



信息技术和电气工程学科国际知名教材 中译本 系列

过程控制系统 (第3版)

——应用、设计与整定

PROCESS CONTROL SYSTEMS
APPLICATION, DESIGN, AND TUNING
(Third Edition)

F. G. Shinskey 著
萧德云 吕伯明 译
方崇智 校



清华大学出版社

过程控制系统 (第3版)

——应用、设计与整定

PROCESS CONTROL SYSTEMS
APPLICATION, DESIGN, AND TUNING
(Third Edition)

F. G. Shinskey 著
萧德云 吕伯明 译
方崇智 校

清华大学出版社
北京

F. G. Shinskey

Process Control Systems—Application, Design, and Tuning (Third Edition)

EISBN: 0-07-056903-7

Copyright © 1998 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by Tsinghua University Press under the authorization by McGraw-Hill Education (Asia) Co., within the territory of the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授权清华大学出版社在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)独家出版发行。未经许可之出口视为违反著作权法,将受法律之制裁。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2002-4654

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统——应用、设计与整定(第3版)/欣斯基(F. G. Shinskey)著;萧德云,吕伯明译.

—北京:清华大学出版社,2004

书名原文: Process Control Systems—Application, Design, and Tuning

ISBN 7-302-07849-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 120198 号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机: (010)62770175

组稿编辑: 王一玲

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 北京市鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 175×245 印张: 28.75 字数: 561 千字

版 次: 2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-07849-1/TP·5706

印 数: 1~3000

定 价: 45.00 元

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: (010)62776969

文稿编辑: 魏艳春

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770175-3103 或 (010)62795704

中译本序

过程控制系统——应用、设计与整定

F. G. 欣斯基先生是美国著名的过程控制专家,在 Foxboro 公司任职期间提出了许多新颖的过程控制系统方案,并将这些方案成功地应用于各类实际工业生产过程中,同时与 E. 布里斯顿先生一道开创了多变量过程控制系统的解耦理论,在前馈控制应用方面也做出了许多贡献。F. G. 欣斯基先生曾先后在 30 多个国家和地区(包括美国和加拿大)许多大学举办过过程控制学习班。在学习班上,他的讲授方法别具一格。他始终坚持采用时域的分析方法,利用迟延环节的特性,一次课就把过程控制的概念和要点讲清楚。他分析问题和整理论点的思路也别树一帜,特别注重实用。他能绕过许多繁难高深的理论,使内容直观好学,而且学了就能用,用上就能见效,从而在过程控制技术方面逐渐形成了一种具有鲜明实用特色的风格,令人瞩目。

本书是作者在举办各类学习班的基础上写成的,自 1967 年第 1 版问世以来,于 1982 年出版了第 2 版,并于 1979 年和 1988 年先后作了修订,现为第 3 版。每版都注意内容更新,引进新成果、新应用。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,即使读者不具备较深的控制理论知识,也完全可以从书中学到有关过程控制系统的基本内容,尤其对那些感到控制理论难以用于工程实践的读者,更能从书中获得有益的启迪。自本书第 2 版于 1982 年译成中文出版以来,颇受国内从事过程控制教学、科研及工程应用的同行欢迎。许多同志将书中的一些观点直接应用于科学研究和生产技术改造,取得了一些可喜的成绩,有力地推动了国内过程控制的发展。一些高等院校也选它作为本科生的教材或研究生的教学参考书,对过程控制的教学起到了积极的作用。现在,将第 3 版也译成中文推荐给国内读者,相信它会和第 2 版中译本一样受到广大读者的欢迎,第 4 版的中译本也即将问世。这样,欣斯基的主要著作就都推荐给国内读者,这对读者系统地了解欣斯基有关过程控制方面的学术思想是有益的。

