

高等学校规划教材

工业过程控制工程

王树青 等编著



TB114.2-43
w36

高等学校规划教材

工业过程控制工程

王树青 等编著

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工业过程控制工程/王树青等编著. —北京: 化学工业出版社, 2002.12
高等学校规划教材
ISBN 7-5025-3917-4

I. 工… II. 王… III. 工业-过程控制-高等学校-教材 IV. TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 084534 号

高等学校规划教材
工业过程控制工程
王树青 等编著

责任编辑: 唐旭华
责任校对: 陈 静
封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64982530
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市昌平振南印刷厂印刷
三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 28 字数 698 千字
2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-3917-4/G·1068
定 价: 40.00 元



版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

应用计算机技术和控制理论，改造和拉动传统产业已成为工业生产过程的紧迫任务。同时，自动化已是现代工业必不可少的生产技术。本书是在浙江大学王骥程教授等主编的《化工过程控制工程》（第二版）一书的基础上，综合多所大学最近十多年来在过程控制工程这一门课程的教学与相关科学研究的成果编写而成。本书可作为本科自动化及相关专业高年级学生或硕士生的教材。

本书共分3篇24章。第1篇是工业过程控制工程基础篇，它汇集了近50年来工业过程控制最基础的而且又实用的内容。第2篇是先进控制技术篇，它是现代可用于工业生产过程控制的高级控制算法与策略。第3篇是工业生产过程控制应用篇，它是第1篇和第2篇内容分别在工业生产过程典型装置、过程和领域中的应用示例。参加本书编写的有浙江大学王树青、戴连奎、祝和云，西北工业大学王新民，石油大学田学民和大连理工大学宋彤。他们参加编写的内容分别为：王树青编写第1，10，16，24章；戴连奎编写第13，14，17，18，19，20章及串级和预测控制应用示例；祝和云编写第3，4，5，6，8，11，23章；王新民编写第7，9章；田学民编写第2，12，22章；宋彤编写第15，21章；全书由王树青统稿。

本书在内容选取上力求保留原有过程控制工程中的精华部分，尽力增加现代控制理论中行之有效的内容。在写作上，做到概念清楚，深入浅出，并尽量用例子来说明，每章后面都有思考题与习题。由于本书涉及内容广泛，既有控制理论内容，又有工程实践算法和技术，同时，还有大量的不同性质的工业实际被控过程知识，因此，在选用本书作为教材时，可以根据不同需求进行组合。

本书在编写过程中，一直得到王骥程教授的指导和关心，北京化工大学厉玉鸣教授对书中内容提出了许多宝贵意见，浙江大学控制系部分研究生参与了仿真实验以及画图工作，特别是来国妹女士对全书的录入、编排、画图等做了大量工作，在此向他们表示衷心的感谢。由于作者水平有限，书中不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2002年8月于浙大求是园

目 录

第 1 篇 工业过程控制工程基础

1 绪论	1	3.3.4 操纵变量的选择	26
1.1 工业生产过程控制概述	1	3.4 过程建模	26
1.2 工业生产过程运行操作	2	3.4.1 过程建模目的和要求	26
1.2.1 工业生产过程操作功能	2	3.4.2 机理建模方法及举例	27
1.2.2 影响工业生产过程稳定因素	3	3.4.3 测试法建模	32
1.2.3 影响工业生产过程控制的因素	3	思考题与习题 3	37
1.3 工业生产过程控制系统发展过程	4	4 测量变送环节和执行器	39
1.3.1 自动化仪表技术的发展	4	4.1 在系统设计时对测量变送环节的	
1.3.2 计算机在工业生产控制中应用	6	考虑	39
1.4 工业生产过程自动化	6	4.1.1 关于测量误差	39
1.4.1 常规控制	7	4.1.2 测量信号的处理	40
1.4.2 先进控制	8	4.2 控制阀环节在控智系统设计中的	
1.4.3 优化	9	考虑	41
1.4.4 决策调度	9	4.2.1 控制阀概述	41
思考题与习题 1	10	4.2.2 流量特性和阀门增益	42
2 控制系统组成及性能指标	11	4.2.3 流量特性的选择	44
2.1 控制系统组成	11	4.2.4 非线性补偿的其他方法	49
2.1.1 控制系统组成	11	4.2.5 阀门定位器的使用	49
2.1.2 控制系统的方框图	13	4.3 其他执行器	51
2.2 控制性能指标	15	4.3.1 执行电动机	51
2.2.1 控制系统的稳态和动态	15	4.3.2 液压传动和液压伺服系统	56
2.2.2 阶跃输入和过渡过程的形式	15	思考题与习题 4	57
2.2.3 控制系统的性能指标	16	5 常规控制器的选型、整定和系统	
思考题与习题 2	18	投运	59
3 过程动态特性与建模	20	5.1 三类常规控制器	59
3.1 典型被控过程	20	5.1.1 比例控制器	59
3.1.1 自衡的非振荡过程	20	5.1.2 比例积分控制器	59
3.1.2 无自衡的非振荡过程	21	5.1.3 比例积分微分控制器	62
3.1.3 有自衡的振荡过程	21	5.1.4 积分饱和及其防止	63
3.1.4 具有反向特性的过程	21	5.2 控制规律的选取	63
3.2 系统被控变量的选择	22	5.3 控制器参数整定	64
3.3 广义对象各环节特性对控制品质的		5.4 控制系统的投运	67
影响	24	思考题与习题 5	67
3.3.1 增益(放大系数) K 的影响	24	6 串级控制系统	69
3.3.2 时间常数 T 的影响	25	6.1 基本原理和结构	69
3.3.3 时滞 τ 的影响	25	6.1.1 串级控制系统概念	69

