

〔美〕 G·史蒂芬拿不勒斯

化工过程  
控制

—理论与工程—

HUAGONG GUOCHENG KONGZHI

— lilun yi gongcheng —

化学工业出版社

1007  
174  
6.2

# 化工过程控制

—理论与工程—

[美]G·史蒂芬拿不勒斯

吴惕华 译

化学工业出版社

## 内 容 简 介

本书是美国麻省理工学院的教科书，它全面系统地介绍了近代化工过程控制的理论与实践问题。其中包括：过程模型化及动态特性（第4—12章），简单反馈控制系统（第13—18章），前馈、串级、比值、选择性、分程等各种复杂控制系统以及纯滞后补偿、推断、适应性等高级控制系统（第19—22章），工艺设备和整个生产过程的多变量控制系统（第23—25章），计算机控制系统（第26—31章）等。全书从工艺过程特点出发，理论联系实际地研究其控制问题。本书图文并茂，内容丰富新颖。深入浅出，通俗易懂，备有生产实例150余个和大量思考问题、习题及参考书目，既适用于大专院校过程控制专业师生教学或自学，又可供有关工程技术人员学习和参考。学习本书有助于控制专业人员将理论应用于工程实际，也有助于化工、炼油等工程人员掌握控制的基本理论与技术。

George Stephanopoulos

Chemical Process Control

An Introduction to Theory and Practice

PRENTICE-HALL, INC. Englewood Cliffs, 1984

化 工 过 程 控 制

—理论与工程—

吴锡华 译

责任编辑：刘哲 陈逢阳

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850×1168<sup>1/32</sup>印张21<sup>1/8</sup>字数599千字

1988年11月第1版 1988年11月北京第1次印刷

印 数 1-2.670

ISBN7-5025-0156-8/TQ·118

定 价8.00元

## 中文版前言

在过去的三十年里，过程控制作为化学工程本科大学生教育的一门课程，经历了漫长而曲折的道路。伯德、奈魁斯特、齐格勒和尼科尔斯的开拓性著作为化工工程师铺设了阶梯，可惜，这项工作未能充满活力地、富于创造性地继续下去，主导作用转移到系统理论家和应用数学家等身上，他们在六十年代所作的大量重要的理论贡献成为化工工程师一直沿用的理论依据。

大学过程控制课程的历史有着谨慎的开端和类似的命运。课程仿照了应用数学的特点来构思，仅局限于用来丰富有创造性的工程师们的想象力。长期以来，过程控制课程处于教育计划课程的边缘，而不是处于诱人的工程训练科目的核心。然而，来自于化学工业生产现实的压力产生了两方面不同的而又相互关联的影响：(a) 为了尽量提高工作效率，化工厂有了更高程度的自动化，这就需要大量的精通于过程控制理论与技术的工程师。(b) 工业上的需要丰富了新一代的研究者和教育者的想象力。从而，过程控制成为一门主要的教育科目，而有关过程控制的研究在不失去其活力或严格性的前提下更为符合实际。

将本书翻译成中文，这在我的一生中是一个快乐而幸运的时刻。它是过程控制正在苏醒的又一体现。倘若它能激起本书读者去编写有关过程控制的新书，就实现了本书预期的目标——对更进一步工作的诱导和挑战。

我对吴惕华教授表示最深切的感谢。他长期坚持不懈的努力使我得以与中国人民建立起联系，这是一个有着独特的文化传统和美好前景的民族。

G·史蒂芬·不勒斯

麻省理工学院

1987.9.25

40597

## 译 者 的 话

这是一本美国最新出版的全面介绍、分析和研究化工过程的动态特性及其控制理论与实践问题的教科书。作者G·史蒂芬拿不勒斯为麻省理工学院(MIT)的化学工程特级教授,负有盛名。本书自问世以来,深受美国高校师生欢迎,在工程技术人员中也广为流行。

本书内容有以下三个鲜明特点:

1. 作者宣称,化工过程控制与化学工程科学有着极其密切的关系,不能作为纯粹的理论问题来研究,而应当作为复杂的工程实际问题来处理。本书继承了美国教材的上述传统观念,进一步把控制理论与工程有机地结合起来;通过引入大量的工程实例,运用基本控制理论,分析和设计控制系统;不仅分析各种可行的控制方案,而且强调方案的综合及选优;不仅介绍如何设计,而且讨论实施中的问题及评估;不但讲单个工艺设备的控制问题,而且阐述整个生产控制系统的综合与设计。

2. 作者强调为了设计简单、可行而有效的控制系统,要深入理解化工过程本身特点的重要性。有关过程模型化及动态特性分析部分占全书篇幅的 $\frac{1}{4}$ 。模型化的讨论更为复杂和符合实际,而删去了过时的电子模拟内容。同时,在有关控制系统的后续章节中,也是从过程本身特性和要求出发来研究控制问题的。

3. 反映了化工生产过程日趋综合复杂化及计算机技术成熟化所引起的过程控制技术的重大变化。传统的根轨迹和频率特性分析内容有所削减。简单反馈控制系统、复杂和高级控制系统以及计算机控制系统各占全书篇幅的 $\frac{1}{4}$ ,反映了过程控制的当代技术水平

和发展趋势。

本书共七篇31章，内容依次衔接，层次分明，系统性强。插图300余幅和化工生产实例150多个也很有参考价值。书中用了大量的“注释”来强调、提示和补充正文有关内容，以及将参考书目分类，给出内容提要，以便读者快速检索，这更是本书编写技巧的独到之处。

译者在美国进修期间获本书赠阅本后，经仔细阅读，深信这是一本难得的好书，决心尽快译成中文，介绍给我国广大读者。但由于本人水平有限，深有力不从心之感。译文中定有不妥甚至错误之处，敬请读者批评指正。

本书由黄正慧同志审阅，他还对全部译稿作了仔细的校订，提出了许多修改意见。疏松桂研究员、涂序彦教授给予了译者宝贵的指导和帮助。翻译过程中李华、王秉姿同志自始至终全力支持并誉抄了大量手稿。韩建勋、沈承林教授对中译本的出版极为关心。作者G·史蒂芬拿不勒斯教授也来信表示支持和合作。在此，译者仅向他们表示最衷心的感谢。

**译者 吴惕华**

**1986.12**

## 单位符号

符号	单位及其换算
Btu	英热单位 (1Btu=1055.06J)
°F	华氏度 ( $1^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9}\text{K}$ )
deg	度 (1deg=1K)
atm	大气压 (1atm=101325Pa)
psia	每平方英寸磅绝对压力 (1psia=6894.76Pa)
psig	每平方英寸磅表压 (1psig=6894.76Pa)
lb	磅 (1lb=0.45359237kg)
cycle	周
ft	英尺 (1ft=0.3048m)
in	英寸 (1in=0.0254m)
m	米
sec	秒 (1sec=1s)
hr	小时 (1hr=3600s)
min	分 (1min=60s)
μsec	微秒 (1μsec=10 <sup>-6</sup> s)
nsec	纳秒 (1nsec=10 <sup>-9</sup> s)
mole	摩尔 (1mole=1mol)
rad	弧度
V	伏特

## 序 言

正如书名所示，这是一本介绍化工过程控制理论和实践的教科书。为满足基本化学工程教育的需要，本书可用来作为一门（1）有关过程动态学与控制的大学初级课程，和（2）过程控制的大学高级课程或研究生课程的初步。

过去十年间，化工过程控制的学术研究和工业应用的发展具有下述重要特点：

1. 能量和原材料管理的改善，使得化工过程的结构日益复杂。因此，工程上现在主要关心的是整个生产过程的控制系统设计，而不是单个工艺设备的控制器设计。此外，控制系统的设计已变得与过程本身的设计密切相关。