本书第3版汇集了作者更多的工作经验和研究成果,对第2版作了将近2/3的修改,增添了许多新内容、新概念,删去一些不常用的相关内容。书中采用绝对误差积分(IAE)准则来衡量控制性能,以保证回路一定是衰减的,这是前两个版本采用误差积分(IE)准则所做不到的。本书还利用相对增益阵(relative gain array, RGA)和相对积分误差(relative integrated error, RIE)概念,推广了IAE的应用。本书新增加的第12章“批量生产过程控制”所讨论的许多控制系统都是国内未见提及的应用成果。总之,新的版本给读者以更多的信息、更多的启示和教益。

在第3版中,作者仍然没有使用拉普拉斯变换(俗称拉氏变换)、 z 变换、传递函数和频率特性等控制理论方面的术语,但这并不说明作者不重视控制理论的作用。恰恰相反,作者是以更高的境界要求读者真正领悟控制理论的内涵,并把具体被控过程的特性与控制理论有机地结合起来。随着计算机的发展,在新的版本中作者特别强调计算机的作用。他认为,一种新的想法、新的控制方案,不宜过多地停留在数学上的分析和证明,应该利用计算机在时域内进行仿真,直接证实新想法正确与否及新控制方案的性能优劣,然后决定是否付诸实施。对于第3版中的许多系统方案及应用,作者都是这么做的。

吕伯明教授翻译了第1,2,3,8,11,12章。萧德云教授翻译了第4,5,6,7,9,10章,加工整理了内容索引,并负责全书统稿。丁福新教授校阅了第10章,提了许多宝贵的修改意见。我也认真地审校了全书,译文在尊重原著的基础上,更正了原文的一些错误(其中多数得到作者的认同)。对于译文的谬误之处,欢迎读者不吝指正。

方崇智
于清华大学
2002.5

前言

过程控制系统——应用、设计与整定

我正式学习控制理论是 1957 年在 L. Zoss 的指导下开始的,那时他在泰勒(Taylor)仪表公司工作(后来去了瓦尔帕莱索(Valparaiso)大学)。当时课程用的教材是他参与编著的《过程控制的频率响应法》(Frequency Response for Process Control, W. I. Caldwell, G. H. Coon, and L. M. Zoss, McGraw-Hill, New York, 1959),该书那时刚刚最后定稿。书中采用的分析方法是基于运算微积分学的,并且需要用各种不同频率的正弦波去测试特性未知的过程。

当深入学习了该课程,并有机会运用所学的知识时,我很快就发现了频率响应法的局限性。我早期研究的一个课题是 pH 控制回路的稳定性,对此线性代数的局限性是很明显的。毫不奇怪的是,操作人员也不乐意让人仅仅为了收集数据而用正弦波去使过程来回振荡。

频率响应分析的工具是对数坐标图,这时迟延跟它的拉普拉斯变换一样也表现为指数函数形式。然而,人们在记录仪和屏幕上观察到的性能是时间的线性函数,迟延时间和振荡周期可以直接测量出来,但频率必须通过计算才能得到。

另外一个困难就是,我需要把经典控制理论教给一批新人。如果各种关系都需要用数学变换来表示,那就必须在课程之前安排一次运算微积分学课。这样既延长了学习时间,又增加了学习上的难度。

但是,如果始终在时域上进行分析,那么就可以在一次讲授中利用迟延的概念把控制系统的主要特性讲清楚。按照这个办法,学生们可以在已建立起来的基础知识上,很快即能了解过程控制的要点是什么。在编写本书第 1 版时就遵循了这种方法,现在的修订版仍继续这样做。

现在有一些理论界人士认为,要理解控制,数学变换是不可缺少的,尤其现在采样控制已被广泛应用, z 变换更是不可缺少,但是我不同意这个观点。在编写本书第 3 版时,已开始有条件利用个人计算机来仿真过程控制回路。计算机的应用证实了我的许多想法,也舍弃或修正了一些