6.1.2 方块图及常用名词	69	8.1.1 均匀控制的由来	104
6.2 串级控制系统分析	70	8.1.2 怎样来实现均匀控制	105
6.2.1 临界频率和临界增益	70	8.1.3 均匀控制参数工程整定	108
6.2.2 关于系统的鲁棒性 (Robust)	72	8.2 选择性控制系统	109
6.2.3 对分析的归纳	73	8.2.1 超驰控制系统	109
6.3 串级控制系统设计	73	8.2.2 其他选择性控制系统	111
6.3.1 副变量的选择	73	8.3 分程控制系统	112
6.3.2 主、副控制器的选型	74	8.4 阀位控制 (VPC) 系统	116
6.3.3 主副控制器正、反作用选择	74	思考题与习题 8	117
6.3.4 防积分饱和	74	9 系统关联与解耦控制	120
6.3.5 串级系统投运及参数整定	75	9.1 系统关联分析	120
6.4 串级控制系统举例	76	9.1.1 系统关联分类	120
6.4.1 控制问题与方案设计	76	9.1.2 关联系统的稳定性分析	121
6.4.2 仿真模型的建立	77	9.1.3 系统关联分析举例	123
6.4.3 串级系统 PID 参数整定	78	9.2 相对增益	125
6.4.4 串级控制与单回路控制的比较	79	9.2.1 相对增益阵定义	125
思考题与习题 6	81	9.2.2 相对增益的求取方法	127
7 前馈及比值控制	83	9.2.3 控制回路的选择原则	131
7.1 前馈控制系统的原理和特点	83	9.2.4 动态相对增益	134
7.1.1 前馈控制和不变性原理	83	9.3 解耦控制设计方法	135
7.1.2 前馈控制系统的特点	85	9.3.1 减少和消除耦合的方法	135
7.2 前馈控制系统的几种结构形式	85	9.3.2 对角矩阵解耦设计方法	139
7.2.1 静态前馈	85	思考题与习题 9	148
7.2.2 动态前馈	86	10 计算机控制系统	150
7.2.3 前馈-反馈控制系统	87	10.1 计算机控制系统概述	150
7.2.4 前馈-串级控制系统	88	10.1.1 信号采集与变换	152
7.2.5 多变量前馈控制	89	10.1.2 信号处理与数据滤波	154
7.2.6 用计算机实施前馈控制	91	10.1.3 计算机控制软件	156
7.3 比值控制系统	92	10.2 PID 控制算法	157
7.3.1 比值控制概述	92	10.2.1 数字 PID 控制算式	157
7.3.2 定比值控制系统	93	10.2.2 数字 PID 改进算式	159
7.3.3 变比值控制系统	95	10.2.3 数字 PID 控制的实现	161
7.3.4 比值控制系统的实施	96	10.2.4 数字 PID 控制器参数整定	163
7.3.5 比值控制系统的设计、投运及 整定	98	10.3 DCS (Distributed Control System) 系统	164
7.3.6 比值控制系统中的若干问题	99	10.3.1 DCS 概念	164
思考题与习题 7	101	10.3.2 JX-300X 系统结构	165
8 特殊控制系统	104	10.3.3 JX-300X 系统软件	169
8.1 均匀控制系统	104	思考题与习题 10	171

第 2 篇 先进控制技术

11 纯滞后补偿和内模控制	173	11.2.1 控制系统方块图和理想控 制器	177
11.1 史密斯 (Smith) 预估算法	173	11.2.2 实际内模控制器	178
11.2 内模控制	177		

11.2.3 内模控制器与反馈控制器 关系	179	思考题与习题 13	229
11.2.4 内模控制的离散算式	180	14 非线性过程控制	230
11.3 内模控制的应用	181	14.1 非线性过程特点	230
思考题与习题 11	183	14.2 非线性补偿方法	232
12 模型预测控制算法	185	14.3 pH中和过程控制	237
12.1 模型预测控制的主要特征	185	14.3.1 pH中和过程的滴定曲线	237
12.2 几种常见的模型预测控制算法	186	14.3.2 pH中和过程的动态模型	238
12.2.1 模型算法控制	186	14.3.3 pH过程的典型控制系统	239
12.2.2 动态矩阵控制	189	思考题与习题 14	244
12.2.3 多变量约束过程的模型预测 控制	192	15 智能控制方法	245
12.3 预测控制举例	193	15.1 模糊控制	245
12.3.1 四储罐关联实验装置	193	15.1.1 模糊逻辑基础	245
12.3.2 预测控制的应用	195	15.1.2 模糊控制系统组成	250
12.4 模型预测控制的工业应用举例	197	15.1.3 模糊控制器设计	253
思考题与习题 12	200	15.2 神经网络控制	256
13 自适应、鲁棒与推断控制	201	15.2.1 神经网络概念	256
13.1 自适应控制	201	15.2.2 神经网络控制	259
13.1.1 增益调度自适应控制	201	15.3 专家控制	261
13.1.2 模型参考自适应控制	203	15.3.1 专家系统概述	261
13.1.3 实时参数估计	204	15.3.2 专家控制系统	262
13.1.4 自校正控制	207	15.3.3 专家控制器	264
13.2 自整定 PID 控制	210	思考题与习题 15	267
13.2.1 模式识别法	210	16 监督控制	268
13.2.2 基于继电反馈的参数自整定	211	16.1 监督控制概述	268
13.3 鲁棒控制	215	16.2 在线优化控制	269
13.3.1 基本概念	215	16.2.1 最优化	269
13.3.2 对象的不确定性描述	217	16.2.2 最优化技术	271
13.3.3 信号与系统的范数	218	16.2.3 最优操作工况	272
13.3.4 不确定系统的鲁棒稳定性	220	16.3 最优化问题的实施技术	274
13.3.5 鲁棒控制器的设计	221	16.4 统计过程控制	278
13.4 软测量技术和推断控制系统	222	16.4.1 统计过程的基本原理	278
13.4.1 软测量技术	222	16.4.2 单变量统计过程描述及 模型	279
13.4.2 推断控制系统	225	16.4.3 统计控制图	281
		思考题与习题 16	283

第 3 篇 工业生产过程控制应用

17 流体输送设备的控制	285	喘振	290
17.1 泵及压缩机的控制方案	286	17.2.2 引起喘振的因素	292
17.1.1 泵和管路系统的静态特性及泵的 控制方案	286	17.2.3 喘振的极限线方程及安全操 作线	292
17.1.2 离心式压缩机的控制方案	289	17.2.4 防喘振控制系统	293
17.2 离心式压缩机的防喘振控制	290	思考题与习题 17	296
17.2.1 离心式压缩机的特性曲线与		18 传热设备的控制	297

