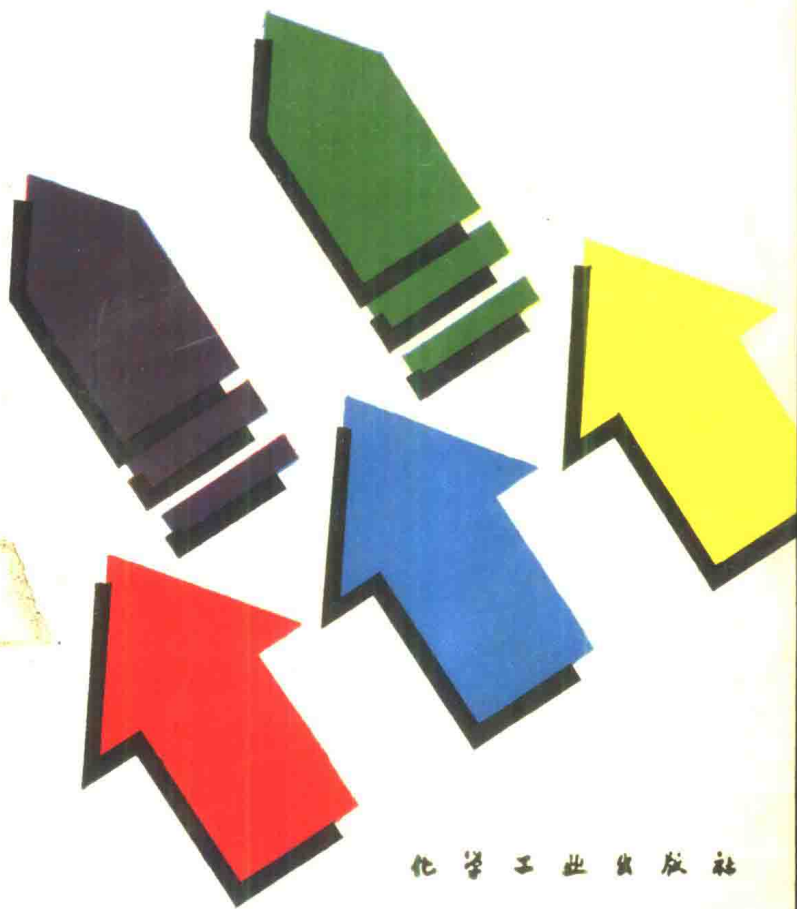


化工继续教育教育系列教材

新型控制系统

中国化工学会教育工作委员会组织编写



化学工业出版社

化工继续工程教育系列教材

新型控制系统

中国化工学会教育工作委员会组织编写

俞金寿 何衍庆 夏国世 编著

化学工业出版社

内 容 提 要

本书是《化工继续工程教育系列教材》中的一本。全书共分12章,向读者介绍了前馈控制系统,选择性控制系统,纯滞后补偿控制系统,差拍控制系统,采用阀位调节器的控制系统,解耦控制系统,采用计算指标的控制系统,推断控制,预测控制,非线性控制系统,状态反馈控制,自适应控制。这些内容为自动化工程技术人员提供了很好的参考资料。

本书是对从事过程控制、系统设计、安装和现场维护操作的工程技术人员进行继续工程教育的教材,也为自动化专业的大专院校师生提供了一本结合工程实践的参考书。

化工继续工程教育系列教材

新 型 控 制 系 统

中国化工学会教育工作委员会组织编写

俞金寿 何衍庆 夏国世 编著

责任编辑:张婉如

封面设计:任 辉

*

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $9^{3/8}$ 字数213千字

1990年11月第1版 1990年11月北京第1次印刷

印 数 1-1,430

ISBN 7-5025-0313-0/TP·24

定 价6.80元

前 言

《化工继续工程教育系列教材》是由中国化学工业部、中国石油化工总公司、中国化工学会共同组织国内教授、专家编写的。供化学工程技术人员大学后继续教育使用，也可以做为科技参考用书。

继续工程教育是当代科学技术迅速发展的产物，是对在职科技人员进行深化、补充和更新知识并不断提高创造能力的教育，也是他们接受新理论、新技术、新方法的重要途径。继续工程教育已成为跟踪世界新技术和高技术发展水平，提高科技人员素质，使知识转化为技术形成生产力，从而推动化学工业发展的强大动力。