2. 一个控制系统的设计，包含了辨识控制对象、选择合适的测量和控制方法、确定联系这些部分的回路和判明正确的控制规律。也就是说，比传统的控制器参数整定涉及的问题多得多。

3. 数字计算机的出现和迅速发展，引起了化工过程控制技术的重大变化，并使近代的控制原理能应用于工业。

普遍认为，目前化工过程控制方面的教育还不适应于上述的最新发展。本教材试图把过程控制的古典方法与当今及未来的发展趋势和需要联系起来。这本书基本上是教学用工具书，而不是用来解决具体工业生产问题的指导书，重点在于对过程控制问题的本质和特点的理解以及解决这些问题的方法的系统化。无需多说，对许多设计手段和方法本书也作了概略的强调。学完这本书以后，我们希望能明确以下几点：

1. 化工过程控制是一项复杂而困难的课题，它与化学工程科学和实践密切相关，并非其它工程学科蜕变的产物。

2. 控制系统的设计不是一个数学问题，应当把它当成一个有



着引人注目的前景和存在着不少实际问题的工程任务。

3. 为了设计简单而有效的控制系统，深刻理解化工过程的物理及化学现象是非常重要的。

4. 对于给定的工艺设备或整个生产过程，通常有若干可供选择的控制方案。要解决的核心问题是选择其中的最优方案。

5. 人们试图处理过程控制问题所需要去熟悉的分析手段和设计方法过多。

本书分为七篇，每篇包括若干章节。

第一篇（第1至3章）是化工过程控制的概述。阐明过程控制的含义、目的和要求，分析设计中的问题，系统提出要解决的问题，为学习后续章节的内容提供理论基础。

第二篇（第4至5章）向读者介绍过程控制中的模型化问题。说明如何从基本原理出发建立有效的模型，并且确定了建立用于过程控制的数学模型的范围和难点。

第三篇（第6至12章）是分析过程的静态和动态特性，重点对各类操作单元动态响应曲线的过程特性进行辨识。分析的结论用于设计有效的控制器。通过拉普拉斯变换，利用输入-输出模型。

第四篇（第13至18章）包括化工生产过程中最常见的控制方法，即反馈控制系统的分析和设计，重点放在理解各种反馈控制器对被控过程响应特性的影响，以及选择最合适的控制器。控制器参数整定不作为重点，因而惯用的根轨迹法和频率响应参数整定方法作了相应削减。

第五篇（第19至22章）是有关描述、分析和设计具有单输出量的复杂控制系统。第19章介绍处理大纯滞后或反向响应系统的Smith预估器反馈补偿的概念。第20章描述和分析化工过程中常见的具有单输出量的各种多回路控制系统，诸如串级控制、选择性控制和分程控制。第21章专门分析和设计前馈及比值控制系统。第22章对适应性控制和推断控制作了扼要介绍，即为什么要采用及如何实现这类控制。

第六篇（第23至25章）专门研究多变量控制问题，重点是系统

地获得各种可供选择的控制方案，然后寻求最佳方案。这并不是说本篇概括了多变量控制所有方面的问题，而仅仅提出了选择最小关联回路的一种设计方法（相对增益矩阵），同时还设计了低阶系统的简单非关联控制回路。第23、25章介绍整个化工生产过程控制的设计问题，并且概述对于此类复杂系统的控制方案进行综合的步骤。

第七篇（第26至31章）介绍数字计算机过程控制。首先（在第26章），按照新的硬件和新的控制设计问题对数字计算机控制回路的特性作出分析。第27至29章提供了对开环和闭环离散时间动态系统的响应进行分析的方法。第30章概述设计数字反馈控制器的最通用的步骤。第31章讨论化工过程的计算机辅助在线辨识以及它在适应性控制系统中的应用。

本书是作者在明尼苏达大学（University of Minnesota）和雅典国立技术大学（National Technical University of Athens）从事过程控制教学七年的结晶。内容是以这样的方式设计的：既对过程控制作出简明而通俗易懂的阐述，又为有兴趣的读者提供了许多资料、问题和深入研究的方向。

