

计算机过程控制原理及应用

[美] P. B. 迪谢潘德
徐书菴 何适生 顾希衍 译

R. H. 阿什 著



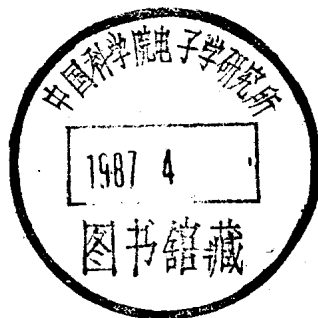
水利电力出版社

72. d22
413
1

计算机过程控制原理及应用

〔美〕 P. B. 迪谢潘德 R. H. 阿什著

徐书崧 何适生 顾希衍 译



水利电力出版社

8710296

内 容 提 要

本书较全面地阐述了计算机控制的理论基础,介绍了计算机系统的分析与设计方法以及新型控制策略在计算机控制系统中的应用。

全书分十七章:第一章简要回顾了常规控制系统的重要概念及常用工程整定方法;第二章为计算机控制中所需的软件和硬件基础;第三至第十二章主要介绍采样数据系统的数学基础、理论基础及分析、设计方法;第十三章说明过程的建模和辨识方法;第十四至第十七章介绍了纯迟延补偿、前馈、串级和多变量系统解耦等新型控制策略的设计与应用。

本书可供从事自动控制工作的技术人员以及有关专业的大专院校师生阅读。

Pradeep B. Deshpande

Raymond H. Ash

Advanced Control Applications

Elements of Computer Process Control with
Instrument Society of America (North Carolina 27709) 1981.

计算机过程控制原理及应用

[美] P. B. 迪谢潘德 著
R. H. 阿什

徐书崧 何适生 顾希衍 译

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 32开本 11.75印张 260千字 1插图

1986年10月第一版 1986年10月北京第一次印刷

印数 0001—6780 册 定价2.45元

书号 15143·5992

译 者 的 话

近年来,随着我国工业和科学技术事业的发展,计算机在生产过程控制中的应用日益广泛。鉴于目前国内尚需大力普及和推广计算机控制方面的基本知识,我们翻译了此书,以期能使从事自动控制工作的技术人员及有关专业的大专院校师生有所借鉴。

本书具有概念清晰、切合实用和简洁易懂等优点。此外,作者还避免了冗长的数学推导,注重了物理概念的阐述,书中并附有许多可供参考的实例、曲线、图表和计算机程序,故此书不失为一本较好的计算机控制设计和应用参考书。

本书承清华大学自动控制系徐用懋、何镇湖同志作了认真的审阅;在翻译过程中,还得到了齐徕之、叶慧群同志的有益帮助;在此,表示衷心的感谢。

由于我们英语水平和专业知识有限,书中错误和不当之处在所难免,恳望读者批评指正。

译 者

一九八六年元月

前 言

本书供有兴趣学习计算机过程控制的读者使用。为了收到事半功倍的效果,读者应先学习线性控制理论的初级教程。此外,读者还应该熟练掌握求解微分方程的拉氏变换方法;过程控制系统的框图表示方法;确定开环、闭环瞬态响应及过程控制系统稳定性的方法;以及确定常规调节器整定参数的频率响应法(根据波德图)。

使用计算机进行过程控制的方式有以下几种:第一种方式是,用数字计算机代替常规控制系统中的模拟调节器,也就是用数字计算机程序来实现调节器的运算规律。这里,至少从理论上说,可以用适当的计算机程序来代替许多模拟式调节器。这样的控制方式称为直接数字控制。本书主要讨论直接数字控制系统(我们简称为计算机控制系统)的设计和实现方法。

数字计算机应用于过程控制的第二种方式称为监督控制。使用这种控制方式时,一台中央计算机的程序,按某种预定的控制策略,不断地计算和修改模拟调节器的设定值,而计算机的硬件则去校正模拟调节器的设定值,以便使系统在某种最佳工况。在另一种计算机应用的方式中,计算机起查询作用。在采用这种方式时,计算机收集、处理和贮存系统的数据,并把数据提供给操作人员和其他管理人员。这种情况下,计算机不直接改变过程的运行工况。