大学后继续教育是学校教育的延伸、补充和扩展，具有教学要求定向性、教学对象复杂性、教学结构层次性和教学方式开放性诸多特点。因此，本系列教材包括以下四种类型内容：

一、概述型课程。这类教材力求开阔科技人员的视野，了解本学科发展现状与趋势，以便根据需要选择学习内容，同时起到触类旁通的作用。现已出版《化学工程(一)》、《化学工程(一)辅导材料》、《化学工程(二)》三本书，内容为化工热力学、反应工程、分离工程、系统工程、化工技术开发及其管理以及技术经济评价等的概括。我们认为化学工程技术人员对这些知识应有全貌的了解，然后根据工作需要，深入学习所需课程。因而，这几本书突出了“先进、概括、引路”的特色。

二、提高型课程。这类教材着重提高化学工程技术人员

知识水平，较系统地介绍基本原理、基本知识和应用思路。经过办班实践，即将出版《化工热力学》、《化学反应工程基本原理》、《计算机模拟与辅助设计》、《多级分离过程——蒸馏、吸收、萃取、吸附》等四本书，努力体现先进性、针对性、实用性和自学性。

三、扩展型课程。化学工程技术人员不仅要掌握本学科的知识，还需要了解和运用相近学科的知识，才能综合解决工程实际问题，比如化工自动化、化工设备、化工腐蚀与防护、化工技术经济等等。我们正在开发这类课程，将陆续出版。

四、技术专题课程。这类课程侧重于化工过程的开发放大，以掌握化工过程开发方法，培养化学工程技术人员的技术开发能力。比如化工节能原理与技术、化工过程优化方法等。这类课程正在开发之中。

以上是我们组织编写这套教材的构思。考虑到化工行业复杂，学习要求不一的具体情况，在组织继续教育或安排自学时，应采取多种层次、多种方式、灵活选择、联系实际的原则适当组配，使本系列教材具有较强的适应性。

由于我们对组织编写化工继续工程教育系列教材缺乏经验，殷切希望读者提出宝贵意见，不断改进，为提高化学工程技术人员素质做出贡献。

中国化工学会教育工作委员会

一九九〇年三月

序 言

在工业生产过程中，一个好的控制系统不但要保证系统的稳定性和整个生产过程的安全，满足一定的约束条件，而且应该带来一定的经济效益和社会效益。然而设计这样的控制系统有时会遇到困难，许多过程往往具有其本身的特殊性，如机理比较复杂，变量间关联严重，而且往往还存在着非线性、时滞以及各种各样的扰动因素。因此，对于过程系统的设计，只完全采用控制理论中已提出的现成方法是不够的，还必须针对过程系统的特殊要求，开发新型的过程控制系统结构，研究先进的过程控制规律以及将控制理论与方法向过程控制领域移植和改造等方面，这些越来越引起人们的关注。所以开发和研究新型过程控制理论和方法具有很大的社会经济价值。

我们编写这本书的目的着眼于应用，为从事现场自动化工程技术人员介绍近年来国内外开发和研究的新型控制系统，以便把这些新型控制系统推广到实际生产过程，也为自动化专业的大学生和研究生提供一本结合工程实践的参考书。

全书共分十二章：前馈控制系统；选择性控制系统；纯滞后补偿控制系统；差拍控制系统；采用阀位调节器的控制系统；解耦控制系统；采用计算指标的控制系统；推断控制；预测控制；非线性控制系统；状态反馈控制；自适应控制。书中所介绍的多数内容是在生产上经过实践的考验，证明是行之有效的方案。但亦有一些没有经过工程上的实践考验，或尚处在上升到理论的过程中，不一定全面完整地反映客观实际情况，

有待进一步总结，提高。

本书由俞金寿主编，并编写了第一、二、六、七章，何衍庆编写第三、四、五章，夏圉世编写第八、九、十、十一、十二章。

期望读者对本书提出指正和批评。

最后对于沈承林教授在审校书稿过程中所付出的辛勤劳动，谨致谢意。

编者

一九八九年十二月于华东化工学院

目 录

第一章 前馈控制系统	1
第一节 前馈控制的基本原理	1
第二节 前馈控制的主要结构形式	4
一、静态前馈	4
二、前馈反馈控制系统	5
三、多变量前馈控制系统	8
第三节 前馈控制系统的设计	11
一、采用前馈控制系统的条件	11
二、前馈补偿装置的控制算法	12
三、前馈补偿装置的选择	13
四、前馈控制设计中有关问题	16
第四节 前馈控制系统的工业应用	19
一、锅炉给水系统的前馈反馈控制系统	20
二、加热炉的前馈反馈控制系统	27
三、精馏塔的前馈反馈控制系统	30
第二章 选择性控制系统	35
第一节 基本原理和结构	35
第二节 选择性控制系统的类型	37
一、选择器位于两个调节器与执行器之间	37
二、选择器在变送器和调节器之间（选择测量信号和操纵变量）	39
三、利用选择器实现非线性控制规律	41
第三节 选择性控制系统的工程设计	42
一、控制设备的选择	42

