

Advanced Process Control

高级 过程控制

[美] W.H. 雷 著



化学工业出版社

高级过程控制

[美] W.H.雷著

邵惠鹤 俞金寿 译

蒋慰孙 校

烃加工出版社

ADVANCED PROCESS CONTROL

W. Harmon Ray

McGraw-Hill, Inc. 1981年版

*

高级过程控制

[美]W. H. 雷著

邵惠鹤 俞金寿译

蒋慰孙校

*

轻工业出版社出版

北京市昌平沙河建华印刷厂排版

北京昌平沙河建华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

950×1168毫米 32开本 13³/₄印张 351千字 印1—2,100

1987年4月北京第1版 1987年4月北京第1次印刷

书号: 15391·38 定价: 3.00 元

序

微计算机用于过程控制,已是当代的主要趋势。问题是如何应用?实践表明,微计算机用于间歇过程的控制,确有很多优于常规调节仪表之点,但用于更大量的连续过程,如果仍然采用单回路PID控制方案,则远远没有充分发挥计算机的功能。计算机与常规调节仪表间决不是简单的取代关系,在控制系统结构与控制算法上必须发展与提高,以收到更大的经济效益。现代控制理论的应用显然是关键问题之一。

现代控制理论从60年代初期发展以来,已有二十多年历史,早已相当成熟。在航天、航空、制导等技术领域的实践,业已取得卓越的成就。但在过程控制方面,尽管也有很多成绩,但困难和问题还不少。一方面固然是由于实际工作者不太熟悉新理论,理论工作者不太熟悉具体过程的特征,其间有些脱节;另一方面也由于不少过程具有显著的非线性和分布参数的特点,不能把线性、集中参数系统的理论照搬照套。本书正是解决以上两方面问题的一把钥匙。

W.H.雷是美国Wisconsin大学化工系的教授,他的研究工作着重过程机理、着重非线性和分布参数的特点,着重现代控制理论的应用。他与联邦德国的E.D.吉勒斯教授等共同开辟相近的道路,可以说是现代控制理论应用在过程控制的一个主要流派。

本书共分六章。除了引言和计算机控制概述外,重点阐述集中参数与分布参数、线性与非线性、确定性与随机性系统的控制,最后还有几个实例研究。总的来说,在理论的改造、移植与应用上作了比较深入的介绍和探讨。

本书内容丰富。由于篇幅限制,对于有些次要问题,不可能

深入展开讨论，而是介绍了必要的参考文献，这些材料是很有价值的。在理论起点方面，作者作了折衷的处理，即假定读者有初步的了解，这对我国目前的情况也是合适的。

本书由邵惠鹤和俞金寿两同志译出。其中第一至三章的译者是俞金寿同志，原序第四至六章是邵惠鹤同志。我以边学习边校订的态度，通读了全书。估计仍会有疏漏之处，欢迎读者指正。

希望本书能对我国的过程计算机控制工作有所帮助，这是译者与我的最大心愿。

蒋慰孙

序于华东化工学院

原 序

本书是为高年级大学生和研究生课程编写的、关于过程控制方面的一本教材，同时也可作为从事实际工作的控制工程师的参考书。读者应有一定的基础，例如应具有大学课程过程控制的一些基本概念，了解矩阵代数初步和微分方程导论。一般的化学工程大学课程通常就具有这些基础。尽管有这些数学要求，本书还是着重于叙述现代控制理论应用的广阔领域，虽然全书只用一节或两节来讨论理论问题，其目的是给过程控制工程师有一个理论梗概，但是对有用的设计方法作了详尽的介绍，并用例子来说明计算算法的关键点。本书提供了许多参考文献，有兴趣的读者可以了解更深的数学理论或找到更进一步的实例。

本书已在布法罗 (Buffalo) 的纽约州立大学和威斯康星大学的课堂教学中试用过五年多。学生的大多数是化学工程系的大学生和研究生，但也有那些对过程控制有兴趣的电气和机械工程系的学生。通常这些课程还包括实验设计，通过这些实验项目使学生们能进行一些控制系统的设计。

指出每章的简要内容也许对读者是有用的。第一章讨论了实现高级过程控制后在工程上和经济上能带来的好处，以及高级控制方案的主要组成部分和它们结合在一起的综合的结构框图。接着回顾了经常遇到的几种不同类型的过程动态模型，它们是作为以后各章的指南，因为以后几章是按各种类型的过程模型来进行控制系统的设计的。

