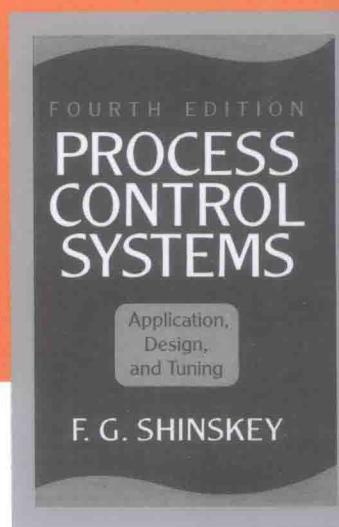


Mc
Graw
Hill
Education

Process Control Systems: Application, Design, and Tuning
Fourth Edition

过程控制系统：应用、设计与整定 (第4版)

[美] F. G. SHINSKEY 著
萧德云 吕伯明 译



清华大学出版社

Mc
Graw
Hill
Education

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

Process Control Systems: Application, Design, and Tuning
(Fourth Edition)

过程控制系统：应用、设计与整定
(第4版)

[美] F. G. SHINSKEY 著

萧德云 吕伯明 译

清华大学出版社
北京

F. G. Shinskey

Process Control Systems: Application, Design, and Tuning, Fourth Edition

ISBN 0-07-057101-5

Copyright © 1996 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Tsinghua University Press Limited.

This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2014 by McGraw-Hill Education and Tsinghua University Press Limited.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和清华大学出版社有限公司合作出版。此版本经授权仅限于中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)销售发行。

版权 © 2014 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与清华大学出版社有限公司所有。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2014-7919

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统:应用、设计与整定(第4版)=Process Control Systems: Application, Design, and Tuning: 英文/(美)欣斯基(Shinskey, F. G.)著;萧德云,吕伯明译.--北京:清华大学出版社,2014

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

ISBN 978-7-302-37124-3

I. ①过… II. ①欣… ②萧… ③吕… III. ①过程控制—自动控制系统—英文 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 146792 号

责任编辑:王一玲

封面设计:傅瑞学

责任校对:李建庄

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:21.75

字 数:540 千字

版 次:2014 年 12 月第 1 版

印 次:2014 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:59.00 元

产品编号:060542-01

中译本序言

本书作者 F. G. 欣斯基先生在 Foxboro 公司任职终身, 是美国著名的过程控制专家, 在非线性调节器和基于迟延补偿的自整定调节器方面做出了原创性的贡献。F. G. 欣斯基先生的著作《过程控制系统——应用、设计与整定》融会了他一生的知识财富。译者在 2004 年翻译该著作第 3 版时就为他那独特的分析问题思路和丰富的经验所折服, 十年之后又将该著作第 4 版翻译出版, 加上 1982 年清华大学方崇智教授翻译的第 2 版, 就将 F. G. 欣斯基先生对过程控制的分析方法和思想完整地推荐给了国内读者, 对了解 F. G. 欣斯基先生有关过程控制方面的学术思想很有益处。F. G. 欣斯基先生始终坚持采用时域法来分析过程控制问题, 思路别具一格, 特别注重应用, 绕过许多繁杂的理论, 尤其是利用迟延的特性和补偿的思想解决了过程控制中许多繁难的问题, 形成一种具有鲜明实用特色的风格, 令人瞩目。F. G. 欣斯基先生特别善于针对具体问题构建过程控制方案, 方案的独特性常常让人意想不到, 惊讶不已; 对调节器的整定那么富有经验, 游刃有余, 到了出神入化的境界, 其巧妙与规律让人目瞪口呆; 又特别能利用补偿思想, 犹如“女娲补天”, 其有效性让人不得不折服。

