

先进控制技术的应用



王树青等编著

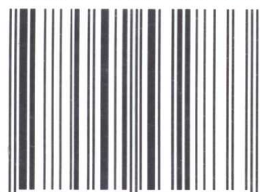


化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

- 石油化工自动控制设计手册 138.00
- 流量测量节流装置设计手册 58.00
- 仪表常用数据手册 38.00
- 仪表工手册 75.00
- 可编程序控制器原理及应用技巧 28.00
- 流量测量方法和仪表的选用 60.00
- 变送器使用与维护 25.00
- 生化过程自动化技术 30.00
- 间歇过程计算机控制系统 28.00
- 多变量统计过程控制 19.00
- 软测量技术及其在石油化工中的应用 18.00
- 软测量技术原理及应用 20.00
- 过程控制装置 38.00
- 调节阀使用与维修 25.00
- 集散控制系统原理及应用 28.00
- 工程测量技术手册 32.00
- 仿真技术 50.00

ISBN 7-5025-3283-8



9 787502 532833 >

ISBN 7-5025-3283-8/TP·285 定价：32.00元

先进控制技术的应用

王树青 等编著

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

先进控制技术的应用/王树青等编著. —北京: 化学工业出版社, 2001.7
ISBN 7-5025-3283-8

I. 先… II. 王… III. 自动控制-技术 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 032599 号

先进控制技术的应用

王树青 等编著

责任编辑: 刘 哲

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64918013
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 16 字数 392 千字

2001 年 7 月第 1 版 2001 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3283-8/TP·285

定 价: 32.00 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

先进过程控制 (Advanced Process Control —— APC) 技术, 也称“先控”技术, 或简称“APC”, 已逐步被工业生产过程控制界所熟悉, 并且正在迅速推广应用, 同时也受到自动控制理论界的严重关注, 并成为自动控制理论研究的热点。为了迅速推广先进控制技术, 改造传统的工业生产过程, 特编著此书, 供广大自动控制工程技术和自动控制领域的师生参考或作教材。

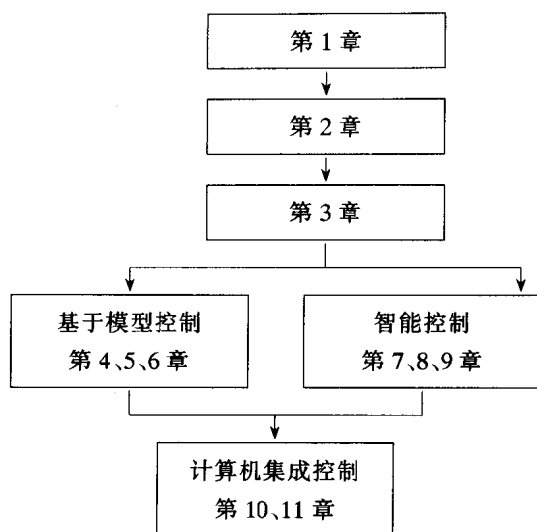
传统的 PID 控制在工业生产过程控制中起到很好的作用, 但是, 随着现代工业生产过程大型化、复杂化, 对生产过程的产品质量、产率、安全以及对环境影响的控制要求越来越严格, 许多复杂、多变量、时变的而且又是生产过程的关键系统的控制, 常规 PID 控制已不能胜任。从 60 年代起, 人们一直想把现代控制理论用于工业生产过程控制, 到了 80 年代基于模型的预测控制在工业生产过程中成功应用, 才打破了现代控制理论在工业生产过程不适用的僵局。本文将较全面介绍这些先进控制方法以及在工业生产中的应用。