图0-1表示一个典型的计算机控制回路的框图。当然,

这一回路也许只是工厂中上百个这样的回路中的一个。计算机借助一种称为模/数转换器的装置对被测量进行采样,并将采得的被测量与设定值进行比较,产生一个偏差量。数字计算机的程序按这个偏差量发出控制指令。该指令由称作数/模转换器的装置转换成连续信号,并把该信号送至调节阀。这个控制策略不断地重复,以使偏差减小到所允许的水平。作为控制工程师,必须能设计、分析和实现这样的计算机控制系统。

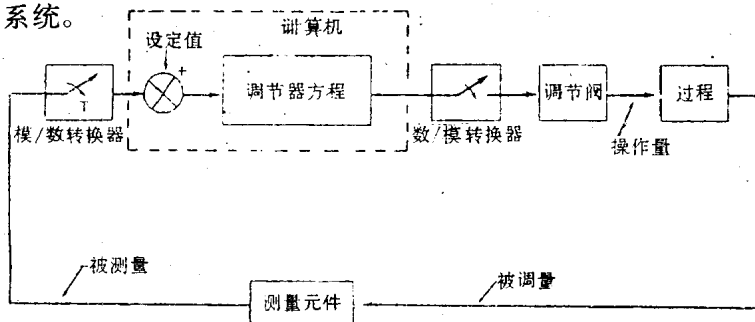


图 0-1 典型的计算机控制系统

本书第一章概述线性控制理论及其应用于常规过程控制的问题。以后各章分别讨论计算机控制回路的各个环节。因为分析计算机控制回路需要 Z -变换的知识,为此,本书先向读者介绍 Z -变换及其在研究计算机控制系统中的应用。学懂了前十二章,读者就可以设计和分析计算机控制系统。余下的章节叙述新型控制概念的应用和有关的设计方法。如果有控制计算机的话,这些概念特别有价值,而且实现起来也很简便。

如果用作教材,本书的内容足够“计算机过程控制”课程用一个学期。电气和机械专业方面的教师,也会感到本教材适合于“采样数据控制理论”课程。在路易斯维尔

(LOUISVILLE) 大学, 本书用于化学工程、机械工程和电气工程各专业, 学生的反映十分良好。

对于在本书准备过程中, 普罗克特 (Procter) 和甘布尔 (Gamble) 公司给予的支持以及路易斯维尔大学化学系和环境工程系主任 C. A. 普兰克 (Charles A. Plank) 教授给予的支持, 我们深表感谢。还应特别感谢系的高级秘书玛丽·格斯特尔 (Mary Gerstle) 夫人耐心地打印了充满数学内容的原稿, 达雷尔·切诺韦思 (Darrel Chenoweth) 教授提供了一些 Z-变换方面的习题, R. A. 谢弗 (R. Alan Schaefer)、F. J. 肖尔克 (F. Joseph Schork)、P. C. 戈帕泰尔拉特纳姆 (P. C. Gopalratnam) 等三位研究生编制了一些计算机程序。我们对 P. M. 克里斯托弗 (P. M. Christopher) 教授就本书一些内容所写的编辑评论表示谢意。

P. B. 迪谢潘德 (Pradeep B. Deshpande)

R. H. 阿什 (Raymond H. Ash)

于 肯塔基州, 路易斯维尔;
俄亥俄州, 辛辛那提。

目 录

译者的话

前 言

第一章 常规过程控制原理的回顾	1
1.1 过程控制导论	1
1.2 过程动力学及其数学模型	2
1.3 动态过程的类型	5
1.4 基本反馈控制	17
1.5 常规控制系统的稳定性	28
1.6 一些难控的情况	31
第二章 计算机控制的硬件和软件	34
2.1 常规控制与计算机控制	34
2.2 计算机的基本概念	37
2.3 计算机系统硬件的概念	50
2.4 计算机系统软件概念	65
2.5 组合式数字系统和网络	76
第三章 单回路计算机控制	79
3.1 常规系统	79
3.2 切换至计算机控制	83
第四章 采样过程的数学表达式	88
第五章 Z 变换	94
5.1 几种函数的 Z -变换	95
5.2 Z -变换的性质	98
5.3 反 Z 变换	102
第六章 脉冲传递函数	109
6.1 采样器的复级数表达式	109