该著作是 F. G. 欣斯基先生在包括美国和加拿大在内的许多国家的大学、工业现场和专业学术会议演讲授课的基础上写成的。现在的第 4 版完全不同于前面 3 个版本, 内容大部分更新, 引进了新的成果和应用, 尤其是加进了两种高性能调节器 $PI\tau_d$ 和 $PID\tau_d$ 的内容。这两种调节器特别适合于以时滞为主的过程, 已成功地应用于许多非自平衡过程和稳态不稳定过程, 对负荷变化的响应性能是其他类型的调节器无法比拟的, 调节器的整定方法也已十分成熟。

本书 1967 年出版第 1 版以来, 指导过许多流程工业的控制系统设计和整定, 获得许多成功的应用, 但尚少用作高校本科教材。确实, 本书不适合当作本科教材, 因为作者在书中论述的每一点, 要理解它都必须先具备过程控制的基本知识, 否则会不知所云, 它面对的是已具备过程控制基本知识的读者。但是, 它又确实能帮助过程控制工程师把他们的理论知识与实际应用结合起来。当在过程控制方面遇到难处时, 本书是一剂很好的药方, 从中可直接获得所需要的东西或有益的启迪, 尤其是化学工程、炼油工程和能源工程的控制问题。对从事过程控制教学的老师也建议很好地阅读本书, 它会让你在教学过程中底气十足, 即使你没有亲身参加过实际的过程控制项目。如何将 F. G. 欣斯基先生关于过程控制的经验知识融合到过程控制教学中是一种挑战, 是培养创新性应用人才的一种很好的结合。F. G. 欣斯基先生的经验可以说是过程控制理论知识很好的诠释, 反过来过程控制理论知识又是 F. G. 欣斯基先生经验知识的深化。有心的话, F. G. 欣斯基先生书中论述的每个经验或规则都可以演化出深刻的理论分析。总的来说, 本书是一本难得的过程控制系统设计、整定方面的应用专著。

本书第 4 版的总体构架与第 3 版相同, 遵循的写作思想也与第 3 版一致, 但内容几乎全部更新。本书第 4 版已不再强调振荡、稳定性和相位移的分析, 更多地强调负荷变化后被调量偏差和误差积分的分析。整定方面不再刻意追求四分之一衰减振荡, 而是以对称性和超

调等特性为引导,追求生成不振荡的最佳响应曲线。本书第4版的亮点包括以下多方面:(1)以一阶时滞加迟延为过程模型,讨论控制性能的评估和整定方法;(2)对微分滤波、整定法则、回路鲁棒性和阀门的选择作了深刻的分析;(3)对常见控制回路(流量、压力、液位、温度 and 产品质量)作了更实用的剖析,突出回路的可控性;(4)对线性和非线性 PID 调节器的整定规则,更侧重于方法,不强调细节;(5)对串级控制、前馈控制和解耦控制特别强调控制策略、动态特性的作用和抗积分饱和以及开停车的控制问题;(6)对稳态不稳定过程及 pH 回路的控制性能和鲁棒性以及所用的 PID 和 PID_{τ_d} 调节器的整定法则进行了深入的分析;(7)精馏、蒸发、干燥等过程的控制方案组成和实际应用等。

在本书第4版中,作者还是没有采用传递函数、状态模型及频率分析等方面的知识,说明作者真正领悟了过程控制的内涵,从系统分析、控制方案的组成、调节器的选择、非线性补偿、PID 参数整定和调节阀的选型,乃至工艺过程的改进建议等方面将过程控制理论与实际被控对象紧密结合起来,作者坚信这才是解决过程控制问题的关键所在。

F. G. 欣斯基先生在本书第4版中提出了可能的最佳响应和实际的最佳响应及最佳调节器整定值的概念,这是一个不完备约束下的优化问题,目前过程控制领域对此还缺乏深入的研究,或许这是过程控制未来研究的方向之一。另外,目前国内过程控制教学面临着一个难堪的窘境,学生缺乏应有的工艺知识,如传热学和化工原理等知识,难以深入进行过程控制系统的分析,而独立设置这类课程,对自动化专业来说又不十分适宜。F. G. 欣斯基先生在书中自然地将过程控制知识与工艺知识结合在一起,不觉得有必要另外选修有关工艺知识的课程,这是否值得仿效,也是过程控制教学需要考虑的问题。