全书共分 11 章, 第 1 章介绍工业过程先进控制技术概述, 其中包括工业过程控制发展历程、工业过程控制理论应用和工业生产过程先进控制技术。

因为先进控制技术是基于模型的控制方法, 因此, 在第 2 章简要讨论过程建模的一些常用方法和典型工业过程的建模例子以及经验建模的方法。先进控制系统是对一些关键的变量进行优化或卡边控制, 而这些关键变量又通常无法在线测量, 所以在第 3 章, 专门介绍软测量技术及应用, 其中包括软测量建模方法, 软测量器的工程化设计及实施, 软测量模型的自校正及维护, 软测量技术工业应用示例。在第 4、5、6 三章中, 分别介绍基于模型控制的三种类型与方法, 其中第 4 章讨论内模控制, 内容包括内模控制基本原理, 内模控制器的设计方法 (包括连续的和离散的过程), 简化模型预测控制, 以及内模控制工业应用例子。第 5 章讨论模型预测控制, 其中包括预测控制的基本算法, 即模型算法控制、动态矩阵控制和广义预测控制, 大时滞控制过程的预测控制及应用, 多变量协调预测控制及应用。第 6 章介绍预测函数控制, 其中包括预测函数控制基本原理, 典型工业过程的预测函数控制, 预测函数控制的稳定性和鲁棒性, 以及化学反应过程和工业精馏塔重沸炉的预测函数控制应用实例。

在第 7、8、9 三章, 分别介绍智能控制的方法, 其中第 7 章专门讨论模糊控制方法, 内容包括模糊控制的数学基础, 模糊控制的基本原理与设计, 模糊 PID 控制器以及模糊控制器的新进展和工业应用。第 8 章介绍神经控制, 其中包括基于模型的神经控制, 其他神经网络控制、神经非模型控制, 汽油调和过程的神经内模优化控制, 以及神经控制技术的应用及存在的问题。第 9 章讨论专家控制, 其中包括专家控制系统的概念和特征, 专家控制系统的分类, 专家控制系统的基本思想和结构, 专家控制系统在过程控制领域中的应用及专家控制实用化问题。第 10 章和第 11 章分别讨论计算机集成控制问题, 计算机综合集成控制是 90 年代随着计算机和网络技术在工业生产过程中不断应用而提出来的新的控制技术。其中第 10 章专门介绍计算机集成控制的关键技术——过程数据校正, 内容包括过程数据校正技术原理和过程数据校正技术的工程应用。第 11 章讨论计算机集成控制技术, 其中包括计算机

集成控制目的和意义，信息源和信息集成系统，流程工业的运作与信息结构，综合集成优化控制以及计划与调度优化。全书的结构如下图所示。



本著作是工业控制技术国家重点实验室众多同志紧密结合工业生产实际问题，开展先进控制技术理论和应用研究的成果总结，参加编写的作者有：

| | | |
|------|--------------|-----|
| 第1章 | 工业过程先进控制技术概述 | 王树青 |
| 第2章 | 过程模型的建立 | 王树青 |
| 第3章 | 软测量技术及应用 | 荣冈 |
| 第4章 | 内模控制 | 金晓明 |
| 第5章 | 模型预测控制 | 金晓明 |
| 第6章 | 预测函数控制 | 金晓明 |
| 第7章 | 模糊控制 | 金晓明 |
| 第8章 | 神经控制 | 王宁 |
| 第9章 | 专家控制 | 王宁 |
| 第10章 | 过程数据校正 | 荣冈 |
| 第11章 | 计算机集成控制技术 | 王树青 |

在本书编写过程中，黄海、王达、赵向海、刘峙飞、王寅、张泉灵、王秀萍等参与了编写、画图及提供有价值的资料，特别是来国妹女士利用许多假节日时间，以她娴熟的排版技巧与敬业精神，录入、排版并画好大量的插图，在此向他们表示衷心的感谢！

作者于杭州
2000年11月

内 容 提 要

目前先进控制技术 (APC) 正在迅速推广应用, 并受到自动控制理论界的关注, 成为自动控制理论研究的热点。本书首先介绍了过程建模方法和软测量技术; 然后介绍基于模型控制的三种方法, 即内模控制、模型预测控制和预测函数控制, 以及智能控制方法, 包括模糊控制、神经网络控制和专家控制; 最后介绍计算机集成控制。

作者在博览大量中外文献的基础上, 对先进控制技术进行了较全面的论述, 内容新颖, 大部分章节都给出了应用实例, 对工程技术人员很有启示。本书适合从事自动控制工作的科研人员、设计人员、工程技术人员学习、参考, 也可作为本科生或研究生的教学参考书。