每章包括讲一次课的适量内容，很少例外。为了保持基本课文的连续和通畅，用了两种编写技巧。第一种，专门的说明常以“注释”为标题，放在有关内容的末尾。第二种，有用但并非必需的补充资料放在有关章末尾的附录中。课文中穿插了许多例子来解释某些概念或示范各种技术的用法，并非所有例子都要在一节课里讲，某些可留下来个别研究。

为了使本书更有益于教学，每章末有许多思考问题，并在每篇末有大量作业。有的思考题答案可在其它一些书刊、论文或手册中找到，它们列在每篇末尾的文献目录中。

我很感谢那些以各种不同方式，自始至终对我帮助和鼓励的人们。首先，我要感谢“头”，Neal R. Amundson，他多次直接和间接地支持我写此书的想法和增强我的决心。Rutherford Aris, Arnie Fredrickson和Skip Scriven可能还没有意识到他们的慷慨、指导和友谊对于本书的完成有多么大的影响。感谢J. Wei对我进

行这一工作的鼓励，以及 M. M. Denn 在本书处于萌芽时对我的友善和帮助。J. M. Douglas 的建设性评论对我非常有用，他慷慨地允诺摘用他的有关整个生产过程控制系统设计的著作，这是令人感谢不尽的。

A. W. Westerberg和K. Jensen阅读了手稿并用于课堂教学，他们认真而有价值的评论和建议对本书的改进有极大帮助。T. Umeda, I. Hashimoto, M. Morari, Y. Arkun, J. Romagnoli, S. Svoronos, M. Nikolaou和 K. Christodoulou 给予了许多中肯的批评、建议和指正。我谨向他们表示衷心的感谢。

难以用任何言词来表达我对明尼苏达大学所有同事们的感谢。他们创造了那种激励学术完臻的气氛，这是任何长期不懈工作所必需的基本条件。

Shirley Tabis 打印了原稿，她的认真、艺术家般的风格、熟练和献身精神，在我看来是无与伦比的。

我尤其感谢我的夫人Eleni，她一直参与了本书的工作，在照顾我们大儿子的同时，还非常认真地誊写我的草稿（经常不止一次），画了大量的插图，多次校对和编纂手稿。对她的感激之情我难以形容。

最后，我永远感谢我的双亲和兄弟们对我的热爱和支持，以及他们的献身精神。

**(George stephanopoulos)**

# 目 录

## 序 言

### 第一篇 化工过程控制：特点及有关问题

<b>第1章 化工过程控制的目的</b> .....	1
1.1 抑制外部扰动的影响 .....	3
1.2 确保过程的稳定性 .....	6
1.3 使化工过程的工况最优化 .....	8
<b>第2章 过程控制系统的设计概论</b> .....	11
2.1 化工过程变量的分类 .....	11
2.2 控制系统的设计要点 .....	12
2.3 整个化工生产过程控制的概述 .....	22
<b>第3章 过程控制系统的硬件</b> .....	25
3.1 控制系统的基本硬件 .....	25
3.2 数字计算机在过程控制中的应用 .....	27
第一篇重点 .....	29
第一篇思考问题 .....	29
第一篇参考文献 .....	31
第一篇习题 .....	32

### 第二篇 化工过程动态及静态特性的模型化

<b>第4章 数学模型的建立</b> .....	39
4.1 过程控制为何需要建立数学模型 .....	39
4.2 化工过程的状态变量和状态方程 .....	41
4.3 数学模型的辅助基本方程 .....	47
4.4 纯滞后 .....	50
4.5 建立数学模型的补充示例 .....	51
4.6 模型化的难点 .....	65