想法,这样一些概念就可以讲得更加准确和令人信服。现在已经没有必要一定要按照某种特定的数学方法去解决一个控制问题。如果把过程和调节器加以仿真,并在人们熟悉的时域内对结果进行分析,那么这样会更简单些。在为这次修订版准备响应曲线和表格数据时就采用这种方法。

计算机不仅改进了性能估计的准确性,而且可以用绝对数值来评估。例如,现在我们不仅可以知道调节器的这个或这一组整定值比另外一个或另外一组好,而且还知道它距可能的最好控制究竟还差多少。

采用仿真的好处之一是,可以用绝对误差积分(IAE)来衡量控制性能,这个指标无法用分析的方法计算,它必须在每次实验中累积出来。由于这个指标可以保证振荡的衰减,而误差积分(IE)却做不到,因此在本修订版中用 IAE 作为衡量性能的指标,以代替本书前两版所采用的 IE。

第 1,2 两章的重点是基础知识,因此变动比其他各章节要少一些。然而,利用仿真方法获得衰减与振荡周期之间的重要关系,这是前两版中所没有的。另外还给出了 IAE 最小值估计的分析结果。

第 3 章丰富了水力共振方面的内容,包括可变衰减问题以及为适应这种情况而开发的新型液位调节器。对于典型的温度回路,文中更深入地分析了它的非线性特性。此外,本章还给出了估计流量计精度的一种方法。

第 4 章介绍了一些新的控制作用,并对众所熟知的控制作用作出了更加精确的评价,清楚地比较了它们的性能。对基于模型的调节器,既定量地给出了它的潜力所在,又指出了它所冒的风险。同时开发了新的整定规则,并把它们延伸到把副时滞同迟延一起考虑进去的情况。第 5 章描述了非线性过程和调节器,由于利用了仿真技术,使人们加深了对它们的直观了解。另外,还发现负阻过程在一个适当定义的限度内是可以控制的,它跟放热反应器非常相似。

第 6 章给出了串级控制系统的整定规则和对若干类型的自整定调节器的评价。第 7 章增加了新的一节,用于专门讨论采用前馈的液位均匀控制,以及在过程迟延和容积都不平衡的情况下整定动态补偿器的完整步骤。

正如第 8 章中所论述的那样,自第 2 版问世以来,许多研究工作者对控制回路的关联有了许多新的发现。本章大部分内容都重写了,并给出关联过程的调节器整定规则,这些结果只有通过仿真才能得到。

在第 9 章传热过程模型中,算术平均温差用更加准确的对数平均温差代替。本章大多数图形都是新增加的,同时提出了一个新的锅炉水位控制系统,还给出了压缩机喘振的不对称控制方案。

第 10 章通过仿真探讨了放热反应器的稳定裕量,集中讨论了转换率控制和生产率最大化问题。本章不再讨论间歇反应器控制问题,对该问题的讨论移到了第 12 章。

根据精馏控制和关联分析最新取得的经验,第 11 章全部重写了。本章描述了

为侧线塔开发出来的一个控制方法,增加了蒸发器和连续干燥器的控制方案,这样,本章就覆盖了有关传质操作方面的所有内容,那些不常见和没有需求的应用都删去了。

第12章是全新的,专门讨论批量生产过程的控制。本章从批量生产过程的一般特性(如零负荷操作和可变体积操作等)开始,同时比较了各种调节器在启动和设定值等速斜坡变化下的响应,然后把这些知识应用于间歇反应器控制,最后讨论批量精馏和干燥过程的控制。

与以前的版本一样,全书各章都配有例题,每章的末尾附有习题,习题的答案见附录B。

对于想在深度和广度上进一步学习的读者,本书提供生成书中响应曲线和表格数据的仿真程序磁盘,以资利用。软件是用BASIC和GW-BASIC语言写的,可在IBM PC机和配有CGA彩色和制图功能的兼容机上运行。这些程序没有编译,可以列出程序的源代码,作为仿真学习的仿效课本,允许用户按照各自的需要进行修改。