二、调节器的防积分饱和措施	43
第四节 选择性控制系统的工业应用	45
一、具有逻辑规律的比值控制	45
二、从动量供应不足时的自动比值控制	47
三、用于保护设备安全的选择性控制系统	48
第三章 纯滞后补偿控制系统	51
第一节 纯滞后对调节质量的影响	51
一、纯滞后出现在干扰通道	52
二、纯滞后出现在反馈通道	52
三、纯滞后出现在前向通道	53
四、纯滞后同时出现在各通道	54
第二节 史密斯预估补偿控制方案	55
一、基本原理和结构	55
二、实施中的一些问题	57
三、应用实例	61
第三节 解析预估补偿控制方案	62
一、基本原理和结构	62
二、实施中的一些问题	64
三、应用实例	65
第四节 观测补偿器控制方案	66
一、基本原理和结构	66
二、系统分析	69
三、实施中的一些问题	75
四、实例	76
第五节 纯滞后对象的采样控制	77
一、基本原理和结构	77
二、实施中的一些问题	80
第四章 差拍控制系统	82
第一节 差拍控制系统	82
一、差拍控制原理	82

二、差拍控制设计	83
第二节 大林控制算法	88
一、大林控制算法	88
二、参数 λ 的影响	89
三、定值控制算式	91
第三节 卡尔曼控制算法	93
一、卡尔曼控制算法	93
二、示例	95
第四节 V. E. 控制算法	103
一、V. E. 控制算法	103
二、示例	105
第五章 采用阀位调节器的控制系统	107
第一节 双重控制系统	107
一、基本原理和结构	107
二、系统分析	109
三、系统设计与实施中的一些问题	112
第二节 浮动塔压控制系统	113
一、浮动塔压控制的基本原理	113
二、浮动塔压控制系统设计中的一些问题	115
第三节 应用实例	118
一、喷雾干燥过程	119
二、加热系统	120
三、蒸汽降压系统	120
第六章 解耦控制系统	122
第一节 系统的关联分析	122
一、系统的关联	122
二、相对增益	123
第二节 减少与解除耦合途径	128
一、被控变量与操纵变量间正确匹配	128

二、调节器的参数整定	131
三、减少控制回路	131
四、串接的解耦装置	132
五、模式控制	133
第三节 串接解耦控制	135
一、对角线矩阵法	135
二、单位矩阵法	135
三、前馈补偿法	136
四、设计中的有关问题	137
第四节 解耦控制应用实例	138
第七章 采用计算指标的控制系统	142
第一节 被控变量通过变量计算而得的控制系统	142
一、质量流量的控制	142
二、内回流控制	145
三、热焓控制	147
第二节 设定值通过变量计算而得的控制系统	150
一、防喘振控制系统	151
二、仪表投运中的信号匹配	153
第八章 推断控制	156
第一节 推断控制的基本原理	156
第二节 静态推断控制	159
第三节 推断—反馈控制	160
第四节 推断控制的工业应用实例	163
一、多元精馏塔的推断控制	163
二、二元精馏塔的静态推断控制	169
三、喷雾干燥过程的推断控制	171
第九章 预测控制	174
第一节 预测控制的结构型式	174
第二节 预测控制的特点与性质	180