18.1 概述	297	20.1.1 化学反应器的类型	340
18.1.1 传热设备的结构类型	297	20.1.2 化学反应的基本规律	342
18.1.2 热量传递的三种方式	297	20.2 化学反应器的动态数学模型	346
18.1.3 传热设备的动态特点	300	20.2.1 基本动态方程式	346
18.2 对象的静态数学模型	300	20.2.2 非线性模型的线性化	348
18.2.1 对象静态模型的基本方程式	301	20.2.3 反应器的热稳定性	349
18.2.2 对象的静态增益	302	20.3 反应器的基本控制方案	351
18.3 对象的动态数学模型	303	20.3.1 概 述	351
18.3.1 集中参数对象	303	20.3.2 温度被控变量的选择	352
18.3.2 分布参数对象	304	20.3.3 以温度作为控制指标的控制 系统	354
18.4 换热器的控制	306	20.4 几种典型反应器的控制方案	357
18.5 加热炉的控制	308	20.4.1 聚合反应釜的控制	357
18.5.1 加热炉的单回路控制方案	308	20.4.2 合成氨过程的控制	360
18.5.2 加热炉的串级控制方案	310	思考题与习题 20	366
18.5.3 安全联锁保护系统	313	21 间歇生产过程控制	367
思考题与习题 18	315	21.1 间歇生产过程概述	367
19 精馏过程的控制	316	21.1.1 间歇生产	367
19.1 精馏塔的控制目标	316	21.1.2 间歇生产过程的特点	368
19.1.1 质量指标	316	21.2 间歇生产过程控制	368
19.1.2 产品产量和能量消耗	317	21.2.1 间歇生产的控制要求	368
19.2 精馏塔的静态特性和动态特性	317	21.2.2 间歇控制模型	369
19.2.1 精馏塔的静态特性	318	21.2.3 间歇生产过程控制	370
19.2.2 动态影响分析	321	21.3 优化工艺与操作	376
19.3 精馏塔质量指标的选取	322	21.3.1 约翰逊 (Johnson) 算法	377
19.3.1 灵敏板的温度控制	322	21.3.2 多产品的生产排序	377
19.3.2 温差控制	322	思考题与习题 21	381
19.3.3 双温差控制	323	22 炼油工业生产过程控制	382
19.4 精馏塔的基本控制方案	324	22.1 炼油工业概述	382
19.4.1 物料平衡控制	325	22.2 常减压生产过程控制	383
19.4.2 控制一端产品质量	328	22.2.1 常减压蒸馏工艺流程简介	383
19.4.3 按塔顶塔底两端质量指标 控制	332	22.2.2 常减压蒸馏常规过程控制	384
19.5 先进控制应用示例: 原油蒸馏塔的多 变量预测控制	334	22.2.3 常减压蒸馏的先进控制	385
19.5.1 工艺概况	334	22.3 催化裂化	388
19.5.2 常压塔的多变量约束控制 问题	335	22.3.1 工艺流程简述	388
19.5.3 多变量过程的约束预测 控制	336	22.3.2 FCCU 反应再生系统常规 控制	389
19.5.4 常压塔先进控制系统的运行 结果	337	22.3.3 FCCU 先进控制	389
思考题与习题 19	338	22.4 催化重整	393
20 化学反应过程控制	340	22.4.1 催化重整工艺流程概述	393
20.1 化学反应过程	340	22.4.2 催化重整过程的控制	395
		22.5 油品调合	398
		22.5.1 油品调合过程简介	398
		22.5.2 调合控制	399

思考题与习题 22	403
23 火力发电生产过程的控制	405
23.1 锅炉控制	405
23.1.1 汽包水位的控制	406
23.1.2 燃烧控制系统	410
23.1.3 过热蒸汽温度控制	414
23.2 汽轮机控制	415
23.2.1 轮机监控任务	415
23.2.2 转速自动控制	416
23.2.3 中间再热式汽轮机的控制	417
23.3 机炉协调控制	418
23.3.1 炉跟机运行方式	419
23.3.2 机跟炉运行方式	419
23.3.3 机炉协调控制	419
思考题与习题 23	420
24 计算机综合集成控制	422
24.1 计算机集成控制概述	422
24.1.1 流程工业生产过程运作 特点	422
24.1.2 计算机综合集成控制	423
24.2 信息源与信息集成系统	424

24.2.1 企业信息和数据来源	424
24.2.2 信息分类与编码	425
24.2.3 企业信息系统综合集成 技术	426
24.3 数据校正技术	427
24.3.1 概述	427
24.3.2 数据校正原理	428
24.3.3 过失误差的侦破原理	428
24.3.4 过程数据校正技术的工程应用 实施	429
24.3.5 一个炼油厂的物流数据校正工业 应用实例	430
24.4 信息（数据）驱动下流程工业的 运作	432
24.4.1 企业运行概述	432
24.4.2 企业决策功能	432
24.4.3 期望目标（运行）实施	433
24.4.4 数据驱动下的企业运行	433
思考题与习题 24	435
参考文献	436