目 录

| | |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 工业过程先进控制技术概述 | 1 |
| 1.1 工业过程控制技术发展历程 | 1 |
| 1.1.1 引言 | 1 |
| 1.1.2 自动控制理论与过程控制的发展过程 | 2 |
| 1.1.3 工业自动化技术工具的发展过程 | 3 |
| 1.2 工业过程控制理论及应用 | 5 |
| 1.2.1 工业过程控制理论 | 5 |
| 1.2.2 工业生产过程的特殊性 | 7 |
| 1.2.3 过程控制理论在工业生产过程中的应用 | 9 |
| 1.3 工业生产过程的先进控制 | 10 |
| 1.3.1 何为先进控制? | 10 |
| 1.3.2 先进控制的发展现状 | 11 |
| 1.3.3 先进控制的核心内容 | 13 |
| 1.3.4 先进控制工程化方法 | 14 |
| 1.3.5 先进控制的经济效益 | 15 |
| 1.3.6 先进控制面临的挑战 | 16 |
| 参考文献 | 16 |
| 第 2 章 过程模型的建立 | 17 |
| 2.1 模型重要性 | 17 |
| 2.2 过程建模一般原理 | 18 |
| 2.3 典型工业过程建模 | 21 |
| 2.3.1 液体贮存系统 | 22 |
| 2.3.2 一类热焓过程的模型化 | 23 |
| 2.3.3 连续带搅拌反应器建模(CSTR) | 25 |
| 2.3.4 三级吸收塔系统(级联过程) | 26 |
| 2.4 阶跃响应经验建模 | 27 |
| 2.4.1 线性迭代建模 | 27 |
| 2.4.2 非线性迭代建模 | 30 |
| 参考文献 | 32 |
| 第 3 章 软测量技术及其应用 | 33 |
| 3.1 引言 | 33 |
| 3.2 软测量建模方法 | 33 |
| 3.2.1 软测量模型的数学描述 | 33 |
| 3.2.2 软测量建模的主要数学基础 | 34 |
| 3.2.3 软测量建模的主要方法 | 37 |

| | |
|--------------------------|-----------|
| 3.3 软测量器的工程化设计及实施 | 38 |
| 3.3.1 辅助变量的初选 | 38 |
| 3.3.2 现场数据采集与处理 | 39 |
| 3.3.3 辅助变量精选——输入数据集降维 | 39 |
| 3.3.4 软测量模型的结构选择 | 40 |
| 3.3.5 模型参数的估计 | 41 |
| 3.3.6 软测量模型实施 | 41 |
| 3.4 软测量模型的自校正及维护 | 42 |
| 3.4.1 在线自校正 | 42 |
| 3.4.2 模型更新 | 42 |
| 3.5 软测量技术工业应用示例 | 42 |
| 3.5.1 催化裂化装置反应-再生部分软测量 | 42 |
| 3.5.2 催化裂化装置分馏塔部分软测量 | 44 |
| 3.5.3 航空煤油密度软测量 | 44 |
| 参考文献 | 47 |
| 第4章 内模控制 | 48 |
| 4.1 引言 | 48 |
| 4.2 内模控制基本原理 | 49 |
| 4.2.1 内模控制结构及其等价形式 | 49 |
| 4.2.2 内模控制的主要性质 | 49 |
| 4.2.3 内模控制的实现问题 | 51 |
| 4.3 内模控制器设计——连续过程 | 51 |
| 4.3.1 $\hat{G}_p(s)$ 的分解 | 52 |
| 4.3.2 滤波器设计 | 53 |
| 4.3.3 鲁棒性问题 | 53 |
| 4.3.4 设计示例 | 54 |
| 4.4 内模控制器设计——离散过程 | 58 |
| 4.4.1 开环稳定过程 | 58 |
| 4.4.2 开环不稳定过程 | 62 |
| 4.5 多输入多输出(MIMO)过程内模控制 | 64 |
| 4.5.1 基本概念 | 64 |
| 4.5.2 MIMO过程IMC设计 | 65 |
| 4.6 简化模型预测控制(SMPC) | 67 |
| 4.6.1 SMPC方法 | 67 |
| 4.6.2 SMPC的内模控制结构 | 68 |
| 4.6.3 改进的SMPC算法 | 71 |
| 4.6.4 多变量SMPC算法 | 72 |
| 4.7 内模控制的工业应用 | 74 |
| 4.7.1 基于内模控制的PID控制器参数整定 | 74 |
| 4.7.2 热交换器温度控制 | 78 |