第三节 预测控制的设计方法	181
第四节 广义预测控制	188
第五节 预测控制的工业应用	191
一、原油加热炉的预测控制	192
二、酒精蒸馏塔的预测控制	193
第十章 非线性控制系统	196
第一节 非线性系统控制理论简介	196
一、相平面分析法	197
二、双线性系统控制方法简述	201
第二节 线性系统的非线性控制方法	207
一、Bang-Bang控制与切换曲面	207
二、变结构控制系统	212
三、聚氯乙烯聚合釜的最短时间控制	215
第三节 非线性控制系统的工程设计	217
一、位式控制	217
二、线性系统的变增益控制规律	219
三、变增益过程的非线性控制	220
第十一章 状态反馈控制	222
第一节 状态空间分析基础	222
第二节 单变量系统的状态反馈	228
一、标准型	228
二、状态反馈系统设计方法	233
三、状态反馈的性质	236
第三节 PID控制与状态反馈控制	238
第四节 多变量系统的状态反馈	242
一、标准型及状态变换	242
二、状态反馈的特征向量设计方法	246
第五节 状态反馈控制系统的工程设计	248
第十二章 自适应控制	256

第一节 自适应控制的基本类型与概念	256
第二节 自整定PID参数调节器	258
一、基本原理	259
二、闭环参数估计方法	260
三、最优PID参数的整定	263
四、自整定PID调节器的应用	264
第三节 自校正最小方差调节器	265
一、最小方差控制器	266
二、递推的增广最小二乘辨识	269
三、自校正最小方差调节器算法	270
第四节 模型参考自适应控制	273
一、模型参考自适应控制系统的结构	273
二、局部参数最优化的设计方法	274
三、基于稳定性理论的设计方法	277
第五节 自适应控制的工业应用示例	279
一、蒸发器液位的自校正最小方差控制	279
二、反应器的模型参考自适应控制	282
参考文献	285

第一章 前馈控制系统

第一节 前馈控制的基本原理

反馈控制是根据被控变量的偏差进行调节的，它们是闭环控制，不论产生偏差的根源何在，它们都可以工作，只要输入作用能平稳下来，系统最终能使偏差消除或基本消除。然而，按偏差而调节的控制方式尽管有较普遍的适用性，但亦有其本质上的弱点，因为只有在偏差（至少是其导数项）形成以后，控制作用才发生变化，以补偿输入作用对被控变量的影响，这种控制作用总是落后于输入作用，是“不及时”的控制。尤其是化工、炼油、热工等工业过程的对象具有较大的滞后，往往扰动已发生，而被控变量还未变化，调节器就不动作，滞后时间越长，偏差越大，不易稳定，被控变量的品质就越差，这种情况对生产是不利的。

可以从另一角度提出控制策略，即基于补偿原理，采用开环结构，控制作用采用输入作用（设定值或扰动作用）的函数。对于设定值的变化，有一种所谓“预负载”系统，控制作用本身是设定值的函数，如果能精确地了解过程特性，则计算得出的控制作用恰好能使系统在新的设定值下建立平衡，达到稳态。由于扰动作用的客观存在，为了使系统同时具有克服扰动影响的能力，因此常与反馈控制结合起来，例如采用PI控制规律时

$$u = u_r + K_c \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt \right) \quad (1-1)$$

式中 $u_r = f(r)$

常用的形式是

$$u_r = u_0 + C(r - r_0) \quad (1-2)$$

式中的 r 是设定值， c 是相应的系数， u_0 是 $r=r_0$ 时的 u_r 值。

在过程控制中，更经常遇到的输入作用是扰动，如负荷的变化，对此采用前馈控制系统。前馈控制是根据扰动作用的大小进行调节的，其特点是当扰动产生后，被控变量还未显示变化以前，根据扰动作用大小进行调节，以补偿扰动作用对被控变量的影响。这种前馈作用运用恰当，可以使被控变量不会因扰动作用而产生偏差，比反馈控制要及时，并且不受系统滞后的影响。

前馈控制的出现和反馈控制一样古老，其雏型在我国古代已有实施。其基本原理就是苏联学者早在三、四十年代倡导的不变性原理。但广泛应用于工程上，还是50年代以后的事情。

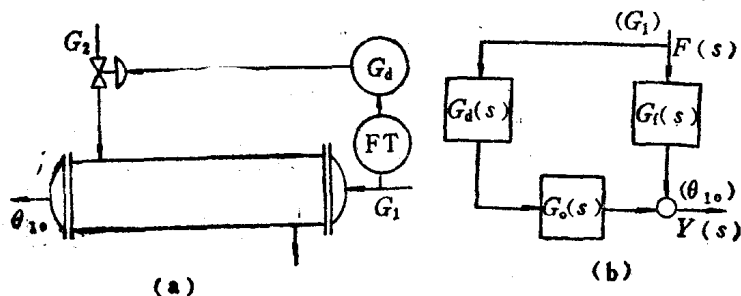


图 1-1 换热器的前馈控制系统及方框图

图1-1所示是换热器的前馈控制系统及其方框图。设扰动通道的传递函数为 G_f ，调节通道的传递函数为 G_o ，则如把扰动值（进料流量）测量出来，并通过前馈补偿装置 G_d 输出控制作用，