6.2	脉冲传递函数的推导	112
第七章	数据保持	116
7.1	零阶保持器的传递函数	119
7.2	一阶保持器的传递函数	121
7.3	确定采样频率时需要考虑的一些问题	125
7.4	最佳采样周期的选择	131
第八章	采样-数据控制系统的开环响应	134
8.1	求取开环响应的例子	135
第九章	采样-数据控制系统的闭环响应	139
9.1	闭环脉冲传递函数	139
9.2	确定闭环瞬态响应的例子	144
第十章	采样-数据控制系统的设计	149
10.1	无振荡算法	152
10.2	达林算法	155
10.3	常规调节器的等效数字算法	158
10.4	过程信号中噪声的处理方法	165
第十一章	采样-数据控制系统的稳定性	174
11.1	舒尔-科恩 (Schur-Cohn) 稳定性判据	178
第十二章	改进的Z-变换	181
12.1	改进的 Z -变换的定义和求法	181
12.2	改进的 Z -变换应用于有纯迟延的系统	183
12.3	应用改进的 Z -变换来确定采样时刻之间 的输出	189
第十三章	过程模型的建立与辨识	196
13.1	由阶跃试验数据产生的过程模型	198
13.2	过程辨识的脉冲试验法	207
13.3	过程辨识的时域方法	219
第十四章	有纯迟延过程的算法	231
14.1	史密斯预测器算法	231
14.2	分析预测器算法	243

14.3 高滕和马札雷森算法	251
第十五章 前馈控制	258
15.1 引言和设计基础	258
15.2 例 1	264
15.3 例 2	267
第十六章 串级控制	271
16.1 串级系统的调节器设计	277
16.2 串级控制方法的一种工业应用	294
16.3 什么时候用串级控制	297
第十七章 多变量控制系统	301
17.1 关联作用的度量	302
17.2 关联与解耦	314
附录 A Z -变换和改进 Z -变换表	324
附录 B 习题	325
B.1 常规过程控制理论的复习	325
B.2 Z 变换	331
B.3 脉冲传递函数	332
B.4 开环响应	332
B.5 闭环响应	334
B.6 控制系统设计	336
B.7 稳定性	338
B.8 改进的 Z 变换	338
B.9 过程辨识	340
B.10 有纯延迟过程的算法	341
B.11 前馈调节	342
B.12 串级调节	342
附录 C1 供 Z -变换反演用的计算机程序清单	344
附录 C2 采样数据系统的闭环仿真程序	348

第一章 常规过程控制原理的回顾

本章我们将复习并强调线性控制理论的一些重要内容及其在常规过程控制中的应用。计算机控制原理是本书研究的对象，而线性控制理论又是建立计算机控制原理的基础，所以全面复习线性控制理论的有关概念，对读者理解后续各章关于计算机控制的内容将会有很大帮助。

1.1 过程控制导论

就化工应用的范围而论，我们可以把过程这一术语定义为一些有内在联系的设备（例如容器、管道、配件、马达、轴杆、联轴节和表计等）的集合。其中每一设备都为生产某种产品或一组有关联的产品而发挥各自的作用。这一定义也适合于工艺工程师的观点，他们的工作就是设计这类设备。从控制工程师的观点来看，注意点集中在物理量（例如温度、压力、液位、流量、电压、速度、位置和成分）而不是设备本身。控制工程师感兴趣的是，了解这些变量是如何相互影响的，以及它们是怎样随时间变化的。过程控制的基本目标是在尽可能长的时间内，把一些主要的过程变量保持在尽可能接近于预定的数值上，即所谓设定值上。从所有过程变量中选择一些变量作为主要的过程变量，因为把主要变量保持在指定的数值上，就意味着满足生产目标。这些生产目标是：

- （1）完成预定的生产，即产量；

8710296

- (2) 以合适的成本生产;
- (3) 生产合乎质量的产品;
- (4) 以对环境污染为最小的安全方式, 完成上述全部生产目标。

论述过程控制概念时, 按下述分类法对各物理量分类是有用的:

(1) 输出量: 被保持在预定值上的主要过程变量, 即被调量。

(2) 输入量: 当这些量变化时, 会引起一个或几个输出量变化。输入量还可以进一步细分为控制输入量和扰动输入量。

(a) 控制输入量: 又称为调节量。调节器改变调节量使输出量返回或保持在设定值上。例如, 生产过程中流体的流量经常由执行器(如控制阀或变速泵)来改变, 以便控制某些输出量。