本书第4版由清华大学萧德云教授和山东大学吕伯明教授翻译,并得到清华大学方崇智教授生前给予的指导。吕伯明教授翻译了本书第4版的第1、2、3、8、11和12章,萧德云教授翻译了本书第4版的第4、5、6、7、9和10章以及习题解答与索引,并负责全书统稿,包括专业名词的统一,语言风格的一致及对原著作问题的注释。为了忠于原文,还慎重地修改了吕伯明教授的一些意译内容,包括割爱删去译者为了更清楚说明原文的意思而增加的一些解释。

本书第4版翻译过程中,清华大学杨帆博士和徐海鸥老师协助做了许多工作,在此表示衷心感谢。特别应该致谢的是责任编辑王一玲老师和 McGraw-Hill 出版公司的牛晓立女士,她们别具慧眼,坚持认为 F. G. 欣斯基先生的学术思想对中国读者格外有价值,因此始终鼓励和帮助译者完成本书的翻译工作。另外,因译者水平有限,译文的错误在所难免,欢迎读者批评指正。

译者 萧德云
于清华大学
2014 年初春

第 4 版前言

自从本书第 1 版于 1967 年出版以来,已在许多流程工业过程中被用作控制系统设计的工作指南。虽尚少被选作高校本科教材,但它确实在全世界范围内帮助了许多工程师,把他们的学术理论知识与其在不同工业部门工作中的实际需要联系起来。它的这些成功已由其新版本每年发行量持续增长所证实。当我首先提出在时域中分析控制回路时,该方法还颇新奇,其后便一直是最实用的研究方法。而学术上的分析,从算法到各种状态空间和卷积模型的变换等则应用得越来越少。如今个人电脑已取代图形表示法,这便使时域法在应用中更为简便。因为仿真的结果是按时间显示的,就像在控制室里从记录纸和屏幕上看到的变化是一样的。

本书第 3 版是在一台个人电脑上利用对过程控制回路的仿真完成的,这个软件包最终已作为本书附件公开发行。我还在全世界许多地区通过各种研讨会向数千工程师介绍了这些仿真系统。计算机屏幕在观众面前展现的图像与在控制室里所见到的一样,只是参数的变化比实际情况要快得多,这便可使一些原理能够更快、更方便地得到证实。这个办法在调节器整定的教学中更是特别有用,不然这个任务要不断重复多次,耗费大量时间。

在进行这些论证和示范中,有时会偶尔得到一些出人意料的结果。从另一方面来看,这也为进行更深入的研究提供一个机会,对已熟悉的问题也可能会找到新的、更好的解决方法。另外,每次研讨会也带来了更多工程师的参与以及他们在不同领域中遇到的问题 and 令人注目的宝贵经验,其中有些具有普遍意义,已被收入这个版本之中。

在这同一时期,我一直在研究两种高性能的调节器 PI_{τ_d} 和 PID_{τ_d} , 它们的潜在能力在本书出版第 3 版时还没有被充分认识。这两种调节器的作用原理基本上与模型预估和内模控制器相似,但不同之处是它们是可整定的,因而它们没有其他类似调节器用于以时滞为主的过程时所表现出来的负荷响应很差的缺点,并已被成功地应用在非自平衡过程和稳态不稳定等过程。这些成功的诀窍在于它们必须整定得十分精确,因为高的性能总是与低的鲁棒性联系在一起的。现在它们的整定方法也已十分成熟。

本书第 1 篇,关于反馈控制的基本原理部分已彻底改写,以便与我所遵循的新的教学方法保持一致。在这个新版本中不太强调振荡、稳定性和相位移的分析,而是更多地强调负荷变化后使偏差和误差积分达到最小。大家熟悉的以四分之一振幅衰减作为整定目标的时代已成为过去,如今高性能的调节器可以产生不振荡的最佳响应曲线,因而也就没有可测量的衰减度和周期。现在是以对称性和超调等特性引导去寻求最小误差和最小面积响应。

