现离散系统理论后, Z 变换和相应的一些概念如理想采样等相继进入使用, 结果设计者既要掌握连续系统控制理论, 又要掌握数字控制理论, 才能设计一个离散控制系统。对于大多数希望用计算机进行反馈控制的设计者来说, 要达到上述要求是有困难的。幸好有别的办法可以实现我们的目的。

本书涉及一种离散信息的处理, 利用差分方程, 序列的一种时域法, 它提供了一个有效的工具来实现计算机控制。基本工具是有限差分方程的后移算子(B 算子)法理论, 它提供一个直接、有效的方法使设计者在实际应用中学会如何设计一个计算机反馈控制系统。

§ 1-2 计算机控制

数字计算机只能接受和处理时间离散的数码。通常的物理量(温度、压力、速度等)都是模拟信号,所以计算机要将模拟信号转换成数字信号。

图1-2为计算机获取信息的过程。一条随时间 t 变化的连续的温度曲线,经传感器转换为电压 $X(t)$ 的模拟信号,电压 $X(t)$ 为时间上连续幅值上也连续的信号。对模拟信号 $X(t)$ 按一定的时间间隔抽样,就得到离散模拟信号 $X^*(t)$,这就是采样过程。离散模拟信号 $X^*(t)$ 为时间上离散而幅值上连续的信号。最后,要采用一组数码(如二进制)来逼近离散模拟信号的幅值,这个过程叫量化。量化后,我们才获得计算机能处理的数字信号 $X(nt)$, $X(nt)$ 不仅在时间上离散而且幅值上也离散,可用一序列来表示。

以上信息转换过程中, T 为采样周期, τ 是采样时间。采样周期 T 的选择应保证足够信息的获得; T 过大,将损失信息; T 过小,则要过多的数据存贮和运算。 T 由采样定理决定。 τ 的选择需满足在时间 τ 内,信号 $X(t)$ 基本保持不变。量化过程会带来量化误差,减小量化单位能获得足够的计算精度,但量化单位过小,将导致计算上有效字长的增加。

计算机控制可分以下各类:

1. 计算机操作指示控制

如图1-3所示,计算机只是输出一些数据(打印或显示)供操作人员参考,操作人员直接操作执行机构或其他过程控制器。这种控制灵活、安全。缺点是仍有手工操作,速度受到限制,不能同时控制多个回路;常用于试验新的模型,或调试新的控制程序等。