第 1 篇 工业过程控制工程基础

1 绪 论

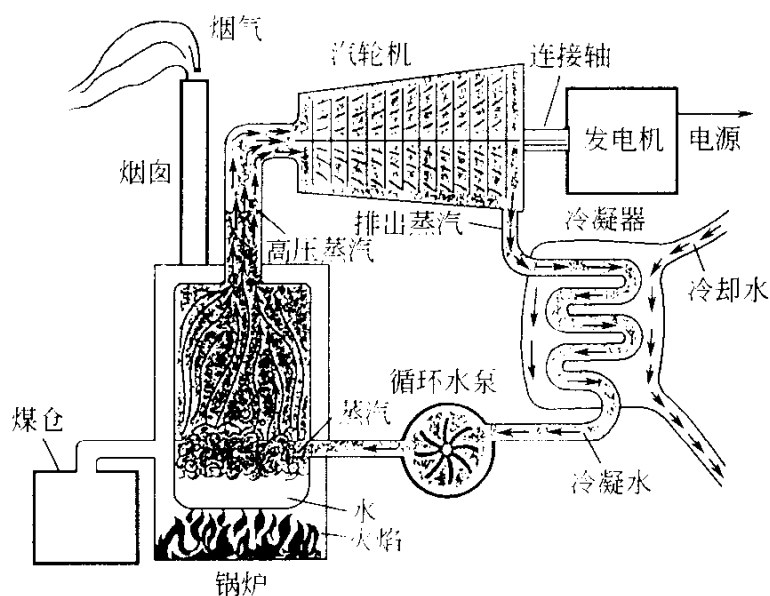
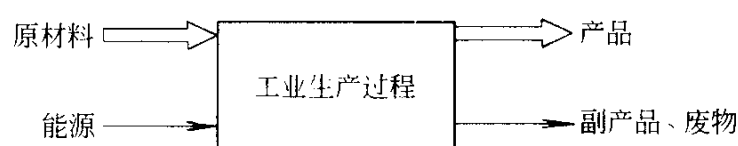
现代工业生产过程，随着生产规模的不断扩大，生产过程的强化，对产品质量的严格要求，以及各公司之间的激烈竞争，人工操作与控制已远远不能满足现代化生产的要求，工业过程控制系统已成为工业生产过程必不可少的设备，因为，它是保证现代企业安全、优化、低消耗和高效益生产的主要技术手段。

1.1 工业生产过程控制概述

什么叫工业生产过程？通常把原材料转变成产品并具有一定生产规模的过程叫工业生产过程，如图 1.1-1 所示。

例如一座以煤作燃料的发电厂，如图 1.1-2 所示。在这一工业生产过程中，原料是煤和水，产品是电能。整个生产过程由储仓、锅炉、汽轮机、发电机、水冷凝器和循环水泵、相应的管道以及控制系统等组成。煤通过在炉膛中燃烧产生热能从而加热水使之变成高压蒸汽用以推动汽轮机。汽轮机通过连接轴带动发电机发出电能。所产生的电能送给电网再供给各种各样的用户，如有的用于照明，有的用于驱动马达，有的用作家电产品的电源等。

对发电厂来说，它的工作目标是：



- 安全生产 锅炉、汽轮机等必须绝对安全运作；

- 单位电能的煤耗 要求煤耗小，能量转换效率高；

- 排出烟气对环境污染 烟气中灰尘及硫化物含量要低。

上述目标，只有通过良好的自动控制系统才能实现。

工业生产过程可分连续（或批处理）的生产过程（如化工、炼油、石油化工、冶金、发电、造纸、生物化工、轻工、水处理等）和离散制造过程（如机械加工、汽车制造等）。本书讨论的工业生产过程

控制着重在连续的工业生产过程。

由图 1.1-1 和图 1.1-2 发电厂例子可知，在运作一个工业生产过程时，希望达到：①安

全生产；⑥单位产品的原材料和能源消耗尽量少；⑦副产品，特别是废物如污水最好不要产生，防止对环境的污染；⑧生产设备的利用率要高。一般的工业生产过程都是在密闭的容器、管道及相应的设备中进行，为了达到预期的生产目标，必须对整个工业生产过程进行谨慎的操作，严格的控制。怎样对一个工业生产过程实行仔细操作和准确的控制呢？首先，要对整个工业生产过程的物料流（气体、液体、固体）、能源流（电、蒸汽、煤气等）和生产过程中的有关状态〔如温度、压力、流量、液面（料面）、体积及成分〕进行准确的测量和计量。根据测量到的数据和信息，用生产工艺和控制理论的知识管理、控制该生产过程。工程上是通过工业过程控制系统来操作和控制实际的工业生产过程。因此，工业生产过程控制的任务是根据不同的工业生产过程和特点，采用测量仪表和计算机等自动化工具，应用控制理论，设计工业生产过程控制系统，实现工业生产过程自动化。工业生产过程控制与各学科的关系如图 1.1-3 所示。

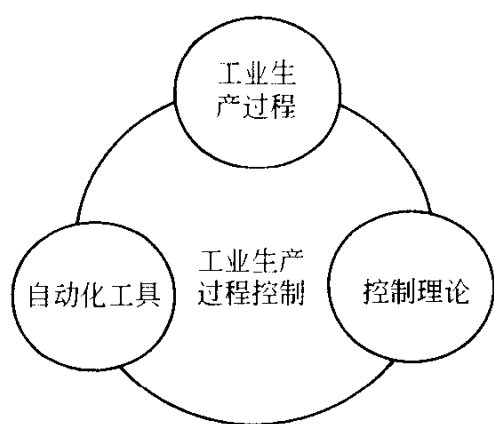


图 1.1-3 工业生产过程控制与其他学科的关系

由于工业生产过程各种各样而且非常复杂，因此，在设计工业生产过程控制系统时，必须花大量的时间和精力了解该工业生产过程的基本原理、操作过程和过程特性，这是设计和实现一个工业生产过程控制系统的首要条件。

1.2 工业生产过程运行操作

1.2.1 工业生产过程操作功能

对于大工业生产过程，特别是现代化工业，其生产操作过程越来越复杂和多样化，一般来说现代工业生产过程有下述的一些操作和控制的问题：

- 生产过程的开车和停车；
- 设备之间的切换；
- 间歇生产过程操作；
- 生产负荷的改变。

在连续生产过程和间歇生产过程中，开车和停车都有自己的一套顺序和操作步骤，特别是大型的石油化工生产过程，其开停车要花很长时间，若不按照一定的步骤和顺序进行，就会出现生产事故，延长开车时间。对于间歇生产过程，其往复循环操作更频繁，而在某些连续生产过程，也包含着间歇操作的设备和单元，如那些需要再生的系统。有时，要改变生产品种和生产负荷，这些都要求按一定的顺序规划进行操作。一般说来，顺序操作包括一系列的阶段或操作步骤。这些阶段，有些是由过程事件来决定，而有些根据特定的时间间隔来激发。