此时

$$\begin{aligned} Y(s) &= G_f(s)F(s) + G_d(s)G_o(s)F(s) \\ &= [G_f(s) + G_d(s)G_o(s)]F(s) \end{aligned} \quad (1-3)$$

为了使系统在扰动 f 的作用下, 输出 y 的偏差性等于零, 则应满足下列条件

$$G_f(s) + G_d(s)G_o(s) = 0$$

即
$$G_d(s) = - \frac{G_f(s)}{G_o(s)} \quad (1-4)$$

由此可见, 如果补偿得当, 对于某一特定扰动, 前馈控制系统的品质十分理想, 可以十倍直至百倍地优于反馈控制系统。但是, 要实现完全补偿并非易事。因为要得到工业过程的精确数学模型是十分困难的; 同时, 扰动亦往往不止特定的一种或数种。为了保证有更大的适应性, 因此工业过程的许多场合把前馈控制与反馈控制结合起来, 构成前馈-反馈控制系统。前馈控制克服主要扰动的影响, 反馈控制克服其余扰动及前馈补偿不完全的部分。这些系统即使在大而频繁的扰动下, 依旧可以获得优良控制品质。

国内70年代已开展了不少推广应用工作, 但至今使用得仍不够普遍, 还要继续推广应用。要知道, 控制品质的提高不单纯是一个产品质量问题, 与产量、能耗等亦有着密切的关系。有一个精馏塔前馈控制的例子清晰而形象地说明了这一点。精馏塔的产品有一定质量要求, 如果控制精度稍差, 必须把设定值提高, 这样即使偏差稍大, 产品质量仍然合格。但由于浓度设定值的提高, 分离程度就提高了, 需要的回流比就加大, 载热体(如蒸汽)及冷却剂(如水)的耗量亦就增加。由于塔内蒸汽流速有一定限制, 这样也就降低了塔的处理能力。当需要增加处理量时, 工艺工程师就考虑将塔径加大或另增加一个塔, 这样做投资不小。而控制工程师从另一侧面来解决问题, 采用前馈控制, 提高了控制精度, 把设定值适当降低, 回流比相应减小, 这样既增加了处理量, 又降低了能耗, 取得了成

功。因此好的控制方案会带来显著的经济效益，而前馈控制是其中最简单易行的途径之一。

第二节 前馈控制的主要结构形式

一、静态前馈

静态前馈是在扰动作用下，前馈补偿作用只能最终使被控变量回到要求的设定值，而不考虑补偿过程中的偏差大小。在有条件的情况下，可以通过物料和能量平衡关系来求得采用多大校正作用。现以蒸汽加热器为例加以说明。从静态前馈的角度考虑，当负荷方面的工艺介质流量 G_1 和入口温度 θ_{1i} 发生变化时，为了保证出口温度 θ_{1o} 不变，则载热体——蒸汽也必须相应调整，但蒸汽要变化多少才能补偿负荷扰动对出口温度的影响呢？由热量衡算关系得

$$G_2 \lambda = G_1 C_1 (\theta_{1o} - \theta_{1i})$$

$$\text{或} \quad G_2 = \frac{C_1}{\lambda} G_1 (\theta_{1o} - \theta_{1i}) \quad (1-5)$$

假设比热 C_1 和蒸汽冷凝潜热 λ 不变，则由式(1-5)可以组成静态前馈，如图1-2所示。从图中可以看出前馈信号 G_1 、

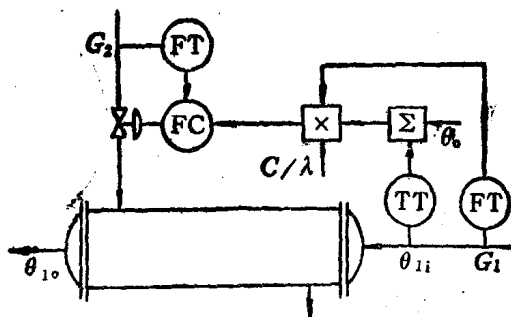


图 1-2 蒸汽加热器的静态前馈控制系统