2. 计算机开环控制

如图1-4所示,计算机作为一个程

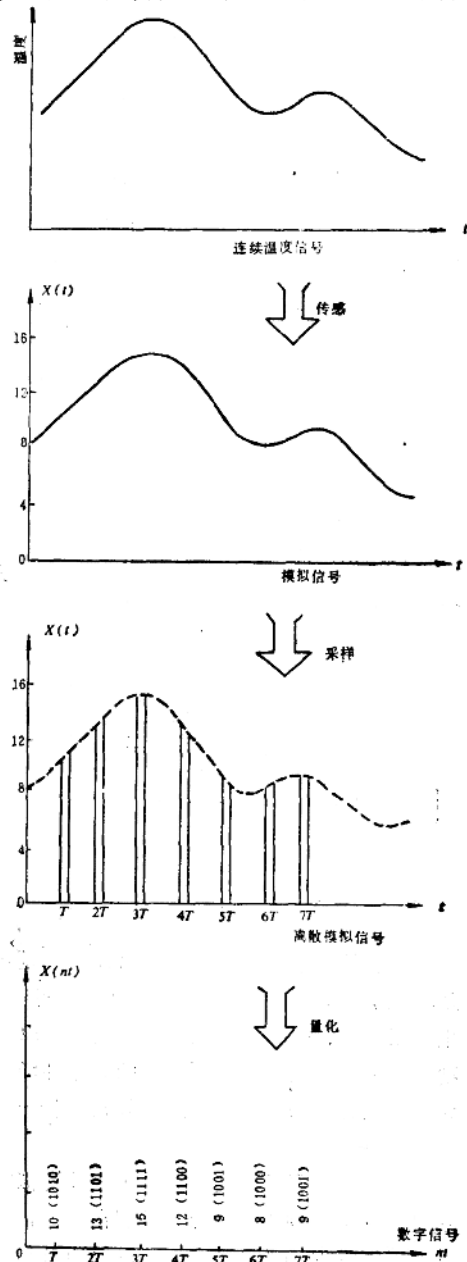


图1-2 信息的转换过程

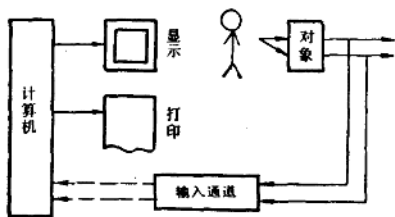


图1-3 操作指示控制系统

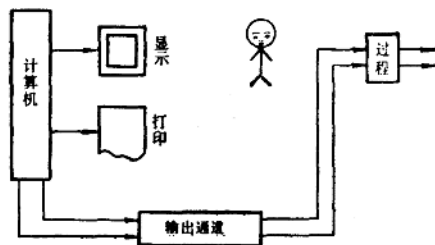


图1-4 计算机开环控制

序和数据的联机处理器，对设备和过程执行机构的操作发出具体命令。图1-5为计算机控制步进马达通过滚珠丝杠来操作工作台运动。

这种控制的优点是结构简单，响应迅速，由于是开环控制（即被控部分信息不传送回计算机），本身不会产生不稳定。缺点是各种干扰将对工作性能有显著的影响。常用于被控对象性能比较稳定，干扰影响不大的场合。

3. 计算机闭环控制

为了自动控制一个过程，显然要有一个计算机控制系统可以对给定的输入值和实际的输出值进行比较，然后发出校正动作，这就是闭环控制。

图1-6所示为计算机闭环控制。计算机在控制环中，通过过程的传感器进行采样，计算机同时从操作者那里接受给定的参考值，然后通过建立操作命令来闭合这个控制环。操作命令对过程输出产生校正作用。

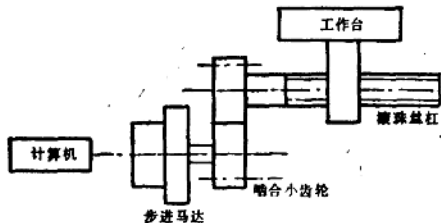


图1-5 计算机开环控制应用

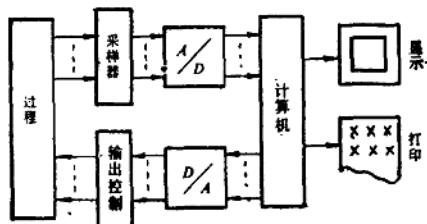


图1-6 计算机闭环控制

在计算机里通常进行两种操作，一是求给定参考值和实际输出值之差或误差： $E = X_r - X_o$ (X_r 为给定的参考值， X_o 为实际输出值)，二是由求解一个方程或一组方程产生校正作用，这些方程或方程组是作为以要求的方式来控制系统而建立的。这种确定操作的控制法则称为控制算法。图1-7为其框图。

计算机闭环反馈控制相似于连续模拟系统的闭环反馈控制概念。差别在于，计算机工作在时间的离散点上。计算机对瞬时输出变量的采样值工作，通过计算机求

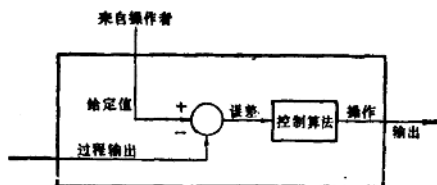


图1-7 计算机闭环控制计算框图

出误差和相应于该误差所要求的操作，该操作进入过程。在一个事先决定的时间间隔（采样周期）后，过程输出被再一次采样。很明显，计算机执行各种操作的速度与过程响应速度的相互关系是一个重要因素，这个因素决定过程能否被很好地控制。

4. 计算机前馈控制

计算机前馈控制特别适用于一个受外界干扰的过程，而且这个外界干扰是容易测量和监视的。计算机不等信息通过反馈回路返回就提前计算过程的操作直接控制过程的输出。

第二章 计算机控制的数学模型

计算机工作的特点是在一个时刻只能处理一个控制变量。在采样一个变量后，计算机必须迅速进行合适的校正然后移到另一个控制变量。虽然一个给定变量在时间上是连续的，但计算机仅仅得到它的离散点上的值。

对连续系统一般是用微分方程作为数学建模基础，但计算机要处理离散系统，差分方程提供了数学基础。

§ 2-1 过 程

这里我们将控制对象称为“过程”，它可以指一个具体的物理过程，也可涉及一个反馈控制链。

讨论“过程”的目的，是在已知过程的动态特性基础上找出其输入量和相应输出量的数学关系。对于计算机控制，输入可看作为一系列的阶跃，因为计算机控制的特点是建立一个输入，然后就一直保持到一个采样周期结束，新的输入进入为止。图2-1 (a)为一个过程其输入 $X(t)$ ，输出 $Y(t)$ ，图2-1 (b) 给出一个假设的输入与时间 t 的关系， T 是采样周期，图2-1 (c) 给出由过程的阶跃输入而产生的相应的过程输出。