除了上述顺序操作要求之外，工业生产过程还要求：

- 监视和管理整个生产过程；
- 对生产过程进行规划、调度和决策；
- 生产过程的优化操作与控制。

在过程控制系统中监视和管理整个生产过程是很重要的功能。监视生产过程的变化，收集生产历史数据，对寻找出过程的扰动因素和优化工艺条件以及分析过程操作都是极为有用的。

一个工厂可能由许多生产过程所组成，如何根据市场需求和原料状况，编排生产计划，调度全厂原材料、能源、水、电的分配，对一个工厂来说具有很大的经济意义。

在工厂生产过程中，从设备到单元的整个生产线，直至全厂都有优化操作点和控制点问题。而一个生产过程的优化操作点往往是时变的，因此，针对工业生产过程具体情况，进行连续寻优是十分重要的。通常，优化问题是以经济效益最好为目标，它往往是用一组约束条件来描述，在这些约束条件之内操作，使系统处于安全运行的条件下经济效益达到最优。

1.2.2 影响工业生产过程稳定因素

作为一个工厂、一个生产流程或一个生产装置，是根据产品质量和数量的要求、原材料供应以及公用工程情况，建设一定的工艺流程与设备，然后组织生产。在生产过程中，产品的质量、产量和产率等都会随着生产过程的各种扰动（干扰）和生产过程工艺设备等特性的改变而波动。

工业生产过程的扰动作用使得生产过程操作不稳定，从而影响工厂生产过程的经济效益，这些扰动主要来自下述几个方面。

① 原材料的组成变化 在工业生产过程中都是依一定的原料性质生产一定规格的产品，然而，由于原料性质的改变会严重影响产品的规格、质量和产率。

② 产品质量与规格的变化 随着市场对产品质量与规格要求的改变，工业生产企业必须马上能适应市场的需求而改变，否则所生产的产品在市场上无法销售。

③ 生产过程设备的可使用性 工业生产过程的生产设备都是按照一定的生产规模而设计的。但是随着市场对产品数量需求的改变，原设计不能满足实际生产的需要，或者工厂生产设备的损坏或被占用，都会影响生产负荷的变化。在工业生产过程中通常会出现大设备小负荷或小设备超负荷的现象。

④ 装置与装置或工厂与工厂之间的关联 在流程工业中，物料流与能量流在各装置之间或工厂之间有着紧密的关系，由于前后的联结调度等原因，往往要求生产过程的运行作相应的改变，以满足整个生产过程物料与能量的平衡。

⑤ 生产设备特性的漂移 在工业生产工艺设备中，有些重要的设备特性随着生产过程的进行将会发生变化，如热交换器由于结垢而影响传热效果，化学反应器中的催化剂的活性随化学反应的进行而衰减，有些管式裂解炉随着生产的进行而结焦等等。这些特性的漂移都将成为严重的工业生产过程扰动作用。

⑥ 控制系统的失灵 仪表自动化系统是监督、管理、控制工业生产过程的关键设备与手段，自动控制系统本身的故障或特性变化也是生产过程的主要扰动来源。例如测量仪表测量过程的噪声、零点的漂移、控制过程特性的改变而控制器的参数没有及时调整以及操作者的操作失误，这些都是工业生产过程的扰动来源。

由于现代工业生产过程规模大，设备关联严重，强化生产，对于扰动十分敏感。例如炼油工业中催化裂化生产过程，采用固体催化剂流态化技术，该生产过程不仅要求物料和能量的平衡，而且要求压力保持平衡，使固体催化剂保持在良好的流态化状态。再如芳烃精馏生产过程，各精馏塔之间不仅物料紧密相连，而且采用热集成技术，前后装置的热量耦合在一起。因此，现代工业生产过程，能量平衡接近于临界状态，中间储存环节尽量省略不用，工厂内部的物料和能源再循环和再利用十分普遍，所以，一个局部的扰动，就会在整个生产过程传播开来。

1.2.3 影响工业生产过程控制的因素

工业生产过程除了上述特点外，若从反馈控制的观点来分析，其被控过程（对象）又具有下述的一些特性，影响着工业生产过程的操作、控制和优化。

① 信号的测量问题 工业生产过程的物料与能量流都是在密闭的管道与容器中传递、反应或分离，而有些物料又具有易燃、易爆、腐蚀和毒性。工业生产过程的变量很难在线测量，有些可能测不准，噪声大且不可靠，而有些变量至今还无法在线测量，特别是那些物料性质和产品质量的参数，只能通过取样送实验室化验分析才能获得。随着在线质量（成分）分析仪的逐步使用，使得原来不可测的变量变成可测量，然而，在线分析仪满足不了千变万化的工业生产过程的需求。为了解决这一问题，人们寻求用间接的方法来测量不可测的变量，通常称为软测量技术或叫推断测量的方法，即利用可测量的变量和相关模型，计算出不可测量的变量。对于负反馈控制来说完全依赖于工业生产过程信号测量的准确性。

② 被控过程的滞后特性 在实际工业生产过程中由于在管道中的传递或取样化验分析等原因，被控过程存在着各种纯滞后或叫时滞。纯滞后对于负反馈控制系统来说是最难控制的过程。一个控制系统的输出作用希望能尽快在被控变量中反应出来，然而，由于有纯滞后的存在，其动态响应就会不及时。

③ 被控过程的时间常数长短不一样 由于工业生产过程形状、尺寸大小等不一样，其过程的时间常数差别很大，例如流量过程，时间常数很小，而工业加热炉的时间常数就很大。

④ 非线性特性 严格地说工业生产过程随着运行操作点不同，其特性是不一样的，也就是说工业生产过程一般都具有非线性的特性，这种非线性特性使得控制校正和扰动在不同的工作区域会有不同的作用特性。

⑤ 时变性 例如生物发酵过程，生物质浓度的增长随着时间而变化，相应的原料消耗与产物的形成都是时间的函数。整个生物发酵过程从接种、生物生长、产品形成直到生物质的衰亡都是时变的。

⑥ 本征不稳定性 有些工业生产过程，如化学反应过程或生化反应过程，在某些操作范围内系统本身是不稳定的。如果过程进入不稳定的操作区域，其过程变量的变化，如化学反应温度与压力，可能会以指数形式增加，在某些时候，系统可能会进入循环振荡而不稳定。