最后,衷心感谢J. Pelletier为本修订版打印了书稿及其中的大量方程式。

F. G. 欣斯基

目 录

过程控制系统——应用、设计与整定

第 1 篇 反馈控制的基本原理

第 1 章 控制回路中的动态环节	3
1.1 负反馈	3
1.2 难以控制的环节——迟延	7
1.3 容易控制的环节——容积	19
1.4 单容加迟延	25
符号说明	29
习题	30
第 2 章 实际过程的特性	31
2.1 多容过程	31
2.2 静态增益	43
2.3 生产装置的测试	52
符号说明	56
参考文献	57
习题	57
第 3 章 一些常见回路的分析	59
3.1 流量控制	60
3.2 压力控制	67
3.3 液位与水力共振	70
3.4 成分控制	77
3.5 温度控制	82
3.6 小结	87

符号说明	88
参考文献	89
习题	89

第2篇 反馈调节器的选择

第4章 线性调节器	93
4.1 性能准则	93
4.2 扰动	100
4.3 PI 和 PID 调节器	107
4.4 基于模型的调节器	121
4.5 断续控制回路	127
4.6 数字控制	131
符号说明	135
参考文献	136
习题	137
第5章 非线性控制环节	139
5.1 闭合回路中的非线性环节	139
5.2 非线性相移环节	144
5.3 各种类型的开关调节器	151
5.4 复式系统的概念	155
5.5 非线性 PID 调节器	162
符号说明	166
参考文献	167
习题	167

第3篇 多回路系统

第6章 利用多回路改善控制	171
6.1 串级控制	171
6.2 多输出控制系统	182
6.3 选择性控制回路	187
6.4 适应性控制系统	192
6.5 小结	202
符号说明	202

参考文献	203
习题	204
第 7 章 前馈控制	205
7.1 按过程模型构成控制系统	206
7.2 比值控制系统	213
7.3 动态补偿的应用	218
7.4 引入反馈	229
7.5 经济方面的考虑	234
7.6 小结	236
符号说明	236
参考文献	237
习题	237
第 8 章 关联与解耦	239
8.1 相对增益分析	239
8.2 相对增益的计算方法	242
8.3 关联的影响	248
8.4 对干扰的响应	258
8.5 解耦	262
符号说明	271
参考文献	272
习题	273
第 4 篇 应 用	
第 9 章 能量的传递和转换	277
9.1 传热	277
9.2 燃烧控制	285
9.3 蒸汽厂的控制系统	288
9.4 泵与压缩机	293
符号说明	299
参考文献	300
习题	301

第 10 章 化学反应的控制	303
10.1 控制反应进行的基本原理	303
10.2 连续反应器	313
10.3 pH 控制	321
符号说明	330
参考文献	331
习题	331
第 11 章 传质操作	333
11.1 精馏	333
11.2 蒸发	358
11.3 干燥	364
符号说明	369
参考文献	371
习题	372
第 12 章 批量生产过程的控制	373
12.1 批量生产过程的特殊要求	373
12.2 批量生产过程的调节器选择	380
12.3 间歇反应器	386
12.4 批量精馏	393
12.5 批量干燥	397
符号说明	401
参考文献	402
习题	402
附录 A 图形符号说明	404
附录 B 习题解答	405
附录 C 本书所涉及的工程单位及其转换	420
内容索引	421

第 1 篇

反馈控制的基本原理

- ◆ 第 1 章 控制回路中的动态环节
- ◆ 第 2 章 实际过程的特性
- ◆ 第 3 章 一些常见回路的分析

第 1 章

控制回路中的动态环节

大多数生产过程的经济效益(当然还有它们的安全性和操作性能)在很大程度上取决于它们被控制得好坏。因此,把尚未加以控制的过程控制起来,或进一步改善已有控制系统的性能,是有很强吸引力的事情。