| | |
|--------------------------------|------------|
| 参考文献 | 79 |
| 第5章 模型预测控制 | 81 |
| 5.1 引言 | 81 |
| 5.2 模型预测控制基本原理 | 82 |
| 5.3 预测控制基本算法 | 84 |
| 5.3.1 模型算法控制 | 84 |
| 5.3.2 动态矩阵控制 | 88 |
| 5.3.3 广义预测控制 | 91 |
| 5.4 大时滞过程的预测控制及其应用 | 95 |
| 5.4.1 时滞过程的控制问题 | 95 |
| 5.4.2 大时滞过程的预测控制 | 96 |
| 5.4.3 时滞过程预测控制的工业应用 | 97 |
| 5.5 多变量协调预测控制及应用 | 99 |
| 5.5.1 约束多变量预测控制问题 | 99 |
| 5.5.2 基于关联分析的多变量协调预测控制策略 | 101 |
| 5.5.3 仿真研究 | 102 |
| 5.5.4 工业应用 | 103 |
| 参考文献 | 108 |
| 第6章 预测函数控制 | 109 |
| 6.1 引言 | 109 |
| 6.2 预测函数控制基本原理 | 110 |
| 6.2.1 基函数的概念 | 110 |
| 6.2.2 预测模型 | 110 |
| 6.2.3 误差预测及补偿 | 111 |
| 6.2.4 优化计算 | 111 |
| 6.3 典型工业过程的预测函数控制 | 112 |
| 6.3.1 一阶过程 | 112 |
| 6.3.2 一阶加纯滞后过程 | 115 |
| 6.4 预测函数控制的稳定性与鲁棒性 | 117 |
| 6.4.1 双值预测函数控制的内模结构 | 118 |
| 6.4.2 模型匹配时的闭环稳定性 | 118 |
| 6.4.3 模型失配时的鲁棒性 | 119 |
| 6.5 化学反应过程的预测函数控制 | 120 |
| 6.5.1 工艺流程 | 120 |
| 6.5.2 透明控制结构及其实现 | 122 |
| 6.5.3 仿真研究 | 122 |
| 6.5.4 工业应用 | 123 |
| 6.6 工业精馏塔重沸炉的预测函数控制 | 126 |
| 6.6.1 工艺简介 | 126 |
| 6.6.2 重沸炉的预测函数控制 | 127 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 6.6.3 工业应用 | 128 |
| 参考文献 | 129 |
| 第7章 模糊控制 | 130 |
| 7.1 引言 | 130 |
| 7.2 模糊控制的数学基础 | 132 |
| 7.2.1 模糊集合及其运算 | 132 |
| 7.2.2 模糊关系 | 136 |
| 7.2.3 模糊逻辑与模糊推理 | 138 |
| 7.2.4 解模糊化 | 144 |
| 7.3 模糊控制的基本原理与设计 | 145 |
| 7.3.1 模糊控制器的基本结构 | 145 |
| 7.3.2 模糊控制器的设计 | 147 |
| 7.3.3 模糊控制器设计示例 | 153 |
| 7.4 模糊PID控制器 | 155 |
| 7.4.1 模糊PID控制器基础 | 155 |
| 7.4.2 模糊PID控制器的参数整定 | 157 |
| 7.5 模糊控制的新进展 | 159 |
| 7.5.1 自适应模糊控制 | 159 |
| 7.5.2 基于模糊模型的控制 | 161 |
| 7.6 模糊控制的工业应用 | 162 |
| 7.6.1 工业背景 | 162 |
| 7.6.2 模糊控制器的DCS实现 | 162 |
| 7.6.3 工业应用效果 | 164 |
| 参考文献 | 164 |
| 第8章 神经控制 | 166 |
| 8.1 引言 | 166 |
| 8.2 基于模型的神经控制 | 166 |
| 8.2.1 直接逆控制 | 166 |
| 8.2.2 前馈加反馈复合控制 | 167 |
| 8.2.3 神经内模控制 | 167 |
| 8.2.4 基于神经网络的预测控制 | 168 |
| 8.2.5 神经自适应控制 | 168 |
| 8.3 其他神经网络控制系统 | 169 |
| 8.3.1 基于神经网络的PID控制 | 169 |
| 8.3.2 模糊神经网络控制 | 169 |
| 8.3.3 神经鲁棒控制 | 169 |
| 8.3.4 用于控制系统的神经网络模型 | 170 |
| 8.4 一个例子——汽油调和过程的神经内模优化控制 | 170 |
| 8.4.1 汽油调和神经网络模型的建立 | 170 |
| 8.4.2 汽油管道调和过程的动态模型 | 171 |