第二章是介绍实时过程控制所需的计算机和接口技术，讨论了微型计算机和小型计算机的基本结构及有关的外围设备的特点；数字和模拟数据采集的接口和特点。从典型的应用角度出发，介绍了过程传感器、控制执行器和变送器。最后叙述了几种实际

075265/02

过程控制接口的设计,传感器的选择、多路开关、信号的处理和传输方式等。本章的目的是使读者能更好领会实现计算机控制时所必须考虑的问题。

在以后各章中,作者试图介绍一些理论的应用以显示理论的威力和理论应用的广阔前景。

第三章讨论了集中参数控制系统的综合问题。同时考虑了微分方程状态空间模型和传递函数模型并论证了两种形式的等效性。介绍了线性多变量系统的一般设计步骤,并证明“次最优”设计往往能得到高的质量,而且设计比较简单。然后叙述了典型的最优控制理论,它既提供了与较简单的次最优策略作比较的基础,又为以后讨论状态估计和随机控制打下了理论基础。最后,提出了几种非线性系统控制器的设计方法。

第四章介绍了用偏微分方程和微分-时滞方程描述的分布参数系统。象上一章中那样,讨论了在过程工业中经常遇到的那些分布参数控制系统的设计方法。接着,叙述了最优控制理论并用例子说明最优控制器的设计。对于线性系统可用模态分解法,而对于非线性系统则采用Galerkin法。这章的最后是讨论如何处理具有纯时间滞后的系统,本章的目的是为了证明通过适当的分析,分布参数系统并不比集中参数系统困难多少。

第五章致力于讨论状态估计和随机控制。虽然统计理论比较深一点,特别是对于非线性系统而言,但是,以操作-直觉(operational-intuitive)方式来叙述时,它能适应于在统计学方面只具有基本知识的读者。这种设计方法能使控制工程师知道分析和理解这些重要结果的关键,因此,他们可以开发有用的状态估计和控制算法。

第六章是由一系列控制系统的详细应用实例组成的。对每一种所讨论的控制问题,读者是通过控制系统综合的步骤来理解的。然后,说明有关的设计方法应用于实际装置时的性能(下略)。

内 容 提 要

本书结合化工过程的生产实际，深入讲解了现代控制理论的应用，重点阐述了集中参数与分布参数、线性与非线性、确定性与随机性系统的控制，并列举了一些控制系统的详细应用实例。

现代控制理论在过程控制中的作用发挥不够的主要原因是生搬硬套，没有结合化工过程的特点。本书正好在这方面花了很大功夫，因此对过程控制工作者将有很大参考价值。

读者对象：从事过程控制的人员及有关的高等院校师生。

目 录

第一章 引言.....	1
1.1 为什么要引出高级过程控制	1
1.2 “现代”控制理论是什么?	2
1.3 过程动态特性的数学模型	5
参考文献	9
第二章 在线数据采集及计算机控制引论.....	10
2.1 引言	10
2.2 计算机系统结构	11
2.3 数据采集和控制	24
2.4 一些实例	34
参考文献	38
习题	39
第三章 集中参数系统的控制.....	41
3.1 引言	41
3.2 线性多变量控制系统	42
3.3 最优控制理论与实例	92
3.4 非线性多变量控制	130
3.5 离散系统	140
参考文献	141
习题	142
第四章 分布参数系统的控制	149
4.1 引言	149
4.2 线性分布参数系统的反馈控制	152
4.3 最优控制理论和实践	187
4.4 非线性分布参数系统反馈控制器的设计	219

4.5 具有时滞系统的控制.....	332
参考文献	375
习题	377
第五章 状态估计与随机控制	282
5.1 引言	282
5.2 由常微分方程描述的线性系统的状态估计	286
5.3 由常微分方程描述的非线性系统的状态估计	315
5.4 由常微分方程描述的系统的随机反馈控制	334
5.5 由一阶双曲线偏微分方程描述的系统的状态估计	340
5.6 由二阶偏微分方程描述的系统的状态估计	347
5.7 分布参数系统的随机反馈控制	362
参考文献	364
习题	366
第六章 控制系统设计实例研究	370
6.1 引言	370
6.2 一个多侧线精馏塔的控制	370
6.3 多效蒸发器的控制	381
6.4 钢厂均热炉控制策略	390
6.5 冶金铸造生产的控制	404
6.6 其他应用	416
参考文献	416
附录 计算机辅助设计程序	417
参考文献	418