如果给出了过程的数学模型，在任何时刻 $t=0$ 的输入值以及 $t=0$ 时刻的输出值和任何需要的以前时刻的值，我们希望能确定在一个采样周期 ($t=T$) 后的输出值。

一个过程可由几个基本模型来说明。积分过程、一阶过程、二次积分过程和延迟过程为四个基本过程。许多复杂过程可以是几个低阶模型的组合或是低阶模型和延迟过程的组合。

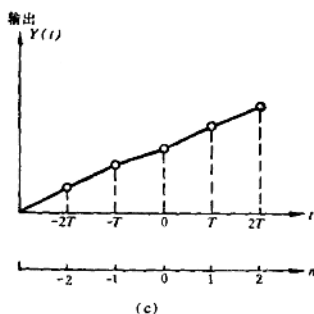
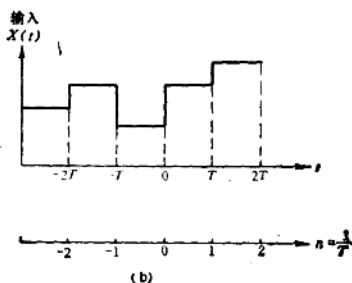
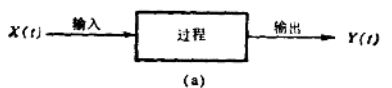


图2-1 典型过程输入或输出

一、积分过程

假定过程由下面方程确定

$$\frac{dY(t)}{dt} = KX(t) \quad (2-1)$$

其中, $X(t)$ 是输入, $Y(t)$ 是输出, K 为常数。在 $t=0$ 时, $Y=Y_0$; $0 < t < T$ 时, 有一个大小为 X_0 的输入, T 为采样周期。

由式 (2-1) 和初始条件可得:

$$Y(t) = \int_{-\infty}^0 KX(t) dt + \int_0^t KX_0 dt$$

$$\begin{aligned} \text{因为实际的物理过程在 } t < 0 \text{ 时输出为零, } Y(t) = 0, \text{ 所以, } Y(t) &= \int_0^t KX_0 dt \\ &= Y_0 + KX_0 t \end{aligned} \quad (2-2)$$

将式 (2-2) 作 $t=T$ 变换:

$$Y(T) = Y_0 + KX_0 T \quad (2-3)$$

相应地分别将 X_0 , Y_0 用广义的 X_n , Y_n 代替, $Y(T)$ 表示一个采样间隔后的输出; 用 Y_{n+1} 代替 ($n=t/T$), 结果得到一阶差分方程:

$$Y_{n+1} = Y_n + KTX_n \quad (2-4)$$

式 (2-4) 表示: 下一时刻的输出等于现时刻的输出与现时刻输入与 KT 乘积之和。

二、一阶过程

一个典型的一阶过程由式 (2-5) 来定义:

$$\tau \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = KX(t) \quad (2-5)$$

其中, τ 是时间常数。在 $t=0$ 时, $Y=Y_0$; $0 < t < T$ 时, 有一个大小为 X_0 的输入, T 为采样周期。

解方程 (2-5), 可得:

$$Y(t) = C_1 e^{-t/\tau} + KX_0$$

由初始条件可求得常数 C_1 :

$$Y_0 = C_1 + KX_0$$

$$C_1 = Y_0 - KX_0$$

所以

$$Y(t) = Y_0 e^{-t/\tau} + KX_0 (1 - e^{-t/\tau})$$

作 $t=T$ 变换:

$$Y(T) = Y_0 e^{-T/\tau} + KX_0 (1 - e^{-T/\tau})$$

相应的一阶差分方程为:

$$Y_{n+1} = e^{-T/\tau} Y_n + K(1 - e^{-T/\tau}) X_n \quad (2-6)$$

差分方程 (2-6) 在采样时刻产生和微分方程同样的正确的响应值。

我们可以用一例子说明。假设 $\tau=1s$, $K=2$, $X(t)=1$, $t=0$ 时 $Y=Y_0=0$, 则相应的微分方程为:

$$\frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = 2$$

解得 $Y(t) = 2(1 - e^{-t})$ (2-7)