| | | |
|-------------|--------------------------|------------|
| 8.4.3 | 调和过程的内模优化控制器 | 171 |
| 8.4.4 | 仿真结果 | 173 |
| 8.5 | 神经非模型控制 | 174 |
| 8.5.1 | 面向控制的神经元模型及学习策略 | 174 |
| 8.5.2 | 神经非模型控制的结构 | 175 |
| 8.5.3 | 一个例子——水轮发电机组的神经元控制 | 176 |
| 8.6 | 神经控制技术的应用及存在的问题 | 180 |
| 8.6.1 | 神经机器人控制系统 | 180 |
| 8.6.2 | 工业过程控制 | 180 |
| 8.6.3 | 神经网络用于求解控制领域中的相关问题 | 180 |
| 8.6.4 | 神经控制存在的问题 | 180 |
| 8.6.5 | 研究展望 | 181 |
| | 参考文献 | 182 |
| 第9章 | 专家控制 | 186 |
| 9.1 | 引言 | 186 |
| 9.2 | 专家控制系统的概念和特征 | 186 |
| 9.3 | 专家控制系统的分类 | 188 |
| 9.3.1 | 基于规则的专家整定和自适应控制器 | 188 |
| 9.3.2 | 专家监督控制系统 | 188 |
| 9.3.3 | 混合型专家控制系统 | 189 |
| 9.3.4 | 实时专家智能控制系统 | 189 |
| 9.3.5 | 仿人智能控制系统 | 190 |
| 9.4 | 专家控制系统的基本思想和结构 | 191 |
| 9.4.1 | 专家控制的基本思想 | 191 |
| 9.4.2 | 专家控制系统的组织结构 | 193 |
| 9.5 | 专家控制系统在过程控制领域中的应用 | 194 |
| 9.5.1 | 专家控制在工业控制中应用概况 | 194 |
| 9.5.2 | 专家控制的应用示例 | 195 |
| 9.6 | 专家控制实用化问题 | 198 |
| 9.6.1 | 实时知识库的构建和更新 | 198 |
| 9.6.2 | 实时推理技术的应用 | 198 |
| 9.6.3 | 智能化接口 | 199 |
| | 参考文献 | 199 |
| 第10章 | 过程数据校正技术 | 201 |
| 10.1 | 引言 | 201 |
| 10.2 | 过程数据校正技术原理 | 202 |
| 10.2.1 | 线性稳态数据协调原理 | 202 |
| 10.2.2 | 显著误差检测原理 | 203 |
| 10.2.3 | 系统冗余性分析原理 | 206 |
| 10.3 | 过程数据校正技术的工程应用 | 208 |

| | | |
|---------------|-----------------------|------------|
| 10.3.1 | 数据校正工程化软件的功能与实施 | 209 |
| 10.3.2 | 一个炼化公司的物流数据校正工业应用实例 | 212 |
| | 参考文献 | 217 |
| 第 11 章 | 计算机集成控制技术 | 219 |
| 11.1 | 计算机集成控制目的和意义 | 219 |
| 11.1.1 | 流程工业生产过程运作特点 | 219 |
| 11.1.2 | 计算机综合集成控制 | 220 |
| 11.2 | 信息源与信息集成系统 | 221 |
| 11.2.1 | 企业信息和数据来源 | 221 |
| 11.2.2 | 信息分类与编码 | 222 |
| 11.2.3 | 企业信息系统综合集成技术 | 224 |
| 11.2.4 | 企业信息系统综合集成例子 | 225 |
| 11.3 | 流程工业的运作与信息结构 | 226 |
| 11.3.1 | 企业运行概述 | 226 |
| 11.3.2 | 企业决策功能 | 227 |
| 11.3.3 | 期望目标(运行)实施 | 228 |
| 11.3.4 | 监督控制 | 228 |
| 11.3.5 | 数据驱动下的企业运行 | 229 |
| 11.4 | 综合集成优化控制 | 231 |
| 11.4.1 | 综合集成在线优化控制概述 | 231 |
| 11.4.2 | 最优操作工况 | 234 |
| 11.5 | 计划与调度优化 | 238 |
| 11.5.1 | 流程工业生产计划与调度的特点 | 238 |
| 11.5.2 | 基于 Petrofine 的计划与调度优化 | 239 |
| 11.5.3 | PIMS 在炼油企业中应用 | 242 |
| | 参考文献 | 244 |