⑦ 耦合特性 工业生产过程中的输入和输出之间的关系通常是很复杂的，各变量之间可能具有很强的耦合性。一个输入可能会同时改变几个输出，反过来，一个输出可能会受到多个输入的影响。

⑧ 执行器特性 作为一个自动控制系统，由测量环节、被控过程和执行器三部分组成，执行器的特性，直接影响到控制系统的品质。

1.3 工业生产过程控制系统发展过程

自 19 世纪世界工业革命以后，工业生产过程由简单到复杂，规模由小到大。至今，已有各种各样的工业生产过程，生产出多种多样的产品满足人们的生活需要。作为工业生产过程一部分的工业过程控制系统也在不断发展和提高。现就工业自动化仪表和计算机控制技术应用两个方面介绍工业生产过程控制系统发展过程。

1.3.1 自动化仪表技术的发展

在工业生产过程中，通常需要测量和控制的变量有：温度、压力、流量、液面、称重、电量（电流、电压、功率）和成分等。这些变量的测量和控制随着电子技术、计算机技术以及测量技术的不断发展，虽然其基本测量原理变化不大，但是信号转换、显示和控制装置的变化十分迅速。最近 50 年，工业自动化仪表从气动仪表到电动仪表，从现场就地控制到中央控制室控制，从在仪表屏上操作到用计算机工作站（CRT）操作，从模拟信号到数字信号

等等，其发展和变化十分惊人，如表 1.3-1 所示。

表 1.3-1 自动化仪表技术的发展

年 代	工业发展状况	仪 表 技 术
20 世纪 50 年代	化工 钢铁 纺织 造纸 电子管时代 规模较小	• 仪表信号传输标准 ($0.2 \sim 1.0 \text{kgf/cm}^2$)^①($3 \sim 15 \text{psi}$)^②气动信号 • 采用真空电子管 • 记录仪表为自动平衡型 • 气动仪表控制器
20 世纪 60 年代	• 半导体技术(分立元件) • 石油化工 • 计算机 • 大型电站 • 过程工业大型化	• 电动仪表开始应用, (DDZ-Ⅱ型)信号标准 $0 \sim 10 \text{mA}$ 直流电流信号 • 仪表控制室 • 模拟流程图 • DDC
20 世纪 70 年代	• 集成电路技术 • 微处理器 • 能源危机 • 工业现代化 • 微机广泛应用	• 电动仪表 (DDZ-Ⅲ型) 信号标准 $4 \sim 20 \text{mA}$ 直流电流信号 • CAD • 自动机械工具 • 机器人 • DCS, PLC
20 世纪 80 年代	• 办公自动化 • 数字化技术 • 通讯、网络技术 • 对环境的重视	• 数字化仪表, 各种通信协议, 如 RS-232 • 智能化仪表, 微机化仪表 • 先进控制软件 • DCS 功能扩展
20 世纪 90 年代	• 智能控制 • 工业控制高要求	• 现场总线 • 分析仪器的在线应用 • 优化控制

① $1 \text{kgf/cm}^2 = 98.0665 \text{kPa}$;

② $1 \text{psi} = 6894.76 \text{Pa}$ 。

20 世纪 50 年代是电子真空管时代，工业生产过程规模比较小，所用的仪表与控制系统都比较简单且粗笨，多用气动仪表进行测量与控制，采用 $0.2 \sim 1.0 \text{kgf/cm}^2$ ($3 \sim 15 \text{psi}$) 气动信号作为统一标准信号，记录仪是电子管式的自动平衡记录仪。控制系统为就地式的简单控制装置。

到了 20 世纪 60 年代，随着工业规模的不断扩大，特别是石油化工工业的迅速发展，工业生产过程要求集中操作与控制。在这期间，半导体技术有了迅速的发展，自动化仪表开始用电动仪表，电子管由晶体管代替，开发出以半导体分立元件制造成的电动Ⅱ型仪表，统一信号标准为 $0 \sim 10 \text{mA}$ 。采用中央仪表控制室对工业生产过程进行操作、监视与控制，同时，计算机开始在工业生产过程中应用，实现直接数字控制 (DDC——Directly Digital Control)。

进入 20 世纪 70 年代，由于集成电路和微处理器的工业化生产，使电动仪表更可靠，很快开发出电动Ⅲ型仪表，统一标准信号为 $4 \sim 20 \text{mA}$ 。期间，以微处理器为核心的集散型控制系统 (DCS——Distributed Control System) 的出现，代替了原有集中式 DDC 系统，在工业生产过程中开创了计算机控制的新时代。与此同时，可编程控制器 (PLC) 亦在机械、间歇生产过程中得到广泛应用。

20 世纪 80 年代是 DCS 广泛在工业生产过程控制中应用的时期。同时，自动化仪表数字化、智能化不断创新，网络、通信技术引入到自动控制系统中，友好的人机界面，以及工业电视等成为工业自动化的重要手段之一。

到了 20 世纪 90 年代，随着市场对产品要求多样化、高品质，而工业生产本身要求低能耗、低成本，迫切要求自动化仪表高精度、高可靠，从而在线分析仪表大量在工业生产过程中采用，同时，开发出比 DCS 价更廉的现场总线控制系统和智能化仪表，为优化控制提供