这项任务说起来容易,做起来却不那么简单。我们可以看到,有些过程对控制作用的响应特别好,而另外许多过程却不然。这方面的情况可能是多种多样的,不过大多数过程可分解为一些基本的功能块或环节,每个环节都便于分析,并具有其特定的性能。一旦彻底掌握了这些环节,就能对过程进行某些改造,并用这些知识去预估它的性能。

本章将论述这些环节本身在反馈控制回路中的行为。虽然反馈不是惟一的控制方法,而且也不总是最有效的,但它却是最简单也是鲁棒性最好的。也就是说,它经受过程的参数和工况在很大范围内的变化而仍然可以工作得很好。它只要求控制工程师掌握不很多的和不那么确切的工艺知识,因而反馈比其他方法获得更广泛的应用。

这一章还将证明,如果要用反馈把过程有效地控制住,那么仍然有必要具备一些有关过程的工艺知识。过程本身的特性决定了它能被控制得好坏程度,同时也决定了取得最佳效果所需的调节器整定值。

1.1 负反馈

在闭合回路里可能有两种类型的反馈:正反馈和负反馈。正反馈扩大不平衡,因而排除了稳定的可能。如果用一个带正反馈的调节器去控制一个房间的温度,那么当温度超过设定值时,调节器将增大加热量;而当温度低于设定值时反而减小加热量。具有正反馈的回路最后总是锁定在这一头或那一头的极限状态。很明显,这种性质是无助于控制的,因而将不再作进一步的讨论。

相反,负反馈总是力图恢复平衡。如果温度过高,就减小加热量。实际上,所采用的措施即加热作用,在效果上总是与被调量——温度的变化方向相反。

图 1.1 表示反馈回路中的信息流。

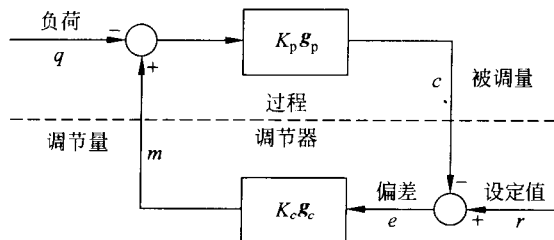


图 1.1 调节器改变 m 以抵消负荷扰动 q , 使偏差 e 回到零

在这里,只考虑把一个控制回路分成过程和调节器两部分。它们的区别在于调节器是可以调整的,而过程一般来说是不能调整的。在生产实际中,过程由阀门、管线、泵、容器、检测装置、变送器等组成。为了讨论方便,暂且假定它们的参数都是不变的。在后面几章中还要详细研究这些环节的特性。目前只是简单地把它捏合在一起,看成是一个具有一定特性的过程。

过程增益定义为其输出变化 dc 与相应的输入变化 dm 之比:

$$K_r g_p = \frac{dc}{dm} \quad (1.1)$$

其中, m 是用来控制 c 的调节量。过程增益可以看成由两个独立的分量组成:静态分量 K_p 和动态分量 g_p 。 K_p 不随驱动信号的周期而变化,而 g_p 则随驱动信号的周期变化而变化。动态分量可看成是一个矢量,其模为 G_p , 相角为 ϕ_p 。

调节器增益表示成其输出变化 dm 与输入偏差变化 de 之比:

$$K_c g_c = \frac{dm}{de} \quad (1.2)$$

同样,调节器增益也可以看成由两个分量组成。静态分量 K_c 不随信号的周期而变化,动态增益矢量 g_c 则随周期而变。矢量 g_c 通常用它的模 G_c 和相角 ϕ_c 来表示。