第 1 章 工业过程先进控制技术概述

1.1 工业过程控制技术发展历程

1.1.1 引言

工业生产过程由简单到复杂，由小规模到大规模，直至今日，现代化、大型化的工业或多品种、精细的工业，生产出各种各样的产品以满足人们的生活需要。对这些工业生产过程的控制要求做到正确化、自动化、省力化和高效化。由于工业生产过程中的实际问题不断提出，促使理论研究不断地发展，同时理论研究的结果变成相应的自动化工具产品，用来解决生产实际问题。这样，实际问题、理论研究和自动化工具三者共同作用，推动着工业自动化技术的发展。其关系如图 1.1-1 所示。

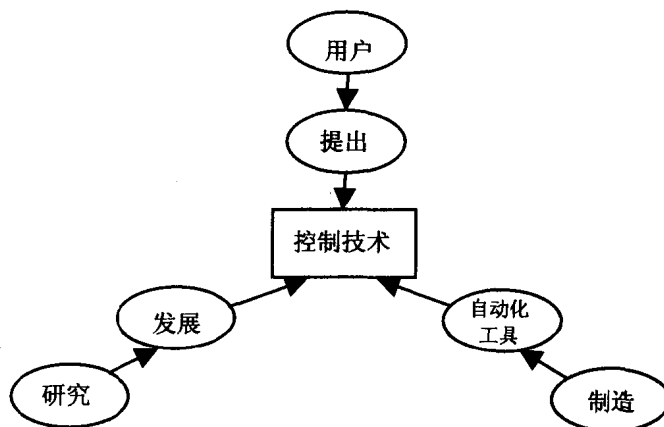


图 1.1-1 三股力量推动工业过程控制技术进步

在过去的 50 年里，随着工业生产工艺的复杂化，生产过程的强化和生产操作方式的改变，使得工业自动化技术有了迅速的变化。50 年代，工业生产过程操作与管理比较简单，所有测量仪表分散在各生产单元工艺设备上，操作工绕着生产现场查看仪表及作相应的操作。60 年代，随着化学工业的迅速发展，规模的扩大，生产的复杂性和对产品质量要求的严格，迫切要求单元生产过程集中管理与控制，当初是以气动仪表对生产过程进行测量与控制，因此需要大量的气动信号管线传送测量与控制信号。于是人们寻求用电的办法来解决这一问题，即开发电动类型的测量仪表与控制设备。到了 70 年代，随着电子技术的迅速发展，半导体产品取代了电子真空管，随后，集成电路取代了分立元件，电子仪表的可靠性、可使用性大大提高，从而逐步替代了气动仪表。在这期间，计算机在过程控制中的应用，引起了工业生产过程革命性的变化。进入 80 年代，电子仪表和以微处理器为基础的集散型控制系统（DCS）普遍在工业生产过程控制中应用，一座工厂只用一个中央控制室，用 CRT 来监

视、操作工厂的生产过程。进入 90 年代以后，测量仪表数字化、通信系统网络化、集散型 (DCS) 控制的成熟，工业生产过程控制进入微机化、数字化和网络化的时代，而工业生产过程的大型化、精细化，又要求进行生产过程优化控制。由于生产过程的复杂性、高要求，一般的常规控制方法无法满足工业过程优化生产的要求，因此，基于模型的先进控制算法和优化控制算法成为现代工业生产过程优化操作与控制的关键。

1.1.2 自动控制理论与过程控制的发展过程

自动控制理论是应用数学的一个分支，也就是说自动控制理论是属于数学学科的范畴。1922 年，Minorsky 分析了受控车箱的系统稳定性问题，即被控过程的基本要求——稳定性分析。30 年代，Nyquist 提出系统稳定频率特性响应分析方法的革命性思想，至今仍可用他的方法分析自动控制系统稳定性问题。随后，Black 详细介绍了他的频率特性图解技术。40 年代，著名的控制论专家 Wiener 提出了滤波和优化控制理论，这为自动控制理论开创了一个新时代。二次大战期间，因为战争需要，大大推动了自动控制技术的应用和发展，对此，James、Nichols 和 Philips 分别作出了重要的贡献和总结。40 年代末期，Shannon 奠定了信息论的基础。