第一章 引言

1.1 为什么要引出高级过程控制

从古代开始直到20世纪60年代,过程控制领域几乎都是以机械模拟控制器、电动模拟控制器和气动模拟控制器为基础,它们通常是按线性单输入-单输出的角度设计的^[1,2]。由于硬件的限制,经济成本以及缺少可用的理论,因而过程控制不可能比这些简单的控制方案更为复杂。在许多大规模的工业过程中,由于系统本身就具有比较大的时间常数,开环是稳定的,加之存在着混和与储槽对于振幅的很大阻尼,因此我们所碰到的大约80%的控制回路用这些简单的控制方案能正常工作。另外20%的系统是难于控制的,在过去这段时间内,基本上不要求环境控制,而且产品的质量要求也相当低,同时中间容器也能克服这些不合适的控制方案的很多缺点,故大多数控制回路在一定程度上也是可以接受的。另外控制方案进行微小改进所需要的成本过高,而改进控制回路的经济效益相对来说较低。

但是在最近的10~15年内,这些因素发生了急剧的变化。现代的工业过程以连续过程为主,且生产能力较大,同时能量流和物料流紧密结合成整体,由于高质量的生产过程要求,使得约束条件很严格,而且对于安全性及环境的排泄标准也具有很高的要求。所有这些就产生了更为困难的过程控制问题以及对于较高性能控制器的需求。由于大批量的连续生产过程具有明显的经济效益倍增特性,所以在相当一段时间内,不合格的产品以及超量的环境排泄物,或者由于控制系统失灵所引起的生产停车,都可能产生相当严重的经济后果。这样就促使我们必须对现代工业设备的可靠性及高质量的控制系统的经济效益加以考虑。

近来过程控制发展的另一个原因就是适用于在线控制的实时计算机性能的明显改进及计算机价格的急剧下跌。尽管包括了更为可靠的电子器件的问世和不断增长的通货膨胀等因素,小型计算机的价格发展趋势仍如图1.1所示。现在过程控制计算机只

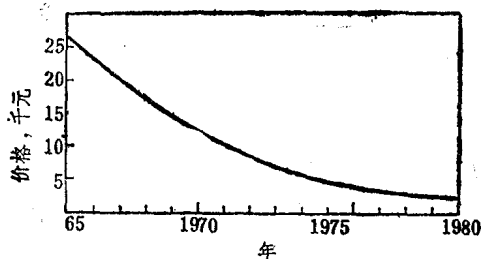


图 1.1 小型实时计算机价格趋势的一个例子

占整个过程投资费用的很小一部分,因而是否要配置具有大容量存储单元的高速小型计算机,可以根据安全性的改善程度和节省人力的情况来进行权衡。在另一方面,计算机是对很多输入-输出设备进行分时处理的,因而中心处理单元(CPU)一般只有5%的时间处于运行状态。因此许多装置的功能较强小型计算机具有95%的计算能力,可以用高级语言进行程序编制,例如Fortran,适用于实施复杂的计算机控制方案。

同时,现代控制理论已经有了巨大的进展,而且很成功地用于航天和航空工业。尤其在最近,许多过程控制研究小组也已经将这些想法用于仿真、实验室甚至几个完全是工业规模的过程中。因而对于高级的过程控制算法所需要的很多可用理论都是现成的。然而怎样将这些结果以简单可用的形式转移到过程控制工程师手中,以使它们能设计出经济上最优的过程控制方案,还有个移植的问题。这本教材就是为这方面的教学需要而编写的,它的目的是对现代计算机过程控制的理论和实践作一完整的介绍。

1.2 “现代”控制理论是什么?

与本质上只限于用常系数线性微分方程(或相应的拉氏变

换)描述的单输入-单输出系统的经典控制理论相反,所谓现代控制理论发展到今天,它的结论适用于较为广泛的一般多变量系统,其中主要包括用下述方式描述的系统:

1. 线性变系数微分方程;
2. 非线性微分方程;
3. 微分-差分方程及其他遗传 (hereditary) 方程;
4. 偏微分方程及积分方程。

现代控制理论的成果包括所谓的最优控制理论,用它设计的控制方案在控制器性能使某些规定的目标函数最小的意义上是最优的。

另外对于控制器的设计,现代控制理论还包括过程辨识和状态估计的方法。已经建立的过程辨识算法可用于确定模型的结构及估计模型的参数,过程辨识可以离线进行也可以在线自适应进行。过程辨识对于初期的控制系统设计及自适应控制系统的设计都是极为有用的,自适应控制系统对于过程特性可能产生的变化具有适应性,例如换热器表面的结垢或者化学反应器中催化剂的失活。状态估计方法是对系统中那些不可量测的状态变量在线估计的方法,用以在存在测量误差情况下改善所有状态变量估计值的品质。在许多检测元件缺乏或者非常昂贵的过程中,利用在线的状态估计具有特别重要的实际意义。