图 1.1 中被调量 c 所带的负号说明调节器具有反作用,即调节器的输出随输入测量值的减小而增大。这种作用对于图中所示过程的负反馈是必需的,因为这时施加在过程上的调节量的符号为正。图 1.1 可以代表一个加热过程,其中温度 c 随蒸汽阀门阀位 m 的增大而升高,又随热量损失 q 的增加而降低。有些阀门随信号 m 的增大而关闭,这些阀门通常用于冷却系统。这样,冷却系统用的温度调节器也必须具有反作用。如果 m 和 q 的符号相反,那么 c 和 r 的符号也必须反过来。也就是说,这时需要用正调节作用。工业上用的调节器大多数都是反作用的。

调节器的主要功能是在负荷变化时起调整作用。这是靠尽可能增大调节器的增益 $K_c g_c$ 来实现的。 $K_c g_c$ 愈大,产生与负荷变化相应的调节作用 m 所需的偏差信号 e 就愈小。如果 $K_c g_c$ 设置得很大(譬如说 100 或更大),那么因负荷变化而引起的调节器的输入偏差就会很小。遗憾的是,调节器的增益不能取得很大,它有一

个上限值,若超过该值,系统就会出现不衰减振荡。反馈调节器用于生产过程时,为了确定其效果如何,必须研究它的稳定性界限。

闭环中的振荡

在闭环中振荡得以保持,就如同每隔 360° 相位间隔就周期性地给小球加一个力,使小球来回弹跳一样。如果一个小球在其弹跳的最高位置上重复受到同样的作用力,它将以不变的幅度和周期保持振荡。但是,若在振荡过程中,作用力施加得过早,即若与上次脉冲力相移小于 360° ,则其周期将缩短。要想保持等幅振荡就得严格地每隔 360° 相位施加同样大的力。

实际上,多数调节器提供的是连续的作用力而不是脉冲式的。当被调量作正弦变化时,力的大小也作正弦变化(在第5章中将讲到,由于非线性环节的存在,可能使振荡波形发生畸变。但在这里仍假定为正弦振荡)。

现考虑被调量作等幅振荡的情况,见图1.2。如果像在加热系统中那样,调节器为反作用,则偏差信号的相位将与被调量相差 180° (如图1.2所示)。这 180° 的相移就是负反馈中的“负号”造成的。如果调节器的矢量 g_c 没有相移,则调节量在振荡中将与偏差信号同相,其幅度大小反映调节器在该振荡周期下的增益。

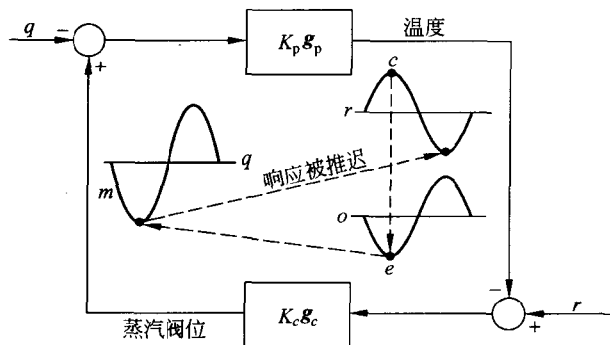


图 1.2 最小的蒸汽阀位在半个周期以后才会使温度达到最低

调节器把一个上升的被调量(如温度)转换成一个下降的调节量(如蒸汽阀位)。因为已经假定调节器没有相移(除了由于负号引起的 180° 相移以外),所以这一切都是同时发生的。倘若过程也没有相移,关小蒸汽阀门将会同时引起温度的下降。在图1.2中,温度却随蒸汽阀门的关小而上升。这就是说,关小蒸汽阀门的影响要等到下半个周期才能使温度下降。由此可见,过程把温度对阀位的响应推迟了半个周期。这种延时作用产生了维持振荡所需的剩下的 180° 相移。

这一章后面将讲到,通过某些调整,有可能使调节器产生某些相移。这时,过程的相移也要发生变化。但不管怎样,要维持等幅振荡,回路中的动态相位滞后就必须是 180° 。也就是说,过程和调节器的相位滞后合在一起应为 180° (除了由于负