50 年代，Ragazzomo 和 Zadeh 等人对采样数据系统进行了详细的研究，并提出了相应的理论，Bellman 介绍了他有名的动态规划方法，而 Pontryagin 等开发了动态优化控制的极大值原理。1956 年国际自动控制联合会 (IFAC) 成立，这标志着世界上在自动控制领域中的研究已取得巨大成就和进展。

60 年代随着空间技术的迅速发展，有力地推动自动控制理论的迅速发展，出现了现代控制理论。其中 Kalman 提出了具有一般原理的控制系统理论——卡尔曼滤波器，是现代控制理论的典型代表作。期间，Joseph 和 Tou 提出了分离原理；Rosenbrok 提出了优化控制理论频域分析方法；Zames 等人提出了新的稳定性理论，而 Kailth 提出了估计理论，并为这一领域的发展打下了坚实的基础。

进入 70 年代，Astrom 和他的合作者大量研究了系统辨识的基本理论和自适应控制系统，把现代控制理论的发展又向前推动了一步。Polak 和 Mayne 提出了带约束的优化方法，Bar Shalom 和 Tse 发展了早在 10 年前由 Feldbaum 定义的对偶控制，Mehra 和 Richalet 提出了更适用于过程控制的模型预测控制 (MPC) 算法。到 70 年代末期，Ljung 等人在系统辨识理论上作出了很大贡献，而 Doyle 和 Stein 等人借用 Laub 与其他人提供的计算机辅助设计工具，在鲁棒控制系统设计中做了许多研究工作。

80 年代，在具有约束的优化控制系统设计，新的 H_∞ 判据及对鲁棒性能的进一步研究，都有大量的文章。Isidori 对非线性控制理论作了近 20 年的研究。到了 90 年代，将神经元方法引入到自动控制领域，同时，在 60 年代后期由 Zadeh 提出的模糊控制理论也有进一步的发展。人工智能控制理论 (或称知识工程) 在控制领域中的应用，在这期间有了迅速的发展。

过程控制，作为自动控制理论在工业过程控制中的应用，与控制理论一样古老。从某种意义上说，过程控制是从工业生产实际出发而开创的自动控制方法与技术。历史上发明的流砂计时、计程车、自动提水车，以及瓦特蒸汽机的自动调速装置都是从实际中创造出来的过程控制方法与技术。至今仍在工业界广泛应用的 PID 控制、位式控制都是人们在生产实践中关于自动控制的长期经验积累。但是，对于过程控制来说，从数学理论上进行研究，最早

提出的是 1942 年 Ziegler 和 Nichol 关于 PID 控制回路的整定规则，这一规则至今还被过程控制工程界广泛应用。直到 Donald Campbell 在 MIT 开始架设起自动控制理论与过程控制应用之间的桥梁，才在过程控制中有较系统的理论，如 50 年代初期 A.J.Yong 和 Takahashi 在过程控制中全力推动应用自动控制理论，这些为过程控制的理论研究奠定了基础。但是，这与自动控制理论发展相比已滞后了 10 多年。

在 60 年代，T.J.Williams 和 Rademaker 等人对化工过程主要分离装置——精馏塔的控制，进行了许多很有贡献的研究。Kipiniak 在 MIT 研究了工业过程控制中的优化问题，而 Buckley 结合化工生产实际，写出了自动控制理论在工业过程控制中的应用评述论文。到了 60 年代中期，Aris 和 Amundson 等人研究了工业过程数学模型的建立方法。但是，现代控制理论应用于过程控制方面一直落后于航空航天领域中的应用。直到 70 年代，Weekman 等人虽然介绍过工业过程复杂控制问题，而且串级控制、前馈控制、选择性控制以及防积分饱和和控制等策略在过程控制中得到应用，但是现代控制理论仍很少在工业过程控制中应用，Foss 1973 年抱怨现代控制理论与工业过程控制的实际需求不相符。然而，在这期间，Seborg 等人积极推进现代控制理论在各种工业过程中的应用，Richalet 等人开发了模型预测控制算法，并极力在工业过程控制中推广应用，Gilles 提出了基于机理模型的控制方法及相应的计算机仿真，这些都为现代控制理论在工业过程控制中应用打下了坚实的基础。