说明如何针对一个具体过程将整个计算机过程控制方案的所有元件组合在一起,并提出本书中在哪里进行技术细节的讨论,对读者也许是有用的。图1.2表示了一个控制系统的方案,它由下述几方面构成:

1. 过程,它对控制输入 u ,过程的自发扰动 d_1 以及用于辨识的特定输入扰动 d_2 产生响应。真实的过程状态 x 是形成了,但是它一般不能完全地或无差地测量出来,为了测量就要采用。
2. 测量装置,它通常只能测量出几个状态或者是一些状态的组合,而且总是存在测量误差,这些将在第二章进行讨论。测量装置的输出 y 送到。

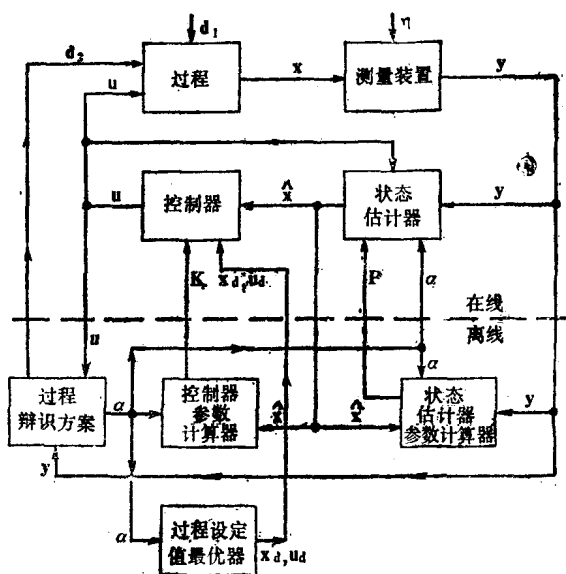


图 1.2 一个完整的计算机控制方案

u —控制输入； d_1 —过程自身扰动； d_2 —辨识输入扰动； x —真实过程状态； y —测量输出； η —测量误差； $\hat{x}$ —过程状态估计； x_d ， u_d —控制器设定值； α —过程模型参数

3. 状态估计器，它可以利用带有噪声的测量值 y 和过程模型来重构可能的最好过程状态估计 $\hat{x}$ 。状态估计器所必须具有的参数 p ，由算法计算（离线或周期性采样计算）得出，在此也可能需要测量输出 y ，状态估计 $\hat{x}$ 以及过程模型参数 α 。状态估计的详细讨论见第五章。将过程的状态估计送到。

4. 控制器，它根据状态估计 $\hat{x}$ ，设定值 u_d ， x_d （它们本身可能是过程的最优化问题^[8]）和控制器参数 k ，来计算应该采用的控制作用。控制器参数 k 可以根据模型参数 α 和过程状态 $\hat{x}$ 的目前估计值进行离线或者在线自适应计算控制器的设计方法在第三章和第四章讨论。过程模型参数必须用过程辨识方法来确定。

5. 过程辨识方案，为了辨识过程的模型参数 α ，将过程的测量值 y 作为原始数据（也可以引入实验设计的输入扰动 d_2 ）。如

果参数不随时间变化, 则辨识计算只需执行一次。然而如果过程随时间变化, 则过程辨识方案就必须周期性地, 从而保证对于变化条件的适应性。由于过程辨识方面有许多优秀的参考书目^[4~10], 故本书中不详细讨论过程辨识的方法。

在许多实际应用场景, 只需要这种控制结构的几个部分就可以了。为了说明这点, 在第六章将介绍一些控制系统设计实例。

1.3 过程动态特性的数学模型

除了最简单的方案以外, 为使控制系统有效, 被控过程的某些描述是不可缺少的。通常这种描述是数学模型。在经典的单回路过程控制理论中, 这种模型的形式通常为:

$$\bar{y}(s) = g(s)\bar{u}(s) + g_d(s)\bar{d}(s) \quad (1.3.1)$$

式中 $\bar{d}(s)$, $\bar{u}(s)$, $\bar{y}(s)$ 分别是已知扰动 $d(t)$, 控制器输出(即过程输入) $u(t)$ 及过程输出 $y(t)$ 的拉氏变换。在此 $g(s)$, $g_d(s)$ 是连系这些量的标量传递函数, 如图 1.3 所示。但是很多过程要复杂得多, 因而需要采用更复杂的模型。下面我们将讨论这些较为复杂的过程模型。