第 1 章以介绍稳定性极限相应的条件开始,其中回路增益、衰减度和周期都是可识别的。过程的环节,如迟延和容积,先以单独的形式包括在只有比例或积分控制作用的回路中,然后再研究它们组合起来的情况。在这章中,储量控制是作为只宜采用纯比例调节器的

过程来介绍的。本章的最后,以一阶时滞加迟延模型作为最实用的基础来讨论控制性能评估和整定方法。

第2章讲述第1章中介绍的基本环节在真实过程中是如何结合在一起的。首先是估计副时滞的作用,这就为比例加微分调节器提供了一个展示自己功能的机会。这里还详细介绍了微分滤波问题。然后对多容过程作了比以往更全面的分析和处理,还包括分布式过程和带迟延的二阶时滞过程采用PI控制时的整定法则等。由于一般对阀门选择问题多未能很好地掌握,而它对回路的鲁棒特性又至关重要,所以也在这里作了比以前更深入的介绍。

第3章讨论五种常见的控制回路,包括流量、压力、液位、产品质量和温度控制回路。水力共振和传热的数学分析已经简化了,以便容纳更多的实用问题。混合过程的模型也作了改进,以适应返混容器及具有再循环的固定式混合器。另外,还对过程(工艺)设计提出一些指导性意见,以改善组分回路(如pH值)的可控性。

第4章和第5章,关于线性和非线性调节器,做了较大的改动。PID调节器的整定方法已扩展至分布式过程。新增加了控制作用的相互干扰和采样对控制性能及误差积分的影响等内容。此外,更全面地研究了PID调节器按设定值整定和按负荷整定可能遇到的窘境,包括采用设定值滤波措施等。对增加的内模和模型预测控制以及 $PI\tau_d$ 和 $PID\tau_d$ 调节器等内容,仅更强调它们的整定方法,一些推导和细节都被删掉。如有读者对调节器及其整定有更多、更深的兴趣,请参阅我于McGraw-Hill出版的配套书籍“*Feedback Controllers for the Process Industries*”(1994)。另外,还研究了滞环的辨识及其对调节器影响的新方法。读者还可看到一些有趣的模糊逻辑补偿等。

第6章许多地方保留了原样,只是更注意在现有仿真结果的基础上对串级控制回路进行整定,并做了某些简化。第7章关于前馈控制,许多基本方法已经重新改写,更多地注意利用现有的可用设备来实现控制策略,包括自整定。对抗积分饱和与开车过程中的问题也给予更多的考虑。第8章是关联与解耦,为了便于理解做了简化,但仍和以前一样严格,并更多地考虑了动态特性的作用。

本书最后一篇,关于应用问题,包含了和过去一样多的内容,但注意的焦点有所不同。压缩机抗喘振控制系统多种方案的选择是第9章的新内容。第10章新增了不稳定放热反应器控制性能和鲁棒性分析,及其所用的PID和 $PID\tau_d$ 调节器的整定法则。还增加了有关硫的生产设备控制问题的讨论。对过程(工艺)设计提出的一些意见,使pH值控制变得更可控,从而去掉了讨论pH值前馈控制的必要性,因为采用新工艺方案远比设计一个非常复杂的控制系统要好得多。此外,还讨论了废水处理设施的故障保护问题。

第11章中的精馏控制是本书中单题材所占篇幅最多的一节。由于设计指导思想方面增多了经济因素的考虑,便更突出了正确构成控制系统的重要性。在第12章中,因为间歇精馏与其他内容关系不大而被省略,更多的篇幅留给了间歇反应器,它在工业中仍占重要地位。这个题材中还增添了新型调节器及有关整定的建议等。