更好的自动化仪表工具。

1.3.2 计算机在工业生产控制中应用

计算机在工业生产过程中的应用发展过程，如表 1.3-2 所示。在 20 世纪 60 年代，计算

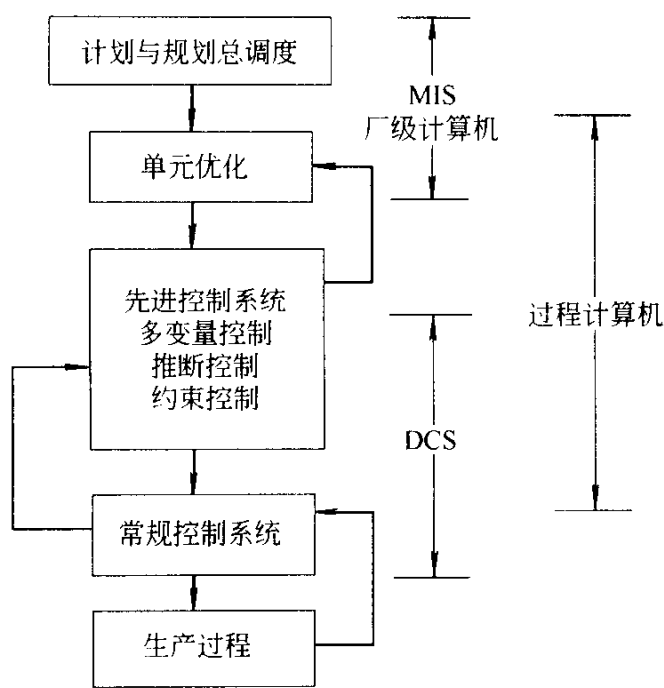


图 1.3-1 工厂计算机综合优化控制

机在工业生产过程中的应用，只是代替常规的 PID 控制器、显示、记录和报警仪表，实现所谓直接数字控制（DDC）。因为这种集中式的计算机控制系统，由于可靠性不够高，所以，模拟仪表控制系统仍旧大量采用。直到 20 世纪 70 年代，微处理器和微型计算机的出现，从而开发出基于微处理器的集散型计算机控制系统（DCS）。由于这种系统对测量和控制回路采用分散结构而信息又进行集中处理和管理，大大提高了计算机控制系统的可靠性，从而为计算机在工业生产过程中的应用开创了新局面。到了 20 世纪 80 年代，DCS 进入成熟期，一条生产线，乃至一个工厂可用一台大型的 DCS 来控制，真正实现计算机控制工业生产过程。同时，有更好

的人机接口、硬件和软件平台，为先进控制和优化控制奠定物质基础。自从进入 20 世纪 90 年代，人们称为是信息化和网络化时代，基于现场总线的计算机控制系统正在开发并逐步走向实用化。随着计算机在企业管理和控制中的应用，过程自动化（PA）、工厂自动化（FA）、计算机集成过程控制（CIPS）、计算机集成制造系统（CIMS）和企业资源总综合规划（ERP）等，正在成为提高工业生产过程经济效益的关键手段，从而形成如图 1.3-1 所示的工厂计算机综合优化控制系统。

表 1.3-2 计算机在工业生产过程中应用发展过程

年 代	计算机应用技术
20 世纪 60 年代	计算机控制时代开始 主要用于直接数字控制（DDC）
20 世纪 70 年代	微型计算机的产生 微处理机技术用于工业控制 集散型计算机控制系统产生（DCS） 小型机开始在企业管理中应用
20 世纪 80 年代	微机广泛在工厂管理信息系统中应用（MIS） DCS 大量在工业控制中应用 先进控制技术在工业上应用
20 世纪 90 年代	工业生产过程自动化（PA），工厂自动化（FA） 计算机集成制造技术（CIMS，CIPS） 企业资源规划（ERP） 现场总线控制技术发展（Fild Bus）

1.4 工业生产过程自动化

为了使一个工业生产过程或一个企业良好、高效地运行，都离不开对整个生产过程物料、能源、人力等的管理、组织和运作。要达到此目的，必须对工业生产过程的信息、数据进行及时的检测和控制。因此，生产计划、生产调度、安全稳定地生产与操作等，都离

不开自动化技术。一个企业生产过程管理与控制的递阶（分层）结构如图 1.4-1 所示。其中生产过程层是由有关的生产过程工艺设备如容器、泵、机器、管道等组成。不同的产品由不同的生产设备来生产，一般工业生产过程的设备是不变的，但是，由于腐蚀、老化等原因，这些设备需进行定期检修或更换。常规控制层是由生产过程工艺参数的测量变送仪表、仪器、自动执行机构如控制阀、电磁阀、电动执行器，以及显示、记录、控制器（有时称调节器）等组成。该层是用于自动监视和代替人工自动控制工业生产过程最基本的自动化设备。先进控制层是由计算机（或 DCS）和有关软件及控制算法等组成，该层的功能是实现常规控制层无法做到的多变量控制。

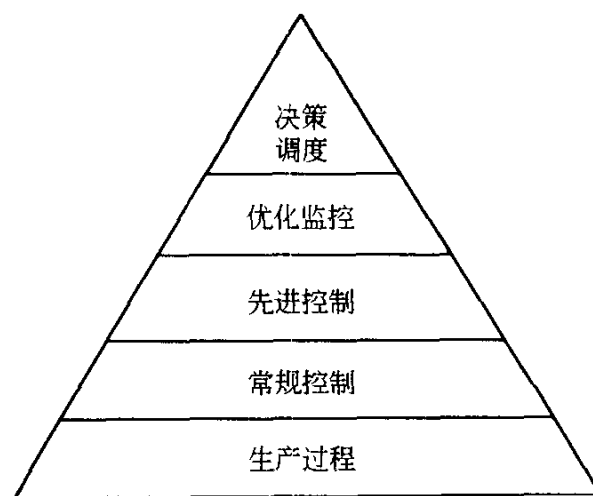


图 1.4-1 企业生产过程管理与控制的递阶结构

优化层是由计算机和有关优化软件及优化算法等组成，它的功能是为先进控制层提供优化给定值、优化控制轨迹或生产方案。决策调度层也是属于企业信息管理系统与实时生产过程控制密切相关的离线优化系统，这一层的作用是为优化层提供各种优化目标或约束条件。这五个层次所实现的功能虽然不同，但是，它们都共享实时生产过程的信息，也就是说由常规控制层所提供的生产过程信息，把这五个层次紧密地联系在一起。下面对各个层次进行较详细的介绍。

1.4.1 常规控制

所谓常规控制是指采用经典的 PID（比例 + 积分 + 微分）控制算法或其他简单的控制算法，如双位控制、比例控制以及比较复杂的前馈控制、串级控制、比值控制等，使工业生产过程的被控变量，如温度、液面、压力、流量等，在遭受到外来扰动情况下，稳定地维持在预先的给定值上。这种控制系统最典型的是单回路（单个参数的控制）负反馈控制系统（或叫反馈控制回路），如图 1.4-2 所示。如果外来的扰动是可以测量的，则可组成如图 1.4-3 所示的单回路的反馈加前馈控制系统，这种系统只要前馈补偿器设计合理，前馈补偿作用完全可以抵消扰动对生产过程被控变量的影响。