(b) 扰动输入量: 以任何方式影响输出量的其他过程变量, 都称为扰动量或过程负荷。扰动输入量使过程输出量发生不希望的变化。

1.2 过程动力学及其数学模型

设计控制策略的目的在于确定如何改变控制输入量, 以便校正过程输出量的实际值与要求值之间的偏差。由于大多数过程存在惯性或时滞, 因而会使设计工作变得复杂。存在时滞, 意味着如果让控制输入量产生一个突变, 输出量不会立即跟着变化, 而要有一段时间滞后才能达到新的数值。

为了做好控制生产过程的工作, 我们需要从定量上了解

控制输入是如何影响控制输出的。如果已知控制输入的变化量，那么我们就需要知道：

- (1) 输出量最终变化多少，以及朝哪个方向变化；
- (2) 输出量变化要经历多长时间；
- (3) 输出量会沿着什么样的轨迹变化，即输出量随时间变化的形式是怎样的。

过程动态数学模型为上述问题提供了答案。这种模型给出了过程输入量与输出量之间的函数关系，并可定义成某种数学表达式或公式。在已知自变量（即输入量）的数值后，就可把它代入公式并计算出结果，从而预测因变量（即输出量）的数值。所以，数学模型就是一个可以预测物理特性的表达式。

输出量与输入量之间因果关系的图解表示称为方框图（见图 1-1）。一般说来，整个生产过程的每个部分用一个方框表示。每个方框通常有一个输出量、一个控制输入量以及几个可辨识的和（或）可测量的干扰输入量。也可能有几个不可辨识的或未知的干扰输入量。方框图还表示输入与输出之间定量的因果关系（即数学模型）。过程中任何一个已知

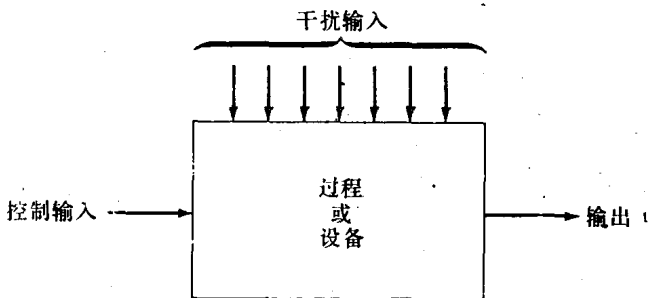


图 1-1 典型方框图

物理量,可以是图 1-1 所示的几类变量中的某一个;某一方框的输出或控制输入可以是对另一方框的干扰输入。

数学模型是由一些物理和化学定律导出的,下面是几个例子:

(1) 质量和能量守恒(即不稳定状态时的物质和能量平衡)定律;

(2) 牛顿运动定律;

(3) 电路中的基尔霍夫定律;

(4) 气体状态方程。

通常,数学模型的形式是包含变量和变量对时间变化率的微分方程式。为了预测由已知输入量的变化所引起的输出量响应,必须求解这些微分方程式。但是,求解微分方程式要比求解代数方程式困难得多。

有些过程是线性的,它们就是那些可以用线性微分方程或代数方程来描述的并运用叠加原理的过程。另外有很多过程是非线性的,它们要用复杂的非线性微分方程式来描述。然而,非线性过程在某个额定运行点附近的特性,可以用线性微分方程式来近似。对于处在控制状态下的过程来说,人们关心的是某个稳态运行点附近的过程特性,因此,这种近似方法通常是适用的。