思考问题 .....	68
<b>第5章 建立用于控制的模型应考虑的问题 .....</b>	<b>71</b>
5.1 输入-输出模型 .....	71
5.2 自由度 .....	76
5.3 自由度与过程控制器 .....	79
5.4 归纳建立过程控制用模型所涉及的问题 .....	83
思考问题 .....	86
<b>第二篇参考文献 .....</b>	<b>87</b>
<b>第二篇习题 .....</b>	<b>89</b>

### 第三篇 化工过程的动态特性分析

<b>第6章 计算机仿真和非线性系统的线性化 .....</b>	<b>100</b>
6.1 过程动态特性的计算机仿真 .....	100
6.2 单变量系统的线性化 .....	102
6.3 偏差变量 .....	106
6.4 多变量系统的线性化 .....	107
思考问题 .....	114
<b>第7章 拉普拉斯变换 .....</b>	<b>116</b>
7.1 拉氏变换的定义 .....	116
7.2 基本函数的拉氏变换 .....	117
7.3 导数的拉氏变换 .....	126
7.4 积分的拉氏变换 .....	127
7.5 终值定理 .....	128
7.6 初值定理 .....	129
思考问题 .....	130
<b>第8章 用拉氏变换解线性微分方程 .....</b>	<b>131</b>
8.1 示例及求解步骤 .....	131
8.2 拉氏反变换：海维赛展开式 .....	133
8.3 用拉氏变换解线性微分方程的例题 .....	140
思考问题 .....	146
<b>第9章 传递函数和输入-输出模型 .....</b>	<b>147</b>
9.1 单输出过程的传递函数 .....	147
9.2 多输出过程的传递矩阵 .....	151

9.3	传递函数的极点和零点	155
9.4	系统响应的定性分析	157
	思考问题	160
<b>第10章</b>	<b>一阶系统的动态特性</b>	<b>162</b>
10.1	什么是一阶系统	162
10.2	模型为一阶系统的过程	163
10.3	纯容量过程的动态响应	167
10.4	一阶滞后系统的动态响应	168
10.5	具有可变时间常数及增益的一阶系统	171
	思考问题	172
<b>第11章</b>	<b>二阶系统的动态特性</b>	<b>174</b>
11.1	什么是二阶系统	174
11.2	二阶系统的动态响应	175
11.3	作为二阶系统的多容过程	181
11.4	固有的二阶过程	189
11.5	控制器导致的二阶系统	189
	思考问题	192
	附录11 A 固有二阶动态特性的物理系统举例	193
<b>第12章</b>	<b>高阶系统的动态特性</b>	<b>200</b>
12.1	$N$ 个串联的容量	200
12.2	具有纯滞后的动态系统	202
12.3	具有反向响应的动态系统	204
	思考问题	207
	第三篇参考文献	207
	第三篇习题	210

## 第四篇 反馈控制系统的分析和设计

<b>第13章</b>	<b>反馈控制概述</b>	<b>226</b>
13.1	反馈控制的概念	226
13.2	反馈控制器的类型	229
13.3	测量装置 (感测元件)	233
13.4	传输管线	237
13.5	执行器	238

	思考问题 .....	241
<b>第14章</b>	<b>反馈控制过程的动态特性</b> .....	241
14.1	方块图和闭环响应 .....	241
14.2	比例控制对被控过程响应的影响 .....	249
14.3	积分控制作用的影响 .....	256
14.4	微分控制作用的影响 .....	259
14.5	组合控制作用的影响 .....	261
	思考问题 .....	262
<b>第15章</b>	<b>反馈系统的稳定性分析</b> .....	264
15.1	稳定性的概念 .....	264
15.2	特征方程式 .....	268
15.3	劳斯-赫尔维茨稳定判据 .....	270
15.4	根轨迹分析 .....	273
	思考问题 .....	278
<b>第16章</b>	<b>反馈控制器的设计</b> .....	280
16.1	设计问题的要点 .....	280
16.2	单一性能准则 .....	281
16.3	时间-积分性能准则 .....	284
16.4	反馈控制器的选型 .....	288
16.5	控制器参数整定 .....	292
	思考问题 .....	297
<b>第17章</b>	<b>线性过程的频率响应分析</b> .....	299
17.1	一阶系统对正弦输入的响应 .....	299
17.2	一般线性系统的频率响应特性 .....	302
17.3	伯德图 .....	307
17.4	奈魁斯特图 .....	319
	思考问题 .....	323
<b>第18章</b>	<b>用频率响应法设计反馈控制系统</b> .....	325
18.1	伯德稳定判据 .....	325
18.2	增益裕量和相位裕量 .....	329
18.3	齐格勒-尼柯尔斯参数整定法 .....	333
18.4	奈魁斯特稳定判据 .....	336
	思考问题 .....	339