和前几版一样,每章中均包括一些数值例题及部分特别挑选出来的习题,其解答列于本书末尾的附录B中。

第 3 版所附带的软件已取得巨大成功,这次针对第 4 版进行了修正升级,该换代软件仍由 Foxboro 公司出版,名为“解决问题软件”^①。它通过与本书标题相一致的菜单用图、表和习题号等对 100 多个专题做了详细说明。它还附有一本使用手册,向读者介绍如何将每个仿真中的大部分资料调出来。本书与其配套软件结合在一起就构成了一份最好的自学材料。对于高水平的读者,还可以随意组成仿真系统进行更多的研究。

F. G. 欣斯基

^① 译者注:因版权原因,译本没有附该软件。

目 录

第 1 篇 理解反馈控制

第 1 章 控制回路中的动态环节	3
负反馈回路	3
稳态增益与动态增益	4
稳定性极限	5
回路增益与衰减	6
过程迟延	7
固定式混合器	7
迟延的增益和相位	7
比例偏差	8
积分控制模式	9
积分的增益和相位	10
迟延的积分控制	11
误差积分准则	11
可能的最佳负荷响应	13
迟延的 PI 控制	14
过程容积	16
非自平衡过程	16
储量控制	18
自平衡	20
一阶时滞的增益和相位	22
迟延加一阶时滞模型	23
实际的最佳负荷响应	23
自然周期和动态增益	24
PI 调节器的性能和整定	26
符号说明	27
参考文献	29
习题	29
第 2 章 实际过程分析	30
二阶时滞过程	30
副时滞	30
比例控制	32

比例加微分控制	32
带延迟的二阶时滞过程	34
多容过程	36
无相互作用的时滞	37
有相互作用的时滞和分布式时滞	38
直通式过程	39
分布式过程的 PI 控制	40
稳态增益	41
变送器增益	41
过程量纲增益	42
阀门增益	43
阀门特性	43
固有特性	43
可调范围的扩展	45
安装特性	46
阀门特性化器	48
符号说明	50
参考文献	51
习题	52
第3章 五类常见的控制回路	53
流量控制	53
动态特性	53
流量计的特性	55
系统精度的估计	56
压力控制	59
液体压力	59
气体压力	59
蒸汽压力	60
液位控制	60
水力共振	60
比例-时滞控制	61
逆响应	62
质量控制	64
混合过程的动态特性	64
过程增益	67
质量检测	67
温度控制	68

多个有相互作用的时滞	68
热流量相对于流体流量的关系	70
小结	70
符号说明	71
参考文献	72
习题	73

第 2 篇 反馈调节器的选择

第 4 章 线性调节器	77
性能准则	77
误差幅度	77
误差积分函数	78
统计误差函数	80
鲁棒性	82
PID 调节器	82
模式关联	83
对负荷变化的整定	84
对振荡负荷的响应	89
对设定值变化的整定	90
积分饱和和保护	92
基于模型的调节器	94
内模控制	95
模型预测控制	96
PI_{τ_d} 调节器	97
PID_{τ_d} 调节器	99
断续控制回路	101
采样分析仪	102
数字调节器	103
符号说明	106
参考文献	108
习题	108
第 5 章 非线性控制环节	109
与振幅相关的增益	109
再生振荡	110
极限环	111
非线性滤波器	112
非线性 pH 控制	113

动态非线性函数·····	114
滞环·····	115
速率限制·····	117
负阻·····	118
多状态(位)调节器·····	120
开关控制·····	120
三状态(位)控制·····	122
最佳切换·····	123
模糊逻辑·····	124
符号说明·····	125
参考文献·····	126
习题·····	127