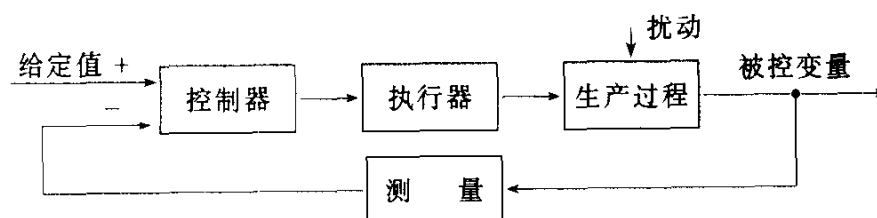


图 1.4-2 典型的负反馈控制系统

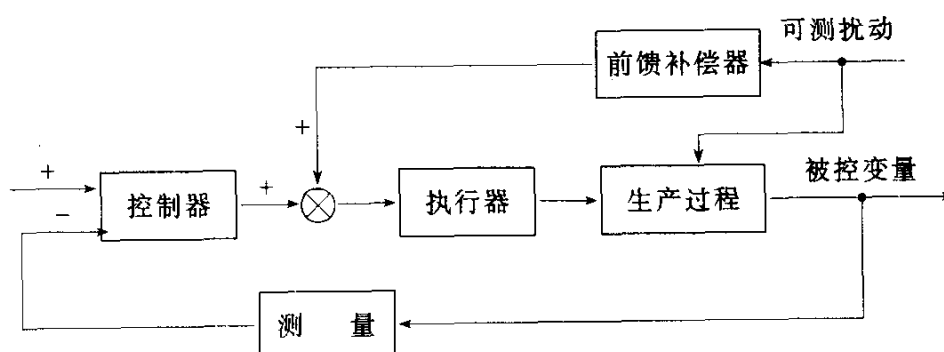


图 1.4-3 典型的反馈加前馈控制系统

工业生产过程稳定控制是工业生产过程控制的基础，这也是本书第 1 篇工业过程控制基础着重要讨论的内容。一个工业生产过程只有常规控制层设计合理，运行正常，才能进行优化操作与控制。这种单回路反馈控制系统再加上前馈、串级等控制系统，一般都能满足工业生产过程稳定控制的要求，因此，工业上 80% 以上的控制回路都采用这种简单的 PID 控制系统。

1.4.2 先进控制

虽然传统的 PID 控制系统对于一般的工业生产过程都能满足控制要求，再加上这种控制方式比较简单，也容易操作，所以受到工业界的欢迎。但是，随着工业生产过程规模的扩大和复杂性的增加，对产品质量和过程被控变量的波动范围要求越来越严格，特别是对于那些与工业企业经济效益密切相关的工业生产过程，简单的 PID 控制系统已远远不能适应了。具体表现在单回路 PID 控制系统对于复杂的工业生产过程，其被控变量波动较大，难以实现卡边控制。另一方面，对于多变量的工业生产过程，这种简单的控制方法不能实现多变量控制。

自 20 世纪 60 年代发展起来的现代控制理论，在航空航天领域，取得了较好的应用以后，人们一直寻求各种现代控制算法，企图能在复杂的工业生产过程控制中应用。经过 30 多年的努力，首先是基于模型的预测控制方法，于 20 世纪 80 年代在复杂的工业生产过程中取得成功应用以后，从而形成了先进控制在工业生产过程中应用的新时代。

什么是先进控制（Advanced Process Control——APC）？

先进控制是对那些不同于常规单回路 PID 控制，并具有比常规 PID 控制更好控制效果的控制策略的统称，而非专指某种计算机控制算法。由于先进控制的内涵丰富，同时带有较好的时代特征，即用来处理那些采用常规控制效果不好，甚至无法控制的复杂工业过程控制的问题。先进控制应用得当可带来显著的经济效益。以石油化工行业为例，一个先进控制项目的年经济效益在百万元以上，其投资回收期一般在 1 年以内。

先进控制与常规（PID）控制的关系如图 1.4-4 所示。这种结构形成是在原来常规控制方案基础上，加上先进控制策略，这不仅容易实现，而且也方便操作和维护，从而保证先进控制系统安全可靠地运行。

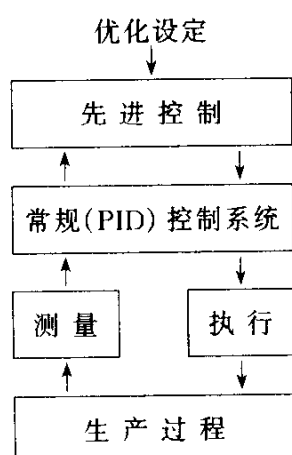


图 1.4-4 先进控制与常规（PID）控制关系

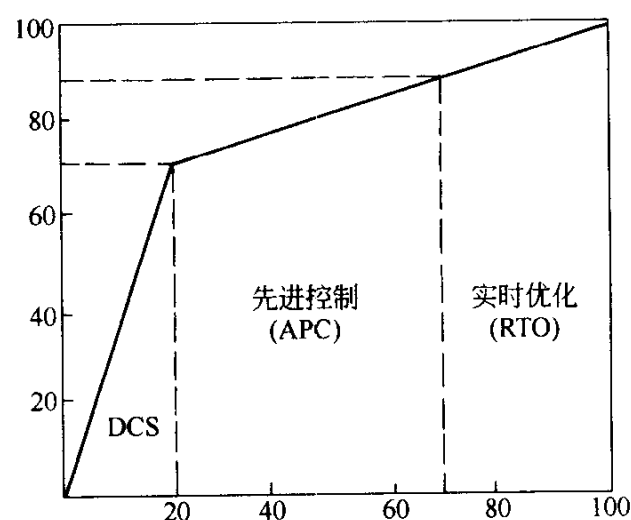


图 1.4-5 先进控制投资效益

先进控制在复杂的关键工业生产过程中应用，可获得很好的经济效益，其投资收益关系见图 1.4-5 所示。一般的工业生产过程，采用 DCS 控制，需花费 70% 的投资，其收益为