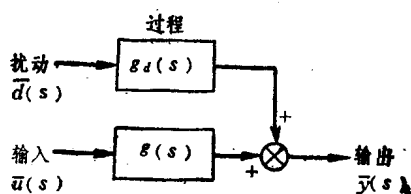


图 1.3 单输入-单输出线性系统

线性多变量“集中参数”模型

“集中参数”或者“集中”模型是描述不存在空间参数变量的一类过程的。这类模型可用常微分方程或者拉氏变换描述。多变量集中参数过程模型最简单的情况是将单输入-单输出传递函数[式(1.3.1)]推广到多输入-多输出过程, 如图 1.4 所示。在此情况下, 过程具有 k 个扰动, m 个输入和 l 个输出, 它们之间的关

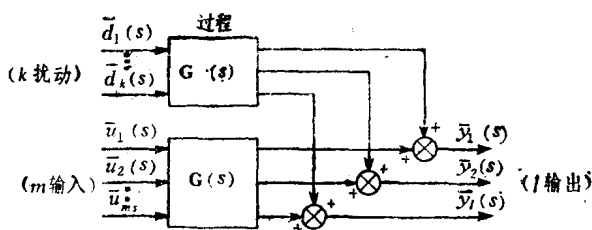


图 1.4 具有 k 个扰动, m 个输入和 l 个输出的线性多变量系统

系为

$$\bar{\mathbf{y}}(s) = \mathbf{G}(s) \bar{\mathbf{u}}(s) + \mathbf{G}_d(s) \bar{\mathbf{d}}(s) \quad (1.3.2)$$

式中 $\bar{\mathbf{d}}(s)$, $\bar{\mathbf{u}}(s)$, $\bar{\mathbf{y}}(s)$ 分别是不同维数的向量, $\mathbf{G}(s)$ 是 $l \times m$ 维的矩阵, 而 $\mathbf{G}_d(s)$ 是 $l \times k$ 维的矩阵。

$$\bar{\mathbf{d}}(s) = \begin{bmatrix} \bar{d}_1(s) \\ \bar{d}_2(s) \\ \vdots \\ \bar{d}_k(s) \end{bmatrix} \quad \bar{\mathbf{u}}(s) = \begin{bmatrix} \bar{u}_1(s) \\ \bar{u}_2(s) \\ \vdots \\ \bar{u}_m(s) \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{y}}(s) = \begin{bmatrix} \bar{y}_1(s) \\ \bar{y}_2(s) \\ \vdots \\ \bar{y}_l(s) \end{bmatrix} \quad (1.3.3)$$

$$\mathbf{G}_d(s) = \begin{bmatrix} g_{11_d}(s) & g_{12_d}(s) & \cdots & g_{1k_d}(s) \\ g_{21_d}(s) & g_{22_d}(s) & \cdots & g_{2k_d}(s) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ g_{l1_d}(s) & \cdots & \cdots & g_{lk_d}(s) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & \cdots & g_{1n}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & \cdots & g_{2m}(s) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ g_{l1}(s) & \cdots & \cdots & g_{lm}(s) \end{bmatrix}$$

线性集中参数模型的另一种形式是时间域模型，即

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{r}\mathbf{d}(t) \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (1.3.4)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (1.3.5)$$

式中变量 $x_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 是状态变量; $y_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, l$ 是输出变量; $u_r(t)$, $r = 1, 2, \dots, m$ 是输入变量或控制变量; $d_s(t)$, $s = 1, 2, \dots, k$ 是扰动变量。

如果 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 是常数矩阵，则 S 域模型[式(1.3.2)]和时间域模型[式(1.3.4)]是等价的，可以方便地选择这两种模型的任一种。这些多变量系统模型的建立有的是以基本的机理微分方程为基础，但更为常见的是由被测过程动态特性拟合得出经验方程，因而用这种模型可以近似地模拟范围很广的一类过程。有关这种模型在第三章更进一步说明。

非线性集中参数模型

用非线性常微分方程描述的系统在工业过程中是极为普遍的，这些系统的一般模型形式为

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{d}(t)) \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (1.3.6)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (1.3.7)$$

与前述相同，在此 $\mathbf{x}(t)$ 表示状态向量， $\mathbf{y}(t)$ 是输出向量， $\mathbf{d}(t)$ 是扰动向量， $\mathbf{u}(t)$ 是控制输入。非线性函数 $\mathbf{f}$ 、 $\mathbf{h}$ 可以具有很多形式，它们通常是根据动量平衡，能量平衡和物料平衡及所研究过程采用的检测元件的形式来导出的。例如在连续搅拌槽反应器中进行的液相反应， $A \rightarrow B$ ，非线性模型形式为