第四篇参考文献 .....	340
第四篇习题 .....	343

## 第五篇 复杂控制系统的分析和设计

<b>第19章 大纯滞后或反向响应系统的反馈控制</b> .....	361
19.1 具有大纯滞后的过程 .....	362
19.2 纯滞后补偿 .....	364
19.3 反向响应系统的控制 .....	368
思考问题 .....	371
<b>第20章 多回路控制系统</b> .....	373
20.1 串级控制 .....	373
20.2 选择性控制系统 .....	380
20.3 分程控制 .....	384
思考问题 .....	387
<b>第21章 前馈及比值控制</b> .....	388
21.1 前馈控制的概念 .....	388
21.2 前馈控制器的设计 .....	390
21.3 有关前馈控制器设计的实际考虑 .....	395
21.4 前馈-反馈控制 .....	399
21.5 比值控制 .....	403
思考问题 .....	405
<b>第22章 适应性及推断控制系统</b> .....	406
22.1 适应性控制 .....	406
22.2 推断控制 .....	412
思考问题 .....	416
第五篇参考文献 .....	417
第五篇习题 .....	420

## 第六篇 多变量过程控制系统的设计:

### 整个生产过程控制的介绍

<b>第23章 多输入-多输出过程控制方案的综合</b> .....	430
23.1 多输入-多输出控制系统的设计问题 .....	431



23.2	自由度与被控及控制变量的数目 .....	432
23.3	可供选择回路方案的制定 .....	435
23.4	在具有相互关联单元的系统中的推广 .....	438
	思考问题 .....	453
<b>第24章</b>	<b>控制回路的关联和解耦 .....</b>	<b>455</b>
24.1	控制回路的关联 .....	455
24.2	相对增益矩阵与回路的选择 .....	463
24.3	非关联控制回路的设计 .....	472
	思考问题 .....	476
<b>第25章</b>	<b>整个生产过程控制系统的设计 .....</b>	<b>479</b>
25.1	过程设计与过程控制 .....	479
25.2	甲苯加氢脱烷基制苯生产过程：示例分析 .....	484
25.3	加氢脱烷基生产过程的物料平衡控制 .....	487
25.4	加氢脱烷基生产过程的产品质量控制 .....	493
25.5	有关整个生产过程控制设计的若干说明 .....	497
	思考问题 .....	502
	第六篇参考文献 .....	504
	第六篇习题 .....	506

## 第七篇 数字计算机过程控制

<b>第26章</b>	<b>数字计算机控制回路 .....</b>	<b>516</b>
26.1	数字计算机 .....	517
26.2	计算机与过程之间的数据采集和控制接口 .....	522
26.3	计算机控制回路 .....	526
26.4	控制设计中的新问题 .....	531
	思考问题 .....	533
<b>第27章</b>	<b>连续时间与离散时间系统 .....</b>	<b>535</b>
27.1	连续信号的采样 .....	535
27.2	由离散时间值复现连续信号 .....	541
27.3	由连续模型变换为离散时间模型 .....	545
	思考问题 .....	551
<b>第28章</b>	<b><math>z</math> 变换 .....</b>	<b>553</b>
28.1	$z$ 变换的定义 .....	553