到了 80 年代，Richalet 和 Cutler 等人同时推出了基于模型的预测控制方法（MPC）软件系统。Cutler 在壳牌石油公司管理层上安装了基于优化控制概念的多变量控制以及 Richalet 将他的专利出让给 Setpoint 公司开发出多变量控制器以后，现代控制理论在工业过程控制中的应用才打破沉闷的僵局，这一事件的重大意义在于工业界接受了现代控制理论和有关概念，由此在工业过程控制中开创了一个新的局面。在这期间，有许多人，如 Morari, Garcia 和 Biegler 等致力于开发能够实用的带有控制和状态变量约束的基于模型预测控制软件包和它的推广应用工作。从 1980 年到 1995 年期间，在工业过程控制领域中掀起了现代过程控制理论的研究高潮。但是，十分明显，即使在工业过程控制领域中现代控制理论得到大量的采用，工业过程控制仍旧落后于自动控制理论的发展约 10 多年。

从自动控制理论的发展看，在这 50 年中，由经典的方法发展成现代控制理论，由单变量演变到多变量控制系统的分析，由线性的确定的系统到非线性的时变的系统，这些研究成果为工业过程先进控制的发展创造了很好的条件，我们期盼着理论与实践之间的鸿沟将会越来越小。

1.1.3 工业自动化技术工具的发展过程

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，其基本测量原理虽然变化不大，但是信号转换、显示和控制装置的变化十分迅速。

50 多年来，自动化仪表从气动到电动，从现场控制到中央控制室，从仪表屏操作到计算机操作站（CRT），从模拟信号到数字信号，等等，其变化是惊人的，如表 1.1-1 所示。

50 年代是电子真空管时代，工业生产过程规模较小，所用的仪表与控制系统都比较简单且粗笨，多用气动仪表，采用 20~100kPa (0.2~1.0 kg/cm² 或 3~15 psi) 信号标准，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 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,以及半导体技术的开发,工业生产过程要求集中操作与控制。自动仪表开始使用电动仪表,电子管由晶体管所代替,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 0~10mA。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)。

进入 70 年代,由于半导体技术的迅速发展,集成电路和微处理器的工业化生产,使得电动仪表更可靠,自动化仪表很快开发出电动 III 型仪表,统一标准信号为 4~20mA。由于我国集成电路技术发展缓慢等原因,没有及时跟上国际上自动化仪表的发展趋势,一直延用电动 II 型仪表,从而使我国的电动 III 型仪表基本上被国际市场所占领。期间,以微处理器为核心的分散控制系统 (DCS) 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。

表 1.1-1 仪表技术的发展

| 年 代 | 工业发展状况 | 仪 表 技 术 |
|------|--|---|
| 1950 | 化工 钢铁 纺织 造纸 规模较小 电子管时代 | <ul style="list-style-type: none"> ·仪表信号传输标准 20~100kPa (0.2~1.0kg/cm²) ·采用真空电子管 ·记录仪表为自动平衡型 ·气动仪表 |
| 1960 | <ul style="list-style-type: none"> ·半导体技术 ·石油化工 ·计算机 ·大型电站 ·过程工业大型化 | <ul style="list-style-type: none"> ·电动仪表开始应用, 信号标准 0~10mA ·仪表控制室 ·模拟流程图 ·DDC |
| 1970 | <ul style="list-style-type: none"> ·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 | <ul style="list-style-type: none"> ·电动仪表信号标准 4~20mA ·CAD ·自动机械工具 ·机器人 ·DCS ·PLC |
| 1980 | <ul style="list-style-type: none"> ·办公自动化 ·数字化技术 ·通讯、网络技术 ·对环境的重视 | <ul style="list-style-type: none"> ·数字化仪表 ·智能化仪表 ·先进控制软件 |
| 1990 | <ul style="list-style-type: none"> ·智能控制 ·工业控制高要求 | <ul style="list-style-type: none"> ·现场总线 ·分析仪器的在线应用 ·优化控制 |

80 年代是 DCS 广泛在工业生产控制中应用的年代。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、工业电视等成为工业自动化的重要手段之一。

到了 90 年代,随着市场对产品要求的多样化、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,从而在线成分分析仪表大量在工业生产过程