由上述解可得

$$Y(0) = 0$$

$$Y(1) = 1.264$$

$$Y(2) = 1.729$$

$$Y(3) = 1.900$$

$$Y(4) = 1.963$$

如果采样时间选为 $T = 1s$, $e^{-T} = e^{-1} = 0.368$, $K(1 - e^{-T}) = 2 \times (0.632) = 1.264$, 从而方程 (2-6) 的差分方程为:

$$Y_{n+1} = 0.368Y_n + 1.264X_n \quad (2-8)$$

所以 $Y_0 = 0$

$$Y_1 = 0 + 1.264$$

$$Y_2 = 0.368 \times 1.264 + 1.264 = 1.729$$

$$Y_3 = 0.368 \times 1.729 + 1.264 = 1.900$$

$$Y_4 = 0.368 \times 1.900 + 1.264 = 1.963$$

由此可见在采样点的值, 用微分方程和差分方程得出结果是相同的。

三、二次积分过程

二次积分过程可由方程 (2-9) 定义:

$$\frac{d^2Y(t)}{dt^2} = KX(t) \quad (2-9)$$

在 $t=0$ 时, $Y(t) = Y_0$, $\dot{Y}(t) = \dot{Y}_0$; 定值输入 $X(t) = X_0$,

从而 $\frac{d^2Y(t)}{dt^2} = KX_0$

积分得 $\frac{dY(t)}{dt} = \dot{Y}(t) = KX_0t + \dot{Y}_0$

$$Y(t) = \frac{KX_0t^2}{2} + \dot{Y}_0t + Y_0$$

作 $t=T$ 变换 $\dot{Y}(T) = KX_0T + \dot{Y}_0$

$$Y(T) = \frac{KX_0}{2}T^2 + \dot{Y}_0T + Y_0$$

相应的差分方程为

$$\dot{Y}_{n+1} = \dot{Y}_n + KTX_n \quad (2-10)$$

$$Y_{n+1} = Y_n + T\dot{Y}_n + \frac{KT^2}{2}X_n \quad (2-11)$$

方程 (2-10) 和 (2-11) 中出现 $\dot{Y}_n$ 项, 无法用计算机计算。微分项 $\dot{Y}_n$ 一般说来

不能直接量测，必须修改方程，消去 $\dot{Y}_s$ 项。

首先，将方程 (2-10) 后移一个时间间隔：

$$\dot{Y}_s = \dot{Y}_{s-1} + KT X_{s-1} \quad (2-12)$$

又由方程 (2-11) 解出

$$\dot{Y}_s = \frac{1}{T} Y_{s+1} - \frac{1}{T} Y_s - \frac{KT}{2} X_s \quad (2-13)$$

将方程 (2-13) 后移一个时间间隔：

$$\dot{Y}_{s+1} = \frac{1}{T} Y_s - \frac{1}{T} Y_{s-1} - \frac{KT}{2} X_{s-1} \quad (2-14)$$

将方程 (2-13) 和 (2-14) 代入 (2-12)：

$$\frac{1}{T} Y_{s+1} - \frac{1}{T} Y_s - \frac{KT}{2} X_s = \frac{1}{T} Y_s - \frac{1}{T} Y_{s-1} - \frac{KT}{2} X_{s-1} + KT X_{s-1}$$

将上式简化：

$$Y_{s+1} = 2Y_s - Y_{s-1} + \frac{KT^2}{2} X_s + \frac{KT^2}{2} X_{s-1} \quad (2-15)$$

式(2-15)为二次积分过程的差分方程。

四、延迟过程

在许多过程里，当输入信号加入后，其输出端要隔一定时间复现输入信号，这种现象叫延迟，如图2-2所示。

图中纵坐标为输入 X_s 和延迟过程的输出 Y_s ，横坐标为 n 。从图中可以看到，除了输出比输入延迟了两个采样间隔外，输出与输入相同。

图2-2所示延迟过程写成差分方程为：

$$Y_s = X_{s-2} \quad (2-16)$$

如果 D 为死区时间， $d = \frac{D}{T}$ 取整数

(若结果不为整数，则 d 要圆整到其相邻的较大整数，这样对延迟的影响有足够的估计)。

$$Y_s = Y_{s-d} \quad (2-17)$$

表2-1为各种基本过程的差分方程。

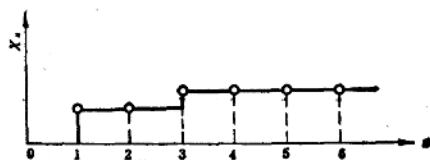


图2-2 延迟过程

由于现时刻的误差 e_n 和先前时刻的误差可以得到,就可写出控制算法如下式所示:

$$m_n - m_{n-1} = \Delta m_n = K_0 e_n + K_1 e_{n-1} + K_2 e_{n-2} \cdots \quad (2-18)$$