第3篇 多回路系统

第6章 利用多回路改善控制 ·····	131
串级控制·····	131
控制闭环回路·····	132
副被调量作为主回路的反馈·····	133
串级调节器的整定·····	135
阀门定位器·····	136
流量串级控制·····	137
多输出控制系统·····	137
总流量控制·····	138
变负荷设备与开关设备的组合·····	140
阀门位置控制·····	140
并行通道的均衡·····	141
选择性控制回路·····	142
多输入·····	142
多约束·····	143
可变结构·····	144
自适应控制系统·····	145
程序适应性·····	146
自整定调节器·····	147
爬山法调节器·····	149
符号说明·····	150
参考文献·····	152
习题·····	152

第 7 章 前馈控制	153
稳态模型	154
线性过程	155
双线性过程	156
比值控制系统	157
流量比值控制	157
数字式混合系统	159
动态补偿	160
未经补偿的响应	160
延迟与导前-滞后补偿器	162
动态补偿器的整定	163
前馈和反馈的结合	165
对积分误差的影响	166
未知和不可测量的负荷	167
替代反向计算	168
单站调节器	169
自适应	169
符号说明	170
参考文献	171
习题	172
第 8 章 关联与解耦	173
相对增益分析	173
不同的开环增益	173
相对增益矩阵(RGA)的性质	175
变量的选择	176
相对增益的计算	177
比值方法	178
所有回路都处于开环状态	179
所有回路都处于闭环状态	180
斜率方法	180
矩阵方法	180
大系统的分解	181
回路关联的影响	182
调节器的失谐整定	182
相对增益 0 到 1	184
相对增益大于 1	185
负的相对增益	186

动态耦合·····	187
解耦·····	188
推理解耦·····	189
黑箱解耦器·····	190
解耦系统的稳定性·····	191
部分解耦·····	193
线性多变量系统·····	194
符号说明·····	195
参考文献·····	196
习题·····	196

第4篇 应 用

第9章 能量的传递与转换·····	201
传热·····	201
直接接触传热·····	201
显热交换·····	202
沸腾与冷凝·····	206
锅炉控制·····	208
燃烧控制·····	208
汽包水位控制·····	210
汽包压力控制·····	211
蒸汽温度控制·····	212
泵与压缩机·····	213
正排量泵·····	213
离心泵·····	213
正排量压缩机·····	215
压缩机防喘振控制·····	215
符号说明·····	219
参考文献·····	220
习题·····	220
第10章 化学反应控制·····	221
化学动力学·····	221
化学平衡·····	221
反应速度·····	223
放热式反应器的稳定性·····	226
调节器性能与鲁棒性·····	228
连续反应器·····	230

化学计量	231
温度控制	233
使产量最大化	234
pH 控制	235
滴定曲线	235
设计建议	238
符号说明	240
参考文献	241
习题	242
第 11 章 传质操作	243
精馏	243
过程建模	243
相对增益分析	249
抗干扰性	251
最大产品回收率	255
最小能量消耗	257
组分反馈	258
浮压控制	259
侧线塔	262
蒸发	264
多效蒸发	264
物料平衡控制	265
蒸汽压缩蒸发	267
干燥	268
干燥速度	268
推理控制	270
限制与扩展	271
含水量反馈	271
符号说明	272
参考文献	274
习题	275
第 12 章 间歇过程控制	276
间歇过程的特殊性	276
零负荷过程	276
间歇过程的终点控制	278
半间歇过程	279
成批物料的加热	280

调节器的选择·····	281
间歇过程的 PID 控制 ·····	281
有相互干扰的 PID 和 PID_{τ_d} 调节器 ·····	283
斜坡变化的设定值 ·····	283
间歇反应器·····	285
温度控制·····	285
辅助冷却·····	288
优化产量·····	288
间歇干燥·····	290
含水量的推理控制 ·····	290
热量回收·····	291
木材的干燥·····	292
符号说明·····	293
参考文献·····	294
习题·····	294
附录 A 图形符号说明·····	295
附录 B 习题解答·····	296
索引 ·····	310

第 1 篇 理解反馈控制

- 第 1 章 控制回路中的动态环节
- 第 2 章 实际过程分析
- 第 3 章 五类常见的控制回路