用拉氏变换可以把线性微分方程式转换为代数方程,从代数方程能导出传递函数。因为拉氏变换能把微分方程式转换成代数方程式,所以求解该方程也就简单多了。

如图 1-2 所示,传递函数 $G(s)$ 是一个数学表达式,它是过程输出的拉氏变换 $Y(s)$ 与输入的拉氏变换 $M(s)$ 之比值。

把输出 $Y(t)$ 和输入 $M(t)$ 表示为偏差量,即

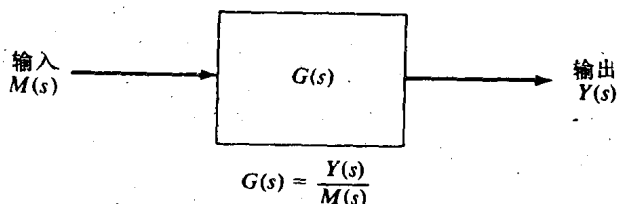


图 1-2 用方框图表示的传递函数

$$Y(t) = y(t) - y_{\text{稳}} \quad (1-1)$$

以及

$$M(t) = m(t) - m_{\text{稳}}$$

因此，在稳态运行时， Y 和 M 将是零。根据传递函数的概念， $Y(t)$ 对于某一个确定的 $M(t)$ 的响应，可通过对以下方程式进行反变换来求得：

$$Y(s) = G(s)M(s) \quad (1-2)$$

1.3 动态过程的类型

过程可以分成以下各种类型：

- (1) 瞬态或稳态；
- (2) 一阶惯性；
- (3) 二阶惯性；
- (4) 纯迟延或传输迟延。

当然，有些过程可能有很高的阶数，但我们很快就会明白，它们的特性经常可以用一阶或二阶惯性加纯迟延的模型来近似。

1. 瞬变过程

这类过程的动态特性是可以忽略的，即实际上其输出跟随输入的变化是如此之快，以致过程总是保持在稳定状态下。

图1-3(a)表示一个瞬变过程。作为例子,我们研究图1-3(b)表示的一个具有线性流量特性的调节阀的工作情况。在这种情况下:

输入量是阀位 X_v $0 \sim 100\%$

输出量是流量 Q $0 \sim Q_{\max}$

$$K_p = \frac{\Delta Q}{\Delta X_v} = \frac{\text{gpm}^{①}}{\%} \quad (1-3)$$

2. 一阶惯性

输入量阶跃变化后,一阶惯性过程的输出按典型的指数规律变化。这类过程的模型、参数和传递函数是:

$$\text{过程模型} \quad \tau \frac{dy}{dt} + y = K_p x \quad (1-4)$$

式中 x —— 过程输入;

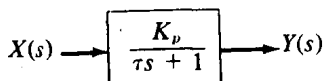
y —— 过程输出;

K_p —— 过程的静态增益;

τ —— 时间常数。

$$\text{传递函数} \quad G_p(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1} \quad (1-5)$$

方框图



动态参数

$$\text{静态增益 } K_p = \frac{\text{输出的最终稳态变化量}}{\text{输入变化量}}$$

① gpm: gallon per minute(加仑/分), 1 gpm = 3.783 L/min——译注。

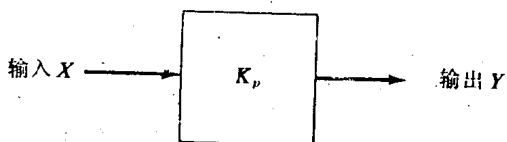


图 1-3 (a) 瞬变过程

模型: $Y(t) = K_p X(t)$

传递函数: $G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$

式中 s —— 拉氏变换的变量。

过程增益 $K_p = \frac{\text{输出变化量}}{\text{输入变化量}}$

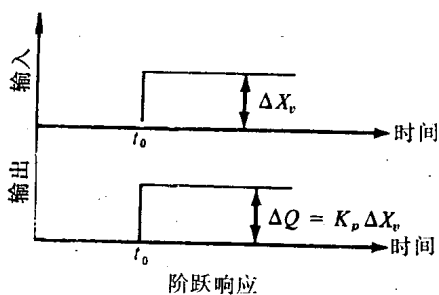
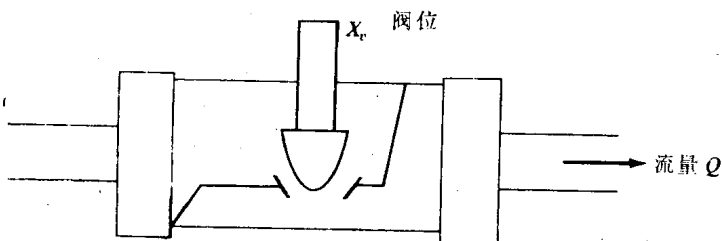


图 1-3 (b) 瞬变过程的例子