通过控制算法,计算机就可以计算其输出操作变量的值。控制部分是由一些基本控制器组成的(如比例控制器、积分控制器、微分控制器等)。

一、比例控制

比例控制是最基本的控制方式,即输出与输入成正比,不失真也不延迟而按比例地反映输入。在比例控制下,操作变量正比于误差:

$$m(t) = K_p e(t) \quad (2-19)$$

其中 K_p 是比例常数或增益。式(2-19)的离散形式为:

$$m(nT) = K_p e(nT)$$

上式可以写成

$$m_n = K_p e_n \quad (2-20)$$

$$\text{或} \quad m_{n-1} = K_p e_{n-1} \quad (2-21)$$

将式(3-20)与式(3-21)相减,可得增量:

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = K_p (e_n - e_{n-1}) \quad (2-22)$$

根据这个增量公式,就可编制计算机控制程序。

二、积分控制

为了改善系统的调节品质,通常引入误差的积分以改善稳态性能,提高精度。控制器的输出 $m(t)$ 之值是以一个比例于误差信号 $e(t)$ 的速率而变化的,就是

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_i e(t)$$

$$\text{即} \quad m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2-23)$$

其中 K_i 是一个可调节的参数,即控制器增益。当误差信号为零时, $m(t)$ 的值则保

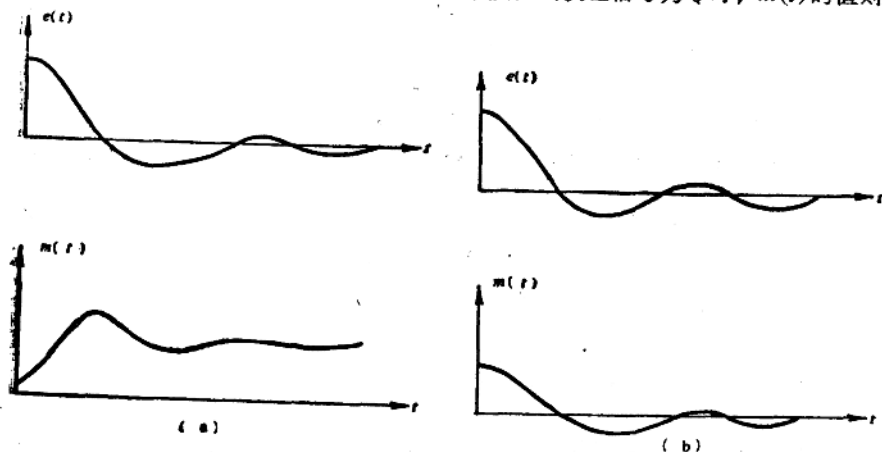


图2-3 误差信号 $e(t)$ 和控制信号 $m(t)$ 曲线

持不变。根据连续曲线下的面积可以近似地由一些矩形面积之和表达,如图 2-3 可得

$$m_n = K_i \sum_{j=0}^{n-1} T e_j = K_i T \sum_{j=0}^{n-1} e_j \quad (2-24)$$

或
$$m_{n-1} = K_i T \sum_{j=0}^{n-2} e_j \quad (2-25)$$

将式(2-24)与式(2-25)相减得增量:

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = K_i T e_{n-1} \quad (2-26)$$

根据式(2-26) 这个增量公式,可以编制计算机控制程序。

三、微分控制

由于微分控制能反应误差信号变化的速率,并能在误差信号的值变得太大前产生一个有效的修正,因而微分控制使误差信号提前,从而引进一个早期的修正作用,并且有助于增加系统的稳定性。

$$m(t) = K_d \frac{de}{dt} \quad (2-27)$$

其中 K_d 为比例常数。式(2-27) 的离散方程为:

$$m_n = K_d \frac{e_n - e_{n-1}}{T} \quad (2-28)$$

其增量形式为:

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = \frac{K_d}{T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (2-29)$$

因为微分控制作用只是在瞬态过程才是有效的,这种控制不能单独应用。

四、比例-加-微分-加-积分控制作用

比例控制作用,微分控制作用和积分控制作用的组合叫做比例-加-微分-加-积分控制作用。这种组合作用具有三个单独的控制作用各自的优点。

即
$$\Delta m_n = (\Delta m_n)_p + (\Delta m_n)_i + (\Delta m_n)_d$$

将式(2-22), (2-26)和(2-29) 相组合,可得

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = K_0 e_n + K_1 e_{n-1} + K_2 e_{n-2} \quad (2-30)$$

其中
$$K_0 = K_p + \frac{K_i}{T}$$

$$K_1 = -K_p + K_i T - \frac{2K_d}{T}$$

$$K_2 = \frac{K_d}{T}$$

对于比例-加-微分-加-积分的组合控制,我们可以编制图2-4所示的 计算机程序框图。